



طراحی و ساخت عملی کنترل کننده PID مرتبه کسری برای یک ربات تک لینک انعطاف پذیر

هادی دلآوری^{1*}، عاطفه عزیزخانی²، پویا شیوویی³

1- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

2- کارشناسی ارشد، مهندسی برق کنترل، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

3- کارشناسی، مهندسی رباتیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

* همدان، صندوق پستی 65155، delavari@hut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 مرداد 1396

پذیرش: 02 مهر 1396

ارائه در سایت: 05 آبان 1396

کلید واژگان:

ربات تک لینک انعطاف پذیر

حسابان مرتبه کسری

کنترل کننده فازی

کنترل کننده PID مرتبه کسری

اغتشاش

خطای ردیابی

چکیده

صرفه جویی در انرژی، نسبت پایین جرم ربات به جرم قابل حمل، قابلیت بیشتر کار در محیط‌های مختلف، حمل آسان تر قطعات و هزینه‌ی تولید پایین تر در ربات‌های انعطاف پذیر این ربات‌ها را نسبت به ربات‌های صلب برای بسیاری از محققان و صنایع جذاب تر کرده است. اما به دلیل غیرخطی بودن سیستم ربات انعطاف پذیر و ارتعاشات بالای آن در نقاط کاری و همچنین حساسیت بیشتر نسبت به اغتشاشات خارجی، کنترل این نوع ربات‌ها دشوارتر و پیچیده تر است. در این مقاله یک کنترل کننده بر اساس حسابان مرتبه کسری برای ربات‌های انعطاف پذیر بصورت عملی پیاده سازی می‌شود. ابتدا مدل دینامیکی یک ربات تک لینکی انعطاف پذیر معرفی می‌شود. سپس بر روی یک ربات تک لینک انعطاف پذیر که در آزمایشگاه ساخته شده است، کنترل کننده‌های مختلف از جمله کنترل کننده فازی، کنترل کننده PID و کنترل گشتاور PID مرتبه کسری به صورت عملی در آزمایشگاه پیاده سازی شده و سپس عملکرد هر یک از کنترل کننده‌ها در کاهش ارتعاشات بازو در نقطه‌ی مطلوب نهایی و کاهش خطای ردیابی بررسی می‌گردد. علاوه بر این، برای مقایسه کنترل کننده‌های طراحی شده از نظر مقاوم بودن، یک اغتشاش ثابت و یکسان به همه کنترل کننده‌ها اعمال شده و عملکرد آن‌ها مقایسه می‌گردد. در پایان، نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی آزمایشگاهی ربات، نشان می‌دهد که کنترل گشتاور PID مرتبه کسری بهترین نتایج را در میان کنترل کننده‌های پیاده سازی شده دارد.

Design and practical implementation of a fractional order pid controller for a single flexible-link robot

Hadi Delavari^{1*}, Atefeh Azizkhani¹, Pooya Shiuooei²

1- Department of Electrical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

2- Department of Robotic Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

* P.O.B. 65155 Hamedan, Iran, delavari@hut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 31 July 2017

Accepted 24 September 2017

Available Online 27 October 2017

Keywords:

Single flexible-link

Fractional Calculus

Fuzzy Control

Fractional order PID torque control

Disturbance

Tracking error

ABSTRACT

Energy saving, low robot mass to carried mass ratio, more ability to work in various environments, easier delivery of parts and lower production costs in flexible robots make these robots more attractive than rigid robots to many researchers and industries. But due to nonlinearities in flexible robot system and high vibration in operation points and also more sensitivity against external disturbances, control of these robots is more difficult and complex. In this paper a controller for a flexible link manipulator based on fractional calculus is practically implemented. At first the dynamic model of a single flexible-link robot is introduced. Then various controllers such as fuzzy control, PID control, and fractional order PID torque control are practically implemented on a single flexible-link robot made in laboratory, and then the performance of each controllers in decreasing of arm vibration in final desired point and tracking error reduction are investigated. Further, to compare the robustness of the designed controllers, a same constant disturbance is applied to all controllers and their performance are compared. Finally, the simulation results and experimental results show that the fractional order PID torque controller has the best results among the implemented controllers.

1- مقدمه

بسیاری قرار گرفته‌اند [1]. اما باید توجه داشت که انعطاف پذیری لینک¹ ربات سبب غیرخطی شدن بیشتر معادلات دینامیکی، افزایش ارتعاش ربات در نقاط کاری و همچنین حساسیت بیشتر به اغتشاش و نویزهای محیطی

با توجه به مزیت‌های ربات انعطاف پذیر نسبت به ربات صلب مانند سبک تر بودن، صرفه جویی در انرژی، افزایش قابلیت حمل بار و انجام کار در محیط‌های مختلف و هزینه‌ی تولید پایین تر این نوع ربات‌ها مورد توجه

¹ Link

Please cite this article using:

H. Delavari, A. Azizkhani, P. Shiuooei, Design and practical implementation of a fractional order pid controller for a single flexible-link robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 411-419, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

و ارزیابی کنترل ربات با لینک انعطاف‌پذیر و پیاده‌سازی آن به صورت عملی می‌باشد.

برای مشاهده‌ی چگونگی رفتار ربات در حضور کنترل‌کننده‌های مختلف، با پیاده‌سازی عملی در آزمایشگاه، حلقه‌های کنترلی پایدار، موقعیت و گشتاور برای رسیدن به نقطه‌ی مطلوب نهایی به دست آمده‌اند. از نوآوری‌ها و مزیت‌های این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- 1- در شبیه‌سازی‌های کامپیوتری از مدل‌های تقریبی ربات استفاده می‌شود که در این مدل‌ها برای ساده‌سازی مدل، معمولاً از مودهای ارتعاشی فرکانس بالای سیستم صرف‌نظر شده است، اما در مقاله حاضر کنترل‌کننده روی ربات واقعی پیاده‌سازی عملی شده است که چالش‌های کنترلی را بسیار بیشتر کرده و کار کنترل ارتعاشات نوک ربات بسیار پیچیده‌تر خواهد شد.
- 2- در مقاله حاضر یک کنترل‌کننده مرتبه کسری جدید ارائه شده و اثبات پایداری کنترل‌کننده پیشنهادی به صورت تئوری انجام شده و سپس به صورت عملی پیاده‌سازی گردیده است.

- 3- در این مقاله از کنترل PID مرتبه کسری برای یک ربات تک لینک انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود و عملکرد مقاوم کنترل‌کننده در مقابل اغتشاش بررسی می‌گردد.

روند مقاله بدین شرح است: در بخش 2 مدل دینامیکی ربات و مسئله‌ی کنترلی شرح داده شده است. در بخش 3 پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده‌ها روی ربات و روش حل مورد توجه قرار گرفته است. در بخش 4 نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی تفسیر و تحلیل شده‌اند. بخش 5 به نتیجه‌گیری نهایی پرداخته شده است.

2- مدل دینامیکی ربات

در این بخش، مدل دینامیکی یک ربات با n بازوی انعطاف‌پذیر معرفی می‌گردد [2]. یک راه آسان برای تخمین دینامیک‌های یک ربات انعطاف‌پذیر با استفاده از روش مدشپ¹ است. با فرض مدل تیر اوپلر-برنولی، انحراف تیر الاستیک $w_i(\eta, t)$ لینک i ام، به صورت مجموع ترم‌های بی‌نهایت بیان می‌شود:

$$w_i(\eta, t) = \sum_{j=1}^{\infty} q_{ij}(t) \phi_{ij}(\eta) \quad (1)$$

که در آن $q_{ij}(t)$ دامنه‌ی متغیر با زمان مد j از لینک i ام و $\phi_{ij}(\eta)$ تابع مدشپیی است که جابجایی مد j انحراف لینک i ام را بیان می‌کند. η نیز جابجایی لینک i ام را در هر راستای محور نشان می‌دهد [2].

با توجه به انعطاف‌پذیری لینک، یک حل برای حرکت لینک i ام، با استفاده از تخمین مقید کوتاه² به دست می‌آید. فرم حل به دست آمده برای لینک i ام به صورت معادله‌ی (2) است:

$$w_i(\eta, t) = \sum_{j=1}^{m_i} q_{ij}(t) \phi_{ij}(\eta) \quad (2)$$

که در آن m_i تعداد مدهای استفاده شده برای توصیف انحراف لینک i ام است.

معادلات دینامیکی حرکت بازو با استفاده از روش لاگرانژ به دست آمده است. برای دستیابی به این هدف، عباراتی برای انرژی‌های پتانسیل و جنبشی به دست می‌آید. انرژی پتانسیل شامل انرژی کششی و تأثیر گرانش است. با

خواهد شد. از این رو کنترل آن‌ها بسیار پیچیده‌تر و دشوارتر خواهد بود. در شکل 1 شمای کلی ربات تک لینک انعطاف‌پذیر ساخته شده در آزمایشگاه نشان داده شده است. در بسیاری از کاربردهای رباتیکی لازم است هم‌زمان کنترل موقعیت و سرعت مجری نهایی، گشتاور تولیدی موتور و نیروی اتصال بین مجری نهایی و محیط انجام گیرد. مثال‌های رایج از کاربردهای صنعتی عبارت‌اند از: مونتاژ کردن، صیقل کاری، نقاشی، حکاکی، نوشتن، هموار کردن لبه و غیره، که کنترل موقعیت به تنهایی برای انجام این چنین کاربردهایی کافی نیست، پس لازم است نیرو و یا گشتاور نیز کنترل شود.

در مقالاتی که تا کنون منتشر شده است، کنترل‌کننده‌های متعددی از جمله کنترل موقعیت PID مرتبه کسری [2,1]، کنترل فازی [3-7]، کنترل مدل‌گزشی [8] و کنترل PID برای کنترل این نوع ربات به کار گرفته شده است. اما به دلیل وجود عوامل غیرخطی‌های شدید در مدل ربات، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده با سعی و خطا [3] و یا با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند از جمله الگوریتم ژنتیک [1] انجام می‌گیرد.

در برخی مراجع [9,10] از کنترل تطبیقی و مقاوم برای غلبه بر نویز و اغتشاشات محیطی وارد بر ربات دارای مفاصل انعطاف‌پذیر استفاده شده است و نتایج به صورت عملی نیز بررسی شده‌اند. در [11,12] یک روش کنترلی جدید برای ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر پیشنهاد شده است که علاوه بر اینکه ربات را در حضور نامعینی‌های ساختاری و غیرساختاری بصورت مقاوم پایدار می‌سازد و مشکلات کنترل‌کننده‌های طراحی شده بر اساس مدل صلب را ندارد. در [13-17] مدل دینامیکی نسبتاً دقیقی برای یک بازوی انعطاف‌پذیر دو لینکی و یک ربات با مفصل انعطاف‌پذیر ارائه شده است، که توسط قانون کنترل غیرخطی بر اساس لیاپانوف و کنترل مد لغزشی- فازی تا حدی ارتعاشات ناشی از الاستیک بودن لینک‌ها حذف گردیده است ولی به خاطر پیچیدگی دینامیک ربات، قانون کنترل پیچیده شده و تعیین توابع محدودیت دشوار است، به علاوه عملکرد کنترلی در سرعت‌های بالا تضعیف شده است. در [18-20] ربات تک بازو با مفصل انعطاف‌پذیر در صفحه‌ی قائم توسط الگوریتم‌های تطبیقی و مقاوم کنترل شده است که نتایج مطلوبی برای ردیابی در پی دارد و در [21] عملکرد کنترل‌کننده‌ی PID مرتبه کسری فازی برای بازوی ربات صلب ارزیابی شده است که استفاده از این کنترل‌کننده سبب کنترل زوایای مفاصل لینک‌های بازو و کاهش خطای موقعیت لینک‌ها شده است. در [22,23] کنترل فازی تطبیقی مبتنی بر رویکرد برای سیستم‌های غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است.

با بررسی مقالات و مطالعات منتشر شده تا کنون مشاهده می‌گردد که در بیشتر آنها ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر مورد توجه قرار گرفته است که دینامیک آن نسبت به ربات با لینک انعطاف‌پذیر ساده‌تر بوده و به همین جهت طراحی کنترل‌کننده نیز ساده‌تر خواهد بود. از طرفی کاربرد ربات با لینک انعطاف‌پذیر نسبت به مفصل انعطاف‌پذیر به خصوص در صنایع بیشتر بوده و از اهمیت بیشتری برخوردار است، بنابراین، در این مقاله هدف بررسی

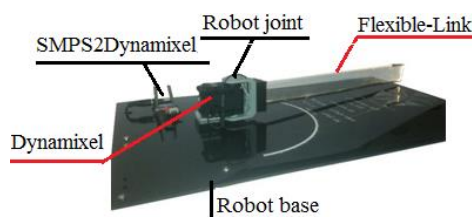


Fig. 1 Single flexible-link robot made in laboratory

شکل 1 ربات تک لینکی انعطاف‌پذیر ساخته شده در آزمایشگاه

¹ Mode Shape

² Truncated modal approximation

می‌شود. رابطه‌ی کنترل کننده PID به صورت معادله‌ی (5) است:

$$C(t) = K_p e(t) + K_D \dot{e}(t) + K_I \int e(t) dt \quad (5)$$

که در آن K_p ، K_D و K_I به ترتیب ضرایب تناسبی، مشتقی و انتگرالی هستند. $e(t)$ خطا و $\dot{e}(t)$ مشتق خطا توسط فیدبک خروجی موقعیت و مشتق‌گیری از آن به دست می‌آیند. در حقیقت ورودی کنترلی $C(t)$ در کنترل‌کننده‌ی PID که فیدبک موقعیت دارد، زاویه لحظه‌ای محاسبه شده توسط کنترل‌کننده به موتور استفاده شده می‌باشد و در آن $e = x - x_d$ است. در محیط شبیه‌سازی از دو تابع اشباع استفاده شده است. یک تابع اشباع^۷ برای محدود کردن فضای حرکتی ربات و دیگری برای ورودی‌های کنترلی، البته باید توجه داشت که در پیاده‌سازی عملی به منظور پایدار ماندن سیستم و عملکرد بهتر آن برای محدود کردن قانون کنترل تا جایی که عملکرد ربات به مخاطره نیفتد و ربات از محیط در نظر گرفته شده برای آن خارج نگردد می‌توان از بلوک اشباع استفاده کرد. در شکل 2 محیط شبیه‌سازی کنترل کننده PID نشان داده شده است.

2-3- طراحی کنترل کننده فازی

کنترل‌کننده‌های فازی از یک سری اطلاعات تعریفی غیر دقیق به عنوان مجموعه‌ی ورودی فازی و از یک طرح استنتاجی، مبتنی بر پایه‌ی دانش استفاده می‌کنند. می‌توان از کنترل کننده فازی سلسله مراتبی که هدف آن ردیابی و حل موقعیت و نیرو می‌باشد استفاده کرد [3]. توابع عضویت و جدول قواعد کنترل کننده فازی با ورودی‌های خطا و تغییرات خطا و خروجی قانون کنترل به صورت شکل‌های 3 و 4 و جدول 1 هستند. با توجه به شکل 4 بازه‌های ورودی خطا و سرعت خطا و همچنین خروجی کنترل کننده که همان ورودی کنترلی است به ترتیب برابر $e = [-0.1 \ 0.1]$ ، $\dot{e} = [-0.1 \ 0.1]$ و $u = [-0.1 \ 0.3]$ است. ذکر این نکته ضروری است که می‌توان برای سرعت بخشیدن به کنترل و حرکت ربات در حالت پیاده‌سازی عملی و بلادرنگ شدن کنترل برخی قواعد ذکر شده در جدول 1 را حذف و یا ساده‌تر کرد. ورودی کنترلی $C(t)$ در کنترل کننده‌ی فازی با فیدبک موقعیت نیز از نوع ارسال زاویه لحظه‌ای محاسبه شده توسط کنترل کننده به موتور می‌باشد و در آن $e = x - x_d$ است. شکل 5 نیز محیط شبیه‌سازی کنترل کننده فازی را نشان می‌دهد.

3-3- طراحی کنترل گشتاور PID مرتبه کسری

محاسبات مرتبه کسری نقش بسیار مهمی در زمینه‌های گوناگون علمی دارد و به خصوص در دهه اخیر کاربرد کنترل مرتبه کسری در مهندسی کنترل به عنوان یک موضوع مهم در عرصه تحقیقات بین‌المللی مطرح شده است. در رابطه‌ی کنترل کننده PID مرتبه صحیح که به صورت معادله‌ی (5) ارائه شد،

این حال، از انحرافات پیچشی و طولی چشم پوشی شده است. در نهایت، اجزاء مدل دینامیکی باید صریحاً جداسازی شده تا به فرم ماتریسی تبدیل شود. ماتریسهای M ، D ، K ، F و G به ترتیب نشان دهنده‌ی ماتریس اینرسی، ماتریس میرایی، ماتریس سختی، ماتریس اصطکاک و بردار گرانش هستند.

$$M(x)\ddot{x} + D(x, \dot{x})\dot{x} + K(x)x + F(x, \dot{x}) + G(x) = B\tau \quad (3)$$

B ماتریس ورودی است که وابسته به فرضیات لینک مقید است و τ ورودی گشتاور کنترلی است. $M \in R^{n+m' \times n+m'}$ ، $m' = \sum_{i=1}^n m_i$ ، $B \in R^{n+m' \times n+m'}$ ، $q_r \equiv [q_{r1} \ q_{r2} \ \dots \ q_{rn}]^T$ ، $x \equiv [q_r \ q_f]^T$ حالت کلی و $q_f \equiv [q_{f11} \ q_{f12} \ \dots \ q_{1m_1} \ \dots \ q_{2m_2} \ \dots \ q_{nm_n}]^T$ بردار متغیرهای انحراف لینک است، $q_f \in R^{n \times 1}$ ، $K \in R^{n+m' \times n+m'}$.

ماتریس ضریب D تعریف واحدی ندارد، اگرچه که می‌توان آن را با توجه به خاصیت مهم و مفید شبه‌تقارنی در طراحی کنترل مقاوم انتخاب کرد. به این دلیل که تعمیم دستی و نمادین^۱ معادلات دینامیکی ربات خسته کننده، زمان بر و همراه با خطاست، یک فرآیند استنتاج اتوماتیک مورد نیاز است؛ بنابراین، یک برنامه‌ی نمادین در نرم‌افزار متلب^۲ یا متمتیکا^۳ برای تولید معادلات دینامیکی یک ربات صفحه‌ای با فرض لینک صلب یا انعطاف‌پذیر و توابع مدشپ انعطاف‌پذیر در [24-27] نشان داده شده است.

یک فضای حالت شبه خطی برای بازوی انعطاف‌پذیر به این صورت است:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{bmatrix} \tau + \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1} \end{bmatrix} \tau_n \quad (4)$$

که $X = [x \ \dot{x}]^T$ و $\tau_n = [F(x, \dot{x}) + G(x)]$ ترم‌های غیرخطی نیرو است. I و 0 نشان دهنده‌ی ماتریس‌های یکه و تهی با ابعاد مشخص هستند.

3- پیاده‌سازی عملی کنترل کننده

در این بخش به ترتیب انواع کنترل کننده‌های اعمال شده به ربات شرح داده می‌شوند که با تغییر ضرایب کنترلی با سعی و خطا، بهترین ضرایب که نتایج عملی مناسب‌تری دارند به دست می‌آیند. شبیه‌سازی کنترل کننده‌ها در محیط سیمولینک^۴ نرم‌افزار متلب انجام شده است و در پیاده‌سازی عملی ربات، قطعات اساسی مورد نیاز یک لینک انعطاف‌پذیر، موتور و رابط موتور به کامپیوتر است که لینک انعطاف‌پذیر، تیری از جنس پلکسی گلس^۵ با ضخامت 2 mm با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا انتخاب شده است تا ارتعاش و لرزش آن به وضوح قابل مشاهده باشد و موتور، یک داینامیکسل^۶ با مدل $AX - 18A$ است که حداقل نیاز گشتاور برای کنترل و حرکت لینک مورد نظر را فراهم کند. در داخل موتور سنسورهایی از جمله سنسور سرعت، موقعیت، گشتاور، بار، دما و ... تعبیه شده است که می‌توان از آنها در فیدبک‌گیری از سیستم استفاده کرد. دستورات عمل راه اندازی و استفاده از موتور داینامیکسل و مشخصات آن در [28-30] موجود است.

1-3 طراحی کنترل کننده PI

کنترل کننده‌های PID از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرایندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار، کنترل دما و ... کاربرد دارد. در این قسمت از این کنترل کننده برای کنترل مناسب و کاهش ارتعاشات نامطلوب ربات با لینک انعطاف‌پذیر استفاده

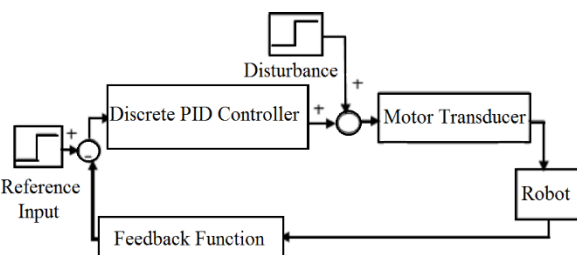


Fig. 2 PID controller simulation

شکل 2 شبیه‌سازی کنترل کننده PID در محیط سیمولینک

¹ Symbolic

² MATLAB

³ Mathematica

⁴ Simulink

⁵ Plexi glass

⁶ Dynamixel

⁷ Saturation

است و v_p ، v_D و v_I مرتبه‌های مشتق و انتگرال کسری را مشخص می‌کنند که مقدار مطلوب آن‌ها با سعی و خطا به دست آمده‌اند. ورودی کنترلی $C(t)$ در کنترلر گشتاور PID مرتبه کسری، گشتاور وارده لحظه‌ای به لینک کنترلر شده توسط کنترلر کننده به موتور می‌باشد که در آن $e = T - T_d$ خواهد بود. انتگرال مرتبه کسری یک تابع $f(t)$ از معادله‌ی (7) بدست می‌آید:

$$D_{0,t}^{-\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau \quad (7)$$

و مشتق مرتبه کسری آن نیز از معادله‌ی (8) بدست می‌آید:

$${}_0^c D_t^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{m-\alpha-1} f^{(m)}(\tau) d\tau \quad (8)$$

که در آن $m-1 < \alpha < m \in Z$ ، $\alpha \in R^+$

پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری در معادله‌ی (6) باید به نحوی انتخاب شوند که پایداری کنترل کننده پیشنهادی تضمین شود، بدین منظور فرض می‌شود $e(t) = e_1(t)$. با این فرض می‌توان معادله‌ی (6) را به شکل رابطه (9) بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} D^{v_I} e_1(t) &= e_2(t) \\ D^{v_p} e_2(t) &= e_3(t) \\ D^{v_D-v_p} e_3(t) &= -\frac{k_I}{k_D} e_1(t) - \frac{k_p}{k_D} e_3(t) \end{aligned} \quad (9)$$

حال فرض می‌شود که $v_I = v_1/u_1$ ، $v_p = v_2/u_2$ و همچنین فرض شود که $(v_i, u_i) = 1$ ، $v_i, u_i \in Z^+$ و $v_D - v_p = v_3/u_3$ کوچکترین مضرب مشترک مخرج این کسرها باشد. اگر همه ریشه‌های $\det(\Delta(\lambda))$ در معادله‌ی (10) در شرط $|\arg(\lambda)| > \frac{\pi}{2L}$ صدق کنند، کنترل کننده پیشنهادی پایدار خواهد بود.

$$\begin{aligned} \det(\Delta(\lambda)) &= \begin{vmatrix} \lambda^{Lv_I} & -1 & 0 \\ 0 & \lambda^{Lv_p} & -1 \\ \frac{k_I}{k_D} & 0 & \lambda^{L(v_D-v_p)} + \frac{k_p}{k_D} \end{vmatrix} \\ &= \left(\lambda^{Lv_I} \lambda^{Lv_p} \left(\lambda^{L(v_D-v_p)} + \frac{k_p}{k_D} \right) + \frac{k_I}{k_D} \right) \\ &= \lambda^{L(v_D+v_I)} + \frac{k_p}{k_D} \lambda^{L(v_p+v_I)} + \frac{k_I}{k_D} \end{aligned} \quad (10)$$

با توجه به معادله‌ی (6) کنترلر گشتاور PID مرتبه کسری برای ربات طراحی شده است که در این حالت قانون کنترلر با دریافت فیدبک موقعیت و گشتاور از خروجی به کنترلر گشتاور تولیدی موتور و سرعت حرکت لینک انعطاف‌پذیر می‌پردازد تا ربات به نقطه‌ی نهایی مطلوب دست یافته و متوقف شود. در این بخش به دلایل متعددی از جمله کاهش خطای ردیابی، کاهش لرزش و ارتعاش لینک انعطاف‌پذیر و اصلاح ورودی کنترلی، کنترلر گشتاور به موتور اضافه شده است. شکل 6 نشان دهنده‌ی محیط شبیه‌سازی کنترلر گشتاور PID مرتبه کسری است، که برای شبیه‌سازی بخش مرتبه کسری از جعبه ابزار مرتبه کسری [31,18] استفاده شده است. جعبه ابزار مرتبه کسری قابلیت نصب در نرم افزار متلب دارد. این جعبه ابزار مشتق و انتگرال مرتبه کسری را در حوزه فرکانس تقریب می‌زند.

4-3- پایداری سیستم

در این پژوهش به طراحی کنترلر کننده‌های PID کلاسیک و یا کنترلر کننده فازی از نظر تئوری و یا اثبات پایداری آن‌ها پرداخته نشده است زیرا که پیش از این بسیار مورد توجه واقع شده‌اند و در مراجع به طور کامل پایداری و اثبات آن‌ها ذکر گردیده است. لذا این کنترلر کننده‌ها مستقیماً بصورت عملی روی ربات ساخته شده اعمال شده‌اند، از سویی دیگر در مقاله حاضر یک

¹ Nipid block

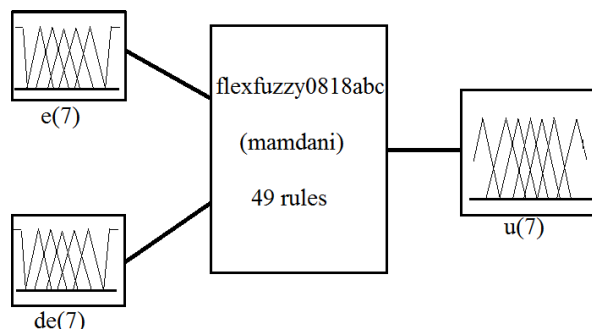


Fig. 3 Membership functions for fuzzy logic controller design[3]

شکل 3 توابع عضویت برای طراحی کنترل کننده‌ی منطق فازی [3]

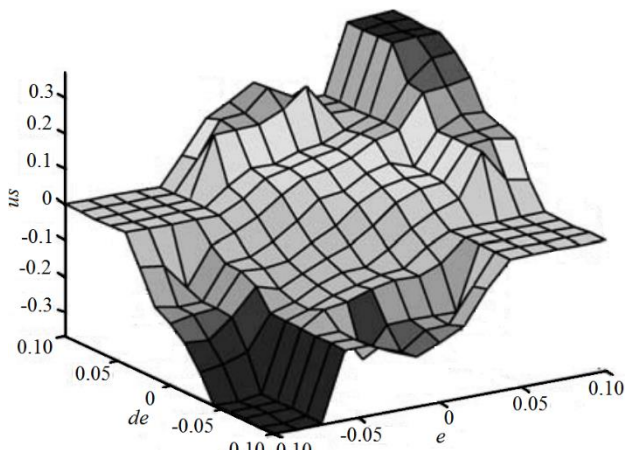


Fig. 4 The fuzzy surface for the system[3]

شکل 4 نمای سطح فازی برای سیستم [3]

جدول 1 جدول قواعد پایه برای طراحی کنترل کننده‌ی منطق فازی [3]

Table 1 Rule-base table for fuzzy logic controller design[3]

تغییرات خطا							
LP	MP	SP	ZE	SN	MN	LN	U
SP	MP	ZE	LN	LN	MN	LN	LN
MP	MP	ZE	MN	MN	MN	MN	MN
SP	SP	ZE	SN	SN	MN	LN	SN
SP	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	SN	ZE
LP	MP	SP	SP	ZE	SN	SN	SP
MP	MP	MP	MP	ZE	MN	MN	MP
LP	LP	LP	LP	ZE	SN	SN	LP

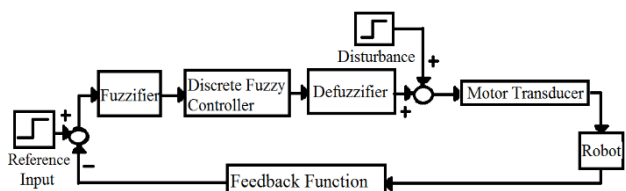


Fig. 5 Fuzzy controller simulation in Simulink

شکل 5 شبیه‌سازی کنترل کننده فازی در محیط سیمولینک

از انتگرال و مشتق مرتبه صحیح استفاده شده است، لذا به منظور افزایش درجه آزادی و همچنین افزایش مقاومت کنترل کننده، می‌توان از مشتق و انتگرال مرتبه کسری به جای مشتق و انتگرال مرتبه صحیح در معادله‌ی (5) استفاده نمود. از این رو یک کنترلر کننده مرتبه کسری به فرم معادله‌ی (6) پیشنهاد می‌شود:

$$C(t) = k_p D^{v_p} e(t) + k_D D^{v_D} e(t) + k_I D^{-v_I} e(t) \quad (6)$$

که در آن k_p ضریب تناسبی، k_D ضریب مشتقی و k_I ضریب انتگرالی

بدست آمده است. شکل 7 شمای کلی از سیستم کنترلی ساخته شده در دانشگاه صنعتی همدان برای ربات انعطاف پذیر تک لینک را نشان می دهد. ارتباط بین نرم افزار متلب و سیستم ربات به این صورت است که ابتدا در محیط سیمولینک، کنترل کننده شبیه سازی شده است و توسط کابل داینامیکسل¹ به ربات مورد نظر متصل شده است و فیدبک های مورد نیاز از جمله موقعیت، سرعت و گشتاور ربات توسط این موتور و سنسورهای تعبیه شده در آن به دست آمده و توسط کابل به محیط شبیه سازی منتقل می شود سپس برنامه های کنترلی نوشته شده در متلب ورودی کنترلی مناسب را تولید کرده و به ربات اعمال می کند تا جایی که لینک انعطاف پذیر با کمترین ارتعاش به نقطه ی مطلوب نهایی دست یابد.

ورودی ها و خروجی های سیستم کنترلی در حالت کنترل PID و کنترل فازی، موقعیت ربات، خطا و مشتق خطا است به این صورت که موقعیت فعلی ربات توسط سنسورهای موتور و کابل رابط به متلب ارسال شده و ورودی کنترلی مناسب تولید می شود که این ورودی کنترلی نیز روی موقعیت تأثیر گذار است به این صورت که موتور مورد استفاده ورودی کنترلی را به PWM مناسب جهت کنترل موقعیت تبدیل می کند. در حالت کنترل گشتاور PID مرتبه کسری نیز به دلایلی از جمله اینکه کنترل موقعیت به تنهایی برای کنترل ربات انعطاف پذیر در برخی کاربردهای صنعتی کافی نیست، و لازم است نیرو و یا گشتاور نیز کنترل شود، از گشتاور موتور فیدبک گرفته می شود و ورودی کنترلی این گشتاور را تحت تأثیر قرار می دهد و نهایتاً موتور با PWM مناسب، ربات را به حرکت در می آورد. کنترل گشتاور PID مرتبه کسری به این صورت عمل می کند که گشتاور فعلی از موتور به متلب فیدبک شده و کنترل کننده ورودی کنترلی مناسب را تولید کرده و مجدداً به موتور ارسال می کند که در این حالت ورودی کنترلی بر روی گشتاور تولیدی موتور تأثیر گذار است و در حقیقت برای کنترل موقعیت ربات، گشتاور تولیدی موتور کنترل شده و به PWM تبدیل می شود.

در این پژوهش به مدل دینامیکی تئوری موتور نیازی نیست، زیرا به جای استفاده از مدل دینامیکی تئوری موتور و شبیه سازی آن در محیط متلب، که اغلب با تقریب بدست می آید و دقیقاً با سیستم واقعی موتور همخوانی ندارد، مستقیماً از خود موتور و سیستم واقعی (دقیق) استفاده شده

جدول 2 پارامترهای کنترل کننده ها

Table 2 Controllers parameters

کنترل کننده	v_I	k_I	v_D	k_D	v_P	k_P
کنترل PI	---	1	---	0	---	0.1
کنترل گشتاور PID مرتبه کسری	0.99	10	0.01	0.1	0	100

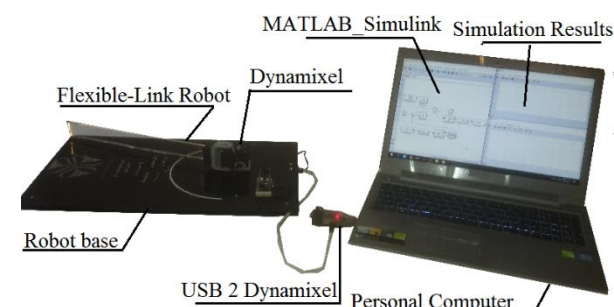


Fig. 7 Fabricated single flexible-link robot and its control system

شکل 7 ربات تک لینکی انعطاف پذیر ساخته شده و سیستم کنترلی آن

¹ USB2Dynamixel

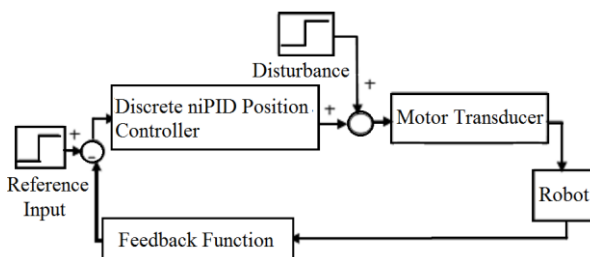


Fig. 6 Fractional order PID torque control simulation in Simulink

شکل 6 شبیه سازی کنترل گشتاور PID مرتبه کسری در محیط سیمولینک

کنترل کننده مرتبه کسری جدید ارائه شد و ابتدا اثبات پایداری کنترل کننده پیشنهادی به صورت تئوری انجام شد و سپس به صورت عملی در بخش 4 پیاده سازی می گردد.

علاوه بر اثبات پایداری در حالت تئوری، در حالت عملی نیز سیستم پایدار بوده و در مقابل اغتشاشات نیز پایداری مقاوم دارد. اثبات پایداری تنها بصورت تئوری بدون در نظر گرفتن مشکلات و قیود عملی در موقع پیاده سازی عملی با مشکل مواجه خواهد شد. برای مثال در حالت شبیه سازی تنها، اگر به یک موتور با ولتاژ نامی 12 v در محیط شبیه سازی یک ولتاژ با مقدار 120 v هم اعمال شود در ظاهر مشکلی پیش نخواهد آمد سیستم در محیط شبیه سازی به کار خود ادامه خواهد داد ولی در حالت عملی این امر امکان پذیر نیست و همواره محدودیت ها و چالش هایی برای پیاده سازی عملی وجود دارد. علی الخصوص ربات انعطاف پذیر که با وجود خاصیت الاستیسیته ربات و ارتعاشات زیاد نوک ربات، کنترل آن در عمل کار بسیار مشکلی است. در مقاله حاضر در پیاده سازی عملی، ربات پایدار است و علاوه بر این مورد، پایداری مقاوم کنترل کننده ها در عمل در مقابل اغتشاش در ادامه بررسی خواهد شد.

البته ذکر این نکته ضروری است که کنترل کننده ی پیشنهادی فقط برای این سیستم کنترلی و تحت شرایط خاصی امکان پذیر است که این شرایط خاص شامل تابع اشباع ورودی، موقعیت بازوی ربات و غیره می باشند. در حقیقت در این پژوهش دو تابع اشباع استفاده شده است که یکی از آنها مربوط به محدود کردن موقعیت و زوایای لینک ربات است چرا که موتور مورد استفاده قابلیت چرخش کامل را ندارد و موانعی مثل کابل اتصال نیز در سر راه لینک حضور دارند به همین دلیل مقدار حداقل و حداکثری برای چرخش ربات در نظر گرفته شده است که ربات آسیب نبیند و محدودیت های موتور نیز جبران شود. اشباع بعدی نیز مربوط به ورودی کنترلی است همان طور که قبلاً توضیح داده شد در حالت عملی محدودیت هایی وجود دارد به همین دلیل در محیط شبیه سازی محدودیتی در این خصوص که ورودی کنترلی نباید بیش از یک حد مشخص تولید شود، تعریف شده است. به همین دلیل باید یک مقدار مناسب برای تابع اشباع در نظر گرفته شود که هم کنترل سیستم امکان پذیر باشد و هم در حالت عملی بتوان آن را به سیستم اعمال کرد.

4- نتایج آزمایشگاهی

4-1- نتایج پیاده سازی عملی کنترل کننده ها بدون حضور نویز و اغتشاش

با در نظر گرفتن مقادیر مناسب برای پارامترهای هر کنترل کننده به صورت جدول 2 و تعریف مناسب ورودی و خروجی ها طبق توضیحات بخش 3 نمودارهای خطا، مجموع قدرمطلق خطا و ورودی کنترلی هر کنترل کننده

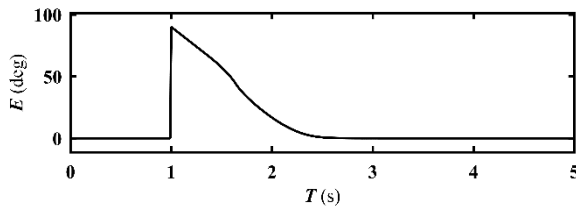


Fig. 10 Position error for fuzzy controller

شکل 10 خطای موقعیت کنترل کننده فازی

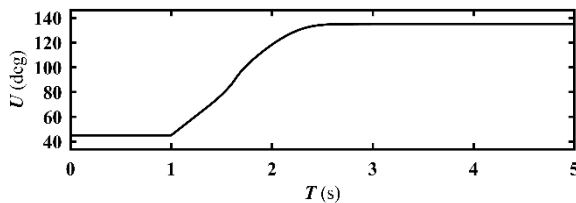


Fig. 11 Control signal for fuzzy controller

شکل 11 سیگنال کنترل برای کنترل کننده فازی

مطلوب، در طول مسیر با کنترل گشتاور باعث حرکت نرم تر ربات می گردد. همان گونه که مشاهده می گردد ورودی کنترلی چترینگ¹ ندارد و با اصلاح ضرایب کنترلی مقدار بالازدگی ورودی کنترلی کاهش داشته است. با توجه به اینکه زاویه مطلوب برابر 135 درجه و زاویه نهایی ربات پس از کنترل 134 درجه بوده است، مقدار خطا نیز کاهش یافته است.

4-1-4- مقایسه‌ی نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی کنترل کننده‌ها

در شکل‌های 14 و 15 به ترتیب مقادیر خطا و ورودی‌های کنترلی حاصل از کنترل کننده‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل 14 مشاهده می گردد که خطای حاصل از کنترل گشتاور PID مرتبه کسری کمترین مقدار را دارد و همچنین سرعت همگرایی به خطای صفر در این حالت بیشتر از سایر کنترل کننده‌هاست. با توجه به شکل 15 ورودی کنترلی نیز در حالت کنترل گشتاور PID مرتبه کسری دارای مقدار مناسب بوده و همچنین چترینگ

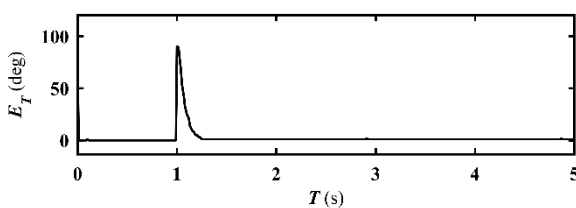


Fig. 12 Position error for fractional order PID torque control

شکل 12 خطای موقعیت کنترل گشتاور PID مرتبه کسری

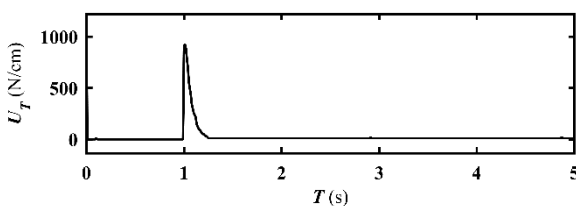


Fig. 13 Control signal for fractional order PID torque control

شکل 13 سیگنال کنترل برای کنترل گشتاور PID مرتبه کسری

است. یک مزیت دیگر این پژوهش آن است که نیازی به مدل دقیق دینامیکی موتور نیست زیرا مدل دینامیکی سیستم و موتور هر چقدر هم که دقیق باشد باز هم یک تقریب مدل سازی ریاضی است و از بسیاری از دینامیک‌های فرکانس بالا و غیره در آن صرف نظر می شود و نسبت به سیستم واقعی آن تفاوت‌ها و شاید نامعینی‌هایی دارد، به همین دلیل مطمئناً استفاده از خود ربات دقیق تر بوده و عملکرد صحیح تری را نتیجه خواهد داد.

ورودی کنترلی به ربات در حالت تئوری و شبیه سازی ولتاژ یا جریان در نظر گرفته می شود و روابط بررسی می گردند ولی در اغلب موارد در پیاده سازی عملی به جای استفاده مستقیم از ولتاژ، جریان یا گشتاور از PWM استفاده می گردد که در حقیقت عملکردی مشابه به افزایش یا کاهش ولتاژ دارد. ورودی کنترلی تولید شده در متلب توسط کابل رابط به موتور داده می شود و موتور طبق برنامه‌ای که برای کنترل موقعیت آن دارد این ورودی را تبدیل به PWM مورد نیاز خود کرده و فیدبک‌های مورد نیاز را به متلب ارسال می کند.

1-1-4- نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی کنترل کننده PI

شکل‌های 8 و 9 به ترتیب نشان دهنده خطا و ورودی کنترلی حاصل شده از کنترل کننده PI هستند. همان طور که مشاهده می گردد قانون کنترل مقدار مناسبی دارد و دارای لرزش نیست، ولی با توجه به اینکه زاویه مطلوب برابر 135 درجه و زاویه نهایی ربات پس از کنترل 132.7 درجه بوده است، خطای موقعیت نسبتاً زیاد است.

2-1-4- نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی کنترل کننده فازی

شکل‌های 10 و 11 نیز به ترتیب نشان دهنده خطا و ورودی کنترلی حاصل شده از کنترل کننده فازی هستند. مشاهده می گردد در این حالت نیز قانون کنترل مقدار مناسبی دارد و دارای لرزش نیست، خطا نیز نسبت به کنترل کننده PI کمتر شده است و دستیابی به زاویه مطلوب مناسب تر است.

3-1-4- نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی کنترل گشتاور PID مرتبه کسری

شکل‌های 12 و 13 نتایج حاصل از کنترل گشتاور PID مرتبه کسری را نشان می دهند. همان طور که ملاحظه می گردد موتور پس از دریافت موقعیت

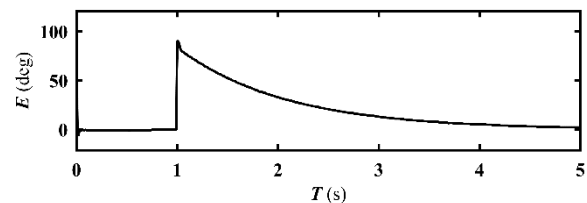


Fig. 8 Position error for PI controller

شکل 8 خطای موقعیت کنترل کننده PI

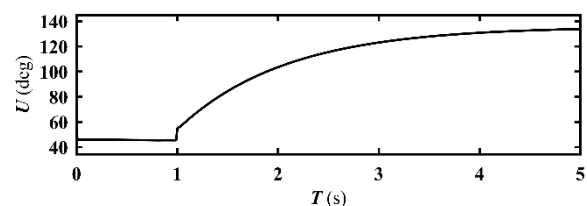


Fig. 9 Control signal for PI controller

شکل 9 سیگنال کنترل برای کنترل کننده PI

¹ Chattering

اعمال شده و سپس عملکرد کنترل کننده‌ها در حضور اغتشاش ثبت و مقایسه می‌گردد.

1-2-4- نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی کنترل کننده PI

شکل‌های 16 و 17 به ترتیب نشان دهنده خطا و ورودی کنترلی حاصل شده از کنترل کننده PI در حضور اغتشاش ثابت هستند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در این حالت نیز قانون کنترل مقدار مناسبی دارد و دارای لرزش نیست، ولی خطای موقعیت نسبتاً زیاد است.

2-2-4- نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی کنترل کننده فازی

شکل‌های 18 و 19 نیز به ترتیب نشان دهنده خطا و ورودی کنترلی حاصل شده از کنترل کننده فازی در حضور اغتشاش ثابت هستند. مشاهده می‌گردد در این حالت نیز قانون کنترل مقدار مناسبی دارد و دارای لرزش نیست، خطا نیز نسبت به کنترل کننده PI کمتر شده است و دستیابی به زاویه مطلوب مناسب‌تر است، به عبارت دیگر کنترل کننده در برابر اغتشاش

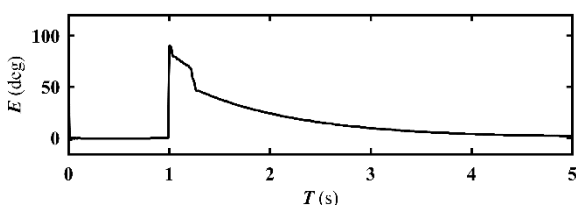


Fig. 16 Position error for PI controller in presence of disturbance

شکل 16 خطای موقعیت کنترل کننده PI در حضور اغتشاش

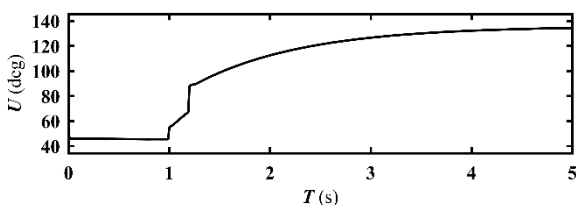


Fig. 17 Control signal for PI controller in presence of disturbance

شکل 17 سیگنال کنترل برای کنترل کننده PI در حضور اغتشاش

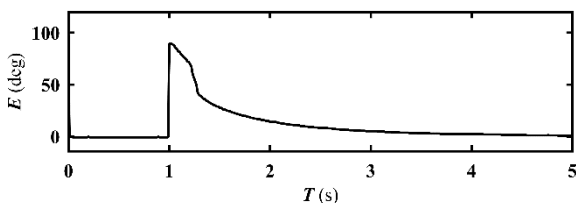


Fig. 18 Position error for fuzzy controller in presence of disturbance

شکل 18 خطای موقعیت کنترل کننده فازی در حضور اغتشاش

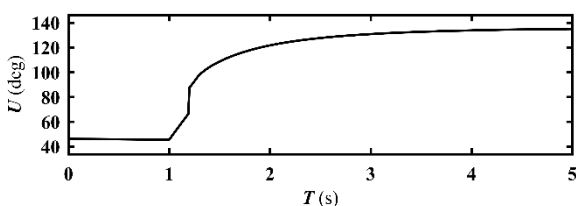


Fig. 19 Control signal for fuzzy controller in presence of disturbance

شکل 19 سیگنال کنترل برای کنترل کننده فازی در حضور اغتشاش

پایینی دارد که در پیاده‌سازی عملی مناسب بوده و بهترین عملکرد را دارد. جدول 3 مجموع قدر مطلق خطای موقعیت را در طول زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بیانگر این است که بهترین عملکرد مربوط به کنترل گشتاور PID مرتبه کسری است.

2-4- نتایج پیاده‌سازی عملی کنترل کننده‌ها با اعمال اغتشاش ثابت

در این بخش برای مقایسه کنترل کننده‌های طراحی شده از نظر مقاوم بودن، یک اغتشاش ثابت و یکسان پله‌ای با مقدار 10 واحد در ثانیه‌ی 1.2 به ربات

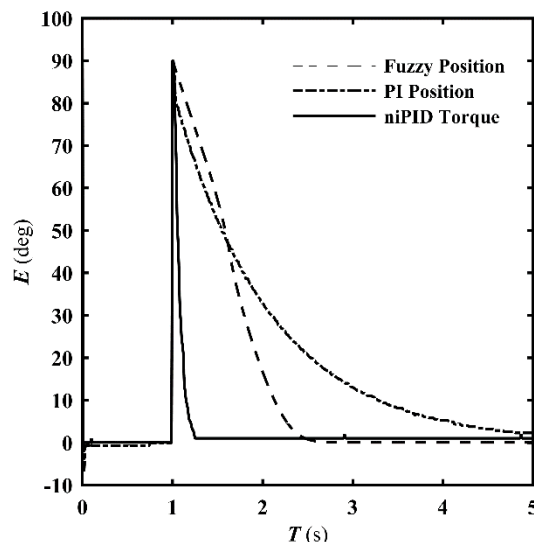


Fig. 14 Controllers position error comparison

شکل 14 مقایسه‌ی خطای موقعیت کنترل کننده‌ها

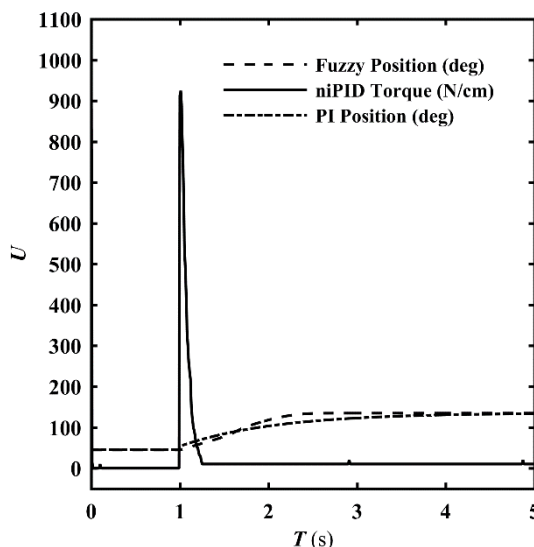


Fig. 15 control signals of different controllers

شکل 15 سیگنال کنترل برای کنترل کننده‌های مختلف

جدول 3 مجموع قدر مطلق خطای موقعیت برای کنترل کننده‌های مختلف

Table 3 Sum of absolute position error for different controllers

مجموع قدر مطلق خطای موقعیت (deg)	کنترل کننده
8984	کنترل PI
3014	کنترل فازی
1252	کنترل گشتاور PID مرتبه کسری

عملکرد مطلوبی دارد.

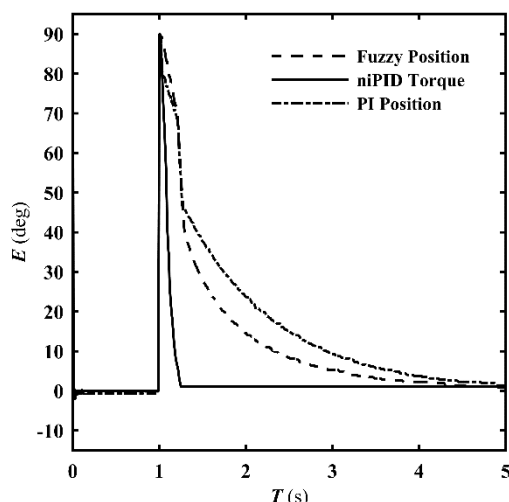


Fig. 22 Controllers position error comparison in presence of disturbance

شکل 22 مقایسه‌ی خطای موقعیت کنترل کننده‌ها در حضور اغتشاش

کنترل این نوع ربات‌ها دشوار و پیچیده است. در این مقاله کنترل کننده‌های مختلف از جمله کنترل کننده فازی، کنترل کننده PI و کنترل گشتاور PID مرتبه کسری به صورت عملی در آزمایشگاه برای ربات ساخته شده، پیاده‌سازی و عملکرد هر یک از آنها در کاهش ارتعاشات بازو و کاهش خطای ردیابی بررسی گردید. با مقایسه‌ی نحوه‌ی عملکرد کنترل کننده‌های مختلف از جمله کنترل کننده فازی، کنترل کننده PI و کنترل کننده‌ی گشتاور PID مرتبه کسری مشاهده شد که خطای موقعیت در حالت پیاده‌سازی عملی کنترل کننده فازی و کنترل گشتاور PID مرتبه کسری نسبت به کنترل کننده‌ی PI پایین‌تر بوده و ورودی کنترلی هموارتر است و چترینگ کمتری دارد. همچنین در حالت اعمال اغتشاش ثابت و یکسان به کنترل کننده‌ها نیز مشاهده گردید که عملکرد کنترل گشتاور PID مرتبه کسری برای ربات تک لینک انعطاف پذیر ساخته شده مناسب تر است.

6- فهرست علائم

L	بزرگ
M	متوسط
N	منفی
P	مثبت
S	کوچک
U	قانون کنترل

7- مراجع

- [1] D. Valerio, J. Sadacosta, *Fractional Order Control of a Flexible Robot*, Lisbon, Portugal, Department of Mechanical Engineering, GCAR, 2004.
- [2] H. Delavari, P. Lanusse, J. Sabatier, Fractional order controller design for a flexible link manipulator robot, *Asian Journal of Control*, Vol. 15, No. 3, pp. 783-795, May 2002.
- [3] J. Lin, Hierarchical fuzzy logic controller for a flexible link robot arm performing constrained motion tasks, *International Journal of Control Theory and Applications*, Vol. 150, No. 4, pp. 2-7, July 2003.
- [4] J. Lin, F. L. Lewis, Fuzzy controller for flexible-link robot arm by reduced-order techniques, *Journal of Luoyang Institute of Technology*, Vol. 147, No. 3, pp. 79-81, May 2002.
- [5] A. Jnifene, W. Andrews, Experimental study on active vibration control of a single-link flexible manipulator using Tools of fuzzy logic and neural networks, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 54, No. 3, pp. 1200-1208, June 2005.
- [6] V. G. Moudgal, K. M. Passino, Rule-based control for a flexible-link robot,

3-2-4- نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی کنترل گشتاور PID مرتبه کسری شکل‌های 20 و 21 نتایج حاصل از کنترل گشتاور PID مرتبه کسری را در حضور اغتشاش نشان می‌دهند. ملاحظه می‌گردد کنترل گشتاور موتور باعث حرکت نرم‌تر ربات در طول مسیر می‌گردد و از سوئی دیگر ورودی کنترلی چترینگ نداشته و همچنین مقدار خطا کاهش یافته است.

4-2-4- مقایسه‌ی نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی کنترل کننده‌ها

در شکل 22 مقادیر خطای حاصل از کنترل کننده‌ها در حضور اغتشاش ثابت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل 22 مشاهده می‌گردد که خطای حاصل از کنترل گشتاور PID مرتبه کسری در حضور اغتشاش نیز کمترین مقدار را دارد و همچنین سرعت همگرایی به خطای صفر در این حالت نیز بیشتر از سایر کنترل کننده‌هاست. مقایسه شکل‌های ورودی کنترلی نیز در حالت کنترل گشتاور PID مرتبه کسری در حضور اغتشاش ثابت دارای مقدار مناسب و همچنین بدون چترینگ است که در پیاده‌سازی عملی مناسب بوده و بهترین عملکرد را به دست می‌دهد. جدول 4 مجموع قدر مطلق خطای موقعیت در حضور اغتشاش ثابت را در طول زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بیانگر این است که در حضور اغتشاش بهترین عملکرد مربوط به کنترل کننده گشتاور PID مرتبه کسری است.

5- نتیجه گیری

با توجه به غیرخطی بودن سیستم ربات انعطاف پذیر و ارتعاشات بالای آن

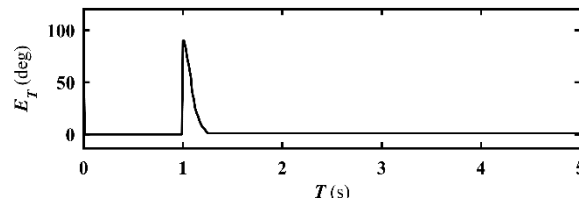


Fig. 20 Position error for fractional order PID torque control in presence of disturbance

شکل 20 خطای موقعیت کنترل گشتاور PID مرتبه کسری در حضور اغتشاش

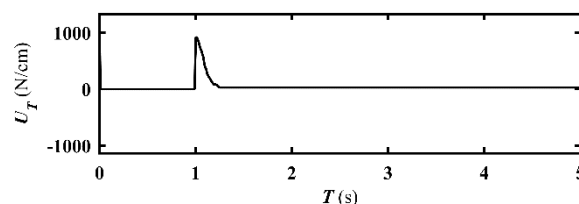


Fig. 21 Control signal for fractional order PID torque control in presence of disturbance

شکل 21 سیگنال کنترل برای کنترل گشتاور PID مرتبه کسری در حضور اغتشاش

جدول 4 مقایسه‌ی مجموع قدر مطلق خطای موقعیت در حضور اغتشاش

Table 4 Sum of absolute position error comparison in presence of disturbance

کنترل کننده	مجموع قدر مطلق خطای موقعیت (deg)
کنترل PI	2601
کنترل فازی	3173
کنترل گشتاور PID مرتبه کسری	1204

- of disturbance, *13th Annual Conference of Mechanical*, Isfahan, Iran, May 15-17, 2005. (in Persian فارسی)
- [19] P. Zarafshan, S. A. A. Moosavian, Adaptive hybrid suppression control using piezoelectric patches on flexible solar panels, *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Budapest, June 2-5, 2011.
- [20] M. R. Faieghi, H. Delavari, D. Baleanu, Anovel adaptive controller for two-degree of freedom polar robot with unknown perturbations, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 17, No. 2, pp. 1021-1030, 2012.
- [21] R. Roohi Ardeshiri, S. M. Ghadami, Analysis performance of a fractional PID-Fuzzy controller for a 2-DOF robot link, *2th National Conference of Engineering Sciences*, Tonekabon, Iran, May 13-14, 2015. (in Persian فارسی)
- [22] H. F. Ghavidel, A. A. Kalat, Observer-based hybrid adaptive fuzzy control for affine and nonaffine uncertain nonlinear systems, *Neural Computing and Applications*, <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2732-7>, 2016.
- [23] H. F. Ghavidel, Robust control of large-scale nonlinear systems by a hybrid adaptive fuzzy observer design with input saturation, *Soft Computing*, <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2699-z>, 2017.
- [24] J. Lin, F. L. Lewis, A symbolic formulation of dynamic equations for a methodology for flexible link arm control, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 13, No. 5, pp. 454-466, 1994.
- [25] J. Lin, F. L. Lewis, Enhanced measurement and estimation methodology for flexible link arm control, *Journal of Robotics Systems*, Vol. 11, No. 5, pp. 367-385, 1994.
- [26] M. Navabi, P. Roozgard, Nonlinear fault-tolerant flight control for a transport aircraft in presence of actuators fault and failure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 209-220, 2015. (in Persian فارسی)
- [27] Kh. Alipour, S. A. A. Moosavian, Y. Bahramzadeh, Dynamics of wheeled mobile robots with flexible suspension: analytical modelling and verification, *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 23, No. 4, pp. 242-250, 2008.
- [28] ROBOTIS e-Manual v1.25.00, Instruction Packet, 2010; http://www.support.robotica.com/en/product/dynamixel/communication/dxl_pac/.
- [29] ROBOTIS e-Manual v1.25.00, Kind of Instruction, 2010; http://www.support.robotica.com/en/product/dynamixel/communication/dxl_ins/.
- [30] ROBOTIS e-Manual v1.25.00, Data Sheet, 2010; <http://www.support.robotica.com/en/product/dynamixel/communication/>.
- [31] D. Pedro Mata de Oliveira Valério, Ninteger v.2.3 Fractional control toolbox for MATLAB, Lisboa, Universidade Technical, 2005.
- IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 392-405, December 1994.
- [7] V. G. Moudgal, W. Andrew Kwong, K. M. Passino, fuzzy learning control for a flexible-link robot, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 199-210, May 1995.
- [8] J. F. Peza-Solis, G. Silva-Navarro, N. R. Castro-Linares, Trajectory tracking control in a single flexible-link robot using finite differences and sliding modes, *Journal of Applied Research and Technology*, Vol. 13, No. 1, pp. 70-78, February 2015.
- [9] P. Zarafshan, S. A. A. Moosavian, Adaptive hybrid suppression control of a wheeled mobile robot with flexible solar panels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 130-143, 2014. (in Persian فارسی)
- [10] M. Habibejad Korayem, N. Yousefi Lademakhi, S. Rafee Nekoo, The SDRE controller and estimator design for flexible joint manipulators in presence of noise and disturbance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 1-12, 2016. (in Persian فارسی)
- [11] H. R. Taghirad, M. A. Khosravi, Stability analysis of a robust linear controller for flexible joint robots, *Journal of Faculty of Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 15-25, 2008. (in Persian فارسی)
- [12] M. Salehi, A. Nikoobin, Optimal trajectory planning of flexible joint manipulator: Maximum load carrying capacity-minimum vibration, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 14, pp. 68-80, 2013. (in Persian فارسی)
- [13] M. Ghayour, A. Ahmadi, Control a two link planar flexible robot with rotary joints, *16th International Conference of Mechanical Engineering*, Kerman, Iran, May 13-15, 2008. (in Persian فارسی)
- [14] M. M. Fateh, M. Souzanchi Kashani, A. A. Arab, Sliding mode fuzzy control for flexible-joint robot manipulators, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 4, pp. 23-32, 2014. (in Persian فارسی)
- [15] S. Kv, M. Pala Prasad reddy, Precise nonlinear modeling of flexible-link joint manipulator, *Article in International Review and Modelling and Simulation*, Vol. 5, No. 3, pp. 1368-1374, June 2012.
- [16] A. Ebrahimi, S. A. A. Moosavian, Dynamics of space free-flying robots with flexible appendages, *Iranian Journal of Science and Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 29-36, 2008. (in Persian فارسی)
- [17] P. Zarafshan, S. A. A. Moosavian, Rigid-flexible interactive dynamics modelling approach, *Journal of Mathematical and Computer Modelling of Dynamics Systems*, Vol. 18, No. 2, pp. 1-25, 2011.
- [18] A. Alfí, M. R. Jahedmotlagh, M. Farrokhi, Controlling performance of a single link flexible-joint robot with performing in vertical plane in presence