



کنترل مود لغزشی - فازی ربات با مفاصل انعطاف پذیر

محمد مهدی فاتح^{۱*}، مهدی سوزنجی کاشانی^۲ و علی اصغر عرب^۲

^۱ استاد، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

^۲ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۰۷/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۶

چکیده

ربات‌های با مفاصل انعطاف‌پذیر دارای دینامیک پیچیده‌ای هستند که ناشی از غیرخطی بودن، عدم قطعیت و انعطاف در مفاصل است. در روش کنترل مود لغزشی مرسوم برای ربات‌های با مفاصل انعطاف‌پذیر از راهبرد کنترل گشتاور استفاده می‌شود که دارای چند ایراد است. به خاطر پیچیدگی دینامیک ربات، قانون کنترل پیچیده شده و تعیین توابع محدودیت دشوار است. بعلاوه، دینامیک عملگرها در قانون کنترل دیده نمی‌شود که عملکرد کنترل را در سرعت‌های بالا تضعیف می‌نماید. پدیده لرزش کنترل نیز رخ می‌دهد که دینامیک‌های مدل نشده را تحریک می‌کند. برای غلبه بر این ایرادها، طرح جدید کنترل مود لغزشی-فازی ربات از نوع کنترل جداگانه هر مفصل در این مقاله ارائه می‌شود. این طرح از تخمین‌گر فازی تطبیقی برای تقریب تابع استفاده کرده و نیازمند محاسبه توابع محدودیت نمی‌باشد و پدیده لرزش کنترل را کاهش می‌دهد. هم‌چنین، از راهبرد کنترل ولتاژ استفاده می‌نماید که نسبت به راهبرد کنترل گشتاور، ساده‌تر و عملکرد بهتری دارد. نوآوری دیگر اینکه بجای روش مرسوم کنترل دو حلقه‌ای ربات از کنترل یک حلقه ای استفاده می‌شود. پایداری سیستم کنترل اثبات می‌شود و عملکرد روش کنترل پیشنهادی با روش کنترل فازی PI بهبود یافته مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی روی بازوی ربات هنرمند با مفاصل انعطاف‌پذیر برتری روش پیشنهادی را نشان داده می‌شود.

کلمات کلیدی: ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر؛ کنترل مود لغزشی-فازی؛ تخمین‌گر فازی تطبیقی؛ راهبرد کنترل ولتاژ.

Sliding mode fuzzy control for flexible-joint robot manipulators

M.M. Fateh^{1,*}, M. Souzanchi Kashani² and A.A. Arab²

¹ Prof. of Control Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

² M.Sc. of Control Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

Abstract

Flexible-joint robots have complex dynamics due to the nonlinearity, uncertainty, and flexibility in joints. The conventional sliding mode control for flexible-joint robots is based on the torque control strategy which has a few drawbacks. Because of complexity of the robot dynamics, the control law becomes complex and determining the bounding functions is difficult. In addition, dynamics of actuators are not considered in the control law; thereby the control performance is degraded. Moreover, the chattering problem occurs which excites the unmodeled dynamics. In order to overcome these problems, a novel sliding mode fuzzy control design for robots is presented in this paper. This design employs an adaptive fuzzy estimator for function approximation and has no need to calculate the bounding functions. The chattering phenomenon is reduced, as well. The controller is based on the voltage control strategy which is simpler and more effective than the torque control strategy. Another novelty is that the controller has only one control loop whereas the conventional control approach uses two control loops. Stability of the control system is proven and efficiency of the proposed control law and its superiority over the conventional sliding mode control are shown through simulations on the flexible-joint articulated robot manipulator.

Keywords: Flexible-joint robot; Sliding mode fuzzy control; Adaptive fuzzy estimator; Voltage control strategy

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر کنترل ربات‌های صلب به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است و اکثر کنترل‌کننده‌های ربات‌های صنعتی بر این مبنا طراحی می‌شوند. در اغلب کنترل‌کننده‌های قبلی، معادلات دینامیکی محرکه‌ها در نظر گرفته نشده که باعث ایجاد خطای دائمی و در بعضی موارد ناپایداری در سیستم می‌شود. از طرفی، ربات‌ها نیاز به گشتاور بالا و سرعت پایین دارند ولی موتورهای الکتریکی دارای گشتاور پایین و سرعت بالایی هستند. در نتیجه، موتورهای الکتریکی مجهز به سیستم انتقال نیرو می‌شوند. به دلیل وجود چرخ-دنده‌ها، پدیده انعطاف به وجود می‌آید. این پدیده منبع اصلی نوسانات در ربات‌های صنعتی است [۱]. همچنین از عوامل تأثیر گذار در پیچیدگی سیستم ربات محسوب می‌شود. استفاده از روش‌های کنترل ربات صلب برای ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر، ممکن است موجب ناپایداری گردد. پس، باید اثر انعطاف را برای بهبود کارایی کنترل‌کننده در نظر گرفت. مدل ربات‌هایی با مفاصل انعطاف‌پذیر بسیار پیچیده‌تر از ربات‌های صلب است و تعداد درجات آزادی آن‌ها دو برابر تعداد عملگرهای کنترلی است [۲]. به دلیل اینکه موقعیت رابط بطور مستقیم با موقعیت موتور در ارتباط نیست، کنترل آن‌ها بسیار مشکل و پیچیده است. بنابراین، روش‌های پیشرفته‌ای برای کنترل ربات‌های با مفاصل انعطاف‌پذیر ارائه شده است. به طور مثال از تکنیک‌هایی نظیر کنترل تطبیقی [۳ و ۴]، کنترل فازی [۵ و ۶]، شبکه عصبی [۷ و ۸]، کنترل مقاوم [۹]، کنترل امیدانس [۱۰ و ۱۱]، کنترل مود لغزشی [۱۲ و ۱۳] کنترل تناسبی-مشتقی-انتگرالی [۱۴]، کنترل گام به عقب [۱۵] استفاده شده است.

تمامی روش‌های مذکور، بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور هستند. یکی از ایرادهای آن، این است که در قانون کنترل از دینامیک ربات استفاده می‌شود. در نتیجه، محاسبات قانون کنترل، پیچیده و زیاد می‌شود. با توجه به حضور موتور‌ها در مواردی به دینامیک بخش مکانیکی موتور‌ها توجه شده است ولی در بسیاری موارد از دینامیک بخش الکتریکی موتور‌ها صرف نظر شده است [۱۶]. برای غلبه بر این مشکل‌ها، روش‌هایی بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ [۱۷] مانند کنترل مقاوم [۱۸]، کنترل تطبیقی [۱۹]، کنترل فازی نوع ۲ [۲۰] و کنترل فازی تطبیقی نوع ۲ [۲۱] ارائه شده است. در این

راهبرد، محرکه‌ها در نظر گرفته می‌شوند و ولتاژهای موتور‌ها همان ورودی‌های سیستم هستند. بعلاوه، قانون کنترل مستقل از معادلات سنگین ربات است و ربات به عنوان بار خارجی موتور عمل می‌کند.

از کنترل مود لغزشی برای کنترل ربات‌ها با مفاصل انعطاف‌پذیر استفاده شده است. اگرچه کنترل مود لغزشی یکی از روش‌های مقاوم کنترلی سیستم‌های غیر خطی نامعین است اما برای طراحی باید حدود عدم قطعیت‌ها معلوم باشد. همچنین سیگنال کنترل دارای لرزش است که در عمل مطلوب نیست. لرزش سیگنال کنترل موجب نوسان شدید، تنش بین قطعات مکانیکی، ارتعاش و تحریک "دینامیک‌های مدل نشده" می‌گردد. برای غلبه بر این ایرادها، طرح جدید کنترل مود لغزشی در این مقاله ارائه می‌شود. این طرح از تخمین‌گر فازی تطبیقی برای تقریب تابع استفاده کرده و نیازمند محاسبه توابع محدودیت نمی‌باشد و پدیده لرزش کنترل را کاهش می‌دهد.

روش مود لغزشی فازی پیشنهادی با روش‌های قبلی کاملاً متفاوت است. به عنوان مثال، در بسیاری از روش‌های مود لغزشی- فازی مانند [۲۵-۲۲] سیستم فازی برای معرفی سطح لغزش بکارگیری شده است. در بعضی موارد نیز از سیستم فازی برای تخمین حدود عدم قطعیت یا تعیین ضرایب کنترل‌کننده استفاده شده است [۲۶]. تفاوت دیگر روش کنترلی پیشنهادی این است که از راهبرد کنترل ولتاژ استفاده می‌نماید که در مقایسه با راهبرد کنترل گشتاور، ساده‌تر و عملکرد بهتری دارد. بعلاوه، بجای روش مرسوم کنترل دو حلقه‌ای از کنترل یک حلقه‌ای استفاده می‌شود.

در ادامه، بخش دوم به مدل‌سازی ربات هنرمند با مفاصل انعطاف‌پذیر می‌پردازد. بخش سوم قانون کنترل مود لغزشی را بیان می‌نماید. بخش چهارم تخمین‌گر فازی را تشریح می‌کند. سپس، بخش پنجم پایداری سیستم را تحلیل می‌نماید. بخش ششم نتایج شبیه‌سازی‌ها را می‌دهد و به بررسی عملکرد کنترل‌کننده می‌پردازد و در انتها بخش هفتم نتیجه‌گیری می‌نماید.

۲- مدل سازی

در این مدل‌سازی، ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر به وسیله موتورهای مغناطیس دائم گیربکس‌دار حرکت می‌کند. اثر

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{v}) \quad (5)$$

که در آن،

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{x}_1)(-\mathbf{g}(\mathbf{x}_1) - \mathbf{K}\mathbf{x}_1 - \mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 + \mathbf{K}\mathbf{r}\mathbf{x}_3) \\ \mathbf{x}_4 \\ \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{r}\mathbf{K}\mathbf{x}_1 - \mathbf{r}^2\mathbf{K}\mathbf{x}_3 - \mathbf{B}\mathbf{x}_4 + \mathbf{K}_m\mathbf{x}_5) \\ -\mathbf{L}^{-1}(\mathbf{K}_b\mathbf{x}_4 + \mathbf{R}\mathbf{x}_5) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{L}^{-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\theta}_m \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \\ \mathbf{I}_a \end{bmatrix} \quad (6)$$

مدل فضای حالت (۵) به فرم همراه نیست اگرچه می‌توان با انجام محاسبات پیچیده آن را به فرم همراه درآورد.

۳- کنترل مود لغزشی - فازی

از آنجا که معادلات حالت سیستم (۵) به فرم همراه نیست، کنترل مود لغزشی مرسوم قابل ارائه نمی‌باشد. البته بدون در نظر گرفتن دینامیک موتورها، معادلات به فرم همراه بوده و کنترل مود لغزشی مرسوم قبلاً برای آن ارائه شده است. طرح جدید کنترل مود لغزشی به صورت زیر ارائه می‌شود:

با توجه به (۳)، معادله الکتریکی موتور چنین است،

$$R\mathbf{I}_a + L\dot{\mathbf{I}}_a + K_b\dot{\boldsymbol{\theta}}_m = \mathbf{v} \quad (7)$$

که در آن R ، L و K_b پارامترهای موتور و $\dot{\boldsymbol{\theta}}_m$ سرعت موتور و \mathbf{v} ولتاژ اعمالی به موتور است. برای ظاهر شدن سرعت مفصل در معادلات می‌توان نوشت،

$$\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}} + R\mathbf{I}_a + L\dot{\mathbf{I}}_a + K_b\dot{\boldsymbol{\theta}}_m = \mathbf{v} \quad (8)$$

معادله (۸) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\dot{\mathbf{q}} + F = \mathbf{v} \quad (9)$$

که تابع F در آن عبارت است از

$$F = R\mathbf{I}_a + L\dot{\mathbf{I}}_a + K_b\dot{\boldsymbol{\theta}}_m - \dot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

حال برای طراحی کنترل مود لغزشی، سطح لغزش را به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$S = e + \lambda \int e dt \quad (11)$$

انعطاف معمولاً به وسیله یک فنر خطی مدل‌سازی می‌شود. در نتیجه، معادلات دینامیکی ربات به صورت زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{K}(\mathbf{r}\boldsymbol{\theta}_m - \mathbf{q}) \quad (1)$$

$$\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{r}\mathbf{K}(\mathbf{r}\boldsymbol{\theta}_m - \mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_m \quad (2)$$

که در آن $\boldsymbol{\theta}_m \in R^n$ بردار موقعیت موتورها و $\mathbf{q} \in R^n$ بردار موقعیت رابطها، $\mathbf{D}(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$ ماتریس ممان اینرسی، $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^n$ بردار شتاب جانب مرکز و شتاب کوریولس، $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in R^n$ بردار شتاب گرانشی و $\boldsymbol{\tau}_m \in R^n$ بردار گشتاور موتورها هستند. $\mathbf{J}, \mathbf{B}, \mathbf{r} \in R^{n \times n}$ ماتریس‌های قطری هستند که ضرایب اینرسی، میرایی و چرخ‌دنده کاهشی موتور هستند. ماتریس قطری $\mathbf{K} \in R^{n \times n}$ ضرایب فنری است که به عنوان اثر انعطاف در نظر گرفته می‌شود. برای سادگی ضریب چرخ‌دنده و انعطاف مفصل ثابت در نظر گرفته می‌شود.

معادلات ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر، غیرخطی با محاسبات زیاد، چند متغیره و چند ورودی-چند خروجی هستند و تعداد درجات آزادی نیز دو برابر تعداد متغیرهای مفاصل مستقل می‌شود. این پیچیدگی یکی از چالش‌های مهم در مدل‌سازی و کنترل ربات انعطاف‌پذیر است. با در نظر گرفتن معادلات دینامیکی محرکه‌ها پیچیدگی افزایش می‌یابد.

معادلات الکتریکی موتور به صورت زیر است:

$$R\mathbf{I}_a + L\dot{\mathbf{I}}_a + K_b\dot{\boldsymbol{\theta}}_m = \mathbf{v} \quad (3)$$

که در آن $\mathbf{v} \in R^n$ بردار ولتاژ موتورها، $\mathbf{I}_a \in R^n$ بردار جریان موتورها و $\dot{\boldsymbol{\theta}}_m$ بردار سرعت موتورها هستند. $\mathbf{R}, \mathbf{L}, \mathbf{K}_b \in R^{n \times n}$ ماتریس‌های قطری برای بیان مقاومت، اندوکتانس و ضریب ضدمحرکه موتور هستند. گشتاور موتور $\boldsymbol{\tau}_m$ که به عنوان ورودی برای معادله دینامیکی (۲) در نظر گرفته می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\mathbf{K}_m\mathbf{I}_a = \boldsymbol{\tau}_m \quad (4)$$

که ماتریس قطری \mathbf{K}_m بیان‌کننده ثابت گشتاور است. بردار ولتاژ موتورها \mathbf{v} به عنوان ورودی سیستم رباتیک و بردار موقعیت رابطها \mathbf{q} به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از معادلات (۱-۴) معادلات فضای حالت به صورت زیر بدست می‌آید:

زمانی مکانیکی موتور است [۱۶] می‌توان از اثر $L\dot{I}_a$ صرف نظر نمود. بنابراین، با تقریب می‌توان نوشت:

$$\Delta F \square RI_a + K_b \dot{\theta}_m \quad (21)$$

در موتور های جریان مستقیم به دلیل کوچک بودن ثابت زمانی الکتریکی نسبت به ثابت زمانی مکانیکی از عبارت $L\dot{I}_a$ در معادله الکتریکی موتور (۳) صرف نظر می‌شود [۱۶]. علاوه بر آن اندازه‌گیری \dot{I}_a با نویز همراه است و وجود آن در قانون کنترل موجب تضعیف عملکرد سیستم کنترل می‌شود. بنابراین صرف نظر نمودن از $L\dot{I}_a$ ، عملکرد سیستم کنترل را بهبود می‌دهد.

حال $\overline{\Delta F}$ را که تخمین عدم قطعیت ΔF است به صورت یک سیستم فازی پیشنهاد می‌شود که

$$\Delta F \square \overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m) \quad (22)$$

با جایگذاری (۲۲) و (۱۹) در (۱۸) و سپس با جایگذاری (۱۸) در (۱۷) بدست می‌آید،

$$(\dot{q}_d - \dot{q} + \overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m) - v + \lambda e) \operatorname{sgn}(S) = -\alpha \quad (23)$$

با ضرب طرفین (۲۳) در $\operatorname{sgn}(S)$ و اینکه $\operatorname{sgn}(S)\operatorname{sgn}(S) = 1$ ، قانون کنترل v به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$v = \dot{e} + \lambda e + \overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m) + \alpha \operatorname{sgn}(S) \quad (24)$$

قانون کنترل v ، قانون کنترل مود لغزشی- فازی نامیده می‌شود و از نوع کنترل جداگانه هر مفصل است. قانون کنترل پیشنهادی کاملاً متفاوت با قانون کنترل مود لغزشی مرسوم است. برای اجرای کنترل مود لغزشی مرسوم باید حدود عدم قطعیت‌ها معلوم باشند ولی قانون کنترل مود لغزشی جدید با کمک تخمین‌گر فازی $\overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m)$ ، نیازی به دانستن حدود عدم قطعیت ندارد.

که در آن $e = q_d - q$ خطای ردگیری و q_d مسیر مطلوب مفصل است. تابع مثبت معین y را به صورت زیر فرض نمایید:

$$y = \frac{1}{2} S^2 \quad (12)$$

با مشتق گرفتن از این تابع، داریم،

$$\dot{y} = S\dot{S} \quad (13)$$

برای آنکه $S \rightarrow 0$ کافی است $\dot{S} < 0$. پس، پیشنهاد می‌شود،

$$\dot{S}\dot{S} = -\alpha|S| \quad (14)$$

$$\dot{S} \operatorname{sgn}(S) = -\alpha \quad (15)$$

که α مقداری مثبت و $\operatorname{sgn}(S) = S/|S|$ است. با محاسبه \dot{S} از (۱۱) و جایگذاری آن در (۱۵)، داریم،

$$(\dot{e} + \lambda e) \operatorname{sgn}(S) = -\alpha \quad (16)$$

جایگذاری (۹) در (۱۶) می‌دهد،

$$(\dot{q}_d + F - v + \lambda e) \operatorname{sgn}(S) = -\alpha \quad (17)$$

که در آن F از دو بخش زیر تشکیل شده است:

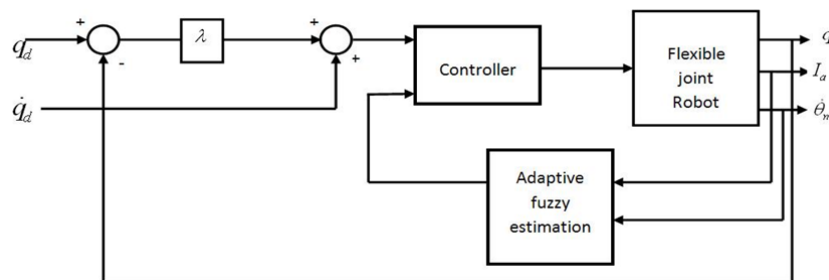
$$F = \overline{F} + \Delta F \quad (18)$$

که در آن \overline{F} بخش معلوم و ΔF عدم قطعیت است که با تخمین‌گر فازی تطبیقی محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن توصیف F در (۱۰) می‌توان \overline{F} و عدم قطعیت ΔF را به صورت زیر بیان کرد:

$$\overline{F} = -\dot{q} \quad (19)$$

$$\Delta F = RI_a + L\dot{I}_a + K_b \dot{\theta}_m \quad (20)$$

از (۲۰) می‌توان دریافت که عدم قطعیت ΔF تابعی از جریان موتور I_a ، مشتق آن \dot{I}_a و سرعت موتور $\dot{\theta}_m$ است. به دلیل اینکه ثابت زمانی الکتریکی موتور بسیار کمتر از ثابت



شکل ۱- بلوک دیاگرام کنترلی

$$\psi_l(x_1, x_2) = \frac{\mu_{A_l}(x_1)\mu_{B_l}(x_2)}{\sum_{l=1}^9 \mu_{A_l}(x_1)\mu_{B_l}(x_2)} \quad (30)$$

که در آن $\mu_{A_l}, \mu_{B_l} \in [0, 1]$ است. پس، $|\psi_l(x_1, x_2)| \leq 1$ است. بنابراین،

نتیجه ۱. تابع فازی Ψ محدود است.

با توجه به این که سیستم‌های فازی را می‌توان به عنوان تخمین‌گر عمومی در نظر گرفت. عدم قطعیت ΔF را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta F = \mathbf{y}^T \Psi(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (31)$$

که در آن $\mathbf{y} = [y_1 \dots y_9]^T$ است. همچنین ε به عنوان خطای تقریب در نظر گرفته می‌شود که طبق قضیه تقریب عمومی مقدار محدودی دارد. یعنی نتیجه ۲. خطای تقریب ε محدود است.

برای بدست آوردن قانون تطبیق ابتدا با جایگذاری قانون کنترل (۲۴) در (۹) سیستم حلقه بسته را تشکیل می‌دهیم،

$$\dot{q} + F = \dot{e} + \lambda e + \overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m) + \alpha \operatorname{sgn}(S) \quad (32)$$

سپس، با جایگذاری (۱۸)، (۱۹)، (۲۹) و (۳۱) در (۳۲) بدست می‌آید،

$$\dot{e} = -\lambda e - \alpha \operatorname{sgn}(S) + (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \Psi(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (33)$$

حال برای به دست آوردن قانون تطبیق به منظور محاسبه $\hat{\mathbf{y}}$ تابع مثبت معین V را به صورت زیر پیشنهاد می‌دهیم.

$$V = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2\gamma} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \quad (34)$$

که در آن γ مقداری مثبت است. \dot{V} به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{V} = e\dot{e} - \frac{1}{\gamma} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \dot{\hat{\mathbf{y}}} \quad (35)$$

با جایگذاری (۳۳) در (۳۵)، داریم.

$$\dot{V} = -\lambda e^2 + e \left((\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \Psi + \varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S) \right) - \frac{1}{\gamma} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \dot{\hat{\mathbf{y}}} \quad (36)$$

برای محاسبه قانون تطبیق، (۳۶) را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم.

$$\dot{V} = -\lambda e^2 + (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \left(e \Psi - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\mathbf{y}}} \right) + e (\varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S)) \quad (37)$$

با پیشنهاد قانون تطبیق،

برای طراحی تخمین‌گر فازی، ورودی‌های سیستم فازی $\overline{\Delta F}$ به صورت زیر نام‌گذاری می‌شوند:

$$x_1 = I_a \quad x_2 = \dot{\theta}_m \quad (25)$$

با در نظر گرفتن سه تابع عضویت برای هر ورودی، کل فضا را می‌توان با ۹ قانون فازی پوشش داد. قوانین به فرم ممدانی به صورت زیر بیان می‌شوند:

(۲۶) قانون l : اگر x_1 برابر با A_l و x_2 برابر با B_l باشد آنگاه $\overline{\Delta F}$ برابر C_l است

که در آن $l = 1, \dots, 9$ است و برای هر ورودی سه تابع تعلق مثبت P ، صفر Z و منفی N با توصیف زیر در نظر می‌گیریم:

$$\mu_N(x_1) = \begin{cases} 1 & x_1 \leq -1 \\ 1 - 2(x_1 + 1)^2 & -1 \leq x_1 \leq -0.5 \\ 2x_1^2 & -0.5 \leq x_1 \leq 0 \\ 0 & x_1 \geq 0 \end{cases} \quad (27)$$

$$\mu_P(x_1) = \begin{cases} 0 & x_1 \leq 0 \\ 2x_1^2 & 0 \leq x_1 \leq 0.5 \\ 1 - 2(x_1 - 1)^2 & 0.5 \leq x_1 \leq 1 \\ 1 & x_1 \geq 1 \end{cases}$$

$$\mu_Z(x_1) = \exp(-x_1^2 / (2\sigma^2)), \quad \sigma = 0.5$$

برای ورودی x_2 نیز توابع به همین صورت در نظر گرفته می‌شود. توابع تعلق خروجی را به صورت گوسین در نظر می‌گیریم که به صورت زیر است.

$$\mu_{C_l}(\overline{\Delta F}) = \exp\left(-\left(\frac{\overline{\Delta F} - \hat{y}_l}{2\sigma^2}\right)^2\right) \quad (28)$$

که در آن \hat{y}_l مرکز C_l است. قواعد فازی در جدول ۱ بیان شده است. با استفاده از (۲۶) تا (۲۸) و در نظر گرفتن موتور استنتاج ممدانی، فازی ساز منفرد و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز $\overline{\Delta F}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸]،

جدول ۱- پایگاه قواعد فازی

x_1	x_2	P	Z	N
P		PH	PM	Z
Z		PM	Z	NM
N		Z	NM	NH

$$\overline{\Delta F} = \sum_{l=1}^9 \hat{y}_l \psi_l(x_1, x_2) = \hat{\mathbf{y}}^T \Psi(x_1, x_2) \quad (29)$$

که در آن $\hat{\mathbf{y}} = [\hat{y}_1 \dots \hat{y}_9]^T$ و $\Psi = [\psi_1 \dots \psi_9]^T$ است. مقدار مثبتی دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

ربات تعمیم می‌یابد. برای تحقق پایداری، فرضیات زیر را در نظر بگیرید:

فرض اول: مسیر مطلوب q_d باید نرم باشد. بدین مفهوم که q_d و مشتقات آن محدود هستند [۲۹].

فرض دوم: موتور الکتریکی باید در برابر اضافه ولتاژ حفاظت شود. در نتیجه ولتاژ موتور توسط محدود کننده ولتاژ محدود می‌شود.

$$|v| \leq v_{\max} \quad (44)$$

با توجه به فرض اول و نتیجه ۱، q_d و e محدود هستند. با توجه به رابطه $q = q_d - e$ نتیجه می‌شود که **نتیجه ۵.** q محدود است.

برای محدود بودن \dot{e} به سمت راست معادله (۳۳) توجه کنید. طبق نتایج ۱ تا ۴، تابع فازی ψ ، خطای تخمین ε ، متغیرهای ψ ، خطای ردگیری e و خطای تخمین پارامتر $\hat{y} - y$ محدود هستند. پس،

نتیجه ۶. \dot{e} محدود است.

داریم $\dot{q} = \dot{q}_d - \dot{e}$. فرض اول می‌گوید \dot{q}_d محدود است و \dot{e} از نتیجه ۶ محدود است. بنابراین، **نتیجه ۷.** \dot{q} محدود است.

به معادله (۲۴) توجه نمایید. $|\alpha \operatorname{sgn}(S)| \leq \alpha$ و e نیز محدود هستند. برای آنکه فرض ۲ برقرار باشد. یعنی ولتاژ موتور v محدود باشد باید $\overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m)$ محدود شود. برای این منظور با اعمال محدودیت روی \hat{y} محدود بودن $\overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m)$ محقق می‌شود. بنابراین، فرض زیر لازم است

$$|y_l| \leq v_{\max} \quad l = 1, \dots, 9$$

طبق فرض ۲ ولتاژ موتور محدود است. پس، بر اساس اثبات آمده در [۱۸]،

نتیجه ۸. جریان موتور I_a و سرعت موتور $\dot{\theta}_m$ نیز محدود هستند.

با توجه به اینکه برای هر موتور متغیرهای q ، \dot{q} ، θ_m و I_a طبق نتیجه‌های ۵، ۷ و ۸ محدود هستند. پس،

نتیجه ۹. بردارهای q ، \dot{q} ، θ_m و I_a محدود هستند.

جایگذاری (۴) در (۲) می‌دهد،

$$J\ddot{\theta}_m + B\dot{\theta}_m + rKr\theta_m = K_m I_a + rKq \quad (45)$$

سمت راست معادله (۴۵) طبق نتیجه ۹ محدود است و همچنین J ، B و rKr ماتریس‌های ثابت مثبت معین

$$\dot{\hat{y}} = \gamma e \psi \quad (38)$$

پارامترهای سیستم فازی چنین محاسبه می‌شوند.

$$\hat{y} = \gamma \int_0^t e \psi dt + \hat{y}(0) \quad (39)$$

که در آن $\hat{y}(0)$ مقدار اولیه پارامترها است.

روش تطبیقی به مقادیر اولیه پارامترها و ضریب همگرایی بستگی دارد. اگر مقادیر اولیه به خوبی انتخاب نشوند نه تنها عملکرد سیستم قابل قبول نمی‌باشد بلکه ممکن است پاسخ-ها واگرا شوند. همچنین ضریب تطبیق نیز در سرعت همگرایی موثر است. اگر سیگنال مرجع فرکانس‌های کافی را در بر نگیرد بردار پارامترها به مقادیر صحیح همگرا نمی‌شود [۳۱].

با جایگذاری (۳۸) در (۳۷) به دست می‌آید،

$$\dot{V} = -\lambda e^2 + e(\varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S)) \quad (40)$$

اگر $\dot{V} < 0$ باشد خطای ردگیری کاهش می‌یابد. برای آنکه $\dot{V} < 0$ باشد، کافی است،

$$e(\varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S)) \leq \lambda e^2 \quad (41)$$

با توجه به آنکه $e(\varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S)) \leq |e|(|\varepsilon| + \alpha)$ نامعادله (۴۱) برقرار خواهد بود، اگر

$$|e|(|\varepsilon| + \alpha) \leq \lambda e^2 \quad (42)$$

که می‌شود

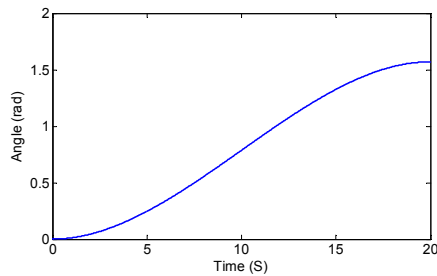
$$\frac{|\varepsilon| + \alpha}{\lambda} \leq |e| \quad (43)$$

بدین معنا که اگر $\frac{|\varepsilon| + \alpha}{\lambda} \leq |e|$ باشد آنگاه $\dot{V} < 0$ برقرار می‌شود. پس با کاهش $(|\varepsilon| + \alpha)/\lambda$ ، مقدار نهایی اندازه خطای ردگیری کاهش می‌یابد. بنابراین، **نتیجه ۳.** خطای ردگیری e محدود است.

یعنی در نهایت مسیر خطا وارد کره‌ای به شعاع $(|\varepsilon| + \alpha)/\lambda$ خواهد شد. بعلاوه، V تابعی مثبت معین از e و $\hat{y} - y$ است. بنابراین، اگر $\dot{V} < 0$ باشد، آنگاه، **نتیجه ۴.** خطای تخمین پارامتر $\hat{y} - y$ محدود است.

۴- تحلیل پایداری

از آنجا که برای هر مفصل یک کنترل کننده طراحی می‌شود، بررسی پایداری نیز برای هر مفصل انجام شود و سپس به کل



شکل ۲- مسیر مطلوب

شبیه‌سازی دوم: این شبیه‌سازی به بررسی عملکرد قانون کنترل (۲۴) برای حالت تنظیم می‌پردازد. پارامترهای قانون کنترل، با روش سعی و خطا برای دستیابی به عملکرد بهتر به صورت $\alpha = 0.05$ و $\lambda = 70$ داده شده‌اند. مقدار مطلوب موقعیت مفصل 1 rad است. در شکل ۸ عملکرد کنترل کننده مشاهده می‌شود که در مدت زمان ناچیزی موقعیت مفاصل به مقدار مطلوب رسیده‌اند. همچنین در شکل ۹ ولتاژ اعمالی به موتورها برای حالت تنظیم مشاهده می‌شود. جریان موتورها در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. شکل ۱۱ تخمین عدم قطعیت و شکل ۱۲ خطای تخمین عدم قطعیت در حالت تنظیم را نشان می‌دهد. خطای تخمین در آغاز قابل توجه است ولی با سرعت کاهش می‌یابد و به مقدار ثابت همگرا می‌شود.

شبیه‌سازی سوم: روش کنترل فازی-تناسبی-انترگرالی بهبود یافته که در [۳۰] برای کنترل بازوی رباتیک با مفاصل انعطاف پذیر ارائه شده است روی ربات هنرمند شبیه‌سازی می‌شود و عملکرد آن با روش پیشنهادی مقایسه می‌شود. شباهت این کنترل با کنترل پیشنهادی آن است که هر دو از نوع "کنترل جداگانه هر مفصل" هستند، برای مفصل انعطاف پذیر ارائه شده‌اند و از سیستم فازی تطبیقی استفاده کرده‌اند. تفاوت آن دو در این است که این روش بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور است ولی روش پیشنهادی بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ است. البته قانون کنترل آنها کاملاً متفاوت است. این روش، کنترل فازی-تناسبی-انترگرالی تطبیقی بوده در حالی که روش پیشنهادی، کنترل مود لغزشی فازی تطبیقی است. شکل ۱۳ عملکرد کنترل کننده را در ردگیری موقعیت مفصل نشان می‌دهد. خطای ردگیری کمتر از 0.25 rad است ولی دامنه نوسانات در حال افزایش است. بنابراین، اثرات

هستند. در نتیجه، (۴۳) یک معادله درجه دو خطی پایدار با ورودی محدود است. در نتیجه، خروجی آن محدود است. یعنی

نتیجه ۱۰. بردار θ_m محدود است.

با توجه به نتایج ۹ و ۱۰ تمامی متغیرهای حالت سیستم محدود هستند. در نتیجه، پایداری سیستم اثبات می‌شود.

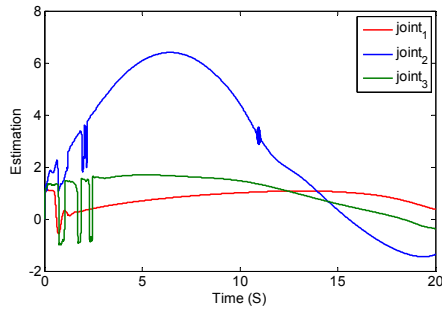
۵- شبیه‌سازی

قانون کنترل پیشنهادی بر روی ربات هنرمند با مفاصل انعطاف پذیر که مشخصات آن در [۱۹] آمده است شبیه سازی می‌شود با این تفاوت که ضریب چرخ دنده $r = 0.01$ است. شکل ۲ مسیر مطلوب را نشان می‌دهد که با معادله زیر توصیف می‌شود:

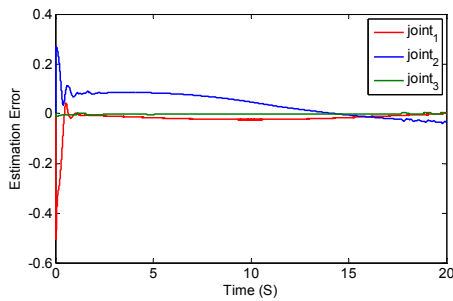
$$q_d = (\pi/150)t^2 - (\pi/3375)t^3 \quad (46)$$

شبیه‌سازی اول: قانون کنترل (۲۴) برای ردگیری مسیر شکل ۲ بر روی ربات شبیه سازی می‌شود. پارامترهای قانون کنترل، با روش سعی و خطا برای دستیابی به عملکرد بهتر به صورت $\alpha = 0.05$ و $\lambda = 140$ داده شده‌اند. در شکل ۳ عملکرد کنترل کننده مشاهده می‌شود که به خوبی اثر انعطاف در مفاصل خنثی شده است. ولتاژ اعمالی به موتورها نیز در شکل ۴ آمده است. به خاطر اینکه ربات زیر بار قرار دارد موتورها در لحظه شروع به ولتاژ زیادی احتیاج دارند که به مرور زمان این ولتاژ کاهش پیدا می‌کند. مقدار اولیه ولتاژ به مقدار اولیه گشتاور وابسته است به صورتی که اگر گشتاور کم باشد ولتاژ نیز کم است. شکل ۵ جریان موتورها را نشان می‌دهد. بخش دوم منحنی جریان موتورهای ۲ و ۳ منفی شده است. در مورد علت آن می‌توان بیان کرد که گشتاور در این بازه منفی بوده است. زیرا با توجه به معادله (۴)، گشتاور متناسب با جریان موتور است. البته تحلیل معادله دینامیکی گشتاور ربات ساده بنظر نمی‌رسد ولی می‌توان گفت که در حرکت آهسته مانند مسیر پیشنهادی گشتاور ربات بیشتر از گشتاور ثقلی و انعطاف مفصل تاثیر می‌پذیرد که وابسته به موقعیت مفاصل است. با توجه به معادله (۳)، منفی بودن جریان موجب منفی شدن ولتاژ در شکل ۴ شده است. شکل ۶ تخمین عدم قطعیت و شکل ۷ خطای تخمین در حالت ردگیری را نشان می‌دهد. خطای تخمین در آغاز قابل توجه است ولی با سرعت کاهش می‌یابد.

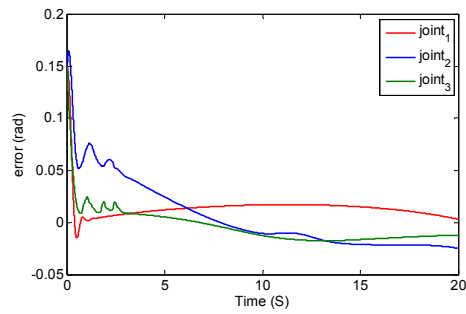
انعطاف مفاصل به خوبی مهار نشده است. اگرچه این روش کنترلی از نوع کنترل جداگانه هر مفصل است ولی اجرای آن روی ربات چندان موفق نمی‌باشد. مقایسه عملکرد کنترل پیشنهادی در شکل ۳ با عملکرد این کنترل کننده در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که عملکرد کنترل کننده پیشنهادی برتری دارد. دامنه خطای ردگیری کمتر از 0.025 rad است که تقریباً 0.1 شده است. نوسانات نیز به خوبی مهار شده است.



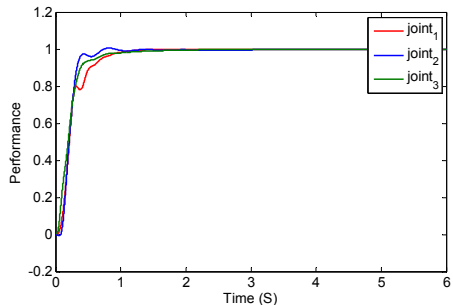
شکل ۶- تخمین عدم قطعیت



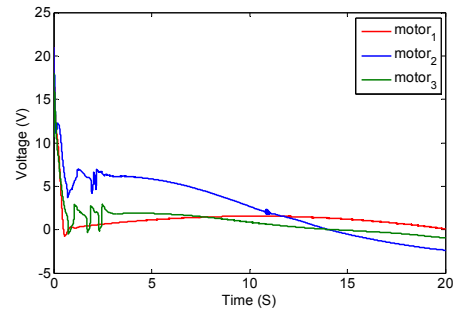
شکل ۷- خطای تخمین عدم قطعیت



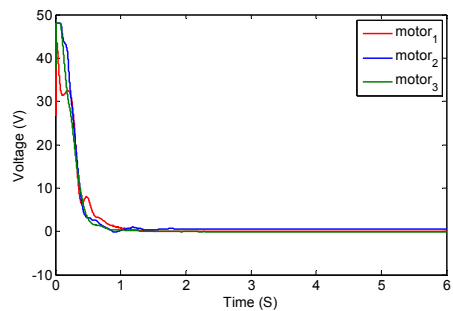
شکل ۸- عملکرد کنترل کننده در حالت ردگیری



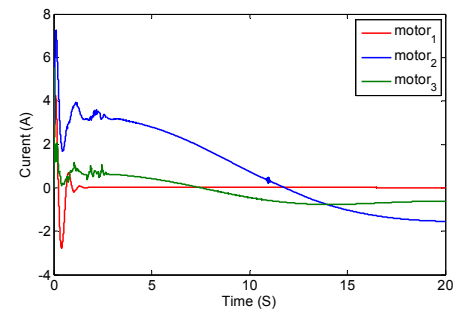
شکل ۹- عملکرد کنترل کننده در حالت تنظیم



شکل ۱۰- ولتاژ اعمالی به موتورها



شکل ۱۱- ولتاژ اعمالی به موتورها



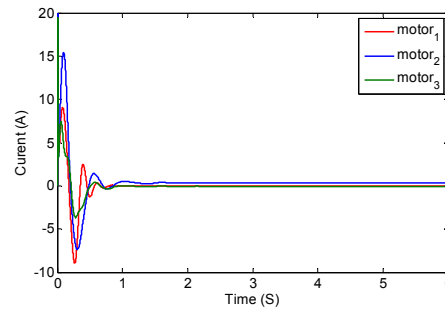
شکل ۱۲- جریان موتورها

۷- نتیجه‌گیری

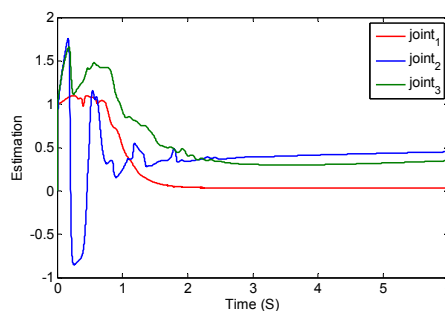
این مقاله به طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی-فازی برای کنترل ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ پرداخته است. در روش پیشنهادی از سیستم فازی برای تخمین عدم قطعیت استفاده شده است. در نتیجه، نیازی به محاسبه حدود عدم قطعیت نبوده و پدیده لرزش سیگنال کنترل نیز کاهش یافته است. بعلاوه، کنترل چند متغیره ربات تبدیل به کنترل ساده جداگانه هر مفصل ربات شده است. از مزایای این روش نسبت به روش‌های گذشته این است که از یک حلقه کنترلی استفاده می‌شود در صورتی که در روش‌های پیشین از دو حلقه کنترلی استفاده شده است. همچنین راهبرد کنترل ولتاژ این برتری را نسبت به راهبرد کنترل گشتاور دارد که معادلات پیچیده ربات در قانون کنترل ظاهر نمی‌شود و کنترل ربات از طریق کنترل موتورها صورت می‌پذیرد. شبیه‌سازی‌ها، کارایی این کنترل‌کننده را نشان داده‌اند.

مراجع

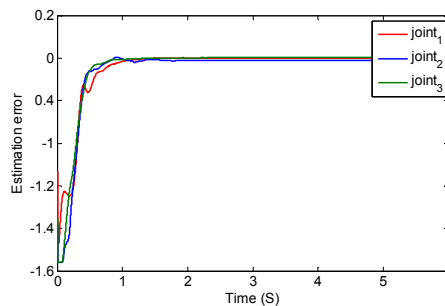
- [1] Sweet LM, Good MC (1985) Redefinition of the robot motion control problem. *IEEE Control Syst Mag*, 5(3): 18–24.
- [2] Brogliato B, Ortega R, Lozano R (1995) Global tracking controllers for flexible-joint manipulators: a comparative study. *Automatica* 31(7): 41–956.
- [3] Chien MC, Huang AC (2007) Adaptive control for flexible-joint electrically driven robot with time-varying uncertainties. *IEEE Trans Ind Electron* 54(2): 1032–1038.
- [4] Gole'a N, Gole'a A, Barra K, Bouktir T (2008) Observer-based adaptive control of robot manipulators: Fuzzy systems approach. *Appl Soft Comput* 8(1):778–787.
- [5] Li Y, Tong S, Li T (2012) Fuzzy adaptive dynamic surface control for a single-link flexible-joint robot. *Nonlinear Dyn* 70(3): 2035–2048.
- [6] Chaoui H, Gueaieb W (2008) Type-2 Fuzzy Logic Control of a Flexible-Joint Manipulator. *J Intell Robot Syst* 51(2): 159–186.
- [7] Yoo SJ, Park JB, Choi YH (2008) Adaptive Output Feedback Control of Flexible-Joint Robots Using Neural Networks: Dynamic Surface Design Approach. *IEEE Trans Neural Networks* 19(10): 1712–1726.
- [8] Yoo S.J, Park J.B, Choi Y.H (2006) Adaptive Dynamic Surface Control of flexible-joint robots using self-recurrent wavelet neural networks.



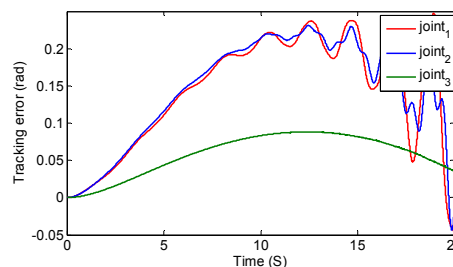
شکل ۱۰- جریان موتورها



شکل ۱۱- تخمین عدم قطعیت



شکل ۱۲- خطای تخمین عدم قطعیت



شکل ۱۳- عملکرد کنترل‌کننده در حالت ردگیری

- [20] Moradi Zirkohi M, Fateh MM, Aliyari Shoorehdeli M (2013) Type-2 fuzzy control of a flexible-joint robot using voltage control strategy. *International Journal of Automation and Computing*, 10(3): 242–255.
- [21] Moradi Zirkohi M, Fateh MM, Aliyari Shoorehdeli M (2013) Indirect adaptive type 2 fuzzy control for flexible-joint robots. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2(2): 31–43.
- [22] Li THS, Huang YC (2010) MIMO adaptive fuzzy terminal sliding-mode controller for robotic manipulators. *Inform Sci* 180(23): 4641–4660.
- [23] Hicham C, Wail G, Mustapha CE, Pierre S (2006) Hybrid neural fuzzy sliding mode control of flexible-joint manipulators with unknown dynamics. *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006, 32nd Annual Conference, Paris*, 4082–4087.
- [24] Ha QP, Rye DC, Durrant-Whyte HF (1999) Fuzzy moving sliding mode control with application to robotic manipulators. *Automatica* 35(4): 607–616
- [25] Liang CY, Perng JS (2003) A new approach to the design of a fuzzy sliding mode controller. *Fuzzy Sets and Systems* 139 (1): 111–124.
- [26] Guo Y, Woo PY (2003) An adaptive fuzzy sliding mode controller for robotic manipulators. *IEEE Trans Syst Man Cybern—PART B: Systems and Humans* 33(2): 149–159.
- [27] Spong, MW (1987), Modeling and control of elastic joint robots. *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control* 109, 310–319.
- [28] Wang LX (1997) *A Course in fuzzy systems and control*, Prentice-Hall International, Inc, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [29] Qu Z, Dawson DM (1996) *Robust tracking control of robot manipulators*. IEEE Press, New York.
- [30] Tang W, Chen G, Lu R (2001), A modified fuzzy PI controller for a flexible-joint robot arm with uncertainties, *Fuzzy Sets Syst*, 118(1): 109–119.
- [31] Boyd S, Sastry S (1986), Necessary and sufficient conditions for parameter convergence in adaptive control, *Automatica*, 22(6): 629–639.
- IEEE Trans Syst Man Cybern—PART B: CYBERN 36(6): 1342-1355.
- [9] Chang Y.C, Yen H.M (2012) Robust tracking control for a class of electrically driven flexible-joint robots without velocity measurements. *Int. J. Control* 85: 194–212.
- [10] Ott C, Albu-Schäffer A, Kugi A, Hirzinger G (2008) On the passivity-based impedance control of flexible-joint robots, *IEEE Trans Robotics* 24(2): 416–429.
- [11] Albu-Schäffer A, Ott Ch, Hirzinger G (2007) A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible-joint robots. *Int J Robot Res* 26(1): 23–39.
- [12] Huang AC, Chen YC (2004) Adaptive sliding control for single-link flexible-joint robot with mismatched uncertainties, *IEEE Trans Control Syst Technol* 12(5): 770–775.
- [13] Talole SE, Phadke SB (2008) Model following sliding mode control based on uncertainty and disturbance estimator. *ASME J Dyn Syst Meas Control* 130(3): 1–5.
- [14] Carvajal, Chen G, Ogmen H (2000) Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis. *Inform Sci* 123(3-4): 249–270.
- [15] Bang JS, Shim H, Park SK, Seo JH (2010) Robust tracking and vibration suppression for a two-inertia system by combining backstepping approach with disturbance observer. *IEEE Trans Ind Electron* 57(9): 3197–3206.
- [16] Spong MW, Hutchinson S, Vidyasagar M (2006) *Robot modelling and control*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- [17] Fateh MM (2008) On the voltage-based control of robot manipulators. *Int J Control Autom Syst* 6(5): 702–712.
- [18] Fateh MM (2012) Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy. *Nonlinear Dyn* 67(2): 1525–1537.
- [19] Fateh MM (2012) Nonlinear control of electrical flexible joint robots. *Nonlinear Dyn* 67(4): 2549–2559.