

کنترل تطبیقی عملگر الاستیکی چرخشی سری مفصل زانو در حضور عدم قطعیت

علی کارساز
مؤسسه آموزش عالی خراسان
مشهد، ایران
a_karsaz1@yahoo.com

هادی صباغی کندری
مؤسسه آموزش عالی خراسان
مشهد، ایران
Hadi.sab2015@gmail.com

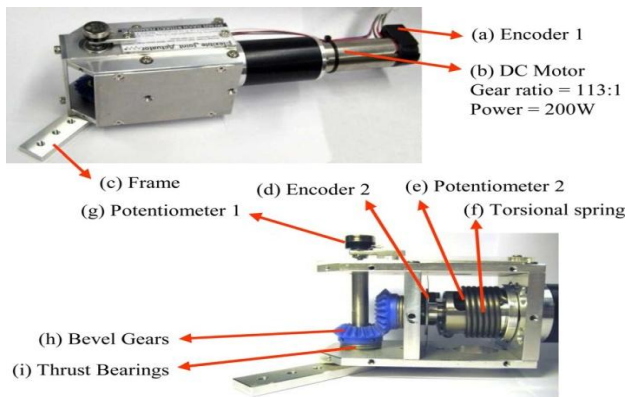
مرصع مهدوی مجد
مؤسسه آموزش عالی خراسان
رامسر، ایران
Morassa_mahdavi@yahoo.com

با توجه به پیشرفت روزافزون عملگرهای الاستیکی که در تعامل با انسان می‌باشند کاربرد آن در سیستم‌های توانبخشی گسترش یافته است. این عملگرها در حالت گشتاور یا نیرو کنترل می‌گردند اما به دلیل داشتن مقاومت (اصطکاک) ذاتی مکانیکی، خاصیت غیرخطی دارند. در حالت طبیعی این اصطکاک غیرخطی یک مانع در کنترل بهینه آنها محسوب می‌شود. تاکنون عملگرهای الاستیکی سری در مدل‌های مختلفی معرفی شده اند [۱-۳].

کنترل عملگرهای الاستیکی توسط این اصطکاک غیرخطی در سیستم‌های موتور گیربکس‌دار و مدل‌هایی که دارای عدم قطعیت هستند به چالش کشیده می‌شوند [۵].

چکیده — امروزه رباتها به خصوص عملگرهای الاستیکی در مصارف توانبخشی انسانی کاربردهای گسترده‌ای یافته‌اند که باید گشتاور دقیق و مطلوبی را تولید کنند. در این عملگرها بارهای مقاومتی غیرخطی ذاتی بوده، گشتاور تولیدی را به چالش می‌کشند که می‌بایست کنترل مناسبی را جهت تولید گشتاور دقیق عملگر طراحی نمود. عملگر مورد استفاده در مفصل زانوی انسان نصب می‌گردد و با توجه به زاویه حرکت مطلوب پا، موتور به کار رفته در مفصل کنترل می‌گردد. در روش‌های متداول همچون مدل لغزشی پارامترهای عدم قطعیت محدودی در نظر گرفته شد ولی در این مقاله تعداد عدم قطعیت‌های پارامتری بیشتری لحاظ شده است. در اینجا روش پیشنهادی شامل حلقه فیدبک خطی ساز و کنترل تطبیقی بوده که با وجود فاکتورهای غیرخطی و عدم قطعیت در مدل به کار گرفته شده اند و نتایج حاصل همراه با عدم قطعیت در پارامترهای سیستم نسبت به روش‌های متداولی مانند مدل لغزشی بهبود قابل توجهی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: عملگر الاستیکی، کنترل تطبیقی، کنترل غیرخطی.



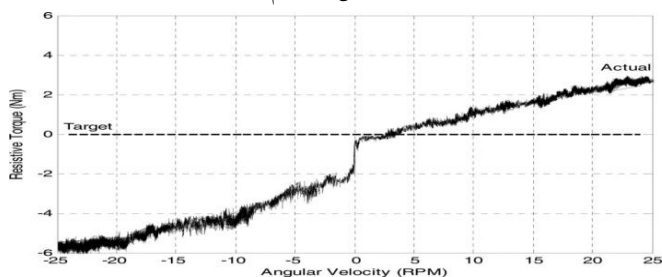
شکل ۱ یک عملگر الاستیکی چرخشی

گشتاور تولیدی بوسیله موتور DC گیربکس دار و گشتاور مقاومتی غیرخطی بوسیله گیربکس کاهنده تولید می گردد. این گشتاور مقاومتی غیرخطی برای عملگر در تعامل با انسان و ربات مشخصه غیرقابل قبولی می باشد که باید آن را جبران نمود.

معادله گشتاور کولمب برحسب زاویه به صورت زیر مدل می گردد:

$$\tau_{res} = a_1 + a_2 \text{sign}(\dot{\theta}_M) + a_3 \dot{\theta}_M \quad (1)$$

که a_1 و a_2 و a_3 به ترتیب ضرایب بایاس، اصطکاک غیر خطی و ضربه گیر خطی می باشد. نمودار گشتاور مقاومتی کولمب برحسب سرعت زاویه ای موتور در شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۲ گشتاور مقاومتی غیر خطی موتور

در این مقاله کنترل تطبیقی جهت جبران عدم قطعیت و بهبود و پاسخ خروجی پیشنهاد می گردد، تا گشتاور تولیدی مقدار مطلوبی را دنبال کند. در بخش ۳ ابتدا به بررسی پیشنهادات مرجع [۵] پرداخته و سپس در بخش ۵ پیشنهادات خود را به همراه بهبودهای پاسخ بیان می کنیم.

۲.۱. مدل سیستم:

طبق مدل شکل ۳، معادلات سیستم به شکل زیر است [۵]:

در [۶] روش مشاهده گر اغتشاش (DOB) بکار می رود تا باعث شود عملگر به طور سریع گشتاور مطلوب در وضعیت های مختلف تولید کند و از یک کنترل PD، با اعمال روش LQ استفاده گردید، ولی روش اصلی مقاله کنترل فیدبک نیرو می باشد که بوسیله آن گشتاور خروجی را کنترل می نماید.

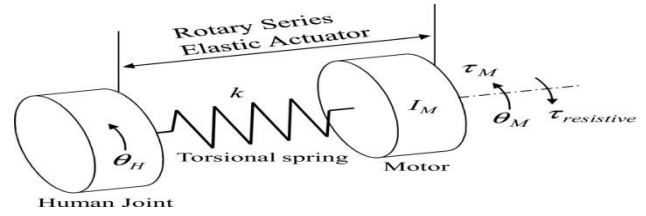
در [۱] با در نظر گرفتن مدل ساده ای از یک عملگر الاستیکی، قدرت خروجی به کمک یک منبع نیرو با پهنای باند محدود بالا برده می شود.

در [۵] یک فیدبک خطی ساز جهت پس زدن اصطکاک کولمب ذاتی بکار گرفته شده پس با فرض یک عدم قطعیت پارامتر در اینرسی موتور روش فیدبک خطی ساز کنار گذاشته شده و از یک کنترل کننده مد لغزشی جهت غلبه بر عدم قطعیت و غیرخطی بودن سیستم بهره گیری شده است. در روش پیشنهادی این مقاله سه عدم قطعیت و سیستم لحاظ شده فیدبک خطی ساز به منظور پس زدن عامل غیر خطی بکار می رود و عدم قطعیت را بوسیله چند حلقه کنترل تطبیقی تخمین زده و نهایتاً به کمک مدل مرجع گشتاور خروجی مطلوب تولید می گردد.

این مقاله شامل ۴ بخش می باشد که به ترتیب به تعریف مسئله، کنترل ارائه شده توسط [۵] و نتایج آن، روش پیشنهادی و کنترل های لازم، نتایج و مقایسه با [۵] پرداخته می شود.

۲. تعریف مسئله

عملگر الاستیکی مورد استفاده از نوع چرخشی می باشد و دارای یک موتور DC، یک فنر چرخشی و دو انکدر که یکی در پای انسان و دیگری در اطراف موتور نصب می گردد. فنر چرخشی به طور مستقیم بین مفصل انسان و موتور در طراحی عملگر الاستیکی چرخشی نصب می شود و برای تولید گشتاور مطلوب به کار می رود. موقعیت موتور DC به جهت داشتن انحراف درست فنر و تولید گشتاور مطلوب توسط فنر، کنترل می گردد. طرحی از عملگر الاستیکی در شکل ۱ نشان داده شده و جزئیات آن در [۶] بیان گردیده است.



شکل ۳: شماتیک مفصل انسان و عملگر الاستیکی

$$I_M \ddot{\theta}_M = \tau_M(t) + k(\theta_H - \theta_M) - \tau_{res} \quad (2)$$

در مدل ارائه شده در [۵] پارامترهای I_M اینرسی موتور، θ_H و θ_M به ترتیب زوایای موتور و مفصل انسان و همچنین k ثابت فنر و τ_{res} گشتاور مقاومتی غیرخطی می باشد. طبق شکل ۳، موتور و مفصل انسان به یکدیگر از طریق فنر با ثابت k متصل بوده و گشتاور فنر با اختلاف بین زاویه موتور و مفصل رابطه مستقیم خواهد داشت.

با توجه به مدل سیستم و تعریف پارامترهای فضای حالت $x_1 = \theta_M$ به عنوان زاویه حرکت موتور، $x_2 = \dot{\theta}_M$ سرعت زاویه ای موتور و $u = \tau_M$ گشتاور ورودی موتور می باشد.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{I_M} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{I_M} & \frac{K}{I_M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \theta_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I_M} \end{bmatrix} \tau_{res} \quad (3)$$

$$y = x_1$$

طبق رابطه (۱)، اصطکاک ذاتی، تابعی غیرخطی از سرعت زاویه ای موتور می باشد، بنابراین:

$$\tau_{res} = f(\dot{x}_2) \quad (4)$$

۳. کنترل گشتاور خروجی به روش مد لغزشی :

چنانچه در پارامترهای سیستم و مدل، عدم قطعیت یا دینامیک مدل نشده ای وجود داشته باشد می بایست خروجی را در مقابل این عدم قطعیت مقاوم کرد. در [۵] طرحی از یک مدل لغزشی جهت کنترل و افزایش مقاومت خروجی در مقابل عدم قطعیت پیشنهاد شده است. با توجه به خطای تعریف شده بر روی مدل ($E = \theta_M - \theta_H$)، مشتقات آن و خطای بین انحراف مطلوب و واقعی داریم:

$$\varepsilon = E - E_d = (\theta_M - \theta_H) - (\theta_{Md} - \theta_H) \Rightarrow \varepsilon = \theta_M - \theta_{Md} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن صفحه لغزش :

۴. روش پیشنهادی :

۴.۱ کنترل گشتاور موتور بدون عدم قطعیت (کنترل PD):

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) \varepsilon \quad (6)$$

$$\dot{S} = (\ddot{\theta}_M + \ddot{\theta}_{Md}) + \lambda(\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_{Md}) = f(x) + CE(x) + b(x)u \quad (7)$$

$$b = \frac{1}{I_M} \quad (8)$$

$$CE(x) = \lambda(\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_{Md}) \quad (9)$$

$$f(x) = -\frac{k}{I_M}x_1 - \frac{a_3}{I_M}x_2 - \frac{a_2}{I_M}\text{sgn}(x_2) - \frac{a_1}{I_M} + \frac{k}{I_M}\theta_H - \ddot{\theta}_{Md} \quad (10)$$

در [۵] با توجه به عدم قطعیت در $f(x)$ و $b(x)$ انحراف آن را می توان Δb و Δf در نظر گرفت و چنین نوشت :

$$f(x) = \hat{f}(x) + \Delta f(x) \quad (11)$$

$$b = \hat{b} + \Delta b \quad (12)$$

با اعمال قانون کنترل :

$$u = \frac{1}{\hat{b}(x)} \left[-\hat{f}(x) - CE(x) - k.\text{sgn}(s) \right] \quad (13)$$

به دلیل حدگیری $S=0$ یعنی روی صفحه لغزش پدیده چترینگ رخ داده است که از کنترل هموار لغزشی جهت حذف آن استفاده می گردد.

$$u = \frac{1}{\hat{b}(x)} \left[-\hat{f}(x) - CE(x) - k.\text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \right] \quad (14)$$

ϕ ضخامت لایه مرزی است [۵]. و جهت بهبود هر چه بیشتر پاسخ، ϕ با توجه به فاز حرکت تغییر می کند.

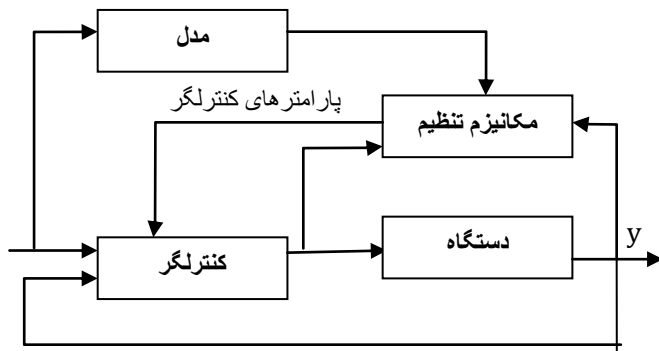
گشتاور خروجی توسط عملگر الاستیکی چرخشی تولید می گردد :

$$\tau = k(\theta_M - \theta_H) \quad (15)$$

با توجه به معادله فوق، زاویه مطلوب موتور به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\theta_{Md} = \frac{\tau_{Desired}}{k} + \theta_H \quad (16)$$

پسخور خطا که تفاوت بین خروجی سیستم و خروجی مدل مرجع است تغییر می کند.



شکل ۴ بلوک دیاگرام کنترل تطبیقی مدل مرجع

با انتخاب بردار کنترل v داریم:

$$v = v_1 + a_3 \dot{\theta}_M + k \theta_M \quad (22)$$

در این صورت داریم:

$$I_M \ddot{\theta}_M = v_1 \quad (23)$$

حال با تعریف معادله خطا و با در نظر گرفتن $y = \ddot{\theta}_M$ و $b = \frac{1}{I_M}$ و ورودی v_1 جهت تطبیق b :

$$e = \hat{y} - y = (\hat{b} - b)v_1 = \tilde{b}v_1 \quad (24)$$

که در اینجا $\hat{b}$ تخمین b می باشد.

قانون تنظیم پارامتر باتوجه به ورودی v_1 :

$$\frac{\partial e^2}{\partial \hat{b}} = 2ev_1 \quad (25)$$

$$\dot{\hat{b}} = \dot{b} = -\gamma \hat{b} v_1^2 \quad (26)$$

بعد از تخمین b می توان با اعمال آن به کنترلر اثر عدم قطعیت آن را حذف کرد. در اینجا پارامتر γ بهره تطبیق میباشد.

$$v_1 = \frac{v_2}{\hat{b}} \quad (27)$$

$$\ddot{\theta}_M = v_2 \quad (28)$$

با اعمال دو حلقه کنترلی دیگر می توان k و a_3 را تخمین زده و به کنترلر وارد نمود.

مدل مرجع را طوری در نظر میگیریم که قطب های مدل به طور انتخابی در -70 و -50 جابجایی شوند.

چنانچه سیستم را فقط با عامل غیر خطی و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت فرض کنیم کافی است با یک الگوریتم خطی سازی، سیستم را خطی و با اعمال یک کنترلر PD مناسب قطبهای سیستم حلقه بسته جدید را در مکان مطلوب جایابی نماییم.

۴,۱,۱. خطی سازی فیدبکی:

با توجه به [۵] یک کنترل غیرخطی در صورت نبود عدم قطعیت در سیستم اعمال و سیستم خطی سازی شده است.

$$\dot{y} = \dot{x}_1 = x_2 \quad (17)$$

$$\ddot{y} = \dot{x}_2 = -\frac{k}{I_M} x_1 + \frac{1}{I_M} u - \frac{\tau_{res}}{I_M} + K \frac{\theta_H}{I_M} = V \quad (18)$$

در صورتی که:

$$u = I_M (V + \frac{k}{I_M} x_1 + \frac{\tau_{res}}{I_M} - K \frac{\theta_H}{I_M}) \quad (19)$$

باشد.

۴,۲. کنترل گشتاور موتور به روش پیشنهادی (کنترل تطبیقی):

در این مقاله هدف کنترل عملگر الاستیکی با فرض عدم قطعیت در سه پارامتر I_M و a_3 و k می باشد تا گشتاور خروجی، گشتاور ورودی مطلوب را ردیابی کند. در اینجا یک حلقه کنترل غیر خطی جهت خطی سازی سیستم به کار رفته و در ادامه چند حلقه کنترل تطبیقی [۶] جهت تخمین سه پارامتر دارای عدم قطعیت و پاسخ مطلوب پیشنهاد می گردد.

۴,۲,۱. فیدبک خطی سازی:

با توجه به معادله (۲) وبا اعمال کنترل غیرخطی زیر:

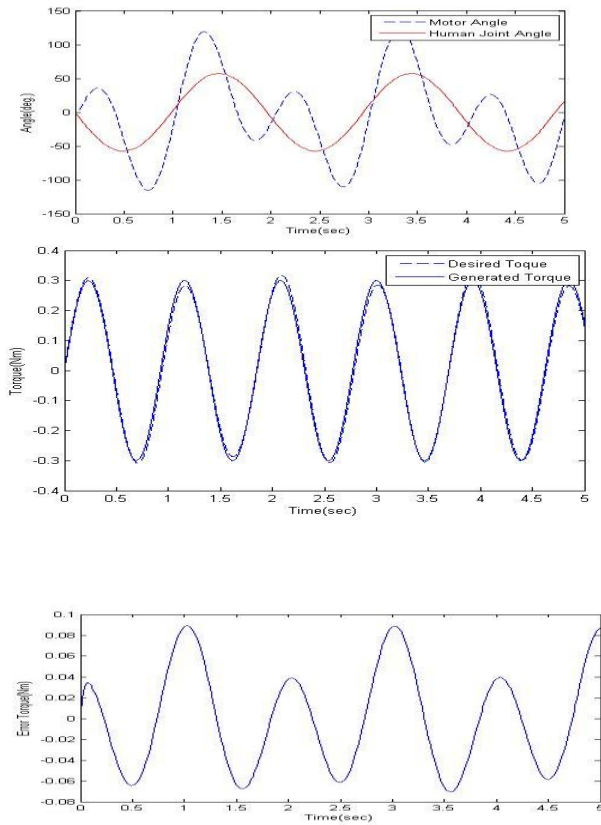
$$u = v + a_1 + a_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_M) - k \theta_H \quad (20)$$

معادله خطی شده دارای عدم قطعیت، بدین صورت می باشد:

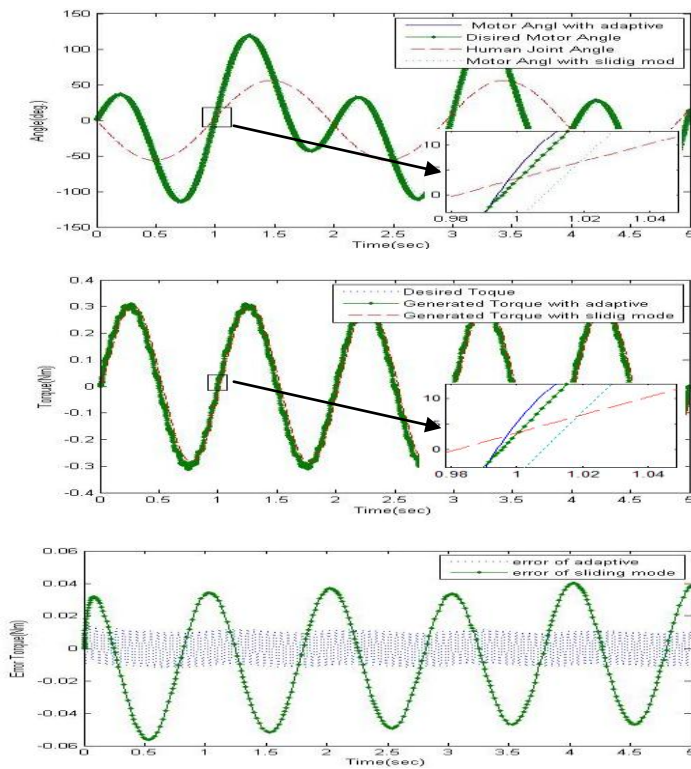
$$I_M \ddot{\theta} = v - a_3 \dot{\theta}_M - k \theta_M \quad (21)$$

۴,۲,۲ کنترل تطبیقی مدل مرجع:

کنترلر مدل مرجع (MRAS) یکی از کنترلر های مهم تطبیقی است [۶]. طبق بلوک دیاگرام پیشنهادی شکل (۴) سیستم دارای یک پسخور معمولی است که از فرآیند و کنترلر تشکیل شده است و یک حلقه پسخور دیگر که پارامترهای کنترلر را تغییر می دهد. پارامترها بر اساس



شکل ۶ شبیه سازی با اعمال کنترلر PD



شکل ۷ نتایج شبیه سازی با در نظر گرفتن θ_H و گشتاور مطلوب به صورت موج سینوسی

$$\frac{\theta_M}{\theta_{Md}} = \frac{c_2}{s^2 + c_1s + c_2} \quad (29)$$

که در اینجا ضرایب c_1 و c_2 به ترتیب جمع و ضرب دو قطب انتخابی می باشند.

با در نظر گرفتن حلقه کنترل بعدی جهت تخمین پارامتر a_3 داریم:

$$v_2 = c_1 v_3 + \ddot{\theta}_M - c_1 a_3 \dot{\theta}_M \quad (30)$$

با استفاده از ورودی v_3 پارامتر a_3 تخمین زده میشود $(\hat{a}_3)$:

$$v_3 = \hat{a}_3 v_4 \quad (31)$$

$$v_4 = c_2 v_5 + \dot{\theta}_M - c_2 k \theta_M \quad (32)$$

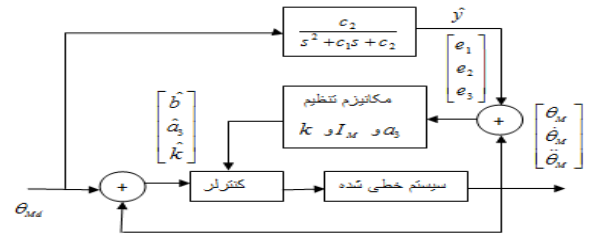
k نیز که ثابت فنر سیستم می باشد توسط ورودی v_5 تخمین زده میشود.

$$v_5 = \hat{k} v_6 \quad (33)$$

معادله حاصل به صورت مقابل می باشد:

$$\theta_M = v_6 \quad (34)$$

با انتخاب v_6 به عنوان θ_{Md} ، زاویه موتور مقدار مطلوب خود را ردیابی می نماید.



شکل ۵ بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترل شده

۵. نتایج شبیه سازی:

نتیجه آزمایش با در نظر گرفتن ورودی گشتاور با دامنه یک رادیان و فرکانس ۱ هرتز در شکل ۵ و ۶ مشخص شده است و همچنین θ_H نیز به عنوان ورودی دوم یک موج سینوسی دارای دامنه ۵۶ درجه و فرکانس ۰/۵ هرتز در نظر گرفته می شود

پارامتر I_M دارای متوسط یک کیلوگرم و عدم قطعیت ۱۰٪ و همچنین پارامتر a_3 متوسط آن طبق جدول ۱ و عدم قطعیت ۵٪ و ثابت فنر یعنی k نیز دارای متوسط ۰/۲۳ و عدم قطعیت ۵٪

جدول ۱ ضرایب گشتاور مقاومتی

ضرایب (واحد)	$a_1 (Nm)$	$a_2 (Nm)$	$a_3 (Nm/rads^{-1})$
مقدار	-۱/۵۰۹	۰/۹۵۷۲	۰/۱۴۱۴

۷. نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتم های کنترل غیر خطی جهت تولید گشتاور مطلوب با وجود عدم قطعیت در مدل و پارامتر و همچنین وجود اصطکاک مقاومتی غیرخطی ارائه شده است. برای تخمین عدم قطعیت کنترل تطبیقی اعمال شد و به کمک مدل مرجع گشتاور مطلوب از طریق حلقه های غیرخطی داخلی تولید گردید. نتایج حاصل از گشتاور خطا طبق جدول ۲ نشان می دهد که بهبود قابل توجهی در خروجی سیستم به کمک روش پیشنهادی نسبت به روش مد لغزشی حاصل می شود.

مراجع

- [1] Paluska,D.,and herr,h.,2006,"series Elasticity and Actuator power output,"in IEEE international conference on Robotics and Automation (ICRA),pp.1830-1833
- [2] pratt,J.kupp,B.and Morse,C.,2002,"series Elastic Actuators for High fidelity force control,"Industrial Robot:An International journal,29,pp.234-241
- [3] pratt,G.,and Williamson,M.,1995,"Series Elastic Actuators",in IEEE International conference on Intelligent Robots and systems,pp.399-406
- [4]Astrom,karl.j and Wittenmark.B,1934,"Adaptive control"
- [5] Bae.j,tomizuke.M,and kong.k,2011a,Gait phase-Based control for arotary series Elastic Actuator Assisting the knee joint in ASME Jornal of medical Derices,031010-6
- [6] Kong.k,Bae.j,and Tomi zuke.M,2009,"control of rotary series Elastic Actuator for ideal force –mode Actuation in human-robot Interaction Application",IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 14, NO. 1, FEBRUARY 2009

۶. تعریف خطا

با تعریف انواع مختلف خطا به صورت زیر می توان نتایج حاصل را مقایسه نمود:

۱-متوسط خطای مطلق (Mean Absolute Error)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \hat{x}_i| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_i| \quad (35)$$

که $\hat{x}_i$ مقدار تخمین x_i و $e = x_i - \hat{x}_i$ است.

۲- انحراف استاندارد خطا (Standard Deviation of error)

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [e_i - \bar{e}]^2} \quad (36)$$

$\bar{e}_i$ مقدار متوسط e_i می باشد.

۳- میانگین مربع خطا (mean square error)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (37)$$

جدول ۲ مقادیر خطای گشتاور خروجی

معیار خطا عنوان روش	STD(Nm)	MSE(Nm)	MAE(Nm)
مدل لغزشی	۰/۰۲۹۳	۰/۰۰۰۸۷۱۵	۰/۰۲۵۷
پیشنهادی	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۰۰۶۱۲	۰/۰۰۷۱
درصد بهبود	۷۳/۳۷	۹۲/۹۷	۷۲/۳۷