

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 خواجه نصیرالدین طوسی، h_khaloozadeh@kntu.ac.ir
^۲ دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه کنترل و سیستم، دانشگاه خواجه نصیرالدین 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 الگا با 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. هرچند 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^1 می‌باشند. روش‌های فیلترینگ تطبیقی بر اساس مدل که به مدل‌های چندگانه متعامل IMM^2 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 $STMIE^{16}$ 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^1 می‌باشند. روش‌های فیلترینگ تطبیقی بر اساس مدل که به مدل‌های چندگانه متعامل IMM^2 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^۴ 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^7 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^{۱۱} 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 غیرجایابی‌پذیر^{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 ایتو^{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 مسأله 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 مسأله 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} توری

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 مسأله 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 ML^۶ 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 فرانسی^{۱۴} FRF در تعدادی از نقاط کار می‌باشد. مدل غیرخطی جعبه-خاکستری نیز در همان نقاط کار خطی‌سازی شده و منتج به تابع پاسخ فرانسی پارامتری گشته است. پارامترهای بهینه توسط کمینه‌سازی اختلاف بین توابع پاسخ فرانسی 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 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 کیلومترشمار 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 (کیلومترشمار) 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 کیلومترشمار 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 (DVC^{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 بالایی دوطبقه 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 توزیع‌شده، 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

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

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

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^۷ AIO 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 حلقه بسته 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.

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 حل نشده مد نظر قرار گیرد.

در زمینه شناسایی سیستم‌ها نیز علیرغم تاریخچه غنی و پیشرفت‌های بسیار، همچنان مسائل باز و حل نشده 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 حل نشده 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 انجام شده 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

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.

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., Poignet, 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] Delpoux, R., Bodson, 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.

