



Distributed Adaptive Robust Controller Design for Consensus in Multi-Agent System Including Robot Arms with Actuator Saturation Constraint

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rahimi N.¹ ??,
Binazadeh T.*¹ PhD

How to cite this article

Rahimi N, Binazadeh T. Distributed Adaptive Robust Controller Design for Consensus in Multi-Agent System Including Robot Arms with Actuator Saturation Constraint. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(7):1759-1766.

ABSTRACT

In this paper, distributed adaptive robust controller is investigated to solve the leader-follower consensus problem for a multi-agent system consisting of several single-link robot arms. In this approach, each arm is considered as an agent. The dynamical model of each arm contains known and unknown non-linear terms. Unknown terms may be due to parameter uncertainty or simplification of the model. Furthermore, external disturbances are considered in the dynamical equations of each agent. Moreover, the input signal amplitude for each agent should be limited, which is due to the upper bound of the saturation function of the input. In this paper, in order to eliminate the effect of uncertain terms, the adaptive robust approach is used in the design of control laws. In this regard, the upper bounds of uncertain terms are obtained through adaptive laws, which dramatically reduce conservatism. Furthermore, the distributed control laws are designed in such a way that all the agents reach consensus in spite of the uncertain terms and input saturation constraint. The basis of the approach proposed in this paper is based on adaptive sliding mode techniques. For this purpose, suitable sliding surfaces are proposed and distributed adaptive sliding mode controllers are designed. Finally, simulations are presented to confirm the results of theories.

Keywords Consensus; Actuator Saturation; Adaptive Laws

CITATION LINKS

[1] Fault-tolerant multi-agent control architecture for autonomous ... [2] Adaptive hybrid suppression control of a wheeled mobile ... [3] Multi-agent systems with dynamical topologies: Consensus ... [4] Finite-time attitude tracking control of spacecraft with application ... [5] The application of multi-agent system in robot ... [6] Decentralized dynamic output feedback controller design for ... [7] Finite-time consensus tracking of second-order multi-agent systems ... [8] Distributed robust consensus control for nonlinear leader ... [9] Sliding mode leader-following consensus controllers for second ... [10] Finite-time consensus for second-order multi-agent ... [11] Leader-follower and leaderless consensus in networks of ... [12] A stochastic sampling consensus protocol of networked Euler ... [13] Input-state feedback linearization control of a single-link ... [14] Sampled-data reliable control for T-S fuzzy semi ... [15] New stabilization of stochastic delayed jumping systems realized ... [16] New results on finite-time stabilization for stochastic ... [17] Practically finite-time control for nonlinear systems with ... [18] Adaptive wavelet neural network tracking control of a single ... [19] Lyapunov, adaptive, and optimal design techniques for cooperative ... [20] Improved fuzzy control design for nonlinear Markovian ... [21] Optimal fractional order iterative learning control for ... [22] Robust stabilization for uncertain Markovian jump fuzzy systems ... [23] An event-triggered ADP controller for single link robot arm system ... [24] Stabilization for Markovian jump nonlinear systems ... [25] Fuzzy switched hybrid systems-modeling ... [26] A Class of stabilizing PID controllers for position control ... [27] Fault tolerant control for a class of uncertain chaotic ... [28] Robust adaptive synchronization of chaotic systems ... [29] Adaptive output feedback sliding-mode manoeuvring ... [30] Nonlinear control ...

¹Electrical & Electronic Engineering Faculty, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

*Correspondence

Address: Electrical & Electronic Engineering Faculty, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
Phone: -
Fax: -
binazadeh@sutech.ac.ir

Article History

Received: May 22, 2018
Accepted: January 13, 2019
ePublished: July 01, 2019

طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی توزیع‌شده برای توافق در سامانه چندعاملی شامل بازوهای ربات با قید اشباع محرک

ناهید رحیمی MSc

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

طاهره بینازده* PhD

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

در این مقاله به طراحی کنترل‌کننده‌های توزیع‌شده به‌منظور حل مساله توافق رهبر محور برای یک سامانه چندعاملی متشکل از چند بازوی ربات تک‌لینک پرداخته شده است. در این نگرش هر کدام از بازوها به‌عنوان یک عامل در نظر گرفته می‌شوند. مدل دینامیکی هر بازو شامل ترم‌های غیرخطی معلوم و نامعلوم است. ترم‌های نامعلوم به‌دلیل عدم قطعیت پارامترها یا ساده‌سازی مدل ایجاد می‌شود. همچنین اغتشاشات خارجی نیز در معادلات دینامیکی هر عامل در نظر گرفته شده است. علاوه بر این دامنه سیگنال ورودی برای هر عامل باید محدود باشد که این امر ناشی از قید حد بالای تابع اشباع محرک مربوطه است. در این مقاله برای از بین بردن اثر ناپیچینی‌های سیستم، از رویکرد مقاوم تطبیقی در طراحی قوانین کنترلی استفاده شده است. برای این منظور، حد بالای ناپیچینی‌های سیستم از طریق قوانین تطبیقی به دست می‌آیند. این رویکرد محافظه‌کاری را به‌شدت کاهش می‌دهد. همچنین قوانین کنترلی توزیع‌شده به نحوی طراحی می‌شود که تمام بازوها، علی‌رغم ناپیچینی‌های موجود و اشباع محرک به توافق دست یابند. اساس رویکرد مطرح‌شده در این مقاله بر مبنای تئوری مد لغزشی تطبیقی است. برای این منظور سطوح لغزش مناسب پیشنهاد شده و کنترل‌کننده‌های مد لغزشی تطبیقی توزیع‌شده طراحی شده‌اند. در انتها شبیه‌سازی‌هایی به‌منظور تایید نتایج تئوری‌ها ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: توافق، اشباع محرک، قوانین تطبیقی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳

* نویسنده مسئول: binazadeh@sutech.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه ربات‌ها به‌دلیل توانایی بالایی که در انجام کارها دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. ربات‌ها را می‌توان به دو جزء مکانیکی و کنترلی تفکیک نمود. ربات‌ها به‌منظور فعال‌سازی برنامه‌های عملی مورد نظر به کنترل نیاز دارند. سیستم‌های مکانیکی از جمله ربات‌ها معمولاً دارای دینامیک‌های غیرخطی و پیچیده‌ای هستند که طراحی کنترل‌کننده را برای این دسته از سیستم‌ها دشوار می‌سازد [1, 2].

یکی از مباحث مهم در تئوری کنترل، سیستم‌های چندعاملی است که این بحث کاربردهای متنوعی را در زمینه‌های گوناگونی مانند ریاضیات، فیزیک، علوم کامپیوتر، علوم اجتماعی، هوا فضا و غیره دارد [3-5]. از رویکردهای مطرح در حل مساله کنترل سیستم‌های مکانیکی، مطالعه آنها در ساختار سیستم‌های چندعاملی است [6]. از مسایل مهم و قابل توجه در مورد سیستم‌های چندعاملی، مساله توافق است. این مساله به‌دنبال همگرایی عامل‌ها به یک مقدار مشخص است [7]. در حقیقت زمانی که عامل‌ها در یک سیستم چندعاملی با وجود تغییرات پیش‌بینی‌نشده بتوانند به یک مقدار مشخص همگرا شوند، توافق حاصل شده است. از دید کنترلی، مساله توافق شامل طراحی قوانین کنترلی توزیع‌شده برای عامل‌ها است، به‌گونه‌ای که توافق بین عامل‌ها را تضمین کند [8]. از این رو سیستم‌های چندعاملی به دو دسته رهبرمحور و بدون رهبر تقسیم‌بندی می‌شوند [9]. در سیستم‌های چندعاملی رهبرمحور یکی

از عامل‌ها به‌عنوان رهبر در نظر گرفته می‌شود و بقیه عامل‌ها پیرو خوانده می‌شوند. مقدار مورد توافق عامل‌ها در سیستم رهبرمحور، حالت رهبر است و حالت‌های عامل‌ها باید به حالت رهبر همگرا شوند [10].

یکی از موارد کاربردی این بحث در سیستم‌های مکانیکی، بلندکردن یک شیء در صنعت است که برای این منظور تعدادی از بازوهای مکانیکی باید در موقعیت یکسانی قرار بگیرند یا تعدادی از بازوهای مکانیکی که دور از هم قرار دارند، اما وظیفه یکسانی دارند را می‌توان با هم شبکه کرد و با تنظیم یکی از ربات‌ها، ربات‌های دورتر نیز از موقعیت و حالت آن پیروی کنند. از این رو می‌توان هر بازو را به‌عنوان یک عامل در نظر گرفت و هر کدام از عامل‌ها با یکدیگر به توافق دست یابند [11]. همچنین در ربات‌هایی با دینامیک پیچیده‌تر به‌منظور ساده‌ترکردن روند طراحی می‌توان هر ربات را به چندین زیرسیستم تفکیک کرد و هر زیرسیستم را به‌طور جداگانه کنترل نمود. در این نگرش هر زیرسیستم را به‌عنوان یک عامل در سیستم چندعاملی در نظر گرفته می‌شود. یکی از عامل‌ها، عامل رهبر است و سایر عامل‌ها، به‌عنوان عامل پیرو باید رفتار رهبر را ردیابی کنند. زمانی که عامل‌ها به یک توافق دست یابند، هدف مساله برآورده می‌شود [12].

مراجع محدودی به طراحی کنترل‌کننده برای یک بازوی ربات تک‌لینک پرداخته‌اند. نویسندگان در مرجع [13] با استفاده از خطی‌سازی فیدبکی به طراحی کنترل‌کننده برای یک بازوی ربات تک‌لینک به‌منظور ردیابی یک مسیر دلخواه پرداخته‌اند. مساله پایداری بازوی ربات تک‌لینک در حضور ترم‌های ناپیچینی در مرجع [14] بررسی شده است. در مطالعه‌ای [15] به طراحی کنترل‌کننده برای یک بازوی ربات تک‌لینک در حضور تأخیر پرداخته شده است. طراحی کنترل‌کننده زمان محدود در حضور تأخیر متغیر با زمان، در یک مطالعه [16] بررسی شده است. نویسندگان در پژوهشی [17] به طراحی کنترل‌کننده برای یک بازوی ربات تک‌لینک در حضور اغتشاشات خارجی سازگار و ناسازگار با ورودی با استفاده از رویکرد اغتشاش پرداخته‌اند. طراحی کنترل‌کننده ردیاب شبکه عصبی برای یک بازوی ربات تک‌لینک با ورودی لقی در پژوهشی [18] بررسی شده است.

یکی از رویکردهای مطرح در کنترل سیستم‌های رباتیک، در نظر گرفتن این سیستم‌ها به‌عنوان یک سیستم چندعاملی است. یعنی هر یک از بازوهای ربات در یک سیستم مکانیکی به‌عنوان یک عامل در سیستم چندعاملی لحاظ شوند. مقالات محدودی این رویکرد را در حل مساله رباتیک و طراحی کنترل‌کننده‌های توزیع‌شده برای هر یک از بازوهای ربات در یک سیستم رباتیک با دینامیک پیچیده مد نظر قرار داده و رویکردهای مختلفی را مطرح کرده‌اند [19]. اما تاکنون مقاله‌ای براساس مطالعات نویسندگان این مقاله یافت نشده است که به بررسی حل مساله توافق برای یک سامانه چندعاملی متشکل از چند بازوی ربات تک‌لینک با در نظر گرفتن قید اشباع محرک و ناپیچینی‌های سیستم بپردازد.

در این مقاله، هدف طراحی کنترل‌کننده برای یک سامانه چندعاملی شامل چند بازوی ربات است، به‌گونه‌ای که رفتار بازوی رهبر را ردیابی کنند. برای دستیابی به هدف فوق باید تمام بازوها رفتار مورد نظر را ردیابی کنند. بنابراین هر بازو به‌عنوان یک عامل در نظر گرفته می‌شود. کنترل‌کننده‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که علی‌رغم وجود ترم‌های ناپیچینی و اشباع محرک در سیستم توافق حاصل شود.

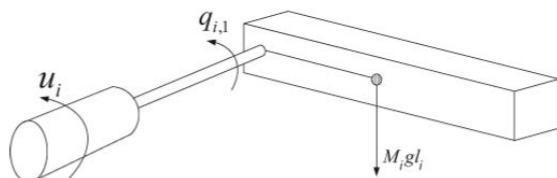
در این مقاله به طراحی کنترل‌کننده تطبیقی به‌منظور دستیابی به

۱-۲- تعریف مساله

در شکل ۱، یک بازوی ربات تک‌لینک نشان داده شده است [18-26]. مدل دینامیکی بازوی ربات توسط یک معادله درجه دو به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= \dot{q}_2 \\ \dot{q}_2 &= (j)^{-1} [u - Bq_2 - Mgl \sin(q_2)] \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن q_1 و q_2 به ترتیب زاویه و سرعت زاویه لینک بازوی ربات است. j مجموع اینرسی دورانی لینک بازوی ربات، B ضریب استهلاک، M جرم لینک، g شتاب گرانشی و l فاصله از محور مفصل تا مرکز جرم لینک است. u نیز سیگنال کنترلی ورودی است.



شکل ۱) بازوی ربات تک‌لینک

در اینجا یک سیستم چندعاملی متشکل از N بازوی ربات در نظر گرفته شده است. یکی از بازوها به عنوان رهبر و $N-1$ بازوی دیگر به عنوان پیرو فرض شده است. عامل‌های پیرو تحت تاثیر نایقینی‌های سیستم و اغتشاشات خارجی قرار دارند. همچنین سیگنال کنترلی عامل‌های پیرو در معرض اشباع ورودی قرار گرفته‌اند. عامل رهبر با بالانویس 0 و عامل‌های پیرو با بالانویس i مشخص شده‌اند.

تذکره ۱: در تمام معادلات بیان شده در مقاله، $i = (1, 2, \dots, N)$ است.

معادلات دینامیکی عامل رهبر به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1^0 &= \dot{q}_2^0 \\ \dot{q}_2^0 &= (j^0)^{-1} [u^0 - B^0 \dot{q}_2^0 - M^0 g l^0 \sin(q_2^0)] \end{aligned} \quad (4)$$

u^0 سیگنال کنترلی رهبر بوده و دارای یک مقدار مشخص است. در معادلات دینامیکی در نظر گرفته شده برای بازوی ربات تک‌لینک در منابع [18-26]، عدم قطعیت‌ها و نایقینی‌های موجود در سیستم که ناشی از ساده‌سازی مدل و اغتشاشات خارجی بوده و همچنین ترم‌های غیرخطی ناشی از اثرات کوپلینگ، فرض نشده است. در اینجا برای اینکه بتوانیم این اثرات را در معادلات عامل‌های پیرو لحاظ کنیم، ترم‌های Δf^i و d^i برای در نظر گرفتن پیچیدگی‌های ناشی از ترم‌های غیرخطی اثرات کوپلینگ و عدم قطعیت‌های سیستم در معادلات دینامیکی هر یک از عامل‌ها اضافه شده‌اند. علاوه بر این، سیگنال ورودی هر یک از عامل‌ها در معرض اشباع محرک قرار گرفته‌اند و این قید عملی نیز لحاظ شده است.

معادلات دینامیکی هر یک از عامل‌های پیرو به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1^i &= \dot{q}_2^i \\ \dot{q}_2^i &= (j^i)^{-1} [\phi(u^i) - B^i \dot{q}_2^i - M^i g l^i \sin(q_2^i)] + \Delta f^i + d^i \end{aligned} \quad (5)$$

$\phi(u^i)$ سیگنال کنترلی ورودی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi(u^i) = \begin{cases} u_H^i & u^i > u_H^i \\ u^i & -u_L^i \leq u^i \leq u_H^i \\ -u_L^i & u^i < -u_L^i \end{cases} \quad (6)$$

توافق در سامانه چندعاملی متشکل از چند بازوی ربات با دینامیک غیرخطی در حضور اشباع محرک پرداخته شده است. علاوه بر این، ترم‌های نایقینی که حاصل از عدم قطعیت پارامترهای سیستم، اثرات کوپلینگ و اغتشاشات خارجی هستند، در معادلات دینامیکی هر یک از بازوها فرض شده است. برای ازیمن‌بردن اثر عدم قطعیت‌های سیستم، به جای اینکه مطابق روش‌های کلاسیک کنترل مقاوم، حد بالایی عدم قطعیت‌های سیستم به عنوان یک تابع مثبت مشخص در نظر گرفته شود، مرزهای بالایی عدم قطعیت‌های سیستم به عنوان ثوابت مثبتی فرض می‌شوند که از طریق قوانین تطبیقی به دست می‌آیند. این رویکرد محافظه‌کاری را به شدت کاهش می‌دهد و منجر به کاهش دامنه تابع تابع علامت در قوانین کنترلی می‌شود. برای این منظور، سطوح لغزش مناسب پیشنهاد شده و کنترل‌کننده‌های مد لغزشی تطبیقی توزیع شده به گونه‌ای طراحی شده‌اند که توافق بین عوامل را علی‌رغم محدودیت اشباع ورودی و عدم قطعیت‌های مدل در معادلات دینامیکی هر عامل، تضمین می‌کنند. در انتها نتایج شبیه‌سازی‌ها کاملاً دستاوردهای قوانین پیشنهادی را تایید کرده است.

ادامه مقاله به این صورت تنظیم شده که در بخش اول، تئوری گراف بیان شده، سپس در بخش دوم مدل دینامیکی بازوی ربات به همراه قوانین کنترلی برای حصول توافق و روند کامل اثبات مطرح شده است. در بخش سوم، مثال عددی این سامانه مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها و در بخش چهارم، خلاصه و جمع‌بندی از آنچه که در مقاله مطرح شده، بیان شده است.

۱-۱- تئوری سیستم‌های چندعاملی

یک سیستم چندعاملی به سیستمی گفته می‌شود که از چند عامل خودگردان که با هم در ارتباط هستند، تشکیل شده باشد. نحوه ارتباط عامل‌ها که شامل رد و بدل کردن اطلاعات است می‌تواند متفاوت باشد. نحوه این ارتباطات با یک گراف (G) مدل می‌شود. در حقیقت گراف G بیان می‌کند که عامل‌ها چگونه با هم یا با رهبر (در سیستم‌های رهبرمحور) در ارتباط هستند. گراف $G(V, E, A)$ شامل سه عنصر V, E, A است. عنصر V نشان‌دهنده تعداد گره‌ها یا در حقیقت تعداد عامل‌ها است.

$$V = \{0, 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

عنصر E از زوج (i, k) به صورت زیر تشکیل شده است:

$$E = \{(i, k), i, k \in V\} \quad (2)$$

به این صورت که $(i, k) \in E$ اگر و فقط اگر عامل i بتواند از عامل k اطلاعات بگیرد. عنصر A یک ماتریس $N \times N$ است که اعضای این ماتریس، نشانگر وجود یا عدم وجود ارتباط بین یک عامل و دیگر عامل‌ها است. ماتریس B برابر است با $B = \text{diag}\{b^1, b^2, \dots, b^N\}$ که این ماتریس ارتباط بین عامل‌ها و رهبر را در سیستم‌های چندعاملی رهبرمحور مشخص می‌کند. اگر عامل i با رهبر در ارتباط باشد $b^i = 1$ و در غیر این صورت $b^i = 0$ است.

فرض ۱: بردار B نمی‌تواند صفر باشد و حداقل یکی از عامل‌های پیرو باید با عامل رهبر در ارتباط باشد.

در این قسمت به معرفی دینامیک بازوی ربات تک‌لینک و همچنین طراحی کنترل‌کننده به منظور دستیابی به توافق رهبرمحور در سامانه چندعاملی شامل N بازوی ربات پرداخته می‌شود.

$$\sigma^i = e_2^i + c^i e_1^i \quad (۱۷)$$

که $\sigma^i \in R$ سطح لغزش عامل پیروی i ام و $c^i > 0$ پارامتر طراحی هستند.

در ادامه، قضیه‌ای مطرح می‌شود که ساختار قوانین کنترلی پیشنهادی به همراه قوانین تطبیقی در صورت قضیه ارائه می‌شود. در نهایت، روند اثبات قضیه، بیان و نشان داده می‌شود که قوانین کنترلی توزیع شده پیشنهادی به همراه قوانین تطبیقی استخراج شده منجر به حل مساله توافق در حضور نایقینی‌های موجود در سیستم و اشباع محرک می‌شود.

قضیه: یک سیستم چندعاملی متشکل از چند بازوی ربات با معادلات بیان شده در روابط ۴ و ۵ را در نظر بگیرید. قوانین کنترلی توزیع شده ۱۸ به همراه قوانین تطبیقی بیان شده در معادلات ۲۲ و ۲۳ توافق بین عامل‌ها را تضمین می‌کنند.

$$u^i = -\frac{\tau_j^i}{(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik})} \xi_1^i \mu^i \operatorname{sgn}(\sigma^i) \quad (۱۸)$$

که $\tau > 1$ است و

$$\mu^i = |c^i e_2^i| + |(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik})f^i - \sum_{k=1}^N a_{ik}f^j - b^i f^0| + |-\sum_{k=1}^N a_{ik}(j)^{-1}\phi(u^k) - b^i u^0| + \hat{\Lambda}^i \quad (۱۹)$$

که در آن

$$\begin{aligned} f^0 &= (j^0)^{-1}[-B^0 q_2^0 - M^0 g l^0 \sin(q_2^0)] \\ f^i &= (j^i)^{-1}[-B^i q_2^i - M^i g l^i \sin(q_2^i)] \end{aligned} \quad (۲۰)$$

همچنین $\hat{\Lambda}^i$ تخمین Λ^i است و در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$\Lambda^i > |(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik})\Delta f^i - \sum_{k=1}^N a_{ik}\Delta f^k| + |(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik})d^i - \sum_{k=1}^N a_{ik}d^k| \quad (۲۱)$$

قوانین تطبیقی عبارت‌اند از:

$$\xi_1^i = \tau \mu^i (\xi_1^i)^3 |\sigma^i| \quad (۲۲)$$

$$\dot{\Lambda}^i = |\sigma^i| \quad (۲۳)$$

اثبات: تابع زیر به عنوان کاندید تابع لیپانوف در نظر گرفته می‌شود:

$$V^i = \frac{1}{2}(\sigma^i)^2 + \frac{1}{2}(\hat{\Lambda}^i)^2 + \frac{1}{2}(\xi_2^i)^2 \quad (۲۴)$$

که $\xi_2^i = (\xi_1^i)^{-1} - \xi^i$ و $\tilde{\Lambda}^i = \hat{\Lambda}^i - \Lambda^i$ تخمین $(\xi_1^i)^{-1}$ است.

با مشتق‌گیری از تابع لیپانوف داریم:

$$\dot{V}^i = \sigma^i \dot{\sigma}^i + \tilde{\Lambda}^i \dot{\Lambda}^i + \xi_2^i \dot{\xi}_2^i \quad (۲۵)$$

با توجه به معادلات ۴، ۵ و ۱۶ مشتق سطح لغزش برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}^i &= \dot{e}_2^i + c^i \dot{e}_1^i \\ &= \left(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik} \right) (f^i + \Delta f^i + d^i + (j^i)^{-1} \phi(u^i)) \\ &\quad - \sum_{k=1}^N a_{ik} (f^k + \Delta f^k + d^k + (j^k)^{-1} \phi(u^k)) - \\ &\quad b^i (j^0)^{-1} u^0 + f^0 + c^i e_2^i \end{aligned}$$

که u_L^i و u_H^i به ترتیب حد بالا و پایین اشباع محرک مربوط به عامل i ام هستند.

معادله فوق را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [27, 28]:

$$\phi(u^i) = \omega(u^i) u^i \quad (۷)$$

که در آن $\omega(u^i)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\omega(u^i) = \begin{cases} \frac{u_H^i}{u^i} & u^i > u_H^i \\ 1 & -u_L^i \leq u^i \leq u_H^i \\ \frac{-u_L^i}{u^i} & u^i < -u_L^i \end{cases} \quad (۸)$$

که

$$0 < \omega(u^i) u^i < 1 \quad (۹)$$

تذکر ۲: طبق خاصیت چگالی اعداد حقیقی، همواره یک مقدار ثابت ξ^i وجود دارد، به نحوی که در معادله زیر صدق کند [29]:

$$0 < \xi^i < \omega(u^i) u^i < 1 \quad (۱۰)$$

فرض ۲: نرم ترم‌های نامعلوم Δf^i و d^i کران‌دار هستند و در رابطه زیر صدق می‌کنند:

$$|\Delta f^i| < \lambda^i \quad (۱۱)$$

$$|d^i| < v^i \quad (۱۲)$$

۲-۲- طراحی قوانین کنترلی

هدف این است که عامل‌های پیرو بتوانند رفتار عامل رهبر را علی‌رغم وجود نایقینی‌های موجود در سیستم و اغتشاشات خارجی و همچنین اشباع ورودی ردیابی کنند. بنابراین ابتدا مساله ردیابی به مساله پایدارسازی خطا تبدیل می‌شود و بردار خطای توافق تشکیل داده می‌شود. در صورتی که خطای توافق به سمت صفر میل کند، توافق حاصل شده است و عامل‌های پیرو می‌توانند عامل رهبر را ردیابی کنند.

بردار خطای توافق به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e^i = [e_1^i, e_2^i] \quad (۱۳)$$

$$e_1^i = \sum_{k=1}^N a_{ik} (q_1^i - q_1^k) + b^i (q_1^i - q_1^0) \quad (۱۴)$$

$$e_2^i = \sum_{k=1}^N a_{ik} (q_2^i - q_2^k) + b^i (q_2^i - q_2^0) \quad (۱۵)$$

بنابراین دینامیک خطای توافق به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1^i &= \dot{e}_2^i \\ \dot{e}_2^i &= \sum_{k=1}^N a_{ik} (\dot{q}_2^i - \dot{q}_2^k) + b^i (\dot{q}_2^i - \dot{q}_2^0) \end{aligned} \quad (۱۶)$$

هدف طراحی کنترل‌کننده براساس ایده مد لغزشی است. ایده مد لغزشی از دو فاز اساسی فاز دستیابی و فاز لغزش تشکیل شده است. نخست باید سطح لغزش مناسب به گونه‌ای طراحی شود که معادلات حرکت روی سطح (معادلات کاهش مرتبه‌یافته) پایدار باشند و سپس با استفاده از سطح لغزش، قانون کنترلی به گونه‌ای طراحی می‌شود که مسیرهای حالت سیستم به سطح لغزش دست یابند و روی آن باقی بمانند. ساختار سطح لغزش پیشنهادی برای عامل پیروی i ام به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{V}^i \leq & |\sigma^i| \left| \left(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik} \right) (f^i) - \sum_{k=1}^N a_{ik} (f^k) \right| \\ & + |\sigma^i| \left| - \sum_{k=1}^N a_{ik} (j^k)^{-1} \phi(u^k) - b^i ((j^0)^{-1} u^0 + f^0) \right| \\ & + |\sigma^i| |c^i e_2^i| + \Lambda^i |\sigma^i| + |\sigma^i| \tau \xi_1^i \mu^i + \tilde{\Lambda}^i \dot{\Lambda}^i - \\ & \xi_2^i (\xi_1^i)^{-2} \xi_1^i \end{aligned}$$

با جای گذاری قوانین تطبیقی ۲۲ و ۲۳ در معادله فوق داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}^i \leq & |\sigma^i| \left| \left(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik} \right) (f^i) - \sum_{k=1}^N a_{ik} (f^k) \right| \\ & + |\sigma^i| \left| - \sum_{k=1}^N a_{ik} (j^k)^{-1} \phi(u^k) - b^i ((j^0)^{-1} u^0 + f^0) \right| \\ & + |\sigma^i| |c^i e_2^i| + \Lambda^i |\sigma^i| + |\sigma^i| \tau \xi_1^i \mu^i + \tilde{\Lambda}^i |\sigma^i| - \\ & \xi_2^i (\xi_1^i)^{-2} \tau \mu^i (\xi_1^i)^3 |\sigma^i| \end{aligned} \quad (۳۴)$$

با اضافه و کم کردن $|\sigma^i| \Lambda^i$ به طرف راست معادله فوق و ایجاد μ^i با توجه به تعریف ارائه شده برای آن در رابطه ۱۹ داریم:

$$\dot{V}^i \leq |\sigma^i| (\mu^i - \tilde{\Lambda}^i + \Lambda^i - \xi^i \xi_1^i \tau \mu^i) + \tilde{\Lambda}^i |\sigma^i| - \xi_2^i \xi_1^i \tau \mu^i |\sigma^i| \quad (۳۵)$$

با استفاده از تعریف بیان شده برای $\tilde{\Lambda}^i = \tilde{\Lambda}^i - \Lambda^i$ و $\xi^i = (\xi_1^i)^{-1} - \xi^i$ جای گذاری در رابطه فوق داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}^i \leq & |\sigma^i| (\mu^i - \tilde{\Lambda}^i + \Lambda^i - \xi^i \xi_1^i \tau \mu^i) + (\tilde{\Lambda}^i - \Lambda^i) |\sigma^i| \\ & - (\xi_1^i)^{-1} \xi_1^i \tau \mu^i |\sigma^i| + \xi^i \xi_1^i \tau \mu^i |\sigma^i| = -|\sigma^i| \mu^i (\tau - 1) \\ & = -h^i < 0 \end{aligned} \quad (۳۶)$$

با توجه به اینکه $\tau > 1$ و $\mu^i > 0$ ، تابع h^i یک تابع مثبت است. بنابراین با انتگرال گیری از طرفین رابطه فوق خواهیم داشت:

$$V^i(t) - V^i(0) \leq - \int_0^t h^i(t) \quad (۳۷)$$

با توجه به اینکه $V^i(0)$ دارای یک مقدار متناهی بوده و تابع $\dot{V}^i(t)$ منفی است، می توان نتیجه گرفت که $V^i(t)$ یک تابع غیرصودی است. بنابراین با استناد به لم باربالات^[30] داریم $\lim_{t \rightarrow \infty} h^i = 0$ از آنجایی که $h^i = |\sigma^i| \mu^i (\tau - 1)$ و μ^i و $(\tau - 1)$ مقادیر مثبت و ثابتی هستند، می توان نتیجه گرفت که $\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma^i = 0$ است. همچنین با توجه به تعریف سطح لغزش، همگرا شدن σ^i به صفر به معنای همگرا شدن بردار خطا به سمت صفر است، یعنی $\lim_{t \rightarrow \infty} e^i = 0$ بنابراین هدف مساله که حصول توافق است، حاصل می شود.

تذکر ۳: به علت استفاده از تابع علامت در قوانین کنترلی طراحی شده، سیگنال کنترلی دارای چترینگ است. از این رو برای حذف چرینگ، سیگنال کنترلی با یک تابع پیوسته، تقریب زده شده

با جای گذاری معادله فوق در معادله ۲۵ داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}^i = & \sigma^i \left(\left(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik} \right) (f^i + \Delta f^i + d^i + (j^i)^{-1} \phi(u^i)) \right) \\ & + \sigma^i \left(- \sum_{k=1}^N a_{ik} (f^k + \Delta f^k + d^k + (j^k)^{-1} \phi(u^k)) \right) \\ & + \sigma^i (-b^i ((j^0)^{-1} u^0 + f^0) + c^i e_2^i) + \tilde{\Lambda}^i \dot{\Lambda}^i + \xi_2^i \xi_1^i \end{aligned} \quad (۲۷)$$

با جای گذاری حد بالای ترم های نایقینی خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{V}^i \leq & |\sigma^i| \left| \left(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik} \right) (f^i) - \sum_{k=1}^N a_{ik} (f^k) \right| \\ & + |\sigma^i| \left| - \sum_{k=1}^N a_{ik} (j^k)^{-1} \phi(u^k) - b^i ((j^0)^{-1} u^0 + f^0) \right| \\ & + \Lambda^i |\sigma^i| + \left((b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik}) ((j^i)^{-1} \phi(u^i)) \right) \sigma^i + \\ & |\sigma^i| |c^i e_2^i| + \tilde{\Lambda}^i \dot{\Lambda}^i + \xi_2^i \xi_1^i \end{aligned} \quad (۲۸)$$

با استفاده از رابطه بیان شده در معادله ۷ می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{V}^i \leq & |\sigma^i| \left| \left(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik} \right) (f^i) - \sum_{k=1}^N a_{ik} (f^k) \right| \\ & + |\sigma^i| \left| - \sum_{k=1}^N a_{ik} (j^k)^{-1} \phi(u^k) - b^i ((j^0)^{-1} u^0 + f^0) \right| \\ & + \Lambda^i |\sigma^i| + \left((b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik}) ((j^i)^{-1} \omega(u^i) u^i) \right) \sigma^i + \\ & |\sigma^i| |c^i e_2^i| + \tilde{\Lambda}^i \dot{\Lambda}^i + \xi_2^i \xi_1^i \end{aligned} \quad (۲۹)$$

با جای گذاری قوانین کنترلی در معادله فوق داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}^i \leq & |\sigma^i| \left| \left(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik} \right) (f^i) - \sum_{k=1}^N a_{ik} (f^k) \right| \\ & + |\sigma^i| \left| - \sum_{k=1}^N a_{ik} (j^k)^{-1} \phi(u^k) - b^i ((j^0)^{-1} u^0 + f^0) \right| \\ & + \Lambda^i |\sigma^i| + (\tau \xi_1^i \mu^i \operatorname{sgn}(\sigma^i) \omega(u^i) u^i) \sigma^i + |\sigma^i| |c^i e_2^i| + \\ & \tilde{\Lambda}^i \dot{\Lambda}^i + \xi_2^i \xi_1^i \end{aligned} \quad (۳۰)$$

با توجه به تعریف بیان شده برای $\tilde{\Lambda}^i = \tilde{\Lambda}^i - \Lambda^i$ و $\xi^i = (\xi_1^i)^{-1} - \xi^i$ داریم:

$$\xi_2^i = -(\xi_1^i)^{-2} \xi_1^i \quad (۳۱)$$

$$\dot{\Lambda}^i = \dot{\Lambda}^i \quad (۳۲)$$

و همچنین با توجه به معادله ۱۰ و جای گذاری معادلات ۳۱ و ۳۲ در معادله ۳۰ داریم:

$$u^i = -\frac{\tau_j^i}{(b^i + \sum_{k=1}^N a_{ik})} \xi_1^i \mu^i \tanh\left(\frac{\sigma^i}{\varepsilon}\right) \quad (38)$$

که ε یک مقدار کوچک مثبت است.

تذکر ۴: همان‌طور که مشخص است، ساختار قوانین کنترلی پیشنهادی به ضرایب a_{ik} و b^i بستگی دارد. این ضرایب از روی شکل ساختار گراف و براساس ارتباطاتی که بین عامل‌ها وجود دارد، تعیین می‌شوند. بنابراین شکل ساختار گراف ارتباطی در تشکیل قوانین کنترلی تاثیرگذار هستند.

۳- شبیه‌سازی

در این بخش به‌منظور تایید کارایی قوانین طراحی‌شده، یک سامانه چندعاملی متشکل از چهار بازوی ربات، شامل یک بازوی رهبر و سه بازوی پیرو مورد بررسی قرار می‌گیرند. این بازوها تحت گراف ارتباطی نشان‌داده‌شده در شکل ۲، با یکدیگر در ارتباطند. مدل دینامیکی بازوهای رهبر و پیرو در معادله‌های ۴ و ۵ بیان شده و مقادیر پارامترها به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned} [j^0, j^1, j^2, j^3]^T &= [6.9667, 7.7, 8.46, 10.2]^T \\ [B^0, B^1, B^2, B^3]^T &= [30.5, 30.5, 30.5, 30.5]^T \\ [l^0, l^1, l^2, l^3]^T &= [0.8, 1.2, 1.5]^T \\ [M^0, M^1, M^2, M^3]^T &= [1, 1, 1, 1]^T \end{aligned}$$

شبیه‌سازی‌ها به‌ازای مقادیر زیر صورت گرفته است:

$$\begin{aligned} \Delta f^i &= 0.3 \cos(q_2^i), \quad d^i = 0.1 \sin(t) \\ q_1^0(0) &= 0, q_1^1(0) = 0.4, q_1^2(0) = 1, q_1^3(0) = -0.2 \\ q_2^0(0) &= 0, q_2^1(0) = 0, q_2^2(0) = 0, q_2^3(0) = 0 \\ \xi_1^1(0) &= 0.0001, \xi_2^1(0) = 0.0001, \xi_3^1(0) \\ &= 0.0001, \quad \Lambda^1(0) = 0, \Lambda^2(0) \\ &= 0, \Lambda^3(0) = 0 \end{aligned}$$

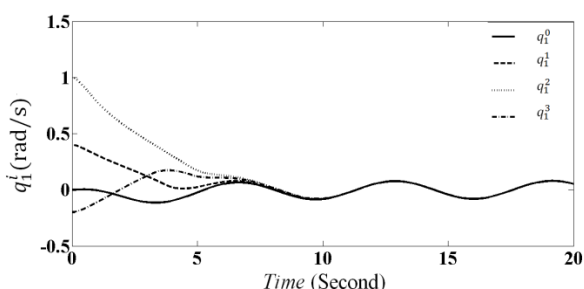
$g = 9.8$ و سیگنال کنترلی $u^0 = -2.3 \sin(t) + 0.8 \cos(t)$ فرض شده است.

همچنین حدود بالا و پایین اشباع $u_H^i = 3, u_L^i = -3, (i = \text{پایین اشباع} \dots 3)$ لحاظ شده است.

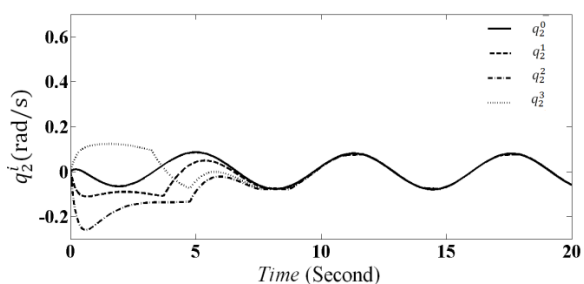
نمودارهای ۱-۴، نتایج شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهند. پاسخ زمانی متغیرهای حالت زاویه و سرعت زاویه‌ای هر یک از عامل‌ها در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمام متغیرهای حالت عامل‌های پیرو به متغیرهای حالت عامل رهبر همگرا شده‌اند و توافق علی‌رغم به اشباع‌رفتن سیگنال کنترلی و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم حاصل شده است. پاسخ زمانی سیگنال کنترلی اشباع‌شده هر یک از عامل‌ها در نمودار ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیگنال کنترلی با توجه به بازه اشباعی که برای آن تعریف شده، به اشباع رفته است. نمودار ۴، پاسخ زمانی تخمین حد بالای عدم قطعیت‌های سیستم $(\hat{\Lambda}^i)$ را نشان می‌دهد که با استفاده از قوانین تطبیقی (۲۲ و ۲۳) به دست آمده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر یک از این حدود به یک مقدار ثابت همگرا شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی نشان داد که عامل‌ها در حضور عدم قطعیت‌های مدل، اغتشاشات واردشده بر آنها و همچنین اشباع محرک به توافق دست یافتند. در ادامه به‌منظور نشان‌دادن ارجحیت عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادشده، عملکرد آن با کنترل‌کننده مطرح‌شده در یک مطالعه^[19]، مقایسه می‌شود. رویکرد

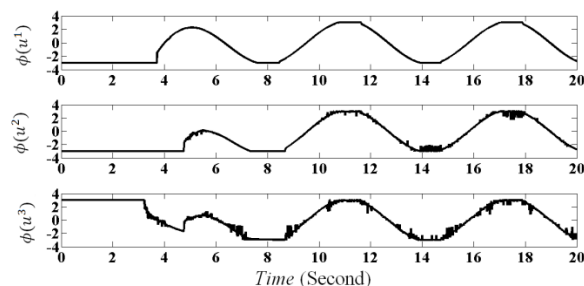
ارائه‌شده در مرجع^[19] را در دو حالت مورد بررسی قرار می‌دهیم. در حالت اول بدون در نظر گرفتن قید اشباع و در حالت دوم با در نظر گرفتن قید اشباع محرک، شبیه‌سازی‌هایی انجام پذیرفته است.



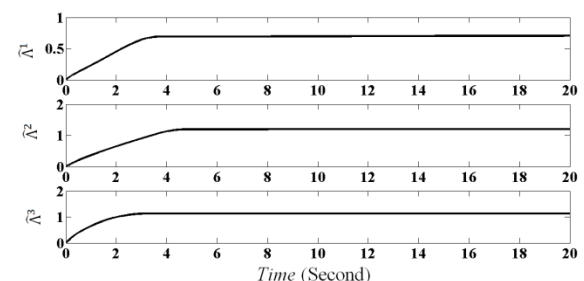
نمودار (۱) پاسخ زمانی متغیر حالت زاویه هر یک از عامل‌ها براساس روش پیشنهادی



نمودار (۲) پاسخ زمانی سرعت زاویه هر یک از عامل‌ها براساس روش پیشنهادی

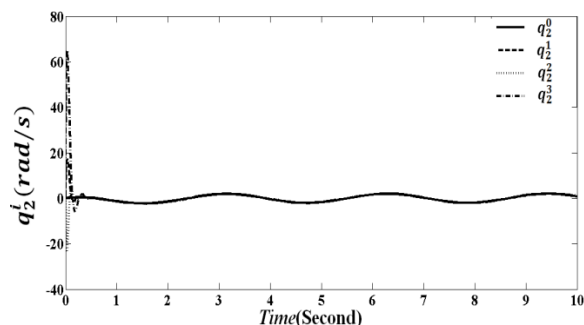


نمودار (۳) پاسخ زمانی سیگنال کنترلی اشباع‌شده هر یک از عامل‌ها براساس روش پیشنهادی

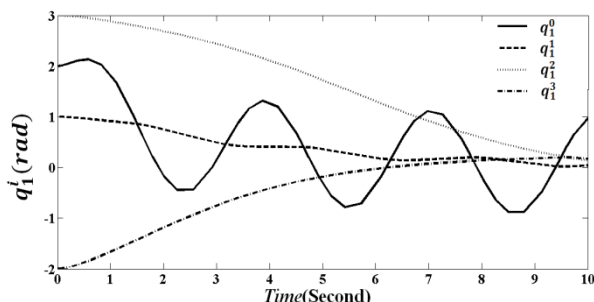


نمودار (۴) پاسخ زمانی متغیر تطبیقی هر یک از عامل‌ها براساس روش پیشنهادی

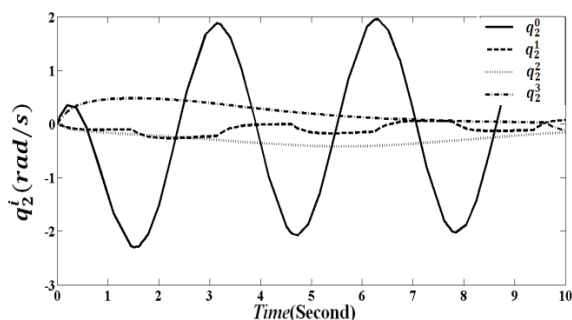
در مطالعه مورد نظر^[19]، هدف طراحی کنترل‌کننده به نحوی است که عامل‌های پیرو بتوانند عامل رهبر را ردیابی کنند. رویکرد حل مساله در این مرجع براساس شبکه‌های عصبی است. معادلات



نمودار ۶) پاسخ زمانی سرعت زاویه هر یک از عامل‌ها براساس رویکرد مرجع [19] بدون قید اشباع



نمودار ۷) پاسخ زمانی متغیر حالت زاویه هر یک از عامل‌ها براساس رویکرد مرجع [19] در حضور قید اشباع



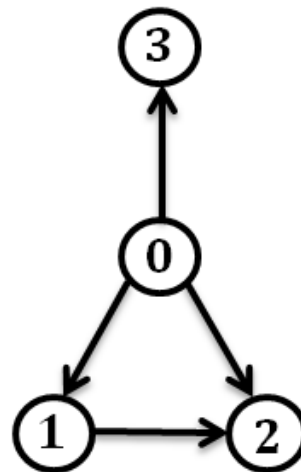
نمودار ۸) پاسخ زمانی متغیر حالت زاویه هر یک از عامل‌ها براساس رویکرد مرجع [19] در حضور قید اشباع

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله قوانین کنترلی توزیع‌شده به‌منظور حل مساله توافق برای یک سیستم چندعاملی، شامل چند بازوی ربات در حضور ترم‌های نایقینی و اشباع ورودی طراحی شد. برای این منظور، ابتدا سطح لغزش مناسب برای هر یک از عامل‌ها طراحی و سپس قوانین کنترلی تطبیقی توزیع‌شده براساس ایده مد لغزشی تطبیقی برای هر یک از عامل‌ها طراحی شد. استفاده از رویکرد تطبیقی سبب کاهش محافظه‌کاری نسبت به سایر رویکردهای موجود شد. قوانین کنترلی، رویکردی مقاوم در برابر ترم‌های نایقینی سیستم و اغتشاشات خارجی داشتند. در این راستا یک قضیه، بیان و با استفاده از تابع لیپانوف مناسب اثبات شد که با وجود اشباع ورودی و ترم‌های نایقینی، خطای توافق به صفر همگرا می‌شود. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی‌ها عملکرد موثر کنترل‌کننده پیشنهادی را تایید نمودند و مزیت روش پیشنهادی در مقایسه با یک روش معتبر دیگر در حضور قید اشباع را نشان دادند.

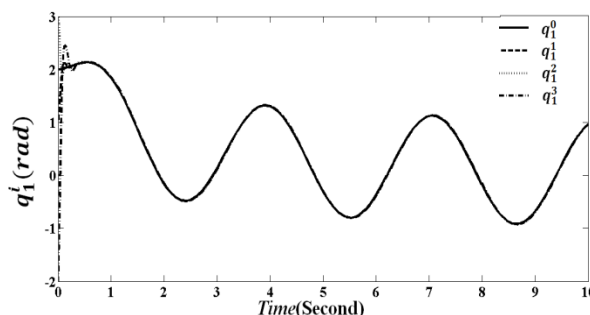
تشکر و قدردانی: مودی از سوی نویسندگان بیان نشد.

دینامیکی بازوهای ربات تک‌لینک همانند معادلات بیان‌شده در متن مقاله است (معادلات ۳-۵). با این تفاوت که در این مرجع، عدم قطعیت‌های موجود در سیستم، اثرات کوپلینگ و اشباع ورودی لحاظ نشده است. عامل‌ها تحت گراف ارتباطات رسم‌شده در شکل ۲ با یکدیگر در ارتباطاند.



شکل ۲) گراف ارتباطی عامل‌ها

نمودارهای ۵-۸ نتایج شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهند. نمودارهای ۵ و ۶ به‌ترتیب پاسخ زمانی زاویه و سرعت زاویه‌ای هر یک از عامل‌ها (بازوهای ربات تک‌لینک) را در حالتی که سیگنال کنترلی به اشباع نرفته است، نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیستم چندعاملی به توافق رسیده است و متغیرهای حالت عامل‌ها به متغیرهای حالت عامل رهبر همگرا شده‌اند. در حالت بعد، قید اشباع محرک در اعمال روش کنترلی مرجع [19] لحاظ شده است. پاسخ زمانی زاویه و سرعت زاویه‌ای هر یک از عامل‌ها (بازوهای ربات تک‌لینک) در حالتی که سیگنال کنترلی مرجع [19] به اشباع رفته است به‌ترتیب در نمودارهای ۷ و ۸ رسم شده‌اند. حدود اشباع نیز مانند قبل، $u_H^i = 3, u_L^i = -3$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با به اشباع رفتن سیگنال کنترلی، کنترل‌کننده مرجع [19] کارایی مطلوب خود را از دست داده و توافق حاصل نشده است. در صورتی که کنترل‌کننده طراحی‌شده در این مقاله، علاوه بر اینکه در برابر عدم قطعیت‌های مدل، اغتشاشات خارجی مقاوم است، در حضور اشباع محرک نیز کارایی خود را از دست نمی‌دهد و عامل‌ها تحت اشباع محرک نیز می‌توانند به توافق دست یابند که نمودارهای ۴-۱ مؤید عملکرد مطلوب روش پیشنهادی این مقاله هستند.



نمودار ۹) پاسخ زمانی متغیر حالت زاویه هر یک از عامل‌ها براساس رویکرد مرجع [19] بدون قید اشباع

2017;11(12):1904-1912.

15- Liu L, Wang G, Li Z. New stabilization of stochastic delayed jumping systems realized by a partially delay-dependent controller. Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 28-30 May 2016, Yinchuan, China. Piscataway: IEEE; 2016.

16- Zhang L, Messous MA, Bouzouia B. New results on finite-time stabilization for stochastic systems with time-varying delay. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems. 2018;16(2):649-658.

17- Min H, Xu Sh, Zhang B, Duan N. Practically finite-time control for nonlinear systems with mismatching conditions and application to a robot system: Simulation results. Computers & Electrical Engineering. 2017.

18- Esapour S, Ranjbar Noei A, Sadati Rostami SJ. Adaptive wavelet neural network tracking control of a single-link robot arm with backlash input. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(8):37-44. [Persian]

19- Zhang H, Lewis FL, Qu Z. Lyapunov, adaptive, and optimal design techniques for cooperative systems on directed communication graphs. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012;59(7):3026-3041.

20- Shen M, Ye D. Improved fuzzy control design for nonlinear Markovian-jump systems with incomplete transition descriptions. Fuzzy Sets and Systems. 2013;217:80-95.

21- Ghasemi I, Ranjbar Noei A, Sadati Rostami SJ, Optimal fractional order iterative learning control for single-link robot control. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(10):259-268. [Persian]

22- Song MK, Park JB, Joo YH. Robust stabilization for uncertain Markovian jump fuzzy systems based on free weighting matrix method. Fuzzy Sets and Systems. 2015;277:81-96.

23- Yang Y, Xu C, Meng Q, Tan J. An event-triggered ADP controller for single link robot arm system based on output position. Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 9-11 June 2018, Shenyang, China. Piscataway: IEEE; 2018.

24- Sheng L, Gao M. Stabilization for Markovian jump nonlinear systems with partly unknown transition probabilities via fuzzy control. Fuzzy Sets and Systems. 2010;161(21):2780-2792.

25- Palm R, Driankov D. Fuzzy switched hybrid systems-modeling and identification. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC) held jointly with IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA) Intell, 17-17 Sept 1998, Gaithersburg, MD, USA. Piscataway: IEEE; 1998.

26- Leena G, Datta KB, Ray G. A Class of stabilizing PID controllers for position control of single-link robot. International Journal of Control and Automation. 2011;4(3):127-141.

27- Hao LY, Yang GH. Fault tolerant control for a class of uncertain chaotic systems with actuator saturation. Nonlinear Dynamics. 2013;73(4):2133-2147.

28- Mohammadpour S, Binazadeh T. Robust adaptive synchronization of chaotic systems with nonsymmetric input saturation constraints. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. 2017;13(1):011005.

29- Hu Q. Adaptive output feedback sliding-mode manoeuvring and vibration control of flexible spacecraft with input saturation. IET Control Theory & Applications. 2008;2(6):467-478.

30- Khalil HK. Nonlinear control. 2nd Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall; 1989. pp. 305-320.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشد.

سهام نویسندگان: ناهید رحیمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ طاهره بینازاده (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشد.

منابع

- Hentout A, Messous MA, Bouzouia B. Fault-tolerant multi-agent control architecture for autonomous mobile manipulators: Simulation results. Computers & Electrical Engineering. 2015;43:238-256.
- Zarafshan P, Moosavian SAA. Adaptive hybrid suppression control of a wheeled mobile robot with flexible solar panels. Modares Mechanical Engineering. 2013;13(5):130-143. [Persian]
- Chen Y, Lu J, Yu X, Hill DJ. Multi-agent systems with dynamical topologies: Consensus and applications. IEEE Circuits and Systems Magazine. 2013;13(3):21-34.
- Du H, Li Sh, Qian C. Finite-time attitude tracking control of spacecraft with application to attitude synchronization. IEEE Transactions on Automatic Control. 2011;56(11):2711-2717.
- Chen D, Dong Sh. The application of multi-agent system in robot football game. Proceedings The 2nd International Conference on Computer and Applications. Unknown City: SERSC; 2013. p. 183-187.
- Amini A, Sojoodi M, Ozgoli S. Decentralized dynamic output feedback controller design for consensus in multi-agent system of single link manipulators with flexible joint. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(15):75-84. [Persian]
- Zhao LW, Hua CC. Finite-time consensus tracking of second-order multi-agent systems via nonsingular TSM. Nonlinear Dynamics. 2014;75(1-2):311-318.
- Rahimi N, Binazadeh T. Distributed robust consensus control for nonlinear leader-follower multi-agent systems based on adaptive observer-based sliding mode. Journal of Vibration and Control. 2019;25(1):109-121.
- Ren CE, Philip Chen CL. Sliding mode leader-following consensus controllers for second-order non-linear multi-agent systems. IET Control Theory & Applications. 2015;9(10):1544-1552.
- Yu Sh, Long X. Finite-time consensus for second-order multi-agent systems with disturbances by integral sliding mode. Automatica. 2015;54:158-165.
- Nuño E, Valle D, Sarras I, Basañez L. Leader-follower and leaderless consensus in networks of flexible-joint manipulators. European Journal of Control. 2014;20(5):249-258.
- Zhao X, Ma C, Xing X, Zheng X. A stochastic sampling consensus protocol of networked Euler-Lagrange systems with application to two-link manipulator. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2015;11(4):907-914.
- Cambara JC, Feliu-Batlle V. Input-state feedback linearization control of a single-link flexible robot arm moving under gravity and joint friction. Robotics and Autonomous Systems. 2017;88:24-36.
- Cheng J, Wang B, Park JH, Kang W. Sampled-data reliable control for T-S fuzzy semi-Markovian jump system and its application to single-link robot arm model. IET Control Theory & Applications.