



Optimal Adaptive High-Order Super Twisting Sliding Mode Control of a Lower Limb Exoskeleton Robot

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. Optimal Adaptive High-Order Super Twisting Sliding Mode Control of a Lower Limb Exoskeleton Robot. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(3):777-787.

ABSTRACT

External disturbances and internal uncertainties with an unknown range, as well as the connection between the human body and robot, are major problems in control and stability of exoskeleton robots. In order to deal with disturbances and uncertainties with the known range of the system, the sliding mode controller is used as a robust approach. The chattering phenomenon is one of the drawbacks of sliding mode controller, which boundary layer is employed to reduce the effects of this phenomenon. In this case, not only the chattering phenomenon is not completely eliminated, but the robust characteristics of the controller are mitigated. In this paper, in order to cope with the disturbances and uncertainties with unknown range, and guard against chattering as a key ingredient of excessive energy consumption and convergence rate reduction, optimal adaptive high-order super twisting sliding mode control has been applied. The dynamic model of a lower limb exoskeleton robot is extracted using the Lagrange method in which four actuators on the hip and knee joints of the left and right legs are considered. To achieve optimal performance, controller parameters are determined using Harmony Search algorithm by minimizing an objective function consisting of ITAE and control signal rate. The proposed controller performance is compared with optimal adaptive super twisting sliding mode and optimal sliding mode controllers which shows the superiority of the optimal adaptive high-order sliding mode controller rather than other designed controllers.

Keywords Exoskeleton Robot; Dynamic Modeling; High-Order Sliding Mode Control; Adaptive Control; Harmony Search Algorithm

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

*Correspondence

Address: Mechatronics Department, Mechanical Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Postal Code: 1743524155
Phone: +98 (21) 73932670
Fax: +98 (21) 73932699
mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

Article History

Received: November 15, 2017
Accepted: November 13, 2018
ePublished: March 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Exoskeletons and robotic prosthetics: A review of recent developments [2] On the Stability of Biped Locomotion [3] Biped locomotion: Dynamics, stability, control and application [4] Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art [5] Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review [6] Robotic orthosis lokomat: A rehabilitation and research tool [7] Variable impedance actuators: A review [8] Hybrid control of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) [9] Springer handbook of robotics [10] An autonomous, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation [11] Robust tracking control of robots by a linear feedback law [12] Finite-time stabilization and stabilizability of a class of controllable systems [13] Terminal sliding mode control design for uncertain dynamic systems [14] On second order sliding mode controllers [15] Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control [16] MIMO uncertain nonlinear system control via adaptive high-order super twisting sliding mode and its application to robotic manipulator [17] Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for HAL [18] Body Extender: Whole body exoskeleton for human power augmentation [19] Bipedal Robots: Modeling, design and walking synthesis [20] Optimal robust hybrid active force control of a lower limb exoskeleton [21] Sliding mode control of 3-RPR parallel robot on the optimal path using cuckoo optimization algorithm [22] A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers [23] Super-twisting sliding mode control approach with its application to wind turbine systems [24] Sliding mode control and observation [25] Lyapunov function for levant's second order differentiator [26] Harmony Search Optimization: Application to Pipe Network Design [27] Global dynamic harmony search algorithm: GDHS

کنترل مد لغزشی فرایپچی مرتبه بالای تطبیقی بهینه یک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه

مجید مختاری MSc

گروه مکاترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

مصطفی تقی‌زاده PhD

گروه مکاترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محمود مزارع MSc

گروه مکاترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

اغتشاشات خارجی و نامعینی‌های داخلی با دامنه نامعلوم و همچنین وجود اتصال بین بدن انسان و ربات از مشکلات عمده در کنترل و پایداری ربات‌های اسکلت خارجی است. کنترل‌کننده مد لغزشی، یک روش مقاوم برای مقابله با اغتشاشات و نامعینی‌ها با دامنه معلوم سیستم است. یکی از معایب این کنترل‌کننده، وجود پدیده چترینگ است که برای کاهش اثرات این پدیده از لایه مرزی استفاده می‌شود. در این حالت نه تنها پدیده چترینگ به طور کامل حذف نمی‌شود، بلکه خاصیت مقاوم بودن کنترل‌کننده نیز کاهش می‌یابد. در این مقاله به منظور مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم و همچنین مقابله با پدیده چترینگ به عنوان عامل اساسی در افزایش انرژی مصرفی و کاهش سرعت همگرایی سیستم، از روش کنترل بهینه مد لغزشی فرایپچی مرتبه بالای تطبیقی استفاده شده است. مدل دینامیک برای ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه دویا با در نظر گرفتن چهار عملکرد روی مفاصل ران و زانوی پاهای چپ و راست به کمک روش لاگرانژ استخراج شده است. به منظور دستیابی به عملکرد بهینه، پارامترهای کنترل‌کننده با کمینه کردن معیار خطای ITAE و نرخ تغییرات ورودی کنترل، با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی تعیین شده‌اند. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با عملکرد کنترل‌کننده‌های بهینه مد لغزشی فرایپچی تطبیقی و مد لغزشی معمولی مقایسه شده که نتایج بیانگر برتری روش کنترل مد لغزشی مرتبه بالای تطبیقی بهینه نسبت به دیگر کنترل‌کننده‌های طراحی شده است.

کلیدواژه‌ها: ربات اسکلت خارجی، مدل‌سازی دینامیک، کنترل مد لغزشی مرتبه بالا، کنترل تطبیقی، الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۲

* نویسنده مسئول: mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از ربات‌های اسکلت خارجی یکی از راهکارهای نوین و مورد مطالعه در دنیا به منظور افزایش عملکرد فیزیکی انسان است. ربات اسکلت خارجی، رباتی پوشیدنی است که با ظاهری شبیه به انسان یا بخشی از بدن انسان می‌تواند علاوه بر افزایش قابلیت‌های شخص، نیروی وارد بر مفاصل، خستگی عضلات و هزینه متابولیک او را نیز کاهش دهد. این ربات‌ها دارای دامنه وسیعی از کاربردهای نظامی، پزشکی و توانبخشی هستند و برای کمک به افراد سالم و همچنین افرادی به کار می‌روند که در اعضای بدن دچار اختلال هستند [1].

تحقیقات اولیه در مورد ربات‌های اسکلت خارجی در دهه ۱۹۶۰ در ایالات متحده [2]، ژاپن و یوگسلاوی سابق صورت گرفته است [3, 4]. همزمان با دستاوردهای بزرگ در زمینه مهندسی و علم مواد، ربات‌های اسکلت خارجی نیز از لحاظ ساختارهای مکانیک، محرک‌ها و رابط‌ها توسعه یافته‌اند و تحقیقات بسیاری روی آنها انجام شده است. اولین ربات اسکلت خارجی عملی با نام هاردمن ساخته شده است [5]. در سال ۲۰۰۳ برای کنترل موقعیت مسیرهای از پیش تعیین شده زاویه مفاصل یک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه

با کاربرد توانبخشی و از کنترل امپدانس برای کنترل راحت‌تر و سازگارپذیرتر با کاربر استفاده شده است [6, 7]. ربات بلیکس به منظور تقویت نیروی عضلانی و استقامت کاربران هنگام حرکت برای کاربردهای نظامی، توسط دانشگاه برکلی ارائه شد. الگوریتم کنترلی این ربات به صورت کنترل مبتنی بر مدل با راهبرد کمکی افزایش حساسیت به نیروها و گشتاورهای خارجی است [8]. برای حمل بارهای سنگین در مدت زمان طولانی و حرکت در سطوح با شیب کم، رباتی با عنوان آگروه‌ایکر بر مبنای ربات بلیکس طراحی شده است. راهبرد کنترلی این ربات به صورت راهبرد کنترل فعال تعقیب مفصل است [9]. برای کمک به افراد معلول برای راه رفتن، آگرواسکلتونی با نام ریوالک ارائه شده که کنترل آن بر مبنای تعقیب موقعیت مطلوب از پیش تعیین شده مفاصل است [10].

انتخاب روش کنترلی مناسب، نقش اساسی در عملکرد ربات اسکلت خارجی به منظور تعقیب منحنی مفاصل مطلوب ربات دارد. همچنین پایداری حرکت ربات، ارتباط مستقیمی با عملکرد کنترل‌کننده در مقابله با اغتشاشات وارد شده از محیط و انسان به ربات و همچنین دینامیک‌های مدل نشده و عدم قطعیت‌های سیستم دارد. کنترل‌کننده‌هایی از قبیل کنترل‌کننده خطی‌سازی فیدبک، مقاوم، تطبیقی، مقاوم تطبیقی، مبتنی بر رویت‌گر و کنترل‌کننده مد لغزشی برای مقابله با اغتشاشات خارجی و همچنین عدم قطعیت‌های داخلی ارائه شده‌اند. این راهبردها به لحاظ نظری به محبوبیت فراوان دست یافته‌اند، اما اکثر آنها فقط پایداری نسبی را تضمین می‌کنند [11]. در این حالت، سیستم کنترلی، زمان زیادی را برای تعقیب مسیرهای مطلوب صرف خواهد کرد. از طرفی، کنترل پایدار سیستم، مستلزم داشتن بهره کنترلی بالایی است که این موضوع، گاهی اوقات عملی نیست. در نتیجه، یک کنترل‌کننده مقاوم با همگرایی سریع برای کاربردهای نظری و عملی لازم است. امروزه روش‌های کنترلی مانند رویکرد زمان محدود پایداری لیاپانوف [12]، رویکرد مد لغزشی ترمینالی [13] و روش مد لغزشی فرایپچی [14] توسعه یافته‌اند که پایداری حالت‌های سیستم‌های غیرخطی را به نقاط تعادل در زمان محدود (Finite-time stability) تضمین می‌کنند.

کنترل‌کننده مد لغزشی فرایپچی از محبوب‌ترین کنترل‌کننده‌های مرتبه دوم مد لغزشی است که خصوصیتی مانند کاهش پدیده چترینگ، ایجاد سیگنال کنترلی پیوسته برای تعقیب مسیرهای مطلوب در زمان‌های محدود و حفظ خواص مقاوم بودن کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی در مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها را داراست [15]. این کنترل‌کننده برای سیستم‌هایی با درجه نسبی یک قابل استفاده بوده و همچنین نیاز به اطلاعات معلومی در مورد اغتشاشات است که عموماً امکان‌پذیر نیست. وجود پدیده چترینگ باعث ایجاد دینامیک‌های مدل نشده فرکانس بالایی می‌شود که می‌تواند ضمن کاهش عملکرد مطلوب سیستم، خسارات جبران‌ناپذیری به آن وارد کند. سیستم‌های واقعی به صورت مرتبه دوم یا بالاتر مدل می‌شوند. در کنترل‌کننده مد لغزشی فرایپچی، متغیر لغزشی به صورت ترکیب خطی از حالت‌ها تعریف می‌شود که باعث همگرایی نسبی به جای همگرایی زمان محدود می‌شود [16]. در این مقاله، روش کنترل مد لغزشی فرایپچی مرتبه بالای تطبیقی بهینه به منظور کنترل ربات اسکلت خارجی به عنوان یک سیستم مرتبه دوم، برای تعقیب منحنی‌های مطلوب مفاصل در زمان محدود، کاهش پدیده چترینگ، مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم ارائه شده است.

در این مقاله با استفاده از روش لاگرانژ، معادلات دینامیک برای

در جدول ۱، L_{Ci} مرکز جرم هر یک از لینک‌ها است [19]. با استخراج روابط سینماتیک به صورت رابطه ۱ و استفاده از روش لاگرانژ که دارای معادلاتی به صورت رابطه ۲ بوده، معادلات دینامیک حاکم بر ربات به صورت رابطه ۳ بیان شده است.

$$\begin{aligned} xc_1 &= l_{c1} \sin(\theta_1) \\ xc_2 &= l_1 \sin(\theta_1) + l_{c2} \sin(\theta_2) \\ xc_3 &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) + l_{c3} \sin(\theta_2) \\ xc_4 &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) \\ &\quad + (l_4 - l_{c4}) \sin(\theta_4) \\ xc_5 &= l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) + l_4 \sin(\theta_4) \\ &\quad + (l_5 - l_{c5}) \sin(\theta_5) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} yc_1 &= l_{c1} \cos(\theta_1) \\ yc_2 &= l_1 \cos(\theta_1) + l_{c2} \cos(\theta_2) \\ yc_3 &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) + l_{c3} \cos(\theta_2) \\ yc_4 &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) \\ &\quad - (l_4 - l_{c4}) \cos(\theta_4) \\ yc_5 &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) - l_4 \cos(\theta_4) \\ &\quad - (l_5 - l_{c5}) \cos(\theta_5) \end{aligned}$$

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

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + \tau_d \quad (3)$$

در رابطه ۱، l_i طول هر یک از لینک‌ها، xc_i مختصات در جهت x مرکز جرم هر یک از لینک‌ها و yc_i مختصات در جهت y مرکز جرم هر یک از لینک‌ها است. در رابطه ۲، θ_i متغیر تعمیم‌یافته هر یک از مفاصل، K مجموع انرژی جنبشی لینک‌های ربات، U مجموع انرژی پتانسیل لینک‌های ربات و τ_i گشتاور وارد شده به هر یک از مفاصل است. 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 $G(q)$ بردار نیروهای گرانشی و τ_d گشتاور اغتشاش هستند [20].

جدول ۱) پارامترهای ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه [19]

پارامتر	واحد	مقدار
m_1	kg	۳/۲
m_2	kg	۶/۸
m_3	kg	۱۶/۵
m_4	kg	۶/۸
m_5	kg	۳/۲
I_1	kg m ²	۰/۰۵
I_2	kg m ²	۰/۰۷
I_3	kg m ²	۱/۵۶
I_4	kg m ²	۰/۰۵
I_5	kg m ²	۰/۰۷
L_1	m	۰/۱۸
L_2	m	۰/۳۲
L_3	m	۰/۴
L_4	m	۰/۳۲
L_5	m	۰/۱۸
L_{C1}	m	۰/۵۲۷
L_{C2}	m	۰/۱۶۳
L_{C3}	m	۰/۲
L_{C4}	m	۰/۵۲۷
L_{C5}	m	۰/۱۶۳

ربات اسکلت خارجی دوبا با در نظر گرفتن چهار مفصل فعال روی زانو و ران هر یک از پاها استخراج شده است. سپس ربات به روش مد لغزشی فرایپچی مرتبه بالای تطبیقی بهینه برای تعقیب موقعیت مطلوب مفاصل ربات کنترل شده است. این روش کنترلی علاوه بر سرعت بالای همگرایی، به دلیل کارایی بالا در مقابله با اغتشاشات و نامعینی‌های با دامنه نامعلوم و همچنین کاهش پدیده چترینگ، پایداری حرکت ربات را افزایش می‌دهد. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با عملکرد کنترل‌کننده‌های مد لغزشی فرایپچی تطبیقی بهینه و مد لغزشی معمولی بهینه مقایسه شده است. پارامترهای کنترل‌کننده‌های طراحی شده با کمینه کردن یک تابع خطا به صورت ترکیب معیار خطای ITAE و تغییرات ورودی کنترلی توسط الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی تعیین شده‌اند. نوآوری این مقاله عبارت از موارد زیر است:

۱- استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی فرایپچی مرتبه بالای تطبیقی بهینه برای ربات اسکلت خارجی پنج‌لینکی با مفاصل فعال
۲- تعیین پارامترهای کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی به منظور دستیابی به عملکرد بهینه
۳- بالابردن قابلیت مقابله با اغتشاشات با دامنه نامعلوم وارد شده به ربات

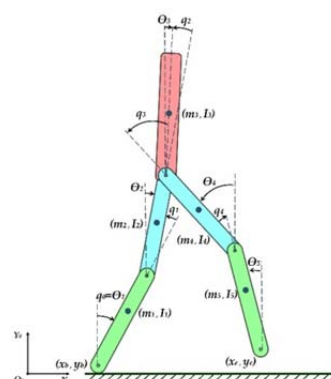
۴- بالابردن سرعت همگرایی ربات به موقعیت‌های مطلوب مفاصل و کاهش پدیده چترینگ

ساختار این مقاله بدین ترتیب است که در قسمت ۲، ربات اسکلت خارجی مورد مطالعه معرفی و پارامترهای آن بیان و سپس مدل دینامیک حاصل از روش لاگرانژ ارائه شده است. در قسمت ۳، روش کنترل ارائه شده و پایداری آن بررسی شده است. در قسمت ۴، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی شرح داده شده است. در قسمت ۵، ورودی‌های کنترلی حاصل از روش‌های کنترلی به مدل شبیه‌سازی شده، اعمال و در آخر، نتایج حاصل از مقاله در بخش ۶ ذکر شده است.

۲- معرفی و مدل‌سازی مکانیزم پیشنهادی

تطابق سینماتیک ربات با بدن انسان و نحوه قرارگیری مفاصل ربات در محل مفاصل انسان باعث تبعیت کامل سینماتیک ربات از کاربر می‌شود. این رویکرد در سری ربات‌های Hal مشاهده شده است [17]. در این مقاله، مدل استفاده شده شامل پنج لینک و مفاصل فعال برای ران و زانوی پاهای چپ و راست است. در شکل ۱ شماتیک ربات اسکلت خارجی مورد مطالعه نشان داده شده است.

در شکل ۱، θ_i برای $i=1,2,3,4,5$ زاویه مطلق هر یک از مفاصل، q_i زاویه نسبی هر یک از مفاصل I_i ممان اینرسی لینک‌ها و m_i جرم لینک‌ها هستند. پارامترهای ربات مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱) شماتیک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه ۵ درجه آزادی

در این مقاله به منظور بالابردن سرعت همگرایی کنترل کننده در تعقیب مسیر تعیین شده برای مفاصل ربات، مقابله با اغتشاشات خارجی و نامعینی های داخلی با دامنه نامحدود سیستم و کاهش پدیده چترینگ، از کنترل کننده بهینه مد لغزشی فرایچهشی مرتبه بالای تطبیقی استفاده شده است. عملکرد کنترل کننده پیشنهاد شده با عملکرد کنترل کننده های مد لغزشی فرایچهشی تطبیقی بهینه و مد لغزشی معمولی بهینه مقایسه شده و در ادامه روابط حاکم بر این کنترل کننده ها ارائه شده است.

۳-۱- کنترل کننده مد لغزشی

روش کنترل مد لغزشی از جمله روش های کنترلی مشهور در دسته کنترل کننده های مقاوم است که عملکرد مناسبی در مقابله با عدم قطعیت ها و اغتشاشات با دامنه محدود و معلوم سیستم دارد [21]. از معایب این روش کنترلی، وجود پدیده چترینگ به عنوان یک دینامیک فرکانس بالای مدل نشده و نیاز به آگاهی از محدوده عدم قطعیت ها و اغتشاشات سیستم است.

برای اعمال این روش کنترلی به ربات، برای هر یک از متغیرهای حالت (q)، معادله خطا به صورت $e = q - q_d$ در نظر گرفته شده است. سطح لغزش متغیر با زمان مطابق با رابطه ۴ تعریف شده که در آن n بعد فضای حالت و λ یک ثابت اکیداً مثبت است. در کنترل کننده مد لغزشی، هدف میل دادن شیب این سطح لغزش به سمت صفر است.

$$S(q, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (4)$$

در رابطه بالا، $n = 2$ است. با مشتق گیری از رابطه ۴ نسبت به زمان و استفاده از رابطه ۳، ورودی کنترلی برای رسیدن به $\dot{S} = 0$ به دست می آید.

$$\hat{\tau}(t) = C(q, \dot{q}) + G(q) + \tau_d + M(\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)) \quad (5)$$

همچنین برای کاهش پدیده چترینگ، یک جمله ناپیوسته به صورت یک لایه مرزی به ورودی کنترلی اضافه می شود.

$$\tau(t) = \hat{\tau}(t) - K \tanh(S) \quad (6)$$

که در آن K یک ثابت مثبت است. در نهایت قانون کنترل مد لغزشی به صورت رابطه ۷ بیان شده است.

$$\hat{\tau}(t) = C(q, \dot{q}) + G(q) + \tau_d + M(\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d) - K \tanh(S)) \quad (7)$$

۳-۲- کنترل کننده تطبیقی مرتبه بالای مد لغزشی فرایچهشی

نسل جدید کنترل کننده های مد لغزشی مرتبه دوم به نام کنترل مد لغزشی فرایچهشی (STSMC) پیشنهاد شده است [22]. کنترل مد لغزشی فرایچهشی، یک الگوریتم کنترل مد لغزشی حالت پیوسته مرتبه دوم است که با تولید یک تابع کنترلی پیوسته، متغیر لغزشی و مشتق آن را در زمان محدود در حضور اغتشاشات خارجی و نامعینی های داخلی با دامنه محدود و معلوم به مقدار صفر میل می دهد [23]. در روش کنترل مد لغزشی معمولی به منظور مقابله با پدیده چترینگ، یک ترم به صورت لایه مرزی به قانون کنترلی اضافه می شود. در نظر گرفتن این لایه باعث کاهش خواص مقاوم بودن کنترل کننده مد لغزشی در مقابله با عدم قطعیت ها و اغتشاشات می شود. در روش کنترلی مد لغزشی فرایچهشی، قانون کنترل با ایجاد یک تابع کنترلی پیوسته، ذاتاً و بدون تعریف لایه مرزی با حفظ توانایی کنترل کننده در مقابله با عدم قطعیت ها و اغتشاشات سعی در کاهش پدیده چترینگ دارد [24]. از آنجایی که این روش کنترلی دارای انتگرال ناپیوسته است، بنابراین پدیده چترینگ حذف

نمی شود، اما به مقدار قابل قبولی کاهش می یابد. کنترل کننده مد لغزشی فرایچهشی، یک کنترل کننده مد لغزشی مرتبه دوم است که در آن متغیر لغزشی به صورت ترکیب خطی از حالت های سیستم تعریف می شود. از این رو این کنترل کننده برای کنترل سیستم هایی با درجه نسبی یک مناسب است. سیستم های واقعی، دارای مرتبه دوم یا بالاتر هستند که استفاده از کنترل کننده مد لغزشی فرایچهشی برای آنها باعث همگرایی نسبی به موقعیت های مطلوب به جای همگرایی زمان محدود می شود [16]. بنابراین در این مقاله، کنترل کننده مرتبه بالای مد لغزشی فرایچهشی برای کنترل سیستم های واقعی مانند ربات که درجه نسبی بزرگ تر از یک دارند، به منظور دستیابی به سرعت همگرایی بالا در تعقیب زوایای مطلوب مفاصل، کاهش پدیده چترینگ و مقابله با اغتشاشات با دامنه محدود پیشنهاد شده است. معادله سطح لغزش برای کنترل کننده مد لغزشی فرایچهشی معمولی به صورت رابطه ۴ بوده که سطح لغزش تعریف شده توسط آن، یک معادله خطی از خطا و مشتق آن است. ورودی کنترلی در روش مد لغزشی فرایچهشی تطبیقی به صورت رابطه ۸ بیان شده است [24].

$$\begin{aligned} \tau_i(t) &= \hat{\tau}_i(t) + \omega_i \\ \omega_i &= A_i \sqrt{|S_i|} \operatorname{sgn}(S) + \vartheta_i \\ \dot{\vartheta}_i &= -\frac{\beta_i}{2} \operatorname{sgn}(S) \end{aligned} \quad (8)$$

در رابطه بالا $\beta = 2\epsilon A$ و همچنین:

$$\dot{A} = \begin{cases} w_1 \sqrt{\frac{\gamma_1}{2}} \operatorname{sgn}(|S| - \mu) & A > \alpha_m \\ \eta & A \leq \alpha_m \end{cases} \quad (9)$$

است که در آن $w_1, \gamma_1, \mu, \epsilon, \eta$ ثابت هستند. اثبات پایداری روش مد لغزشی فرایچهشی تطبیقی در یک پژوهش [25] ارائه شده است. برای داشتن سرعت همگرایی بالاتر، کنترل کننده مد لغزشی فرایچهشی با یک سطح لغزش غیرخطی همگن به صورت رابطه ۱۰ ارائه شده است.

$$s = \dot{e} + k_1 e^{2/3} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، k_1 یک ثابت اکیداً مثبت است. با مشتق گیری از سطح لغزش، رابطه ۱۱ به دست می آید.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + \frac{2}{3} \dot{e} k_1 [e]^{-1/3} \\ \dot{s} &= \ddot{q} - \ddot{q}_d + \frac{2}{3} (\dot{q} - \dot{q}_d) k_1 [q - q_d]^{-1/3} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= M(q)^{-1} (\tau + \tau_d - c(q, \dot{q}) - G(q)) - \ddot{q}_d \\ &\quad + \frac{2}{3} (\dot{q} - \dot{q}_d) k_1 [q - q_d]^{-1/3} \end{aligned}$$

با مساوی صفر قراردادن $\dot{s}$ ، رابطه ۱۲ به دست می آید.

$$\tau = -\tau_d + c(q, \dot{q}) + G(q) + M(q)(\ddot{q}_d - \frac{2}{3} (\dot{q} - \dot{q}_d) k_1 [q - q_d]^{-1/3}) \quad (12)$$

قانون کنترلی اصلاح شده برای کنترل کننده مرتبه بالای مد لغزشی فرایچهشی به صورت معادله ۱۳ بیان شده است [22, 25].

$$\begin{aligned} \tau_{HSTC} &= \tau + u \\ u &= -k_2 |s|^{1/2} \operatorname{sgn}(s) + u_1 \end{aligned} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، k_2 و k_3 ثوابت اکیداً مثبت هستند. به منظور مقابله با اغتشاشات و نامعینی ها با دامنه نامعلوم، ثوابت k_2 و k_3 در هر لحظه از زمان توسط رابطه ۱۴ تخمین زده می شوند.

$$\begin{aligned} \hat{k}_2 &= k_{20} \sqrt{\theta(t)} \\ \hat{k}_3 &= k_{30} \theta(t) \end{aligned} \quad (14)$$

۴- الگوریتم جست‌وجوی هارمونی (HSA)

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای اولین بار توسط گیم و همکاران با الهام از پدیده‌های موسیقی ارایه شده است [26]. در این الگوریتم، بردار حل، برداری است که اجزای آن مقادیر اختصاص‌داده‌شده به متغیرهای تصمیم‌گیری یک مساله هستند. در صورتی که مساله بهینه‌سازی دارای N متغیر باشد، بردار هارمونی نیز دارای N جزء خواهد بود [27]. این الگوریتم شامل ۵ مرحله به شرح زیر است:

- ۱- تعیین اولیه مساله و پارامترهای الگوریتم
 - ۲- تعیین اولیه حافظه هارمونی با بردارهای حل تصادفی
 - ۳- تولید یک بردار هارمونی جدید
 - ۴- به‌روزرسمون حافظه هارمونی
 - ۵- بررسی معیار توقف الگوریتم و تکرار مراحل ۳ و ۴.
- در این الگوریتم $f(x)$ تابع هدف، $h(x)$ تابع قیود مساوی، $g(x)$ تابع قیود غیرتساوی، x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری و X_i مجموعه محدوده ممکن مقادیر هر متغیر تصمیم‌گیری است که $X_{iL} \leq X_i \leq X_{iU}$ و به ترتیب حدود پایینی و بالایی برای هر متغیر تصمیم‌گیری هستند. در نهایت الگوریتم بهینه‌سازی به صورت رابطه ۱۸ بیان می‌شود.

$$\text{Minimum: } \{f(x) | x \in X\} \quad (18)$$

$$\&: g(x) \geq 0 \text{ و } h(x) = 0$$

در حافظه هارمونی (HM) دسته متغیرهای تصمیم‌گیری ذخیره می‌شوند. اندازه حافظه هارمونی (تعداد بردارهای جواب در حافظه هارمونی)، HMS و نرخ ملاحظه حافظه هارمونی HMCR نامیده شده است. نرخ تنظیم صدادهی با PAR، تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری با پارامتر N ، تعداد بردار هارمونی جدید با پارامتر NI و فاصله پهنای باند با پارامتر BW مشخص شده است. حافظه هارمونی اولیه با تعداد بسیار زیادی بردار جواب که به صورت تصادفی ایجاد شده است و با توجه به اندازه حافظه هارمونی مطابق با رابطه ۱۹ تولید می‌شود.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (19)$$

سپس یک بردار هارمونی جدید $X' = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_N\}$ بر مبنای سه قانون تولید می‌شود که عبارت از ملاحظات حافظه، تنظیم صدادهی و انتخاب تصادفی هستند. در ملاحظات حافظه، مقادیر بردار هارمونی جدید به‌طور تصادفی از بردارهای موجود در HM با احتمال HMCR که مقداری بین صفر تا یک و متغیر بوده، انتخاب شده است.

$$x'_i = \begin{cases} x'_i \in \{x_1^1, x_2^1, \dots, x_N^{HMS}\}; \text{ with prob}([HMCR]) \\ x'_i \in X_i; \text{ with prob}([1 - HMCR]) \end{cases} \quad (20)$$

HMCR، نرخ انتخاب از مقادیر محاسبه‌شده قبلی بوده که در HM ذخیره شده و $(1-HMCR)$ نرخ گزینش تصادفی از محدوده ممکن مقادیر است. هر جزء به‌دست‌آمده توسط ملاحظات حافظه برای تعیین این که تنظیم صدادهی مناسب‌تر است یا خیر، امتحان می‌شود. این عمل با استفاده از پارامتر PAR انجام می‌گیرد که با استفاده از رابطه ۲۱ تعریف شده است.

$$x'_i = \begin{cases} x'_i + rand \times BW; & \text{with prob}(PAR) \\ x'_i; & \text{with prob}([1 - PAR]) \end{cases} \quad (21)$$

$$\theta = \begin{cases} \sqrt{\frac{\mu}{2}} \omega & \text{if } |s| \geq \varepsilon \\ 0 & \text{if } |s| \leq \varepsilon \end{cases}$$

در رابطه ۱۴، k_{20} و k_{30} پارامترهای طراحی و μ و ω بهره‌های تطبیق هستند که مقادیری بزرگ‌تر از صفر دارند. ε یک ثابت مثبت کوچک است.

۳-۲- اثبات پایداری

به‌منظور اثبات پایداری باید برای تمام شرایط اولیه، خطا و مشتق آن در زمان محدود به سمت صفر میل کند و همچنین همگرایی قانون تطبیق تضمین شود. متغیرهای حالت جدید برای اثبات پایداری به صورت رابطه ۱۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \xi_2 \\ \xi_2 &= -\hat{k}_2 |s|^{1/2} \text{sgn}(s) + \xi_3 \\ \xi_3 &= -\hat{k}_3 \text{sgn}(s) + \rho \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن ρ نشان‌دهنده مشتق مجموعه نامعینی‌های داخلی سیستم و اغتشاشات خارجی وارد بر سیستم است. تابع لیاپانوف مطابق با رابطه ۱۶ در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} V(\xi, \theta) &= V_0(\xi) + \frac{1}{4\mu} (\theta - \theta^*)^4 \\ V_0(\xi) &= A^T \Gamma A \\ A^T &= [[\xi_1]^2 s_1 [\xi_3]^2] \\ \Gamma &= \begin{bmatrix} \gamma_1 & -\frac{1}{2}\gamma_{12} & \frac{1}{2}\gamma_{13} \\ -\frac{1}{2}\gamma_{12} & \gamma_2 & -\frac{1}{2}\gamma_{23} \\ \frac{1}{2}\gamma_{13} & -\frac{1}{2}\gamma_{23} & \gamma_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

در رابطه ۱۶، $V_0(\xi)$ مثبت معین است. اگر $\Gamma > 0$ باشد، با مشتق‌گیری از تابع $V_0(\xi)$ رابطه زیر را داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0(\xi) &= \beta_1 [\xi_1]^{\frac{1}{3}} \xi_2 - \beta_2 [\xi_1]^{-\frac{1}{3}} \xi_2^2 - 2k_1 \gamma_2 |s_1|^{\frac{3}{2}} \\ &\quad - \gamma_{23} |\xi_3|^3 - \beta_3 [\xi_1]^{-\frac{1}{3}} \xi_2 [\xi_3]^2 \\ &\quad + k_1 \gamma_{12} [\xi_1]^{\frac{2}{3}} [s_1]^{\frac{1}{2}} \\ &\quad - \beta_4 [\xi_1]^{\frac{2}{3}} \xi_3 + \beta_5 \xi_3 s_1 \\ &\quad + k_1 \gamma_{23} [\xi_3]^2 [s_1]^{\frac{1}{2}} \\ &\quad - \beta_6 [\xi_3]^3 [s_1]^0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{4}{3} \gamma_1 - \frac{4}{3} \gamma_{12} k_3 + \frac{4}{3} \gamma_2 k_3^2 \\ \beta_2 &= \frac{2}{3} \gamma_{12} - \frac{4}{3} \gamma_2 k_3 \\ \beta_3 &= -\frac{2}{3} \gamma_{13} - \frac{2}{3} \gamma_{23} k_3 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\beta_4 = \gamma_{12} + 2\gamma_{13} k_2 [s_1]^0 [\xi_3]^0 - 2\gamma_{13} k_2 \rho [\xi_3]^0$$

$$\beta_5 = 2\gamma_2 + 2\gamma_{23} k_2 [s_1]^0 [\xi_3]^0 - 2\gamma_{23} k_2 \rho [\xi_3]^0$$

$$\begin{aligned} \beta_6 &= 2\gamma_2 + 4\gamma_3 k_2 - 4\gamma_3 k_2 \rho [s_1]^0 \\ [s_1]^0 &= \text{sgn}(s_1) \\ [\xi_3]^0 &= \text{sgn}(\xi_3) \end{aligned}$$

در رابطه ۱۷، $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}$ پارامترهای ثابتی هستند که می‌توان آنها را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که $\dot{V}_0(\xi)$ منفی و پایداری حاصل شود. در این حالت ξ_i ها در زمان محدودی به سمت صفر همگرا خواهند شد.

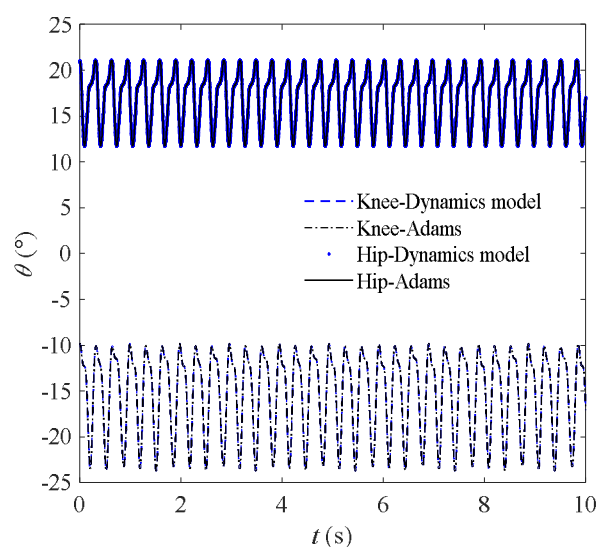
تطبیقی مد لغزشی فرایپچشی (ASTSMC) و مد لغزشی معمولی (SMC) استفاده شده است. مسیرهای مرجع برای مفاصل مطابق با مسیرهای استخراج شده برای ربات مرجع [19] در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی عملکرد هر یک از کنترل کننده‌ها در برابر اغتشاشات، اغتشاشاتی با دامنه‌ای برابر با ۲۰٪ ماکزیمم دامنه حرکت هر یک از مفاصل و فرکانس ۳ هرتز به سیستم اعمال شده است. میزان عدم قطعیت در نظر گرفته شده برای هر یک از پارامترهای ربات نیز برابر با ۲۰٪ مقدار نامی هر یک از پارامترها است. به منظور مقایسه عملکرد کنترل کننده‌های مورد استفاده در این مقاله، نمودارهای موقعیت هر یک از مفاصل، نمودار خطا و نمودارهای مربوط به انرژی مصرفی برای هر یک از کنترل کننده‌ها ارائه شده است. از آنجایی که نمودارهای تعقیب مسیر مفاصل ربات برای کنترل کننده‌ها دارای نتایج نزدیک به هم هستند، برای مقایسه نتایج از معیارهای خطای ITAE، ITASE و IASE استفاده شده است. همچنین به منظور بهینه‌کردن پارامترهای کنترلی از الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی برای کمینه‌کردن یک تابع هدف انتخابی استفاده شده است. بدین منظور یک تابع هزینه مطابق با رابطه ۲۴ پیشنهاد شده است.

$$Obj = (ITAE) + (|u|)$$

$$ITAE = \int |e(t) \cdot t| dt \quad (24)$$

به منظور اعتبارسنجی، ربات در نرم‌افزار آدامز مدل‌سازی شده و مدل دینامیک استخراج شده از روش لاگرانژ با نتایج حاصل از آدامز مقایسه شده است. در نمودار ۱، مسیرهای مفاصل زانو و ران پای چپ ربات حاصل از روش لاگرانژ و نرم‌افزار آدامز مقایسه شده است. با توجه به نمودار ۱ مشخص می‌شود که منحنی‌های مسیر برای مدل استخراج شده از روش لاگرانژ و نرم‌افزار آدامز مطابقت مناسبی با یکدیگر دارند. برای به دست آوردن خطای موجود بین مسیرها، مجموع مجذور خطاها در طول مسیر محاسبه شده که مقدار خطا برای مفصل ران برابر با ۰/۰۳۷۵ (مجذور درجه) و برای مفصل زانو برابر با ۰/۰۱۰۳ (مجذور درجه) است.

در نمودارهای ۱-۵، نحوه تعقیب مسیرهای مرجع برای هر یک از مفاصل ربات توسط کنترل کننده‌های تطبیقی مرتبه بالای مد لغزشی فرایپچشی، تطبیقی مد لغزشی فرایپچشی و مد لغزشی معمولی نشان داده شده است.



نمودار ۱) مسیر مفصل زانوی و ران چپ در مدل دینامیک و آدامز

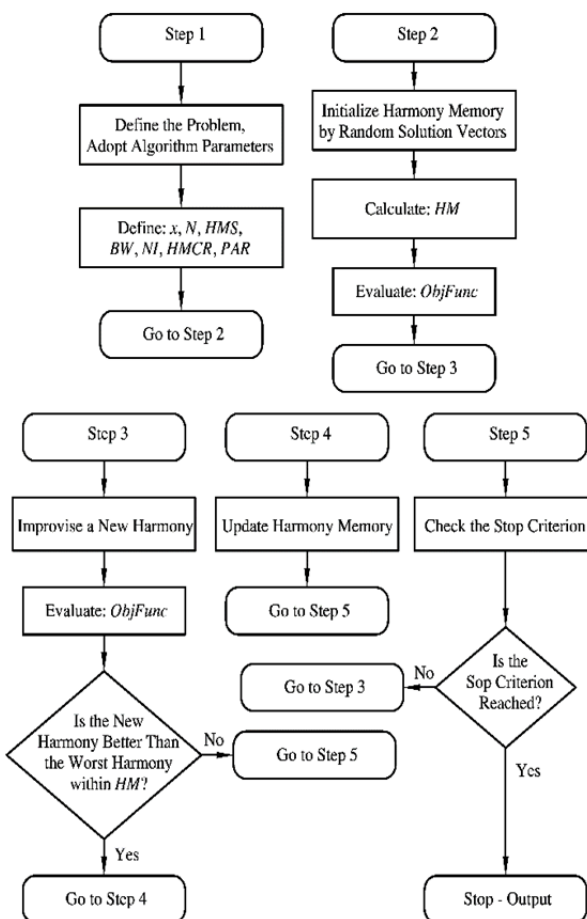
در رابطه بالا مقدار $[1 - PAR]$ ، نرخ انجام هیچ عمل را مشخص می‌کند. اگر نتیجه تصمیم‌گیری، تنظیم صدادهی مثبت باشد، X_i^{new} صدادهی جدید با توجه به رابطه ۲۲ جایگزین شده است.

$$X_i^{new} = X_i^{old} \pm BW \times \varepsilon \quad (22)$$

که در آن X_i^{old} صدادهی موجود انتخاب شده از HM و ε یک عدد تصادفی در محدوده (۱ و -۱) هستند. در صورتی که بردار هارمونی تولید شده از بدترین بردار هارمونی در HM بر مبنای تابع هدف انتخابی بهتر باشد، بردار هارمونی جدید جایگزین بدترین بردار هارمونی می‌شود که داخل HM قرار گرفته است. روند این فرآیند توسط رابطه ۲۳ بیان شده است.

$$X_{worst} = X_{new} \text{ if } f(X_{new}) < f(X_{worst}) \quad (23)$$

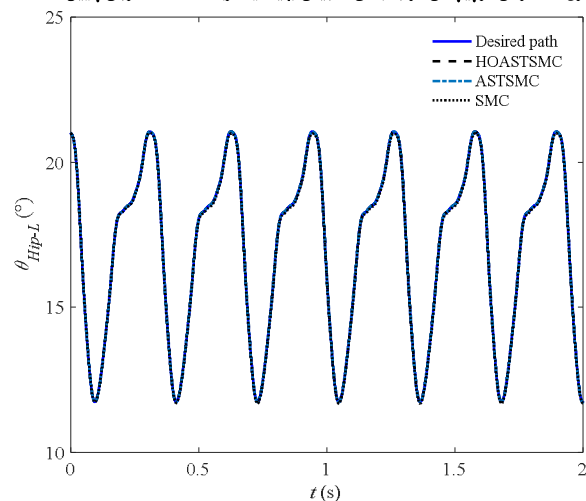
اگر ناحیه توقف الگوریتم (حداکثر تولید بردار هارمونی جدید) برآورده شود، محاسبات پایان می‌یابد و در غیر این صورت مراحل تا رسیدن به حداکثر تولید بردار هارمونی جدید تکرار می‌شوند. شکل ۲ نمایش‌دهنده فلوچارت اجرای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی است.



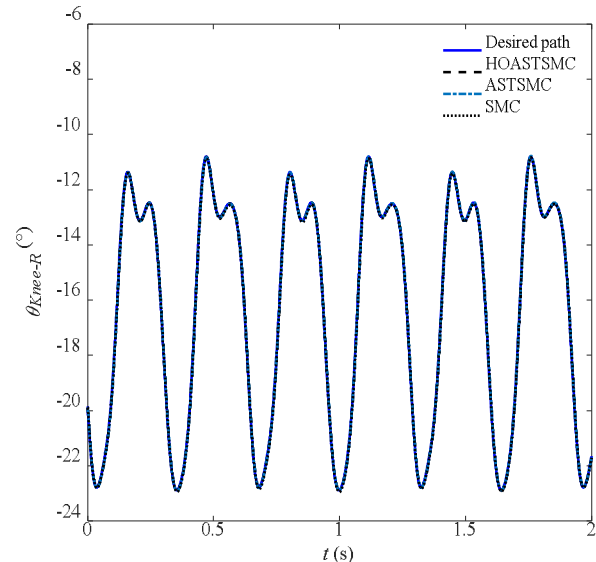
شکل ۲) فلوچارت الگوریتم جست‌وجوی هارمونی [26]

۵- شبیه‌سازی

در این مقاله ابتدا معادلات دینامیک حرکت ربات پایین‌تنه پنج لینکی با استفاده از روش لاگرانژ، استخراج و سپس به منظور تعقیب مسیرهای مرجع هر یک از مفاصل ربات از روش‌های کنترل تطبیقی مرتبه بالای مد لغزشی فرایپچشی (HOASTSMC)،



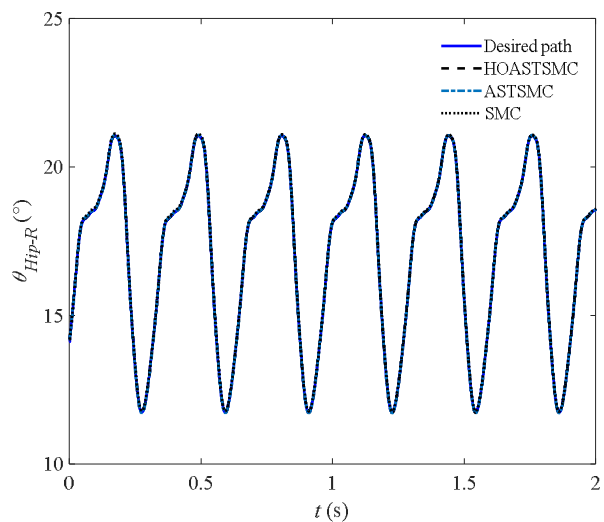
نمودار (۵) تعقیب مسیر مطلوب مفصل ران چپ



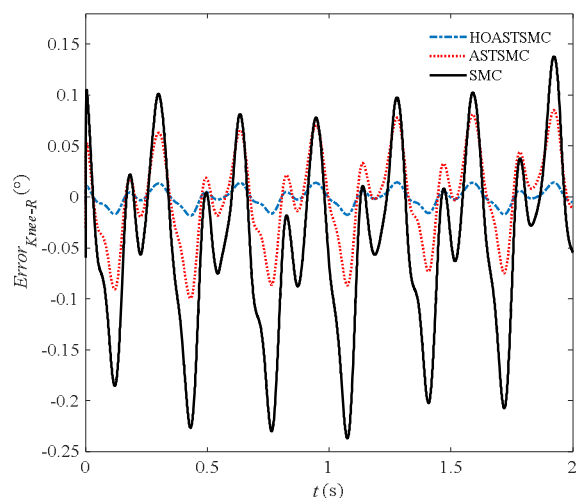
نمودار (۲) تعقیب مسیر مطلوب مفصل زانوی راست

با توجه به نمودارهای ۵-۱ مشخص می‌شود که کنترل‌کننده‌های ارائه‌شده توانایی مناسبی در کنترل مسیرهای مطلوب مفاصل ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه که دارای دینامیک غیرخطی است، دارند. بین کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، کنترل‌کننده مد لغزشی فرایپچی تطبیقی و کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی به دلیل داشتن یک قانون تطبیق در روش کنترلی خود، توانایی مناسبی در مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات وارد بر سیستم داشته‌اند و به همین دلیل عملکرد بهتری از روش کنترلی مد لغزشی دارند. در نمودارهای ۹-۶، میزان خطای ردیابی برای هر یک از کنترل‌کننده‌ها نشان داده شده است.

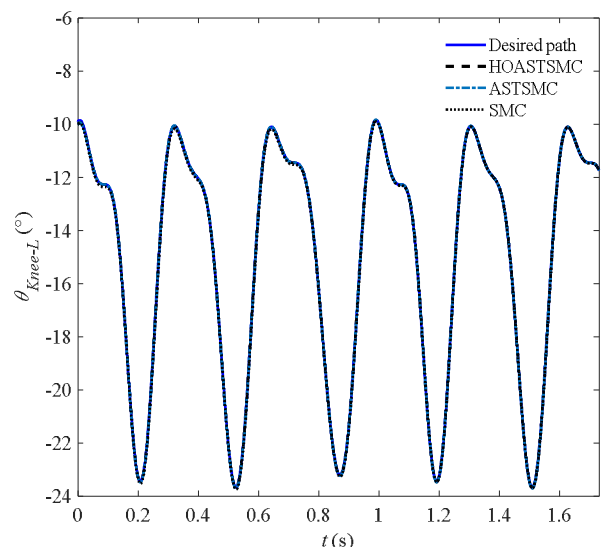
یکی از ویژگی‌های مهم روش‌های کنترلی مبتنی بر روش مد لغزشی فرایپچی، همگرایی سیگنال خطای متغیرهای حالت سیستم در زمان محدود به صفر است. با توجه به نمودارهای ۹-۶ مشخص می‌شود که کنترل‌کننده مد لغزشی فرایپچی تطبیقی و کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی، همگرایی بهتر و دامنه کمتری نسبت به روش مد لغزشی معمولی به سمت صفر دارند. بین کنترل‌کننده‌های ارائه‌شده، کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی که در آن سطح لغزش متناسب با مرتبه معادلات حاکم بر ربات تعریف شده است، عملکرد بهتری در همگرایی خطای متغیرهای حالت به سمت صفر دارد.



نمودار (۳) تعقیب مسیر مطلوب مفصل ران راست

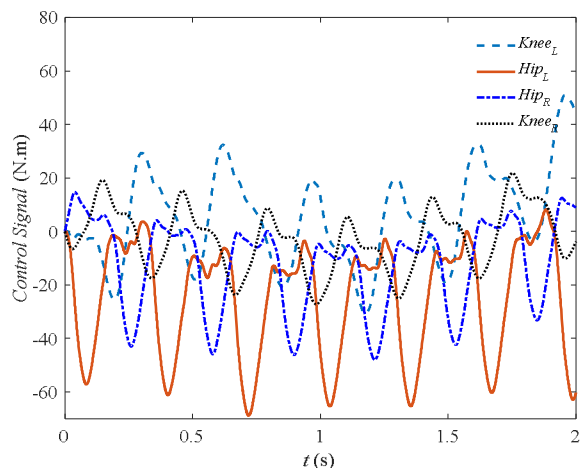


نمودار (۶) سیگنال خطای مفصل زانوی راست

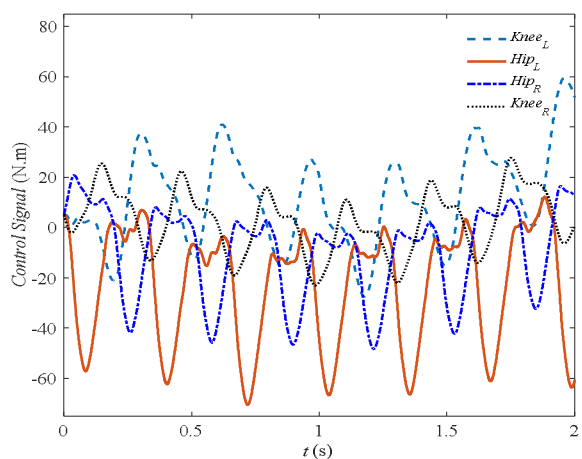


نمودار (۴) تعقیب مسیر مطلوب مفصل زانوی چپ

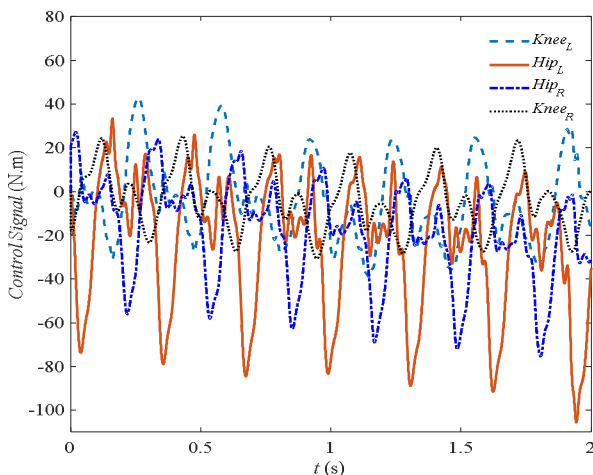
لغزشی معمولی در ورودی کنترلی خود دارای مقداری چترینگ به همراه فرکانس تغییرات بالای دامنه است که این پدیده در ورودی کنترلی کنترل‌کننده‌های دیگر به دلیل خواص ذاتی این کنترل‌کننده‌ها در مقابله با پدیده چترینگ مشاهده نمی‌شود. با توجه به نزدیکی پاسخ‌های به‌دست‌آمده در تعقیب مسیرهای مطلوب ربات توسط کنترل‌کننده‌های مختلف، نمودارهای ۱۳-۱۵ برای مقایسه معیارهای خطای ITAE، ITASE و IASE در هر سه کنترل‌کننده به‌منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد آنها ارایه شده است.



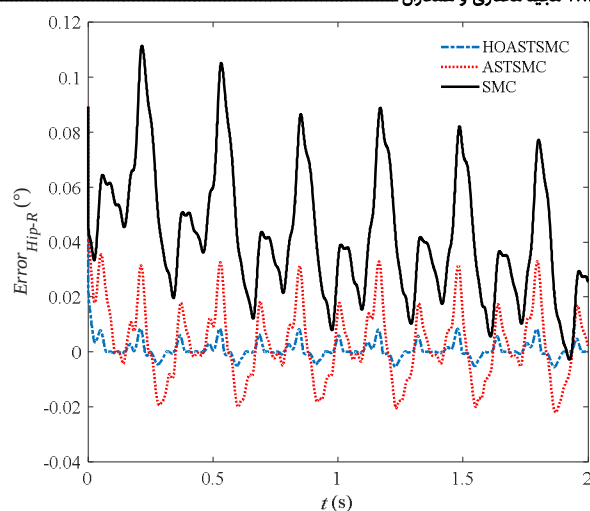
نمودار ۱۰) سیگنال‌های کنترلی کنترل‌کننده HOASTSMC



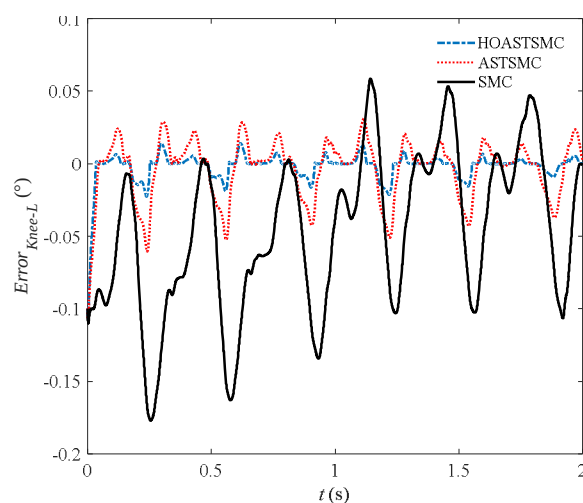
نمودار ۱۱) سیگنال‌های کنترلی کنترل‌کننده ASTSMC



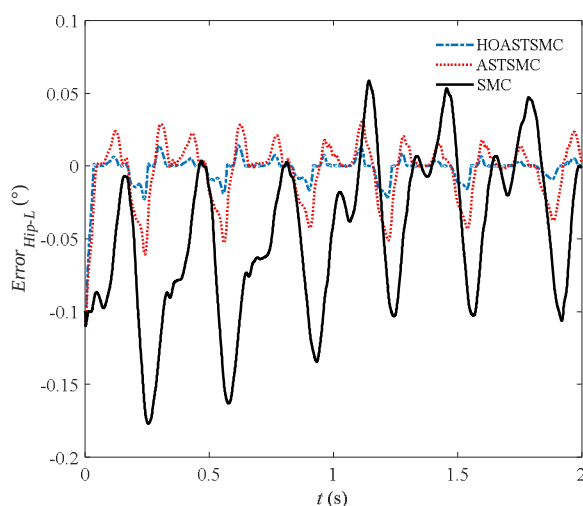
نمودار ۱۲) سیگنال‌های کنترلی کنترل‌کننده SMC



نمودار ۷) سیگنال خطای مفصل ران راست



نمودار ۸) سیگنال خطای مفصل زانوی چپ

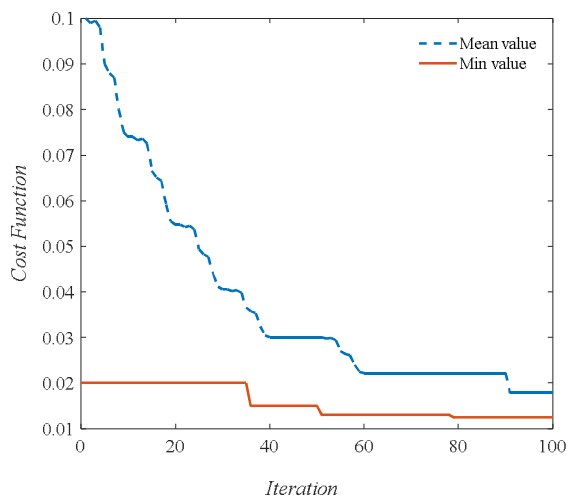


نمودار ۹) سیگنال خطای مفصل ران چپ

در نمودارهای ۱۰-۱۲، سیگنال کنترلی برای هر یک از کنترل‌کننده‌ها ارایه شده است. با توجه به این نمودارها مشخص می‌شود که سیگنال کنترلی حاصل از کنترل‌کننده‌ها دارای شکل‌های هموار و با دامنه مناسب است که امکان استفاده از عملگرهای با وزن و ابعاد مناسب روی مفاصل ربات را فراهم می‌کند. کنترل‌کننده مد

همان طور که در نمودار ۱۳ نشان داده شده است، به دلیل توانایی ذاتی کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش تطبیقی مد لغزشی فرایپچی در حذف پدیده چترینگ، افزایش سرعت همگرایی سیستم به مقادیر مطلوب و همچنین توانایی مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم، هر دو کنترل‌کننده بهینه HOASTSM و ASTSM دارای عملکرد قابل قبولی هستند. در کنترل‌کننده HOASTSM، سطح لغزش متناسب با مرتبه معادلات حاکم بر ربات تعریف می‌شود که باعث افزایش هر چه بیشتر سرعت همگرایی و پایداری ربات می‌شود. بنابراین در کنترل ربات که دارای معادلات دینامیک با درجه نسبی بالاتر از یک بوده، عملکرد کنترل‌کننده بهینه HOASTSM در مقایسه با کنترل‌کننده بهینه ASTSM مناسب‌تر است.

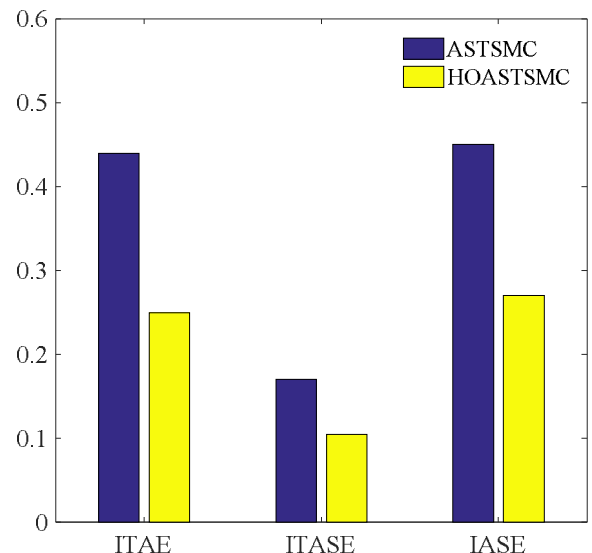
در نمودارهای ۱۴ و ۱۵، عملکرد کنترل‌کننده‌های بهینه HOASTSM و ASTSM با کنترل‌کننده بهینه SMC مقایسه شده است. از مهم‌ترین عواملی که باعث عملکرد مناسب‌تر کنترل‌کننده‌های بهینه HOASTSM و ASTSM نسبت به کنترل‌کننده بهینه SMC می‌شود، می‌توان به حذف ذاتی پدیده چترینگ توسط کنترل‌کننده‌های بهینه HOASTSM و ASTSM و همچنین وجود یک قانون تطبیق برای مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم در این کنترل‌کننده‌ها اشاره کرد. لازم به ذکر است که با توجه به بهینه‌بودن پارامترهای هر سه کنترل‌کننده، کنترل‌کننده‌ها بهترین عملکرد ممکن را از خود نشان می‌دهند. چگونگی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی در نمودار ۱۶ نشان داده شده است.



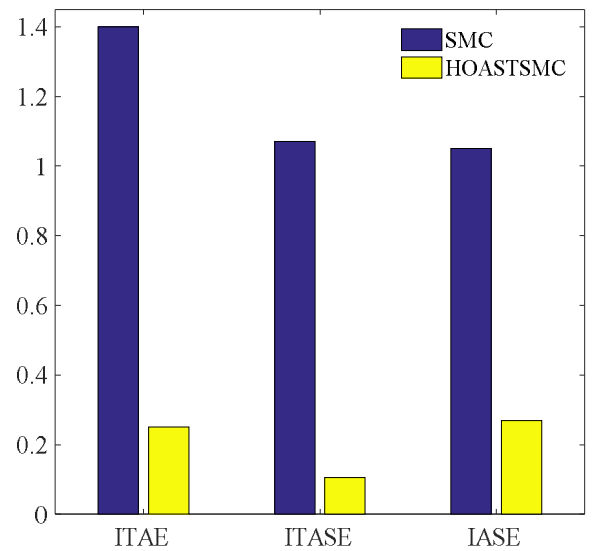
نمودار ۱۶) همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی

۶- نتیجه‌گیری

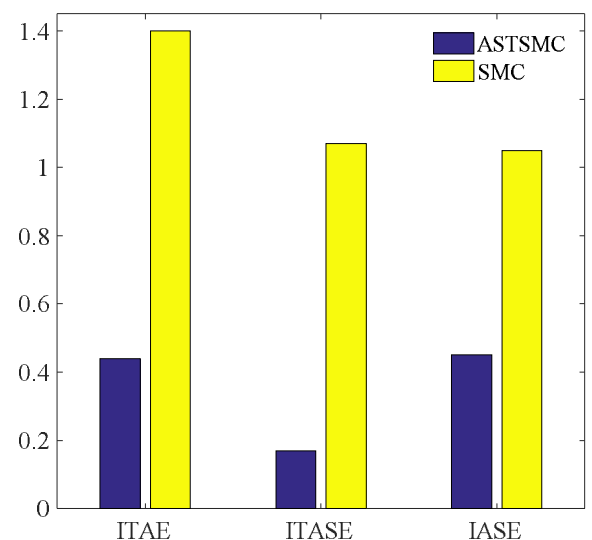
در این مقاله از کنترل‌کننده بهینه مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی به منظور کنترل موقعیت مفاصل یک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه استفاده شده و عملکرد آن با کنترل‌کننده‌های بهینه مد لغزشی فرایپچی تطبیقی و مد لغزشی بهینه معمولی در حضور اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم مقایسه شده است. به منظور دستیابی به بالاترین عملکرد در هر یک از کنترل‌کننده‌ها و مقایسه منطقی بین کنترل‌کننده‌ها، پارامترهای بهینه کنترلی با کمینه‌کردن یک تابع هزینه به صورت ترکیبی از سیگنال کنترلی و معیار خطای انتگرالی به کمک الگوریتم



نمودار ۱۳) معیار خطای کنترل‌کننده‌های HOASTSM و ASTSM



نمودار ۱۴) معیار خطای کنترل‌کننده‌های HOASTSM و SMC



نمودار ۱۵) معیار خطای کنترل‌کننده‌های ASTSM و SMC

منابع

- 1- Bogue R. Exoskeletons and robotic prosthetics: A review of recent developments. *Industrial Robot An International Journal*. 2009;36(5):421-427.
- 2- Vukobratovic M, Frank AA, Juricic D. On the Stability of Biped Locomotion. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1970; BME-17(1):25-36.
- 3- Vukobratovic M, Borovac B, Surla D, Stokic D. Biped locomotion: Dynamics, stability, control and application. Berlin: Springer; 1990. p. 349.
- 4- Dollar AM, Herr H. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art. *IEEE Transactions on Robotics*. 2008;24(1):144-158.
- 5- Ijspeert AJ. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review. *Neural Networks*. 2008;21(4):642-653.
- 6- Jezernik S, Colombo G, Keller T, Frueh H, Morari M. Robotic orthosis lokomat: A rehabilitation and research tool. *Neuromodulation Technology at the Neural Interface*. 2003;6(2):108-115.
- 7- Vanderborght B, Albu-Schaeffer A, Bicchi A, Burdet E, Caldwell DG, Carloni R. Variable impedance actuators: A review. *Robotics and Autonomous Systems*. 2013;61(12):1601-1614.
- 8- 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.
- 9- Siciliano B, Khatib O, editors. *Springer handbook of robotics*. 1st Edition. Berlin: Springer; 2008. pp. 773-793.
- 10- Walsh CJ, Pasch K, Herr H. An autonomous, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 9-15 October, 2006, Beijing, China. Piscataway: IEEE; 2006. p. 1410-1415.
- 11- Qu Z, Dorsey J. Robust tracking control of robots by a linear feedback law. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1991;36(9):1081-1084.
- 12- Hong Y. Finite-time stabilization and stabilizability of a class of controllable systems. *Systems and control letters*. 2002;46(4):231-236.
- 13- Wua Y, Yua X, Manb Z. Terminal sliding mode control design for uncertain dynamic systems. *Systems & Control Letters*. 1998;34(5):281-287.
- 14- Bartolini G, Ferrara A, Levant A, Usai E. On second order sliding mode controllers. In: Young KD, Özgüner Ü, editors. *Variable structure systems, sliding mode and nonlinear control*. London: Springer; 1999. pp. 329-350.
- 15- Levant A. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control. *International Journal of Control*. 1993;58(6):1247-1263.
- 16- Goel A, Swarup A. MIMO uncertain nonlinear system control via adaptive high-order super

جست و جوی هارمونی تعیین شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که استفاده از کنترل کننده پهنه مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی می‌تواند تاثیر بسزایی در مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم، مقابله با پدیده چترینگ، افزایش سرعت همگرایی سیستم به مقادیر مطلوب و همچنین افزایش پایداری سیستم داشته باشد.

روش‌های کنترلی مبتنی بر روش مد لغزشی فرایپچی به دلیل توانایی ذاتی در حذف پدیده چترینگ بدون تعریف لایه مرزی، سیگنال‌های کنترلی پیوسته و همواری را تولید می‌کنند. فرکانس تغییر سیگنال‌های کنترلی تولید شده توسط کنترل کننده مد لغزشی، بیش از ۲ برابر فرکانس تغییر سیگنال‌های کنترلی کنترل کننده‌های مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی و کنترل کننده مد لغزشی فرایپچی تطبیقی بوده و در این سیگنال‌ها پدیده چترینگ قابل مشاهده است.

وجود یک قانون تطبیق در کنترل کننده‌های مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی و کنترل کننده مد لغزشی فرایپچی تطبیقی باعث افزایش توانایی این کنترل کننده‌ها در مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم نسبت به کنترل کننده مد لغزشی معمولی شده است. عملکرد کنترل کننده مد لغزشی با وجود اغتشاش و عدم قطعیت حدود ۲۰٪ نسبت به دو کنترل کننده دیگر به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. در این مقاله برای مقایسه عملکرد کنترل کننده‌ها از سه معیار خطای ITAE، ITASE و IASE استفاده شده است. مقادیر خطای ITAE، ITASE و IASE برای کنترل کننده مد لغزشی نسبت به کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی به ترتیب ۸۱، ۹۰ و ۶۳٪ و نسبت به کنترل کننده مد لغزشی فرایپچی تطبیقی به ترتیب ۷۲، ۸۶ و ۵۸٪ افزایش یافته است.

از آنجایی که معادلات حاکم بر سیستم‌های واقعی مانند ربات دارای مرتبه دوم یا بالاتر هستند، از کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی به منظور بالاتر رفتن سرعت همگرایی و پایداری بیشتر سیستم استفاده شده است. این امر باعث بهبود عملکرد کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی نسبت به کنترل کننده مد لغزشی فرایپچی تطبیقی شده است. مقادیر خطای ITAE، ITASE و IASE برای کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالای فرایپچی تطبیقی نسبت به کنترل کننده مد لغزشی فرایپچی تطبیقی به ترتیب ۴۵، ۲۸ و ۴۸٪ کاهش یافته است.

تشکر و قدردانی: موردی بیان نشده است.

تاییدیه 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 هیچ گونه تعارض منافع با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم 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

- 22- Moreno JA, Osorio M. A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers. 47th IEEE Conference on Decision and Control, 9-11 December, 2008, Cancun, Mexico. Piscataway: IEEE; 2008. p. 2856-2861.
- 23- Zargham F, Mazinan AH. Super-twisting sliding mode control approach with its application to wind turbine systems. *Energy Systems*. 2018;10(1):211-229.
- 24- Shtessel Y, Edward Ch, Fridman L, Levant A. Sliding mode control and observation. New York: Springer; 2014. pp. 135-255.
- 25- Moreno JA. Lyapunov function for levant's second order differentiator. 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 10-13 December, 2012, Maui, HI, USA. Piscataway: IEEE; 2012. p. 6448-6453.
- 26- Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV. Harmony Search Optimization: Application to Pipe Network Design. *International Journal of Modelling and Simulation*. 2002;22(2):125-133.
- 27- Khalili M, Kharrat R, Salahshoor K, Haghighat Sefat M. Global dynamic harmony search algorithm: GDHS. *Applied Mathematics and Computation*. 2014;228:195-219.
- twisting sliding mode and its application to robotic manipulator. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*. 2017;28(1):36-49.
- 17- Kawamoto H, Sankai Y. Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for HAL. *Advanced Robotics*. 2005;19(7):717-734.
- 18- Marcheschi S, Salsedo F, Fontana M, Bergamasco M. Body Extender: Whole body exoskeleton for human power augmentation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 9-13 May 2011, Shanghai, China. Piscataway: IEEE; 2011.
- 19- Chevallereau Ch. Bipedal Robots: Modeling, design and walking synthesis. 1st Edition. Hoboken: Wiley; 2009. pp. 140-160.
- 20- Mokhtari M, Taghizadeh M, Mazare M. Optimal robust hybrid active force control of a lower limb exoskeleton. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(2):342-350. [Persian]
- 21- Moezi SA, Rafeeyan M, Ebrahimi S. Sliding mode control of 3-RPR parallel robot on the optimal path using cuckoo optimization algorithm. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(2):147-158. [Persian]