

ظرفیت حمل بار دینامیکی ربات با مفاصل انعطاف پذیر به کمک کنترلر FEL با استفاده از شبکه عصبی MLP

امین نیکوبین
آزمایشگاه تحقیقاتی رباتیک
دانشگاه علم و صنعت ایران
hkorayem@iust.ac.ir

پیمان سلطانی
آزمایشگاه تحقیقاتی رباتیک
دانشگاه علم و صنعت ایران
hkorayem@iust.ac.ir

محرم حبیب نژاد کورایم
استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی رباتیک
دانشگاه علم و صنعت ایران
hkorayem@iust.ac.ir

افزایش هزینه و مصرف توان بیشتر و همچنین افزایش حجم و وزن محرک ها می شود. شیوه موفقیت آمیزتر افزایش ظرفیت قابل حمل ربات تا حد ممکن در مسیر دینامیک داده شده می باشد. اما مساله مهم در این جاست که چگونه می توان به این مهم دست یافت.

در [1] ظرفیت حمل بار به عنوان معیاری برای تعیین اندازه محرکها در طراحی بازوی ربات به کار رفته است. در این تحقیق حداکثر بار همسایگی پیکره بندی ربات بررسی شده است، و تکنیک مربوطه برای افزایش ظرفیت بار قابل حمل دینامیکی ربات توسعه یافته است که در آن لینک ها و مفاصل صلب در نظر گرفته شده اند. اگر بدنه صلب حذف شود DLCC تنها با محدودیت محرکها مشخص می شود و مقدار آن بسیار زیاد خواهد شد [2]. آنگاه DLCC تعیین شده برای اندازه محرک ها مناسب خواهد بود، اما با این وجود، این شیوه تضمین نمی کند که ربات صریحا چه قدر می تواند مسیر داده شده را تحت این بار ردیابی کند. محاسبه حداکثر ظرفیت حمل بار دینامیکی ربات به روش معمول انجام شده و برای ربات دو بازوی با مفاصل انعطاف پذیر، مدل سازی و شبیه سازی نیز شده است [3]-[8]. اما تا کنون به روش FEL انجام نگرفته است و ما در این بخش قصد داریم با استفاده از روش FEL که در ادامه آورده شده میزان ظرفیت حمل بار دینامیکی ربات را بدست آوریم و بدین طریق با کاهش انحراف پنجه، میزان DLCC را افزایش دهیم.

عواملی که باعث ایجاد محدودیت در میزان ظرفیت حمل بار می شوند، محدودیت ها عبارتند از: ۱- قید محدودیت گشتاور محرک ها؛ ۲- قید خطای ردیابی. DLCC برای بازوی انعطاف پذیر دو لینکی برای مسیر دینامیک مطلوب در [3]-[5] آمده است.

روشهای متداول در کنترل رباتهای صلب برای کنترل رباتهای با مفاصل انعطاف پذیر، کارایی خوبی ندارند و حتی ممکن است با مسأله ناپایداری مواجه شویم. دیدگاههای متنوعی در دو دهه گذشته برای برخورد با مسأله مفاصل انعطاف پذیر ارائه شده اند، و مقاله های زیادی در این زمینه را، می توان در میان منابع یافت. اما در روش FEL انحراف مسیر

چکیده: در این مقاله، مشخصات مکانیکی و مدلسازی دینامیکی و سینماتیکی ربات با مفاصل انعطاف پذیر مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد، سپس با به کارگیری تکنیک کنترل هوشمند آموزشی فیدبک خطا (FEL)، یکی از مشخصه های مهم ربات یعنی ظرفیت حمل بار ماکزیمم ربات تعیین می گردد. روش FEL که در این مجموعه ارائه و شبیه سازی گردیده روشی نوین در کنترل بازوهای رباتیک با مفاصل انعطاف پذیر میباشد و در این روش به کمک سیستمهای کنترل هوشمند شبکه عصبی، MLP و کنترلرهای کلاسیک PID برای ربات دو لینکی با مفاصل انعطاف پذیر بر اساس سیستم مدل آزاد و به صورت on-line می باشد.

کلمات کلیدی: مفصل انعطاف پذیر، شبکه عصبی، کنترلر هوشمند، مدل آزاد، FEL، DLCC.

۱- مقدمه

امروزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی از بازوهای ربات با مفاصل انعطاف پذیر استفاده میشود که نسبتا کند هستند حتی زمانی که باری حمل نمی کنند. ظرفیت حمل بار یک ربات معمولا ماکزیمم باری است که ربات می تواند آنرا تا رسیدن به انتهای مسیر درخواست شده جابجا کند، در حقیقت میتوان برای هر بازوی مکانیکی پارامتری به نام ظرفیت حمل بار استاتیکی تعریف کرد. در یک مسیر مشخص برای ربات، ظرفیت عملی حمل بار، کمترین تعداد ظرفیتهای حمل بار استاتیکی محاسبه شده برای هر حالت بازوی مکانیکی در تمام طول مسیر میباشد، این مساله هنگامی پیچیده تر میشود که اثرات دینامیکی تعیین ظرفیت حمل بار دخالت داده شوند. اما ظرفیت قابل حمل و در نتیجه کارایی این رباتها توسط میزان انحراف ممکن پنجه و توانایی محرکشان محدود شده است. واضح است که افزایش میزان محرک و همچنین توان راه حل مناسبی نمی باشد زیرا باعث

$$\begin{aligned} X_2 &= \phi_1 & X_1 &= q_1 \\ X_4 &= \phi_2 & X_3 &= q_3 \\ X_6 &= \phi_3 & X_5 &= q_2 \\ X_8 &= \phi_4 & X_7 &= q_4 \end{aligned} \quad (۴)$$

حال میتوان سیستم ربات دو لینکی با مفاصل انعطاف پذیر ارائه شده در رابطه (۳) را در فضای حالت با متغیرهای حالت ذکر شده در (۴) به صورت رابطه زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_1 &= X_2 \\ \mathcal{X}_2 &= \frac{D_{22}(CX_4(2X_2+X_4)+K(X_5-X_1))+D_{12}(CX_2^2+K(X_3-X_7))}{D_{11}D_{22}-D_{12}^2} \\ \mathcal{X}_3 &= X_4 \\ \mathcal{X}_4 &= \frac{D_{12}(CX_4(2X_2+X_4)+K(X_5-X_1))+D_{11}(CX_2^2+K(X_3-X_7))}{-D_{11}D_{22}+D_{12}^2} \\ \mathcal{X}_5 &= X_6 \\ \mathcal{X}_6 &= \frac{1}{I}(u_1+K(X_1-X_5)) \\ \mathcal{X}_7 &= X_8 \\ \mathcal{X}_8 &= \frac{1}{I}(u_2+K(X_3-X_7)) \end{aligned}$$

۳- محاسبه ظرفیت حمل بار دینامیکی

۳-۱- محدودیت های گشتاور محرک های مفاصل

پس از یافتن مقادیر گشتاور هر موتور در حالت بدون بار و با جرم موجود در پنجه می توان مقدار گشتاور ماکزیمم مربوط به موتور J ام را از رابطه زیر به دست آورد [5]. این پارامترها به ساختار و مشخصات موتور بستگی دارند.

$$\begin{aligned} u_a^+ &= k_1 - k_2 \phi \\ u_a^- &= -k_1 - k_2 \phi \end{aligned} \quad (۵)$$

که در آن: $k_1 = \tau_s$ و $k_2 = \tau_s / \omega_{nl}$. τ_s : گشتاور موتور در حالت بی باری و ω_{nl} سرعت زاویه ای موتور در حالت بی باری میباشد. دو مقدار $u_a^{(+)}$ و $u_a^{(-)}$ حد بالا و حد پایین گشتاور برای موتور مورد نظر را نشان می دهد.

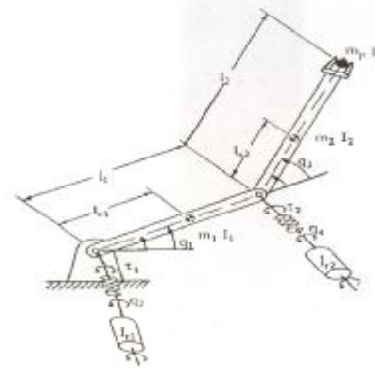
۳-۲- محدودیت های خطای ردیابی

از لحاظ فیزیکی انحراف از مسیر وابسته به عاملهای استاتیکی و دینامیکی ربات می باشد؛ مثلا لقی مفصل، اینرسی ربات و بار و... بطوریکه عوامل فیزیکی فوق باعث تغییر معادلات دینامیکی سیستم می شوند و پاسخ کنترلر در برابر این تغییرات باعث بوجود آمدن انحراف از مسیر طراحی شده می شود. انحراف از مسیر یک کمیت برداری است ولی اگر این جابجایی کوچک باشد میتوان فقط اندازه آنرا در نظر گرفت.

نسبت به سایر روش های فوق الذکر کمتر است، لذا یکی از پارامترهای محدودیت حمل بار بهبود یافته و در نتیجه DLCC افزایش می یابد، و در این تحقیق از این امکان بهره گرفته و با ارایه روشی نوین (استفاده از آموزش خطا) محاسبه حداکثر بار قابل حمل در ربات های با مفاصل انعطاف پذیر ارائه شده است.

۲- مدلسازی دینامیکی و استاتیکی

با توجه به یک ربات با دو درجه آزادی صفحه ای که در شکل (۱) نشان داده شده است، معادلات سینماتیکی که موقعیت پنجه را نسبت به تغییر مکانهای مفصل بیان می کند، به صورت زیر داده شده اند:



شکل (۱): بازوی دو لینکی با مفاصل انعطاف پذیر

معادلات سینماتیک و دینامیک را برای یک بازوی ربات دو درجه آزادی با مفاصل انعطاف پذیر به شکل (۱) را مورد بررسی قرار می دهیم؛ معادلات سینماتیکی:

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_3) \\ y &= l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_3) \end{aligned} \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} (-l_1 \sin(q_1) - l_2 \sin(q_1 + q_3)) \ddot{q}_1 - l_2 \sin(q_1 + q_3) \ddot{q}_3 &= R_{11} \\ (-l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_3)) \ddot{q}_1 + l_2 \cos(q_1 + q_3) \ddot{q}_3 &= R_{12} \end{aligned} \quad (۲)$$

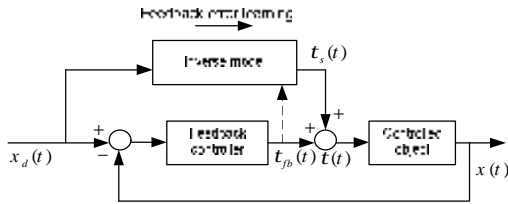
معادلات دینامیکی به روش لاگرانژ:

$$\begin{aligned} D_{11} \ddot{q}_1 + D_{12} \ddot{q}_3 - C \dot{q}_3^2 - 2C \dot{q}_1 \dot{q}_3 + K(q_1 - q_2) &= 0 \\ D_{22} \ddot{q}_3 + D_{12} \ddot{q}_1 + C \dot{q}_1^2 + K(q_3 - q_4) &= 0 \\ I_{r1} \ddot{q}_2 + K(q_2 - q_1) &= t_1 \\ I_{r2} \ddot{q}_4 + K(q_4 - q_3) &= t_2 \end{aligned} \quad (۳)$$

که در آن

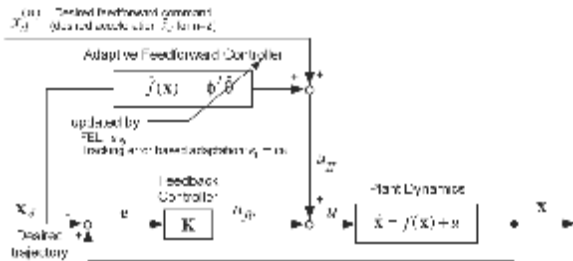
$$\begin{aligned} D_{11} &= m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2 [l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(q_3)] + I_2 + m_3 [l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(q_3)] + I_p \\ D_{22} &= m_2 l_{c2}^2 + I_2 + m_3 l_{c2}^2 + I_p \\ D_{12} &= m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_3) + m_3 l_1 l_{c2} \cos(q_3) + m_3 l_2^2 + I_p \\ C &= m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_3) + m_3 l_1 l_{c2} \sin(q_3) \end{aligned}$$

ابتدا متغیرهای حالت را به صورت زیر تعیین میکنیم.



شکل ۲: نمایی از اولین ساختار معرفی شده برای روش FEL

برای بیان این روش می توان دو فرمول بندی مختلف را مطرح کرد: یکی به صورت کنترلر تطبیقی با پسخور و دیگری به صورت کنترلر تطبیقی پیشرو که در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳: ساختار Adaptive Feed forward Controller در روش FEL

در حالت کنترلر تطبیقی پیشرو، حالت‌های دلخواه به جای حالت‌های واقعی مورد استفاده قرار می گیرند. در اینجا هم یک مدل غیر خطی تک ورودی- تک خروجی در نظر گرفته شده است. در هر دوی حالتها با سیگنال u_{ff} به روز شدن معکوس انجام می شود تا جایی که به طور کامل عکس فرآیند ایجاد شود.

برای اینکه مساله را در حالت کلی بیان کنیم شکلی از سیستم های چند ورودی- چند خروجی که غیر خطی نیز می باشند را نمایش می دهیم:

$$\dot{x} = f(x) + G(x)u \quad (6)$$

$$z = h(x) \quad (7)$$

این در حالی است که $x \in \mathcal{R}^n$ نشان دهنده حالتها، $z \in \mathcal{R}^p$ خروجی و $u \in \mathcal{R}^m$ ورودی سیستم می باشند. ضمناً $G: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^{n \times m}$ و $f: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^n$ بصورت توابع غیر خطی مطرح شده است و $h: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^p$ یک تابع از حالت‌های سیستم به خروجی است. برای یک سیستم از مرتبه n تک ورودی- تک خروجی مسأله را کمی ساده می کنیم. در این حالت می توان نوشت:

۳-۳- تعیین حداکثر بار مجاز دینامیکی

برای تضمین اینکه محدودیت های ظرفیت گشتاور مفصل و انحراف پنجه در طول مسیر داده شده ارضاء شوند. سپس برای حداکثر جرم (m_{max}) برای این مسیر داده شده، به صورت زیر خواهیم داشت:

$$m_{max} = m_{load} + m_e$$

۳-۴- تعیین حداکثر بار قابل حمل برای مسیرمطلوب

در قسمت های قبل به بررسی و بیان قیودی که می توانند در تعیین مقدار بار ماکزیمم حمل شده توسط ربات تاثیر گذار باشند، پرداخته شد. در ادامه فرض می شود که ربات در یک محیط آرام و یکنواخت حرکت می کند، بدین معنی که هیچ نوع نیرو یا گشتاور خارجی غیر متعارف به اعضای ربات وارد نمی شود و نیز در محیط حرکتی ربات هیچ گونه مانع یا قید حرکتی محیطی وجود ندارد. بنابراین مواردی که تعیین مقدار ماکزیمم بار را مقید می سازند عبارتند از: محدوده گشتاور موتورها و سرعت زاویه ای و خطی و دقت ردیابی مسیر حرکت. در چنین وضعیتی می بایست کنترلر ضمن ارضاء قیود فیزیکی حاکم بر سیستم قیود کیفیت رد گیری مسیر را نیز برآورده سازند.

به همین علت ، با فرض اعمال یک بار اولیه به سیستم ، حلقه کنترلی را اجرا می نمایم ، سپس با مشاهده نتایج بدست آمده میزان بار اعمالی را کاهش و یا افزایش میدهم تا ضمن ارضاء کلیه قیود (و عدم خروج منحنی ها از داخل محدوده تعیین شده) ، یکی از منحنی ها با مرزهای تعیین شده مماس گردند. میزان باری که شرایط را ارضاء نماید، ماکزیمم باری است که ربات با حلقه کنترلی پیشنهادی توان حمل آن را دارد.

۴-۵- سیستم کنترل

از نقطه نظر کنترلی روش FEL به عنوان یک روش تطبیقی به شمار می رود. در شکل ۲ از آنچه که در ابتدا به عنوان FEL مطرح شد، آورده شده است؛ همانطور که در شکل مشخص است معکوس فرآیند در مسیر رو به جلو ساخته می شود. چیزی که اهمیت زیادی در این راستا دارد خطایی است که پس از کنترلر کلاسیک PID به عنوان سیگنالی برای آموزش معکوس فرآیند به کار می رود. پس از اینکه معکوس فرآیند به صورت کامل ساخته شد خروجی کنترلر کلاسیک خود به خود از مدار خارج می شود چرا که خطا صفر شده است. حال اگر هر گونه اغتشاش یا تغییر پارامترهای فرآیند اتفاق افتد مجدداً کنترلر کلاسیک وارد کار شده و کنترل را در دست می گیرد و این بار معکوس فرآیند جدید ساخته می شود، پس یک کنترلر دینامیک را با این روش به خوبی خواهیم داشت.

فیلتر شده است در به روز رساندن پارامترها بر مبنای خطای ردیابی کمک می کند. در ضمن SPR بودن نیز در تحلیل لیاپونوفی که در پایداری مطرح می شود مورد استفاده قرار می گیرد. اگر به روز کردن پارامترها را بر اساس قانون مبتنی بر خطای ردیابی بنویسیم خواهیم داشت:

$$\dot{q} = \Gamma f(x) e_1 \quad (12)$$

که در آن Γ یک ماتریس بهره مثبت معین است. باید دقت داشت که x در معادله (۱۰) و (۱۲) همان حالت‌های واقعی هستند.

۴-۲- قانون به روز رسانی در FEL

قانون به روز رسانی پارامترها را به این صورت می نویسیم:

$$\dot{q} = \Gamma \left(\frac{\partial h}{\partial q} \right) (-u_{fb}) \quad (13)$$

در حالیکه می توان معادلات معکوس فرآیند را نیز به این صورت نوشت:

$$u = h(x, \dot{q}) = -f(x, q) + \dot{q} \quad (14)$$

اگر برای f یک خطی سازی مطابق (۹) در نظر بگیریم داریم:

$$\dot{q} = \Gamma \left(-\frac{\partial f}{\partial q} \right) (-u_{fb}) = \Gamma f(x) u_{fb} \quad (15)$$

پس برای ردیابی بر مبنای خطا و FEL در واقع می توان قانون به روز رسانی پارامترها را به این صورت نوشت:

برای FEL:

$$\dot{q} = \Gamma f(x) c e = \Gamma f(x) e_1 \quad (16)$$

برای ردیابی بر مبنای خطا:

$$\dot{q} = \Gamma f(x) k e = \Gamma f(x) u_{fb} \quad (17)$$

می بینیم که تفاوت این دو قانون در U_{fb} و e_1 می باشد که در FEL از خروجی کنترلر پسخورد برای به روز رسانی استفاده می شود.

۴-۳- تحلیل پایداری

می توان با استفاده از تحلیل لیاپونوف، پایداری درآموزش کنترلر تطبیقی و FEL را بررسی نمود. همچنین یک شرط کافی برای بهره های فیدبک مطرح می شود که پایداری را بر اساس تحلیل لیاپونوف تضمین می کند. این شرط مرتبط با SPR (Strictly Positive Real) بودن دینامیک خطا می باشد. می توان نشان داد که با تحلیل پایداری بر مبنای SPR Passivity بودن دینامیک خطا یک شرط لازم و کافی برای پایداری مجانبی می باشد.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\mathbf{M}$$

(۸)

$$\dot{x}_{n-1} = x_n$$

$$\dot{x}_n = f(x) + u$$

$$\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_n]^T \in \mathcal{R}^n \text{ و } \mathbf{x} = x_1$$

که در آن \mathbf{x} فرض می کنیم که به صورت خطی شده بتوان f را نمایش داد:

$$f(x) = \mathbf{f}^T(x) \mathbf{q} + \Delta(x) \quad (9)$$

Φ یک بردار از توابع غیر خطی است، θ بردار پارامترها و Δ برای خطای تقریب است. اگر ساختار f کاملاً مشخص باشد در نتیجه تمامی توابع در بردار Φ شناخته شده هستند و Δ برابر صفر خواهد بود. ولی اگر ساختار f کاملاً مشخص نباشد باید از تقریب هایی استفاده کرد.

۴-۱- بررسی حالت کنترلر تطبیقی با پسخورد

کنترل تطبیقی غیر خطی

در اینجا طبق ساختاری که در شکل ۲ مشخص شده است می توانیم قانون کنترلر را بنویسیم:

$$u = u_{ad} + u_{ff} - u_{fb} := -\hat{f}(x) + x_d^{(n)} - Ke \quad (10)$$

\mathbf{K} در اینجا یک بردار است $\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ و طوری انتخاب می شود که ریشه های چند جمله ای

$$s^n + \sum_{i=1}^n k_i s^{i-1} = 0$$

ای $\hat{f}(x)$ نیز تقریبی از f است که می توان آن را به صورت $\hat{f}(x) = \mathbf{f}^T(x) \hat{\mathbf{q}}$ نوشت.

با توجه به فرمی که در معادله (۸) مطرح شد و با استفاده از معادله (۱۰) اگر مقدار دلخواه حالتها را از مقدار واقعی آنها کم کرده و خطا را محاسبه کنیم خواهیم داشت:

$$\dot{e} = Ae + b(f - \hat{f}) = Ae + b(-\mathbf{f}^T \hat{\mathbf{q}}) \quad (11)$$

که در آن :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \mathbf{L} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{O} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{L} & 1 \\ -k_1 & -k_2 & \mathbf{L} & -k_n \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

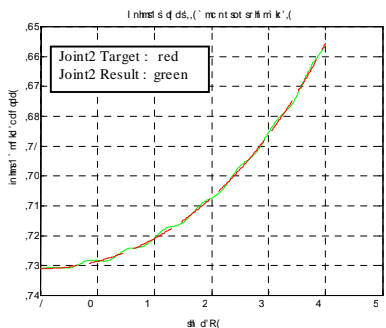
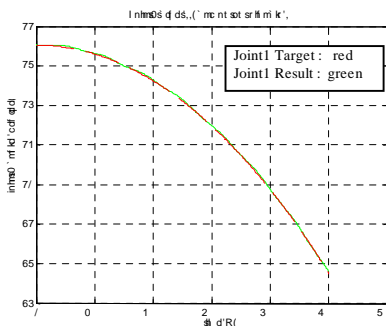
به طوریکه $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ و A هرویتز است.

اگر $\mathbf{c} = [\Lambda_1, \mathbf{L}, \Lambda_n]$ را تعریف کنیم، $\Lambda_i > 0$ باید طوری انتخاب شوند که (A, b, c) مینیمال باشند و $\mathbf{H}(s) = \mathbf{c}(s\mathbf{I} - A)^{-1} b$ SPR باشد. e_1 که در واقع خطای

شبیه سازی به ازای همان پارامترها و همان مسیر به روش FEL انجام میگردد. شکل ۸ نمودار گشتاور مفصل را در وضعیت بار کامل، به همراه محدوده مجاز گشتاور مفصل نشان می دهد. شکل ۹ مسیر مطلوب و مسیر طی شده ربات، بر حسب متر به ازای روش پیشنهادی و روش مود لغزشی را نشان می دهد و همان طور که ملاحظه می گردد، قید دقت به مرزهای تعیین شده رسیده اند. مقدار بار ماکزیمم برای این حالت به روش FEL 3.5 Kg بدست می آید در حالی که مقدار بار ماکزیمم بدست آمده در [7] 0.825 Kg

جدول (۱): پارامترهای مفصل بازوی ربات با دو مفصل انعطاف پذیر

Parameter	Value	Unit
Spring Constant	$k_1 = k_2 = 5.5$	N/M
Motor Moment of inertia	$I_{r1} = I_{r2} = 9.9 \times 10^{-12}$	Kg-m ²
Link Moment of inertia	$I_{1,2} = m_{1,2} L_{1,2}^2 / 12$	Kg-m ²
Link length	$L_1 = L_2 = 1, L_{c1} = L_{c2} = 0.5$	m
Link mass	$m_1 = m_2 = 1$	Kg
Actuator Stall Torque	$t_s = 0.63$	N-m
Maximum No Load Speed	$w_0 = 3.5$	rad /S
Initial Condition	$q_1 = 87, q_2 = -84$	Degree



شکل ۴: نمودار زاویه مفصل اول و دوم بازوی ربات با دو مفصل انعطاف پذیر

حالا تحلیل لیاپونوف را برای ساختار آموزش کنترل تطبیقی و FEL بیان می کنیم. تابع لیاپونوف زیر را در نظر بگیرید:

$$V = \frac{1}{2} e^T S e + \frac{1}{2} q^T \Gamma^{-1} q \quad (18)$$

بوسیله لم Lefschetz-Kalman-Yakubovich و با فرض SPR بودن (A,b,c) ماتریس های متقارن S و L که مثبت معین هستند و بردار q و M>0 وجود خواهند داشت که بتوان رابطه زیر را نوشت:

$$A^T S + S A = -q q^T - m L \quad (19)$$

$$S b = c^T \quad (20)$$

۵- شبیه سازی

۵-۱- شبیه سازی ربات با دو مفصل انعطاف پذیر و محاسبه DLCC

در این بخش نتایج شبیه سازی با نتایج ارائه شده در [6] که از روش خطی سازی فیدبک استفاده نموده است و [7] که روش مود لغزشی را به کار برده است، مقایسه میگردد.

۵-۱-۱- مقایسه با روش خطی سازی فیدبک

در [6] شبیه سازی بازوی ربات دو لینکی با مفاصل انعطاف پذیر را برای حالتی که مسیر مطلوب برای حرکت به صورت:

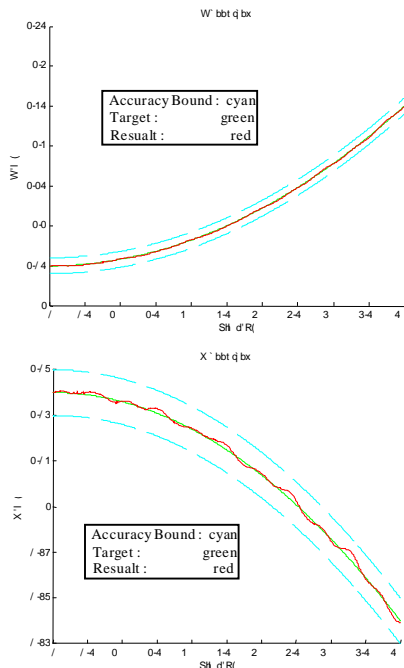
$$X_d = 1.05 - 0.02t^2, \quad Y_d = 1.05 + 0.01t^2$$

در نظر گرفته شود و پارامترهای ربات و محرک ها طبق جدول (۱) می باشد، به انجام می رسانیم. شکل ۴ نمودار حرکت زوایای مفاصل اول و دوم را به نمایش می گذارد و شکل ۵ نمودار گشتاور مفصل را در وضعیت بار کامل، به همراه محدوده مجاز گشتاور مفصل نشان می دهد. شکل ۶ مسیر مطلوب و مسیر طی شده ربات، بر حسب متر به ازای روش پیشنهادی و روش فیدبک خطی را نشان می دهد و همان طور که ملاحظه می گردد، قید دقت به مرزهای تعیین شده رسیده اند. همچنین شکل ۷ نمودار دقت محورهای X,Y را نشان می دهند.

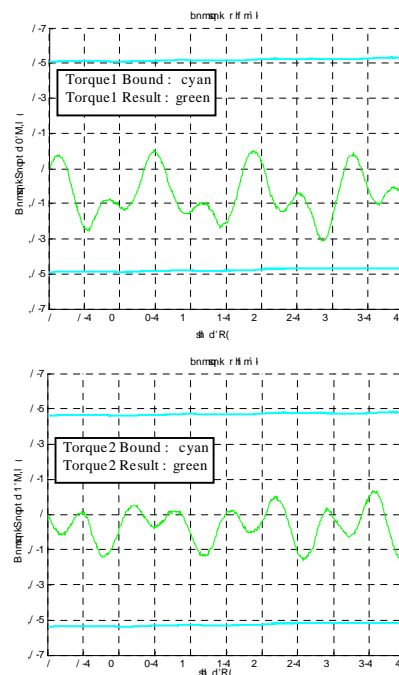
ماکزیمم ظرفیت حمل باری که از روش FEL برای این مثال بدست می آید 2Kg است در حالی که ماکزیمم بار بدست آمده در [6] 1.7Kg میباشد.

۵-۱-۲- مقایسه با روش مودلغزشی

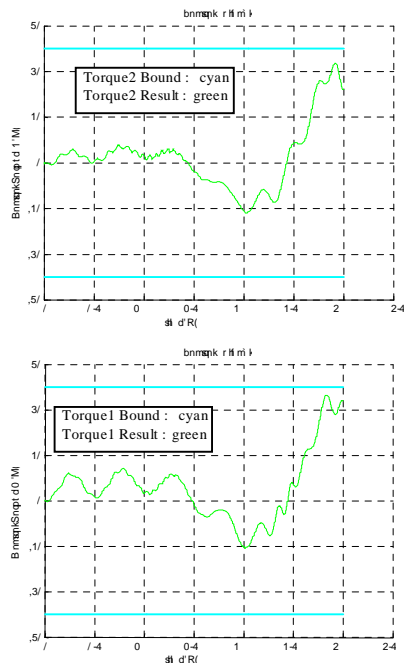
در [7] شبیه سازی بازوی ربات دو لینکی با مفاصل انعطاف پذیر، برای حالتیکه زوایای مطلوب مفاصل به صورت $q_{3d} = 1 - t^2, \quad q_{1d} = t^2$ باشد، انجام شده است. در اینجا



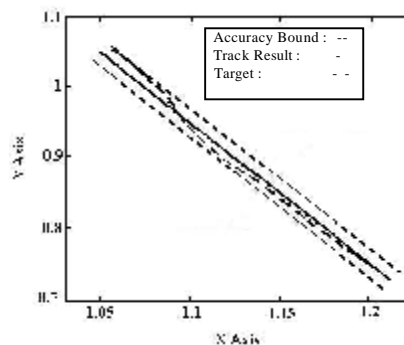
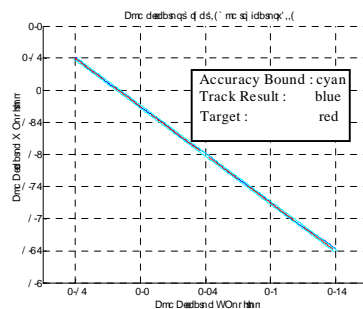
شکل ۷: نمودار موقعیت محور Y و X پنجه بازوی ربات با دو مفصل انعطاف پذیر



شکل ۵: نمودار گشتاور اعمالی ($N-m$) مفصل اول و دوم بازوی ربات با دو مفصل انعطاف پذیر



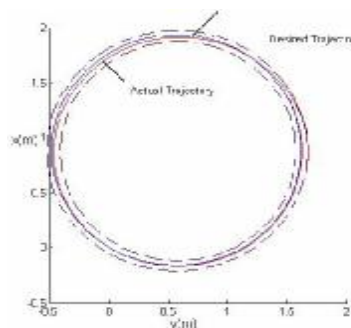
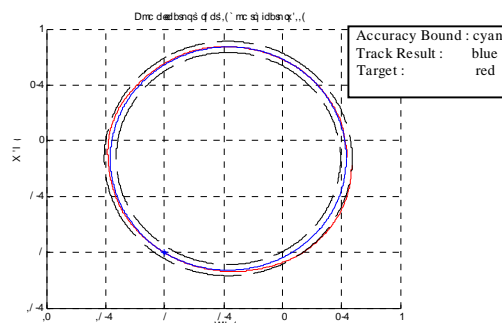
شکل ۸: نمودار گشتاور اعمالی ($N-m$) مفصل اول و دوم بازوی ربات با دو مفصل انعطاف پذیر



شکل ۶: نمودار مقایسه موقعیت پنجه بازوی ربات با دو مفصل انعطاف پذیر (a) کنترلر FEL، (b) کنترلر فیدبک خطی

مراجع

- [1] Korayem M.H., Yao Y. and Basu A., August, "Dynamic Load Carrying Capacity for a Multi-link Flexible Arm", Proc. Int. Conf. Control and Robotics Automation., 1991
- [2] Wang T., Ming Jun Kuo, "Dynamics Load-Carrying Capacity and Inverse Dynamics of Multiple Cooperating Robotic Manipulators", IEEE Transactions of Robotics and Automation, Vol. 10, No. 1, PP. 71-77., February 1994
- [3] Korayem M.H., Yao Y. and Basu A., "Maximum Allowable Load of Flexible Manipulator for a Given Dynamic Trajectory", International Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 10(4), PP. 302-309., 1993
- [4] Korayem M.H. and Basu A., "Dynamic Load Carrying Capacity of Robotic Manipulators with Joint Elasticity Imposing Accuracy Constraints", Robotic and Autonomous Systems 13, PP. 219-229., 1994
- [5] Wang L.T., Ravani B., "Dynamic Load Carrying Capacity of Mechanical Manipulators", Transactions of ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control 110, part I and II: Problem formulation, PP. 46-61., 1988
- [6] Korayem · F. Davarpanah · H. Ghariblu, "Load Carrying Capacity of Flexible Joint Manipulators with Feedback Linearization", International Journal of Manufacturing ,2006
- [7] H. Korayem ,A. Pilechian, "Maximum Dynamic Load Carrying Capacity in Flexible Joint Robots Using Sliding Mode Control ", Tehran International Congress on Manufacturing Engineering (TICME2005) December 12-15, 2005, Tehran, Iran
- [8] Sidi E.V.O., Sicard P., Massicotte D., Lesueur S., "Adaptive High Precision Control for a FJ with Friction and Parameter Uncertainties Using Neural ", Canadian Cont. on Electrical and Computer Engineering, 1998



شکل ۹: نمودار مقایسه موقعیت پنجه بازوی ربات با دو مفصل انعطاف پذیر (a) کنترلر FEL، (b) کنترلر مودلغزشی

۶- نتیجه گیری

FEL روشی کارآمد در کنترل رباتها می باشد. بکارگیری این روش در کنترل رباتهای صلب ساده می باشد، و برای رباتهای n لینکی با مفصل انعطاف پذیر نیز قابل تعمیم می باشند، استفاده از نتایج حاصله برای ربات یک لینکی و دو لینکی می توان از این شیوه بهره جست. با دنبال کردن مراحل شبیه سازی مشخص می شود، ماکزیمم اندازه خطای ردیابی و مقدار بار ماکزیمم قابل حمل توسط بازوی ربات با هم تغییر میکنند بنابراین میتوان در هر کاربرد خاص بار بیشتر و یا خطای کمتری داشت.

همانطور که دیدیم در روش FEL به خاطر امکان رفع خطای ردیابی در هر لحظه از مسیر، خطای سیستم نسبت به روش های قبلی، کاهش می یابد، بدین ترتیب ماکزیمم بار قابل حمل ربات افزایش می یابد. به عبارت دیگر چون افزودن بار باعث افزایش خطای ردیابی می شود، برای اینکه بتوان ظرفیت بار قابل حمل ربات را افزایش داد باید میزان خطای ردیابی را کاهش داد. از روش FEL استفاده کردیم تا خطای ردیابی کاهش یابد و در نتیجه ظرفیت بار قابل حمل دینامیکی ربات (DLCC) افزایش یابد. در یک جمع بندی کلی می توان گفت برای افزایش DLCC ربات می توان از روش FEL به جای روش معمول رو به جلو استفاده کرد، و برای افزایش DLCC در FEL می توان با تغییر ضرایب آموزش و فیدبک بهره، خطای ردیابی کاهش یابد.