

استفاده از تخمینگر فازی تاکاجی-سوگنو در محاسبه دینامیک معکوس ربات موازی 3-RRR برای استفاده در کنترل ربات به روش گشتاور محاسبه شده

کاوه کمالی^۱، علیرضا اکبرزاده توتونچی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، kaveh.kamali@gmail.com

^۲ استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، ali_akbarzadeh_t@yahoo.com

چکیده

رباتهای موازی به دلیل دارا بودن برتری‌های خاص نسبت به رباتهای سری در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. به علت ساختار غیرخطی ربات‌های موازی کنترل این ربات‌ها کاری بسیار پیچیده است. یکی از بهترین روش‌ها برای کنترل ربات‌ها استفاده از روش گشتاور محاسبه شده^۱ است که از دینامیک معکوس برای کنترل ربات استفاده میکند. اما این روش برای رباتهای موازی به علت وجود مشکلاتی نظیر زمان بر بودن و نیاز به استفاده از سینماتیک مستقیم که خود حل دقیق ندارد، در عمل قابل پیاده‌سازی نیست در این مقاله یک کنترلر به روش گشتاور محاسبه شده برای کنترل ربات موازی ارائه شده است که در آن از یک سیستم فازی برای محاسبه دینامیک معکوس استفاده شده است. استفاده از تخمینگر فازی برای محاسبه دینامیک معکوس ربات مشکلات ذکر شده در روش گشتاور محاسبه شده را برطرف می‌سازد. در پایان نتایج کنترل معمولی با PID با استفاده از مدل فازی دینامیک معکوس و کنترلر یکدیگر مقایسه شده‌اند که نشان‌دهنده جواب قابل قبول روش فازی است.

کلمات کلیدی: ربات موازی، تخمین‌گر فازی تاکاجی-سوگنو، دینامیک معکوس.

مقدمه

رباتهای موازی به عنوان «یک زنجیره سینماتیکی بسته که در آن نگه‌دارنده ابزار توسط چندین زنجیره سینماتیکی مجزا به پایه ربات متصل شده است» تعریف می‌شوند [۱]. با توجه به سختی بالا، قابلیت کار در سرعت‌های بالا و قابلیت حمل بارهای سنگین در رباتهای موازی این ربات‌ها از دهه ۱۹۹۰ در مقالات علمی و همچنین در صنعت بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. بسیاری از محققان مسئله کنترل رباتها را مورد بررسی قرار داده‌اند. کنترل رباتها در دو شاخه مختلف دسته‌بندی می‌شود: کنترل بر اساس مدل و کنترل بدون استفاده از مدل دینامیکی ربات [۲]. در روش کنترل بر اساس مدل از مدل دینامیکی ربات برای کنترل استفاده می‌شود و در نتیجه پاسخ دقیق‌تر است. از روش‌های کنترل بر اساس مدل می‌توان به روش گشتاور محاسبه شده اشاره کرد [۲]. اما استفاده از

مدل دینامیکی ربات مشکلاتی از قبیل مقاوم نبودن و زمان زیاد محاسبات را دارد. مشکل زمان در ربات‌های موازی چندین برابر است. به این دلیل که دینامیک این ربات‌ها بسیار پیچیده است. علاوه بر این در ربات‌های موازی برای استفاده از دینامیک ربات ابتدا باید سینماتیک مستقیم آن حل شود. سینماتیک مستقیم ربات‌های موازی دارای حل تحلیلی نیست و همچنین بسیار زمان‌بر و دارای خطا است. به این دلیل پژوهشگران برای کنترل ربات‌های موازی به روش‌های که نیاز به مدل دینامیکی ندارند مانند کنترلر فازی، کنترلر بر اساس شبکه عصبی و کنترلرهای تطبیقی روی آوردند [۳]. این روش‌ها دارای سرعت بالایی هستند اما دقت کنترل در آنها پایین می‌آید. در برخی موارد نیز پژوهشگران سعی کردند با ساده‌سازی دینامیک ربات و در نظر نگرفتن برخی عوامل و ترکیب روش بر پایه مدل با روش‌های مقاوم به کنترلر سریع‌تر و دقیق‌تری دست پیدا کنند [۴]. این روش‌ها دارای دقت بالاتری هستند و مقاوم نیز می‌باشند اما سرعت محاسبات در آنها هنوز مشکل‌ساز است. در مقاله سعی شده است تا با استفاده از یک مدل فازی تاکاجی-سوگنو مدل دینامیکی ربات تخمین زده شود، سپس با استفاده از روش گشتاور محاسبه شده ربات کنترل می‌شود. این روش نسبت به روش‌های بر پایه مدل دارای سرعت بسیار بالایی است در حالی که مقاومت به نویز نسبی خوبی نیز دارد. در این مقاله کنترل ربات صفحه‌ای 3-RRR مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا سینماتیک ربات بررسی شده است. سپس دینامیک ربات با استفاده از روش متعامد تکمیلی طبیعی (NOC) به دست آمده است. در مرحله بعد ماتریس‌های دینامیک ربات حول چندین نقطه تعادل محاسبه شده‌اند و از این ماتریس‌ها برای آموزش مدل فازی تاکاجی-سوگنو^۲ استفاده شده است. سپس مدل فازی بدست آمده با روش گشتاور محاسبه شده ترکیب شده و برای کنترل ربات به کار رفته است. در نهایت نتایج بدست آمده با نتایج کنترلر PID مقایسه شدند.

ساختار ربات موازی صفحه‌ای 3-RRR

در این مقاله کنترل ربات موازی صفحه‌ای 3-RRR مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ربات در شکل (۱) مشاهده می‌شود. این ربات شامل سه زنجیره از لینکها (M_1DA, M_2EB, M_3FC)

^۲ Takagi-Sugeno

^۱ computed torque method

که در آن q^a بردار n بعدی شامل مختصات اتصال مستقل و q^h بردار $m-n$ بعدی شامل مختصات اتصالات غیر مستقل هستند. با توجه به اینکه تعداد درجات آزادی در ربات 3-RRR برابر با ۳ است برای این ربات داریم $n = 3$. فضای کارترین ربات 3-RRR شامل موقعیت صفحه نگهدارنده-ی ابزار (مرکز مثلث ABC) و زاویه ابزار است که آن‌ها را با بردار $[x \ y \ \varphi]^T$ نشان می‌دهیم.

مدل دینامیکی ربات موازی با استفاده از متعامد تکمیلی طبیعی (NOC) توسط Ma و Angeles [۶] به صورت زیر به دست آمده است:

$$I(q)\ddot{q}^a + C(q, \dot{q})\dot{q}^a - G(q) = \tau^a \quad (3)$$

که در آن ماتریس‌های $I(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ماتریس اینرسی، $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ماتریس مربوط به نیروهای کوریولیس و $G(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ ماتریس نیروهای گرانشی هستند که توسط ما^۱ و انجلس^۲ [۸] تعریف شده‌اند. بردار گشتاورهای وارد بر مفاصل محرک نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau^a = \begin{Bmatrix} \tau_1^a \\ \tau_2^a \\ \vdots \\ \tau_n^a \end{Bmatrix} \quad (4)$$

کنترل به روش گشتاور محاسبه شده

مسئله کنترل سیستم پیچیده‌اتی مانند ربات موازی را می‌توان با تغییر متغیری زیر به مسئله‌ای ساده تبدیل نمود:

$$\tau = \alpha \tau' + \beta \quad (5)$$

که در آن τ برداری $n \times 1$ می‌باشد که گشتاور اعمالی به مفاصل‌ها می‌باشد τ' برداری $n \times 1$ می‌باشد که از معادله بالا تعریف می‌شود و:

$$\alpha = I(q) \quad (6)$$

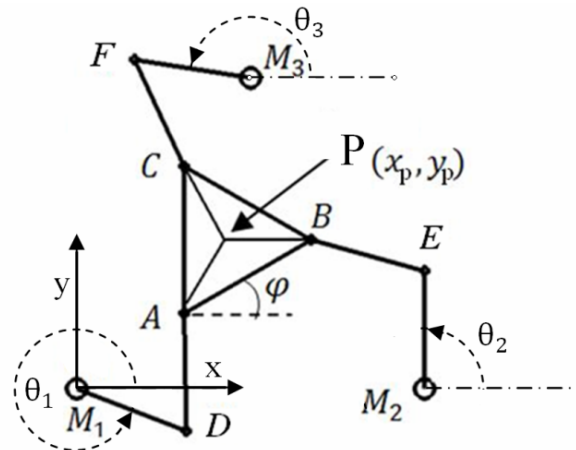
$$\beta = C(q, \dot{q})\dot{q}^a + G(q) \quad (7)$$

حال خواهیم داشت:

$$\tau' = \ddot{q}^a \quad (8)$$

بنابراین مسئله پیچیده‌ی کنترل غیرخطی به یک مسئله‌ی ساده‌ی خطی تبدیل شد. حال سیستم بالا را می‌توان به سادگی با کنترل PID کنترل کرد. این روش زوش گشتاور محاسبه شده نام دارد و از دقیق‌ترین روش‌های کنترل غیر خطی است. اما همان گونه که بیان

می‌باشد که صفحه‌ی ابزار ربات را به پایه‌ی ربات متصل می‌کند. سه موتور بر روی پایه‌ی ربات روی رأسهای یک مثلث متساوی الاضلاع در نقاط M_1, M_2, M_3 ثابت شده‌اند و صفحه ابزار ربات مثلث متساوی‌الضلاع ABC است. هر زنجیره سینماتیکی شامل دو لینک یک مفصل چرخشی ساده می‌باشد. ساختار کلی ربات به صورت سه زنجیره حلقه بسته $M_1DABEM_2, M_2EBCFM_3, M_3FCADM_1$ سینماتیکی است که دو حلقه از آنها مستقل هستند و یکی وابسته است. هدف این ربات این است که ابزار را در موقعیت و زاویه دلخواه در صفحه قرار دهد.



شکل ۱: ربات موازی صفحه‌ای 3-RRR [۵]

در مجموع ربات 3-RRR شامل ۹ عدد مفصل چرخشی یک درجه آزادی و ۷ عدد جسم صلب متحرک است. تعداد درجات این ربات برابر ۳ است بنابراین با استفاده از سه موتور که مفصل‌های M_1, M_2, M_3 را حرکت می‌دهند می‌توان ابزار ربات را به هر موقعیت و زاویه دلخواه در فضای کاری انتقال داد.

دینامیک ربات موازی 3-RRR

در این بخش دینامیک ربات موازی 3-RRR به روش مکمل متعامد طبیعی NOC مورد بحث قرار می‌گیرد. ربات 3-RRR دارای $r = 7$ عضو صلب باشد که توسط $m = 9$ اتصال یک درجه آزادی به یکدیگر متصل شده‌اند. برای بیان حرکت ربات دو فضای حرکتی وجود دارد که عبارتند از: فضای اتصالات و فضای کارترین (نقطه کاری). می‌توان تغییر مکان کل سیستم را توسط یک بردار m بعدی که شامل مختصات همه اتصالات می‌باشد، به صورت زیر بیان کرد.

$$q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_m]^T \quad (1)$$

در این رابطه q_i مختصات اتصال i ام ($i = 1, 2, \dots, m$) می‌باشد. در ربات 3-RRR مختصات تمام اتصالات از یکدیگر مستقل نیستند. بنابراین بردار موقعیت اتصالات q را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$q = \begin{bmatrix} q^a \\ q^h \end{bmatrix} \quad (2)$$

¹ Ma
² Angeles

را به عنوان یک نقطه تعادل در نظر می‌گیریم.

۴. مقادیر عددی ماتریس‌های $\mathbf{I}(q)$ ، $\mathbf{C}(q, \dot{q})$ و $G(q)$ را برای هر نقطه تعادل محاسبه می‌کنیم.

۵. برای هر نقطه تعادل \mathbf{x}_i یک قانون فازی را به صورت زیر ایجاد می‌کنیم:

$$\text{if } \mathbf{x} = \mathbf{x}_i \text{ then } (I = I_i, C = C_i, \text{ and } G = G_i) \quad (9)$$

توابع عضویت فازی به صورت توابع گوسی در نظر گرفته شده است. اگر تابع عضویت فازی مربوط به نقطه تعادل \mathbf{x}_i و درایه j ام بردار \mathbf{x} را $f_{ij}(\mathbf{x})$ بنامیم آنگاه تابع عضویت فازی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f_{ij}(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{(x_j - \mu_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}\right) \quad (10)$$

پارامترهای μ_{ij} و σ_{ij} را به صورت زیر تعیین می‌کنیم:

$$\mu_{ij} = \mathbf{x}_i(j) \quad (11)$$

$$\sigma_{ij} = \max(|\mathbf{x}_i(j) - \mathbf{x}_{i-1}(j)|, |\mathbf{x}_{i+1}(j) - \mathbf{x}_i(j)|) \quad (12)$$

پس از اعمال غیرفازی سازی خروجی مدل فازی تاکاجی-سوگنو که مقدار تخمین زده شده برای ماتریس‌های $\mathbf{I}(q)$ ، $\mathbf{C}(q, \dot{q})$ و $G(q)$ است، به صورت معادلات زیر به دست می‌آید:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{x}) I_i}{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{x})}, \quad (13)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{x}) C_i}{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{x})}, \quad (14)$$

$$G = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{x}) G_i}{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{x})}. \quad (15)$$

که در آن \mathbf{I}_i ، \mathbf{C}_i و G_i ماتریس‌های معادله‌ی دینامیکی برای نقطه‌ی i ام هستند و $w_i(\mathbf{x})$ به صورت زیر به دست می‌آید:

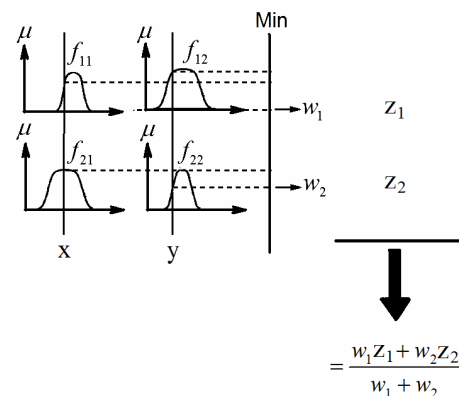
$$w_i(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n f_{ij}(\mathbf{x}) \quad (16)$$

شد، محاسبه‌ی ماتریس‌ها و بردار $\mathbf{I}(q)$ ، $\mathbf{C}(q, \dot{q})$ و $G(q)$ زمان‌بر و پیچیده است. در ادامه روشی برای استفاده از مدل فازی برای محاسبه‌ی این ماتریس‌ها بیان خواهد شد.

ایجاد مدل فازی جهت تخمین دینامیک معکوس ربات موازی

در این مقاله با استفاده از مدل فازی تاکاجی-سوگنو روشی ارائه شده است که تنها با داشتن مقادیر q^a و \dot{q}^a و با محاسباتی ساده و سریع بتوان تخمینی قابل قبول برای ماتریس‌های $\mathbf{I}(q)$ ، $\mathbf{C}(q, \dot{q})$ و $G(q)$ به دست آورد.

مدل فازی سوگنو^۱ (که همچنین به عنوان مدل TSK نیز شناخته می‌شود) توسط تاکاجی^۲، سوگنو و کنگ^۳ [۷] معرفی شد. برای مثال، اگر فرض کنیم در یک سیستم X و Y ورودی‌ها و Z نشان دهنده خروجی باشد، مدل فازی تاکاجی-سوگنو به طور کلی به شکل زیر است:



شکل ۲: مدل فازی تاکاجی-سوگنو

برای استفاده از مدل فازی ذکر شده در تخمین سینماتیک مستقیم، زاویه مفصل‌های محرک $(\mathbf{x} = [q_1, q_2, q_3, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3]^T)$ را به عنوان ورودی و ماتریس‌های $\mathbf{I}(q)$ ، $\mathbf{C}(q, \dot{q})$ و $G(q)$ به عنوان خروجی مدل فازی در نظر گرفته شده‌اند.

برای تولید قوانین مراحل زیر به کار رفته است:

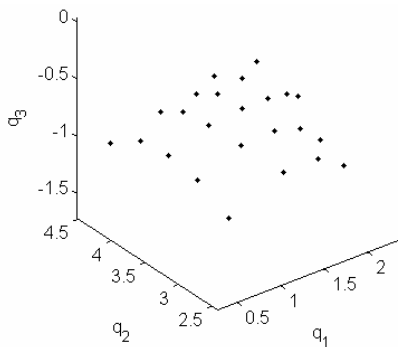
۱. فضای کاری ربات را مشخص می‌کنیم و نقاطی را با پراکنندگی یکنواخت از درون فضای کاری ربات در نظر می‌گیریم.
۲. برای هر یک از نقاط تعادل با استفاده از سینماتیک معکوس زوایای موتورهای محرک مربوط به آن‌ها (q_1, q_2, q_3) را به دست می‌آوریم.
۳. در این مقاله برای هر دسته از مقادیر q_1, q_2 و q_3 سه مقدار $q_3 = 1$ و $q_2 = 0$ و $q_1 = 90$ در نظر گرفته شده است. بنابراین ۹ حالت مختلف برای \dot{q}_i ها به ازای هر دسته از مقادیر q_1, q_2 و q_3 داریم. هر یک از بردارهای $\mathbf{x} = [q_1, q_2, q_3, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3]^T$

¹ Sugeno

² Takagi

³ Kang

زوایای محرک‌های معادل این ۲۴ نقطه در به دست آمد که در شکل (۴) این زوایا به صورت نقاطی در فضای زوایای محرک‌ها نشان داده شده است. سپس با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش ۵ تخمینگر فازی در این ۲۴ نقطه تعادل آموزش داده شد.



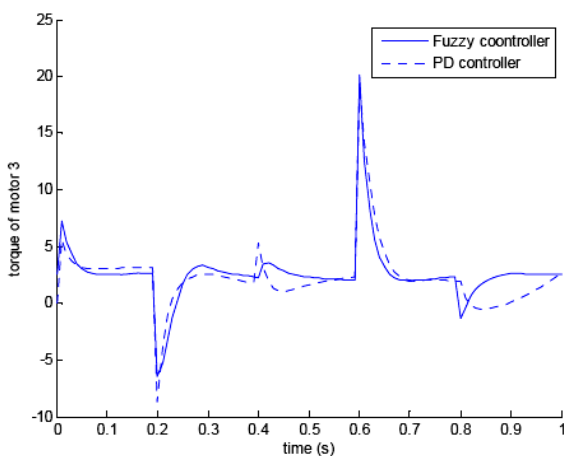
شکل ۴: نقاط تعادل در نظر گرفته شده در فضای مختصات محرک‌ها

علاوه بر کنترلر پیشنهاد شده یک کنترلر PID معمولی نیز برای مقایسه بر روی ربات اعمال شده است. گین‌های PID در هر دو کنترلر به صورت دستی تنظیم شده‌اند (جدول ۲) و معیار این تنظیم این بوده است که ماکزیمم گشتاور اعمال شده به موتورها در دو کنترلر یکسان باشد.

جدول ۲: مقدار گین‌ها برای کنترلر پیشنهاد شده و کنترلر PID

	P	I	D
کنترلر پیشنهاد شده	600	10	50
کنترلر PID	100	1000	6

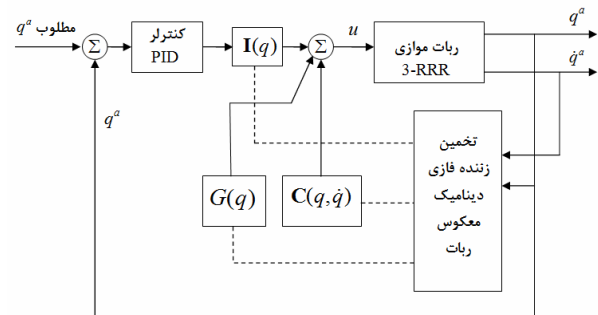
کنترلر پیشنهاد شده و کنترلر PID بر روی مدل ربات 3-RRR در محیط Simulink نرم‌افزار MATLAB شبیه سازی شدند. در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) گشتاورهای اعمال شده به موتورها برای دو کنترلر نشان داده شده است. نتایج این دو کنترلر در شکل (۸) مقایسه شده‌است.



شکل ۵: گشتاور اعمال شده به موتور برای کنترلر PID معمولی در مقایسه با کنترلر فازی پیشنهاد شده برای موتور اول

کنترلر گشتاور محاسبه شده با تخمینگر فازی دینامیک معکوس

پس از تخمین $I(q)$ ، $C(q, \dot{q})$ و $G(q)$ توسط مدل فازی می‌توان ربات را با استفاده از روش گشتاور محاسبه شده کنترل کرد. دیاگرام کنترلر پیشنهادی در شکل (۳) مشاهده می‌شود.



شکل ۳: کنترلر گشتاور محاسبه شده با تخمینگر فازی دینامیک معکوس

باید توجه داشت که تفاوت این کنترلر با کنترلر کلاسیک گشتاور محاسبه شده این است که در این روش ماتریس‌ها و بردار $I(q)$ ، $C(q, \dot{q})$ و $G(q)$ به سادگی و با سرعت زیاد توسط مدل فازی به دست می‌آیند.

مقایسه نتایج گرفته شده از سیستم فازی

برای بررسی نتایج به دست آمده از تخمینگر فازی سینماتیک مستقیم یک مسیر مستطیل شکل در فضای کاری ربات در نظر گرفته شده است. ابراز ربات باید این مسیر را با سرعت یکنواخت در ۱ ثانیه طی کند. همان طور که پیشتر بیان شد برای سادگی فرض شده است که زاویه‌ی ابزار در طول مسیر ثابت و معادل صفر باشد. بنابراین فضای کار ربات از سه بعد (x, y, φ) به دو بعد (x, y) کاهش می‌یابد. مشخصات ربات که برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

جدول ۱: مشخصات ربات موازی 3-RRR شبیه‌سازی شده

	زنجره اول	زنجره دوم	زنجره سوم
l_1 (m)	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۵
l_2 (m)	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۵
l_3 (m)	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۵
موقعیت قرار گرفتن موتور (m)	$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0.7 \\ 0 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0.35 \\ 0.7\sqrt{3}/2 \end{Bmatrix}$

برای آموزش ربات ۲۴ نقطه به که صورت یکنواخت در صفحه XY ربات پراکنده شده‌اند در نظر گرفته شده است. سپس توسط برنامه نوشته شده برای محاسبه سینماتیک معکوس ربات 3-RRR در نرم‌افزار MATLAB

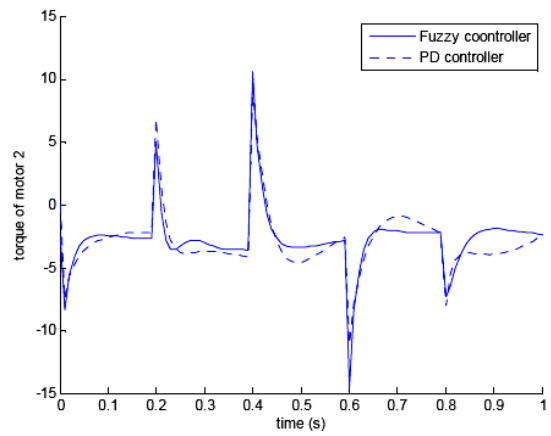
کنترلر تقریباً یکسان است.

نتیجه گیری

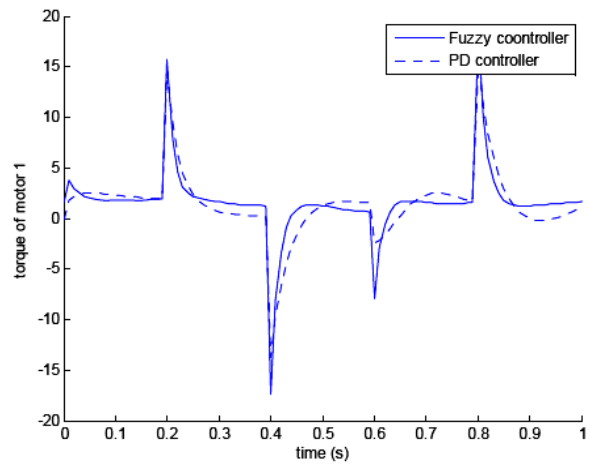
در این مقاله کنترل ربات صفحه‌ای 3-RRR مورد بررسی قرار گرفته شد. ابتدا سینماتیک و دینامیک ربات با استفاده از روش تکمیل کننده‌ی طبیعی متعامد (NOC) به بررسی شد. در مرحله بعد ماتریس‌های دینامیکی ربات حول چندین نقطه تعادل محاسبه شدند و از این ماتریس‌ها برای آموزش مدل فازی تاکاجی-سوگنواستفاده شد. مدل فازی بدست آمده با روش گشتاور محاسبه شده ترکیب شده و برای کنترل ربات به کار گرفته شد. در نهایت نتایج بدست آمده با نتایج کنترلر PID مقایسه شدند. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که کنترلر ارائه شده در این مقاله نتایج بهتری در مقایسه با کنترلر PID را به دست داده است در حالی که این کنترلر نیاز به ماسبات بسیار کمتری نسبت به کنترلرهای بر پایه‌ی مدل همچون کنترلر گشتاور محاسبه شده دارد.

مراجع

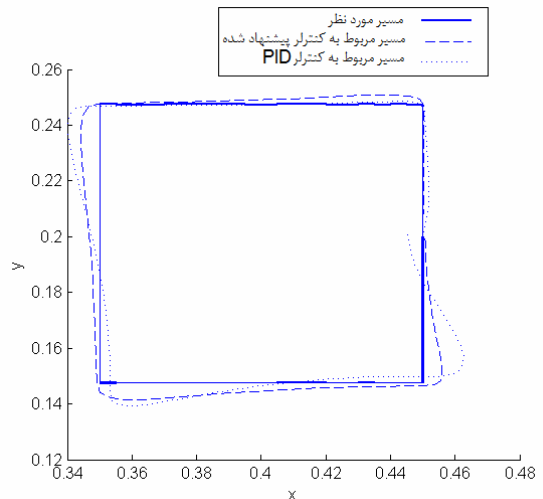
- [1]-Merlet J.P. and 1988, "Parallel manipulators", in: Proceedings of Seventh CISMIF TOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Udine, Italy, pp. 317-324.
- [2]-He, J.F., Jiang, H.Z., Cong, D.C., Ye, Z.M. and Han, J.W., 2007, "A Survey On Control Of Parallel Manipulator", Key Engineering Materials vol. 339, pp. 307-313.
- [3]-Su, Y., Sun, D., Ren, L., and Mills, J. K., 2006, "Integration of Saturated PI Synchronous Control and PD Feedback for Control of Parallel Manipulators", IEEE Transactions on Robotics, vol. 22, pp. 202-207.
- [4]-Lee S.H., Song J.B., Choi W.C., Hong D., "Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics", Mechatronics. Vol.13(2003), p. 605-619."
- [5]-Gosselin C. and Angeles J., 1989, Kinematics of parallel manipulators, McGill University Montreal, Quebec, Canada, December.
- [6]-Ma, O. and Angeles, J., 1989, "Direct Kinematics and Dynamics of a Planar 3-DOF Parallel manipulator", Advances in Design Automation, Proc. Of ASME Design and Automation Conference, 3, pp. 313-320.
- [7]-Jang J.-S. R., Sun C.-T., Mizutani E., Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Prentice Hall, 1997.



شکل ۶: گشتاور اعمال شده به موتور برای کنترلر PID معمولی در مقایسه با کنترل کننده‌ی فازی پیشنهاد شده برای موتور دوم



شکل ۷: گشتاور اعمال شده به موتور برای کنترلر PID معمولی در مقایسه با کنترل کننده‌ی فازی پیشنهاد شده برای موتور سوم



شکل ۸: نتیجه به دست آمده توسط کنترلر پیشنهاد شده و کنترلر PID معمولی برای مسیر مستطیل شکل

از شکل (۸) می‌توان نتیجه گرفت که کنترلر پیشنهاد شده خطای بسیار کمتری نسبت به کنترلر PID دارد و این در حالی است که با توجه به سه شکل (۵)، (۶) و (۷) ماکزیمم گشتاور اعمال شده به موتورها در مورد دو