



مجله کنترل

ISSN 2008-8345



قطب علمی کنترل صنعتی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

نشریه علمی - پژوهشی

انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران - قطب علمی کنترل صنعتی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

جلد ۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳

فهرست مقالات

- ۱
حسگرهای گاز: مبانی، کاربرد و صنعت آینده
فرامرز حسین بابایی
- ۲۷
مروری بر نظریه و کاربرد سیستم‌ها و کنترل کننده های هوشمند بازه‌ای
محمد تشنه لب، پوریا جعفری، سید محمد جواد آل‌هاشر
- ۵۱
بررسی پیشرفت‌های فن آوری ربات‌های چهارپا
وحید جوهری مجد
- ۶۹
بررسی روش‌های تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌های پیش‌بین و راهکارهای نوین تنظیم
علی خاکی صدیق، پیمان باقری
- ۸۷
ربات‌های موازی کابلی: سینماتیک، دینامیک و کنترل
حمید رضا تقی راد، آزاده ظریف لولویی، محمد اعظم خسروی
- ۱۱۹
مروری بر کاربردهای نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در سیستم‌های صنعتی
حمید خالوزاده، عطیه کشاورز محمدیان



نشریه علمی - پژوهشی، انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران - قطب کنترل صنعتی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، جلد ۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳

پست الکترونیک: control@isice.ir

صاحب امتیاز: انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران

مدیر مسئول: پروفسور ایرج گودرزنیا

سردبیر: پروفسور علی خاکی صدیق - تلفن: ۸۴۰۶۲۳۱۷ - پست الکترونیک: sedigh@kntu.ac.ir

آدرس محل کار: خیابان دکتر شریعتی، پل سیدخندان، دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

شورای سردبیری: پروفسور علی خاکی صدیق، پروفسور حمید خالوزاده، دکتر مهدی علیاری شوره دلی

دبیر اجرایی: دکتر مهدی علیاری شوره دلی - تلفن - ۷۱۳۲۲۱۳۳ - پست الکترونیک aliyari@kntu.ac.ir

هیأت تحریریه:

پروفسور علی خاکی صدیق (استاد) - پروفسور ایرج گودرزنیا (استاد) - پروفسور حمید خالوزاده (استاد) - پروفسور پرویز جبه دار مارالانی (استاد) - پروفسور علی غفاری (استاد) - دکتر حمیدرضا مومنی (دانشیار) - پروفسور سید کمال الدین نیکروش (استاد) - پروفسور مسعود شفیعی (استاد) - پروفسور بهزاد مشیری (استاد)

هیأت مشاوران:

دکتر حمیدرضا مومنی، پروفسور بهزاد مشیری، پروفسور مسعود شفیعی، پروفسور علی خاکی صدیق، پروفسور پرویز جبه دار مارالانی، پروفسور علی غفاری، پروفسور حمید خالوزاده، پروفسور حمیدرضا تقی راد، دکتر کیوان مسروری، دکتر محمدتقی بطحایی، دکتر محمدتقی بهشتی، دکتر فرزاد جعفر کاظمی، دکتر رویا امجدی فرد، پروفسور سید علی اکبر موسویان، پروفسور محمد تشنه لب، پروفسور محمد حایری، پروفسور سید علی اکبر صفوی، پروفسور حسین سیفی، دکتر احد کاظمی، دکتر علیرضا فاتحی، دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی، دکتر مسعود علی اکبر گلکار، دکتر ناصر پرینز، دکتر مهرداد جوادی، دکتر جعفر حیرانی نوبری، پروفسور فرامرز حسین بابایی، دکتر بیژن معاونی، دکتر مهدی علیاری شوره دلی، دکتر محمد عاروان، پروفسور محمد توکلی بینا، دکتر مجتبی احمدیه خانه سر، دکتر فائزه فریور، دکتر موسی آیتی.

هیأت مدیره انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق:

پرفسور مسعود شفیعی، دکتر محمدرضا جاهد مطلق، پرفسور ایرج گودرزنیا، پرفسور بهزاد مشیری، پروفسور علی اکبر صفوی، دکترایمان محمدزمان، دکتر علی اشرف مدرس، مهندس علی کیانی.

مدیر سایت: مهندس نسیمه فراهانی

صفحه آرا: کیان خالوزاده

سخن سردبیر

مطالعه جامع در رابطه با زمینه‌های تخصصی حوزه‌های مختلف مهندسی کنترل، با توجه به پراکندگی موضوعات جانبی آن‌ها و گستردگی مطلب و دشواری موضوع می‌تواند بسیار دشوار و وقت‌گیر باشد. مقالات مروری که توسط صاحب‌نظران و متخصصان نوشته می‌شوند، کمک شایانی به پژوهش‌گران در دسترسی آسان‌تر آن‌ها به حجم انبوهی از دانش در موضوعی خاص می‌کند. این مقالات می‌توانند به آموزش مباحث پیشرفته کمک نمایند و با دسته‌بندی موضوعی و ارائه مطالب با زبان ساده‌تر و تبیین اصول و مبانی ریاضی به پژوهش‌گران این فرصت را می‌دهند که با آخرین دست‌آوردهای یک زمینه تخصصی آشنا شوند. از ویژگی‌های بارز این مقالات می‌توان به جمع‌آوری وضعیت کنونی یک موضوع علمی از نظر آخرین دست‌آوردهای آن و ارائه گنجینه‌ای گران‌بها از مراجع مربوطه و همچنین دسته‌بندی موضوعی زیرشاخه‌ها یا مباحث جانبی مرتبط با آن‌ها اشاره کرد. این مقالات به نقد و بررسی دست-آوردهای دیگران می‌پردازند و مسایل حل نشده و یا چالش‌های جدی در زمینه‌ی مورد نظر را فرا روی پژوهش‌گران قرار می‌دهند و به این ترتیب به آموزش مباحث جدید علمی و فن‌آوری در مرزهای دانش می‌پردازند، که برای پژوهش‌گران در صنعت و دانشجویان تحصیلات تکمیلی بسیار سودمند است.

از این‌رو، مجله کنترل در راستای رسالت خود برای ترویج آخرین دست‌آوردهای علمی پژوهش‌گران ایرانی به زبان فارسی، در این ویژه‌نامه به انتشار مقالات مروری در سیستم‌های کنترل پرداخته است. این مقالات، برگرفته‌شده از مطالعاتی بوده است که به دعوت قطب کنترل صنعتی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی توسط برخی از پژوهش‌گران به نام کشور در عرصه‌های مختلف مهندسی کنترل انجام شده است. هرچند پیش از این نیز به طور موردی مقالات مروری در مجله چاپ شده‌اند، اما این برای نخستین بار است که یک شماره از مجله به این امر مهم اختصاص یافته است که امیدوارم مورد توجه پژوهش‌گران این عرصه قرار گیرد. مقالات چاپ شده به ترتیب در زمینه‌های زیر ارائه شده‌اند:

۱. **حسگرهای گاز: مبانی، کاربرد و صنعت آینده.** حسگرهای گازی از ابزارهای دقیقی است که کشور ما به دلیل زیرساخت-های موجود نیاز مبرم به آن دارد. این مقاله به توضیح جامعی در باره این حسگرها و نکاتی کلیدی در تولید و به کارگیری آن‌ها در صنعت ایران می‌پردازد که نتیجه سال‌ها پژوهش نظری و کاربردی نویسنده مقاله است.
۲. **مروری بر فناوری ربات‌های چهارپا.** رباتیک به علت کاربردهای بسیار گسترده، یکی از علوم مورد توجه پژوهش‌گران و صنعت‌گران دنیا و ایران است. این مقاله به مرور اجمالی نوع چهارپا از ربات‌ها می‌پردازد و اطلاعات جامعی از این ربات‌ها در اختیار خواننده قرار می‌دهد. نویسنده مقاله به خوبی توانسته است تصویر جامعی از نظریه تا کاربرد این دسته مهم از ربات‌ها ارائه نماید.
۳. **ربات‌های موازی کابلی: سینماتیک، دینامیک و کنترل.** ربات‌های کابلی تفاوت‌های بنیادی با ربات‌های سنتی شناخته شده از نظر سینماتیک، دینامیک و کنترل دارند. این موضوع در دهه اخیر مورد توجه پاره‌ای از پژوهش‌گران و صنعت‌گران حوزه

رباتیکی شده است و بدون شک گروه رباتیکیک ارس از پیشگامان این حوزه است. این مقاله علاوه بر مرور جامعی بر موضوع به دست آوردهای نویسنده و گروه ارس در این حوزه پرداخته و مسائل حل نشده آنرا به خوبی ارائه کرده است.

۴. *مروری بر نظریه و کاربرد سیستم‌ها و کنترل کننده‌های هوشمند بازه‌ای*. سیستم‌ها و کنترل کننده‌های هوشمند از موضوعات بسیار پر کاربرد است و گروه‌های پژوهشی فراوانی در ایران به این موضوع می‌پردازند. یکی از زمینه‌های خاص پژوهشی در سیستم‌های هوشمند سیستم‌های هوشمند بازه‌ای است که اخیراً مورد توجه گرفته است و آزمایشگاه سیستم‌های هوشمند به صورت ویژه به آن می‌پردازد. نویسنده مقاله علاوه بر دست آوردهای داخل کشور به صورت جامعی موضوع را مورد مرور و بررسی قرار داده است.

۵. *بررسی روش‌های تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌های پیش‌بین و راهکارهای نوین تنظیم*. کنترل پیش‌بین از پرکاربردترین روش‌های کنترل پیشرفته در صنعت است که از دیدگاه نظری و کاربردی در چند دهه گذشته مورد توجه فراوان بوده است. تنظیم مناسب پارامترهای کنترل کننده‌های پیش‌بین از شرایط اساسی کارکرد درست این روش‌ها است. این مقاله که حاصل نتایج پژوهش چند سال اخیر در آزمایشگاه کنترل پیشرفته است، علاوه بر مرور روش‌های قدیمی تنظیم به راهکارهای جدید آن می‌پردازد.

۶. *مروری بر کاربردهای نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در سیستم‌های صنعتی*. سیستم‌های تصادفی و کنترل آن‌ها از موضوعات مهم و نظری در مهندسی کنترل است. اما به کاربردهای آن‌ها در سیستم‌های صنعتی کمتر پرداخته شده است. نویسندگان این مقاله نشان می‌دهند که این موضوع کاربردهای فراوان صنعتی داشته و به خوبی به آن پرداخته‌اند.

در پایان از تمام پژوهش‌گران و صاحب‌نظران دعوت می‌شود تا در زمینه‌های مهم اصلی و مرتبط با سیستم‌های کنترل، مقالات مروری خود را به زبان فارسی برای بررسی و انتشار به مجله ارسال نمایند تا به یاری خداوند متعال شاهد تداوم این رویه نیکو باشیم.

علی خاکی صدیق

فهرست مقالات

- ۱ **حسگرهای گاز: مبانی، کاربرد و صنعت آینده**
فرامرز حسین بابایی
- ۲۷ **مروری بر نظریه و کاربرد سیستم‌ها و کنترل کننده های هوشمند بازه‌ای**
محمد تشنه لب، پوریا جعفری، سید محمد جواد آل‌هاشر
- ۵۱ **بررسی پیشرفت‌های فن آوری ربات‌های چهارپا**
وحید جوهری مجد
- ۶۹ **بررسی روش‌های تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌های پیش‌بین و راهکارهای نوین تنظیم**
علی خاکی صدیق، پیمان باقری
- ۸۷ **ربات‌های موازی کابلی: سینماتیک، دینامیک و کنترل**
حمید رضا تقی راد، آزاده ظریف لولویی، محمد اعظم خسروی
- ۱۱۹ **مروری بر کاربردهای نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در سیستم‌های صنعتی**
حمید خالوزاده، عطیه کشاورز محمدیان

مجله کنترل، مجله‌ای علمی - پژوهشی است که دربرگیرنده تازه‌ترین نتایج تحقیقات نظری و کاربردی در علوم مختلف مرتبط با مهندسی کنترل و ابزار دقیق می‌باشد. مقالات ارسالی به مجله کنترل می‌بایست به زبان فارسی و دارای چکیده انگلیسی باشند. از میان مباحث مورد نظر این مجله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- (۱) مدل‌سازی، شناسایی، شبیه‌سازی، پیش‌بینی، بهینه‌سازی و پایش عملکرد سیستم‌ها.
- (۲) تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل پیشرفته از قبیل سیستم‌های کنترل خطی و غیرخطی، سیستم‌های کنترل تطبیقی، کنترل مقاوم و کنترل بهینه، سیستم‌های کنترل هوشمند، سیستم‌های کنترل تصادفی، سیستم‌های کنترل گسسته پیشامد و ترکیبی، سیستم‌های ابعاد وسیع، سیستم‌های کنترل چندمتغیره.
- (۳) مکاترونیک و رباتیک.
- (۴) ابزار دقیق و سیستم‌های ترکیب داده و اطلاعات سنسوری.
- (۵) اتوماسیون صنعتی از قبیل سیستم‌های کنترل گسترده، رابط انسان - ماشین، سیستم‌های ایمنی و تشخیص خطا، تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل کسری، شناسایی و تشخیص عیب در سیستم‌ها، سیستم‌های کنترل پیچیده، سیستم‌های زمان حقیقی و سیستم‌های کنترل تحت نظارت.

کاربردهای مورد علاقه این مجله، وسیع بوده و می‌تواند در برگیرنده موارد زیر باشد:

- (۱) سیستم‌های هدایت و ناوبری.
- (۲) فرآیندهای صنعتی شامل فرآیندهای شیمیایی و بیوتکنولوژی.
- (۳) تولید و توزیع نیروی برق.
- (۴) مهندسی محیط زیست و هواشناسی.
- (۵) سیستم‌های اقتصادی و مالی.
- (۶) سیستم‌های اطلاعاتی، مخابراتی و شبکه‌های صنعتی.
- (۷) مهندسی پزشکی.
- (۸) نانو کنترل.

از کلیه پژوهشگران و کارشناسان فعال در زمینه‌های مرتبط با مهندسی کنترل و ابزار دقیق دعوت بعمل می‌آید تا مقالات و نتایج آخرین دستاوردهای علمی و پژوهشی خود را به این مجله ارسال نمایند. خواهشمند است مقالات خود را به صورت الکترونیکی به آدرس www.joc-isice.ir ارسال فرمایید. برای کسب اطلاعات بیشتر و دریافت نحوه تهیه و ارسال مقالات می‌توانید به سایت مجله با آدرس www.joc-isice.ir مراجعه نمایید.

شیوه تدوین

متن مقالات شامل چکیده، بدنه مقاله، مراجع و زیرنویس‌ها باید با فونت ۱۲ B Zar و با فاصله double میان خطوط، در صفحات A4 یک ستونی و تحت نرم‌افزار Word تهیه گردد.

آدرس نویسندگان

آدرس پستی کامل همه نویسندگان همراه با شماره تلفن و دورنگار (فکس) و نشانی پست الکترونیک (email) نویسنده عهده‌دار مکاتبات در برگه مستقلی چاپ و به همراه مقاله ارسال گردد.

چکیده

هر مقاله باید شامل، عنوان (فارسی و انگلیسی)، چکیده (فارسی و انگلیسی) مقاله در حداکثر ۲۰۰ واژه، کلیدواژه (فارسی و انگلیسی) در حداکثر ۵ واژه باشد.

تصاویر و عکس‌ها

در هنگام ارسال مقاله جهت داوری نیازی به ارسال اصل تصاویر و عکس‌ها نمی‌باشد، ولی رونوشت ارسالی باید واضح باشد. پس از تایید مقاله، ارسال اصل تصاویر و عکس‌ها جهت چاپ مقاله ضروری می‌باشد.

مراجع

به کلیه مراجع باید در متن ارجاع داده شده باشد. مراجع باید با شماره مشخص گردند و جزئیات آنها به شرح زیر در پایان مقاله به ترتیب حروف الفبای نویسندگان ظاهر گردد:

مقالات

[شماره مرجع] نام خانوادگی و علامت اختصاری اول نام، سال انتشار یا تاریخ برگزاری، "عنوان مقاله"، نام کامل نشریه یا کنفرانس، شماره مجله یا شماره جلد، شماره صفحات.

کتابها

[شماره مرجع] نام خانوادگی و نام کامل همه نویسندگان، عنوان کتاب، نام مترجم (در صورت وجود)، نام کامل ناشر، سال انتشار.

واحدها

کلید مقالات باید از واحد استاندارد SI (متریک) در تمام بخشهای مقاله استفاده نمایند. در کنار واحد SI می‌توان از واحد انگلیسی در داخل پرانتز نیز استفاده نمود.

طول مقالات

حداکثر تعداد صفحات مقاله ۱۵ صفحه است که معادل حدود ۷۵۰۰ واژه است. برای چاپ صفحات بیشتر و یا رنگی لازم است هزینه‌ای معادل ۲۵۰,۰۰۰ ریال (۲۵ دلار آمریکا) برای هر صفحه پرداخت گردد.

فرآیند ارسال مقاله

مقالات قابل چاپ در مجله شامل مقالات کامل پژوهشی، مقالات کوتاه و یادداشتهای پژوهشی است. مقالات ارسالی نباید در هیچ مجله داخلی و یا خارجی چاپ شده باشد و یا در حال داوری باشد.

- برای ارسال مقاله خود به سایت مجله به آدرس www.joc-isice.ir مراجعه نموده و طبق دستورالعمل مندرج در سایت عمل نمایید.
- مقالات جهت داوری به داوران متخصص ارسال می‌گردد. در پایان تایید یا رد هر مقاله توسط هیئت تحریریه مجله انجام خواهد پذیرفت. سردبیر مجله نتیجه داوری را برای نویسنده عهده دار مکاتبات ارسال خواهد نمود.
- در صورتی که نیاز به تصحیح مقاله باشد، تصحیحات باید تنها محدود به موارد ذکر شده باشد. در سایر موارد نویسنده لازم است سردبیر را در جریان هرگونه تغییر و یا تصحیح دیگری قرار دهد. در هر صورت مسئولیت صحت و سقم مطالب بر عهده نویسنده خواهد بود.

حق کپی

در صورت تایید مقاله، نویسندگان لازم است فرم انتقال حق انتشار آن به "انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران" را تکمیل و به همراه اصل مقاله ارسال نمایند. نویسندگان لازم است موافقت کتبی دارندگان حق کپی بخشهایی از مقاله که از مراجع و منابع دیگر نسخه‌برداری شده است را دریافت و به دفتر مجله ارسال نمایند.

بدینوسیله از کلیه اساتید، پژوهشگران و کارشناسان مهندسی کنترل و ابزار دقیق جهت ارائه مقالات خود در این نشریه دعوت به عمل می‌آورد. خواهشمند است مقالات خود را به صورت الکترونیکی از طریق سایت مجله به آدرس: www.joc-isice.ir ارسال نمایید.

حسگرهای گاز: مبانی، کاربرد و صنعت آینده

فرامرز حسین بابایی

استاد، دانشکده مهندسی برق، گروه الکترونیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، fhbabaei@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۳/۳/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۳/۷/۲۰)

چکیده: از اولین گزارش کار پژوهشی در زمینه حسگر گاز در ایران نزدیک به ۲۰ سال می‌گذرد، و در این مدت رساله‌های ارزشمندی در این خصوص از دانشگاه‌های کشور صادر شده است. لیکن، نه تنها هنوز از تولید صنعتی این افزاره‌های مهم و پرکاربرد خبری نیست، احساس می‌شود که گزارش‌های اخیر بعضاً حتی از صنعت مربوطه دورتر شده‌اند. در این مقاله، انواع پرکاربرد حسگرهای گاز موجود در بازار اجمالاً معرفی شده مقایسه می‌شوند. نیازهای حال و آینده‌ی بازار به انواع حسگرهای گاز بیان و عدم اغنای این نیازها با توانایی‌های حسگرهای گاز موجود بحث می‌گردد، و بدین ترتیب، بعضی از زمینه‌های نیازمند پژوهش مشخص می‌شود. در ادامه نشان داده می‌شود که فن‌آوری ساخت بسیاری از انواع حسگرهای گاز در داخل کشور برای شروع تولید صنعتی حاضر است. دانش فنی و امکانات صنعتی میسر و آغاز کار چندان سخت نیست؛ نگارنده دشواری اصلی را در مدیریت بازار می‌بیند.

کلید واژه‌ها: شامه مصنوعی، حسگر گاز، تولید صنعتی، کاربردها، نیاز بازار، تولید در ایران.

Gas Sensors: Fundamentals, Applications, and Scope

Faramarz Hossein-Babaei

Abstract: Almost two decades after the publication of the first Iranian research report on gas sensors, no such device is commercially fabricated inside the country. Valuable experimental and theoretical articles and theses have been produced in Iranian universities and research organizations during this period, but recent literature does not seem to set or cater to any specific industrial goal. In this paper, the commercially available gas sensors are introduced, their prominent quality factors described, and their present-day domestic and industrial applications specified. The intricate combinations of quality factors demanded by future applications are discussed, demonstrating that the available sensors are far from satisfactory for even today's requirements. It is established that, owing to the continuous research carried out on the subject, the fabrication technologies and knowhow related to major gas sensor types are within the national capacity; the main barrier is connected to the internal market management.

Keywords: Artificial olfaction, Gas sensor, Applications, Industrial fabrication, Market demand, Local concerns.

۱- مقدمه

از دیرباز، اجداد ما در محیط‌های حاوی مواد خطرناک و سمی کار و زندگی کرده‌اند، و نگرانی از آلودگی‌های محیطی، به صورت گوناگون، دیرینه‌ای چندین هزار ساله دارد. آتش مصرف‌کننده اکسیژن هوا و منبعی برای تولید گاز مونوکسید کربن است، و در محیطی با تهویه نامناسب (غارها) احتمالاً باعث مرگ انسان‌های اولیه می‌شده است. لیکن، اولین تلاش‌های ثبت شده برای آشکارسازی و شناسایی گاز، به نیاز مبرم در این خصوص در معادن زغال سنگ مرتبط است. در این معادن، منابع قابل ملاحظه‌ای از گازهای قابل احتراق و سمی با کاهش معدن آزاد می‌شود. "چراغ‌های شعله باز" اولین وسیله تشخیص گازی است که در این معادن مورد استفاده قرار گرفت. کاهش اکسیژن در محیط معدن منجر به فروکش کردن شعله و یا خاموشی آن شده به عنوان عامل هشدار دهنده مورد استفاده قرار می‌گرفت. این وسیله هر از گاهی خود باعث بروز انفجارهای ناخواسته بر اثر افزایش بیش از حد گازهای قابل احتراق می‌گردید و ایمن نبود. این امر منجر به پیدایش نسل دیگری از این چراغ‌ها در سال ۱۸۱۵ شد. در چراغ جدید، شعله درون یک غلاف شیشه‌ای مدرج و یک سیستم خروج گاز مجبوس بود. با درجه‌بندی غلاف شیشه‌ای، مقیاسی برای اندازه‌گیری ارتفاع شعله و تعیین فشار جزئی اکسیژن در محیط حاصل می‌شد. این ابزار در واقع مقدار اکسیژن محیط را با تقریب قرائت می‌نمود و ایمنی در معادن زغال‌سنگ را بهبود بخشید، اما هنوز تشخیص خطر در اتمسفر معدن با اشتباه‌های کشنده‌ای همراه بود [۱].

در اوایل قرن بیستم، روش‌های متفاوتی از آشکارسازی گاز مورد توجه قرار گرفته در معادن زغال سنگ به کار گرفته شدند. از جمله این روش‌ها، استفاده از پرندگانی چون قناری در قفس بود. وجود گازهای سمی، قبل از این که صدمه‌ای به انسان بزنند، میل به حرکت و آواز پرند را کاهش داده در نهایت باعث مرگ پرند می‌شد. مشاهده رفتارهای غیر عادی حیوان، به عنوان سیگنال هشدار دهنده‌ای برای خروج اضطراری کارگران از معدن تلقی می‌شد [۲-۵].

دهه ۱۹۲۰ شاهد پیشرفت‌های مهمی در زمینه تشخیص گاز بود: دکتر تسوجی^۱ در سال ۱۹۲۵ روشی نوری را برای آشکارسازی گازها ارائه کرد. در این روش، از تغییر ضریب شکست هوا به دلیل حضور گاز هدف استفاده می‌گردد که باعث جابه‌جایی خطوط تداخل شعاع نور با شعاع مرجع می‌شود. تعداد خطوط جابه‌جا شده ارتباط مستقیمی با تراکم گاز هدف دارد. در سال ۱۹۲۷، دکتر جانسون روش متفاوتی را بر مبنای اثر کاتالیزوری پلاتین بنا نهاد. در این روش، گاز سمی حاضر در هوا به دلیل اثر کاتالیزوری پلاتین سوخته باعث گرمتر شدن سیم پلاتین و تغییر مقاومت الکتریکی آن می‌گردد. اندازه‌گیری این تغییر مقاومت توسط یک پل اندازه‌گیری مقاومت صورت گرفته حضور گاز مشخص می‌شود. حوالی ۱۹۳۰، نمونه‌های صنعتی از این حسگر با وزن تقریبی ۵,۵

کیلوگرم وارد بازار شد. در سال‌های بعد، نمونه‌های توسعه یافته این سامانه حسگری با نام تجاری "J-W Sniffer" با وزن و ابعاد کمتر در بازار جهانی تثبیت شد. این حسگر گاز اولین حسگر از دسته حسگرهای گاز مبتنی بر دماسنجی می‌باشد [۶-۹]. این نوع حسگرها که با تکنولوژی روز (۲۰۱۴) مینیاتوری شده‌اند می‌توانند دمای بالا و شرایط سخت آگروز اتمسفر را تحمل کنند و هنوز هم در صنایع مختلف مورد استفاده هستند. اندیشه استفاده از نیمه‌هادی‌ها به عنوان حسگرهای گاز به سال ۱۹۵۳ برمی‌گردد؛ براتین^۲ و باردین^۳ در آزمایشگاه بل^۴ به هنگام کار بر روی ژرمانیموم، حساسیت و ویژگی‌های الکترونیکی آن را به تغییر ترکیب اتمسفر اطراف آن مشاهده و گزارش کردند. در ادامه این کار، محققین دیگری به بررسی نقش اتمسفر گازی بر هدایت الکتریکی دیگر نیمه‌هادی‌ها پرداختند و حدود ده سال بعد سیاما^۵ حساسیت "نیمه‌هادی‌های اکسید فلزی"^۶ را به برخی از گازها گزارش نمود. در همان سال، تاگوشی^۷ اختراع حسگرهای گاز بر اساس اکسید قلع را به ثبت رسانید. عملکرد حسگر تاگوشی، از طریق به کار گرفتن روش‌هایی چون اضافه کردن ذرات فلزهای نجیب به اکسید قلع، به سرعت بهبود یافت و در سال ۱۹۶۸، شرکت فیگارو، توسط شخص تاگوشی در ژاپن بنیان‌گذاری شد. این شرکت در همان سال تولید انبوه این حسگرها را آغاز نمود. این محصول سریعاً برای جلوگیری از سوانح احتمالی مربوط به نشت گاز در خانه‌های ژاپنی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. تجارب حاصل، خیلی زود، این نوع حسگر گاز را به عنوان یک ابزار ایمن برای شناسایی نشتی گاز در بازار جهانی تثبیت کرد، و اقبال بازار عاملی شد برای بررسی هر چه بیشتر عملکرد حسگرهای اکسید فلزی. این دسته از حسگرها هم اکنون (۲۰۱۴) نیز به خاطر ارزانی و مزایای دیگر از حسگرهای گاز پر مصرف در جهان می‌باشد [۱۰-۱۲].

حسگرهای اکسید فلزی بر اساس تغییر مقاومت الکتریکی نیمه-هادی‌های اکسیدی در حضور گازهای سمی و آتش‌زا، یا بطور کلی گازهای احیا کننده، کار می‌کنند و به دسته بزرگتر "حسگرهای مقاومتی گاز"^۸ نیز تعلق دارند. حساسیت به گاز این حسگرها به روش‌های متعددی، چون آلایش حجمی^۹ اکسید فلز مورد استفاده یا آرایش سطحی^{۱۰} آن با انواع مواد کاتالیزوری، قابل افزایش است. در حال حاضر، دسته حسگرهای مقاومتی شامل ادواتی ساخته شده بر اساس مواد غیر اکسیدی نیز می‌شود. علی‌الخصوص اخیراً نیمه‌هادی‌ها و هادی‌های آلی از این نظر مورد مطالعه بوده‌اند. حسگرهای مقاومتی گاز ساخته شده از مواد آلی در دمای اتاق کار کرده اکثراً در مقایسه با انواع اکسید فلزی از

² W. H. Brattain

³ J. Bardeen

⁴ Bell laboratories

⁵ K. Sayama

⁶ Metal oxide semiconductors

⁷ N. Taguchi

⁸ Resistive gas sensors

⁹ Doping

¹⁰ Surface decoration

¹ Jiro Tsuji

صنعت اتومبیل سازی مورد استفاده قرار گرفتند. هم‌اکنون نیز، به دلیل اقبال صنایع اتومبیل سازی، انواع حسگرهای گاز الکتروشیمیایی جزو پرمصرف‌ترین حسگرها می‌باشند. این حسگرها، برای بهینه‌سازی اختلاط مصرف سوخت و هوا و کاهش آلودگی‌های خروجی از آگزوز استفاده می‌شوند [۲۷-۳۰].

ارائه و توسعه ترانزیستورهای اثر میدانی-شیمیایی^۸ نیز در دهه ۱۹۷۰ صورت گرفت و ساختارهای متفاوتی از این نوع حسگرهای گاز مورد توجه محققان قرار گرفت [۳۱]. این دسته، به علت دشواری‌های فنی غیر قابل حل، مورد اقبال بازار صنعتی قرار نگرفت. در حال حاضر مصرف آن‌ها محدود به کاربردهای کم قیمت گردیده است.

به‌جز چند دسته فوق‌الذکر، انواع متعدد دیگری از حسگرهای گاز مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته و بعضاً مورد استفاده محدود قرار گرفته‌اند، لیکن در این متن، هدف مرور ادبیات مربوط به حسگرهای گاز استفاده شده در صنعت است. درخصوص سایر انواع، خواننده علاقه‌مند را به مقالات مروری دیگر ارجاع می‌دهیم [۳۲-۳۶]. این متن، پر کاربرد-ترین حسگرهای گاز محیطی، یعنی رطوبت‌سنج‌ها را نیز پوشش نمی‌دهد. نگارنده امیدوار است که در آینده‌ای نزدیک متنی را در این خصوص ارائه دهد و در حال حاضر، خواننده علاقه‌مند را به مطالعه مراجع [۳۷-۴۰] و مراجع ارائه شده در آن‌ها توصیه می‌نماید.

در اواخر دهه ۱۹۸۰، با پیدایش زمینه‌ی دیگری در ادبیات بویایی با عنوان "بینی الکترونیکی"^۹، اهمیت حسگرهای گاز و وسعت کاربردهای بالقوه آن‌ها بیش از پیش مشخص شد [۴۱]. در این زمینه، هدف تقلید از ساختار بویایی پستانداران است [۴۲، ۴۳]. در سامانه بویایی پستانداران از میلیون‌ها حسگر گاز بصورت هم‌زمان برای شناسایی گاز هدف استفاده می‌گردد. از اینرو، استفاده از آرایه‌های حسگر گاز به‌طور وسیعی وارد متون پژوهشی و حتی صنایع مربوط به آشکارسازی و شناسایی گاز گردید. در حال حاضر، آرایه‌های مورد بررسی، به دو دسته مجازی و حقیقی تقسیم می‌شوند (نویسنده مقالات متعددی را در خصوص دسته اول ارائه کرده است [۴۴-۴۷]). اگرچه فعالیت‌های پژوهشی بسیاری در زمینه آرایه‌های حسگری گاز متمرکز است، هنوز امکانات عملی در این زمینه با فاصله زیادی از نیازهای بازار عقب است. این نیازها به سرعت گسترده‌تر می‌شوند و کارهای بیشتر نظری و عملی را طلب می‌کنند. (فقط امکانات ناشی از نصب یک بینی الکترونیکی قابل اطمینان را روی تلفن موبایل تجسم کنید؛ مجسم کنید که خانم خانه‌داری تازه بودن ماهی، سبزی و یا کیفیت زعفران را با استفاده از حسگر نصب شده روی تلفن موبایل خود بررسی کند). پوشش متن حاضر، محدود به ساختارهای تک حسگری است و شامل آرایه‌های حسگری نمی‌شود. آرایه‌های حسگری در این متن فقط به عنوان مصرف‌کننده‌های حسگرهای گاز مطرح هستند.

حساسیت بالایی برخوردارند. مقالات مروری متعددی در زمینه حسگر-های مقاومتی گاز در دسترس است که قرائت آن‌ها توصیه می‌گردد [۱۳-۱۸].

در چند سال اخیر، در زمینه حسگرهای اکسید فلزی، باب دیگری با عنوان حسگرهای گاز فوق‌العاده حساس^۱ نیز باز شده است. پژوهشگران متعددی این حساسیت فوق‌العاده بالا را به ویژگی‌های شیمیایی-مقاومتی ذرات نانومتری اکسیدهای مورد استفاده نسبت داده‌اند [۱۹، ۲۰]. اخیراً، نگارنده، طی یک کار نظری-آزمایشگاهی، نشان داده است که این دسته اساساً خارج از دسته حسگرهای مقاومتی قرار می‌گیرند و ساز و کار حسگری متفاوتی دارند [۲۱].

دسته دیگری از حسگرهای گاز مبتنی بر نیمه‌هادی‌ها، خصوصاً نیمه-هادی‌های اکسید فلزی، حسگرهای نوع "دیود شاتکی"^۲ است. کارکرد اولین حسگر گاز دیودی در سال ۱۹۷۹ توسط ایتو^۳ بر اساس اتصال اکسید روی با فلز پالادیوم عملاً نمایش داده شد [۲۲]. این دسته بر اساس تغییر ارتفاع سد پتانسیل موجود در فصل مشترک اتصال فلز-نیمه‌هادی به دلیل حضور گاز عمل می‌کند. سد شاتکی تقریباً متناسب با تراکم گاز هدف تغییر می‌کند، و در بایاس ثابت، جریان دیود به صورت نمایی به ارتفاع سد وابسته است. تغییر ارتفاع سد در حضور گاز احیایی منفی است و از اینرو، مشابه حسگرهای مقاومتی، حضور گاز باعث افزایش جریان الکتریکی می‌گردد. به همین دلیل، در بسیاری از متون، این دو نوع عملکرد متفاوت حسگری از هم تمیز داده نشده‌اند. به خاطر این وابستگی نمایی، حسگرهای دیودی از حساسیت بالاتری نسبت به حسگرهای مقاومتی برخوردار هستند و از اینرو اخیراً مورد توجه بیشتر محققین قرار گرفته‌اند. از این گروه، حسگرهای مبتنی به اتصال اکسید تیتانیوم با فلزات نجیب توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [۲۱-۲۶].

اولین تلاش‌ها در زمینه حسگرهای الکتروشیمیایی^۴ گاز در سال ۱۹۶۳ توسط گوتو^۵ و همکارانش گزارش شده است. آن‌ها نشان دادند که یک سلول الکتروشیمیایی، متشکل از دو الکتروود فلزی از دو جنس متفاوت و یک الکتروولیت جامد، نیروی محرکه‌ی پایداری را تولید می‌کند که مرتبط به فشار جزئی اکسیژن در محیط است. نشان داده شد که با اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل به‌وجود آمده بین این دو الکتروود می‌توان تراکم گاز اکسیژن را در محیط آشکار نمود. در سال ۱۹۷۶، برپایه این ساختار، شرکت بوش^۶ حسگری را به بازار ارائه نمود که ترکیب بهینه‌ی سوخت و اکسیژن را در کاربراتور اتومبیل تعیین می‌نمود. از آن سال، این حسگرهای گاز، که به حسگر^۷ مشهور شدند، بصورت وسیعی در

¹ Super sensitive

² Schottky diode

³ K. ITO

⁴ Electrochemical sensors

⁵ K. S. Goto

⁶ Bosch

⁷ lambda

⁸ Chem-FET

⁹ Electronic nose

۲- کاربردهای حسگرهای گاز و بینی الکترونیکی

هرجا که نیازی برای احساس و تشخیص گاز و بو وجود دارد، کاربردی از حسگر گاز قابل تصور است. ابتدای کار، نیاز به ابزاری برای هشدار در مورد حضور گازهای سمی و خطرناک در محیط کار بوده است. لیکن، با توسعه دانش و فن ساخت حسگرهای گاز، نیازهای صنعتی و خانگی دیگری به تدریج مطرح و به لیست نیازها افزوده شدند. این لیست به سرعت بلندتر می شود؛ مثلاً، از چند سال قبل، نیاز به تشخیص بیماری های خطرناک ریوی از طریق تشخیص بوی برخی ترکیبات فرار در نفس، یا تعیین هویت اشخاص از طریق بوی عرق (کاری که شامه سگ به راحتی قادر به انجام است) و ... به این لیست اضافه گردیده اند [۴۹،۴۸]. بلندتر شدن این لیست نیاز، محرک اصلی تحقیق و توسعه در زمینه حسگرهای گاز و بینی الکترونیکی بوده است.

هم اکنون، در اکثر کشورها، نصب حسگرهای تشخیص مونوکسید-کربن و متان در منازل، فروشگاهها و کارگاهها و تست منظم ادواری آن-ها اجباری است. هم چنین، نصب حسگرهای مناسب برای سنجش سطح تراکم سایر گازهای قابل احتراق و خطرناک مانند هیدروژن و کنترل منظم آنها در محل های واجد شرایط ضروری اعلام شده است. اکثر این کاربردها با استفاده از یک یا چند حسگر در هر موقعیت اغناء می شود، اما مجموع تعداد حسگر استفاده شده در یک مجتمع مسکونی پنجاه واحدی، به چند صد عدد بالغ می شود که به صورت یک شبکه امنیت ساختمان را به عهده می گیرند. با این همه، در حال حاضر، بزرگترین مصرف کننده حسگر گاز، صنایع اتومبیل سازی است [۵۰]. حجم این مصرف نیز، به دلیل دقیقتر شدن استانداردهای وضع شده روی چگونگی مصرف سوخت، کنترل گازهای آلاینده و هوشمند شدن اتومبیل ها، به سرعت در حال رشد است. حسگرهای به کار رفته در اتومبیل ها بیشتر از نوع الکتروشیمیایی می باشند [۲۸] ولی با تغییر نوع نیازها، بحث استفاده از انواع دیگر نیز مطرح می باشد. متأسفانه، با وجود این که مقدار مصرف گاز بر نفر در ایران در بالاترین سطح جهان است، هنوز نصب آشکارسازهای CO و CH₄ در کشور ما نه مرسوم است و نه اجباری، و به همین دلیل سالانه جمع قابل ملاحظه ای از هموطنان، خصوصاً در فصل زمستان، جان می بازند. صنایع اتومبیل سازی ایران نیز ده سالی است که به نصب حسگر گاز روی اتومبیل های ساخت داخل پرداخته است. با وجود اینکه طی این مدت علاقه گروهی از پژوهشگران منجر به فراهم سازی پشتوانه پژوهشی لازم برای تولید صنعتی این قطعات در داخل کشور شده است [۵۱-۵۳]، هنوز هم صنعت ساخت اتومبیل در ایران از حسگر گاز ساخت خارج استفاده می کند. صنایع پتروشیمی نیز از مصرف کنندگان عمده حسگرهای گاز هستند. در این صنایع حسگرهای گاز و آرایه های حسگری برای کنترل کیفیت محصول نهایی، کنترل کیفیت خوراک واحدهای مختلف، امنیت محیط کار، نشت احتمالی گاز، تعیین سطح گازهای گوگردی در مراحل مختلف و محیط های متفاوت، دسته بندی

محصول و ... [۵۴،۵۵] به کار گرفته می شوند. علی رغم وجود صنایع بزرگ نفت و پتروشیمی در کشور، نویسنده هنوز متن مدونی را در خصوص حسگرهای گاز مورد نیاز این صنایع و محل تامین آنها قرائت نکرده است.

در کاربردهای جدیدتر و پیچیده تر، حسگرهای گاز به صورت اجزای آرایه های حسگری به کار می روند. در این کاربردها، حسگرهای گاز به مثابه گیرنده های بویایی عمل می کنند. صنایع غذایی در حال حاضر عمده ترین مصرف کننده این آشکارسازهای بویایی می باشند [۵۶،۵۷]. بوی مواد غذایی فاکتور کیفی مهم و معیار انتخاب آنها توسط مصرف کننده است. مضافاً، با تحلیل بوی مواد غذایی می توان اطلاعاتی در مورد تازگی، کیفیت، آلودگی، افزودنی ها و نوع مواد اولیه استفاده شده به دست آورد. آشکارسازهای بویایی برای کنترل فرآیند فرآوری و طبع مواد غذایی نیز استفاده می شود. در این زمینه، بیشترین پژوهش ها بر روی محصولات لبنی، گوشت و ماهی، قهوه، چای، روغن های خوراکی و سرکه انجام شده است. در صنایع لبنی، از بینی الکترونیکی برای شناسایی و تشخیص تازگی شیر، تشخیص محصولات طبیعی از مصنوعی و تشخیص فساد در مواد اولیه استفاده شده است [۵۸،۵۹]. در زمینه گوشت، می توان به کاربردها در تشخیص فساد، کنترل کیفیت، دسته بندی انواع گوشت، تشخیص تازگی گوشت، تشخیص تازگی ماهی و کنترل کیفیت ماهی اشاره نمود [۶۰-۶۲]. مثال ها در زمینه تحلیل بوی قهوه و چای، شامل تشخیص تولید کننده قهوه، تشخیص رسیده بودن قهوه، تشخیص مرغوبیت چای و تعیین زمان تخمیر بهینه چای است [۶۳،۶۴]. در زمینه روغن های خوراکی بیشترین تحقیق بر روی روغن زیتون انجام شده است. کنترل کیفیت روغن های خوراکی، آشکارسازی افزودنی های تقلبی و دسته بندی انواع روغن از جمله کاربردها در این زمینه است [۶۵]. از دیگر کاربردهای حسگرهای گاز در صنایع غذایی، می توان به دسته بندی انواع سرکه، تشخیص فساد چپس، پایش تغییر تدریجی کیفیت قارچ، بررسی تغییر کیفیت تخم مرغ، دسته بندی انواع عسل، شناسایی محل تولید عسل، پایش بوی ناشی از مراحل مختلف پخت نان و خودکار کردن فرآیند پخت مواد غذایی اشاره نمود [۶۶-۶۹]. تولید کنندگان انواع نوشیدنی نیز از علاقه مندان اصلی انواع حسگر-های گاز می باشد. با تحلیل بوی نوشیدنی ها، می توان اطلاعاتی را در مورد کیفیت، هویت تولید کننده، محتویات، تازگی و نوع این محصولات به دست آورد. تشخیص تازگی آبمیوه، تشخیص آب انگور از انگور تخمیر شده، دسته بندی ماءالشعیر، تشخیص نوع افزودنی های طعم دهنده، سنجش عمر نوشیدنی، دسته بندی انواع نوشیدنی ها و تشخیص ترکیبات بودار در آب از کاربردهای گزارش شده حسگرهای گاز در این زمینه می باشد [۷۰-۷۳]. اخیراً، در ایران نیز صنایع غذایی به تکاپوی استفاده از چنین سامانه های حسگری افتاده اند و در چند سال اخیر مراجعات مکرری را از صنایع آبمیوه و نوشابه سازی برای پایش کیفیت، از صنایع عرقیات و اسانس گیری برای کنترل کیفیت و از صنعت بزرگ

تشخیص آمونیاک و کلروفرم در آب، پایش گازهای ساطع شده از محل بازیافت آب، بررسی کیفیت آب آشامیدنی و تشخیص آلودگی‌ها در رودخانه‌ها از جمله این کاربردها هستند [۹۴-۹۶].

کاربردهای نظامی بینی الکترونیکی نیز از اهمیت بالایی برخوردارند، تا حدی که ناتو (NATO)^۲، از ابتدای کار، یکی از حامیان اصلی پروژه توسعه بینی الکترونیکی بوده است. کاربردها عمدتاً از دو دسته کشف مواد منفجره و آشکارسازی سریع گازهای سمی می‌باشند. خواننده علاقه‌مند به مقالات مروری موجود [۹۷-۹۹] مراجعه نماید.

در زمینه رباتیک، از حسگر گاز و آرایه‌های حسگری برای تجهیز ربات به حس بویایی استفاده می‌شود. ربات‌های مجهز به حس شامه می‌توانند برای دنبال کردن رد بوها و پیدا کردن محل انتشار بو مورد استفاده قرار گیرند [۱۰۰]. اهمیت استفاده از چنین ربات‌هایی در سفینه‌های فضایی برای تشخیص محل نشت گاز آمونیاک یا تشخیص آغاز آتش‌سوزی مورد بحث و تست عملی قرار گرفته است. به دلیل اهمیت بالای این ابزار در ایمنی سفینه‌های فضایی، سازمان فضایی اروپا^۳ و ناسا^۴ از حامیان توسعه شامه مصنوعی هستند [۱۰۱].

بیش از بیست سال است که، همانند آنچه که دائماً بر روی صدا و تصویر صورت می‌گیرد، نیاز به ابزاری برای ثبت، کد گذاری و مقایسه بوها و ابزار دیگری برای بازتولید آن‌ها بر اساس اطلاعات عددی احساس می‌شود. قسمت اول این سناریو مدت‌هاست که عملی گردیده است و اکنون اطلاعات مربوط به احساس بو با دقت مورد نیاز، بصورت مجموعه‌ای از اعداد قابل ثبت و مقایسه با مجموعه‌های عددی دیگر، می‌باشد (این کار به طور مستمر توسط نگارنده و همکاران در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی صورت می‌گیرد [۴۴-۴۷]). لیکن قسمت دوم، یعنی بازسازی بو بر اساس اطلاعات عددی، اشکال سخت-افزاری دارد و علی‌رغم تلاش‌ها [۱۰۲-۱۰۴]، راهی عملی برای آن پیشنهاد نگردیده است. مشکل اصلی این است که احساس بو هنوز به تعداد اندکی بوی ساده قابل تجزیه نیست و لذا زمینه سنتز احساس بو، مشابه سنتز احساس رنگ براساس سه رنگ پایه، هنوز نیازمند ورود پژوهشگران باهوش و تازه نفس است.

۳- مفاهیم پایه و تعاریف

در این قسمت، بعضی از کلید واژه‌های مربوط به حسگر گاز که در ادبیات مربوطه پیوسته تکرار می‌شود، تعریف شده مختصراً تشریح می‌شوند.

در یک حسگر گاز، تعامل مولکول‌های گاز هدف با ساختار حسگر، یک یا چند مشخصه فیزیکی حسگر (جرم، رسانایی، ظرفیت خازنی، ...) را تغییر می‌دهد. با تبدیل این تغییرات به سیگنال الکتریکی، پاسخ حسگر به گاز مورد نظر حاصل می‌شود [۱۰۵]. بنابراین، در ساده-

زعفران برای عیارزنی محصول به "آزمایشگاه خواص الکترونیکی مواد"^۱ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی شاهد بوده‌ایم که حاکی از این علاقه می‌باشد.

صنایع کشاورزی نیز به انحاء مختلف نیازمند حسگرهای گاز هستند. بوی محصولات کشاورزی حاوی اطلاعات ارزشمندی در مورد رسیده بودن، تازگی، کیفیت و نوع آن‌ها است. مهمترین کارهای پژوهشی در این خصوص بر روی میوه‌ها، سبزیجات، غلات و تعیین سلامت درخت‌ها و نوع کود انجام شده است. در زمینه میوه‌ها، می‌توان به بررسی تازگی آناناس، پایش فرآیند خشک کردن انگور، تعیین کیفیت هلو، دسته‌بندی انواع مختلف زردآلو، تشخیص ضایعات سیب و تعیین میزان رسیده بودن میوه‌ها اشاره نمود [۷۴-۷۶]. در زمینه گیاهان، می‌توان به تشخیص بیماری درخت‌ها، بررسی سلامت گیاهان در گل‌خانه، کنترل کیفیت گیاهان دارویی، تشخیص نوع زعفران، تشخیص آلودگی گوجه‌فرنگی و سبب‌زمینی و سنجش کیفیت گوجه‌فرنگی اشاره نمود [۷۷-۸۰]. در زمینه غلات، از حسگرهای گاز برای دسته‌بندی انواع برنج، تشخیص ضایعات ذرت، تشخیص آلودگی‌های قارچی غلات، بررسی کیفیت گندم و دسته‌بندی انواع جو استفاده شده است [۸۱-۸۳]. کنترل فرآیند تولید کود، آشکارسازی گازهای ناشی از کود و کنترل هوای مرغ‌داری‌ها از دیگر کاربردهای حسگرهای گاز و بینی الکترونیکی در کشاورزی و دامداری است [۸۵،۸۴].

پزشکی و دامپزشکی از زمینه‌های جذاب حسگرهای گاز و بینی الکترونیکی است. با تحلیل بوی بدن، بافت‌ها، تومورها و هوای بازدم می‌توان اطلاعات زیادی را در مورد سلامت بدن به دست آورد. بر اساس این اطلاعات، می‌توان برخی از بیماری‌ها را در مراحل اولیه شناسایی کرد. تشخیص بیماری‌های ریوی با تحلیل هوای بازدم، تشخیص دیابت بر اساس سطح تراکم استون در هوای بازدم، استفاده از مجموع این داده‌ها برای تشخیص ناراحتی کلیوی، شناسایی باکتری‌های بیماری‌زا، تشخیص سرطان مجاری ادرار، تشخیص باکتری‌های بیماری‌های گوش و حلق و بینی و لته و دندان و تشخیص نوع باکتری کشت داده شده از جمله این کاربردها هستند [۴۸،۴۹،۸۶-۹۰]. با تحلیل بازدم می‌توان اعتیاد افراد به سیگار، الکل یا مواد مخدر را تشخیص داد [۹۱،۹۲]. در ایران نیز طی دو سال اخیر شاهد ابراز علاقه پژوهشگران به کاربرد حسگر گاز و سامانه‌های بویایی در زمینه پایش فرآیند کشت باکتری و سعی در تشخیص سل گاوی در مراحل اولیه بوده‌ایم [۹۳].

پایش پارامترهای کیفی محیط زیست از گسترده‌ترین زمینه برای کاربرد حسگرهای گاز است. برای بررسی کیفیت محیط و آشکارسازی انواع آلودگی‌ها در آب، خاک یا هوا انواع مختلفی از حسگرها به کار می‌روند. تشخیص آلودگی‌های خاک، آشکارسازی میزان بوهای نامطبوع محیط، تحلیل بوی ساطع شده از کودهای شیمیایی، بررسی بوها در محل دفن زباله، آشکارسازی کپک‌های تشکیل شده در ساختمان‌ها،

² North Atlantic Treaty Organization

³ European space agency

⁴ The National Aeronautics and Space Administration

¹ Electronic Material Laboratory (EML)

اشباع حسگر: هم‌چنان که در شکل ۱۱۱ مشهود است، پاسخ حسگر حداکثر تا سطح معینی با افزایش گاز هدف بالا می‌رود. این سطح پاسخ و تراکم گاز هدف را پاسخ و تراکم گاز اشباع می‌گوییم.

حد تشخیص^۲: کمترین سطح از تراکم گاز هدف است که توسط حسگر قابل تشخیص است. این حد به نوع گاز هدف و بسیاری از عوامل دیگر وابسته است.

بازه پویا^۳: بازه‌ای از تراکم گاز هدف است که تغییر تراکم گاز در این بازه منجر به تغییر قابل ملاحظه در پاسخ شود. بازه پویای هر حسگر گاز محدوده تراکمی بین حد تشخیص و تراکم اشباع آن است (شکل ۱۱۲).

حساسیت: به شیب منحنی تغییرات پاسخ حسگر بر حسب تراکم گاز (شکل ۱۱۳) حساسیت گفته می‌شود. به دلیل غیر خطی بودن این منحنی، مقدار حساسیت وابسته به سطح تراکم گاز است. حساسیت در تراکم اشباع تقریباً به صفر می‌رسد.

زمان پاسخ: زمانی است که طی آن پاسخ حسگر از سطح مبنا به ۹۰ درصد پاسخ مانا صعود می‌کند، به شرط این که ورود گاز به طور ناگهانی صورت گرفته باشد. زمان پاسخ یک حسگر به نوع گاز هدف نیز وابسته است.

زمان بازیافت^۴: زمانی است که طی آن پاسخ حسگر، پس از رفع ناگهانی گاز، از سطح پاسخ مانا تا ۱۰ درصد بالای سطح مبنا کاهش می‌یابد. زمان بازیافت به نوع گاز هدف و تراکم آن نیز بستگی دارد. در اکثر حسگرهای گاز زمان پاسخ با زمان بازیافت برابر نیست.

انتخابگری^۵: توانایی حسگر برای آشکارسازی انتخابی یک یا چند گاز معین است. هیچ حسگر گازی به تنهایی انتخابگر کامل نیست. مثلاً حسگرهای اکسید فلزی عملاً به اکثر قریب به اتفاق گازهای احیایی پاسخ می‌دهند. انتخابگری نسبی در حسگرها بر حسب تفاوت حساسیت به گازهای مختلف قابل تعریف و استفاده می‌باشد.

رانس^۶: به تغییر تدریجی پاسخ حسگر به سطح معینی از گاز هدف رانس گفته می‌شود. معمولاً، رانس در جهت کاهش پاسخ صورت می‌گیرد و غیر قابل بازگشت است. به دلیل رانس، نه تنها پاسخ بلکه تمام پارامترهای مهم حسگر به صورت برگشت ناپذیری به تدریج تغییر می‌کنند. رانس به علت تغییرات تدریجی در ساختار لایه حساس حسگر در اثر عوامل فیزیکی و شیمیایی صورت می‌گیرد و غیر قابل بازگشت است. تف‌جوشی^۷ تدریجی مواد سرامیکی در ساختار لایه حساس از اهم این عوامل است.

ترین سامانه حسگری، تراکم مولکول‌های گاز هدف تنها ورودی سامانه حسگری و پاسخ حسگر تنها خروجی آن است (شکل ۱۱۱ الف). لیکن در عمل همیشه پاسخ به گاز هدف تحت تاثیر پارامترهای محیطی متعدد دیگری قرار می‌گیرد. این عوامل بعضاً قابل برآورد و در برخی موارد اثرشان در پاسخ حسگر قابل جبران است. تغییر دما و رطوبت نسبی محیط روی پاسخ، در خیلی از موارد قابل ملاحظه است و می‌تواند باعث اشتباه در آشکارسازی گردد. با پایش سطح رطوبت و دمای محیط می‌توان با روش‌های نرم‌افزاری اثر این عوامل را در پاسخ حسگر ده‌ها بار کمتر نمود. جبران موفق این دو عامل در پاسخ‌های تک حسگر گاز اولین بار در EML صورت گرفته است [۱۰۶]. برخی دیگر از عوامل ناخواسته هم اساساً قابل شناسایی و جبران نیستند و این عوامل در برخی از مدل‌سازی‌ها جمعاً به صورت نویز در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال، فرض کنید که هدف، تشخیص گاز مونوکسید کربن است. در عمل، پاسخ تحت تاثیر پارامترهای دیگری نظیر رطوبت و دما نیز قرار گرفته تغییر می‌کند؛ این تغییر با برآورد سطح تغییرات دما و رطوبت قابل جبران است. لیکن، حضور احتمالی گاز موثر دیگری در سطح تراکمی متغیر، یا تغییر فشار نسبی اکسیژن در محیط نیز می‌تواند پاسخ را تغییر داده در امر آشکارسازی تداخل ایجاد کند. البته، آثار این عوامل نیز توسط حسگر-های دیگری قابل برآورد و تا اندازه‌ای قابل جبران است. اما، حسگرهای اضافه شده نیز مسائل مشابهی دارند و نتیجتاً لازم می‌شود که جمع عوامل جبران نشده را بصورت نویز در مدل حسگر بپذیریم.

وقتی حسگر گازی وارد محیط حاوی گاز هدف می‌گردد، پاسخ آن، مثلاً به صورت هدایت الکتریکی حساسه یا پتانسیل نقطه‌ای از مدار، افزایش یافته، پس از زمانی، به پایداری می‌رسد (شکل ۱۱۲ ب). با خروج حسگر از آن محیط و برگشت آن به محیط مرجع، پاسخ حسگر به تدریج به سطح مبنا^۱ بازمی‌گردد [۲۱]. براساس این رفتار حسگر (شکل ۱۱۲ ب)، پارامترهای زیر تعریف می‌گردد:

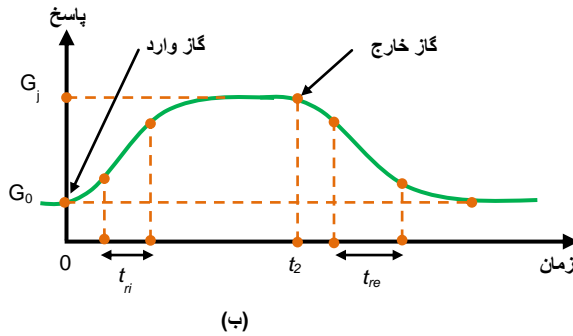
سطح مبنا: پاسخ حسگر گاز، پس از ایست طولانی در محیط مرجع (مثلاً هوای تمییز)، سطح مبنا^۱ آن را تعیین می‌کند. سطح مبنا می‌تواند براساس هدایت، مقاومت، اختلاف پتانسیل یا جریان تعریف گردد. در شکل ۱۱۲ ب و ج این سطح با G_0 نشان داده شده است.

پاسخ مانا: پاسخ حسگر، پس از ایستادن طولانی در محیطی حاوی مقدار معینی از گاز هدف، پاسخ مانا آن را به شرایط مذکور تعیین می‌کند. بدیهی است که پاسخ مانا به تراکم گاز هدف وابسته است. این وابستگی عموماً غیر خطی است. نمونه‌ای از این وابستگی در شکل ۱۱۳ نشان داده شده است.

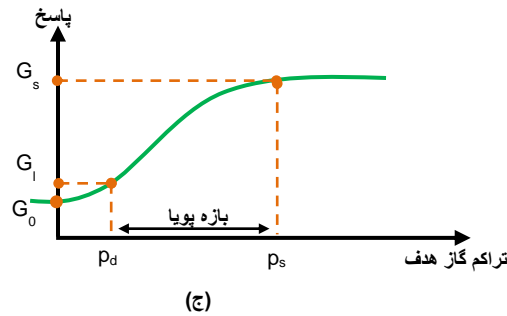
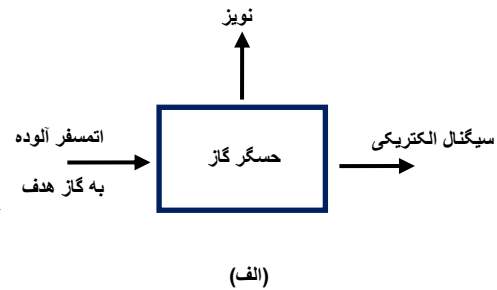
پاسخ گذرا: نحوه تغییر پاسخ حسگر از سطح مبنا تا پاسخ مانا را پاسخ گذرای حسگر می‌گوییم، مشروط بر این که تغییر محیط حسگر، از محیط مرجع به محیط حاوی گاز هدف، ناگهانی صورت گرفته باشد (شکل ۱۱۲ ب).

² Detection limit³ Dynamic range⁴ Recovery time⁵ Selectivity⁶ Drift⁷ Sintering¹ Baseline

متفاوت است و دو محیط توسط یک پل هادی یون به هم متصل گردیده-
اند. نوع اخیر برای درک ساختار حسگر گاز مورد نظر مناسب می‌باشد.



عمر مفید: به بازه زمانی گفته می‌شود که طی آن به دلیل رانش، پاسخ حسگر به تراکم معینی از گاز هدف به سطح غیر قابل قبولی کاهش



شکل ۱- (الف) دیاگرام جعبه‌ای ساده‌ترین سامانه حسگری گاز؛ (ب) دیاگرام نوعی یک سیکل کامل پاسخ گذرا، مانا و بازیافت یک حسگر گاز نوعی؛ (ج) وابستگی پاسخ مانا به تراکم گاز هدف.

حسگر الکتروشیمیایی گاز متشکل از دو الکترود فلزی هم‌جنس (مثلاً پلاتین) است که بر سطح یک دیسک سرامیکی (الکترولیت جامد) نشانداده شده‌اند. در یک طرف، الکترود پلاتینی در محیط مرجع قرار دارد و در طرف دیگر، محیط حاوی گاز هدف با الکترود پلاتین دوم در تماس است. اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده بین دو الکترود پلاتینی به اختلاف ترکیب محیط مرجع و محیط مورد تست وابسته می‌باشد. این حسگرها به دو نوع پتانسیومتریک و آمپرمتریک تقسیم می‌شوند و عمدتاً به‌عنوان حسگر اکسیژن یا حسگر λ به کار می‌روند. ساده‌ترین ساختار استفاده شده برای حسگر اکسیژن از نوع پتانسیومتریک می‌باشد و در شکل ۳ الف نمایش داده شده است. در این ساختار از اکسید زیرکونیوم و ترکیبات آن به‌عنوان الکترولیت جامد استفاده می‌گردد و الکترودها از جنس پلاتین می‌باشند. این ساختار، تحمل دمایی و شیمیایی لازم را برای تحمل گازهای خروجی از موتور اتومبیل و شرایط سخت شیمیایی را داراست. محیط مرجع در این حسگرها می‌تواند از طریق اتصال به هوای تمییز تامین گردد (شکل ۳ ب). جایگزین ارجح، استفاده از مواد سرامیکی با فشار اکسیژن معین در دمای کار حسگر می‌باشد و در این صورت، محفظه مرجع آب‌بندی شده می‌باشد (شکل ۳ ج). در حال حاضر، پرمصرف‌ترین حسگرهای پتانسیومتریک، حسگرهای λ (شکل ۴) هستند. این حسگرها به طور گسترده برای کنترل نسبت هوا به سوخت، از طریق پایش ترکیب گازهای خروجی از موتور خودروها استفاده می‌شود.

می‌یابد. واضح است که عمر مفید یک حسگر برای وظایف و شرایط کاری مختلف، متفاوت خواهد بود. عمر مفید اکثر حسگرهای گاز کمتر از یک سال کار مداوم است.

با توجه به تعاریف ارائه شده، حسگر گازی مطلوب است که حساسیت، گستره پویا، انتخابگری و طول عمر بالایی داشته باشد، از سوی دیگر، داشتن زمان‌های پاسخ و بازیافت کوتاه، حد تشخیص پایین و رانش کم نیز برای یک حسگر مورد توجه می‌باشد [۱۰۷-۱۰۹].

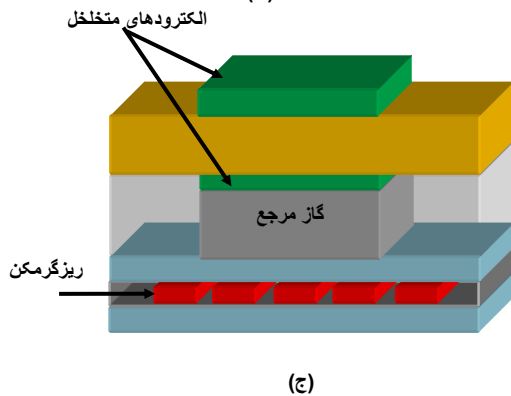
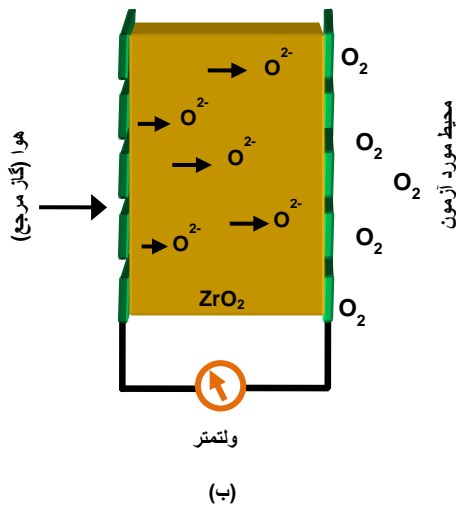
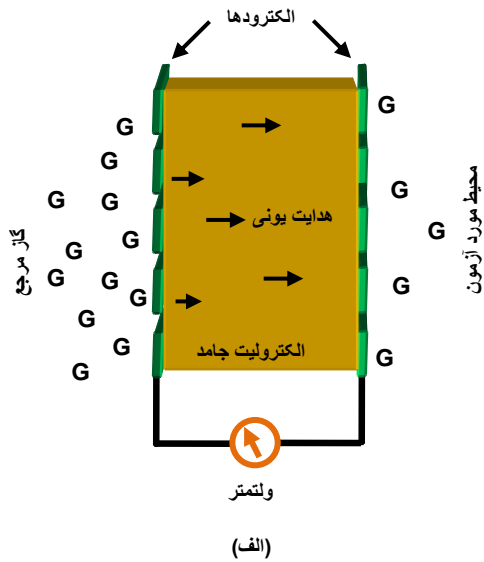
۴- حسگرهای الکتروشیمیایی گاز

سلول الکتروشیمیایی^۱ افزاری است که انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی و برعکس تبدیل می‌کند. در شکل ۲ قدیمی‌ترین و ساده‌ترین نوع این افزارها، پیل گالوانی^۲، نمایش داده شده است. این افزار شامل دو الکترود فلزی غیر هم‌جنس است که درون یک مایع هادی یون (الکترولیت) قرار گرفته‌اند. در این افزار، اختلاف پتانسیل شیمیایی دو فلز نسبت به الکترولیت، به‌صورت اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود فلزی خود را نمایش می‌دهد (شکل ۲ الف). صورت دیگری از این پیل در شکل ۲ ب نمایش داده شده است که در آن از دو الکترود هم‌جنس استفاده شده است ولی غلظت یا نوع الکترولیت در همسایگی الکترودها

^۱ Electrochemical cells

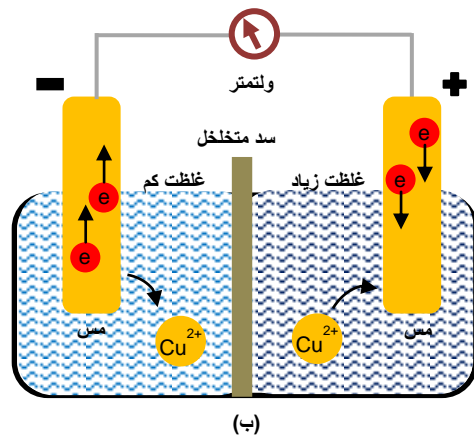
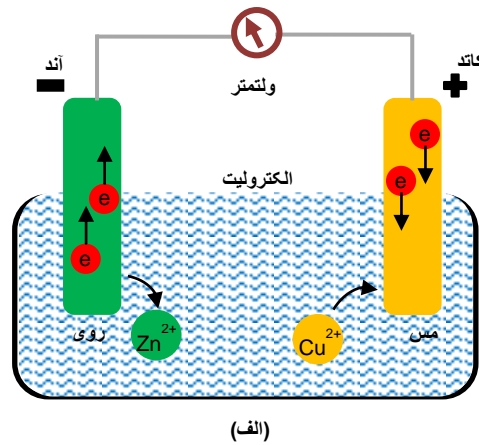
^۲ Galvanic cell

شکل ۲- طرح‌واره سلول گالوانی با دو الکترودهای (الف) غیر هم‌جنس؛ (ب) هم‌جنس.



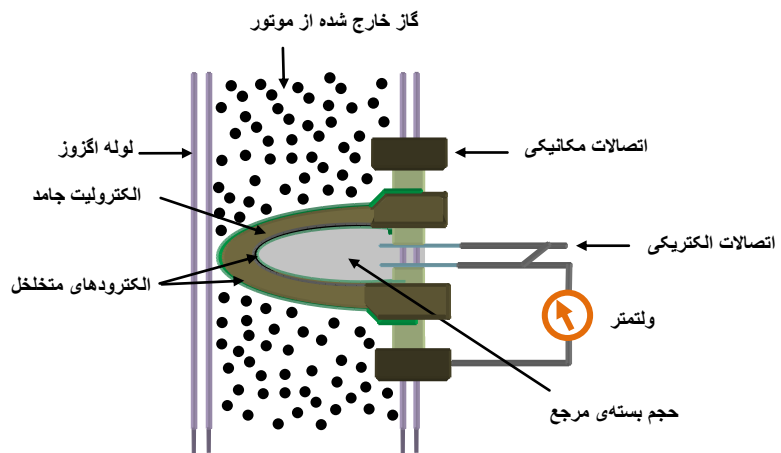
خروجی حسگر به کنترل کننده ورودی‌های موتور داده می‌شود تا این که موتور در حالت بهینه‌ای نزدیک به نسبت استوکیومتری^۱ هوا به سوخت کار کند. این حسگر توسط گازهای خروجی به دمای مناسب عملکرد خود می‌رسد و نیازی به گرم کن مجزا ندارد. به همین دلیل، در مدتی که حسگر به دمای بهینه خود نرسیده است، کنترل از طریق دیگری صورت می‌گیرد. زمان لازم برای رسیدن به دمای کار بهینه حسگرهای λ از چند دقیقه در مدل‌های ده سال قبل به کسری از دقیقه در مدل‌های جدید کاهش یافته است [۱۱۰، ۲۸]. کار پژوهشی جهت دار و هدف‌مندی در خصوص سازوکار ساختار حسگرهای گاز الکتروشیمیایی پتانسیومتریکی در دانشکده فنی دانشگاه تهران انجام شده است و در حال حاضر دانش فنی ساخت این حسگر در داخل کشور در دسترس است [۵۱-۵۳].

حسگرهای شیمیایی نوع آمپرمتریکی، در ساده‌ترین شکل، ساختاری مشابه انواع پتانسیومتریکی دارند (شکل ۵). در این نوع حسگر، اکسیژن به وسیله اعمال یک پتانسیل ثابت خارجی بین دو الکترود پلاتین، از یک طرف الکترولیت جامد به طرف دیگر پمپ می‌شود. نتیجه این پمپاژ، یک طرف الکترولیت جامد به طرف دیگر پمپ می‌شود. نتیجه این پمپاژ، یک جریان یونی ناشی از یون‌های اکسیژن درون الکترولیت زیر کونیایی

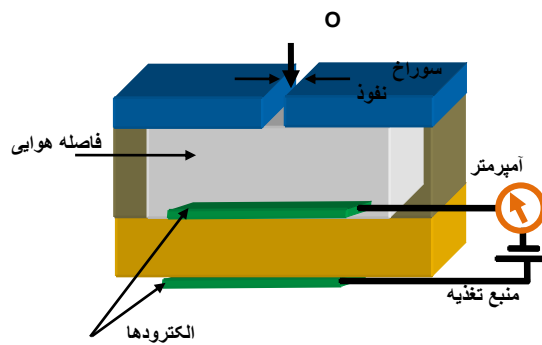


شکل ۳- (الف) طرح‌واره یک حسگر الکتروشیمیایی گاز از نوع پتانسیو-متریکی؛ (ب) طرح‌واره ساده‌ترین حسگر الکتروشیمیایی اکسیژن؛ (ج) حسگر الکتروشیمیایی گاز با محفظه‌ی مرجع آب‌بندی شده.

^۱ Stoichiometric



شکل ۴- طرح‌واره یک حسگر λ از نوع پتانسیومتریک.

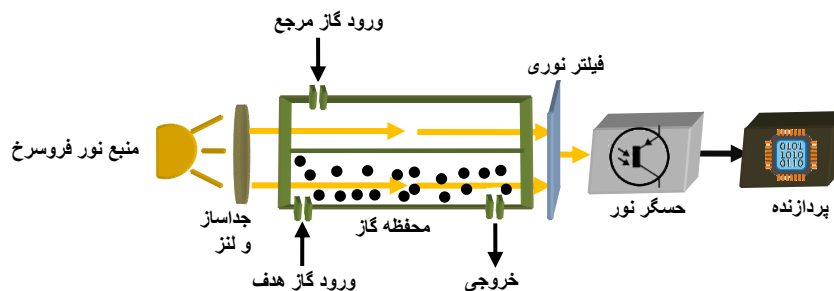


شکل ۵- طرح‌واره یک حسگر λ از نوع آمپرمتریکی.

۵- حسگرهای نوری گاز

کارکرد این حسگرهای گاز عمدتاً بر پایه تغییر ویژگی‌های نوری محیط بر اثر حضور گاز هدف یا به دلیل تغییر ویژگی‌های نوری سطح خاصی از حسگر به دلیل جذب مولکول‌های گاز هدف استوار است. مثلاً محیط حاوی گاز هدف، فوتون با طول موج خاصی را به طور انتخابی جذب می‌کند و میزان این جذب وابسته به غلظت گاز هدف در محیط است [۱۱۳]. اطلاعات مربوط به طول موج‌های مربوط به گازهای مختلف در پایگاه‌های داده مربوط در دسترس است [۱۱۴]. طرح‌واره ساختار یک حسگر گاز فروسرخ که براساس طیف جذبی اتمسفر کار می‌کند، در شکل ۶ نشان داده شده است. این حسگر شامل سه بخش اصلی منبع اشعه-ی فروسرخ، محفظه‌ی گاز و آشکارساز است. منبع، نور فروسرخ با طیف وسیعی را تولید می‌کند که شامل طول موج قابل جذب توسط گاز هدف نیز می‌باشد. در صورتی که محفظه حاوی گاز هدف باشد، آن طول موج

می‌باشد. با داشتن محیط مرجعی حاوی فشار نسبی ثابتی از اکسیژن، شدت پمپاژ اکسیژن و در نتیجه شدت جریان عبور کرده از مدار، وابسته به فشار نسبی اکسیژن در محیط مورد تست خواهد بود. اندازه‌گیری جریان مدار، براساس اطلاعات مربوط به کالیبراسیون حسگر، فشار نسبی اکسیژن را در محیط مورد مطالعه نتیجه می‌دهد [۱۱۱]. در نوع جدیدتری از این حسگرها، برای پایش دقیق‌تر نسبت سوخت به هوا در اتومبیل، از ترکیب یک سلول پتانسیومتریک و یک سلول آمپرمتریکی استفاده شده است [۲۸]. ارجحیت اصلی این نوع حسگر الکتروشیمیایی عدم نیاز آن به محیط مرجع است. از حسگرهای الکتروشیمیایی علاوه بر سنجش میزان اکسیژن، برای آشکارسازی گازهای دیگری مانند هیدروژن، مونوکسید کربن، سولفید هیدروژن و آمونیاک نیز استفاده شده است [۱۱۰]. برای اطلاعات بیشتر در زمینه حسگرهای الکتروشیمیایی به مراجع [۱۱۱، ۱۱۲] مراجعه شود.



شکل ۶- طرح‌واره یک حسگر نوری گاز که براساس تغییر ضریب شکست نور به دلیل حضور گاز هدف کار می‌کند.

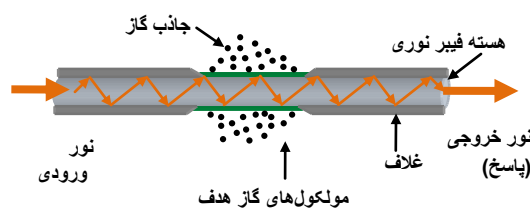
نرم‌افزار پیچیده برای آشکارسازی و شناسایی گاز، گرانی و طول عمر نسبتاً کوتاه پوشش‌های حساس به گاز از نقاط ضعف این حسگرها به حساب می‌آید [۱۱۷].

۶- پلیستورها

فرض کنید که یک مقاومت الکتریکی توان ثابتی را به صورت گرما از دست می‌دهد. در حالت ایستا، همه توان مصرف شده به محیط اطراف منتقل می‌شود. در این حالت، دمای سطحی مقاومت به پارامترهای متعددی وابسته است. یکی از مهم‌ترین این پارامترها ضریب هدایت حرارتی محیط است. در توان ثابت، هر چه ضریب هدایت حرارتی محیط کاهش یابد، دمای سطح مقاومت بالاتر می‌رود. این تغییر دما به نوبه خود باعث تغییر مقاومت الکتریکی می‌گردد. تعیین اندازه این تغییر می‌تواند منجر به آشکارسازی تغییر ترکیب یا تغییر فشار محیط اطراف گردد. به مقاومتی که براساس تغییر دمای نقطه کار به سنجش محیطی پردازد عموماً پلیستور^۲ می‌گوییم. انواع متعددی از پلیستورها به‌عنوان حسگر گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند که رایج‌ترین آن‌ها پلیستورهای کاتالیستی است. حسگرهای کاتالیستی^۳ عمدتاً برای آشکارسازی گازهای اشتعال‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پلیستورها، تغییر مقاومت ناشی از تغییرات دمایی است که عمدتاً در نتیجه سوختن گاز هدف در سطح پلیستور صورت می‌گیرد. دمای کار این پلیستورها پایینتر از نقطه اشتعال گاز هدف است و عمل اشتعال به کمک ذرات کاتالیزوری که در سطح پلیستور تعبیه شده است انجام می‌شود. در نوع دقیقتری از این حسگرها، آشکارسازی گاز براساس مقایسه مقاومت الکتریکی یا دمای دو افزاره‌ی با و بدون کاتالیزور صورت می‌گیرد. بدین ترتیب اثر تغییر سایر پارامترهای محیطی، مثل تغییر رطوبت یا دمای محیط، در پاسخ حذف می‌شود. تامین دمای نقطه کار در این حسگرها توسط عبور جریان الکتریکی از خود لایه حساس صورت می‌گیرد. پلیستورهایی که برای کار در آگروز اتومبیل طراحی می‌شوند نیاز به گرم‌کن ندارند.

خاص بیشتر جذب می‌شود. مشخص شدن طول موج و مقدار این جذب توسط آشکارساز منجر به تعیین نوع و میزان گاز هدف در محفظه می‌گردد. از مزایای اصلی این حسگرها کارکرد آن‌ها در دمای اتاق و عدم تعامل مستقیم آشکارکننده با ملکول‌های گاز است که آن‌ها را برای پایش طولانی مدت گاز مناسب می‌سازد. علاوه بر این، این حسگرها حساسیتی بسیار انتخابی دارند و برای شناسایی مولکول خاصی در یک مخلوط پیچیده گازی مناسب می‌باشند. این سامانه‌های حسگری به دلیل دارا بودن قطعات ظریف نوری گران بوده به راحتی قابل حمل نیستند [۱۱۵، ۱۱۶].

در انواع دیگری از حسگرهای نوری گاز، از تکنولوژی فیبر نوری استفاده می‌شود (شکل ۷). این دسته از حسگرهای نوری از ساختارها و سازوکارهای آشکارسازی متفاوتی سود می‌جویند. در نوع نشان داده شده در شکل ۷، غلاف قسمتی از فیبر نوری برداشته شده و به جای آن از نوعی رنگ دانه فلورسنت^۱ پوشیده شده است. تعامل مولکول‌های گاز هدف با رنگ دانه‌ها باعث تغییر تابع تبدیل فیبر در آن ناحیه می‌گردد. آشکارسازی این تغییرات توسط حسگر نوری مستقر در خروجی فیبر، با استفاده از نرم‌افزارهای مناسب، می‌تواند به حضور گاز هدف در محیط مرتبط شود. این حسگر می‌تواند ناحیه وسیعی را پوشش دهد؛ وسعت ناحیه پوشش داده شده به طول قسمت حساس شده فیبر ارتباط دارد. پاسخ سریع، کارکرد در دمای اتاق و قابلیت کار در حضور اغتشاشات الکترومغناطیسی از ارجحیت‌های این حسگر است. نیاز به سخت افزار و



شکل ۷- طرح‌واره حسگر فیبر نوری گاز.

^۲ Pellistor

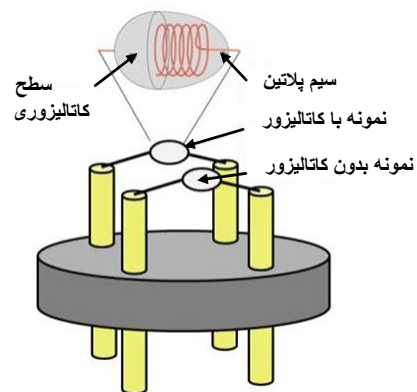
^۳ Catalytic sensors

^۱ Dye

(SiO_2)، لیتیم نیوبات (LiNbO_3)، لیتیم تانتالات (LiTaO_3) یا اکسید روی (ZnO)، و دو الکتروذ فلزی مستقر در سطوح مقابل، تشکیل می‌شوند. بدنه پیزوالکتریک معمولاً دارای ضخامتی در حدود 0.1 mm و قطری حدود 10 mm می‌باشد. طرح‌واره این افزار در شکل ۹ الف نشان داده شده است که در آن لایه جاذب مولکول‌های گاز هدف نیز روی یکی از قاعده‌های بدنه پیزوالکتریک مشاهده می‌شود. این ساختار مکانیکی-الکتریکی دارای فرکانس تشدید معینی است که توسط پارامترهای مکانیکی و الکتریکی آن تعیین می‌شود. با اتصال الکترودهای فلزی به مدار نوسان‌ساز مناسب، افزاره با فرکانس تشدید خود نوسان می‌کند. در حضور گاز هدف، با جذب مولکول‌های گاز به سطح جاذب، افزایش جرم افزاره باعث کاهش فرکانس نوسان می‌گردد. مقدار تغییر فرکانس بر حسب هرتز با مقدار تغییر جرم کریستال و در نتیجه تراکم گاز در محیط مرتبط است. این ارتباط غیرخطی است و برای گازهای هدف و مواد جاذب مختلف متفاوت است. تعیین این ارتباط براساس تجارب قبلی و کالیبراسیون اولیه صورت می‌گیرد. فرکانس کاری این نوع از حسگرهای گاز حدود 10 MHz است [۱۲۲، ۱۲۱]. اصول کارکرد ادوات GAS MEMS پیزوالکتریک نیز مشابه شرح فوق است، با این تفاوت که ساختار نوسانگر در مقیاس میکرومتری است و از شکل هندسی متفاوتی برخوردار می‌باشد. در شکل ۹ ب طرح‌واره یک حسگر گاز از این نوع ارائه شده است.

در حسگرهای گاز SAW، الکترودهای فلزی هر دو در یک سمت زیرپایه پیزوالکتریک قرار دارند. همچنان که در شکل ۹ ج نشان داده شده است، یک زوج الکتروذ شانه‌ای^۴ نقش فرستنده امواج سطحی را دارند و امواج صوتی را در سطح زیرپایه پخش می‌کنند. زوج الکتروذ دیگری در فاصله معینی از فرستنده قرار گرفته امواج مذکور را دریافت می‌کند. لایه جاذب گاز در سطح زیرپایه، بین فرستنده و گیرنده نشانده شده است، به گونه‌ای که امواج صوتی در مسیر خود از فرستنده به گیرنده از آن عبور می‌کنند. ویژگی‌های سیگنال دریافت شده توسط گیرنده با حضور گاز هدف و جذب آن روی لایه جاذب تغییر کرده آشکار می‌شود. به عنوان مثال، با جذب گاز هدف، سرعت انتشار موج صوتی در سطح تغییر می‌کند و این تغییر منجر به تغییر فاز سیگنال دریافتی توسط گیرنده می‌شود. جذب گاز در لایه جاذب پدیده‌ای سطحی است و انتشار امواج نیز در این دسته از حسگرها عمدتاً در سطح (تا عمق چند طول‌موج از سطح) صورت می‌پذیرد، و از اینرو، حساسیت بیشتر و آستانه آشکارسازی بهتر حسگرهای گاز پیزوالکتریک امواج سطحی نسبت به ریزترازوها قابل درک است. فرکانس کار ادوات موج سطحی نیز بالاتر از ریزترازوها است و حدود 100 مگاهرتز می‌باشد [۱۲۳، ۱۲۰].

در شکل ۸ طرح‌واره یک حسگر گاز پلیستوری ارائه شده است. این حسگر شامل دو مقاومت هم‌شکل اکسید فلزی است که به همراه ریزگره‌های خود بر روی یک زیر پایه آلومینایی مجتمع شده اند. سطح یکی از دو مقاومت مذکور با ذرات پلاتین آرایش شده است که اکسیداسیون گاز هدف را در دمای کار ممکن می‌سازد. تفاوت دمای این دو مقاومت باعث تفاوت مقاومت‌ها می‌گردد. این عدم تقارن در یک پل آشکار شده به تراکم گاز هدف مرتبط می‌شود. این حسگرها حضور تمام گازهای قابل اشتعال را، عملاً، بدون تمایز آشکار می‌سازند، حد آشکارسازی خوبی ندارند، توان الکتریکی نسبتاً زیادی را مصرف می‌کنند و در دمای بالا کار می‌کنند. وجود این معایب مصرف پلیستورها را به تدریج کاهش می‌دهد. لیکن به دلیل تکنولوژی ساخت جا افتاده و قابل اعتماد، و شناخت کاربران، این دسته حسگرهای گاز هنوز مورد استفاده می‌باشند [۱۱۹، ۱۱۸، ۱۱۵].



شکل ۸- طرح‌واره یک حسگر گاز پلیستوری [۱۱۹].

۷- حسگرهای پیزوالکتریک گاز

در انواع متعددی از حسگرهای گاز از اثر پیزوالکتریک برای آشکارسازی حضور گاز هدف استفاده می‌شود. لیکن واقعیت این است، که در این ادوات، ماده پیزوالکتریک تعامل مستقیم با مولکول‌های گاز هدف ندارد. جذب گاز معمولاً توسط لایه مجزایی که بر سطح بدنه پیزوالکتریک نشسته است صورت می‌گیرد و باعث تغییر ویژگی‌های مکانیکی افزاره می‌گردد. جذب گاز معمولاً لایه نازکی است از یک ماده آلی که به روش‌های مختلفی روی پایه پیزوالکتریک نشانده می‌شود. حسگرهای گاز پیزوالکتریک به سه دسته اصلی- ریزترازوها، ادوات امواج سطحی SAW^۲ و MEMS گازی^۳ تعلق دارند [۱۱۷، ۱۲۰].

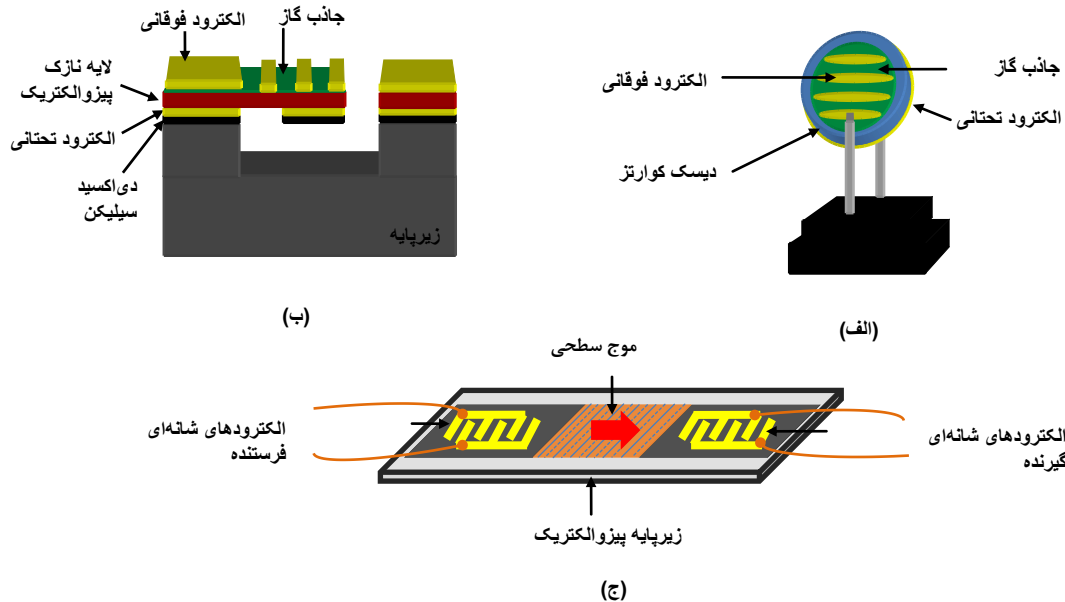
حسگرهای گاز مبتنی بر ریزترازوها ساختار ساده‌ای دارند. این ادوات از یک بدنه دیسکی شکل پیزوالکتریک، معمولاً از جنس کوارتز

¹ Microbalance

² Surface Acoustic Wave

³ Gas Micro Electromechanical Systems

⁴ Interdigital



شکل ۹- انواع حسگر پیزوالکتریک گاز، (الف) ریزترازو؛ (ب) ممز گازی؛ (ج) موج سطحی.

در دمای کار، منجر به تغییر مقاومت الکتریکی می‌شود. با حذف گاز هدف از محیط، قسمت حساس به گاز به حالت اولیه خود برگشته مقاومت به سطح مینا برمی‌گردد. اندازه‌گیری این تغییر مقاومت، با استفاده از یک مدار الکترونیکی ساده، منجر به آشکارسازی گاز هدف می‌شود [۱۱۹، ۱۱۶، ۱۲۴].

طرح‌واره یک نمونه حسگر مقاومتی گاز در شکل ۱۰ ارائه شده است. اجزای اصلی این حسگر عبارتند از بدنه یا لایه نیمه‌هادی حساس به گاز، زیرپایه عایق، ریزگر مکن و الکتروودهای فلزی. زیرپایه معمولاً از یک تراشه آلومینایی با ابعاد چند میلی‌متر و ضخامت چند ده میلی‌متر است. نیمه‌هادی حساس به گاز به روش‌های مرسوم لایه‌نشانی (لایه نازک یا لایه ضخیم) بر سطح زیرپایه نشانداده شده است. مقاومت الکتریکی پرتوانی به عنوان ریزگر مکن بر سمت دیگر زیرپایه نشانداده شده است؛ با عبور جریان الکتریکی از ریزگر مکن زیرپایه گرم شده به دمای کار بهینه حسگر می‌رسد. دو زوج الکتروود فلزی، یک زوج برای اتصال بدنه حساس به مدار الکترونیکی و یک زوج برای تامین توان ریزگر مکن، نیز با استفاده از تکنولوژی فیلم ضخیم یا تکنولوژی فیلم نازک نشانداده شده به پایه‌های اتصال به بیرون متصل می‌گردند (شکل ۱۰) [۴۶، ۱۱].

حسگرهای مقاومتی گاز با داشتن ساختار ساده، ارزانی، حساسیت بالا به گازهای مختلف و آشکارسازی گسترده وسیعی از گازهای سمی و اشتعال پذیر برای بسیاری از کاربردهای صنعتی و خانگی مورد علاقه هستند. از سوی دیگر انتخابگری پایین و دمای کار بالا (در حسگرهای مقاومتی مبتنی بر نیمه‌هادی‌های اکسیدی) و طول عمر پایین (در

حسگرهای پیزوالکتریک با انواع متعددی از مواد جاذب می‌توانند پوشش داده شوند و به همین دلیل تقریباً حساس به همه‌ی گازها هستند. این حسگرها کوچک و ارزان بوده در میان انواع حسگرهای گاز از انعطاف بیشتری در طراحی و انتخابگری برخوردارند، به‌طوری‌که یک آرایه حسگری برای ساخت بینی الکترونیکی را می‌توان بر مبنای میکروترازوهای همسان، فقط با نشانش مواد جاذب متفاوت به وجود آورد. ارجحیت دیگر این حسگرهای گاز، کارکرد آن‌ها در دمای اتاق است. ضعف اصلی حسگرهای گاز پیزوالکتریک تداخل شدید پارامتر-های محیطی مثل دما و رطوبت در پاسخ آن‌ها می‌باشد. تغییر دما، با تغییر ضریب الاستیسیته ماده پیزوالکتریک و سازوکار جذب گاز در ماده جاذب، باعث تغییر عملکرد حسگر می‌شود. تغییر رطوبت نیز می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای روی مکانیزم جذب گاز و سطح مبنای حسگر تاثیر بگذارد [۱۱۶، ۱۱۷].

با توجه به در دسترس بودن و ارزانی زیرپایه‌های پیزوالکتریک، تعجب برانگیز است که هنوز گزارشی پژوهشی در زمینه حسگرهای پیزوالکتریک گاز در ایران ارائه نشده است. به نظر نویسنده، علت اصلی این است که مقدمات پیزوالکتریسیته در برنامه مهندسی برق و مهندسی مکانیک کشور مدنظر قرار نگرفته است، و این مورد، ترغیب دانشجویان تحصیلات تکمیلی به انتخاب موضوع تحقیق در این زمینه را دشوار می‌سازد.

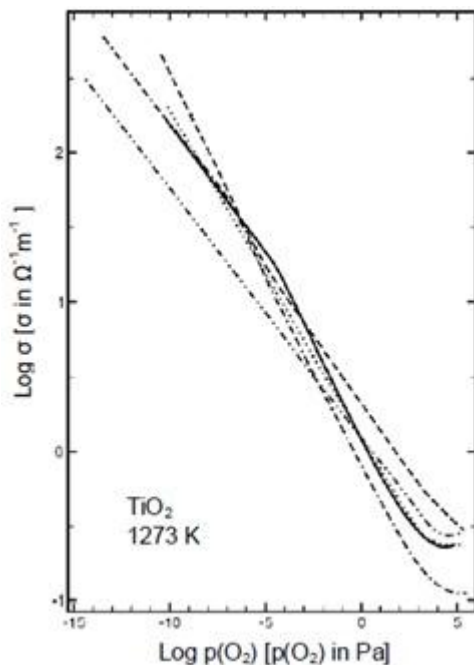
۸- حسگرهای مقاومتی گاز

یکی از انواع پرکاربرد حسگرهای گاز، حسگر مقاومتی گاز است. در این حسگرها، واکنش مولکول‌های گاز هدف با قسمت حساس حسگر

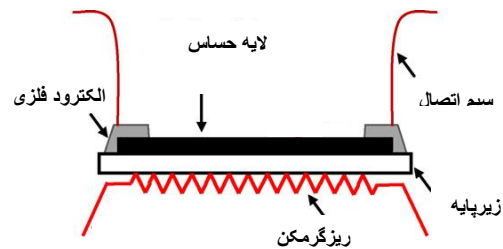
حالت‌های تعادل در شرایط مختلف محیطی و ساختاری، در اکثر مراجع مربوط قابل دسترس است [۱۲۸-۱۳۰].

در حسگرهای گاز اکسید فلزی، سازوکار احساس گاز اساساً بر پایه تعامل بدنه حساس با گاز اکسیژن موجود در محیط استوار است. برای این تعامل صور متفاوتی را می‌توان بیان کرد که عملاً قابل تقسیم به دو سازوکار اصلی "بطنی"^۳ و "سطحی" هستند [۲۱]:

الف): تغییر فشار جزئی اکسیژن در محیط اطراف باعث تغییر چگالی تهی‌جای در بطن یک بدنه تک بلور اکسید فلز و در نتیجه تغییر ضریب هدایت الکتریکی آن می‌شود. کاهش چگالی تهی‌جای اکسیژن با ازدیاد فشار جزئی اکسیژن در محیط اطراف بر اساس اصل شاتولیه^۴ قابل درک است. این تغییر هدایت از تغییر ضریب هدایت در تمام بدنه دانه^۵ های لایه پلی کریستال حادث می‌شود. این سازوکار، به دلیل آهسته بودن نفوذ اکسیژن در ساختار کریستال، در دمای اتاق بسیار کند است و رسیدن به چگالی تعادل ممکن است ساعت‌ها طول بکشد. به همین دلیل، آشکارسازی اکسیژن توسط این سازوکار در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد قابل اجرا است. این سازوکار کاملاً برگشت‌پذیر است و ضریب هدایت بدنه اکسیدی، پس از بازگشت فشار اکسیژن به مقدار اول، به سطح تعادل اولیه بر می‌گردد. در شکل ۱۱، منحنی تغییرات



شکل ۱۱- منحنی تغییرات ضریب هدایت الکتریکی TiO₂ در دمای ۱۲۷۳ کلوین برحسب فشار جزئی اکسیژن، منحنی‌ها توسط گروه‌های مختلف پژوهشگر ارائه شده است [۱۳۱].



شکل ۱۰- طرح‌واره یک حسگر مقاومتی گاز [۴۴].

حسگرهای مبتنی بر نیمه‌هادی‌های ارگانیکی) از معایب این حسگرها می‌باشد [۱۲۶، ۱۲۵، ۱۱۶].

در حال حاضر دو دسته از حسگرهای مقاومتی گاز مورد استفاده و پژوهش قرار دارند. در ادامه به بررسی بیشتر این دو دسته می‌پردازیم.

۹- حسگرهای مقاومتی گاز مبتنی بر نیمه-هادی‌های اکسید فلزی

در حال حاضر، گستره وسیعی از گازهای اشتعال‌پذیر و سمی (از جمله مونوکسید کربن، متان، خانواده الکل‌ها، هیدروژن)، و بسیاری دیگر از گازها و بوهای ساده و مرکب عمدتاً توسط حسگرهای مقاومتی گاز مبتنی بر نیمه‌هادی‌های اکسید فلزی آشکار می‌شود. اکسید قلع اولین و در حال حاضر رایج‌ترین ماده حساس مورد استفاده در حسگرهای گاز تجاری است که از حدود دهه ۱۹۷۰ تاکنون به‌طور پیوسته در بازار حضور داشته است. اکسیدهای پر مصرف دیگر اکسید روی و اکسید تیتانیوم می‌باشند [۱۲۷].

نیمه‌هادی‌های اکسید فلزی اکثراً به دلیل پهنای نوار انرژی ممنوعشان در بسیاری از موارد به‌عنوان عایق به کار گرفته می‌شوند. لیکن، در اکثر اکسیدهای فلزی فراوانی تهی‌جای^۱ اکسیژن در ساختار کریستالی باعث خروج ترکیب از نسبت‌های استوکیومتری^۲ می‌گردد. مثلاً SnO₂ معمولاً به دلیل فراوانی تهی‌جای اکسیژن به صورت SnO_{2-δ} در می‌آید که δ عددی است مثبت و بزرگی آن بستگی به شرایط محیطی دارد. وجود تهی‌جای اکسیژن بالانس توزیع الکترون‌ها را در نوارهای مجاز انرژی بهم زده حالت‌هایی را در نوار ممنوعه نزدیک نوار هدایت ایجاد می‌کند. حالت‌های به‌وجود آمده در نوار ممنوعه مشابه حالت‌های مربوط به ناخالصی‌های دهنده در نیمه‌هادی‌های خانواده III-V عمل می‌کنند. در دمای اتاق این حالت‌ها یونیزه شده باعث حضور الکترون در نوار هدایت و بالا رفتن ضریب هدایت کریستال می‌گردند. فیزیک فرآیند فوق در پنجاه سال گذشته مورد مطالعه بوده است و نتایج کمی در خصوص

³ Bulk

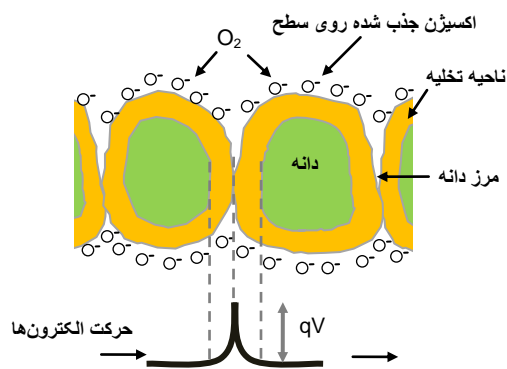
⁴ Le Chatelier's principle

⁵ Grain

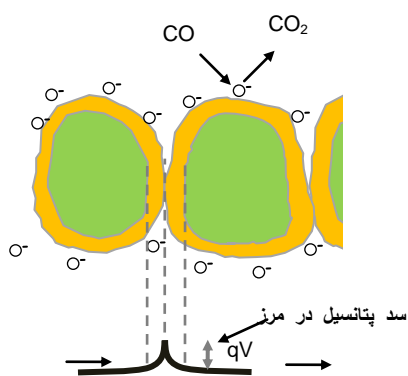
¹ Vacancy

² Stoichiometric ratios

حسگر گاز را تعیین می‌کند [۱۵۰-۱۵۲]. ارتباط کمی ضخامت لایه حساس با حساسیت شیمیایی-مقاومتی حسگر ساخته شده از آن محاسبه گردیده نشان داده شده است که در اکثر موارد با نازکتر شدن لایه، حساسیت به گاز حسگر بالا می‌رود [۱۵۳]. همین‌طور مشخص شده است که ضریب تخلخل بیشتر نیز باعث افزایش حساسیت می‌گردد [۱۵۴، ۱۵۵]. هر دو پدیده فوق به آسانی قابل لمس هستند زیرا که ضخامت کمتر و تخلخل بیشتر تماس توده معینی از اکسید فلز را با ملاء گازی اطراف بیشتر می‌کند. همین نتیجه علت استفاده از لایه‌های ماده حساس به جای بدنه‌های مثلاً استوانه‌ای یا مکعبی را مشخص می‌کند.



در حضور هوا



در حضور مونوکسید کربن

شکل ۱۲-نمایش کاهش سد انرژی بین دانه‌های یک اکسید فلز پلی-کریستال در اثر تعامل با گاز هدف.

ضریب هدایت الکتریکی اکسید تیتانیوم بر حسب تغییر فشار جزئی اکسیژن، به دست آمده توسط محققان مختلف، ارائه شده است. نتیجه این است که سازوکار بطنی عملاً فقط برای آشکارسازی تغییر فشار جزئی اکسیژن آن‌هم در دماهای بالا مناسب است.

ب): تعامل سطحی گاز با سطح موثر مواد پلی کریستال سازوکار اصلی آشکارسازی حضور گاز هدف است. در مواد پلی کریستال ناقل بار باید در فاصله بین دو الکتروود از تعداد زیادی ریزدانه‌های کریستالی و مرز بین آن‌ها عبور کند. برای عبور از هر "مرز دانه" ناقل بار باید به انرژی پتانسیل بین دو دانه همسایه غلبه کند. این سد در اکسیدهای فلزی، خصوصاً به دلیل جذب اکسیژن به سطح دانه‌ها، تشکیل می‌شود. دشواری عبور از این سد قسمت قابل ملاحظه‌ای از مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده بین دو الکتروود را باعث می‌شود. گاز هدف، در دمای کار حسگر، اکسیژن سطحی دانه‌های کریستال را کاهش داده باعث کاهش سد پتانسیل بین دانه‌ای و در نتیجه کاهش مقاومت الکتریکی بدنه می‌گردد (شکل ۱۲). این کاهش مقاومت به‌عنوان پاسخ حسگر به حضور گاز هدف ثبت می‌شود. سازوکار سطحی نیز در دمای اتاق کند است و به همین دلیل برای استفاده عملی از این سازوکار آشکارسازی، دمای کار حسگر حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد انتخاب می‌گردد. اکثر حسگرهای گاز مقاومتی تجاری از این سازوکار آشکارسازی سود می‌برند. در شکل ۱۳ طرحواره و تصویر یک حسگر مقاومتی گاز تجاری ارائه شده است.

اگرچه دو سازوکار بطنی و سطحی طبیعتاً متفاوت بوده از اصول متفاوت فیزیکی-شیمیایی سرچشمه می‌گیرند، هر دو سازوکار به‌طور هم‌زمان در یک حسگر مقاومتی گاز اتفاق می‌افتد. شدت و ضعف هر کدام از این سازوکارها بستگی به دمای کار حسگر دارد و مجموع آن‌ها بزرگی پاسخ حسگر را تعیین می‌کند. روابط حاکم بر دو فرآیند در مراجع [۱۳۲-۱۳۸] مورد بحث قرار گرفته است. در مراجع [۲۱، ۲۳] نیز نگارنده از جمع کردن بزرگی دو سازوکار رابطه‌ی ساده‌ای را برای محاسبه مقدار پاسخ شیمیایی-مقاومتی ارائه کرده است.

فیلیم‌های اکسید فلزی به روش‌های متفاوت شیمیایی و فیزیکی بر روی زیرپایه‌های عایق لایه نشانی می‌شوند. به‌عنوان مثال می‌توان به روش‌های متعدد لایه‌نشانی مانند نشان سل ژل [۱۳۹-۱۴۱]، اسپری پیرولیز [۱۴۲-۱۴۴]، اسپین کوتینگ [۱۴۵]، لایه‌نشانی شیمیایی از فاز بخار [۱۴۶]، لایه‌نشانی به کمک تبخیر حرارتی [۱۴۷]، اشعه الکترونی [۱۴۸] و انواع کندوپاش [۱۴۹] اشاره کرد. روش نشان و پارامترهای فرآیند لایه‌نشانی، ضخامت و ریزساختار بدنه حساس و ویژگی‌های اصلی

¹ Grain boundary

² Sol-gel

³ Spray pyrolysis

⁴ Spin coating

⁵ Chemical vapor deposition

⁶ Thermal evaporation

⁷ Electron beam

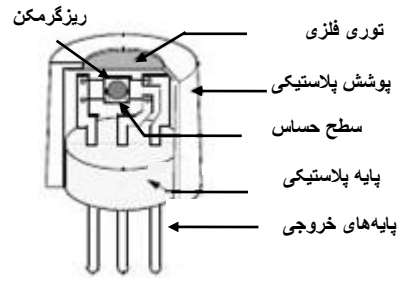
⁸ Sputtering

افزودنی به ساختار این اکسیدها صورت می‌گیرد. این افزودنی‌ها حساسیت و انتخابگری حسگر را افزایش داده باعث کاهش زمان پاسخ و دمای کار آن‌ها می‌شوند. افزودنی‌ها را می‌توان به دو دسته حجمی و سطحی تقسیم کرد: دسته اول، مثل آلایش با ناخالصی‌های دهنده و گیرنده، به بدنه نیمه‌هادی اضافه می‌شوند. مثلاً آلایش اکسید قلع با آلومینیوم به عنوان ناخالصی گیرنده باعث کاهش هدایت بدنه شده تاثیر افزایش هدایت ناشی از گازهای احیایی را ملموس‌تر می‌سازد. دسته دوم به صورت ذرات فعال روی سطح لایه حساس قرار گرفته تعامل بین گاز و اکسیژن‌های سطحی اکسید فلز را تسهیل می‌نمایند. به‌عنوان مثال آرایش سطح لایه اکسید قلع با ذرات پلاتین، به دلیل تسهیل تجزیه مولکول O_2 به اتم‌های اکسیژن، سبب ازدیاد اکسیژن جذب شده در سطح لایه و افزایش مقاومت الکتریکی آن می‌گردد. در نتیجه، هم حساسیت مقاومت حسگر به گاز و هم بازه‌ی دینامیک حسگر افزایش پیدا می‌کند. ادبیات پژوهشی در خصوص افزودنی‌ها، خصوصاً آرایش سطحی، وسیع است و خواننده علاقه‌مند به قرائت مقالات مروری متعدد در این زمینه توصیه می‌شود [۱۱، ۱۵، ۱۵۵، ۱۵۷-۱۵۹].

۱-۰ حسگرهای مقاومتی گاز مبتنی بر مواد آلی

مشابه حسگرهای مقاومتی مبتنی بر اکسیدهای فلزی، این دسته از حسگر-های گاز نیز براساس تغییر مقاومت لایه‌های حساس به گاز، فیلم‌های آلی در اثر حضور گاز هدف کار می‌کنند. لیکن نحوه تاثیر گذاری گاز به لایه حساس، با آنچه که در خصوص حسگرهای اکسید فلزی گفته شد، متفاوت است. در عملکرد این حسگرها، اکسیژن محیط نقشی ندارد، و مولکول‌های گاز هدف مستقیماً با سطح لایه آلی ارتباط برقرار می‌کنند. این ارتباط باعث تغییر پارامترهای الکتریکی مهم لایه حساس مثل چگالی ناقل اکثریت یا ضریب تحرک آن شده مقاومت الکتریکی حساسه را تغییر می‌دهد. تعامل مولکول‌های گاز هدف با سطح حساسه در دمای اتاق صورت می‌گیرد و برگشت پذیر است و از اینرو، این حسگرها نیازی به ریزگرما ندارند.

واکنش شیمیایی مولکول گاز هدف، مثلاً با یک لایه نازک پلیمر هادی، باعث انتقال الکترون از پلیمر به مولکول گاز یا برعکس می‌شود. با انتقال الکترون، تابع کار و ضریب هدایت الکتریکی پلیمر تغییر می‌کند. روند تغییر مقاومت در این حسگر نیز مطابق حسگرهای مقاومتی اکسید فلزی است و بستگی به نوع ناقل اکثریت دارد. در پلیمرهای نوع p، حضور گازهای اکسند، نظیر NO_2 و I_2 ، باعث کاهش مقاومت الکتریکی می‌گردند و گازهای کاهنده نظیر هیدروژن و آمونیاک، سبب افزایش مقاومت الکتریکی می‌شوند. در پلیمر نوع n عکس این روند صادق است. معمولاً، عملکرد حساسه‌های ساخته شده از پلیمرهای نوع P پایداری بیشتری نسبت به حساسه‌های ساخته شده از پلیمرهای نوع n دارند [۱۶۰-۱۶۲].



(الف)



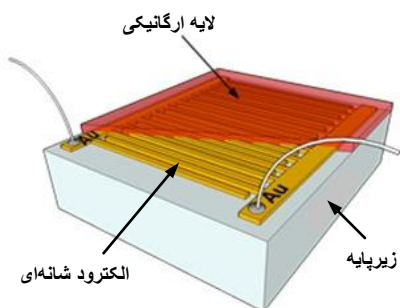
(ب)

شکل ۱۳- (الف) طرح‌واره و (ب) تصویر یک حسگر گاز مقاومتی تجاری مبتنی بر اکسید قلع (FIS-SP3-AQ2) [۱۵۶].

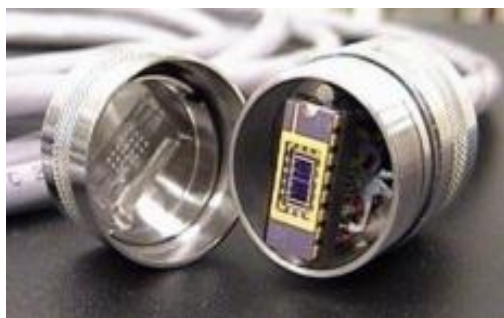
حسگرهای گاز در دمای بالا و محیط‌های آلوده کار می‌کنند و لازم است که اتصال‌های فلزی بکار رفته در آن‌ها از جنس فلزات نجیب باشد. تعیین رفتار الکترونیکی این اتصال‌های فلزی با لایه اکسید از اهمیت بالایی برخوردار است و پاسخ حسگر به گاز، به مقدار قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر رفتار این اتصال‌ها است. اتصال فلز-اکسید فلز می‌تواند به یکی از دو صورت اتصال اهمی و اتصال شاتکی^۱ باشد. در حالت اخیر، حسگر کلاً به‌صورت دو دیود پشت به پشت و یک مقاومت سری مدل می‌شود و پاسخ حسگر به تغییر ترکیب اتمسفر، نه تنها به حساسیت مقاومت لایه اکسید بلکه به حساسیت دیودها نیز بستگی پیدا می‌کند. بنابراین، حساسیت دیده شده در این حسگرها دارای دو منشأ متفاوت حساسیت مقاومتی-شیمیایی مربوط به لایه اکسید فلزی و حساسیت به گاز اتصال شاتکی بین اکسید و الکتروند می‌باشد [۲۱]. در حالی که در حسگر اهمی حساسیت تنها از حساسیت مقاومتی-شیمیایی لایه اکسید حادث می‌شود [۲۱-۲۴، ۱۲۶].

حساسیت حسگرهای ساخته شده با اکسیدهای فلزی خالص زیاد نیست و این سطح از حساسیت برای بسیاری از نیازهای صنعتی و حتی خانگی کفایت نمی‌کند. مثلاً ضریب هدایت اکسید قلع در بهترین شرایط دمایی و ساختاری در پاسخ به حضور 100 ppm گاز مونوکسید کربن کمتر از ۲۵ درصد تغییر می‌کند. برای توسعه‌ی کامل حسگرهای اکسید فلزی نیاز به بهبود مشخصه‌های آن‌ها (هم‌چون حساسیت، انتخابگری، زمان پاسخ و دمای کار) است. افزایش حساسیت با وارد کردن انواع

^۱ Schottky contact



(الف)



(ب)

شکل ۱۴- (الف) طرح‌واره ساختار یک حسگر مقاومتی گاز مبتنی به پلیمر حساس به گاز [۱۶۶]؛ (ب) تصویر یک آرایه حسگری متشکل از این نوع حسگرها [۱۶۷].

۱۱- حسگرهای اثر میدانی گاز

این حسگرها، عملاً، ترانزیستورهای ماسفت با گیت شناورند. اساس کار این ادوات بر تعامل گاز هدف با فلز گیت یا مواد حساس به گاز نشانه شده روی فلز گیت استوار است. این تعامل باعث تغییر تابع کار فلز گیت شده و لذا آستانه‌ی ماسفت را تغییر می‌دهد. از اینرو دسترسی گاز به سطح گیت ضروری است. در مواردی، مواد حساس به گاز مستقیماً بر روی اکسید گیت نشانه شده فلز گیت از ساختار افزاره حذف می‌شود. چون تعامل مولکول‌های گاز با سطح گیت صورت می‌گیرد، حساسیت حسگر متناسب با سطح موثر گیت است. از اینرو، تخلخل و ناهمواری سطح گیت بر حساسیت حسگر می‌افزاید. همانند حسگرهای مقاومتی مبتنی بر مواد آلی، عملکرد این حسگرها نیز بر اساس تعامل یک لایه حساس با مولکول‌های گاز است و ترانزیستور اثر میدانی فقط باعث تقویت علائم ناشی از گاز هدف می‌گردد. شکل ۱۵ طرح‌واره ساختار یک حسگر گاز از این نوع را نشان می‌دهد. ساخت این حسگر توسط روش‌های استاندارد فن‌آوری سیلیکان انجام می‌شود. فلز گیت عموماً از فلزات کاتالیزوری از قبیل پلاتین، پالادیوم و ایریدیم است که به روش‌های نشان فیزیکی، بر روی لایه دی‌اکسید سیلیکان نشانه می‌شود. دمای کار این حسگرهای گاز از بالا توسط محدودیت‌های مرتبط با

پلیمرهایی که جهت ساخت حساسه حسگرهای مقاومتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند مشتقاتی از پلی‌پیرول^۱، پلی‌آنیلین^۲، پلی‌تیوفن^۳، پلی‌ایندول^۴ یا مخلوطی از آن‌ها هستند. پلیمرهای پلی‌پیرول و پلی‌آنیلین بیش از سایرین مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته‌اند. هدایت الکتریکی این پلیمرها پایین است (حدود 10^{-5} S/cm) که البته با آرایش مناسب قابل افزایش می‌باشد. تغییر حساب شده غلظت ناخالصی آلاینده در پلیمرها می‌تواند باعث بهبود ویژگی‌های آشکارسازی گاز در آن‌ها شود [۱۷].

طرح‌واره یک حسگر مقاومتی ساخته شده از مواد آلی در شکل ۱۴ الف ارائه شده است. این ساختار اساساً ساده و شبیه ساختار حسگر اکسید فلزی می‌باشد، اما به خاطر کارکرد در دمای اتاق، ریزگره‌ها از ساختار آن حذف شده است. از تکنیک‌های مورد استفاده برای ایجاد فیلم‌های پلیمری می‌توان به روش‌های الکتروشیمیایی، اسپین کوتینگ و روش‌های مبتنی بر تبخیر فیزیکی اشاره کرد. داشتن ساختاری ساده، حساسیت مناسب به مولکول‌های گاز، زمان پاسخ قابل قبول، مصرف توان اندک، و مهم‌تر از همه، کارکردن در دمای اتاق از مزایای این نوع حسگرهای مقاومتی می‌باشند. با این وجود، عدم پایداری در مقابل عوامل محیطی، عمر کوتاه و رانش، سبب محدودیت استفاده تجاری از این نوع حسگرها شده است. از طرف دیگر، به دلیل انتخابی بودن حساسیت و تعدد انواع، استفاده از این حسگرها در ساخت آرایه‌های تشخیصی بو و بینی الکترونیکی به صورت گوناگون مد نظر بوده است. در شکل ۱۴ ب، تصویر یک آرایه حسگری تجاری متشکل از ۴ حسگر مقاومتی گاز ساخته شده بر اساس مواد آلی ارائه شده است. علی‌رغم عمر مفید کوتاه (بعضاً پس از چند هفته کار نیازمند تعویض می‌باشند) و قیمت بالا، به دلیل مجموعه مزایایی که با تکنولوژی موجود بدون جایگزین است، این آرایه‌ها در بینی الکترونیکی نیز مورد استفاده می‌باشند [۱۷]. در سال‌های اخیر، پژوهش با شدت بیشتری در راستای بهبود نواقص این حسگرها در جریان است [۱۶۳-۱۶۵]. کار پژوهشی روی ساخت این نوع حسگرها در ایران نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۶۶، ۳۷]. در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، اولین دانشجوی دکتری در تابستان سال ۱۳۹۳ از پایان نامه خود در این زمینه دفاع کرد.

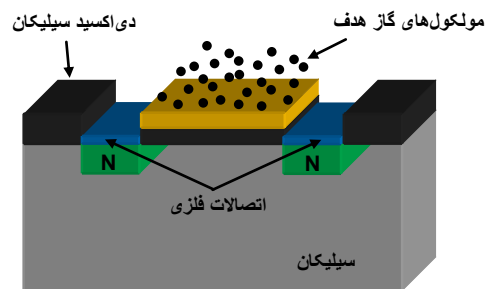
¹ Polypyrrole² Polyaniline³ Polythiophene⁴ polyindole

نیست. حسگرهای موجود هر کدام کمبودهایی را از لیست خواسته‌های ساده فوق دارند و پارامترهای کیفی حسگری که امروز برای این کار مورد استفاده قرار می‌گیرد شباهتی به مجموعه خواسته‌های فوق ندارد. معمولاً از یک حسگر عمومی اکسید فلزی استفاده می‌شود که نقطه کار بهینه‌اش حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد است. مصرف انرژی الکتریکی آن به‌طور پیوسته حدود 300 mW است (یعنی ۳ عدد باتری قلمی کیفیت متوسط را طی ۲۴ ساعت مصرف می‌کند)، بنابراین، انرژی لازم باید از طریق برق شهر تامین گردد. این حسگر حساسیت عمومی دارد و معمولاً به آدوکلن و پاک کننده لاک ناخن (استون) بیشتر از CO حساس است! عمر مفید آن توسط سازنده‌های مختلف حدود ۶ ماه تا یک سال اعلام می‌شود و لذا، حتی به فرض بازدید سالانه، کارکرد ۶ ماه دوم پس از بازدید مورد تایید شرکت‌های بیمه‌گر نخواهد بود.

لیست خواسته‌ها به سرعت در حال افزایش است: حسگرهایی لازم است که در دمای اتاق کار کنند و احتیاج به ریزگرم‌کن نداشته باشند. در زمینه تشخیص طبی، نیاز شدید به حسگرهایی است که بتوانند گازهای هدف را در مقیاس چند^۱ ppb آشکار سازند. به طور مثال در بازدم انسان سالم گاز ۱- پروپانول وجود ندارد، در حالیکه در شخص مبتلا به سرطان ریه، تراکم این گاز تا حدود 93 ppb صعود می‌کند [۱۷۰] و حسگر گازی با ویژگی‌های مناسب به سادگی می‌تواند افراد را از این نظر غربال کند. برای چنین حسگری، آستانه تشخیص گاز باید حدود 10 ppb باشد. ولی این تنها ویژگی لازم نیست، مهم است که این حسگر، مثلاً گاز استون و گازهای دیگر را به جای گاز هدف اصلی (۱- پروپانول) آشکار نکند، که چنین اشتباهی می‌تواند مشکلات عدیده‌ای را در امر تشخیص باعث شود. این بدین معنی است که حسگر مورد نظر باید نسبت به ۱- پروپانول حساسیت انتخابی داشته باشد و حساسیت آن نسبت به مثلاً آمونیاک یا استون ده‌ها بار یا حتی صدها بار کمتر باشد، زیرا که حضور طبیعی استون در بازدم شخص سالم چندین برابر بیشتر از حضور پروپانول است (میزان استون در بازدم انسان سالم می‌تواند تا حدود 530 ppb صعود کند) و اشتباه تشخیص استون به جای ۱- پروپانول در نفس بازدم شخص مریض، هر شخص سالمی را به‌عنوان نمونه مشکوک به بیماری ریه کلاسه‌بندی خواهد نمود. مسئله‌ی اساسی دیگر از آن‌جا حادث می‌شود که بازدم، حاوی مقدار قابل ملاحظه‌ای بخار آب است و حسگر مورد بحث نه تنها باید در رطوبت نسبی بالاتر از ۹۰ درصد به کار ادامه دهد بلکه باید هوشمندانه اثر ناشی از رطوبت را از آثار مربوط به گاز هدف جدا سازد. مضافاً، حسگر مورد نظر، پس از هر کار تشخیص، باید در مدت چند دقیقه به وضع اول خود برگردد (بازیابی شود). البته اگر بتوانیم حسگر مورد نظر را با قیمتی کمتر از ۳ دلار تولید کنیم (!) می‌توانیم از بازیابی صرف‌نظر کرده حسگر را با نمونه جدید جایگزین کنیم. حتی در حالت اخیر نیز مشکل حل نشده است، مگر این که فرایند ساخت حسگر با دقت قابل قبولی تکرارپذیر بوده حساسیت حسگرهای

ادوات سیلیکانی و یا توسط حداکثر تحمل دمایی مواد آلی روی گیت، هر کدام کوچکتر باشد، تعیین می‌گردد. معمولاً حسگرهای اثر میدانی در گستره دمایی ۵۰-۱۷۰ درجه سانتیگراد کار می‌کنند و گرمایش آن را ریزگرم‌کن سیلیکانی تامین می‌نماید [۱۱۶، ۱۱۷].

حسگرهای گاز اثر میدانی، به دلیل استفاده از فن آوری سیلیکان، ابعاد بسیار کوچکی داشته قابلیت تکرارپذیری بالایی در تولید دارند. به همین دلایل این حسگرها از قیمت پایینتری نیز نسبت به انواع دیگری برخوردارند. این حسگرها قابلیت مجتمع شدن با مدارهای کنترل کننده را دارا می‌باشند و با استفاده از آنها مجتمع شدن حسگر و ریزپردازنده روی یک تراشه قابل اجرا می‌باشد. با این وجود، این نوع حسگرهای گاز از رانش در پاسخ و ناپایداری ماده‌ی حساس رنج می‌برند. برای درک علت رانش، ترانزیستور اثر میدانی را مجسم کنید که گیت آن شناور شده کاملاً در معرض هوا قرار دارد. به دلیل این نقیصه، حسگرهای اثر میدانی قابلیت اتکاء لازم را برای استفاده در کاربردهای حساس ندارند. برای به-حداقل رساندن رانش سعی می‌شود که همه جای تراشه سیلیکانی، به جز سطح گیت حسگر، با مواد مناسب آب‌بندی گردد. انواع متعددی از حسگرهای اثر میدانی گاز ساخته شده بعضاً به بازار نیز ارائه گردیده‌اند. برای اطلاعات بیشتر استفاده از مراجع [۱۶۸، ۱۶۹] توصیه می‌گردد.



شکل ۱۵- طرح‌واره یک حسگر گاز از نوع MOSFET.

۱۲- نیازهای صنعتی و نسل آینده حسگرهای

گاز

حسگرهای گاز موجود، نه تنها نیازهای آینده، بلکه نیازهای حال را اغنا نمی‌کنند. مثلاً هم‌اکنون نیاز شدید به حسگر گازی است که گاز مونوکسید کربن را در محیط‌های مسکونی به طور شبانه روزی پایش کند، آن را با بوی عطر و آدوکلن اشتباه نگیرد، آستانه تشخیص آن چند برابر کمتر از سطح خطرناک CO باشد، مصرف توان اندکی داشته باشد (تا بتوان آن را با باتری مورد استفاده قرار داده اعلام خطر را از قطع برق مستقل ساخت) عمر مفیدی حدود پنج سال داشته باشد و قیمت آن از حدود ده دلار بیشتر نباشد. واقعیت این است که چنین حسگری در بازار

^۱ Part Per Billion

۱۳- آینده علم و تکنولوژی حسگرهای گاز

در ایران

نیاز مشخص است: ایران با بالاترین مصرف سرانه گاز در جهان، علی‌الاصول، باید حائز بیشترین خطرات و لطامات سرانه از این ناحیه نیز باشد. با استاندارد سازی ایمنی در منازل، و در نظر گرفتن عمر مفیدی برابر یک سال برای حسگرهای مقاومتی گاز نوع اکسید فلزی، نیاز سالانه به بیش از بیست میلیون عدد حسگر گاز عمومی (آشکارساز متان و مونوکسید-کربن) بصورت سرانگشتی محرز می‌گردد. با فرض قیمت ۳ دلار بر قطعه، فروش سالانه کارخانه فرضی سازندهی این قطعه بیش از ۶۰ میلیون دلار برآورد می‌گردد. آزمایشگاه‌های متعددی در کشور صاحب فن-آوری ساخت چنین قطعاتی هستند و کارهای با ارزشی در دانشگاه گیلان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشگاه صنعتی شیراز، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشگاه تبریز، دانشگاه تربیت مدرس، دانشگاه علم و صنعت، دانشگاه صنعتی شریف، دانشگاه تهران و دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در حال اجرا است. آغاز کار صنعتی، بدون اطلاع از تصمیم مراجع ذیربط در خصوص ایمن سازی محیط‌های مسکونی خطرات اقتصادی غیر قابل توجهی را در بردارد که کمتر از خطر گاز نیست! و شاید به این دلیل است که صاحبان فن‌آوری دست به کار نمی‌شوند.

نیاز واضح دیگر کشور، صنایع خودروسازی است. این مورد بازار آماده‌ای را حائز است و انتظار در تصمیم‌گیری جایز نیست. ایران سالانه نزدیک به یک میلیون اتومبیل تولید می‌کند و فرض بر این است که در هر اتومبیل حداقل یک حسگر گاز لامبدا (بخش ۴) که قیمتی در حدود ۳۰ دلار دارد (انواع حسگر لامبدا در گستره وسیعی از حدود ۲۰ دلار تا بالاتر از ۲۰۰ دلار قیمت دارند)، به کار رود. در این صورت، درک این که بازار آماده‌ای به حجم بیش از ۳۰ میلیون دلار برای حسگر لامبدا داریم به ریاضیات پیشرفته احتیاج ندارد، لیکن، در ایران، بازار مذکور در انحصار دو خودروساز اصلی کشور می‌باشد که از ساختار دولتی برخوردارند. یعنی تولیدکننده حسگر لامبدا روی ساخت کالایی سرمایه‌گذاری خواهد نمود که عملاً تنها خریدار آن دولت محترم است. خوب یا بد (۴)، بستگی به مدیران نصب شده خواهد داشت. ولی اساساً، صنعتگران علاقه‌مند به بازارهایی با مشتریان متعدد و در حال رقابت با یکدیگر هستند.

نتیجه این که نگارنده در حال حاضر زیر ساخت هر دو بازار فوق-الذکر را نامطمئن می‌بیند و جهت ورود به یکی از دو صنعت مربوط منتظر تغییر پارامترهای فوق‌الذکر می‌ماند. اما، این نتیجه از ارزش کارهای پژوهشی در زمینه مربوط نمی‌کاهد. این که در حال حاضر، با قاطعیت می‌توانیم بگوییم که در خصوص علم و حتی تکنولوژی ساخت حسگر-های گاز کاملاً به‌روز هستیم نتیجه با ارزش زحمات پژوهشگران در این زمینه است.

تولید شده همسان باشد. در غیر این صورت، با تعویض هر حساسه، به یک یا چند آزمون جهت کالیبراسیون نیاز خواهیم داشت. واقعیت این است که چنین حسگری فعلاً با هیچ قیمتی میسر نیست. اندازه‌گیری‌هایی در این وضع و مقیاس فقط با استفاده از سامانه GC-MS امکان‌پذیر است که سامانه‌ای پیچیده، گران‌قیمت و حجیم است و استفاده از آن نیازمند افراد آموزش دیده می‌باشد (جهت اطلاعات بیشتر در خصوص این سامانه خواننده علاقه‌مند می‌تواند به مراجع مربوط مراجعه کند [۱۷۱-۱۷۳]). در این خصوص حتی به آرایه‌های حسگری نیز فعلاً نمی‌توان امید بست، زیرا که حد آشکارسازی آرایه‌ها توسط حد آشکارسازی اجزای آن تعیین می‌شود و تکلیف این اجزاء نیز در بالا مشخص شد. لیکن ویژگی‌های دیگری چون حساسیت انتخابی، با حذف اثر تغییرات محیطی، از طریق استفاده از آرایه‌ها قابل بهبود است.

مثالی دیگر از نیازهای امروز، نیاز به به حسگرهای پایش محیطی در خصوص گاز آمونیاک (NH_3) می‌باشد. حد استاندارد برای این گاز در حالت استنشاق پیوسته کمتر از 25 ppm است (غلظت آمونیاک در نفس انسان سالم در گستره 0.25-2.9 ppm است). هم‌اکنون نمونه‌های آزمایشگاهی از حسگرهای مقاومتی آلی با توانایی آشکارسازی چنین سطوحی از آمونیاک ارائه شده است. لیکن چنین حسگرهایی به رطوبت هوا، تغییر دمای محیط و آلوده‌کننده‌های دیگر (مانند بخار اتانول) که در تراکم بالاتری در محیط حضور دارند نیز حساس می‌باشند. جلوگیری از اشتباه نیازمند ادغام اطلاعات ناشی از این حسگرها با اطلاعات حسگر-های دما، رطوبت و غیره است که سامانه هوشمندانه از مجموع اطلاعات واصل، تراکم گاز هدف را استخراج می‌نماید.

با بیان این مثال، نیاز به حسگرهای هوشمند گاز نیز مشخص می‌شود. حسگرهای هوشمند گاز هم‌اکنون یکی از شاخه‌های فعال پژوهشی در حسگرهای گاز است. اساساً، یکی از زمینه‌های پرفعالیت در ارتباط با حسگرهای گاز، پژوهش روی نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای فرآوری داده‌های حاصل از پاسخ‌های حسگرهاست. خصوصاً، با توجه به بطنی بودن پیشرفت در ارائه صنعتی ساختارهای جدید حسگری، علاقه و فشار اجرایی به این قسمت بیشتر محسوس بوده است. پاسخ‌های گذرای یک حسگر گاز حاوی اطلاعات زیادی است و بردارهای ویژگی مستخرج از آن‌ها برای گازهای هدف، ذاتاً در فضاهای ویژگی بیش از صد بعدی تعریف می‌گردند که معمولاً عملیات را کند و خطاپذیر می‌سازند (در ادبیات مربوط، به این مقوله "طلسم ابعاد بزرگ" اطلاق می‌شود). کار-های پژوهشی در این زمینه، شامل مطالعه روش‌های فیلتر کردن اطلاعات فشرده و ادغام اطلاعات، استخراج ویژگی‌ها، کاهش بعد، شناسایی الگو، طبقه‌بندی، تعیین خطا، بهینه‌سازی و ... می‌باشند. در حال حاضر تعداد مقالات پژوهشی در خصوص این قسمت کمتر از گزارش‌های مربوط به ساختارهای حسگری نیست [۴۴-۴۷].

¹ Gas Chromatography-Mass Spectrometry

² Curse of dimensionality

- [16] J. F. McAleer, P. T. Moseley, J. O. W. Norris, D. E. Eilliams and B. C. Tofield, "Tin dioxide gas sensors, Part 2. The Role of Surface Additives", *Journal of Chemical Society*, vol. 84, pp. 441-457, 1988.
- [17] H. Bai and G. Shi, "Gas sensors based on conducting polymers", *Sensors*, vol. 7, pp. 267-307, 2007.
- [18] J. Janata and M. Josowicz, "Conducting polymers in electronic chemical sensors", *Nature materials*, vol. 2, pp.19-24, 2003.
- [19] J. H. Lee, "Gas sensors using hierarchical and hollow oxide nanostructures: overview" *Sensors and Actuators B*, vol. 140, pp. 319-336, 2009.
- [20] J. Huang and Q. Wan, "Gas sensors based on semiconducting metal oxide one-dimensional nanostructures", *Sensors*, vol. 9, pp. 9903-9924, 2009.
- [21] F. Hossein-Babaei and S. Rahbarpour, "Separate assessment of chemoresistivity and schottky-type gas sensitivity in M-metal oxide-M' structures", *Sensors and Actuators B*, vol. 160, pp. 174-180, 2011.
- [22] K. Ito, "Hydrogen-Sensitive schottky barrier diodes", *Surface Science*, vol. 86, pp. 345-352, 1979.
- [23] F. Hossein-Babaei and S. Rahbarpour, "Titanium and silver contacts on thermally oxidized titanium chip: electrical and gas sensing properties", *Solid-State Electronics*, vol. 56, pp. 185-190, 2011.
- [24] F. Hossein-Babaei, "Porous silver-TiO₂ Schottky-type chemical sensor fabricated on thermally oxidized titanium", *Electronics letters*, vol. 44, pp. 161-162, 2008.
- [25] F. Hossein-Babaei, S. Abbaszadeh and M. Samiee Esfahani, "Gas sensitive porous silver-rutile high-temperature schottky diode on thermally oxidized titanium", *Sensors Journal, IEEE*, vol. 9(3), pp. 237-243, 2009.
- [26] F. Raissi and R. Farivar, "Room-temperature hydrogen gas sensor", *Applied physics letters*, vol. 87, pp. 164101- 164103, 2005.
- [27] D. K. Aswal and S. K. Gupta, "Science and technology of chemiresistor gas sensors" *Nova Science*, New York, 2007.
- [28] R. Moos, "A Brief overview on automotive exhaust gas sensors based on electroceramics", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 2, pp. 401-413, 2005.
- [29] C. López-Gándara, F. M. Ramos and A. Cirera, "YSZ-based oxygen sensors and the use of nanomaterials: a review from classical models to current trends", *Journal of Sensors*, vol. 2009, pp. 1-15, 2009.

تشکر:

از آقای سعید مقدم (کارشناس ارشد الکترونیک) به خاطر همکاری در تهیه این مقاله تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] <http://www.goacd.com>, "A summary of gas detection", pdf, Last visited on 9-May-2015.
- [2] J. Fraden, "Handbook of modern sensors: physics, designs and applications", 4th Edition, Chapter 17, Springer, New York, 2004.
- [3] J. P. Kopasz, "Fuel cells and odorants for hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 2527-2531, 2007.
- [4] T. H. Dubaniewicz and J. E. Chilton, "Optically powered remote gas monitor", US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1995.
- [5] M. A. Carpenter, S. Mathur and A. Kolmakov, "Metal oxide nanomaterials for chemical sensors", Springer, New York, 2012.
- [6] P. Hariharan, "Basics of interferometry", Academic Press, 2nd Edition, USA, (2010).
- [7] <http://www.rkiinstruments.com>, "Gas detection history- RKI instruments", Last visited on 9-May-2015.
- [8] N. Fabricius, G. Gauglitz and J. Ingenhoff, "A gas sensor based interferometer on an integrated optical mach-zehnder interferometer", *Sensors and Actuators B*, vol. 7, pp. 672-676, 1992.
- [9] A. M. Azad, S. A. Akbar, S. G. Mhaisalkar, L. D. Birkefeld and K. S. Goto, "Solid-State gas sensors: a review", *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 139, pp. 3690-3704, 1992.
- [10] G. Aleksander, "Insights into the mechanism of gas sensor operation" Chapter 1, Springer, New York, 2013.
- [11] N. Yamazoe, G. Sakai and K. Shimano, "Oxide semiconductor gas Sensors", *Catalysis Surveys from Asia*, vol. 7, pp. 63-75, 2003.
- [12] S. R. Morrison, "Semiconductor gas Sensors", *Sensors and Actuators B*, vol. 1, pp. 329-341, 1982.
- [13] M. Batzill, "Surface science studies of gas sensing materials: SnO₂", *sensors*, vol. 6, pp. 1345-1366, 2006.
- [14] D. E. Williams, "Semiconducting oxides as gas-sensitive resistors", *Sensors and Actuators B*, vol. 57, pp. 1-16, 1999.
- [15] N. Yamazoe, Y. Kurokawa and T. Seiyama, "Effects of additives on semiconductor gas Sensors", *Sensors and Actuators*, vol. 4, pp. 283-289, 1983.

- [45] F. Hossein-Babaei, S. M. Hosseini-Golgoos and A. Amini, "Extracting discriminative information from the Padé-Z-transformed responses of a temperature-modulated chemoresistive sensor for gas recognition", *Sensors and Actuators B*, vol. 142, pp. 19-27, 2009.
- [46] F. Hossein-Babaei, M. Hemmati and M. Dehmobed, "Gas diagnosis by a quantitative assessment of the transient response of a capillary-attached gas sensor", *Sensors and Actuators B*, vol. 107, pp. 461-467, 2005.
- [47] F. Hossein-Babaei and A. Amini, "Recognition of complex odors with a single generic tin oxide gas sensor", *Sensors and Actuators B*, vol. 194, pp. 156-163, 2014.
- [48] C. H. Shih, Y. J. Lin, K. F. Lee, P. Y. Chien and P. Drake, "Real-Time electronic nose based pathogen detection for respiratory intensive care patients", *Sensors and Actuators B*, vol. 148, pp. 153-157, 2010.
- [49] C. D. Natale, A. Macagnano, R. Paolesse, E. Tarizzo, A. Mantini and et al., "Human skin odor analysis by means of an electronic Nose", *Sensors and Actuators B*, vol. 65, pp. 216-219, 2000.
- [50] <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/gas-sensors-market>, "Gas sensors market analysis and segment forecasts to 2020", Last visited on 9-May-2015.
- [51] B. Elyassi, N. Rajabbeigi, A. Khodadadi, S. S. Mohajezadeh and M. Sahimi, "An yttria-doped ceria-based oxygen sensor with solid-state reference", *Sensors and Actuators B*, vol. 103, pp. 178-183, 2004.
- [52] N. Rajabbeigi, B. Elyassi, A. Khodadadi, S. S. Mohajezadeh and M. Sahimi "A novel miniaturized oxygen sensor with solid-state ceria-zirconia reference", *Sensors and Actuators B*, vol. 100, pp. 139-142, 2004.
- [53] N. Rajabbeigi, B. Elyassi, A. Ali Khodadadi, S. S. Mohajezadeh, Y. Mortazavi and et al., "Oxygen sensor with solid-state $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-TiO}_2$ reference", *Sensors and Actuators B*, vol. 108, pp. 341-345, 2005.
- [54] N. Papamichail, N. Barsan and U. Weimar, "Monitoring of oil aerosol contamination in pressurised air with SnO_2 -based thick film sensors in real life conditions", *Sensors and Actuators B*, vol. 106, pp. 61-66, 2005.
- [55] K. Brudzewski, S. Osowski, T. Markiewicz and J. Ulaczyk, "Classification of gasoline with supplement of bio-products by means of an electronic nose and SVM neural network", *Sensors and Actuators B*, vol. 113, pp. 135-141, 2006.
- [56] M. Peris and L. Escuder-Gilbert, "A 21st century technique for food control: electronic noses", *Analytica Chimica Acta*, vol. 638, pp. 1-15, 2009.
- [30] J. Fouletier, "Gas analysis with potentiometric sensors. a review", *Sensors and Actuators*, vol. 3, pp. 295-314, 1983.
- [31] <https://www.ee.washington.edu>, "History of chemical Sensing", Chapter 2, pdf, Last visited on 9-May-2015.
- [32] S. M. Van Ruth, "Methods for gas chromatography-olfactometry: a Review", *Biomolecular Engineering*, vol. 17, pp. 121-128, 2001.
- [33] R. L. Grob and E. F. Barry, "Modern practice of gas chromatography", 4th Edition, John Wiley and Sons, New York, 2004.
- [34] J. M. Miller, "Chromatography: concepts and contrasts", 2nd Edition, John Wiley and Sons,
- [35] O. D. Sparkman, Z. Peton and F. G. Kitson, "Gas chromatography and mass spectrometry: a practical guide", 2nd Edition, Elsevier Science and Technology, 2010.
- [36] W. M. A. Niessen, "Liquid chromatography-mass spectrometry", 3rd Edition, CRC Press, London, 2006.
- [37] F. Hossein-Babaei and P. Shabani, "A gold/organic semiconductor diode for ppm-level humidity sensing", *Sensors and Actuators B*, vol. 205, pp. 143-150, 2014.
- [38] Z. Chen and C. Lu, "Humidity sensors: a review of materials and mechanisms", *Sensor Letters*, vol. 3, 274-295, 2005.
- [39] B. M. Kulwicki, "Humidity sensors", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 74, pp. 697-708, 1991.
- [40] Z. M. Rittersma, "Recent achievements in miniaturised humidity sensors-a review of transduction techniques", *Sensors and Actuators A*, vol. 96, pp. 196-210, 2002.
- [41] J. W. Gardner and P. N. Bartlett, "A brief history of electronic noses", *Sensors and Actuators B*, vol. 18, pp. 210-211. 1994.
- [42] P. Erdi, I. Aradi, Y. Kato and K. Yoshikawa, "Dynamic information processing in natural and artificial olfactory systems", *Biosystems*, vol. 46, pp. 107-112, 1998.
- [43] T. C. Pearce, "Computational parallels between the biological olfactory pathway and its analogue the electronic nose: part I. biological olfaction", *Biosystems*, vol. 41, pp. 43-67, 1997.
- [44] F. Hossein-Babaei and A. Amini, "A breakthrough in gas diagnosis with a temperature-modulated generic metal oxide gas sensor", *Sensors and Actuators B*, vol. 166-167, pp. 419-425, 2012.

- [69] A. Ponzoni, A. Depari, M. Falasconi, E. Comini, A. Flammini and et al. "Bread baking aromas detection by low-cost electronic nose", *Sensors and Actuators B*, vol. 130, pp. 100-104, 2008.
- [70] P. Mielle and F. Marquis, "One-Sensor electronic olfactometer for rapid sorting of fresh fruit juices", *Sensors and Actuators B*, vol. 76, pp. 470-476, 2001.
- [71] J. Lozano, T. Arroyo, J. P. Santos, J. M. Cabellos and M. C. Horrillo, "Electronic nose for wine ageing detection", *Sensors and Actuators B*, vol. 133, pp. 180-186, 2008.
- [72] J. A. Ragazzo-Sanchez, P. Chalier, D. Chevalier-Lucia, M. Calderon-Santoyo and C. Ghommidh, "Off-Flavours detection in alcoholic beverages by electronic nose coupled to GC", *Sensors and Actuators B*, vol. 140, pp. 29-34, 2009.
- [73] J. P. Santos, J. Lozano, M. Alexandre, I. Sayago, M. J. Fernandez and et al., "Discrimination of different aromatic compounds in water, ethanol and wine with a thin film sensor array", *Sensors and Actuators B*, vol. 103, pp. 98-103, 2004.
- [74] L. Torri, N. Sinelli and S. Limbo, "Shelf life evaluation of fresh-cut pineapple by using an electronic nose", *Postharvest Biology and Technology*, vol. 56, pp. 239-245, 2010.
- [75] H. Zhang, M. Chang, J. Wang and S. Ye, "Evaluation of peach quality indices using an electronic nose by MLR, QPST and BP network", *Sensors and Actuators B*, vol. 134, pp. 332-338, 2008.
- [76] J. Brezmes, M. L. L. Fructuoso, E. Llobet, X. Vilanova, I. Recasens and et al., "Evaluation of an electronic nose to assess fruit ripeness", *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, pp. 97-108, 2005.
- [77] F. Spinelli, M. Noferini, J. L. Vanneste and G. Costa, "Potential of the electronic-nose for the diagnosis of bacterial and fungal diseases in fruit trees", *OEPP/EPPO Bulletin*, vol. 40, pp. 59-67, 2010.
- [78] R. Baby, M. Cabezas, E. Castro, R. Filip and N. E. Walsøe de Reça, "Quality control of medicinal plants with an electronic nose", *Sensors and Actuators B*, vol. 106, pp. 24-28, 2005.
- [79] M. Carmona, J. Martinez, A. Zalacain, M. L. Rodriguez-Mendez, J. A. de Saja and et al., "Analysis of saffron volatile fraction by TD-GC-MS and E-nose", *European Food Research and Technology*, vol. 223, pp. 96-101, 2006.
- [80] I. Concina, M. Falasconi, E. Gobbi, F. Bianchi, M. Musci and et al., "Early detection of microbial contamination in processed tomatoes by electronic nose", *Food Control*, vol. 20, pp. 873-880, 2009.
- [57] A. K. Deisingh, D. C. Stone and M. Thompson, "Application of electronic noses and tongues in food analysis", *international journal of food science and technology*, vol. 39, pp. 587-604, 2004.
- [58] S. Ampuero and J. O. Bosset, "The electronic nose applied to dairy products: a review", *Sensors and Actuators B*, vol. 94, pp. 1-12, 2003.
- [59] S. Labreche, S. Bazzo, S. Cade and E. Chanie, "Shelf life determination by electronic nose: application to milk", *Sensors and Actuators B*, vol. 106, pp. 199-206, 2005.
- [60] N. E. Barbri, E. Llobet, N. E. Bari, X. Correig and B. Bouchikhi, "Electronic nose based on metal oxide semiconductor sensors as an alternative technique for the spoilage classification of red meat", *Sensors*, vol. 8, pp. 142-156, 2008.
- [61] M. Ghasemi-Barnamkhashti, S. S. Mohtasebi, M. Siadat and S. Balasubramanian, "meat quality assessment by electronic nose (machine olfaction technology)", *Sensors*, vol. 9, pp. 6058-6083, 2009.
- [62] N. E. Barbri, J. Mirhisse, R. Ionescu, N. E. Bari, X. Correig and et al., "An electronic nose system based on a micro-machined gas sensor array to assess the freshness of sardines", *Sensors and Actuators B*, vol. 141, pp. 538-543, 2009.
- [63] B. A. Suslick, L. Feng and K. S. Suslick, "Discrimination of complex mixtures by a colorimetric sensor array: coffee aromas", *Analytica Chemistry*, vol. 82, pp. 2067-2073, 2010.
- [64] N. Bhattacharyya, S. Seth, B. Tudu, P. Tamuly, A. Jana and et al., "Detection of optimum fermentation time for black tea manufacturing using electronic nose", *Sensors and Actuators B*, vol. 122, pp. 627-634, 2007.
- [65] E. Z. Panagou, N. Shgal, N. Magan and G. J. E. Nychas, "Table olives volatile fingerprints: potential of an electronic nose for quality discrimination", *Sensors and Actuators B*, vol. 134, pp. 902-907, 2008.
- [66] Y. Yin, H. Yu and H. Zhang, "A feature extraction method based on wavelet packet analysis for discrimination of chinese vinegars using a gas sensor array", *Sensors and Actuators B*, vol. 134, pp. 1005-1009, 2008.
- [67] W. Yongwei, J. Wang, B. Zhou and Q. Lu, "Monitoring storage time and quality attribute of egg based on electronic nose", *Analytica Chemica Acta*, vol. 650, pp. 183-188, 2009.
- [68] F. Cacic, L. Primorac, D. Kenjeric, S. Benedetti and M. L. Mandic, "Application of electronic nose in honey geographical origin characterisation", *Journal of Central European Agriculture*, vol. 10, pp. 19-26, 2009.

- [93] T. Taghipoor Bazargani, Faculty of veterinary Medicine, University of Tehran, Private Communication.
- [94] M. Kuske, M. Padilla, A. C. Romain, J. Nicolas, R. Rubio and et al., "Detection of diverse mould species growing on building materials by gas sensor arrays and pattern recognition", *Sensors and Actuators B*, vol. 119, pp. 33-40, 2006.
- [95] J. Goschnick, I. Koronczi, M. Frietsch and I. Kiselev, "Water pollution recognition with the electronic nose kamina", *Sensors and Actuators B*, vol. 106, pp. 182-186, 2005.
- [96] W. Bourgeois, A. C. Romain, J. Nicolas and R. M. Stuetz, "The use of sensor arrays for environmental monitoring: interests and limitations", *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 5, pp. 852-860, 2003.
- [97] J. Yinon, "Detection of explosives by electronic noses", *Analytical Chemistry*, vol. 75, pp. 99A-105A, 2003.
- [98] N. J. Choi, J. H. Kwak, Y. T. Lim, T. H. Bahn, K. Y. Yun, J. C. Kim, J. S. Huh, D. D. Lee, "Classification of chemical warfare agents using thick film gas sensor array", *Sensors and Actuators B*, vol. 108, pp. 298-304, 2005.
- [99] A. T. Nimal, U. Mittal, M. Singh, M. Khaneja, G. K. Kannan and et al., "Development of handheld SAW sensors for explosives and CW agents", *Sensors and Actuators B*, vol. 135, pp. 399-410, 2009.
- [100] H. Ishida, G. Nakayama, T. Nakamoto and T. Moriizumi, "Controlling a gas/odor plume-tracking robot based on transient responses of gas sensors", *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, pp. 537-545, 2005.
- [101] R. C. Young, W. J. Buttner, B. R. Linnell and R. Ramesham, "Electronic nose for space program applications", *Sensors and Actuators B*, vol. 93, pp. 7-16, 2003.
- [102] F. Davide, M. Holmberg and I. Lundstrom, "12 virtual olfactory interfaces: electronic noses and olfactory displays", *Communications Through Virtual Technology: Identity Community and Technology in the Internet Age*, edited by G. Riva and F. Davide, IOS Press, Amsterdam, 2001.
- [103] P. Somboon, B. Wyszynski and T. Nakamoto, "Novel odor recorder for extending range of recordable odor", *Sensors and Actuators B*, vol. 121, pp. 583-589, 2007.
- [104] L. Carmel and D. Harel, "Mix-to-Mimic odor synthesis for electronic noses", *Sensors and Actuators B*, vol. 125, pp. 635-643, 2007.
- [105] K. J. Albert, N. S. Lewis, C. L. Schauer, G. A. Sotzing, S. E. Stitzel and et al., "Cross-Reactive chemical sensor arrays", *Chemical Review*, vol. 100, pp. 2595-2626, 2000.
- [81] X. Z. Zheng, Y. B. Lan, J. M. Zhu, J. Westbrook, W. C. Hoffmann and et al., "Rapid identification of rice samples using an electronic nose", *Journal of Bionic Engineering*, vol. 6, pp. 290-297, 2009.
- [82] F. Cheli, A. Campagnoli, L. Pinotti, G. Savoini and V. Dell'Orto, "Electronic nose for determination of aflatoxins in maize", *Biotechnologie Agronomie Societe at Environnement*, vol. 13, pp. 39-43, 2009.
- [83] R. Paolesse, A. Alimelli, E. Martinelli, C. D. Natale, A. D'Amico and et al., "Detection of fungal contamination of cereal grain samples by an electronic nose", *Sensors and Actuators B*, vol. 119, pp. 425-430, 2006.
- [84] J. Nicolas, A. C. Romain and C. Ledent, "The electronic nose as a warning device of the odour emergence in a compost hall", *Sensors and Actuators B*, vol. 116, pp. 95-99, 2006.
- [85] J. H. Sohn, N. Hudson, E. Gallagher, M. Dunlop, L. Zeller and et al., "Implementation of an electronic nose for continuous odour monitoring in a poultry shed", *Sensors and Actuators B*, vol. 133, pp. 60-69, 2008.
- [86] Y. J. Lin, H. R. Guo, Y. H. Chang, M. T. Kao, H. H. Wang and et al., "Application of the electronic nose for uremia diagnosis", *Sensors and Actuators B*, vol. 76, pp. 177-180, 2001.
- [87] M. Bruins, A. Bos, P. L. C. Petit, K. Eadie, A. Rog and et al., "Device-Independent, real-time identification of bacterial pathogens with a metal oxide-based olfactory sensor", *European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Disease*, vol. 28, pp. 775-780, 2009.
- [88] M. Bernabei, G. Pennazza, M. Santonico, C. Corsi, C. Roscioni and et al., "A preliminary study on the possibility to diagnose urinary tract cancers by and electronic nose", *Sensors and Actuators B*, vol. 131, pp. 1-4, 2008.
- [89] B. Kateb, M. A. Ryan, M. L. Homer, L. M. Lara, Y. Yin and et al., "Sniffing out cancer using the JPL electronic nose: a pilot study of a novel approach to detection and differentiation of brain cancer", *NeuroImage*, vol. 47, pp. T5-T9, 2009.
- [90] Z. J. Cheng, G. Warwick, D. H. Yates and P. S. Thomas, "An electronic nose in the discrimination of breath from smokers and non-smokers: a model for toxin exposure", *Journal of Breath Research*, vol. 3, pp. 036003-036009, 2009.
- [91] Z. Jin, T. Shimbo, Y. Hosoe and T. Oyabu, "Breath odor characteristics after drinking and identification of sake quantity", *Sensors and Actuators B*, vol. 108, pp. 265-270, 2005.
- [92] A. -C. Romain, J. Delva and J. Nicolas, "Complementary approaches to measure environmental odours emitted by landfill areas", *Sensors and Actuators B*, vol. 131, pp. 18-23, 2008.

- [120] S. Tadigadapa and K. Mateti, "Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives" *Measurement Science and Technology*, vol. 20, pp. 092001, 2009.
- [121] G. N. Ferreira, A. C. da-Silva and B. Tomé, "Acoustic wave biosensors: physical models and biological applications of quartz crystal microbalance" *Trends in biotechnology*, vol. 27, pp. 689-697, 2009.
- [122] B. Drafts, "Acoustic wave technology sensors" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, pp. 795-802, 2001.
- [123] Y. H. Wang, C. P. Chen, C. M. Chang, C. P. Lin, C. H. Lin and et al. "MEMS-Based gas flow sensors" *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 6, pp. 333-346, 2009.
- [124] S. Lakkis, R. Younes, Y. Alayli and M. Sawan, "Review of recent trends in gas sensing technologies and their miniaturization potential" *Sensor Review*, vol. 34, pp. 24-35, 2014.
- [125] J. S. Bae, D. H. Yun, C. O. Park and J. S. Hwang, "Improved selectivity of oxide semiconductor type gas sensor using compensating element" *Sensors and Actuators B*, vol. 75, pp. 160-165, 2001.
- [126] N. Barsan, D. Koziej and U. Weimar, "Metal oxide-based gas sensor research: how to?", *Sensors and Actuators B*, vol. 121, pp. 18-35, 2007.
- [127] G. Eranna, B. C. Joshi, D. P. Runthala and R. P. Gupta, "Oxide materials for development of integrated gas sensors-a comprehensive review", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 29, pp. 111-188, 2004.
- [128] V. Lantto, T. T. Rantala and T. S. Rantala, "Atomistic understanding of semiconductor gas sensors", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 21, pp. 1961-1965, 2001.
- [129] Y. Li-Zi, S. Zhi-Tong and W. Chan-Zheng, "A thermodynamic study of tin oxides by coulometric titration", *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 113, pp. 221-224.
- [130] S. Hahn, "SnO₂ thick film sensors at ultimate limits: performance at low O₂ and H₂O concentrations-size reduction by CMOS technology, University of Tübingen, 2002.
- [131] K. Singh, J. Nowotny and V. Thangadurai, "Amphoteric oxide semiconductors for energy conversion devices: a tutorial review", *Chemical Society Reviews*, vol. 42(5), pp. 1961-1972, 2013.
- [132] Y. Xu, X. Zhou and O. T. Sorensen, "Oxygen sensors based on semiconducting metal oxides: an overview" *Sensors and Actuators B*, vol. 65, pp. 2-4, 2000.
- [106] F. Hossein-Babaei and V. Ghafarinia, "Compensation for the drift-like terms caused by environmental fluctuations in the responses of chemoresistive gas sensors" *Sensors and Actuators B*, vol. 143, pp. 641-648, 2010.
- [107] A. D'Amico and C. D. Natale, "A contribution on some basic definitions of sensors properties", *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, pp. 183-190, 2001.
- [108] P. Gründler, "Chemical sensors: an introduction for scientists and engineers", Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [109] C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang and R. Gao, "Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors", *sensors*, vol. 10, pp. 2088-2106, 2010.
- [110] <http://www.intlsensor.com/electrochemical>, "Electrochemical sensors", Chapter 2, pdf, Last visited on 9-May-2015.
- [111] J. R. Stetter and J. Li, "Amperometric gas sensors a review", *Chemical reviews*, vol. 108, pp. 352-366, 2008.
- [112] S. S. Bhoga and K. Sing, "Electrochemical solid state gas sensors: an overview", *Ionics*, vol. 13, pp. 417-427, 2007.
- [113] D. James, S. M. Scott, Z. Ali and W. T. O'hare, "Chemical sensors for electronic nose systems", *Microchimica Acta*, vol. 149, pp. 1-17, 2005.
- [114] L. S. Rothman, R. R. Gamache, A. Goldman, L. R. Brown, R. A. Toth and et al., "The HITRAN database: 1986 Edition", *Applied Optics*, vol. 26, pp. 4058-4097, 1987.
- [115] X. Liu, S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang and H. Ning, "A survey on gas sensing technology", *Sensors*, vol. 12, pp. 9635-9665, 2012.
- [116] A. D. Wilson and M. Baietto, "Applications and advances in electronic-nose technologies," *Sensors*, vol. 9, pp. 5099-5148, 2009.
- [117] K. Arshak, E. Moore, G. M. Lyons, J. Harris and S. Clifford, "A review of gas sensors employed in electronic nose applications", *Sensor Review*, vol. 24, pp. 181-198, 2004.
- [118] E. A. Symons, "Catalytic gas sensors", In *Gas Sensors*, Springer, Netherlands, pp. 169-185, 1992.
- [119] R. A. Overfelt, B. W. Jones, S. M. Loo, R. L. Haney, A. J. Neer and et al., "Sensors and prognostics to mitigate bleed air contamination events", *Kansas State University, Progress Report*, 2012.

- trioxide (WO_3) thin films”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 98(2), pp. 401-405, 2006.
- [148] J. Singh and D. E. Wolfe, “Review nano and macro-structured component fabrication by electron beam-physical vapor deposition (EB-PVD)”, *Journal of materials Science*, vol. 40, pp. 1-26, 2005.
- [149] P. J. Kelly and R. D. Arnell, “Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications”, *Vacuum*, vol. 56, pp. 159-172, 2000.
- [150] G. Korotcenkov, “The role of morphology and crystallographic structure of metal oxides in response of conductometric-type gas sensors”, *Materials Science and Engineering*, vol. 61, pp. 1-39, 2008.
- [151] N. Kakati, S. H. Jee, S. H. Kim, J. Y. Oh and Y. S. Yoon, “Thickness dependency of sol-gel derived ZnO thin films on gas sensing behaviors”, *Thin Solid Films*, vol. 519, pp. 494-498, 2010.
- [152] C. Cantalini, W. Wlodarski, Y. Li, M. Passacantando, S. Santucci and et al., “Investigation on the O_3 sensitivity properties of WO_3 thin films prepared by sol-gel, thermal evaporation and RF sputtering techniques” *Sensors and Actuators B*, vol. 64, pp. 182-188, 2000.
- [153] F. Hossein-Babaei and M. Orvatinia, “Analysis of thickness dependence of the sensitivity in thin film resistive gas sensors”, *Sensors and Actuators B*, vol. 89, pp. 256-261, 2003.
- [154] M. H. Seo, M. Yuasa, T. Kida, J. S. Huh, K. Shimano and et al., “Gas sensing characteristics and porosity control of nanostructured films composed of TiO_2 nanotubes”, *Sensors and Actuators B*, vol. 137, pp. 513-520, 2009.
- [155] A. M. Ruiz, A. Cornet, K. Shimano, J. R. Morante and N. Yamazoe, “Effects of various metal additives on the gas sensing performances of TiO_2 nanocrystals obtained from hydrothermal treatments”, *Sensors and Actuators B*, vol. 108(1), pp. 34-40, 2005.
- [156] <http://www.fisinc.co.jp>, “FIS gas sensor SP3-AQ2 for air quality controls (VOCs): datasheet”, pdf, Last visited on 9-May-2015.
- [157] L. H. Qian, K. Wang, Y. Li, H. T. Fang, Q. H. Lu and X. L. Ma, “CO sensor based on Au-decorated SnO_2 nanobelt”, *Materials chemistry and physics*, vol. 100(1), pp. 82-84, 2006.
- [158] H. Song, L. Zhang, C. He, Y. Qu, Y. Tian and Y. Lv, “Graphene sheets decorated with SnO_2 nanoparticles: in situ synthesis and highly efficient materials for cataluminescence gas sensors”, *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21(16), pp. 5972-5977, 2011.
- [133] X. Zhou, O. T. Sorensen and Y. Xu, “Defect structure and oxygen sensing properties of Mg-doped SrTiO_3 thick film sensors”, *Sensors and Actuators B*, vol. 41, pp. 177-182, 1997.
- [134] S. R. Morrison, “Mechanism of semiconductor gas sensor operation”, *Sensors and Actuators B*, vol. 11, pp. 283-287, 1987.
- [135] N. Barsan and U. Weimar, “Conduction model of metal oxide gas sensors” *Journal of Electroceramics*, vol. 7, pp. 143-167, 2001.
- [136] N. Yamazoe, K. Suematsu and K. Shimano, “Gas reception and signal transduction of neat tin oxide semiconductor sensor for response to oxygen”, *Thin Solid Films*, vol. 548, pp. 695-702, 2013.
- [137] C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang and R. Gao, “Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors”, *Sensors*, vol. 10, pp. 2088-2106, 2010.
- [138] I. D. Kim, A. Rothschild and H. L. Tuller, “Advances and new directions in gas-sensing devices”, *Acta Materialia*, vol. 61, pp. 974-1000, 2013.
- [139] C. J. Brinker, A. J. Hurd, P. R. Schunk, G. C. Frye and C. S. Ashley, “Review of sol-gel thin film formation”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 147, pp. 424-436, 1992.
- [140] J. Livage and D. Ganguli, “Sol-gel electrochromic coatings and devices: a review”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 68, pp. 365-381, 2001.
- [141] L. Znaidi, “Sol-gel-deposited ZnO thin films: a review”, *Materials Science and Engineering: B*, vol. 174, pp. 18-30, 2010.
- [142] D. Perednis and L. J. Gauckler, “Thin film deposition using spray pyrolysis”, *Journal of Electroceramics*, vol. 14, pp. 103-111, 2005.
- [143] P. S. Patil, “Versatility of chemical spray pyrolysis technique”, *Materials Chemistry and physics*, vol. 59, pp. 185-198, 1999.
- [144] D. Jadsadapattarakul, C. Euvananont, C. Thanachayanont, J. Nukeaw and T. Sooknoi, “Tin oxide thin films deposited by ultrasonic spray pyrolysis”, *Ceramics International*, vol. 34, pp. 1051-1054, 2008.
- [145] U. Mennicke and T. Salditt, “Preparation of solid-supported lipid bilayers by spin-coating”, *Langmuir*, vol. 18, pp. 8172-8177, 2002.
- [146] J. H. Park, and T. S. Sudarshan, “Chemical vapor deposition”, *ASM International, USA*, 2001.
- [147] M. G. Hutchins, O. Abu-Alkhair, M. M. El-Nahass and K. A. El-Hady, “Structural and optical characterisation of thermally evaporated tungsten

- [166] F. Hossein-Babaei, P. Shabani and M. Azadnia, "Air-stable electrical conduction in oxidized poly [2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-p-phenylene vinylene] thin films", *Applied Physics Letters*, vol. 103(22), pp. 223303-223308, 2013.
- [167] <http://www.infoserve.sandia.gov>, "Chemiresistor microsensors for in-situ monitoring of volatile organic compounds: final LDRD report", pdf, Last visited on 9-May-2015.
- [168] C.S Lee, S. K. Kim and M. Kim, "Ion-sensitive field-effect transistor for biological sensing", *Sensors*, vol. 9(9), pp. 7111-7131, 2009.
- [169] T. Someya, A. Dodabalapur, J. Huang, K. C. See and H. E. Katz, "Chemical and physical sensing by organic field-effect transistors and related devices", *Advanced Materials*, Vol. 22, No. 34, pp. 3799-3811, 2010.
- [170] J. Rudnicka, T. Kowalkowski, T. Ligor and B. Buszewski, "Determination of volatile organic compounds as biomarkers of lung cancer by SPME-GC-TOF/MS and chemometrics", *Journal of Chromatography B*, vol. 879, pp. 3360-3366, 2011.
- [171] O. D. Sparkman, Z. Penton and F. G. Kitson, "Gas Chromatography and Mass Spectrometry: a Practical guide, 2nd Edition, Academic Press, USA, 2011.
- [172] F. W. Karasek and R. E. Clement, "Basic gas chromatography-mass spectrometry: principles and techniques", 3rd Impression, Elsevier, 2003.
- [173] J. T. Watson and O. D. Sparkman, "Gas chromatography/mass spectrometry", Chapter 10, John Wiley and Sons, New York, 2008.
- [159] S. Moghadam, S. Zendehtell and A. Rouhollahi, "Sensitivity enhancement in SnO₂ based gas sensors by surface decoration with platinum nanoparticles", *The 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tehran, Iran, 2014.
- [160] A. Nguyen and V. C. Potje-Kamloth, "Electrical and chemical sensing properties of doped polypyrrole/gold schottky barrier diodes", *Thin Solid Films*, vol. 338(22), pp. 142-148, 1999.
- [161] C. N. Potje-Kamloth, "Electrical and NO_x gas sensing properties of metallophthalocyanine-doped polypyrrole/silicon heterojunctions," *Thin Solid Films*, vol. 392(11), pp. 113-121, 2001.
- [162] D. Jiang, Y. D. Pan, W. Li, D. Wu and Z. M. Li, "Fabrication and characterization of polyaniline-based gas sensor by ultra-thin film technology", *Sensors and Actuators B*, vol. 81(7), pp. 158-164, 2002.
- [163] C. M. Hangarter, N. Chartuprayoon, S. C. Hernández, Y. Choa and N. V. Myung, "Hybridized conducting polymer chemiresistive nano-sensors", *Nano Today*, vol. 8(1), pp. 39-55, 2013.
- [164] O. SeokáKwon and S. JooáPark, "Highly sensitive and selective chemiresistive sensors based on multidimensional polypyrrole nanotubes", *Chemical Communications*, vol. 48(85), pp. 10526-10528, 2012.
- [165] C. H. Esteves, B. A. Iglesias, R. W. Li, T. Ogawa, K. Araki and et al., "New composite porphyrin-conductive polymer gas sensors for application in electronic noses", *Sensors and Actuators B*, vol. 193, pp. 136-141, 2014.

مروری بر نظریه و کاربرد سیستم‌ها و کنترل کننده های هوشمند بازه‌ای

محمد تشنه‌لب^۱، پوریا جعفری^۲، سید محمد جواد آل‌هاشر^۳

^۱دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، آزمایشگاه سیستم‌های هوشمند و قطب اتوماسیون صنعتی

teshnehlab@eed.kntu.ac.ir

^۲دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، pjafari@ece.usb.ac.ir

^۳دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه کامپیوتر، soheil.alehasher@gmail.com

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۳/۳/۱۷، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۳/۸/۱)

چکیده: در این مقاله دانش بازه‌ای و کاربرد آن در شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی بررسی شده است. دانش بازه‌ای چارچوبی برای بازنمایی دانش ضمنی - حدودی بشر با استفاده از روش‌های محاسباتی مبتنی بر گرانول‌های اطلاعاتی مانند مجموعه‌های فازی و مجموعه‌های راف می‌باشد. کنترل کننده‌ها و سیستم‌های مبتنی بر دانش بازه‌ای و محاسبات گرانولی به اصطلاح کنترل کننده‌ها و سیستم‌های هوشمند بازه‌ای گفته می‌شوند. کنترل کننده‌ها و سیستم‌های هوشمند بازه‌ای قادر هستند تا با انواع ابهامات و عدم قطعیت‌ها کار کنند. تحقیقات متعدد در دو دهه گذشته ثابت کرده است که کنترل کننده‌ها و سیستم‌های هوشمند بازه‌ای نسبت به همتایانشان که از روش‌های معمول استفاده می‌کنند از توانایی بالاتری در پردازش داده‌ها به خصوص در شرایط نویزی برخوردار هستند و در شرایط یکسان کارایی بالاتری را ارائه می‌دهند. در این مقاله مجموعه‌های راف، شبکه‌های عصبی راف، مجموعه‌های فازی نوع - ۲ و برخی از کاربردهای آنها بطور فشرده مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: دانش بازه‌ای، محاسبات گرانولی، سیستم‌های هوشمند بازه‌ای، شبکه‌های عصبی راف، کنترل کننده‌های فازی نوع ۲

An Overview of the Theory and Applications of Interval-based Intelligent Systems and Controllers

Pourya Jafari, Seyed Mohammad Javad Alhasher, Mohammad Teshnehlab

Abstract: Interval knowledge and its application in Neural Networks and Fuzzy systems is introduced in this paper. It is a new paradigm for representation of human's partial-implicit knowledge which applies granular information-based computational methods, e.g., rough sets and fuzzy sets. The interval-based intelligent systems and controllers are ones used interval knowledge and granular computing approaches. These systems and controllers are able to deal with the types of vagueness and uncertainties. During past two decades, several researches have proved that the interval-based intelligent system are more capable than ones use traditional approaches in order to processes of data, especially in noisy situations. In this paper, rough sets theory, rough set neural networks, and theory of fuzzy type2 as most important interval knowledge approaches are presented, and also some their applications are summarized.

Keywords: Interval knowledge, Granular computing, Interval-based intelligent systems, Rough neural networks, Fuzzy type - 2 controllers.

۱- مقدمه

ناسازگاری در داده‌ها، چارچوبی را برای اکتساب دانش در مواجهه با ابهام و عدم قطعیت فراهم می‌آورد. در این بخش مفاهیم پایه در مجموعه‌های راف [۳، ۹، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳] بطور مختصر مرور می‌گردد.

۲-۱-۱- سیستم اطلاعاتی

داده‌ها را می‌توان در قالب جدولی که به آن سیستم اطلاعاتی گفته می‌شود، بازنمایی کرد. هر سطر این جدول متناظر با یک شی و هر ستون آن متناظر با یک خصوصیت آن شی است که به آن صفت گفته می‌شود.

زوج $IS = (U, A)$ سیستم اطلاعاتی است که در آن $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ مجموعه‌ای متناهی و غیرتهی از اشیا است و $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ به آن مجموعه جهانی گفته می‌شود و $a: U \rightarrow V_a$ مجموعه‌ای متناهی و غیرتهی از صفات است بطوریکه $a \in A$ بوده و V_a مجموعه مقادیر صفت a است که دامنه a نامیده می‌شود.

۲-۱-۲- رابطه تمایزناپذیری

رابطه تمایزناپذیری این واقعیت را منعکس می‌کند که با استفاده از اطلاعات در دسترس و با توجه به وجود نقصان در دانش، برخی از اشیا نسبت به هم غیر قابل تشخیص هستند. این رابطه به نوعی افزونگی در داده‌ها را نشان می‌دهد. هر مجموعه صفات $B \subseteq A$ رابطه‌ای باینری را روی مجموعه جهانی U مشخص می‌کند که رابطه تمایزناپذیری گفته می‌شود. این رابطه عبارت است از:

$$IND(B) = \{(x, y) \in U^2 : \forall a \in B a(x) = a(y)\} \quad (1)$$

اگر $(x, y) \in IND(B)$ ، آنگاه دو شی x و y با توجه به مجموعه صفات B نسبت به هم غیر قابل تشخیص هستند. رابطه بالا دارای خواص بازتابی، تقارنی و تعدی است و بنابراین رابطه‌ای هم‌ارز محسوب می‌شود.

۲-۱-۳- کلاس‌های هم‌ارزی

رابطه تمایزناپذیری $IND(B)$ مجموعه جهانی U را به خانواده‌ای از کلاس‌های هم‌ارزی افزایش می‌دهد که با U/B نشان داده می‌شود. همچنین کلاس هم‌ارزی شی x ، یعنی بلاکی از افزایش U/B که شامل شی x است با $B(x)$ نشان داده شده و به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$B(x) = \{y \in U : (x, y) \in IND(B)\} \quad (2)$$

این کلاس‌ها هم‌ارزی مجموعه‌های ابتدایی و به عبارتی دیگر گرانول‌های ابتدایی گفته می‌شوند. همچنین اجتماع تمامی مجموعه‌های ابتدایی مجموعه تعریف پذیر نام دارد.

دانش بازه‌ای^۱ رهیافت نوینی در اکتساب، بازنمایی و پردازش دانش با استفاده از محاسبات در حضور نامعینی و عدم قطعیت^۲ به شمار می‌رود. برخلاف شرایط ایده‌آل دنیای انتزاعی که در آن دانش را می‌توان کامل فرض کرد، در دنیای واقعی ناکامل بودن دانش، که از ابهام و عدم قطعیت ناشی می‌شود، چالش برانگیز است. سوالی که مطرح می‌شود این است که بشر در مواجهه با پدیده‌ها چگونه با ابهام و عدم قطعیت برخورد می‌کند و با دانش ناکامل چگونه می‌تواند این پدیده‌ها را برای حل مسائل آنالیز نماید؟ ادعا این است که بشر در مواجهه با پدیده‌ها به جای آنالیز آنها با استفاده از اطلاعات دقیق، اطلاعات حدودی را به عنوان عناصر ابتدایی دانش بکار می‌برد. این اطلاعات حدودی که در واقع به شکل بازه‌هایی انتزاعی هستند و با توابع عضویت، اعداد بازه‌ای، مجموعه‌ها، خوشه‌ها و نظایر آن بازنمود می‌شوند، به گرانول‌های اطلاعاتی^۳ موسومند. اصطلاح گرانولی بودن اطلاعات و گرانوله‌سازی اطلاعات بطور صریح ابتدا توسط زاده در [۲۰۱] و پالاک در [۴۰۳] مطرح گردید. این بخش از حوزه تحقیقاتی تحت عنوان محاسبات گرانولی در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران حوزه هوش محاسباتی [۵، ۶، ۷، ۸ و ۹] قرار گرفته است. مجموعه‌های فازی [۱۰]، محاسبه با کلمات [۱۱]، مجموعه‌های راف [۱۲] و فضای تقریب [۱۳]، مجموعه‌های فازی-راف^۴ و راف-فازی^۵ [۱۴، ۱۵ و ۱۶] و محاسبات بازه‌ای^۶ [۱۷ و ۱۸] که در آنها بازنمود اطلاعات به صورت حدودی است، همگی روش‌هایی را برای محاسبات گرانولی، گرانوله‌سازی اطلاعات و مدل‌سازی گرانول‌های اطلاعاتی ارائه می‌دهند. در این مقاله در دو بخش مجزا به معرفی و بررسی دو روش هوشمند بازه‌ای پرداخته می‌شود. ابتدا در بخش اول به مطالعه مجموعه‌های راف و کاربرد آن در شبکه‌های عصبی پرداخته شده و در بخش دوم سیستم‌های فازی نوع دوم و کاربردهای آن بررسی می‌شوند.

۲- بخش اول- مجموعه‌های راف و کاربرد آنها

در شبکه‌های عصبی

۲-۱- نظریه مجموعه‌های راف: مفاهیم اولیه

نظریه مجموعه‌های راف که برای آنالیز داده‌ها ارائه شده است را می‌توان یکی از رویکردهای اصلی در اکتساب، بازنمایی و پردازش دانش بازه‌ای به شمار آورد. این نظریه با هدف برخورد با تناقض و

¹ Interval knowledge

² Uncertainty

³ Granularities of information

⁴ Fuzzy rough sets

⁵ Rough fuzzy sets

⁶ Interval Analysis

فضای تقریب و تقریب مجموعه

(۸)

فضای تقریب ساخته شده توسط مجموعه صفات $B \subseteq A$ روی سیستم اطلاعاتی IS که با چندتایی $(U, IND(B))$ نشان داده می‌شود، خصوصیتی تقریبی را برای هر مجموعه $X \subseteq U$ فراهم می‌کند. با توجه به اطلاعاتی که توسط مجموعه صفات $B \subseteq A$ در دسترس است، هر مجموعه $X \subseteq U$ که غیر قطعی است، را می‌توان با دو مجموعه قطعی جایگزین کرد. این تقریب‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\underline{B}(X) = \{x \in U | B(x) \subseteq X\} \quad (۱)$$

$$\overline{B}(X) = \{x \in U | B(x) \cap X \neq \emptyset\} \quad (۲)$$

که $\underline{B}(X)$ و $\overline{B}(X)$ به ترتیب تقریب پایین و تقریب بالای مجموعه X می‌باشند. بر حسب مجموعه صفات $B \subseteq A$ ، تقریب پایین مجموعه‌ی اشیایی است که قطعاً عضو مجموعه X هستند، در حالیکه تقریب بالا شامل مجموعه اشیایی است که ممکن است که عضو مجموعه X باشند.

بر اساس تقریب‌های پایین و بالای مجموعه $X \subseteq U$ ، مجموعه جهانی U را می‌توان، به ناحیه مرزی $BN(X)$ ، ناحیه مثبت $POS(X)$ و ناحیه منفی $NEG(X)$ تقسیم کرد. این نواحی به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$BND(X) = \overline{B}(X) - \underline{B}(X) \quad (۳)$$

$$POS(X) = \underline{B}(X) \quad (۴)$$

$$NEG(X) = U - \overline{B}(X) \quad (۵)$$

بر حسب مجموعه صفات $B \subseteq A$ ، هر عنصر $x \in POS(X)$ به طور قطع به X متعلق است، در حالی که هر عنصر $x \in NEG(X)$ به X متعلق نیست. هر عنصر $x \in BND(X)$ می‌تواند به X متعلق باشد و یا نباشد. بر حسب مجموعه صفات $B \subseteq A$ ، اگر ناحیه مرزی مجموعه X تهی باشد، یعنی $BND(X) = \emptyset$ ، آنگاه مجموعه X صریح و دقیق^۱ است. در غیر اینصورت مجموعه X راف^۲ یا نادقیق است.

۲-۱-۴- انواع ابهام

چهار کلاس پایه مجموعه‌های راف را می‌توان با توجه به تقریب‌های پایین و بالای مجموعه $X \subseteq U$ ، بر حسب مجموعه صفات $B \subseteq A$ ، به صورت زیر تعریف کرد.

$\underline{B}(X) \neq \emptyset$ & $\overline{B}(X) \neq U$, iff X is roughly definable

$\underline{B}(X) = \emptyset$ & $\overline{B}(X) \neq U$, iff X is internally indefinable

$\underline{B}(X) \neq \emptyset$ & $\overline{B}(X) = U$, iff X is externally indefinable

$\underline{B}(X) = \emptyset$ & $\overline{B}(X) = U$, iff X is totally indefinable

۲-۱-۵- صحت تقریب

معیار صحت تقریب بیان می‌نماید که یک مجموعه چقدر راف است. این معیار به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\alpha_B(X) = \frac{card(\underline{B}(X))}{card(\overline{B}(X))} \quad (۶)$$

که $card(X)$ تعداد اعضای مجموعه X را نشان می‌دهد. بدیهی است که $0 \leq \alpha_B(X) \leq 1$ می‌باشد. بر حسب مجموعه صفات $B \subseteq A$ ، اگر $\alpha_B(X) = 1$ آنگاه X صریح و دقیق است. در غیر اینصورت X راف یا نادقیق می‌باشد. صحت تقریب را می‌توان برای اندازه‌گیری کیفیت تقریب کلاس‌های تصمیم روی مجموعه جهانی U استفاده کرد. همچنین معیارهای دیگری را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$1 - \alpha_B(X) \quad (۷)$$

$$\beta_B(X) = 1 - \frac{card(BND(X))}{card(U)} \quad (۸)$$

۲-۱-۶- تابع عضویت راف

تابع عضویت راف، احتمال شرطی تعلق عنصر $x \in U$ به مجموعه $X \subseteq U$ را بیان می‌کند. از نظر اطلاعات بیان شده توسط کلاس هم‌ارز $B(x)$ ، به عنوان درجه تعلق عنصر x به مجموعه X تفسیر می‌گردد. تابع عضویت راف به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\mu_X^B(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \notin X \\ \frac{card(B(x) \cap X)}{card(X)} & \text{if } x \in X \end{cases} \quad (۹)$$

که در آن $x \in X \subseteq U$ است. مقدار $\mu_X^B(x)$ را می‌توان عنوان درجه تعلق عنصر x به مجموعه X بر حسب مجموعه صفات $B \subseteq A$ تفسیر کرد. این تعریف در مقابل تعریف کلاسیک مجموعه، دانش ذهنی را در مورد عناصر مجموعه جهانی منعکس می‌کند.

می‌توان با استفاده از تابع عضویت راف، ناحیه مرزی و تقریب‌های پایین و بالای مجموعه $X \subseteq U$ را به صورت زیر باز تعریف کرد.

$$\underline{B}(X) = \{x \in U | \mu_X^B(x) = 1\} \quad (۱۰)$$

$$\overline{B}(X) = \{x \in U | \mu_X^B(x) > 0\} \quad (۱۱)$$

$$BND(X) = \{x \in U | 0 < \mu_X^B(x) < 1\} \quad (۱۲)$$

اکنون می‌توان دو تعریف مجموعه راف را به صورت زیر ارائه کرد.

تعریف ۱- مجموعه X بر حسب مجموعه صفات $B \subseteq A$

راف است اگر $\underline{B}(X) \neq \overline{B}(X)$

^۱ Crisp

^۲ Rough

یافته $\partial_C : U \rightarrow \text{Pow}(x_{d \in D} V_d)$ را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد.

$$\partial_C(x) = \{i : \exists x' \in U [(x', x) \in \text{IND}(C) \text{ and } d(x') = i]\} \quad (17)$$

که $\text{Pow}(V_d)$ مجموعه توانی ضرب کارترین $x_{d \in D} V_d$ از خانواده $\{V_d\}_{d \in D}$ است. سیستم تصمیم DT سازگار یا قطعی گفته می‌شود، اگر برای هر $x \in U$ ، $\text{card}(\partial_C(x)) = 1$ ، در غیر اینصورت سیستم تصمیم DT ناسازگار یا غیر قطعی است. از این رو، سیستم تصمیم ناسازگار است اگر شامل اشیایی با تصمیمات متفاوت اما بر حسب صفات شرطی تمایزناپذیر باشد. هر مجموعه شامل همه اشیاء با مقادیر یکسان تصمیم تعمیم یافته، کلاس تصمیم تعمیم یافته گفته می‌شود.

۲-۲-۲-۲-۲ وابستگی صفات

یکی دیگر از موضوعات مهم در آنالیز داده‌ها کشف وابستگی بین صفات در یک سیستم تصمیم است. مجموعه صفات D کاملاً به صفات C وابسته است، اگر مقادیر صفات C منحصرماً مقادیر صفات D را تعیین کنند. به عبارت دیگر، تصمیمات D کاملاً به صفات C وابسته است اگر وابستگی کارکردی بین مقادیر C و D وجود داشته باشد. از این رو، $C \Rightarrow D$ اگر و فقط اگر قاعده (۱۶) برای هر $x \in U$ روی DT صحیح باشد. همچنین تصمیمات D به صفات C وابسته است اگر وابستگی کارکردی بین مقادیر C و D با درجه‌ای وجود داشته باشد. بطور رسمی، گفته می‌شود که D با درجه $k \in [0, 1]$ به C وابسته است و با $C \Rightarrow_k D$ نشان داده می‌شود، اگر درجه وابستگی به صورت زیر تعریف گردد.

$$k = \gamma(C, D) = \frac{\text{card}(\text{POS}_C(D))}{\text{card}(U)} \quad (14)$$

که در آن

$$\text{POS}_C(D) = \bigcup_{X \in U/D} C(X) \quad (15)$$

که ناحیه مثبت افزاز U/D بر حسب C گفته می‌شود. مجموعه همه عناصری از U است که به وسیله C می‌توانند منحصرماً با بخش‌هایی از افزاز U/D کلاس‌بندی شوند. اگر $k = 1$ باشد، گفته می‌شود که D کاملاً وابسته به C است. اگر $k < 1$ باشد، گفته می‌شود که D جزء وابسته به C است. همچنین اگر $k = 0$ باشد، آنگاه ناحیه مثبت افزاز U/D بر حسب C تهی است. بدیهی است که اگر D کاملاً وابسته به C باشد آنگاه $\text{IND}(C) \subseteq \text{IND}(D)$. بطور خلاصه، D کاملاً وابسته به (جزء) C است، اگر همه (برخی) عناصر مجموعه جهانی U را بتوان با بلاک‌های افزاز U/D منحصرماً توسط C کلاس‌بندی کرد.

تعریف ۲- مجموعه X بر حسب مجموعه صفات $B \subseteq A$ راف است اگر $0 < \mu_X^B(x) < 1$

این دو تعریف معادل نیستند. تعریف اول بر اساس عملگرهای تقریب بوده و ناحیه مرزی غیر تهی را نشان می‌دهد. در حالیکه تعریف دوم بر اساس تابع عضویت راف است که مقدار عضویت عنصر به مجموعه را نشان می‌دهد.

۲-۱-۲-۲ وابستگی کارکردی

برای سیستم اطلاعاتی مفروضی مانند $IS = (U, A)$ ، وابستگی کارکردی صفت D به C در A با $C \Rightarrow D$ نشان داده می‌شود. این وابستگی اگر و فقط اگر $\text{IND}(C) \subseteq \text{IND}(D)$ برقرار است.

۲-۲-۲ سیستم تصمیم و قواعد تصمیم

مجموعه صفات ممکن است به دو زیر مجموعه صفات شرطی $C \subset A$ و صفات تصمیم $D = A - C$ تقسیم شود. صفات شرطی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده اشیاء و صفات تصمیم، که معمولاً دو مقادیراند، کلاس شی را نشان می‌دهند. یک سیستم تصمیم، یک سیستم اطلاعاتی با صفت تصمیم است. بطور رسمی، یک سیستم تصمیم چندتایی $DT = (U, C, D)$ است، که در آن $d : U \rightarrow V_d$ و $a : U \rightarrow V_a$ یک صفت تصمیم و $a \in C$ یک صفت شرطی است و $V = \bigcup \{V_a : a \in C\} \cup \{V_d : d \in D\}$.

در موردی که $C \Rightarrow d$ کاملاً برقرار باشد، گفته می‌شود که سیستم تصمیم DT قطعی یا سازگار و وابستگی $C \Rightarrow d$ دقیق است. آنگاه برای سرتاسر هر کلاس هم‌ارزی $C(x)$ ، تصمیم منحصر بفر $d(x)$ وجود دارد. در غیر اینصورت، وابستگی $C \Rightarrow d$ با درجه‌ای برقرار است و گفته می‌شود که سیستم تصمیم DT غیرقطعی یا ناسازگار و وابستگی $C \Rightarrow d$ نادقیق است. هر شی در جدول تصمیم DT، یک قاعده تصمیم را مشخص می‌کند که هر عبارتی است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\wedge \{a = a(x) : a \in C, a(x) \in V_c\} \Rightarrow \wedge \{d = d(x) : d \in D, d(x) \in V_d\} \quad (13)$$

این قاعده تصمیم صحیح یا مطمئن است اگر برای هر شی، ارضای سمت چپ آن سمت راست را نیز برآورده کند یا به عبارت دیگر سازگار باشد، و در غیر اینصورت با درجه‌ای صحیح یا محتمل است. تعداد قواعد سازگار به تمام قواعد جدول تصمیم فاکتور سازگاری گفته می‌شود.

۲-۲-۱-۲ تصمیم تعمیم یافته

برای هر سیستم تصمیم $DT = (U, C, D)$ ، تابع تصمیم تعمیم

۲-۲-۳- کاهش و هسته

کاهش زیر مجموعه‌ای از صفات است که دانش در مجموعه داده‌ها بطور کامل مشخص نماید. این به معنای آن است که می‌توان بدون ایجاد نقصان در دانش و با حفظ ویژگی‌های اساسی، برخی از داده‌های غیر ضروری را از مجموعه داده‌ها حذف کرد. کاهش را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای کافی از ویژگی‌ها تصور کرد. فرض کنید که $IS = (U, A)$ ، یک سیستم اطلاعاتی و $B \subseteq A$ زیر مجموعه‌ای از صفات باشد. اگر $a \in B$ غیر ضروری باشد، آنگاه $B' = B - \{a\}$ یک مجموعه کاهشی از صفات است. بطوریکه $IND(B') = IND(B)$. همچنین هسته مجموعه صفات ضروری است که در تمامی مجموعه‌های کاهشی وجود دارند. یعنی:

$$CORE(B) = \bigcap RED(B) \quad (۱۶)$$

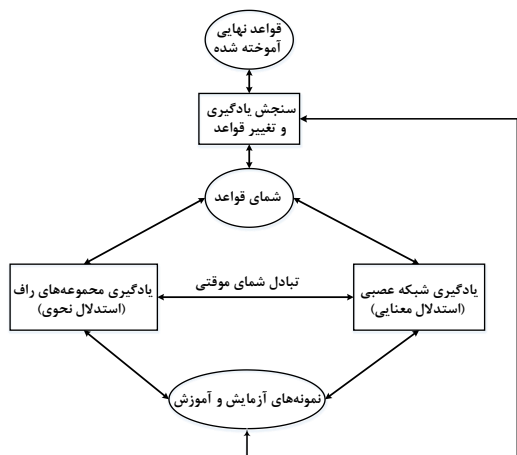
فرض کنید که $DT = (U, C, D)$ ، یک سیستم تصمیم و C و D به ترتیب مجموعه صفات شرط و تصمیم باشد. آنگاه $C' \subseteq C$ یک کاهش از C است، اگر C' مجموعه‌ای کمیته از C باشد. بطوریکه

$$\gamma(C, D) = \gamma(C', D) \quad (۱۷)$$

به اشتراک همه کاهش‌ها هسته گفته می‌شود. بنابراین هسته شامل صفاتی است که بدون فروپاشی ساختار افزاز مجموعه جهانی، از سیستم اطلاعاتی حذف ناپذیرند. هسته را می‌توان به عنوان مجموعه صفات ضروری تصور کرد.

۲-۳- شبکه‌های عصبی راف

مجموعه‌های راف به نحوه تفکر منطقی بشر نزدیک است، قابلیت تفسیر داده‌ها و کاهش افزونگی‌ها را دارد و می‌تواند دانش را بطور صریح بازنمایی کند، اما فاقد تحمل‌پذیری در برابر نویز موجود در داده‌ها است. از طرف دیگر شبکه‌های عصبی به نحو تفکر شهودی بشر نزدیک است، قابلیت پردازش موازی، خود تطبیقی و یادگیری دارد و می‌تواند مسائل پیچیده و غیر خطی را حل کند. هر چند در برابر نویز موجود در داده‌ها تحمل‌پذیر است. اما فرآیند آموزش آن طولانی بوده و نمی‌تواند دانش را بطور صریح بازنمایی کند. از این رو، به نظر می‌رسد با ترکیب مجموعه‌های راف و شبکه‌های عصبی، نقطه ضعف یکی توسط توانایی دیگری بر طرف می‌شود. اولین تلاش در زمینه ترکیب مجموعه‌های راف و شبکه‌های عصبی در [۲۳] انجام شد. که در آن یک روش آموزش ترکیبی از یادگیری مجموعه‌های راف و یادگیری عصبی برای مواجه با اطلاعات نادقیق و غیر قطعی ارائه گردید. شکل ۱ چارچوب کلی الگوریتم ارائه شده در [۲۳] را نشان می‌دهد.



شکل ۱- چارچوب کلی ادغام یادگیری مجموعه راف و یادگیری عصبی [۲۳]

بطور کلی، دو رویکرد اصلی در ترکیب مجموعه‌های راف و شبکه‌های عصبی وجود دارد: ترکیب مجزا، و ترکیب ادغامی. در ترکیب مجزا، این دو ایده به صورت دو سیستم مستقل از هم با یکدیگر ترکیب می‌شوند، در حالیکه در ترکیب ادغامی، این دو ایده به صورت یک سیستم واحد با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

۲-۴- مجموعه‌های راف در پیش‌پردازشگر داده‌ها

از آنجا که نظریه مجموعه راف اصالتاً روشی برای پردازش داده‌ها بوده و ابزارهای مفیدی را برای حذف افزونگی‌ها از اطلاعات ناکامل فراهم می‌کند، بدیهی است که دیدگاه غالب در ترکیب مجموعه‌های راف با شبکه‌های عصبی، مجموعه‌های راف را به عنوان پیش‌پردازشگر داده‌ها ورودی به شبکه عصبی استفاده می‌کند. در این دیدگاه مجموعه‌های راف معمولاً به منظور انتخاب ویژگی‌ها و کاهش ابعاد بردار ورودی به شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این مطالعات می‌توان به [۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹ و ۳۰] اشاره کرد. شکل ۲ چارچوب کلی چنین ترکیب‌سازی را نشان می‌دهد.



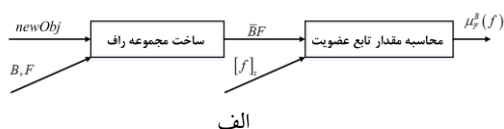
شکل ۲- رویکرد مجزا در ترکیب مجموعه‌های راف و شبکه‌های عصبی، استفاده از مجموعه‌های راف در پیش‌پردازش داده‌های ورودی به شبکه عصبی

۷-۲- ترکیب مجموعه‌های فازی، مجموعه‌های راف و شبکه‌های عصبی

تاکنون روش‌های متنوعی برای ترکیب مجموعه‌های فازی، مجموعه‌های راف و شبکه‌های عصبی در یک قالب ترکیبی ارائه شده است. در [۳۴] از مجموعه‌های راف - فازی برای استخراج ویژگی‌های مهم و از الگوریتم خوشه‌بندی k-نزدیکترین همسایه برای کلاس‌بندی استفاده شد، در [۳۵] یک معماری ماژولار تکاملی برای شبکه چند لایه پرسپترون فازی در ترکیب با مجموعه‌های راف پیشنهاد شده است، در [۳۶] توابع عضویت فازی - راف در معماری شبکه عصبی به کار رفته است، در [۳۷] یک رویکرد هیبریدی مبتنی بر مجموعه‌های راف و ANFIS برای داده‌های با ابعاد بالا معرفی شده است که در آن مجموعه‌های راف برای کاهش ابعاد ویژگی، تعیین اتصالات بین لایه‌های اول و دوم، و پارامترهای لایه چهارم استفاده شده است، در [۳۸] شبکه عصبی فازی - راف و کاربردهای آن در انتخاب ویژگی مورد بررسی قرار گرفته است، در [۳۹] یک معماری جدید عصبی - فازی - راف برای کلاس‌بندی داده‌ها با مقادیر ناقص ارائه شده است.

۸-۲- محاسبات عصبی راف مبتنی بر تابع عضویت راف

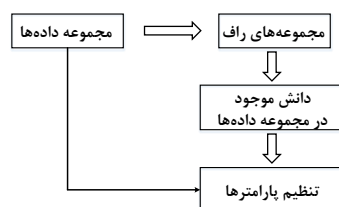
در [۴۰ و ۴۱] نون راف تقریب (شکل ۵ - الف) و نون راف تصمیم (شکل ۵ - ب) معرفی شده است. معماری شبکه عصبی تشکیل شده از این نوع نون‌ها دو لایه دارد، که لایه اول شامل تعدادی نون راف تقریب و لایه دوم شامل یک نون تصمیم می‌باشد. نون‌های تقریب درجه همپوشانی سیگنال‌های ورودی و کلاس‌های هم‌ارزی را محاسبه می‌کنند، و سپس نون تصمیم که مجموعه قواعد تصمیم را شبیه‌سازی می‌کند، یکی از قواعد با کمترین خطا را انتخاب می‌کند. از چنین شبکه‌ای برای کالیبراسیون کیفیت نرم‌افزار [۴۲] و آنالیز سیگنال [۴۳] استفاده شده است. محاسبات و دیاگرام نون‌های تقریب و تصمیم در ادامه شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- الف) دیاگرام نون راف تقریب، ب) دیاگرام نون راف تصمیم

۵-۲- استفاده از مجموعه‌های راف در تنظیم پارامترهای شبکه عصبی

یکی از مسائل مهم در شبکه‌های عصبی، تنظیم اولیه پارامترهای آن است. از جمله کاربردهای مجموعه راف استخراج دانش نهفته در داده‌ها، از قبیل هسته، مجموعه صفات کاهش‌یافته و ضرایب وابستگی صفات، برای تنظیم پارامترهای ساختاری شبکه عصبی مانند تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نون‌های هر لایه، اتصالات بین نون‌ها و یا تنظیم مقادیر اولیه پارامترهای شبکه عصبی مانند مقادیر اولیه وزن اتصالات و تعداد تکرارهای آموزش است. از جمله این مطالعات می‌توان به [۳۱] اشاره کرد. شکل ۳ چارچوب کلی چنین ترکیب‌سازی را نشان می‌دهد.

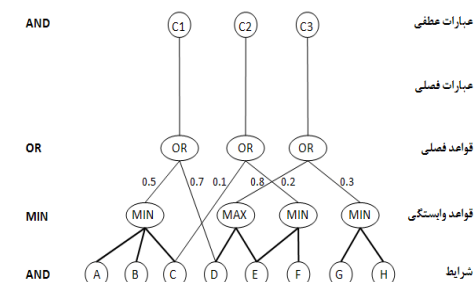


شکل ۳- ترکیب مجموعه‌های راف و شبکه‌های عصبی، استفاده از مجموعه‌های راف در تنظیم پارامترهای شبکه عصبی

۶-۲- طراحی معماری شبکه عصبی مبتنی بر مجموعه‌های راف

قواعد تصمیم استخراج شده از پردازش داده‌ها توسط مجموعه‌های راف را می‌توان بطور مستقیم در طراحی معماری یک کلاس‌بندی کننده شبکه عصبی اعمال کرد. در این رویکرد ابتدا ضرایب وابستگی و قواعد تصمیم از مجموعه داده‌ها استخراج می‌شوند، سپس یک کلاس‌بندی کننده شبکه عصبی معمولاً با چندین لایه AND و OR، min و max ایجاد می‌شود به گونه‌ای که اتصالات بین نون‌های آن قواعد تصمیم استخراج شده را باز نمود می‌کنند. همچنین مقادیر اولیه وزن اتصالات در شبکه عصبی برابر با ضرایب وابستگی است که در طول آموزش برای رسیدن به یک کلاس‌بندی مناسب تطبیق می‌یابند. از جمله این مطالعات می‌توان به [۳۲ و ۳۳] اشاره کرد. شکل ۴ ساختار یک کلاس‌بندی کننده شبکه عصبی راف را نشان می‌دهد.

عملگرهای مورد استفاده هر لایه



شکل ۴- بازنمایی قواعد تصمیم در معماری شبکه عصبی در یک

ساختار سلسله مراتبی [۲۳]

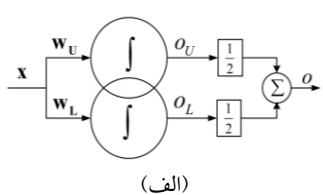
قانونمند^۱ فرآیندهای صنعتی [۶۵]، طراحی کنترل‌گرهای راف-فازی [۶۶]، جبر و هندسه کنترل کننده‌های راف [۶۷]، کنترل کننده‌های میرولولژیکی راف [۶۸]، شبیه‌سازی فرآیندهای کنترل با مجموعه راف [۶۹]، کنترل فازی با مجموعه راف [۷۰]، و کنترل ماهواره [۷۱] اشاره کرد. هر چند این تحقیقات پایه در مقایسه با کاربردهای منطق فازی در کنترل اندک است اما بطور کلی اصولی را برای مطالعات کاربردی‌تر بعدی ایجاد کرده‌اند، بطوریکه در دهه اخیر مبحث کنترل راف همانند کنترل فازی در مسیر رو به رشد قابل قبولی قرار گرفته است.

۲-۱۰- شبکه‌های عصبی راف مبتنی بر نورن‌های

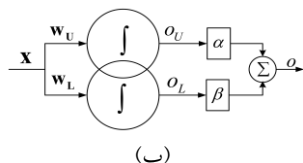
بازه‌ای

یکی دیگر از راه‌ها ادغام کامل مجموعه راف و شبکه عصبی در مدلی یکپارچه استفاده از نورن‌های راف بازه‌ای در معماری شبکه است که اولین بار در [۷۲ و ۷۳] معرفی شده است. یک نورن راف متشکل از دو نورن کرانه پایین و کرانه بالا است، و توانایی پردازش الگوهای راف را دارد و می‌تواند با اندکی تغییر در انواع ساختارهای شبکه عصبی نظیر شبکه‌های پیشرو [۷۳]، شبکه بدون نظارت SOM [۷۴] شبکه فازی - عصبی تطبیقی [۷۵] اعمال شود. **Error! Reference source not found.** ساختار انواع نورن‌های راف را نشان می‌دهد.

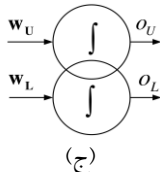
بطوریکه در آن w بردار وزن، x بردار ورودی، o خروجی نورن، α و β ضریب وزن‌دهی خروجی، زیرنویس U حد بالا و زیرنویس L حد پایین متغیر را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶- انواع ساختارهای نورن‌های راف الف- مدل نورن راف با خروجی میانگین ب- مدل نورن راف با خروجی وزن دار ج- ساختار مدل نورن راف مستقل

محاسبات در هریک از انواع نورن‌ها	
$y = \sum_{i=1}^n w_i x_i + v$	نورن معمول که در آن x_i ورودی و w_i وزن بین نورن و ورودی، و v وزن بایاس است
$y_x = f(\overline{BX}, \underline{BX}, X)$	نورن تقریب بالا
$y = f(\overline{BX}, X)$	نورن تقریب پایین
$y_{rule} = \min(e_i, d_i [\mu_x^{A_i}(x) \dots \mu_x^{A_n}(x)])$	نورن تصمیم با گزینش شرطی
$[\mu_x^{A_i}(x) \dots \mu_x^{A_n}(x)]$	

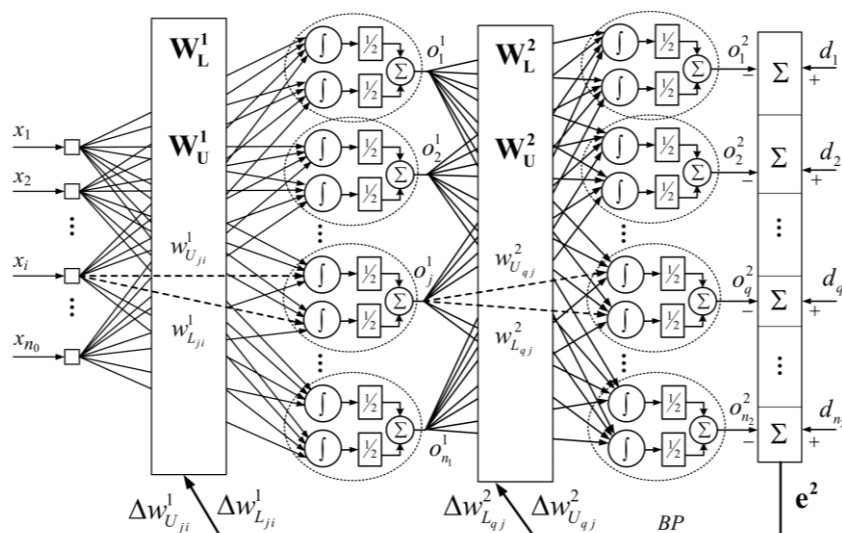
ادامه شکل ۵- جدول محاسبات در نورن‌های راف [۴۳]

۲-۹- کاربردهای مجموعه راف

نظریه مجموعه‌های راف همانند نظریه مجموعه‌های فازی از پشتوانه فلسفی محکمی برخوردار است، عدم قطعیت و ابهام را به خوبی فرموله کرده، توانایی مواجه با دانش ناکامل و باز نمود آنرا دارد و با منطق، قیاس، استدلال تقریبی مرتبط است. منطق راف، جبر آن و ارتباطش با استدلال بولی بطور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه ریاضیدانان قرار گرفته است. از سوی دیگر همانطور که نظریه مجموعه‌های فازی با مبحث کنترل و بازنمایی دانش ضمنی پیوند خورده است، نظریه مجموعه راف با مبحث داده کاوی، و استخراج دانش از درون داده‌ها پیوند خورده است. در واقع، مجموعه‌های راف ابزار قدرتمندی برای کاهش افزونگی‌ها و انتخاب ویژگی‌ها است و به تبع آن سهم عمده‌ی مطالعات مجموعه‌های راف معطوف به کاربرد آن در یادگیری ماشین، بازشناسی الگو و اکتشاف دانش شده است. به عنوان مثال در [۴۴ و ۴۵] روش‌های مجموعه راف در انتخاب ویژگی و بازشناسی الگو، در [۴۶ و ۴۷] کاربرد آن در یادگیری ماشین و اکتشاف دانش، و در [۴۸] کاربرد آن در پردازش سیگنال و پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در زمینه پشتیبانی تصمیم [۴۹ و ۵۰]، تصمیم‌گیری چند معیاره [۵۱]، استدلال تقریبی و یادگیری سلسله مراتبی [۵۲] کاربرد یافته‌اند.

امروزه استفاده از روش‌های هوشمند در صنایع زمینه‌ای است که به صورت روز افزون مورد توجه قرار می‌گیرد. مجموعه‌های راف در کنار سایر روش‌های هوش مصنوعی از جمله مجموعه‌های فازی، شبکه‌های عصبی و پردازش‌های تکاملی در زمینه‌های کاربردهای صنعتی مطرح می‌شود. از جمله تحقیقاتی که در زمینه کاربرد مجموعه‌های راف در حوزه صنایع انجام شده است می‌توان به مواردی از قبیل طراحی و بررسی خواص مواد [۵۳] و بررسی رابطه بین ساختار و فعالیت دارو [۵۴]، طراحی سیستم‌های تصمیم‌یار در پیش‌بینی ورشکستگی [۵۵] و بازار سهام [۵۶]، و تشخیص عیوب [۵۷ و ۵۸] اشاره کرد. علاوه بر این، یکی از کاربردهای مورد توجه نظریه مجموعه‌های در صنایع استفاده از آن در حوزه کنترل هوشمند [۵۹، ۶۰، ۶۱ و ۶۲] است. برخی از تحقیقات ابتدایی در این زمینه عبارتند از اکتساب الگوریتم‌های کنترل [۶۳]، مدل‌سازی و کنترل با استفاده از مجموعه راف [۶۴]، کنترل

¹ Rule Base



شکل ۷- ساختار شبکه عصبی راف کامل

درون نون است. نون راف j -ام لایه میانی از طریق وزن‌های حد بالا و حد پایین بین لایه ورودی و لایه میانی با سیگنال ورودی تحریک می‌شود. پس هر نون لایه میانی دارای مجموع وزن دار ورودی حد بالا و حد پایین است. خروجی نون j -ام لایه میانی نیز دارای حد بالا و حد پایین به صورت زیر است. همچنین نوع تابع درونی هر نون راف می‌تواند تک قطبی، دو قطبی و هر تابع مشتق‌پذیر دیگر در نظر گرفته شود. سپس خروجی هر نون لایه فعال ساز اول عبارت است از:

$$o_{U_j}^1(k) = \max\left(f_j^1\left(\text{net}_{L_j}^1(k)\right), f_j^1\left(\text{net}_{U_j}^1(k)\right)\right) \quad (21)$$

$$o_j^1(k) = \frac{o_{U_j}^1(k) + o_{L_j}^1(k)}{2} \quad (22)$$

که در آن $j = 1, 2, \dots, n_1$ می‌باشد.

الگوریتم پیشرو در لایه فعال ساز دوم (لایه خروجی):

از آنجاییکه نون‌های لایه خروجی نیز به صورت نون راف مدل میانگین تعریف شده‌اند پس در هر نون لایه خروجی و وزن‌های مربوط به آن دو قسمت حد بالا و حد پایین وجود دارد. به عنوان مثال برای نون k -ام در لایه خروجی خواهیم داشت:

$$\text{net}_{L_q}^2(k) = \sum_{j=1}^{n_1} w_{L_{qj}}^2(k) o_j^1(k) \quad (23)$$

$$\text{net}_{U_q}^2(k) = \sum_{j=1}^{n_1} w_{U_{qj}}^2(k) o_j^1(k) \quad (24)$$

$$o_{L_q}^2(k) = \min\left(f_q^2\left(\text{net}_{L_q}^2(k)\right), f_q^2\left(\text{net}_{U_q}^2(k)\right)\right) \quad (25)$$

$$o_{U_q}^2(k) = \max\left(f_q^2\left(\text{net}_{L_q}^2(k)\right), f_q^2\left(\text{net}_{U_q}^2(k)\right)\right) \quad (26)$$

شبکه عصبی راف معرفی شده در [۷۲] دارای ایراداتی از جمله تبادل قطعی اطلاعات بین کرانه‌های بالا و پایین نون با استفاده از عملگرهای \min , \max است، و همچنین به تمهیداتی برای تغییر نوع اتصالات از تحریک به مهار و بالعکس نیاز دارد. مساله دیگر استفاده از الگوریتم قاعده دلتای تعمیم یافته برای آموزش پارامترهای شبکه است. به همین منظور در [۷۶] اصلاحاتی برای رفع ایرادات شبکه عصبی راف پیشنهاد گردید. در شبکه اصلاح شده، (۱) با استفاده از تعریف نرخ تبادل اطلاعات بین کرانه‌های بالا و پایین مشکل مربوط به اعمال عملگرهای قطعی \min و \max حل شده است (۲) اتصالات تحریک و مهار همزمان در مجموع وزن‌دار شده تاثیر می‌گذارند، این مشکل دوم در مورد تمهیدات مربوط به فعالسازی اتصالات و تغییر دائمی بین آنها را حل می‌کند (۳) روش آموزش شبکه بر پایه پس انتشار خطا مبتنی بر گرادینت نزولی مرتبه اول ارائه شده است، که می‌توان را به سادگی به شبکه‌ای با چندین لایه اعمال کرد. شکل ۷ ساختار شبکه عصبی راف و پارامترهای آنرا نشان می‌دهد. که در آن اعداد بالانویس نشان دهنده شماره لایه، و حروف پایین‌نویس شمارش گر نون در آن لایه است. به عنوان مثال o_j^1 به خروجی نون j -ام از لایه فعال‌ساز اول اشاره دارد. همچنین d_q مقدار مطلوب خروجی نون q -ام، e^2 بردار خطای لایه فعال‌ساز دوم و BP روش آموزش پس انتشار خطا است. الگوریتم پیشرو [۷۶]

الگوریتم پیشرو در لایه فعال ساز اول (لایه پنهان):

$$\text{net}_{L_j}^1(k) = \sum_{i=1}^{n_0} w_{L_{ji}}^1(k) x_i(k) \quad (18)$$

$$\text{net}_{U_j}^1(k) = \sum_{i=1}^{n_0} w_{U_{ji}}^1(k) x_i(k) \quad (19)$$

$$o_{L_j}^1(k) = \min\left(f_j^1\left(\text{net}_{L_j}^1(k)\right), f_j^1\left(\text{net}_{U_j}^1(k)\right)\right) \quad (20)$$

که در آن net مجموع وزن‌دار ورودی نون و f تابع فعال‌ساز

$$\begin{aligned} \Delta w_{L_{qj}}^2(k) &= -\eta^2 \frac{\partial E}{\partial w_{L_{qj}}^2}(k) \\ &= -\eta^2 \frac{\partial E}{\partial e_q^2} \frac{\partial e_q^2}{\partial o_q^2} \frac{\partial o_q^2}{\partial net_{L_q}^2} \frac{\partial net_{L_q}^2}{\partial w_{L_{qj}}^2}(k) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \eta^2 e_q^2(k) f_q^{2'}(net_{L_q}^2(k)) o_j^1(k) \\ \Delta w_{L_{qj}}^2(k) &= \eta^2 \delta_{L_{qj}}^2(k) o_j^1(k) \\ \delta_{L_{qj}}^2(k) &= \frac{1}{2} e_q^2(k) f_q^{2'}(net_{L_q}^2(k)) \end{aligned} \quad (32)$$

تنظیم وزن حد بالای لایه خروجی:

$$\begin{aligned} \Delta w_{U_{qj}}^2(k) &= -\eta^2 \frac{\partial E}{\partial w_{U_{qj}}^2}(k) \\ &= -\eta^2 \frac{\partial E}{\partial e_q^2} \frac{\partial e_q^2}{\partial o_q^2} \frac{\partial o_q^2}{\partial net_{U_q}^2} \frac{\partial net_{U_q}^2}{\partial w_{U_{qj}}^2}(k) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \eta^2 e_q^2(k) f_q^{2'}(net_{U_q}^2(k)) o_j^1(k) \\ \Delta w_{U_{qj}}^2(k) &= \eta^2 \delta_{U_{qj}}^2(k) o_j^1(k) \\ \delta_{U_{qj}}^2(k) &= \frac{1}{2} e_q^2(k) f_q^{2'}(net_{U_q}^2(k)) \end{aligned} \quad (34)$$

حالت دوم: اما اگر در نورن q -ام لایه دوم رابطه بصورت

$$f_q^2(net_{L_q}^2(k)) \geq f_q^2(net_{U_q}^2(k))$$

پایین و بالای نورن q -ام عبارت است از:

$$\begin{aligned} o_{L_q}^2(k) &= \\ \min &\left(f_q^2(net_{L_q}^2(k)), f_q^2(net_{U_q}^2(k)) \right) \\ &= f_q^2(net_{U_q}^2(k)) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} &= f_q^2 \left(\sum_{j=1}^{n_1} w_{U_{qj}}^2(k) o_j^1(k) \right) \\ o_{U_q}^2(k) &= \\ \max &\left(f_q^2(net_{L_q}^2(k)), f_q^2(net_{U_q}^2(k)) \right) \\ &= f_q^2(net_{L_q}^2(k)) \end{aligned} \quad (36)$$

پس خروجی حد پایین o_L^2 به w_U^2 و خروجی حد بالا o_L^2 به w_L^2 وابسته است. آموزش پارامتر وزن بین نورن q -ام لایه خروجی و نورن j -ام لایه میانی به فرم زیر خواهد بود.
تنظیم وزن حد پایین لایه خروجی:

$$o_q^2(k) = \frac{o_{U_q}^2(k) + o_{L_q}^2(k)}{2} \quad (27)$$

بطوریکه $q=1,2,\dots,n_2$ می باشد.

۲-۱۰-۱- الگوریتم آموزش پس انتشار شبکه عصبی راف

همانطور که گفته شد روند آموزش پارامترهای این مدل بر اساس بهینه‌سازی گرادیان نزولی مرتبه اول بوده که در ادامه با در نظر گرفتن تابع هزینه زیر محاسبات آن انجام می شود.

$$E(k) = \frac{1}{2} \left(\mathbf{e}^2(k) \right)_{1 \times n_2}^T \mathbf{e}^2(k)_{n_2 \times 1} = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{n_2} (e_q^2(k))^2 \quad (28)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{n_2} (d_q(k) - o_q^2(k))^2$$

که در آن $\mathbf{e}^2(k) = [e_1^2(k), e_2^2(k), \dots, e_{n_2}^2(k)]^T$ بردار

خطای خروجی شبکه می باشد. ابتدا آموزش پارامترهای لایه فعال ساز دوم (خروجی) بررسی می گردد. برای این منظور وزن بین نورن q -ام در لایه خروجی و نورن j -ام در لایه فعال ساز اول به صورت زیر به روز می شود.

الگوریتم پس انتشار در لایه فعال ساز دوم (لایه خروجی):

برای آموزش وزن‌ها در لایه فعال ساز دوم می توان دو حالت را با توجه به حد بالا و حد پایین بودن پارامترهای بازه ای $(\mathbf{f}^2(\mathbf{net}_{U_q}^2(k))$ و $\mathbf{f}^2(\mathbf{net}_{L_q}^2(k))$) در نورن لایه خروجی در نظر گرفت.

حالت اول: اگر در نورن q -ام لایه دوم (لایه خروجی) رابطه $f_q^2(net_{L_q}^2(k)) \leq f_q^2(net_{U_q}^2(k))$ برقرار باشد، آنگاه خروجی حد پایین و حد بالای نورن q -ام لایه خروجی با توجه به روابط زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned} o_{L_q}^2(k) &= \min \left(f_q^2(net_{L_q}^2(k)), f_q^2(net_{U_q}^2(k)) \right) \\ &= f_q^2(net_{U_q}^2(k)) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} &= f_q^2 \left(\sum_{j=1}^{n_1} w_{L_{qj}}^2(k) o_j^1(k) \right) \\ o_{U_q}^2(k) &= \max \left(f_q^2(net_{L_q}^2(k)), f_q^2(net_{U_q}^2(k)) \right) \\ &= f_q^2(net_{L_q}^2(k)) \end{aligned} \quad (30)$$

پس خروجی حد پایین o_L^2 به w_L^2 و خروجی حد بالا o_U^2 به w_U^2 وابسته است. آموزش پارامتر وزن بین نورن q -ام لایه خروجی و نورن j -ام لایه میانی به فرم زیر خواهد بود.

تنظیم وزن حد پایین خروجی:

که در آن $j = 1, 2, \dots, n_1$ و $w_{L_j}^2(k)$ و $w_{U_j}^2(k)$ به ترتیب بردار وزن‌های خروجی حد پایین و حد بالای نورن راف j -ام لایه میانی می‌باشند. عملگر $(**)$ نشان دهنده ضرب آرایه در آرایه متناظر دو ماتریس یا دو بردار است. در این نوع ضرب باید ابعاد دو ماتریس یا دو بردار باهم برابر باشد و ماتریس حاصل ضرب نیز دارای همان ابعاد خواهد بود. نحوه عملکرد این عملگر در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{bmatrix} \rightarrow \quad (45)$$

$$\mathbf{A} * \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_1 b_1 & a_2 b_2 \\ a_3 b_3 & a_4 b_4 \end{bmatrix}$$

الگوریتم پس انتشار در لایه فعال ساز اول (لایه پنهان):

همانطور که در آموزش وزن‌های لایه فعال ساز خروجی نشان داده شد، بزرگتر یا کوچکتر بودن تابع فعال ساز لایه خروجی تغییری در روند آموزش ایجاد نمی‌کند. در نتیجه می‌توان بدون توجه به اختلاف $\mathbf{f}^2(\mathbf{net}_U^2(k))$ و $\mathbf{f}^2(\mathbf{net}_L^2(k))$ به آموزش وزن‌های لایه فعال ساز میانی با توجه به مقادیر $\mathbf{net}_U^1(k)$ و $\mathbf{net}_L^1(k)$ پرداخت.

حالت اول: اگر در نورن j -ام لایه فعال ساز میانی $f_j^1(\mathbf{net}_{L_j}^1(k)) \leq f_j^1(\mathbf{net}_{U_j}^1(k))$ باشد، طبق روال قبل خواهیم داشت:

$$\Delta w_{L_{ji}}^1(k) = -\eta^1 \frac{\partial E}{\partial w_{L_{ji}}^1(k)} = -\eta^1 \left(\frac{\partial E}{\partial \mathbf{e}^2} \frac{\partial \mathbf{e}^2}{\partial \mathbf{o}^2} \frac{\partial \mathbf{o}^2}{\partial \mathbf{o}_L^2} \frac{\partial \mathbf{o}_L^2}{\partial \mathbf{net}_L^2} \frac{\partial \mathbf{net}_L^2}{\partial \mathbf{o}_j^1} \frac{\partial \mathbf{o}_j^1}{\partial \mathbf{o}_{L_j}^1} \frac{\partial \mathbf{o}_{L_j}^1}{\partial \mathbf{net}_{L_j}^1} \frac{\partial \mathbf{net}_{L_j}^1}{\partial w_{L_{ji}}^1} + \right) \quad (46)$$

$$\left(\frac{\partial E}{\partial \mathbf{e}^2} \frac{\partial \mathbf{e}^2}{\partial \mathbf{o}^2} \frac{\partial \mathbf{o}^2}{\partial \mathbf{o}_U^2} \frac{\partial \mathbf{o}_U^2}{\partial \mathbf{net}_U^2} \frac{\partial \mathbf{net}_U^2}{\partial \mathbf{o}_j^1} \frac{\partial \mathbf{o}_j^1}{\partial \mathbf{o}_{L_j}^1} \frac{\partial \mathbf{o}_{L_j}^1}{\partial \mathbf{net}_{L_j}^1} \frac{\partial \mathbf{net}_{L_j}^1}{\partial w_{L_{ji}}^1} \right) (k)$$

$$\Delta w_{L_{ji}}^1(k) = -\eta^1 \left(\mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}^{2'}(\mathbf{net}_L^2(k)) \mathbf{w}_{L_j}^2(k) f_j^{1'}(\mathbf{net}_{L_j}^1(k)) - \right) \quad (47)$$

$$\frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}^{2'}(\mathbf{net}_U^2(k)) \mathbf{w}_{U_j}^2(k) f_j^{1'}(\mathbf{net}_{L_j}^1(k)) x_i(k)$$

$$\Delta w_{L_{ji}}^1(k) = \eta^1 \delta_{L_{ji}}^1(k) x_i(k) \quad (48)$$

$$\Delta w_{U_{ji}}^1(k) = -\eta^1 \left(-\frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}^{2'}(\mathbf{net}_L^2(k)) \mathbf{w}_{L_j}^2(k) f_j^{1'}(\mathbf{net}_{U_j}^1(k)) - \right) \quad (49)$$

$$\frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}^{2'}(\mathbf{net}_U^2(k)) \mathbf{w}_{U_j}^2(k) f_j^{1'}(\mathbf{net}_{U_j}^1(k)) x_i(k)$$

$$\Delta w_{U_{ji}}^1(k) = \eta^1 \delta_{U_{ji}}^1(k) x_i(k) \quad (50)$$

حالت دوم: اگر در نورن j -ام لایه فعال ساز میانی $f_j^1(\mathbf{net}_{L_j}^1(k)) \geq f_j^1(\mathbf{net}_{U_j}^1(k))$ باشد، داریم:

$$\Delta w_{L_{ji}}^2(k) = -\eta^2 \frac{\partial E}{\partial w_{L_{ji}}^2(k)} = -\eta^2 \frac{\partial E}{\partial \mathbf{e}_q^2} \frac{\partial \mathbf{e}_q^2}{\partial \mathbf{o}_q^2} \frac{\partial \mathbf{o}_q^2}{\partial \mathbf{o}_{U_q}^2} \frac{\partial \mathbf{o}_{U_q}^2}{\partial \mathbf{net}_{L_q}^2} \frac{\partial \mathbf{net}_{L_q}^2}{\partial w_{L_{ji}}^2}(k) \quad (37)$$

$$= \frac{1}{2} \eta^2 e_q^2(k) f_q^{2'}(\mathbf{net}_{L_q}^2(k)) o_j^1(k)$$

$$\Delta w_{L_{ji}}^2(k) = \eta^2 \delta_{L_{ji}}^2(k) o_j^1(k) \quad (38)$$

$$\delta_{L_{ji}}^2(k) = \frac{1}{2} e_q^2(k) f_q^{2'}(\mathbf{net}_{L_q}^2(k))$$

تنظیم وزن حد بالای لایه خروجی:

$$\Delta w_{U_{ji}}^2(k) = -\eta^2 \frac{\partial E}{\partial w_{U_{ji}}^2(k)} = -\eta^2 \frac{\partial E}{\partial \mathbf{e}_q^2} \frac{\partial \mathbf{e}_q^2}{\partial \mathbf{o}_q^2} \frac{\partial \mathbf{o}_q^2}{\partial \mathbf{o}_{L_q}^2} \frac{\partial \mathbf{o}_{L_q}^2}{\partial \mathbf{net}_{U_q}^2} \frac{\partial \mathbf{net}_{U_q}^2}{\partial w_{U_{ji}}^2}(k) \quad (39)$$

$$= \frac{1}{2} \eta^2 e_q^2(k) f_q^{2'}(\mathbf{net}_{U_q}^2(k)) o_j^1(k)$$

$$\Delta w_{U_{ji}}^2(k) = \eta^2 \delta_{U_{ji}}^2(k) o_j^1(k) \quad (40)$$

$$\delta_{U_{ji}}^2(k) = \frac{1}{2} e_q^2(k) f_q^{2'}(\mathbf{net}_{U_q}^2(k))$$

رابطه (۳۸) و (۳۹) نشان می‌دهند که تابع حساسیت حد پایین لایه فعال ساز خروجی در هر دو حالت مقدار یکسانی دارد. همچنین در هر دو رابطه (۴۰) و (۴۱) نیز تابع حساسیت حد بالا مشابه است. در نتیجه بدون توجه به تفاوت $\mathbf{f}^2(\mathbf{net}_U^2(k))$ و $\mathbf{f}^2(\mathbf{net}_L^2(k))$ مقدار تابع حساسیت حد بالا و حد پایین لایه دوم فعال ساز به ازای $q = 1, 2, \dots, n_2$ برابر است با:

$$\delta_{L_{ji}}^2(k) = \frac{1}{2} e_q^2(k) f_q^{2'}(\mathbf{net}_{L_q}^2(k)) o_j^1(k) \quad (41)$$

$$\delta_{U_{ji}}^2(k) = \frac{1}{2} e_q^2(k) f_q^{2'}(\mathbf{net}_{U_q}^2(k)) o_j^1(k) \quad (42)$$

به این ترتیب می‌توان به جای بررسی نورن به نورن در لایه خروجی، روابط آموزش وزن‌های بین تمام نورن‌های لایه فعال ساز خروجی و نورن j -ام لایه فعال ساز اول را به صورت برداری نوشت. در این صورت خواهیم داشت:

$$\Delta \mathbf{w}_{U_j}^2(k) = \frac{1}{2} \eta^2 \left[\mathbf{e}^2(k) * \mathbf{f}^{2'}(\mathbf{net}_U^2(k)) \right]_{n_2 \times 1} o_j^1(k) \quad (43)$$

$$= \eta^2 \delta_U^2(k) o_j^1(k)$$

$$\Delta \mathbf{w}_{L_j}^2(k) = \frac{1}{2} \eta^2 \left[\mathbf{e}^2(k) * \mathbf{f}^{2'}(\mathbf{net}_L^2(k)) \right]_{n_2 \times 1} o_j^1(k) \quad (44)$$

$$= \eta^2 \delta_L^2(k) o_j^1(k)$$

$$\mathbf{e}_L^1(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_{L_j}^2(k) \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{e}^2(k) * \mathbf{f}'(\mathbf{net}_L^2(k)) \end{bmatrix}_{n_2 \times 1} \quad (60)$$

$$\mathbf{e}_U^1(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_{U_j}^2(k) \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{e}^2(k) * \mathbf{f}'(\mathbf{net}_U^2(k)) \end{bmatrix}_{n_2 \times 1} \quad (61)$$

۳- بخش دوم سیستم‌های فازی نوع دوم و کاربردهای آن

سیستم‌های فازی نوع اول در سال ۱۹۶۵ توسط پرفسور لطفی عسگرزاده ارائه شدند و تاکنون در زمینه‌های متعددی از قبیل صنعتی، نظامی، تجاری و غیره به صورت موفقیت آمیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال این نوع سیستم‌ها دارای محدودیت در کار کردن با داده های نامعین هستند. کار کردن با داده‌های نامعین شامل مدل سازی آنها و همچنین کمینه کردن اثر آنها در مدل است. نامعینی در حالت‌های متنوعی ظاهر شده بطوریکه مستقل از نوع سیستم و روش ارتباط با آن است. دو نوع مهم از نامعینی‌ها عبارتند از نامعینی زبانی و نامعینی تصادفی. نامعینی زبانی به کلماتی که در ساخت قواعد مقدم و تالی فازی به کار می‌روند بستگی دارد. زیرا هر کلمه مفهوم و معنی متفاوتی بین افراد گوناگون دارد [۷۷ و ۷۸]. به عنوان مثال ممکن است یک نفر سرعت زیاد را ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و نفر دیگر ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت تعریف نماید. اختلاف بین این دو مقدار به عنوان نامعینی در مفهوم کلمه "سرعت زیاد" به حساب می‌آید. نامعینی تصادفی نیز به مفهوم غیرقابل پیش‌بینی بودن برخی پارامترهای مدل اشاره می‌کند. این نامعینی‌ها می‌توانند به صورت نویز در اندازه‌گیری و یا داده های ورودی ظاهر شوند [۷۸]. تئوری احتمال برای کنترل نامعینی‌های تصادفی و سیستم‌های فازی برای مدیریت نامعینی‌های زبانی ارائه شده‌اند. البته در بعضی موارد سیستم فازی برای کار بر روی داده های نامعین زبانی و تصادفی استفاده شده است. در اینگونه موارد سیستم فازی داده‌ی نویزی را دریافت نموده و با وجود اغتشاش تصادفی در سیستم عمل می‌کند.

سیستم‌های فازی مرسوم که به سیستم‌های فازی نوع اول شناخته شده‌اند قادر به مدیریت و کنترل کامل نامعینی‌های زبانی و عددی مربوط به دینامیک محیط‌های ساختار نیافته نمی‌باشند. زیرا در این نوع سیستم‌ها از تابع تعلق دقیق و صریح استفاده می‌شود که قابلیت زیادی برای پوشش عدم قطعیت داده ورودی را ندارد. به همین دلیل دقت قسمت‌های مقدم و تالی در سیستم فازی نوع اول در برخورد با نامعینی‌ها کاهش می‌یابد. همچنین هر سیستم فازی برای محیط مشخصی طراحی شده و می‌تواند تحت شرایط از قبل تعیین شده‌ای بازدهی نسبتاً بهینه‌ای داشته باشد. اما اگر تحت هر عاملی، نامعینی در محیط و یا شرایط حاکم بر سیستم ایجاد شود، کارکرد سیستم فازی نوع اول طراحی شده مناسب نباشد. در نتیجه

$$\Delta w_{L_{ji}}^1(k) = -\eta^1 \left(-\frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}''(\mathbf{net}_L^2(k)) \mathbf{w}_{L_j}^2(k) f_j'(\mathbf{net}_L^1(k)) - \frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}''(\mathbf{net}_U^2(k)) \mathbf{w}_{U_j}^2(k) f_j'(\mathbf{net}_L^1(k)) \right) x_i(k) \quad (51)$$

$$\Delta w_{L_{ji}}^1(k) = \eta^1 \delta_{L_{ji}}^1(k) x_i(k) \quad (52)$$

$$\Delta w_{U_{ji}}^1(k) = -\eta^1 \left(-\frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}''(\mathbf{net}_L^2(k)) \mathbf{w}_{L_j}^2(k) f_j'(\mathbf{net}_U^1(k)) - \frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}''(\mathbf{net}_U^2(k)) \mathbf{w}_{U_j}^2(k) f_j'(\mathbf{net}_U^1(k)) \right) x_i(k) \quad (53)$$

$$\Delta w_{U_{ji}}^1(k) = \eta^1 \delta_{U_{ji}}^1(k) x_i(k) \quad (54)$$

مشخص است که توابع حساسیت حد بالا و حد پایین بدون توجه به تفاوت $f_j'(\mathbf{net}_{L_j}^1(k))$ و $f_j'(\mathbf{net}_{U_j}^1(k))$ عبارتند از:

$$\delta_{L_{ji}}^1(k) = -\frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}''(\mathbf{net}_L^2(k)) \mathbf{w}_{L_j}^2(k) f_j'(\mathbf{net}_L^1(k)) \quad (55)$$

$$-\frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}''(\mathbf{net}_U^2(k)) \mathbf{w}_{U_j}^2(k) f_j'(\mathbf{net}_L^1(k))$$

$$\delta_{U_{ji}}^1(k) = -\frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}''(\mathbf{net}_L^2(k)) \mathbf{w}_{L_j}^2(k) f_j'(\mathbf{net}_U^1(k)) \quad (56)$$

$$-\frac{1}{4} \mathbf{e}^2(k) \mathbf{f}''(\mathbf{net}_U^2(k)) \mathbf{w}_{U_j}^2(k) f_j'(\mathbf{net}_U^1(k))$$

در نتیجه نیازی به بررسی نوردن به نوردن در لایه فعال ساز میانی برای $j=1,2,\dots,n_1$ نیست و می‌توان به صورت برداری روابط آموزش وزن‌های لایه فعال ساز میانی را برای ورودی i -ام نوشت.

$$\Delta w_{U_i}^1(k) = \frac{1}{2} \eta^1 \begin{bmatrix} \mathbf{e}^1(k) * \mathbf{f}'(\mathbf{net}_U^1(k)) \end{bmatrix}_{n_1 \times 1} x_i(k) \quad (57)$$

$$= \eta^1 \delta_{U_i}^1(k) x_i(k)$$

$$\Delta w_{L_i}^1(k) = \frac{1}{2} \eta^1 \begin{bmatrix} \mathbf{e}^1(k) * \mathbf{f}'(\mathbf{net}_L^1(k)) \end{bmatrix}_{n_1 \times 1} x_i(k) \quad (58)$$

$$= \eta^1 \delta_{L_i}^1(k) x_i(k)$$

که در آن $i=1,2,\dots,n_0$ و $\mathbf{e}^1(k)$ خطای پس انتشار شده به لایه فعال ساز اول است. بطوریکه:

$$\mathbf{e}^1(k) = \frac{\mathbf{e}_L^1(k) + \mathbf{e}_U^1(k)}{2} \quad (59)$$

که در آن $\mathbf{e}_L^1(k)$ و $\mathbf{e}_U^1(k)$ به ترتیب خطای حد بالا و حد پایین پس انتشار شده به لایه اول می‌باشند. بطوریکه:

مخابرات دیجیتال غیر خطی متغیر با زمان.
- الگوهای متغیر توصیف شده توسط مشخصه‌های آماری که امکان توصیف آنها با روابط ریاضی متغیر با زمان نیست. مانند دسته بندی قانونمند تصاویر ویدئویی ترافیک.

اطلاعاتی که از فرد خبره با پرسش‌های اگر - آنگاه استخراج می‌شوند. طبیعتاً پاسخ به آنها با توجه به دانش هر فرد خبره با عدم قطعیت و نامعینی همراه خواهد بود. مانند کنترل صحت و تایید برقراری ارتباط در شبکه‌های ATM [۷۸].

این چهار نوع نامعینی که در بالا اشاره شد، منجر به تولید خروجی نامعین در سیستم فازی نوع دوم می‌شوند. در یک سیستم فازی نوع دوم (به عنوان مثال سیستم فازی مرتبه دوم بازه‌ای که پر کاربردترین سیستم فازی نوع دوم است) خروجی به صورت نامعین در یک بازه با استفاده از روش کاهش نوع بدست می‌آید.

۳-۱- مجموعه‌های فازی نوع دوم

یک مجموعه فازی نوع دوم مثل \tilde{A} می‌توان به صورت رابطه (۶۲) بیان شود.

$$\tilde{A} = \{((x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u)) \mid \forall x \in X \quad \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]\} \quad (62)$$

بطوریکه $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ تابع تعلق فازی نوع دوم بود که در بازه $[0, 1]$ صدق خواهد کرد. همچنین می‌توان این مجموعه فازی را به صورت زیر نیز بیان کرد.

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u) \quad (63)$$

$$J_x \subseteq [0, 1]$$

که در آن \int به عمل اجتماع فازی بر روی تمام مقادیر قابل قبول x و u اشاره می‌کند. J_x تابع عضویت اولیه x نام دارد [۸۱].

به علاوه هر مقدار تابع تعلق اول دارای تابع تعلق دیگری است که آن را به صورت فازی بیان می‌کند. این تابع تعلق دوم نیز دارای مقداری در بازه $[0, 1]$ است. این مقدار می‌تواند برای هر متغیر ورودی مثل x یک مقدار مشخص بین دو بازه حد بالا و حد پایین داشته باشد. به عنوان مثال اگر تابع تعلق گوسی باشد می‌توان با بازه‌ای کردن مقدار میانگین در واریانس ثابت و یا مقدار واریانس در میانگین ثابت به تابع تعلق بازه‌ای دست یافت. در اینصورت هر تابع تعلق بازه‌ای شده فضای محدودی را پوشش می‌دهد که دارای یک مرز در حد بالا و یک مرز در حد پایین است. به ناحیه بین این دو مرز سطح نامعینی (FOU)^۳ گفته می‌شود. این ناحیه از اجتماع تمام مقادیر ممکن برای تابع تعلق ساخته شده است. به بالاترین مرز هر سطح نامعینی، تابع تعلق حد بالا^۴ و به پایین‌ترین مرز،

به علت پایین بودن بازدهی سیستم فازی نوع اول در برخورد با نامعینی‌های متنوع محیط، نیاز به تنظیم مجدد و پی در پی پارامترهای سیستم فازی ضروری است. این امر موجب کاهش دقت سیستم و از دست رفتن زمان برای طراحی خواهد شد [۷۹].

همانطور که در آمار و احتمال از واریانس برای اندازه گیری پراکندگی داده‌ها اطراف میانگین استفاده می‌شود، سیستم فازی نوع اول نیز به ابزاری نیاز دارد که نامعینی‌های زبانی اطراف تابع تعلق را پوشش دهد و عملکردی شبیه واریانس در احتمال داشته باشد. سیستم فازی نوع دوم (T2 FS)^۱ که توسط پرفسور لطفی عسگرزاده در سال ۱۹۷۵ ارائه گردید، برای تامین این خواسته و ایجاد یک ابزار جهت مدل‌سازی پراکندگی اطراف تابع تعلق^۲ ارائه شده است [۷۷]. برخلاف آنچه در مجموعه فازی نوع اول معرفی شده است، که هر تابع تعلق برای هر عضو یک مقدار ثابت و صریح در بازه $[0, 1]$ دارد، یک مجموعه فازی نوع دوم که تشکیل دهنده سیستم فازی نوع دوم است، با توابع تعلق فازی گونه توصیف می‌شود. به عنوان مثال مقدار تابع تعلق فازی یا درجه تابع عضویت فازی برای هر عضو از این مجموعه به صورت مجموعه فازی در بازه $[0, 1]$ است. به همین دلیل به آنها مجموعه‌های فازی - فازی نیز گفته می‌شود. که به معنی مجموعه فازی‌ای است که تابع عضویت آن خود یک مجموعه فازیست. در حقیقت مجموعه‌های فازی نوع اول تقریب درجه اول عدم قطعیت و مجموعه‌های فازی نوع دوم تقریب درجه دوم از نامعینی است. به همین ترتیب می‌توان با تعمیم مجموعه‌های فازی نوع ۳، نوع ۴ و تا نوع بینهایت نامعینی را با دقت بالاتری تقریب زد. البته اجرایی کردن این امر در عمل به علت بالا رفتن پیچیدگی محاسبات امکان پذیر نبوده و باید با یک مجموعه فازی محدود عدم قطعیت‌های موجود در سیستم را تخمین زد [۸۰].

توابع تعلق مجموعه‌های فازی نوع دوم سه بعدی در نظر گرفته شده‌اند بطوریکه تاثیر نامعینی‌ها را نیز در لحاظ نماید. با اضافه شدن بعد سوم به تابع تعلق انعطاف پذیری تابع تعلق بیشتر شده و مدل‌سازی و مدیریت مستقیم داده‌های نامعین امکان‌پذیر می‌شود. همچنین این مجموعه‌ها در مواقعی که تعیین یک تابع تعلق صریح برای سیستم دشوار است کاربرد دارند [۷۹].

شرایطی که برای آنها استفاده از سیستم و مجموعه‌های فازی نوع دوم مناسب است، عبارتند از:

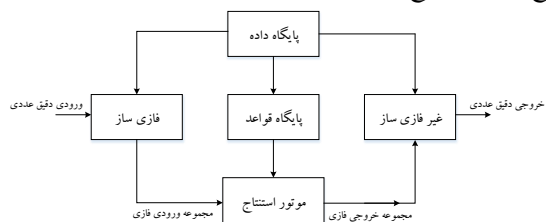
- وجود نویز متغیر و غیر ثابت که بیان آن با روابط ریاضی امکان‌پذیر نیست. به عنوان مثال پیش‌بینی سری‌های زمانی با نسبت سیگنال به نویز متغیر با زمان.
- مکانیزم تولید داده متغیر با زمان بوده و بدست آوردن رابطه ریاضی آن امکان پذیر نباشد. به عنوان مثال کاهش تداخل در کانال‌های

³ Footprint of uncertainty
⁴ Upper bound

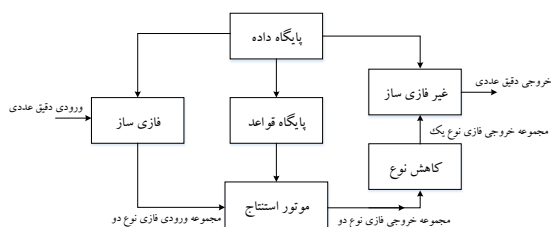
¹ Type two Fuzzy System
² Membership function

شده است. لذا به ازای هر ورودی صریح و دقیق با استفاده از فازی ساز یک مقدار صریح از تابع تعلق فازی بدست آمده که بر اساس قوانین از قبل طراحی شده خروجی فازی از موتور استنتاج بدست می‌آید. این خروجی فازی به بخش غیرفازی ساز انتقال یافته و خروجی دقیق و غیر فازی بدست می‌آید.

نمای کلی سیستم فازی نوع دوم بازه‌ای در شکل ۱۱ نشان می‌دهد. سیستم فازی نوع دوم در بلوک دیاگرام خود یک بلوک اضافی بنام کاهش نوع^۶ نسبت به بلوک دیاگرام نوع اول دارد. این امر نشان می‌دهد که در کنار افزایش قابلیت کار با عدم قطعیت‌ها، افزایش محاسبات در نوع دو بیشتر از نوع یک است [۸۱].



شکل ۱۰- بلوک دیاگرام سیستم فازی نوع اول [۸۱]



شکل ۱۱- بلوک دیاگرام سیستم فازی نوع دوم [۸۱]

۳-۲-۱- فازی ساز

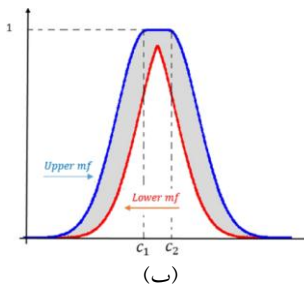
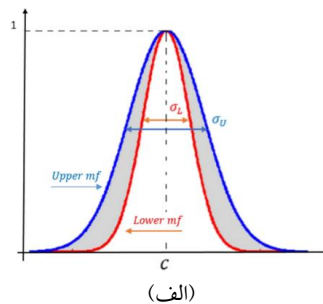
قسمت فازی ساز ورودی‌های دقیق عددی $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_2)^T \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_p \equiv \mathbf{X}$ را به مجموعه‌ی فازی نوع دوم \tilde{A}_x در \mathbf{X} نگاشت می‌نماید. معمولاً جهت سادگی و راحتی در کاربردهای زمان واقعی^۷ از فازی ساز منفرد برای سیستم‌های بازه‌ای نوع دوم استفاده می‌شود. در فازی ساز منفرد تابع تعلق فقط یک مقدار غیر صفر دارد. \tilde{A}_x یک فازی ساز منفرد نوع دوم است اگر برای $\mu_{\tilde{A}_x}(x) = 1/1$ برای $\mathbf{x} = \mathbf{x}'$ و $\mu_{\tilde{A}_x}(x) = 1/0$ برای $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}'$ برقرار باشد.

۳-۲-۲- قوانین

مجموعه قوانین در سیستم‌های فازی نوع دوم مشابه با سیستم‌های فازی نوع اول است با این تفاوت که بخش‌های مقدم^۸ و تالی^۱ آن به

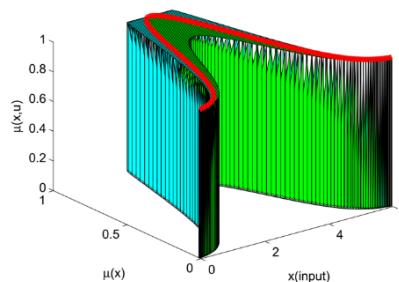
تابع تعلق حد پایین^۱ گفته می‌شود. به این نوع توابع تعلق توابع تعلق بازه‌ای گفته می‌شود. شکل ۸ تابع تعلق گوسی بازه‌ای را به ازای واریانس بازه‌ای و یا میانگین بازه‌ای نشان می‌دهد [۸۲].

در مواردی که از میزان عدم قطعیت اطلاعات زیادی در دسترس نباشد می‌توان از یک تابع متغیر همچون گوسی، مثلثی و دوزنقه‌ای به عنوان تابع تعلق دوم استفاده کرد. به عنوان مثال شکل ۹ تابع تعلق بازه‌ای سه بعدی را نمایش می‌دهد که در آن هر دو تابع تعلق اول و دوم به صورت گوسی هستند [۸۱].



شکل ۸- تابع تعلق گوسی بازه‌ای به ازای (الف) واریانس

بازه‌ای (ب) میانگین بازه‌ای [۸۲]



شکل ۹- تابع تعلق گوسی فازی سه بعدی [۸۱]

۳-۲-۲- چگونگی عملکرد یک سیستم فازی نوع دوم بازه‌ای

مطابق شکل ۱۰ هر سیستم فازی نوع اول از پنج بخش (پایگاه قواعد^۲، فازی ساز^۳، موتور استنتاج^۴، پایگاه داده و غیرفازی ساز^۵) تشکیل

¹ Lower bound
² Rules
³ Fuzzifier
⁴ Inference
⁵ Defuzzifier

⁶ Type reduction
⁷ Real time
⁸ Antecedent

بخش مقدم (که شامل مجموعه $(x'_i \equiv F^l(\mathbf{x}'))$ $\prod_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i}$ هستند)، خود یک مجموعه نوع یک بازه‌ای است.

$$F^l(\mathbf{x}') = [\underline{f}^l(\mathbf{x}'), \bar{f}^l(\mathbf{x}')] \equiv [\underline{f}^l, \bar{f}^l] \quad (70)$$

که در آن

$$\underline{f}^l(\mathbf{x}') = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x'_1) * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x'_p) \quad (71)$$

و

$$\bar{f}^l(\mathbf{x}') = \bar{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x'_1) * \dots * \bar{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x'_p) \quad (72)$$

می‌باشند. همچنین عملگر * به معنی ضرب می‌باشد [۸۴ و ۸۵].

۳-۲-۴- کاهش نوع

برای تبدیل خروجی فازی نوع دوم به فازی نوع اول از قسمت کاهش نوع استفاده می‌شود. دو روش مرسوم برای عملیات کاهش نوع در سیستم فازی نوع دوم بازه‌ای وجود دارد. اولی الگوریتم تکراری Karnik-Mendel [۸۶] است که یک روش زمان‌بر بوده و در کاربردهای زمان واقعی چندان قابل استفاده نیست. دومین روش الگوریتم الگوریتم مبتنی بر حداکثر و حداقل حدود نامعینی^۴ [۸۷] نام دارد. این روش که در شرایط زمان واقعی نیز استفاده می‌شود به روش حدود نامعینی Wu-Mendel نیز مشهور است. هر دو روش از محاسبات مربوط به مرکز ثقل استفاده می‌کنند.

۳-۲-۵- غیرفازی‌ساز

بعد از انجام عملیات کاهش نوع، خروجی کاهش پیدا کرده به قسمت غیرفازی‌ساز انتقال پیدا می‌کند. در این بخش خروجی دقیق و قطعی از خروجی فازی استخراج می‌شود [۸۷].

۳-۳- کاربردهای سیستم فازی نوع دو

پس از پیدایش مجموعه‌های فازی نوع دوم و نمایش توانایی آنها در حذف تاثیر منفی عدم قطعیت‌های ورودی و نامعینی‌های سیستم، کاربردهای متنوع و فراوانی برای آنها ارائه گردیده است. در این راستا بسیاری از محققان و پژوهشگران با استفاده از این ویژگی مهم سیستم‌های فازی نوع دو، مقالات متنوعی را به چاپ رسانده‌اند. به عنوان مثال سیستم فازی نوع دوم به خوبی به عنوان یک متعادل کننده در کانال‌های مخابراتی دیجیتال غیرخطی متغیر با زمان استفاده شده است. بطوریکه در آن سیستم فیلتر تطبیقی فازی نوع دوم از همتای نوع اولش و الگوریتم k-امین نزدیکترین همسایه عملکرد بهتری از خود نشان داده است. این برتری با افزایش تعداد کانال‌های بارزتر می‌شود [۸۸]. در [۸۹] سیستم فازی نوع دو برای دسته‌بندی و مدل‌سازی ویدیوی نرخ بیت متغیر MPEG بکار رفته است. که در آن کلاس‌بندی کننده فازی نوع دو برای

صورت بازه‌ای در مجموعه‌های فازی نوع دوم تعریف می‌شوند. بطوریکه برای سیستم فازی نوع دوم با p ورودی $x_1 \in X_1, \dots, x_p \in X_p$ و یک خروجی $y \in Y$ ، با فرض وجود M قانون، l -امین قانون به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$R^l : \text{IF } x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_p \text{ is } \tilde{F}_p^l, \quad (64)$$

THEN y is $\tilde{G}^l \quad l=1, \dots, M$

۳-۲-۳- موتور استنتاج

موتور استنتاج ورودی‌های فازی شده را بر اساس قوانین موجود در مجموعه و قواعد فازی به خروجی‌های فازی نوع دوم تبدیل می‌نماید. قواعد فازی مورد استفاده در این قسمت قاعده انطباق^۲ \prod معادل با اشتراک، اتصال \prod معادل با اجتماع و ترکیب تعمیم یافته روابط نوع دوم می‌باشند. اگر $\tilde{A}^l = \tilde{F}_1^l \times \dots \times \tilde{F}_p^l$ برای رابطه (۶۴) برقرار باشد می‌توان نوشت:

$$R^l : \tilde{F}_1^l \times \dots \times \tilde{F}_p^l \rightarrow \tilde{G}^l \equiv \tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l \quad (65)$$

$$l=1, \dots, M$$

قانون R^l با تابع تعلق $\mu_{R^l}(\mathbf{x}, y)$ $\mu_{R^l}(x_1, \dots, x_p, y)$ توصیف می‌شود، بطوریکه:

$$\mu_{R^l}(\mathbf{x}, y) = \mu_{\tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l}(\mathbf{x}, y) \quad (66)$$

که با توجه به [۸۳] می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\mu_{R^l}(\mathbf{x}, y) = \mu_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \prod \dots \prod \mu_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \prod \mu_{\tilde{G}^l}(y) \quad (67)$$

$$= \left[\prod_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i^l}(x_i) \right] \prod \mu_{\tilde{G}^l}(y)$$

بصورت متداول ورودی p بعدی توسط مجموعه فازی نوع دوم \tilde{A}_x با قانون R^l داده می‌شود. تابع تعلق \tilde{A}_x به صورت زیر حساب می‌شود:

$$\mu_{\tilde{A}_x}(\mathbf{x}) = \mu_{\tilde{A}_x}(x_1) \prod \dots \prod \mu_{\tilde{A}_x}(x_p) = \prod_{i=1}^p \mu_{\tilde{A}_x}(x_i) \quad (68)$$

بطوریکه $\tilde{x}_i (i=1, \dots, p)$ معرف مجموعه فازی ورودی است. هر قانون R^l مجموعه فازی نوع دومی چون $\tilde{B}^l = \tilde{A}_x \circ R^l$ را نتیجه می‌دهد. که تابع تعلق آن عبارت است از:

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{A}_x \circ R^l} \quad (69)$$

$$= \prod_{x \in X} \left[\mu_{\tilde{A}_x}(\mathbf{x}) \prod \mu_{R^l}(\mathbf{x}, y) \right]$$

$$y \in Y, \quad l=1, \dots, M$$

در سیستم منطقی فازی (FLS) از مجموعه‌های فازی نوع دوم بازه‌ای به همراه t نرم استفاده می‌شود. پس نتیجه اعمال ورودی بر عملگرهای

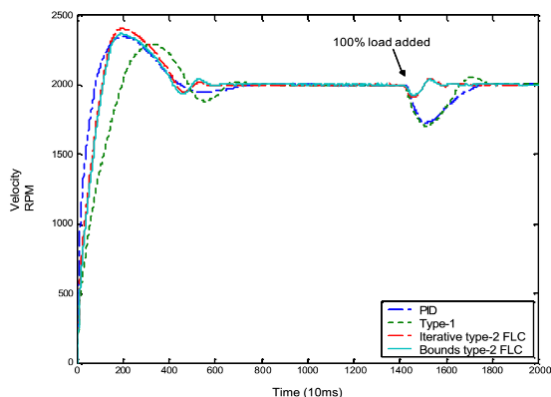
¹ Consequent

² Meet

³ Joint

⁴ Minimax uncertainty bounds

نظر بگیرد و پایداری را در هر شرایط تامین کرده و پاسخ گذرای سریعی ایجاد نماید. شمای کلی این مبدل در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. در [۹۳] از کنترل‌کننده فازی نوع دو برای کنترل این مبدل‌ها استفاده کرده است که نتایج مناسب‌تری نسبت با کنترل‌کننده فازی نوع یک بدست آورده است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات سرعت کنترل موتور دیزل دریایی برای چند کنترل‌کننده متفاوت [۹۲]

کنترل‌کننده فازی نوع دو در کنترل ربات و هدایت ربات‌های متحرک خودکار نیز وارد عمل شده است. کنترل‌کننده ربات‌های متحرک خودکار در محیط واقعی با موقعیت‌های مبهم و پیش‌بینی نشده‌ای مواجه می‌شود که باید بتواند فرمان مناسب را در این شرایط نامعین تولید نماید. قبل از فازی نوع دو از کنترل‌کننده فازی نوع یک برای ناوبری ربات‌ها استفاده شده است، ولی سیستم‌های فازی نوع اول تحت شرایط مشخصی از محیط و ربات می‌توانستند پاسخ نسبتاً بهینه‌ای داشته باشند. بطوریکه با ایجاد نامعینی در ربات و محیط اطرافش، به عنوان مثال با تغییر شرایط آب و هوایی و یا قرار گرفتن ربات در موقعیتی نسبتاً جدید، خطای این کنترل‌کننده‌ها افزایش می‌یافت. در [۸۷] کنترل‌کننده فازی نوع دو بازه‌ای برای کنترل ربات در محوطه‌های مختلف باز و بسته ارائه شده است. در انتهای این مقاله نیز نتیجه می‌شود که کنترل‌کننده فازی نوع دوم علاوه بر کاهش خطای هدایت ربات از تعداد قوانین کمتری نیز استفاده می‌کند. شکل ۱۴ تفاوت عملکرد کنترل‌کننده فازی نوع یک و نوع دو را به صورت رسم گرافیکی مسیر حرکت یک ربات متحرک نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است مسیر حرکتی رباتی که با فازی نوع دوم هدایت می‌شود بسیار هموارتر و مفیدتر است. این عملکرد خوب بدلیل آن است که فازی نوع دو از تعداد بسیار زیادی فازی نوع یک تشکیل شده است که در نتیجه در کنار هم می‌توانند جزئیات محوطه را بهتر توصیف نمایند.

دسته بندی ویدیوی ترافیک از داده‌های فشرده استفاده کرده و در نهایت از سیستم فازی نوع اول و کلاس‌بندی به روش بیزین بهتر عمل نموده است. همچنین از سیستم فازی نوع دو برای پیش‌بینی توان سیگنال دریافت شده در سنسورهای بیسیم نیز استفاده شده است که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نسبت به فازی نوع یک بازدهی بالاتری دارد [۹۰]. علاوه بر این در علم پزشکی هم از فازی نوع دوم استفاده شده است. به عنوان مثال در [۹۱] از سیستم تصمیم‌گیری فازی نوع دو برای تشخیص و مدیریت بیماری‌های نادر و سخت استفاده شده است. در ادامه چند زمینه پرکاربرد از فازی نوع دوم بررسی و مقالات مرتبط بررسی می‌گردند.

۳-۳-۱- کاربرد سیستم‌های فازی نوع دو در کنترل

اولین کاربرد کنترل صنعتی سنگین فازی نوع دو بازه‌ای در کنترل سرعت موتورهای دیزل دریایی^۱ بوده است. موتورهای دیزل دریایی، موتورهای عظیمی هستند که با توجه به حجم بالا و توان خروجی زیاد (در حدود ۹۰۰۰ کیلو وات) به کنترل سرعت دقیق و مقاوم نیاز دارند. اینگونه موتورها در محیطی با دینامیک بالا و عدم قطعیت زیاد کار کرده بطوریکه تغییرات وسیعی در دمای پیرامون، سوخت، رطوبت و بار را تجربه می‌کنند. به همین دلیل انتخاب یک مدل کنترلی مناسب برای کار در چنین شرایط نامطمئنی بسیار حیاتی است. در [۹۲] کنترل‌کننده فازی نوع دومی برای کنترل سرعت موتور دیزل دریایی ارائه شده است. در این تحقیق از کنترل‌کننده فازی نوع دو برای کنترل جریان موتور به صورت زمان واقعی استفاده شده که در خاتمه نتایج بهتری نسبت به کنترل‌کننده PID و کنترل‌کننده فازی نوع اول بدست آمده است. شکل ۱۲ نمودار تغییرات سرعت را به ازای کنترل‌کننده‌های متفاوتی نشان می‌دهد که در زمان ۱۴ ثانیه بار مصرفی دو برابر می‌شود.

کاربرد دیگر کنترل‌کننده فازی نوع دو در مبدل DC به DC باک^۲ است. مبدل‌های DC به DC سیستم‌های الکترونیک قدرتی هستند که سطح ولتاژ الکتریکی را با عمل کلیدزنی^۳ تغییر می‌دهند. مبدل‌های DC به DC مصارف گسترده‌ای در کامپیوترهای شخصی، دستگاه‌های جانبی کامپیوتر، آداپتورهای وسایل برقی خانگی دارند. با توجه به ماهیت غیرخطی و پیچیده‌ی که در مبدل‌های DC به DC وجود دارد، آنها جزء موضوعات مورد علاقه بسیاری از محققان هستند. مسئله کنترل در این سیستم‌ها شامل تعیین چرخه کاری^۴ مناسب برای داشتن خروجی ثابت در ازای ورودی متغیر و بار مصرفی نامعین است. روش کنترل این مبدل‌ها باید گسترده‌ی وسیعی از ولتاژ ورودی و تغییرات زیاد بار مصرفی را در

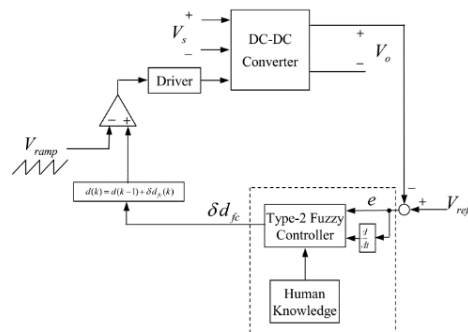
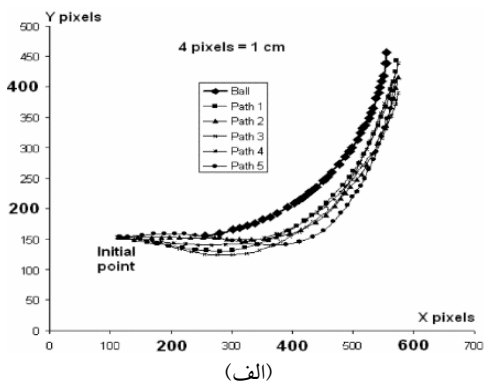
¹ Marine diesel engines

² Buck DC-DC convertor

³ Switching

⁴ Duty cycle

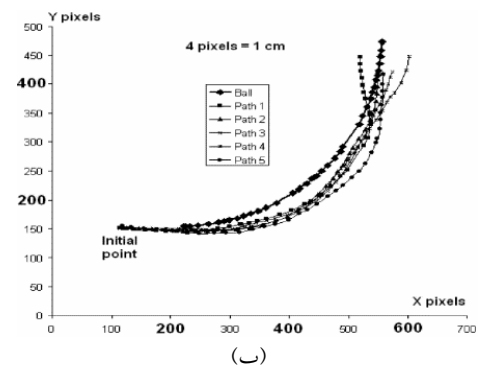
ربات می‌شود. ولی کنترل کننده فازی نوع دوم بر این مشکل نیز غلبه کرده و با تعداد قوانین کمتری نسبت به فازی نوع اول پاسخ سریعتری دارد. در زمینه کنترل فازی نوع دو بازه‌ای پژوهش‌های متنوعی انجام شده است که برای مطالعه بیشتر می‌توان به [۷۹] مراجعه نمود.



شکل ۱۳- کنترل کننده فازی نوع دوم برای مبدل DC به DC [۹۳]

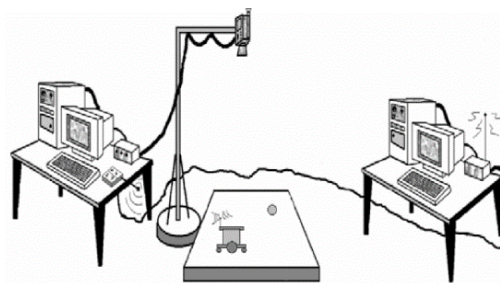


شکل ۱۴- کنترل کننده‌های فازی نوع دوم و نوع اول برای هدایت ربات متحرک خودکار [۸۷]



شکل ۱۶- کنترل فازی (الف) نوع یک و (ب) نوع دو برای هدایت ربات فوتبالیست با توپ متحرک [۹۴]

در [۹۴] از سیستم فازی نوع دو برای هدایت ربات فوتبالیست استفاده از تصاویر گرفته شده از دوربین استفاده شده است. شکل ۱۵ چگونگی قرار گرفتن دوربین برای مشاهده موقعیت ربات، توپ و دروازه را نشان می‌دهد. در یک زمین بازی و بین ربات و توپ موقعیت‌های متنوع و پیش‌بینی نشده‌ی فراوانی ایجاد می‌شوند که باید کنترل کننده ربات توانایی مدیریت آنها را داشته باشد. به همین دلیل کنترل کننده فازی نوع دو می‌تواند تا حدود زیادی این وظیفه را بخوبی انجام دهد. نمودارهای (الف) و (ب) در شل ۱۶ نحوه حرکت ربات فوتبالیست به دنبال توپ متحرک را نشان می‌دهد.

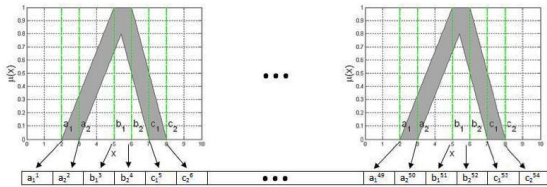


شکل ۱۵- کنترل فازی نوع دوم و نوع اول برای هدایت ربات متحرک خودکار [۹۴]

شبکه عصبی فازی تطبیقی^۱ نوع دو نیز با ترکیب ANFIS و سیستم فازی نوع دو طراحی شده است. با توجه به توانایی یادگیری این گونه سیستم‌ها و تطبیق به‌هنگام^۲ پارامترها، کاربردهای زیادی برای آنها اختصاص یافته است. به عنوان مثال در [۹۵] از شبکه عصبی فازی تطبیقی نوع دو به منظور کنترل به‌هنگام دمای آب حمام^۳ به عنوان سیستم دینامیکی غیرخطی، استفاده شده است. این سیستم شامل پارامترهای نامعین بوده که با سیستم تطبیقی عصبی فازی نوع دو، علاوه بر شناسایی و کنترل این سیستم، تاثیر عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای آن نیز کاهش داده شده است. در این کنترل کننده تطبیقی هر دو بخش مقدم و تالی از توابع تعلق بازه‌ای استفاده کرده‌اند و به منظور تنظیم پارامترهای بازه‌ای از الگوریتم کاهش شیب^۴ استفاده شده است. البته در صورتیکه شناسایی سیستم به صورت غیربهنگام^۵ انجام شود، می‌توان برای تنظیم

این دو نمودار بیانگر آن است که سیستم فازی نوع دوم خطای تعقیب کمتری نسبت به سیستم فازی نوع اول دارد. نکته قابل توجه دیگری که در این مقاله به آن اشاره شده است سرعت عمل ربات می‌باشد. هر چه سرعت عمل ربات بیشتر باشد عملکرد ربات بهتر خواهد بود. در نتیجه نمی‌توان در فازی نوع یک تعداد قوانین فازی سیستم کنترل کننده را افزایش داد، زیرا افزایش قوانین فازی باعث کند شدن پاسخ

¹ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)
² Online
³ Water bath temperature system
⁴ Gradient descent
⁵ Offline



شکل ۱۷- اختصاص پارمترهای توابع تعلق فازی نوع دو به کروموزوم

[۹۷]

همانطور که در بخش کنترل فازی نوع دوم اشاره شد، کنترل و هدایت ربات‌های متحرک خودکار زمینه بسیار مستعدی برای به کار بردن سیستم فازی نوع دوم است. ولی در برخی مواقع انتخاب و تعیین توابع تعلق کنترل‌کننده فازی نوع دو کار دشواری است و نیاز به سعی و خطای بسیاری دارد. به همین دلیل از الگوریتم‌های بهینه‌ساز جهت انتخاب مناسب این توابع استفاده می‌شود. در [۹۸ و ۹۹] کنترل‌کننده فازی نوع دو برای هدایت ربات خودکار در محیطی با شرایط نامعین و با عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. بطوریکه توابع تعلق آن در فاصله زمانی کوتاهی توسط الگوریتم ژنتیک تنظیم می‌شوند. توابع تعلق که در نظر گرفته شده‌اند به فرم گوسی بوده که دارای دو پارامتر مقدار متوسط و مقدار واریانس بازه‌ای می‌باشند. با کنار هم قرار دادن مقادیر واریانس بازه‌ای و میانگین‌های توابع تعلق ورودی و خروجی کروموزوم را تشکیل داده و با الگوریتم ژنتیک بهترین کروموزوم را انتخاب کرده است.

یادگیری ژنتیک در [۱۰۰] با کنترل فازی نوع دو ترکیب شده و برای کنترل سیستم کنترل سطح مایع با دو مخزن استفاده شده است. نتایج بدست آمده در این روش با سه سیستم فازی نوع ۱ متفاوت بهینه شده با یادگیری ژنتیک مقایسه شده است. در این مقاله نتیجه می‌شود که به علت بالاتر بودن درجه آزادی نوع دو نسبت به فازی نوع یک عملکرد کنترل‌کننده فازی نوع دو بهتر می‌باشد. همچنین در [۱۰۱] نشان داده شده است که روی همان سیستم کنترل سطح مایع دو مخزن کنترل‌کننده بهینه فازی نوع دو با الگوریتم ژنتیک نسبت به کنترل‌کننده بهینه فازی نوع یک با الگوریتم ژنتیک در برابر نامعینی‌ها و عدم قطعیت‌ها مقاوم‌تر است.

از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) نیز برای بهینه‌سازی سیستم و کنترل‌کننده‌های فازی نوع دو استفاده شده است. به عنوان مثال در [۱۰۲] الگوریتم اجتماع ذرات با کنترل‌کننده تطبیقی و بهینه فازی نوع دوی بازه‌ای برای کنترل سیستم تعلیق فعال غیرخطی ترکیب شده است. کنترل‌کننده به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند از عهده خواص غیر خطی، نامعین و نامنظم جاده و اغتشاش‌های غیر قابل اندازه‌گیری برآید. استراتژی تطبیقی در این روش به گونه‌ای به کار رفته است که کنترل‌کننده به صورت خود تنظیم توابع تعلق حد بالا و حد پایین را بهینه نماید.

[۱۰۳] کنترل‌کننده بهینه فازی نوع اول و فازی نوع دوم بازه‌ای را

بهینه پارمترهای سیستم عصبی فازی نوع دو از الگوریتم‌های هوشمند از جمله الگوریتم ژنتیک استفاده کرد [۹۶].

۳-۳-۲- کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌ساز هوشمند در سیستم‌های فازی نوع دوم

در این بخش به بررسی مقاله‌هایی پرداخته می‌شود که در آنها برای طراحی یک سیستم بهینه فازی نوع دو از بهینه‌سازهای هوشمند از جمله ژنتیک، الگوریتم بهینه‌ساز اجتماع ذرات و مورچگان استفاده شده است. بطور کلی دو روش برای طراحی بهینه سیستم فازی نوع دو با توجه به داده وجود دارد. در روش اول فرض می‌شود که سیستم بهینه فازی نوع یک از قبل طراحی شده و تنها کافی است که سیستم بهینه فازی نوع دو از روی آن به دست آید. پس مسئله طراحی تنها تبدیل سیستم فازی نوع یک به سیستم فازی نوع دو را در بر می‌گیرد. در روش دوم، سیستم بهینه فازی نوع دو بصورت مستقیم از روی داده طراحی خواهد شد. در هر دو روش از الگوریتم‌های بهینه‌ساز مختلفی برای بالا بردن بازدهی سیستم و یا کنترل‌کننده استفاده می‌شود. از طرفی توانایی الگوریتم‌های بهینه‌ساز بیولوژیک محور^۱ در حل مسائل پیچیده به اثبات رسیده است. به همین دلیل از این الگوریتم‌ها برای بدست آوردن ساختار و پارامترهای مناسب و بهینه سیستم‌های فازی نوع دو استفاده می‌شود. البته مسئله طراحی سیستم بهینه فازی با هر کدامیک از الگوریتم‌های بهینه‌ساز تکاملی قابل حل می‌باشد. تنها تفاوت این روش‌ها نحوه ارائه سیستم فازی نوع دو به عنوان تابع هزینه الگوریتم بهینه‌ساز است. مثلاً در الگوریتم‌های ژنتیک پارامترهای سیستم فازی نوع دو به عنوان کروموزوم در نظر گرفته می‌شوند. سیستم فازی نوع دو در الگوریتم مورچگان به صورت یک مسیر حرکتی بهینه و در الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) به صورت یک ذره در روند بهینه‌سازی فرض می‌شود [۸۵].

در ابتدا به کاربرد الگوریتم‌های ژنتیک در بهینه‌سازی سیستم‌های فازی پرداخته می‌شود. الگوریتم ژنتیک که یکی از پرکاربردترین روش‌های بهینه‌ساز است در طراحی و بهینه‌سازی سیستم فازی نوع دو نیز استفاده شده است. در [۹۷] پارامترهای توابع تعلق بازه‌ای کنترل‌کننده فازی نوع دو به عنوان کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده‌اند. سیستمی که در این مقاله در نظر گرفته شده است، یک سیستم سروو مکانیزم به همراه لقی بوده که خروجی آن با کمک کنترل‌کننده فازی نوع دو تنظیم می‌شود. هدف کنترل‌کننده بهینه‌سازی شده فازی نوع دو رسیدن خروجی سیستم حلقه بسته به موقعیت دلخواه است. شکل ۱۷ نحوه انتخاب کروموزوم را با توجه به پارامترهای توابع تعلق نشان می‌دهد.

² Particle Swarm Optimization

¹ Bio inspired

بطوریکه با ترکیب شبکه عصبی و سیستم فازی و تشکیل یک شبکه فازی - عصبی طبقه‌بندی بر روی داده های موجود را با توجه به این سه پارامتر انجام می‌گیرد. در پایان مقاله شبیه سازی‌های انجام شده نشان می‌دهند که سیستم فازی نوع دوی بازه‌ای در برابر عدم قطعیت های موجود در داده ورودی مقاوم تر از فازی نوع اول عمل می‌کند.

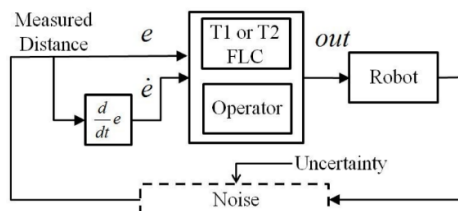
در [۱۰۷] با توجه به اهمیت تشخیص سرطان سینه و بالا بودن نرخ مرگ و میر بر اثر این بیماری روشی ارائه شده است که با استفاده از تجمع کلسیم در ماموگرافی بتوان زودتر از موعد این بیماری خطرناک را تشخیص داد. بری این منظور از سیستم فازی نوع دوی بازه‌ای به همراه الگوریتم طبقه‌بندی PCM^۵ استفاده شده است. بطوریکه الگوریتم PCM به صورت خودکار توابع تعلق سیستم فازی را تولید می‌کند. شبیه‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که سیستم فازی نوع دوی بازه‌ای به همراه PCM نتایج بهتری نسبت به فازی نوع دو به همراه FCM دارد.

در روش پیشنهادی [۱۰۸] خودروهای زرهی^۶ بوسیله امواج صوتی دسته‌بندی می‌شوند. برای این منظور از سیستم فازی نوع یک سلسه مراتبی و غیر سلسله مراتبی و سیستم فازی نوع دو و دسته‌بندی کننده بی‌زین استفاده شده است. نتایج شبیه سازی شده نشان می‌دهند که تمام دسته‌بندی کننده‌های فازی عملکرد بهتری نسبت به دسته‌بندی کننده بی‌زین داشته و بازده‌ای دسته‌بندی کننده فازی نوع دو در وضعیت نامعین و متغیر با زمان نسبت به فازی نوع یک بهتر بوده است.

یک از کاربردهای منطق فازی نوع دو در تشخیص الگو در مقاله [۱۰۹] ارائه شده است. به این ترتیب که از منطق فازی نوع دوی بازه‌ای جهت تشخیص لبه تصاویر در پردازش تصویر در مقایسه با نوع یک استفاده شده و همچنین بردارهای ورودی سیستم فازی با استفاده از فیلتر سوبل^۸ آماده گردیده است.

در [۱۱۰] روش جدیدی برای حذف نویز از تصاویر اثرانگشت با توجه به مقدار متوسط پیکسل به وسیله سیستم‌های فازی نوع یک و دو معرفی شده که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود. بطوریکه در آن ابتدا به چند شبکه عصبی مجزا (چند مدول مجزا) تصویر اثرانگشت ورودی معیوب و نویز دار داده شده و سپس با کنار هم قرار دادن خروجی مدول‌های عصبی ورودی سیستم فازی (نوع یک یا نوع دو) فراهم می‌شود. از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی توابع تعلق سیستم فازی استفاده کرده و در پایان تصویر بدون نویز اثر انگشت از سیستم فازی بدست می‌آید. روند کلی این روش را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی این مقاله نشان می‌دهد که سیستم تصمیم گیر فازی نوع دو نسبت به نویز اضافه شده مقاوم تر عمل می‌نماید. مقاله‌ها و تحقیق‌های بسیاری در زمینه کاربرد سیستم‌های فازی

بر روی یادگیری ربات‌های متحرک با یکدیگر مقایسه کرده است. هر دو نوع کنترل کننده با استفاده از الگوریتم PSO بهینه سازی شده و عملکردشان در محیط نویز و بدون نویز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که کنترل بهینه فازی نوع دوم توانایی بالاتری در مدیریت حرکت ربات در محیط‌های نامعین و با عدم قطعیت را دارا است. شکل ۱۸ ساختار این سیستم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- ساختار کنترل کننده فازی برای ربات متحرک [۱۰۳]

از الگوریتم کلونی مورچه‌ها نیز در بهینه سازی سیستم فازی نوع دو استفاده شده است. در [۱۰۴] سیستم فازی نوع دوم بازه‌ای خود تنظیم تقویتی (RSOIT2FS-ACO)^۱ با الگوریتم مورچه‌ها ارائه شده است. در این سیستم هیچ قانون فازی در ابتدا وجود نداشته و تمام قوانین به صورت برخط^۲ تولید می‌شوند. بخش تالی هر قانون فازی با استفاده از بهینه ساز کلونی مورچه‌ها طراحی می‌شود. همچنین در شبیه‌سازی این سیستم مسئله پارک کامیون در نظر گرفته شده که هر دو سیستم فازی نوع یک و نوع دو با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نهایی این مقاله نیز نشان می‌دهند که سیستم فازی نوع دو در هنگام وجود نویز و نامعینی مقاوم تر عمل می‌نماید. مقاله‌های بسیار زیادی دیگری نیز در حوزه کاربرد الگوریتم‌های بهینه ساز هوشمند در سیستم‌های فازی نوع دو به چاپ رسیده‌اند که برای مطالعه بیشتر می‌توان به مرجع [۸۵] مراجعه نمود.

۳-۳-۳- سیستم‌های فازی نوع دو در تشخیص الگو و طبقه‌بندی داده

توانایی انکار نشدنی سیستم فازی نوع دو در مدیریت نامعینی‌های موجود در ورودی و پارامترهای مربوط به سیستم دلیل بسیار خوبی است تا این روش در مقاله‌های مربوط به طبقه‌بندی داده و تشخیص الگو نیز مورد استفاده قرار بگیرد. نتایج بدست آمده در این مقاله‌ها نیز مبین برتری سیستم فازی نوع دو نسبت به فازی نوع یک در برخورد با عدم قطعیت‌ها است. در این بخش به چند نمونه از این تحقیق‌ها اشاره می‌شود.

[۱۰۵] و [۱۰۶] سیستم فازی نوع دوی بازه‌ای را برای طبقه‌بندی خودروهای درون جاده به کار گرفته‌اند. هر کلاس از روی فاصله بین چرخ جلو و عقب^۳، فاصله تا زمین^۴ و طول ماشین مشخص می‌شود.

⁴ Ground clearance

⁵ Possibilistic C-Means

⁶ Battlefield ground vehicles

⁷ Acoustic

⁸ Sobel

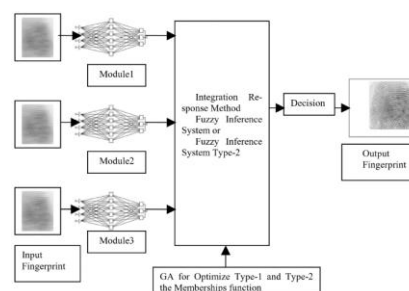
¹ Reinforcement Self-organizing Interval Type-2 Fuzzy System

² On line

³ Wheel base

- [4] Z. Pawlak, "Granularity of Knowledge, Indiscernibility and Rough Sets," in Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1998.
- [5] Bargiela, A., Pedrycz, W., Granular Computing: an Introduction, Boston: Kluwer Academic, 2002.
- [6] P. W., Granular Computing: an Emerging Paradigm, Heidelberg: Physica-Verlag, 2001.
- [7] Lin, T. Y., Yao, Y. Y., Zadeh, L. A., Data Mining, Rough Sets and Granular Computing, Heidelberg: Physica-Verlag, 2002.
- [8] Inuiguchi, M., Hirano, S., Tsumoto, S., Rough Set Theory and Granular Computing, Berlin: Springer, 2003.
- [9] Pedrycz, W., Skowron, A., Kreinovich, V., Handbook of Granular Computing, West Sussex: Wiley and Sons Ltd, 2008.
- [10] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," Information and Control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [11] L. A. Zadeh, "Fuzzy Logic=Computing with Words," IEEE Transaction on Fuzzy Sets and Systems, vol. 4, pp. 103-111, 1996.
- [12] Z. Pawlak, "Rough Sets," Computer and Information Sciences, vol. 11, pp. 341-356, 1982.
- [13] Z. Pawlak, "Rough Sets and Fuzzy Sets," IEEE Transaction on Fuzzy Sets and Systems, vol. 17, pp. 99-102, 1985.
- [14] Skowron, A., Swiniarski, R., "Approximation Spaces and Information Granulation," Transaction on Rough Set III, vol. 3400, pp. 175-189, 2005.
- [15] Dubois, D., Prade, H., "Rough Fuzzy Sets and Fuzzy Rough Sets," IEEE Transaction on Fuzzy Sets and Systems, vol. 23, pp. 3-18, 1987.
- [16] Pal, S. K., Skowron, A. (Eds.), Rough Fuzzy Hybridization: A New Trend in Decision-Making, Singapore: Springer-Verlag, 1999.
- [17] R. E. Moore, Interval Analysis, New Jersey, 1966.
- [18] R. B. Kearfott, "Interval Computations: Introduction, Uses, and Resources," Euromath Bulletin, vol. 1, no. 2, pp. 1-23, 1994.
- [19] Z. Pawlak, "Rough Classification," International Journal of Man-Machine Studies, vol. 2, no. 5, pp. 469-483, 1984.
- [20] Z. Pawlak, "Rough Logic," Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Sciences, vol. 35, no. 5-6, pp. 253-258, 1987.
- [21] Z. Pawlak, "Decision Rules, Bayes' Rules and Rough Set," in Proceedings of the 7th International Workshop on Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular-Soft Computing, Yamaguchi, 1999.
- [22] L. Polkowski, Rough Sets: Mathematical Foundation, Advances in Soft Computing, Heidelberg: Physica-Verlag, 2002.

نوع دو در تشخیص الگو، استخراج ویژگی و طبقه‌بندی داده ارائه شده که [۸۴] به معرفی آنها پرداخته است.



شکل ۱۹- روند کلی حذف نویز از تصاویر اثر انگشت [۱۱۰]

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بصورت خلاصه به روابط و ویژگی‌های مجموعه‌های راف، شبکه‌های عصبی راف، سیستم‌های فازی نوع دوم و کاربرد آنها پرداخته شد. نشان داده شد که شبکه‌های عصبی راف نسبت به نویز و نامعینی در سیستم و عدم قطعیت در پارامترهای آن نسبت به شبکه‌های عصبی غیر بازه‌ای مقاوم‌تر می‌باشند. از طرفی با توجه به اینکه سیستم‌های فازی نوع دو شامل تعداد زیادی از سیستم‌های فازی نوع اول هستند، علاوه بر دارا بودن تمامی خواص سیستم فازی نوع یک، می‌توانند اثر نامطلوب عدم قطعیت محیط و نامعینی پارامترهای سیستم را نیز تا حد بسیار زیادی کاهش دهند. زیرا در دنیای واقعی نامعینی و عدم قطعیت‌های فراوانی وجود دارد که با اضافه شدن آنها به مدل سیستم، مدیریت و کنترل سیستم‌ها با مشکل مواجه می‌شود. به همین دلیل در زمینه‌های متنوع مهندسی، تجاری و نظامی که عدم قطعیت‌ها قابل پیش‌بینی و اندازه‌گیری نمی‌باشند، شبکه‌های عصبی راف بر پایه مجموعه‌های راف و سیستم‌های فازی نوع دو بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. البته لازم به ذکر است اگر نامعینی و عدم قطعیت وجود نداشته باشد سیستم فازی نوع دو همانند سیستم فازی نوع یک و شبکه‌های عصبی راف شبیه شبکه‌های عصبی غیر بازه‌ای عمل خواهند کرد.

مراجع

- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets and Information Granularity," in Advance in Fuzzy Set Theory and Applications, Amsterdam, Gupta, 1979, pp. 3-18.
- [2] L. A. Zadeh, "The Key Roles of Information Granulation and Fuzzy Logic in Human Reasoning," Proceeding IEEE International Conference on Fuzzy Systems, vol. 90, no. 2, pp. 8-11, 1996.
- [3] Z. Pawlak, Rough Sets. Theoretical Aspects of Reasoning about Data, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.

- Evaluation," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 15, no. 1, January/February 2003.
- [36] N. A. A. Kumar, "Nonparametric Neural Network Model Based on Rough-Fuzzy Membership Function for Classification of Remotely Sensed Images," *ICVGIP*, p. 106 – 117, 2006.
- [37] C. S. Lee, "A Rough-Fuzzy Hybrid Approach on a Neuro-Fuzzy Classifier for High Dimensional Data," in *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*, 2011.
- [38] Zhao, J., Zhang, Z., "Fuzzy Rough Neural Network and Its Application to Feature Selection," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. Vol. 13, no. 4, pp. 270-275, December 2011.
- [39] Nowak, B. A., Nowicki, R. K., "Learning in rough-neuro-fuzzy system for data with missing values," *Springer, Heidelberg*, vol. 7203, p. 501–510, 2012.
- [40] J. S. A. S. Z. H. L. R. S. Peters, "Design of Rough Neurons: Rough Set Foundation and Petri Net Model," *LNAI*, vol. 1932, pp. 283-291, 2000.
- [41] Peters, J.F., Skowron, A., Han, L., Ramanna, S., "Towards Rough Neural Computing Based on Rough Membership Functions: Theory and Application," *LNAI*, p. 611–618, 2001.
- [42] H. L. P. J. F. R. S. Z. R. Pedrycz W., "Calibration of software quality: Fuzzy neural and rough neural computing approaches," *Neurocomputing*, vol. 36, pp. 149-170, 2001.
- [43] Peters, J. F., Han, L. H., Ramanna, S., "Rough Neural Computing in Signal Analysis," *Computational Intelligence*, vol. 17, no. 3, pp. 493-513, 2001.
- [44] R. W. S. A. Swiniarski, "Rough set methods in feature selection and recognition," *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, p. 833–849, 2003.
- [45] Thangavel, K., Pethalakshmi, A., "Dimensionality reduction based on rough set theory: A review," *Applied Soft Computing*, vol. 9, p. 1–12, 2009.
- [46] Polkowski, L., Lin, T. Y., Tsumoto, S., "Rough Set Methods and Applications: New Developments in Knowledge Discovery in Information Systems," *Springer Verlag/Physica-Verlag, Heidelberg*, vol. vol. 56, 2000.
- [47] A. P. S. K. Skowron, "Rough sets, pattern recognition and data mining," *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, no. 6, 2003.
- [48] S. T. S. Hirano, "Rough representation of a region of interest in medical images," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 40, no. 1-2, p. 23–34, 2005.
- [49] R. Słowiński, *Intelligent Decision Support. Handbook of Applications and Advances of the Rough Set Theory*, Kluwer Academic
- [23] R. Yasdi, "Combining Rough Sets Learning- and Neural Learning-method to deal with uncertain and imprecise information," *Neurocomputing*, vol. 7, pp. 61-84, 1995.
- [24] Jelonek, J., Krawiec, K., Slowinski, R., "Rough Set Reduction of Attributes and Their Domains for Neural Networks," *International Journal of Computational Intelligence*, vol. 11, no. 2, pp. 339-347, 1995.
- [25] Hashemi, R. R., Blanc L. A., Rucks, C. T., Rajartnam, A., "A Hybrid Intelligent System for Predicting Bank Holding Structures," *European Journal of Operational Research*, vol. 109, pp. 390-402, , 1998.
- [26] Ahn, B. S., Cho, S. S., Kim, C. Y., "The Integrated Methodology of Rough Set Theory and Artificial Neural Network for Business Failure Prediction," *Expert Systems with Applications*, vol. 18, no. 2, p. 65–74, 2000.
- [27] R. Swiniarski, "Rough Sets Methods in Feature Reduction and Classification," *International Journal of Applied Mathematics and Computing Science*, vol. 11, no. 3, pp. 565-582, 2001.
- [28] Shen, Q., Chouchoulas, A., "Rogh Set-based Dimensionality Reduction for Supervised and Unsupervised Learning," *International Journal of Applied Mathematics and Computers*, vol. 11, no. 3, pp. 583-601, 2001.
- [29] Shang, C., Shen, Q., "Rough Feature Selection for Neural Network Based Image Classification," *International Journal of Image and Graphics*, vol. 2, no. 4, pp. 541-555, 2002.
- [30] Durairaj, M., Meena, K., "A Hybrid Prediction System Using Rough Sets and Artificial Neural Networks," *International Journal of Innovative Technology & Creative Engineering*, vol. vol. 1, no. 7, pp. 16-23, 2011.
- [31] Shen, Y., Li, T., Hermans, E., Ruan, D., Wets, G., Vanhoof, K., Brijs, T., "A hybrid system of neural networks and rough sets for road safety performance indicators," *International Journal of Soft Computing*, vol. 14, no. 12, pp. 1255-1263, 2010.
- [32] Liu, H., Kong, W., Oiu, T. S., Li, G. L., "A Neural Network based on Rough Set (RSNN) for Prediction of Solitary Pulmonary Nodules," in *IEEE International Joint Conference on Bioinformatics, Systems Biology and Intelligent Computing*, 2009.
- [33] R. W. Z. Li, "Mining Classification Rules Using Rough Sets and Neural Networks," *European Journal of Operational Research*, vol. 157, pp. 439-448, 2004.
- [34] Sarkar, M., Yegnanarayana, B., "Rough-Fuzzy Set Theoretic Approach to Evaluate the Importance of Input Features in Classification," *IEEE*, pp. 1590-1595, 1997.
- [35] Pal, S. K., Mitra, S., Mitra, P., "Rough-Fuzzy Mlp: Modular Evolution, Rule Generation, And

- analysis and reduction: machine learning approach," Knowledge-Based Systems Diagnosis, Supervision and Control, Plenum Press, Oxford, pp. 167-178, 1989.
- [64] W. K. J. Ziarko, "Rough sets approach to system modelling and control algorithm acquisition," in Proceedings of IEEE WESCANEX 93 Conference, Saskatoon, 1993.
- [65] L. M. A. Płonka, "Rule-based stabilization of the inverted pendulum," Computational Intelligence, An International Journal, vol. 11, pp. 348-356, 1995.
- [66] E. M. A. P. Z. Czogała, "The idea of rough-fuzzy controller," International Journal of Fuzzy Sets and Systems, vol. 72, 1995.
- [67] T. Y. W. M. Lin, "Algebra and geometry of rough logic controllers," in The fourth International Workshop on Rough Sets, Fuzzy Sets, and Machine Discovery, Proceeding, The University of Tokyo, 1996, pp. 111-117.
- [68] P. L. Skowron A., "Rough mereological controller," in Proc. of The Fourth European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, 1996.
- [69] J. S. J. Pulaczewski, "A rough set approach to process control – simulations and results," Fourth European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, Proceedings, vol. 1, p. 197–201, 1996.
- [70] T. Y. Lin, "Fuzzy controllers: an integrated approach based on fuzzy logic, rough sets, and evolutionary computing," in Rough Sets and Data Mining. Analysis for Imprecise Data, Kluwer Academic Publishers, 1997, pp. 123-138.
- [71] Peters, J. F., Ziaei, K., Ramanna, S., "Approximate time rough control: Concepts and applications to satellite attitude control," in Rough Sets and Current Trends in Computing, Springer Verlag, 1998, pp. 491-498.
- [72] P. Lingras, "Rough Neural Networks," in In: Proc. of the 6th Int. Conf. on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-based Systems, 1996.
- [73] P. Lingras, "Comparison of Neofuzzy and Rough Neural Networks," Information Science, vol. 110, pp. 207-215, 1998.
- [74] P. Lingras, "Unsupervised learning using rough Kohonen neural network classifiers," in ", in: Proceedings of Symposium on Modelling, Analysis and Simulation, CESA'96 IMACS Multi conference, Lille, 1996.
- [75] S. M. R. V. Chandana, "Rough Neuron based on Pattern Space Partitioning," Neurocomputing, vol. 74, p. 2052–2061, 2011.
- [76] آل‌هاشر، سید محمد جواد، تشنه لب، محمد؛ پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی راف با یادگیری احتمالاتی جهت شناسایی سیستم‌های غیرخطی، "نشریه علمی - پژوهشی انجمن مهندسان کنترل و ابزار Publishers, 1992.
- [50] R. Słowiński, "Rough set theory and its applications to decision aid," Belgian Journal of Operation Research, Special Issue Francoro, vol. 35, no. 3-4, pp. 81-90, 1995.
- [51] S. M. B. S. R. Greco, "Dealing with missing data in rough set analysis of multi-attribute and multi-criteria decision problems," in Decision Making: Recent Developments and Worldwide Applications, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp. 295-316.
- [52] A. Skowron, "Approximate reasoning in distributed environments," in Intelligent Technologies for Information Analysis, Heidelberg, Springer, 2004, p. 433–474.
- [53] Jackson, A. G., Pawlak, Z., Leclair, S. R., "Rough set and discovery of new materials," Journal of Alloys and Compounds, 2000.
- [54] J. Krysinski, "Application of the rough sets theory to the analysis of structure-activity relationships of antimicrobial pyridinium compounds," Die Pharmazie, vol. 50, pp. 593-597, 1995.
- [55] Ziarko, W., Golan, R., Edwards, D., "An application of DATALOGIC/R knowledge discovery tool to identify strong predictive rules in stock market data," in Proc. AAAI Workshop on Knowledge Discovery in Databases, Washington, DC, 1993.
- [56] Słowiński, R., Zopounidis, C., "Application of the rough set approach to evaluation of bankruptcy risk Int. J. Intelligent Systems in Accounting," Finance & Management, vol. 4, no. 1, pp. 27-41, 1995.
- [57] F. E. H. S. L. Taya, "Fault diagnosis based on Rough Set Theory," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 16, p. 39 – 43, 2003.
- [58] Y. W. L. Xu, "Fault Diagnosis System Based on Rough Set Theory and Support Vector Machine," Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3614, pp. 980-988, 2005.
- [59] Z. Pawlak, "Rough real functions and rough controllers," Rough Sets and Data Mining – Analysis of Imperfect Data, p. 139–147.
- [60] Z. M. T. Pawlak, "Rough control: Application of rough set theory to control," Fourth European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing Proceedings, vol. 1, pp. 209-218, 1996.
- [61] A. Oehrn, "Rough logic control," Knowledge Systems Group, the Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 1993.
- [62] T. Munakata, "Rough control: a perspective," in Rough Sets and Data Mining. Analysis for Imprecise Data, Kluwer Academic Publishers, 1997, pp. 77-88.
- [63] W. K. J. Ziarko, "Control algorithms acquisition,

- Type-2 Fuzzy Logic System," in The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, May 22-25, 2005.
- [91] L. D. Lascio, A. Gisolfi and A. Nappi, "Medical Differential Diagnosis through Type-2 Fuzzy Sets," in The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 25-25 May 2005.
- [92] C. Lynch and H. V. Callaghan, "Embedded Type-2 FLC for Real-Time SpeedControl of Marine & Traction Diesel Engines," in The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2005.
- [93] P.-Z. Lin, C.-F. Lin and T.-T. Lee, "Type-2 Fuzzy Logic Controller Design for Buck DC-DC Converters," in The 2005 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2005.
- [94] J. Figueroa, J. Posada, J. Soriano, M. Melgarejo and S. Rojas, "A Type-2 Fuzzy Logic Controller for Tracking Mobile Objects in the Context of Robotic Soccer Games," in The IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2005.
- [95] طاووسی، جعفر؛ بادامچی‌زاده، محمد علی؛ قانمی، سحرانه؛، "کنترل معکوس سیستم‌های دینامیکی غیرخطی با شبکه‌های فازی نوع 2-،" نشریه علمی - پژوهشی انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، vol. 5, no. 2, pp. 59-52 تابستان 1390.
- [96] Chi-Hsu Wang, Chun-Sheng Cheng, and Tsu-Tian Lee, "Dynamical Optimal Training for Interval Type-2 Fuzzy Neural Network (T2FNN)," IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART B: CYBERNETICS, vol. 34, no. 3, pp. 1462-1477, 2004.
- [97] N. R. Cazarez-Castro, L. T. Aguilar and O. Castillo, "Hybrid Genetic-Fuzzy Optimization of a Type-2 Fuzzy Logic Controller," in The Eighth International Conference on Hybrid Intelligent Systems, 10-12 Sept. 2008.
- [98] C. Wagner and H. Hagnas, "Evolving Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Autonomous Mobile Robots," Analysis and Design of Intelligent Systems using Soft Computing Techniques Advances in Soft Computing, vol. 41, pp. 16-25, 2007.
- [99] C. Wagner and H. Hagnas, "A Genetic Algorithm Based Architecture for Evolving Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Real World Autonomous Mobile Robots," in Fuzzy Systems Conference, London, 23-26 July 2007.
- [100] D. Wu and W. W. Tan, "Genetic Learning and Performance Evaluation of Interval Type-2 Fuzzy," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 19, no. 8, p. 829-841, December 2006.
- [101] D. WU and W. W. Tan, "A Type-2 Fuzzy Logic Controller for the Liquid-level Process," in The , vol. 6, no. 1, دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، pp. 41-50, 1391.
- [77] J. M. Mendel, "Type-2 Fuzzy Sets and Systems: An Overview," IEEE Computational Intelligence magazine, vol. 2, no. 1, pp. 20-29, February 2007.
- [78] H. Wu and J. M. Mendel, "Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 10, no. 5, pp. 622-639, october 2002.
- [79] H. Hagnas, "Type-2 FLCs: A New Generation of Fuzzy Controllers," IEEE Computational Intelligence Magazine, vol. 2, no. 1, pp. 30-43, February 2007.
- [۸۰] ح. مرادی فراهانی، ج. عسگری و م. ذکری، "مروری بر منطق فازی نوع-۲: از پیدایش تا کاربرد،" نشریه علمی - ترویجی محاسبات نرم، جلد ۳، pp. 22-43، دی ۱۳۹۲.
- [81] E. Kayacan, Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Theory and Design, Boğaziçi University: PhD theses, 2011.
- [82] Q. Liang and J. M. Mendel, "Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Theory and Design," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 8, no. 5, pp. 535-550, october 2000.
- [83] N. N. Karnik and J. M. Mendel, "Introduction to Type-2 Fuzzy Logic Systems," in Fuzzy Systems Proceedings, Anchorage, AK, 1998.
- [84] P. Melin and O. Castillo, "A Review on the Applications of Type-2 Fuzzy Logic in Classification and Pattern Recognition," Expert Systems with Applications, vol. 40, no. 13, pp. 5413-5423, October 2013.
- [85] O. Castillo and P. Melin, "A Review on the Design and Optimization of Interval Type-2 Fuzzy Controllers," Applied Soft Computing, vol. 12, no. 4, pp. 1268-1278, April 2012.
- [86] J. M. Mendel, Uncertain Rule-Base Fuzzy Logic Systems : Introduction and New Directions, Prentice Hall PTR, 2001.
- [87] H. A. Hagnas, "A Hierarchical Type-2 Fuzzy Logic Control Architecture for Autonomous Mobile Robots," IEEE Transactions on fuzzy systems, vol. 12, no. 4, pp. 524-539, 2004.
- [88] Q. Liang and J. M. Mendel, "Overcoming Time-Varying Co-Channel Interference Using Type-2 Fuzzy Adaptive Filters," IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Analog and Digital Signal Processing, vol. 47, no. 12, pp. 1419-1428, December 2000.
- [89] Q. Liang and J. M. Mendel, "MPEG VBR Video Traffic Modeling and Classification Using Fuzzy Technique," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 19, no. 1, pp. 183-193, February 2001.
- [90] Q. Liang and L. Wang, "Sensed Signal Strength Forecasting for Wireless Sensors Using Interval

- IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2004.
- [102] J. Cao, P. Li, H. Liu and D. Brown, "Adaptive Fuzzy Controller for Vehicle Active Suspensions," in Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology. International Society for Optics and Photonics., 2008.
- [103] O. Linda and M. Manic, "Comparative Analysis of Type-1 and Type-2 Fuzzy Control in Context of Learning Behaviors for Mobile Robotics," in The 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010.
- [104] C.-F. Juang, C.-H. Hsu and C.-F. Chuang, "Reinforcement Self-Organizing Interval Type-2 Fuzzy System with Ant Colony Optimization," in The IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2009.
- [105] P. Sharma and P. Bajaj, "Performance Analysis of Vehicle Classification System using Type-1 Fuzzy, Adaptive Neuro-Fuzzy and Type-2 Fuzzy Inference System," in The 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), Nagpur, 2009.
- [106] P. Sharma and P. Bajaj, "Accuracy Comparison of Vehicle Classification System using Interval Type-2 Fuzzy Inference System," in Third International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Goa, 2010.
- [107] S. Chumklin., S. Auephanwiriyakul and N. Theera-Umpon, "Microcalcification Detection in Mammograms Using Interval type-2 Fuzzy logic System with Automatic Membership Function Generation," in The IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, 18-23 July 2010.
- [108] H. Wu and J. M. Mendel, "Classification of Battlefield Ground Vehicles Using Acoustic Features and Fuzzy Logic Rule-Based Classifiers," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 15, no. 1, pp. 56 - 72, February 2007.
- [109] P. Melin, "Interval Type-2 Fuzzy Logic Applications in Image Processing and Pattern Recognition," in IEEE International Conference on Granular Computing, 2010.
- [110] M. Lopez, P. Melin and O. Castillo, "Optimization of Response Integration with Fuzzy Logic in Ensemble Neural Networks Using Genetic Algorithms," Soft Computing for Hybrid Intelligent Systems Studies in Computational Intelligence, vol. 154, pp. 129-150, 2008.
- [111] Alehasher, M. J., Teshnehlal, M., "Implementation of Rough Neural Networks with Probabilistic Learning for Nonlinear System Identification," (in Persia), Journal of Control, vol. 6, no. 1, pp. 41-50, 2012.

بررسی پیشرفت‌های فن آوری ربات‌های چهارپا

وحید جوهری مجلد^۱

^۱ دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه مهندسی کنترل، majd@modares.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۳/۳/۲۵، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۳/۸/۱۱)

چکیده: در این مقاله، پس از ارائه یک تاریخچه و بررسی مزایای ربات چهارپا، به آخرین پژوهش‌های انجام شده در جهان در زمینه این ربات‌ها اشاره می‌گردد. در ادامه انواع مکانیزم‌های گام برداری و مسیرهای حرکتی ربات چهارپا و نیز معیارهای پایداری ایستا و پویای آن ارائه می‌شود. همچنین مدلسازی و تحلیل جنبشی و پویایی یک ربات چهارپای کلی با دوازده درجه آزادی بررسی می‌گردد. در نهایت الگوریتم‌های کلی مسیریابی این گونه ربات‌ها برای یک مد حرکتی و نیز نحوه استخراج شروط پایداری آن‌ها تشریح می‌گردد.

کلمات کلیدی: ربات چهارپا؛ ربات پادار؛ برنامه ریزی مسیر؛ پایداری پویا؛ پایداری ایستا.

A Review of the Technical Developments on the Quadruped Robots

Vahid Johari Majd

Abstract: In this paper, after reviewing a history of early literature and enumerating the benefits of quadruped robots, the latest world-wide research works on these robots are discussed. Then, various gate mechanisms, path movement methods, and static and dynamic stability margins of these robots are investigated. The modeling and kinematic and dynamic analyses of a typical quadruped robot with twelve degrees of freedom are also provided. Finally, a general path planning algorithms of such robots and the methods of deriving their stability conditions are explained.

Keywords: Quadruped robot; legged robot; path planning; dynamic stability; static stability.

حدوداً ۳ متر با موتور بنزینی ۹۰ اسب بخار ساخت که توسط انسان کنترل می‌شد. اولین استفاده از کامپیوتر در کنترل ربات‌های پادار برای حل معادلات سینماتیک و فرمان دادن به محرک‌ها در سال ۱۹۷۷ توسط مک گی^۶ بر روی ربات شش پای حشره گون انجام گرفت [۱].

پژوهش‌های نوین و جامع بر روی ربات‌های تک پا، دو پا، و چهارپا و کنترل پویای آن‌ها از سال ۱۹۸۶ توسط ریبرت^۷ در دانشگاه MIT آغاز گردید [۲]. پس از ریبرت تا به امروز بیش از ۲۰۰ ربات با تعداد پاهای مختلف ساخته شده‌اند [۳] که هر یک سعی در افزودن قابلیت‌های ربات‌ها در سرعت و برخورد با موانع داشتند. ربات‌های پا دار زیادی در سال‌های پس از آن در مراکز تحقیقاتی مختلف ساخته شد ولی همچنان به نظر

۱- مقدمه

ربات‌های راه رونده را می‌توان گفت آخرین دسته از ربات‌هایی هستند که مراحل بلوغ خود را طی می‌کنند گرچه تحقیقات و بررسی‌ها در مورد ربات‌های پادار از بیش از یک قرن پیش آغاز شده است. از زمانی که یک ریاضی دان روسی به نام چبی شف^۱ در حدود سال ۱۸۷۰ با هدف تقلید از راه رفتن موجودات در طبیعت براساس مکانیزم چهار میله از یک اتصال^۲ برای به جلو راندن بدنه در وضعیت افقی استفاده کرد [۱]. در سال ۱۸۹۳ یک اسب مکانیکی پدالی توسط ریگ^۳ ساخته شد. در سال ۱۹۶۲ موشر^۴ یک ربات چهارپا^۵ به وزن ۱۴۰۰ کیلوگرم و ارتفاع

^۵ Quadruped

^۶ McGhee

^۷ Raibert

^۱ Chebyshev

^۲ Linkage

^۳ Rygg

^۴ Mosher

۲- مروری بر نمونه‌های اخیر ربات‌های چهارپای ساخته‌شده در جهان

۱-۲- ربات آیبو

آیبو^۲ یک ربات کوچک چهارپا به شکل سگ که در شرکت سونی ساخته شده است. پروژه آیبو از سال ۱۹۹۰ شروع شده و مدل‌های مختلفی از آن ساخته شد. مدلی از این ربات که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در سال ۲۰۰۳ به منظور مسابقات جهانی ارائه گردید. این ربات به ازای هرپا دارای سه درجه آزادی است و با هدف سرگرمی ساخته شده است که در طراحی این ربات از سرو موتورهای جدیدی با گشتاور بالا استفاده شده است. این ربات برای یک ساعت حد اقل بدون شارژ کردن مجدد می‌تواند کار کند [۵].



شکل ۱: ربات‌های چهارپای آیبو [۵].

۲-۲- ربات جی-داگ

کمپانی رباتیکی ژاپنی HPI در حال تبلیغ جدیدترین محصول تجاری خود به نام جی-داگ^۳ با قیمتی معادل ۵۵۰ یورو می‌باشد که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. واحد پردازشگر این ربات از نوع RPU-11 است و ارتفاع به ربات ۱۹ سانتیمتر می‌رسد. از طریق درگاه RS232 می‌توان اتصال میان ربات و کامپیوتر برقرار و حرکات آن را برنامه ریزی نمود. این ربات دارای سه سرو موتور می‌باشد که در هر پا دو موتور قرار گرفته‌است که در کل نه درجه آزادی به این ربات می‌دهد. قابلیت اضافه کردن موتورهای اضافه نیز به این ربات وجود دارد [۶].



شکل ۲: ربات جی-داگ [۶].

۳-۲- سگ کوچک

سگ کوچک^۴ یک ربات چهارپاست که به منظور انجام تحقیقات در خصوص یادگیری گام‌برداری^۵ به خصوص در زمین‌های ناهموار

می‌رسد ربات‌های پا دار هنوز در عرصه تحقیقاتی خود به سر می‌برد و هنوز به طور فراگیر مورد استفاده قرار نگرفته است که این امر احتمالاً به این دلیل پیچیدگی زیاد این ربات‌هاست.

۱-۱- دلیل رویکرد، مزایا و معایب استفاده از ربات چهارپا

تمایل انسان به بکارگیری ظرفیت‌های طبیعت، بدست آوردن فهم بهتر از راه رفتن و حرکات چابک جانوران طبیعی، و الگو برداری و شبیه سازی ماشینی رفتار حیوانات از جمله دلایل رویکرد به ربات‌های پادار است [۲]. در میان ربات‌های پادار، ربات‌های چهارپا به علت پایداری مناسبتر نسبت به ربات‌های دو پا و نیز تعداد پاهای کمتر نسبت به ربات‌های شش پا، پیچیدگی کمتر را در طراحی داشته و مانورهای مختلف ممکن را که از ربات‌های پادار انتظار می‌رود دارا است ربات‌های چهارپا نسبت به ربات‌های چرخ دار و شنی دار دارای مزایایی هستند که استفاده از آن‌ها را در برخی زمینه‌ها توجیه می‌کند. از جمله این قابلیت‌ها می‌توان از سازگاری با محیط‌های ناهموار، جابجایی کارآمد، تعلیق پویا و فعال با زاویه دادن به بندگاه‌ها، عبور از موانع، مصرف یکسان انرژی در محیط‌های هموار و ناهموار، امکان کاهش سر خوردگی با تماس عمودی با زمین نام برد [۴].

با وجود مزایای ذکر شده ربات‌های پادار راه حل کامل مسئله حرکت نیست و مشکلات آن‌ها باعث شده تا بکارگیری آن‌ها در صنایع و بخش‌های خدماتی با کندی صورت گیرد. از جمله این مشکلات پیچیدگی، توان مصرفی بالا در مقایسه با ربات‌های چرخدار در محیط‌های هموار، و سرعت کم آنهاست.

۱-۲- موارد کاربرد ربات‌های چهارپا

موارد کاربرد ربات‌های چهارپا به مزیت‌های آنان نسبت به ربات‌های چرخدار باز می‌گردد که شامل کمک به جمع‌آوری اطلاعات در امداد و نجات شهری به هنگام زلزله، آتش سوزی، و یا حوادث تروریستی و در جاهایی که حضور پرسنل انسانی دارای ریسک می‌باشد با امکان بالا رفتن و عبور از سطوح ناهموار، حمل بار از نقاط صعب العبور با کنترل از راه دور، اکتشافات سطحی و جستجو در کف دریاها، سطوح کرات دیگر، قابلیت استفاده در محیط‌های پرمانع مانند محیط‌های جنگلی، کمک به افراد معلول در حرکت در محیط‌های ناهموار و نیز به عنوان ربات‌های توان‌بخشی می‌باشد.

^۲ AIBO

^۳ G-Dog

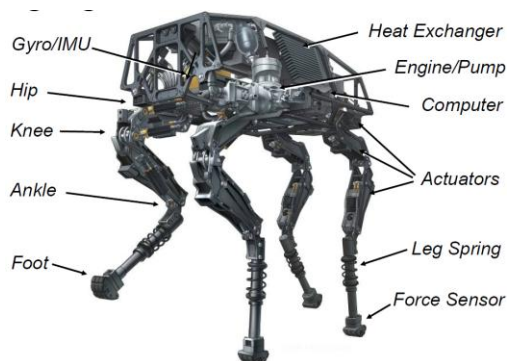
^۴ Little dog

^۵ Locomotion

^۱ Joints

حمایت ۳۰ میلیون دلاری آژانس طرح‌های پژوهشی پیشرفته دفاعی (DARPA)^۵ انجام گردیده است و در افغانستان نیز عملیات آزمایشی انجام داده است [۹]. ربات سنگ بزرگ ۱۰۹ کیلو وزن دارد و یک متر ارتفاع، ۱/۱ متر طول، و ۰/۳ متر عرض دارد. این ربات قادر است ۵۰ کیلوگرم بار را حمل نماید و نیز قادر است بدون بار مسافت ۱۰ کیلومتر را در ۲/۵ ساعت بدون سوخت‌گیری طی نماید. این چهارپا قادر به پرس تا ۱/۱ متر نیز می‌باشد [۱۰].

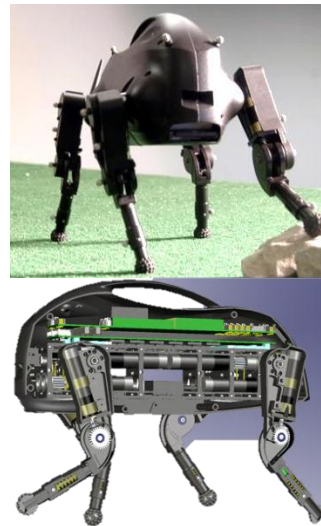
همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، هر پای این ربات دارای ۴ درجه آزادی فعال (دو عدد در لگن، و یکی در زانو و یکی در مچ) و یک درجه آزادی غیر فعال (در فتر مچ پا) است. و نیروی محرکه آن توسط یک موتور بنزینی تک سیلندر ۱۵ اسب بخار و سیستم هیدرولیک با فشار ۳۰۰۰ psi تأمین می‌شود. هر پا توسط چهار شیر سرو الکتروهیدرولیک دو مرحله‌ای کنترل می‌گردد [۱۰].



شکل ۴: ربات سنگ بزرگ [۱۱].

سنگ بزرگ دارای حسگرهای متعددی است که شامل: ۱۶ پتانسیومتر خطی برای اندازه‌گیری تغییر زوایای بندگاه‌های زانو، لگن، و مچ پا، ۱۶ عدد حسگر بار^۶ برای پاها، ۱۶ عدد حسگر جریان برای پایش جریان شیرهای سرو، ۳ عدد دوربین برای بینایی سه بعدی، یک عدد رادار لیزری (لیدار)^۷، یک عدد گردش‌نما^۸ که تغییرات سه زاویه و شتاب خطی سه محور را می‌دهد، دو عدد حسگر ولتاژ باتری می‌باشد. شکل ۵ محل قرارگیری حسگرها را در سنگ بزرگ نشان می‌دهد.

توسط شرکت بوستون داینمیکس در سال ۲۰۰۶ میلادی با حمایت DARPA ساخته شده [۷] که در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳: ربات سنگ کوچک [۷].

ربات سنگ کوچک دارای ۳۰ سانتی‌متر طول، ۱۸ سانتی‌متر عرض، و ۲۶ سانتی‌متر ارتفاع است و وزن آن تقریباً برابر با ۲/۵ کیلوگرم است [۸]. این ربات دارای سه موتور الکتریکی برای کنترل هر پا می‌باشد که مجموعاً ۱۲ درجه آزادی را به آن می‌دهند. در طراحی این ربات سعی شده که موتورها تا حد امکان در نزدیکی بدن قرار گرفته تا اندازه‌هاها کوچک بمانند. همچنین از یک فنر برای گرفتن ارتعاشات سطوح در پایین هر پا استفاده شده است. هر کدام از راه‌اندازنده موتورها با فرکانس ۱۰۰ هرتز با یک کنترلر PD زاویه و یا گشتاور توسط یک کامپیوتر تحت سیستم عامل Linux کنترل می‌گردد. سنگ کوچک دارای چهار حسگر تماس در پاها و یک حسگر مجاورتی^۱ در سر و حسگر زاویه در تمامی بندگاه‌ها، و یک واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU)^۲ برای تنظیم موقعیت بدنه و شتاب آن است. سنگ کوچک دارای یک باتری قابل شارژ است که انرژی آن را برای ۳۰ دقیقه حرکت مستمر تأمین می‌نماید [۸].

۲-۴- سنگ بزرگ

ربات سنگ بزرگ^۳ محصول شرکت بوستون داینمیکس^۴ است و دارای قابلیت‌های منحصر به فردی در مانور دادن در محیط‌های طبیعی و خشن می‌باشد. این ربات قادر است بارهای نسبتاً سنگین تا حدود دو برابر وزن خود را در زمین‌های شیب دار، برفی و یخ زده حمل نماید. ربات سنگ بزرگ قادر به دویدن می‌باشد و در حال حاضر به عنوان پیشرفته ترین ربات چهارپا در جهان شناخته می‌شود. ساخت این ربات تحت

^۵ Defense Advanced Research Projects Agency

^۶ Load cell

^۷ Lidar

^۸ Gyro

^۱ Proximity

^۲ Inertial measuring unit

^۳ Big dog

^۴ Boston Dynamics



شکل ۷: دو تصویر از ربات LS3 [۱۲].



شکل ۸: گربه وحشی [۱۳].

۲-۵- چهارپای پیرو

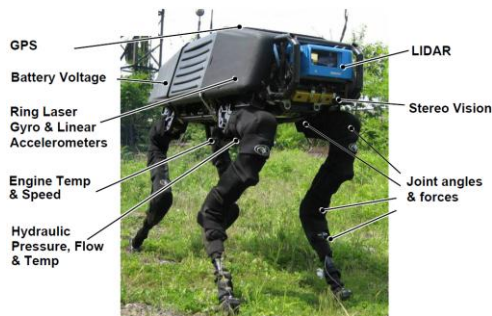
ربات پیرو^۳ که به طول ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد، محصول انستیتو کوه‌ای پوهانگ است. ربات چهارپای پیرو برای انجام عملیاتی نظیر جستجو، کشف و حمل بار در شرایط طبیعی در نظر گرفته شده است (شکل ۹). از آنجا که این ربات شباهت زیادی به ربات سگ بزرگ دارد بسیاری آن را نمونه کوه‌ای سگ بزرگ قلمداد کرده و این امر را نشانه علاقه کوه به رقابت در عرصه رباتیک در تراز نخست می‌دانند [۱۵]. این ربات دارای سه درجه آزادی فعال در هر پا می‌باشد.



شکل ۹: ربات چهارپای پیرو [۱۶].

۲-۶- ربات‌های آیدین

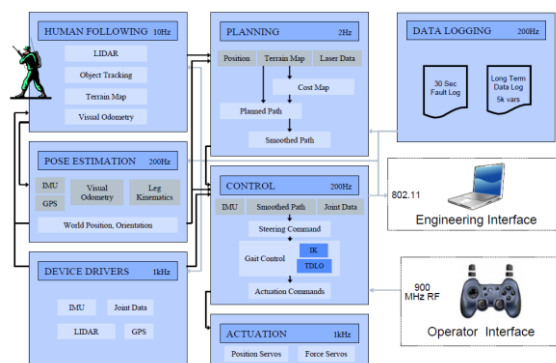
ربات آیدین^۴ و آیدین^۵ (AiDIN) ساخت آزمایشگاه رباتیک هوشمند سیستم‌های مکترونیک^۵ در کره شمالی در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ می‌باشد [۱۷ و ۱۸ و ۱۹]. شکل ۱۰ نمایی از این دو نسل ربات را نشان می‌دهد. این ربات دارای ۱۰ درجه آزادی فعال و ۴ درجه آزادی غیر فعال است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، پاهای جلو هر کدام دارای ۳ درجه آزادی فعال و یک غیر فعال به صورت فنر و پاهای عقب



شکل ۵: حسگرهای ربات سگ بزرگ و محل قرارگیری آنها [۱۱].

کامپیوتر روی ربات به صورت سفارشی تهیه شده است و دارای پردازشگر پنتیم با سیستم عامل بلادرنگ QNX می‌باشد. کد برنامه به زبان ++C نوشته شده است که اطلاعات حسگرها را دریافت و کنترل لازم به راهاندازها را اعمال می‌کند و نیز ارتباط با کاربر را نیز فراهم می‌نماید. معماری نرم افزار ربات سگ بزرگ در شکل ۶ نمایش داده شده است. فرکانس نمونه برداری برای اطلاعات مربوط به مسیریابی ۲ هرتز، فاصله یابی و تشخیص موانع ۱۰ هرتز، تخمین موقعیت، کنترل و ثبت داده ۲۰۰ هرتز، محرک‌ها و راهاندازها یک کیلوهرتز می‌باشد. همچنین جلیقه‌ای برای کاربر ربات طراحی گردیده است که با تجهیزات نصب شده بر روی آن کاربر می‌تواند از طریق یک ارتباط رادیویی بی‌سیم ۹۰۰ مگاهرتز اطلاعات دریافت شده توسط ربات را پایش کرده، و از طریق یک اهم کنترل، حرکت ربات را کنترل کند.

نمونه پیشرفته تر ربات سگ بزرگ بنام سامانه پشتیبان گروهان (LS3)^۱ یا سگ آلفا و نیز گربه وحشی^۲ می‌باشد که اخیراً توسط همین شرکت و تحت حمایت وزارت دفاع آمریکا ساخته شده است که در شکل ۷ و شکل ۸ قابل مشاهده‌اند [۱۲ و ۱۳]. این ربات‌ها بیشتر جنبه نمایشی نظامی داشته و هنوز اطلاعات مستندی در مورد آن‌ها در مقالات علمی موجود نیست. گربه وحشی نمونه پیشرفته تر ربات یوزپلنگ MIT است [۱۴] و هم اکنون مراحل آزمون و اصلاحات خود را طی می‌کند و قرار است تا سرعت ۵۰ کیلومتر در ساعت بدود.



شکل ۶: معماری نرم افزار ربات سگ بزرگ [۱۱].

³ PIRO quadruped

⁴ Artificial Digitigrade for Natural Environment

⁵ Intelligent Robotics and Mechatronic Systems Laboratory

¹ Legged Squad Support System

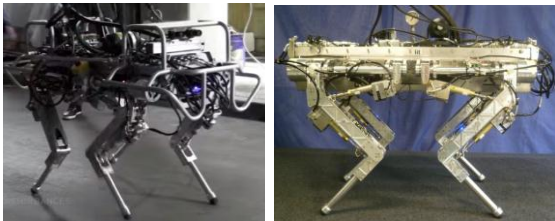
² WildCat



شکل ۱۱: ربات چهارپای هانما [۲۰].

۲-۸- چهارپای هایکیو

ربات هایکیو^۵ ساخت انستو تکنولوژی ایتالیاست که دارای ۱۲ درجه آزادی است و موقعیت و گشتاور بندگاه‌های آن بوسیله بازوی‌های هیدرولیکی کنترل می‌گردد [۲۱]. وزن ربات حدود ۷۵ کیلوگرم و دارای یک متر طول و نیم متر عرض است و جثه آن به اندازه یک بز می‌باشد. سامانه کنترل این ربات بر روی یک کامپیوتر تک برد PC104 تحت لینوکس زمان واقعی با پیچ Xenomai اجراء می‌گردد. این ربات می‌تواند علاوه بر قدم زدن، به صورت یورتمه نیز حرکت نماید. شکل ۱۲ تصاویری از این ربات را نشان می‌دهد.

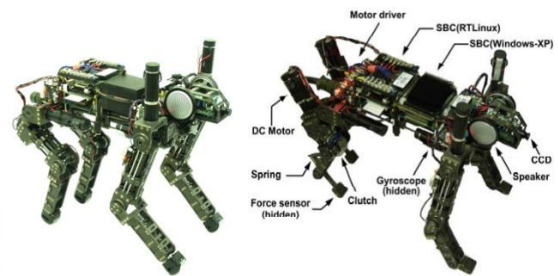


شکل ۱۲: ربات چهارپای هایکیو [۲۱].

۲-۹- چهارپای تی ام یو بات

ربات چهارپای تی ام یو بات (TMUBot) یک ربات دارای ۱۲ درجه آزادی است که با امکانات پیشرفته برای اولین بار در ایران با حمایت طرح‌های صنایع نوین وزارت صنعت، معدن، و تجارت، در آزمایشگاه سیستم‌های کنترل هوشمند دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شده و به صورت بی سیم از طریق کاربر قابل کنترل می‌باشد [۲۲]. این ربات ۳۵ کیلوگرم وزن دارد و قادر است ۸ کیلو بار را حمل نماید. طول و عرض ربات به ترتیب ۸۰ و ۲۵ سانتی متر، و طول ساق، ران و بیرون زدگی ران ربات به ترتیب ۳۱، ۳۴، و ۷ سانتی متر می‌باشد. در شکل‌های زیر تصاویری از این ربات در حالت ایستاده، نشسته و در حال حرکت با بار نشان داده شده است.

دارای ۲ درجه آزادی فعال و یک غیر فعال به صورت فتر می‌باشد. پاهای ربات آیدین ۲ دارای وزن کمتر و نسبت ساق به ران آن مناسبتر انتخاب شده است و نیز مکان مرکز ثقل پاهای پایدار برای پایداری بهتر اصلاح گردیده است.



شکل ۱۰: نمای ربات آیدین ۱ (راست) و آیدین ۲ (چپ) [۱۷].

هر بندگاه فعال توسط یک موتور جریان ثابت ۲۰ وات با جعبه با نسبت دور ۵۳:۱ تحریک می‌گردد. ربات آیدین دارای دو کنترلگر درونی^۱ اصلی است که به صورت کامپیوترهای تک برد پنتم^۲ با فرکانس ۸۰۰ مگاهرتز با دیسک فلش و کنترلگر CAN^۳ تحت سیستم عامل بلادرنگ RTLinux می‌باشد. کامپیوتر تک برد دیگر که پنتم ۱/۱ گیگاهرتز و دارای شبکه بی سیم است، وظیفه پردازش صدا و تصویر را دارد. انرژی ربات توسط یک سیم برق ۲۲۰ ولت تأمین می‌گردد ولی تمام تبادل اطلاعات ربات با کاربر از طریق شبکه بی سیم انجام می‌پذیرد. این ربات همچنین دارای ۱۰ کنترلگر کوچک از نوع MicroChip PCI 18f458 می‌باشد که هر کدام به طور محلی یکی از درجات آزادی را کنترل می‌کند.

۲-۷- چهارپای هانما

چهارپای هانما^۴ در سال ۲۰۱۰ در پژوهشکده رباتیک دانشگاه شاناندنگ (SUCRO)^۴ چین ساخته شده که دارای ۱۲ درجه آزادی و ۵۰ کیلو گرم وزن بود که البته برق آن از خارج از ربات تأمین می‌گردد [۲۰]. ارتفاع ربات در حالت اولیه ۶۷ سانتی متر و طول و عرض آن به ترتیب ۱۰۰ و ۴۰ سانتی متر است. برای حرکت بندگاه‌های ربات از محرک‌های هیدرولیکی استفاده شده است و قادر است ۸۰ کیلو گرم بار را با سرعت ۴۰ سانتی متر بر ثانیه منتقل نماید. شکل ۱۱ دو نما از این ربات چهارپا را نشان می‌دهد.

^۱ Embedded Controller

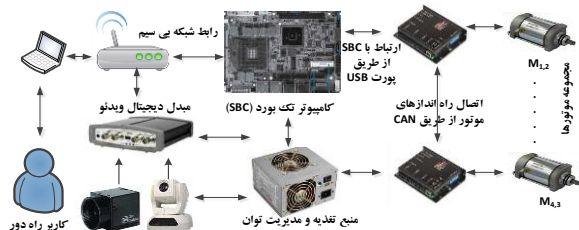
^۲ Controller Area Network

^۳ Hanma

^۴ Shandong University Center for Robotics

^۵ HyQ

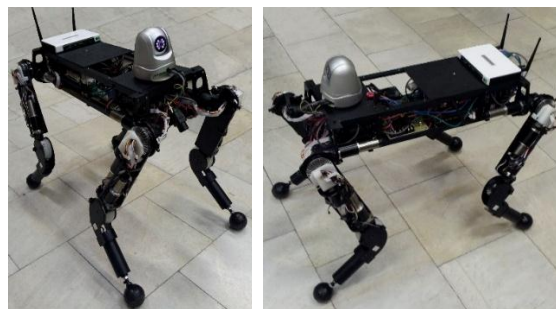
می‌شود. سامانه‌های الکترونیکی و کامپیوتری TMUBot برای اندازه‌گیری، پایش^۳، پردازش و اعمال فرمان‌های حرکتی به ربات هستند. معماری سطح بالای سامانه کنترل و پایش ربات چهارپا در شکل ۱۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱۶: معماری سطح بالای سامانه کنترل و پایش TMUBot [۲۲].

بر روی این ربات سه دوربین نصب گردیده است که ربات را قادر می‌سازد علاوه بر اطراف خود، زیر پایهای خود را ببیند. این دوربین‌ها این امکان را فراهم می‌آورند تا ربات بتواند از بدون حضور کاربر در کنار آن، از دور کنترل شود. از این رو این ربات برای موقعیت‌های خطرناک زیست محیطی، حوادث طبیعی و یا امنیتی در آینده قابلیت کاربرد دارد. همچنین تصویر زیر پای ربات هوشمند سازی ربات برای عبور از مسیرهای ناهموار را میسر می‌سازد. با پردازش تصاویر نیز می‌توان اجازه حرکت خودگردان به ربات داد که راه خود را در یک محیط ناشناخته پیدا کند. این دوربین‌ها به طور با استفاده از یک مبدل و کدگذار تصویر (DVS)^۴ به سوئیچ شبکه متصل هستند.

بستر شبکه WiFi کاربر را قادر می‌سازد با استفاده از رابط گرافیکی که برای او طراحی شده تصویر مربوط به دوربین‌های ربات را بر روی یک لپ تاپ مشاهده نماید و نیز توانایی ارسال فرمان‌های حرکتی مورد نظر برای حرکت ربات و نیز حرکت دوربین متحرک آن را داشته باشد. ضمناً وضعیت جاری ربات که شامل مشاهده مقادیر تمامی حسگرهای آن است نیز در این رابط گرافیکی نمایش داده شده و برای استفاده‌های بعدی بر اساس درخواست کاربر ثبت می‌شوند. نمایی از صفحه کنترل برنامه کلاینت در بر روی یک لپ تاپ از راه دور قابل اجراست در شکل ۱۷ مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۳: چهارپای TMUBot در حالت ایستاده [۲۲].



شکل ۱۴: ربات TMUBot در حال نشسته و نیز حرکت پایدار با حمل بار [۲۲].

همچنین این ربات می‌تواند با حفظ بدنه به صورت افقی از سطح شیب دار و موانع عبور نماید که تصویری از آن در شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۵: چهارپای TMUBot در حال عبور از مانع [۲۲].

این ربات دارای یک کامپیوتر تک بردی (SBC)^۱ است که تنها برنامه کنترلی و مسیریاب حرکتی را اجراء می‌کند و نیز فرمان‌های لازم را از کاربر از طریق بیسیم دریافت و اطلاعات مورد نیاز را در اختیار آن قرار می‌دهد. برنامه مسیریابی این ربات که بالغ بر ۱۰۰۰ خط برنامه MATLAB است به صورت کامپایل شده و با سرعت بسیار بالا بر روی SBC اجراء می‌گردد. علاوه بر آن یک برنامه کنترلی طراحی و اجراء گردیده است که در یک نخ جدا از برنامه اصلی به صورت بیدرتنگ هر ۲۰ میلی ثانیه اجرا می‌شود و برای مواجهه با تأخیرهای احتمالی برنامه مسیریابی یک صف از اطلاعات مسیریابی ایجاد و به صورت بی درنگ بین نقاط فرمان برنامه مسیریاب درونیابی می‌نماید و فرمان‌های لازم را به راه‌اندازهای موتورهای اعمال می‌نماید و بدین وسیله حرکت پاها را با هم همزمان می‌نماید. فرمان‌های مذکور از طریق کابل USB به یکی از راه‌اندازهای موتورهای اعمال شود و دیگر راه‌اندازها از طریق شبکه CAN به هم متصلند. اطلاعات مربوط به حسگر موتورهای شامل کدگذار زاویه از طریق راه‌اندازها بوسیله CAN و نهایتاً با کابل USB به برد SBC منتقل

³ Monitoring

⁴ Digital Video Server

¹ Single Board Computer

² Encoder

و معیار پاندول معکوس^{۱۱} نام برد [۲۸ و ۲۹]. باید توجه داشت که بسیاری از این معیارها نتایج نزدیک به همی را ارائه می‌دهند و اختلاف چندانی در نتایج آن‌ها وجود ندارد. البته باید توجه داشت که در پایداری پویا مرکز ثقل می‌تواند موقتا به خارج از چند ضلعی تکیه گاه نیز برود. در این حالت محل قرار دادن جای پا به شدت به دینامیک بدنه‌ی ربات بستگی دارد.

۵- ربات‌های چهارپا در محیط‌های ناهموار

یک ربات چهارپا ممکن است از الگوهای حرکتی ایستا یا پویا برای حرکت در محیط‌های ناهموار استفاده کند. پارامترهای پایه برای حرکت ربات‌های پادار مانند سلول ممنوعه^{۱۲}، ناحیه‌ی دسترس پذیر^{۱۳} و حاشیه‌ی جنبشی^{۱۴} در [۲۶] ارائه شد. یک الگوی حرکت منطبق شونده با محیط برای ربات‌های چهارپا در [۳۰] ارائه شده است. سپس مسائل اساسی ربات‌های چهارپا در محیط‌های ناهموار بررسی شد [۳۱-۳۴]. یکی از کارهای پیشرو در جستجوی مسیر بر پایه گراف در [۳۵] پیشنهاد داده شد. در این کار تعدادی از حالات مناسب ربات از میان تعداد محدود حالات ربات انتخاب می‌شوند. روش جستجوی مسیر بر پایه‌ی گراف با بکارگیری روش‌های برنامه ریزی سلسله مراتبی^{۱۵} یا روش‌های برنامه ریزی حرکت چند مرحله‌ای^{۱۶}، با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گرفت [۳۶-۳۸]. بر روی حرکت ربات چهارپا به نام سیلو^{۱۷} در محیط‌های ناهموار دارای حفره و شیب در مرجع [۳۹] کار شده است. بعلاوه بعضی محققین روش‌های بهبود انطباق پذیری ربات‌های پادار با محیط‌های ناهموار با استفاده از برنامه ریزی مسیر فراگیر^{۱۸} را گزارش کرده‌اند [۴۰ و ۴۱].

الگوریتم‌های جستجوی جای پا، معمولا مکان مناسب برای پای بعدی را بر اساس کیفیت شرایط هندسی اطراف آن مکان می‌یافتند. اما در واقع مناسب بودن مکان قرار گیری پای بعدی با موقعیت پاهای دیگر و وضعیت بدنه، ارتباط نزدیکی دارد [۴۲]. برخی از پژوهشگران به تازگی برای انتخاب مکان جای پای بعدی، وضعیت بدنه و موقعیت پاهای دیگر را در نظر گرفته‌اند [۴۳ و ۴۴ و ۴۵].

۵-۱- کنترل کشسان ربات چهارپا برای حرکت در سطوح

نا هموار

برای کنترل حرکت ربات، در حالتی که مدل دقیقی از ربات و محیط در دسترس باشد، می‌توان از یک کنترل‌گر موقعیت با بهره‌کنترلی

حاصل از نقاط اتکا قرار گیرد. منظور از ایده آل رباتی است که پاهای آن بدون وزن و اثرات پویای محدود است.

ایده تعادل ایستا الهام یافته از حشرات می‌باشد. پای حشرات وزن ناچیزی دارد و همزمان وظیفه حفظ تعادل بدن و پیشروی به سمت جلو را ایفا می‌کند. نحوه حرکت در سرعت‌های آهسته به گونه‌ای است که در هر گام تعادل ایستا طبق تعریف فوق برقرار باشد.

تعریف فوق محدود به زمین هموار می‌شود. بعدها این تعریف برای استفاده در زمین ناهموار تعمیم داده شد به این صورت که از چند ضلعی حاصل از تصویر نقاط اتکا روی صفحه افق استفاده شد [۲۶].

۴-۲- معیارهای پایداری ایستای ربات‌های چهارپا

برای ربات‌های با سرعت کم پایداری براساس مکان مرکز ثقل (COG) ربات مورد بررسی قرار می‌گیرد که حاشیه پایداری بر اساس معیارهای گوناگونی قابل سنجش است [۱]. از جمله آن‌ها می‌توان به معیار حاشیه پایداری ایستا (SSM)^۱ (کوئتاترین فاصله بین مرکز جرم ربات و چند ضلعی تشکیل شده توسط نقاط تماس ربات با زمین)، معیار حاشیه پایداری طولی (LSM)^۲ (کوئتاترین فاصله مرکز ثقل با چند ضلعی تشکیل شده توسط نقاط تماس ربات با زمین در محور طولی ربات)، معیار حاشیه پایداری طولی خرچنگی (CLSM)^۳ (کوئتاترین فاصله مرکز ثقل با چند ضلعی تشکیل شده توسط نقاط تماس ربات با زمین در محور هم امتداد با مسیر حرکتی ربات)، معیار حاشیه پایداری انرژی (ESM)^۴ (کمترین انرژی پتانسیل لازم برای واژگونی ربات حول اضلاع چند ضلعی تعادل)، و معیار حاشیه پایداری انرژی نرمال شده (NESM)^۵ (معیار قبلی تقسیم بر وزن ربات) می‌باشد. که از سال ۱۹۹۸ به بعد در تحلیل‌های مورد استفاده قرار گرفته شده است.

۴-۳- معیارها پایداری پویای ربات چهارپا

معروفترین معیارهای معرفی شده برای پایداری پویای چهارپا معیار نقطه ممان صفر (ZMP)^۶ می‌باشد [۲۷]. نقطه ممان صفر نقطه‌ای بر روی سطح تماس است که مجموع تمامی گشتاورهای اعمال شده به ربات در آن نقطه صفر می‌باشد. اگر نقطه ممان صفر همواره در داخل چند ضلعی حاصل از پاهای پشتیبان قرار گیرد، تعادل ربات حفظ خواهد شد.

از دیگر معیارهای پایداری پویا می‌توان از معیار مرکز فشار (COP)^۷، معیار حاشیه پایداری پویا (DSM)^۸، معیار حاشیه پایداری نیرو-زاویه (FASM)^۹، معیار حاشیه پایداری انرژی پویای نرمال شده (NDESM)^{۱۰}

¹ Static Stability Margin

² Longitudinal Stability Margin

³ Crab Longitudinal Stability Margin

⁴ Energy Stability Margin

⁵ Normalized Energy Stability Margin

⁶ Zero Moment Point

⁷ Centre of Pressure

⁸ Dynamic Stability Margin

⁹ Force-Angle Stability Margin

¹⁰ Normalized Dynamic Energy Stability Margin

¹¹ Inverted Pendulum

¹² Forbidden cell

¹³ Reachable area

¹⁴ Kinematic margin

¹⁵ Hierarchical

¹⁶ Multi-step

¹⁷ SILO

¹⁸ Global

است که با استفاده از اعمال نیروی چسبندگی^۹، پایداری ربات را ایجاد می‌کند؛ و در نتیجه، نیازی به محدود کردن مرکز جرم در چند ضلعی تکیه‌گاه، نمی‌باشد؛ و این امر باعث افزایش فضای دسترسی پذیری ربات و متعاقباً افزایش تطبیق پذیری آن، می‌شود؛ ولی استفاده از این رهیافت، تنها برای برخی از ربات‌های بالارونده^{۱۰}، با استفاده از تجهیزات خاص، امکان پذیر است. همچنین در [۵۵]، پژوهش جامعی به همراه نتایج شبیه سازی و آزمایش عملی برای عبور ربات از موانع ناخواسته، ارائه گردیده است؛ به طوری که کنترل‌گرهای کشسان مختلف، با بهره‌های کنترلی متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در عین حال، در این پژوهش حداکثر ارتفاع مانع که ربات موفق به عبور از آن می‌شود، برابر با نصف ارتفاع ربات، به دست آمده است. در [۴۵] مسئله حرکت ربات چهارپا در سطح ناهموار به چهار قسمت تقسیم بندی شده است: ۱) جست و جو و انتخاب جای پای مناسب (۲) طراحی مسیر حرکت بدنه به صورتی که بیشینه‌ی پایداری حرکت، به دست آید. ۳) استفاده از کنترل‌گر پویایی وارون^{۱۱} پایه شناور و در نظر گرفتن نیرو، برای ایجاد رفتار کشسان. همچنین در [۵۷] رهیافتی برای حرکت کشسان ربات چهارپا پیشنهاد شده است که از یک تولید کننده الگوی مرکزی^{۱۲}، برای تولید دنباله حرکت پا استفاده می‌کند و همچنین به منظور ایجاد کشسانی در حرکت، از بندگاه غیر فعال در فوزک پا بهره می‌برد؛ با استفاده از این رهیافت، ربات قادر است با انواع روش‌های مختلف، گام برداری کند. کنترل ربات با محرک کشسان در مواجهه با فاز تکیه‌گاه دوگانه، چالش برانگیز است؛ از این رو، در [۴۹] با تاکید بر افزایش بهره‌ی انرژی با استفاده از محرک کشسان، به رفع این مشکل پرداخته است.

۶- مدل‌سازی و تحلیل جنبشی و پویایی ربات‌های

چهارپا

در این بخش ابتدا به صورت خلاصه پیکربندی و روابط جنبشی^{۱۳} کلی یک ربات چهارپای با دوازده درجه آزادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به روابط و معادلات پویایی^{۱۴} ربات پرداخته شده و این روابط برای گام‌برداری کلی ربات و بر مبنای روابط جنبشی استخراج می‌گردد. از این روابط در بخش بعدی در مسیرهای حرکتی و شروط پایداری ربات استفاده خواهد شد.

۶-۱- روابط جنبشی ربات

در اکثر ربات‌های چهارپا، هر پا دارای سه درجه آزادی فعال در نظر گرفته می‌شود که توانایی حرکت در دو صفحه جلو، عقب، و صفحه جانبی را به ربات می‌دهد و در مجموع ۱۲ درجه فعال آزادی را برای

بالا استفاده نمود. از آنجا که مدل دقیق ربات و محیط، غیر قابل دسترس است؛ کنترل کشسان^۱ ربات، به عنوان یک راهکار کاربردی، مطرح می‌شود [۴۶]. بررسی رفتار کشسان ربات، برای عبور از موانع ناخواسته و سطوح ناهموار، در مراجع مختلف بررسی شده است. در [۴۷] یک ساختار برای ایجاد پای کشسان به صورت غیر فعال^۲، معرفی شده است. با استفاده از این ساختار، یک ربات با قابلیت گام برداری پورتمه^۳، پیاده‌سازی گردیده است. در پژوهش‌های جدید تر از بندگاه‌های غیر فعال به همراه بندگاه‌های فعال، استفاده شده است [۴۸]. هرچند استفاده از این رهیافت‌ها تا حدی حرکت کشسان ربات را ایجاب می‌کند، ولی دارای عملکرد ضعیف در گستره‌ی وسیع و پایداری با حاشیه اطمینان کم می‌باشد؛ درحالی‌که برای عبور ربات از موانع با ارتفاع متفاوت، نیاز به ایجاد رفتار کشسان، در گستره‌ی وسیع می‌باشد. یک راه دیگر برای افزایش کشسانی سامانه، استفاده از محرک‌های کشسان است [۴۹]. از تلاش‌های اولیه به منظور کنترل کشسان فعال ربات چهارپا، می‌توان به [۵۰] اشاره کرد، که کنترل نیروی ربات را مورد بررسی قرار داد. در [۵۱] رهیافتی برای کنترل کشسان ربات‌های پادار، معرفی شده است که بر مبنای کنترل‌گر گشتاور محاسبه شده^۴ در فضای کاری^۵، پایه‌گذاری شده است و مشکلات استفاده از رهیافت‌های مبتنی بر ترانهاده‌ی ماتریس ژاکوبین^۶ را ندارد. همچنین در [۵۲] برای ایجاد کنترل کشسان ربات، از کنترل ناگذرای^۷ با قابلیت اعمال نیروی مرجع، استفاده شده است. در [۵۳] رهیافتی معرفی گردید که علاوه بر تطبیق پارامترهای گام، به منظور افزایش حاشیه پایداری حرکت، از یک کنترل‌گر کشسان استفاده می‌کند. مدل کشسانی در نظر گرفته شده در این پژوهش، نیاز به اعمال نیروی مرجع دارد که برای محاسبه این نیرو، از الگوریتم ارائه شده در [۵۴] استفاده می‌شود.

به منظور افزایش قابلیت ربات‌های پادار در [۲۵ و ۲۴]، رویه‌ای برای عبور ربات از سطوح ناهموار، ارائه شده است که برای پیاده‌سازی آن، نیاز به سامانه‌های بینایی، راداری و طراحی گام برداری آزاد^۸، می‌باشد و دارای الگوریتم پیچیده‌ای است و برای عبور از موانع، از سامانه طراحی مسیر برخط، بهره می‌برد. در [۵۵]، رویه‌ای ارائه شده است که مشکل غیر کشسان بودن ربات را با کاهش بهره کنترلی، برطرف کرده است؛ ولی در عین حال، دقت سامانه کنترلی را برای جابجایی صحیح، از دست داده است. هرچند این رویه تا حدی رفتار ربات را کشسان می‌کند؛ ولی گستره‌ی عملکرد آن، محدود بوده و به دلیل عدم داشتن جابجایی صحیح، رفتار ربات با حرکات ناخواسته، همراه است. در [۵۶]، راهبردی برای افزایش قابلیت تطبیق پذیری ربات در محیط‌های مختلف، پیشنهاد شده

¹ Compliant

² Passive

³ Trot

⁴ Computed torque controller

⁵ Task space

⁶ Jacobian matrix

⁷ Impedance control

⁸ Free gait

⁹ Adherent force

¹⁰ Climbing robot

¹¹ Invers dynamic controller

¹² Central pattern generator

¹³ Kinematics

¹⁴ Dynamic

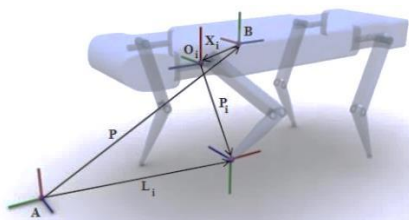
$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} c_1c_{23} & -c_1s_{23} & s_1 & ds_1 + c_1(l_2c_2 + l_3c_{23}) \\ s_1c_{23} & -s_1s_{23} & -c_1 & -dc_1 + s_1(l_2c_2 + l_3c_{23}) \\ s_{23} & c_{23} & 0 & l_2s_2 + l_3s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که c_i, s_i, c_{ij} و s_{ij} به ترتیب بیانگر $\cos(\theta_i)$ ، $\sin(\theta_i)$ ، $\cos(\theta_i + \theta_j)$ و $\sin(\theta_i + \theta_j)$ می‌باشند. با توجه به این معادلات، بردار موقعیت 0P_i ($i = 1, \dots, 4$) که مرکز دستگاه سوم هر پا (مثلا $i=3$ پای سوم که پای عقب-راست است را نشان می‌دهد) را نسبت به مرکز دستگاه صفرم (O_0) مشخص می‌کند، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$${}^0P_i = \begin{bmatrix} ds_{1,i} + c_{1,i}(l_2c_{2,i} + l_3c_{23,i}) \\ -dc_{1,i} + s_{1,i}(l_2c_{2,i} + l_3c_{23,i}) \\ l_2s_{2,i} + l_3s_{23,i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

در شکل ۲۱ طول پیوندها و بردار موقعیت P_i نشان داده شده است. به منظور بررسی روابط جنبش معکوس هر پا ابتدا بردار 0P_i به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$${}^0P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$



شکل ۲۱: بردارهای مکان در ربات چهارپا.

مقدار زاویه سوم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$c_{3,i} = \frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - d^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (4)$$

$$s_{3,i} = \pm \sqrt{1 - c_{3,i}^2} \Rightarrow \theta_{3,i} = \text{atan2}(s_{3,i}, c_{3,i}) \quad (5)$$

همان‌طور که دیده می‌شود برای زاویه سوم جواب دوگانه وجود خواهد داشت. برای یافتن زاویه دوم داریم:

$$\theta_{2,i} = \text{atan2}\left(\frac{z_i}{r_i}, \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 - d^2}}{r_i}\right) - \text{atan2}(k_{2,i}, k_{1,i}) \quad (6)$$

که در آن

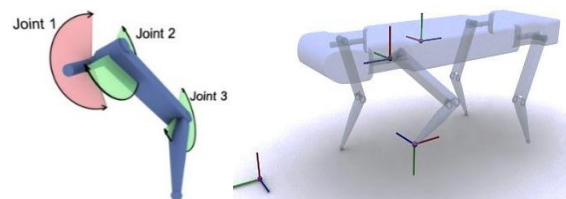
$$r_i = \sqrt{k_{1,i}^2 + k_{2,i}^2}, \quad \gamma_i = \text{atan2}(k_{2,i}, k_{1,i}) \quad (7)$$

$$k_{1,i} = l_2 + l_3c_{3,i}, \quad k_{2,i} = l_3s_{3,i}$$

و در نهایت مقدار زاویه اول با استفاده از مقادیر به دست آمده محاسبه می‌شود:

$$\theta_{1,i} = \text{atan2}\left(\frac{dx_i + (c_{2,i}l_2 + c_{23,i}l_3)y_i}{d^2 + (c_{2,i}l_2 + c_{23,i}l_3)^2}, \frac{(c_{2,i}l_2 + c_{23,i}l_3)x_i + dy_i}{d^2 + (c_{2,i}l_2 + c_{23,i}l_3)^2}\right) \quad (8)$$

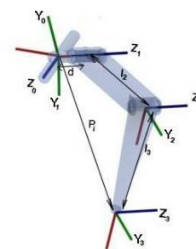
ربات فراهم می‌آورد و شمای کلی ربات، دستگاه‌های مختصات و ترتیب بندگاه‌های پاها در شکل ۱۹ نشان داده شده است. هر سه درجه آزادی در هر پا دورانی بوده که از بالا درجه آزادی‌های دوم و سوم پا را جلو و عقب برده و درجه آزادی اول پا را در صفحه جانبی تکان می‌دهد. برای راحتی طراحی و چینش قطعات واردکننده نیرو ممکن است، بین درجه آزادی اول و دوم یک بیرون‌زدگی^۱ در نظر گرفته شود. همچنین ممکن است به منظور کاهش اثر ضربه ناشی از برخورد پاها به زمین یک فنر در ساق هر پا صورت یک درجه آزادی غیرفعال^۲ در نظر گرفته شود. به علاوه به طور معمول زاویه بین ران و ساق ربات به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که پاها به داخل جمع شده و بدین ترتیب طول ربات کاسته شود. ربات سگ کوچک و بسیاری از ربات‌های چهارپای مطرح جهان نیز همین ویژگی‌ها را دارا هستند.



شکل ۱۹: شمایی کلی از ربات چهارپا، دستگاه‌های مختصات و ترتیب بندگاه‌های پاها.

۶-۲- جنبش مستقیم و معکوس هر پا

بر اساس روش دناویت-هانتبرگ (DH)^۳ دستگاه‌های مختصات متناظر مطابق شکل ۲۰ بر روی هر بندگاه پا قرار داده شده و پارامترهای DH در برای هر پیوند^۴ در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲۰: دستگاه‌های مختصات نسبت داده شده به هر بندگاه.

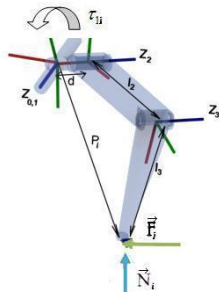
جدول ۱: پارامترهای DH

	θ	α	d	a
1	θ_1	90	0	0
2	θ_2	0	0	l_2
3	θ_3	0	d	l_3

بدین صورت ماتریس انتقال از دستگاه مختصات سوم در کف پا به دستگاه مختصات صفر که محل اتصال پا به بدن می‌باشد بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید:

¹ Offset
² Passive
³ Denavit-Hartenberg
⁴ Link

که در آن m و l به ترتیب جرم و تانسور لختی بدنه بوده و همچنین ΣF و $\Sigma \tau$ به ترتیب برآیند نیروها و گشتاورهای وارد بر بدنه می‌باشند. در رابطه (۱۲) تنها شتاب خطی (a) مجهول می‌باشد که با توجه به داشتن مکان مرکز جرم از منحنی طراحی شده برای آن و با دو بار مشتق گرفتن از آن بدست می‌آید. اما در رابطه (۱۳) با توجه به این که برای بدنه حرکت بدون چرخش را در نظر گرفته ایم، می‌توان α را صفر در نظر گرفت. برآیند نیروهای وارد بر بدنه (ΣF) و گشتاورهای وارد بر آن ($\Sigma \tau$) در ادامه محاسبه می‌گردد. با توجه به این که فرض ساده شونده ذکر شده، گشتاور حاصل از نیروی عمود بر مرکز و اصطکاک در محل اتصال بدنه به پا بر مبنای شکل ۲۲ محاسبه می‌شود.



شکل ۲۲: گشتاور حاصل از نیروی عمود بر مرکز و اصطکاک بر پیوند سوم.

با توجه به شکل بالا داریم:

$$\vec{\tau}_{1i} + \vec{P}_i \times \vec{F}_i = 0 \quad (14)$$

که \vec{F}_i مجموع نیروهای وارد بر کف پای نام یعنی مجموع نیروی اصطکاک و نیروی عمود بر مرکز $\vec{\tau}_{1i}$ گشتاوری است که در موتور شماره یک پای پشتیبان نام قرار دارد و در دستگاه مختصات اینرسی با بردارهای $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ که به صورت زیر قابل بسط می‌باشد:

$$\vec{\tau}_{1i} + \vec{P}_i \times ((f_i \sin \phi_i)\hat{x} + N_i\hat{y} + (f_i \cos \phi_i)\hat{z}) = 0 \quad (15)$$

از طرفی:

$$f_i = \mu N_i \quad (16)$$

که با جایگذاری معادله بالا داریم:

$$\vec{\tau}_{1i} + \vec{P}_i \times ((\mu N_i \sin \phi_i)\hat{x} + N_i\hat{y} + (\mu N_i \cos \phi_i)\hat{z}) = 0 \quad (17)$$

در معادله بالا ϕ_i زاویه نیروی اصطکاک وارد بر هر پا با محور \hat{x} می‌باشد. شایان ذکر است این زاویه در صفحه نیروی اصطکاک که همان زمین می‌باشد قرار دارد. گشتاور وارد بر بدنه از جانب هر پای پشتیبان، $-\vec{\tau}_{1i}$ و گشتاور ناشی از معکوس نیروی عمود بر مرکز و اصطکاک در لگن پای پشتیبان و حول مرکز جرم ربات $\vec{\tau}'_i$ می‌باشد. در اینصورت:

$$\vec{\tau}'_i = \vec{X}_i \times ((-\mu N_i \sin \phi_i)\hat{x} + (-N_i)\hat{y} + (-\mu N_i \cos \phi_i)\hat{z}) \quad (18)$$

$$\vec{\tau}_i = -\vec{\tau}_{1i} + \vec{\tau}'_i \quad (19)$$

که $\vec{\tau}_i$ برآیند تمام گشتاورهای وارد بر بدنه از جانب پای پشتیبان نام می‌باشد. از طرفی از (۱۷) می‌دانیم:

$$\tau'_i = -\vec{P}_i \times ((\mu N_i \sin \phi_i)\hat{x} + N_i\hat{y} + (\mu N_i \cos \phi_i)\hat{z}) \quad (20)$$

باید توجه داشت که برخی از جواب‌های بدست آمده برای زوایای بندگاه‌ها از رابطه‌های قبل جواب‌های غیر قابل قبول مساله بوده و با توجه به فرم زانو که به داخل یا خارج باشد تنها یک جواب از جواب‌های بالا در هر لحظه جواب درست مساله می‌باشد که در پیاده‌سازی عملی، جواب‌های درست از مقایسه جواب‌های بدست آمده و وضعیت زوایا در یک گام زمانی قبل، قابل حصول می‌باشد.

۳-۶- روابط جنبش کل ربات

برای بدست آوردن روابط جنبش برای کل ربات چهارپا مطابق شکل ۲۱ دو دستگاه مختصات A و B در نظر گرفته می‌شود. دستگاه مختصات A ثابت بوده و به زمین متصل است و دستگاه مختصات B متحرک بوده و در مرکز جرم بدنه قرار دارد. بردار موقعیت مکان مرکز B نسبت به A بوده و بردارهای $X_i (i = 1..4)$ موقعیت مرکز دستگاه صفرم متصل به هر پا (O_i) را نسبت به مرکز دستگاه B مشخص می‌کند، همچنین بردار L_i مکان کف هر پا (مرکز دستگاه چهارم) نسبت به مرکز دستگاه A می‌باشد. بر این اساس رابطه زیر برای جنبش کل ربات صادق می‌باشد:

$$P + {}^A R_B {}^B X_i = L_i - {}^A R_B {}^B R_{O_i} {}^{O_i} P_i \quad (9)$$

در رابطه بالا ${}^A R_B$ و ${}^B R_{O_i}$ به ترتیب ماتریس‌های دوران دستگاه B نسبت به A و O_i نسبت به B می‌باشد.

۴-۶- معادلات پویا ربات چهارپا

برای کاهش محاسبات و با توجه به این که عموماً جرم پاها نسبت به بدنه ربات ناچیزند، با صرف نظر نمودن از جرم پاها می‌توان نیروهای وارد شده به نقاط تماس پاها را در لگن ربات در نظر گرفت. بعد از بدست آوردن معادلات پویا با شبیه سازی ربات، بازه‌ای از نسبت جرم پا به بدنه را که شرایط پایداری همچنان صادق باقی می‌مانند را به عنوان حوزه قابل قبول برای معادلات پویای بدست آمده قابل محاسبه است. معادلات برای حالتی استخراج می‌گردد که سه پای ربات بر روی زمین بوده و یک پا در حال گام برداری می‌باشد. برای هر پای ثابت روی زمین شرایط پایداری آن با عبارتند از:

$$N > 0 \quad (10)$$

$$f_s < \mu N \quad (11)$$

که در روابط بالا N نیروی عمودی وارد شده از زمین به پا بوده و f_s نیروی اصطکاک بین کف پا و زمین می‌باشد. همچنین μ ضریب اصطکاک استاتیکی بین کف پا و زمین است. برای بدنه ربات براساس معادلات نیوتن و اوایلر داریم:

$$\Sigma F = ma \quad (12)$$

$$\Sigma \tau = I\alpha \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 f_{ix} \\ \sum_{i=1}^3 f_{iy} \\ \sum_{i=1}^3 N_i + mg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m\ddot{p}_x \\ m\ddot{p}_y \\ m\ddot{p}_z \end{bmatrix} \quad (۳۲)$$

در صورت باز کردن معادلات نیرویی براساس (۱۵) و (۱۶) به معادله زیر می‌توان دست‌یافت:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 (\mu N_i \sin \phi_i) \\ \sum_{i=1}^3 N_i - mg \\ \sum_{i=1}^3 (\mu N_i \cos \phi_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m\ddot{p}_x \\ m\ddot{p}_y \\ m\ddot{p}_z \end{bmatrix} \quad (۳۳)$$

سه معادله (۲۶)، (۲۷) و (۲۸) به همراه سه معادله‌ی داده شده در (۳۳) در مجموع شش معادله و شش مجهول را بدست می‌دهند که این مجهول‌ها شامل سه نیروی عمودی N_i و سه زاویه ϕ_i می‌باشند. با مشتق‌گیری از منحنی‌های مسیر حرکت بدنه و پاها که در بخش بعدی بدست می‌آید می‌توان به سرعت و شتاب بخش‌های مختلف ربات در هر لحظه دست‌یافت و در روابط بالا جاگذاری نمود.

۷- طراحی مسیرهای حرکتی متناوب و استخراج شروط پایداری ربات

در این مقاله برای اختصار تنها به جزئیات طراحی حرکت متناوب بر روی مسیر هموار می‌پردازیم. به صورت کلی، طراحی منحنی‌های مسیر متناوب برای حرکت یک ربات چهارپا را می‌توان به ۳ مرحله تقسیم کرد:

۱- مشخص کردن نقاط کلیدی از حرکت انتهای پاها و مرکز بدنه ربات و تعیین مکان آن‌ها در برداشتن یک گام.

۲- نوشتن معادلات مسیر به صورت پارامتری بین دو نقطه کلیدی در طول زمان. این معادلات به منظور پیوسته بودن سرعت و شتاب رابط‌های مختلف ربات می‌بایست تا مشتق دوم آن‌ها پیوسته باشد، به خصوص در زمان انتقال از یک بازه زمانی به بازه دیگر، به همین دلیل از منحنی‌های خاصی موسوم به منحنی‌های بی‌زیه^۱ استفاده می‌شود.

۳- استفاده از معادلات جنبش معکوس برای تبدیل مکان هر نقطه به زاویه متناظر برای هر محرک. این زوایا به صورت کامل وضعیت تمام اجزای ربات را در هر لحظه از زمان مشخص کرده و همچنین نیز سرعت آن‌ها را هم بدست می‌دهد.

با مشخص کردن پارامترهای مختلف گام‌برداری از قبیل طول و ارتفاع قدم، برنامه مسیریاب زاویه هر یک از ۱۲ موتور ربات را در هر زمان به عنوان خروجی مشخص می‌کند.

در مسیر یابی حرکتی پای ربات برای حرکت از یک نقطه به نقطه بعدی کوتاهترین مسیر، مسیر مستقیم می‌باشد که این نوع حرکت به معنی کشیده شدن پای ربات به روی زمین و ایجاد حرکتی نامنظم می‌باشد. بنابراین مسیر پیشنهادی برای حرکت پا مسیر منحنی است. شکل منحنی حرکتی را عوامل زیادی مانند توانایی گام‌برداری از روی موانع مسیر

با استفاده از دو معادله بالا برای \vec{t}_i داریم:

$$\vec{t}_i = -\vec{P}_i \times ((\mu N_i \sin \phi_i)\hat{x} + N_i\hat{y} + (\mu N_i \cos \phi_i)\hat{z}) + \vec{X}_i \times ((-\mu N_i \sin \phi_i)\hat{x} + (-N_i\hat{y}) + (-\mu N_i \cos \phi_i)\hat{z}) \quad (۲۱)$$

و در نتیجه با جمع گشتاورها برای سه پا خواهیم داشت:

$$\vec{t}_i = \sum_{i=1}^3 \vec{P}_i \times ((\mu N_i \sin \phi_i)\hat{x} + N_i\hat{y} + (\mu N_i \cos \phi_i)\hat{z}) + \vec{X}_i \times ((-\mu N_i \sin \phi_i)\hat{x} + (-N_i\hat{y}) + (-\mu N_i \cos \phi_i)\hat{z}) \quad (۲۲)$$

همچنین بر اساس معادله جنبش (۹) برای P_i داریم:

$$\vec{P}_i = \begin{bmatrix} {}^{oi}P_{ix} \\ {}^{oi}P_{iy} \\ {}^{oi}P_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x + {}^B X_{ix} - L_{ix} \\ P_y + {}^B X_{iy} - L_{iy} \\ P_z + {}^B X_{iz} - L_{iz} \end{bmatrix} \quad (۲۳)$$

در این صورت، گشتاور کل بدنه به صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{t}_i = \sum_{i=1}^3 \begin{bmatrix} P_x + {}^B X_{ix} - L_{ix} \\ P_y + {}^B X_{iy} - L_{iy} \\ P_z + {}^B X_{iz} - L_{iz} \end{bmatrix} \times ((\mu N_i \sin \phi_i)\hat{x} + N_i\hat{y} + (\mu N_i \cos \phi_i)\hat{z}) + \sum_{i=1}^3 \begin{bmatrix} {}^B X_{ix} \\ {}^B X_{iy} \\ {}^B X_{iz} \end{bmatrix} \times ((\mu N_i \sin \phi_i)\hat{x} + N_i\hat{y} + (\mu N_i \cos \phi_i)\hat{z}) \quad (۲۴)$$

پس از باز کردن معادلات و ساده‌سازی، برای هر سه پای پشتیبان خواهیم داشت:

$$\vec{t} = \sum_{i=1}^3 [(P_y \mu N_i \cos \phi_i - L_{iy} \mu N_i \cos \phi_i - N_i P_z + N_i L_{iz})\hat{x} + (P_x \mu N_i \cos \phi_i - L_{ix} \mu N_i \cos \phi_i - P_z \mu N_i \sin \phi_i + L_{iz} \mu N_i \sin \phi_i)\hat{y} + (P_x N_i - L_{ix} N_1 - P_y \mu N_i \sin \phi_i + L_{iy} \mu N_i \sin \phi_i)\hat{z}] \quad (۲۵)$$

معادله (۲۵) در راستای سه محور مختصات، به صورت زیر تجزیه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^3 (P_y \mu N_i \cos \phi_i - L_{iy} \mu N_i \cos \phi_i - N_i P_z + N_i L_{iz}) = 0 \quad (۲۶)$$

$$\sum_{i=1}^3 (P_x \mu N_i \cos \phi_i - L_{ix} \mu N_i \cos \phi_i - P_z \mu N_i \sin \phi_i + L_{iz} \mu N_i \sin \phi_i) = 0 \quad (۲۷)$$

$$\sum_{i=1}^3 (P_x N_i - L_{ix} N_1 - P_y \mu N_i \sin \phi_i + L_{iy} \mu N_i \sin \phi_i) = 0 \quad (۲۸)$$

و معادلات بالا را می‌توان پس از ساده‌سازی به فرم زیر در آورد:

$$\sum_{i=1}^3 (L_{iz} - P_z) N_i = \sum_{i=1}^3 (L_{iy} - P_y) \mu N_i \cos \phi_i \quad (۲۹)$$

$$\sum_{i=1}^3 (P_x - L_{ix}) \mu N_i \cos \phi_i = \sum_{i=1}^3 (P_z - L_{iz}) \mu N_i \sin \phi_i \quad (۳۰)$$

$$\sum_{i=1}^3 (P_x - L_{ix}) N_i = \sum_{i=1}^3 (P_y - L_{iy}) \mu N_i \sin \phi_i \quad (۳۱)$$

همچنین برای نیروهای وارد بر بدنه از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

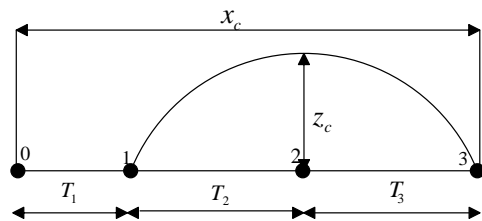
^۱ Bezier

$$C(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \left(1 - \frac{t+t_1}{t_2-t_1}\right)^3 + 3 \left(\frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ v_{z_1} \end{bmatrix} (t_2 - t_1) + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \right) \left(\frac{t+t_1}{t_2-t_1}\right) \times \left(1 - \frac{t+t_1}{t_2-t_1}\right)^2 + 3 \left(-\frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{x_2} \\ v_{y_2} \\ v_{z_2} \end{bmatrix} (t_2 - t_1) + \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \right) \left(\frac{t+t_1}{t_2-t_1}\right)^3 \quad (38)$$

معادله (۳۸) مکان ذره‌ای را که در لحظه t_1 در مکان $\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$ و با سرعت $\begin{bmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ v_{z_1} \end{bmatrix}$ است و در لحظه t_2 در مکان $\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$ و با سرعت $\begin{bmatrix} v_{x_2} \\ v_{y_2} \\ v_{z_2} \end{bmatrix}$ می‌باشد را برای هر زمان بین t_1 و t_2 مشخص می‌کند. با توجه به آن که برای هر بازه حرکتی یک منحنی بی‌زیه در نظر گرفته می‌شود، سرعت‌های ابتدا و انتهای بازه در معادلات بالا باید به گونه‌ای قرار گیرند که سرعت‌ها بین هر دو بازه حرکتی پیوسته شوند.

۷-۲- زمان‌بندی و پارامترهای منحنی‌های مسیر

برای انجام حرکت هر پا در ربات به طور معمول سه بازه زمانی توسط چهار نقطه کلیدی در نظر گرفته می‌شود که به هر کدام از آن‌ها "گام کوچک" گفته می‌شود. پارامترهای زمانی این تقسیم‌بندی در شکل ۲۵ نشان داده شده است. در هر یک از این گام‌های کوچک تنها یک پا به اندازه پارامتر z_c از زمین بلند می‌شود و سه پای دیگر روی می‌مانند.



شکل ۲۵: نمایش زمان‌بندی هر گام با سه بازه و چهار نقطه کلیدی. گام کوچک اول (حرکت جانبی بدنه)، گام کوچک دوم (برخاستن پا)، گام کوچک سوم (پایین آمدن پا).

در بازه اول حرکت $\Delta t \in [0, T_1]$ ، ابتدا بدنه مقداری حرکت جانبی دارد. در این بازه پاهای ربات روی زمین قرار دارند و بندگاه‌های ربات بگونه‌ای حرکت می‌کنند که ای حرکت بدنه را تأمین کنند. همچنین به منظور چرخاندن بدنه، سه زاویه چرخش α ، β و γ به ترتیب در سه جهت x ، y و z دستگاه مختصات ثابت در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این سه زاویه ماتریس دوران ${}^A R_B$ در معادله (۹) بدست می‌آید. براین اساس بردار Φ برای دوران P موقعیت بدنه ربات بین دو نقطه کلیدی P_1 و P_2 تغییر می‌کند:

$$P_1 \rightarrow P_2 = P_1 + \begin{bmatrix} xh_1 \\ yh_1 \\ zh_1 \end{bmatrix} \quad \Phi_1 \rightarrow \Phi_2 = \Phi_1 + \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{bmatrix}$$

در بازه دوم $\Delta t \in [T_1, T_2]$ پایی که قرار است از زمین بلند شود به مقدار ارتفاع گام بالا رفته و همزمان نصف طول گام را نیز طی می‌کند. در این بازه بدنه از نقطه P_2 به P_3 منتقل می‌شود:

$$P_2 \rightarrow P_3 = P_2 + \begin{bmatrix} xh_2 \\ yh_2 \\ zh_2 \end{bmatrix} \quad \Phi_2 \rightarrow \Phi_3 = \Phi_2 + \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}$$

تعیین می‌کنند. ساده‌ترین منحنی در نظر گرفته شده برای حرکت چهارپا منحنی سینوسی می‌باشد. اما بر اساس تحقیقات انجام شده بر روی ربات‌های با وزن بالا (SILO با وزن ۴۶ کیلو گرم)، منحنی حرکتی سینوسی به علت نحوه نیروی وارده در نقاط اتصال و جدا شدن از زمین در آغاز و پایان حرکت احتیاج به نیروی زیادی در این نقاط دارد. مسیر پیشنهادی برای رفع این مشکل منحنی ترکیبی دایروی می‌باشد [۴].



شکل ۲۳: منحنی سینوسی (راست) و ترکیبی دایروی چپ.

۷-۱- منحنی‌های بی‌زیه

از منحنی‌های بی‌زیه در غالب طراحی‌های مسیریابی برای ربات چهارپا استفاده می‌گردد. ساده‌ترین فرم منحنی‌های بی‌زیه یک تابع درجه ۳ می‌باشد که در آن با تغییر یک پارامتر مستقل مانند u از صفر تا یک مقادیر منحنی بر طبق رابطه زیر بدست می‌آید [۵۸]:

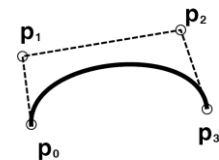
$$C(u) = \sum_{i=0}^3 P_i B_i(u) \quad (34)$$

که در آن مطابق شکل ۲۴، P_0 و P_3 به ترتیب مقادیر تابع در نقاط ابتدا و انتهای آن و P_1 و P_2 دو مقدار برای کنترل شیب خروج منحنی از نقطه ابتدا و شیب ورود منحنی به نقطه انتها می‌باشد و همینطور B_i ها توابعی می‌باشند که مقادیر آن‌ها به قرار زیر است:

$$\begin{aligned} B_0(u) &= (1-u)^3 \\ B_1(u) &= 3u(1-u)^2 \\ B_2(u) &= 3u^2(1-u) \\ B_3(u) &= u^3 \end{aligned} \quad (35)$$

با مشتق‌گیری از معادله (۳۴) نسبت به u ، شیب تابع در نقاط ابتدا و انتها به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} C'(0) &= 3(P_1 - P_0) \\ C'(1) &= 3(P_3 - P_2) \end{aligned} \quad (36)$$

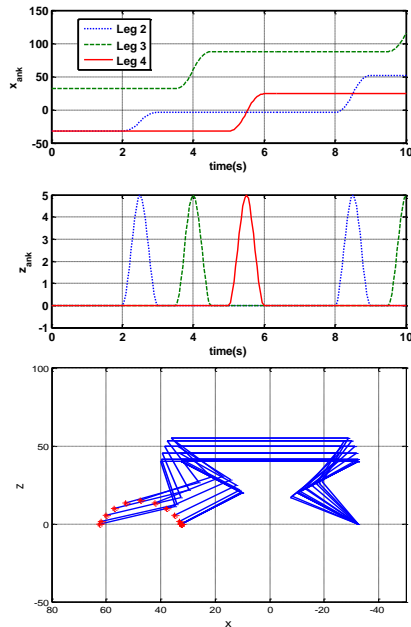


شکل ۲۴: منحنی بی‌زیه با چهار نقطه کنترلی.

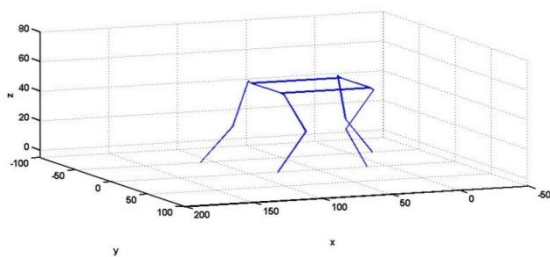
برای تبدیل شکل ساده بالا به رابطه‌ای که بتوان از آن برای بدست آوردن منحنی‌های مسیر قسمت‌های مختلف ربات استفاده کرد، باید با استفاده از دو رابطه بالا به جای مقادیر P_1 و P_3 ، مقادیر شیب در معادله اصلی قرار داد و همچنین با تغییر زیر بازه متغیر مستقل را از ۰ تا ۱ به بازه t_1 تا t_2 تغییر داد:

$$u = \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \quad (37)$$

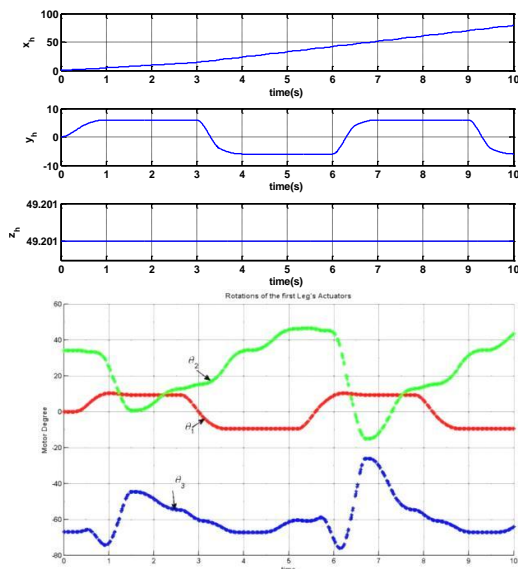
در این صورت معادله منحنی در سه بعد، به صورت زیر در می‌آید:



شکل ۲۶: راست: منحنی حرکت پاها، چپ: حرکت همزمان بدنه و یک پای ربات در یک گام.



شکل ۲۷: نمای سه بعدی حرکت یک ربات چهارپای شبیه‌سازی شده



شکل ۲۸: راست: منحنی حرکت بدنه ربات، چپ: زوایای چرخش محورهای پای اول.

۷-۳- الگوریتم کلی مسیریابی ربات چهارپا

قالب کلی الگوریتم مسیریابی یک ربات چهارپا در شکل ۲۹ نشان داده شده‌است. این الگوریتم در هر زمان حرکت مورد نظر زوایای

همچنین اگر x_c طول یک گام ربات و z_c حداکثر ارتفاع گام را از زمین فرض کنیم، پای در حال حرکت که موقت انتهایی آن با L_i بیان می‌شود به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$L_i \rightarrow L_i + \begin{bmatrix} x_c \\ z_c \\ 0 \end{bmatrix}$$

در بازه سوم $\Delta t \in [T_2, T_3]$ پای که از زمین بلند شده بود، پایین آمده و دوباره روی زمین قرار می‌گیرد و بقیه مقدار طول گام را نیز طی می‌کند. رفتار پای در حال حرکت در بازه سوم ارتباط مستقیم با مسیری که ربات حرکت می‌کند خواهد داشت مثلاً اگر ربات روی مسیر مسطح حرکت می‌کند، پا به مقداری که در بازه دوم بالا رفته باید پایین بیاید ولی اگر روی سطح شیبدار و یا پله حرکت می‌کند باید مقدار کمتری پایین بیاید تا پا روی زمین قرار گیرد. در این فاز، جابجایی بدنه و کف پای متحرک ربات به صورت زیر خواهد بود:

$$P_3 \rightarrow P_4 = P_3 + \begin{bmatrix} xh_3 \\ yh_3 \\ zh_3 \end{bmatrix} \quad \Phi_3 \rightarrow \Phi_4 = \Phi_3 + \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} \quad L_i \rightarrow L_i + \begin{bmatrix} x_c \\ z_c \\ 0 \end{bmatrix}$$

در شکل ۲۶ مسیر حرکت کف پاهای ربات در صفحه XZ مطابق طراحی فوق برای گام برداری پاهای مختلف نشان داده شده است. در همین شکل نمای جانبی از حرکت پاهای شماره یک و دو ربات که در سمت راست بدنه قرار گرفته‌اند، در طول یک گام برداری نشان داده شده است. در این شکل پای عقب در حال حرکت است و مسیر حرکت نقطه انتهایی آن با ضربدرهایی مشخص شده‌است. همچنین در شکل ۲۷ نمای سه‌بعدی از ربات شبیه‌سازی شده در متلب نشان داده شده است.

در شکل ۲۸ نیز منحنی حرکت بدنه نشان داده شده است، حرکت بدنه در راستای x نشان می‌دهد که بدنه روبه جلو در حال حرکت است. حرکت جانبی بدنه در جهت y نیز در این شکل برای حفظ تعادل ربات دیده می‌شود. هنگام حرکت یک پا، اگر حرکت جانبی پای قبل موافق آن باشد، بدنه در همان موقعیت جانبی می‌ماند. در همین شکل زوایای بدست آمده برای عملگرهای پای اول که با استفاده از روابط جنبش معکوس (۵)، (۶) و (۸) بدست آمده‌اند، برای رسیدن به منحنی‌های مسیر مطلوب، نشان داده شده است. برنامه مسیریابی باید بتواند پیوستگی حرکت بدنه ربات را حین گام برداری پاهای مختلف حفظ نماید و در هر گام سرعت نهایی را به عنوان سرعت اولیه در گام بعدی لحاظ کند.

$$X_{zmp,l} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{y}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i y_i - \sum_{i=1}^n I_{iz} \ddot{\Omega}_{iz}}{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{y}_i + g)} \quad (۴۱)$$

$$Z_{zmp,l} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{y}_i + g)z_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{z}_i y_i - \sum_{i=1}^n I_{ix} \ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{y}_i + g)} \quad (۴۲)$$

$$X_{zmp,h} = \frac{m(\ddot{y} + g)x - m\ddot{x}y - I_z \ddot{\Omega}_z}{m(\ddot{y} + g)} \quad (۴۳)$$

$$Z_{zmp,h} = \frac{m(\ddot{y} + g)z - m\ddot{z}y - I_x \ddot{\Omega}_x}{m(\ddot{y} + g)} \quad (۴۴)$$

که در معادلات بالا m_i جرم i امین پیوند ربات و I_i ممان اینرسی آن پیوند بوده که مختصات مرکزجرم، شتاب خطی مرکزجرم و شتاب زاویه‌ای آن به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \dot{P}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix}, \ddot{P}_i = \begin{bmatrix} \ddot{\Omega}_{ix} \\ \ddot{\Omega}_{iy} \\ \ddot{\Omega}_{iz} \end{bmatrix} \quad (۴۵)$$

همچنین m جرم بدنه ربات و I تانسور لختی آن بوده که مختصات مرکزجرم، شتاب خطی مرکزجرم و شتاب زاویه‌ای آن به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \ddot{P} = \begin{bmatrix} \ddot{\Omega}_x \\ \ddot{\Omega}_y \\ \ddot{\Omega}_z \end{bmatrix} \quad (۴۶)$$

با توجه به آن‌که در تحلیل پویای انجام شده از جرم پاها صرف‌نظر شده است، در معادله بالا فقط یک پیوند وجود داشته و آن بدنه ربات است که جرم اصلی ربات در آن قرار دارد. بنابراین معادلات فوق نهایتاً به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$X_{zmp} = \frac{m(\ddot{y} + g)x - m\ddot{x}y}{m(\ddot{y} + g)} \quad (۴۷)$$

$$Z_{zmp} = \frac{m(\ddot{y} + g)z - m\ddot{z}y}{m(\ddot{y} + g)} \quad (۴۸)$$

برای آن‌که نقطه ZMP در مثلث پشتیبان قرار گیرد، با توجه به شکل ۳۰، بردارهای v_0, v_1, v_2 را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$v_0 = C - A \quad (۴۹)$$

$$v_1 = B - A \quad (۵۰)$$

$$v_2 = P - A \quad (۵۱)$$

حال اگر نقطه P بخواهد در مثلث ABC قرار گیرد می‌بایست شروط زیر برقرار باشند:

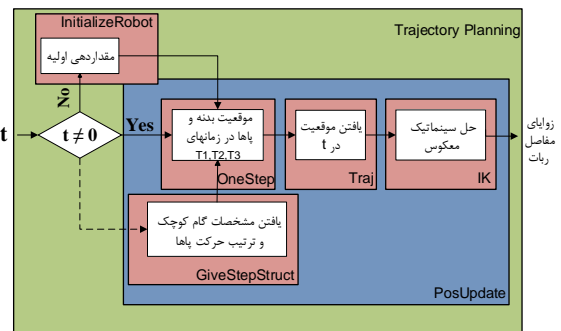
$$u > 0 \quad (۵۲)$$

$$v > 0$$

$$u + v < 1 \quad (۵۳)$$

که u و v از معادلات زیر بست می‌آیند:

بندگاه‌های ربات را به منظور انجام حرکت مورد نظر ارائه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود پس از راه اندازی ربات و مقدار دهی اولیه به کلیه متغیرها و پارامترهای آن در لحظه نخست، مقادیر ابتدا و انتهای هر گام کوچک (نقاط زمانی کلیدی) تعیین شده و سپس موقعیت بدنه و پاها در نقاط کلیدی تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از تابع مسیریابی (Traj) که رابطه ریاضی آن معادله (۳۸) می‌باشد، موقعیت بدنه و هر پا را در هر زمان دلخواه بین نقاط کلیدی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از موقعیت تولید شده در زمان دلخواه، محاسبات لازم برای یافتن موقعیت نسبی پاها و بدنه در دستگاه مختصات مرجع انجام شده و این موقعیت با استفاده از حل جنبش معکوس ربات (IK) تبدیل به زوایای بندگاه‌های پاها می‌شوند که این مقادیر به حلقه کنترل موقعیت بندگاه‌ها ارسال می‌گردد.



شکل ۲۹: الگوریتم کلی مسیریابی ربات چهارپا.

۴-۷- بررسی پایداری ایستای ربات چهارپا

ربات چهارپا از نظر ایستا پایدار است اگر همواره تصویر مرکز ثقل ربات در مثلث تشکیل شده از نقاط تماس ربات با زمین قرار بگیرد. به طور معادل می‌توان گفت اگر مجموع مساحت‌های سه مثلث تشکیل شده با راس‌های تصویر مرکز جرم و هر دو نقطه از سه نقطه تماس با زمین با مساحت مثلث سه نقطه تماس با زمین برابر باشد ربات چهارپا پایدار ایستا و اگر نباشد ناپایدار است. برای محاسبه مساحت هر کدام از مثلث‌ها در مختصات کارتزین از رابطه زیر استفاده کنیم:

که (x_i, y_i) سه نقطه از مثلث می‌باشند. بدین وسیله می‌توان در هر لحظه مساحت مثلث‌ها را محاسبه و پایداری ایستای ربات را مورد ارزیابی قرار داد.

۵-۷- استخراج شروط پایداری پویا

برای پایداری پویا باید نقطه ZMP ربات درون مثلث تشکیل شده از نقاط تماس سه پای پشتیبان با زمین قرار بگیرد. مختصات نقطه ZMP ربات از روابط زیر بدست می‌آید:

$$X_{zmp} = X_{zmp,l} + X_{zmp,h} \quad (۳۹)$$

$$Z_{zmp} = Z_{zmp,l} + Z_{zmp,h} \quad (۴۰)$$

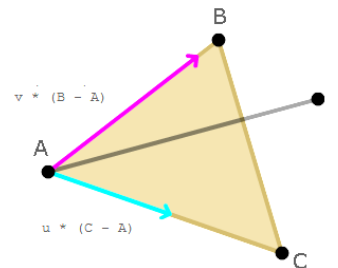
که در آن:

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از ارائه تاریخچه‌ای از پژوهش‌ها در زمینه طراحی و ساخت ربات چهارپا، تحلیل جنبشی و پویایی یک نمونه کلی از این ربات‌ها انجام گرفت. همچنین نحوه مسیریابی ربات و شرایط تضمین پایداری ربات ارائه گردید. البته علاوه بر تضمین پایداری می‌توان مسیرهای حرکت ربات را طوری تنظیم نمود که حاشیه پایداری ربات بر پایه یکی از معیارهای ذکر شده در مقاله پیشینه نمود. همچنین بهینه‌سازی کیفیت حرکت و هوشمندسازی ربات در جهت بهبود پایداری، دفع اغتشاش و کنترل مقاوم ربات، کنترل ربات با تحمل آسیب بر روی یکی از پیوندها، و نیز کنترل خودگردان ربات از جمله فعالیت‌هایی است که اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و هنوز جای کار بسیاری دارد.

$$u = \frac{(v1.v1)(v2.v0) - (v1.v0)(v2.v1)}{(v0.v0)(v1.v1) - (v0.v1)(v1.v0)} \quad (54)$$

$$v = \frac{(v0.v0)(v2.v1) - (v0.v1)(v2.v0)}{(v0.v0)(v1.v1) - (v0.v1)(v1.v0)} \quad (55)$$



شکل ۳۰: شروط قرار گیری نقطه P در مثلث ABC.

[11] Big Dog Overview, Boston Dynamics, Nov 22, 2008
www.bostondynamics.com/img/BigDog_Overview.pdf

[12] Legged Squad Support System (LS3), DARPA
(http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/Legged_Squad_Support_System_%28LS3%29.aspx)

[13] Ackerman, E., Boston Dynamics Announces New WildCat Quadruped Robot, IEEE Spectrum Robotics Blog
(<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/whoa-boston-dynamics-announces-new-wildcat-quadruped>).

[14] Seok, S., et. al., Design Principles for Highly Efficient Quadrupeds and Implementation on the MIT Cheetah Robot, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, pp. 3307-3312 (2013).

[15] Pohang Institute of Intelligent Robotics (<http://eng.piro.re.kr>).

[16] PIRO Quadruped robot (<http://www.gizmag.com/rex-robotic-beast-of-burden-hits-the-market/13586/picture/107029/>).

[17] AiDIN - Quadruped Walking Robot for Outdoor Environments, Intelligent Robotics and Mechatronic System Laboratory
(http://mecha.skku.ac.kr/board/list.php?bbs_id=Robotics_03).

[18] Koo, I., et. al., Control of a Quadruped Walking Robot Based on Biologically Inspired Approach, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, pp. 2969-29-74 (2007).

[19] Koo, M., Kang, T., Vo, G., Trong, T., Song, K., and Choi, H., Biologically Inspired Control of Quadruped Walking Robot, International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 7, pp. 577-584 (2009).

مراجع

[1] Santos, P., Garcia, E., and Estremera, J., Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots, Madrid.: Springer Science (2007).

[2] Raibert, M.H., Legged Robots, communications of the ACM, vol. 29, No. 6, pp. 499-514 (1986)

[3] Berns, K., Walking Machines Catalogue (2006)
(http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/RobotActuation/2002_MarcoMelo_VascoQuinteiro/Projecto/Artigos_net/catalogo/walking_machines_katalog/walking_machines_katalog.html).

[4] Kordic, V., Lazinica, A., and Merdan, M., Cutting Edge Robotics, Mammendorf.: Robert Mayer Scholz, Ch. 1, 8 (2005).

[5] Artificial Intelligence robot (AIBO), Wikipedia (<http://en.wikipedia.org/wiki/AIBO>).

[6] G-Dog, HPI, Inc. (<http://www.hpirobot.jp/g-dog/en/product/index.html>).

[7] LittleDog - The Legged Locomotion Learning Robot, Boston Dynamics Inc., U.S.A. (http://www.bostondynamics.com/robot_littledog.html).

[8] Pongas, D., Mistry, M., and Schaal, S., A Robust Quadruped Walking Gait for Traversing Rough Terrain, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy (2007).

[9] Robots Take Center Stage in U.S. War in Afghanistan, FOX News, March 23, 2009 (<http://www.foxnews.com/story/0,2933,509684,00.html>).

[10] Raibert, M., et al, BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot, Proceedings of the 17th World Congress, IFAC, Seoul, Korea (2008).

- [34] Bai, S., Low, K.H., A new free gait generation for quadrupeds based on primary/secondary gait, in: Proceeding of 1999 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., vol. 2, pp. 1371–1376 (1999).
- [35] Pal, P.K., Jayarajan, K., Generation of free gait—a graph search approach, IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, pp. 299–305 (1991).
- [36] Pack, D.J., Kang, H.S., Free gait control for a quadruped walking robot, Laboratory Robotics and Automation, vol. 11, no. 2, pp. 71–81 (1999).
- [37] Eldershaw, C., Yim, M., Motion planning of legged vehicles in an unstructured environment, in: Proceeding of 2001 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., vol. 4, pp. 3383–3389 (2001).
- [38] Bretl, T., Motion planning of multi-limbed robots subject to equilibrium constraints: the free-climbing robot problem, International Journal of Robotics Research, vol. 25, no. 4, pp. 317–342 (2006).
- [39] Estremera, J., de Santos, P.G., Generating continuous free crab gaits for quadruped robots on irregular terrain, IEEE Transactions on Robotics, vol. 21, no. 6, pp. 1067–1076 (2005).
- [40] Hauser, K., Bretl, T., Latombe, J.-C., Motion planning for legged robots on varied terrain, International Journal of Robotics Research, vol. 27, no. 11-12, pp. 1325–1349 (2008).
- [41] Chillian, A., Hirschmuller, H., Stereo camera based navigation of mobile robots on rough terrain, in: Proceeding of 2009 IEEE Int. Conf. Robots Syst., USA, pp. 4571–4576 (2009).
- [42] Chen, W., Low, K., Yeo, S., Adaptive gait planning for multi-legged robots with an adjustment of center-of-gravity, Robotica, vol. 17, pp. 391–403 (1999).
- [43] Kolter, J.Z. and Andrew, Y.N., The Stanford LittleDog: A Learning and Rapid Replanning Approach to Quadruped Locomotion, Int. Journal of Robotics Research, vol. 30, no. 2, pp. 150–174 (2010).
- [44] Vernaza, P., Likhachev, M., Bhattacharya, S., Chitta, S., Kushleyev, A., Lee, D.D., Search-based planning for a legged robot over rough terrain, in: Proceeding of 2009 IEEE Int. Conf. Robots Syst., USA, vol. 12, pp. 2380–2387 (2009).
- [45] Kalakrishnan, M., Buchli, J., Pastor, P., Mistry, M., Schaal, S., Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain, International Journal of Robotics Research, vol. 30, no. 2, pp. 236–258 (2011).
- [46] Saranli, U., Buehler, M., Koditschek, D., RHex – a simple and highly mobile hexapod robot, International Journal of Robotics Research, vol. 20, no. 7, pp. 616–631 (2001).
- [47] Mennitto, G., Buehler, M., A compliant articulated robot leg for dynamic locomotion, Robotics
- [20] Li, Y., Li, B., Ruan, J., and Rong, X., Research of Mammal Bionic Quadruped Robots: a Review, IEEE Conference on Robotics Automation and Mechatronics, Qingdao, China, pp.166-171 (2011).
- [21] Ugurlu, B., Havoutis, I., Semini, C., and Caldwell, D., Dynamic Trot-Walking with the Hydraulic Quadruped Robot - HyQ: Analytical Trajectory Generation and Active Compliance Control, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan (2013).
- [22] TMU-Bot Final technical report, The Ministry of Industries, Mines and Business, October 2014.
- [23] AppinKnowledge Solutions, Robotics, New Delhi:BPB Publications (2007).
- [24] Zucker, M., et. al., An Optimization Approach to Rough Terrain Locomotion, In IEEE International Conference on Robotics and Automation Convention Discrete, Anchorage, Alaska, USA (2010).
- [25] Kalakrishnan, M., Buchli, J., Pastor, P., Mistry, M., Schaal, S., Fast, Robust Quadruped Locomotion over Challenging Terrain, In IEEE International Conference on Robotics and Automation Convention Discrete, Anchorage, Alaska, USA (2010).
- [26] McGhee, R.B., Iswandhi G.I., Adaptive locomotion of a multi-legged robot over rough terrain, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-9, vol. 4 pp. 176–182 (1979).
- [27] Vukobratovic, M., Borovac, B., Zero moment point- thirty five years of its life, International Journal of Humanoid Robotics vol. 1, no 1, pp. 161-162 (2004).
- [28] Santos, P. G., Jimenez, M. A., Armada, M. A., Dynamic Effects in Statically Stable Walking Machines, Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol.23, pp. 71-85, (1998).
- [29] Garcia, E., Santos, P. G., An improved energy stability margin for walking machines subject to dynamic effects, Robotica, vol. 23, pp.13 - 20 (2005).
- [30] McGhee, R. B. and Frank, A. A., On the stability properties of quadruped creeping gaits, Mathematical Biosciences, vol. 3, pp. 331–351 (1968).
- [31] Messuri, D., Klein, C., Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough terrain locomotion, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 1, no. 3, pp. 132–141 (1985).
- [32] Lee, T.T., Shih, G.L., A study of the gait control of a quadruped walking vehicle, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 2, no. 2, pp. 61–69 (1986).
- [33] Shih, C.L., Klein, C.A., An adaptive gait for legged walking machines over rough terrain, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 4, pp. 1150–1155 (1993).

- [53] Garcia, E., Santos, P., G., On the Improvement of Walking Performance in Natural Environments by a Compliant Adaptive Gait, *IEEE Transaction on Robotics*, vol.22, no. 6, pp. 1240-1253 (2006).
- [54] Jiang, W., Liu, A., Howard, D., Optimization of legged robot locomotion by control of foot-force distribution, *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 26, no. 4, pp. 311–323 (2004).
- [55] Buchli, J., Kalakrishnan, M., Mistry, M., Pastor, P., Schaal, S., Compliant quadruped locomotion over rough terrain, *The IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, Louis, USA (2009).
- [56] Loc, V., et. al., Sensing and gait planning of quadruped walking and climbing robot for traversing in complex environment, *International journal of Robotics and Autonomous Systems*, Elsevier, no.58, pp.666-675 (2010).
- [57] Rutishauser, S., Sprówitz, A., Righetti, L., Ijspeert, A.J., Passive compliant quadruped robot using central pattern generators for locomotion control, *2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2008*, Scottsdale, AZ, pp. 710-715 (2008).
- [58] Pratzsch, H., Boehm, W., Paluszny, M., Bézier and B-Spline Techniques, *Springer Science & Business Media* (2002).
- and *Autonomous Systems*, Vol. 18, no. 3, pp. 337-344 (1996).
- [48] Wyffels, F., D'Haene, M., Waegeman, T., Caluwaerts, K., Nunes, C., Schrauwen, B., Realization of a passive compliant robot dog, *3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, Tokyo, Japan, pp. 882-886 (2010)
- [49] Cerda, G. M. A., Dallali, H. B., Brown, M., Control of a compliant humanoid robot in double support phase: A geometric approach, *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 9, no. 1 (2012).
- [50] Gorinevsky, D., Schneider, A., Force control in locomotion of legged vehicles over rigid and soft surfaces, *Int. J. Robot. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 4–23 (1990).
- [51] Bevely, D., Dubowsky, S., Mavroidis, C., A simplified Cartesian computed torque controller for highly geared systems and its application to an experimental climbing robot, *J. Dyn. Syst., Meas., Control*, vol. 122, pp. 27–32 (2000).
- [52] Palis, P., Rusin, V., Schneider, A., Adaptive impedance/force control of legged robot systems, in *Proc. Int. Conf. Climbing, Walking Robots*, Karlsruhe, Germany, pp. 323–329 (2001).

بررسی روش‌های تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌های پیش‌بین و راهکارهای نوین تنظیم

علی خاکی صدیق^۱، پیمان باقری^۲

^۱ استاد، دانشکده مهندسی برق، قطب علمی کنترل صنعتی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Sedigh@kntu.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری کنترل، قطب علمی کنترل صنعتی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Bagheri.Peyman@ee.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۳/۴/۳، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۳/۸/۲۱)

چکیده: کنترل کننده‌های پیش‌بین با ویژگی‌های منحصر به فرد خود از قبیل حل مسئله قید، برخورد مهندسی با تأخیر و کاربرد در سیستم‌های چندمتغیره جایگاه ویژه‌ای در صنعت یافته‌اند. اما همانند سایر راهکارهای طراحی سیستم‌های کنترلی، کارکرد مطلوب و درست این کنترل کننده‌ها به تنظیم مناسب پارامترهای آن‌ها وابسته است. مسأله تنظیم کنترل پیش‌بین با توجه به ارتباط پیچیده و غیرخطی پارامترهای آن با عملکرد سیستم حلقه بسته مسأله‌ای بسیار دشوار است و در سال‌های اخیر توجه فراوانی به آن شده است. در این مقاله، نخست به بررسی تأثیر هر کدام از پارامترها بر رفتار کنترل پیش‌بین پراخته می‌شود و سپس مسأله تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین مورد توجه قرار می‌گیرد و ضمن مطالعه مروری روش‌های تنظیم ارائه شده در مراجع مختلف، راهکارهای نوین تنظیم بررسی شده‌اند. تأکید این مقاله بر روش‌هایی بر پایه‌های نظری است که به عبارت‌های بسته‌ای برای تنظیم منجر می‌شوند، زیرا فرمول‌های بسته بر پایه‌های نظری در تحلیل‌های حلقه بسته بسیار سودمنداند. هم‌چنین با استفاده از یک مثال، بعضی از روش‌های تنظیم را که عبارت‌های بسته تنظیم دارند مقایسه نموده و نقاط قوت و ضعف هر کدام بیان شده است.

کلمات کلیدی: کنترل پیش‌بین، تنظیم پارامترهای کنترل کننده، مدل مرتبه اول با تأخیر.

Review of Model Predictive Control Tuning Methods and Modern Tuning Solutions

Ali Khaki Sedigh, Peyman Bagheri

Abstract: Model Predictive Controllers (MPC) are effective control strategies widely used in the industry. The desirable MPC performance requires appropriate tuning of the controller parameters. However, the MPC tuning parameters are related to the closed loop characteristics in a complex and nonlinear manner, so the tuning procedure is an intricate problem, which has received much attention in recent decades. In this paper, the effects of each tuning parameter on the closed loop behavior are studied. Then, the issue of MPC tuning problem is considered and a review of the available tuning methods are provided. Modern tuning strategies are also considered. The emphasis of this paper is on theoretical tuning strategies which lead to closed form tuning equations that can be used in closed loop analysis. Finally, a simulation study is employed to have a comparative study on some closed form tuning equations and the advantages and disadvantages of each method is clarified.

Keywords: Model Predictive Control, Controller tuning, First order plus dead time model.

۱- مقدمه

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل^۱ به عنوان یکی از موفق‌ترین روش‌های کنترل فرآیند پیشرفته بیش از چهار دهه است که مطرح گردیده است. استقبال روزافزون از این روش کنترلی در صنعت و دانشگاه‌ها اهمیت آن را بیش از پیش نمایان می‌سازد. کاربردهای موفق این خانواده از کنترل‌کننده‌ها در صنایع مختلف، مخصوصاً صنایع شیمیایی مانند نفت و پتروشیمی در مراجع متعددی از بدو ارائه این روش‌ها تا سال‌های اخیر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۱۲-۱].

ویژگی‌های منحصر به فردی مانند قابلیت حل مسئله‌ی قید، برخورد اصولی و مهندسی با تاخیر و کنترل سیستم‌های چندمتغیره از دلایل موفقیت کنترل پیش‌بین در این چند دهه است. یکی از چالش‌های به کارگیری کنترل‌کننده‌های پیش‌بین بررسی اثر و تنظیم پارامترهای آن‌ها است. مسأله تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین از همان ابتدا مورد توجه محققان بوده است. با توجه به ارتباط پیچیده و غیرخطی پارامترهای تنظیم کنترل‌کننده‌های پیش‌بین با پایداری، عملکرد و مقاومت سیستم حلقه بسته، مسأله تنظیم دشوار و حل کامل آن مسأله بازی در حوزه کنترل پیش‌بین است. در سال‌های اخیر روش‌های فراوانی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین انجام شده است. در [۱۳] روش‌های تنظیم ارائه شده از سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۴ آورده شده است. کارهای جدیدتر تا سال ۲۰۰۹ در [۱۴] بررسی شده است. هم‌چنین در [۱۵] روش‌های تنظیم ارائه شده برای کنترل ماتریس دینامیکی^۲ معرفی شده‌اند. در این مقاله به بررسی مروری روش‌های تنظیم ارائه شده برای پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده‌های پیش‌بین پرداخته می‌شود. مطالعات انجام شده در زمینه تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین را می‌تون به سه دسته اصلی تقسیم کرد: روش‌های متفرقه تنظیم، تنظیم بر پایه روش‌های عددی و محاسبات نرم و فرمول‌های بسته تنظیم. هر کدام از این دسته‌ها به زیر دسته‌های کوچک‌تری تقسیم شده و کارهای انجام شده بر اساس این دسته‌بندی‌ها مطالعه خواهد شد. در این دسته‌بندی، فرمول‌های بسته تنظیمی که برپایه‌های نظری ارائه شده‌اند اهمیت بیشتری دارند زیرا این فرمول‌ها در تحلیل‌های حلقه بسته بسیار سودمند است و دید خوبی از رفتار سیستم حلقه بسته از نظر پایداری، عملکرد و مقاومت ایجاد می‌کند. این روش‌ها با تفصیل بیشتری بررسی می‌شوند. در انتهای مقاله با استفاده از یک مثال، برخی از روش‌های تنظیم را که فرمول‌های بسته دارند مقایسه نموده و نقاط قوت و ضعف هر کدام نشان داده شده است.

در بخش دوم مقاله ابتدا ساختار کلی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین معرفی شده و سپس به کنترل ماتریس دینامیکی به عنوان یکی از کاربردی‌ترین روش‌های کنترل پیش‌بین می‌پردازیم. سپس پارامترهای قابل تنظیم معرفی شده و از طریق شبیه‌سازی تأثیر آن‌ها در کنترل ماتریس دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس دسته‌بندی روش‌های تنظیم

معرفی می‌گردد که در بخش‌های بعد بر اساس همین دسته بندی کارها مطالعه خواهند شد. در بخش سوم به بررسی روش‌های تنظیم متفرقه پرداخته شده است. بخش چهارم روش‌های تنظیمی را که مبتنی بر بهینه سازی به روش‌های عددی و یا محاسبات نرم هستند معرفی می‌کند. در بخش پنجم به روش‌های تنظیمی که فرمول بسته ارائه نموده‌اند می‌پردازیم. با توجه به اهمیت این دسته از روش‌ها، دسته‌بندی کوچک‌تری ارائه شده و با جزئیات بیشتری به این دسته از روش‌ها پرداخته شده است. در بخش ششم، مطالعه مقایسه‌ای از روش‌های تنظیم فرمول بسته بر روی فرآیند^۳ pH، پرداخته شده است. در نهایت در بخش نهمی این مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و مسأله تنظیم

پارامترهای آن

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل چند دهه است که به عنوان موفق‌ترین روش کنترل فرآیند پیشرفته جایگاه بسیار خوبی در صنایع مختلف پیدا کرده است. کاربردهای موفق این کنترل‌کننده‌ها از سال ۱۹۷۵ تا کنون در مراجع بسیاری آورده شده است [۱۲-۱]. در این بخش ابتدا کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدل به صورت مختصر معرفی می‌شود. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به روش‌های کنترلی اطلاق می‌شود که در آن‌ها روند زیر اجرا می‌شود [۶]:

- پیش‌بینی رفتار آینده سیستم در طول افق پیش‌بین^۴ با استفاده از مدلی که برای فرآیند در نظر گرفته شده است،
- تعریف یک تابع معیار^۵ به عنوان هدف بهینه‌سازی،
- حل مسأله بهینه‌سازی با استفاده از مدل پیش‌بین به منظور به دست آوردن سیگنال‌های کنترلی بهینه در طول افق کنترل^۶،
- اعمال اولین سیگنال کنترلی بهینه در طول افق کنترل و اجرای مجدد همین روند.

روش‌های مختلف کنترل پیش‌بین بر اساس سه بند فوق پایه‌گذاری شده‌اند. به عنوان دو نمونه معروف می‌توان به کنترل ماتریس دینامیکی [۱۶] و کنترل پیش‌بین تعمیم یافته^۷ [۱۷] که به ترتیب از پاسخ پله و تابع تبدیل برای پیش‌بینی رفتار خروجی سیستم استفاده می‌کند، اشاره نمود.

۲-۱ کنترل ماتریس دینامیکی سیستم‌های تک ورودی-

تک خروجی

در این بخش روابط حاکم بر طراحی کنترل ماتریس دینامیکی ارائه شده و پارامترهای تنظیم بررسی می‌شوند. همان‌طور که اشاره شد، کنترل

^۳ Power of Hydrogen^۴ Prediction Horizon^۵ Cost Function^۶ Control Horizon^۷ Generalized Predictive Control (GPC)^۱ Model Based Predictive Control^۲ Dynamic Matrix Control (DMC)

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u(n)} & ([w(n) - \hat{y}_p(n)]^T Q [w(n) - \hat{y}_p(n)] \\ & + [\Delta u(n)]^T R [\Delta u(n)]) \\ \text{s. t.} & \\ u_{\min} & \leq u(n+i) \leq u_{\max}, \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \\ y_{\min} & \leq \hat{y}_p(n+j|n) \leq y_{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, P \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن $w(n) = [w(n+1) \ w(n+2) \ \dots \ w(n+P)]^T$ سیگنال مرجع، Q و R ماتریس های وزنی مثبت نیمه معین و مثبت معین هستند. در حالتی که قیدهای مسأله بهینه سازی (۷) فعال نباشند، جواب بهینه عبارت است از:

$$\Delta u(n) = (G^T Q G + R)^{-1} G^T Q (w(n) - f(n)) \quad (8)$$

اولین عنصر $\Delta u(n)$ که $\Delta u(n)$ است، برای محاسبه $u(n)$ استفاده و به سیستم اعمال می شود. افق مدل N ، افق پیش بین P ، افق کنترل M و ماتریس های وزنی Q و R پارامترهای قابل تنظیم کنترل ماتریس دینامیکی هستند.

۲-۲ مسأله تنظیم پارامترهای کنترل کننده های پیش بین

پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده های پیش بین عبارت اند از: زمان نمونه برداری (T_s)، افق پیش بینی (P) یا حد بالا و پایین افق پیش بینی (N_1, N_2)، افق کنترل (M)، افق مدل (N) که در کنترل ماتریس دینامیکی تعریف می شود، ضریب یا ماتریس های وزنی در تابع هزینه، (λ) برای حالت تک ورودی- تک خروجی و (Q, R) برای حالت چند ورودی- چند خروجی و قطب فیلتر نرم کننده ورودی مرجع (α). در ادامه به بررسی هر کدام از این پارامترها و تأثیر آن ها بر عملکرد کنترل کننده می پردازیم.

زمان نمونه برداری. انتخاب مناسب زمان نمونه برداری در گسسته سازی سیستم تأثیر بسزایی دارد و بزرگ تر از اندازه شدن آن می تواند باعث از دست رفتن بخشی از رفتار دینامیکی سیستم گردد هم چنین بیش از اندازه کوچک بودن آن حجم محاسباتی بالایی داشته و خطاهای محاسباتی را به همراه خواهد داشت. در بعضی از مراجع، به نحوه انتخاب زمان نمونه برداری مناسب پرداخته شده است. با این وجود، زمان نمونه برداری همیشه به عنوان پارامتر تنظیم مطرح نیست چون در اغلب کاربردهای عملی زمان نمونه برداری توسط محدودیت های موجود در سیستم سخت افزار به کاربر تحمیل می شود.

افق پیش بینی. اگر حد پایین افق پیش بینی مقدار بزرگی انتخاب شود، به این معنی است که خطا در زمان های اولیه مهم نیست و این باعث کند شدن پاسخ در حالت گذرا می شود. هم چنین این حد اگر کوچک تر از میزان تأخیر سیستم انتخاب شود تأثیری در بهینه سازی نخواهد داشت. در سیستم های پایدار، زمان نشست سیستم حلقه باز برای حد بالای افق پیش بینی در نظر گرفته می شود.

ماتریس دینامیکی از پاسخ پله برای پیش بینی استفاده می کند. برای سیستم پایدار تک ورودی- تک خروجی داریم:

$$y_m(n) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(n-i) \quad (1)$$

که در آن $y_m(n)$ و $u(n)$ به ترتیب خروجی مدل و سیگنال کنترلی در لحظه نمونه برداری n هستند، g_i آمین پاسخ پله سیستم و $\Delta u(n) = u(n) - u(n-1)$ با توجه به رابطه (۱) می توان پیش بینی j گام جلوتر خروجی سیستم را در لحظه نمونه برداری n به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \hat{y}_p(n+j|n) &= \sum_{i=1}^j g_i \Delta u(n+j-i) \\ &+ \sum_{i=j+1}^{\infty} g_i \Delta u(n+j-i) + d(n) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن $d(n) = y_p(n) - y_m(n)$ عبارت تصحیح کننده و در برگزیده نامعینی ها و اغتشاش ها است که بهترین پیش بینی آن در آینده، مقدار کنونی آن است. $y_p(n)$ خروجی سیستم در لحظه نمونه برداری n است. به این ترتیب رابطه (۲) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\hat{y}_p(n+j|n) = \sum_{i=1}^j g_i \Delta u(n+j-i) + f(n+j) \quad (3)$$

که در آن $f(\cdot)$ پاسخ آزاد^۱ سیستم بوده و حاوی اطلاعات گذشته و کنونی سیستم است و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$f(n+j) = \sum_{i=1}^N (g_{i+j} - g_i) \Delta u(n-i) + y_p(n) \quad (4)$$

که در آن N افق مدل^۲ است و $i > N$ ، $g_{i+j} - g_i \approx 0$ حال در طول افق پیش بین، پیش بینی خروجی سیستم به صورت زیر نوشته می شود:

$$\hat{y}_p(n) = \begin{bmatrix} \hat{y}_p(n+1|n) \\ \hat{y}_p(n+2|n) \\ \vdots \\ \hat{y}_p(n+P|n) \end{bmatrix}_{P \times 1} = G \Delta u(n) + f(n) \quad (5)$$

که در آن

$$\Delta u(n) = \begin{bmatrix} \Delta u(n) \\ \Delta u(n+1) \\ \vdots \\ \Delta u(n+M-1) \end{bmatrix}, \quad f(n) = \begin{bmatrix} f(n+1) \\ f(n+2) \\ \vdots \\ f(n+P) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ g_M & g_{M-1} & \dots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_P & g_{P-1} & \dots & g_{P-M+1} \end{bmatrix}$$

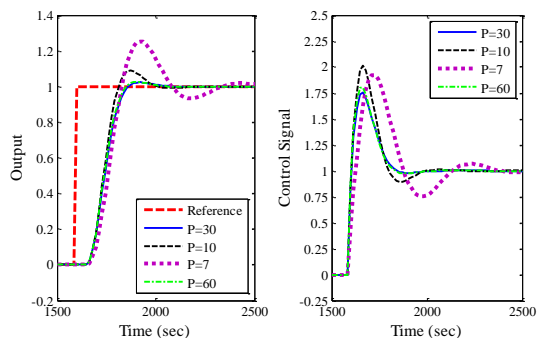
و P افق پیش بین، M افق کنترل و G ماتریس دینامیکی^۳ نام دارد. اکنون مسأله بهینه سازی زمان محدود زیر را در نظر بگیرید:

¹ Free Response

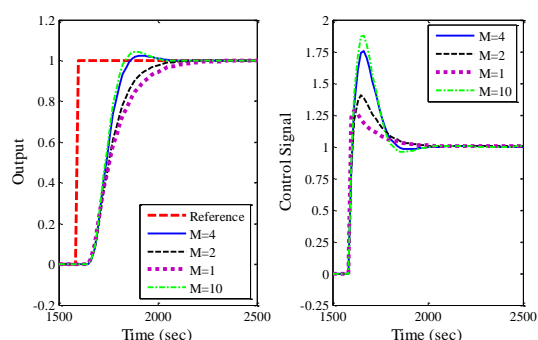
² Model Horizon

³ Dynamic Matrix

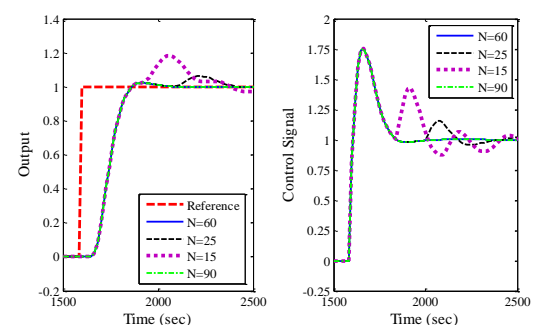
می‌دهد که این پارامتر، پارامتر مناسبی برای تنظیم نیست و بهتر است مقدار مناسبی برای آن در نظر گرفته شود. در شکل ۴ تأثیر تغییر پارامتر وزنی موجود در تابع معیار به عنوان با اهمیت‌ترین پارامتر قابل تنظیم این کنترل‌کننده دیده می‌شود.



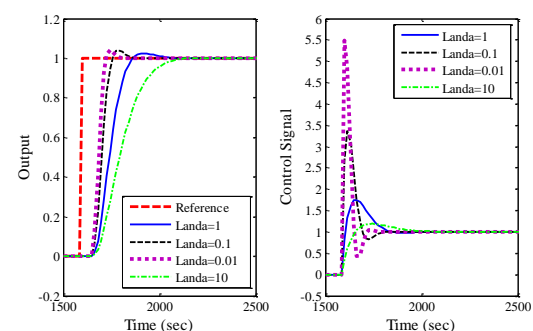
شکل ۱: تأثیر افق پیش‌بینی بر پاسخ سیستم حلقه بسته.



شکل ۲: تأثیر افق کنترل بر پاسخ سیستم حلقه بسته.



شکل ۳: تأثیر افق مدل بر پاسخ سیستم حلقه بسته.



شکل ۴: تأثیر پارامتر وزنی موجود در تابع معیار بر پاسخ سیستم حلقه بسته.

افق کنترل. افق کنترل میزان درجه آزادی کنترل‌کننده است و حداکثر می‌تواند برابر با افق پیش‌بینی باشد. حد پایین افق کنترل برای سیستم‌های پایدار، برابر یک است. برای سیستم‌های دینامیکی ساده که با مدل مرتبه اول با تأخیر^۱ توصیف می‌شوند، عملکردهای مطلوب قابل حصول، با افق کنترل یک به دست می‌آید [۱۸]. ولی برای سیستم‌های پیچیده‌تر عملکرد مطلوب با یک درجه آزادی قابل دستیابی نیست.

ماتریس‌های وزنی در تابع معیار. این پارامترها تأثیر گذارترین پارامترها در پایداری، عملکرد و مقاومت سیستم حلقه بسته هستند [۱۹]. ماتریس‌های وزنی در مقیاس^۲ کردن خطاهای پیش‌بینی و تغییرات سیگنال‌های کنترلی، جلوگیری از بدخیمی^۳ در محاسبه سیگنال کنترلی [۱۹] و محدود کردن سیگنال کنترلی نقش دارند.

قطب فیلتر نرم‌کننده ورودی مرجع. در عمل، ورودی مرجع بعد از عبور از یک فیلتر به سیستم اعمال می‌شود. این فیلتر غالباً یک فیلتر پایین‌گذر با یک قطب و بهره حالت ماندگار واحد بوده و محل قطب فیلتر یکی از پارامترهای تنظیم است.

۱-۲-۲ بررسی تأثیر پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی در پاسخ سیستم حلقه بسته
در این بخش تأثیر پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی برای سیستم خطی تک ورودی- تک خروجی با شبیه‌سازی مطالعه گردیده و نکاتی در مورد هر پارامتر و تأثیر آن بیان شده است. سیستم زیر را در نظر بگیرید [۱۹]:

$$G_p(s) = \frac{e^{-50s}}{(150s + 1)(25s + 1)} \quad (9)$$

فرض کنیم بین مدل و فرآیند اختلافی وجود نداشته باشد، یعنی $G_m(s) = G_p(s)$. در این مقاله اندیس m و p به ترتیب برای نشان دادن مدل و فرآیند واقعی به کار گرفته شده است. در [۱۹] برای سیستم فوق زمان نمونه‌برداری $T_s = 16 \text{ sec}$ پیشنهاد شده است که مناسب می‌باشد. مقادیر زیر برای پارامترهای تنظیم انتخاب شده است:

$$N = 60, P = 30, M = 4, \lambda = 1 \quad (10)$$

فیلتر ورودی مرجع نیز در نظر گرفته نمی‌شود. برای نشان دادن تأثیر هر پارامتر، آن پارامتر را تغییر داده و مابقی پارامترها در همان مقدار نامی داده شده در رابطه (۱۰) ثابت نگه داشته می‌شوند. در شکل ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب تأثیر تغییر افق پیش‌بینی، کنترل و مدل دیده می‌شود. افزایش افق پیش‌بینی پایداری بیشتری ایجاد می‌کند. هم‌چنین دیده می‌شود که با کم شدن افق کنترل سرعت پاسخ سیستم حلقه بسته کاهش می‌یابد. در شکل ۳ دیده می‌شود که با کم کردن افق مدل پاسخ سیستم حلقه بسته از حالت مطلوب خارج می‌شود چون فرض $g_{i+j} - g_i \approx 0, i > N$ نقض می‌شود. بیشتر از حد زیاد شدن آن نیز بی‌تأثیر است. این نکته نشان

1- First Order plus Dead Time (FOPDT) Models

2- Scaling

3- ill-condition

۲-۳ دسته بندی روش های تنظیم پارامترهای

کنترل کننده های پیش بین

بررسی روش های تنظیم ارائه شده از سال ۱۹۸۰ تا سال ۱۹۹۴ در [۱۳] و کارهای جدیدتر تا سال ۲۰۰۹ در [۱۴] مرور شده اند. در [۱۵] روش های تنظیم ارائه شده برای کنترل ماتریس دینامیکی آمده است. در [۱۴] بررسی بر اساس پارامترهای تنظیم است و نویسندگان برای هر پارامتر قابل تنظیم، کارهای ارائه شده را معرفی نموده اند. دیدگاهی که در این مقاله در پیش گرفته شده است بر اساس ماهیت روش تنظیم است. با توجه به این که نقش پارامترهای وزنی در تابع معیار نسبت به دیگر پارامترهای قابل تنظیم بیشتر است، دسته بندی که ارائه می شود نیز بر اساس روش تنظیم ارائه شده برای این پارامترها است. روش های تنظیم را به صورت کلی زیر تقسیم بندی کرده ایم:

- روش های متفرقه تنظیم:
 - ✓ روش های تجربی بر اساس سعی و خطا،
 - ✓ روش های تنظیم با در نظر گرفتن سیستم های خاص،
 - ✓ روش های تنظیم برای کنترل کننده های پیش بین خاص و یا پارامترهای خاص،
- تنظیم بر پایه روش های عددی و محاسبات نرم.
- فرمول های بسته تنظیم:
 - ✓ مبتنی بر روش های تجربی،
 - ✓ روش های بر پایه های نظری:
 - روش های آماری،
 - روش های تحلیلی.

در این دسته بندی، دسته آخر که عبارات تحلیلی برای تنظیم ارائه می کنند اهمیت بیشتری دارند زیرا فرمول های داده شده در تحلیل رفتار سیستم حلقه بسته اهمیت دارند.

۳- روش های متفرقه تنظیم

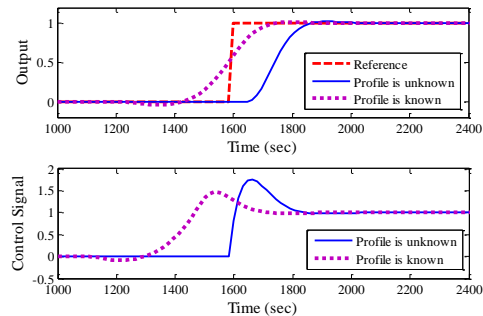
در این بخش ابتدا روش هایی معرفی می شوند که فقط به ارائه دستورالعمل ها و نکات کلی در مورد تنظیم پارامترها و یا تأثیر آنها بر پایداری، عملکرد و مقاومت سیستم بسنده کرده اند. سپس به مطالعاتی اشاره می شود که مسأله تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین را برای یک سیستم خاص و یا روش های خاص کنترل پیش بین و پارامترهای خاص این کنترل کننده حل کرده اند.

۳-۱ روش های تجربی بر اساس سعی و خطا

در بحث تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین، دسته ای از مطالعات به صورت تجربی به ارائه مطالبی نکته وار و کلی در مورد پارامترها پرداخته اند. در این بخش به مطالعه تعدادی از کارهای برجسته در این دسته از روش ها می پردازیم.

اولین ایده مطرح شده برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین مربوط به سال ۱۹۸۰ است [۲۰]. برای کنترل کننده های پیش بین تک ورودی-

شکل ۴ نشان می دهد که افزایش پارامتر وزنی موجب کند شدن سرعت پاسخ سیستم حلقه بسته و کاهش تغییرات سیگنال کنترلی می شود. در شکل های ۱ تا ۴ فرض شده است ورودی مرجع از قبل مشخص نباشد. در شکل ۵ پاسخ سیستم حلقه بسته در حالتی که آینده پروفایل ورودی مرجع مشخص باشد با حالتی که آینده ورودی مرجع وجود نداشته باشد، مقایسه شده است. دیده می شود که لختی و تأخیر سیستم تا حدی جبران گردیده است و هم چنین به دلیل اضافه شدن صفرهای خارج از دایره واحد توسط کنترل کننده، پاسخ غیر می نیمم فاز شده است.

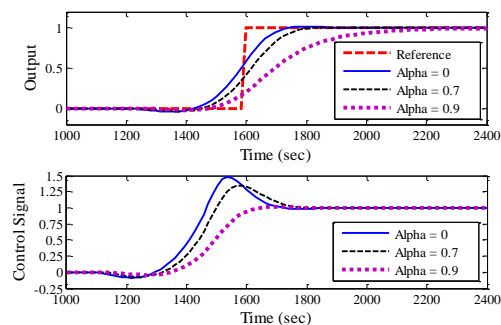


شکل ۵: تأثیر استفاده از اطلاعات آینده پروفایل ورودی مرجع.

در شکل ۶ تأثیر فیلتر نرم کننده ورودی مرجع دیده می شود. همان طور که اشاره شد، این فیلتر باعث کند شدن پاسخ سیستم حلقه بسته و نرم شدن سیگنال کنترلی می شود. داریم:

$$w(n) = \frac{1 - \alpha}{z - \alpha} w_1(n) \quad (11)$$

که در آن $w(n)$ سیگنال نرم شده ورودی مرجع $w_1(n)$ است و α قطب فیلتر است.



شکل ۶: تأثیر فیلتر نرم کننده (آینده پروفایل ورودی مرجع مشخص است).

جمع بندی نتایج شبیه سازی ها به صورت زیر است:

- پارامتر وزنی تأثیر زیادی بر پاسخ حلقه بسته دارد و به عنوان موثرترین پارامتر قابل تنظیم مطرح است.
- افق کنترل و افق پیش بینی به عنوان پارامترهای قابل تنظیم تأثیر محدودی بر سیستم حلقه بسته دارند و حد بالایی برای آنها وجود دارد.
- افق مدل پارامتر مناسبی برای تنظیم نیست و مقدار آن باید مناسب انتخاب شود.

$$\lambda_{opt} \approx 500k^{1.5} \quad (۱۲)$$

که در آن k بهره حالت ماندگار سیستم حلقه باز را نشان می‌دهد. با توجه به این که به حد فاز بالا نیاز است، افق کنترل یک در نظر گرفته شده است و افق پیش‌بینی هم بر اساس زمان خیز سیستم حلقه باز انتخاب شده است. در [۲۷] برای کنترل سیستم چندمتغیره فشار از کنترل ماتریس دینامیکی استفاده شده است. در این مقاله برای تنظیم افق کنترلی و ماتریس‌های وزنی روشی به نام روش سطوح پاسخ^۴ ارائه شده است. [۲۸] برای کنترل فرآیند تولید پنسیلین^۵ از کنترل پیش‌بین تعمیم یافته بهره گرفته و روش تنظیمی با بررسی حساسیت انتگرال قدر مطلق خطا نسبت به پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده ارائه کرده است. در [۲۹] از روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تنظیم ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی کنترل‌کننده پیش‌بین تعمیم یافته برای کنترل فرآیند pH استفاده شده و با پیاده‌سازی عملی نتایج روش تنظیم ارائه شده از دید انواع خطاهای ردیابی بررسی شده است. در [۳۰] تنظیم پارامتر وزنی کنترل پیش‌بین تعمیم یافته برای کنترل سرعت سیستم راه اندازی^۶ مطرح شده است. در این مقاله به منظور افزایش مقاومت کنترل‌کننده، فیلتر نویز به مدل کنترل‌کننده افزوده شده و با در نظر گرفتن مقادیری تجربی برای این فیلتر، نتایج پیاده‌سازی آن در مقاله آورده شده است. کنترل شبکه انتقال آب آشامیدنی با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین چندمتغیره در [۳۱] بررسی شده است. در این مرجع تنظیم افق پیش‌بینی و وزن‌های موجود در تابع هزینه با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس قوانین فازی انجام شده است. در [۳۲] کنترل مبدل چهار مرحله‌ای^۷ با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین ارائه شده است که برای انتخاب عوامل وزنی مناسب، از معیار میانگین حاصل جمع مجذور خطای ردیابی استفاده شده است. در [۳۳] هدف کنترل ستون تقطیر با دو ورودی و دو خروجی است و تأثیر پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده پیش‌بین بر پاسخ سیستم حلقه بسته از طریق شبیه‌سازی بررسی شده است. کنترل سیستم ترکیبی^۸ باطری خودرو در [۳۴] مطرح شده است. کنترل‌کننده پیش‌بین با فرض افق پیش‌بینی بینهایت برای کنترل این سیستم در نظر گرفته شده و بر این اساس فرمول‌های تنظیمی ارائه شده است.

۳-۳ روش‌های تنظیم برای کنترل‌کننده‌های پیش‌بین

خاص و یا پارامترهای خاص

در کنار روش‌های معروفی مانند کنترل ماتریس دینامیکی و کنترل پیش‌بین تعمیم یافته روش‌های خاص دیگری نیز معرفی شده‌اند. برای برخی از این روش‌ها، روش‌های تنظیمی ارائه شده است. برای نمونه، [۳۵] کنترل پیش‌بین ساده شده^۹ را ارائه و روشی برای تنظیم پارامترهای

تک خروجی، پیشنهاد نرمالیزه کردن ضریب وزنی λ نسبت به بهره سیستم به صورت $\lambda = fk^2$ (که در آن k بهره سیستم حلقه باز است) اولین بار در [۲۰] ارائه شده است. این نرمالیزه کردن بسیار کاربردی بوده و پاسخ حلقه بسته را مستقل از بهره سیستم حلقه باز می‌کند. هم‌چنین اولین راهکار پیشنهادی برای تنظیم پارامترهای کنترل ماتریس دینامیکی روش‌های سعی و خطای روشمند بوده است که در [۲۱] مطرح شده است. [۲۲] جز اولین مقالات در زمینه بررسی تأثیر پارامترهای کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی بر پایداری سیستم حلقه بسته است. در این مقاله شرایط لازم و یا کافی را برای مقدار افق‌ها برای پایداری سیستم حلقه بسته بیان می‌کند. در [۲۳] تنظیم کنترل‌کننده پیش‌بین تعمیم یافته بیان شده است و تأثیر کم و یا زیاد کردن هر کدام از پارامترها بر پاسخ سیستم حلقه بسته بررسی شده است. در این مقاله، برای حد بالای افق پیش‌بینی بازه تأخیر سیستم تا زمان نشست پاسخ پله حلقه باز پیشنهاد شده است. هم‌چنین ذکر شده است که در انتخاب ضریب وزنی باید مصالحه‌ای بین عملکرد ردیابی و تغییرات سیگنال کنترلی انجام پذیرد. در این مقاله به نرمالیزه کردن ضریب وزنی نیز اشاره شده است و برای انتخاب آن یک مقدار اولیه نیز پیشنهاد شده است. در بسیاری از کتاب‌های کنترل پیش‌بین نیز مطالبی در مورد تنظیم پارامترها آمده است. برای مثال [۲۴] به صورت سرانگشتی قوانینی برای پارامترهای کنترل ماتریس دینامیکی آورده است. در [۴] نیز نکاتی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین تعمیم یافته بیان شده است. به عنوان مثال نویسنده در [۴] ذکر کرده است که افق کنترل باید بزرگ باشد و اختلاف افق پیش‌بینی و افق کنترل باید از زمان نشست سیستم حلقه باز بزرگ‌تر باشد. در [۲۵] ابتدا به بررسی چند روش تنظیم ارائه شده برای کنترل ماتریس دینامیکی پرداخته شده است. سپس تأثیر پارامترهای قابل تنظیم بر مسیر حرکت قطب‌های حلقه بسته با شبیه‌سازی بر روی یک سیستم مرتبه دوم مطالعه شده است. این کنترل‌کننده حل کرده‌اند.

۲-۳ روش‌های تنظیم با در نظر گرفتن سیستم‌های خاص

در این بخش مراد بررسی قرار داده می‌شود که مسأله تنظیم کنترل پیش‌بین را برای یک سیستم خاص حل نموده‌اند و به صورت عملی یا شبیه‌سازی روش خود را روی سیستم مد نظر پیاده‌سازی کرده‌اند. اولین کاری که در این دسته قرار می‌گیرد مربوط به سال ۱۹۹۲ است که در آن مسأله‌ی تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین تعمیم یافته برای سیستم کنترل عددی کامپیوتری^۱ مطرح شده است [۲۶]. اهداف تنظیم در این مقاله رسیدن به حد فاز^۲ بیشتر از ۴۵ درجه و حد بهره^۳ بیشتر از ۸dB است. تأثیر افق پیش‌بین و ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی بر حد بهره و حد فاز بررسی شده و فرمولی تجربی برای ضریب وزنی λ برای سیستم مدنظر به صورت زیر ارائه شده است:

^۴- Response Surface Method

^۵- Fed-batch Penicillin Production

^۶- Driver

^۷- Four-level flying-capacitor inverter

^۸- Hybrid

^۹- Simplified MPC (SMPC)

^۱- Computer Numerical Control (CNC)

^۲- Phase Margin

^۳- Gain Margin

روابطی که در مقاله ارائه شده است تنظیم می‌شوند. پیشنهاد مقاله برای زمان اعمال سیگنال ورودی مرجع میزان تأخیر سیستم با اضافه مرتبه سیستم است. در [۴۰] پارامتری قابل تنظیم، مشابه با ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی برای قسمت ردیابی در تابع معیار تعریف شده است. به این صورت که داریم:

$$J = \sum_{i=1}^P (\hat{y}(k+i|k) - y_{ref}(k+i|k))^2 + \lambda \sum_{i=1}^{M-1} (\Delta u(k+i|k))^2 \quad (16)$$

$$y_{ref}(k+i|k) = y_{sp}(k) - \alpha^i (y_{sp}(k) - y(k))$$

که در آن $y(k)$ مقدار واقعی خروجی اندازه‌گیری شده است و $y_{sp}(k)$ ورودی مرجع است. در این فرمول α پارامتر قابل تنظیم جدیدی است. علاوه بر پارامتر نرم‌کننده ورودی مرجع، پارامتر دیگری نیز در مرجع [۴۱] به همین منظور مطرح گردیده است. در این مقاله نویسندگان برای نرم کردن تغییرات سیگنال کنترلی پارامتر β را تعریف می‌کنند:

$$\Delta u(t+1) = \left(1 + \sum_{i=1}^j \beta^i \right) \Delta u(t), \quad (17)$$

$$\text{for } j = 1, 2, \dots, M-1, \quad 0 \leq \beta \leq 1$$

نویسندگان ادعا کرده‌اند که تنظیم این پارامتر ساده‌تر از λ بوده و با دید فیزیکی تری امکان‌پذیر است.

۴- تنظیم بر پایه روش‌های عددی و محاسبات

نرم

با توجه به پیشرفت چشمگیر در محاسبات عددی و امکان انجام محاسبات پیچیده بهینه‌سازی، محققانی به استفاده از این ابزار در مسأله تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین پرداخته‌اند. در این بخش به بررسی روش‌های تنظیمی پرداخته می‌شود که با استفاده از روش‌های عددی و یا با استفاده از روش‌های محاسبات نرم مانند شبکه‌های عصبی، فازی، الگوریتم ژنتیک و دیگر روش‌های عددی بهینه‌سازی به تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین می‌پردازند.

۴-۱ - تنظیم مبتنی بر الگوریتم‌های عددی

در سال ۲۰۰۰ تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین تعمیم یافته به روش بهینه‌سازی چند هدفه با الگوریتم ژنتیک مطرح شد [۴۲]. در این مقاله پارامترهای مد نظر افق کنترل و پیش‌بینی، فیلتر مربوط به نویز در مدل و زمان نمونه‌برداری بوده و ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی صفر فرض شده است. دو معیار بهینه‌سازی به صورت هم‌زمان برای حالت گذرا و ماندگار در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی این معیارها با الگوریتم ژنتیک انجام پذیرفته است. محققان دیگری نیز از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده پیش‌بین تعمیم یافته استفاده نموده‌اند [۴۳].

این کنترل‌کننده پیشنهاد می‌دهد. در این روش به جای بهینه‌سازی در طول افق، بهینه‌سازی فقط در یک نقطه انجام می‌پذیرد یعنی:

$$\hat{y}(t+P_c) = w(t+P_c) \quad (13)$$

که در آن \hat{y} خروجی پیش‌بینی شده و w ورودی مرجع است. به این ترتیب داریم $M = P = 1, \lambda = 0$. برای این کنترل‌کننده، پارامتر قابل تنظیم نقطه تطابق P_c است که عددی طبیعی می‌باشد. در این مقاله تابع تبدیل کنترل‌کننده محاسبه شده و با رسم نمودارهای مربوط به پایداری مقاوم حلقه بسته و با کم و زیاد کردن مقدار P_c تا رسیدن به مقدار مطلوب، این پارامتر تنظیم می‌شود. یکی از ویژگی‌های ضریب وزنی تابع معیار کنترل پیش‌بین، جلوگیری از ویژه شدن ماتریس $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ است. برای جلوگیری از ویژه شدن، ماتریس دینامیکی انتقال یافته^۱ [۳۶] و کنترل پیش‌بین تعمیم یافته اصلاح شده^۳ [۳۷] مطرح شده است. در روش اول ستون اول ماتریس \mathbf{G} بدون تغییر نگه داشته می‌شود ولی ستون بعدی به پایین انتقال پیدا کرده و از بالا به آن صفر افزوده می‌شود. مابقی ستون‌ها نیز به همین ترتیب تشکیل می‌شوند. در این روش پارامتر تنظیم مقدار انتقال است که عددی صحیح بوده و ضریب وزنی وجود ندارد. در روش دوم از ماتریس غیرقطری زیر برای ماتریس وزنی استفاده می‌شود:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & -R_1\lambda & -\lambda & -R_1\lambda & -\lambda & \dots \\ -R_1\lambda & 0 & -R_2\lambda & -\lambda & -R_2\lambda & \dots \\ -\lambda & -R_2\lambda & 0 & -R_2\lambda & -\lambda & \dots \\ -R_1\lambda & -\lambda & -R_2\lambda & 0 & -R_2\lambda & \dots \\ -\lambda & -R_2\lambda & -\lambda & -R_2\lambda & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (14)$$

این نوع وزن‌دهی اشکال مفهومی دارد زیرا عناصر قطری که نقش محدود کنندگی در تغییرات سیگنال کنترلی دارند در این فرمول صفر در نظر گرفته شده است. در [۳۸] برای سیستم مرتبه دوم با تأخیر روابط بازگشتی در ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین ارائه شده است که حجم محاسبات را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. در این مقاله سعی شده است که پارامترهای جدید کنترل‌کننده بر حسب پارامترهای مدل و ضریب وزنی نوشته شود. با توجه به ساده نبودن ارتباط پارامترهای جدید و ضریب وزنی، این پارامترها با توابعی غیرخطی از ضریب وزنی تخمین زده شده‌اند و روشی برای تنظیم آن‌ها بیان شده است.

همان‌طور که اشاره شد، مطالعاتی نیز وجود دارد که پارامترهای جدیدی معرفی کرده و سعی در تنظیم این پارامترها دارند. به عنوان مثال در [۳۹] تکیه اصلی روی سیگنال ورودی مرجع است. برای ورودی مرجع یک فیلتر پایین‌گذر به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\frac{1 - \alpha z^{-1}}{(1 - \alpha)(a + bz^{-1})}, \quad a + b = 1 \quad (15)$$

علاوه بر این، در این مرجع تنظیم زمان اعمال سیگنال ورودی مرجع نیز در نظر گرفته شده است. پارامترهای فیلتر فوق با توجه به زمان نشست و

¹- Coincidence Point

²- Shifted Dynamic Matrix Control (Shifted DMC)

³- Modified GPC

غیر خطی چندمتغیره مقید مطرح شده است. برای تنظیم پارامترها از قوانین فازی استفاده می‌شود. در [۵۲] بحث تنظیم خودکار کنترل پیش‌بین چندمتغیره مطرح شده است. در این مقاله، تنظیم مقاوم کنترل‌کننده نسبت به نامعینی با استفاده از روش min-max مد نظر است و برای بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات بهره گرفته شده است. در [۵۳] از روش گرادیان نزولی برای بروز رسانی پارامترهای تنظیم استفاده شده است. در این تنظیم افق‌ها و ماتریس‌های وزنی تنظیم می‌شوند.

۴-۲ - تنظیم برپایه مهندسی معکوس

تعدادی از محققان نیز از ایده مهندسی معکوس^۳ استفاده کرده‌اند و به صورت عددی روشی برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده پیش‌بین ارائه نموده‌اند. در این روش‌ها هدف تنظیم کنترل‌کننده پیش‌بین به نحوی است که این کنترل‌کننده به مانند یک کنترل‌کننده خطی ساده رفتار نماید. با معادل‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین با کنترل‌کننده‌های ساده‌تر این امکان ایجاد می‌شود که به جای تحلیل کنترل‌کننده پیش‌بین، کنترل‌کننده معادل تحلیل گردد. در این دسته از روش‌ها فرض معادل بودن کنترل‌کننده‌ها فقط زمانی مطرح است که قیده‌ها غیرفعال باشند. اولین کار در این دسته از روش‌ها در [۵۴] ارائه شده است. هدف این مقاله هدف آن است که در حالت غیرفعال بودن قیده‌ها، تابع معیار و بهره تخمین زن حالت کنترل‌کننده پیش‌بین طوری تعیین شود که رفتار کنترل‌کننده به مانند یک کنترل‌کننده مرتبه پایین و ساده‌تر باشد. با فرض افق پیش‌بین بینهایت روابطی برای تنظیم بدست آمده است. این ایده در [۵۵] تکمیل‌تر شده است. هم‌چنین ایده این دو مقاله در [۵۶] مورد استفاده قرار گرفته و بیشتر تاکید بر روی رویت‌گر و طراحی رویت‌گر مرتبه پایین است. در مراجع مذکور، فیدبک حالت مد نظر بوده ولی اخیراً در [۵۷] بحث فیدبک حالت به فیدبک خروجی نیز تعمیم داده شده است. در کنار روش‌های مطرح شده که بر پایه طراحی رویت‌گر هستند، روش‌هایی هم ارائه شده‌اند که فرض دسترسی به متغیرهای حالت را دارند. در [۵۸] بحث تطابق کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین با کنترل‌کننده فیدبک حالت مطرح شده است. در این مقاله نویسندگان بر این تلاش‌اند که ماتریس‌های وزنی کنترل‌کننده پیش‌بین را به گونه‌ای تنظیم نمایند که به رفتاری مشابه کنترل‌کننده فیدبک حالت با بهره دلخواه داده شده برسند. این کار توسط تبدیل مسأله تطابق کنترل‌کننده‌ها به یک مسأله نامعادله ماتریسی خطی^۴ حل شده است. ایراد وارد بر روش‌های ارائه شده در این مقاله، حجم محاسباتی بالا و تضمین نشدن امکان‌پذیری^۵ مسأله است. در [۵۹] کار مشابهی با مسأله تطابق کنترل‌کننده‌ها انجام شده است با این تفاوت که سیستم از دید ورودی-خروجی در نظر گرفته شده است. در این مقاله کنترل پیش‌بین تعمیم یافته مد نظر بوده و نویسندگان بر این تلاش هستند

در [۴۳] بیشتر تمرکز بر روی افق‌ها بوده و اشاره شده است که بر اساس دانشی که از سیستم داریم باید انتخاب شود. معیاری که برای تنظیم در نظر گرفته شده است علاوه بر می‌نیم سازی خطا و تلاش کنترلی، افق‌های پیش‌بینی و کنترل را نیز می‌نیم می‌کند. در [۴۴] روش تنظیمی برای کنترل‌کننده‌های پیش‌بین با استفاده از تلفیق الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی چندهدفه با تصمیم‌گیری فازی ارائه شده است. به وسیله روش ارائه شده در این مقاله به تنظیم ماتریس‌های وزنی کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی برای سیستم‌های چندمتغیره مقید پرداخته شده است. الگوریتم تکاملی ذهنی^۱ برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده پیش‌بین در [۴۵] بکار گرفته شده است. افق کنترل و پیش‌بینی و وزن‌های موجود در تابع معیار پارامترهای مد نظر این مقاله هستند. برای تنظیم نیز علاوه بر تابع معیار متداول کنترل‌کننده پیش‌بین، عبارت‌هایی برای محدود کردن فراجش و بهبود مقاومت کنترل‌کننده و هم‌چنین سرعت‌دهی مناسب به پاسخ سیستم حلقه بسته وجود دارد. [۴۶] بهینه‌سازی چند هدفه را برای تنظیم کنترل‌کننده پیش‌بین چندمتغیره مقید مطرح کرده است و هدف آن عملکرد مقاوم کنترل‌کننده است. با در نظر گرفتن توابع حساسیت چندگانه در حوزه فرکانس و می‌نیم‌سازی چنین توابعی تنظیم حاصل می‌گردد. برای تنظیم افق‌ها از جستجوی تصادفی استفاده شده است و برای ضرایب وزنی از روش برنامه‌ریزی مربعی سلسله‌مراتبی^۲ بهره گرفته شده است. در [۴۷] با استفاده از بهینه‌سازی اجتماع ذرات برای کنترل‌کننده پیش‌بین چندمتغیره مقید، روش تنظیمی ارائه شده است که عملکرد مقاوم دارد. در این روش فرض می‌شود که سیستم متعلق به یک مجموعه از سیستم‌ها باشد و برای بدترین حالت تنظیم انجام می‌شود. در [۴۸] به بحث تنظیم کنترل ماتریس دینامیکی پرداخته شده و هدف رسیدن به میزان مشخصی از فراجش در سیگنال کنترلی است. در این مرجع تنظیم ماتریس وزنی کنترل ماتریس دینامیکی چندمتغیره مد نظر است و هدف تنظیم آن دستیابی به میزان مشخصی از فراجش در سیگنال کنترلی است که برای این کار از روش بهینه‌سازی Simplex استفاده شده است. اغلب روش‌های ارائه شده تنظیم، برای سیستم‌های خطی بوده و خیلی کم به تنظیم کنترل پیش‌بین غیرخطی پرداخته شده است. از معدود مراجعی که جدیداً به این مسأله پرداخته است می‌توان به [۴۹] اشاره کرد. در این مقاله، تنظیم بر اساس بهینه‌سازی چندهدفه انجام می‌شود.

تمام روش‌های تنظیمی که تا به این‌جا معرفی شده‌اند، به صورت خارج از خط هستند. اما در زمینه تنظیم بر خط پارامترهای کنترل پیش‌بین نیز تعداد معدودی کار وجود دارد. در [۵۰] روش تنظیمی به صورت بر خط برای ماتریس‌های وزنی کنترل‌کننده پیش‌بین مقید ارائه شده است. با محاسبه حساسیت پیش‌بینی انجام شده نسبت به پارامترهای قابل تنظیم، فرمول‌های تنظیم ارائه شده است. در [۵۱] بحث تنظیم روی خط کنترل‌کننده پیش‌بین

³- Inverse engineering

⁴- Linear Matrix Inequality (LMI)

⁵- Feasibility

¹- Mind Evolutionary Algorithm (MEA)

²- Sequential Quadratic Programming (SQP)

$$\lambda_i = 9 \left(1 + \frac{6\theta_i}{P} + \frac{3k_i\theta_i}{P} \right)^2 \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (20)$$

که در آن θ_i و k_i به ترتیب تأخیر و بهره برای مدل از ورودی i به خروجی‌ها و P افق پیش‌بینی است. ایراداتی به این فرمول وارد است [۶۴]. از جمله این‌که برای بهره‌های خیلی کمتر از یک و خیلی بیشتر از یک عملکرد بسیار متفاوتی دارد. در [۶۵] روشی تجربی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین تعمیم یافته بیان شده است. برای حد پایین افق پیش‌بینی، حد بالای آن و افق کنترل به ترتیب مقدار تأخیر، سه برابر تأخیر و برابر با مقدار تأخیر سیستم پیشنهاد شده است. این انتخاب‌ها برای سیستم‌های بدون تأخیر دچار مشکل می‌شود. مدل زیر برای سیستم در نظر گرفته شده است:

$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_m z^{-m}} z^{-d} \quad (21)$$

انتخاب λ به این صورت است که b_1 به ۱۰ چندین بار ضرب یا تقسیم می‌شود تا عددی در بازه [0.9, 9] بدست آید. این عدد بدست آمده برای λ در نظر گرفته می‌شود. بارزترین ایراد وارده به این انتخاب، نرمالیزه نکردن λ نسبت به بهره حالت ماندگار مدل است.

۵-۲ - روش‌های مبتنی بر پایه‌های نظری (روش‌های

آماري)

سال ۲۰۰۶ ایده‌ای برای تنظیم ضریب وزنی کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی ارائه شد که بر مبنای استفاده از ابزاری به نام تحلیل واریانس^۱ است [۶۶]. تحلیل واریانس برای یک سری از داده‌های ورودی و خروجی میزان تأثیر و اهمیت داده‌های ورودی و یا ترکیبی از داده‌های ورودی را بر داده‌های خروجی مشخص می‌کند. در این مقاله از مدل مرتبه اول با تأخیر (۱۸) استفاده می‌شود و برای تنظیم معیاری برای عملکرد به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| + \Gamma |u(t)| dt \quad (22)$$

که در آن Γ پارامتر طراحی است. مجموعه پارامترهای مدل یعنی k, τ, θ و پارامتر Γ در نظر گرفته شده و برای هر دسته مقدار ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی بهینه λ_{opt} که معیار (۲۲) را بهینه می‌کند، محاسبه می‌شود. سپس برای مجموعه $(k, \tau, \theta, \Gamma, \lambda_{opt})$ تحلیل واریانس انجام می‌شود. بر اساس این تحلیل و سعی و خطا، فرمولی بسته به صورت زیر ارائه شده است:

$$\lambda = 1/631k \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{0.4094} \quad (23)$$

به این فرمول ایرادهایی وارد است که در [۶۴]، [۶۷] و [۶۸] بیان شده است. از جمله می‌توان به متناسب بودن بهره با ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی و عدم وجود پارامتر Γ در فرمول اشاره کرد. در [۶۸] به

که با استفاده از روش بهینه‌سازی محدب، ماتریس‌های وزنی کنترل‌کننده را به نحوی تنظیم نمایند که قطب و صفرهای سیستم حلقه بسته کم‌ترین اختلاف را با مقادیر مطلوب داشته باشد. در این مقاله افق کنترل یک فرض شده است. ایده این مقاله به سیستم‌های چندمتغیره نیز تعمیم داده شده است [۶۰]. هم‌چنین در [۶۱] مشکل فرض افق کنترل یک که در دو مقاله [۵۹] و [۶۰] بود حل شده است و هم‌چنین بحث‌هایی در مورد انتخاب قطب و صفرهای مطلوب سیستم حلقه بسته شده است چون هر انتخابی مجاز نبوده و ممکن است مسأله بهینه‌سازی جواب مناسبی ندهد.

۵- فرمول‌های بسته تنظیم

در این بخش روش‌های فرمول بسته برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌های پیش‌بین ارائه می‌شوند. پاره‌ای از این روش‌ها مبتنی بر روش‌های تجربی و آزمون و خطا و پاره‌ای بر پایه‌های نظری استوارند. روش‌های مبتنی بر پایه‌های نظری، به روش‌های آماری و تحلیلی تقسیم‌بندی می‌شود. از آن‌جا که روش‌های مبتنی بر پایه‌های نظری اهمیت فراوانی دارند، با جزئیات بیشتری به آن‌ها می‌پردازیم.

۵-۱ - فرمول‌های بسته مبتنی بر روش‌های تجربی و

آزمون و خطا

در چندین مرجع با سعی و خطا و یا به صورت تجربی فرمول‌های بسته‌ای برای ضریب یا ماتریس‌های وزنی تابع معیار کنترل‌کننده پیش‌بین ارائه شده است. اولین مرجع در این دسته [۶۲] است که برای پارامترهای کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی تک ورودی- تک خروجی مقادیری پیشنهاد داده است. فرض می‌شود که سیستم با مدل مرتبه اول با تأخیر زیر تقریب زده شده است:

$$G(s) = \frac{ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (18)$$

برای افق مدل و پیش‌بینی مقدار $P = M = \frac{5\tau + \theta}{T_s}$ و برای پارامتر وزنی $\lambda = 10k^2$ داده شده است و ادعا شده که این λ به پاسخ حلقه بسته سریع و ۱۰ تا ۱۵ درصد فراجش منجر می‌شود. این انتخاب ساده، کاربری آن را آسان می‌سازد ولی مستقل بودن آن نسبت به تأخیر و ثابت زمانی محدودیت این فرمول است. در [۶۳] تنظیم کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی چندمتغیره بررسی شده است. در این مقاله آمده است که بایستی اندازه افق پیش‌بینی بزرگ انتخاب شود تا بزرگ‌تر شدن آن تأثیری بر سیگنال کنترلی نداشته باشد. برای سیستم چندمتغیره، ماتریس وزنی تغییرات سیگنال کنترلی به صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$R = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \mathbf{0} \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \lambda_S \end{bmatrix} \quad (19)$$

که در آن S تعداد سیگنال‌های کنترلی، $\mathbf{0}$ ماتریسی با عناصر صفر و ابعاد مناسب است و داریم:

¹ - Analysis of Variance (ANOVA)

این مرجع به مانند مراجع [۶۶] تا [۷۰] بوده و برای کلاس خاصی از سیستم‌های با دو ورودی و دو خروجی فرمول تنظیم ارائه گردیده است.

۳-۵ - روش‌های مبتنی بر پایه‌های نظری (روش‌های

تحلیلی)

اولین کارهای تحلیلی در حوزه تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین در سال ۱۹۷۷ انجام شده است [۱۹] و [۷۲]. در این مراجع برای تمامی پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده تک ورودی- تک خروجی کنترل ماتریس دینامیکی روابط تحلیلی ارائه شده است. این روابط با در نظر گرفتن مدل مرتبه اول با تأخیر برای سیستم واقعی به دست آمده است. تنظیم به قصد جلوگیری از بدخیم شدن ماتریس دینامیکی انجام پذیرفته است. نویسندگان با مثال‌هایی نشان داده‌اند که تأثیر ضریب وزنی بر عملکرد سیستم بیش‌تر است. در این مقاله‌ها برای زمان نمونه‌برداری داریم:

$$T_s = \max(0.1\tau, 0.5\theta) \quad (۲۹)$$

برای افق‌های پیش‌بینی و مدل نیز داریم:

$$P = N = \frac{5\tau}{T_s} + b, \quad b = \text{int}\left(\frac{\theta}{T_s}\right) + 1 \quad (۳۰)$$

این انتخاب برای افق پیش‌بینی مناسب است اما افق مدل بایستی بزرگ‌تر انتخاب گردد [۶۴]. در این مراجع افق کنترل عددی بین ۲ تا ۶ پیشنهاد می‌شود. سپس به اثبات نرمالیزه کردن ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی یعنی $\lambda = fk^2$ که در آن f مستقل از k است، پرداخته شده است. با تقریب‌هایی مناسب و با در نظر گرفتن مقدار ۵۰۰ برای عدد شرطی ماتریس $(G^T G + \lambda I)$ ، فرمول تنظیم زیر پیشنهاد شده است:

$$\lambda = fk^2, \quad f = \frac{M}{500} \left(\frac{7\tau}{2T_s} + 2 - \frac{M-1}{2} \right) \quad (۳۱)$$

همین نویسندگان روش ارائه شده را به سیستم‌های چند ورودی- چند خروجی نیز تعمیم داده‌اند [۷۳] و [۷۴]. ماتریس‌های وزنی به صورت بلوکی قطری زیر فرض شده است:

$$Q = \begin{bmatrix} \gamma_1^2 I_{P \times P} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \gamma_2^2 I_{P \times P} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \gamma_R^2 I_{P \times P} \end{bmatrix} \quad (۳۲)$$

$$R = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 I_{M \times M} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda_2^2 I_{M \times M} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \lambda_S^2 I_{M \times M} \end{bmatrix}$$

که در آن R و S تعداد خروجی‌ها و ورودی‌های سیستم است. فرض شده است که تک تک توابع تبدیل سیستم چندمتغیره به صورت مدل مرتبه اول با تأخیر زیر باشند:

$$\frac{Y_r(s)}{U_s(s)} = \frac{k_{rs} e^{-\theta_{rs} s}}{\tau_{rs} s + 1} \quad r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S \quad (۳۳)$$

در این مقاله‌ها پارامترهای تنظیم به صورت زیر پیشنهاد شده‌اند:

اصلاح بعضی از ایرادات فرمول (۲۳) پرداخته شده است و فرمولی به صورت زیر ارائه شده است:

$$\lambda = k^2 \left(1.793 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \Gamma^{0.41} \Psi^{1.688} + 0.264 \right) \quad (۲۴)$$

که در آن Ψ پارامتر جدیدی است که به سرعت پاسخ سیستم مرتبط است. برای سیستم با تأخیر کم در برابر ثابت زمانی، $\lambda = 0.264k^2$ را خواهیم داشت که نمی‌تواند پاسخ سریعی ایجاد نماید. در [۶۹] و [۷۰] از تحلیل واریانس برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین تعمیم یافته استفاده شده است. در این مراجع، سیستم مرتبه دوم با تأخیر^۱ به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$G_{m1}(s) = \frac{k e^{-tas}}{(s + p_1)(s + p_2)} \quad (۲۵)$$

$$G_{m2}(s) = \frac{k e^{-tas}}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

با استفاده از تحلیل واریانس و برازش غیرخطی فرمول‌های تنظیم پارامتر وزنی به صورت زیر بدست آمده است:

$$\lambda = \omega_n^{-0.0342} (\xi + \omega_n)^{-0.046} + 1.136 (\omega_n)^{0.24} \Gamma^{-0.0021} \quad (۲۶)$$

$$\lambda = \frac{(p_1 p_2)^{-0.064}}{(p_1 + p_2)^{0.8}} + 2.0374 (p_1 p_2)^{2.051} \Gamma^{-0.0746}$$

در فرمول‌ها تأخیر دیده نمی‌شود. علاوه بر این، نرمالیزه کردن ضریب وزنی نسبت به بهره ماندگار به صورت صریح در فرمول‌ها ظاهر نشده است. کاری مشابه در [۶۴] و [۶۷] انجام شده است و ایرادهای کارهای قبلی مرتفع گردیده است. در این مراجع با استفاده از مدل مرتبه اول با تأخیر برای تمام پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی فرمول ارائه شده است. زمان نمونه‌برداری و افق پیش‌بین به مانند [۱۹] و افق مدل دو برابر مقدار پیشنهادی [۱۹] و برای افق کنترلی مقدار ۴ پیشنهاد شده است. برای تنظیم تابع معیاری به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$J = \int_0^{t_f} \left[(r(t) - y(t))^2 + \Gamma (\Delta u(t))^2 \right] dt \quad (۲۷)$$

که در آن $r(t)$ سیگنال مرجع و t_f زمان کل شبیه‌سازی است. ابتدا λ نسبت به بهره سیستم نرمالیزه شده است، یعنی $\lambda = fk^2$ و سپس برای ارائه فرمول تنظیم f رونندی مشابه با [۶۶] در پیش گرفته شده و با انتخاب مناسب بازه برای پارامترها فرمول زیر پیشنهاد شده است:

$$\lambda = k^2 \left(0.84 \left(\frac{\theta}{\tau} + 0.94 \right) \Gamma^{0.15} \right) \Gamma^{0.9} \quad (۲۸)$$

در کاری جدید با استفاده از تحلیل واریانس فرمول‌هایی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین چندمتغیره ارائه شده است [۷۱]. روند کار در

^۱- Second Order plus Dead Time (SOPDT)

روند تنظیم پارامترهای وزنی مشابه مقالات قبلی بوده ولی عدد شرطی ۱۰ در نظر گرفته شده است. فرمول زیر برای تنظیم پارامتر وزنی ارائه شده است:

$$\lambda = f(kT_s)^2$$

$$f = \frac{M^2(P - b + 1)^3}{30M} - \frac{0.008M^3(P - b + 1)^2}{10M} \quad (40)$$

در بخش پایانی مقاله با الهام از [۳۴] به بحث چندمتغیره هم پرداخته شده است. فرض شده که تک تک توابع تبدیل سیستم چندمتغیره $S \times R$ یا مرتبه اول با تأخیر پایدار و یا مرتبه اول انتگرالی هستند، یعنی:

$$\frac{Y_r(s)}{U_s(s)} = \frac{k_{rs}e^{-\theta_{rs}s}}{\tau_{rs}s + 1} \quad or$$

$$\frac{Y_r(s)}{U_s(s)} = \frac{k_{rs}e^{-\theta_{rs}s}}{s} \quad r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S \quad (41)$$

در این حالت، پارامترهای تنظیم به صورت زیر انتخاب می شوند:

$$T_s = \min_{r,s}(T_{rs})$$

for $r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S$

$$T_{rs} = \begin{cases} \max(0.1\tau_{rs}, 0.5\theta_{rs}) & \text{non-integrating} \\ 0.5\theta_{rs} & \text{integrating} \end{cases}$$

$$\tau_{CLrs} = \theta_{rs}\sqrt{10}$$

$$P = N = \max_{r,s}(X_{rs}) \quad r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S$$

$$X_{rs} = \begin{cases} \text{int}\left(\frac{5\tau_{rs}}{T_s}\right) + b_{rs} & \text{stable} \\ \text{int}\left(\frac{5\tau_{CLrs}}{T_s}\right) + b_{rs} & \text{integrating} \end{cases}$$

$$b_{rs} = \text{int}\left(\frac{\theta_{rs}}{T_s}\right) + 1, \quad M = \max_{r,s}(Y_{rs}) \quad (42)$$

$$Y_{rs} = \begin{cases} \text{int}\left(\frac{\tau_{rs}}{T_s}\right) + b_{rs} & \text{stable} \\ \text{int}\left(\frac{\tau_{CLrs}}{T_s}\right) + b_{rs} & \text{integrating} \end{cases}$$

$$\lambda_s^2 = \frac{M}{10} \sum_{r=1}^R \gamma_j^2 k_{rs}^2 \left\{ P - b_{rs} - \frac{3}{2} \frac{\tau_{rs}}{T_s} + 2 - \frac{M-1}{2} \right\}$$

$$+ \frac{1}{10M} \sum_{r=1}^R \gamma_j^2 k_{rs}^2 T_s^2 \left([M^2(P - b_{rs} + 1)^3 / 3] - 0.008M^3(P - b_{rs} + 2)^2 \right) \quad s = 1, \dots, S$$

در [۷۶] بحث تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین در فضای حالت برای دستیابی به عملکرد مقاوم مطرح گردیده است. با در نظر گرفتن نویز و تخمین زن حالت به تنظیم کنترل پیش بین برای سیستم های چندمتغیره پرداخته شده است و قواعدی برای پارامترهای قابل تنظیم بیان شده است. به عنوان مثال برای ماتریس وزنی و با نرمالیزه سازی ورودی ها فرمول زیر ارائه شده است:

$$\mathbf{R} = \lambda \begin{bmatrix} 1 & & & \mathbf{0} \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \lambda_M \end{bmatrix} \mathbf{R}_I^T \quad (43)$$

که \mathbf{R}_I ماتریس نامعینی ورودی و λ_2 تا λ_M با توجه به حداکثر خطا در هر خروجی در اثر نامعینی در ورودی انتخاب می شوند. به این ترتیب فقط

$$T_s = \min_{r,s}(T_{rs})$$

for $r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S$

$$T_{rs} = \max\left(\frac{\tau_{rs}}{10}, \frac{\theta_{rs}}{2}\right)$$

$$P = N = \max_{r,s}\left(\text{int}\left(\frac{5\tau_{rs}}{T_s}\right) + b_{rs}\right) \quad (34)$$

$$M = \max_{r,s}\left(\text{int}\left(\frac{\tau_{rs}}{T_s}\right) + b_{rs}\right)$$

$$b_{rs} = \text{int}\left(\frac{\theta_{rs}}{T_s}\right) + 1$$

برای انتخاب γ_j^2 فرمولی ارائه نشده و فقط به این راهکار بسنده شده است که این ضرایب برای هر خروجی اندازه گیری شده طوری انتخاب شوند که دامنه خروجی ها در یک بازه قرار گیرند. برای λ_s^2 ها روند مشابه به حالت تک ورودی- تک خروجی [۱۹] در پیش گرفته شده است و در نهایت با در نظر گرفتن عدد شرطی ۵۰۰ برای تنظیم ضرایب ماتریس وزنی تغییرات سیگنال های کنترلی چنین فرمولی ارائه کرده اند:

$$\lambda_s^2 = \frac{M}{500} \sum_{r=1}^R \gamma_r^2 k_{rs}^2 \left\{ P - b_{rs} - \frac{3}{2} \frac{\tau_{rs}}{T_s} + 2 - \frac{M-1}{2} \right\} \quad s = 1, \dots, S \quad (35)$$

مقاله [۷۵] با هدف ارائه فرمول تنظیم برای کنترل کننده ماتریس دینامیکی چندمتغیره با یک یا چند زیر توابع تبدیل دارای انتگرال گیر ارائه شده است. در این مرجع ابتدا به معرفی روش کنترل کننده ماتریس دینامیکی اصلاح شده که برای سیستم های انتگرالی است، پرداخته شده است. در ادامه برای حال تک ورودی- تک خروجی فرمول هایی ارائه شده است و سپس به حالت چندمتغیره تعمیم داده شده است. در حالت تک ورودی- تک خروجی برای تقریب سیستم واقعی مدل مرتبه اول با تأخیر انتگرالی زیر فرض شده است:

$$G_m(s) = \frac{ke^{-\theta s}}{s} \quad (36)$$

زمان نمونه برداری در این مقاله به صورت زیر پیشنهاد داده شده است:

$$T_s \leq 0.5\theta \quad (37)$$

در سیستم های انتگرالی از پاسخ پله حلقه باز نمی توان استفاده کرد. برای سیستم حلقه بسته مقدار مطلوب زمان نشست به صورت زیر در نظر گرفته شده است تا از آن بتوان برای محاسبه افق ها استفاده نمود:

$$\tau_{CL} = \theta\sqrt{10} \quad (38)$$

افق های پیش بینی، مدل و کنترل در این مقاله به این صورت انتخاب می شوند:

$$P = N = \text{int}\left(\frac{5\tau_{CL}}{T_s}\right) + b, \quad M = \text{int}\left(\frac{\tau_{CL}}{T_s}\right) + b \quad (39)$$

$$b = \text{int}\left(\frac{\theta}{T_s}\right) + 1$$

$$G_{cl}(z) = \frac{y_p(n)}{w(n)} = \frac{\hat{K}_{y1}}{\Delta_{cl}(z)}$$

$$\Delta_{cl}(z) = z^d [z^2 + z(-1 - a + \hat{K}_{x1} + \hat{K}_{y1}) + (a - \hat{K}_{x1})] \quad (46)$$

که در آن \hat{K}_{x1} و \hat{K}_{y1} بهره هایی هستند که از پارامترهای مدل و پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده ناشی می شوند. در ادامه مفهوم بهره های شدنی^۲ معرفی می شود. این مفهوم کلیدی نقش تعیین کننده ای در بررسی عملکرد سیستم حلقه بسته دارد و عملکردهای امکان پذیر سیستم حلقه بسته را به ازای پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده تعیین می کند. در این مقاله تاکید شده است که بهره های مطلوب \hat{K}_{xd1} و \hat{K}_{yd1} توسط کاربرد انتخاب می شوند. در صورتی که پارامترهای تنظیمی وجود داشته باشند که به این بهره ها منجر شود به بهره های انتخاب شده بهره های مطلوب شدنی گفته می شود. در ادامه برای رسیدن به بهره های مطلوب شدنی، با در نظر گرفتن افق کنترل یک و دو قضایایی مطرح شده است. فرمول های تنظیم ارائه شده برای سیستم پایدار معتبر بوده و هم چنین محدودی بهره های شدنی نیز در این قضایا مشخص می گردد. نشان داده می شود که تمام عملکرد شدنی با افق کنترل یک و یا دو قابل حصول بوده و نیازی به افزایش حجم محاسبات به واسطه بالا بردن افق کنترل نیست. این نتیجه مهمی است که در کنار کاهش حجم محاسباتی، ساختار کنترل کننده را نیز ساده تر و تنظیم و تحلیل آن را ساده تر می سازد. در این جا یکی از قضایای تنظیم که برای افق کنترل دو ارائه شده است، بیان می شود. گفته شده است که برای افق کنترل دو با انتخاب وزن های ضریب تغییرات سیگنال کنترلی به عنوان پارامترهای تنظیم، بهره های مطلوب شدنی \hat{K}_{xd1} و \hat{K}_{yd1} ناسوای های زیر را بر آورده می سازند:

$$\hat{K}_{yd1} > 0, \quad 0 < \hat{K}_{xd1} < a, \quad \frac{1}{a} \frac{Y_{11}}{X_{11}} < \frac{\hat{K}_{yd1}}{\hat{K}_{xd1}} < \frac{1}{a} \quad (47)$$

و فرمول های تنظیم برای رسیدن به بهره های مطلوب شدنی عبارت اند از:

$$r_1 = \frac{(Y_{11}X_{12} - X_{11}Y_{22})(a - \hat{K}_{xd1})}{aX_{12}\hat{K}_{yd1} - Y_{22}\hat{K}_{xd1}} \quad (48)$$

$$r_2 = \frac{(Y_{11}X_{22} - X_{12}Y_{22})(\hat{K}_{xd1} - a\hat{K}_{yd1})}{aX_{11}\hat{K}_{yd1} - Y_{11}\hat{K}_{xd1}}$$

که در آن:

$$X_{11} = 1 + q_2(1+a)^2 + q_3(1+a+a^2)^2 + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-1})^2$$

$$X_{12} = q_2(1+a) + q_3(1+a)(1+a+a^2) + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-2})(1+\dots+a^{p-1})$$

$$X_{22} = q_2 + q_3(1+a)^2 + q_4(1+a+a^2)^2 + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-2})^2 \quad (49)$$

$$Y_{11} = 1 + q_2(1+a) + q_3(1+a+a^2) + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-1})$$

$$Y_{22} = q_2 + q_3(1+a) + q_4(1+a+a^2) + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-2})$$

λ پارامتر تنظیم باقی می ماند که در مقاله گفته شده این پارامتر را کم کم افزایش می دهیم تا به عملکرد مقاوم مطلوب دست یابیم.

برای سیستم های چندمتغیره غیرمی نیم فاز روش تنظیمی به قصد عملکرد مقاوم سیستم حلقه بسته ارائه شده است [۷۷] که مبتنی بر عدد عملکرد مقاوم^۱ است. در این مقاله زمان نمونه برداری به صورت $0.06T_s \leq T_r \leq 0.4T_s$ انتخاب می شود. که در آن T_r زمان خیز پاسخ پله برای سیستم حلقه بسته مطلوب است. برای حد بالای افق پیش بینی، زمان نشست سیستم حلقه باز و برای حد پایین آن هم میزان تأخیر پیشنهاد شده است. افق کنترل یک چهارم حد بالای افق پیش بینی انتخاب می شود. ماتریس های وزنی به صورت قطری هستند و برای دستیابی به عملکرد مطلوب و هم رنج سازی سیگنال های سیستم به کار می روند. یک الگوریتم کامل برای تنظیم ماتریس های وزنی با استفاده از جهت های صفر ورودی و خروجی و عدد عملکرد مقاوم ارائه شده است.

در [۷۸] به بررسی تحلیلی تأثیر پارامترهای قابل تنظیم کنترل پیش بین بر عملکرد سیستم حلقه بسته از دیدگاه مقادیر ویژه آن پرداخته شده است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار MATHEMATICA روابطی تحلیلی برای ارتباط پارامترها با قطب های حلقه بسته به دست آمده است. با توجه به پیچیدگی فراوان روابط، تأثیر هر پارامتر با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها (اغلب صفر یا یک) انجام شده است. در این مقالات بر روی افق پیش بینی تأکید فراوانی شده است و نقش ضریب وزنی مورد توجه قرار نگرفته است.

در [۱۸] با در نظر گرفتن مدل مرتبه اول با تأخیر برای سیستم، روش تحلیلی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین تک ورودی- تک خروجی ارائه شده است. مدل مرتبه اول بدون تأخیر (۱۸) با فرض زمان نمونه برداری T_s به صورت زیر گسسته سازی می شود:

$$G_m(z^{-1}) = \frac{y_m(n)}{u(n)} = \frac{k(1-a)z^{-d-1}}{1-az^{-1}} \quad (44)$$

که در آن $a = e^{-\frac{T_s}{\tau}}$ و $d = \theta/T_s$ و $y_m(n)$ و $u(n)$ به ترتیب خروجی مدل و سیگنال کنترل در لحظه n هستند و تأخیر ضریب صحیحی از زمان نمونه برداری فرض شده است. در این مقاله از نمایش فضای حالت تابع تبدیل داده شده استفاده شده و پیش بینی خروجی ها به دست آمده است. تابع معیار در نظر گرفته شده عبارت است از:

$$\min_{\Delta u(n)} \left(\mathbf{w}(n) - \mathbf{y}_p(n) \right)^T \mathbf{Q} \left(\mathbf{w}(n) - \mathbf{y}_p(n) \right) + \left(\Delta \mathbf{u}(n) \right)^T \mathbf{R} \left(\Delta \mathbf{u}(n) \right)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & q_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & q_p \\ \mathbf{0} & & & & \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = k^2(1-a)^2 \begin{bmatrix} r_1 & & & \mathbf{0} \\ & r_2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & r_M \end{bmatrix} \quad (45)$$

در حالتی که بین خروجی سیستم و مدل تفاوتی نباشد، تابع تبدیل سیستم حلقه بسته به صورت زیر محاسبه شده است:

²- Feasible

¹- Robust performance number

ثابت های معادله فوق در [۸۱] آمده است. معادله فوق چهار جواب دارد که فقط یکی از آن ها معتبر است. این جواب از طریق رابطه زیر، pH را تعیین می کند:

$$pH = -\log_{10}[H^+] \quad (52)$$

کنترل این فرآیند غیرخطی با کنترل کننده ثابت مناسب نبوده، عملکرد مطلوبی ندارد و نیازمند روش های دیگری می باشد [۸۲]. اما برای بازه کوچکی از تغییرات pH می توان از تک کنترل کننده استفاده کرد. در این مثال، بازه ۵/۷۵ تا ۷ برای pH در نظر گرفته می شود. در این بازه، می توان فرآیند را با مدل زیر توصیف کرد:

$$G_m(s) = \frac{0.4e^{-30s}}{95s + 1} \quad (53)$$

برای این مدل، زمان نمونه برداری $T_s = 10 \text{ sec}$ مناسب است. در این فرآیند اندازه گیری pH در داخل مخزن انجام نشده و با فاصله ای از مخزن اندازه گیری انجام می شود. این فاصله، تاخیری در خروجی ایجاد می کند که ۳۰ ثانیه فرض شده است.

روش تنظیم ارائه شده در [۱۸] با بهره های مطلوب $K_{xd1} = 0.4$ و $K_{yd1} = 0.07$ برای مدل (۵۳) به پاسخ حلقه بسته با زمان نشست حدود ۲۵۰ ثانیه و بدون فرجهش می انجامد. برای دستیابی به این بهره ها، از قضایای آمده در [۱۸] استفاده می کنیم. داریم:

$$P = 10, M = 1, R = \lambda = 3822.5 \quad (54)$$

$$Q = \text{diag}\{1, 1, \dots, 1, 69.32\}$$

روش تنظیم ارائه شده در [۱۹] برای کنترل ماتریس دینامیکی منجر به پارامترهای تنظیم زیر می شود:

$$P = N = 48, M = 4, \lambda = 0.043 \quad (55)$$

در [۶۴] و [۶۷] پارامترهای تنظیم به صورت زیر انتخاب می شوند:

$$P = 40, N = 80, M = 4, \Gamma = 1, \lambda = 0.139 \quad (56)$$

با مرجع [۶۲] نیز پارامترهای تنظیم همانند (۵۵) انتخاب می شود، به جز ضریب وزنی که با توجه به بهره حالت ماندگار سیستم به صورت زیر انتخاب می شود:

$$\lambda = 1.6 \quad (57)$$

در شکل ۷ نتایج شبیه سازی روش های مذکور برای فرآیند pH آمده است. نتایج ردیابی ورودی پله به همراه حذف اغتشاش در این شکل آمده است. در لحظه ۴۵۰۰ ثانیه اغتشاش بافر وارد شده است. هم چنین برای بررسی مقاومت روش ها در برابر نامعینی، بعد از ورود اغتشاش پله بافر، ورودی مرجع به مقدار ۷ تغییر داده شده است. با توجه به این که با تغییر بافر رفتار دینامیکی فرآیند تغییر می کند، عملکرد کنترل کننده در ردیابی این مقدار می تواند نشان گر میزان مقاومت کنترل کننده در برابر نامعینی در مدل باشد.

در [۷۹] و [۸۰] به ترتیب روش مطرح شده در [۱۸] به سیستم های ناپایدار دارای تاخیر غیرضریب صحیح از زمان نمونه برداری و سیستم های چند متغیره تعمیم داده شده است.

۶- مطالعه مقایسه ای عملکرد چند روش تنظیم با شبیه سازی

در این بخش به مقایسه چند روش تنظیمی که فرمول های بسته ارائه کرده اند پرداخته می شود. این مقایسه با شبیه سازی بر روی فرآیند تک ورودی- تک خروجی pH انجام می شود. در این مثال عملکرد ردیابی، حذف اغتشاش و مقاومت فرمول های تنظیم در برابر نامعینی مورد مطالعه قرار گرفته است. روش های مد نظر از مراجع [۱۸]، [۱۹]، [۶۲]، [۶۴] و [۶۷] انتخاب شده اند.

مسئله رگوله سازی و کنترل فرآیند pH یک مسئله کنترل غیرخطی دشوار است که در صنعت به وفور یافت می شود از جمله می توان به فرآیندهای شیمیایی همچون خنثی سازی پساب^۱، تخمیر، تولید صابون ها یا اسیدهای چرب اشاره کرد. مدل سازی کاملی از یک فرآیند چندمتغیره pH در [۸۱] ارائه شده است. این فرآیند سه ورودی و دو خروجی دارد. ورودی های این فرآیند اسید، باز و بافر^۲ و خروجی های آن pH خروجی از مخزن ترکیب و ارتفاع محلول داخل مخزن است. دبی ورودی اسید با F_a ، باز با F_b و دبی بافر با F_{bf} نشان داده شده است. در حالت تک ورودی- تک خروجی یکی از ورودی های اسید یا باز ثابت فرض می شود و pH تنها خروجی فرآیند است. هم چنین فرض می شود بافر اغتشاش غیر قابل اندازه گیری این فرآیند است. روابط دینامیکی حاکم بر فرآیند pH که در [۸۱] معرفی شده است، به صورت زیر است:

$$\frac{dw_a}{dt} = \frac{1}{V} [(w_{aa} - w_a)F_a + (w_{ba} - w_a)F_b + (w_{bfa} - w_a)F_{bf}] \quad (50)$$

$$\frac{dw_b}{dt} = \frac{1}{V} [(w_{ab} - w_b)F_a + (w_{bb} - w_b)F_b + (w_{bfb} - w_b)F_{bf}]$$

که در آن V حجم محلول موجود در مخزن، w_a و w_b متغیرهای تغییرناپذیر و اکنش^۳ و w_{ij} ها ثابت هایی هستند که مقادیر آن ها در [۸۱] آمده است. معادله استاتیکی حاکم بر این فرآیند که در تعیین pH نقش دارد به رابطه تتراسیون^۴ معروف است و غلظت یون هیدرونیوم $[H^+]$ را می دهد به صورت زیر می باشد:

$$[H^+]^4 + [H^+]^3(k_{a1} - w_a) + [H^+]^2 \times (k_{a1}(k_{a2} - w_a - w_b) - k_w) + [H^+] \times (k_{a1}(k_w + k_{a2}(w_a + 2w_b))) - k_{a1}k_{a2}k_w = 0 \quad (51)$$

¹- Waste Water Neutralization

²- Buffer

³- Reaction invariants

⁴- Titration

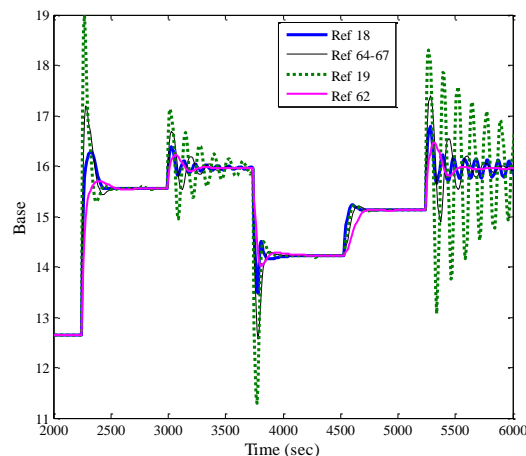
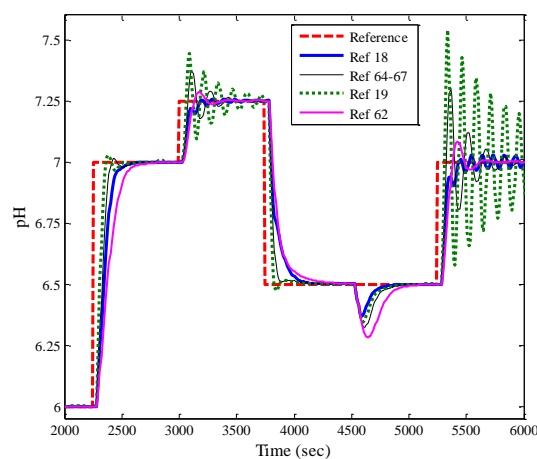
۵- نتیجه گیری

ویژگی های منحصر به فرد کنترل کننده های پیش بین، این خانواده از کنترل کننده ها را روز به زور بیشتر مورد توجه دانشگاهیان و صنعتگران قرار داده است. از طرف دیگر، مسأله تنظیم پارامترهای کنترل کننده برای هر روش کنترلی بسیار پر اهمیت است و شرط دستیابی به عملکرد مطلوب، تنظیم صحیح پارامترهای کنترل کننده است. از همان سال های نخست که روش های کنترل پیش بین ارائه شد، تعداد زیادی از محققان به مسأله تنظیم پارامترهای این کنترل کننده ها پرداخته اند. در این مقاله پس از بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار سیستم حلقه بسته با کنترل پیش بین و ارائه یک دسته بندی، روش های مختلف تنظیم کنترل کننده های پیش بین به اختصار مرور شدند. در بین روش های تنظیم، روش هایی که بر پایه های نظری به فرمول های بسته منجر شده اند بیشتر مورد توجه قرار گرفت. در این گزارش علاوه بر مطالعه روش های مختلف تنظیم، با یک مثال بعضی از روش های تنظیم را که فرمول های بسته ارائه کرده اند، مقایسه نموده و نقاط قوت و ضعف هر کدام نشان داده شد.

مراجع

- [1] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud, J. Papon, "Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes", *Automatica*, vol. 14, no. 5, pp. 413-428, 1978.
- [2] C.E. Garcia, D.M. Prett, M. Morari, "Model predictive control: theory and practice-a survey", *Automatica*, vol. 25, no. 3, pp. 335-348, 1989.
- [3] M. Morari, J. H Lee, "Model predictive control: past, present and future," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 667-682, 1999.
- [4] J. A. Rossiter, *Model-based predictive control: a practical approach*. CRC press, 2003.
- [5] S. J. Qin, T. A. Badgwell, "A survey of industrial model predictive control technology", *Control Engineering Practice*, vol. 11, no. 7, pp. 733-764, 2003.
- [6] E. F. Camacho, C. Bordons, *Model Predictive Control*, 2th ed, London, Springer-Verlog, 2004.
- [7] J. B. Rawlings, D. Q. Mayne, *Model Predictive Control: Theory and Design*, London, U.K.: Nob Hill Publishing, 2009.
- [8] M. Kano, M. Ogawa, "The state of the art in chemical process control in Japan: Good practice and questionnaire survey", *Journal of Process Control*, vol. 20, no. 9, pp. 969-982, 2010.
- [9] J. Mattingley, Y. Wang, S. Boyd, "Receding horizon control", *Control Systems, IEEE*, vol. 31, no. 3, pp. 52-65, 2011.

در این مثال روش تنظیم ارائه شده در [۶۲]، پاسخ کندی در ردیابی و حذف اغتشاش دارد. اما در برابر نامعینی مقاومت خوبی نشان داده است. روش [۱۹] به پاسخ سریعی در ردیابی و حذف اغتشاش منجر شده است. این سرعت زیاد مقاومت را در برابر نامعینی پایین می آورد و حتی می تواند به ناپایداری بیانجامد. روش ارائه شده در [۶۴] و [۶۷] در ردیابی سرعت نسبتاً بالایی دارد و در حذف اغتشاش عملکرد متوسطی دارد. نهایتاً روش ارائه شده در [۱۸] سرعت متوسطی در ردیابی داشته و حذف اغتشاش با سرعت بالایی انجام می پذیرد. در برابر نامعینی نیز مقاومت خوبی از خود نشان داده است.



شکل ۷۰: پاسخ حلقه بسته فرآیند pH برای روش های مختلف تنظیم.

در جدول ۱ خطا و انرژی سیگنال کنترلی آمده است. کم ترین خطا در کل مربوط به روش [۶۴] و [۶۷] و سپس [۱۸] است و بیش ترین خطا را روش [۶۲] دارد.

جدول ۱: مقایسه عملکرد روش های مختلف تنظیم در مثال فرآیند pH

روش تنظیم	مرجع [۱۸]	مرجع [۱۹]	مرجع [۶۲]	مرجع [۶۴]
$\sum e^2$	13.64	13.84	17.35	12.51
$\sum u^2$	92840	93015	92441	92880

- [23] A. R. Mcintosh, S. L. Shah, D. G. Fisher, "Analysis and tuning of adaptive generalized predictive control", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 69, no. 1, pp. 97-110, 1991.
- [24] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, New York, 2nd ed, 2004.
- [25] C. M. Reverter, J. Ibarrola, J. M. Cano-Izquierdo, "Tuning rules for a quick start up in Dynamic Matrix Control", *ISA Transactions*, vol. 53, no. 2, pp. 612-627, 2014.
- [26] P. Boucher, D. Dumur, S. Daumuller, "Automatic Design of Tuning Parameters for Predictive Control of CNC Machines", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 417-420, 1992.
- [27] A. Jiang, A. Jutan, "Response surface tuning methods in Dynamic Matrix Control of a pressure tank system", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 39, no. 10, pp. 3835-3843, 2000.
- [28] J. A. D. Rodrigues, E. C. V. Toledo, R. M. Filho, "A tuned approach of the predictive-adaptive GPC controller applied to a fed-batch bioreactor using complete factorial design", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 26, no. 10, pp. 1493-1500, 2002.
- [29] A. Altinten, "Generalized predictive control applied to a pH neutralization process", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 31, No. 10, 2007, pp. 1199-1204.
- [30] N. Hoffmann, S. Thomsen, F.W. Fuchs, "Appropriate tuning and robust design of a generalized predictive speed controller for drive systems with resonant loads", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Atlanta, GA, pp. 764-771, 2010.
- [31] J. M. Grosso, C. Ocampo-Martínez, V. Puig, "Learning-based tuning of supervisory model predictive control for drinking water networks", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 7, pp. 1741-1750, 2013.
- [32] T. J. Vyncke, S. Thielemans, J. AA. Melkebeek, "Simulation-based weight factor selection and FPGA prediction core implementation for finite-set model based predictive control of power electronics", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 91, pp. 150-166, 2013.
- [33] R. K. Mishra, R. Khalkho, B. Kumar, T. K. Dan, "Effect of tuning parameters of a model predictive binary distillation column", In *IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICE-CCN)*, pp. 660-665, 2013.
- [10] J. H. Lee, "Model predictive control: Review of the three decades of development", *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 415-424, 2011.
- [11] M. L. Darby, M. Nikolaou, "MPC: Current practice and challenges", *Control Engineering Practice*, vol. 20, no. 4, pp. 328-342, 2012.
- [12] D. Hrovat, S. Di Cairano, H. E. Tseng, I. V. Kolmanovsky, "The development of model predictive control in automotive industry: A survey", In *Proc. of IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, Dubrovnik, Croatia, pp. 295-302, Oct 2012.
- [13] K. Y. Rani, H. Unbehauen, "Study of Predictive Controller Tuning Methods", *Automatica*, vol. 33, no. 12, pp. 2243-2248, 1997.
- [14] L. Garriga, M. Soroush, "Model Predictive Control Tuning Methods: A Review", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 8, pp. 3505-3515, 2010.
- [15] R. D. Kokate, L. M. Waghmare, S. D. Deshmukh, "Review of Tuning Methods of DMC and Performance Evaluation with PID Algorithms on a FOPDT Model", In *Proc. of International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom)*, pp. 71-75, 2010.
- [16] C. R. Cutler, B. L. Ramaker, "Dynamic Matrix Control: A Computer Control Algorithm", *Proceeding of joint Automatic Control Conference*, 1980.
- [17] D. W. Clarke, C. Mohtadi, P. S. Tuffs, "Generalized predictive control-Part I. The basic algorithm", *Automatica*, vol. 23, no. 2, pp. 137-148, 1987.
- [18] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, "Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models", *IET Control Theory & Applications*, vol. 7, no. 14, pp. 1806-1817, 2013.
- [19] R. Shridhar, D. J. Cooper, "A tuning strategy for unconstrained SISO model predictive control", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 36, no. 3, pp. 729-746, 1997.
- [20] K. P. Lam, "Implicit and explicit self-tuning controllers", *OUEL Report*, No. 1334/80, University of Oxford, 1980.
- [21] C. R. Cutler, "Dynamic Matrix Control, an optimal multivariable control algorithm with constraints", *Ph.D. Dissertation*, University of Houston, Houston, TX, 1983.
- [22] C. E. Garcia, M. Morari, "Internal model control. A unifying review and some new results", *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 21, no. 2, pp. 308-323, 1982.

- [46] P. Vega, M. Francisco, F. Tadeo, "Multiobjective optimization for automatic tuning of robust ModelBased Predictive Controllers", In 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, pp. 6980-6985, 2008.
- [47] G. A. NeryJúnior, M. A. F. Martins, R. Kalid, "A PSO-based optimal tuning strategy for constrained multivariable predictive controllers with model uncertainty", ISA Transactions, vol. 53, no. 2, pp. 560-567, 2014.
- [48] G. Z. Gous, P. L. de Vaal, "Using MV overshoot as a tuning metric in choosing DMC move suppression values", ISA Transactions, vol. 51, pp. 657-664, 2012.
- [49] M. Vallerio, J. Van Impe, F. Logist, "Tuning of NMPC controllers via multi-objective optimization", Computers & Chemical Engineering, vol. 61, pp. 38-50, 2014.
- [50] A. Al. Ghazzawi, E. Ali, A. Nouh and E. Zafiriou, "On-line Tuning Strategy for Model Predictive Controllers", Journal Process Control, vol. 11, pp. 265-284, 2001.
- [51] E. Ali, "Heuristic On-line Tuning for Nonlinear Model Predictive Controllers using Fuzzy Logic", Journal of Process Control, vol. 13, pp. 383-396, 2003.
- [52] K. Han, J. Zhao, J. Qian, "A Novel Robust Tuning Strategy for Model Predictive Control", In the Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, pp. 6406-6410, 2006.
- [53] G. A. Bunin, F. Fraire, G. François, D. Bonvin, "Run-to-run MPC tuning via gradient descent", In 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering, London, pp. 927-931, 2012.
- [54] J. M. Maciejowski, "Reverse engineering existing controllers for MPC design", In 3rd IFAC Symposium on Power System, Structure and Control, Iguassu Falls, Brazil, pp. 436-441, 2007.
- [55] E. N. Hartley, J. M. Maciejowski, "Initial tuning of predictive controllers by reverse engineering", In Proc. 10th European Control Conf., Budapest, Hungary, pp. 725-730, 2009.
- [56] M. Foo, E. Weyer, "On reproducing existing controllers as model predictive controllers", In Australian Control Conference (AUCC), pp. 303-308, 2011.
- [57] E. N. Hartley, J. M. Maciejowski, "Designing Output-Feedback Predictive Controllers by Reverse-Engineering Existing LTI Controllers", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 58, no. 11, pp. 2934-2939, 2013.
- [58] S. Di Cairano, A. Bemporad, "Model Predictive Control Tuning by Controller Matching", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 55, no. 1, pp. 185-190, 2010.
- [34] S. K. Ahmed, D. J. Chmielewski, "On the Tuning of Predictive Controllers for Hybrid Fuel Cell Vehicle Applications", In the 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, Mumbai, India, pp. 129-134, 2013.
- [35] Y. P. Gupta, "Characteristic Equations and Robust Stability of a Simplified Predictive Control Algorithm", The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 71, no. 4, pp. 617-624, 1993.
- [36] R. Dubay, G. Kember, B. Pramujatic, "Well-conditioned model predictive control", ISA Transactions, vol. 43, pp. 23-32, 2004.
- [37] M. Abu-Ayyad, R. Dubay, G. C. Kember, "SISO extended predictive control-implementation and robust stability analysis", ISA Transactions, vol. 45, pp. 9-20, 2006.
- [38] A. R. Neshasteriz, A. Khaki Sedigh, H. Sadjadian, "Generalized predictive control and tuning of industrial processes with second order plus dead time models", Journal of Process Control, vol. 20, no. 1, pp. 63-72, 2010.
- [39] S. Drogies, D. De Geest, "Predictive Control: Propositions for the Design Methodology", American Control Conference (ACC), San Diego, California, pp. 647-651, 1999.
- [40] O. Jing, R. R. Rhinehart, "CV Damping versus MV Suppression for MPC Tuning", American Control Conference (ACC), OK, USA, pp. 2695-2700, 2002.
- [41] H. Cui, Z. Pang, Z. Pang, "Generalized Predictive Control Based on Input Design", 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, pp. 5594-5599, 2008.
- [42] M. Mahfouf, D. A. Linkens, M. F. Abbod, "Multi-objective genetic optimization of GPC and SOFLC tuning parameters using a fuzzy-based ranking method," IEE Proceedings-Control Theory and Applications, vol. 147, no. 3, pp. 344-354, 2000.
- [43] S. Filaliy, V. Wertzz, "Using genetic algorithms to optimize the design parameters of generalized predictive controllers", International Journal of Systems Science, vol. 32, no. 4, pp. 503-512, 2001.
- [44] J. H. Van der Lee, W. Y. Svrcek, B. R. Young, "A tuning algorithm for model predictive controllers based on genetic algorithms and fuzzy decision making", ISA Transactions, vol. 47, pp. 53-59, 2008.
- [45] G. Hongge, K. Xie, "A Tuning Scheme for Parameters of Generalized Predictive Controller Based on Mind Evolutionary Algorithm", In International Conference on Computing, Measurement, Control and Sensor Network (CMCSN), pp. 307-310, 2012.

- [۷۱] زاهد ابراهیمی، تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین چندمتغیره بر اساس ANOVA، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، بهمن ۱۳۹۲.
- [72] R. Shridhar, D. J. Cooper, "Selection of the move suppression coefficients in tuning Dynamic Matrix Control", In American Control Conference, New Mexico, pp. 729-733, 1997.
- [73] R. Shridhar, D. J. Cooper, "A novel tuning strategy for multivariable predictive control," ISA Transactions, vol. 36, no. 4, pp. 273-280, 1998.
- [74] R. Shridhar, D. J. Cooper, "A tuning strategy for unconstrained multivariable model predictive control", Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 37, pp. 4003-4016, 1998.
- [75] D. Dougherty, D. J. Cooper, "Tuning Guidelines of a Dynamic Matrix Controller for integrating (non-self regulating) processes", Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 42, no. 8, pp. 1739-1752, 2003.
- [76] J. H. Lee, Z. H. Yu, "Tuning of Model Predictive Controllers for Robust Performance", Computers & Chemical Engineering, vol. 18, no. 1, pp. 15-37, 1994.
- [77] J.O. Trierweilera, L.A. Farinab, "RPN tuning strategy for model predictive control", Journal of Process Control, vol. 13, no. 7, pp. 591-598, 2003.
- [78] J. L. Garriga, M. Soroush, "On the effects of tunable parameters of model predictive control on the locations of closed-loop eigenvalues", Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 49, no. 17, pp.7951-7956, 2010.
- [79] P. Bagheri, A. Khaki-Sedigh, "Closed Form Tuning Equations for Model Predictive Control of First-Order", International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 13, no. 1, pp. 73-80, 2015.
- [80] P. Bagheri, A. Khaki-Sedigh, "An analytical tuning approach to multivariable model predictive controllers", Journal of Process Control, vol. 24, no. 12, pp. 41-54, 2014.
- [81] M. A. Henson, D. E. Seborg, "Adaptive nonlinear control of a pH neutralization process", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 2, no. 3, pp. 169-182, 1994.
- [82] P. Bagheri, V. Mardanlou, A. Fatehi, A, "Multiple Model Predictive Control of Multivariable pH Process Using Adaptive Weighting Matrices", In Proc of 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, pp. 12366-12371, 2011.
- [59] G. Shah, S. Engell, "Tuning MPC for Desired Closed-Loop Performance for SISO Systems", In 18th Mediterranean Conference on Control & Automation, Marrakech, Morocco, pp 628-633, 2010.
- [60] G. Shah, S. Engell, "Tuning MPC for Desired Closed-Loop Performance for MIMO Systems", In American Control Conference (ACC), San Francisco, USA, pp. 4404-4409, 2011.
- [61] G. Shah, S. Engell, "Multivariable MPC design based on a frequency response approximation approach", In European Control Conference (ECC), pp. 13-18, 2013.
- [62] R. F. Hinde Jr, D. J. Cooper, "A pattern-based approach to excitation diagnostics for adaptive process control", Chemical Engineering Science, vol. 49, no. 9, pp. 1403-1415, 1994.
- [63] W. Wojsznis, J. Gudaz, T. Blevins, A. Mehta, "Practical approach to tuning MPC", ISA Transactions, vol. 42, pp. 149-162, 2003.
- [64] P. Bagheri, A. Khaki-Sedigh, "Tuning of Dynamic Matrix Controller for FOPDT models using analysis of variance", In Proc of 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, pp. 12319-12324, 2011.
- [65] M. Schwarz, C. S. Cox, J. Börcsök, "A Filtered Tuning Method for a GPC Controller", In IET Irish Signals and Systems Conference, Cork Ireland, 2010, pp.180-185.
- [66] E. J. Iglesias, M. E. Sanjuan, C. A. Smith, "Tuning equation for dynamic matrix control in SISO loops", *Revista Ingenieria y Desarrollo*, Vol. 19, 2006, pp. 88-100.
- [67] P. Bagheri, A. Khaki-Sedigh, "An ANOVA based analytical Dynamic Matrix Controller tuning procedure for FOPDT models", *Amirkabir Journal of Modeling, Identification, Simulation and Control*, vol. 42, no. 2, pp. 55-64, Fall 2010.
- [۶۸] محمد قاضی مغربی، تنظیم پارامترهای ماتریس دینامیکی DMC، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، شهریور ۱۳۸۸.
- [۶۹] امیررضا نشاسته‌ریز، تنظیم خودکار کنترل‌کننده‌های پیش‌بین تعمیم یافته (GPC)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، مرداد ۱۳۸۸.
- [70] A. R. Neshasteriz, A. Khaki-Sedigh, H. Sadjadian, "An Analysis of Variance Approach to Tuning of Generalized Predictive Controllers for Second Order plus Dead Time Models", In Proc of 8th IEEE International Conference on Control & Automation, pp 180-186, 2009.

ربات‌های موازی کابلی: سینماتیک، دینامیک و کنترل

حمید رضا تقی راد^۱، آزاده ظریف لولویی^۲، محمد اعظم خسروی^۳

^۱ استاد دانشکده مهندسی برق، قطب علمی کنترل صنعتی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، taghirad@kntu.ac.ir

^۲ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پردیس، پردیس، تهران، ایران، azadeh.zarif@gmail.com

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، m.a.khosravi@aut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۳/۴/۷، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۳/۹/۲)

چکیده: ربات‌های کابلی دسته‌ای از ربات‌های موازی می‌باشند که در آن‌ها کابل‌ها جایگزین بازوهای صلب معمول گردیده‌اند. جایگزینی کابل بجای بازوهای صلب در ربات‌های موازی، این دسته از ربات‌ها را جایگزینی مناسب برای مقابله با کاستی‌های ذاتی و ساختاری ربات‌های معمول سری و موازی می‌سازد. اما این موضوع چالش‌ها و افق‌های جدیدی را پیش‌روی محققین پدیدار می‌سازد. در این مقاله یک مطالعه مروری بر روی تحقیقات انجام شده در زمینه با تاکید بر نوع مقید کامل آن انجام شده است، ضمن اینکه مسائل چالش‌برانگیز در این حوزه را نیز بررسی می‌کند. با این توصیف، در این مقاله بررسی اجمالی کاربردها و موضوعات نظری مطرح شده در حوزه ربات‌های کابلی مانند فضای کاری، دینامیک و کنترل صورت می‌پذیرد. علیرغم اینکه با توجه به پیشینه تحقیقات مختلف انجام شده در این زمینه به نظر می‌رسد که تحقیقات وسیعی در این زمینه صورت گرفته است، در این مقاله موضوعات نظری و کاربردی گوناگونی عنوان می‌گردد که هنوز به عنوان مسائل چالش‌برانگیز باز تحقیقات در این موضوع اشاره دارند.

کلمات کلیدی: ربات موازی، ربات کابلی، مقاله مروری، سینماتیک، دینامیک، حل افزونگی، فضای کاری، کنترل.

Cable Driven Parallel Robots: Kinematics, Dynamics and Control

Hamid D. Taghirad, Azadeh Zarif Loloee, Mohammad A. Khosravi

Abstract: Cable-driven robots are a class of parallel robots in which the rigid links are replaced by cables. Using cables instead of rigid links in parallel robots makes them a suitable choice to remedy some of the traditional shortcoming of the conventional robots. However, this introduces new challenges in the study of cable-driven robots. This paper presents a survey of cable-driven robots and addresses numerous challenging open problems in this field. The paper consists of an overview of both applications and theoretical issues of cable-driven robots such as workspace, dynamics and control, and furthermore some open challenging issues in this field of research.

Keywords: Parallel robots, cable driven robots, kinematics, dynamics, control, redundancy resolution, workspace.

۱- مقدمه

ساخته شوند تا بتواند پاسخ‌گوی نیازهای گسترده‌ی بشری باشد. ربات‌ها را می‌توان از دیدگاه‌های متفاوتی از جمله درجات آزادی، نوع عملگرها و غیره تقسیم‌بندی کرد. یکی از این تقسیم‌بندی‌ها، طبقه‌بندی ربات‌ها از نقطه نظر ساختار زنجیره‌های سینماتیکی است. از این منظر ربات‌ها به سه دسته‌ی سری، موازی و ربات‌های سیار طبقه‌بندی می‌شوند [۲]. ربات‌های سری، مکانیزم‌های با زنجیره‌های سینماتیکی باز بوده که مجری نهایی توسط مجموعه‌ای

پیشرفت روزافزون علم رباتیک سبب شده که این مکانیزم‌ها فراتر از صنایع و در بسیاری از فرآیندهای پزشکی، خدماتی و غیره به فعالیت بپردازند [۱]. با توجه به گسترش روزافزون استفاده از ربات‌ها در کاربردهای مختلف، امروزه بسیاری از ربات‌های متداول صنعتی قادر به پاسخ‌گویی به تمامی نیازها نیستند. این موضوع سبب شده ساختارهای جدیدی از ربات‌ها طراحی و

صنعت از اقبال خوبی برخوردارند. یکی از آنها، ربات استوارت-گو^۴ است که از مشهورترین مکانیزم‌های موازی بوده و مطالعات گسترده‌ای بر روی آن صورت گرفته است. این مکانیزم توسط گو برای سیستم تست تایر در سال ۱۹۴۷ معرفی شد [۸]. در سال ۱۹۶۵ نیز استوارت به ارائه طرح دیگری از این ساختار پرداخت [۹]. آنچه به عنوان ربات استوارت-گو امروزه شناخته می‌شود، یک مکانیزم شش درجه آزادی است که در دستگاه‌های شبیه‌ساز پرواز و به کارگیری آن در ماشین‌کاری دقیق است [۹]. علیرغم کاربردهای بیان شده، این مکانیزم از ضعف محدودیت فضای کاری در ربات‌های موازی رنج می‌برد. ربات دلتا^۵ یک نمونه‌ی پرکاربرد دیگر از مکانیزم‌های موازی در صنعت است [۱۰]. این ربات از سه بازوی متوازی‌الاضلاعی تشکیل شده که توسط مفاصل چرخنده به پایه متصل است. مهم‌ترین ویژگی این مکانیزم سرعت و دقت بالای آن در برداشتن و گذاشتن اجسام سبک در صنایع بسته‌بندی، بهداشتی و دارویی است [۱۱]. ربات کواترو^۶ نیز مکانیزمی اقتباس شده از ربات دلتا است که با افزودن یک بازوی بیشتر دارای چهار درجه آزادی است [۱۲].

هر چند جهت‌گیری در تحقیقات و توسعه فن‌آوری در زمینه‌ی رباتیک به سمت ربات‌های موازی پیش رفته است، به دلیل محدودیت فضای کاری و مشکلات ساخت، این نوع ربات‌ها نسبت به نوع متداول سری از گستردگی کمتری در کاربردهای صنعتی برخوردارند. از حدود سه دهه گذشته و برای غلبه بر ضعف‌های هر دو مکانیزم سری و موازی نگرش جدیدی در طراحی ربات‌های موازی مطرح گردید [۱۳]. این نگرش مبتنی بر به کارگیری بازوهای کابلی به جای بازوهای صلب است و با طراحی یک بازوی ماهر که تنها از نیروی کششی کابل استفاده کند، بکار گرفته می‌شود. با استفاده از این رویکرد جدید می‌توان ربات‌های موازی طراحی کرد که از نظر وزن به مراتب سبک‌تر از مکانیزم‌هایی با بازوی صلب می‌باشند [۱۴]. به این ترتیب جرم متحرک ربات بسیار کاهش می‌یابد و در نتیجه با نیروی یکسان، سرعت و شتاب بیشتری را می‌توان در مجری نهایی به دست آورد و بار بیشتری را نیز حمل کرد [۱۵]. در ادامه به معرفی این نوع مکانیزم‌ها پرداخته می‌شود.

از بازوها^۱ که به صورت سری نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند به پایه متصل شده است. مزایای اصلی این مکانیزم‌ها فضای کاری نسبتاً وسیع، قابلیت انعطاف و مانور زیاد است. با این حال شکل قرارگیری مفاصل به صورت متوالی سبب بوجود آمدن معایب قابل توجهی از جمله سختی^۲ کم، دقت پایین و خطای انباشتگی شده است. همچنین قابلیت حمل بار موثر در این نوع ربات‌ها به دلیل حمل وزن بازوها، موتورها و سایر اجزای خود به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد [۲].

در دهه‌های اخیر با گسترش کاربرد ربات‌ها، محققان با نگاهی تازه به طبیعت به ساختارهای زنجیره‌ی سینماتیکی بسته با ویژگی‌هایی نظیر دقت بالا، شتاب زیاد و قابلیت حمل بار دست یافتند [۳]. همان‌گونه که انسان برای حمل اشیای سنگین از هر دو دست استفاده می‌کند و یا برای انجام کارهایی مثل نوشتن یا گرفتن اجسام چند انگشت خود را به کار می‌برد، استفاده از زنجیره‌های بسته‌ی سینماتیکی راه کار مناسبی برای رفع مشکلات بازوهای سری است [۵، ۴]. با توجه به این درک شهودی، به کارگیری زنجیره‌های سینماتیکی بسته رو به افزایش بوده و جهت‌گیری تحقیقات و توسعه‌ی فناوری در زمینه‌ی ربات‌های موازی گسترش یافته است [۶].

در بازوهای موازی به طور معمول تعداد بازوها با درجات آزادی ربات برابر بوده و هر بازو توسط یک عملگر کنترل شده است. عملگرها معمولاً نزدیک پایه یا روی آن نصب می‌شوند و منجر به سبکی بازوها و کاهش ابعاد موتورها می‌گردند. بدین ترتیب بازوها در ساختار موازی معمولاً بار عملگرها را به دوش نمی‌کشند و لذا سبک‌تر از بازوهای ساختار سری مشابه قابل طراحی است. از طرف دیگر به دلیل وجود بازوهای موازی هر بازو تحمل بخشی از بار را عهده‌دار است و در نتیجه می‌توان نیروهای بزرگتری را به آن اعمال کرد و سرعت و شتاب‌های بالاتری را انتظار داشت [۷]. هر چند مکانیزم‌های موازی معایب ربات‌های سری را پوشش داده‌اند ولی فضای کاری محدود و وجود موقعیت‌های تکین^۳ داخل فضای کاری موجب محدودیت در کاربردهای این مکانیزم‌ها شده است. علاوه بر این در ربات‌های موازی پیچیدگی محاسباتی در سینماتیک مستقیم و به کارگیری آن در سیستم کنترلی ربات بر ضعف‌های این نوع مکانیزم‌ها افزوده است.

علیرغم ضعف‌های بیان شده، دو گونه از این نوع ربات‌ها در

^۴ Stewart-Gough

^۵ Delta

^۶ Quattro

^۱ Link

^۲ Stiffness

^۳ Singular

۱-۱- ربات‌های موازی کابلی

حریق چاه‌های نفت کویت [۱۹] و کاربردهای مربوط به بازیافت پس‌مانده‌های هسته ای و سمی [۲۳] به کار گرفته شده است. این سیستم در موسسه ملی استاندارد و فناوری^۴ با هدف طراحی و ساخت یک ربات کابلی مجسمه ساز توسعه داده شده است. در این مکانیزم از شش پتانسیومتر خطی کابلی پسو به منظور اندازه‌گیری موقعیت مجری نهایی استفاده می‌شود. در IPA نیز پات^۵ با تمرکز بر کاربردی کردن ربات‌های کابلی دو نمونه ربات کابلی IPANema و IPANema2 را معرفی کرده است [۲۴]. به لحاظ نظری در این پروژه الگوریتم‌هایی برای تحلیل سریع فضای کاری ربات توسعه داده شده‌اند [۲۵]. در شکل (الف)، نمونه‌ای از ربات موازی کابلی را نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱: (الف) ربات کابلی ربوچرثقیل [۲۰]، (ب) ربات موازی SkyCam در تصویربرداری از یک استادیوم ورزشی [۱۷]

تصویربرداری هوایی از استادیوم‌ها یکی دیگر از کاربردهای قابل درک این مکانیزم‌ها برای عموم مردم در سطح جهان است. یک نمونه عملی از این ربات، ربات SkyCam است که برای فیلم برداری در محدوده وسیع فضای استادیوم‌ها از آن استفاده می‌شود.

ربات موازی کابلی، مکانیزمی با حلقه‌های سینماتیکی بسته است که قسمت متحرک آن توسط کابل‌ها به پایه متصل شده است. این مکانیزم‌ها از دیدگاه مصرف انرژی بسیار پربازده بوده و به کارگیری آنها در حمل و انتقال بارهای سنگین شبیه به ربوچرثقیل‌ها^۱ انتخاب مناسبی است [۱۶]. از منظر فضای کاری نیز به دلیل نبود محدودیت در انتخاب طول کابل، این نوع ربات‌ها می‌توانند در کاربردهای با فضای کاری‌های بسیار بزرگ مانند تصویربرداری از استادیوم‌ها [۱۷] و یا تلسکوپ‌های رادیویی [۱۸] مورد استفاده قرار گیرند.

در ربات‌های کابلی موقعیت مجری نهایی با تغییر طول کابل تنظیم می‌شود و کابل‌ها فقط می‌توانند نیروی کششی اعمال کنند و قادر به اعمال نیروی فشاری و یا گشتاور نیستند. با توجه به این موضوع، ربات‌های موازی کابلی نیاز به حداقل یک محرک افزون‌تر بر درجات آزادی یا نیروی ایستا دارند تا کابل‌ها را در تمام جهت‌های فضای کاری در حال کشش نگه دارند. از این نقطه نظر مکانیزم‌های کابلی به دو دسته کلی مقید کامل^۲ و مقید ناقص^۳ تقسیم می‌شوند [۱۹]. ربات‌های کابلی مقید کامل با افزونگی در محرک‌ها طراحی می‌شوند و درجات آزادی سیستم به وسیله کابل‌ها محدود می‌شود. در این نوع تعداد کابل‌های فعال از تعداد درجه آزادی سیستم بیشتر است [۱۹]. در مکانیزم‌هایی که به صورت ناقص مقید می‌باشند کشش کابل‌ها توسط یک نیروی منفعل شبیه به جاذبه تامین می‌شود. این بدان معنی است که در این نوع از ربات‌های کابلی موقعیت مجری نهایی بیشتر تحت تاثیر اغتشاش قرار می‌گیرد.

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد مکانیزم‌های کابلی، کاربرد آن‌ها روز به روز در حال افزایش است. طیف وسیع کاربردهای جدید آن در صنایع گوناگون از حمل و نقل اشیا سنگین تا کاربردهای توانبخشی و فضایی گسترده است. ربات ربوچرثقیل از مکانیزم‌های پرکاربرد کابلی مقید ناقص است که در حمل و نقل اجسام با هدف افزایش ایمنی و کنترل‌پذیری نسبت به جرثقیل‌های معمولی بکار می‌رود [۲۰]. این نمونه در سال ۱۹۸۵ ساخته شده است که بیشترین استفاده از آنها در حمل کانتینرها و بنادر است [۲۱، ۲۲]. نمونه بهبود یافته آن در جنگ خلیج فارس برای اطفای

^۱ RoboCrane^۲ Fully Constrained^۳ Under Constrained^۴ NIST
^۵ Pott

سریع این ربات‌ها، نگاه پژوهش‌گران را در مسایل امداد و نجات به خود معطوف ساخته است [۳۱].



(الف)



(ب)

شکل ۲: (الف) ربات کابلی مورد استفاده در بازتاب‌بخشی [۲۸]، (ب) ربات کابلی امدادگر [۳۱].

استفاده از شتاب‌های بالا در سیستم‌های شبیه‌سازی و واقعیت مجازی موجب شده است تا بخشی از کاربردهای ربات‌های موازی کابلی در توسعه این کاربرد معطوف گردد. مکانیزم وارپ^۴ یکی از مکانیزم‌های شش درجه آزادی با هشت عملگر کابلی است که با تاکید بر بهینه‌سازی فضای کاری طراحی شده است [۳۲]. در این راستا مکانیزم‌های دیگری مانند فالکن^۵ [۳۳] با هدف کاربرد در سرعت‌های خیلی بالا نیز پیشنهاد شده‌است. این مکانیزم که از هفت عملگر کابلی سود می‌برد، می‌تواند سرعت‌های خیلی بالایی را داشته و با استفاده از هفت موتور 60W شتاب‌های تا 40g را بدست دهد.

با عنایت به پتانسیل گسترده استفاده از ربات‌های کابلی در صنعت و قابلیت‌های بالقوه علمی در گروه رباتیک ارس، این گروه طراحی و ساخت صنعتی ربات موازی کابلی را در دستور کار خود قرار داده است. هدف از این پروژه طراحی، ساخت و تولید فن آوری یک ربات موازی افزونه کابلی است که در عین دارا

شکل ۱(ب) نمونه‌ای از این ربات را که در یک استادیوم فوتبال نصب شده است نشان می‌دهد [۱۷]. شایان ذکر است که در این ربات وزن دوربین همان نیروی انفعالی موردنیاز برای همواره در کشش قرار دادن کابل‌ها می‌باشد.

در پروژه لار^۱ با نگاهی تازه کاربرد دیگری از مکانیزم‌های کابلی معرفی گردیده است. در این پروژه به منظور ساخت تلسکوپ‌های غول‌پیکر رادیویی بین‌المللی از یک بالن سبک جهت اطمینان از تحت کشش بودن کابل‌ها استفاده شده است [۲۶]. این بالن به مجری نهایی متصل بوده و با اوج گرفتن در هوا و بالا رفتن، نیروی کششی کابل‌ها را که یک سر آنها به زمین و سر دیگر آنها به مجری نهایی وصل است، تامین می‌کند.

جرم بسیار کم مکانیزم‌های کابلی، توجه پژوهشگران را در بکارگیری این گونه ربات‌ها در کاربردهای فضایی به خود جلب کرده است. ربات کابلی شارلوت^۲ از مشهورترین مکانیزم‌های کابلی مقید کامل است که برای انجام آزمایشات در هاب فضایی^۳ به کار می‌رود [۲۷]. این مکانیزم دارای هشت کابل بوده و یک مکانیزم مقید کامل بشمار می‌آید. از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد آن می‌توان به فضای کاری گسترده‌اش اشاره نمود. علاوه بر این به دلیل وزن پایین این مکانیزم قابلیت حمل و نقل آن به سادگی امکان‌پذیر است.

به دلیل سادگی مونتاژ و حمل و نقل ربات‌های کابلی، رد پای آن در کاربردهای بازتاب‌بخشی نیز دیده می‌شود. در شکل ۲ (الف) نمونه‌ای از این ربات نشان داده شده است. جرم ناچیز کابل‌ها و مجری نهایی در این ربات، آن را ایمن ساخته و مصرف انرژی را بسیار پایین آورده است [۲۸]. علاوه بر این ساختار مکانیکی ساده ربات که روی هم سوار شده و یا از هم جدا می‌شوند و همین مزیت نگهداری و حمل و نقل آن‌ها را آسان‌تر می‌کند، می‌تواند بکارگیری این دسته از ربات‌ها را در این نوع از کاربردها گسترش دهد. همچنین امکان اصلاح و توسعه‌ی عملکرد ربات با اضافه نمودن ماژول‌های بیشتر همانند نمونه‌ی ربات ارائه شده در [۲۹] وجود دارد و تعمیر و پیکربندی مجدد این ربات‌ها را تسهیل می‌کند [۳۰].

یکی دیگر از کاربردهای مکانیزم‌های کابلی در عملیات امداد و نجات ناشی از بلایا مانند زلزله است. در واقع باز هم ویژگی‌های فضای کاری گسترده و قابلیت حمل بار بالا و نقل و انتقال و نصب

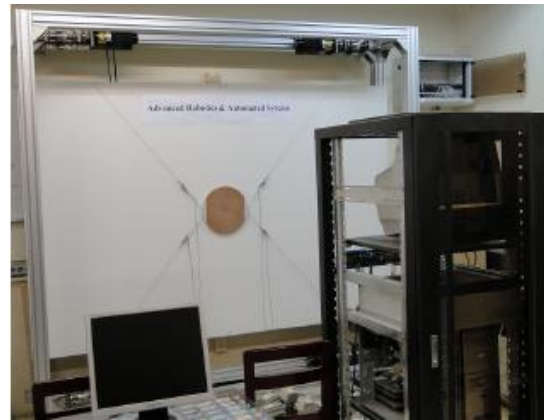
^۱ LAR (Large Adaptive Reflector)^۲ Charlotte^۳ Space-Hub^۴ WARP (Wirepuller Arm driven Redundant Parallel)^۵ Falcon

مساله سینماتیک مستقیم در این نوع ربات همانند مکانیزم موازی دیگر، مشکل و پیچیده است. افزونگی یکی از راهکارهای مناسب در فرار از پیچیدگی سینماتیک مستقیم می‌باشد. تحلیل فضای کاری یکی دیگر از مهم‌ترین بخش‌ها در طراحی ربات‌ها است و وجود یک روش تحلیلی مناسب دیدگاه موثری در گام طراحی برای طراح به وجود می‌آورد. در حوزه ربات‌های کابلی به دلیل قید کششی بودن کابل تحلیل فضای کاری بسیار پیچیده‌تر از ربات‌های متداول سری و موازی است. در این راستا این موضوع به عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در حوزه ربات‌های کابلی تا کنون مطرح است. در ربات‌های کابلی امکان برخورد کابل‌ها به یکدیگر و به بدنه ربات وجود دارد و این امر منجر به یک قید در طراحی بهینه ربات می‌شود.

در طراحی بهینه مکانیزم علاوه بر توجه به افزایش فضای کاری مکانیزم، ساختار هندسی نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در طول فرایند طراحی، انتخاب تعداد کابل، هندسه بدنه ربات، محل قرارگیری اتصالات کابل و ... دارای اهمیت فراوانی در تحلیل عملکرد ربات از جمله: تکنیکی، پایداری، فضای کاری، مهارت ربات در فضای کاری سیستم است. یک مساله پایه در ساختار فیزیکی کابل این است که هرگز نمی‌تواند نیروی فشاری و یا هر نیروی دیگری بجز نیروی محوری کششی تولید کند. همین مساله در طراحی، کنترل و توزیع نیروها در این دسته از ربات‌ها به مساله‌های باز متعددی تبدیل می‌شود. این خاصیت ذاتی کابل، همان دلیلی است که هرگز یک ربات موازی کابلی ماهر نمی‌تواند جدای از افزونگی باشد. یعنی طراحی کنترل‌کننده به تنهایی نمی‌تواند این مساله را حل کند و ابزار دیگری در کنار خود نیاز دارد که حل افزونگی در توزیع نیروها بین عملگرهای کابلی ربات است.

در مکانیزم‌های کابلی به دلیل وجود زنجیره سینماتیکی حلقه بسته، دارای دینامیک پیچیده‌تری نسبت به مکانیزم‌های سری است. این مسئله هنگامی که دینامیک کابل نیز در نظر گرفته شود بغرنج‌تر و پیچیده‌تر خواهد بود. با توجه به غیر محدب بودن فضای کاری قابل کنترل در این ربات‌ها حتی حرکت نقطه به نقطه نیز در این فضای کاری نیاز به یک الگوریتم پیچیده دارد تا بتواند منحنی مورد نیازی را بیابد که در فضای کاری قابل کنترل بوده و زمان یا انرژی را کمینه کند. به دلیل ویژگی یکتای کابل که فقط می‌تواند نیروی کششی اعمال کند، بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی که تاکنون برای ربات‌های سری و موازی پیشنهاد شده‌اند، نمی‌توانند

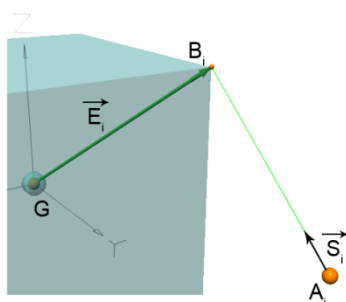
بودن سرعت، شتاب و سختی بالا، حداقل محدودیت‌های فضای کاری را داشته و بتواند کارکرد دقیق و مناسبی را برای کاربردهای صنعتی به ارمغان آورد. در این پروژه جدیدترین نظریه‌های علمی در زمینه‌های طراحی، ساخت و کنترل ربات افزونه کابلی در کنار استفاده صنعتی از این نظریه‌ها مد نظر قرار گرفته است. هدف از تعریف این پروژه طراحی و ساخت سامانه رباتیکی است که بتواند با استفاده از لیزر، عملیات جوش و برش را با دقت‌های مناسب انجام دهد. طراحی این ربات در دو فاز صفحه‌ای و فضایی پیش‌بینی شده است. در فاز اول هدف ساخت یک ربات موازی افزونه کابلی در صفحه بوده است که سه درجه آزادی لازم برای حرکت در صفحه را برای مجری نهایی فراهم می‌کند. این مکانیزم که هم اکنون در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ساخته شده و با عنوان ربات موازی کابلی صفحه‌ای نصیر معرفی می‌گردد، یک مکانیزم سه درجه آزادی با دو درجه آزادی حرکت انتقالی در راستاهای x و y و یک درجه چرخشی حول محور z است که در شکل ۳ نشان داده شده است [۳۴]. در فاز دوم طراحی و ساخت یک مکانیزم فضایی شش درجه آزادی تعقیب می‌شود که مطالعات تکمیلی بر روی آن در حال انجام است.



شکل ۳: ربات موازی کابلی صفحه‌ای ساخته شده در گروه رباتیک ارس دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی [۳۴].

۱.۲- چالش‌های ربات‌های موازی کابلی

علیرغم عمر کوتاه ربات‌های کابلی ویژگی‌های مطلوب آن توانسته است اشتیاق محققان را برای به کارگیری این مکانیزم‌ها در زمینه‌های مختلف افزایش دهد. اما به منظور توسعه این فن‌آوری در سطح گسترده، چالش‌ها و موانع فراوانی وجود دارد که در ادامه به توضیح آنها پرداخته می‌شود.



شکل ۴: بردارهای فرضی سینماتیکی بر روی ربات موازی کابلی.

۲.۱- سینماتیک وارون

آنچه که سینماتیک وارون ربات نامیده می‌شود، رابطه‌ای است که متغیرهای فضای مفاصل را برحسب متغیرهای فضای کاری بیان کند. یا به عبارت دیگر، بیان طول بازوها (کابل‌ها) در ربات موازی بر اساس موقعیت قرارگیری سکوی متحرک^۲ است.

با توجه به اینکه طول کابل همواره مقدار مثبت و حقیقی دارد، جواب فوق یکتاست [۳۷]. برای تحلیل معادلات سینماتیک وارون ربات فرض می‌کنیم که با یک سنسور موقعیت صفحه متحرک را به دست می‌آوریم و در هر لحظه مختصات نقطه G را در فضا در اختیار داریم که دارای حداکثر ۶ پارامتر شامل موقعیت در مختصات کارترین و موقعیت در جهت گیری است که همگی نسبت به مختصات ساکن A اندازه‌گیری می‌شوند. در واقع طول هر بازو با طول بردار $\overrightarrow{A_i B_i}$ برابر است.

۲.۲- ژاکوبین و حالت‌های تکینگی

آنالیز ماتریس ژاکوبین نقش اساسی در تحلیل و مطالعات ربات‌ها بازی می‌کند. این ماتریس مختصات فضای مفصلی را به مختصات فضای کاری مرتبط کرده ضمن این که بین نیروهای فضای کاری و گشتاورهای عملگرها ارتباط برقرار می‌کند. هرگاه بردار متغیرهای عملگرهای ربات L و بردار موقعیت سکوی متحرک x در نظر گرفته شود، معادلات سینماتیکی ربات به صورت یک تابع ضمنی $f(L, x) = 0$ به دست می‌آید و با مشتق‌گیری از این تابع رابطه بین سرعت مجری نهایی و نرخ تغییرات ورودی یافت می‌شود و ماتریس ژاکوبین کلی (J) ربات موازی از رابطه زیر به دست می‌آید:

بدون تغییر در کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در همه الگوریتم‌های کنترلی سابق، محرک‌ها می‌توانند در هر دو جهت مثبت و منفی اعمال تحریک کنند اما در این ربات‌ها محرک‌ها فقط باید در یک جهت عمل کنند به همین دلیل از نقطه نظر کنترلی، افزونگی در این ربات‌ها یک نیاز اساسی است تا سیستم بتواند نقص اعمال یک جهته تحریک را به نحوی جبران کند. در مقایسه با حجم زیاد پژوهش‌های انجام شده در زمینه کنترل ربات‌های سری و موازی بحث کنترل ربات‌های کابلی چندان مورد توجه محققین قرار نگرفته است. البته باید توجه داشت در این ربات‌ها تنها طراحی کنترل‌کننده کافی نیست و باید به گونه‌ای مسئله حل افزونگی که به نحوی با توزیع نیروها در کابل‌ها در ارتباط است، مد نظر قرار گیرد.

۲- سینماتیک مکانیزم‌های موازی کابلی

تحلیل سینماتیکی ربات‌ها از پایه‌ای‌ترین مسایل مورد بررسی در علم رباتیک است. در تحلیل سینماتیکی، هندسه‌ی حرکت اجزاء مختلف ربات و رابطه آنها (صرف‌نظر از نیروهای به‌وجود آورنده حرکت‌ها) بررسی می‌شوند. در ربات‌های موازی برخلاف ربات‌های سری، تحلیل سینماتیکی وارون ساده‌تر است و عموماً، روابط مستقیمی بین هر یک از پارامترهای مفصلی و موقعیت مجری نهایی به دست می‌آید [۳۵]. سینماتیک وارون ربات‌های موازی از پیچیدگی خاصی برخوردار نیست و به راحتی قابل حصول است اما سینماتیک مستقیم در این مکانیزم‌ها از جمله مسائل باز^۱ محسوب می‌شود [۳۶]. ربات موازی کابلی نیز چنین خواصی را از خانواده ربات‌های موازی به ارث برده‌است.

با در نظر گرفتن شماتیک کلی مکانیزم موازی کابلی در شکل ۴، موقعیت مجری نهایی و فریم ثابت نسبت به مرکز مختصات G به صورت برداری قابل تعریف است. در این شکل S_i بردار یکه در امتداد طول کابل از A_i به B_i است که A_i و B_i نقاط اتصال آمین کابل به پایه و مجری نهایی است. همچنین E_i برداری در امتداد خط واصل بین G و B_i است. با توجه به بردارهای معرفی شده به بررسی تحلیل سینماتیکی مکانیزم‌های کابلی پرداخته می‌شود.

^۲ Moving Platform^۱ Open Problems

[۳۸]. این پیچیدگی در رباتی که جاسلین و همکار ایشان بر اساس سادگی حل سینماتیک مستقیم پیشنهاد کرده‌است، وجود ندارد [۳۹]. این ساختار ربات موازی نیازی به حل سینماتیک پیچیده‌ی معمول ربات‌های موازی ندارد. مخترعین این نوع از ربات‌های موازی ساختارهای جایگزین برای هر درجه آزادی از ربات‌های موازی پیشنهاد کرده‌اند که بر اساس مقید کردن مفاصل ربات به نحوی است که حرکت ربات تنها در جهت حرکت‌های کارترین امکان‌پذیر باشد [۴۰]. اما به علت وجود قیود خاص در عملگرهای صلب بکار رفته، چنان ساختاری را نمی‌توان در مورد ربات کابلی بکار بست.

سینماتیک مستقیم ربات‌های موازی توسط روش‌های مختلف عددی و تحلیلی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. مطابق مطالعات انجام یافته از روش‌های مختلف، آنچه که مشهود است عدم یکتایی حل این مسئله و وجود جواب‌های مختلف برای آن است. به عنوان مثال برای ربات استوارت-گو جواب سینماتیک مستقیم نه تنها الزاماً یکتا نیست بلکه وجود ۴۰ جواب برای موقعیت مجری نهایی ربات گزارش شده‌است [۴۱]. از میان روش‌های مختلف حل این مسئله برخی از محققان از اندازه‌گیری متغیرهای مفاصل غیر فعال برای حل مسئله سینماتیک وارون سود برده‌اند [۴۲]. اکثر این روش‌های حل منحصر به تعداد درجات آزادی ربات نیست. در یکی از این روش‌ها معادلات سینماتیک مستقیم با استفاده از روابط بین مختصات نقاط اتصال و سینماتیک وارون، ساده می‌شود. بدین ترتیب یک حل بصورت بسته^۲ از معادلات بدست می‌آید [۴۳]. البته می‌توان این حل حلقه بسته را با داده‌های یک سنسور خطی آمیخت تا حل سینماتیک مستقیم بهتر شود [۴۴]. در مطالعه دیگری نیز، این روش بصورت تجزیه معادلات غیر خطی حاصله به دو دسته مسئله خطی و ماتریسی انجام یافته است [۴۵]. در کارهای جدیدتر، به جای حل معادله‌ی مثلثاتی بر حسب مختصات مجری نهایی، از حل معادلات جبری چند جمله‌ای برای نقاط اتصال استفاده شده‌است [۴۶]. علاوه بر روش‌های فوق، برخی نیز با استفاده از راهبردهای غیر کلاسیک سعی در حل این مسئله داشته‌اند. الگوریتم ژنتیک^۳ از روش‌هایی است که با تبدیل سینماتیک مستقیم به یک مسئله بهینه‌سازی قابل استفاده است [۴۷]. یکی از روش‌های بکار رفته دیگر در این زمینه، شبکه عصبی مصنوعی^۴ است. بدین ترتیب که وزن‌های شبکه عصبی در

$$J = J_L^{-1} J_x, \dot{L} = J \dot{x} \quad (1)$$

در این رابطه پارامترهای J_x و J_L از روابط زیر پیروی می‌کنند:

$$J_x = + \frac{\partial f}{\partial x}, J_L = - \frac{\partial f}{\partial L} \quad (2)$$

همچنین با آنالیز ماتریس ژاکوبین می‌توان به نقاط تکین دست پیدا کرده و روش مناسبی برای به دست آوردن فضای کاری ربات و مهارت ربات در این فضا هم به حساب می‌آید. همین موضوع‌ها باعث شده تا آنالیز ژاکوبین یکی از موارد مهم در مطالعه ربات‌ها باشد. در بیشتر بازوهای مکانیکی، به ازای مقادیری از متغیرها ماتریس ژاکوبین تکین می‌شود. در ربات‌های سری، ربات یکی از درجات آزادی خود را از دست می‌دهد. در چنین وضعیتی راستایی وجود دارد که به ازای اعمال نیرو توسط عملگرهای مفاصل، حرکتی در آن راستا انجام نمی‌پذیرد. به این حالت، تکینگی سری گفته می‌شود.

ربات‌های موازی علاوه بر تکینگی مزبور تکینگی دیگری تحت عنوان تکینگی موازی دارند. در این حالت سرعت‌های غیر صفر برای مجری نهایی در حالی که عملگرها ساکن هستند، امکان‌پذیر می‌شود. ربات در این حالت یک درجه آزادی به دست می‌آورد که عملگری برای کنترل آن ندارد. بخش دیگری از تکینگی ربات‌های موازی در مطالعه رابطه بین سرعت‌های مفاصل منفعل با سرعت‌های مفاصل فعال یا مجری نهایی حاصل می‌شود. تکینگی ژاکوبین تبدیل این مفاصل موجب بروز تکینگی مفاصل منفعل می‌شود. در ربات‌های کابلی با جایگزینی کابل و خصوصیت کششی بودن آن، برداشت‌های متعارفی که از ماهر بودن و فضای کاری مطرح بوده، تغییر یافته‌است. همچنین با بهره‌گیری از مفاهیم موجود با افزودن قید کششی بودن کابل رویکردهای جدیدی در تحلیل ژاکوبین و فضای کاری ربات به وجود آمده‌است. با عنایت به نو بودن بحث ربات‌های کابلی در حوزه رباتیک این موضوعات هم اکنون به عنوان مسائل باز مطرح است.

۲،۳- سینماتیک مستقیم

استخراج مختصات مجری نهایی در صورت معلوم بودن طول کابل‌ها در سینماتیک مستقیم^۱ ربات بررسی می‌شود. پیچیدگی این مسئله در اکثریت قریب به اتفاق ربات‌های موازی مشاهده می‌شود

² Closed Form Solution

³ Genetic Algorithm

⁴ Artificial Neural Network

¹ Forward Kinematics

در مطالعه‌ی فضای کاری ربات‌های موازی کابلی علاوه بر بررسی مسایلی که در تحلیل فضای کاری ربات‌های موازی مورد توجه قرار می‌گیرند، باید مسأله کششی بودن نیروی کابل‌ها نیز به عنوان یک ویژگی ذاتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. از اینرو محققان چندین نوع فضای کاری جدید را با در نظر گرفتن خصوصیت کششی بودن نیروی کابل معرفی نموده و آنها را مورد تحلیل قرار داده‌اند [۵۳، ۵۴]. این محققان معتقدند فضای کاری متعارف در ربات‌های موازی لزوماً در فضای کاری ربات‌های موازی کابلی معتبر نبوده و این عدم اعتبار ناشی از نیاز به کششی بودن نیروی کابل‌ها است [۵۴]. اثر نیروی کابل‌ها و رابطه بین نیروی عملگر و نیروی اعمال شده به مجری نهایی با توجه به اصل کار مجازی به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد [۵۳]:

$$A_{n \times m} f_{m \times 1} = w_{n \times 1}, \quad A = -J^T \quad (۳)$$

در رابطه فوق ماتریس A ، ماتریس ساختار^۶ نامیده می‌شود [۵۵]. همان‌گونه که بیان گردید، تحلیل فضای کاری مکانیزم‌های کابلی علاوه بر وابستگی به تحلیل تکینگی در فضای ربات، به آنالیز کششی بودن نیروی کابلی نیز وابسته است. در تحلیل کششی بودن نیروی کابل‌ها، لازم است در هر وضعیت از فضای ربات، رابطه (۳) با شرط مثبت بودن بردار نیروی کابل حداقل دارای یک جواب حقیقی باشد. در واقع تمام موقعیت‌هایی از ربات که منجر به وجود پاسخی مثبت در رابطه (۳) گردد، در فضای کاری مکانیزم کابلی قرار می‌گیرد.

$$\text{workspace: } \{X | \forall w \in w_t, A_{n \times m} f_{m \times 1} = w_{n \times 1}, 0 \leq f_0 \leq f, \leq f_1\} \quad (۴)$$

در این رابطه w_t مجموعه‌ای از نیروهای خارجی اعمال شده به مجری نهایی است. بردارهای f_0 و f_1 کران بالا و پایین نیروهای کششی کابل هستند. با این تعریف کلی و تعیین کران‌های بردار نیروی کابلی و مجموعه نیروی خارجی w_t فضاهای کاری مختلفی در حوزه مکانیزم‌های کابلی تعریف می‌شود. علاوه بر این یکی از شروط لازم برای وجود جواب در رابطه فوق، برآورده شدن قید کامل بودن مرتبه ماتریس ساختار (A) است. از این حیث بررسی تکین بودن ماتریس ژاکوبین در تحلیل فضای کاری مکانیزم‌های کابلی همواره به عنوان یک شرط لازم مورد توجه است.

آموزش با سینماتیک وارون آموزش می‌بینند و به هنگام اجرا عکس کاری را می‌کنند که در سینماتیک وارون انجام می‌گیرد [۴۸]. نگارندگان این مقاله در تحقیق دیگری [۴۹] نتیجه گرفته‌اند که شبکه عصبی جوابگوی استفاده در سینماتیک مستقیم نیست.

۳- تحلیل فضای کاری ربات‌های موازی کابلی

عوامل مختلفی حرکت‌های مکانیزم‌های موازی را محدود می‌نمایند. از آن جمله می‌توان محدودیت‌های مکانیکی مفاصل غیرفعال، تداخل و برخورد سایر اعضا، محدودیت‌های محرک‌ها و تکینگی‌هایی که فضای کاری مکانیزم را به چند قسمت جدا می‌نمایند، برشمرد. به همین دلیل در این ربات‌ها که در مقایسه با مکانیزم‌های سری به داشتن فضای کاری محدود مشهورند، حجم قابل توجهی از تحقیقات بر روی الگوریتم‌های مختلف یافتن فضای کاری آن تمرکز دارند [۵۰، ۵۱ و ۵۲].

در تحلیل فضای کاری این مکانیزم‌ها، مشکل اصلی در به تصویر کشیدن فضای کاری آن‌ها و ارتباط و وابستگی درجات آزادی به یکدیگر است. به همین علت فضای کاری مکانیزم‌هایی که بیش از سه درجه آزادی دارند را نمی‌توان به تصویر کشید. برای مکانیزم‌هایی که بیش از سه درجه آزادی دارند $n > 3$ ، لازم است که $n - 3$ تا از درجات آزادی را ثابت نگه داریم. با توجه به درجات آزادی که برای مکانیزم ثابت نگه می‌داریم، فضای کاری‌های گوناگونی برای مکانیزم به دست آورده است.

فضای کاری دوران ثابت^۱ یکی از انواع فضاهای کاری است که در آن زاویه‌های دوران ثابت فرض می‌شود و با تغییر موقعیت‌های ربات فضای کاری محاسبه می‌شود. یکی دیگر از فضاهای کاری، فضای کاری موقعیت ثابت^۲ است که به تمام جهت‌گیری‌هایی از ربات اطلاق می‌شود که با در نظر گرفتن موقعیت ثابت، مجری نهایی می‌تواند به آن دست یابد. نیز تمام موقعیت‌هایی از ربات است که با در نظر گرفتن محدوده معینی از جهت‌گیری، مجری نهایی می‌تواند به آن دست یابد. علاوه بر این فضاهای کاری دیگری مانند فضای کاری دوران تام^۳، فضای کاری دوران فراگیر^۴ و فضای کاری دوران تام کاهش یافته^۵ در تحلیل فضای کاری ربات‌های موازی تعریف شده‌اند [۲].

^۱ Constant Orientation Workspace (COW)

^۲ Constant Position Workspace (CPW)

^۳ Total Orientation Workspace (TOW)

^۴ Inclusive orientation workspace

^۵ Reduced total Orientation workspace

^۶ Structure matrix

۳،۱- انواع فضای کاری ربات‌های کابلی افزونه

فضاهای کاری تعریف شده در حوزه ربات‌های موازی کابلی را می‌توان به چهار گروه اصلی فضای کاری قابل دسترس، فضای کاری استاتیکی، فضای کاری دینامیکی و فضای کاری کنترل‌پذیر تقسیم نمود [۵۶]. فضای کاری قابل دسترس با در نظر گرفتن خواسته‌های واقعی و فیزیکی موجود در ربات از جمله محدودیت کمینه و بیشینه در نیروی کابل‌ها و یا اعمال یک مجموعه مشخص از نیروهای خارجی به مجری نهایی مکانیزم به دست می‌آید که در نوع خود حایز اهمیت و درخور توجه است. برخی از محققان این نوع فضای کاری را با نام‌های فضای کاری چرخش-شدنی^۱، فضای کاری نیرو-شدنی^۲ و یا فضای کاری قابل قبول^۳ معرفی نموده‌اند [۵۷، ۵۸]. یکی از روش‌های مطرح در تحلیل این نوع فضا، به کارگیری تحلیل بازه‌ای [۵۹] در تعیین محدوده‌ی آن است. در این دیدگاه محدودیت‌های عملی در نظر گرفته شده است و می‌تواند در طراحی یک مکانیزم خاص با عملکرد مشخص کارآمد باشد. اما به علت آنکه این محدودیت‌ها مسئله به مسئله متفاوت بوده و مقدار مشخصی ندارند در مسئله بهینه‌سازی در حالت کلی قابل استفاده نمی‌باشد. فضای کاری قابل دسترس استاتیکی، نیروی جاذبه زمین را به عنوان یکی از عوامل مقید کننده ربات در نظر می‌گیرد. در واقع این نوع فضا در ربات‌های مقید ناقص مطرح است که نیروی جاذبه، نقش یکی از کابل‌های افزونه را دارد [۶۰]. این نوع فضا با نام‌های فضای کاری تعادلی استاتیکی [۶۱] و ناحیه نیروی کابلی [۶۲] نیز تعریف شده است. دیگر فضای کاری تعریف شده، فضای کاری دینامیکی است که در آن شتاب‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی مکانیزم در آن مورد توجه است [۶۳]. در واقع این نوع فضا زیر مجموعه‌ای از فضای کاری قابل دسترس است که نیروی خارجی، ناشی از شتاب‌های تعیین شده است. محققان این نوع فضای کاری را برای ربات‌های صفحه‌ای بررسی نموده‌اند و ادعا کرده‌اند که قابل تعمیم به ربات‌های فضایی نیز می‌باشد [۶۳]. این نوع فضا نیز مانند دو فضای کاری دیگر وابسته به خصوصیات کاربردی یک مکانیزم است و تعبیر آن در مسائل متفاوت نیز متغیر است. یکی از عمومی‌ترین فضاهای کاری مطرح شده در مکانیزم‌های کابلی، فضای کاری کنترل‌پذیر است [۶۴] که با نام‌های

فضای کاری بستار چرخش^۴ [۵۳] و بستار نیرو^۵ [۶۵] نیز شناخته شده است. در این فضای کاری، بردارهای نیروی خارجی مجموعه‌ای از تمام بردارهای نیرو در هر جهت و با هر اندازه است. همچنین کران بردار نیروی کابلی نیز در محدوده مثبت محور حقیقی قرار دارد. در واقع در رابطه (۴) کران پایین بردار نیرو صفر و کران بالای آن بینهایت است. یکی از نکات حایز اهمیت در این نوع فضا، الزام قید افزونگی کابلی در مکانیزم است و در مکانیزم‌های مقید کامل قابل بررسی است [۶۶]. از آنجایی که هیچ محدودیتی به غیر از مثبت بودن نیروی کابلی در این نوع نگرش وجود ندارد، این فضای کاری فقط وابسته به هندسه ربات و نحوه قرار گرفتن نقاط اتصال به قاب ساکن و متحرک در ربات است [۵۳]. از این منظر فضای کاری کنترل‌پذیر در مسأله‌ی طراحی مکانیزم کابلی مقید کامل بسیار حایز اهمیت است. به این علت، تحقیقات نسبتاً گسترده‌تری در این نوع فضای کاری نسبت به دیگر فضاهای کاری انجام شده است.

یکی از مهم‌ترین قضایای مطرح در تحلیل فضای کاری کنترل‌پذیر بررسی فضای پوچی ماتریس ساختار است. بر مبنای خصوصیت فضای پوچی، موقعیت ربات در فضای کاری کنترل‌پذیر قرار می‌گیرد اگر و تنها اگر ماتریس ساختار ربات مرتبه کامل بوده و فضای پوچی آن شامل برداری با عناصر مثبت (یا هم‌علامت و مخالف صفر) باشد [۶۷، ۶۸].

در یک مکانیزم افزونه در موقعیت‌های غیرتکین تعداد بردارهای مستقل پوچی با تعداد درجه افزونگی ربات برابر است. در نتیجه در یک ربات کابلی یک درجه افزونه یافتن این بردار و تعیین علامت آن نسبتاً سهل و ساده است. با افزایش درجات آزادی تعداد بردارهای مستقل فضای پوچی افزایش یافته و دست‌یابی به برداری اکیداً مثبت در این دسته از بردارها پیچیدگی مسئله را چند برابر می‌کند. از این منظر برای مکانیزم‌های با بیش از یک درجه افزونگی تحلیل‌های مختلفی ارائه گردیده است. الگوریتم بازگشتی کاهش ابعاد^۶، یکی از روش‌هایی است که برای تعیین فضای کاری کنترل‌پذیر پیشنهاد شده است [۶۹، ۷۰]. در این روش فضای کاری کنترل‌پذیر با نام فضای کاری بستار نیرو معرفی شده است. این روش مبتنی بر تحلیل پوسته محدب^۷ [۷۱] بوده و یک روش سیستماتیک عددی است. این روش برای آنکه نشان دهد الگوریتم ارائه شده تمام فضای کنترل‌پذیر را می‌پوشاند، فاقد یک

⁴ Wrench Closure Workspace (WCW)

⁵ Force Closure Workspace (FCW)

⁶ Recursive dimension reduction algorithm

⁷ Convex Hull

¹ Wrench Feasible Workspace (WFW)

² Force Feasible Workspace (FFW)

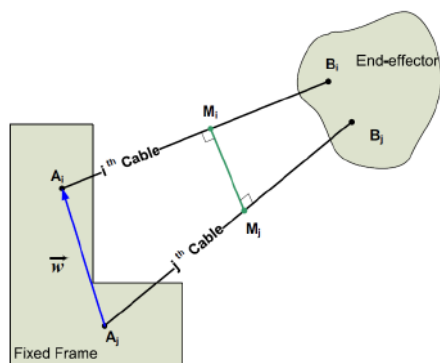
³ Acceptable Workspace

معادلات نمایند. از طرف دیگر با ارائه و اثبات قضایای مهمی در این زمینه نواقص روش‌های گذشته مرتفع شده است. با روش ارائه شده علاوه بر اینکه تمامی مرزهای فضای کاری بدست می‌آیند، می‌توان با قطعیت اثبات نمود که فضای درون این مرزها فضای کاری کنترل‌پذیر را تشکیل می‌دهند و هیچ موقعیتی خارج از این محدوده، جزو فضای کاری کنترل‌پذیر نمی‌باشد. با تعمق بیشتر بر روی ربات‌های کابلی و به منظور توصیف فیزیکی فضای کاری، آنها به یک مجموعه نیروی بنیادی دست یافتند به گونه‌ای که در هر موقعیت ربات، هر گاه با اعمال این مجموعه نیرو کابل‌ها در کشش قرار گیرند، حتماً به ازای تمامی نیروهای خارجی دیگر نیز کشیده باقی خواهند ماند.

۳-۲- برخورد کابل‌ها

یکی از مشکلاتی که فضای کاری ربات‌های کابلی را بسیار محدود می‌کند، پدیده برخورد کابل‌ها است. اهمیت این شاخص به خصوص در ربات‌های کابلی فضایی به حدی زیاد است که معیارهایی نظیر کنترل‌پذیری و یا مهارت ربات را تحت الشعاع قرار می‌دهد. در [۷۵] الگوریتم‌هایی بیان شده است که در موقعیت‌های مختلف ربات، امکان برخورد کابل با کابل و یا مجری نهایی و قطعه کار را آشکار می‌کند.

در صورتی که دو کابل ربات کابلی حین حرکت مجری نهایی به یکدیگر برخورد کنند، حرکت مختل شده و ربات مهارت خود را از دست می‌دهد. برای آشکارسازی برخورد دو کابل، روش‌های متعددی ارائه شده است که روش ارائه شده در [۷۵] یکی از ساده ترین و درعین حال کاراترین الگوریتم‌های آشکارسازی برخورد کابل‌ها است.



شکل ۵: قرار گرفتن دو کابل و فاصله بین آنها [۷۵].

در این روش ابتدا عمود مشترک بین دو برداری که در راستای دو

بیان مستدل است. همچنین با به کارگیری این روش تنها با شبکه‌بندی فضای مکانیزم می‌توان فضای کاری کنترل‌پذیر را به دست آورد و توانایی تعیین مرز فضای کاری مکانیزم وجود ندارد. تعیین تحلیلی مرز فضای کاری کنترل‌پذیر مکانیزم، یکی دیگر از رویکردهای مورد مطالعه است. در این نگرش منحنی‌های مرز فضای کاری به صورت یک معادله چندجمله‌ای معرفی می‌گردد و ادعا شده است تمامی موقعیت‌های درون مرز مشخص شده، در فضای کاری کنترل‌پذیر قرار دارد. در [۷۲] طبق روش ارائه شده معادلات مرز فضای کاری برای ربات‌های با یک درجه افزونگی استخراج گردیده است و ادعا شده که این روش قابل تعمیم برای مکانیزم‌های با بیش از یک درجه نیز می‌باشد، هر چند که این ادعا به اثبات نرسیده است. در [۷۳] نیز با ارائه یک روش موثر به بررسی فضای کاری کنترل‌پذیر پرداخته شده است. در این روش نحوه‌ی قرارگیری بردارهای ستونی ماتریس ساختار یک مکانیزم صفحه‌ای نسبت به یکدیگر مورد مطالعه قرار گرفته و مرزهای فضای کاری کنترل‌پذیر ربات صفحه‌ای به صورت معادلات چندجمله‌ای بیان شده‌اند. تعمیم همین روش به مکانیزم‌های فضایی نیز در [۵۳] ارائه گردیده است. هر چند این روش در فضای صفحه‌ای بطور مستدل بیان شده است ولی در بیان تعمیم این روش به مکانیزم‌های فضایی استدلال روشی در آن دیده نمی‌شود. مهم‌ترین علت فقدان بیان مستدل در هر یک از روش‌های بیان شده در [۷۲، ۵۳] این است که اگر تمام موقعیت‌های درون مرز فضای کاری با روش‌های بیان شده بررسی گردند نقاطی درون فضای کاری وجود دارد که در الگوریتم‌های بیان شده به اشتباه به عنوان فضای کاری کنترل‌پذیر شناخته نمی‌شوند.

یکی از عمومی‌ترین روش‌های تحلیل این فضای کاری، تحلیل بردارهای فضای پوچی است که با چالش‌هایی همچون پیچیدگی شدید محاسبات با افزایش درجه آزادی و درجه افزونگی ربات همراه است. همچنین روش‌های بیان شده فاقد یک توصیف فیزیکی از فضای کاری کنترل‌پذیر است و نمی‌توانند تمام این فضا را پوشش دهد. در نتیجه ارائه یک روش حل تحلیلی برای ربات‌های فضایی با بیش از یک درجه افزونگی مرز دانش در این زمینه را گسترش خواهد داد.

ظریف لولویی و تقی راد در [۷۴] با ارائه یک مجموعه جدید از نیروهای خارجی موسوم به نیروهای بنیادی توانسته‌اند از پیچیدگی‌های محاسباتی روش‌های پیشین بکاهند و تحلیل فضای کاری کنترل‌پذیر را معطوف به حل یک گروه محدود از

بیضی گون مهارت خواهد بود [۷۸]. هر چند عدد وضعیت به دلیل سادگی محاسبات و بیان مهارت ربات از اقبال بسیار خوبی برخوردار است ولی در حضور توأمان درجات آزادی دورانی و انتقالی همگن نبوده و دارای واحدهای فیزیکی یکسانی نیست. [۷۹، ۸۰، ۸۱ و ۸۲]. در سال‌های اخیر برای برطرف کردن مشکلات شاخص‌های سینماتیکی، دو شاخص متمایز با نام حساسیت سینماتیکی دورانی و حساسیت سینماتیکی انتقالی تعریف گردیده است [۸۳].

شاخص‌های حساسیت سینماتیکی دورانی و حساسیت سینماتیکی انتقالی کران بالای خطای دورانی و انتقالی مکانیزم هستند که این خطاها ناشی از خطای با نرم واحد در فضای مفصلی است [۸۴]. از آنجا که این دو شاخص خطای درجات آزادی دورانی و انتقالی را به طور جداگانه در نظر می‌گیرند، از نظر واحد سازگار هستند. اما این شاخص تفسیری از میزان نزدیکی به تکنیکی ارائه نمی‌دهد [۸۵]. چنان‌که ممکن است در موقعیتی خاص، حساسیت سینماتیکی ربات بسیار مطلوب باشد، اما ربات به مرز تکنیکی نیز نزدیک باشد.

۴.۱- معیارهای مهارت مکانیزم‌های موازی کابلی

در مکانیزم‌های موازی معیارهای متعددی در تعیین عملکرد سینماتیکی بیان گردیده است و این معیارها در ربات‌های کابلی نیز بکار می‌رود. اما بدلیل کشتی بودن نیرو در کابل‌ها به کارگیری معیارهای مهارت بیان شده در ربات‌های مرسوم به تنهایی کارایی مناسبی ندارد. زیرا ممکن است در وضعیتی معیار مهارت مناسب باشد ولی نیروی کشتی کابل قابل دسترس نباشد. از این حیث تعریف یک معیار مهارت جدید در ربات‌های کابلی مرز دانش را در این زمینه گسترش می‌دهد. در این گونه ربات‌ها یکی از محدود شاخص‌های موجود، معیار مهارت یک‌جهته^۵ برای ربات‌های کابلی با یک درجه افزونگی [۸۶] است.

این معیار به خوبی توانسته است هم اثر نیروی داخلی که ناشی از بردار پوچی است را در نظر بگیرد و هم اثر ژاکوبین را مطرح سازد. این معیار هرچند برای مکانیزم‌های یک درجه افزونه می‌تواند به عنوان یک معیار مناسب انتخاب گردد و فضای کاری کنترل‌پذیر را نیز مشخص می‌کند، ولی یکی از مشکلاتی که به کارگیری این معیار برای ربات‌های با بیش از یک درجه افزونگی ایجاد می‌کند، به دست آوردن یک بردار پوچی منحصر به فرد است. زیرا با

کابل ($M_i M_j$ در شکل ۵) قرار می‌گیرد را به دست آورده و طول آن را محاسبه می‌کنند. هرگاه مقدار این طول کمتر از مقداری مانند ε باشد در آن شرایط برخورد حادث شده است. مقدار ε بستگی به ضخامت کابل‌های بکار رفته در مکانیزم دارد و یک معیار عملی است. در [۷۵] همچنین به شرایط برخورد کابل با مجری نهایی و قطعه کار نیز توجه گردیده و الگوریتمی موثر در این راستا نیز ارائه شده است. در این روش با بررسی کابل در نزدیکی قطعه کار شرایط برخورد مورد توجه قرار گرفته است. هر چند الگوریتم ارائه شده در نحوه برخورد کابل با قطعه کار روشی کارا و موثر است ولی در آن قطعه کار صرفاً با هندسه مکعبی در نظر گرفته شده است. البته شایان ذکر است که هر قطعه کار و مجری نهایی را می‌توان در یک مکعب محاط نمود و سپس از روش ارائه شده در برخورد کابل و مجری نهایی استفاده کرد. هر چند مطالعات قابل توجهی در مورد فضای کاری مکانیزم‌های کابلی صورت پذیرفته است، اما همچنان این موضوع یکی از موضوعات چالشی در این نوع مکانیزم‌ها است.

۴- معیارهای مهارت

محاسبه فاصله از نقاط تکین کار پیچیده‌ایست و هیچ بررسی کاملی برای محاسبه فاصله‌ی بین یک موقعیت از مکانیزم از نزدیکترین موقعیت تکین آن انجام نگرفته است. برای ایجاد کمیتی که فاصله تکینگی را نمایش دهد با کمی اغماض می‌توان شاخص‌های سینماتیکی-استاتیکی را در نظر گرفت. یکی از مفروضات در بررسی عملکرد سینماتیکی محدود در نظر گرفتن نرم خطای اندازه‌گیری است [۷۶] منجر به بیان رابطه‌ی شبه-کره‌ی^۱ خطا در فضای مفصلی و بیضی گون خطا در فضای کاری مکانیزم می‌شود. در ادبیات فضای کاری معمولاً این حجم، بیضی گون مهارت^۲ نامیده می‌شود، که شکل و حجم آن مشخصه‌ای از مهارت مکانیزم است.

یکی از مشهورترین شاخص‌های مهارت، شاخص یوشیکاوا^۳ [۷۷] است. مقدار این شاخص متناسب با حجم بیضی گون مهارت است. از دیگر شاخص‌های پرکاربرد در مکانیزم‌های موازی معیار عدد وضعیت^۴ است که متناسب با نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک

¹ hyper-sphere

² manipulability ellipsoid

³ Yoshikawa's manipulability index

⁴ Condition number

⁵ Unilateral Dexterity

داشتن درجه آزادی برای طراحی کنترل‌کننده مناسب اشاره نمود. همه موارد فوق در ربات‌های متداول غیرکابلی یک قید ضروری نیست و منجر به بهبود عملکرد ربات می‌شود. در حالی که در ربات‌های کابلی، افزونگی نه یک امکان بلکه یک ضرورت است. محدودیت ذاتی کابل‌ها در اعمال نیروی محوری تنها در جهت کشش، وارد کردن نیرو در دو جهت مخالف را غیر ممکن می‌سازد. بدین ترتیب افزونگی در عملگر و جایگذاری مناسب آن در طراحی موجب می‌شود که سیستم کنترلی اختیار توزیع بهینه نیروها جهت حرکت را داشته باشد. این توزیع بهینه که به کششی بودن نیروها مقید است در حل افزونگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بر اساس آنچه بیان شد، در ربات‌های موازی که عملگرهای صلب با کابل جایگزین شده‌اند به دلیل کاهش چشمگیر وزن عملگرها، شتاب‌های بزرگی را می‌توانند تولید کنند و در کاربردهای سرعت بالا جایگاه ویژه‌ای پیدا کنند. اما عملگر کابلی تنها نیروی کششی تولید می‌کند. از سال ۱۹۹۰ به بعد تا کنون، ربات‌های کابلی زیادی به دنیا معرفی شده‌اند و برای هر کدام به نحوی مسئله تضمین کشش کابل‌ها حل شده است، در بعضی با اضافه کردن کابل افزونه و در مواردی نیز از طریق یک المان فتری [۸۸] و یا یک سیلندر نیوماتیکی [۸۹]. در [۸۸] یک فتر برای تحت کشش نگه داشتن کابل در ساختار روبات طراحی شده است. در [۹۰] یک نمونه اولیه از روبات با عملگرهای ترکیبی کابل و سیلندر پیستون مورد توجه قرار گرفته است.

در [۹۱] یک روش تحلیلی برای توزیع بهینه نیروی کابلی ارائه گردیده است و در آن مجموع نیروهای کششی کابل در هر موقعیت بهینه می‌گردد. روش ارائه شده هر چند تحلیلی است ولی برای روبات‌های با بیش از یک درجه افزونگی کاربردی ندارد. همچنین در [۹۲] یک الگوریتم تکرار شونده برای یافتن مقدار کمینه نیروی کابلی ارائه داده است. این الگوریتم یک روش تصویر کردن عددی تکرار شونده و همگرا می‌باشد. سپس برای یافتن مقدار کمینه از یک الگوریتم تکراری دیگر استفاده نموده است. این روش به مساله هموار بودن مجموعه جواب نیروی کششی و همچنین بازه کمینه و بیشینه نیرو در یک مسیر توجهی نداشته است.

تقی راد و بابازاده بدوستانی در [۹۳] با استفاده از قضیه‌های موجود در تئوری برنامه‌ریزی غیرخطی [۹۴] و قضیه کروش-کان-تاکر^۲ به حل مساله افزونگی در مکانیزم‌های کابلی پرداخته‌اند. در این

افزایش درجه افزونگی ابعاد بردار پوچی افزوده می‌شود و در صورت قرار گرفتن موقعیت مکانیزم در فضای کنترل‌پذیر به تعداد درجات آزادی بردار پوچی مثبت وجود دارد. در نتیجه انتخاب بردارهای پوچی با عناصر مثبت متفاوت منجر به مقادیر متفاوتی در این معیار می‌شود. از این منظر، خلاء بیان یک معیار مهارت که بیان‌کننده تاثیر ژاکوبین و نیروی داخلی به صورت همزمان باشد برای ربات‌های موازی کابلی با بیش از یک درجه افزونگی در ادبیات موضوع مشاهده می‌شود.

ظریف لولویی و تقی راد در [۸۷] معیار حساسیت نیرویی^۱ را پیشنهاد داده‌اند، این معیار هر چند از مفاهیم حساسیت سینماتیکی بهره جسته است، ولی در عمل مفهومی فیزیکی از دقت ربات در توزیع نیروی کابلی در مکانیزم‌های افزونه ارائه داده است. در این معیار به جای نگاه بر تغییرات موقعیتی مکانیزم نسبت به طول کابل، به نحوه تغییرات نیروی کابل در برابر اعمال نیروی خارجی به مجری نهایی توجه شده است. از این حیث با محدود فرض کردن بردار نیروی خارجی تغییرات نیروی کابل بررسی شده است. در این معیار کران بالای نرم بردار نیروی کابل محاسبه می‌گردد که این مقدار ناشی از اعمال نیروی خارجی با نرم واحد به مکانیزم بوده است.

معیار حساسیت نیرویی به عنوان معیاری منحصر به فرد در حوزه مکانیزم‌های کابلی بوده است. بر اساس این معیار که بر پایه ایده نیروهای بنیادی استوار است، نسبت تغییرات نیروی کابلی به تغییرات نیروی خارجی سنجیده می‌شود. این معیار علاوه بر اینکه رویکرد مناسبی در نقاط تکین یا کنترل‌ناپذیر دارد و در این نقاط مقدار صفر را به خود اختصاص داده است، در نزدیکی مرزهای کنترل‌پذیری نیز به صفر میل می‌کند.

۵- تحلیل افزونگی و توزیع نیروها

ایجاد افزونگی در عملگرهای بازوی روبات موضوعی است که از مدت‌ها قبل توسط طراحان، چه سری و چه موازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حقیقت به خاطر خصوصیات متعددی که در اثر افزونه بودن عملگرها حاصل می‌شود این موضوع همواره مورد توجه طراحان روبات در دنیا بوده است. از جمله این مزایا می‌توان به گسترش فضای کاری و دوری از تکینگی، کم شدن نقاط تکین، افزایش مهارت روبات، بهبود در نحوه حرکت ربات موازی و

² Karush-Kuhn-Tucker

¹ Force Sensitivity Index

طراح ایجاد کند. به همین دلیل، برخی ابزارهای گرافیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا به وضوح دید طراحی بیافزایند. برای مثال، مرجع [۱۰۰] وابستگی معیار بهینگی را در موقعیت‌های مختلف برای ربات‌های سری توسط بیضی‌گون نمایش می‌دهد و مرجع [۱۰۱] برای ربات موازی کابلی کشش کابل را به همان طریق نشان می‌دهد.

کارایی‌های مطلوب در یک ربات در حالت کلی می‌تواند شامل دسترسی به فضای کاری، مهارت ربات، سختی و یا مسیر مورد نظر باشد [۱۰۲، ۱۰۳، ۱۰۴]. در بهینه‌یابی چندهدفه دو نگاه عمده وجود دارد، در نگاه اول که مبتنی بر ارجحیت است بر اساس اطلاعات سطح بالاتر یک بردار ارجحیت وزنی انتخاب گردیده و سپس با تشکیل یک تابع مرکب، مسأله تبدیل به یک بهینه‌یابی تک هدفه می‌شود. معمولاً این نوع نگرش در بهینه‌یابی‌های کلاسیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از عمده‌ترین مشکلات به کارگیری این نوع روش‌ها یافتن بردار وزنی است. در نگرش دوم، مجموعه جواب‌های بهینه موسوم به پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینصورت می‌توان بر اساس ترجیحات متفاوت کاربر، با توجه به منحنی پرتو به دست آمده مصالحه‌های متفاوتی را در جواب‌های بهینه به دست آورد. این نوع نگاه قاعده‌مندتر و عینی‌تر از روش اول است [۱۰۵].

در نگاه اول مسأله طراحی بهینه تعریف یک تابع معیار T شامل مجموع وزن‌دهی شده شاخص‌های مطلوب C_i است، که هر کدام از این شاخص‌ها تابعی از پارامترهای طراحی (ρ) می‌باشند [۱۰۶].

$$T = \sum_i w_i C_i(\rho) \quad (5)$$

که در رابطه فوق w_i وزن‌های تعریف شده طراح برای شاخص‌ها می‌باشد. روش‌های عددی برای یافتن مجموعه ρ_m بطوری که تابع معیار T را کمینه کند، به کار می‌رود. معمولاً این روش‌ها با یک حدس مقدار اولیه ρ_0 شروع شده و مجموعه بهینه ρ_m را پس از چند تکرار به دست می‌آورد و ρ_m به عنوان پاسخ طراحی بهینه محسوب می‌گردد.

اما این روش دارای چندین چالش است؛ اول اینکه فرض بر آن است که شاخص‌های مطلوب قابل تعریف باشند و بتوانند بطور سریع و موثری در رویه^۷ عددی بهینه‌سازی محاسبه گردند. دومین مسأله همگرایی تابع معیار تعریف شده در رویه بهینه‌سازی است، که ممکن است در روند الگوریتم بهینه‌سازی در یک کمینه

روش مساله افزونگی به حل مساله کمینه‌سازی نیروها در فضای بازوها با در نظر گرفتن قیدها برای نیروها (کششی بودن نیروها در کابل‌ها) تقلیل پیدا کرده و با به دست آوردن معادلات لاگرانژ یک روش شبه-تحلیلی کارآمد برای حل مساله ارائه شده است.

۶- بهینه‌سازی فضای کاری ربات‌های موازی کابلی

تقاضای روز افزون برای ربات‌هایی پر شتاب، با بازده انرژی بالا و فضای کاری وسیع نیازمند طراحی بهینه بر اساس محدودیت منابع است. مسأله‌ی طراحی بهینه عبارت است از تعیین بهینه مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی که اهداف طراحی^۱ را بر اساس معیارهای^۲ مختلف به صورت همزمان برآورده سازد. پیچیدگی ساختار و فراوانی پارامترها، محدودیت‌ها و هدف‌های بهینه‌سازی موجب می‌شود فرآیند طراحی بهینه برای ربات‌های سری و با شدت بیشتر برای ربات‌های موازی مشکل شود [۲]. در حالیکه تحقیقات بسیاری بر روی طراحی بهینه ربات‌ها انجام شده است، بر روی طراحی ربات‌های موازی کابلی مطالعات کمتری انجام یافته است [۹۵] که در تمامی این مطالعات تنها به فضای کاری با نیروی کششی تمرکز شده است.

روش‌های بسیاری برای طراحی بهینه ربات‌های سری و موازی استفاده شده است. روش‌های ترکیب‌بندی تحلیلی^۳، گرچه بسیار مفهومی و کم اشتباه به نظر می‌رسند اما برای ربات‌هایی با درجات آزادی بیشتر از سه غالباً بسیار پیچیده و اکثراً غیرقابل حل هستند. به عنوان یک راه‌حل جایگزین، تعریف یک شاخص بهینگی^۴ و سعی در کمینه ساختن آن به صورت فراگیر پیشنهاد شده است [۹۶، ۹۷]. بدین منظور شاخص‌های مختلفی در مقالات معرفی و مقایسه شده‌اند. گرچه در تحقیقات مختلف بر روی یک ربات خاص این شاخص‌ها جوابگو هستند، اما به دلیل وابستگی به مقیاس^۵ غالباً برای مقایسه ربات‌های مختلف قابل بهره‌برداری نمی‌باشند [۹۸، ۹۹].

این روش‌های ریاضی نمی‌توانند یک تصویر شفاف از وابستگی معیارهای طراحی به پارامترها، نواحی بهینگی و تحدب^۶ آنها در

¹ Design Objective

² Criterion

³ Analytical Synthesis Methods

⁴ Optimality Index

⁵ Scale Dependency

⁶ Convexity

⁷ Procedure

انتخاب یک تابع هدف کلی وزن‌دهی شده پارامترهای طراحی محاسبه می‌گردند. آنچه در تمامی روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده قابل مشاهده است به کارگیری یک تابع هدف کلی در روند بهینه‌سازی است.

با توجه به آنچه در روش‌های مورد مطالعه دیده می‌شود وجود چند هدف در بهینه‌سازی ربات کابلی امری اجتناب‌ناپذیر است. در [۸۵] و [۸۷] به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر جبهه پرتو پیشنهاد گردیده است. سپس طرح بهینه یک مکانیزم کابلی فضایی با استفاده از روش‌های الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات و با توابع هدف انتخابی فضای کاری کنترل‌پذیر، حساسیت سینماتیکی و عدد وضعیت، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این روش امکان انتخاب نقاط بهینه با توجه به اهمیت معیارهای طراحی در شرایط گوناگون توسط طراح فراهم است.

۷- دینامیک ربات‌های موازی کابلی

بر خلاف بازوهای مکانیکی ماهر سری، مدل‌سازی دینامیکی بازوهای مکانیکی موازی بسیار پیچیده است. بر خلاف تحقیقات زیادی که در زمینه سینماتیک ربات‌های موازی انجام پذیرفته، کارهای انجام شده در زمینه دینامیک این ربات‌ها محدود می‌باشد. رایج ترین روش برای بدست آوردن معادلات دینامیکی حرکت در ربات‌های موازی استفاده از روش نیوتون اولر است. با این روش می‌توان به درک شهودی بهتری از فیزیک مساله دست یافت زیرا همه نیروهای داخلی، قیود و ... در این روش دیده می‌شوند اما پیچیدگی معادلات و حجم زیاد آنها باعث می‌شود حتی برای مسائل ساده نتوان به شکل دلخواه معادلات دست یافت. جاسلین^۵ در [۱۱۳] از این روش برای تحلیل دینامیکی ربات‌های موازی صفحه‌ای و فضایی استفاده کرده است. داسگوپتا^۶ نیز برای بدست آوردن معادلات دینامیکی حرکت ربات استوارت-گو که مشهورترین مکانیزم موازی است از روش نیوتون اولر استفاده کرده است. برای اینکار وی معادلات حرکت همه شاخه‌ها و سکوی متحرک را با در نظر گرفتن نیروهای قیود بدست آورده که حجم این معادلات بالاست [۱۱۴]. فتاح نیز در [۱۱۵] برای بدست آوردن معادلات دینامیکی حرکت مکانیزم موازی با سه درجه آزادی مستقل از روش نیوتون اولر استفاده کرده است.

محل^۱ قرار گیرد و به حل بهینه طراحی همگرا نشود. علاوه بر این انتخاب مقدار توابع وزنی نیز دیگر مشکل مهم در انتخاب تابع معیار است و کمترین تغییر در هر یک از وزن‌ها ممکن است باعث تغییر مقدار بهینه گردد. در بهینه‌سازی چندهدفه اگر هدف‌ها را نتوان از روش‌هایی مانند جبهه پرتو^۲ به هم مربوط ساخت، ناگزیر از یک تابع هزینه کلی استفاده می‌گردد. در بسیاری از طراحی‌ها محققان با توجه به این مشکل تنها یک معیار را در بهینه‌سازی در نظر می‌گیرند [۱۰۷].

در مکانیزم‌های کابلی روش‌های مختلفی در بهینه‌سازی مکانیزم به کار رفته است. یکی از روش‌های مطرح در ربات‌ها روش‌های گسسته‌سازی است که به صورت گسترده‌ای در طراحی ربات‌های کابلی به کار رفته است [۱۰۸، ۱۰۹، ۱۱۰]. در این روش‌ها به دلیل گسسته‌سازی پارامترها و بررسی تاثیر آنها در کل فضای کاری فرض شده ربات، هزینه محاسباتی زیادی به طراح تحمیل می‌شود و از طرفی تعیین فاصله بین مقادیر گسسته نیز در تعیین پارامترهای طراحی بسیار موثر است. همچنین در این روش‌ها هیچ ضمانتی برای به دست آمدن طراحی بهینه وجود ندارد.

در [۱۱۱] نیز تابع معیار با ترکیب وزن‌دار از فضای کاری کنترل‌پذیر، فضای کاری در دسترس استاتیکی و فضای عاری از برخورد کابل‌ها به یکدیگر ارائه شده است. با تغییر مسأله بهینه‌سازی چند هدفه به یک مسأله تک هدفه و با گسسته‌سازی پارامترهای طراحی در بازه‌های مفروض با استفاده از یک الگوریتم ترتیبی^۳ مقادیر بهینه پارامترها به دست آمده است. با توجه به اینکه ممکن است جواب بهینه به یک حل همگرا همگرا نشود، از الگوریتم ژنتیک برای تایید آن استفاده می‌شود. در این روش در صورتی که الگوریتم ژنتیک منجر به پاسخ بهتری نگردد، پارامترهای تعیین شده در مرحله اول به عنوان پاسخ بهینه در نظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم راهکار مناسبی در ارزش‌دهی توابع وزنی ارائه نشده است و با اعتماد بر تبحر طراح این وزن‌دهی بایستی انجام پذیرد.

به کارگیری نمودارهای بازبینی نظارتی^۴ یکی دیگر از روش‌هایی است که برای وزن‌دهی توابع هدف در مسأله بهینه‌سازی تک هدفه با یک تابع هزینه کلی مطرح شده است [۱۱۲]. با بررسی وابستگی هر هدف به متغیرهای طراحی، طراح با درک اثر هر متغیر بر روی توابع، وزن مناسب را پیشنهاد می‌دهد و سپس با

¹ Local minimum

² Pareto

³ Sequential Algorithm

⁴ Inspection Visualization

⁵ Gosselin

⁶ Dasgupta

مفاصل پسیو را به زاویه مفاصل تحریک شده مربوط می‌کند، دینامیک وارون مکانیزم‌های دارای حلقه بسته سینماتیکی را بدست آورده‌اند. چنگ^۴ نیز در [۱۲۳] مسئله دینامیک ربات‌های موازی افزونه را مورد توجه قرار داده‌است. وی با اعمال اصل دالامبر- لاگرانژ و استفاده از سیستم کاهش یافته معادلات دینامیکی حرکت مکانیزم با حلقه‌های سینماتیکی بسته را بدست آورده‌است. در این تحقیق نیز چگونگی تاثیر قیود در معادلات دینامیکی سیستم با ماتریس‌های ژاکوبینی که سرعت‌های مفاصل را بر حسب مختصات تعمیم یافته بیان می‌کنند، توصیف می‌شود.

استفاده از کابل به جای بازوهای صلب معمول در ربات‌های موازی کابلی، علیرغم سادگی در طرح و هزینه، چالش‌های جدیدی را بویژه در حوزه دینامیک و کنترل پیش روی محققین قرار می‌دهد. علاوه بر این به دلیل ماهیت ذاتی کابل که فقط قادر به اعمال نیروهای کششی است، در طراحی دینامیکی این ربات‌ها باید چگونگی اعمال و توزیع نیروها را نیز به صورت مناسبی در نظر گرفت. علیرغم اینکه رفتار کابل‌ها از زمان‌های طولانی مورد مطالعه قرار گرفته است، کاربرد آن‌ها در ربات‌های موازی بجای بازوهای صلب با آنچه در مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفته است، متفاوت است. در کاربردهای مهندسی عمران معمولاً کابل بسیار سنگین بوده و عملاً تحلیل استاتیکی آن به منظور پایداری سازه مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲۴]؛ [۱۲۵]. در حالی که در کاربردهای مبتنی بر ربات‌های موازی تغییر طول کابل به عنوان یک متغیر کنترلی مطرح بوده و کابل‌های مورد استفاده سبک می‌باشند. در مطالعاتی که تاکنون در این زمینه به منظور لحاظ کردن تغییر شکل کابل و بحث سینماتیک ربات‌های کابلی انجام پذیرفته، مدل‌های متفاوتی که اکثر آنها در [۱۲۶] جمع‌آوری گردیده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در بسیاری از ربات‌های کابلی از جرم کابل‌ها صرف نظر گردیده و کابل به عنوان یک المان صلب بدون جرم در نظر گرفته می‌شود [۱۲۷]، [۱۲۸] و [۱۲۹]. این فرض ساده‌کننده در کاربردهای با فضای کاری بزرگ شیهه تلسکوپ‌های غول آسا بدلیل عدم توصیف مناسب رفتار دینامیکی کابل نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و باید به نحوی با مسئله خمش و کشیدگی کابل رودررو شده و راهکارهای مناسبی برای برخورد با این مسئله ارائه داد. با فرض قابل ملاحظه بودن جرم کابل، خمش ناشی از کابل قابل توجه است پس باید از نقطه نظر استاتیکی کابل را به خوبی

روش لاگرانژ که دینامیک سیستم را با استفاده از مفاهیم کار و انرژی توصیف می‌کند نیز در مدل‌سازی ربات‌های موازی به کار رفته است. از آنجا که نیروهای قیدی در این روش حذف شده و دیده نمی‌شوند، این روش از نقطه نظر محاسباتی کارآمدتر از روش نیوتون اولر می‌باشد. در [۱۱۶] از این روش برای مدل‌سازی یک مکانیزم موازی شش درجه آزادی استفاده شده و معادلات دینامیکی حرکت به فرم بسته بدست آمده است. آنها در این مدل‌سازی شاخه‌ها را به صورت جرم‌های نقطه‌ای در نظر گرفته‌اند. لیره^۱ در [۱۱۷] نیز از روش لاگرانژ برای مدل‌سازی مکانیزم استوارت سود برده است. البته باید دقت داشت که در این روش بدلیل وجود حلقه‌های سینماتیکی متعدد بدست آوردن معادلات صریح حرکت بر حسب مختصات مستقل تعمیم یافته بسیار مشکل است.

از دیگر روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی دینامیکی ربات‌های موازی می‌توان از روش کار مجازی نام برد [۱۱۸]. در این روش با استفاده از شتاب‌های خطی و زاویه‌ای هر جسم، نیروها و گشتاورهای اینرسی محاسبه می‌شوند و نیازی به محاسبه نیروهای قیدی نیست. از دیگر روش‌های معمول برای بدست آوردن معادلات دینامیکی سیستم‌های با حلقه‌های سینماتیکی بسته استفاده از سیستم کاهش یافته^۲ است [۱۱۹] و [۱۲۰]. این ایده اولین بار توسط ویتنبرگ^۳ در مطالعه دینامیک مکانیزم‌های با حلقه‌های سینماتیکی بسته ارائه شد [۱۲۱]. در این روش ابتدا مکانیزم با حلقه بسته سینماتیکی به یک مکانیزم حلقه باز با ساختار درختی تبدیل می‌شود و فرض می‌شود که همه مفاصل تحریک نشده در ساختار درختی نیز محرک‌های مجازی می‌باشند. سپس همه گشتاورهای مفاصل مکانیزم با ساختار باز درختی بر مبنای همان حرکت دلخواه مکانیزم حلقه بسته محاسبه می‌شوند و در نهایت گشتاورهای مفاصل تحریک شده سیستم اصلی از گشتاورهای محاسبه شده برای سیستم حلقه باز با در نظر گرفتن قیود بدست می‌آید.

دینامیک سیستم درختی (کاهش یافته) که به صورت یک مکانیزم حلقه باز است به صورت گسترده‌ای توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۵]، [۱۲۲]. ناکامورا و قدوسی در [۱۲۰] از این ایده برای بدست آوردن معادلات دینامیکی ربات‌های موازی استفاده کرده‌اند. آنها با اعمال اصل دالامبر-لاگرانژ به سیستم و در نظر گرفتن تاثیر قیود توسط یک ماتریس ژاکوبین که زاویه

¹ Lebret

² Reduced System

³ Wittenburg

⁴ Cheng

شناخت. کژک^۱ با در نظر گرفتن جرم کابل، یک مدل استاتیکی از کابل بر مبنای یکی از مدل‌های پیشنهادی در [۱۳۰] بدست آورده است. وی نشان داده‌است که خمش کابل تأثیر زیادی در مسئله سینماتیک و سختی سیستم دارد. ژئی^۲ نیز با فرض سرعت پایین برای ربات به گونه‌ای که بتوان آن را با حالت ایستا تخمین زد، یک مدل ریاضی از کابل با در نظر گرفتن خمش پیشنهاد داده‌است و بر مبنای این مدل با در نظر گرفتن نیروهای اعمالی، جابه‌جایی استاتیکی کابل را بدست آورده است [۱۳۱].

وقتی که نیرویی بر نقطه انتهایی یک بازوی مکانیکی اعمال می‌شود این نقطه انتهایی با مقداری که بستگی به مقاومت بازو و نیروی اعمال شده دارد، تغییر شکل می‌دهد. سختی نقطه انتهایی بازو مقاومت بازوی مکانیکی و از همه مهم‌تر دقت موقعیتی در برابر بارها و نیروهای اعمالی را تعیین می‌کند. از آنجا که ربات‌های موازی کابلی با عنایت به ماهیت ساختاری کابل‌ها در معرض ارتعاشات قرار دارند، پس تعیین سختی سیستم می‌تواند به عنوان یک پارامتر مهم در طراحی، تحلیل و کنترل این ربات‌ها تلقی گردد. به همین دلیل یکی از چالش‌هایی که در ربات‌های کابلی با آن مواجهیم، سختی کم این ربات‌ها در مقایسه با هم‌تایان صلب خود می‌باشد. سختی کم، صلیبیت پایین را نتیجه داده و در نهایت به عدم دقت مکانی در سیستم منجر می‌شود.

در بسیاری از ربات‌های کابلی ریشه انعطاف، مدول الاستیک کابل می‌باشد که باید مدل گردد اما برای سیستم‌هایی که خمش کاملاً قابل توجه است یک نوع دیگر از انعطاف که وابسته به انرژی جاذبه کابل‌هاست، نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. کژک نشان داده‌است که خمش ناشی از جرم کابل‌ها می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر سختی سیستم به ویژه در ربات‌های کابلی با مقیاس بزرگ بگذارد. وی برای نشان دادن این مطلب از معیار فرکانس طبیعی سیستم استفاده کرده‌است. با توجه به ارتباط مستقیمی که بین فرکانس‌های طبیعی و سختی سیستم وجود دارد وی برای دو سیستم نمونه نشان داده‌است که بزرگترین فرکانس طبیعی سیستم با در نظر گرفتن خمش در کابل‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱۳۰]. بهزادی پور نیز با معرفی یک مدل چهار فتره برای کابل، شرایط لازم و کافی برای پایداری ربات در یک موقعیت خاص را بر پایه مثبت معین بودن ماتریس سختی سیستم بدست آورده است [۱۳۲]، [۱۳۳].

همان گونه که تاکنون ملاحظه شد اکثر مدل‌هایی از کابل که

مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، مدل‌های استاتیکی هستند که در تحلیل سینماتیکی و ماتریس سختی سیستم کاربرد دارند. از نقطه نظر دینامیکی برای مدل‌سازی کابل در مکانیزم‌های موازی کابلی مدل‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در اکثریت قریب به اتفاق این تحقیقات کابل‌ها به صورت المان‌های صلب بدون جرم در نظر گرفته شده‌اند [۱۲۷]، [۱۲۸]، [۱۲۹]. با این فرض ساده کننده دینامیک ربات به مشخصه‌های دینامیکی مجری نهایی وابسته خواهد بود. اما در کاربردهای با دقت و سرعت بالا دیگر نمی‌توان این فرض ساده کننده را به کار برد و باید از مدل‌های دقیق‌تری سود برد. نیهان^۳ از روش کلون-ویت^۴ برای مدل‌سازی دینامیکی کابل استفاده کرده‌است [۱۳۴]. آگراوال^۵ نیز برای مدل‌سازی ارتعاشات منتجه از انعطاف‌پذیری کابل با فرض اینکه کابل بدون جرم و طول آن ثابت است، نشان داده‌است که می‌توان از معادله موج برای مدل‌سازی کمک گرفت [۱۳۵]. فرض طول ثابت در کاربردهای مبتنی بر ربات‌های کابلی فرض درستی نیست. برای رفع این مشکل فرض بر این قرار گرفته که ابتدا حرکت‌های بزرگ مجری نهایی که مستلزم تغییرات بزرگ در طول کابل‌هاست، با در نظر گرفتن همان مدل سنتی ربات انجام گرفته است و مجری نهایی به محل مطلوب رسیده است اما به دلیل انعطاف‌پذیری کابل سیستم حول این نقطه ارتعاش دارد. حال برای تضعیف این ارتعاشات از مدل ذکر شده استفاده گردیده و کنترل مناسب بر این مینا طراحی می‌گردد. ژنگ^۶ نیز به مدل‌سازی و کنترل یک سیستم نقاله ساده دو کابله پرداخته و معادلات حرکت را برای این سیستم ساده با طول کابل متغیر بدست آورده است. معادلات بدست آمده بسیار حجیم و پیچیده بوده و عملاً برای استفاده از آنها مجبور به ساده‌سازی هستیم [۱۳۶].

در اکثریت قریب به اتفاق مطالعاتی که در زمینه کنترل ربات‌های کابلی صورت پذیرفته، برای سادگی و فرار از پیچیدگی‌های موجود از مدل ایده‌آل کابل (یک رشته صلب بدون جرم) استفاده شده‌است [۱۲۷]، [۱۲۸]، [۱۲۹]. استفاده از این مدل در کاربردهای با سرعت و دقت بالا، بدلیل در نظر نگرفتن انعطاف ذاتی کابل مناسب نبوده و راه به جایی نمی‌برد علاوه بر این استفاده از این مدل در فرآیند طراحی الگوریتم کنترلی ممکن است منجر به نتایج ناگوار در عملکرد حلقه بسته سیستم و حتی ناپایداری مکانیزم گردد. به همین دلیل باید در این کاربردها تأثیرات انعطاف کابل را

³ Nahon

⁴ Kelvin-Voigt

⁵ Agrawal

⁶ Zhang

¹ Kozak

² Zi

سیستم صورت پذیرفته است.

۷-۱- دینامیک ربات‌های کابلی با کابل‌های ایده‌آل

همان گونه که گفته شد، از آنجا که در کاربردهای عملی جرم کابل در قیاس با سایر قطعات مکانیکی به ویژه مجری نهایی ناچیز است در بسیاری از کاربردها می‌توان از جرم کابل چشم پوشی نموده و آن را شبیه به یک رشته صلب بدون جرم در نظر گرفت [۱۲۷]، [۱۲۸] و [۱۲۹]. با این فرض ساده‌کننده معادلات دینامیکی حاکم بر ربات را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۴۳]:

$$M(x)\ddot{x} + N(x, \dot{x}) = -J^T \tau$$

$$N(x, \dot{x}) = C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) + F_d\dot{x} + F_s(x) + T_d \quad (6)$$

که در آن x بردار مختصات تعمیم یافته، τ بردار نیروی کابل‌ها، F_d ماتریس ضرایب اصطکاک ویسکوز و F_s بردار اصطکاک کولمب می‌باشند. $M(x)$ ماتریس جرم، $C(x, \dot{x})$ ماتریس کوریولیس/سانتریفوژ و $G(x)$ بردار جاذبه می‌باشند که بسط آن‌ها در [۱۴۳] به تفصیل آمده است. J ماتریس ژاکوبین بوده و T_d بردار اغتشاش در سیستم می‌باشد که می‌تواند نمایانگر هر گونه نامعینی در دینامیک سیستم باشد. توجه به این نکته ضروری است که معادلات دینامیکی بالا در صورتی صادق هستند که ماتریس ژاکوبین J غیرتکین بوده و همه کابل‌ها تحت کشش باشند ($\tau \geq 0$). از طرف دیگر دینامیک محرک‌ها را نیز می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$I_m \ddot{q} + D\dot{q} - r\tau = u \quad (7)$$

در این معادله r شعاع درام، I_m ماتریس لختی موتورها، D ماتریس استهلاك و q زاویه شفت موتور است. با این فرض که وقتی ربات در موقعیت صفر قرار دارد، چرخش مثبت q مقدار تغییر طول ΔL را در کابل‌ها باعث خواهد شد، داریم:

$$r q = \Delta L = L - L_0 \Rightarrow q = r^{-1}(L - L_0) \quad (8)$$

با ترکیب معادلات بالا و توجه به این نکته که $\dot{L} = J\dot{x}$ خواهیم داشت:

$$M_{eq}(x)\ddot{x} + N_{eq}(x, \dot{x}) = J^T u \quad (9)$$

که در آن

به گونه‌ای لحاظ کرد. اتاویانو^۱ و کاستلی^۲ در [۱۳۷] و [۱۳۸] بر اساس نتایج شبیه‌سازی و عملی نشان داده‌اند در صورتی که جرم مجری نهایی خیلی بزرگتر از جرم کابل‌ها باشد می‌توان از جرم کابل‌ها صرف نظر کرد و دینامیک غالب کابل را فقط انعطاف طولی در امتداد کابل در نظر گرفت. دیائو^۳ و ما^۴ در [۱۳۹] با رویکرد استفاده از فرکانس‌های طبیعی ربات به همین نتیجه رسیده‌اند. آنها نشان داده‌اند که در ربات‌های کابلی مقید کامل ارتعاشات ربات که ناشی از نوسانات عرضی کابل‌هاست در مقایسه با تاثیر ارتعاشات طولی کابل‌ها ناچیز بوده و می‌توانند نادیده گرفته شوند. این مطالعات می‌تواند به این نتیجه منجر شود که در ربات‌های کابلی مقید کامل مدل فتر خطی در امتداد کابل بخوبی می‌تواند تاثیرات دینامیکی غالب کابل را در این کلاس از ربات‌ها توصیف کند. کاوامورا نیز با استفاده از مفهوم سختی به همین نتیجه رسیده است [۳۳]. با توجه به آنچه گفته شد، خسروی و تقی‌راد در [۱۴۰] با در نظر گرفتن مدل فتر با سختی ثابت برای توصیف تاثیرات دینامیکی غالب کابل، معادلات دینامیکی سیستم را با در نظر گرفتن انعطاف بدست آورده‌اند. این نحوه نمایش معادلات که رفتار دینامیکی غالب کابل را نیز در بر دارد از شکل مناسبی برای بهره بردن از نظریه‌های مختلف کنترلی برخوردار است. معادلات بدست آمده ربات موازی کابلی را به عنوان یک سیستم غیرخطی و کوپل‌شده نشان می‌دهند. با توجه به این معادلات برخلاف آنچه در ربات‌های معمول داریم، معادلات دینامیکی به صورت کوپل‌شده در هر دو فضای کاری کارترین و فضای طولی کابل‌ها نوشته شده‌اند و توسط ماتریس ژاکوبین مکانیزم که ارتباط مستقیمی با تحلیل سینماتیکی ربات و فضای کاری آن دارد، به هم مربوط می‌شوند. این شکل نمایش شامل زیرسیستم‌های کند و تند و برهم کنش آن‌ها با یکدیگر است. به سادگی می‌توان نشان داد که مدل ربات کابلی با کابل‌های کشسان می‌تواند به مدل ربات کابلی با کابل‌های ایده‌آل کاهش یابد اگر سختی کابل‌ها به بی نهایت میل کند [۱۴۱]. این نوع نگرش در مدل‌سازی ربات‌های کابلی با در نظر گرفتن دینامیک‌های غالب این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان از نظریه انحرافات تکین در مدل‌سازی و کنترل این دسته از ربات‌ها استفاده کرد. در [۱۴۲] مدل فتر با سختی متغیر برای توصیف تاثیرات دینامیکی غالب کابل توسط همین نویسندگان مورد استفاده قرار گرفته و اصلاح لازم در دینامیک

¹ Ottaviano

² Castelli

³ Diao

⁴ Ma

$$\mathcal{L} = K - P = \frac{1}{2} \dot{x}^T M(x) \dot{x} + \frac{1}{2} \dot{q}^T I_m \dot{q} - P_0 - \frac{1}{2} (L_1 - L_2)^T K (L_1 - L_2) \quad (10)$$

و اعمال معادله لاگرانژ به فرم

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{y}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_i} = Q_i \quad (11)$$

می توان معادلات دینامیکی کامل سیستم را پس از پاره ای محاسبات و ساده سازی معادلات بدست آورد [۱۴۰]، [۱۴۵]:

$$M(x) \ddot{x} + N(x, \dot{x}) = J^T K (L_2 - L_1) \quad (12)$$

$$I_m \ddot{q} + rK(L_2 - L_1) + D\dot{q} = u$$

در این معادله رابطه $\dot{L}_1 = J\dot{x}$ که J ماتریس ژاکوبین است، بین فضای مفصلی و کارترین برقرار است و داریم:

$$N(x, \dot{x}) = C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) \quad (13)$$

$$L_2 - L_0 = rq$$

در این معادلات x بردار شش بعدی موقعیت، q بردار زاویه ای محرک ها و K ماتریس قطری سختی کابل هاست. بقیه پارامترها نیز شبیه به قبل تعریف می شوند. وجود ترم سختی فنر K که ارتباط دهنده معادلات بوده و مقدار بزرگی را نیز دارا می باشد، ما را قادر می سازد تا این معادلات را به فرم تئوری انحرافات تکین بیان نماییم. با فرض اینکه همه ثابت فنرها دارای یک مقدار باشند (این فرض از عمومیت مسئله نمی کاهد زیرا با مقیاس کردن z می توان به این نتیجه رسید)، می توان نیروی الاستیک در کابل ها را بدین صورت نوشت:

$$z = k(L_1 - L_2), \quad K = kI \quad (14)$$

با این فرض می توان نوشت:

$$\dot{x} = -M^{-1}(x)N(x, \dot{x}) - M^{-1}(x)J^T(x)z \quad (15)$$

از آنجا که نظریه انحرافات تکین معمولاً برای ترم های کوچک بیان می شود تا ترم های بزرگ، ε را به صورت $\varepsilon = \frac{1}{k}$ تعریف می کنیم بنابراین این $\varepsilon \rightarrow 0$ وقتی $k \rightarrow \infty$ ، از طرف دیگر می دانیم که: $\dot{L}_1 = J\dot{x}$ ، $rq = L_2 - L_0$ بنابراین

$$\dot{q} = r^{-1} \dot{L}_2 = -r^{-1}(\varepsilon \dot{z} - J\dot{x}) \quad (16)$$

$$\ddot{q} = -r^{-1}(\varepsilon \ddot{z} - J\ddot{x} - \dot{J}\dot{x})$$

با جایگذاری این روابط در معادله دینامیکی مربوط به محرک‌ها و پاره‌ای محاسبات خواهیم داشت:

$$M_{eq} = rM(x) + r^{-1}J^T I_m J \quad (10)$$

$$N_{eq} = rN(x, \dot{x}) + r^{-1}J^T I_m \dot{J}\dot{x} + r^{-1}J^T D J \dot{x}$$

همان گونه که می بینیم دینامیک محرک ها با تبدیل ژاکوبین که یک نگاشت از فضای مفصلی به فضای کارترین است، به فضای کارترین منتقل شده اند.

۷.۲- مدل سازی ربات‌های کابلی با در نظر گرفتن انعطاف در کابل‌ها

در ربات‌های موازی کابلی هنگامی که انعطاف در کابل را نیز در نظر بگیریم، موقعیت محرک مستقیماً به موقعیت مجری نهایی مرتبط نیست. بنابراین در مدل سازی این ربات‌ها، باید هم موقعیت محرک و هم موقعیت مجری نهایی را به عنوان بردار حالت سیستم در نظر گرفت [۱۴۰]، [۱۴۴]، [۱۴۵]. در مدل سازی ربات کابلی می توان از مدل فنر طولی برای توصیف رفتار دینامیکی کابل سود برد. برای مدل سازی یک ربات موازی با n کابل فرض می کنیم که L_{1i} : $i = 1, 2, \dots, n$ نشان دهنده طول i امین کابل تحت کشش بوده و L_{2i} : $i = 1, 2, \dots, n$ نشان دهنده طول i امین کابل بدون کشش باشد. اگر سیستم کاملاً صلب باشد خواهیم داشت:

$$L_{1i} = L_{2i} \text{ با اعمال نماد برداری:}$$

$$L = (L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1n}, L_{21}, L_{22}, \dots, L_{2n})^T = (L_1^T, L_2^T)^T \quad (6)$$

انرژی جنبشی سیستم عبارت است از:

$$K = \frac{1}{2} \dot{x}^T M(x) \dot{x} + \frac{1}{2} \dot{q}^T I_m \dot{q} \quad (7)$$

که در آن x بردار مختصات تعمیم یافته در فضای کارترین (که رابطه سینماتیکی با L_1 دارد)، q زاویه شفت موتور (متناسب با L_2)، $M(x)$ ماتریس جرم ربات صلب و I_m ماتریس اینرسی موتورها می باشد. مجموع انرژی پتانسیل سیستم را نیز می توان به این صورت نوشت:

$$P = P_0 + P_1 \quad (8)$$

در این معادله P_0 انرژی پتانسیل ربات صلب بوده و ترم دوم با فرض مدل فنر خطی برای کابل عبارت است از:

$$P_1 = \frac{1}{2} (L_1 - L_2)^T K (L_1 - L_2) \quad (9)$$

که K ماتریس سختی کابل ها می باشد. با تشکیل لاگرانژین سیستم به صورت:

جهت عمل کنند به همین دلیل از نقطه نظر کنترلی، افزونگی در این ربات‌ها یک نیاز اساسی است تا سیستم بتواند نقص اعمال یک جهته تحریک را به نحوی جبران کند. علاوه بر این الگوریتم کنترلی باید به گونه‌ای طراحی شود که فرض کششی بودن نیروی کابل‌ها را در تمام مانورهای حرکتی ارضا کند.

$$\begin{aligned} \varepsilon \ddot{z} = & -JM^{-1}N + \dot{J}\dot{x} - \varepsilon I_m^{-1}D\dot{z} + I_m^{-1}DJ\dot{x} \\ & - (r^2 I_m^{-1} + JM^{-1}J^T)z \\ & - rI_m^{-1}u \end{aligned} \quad (17)$$

بدین ترتیب معادلات کلی سیستم که به فرم استاندارد نظریه انحرافات استثنایی درآمده اند را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد [۱۴۱]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a_1(x, \dot{x}) + A_1(x)z \\ \varepsilon \ddot{z} &= a_2(x, \dot{x}, \varepsilon \dot{z}) + A_2(x)z + B_2u \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن

$$\begin{aligned} a_1(x, \dot{x}) &= -M^{-1}(x)N(x, \dot{x}) \\ A_1(x) &= -M^{-1}(x)J^T(x) \\ a_2(x, \dot{x}, \varepsilon \dot{z}) &= -JM^{-1}N + \dot{J}\dot{x} - \varepsilon I_m^{-1}D\dot{z} \\ &+ I_m^{-1}DJ\dot{x} \\ A_2(x) &= -(r^2 I_m^{-1} + JM^{-1}J^T) \\ B_2 &= -rI_m^{-1} \end{aligned} \quad (19)$$

۸.۱ - اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی در ربات‌های کابلی

اولین مرحله در طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم حلقه بسته کنترل، اندازه‌گیری صحیح و دقیق هدف کنترلی است. بدون یک اندازه‌گیری درست حتی پیشرفته‌ترین کنترل‌کننده‌ها نیز از کنترل دقیق باز خواهند ماند. اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری ربات‌های موازی کابلی در حالت کلی می‌تواند به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم انجام گردد. در روش غیر مستقیم طول هر کدام از کابل‌ها توسط انکودرهای متصل شده به شفت موتورهای اندازه‌گیری شده و سپس با حل مسئله سینماتیک مستقیم مکان مجری نهایی ربات بدست می‌آید. از این روش در [۱۴۳]، [۱۴۷] به عنوان روش اندازه‌گیری استفاده شده است. از مزایای این روش پیاده‌سازی آسان آن با هزینه‌ای اندک است. اما در کاربردهایی از ربات‌های کابلی که به دقت و سرعت بالایی نیاز است طول کابل اندازه‌گیری شده در این روش به علت کشسانی ذاتی کابل قابل اطمینان نیست. علاوه بر این حل مسئله سینماتیک مستقیم به علت پیچیدگی و دارابودن جواب‌های متعدد، دقت و سرعت اندازه‌گیری را محدود خواهد کرد.

به منظور کاهش تاثیر کشسانی کابل‌ها بر اندازه‌گیری می‌توان از مبدل‌های موقعیت کابلی^۱ استفاده کرد [۱۴۸]. در این صورت کابل غیرفعال خروجی از این مبدل‌ها به موازات هر کابل قرار گرفته و به علت این که تحت بارگذاری نیست طول دقیق هر کابل را بدست خواهد داد. اما باید دقت داشت که دقت در این مبدل‌ها بر حسب درصدی از کل بازه اندازه‌گیری بیان شده و با افزایش بازه اندازه‌گیری دقت مبدل کاهش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به این که اندازه‌گیری با این روش یک روش تماسی محسوب می‌شود ممکن است بر حرکت مجری نهایی تاثیر داشته باشد. از دیگر معایب این مبدل‌ها قیمت بالای این تجهیزات اندازه‌گیری است. علاوه بر این مسئله سینماتیک مستقیم و پیچیدگی‌های

۸ - کنترل ربات‌های موازی کابلی

از اوایل دهه هفتاد که مهندسين کنترل وارد عرصه کنترل حلقه بسته ربات‌ها شدند، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای کنترل ربات‌ها پیشنهاد شده‌اند به طوری که هم اکنون می‌توان گفت مسئله کنترل ربات‌های سری به خوبی فهمیده شده‌است. از جمله این روش‌های کنترلی می‌توان به کنترل PID، روش‌های غیرخطی نظیر گشتاور محاسبه شده، مقاوم، تطبیقی و روش‌های هوشمند اشاره کرد [۳۵]، [۳۶]. کنترل سیستم‌های با حلقه‌های بسته سینماتیکی به دلیل پیچیده بودن معادلات دینامیکی و وجود قیود سینماتیکی در متغیرهای مفصلی از دیرباز مورد توجه محققین قرار گرفته است. بسیاری از روش‌های کنترلی که برای ربات‌های سری پیشنهاد شده‌اند برای استفاده در این ربات‌ها تطبیق داده شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به کنترل خطی، ساده و غیر متمرکز PID که عملی‌ترین روش کنترلی در ربات‌های سری است، اشاره کرد [۱۲۳]. روش گشتاور محاسبه شده یا کنترل دینامیک وارون نیز از جمله روش‌های غیر خطی است که در کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲۳]، [۱۴۶].

بدلیل ویژگی یکتای کابل که فقط می‌تواند نیروی کششی اعمال کند، بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی که تاکنون برای ربات‌های معمول پیشنهاد شده‌اند، نمی‌توانند بدون تغییر در کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در همه الگوریتم‌های کنترلی سابق، محرک‌ها می‌توانند در هر دو جهت مثبت و منفی اعمال تحریک کنند اما در این ربات‌ها محرک‌ها فقط باید در یک

¹ Cable Position Transducer

مربوط به آن همچنان به قوت خود باقی است. با عنایت به این دلایل بهتر است که موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی ربات در کاربردهای دقیق و سرعت بالا با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انجام شود. اما باید توجه داشت که اندازه‌گیری مستقیم در مقایسه با روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم پیچیده‌تر بوده و به تجهیزات پیشرفته و سنسورهای گران‌قیمتی مانند مسافت‌سنج‌های لیزری یا ترکیبی از جی‌پی‌اس‌ها، شتاب‌سنج‌ها و ژيروسکوپ‌ها و یا چند دوربین با وضوح و سرعت نمونه‌برداری بالا نیاز دارد. به همین دلیل تحقیقات کمی در حوزه پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های فضای کاری که از اندازه‌گیری‌های مستقیم سود می‌برند، انجام شده است. در [۱۳۱]، [۱۴۹]، [۱۵۰] از مسافت‌سنج‌های لیزری برای اندازه‌گیری مستقیم مکان ربات کابل ۶ درجه آزادی استفاده شده است. در [۱۵۱] موقعیت مجری نهایی به صورت مستقیم با استفاده از GPS‌های تفاضلی و جهت‌گیری مجری نهایی به کمک ژيروسکوپ‌های متصل به مجری نهایی اندازه‌گیری شده است. در [۱۵۲]، [۱۵۳] و [۱۵۴] از دوربین و روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری دیداری برای اندازه‌گیری مستقیم مکان ربات‌های کابلی استفاده شده است. روش‌های دیداری از جمله روش‌های اندازه‌گیری غیرتماسی هستند که قابلیت استفاده در ربات‌های کابلی با فضاهای کاری بزرگ را نیز دارا می‌باشند. با استفاده از این روش می‌توان مکان مجری نهایی ربات را با دقت بالا و به صورت مستقیم اندازه‌گیری کرد. این کار معمولاً با نصب یک نشانه بر روی مجری نهایی و ردیابی ویژگی‌های مربوط به آن انجام می‌شود.

۸.۲- کنترل کلاسیک ربات‌های موازی کابلی با کابل‌های ایده‌آل

در مقایسه با حجم زیاد پژوهش‌های انجام شده که در زمینه کنترل ربات‌های سری و موازی معمول به انجام رسیده، متأسفانه تعداد محدودی به بحث کنترل ربات‌های کابلی پرداخته‌اند که در بسیاری از آن‌ها الگوریتم‌های کنترلی که برای ربات‌های سری و موازی توسعه داده شده‌اند برای استفاده در ربات‌های موازی کابلی تطبیق داده شده‌اند. البته باید توجه داشت در این ربات‌ها تنها طراحی کنترل‌کننده کافی نیست و باید به گونه‌ای مسئله حل افزونگی که به نحوی با توزیع نیروها در کابل‌ها در ارتباط است، مد نظر قرار گیرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر قضیه لیاپانوف [۳۳]، [۱۵۵]، گشتاور محاسبه شده [۱۲۸]، [۱۵۶]، کنترل PID [۱۴۳] و روش سطوح لغزشی [۱۵۷] اشاره

کرد. الگوریتم‌های کنترل موقعیت ربات‌های کابلی را می‌توان بر مبنای معیارهای متفاوتی دسته‌بندی کرد. یکی از این معیارها، دستگاه مختصاتی است که کنترل‌کننده در آن طراحی می‌شود. بر مبنای این معیار، الگوریتم‌های کنترلی را می‌توان به دو دسته کنترل در فضای کابل و کنترل ربات در فضای کاری تقسیم‌بندی کرد. در فضای طول کابل ابتدا مسیرهای مطلوب که در فضای کاری طراحی می‌شوند با استفاده از سینماتیک وارون ربات به فضای طولی کابل نگاشته می‌شوند و سپس از کنترل‌کننده‌های غیرمتمرکز به منظور کنترل طول هر کدام از بازوهای کابلی استفاده می‌شود. در این دسته برای پرهیز از حل مسئله سینماتیک مستقیم که بسیار پیچیده است و یا عدم استفاده از سنسورهای شش بعدی موقعیت که بسیار گران قیمت هستند، طراحی کنترل‌کننده در فضای طول کابل‌ها انجام می‌پذیرد. بدین معنی که طول هر کدام از کابل‌ها به راحتی توسط انکودرهای متصل به شفت موتورها اندازه‌گیری شده و به عنوان فیدبک در ساختار کنترل‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۳]، [۱۲۷]. اما همان گونه که گفته شد در کاربردهایی که به سرعت و دقت بالایی نیاز است استفاده از فیدبک طول کابل در ساختار کنترل‌کننده قابل اطمینان نیست. علاوه بر این نامعینی‌های موجود در سینماتیک ربات بر نگاشت صحیح مسیرهای زمانی به فضای طول کابل تأثیر منفی گذاشته و عملکرد کلی سیستم را تحت‌الشعاع قرار خواهد داد. با عنایت به این مسائل می‌توان گفت که با وجود ساختار ساده، کم هزینه و عملی کنترل‌کننده در فضای طول کابل، کنترل ربات‌های کابلی در این فضا چندان قابل اطمینان نیست و بهتر است به منظور بهبود عملکرد کنترل‌کننده در ردیابی مسیر مطلوب تعریف شده در فضای کاری، خطای مکانی ربات به صورت مستقیم و بدون بهره بردن از تبدیلات سینماتیکی مورد استفاده قرار گیرد.

در دسته دیگر طراحی کنترل‌کننده در فضای کاری کارترین صورت پذیرفته [۳۳]، [۱۲۸]، [۱۳۱]، [۱۴۷] و سپس با حل مسئله افزونگی توزیع نیروها در کابل‌ها بدست می‌آید. در این فضا می‌توان کنترل‌کننده را به دو صورت طراحی کرد. در روش اول درست است که کنترل‌کننده با توجه به خطای مکانی مجری نهایی طراحی می‌شود، اما به منظور پرهیز از اندازه‌گیری مستقیم موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی، تغییر طول کابل به وسیله انکودرهای اندازه‌گیری شده و با حل سینماتیک مستقیم برای ربات، موقعیت و

مجری نهایی ربات ندارند.

با این مقدمه و با در نظر گرفتن مدل ایده آل برای کابل، کاوامورا و دیگران در [۳۳] از الگوریتم کنترلی PD به همراه جبران سازی جاذبه برای کنترل ربات کابلی در فضای کابل استفاده کرده اند. در این الگوریتم برای اینکه کابل ها همیشه در حالت کشش باقی بمانند از بردار نیروی داخلی استفاده شده است. این بردار که به منظور اطمینان از تحت کشش بودن کابل ها به خروجی کنترلر اضافه می شود، تاثیری در حرکت مجری نهایی نداشته و در فضای پوچی ماتریس ژاکوبین مکانیزم قرار دارد. آلپ و آگراوال در [۱۲۸] از روش خطی سازی با فیدبک برای طراحی کنترلر سود می برند. در این روش ابتدا با استفاده از دینامیک مکانیزم، سیستم خطی شده و سپس از یک کنترلر خطی برای دستیابی به مشخصات مطلوب استفاده می شود. این روش کنترلی در فضای کاری کارترین شکل می گیرد و با توجه به وابسته بودن آن به مدل سیستم در مقابل خطاهای مدل سازی و تغییر پارامترهای سیستم مقاوم نیست. در [۱۳۴] از ایده کنترل سری برای کنترل LAR که یک ربات کابلی با فضای کاری بزرگ است، استفاده شده است. در این ایده از دو حلقه کنترلی داخلی و خارجی استفاده شده است. در [۱۵۷] نیز از کنترل مد لغزشی برای کنترل یک ربات کابلی صفحه‌ای استفاده شده است. روش‌های کنترل تطبیقی نیز در کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۵۲]، [۳۳]. در [۱۵۲] برای کنترل یک ربات کابلی با درجات آزادی انتقالی x و y از یک کنترل کننده PD به علاوه یک ترم اصلاحی تطبیقی به منظور شناسایی مقادیر پارامترهای سینماتیکی و قوام بخشیدن هر چه بیشتر به سیستم کنترلی در مقابل نامعنی‌ها استفاده شده است. علاوه بر این در این تحقیق نشان داده شده است که با اندازه‌گیری همزمان طول کابل‌ها و مکان مجری نهایی می‌توان نیروهای داخلی را بر حسب یک ماتریس رگر سور و یک بردار شامل پارامترهای سینماتیکی نوشت. باباقصایها و دیگران نیز در [۱۵۹] به منظور برطرف کردن مشکلات ناشی از وجود نامعنی‌های پارامتری، الگوریتم کنترلی تطبیقی را در فضای کاری پیشنهاد داده‌اند که در این الگوریتم پارامترهای سینماتیکی و تطبیقی به صورت همزمان تطبیق داده می‌شوند. همین نویسندگان در [۱۶۰] به منظور افزایش قوام کنترل کننده پیشنهادی تطبیقی در مقابل اغتشاشات خارجی و نامعنی‌های ساختاریافته مدل سینماتیکی و دینامیکی ربات به طراحی کنترل کننده مقاوم تطبیقی پرداخته و با اعمال این الگوریتم به ربات موازی کابلی نصیر به

جهت گیری ربات تخمین زده می‌شود. اما همان گونه که گفته شد اندازه گیری طول کابل به دلیل نامعنی‌های سینماتیکی و دینامیکی، قابل اطمینان نبوده ضمن اینکه حل بهنگام مسئله سینماتیک مستقیم ربات در حلقه فیدبک به علت پیچیدگی و وجود جواب‌های متعدد علاوه بر کاهش دقت اندازه‌گیری پهنای باند حلقه کنترل را نیز محدود خواهد کرد. در روش دوم مکان مجری نهایی ربات به صورت مستقیم اندازه‌گیری شده و به صورت مستقیم در حلقه فیدبک کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳۱]، [۱۵۱]. اما همان طور که گفته شد اندازه‌گیری مستقیم موقعیت و جهت گیری مجری نهایی در مقایسه با اندازه‌گیری طول کابل پیچیده‌تر و چالش‌برانگیزتر بوده و به تجهیزات پیشرفته و گرانیگیمی نیاز دارد [۱۳۱]، [۱۵۱]، [۱۵۸].

یکی دیگر از معیارهای دسته‌بندی الگوریتم‌های کنترل موقعیت ربات‌های کابلی روش طراحی الگوریتم است. مطابق این معیار کنترل کننده‌ها را می‌توان به دو دسته کنترل کننده‌های کلاسیک و کنترل کننده‌های غیرخطی دسته‌بندی کرد. کنترل کننده‌های کلاسیک مانند کنترل کننده‌های PID ساختاری ساده داشته و به مدل دقیق دینامیکی ربات نیازی ندارند [۱۴۳]. علاوه بر این به سادگی قابل پیاده‌سازی بوده و هزینه‌های سنگین محاسباتی در بر ندارند. اما لحاظ نکردن تاثیرات دینامیکی ربات در ساختار کنترل کننده عملکرد آن را در ردیابی مسیرهای مطلوب زمانی محدود خواهد کرد. کنترل کننده‌های غیرخطی مانند کنترل کننده‌های دینامیک وارون [۱۴۷]، [۱۵۶]، کنترل کننده‌های مبتنی بر روش لیاپانوف [۱۴۲] و یا کنترل کننده‌های مد لغزشی [۱۵۷] می‌توانند با بهره بردن از دینامیک ربات عملکرد ردیابی کنترل کننده را در تعقیب مسیرهای زمانی بهبود بخشند. اما باید توجه داشت که برای پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها به مدل سینماتیکی و دینامیکی دقیقی از ربات نیاز است که در اکثر موارد این چنین مدلهایی در دسترس نیست. وجود این مشکل عملکرد کنترل کننده‌های غیرخطی مبتنی بر مدل را در ردیابی مسیرهای زمانی دلخواه محدود خواهد کرد. همان گونه که گفته شد کابل‌ها باید در حین اجرای مانورهای حرکتی توسط ربات تحت کشش باقی بمانند. به همین دلیل در ربات‌های موازی کابلی مقید کامل از مفهوم نیروهای داخلی برای اطمینان از تحت کشش ماندن کابل‌ها در تمام فضای کاری ربات استفاده می‌شود [۱۴۳]. این نیروها فضای پوچی ماتریس ژاکوبین ربا را اسپن می‌کنند. این بدان معنی است که این نیروها در حالت ایده آل هیچ تاثیری در حرکت

بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی در عمل پرداخته‌اند.

اما در این روشهای کنترلی، ساختار روش کنترلی پیچیده بوده و در اکثر این روش‌ها تحلیل پایداری مقاوم سیستم حلقه بسته در مقابل نامعینی‌های ساختاریافته و غیر ساختار یافته انجام نشده است. بنابر این پیاده سازی این روش‌ها با عنایت به دسترس نبودن اطلاعات کامل از دینامیک سیستم و پیچیدگی ساختار کنترلی غیر عملی است. با عنایت به این محدودیت‌ها و با توجه به محبوبیت کنترل ساده PID در صنعت واکثریت قریب به اتفاق کاربردهای عملی رباتیک، در [۱۴۳] چهار چوب نظری لازم برای استفاده از این کنترلر در ربات‌های موازی کابلی تبیین گردیده و پایداری مقاوم آن در مقابل نامعینی‌های ساختاریافته و غیر ساختار یافته بررسی می‌گردد. در این تحقیق برای اطمینان از تحت کشش بودن کابل‌ها در تمامی فضای کاری مفهوم نیروی داخلی که فضای پوچی ماتریس ژاکوبین مکانیزم را پوشش می‌دهد، معرفی شده و در ساختار کنترلی پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضمن اینکه در تحلیل پایداری سیستم حلقه بسته فرض بر این قرار می‌گیرد که همه پارامترهای دینامیکی و ژاکوبین مکانیزم نامعین بوده و تنها کران آن‌ها در دسترس می‌باشد.

۸.۳- کنترل ربات‌های موازی کابلی با کابل‌های انعطاف پذیر

برای کاربردهایی که دقت و سرعت بالایی مورد نیاز است، باید مدل دقیقی از کابل که تاثیر انعطاف پذیری کابل را در خود لحاظ کند، مورد استفاده قرار داد و سیستم کنترلی را با توجه به آن طراحی نمود. در غیر این صورت ارتعاشات نتیجه شده از کابل دقت مکانی سیستم را تحت تاثیر قرار خواهد داد. ضمناً این نکته را باید مورد توجه قرار داد که مدل‌سازی دقیق دینامیکی کابل‌ها در مکانیزم‌های موازی کابلی، بسیار پیچیده است. علاوه بر این از آنجا که مدل بدست آمده در طراحی الگوریتم کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید حتی الامکان با ساده‌سازی آن را به یک شکل مناسب برای اعمال الگوریتم‌های مختلف کنترلی تبدیل کرد. به همین دلیل در عمل فقط دینامیک‌های غالب کابل در مدل‌سازی نهایی مورد توجه قرار می‌گیرند. همان گونه که در بخش قبل نشان داده شد، در ربات‌های مقید کامل مدل فنر طولی در امتداد کابل می‌تواند به خوبی بیانگر تاثیرات غالب دینامیکی کابل در تحلیل دینامیکی سیستم باشد.

وارد کردن ویژگی‌های دینامیکی کابل در مدل‌سازی ربات‌های

کابلی منجر به پیچیده‌تر شدن الگوریتم‌های کنترلی شده و مطالعات در این زمینه بسیار محدود و هنوز در مراحل ابتدایی است. از آنجا که توانایی ربات‌های کابلی در برآوردن دقت‌ها و سرعت‌های مورد نظر حرکتی و نیز ارتعاشات حرکتی ربات وابستگی مستقیمی به الگوریتم کنترلی پیشنهادی برای این دسته از ربات‌ها دارد، بنابراین مطالعه عمیق کنترل ربات‌های کابلی و تحلیل پایداری آنها با توجه به انعطاف پذیری ذاتی کابل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باید به نحوی این مفاهیم را در طراحی الگوریتم کنترلی در نظر گرفت.

میونیر و همکاران در [۱۳۴] از طرح کنترلی دو حلقه‌ای برای کنترل ربات کابلی LAR استفاده کرده‌اند. در این طرح حلقه داخلی که از تکنیک زمان بندی بهره^۱ برای تطبیق طول کابل با کنترل H_{∞} بهره می‌برد با مدل در نظر گرفته شده برای کابل تعامل دارد. ضمن اینکه حلقه خارجی که حلقه کنترل موقعیت است از الگوریتم کنترلی گشتاور محاسبه شده با یک کنترل کننده PID بهره می‌برد. متأسفانه در این تحقیق توجهی به پایداری سیستم حلقه بسته نگردیده و تحلیل پایداری مکانیزم با الگوریتم کنترلی پیشنهادی مغفول مانده است. در [۱۳۷] از مدل فنر طولی بدون جرم در امتداد کابل به عنوان مدل کابل استفاده شده و بر مبنای این مدل یک الگوریتم کنترلی برای کنترل ربات موازی کابلی پیشنهاد شده است. این الگوریتم کنترلی که در فضای طول کابل شکل گرفته از مفهوم نیروهای داخلی به منظور تحت کشش نگه داشتن کابل‌ها و یک ترم اصلاحی به منظور تضعیف ارتعاشات کابل‌ها سود می‌برد. همچنین در این تحقیق آنالیز پایداری سیستم حلقه بسته از طریق روش دوم لیاپانوف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله از شبیه‌سازی ارائه شده است. اما همان گونه که گفته شد با وجود ساختار ساده، کم هزینه و عملی کنترل کننده‌های طراحی شده در فضای طول کابل، کنترل در این فضا بدلیل نامعینی‌های سینماتیکی و خصوصیات ذاتی کابل از جمله کشسانی موجود چندان قابل اطمینان نبوده و عملکرد ربات را در تعقیب مناسب مسیرهای زمانی مطلوب محدود خواهد کرد.

به منظور برطرف کردن این مشکل، خسروی و تقی راد در [۱۶۱] با استفاده از مدل فنر طولی بدون جرم در امتداد کابل به عنوان رفتار دینامیکی غالب کابل، از یک الگوریتم کنترلی ترکیبی که در فضای کاری طراحی شده و از یک ترم اصلاحی میرایی در فضای طول کابل سود می‌برد، استفاده کرده‌اند. این الگوریتم کنترلی

¹ Gain Scheduling

ربات‌های کابلی بدلیل قید کششی بودن کابل‌ها تحلیل فضای کاری بسیار پیچیده‌تر از ربات‌های متداول سری و موازی است و بر این مبنای و با این قید، تعریف و تحلیل فضای کاری و تکنیکی‌های آن متفاوت با روش‌های معمول بوده و نیاز به تعریف دقیق و متفاوت فضای کاری و تکنیک‌های مختلف جهت تحلیل آن بیش از پیش احساس می‌شود. معیارهای کمی و کیفی که در مقایسه و بهینه‌سازی فضای کاری ربات مورد استفاده قرار می‌گیرند نیز از سایر مسایل مهمی هستند که در چند سال اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند.

دینامیک مکانیزم‌های با حلقه‌های سینماتیکی بسته از جمله ربات‌های موازی کابلی از دیگر مسایل چالش برانگیزی است که توجه زیادی را به خود جلب نموده است. دینامیک این سیستم‌ها بسیار پیچیده‌تر از سیستم‌های سری می‌باشد. اصلی‌ترین چالش در این مکانیزم‌ها وابستگی متغیرهای مفصلی به یکدیگر می‌باشند. این وابستگی با قیود سینماتیکی که می‌توانند بسیار پیچیده باشند، بیان می‌شود. در اغلب اوقات انتخاب و شناسایی یک مجموعه مستقل و ناوابسته از متغیرهای موقعیت بسیار مشکل و غیر کاربردی است. در ربات‌های کابلی شرایط از این نیز بغرنج‌تر است زیرا کابل یک المان منعطف بوده و انعطاف ذاتی کابل‌ها تاثیرات اساسی در همه موضوعات مربوط به مدل‌سازی، سینماتیک، طراحی بهینه، کنترل و دقت ربات به جای می‌گذارد و باید به گونه‌ای با این موضوع برخورد کرد. با توجه به پیچیدگی موضوع متاسفانه پژوهش‌های مربوط به تاثیرات ویژگی‌های ذاتی کابل در موضوعات مختلف طراحی این دسته از ربات‌ها نظیر فضای کاری، دینامیک و ... اندک می‌باشد.

در حوزه کنترل ربات‌های موازی کابلی نیز شرایط با آنچه در ربات‌های سری و موازی است، متفاوت است. بدلیل ویژگی کابل که فقط می‌تواند نیروی کششی اعمال کند، بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی که تاکنون برای ربات‌های سری و موازی پیشنهاد شده‌اند، نمی‌توانند بدون تغییر در کنترل این دسته از ربات‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در همه الگوریتم‌های کنترلی معمول محرک‌ها می‌توانند در هر دو جهت مثبت و منفی اعمال تحریک کنند، اما در این ربات‌ها محرک‌ها فقط باید در یک جهت عمل کنند. به همین دلیل از نقطه نظر کنترلی افزونگی در این ربات‌ها یک ضرورت است تا بتواند به نحوی این نقص اعمال یک طرفه اعمال نیرو را به نحوی جبران کند. البته باید به این نکته توجه داشت که علاوه بر طراحی کنترل با در نظر گرفتن قید

ترکیبی که با سود بردن از نظریه تئوری انحرافات تکین طراحی شده شامل یک کنترل‌کننده مقاوم PID، ترم نیروهای داخلی و یک ترم اصلاحی برای میرا نمودن ارتعاشات کابل‌هاست. در این تحقیق با بکارگیری تئوری انحرافات تکین، مدل ربات به دو زیر سیستم کند و تند تجزیه شده و در آنالیز پایداری سیستم کامل حلقه بسته مورد استفاده قرار گرفته است. همان طور که گفته شد اگر چه کنترل‌کننده PID برای طراحی ساختاری ساده داشته و به مدل دقیق دینامیکی ربات نیازی ندارد اما لحاظ نکردن تاثیرات دینامیکی ربات در ساختار کنترل‌کننده عملکرد آن را در ردیابی مسیرهای زمانی مطلوب تحت الشعاع قرار خواهد داد. برای رفع این مشکل و به منظور بهبود عملکرد ربات در تعقیب مسیرهای زمانی مطلوب در [۱۴۲] نیز همانند [۱۶۱] از یک الگوریتم کنترلی ترکیبی استفاده شده است با این تفاوت که در این تحقیق دینامیک ربات در ساختار الگوریتم پیشنهادی کنترل بکار گرفته شده است. آنالیز پایداری سیستم نیز با استفاده از نظریه انحرافات تکین صورت گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر روی یک مدل ۶ درجه آزادی با ۸ کابل مویید این نکته است که این الگوریتم پیشنهادی قادر به ردیابی مطلوب مسیرهای زمانی حتی با در نظر گرفتن کشسانی کابل‌هاست.

۹- نتیجه گیری

ربات‌های موازی کابلی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان از جمله فضای کاری بزرگ، نسبت بار به وزن ربات بالا و دارا بودن سرعت و شتاب‌های بالا از حدود سه دهه پیش مورد توجه قرار گرفته و کاربردهای متعددی پیدا کرده‌اند. نگرش اساسی در این گونه ربات‌ها استفاده از کابل به جای بازوهای صلب معمول در ربات‌های موازی است. استفاده از کابل به جای بازوهای صلب، پیچیدگی ساختار مکانیکی و هزینه‌های زیاد ساخت را تحت الشعاع قرار می‌دهد، اما چالش‌های جدیدی را نیز پیش روی محققین پدیدار می‌سازد. از آنجا که کابل‌ها تنها قادر به اعمال نیروی کششی بوده و توانایی اعمال نیروی فشاری و یا گشتاور نیستند پس نمی‌توان مستقیماً و بدون هیچ تغییری از مکانیزم‌های موازی معمول استفاده کرد و باید این نقص اعمال تحریک یک طرفه نیرو را بگونه‌ای جبران نمود.

تحلیل فضای کاری ربات یکی از مهمترین بخش‌ها در فرایند طراحی ربات است و وجود یک روش مناسب برای تعیین فضای کاری ربات می‌تواند طراح را در جهت بهینه کردن این فضا با توجه به مشخصات عملکردی مطلوب یاری کند. در حوزه

کششی بودن نیروی کابل‌ها باید به گونه‌ای مسئله حل افزونگی که به نحوی با توزیع نیروهای کابل‌ها در ارتباط است مد نظر گیرد. علاوه بر این در کاربردهای سرعت بالا و یا فضاهای کاری بزرگ انعطاف پذیری کابل و شکم دادگی آن باید به گونه‌ای موثر در نظر گرفته شده و الگوریتم کنترلی به گونه‌ای طرح شود که بتواند حداکثر کارایی را در قبال نوسانات ناخواسته ناشی از دینامیک کابل داشته باشد. از دیگر موضوعات نظری دیگری که در رابطه با ربات‌های موازی کابلی می‌توانند به عنوان چالش مطرح گردند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- حل سینماتیک وارون و مستقیم ربات‌های کابلی با در نظر گرفتن شکم دادگی کابل و تحلیل نیروی کشش در آن.
- پیدا کردن توزیع بهینه نیروهای کششی کابل‌ها به خصوص در سیستم‌های با افزونگی بالا.
- توسعه روش‌های کالیبراسیون مناسب ربات‌های کابلی با توجه به امکان حل بر خط آن.
- استفاده از افزونگی در سنسورهای اندازه گیری به منظور خود-کالیبراسیون ربات.
- تحلیل مسئله سختی و کنترل آن در ربات‌های با کابل‌های انعطاف پذیر.
- تحلیل فضای کاری و دینامیک ربات‌های کابلی معلق
- طراحی مسیر زمان بهینه در ربات‌های کابلی معلق با در نظر گرفتن محدودیت کششی در کابل‌ها
- حل مسئله کالیبراسیون و کنترل همزمان در ربات‌های کابلی بازشونده^۱
- طراحی کنترل کننده های مقاوم در ربات‌های کابلی بازشونده
- طراحی بهینه ربات‌های کابلی تغییر شکل پذیر^۲
- تحلیل دینامیکی و کنترل ربات‌های کابلی تغییر شکل پذیر

مراجع

- [1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo. Robotics: modelling, planning and control. Springer, 2011.
- [2] J. P. Merlet, Parallel Robots, Springer, 2006.
- [3] H. D. Taghirad. Parallel Robots: Mechanics and Control. CRC Press, 2013.
- [4] Z-F. Shao, X. Tang, X. Chen, L-P. Wang. Research on the inertia matching of the Stewart parallel manipulator. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 28, no. 6, pages 649-659, 2012.
- [5] G. Chen, H. Wang, Z. Lin. Generalized kinematic mapping of constrained plane motions and its application to the accuracy analysis of general planar parallel robots. Mechanism and Machine Theory, vol. 50, pages 29-47, 2012.
- [6] L.W. Tsai. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. Wiley-Interscience, 1999.
- [7] M. Isaksson, T. Brogardh, M. Watson, S. Nahavandi, P. Crothers. The octahedral hexarot - A novel 6-DOF parallel manipulator. Mechanism and Machine Theory, vol. 55, pages 91-102, 2012.
- [8] VE Gough. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance. In Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng, 1957.
- [9] D. Stewart. A platform with six degrees of freedom. UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings, vol.180, no.1, pages 371-386, 1965.
- [10] M. Pellicciari, G. Berselli, F. Leali, A. Vergnano. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots. Mechatronics, vol. 23, no. 3, pages 326-334, 2013.
- [11] O. Company, F. Marquet and F. Pierrot. A new High-Speed 4-DOF parallel robot synthesis and modeling Issues. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 19, no. 3, pages 411-420, 2003.
- [12] Adept. Technology inc. <http://www.adept.com>, 2012.
- [13] S. E. Landsberger and T.B. Sheridan. A new design for parallel link manipulator. Proc Systems, Man and Cybernetics, pages 8-12, 1985.

¹ Deployable Cable Robots

² Reconfigurable Robots

- Kinematics of a Redundant Parallel Manipulator, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2005.
- [50] A. Rezaei, A. Akbarzadeh, P. Mahmoodi-Nia, M-R. Akbarzadeh. Position, Jacobian and workspace analysis of a 3-PSP spatial parallel manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 4, pages 158-173, 2013.
- [51] C. Zhang, L. Zhang. Kinematics analysis and workspace investigation of a novel 2-DOF parallel manipulator applied in vehicle driving simulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 4, pages 113-120, 2013.
- [52] A. Gallant, R. Boudreau, M. Gallant. Geometric determination of the dexterous workspace of n-RRRR and n-RRPR manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 51, pages 159-171, 2012.
- [53] M.Gouttefarde, J-P. Merlet, D.Daney. Determination of the wrench-closure workspace of 6-DOF parallel cable-driven mechanisms. *Advances in Robot Kinematics Mechanisms and Motion*, Springer, Printed in the Netherlands., pages 315-22, 2006.
- [54] S.K.Mustafa, S.H.Yeo and C.B.Pham, G.Yang and W.Lin. A Biologically-Inspired Anthropocentric Shoulder JointRehabilitator: Workspace Analysis & Optimization. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 1045- 1050, 2005.
- [55] Sh.Fang, D.Franitza, M.Torlo, F.Bekes, and M.Hiller. Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 3, pages 561-568, 2004.
- [56] M. Arsenault. Workspace and stiffness analysis of a three-degree-of-freedom spatial cable-suspended parallel mechanism while considering cable mass. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 66, no. 1, pages 1-13, 2013.
- [57] P.Bosscher, A.T. Reichel, I.Ebert-Uphoff. Wrench feasible workspace generation for cable driven robots. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 5, pages 890-902, 2006.
- [58] A.T.Riechel, I.Ebert-Uphoff. Force feasible workspace analysis for underconstrained, point mass cable robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.5, pages 4956-62, 2004.
- [59] M. Gouttefarde, D. Daney, J.P. Merlet. Interval analysis based determination of the wrench feasible workspace of parallel cable driven robots. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 1, pages 1-13, 2011.
- [37] Hamid D. Taghirad and Meyer Nahon, Dynamic Analysis of A Macro-Micro Redundantly Actuated Parallel Manipulator, *Advanced Robotics*, Vol. 22, No. 3, pp 949-981, Sept. 2008.
- [38] J. P. Merlet, Still a Long Way to Go to the Road for Parallel Manipulator, *ASME 2002 DETC Conference*, Montréal, Canada, 2002.
- [39] Xianwen Kong and Clément Gosselin, Cartesian Parallel Manipulators, *US Patent 6,729,202 B2*, May 4, 2004.
- [40] Xianwen Kong and Clément Gosselin, *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*, Springer Tracts in Advanced Robotics, Germany, 2007.
- [41] Andrew J. Sommse and Charles W. Wampler, *The Numerical Solution of Systems of Polynomials Arising in Engineering and Science*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005, Pg 104.
- [42] V. Parenti-Castelli and R. D. Gregorio, a New Algorithm Based on Two Extra Sensors for Real-Time Computation for the Actual Configuration of the Generalized Stewart-Gough Manipulator. *ASME Journal of Mechanics*, Vol. 112, 2000.
- [43] H. Sadjadian, H.D. Taghirad, A Quasi-Closed Solution Method for Computing the Forward Kinematics of a Redundant Parallel Manipulator *12th Iranian International Conference on Electrical Engineering*, Mashad, May 2004.
- [44] Yu-Jen Chiu and Ming-Hwei Perng, Forward Kinematics of a General Fully Parallel Manipulator with Auxiliary Sensors, *the International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, 2001.
- [45] R. Nair and J.H. Maddocks, On the Forward Kinematics of Parallel Manipulators, *the International Journal of Robotics Research*, 1994.
- [46] Jing-Shan Zhao, Yuan Yun, Li-Ping Wang, Jin-Song Wang and Jing-Xin Dong, Investigation of the forward kinematics of the Gough-Stewart manipulator with natural coordinates, *International Journal of Manufacturing Technology*, 2005.
- [47] H. L. le, L.H. Zhao, W. Peng and D. Zhi-shan, Forward kinematics based on improved genetic algorithms of 6-DOF parallel robot, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 23, 2005.
- [48] H. Sadjadian, H.D. Taghirad and A. Fatehi, Neural Networks Approaches for Computing the Forward Kinematics of a Redundant Parallel Manipulator, *International Journal of Computational Intelligence*, Vol. 2, Number 1, 2005.
- [49] H. Sadjadian and H. D. Taghirad, Comparison of Different Methods for Computing the Forward

- [72] D. McColl, L. Notash. Workspace formulation of planar wire-actuated parallel manipulator. *Robotica*, vol. 29, no. 4, pages 607-617, 2011.
- [73] M. Gouttefarde, C.M.Gosselin. Analysis of the Wrench-Closure Workspace of Planar Parallel Cable-Driven Mechanisms. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 3, pages 434-45, 2006.
- [74] A. Zarif Loloie, H. D. Taghirad. Controllable workspace of cable driven redundant parallel manipulator by fundamental wrench analysis. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 36, no. 3, pages 297-314, 2012.
- [75] M. M. Aref and H. D. Taghirad, Geometrical Workspace Analysis of a Cable-Driven Redundant Parallel Manipulator: KNTU CDRPM, in the proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2008, Nice, France, Sept. 2008.
- [76] J.P.Merlet, Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots. *Transactions of the ASME. Journal of Mechanical Design*, vol. 128, no. 1, pages 199-206, 2006.
- [77] T. Yoshikawa. Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy. In *Robotics Research: The First International Symposium*, pages 735-747. Mit Press, 1984.
- [78] G. Legnani, I. Fassi, H. Giberti, S. Cinquemani, D. Tosi. A new isotropic and decoupled 6-DoF parallel manipulator. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 58, pages 64-81, 2012.
- [79] P. Cardou, S. Bouchard, and C. Gosselin. Kinematic-Sensitivity Indices for Dimensionally Nonhomogeneous Jacobian Matrices. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 1, pages 166-173, 2010.
- [80] T. Yoshikawa. Manipulability of Robotic Mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pages 3-9, 1985.
- [81] W. A. Khan and J. Angeles. The Kinetostatic Optimization of Robotic Manipulators: The Inverse and the Direct Problems. *Journal of Mechanical Design*, vol. 128, no. 1, pages 168-178, 2006.
- [82] L. J. Stocco, S. E. Salcudean, and F. Sassani. On the Use of Scaling Matrices for Task-Specific Robot Design. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 5, pages 958-965, 1999.
- [83] P. Cardou, S. Bouchard, and C. Gosselin. Kinematic-sensitivity indices for dimensionally nonhomogeneous jacobian matrices. *IEEE*
- [60] M. Hiller, S. Fang, S. Mielczarek, R. Vehoeven, and D. Franitza, Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 4, pages 429-445, 2005.
- [61] I.Ebert-Uphoff and P. H.Voglewede. On the connections between cable-driven robots, parallel manipulators and grasping. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4521-6, 2004.
- [62] H.Osumi, Y., and M.Koshikawa. Development of a manipulator suspended by parallel wire structure. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)*, pages 498-503, 2000.
- [63] G.Barrette, C.M.Gosselin, Determination of the dynamic workspace of cable-driven planar parallel mechanisms. *Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design*, vol. 127, no. 2, pages 242-248, 2005.
- [64] R. Verhoeven. Analysis of the workspace of tendon-based Stewart Platforms. PhD. Thesis, Duisburg-Essen University, 2004.
- [65] W.B. Lim, G. Yang, S. H. Yeo, S. K. Mustafa. A generic force-closure analysis algorithm for cable-driven parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 46, pages 1265-1275, 2011.
- [66] S. Kawamura and K. Ito. A new type of master robot for teleoperation using a radial wire drive system. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, Intelligent Robots for Flexibility*, vol. 1, no. 1, pages 55-60, 1993.
- [67] M. Gouttefarde, S. Krut, O. Company, F. Pierrot and N. Ramdani. On the design of fully constrained parallel cable-driven robots. *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design*, part 2, Springer, printed in Netherlands, pages 71-78, 2008.
- [68] R. G. Roberts, T.Graham and T. Lippitt. On the Inverse Kinematics, Statics, and Fault Tolerance of Cable-Suspended Robots. *Journal of Robotic Systems*, vol. 15, no. 10, pages 581-97, 1998.
- [69] C.B.Pham, S.H.Yeo, G. Yang, M.S. Kurbanhusen, I-M.Chen. Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms. , vol. 41, pages 53-69, 2006.
- [70] C.B.Pham, S.H.Yeo, G. Yang. Tension analysis of cable-driven parallel mechanism. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005.
- [71] R.T. Rockafellar, *Convex Analysis*, Princeton univ. Press, 1970.

- [96] T. Yoshikawa. Manipulability of robotic mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pages 3–9, 1985.
- [97] F. Hao and J. Merlet. Multi-criteria optimal design of parallel manipulators based on interval analysis. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 2, pages 157–171, 2005.
- [98] J. O. Kim. Dexterity measures for design and control of manipulators. In *IEEE International workshop on intelligent robots and systems*, (Osaka, Japan), pages 758–763, 1991.
- [99] C. A. Klein and B. E. Blaho. Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators. *International Journal of Robotics Research*, vol. 6, no. 1, pages 72–83, 1987.
- [100] H. Asada. A geometrical representation of manipulator dynamics and its application to arm design. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 105, no. 3, pages 131–142, 1983.
- [101] M. Hiller, Sh. Fang, S. Mielczarek, R. Vehoeven and D. Franitza. Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 1, pages 429–445, 2005.
- [102] L. Weihmann, D. Martins, L.S. Coelho. Parallel manipulators, *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 6, pages 6150–6156, 2012.
- [103] R. Boudreau, S. Nokleby. Parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 56, pages 138–155, 2012.
- [104] D. Zhang, Z. GAO. Forward kinematics, performance analysis, and multi-objective optimization of a bio-inspired parallel manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 4, pages 484–492, 2012.
- [105] D. Kalyanmoy. Multi objective optimization using evolutionary algorithms. *John Wiley and Sons*, 2001.
- [106] F. Hao, J.P. Merlet. Multi-criteria optimal design of parallel manipulator based on interval analysis. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 2, pages 157–71, 2005.
- [107] Z. Ji. Analysis of design parameters in platform manipulators. *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 118, no. 4, pages 526–31, 1996.
- [108] T. Bruckmann, L. Mikelsons, T. Brandt, M. Hiller and D Schramm. *Wire Robots Part I: Kinematics, Analysis & Design*. Published in: *Parallel Manipulators: New Developments*, *Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 1, pages 166–173, 2010.
- [84] M.H. Saadatzi, M.T. Masouleh, H.D. Taghirad, C. Gosselin, and P. Cardou. Geometric analysis of the kinematic sensitivity of planar parallel mechanisms. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 35, no. 4, pages 477–487, 2011.
- [85] S.A. Khalilpour. Multi Objective Optimal Design of Cable Robots Based on Kinematic Sensitivity and Controllable Workspace Indices. M. Sc. Thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2013.
- [86] R. Kurtz and V. Hayward. Dexterity measures with unilateral actuation constraints: the n+1 case. *Advanced Robotics*, vol. 9, no. 5, pages 561–77, 1995.
- [87] A. Zarif-Loloei, *Workspace Optimization of Spatial Cable-Driven Redundant Parallel Manipulators*, PhD Thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2013.
- [88] A. Russell, “A Robotic System for Performing Sub-millimeter Grasping and Manipulation Tasks”, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 13, no. 3, p 209–18, 1994.
- [89] S. Behzadipour, and A. Khajepour, “A New Cable-based Parallel Robot with Three Degrees of Freedom”, *Multibody System Dynamics*, vol. 13, no. 4, p 371–83, 2005.
- [90] G. Mroz and L. Notash, “Design and prototype of parallel, wire-actuated robots with a constraining linkage”, *Journal of Robotic Systems*, vol. 21, no. 12, p 677 – 87, 2004.
- [91] Sh. Fang, D. Franitza, M. Torlo, F. Bekes, and M. Hiller, “Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 3, p 561–8, 2004.
- [92] M. Hassan, A. Khajepour, “Optimization of actuator forces in cable-based parallel manipulators using convex analysis”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 3, p 736–40, 2008.
- [93] Hamid D. Taghirad, Yousef B. Bedoustani, An Analytic-Iterative Redundancy Resolution Scheme for Cable-Driven Redundant Parallel Manipulators, *IEEE Trans. On Robotics*, 27(6), p. 1137–1143, Dec. 2011.
- [101] David G. Luenberger: “Introduction to Linear and Nonlinear Programming”, Addison-Wesley Publishing Company, 1973.
- [95] S. Tadokoro and T. Matsushima. A parallel cable-driven motion base for virtual acceleration. In *International Conference of IROS*, 2001.

- [121] J. Wittenburg. Dynamics of multibody systems. B.G. Teubner, Stuttgart, 1977.
- [122] M.W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar. Robot modeling and control. John Wiley & Sons, 2006.
- [123] Hui Cheng, Yiu-Kuen Yiu, and Zexiang Li. Dynamics and control of redundantly actuated parallel manipulators. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 8:483–491, 2003.
- [124] N. Srinil, G. Rega, and S. Chucheeprakul. Three-dimensional non-linear coupling and dynamic tension in the large-amplitude free vibrations of arbitrarily sagged cables. Journal of Sound and Vibration, 269(3):823–852, 2004.
- [125] M. Lepidi, V. Gattulli, and F. Vestroni. Static and dynamic response of elastic suspended cables with damage. International Journal of Solids and Structures, 44(25):8194–8212, 2007.
- [126] H.M. Irvine. Cable structures. The MIT Press, 1981.
- [127] J.J Gorman, K.W. Jablokow, and D.J. Cannon. The cable array robot: Theory and experiment. In Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on, volume 3, pages 2804–2810. IEEE, 2001.
- [128] A.B Alp and S.K. Agrawal. Cable suspended robots: Feedback controllers with positive inputs. American Control Conference, volume 1, pp. 815–820. IEEE, 2002.
- [129] O. Ma and X. Diao. Dynamics analysis of a cable-driven parallel manipulator for hardware-in-the-loop dynamic simulation. In Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on, pages 837–842. IEEE, 2005.
- [130] K. Kozak, Q. Zhou, and J. Wang. Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable mass. Robotics, IEEE Transactions on, 22(3):425–433, 2006.
- [131] B. Zi, BY Duan, JL Du, and H. Bao. Dynamic modeling and active control of a cable-suspended parallel robot. Mechatronics, 18(1):1–12, 2008.
- [132] Behzadipour and A. Khajepour. Stiffness of cable-based parallel manipulators with application to stability analysis. Journal of mechanical design, 128:303, 2006.
- [133] S. Behzadipour and M.A. Sohi. Antagonistic stiffness in cable-driven mechanisms. In IFToMM World Congress, France, 2007.
- [134] G. Meunier, B. Boulet, and Meyer Nahon. Control of an overactuated cable-driven parallel mechanism for a radio telescope application. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 17(5):1043–54, Sept. 2009.
- Edited by: Jee-Hwan Ryu, I-Tech Education and Publishing, pages 109-132, first Edition: 2008.
- [109] A.M.Hay, and J.A. Snyman. Optimization of a planar tendon-driven parallel manipulator for a maximal dextrous workspace. Engineering Optimization, vol. 37, no. 3, pages 217–36, 2005.
- [110] A. Fattah, and S. K. Agrawal. On the design of cable-suspended planar parallel robots. Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, vol. 127, no. 5, pages 1021-8, 2005.
- [111] S.Perreault, C.M.Gosselin, “Cable-driven parallel mechanisms: application to a Locomotion Interface”, Journal of Mechanical Design, vol. 130, no. 10, p 102301-8, 2008.
- [112] M.M. Aref, H.D. Taghirad, and S. Barissi. Optimal design of dexterous cable driven parallel manipulators. International Journal of Robotics, vol. 1, no. 1, pages 29–47, 2009.
- [113] C. Gosselin. Parallel computational algorithms for the kinematics and dynamics of planar and spatial parallel manipulators. Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 118(1):22–28, 1996.
- [114] N. Dasgupta and T.S. Mruthyunjaya. A newton-euler formulation for the inverse dynamics of the stewart platform manipulator. Mechanism and Machine Theory, 33(8):1135–52, 1998.
- [115] A. Fattah and G. Kasaei. Kinematics and dynamics of a parallel manipulator with a new architecture. Robotica, 18:535–543, Sept. 2000.
- [116] C.C. Nguyen and F.J Pooran. Dynamic analysis of a 6 DOF CKCM robot end-effector for dual arm telerobot systems. Robotica and Autonomous Systems, 5(4):377-394, 1989.
- [117] G. Lebret, K. Liu, and F.L. Lewis. Dynamic analysis and control of a stewart platform manipulator. Journal of Robotic Systems, 10(5):629–655, July 1993.
- [118] Jiegao Wang and C.M. Gosselin. A new approach for the dynamic analysis of parallel manipulators. Multibody System Dynamics, 2(3):317–334, Sept. 1998.
- [119] YK Yiu, H. Cheng, ZH Xiong, GF Liu, and ZX Li. On the dynamics of parallel manipulators. In Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on, volume 4, pp. 3766–3771. IEEE, 2001.
- [120] Y. Nakamura and M. Ghodoussi. Dynamics computation of closed-link robot mechanisms with nonredundant and redundant actuators. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 5(3):294–302, 1989.

- controllers with positive tensions. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(3):457–465, 2005.
- [148] Robert L. Williams, James S. Albus, and Roger V. Bostelman. 3d cable-based Cartesian metrology system. *Journal of Robotic Systems*, 21(5):237–257, 2004.
- [149] Werner Kraus, Valentin Schmidt, Puneeth Rajendra, and Andreas Pott. Load identification and compensation for a cable-driven parallel robot. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 2485–2490. IEEE, 2013.
- [150] BY Duan, YY Qiu, FS Zhang, and B Zi. On design and experiment of the feed cable-suspended structure for super antenna. *Mechatronics*, 19(4):503–509, 2009.
- [151] Peter Dewdney, Meyer Nahon, and Bruce Veidt. The large adaptive reflector: a giant radio telescope with an aero twist. *Canadian aeronautics and space journal*, 48(4):239–250, 2002.
- [152] Hitoshi Kino, Toshiaki Yahiro, Fumiaki Takemura, and Tetsuya Morizono. Robust PD control using adaptive compensation for completely restrained parallel-wiredriven robots: Translational systems using the minimum number of wires under zero-gravity condition. *Robotics*, *IEEE Transactions on*, 23(4):803–812, 2007.
- [153] Tej Dallej, Marc Gouttefarde, Nicolas Andreff, Redwan Dahmouche, and Philippe Martinet. Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012, IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1581–1586. IEEE, 2012.
- [154] R. Babaghasabha, M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, “Vision Based PID Control on a Planar Cable Robot,” in *proceedings of 22nd Iranian Conference on Electrical Eng. (ICEE2014)*, Iran, 2014.
- [155] A.B. Alp and S.K. Agrawal. Cable suspended robots: Design, planing and control. In *Proceeding of Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 4275–4280, Desember 2002.
- [156] R.L. Williams II, P. Gallina, and J. Vadia. Planar translational cable-direct-driven robots. *Journal of Robotic Systems*, 20(3):107–120, 2003.
- [157] So-Ryeok Oh and S.K. Agrawal. Generation of feasible set points and control of a cable robot. *IEEE Trans. on Robotics*, 22(3):551–558, June 2006.
- [135] Y. Zhang, S.K Agrawal, and M.J Piovoso. Coupled dynamics of flexible cables and rigid end-effector for a cable suspended robot. *American Control Conference*, 2006.
- [136] Y. Zhang. Modeling and control of flexible cable transporter systems with arbitrary axial velocity, PhD Thesis, 2004.
- [137] E. Ottaviano and G. Castelli. A study on the effects of cable mass and elasticity in cable-based parallel manipulators. *ROMANSY 18 Robot Design, Dynamics and Control*, pages 149–156, 2010.
- [138] E. Ottaviano and G. Castelli. Issues on the modelling of cable-based parallel manipulators.
- [139] X. Diao and O. Ma. Vibration analysis of cable-driven parallel manipulators. *Multibody System Dynamics*, 21(4):347–360, 2009.
- [140] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, “Stability Analysis and Control of Parallel Robots with Elastic Cables: Singular Perturbation Approach,” *IEEE Transactions of Robotics*, Vol. 30, No.3, pp. 694-704, 2014.
- [141] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, “Dynamic Modeling of Cable Driven Robots; Singular Perturbation Approach,” in *Proceedings of 2th International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, Shiraz, Iran, 2011 (in Persian).
- [142] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, “Dynamic Analysis and Control of Fully-Constrained Cable Robots with Elastic Cables: Variable Stiffness Formulation,” *Cable Driven Parallel Robots*, In *Cable-Driven Parallel Robots*, pages 161–177. Springer, 2015.
- [143] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, “Robust PID Control of Fully-Constrained Cable Driven Parallel Robots,” *Mechtronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 87-97, 2014.
- [144] A. Vafaei, M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, “Modeling and Control of Cable Driven Parallel Manipulators with Elastic Cables: Singular Perturbation Theory,” *Intelligent Robotics and Applications*, Springer, pp. 455-464, 2012.
- [145] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, “Dynamic Analysis and Control of Cable Driven Robots with Elastic Cables,” *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 35, No. 4, pp. 543-557, 2011.
- [146] A. Codourey. Dynamic modeling of parallel robots for computed-torque control implementation. *The International Journal of Robotics Research*, 17(12):1325–1336, 1998.
- [147] A. Ryeok Oh and Sunil Kumar Agrawal. Cable suspended planar robots with redundant cables:

- [160] R. Babaghasabha, M. A. Khosravi, and H. D. Taghirad. Adaptive robust control of fully-constrained cable driven parallel robots. Accepted for publication in *Mechatronics*, 2014.
- [161] M.A. Khosravi and H.D. Taghirad, "Robust PID Control of Cable-Driven Robots with Elastic Cables," in proceedings of First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), Iran, 2013.
- [158] R. Chellal, L. Cuvillon, and E. Laroche. A Kinematic Vision-Based Position Control of a 6-DoF Cable-Driven Parallel Robot. In *Cable-Driven Parallel Robots*, pages 213–225. Springer, 2015.
- [159] R. Babaghasabha, M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, "Adaptive Control of KNTU Planar Cable- driven Parallel Robot with Uncertainties in Dynamic and Kinematic Parameters," *Cable Driven Parallel Robots, Mechanisms and Machine Science* 32, Springer, pp. 145-160, 2014.

مروری بر کاربردهای نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در سیستم‌های صنعتی

حمید خالوزاده^۱، عطیه کشاورز محمدیان^۲

^۱ استاد دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل و سیستم، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، h_khaloozadeh@kntu.ac.ir
^۲ دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه کنترل و سیستم، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، atiyekeshavarz@ee.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۳/۴/۱۹، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۳/۹/۱۳)

چکیده: در این مقاله، مروری بر کاربردهای نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در سیستم‌های صنعتی و عملی صورت گرفته است. نظریه شناسایی و تخمین پارامترها و متغیرهای حالت یک سیستم دینامیکی و کنترل تصادفی از مباحث مهم و پرکاربرد در سیستم‌های صنعتی می‌باشند. شاخه‌های مختلف علمی مطالعه شده در این مقاله شامل، استفاده از نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در مقولاتی مانند تشخیص نشتی در خطوط انتقال سیالات، حوزه ردیابی اهداف مانوردار، مدیریت فعال صف در شبکه‌های ارتباطی، کاربرد نظریه کنترل و مدل‌سازی تصادفی در پزشکی و سلامت، کنترل سرایت بیماری، تنظیم تجویز دارو، مدل‌سازی بیماری‌ها و درمان بیماری می‌باشد. همچنین در این مقاله، موضوعات انتساب کواریانس خاص به متغیرهای حالت یک سیستم دینامیکی، سیستم‌های کوانتومی، مکان‌یابی، شناسایی و کنترل تصادفی ربات‌ها، کاربرد نظریه تخمین در سیستم‌های ناوبری، تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی موتورهای الکتریکی و تخمین ترافیک در سیستم‌های حمل و نقل هوشمند بررسی شده‌اند. در ادامه تعدادی از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه سیستم‌های آشوبی با رویکرد کنترل، تخمین و شناسایی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. علاوه بر مطالعات مروری، تعدادی از مسائل باز و چالش‌های پیش رو در زمینه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی، در این مقاله معرفی گشته‌اند.

کلمات کلیدی: نظریه تخمین، شناسایی سیستم‌ها، کنترل تصادفی، تشخیص عیب، ردیابی هدف مانوردار، مدیریت فعال صف، پزشکی و سلامت، انتساب کواریانس، رباتیک، ناوبری، موتورهای الکتریکی، سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، سیستم‌های مخابرات آشوبی.

A Survey on Applications of Estimation Theory, Identification and Stochastic Control in Industrial Systems

Hamid Khaloozadeh, Atiyeh Keshavarz-Mohammadiyan

Abstract: In this paper, a survey on applications of estimation theory, identification and stochastic control in industrial systems is presented. Identification, parameter and state estimation of a dynamical system, and stochastic control are three important and applicable fields in industry. Several fields are discussed in this paper containing, leak detection in fluid pipelines, maneuvering target tracking, Active Queue Management (AQM) in communication networks, applications of stochastic modeling and control in medical and health issues, disease infection and control, dosage regimen design, and disease modeling and treatment. In addition, covariance assignment of dynamical systems' states, quantum systems, localization, identification and stochastic control of robots, and also applications of estimation theory in navigation systems are reviewed. Furthermore, estimation, identification, and stochastic control

of electrical motors, and traffic control in Intelligent Transportation Systems (ITS) are investigated. Also, chaotic systems control, synchronization, estimation, and identification are studied. Moreover, some open problems in the estimation theory, identification, and stochastic control are introduced in this paper.

Keywords: Estimation theory, System identification, Stochastic control, Fault detection, Maneuvering target tracking, Active Queue Management, Medical and health, Covariance assignment, Robotics, Navigation, Electrical motors, Intelligent Transportation Systems, Chaotic communication systems.

نویزهای ناشناخته فرآیند و مشاهدات می‌باشند، نظریه کنترل تصادفی به عنوان ابزاری مهم در سیستم‌های صنعتی و عملی کاربرد پیدا می‌کند.

در این مقاله به علت اهمیت نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی و کاربردهای وسیعی که در سیستم‌های صنعتی دارند، مروری در زمینه کاربردهای این سه نظریه در سیستم‌های صنعتی صورت گرفته است. این مطالعه مروری از آن جهت حائز اهمیت می‌باشد که می‌تواند برای پژوهش‌های آتی محققان به عنوان یک مرجع و راهنما از کارهای پیشین مورد استفاده قرار بگیرد.

ساختار این مقاله به شرح زیر می‌باشد. در بخش ۲ به مرور شاخه‌های مختلف علمی و پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه استفاده از نظریه تخمین و شناسایی برای تشخیص نشتی در خطوط انتقال سیالاتی مانند گاز، نفت و آب پرداخته شده است. بخش ۳ به معرفی پژوهش‌های انجام شده در حوزه ردیابی اهداف مانوردار با استفاده از نظریه تخمین تصادفی اختصاص داده شده است. کاربرد کنترل تصادفی در مدیریت فعال صف در شبکه‌های ارتباطی در بخش ۴ مورد بحث و مرور قرار گرفته است. در بخش ۵ نیز به مطالعه کاربرد نظریه کنترل و مدل‌سازی تصادفی در پزشکی و سلامت پرداخته شده و پژوهش‌های صورت گرفته با استفاده از نظریه کنترل و یا مدل‌سازی تصادفی در مباحثی مانند کنترل سرایت بیماری، تنظیم تجویز دارو، مدل‌سازی بیماری‌ها و درمان بیماری معرفی شده‌اند. بخش ۶ به معرفی کاربردهای نظریه تخمین و کنترل تصادفی در انتساب کواریانس خاص به متغیرهای حالت یک سیستم دینامیکی و مرور پژوهش‌های پیشین در این زمینه اختصاص یافته است. در بخش ۷ مطالعه پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه کاربرد کنترل تصادفی در سیستم‌های کوانتومی انجام شده است. بخش ۸ به مروری بر پژوهش‌های پیشین در زمینه مکان‌یابی، شناسایی و کنترل تصادفی ربات‌ها اختصاص یافته است. در بخش‌های ۹ الی ۱۲ نیز به ترتیب مروری بر سابقه پژوهشی استفاده از نظریه تخمین در سیستم‌های ناوبری، مطالعه روش‌های پیشنهادی در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی موتورهای الکتریکی، مروری بر سابقه پژوهشی در زمینه تخمین ترافیک در سیستم‌های حمل و نقل هوشمند و مروری بر تعدادی از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه سیستم‌های آشوبی با رویکرد کنترل، تخمین و شناسایی انجام شده است. در انتها در

۱- مقدمه

نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی سه مبحث مهم و پرکاربرد در سیستم‌های صنعتی می‌باشند. به یافتن یک پارامتر ناشناخته از روی داده‌های در دسترس تخمین گفته می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم برای کنترل پس‌خور یک سیستم به متغیرهای فضای حالت آن سیستم نیازمندیم، بنابراین تخمین حالت یک سیستم دینامیکی از روی مشاهدات آن، به مسأله‌ای مهم تبدیل می‌شود. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه تخمین حالت‌های یک سیستم دینامیکی صورت گرفته است و فیلترهای مختلفی برای حل مسأله تخمین معرفی گشته‌اند. به طور مثال می‌توان از فیلترهای بیزین مانند فیلتر کالمن و نسخه‌های تغییر یافته آن، فیلتر ذره‌ای و نسخه‌های تغییر یافته آن و فیلترهای مبتنی بر جدول نام برد. همان‌گونه که اشاره شد، تخمین حالت یک سیستم دینامیکی به عنوان یک مسأله مهم و پرکاربرد در صنعت شناخته می‌شود و در زمینه‌های مختلفی مانند ردیابی هدف مانوردار، رباتیک، ناوبری، پزشکی و تشخیص نشتی در خطوط انتقال سیالات به کار می‌رود.

همچنین به منظور تحلیل و کنترل یک سیستم دینامیکی نیازمندیم تا یک مدل ریاضی از آن سیستم داشته باشیم. به عمل استخراج مدل ریاضی برای یک سیستم دینامیکی با استفاده از سیگنال‌های ورودی و خروجی آن، شناسایی سیستم گفته می‌شود. مبحث شناسایی سیستم نیز یکی از شاخه‌هایی است که مورد توجه بسیاری از محققان و دانشمندان قرار گرفته و حوزه وسیعی از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است. شناسایی سیستم کاربردهای مهم و مختلفی در صنعت داشته و نقشی اساسی در تحلیل و کنترل یک سیستم صنعتی دارد.

نظریه کنترل تصادفی نیز زیرشاخه‌ای از نظریه کنترل می‌باشد که برای سیستم‌های دارای نامعینی در معادلات فرآیند و یا مشاهدات به کار می‌رود. این نظریه با دسته‌ای از سیستم‌های دینامیکی سروکار دارد که تحت اغتشاشاتی در قالب فرآیندهای تصادفی قرار می‌گیرند. این نظریه به تحلیل مشخصات آماری متغیرهای یک سیستم تصادفی و همچنین به دست آوردن یک قانون کنترلی برای سیستم تصادفی جهت بهینه‌سازی یک تابع هزینه می‌پردازد. از آن‌جا که در عمل، اکثر سیستم‌ها تحت

فواصل مساوی مورد نیاز می‌باشد. در روش پیشنهادی رویکرد مرزی توسعه یافته، تنها فشار آب در نقاط ابتدایی^۳ و انتهایی^۴ خط لوله و همچنین دبی جریان در این نقاط مورد نیاز می‌باشد. با استفاده از اطلاعات دو نشستی ساختگی، مکان نشستی واقعی و اندازه آن قابل تعیین خواهد بود. روش پیشنهادی در [۳] تنها قادر به تشخیص نشستی در یک خط لوله مجزا می‌باشد.

در [۴] به پایش نرم‌افزاری و شناسایی میزان نشستی در خطوط انتقال گاز پرداخته شده و یک روش پایش نرم‌افزاری که تنها از اندازه‌گیری‌های ابزار دقیق موجود در خطوط انتقال استفاده می‌کند پیشنهاد شده است. در واقع در این روش به جای استفاده از مدل‌های خط لوله که به علت در نظر گرفتن فرض‌های ساده کننده دقت چندانی ندارند، رفتار سیال درون لوله بررسی می‌شود؛ زیرا هنگام بروز نشستی رفتار سیال درون لوله تغییر می‌کند. در این روش با استفاده از اندازه‌گیری دبی جریان و فشار گاز در نقاط مشخصی از خط لوله به تشخیص نشستی پرداخته شده و برای تشخیص نشستی از فیلتر کالمن و فیلتر کالمن حالت افزوده استفاده شده است. در فیلتر کالمن افزوده، ورودی به متغیرهای حالت اضافه گشته است. برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی از شبیه‌سازی در نرم‌افزار الگابا مشخصات یک خط لوله واقعی استفاده شده و برای نزدیک شدن نتایج شبیه‌سازی به حالت واقعی، نویز اندازه‌گیری به داده‌ها افزوده شده که منجر به شناسایی و تخمین بهتر پارامترها می‌گردد. با استفاده از اطلاعات دبی جریان و فشار نقاط مختلف با نشستی‌ها و اندازه‌های مختلف، سیستم شناسایی نشستی و مقدار آن در نقاط و زمان‌های مختلف تشخیص داده شده است. در شناسایی این سیستم تغییرات فشار در نقاط مختلف از خط لوله به عنوان ورودی سیستم و دبی جریان در همان نقاط به عنوان خروجی استفاده شده است. این روش قادر است وجود نشستی را در بین دو حسگر تشخیص دهد ولی امکان تعیین دقیق محل نشستی توسط آن وجود ندارد.

یکی دیگر از پژوهش‌ها [۵] به ارائه روشی بر اساس مدل برای تشخیص نشستی و موقعیت آن در خطوط لوله گاز بر اساس فیلتر^۵ STF پرداخته است. این فیلتر بر خلاف فیلتر کالمن توسعه یافته در برابر نامعینی‌های مدل، مقاومت^۶ بالایی دارد. بنابراین تشخیص نشستی و موقعیت توسط فیلتر STF با دقت و سرعت بیشتری نسبت به فیلتر کالمن توسعه یافته انجام می‌شود. فیلتر STF در واقع یک فیلتر کالمن توسعه یافته محوشونده زیربهنه^۷ SFEKF می‌باشد که در برابر خطاها و نویز مدل‌سازی نسبت به فیلتر کالمن توسعه یافته، کارآمدتر است. روش پیشنهادی در [۵] توسط شبیه‌سازی کامپیوتری بررسی شده و نتایج بهتری را نسبت به فیلتر کالمن توسعه یافته نشان داده است.

بخش ۱۳ به ارائه مسائل باز و چالش‌های پیش رو در پژوهش‌های آتی و در بخش ۱۴ به جمع‌بندی مطالب پرداخته شده است.

۲- کاربرد در تشخیص نشستی در خطوط انتقال سیالات

همان‌طور که می‌دانیم برای انتقال سیالاتی مانند گاز، نفت و آب از خطوط لوله استفاده می‌شود. این خطوط لوله ممکن است بر اثر تصادف، خوردگی و یا با گذشت زمان دچار نشستی گردند. بروز نشستی در خطوط می‌تواند منجر به ایجاد حوادثی مانند انفجار و همچنین اتلاف سیال مورد انتقال شود. بنابراین ارائه روشی برای تشخیص نشستی در خطوط انتقال سیالات حائز اهمیت می‌باشد. در این بخش به بررسی کاربرد نظریه تخمین و شناسایی در تشخیص نشستی و مرور پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌پردازیم.

در [۱] که یکی از اولین پژوهش‌هایی است که به تشخیص نشستی با استفاده از نظریه تخمین پرداخته است، روشی برای تشخیص و مکان‌یابی نشستی در خطوط لوله طولانی گاز ارائه شده است. در این روش، نشستی‌های مصنوعی (ساختگی)^۱ در مکان‌های از پیش تعیین شده در امتداد خط لوله ایجاد شده و فیلتر کالمن توسعه یافته برای تشخیص دامنه این نشستی‌ها اجرا شده است. سپس برای تشخیص نشستی از درون‌یابی خطی دامنه و مکان نشستی‌های مصنوعی استفاده شده است. مدل پیشنهادی، خط لوله‌ای به طول ۹۰ کیلومتر را شبیه‌سازی کرده است. نتایج روش پیشنهادی در این مقاله حاکی از این بوده است که می‌توان از یک زمان گسسته‌سازی بزرگ برای کاهش بار محاسباتی استفاده نمود بدون این که دقت تخمین مکان نشستی کاهش یابد. در [۲] نیز یک الگوریتم بر اساس مدل و با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته برای تعیین دامنه و مکان نشستی در خط لوله انتقال آب پیشنهاد شده است. این روش نیز مانند روش پیشنهادی در [۱] از نشستی‌های مصنوعی با موقعیت‌های از پیش تعیین شده استفاده می‌کند. هر چند دامنه‌های این نشستی‌های مصنوعی باید تخمین زده شوند. در این روش با استفاده از تخمین نشستی‌های مصنوعی، به تعیین موقعیت و دامنه نشستی‌های واقعی در خط لوله پرداخته شده است.

در [۳] یک روش تشخیص نشستی در خطوط لوله آب بر اساس مدل ارائه شده و توانایی آن برای تشخیص نشستی در خطوط بررسی گشته است. هدف از این پژوهش تعیین کارایی فیلتر کالمن و روش جدیدی به نام رویکرد مرزی توسعه یافته^۲ برای تشخیص نشستی در یک شبکه توزیع آب بوده است. در این روش از فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین دو نشستی ساختگی در مکان‌های مشخص از خط لوله استفاده شده است. در این پژوهش عنوان شده است که برای حصول اطمینان از رؤیت‌پذیر بودن مدل، اندازه‌گیری فشار آب درون لوله در چهار نقطه با

³ Upstream

⁴ Downstream

⁵ Strong Tracking Filter

⁶ Robustness

⁷ Suboptimal Fading Extended Kalman Filter

¹ Fictitious

² Extended Boundary Approach

وجود نشستی، دبی را تخمین می‌زند؛ بنابراین به عنوان یک مرجع عمل می‌کند. فیلتر دوم از یک سیگنال زمان‌بندی اندازه‌گیری شده استفاده کرده و حالت افزوده با مقدار مرجع مقایسه می‌گردد. در صورت وجود اختلاف بارز میان حالت افزوده و مقدار مرجع، اعلان نشستی می‌گردد. کارایی این روش توسط آزمایش با داده‌های واقعی و داده‌های شبیه‌سازی نشان داده شده است.

در [۱۱] روشی برای تشخیص و مکان‌یابی نشستی روی خط^۷ در شبکه خطوط لوله گاز با استفاده از اندازه‌گیری‌های دبی و فشار پیشنهاد شده است. ویژگی اصلی این روش پیشنهادی این است که هم قابل اعمال به یک خط لوله تنها و هم به یک شبکه خطوط لوله می‌باشد. در این روش از یک الگوریتم تخمین حالت کارآمد بر اساس مدل تابع تبدیل که در [۱۲] ارائه گشته استفاده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی بر روی دو شبکه خطوط لوله انجام شده است. در [۱۳] نیز عملکرد روش پیشنهادی در [۱۱] توسط آزمایش عملی بر روی یک شبکه آزمایشگاهی بررسی شده است. همچنین به منظور بررسی کارایی این روش به صورت روی خط، آزمایش عملی بر روی یک خط لوله به طول ۲۰۴/۷ کیلومتر انجام شده است. هر دو آزمایش عملی نشان‌دهنده عملکرد خوب روش پیشنهادی در تشخیص سریع و روی خط نشستی با دقت قابل قبول در تعیین مکان نشستی بوده‌اند.

۳- کاربرد در ردیابی اهداف مانوردار

چنانچه می‌دانیم ردیابی هدف مسأله‌ای است که از گذشته تا حال مورد توجه محققان و دانشمندان بوده و در زمینه‌های مختلفی مانند محیط‌های نظامی، ردیابی جانوران در محیط زیست، ردیابی انسان‌ها و یا وسایل نقلیه کاربرد دارد. در بحث ردیابی، ردیابی اهداف مانوردار^۸ به عنوان یک مسأله پر اهمیت، بخش وسیعی از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است. در این قسمت به معرفی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه ردیابی اهداف مانوردار با استفاده از نظریه تخمین تصادفی می‌پردازیم.

یکی از پژوهش‌هایی که در آن مسأله ردیابی هدف مانوردار مورد توجه قرار گرفته است [۱۴] می‌باشد. در این روش معادله شتاب هدف به فیلتر کالمن افزوده شده و به صورت یک فرآیند^۹ AR مرتبه اول نمایش داده شده است. فیلتر افزوده، به خوبی اهداف مانوردار را ردیابی می‌کند اما در حالتی که هدف با سرعت ثابت و در خط مستقیم حرکت می‌کند، عملکرد فیلتر افزوده در مقایسه با فیلتر کالمن ساده تنزل می‌یابد. یک روش کاربردی برای حل این مسأله این است که در زمان حرکت هدف با سرعت ثابت از مدل هدف بدون مانور استفاده شود و در زمان تشخیص مانور هدف، یک فیلتر ردیاب با مدل مانور مناسب به کار گرفته شود. تا کنون فیلترهای ردیاب بسیاری به منظور ردیابی اهداف مانوردار پیشنهاد

در [۶] یک روش شناسایی سیستم بیزین^۱ برای به روز رسانی مدل و تشخیص نشستی در خطوط لوله توزیع آب پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی احتمال^۲ هر رویداد^۳ نشستی (شامل موقعیت و شدت نشستی) را توسط اندازه‌گیری دبی و فشار سیال، تخمین می‌زند. طبق تخمین احتمال رویدادها، محتمل‌ترین رویداد تعیین گشته و باقی رویدادها به ترتیب احتمال وقوع رده‌بندی می‌شوند. تعیین محتمل‌ترین رویداد منجر به یک مسأله بهینه‌سازی گسسته‌زمان می‌گردد. کارایی روش پیشنهادی در [۶] توسط اعمال آن به یک شبکه خطوط لوله آب ارزیابی گشته و تأثیر عوامل مختلفی مانند خطای مدل‌سازی، نویز اندازه‌گیری، شدت نشستی و موقعیت، تعداد و نوع حسگرها بر روی کارایی روش پیشنهادی بررسی شده است. در صورت عدم وجود نویز اندازه‌گیری و خطای مدل‌سازی، نشستی و موقعیت آن به طور دقیق توسط این روش شناسایی می‌شوند.

همان‌طور که گفته شد در برخی پژوهش‌ها از روش‌هایی بر اساس مدل در زمینه تشخیص نشستی استفاده شده است. برای مثال از روش‌های بر اساس فیلتر کالمن توسعه‌یافته و فیلتر STF نام برده شد. این روش‌ها نیازمند خطی‌سازی مدل غیرخطی خطوط لوله می‌باشند که منجر به کاهش سرعت و دقت تشخیص نشستی می‌گردند. چنانچه می‌دانیم فیلترهای ذره‌ای قابل اعمال به سیستم‌های غیرگوسی و غیرخطی بدون نیاز به خطی‌سازی می‌باشند. در [۷] یک فیلتر ذره‌ای تطبیقی برای تشخیص نشستی پیشنهاد گشته است. در این روش به منظور تخمین نشستی، از روش حالت افزوده استفاده شده است. شبیه‌سازی کامپیوتری مؤثر بودن روش پیشنهادی در [۷] را نشان می‌دهد.

در [۸] روش جدیدی برای تشخیص نشستی در خطوط لوله گاز با فشار بالا پیشنهاد شده است. در این روش خط لوله به صورت یک سیستم LPV^۴ مدل شده و دبی نقطه خروجی به عنوان خروجی سیستم، دبی نقطه ورودی به عنوان ورودی سیستم و فشار گاز به عنوان متغیر زمان‌بندی^۵ در نظر گرفته شده است. شناسایی سیستم توسط الگوریتم شناسایی سیستم LPV که در [۹] پیشنهاد شده است، صورت گرفته است و نشستی توسط یک فیلتر کالمن تشخیص داده شده است. در این روش خطا به عنوان یک حالت افزوده در نظر گرفته شده است. در [۱۰] نیز یک روش برای تشخیص نشستی در خطوط لوله گاز فشار بالا ارائه شده است. در این روش دو آشکارساز^۶ نشستی به صورت سیستم‌های LPV مدل شده‌اند و سیگنال‌های زمان‌بندی آن‌ها به ترتیب فشار ورودی و خروجی خط می‌باشند. این دو آشکارساز یکسان بوده و به صورت همزمان اجرا می‌شوند. ابتدا خط لوله توسط الگوریتم شناسایی سیستم LPV شناسایی می‌شود. هر آشکارساز نشستی از دو فیلتر کالمن استفاده می‌کند و خطا به عنوان یک حالت افزوده در نظر گرفته می‌شود. فیلتر اول با فرض عدم

¹ Bayesian

² Probability

³ Event

⁴ Linear Parameter Varying

⁵ Scheduling variable

⁶ Detector

⁷ Online

⁸ Maneuvering target

⁹ Auto Regressive

گشته‌اند. دو رویکرد مختلف که برای ردیابی اهداف با مانور نامشخص مورد مطالعه قرار گرفته‌اند شامل فیلترینگ تطبیقی بر اساس مدل [۱۵] و تخمین ورودی IE^۱ می‌باشند. روش‌های فیلترینگ تطبیقی بر اساس مدل که به مدل‌های چندگانه متعامل IMM^۲ تکامل یافته‌اند [۱۶]، تغییرات سیستم را به صورت یک پارامتر مارکوف^۳ با یک احتمال گذار^۴ مدل می‌کنند. ردیاب‌های IMM چند مود مختلف برای مانور در نظر می‌گیرند و تغییرات مودها توسط فرآیند مارکوف پنهان^۵ مدل می‌شوند. در هر مود تخمین حالت انجام شده، سپس نتایج تخمین در مودهای مختلف به صورت یک مجموع وزن‌یافته^۶ با یکدیگر ترکیب می‌شوند. وزن‌ها در این حالت متناسب با احتمال‌ها^۷ می‌باشند [۱۷]. در [۱۸] که ردیابی هدف بر اساس مدل IMM پایه پیشنهاد شده است، دو مود شتاب کم و شتاب زیاد در نظر گرفته شده و فرض بر این است که احتمال‌های گذار زنجیره‌های مارکوف^۸، ایستا و مشخص می‌باشند. در برخی پژوهش‌ها، ردیابی هدف بر اساس تخمین‌گرهای IMM با ساختار متغیر^۹ انجام شده است [۱۹، ۲۰]. در نظر گرفتن ساختار متغیر در تخمین‌گرهای IMM منجر به کاهش تعداد مدل‌های مورد نیاز و در نتیجه کاهش حجم محاسباتی می‌گردد. به طور مثال در [۱۹] به طراحی یک تخمین‌گر IMM با ساختار متغیر برای ردیابی گروهی از اهداف زمینی یعنی تعدادی خودرو در بزرگراه پرداخته شده است. در این روش، برای حل مسأله تغییر شرایط مانند انشعاب در مسیر، به هم پیوستن دو مسیر و تقاطع‌ها از تغییر در ساختار تخمین‌گر IMM به طور مثال تغییر تعداد مدل‌ها و یا تغییر پارامترها در هر مدل استفاده شده است.

در [۲۷] روش تخمین ورودی جدیدی برای مسأله ردیابی اهداف مانوردار ارائه شده است. مدل پیشنهادی از ترکیب دو مدل نامعینی یعنی مدل‌های بی‌زین و فیشر^{۱۵} تشکیل شده است. در این روش شتاب به عنوان یک ورودی اضافی در معادلات حالت در نظر گرفته شده است. ایده اصلی این روش تبدیل مسأله هدف مانوردار به هدف بدون مانور توسط حالت افزوده به منظور حصول یک مدل بی‌زین استاندارد می‌باشد. این روش نیازی به مرحله تشخیص مانور ندارد. مدل پیشنهاد شده در این روش یک مدل فضای حالت افزوده است که هم بردار حالت و هم بردار ورودی نامعلوم را به عنوان یک بردار حالت افزوده جدید در نظر می‌گیرد. در این روش بردارهای شتاب و حالت اصلی به طور همزمان توسط یک فیلتر کالمن استاندارد تخمین زده می‌شوند. این روش هم برای اهداف بدون مانور و هم اهداف مانوردار قابل اجرا است. در [۲۸] نیز روش جدیدی برای ردیابی اهداف مانوردار بر اساس تخمین ورودی ارائه شده است. در این روش با افزودن ورودی‌های ناشناخته (مانورها) به بردار حالت، تحقق فضای حالت مرتبه بالاتری به دست آمده و تخمین حالت و ورودی‌های ناشناخته به طور همزمان انجام شده است. تخمین همزمان حالت و ورودی‌ها منجر به حذف تأخیر ناشی از مرحله آشکارسازی مانور می‌گردد. روش پیشنهادی هم برای اهداف مانوردار و هم اهداف بدون مانور عملکرد خوبی از خود نشان داده است.

در [۲۹] یک روش فیلترینگ جدید به نام STMIE^{۱۶} بر اساس فیلتر STF با فاکتورهای چندگانه محوشونده به منظور بهبود عملکرد ردیابی روش تخمین ورودی تغییر یافته برای اهداف با مانور بالا معرفی گشته است. در این روش بهره فیلتر به منظور افزایش عملکرد ردیابی اهداف مانوردار در حالت زمان-واقعی^{۱۷} تنظیم می‌گردد. کارایی این روش توسط شبیه‌سازی ارزیابی گشته و نتایج نشان‌دهنده دقت بیشتر و عملکرد بهتر زمان-واقعی این روش در مقایسه با MIE فازی تطبیقی بوده است.

گشته‌اند. دو رویکرد مختلف که برای ردیابی اهداف با مانور نامشخص مورد مطالعه قرار گرفته‌اند شامل فیلترینگ تطبیقی بر اساس مدل [۱۵] و تخمین ورودی IE^۱ می‌باشند. روش‌های فیلترینگ تطبیقی بر اساس مدل که به مدل‌های چندگانه متعامل IMM^۲ تکامل یافته‌اند [۱۶]، تغییرات سیستم را به صورت یک پارامتر مارکوف^۳ با یک احتمال گذار^۴ مدل می‌کنند. ردیاب‌های IMM چند مود مختلف برای مانور در نظر می‌گیرند و تغییرات مودها توسط فرآیند مارکوف پنهان^۵ مدل می‌شوند. در هر مود تخمین حالت انجام شده، سپس نتایج تخمین در مودهای مختلف به صورت یک مجموع وزن‌یافته^۶ با یکدیگر ترکیب می‌شوند. وزن‌ها در این حالت متناسب با احتمال‌ها^۷ می‌باشند [۱۷]. در [۱۸] که ردیابی هدف بر اساس مدل IMM پایه پیشنهاد شده است، دو مود شتاب کم و شتاب زیاد در نظر گرفته شده و فرض بر این است که احتمال‌های گذار زنجیره‌های مارکوف^۸، ایستا و مشخص می‌باشند. در برخی پژوهش‌ها، ردیابی هدف بر اساس تخمین‌گرهای IMM با ساختار متغیر^۹ انجام شده است [۱۹، ۲۰]. در نظر گرفتن ساختار متغیر در تخمین‌گرهای IMM منجر به کاهش تعداد مدل‌های مورد نیاز و در نتیجه کاهش حجم محاسباتی می‌گردد. به طور مثال در [۱۹] به طراحی یک تخمین‌گر IMM با ساختار متغیر برای ردیابی گروهی از اهداف زمینی یعنی تعدادی خودرو در بزرگراه پرداخته شده است. در این روش، برای حل مسأله تغییر شرایط مانند انشعاب در مسیر، به هم پیوستن دو مسیر و تقاطع‌ها از تغییر در ساختار تخمین‌گر IMM به طور مثال تغییر تعداد مدل‌ها و یا تغییر پارامترها در هر مدل استفاده شده است.

در [۲۱] نیز روش فیلترینگ با ابعاد متغیر پیشنهاد گشته است. در این روش در زمان تشخیص مانور هدف، مدل حالت هدف با افزودن شتاب هدف به متغیرهای هدف تغییر می‌یابد.

روش تخمین ورودی رویکرد دیگری برای ردیابی اهداف با مانور نامشخص می‌باشد. ایده اصلی در این رویکرد، تخمین ورودی ناشناخته و سپس تخمین حالت توسط تخمین ورودی می‌باشد. این رویکرد در [۲۲] پیشنهاد شده است. در این روش هنگام تشخیص مانور، دامنه شتاب هدف توسط تخمین حداقل مربعات^{۱۱} به دست می‌آید. سپس با استفاده از تخمین شتاب و فیلتر کالمن استاندارد به تخمین حالت هدف پرداخته می‌شود. در زمانی که هیچ مانوری تشخیص داده نشود، فیلتر کالمن به تنهایی استفاده می‌شود. ایراد این روش این است که ورودی ثابت در نظر گرفته می‌شود.

¹ Input Estimation
² Interacting Multiple Model
³ Marcov parameter
⁴ Transition probability
⁵ Hidden markov process
⁶ Weighted
⁷ Likelihoods
⁸ Marcov chains
⁹ Variable structure IMM
¹⁰ Least Squares

¹¹ Modified Input Estimation
¹² Enhanced Input Estimation
¹³ Generalized
¹⁴ Optimal coefficients
¹⁵ Fisher
¹⁶ Strong Tracing Modified Input Estimation
¹⁷ Real-time

۵- کاربرد در پزشکی و سلامت

در این قسمت به مطالعه کاربرد نظریه کنترل و مدل‌سازی تصادفی در پزشکی و سلامت می‌پردازیم. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای با استفاده از نظریه کنترل و یا مدل‌سازی تصادفی در مباحث پزشکی و سلامت به طور مثال کنترل سرایت بیماری، تنظیم تجویز دارو، مدل‌سازی بیماری‌ها و درمان بیماری صورت گرفته است. در ادامه مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته در این مباحث انجام می‌دهیم.

همان‌طور که گفته شد تنظیم و مدیریت تجویز دوز^{۱۰} دارو یکی از زمینه‌هایی است که کنترل تصادفی در آن کاربرد دارد. به طور مثال در [۳۲] روش کنترل بهینه تصادفی برای تجویز دارو پیشنهاد شده است. این مسأله از آن جهت تصادفی در نظر گرفته شده است که هم میزان تأثیر دارو و هم شرایط اولیه فیزیولوژیکی^{۱۱} بیمار دارای نامعینی می‌باشند. همچنین به منظور جلوگیری از عوارض جانبی دارو، مقدار بیشینه‌ای برای دوز مجاز دارو در نظر گرفته شده است.

در [۳۳] نیز به مطالعه کاربرد نظریه کنترل تصادفی به منظور تنظیم بهینه رژیم^{۱۲} دارویی پرداخته شده است. این مسأله به سه بخش تقسیم‌بندی شده است. بخش اول دربرگیرنده تعریف یک مدل شامل ساختار، پارامترها و نامعینی در اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. بخش دوم انتخاب ورودی کنترلی است. به طور مثال می‌توان از مقدار دوز دارو و یا فواصل زمانی بین دوزها به عنوان ورودی کنترلی استفاده نمود. بخش سوم نیز شامل تعریف یک معیار عملکرد مناسب برای ارزیابی روش کنترلی می‌باشد. در [۳۴] رویکرد کنترل تصادفی با مدل چندگانه به منظور طراحی دوز دارویی در نظر گرفته شده است. این روش بر روی فرآیند تجویز داروی بیهوشی پیاده‌سازی شده و نتایج خوبی را در بر داشته است. در [۳۵] نیز یک روش بهینه‌سازی تصادفی به منظور طراحی رژیم دارویی پیشنهاد شده است. هدف از روش پیشنهادی، تنظیم دوز دارو شامل مقدار دوز و فواصل زمانی بین دوزها برای هر بیمار بوده است؛ به طوری که میزان دوز از یک آستانه پایین‌تر باشد تا اثرات جانبی کاهش یابد و از یک آستانه‌ای بالاتر باشد تا دارو روی بیمار تأثیر داشته باشد. به منظور بررسی مزایا و محدودیت‌های روش پیشنهادی دو مطالعه موردی بر روی داروهای سیکلوفسفامید^{۱۳} و گاباپنتین^{۱۴} صورت گرفته است. نتایج عددی نشان‌دهنده وجود پاسخ‌های بهینه و کاهش بار محاسباتی در مقایسه با رویکرد متداول جستجو بر اساس جدول^{۱۵} و مونت-کارلو^{۱۶} بوده است.

در [۳۶] یک کنترل‌کننده تصادفی غیرخطی جدید بر اساس روش بهینه‌سازی BFO^{۱۷} به منظور کاهش سلول‌های آلوده به بیماری HIV در

۴- کاربرد در مدیریت فعال صف در شبکه‌های ارتباطی

یکی از رویکردهای مؤثر جهت جلوگیری و کنترل تراکم در شبکه‌های کامپیوتری، روش مدیریت فعال صف^۱ AQM می‌باشد. در این روش با نظارت طول صف در مسیریاب‌های شبکه، احتمال دور ریختن بسته‌های ورودی به مسیریاب‌ها محاسبه می‌شود. با دور ریختن بسته‌ها پیش از پر شدن کامل صف در مسیریاب، فرستنده از امکان وقوع تراکم آگاه گشته و نرخ ارسال خود را به منظور جلوگیری از تراکم کاهش می‌دهد. بدین ترتیب طول صف در مسیریاب مدیریت می‌شود. انتظار می‌رود به علت خاصیت تصادفی شبکه‌های ارتباطی، روش‌های مدیریت فعال صف بر اساس نظریه کنترل تصادفی در مقایسه با روش‌های متداول مدیریت صف عملکرد بهتری از خود نشان دهند. در ادامه به مطالعه کاربرد نظریه کنترل تصادفی در مدیریت فعال صف در شبکه‌های ارتباطی به منظور کاهش تراکم^۲ می‌پردازیم.

در [۳۰] یک روش مدیریت فعال صف تصادفی جدید به نام الگوریتم PDF-HRED^۳ پیشنهاد شده است. این روش بر اساس تخمین تصادفی تابع چگالی احتمال و کنترل‌کننده HRED و روش PSO^۵ عمل می‌کند. در واقع در این روش بر خلاف روش‌های پیشین که بر اساس گشتاور^۶ مرتبه اول تغییرات طول صف هستند، بر اساس تابع چگالی احتمال عمل می‌کند؛ به این صورت که ورودی کنترلی (احتمال دور ریختن بسته‌های داده) طوری انتخاب می‌شود که تابع چگالی احتمال طول صف به یک تابع مطلوب همگرا گردد. عملکرد این روش توسط شبیه‌سازی با نرم‌افزار NS^۷ بررسی شده و نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های مدیریت فعال صف متداول به دست آمده است.

در [۳۱] نیز یک روش مدیریت فعال صف بر اساس کنترل‌کننده تصادفی و رؤیت‌گر B-spline به نام IPDF^۸-AQM پیشنهاد شده است. این روش که بر اساس کنترل تابع چگالی احتمال و روش PSO می‌باشد، نه تنها طول صف متوسط در زمان کنونی بلکه تابع چگالی احتمال طول صف در یک زمان چرخشی RTT^۹ را در نظر می‌گیرد. در این روش سعی بر این است که بر اساس تقریب B-spline، تابع چگالی احتمال طول صف به یک تابع مطلوب همگرا گردد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از بهبود عملکرد مدیریت فعال صف توسط این روش بوده است.

¹ Active Queue Management

² Packet

³ Congestion

⁴ Probability Density Function-Hyperbolic Random Early Detection

⁵ Particle Swarm Optimization

⁶ Moment

⁷ Network Simulator

⁸ Intelligent Probability Density Function

⁹ Round Trip Time

¹⁰ Dosage

¹¹ Physiological

¹² Regimen

¹³ Cyclophosphamide

¹⁴ Gabapentin

¹⁵ Grid search

¹⁶ Monte-Carlo

¹⁷ Bacterial Foraging Optimization

عواملی چون اندازه اولیه تومور، نرخ جهش^{۱۱} و نرخ دگرگونی^{۱۰} سلول‌های سرطانی بررسی شده است.

در [۴۳] یک مدل تصادفی برای آغاز بیماری سرطان در نظر گرفته شده است. این مدل به منظور ارزیابی اثر مجاورت^{۱۲} بر مراحل پیش‌بدخیمی^{۱۳} و بدخیمی^{۱۴} بروز سرطان به کار رفته است. همچنین از این مدل برای تخمین نرخ جهش ژن‌های شرکت‌کننده در پیشرفت نوعی توده پیش‌سرطانی دهانی استفاده شده است. اثر مجاورت به معنای توانایی جهش ژن‌های تومورزا^{۱۵} برای افزایش احتمال جهش سلول‌های مجاور می‌باشد.

در [۴۴] نیز یک مدل تصادفی برای رشد تومور جامد^{۱۶} بر اساس قانون گامپرتز^{۱۷} ارائه شده است. تکامل سلول‌های تومور توسط یک فرآیند تک‌بعدی دیفیوژن^{۱۸} که توسط دو آستانه بهبود کامل بیمار و مرگ بیمار محدود شده، توصیف گشته است. مدل پیشنهادی به منظور شبیه‌سازی اثرات یک نوع درمان وابسته به زمان به کار گرفته شده است. چنان‌چه اشاره شده یکی از کاربردهای مدل تصادفی در توصیف بیماری‌های مسری و همه‌گیر می‌باشد. در [۴۵] مدلی تصادفی به نام GSCM^{۱۹} که ترکیبی از شبیه‌سازی تصادفی و مدل‌سازی مبتنی بر عامل^{۲۰} می‌باشد برای توصیف بیماری‌های مسری طراحی شده است.

در [۴۶] نیز توسط مدل‌سازی تصادفی به مطالعه دینامیک گسترش ویروس RSV^{۲۱} در منطقه‌ای از اسپانیا پرداخته شده است. مدل تصادفی توسط توصیف آشفستگی‌های^{۲۲} تصادفی بر روی پارامتر سرشماری جمعیت و نرخ گسترش ویروس RSV به دست آمده است. به منظور بررسی اثر نرخ پیدایش^{۲۳} و نرخ گسترش^{۲۴} ویروس RSV بر روی دینامیک جمعیت، شبیه‌سازی عددی بر روی مدل‌های تصادفی و معین^{۲۵} صورت گرفته است. پاسخ‌های عددی مدل تصادفی توسط روش‌های اویلر-مارویاما^{۲۶} و میل‌اشتاین^{۲۷} محاسبه شده و بازه‌های اطمینان^{۲۸} پاسخ‌های تصادفی توسط روش مونت-کارلو به دست آمده‌اند.

در [۴۷] مدل تصادفی مبتنی بر عامل و ناهمگن^{۲۹} برای بیماری‌های مسری ارائه شده است. در [۴۸] نیز به ارائه مدل تصادفی برای بیماری‌های

حضور پارامترهای تصادفی دینامیک HIV ارائه گشته است. روش کنترل غیرخطی سیگموئید^۱ BFO-SNC یک روش بهینه مقاوم غیرخطی جدید است که قادر به کنترل مشخصات بیولوژیکی^۲ دینامیک غیرخطی و تصادفی HIV توسط مدیریت دوز دارو می‌باشد. کنترل‌کننده پیشنهادی، توانایی کنترل دینامیک HIV را تحت تغییرات تصادفی پارامترهای عفونت بیماری دارد. روش کنترلی پیشنهادی با کمینه کردن مقدار متوسط^۳ یک تابع هزینه تصادفی، به جستجوی بهترین محدوده برای پارامترهای کنترل‌کننده می‌پردازد و سطح عفونت را به پایین‌تر از یک مقدار معین می‌رساند. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده بهبود عملکرد درمان با روش BFO-SNC در مقایسه با روش‌های کنترلی دیگر بوده است.

چنان‌چه پیش‌تر اشاره شد، رویکرد تصادفی در زمینه‌های مختلف پزشکی و سلامت کاربرد دارد. در ادامه به معرفی کاربردهای رویکرد تصادفی در سایر زمینه‌های پزشکی و سلامت می‌پردازیم. در [۳۷] از روش بهینه‌سازی تصادفی برای نحوه ذخیره‌سازی و توزیع داروها در زمان رخداد سوانح استفاده شده و یک مطالعه موردی برای روش پیشنهادی در هنگام وقوع زلزله انجام شده است. در [۳۸] با استفاده از فیلتر کالمن به تخمین ضریب نفوذپذیری^۴ BBB پرداخته شده است. در [۳۹] از فیلتر کالمن با مدل مشاهدات افزوده برای تصویربرداری ECG^۵ استفاده شده است. در [۴۰] روشی جدید برای تعیین و ردیابی مسیر رگ‌ها در شبکه چشم بر اساس فیلتر ذره‌ای ارائه شده است.

همان‌طور که می‌دانیم مدل‌سازی تصادفی نقش مهمی در مدل‌سازی و تحلیل بیماری‌های مسری، سلول‌های سرطانی و سایر بیماری‌ها دارد. در ادامه به معرفی پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌پردازیم. در [۴۱] یک مدل تصادفی برای شیمی‌درمانی سرطان به دست آمده است. یکی از موانع مهم در درمان سرطان افزایش مقاومت سلول‌های سرطانی در برابر دارو می‌باشد. بنابراین این مدل دربرگیرنده افزایش مقاومت در برابر دارو بوده و می‌تواند طیف گسترده‌ای از تومورها را در بر گیرد. این مدل به منظور تحلیل اثر داروهایمانند آدریامایسین^۶، سیکلوفسفامید و متروترکسات^۷ بر سرطان سینه بر روی داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های بالینی^۸ به کار گرفته شده است.

یک روش مؤثر برای جلوگیری از مقاومت دارویی و افزایش موفقیت درمان، به کارگیری روش‌های درمانی چنددارویی^۹ می‌باشد. در [۴۲] یک مدل تصادفی برای مقاومت سلول‌های سرطانی در برابر درمان چنددارویی ارائه و تحلیل گشته است. همچنین وابستگی نتیجه درمان به

¹⁰ Mutation rate

¹¹ Turnover rate

¹² Bystander effect

¹³ Pre-malignant

¹⁴ Malignant

¹⁵ Oncogens

¹⁶ Solid tumor

¹⁷ Gompertz law

¹⁸ Diffusion process

¹⁹ Global Stochastic Contact Model

²⁰ Agent-based modeling

²¹ Respiratory Syncytial Virus

²² Perturbations

²³ Birth rate

²⁴ Transmission rate

²⁵ Deterministic

²⁶ Euler-Maruyama

²⁷ Milstein

²⁸ Confidence intervals

²⁹ Heterogeneous

¹ Bacterial Foraging Optimization Sigmoid Nonlinear Control

² Biological characteristics

³ Expected value

⁴ Blood-Brain Barrier

⁵ Electrocardiogram

⁶ Adriamycin

⁷ Methotrexate

⁸ Clinical

⁹ Multi-drug therapeutic

در [۵۹] معادلات کواریانس حالت حلقه‌بسته بر اساس مدل سیستم تصادفی اصلی به دست آمده و مسأله انتساب کواریانس به طراحی جبران‌کننده‌ای با توانایی حذف اغتشاش تبدیل شده است. برای این مسأله، ابتدا یک کنترل‌کننده PID^v طراحی گشته و سپس یک ردیاب بهینه بر اساس قضیه ردیاب بهینه کلاسیک با تابع هزینه با افق نامحدود برای سیستم کواریانس طراحی شده است. همچنین نشان داده شده است که همگرایی ماتریس کواریانس سیستم به مقدار مطلوب قابل تضمین است.

در [۶۰] یک فرم جدید برای توصیف سیستم کواریانس بر اساس سیستم تصادفی خطی پیشنهاد شده است. ایده اصلی این روش بر اساس تغییر چیدمان^۸ معادله ریکاتی^۹ ماتریس کواریانس مربوطه به یک سیستم فضای حالت خطی معین می‌باشد. در سیستم کواریانس جدید، واریانس متغیرهای حالت و کواریانس بین هر دو متغیر به عنوان حالت سیستم در نظر گرفته می‌شوند. با انجام یک سری عملیات ریاضی، مسأله انتساب کواریانس به مسأله استاندارد حذف اغتشاش تبدیل می‌شود. به علت خطی و معین بودن سیستم کواریانس جدید، تمامی کنترل‌کننده‌های متداول بر روی آن قابل استفاده هستند. نتیجه این روش با به‌کارگیری قانون کنترل پسخور کواریانس بر اساس کنترل انتگرالی روی سیستم کواریانس جدید نشان داده شده است. قانون کنترلی پیشنهادی منجر به پایداری سیستم حلقه‌بسته به همراه ماتریس کواریانس از پیش تعیین شده برای متغیرهای حالت سیستم حلقه‌بسته می‌گردد.

در [۶۱] نیز یک روش ابداعی به فرم بسته^{۱۰} برای انتساب کواریانس بر اساس سیستم تصادفی خطی پیشنهاد شده است. فرم بسته معادلات کواریانس حالت توسط تبدیل معادلات ریکاتی ماتریس کواریانس به یک سیستم فضای حالت خطی معین، به دست آمده و مسأله انتساب کواریانس تبدیل به یک مسأله حذف اغتشاش شده است. مزیت این روش این است که بر خلاف روش‌های پیشین، نیازی به حل مسأله ریکاتی وجود ندارد. در این روش پیشنهادی، طبق عملگر ضرب کرونکر^{۱۱}، مدل فرم بسته برای ماتریس‌های سیستم کواریانس جدید ارائه شده است.

در [۶۲] مسأله مقاوم تصادفی انتساب تقریبی کواریانس و پایداری کواریانس در نظر گرفته شده و بر روی پارامترهای متغیر شبکه‌های $AIMD^{12}$ به کار گرفته شده است. کنترل گشتاورهای بالاتر اندازه پنجره تراکم^{۱۳} به دلایل مختلف از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. اندازه پنجره تراکم برابر با تعداد بسته‌هایی است که یک فرستنده در شبکه می‌تواند به صورت متوالی ارسال نماید بدون این که منتظر

مسری پرداخته شده است. در این مدل از روش جداسازی متغیرها برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده گشته است. برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی به دست آمده از معادلات جزئی نیز، از تابع تولید احتمال^۱ PGF یک متغیر تصادفی استفاده شده است.

۶- کاربرد در انتساب کواریانس

مسأله کنترل و یا انتساب کواریانس به معنای طراحی کنترل‌کننده‌ای است که ماتریس کواریانس حالت معینی را برای سیستم حلقه‌بسته تحت عملکرد مطلوب نتیجه دهد. اهمیت مسأله کنترل کواریانس از آن جهت است که انتساب گشتاور دوم متغیرهای حالت سیستم، نتایج مطلوبی را در بر دارد. به طور مثال خطای RMS^2 در ورودی، خروجی و متغیرهای حالت به وضوح در ماتریس کواریانس نقش دارند. بنابراین می‌توان با کنترل کواریانس، خطای RMS را نیز کنترل نمود. همچنین پارامترهای مارکوف که پاسخ حالت گذرای سیستم را تعیین می‌کنند، وابسته به ماتریس کواریانس حالت هستند. مزیت دیگر کنترل کواریانس این است که برخی خواص مقاومت سیستم به خواص ماتریس کواریانس حالت وابسته است.

تاکنون پژوهش‌های بسیاری روی مسأله طراحی پسخور^۳ حالت خطی به منظور کنترل کواریانس سیستم تصادفی حلقه‌بسته در حالت ماندگار انجام گرفته است. به طور مثال در [۴۹] قضیه‌ای برای طراحی کنترل‌کننده‌های پسخور خطی با هدف حصول کواریانس مطلوب متغیرهای حالت سیستم حلقه‌بسته معرفی شده است. در [۵۰] حدود پایین و بالای ماتریس کواریانس حالت، تحت نامعینی‌های پارامتری سیستم ارائه شده‌اند. در [۵۱-۵۴] نیز نشان داده شده است که می‌توان با استفاده از قضیه انتساب کواریانس حالت SCA^4 ، قسمت‌هایی از ماتریس کواریانس حالت را تغییر داد. در [۵۵، ۵۶] از قضیه کنترل کواریانس برای سیستم‌های تصادفی دوخطی^۵ استفاده شده است. در [۵۷] نیز روشی برای کنترل کواریانس سیستم‌های تصادفی پیوسته-زمان آشفته^۶ با قیود واریانس پیشنهاد شده است.

در [۵۸] مسأله کنترل کواریانس برای سیستم‌های تصادفی گسسته-زمان بررسی شده است. برای کنترل کواریانس از روش کنترل انتگرالی با تضمین پایداری کواریانس حالت‌ها استفاده شده است. در این روش خطای ردیابی کواریانس به عنوان یک حالت جدید به سیستم کواریانس افزوده شده است. بنابراین می‌توان کنترل‌کننده را طوری طراحی نمود که هم پایداری کواریانس حالت و هم ردیابی کواریانس حالت برای سیستم تصادفی گسسته-زمان به دست آید.

⁷ Proportional Integral Derivative

⁸ Arrangement

⁹ Riccati

¹⁰ Closed-form

¹¹ Kronecker

¹² Additive Increase Multiplicative Decrease

¹³ Congestion Window Size

¹ Probability Generating Function

² Root Mean Square

³ Feedback

⁴ State Covariance Assignment

⁵ Bilinear

⁶ Perturbed

کوانتومی است. در [۷۱] با استفاده از معادلات دیفرانسیل تصادفی کوانتومی، معادلات دیفرانسیل تصادفی کلاسیکی استخراج شده که بر اساس اندازه‌گیری‌های خروجی، تخمین حالت سیستم کوانتومی باز^{۱۶} (دارای تقابل و برهم کنش با محیط) را امکان‌پذیر می‌نماید. این معادلات تخمین، مسیر کوانتومی^{۱۷} نام دارد. روش‌های کنترلی فراوانی برای مسیرهای کوانتومی ارائه گشته‌اند که به عنوان مثال می‌توان از کنترل بهینه تصادفی و پایدارسازی تصادفی نام برد. در [۷۲] پایدارسازی تصادفی مسیر کوانتومی برای یک بیت کوانتومی (کوبیت^{۱۸}) بررسی شده است. در [۷۳] مسأله پایدارسازی سراسری برای دو دسته مسیر بررسی شده و از روش کنترل چندقانونی سوئیچینگ^{۱۹} برای پایدارسازی این دو سیستم استفاده شده است. در [۷۴] کنترل لیاپانوف مسیر کوانتومی با وجود مشاهده‌پذیر خودالحاقی و پایدارسازی تصادفی سراسری سیستم کوانتومی بررسی شده است [۷۵].

در [۷۶] سیستم کوانتومی با دینامیک‌های غیرخطی و کنترل حلقه بسته کوانتومی به صورت یک مسئله‌ی کنترل غیرخطی تصادفی در نظر گرفته شده است. کنترل تصادفی مسئله را به دو قسمت تقسیم کرده است. ابتدا با تشکیل یک فیلتر، حالت سیستم تخمین زده شده، سپس کنترل حلقه بسته برای سیستم طراحی گشته است. نوع پس‌خور در این سیستم، پس‌خور حالت است. مدل فیزیکی به کار رفته در این مقاله شامل ابری از الکترون‌ها است که با یک میدان نوری (هم‌جهت با محور z) برهم‌کنش دارند. میدان نوری پس از برهم‌کنش، توسط یک آشکارساز نوری آشکار می‌گردد. یک میدان الکتریکی (هم‌جهت با محور y) نیز نقش کنترل را بازی می‌کند.

در [۷۷] روش‌های کنترل تصادفی حلقه‌باز با هدف کنترل چسبیدگی^{۲۰} در محیط‌های اتلافی^{۲۱} ارائه و مقایسه شده‌اند. یکی از این روش‌ها زمان‌نمو را به صورت یک متغیر تصادفی غیرگوسی توصیف می‌کند و روش دیگر توسط مدولاسیون تصادفی، کنترل دینامیکی را روی مقیاس‌های زمانی^{۲۲} غیرمارکوفی^{۲۳} به کار می‌گیرد.

می‌توان رابطه بین سیستم‌های کوانتومی باز و نویزهای کوانتومی غیرجای‌پذیر^{۲۴} بنیادی^{۲۵} را توسط معادلات دیفرانسیل تصادفی کوانتومی توصیف نمود. این معادلات نقش مهمی در طراحی و تحلیل شبکه‌های کوانتومی^{۲۶} به ویژه در پردازش اطلاعات کوانتومی دارند. بنابراین در [۷۸] یک معادله هامیلتون-ژاکوبی-بلمن^{۲۷} برای معادلات

دریافت بیت اعلام وصول^۱ آن‌ها باشد. یکی از دلایل اهمیت کنترل گشتاورهای بالاتر اندازه پنجره تراکم این است که گشتاور اول هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد نوسانات^۲ پنجره تراکم به دست نمی‌دهد، هرچند این نوسانات پراهمیت می‌باشند. گشتاور مرتبه دوم یا همان کواریانس از آن جهت حائز اهمیت است که عدم عدالت^۳ و نوسانات در شبکه در زمان کوتاه را نشان می‌دهد. ایده اصلی الگوریتم پیشنهادی، استفاده از تنظیم پارامترهای شبکه AIMD به منظور انتساب کواریانس اندازه پنجره تراکم به مقداری مطلوب می‌باشد. هدف از این روش، پیدا کردن پارامترهای بهینه کنترل تراکم در شبکه AIMD برای بهره‌پس‌خور ماتریسی است به طوری که تابع هزینه‌ای که بر اساس معیارهای مقاوم بودن و قیود انتساب کواریانس به دست آمده است، با الگوریتم ژنتیک تطبیقی^۴ AGA^۵ بهینه گردد. در واقع در [۶۲] کنترل تراکم توسط روش کنترل تصادفی جدید که ترکیبی از کنترل مقاوم، جایابی قطب^۶ و کنترل تابع چگالی احتمال می‌باشد، صورت گرفته است. با استفاده از این روش کنترل تراکم، معیارهای QoS^۷ شبکه بهبود یافته است. دقت و عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی توسط شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای متلب^۸ و NS^۹ نشان داده شده است.

۷- کاربرد در سیستم‌های کوانتومی

در این بخش به مطالعه پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه کنترل سیستم‌های کوانتومی^۸ می‌پردازیم. تاریخچه تخمین و کنترل سیستم‌های کوانتومی به سال ۱۹۸۰ میلادی باز می‌گردد [۶۳-۶۵]. اولین کسی که تخمین کوانتومی را بر اساس نظریه مارتینگل^۹ و محاسبات کوانتومی توسعه داد، بلاو کین^{۱۰} بود [۶۵، ۶۶]. سپس در [۶۷] توسط ابداع محاسبات تصادفی کوانتومی، قانون کوانتومی ایتمو^{۱۱} و معادلات دیفرانسیل تصادفی کوانتومی^{۱۲} QSDE، نظریه تخمین توسعه یافت. در [۶۸-۷۰] نیز با استفاده از محاسبات تصادفی بر اساس نظریه احتمالات شرطی کوانتومی و قانون کوانتومی بیز^{۱۳}، معادلات تخمین کوانتومی بلاو کین به دست آمد.

یکی از مهمترین کاربردهای کنترل سیستم‌های کوانتومی، در توسعه محاسبات و پردازش اطلاعات کوانتومی به منظور تحقق و ساخت رایانه‌های کوانتومی است. معادلاتی که نمو^{۱۴} سیستم کوانتومی با نویز کوانتومی (فوتون^{۱۵}) را بیان می‌کند، معادلات دیفرانسیل تصادفی

¹ Acknowledgment bit

² Fluctuations

³ Unfairness

⁴ Adaptive Genetic Algorithm

⁵ Pole placement

⁶ Quality of Service

⁷ Matlab

⁸ Quantum

⁹ Martingale theory

¹⁰ Belavkin

¹¹ Itô

¹² Quantum Stochastic Differential Equation

¹³ Bayes

¹⁴ Evolution

¹⁵ Photon

¹⁶ Open quantum system

¹⁷ Quantum trajectory

¹⁸ Qubit

¹⁹ Switching

²⁰ Coherence

²¹ Dissipative

²² Time-scales

²³ Non-markovian

²⁴ Non-commutative

²⁵ Fundamental

²⁶ Quantum Networks

²⁷ Hamilton-Jacobi-Bellman

پیشنهاد شده است. این فیلتر، پارامتر نامعین را توسط سخت‌افزار اضافی تخمین زده و به منظور حصول عملکرد مناسب در تخمین، الگوریتم فیلتر را به طور تطبیقی تغییر می‌دهد. مقاوم بودن این فیلتر در قالب خطای تخمین ارزیابی شده و با روش عددی نشان داده شده است.

در [۸۴] کران کرامر-رانو^{۱۰} کوانتومی برای حساسیت محاسبه شده است که می‌توان توسط آن، یک و یا چندین پارامتر را که در یک حالت گوسی سراسری تک-مودی^{۱۱} رمزگذاری^{۱۲} شده‌اند تخمین زد. این فرمول برای تخمین فاز، خلوص^{۱۳}، تلفات^{۱۴}، دامنه^{۱۵} و فشردگی^{۱۶} به کار گرفته شده است. در حالتی که چندین پارامتر به صورت همزمان تخمین زده می‌شوند، ماتریس اطلاعات فیشر کوانتومی^{۱۷} ارائه می‌گردد. نتیجه روش پیشنهادی در [۸۴] تشکیل یک پاسخ کامل برای مسئله جستجوی بهترین حساسیت اندازه‌گیری‌ها بر اساس یک حالت گوسی تک-مودی است.

۸- کاربرد در رباتیک

در این بخش به مطالعه کاربرد نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در رباتیک می‌پردازیم. بدین منظور پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه مکان‌یابی، شناسایی و کنترل تصادفی ربات‌ها را بررسی می‌کنیم. ابتدا مروری می‌کنیم بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه کنترل تصادفی ربات‌ها. در [۸۵] یک کنترل‌کننده تصادفی و یک کنترل‌کننده پیش‌نمایشی^{۱۸} برای کنترل حرکت دارای n درجه آزادی بازوی^{۱۹} ربات‌ها با هم ترکیب شده‌اند. رفتار این دو کنترل‌کننده در حضور اغتشاش‌های تصادفی و معین نشان داده شده است. کنترل‌کننده پیش‌نمایشی پیشنهادی به صورت برون‌خطی^{۲۰} به کار گرفته شده و مسئله بهینه برای یک مسیر حرکت از پیش تعیین شده حل شده است. در حالی که طراحی کنترل‌کننده تصادفی بر اساس کنترل مینیم واریانس صورت گرفته و از روش حداقل مربعات برای تخمین پارامترهای کنترل‌کننده تصادفی استفاده شده است. برای ارزیابی عملی بودن و مقاوم بودن این دو کنترل‌کننده و همچنین دقت ردیابی آن‌ها از شبیه‌سازی استفاده شده است. در [۸۶] نیز به طراحی کنترل‌کننده پسخور بهینه برای ربات در حضور نامعینی‌های تصادفی در شرایط اولیه پرداخته شده است. روش پیشنهادی از یک تابع هزینه میانگین^{۲۱} استفاده نموده و هزینه کنترل اولیه و خطای ردیابی را ارزیابی می‌کند. پارامترهای تنظیم‌کننده^{۲۲} طوری

دیفرانسیل تصادفی کوانتومی به دست آمده و اصل بهینگی بلمن برای سیستم‌های کوانتومی باز حاصل شده است. تابع هزینه مشاهده‌گر کوانتومی که قرار است کمینه گردد، عبارت است از یک چندجمله‌ای غیرجایابی پذیر از عملگر کوانتومی^۱. این روش برای شبکه‌های نوری کوانتومی^۲ قابل استفاده است.

در [۷۵] کنترل پایدارساز سراسری مسیر کوانتومی با حالت‌های تعادل چندگانه بررسی شده است. بدین منظور سیستم کوانتومی تصادفی با حالت تخمین‌یافته (مسیر کوانتومی) که چندین نقطه تعادل دارد، به منظور طراحی کنترل‌کننده پایدارساز سراسری مورد مطالعه قرار گرفته است. قانون کنترلی که در [۷۵] طراحی شده است، رسیدن سیستم را به تنها یک نقطه از چندین نقطه تعادل تضمین می‌کند. به منظور بررسی روش پیشنهادی پایدارسازی سراسری از شبیه‌سازی روی یک اتم دارای اسپین^۳ نیم (شامل دو نقطه تعادل) که به عنوان بیت کوانتومی کاربرد گسترده‌ای در محاسبات کوانتومی دارد، استفاده شده است.

در [۷۹] فرآیندهای پیوسته‌زمان مشاهدات در سیستم‌های کوانتومی توصیف شده‌اند و مسئله بهینه‌سازی با هدف به دست آوردن بهترین حالت کوانتومی a-posteriori در نظر گرفته شده است. همچنین این واقعیت که فیلترینگ بهینه یک سیگنال کوانتومی مارکوفی با نویز کوانتومی گوسی سفید را می‌توان توسط یک فیلتر خطی مارکوفی توصیف نمود، اثبات شده است.

در [۸۰] برای از پیش رو برداشتن محدودیت هایزنبرگ^۴ در مغناطیس‌سنجی اتمی^۵، روشی بر اساس ترکیب اندازه‌گیری پیوسته و فیلتر کالمن کوانتومی ارائه شده است.

در [۸۱] مطالعه جامعی روی دستاوردهای نظری و عملی در زمینه تخمین حالت‌ها در سیستم‌های کوانتومی صورت گرفته است. به طور مثال روش پیشینه‌شبه‌بافت^۶ ML برای تخمین حالت‌های کوانتومی شامل تخمین فرآیندهای کوانتومی و تخمین مشاهدات کوانتومی بررسی شده است.

در [۸۲] یک فیلتر تصادفی کوانتومی با مدل‌سازی پاسخ یک شبکه عصبی^۷ توسط معادله موج شرودینگر^۸ ارائه شده است. این فیلتر با فیلترهای متداول مانند فیلتر کالمن مقایسه شده است. دقت این روش در بدون نویز نمودن یک سیگنال DC در مقایسه با فیلتر کالمن هزار مرتبه بهتر بوده است. مهمترین خاصیت این فیلتر این است که هیچ‌گونه فرضی را در مورد شکل و طبیعت سیگنال و نویز در نظر نمی‌گیرد. در [۸۳] نیز یک فیلتر کالمن کوانتومی مقاوم برای سیستم نوری^۹ با پارامتر نامعین

¹⁰ Cramér-Rao

¹¹ Single-mode

¹² Encode

¹³ Purity

¹⁴ Loss

¹⁵ Amplitude

¹⁶ Squeezing

¹⁷ Quantum Fisher information matrix

¹⁸ Preview

¹⁹ Manipulator

²⁰ Offline

²¹ Expected cost function

²² Regulator

¹ Quantum operator

² Quantum optical networks

³ spin

⁴ Heisenberg limit

⁵ Atomic magnetometry

⁶ Maximum Likelihood

⁷ Neural lattice

⁸ Schrodinger wave equation

⁹ Optical system

در [۹۱] مسأله تخمین پارامترهای نامعین مدل غیرخطی جعبه-خاکستری^{۱۳} مطالعه شده است. روش پیشنهادی بر اساس تخمین تابع پاسخ فرکانسی^{۱۴} FRF در تعدادی از نقاط کار می‌باشد. مدل غیرخطی جعبه-خاکستری نیز در همان نقاط کار خطی‌سازی شده و منتج به تابع پاسخ فرکانسی پارامتری گشته است. پارامترهای بهینه توسط کمینه‌سازی اختلاف بین توابع پاسخ فرکانسی پارامتری و غیرپارامتری به دست آمده‌اند. طرزکار روش پیشنهادی توسط تخمین پارامترهای ارتجاع‌پذیری^{۱۵} یک ربات صنعتی نشان داده شده و نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده مفید بودن روش شناسایی پیشنهادی بوده است.

در [۹۲] روش شناسایی^{۱۶} IV برای شناسایی ربات‌های صنعتی صلب^{۱۷} معرفی گشته است. به منظور همگرایی سریع، بهره‌های کنترل کننده مطابق تخمین IV به‌روزرسانی شده‌اند. مؤثر بودن روش پیشنهادی توسط آزمایش عملی روی یک ربات صنعتی با ۴ درجه آزادی نشان داده شده است. در [۹۳] یک روش کالیبراسیون^{۱۸} برای افزایش دقت موقعیت بازوی ربات‌ها پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی یک مدل سینماتیکی برای ربات به دست آمده و پارامترهای هندسی ربات توسط الگوریتم EKF شناسایی شده‌اند.

در [۹۴] به شناسایی روی خط پارامترهای کیلومترشمار یک ربات متحرک پرداخته شده است. بدین منظور الگوریتم EKF توسط مقادیر نامی کیلومترشمار طراحی گشته است. یک مدل حلقه‌باز ثانویه که فیلتر EKF را ردیابی می‌کند نیز در نظر گرفته شده است. پارامترهای سیستم ردیاب حلقه‌باز، با هدف ردیابی حالات سیستم که توسط EKF تخمین زده شده‌اند، به‌روزرسانی می‌گردند. با آموزش پارامترهای سیستم حلقه‌باز، مقادیر نامی پارامترهای EKF نیز به‌روزرسانی می‌شوند. بنابراین یک سیستم حلقه‌بسته آشناری^{۱۹} پیشنهاد شده است. در [۹۵] نیز شناسایی روی خط مدل ربات متحرک توسط EKF انجام شده است.

در ادامه به مرور تحقیقات صورت گرفته در زمینه مکان‌یابی ربات می‌پردازیم. در [۹۶،۹۷] یک روش مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان^{۲۰} SLAM ترکیبی بر اساس فیلتر پیشنهاد شده است. این روش از ترکیب الگوریتم EKF و شبکه عصبی RBF تشکیل شده است. مزیت این روش نسبت به روش EKF تنها، جبران خطای ناشی از فرآیند خطی‌سازی است. در [۹۸] به مکان‌یابی یک ربات متحرک بر اساس فناوری رادیویی^{۲۱} UBW و فیلتر ذره‌ای پرداخته شده است. بدین منظور تعدادی آزمایش در محیط‌ها و شرایط مختلف صورت گرفته و طبق نتایج این آزمایش‌ها، یک مدل احتمالاتی به دست آمده است. سپس یک فیلتر ذره‌ای با

انتخاب می‌شوند که تابع هزینه کمینه گردد. توسط روش‌های بهینه‌سازی تصادفی، کنترل پس‌خور بهینه و مقاوم به دست آمده است. در نهایت عملکرد روش پیشنهادی با مقایسه با کنترل‌کننده PD^۱ آزمایش شده است.

در [۸۷] روشی برای طراحی کنترل‌کننده بهینه تطبیقی تصادفی برای ربات‌های کم عملگر^۲ ارائه شده است. ربات‌های کم عملگر، ربات‌هایی هستند که در آن‌ها تعداد درجات آزادی بیشتر از تعداد ورودی‌های کنترلی می‌باشند. در این روش سیستم به دو زیرسیستم تقسیم شده است. زیرسیستم اول شامل تعداد $n - 1$ مفصل^۳ دارای عملگر^۴ بوده و زیرسیستم دوم شامل یک مفصل بدون عملگر^۵ می‌باشد. برای زیرسیستم اول یک مدل مرجع توسط روش بهینه‌سازی LQR^۶ به دست آمده است. برای مفصل زیرسیستم دوم نیز شبکه عصبی RBF^۷ برای طراحی کنترل مرجع تطبیقی استفاده شده است. پایداری و ردیابی بهینه روش پیشنهادی توسط تحلیل نظری اثبات شده و شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده کارایی روش کنترلی بوده‌اند.

در ادامه به مرور پژوهش‌های انجام شده در زمینه شناسایی ربات می‌پردازیم. در [۸۸] یک مرور کلی بر روی تحقیقات صورت گرفته روی شناسایی پارامترهای ربات‌های سری و موازی انجام شده است. به این ترتیب که مدل تحت شناسایی، روش بهینه‌سازی دینامیک مسیر، روش‌های سنجش اعتبار^۸ مدل‌های تخمین زده شده و کاربردهای شناسایی پارامتری دینامیک سیستم معرفی شده‌اند. نتایج به دست آمده در [۸۸] قابل استفاده برای محققان و سازندگان ربات جهت انتخاب صحیح روش شناسایی می‌باشند.

در [۸۹] آزمایشی به منظور مقایسه روش تخمین WLS^۹ و فیلتر EKF برای شناسایی دینامیک ربات انجام شده است. در [۹۰] یک الگوریتم تخمین تصادفی بر اساس روش ترکیبی^{۱۱} GHMM ارائه شده است. از این الگوریتم برای شناسایی پارامترهای دینامیک غیرخطی و مکان‌یابی ربات متحرک چرخ‌دار استفاده شده است. مدل‌های تصادفی دینامیکی و سینماتیکی^{۱۲} ربات و محیط با در نظر گرفتن نامعینی‌ها معرفی گشته‌اند. سپس برای شناسایی مدل تصادفی غیرخطی از روش GHMM استفاده شده است. حالت ربات توسط بهینه‌سازی پاسخ بیشینه‌شبهت و به کمک الگوریتم ژنتیک^{۱۱} تخمین زده شده است.

¹ Proportional Derivative

² Under-actuated

³ Joint

⁴ Fully actuated

⁵ Unactuated

⁶ Linear Quadratic Regulator

⁷ Radial Basis Function

⁸ Model Validation

⁹ Weighted Least Squares

¹⁰ Hybrid

¹¹ Genetic-Hidden Markov Model

¹² Kinematic

¹³ Gray-Box

¹⁴ Frequency Response Function

¹⁵ Elasticity

¹⁶ Instrumental Variable

¹⁷ Rigid

¹⁸ Calibration

¹⁹ Cascaded

²⁰ Simultaneous Localization And Mapping

²¹ Ultra-Wide-Band

در [۱۰۳] نیز مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان CSLAM^۸ توسط چند ربات بر اساس فیلتر UKF^۹ انجام شده است. اطلاعات مکان‌یابی و نقشه‌برداری که توسط ربات حکمران^{۱۰} به دست آمده، با ربات‌های زیردست^{۱۱} به اشتراک گذاشته می‌شوند. ربات‌های زیردست در این روش تنها به مکان‌یابی موقعیت خود می‌پردازند. روش پیشنهادی منجر به کاهش بار پردازشی ربات‌های زیردست گشته و کاهش زمان محاسبات و پیچیدگی سخت‌افزار آن‌ها را نتیجه می‌دهد.

در [۱۰۴] به مکان‌یابی ربات توسط ترکیب فیلتر کالمن و فیلتر EFIR^{۱۲} به روش مثلث‌بندی^{۱۳} پرداخته شده است. در صورت عدم شناخت شرایط اولیه و نویز، استفاده از فیلتر EKF برای مکان‌یابی منجر به تخمین‌های غیر قابل قبول می‌گردد. در صورت استفاده از فیلتر EFIR نیاز به اطلاعات نویز مرتفع می‌گردد ولی همچنان n نقطه اولیه از اندازه‌گیری‌های خطی مورد نیاز خواهد بود. بنابراین در [۱۰۴] از n تخمین اولیه توسط EKF استفاده شده و اطلاعات نویز و شرایط اولیه برای تخمین‌های بعدی در اختیار فیلتر EFIR قرار داده شده‌اند.

در [۱۰۵] روشی برای تخمین جهت ربات و انحراف ژيروسکوپ بر اساس فیلتر آبخاری کالمن-ذره‌ای پیشنهاد شده است. فضای حالت این سیستم شامل سینماتیک و دینامیک سرعت زاویه‌ای ربات و دینامیک انحراف ژيروسکوپ می‌باشد. این سیستم غیرخطی بوده و ابعاد بالایی دارد. بنابراین به منظور کاهش پیچیدگی، تجزیه این سیستم به دو زیرسیستم آبخاری و طراحی رؤیت‌گرهای آبخاری جداگانه پیشنهاد شده است. این طراحی منجر به تنظیم ساده‌تر و کاهش زمان محاسباتی می‌گردد. برای زیرسیستم گوسی و خطی شامل سرعت زاویه‌ای و دینامیک انحراف ژيروسکوپ از فیلتر کالمن استفاده شده است. سپس سرعت زاویه‌ای که تخمین زده شده به عنوان ورودی مشاهده‌گر دوم که یک فیلتر ذره‌ای است، استفاده می‌شود.

۹- کاربرد در ناوبری

همان‌طور که می‌دانیم، ناوبری^{۱۴} به معنای تعیین موقعیت، سرعت و مسافت پیموده شده توسط یک جسم یا وسیله نقلیه نسبت به یک سیستم مختصاتی می‌باشد [۱۰۶]. این وسیله نقلیه می‌تواند یک کشتی، هواپیما، زیردریایی، ماهواره و یا فضاپیما باشد. در ادامه مروری بر سابقه پژوهشی استفاده از نظریه تخمین در سیستم‌های ناوبری انجام می‌دهیم.

در یک روش ناوبری که ناوبری اینرسی^{۱۵} نام دارد، با استفاده از حسگرهای حرکت مانند شتاب‌سنج و حسگرهای چرخش مانند ژيروسکوپ و توسط عملیات ریاضی و فیلترینگ به تخمین موقعیت،

ترکیب اطلاعات به دست آمده از بیکن^۱‌های رادیویی UWB و کیلومتر شمار ربات، به تخمین موقعیت ربات می‌پردازد.

در [۹۹] مکان‌یابی یک ربات متحرک در محیط شناخته‌شده توسط فیلتر کالمن کوانتیزه‌شده^۲ انجام شده است. محیط مورد نظر مجهز به برجسب^۳‌های RFID^۴ می‌باشد. ربات می‌تواند حضور این برجسب‌ها را با عبور از نزدیکی‌شان تشخیص داده و اطلاعات حاصله را با اطلاعات دریافتی از حسگرهای خود (کیلومتر شمار) ترکیب نماید. از آن‌جا که اندازه‌گیری‌های RFID دارای نویز غیرگوسی بالایی می‌باشند، معمولاً از فیلتر ذره‌ای برای ترکیب اطلاعات RFID و حسگرها استفاده می‌شود؛ هرچند فیلترهای ذره‌ای بار محاسباتی بالایی را در پی دارند. بنابراین در [۹۹] استفاده از فیلتر کالمن کوانتیزه‌شده به منظور کاهش بار محاسباتی در مقایسه با فیلترهای ذره‌ای استفاده شده است.

اطلاعات کیلومتر شمار ربات که در مکان‌یابی استفاده می‌شود، ممکن است به علت لغزش ربات دچار خطا گردد. بنابراین استفاده از یک ژيروسکوپ^۵ ارزان‌قیمت به همراه روش‌های فیلتر کالمن در بسیاری از پژوهش‌ها پیشنهاد شده است. هرچند در صورت استفاده از فیلتر کالمن استاندارد، محدودیت‌ها و قیود فیزیکی ربات در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین در [۱۰۰] به مکان‌یابی ربات متحرک با استفاده از ژيروسکوپ و فیلتر کالمن با در نظر گرفتن محدودیت‌های ربات و یک روش بهینه‌سازی مقید پرداخته شده است. مشاهده‌پذیری حالت در این روش توسط افزودن متغیرهای حالت بهبود یافته است.

در [۱۰۱] حل مسأله مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان توسط چند ربات بر اساس فیلتر ذره‌ای RBPF^۶ انجام شده است. در این روش هر ربات دارای یک دوربین بوده و قادر به مشاهده علامتگذاری^۷‌های بصری محیط می‌باشد. هر کدام از ربات‌ها در مسیری جداگانه در محیط حرکت کرده و اندازه‌گیری علامت‌ها را جمع‌آوری می‌نمایند. سپس با استفاده از فیلتر ذره‌ای RBPF و اطلاعات جمع‌آوری شده توسط تمامی ربات‌ها یک نقشه واحد از محیط به دست می‌آید.

در [۱۰۲] به پیاده‌سازی عملی مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان یک ربات بر اساس EKF و توسط حسگرهای بینایی پرداخته شده است. این سیستم با موفقیت در محیط آزمایشگاهی پیاده‌سازی و آزمایش شده است. در این آزمایش، ربات در محیط به حرکت درآمده و به نقاط مشخصی هدایت شده و موفق به ایجاد نقشه‌ای از محیط پیرامونش گشته است. نتایج این آزمایش نشان‌دهنده این بوده است که موقعیت تخمین زده شده علامت‌ها در محیط روی نقشه حاصله، انطباق خوبی با موقعیت این علامت‌ها در محیط واقعی داشته است.

⁸ Coordinative Simultaneous Localization And Mapping

⁹ Unscented Kalman Filter

¹⁰ Master

¹¹ Slave

¹² Extended Finite Impulse Response

¹³ Triangulation

¹⁴ Navigation

¹⁵ Inertial Navigation

¹ Beacon

² Quantized

³ Tag

⁴ Radio Frequency IDentification

⁵ Gyroscope

⁶ Rao-Blackwellized Particle Filter

⁷ Landmark

اساس روش بهینه‌سازی BBO^{۱۲} برای ناوبری یک وسیله زمینی بدون سرنشین پیشنهاد گشته است و در [۱۱۳] فیلتر کالمن WMFKF^{۱۳} برای ناوبری وسیله هوایی بدون سرنشین پیشنهاد شده است. در این روش خطای اندازه‌گیری حسگرهای مکان‌یابی بی‌سیم به عواملی چون مسافت حرکت، اثرات چندمسیری^{۱۴} و نویز حسگرها وابسته است. در روش WMFKF پیشنهادی، اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی مسافت طی شده توسط سیگنال، وزن‌دهی می‌گردند. این روش پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به فیلتر کالمن استاندارد دارد. در [۱۱۴] نیز از فیلتر تطبیقی مربع‌سازی مبتنی بر جدول پراکنده^{۱۵} برای ناوبری نسبی^{۱۶} یک فضایما استفاده گشته است.

از آن‌جا که تأخیر یونوسفریک^{۱۷} بر روی سیگنال‌های ناوبری ماهواره‌ها تأثیرگذار بوده و نیاز به اصلاح دارد، در [۱۱۵] به تخمین این تأخیر با استفاده از فیلتر کالمن بر اساس اثر داپلر^{۱۸} پرداخته شده است. بدین منظور محققان در [۱۱۵] با استفاده از اطلاعات GPS^{۱۹} ماهواره‌های موجود در مدار زمین در طول چهار روز، تخمین تأخیر مذکور را در مودهای پیوسته و کالیبره‌شده انجام داده‌اند.

در [۱۱۶] به تخمین دینامیک وسیله هوایی بدون سرنشین توسط فیلتر کالمن تطبیقی مقاوم RAKF^{۲۰} در حضور خطاهای حسگری و عملگری پرداخته شده است. فیلتر RAKF با به‌کارگیری الگوریتم‌های تطبیقی برای کواریانس نویز فرآیند و نویز اندازه‌گیری به تطبیق خود در برابر خطاهای حسگری و عملگری می‌پردازد. بدین ترتیب این فیلتر در برابر خطاها و حتی از کار افتادن حسگرها و یا عملگرها مقاوم می‌باشد. عملکرد فیلتر RAKF توسط شبیه‌سازی و تخمین حالت یک وسیله هوایی بررسی گشته است.

در [۱۱۷] نیز فیلتر کالمن جدیدی بر اساس ترکیب اطلاعات^{۲۱} و سوئیچینگ و با استفاده از فیلتر ISRUKF^{۲۲} پیشنهاد شده است. سپس با استفاده از این فیلتر به ناوبری خودمختار یک فضایمای مانوردار پرداخته شده است.

در [۱۱۸، ۱۱۹] ناوبری وسایل زیرآبی توسط نسخه‌های تغییر یافته فیلتر کالمن مورد پژوهش قرار گرفته است. به این صورت که در [۱۱۸] از فیلتر EKF برای ناوبری یک وسیله زیرآبی خودمختار استفاده شده است. در این روش داده‌های مربوط به جهت حرکت، ارتفاع، سرعت و اطلاعات GPS، بردار حالت را تشکیل می‌دهند. در [۱۱۹] نیز به ناوبری

سرعت و جهت حرکت وسیله نقلیه پرداخته می‌شود. در [۱۰۷] مطالعه جامعی در راستای کاربرد نسخه‌های مختلف فیلتر کالمن در سیستم ناوبری اینرسی برای یک بالون بدون سرنشین انجام شده است. نتیجه این مطالعه نشان‌دهنده این بوده است که بهترین مصالحه بین دقت و قدرت پردازش هنگامی به دست می‌آید که از دو فیلتر EKF متوالی استفاده گردد. فیلتر اول جهت حرکت بالون و فیلتر دوم سرعت و موقعیت بالون را تخمین می‌زند.

در [۱۰۸] نیز یک فیلتر UKF تغییر یافته برای سیستم‌های تصادفی غیرخطی پیشنهاد گشته است. از این فیلتر برای تعیین خودمختار^۱ مدار ماهواره‌های موجود در جو زمین استفاده شده است. همچنین در [۱۰۸] نشان داده شده است که طراحی ماتریس کواریانس نویز نقش اساسی در افزایش پایداری فیلتر دارد. بنابراین یک روش طراحی برای ماتریس کواریانس توسط نسخه تغییر یافته UKF پیشنهاد شده است.

یکی دیگر از پژوهش‌هایی که با استفاده از فیلترینگ به ناوبری پرداخته است [۱۰۹] می‌باشد که در آن نسخه‌ای تغییر یافته از فیلتر کالمن نقطه‌سیگما^۲ برای تخمین جهت^۳ و موقعیت دو فضایما^۴ (پیش‌رو^۵ و دنباله‌رو^۶) ارائه شده است. این فیلتر به علت تضمین مثبت نیمه‌معین^۷ بودن تمامی ماتریس‌های کواریانس، پایداری بالایی دارد. در روش ناوبری پیشنهادی، تمامی متغیرهای حالت فضایمای پیش‌رو شناخته شده فرض شده‌اند. در حالی که متغیرهای حالت نسبی با استفاده از مشاهدات سرعت زاویه‌ای و شتاب فضایمای دنباله‌رو، تخمین زده می‌شوند. روش پیشنهادی، خطای تخمین موقعیت و جهت نسبی کمتر و همگرایی سریع‌تری را نسبت به فیلتر EKF استاندارد از خود نشان داده است.

در [۱۱۰] نیز روش تخمین وزن یافته تصادفی^۸ جدیدی برای موقعیت‌یابی و ناوبری دینامیک ارائه گشته است. این روش با استفاده از مفهوم تخمین وزن یافته تصادفی به تخمین ماتریس‌های کواریانس نویزهای مشاهدات و نویزهای متغیرهای حالت سیستم با هدف کنترل اغتشاشات مشاهدات و خطاهای مدل‌سازی سینماتیک می‌پردازد. در [۱۱۱] نیز نسخه‌ای تغییر یافته از فیلتر کالمن-ذره‌ای توسعه یافته به نام MEKPF^۹ برای ناوبری نسبی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده دقت و عملکرد خوبی در ناوبری یک فضایما بوده است.

در [۱۱۲] و [۱۱۳] به ترتیب به ناوبری وسیله نقلیه زمینی بدون سرنشین UGV^{۱۰} و وسیله هوایی بدون سرنشین UAV^{۱۱} پرداخته شده است. به این صورت که در [۱۱۲] روشی برای تخمین کواریانس نویز بر

¹² Biogeography-Based Optimization

¹³ Weighted Measurement Fusion Kalman Filter

¹⁴ Multipath

¹⁵ Adaptive Sparse Grid Quadrature Filter

¹⁶ Relative Navigation

¹⁷ Ionospheric

¹⁸ Doppler

¹⁹ Global Positioning System

²⁰ Robust Adaptive Kalman Filter

²¹ Information fusion

²² Iterated Square Root Unscented Kalman Filter

¹ Autonomous

² Sigma-Point Kalman Filter

³ Attitude

⁴ Spacecraft

⁵ Leader

⁶ Follower

⁷ Semi-Positive Definite

⁸ Random Weighting Estimation

⁹ Modified Extended Kalman Particle Filter

¹⁰ Unmanned Ground Vehicle

¹¹ Unmanned Aerial Vehicle

از چهار گروه LS^{11} ، ES^{12} ، EA^{13} و PSO انتخاب شده‌اند. در [۱۲۳] روشی برای تخمین همزمان پارامترها و متغیرهای حالت موتورهای القایی بر اساس یک رویکرد مشابه کالمن ارائه گشته است. در [۱۲۴] با استفاده از دو الگوریتم EKF و سوئیچینگ بین آن‌ها، به تخمین همزمان مقاومت روتور و استاتور^{۱۴} و کنترل بدون حسگر سرعت^{۱۵} پرداخته شده است. در این روش پس از هر n بازه زمانی از یک الگوریتم EKF به دیگری سوئیچ می‌شود. بنابراین توسط این روش می‌توان تعداد پارامتر بیشتری را نسبت به روش‌هایی که از تنها یک EKF استفاده می‌کنند، تخمین زد. در این روش، تخمین بدون حسگر مقاومت روتور و استاتور در حالت گذرا و ماندگار و در سرعت بالا و پایین و همچنین تخمین گشتاور^{۱۶} نامعین بار و سرعت و شار^{۱۷} به طور همزمان به دست می‌آیند. در [۱۲۵] نیز الگوریتمی بر اساس تخمین گر کالمن دو طبقه‌ای^{۱۸} برای تخمین غیرخطی با کاربرد تخمین شار و سرعت روتور یک موتور القایی پیشنهاد گشته است. استفاده از این الگوریتم منجر به کاهش ۲۵ درصدی عملیات حسابی شده و استفاده از میکروکنترلرهای ارزان‌تر را ممکن می‌سازد. در [۱۲۶] نیز به مقایسه فیلتر کالمن و فیلتر ذره‌ای در تخمین بردار حالت یک موتور DC و کنترل آن پرداخته شده است. در [۱۲۷] نیز یک روش جدید برای تخمین روی خط مقاومت استاتور و روتور موتور القایی پیشنهاد گشته است. در روش پیشنهادی، از یک الگوریتم EKF با دو ورودی مختلف که به طور متوالی به الگوریتم اعمال می‌شوند استفاده شده است. این دو ورودی از دو مدل مجزا برای موتور القایی که بر اساس تخمین مقاومت روتور و استاتور به دست آمده‌اند، حاصل می‌شوند. با استفاده از این روش به تخمین روی خط جریان استاتور، شار روتور، سرعت زاویه‌ای روتور، گشتاور بار و مقاومت روتور و استاتور و همچنین کنترل بدون حسگر سرعت موتور القایی پرداخته شده است. عملکرد این روش در حالات مختلف مانند تغییرات پله‌ای و یا خطی در سرعت مرجع، گشتاور بار و مقاومت روتور و استاتور و در سرعت‌های بالا و پایین ارزیابی شده است. این روش عملکرد بهتری را نسبت به روش ارائه شده در [۱۲۴] که از دو الگوریتم EKF استفاده می‌کند، نشان داده است. در [۱۲۸] نیز به طراحی یک رویکرد بهره‌بردار برای تخمین مقاومت روتور و استاتور پرداخته شده است.

در [۱۲۹] یک روش کنترل برداری بدون حسگر برای موتور القایی با تخمین سرعت روتور توسط EKF معرفی گشته است. این فیلتر طوری طراحی شده که خطای تخمین سرعت در حالت گذرا و ماندگار و در گستره وسیعی از سرعت، کوچک باشد. در این روش، گشتاور بار و سرعت روتور به طور همزمان تخمین زده شده‌اند. در این تخمین،

وسایل نقلیه زیرآبی توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی^۱ AUKF پرداخته شده است. آزمایش‌های عملی نشان‌دهنده برتری عملکرد این روش در کاهش خطای موقعیت و افزایش مقاومت در مقایسه با فیلتر EKF و UKF بوده‌اند.

در [۱۲۰] مسأله مکان‌یابی و ناوبری خودمختار یک سیستم وسیله هوایی بدون سرنشین چندگانه توسط روش‌های فیلترینگ توزیع‌یافته^۲ مورد مطالعه قرار گرفته است. در سیستم وسیله هوایی بدون سرنشین چندگانه در [۱۲۰] فرض بر این است که تعداد m وسیله نقلیه هوایی (هلیکوپتر) بدون سرنشین توسط n ایستگاه زمینی نظارت می‌شوند. رویکرد کلی روش پیشنهادی استفاده از یک فیلتر در هر یک از ایستگاه‌ها برای ردیابی وسایل هوایی بدون سرنشین توسط ترکیب اندازه‌گیری‌های به دست آمده از حسگرهای آن‌ها می‌باشد. سپس با ترکیب تخمین‌های حالت به دست آمده از همه فیلترهای توزیع‌یافته، یک تخمین نهایی برای هر وسیله هوایی بدون سرنشین به دست می‌آید. طبق این رویکرد، ابتدا با در نظر گرفتن گوسی بودن نویزها از فیلترهای EIF^۳ و UIF^۴ استفاده شده است. تخمین‌های به دست آمده توسط این دو فیلتر به ترتیب توسط یک کنترل‌کننده Flatness-Based استفاده می‌شود تا وسایل نقلیه هوایی در مسیرهای مطلوب حرکت کنند. همچنین در [۱۲۰] از فیلتر DPF^۵ با فرض غیرگوسی بودن اندازه‌گیری‌ها استفاده شده است. روش پیشنهادی با فیلتر DEIF^۶ پیاده‌سازی گشته و عملکرد روش پیشنهادی با فیلترهای DPF، EIF، UIF، DEIF نیز توسط شبیه‌سازی روی یک سیستم دارای دو وسیله هوایی بدون سرنشین و دو ایستگاه نظارت زمینی بررسی شده است.

۱۰- کاربرد در موتورهای الکتریکی

در این بخش به مطالعه روش‌های پیشنهادی در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی موتورهای الکتریکی می‌پردازیم.

در کنترل سرعت بدون حسگر^۷ موتور القایی^۸، پارامترهای موتور به خصوص مقاومت روتور^۹ تأثیر زیادی روی تخمین سرعت دارند. بنابراین در بسیاری از پژوهش‌ها به تخمین پارامترهای موتور پرداخته شده است. به طور مثال در [۱۲۱] تخمین مقاومت روتور در حالت گذرا، بر اساس الگوریتم حداقل میانگین مربعات^{۱۰} و الگوریتم تطبیقی انجام شده است. در [۱۲۲] به مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف برای شناسایی پارامترهای دو موتور القایی پرداخته شده است. این الگوریتم‌ها

¹ Adaptive Unscented Kalman Filter

² Distributed

³ Extended Information Filter

⁴ Unscented Information Filter

⁵ Distributed Particle Filter

⁶ Distributed Extended Information Filter

⁷ Sensorless

⁸ Induction motor

⁹ Rotor

¹⁰ Least Mean Square

¹¹ Local Search

¹² Evolution Strategies

¹³ Evolutionary Algorithms

¹⁴ Stator

¹⁵ Direct Vector Control

¹⁶ Torque

¹⁷ Flux

¹⁸ Two-stage

گشتاور بار به صورت یک پارامتر ثابت و سرعت روتور به صورت یک معادله حرکت در نظر گرفته شده‌اند.

در [۱۳۰] تخمین مقاومت شار و سرعت روتور در موتور القایی و کنترل بدون حسگر سیستم‌های کنترل حرکت^۱ در نظر گرفته شده است. در این روش از یک فیلتر کالمن مقاوم توصیف‌کننده^۲ مرتبه چهار برای تخمین سرعت توسط روش حداقل مربعات بازگشتی استفاده شده است. این فیلتر نامعینی‌های پارامتری موتور را در بر می‌گیرد. در [۱۳۱] نیز طراحی یک فیلتر کالمن مقدار-مختلط توسعه‌یافته^۳ ECKF برای تخمین حالت موتور القایی و کنترل بدون حسگر سیستم‌هایی که این نوع موتور در آنها به عنوان عملگر عمل می‌کند، انجام شده است. در روش پیشنهادی، از یک مدل مقدار-مختلط به منظور ساده‌سازی تحلیل رؤیت‌پذیری سیستم و تخمین مؤثرتر حالت استفاده شده است. تحلیل رؤیت‌پذیری این مدل، با نادیده گرفتن معادلات مکانیکی مدل موتور القایی انجام شده است. نادیده گرفتن این معادلات در حالتی که موتور سرعت ثابت دارد، فرضی معتبر است. تحلیل رؤیت‌پذیری در این حالت نسبت به مدل مقدار-واقعی ساده‌تر است، زیرا در این حالت می‌توان شرایط رؤیت‌پذیری را بر حسب بردارهای مقدار-مختلط جریان استاتور و روتور به دست آورد. به کارگیری این روش منجر به کاهش ۳۵ درصدی زمان محاسبات در مقایسه با فیلتر EKF استاندارد شده است.

در [۱۳۲] نیز یک روش شناسایی پارامتر بدون حسگر جدید برای موتورهای پله‌ای مغناطیس‌دائمی^۴ ارائه گشته است. در این روش فرض بر این بوده است که حسگرهای جریان در دسترس می‌باشند ولی حسگرهای مکانیکی وجود ندارند.

۱۱- کاربرد در سیستم‌های حمل و نقل هوشمند

سیستم‌های حمل و نقل هوشمند ITS^۵ به سیستم‌هایی گفته می‌شود که به ارائه خدماتی مانند امنیت و راحتی بیشتر در روش‌های مختلف حمل و نقل می‌پردازند. از کاربردهای این سیستم‌ها می‌توان تابلوهای اعلام سرعت مجاز متغیر، سیستم‌های جلوگیری از تصادف و ترافیک، چراغ‌ها و علائم رانندگی دینامیک و سیستم‌های اعلان وضعیت اضطراری در وسایل نقلیه را نام برد. در ادامه مروری بر سابقه پژوهشی در زمینه تخمین ترافیک که جزئی اساسی از مدیریت و کنترل ترافیک می‌باشد، انجام می‌دهیم.

در [۱۳۳] تخمین ترافیک با هدف پیش‌بینی روی خط ترافیک انجام شده و یک فیلتر ذره‌ای بر اساس مدل ترافیک آزادراه^۶ به دست آمده است. در این روش، آزادراه به صورت شبکه‌ای از اجزاء در نظر گرفته شده است که هر جزء عبارت از بخشی از شبکه ترافیک می‌باشد. ترافیک

آزادراه به صورت یک سیستم تصادفی ترکیبی در نظر گرفته شده است. به این معنا که هر بخش ترافیک شامل تعدادی متغیر حالت پیوسته و گسسته است که با بخش‌های مجاور در تعامل می‌باشد.

در [۱۳۴، ۱۳۵] با استفاده از داده‌های واقعی از ترافیک آزادراه به تخمین حالت ترافیک توسط مدل‌سازی تصادفی جریان ترافیک^۷ و فیلتر EKF پرداخته شده است. ویژگی اصلی روش پیشنهادی در این دو مقاله، تخمین روی خط همزمان پارامترهای مهم مدل و متغیرهای جریان ترافیک مانند سرعت متوسط، سرعت مجاز و تراکم می‌باشد. از مزایای روش پیشنهادی نیز می‌توان عدم نیاز به کالیبراسیون^۸ قبلی مدل و انطباق خودکار آن نسبت به تغییرات شرایطی مانند آب و هوا را نام برد.

در [۱۳۶] مسأله تخمین جریان ترافیک آزادراه توسط فیلتر UKF در نظر گرفته شده است. در این روش نیز آزادراه به صورت شبکه‌ای از اجزاء مختلف در نظر گرفته شده است. توسعه ترافیک در هر بخش به صورت یک سیستم دینامیکی تصادفی مدل‌سازی شده که تحت تأثیر متغیرهای حالت بخش‌های مجاور می‌باشد. کارایی فیلتر UKF پیشنهادی توسط داده‌های واقعی و ساختگی^۹ ترافیک، با روش فیلتر ذره‌ای مقایسه گشته است.

در [۱۳۷] تخمین ترافیک آزادراه توسط فیلتر ذره‌ای و بر اساس مدل^{۱۰} CTM ترافیک، انجام شده است. در [۱۳۸] نیز به تخمین حالت ترافیک توسط فیلتر UKF و سوئیچینگ بین مدل‌های خطی پرداخته شده است. روش دیگری که برای تخمین حالت ترافیک آزادراه در [۱۳۹] ارائه شده است بر اساس فیلتر EKF می‌باشد. در این روش از مدل مرتبه اول ترافیک در مختصات لاگرانژی^{۱۱} استفاده شده است.

از آنجا که فیلتر EKF در کاربردهای زمان-واقعی و شبکه‌های بزرگ ترافیک عملکرد کندی دارد، در [۱۴۰] راهکاری برای غلبه بر این مشکل ارائه شده است. در این روش از فیلتر EKF محلی^{۱۲} (L-EKF) برای تخمین حالت ترافیک زمان-واقعی مقیاس‌پذیر^{۱۳} استفاده شده است. به این معنا که از تمامی اطلاعات در دسترس برای به‌روزرسانی حالت استفاده نمی‌شود. نتایج آزمایش نشان‌دهنده این بوده است که روش پیشنهادی در مقایسه با EKF معمولی سریع‌تر بوده و در مقابل اندازه شبکه ترافیک مقیاس‌پذیری بهتری داشته است. همچنین دقت تخمین در روش L-EKF نزدیک به دقت EKF معمولی بوده است.

در [۱۴۱] با توسعه یک مدل پیش‌بین و ترکیب مدل^{۱۴} GMM و فیلتر کالمن به پیش‌بینی روی خط امنیت ترافیک در بزرگراه‌ها پرداخته شده است. در [۱۴۲] به منظور فراهم آوردن سیستم حمل و نقل هوشمند، به آشکارسازی و تشخیص علائم رانندگی در جاده‌ها توسط روش

⁷ Traffic flow

⁸ Calibration

⁹ Synthetic

¹⁰ Cell-Transmission Model

¹¹ Lagrangian coordinates

¹² Localized-EKF

¹³ Scalable

¹⁴ Gaussian Mixture Model

¹ Motion control systems

² Descriptor-type

³ Extended Complex Kalman Filter

⁴ Permanent magnet stepper motors

⁵ Intelligent Transportation System

⁶ Freeway

در [۱۴۷] خانواده جدیدی از رؤیت‌گرها به نام رؤیت‌گر ضربه‌ای تطبیقی AIO^۷ پیشنهاد شده است. این رؤیت‌گر قادر است تخمین پیوسته حالت‌های یک سیستم غیرخطی پیوسته را با استفاده از خروجی سیستم در زمان‌های ضربه‌ای گسسته به دست آورد. در [۱۴۸] نیز رؤیت‌گر ضربه‌ای تطبیقی جدیدی با توانایی تخمین حالات و پارامترهای ناشناخته یک سیستم نامعین با استفاده از خروجی سیستم در زمان‌های گسسته ارائه گشته است. همچنین پایداری سیستم خطای تخمین حالت اثبات شده و حد بالایی برای بیشینه بازه‌های پرش‌ها به دست آمده است. رؤیت‌گر پیشنهادی برای همزمان‌سازی یک سیستم آشوبی استفاده شده است.

۱۳- مسائل باز

در بخش‌های پیشین با مرور پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققان، کاربردهای مختلف نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در سیستم‌های صنعتی مورد مطالعه قرار گرفت. در این بخش تعدادی از مسائل باز در این زمینه‌ها به منظور گشایش افق‌های جدید برای پژوهش‌های آتی محققان، معرفی می‌شوند.

یکی از مواردی که تا کنون آن‌گونه که می‌بایست مورد توجه محققان واقع نشده است، مسأله کنترل و همچنین تخمین متغیرهای حالت و یا پارامترهای سیستم‌هایی است که دارای فقر داده^۸ می‌باشند. سیستم‌های دارای فقر داده به سیستم‌هایی گفته می‌شود که در آن‌ها کیفیت و یا کمیت اطلاعات موجود از سیستم ناکافی می‌باشد. عوامل مختلفی ممکن است منجر به فقر داده شوند. به طور مثال ممکن است تعداد حسگرهای به کار رفته برای یک سیستم کم باشد و یا فرکانس کاری حسگرها در مقایسه با دینامیک فرآیند پایین باشد. در این حالت مدل‌های به دست آمده برای این سیستم‌ها دارای نامعینی زیادی خواهند بود. سیستم‌های بسیاری از جمله سیستم‌های مهندسی، اقتصادی و خصوصاً بیولوژیکی را می‌توان به عنوان سیستم‌های دارای فقر داده توصیف نمود. به طور مثال می‌توان فرآیند درون یک کوره ذوب آهن، سیستم‌های کنترل تعاونی^۹ که در آن‌ها حرکت گروهی از وسایل نقلیه خودمختار کنترل می‌شود، ستون‌های تقطیر، سیستم تجویز دارو، سیستم تولید و توزیع توان الکتریکی، کنترل آب و هوا در محیط‌های بسته و فرآیند تصفیه فاضلاب را به عنوان سیستم‌های دارای فقر داده در نظر گرفت. هر یک از این فرآیندها به دلایل مختلفی از جمله دشواری اندازه‌گیری خروجی، وجود اغتشاشات بزرگ و نامعین در ورودی، تغییرپذیری با زمان، نامعینی‌های ناشی از اطلاعات ناکافی حسگرها و وجود تأخیرهای زمانی می‌توانند در دسته سیستم‌های دارای فقر داده قرار گیرند [۱۴۹]. به طور مثال وجود نامعینی در ارتباطات بین کنترل‌کننده‌های وسایل نقلیه در سیستم‌های کنترل تعاونی و یا دشوار بودن اندازه‌گیری میزان تأثیر دارو (به عنوان مثال عمق بیهوشی بیمار)

دسته‌بندی غیرخطی^۱ SVM و فیلتر کالمن پرداخته شده است. در [۱۴۳] نیز به مدل‌سازی تصادفی برخورد و تصادف وسایل نقلیه در خطوط حمل و نقل هوایی پرداخته شده است. در این روش، هدف تعیین مانور بهینه جهت ایجاد توازن بین هزینه (سوخت) و احتمال برخورد می‌باشد.

۱۲- کاربرد در سیستم‌های مخابرات آشوبی

دینامیک‌های آشوبی^۲ سیستم‌های قطعی هستند که رفتارهای شبه تصادفی از خود نشان می‌دهند. آشوبی کردن و از بین بردن آشوب هر دو کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارند. از مهم‌ترین این کاربردها سیستم‌های مخابراتی آشوبی است که نسبت به سیستم‌های مخابراتی متداول مزیت‌های مهمی همچون امنیت بالا، مقاومت در برابر اغتشاش باند باریک و قابلیت استفاده در سیستم‌های چندکاربره و غیره دارند. در ادامه مروری بر تعدادی از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه سیستم‌های آشوبی با رویکرد کنترل، تخمین و شناسایی انجام می‌دهیم.

در [۱۴۴] به کنترل تطبیقی سیستم‌های آشوبی غیرخطی در پارامتر NLP^۳ پرداخته شده و روشی بر اساس لاگرائزین یک تابعی هدف برای شناسایی پارامترهای سیستم استفاده شده است. همچنین این روش به منظور حصول نرخ همگرایی بهتر در تخمین پارامترها، بهبود داده شده است. از نتایج تخمین برای محاسبه تطبیقی نماهای لیاپانوف^۴ استفاده شده و از روش جایابی نماهای لیاپانوف برای انتساب نماهای لیاپانوف مطلوب سیستم حلقه‌بسته استفاده شده است.

در [۱۴۵] یک روش همزمان‌سازی تطبیقی جدید بر اساس رؤیت‌گر برای سیستم‌های مخابراتی آشوبی ارائه گشته است. همچنین یک رؤیت‌گر مود لرزشی^۵ تطبیقی تصادفی غیرخطی برای بازسازی^۶ حالت‌های فرستنده آشوبی تصادفی، در گیرنده توسعه داده شده است. این رؤیت‌گر قادر به غلبه بر اثر نامعینی‌های پارامتری و مدل مانند نویزهای فرستنده، نویزهای کانال ارتباطی و نویزهای اندازه‌گیری می‌باشد. علاوه بر این در [۱۴۵] با استفاده از معیار پایداری لیاپانوف تصادفی، قضیه‌ای برای اثبات پایداری رؤیت‌گر پیشنهادی ارائه شده است.

در [۱۴۶] نیز رؤیت‌گری برای بازسازی حالت‌های یک سیستم تصادفی غیرخطی با نامعینی‌های مدل ارائه شده است. در مدل سیستم، هر دو نویز فرآیند و اندازه‌گیری در نظر گرفته شده‌اند. رؤیت‌گر پیشنهادی برای همزمان‌سازی آشوبی بر اساس رؤیت‌گر استفاده شده است. از آن‌جا که هم نویزها و هم نامعینی‌ها در مدل رؤیت‌گر در نظر گرفته شده‌اند، این رؤیت‌گر توانایی تخمین مؤثر حالات نویزی یک فرستنده آشوبی با درجه غیرخطی گری بالا را دارد.

¹ Support Vector Machine

² Chaotic

³ Non-Linear in Parameter

⁴ Lyapunov exponents

⁵ Sliding mode

⁶ Reconstruct

⁷ Adaptive Impulsive Observer

⁸ Information-poor systems

⁹ Cooperative control systems

شد و پژوهش‌های صورت گرفته در مباحثی مانند کنترل بهینه تصادفی برای تجویز دارو، بهینه‌سازی تصادفی به منظور طراحی رژیم دارویی، کنترل تصادفی با هدف کاهش سلول‌های آلوده به بیماری، مدل‌سازی تصادفی شیمی‌درمانی سرطان و مدل‌سازی تصادفی رشد تومور معرفی گشتند. سپس به معرفی کاربردهای نظریه تخمین و کنترل تصادفی در انتساب کواریانس و مرور پژوهش‌های پیشین در این زمینه پرداخته شد. در ادامه پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه کاربرد کنترل تصادفی در سیستم‌های کوانتومی مانند تخمین حالت‌های کوانتومی و کنترل تصادفی پایدارسازی مسیر کوانتومی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در این مقاله مروری بر پژوهش‌های پیشین در زمینه مکان‌یابی، شناسایی و کنترل تصادفی ربات‌ها صورت گرفت. مروری نیز بر سابقه استفاده از فیلتر کالمن بی‌رد، روش تخمین وزن‌یافته تصادفی، فیلتر WMFKF، فیلتر کالمن تطبیقی مقاوم و فیلتر ISRUKE برای ناوبری و تخمین جهت و موقعیت وسایل نقلیه انجام گرفت. سپس به مطالعه روش‌های پیشنهادی در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تخمین پارامترها و متغیرهای حالت موتور الکتریکی و شناسایی و کنترل تصادفی آن‌ها پرداخته شد و در انتها مروری بر سابقه پژوهشی در زمینه تخمین ترافیک در سیستم‌های حمل و نقل هوشمند و مروری بر تعدادی از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه سیستم‌های آشوبی با رویکرد کنترل، تخمین و شناسایی انجام شد. همچنین به منظور گشایش افق‌های جدید برای پژوهش‌های آتی محققان، تعدادی از مسائل باز در زمینه کاربردهای نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در سیستم‌های صنعتی معرفی شد.

مراجع

- [1] Benkherouf, A., Allidina, A.Y., 1988, "Leak detection and location in a gas pipeline", Institution of Electrical Engineers (IEE) Proceedings, 135, 142-148.
- [2] Lesyshen, R., 2005, "Water Transmission Line Leak Detection using Extended Kalman Filtering", Thesis. University of Saskatchewan.
- [3] Doney, K.L., 2007, "Leak detection in pipelines using the extended kalman filter and the extended boundary approach", Thesis. University of Saskatchewan.
- [۴] بهناز باباقربانی، ۱۳۹۰، "پایش نرم‌افزاری و شناسایی میزان نشتی در خطوط انتقال گاز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [5] Zhao, Q., Zhou, D. H., 2001, "Leak detection and location of gas pipelines based on a strong tracking filter", Transaction on Control Automation, and Systems Engineering, 3, 2, 89-94.

می‌تواند منجر به فقر داده شوند. در این حالت، تخمین و کنترل این گونه سیستم‌ها با دشواری‌های خاص خود همراه بوده و می‌تواند به عنوان یک مسأله باز و حل‌نشده مد نظر قرار گیرد.

در زمینه شناسایی سیستم‌ها نیز علیرغم تاریخچه غنی و پیشرفت‌های بسیار، همچنان مسائل باز و حل‌نشده متعددی پابرجاست. یک دسته از این مسائل باز، شناسایی سیستم‌های غیرخطی می‌باشد. به عنوان مثال مسائلی همچون شناسایی یک سیستم غیرخطی حلقه‌بسته و پایدارشده توسط یک تنظیم‌کننده ناشناخته، توسعه مدل‌های خطای^۱ خطی یا غیرخطی برای سیستم‌های غیرخطی به منظور استفاده در طراحی کنترل‌کننده مقاوم و ابداع آزمون‌های غیرخطی‌گری برای سیستم‌های دینامیکی بر اساس داده^۲، می‌تواند به عنوان مسائلی حل‌نشده و پر ارزش مورد توجه محققان قرار گیرند. همچنین مسأله فرمول‌بندی روش‌های تخمین به صورت یک مسأله بهینه‌سازی محدب^۳ می‌تواند در زمینه شناسایی سیستم‌ها به خصوص سیستم‌های غیرخطی مد نظر قرار گیرد. مسأله دیگری که می‌توان به عنوان موضوعی برای تحقیقات آتی پیشنهاد نمود، بحث کاهش مدل^۴ و همچنین تقریب مدل^۵ در حوزه شناسایی سیستم‌های غیرخطی است. علاوه بر این مسائل، به علت پیشرفت فناوری ذخیره داده و پیدایش پایگاه‌های داده^۶ عظیم، ممکن است برای برخی از فرآیندها (به طور مثال شبکه‌های حسگر^۷)، حجم داده بسیار بالایی در دسترس باشد. از این رو، می‌توان با گنجاندن مسأله داده‌کاوی^۸ در حوزه شناسایی و مدل‌سازی، به نتایج جدید و ارزشمندی دست یافت [۱۵۰].

۱۴- جمع‌بندی

در این مقاله، یک مطالعه مروری در زمینه کاربردهای نظریه تخمین، شناسایی و کنترل تصادفی در سیستم‌های صنعتی و عملی با هدف ایجاد یک مرجع و راهنما برای پژوهش‌های آتی محققان در این زمینه‌ها، انجام شد. ابتدا پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه استفاده از نظریه تخمین و شناسایی برای تشخیص نشتی در خطوط انتقال سیالاتی مانند گاز، نفت و آب انجام شد و استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته، فیلتر کالمن حالت افزوده، فیلتر SFT و فیلتر ذره‌ای با هدف تشخیص نشتی، مورد مطالعه قرار گرفت. سپس پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه ردیابی اهداف مانوردار با استفاده از نظریه تخمین تصادفی با دو رویکرد فیلترینگ تطبیقی بر اساس مدل و تخمین ورودی معرفی گشتند. در ادامه کاربرد کنترل تصادفی در مدیریت فعال صف در شبکه‌های ارتباطی و تخمین و کنترل تصادفی تابع چگالی احتمال طول صف مورد مطالعه قرار گرفت. سپس به مطالعه کاربرد نظریه کنترل و مدل‌سازی تصادفی در پزشکی و سلامت پرداخته

¹ Error models

² Data-based

³ Convex optimization

⁴ Model reduction

⁵ Model approximation

⁶ Database

⁷ Sensor networks

⁸ Data mining

- [16] Blom, H.A.P., Bar-Shalom, Y., 1988, "The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33, 8, 780–783.
- [17] Mazor, E., Averbuch A., Bar-Shalom, Y., Dayan, J., 1988, "Interacting multiple model methods in target tracking: a survey", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 34, 1, 103–123.
- [18] Bar-Shalom, Yaakov, Li, Xiao-Rong, *Multitarget-multisensor tracking: principles and techniques*, Yaakov Bar-Shalom Press, 1995.
- [19] Kirubarajan, T., Bar-Shalom, Y., Pattipati, K., Kadar, I., 2000, "Ground target tracking with variable structure IMM estimator", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 36, 1, 26–46.
- [20] Li, X.R., 2000, "Engineer's Guide to Variable-Structure Multiple-Model Estimation for Tracking", *Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances* (Y. Bar-Shalom and D. W. Blair, eds.), 3, 499–567.
- [21] Bar-Shalom, Y., Birmiwal, K., 1982, "Variable dimension filtering for maneuvering target tracking", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 18, 5, 621–628.
- [22] Chan, Y.T., Hu, A.G.C., Plant, J.B., 1979, "A Kalman filter based tracking scheme with input estimation", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-15, 2, 237–244.
- [23] Whang, H.I., Lee, J.G., Sung, T.K., 1994, "Modified input estimation technique using pseudo residuals", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 30, 1, 220–228.
- [24] Bogler, P.L., 1987, "Tracking a maneuvering target using input estimation", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES- 23, 3, 298–310.
- [25] Lee, H., Tahk, M.J., 1999, "Generalized input-estimation technique for tracking maneuvering targets", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 35, 4, 1388–1402.
- [26] Park, Y.H., Seo, J.H., Lee, J.G., 1995, "Tracking using the variable-dimension filter with input estimation", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 31, 1, 399–408.
- [27] Khaloozadeh, H., Karsaz, A., 2009, "Modified input estimation technique for tracking manoeuvring targets", *IET Radar, Sonar & Navigation*, 3, 1, 30–41.
- [28] Rahmati, H., Khaloozadeh, H., Ayati, M., 2012, "Novel Approach for Nonlinear Maneuvering Target Tracking based on Input Estimation", *Applied Mechanics and Materials* 110-116, 4415-4423.
- [6] Poulakis, Z., Valougeorgis, D., Papadimitriou, C., 2003, "Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 18, 4, 315-327.
- [7] Liu, M., Zang, SH., Zhou, D., 2005, "Fast leak detection and location of gas pipelines based on an adaptive particle filter" *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 15, 4, 541-550.
- [8] Lopes dos Santos, P., Azevedo-Perdicoulis, T.P., Ramos, J.A., de Carvalho, J.L.M., Jank, G., Milhinhos, J., 2011, "An LPV Modeling and Identification Approach to Leakage Detection in High Pressure Natural Gas Transportation Networks", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19, 1, 77-92.
- [9] Lopes dos Santos, P., Ramos, J.A., de Carvalho, J.L.M., 2008, "Subspace identification of linear parameter varying systems with innovation-type noise model driven by general inputs and a measurable white noise time varying parameter vector", *International Journal of System Science*, 39, 9, 897-911.
- [10] Lopes dos Santos, P., Azevedo-Perdicoulis, T.P., Jank, G., Ramos, J.A., Martins, J.L., de Carvalho, J.L.M., 2011, "Leakage detection and location in gas pipelines through an LPV identification approach", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 16, 12, 4657–4665.
- [11] Prashanth Reddy, H., Narasimhan, SH., Murty Bhallamudia, S., Bairagic, S., 2011, "Leak detection in gas pipeline networks using an efficient state estimator. Part-I: Theory and simulations", *Computers & Chemical Engineering*, 35, 651-661.
- [12] Prashanth Reddy, H., Narasimhan, SH., Murty Bhallamudia, S., 2006, "Simulation and state estimation of transient flow in gas pipeline networks using transfer function model", *Industrial & Engineering Chemical Research*, 45, 3853–3863.
- [13] Prashanth Reddy, H., Narasimhan, SH., Murty Bhallamudia, S., Bairagic, S., 2011, "Leak detection in gas pipeline networks using an efficient state estimator. Part II. Experimental and field evaluation", *Computers & Chemical Engineering*, 35, 662-670.
- [14] Singer, R.A., 1970, "Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-6, 473–483.
- [15] Gutman, P.O., Velger, M., 1990, "Tracking targets using adaptive Kalman filtering", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-26, 691–699.

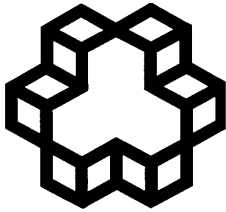
- [41] Coldman, A.J., Murray, J.M., 2000, "Optimal control for a stochastic model of cancer chemotherapy", *Mathematical Biosciences*, 168, 2, 187–200.
- [42] Komarova, N., 2006, "Stochastic modeling of drug resistance in cancer", *Journal of Theoretical Biology*, 239, 3, 351–366.
- [43] Ostby, I., Oyehaug, L., Steen, H.B., 2006, "A stochastic model of cancer initiation including a bystander effect", *Journal of Theoretical Biology*, 241, 4, 751–764.
- [44] Albano, G., Giorno, V., 2006, "A stochastic model in tumor growth", *Journal of Theoretical Biology*, 242, 2, 329–336.
- [45] Mikler, A.R., Bravo-Salgado, A., Corley, C.D., 2009, "Global Stochastic Contact Modeling of Infectious Diseases", *IEEE International Joint Conference on Bioinformatics, Systems Biology and Intelligent Computing*, 327 – 330.
- [46] Abraham, J.A., González-Parra, G., Morano, J.A., 2009, "Stochastic modeling of the transmission of respiratory syncytial virus (RSV) in the region of Valencia, Spain", *Biosystems*, 96, 3, 206–212.
- [47] Duan, W., Qiu, X., Cao, Z., Zheng, X., Heterogeneous and Stochastic Agent-Based Models for Analyzing Infectious Diseases' Super Spreaders, *IEEE Intelligent Systems*, 28, 4, 18 – 25.
- [48] Seddighi Chaharborj, S., Fudziah, I., Abu Bakar, MR., Seddighi Chaharborj, R., Majid, ZA., Ahmad, AGB., 2013, "The use of generation stochastic models to study an epidemic disease", *Advances in Difference Equations*.
- [49] Hotz, A., Skelton, R.E., 1987, "Covariance control theory", *International Journal of Control*, 46, 1, 13–32.
- [50] Xu, J.H., Skelton, R.E., Zhu G., 1990, "Upper and lower covariance bounds for perturbed linear systems", *IEEE Transactions on Automat Control*, 35, 8, 944–948.
- [51] Collins, E.G., Skelton, R.E., 1987, "A theory of state covariance assignment for discrete systems", *IEEE Transactions on Automat Control*, 32, 1, 35–41.
- [52] Hsieh, C., Skelton, R.E., 1990, "All covariance controllers for linear discrete-time systems", *IEEE Transactions on Automat Control*, 35, 8, 908–915.
- [53] Skelton, Robert E., *Dynamic system control*, John Wiley and Sons, 1988.
- [54] Xu, H., Skelton, R.E., "An improved covariance assignment theory for discrete systems", *IEEE Transactions on Automat Control*, 37, 10, 1588–1590.
- [29] Yang, J-L., Ji, H-B., 2010, "High maneuvering target-tracking based on strong tracking modified input estimation", *Scientific Research and Essays*, 5, 13, 1683-1689.
- [30] Abharian, A.E., Khaloozadeh, H., Amjadifard, R., 2012, "Stochastic hyperbolic random early detection controller based on probability density function estimator and particle swarm optimisation algorithm", *IET Communications*, 6, 6, 638 – 648.
- [31] Abharian, A.E., Khaloozadeh, H., Amjadifard, R., 2013, "Stochastic controller as an active queue management based on B-spline kernel observer via particle swarm optimization", *Neural Computing and Applications*, 23, 2, 323-331.
- [32] Lim, C.C., Teo, K.L., 1989, "A stochastic optimal control approach to a mathematical drug administration model", *Mathematical and Computer Modelling*, 12, 8, 1009–1015.
- [33] Schumitzky, A., 1991, "Application of Stochastic Control Theory to Optimal Design of Dosage Regimens", *Advanced Methods of Pharmacokinetic and Pharmacodynamic Systems Analysis*, 137-152.
- [34] Bayard, D.S., Milman, M.H., Schumitzky, A., 1994, "Design of dosage regimens: A multiple model stochastic control approach", *International Journal of Bio-Medical Computing*, 36, 1-2, 103-15.
- [35] Laínez-Aguirre, J.M., Gintaras, V., Reklaitis, A., 2013, "Stochastic Optimization approach for the design of Individualized Dosage Regimens", *AIChE Journal*, 59, 9, 3296–3307.
- [36] Abharian, A.E., Zarie Sarabi, Sh., Yomi, M., 2014, "Optimal sigmoid nonlinear stochastic control of HIV-1 infection based on bacteria foraging optimization method", *Biomedical Signal Processing and Control*, 10, 184–191.
- [37] Mete, H.O., Zabinsky, Z.B., 2010, "Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management", *International Journal of Production Economics*, 126, 1, 76–84.
- [38] Taheri, S., Sood, R., 2006, "Kalman filtering for reliable estimation of BBB permeability", *Magnetic Resonance Imaging*, 24, 1039-1049.
- [39] Schulze, W.H.W., Henar, F.E., Potyagaylo, D., Loewe, A., Stenroos, M., Dössel, O., 2013, "Kalman Filter with Augmented Measurement Model: An ECG Imaging Simulation Study", *Functional Imaging and Modeling of the Heart*, 200-207.
- [40] Nayebifar, B., Abrishami Moghaddam, H., 2013, "A novel method for retinal vessel tracking using particle filters", *Computers in Biology and Medicine*, 43, 5, 541–548.

- [69] Van Handel, R., 2007, "Filtering Stability and Robustness", PhD Thesis. California Institute of Technology, Physical Measurement and Control.
- [70] Bouten, L., Van Handel, R., James, M.R., 2007, "An Introduction to Quantum Filtering", *SIAM Journal of Optimization and Control*, 46, 2199-2241.
- [71] Belavkin, V.P., 1992, "Quantum Continual Measurements and a Posteriori Collapse on CCR", *Communications in Mathematical Physics*, 146, 3, 611-635.
- [72] Van Handel, R., Stockton, J. K., Mabuchi, H., 2005, "Feedback control of Quantum State Reduction", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50, 6, 768-780.
- [73] Mirrahimi, M., Van Handel, R., 2007, "Stabilizing feedback control for quantum systems", *SIAM Journal of Optimization and Control*, 46, 445-467.
- [74] Altafini, C., Ticozzi, F., 2005, "Almost global stochastic feedback stabilization of conditional quantum dynamics", *Quantum Physics/0510222*.
- [۷۵] جواد شریفی، حمیدرضا مومنی، "کنترل پایدار ساز مسیر کوانتومی با حالت‌های تعادل چندگانه"، *مجله کنترل*، ج ۳، ش ۲، تابستان ۸۸، ۳۳-۲۵
- [76] Tippayagosai, P., Watkins, J., 2006, "Feedback Quantum Control", 2nd Annual Symposium on Graduate Research and Scholarly Projects, 34-35.
- [77] Gordon, G., Kurizki, G., Mancini, S., Vitali, D., Tombesi, P., 2007, "Open-loop stochastic control of quantum coherence", *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 40, 9.
- [78] Sharifi, J., Momeni, H., 2010, "Optimal control equation for quantum stochastic differential equations", *IEEE Conference on Decision and Control*, 4839 – 4844.
- [79] Belavkin, V.P., 1995, "Quantum Filtering of Markov Signals with White Quantum Noise", *Quantum Communications and Measurement*, 381-391.
- [80] Geremia, J.M., Stockton, J.K., Doherty, A.C., Mabuchi, H., 2003, "Quantum Kalman filtering and the Heisenberg limit in atomic magnetometry", *Quantum Physics /0306192*.
- [81] Paris, M., Rehacek, J., 2004, "Quantum State Estimation", *Lecture Notes in Physics*, 649.
- [82] Behera, L., Kar, I., 2005, "Quantum stochastic filtering", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 3, 2161 – 2167.
- [83] Lida, S., Ohki, K., Yamamoto, N., 2010, "Robust quantum Kalman filtering under the phase uncertainty of the probe-laser", *IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design*, 749 – 754.
- [55] Skelton, R.E., Kherat, S.M., Yaz, E., 1991, "Covariance control of discrete stochastic bilinear systems", *American Control Conference*, 2660–2664.
- [56] Chung, H.Y., Chang, W.J., Tsay, M.K., 1990, "On the controller design for perturbed bilinear stochastic systems", *JSME International Journal*, 33, 4, 559–566.
- [57] Chung, H.Y., Chang, W.J., 1992, "Covariance control with variance constraints for continuous perturbed stochastic systems", *Systems & Control Letters*, 19, 5, 413–417.
- [58] Baromand, S., Khaloozadeh, H., 2007, "Covariance control of linear discrete-time stochastic systems", *IEEE International Conference on Control and Automation*, 2664–2668.
- [59] Baromand, S., Khaloozadeh, H., Rajati M., 2007, "Output covariance tracking as a disturbance rejection problem", *IEEE Conference on Decision and Control*, 3679–3684.
- [60] Khaloozadeh, H., Baromand, S., 2010, "State covariance assignment problem", *IET Control Theory & Applications*, 4, 3, 391–402.
- [61] Khaloozadeh, H., Baromand, S., 2010, "On the closed-form model for state covariance assignment problem", *IET Control Theory & Applications*, 4, 9, pp. 1678 – 1686.
- [62] Abharian, A.E., Khaloozadeh, H., Amjadifard, R., 2013, "Robust stochastic moment control via genetic-pole placement in communication network parameter setting", *Neural Computing and Application*, 23, 7-8, 2351-2365, 2013.
- [63] Belavkin, V.P., 1983, "Theory of the control of observable quantum-systems", *Automation and Remote Control*, 44, 178, 1983.
- [64] Peirce, A.P., Dahleh, M.A., Rabitz, H., 1988, "Optimal-control of quantum-mechanical systems-existence, numerical approximation, and applications", *Physical Review A*, 37, 12, 4950-4964.
- [65] Belavkin, V.P., 1994, "Quantum Diffusion, Measurement and Filtering", *Probability Theory and its Applications*, 38, 4, 742-757.
- [66] Belavkin, V.P., 1994, "Nondemolition Principle of Quantum Measurement Theory", *Foundation of Physics*, 24, 685-714.
- [67] Hudson, R.L., Parthasarathy, K.R., 1984, "Quantum Itô's formula and stochastic evolutions", *Communications in Mathematical Physics*, 93, 3, 301-323.
- [68] Bouten, L., 2004, "Filtering and Control in Quantum Optics", PhD Thesis. University of Nijmegen.

- Precision Engineering and Manufacturing, 11, 2, 255-264.
- [98] González, J., Blanco, J.L., Galindo, C., Ortiz-de-Galisteo, A., Fernández-Madrigal, J.A., Moreno, F.A., Martínez J.L., 2009, "Mobile robot localization based on Ultra-Wide-Band ranging: A particle filter approach", *Robotics and Autonomous Systems*, 57, 5, 496-507.
- [99] Boccadoro, M., Martinelli, F., Pagnottelli, S., 2010, "Constrained and quantized Kalman filtering for an RFID robot localization problem", *Autonomous Robots*, 29, 3-4, 235-251.
- [100] Myung, H., Lee, J.K., Choi, K., Bang, S., 2010, "Mobile robot localization with gyroscope and constrained Kalman filter", *International Journal of Control, Automation and Systems*, 8, 3, 667-676.
- [101] Gil, A., Reinoso, Ó., Ballesta, M., Juliá, M., 2010, "Multi-robot visual SLAM using a Rao-Blackwellized particle filter", *Robotics and Autonomous Systems*, 58, 1, 68-80.
- [102] Chatterjee, A., Ray, O., Chatterjee, A., Rakshit, A., 2011, "Development of a real-life EKF based SLAM system for mobile robots employing vision sensing", *Expert Systems with Applications*, 38, 7, 8266-8274.
- [103] Choi, K.S., Lee, S.G., 2012, "An enhanced CSLAM for multi-robot based on unscented kalman filter", *International Journal of Control, Automation and Systems*, 10, 1, 102-108.
- [104] Pomárico-Franquiz, J., Khan, S.H., Shmaliy, Y.S., 2014, "Combined extended FIR/Kalman filtering for indoor robot localization via triangulation", *Measurement*, 50, 236-243.
- [105] Sadaghzadeh, N., Poshtan, J., Wagner, A., Nordheimer, E., Badreddin, E., 2014, "Cascaded Kalman and particle filters for photogrammetry based gyroscope drift and robot attitude estimation", *ISA Transactions*, 53, 2, 524-532.
- [106] Britting, Kenneth R., *Inertial navigation systems analysis*, John Wiley & Sons, 1971.
- [107] Bijker, J., Steyn, W., 2008, "Kalman filter configurations for a low-cost loosely integrated inertial navigation system on an airship", *Control Engineering Practice*, 16, 12, 1509-1518.
- [108] Xiong, K., Liu, L.D., Zhang, H.Y., 2009, "Modified unscented Kalman filtering and its application in autonomous satellite navigation", *Aerospace Science and Technology*, 13, 4-5, 238-246.
- [109] Tang, X., Yan, J., Zhong, D., 2010, "Square-root sigma-point Kalman filtering for spacecraft relative navigation", *Acta Astronautica*, 66, 5-6, 704-713.
- [110] Gao, Sh., Gao, Y., Zhong, Y., Wei, W., 2011, "Random Weighting Estimation Method for
- [84] Pinel, O., Jian, P., Treps, N., Fabre, C., Braun, D., 2013, "Quantum parameter estimation using general single-mode Gaussian states", *Physical Review A: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 88.
- [85] Negm, M.M.M., 2000, "Preview and stochastic controllers for motion control of robotics manipulator with control input constraints", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3, 3020 - 3027.
- [86] Schacher, M., 2012, "Optimal feedback control of robots in the case of random initial conditions", *Advances in Engineering Software*, 46, 1, 19-26.
- [87] Li, J., Guo, X., Li, Z., Chen, W., 2014, "Stochastic Adaptive Optimal Control of Under-actuated Robots Using Neural Networks", *Neurocomputing*, 142, 190-200.
- [88] Wu, J., Wang, J., You, Z., 2010, "An overview of dynamic parameter identification of robots", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26, 5, 414-419.
- [89] Gautier, M., Pognet, Ph., 2001, "Extended Kalman filtering and weighted least squares dynamic identification of robot", *Control Engineering Practice*, 9, 12, 1361-1372.
- [90] Khoukhi, A., 2010, "Stochastic parameters identification and localization of mobile robots", *IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, 1-6.
- [91] Wernholt, E., Moberg, S., 2011, "Nonlinear gray-box identification using local models applied to industrial robots", *Automatica*, 47, 4, 650-660.
- [92] Janot, A., Vandanjon, P.O., Gautier, M., 2014, "An instrumental variable approach for rigid industrial robots identification", *Control Engineering Practice*, 25, 85-101.
- [93] Nguyen, H.N., Zhou, J., Kang, H.J., Ro, Y.S., 2013, "Robot Geometric Parameter Identification with Extended Kalman Filtering Algorithm", *Communications in Computer and Information Science*, 375, 165-170.
- [94] Dogruer, C.U., 2014, "Online Identification of Odometer Parameters of a Mobile Robot", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 299, 195-206.
- [95] Rogers-Marcovitz, F., Kelly, A., 2014, "On-Line Mobile Robot Model Identification Using Integrated Perturbative Dynamics", *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 79, 417-431.
- [96] Choi, K.S., Song, B.K., Lee, S.G., 2009, "Hybrid Filter Based Simultaneous Localization and Mapping for a Mobile Robot", *Advances in Neural Networks*, 5553, 257-266.
- [97] Choi, K.S., Lee, S.G., 2010, "Enhanced SLAM for a mobile robot using extended Kalman Filter and neural networks", *International Journal of*

- [123] Țiclea, A., Besançon, G., 2006, "Observer Scheme for State and Parameter Estimation in Asynchronous Motors with Application to Speed Control", *European Journal of Control*, 12, 4, 400–412.
- [124] Barut, M., Bogosyan, S., Gokasan, M., 2007, "Switching EKF technique for rotor and stator resistance estimation in speed sensorless control of IMs", *Energy Conversion and Management*, 48, 12, 3120–3134.
- [125] Hilairet, M., Auger, F., Berthelot, E., 2009, "Speed and rotor flux estimation of induction machines using a two-stage extended Kalman filter", *Automatica*, 45, 8, 1819–1827.
- [126] Rigatos, G.G., "Particle and Kalman filtering for state estimation and control of DC motors", *ISA Transactions*, 48, 1, 62–72.
- [127] Barut, M., 2010, "Bi Input-extended Kalman filter based estimation technique for speed-sensorless control of induction motors", *Energy Conversion and Management*, 51, 10, 2032–2040.
- [128] Saïd, S.H., Mimouni, M.F., M'Sahli, F., Farza, M., 2011, "High gain observer based on-line rotor and stator resistances estimation for IMs", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 7, 1518–1529.
- [129] Doan, P.T., Bui, T.L., Kim, H.K., Byun, G.S., 2014, "Sang Bong Kim, Rotor Speed Estimation Based on Extended Kalman Filter for Sensorless Vector Control of Induction Motor", *Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences*, 282, 477-486.
- [130] Alonge, F., D'Ippolito, F., Sferlazza, A., 2014, "Sensorless Control of Induction-Motor Drive Based on Robust Kalman Filter and Adaptive Speed Estimation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 3, 1444 – 1453.
- [131] Alonge, F., D'Ippolito, F., Fagiolini, A., Sferlazza, A., 2014, "Extended complex Kalman filter for sensorless control of an induction motor", *Control Engineering Practice*, 27, 1–10.
- [132] Delpouxa, R., Bodsonb, M., Floque, T., 2014, "Parameter estimation of permanent magnet stepper motors without mechanical sensors", *Control Engineering Practice*, 26, 178–187.
- [133] Mihaylova, L., Boel, R., 2004, "A particle filter for freeway traffic estimation", *IEEE Conference on Decision and Control*, 2, 2106 – 2111.
- [134] Wang, Y., Papageorgiou, M., 2005, "Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: a general approach", *Transportation Research Part B: Methodological*, 39, 2, 141–167.
- Dynamic Navigation Positioning", *Chinese Journal of Aeronautics*, 24, 3, 318–323.
- [111] Wang, X., Zhang, L., Qian, X., Xu, Q., Meng, Y., Su, Z., 2012, "A Modified Extend Kalman Particle Filter with Application to Relative Navigation", *China Satellite Navigation Conference*, 160, 465-476.
- [112] Su, K., Deng, Z., Huang, Z., 2012, "Tuning of Unscented Kalman Filter Based Biogeography-Based Optimization for UGVs Navigation", *Advances in Automation and Robotics*, 122, 411-419.
- [113] Goh, S.T., Abdelkhalik, O., Zekavat, A., 2013, "A Weighted Measurement Fusion Kalman Filter implementation for UAV navigation", *Aerospace Science and Technology*, 28, 1, 315–323.
- [114] Baek, K., Bang, H., 2013, "Adaptive sparse grid quadrature filter for spacecraft relative navigation", *Acta Astronautica*, 87, 96–106.
- [115] Acharya, R., 2013, Doppler utilised Kalman estimation (DUKE) of ionospheric delay for satellite navigation", *Advances in Space Research*, 51, 11, 2171–2180.
- [116] Hajiyev, C., Soken, H.E., 2013, "Robust Adaptive Kalman Filter for estimation of UAV dynamics in the presence of sensor/actuator faults", *Aerospace Science and Technology*, 28, 1, 376–383.
- [117] Yang, W., Li, S., Li, N., 2014, "A switch-mode information fusion filter based on ISRUKF for autonomous navigation of spacecraft", *Information Fusion*, 18, 33-42.
- [118] Ranjan, T.N., Nherakko, A.I., Navelkar, G., 2010, "Navigation of Autonomous Underwater Vehicle Using Extended Kalman Filter", *Communications in Computer and Information Science*, 103, 1-9.
- [119] Liu, K.Z., Li, J., Guo, W., Zhu, P.Q., Wang, X.H., 2014, "Navigation system of a class of underwater vehicle based on adaptive unscented Kalman filter algorithm", *Journal of Central South University*, 21, 2, 550-557.
- [120] Rigatos, G.G., 2012, "Distributed filtering over sensor networks for autonomous navigation of UAVs", *Intelligent Service Robotics*, 5, 3, 179-198.
- [121] Akatsu, K., Kawamura, A., 2000, "Online rotor resistance estimation using the transient state under the speed sensorless control of induction motor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15, 3, 553 – 560.
- [122] Ursem, R.K., Vadstrup, P., 2004, "Parameter identification of induction motors using stochastic optimization algorithms", *Applied Soft Computing*, 4, 1, 49–64.

- [142] Mazinan, A.H., Sarikhani, M., 2014, "Providing an efficient intelligent transportation system through detection, tracking and recognition of the region of interest in traffic signs by using non-linear SVM classifier in line with histogram oriented gradient and Kalman filter approach", *Sadhana*, 39, 1, 27-37.
- [143] Vela, A. E., Salaun, E., Solak, S., Feron, E., Singhose, W., Clarke, J. P., 2009, "A two-stage stochastic optimization model for air traffic conflict resolution under wind uncertainty", *IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference*, 2.E.5-1 - 2.E.5-13.
- [144] Ayati, S.M., Khaki-Sedigh, A., 2008, "Adaptive control of nonlinear in parameters chaotic systems", *Nonlinear Dynamics & System Theory*, 8, 2, 123-135.
- [145] Ayati, M., Khaloozadeh, H., 2009, "A stable adaptive synchronization scheme for uncertain chaotic systems via observer", *Journal of Chaos Solitons and Fractal*, 42, 2473-2483.
- [146] Ayati, M., Khaloozadeh, H., 2010, "A stable chaos synchronization scheme for nonlinear uncertain systems", *IET Control Theory and Applications*, 4, 3, 437-447.
- [147] Ayati, Ms., Khaloozadeh, H., 2012, "Designing a novel adaptive impulsive observer for nonlinear continuous systems using LMIs", *IEEE Transaction on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 59, 1, 179-187.
- [148] Ayati, M., Khaloozadeh, H., Liu, X., 2011, "Synchronizing chaotic systems with parametric uncertainty via a novel adaptive impulsive observer", *Asian Journal of Control*, 13, 6, 809-817.
- [149] Dexter, Arthur L., *Monitoring and Control of Information-Poor Systems: An Approach Based on Fuzzy Relational Models*, John Wiley & Sons, 2012.
- [150] Ljung, L., 2010, "Perspectives on System Identification", *Annual Reviews in Control*, 34, 1, 1-12.
- [135] Wang, Y., Papageorgiou, M., Messmer, A., 2008, "Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: Adaptive capabilities and real data testing", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42, 10, 1340-1358.
- [136] Mihaylova, L., Boel, R., Hegyi, A., 2006, "An unscented Kalman filter for freeway traffic estimation", *Control in Transportation Systems*, 11, 31-36.
- [137] Mihaylova, L., Boel, R., Hegyi, A., 2007, "Freeway traffic estimation within particle filtering framework", *Automatica*, 43, 2, 290-300.
- [138] Tampere, C.M.J., Immers, L.H., 2007, "An Extended Kalman Filter Application for Traffic State Estimation Using CTM with Implicit Mode Switching and Dynamic Parameters", *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 209 - 216.
- [139] Yuan, Y., Van Lint, J.W.C., Hoogendoorn, S.P., Vrancken, J.L.M., Schreiter, T., 2011, "Freeway traffic state estimation using extended Kalman filter for first-order traffic model in Lagrangian coordinates", *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 121-126.
- [140] Van Hinsbergen, C.P.I.J., Schreiter, T., Zuurbier, F. S., Van Lint, J.W.C., Van Zuylen, H.J., 2012, "Localized Extended Kalman Filter for Scalable Real-Time Traffic State Estimation", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13, 1, 385 - 394.
- [141] Jin, S., Wang, D.H., Xu, C., Ma, D.F., 2013, "Short-term traffic safety forecasting using Gaussian mixture model and Kalman filter", *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 14, 4, 231-243.



Industrial Control Center of Excellence
K.N. Toosi University of Technology

Journal of Control (ISSN 2008-8345)



A Joint Publication of the Iranian Society of Instrument and Control Engineers and the Industrial Control Center of Excellence of K.N. Toosi University of Technology, Vol. 8, No. 3, Fall 2014.

Publisher: **Iranian Society of Instrumentation and Control Engineers**

Managing Director: Prof. Iraj Goodarznia

Editor-in-Chief: Prof. Ali Khaki-Sedigh

Tel: 84062317

Email: sedigh@kntu.ac.ir

Assistant Editor: Prof. Hamid Khaloozadeh, Dr. Mahdi Aliyari Shoorehdeli

Executive Director: Dr. Mahdi Aliyari Shoorehdeli, Tel: 84062403, Email: aliayari@kntu.ac.ir

Editorial Board:

Prof. A. Khaki-Sedigh, Prof. I. Goodarznia, Prof. H. Khaloozadeh, Prof. P. Jabedar-Maralani, Prof. A. Ghafari, Dr. H.R. Momeni (Associate Prof), Prof. S.K. Nikravesh, Prof. M. Shafiee, Prof. B. Moshiri.

Advisory Board:

Dr. H.R. Momeni, Prof. B. Moshiri, Prof. M. Shafiee, Prof. A. Khaki-Sedigh, Prof. P. Jabedar-Maralani, Prof. A. Ghaffari, Prof. H. Khaloozadeh, Prof. H.R. Taghirad, Dr. K. Masroori, Dr. M.T. Bathaei, Dr. M.T. Hamidi-Beheshti, Dr. F. Jafarkazemi, Dr. R. Amjadifard, Prof. S.A. Moosavian, Prof. M. Teshnelab, Prof. M. Haeri, Prof. S.A. Safavi, Dr. A. Fatehi, Prof. M.R. Akbarzadeh-Toutouchi, Prof. M. Golkar, Prof. N. Pariz, Dr. M. Javadi, Dr. J. Heirani-Nobari, Prof. F. Hossein-Babaei, Dr. B. Moaveni, Dr. M. Aliyari Sh., Dr. M. Arvan, Prof. M. Tavakoli-Bina, Dr. M. Ahmadih-Khanehsar, Dr. F. Farivar, Dr. M. Ayati.

The ISICE Board of Director:

Prof. Masoud Shafiee., Dr. Mohammad Reza Jahed Motlagh, Prof. Iraj Goodarznia, Prof. Behzad Moshiri, Prof. Ali Akbar Safavi, Dr. Mehrdad Javadi, Dr. Iman Mohammadzaman, Dr. Ali Ashrafmodarres, Ali Kiani.

Site Manager: Nasibeh Farahani

Page Editor: Kiyam Khaloozadeh



**A Joint Publication of the Iranian Society of Instrument and Control Engineers and
the Industrial Control Center of Excellence of K.N. Toosi University of Technology**

Vol. 8, No. 3, Fall 2014

Contents

- | | |
|---|------------|
| Gas Sensors: Fundamentals, Applications, and Scope | 1 |
| Faramarz Hossein-Babaei | |
| An Overview of the Theory and Applications of Interval-based Intelligent Systems and Controllers | 27 |
| Mohammad Teshnehlab, Pourya Jafari, Seyed Mohammad Javad Alhasher | |
| A Review of the Technical Developments on the Quadruped Robots | 51 |
| Vahid Johari Majd | |
| Review of Model Predictive Control Tuning Methods and Modern Tuning Solutions | 69 |
| Ali Khaki Sedigh, Peyman Bagheri | |
| Cable Driven Parallel Robots: Kinematics, Dynamics and Control | 87 |
| Hamid D. Taghirad, Azadeh Zarif Loloie, Mohammad A. Khosravi | |
| A Survey on Applications of Estimation Theory, Identification and Stochastic Control in Industrial Systems | 119 |
| Hamid Khaloozadeh, Atiyeh Keshavarz-Mohammadiyan | |