

طراحی کنترل کننده فازی آنالوگ برای رباتی با دو درجه آزادی

حمید خالوزاده^۱، داریوش بی آزار^۲

گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد

h_khaloozadeh@um.ac.ir

چکیده

تئوری فازی بدلیل اینکه می تواند با اطلاعات زبانی مبهم کار کند مورد توجه بسیاری از محققین واقع شده است. بسیاری از سیستم‌های کنترل فازی در حال حاضر بصورت نرم افزاری در کامپیوترهای دیجیتال تحقق یافته اند. این چنین سیستم‌هایی برای عملکردهای بلادرنگ کارائی ندارند. برای انجام آن شبیه سازی تحقق یک سیستم فازی (بطور کامل) در عملکردهای بلادرنگ در نظر گرفته می شود. در این مقاله یک تحقق سخت افزاری آنالوگ فازی در مد ولتاژ برای سیستم روبات با دو درجه آزادی طراحی شده است. شبیه سازیهای انجام شده توسط نرم افزار Matlab دلالت بر عملکرد بالای ردیابی سیستم حلقه بسته با کنترلگر فازی آنالوگ طراحی شده دارد.

کلمات کلیدی: کنترل فازی - سخت افزار فازی آنالوگ - روبات

۱- مقدمه

با ایده پرفسور لطفی زاده و کار ممدانی (Mamdani)، در حال حاضر فازی در کنترل بسیاری از سیستمها استفاده می شود. اغلب کاربردهای کنترل فازی در کامپیوترهای دیجیتال یا میکروپروسورها که محاسبات سری انجام میدهند، انجام می شود، در حالی که این روش تنها به مسائلی که سرعت پائین دارند، محدود می گردد و سیستمهای بلادرنگ اغلب به زمان خیلی کوتاه نیاز دارند. در این حالت یک تحقق سخت افزاری تنها راه حل به نظر می رسد.

روشهای طراحی کنترل فازی به دو گروه کلی تقسیم می شوند: آنالوگ و دیجیتال. تحقیق در سیستمهای فازی آنالوگ در ۱۹۸۴ با کار یاماکاوا (Yamakawa) شروع شد [۱]، سپس محققین بیشتری در این زمینه کار کردند [۲]، [۳]، [۴]، [۵]. با استفاده از ناحیه های غیرخطی عناصر فعال در مدارات آنالوگ، عناصر فازی می توانند در ساختارهای خیلی ساده تحقق داده شوند. این عمل پیچیدگی مدار و فضای مصرفی را کاهش می دهد و سرعت عملکرد را بهتر می کند. از اشکالات اصلی روشهای آنالوگ انعطاف پذیری کم آن است. برای جبران این نقیصه تراشه های فازی آنالوگ با قابلیت برنامه ریزی پیشنهاد شدند. یاماکاوا [۶] تراشه ای طراحی کرد که توابع عضویت و قوانین آن قابل برنامه ریزی بودند. ولی فضای بسیار بزرگی را اشغال می کرد. سرعت پردازش سیستم استنتاج فازی ۱۴۰۰۰۰۰ قانون بدون غیرفازی کننده و ۶۲۵۰۰۰ قانون فازی با غیرفازی کننده بود [۵]. سپس یونگرینگ (Ungering) یک کنترلگر فازی در مد ترکیبی با واحد استنتاج دیجیتال برای بدست آوردن

۱- استادیار گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد

۲- کارشناسی ارشد کنترل دانشگاه فردوسی مشهد

انعطاف‌پذیری بیشتر طراحی کرد. برای جلوگیری از کاربرد A/D و D/A نیز مقادیر عضویت آنالوگ را در حافظه ذخیره کرد که متأسفانه این روش در تعداد تداخل توابع عضویت محدود بود [۷]. تحقق‌های سالهای بعد نیز عمدتاً از دو نوع تراشه پیروی می‌کرد: یک تراشه‌ای که قانونها در آن وجود دارند و دیگری تراشه غیرفازی کننده. بعد از آن بسیاری از محققین استفاده از تراشه‌های VLSI فازی با عملکرد بالا را گزارش دادند (ارزیابی یک میلیون قانون فازی در یک ثانیه [۸]).

در این مقاله یک کنترلر فازی آنالوگ که قابل برنامه‌ریزی می‌باشد و فضای کمی اشغال می‌کند برای کنترل یک روبات با دو درجه آزادی طراحی شده است. بعد از این که خلاصه‌ای از الگوریتم فازی گفته شد، در بخش سوم روند طراحی سیستم کنترل فازی طراحی شده در این تحقیق توصیف می‌شود. فصل چهارم اختصاص به کنترلر فازی آنالوگ در مدولناژ داشته و مدارات مورد استفاده برای تحقق سخت‌افزاری کنترل فازی مطرح می‌گردد. در بخش پنجم سیستم روبات معرفی می‌گردد و کنترلر آنالوگ طراحی شده به این سیستم اعمال می‌گردد. نتایج حاصله بیانگر عملکرد ردیابی بسیار خوب روبات، تحت کنترلر فازی آنالوگ است.

۲- ساختار کنترلر فازی

یک کنترلر فازی سیستمی است که براساس الگوریتم کنترل فازی تحقق یافته است. ساختار عمومی یک کنترلر فازی شامل سه بلوک فازی کننده، ماشین استنتاج و غیرفازی کننده است. برای استفاده عملی اغلب از کنترلرهایی با الگوریتم استنتاج فازی نوع min-max ممدانی استفاده می‌شود. در این استنتاج قانون \bar{A} بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\text{if } x_1 \text{ is } A_{1i} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{ni} \text{ then } y \text{ is } C_i \quad (1)$$

که x_1, x_2, \dots, x_n متغیرهای ورودی قسمت مقدم، y متغیر خروجی \bar{A} قسمت تالی و $A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{ni}$ و C_i مجموعه‌های فازی برای قانون \bar{A} می‌باشند.

تابع عضویت مجموعه فازی برای قانون \bar{A} بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\mu_{C_i} \times \mu_{C_i} = \min[\mu_{A_{1i}}(x_{1k}), \dots, \mu_{A_{ni}}(x_{nk})] = w_i \times C_i \quad (2)$$

که μ_{C_i} خروجی توابع عضویت شامل منفردهای (Singletons) C_i است. واحد غیرفازی کننده نیز از روش مرکز ثقل

(Center of Gravity) (COG) استفاده می‌کند. بنابراین خروجی بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$y = \frac{\sum_i^n w_i C_i}{\sum_i^n w_i} \quad (3)$$

۳- روند طراحی سیستم کنترل فازی

۳-۱- متغیرهای ورودی و خروجی: در این مقاله از $\theta_1(t)$ ، $\dot{\theta}_1(t)$ ، $\theta_2(t)$ و $\dot{\theta}_2(t)$ بعنوان ورودیهای کنترلر فازی استفاده شده است. در اینجا از سه تابع عضویت برای هر پارامتر استفاده می‌شود.

۳-۲- تولید قوانین کنترل فازی: در این پژوهش قوانین کنترلر فازی با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی کنترل کننده PID کلاسیکی که عملکرد مطلوبی را در سیستم روبات دو درجه آزادی بهمراه می‌آورد بدست آمده است (در واقع با استفاده از دستورهای ANFIS و GENFIS در نرم افزار MATLAB کنترلر فازی با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی کنترل کننده PID کلاسیک آموزش و طراحی می‌شود).

۳-۳- طراحی مکانیزم استنتاج: همانطور که گفته شد معمولاً از روش استنتاج فازی min-max ممدانی استفاده میشود،

۴-۳- انتخاب عملگر غیرفازی کننده: غیرفازی سازی برای تبدیل مقادیر فازی به مقادیر قطعی و آنالوگ برای ایجاد قابلیت اعمال به محرکها و سیستمها انجام می شود. در اینجا بخاطر سهولت در تحقق سخت افزاری و کاهش مدارات آنالوگ (کاهش ترانزیستور) از singleton بعنوان تابع عضویت خروجی استفاده شده است.

۴- کنترلر فازی آنالوگ

کنترلر فازی سیستمی است که براساس الگوریتم کنترل فازی تحقق یافته است. ساختار یک کنترلر فازی شامل سه بلوک فازی کننده، ماشین استنتاج و غیرفازی کننده است. از کنترلرهای آنالوگ موجود، به علت اینکه ساختار آن غیرقابل تغییر است، کمتر استفاده می شود. برای چیره شدن بر این مشکل یک ساختار جدید با مشخصه های زیر فرض می شود:

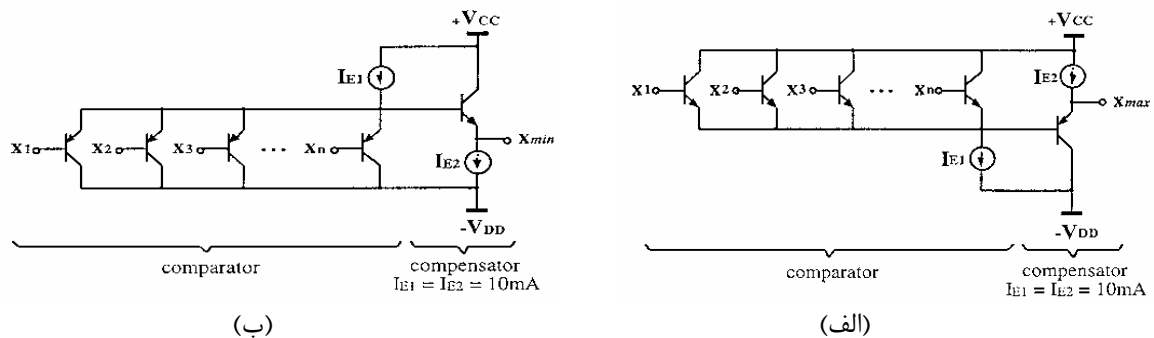
۱. مدار تابع عضویت قابل تنظیم

۲. بلوک غیرفازی کننده با فضای کوچک

توضیح در مورد هر بلوک با تکیه بر ساختار جدید در بخشهای بعد داده شده است.

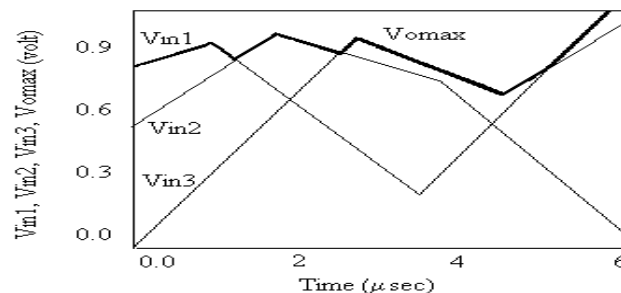
۴-۱- ساختار ماشین استنتاج (مدارات max و min)

در روش استنتاج ممدانی از عملگرهای اشتراک و اجتماع استفاده می شود. در ساختار در نظر گرفته شده این عملگرها با مدارات مینیمم (min) و ماکزیمم (max) در مد ولتاژ تحقق یافته اند. سه روش و دیدگاه عمده برای ساخت سخت افزاری مدارات max و min وجود دارد: روش مد جریان، روش مد ولتاژ و روش مد ترکیبی. در این تحقیق از روش مد ولتاژ استفاده شده است. عملگرهای غیرخطی مورد استفاده در روش استنتاج ممدانی min و max بوده که در مد ولتاژ با استفاده از ترانزیستورهای دوقطبی ساخته شده اند (شکل (۱)). در مد ولتاژ عملگرها و گیتهای غیرخطی مدارات max و min دارای مشخصه خوب و روابستنس عالی می باشند. مدارات max و min چند ورودی CMOS از تقویت کننده های تفاضلی استفاده می کنند تا بهره ولتاژ افزایش یابد. این گونه مدارات پیچیدگی بیشتری دارند اما پهنای باند فرکانسی بالا و عملکردشان بسیار خوب می باشد [۹].



شکل ۱- مدارات (الف) max و (ب) min

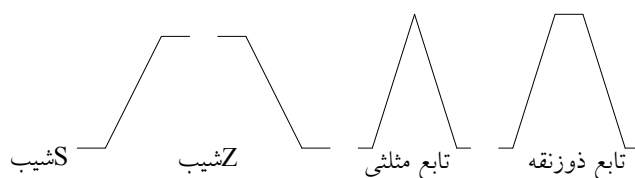
شکل (۲) عملکرد مدار max را با ترانزیستورهای دوقطبی CA3080 نشان می دهد.



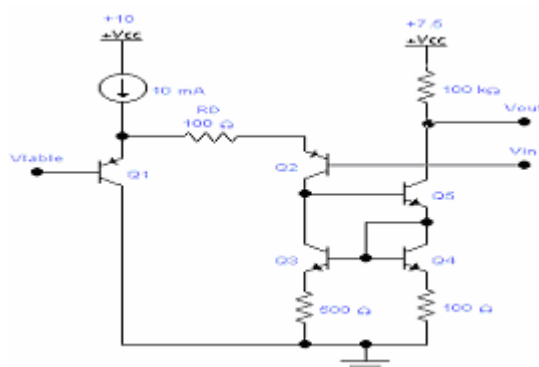
۴-۲- مدار فازی شکل ۲- شبیه سازی عملکرد مدار max سه ورودی کننده

داده ورودی یک کنترلگر فازی معمولاً مقادیر قطعی و آنالوگی است که از سنسور بدست می آید. بنابراین یک استنتاج فازی به محاسبه عضویت ورودیها به جمله های زبانی تعریف شده در قوانین فازی نیاز دارد. این تبدیل به وسیله مدارات تابع عضویت (Membership Function Circuit) (mfc) انجام می شود. خروجی یک mfc، درجه عضویت ورودی یک جمله زبانی در مد جریان یا مد ولتاژ است.

یک mfc از یک مدار تابع S و یک مدار تابع Z تشکیل شده است. بسیاری از توابع عضویت مختلف را می توان با ترکیب خروجی توابع نشان داده در شکل (۳) توسط مدارات آنالوگ مد ولتاژ ایجاد کرد. مشخصه ورودی و خروجی تابع عضویت می تواند با سه پارامتر V_m ، V_{table} و شیب تنظیم شود. در واقع توسط این سه پارامتر مدار آنالوگ قابلیت انعطاف می یابد. در شکل (۴) مدار تابع S که در این طراحی استفاده شده، نشان داده شده است. V_{table} بر موقعیت تابع دلالت دارد و با تغییر آن می توان موقعیت تابع عضویت را تغییر داد. شیب تابع عضویت نیز با تغییر مقاومت R_D تغییر می کند.



شکل ۳- توابع عضویت مدار تابع S و تابع Z



شکل ۴- مدار آنالوگ تابع S

۴-۳- مدار غیر فازی کننده

این بلوک مقدار فازی را به یک مقدار قطعی با روش COG (Center of Gravity) تبدیل می کند. محدوده ولتاژ ورودی ۵ تا ۷/۵ ولت متناظر با $[0, 1]$ و رنج ولتاژ خروجی از ۲/۵ تا ۷/۵ ولت می باشد. یک مدار براساس روش COG شامل یک جمع وزن دار شده، یک جمع معمولی و یک تقسیم کننده آنالوگ در شکل (۵) نشان داده شده است. مدار جمع وزن دار شده شامل شبکه مقاومتی R_1, R_2, \dots, R_7 است، در حالی که مدار جمع معمولی شامل مقاومت های یکسان R می باشد. تقسیم کننده های لگاریتمی بصورتی که در شکل (۵) نشان داده شده، استفاده می کند. وقتی V_{ref} برابر ۵ ولت است، جریانهای خروجی I_a و I_b را از این شبکه بصورت زیر می توان بدست آورد:

$$I_a = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{R_i} V_i \quad , \quad I_b = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{R} V_i \quad (۴)$$

با جایگزین کردن $(\frac{1}{R})V_i$ با I_i ، معادلات رابطه (۴) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$I_a = \sum_{i=1}^3 \frac{R}{R_i} I_i = \sum_{i=1}^3 w_i I_i \quad , \quad I_b = \sum_{i=1}^3 I_i \quad (5)$$

که $w_i = \frac{R}{R_i}$ می باشد. فرض می کنیم ترانزیستورهای Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 مشابه هستند و جریان اشباع معکوس ناچیز می باشد. بنابراین ولتاژ V_p در شکل (۵) بصورت زیر بدست می آید:

$$V_p = V_{ref} - V_a - V_{be1} = V_{ref} - V_b - V_{be2} \quad (6)$$

می توان معادله رابطه (۶) را بصورت معادله (۷) نوشت.

$$\begin{aligned} V_T \times \ln(I_a / I_{co}) + V_T \times \ln(I^* / I_{co}) \\ = V_T \times \ln(I_b / I_{co}) + V_T \times \ln[(I_o + I^*) / I_{co}] \end{aligned} \quad (7)$$

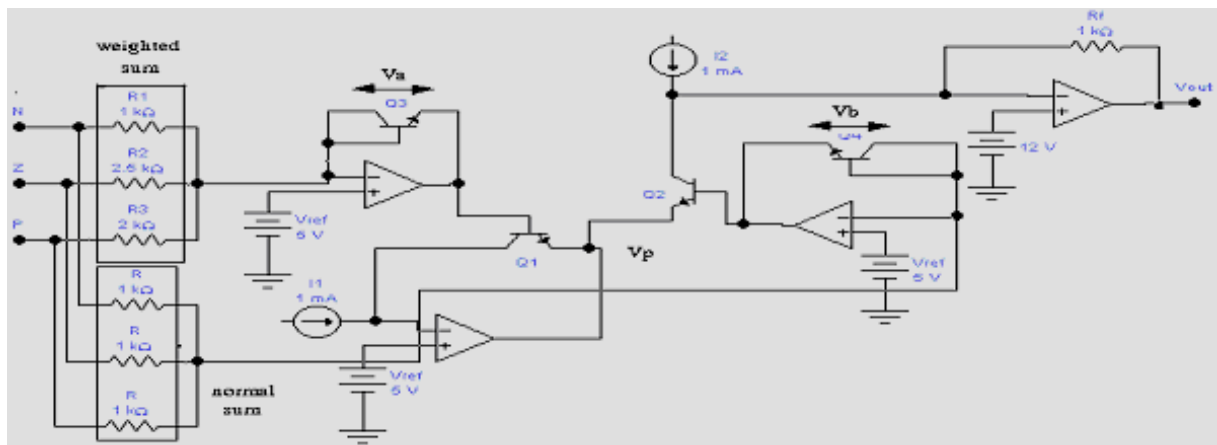
که در آن I_{co} جریان اشباع معکوس می باشد و $V_T = \frac{KT}{q}$ است. همچنین $I_1 = I_2 = I^*$ است. با حل معادله رابطه (۷) می توان نوشت:

$$I_o = I^* [(I_a / I_b) - 1] \quad (8)$$

بنابراین ولتاژ خروجی مدار شکل (۵) برابر است با:

$$V_{out} = R_f \times I_o + 5 = R_f \times I^* [(I_a / I_b) - 1] + 5 \quad (9)$$

مقاومت R_f فاکتور تنظیم خروجی در بازه $2/5$ تا $7/5$ ولت است. دیودها (Q_3, Q_4) از جریان اشباع معکوس خروجی تقویت کننده ها جلوگیری می کنند.



شکل ۵- مدار غیرفازی براساس روش COG

۵- سیستم روبات دو درجه آزادی

یک سیستم روبات شامل اطلاعات تقریبی و غیرمشخص است و اغلب موقعیت و حرکت آن در حالت بلادرنگ شناسائی می شود، به همین دلیل از منطق فازی که پاسخ زمانی سریع دارد، برای کنترل آن استفاده می کنیم. معادله ریاضی تقریبی سیستم روبات بصورت زیر بیان می شود:

$$\tau_1 = (3.34 + 1.94 \cos(q_2) + 1.2 \sin(q_2)) * \ddot{q}_1 + (0.97 + 1.039 \cos(q_2) + 0.6 \sin(q_2)) * \ddot{q}_2 - h\dot{q}_1\dot{q}_2 - h(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)\dot{q}_2$$

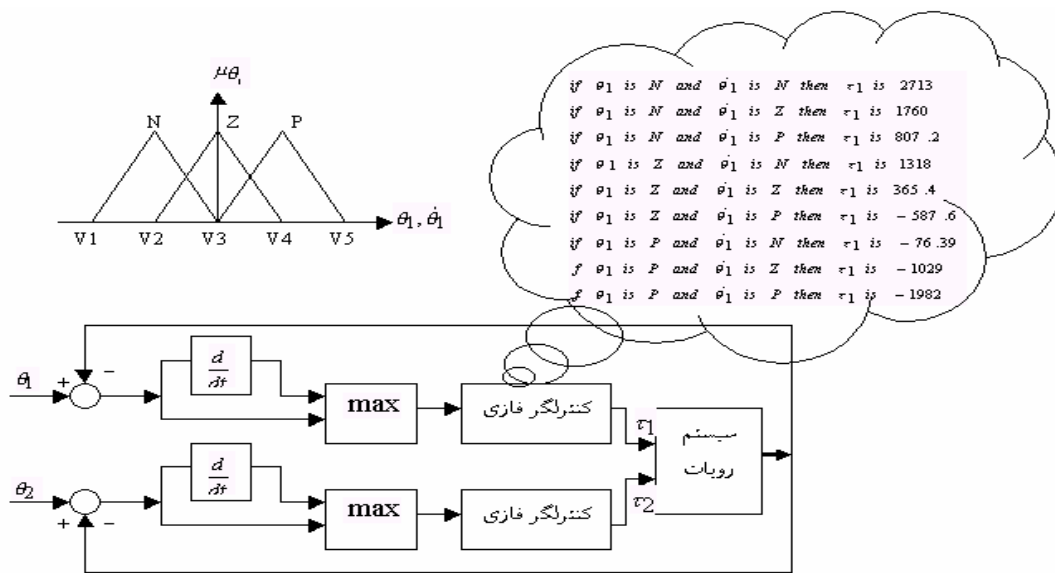
$$\tau_2 = (0.97 + 1.039 \cos(q_2) + 0.6 \sin(q_2)) * \ddot{q}_1 + 0.97\ddot{q}_2 + h\dot{q}_1^2$$

$$h = 1.039 \sin(q_2) - 0.6 \cos(q_2)$$

شکل (۶) دیاگرام سیستم کنترل شده را نشان می دهد، که در آن توابع عضویت ورودی و قوانین کنترل فازی از طریق مدل‌سازی فازی رفتار کنترل کننده PID کلاسیک بر روی روبات مورد نظر بدست آمده اند

۵-۱- پیاده سازی کنترلر آنالوگ برای سیستم

شکل (۷) تحقق آنالوگ یکی از کنترلرهای روبات (θ_1) را نشان می دهد. بلوک mfc شامل توابع عضویت خاص بترتیب برای ورودیهای θ_1 و $\dot{\theta}_1$ برای هر قانون می باشد. بلوکهای M1 ($V1 = -1.8, V2 = -1.1, V3 = -0.4, V4 = 0.3, V5 = 1$) و M2 ($V1 = -14.7, V2 = -5.3, V3 = 4.3, V4 = 13.8, V5 = 23.3$) نیز مقایسه کننده های یک ورودی - سه خروجی ولتاژ آنالوگ می باشند که مطابق جدول شکل (۸) و با توجه به مقدار ولتاژ ورودی آنها، خروجیها فعال می شوند. شکل (۸) نمائی از داخل بلوک M1 (یا M2) را نشان می دهد. بلوک B (شکل (۹)) نیز یک بافر با سیگنال فرمان می باشد. اگر سیگنال فرمان یک باشد، ورودی به خروجی انتقال می یابد و اگر صفر باشد، خروجی صفر می شود. خروجی های بلوک نیز به ورودیهای مدار غیرفازی کننده وصل می شوند. با اعمال θ_1 و $\dot{\theta}_1$ به مقایسه کننده های M1 و M2 مشخص می شود که هر کدام از این ورودیها در چه محدوده از تابع عضویت قرار دارند. مثلاً اگر $\theta_1 = -1.5$ و $\dot{\theta}_1 = -2$ باشد، قوانین (۱) و (۲) فعال می شوند (در هر لحظه حداکثر چهار قانون می تواند بطور همزمان فعال شود). در شکل (۱۰) با اعمال دو ورودی سینوسی و کسینوسی به دو بازوی روبات (فرکانس اعمال شده به بازوی اول دو برابر فرکانس اعمال شده به بازوی دوم است)، مسیرهایی که دو بازوی روبات دنبال می کنند و گشتاورهای τ_1 و τ_2 در مقایسه با کنترلر فازی که با Matlab Fuzzy Toolbox طراحی شده، نشان داده شده است.

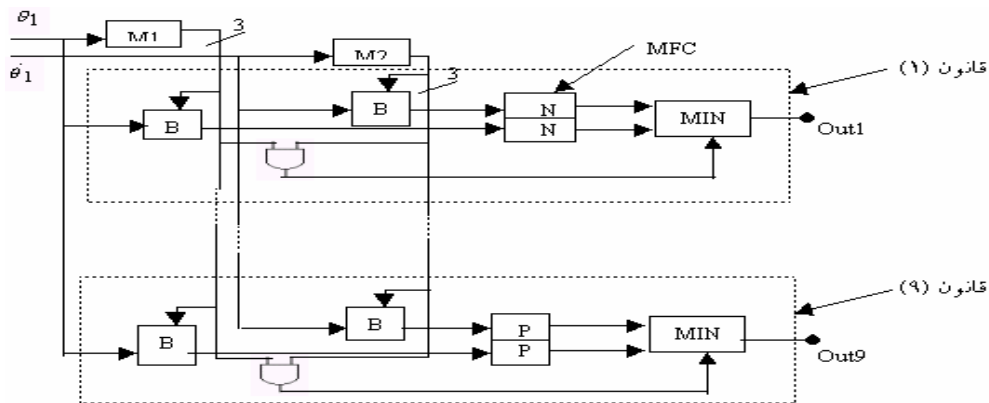


شکل ۶- اتصال کنترلر فازی به سیستم

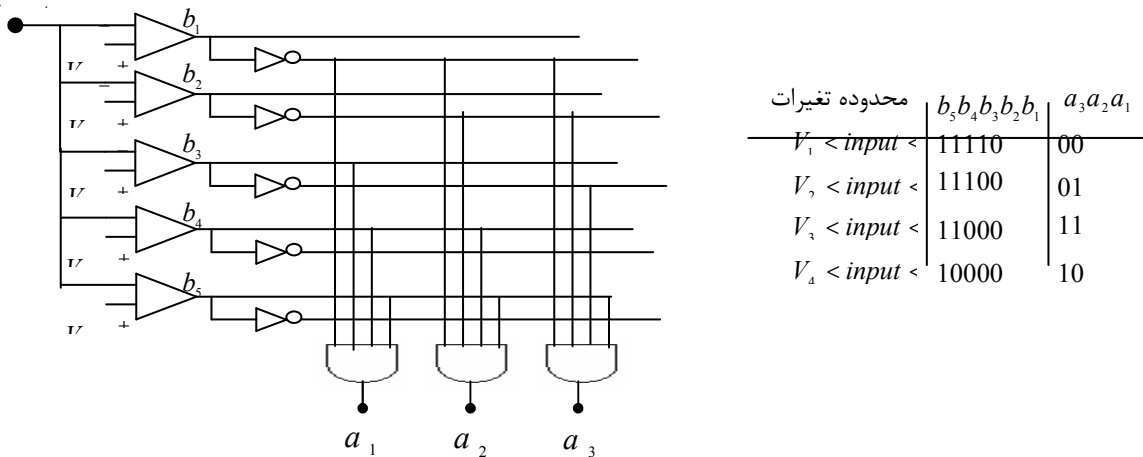
شکل (۱۱) مسیرهایی که دو بازوی روبات روی صفحه $X-Y$ دنبال می کنند، همچنین سطح کنترل مربوط به بازوی اول را نشان می دهد.

۶- نتیجه گیری

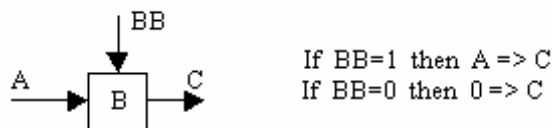
کنترل کننده های فازی آنالوگ را باید با توجه به نوع کاربردشان طراحی کرد. بنابراین در این مقاله ابتدا با استفاده از مدلسازی فازی رفتار کنترل کننده PID ، قوانین و توابع عضویت کنترلر فازی بدست آمد، سپس براساس قوانین و توابع عضویت بدست آمده یک کنترل کننده آنالوگ فازی برای سیستم روبات با دو درجه آزادی طراحی شد. در این تحقیق مشخص شد که کنترل کننده فازی آنالوگ طراحی شده بطور مطلوبی مسیرهای دلخواه را دنبال می کند.



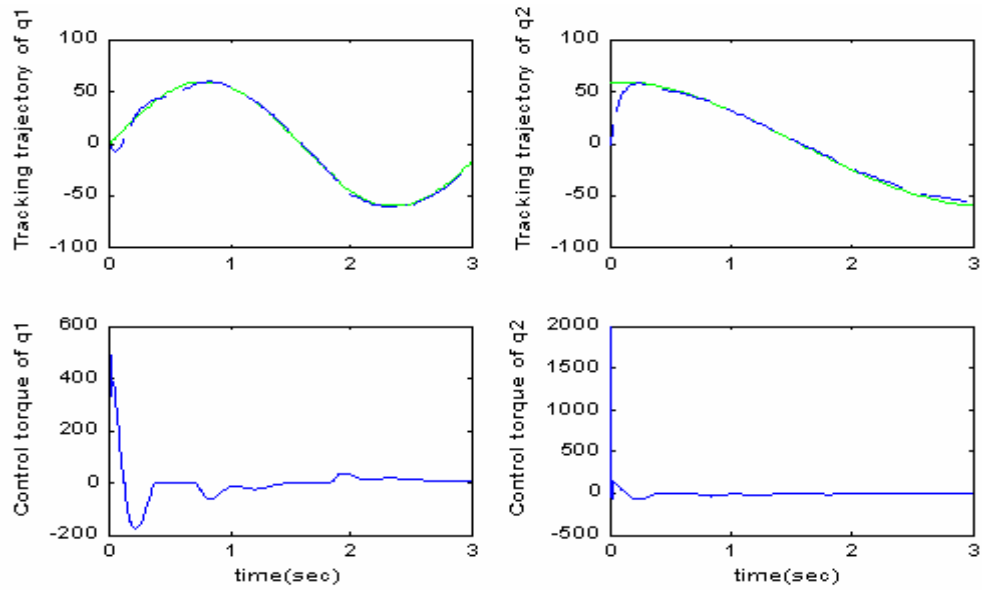
شکل ۷- تحقق آنالوگ کنترلر فازی روبات (برای θ_1)



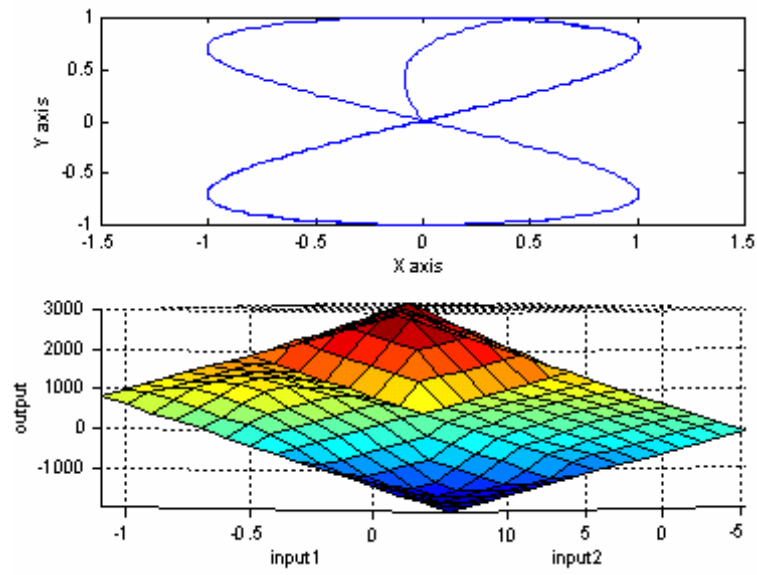
شکل ۸- نمای داخلی بلوک M1



شکل ۹- ساختار بلوک B



شکل ۱۰- Tracking و گشتاورهای دو بازوی روبات



شکل ۱۱- Tracking روبات روی صفحه X-Y و سطح کنترل بازوی اول

مراجع

- [1] T. Yamakawa, "High speed fuzzy controller hardware system: Themega-FIPS Machine in fuzzy computing," in Information Sciences, M. M.Gupta and T. Yamakawa, Eds. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1988, vol. 45, no. 1, pp. 113-128.
- [2] S. Guo, L. Peters and R. Camposano, "Yet another analog fuzzy controller," in Vortrage der ITG-Fachtagung: Mikroelektronik fur die Information stechnik. Berlin: Marz, 1994, pp. 67-70.
- [3] T. Kettner, K. Schumacher and K. Goser, "Realization of a monolithic analog fuzzy logic controller," in proc. 20th Eur. Solid-State Circuit Conf., Sevilla, Spain, Sept. 1993, pp. 66-69.
- [4] L. Lemaitre, M. J. Patyra, and D. Mlynek, "Analysis and design of cmos fuzzy logic controller in current mode," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 29, pp. 317-322, Aug. 1994.
- [5] T. Miki, H. Matsumoto, K. Ohto, and T. Yamakawa, "Silicon implementation for a novel high-speed fuzzy inference engine: Mega-FLIPS analog fuzzy processor," J. Intell. Fuzzy Syst., vol. 1, no. 1, pp. 27-42, 1993.
- [6] T. Yamakawa, "A fuzzy inference engine in nonlinear analog mode and its application to a fuzzy logic controller," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 4, pp. 496-522, May 1993.
- [7] A. Ungering, D. Herbst, A. Weyergraf, and K. Goser, "Architecture of a mixed mode fuzzy controller," in proc. 4th IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst., Yokohama, Japan, pp. 1191-1196, Mar. 1995.
- [8] H. Watanabe, W. D. Dettloff and K. E. Yount, "A VLSI fuzzy logic controller with reconfigurable cascable architecture, IEEE JSSC, vol. 25, no. 2, pp. 376-382, April 1990.
- [9] T. Yamakawa, "An Application of a Grade-Controllable Membership Function Circuit to a Singleton-Consequent Fuzzy Logic Controller, Proc. of the Third IFSA Congress, pp.296-302, Seattle, WA, USA, Aug. 6-11, 1989.