

Hybrid Active Force Control of Super-Twisting PID Sliding Mode Technique of a Lower Limb Exoskeleton

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mokhtari M.¹ MSc,
Taghizadeh M.*¹ PhD,
Mazare M.¹ MSc

How to cite this article

Mokhtari M, Taghizadeh M, Mazare M. Hybrid Active Force Control of Super-Twisting PID Sliding Mode Technique of a Lower Limb Exoskeleton. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):2935-2944.

ABSTRACT

Reference trajectory tracking and guarding against system disturbances and uncertainties are the important factors in the realm of lower limb exoskeleton robots control. Sliding mode PID is one of the robust controllers, which has a sliding manifold in the form of the PID controller. Chattering is the substantial predicament of the PIDSMC so that boundary layer around the sliding manifold is applied to eliminate the phenomenon. In this step, not only the chattering phenomenon is not eliminated but the robustness of the controller is also mitigated. In this study, super twisting PID sliding mode controller (STPIDSMC) was used to eradicate the chattering phenomenon and enhancing controller robustness. The STPIDSMC robustness is protected indigenously and without defining the boundary layer, and the chattering phenomenon is reduced. Furthermore, to meet the external disturbances and uncertainties with unlimited amplitude, adaptive active force control method is combined by STPIDSMC as a modifying input control loop. In the active force control approach, the control input is online modified based on the estimation of moment inertia of the robot links. In order to accomplish maximum performance, control parameters were optimized using harmony search algorithm. In the optimal state, the performance of the proposed controller has been compared with PIDSMC and STPIDSMC that revealed the priority of the proposed controller rather than other controllers. The results indicate that the three error criteria, ITAE, ITASE, and IASE experience significant reduction about 39, 48, and 66 percent respectively compared to STPIDSM.

Keywords Exoskeleton; PID Controller; Super-Twisting Sliding Mode Control; Active Force Controller

CITATION LINKS

[1] Exoskeletons and robotic prosthetics: a review ... [2] Handyman to Hardiman ... [3] Biped Locomotion ... [4] Robotic Orthosis Lokomat: A rehabilitation ... [5] Adaptive support for patient-cooperative gait ... [6] Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity ... [7] Springer handbook of ... [8] Review of assistive strategies in powered ... [9] Advances in variable structure and sliding ... [10] Variable structure systems: from principles to ... [11] Sliding mode control with PID sliding surface and experimental ... [12] Adaptive sliding mode control with perturbation ... [13] Sliding mode controller design using PID sliding surface ... [14] On multi-input chattering-free second-order ... [15] Optimal adaptive high-order super twisting sliding mode ... [16] A Lyapunov approach to second-order sliding mode ... [17] Super-twisting sliding mode control approach with ... [18] MIMO uncertain nonlinear system control ... [19] Super-twisting algorithm based sliding-mode ... [20] Optimal novel super-twisting PID sliding mode ... [21] Muscle activation during unilateral stepping occurs ... [22] Intelligent active force control of a rigid robot ... [23] Active force control applied to a rigid ... [24] A hybrid intelligent active force controller ... [25] Vibration suppression of a handheld ... [26] Dynamics characterization of a high precision ... [27] Vibration control of mechanical suspension ... [28] Optimal robust hybrid active force ... [29] Power assist method based on phase sequence ... [30] Opportunities in robotic exoskeletons hybrid assistive ... [31] Introduction to robotics: mechanics ... [32] Modeling and position controller design of a servo-hydraulic ... [33] Strict Lyapunov functions for the super-twisting ... [34] Active force control of a fluidic muscle system ... [35] Trajectory Optimization for vertical navigation ... [36] Bipedal robots: modeling, design and walking ...

¹Mechanical Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Phone: -

Fax: -

taghizadeh@sbu.ac.ir

Article History

Received: October 11, 2018

Accepted: May 21, 2019

ePublished: December 21, 2019

کنترل نیروی فعال ترکیبی مد لغزشی PID فراپیششی یک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه

مجید مختاری MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

مصطفی تقی‌زاده PhD*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محمود مزارع MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم و همچنین تعقیب مسیرهای مرجع از اساسی‌ترین مسائل در کنترل ربات‌های اسکلت خارجی پایین‌تنه است. از کنترل‌کننده‌های مقاومی که در کنترل ربات‌های اسکلت خارجی می‌توان از آن استفاده کرد، کنترل‌کننده PID مد لغزشی (PIDSM) است. این کنترل‌کننده با تعریف سطح لغزش کنترل‌کننده مد لغزشی بر مبنای کنترل‌کننده PID حاصل شده و از مهم‌ترین مشکل ات کنترل‌کننده PIDSM وجود پدیده چترینگ است. برای حذف پدیده چترینگ در کنترل‌کننده PIDSM از یک لایه مرزی در اطراف سطح لغزش استفاده می‌شود. در این حالت نه تنها پدیده چترینگ به‌طور کامل حذف نمی‌شود بلکه میزان مقاومت کنترل‌کننده نیز کاهش می‌یابد. در این مقاله برای حذف پدیده چترینگ و افزایش مقاومت سیستم از کنترل‌کننده PID مد لغزشی فراپیششی (STPIDSM) استفاده شده است. در این حالت کنترل‌کننده ذاتاً و بدون تعریف لایه مرزی، پدیده چترینگ را با حفظ مقاومت سیستم کاهش می‌دهد. همچنین به منظور مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم، روش تطبیقی کنترل فعال نیرو به عنوان حلقه اصلاحی ورودی کنترلی با کنترل‌کننده STPIDSM ترکیب شده است. در روش کنترل فعال نیرو، ورودی کنترلی در هر لحظه بر مبنای تخمین ممان اینرسی لینک‌های ربات اصلاح می‌شود. برای دستیابی به حداکثر کارایی، پارامترهای کنترل‌کننده پیشنهادی به کمک روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونی به صورت بهینه تعیین شده‌اند. عملکرد روش کنترلی ارائه‌شده با کنترل‌کننده STPIDSM بهینه مقایسه شده است. نتایج حاصل، بیانگر کاهش سه معیار خطای ITAE، ITASE و IASE برای روش کنترلی پیشنهادی به ترتیب به میزان ۳۹، ۴۸ و ۶۶٪ نسبت به کنترل‌کننده STPIDSM است.

کلیدواژه‌ها: ربات اسکلت خارجی، کنترل‌کننده PID، کنترل‌کننده مد لغزشی فراپیششی، کنترل فعال نیرو

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱

* نویسنده مسئول: taghizadeh@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

اگر واسکلتون‌ها تجهیزاتی هستند که عموماً ظاهری شبیه به انسان یا بخشی از اعضای بدن انسان دارند و توسط یک شخص پوشیده شده و حرکاتی هماهنگ با حرکات بدن انجام می‌دهند. ربات‌های اسکلت خارجی پوشیدنی به منظور افزایش کارایی و توان افراد سالم یا به عنوان یک دستگاه توان‌بخشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. میزان تطابق با بدن انسان و نیز استراژی‌های کنترلی مورد استفاده در اگر واسکلتون‌ها تأثیر بسزایی بر عملکرد این تجهیزات دارد [1].

به منظور مقابله با اغتشاشات، دینامیک‌های مدل‌نشده و نامعینی‌های سیستم، انتخاب استراژی کنترلی مناسب حائز اهمیت است. با انتخاب استراژی کنترلی مناسب می‌توان با غلبه بر اغتشاشات وارده از انسان و محیط به ربات، هزینه متابولیکی شخص را کاهش داد. اگر واسکلتون‌ها از سال ۱۹۶۰ در آمریکا [2]، ژاپن و اروپا [3] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پس از آن همراه با دستاوردهای بزرگ در مهندسی مکانیک و الکترونیک، فناوری اتوماسیون، بیولوژیک، علم مواد، و همچنین توسعه مکترونیک و

رباتیک، تحقیقات در این زمینه به سرعت توسعه یافت. در سال ۲۰۰۳ یک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه با دو محرک خطی برگشت‌پذیر، یکی در مفصل ران و دیگری در مفصل زانو، مدل‌سازی و کنترل شده است. در این ربات هم‌زمان با کنترل موقعیت مسیرهای از پیش تعیین‌شده زاویه مفاصل، از یک کنترل‌کننده امیدانس به منظور کنترل راحت‌تر و سازگارپذیرتر با کاربر استفاده شده است. در سیستم کنترل این ربات راه حل مناسبی برای مقابله با اغتشاشات در نظر گرفته نشده است [4,5]. به منظور تقویت نیروی انسان و استقامت انسان در هنگام حرکت برای کاربردهای نظامی، ربات بلیکس ارائه شده است. الگوریتم کنترل این ربات به صورت کنترل مبتنی بر مدل با استراژی کمکی افزایش حساسیت به نیروها و گشتاورهای خارجی می‌باشد [6]. برای حمل بارهای سنگین در مدت زمان طولانی و برای حرکت در سطوح با شیب کم، رباتی با عنوان اگروهیکر طراحی شده است. استراژی کنترلی این ربات به صورت استراژی کنترل فعال تعقیب مفصل است [7]. همچنین یک اگر واسکلتون در زمینه پزشکی و برای کمک به افراد معلول برای راه رفتن، ارائه شده است که کنترل آن بر مبنای کنترل‌کننده موقعیت طبق مسیر از پیش تعیین‌شده می‌باشد [8].

طراحی کنترل‌کننده مناسب تأثیر مستقیم بر عملکرد ربات اسکلت خارجی دارد. کنترل‌کننده علاوه بر تعیین ورودی‌های کنترلی مناسب به منظور تعقیب منحنی مفاصل از پیش تعریف‌شده، باید بتواند بر اغتشاشات واردشده به ربات در اثر نیروی اعمال‌شده از طرف انسان و محیط و همچنین بر دینامیک‌های مدل‌نشده و عدم قطعیت‌های سیستم غلبه کند.

کنترل‌کننده مد لغزشی به عنوان یک کنترل‌کننده مقاوم در برابر اغتشاشات و نامعینی‌های مدل در سال‌های اخیر توسعه یافته است [9, 10]. به منظور افزایش مقاومت کنترل‌کننده مد لغزشی، کنترل‌کننده PIDSM با تعریف سطح لغزش کنترل‌کننده مد لغزشی به فرم PID حاصل شده است [11]. استفاده از این کنترل‌کننده در کنترل سرعت یک صفحه الکترومکانیکی باعث افزایش توانایی سیستم در مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی شده است [11]. به منظور کنترل یک ربات سریال با عملگرهای پیزوالکتریک از کنترل‌کننده PID-SM استفاده شده است که برای دستیابی به حداکثر عملکرد پارامترهای کنترل‌کننده با الگوریتم تجمع ذرات بهینه شده است [12]. نوعی از سیستم تعلیق فعال خودرو برای دستیابی به خوش‌فرمانی بیشتر، به روش PID-SMC کنترل شده است. نتایج برتری روش PID-SMC را نسبت به کنترل‌کننده مد لغزشی تأیید می‌کند [13].

وجود پدیده چترینگ یکی از بزرگترین مشکلات روش کنترل مد لغزشی و کنترل‌کننده PIDSM است که کاهش آن می‌تواند باعث صرفه‌جویی در انرژی مصرفی و بالا رفتن سرعت همگرایی سیستم شود. بدین منظور می‌توان یک لایه مرزی را در اطراف سطح لغزش تعریف نمود. تعریف لایه مرزی در اطراف سطح لغزش باعث کاهش میزان مقاوم‌بودن سیستم در مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم می‌شود [14]. به منظور مقابله با پدیده چترینگ و بالا رفتن سرعت همگرایی سیستم به مقادیر ورودی مرجع از نسل جدیدی از کنترل‌کننده‌های مد لغزشی مرتبه بالا مانند کنترل مد لغزشی فراپیششی (STSMC) استفاده شده است. در این روش کنترلی پدیده چترینگ ذاتاً و بدون تعریف لایه مرزی و با حفظ توانایی کنترل‌کننده در مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم، کاهش می‌یابد [15]. این کنترل‌کننده از قوی‌ترین الگوریتم‌های کنترل مد لغزشی حالت پیوسته مرتبه دوم است که

سیستم، ۲- افزودن کنترل‌کننده تطبیقی کنترل فعال نیرو به کنترل‌کننده مد لغزشی PID فرایپچی به منظور بالابردن خاصیت مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم، ۳- بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده ترکیبی مد لغزشی PID فرایپچی و کنترل‌کننده فعال نیرو به کمک الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی به منظور دستیابی به حداکثر کارایی کنترل‌کننده طراحی شده.

ساختار این مقاله بدین ترتیب است که در قسمت ۲، ربات اسکلت خارجی مورد مطالعه معرفی شده و معادلات دینامیکی حاکم بر آن با استفاده از روش لاگرانژ استخراج شده است. در قسمت ۳، سه روش کنترل مورد استفاده، ارائه شده و روابط آن بسط داده شده است. در قسمت ۴، مدل دینامیکی ربات به همراه ورودی‌های مرجع فواصل و ۳ کنترل‌کننده شبیه‌سازی شده و در آخر نتایج حاصل از مقاله در بخش ۵ ذکر شده است.

۲- معرفی و مدل‌سازی مکانیزم پیشنهادی

تطابق سینماتیکی درجات آزادی ربات با بدن انسان و قرارگیری مفاصل ربات دقیقاً روی مفاصل شخص باعث تبعیت کامل سینماتیک ربات از سینماتیک کاربر می‌شود. این روش بسیاری از مشکلات طراحی را حل می‌کند. این رویکرد در طراحی را می‌توان در دسته ربات‌های هال [29, 30] مشاهده کرد. در این مقاله، از یک مدل ۵ لینک که دارای مفاصل فعال ران و زانوی پاهای چپ و راست می‌باشد، استفاده شده است. در شکل ۱ شماتیک ربات نشان داده شده است.

در شکل ۱، θ_1 برای i از ۱ تا ۵، زاویه مطلق هر یک از مفاصل، q_i زاویه نسبی هر یک از مفاصل I_i ممان اینرسی لینک‌ها و m_i جرم لینک‌ها می‌باشند. پارامترهای ربات مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

در جدول ۱، L_{Ci} مرکز جرم هر یک از لینک‌ها می‌باشد. با استخراج روابط سینماتیکی به صورت رابطه (۱) و استفاده از روش لاگرانژ که دارای معادلاتی به صورت رابطه (۲) می‌باشد، معادلات دینامیکی حاکم بر ربات به صورت رابطه (۳) بیان شده است.

$$\begin{aligned} x_{c1} &= l_{c1} \sin(\theta_1) \\ x_{c2} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_{c2} \sin(\theta_2) \\ x_{c3} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) + l_{c3} \sin(\theta_2) \\ x_{c4} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) \\ &\quad - (l_4 - l_{c4}) \sin(\theta_4) \\ x_{c5} &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) - l_4 \sin(\theta_4) \\ &\quad - (l_5 - l_{c5}) \sin(\theta_5) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_{c1} &= l_{c1} \cos(\theta_1) \\ y_{c2} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_{c2} \cos(\theta_2) \\ y_{c3} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) + l_{c3} \cos(\theta_2) \\ y_{c4} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) \\ &\quad - (l_4 - l_{c4}) \cos(\theta_4) \\ y_{c5} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) - l_4 \cos(\theta_4) \\ &\quad - (l_5 - l_{c5}) \cos(\theta_5) \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} + \frac{\partial U}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (2)$$

$$\begin{aligned} K &= \sum_{i=1}^5 (K_i) \quad U = \sum_{i=1}^5 (P_i) \\ K_i &= 0.5 m_i \dot{\theta}_i^2 + 0.5 I_i \dot{\theta}_i^2 \quad P_i = m_i g y_{Ci} \\ \tau &= M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + \tau_d \end{aligned} \quad (3)$$

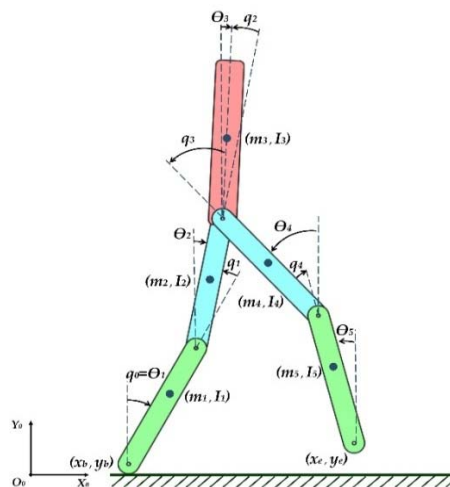
در رابطه (۱)، l_i طول هر یک از لینک‌ها، x_{Ci} و y_{Ci} مختصات مرکز جرم هر یک از لینک‌ها می‌باشد. K انرژی جنبشی ربات، U انرژی پتانسیل ربات و τ_d گشتاور وارد شده به هر یک از مفاصل می‌باشد.

در آن متغیر لغزشی و مشتق آن در زمان محدود در حضور اغتشاشات با دامنه محدود سیستم به مقدار صفر میل می‌کند. این روش کنترلی در سال ۲۰۰۸ توسط مورنو ارائه شده است [16]. کنترل‌کننده مد لغزشی فرایپچی به منظور کنترل دقیق و مقابله با اغتشاشات و نامعینی‌های سیستم توربین باد مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش برتری روش کنترل مد لغزشی فرایپچی در مقایسه با کنترل‌کننده LQR نشان داده شده است [17]. به منظور حذف سریع خطای ردیابی و مقابله با عدم قطعیت‌ها در یک ربات سریال از روش مد لغزشی فرایپچی استفاده شده است که نتایج شبیه‌سازی دقت و سرعت ردیابی مسیر مرجع و اثر کنترل‌کننده در حذف پدیده چترینگ و کاهش انرژی مصرفی را تایید کرده‌اند [18]. از ترکیب یک کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه دوم به همراه یک رویکرد حالت فرایپچی برای کنترل دقیق موقعیت روتور و تخمین مقاومت استاتور یک ماشین مغناطیسی سنکرون استفاده شده است. در مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آزمایش‌های تجربی صحت روش کنترلی تایید شده است [19].

یکی از روش‌های موثر در حذف پدیده چترینگ و افزایش مقاومت سیستم استفاده از ترکیب کنترل‌کننده PID مود لغزشی و کنترل‌کننده فرایپچی (STPID-SM) می‌باشد. از این روش در کنترل یک ژيروسکوپ ممز استفاده شده است. در این پژوهش نشان داده شده است که کنترل‌کننده STPID-SM علاوه بر کاهش پدیده چترینگ، مقاومت سیستم را نیز افزایش می‌دهد [20]. از دیگر روش‌هایی که در افزایش توانایی سیستم در مقابله با اغتشاشات استفاده شده است، روش کنترل فعال نیرو می‌باشد [21]. روش کنترل فعال نیرو یک روش کنترل فیدبک می‌باشد که همگرایی به ورودی مرجع را تا زمان اعمال اغتشاش محدود به سیستم تضمین می‌نماید. در روش کنترل فعال نیرو ممان اینرسی لینک‌های رابط در هر لحظه متناسب با اغتشاش وارد شده تخمین زده شده و براساس شتاب زاویه‌ای هر لینک ورودی کنترلی اعمالی به سیستم اصلاح می‌شود [22, 23]. از این روش در کنترل ربات سریال [24]، کنترل ارتعاشات تجهیزات صنعتی [25]، کنترل ربات‌های دقیق [26] و کاربردهای مربوط به خودرو استفاده شده است [27]. در سال ۲۰۱۰ به کمک روش کنترل فعال نیرو لرزش‌های موجود در دست بیماران پارکینسونی کنترل شده است [25]. برای کنترل یک ربات اسکلت خارجی ۳ لینکی از ترکیب کنترل‌کننده مد لغزشی و روش کنترل فعال نیرو استفاده شده است که نتایج برتری روش ترکیبی را نسبت به روش مد لغزشی تایید می‌کنند [28]. در این مقاله به منظور افزایش توانایی کنترل‌کننده مد لغزشی در تعقیب ورودی‌های مرجع، مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات و همچنین کاهش پدیده چترینگ از ترکیب کنترل‌کننده مد لغزشی PID فرایپچی و کنترل فعال نیرو استفاده شده است.

در این مقاله در ابتدا با استفاده از روش لاگرانژ معادلات مدل دینامیکی ربات اگرزواسکلتون پایین‌تنه ۵ لینکی با در نظر گرفتن مفاصل فعال برای ربات استخراج شده و به منظور اعتبارسنجی معادلات دینامیکی، ربات در نرم‌افزار آدامز شبیه‌سازی شده است. به منظور کنترل موقعیت مفاصل ربات، از کنترل‌کننده‌های مد لغزشی PID فرایپچی بهینه، مد لغزشی PID بهینه و روش ترکیبی و بهینه کنترل‌کننده مد لغزشی PID فرایپچی و کنترل فعال نیرو استفاده شده است. نوآوری این مقاله عبارت است از: ۱- طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی PID فرایپچی به منظور افزایش مقاومت سیستم در مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های

رابطه (۳) فرم استاندارد معادلات حاکم بر ربات را نشان می‌دهد که در آن τ گشتاور مربوط به عملگرها، $M(q)$ ماتریس ممان اینرسی، $C(q, \dot{q})$ ماتریس اثرات گریز از مرکز و ژيروسکوپی، $G(q)$ بردار نیروهای گرانشی و τ_d گشتاور اغتشاش می‌باشند [31].



شکل (۱) شماتیک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه ۵ درجه آزادی

جدول (۱) پارامترهای ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه

پارامتر	واحد	مقدار
m_1	kg	۱/۰۲
m_2	kg	۲/۵
m_3	kg	۴۴/۰۷
m_4	kg	۲/۵
m_5	kg	۱/۰۲
I_1	kg m ²	۰/۰۳۴۴
I_2	kg m ²	۰/۱۴۶
I_3	kg m ²	۲/۰۶
I_4	kg m ²	۰/۱۴۶
I_5	kg m ²	۰/۰۳۴۴
L_1	m	۰/۳۷
L_2	m	۰/۵۲
L_3	m	۰/۷۵
L_4	m	۰/۵۲
L_5	m	۰/۳۷
L_{C1}	m	۰/۱۹
L_{C2}	m	۰/۲۶
L_{C3}	m	۰/۳۸
L_{C4}	m	۰/۲۶
L_{C5}	m	۰/۱۹

۳- طراحی کنترل‌کننده

روش کنترل مد لغزشی یکی از روش‌های کنترلی است که در دسته کنترل‌های مقاوم قرار می‌گیرد [32]. به منظور طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی، برای هر متغیر حالت q خطا به صورت $e = q - q_d$ در نظر گرفته شده و یک سطح متغیر با زمان برای آن تعریف می‌شود. به منظور استفاده از مزایای کنترل‌کننده‌های مد لغزشی و PID سطح لغزشی بر اساس کنترل‌کننده PID به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود [13].

$$S = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

که در آن K_P ، K_I و K_D ثابت می‌باشند. هدف از طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی، قراردادن مشتق سطح متغیر با زمان در

نزدیکی صفر است. با مشتق‌گیری نسبت به زمان، شیب سطح متغیر با زمان از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$\dot{S} = K_P \dot{e}(t) + K_I e(t) + K_D (\ddot{q} - \ddot{q}_d) \quad (5)$$

با قراردادن مشتق سطح لغزش برابر صفر و استفاده از رابطه (۱)، قانون کنترلی $\hat{\tau}(t)$ به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$\hat{\tau}(t)_{PIDSMC} = C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \frac{M}{K_D} (\ddot{q}_d - K_P \dot{e}(t) - K_I e(t)) + \tau_d \quad (6)$$

پدیده چترینگ یکی از مهم‌ترین معایب روش کنترلی مد لغزشی می‌باشد که به منظور مقابله با این پدیده، یک جمله ناپیوسته به صورت یک لایه مرزی به قانون کنترلی اضافه می‌شود. در نهایت قانون کنترلی برای ربات به صورت رابطه (۷) استخراج شده است.

$$\tau(t)_{PIDSMC} = \hat{\tau}(t)_{PIDSMC} - K \text{sign}(S) \quad (7)$$

که در آن K یک ثابت مثبت است. با تعریف لایه مرزی نه تنها پدیده چترینگ به طور کامل حذف نمی‌شود بلکه از طرفی ویژگی مقاوم‌بودن کنترل‌کننده نیز کاهش یابد [14]. یکی از موثرترین روش‌های مقابله با این مشکل استفاده از کنترل‌کننده فرایپچی می‌باشد. کنترل‌کننده مد لغزشی PID فرایپچی (STPIDSM) توانایی مناسب در حذف پدیده چترینگ بدون کاستن از ویژگی مقاوم‌بودن کنترل‌کننده را دارا می‌باشد. بر همین اساس قانون اصلاح‌شده کنترلی به صورت رابطه (۸) بیان شده است [20].

$$\tau(t)_{STPIDSMC} = \hat{\tau}(t)_{PIDSMC} + \omega \quad (8)$$

$$\omega = -K_1 \sqrt{|S_i|} \text{sign}(S) - \int_0^t K_2 \text{sign}(S(\tau)) d\tau$$

که در آن K_1 و K_2 ثوابت مثبت می‌باشند. مشتق سطح لغزش نسبت به زمان که در رابطه (۵) بیان شده بود با جای‌گذاری رابطه (۸) در رابطه (۵) به صورت رابطه (۹) بازنویسی می‌شود [20].

$$\dot{S} = -K_3 \sqrt{|S_i|} \text{sign}(S) + \xi \quad (9)$$

$$\xi = \int_0^t K_4 \text{sign}(S(\tau)) d\tau$$

$$\dot{\xi} = -K_4 \text{sign}(S)$$

$K_3 = K_1 K_D$
 $K_4 = K_2 K_D$
 همگرایی زمان محدود و همچنین مقاومت روش کنترل فرایپچی توسط روش‌های هندسی و همچنین به کمک خواص همگنی اثبات شده است [33].

به منظور بررسی پایداری روش کنترلی تابع لیاپانوف مثبت معین به صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شود [33].

$$V = \delta^T P \delta \quad (10)$$

$$\delta = [\sqrt{|S|} \text{sign}(S) \quad \xi]^T \quad (11)$$

$$P = \begin{bmatrix} -4K_4 + K_3^2 & K_3 \\ K_3 & 2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

با مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف و ساده سازی ریاضی:

$$\dot{V} = -\frac{1}{\sqrt{|S|}} (\delta^T Q \delta + \tau_d q^T \delta) \quad (13)$$

$$Q = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -4K_4 + K_3^2 & K_3 \\ K_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$q^T = -4K_4 + \frac{K_3^2}{2} + \frac{K_3}{2} \quad (15)$$

با جای‌گذاری Q و q^T در رابطه (۱۳):

$$\dot{V} = -\frac{1}{\sqrt{|S|}} (\delta^T \hat{Q} \delta) \quad (16)$$

کنترل نیروی فعال ترکیبی مد لغزشی PID فراپیچی یک ربات اسکلت خارجی پایین تنه ۲۹۳۹
با تخمین ممان اینرسی المان‌های مختلف سیستم ورودی کنترلی
اعمالی به سیستم را مطابق رابطه (۲۰) اصلاح می‌کند.

$$\hat{Q} = I' \alpha - \tau \quad (20)$$

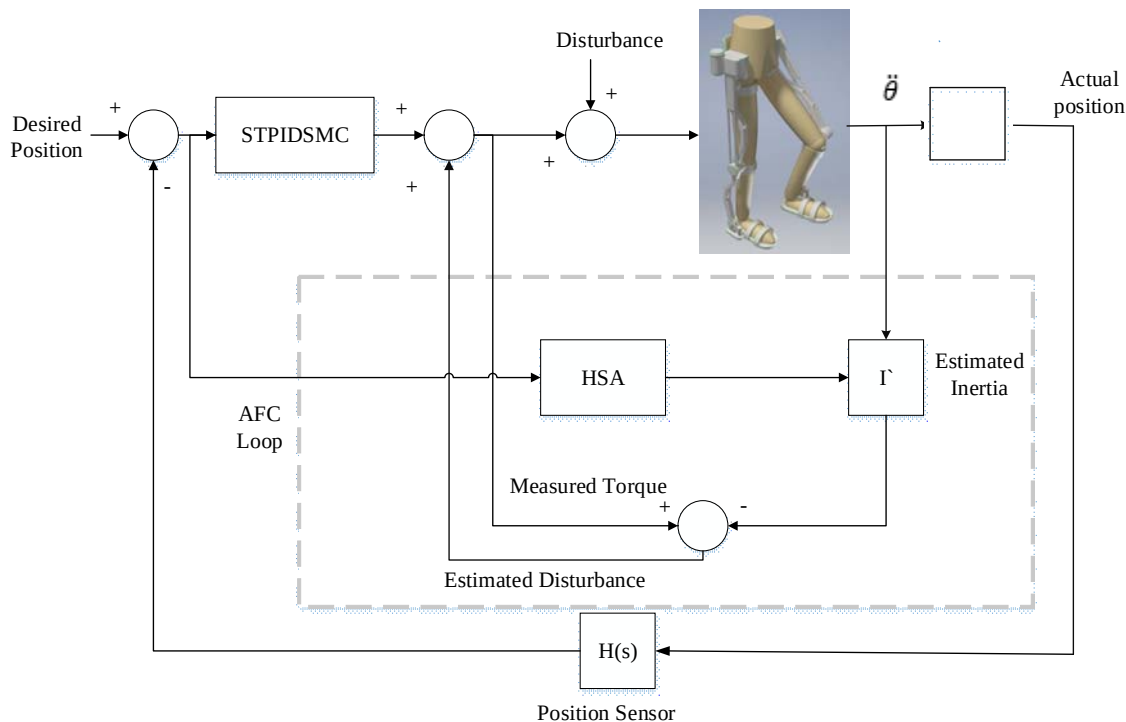
که در آن $\hat{Q}$ گشتاور اغتشاشی تخمین زده شده، τ گشتاور اعمال شده به عملگرها و I' ممان اینرسی تقریب زده شده سیستم است که به صورت یک ماتریس قطری در نظر گرفته شده است. هر چه ماتریس ممان اینرسی بهتر تخمین زده شود، کنترل کننده بهتر عمل می‌کند. گشتاور اغتشاشی تخمین زده شده با سیگنال ورودی عملگر جمع شده تا اثر اغتشاش حذف شود. در این مقاله سیگنال ورودی از کنترل کننده STPIDSM حاصل شده است.

به منظور تخمین ماتریس ممان اینرسی از الگوریتم بهینه سازی جستجوی هارمونی [35]، برای کمینه کردن یک تابع هدف مطابق رابطه (۲۱) استفاده شده است.

$$Obj = (ITAE) + (|\dot{t}|)$$

$$ITAE = \int t|e(t)|dt \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، $e(t)$ بیانگر خطا و $|\dot{t}|$ نرخ سیگنال کنترلی می‌باشند. در شکل ۲ بلوک دیاگرام روش کنترلی آورده شده است.



$$\hat{Q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -4K_4 + K_3^2 - \left(-\frac{16K_4}{K_3} - K_3\right)\Delta & K_3 - 2\Delta \\ K_3 - 2\Delta & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$K_3 < 2\Delta, -K_4 > K_3 \frac{5K_3\Delta}{-2K_3 - 4\Delta} \quad (18)$$

که در آن Δ دامنه اغتشاشات وارد شده به سیستم است. در صورت برقراری شرط (۱۸)، $\dot{V}$ منفی معین شده و سیستم حلقه بسته با روش کنترل STPIDSM پایدار است [34].

۳-۱- کنترل کننده فعال نیرو

کنترل کننده فعال نیرو بر پایه قانون دوم نیوتن ارائه شده است. با استفاده از این روش، اغتشاشات ناخواسته وارد شده به سیستم به صورت موثر و سریع حذف می‌شوند. همچنین کلیه غیرخطی‌های سیستم نیز می‌تواند به صورت اغتشاش در نظر گرفته شود و از دینامیک ربات صرف نظر شود [35]. برای یک جسم در حال دوران، گشتاور اعمالی به جسم مطابق رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$T = I\alpha \quad (19)$$

که در آن I ممان اینرسی و α شتاب زاویه‌ای جسم می‌باشد. این روش کنترل براساس تقریب اغتشاش استوار است. و در هر لحظه

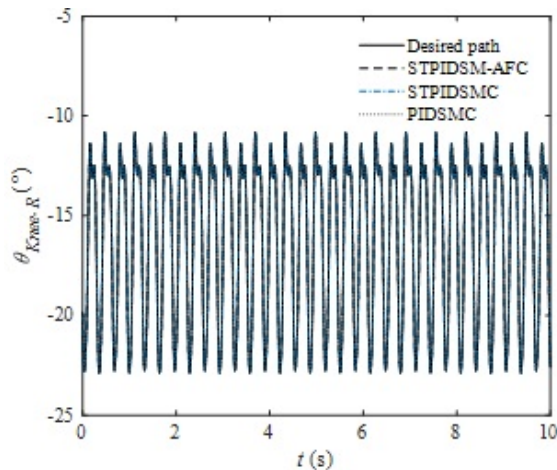
شکل ۲) بلوک دیاگرام روش کنترل مد لغزشی فراپیچی PID و کنترل فعال نیرو

مسیرهای استخراج شده برای ربات مرجع [36] در نظر گرفته شده است. چگونگی عملکرد و مقاومت بودن هر یک از کنترل کننده‌ها در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم، با در نظر گرفتن اغتشاشاتی با دامنه‌ای معادل ۲۰ درصد ماکزیمم دامنه حرکت هر یک از مفاصل و با فرکانس ۳ هرتز و همچنین عدم قطعیت‌هایی به صورت ۲۰ درصد مقدار نامی هر یک از پارامترها بررسی شده است. به منظور مقایسه عملکرد کنترل کننده‌های طراحی شده در این مقاله نمودارهای موقعیت هر یک از مفاصل، نمودار خطا و نمودار انرژی مصرفی برای هر یک از کنترل کننده‌ها ارائه شده است. از آنجا که نمودارهای مسیر مفاصل ربات در بعضی از کنترل کننده‌ها دارای نتایج نزدیک به هم هستند، برای مقایسه نتایج از معیارهای خطای

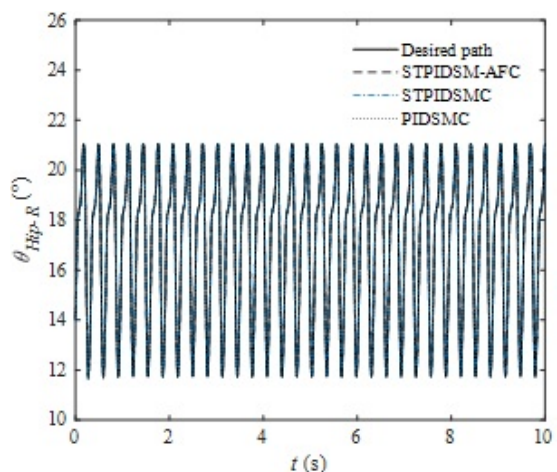
۴- شبیه سازی

در این مقاله با استفاده از روش لاگرانژ معادلات دینامیکی حرکت ربات پایین تنه ۵ لینکی استخراج شده و سپس مسیرهای مرجع هر یک از مفاصل ربات با کنترل کننده‌های مد لغزشی PID فراپیچی ترکیبی با روش کنترل فعال نیرو (STPIDSM-AFC)، مد لغزشی PID فراپیچی بهینه (STPIDSM) و مد لغزشی PID (PIDSM)، ردیابی شده است. پارامترهای کنترل کننده‌ها با کمینه کردن تابع هدف انتگرال خطا توسط الگوریتم بهینه سازی جستجوی هارمونی تعیین شده‌اند. در جدول ۲ پارامترهای بهینه کنترل کننده مد لغزشی PID فراپیچی ترکیبی با روش کنترل فعال نیرو، آورده شده است. مسیرهای مرجع برای مفاصل مطابق با

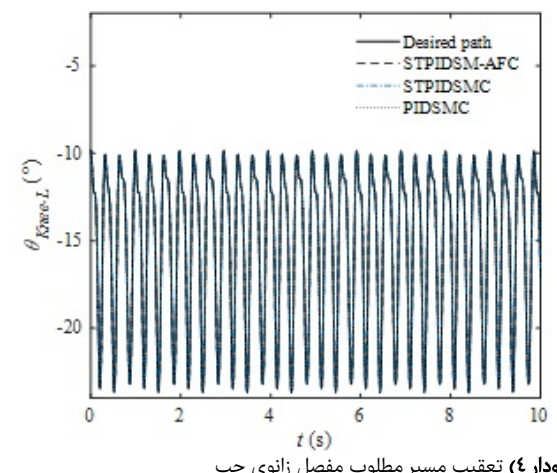
با توجه به نمودارهای ۵-۲ مشخص می‌شود که هر ۳ کنترل‌کننده مسیرهای مطلوب مفاصل ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه را به شکل مطلوبی تعقیب می‌کنند. استفاده از تعریف سطح لغزش به کمک قواعد کنترل‌کننده PID و همچنین استفاده از قانون کنترل فعال نیرو باعث افزایش مقاومت کنترل‌کننده مد لغزشی در مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات وارده بر سیستم شده است. در نمودارهای ۶ تا ۹، میزان خطای ردیابی برای هر یک از کنترل‌کننده‌ها نشان داده شده است.



نمودار ۲) تعقیب مسیر مطلوب مفصل زانوی راست



نمودار ۳) تعقیب مسیر مطلوب مفصل ران راست



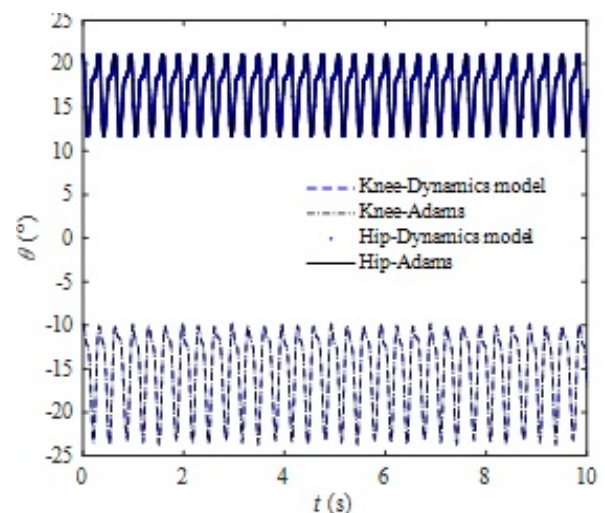
نمودار ۴) تعقیب مسیر مطلوب مفصل زانوی چپ

ITASE، ITAE و IASE استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل دینامیکی استخراج‌شده از روش لاگرانژ، ربات در نرم‌افزار آدامز مدل‌سازی شده و نتایج روش لاگرانژ با نتایج حاصل از آدامز مقایسه شده است. در نمودار ۱ مسیرهای مفاصل زانو و ران یکی از پاهای ربات حاصل از روش لاگرانژ و نرم‌افزار آدامز مقایسه شده است.

در جدول ۲، $I'_1, I'_2, I'_3, I'_4, I'_5$ ممان اینرسی‌های تخمین‌زده‌شده برای لینک‌های ربات می‌باشند.

جدول ۲) پارامترهای بهینه کنترل‌کننده STPIDSM-AFC

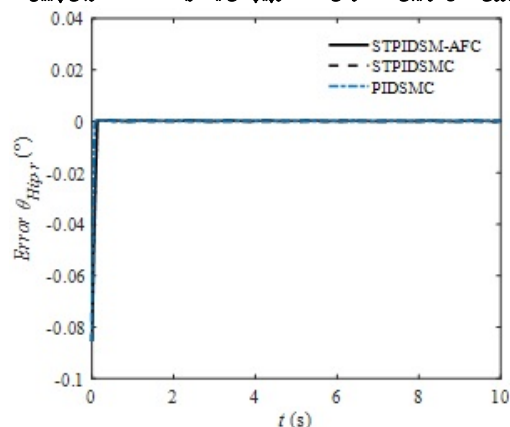
پارامتر	واحد	مقدار
K_P	-	۷۴
K_D	-	۱
K_I	-	۱۰۰
K_1	-	۳۹۰
K_2	-	۵۱۰
I'_1	kg m ²	۰/۲۳۲۲
I'_2	kg m ²	۱/۴۸۲۱
I'_3	kg m ²	۰/۹۵۸۷
I'_4	kg m ²	۰/۷۷۱۸
I'_5	kg m ²	۰/۲۳۷۸



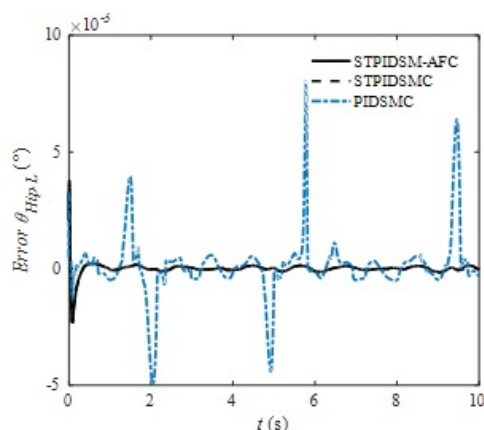
نمودار ۱) مسیر مفصل زانو و ران چپ در مدل دینامیکی و آدامز

همان‌طور که در نمودار ۱ قابل مشاهده است، منحنی‌های مسیر برای مدل استخراج‌شده از روش لاگرانژ و نرم‌افزار آدامز مطابقت مناسبی با یکدیگر دارند. به دلیل نزدیکی مسیرهای حاصل شده به یکدیگر اختلاف بین آنها از روی نمودار قابل تشخیص نمی‌باشد. بنابراین برای به‌دست‌آوردن خطای موجود بین مسیرها، مجموع مجذور خطاها در طول مسیر محاسبه شده است که مقدار خطا برای مفصل ران برابر با ۰/۳۷۵ (مجذور درجه) و برای مفصل زانو برابر با ۰/۱۰۳ (مجذور درجه) می‌باشد که نشان‌دهنده دقت معادلات دینامیکی به‌دست‌آمده برای ربات می‌باشد.

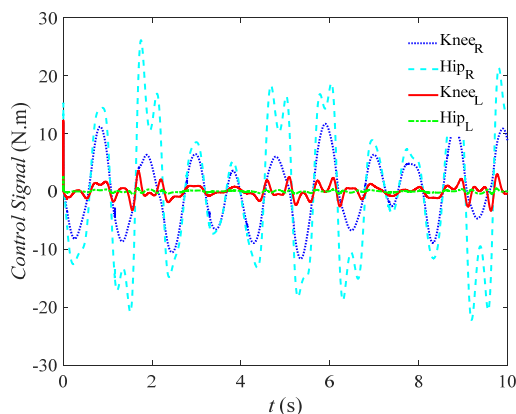
در نمودارهای ۲ تا ۵، نحوه تعقیب مسیرهای مرجع مفاصل ربات توسط کنترل‌کننده‌های مد لغزشی PID فرایپیشی ترکیبی با روش کنترل فعال نیرو (STPIDSM-AFC)، مد لغزشی PID فرایپیشی (STPIDSM) بهینه و مد لغزشی PID (PIDSM) بهینه، نشان داده شده است.



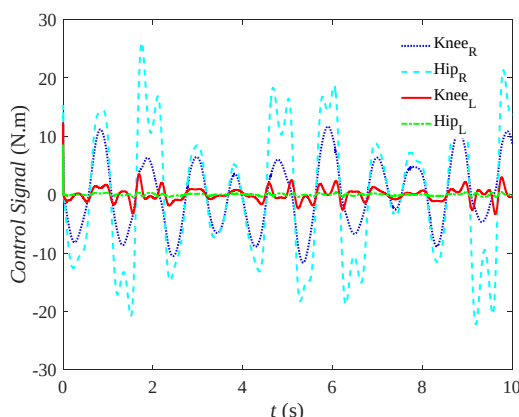
نمودار (۸) سیگنال خطای مفصل زانوی چپ



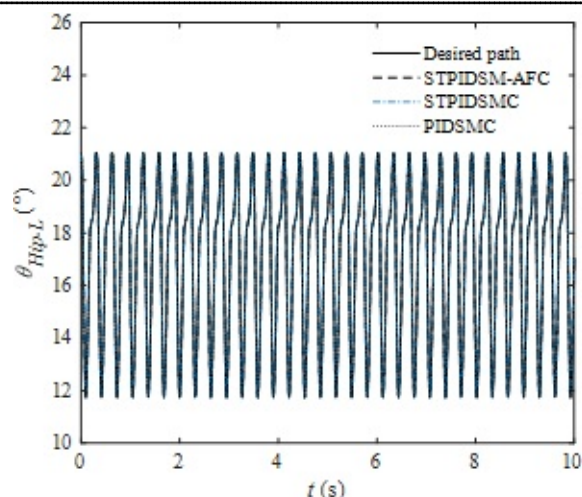
نمودار (۹) سیگنال خطای مفصل ران چپ



نمودار (۱۰) سیگنال‌های کنترلی کنترل کننده STPIDSM-AFC

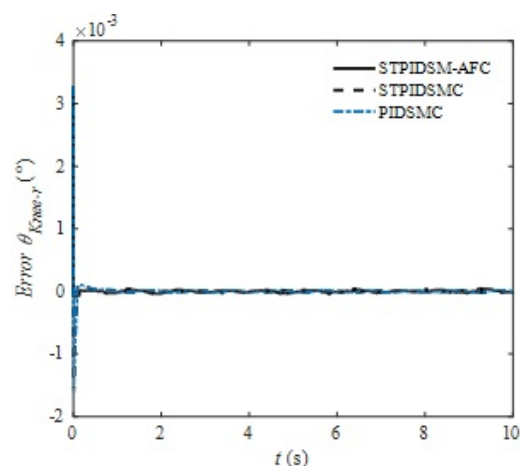


نمودار (۱۱) سیگنال‌های کنترلی کنترل کننده STPIDSMC

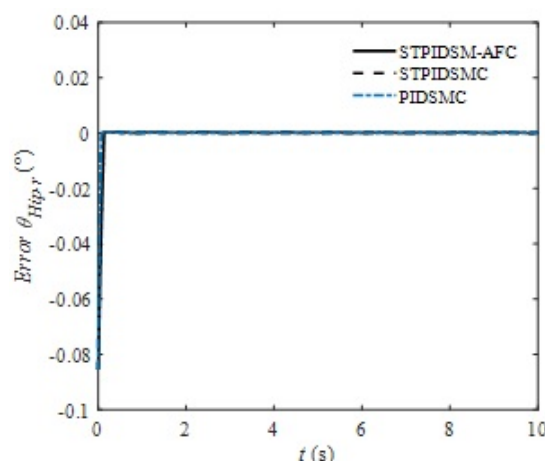


نمودار (۵) تعقیب مسیر مطلوب مفصل ران چپ

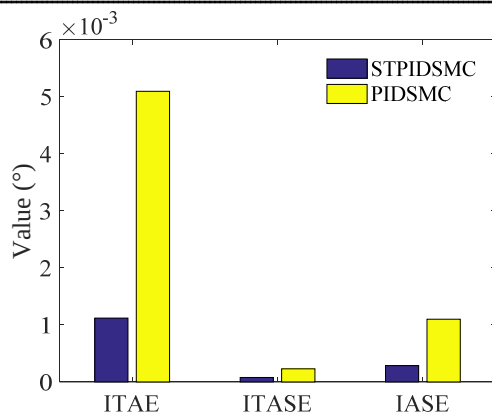
استفاده از روش‌های کنترلی مبتنی بر روش مد لغزشی فرایپچی، باعث افزایش سرعت همگرایی سیگنال خطای متغیرهای حالت سیستم در زمان محدود به صفر می‌شود. با توجه به نمودارهای ۹-۶، مشخص می‌شود که کنترل کننده‌های مد لغزشی PID فرایپچی ترکیبی با روش کنترل فعال نیرو و کنترل کننده مد لغزشی PID فرایپچی بهینه، همگرایی بهتر و با دامنه کمتری نسبت به روش مد لغزشی بهینه به سمت صفر دارند. در نمودارهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲، سیگنال کنترلی برای هر یک از کنترل کننده‌ها ارائه شده است.



نمودار (۶) سیگنال خطای مفصل زانوی راست



نمودار (۷) سیگنال خطای مفصل ران راست



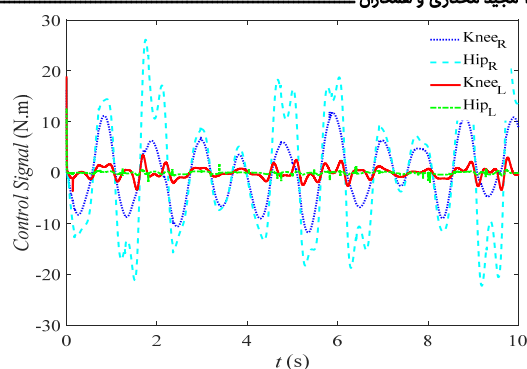
نمودار ۱۵) معیار خطای کنترل‌کننده‌های STPIDSM و PIDSM

همان‌طور که در نمودار ۱۳ نشان داده شده است، هر دو کنترل‌کننده بهینه STPIDSM-AFC و STPIDSM دارای عملکرد قابل قبولی می‌باشند که علت آن توانایی ذاتی کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش فرایچه‌چی در حذف پدیده چترینگ، افزایش سرعت همگرایی سیستم به مقادیر مطلوب و همچنین توانایی مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم می‌باشد. عملکرد کنترل‌کننده STPIDSM-AFC با به‌کارگیری روش کنترل فعال نیرو در حلقه کنترلی خود به عنوان روش موثر در حذف سریع اغتشاشات ناخواسته وارد شده به سیستم، در مقایسه با عملکرد کنترل‌کننده بهینه STPIDSM بهبود یافته است.

در نمودار ۱۴ عملکرد کنترل‌کننده‌های بهینه STPIDSM-AFC و PIDSM مقایسه شده است. کنترل‌کننده PIDSM توانایی مناسب در مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم را دارا می‌باشد. استفاده از قانون کنترل فرایچه‌چی و همچنین استفاده از روش کنترل فعال نیرو باعث عملکرد مناسب‌تر کنترل‌کننده‌های بهینه STPIDSM-AFC نسبت به کنترل‌کننده بهینه PIDSM شده است. همچنین در نمودار ۱۵ عملکرد کنترل‌کننده‌های بهینه PIDSM با کنترل‌کننده بهینه STPIDSM مقایسه شده است که نتایج برتری روش STPIDSM را نشان می‌دهد.

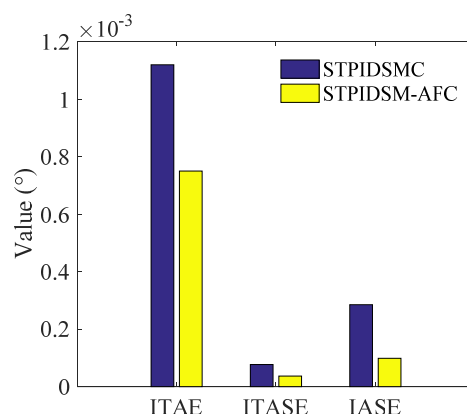
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش کنترلی ترکیبی مد لغزشی PID فرایچه‌چی و کنترل فعال نیرو به منظور مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم، حذف پدیده چترینگ به عنوان یکی از معایب کنترل‌کننده PIDSMC و بالابردن سرعت همگرایی سیستم ارائه شد. کنترل‌کننده مد لغزشی دارای توانایی مناسب در کنترل سیستم‌های غیرخطی می‌باشد. با تعریف سطح لغزش در کنترل‌کننده مد لغزشی با استفاده از قواعد کنترل‌کننده PID که حاصل آن طراحی روش کنترلی PIDSMC می‌باشد، مقاومت کنترل‌کننده مد لغزشی افزایش می‌یابد. در کنترل‌کننده‌های مد لغزشی معمولی و همچنین کنترل‌کننده PIDSMC، برای کاهش اثرات پدیده چترینگ از لایه مرزی استفاده می‌شود. در این حالت نه تنها پدیده چترینگ به طور کامل حذف نمی‌شود بلکه خاصیت مقاوم‌بودن کنترل‌کننده در مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات کاهش می‌یابد. برای مقابله با این مشکل، با استفاده از قوانین فرایچه‌چی در کنترل‌کننده PIDSMC، کنترل‌کننده STPIDSM طراحی شده است. در این حالت پدیده چترینگ ذاتاً و بدون تعریف لایه مرزی با حفظ مقاومت سیستم حذف می‌شود. در مقایسه دو

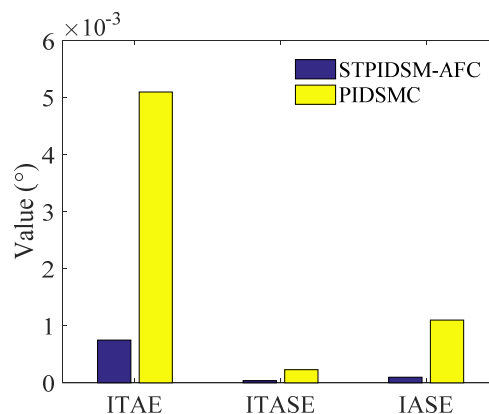


نمودار ۱۲) سیگنال‌های کنترلی کنترل‌کننده PIDSMC

یکی از مزایای استفاده از قانون کنترلی فرایچه‌چی، حذف پدیده چترینگ در کنترل‌کننده مد لغزشی بدون تعریف لایه مرزی می‌باشد. با توجه به نمودارهای ۱۰ تا ۱۲، مشخص می‌شود که سیگنال کنترلی ایجاد شده توسط هر ۳ کنترل‌کننده دارای دامنه مناسب و شکل‌های هموار می‌باشد که این موضوع امکان استفاده از عملگرهای با وزن و ابعاد مناسب روی مفاصل ربات را فراهم می‌کند. در سیگنال کنترلی حاصل از کنترل‌کننده مد لغزشی بهینه مقداری چترینگ وجود دارد که این پدیده در ورودی کنترلی کنترل‌کننده‌های دیگر با به‌کارگیری قانون کنترلی فرایچه‌چی حذف شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده در تعقیب مسیرهای مطلوب ربات، نمودارهای میله‌ای ۱۳، ۱۴ و ۱۵ برای مقایسه معیارهای خطای ITAE، ITASE و IASE برای کنترل‌کننده‌ها، ارائه شده است.



نمودار ۱۳) معیار خطای کنترل‌کننده‌های STPIDSM و STPIDSM-AFC



نمودار ۱۴) معیار خطای کنترل‌کننده‌های STPIDSM-AFC و SMC

- 5- Duschau-Wicke A, Brunsch T, Lünenburger L, Riener R. Adaptive support for patient-cooperative gait rehabilitation with the lokomat. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France: Acropolis Convention Center; 2008. pp. 2355-2361.
- 6- Kazerooni H, Steger R, Huang L. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). The International Journal of Robotics Research. 2006;25(5-6):561-573.
- 7- Siciliano B, Khatib O. Springer handbook of robotics. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2008. pp. 773-793.
- 8- Yan T, Cempini M, Oddo CM, Vitiello N. Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons. Robotics and Autonomous Systems. 2015;64:120-136.
- 9- Edwards C, Colet EF, Fridman L. Advances in variable structure and sliding mode control. Berlin: Springer; 2006. pp. 50-280.
- 10- Sabanovic A, Fridman LM, Spurgeon SK. Variable structure systems: from principles to implementation. Volume 66. 1st Edition. London: The Institution of Engineering and Technology; 2004. pp. 445-456.
- 11- Eker I. Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an electromechanical plant. ISA Transactions. 2006;45(1):109-118.
- 12- Li Y, Xu Q. Adaptive sliding mode control with perturbation estimation and PID sliding surface for motion tracking of a Piezo-Driven micromanipulator. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2010;18(4):798-810.
- 13- Pati A, Singh S, Negi R. Sliding mode controller design using PID sliding surface for half car suspension system. Students Conference on Engineering and Systems (SCES). Allahabad, India; 2014. pp 1-6.
- 14- Bartolini G, Ferrara A, Usai E, Utkin VI. On multi-input chattering-free second-order sliding mode control. IEEE Transactions on Automatic Control. 2000;45(9):1711-1717.
- 15- Mokhtari M, Taghizadeh M, Mazare M. Optimal adaptive high-order super twisting sliding mode control of a lower limb exoskeleton. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(3):777-787. [Persian]
- 16- Moreno JA, Osorio M. A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observer. 47th IEEE Conference on Decision and Control. Cancun, Mexico; 2008. pp. 2856-2861.
- 17- Zargham F, Mazinan AH. Super-twisting sliding mode control approach with its application to wind turbine systems. Energy Systems. 2019;10(1):211-229.
- 18- Goel A, Swarup A. MIMO uncertain nonlinear system control via adaptive high-order super twisting sliding mode and its application to robotic manipulator. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2017;28(1):36-49.
- 19- Liang D, Li J, Qu R. Super-twisting algorithm based sliding-mode observer with online parameter estimation for sensorless control of permanent magnet synchronous machine. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, WI, USA; 2016. pp. 3672-3682.
- 20- Rahmani M, Komijani H, Ghanbari A, Etefagh MM. Optimal novel super-twisting PID sliding mode control of a MEMS gyroscope based on multi-objective bat algorithm. Microsystem Technologies. 2018;24(6):2835-2846.

کنترل‌کننده STPIDSM و PIDSM، ۳ معیار خطای ITAE، ITASE و IASE که معرف خطای سیستم کنترلی و میزان انرژی مصرفی می‌باشند بررسی شده‌اند که مقدار این ۳ معیار در کنترل‌کننده STPIDSM به ترتیب ۷۸، ۵۲ و ۲۶ درصد نسبت به کنترل‌کننده PIDSM کاهش یافته است. به منظور بالا بردن مقاومت کنترل‌کننده STPIDSM و مقابله موثرتر با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم، کنترل‌کننده STPIDSM-AFC با ترکیب کنترل‌کننده STPIDSM و روش کنترل فعال نیرو به عنوان حلقه اصلاحی ورودی کنترلی طراحی شده است. برای دستیابی به حداکثر عملکرد، پارامترهای هر ۳ کنترل‌کننده به کمک الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی و با کمینه‌کردن تابع هزینه انتگرال خطا تعیین شده است. با بررسی معیارهای خطای ITAE، ITASE و IASE برای کنترل‌کننده بهینه STPIDSM-AFC مشخص شد که مقادیر این ۳ معیار خطا به ترتیب ۳۹، ۴۸ و ۶۶ درصد نسبت به کنترل‌کننده STPIDSM کاهش می‌یابد. سیگنال‌های کنترلی حاصل از دو کنترل‌کننده بهینه STPIDSM-AFC و STPIDSM کاملاً هموار بوده و دارای مقادیر مناسب در حدود ۲۵ نیوتن‌متر جهت انتخاب عملگرها قرار دارد. در کنترل‌کننده بهینه PIDSM اگرچه سیگنال دارای دامنه مناسبی می‌باشد اما برخلاف کنترل‌کننده بهینه STPIDSM-AFC دارای مقداری نوسان و چترینگ است که این موضوع توانمندی روش فرایپچی را در حذف پدیده چترینگ نشان می‌دهد. به منظور ایجاد ارتباط مناسب بین ربات و کاربر ترکیب روش کنترل امپدانس با هر یک از کنترل‌کننده‌های طراحی شده در این مقاله پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهام نویسندگان: مجید مختاری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ مصطفی تقی‌زاده (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۰٪)؛ محمود مزارع (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪)

منابع مالی: این پژوهش توسط دانشگاه شهید بهشتی تهران حمایت مالی شده است.

منابع

- 1- Bogue R. Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments. Industrial Robot. 2009;36(5):421-7.
- 2- Mosher RS. Handyman to Hardiman. SAE Technical Papers. 1967;(670088):1-12.
- 3- Vukobratovic M, Borovac B, Surla D, Stokic D. Biped Locomotion. 1st Edition. Berlin: Springer-Verlag; 1990. pp. 1-349.
- 4- Jezernik S, Colombo G, Kelly T, Frueh H, Morari M. Robotic Orthosis Lokomat: A rehabilitation and research tool. Neuromodulation. 2003;6(2):108-115.

2018;18(2):342-350. [Persian]

29- Kawamoto H, Sankai Y. Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for HAL. *Advanced Robotics*. 2005;19(7):717-734.

30- Kyaw PK, Sandar K, Khalid M, Juan W, Li Y, Chen Z. Opportunities in robotic exoskeletons hybrid assistive limb SUIT (MT5009). *Robotic Exoskeletons: Becoming Economically Feasible* [Internet]. Unknown city: Slide Share; 2013 [Unknown cited]. Available from: <https://www.slideshare.net/Funk98/robotic-exoskeletons-becoming-economically-feasible>.

31- Craig JJ. *Introduction to robotics: mechanics and control*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall; 2005.

32- Hasani V, Taghizadeh M, Mazare M. Modeling and position controller design of a servo-hydraulic actuator under variable loads using sliding mode control. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(6):295-302. [Persian]

33- Moreno JA, Osorio M. Strict Lyapunov functions for the super-twisting algorithm. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2012;57(4):1035-1040.

34- Jahanabadi H, Mailah M, Zain MZM. Active force control of a fluidic muscle system using fuzzy logic. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Singapore; 2009.

35- Ruby M, Botez RM. Trajectory Optimization for vertical navigation using the harmony search algorithm. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(17):11-16.

36- Chevallereau C, Bessonnnet G, Abba G, Aoustin Y. *Bipedal robots: modeling, design and walking synthesis*. Hoboken: John Wiley; 2009. pp. 140-160.

21- Ferris DP, Gordon KE, Beres-Jones JA, Harkema SJ. Muscle activation during unilateral stepping occurs in the nonstepping limb of humans with clinically complete spinal cord injury. *Spinal Cord*. 2004;42(1):14-23.

22- Mailah M. *Intelligent active force control of a rigid robot arm using neural network and iterative learning algorithms* [Dissertation]. Dundee, Scotland: University of Dundee; 1998.

23- Mailah M, Hewit JR, Meeran S. Active force control applied to a rigid robot arm. *Jurnal Mekanikal*. 1996;2:52-68.

24- Hussein SB, Jamaluddin H, Mailah M, Zalzal AMS. A hybrid intelligent active force controller for robot arms using evolutionary neural networks. *20th Congress on Evolutionary Computation*. La Jolla, USA; 2000.

25- Hassan MF, Mailah M, Junid R, Alang NA. Vibration suppression of a handheld tool using intelligent active force control (AFC). *The World Congress on Engineering*; London: 2010.

26- Ramli MHM, Patar MNAA, Meon MS, Makhtar AK. Dynamics characterization of a high precision MM3A micro manipulator system. *IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering*. Penang, Malaysia; 2011.

27- Mohamad M, Mailah M, Muhaimin AH. Vibration control of mechanical suspension system using active force control. *1st International Conference on Natural Resources Engineering and Technology INRET*. Kuala Lumpur, Malaysia; 2006.

28- Mokhtari M, Taghizadeh M, Mazare M. Optimal robust hybrid active force control of a lower limb exoskeleton. *Modares Mechanical Engineering*.