

کنترل عصبی - فازی - تطبیقی موقعیت / نیروی رباتی با ۳ درجه آزادی در تماس با یک سطح ناشناخته به همراه جبران کننده اصطکاک سطح

آرش فنائی ، امید سید موسوی ، محمد فرخی

دانشگاه علم و صنعت ایران (دانشکده مهندسی برق)

farrokhi@iust.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک کنترل کننده عصبی-فازی-تطبیقی، به همراه جبران کننده عصبی-فازی-تطبیقی اصطکاک سطح بر اساس مدل ممدانی برای کنترل موقعیت / نیروی رباتی با ۳ درجه آزادی در تماس با یک سطح دارای اصطکاک ارائه خواهد شد. ضمن آنکه با توجه به نیاز به ضریب سختی سطح جهت کنترل نیرو و نامعلوم بودن آن، یک تخمینگر برای تخمین وصل-خط (On-line) ضریب سختی سطح ارائه خواهد شد. همچنین پایداری این سیستم با استفاده از روش پایداری لیاپانوف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و اثبات می‌شود که با انتخاب قانون تطبیق مناسب به نحوی که مشتق تابع لیاپانوف منفی شود، پایداری تضمین خواهد شد.

واژه های کلیدی: ربات - کنترل موقعیت / نیرو - کنترل تطبیقی - کنترل عصبی - فازی

مقدمه

کنترل کننده های عصبی-فازی-تطبیقی کاربرد وسیعی در کنترل سیستم‌های غیر خطی دارند. استفاده موفقیت آمیز این نوع کنترل کننده ها در کنترل سیستم‌های غیر خطی ناشی از کار برد قواعد فازی کنترلی شخص خبره بدون نیاز به شناخت کافی از دینامیک سیستم است. از آنجا که در بسیاری از موارد، دستیابی به دانش و تجربه شخص خبره مشکل می‌باشد، استفاده از این روش می‌تواند مفید واقع گردد. از مهمترین مزایای این نوع کنترل کننده ها، عدم نیاز به مدل ریاضی دقیق و دانش زیاد از سیستم، کاهش قابل ملاحظه قواعد فازی نسبت به کنترل کننده فازی غیر تطبیقی، با توجه به تحت تعلیم بودن کنترل کننده، مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترهای مختلف سیستم و در برابر اغتشاش و نویز، قابلیت تطبیق با دینامیک تحت کنترل بطوریکه پاسخ مطلوب حاصل گردد، است. در این مقاله هدف، کنترل موقعیت و نیروی رباتی است که در تماس با یک سطح است. لذا در ادامه به معرفی این ربات خواهیم پرداخت. هنگامیکه یک ربات در فضای آزاد حرکت می‌کند هدف اصلی، کنترل موقعیت ربات در فضا است، بطوریکه مسیر دلخواهی را دنبال نماید. اما هنگامیکه ربات باید جسمی را مابین پنجه بازوی خود نگه داشته و حرکت دهد و یا هنگامیکه بر روی یک سطح با ضریب سختی نامعلوم و دارای اصطکاک حرکت می‌کند و یا عضو انتهایی آن با سطحی در تماس بوده و بایستی علاوه بر کنترل موقعیت بر روی سطح نیرویی نیز به آن اعمال نماید، نه تنها باید مسیر حرکت بازو بر روی سطح کنترل گردد، بلکه لازم است نیروی اعمالی از سوی آن به جسم نیز کنترل گردد. برای مثال می‌توان به رباتهای صیقل دهنده و تراش دهنده سطوح اشاره نمود. در اینگونه رباتها لازم است که علاوه بر کنترل حرکت عضو انتهایی بازوی ربات بر روی قطعه کار و ضمن حفظ تماس با آن، نیروی مناسبی بصورت عمود بر سطح به آن اعمال نموده که با حرکت بر روی آن، شیء مورد نظر را صیقل و یا تراش دهد. لذا در صورتیکه این نیرو کنترل

نگردد یا تماس ربات با جسم برقرار نمی گردد و یا حتی باعث تخریب جسم و سطح مورد نظر و یا بازوی ربات می شود. لذا استفاده از روش کنترلی دقیق جهت این امر ضروری به نظر می رسد. در [1] از کنترل کننده فازی - تطبیقی جهت کنترل موقعیت / نیرو در ربات استفاده شده است که مراکز توابع عضویت قسمت تالی قواعد فازی جهت تطبیق کنترل کننده تحت تعلیم قرار گرفته اند. در این مقاله تحلیل نسبتاً خوبی برای پایداری انجام شده است ولی از اصطکاک سطح صرف نظر شده و همچنین نتایج کنترل کننده در شرایط وجود نویز و اغتشاش ارائه نشده است. در [2] با استفاده از روش عصبی - فازی به کنترل یک ربات ۲ درجه آزادی با فرض معلوم بودن ضریب سختی سطح و ناچیز بودن اصطکاک آن بدون اثبات پایداری پرداخته است. در [3] نیز از روش عصبی - فازی استفاده شده است. در این مقاله اگرچه از اصطکاک صرف نظر نشده اما از یک مدل بسیار ساده و فقط اصطکاک ایستای بین سطح و ربات در نظر گرفته شده است. ضمن آنکه جبران کننده اصطکاک سطح ارائه شده صرفاً یک سلول عصبی بوده که خروجی آن در وزنی ضرب می شود که در واقع ضریب اصطکاک ایستای سطح است و تعلیم آن نیز به صورت وصل - خط انجام نمی شود. کنترل کننده ارائه شده در [4] دارای این مزیت است که کنترل موقعیت و نیرو برای رباتی در تماس با یک رویه نامعلوم و نامسطح می باشد. اما عیب عمده در آن نیاز به حسگرهای بینایی و تعبیه یک سیستم بینایی برای مشاهده سطح است. زیرا این نوع حسگرها علاوه بر گران قیمت بودن نیاز به مدارات الکترونیکی و همچنین پردازش دیجیتال با سرعت بالا دارند. ضمن آنکه معمولاً سیگنال خروجی آنها دارای نویز قابل ملاحظه ای است. در این مقاله یک کنترل کننده عصبی - فازی - تطبیقی برای کنترل موقعیت و نیرو در رباتی با ۳ درجه آزادی به همراه جبران کننده اصطکاک عصبی - فازی - تطبیقی طراحی و نتایج شبیه سازی ارائه خواهد شد.

دینامیک ربات و مدل سطح تماس

دینامیک ربات در فضای کارترین به صورت ذیل است:

$$\mathbf{M}_x(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_x(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{G}_x(\mathbf{x}) + \mathbf{D}_x(\dot{\mathbf{x}}) = \mathbf{f} - \mathbf{f}_e - \mathbf{f}_s \quad (1)$$

که در آن $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بردار موقعیت عضو انتهایی ربات، $\mathbf{M}_x(\mathbf{x}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ ماتریس اینرسی، $\mathbf{C}_x(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بردار نیروی گریز از مرکز و سنتریفوزال و $\mathbf{G}_x(\mathbf{x}) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بردار نیروی جاذبه، $\mathbf{D}_x(\dot{\mathbf{x}}) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بردار نیروی اصطکاک مفاصل، $\mathbf{f} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بردار نیروی لازم جهت حرکت عضو انتهایی ربات، $\mathbf{f}_e \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بردار نیروی اعمالی خارجی از سوی بازو به سطح و $\mathbf{f}_s \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بردار نیروی اصطکاک سطح در فضای کارترین هستند.

مشخصات سطح تماس ربات

برای این منظور، دو مدل ریاضی یکی در جهت عمود بر سطح، جهت اعمال نیرو، و دیگری در جهت مماس با سطح، جهت حرکت، در نظر گرفته میشود. مدل ریاضی در جهت عمود بر سطح به منظور بیان میزان سختی سطح و برای کنترل نیرو بوده و مدل ریاضی مماس بر سطح برای بیان نیروی اصطکاک سطح می باشد.

مدل ریاضی عمودی سطح

مدل در نظر گرفته شده در جهت عمود بر سطح یک مدل فنری بوده که مهمترین پارامتر این مدل ضریب سختی میباشد. با توجه به اینکه به سطح نیروی خارجی f_e وارد می شود. اگر سطح را بصورت یک فنر با ضریب سختی k_e بیان نماییم، خواهیم داشت [3]، [5]:

$$f_e = k_e(x - x_e) \quad (2)$$

که k_e ضریب سختی سطح بر حسب N/m، x موقعیت عضو انتهایی ربات در داخل سطح و x_e موقعیت سطح است. برای تشریح این مدل لازم به توضیح است که با اعمال نیرو به سطح، سطح که دارای ضریب سختی k_e می باشد، دچار تغییر

شکل شده و این تغییر شکل به صورت فرو رفتگی در سطح ظاهر می‌گردد، که هرچه میزان سختی سطح بیشتر باشد این فرو رفتگی کمتر خواهد بود، در این مقاله فرض بر این است که سطح مورد نظر روی صفحه $x_1 - x_2$ قرار دارد. لذا $x_e = 0$ است.

مدل ریاضی مماسی سطح

هنگامیکه یک جسم بر روی یک سطح حرکت می‌نماید، مابین جسم و سطح نیروی مخالف اصطکاک بوجود می‌آید، که ناشی از نیروی عمودی وارد بر سطح بوده و همواره با نیروی محرک جسم مخالفت مینماید. برای بیان نیروی اصطکاک، مدل‌های مختلفی ارائه گردیده است، که کاملترین مدل موجود در [6] به صورت تابعی از نیروی عمودی اعمال شده به سطح و سرعت حرکت روی سطح به صورت ذیل بیان گردیده است:

$$f_s = \left[\gamma_0 + \gamma_1 e^{-\beta_1 |v|} + \gamma_2 (1 - e^{-\beta_2 |v|}) \right] |f_e| \operatorname{sgn}(v) \quad (3)$$

که در مورد ربات، f_e نیروی اعمالی از سوی عضو انتهایی ربات به صورت عمود، به سطح است. به طوریکه $(\gamma_0 + \gamma_1) |f_e|$ ، $(\gamma_0 + \gamma_2) |f_e|$ مقدار چسبندگی اصطکاک، $(\gamma_0 + \gamma_2) |f_e|$ اصطکاک دینامیکی در سرعت‌های بالا، β_1 نشانگر سرعت میرایی اصطکاک در سرعت‌های پایین و β_2 مبین نرخ افزایش اصطکاک در سرعت‌های بالا است. در کنترل موقعیت/نیرو باید این نیروی مخالف (اصطکاک) به نحو مطلوب جبران گردد، زیرا در غیر این صورت باعث اخلاص در روند کنترل، به خصوص در کنترل موقعیت می‌گردد، و پاسخ سیستم یا دارای خطای ماندگار قابل ملاحظه ای خواهد شد و یا حتی ممکن است باعث ناپایداری گردد.

طراحی کنترل کننده عصبی - فازی - تطبیقی با جبران کننده اصطکاک سطح

از آنجا که ربات مورد نظر در این پروژه دارای ۳ درجه آزادی بوده لذا در فضای کارترین ۳ بعدی، می‌تواند عمل نماید. با توجه به اینکه ربات مورد نظر در جهت x_3 به سطح نیرو اعمال می‌نماید، لذا در این جهت کنترل نیرو خواهیم داشت و همچنین با توجه به رابطه $f_e = k_e (x_{e3} - x_3)$ و با فرض اینکه سطح مورد نظر روی صفحه $x_1 - x_2$ قرار داشته و $x_{e3} = 0$ باشد، خواهیم داشت:

$$\mathbf{x} = \left[x_1, x_2, \frac{f_e}{k_e} \right] \quad (4)$$

لذا مسیر مطلوب با توجه به مسئله کنترل نیرو بصورت ذیل می‌گردد:

$$\mathbf{x}_d = \left[x_{d1}, x_{d2}, \frac{f_d}{k_e} \right] \quad (5)$$

با توجه به اینکه ضریب سختی سطح مقداری نامعلوم و حتی در بعضی موارد متغیر می‌باشد، لذا بایستی آنرا به طور صحیح تخمین زد. برای این منظور، از تخمینگر ضریب سختی سطح استفاده خواهد شد. بلوک دیاگرام کنترل کننده فازی - عصبی - تطبیقی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این بلوک دیاگرام سه کنترل کننده برای هر یک از مفاصل، یک بلوک جهت تخمین و جبران نیروی اصطکاک سطح و یک بلوک نیز جهت تخمین وصل - خط ضریب سختی سطح وجود دارد. با تعریف مقادیر مطلوب موقعیت، نیرو و خطا به شکل روابط ذیل:

$$\mathbf{f}_d = (0, 0, f_d) \quad \mathbf{e} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x} = \left(x_{d1} - x_1 \quad x_{d2} - x_2, \frac{f_d - f_e}{k_e} \right) \quad \mathbf{x}_d = \left(x_{d1}, x_{d2}, \frac{f_d}{k_e} \right)^T \quad (6)$$

و تعریف بردار $\mathbf{s} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بصورت $\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \Lambda \mathbf{e}$ ، که در آن $\Lambda = \operatorname{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ یک ماتریس مثبت قطری است [1], [7]. و با مشتق گیری از \mathbf{s} و محاسبه $\ddot{\mathbf{e}}$ بر حسب \mathbf{s} و انتخاب قانون کنترل ذیل:

$$\mathbf{f} = \mathbf{M}_x (\ddot{\mathbf{x}}_d + \Lambda \dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{C}_{xm} (\dot{\mathbf{x}}_d + \Lambda \mathbf{e}) + \mathbf{G}_x + \mathbf{D}_x + \mathbf{f}_e + \mathbf{f}_s + \mathbf{Ks} \quad (7)$$

که در آن $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ یک ماتریس مثبت معین است. و با قرار دادن قانون کنترل (7) در دینامیک ربات (1) خواهیم داشت:

$$\mathbf{M}_x \dot{\mathbf{s}} + (\mathbf{C}_{xm} + \mathbf{K})\mathbf{s} = \mathbf{0} \quad (8)$$

با توجه به آنکه ضرایب معادله فوق مخالف صفر است، بردار لغزش \mathbf{s} به سمت صفر میل خواهد نمود. لذا رابطه (8) بیانگر پایداری حلقه بسته سیستم است.

اما با توجه به اینکه ماتریسهای $\mathbf{M}_x, \mathbf{C}_{xm}, \mathbf{G}_x$ و \mathbf{D}_x معمولاً نامعین و ناشناخته هستند. لذا قانون کنترل (7) را نمیتوان به این روش تحقق بخشید. در [1] نشان داده شده است که جملاتی از قانون کنترل که در بالا آمده است را میتوان به صورت ذیل نوشت:

$$\mathbf{Y}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}_d, \dot{\mathbf{x}}_d)\boldsymbol{\phi} = \mathbf{M}_x(\ddot{\mathbf{x}}_d + \Lambda\dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{C}_{xm}(\dot{\mathbf{x}}_d + \Lambda\mathbf{e}) + \mathbf{G}_x + \mathbf{D}_x \quad (9)$$

که در آن بردار پارامتر که نامعلوم و $\boldsymbol{\phi} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بردار پارامتر که نامعلوم و $\mathbf{Y}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}_d, \dot{\mathbf{x}}_d) \in \mathbf{R}^{n \times r}$ ماتریس رگرسیون و قسمت معلوم رابطه بالا است. در کنترل تطبیقی، از رابطه فوق میتوان استفاده نموده و بردار $\boldsymbol{\phi}$ را به عنوان پارامتر تطبیقی برای برقراری پایداری و داشتن حداقل خطا به کار برد. در این خصوص F.Y. Hsu و L.C. Fu در [1] نشان دادند که رابطه بالا که قسمت غیرخطی قانون کنترل (7) است، را با استفاده از روش کنترل مقاوم میتوان به صورت ذیل نوشت:

$$\mathbf{Y}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}_d, \dot{\mathbf{x}}_d)\boldsymbol{\phi} = \mathbf{h}(\|\mathbf{x}\|, \mathbf{s}) = \mathbf{M}_x(\ddot{\mathbf{x}}_d + \Lambda\dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{C}_{xm}(\dot{\mathbf{x}}_d + \Lambda\mathbf{e}) + \mathbf{G}_x + \mathbf{D}_x \quad (10)$$

به طوریکه در آن $\|\mathbf{x}\|$ اندازه موقعیت و \mathbf{s} بردار لغزش و $\mathbf{h}(\|\mathbf{x}\|, \mathbf{s}) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ بوده و عناصر این تابع نامعلوم را به صورت ذیل میتوان بیان نمود [1]:

$$h_i(\|\mathbf{x}\|, \mathbf{s}) = \mathbf{w}_i^{*T} \boldsymbol{\eta}_i(\|\mathbf{x}\|, s_i) \quad (11)$$

که در آن $\boldsymbol{\eta}_i(\|\mathbf{x}\|, s_i) \in \mathbf{R}^{r \times 1}$ ، $\mathbf{w}_i \in \mathbf{R}^{r \times 1}$ و \mathbf{w}_i^* مقدار بهینه آن است. لذا دینامیک ربات و قانون کنترل به صورت ذیل میگردند:

$$\mathbf{M}_x \dot{\mathbf{s}} = [\mathbf{w}_1^{*T} \boldsymbol{\eta}_1(\|\mathbf{x}\|, s_1), \dots, \mathbf{w}_n^{*T} \boldsymbol{\eta}_n(\|\mathbf{x}\|, s_n)]^T - \mathbf{C}_{xm}\mathbf{s} + \mathbf{f}_e + \mathbf{f}_s - \mathbf{f} \quad (12)$$

$$\mathbf{f} = [\mathbf{w}_1^{*T} \boldsymbol{\eta}_1(\|\mathbf{x}\|, s_1), \dots, \mathbf{w}_n^{*T} \boldsymbol{\eta}_n(\|\mathbf{x}\|, s_n)]^T + \mathbf{f}_e + \mathbf{f}_s + \mathbf{K}\mathbf{s} \quad (13)$$

در واقع بخش غیر خطی معادله بالا بصورت حاصل ضرب دو تابع $\boldsymbol{\eta}(\|\mathbf{x}\|, \mathbf{s})$ و \mathbf{w} بیان شده است. که در آن برداری است که به صورت وصل - خط در طول زمان کنترل تحت تعلیم بوده و با تغییر پارامترهای سیستم، این مقدار با توجه به تحت تعلیم بودن، آنچنان تنظیم میگردد که خطای سیستم کمینه و پایداری سیستم حلقه بسته برقرار گردد. تعلیم این پارامتر باعث تطبیقی شدن کنترل کننده میگردد. با توجه به اینکه کنترل کننده مورد نظر یک کنترل کننده عصبی - فازی میباشند، لذا بردار \mathbf{w} در این کنترل کننده، بردار وزنههای شبکه عصبی - فازی است، که دارای خاصیت تعلیم پذیری بوده و به صورت وصل - خط تا رسیدن به پاسخ مطلوب تعلیم می بیند. البته نیروی اصطکاک سطح نیز توسط یک تخمینگر عصبی - فازی - تطبیقی که در قسمت بعد خواهد آمد جبران میگردد. با توجه به اینکه در این کنترل کننده از روش عصبی - فازی استفاده می شود، لذا قسمت اصلی کنترل کننده تطبیقی یعنی $\mathbf{w}^T \boldsymbol{\eta}$ را توسط شبکه فوق به شکل ذیل ایجاد می گردد. در کنترل کننده عصبی - فازی شکل 1، برای هر مفصل یک کنترل کننده وجود دارد، هر یک دارای دو ورودی و یک خروجی است. یکی از ورودیها اندازه موقعیت در مختصات دکارتی $\|\mathbf{x}\|$ و دیگری s_i یعنی i امین مولفه \mathbf{s} است. ($i=1, \dots, n$). هر کنترل کننده دارای پایگاه قواعد فازی به صورت ذیل میباشند:

$$\mathbf{R}_i^{j_1 j_2} : \text{IF } \|\mathbf{x}\| \text{ is } A_i^{j_1} \text{ and } s_i \text{ is } A_i^{j_2} \text{ THEN } y_i \text{ is } B^{j_1 j_2}$$

لذا خروجی کنترل کننده عصبی - فازی i ام به صورت ذیل خواهد بود:

$$f_{Nfi} = \mathbf{w}_i^T \boldsymbol{\eta}_i(\|\mathbf{x}\|, s_i) \quad (14)$$

از آنجا که این کنترل کننده به صورت تطبیقی عمل مینماید، مجموعه های قسمت تالی ثابت نبوده و مراکز مجموعه ها بر اساس تعلیم کل شبکه تنظیم میشوند، که همان وزنههای \mathbf{w} هستند. حال اگر برای هر ورودی $(2m+1)$ تابع عضویت تعریف گردد، خروجی حاصل از شبکه عصبی - فازی با در نظر گرفتن فازیگر تکین، موتور استنتاج ضرب و فازیزدای میانگین مرکز عبارت خواهد بود از:

$$f_{Nfi} = \mathbf{w}_i^T \boldsymbol{\eta}_i(\|\mathbf{x}\|, s_i) = \frac{\sum_{j_1=-m}^m \sum_{j_2=-m}^m \mu_{A_i^1(\|\mathbf{x}\|)} \mu_{A_i^2(s_i)} \bar{y}^{j_1 j_2}}{\sum_{j_1=-m}^m \sum_{j_2=-m}^m \mu_{A_i^1(\|\mathbf{x}\|)} \mu_{A_i^2(s_i)}} \quad (15)$$

که در آن $\bar{y}^{j_1 j_2}$ مراکز توابع عضویت قسمت تالی قواعد فازی هستند. خروجی کل \mathbf{n} کنترل کننده به شکل ذیل است:

$$\mathbf{f}_{NF} = [f_{Nf1}, \dots, f_{Nfn}]^T = \mathbf{w}^T \boldsymbol{\eta} \quad (16)$$

پس از مشخص شدن قانون کنترل بایستی قانونی برای تطبیقی نمودن عنصر تحت تعلیم به دست آورد، به طوریکه باعث پایداری گردد. قبل از آن به طراحی جبران کننده عصبی- فازی- تطبیقی پرداخته خواهد شد. و سپس با تعریف یک تابع لیاپانوف به صورتیکه پایداری سیستم حلقه بسته تضمین گردد، قوانین تطبیق استخراج میگردند.

طراحی جبرانگر مقاوم اصطکاک سطح به روش عصبی - فازی - تطبیقی

برای جبران اثر نیروی اصطکاک سطح از یک جبران کننده عصبی - فازی استفاده می‌گردد. به طوریکه وزنه‌های موجود در این جبران کننده به صورت تطبیقی و با توجه به خطای دیده شده در سیستم مرتباً اصلاح شده تا نهایتاً به مقدار بهینه نزدیک و اصطکاک سطح جبران گردد. از آنجا که مطابق رابطه (۳) نیروی اصطکاک سطح رابطه مستقیم با نیروی عمودی اعمالی به سطح و رابطه غیر خطی با سرعت حرکت عضو انتهایی ربات بر روی سطح دارد، لذا میتوان ورودی این جبرانگر را سرعت حرکت در نظر گرفته و در نهایت خروجی جبران کننده را در نیروی عمودی سطح ضرب نمود، و برای تطبیقی نمودن اصلاح وزنها با تعریف یک تابع لیاپانوف قانون تطبیق را به دست آورد. برای هر یک از جهات حرکت ربات نیاز به یک جبرانگر اصطکاک است. و با توجه به آنکه ربات مورد نظر دارای ۳ درجه آزادی بوده و بر روی یک سطح دو بعدی حرکت می‌نماید لذا نیاز به دو جبرانگر اصطکاک است. همانطوریکه گفته شد جبرانگر مورد نظر یک جبرانگر فازی - عصبی بوده و ورودی هریک از جبرانگرها، سرعت حرکت ربات در آن جهت است. هر جبران کننده دارای پایگاه قواعد فازی به صورت ذیل است:

$$R_i^j: \text{IF } \dot{x}_i \text{ is } A_i^j \text{ THEN } y_i \text{ is } B_i^j$$

که در آن $i = 1, 2$ تعداد جبرانگرها یا تعداد مولفه های حرکتی ربات، \dot{x}_i سرعت مولفه i ام موقعیت در فضای کارترین، A_i^j تابع عضویت j ام مولفه i ام سرعت، y_i خرجی جبرانگر i ام که باید در f_e ضرب شده و با نیروی خروجی کنترل کننده فازی - عصبی جمع گردد، B_i^j تابع عضویت j ام خروجی جبرانگر i ام و j شماره تابع عضویت $l = 1, 2, \dots, l$ و $j = 1, 2, \dots, l$ تعداد توابع عضویت است. خروجی حاصل از جبرانگر عصبی - فازی با استفاده از فازی‌گر تکین، موتور استنتاج ضرب و فازی زدای میانگین مرکز عبارت خواهد بود از:

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^l \mu_{A_i^j(\dot{x}_i)} \bar{y}^j}{\sum_{j=1}^l \mu_{A_i^j(\dot{x}_i)}} \quad (17)$$

که در آن \bar{y}^j مرکز تابع عضویت j ام خروجی است. در نتیجه نیروی جبرانی لازم برای جبران اصطکاک سطح به صورت ذیل خواهد بود:

$$\hat{f}_{si} = y_i f_e \quad (18)$$

که نشان دهنده مقدار تخمینی مولفه i ام اصطکاک سطح و f_e نیروی عمودی اعمالی به سطح است. رابطه y_i را به صورت ذیل می‌توان نوشت:

$$y_i = \boldsymbol{\theta}_i^T \boldsymbol{\xi}_i(\dot{x}_i) \quad (19)$$

که در آن $\boldsymbol{\theta}_i, \boldsymbol{\xi}_i(\dot{x}_i) \in \mathbf{R}^{l \times 1}$ هستند. لذا بردار جبرانگر اصطکاک سطح به صورت ذیل خواهد شد:

$$\hat{\mathbf{f}}_s = \hat{\mathbf{f}}_s(\dot{\mathbf{x}}|\boldsymbol{\theta}) = [\boldsymbol{\theta}_1^T \boldsymbol{\xi}_1(\dot{x}_1) f_e, \boldsymbol{\theta}_2^T \boldsymbol{\xi}_2(\dot{x}_2) f_e, 0]^T \quad (20)$$

مولفه سوم بردار اصطکاک صفر است، زیرا در این جهت به دلیل کنترل نیرو، حرکت و لذا اصطکاک نخواهیم داشت. در این جبران کننده بردار $\boldsymbol{\theta}_i$ به عنوان پارامتر تطبیقی در نظر گرفته خواهد شد. به طوریکه این پارامتر، که وزنه‌های جبران کننده هستند، بر اساس قانون تطبیق، که به دست خواهد آمد، آن چنان تنظیم می‌شود که خطای تخمین حداقل گردد. لذا قانون کنترل بالا با توجه به جبران کننده اصطکاک (۲۰) به صورت ذیل می‌گردد:

$$\mathbf{f} = [\mathbf{w}_1^{*T} \boldsymbol{\eta}_1(\|\mathbf{x}\|, s_1), \dots, \mathbf{w}_n^{*T} \boldsymbol{\eta}_n(\|\mathbf{x}\|, s_n)]^T + \mathbf{f}_e + \hat{\mathbf{f}}_s(\dot{\mathbf{x}}|\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{K}\mathbf{s} \quad (21)$$

که در آن $\hat{\mathbf{f}}_s(\dot{\mathbf{x}}|\boldsymbol{\theta})$ بردار تخمینی نیروی اصطکاک سطح که از روابط (۱۷)، (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) به دست می‌آید. حال با توجه به اینکه کنترل کننده و جبران کننده اصطکاک سطح باید تطبیقی باشند، لازم است که قانون تطبیق را برای آنها جهت تطبیقی نمودن عناصر تحت تعلیم یعنی $\boldsymbol{\theta}, \mathbf{w}$ به دست آورد. به طوریکه جبران کننده اصطکاک به نحو مناسبی اصطکاک سطح را جبران نموده و پایداری تضمین گردد. برای به دست آوردن قانون تطبیق از روش لیاپانوف استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه پارامترهای تطبیقی در طول زمان کنترل برای رسیدن به پاسخ مطلوب تغییر می‌کنند و نظر به اینکه برای کنترل بهینه، این پارامترها دارای مقداری بهینه هستند، لذا اختلاف مقدار واقعی با مقدار بهینه، خطای تخمین وزنه‌های کنترل کننده و جبران کننده اصطکاک، به صورت $\boldsymbol{\psi}_i = \mathbf{w}_i^* - \mathbf{w}_i$ و $\boldsymbol{\phi}_i = \boldsymbol{\theta}_i^* - \boldsymbol{\theta}_i$ تعریف می‌گردد. حال تابع لیاپانوف ذیل را به صورتیکه هر سه خطای موجود در کل سیستم یعنی خطاهای $\boldsymbol{\psi}$ و $\boldsymbol{\phi}$ در آن لحاظ شده است را انتخاب می‌نماییم:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{M}_x \mathbf{s} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\psi}_i^T \boldsymbol{\Gamma}_i^{-1} \boldsymbol{\psi}_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\phi}_i^T \boldsymbol{\Phi}_i^{-1} \boldsymbol{\phi}_i \quad (22)$$

که در آن $\boldsymbol{\Phi}_i \in \mathbf{R}^{l \times l} = \text{diag}\{\phi_{1i}, \dots, \phi_{ri}\}$ و $\boldsymbol{\Gamma}_i \in \mathbf{R}^{r \times r} = \text{diag}\{\gamma_{1i}, \dots, \gamma_{ri}\}$ یک ماتریس قطری مثبت معین و $r = (2m + 1)^2$ تعداد قواعد فازی کنترل کننده و l تعداد قواعد فازی جبران کننده اصطکاک است. با توجه به قانون کنترل (۷) با مشتق گیری از طرفین معادله بالا نسبت به زمان خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{V} = \mathbf{s}^T & \left[\mathbf{w}_1^{*T} \boldsymbol{\eta}_1(\|\mathbf{x}\|, s_1), \dots, \mathbf{w}_n^{*T} \boldsymbol{\eta}_n(\|\mathbf{x}\|, s_n) \right]^T - \left[\mathbf{w}_1^T \boldsymbol{\eta}_1(\|\mathbf{x}\|, s_1), \dots, \mathbf{w}_n^T \boldsymbol{\eta}_n(\|\mathbf{x}\|, s_n) \right]^T \\ & + \mathbf{f}_s - \hat{\mathbf{f}}_s(\dot{\mathbf{x}}|\boldsymbol{\theta}) - \mathbf{K}\mathbf{s} + \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\psi}_i^T \boldsymbol{\Gamma}_i^{-1} \dot{\boldsymbol{\psi}}_i + \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\phi}_i^T \boldsymbol{\Phi}_i^{-1} \dot{\boldsymbol{\phi}}_i \end{aligned} \quad (23)$$

اگر تخمین بهینه نیروی اصطکاک از مقدار واقعی $\mathbf{f}_s(\dot{\mathbf{x}})$ دارای خطای $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{f}_s(\dot{\mathbf{x}}) - \hat{\mathbf{f}}_s(\dot{\mathbf{x}}|\boldsymbol{\theta}^*)$ باشد، با انتخاب ماتریس \mathbf{K} به صورت یک ماتریس قطری مثبت معین، جمله اول با توجه به کوچک بودن $\boldsymbol{\varepsilon}$ همواره منفی خواهد بود، لذا برای آنکه \dot{V} همواره منفی بماند و پایداری سیستم تضمین گردد، قوانین تطبیق کنترل کننده و جبران کننده اصطکاک به صورت ذیل انتخاب می‌گردند:

$$\dot{\mathbf{w}}_i = s_i \boldsymbol{\Gamma}_i \boldsymbol{\eta}_i(\|\mathbf{x}\|, s_i), \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_i = s_i f_e \boldsymbol{\Phi}_i \boldsymbol{\xi}_i(\dot{x}_i) \quad (24)$$

روابط اخیر به ترتیب قانون تطبیق کنترل کننده عصبی- فازی- تطبیقی و قانون تطبیق جبران کننده عصبی- فازی- تطبیقی خواهد بود. با انتگرال گیری از قوانین تطبیق بالا مقدار جدید وزنها در هر مرحله به صورت ذیل به دست خواهد آمد:

$$\boldsymbol{\theta}_i(t_2) = \boldsymbol{\theta}_i(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} s_i f_e \boldsymbol{\Phi}_i \boldsymbol{\xi}_i(\dot{x}_i) dt, \quad \mathbf{w}_i(t_2) = \mathbf{w}_i(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} s_i \boldsymbol{\Gamma}_i \boldsymbol{\eta}_i(\|\mathbf{x}\|, s_i) dt \quad (25)$$

ملاحظه می‌گردد که مقدار وزنها در هر مرحله به روز شده و تا رسیدن به مقدار بهینه تغییر می‌کنند. همچنین قابل توجه است که، همانند کنترل کننده عصبی- فازی- تطبیقی، در جبران کننده اصطکاک سطح، مقدار نیروی اصطکاک تخمینی و قانون تطبیق هر دو مستقل از دینامیک ربات و سطح تماس آن بوده و با توجه به خطای ایجاد شده، وزنه‌های جبران کننده و کنترل کننده مطابق رابطه (۲۵) چنان تغییر می‌کنند که، تخمین صحیح حاصل و پایداری حلقه بسته تضمین و خطای سیستم به سمت صفر میل می‌نماید. با انتخاب قوانین تطبیق (۲۴) به صورت ذیل خواهد شد:

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T \mathbf{K}\mathbf{s} + \mathbf{s}^T \boldsymbol{\varepsilon} \quad (26)$$

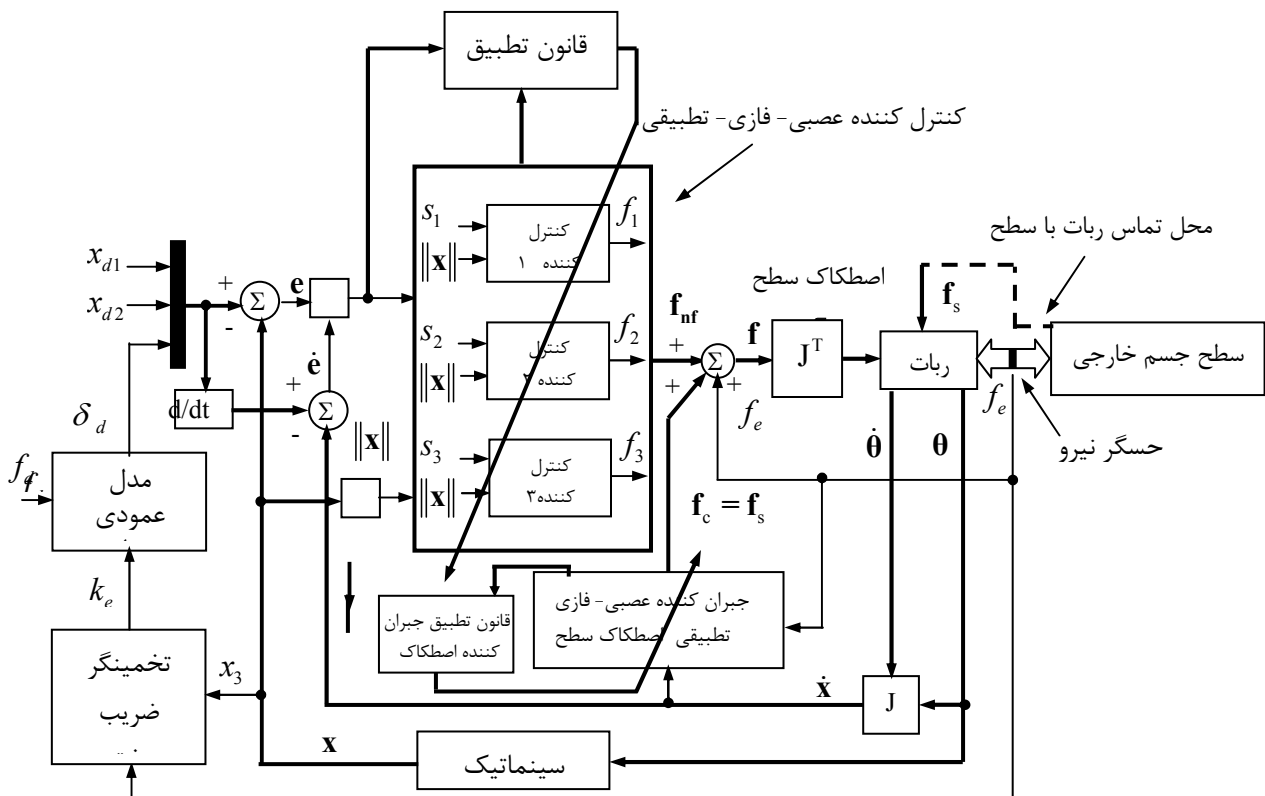
در رابطه بالا عبارت $\mathbf{s}^T \boldsymbol{\varepsilon}$ قرار دارد، که عبارت است از حاصلضرب عددی دو بردار خطای لغزش و خطای تخمین نیروی اصطکاک. اگر خطاهای فوق به اندازه کافی کوچک باشند، به طوریکه از عبارت $\mathbf{s}^T \mathbf{Ks}$ همواره کوچکتر باشد، که معمولاً این گونه است، \dot{V} همواره منفی و پایداری تضمین می‌گردد. اما در غیر این صورت، سیستم ناپایدار خواهد شد زیرا سمت راست معادله \dot{V} مثبت خواهد شد. لذا باید اثر این جمله به نحو مطلوبی از بین برود تا همواره سمت راست معادله \dot{V} منفی بماند. برای این کار قانون کنترل تطبیقی مقاوم به صورت ذیل پیشنهاد می‌گردد [8]، [9]:

$$\mathbf{f} = [\mathbf{w}_1^T \boldsymbol{\eta}_1(\|\mathbf{x}\|, s_1), \dots, \mathbf{w}_n^T \boldsymbol{\eta}_n(\|\mathbf{x}\|, s_n)] + \mathbf{f}_e + \hat{\mathbf{f}}_s(\dot{\mathbf{x}}|\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{Ks} + \mathbf{Qsgn}(\mathbf{s}) \quad (27)$$

که در آن $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{n \times n} = \text{diag}\{q_1, \dots, q_n\}$ یک ماتریس قطری مثبت معین است. با قرار دادن قانون کنترل بالا در خواهیم داشت:

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T \mathbf{Ks} + \mathbf{s}^T \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{Qsgn}(\mathbf{s}) \quad (28)$$

که با انتخاب q_i ها به صورت $q_i \geq |\varepsilon_i|$, $i = 1, \dots, n$ همواره منفی و پایداری سیستم حلقه بسته تضمین می‌گردد. بلوک دیاگرام کنترل کننده در شکل ۱ نشان داده شده است. در این کنترل کننده، مطابق شکل ۲ برای هر ورودی ۳ تابع عضویت گوسی و برای هر یک از کنترل کننده های مفاصل ۹ قاعده فازی در نظر گرفته شده است. تعداد توابع عضویت در نظر گرفته شده برای ورودی هر جبران کننده ۷ تابع عضویت گوسی است، لذا هر جبران کننده دارای ۷ قاعده فازی خواهد بود. که قسمت تالی قواعد فازی کنترل کننده و جبران کننده اصطکاک مطابق روابط (۲۵) به صورت وصل - خط به روز شده، به طوریکه کنترل کننده به بهترین پاسخ با کمترین خطا و جبران کننده به نزدیکترین تخمین برای اصطکاک سطح برسد.





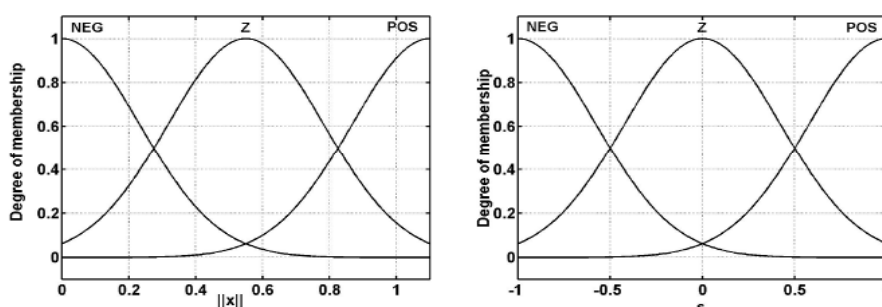
شکل ۱- بلوک دیاگرام کامل کنترل کننده عصبی- فازی- تطبیقی به همراه جبران کننده اصطکاک و تخمینگر ضریب سختی سطح

شبیه سازی

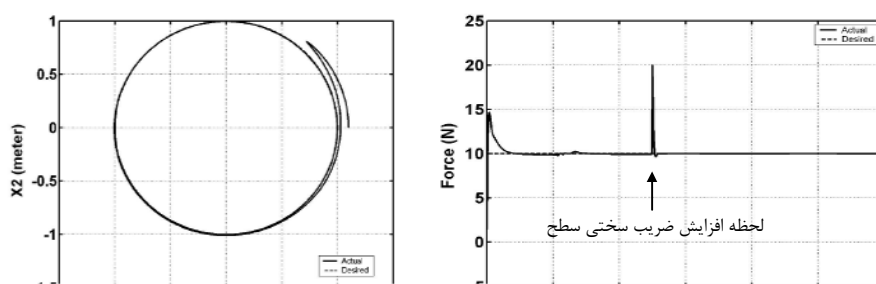
در این قسمت می‌خواهیم با استفاده از کنترل کننده فازی - عصبی - تطبیقی و جبرانگر مقاوم فازی - عصبی - تطبیقی طراحی شده برای کنترل موقعیت/ نیروی ربات ۳ درجه آزادی در حالتیکه اصطکاک سطح ناشناخته می‌باشد استفاده نماییم. مسیر مطلوب حرکت ربات در صفحه $x_1 - x_2$ ، یک مسیر دایره ای شکل به شعاع ۱ متر بوده و باید ضمن حرکت نیروی ۱۰ نیوتن را به سطح اعمال نماید. شبیه سازی های انجام شده در حالتی است که ضریب سختی، اصطکاک مفاصل و جرم بازوها در لحظه $t = 5$ ، ۱۰٪ افزایش می‌ابند. ضمن آنکه در شرایط وجود ۱۰٪ نویز اندازه گیری نیز نتایج نشان داده خواهد شد.

بررسی نتایج وملاحظات عملی

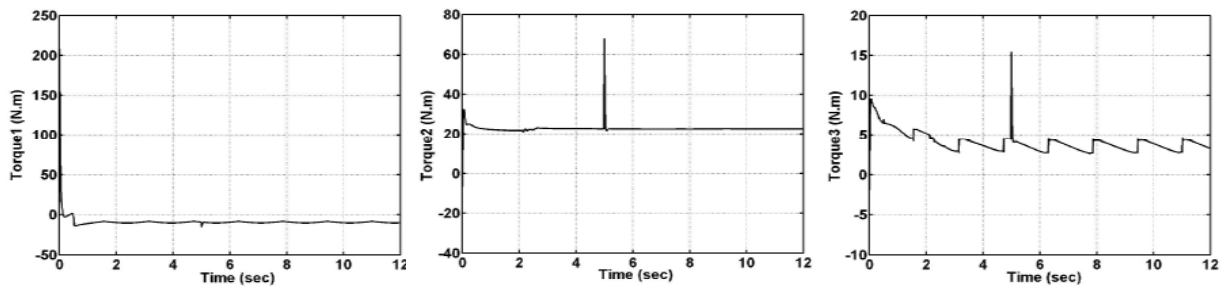
نتایج حاصل از این شبیه سازی در شکل‌های ۳ تا ۱۰ نشان داده شده است. شکل‌های مذکور نشان می‌دهند که کنترل کننده در شرایط عدم وجود دینامیک ربات و مدل اصطکاک سطح به خوبی عمل ردیابی موقعیت و نیرو را انجام می‌دهد که این به دلیل خاصیت تطبیقی بودن کنترل کننده و جبران کننده اصطکاک سطح است. ملاحظه می‌گردد که خطای حالت ماندگار پاسخ در حالت تغییر پارامترهای ربات از قبیل جرم و اصطکاک مفاصل و همچنین تغییر ضریب سختی و اصطکاک سطح صفر بوده و لذا ربات با وجود این کنترل کننده، به خوبی مسیر مطلوب را دنبال و نیروی مطلوب را به سطح اعمال مینماید. همچنین در شرایط وجود ۱۰٪ نویز اندازه گیری پاسخهای موقعیت و نیرو بسیار خوب بوده و تقریباً بدون نویز هستند. ضمن اینکه گشتاورهای مورد نیاز که در شکل‌های ۴ و ۶ نشان داده شده، در عمل قابل پیاده سازی است. لازم به ذکر است که در صورت عدم جبران نیروی اصطکاک سطح پاسخ دارای خطای حالت ماندگار زیاد خواهد شد. لذا جبران آن ضروری به نظر می‌رسد. و با توجه به اینکه در عمل اصطکاک سطح نامعلوم بوده و دارای عدم قطعیت است بایستی به نحو مطلوب تخمین زده شود که تخمینگر طراحی شده در این فصل یک تخمینگر مقاوم و تطبیقی بسیار مناسب برای این منظور می‌باشد.



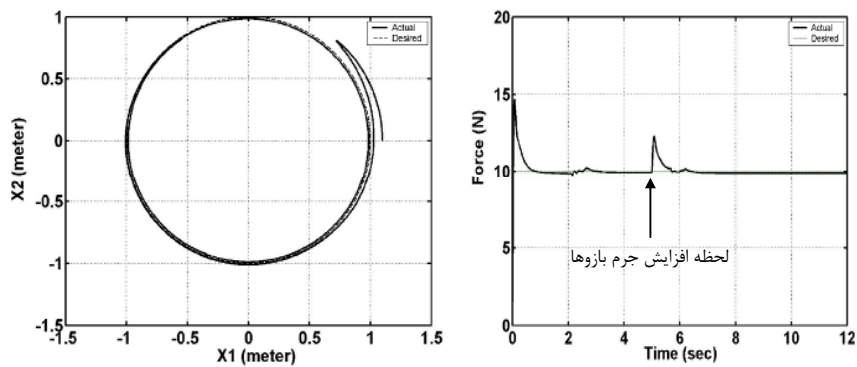
شکل ۲- توابع عضویت کنترل کننده عصبی- فازی- تطبیقی برای ورودیهای $s, ||X||$.



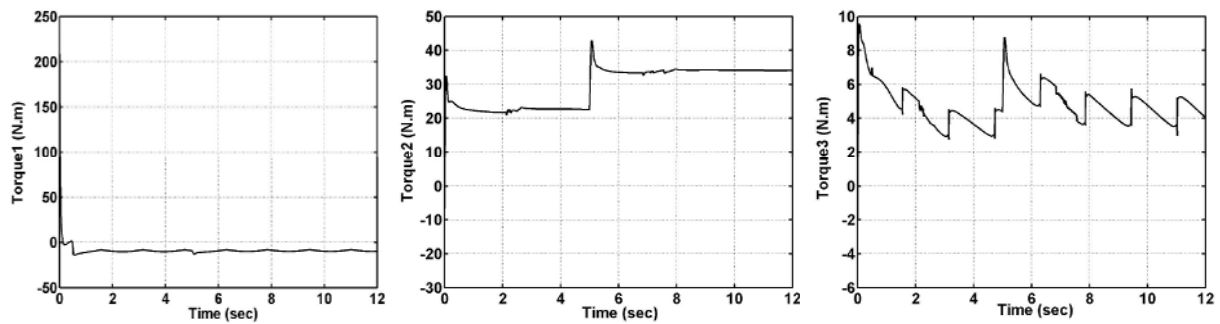
شکل ۳- موقعیت حرکت ربات روی صفحه $x_1 - x_2$ و نیروی اعمالی با اغتشاش افزایش ضریب سختی سطح



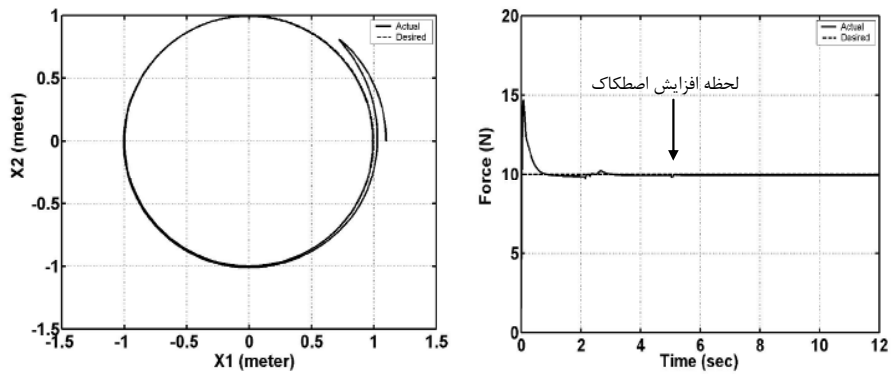
شکل ۴- گشتاورهای اعمالی به مفاصل در حالت وجود اغتشاش افزایش ضریب سختی سطح



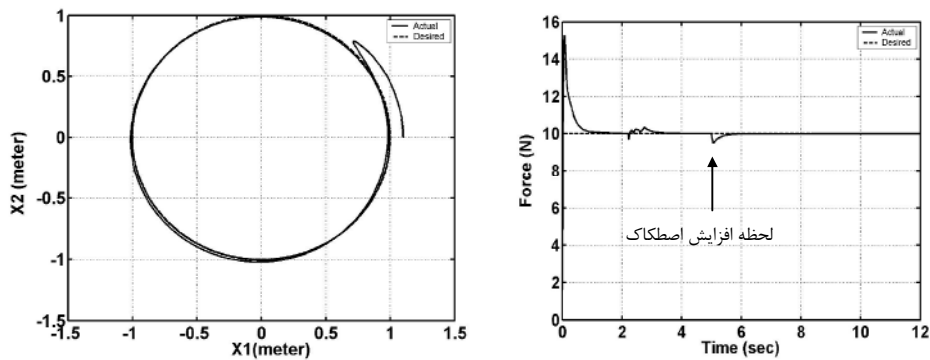
شکل ۵- موقعیت حرکت ربات روی صفحه $x_1 - x_2$ و نیروی اعمالی با اغتشاش افزایش جرم بازوهای ربات



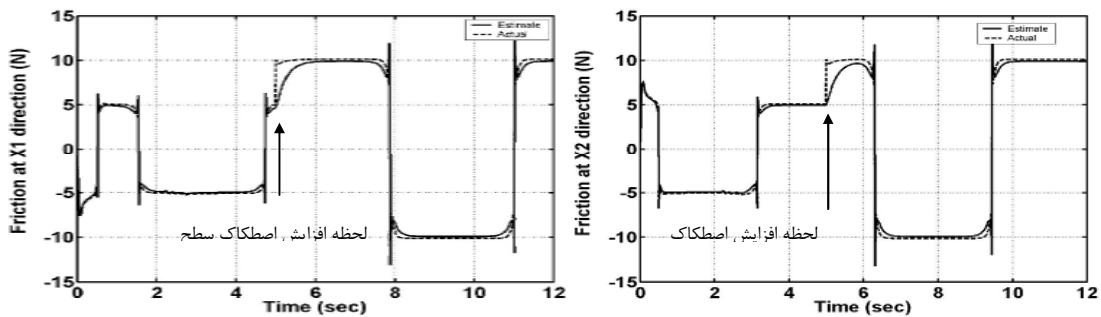
شکل ۶- گشتاورهای اعمالی به مفاصل در حالت وجود اغتشاش افزایش جرم بازوهای ربات



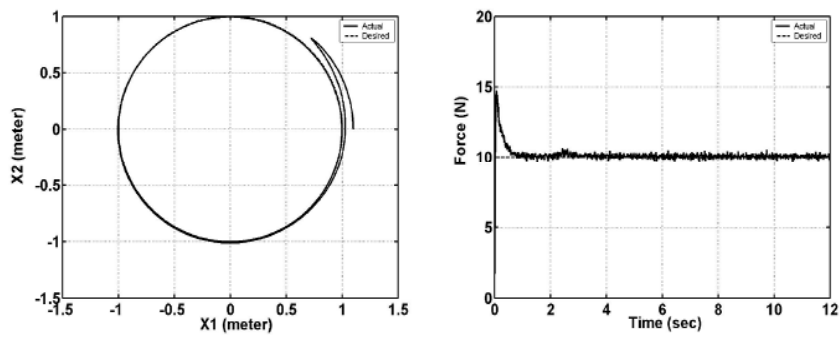
شکل ۷- موقعیت حرکت ربات روی صفحه $x_1 - x_2$ و نیروی اعمالی با اغتشاش افزایش اصطکاک مفاصل



شکل ۸- موقعیت حرکت ربات روی صفحه $x_1 - x_2$ و نیروی اعمالی با اغتشاش افزایش اصطکاک سطح



شکل ۹- نیروهای اصطکاک در جهات حرکت x_1, x_2 (واقعی و تخمینی)



شکل ۱۰- موقعیت حرکت ربات روی صفحه $x_1 - x_2$ و نیروی اعمالی با وجود نویز اندازه گیری

نتیجه گیری

کنترل کننده عصبی- فازی- تطبیقی طراحی شده با ۹ قاعده فازی و جبران کننده اصطکاک سطح با ۷ قاعده فازی عمل کنترل موقعیت/ نیروی ربات را بدون نیاز به دینامک ربات و مدل اصطکاک سطح انجام داده و تغییر پارامترهای ربات و سطح اثری بر روند کنترل نداشته و کنترل کننده با تغییر مراکز توابع عضویت قسمت تالی به خوبی خود را با شرایط جدید تطبیق میدهد. مزیت این کنترل کننده علاوه بر موارد بالا تعداد بسیار کم قواعد فازی است. که در صورت عدم وجود مکانیزم تطبیق بایستی تعداد بسیار زیادتری قواعد فازی در نظر گرفت.

مراجع

- [1] F.Y. Hsu and L.C. Fu, " Intelligent Robot Deburring Using Adaptive Fuzzy Hybrid Position/Force Control," *IEEE Trans. on Robotics And Automation.*, vol.16, no.4, pp. 325-335, Aug. 2000.
- [2] K. Kiguchi and T. Fukuda, "Position/Force Control of Robot Manipulators for Geometrically Unknown Objects Using Fuzzy Neural Networks," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 47, no. 3, June. 2000.
- [3] K. Kiguchi, K. Watanabe, K. Izumi and T. Fukuda, "Two-Stage Adaptation of a Position/Force Robot Controller -Application of Soft Computing Techniques," *IEEE Int. Conf. on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems.*, pp. 141-144, Aug. 1999.
- [4] D.Xiao, B. K. Ghosh, N. Xi and T. J. Tran, "Sensor-Based Hybrid Position/Force Control of a Robot Manipulator in an Uncalibrated Environment," *IEEE Trans. on Control Systems.*, vol. 8, no. 4, July. 2000.
- [5] S. Jung and T.C. Hsia, "Neural Network Impedance Force Control of Robot Manipulator," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 45, no. 3, pp. 451-461, Jun. 1998.
- [6] B. Bona, and M. Indri, "Friction compensation and robustness issues in force/position controlled manipulators," *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol 142, no. 6, Nov. 1995.
- [7] R. G. Berstecher, R. Palm and H. D. Unbehauen, "An Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Controller," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 48, no. 1, Feb. 2001.
- [8] T. Sugie, "Robust Controller Design for Robot Manipulators," *Trans. ASME Dyn. Measurement and Control*, vol. 110, no.1, pp. 94-96, Mar. 1988.
- [9] P. Tomei, "Robust Adaptive Friction Compensation for Tracking Control of Robot Manipulators," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 45, no. 6., 2000.