

طراحی یک کنترل کننده ردیاب فیدبک خروجی برای بازوهای متحرک با استفاده از یک تکنیک مقاوم تطبیقی عصبی

نوشین پورواعظ اصفهانی^۱، خوشنام شجاعی^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، n.poorvaez@sel.iaun.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، shojaei@pel.iaun.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۳/۲۳ ویرایش اول: ۱۳۹۶/۸/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۳

چکیده: در این مقاله، کنترل ردیابی یک بازوی ربات متصل بر روی یک پایه متحرک چرخدار مورد توجه قرار می‌گیرد. یک الگوریتم کنترلی غیرخطی مقاوم تطبیقی عصبی به منظور کنترل ردیاب فیدبک خروجی برای یک بازوی متحرک چرخدار بدون اندازه‌گیری سرعت سیستم برای مقابله با دینامیک‌های مدل نشده سیستم، نامعینی‌های پارامتری و غیرپارامتری و اغتشاشات خارجی، پیشنهاد شده است. یک تحلیل پایداری مبتنی بر لیاپانوف نشان می‌دهد که خطاهای ردیابی و رؤیت حالت نهایتاً به طور یکنواخت کران‌دار هستند و به توپ کوچکی شامل مبدأ همگرا می‌شوند. یک شبکه عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی برای جبران نامعینی‌های ناشی از دینامیک‌های بازوی متحرک به کار گرفته شده است. نامعینی‌های غیر پارامتری و خطای تقریب شبکه عصبی نیز با یک کنترل کننده مقاوم تطبیقی جبران شده‌اند. علاوه بر این، تابع تانژانت هایپربولیک در طراحی کنترل کننده فیدبک خروجی به کار گرفته شده است تا خطر اشباع عملگرها را کاهش دهد و سیگنال‌های کنترلی هموارتری تولید کند. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی تأثیر الگوریتم پیشنهادی در این مقاله را به خوبی نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: اشباع عملگر، بازوهای متحرک، کنترل غیرخطی مقاوم تطبیقی، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی.

Designing an Output Feedback Tracking Controller for Mobile Manipulators by Using a Neural Adaptive Robust Technique

Nooshin Poorvaez Esfahani, Khoshnam Shojaei

Abstract: In this paper, the tracking control of a robotic arm mounted on a wheeled mobile platform is considered. A nonlinear neural adaptive robust control algorithm is proposed for the output feedback tracking control of a wheeled mobile manipulator without measuring system velocities to deal with the unmodeled system dynamics, parametric uncertainties and external disturbances. A Lyapunov-based stability analysis shows that tracking and observation errors are Uniformly Ultimately Bounded (UUB) and converge to a small ball containing the origin. A Radial Basis Function Neural Network (RBFNN) is employed to compensate for the uncertainties of mobile manipulator dynamics. Nonparametric uncertainties and NN approximation errors are also compensated by an adaptive robust controller. In addition, hyperbolic tangent function is employed in the design of the output feedback controller to reduce the risk of actuators saturation and to produce smoother control signals. Finally, simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed controller well.

Keywords: Actuator saturation, Mobile manipulators, Nonlinear adaptive robust control, Radial basis function neural network.

۱- مقدمه

به کارگیری بازوهای ربات با پایه متحرک چرخ‌دار به دلیل این که فضای کاری^۱ بزرگ‌تری نسبت به بازوهای رباتیکی با پایه ثابت را دارا می‌باشند، به‌طور قابل ملاحظه‌ای قابلیت‌های عملکرد این سیستم‌ها را افزایش می‌دهد [۱]. یکی از رایج‌ترین پایه‌های متحرک موجود، دراو تفاضلی^۲ می‌باشد که این دراو دارای دو چرخ ثابت است که در سمت چپ و راست بدنه متحرک نصب شده است. این مقاله به کنترل حرکت بازوی متحرک چرخ‌دار با دراو تفاضلی اختصاص داده شده است. اثر متقابل بین بازوی ماهر و پایه متحرک و همچنین وجود قیدهای هولونومیک و غیرهولونومیک و عملکرد غیرخطی از جمله خصوصیات بازوی متحرک چرخ‌دار هستند که طراحی کنترل کننده را برای آن دشوارتر می‌کنند [۲]. تاکنون روش‌های کنترلی بسیاری برای کنترل بازوی متحرک ربات پیشنهاد شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به کنترل مد لغزشی، کنترل تطبیقی، کنترل تطبیقی عصبی، کنترل مقاوم تطبیقی و غیره اشاره کرد [۱]-[۱۸]. بسیاری از طرح‌های کنترلی برای کنترل حرکت ربات، براساس اندازه‌گیری‌های کامل حالت یعنی اندازه‌گیری‌های موقعیت و سرعت بازوی متحرک ارائه شده است. اندازه‌گیری موقعیت بازو را می‌توان با استفاده از انکودرها که اندازه‌گیری بسیار دقیقی از جابه‌جایی‌های بازو را ارائه می‌دهند، بدست آورد. در مقابل، اندازه‌گیری سرعت بازو با استفاده از سرعت‌سنج‌ها بدست می‌آید که اغلب با نویز همراه هستند و از طرفی، وزن ربات با وجود سرعت‌سنج‌ها افزایش می‌یابد که باعث می‌شود از عملکرد دینامیکی بازو کاسته شود. از این رو، این نکته اهمیت دارد که برای عملکرد کنترل مناسب و حفظ کنترل با دقت بالا، تنها به اندازه‌گیری‌های موقعیت نیاز داریم و به منظور حذف نیاز به سرعت‌سنج‌ها از یک مشاهده‌گر سرعت می‌توان استفاده کرد [۳]. از طرفی، بسیاری از روش‌های کنترلی به دانش قبلی از دینامیک‌های بازوی متحرک نیاز دارند یا برای سادگی دینامیک‌های موجود در مدل دینامیکی مانند دینامیک‌های پایه متحرک، دینامیک‌های بازو و دینامیک‌های ناشی از تعاملات بین پایه و بازو را نادیده می‌گیرند. چنین مسائلی سبب شده است که این طرح‌های کنترلی برای کاربردهای دنیای واقعی نامناسب باشند. روش کنترل تطبیقی نیازی به دانش دقیق قبلی از پارامترهای ربات نظیر جرم، ممان اینرسی یا ضرایب اصطکاک ندارد. مرجع [۴] یک کنترل کننده تطبیقی را براساس ماتریس رگرسیون برای چند

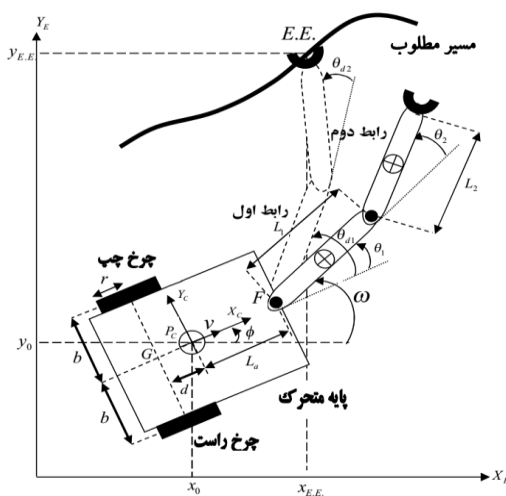
بازوی متحرک در حضور نامعینی‌ها، طراحی کرده است. در مرجع [۵] کنترل کننده تطبیقی به منظور تضمین این که حالت‌های یک سیستم حلقه بسته بطور مجانبی مسیر مطلوب را تحت قیود هولونومیکی در حضور اغتشاشات و نامعینی‌ها دنبال می‌کند، پیشنهاد شده است. حجم محاسباتی بالا، هزینه زیاد پیاده‌سازی و عدم مقاومت در برابر اغتشاشات کران‌دار از جمله معایب روش کنترل تطبیقی می‌باشد. مرجع [۶] کنترل حرکت بازوهای متحرک غیرهولونومیک در حضور نامعینی‌ها و اغتشاشات را بررسی کرده و یک کنترل کننده مقاوم تطبیقی برای مقابله با نامعینی‌های مدل و اغتشاشات کران‌دار پیشنهاد کرده است. این روش کنترلی ترکیب بهترین ویژگی‌های کنترل کننده مقاوم و تطبیقی است، اما تا حدودی سیگنال‌های کنترلی ناهموار را بوجود می‌آورد که برای تبدیل آن‌ها به سیگنال‌های هموارتر، ترکیب شبکه عصبی با کنترل کننده مقاوم تطبیقی پیشنهاد می‌شود. زیرا شبکه‌های عصبی با توجه به توانایی در قدرت یادگیری، اثبات کردند که ابزار مناسبی برای کنترل سیستم‌های دینامیکی غیرخطی پیچیده می‌باشند [۷]. در مرجع [۸] یک الگوریتم کنترل مقاوم تطبیقی برای بازوی متحرک براساس شبکه عصبی مقاوم به منظور مقابله با اغتشاشات، غیرخطی‌ها و قیود غیرهولونومیکی بین پایه متحرک و بازوی نصب شده روی آن، توصیف شده است. در این روش، به دلیل در نظر نگرفتن فیدبک خروجی یا به عبارتی وجود سنسور سرعت، وزن و هزینه ربات افزایش یافته و در نتیجه پیاده‌سازی مشکل‌تر می‌شود. برای رفع این مشکل از مشاهده‌گر مرتبه کاهش یافته، به منظور حذف سنسور سرعت می‌توان استفاده کرد. در مرجع [۹]، یک روش کنترل مقاوم تطبیقی عصبی مبتنی بر رؤیت‌گر برای کنترل یک بازوی زیردریایی هیدرولیکی پیشنهاد شده است. اما این روش کنترلی مسأله اشباع عملگرها را نادیده می‌گیرد و قابل اعمال به بازوی متحرک چرخ‌دار نیست. در مرجع [۱۰]، یک کنترل کننده غیرخطی براساس مدل سینماتیکی و دینامیکی بازوی متحرک با دراو تفاضلی بدون در نظر گرفتن نامعینی طراحی شده است. مسأله کنترل همکاری چندین بازوی متحرک در مرجع [۱۲] مورد توجه قرار گرفته است. در مرجع [۱۳]، مدل سازی و کنترل بازوهای متحرک بر مبنای تکنیک‌های کنترل مقاوم و تطبیقی به طور مفصل ارائه شده است. یک کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی برای کنترل ردیابی مسیر بازوی متحرک تمام جهته در مرجع [۱۷] پیشنهاد شده است. مرجع [۱۸] نیز مسأله کنترل فیدبک خروجی مقاوم تطبیقی را برای بازوهای متحرک غیرهولونومیکی مورد توجه قرار داده است. متأسفانه، اغلب کارهای قبلی

¹ Workspace

² Differentially-Driven

بازوی متحرک چرخ دار شکل ۱ شامل دو قسمت بازوی ماهر و بدنه متحرک می باشد. بدنه متحرک، دو چرخ فعال دارد که محور این چرخ ها در یک راستا واقع شده اند و b فاصله هر چرخ نسبت به خط مرکزی است. خط واصل چرخ ها نسبت به مرکز جرم، در فاصله d واقع شده است. پارامترهای r ، L_a ، L_1 و L_2 به ترتیب شعاع چرخ ها، فاصله پایه بازو تا مرکز جرم و طول رابط ها را نشان می دهند. دستگاه مختصات متصل به بدنه را به صورت (O_B, X_B, Y_B) و دستگاه مختصات متصل به زمین به صورت (O_E, X_E, Y_E) نمایش داده شده است. بردار حالت با $q = [x_0, y_0, \phi, \theta_1, \theta_2]^T$ معرفی می شود که در آن x_0 و y_0 مختصات نقطه P_c در دستگاه مختصات متصل به زمین و زاویه ϕ مختصات متصل به بدنه را نسبت به مختصات متصل به زمین ایجاد می کند که این زاویه سمت گیری ربات را تعیین می کند. متغیر θ_1 زاویه نسبی بین مختصات بدنه و لینک اول است و θ_2 جهت گیری نسبی لینک دوم نسبت به لینک اول را توصیف می کند. تنها قید در نظر گرفته شده در این مقاله، از رفتار غیرهولونومیک چرخ ها بدست می آید و سرعت پایه متحرک را در جهت عمود بر جهت غلتش چرخ ها محدود می کند که به صورت زیر داده شده است [۱۰]:

$$-\dot{x} \sin \phi + \dot{y} \cos \phi - \dot{\phi} d = 0 \quad (1)$$



شکل ۱- توصیف ربات در دستگاه های مختصات

معادله قید در رابطه (۱) برای بازوی متحرک چرخ دار را می توان به شکل ماتریسی $A(q)\dot{q} = 0$ بیان کرد که این معادله انتگرال ناپذیر به عنوان محدودیت غیرهولونومیک در حرکت ربات های متحرک یاد می شود که مفهوم شهودی این محدودیت در یک ربات متحرک با مکانیزم چرخ های موازی، عدم توانایی آن در حرکت از پهلو است. $A(q)$ در این مورد یک

روی کنترل بازوهای متحرک [۱]-[۱۸] نیازمند حسگرهای سرعت هستند و یا سیگنال های کنترلی غیر قابل پیاده سازی تولید می کنند و از مسأله اشباع عملگرها صرف نظر می کنند. در این مقاله، با ترکیب یک مشاهده گر کاهش مرتبه یافته و شبکه های عصبی تابع پایه شعاعی^۱، برای اولین بار یک طرح جدید کنترل فیدبک خروجی غیرخطی مقاوم تطبیقی برای سیستم بازوی متحرک چرخ دار با درایو تفاضلی در حضور نامعینی های پارامتری و غیرپارامتری بدون اندازه گیری های سرعت و کاهش خطر اشباع عملگر را توأماً توسعه داده ایم. با مرور پژوهش های پیشین [۱]-[۱۸]، نوآوری هایی که در این مقاله انجام شده است، به صورت زیر ارائه می شوند:

۱. در این مقاله، با استفاده از تابع اشباع تانژانت هایپربولیک دامنه سیگنال های خطاهای ردیابی و تخمین حالت محدود شده اند تا خطر اشباع عملگر کاهش یابد و سیگنال های کنترلی هموارتری تولید شوند. در حالی که در کارهای پیشین نظیر [۱]-[۱۸]، دامنه سیگنال های کنترلی با افزایش خطای ردیابی اولیه بسیار زیاد می شود و خطر اشباع عملگرها را افزایش می دهد.
۲. بسیاری از کارهای قبلی برای پیاده سازی به حسگرهای سرعت نیاز دارند. در این مقاله، یک رؤیت گر با به کار گیری تابع اشباع برای حذف حسگرهای سرعت سیستم به منظور کاهش هزینه پیاده سازی و کاهش وزن ربات طراحی شده است.
۳. به منظور جبران نامعینی های پارامتری و غیر خطی در پارامتر از شبکه های عصبی تابع پایه شعاعی استفاده می شود. برای جبران نامعینی های غیرپارامتری و خطای تقریب شبکه عصبی، یک کنترل کننده مقاوم تطبیقی نوع اشباع به طور مؤثری به کار گرفته شده است.

این مقاله، از بخش های زیر تشکیل شده است. در بخش دوم، مدل ریاضی غیرخطی بازوی متحرک چرخ دار و مقدمات استفاده آن در طراحی کنترل کننده ارائه شده است. در بخش سوم، اهداف کنترل، فرض ها و لم ها به منظور اثبات پایداری بیان شده است. در بخش چهارم، به بررسی طرح کنترل فیدبک خروجی مقاوم تطبیقی شبکه عصبی برای سیستم بازوی متحرک چرخ دار با وجود دینامیک های نامعین و اغتشاشات نامعلوم زمانی که سرعت بازوی متحرک چرخ دار در دسترس نیستند، می پردازیم. سپس، در بخش پنجم به تحلیل پایداری کنترل کننده پیشنهادی پرداخته شده است. در نهایت، در بخش های ششم و هفتم به ترتیب نتایج شبیه سازی و نتیجه گیری را خواهیم داشت.

۲- مدل حرکت بازوی متحرک

^۱ Radial Basis Function Neural Networks (RBFNN)

$$\begin{aligned} x_{E.E.} &= x_0 + L_a \cos \phi + L_1 \cos(\phi + \theta_{d1}) \\ &\quad + L_2 \cos(\phi + \theta_{d1} + \theta_{d2}) \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن θ_{d1} و θ_{d2} زوایای مطلوب θ_1 و θ_2 را برای قرار گرفتن در موقعیت مطلوب نشان می‌دهند. منظور از این که مجری نهایی و پایه متحرک موقعیت مطلوب را دنبال کند، این است که مختصات موقعیت‌های مطلوب را کنترل کنیم. در واقع هدف ما کنترل مختصات $(x_{E.E.}, y_{E.E.})$ و زوایای θ_1 و θ_2 می‌باشد. به این منظور، بردار خروجی جدید با نام η را به صورت زیر تشکیل می‌دهیم که شامل متغیرهای کنترل است:

$$\eta = h(q) = \begin{bmatrix} x_{E.E.} \\ y_{E.E.} \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} x_0 + L_a \cos \phi + L_1 \cos(\phi + \theta_{d1}) + L_2 \cos(\phi + \theta_{d1} + \theta_{d2}) \\ y_0 + L_a \sin \phi + L_1 \sin(\phi + \theta_{d1}) + L_2 \sin(\phi + \theta_{d1} + \theta_{d2}) \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۸) و جایگذاری معادله (۶) در آن، معادله سینماتیک سرعت بازوی متحرک چرخ‌دار دو لینیکی با درایو تفاضلی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -L_a \sin \phi - L_1 \sin(\phi + \theta_{d1}) - L_2 \sin(\phi + \theta_{d1} + \theta_{d2}) & 0 & 0 \\ \sin \phi & L_a \cos \phi + L_1 \cos(\phi + \theta_{d1}) + L_2 \cos(\phi + \theta_{d1} + \theta_{d2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

حال با در نظر گرفتن $\dot{\eta} = [\dot{x}_{E.E.} \ \dot{y}_{E.E.} \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$ و همچنین با داشتن رابطه (۹) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\eta} = J(q)v \quad (10)$$

که $J(q)$ ماتریس ژاکوبین نامیده می‌شود و یک ماتریس رتبه کامل^۲ است. برای تحلیل سرعت بازوی ربات، از ماتریس ژاکوبین استفاده می‌شود. مشتق زمانی معادله (۱۰) به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\ddot{\eta} = \dot{J}(q)v + J(q)\dot{v} \quad (11)$$

بردار است که به صورت زیر قابل تعریف می‌باشد:

$$A(q) = \begin{bmatrix} -\sin \phi & \cos \phi & -d & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

فرض کنید $N(q)$ یک ماتریس شامل مجموعه‌ای از بردارهای مستقل خطی و هموار $n_1(q), n_2(q), n_3(q)$ و $n_4(q)$ باشد که در فضای پوچی^۱ ماتریس $A(q)$ به صورت $A(q)N(q) = 0$ واقع شده‌اند. مجموعه‌های ممکن بسیاری از بردارهای $n_1(q), n_2(q), n_3(q)$ و $n_4(q)$ وجود دارند که یکی از آن‌ها به صورت زیر است [۱۰]:

$$N(q) = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 & n_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(b \cos \phi - d \sin \phi) & c(b \cos \phi + d \sin \phi) & 0 & 0 \\ c(b \sin \phi + d \cos \phi) & c(b \sin \phi - d \cos \phi) & 0 & 0 \\ c & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

که $c = r/2b$ است و r شعاع چرخ می‌باشد. حال، رابطه سینماتیک سرعت را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{q} = N(q)v, \quad v = [\dot{\theta}_R, \dot{\theta}_L, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T \quad (4)$$

که $\dot{\theta}_R$ و $\dot{\theta}_L$ سرعت زوایای چرخ‌های چپ و راست هستند. برای سادگی، سرعت خطی $v = (r\dot{\theta}_R + r\dot{\theta}_L)/2$ و سرعت زوایای $\omega = c(\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L)$ را برای بدنه متحرک در نظر می‌گیریم و بردار سرعت جدید v به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$v = \begin{bmatrix} v & \omega & \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

اگر برای سادگی $d = 0$ را در نظر بگیریم، معادله سینماتیک بدنه متحرک به صورت زیر باز نویسی می‌شود [۱۱]:

$$\dot{q} = N_n(q)v = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & 0 & 0 \\ \sin \phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

هدف اصلی در این مقاله این است که مجری نهایی بازوی متحرک بتواند یک مسیر زمانی مطلوب را دنبال کند. براساس شکل ۱، موقعیت مطلوب مجری نهایی را با $(x_{E.E.}, y_{E.E.})$ نشان می‌دهیم و زوایای مطلوب روابط را برای رسیدن به آن به صورت θ_{d1} و θ_{d2} در نظر می‌گیریم. برای بررسی سینماتیک بازوی نصب شده بر روی پایه متحرک، مطابق شکل ۱، موقعیت مطلوب مجری نهایی را به صورت زیر تصویرسازی می‌کنیم [۱۲]:

² Full Rank

¹ Null Space

مدل دینامیکی ربات، به کمک روش اولر لاگرانژ به صورت زیر بدست می آید:

$$M_a(q)\ddot{q} + C_a(q, \dot{q})\dot{q} + D_a\dot{q} + \tau_d(t) = B_a(q)\tau(t) - A_a^T(q)\lambda \quad (12)$$

که $M_a(q)$ ماتریس اینرسی، $C_a(q, \dot{q})$ ماتریس کوریولیس و گریز از مرکز، D_a ماتریس اصطکاک ویسکوز و ضرایب میرایی، $\tau_d(t)$ گشتاور اغتشاشات خارجی، دینامیک های مدل نشده و اصطکاک کولمب، $B_a(q)$ ماتریس تبدیل ورودی، $A_a^T(q, 0)^T$ و $\tau(t)$ بردار گشتاور ورودی می باشد. با مشتق گیری از رابطه (۶)، رابطه زیر نتیجه می شود:

$$\ddot{q} = \dot{N}_n v + N_n \dot{v} \quad (13)$$

با ضرب N_n^T از سمت چپ در معادله (۱۲)، در نظر گرفتن $A_a(q)N_n(q) = 0$ و جایگذاری رابطه (۱۳) در این رابطه داریم:

$$M_c(q)\dot{v} + C_c(q, v)v + D_c(q)v + \tau_d(t, q) = B_c(q)\tau(t) \quad (14)$$

که در آن $M_c(q) = N_n^T(q)M_a(q)N_n(q)$

$$C_c(q, v) = N_n^T(q)(M_a(q)\dot{N}_n + C_a(q, \dot{q})N_n)$$

$$D_c(q) = N_n^T(q)D_aN_n(q) \quad \tau_d(t, q) = N_n^T(q)\tau_d(t) \quad \text{و}$$

$$B_c(q) = N_n^T(q)B_a(q)$$

زیر می رسیم:

$$v = J^{-1}(q)\dot{q} \quad (15)$$

$$\dot{v} = J^{-1}(q)\ddot{q} - J^{-1}(q)\dot{J}(q)v \quad (16)$$

که $J^{-1}(q)$ معکوس ماتریس ژاکوبین است. با جایگذاری معادلات (۱۵) و (۱۶) در رابطه (۱۴) و ضرب $J^{-T}(q)$ از سمت چپ در رابطه، دینامیک بازوی متحرک چرخ دار را به شکل زیر بدست می آوریم:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D(q)\dot{q} + \tau_w(t, q) = B(q)\tau(t) \quad (17)$$

که در آن $M(q) = J^{-T}(q)M_c(q)J^{-1}(q)$

$$C(q, \dot{q}) = J^{-T}(q)(C_c(q, v) - M_c(q)J^{-1}(q)\dot{J}(q))J^{-1}(q)$$

$$D(q) = J^{-T}(q)D_c(q)J^{-1}(q)$$

$$B(q) = J^{-T}(q)B_c(q) \quad \tau_w(t, q) = J^{-T}(q)\tau_d(t, q)$$

می باشد. با توجه به مراجع [۱۳]-[۱۴]، خواص ساختاری زیر برای مدل (۱۷) ارائه می شود:

خاصیت ۱: $M(q) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ، ماتریس اینرسی جرم یک ماتریس

مثبت معین و متقارن است به عبارتی $M^T(q) = M(q) > 0$. ماتریس

اینرسی از بالا و پایین کران دار می باشد یعنی $m_1 \leq \|M(q)\| \leq m_2$ که m_1 و m_2 ثابت های اسکالر مثبت هستند.

خاصیت ۲: $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ، ماتریس کوریولیس و نیروهای جانب مرکز، رابطه زیر را برقرار می کند:

$$C(q, x_1)x_2 = C(q, x_2)x_1 \quad \forall q \in \mathbb{R}^5, x_1, x_2 \in \mathbb{R}^4 \quad (18)$$

از طرفی، دقت شود که ماتریس $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ پادمتقارن است، بدین معنی که $x^T(\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q}))x = 0, \forall x, \dot{q} \in \mathbb{R}^4$.

خاصیت ۳: $D \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ یک ماتریس مثبت معین و متقارن است که شامل ماتریس ضرایب میرایی و اصطکاک ویسکوز می باشند. این ماتریس از بالا و پایین به صورت زیر کران دار می باشد:

$$\lambda_d \|x\|^2 \leq x^T D(q)x \leq \lambda_D \|x\|^2 \quad \forall x \in \mathbb{R}^4, q \in \mathbb{R}^5 \quad (19)$$

که $\lambda_D = \max_{q \in \mathbb{R}^5} \lambda_{\max}(D(q))$ و $\lambda_d = \min_{q \in \mathbb{R}^5} \lambda_{\min}(D(q))$ است و همچنین رابطه $0 < \lambda_d \leq \lambda_D < \infty$ برقرار است.

خاصیت ۴: ثابت اسکالر مثبت λ_c ماتریس کوریولیس را به صورت زیر کران دار می کند:

$$\|C(q, \dot{q})\| \leq \lambda_c \|\dot{q}\| \quad (20)$$

۳- اهداف کنترلی

هدف کنترلی مورد نظر در این مقاله، طراحی یک قانون کنترل فیدبک خروجی برای یک سیستم بازوی متحرک چرخ دار، تحت ملزومات زیر می باشد:

- خطای ردیابی $e(t) = \eta(t) - \eta_d(t)$ ، در حضور نامعینی های ساختار یافته و بدون ساختار، حداقل به طور یکنواخت نهایتاً کران دار گردد.
- اندازه گیری سیگنال های سرعت برای فیدبک قابل دسترسی نیستند.
- کنترل کننده پیشنهادی بایستی مشکل اشباع عملگرها را به منظور جلوگیری از عملکرد ضعیف ردیابی سیستم با وجود بزرگ بودن خطای ردیابی اولیه در نظر بگیرد.

در نظر گرفتن فرض های زیر، به منظور توسعه اهداف کنترلی بالا ضروری هستند:

فرض ۱: بردار حالت $q(t)$ برای فیدبک به صورت بلادرنگ قابل اندازه گیری است.

که $\lambda_{\min} \{M\}$ بیانگر کوچکترین مقدار ویژه و $\lambda_{\max} \{M\}$ بیانگر بزرگترین مقدار ویژه ماتریس M می باشد.

لم ۴- چنانچه a, b, p و q اعداد حقیقی و مثبت باشند به نحوی که مجموع معکوسهای p و q برابر یک باشد، آنگاه نامساوی یانگ به صورت زیر برقرار است:

$$ab \leq a^p / p + b^q / q \quad (23)$$

از طرفی، می توان اثبات کرد که به ازای $x, y \in \mathbb{R}^n$ و اسکالر k نامساوی زیر برقرار است [۱۶]:

$$x^T M y \leq \frac{1}{2k^2} \lambda_{\max} \{M\} \|x\|^2 + \frac{k^2}{2} \lambda_{\max} \{M\} \|y\|^2 \quad (24)$$

۴- طراحی کنترل کننده

در این بخش، یک کنترل کننده ردیاب برای بازوی متحرک به منظور دنبال کردن مسیر مطلوب ارائه می شود. برای این منظور، خطاهای تخمین حالت و ردیابی به ترتیب به صورت $\tilde{\eta}(t) = \eta(t) - \hat{\eta}(t)$ و $e(t) = \eta(t) - \eta_d(t)$ بیانگر بردار حالت جدید در (۸)، $\hat{\eta}(t)$ نشان دهنده تخمین حالت $\eta(t)$ و $\eta_d(t)$ مسیر مطلوب می باشد. سپس، متغیرهای خطای زیر معرفی می گردند:

$$s(t) = \dot{e}(t) + A_p \tanh(e(t) - \tilde{\eta}(t)) \quad (25)$$

$$= \dot{e}(t) + A_p \tanh(\hat{e}(t)), \quad (26)$$

که $\hat{e}(t) = \hat{\eta}(t) - \eta_d(t)$ است و $A_p \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ یک ماتریس بهره مثبت معین متقارن می باشد. با جایگذاری رابطه (۲۵) در رابطه (۱۷)، معادله زیر بدست می آید:

$$M(q)\dot{s} = -C(q, \dot{\eta})s - D(q)s + B(q)\tau(t) + \zeta - \tau_w(t, q) + \chi_1 \quad (27)$$

که در آن ζ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\zeta = -M(q)\ddot{\eta}_d - C(q, \dot{\eta}_d)\dot{\eta}_d - D(q)\dot{\eta}_d \quad (28)$$

با استفاده از خواص تقریب شبکه عصبی تابع پایه شعاعی، ζ به شکل زیر تقریب زده می شود [۱۴]، [۱۷]:

$$\zeta = W\sigma(x_w) + \varepsilon(x_w) \quad (29)$$

که $W \in \mathbb{R}^{4 \times \ell}$ ، یک ماتریس وزن نامعلوم است و $\sigma(x_w)$ برداری به صورت $\sigma(x_w) = [\sigma_1(x_w), \dots, \sigma_\ell(x_w)]^T$ می باشد که $\sigma_j(x_w)$ تابع پایه شعاعی j ام است که به صورت

فرض ۲: مسیر مطلوب $\eta_d(t)$ ، به گونه ای انتخاب گردیده است که $\dot{\eta}_d(t)$ و $\ddot{\eta}_d(t)$ همگی سیگنالهای کراندار هستند، بدین معنی که شرایط $\sup_{t \geq 0} \|\dot{\eta}_d(t)\| < B_{dv}$ ، $\sup_{t \geq 0} \|\eta_d(t)\| < B_{dp}$ و $\sup_{t \geq 0} \|\ddot{\eta}_d(t)\| < B_{da}$ برقرار باشند که B_{dv} ، B_{dp} و B_{da} ثابتهای مثبت نامعین هستند.

فرض ۳: بردار اغتشاشهای خارجی به صورت زیر کراندار است که در آن λ_w ثابت نامعلوم می باشد.

$$\|\tau_w(t, q)\| \leq \lambda_w \quad (21)$$

فرض ۴: وزنهای شبکه عصبی کراندار هستند به طوری که شرط (۲۴) $\|W\|_F \leq W_M$ برقرار باشد که W_M ثابتهای مثبت نامعین هستند.

لمهای کمکی زیر در اثبات پایداری سیستم کنترل حلقه بسته استفاده می شوند:

لم ۱- خواص توابع هایپربولیک زیر به سادگی قابل اثبات هستند [۳]:

$$\cdot \quad \tanh^2(\xi) / 2 \leq \ln(\cosh(\xi)) \leq \xi^2, \forall \xi \in \mathbb{R}$$

$$\cdot \quad \ln(\cosh(\xi)) \rightarrow \infty \text{ و } \ln(\cosh(\xi)) > 0, \forall \xi \neq 0$$

$$\cdot \quad \text{صورتی که } |\xi| \rightarrow \infty$$

$$\cdot \quad |\tanh(k_1 x + k_2 y) - \tanh(k_2 y)| \leq k_1 |x|, \forall x, y \in \mathbb{R}$$

$$\cdot \quad |\tanh(x) - \tanh(x - y)| \leq |y|, \forall x, y \in \mathbb{R}$$

$$\cdot \quad |\tanh(k_1 x)| \leq k_1 |x|, \forall x \in \mathbb{R}$$

• از خاصیت ۴ می توان به خاصیت

$$|\tanh(x)|^2 \leq |x| |\tanh(x)| = x \tanh(x), \forall x \in \mathbb{R}$$

$$\cdot \quad x^T \Psi \tanh(x) \geq \lambda_{\min} \{\Psi\} \|\tanh(x)\|^2, \forall \Psi \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

• از خاصیت ۱ می توان به خاصیت

$$\tanh^2(\xi) \leq \xi^2, \forall \xi \in \mathbb{R}$$

$$\cdot \quad \|\tanh(x)\|^2 \leq \|x\|^2 \text{ سوق می دهد.}$$

لم ۲ [۱۵]- نامساوی $\|h\|x - x^T h \tanh(vh x / \varepsilon_t) \leq n \varepsilon_t$ به

ازای هر $\varepsilon_t > 0$ و برای هر $x \in \mathbb{R}^n$ و $h \in \mathbb{R}$ برقرار است که

v یک مقدار ثابت که از رابطه $v = e^{-(v+1)}$ بدست می آید و به عبارت دیگر $v = 0.2785$.

لم ۳- چنانچه M ماتریس مثبت معین باشد، به ازای $x \in \mathbb{R}^n$ نامساوی ریلی ریتز به صورت زیر برقرار است:

$$\lambda_{\min} \{M\} \|x\|^2 \leq x^T M x \leq \lambda_{\max} \{M\} \|x\|^2 \quad (22)$$

که در روابط فوق $\text{Proj}_\bullet$ بیانگر عملگر تصویرسازی پارامتر است [۱۹] و $\hat{a}$ ، γ_a و γ_w بهره‌های تطبیقی را نشان می‌دهند. حال، مشاهده‌گر غیرخطی زیر برای تخمین سیگنال خطای سرعت پیشنهاد می‌گردد:

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}(t) = \xi(t) + A_p \tanh(\tilde{\eta}(t)) + k_d \tilde{\eta}(t) - \dot{\eta}_d(t) \\ \dot{\xi}(t) = \ddot{\eta}_d(t) - A_p \text{sech}^2(\hat{e}(t))\dot{\hat{e}}(t) + k_d A_p \tanh(\tilde{\eta}(t)) \end{cases} \quad (35)$$

که در آن k_d بهره مشاهده‌گر است. شرایط اولیه برای مشاهده‌گر به صورت $\tilde{\eta}_i(0) = 0$ ، $\xi_i(0) = -A_{pi} \tanh(\tilde{\eta}_i(0)) - k_{di} \tilde{\eta}_i(0) + \dot{\eta}_{di}(0)$ و $\dot{\hat{e}}_i(0) = 0$ به انتخاب شده‌اند. به سادگی از تفاضل روابط (۲۵) و (۲۶) به رابطه زیر می‌رسیم:

$$s - r = \dot{\hat{e}} + A_p \tanh(\hat{e}) - A_p \tanh(\tilde{\eta}) \quad (36)$$

با جایگذاری روابط (۲۹) و (۳۲) در معادله (۲۷)، معادله دینامیکی خطای حلقه بسته زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} M(q)\dot{s} = & -C(q, \dot{\eta})s - D(q)s - K_p(s - r) \\ & - \hat{a} \tanh(v\hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a) + \tilde{W}\sigma(x_w) + \varepsilon(x_w) - \tau_w(t, q) + \chi_1 \end{aligned} \quad (37)$$

که $\tilde{W} = W - \hat{W}$ خطای تقریب ماتریس وزن‌ها است. با مشتق‌گیری از دو طرف معادله اول رابطه (۳۵) و جایگذاری رابطه دوم در (۳۵) به $\dot{s}_i = \dot{r}_i + k_{di} r_i$ می‌رسیم که معادله دینامیکی خطای مشاهده‌گر زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\begin{aligned} M(q)\dot{r} = & -C(q, \dot{\eta})r - k_d M(q)r - K_p(s - r) \\ & - \hat{a} \tanh(v\hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a) + \tilde{W}\sigma(x_w) + \varepsilon(x_w) - \tau_w(t, q) + \chi_2 \end{aligned} \quad (38)$$

که $\chi_2 = \chi_1 - C(q, \dot{\eta})(\dot{\hat{e}} + A_p \tanh(\hat{e}) - A_p \tanh(\tilde{\eta})) - D(q)s$ می‌باشد و با توجه به خاصیت‌های ۱ و ۳ و همچنین با در نظر گرفتن یک خاصیت از ماتریس کوریولیس که به صورت $\|C(q, x_1)x_2\| \leq \lambda_c \|x_1\| \|x_2\|$ ، $\lambda_c \geq 0$ بیان می‌شود [۱۴]، χ_2 به صورت زیر کران‌دار شده است:

$$\|\chi_2\| \leq \beta_3 \|z\| + \beta_4 \|z\|^2 \quad (39)$$

که β_3 و β_4 ثابت‌های مثبت نامعین هستند. در بخش بعدی، تحلیل پایداری مبتنی بر لیاپانوف سیستم کنترل پیشنهادی ارائه می‌گردد.

۵- تحلیل پایداری

قضیه ۱- مدل کلی بازوی متحرک چرخ‌دار که توسط معادلات حرکت (۶) و (۱۴) و تبدیل مختصات (۱۰) مطرح شده‌اند، در نظر بگیرید. فرض کنید یک مسیر مطلوب کران‌دار داده شده است. با توجه به فرض‌های ۱ تا ۴، کنترل‌کننده فیدبک خروجی تطبیقی عصبی مقاوم پیشنهادی (۳۲)–(۳۵) تضمین می‌کند که تمامی سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته کران‌دار بوده و خطاهای ردیابی و تخمین حالت نهایتاً به طور

تعریف شده $\sigma_j(x_w) = \exp(-\|x_w - \mu_j\|^2 / \kappa_j^2)$ ، $j = 1, 2, \dots, \ell$ است. به علاوه، $\mu_j = [\mu_{j1}, \mu_{j2}, \dots, \mu_{jq}]^T$ به ترتیب بردار میانگین و انحراف معیار توابع گاوسی هستند. همچنین، $\|e(x_w)\| \leq B_e$ و $x_w = [q^T, \dot{q}_d^T, \ddot{q}_d^T]^T$ می‌باشند. برای جزئیات بیشتر، خواننده علاقه‌مند به مرجع [۱۴] ارجاع داده می‌شود. χ_1 نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \chi_1 = & M(q)A_p \text{sech}^2(\hat{e})\dot{\hat{e}} - C(q, s)(\dot{\eta}_d - A_p \tanh(\hat{e})) \\ & + C(q, \dot{\eta}_d)A_p \tanh(\hat{e}) + C(q, A_p \tanh(\hat{e}))\dot{\eta}_d \\ & - C(q, A_p \tanh(\hat{e}))A_p \tanh(\hat{e}) + D(q)A_p \tanh(\hat{e}) \end{aligned} \quad (30)$$

با به کارگیری روابط (۲۵) و (۲۶)، با استفاده از خاصیت‌های ۱ و ۳ و با توجه خاصیت ماتریس کوریولیس که به صورت $\|C(q, x_1)x_2\| \leq \lambda_c \|x_1\| \|x_2\|$ ، $\lambda_c \geq 0$ بیان می‌شود [۱۴]، χ_1 به شکل زیر کران‌دار می‌گردد:

$$\|\chi_1\| \leq \beta_1 \|z\| + \beta_2 \|z\|^2 \quad (31)$$

که β_1 و β_2 ثابت‌های مثبت نامعلوم هستند و $z = [\tanh^T(\hat{e}), \tanh^T(\tilde{\eta}), s^T, r^T]^T$ برای جلوگیری از طولانی‌تر شدن مقاله، اثبات نامساوی (۳۱) به خوانندگان علاقه‌مند واگذار می‌شود. با ایده گرفتن از [۱۸]، کنترل‌کننده زیر را در این مقاله پیشنهاد می‌کنیم:

$$\begin{cases} \tau(t) = B^{-1}(q) \left(-K_p \dot{\hat{e}} - K_p A_p \tanh(\hat{e}) + K_p A_p \tanh(\tilde{\eta}) \right. \\ \quad \left. - \hat{W}\sigma(x_w) - \hat{a} \tanh(v\hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a) \right) \\ \hat{s} + \hat{r} = \dot{\hat{e}} + A_p \tanh(\hat{e}) + A_p \tanh(\tilde{\eta}) \end{cases} \quad (32)$$

که $K_p \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ یک ماتریس بهره مثبت معین و مقارن را بیان می‌کند و $\hat{a} \in \mathbb{R}^{4 \times \ell}$ و $\hat{W} \in \mathbb{R}^{4 \times \ell}$ توسط قوانین تطبیق زیر به‌روزرسانی می‌شوند:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}} = & \text{Proj}_{\hat{W}} \left(\gamma_w (\hat{s} + \hat{r}) \sigma^T(x_w) \right) \\ = & \begin{cases} \gamma_w (\hat{s} + \hat{r}) \sigma^T, & \text{if } \text{tr}\{\hat{W}^T \hat{W}\} < W_m \text{ or} \\ & \text{if } \text{tr}\{\hat{W}^T \hat{W}\} = W_m \text{ and} \\ & \sigma^T \hat{W}^T (\hat{s} + \hat{r}) \leq 0 \\ \gamma_w (\hat{s} + \hat{r}) \sigma^T - \gamma_w \frac{\sigma^T \hat{W}^T (\hat{s} + \hat{r})}{\text{tr}\{\hat{W}^T \hat{W}\}} \hat{W}, & \text{if } \text{tr}\{\hat{W}^T \hat{W}\} = W_m \\ & \text{and } \sigma^T \hat{W}^T (\hat{s} + \hat{r}) > 0 \end{cases} \quad (33) \\ \dot{\hat{a}} = & \text{Proj}_{\hat{a}} \left(\gamma_a \|\hat{s} + \hat{r}\| \right) = \begin{cases} \gamma_a \|\hat{s} + \hat{r}\|, & \text{if } \hat{a} < a_m \\ 0, & \text{if } \hat{a} = a_m \end{cases} \quad (34) \end{aligned}$$

که $\tilde{s} + \tilde{r} = s + r - (\hat{s} + \hat{r}) = 2\tilde{\eta}$ و به صورت $\|\tilde{s} + \tilde{r}\| \leq \beta_5 \|z\|$ کراندار شده است که β_5 یک ثابت مثبت نامعلوم است و $c_j, j = 1, \dots, 4$ به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{aligned} c_1 &= \lambda_{\min}(K_p A_p) - \lambda_{\max}(K_p) - 0.5\lambda_{\max}(K_p A_p) \\ c_2 &= \lambda_{\min}(K_p A_p) - 0.5\lambda_{\max}(K_p) - 0.5\lambda_{\max}(K_p A_p) \end{aligned} \quad (45)$$

$c_3 = \lambda_{\min}(K_p + D(q)) - 0.5\lambda_{\max}(K_p) - 0.5\beta_2 - 0.5\beta_1$
 $c_4 = \lambda_{\min}(k_d M(q) - K_p) - \lambda_{\max}(K_p) - 0.5\beta_3 - 0.5\beta_4$
 با در نظر گرفتن خواص تصویر سازی [۱۹] و با استفاده از لم ۲، نامساوی‌های زیر را داریم:

$$\begin{aligned} \|\hat{s} + \hat{r}\| \tilde{a} - \tilde{a} \text{Proj}_{\tilde{a}}(\|\hat{s} + \hat{r}\|) &\leq 0 \\ (\hat{s} + \hat{r})^T \tilde{W} \sigma - \text{tr}\{\tilde{W}^T \text{Proj}_{\tilde{W}}((\hat{s} + \hat{r}) \sigma^T)\} &\leq 0 \end{aligned} \quad (46)$$

$\|\hat{s} + \hat{r}\| \hat{a} - \hat{a}(\hat{s} + \hat{r})^T \text{Tanh}(\nu \hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a) \leq 4\varepsilon_a$
 نامساوی $2ab \leq a^2 + b^2$ به ما کمک می‌کند که رابطه (۴۴) را به شکل زیر بیان کنیم:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -\left(c_m - 0.5(\beta_1 + \beta_3) - 0.5(\beta_2 + \beta_4)\|z\|^2\right)\|z\|^2 \\ &\quad + 4\varepsilon_a + \|\tilde{s} + \tilde{r}\| \delta \end{aligned} \quad (47)$$

که $c_m = \min\{c_j\}_{j=1}^4$ و $\delta = \|\tilde{W} \sigma\| + \|\hat{a} \text{Tanh}(\nu \hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a)\| + a$ به صورت $\delta \leq \delta_M$ کراندار شده است که $\delta_M = (W_M + \sqrt{W_M})\sqrt{\ell} + 2a_m + a$ می‌توان رابطه (۴۷) را بدین گونه بیان کرد:

$$\dot{V}(t) \leq -c\|z\|^2 + \gamma \quad (48)$$

که $\gamma = 4\varepsilon_a + \frac{1}{2}\beta_5\delta_M^2$ و $c = c_m - 0.5(\beta_1 + \beta_3 + \beta_5) - 0.5(\beta_2 + \beta_4)\|z\|^2$ اگر شرایط قضیه ۱ برقرار باشد، $c_j > 0, j = 1, \dots, 4$ و

آنگاه $\dot{V}(t)$ خارج از مجموعه $\Omega_z = \{z(t) | 0 \leq \|z(t)\| \leq \sqrt{\gamma/c}\}$ منفی است. در واقع، $V(t)$ خارج از مجموعه Ω_z نامساوی زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\lambda_z \|z\|^2 \leq V(t) \leq V(0) \leq \lambda_{ut} \|u_t(0)\|^2, \forall t \geq 0 \quad (49)$$

از معادله (۴۹)، رابطه $\|z(t)\|^2 \leq \lambda_{ut} / \lambda_z \|u_t(0)\|^2$ بدست می‌آید. بنابراین، یک شرط کافی برای $c_m > 0.5(\beta_1 + \beta_3 + \beta_5) + 0.5(\beta_2 + \beta_4)\|z\|^2$ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} c_m &> 0.5(\beta_1 + \beta_3 + \beta_5) \\ &\quad + 0.5(\beta_2 + \beta_4) \left(\lambda_{ut} / \lambda_z \|u_t(0)\|^2 \right) \end{aligned} \quad (50)$$

بدین صورت، نهایتاً ناحیه جذب زیر را خواهیم داشت:

یکنواخت کراندار نیمه کلی^۱ هستند و به همسایگی کوچکی شامل مبدأ همگرا می‌شوند.

اثبات - تابع لیپانوف زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} V(t) &= \sum_{j=1}^4 k_{pj} \ln \cosh(\hat{e}_j) + \frac{1}{2} s^T M(q) s + \sum_{j=1}^4 k_{pj} \ln \cosh(\tilde{\eta}_j) \\ &\quad + \frac{1}{2} r^T M(q) r + \frac{\text{tr}\{\tilde{W}^T \tilde{W}\}}{2\gamma_w} + \frac{\tilde{a}^2}{2\gamma_a} \end{aligned} \quad (40)$$

که $\tilde{a} = a - \hat{a}$ است. با استفاده از مورد اول لم ۱، تابع لیپانوف فوق می‌تواند به صورت زیر کراندار شود:

$$\lambda_z \|z\|^2 \leq \lambda_{zt} \|z_t\|^2 \leq V(t) \leq \lambda_{ut} \|u_t\|^2 \quad (41)$$

که $\lambda_z = 0.5 \min\{\{k_{pj}\}_{j=1}^4, \lambda_m\}$ ، $z_t = [z^T, \tilde{w}_{11}, \dots, \tilde{w}_{4\ell}, \tilde{a}]^T$ ، $\lambda_{ut} = \max\{\{k_{pj}\}_{j=1}^4, 0.5\lambda_m, 0.5\gamma_w^{-1}, 0.5\gamma_a^{-1}\}$ ، $u_t = [u^T, \tilde{w}_{11}, \dots, \tilde{w}_{4\ell}, \tilde{a}]^T$ ، $z = [\text{Tanh}^T(\hat{e}), \text{Tanh}^T(\tilde{\eta}), s^T, r^T]^T$ ، $\lambda_{zt} = 0.5 \min\{\{k_{pj}\}_{j=1}^4, \lambda_m, \gamma_w^{-1}, \gamma_a^{-1}\}$

هستند. از نامساوی بالا و عبارت دوم لم ۱، این موضوع واضح است که $V(t)$ مثبت معین، به طور شعاعی بی کران و نقصانی است. با مشتق گیری از رابطه (۴۰) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \text{Tanh}^T(\hat{e}) K_p \dot{e} + s^T M(q) \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M}(q) s + \text{Tanh}^T(\tilde{\eta}) K_p \dot{\tilde{\eta}} \\ &\quad + r^T M(q) \dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q) r + \text{tr}\{\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}\} / \gamma_w + \tilde{a} \dot{\tilde{a}} / \gamma_a \\ &= -\text{Tanh}^T(\hat{e}) K_p A_p \text{Tanh}(\hat{e}) - \text{Tanh}^T(\tilde{\eta}) K_p A_p \text{Tanh}(\tilde{\eta}) \\ &\quad - s^T (K_p + D(q)) s - r^T (k_d M(q) - K_p) r \end{aligned} \quad (42)$$

$+ \text{Tanh}^T(\hat{e}) K_p s - \text{Tanh}^T(\tilde{\eta}) K_p r + \text{Tanh}^T(\hat{e}) K_p A_p \text{Tanh}(\tilde{\eta})$
 $+ \text{Tanh}^T(\tilde{\eta}) K_p r + (s + r)^T (\varepsilon(x_w) - \tau_w(t, q))$
 $+ s^T \chi_1 + r^T \chi_2 - \hat{a}(\hat{s} + \hat{r})^T \text{Tanh}(\nu \hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a) + (\hat{s} + \hat{r})^T \tilde{W} \sigma(x_w)$
 $- \hat{a}(\hat{s} + \hat{r})^T \text{Tanh}(\nu \hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a) + (\tilde{s} + \tilde{r})^T \tilde{W} \sigma(x_w)$
 $- \text{tr}\{\tilde{W}^T \text{Proj}_{\tilde{W}}(\gamma_w (\hat{s} + \hat{r}) \sigma^T(x_w))\} / \gamma_w - \tilde{a} \text{Proj}_{\tilde{a}}(\|\hat{s} + \hat{r}\|)$
 با استفاده از نامساوی $2ab \leq a^2 + b^2$ و با در نظر گرفتن رابطه زیر

$$\|e(x_w) - \tau_w(t, q)\| \leq a \quad (43)$$

و همچنین با استفاده از جمله $a = \tilde{a} + \hat{a}$ ، رابطه (۴۲) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -c_1 \|\text{Tanh}(\hat{e})\|^2 - c_2 \|\text{Tanh}(\tilde{\eta})\|^2 - c_3 \|s\|^2 - c_4 \|r\|^2 \\ &\quad + 0.5(\beta_1 + \beta_3)\|z\|^2 + 0.5(\beta_2 + \beta_4)\|z\|^4 + \|\hat{s} + \hat{r}\| \tilde{a} + \|\hat{s} + \hat{r}\| \hat{a} \\ &\quad - \hat{a}(\hat{s} + \hat{r})^T \text{Tanh}(\nu \hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a) + (\hat{s} + \hat{r})^T \tilde{W} \sigma(x_w) \\ &\quad + (\tilde{s} + \tilde{r})^T \tilde{W} \sigma(x_w) - \hat{a}(\tilde{s} + \tilde{r})^T \text{Tanh}(\nu \hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a) + \|\tilde{s} + \tilde{r}\| a \\ &\quad - \text{tr}\{\tilde{W}^T \text{Proj}_{\tilde{W}}(\gamma_w (\hat{s} + \hat{r}) \sigma^T(x_w))\} / \gamma_w - \tilde{a} \text{Proj}_{\tilde{a}}(\|\hat{s} + \hat{r}\|) \end{aligned} \quad (44)$$

¹ Semi-Globally Uniformly Ultimately bounded (SGUUB)

انجام شده اند. L_i ، m_i و I_i به ازای $i = 1, 2$ به ترتیب طول، جرم و ممان اینرسی هر رابط بازو و C_i ضریب اصطکاک ویسکوز در هر مفصل می باشد. I_0 فاصله مرکز جرم پایه متحرک تا بازوی اول، m_c و I_c به ترتیب جرم و ممان اینرسی پایه متحرک، m_w و I_w به ترتیب جرم و ممان اینرسی هر چرخ، C_L و C_R شامل ضریب اصطکاک ویسکوز در چرخ راست و چپ می باشد. وضعیت اولیه ربات شامل موقعیت، سمت گیری و زوایای لینک ها به صورت $\eta(0) = [4, -2, 0, 0, 0]^T$ انتخاب شده اند. ردیابی مسیر مطلوب به منظور کنترل موقعیت مکانی مجری نهایی، به صورت زیر به شکل دایره ای با شعاع 3 و مرکز (2.5, 2.5) انتخاب می شود:

$$\eta_d(t) = \begin{bmatrix} 2.5 + 3\cos(0.05t) & 2.5 + 3\sin(0.05t) \end{bmatrix}^T \quad (53)$$

اصطکاک کولمب و دینامیک مدل نشده و اغتشاشات دینامیکی به صورت $\tau_w(t, q) = 2[\sin(0.05t), \sin(0.05t), \sin(0.05t), \sin(0.05t)]^T + 0.1\text{sign}(v)$ در نظر گرفته شده اند که جمله اول بیانگر دینامیک مدل نشده سیستم و جمله دوم نشان دهنده اصطکاک کولمب می باشد که در آن v به صورت زیر تعریف می شود:

$$v = \begin{bmatrix} r/2 & r/2 & 0 & 0 \\ r/(2b) & -r/(2b) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (54)$$

پارامترهای کنترل کننده و بهره های تطبیق مطابق جدول ۱ انتخاب می شوند. این مقادیر براساس سعی و خطا به صورتی انتخاب شده اند که بهترین پاسخ بدست آید. با این حال، با تنظیم بیشتر پارامترهای کنترلی می توان به پاسخ های بهتری نیز دست یافت.

جدول ۱: تنظیم بهره های کنترل کننده و مشاهده گر فیدبک خروجی عصبی تطبیقی

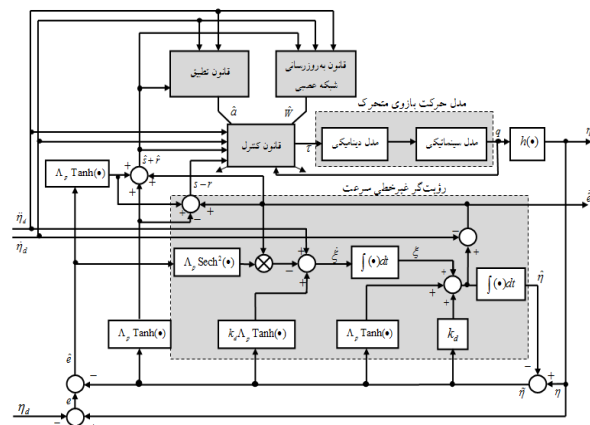
مقدار	سمبل	پارامتر
$7\text{diag}(3, 3, 0.1, 0.1)$	K_p	بهره کنترل کننده
10	k_d	بهره رویتگر
$3\text{diag}(5, 5, 0.1, 0.1)$	Λ_p	بهره کنترل کننده
2	γ_a	بهره تطبیق
180	a_m	ضریب σ ثابت
100	ε_a	ضریب ثابت بیانگر ضخامت لایه مرزی

برای تمام شبیه سازی ها، زمان نمونه برداری ۲۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. پارامترهای شبکه عصبی با تابع پایه شعاعی دارای $l = 12$ گره در لایه مخفی به منظور تخمین دینامیک های نامعین سیستم مطابق با

$$R_A = \left\{ u_i \in \mathbb{R}^p \mid \|u_i(t)\| < \sqrt{\frac{c_m - 0.5(\beta_1 + \beta_3 + \beta_5)}{0.5(\beta_2 + \beta_4)(\lambda_{u_i} / \lambda_z)}} \right\} \quad (51)$$

که $P = 4\ell + 17$ و $u_i = [\tilde{e}^T, \tilde{\eta}^T, s^T, r^T, \tilde{w}_{11}, \dots, \tilde{w}_{4\ell}, \tilde{a}]^T$ می باشد. باید توجه شود که ناحیه جذب R_A می تواند به دلخواه بزرگ در نظر گرفته شود که هر شرط اولیه ای را با انتخاب بهره های کنترلی به اندازه کافی بزرگ در بر گیرد. از بحث بالا به این نتیجه می رسیم که $\text{Tanh}^T(\tilde{e}), \text{Tanh}^T(\tilde{\eta}), s, r, \tilde{w}_{11}, \dots, \tilde{w}_{4\ell}, \tilde{a}$ به طور یکنواخت نهایتاً کران دار نیمه کلی هستند و به یک همسایگی کوچک شامل مبدأ همگرا می شوند. در نتیجه، $\tilde{e}_i(t)$ و $\tilde{\eta}_i(t)$ نیز با توجه به خواص توابع تانژانت هایپربولیک که در بخش قبل اشاره شد، به ناحیه ای کوچک شامل مبدأ همگرا می شوند. به علاوه، با در نظر گرفتن روابط (۲۵) و (۲۶)، $\dot{\tilde{e}}(t), \dot{\tilde{\eta}}(t) \in L_\infty$ در نهایت، با توجه به فرض های ۲ تا ۴ به این نتیجه می رسیم که تمام سیگنال ها در سیستم حلقه بسته کران دار هستند و به عبارتی $\eta(t), \dot{\eta}(t), q(t), v(t), \dot{v}(t), \tau(t), \hat{W}(t), \hat{a}(t) \in L_\infty$ می باشند. در نتیجه اثبات تکمیل می شود. □

در شکل ۲ دیاگرام کنترلی نشان داده شده است که η_d و $\ddot{\eta}_d$ به ترتیب بیانگر مسیر مطلوب و مشتقات مسیر مطلوب می باشند.

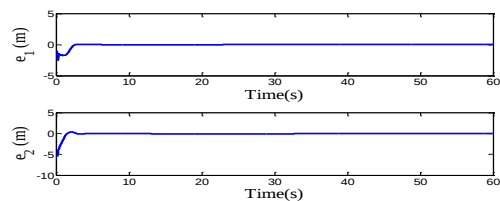
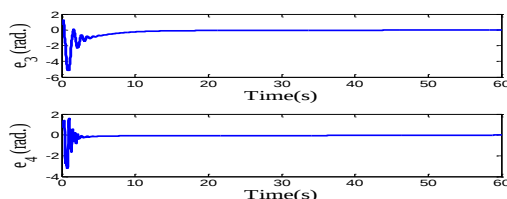


شکل ۲- بلوک دیاگرام کنترل کننده فیدبک خروجی تطبیقی عصبی مقاوم پیشنهادی.

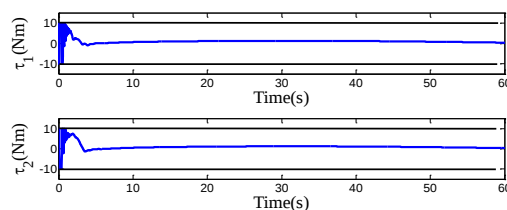
۶- نتایج شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه سازی به منظور اعتبارسنجی روش کنترلی مقاوم تطبیقی شبکه عصبی تابع پایه شعاعی با تابع اشباع به منظور کنترل بازوی متحرک چرخ دار در محیط MATLAB بر اساس مدل مرجع [۱۰] ارائه می گردد. شبیه سازی ها برای ربات دو درجه آزادی صفحه ای با پارامترهای زیر

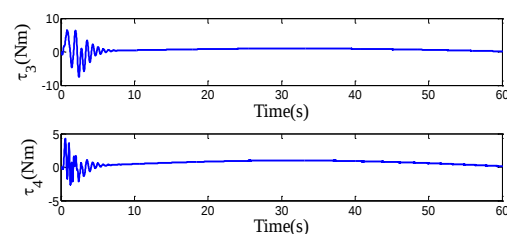
$$\begin{aligned} L_1 &= 0.514, L_2 = 0.362, L_0 = 0.2(m), m_1 = 2.56, m_2 = 1.07, \\ m_c &= 17.25, m_w = 0.159(kg), I_1 = 0.148, I_2 = 0.0228, I_c = 0.297, \\ I_w &= 2e - 4(kg.m^2), c_1 = 0.1, c_2 = 0.1, c_R = 0.1, c_L = 0.1(Nm.sec) \end{aligned} \quad (52)$$

شکل ۴- خطاهای ردیابی e_1 و e_2 شکل ۵- خطاهای ردیابی e_3 و e_4

در شکل ۶، سیگنال‌های کنترلی اعمال شده به بدنه متحرک و در شکل ۷، سیگنال‌های کنترلی مورد نیاز مفاصل دو بازو توسط کنترل کننده فیدبک خروجی عصبی تطبیقی مقاوم طراحی شده در حضور نامعینی‌ها، نشان داده شده است. به دلیل کوچک شدن خطاهای ردیابی و رؤیت بر روی مسیر مطلوب، سیگنال‌های گشتاور نهایتاً به مقادیر کوچکی حدود نیم تا یک نیوتن-متر میل کرده‌اند. با توجه به این شکل‌ها، علیرغم وجود نامعینی‌های پارامتری و غیرپارامتری، ردیابی و مقاومت کنترل کننده پیشنهادی کاملاً رضایت‌بخش می‌باشد. در این کنترل کننده، با محدود شدن دامنه سیگنال‌های کنترلی به صورت $|\tau(t)| \leq 10Nm$ و همچنین توسط تابع تانژانت هایپربولیک در کنترل کننده (۳۲) از خطر اشباع عملگرها کاسته شده است. اما محدود کردن سیگنال‌های کنترلی سبب کاهش سرعت همگرایی می‌گردد و در نتیجه پاسخ گذرا طولانی‌تر می‌شود.



شکل ۶- ورودی‌های کنترل کننده اعمال شده به بدنه متحرک



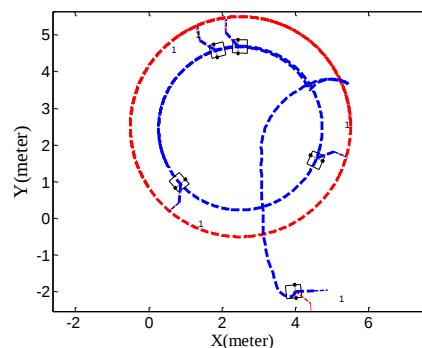
شکل ۷- ورودی‌های کنترل کننده مفاصل دو بازو

جدول ۲ انتخاب می‌گردند. در این شبیه سازی، ضرایب وزنی براساس سعی و خطا انتخاب شده‌اند. با وجود این که انتخاب در تعداد گره‌های بیشتر لایه مخفی، منجر به تخمین دقیق‌تری از نامعینی‌های پارامتری می‌شود اما افزایش تعداد گره‌ها، بار محاسباتی را نیز افزایش می‌دهد.

جدول ۲: پارامترهای شبکه عصبی

پارامتر	سمبل	مقدار
بهره تطبیق	γ_w	2
ضریب σ ثابت	W_m	10000
بردار میانگین تابع گاوسی	μ_x	$\mu_x = (-6, -5, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6)^T$
بردار انحراف معیار تابع گاوسی	λ_k	$\lambda_k = 10(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T$

با توجه به تنظیمات اولیه انجام شده، نتایج شبیه‌سازی برای کنترل کننده فیدبک خروجی عصبی مقاوم تطبیقی در زیر ارائه می‌گردد.



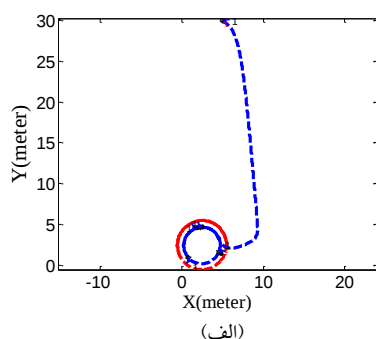
شکل ۳- بازوی متحرک دو درجه آزادی به همراه مسیر مطلوب مجری نهایی و مسیر پایه متحرک

با توجه به شکل ۳، خطوط قرمز و آبی به ترتیب ردیابی مطلوب مجری نهایی و مسیر حرکت پایه متحرک را در صفحه (X, Y) بیان می‌کنند که با اعمال کنترل کننده پیشنهادی، مجری نهایی بازوی متحرک به خوبی مسیر دایره‌ای را طی می‌کند. بردار آرایش مطلوب بازوی متحرک به صورت $q_d = [0.514 \ 0.362 \ -45\pi/180 \ -45\pi/180]^T$ در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴ خطای ردیابی موقعیت مجری نهایی در راستای X و Y برای رسیدن به موقعیت مطلوب را نشان می‌دهد که نهایتاً این خطا به کران بسیار کوچکی اطراف صفر همگرا شده است. شکل ۵ خطاهای ردیابی موقعیت زاویه‌ای رابط‌ها را با استفاده از کنترل کننده عصبی تطبیقی مقاوم برای رسیدن به موقعیت‌های زاویه‌ای مطلوب θ_{d1} و θ_{d2} نمایش می‌دهد.

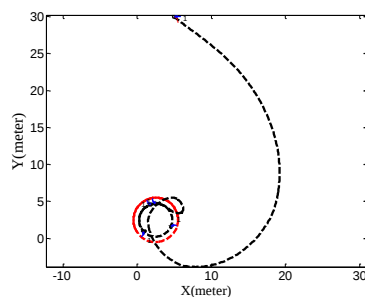
در زیر، معادله کنترل کننده فیدبک خروجی مشابه با مرجع [۱۸] برای بازوهای متحرک با استفاده از روش تطبیقی مقاوم عصبی تابع پایه شعاعی بدون استفاده از تابع تانژانت هاپربولیک به منظور مقایسه با کنترل کننده پیشنهادی ارائه شده است. نتایج شبیه سازی هر دو کنترل کننده در شکل های ۱۲ تا ۱۶ مطابق با پارامترهای رابطه (۵۲) نمایش داده شده اند.

$$\begin{cases} \tau(t) = B^{-1}(q) \left(-K_1(s-r) - K_2(e + \tilde{\eta}) - \hat{W}\sigma(x_w) - \hat{a}\text{Tanh}(\hat{v}\hat{a}(\hat{s} + \hat{r}) / \varepsilon_a) \right) \\ s = \dot{e} + A_p(e - \tilde{\eta}), \quad r = \dot{\tilde{\eta}} + A_p \tilde{\eta}, \\ \hat{s} + \hat{r} = \dot{\hat{\eta}} - \hat{\eta}_d + A_p e, \\ \dot{\hat{\eta}} = \xi + A_p \tilde{\eta} + k_d \tilde{\eta}, \\ \dot{\xi} = \ddot{\eta}_d - A_p(\dot{e} - \dot{\hat{\eta}}) + k_d A_p \tilde{\eta}, \end{cases} \quad (55)$$

شرایط شبیه سازی مشابه شبیه سازی قبل در نظر گرفته شده اند و هر دو کنترل کننده بهره های یکسان دارند.

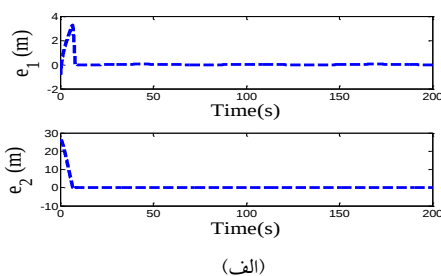


(الف)



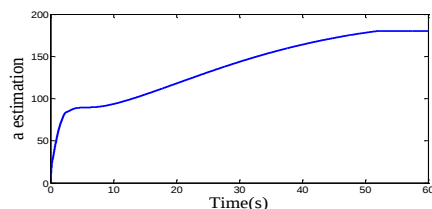
(ب)

شکل ۱۲- مسیر بازوی متحرک و مسیر مطلوب مجری نهایی: (الف) کنترل کننده پیشنهادی (ب) کنترل کننده (۵۵)

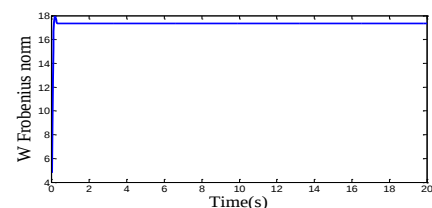


(الف)

در شکل های ۸ و ۹، به ترتیب تخمین کران بالای نامعینی های غیر پارامتری و اندازه فروبنیوس تخمین وزن های شبکه عصبی، نمایش داده شده است که از اصلاح سیگما در بروزرسانی قوانین تطبیق استفاده کرده ایم. همان گونه که مشخص است، این تخمین ها کران دار می باشند. پس می توان نتیجه گرفت که وجود اصلاح سیگما در قوانین تطبیقی که باعث به روز رسانی آن ها می گردد، به منظور افزایش مقاومت کنترلی کاملاً ضروری است و سبب بهبود مقاومت در تخمین پارامترها و تخمین وزن های شبکه عصبی می شود.

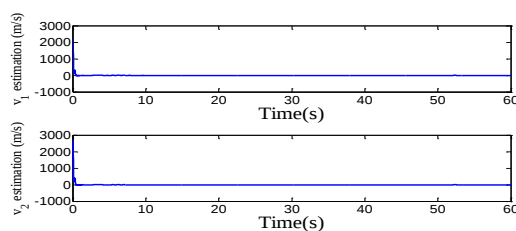


شکل ۸- تخمین پارامتر a

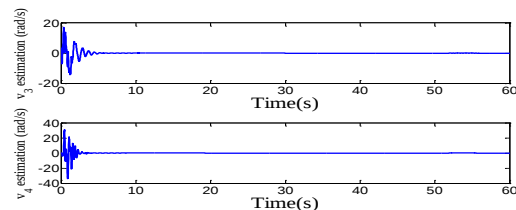


شکل ۹- تخمین وزن های شبکه عصبی

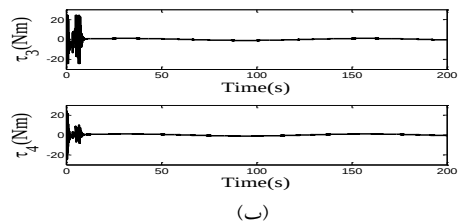
شکل ۱۰، خطای تخمین سرعت مجری نهایی و شکل ۱۱، خطاهای تخمین سرعت زاویه ای رابطه ها را که توسط مشاهده گر سرعت بدست آمده است را ارائه می دهند. همان طور که مشاهده می شود، رؤیت گر سرعت طراحی شده این تخمین ها را به خوبی فراهم می کند و تمام خطاها به همسایگی صفر همگرا می شوند.



شکل ۱۰- خطاهای تخمین سرعت مجری نهایی

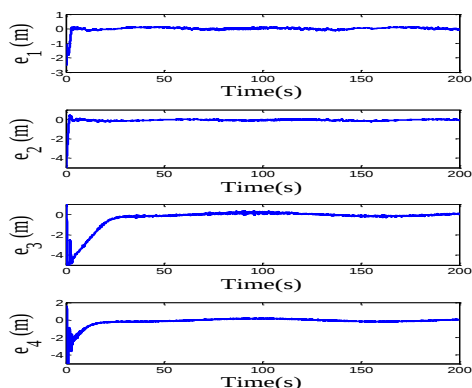


شکل ۱۱- خطاهای تخمین سرعت زاویه ای رابطه ها



شکل ۱۶- ورودی های کنترل کننده مفاصل دو بازو: (الف) کنترل کننده پیشنهادی (ب) کنترل کننده (۵۵)

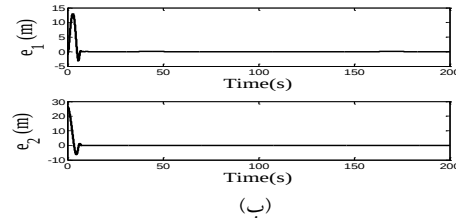
همان طور که از شکل های ۱۲ تا ۱۶ ملاحظه می شود، عملکرد کنترل کننده پیشنهادی نرم تر و هموارتر از عملکرد کنترل کننده (۵۵) است. شبیه سازی ها نشان می دهند که با افزایش خطای ردیابی اولیه برای هر دو کنترل کننده، سیگنال های کنترلی کنترل کننده (۵۵) خشن تر می شوند و پاسخ گذرای ردیابی ناهموارتری بدست می آید. در حالی که کنترل کننده پیشنهادی سیگنال های کنترلی با چترینگ کمتر و پاسخ گذرای هموارتری را نشان می دهد. برای بررسی عملکرد کنترل کننده در برابر نویز اندازه گیری، یک نویز سفید گاوسی با متوسط صفر و انحراف از معیار ۰/۰۰۷ به متغیرهای حالت افزوده شده است و نتایج شبیه سازی در شکل ۱۷ برای نمونه آورده شده است. ملاحظه می شود که بدلیل استفاده از کنترل مقاوم تطبیقی نوع اشباع در کنترل کننده (۳۲)، عملکرد ردیابی کنترل کننده پیشنهادی قابل قبول است. البته باید توجه شود که با افزایش سطح نویز، چترینگ در سیگنال کنترلی بیشتر می شود که با افزایش مقدار پارامتر ε_0 در کنترل کننده (۳۲) می توان آن را کاهش داد.



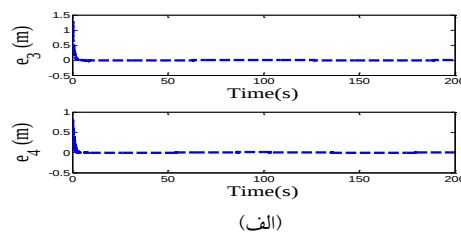
شکل ۱۷- عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در برابر نویز اندازه گیری

۷- نتیجه گیری

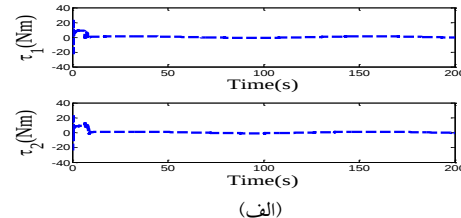
در این مقاله، یک کنترل کننده ردیاب فیدبک خروجی برای بازوهای متحرک با استفاده از روش تطبیقی مقاوم عصبی با ترکیب یک مشاهده گر سرعت و شبکه عصبی تابع پایه شعاعی، پیشنهاد شد. طرح کنترلی پیشنهادی تنها به اندازه گیری های موقعیت و جهت گیری نیازمند می باشد. به همین دلیل، یک مشاهده گر سرعت معرفی شده است تا تخمین سرعت های



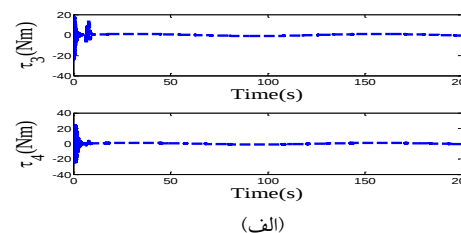
شکل ۱۳- خطاهای ردیابی e_1 و e_2 : (الف) کنترل کننده پیشنهادی (ب) کنترل کننده (۵۵)



شکل ۱۴- خطاهای ردیابی e_3 و e_4 : (الف) کنترل کننده پیشنهادی (ب) کنترل کننده (۵۵)



شکل ۱۵- ورودی های کنترل کننده اعمال شده به بدنه متحرک: (الف) کنترل کننده پیشنهادی (ب) کنترل کننده (۵۵)



- Networks and Learning Systems, Vol. 24, No. 9, pp. 1400-1413, 2013.
- [8] Chen. N., Yang. H., Han. X., Ai. Ch., Tang. Ch., Li. X., "Adaptive robust control of the mobile manipulator based on neural network," 11th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 2425-2430, 2016.
- [9] Xu. Y., Cao. X., Wang. Y., Gu. L., "The observer-based neural network adaptive robust control of underwater hydraulic manipulator," Conference on OCEANS'15 MTS/IEEE Washington, pp. 1-5, 2015.
- [10] White. G. D., Bhatt. R. M., Krovi. V.N., "Dynamic redundancy resolution in a nonholonomic wheeled mobile manipulator," Robotica, Vol. 25, No. 2, pp. 147-156, 2007.
- [11] Tzafestas. Spyros G., Introduction to Mobile Robot Control, 1st Edition, Elsevier Insights, 2013.
- [12] Bhatt. Rajankumar M., "Towards Modular Cooperation Between Multiple Nonholonomic Mobile Manipulators," Ph. D. Thesis, State University of New York at Buffalo, 2007.
- [13] Li. Zhijun, Ge. Shuzhi Sam, Fundamentals in modeling and control of mobile manipulators, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2013.
- [14] Lewis. Frank L., Dawson. Darren M., Abdallah, C.T., *Robot Manipulator Control Theory and Practice*. 2nd ed. Revised and Expanded, Marcel Dekker: New York, 2004.
- [15] Polycarpou. M., "Stable adaptive neural control scheme for nonlinear systems," IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 41, No. 3, pp. 447-451, 1996.
- [16] Khalil. Hassan K., Nonlinear Systems, Englewood Cliffs, Third Edition, Prentice Hall, NJ, 2002.
- [17] Xu. D., Zhao. D., Yi. J., Tan. X., "Trajectory Tracking Control of Omnidirectional Wheeled Mobile Manipulators: Robust Neural Network-Based Sliding Mode Approach," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. 39, No. 3, pp. 788-799, 2009.
- [18] Li. Z., Ge. S. S., Adams. M., Vijesoma. W. S., "Adaptive Robust Output-Feedback Motion/Force Control of Electrically Driven Nonholonomic Mobile Manipulators," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 16, No. 6, pp. 1308-1315, 2008.
- [19] Ioannou. Petros, Fidan. Baris, Adaptive Control Tutorial, SIAM, Philadelphia, 2006.
- غیرقابل دسترس از بازوی متحرک را فراهم کند. علاوه بر این، نیازی به دانش قبلی از دینامیک‌های بازوی متحرک و اغتشاشات محیطی با استفاده از قوانین تطبیقی و شبکه‌های عصبی تابع پایه شعاعی نداریم. از لحاظ نظری اثبات شد که کنترل کننده پیشنهادی می‌تواند با ایجاد موقعیت و جهت گیری بازوی متحرک با وجود خطاهای کوچک، بازو را در حضور نامعینی‌ها به موقعیت مطلوب برساند. کنترل کننده پیشنهادی تضمین می‌کند که تمامی سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته کران‌دار بوده و خطاهای ردیابی و مشاهده سرعت به طور یکنواخت نهایتاً کران‌دار نیمه کلی هستند و به همسایگی کوچکی شامل مبدأ همگرا می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی تأثیر طرح کنترلی پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهند. این مقاله می‌تواند به گروهی از بازوهای متحرک چرخ‌دار با دینامیک‌های نامعین و اغتشاشات نامعلوم تعمیم داده شود.
- ### مراجع
- [1] Galicki. M., "An adaptive non-linear constraint control of mobile manipulators," Mechanism and Machine Theory, Vol. 88, pp. 63-85, 2015.
- [2] Sun. W., Xia. J., "Adaptive control for mobile manipulators with affine constraints," 3rd International Conference on Informative and Cybernetics for Computational Social Systems (ICCSS), pp. 354-357, 2016.
- [3] Shojaei. K., "Neural adaptive output feedback formation control of type (m,s) wheeled mobile robots," IET Control Theory and Applications, Vol. 11, No. 4, pp. 504-515, 2016.
- [4] Fang. M., Chen. W. and Li. Z., "Adaptive tracking control of coordinated nonholonomic mobile manipulators," Proceedings of 17th World Congress: The International Federation of Automatic Control, pp. 4343-4348, 2008.
- [5] Sun. W., Wu. Y Q., "Adaptive motion/force tracking control for a class of mobile manipulators," Asian Journal of Control, Vol. 17, No. 6, pp. 2409-2416, 2015.
- [6] Wang. Y., Miao. Zh., Liu. L., Chen. Y., "Adaptive robust control of nonholonomic mobile manipulators with an application to condenser cleaning robotic systems," 8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 358-363, 2013.
- [7] Li. Zh., Su. Ch., "Neural-Adaptive Control of Single-Master-Multiple-Slaves Teleoperation for Coordinated Multiple Mobile Manipulators With Time-Varying Communication Delays and Input Uncertainties," IEEE Transactions on Neural