



Motion Control of Mechanical Manipulators Using the Fuzzy Controller

ARTICLE INFO

Authors

Sharifnia M^{1*},

¹Department of Mechanical Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, North Khorasan, Iran.

* Correspondence

Address: sharifnia.mehdi@gmail.com

How to cite this article

Sharifnia M. Motion Control of Mechanical Manipulators Using the Fuzzy Controller. *Proceedings of the 6th National Conference on Mechanical-Civil Engineering and Advanced Technologies*. 2024; 24(11):3-9.

ABSTRACT

The series robots have nonlinear dynamics with together uncertainties in joints' forces and robot's model. For the fuzzy control, two parameters of angular position and angular velocity are usually used as the linguistic variables. This method is similar the PD controller, and, consequently it cannot track a desired trajectory and it have a steady-state error. In the present paper the summation of errors is additionally used as a linguistic variable. Using three linguistic variables of error, error derivative and error integration for the angular position, trajectory tracking of a RR series robot is performed for its uncertain dynamic model. This method is similar the PID controller, and, consequently it can track a desired trajectory. Additionally, the presented fuzzy PID controller is not sensitive to the noise and uncertainty, and, it, presents better results than a classic PID controller.

Keywords Fuzzy Control, Uncertainty, Series Robot, Nonlinear Dynamics

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک، عمران و فناوری‌های پیشرفته



کنترل حرکت بازوهای مکانیکی با استفاده از کنترل کننده فازی



چکیده

رباتهای سری دارای دینامیک غیر خطی هستند و دارای عدم قطعیت‌هایی در نیروهای مفصلی و مدل خود ربات هستند. معمولاً در کنترل فازی از دو متغیر زبانی موقعیت زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای استفاده می‌شود. این روش شبیه به آن است که از کنترل کننده PD استفاده شود و در نتیجه قادر به تعقیب مسیر نمی‌باشد و خطای ماندگار خواهد داشت. در این تحقیق از متغیر زبانی مجموع خطاها نیز استفاده می‌شود. با استفاده از متغیرهای زبانی خطا و مشتق خطا و انتگرال خطای موقعیت زاویه‌ای، تعقیب مسیر یک ربات سری RR در حالتی که عدم قطعیت در مدل دینامیکی سیستم وجود دارد، انجام می‌شود. این روش شبیه به آن است که از کنترل کننده PID استفاده شود و در نتیجه قادر به تعقیب مسیر خواهد بود و در عین حال به دلیل عدم حساسیت به اغتشاش و عدم قطعیت، نتایج بهتری نسبت به کنترل کننده PID به دست می‌آید.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

مهدی شریف نیای دبیرینی^{۱*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، خراسان شمالی، ایران

* نویسنده مسئول

آدرس:

sharifnia.mehdi@gmail.com

کلیدواژه‌ها کنترل فازی، عدم قطعیت، ربات سری، دینامیک غیرخطی

۱- مقدمه

همانطور که در گستره علم پیش می‌رویم، اهمیت دانش بشری روز به روز بیشتر می‌شود. بنابراین وجود یک تئوری برای فرموله کردن این دانش و استفاده همزمان آن با اطلاعات دیگر در سیستم‌های مهندسی، الزامی می‌باشد. در بسیاری از سیستم‌های عملی اطلاعات اصلی و مهم از دو منبع تغذیه می‌شوند: منبع اول، انسان خبره است که دانش خود را درباره یک سیستم به زبان طبیعی بیان می‌کند. منبع دوم، استفاده از مدل ریاضی است که از قوانین فیزیکی و اندازه‌گیری‌ها حاصل می‌شود [۱]. بنابراین در اولین قدم با این مشکل مواجه می‌شویم که چگونه این دو منبع اطلاعاتی را با هم ترکیب کرده و تبدیل به یک مدل ریاضی نماییم. سیستم‌های فازی پاسخگوی این سؤال می‌باشند [۲ و ۳ و ۴]. این سیستم‌ها بر پایه یکسری قوانین اگر- آنگاه که از روی دانش بشری ساخته می‌شوند، استوار می‌باشند.

روش‌های کنترل کلاسیک و کنترل‌کننده مشتقگیر در مدل کردن دینامیک ربات‌ها ناتوان بوده و نمی‌توانند خاصه‌های مورد نظر مهندسی که عبارتند از تعقیب یک مسیر دلخواه، حذف اغتشاشات و ... را برآورده سازند. در دهه‌های اخیر کنترل مسیر بازوی ربات در یک مسیر مشخص و کنترل همزمان بازوهای ربات در حضور عوامل خارجی موضوع مورد علاقه بسیاری از محققان بوده است. بطوریکه الگوریتم‌های کنترلی بسیاری از قبیل: روش گشتاور محاسبه شده [۵ و ۶]، کنترل بهینه [۷ و ۸]، کنترل تطبیقی [۹]، شبکه‌های عصبی [۱۰ و ۱۱] و سیستم‌های فازی برای مسأله کنترل مسیر بازوی ربات‌ها ارائه شده‌اند. این ربات‌ها دارای دینامیک کوپل شده غیرخطی بوده و از درجه نامعینی بالایی نیز برخوردار می‌باشند که این خود باعث مشکل شدن کنترل آنها می‌شود. نامعینی‌های ساختاری شامل عدم دقت در خواص لینک‌های ربات، بارهای نامشخص و از این قبیل می‌باشند. نامعینی‌های سازه‌ای توسط دینامیک مدل نشده سیستم از قبیل اصطکاک غیرخطی و اغتشاش بوجود می‌آیند. بنابراین استخراج مدل ریاضی دقیق جهت روش‌های کنترلی مبتنی بر دینامیک از قبیل روش گشتاور محاسبه شده و دیگر کنترل‌کننده‌ها، کار مشکلی است و این خود لزوم استفاده از کنترل‌کننده فازی را نشان می‌دهد.

روش کنترل فازی نیازی به داشتن دینامیک سیستم نداشته و توانایی مدل کردن پارامترهای غیرخطی و نامعینی‌های سیستم را نیز دارا می‌باشد، بنابراین یکی از موارد پرکاربرد در کنترل ربات‌های صنعتی می‌باشد و در این تحقیق دینامیک سیستم صرفاً برای بررسی جواب استفاده می‌شود. تحقیقات زیادی در زمینه روش‌های مختلف کنترل فازی بازوی ربات‌ها صورت پذیرفته است. از آن جمله می‌توان به روش کنترل فازی- تطبیقی [۱۲ و ۱۳] اشاره کرد. در سالیهای اخیر برخی از محققان از کنترل‌کننده‌های فازی PD و یا

PID استفاده کرده‌اند و یا در صدد بهبود رفتار آن بعنوان یک کنترل-کننده ساده و کارآمد بوده‌اند [۱۴ و ۱۵ و ۱۶].

در این مقاله یک کنترل‌کننده فازی برای کنترل ربات در یک مسیر مشخص ارائه می‌شود. محاسبات مربوط به کنترل‌کننده ساده و پایداری آن خوب است. در این روش با گسترش قانونهای زبانی برای خطا، مشتق خطا و انتگرال خطا و استفاده از موتور استنتاج ضرب با فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز، کنترل-کننده فازی ساخته می‌شود. ابتدا معادلات دینامیکی سیستم استخراج شده و سپس به فرم حالت نوشته می‌شوند تا قوانین کنترلی قابل اعمال باشند. با اعمال کنترل PD به سیستم خواهیم دید که یک خطای ماندگار در سیستم وجود خواهد داشت. با اعمال قوانین فازی جدید سعی می‌شود تا خطای تعقیب مسیر بازوی ربات دو درجه آزادی به حداقل برسد.

۲- تشریح سیستم کنترل فازی

در شکل (۱) ربات دو درجه آزادی مورد بررسی نشان داده شده است، خطای موقعیت q_1 و q_2 نسبت به موقعیت مرجع q_1^r و q_2^r با e_1 و e_2 نشان داده می‌شوند.

$$\begin{aligned} e_1 &= q_1 - q_1^r \\ e_2 &= q_2 - q_2^r \end{aligned} \quad (1)$$

برای مفصل اول گشتاور ورودی u_1 بر اساس قوانینی که روی متغیرهای زبانی e_1 و \dot{e}_1 بیان می‌شوند، به دست می‌آید. همچنین برای مفصل دوم گشتاور ورودی u_2 بر اساس قوانینی که روی متغیرهای زبانی e_2 و \dot{e}_2 بیان می‌شوند، به دست می‌آید که در آن $e_2' = e_1 + e_2$ است. همانطور که واضح است در اینجا ۳ متغیر زبانی وجود دارد و در نتیجه فضای تصمیم-گیری سه بعدی خواهد شد. برای متغیرهای زبانی همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده به تعداد ۷ تابع عضویت مثلثی در نظر گرفته می‌شود که در آن عبارات $e_{M_i}^+$ ، $e_{M_i}^-$ و $e_{M_i}^0$ به ترتیب بزرگترین مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرهای زبانی خطا و مشتق خطا و انتگرال خطای موقعیت زاویه‌ای هستند. با استفاده از موتور استنتاج ضرب با فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز، تابع تقریب به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{y}^i \left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^M \left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)} \quad (2)$$

سیستم کنترلی به صورت شکل (۳) است که در آن متغیرها به صورت $\mathbf{u}^T = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ و $\mathbf{q}^T = [q_1 \ q_2]^T$ و $\mathbf{q}^{T*} = [q_1^r \ q_2^r]^T$ هستند.

و در آن عبارات $c_1 = \cos(q_1)$ و $c_2 = \cos(q_2)$ و $s_1 = \sin(q_1)$ و $s_2 = \sin(q_2)$ و $c_{12} = \cos(q_1 + q_2)$ و $s_{12} = \sin(q_1 + q_2)$ هستند. حالت‌های سیستم بدین ترتیب تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} x_1 &= q_1 \\ x_2 &= \dot{q}_1 \\ x_3 &= q_2 \\ x_4 &= \dot{q}_2 \end{aligned} \quad (4)$$

که با استفاده از معادلات دینامیکی می‌توان فضای حالت را تشکیل داد.

۳- قواعد نوشتاری

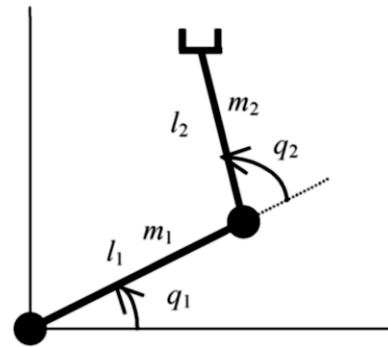
در حالتی که فقط از متغیرهای زبانی خطا و مشتق خطا استفاده می‌شود، تصمیم‌گیری برای مقدار گشتاور (پایگاه قواعد فازی) به صورت شکل (۴) خواهد بود.

$e \backslash \dot{e}$	N	Z	P
N	PB	PS	Z
Z	PS	Z	NS
P	Z	NS	NB

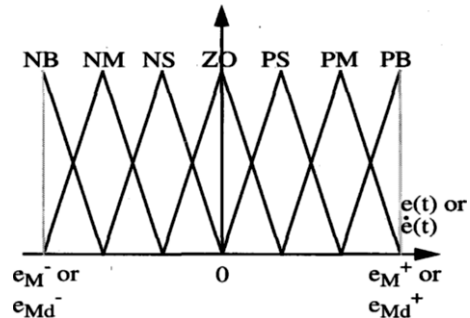
شکل (۴) تصمیم‌گیری برای گشتاور از روی خطا و مشتق خطا

شکل (۴) برای حداقل تعداد توابع عضویت لازم برای متغیرهای زبانی داده شده است و برای به دست آوردن جوابی دقیق‌تر از تعداد توابع عضویت بیشتری استفاده می‌شود. در این شکل حرف N برای منفی، حرف Z برای صفر، حرف P برای مثبت، حرف S برای کوچک و حرف B برای بزرگ استفاده می‌شوند. برای حالتی که متغیر زبانی انتگرال خطا نیز اضافه شود ماتریس شکل (۴) سه بعدی خواهد بود یعنی متغیر e به بعد سوم (بعد عمود بر صفحه) افزوده می‌شود. حالتی که در شکل بالا نشان داده شده برای $e = Z$ است. در این تحقیق تصمیم‌گیری برای متغیر زبانی انتگرال خطا بدین صورت تعریف شده است:

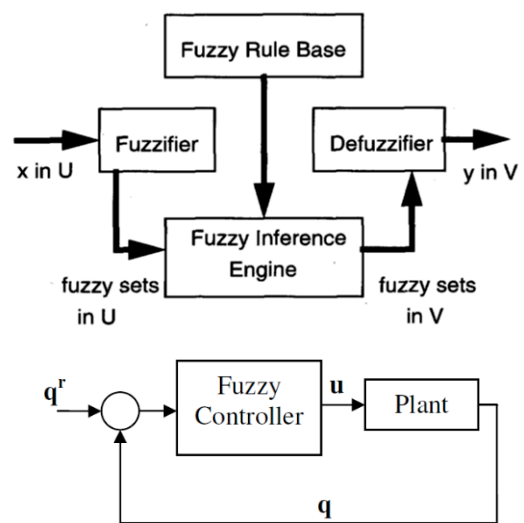
- ۱- هر چه مقدار e منفی‌تر شود مقدار گشتاور مثبت‌تر می‌شود
 - ۲- هر چه مقدار e مثبت‌تر شود مقدار گشتاور منفی‌تر می‌شود
- همانطور که می‌دانیم ضعف کنترل‌کننده‌های PD آن است که نمی‌توانند مسیر مورد نظر را تعقیب کنند. مثلاً در تعقیب یک مقدار ثابت (ورودی پله برای q^r)، سیستم تحت کنترل کننده PD همواره با خطای ماندگار همراه خواهد بود. برای سیستم‌های کنترل فازی که تنها بر اساس خطا و مشتق خطا تصمیم می‌گیرند هم این مشکل وجود دارد. با تعریف قانون برای متغیر e انتظار می‌رود که سیستم فازی در حالت خطای ماندگار



شکل (۱) ربات RR و مختصات تعمیم‌یافته



شکل (۲) توابع عضویت برای متغیرهای زبانی



شکل (۳) مدل سیستم کنترلی

معادلات دینامیکی سیستم به صورت زیر هستند:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = u \quad (3)$$

که در آن:

$$M = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2c_2 & m_2l_2^2 + l_1l_2m_2c_2 \\ m_2l_2^2 + l_1l_2m_2c_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -m_2l_1l_2s_2\dot{q}_2^2 - 2m_2l_1l_2s_2\dot{q}_1\dot{q}_2 \\ m_2l_1l_2s_1\dot{q}_1^2 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} m_2l_2gc_{12} + (m_1 + m_2)l_1gc_1 \\ m_2l_2gc_{12} \end{bmatrix}$$

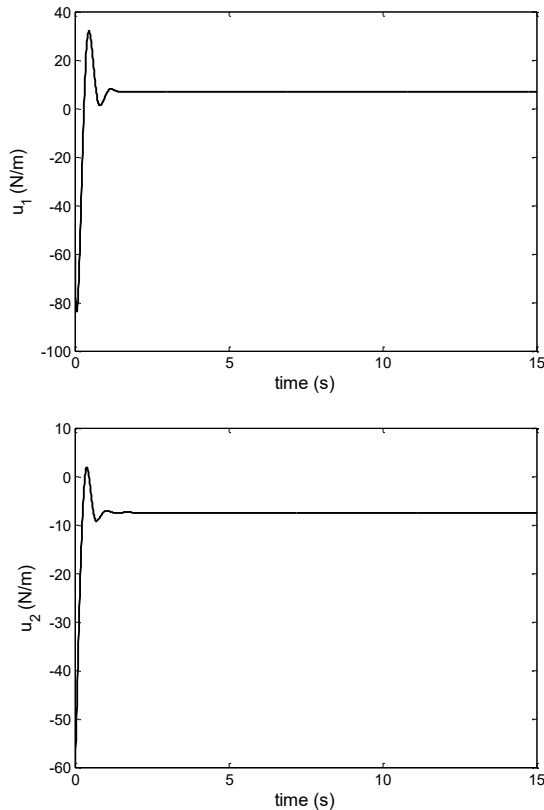
با تغییر در مقدار f در مقدار ورودی (گشتاور) تغییر ایجاد کند و سیستم را از سکون درآورد.

۴- نتایج برای حالت دومتغیره و سه متغیره

نتایج ابتدا برای تعقیب مسیر یک حالت مرجع ثابت و سپس برای تعقیب یک مرجع سینوسی، برای سیستم روبات دو درجه آزادی در دو حالت با دو و سه متغیر زبانی به دست می آید. مشخصات سیستم به صورت $l_1 = l_2 = 1 \text{ m}$ و $m_1 = m_2 = 1 \text{ kg}$ و $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ در نظر گرفته می شود.

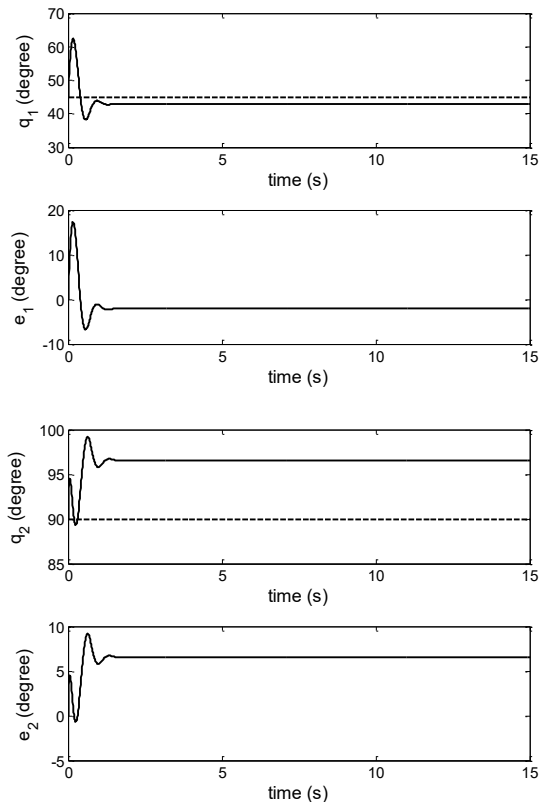
۴-۱- تعقیب مقدار مرجع ثابت

قرار است سیستم ربات دو درجه آزادی که به حالت $q_1 = \frac{\pi}{4}, \dot{q}_1 = 3, q_2 = \frac{\pi}{2}, \dot{q}_2 = 3$ رسیده است، در حالت $q_1 = \frac{\pi}{4}, \dot{q}_1 = 0, q_2 = \frac{\pi}{2}, \dot{q}_2 = 0$ نگه داشته شود. برای حالت با دو متغیر زبانی نتایج برای متغیرهای حالت و ورودی مورد نیاز در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۵) ملاحظه می شود یک خطای ماندگار در حالت کنترل-کننده فازی با دو متغیر زبانی وجود دارد که مشابه کنترل کننده های PD است. در شکل (۶) مقدار گشتاور اولیه به خاطر اختلاف سرعت در حالت اولیه و حالت مطلوب، ورودی اولیه زیاد شده است.



شکل ۶) نمودار گشتاورهای مورد نیاز در حالت کنترل کننده فازی با دو متغیر زبانی

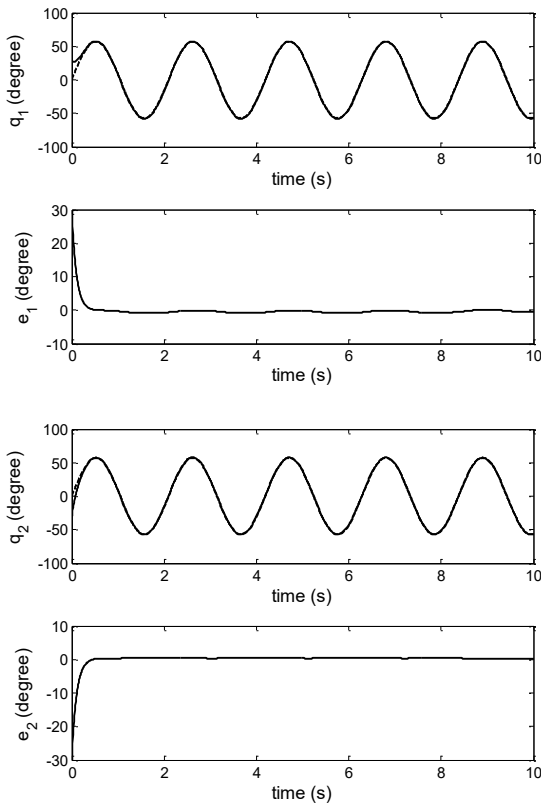
برای حالت با سه متغیر زبانی نتایج برای متغیرهای حالت و ورودی مورد نیاز در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۷) ملاحظه می شود خطای ماندگار در حالت کنترل کننده فازی با سه متغیر زبانی صفر است که مشابه کنترل کننده های PID است. در انجام این محاسبات برای هر یک از سه متغیر زبانی، به تعداد ۷ تابع عضویت در نظر گرفته شده است. بازه تغییرات برای متغیرهای زبانی e_1 و \dot{e}_1 و $\int e_1 dt$ به ترتیب برابر با $[-\pi/6, \pi/6]$ و $[-5, 5]$ و $[-\pi/6, \pi/6]$ است و بازه تغییرات برای متغیرهای زبانی e_2 و \dot{e}_2 و $\int e_2 dt$ به ترتیب برابر با $[-\pi/3, \pi/3]$ و $[-5, 5]$ و $[-\pi/3, \pi/3]$ در نظر گرفته می شود.



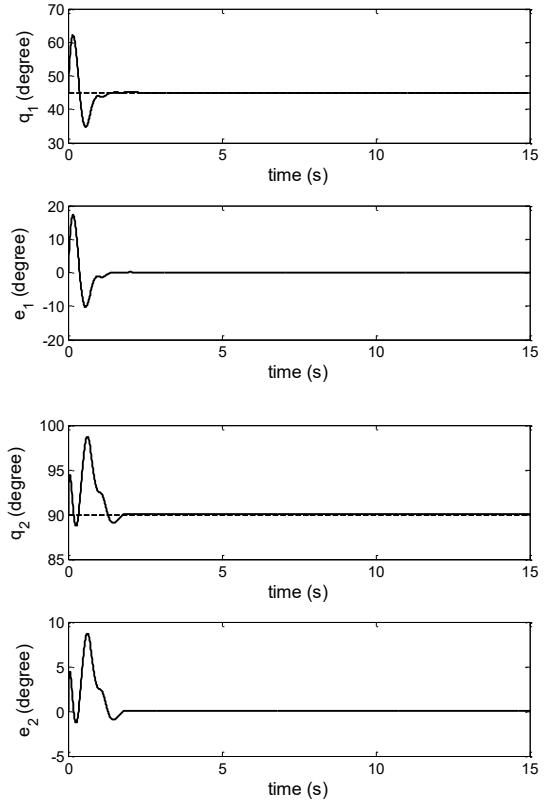
شکل ۵) نمودار متغیرهای حالت و مقدار خطای ردیابی در حالت کنترل کننده فازی با دو متغیر زبانی

۲-۴- تعقیب مقدار مرجع سینوسی

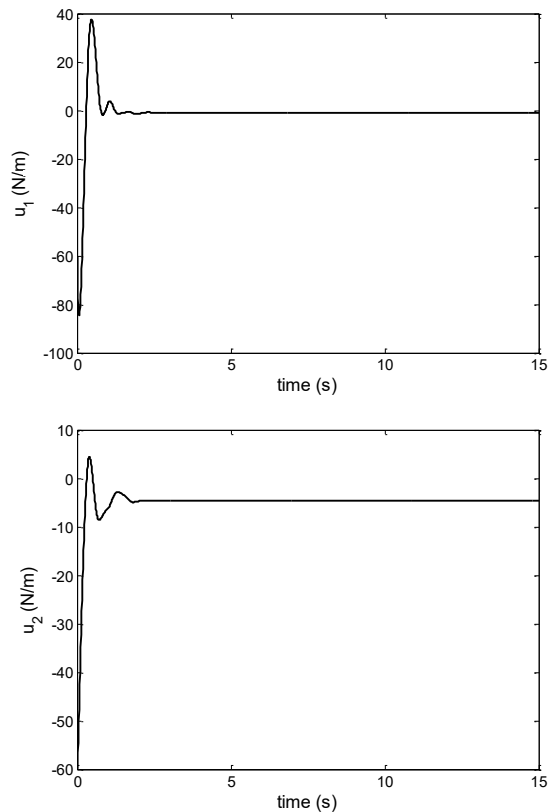
قرار است سیستم ربات دو درجه آزادی که در حالت اولیه قرار دارد مسیر مطلوب $q_1 = \frac{\pi}{6}, \dot{q}_1 = 2, q_2 = -\frac{\pi}{6}, \dot{q}_2 = 2$ را تعقیب کند. برای حالت با سه متغیر زبانی نتایج برای متغیرهای حالت و ورودی مورد نیاز در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود پس از گذشت زمان کمی سیستم مسیر مورد نظر را دنبال می‌کند. همانطور که قبلاً هم گفته شد، در شکل (۱۰) مقدار گشتاور اولیه به خاطر اختلاف سرعت در حالت اولیه و حالت مطلوب، ورودی اولیه زیاد شده است.



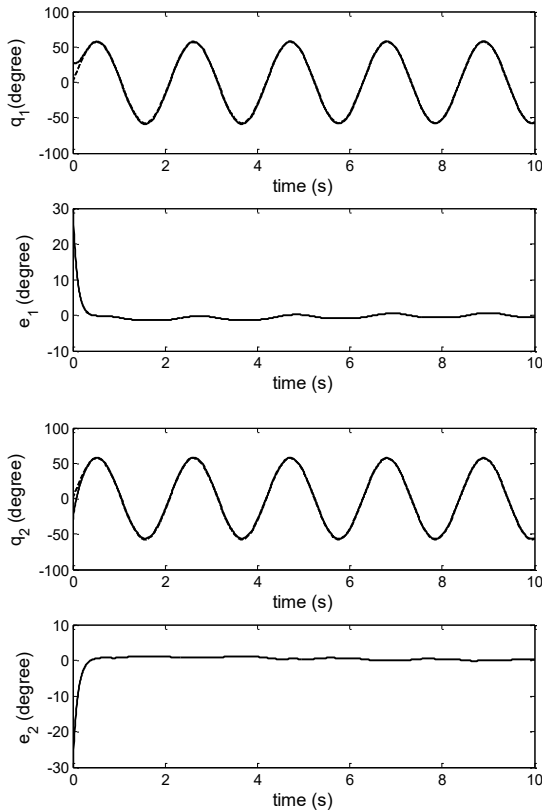
شکل ۹- نمودار متغیرهای حالت و مقدار خطای ردیابی در حالت کنترل کننده فازی با سه متغیر زبانی و مسیر سینوسی



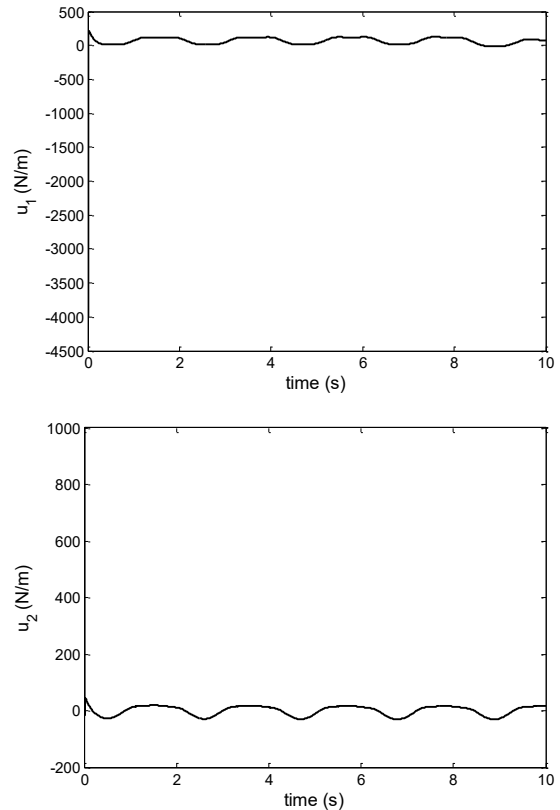
شکل ۷- نمودار متغیرهای حالت و مقدار خطای ردیابی در حالت کنترل کننده فازی با سه متغیر زبانی



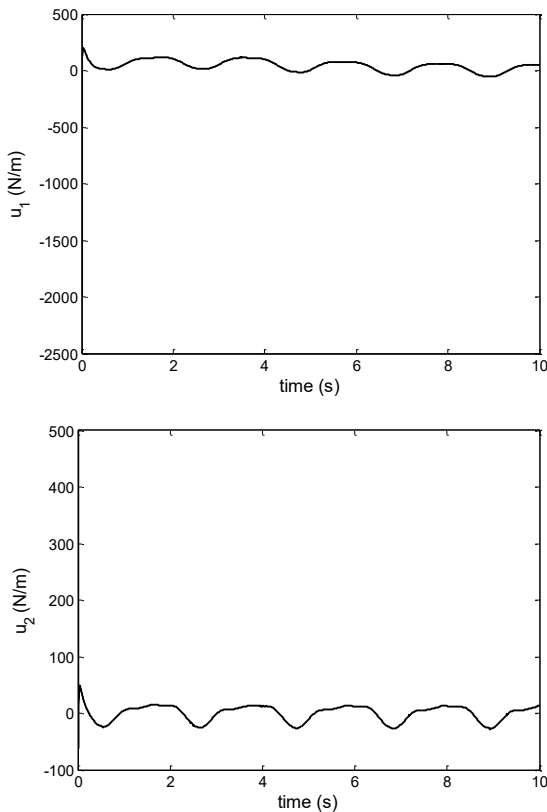
شکل ۸- نمودار گشتاورهای مورد نیاز در حالت کنترل کننده فازی با سه متغیر زبانی



شکل ۱۱- نمودار متغیرهای حالت و مقدار خطای ردیابی در حالت کنترل-کننده فازی با سه متغیر زمانی و مسیر سینوسی و عدم قطعیت



شکل ۱۰- نمودار گشتاورهای مورد نیاز در حالت کنترل کننده فازی با سه متغیر زمانی مسیر سینوسی



شکل ۱۲- نمودار گشتاورهای مورد نیاز در حالت کنترل کننده فازی با سه متغیر زمانی مسیر سینوسی و عدم قطعیت

۵- تاثیر عدم قطعیت در رفتار کنترل کننده فازی

در این قسمت نشان داده می شود زمانیکه از کنترل کننده فازی مورد نظر استفاده می شود عدم قطعیت یا اغتشاش بر پایداری سیستم بی تاثیر است. در حالتیکه سیستم تحت تأثیر عدم قطعیت یا اغتشاش قرار گیرد، معادلات دینامیکی سیستم رامی-توان به صورت زیر نوشت:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + \tau_c(q, \dot{q}) + \tau_d(q, \dot{q}) = u \quad (5)$$

که در آن عدم قطعیت به دو قسمت پیوسته $\tau_c(q, \dot{q})$ و ناپیوسته $\tau_d(q, \dot{q})$ تجزیه شده است. در اینجا عدم قطعیت ها به صورت زیر در نظر گرفته می شوند:

$$\tau_c = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 + 10 \sin(3q_1) \\ 1.2\dot{q}_2 + 5 \sin(2q_2) \end{bmatrix}, \tau_d = \begin{bmatrix} 2\text{sign}(\dot{q}_1) \\ \text{sign}(\dot{q}_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

در این حالت شکل (۱۱) و (۱۲) تغییرات حالت و گشتاورهای ورودی را نشان می دهند. رفتار سیستم تغییر زیادی نکرده ولی مقدار گشتاورها دچار تغییر شده است.

- [7] A. Green, J.Z. Sasiadek, "Dynamics and trajectory tracking control of a two-link robot manipulator", *J. Vibr. Control* 10 (10) (2004) 1415-1440.
- [8] A. Green, J.Z. Sasiadek, "Fuzzy and optimal control of a two-link flexible manipulator", in: *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2001, pp. 1169-1174.
- [9] R. Ortega, M.W. Spong, "Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial", *Automatica* 25 (1989) 877-888.
- [10] O. Barambones, V. Etxebarria, "Robust neural control for robotic manipulators", *Automatica* 38 (2002) 235-242.
- [11] S.S. Ge, C.C. Hang, L.C. Woon, "Adaptive neural network control of robot manipulators in task space", *IEEE Trans. Ind. Electron.* 44 (1997) 746-752.
- [12] M.J. Er, S.H. Chin, "Hybrid adaptive fuzzy controllers of robot manipulators with bounds estimation", *IEEE Trans. Ind. Electron.* 47 (2000) 1151-1160.
- [13] Y. Gao, M.J. Er, S. Yang, "Adaptive fuzzy neural control of robot manipulators", *IEEE Trans. Ind. Electron.* 48 (2001) 1274-1278.
- [14] N. D. Phu, N.N. Hung, A. Ahmadian, N. Senu, "A New Fuzzy PID Control System Based on Fuzzy PID Controller and Fuzzy Control Process", *Int. J. Fuzzy Syst.* 22 (2020) 2163-2187.
- [15] J. Han, X. Shan, H. Liu, J. Xiao, T. Huang "Fuzzy gain scheduling PID control of a hybrid robot based on dynamic characteristics", *Mechanism and Machine Theory* 184 (2023) 105283.
- [16] B. Zhang, H. Zhao, X. Zhang, "Adaptive variable domain fuzzy PID control strategy based on road excitation for semi-active suspension using CDC shock absorber", *Journal of Vibration and Control*, (2023) doi: 10.1177/10775463231152287

۶- خلاصه نتایج

در این تحقیق کنترل فازی و تعقیب مسیر یک ربات RR ارائه شد. در تشکیل پایگاه قواعد فازی از سه متغیر زمانی خطا و مشتق خطا و انتگرال خطای موقعیت زاویه‌ای استفاده شد و در نتیجه قابلیت تعقیب مسیر به کنترل کننده فازی داده شد. در حالتی که تنها از دو متغیر خطا و مشتق خطا استفاده شود سیستم در حالتی خارج از حالت مورد نظر به تعادل می‌رسد و مقدار خطا ثابت شده و مشتق آن صفر می‌شود و در نتیجه مقدار گشتاور هم ثابت و در تعادل با بارهای خارجی (گرانشی) می‌ماند و سیستم به موقعیت مورد نظر نمی‌رسد. اما وقتی که از متغیر انتگرال خطا هم استفاده شود، زمانی که سیستم به تعادل برسد با گذشت زمان انتگرال خطا تغییر می‌کند و در نتیجه گشتاور تغییر کرده و سیستم از حالت سکون خارج می‌شود.

همواره عدم قطعیت‌هایی در نیروهای مفصلی و مدل خود ربات وجود دارد که می‌تواند در کنترل PID ناپایداری ایجاد کند اما در سیستم کنترل فازی این مشکل وجود ندارد چرا که تصمیم‌گیری بر اساس شدت تغییرات و انواع مقدار متغیرهای زبانی می‌تواند دارای انعطاف باشد. به عبارت دیگر میدان تصمیم‌گیری بر اساس متغیرهای زبانی می‌تواند غیرخطی و دلخواه باشد. بنابراین با مجهز کردن سیستم کنترل فازی به متغیر انتگرال خطا، با حفظ خواص کنترل کننده PID، می‌توان مشکلات ناشی از عدم قطعیت را نیز برطرف کرد.

مراجع

- [1] L. Wang, "A Course in Fuzzy Systems and Control", Prentice-Hall Inc., 1997.
- [2] L.A. Zadeh, "From circuit theory to systems theory", *Proceedings of Institution of Radio Engineers* 50 (1962) 856-865.
- [3] L.A. Zadeh, "Fuzzy algorithms", *Information and Control* 12 (2) (1968) 94-102.
- [4] L.A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 3 (1973).
- [5] M.W. Spong, M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control", Wiley, New York, 1989.
- [6] J.J. Craig, "Introduction to Robotics", second ed., Addison-Wisley, Reading, MA, 1989.