

کنترل هیبرید رباتهای کابلی با کابل‌های کشسان

مژگان ملکی فرد^۱ جواد احيائي^۲ اميرفرهاد احيائي^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده فنی مهندسی- گروه مهندسی برق- دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)- قزوین- ایران
f.hyaei@eng.ikiu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده فنی مهندسی- گروه مهندسی مکانیک- دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)- قزوین- ایران
jehyaei@eng.ikiu.ac.ir

۳- استادیار- دانشکده فنی مهندسی- گروه مهندسی برق- دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)- قزوین- ایران

چکیده: در این مقاله یک روش کنترلی اصلاح شده تطبیقی مقاوم برای کنترل رباتهای کابلی کاملاً مقید با کابل‌های کشسان ارائه می‌شود. ابتدا یک الگوریتم کنترلی تطبیقی مبتنی بر کنترل مود لغزشی برای رباتهای صلب معرفی می‌گردد و برای اطمینان از اینکه همه کابلها در محدوده کاری تحت کشش هستند از مفهوم نیروی داخلی استفاده می‌شود. سپس کنترل کننده تطبیقی رباتهای صلب با تبدیل معادلات دینامیکی به دست آمده به فرم آشفته تکین برای کنترل رباتهای با کابل‌های کشسان توسعه داده می‌شود. برای بهبود پایداری و عملکرد مقاوم سیستم به عنوان یکی از نوآوریهای مقاله، یک عبارت اصلاح کننده به قانون تطبیق رباتهای صلب اضافه می‌شود و تحلیل پایداری سیستم به کمک تئوری لیاپانوف انجام می‌شود. در انتها ضمن ارائه نتایج شبیه‌سازی ربات مورد نظر با کابل‌های انعطاف پذیر، کارآمدی الگوریتم کنترلی پیشنهادی در برابر عدم قطعیت پارامترهای دینامیکی اثبات می‌شود و با مقایسه عملکرد روش کنترلی پیشنهاد شده در این مقاله با کنترل کننده تطبیقی مقاوم اولیه، بهبود چشمگیر در دقت ردیابی مسیر مطلوب تأیید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رباتهای کابلی، کابل‌های الاستیک، کنترل مقاوم تطبیقی، مدل آشفته تکین، تحلیل پایداری

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.2.221

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر جواد احيائي

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - قزوین - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - دانشکده‌ی فنی و مهندسی - گروه مکانیک

۱- مقدمه

الکترومکانیکی غیر خطی در حضور عدم قطعیت های پارامتری پرداختند.

مهمترین دستاورد مقاله حاضر، توسعه یک کنترل کننده هیبرید مقاوم تطبیقی از طریق افزودن یک ترم اصلاح کننده در قانون تطبیق سیستم برای رباتهای کابلی کاملاً مقید با در نظر گرفتن کشسانی کابلها در مدل دینامیکی سیستم است که منجر به بهبود عملکرد مقاوم سیستم در حضور عدم قطعیت های پارامتری می گردد. برای این منظور معادلات دینامیکی سیستم به فرم یک مجموعه معادله غیرخطی آشفته تکین نوشته می شوند که پس از حذف دینامیک سریع سیستم به سمت پاسخ یک ربات صلب میل می نماید. این کنترل کننده بر پایه دانش کران بالای عدم قطعیتها طراحی می گردد و پایداری سیستم حلقه بسته با استفاده از تئوری لیاپانوف تحقیق می شود. این روش کنترلی بدلیل سادگی اجرا و قابلیت بهره برداری از دانش قابل ملاحظه ای که برای کنترل رباتهای صلب وجود دارد بسیار مطلوب است.

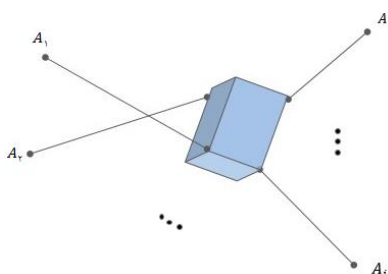
در ادامه، روش پیشنهادی به شرح زیر توضیح داده می شود: بخش ۲ مدل دینامیکی ربات موازی کابلی کاملاً مقید را معرفی می نماید. در بخش ۳-۱ یک کنترل کننده مقاوم تطبیقی برای ربات صلب ارائه می شود. سپس یک روش کنترل ترکیبی اصلاح شده بر پایه مدل آشفته تکین ربات با کابل های الاستیک در بخش ۳-۲ بنا نهاده می شود. بخش ۳-۳ تجزیه و تحلیل پایداری سیستم انعطاف پذیر حلقه بسته حاصل را پوشش می دهد. در آخر، در بخش ۴ عملکرد کنترل کننده ترکیبی پیشنهاد شده با استفاده از شبیه سازیها مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۲- دینامیک رباتهای کابلی

۲-۱- مدل دینامیکی رباتهای کابلی صلب

شکل (۱) ساختار کلی یک ربات موازی کابلی کاملاً مقید با n درجه آزادی و l کابل را نشان می دهد. A_i ها پایه ثابت کابلها هستند. مدل دینامیکی این ربات با ملاحظه دینامیک عملگرها و صرف نظر کردن از انعطاف پذیری و جرم کابلها عبارت است از [۱۴]:

$$M_{eq}(x)\ddot{x} + C_{eq}(x, \dot{x})\dot{x} + G_{eq}(x) = f = J^T u_s \quad (1)$$



شکل (۱): شماتیک یک ربات موازی کابلی کاملاً مقید

که در آن:

$$\begin{aligned} M_{eq}(x) &= rM(x) + r^{-1}J^T I_m J, G_{eq}(x) = rG(x) \\ C_{eq}(x, \dot{x}) &= rC(x, \dot{x}) + r^{-1}J^T I_m \dot{J} \end{aligned} \quad (2)$$

رباتهای کابلی گروه خاصی از بازوهای موازی با عملگرهای الکتریکی هستند که با تعدادی کابل به بستر متحرک متصل می شوند. این عملگرها سبب می شوند تا با تغییر طول کابلها مجری نهایی به سمت موقعیت مطلوب حرکت کند. در این رباتها، با استفاده از کابلهای سبک بجای رابطهای صلب، جرم قسمتهای متحرک بطور چشمگیری کاهش می یابد. در نتیجه، رباتهای کابلی برای بازوهای سرعت بالا کاربرد دارند [۱]. اینرسی پایین، نسبت بالای بار به وزن، هزینه های پایین طراحی و ساخت، شکل دهی مجدد و اجرای آسان برخی از مزایای رباتهای کابلی نسبت به رباتهای مرسوم سری و موازی می باشند [۲-۴]. به دلیل این ویژگیهای منحصر به فرد، رباتهای کابلی اخیراً در حوزه های گوناگون و برای کاربردهایی مانند مشاهدات نجومی [۵]، توانبخشی [۶] و ... توجه محققان را به خود جلب نموده است. تفاوت اصلی اینگونه رباتها در مقایسه با رباتهای مرسوم از این ویژگی منحصر به فرد ناشی می شود که کابلها فقط تحت کشش کار می کنند.

کنترل پی ای دی مقاوم [۷]، خطی سازی بازخورد [۸]، کنترل دینامیک معکوس یا گشتاور محاسبه شده [۹]، مود لغزشی [۱۰]، کنترل تطبیقی [۱۱] و کنترل مقاوم تطبیقی [۱۲] از الگوریتمهای کنترلی هستند که تاکنون برای رباتهای کابلی صلب استفاده شده اند. در عمل، این روشها به اندازه کافی دقیق نیستند زیرا کشسانی کابلها را در مدل سازی و کنترل لحاظ نمی کنند. اگرچه استخراج دینامیک سیستم با فرض انعطاف پذیری کابلها معادلات آنرا پیچیده تر می کند اما صرف نظر کردن از این ویژگی سبب خطاهای جدی در کنترل سیستم می شود. لذا، جهت حذف نوسانات کشسان، کنترل کننده هایی در مختصه طول کابل [۱۳] یا مختصه فضای کاری [۱۴-۱۶] پیشنهاد شده اند. اما کنترل کننده های طول کابل به دلیل انعطاف پذیری ذاتی کابلها دقت مناسبی ندارند [۱۱]. در [۱۴] برای از بین بردن نوسانات کابلها یک کنترل کننده مرکب با ترکیب کنترل کننده پی ای دی مقاوم و یک عبارت کنترلی سریع طراحی می شود. مؤلفان مقاله ثابت می نمایند که از ارتعاش عرضی کابلها در رباتهای موازی کابلی کاملاً مقید (تعداد عملگرها بیشتر از درجات آزادی سیستم) در حضور ارتعاش طولی می توان صرف نظر کرد. با این فرض، دینامیک غالب متناظر با ارتعاش طولی کابلها را می توان بصورت فنرهای محوری خطی بدون جرم در نظر گرفت. در [۱۵-۱۶] بر این اساس معادله ارتعاشات نامطلوب پایه متحرک از معادلات حرکت مطلوب جداسازی می شود و یک جبران ساز مقاوم و بهینه جهت حداقل کردن اثر ارتعاشات نامطلوب طراحی می گردد. اما با نادیده گرفتن اثرات دینامیکی در ساختار این کنترل کننده ها، دقت مورد انتظار در ردیابی اهداف در حضور عدم قطعیتها حاصل نمی شود.

ویسی، م. و همکاران [۱۷] در مقاله ای به طراحی کنترل کننده فازی پایدار با قابلیت حذف اغتشاش برای دسته ای از سیستمهای

که S سطح لغزش بصورت $S = \dot{x} + b\tilde{x}$ و \tilde{I}_D و b ماتریسهای مثبت معین قطری متقارن هستند. $\tilde{x} = x - x_d$ بردار خطای ردیابی و x_d مسیر مطلوب را نشان می‌دهد. $\tilde{a} = \hat{a} - a$ بردار خطای تخمینی پارامترهای دینامیکی است که در آن بردار پارامتر تخمین زده شده دینامیکی را نشان می‌دهد. حال با در نظر گرفتن مسیر مجازی بصورت $x_r = x_d - b \int_0^t \tilde{x} dt$ و مشتق‌گیری از (۷) داریم:

$$\dot{V}(t) = S^T (J^T u_s - M_{eq} \ddot{x}_r - C_{eq} \dot{x}_r - G_{eq}) + \tilde{a}^T \tilde{I}_D \tilde{a} \quad (۸)$$

بر این اساس قانون کنترل را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$f = J^T u_s = \hat{M}_{eq} \ddot{x}_r + \hat{C}_{eq} \dot{x}_r + \hat{G}_{eq} - K_D S \quad (۹)$$

که K_D یک ماتریس قطری مثبت ثابت است و \hat{M}_{eq} ، \hat{C}_{eq} و \hat{G}_{eq} به ترتیب پارامترهای تخمینی M_{eq} ، C_{eq} و G_{eq} می‌باشند و داریم:

$$\begin{cases} \hat{M}_{eq} = \tilde{M}_{eq} + M_{eq}, \hat{C}_{eq} = \tilde{C}_{eq} + C_{eq} \\ \hat{G}_{eq} = \tilde{G}_{eq} + G_{eq} \end{cases} \quad (۱۰)$$

که \tilde{M}_{eq} ، \tilde{C}_{eq} و \tilde{G}_{eq} پارامترهای خطای تخمینی متناظر هستند. بدین ترتیب با بهره‌گیری از (۳) می‌توان نوشت [۱۱]:

$$\tilde{M}_{eq} \ddot{x}_r + \tilde{C}_{eq} \dot{x}_r + \tilde{G}_{eq} = Y_D(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dot{x}_r, \ddot{x}_r) \tilde{a} \quad (۱۱)$$

نهایتاً با تعریف قانون تطبیق بصورت $\dot{\tilde{a}} = -I_D^{-1} Y_D^T S$ و جایگذاری در رابطه (۸) و پس از اندکی ساده‌سازی نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{V}(t) = -S^T K_D S \leq 0 \quad (۱۲)$$

به عبارت دیگر، $\dot{V}(t)$ خارج از سطح لغزش اکیدا منفی است و پایداری و مقاوم بودن قانون کنترل پیشنهاد شده اثبات می‌شود. علاوه بر این، قانون کنترل کلی سیستم به صورت زیر است [۱۸]:

$$u_s = \bar{u}_s + mQ \quad (۱۳)$$

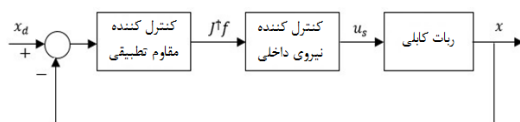
که در آن \bar{u}_s مطابق رابطه زیر کمینه پاسخ است:

$$\bar{u}_s = J^\dagger (\hat{M}_{eq} \ddot{x}_r + \hat{C}_{eq} \dot{x}_r + \hat{G}_{eq} - K_D S) \quad (۱۴)$$

در رابطه فوق J^\dagger شبه معکوس J^T بوده و Q نیروی داخلی است که فضای نول J^T را گسترش می‌دهد و باید رابطه زیر را ارضا نماید:

$$J^T Q = 0 \quad (۱۵)$$

m در رابطه (۱۳) برای اطمینان از کشش مثبت در کابل‌ها و تحت کشش نگاه داشتن همه کابل‌ها در تمام فضای کاری محاسبه می‌شود. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، کشش مثبت کابل‌ها نتیجه این روال کنترلی به عنوان کنترل‌کننده نیروی داخلی است.



شکل (۲): دیاگرام بلوکی کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی

و X بردار موقعیت عملگر نهایی و $M(x)$ ماتریس جرم، $C(x, \dot{x})$ ماتریس جملات مرکزگرا و کوریولیس و $G(x)$ بردار جملات گرانشی را نشان می‌دهد. همچنین r و u_s به ترتیب شعاع پولی و گشتاور ورودی موتورهای ربات صلب و f ، I_m و J به ترتیب بردار رنج دکارتی، ماتریس اینرسی عملگر و ماتریس ژاکوبین ربات می‌باشند. برخی از ویژگیهای مهم معادله حرکت عبارتند از [۱۱، ۱۴]:

$$۱. M_{eq}(x) متقارن است و برای همه x ها مثبت معین است.$$

$$۲. \dot{M}_{eq}(x) - 2C_{eq}(x, \dot{x}) پاد متقارن است.$$

۳. با قابلیت پارامتری شدن خطی دینامیک سیستم، مدل (۱) به فرم حاصلضرب ماتریس رگرسور و بردار پارامترها نوشته می‌شود:

$$M_{eq}(x)\ddot{x} + C_{eq}(x, \dot{x})\dot{x} + G_{eq}(x) = Y(x, \dot{x}, \ddot{x})a \quad (۳)$$

که Y ماتریس توابع معلوم و a بردار پارامترهای دینامیکی است.

۲-۲- مدل دینامیکی ربات با کابل‌های کشسان

در این بخش، مدل دینامیکی رباتهای موازی کابلی کاملاً مقید با کابل‌های الاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که در رباتهای موازی کابلی کاملاً مقید، دینامیک غالب کابل‌ها مربوط به ارتعاشات طولی است [۱۴]. بنابراین، در نظر گرفتن کابل‌ها به عنوان فنرهای خطی یک راه مناسب برای استخراج دینامیک سیستم است. فرض کنید بردارهای L_1 و L_2 به ترتیب معرف طول کابل‌های کشیده شده و بدون کشش باشند. با در نظر گرفتن ماتریس قطری K به عنوان ضریب سفتی کابل و سفتی یکسان برای کلیه کابل‌ها معادلات دینامیکی به صورت زیر اصلاح می‌شوند [۱۸]:

$$M(x)\ddot{x} + C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) = J^T K (L_2 - L_1) \quad (۴)$$

$$I_m \ddot{q} + D\dot{q} + rK (L_2 - L_1) = u \quad (۵)$$

که در روابط فوق:

$$r q = \Delta L = L_2 - L_0, \quad \dot{L}_1 = J\dot{x} \quad (۶)$$

و L_0 و q به ترتیب بردارهای طول اولیه کابل و موقعیت محور موتور هستند. همچنین D و u به ترتیب ماتریس مثبت معین قطری اصطکاک لزجی عملگر و بردار گشتاور ورودی موتور می‌باشند. می‌توان نشان داد که اگر سفتی K کابل‌ها به بی‌نهایت میل کند مدل ربات موازی کابلی با کابل‌های کشسان به رابطه (۱) تبدیل می‌شود [۱۵].

۳- کنترل رباتهای کابلی

۳-۱- کنترل رباتهای کابلی صلب

برای استخراج قانون تطبیق و کنترل، تابع لیاپانوف زیر را در نظر بگیرید:

$$V(t) = \frac{1}{2} (S^T M_{eq} S + \tilde{a}^T \tilde{I}_D \tilde{a}) \quad (۷)$$

$$|a_i| < a_{0i} \quad (26)$$

اهمیت عبارت اصلاح کننده فوق برای پایداری کل سیستم در انتهای بخش ۳ مشخص می شود.

۳-۳-۳ تجزیه و تحلیل سیستم آشفته تکین

استراتژی تجزیه و تحلیل پایداری سیستم در مقاله حاضر شامل بررسی سیستم صلب (با انتخاب $\varepsilon = 0$) و ارتباط آن با سیستم منعطف از طریق شرایط مرزی است
با توسعه تحلیل مطرح شده در [۱۹] می توان پایداری کل سیستم را در چهار مرحله اثبات کرد:

۳-۳-۱-۱ سیستم کاهش یافته

با انتخاب $\varepsilon = 0$ در رابطه (۱۷)، سیستم کاهش یافته را می توان محاسبه کرد. از آنجا که A_2 معکوس پذیر است، در نتیجه $y = 0$ یک ریشه سیستم کاهش یافته خواهد بود و داریم:

$$\dot{p} = f(t, p, y = 0) = \begin{bmatrix} A_1 & A_4 \\ -I_D^{-1}\varphi & -I_D^{-1}\Sigma \end{bmatrix} p \quad (27)$$

سیستم کاهش یافته (۲۷) معادل ربات صلب با کنترل مقاوم تطبیقی و قانون تطبیق شامل عبارت اصلاح کننده است. حال در نظر بگیرید:

$$v(\tilde{x}, S, \tilde{a}) = v(X, \tilde{a}) = v(p) = \frac{1}{2} p^T p_v \quad (28)$$

که در رابطه فوق:

$$p_v = \begin{bmatrix} 2b^T K_D & 0_{n \times n} & 0_{n \times e} \\ 0_{n \times n} & M_{eq} & 0_{n \times e} \\ 0_{e \times n} & 0_{e \times n} & I_D \end{bmatrix} \quad (29)$$

با مشتق گیری از رابطه (۲۸) و ساده سازی می توان نوشت:

$$\dot{v} = [\nabla_p v(p)]^T f(t, p, y = 0) \leq \quad (30)$$

$$-\alpha_1 \|X\|_2^2 - 1/2 \sigma_m \|\tilde{a}\|_2^2 + 1/2 \sigma_M \|a\|_2^2$$

که در آن:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \lambda_{\min} [R] > 0 \\ \sigma_m := \min \{ \sigma_{s1}, \sigma_{s2}, \dots, \sigma_{sr} \} \\ \sigma_M := \max \{ \sigma_{s1}, \sigma_{s2}, \dots, \sigma_{sr} \} \end{cases} \quad (31)$$

به طوریکه $R = \begin{bmatrix} 2b^T K_D b & -b^T K_D \\ -K_D^T b & K_D \end{bmatrix}$ مثبت معین است.

۳-۳-۲ سیستم لایه مرزی

سیستم لایه مرزی بصورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{dy}{d\tau} = g(t, p, y(\tau), \varepsilon = 0) = A_2 y \quad (32)$$

که $\tau = t/\varepsilon$ یک مقیاس زمانی است. از آنجائیکه A_2 یک ماتریس ثابت هورویتز است می توان نوشت:

$$A_2^T H + H A_2 = -N \quad (33)$$

۳-۲ کنترل رباتهای کابلی با کابلهای کشسان

این روش بر پایه اضافه کردن عبارت اصلاح کننده به قوانین کنترل و تطبیق رباتهای صلب مطابق قانون کنترل ترکیبی زیر است:

$$u = u_s + u_f \quad (16)$$

که در آن $u_f = K_d (\dot{L}_1 - \dot{L}_2)$ با استفاده از مدل صلب طراحی می شود [۱۸]. حال با فرض ε به عنوان یک پارامتر کوچک اسکالر جهت توصیف دینامیک بخش سریع سیستم (ناشی از وجود انعطاف در کابلها) می توان روابط ربات را به فرم سیستم آشفته تکین غیرخطی استاندارد زیر نوشت [۱۹]:

$$\begin{cases} \dot{p} = f(t, p, y) = \begin{bmatrix} A_1 & A_4 \\ -I_D^{-1}\varphi & -I_D^{-1}\Sigma \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} A_3 \\ 0_{e \times 2l} \end{bmatrix} y \\ \varepsilon \dot{y} = g(t, p, y, \varepsilon) = A_2 y + \varepsilon A_2^{-1} B_2 U \end{cases} \quad (17)$$

که $p = \begin{bmatrix} X \\ \tilde{a} \end{bmatrix}$ متغیر آرام و $y = \begin{bmatrix} z \\ \varepsilon \tilde{z} \end{bmatrix}$ متغیر سریع است.

$$U = (u_s - r^{-1} I_m \ddot{L}_1 \quad \text{و} \quad z = K(L_2 - L_1 \quad , X = \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ s \end{bmatrix}$$

می باشند. \dot{p} زیر سیستم آرام با مولفه های زیر است:

$$A_1 = A_1(X, x_d, \dot{x}_d) = \begin{bmatrix} -b & I_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & -M_{eq}^{-1}(x)(C_{eq}(x, \dot{x}) + k_D) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$A_4 = A_4(X, x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d) = \begin{bmatrix} 0_{n \times e} \\ M_{eq}^{-1}(x) Y_D \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$A_3 = A_3(X, x_d) = \begin{bmatrix} 0_{n \times l} & 0_{n \times l} \\ M_{eq}^{-1}(x) r J^T & 0_{n \times l} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\varphi = \varphi(X, x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d) = \begin{bmatrix} 0_{e \times n} & Y_D^T \end{bmatrix} \quad (21)$$

همچنین $\varepsilon \dot{y}$ زیر سیستم سریع است که در آن:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0_{l \times l} & I_{l \times l} \\ -r^2 I_m^{-1} K_1 & -r I_m^{-1} K_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0_{l \times l} \\ r I_m^{-1} K_1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

و K_1 و K_2 اسکالر هستند. در این معادلات، قانون تطبیق به صورت مقاله به عنوان یک ترم اصلاح کننده در نظر گرفته شده است که به محدود شدن خطای ردیابی کمک می کند و:

$$\Sigma = \text{diag}[\sigma_{s1}, \sigma_{s2}, \dots, \sigma_{sr}] \quad (24)$$

$$\sigma_{si}(t) = \begin{cases} 0 & : |\hat{a}(t)| < a_{0i} \\ \sigma_{0i} \left(\frac{|\hat{a}(t)|}{a_{0i}} - 1 \right) & : a_{0i} < |\hat{a}(t)| < 2a_{0i} \\ \sigma_{0i} & : |\hat{a}(t)| > 2a_{0i} \end{cases} \quad (25)$$

σ_{0i} یک پارامتر طراحی مثبت است و طوری انتخاب می شود که:

در این رابطه H یک ماتریس مثبت معین متقارن و N یک ماتریس مثبت معین است. بر این اساس تابع لیاپانوف زیر را در نظر بگیرید:

$$W(y) = y^T H y \quad (34)$$

ثابت می‌شود:

$$\dot{W} = [\nabla_y W(y)]^T g(t, p, y(\tau), \varepsilon = 0) \leq -\alpha_2 \|y\|_2^2 \quad (35)$$

که در آن:

$$\alpha_2 = \lambda_{\min}[N] > 0 \quad (36)$$

۳-۳-۳- اولین شرط اتصال داخلی

اولین شرط اتصال داخلی شامل رابطه بین زیر سیستم کند و سیستم کاهش یافته بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[\nabla_p v(p)]^T [f(t, p, y) - f(t, p, y = 0)] = \quad (37)$$

$$X^T S y \leq \beta_1 \|X\|_2 \|y\|_2,$$

$$\beta_1 = \sup_B \|S\|_{2i}; S = \begin{bmatrix} 0_{n \times l} & 0_{n \times l} \\ rJ^T & 0_{n \times l} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\|S\|_{2i} = \{\lambda_{\max}(S^T S)\}^{1/2} \quad (39)$$

$$B = \{(\|X\|_2, \|\tilde{a}\|_2, \|y\|_2) : (X, \tilde{a}, y) \in B\} \quad (40)$$

۳-۳-۴- دومین شرط اتصال داخلی

دومین شرط اتصال داخلی شامل رابطه بین قسمت تند سیستم اصلی و لایه مرزی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$[\nabla_y W(y)]^T [g(t, p, y(\tau), \varepsilon) - g(t, p, y(\tau), \varepsilon = 0)] = \quad (41)$$

$$= 2\varepsilon y^T H A_2^{-1} B_2 \dot{U}$$

به سادگی می‌توان اثبات کرد که $B_2 = A_2 \begin{bmatrix} -r^{-1} I_{l \times l} \\ 0_{l \times l} \end{bmatrix}$ بنابراین:

$$[\nabla_y W(y)]^T [g(t, p, y(\tau), \varepsilon) - g(t, p, y(\tau), \varepsilon = 0)] \quad (42)$$

$$\leq 2\varepsilon \|y\|_2 \|H\|_{2i} \left\| \begin{bmatrix} -r^{-1} I_{l \times l} \\ 0_{l \times l} \end{bmatrix} \right\|_{2i} \|\dot{U}\|_{2i}$$

حال با فرض:

$$F = I_{l \times l} + r^{-2} I_m J M^{-1} J^T \quad (43)$$

و کمی ساده سازی داریم:

$$U = -F^{-1} \begin{bmatrix} r^{-1} I_m J M^{-1} J^T & 0_{l \times l} \end{bmatrix} y + F^{-1} u_s \quad (44)$$

$$+ F^{-1} r^{-1} I_m \dot{J} \dot{x} - F^{-1} r^{-1} I_m J M^{-1} G$$

$$= U(X, \tilde{a}, y, x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d)$$

بنابراین با تعریف:

$$\rho(t) = \frac{\partial U}{\partial x_d} \dot{x}_d + \frac{\partial U}{\partial \dot{x}_d} \ddot{x}_d + \frac{\partial U}{\partial \ddot{x}_d} x_d^{(3)} \quad (45)$$

می‌توان ثابت نمود:

$$\dot{U} = F \frac{\partial U}{\partial X} [A_1 X + \varnothing \tilde{a} + A_3 y] + F \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial y} A_2 y \quad (46)$$

$$- F \frac{\partial U}{\partial \tilde{a}} I_D^{-1} \varphi X - F \frac{\partial U}{\partial \tilde{a}} I_D^{-1} \Sigma \hat{a} + F \rho(t)$$

برای $(X, \tilde{a}, y) \in B$ ، فرض کنید:

$$\left\| F \frac{\partial U}{\partial X} A_3 y + F \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial y} A_2 y \right\|_2 \leq \left(k_3 + \frac{1}{\varepsilon} k_2 \right) \|y\|_2 \quad (47)$$

$$\left\| \left\{ F \frac{\partial U}{\partial X} A_1 - F \frac{\partial U}{\partial \tilde{a}} I_D^{-1} \varphi \right\} X \right\|_2 \leq k_1 \|X\|_2 \quad (48)$$

$$\left\| F \frac{\partial U}{\partial X} \varnothing \tilde{a} - F \frac{\partial U}{\partial \tilde{a}} I_D^{-1} \Sigma \hat{a} \right\|_2 \leq k_1 \|X\|_2$$

$$\|F \rho(t)\| \leq k_4(t) \quad (49)$$

که در آن:

$$k_2 = \sup_B \|F(\partial U / \partial y) A_2\|_{2i} \quad (50)$$

$$k_3 = \sup_B \|F(\partial U / \partial X) A_3\|_{2i} \quad (51)$$

$$k_1 = k_{01} + k_{02} + k_{03} \quad (52)$$

و k_{02} ، k_{03} و k_{01} عبارتند از:

$$\|F(\partial U / \partial X) \varnothing \tilde{a}\|_2 \leq k_{01} \|X\|_2 \quad (53)$$

$$\|F(\partial U / \partial \tilde{a})(I_D^{-1} \varphi X + I_D^{-1} \Sigma \hat{a})\|_2 \leq k_{02} \|X\|_2 \quad (54)$$

$$\|F(\partial U / \partial X) A_1 X\|_2 \leq k_{03} \|X\|_2 \quad (55)$$

از آنجائیکه مجموعه B فشرده است، برای وجود ضرایب ثابت k_i فقط به پیوستگی تابعهای درگیر نیاز داریم. بر این اساس:

$$\|\dot{U}\| \leq k_1 \|X\|_2 + \left(k_3 + \frac{1}{\varepsilon} k_2 \right) \|y\|_2 + k_4(t) \quad (56)$$

بنابراین با استفاده از رابطه‌های (۴۲) و (۵۶) می‌توان نوشت:

$$[\nabla_y W(y)]^T [g(t, p, y, \varepsilon) - g(t, p, y(\tau), \varepsilon = 0)] \leq \quad (57)$$

$$\varepsilon \left(\dot{\gamma}_1 + \frac{1}{\varepsilon} \gamma_2 \right) \|y\|_2^2 + \varepsilon \beta_2 \|X\|_2 \|y\|_2 + \varepsilon \mu(t) \|y\|_2$$

که در آن:

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_1 = 2r^{-1} \|H\|_{2i} k_3, \gamma_2 = 2r^{-1} \|H\|_{2i} k_2 \\ \beta_2 = 2r^{-1} \|H\|_{2i} k_1, \mu(t) = 2r^{-1} \|H\|_{2i} k_4(t) \end{cases} \quad (58)$$

از آنجائیکه مسیر مطلوب سه مرتبه مشتق پذیر پیوسته با مشتقات محدود است، $\exists \bar{\mu}$ ثابت حقیقی مثبتی وجود دارد که $\mu(t) \leq \bar{\mu}$.

۳-۳-۵- تابع لیاپانوف ترکیبی کاندید

تابع لیاپانوف ترکیبی زیر را برای سیستم آشفته تکین در نظر بگیرید:

$$v(p, y) = (1-d)v(p) + dW(y), 0 < d < 1 \quad (59)$$

در این صورت با اندکی محاسبه می‌توان نوشت:

$$\dot{v}(p, y) \leq -[\|X\|_2 \quad \|y\|_2] P_d \begin{bmatrix} \|X\|_2 \\ \|y\|_2 \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$-(1-d)1/2 \sigma_m \|\tilde{a}\|_2^2 + (1-d)1/2 \sigma_M \|a\|_2^2 + d \bar{\mu}^2$$

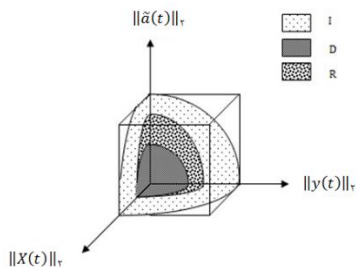
که در آن:

$$P_d = \begin{bmatrix} \alpha_1(1-d) & -((1-d)\beta_1 + d\beta_2)/2 \\ -((1-d)\beta_1 + d\beta_2)/2 & d/\varepsilon(\alpha_2 - \gamma_2) - d\gamma_1 \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$\gamma_1 = \dot{\gamma}_1 + 1/4 \quad (62)$$

$$\left(\|X(t=0)\|_2, \|\tilde{a}(t=0)\|_2, \|y(t=0)\|_2 \right) \in (I \setminus R) \subset D_c \quad (72)$$

در نتیجه تا زمانی که $\left(\|X(t)\|_2, \|\tilde{a}(t)\|_2, \|y(t)\|_2 \right)$ خارج از مجموعه R باشد $v < 0$ است و چنانچه از درون مجموعه R آغاز شود یا در زمان $t > 0$ به R برسد، برای همه زمانهای بعدی در مجموعه R باقی می ماند. از این رو، نتیجه گیری می کنیم که همه مسیرهای جواب که در I آغاز می شوند به مجموعه باقیمانده R همگرا می شوند.



شکل (۳): مجموعه باقیمانده R

اگر عبارت اصلاح کننده $-\Gamma_D^{-1} \Sigma \tilde{a}$ به قانون تطبیق اضافه نشود عبارتهای $(1-d)1/2\sigma_m \|a\|_2^2$ و $(1-d)1/2\sigma_m \|\tilde{a}\|_2^2$ در رابطه (۶۴) ظاهر نمی شوند. از این رو، اضافه کردن این عبارت اصلاح کننده به قانون تطبیق ربات صلب برای پایداری سیستم ضروری است.

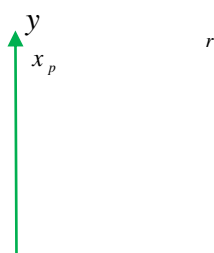
۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش کنترل کننده مقاوم تطبیقی پیشنهادی با ترم اصلاحی در قانون تطبیق روی یک ربات کابلی صفحه ای کاملاً مقید با شماتیک نمایش داده شده در شکل (۴-الف) که دینامیک آن در محیط نرم افزار ادمز شبیه سازی و اعتبارسنجی شده اجرا می شود و عملکرد آن در یک سیستم کنترلی حلقه بسته ارزیابی می گردد.

ربات مورد بررسی شامل چهار کابل محرک و سه درجه آزادی است. همانطور که در شکل (۴-الف) ملاحظه می شود A_i ها نقاط پایه ثابت کابلها و B_i ها نقاط اتصال کابلها به بستر متحرک را مشخص می کنند. موقعیت مرکز جرم بستر متحرک P با مختصات $P = [x, y]^T$ مشخص می شود و جهت گیری بستر متحرک نسبت به چهارچوب مرجع ثابت با ϕ نمایش داده می شود. از این رو، به دلیل حرکت صفحه ای در مدل دینامیکی ربات در رابطه (۴)، $C(x, \dot{x}) = 0$ است. در این حالت، معادلات حرکت ربات را می توان بصورت زیر نوشت:

$$M(x)\ddot{x} + G(x) = J^T K (L_2 - L_1) \quad (73)$$

$$I_m \ddot{q} + D\dot{q} + rK (L_2 - L_1) = u \quad (74)$$



۳-۳-۶- تجزیه و تحلیل پایداری سیستم آشفته تکین

در سمت راست نامعادله (۶۰)، p_d را می توان برای محدوده ای از ε مثبت معین کرد، وقتی:

$$\varepsilon < \frac{\alpha_1(\alpha_2 - \gamma_2)}{\alpha_1 \gamma_1 + \frac{1}{4d(1-d)} [(1-d)\beta_1 + d\beta_2]^2} = \varepsilon_d \quad (63)$$

یک فرض مهم برای مثبت باقی ماندن ε_d این است که $\alpha_2 - \gamma_2 > 0$ باشد. در این صورت با توجه به (۳۶) برای یک انتخاب خاص N می توان $\alpha_2 = \lambda_{min}[N] = \|N\|_{2i}$ را در نظر گرفت و ثابت می شود که اگر $\sup_B \|r^{-1} I_m J M^{-1} J^T\|_{2i}$ به اندازه کافی کوچک باشد فرضیات فوق ارضاء می شوند. برای بحث در خصوص نامعادله (۶۰)، مجموعه های D و D_c را مطابق زیر تعریف می کنیم:

$$D = \left\{ \left(\|X\|_2, \|\tilde{a}\|_2, \|y\|_2 \right) \in B : \left[\|X\|_2 \quad \|y\|_2 \right] p_d \left[\begin{array}{c} \|X\|_2 \\ \|y\|_2 \end{array} \right] + \left((1-d) \frac{1}{2} \sigma_m \|\tilde{a}\|_2^2 \leq (1-d) \frac{1}{2} \sigma_m \|a\|_2^2 + d\bar{\mu}^2 \right) \right\} \quad (64)$$

$$D_c = \left\{ \left(\|X\|_2, \|\tilde{a}\|_2, \|y\|_2 \right) \in B : \left[\|X\|_2 \quad \|y\|_2 \right] p_d \left[\begin{array}{c} \|X\|_2 \\ \|y\|_2 \end{array} \right] + \left((1-d)(1/2) \sigma_m \|\tilde{a}\|_2^2 > (1-d)(1/2) \sigma_m \|a\|_2^2 + d\bar{\mu}^2 \right) \right\} = B \setminus D \quad (65)$$

به ازاء $\left(\|X\|_2, \|\tilde{a}\|_2, \|y\|_2 \right) \in D$ می تواند مثبت یا منفی باشد ولی به ازاء $\left(\|X\|_2, \|\tilde{a}\|_2, \|y\|_2 \right) \in D_c$ $v < 0$ است. فرض کنید:

$$I = \left\{ \left(\|X\|_2, \|\tilde{a}\|_2, \|y\|_2 \right) \in B : v(X, \tilde{a}, y) \leq c \right\} \quad (66)$$

که C بزرگترین عدد مثبتی است بطوریکه $I \subset B$. برای یافتن ماهیت I به یاد می آوریم که:

$$v(X, \tilde{a}, y) = (1-d)v(X, \tilde{a}) + dW(y) \quad (67)$$

بنابراین، با بهره گیری از (۲۸) و (۳۴) ثابت می شود:

$$v(X, \tilde{a}, y) \leq \lambda_x \|X\|_2^2 + \lambda_a \|\tilde{a}\|_2^2 + \lambda_y \|y\|_2^2 \quad (68)$$

که در آن:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_x = 1/2(1-d) \sup_B \lambda_{max} \left(\begin{bmatrix} 2b^T K_D & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & M_{eq} \end{bmatrix} \right) \\ \lambda_a = 1/2(1-d) \lambda_{max}(\Gamma_D^{-1}), \lambda_y = d \lambda_{max}(H) \end{array} \right\} \quad (69)$$

بنابراین مجموعه I زیر مجموعه یک بیضی گون بصورت زیر است:

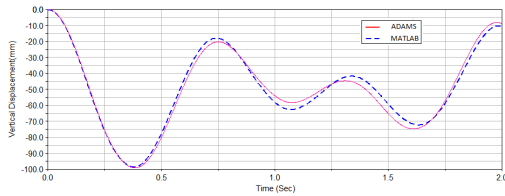
$$\frac{\|X\|_2^2}{(c/\lambda_x)} + \frac{\|\tilde{a}\|_2^2}{(c/\lambda_a)} + \frac{\|y\|_2^2}{(c/\lambda_y)} \leq 1 \quad (70)$$

و $I \cap D_c \neq \emptyset$ است. همچنین، مجموعه زیر را تعریف می کنیم:

$$R = \left\{ \left(\|X\|_2, \|\tilde{a}\|_2, \|y\|_2 \right) \in B : v(X, \tilde{a}, y) \leq c_\mu \right\} \quad (71)$$

که c_μ کوچکترین عدد مثبت است بطوریکه $D \subseteq R$ باشد. شکل ۳ یک نمایش نوعی از مجموعه های I ، D و R را نشان می دهد. حال اگر $\bar{\mu}$ و σ_{0i} بگونه ای باشند که $R \subset I$ ، شرایط اولیه را طوری انتخاب می کنیم که:

یکدیگر مطابقت دارند و بنابراین در پیاده سازی قوانین کنترلی می توان از مدل تحلیلی بهره جست.



شکل (۴-ج): تغییرات جابجایی عمودی (y_p) مرکز جرم دیسک بر حسب زمان

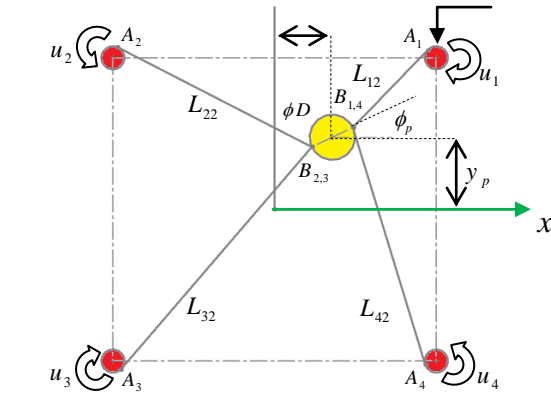
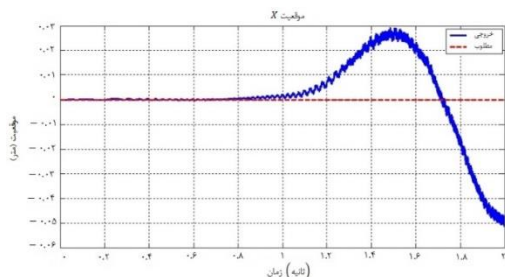
به منظور ارزیابی کارآمدی الگوریتم کنترلی ترکیبی پیشنهاد شده در برابر عدم قطعیت پارامترهای دینامیکی برخی از پارامترهای دینامیکی ربات بصورت نامعین در نظر گرفته می شوند.

$$m = 2.5 \pm 0.5 \text{ kg}, \quad I_m = 0.6 \pm 0.1 \text{ kg.m}^2 \quad (۷۷)$$

مقادیر $K_d = 3500I_{4 \times 4}$ و $K_D = 90I_{3 \times 3}$ و برای قانون تطبیق، σ_{01} و σ_{02} مطابق کران های بالای پارامترهای جرم و اینرسی به ترتیب 10^3 و 10^6 فرض می شوند. همچنین، مسیر مرجع زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} x_d = 0, y_d = 0.4 + 2e^{-t} - 2.4e^{-t/1.2} \\ \phi_d = 0.2 \sin(0.1\pi t) \end{cases} \quad (۷۸)$$

همانطور که در شکل (۵) ملاحظه می شود، اگر فقط قانون کنترل صلب u_s به ربات اعمال شود سیستم کنترل حلقه بسته تنها ناپایداری را جابجا می کند که این امر به دلیل واگرایی متغیرهای سریع اتفاق می افتد. این شکل نشان می دهد که مسیرهای ردیابی با قانون کنترل رباتهای صلب مقاوم نیستند زیرا سیگنال ها کران دار باقی نمی ماندند. نتایج شبیه سازی در شکل (۶) پایداری تضمین شده کنترل کننده ترکیبی پیشنهاد شده را در شرایطی که کابل ها انعطاف پذیر هستند و پارامترها عدم قطعیت دارند نشان می دهد. می توان دریافت که بعد از یک دوره گذرای اولیه، متغیرهای سریع به منیفولد همگرا می شوند. برای اثبات کارآمدی کنترل کننده پیشنهادی، کنترل کننده تطبیقی مقاوم ترکیبی ارائه شده در [۱۵] نیز روی این ربات اجرا می شود و نتایج مقایسه می گردد. هر دو کنترل کننده، برای غلبه بر ارتعاش طولی کابل ها، $u_f = K_d(L_1 - L_2)$ را به عنوان یک عبارت سریع در شیوه کنترل ترکیبی خود به کار می گیرند. همانطور که از شکل (۶) واضح است، شیوه کنترل مقاوم تطبیقی اصلاح شده بطور چشمگیری دقت ردیابی مسیر مطلوب را نسبت به کنترل تطبیقی مقاوم اولیه بهبود بخشیده است.



شکل (۴-الف): مکانیزم کابلی صفحه ای

که در روابط بالا، $x = [x_p, y_p, \phi_p]^T$ و داریم: ثانویه

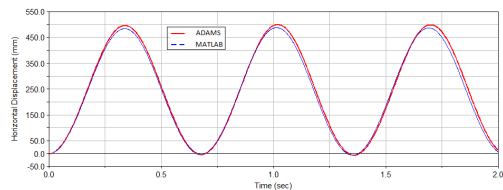
$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ mg \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۷۵)$$

در شکل ۴-الف، L_{12} ، L_{22} ، L_{32} و L_{42} مولفه های بردار L_2 ، طول ثانویه کابل ها هستند. مقادیر عددی زیر در واحد SI برای شبیه سازی های مربوط به اعتبار سنجی مدل دینامیکی استفاده می شوند:

$$\begin{aligned} I_z &= 0.03 \text{ Kg.m}^2, \quad r = 0.035 \text{ m}, \\ K &= 10000I_{4 \times 4} \text{ N/m}, \quad m = 2.5 \text{ Kg}, \\ D &= 0.1575 \text{ m}, \quad u_1 = 150 \text{ N.m}, \quad u_2 = 90 \text{ N.m} \\ u_3 &= 100 \text{ N.m}, \quad u_4 = 120 \text{ N.m} \end{aligned} \quad (۷۶)$$

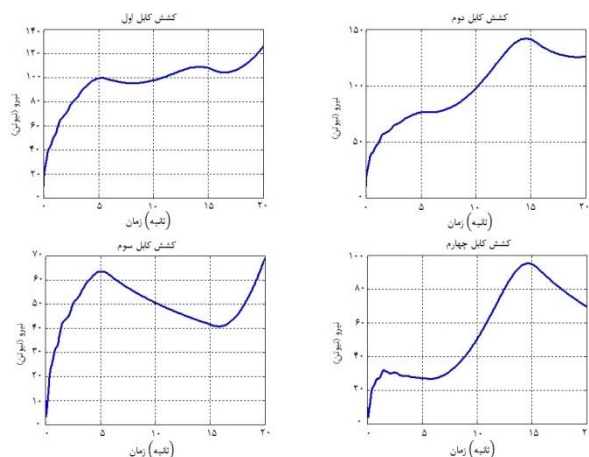
در رابطه فوق u_1 ، u_2 ، u_3 و u_4 به ترتیب گشتاور موتورهای متصل به پولی های ۱ تا ۴ می باشند.

شکل ۴-ب و ج به ترتیب مقایسه تغییرات جابجایی افقی و عمودی مرکز جرم دیسک بر حسب زمان را با استفاده از روش تحلیلی و شبیه سازی نشان می دهد. در روش تحلیلی معادلات حرکت با استفاده از قانون دوم نیوتن استخراج می شوند و سپس این معادلات با کمک نرم افزار متلب به صورت عددی حل می شوند.



شکل (۴-ب): تغییرات جابجایی افقی (x_p) مرکز جرم دیسک بر حسب زمان

به منظور اعتبار سنجی نتایج به دست آمده، مکانیزم کابلی صفحه ای با همان مشخصات هندسی و فیزیکی که در روش تحلیلی در نظر گرفته شد در نرم افزار ادمز شبیه سازی می شود و سپس نتایج شبیه سازی با نتایج روش تحلیلی مقایسه می شوند. همانطور که از شکل های ۴-ب و ۴-ج قابل ملاحظه است این دو روش با دقت خوبی با



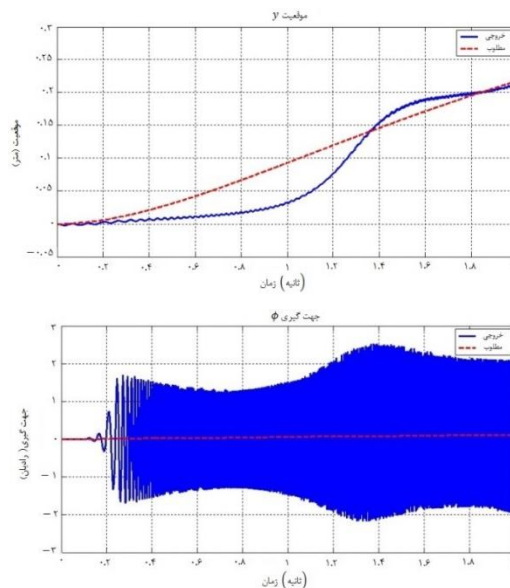
شکل (۷): کشش کابل ها

۵- نتیجه گیری

این مقاله یک روش کنترل مقاوم تطبیقی برای کنترل رباتهای کابلی موازی کاملاً مقید با کابل‌های کشسان در حضور عدم قطعیت پارامتری ارائه می‌کند. در ابتدا، از پایداری سیستم در حالتی که کابل‌ها انعطاف پذیر نیستند اطمینان حاصل می‌شود. سپس، با توجه به ارتعاش طولی غیر قابل اجتناب کابل‌ها بصورت فنرهای محوری خطی مدل می‌شوند و معادلات دینامیکی ربات به شکل آشفته تکین به دست می‌آیند. سپس، شیوه کنترلی ترکیبی شامل کنترل‌کننده رباتهای صلب به همراه یک عبارت اصلاح‌کننده برای از بین بردن نوسانات کشسان طراحی می‌شود. علاوه بر این، به منظور محدود کردن خطاهای ردیابی و بهبود عملکرد مقاوم سیستم، یک عبارت اصلاح‌کننده به قانون تطبیق ربات صلب اضافه می‌شود. در آخر، بر اساس نتایج تئوری سیستم‌های آشفته تکین، پایداری سیستم حلقه بسته ترکیبی تجزیه و تحلیل می‌شود و نتایج شبیه‌سازی‌ها برای نشان دادن موثر بودن کنترل‌کننده پیشنهاد شده ارائه می‌شوند. مؤلفین با توجه به گسترش روز افزون موضوع رباتهای همکار [۲۰]، رباتهای کابلی همکار را به عنوان یک فعالیت پژوهشی آتی مورد توجه قرار خواهند داد.

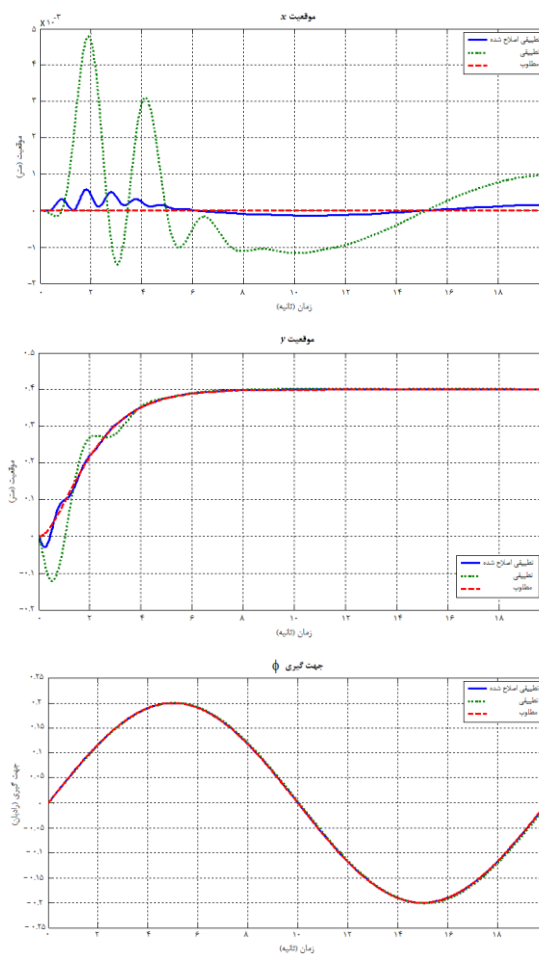
مراجع

- [۱] Ferravante, V., Riva, E., Taghavi, M., Braghin, F., Bock, T.: Dynamic analysis of high precision construction cable-driven parallel robots. *Mechanism and Machine Theory* **135**, 54-64(2019)
- [۲] Qian, S., Zi, B., Shang, W., Xu, Q.: A Review on Cable-driven Parallel Robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* **31**(1), 1-11 (2018)
- [۳] Hong, H., Ali, J., Ren, L., A review on topological architecture and design methods of cable-driven mechanism. *Advances in Mechanical Engineering* **10** (5), 1-14 (2018)
- [۴] ظریف لولویی، آ.، خسروی، م.، تقی‌راد، ح.، ربات‌های موازی کابلی: سینماتیک، دینامیک و کنترل، مجله کنترل **۸**(۳)، ۸۷-۱۱۷ (۱۳۹۳)
- [۵] Li, H., Sun, J., Pan, G., Yang, Q.: Preliminary running and performance test of the huge cable robot of FAST



شکل (۵): جابجایی ناپایداری سیستم کنترل حلقه بسته

شکل (۷) کشش مثبت کابل‌ها را حین استفاده از کنترل‌کننده طراحی شده در این مقاله نشان می‌دهد. از این رو، کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی پیشنهاد شده سیستم را بطور مناسبی پایدار می‌کند و می‌توان آن را به عنوان یک راه حل مناسب برای کاربردهای کابلی گوناگون در رباتیک در نظر گرفت.



شکل (۶): عملکرد ردیابی مسیر مطلوب

- telescope. In: Cable-Driven Parallel Robots. Mechanisms and Machine Science **53**, 402-414 (2018)
- [۴] Chen, Q., Zi, B., Sun, Z., Li, Y., Xu, Q.: Design and Development of a New Cable-Driven Parallel Robot for Waist Rehabilitation. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, DOI: 10.1109/TMECH.2019.2917294 (2019)
- [۷] تقی‌راد، ح.، خسروی، م.، تحلیل پایداری و کنترل PID مقاوم ربات‌های موازی کابلی با شرط نیروی کششی در کابل‌ها، مجله کنترل **۶**(۴)، ۲۳-۳۳ (۱۳۹۱)
- [۸] Korayem, M. H., Tourajzadeh, H., Zehfroosh, A., Korayem, A. H.: Optimal path planning of a cable-suspended robot with moving boundary using optimal feedback linearization approach. Nonlinear Dynamics **78**(2), 1515-1543 (2014)
- [۹] Williams, R. L., Gallina, P.: Planar translational cable-direct-driven robots. Journal of Intelligent and Robotic Systems **37**(1), 69-96 (2002)
- [۱۰] Khalilpour, S. A., Cardou, P.: Robust cascade control of a deployable cable-driven robot. Mechanical Systems and Signal Processing **127**, 513-530 (2019)
- [۱۱] Babaghasabha, R., Khosravi, M. A., Taghirad, H. D.: Adaptive control of KNTU planar cable-driven parallel robot with uncertainties in dynamic and kinematic parameters. Mechanisms and Machine Science **32**, 145-159 (2014)
- [۱۲] El-Ghazaly, G., Gouttefarde, M., Creuze, V.: Adaptive terminal sliding mode control of a redundantly-actuated cable-driven parallel manipulator: CoGiRo. Mechanisms and Machine Science **32**, 179-200 (2014)
- [۱۳] Khosravi, M. A., Taghirad, H. D.: Dynamic analysis and control of cable driven robots with elastic cables. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering **35**(4), 543-557 (2011)
- [۱۴] Khosravi, M., Taghirad, H. D.: Dynamic modeling and control of parallel robots with elastic cables: singular perturbation approach. IEEE Transactions on Robotics **30**(3), 694-704 (2014)
- [۱۵] Babaghasabha, R., Khosravi, M. A., Taghirad, H. D.: Adaptive robust control of fully constrained cable robots: singular perturbation approach. Nonlinear Dynamics, (2016)
- [۱۶] Jamshidifar, H., Khosravani, S., Fidan, B., Khajepour, A., Vibration decoupled modeling and robust control of redundant cable-driven parallel robots. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, (2018)
- [۱۷] ویسی، م.، آقائی، ج.، سلطانیپور، م.، طراحی کنترل‌کننده فازی پایدار با قابلیت حذف اغتشاش برای دسته‌ای از سیستم‌های الکترومکانیکی غیرخطی، در حضور عدم قطعیت‌های پارامتری، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران **۱۶**(۳)، ۱۱۱-۱۲۴ (۱۳۹۸)
- [۱۸] Khosravi, M. A., Taghirad, H. D., Oftadeh, R.: A positive tensions PID controller for a planar cable robot: An experimental study. IEEE First RSI/ISM International Conference Robotics and Mechatronics (ICRoM) (2013)
- [۱۹] Kokotovic, P., Khalil, H. K., O'Reilly, J.: Singular perturbation methods in control: analysis and design (1999)
- [۲۰] میرزائی، ف.، پویان، ع.، مروری بر رباتیک جمعی و جایگاه آن در سیستم‌های چندرباته، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران **۱۷**(۲)، ۷۲-۵۳ (۱۳۹۹)