

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(12) (2021) 873-876 DOI: 10.22060/mej.2019.16292.6321

Optimal Adaptive Super-Twisting Sliding Mode Control of an Lower Limb Exoskeleton

M. Mokhtari, M. Taghizadeh*, M. Mazare

School of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Disturbance and bounded uncertainty are the most important factors which can be degrade efficient performance of the lower limb exoskeleton. While sliding mode control is a robust control approach against such disturbances, however, by applying the boundary layer in spite of chattering phenomenon, robust performance becomes feeble. In order to overcome this drawback, high order sliding mode algorithms like supper twisting has been proposed in which, chattering phenomenon is mitigated by eliminating the boundary layer. In this paper, an adaptive supper twisting sliding mode control is proposed for a lower limb exoskeleton robot in which the sliding variable and its derivative tend to zero continuously in presence of the disturbance and bounded uncertainty. In addition, the desired trajectory of the upper limb is determined so that in each moment the stability of the robot is guaranteed based on zero momentum point criterion. To achieve maximum stability and minimum error in tracking of the desired trajectories, the controller parameters and the upper limb desired trajectory parameters are optimized using the Harmony Search algorithm. Robot is modeled in ADAMS and then control inputs are applied to the Adams model. Finally, Performance of two controllers is compared. Simulation results reveal the effectiveness of the proposed controller rather than the optimal sliding mode controller.

Review History:

Received: 8 May. 2019 Revised: 19 Aug. 2019 Accepted: 22 Sep. 2019 Available Online: 12 Oct. 2019

Keywords:

Exoskeleton Adaptive control Super-twisting sliding mode control Harmony search algorithm Zero momentum point

1-Introduction

Wearable robotic systems (Exoskeletons) are devices that are generally similar to the human body or part of the human body and have harmonious behavior with the movements of the human body. Exoskeletons are applied to enhance the performance, ability and potency of healthy human or as a rehabilitation device. Conformity with the human body and also control strategies which are used in exoskeletons, has immense impacts on the performance of these means [1].

In this paper, first of all, the desired trajectories are designed based on reference [2]. Next, dynamic model of the robot is extracted using Lagrange method. In order to control the position of the robot joints and reduce the interacting force between the robot and the user, Sliding Mode Control (SMC) and adaptive robust nonlinear model predictive control are carried out. To guard against disturbances in result of interacting force between human body and robot, the value of the force is calculated in each time and applied to the robot as a compensatory torque [3]. The desired trajectory of upper limb joint is determined in such a way as to ensure robust stability based on the zero moment point.

2- Methodology

The understudied model in this paper is a lower limb exoskeleton robot containing seven links and five active joints for the hip, knee and ankle of the left and right legs.

By extracting the kinematic equations and using the

Lagrange method, the dynamic model of the robot is as follows [4]:

$$\tau = M(\theta)\theta'' + C(\theta,\theta') + G(\theta) + \tau_d \tag{1}$$

where is the torque vector of the actuators, $M(\theta)$ is the inertia moment matrix, $C(\theta, \theta')$ is the centrifugal and gyroscopic effects matrix, $G(\theta)$ is the vector of gravitational forces and τ_d is the disturbance torque.

The design of the path is carried out in two stages: one and two supports. Schematic of the method is presented in Fig. 1.

where θ_s , θ_e are the start and termination angles of double support phase, D is the one step length, D_1 is the longitudinal distance of hip joint at the beginning of the single support phase, D_2 is the longitudinal distance of hip joint at the end of the single support phase, and D_3 is the longitudinal distance of hip joint at the end of the double support phase.

3- Controller Design

In this section, an adaptive-gain super-twisting sliding mode control is designed. By defining sliding surface and some mathematic simplifications, the sliding mode control law is as follows

$$\tau(t) = C(\theta, \theta') + G(\theta) + M(q_d'' - \lambda(q' - q_d')) + \tau_d - K \operatorname{sign}(S)$$
(2)

*Corresponding author's email: mo taghizadeh@sbu.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 1. Schematic of the phase changing



Fig. 2. Control signal of the proposed controller

To eliminate the chattering without reducing the robustness characteristics of the controller, the control command is modified as adaptive-gain super-twisting sliding mode control law [5].

$$\tau_{i}(t) = \hat{\tau}_{i}(t) + \omega_{i}$$

$$\omega_{i} = A_{i} \sqrt{|S_{i}|} \operatorname{sign}(S_{i}) + v_{i}$$

$$v_{i}' = -\frac{\beta}{2} \operatorname{sign}(S_{i})$$
(3)

In Eq. (3), $\beta = 2\varepsilon A$ and also:

$$A_i' = \begin{cases} W_1 \sqrt{\frac{\gamma_1}{2}} \operatorname{sign}(|S_i| - \mu) & A > a_m \\ \eta & A < a_m \end{cases}$$
(4)

where $W_1, \gamma_1, \varepsilon$, μ and η are constant. Stability analysis can be addressed through Lyapanouv theory. Moreover, Zero Momentum Point (ZMP) is a point on the ground which sum of all the active forces moments is equal to zero. If the ZMP perch into the support polygon between the foot and the ground, stability of the biped robot is guaranteed [6].



Fig. 3. Location of the ZMP



Fig. 4. RMS of tracking error in presence of different disturbances

Therefore, instability of the robot can be illustrated through monitoring the ZMP location. The ZMP in x-axis direction can be calculated as follows:

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g) x_i - \sum_{i=1}^{n} m_i x_i'' z_i - \sum_{i=1}^{n} I_{iy} \theta_{iy}''}{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)}$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g) y_i - \sum_{i=1}^{n} m_i y_i'' z_i - \sum_{i=1}^{n} I_{ix} \theta_{ix}''}{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)}$$
(5)

In order to optimized controller parameters, an objective function considered as:

$$CF = \int \left| ZMP - ZMP_{desird} \right|^2 + \sum_{i=1}^7 \int \left| e_i \right|^2 \tag{6}$$

where ZMP_{desird} is the ZMP in SSP¹ and DSP² which is

¹ Single Support Phase

² Double Support Phase

defined based on maximum stability value in each phase and is trajectory tracking error.

4- Simulation Results

In this section, simulations are performed. Fig. 1 presents the control signal for the controllers which is in the applicable range.

Additionally, the location of ZMP is depicted in Fig. 3, in which both controllers generate a stable motion for the robot using upper limb-angle. The ZMP trajectory produced by the Adaptive Super Twisting Sliding Mode Controller (ASTWSM) controller providing a wider stability margin.

Fig. 4 divulges the superiority of the proposed controller rather than conventional SMC in the presence of exogenous disturbance. Moreover, for 30 percent disturbance, both of the designed controllers have constant and similar performance.

5- Conclusion

This paper addressed a robust control of a lower limb exoskeleton. Effectiveness of the controller was observed against exogenous disturbances and uncertainties. Moreover, stability of the robot through ZMP and its location had less divergent with the optimal ZMP trajectory.

References

- [1] R. Bogue, Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments, Industrial Robot: An International Journal, 36(5) (2009) 421-427.
- [2] P.K. Kyaw, K. Sandar, M. Khalid, W. Juan, Y. Li, Z. Chen, Opportunities in robotic exoskeletons hybrid assistive limbSUIT (MT5009), Robotic Exoskeletons: Becoming Economically Feasible, 21(1) (2013).
- [3] D. Messuri, C. Klein, Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion. Robotics and Automation, IEEE, 1(3) (1985) 141-132.
- [4] J.J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Hall, London, (2005) 85-310.
- [5] M. Doakhan, M. Kabganian, R.Nadafi, A. K. Eigoli, Trajectory Tracking of a Quadrotor for Obstacle Avoidance Using Super-Twisting Sliding Mode Controller and Observer, Modares Mechanical Engineering, 17(8) 333-342, 2017 (in Persian).
- [6] A. Takhmar, MHS measure for postural stability monitoring and control of bipad robts. In Advanced Intelligent Mechatronics, 2008. AIM 2008. IEEE/ ASME International Conference on, China, 2008.

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير



کنترل بهینه تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی برای ربات اسکلت خارجی پایین تنه

مجید مختاری، مصطفی تقیزاده*، محمود مزارع

مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

خلاصه: اغتشاش و عدم قطعیت با دامنه نامعلوم از عواملی است که عملکرد رباتهای اسکلت خارجی را با مشکل مواجه کرده است. یکی از روشهای کنترلی مقاوم در برابر اغتشاشات، مد لغزشی بوده که با بکارگیری لایه مرزی به منظور مقابله با چترینگ، عملکرد مقاوم آن تضعیف میشود. برای مقابله، الگوریتمهای کنترلی مرتبه بالا مانند مد لغزشی فراپیچشی پیشنهاد شده که بدون در نظر گرفتن لایه مرزی، چترینگ را تا حدودی کاهش میدهند. در این مقاله، یک کنترلر مد لغزشی فراپیچشی تطبیقی بهینه برای ربات اسکلت خارجی پایین تنه پیشنهاد شده که در آن متغیر لغزشی و مشتقات آن در حضور اغتشاش محدود با دامنه نامعلوم به سمت صفر میل می کنند. مسیر مفصل بالا تنه به گونهای تعیین شده که در هر لحظه پایداری ربات طبق معیار نقطه گشتاور صفر حاصل شود. به منظور دستیابی به حداکثر پایداری و کمترین خطا در ردیابی مسیرها، پارامترهای کنترلر و مسیر بالا تنه، به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی بهینه شدهاند. برای اعتبارسنجی ربات در نرم افزار آدامز مدل شده و سپس ورودیهای کنترلی به مدل استخراج شده از آدامز اعمال شدهاند. در نهایت عملکرد دو کنترلر با هم مقایسه شده که نتایج برتری روش کنترلی پیشنهادی نسبت به کنترل کننده مدر لغزشی بهینه را نشان می دهند.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۳۱ ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰

کلمات کلیدی: ربات اسکلت خارجی کنترل تطبیقی کنترل مد لغزشی فراپیچشی الگوریتم جستجوی هارمونی معیار نقطه گشتاور صفر

۱ – مقدمه

اگزواسکلتونها تجهیزاتی هستند که عموما ظاهری شبیه به انسان و یا بخشی از اعضای بدن انسان دارند که توسط یک شخص پوشیده شده و حرکاتی هماهنگ با حرکات بدن انجام میدهند. رباتهای اسکلت خارجی پوشیدنی به منظور افزایش کارآیی و توان افراد سالم و یا به عنوان یک دستگاه توانبخشی مورد استفاده قرار می گیرند. میزان تطابق با بدن انسان و نیز استراتژیهای کنترلی مورد استفاده در اگزواسکلتونها تاثیر بسزایی بر روی عملکرد این تجهیزات دارد [۱].

اگزواسکلتونها از سال ۱۹۶۰ در آمریکا[۲]، ژاپن و اروپا [۳]مورد مطالعه قرار گرفتهاند. در سال ۲۰۰۳ یک ربات اسکلت خارجی پایین تنه با دو محرک خطی برگشتپذیر، یکی در مفصل ران و دیگری در مفصل زانو، مدلسازی و کنترل شده است. در این ربات از روش کنترل موقعیت مسیرهای از پیش تعیین شده، استفاده شده است [۴ و ۵]. به منظور تقویت نیروی انسانی و استقامت انسان در هنگام حرکت برای کاربردهای نظامی،

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

ربات بلیکس ارائه شد. الگوریتم کنترلی این ربات به صورت کنترل مبتنی بر مدل با استراتژی کمکی افزایش حساسیت به نیروها و گشتاورهای خارجی میباشد [۶]. برای حمل بارهای سنگین در مدت زمان طولانی و برای حرکت در سطوح با شیب کم، رباتی با عنوان اگزوهیکر طراحی شده است. استراتژی کنترلی این ربات به صورت استراتژی کنترل فعال تعقیب مفصل است [۷]. در سال ۲۰۱۲ یک اگزواسکلتون در زمینه پزشکی و برای کمک به افراد معلول برای راه رفتن، ارائه شده است که کنترل آن بر مبنای کنترل کننده موقعیت طبق مسیر از پیش تعیین شده میباشد [۸].

طراحی کنترل کننده مناسب تاثیر مستقیم بر عملکرد ربات اسکلت خارجی دارد. کنترل کننده علاوه بر تعیین ورودی های کنترلی مناسب به منظور تعقیب منحنی مطلوب مفاصل، باید بتواند بر اغتشاشات وارد شده به ربات در اثر نیروی اعمال شده از طرف انسان و محیط و همچنین بر دینامیک های مدل نشده و عدم قطعیت های سیستم غلبه کند. کنترل کننده هایی مانند کنترل کننده خطی سازی پسخوراند، کنترل کننده مقاوم، کنترل کننده تطبیقی [۹]، کنترل کننده مقاوم تطبیقی [۱۰]، کنترل کننده های مبتنی بر روئیت گر

(Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) (Creative Commons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

و کنترل کننده مد لغزشی [۱۱] برای مقابله با اغتشاشات خارجی و همچنین عدم قطعیتهای داخلی ارائه شدهاند. این روش ای کنترل به لحاظ نظری به محبوبیت فراوان دست یافتهاند، اما اکثر آنها فقط پایداری نسبی را تضمین می کنند. در این حالت سیستم کنترلی برای تعقیب مسیرهای مطلوب زمان زیادی را صرف خواهد کرد. از طرفی کنترل پایدار سیستم مستلزم داشتن بهره کنترلی بالایی می باشد که گاهی اوقات این موضوع عملی نیست. در نتیجه، یک کنترل کننده مقاوم با همگرایی سریع برای کاربردهای نظری و عملی لازم می باشد. امروزه روشهای کنترلی که پایداری حالتهای سیستمهای غیرخطی را به نقاط تعادل در زمان محدود تضمین می کنند، مانند کنترل کننده مد لغزشی فراپیچشی [۱۲]، کنترل کننده مدلغزشی ترمینالی [۱۳] توسعه یافتهاند.

کنترل کننده مد لغزشی بهعنوان یک کنترل کننده مقاوم در برابر اغتشاشات و نامعینیهای مدل در سالهای اخیر توسعه یافته است [۱۴ و ۱۵]. وجود پدیده چترینگ یکی از بزرگترین مشکلات روش کنترل مد لغزشی است که کاهش آن میتواند باعث صرفهجویی انرژی مصرفی شود. بدین منظور میتوان یک لایه مرزی را در اطراف سطح لغزش تعریف نمود. تعریف لایه مرزی در اطراف سطح لغزش باعث کاهش میزان مقاوم بودن سیستم در مقابله با عدم قطعیتها میشود [۱۶].

بهمنظور بهبود عملکرد کنترلکننده مد لغزشی، نسل جدیدی از کنترل کننده های حالت لغزشی با مرتبه بالاتر مانند کنترل مد لغزشی فراپیچشی پیشنهاد شده است که قانون کنترل آنها ذاتا و بدون تعریف لایه مرزی سعی در کاهش پدیده چترینگ دارد؛ درحالی که توانایی کنترلهای مد لغزشی سنتی را در مقابله با عدم قطعیتها و اغتشاشات حفظ می کند [۱۷]. کنترل مد لغزشی فراپیچشی یکی از قویترین الگوریتمهای کنترل مد لغزشی حالت پیوسته مرتبه دوم است. این روش کنترلی، تابع کنترلی پیوستهای تولید میکند که متغیر لغزشی و مشتق آن را در زمان محدود در حضور اغتشاشات هموار با دامنه محدود به مقدار صفر میل میدهد. از أنجا که این روش کنترلی دارای انتگرال ناپیوسته است، بنابراین پدیده چترینگ حذف نشده اما به مقدار قابل قبولي كاهش مي يابد. اساس اين روش كنترلي در سال ۲۰۰۸ توسط مورنو و اوسوریو [۱۸] ارائه شد. روش کنترل مد لغزشی فراپیچشی بهمنظور کنترل دقیق و مقابله با غیرخطیها و نامعینیهای سیستم توربین باد مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹]. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج یک کنترل کننده بهینه مقاوم مقایسه شده است که نتایج، برتری روش کنترل مد لغزشی فراپیچشی را نشان داده است. یک ربات

سریال به روش کنترل مد لغزشی فراپیچشی به منظور حذف سریع خطای ردیابی و مقابله با عدم قطعیتها کنترل شده است که نتایج شبیهسازی دقت و سرعت در ردیابی مسیر مرجع، اعتبار سنجی اثر کنترلکننده و کاهش انرژی مصرفی را تایید کردهاند [۲۰].

در روش کنترل مد لغزشی فراپیچشی آگاهی از محدوده عدم قطعیتها و اغتشاشات یک مشکل اساسی میباشد که در بسیاری از موارد عملی این محدوده قابل تخمین نیست. استفاده از یک قانون تطبیقی مناسب و طراحی کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی یک روش کارآمد در مقابله با اغتشاشات با دامنه نامعلوم است [۱۹ و ۲۲–۲۱] که این نوع از اغتشاشات در کنترل و پایداری رباتهای اسکلت خارجی بسیار حائز اهمیت میباشد.

یکی از مهمترین وظایف مکانیزمهای راه رونده در طول قدم زندن، حفظ تعادل است. از جمله روشهای بررسی پایداری در رباتهای راه رونده میتوان به روشهای معیار پایداری مرکز ثقل [۲۳]، معیار پایداری نشان گر چرخش پا [۲۴]، معیار پایداری انرژی مبنا [۲۵] و معیار پایداری ارتفاع – گشتاور [۲۶] اشاره کرد. اگر ربات مفصلهای فعال داشته باشد و در هر لحظه حداقل روی یک پا بایستد، آنگاه معیار نقطه گشتاور صفر میتواند برای بررسی پایداری مورد استفاده قرار گیرد [۲۶].

در این مقاله، ابتدا بهمنظور طراحی مسیرهای مطلوب مفاصل ربات از الگوریتم ارائه شده در مرجع [۲۷] استفاده شده است. سپس با استفاده از روش لاگرانژ معادلات مدل دینامیکی ربات استخراج و به منظور کنترل موقعیت مفاصل ربات، از روش کنترل مد لغزشی بهینه کلاسیک و کنترل تطبيقي بهينه مد لغزشي فراپيچشي استفاده شده است. همچنين مسير مطلوب مفصل بالا تنه در هر لحظه به گونهای تعیین شده است که پایداری ربات بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر تامین شود. بهمنظور دستیابی به حداکثر پایداری و کمترین خطا در تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل ربات، پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی و پارامترهای مسیر مطلوب بالا تنه، به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی [۲۸] بهینه شده است. در ادامه عملکرد كنترلكننده تطبيقي مد لغزشي فراپيچشي با كنترلكننده مد لغزشي بهينه مقایسه شده است. نوآوری این مقاله عبارتست از: ۱- طراحی کنترل کننده تطبیقی بهینه مد لغزشی فراپیچشی برای ربات اسکلت خارجی هفت درجه آزادی ۲-استفاده از حرکت مفصل بالا تنه بهعنوان جبرانساز پایداری ربات ٣-قابليت مقابله با اغتشاشات با دامنه نامعلوم و پديده چترينگ ۴-بهینهسازی همزمان پارامترهای کنترلکننده و پارامترهای مسیر مطلوب

¹ Sliding Mode Control (SMC)



شکل 1: شماتیک ربات اسکلت خارجی پایین تنه هفت درجه آزادی

Fig. 1. Schematic of the 7-DOF lower limb exoskeleton

بالاتنه با الگوريتم جستجوى هارمونى.

ساختار این مقاله بدین ترتیب است: در قسمت ۲ ربات مورد نظر معرفی شده، مسیرهای مطلوب مفاصل ربات در دو فاز تک و دو تکیهگاهی استخراج شده و معادلات دینامیکی آن با استفاده از روش لاگرانژ ارائه شده است. در قسمت ۳ روش کنترل ارائه شده و پایداری آن بررسی شده است. در قسمت ۴ معیار پایداری نقطه گشتاور صفر ارائه شده و مسیر مطلوب مفصل بالا تنه بهمنظور برقراری پایداری تعیین شده است. در قسمت ۵ مدل دینامیکی به همراه مسیر مطلوب مفاصل شبیهسازی شده و کنترل کنندههای طراحی شده بر روی مدل استخراجی از نرمافزار آدامز اعمال شده است. در آخر نتایج حاصل از پژوهش در بخش ۶ بیان شده است.

۲- معرفی و مدلسازی مکانیزم پیشنهادی

تطابق سینماتیکی درجات آزادی ربات با بدن انسان و قرارگیری مفاصل ربات دقیقا بر 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 سری رباتهای هال مشاهده کرد [۲۹ و ۳۰]. در این مقاله، مدل استفاده شده شامل هفت لینک و هفت مفصل میباشد. در شکل ۱ شماتیک ربات اسکلت خارجی مورد مطالعه نشان داده شده است.

در شکل ۱، θ_i و C_{m_i} برای i از ۱ تا ۷ به ترتیب زوایای L_i ، θ_i در شکل ۵، اطول لینکها و مرکز جرم لینکهای ربات می باشد. a و Error! Bookmark not defined نیز ابعاد کف پای ربات می باشد. برای استخراج

روابط دینامیکی حاکم بر ربات از روش لاگرانژ بهصورت رابطه (۱) استفاده شده است.

$$\tau_{i} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \theta_{i}}\right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_{i}} + \frac{\partial U}{\partial \theta_{i}}$$
(1)

که در آن θ_i متغیر تعمیم یافته، K انرژی جنبشی تمام لینکهای ربات، که در آن θ_i متغیر تعمیم یافته، K انرژی پتانسیل تمام لینکهای ربات، ربات و τ_i گشتاور وارد شده به هر یک از مفاصل میباشد. با استخراج روابط سینماتیکی و استفاده از روش لاگرانژ معادلات دینامیکی حاکم بر ربات به صورت رابطه (۲) بیان می شود [۳۱].

$$\tau = M(\theta)\theta'' + C(\theta, \theta') + G(\theta) + \tau_d \tag{(7)}$$

که در آن Error! Bookmark not defined گشتاور مربوط به عملگرها، $M(\theta) \cdot M(\theta)$ ماتریس ممان اینرسی، $C(\theta, \theta')$ ماتریس اثرات گریز از مرکز و ژیروسکوپی، $G(\theta) \cdot G(\theta)$ بردار نیروهای گرانشی و $\tau_d \cdot \tau_d$ گشتاور اغتشاش میباشند. معادلات استفاده شده در این مقاله از مرجع[۳] میباشند که با نتایج تجربی اعتبار سنجی شدهاند.

۳- طراحی مسیر مطلوب قدمزنی

در این مقاله به منظور طراحی مسیرهای مطلوب مفاصل ربات از الگوریتم مرجع [۲۷] استفاده شده است. ابتدا مسیر حرکت مفصل ران ربات و مسیر حرکت کف پاهای ربات مشخص می شود. با معین شدن این مسیرها، مسیرهای مطلوب مفاصل ربات به صورت یکتا به دست می آیند. طراحی مسیر در دو مرحله تک و دو تکیه گاهی انجام می شود. در این روش برای قابل درک شدن طرز راه رفتن ربات، پاهای ربات به عنوان پای راست و پای چپ مشخص شدهاند. برای ادامه حرکت کافی است که نقش پاهای راست و چپ با یکدیگر عوض شود و حرکت ادامه یابد. مطلب مهم برای ادامه حرکت چپ با یکدیگر عوض شود و حرکت ادامه یابد. مطلب مهم برای ادامه حرکت گام به اندازه D به سمت جلو انتقال داده شود تا بر روی قوزک پای تکیه گاه جدید قرار گیرد. در شکل ۲ پارامترهای لازم برای طراحی مسیر پایین تنه ربات مشخص شده است.

در شکل ۲، \dot{e}_s زاویه شروع فاز دو تکیهگاهی، \dot{e}_e زاویه پایان فاز دو \dot{e}_s ،۲ در شکل D_i ملول یک گام، D_i فاصله طولی مفصل ران در ابتدای فاز

$${}_{vkle-r} = \begin{cases} \theta_s & t = 0\\ \theta_e & t = Ts\\ 0 & Ts < t < Ts + Td \end{cases}$$
$${}_{vkle-r} = \begin{cases} -D + b(1 - \cos(\theta_s)) & t = 0\\ x_{max} & t = 0.5 Ts\\ D - a(1 - \cos(\theta_e) & t = Ts\\ D - a(1 - \cos(\theta_{ankle-r})) & Ts < t < Ts + Td \end{cases}$$
$${}_{vkle-r} = \begin{cases} -b\sin(\theta_s) & t = 0\\ z_{max} & t = 0.5 Ts\\ a\sin(\theta_e) & t = Ts\\ a\sin(\theta_{ankle-r}) & Ts < t < Ts + Td \end{cases}$$
$${}_{ip} = \begin{cases} D_i & t = 0\\ D_2 & t = Ts\\ D_3 & t = Ts + Td \end{cases}$$
$${}_{ip} = z_h = \text{constant} & Ts < t < Ts + Td \end{cases}$$

 $x_{ankle-r}$ (۳)، در رابطه (۳)، $\theta_{ankle-r}$ $\theta_{ankle-r}$ $\theta_{ankle-r}$ (۳)، در رابطه (۳)، مختصه طولی مچ پای راست، $x_{ankle-r}$ ارتفاع مچ $x_{ankle-r}$ ارتفاع مچ پای راست، $x_{ankle-r}$ ارتفاع مفصل ران پای راست، x_{hip} مختصه طولی مفصل ران و z_{hip} ارتفاع مفصل ران میباشد. مسیر مربوط به مچ پای چپ برای استفاده در تعیین مسیر در فاز دو تکیه گاهی در رابطه (۴) آورده شده است.

$$\begin{aligned} \theta_{ankle-l} &= \begin{cases} 0 & 0 < t < Ts \\ \theta_s & t = Ts + Td \end{cases} \\ x_{ankle-l} &= \begin{cases} 0 & 0 < t < Ts \\ b(1 - \cos(\theta_{ankle-l}))) & Ts < t < Ts + Td \end{cases} \\ z_{ankle-l} &= \begin{cases} 0 & 0 < t < Ts \\ -a\sin(\theta_{ankle-l}) & Ts < t < Ts + Td \end{cases} \end{aligned}$$

در رابطه (۴)، $\theta_{ankle-1}$ زاویه مچ پای چپ، $I_{ankle-1}$ مختصه طولی مچ پای چپ و $I_{ankle-1}$ ارتفاع مچ پای چپ میباشد. بهترین شرایط برای حرکت ربات هنگامی است که سرعت برخورد پا با سطح زمین نزدیک به صفر باشد. بدین گونه میتوان از اثرات ضربه صرف نظر کرد. برای کم کردن اثرات ضربه و همچنین برای به دست آوردن حرکتی هموار، متناوب و پیوسته، شتاب و سرعت خطی و زاویهای درابتدای فاز تک تکیهاهی و انتهای فاز دو تکیهگاهی برای مفاصل ران و مچهای پاهای چپ و راست برابر در نظر گرفته شده است. سینماتیک معکوس ربات برای دو فاز تک و دو تکیهگاهی بر اساس نمایش زاویه مفاصل در شکل ۳ ارائه شده است.



Fig. 2. Design parameters of the lower limb trajectory

تک تکیهگاهی، D_2 فاصله طولی مفصل ران در پایان فاز تک تکیهگاهی، D_2 فاصله طولی مفصل ران در پایان فاز دو تکیهگاهی میباشد. D_3

برای مشخص کردن مسیر کف پا در هر لحظه به دو مؤلفه در راستای Xو z و z و یک مؤلفه θ که معرف زاویه کف پا باشد، نیاز است. اولین گام حرکت را پای راست ربات انجام میدهد و پای چپ به عنوان تکیهگاه عمل می کند. در مرحله یک تکیهگاهی حرکت با جدا شدن پنجه پای راست از زمین شروع شده و با تماس پاشنه پای راست با سطح زمین به انتها میرسد. این فاز از حرکت در مدت زمان Ts انجام میشود. در این مرحله پای چپ به طور کامل با سطح زمین شروع میشود. در این مرحله همزمان با فرود آمدن پای راست با سطح زمین شروع میشود. در این مرحله همزمان با فرود آمدن پای در مراست، پای چپ از سطح زمین بلند میشود. این فاز از حرکت در مدت زمان راست با سطح زمین شروع میشود. در این مرحله همزمان با فرود آمدن پای راست با مطح زمین شروع میشود. در این مرحله همزمان با فرود آمدن پای راست با مطح زمین شروع میشود. در این مرحله همزمان با فرود آمدن پای راست با مطح زمین شروع میشود. در این مرحله همزمان با فرود آمدن پای راست میای چپ از سطح زمین بلند میشود. این فاز از حرکت در مدت زمان راست، پای چپ از سطح زمین بلند میشود. این فاز از حرکت در مدت زمان راست، پای چپ از سطح زمین معلوم بودن مسیرهای کف پا و مفصل ران ربات مسیرهای حرکت مطلوب مفاصل ربات به صورت یکتا بدست میآید [۷۲]. مسیرهای مچ پا و مفصل ران با گذراندن منحنی مناسب از چند نقطه که مچ پا و مفصل ران از آن ها میگذرند بدست میآید.



Fig. 5. desired trajectory of the second joint



شکل ۳: فاز دو و تک تکیهگاهی ربات

Fig. 3. single and double support phases



Fig. 4. desired trajectory of the first joint

معادلات سینماتیک معکوس مربوط به فاز تک تکیهگاهی و دو تکیهگاهی برای ربات استخراج شده و بر اساس مسیرهای تعریف شده برای مفاصل مچ و ران ربات، مسیرهای مطلوب مفاصل به صورت شکلهای ۴ تا ۹ می شد. مقادیر پارامترهای موجود در مفاصل مچ و ران ربات بر مبنای مطالعه تجربی صورت گرفته برای حرکتی با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه به صورت جدول ۱ می باشد.

۴- کنترلکننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی^{، -}

در این مقاله به منظور تعقیب مسیر تعیین شده برای مفاصل توسط

1 .Adaptive Super Twisting Sliding Mode Controller (ASTSMC)

Table 1. Hip and Ankle parameters

مقدار	واحد	پارامتر
١	S	Ts
• / \	S	Td
•/۵	М	D
-•/Y۵	М	D.
•/٢•	М	D_1 D_2
• /۲۵	М	D ₃
•/٢۵	М	x max
•/٢•	М	7
١	М	$\frac{z}{h}$
•/٢۵	Rad	$ heta_{arepsilon}$

جدول 1: مقادیر پارامترهای مسیر مفاصل مچ و ران ربات

از کنترل کننده تطبیقی مدلغزشی فراپیچشی استفاده شده است. روش کنترل مد لغزشی یکی از روش های کنترلی است که در دسته کنترل های مقاوم قرار می گیرد [۳۲]. بهمنظور طراحی کنترل کننده مد لغزشی، برای هر متغیر حالت q خطا به صورت $e = q - q_d$ در نظر گرفته شده و یک سطح متغیر با زمان مطابق با رابطه (۵) تعریف شده است.

ربات و همچنین مقابله با اغتشاشات، نامعینیها و دینامیکهای مدل نشده



Fig. 8. desired trajectory of the fifth joint



Fig. 9. desired trajectory of the sixth joint



Fig. 6. desired trajectory of the third joint





$$S' = (q'' - q_d'') + \lambda(q' - q_d')$$
(\$)

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

با قرار دادن مشتق سطح لغزش برابر صفر و استفاده از رابطه (۳)، قانون
کنترلی
$$\widehat{ au}(t)$$
 به صورت رابطه (۷) بدست میآید.

$$\hat{\tau}(t) = C(\theta, \theta') + G(\theta) + M(q_d'' - \lambda(q' - q_d')) + \tau_d \tag{Y}$$

که در آن ë یک ثابت اکیدا مثبت و n بعد فضای حالت است که برای ربات مورد مطالعه برابر با ۳ می باشد. هدف از طراحی کنترل کننده مد لغزشی، قرار دادن شیب سطح متغیر با زمان در نزدیکی صفر است. با مشتق گیری نسبت به زمان، شیب سطح متغیر با زمان از رابطه (۶) بدست می آید.

پدیده چترینگ یکی از مهمترین معایب روش کنترلی مد لغزشی بوده که باعث افزایش مصرف انرژی می شود. به منظور مقابله با این پدیده، یک جمله ناپیوسته به صورت یک لایه مرزی به قانون کنترلی اضافه شده است که در نهایت قانون کنترلی برای ربات به صورت رابطه (۸) استخراج شده است.

$$\tau(t) = \hat{\tau}(t) - K \operatorname{sign}(S) \tag{A}$$

که در آن K یک ثابت مثبت است. استفاده از لایه مرزی برای حذف پدیده چترینگ نه تنها باعث حذف کاملاین پدیده نمی شود بلکه از طرفی باعث کاهش ویژگی مقاوم بودن کنترل کننده می شود. کنترل کننده مدلغزشی فراپیچشی توانایی مناسب در حذف پدیده چترینگ بدون کاستن از ویژگی مقاوم بودن کنترل کننده را دارا می باشد. بر همین اساس قانون اصلاح شده کنترلی به صورت رابطه (۹) بیان شده است [۳۳ و ۳۴].

$$\tau_{i}(t) = \hat{\tau}_{i}(t) + \omega_{i}$$

$$\omega_{i} = A_{i}\sqrt{|S_{i}|}\operatorname{sign}(S_{i}) + v_{i}$$

$$v_{i}' = -\frac{\beta}{2}\operatorname{sign}(S_{i})$$
(9)

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

$$A_{i}' = \begin{cases} W_{1}\sqrt{\frac{\gamma_{1}}{2}}\operatorname{sign}(|S_{i}|-\mu) & A > a_{m} \\ \eta & A < a_{m} \end{cases}$$
(1.)

که در آن W_1 ، W_1 ، γ_1 ، μ ، γ_1 ، γ_1 ، W_1 و η ثابت می باشند. به منظور بررسی پایداری روش کنترلی تابع لیاپانوف مثبت معین به صورت رابطه (۱۱) در نظر گرفته می شود [۲۰]. با مشتق گیری از تابع لیاپانوف و ساده سازی ریاضی رابطه (۱۲) استخراج شده است.

$$V_{i} = \delta_{i}^{T} P_{i} \delta_{i}$$

$$\delta_{i} = \left[\sqrt{|S_{i}|} \operatorname{sign}(S_{i}) \quad v_{i} \right]^{T}$$

$$P_{i} = \left[-\frac{4\beta_{i}}{2} + A_{i}^{2} - A_{i} \\ -A_{i} \qquad 2 \right]$$

(11)

$$V_{i}' = \frac{1}{\sqrt{|S_{i}|}} \left(\delta_{i}^{T} P_{i} \delta_{i} + \tau_{di} q_{i}^{T} \delta_{i} \right)$$

$$Q_{i} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\frac{4\beta_{i}}{2} + A_{i}^{2} & -A_{i} \\ -A_{i} & 1 \end{bmatrix}$$

$$q_{i}^{T} = -\frac{4\beta_{i}}{2} + \frac{A_{i}^{2}}{2} - \frac{A_{i}}{2}$$
(17)

با جایگذاری
$$Q$$
 و q^T در رابطه V داریم: q

$$V_{i}' = \frac{1}{\sqrt{|S_{i}|}} \left(\delta_{i}^{T} \hat{Q}_{i} \delta_{i} \right)$$

$$\hat{Q}_{i} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\frac{4\beta_{i}}{2} + A_{i}^{2} - (\frac{8\beta_{i}}{A_{i}} + A_{i})\Delta_{i} & -A_{i} - 2\Delta_{i} \\ -A_{i} - 2\Delta_{i} & 1 \end{bmatrix}$$
(17)

در صورت برقراری شرط رابطه (۱۴)، [′]، [′]/منفی معین شده و سیستم حلقه بسته پایدار است.

$$A_i > 2\Delta_i \quad , \quad -\frac{\beta_i}{2} > A_i \; \frac{5A_i \, \Delta_i}{2A_i - 4\Delta_i} \tag{14}$$

۵- معیار پایداری نقطه گشتاور صفر ۱

نقطه گشتاور صفر نقطهای است روی زمین به طوری که گشتاور نیروی کلی اینرسی (شامل مجموع نیروی اینرسی و نیروی گرانشی) ربات صفر شود [۳۵]. براساس این معیار، نقطه گشتاور صفر نقطهای بر روی سطح تماس کف پا ربات و زمین است که در آنجا برآیند تمام نیروهای وارد بر ربات را میتوان بایک نیروی تک جایگزین کرد [۲۶]. اگر این نقطه درون محدوده تعادل قرار گیرد ربات پایدار است. در فاز تک تکیهگاهی محدوده تعادل شامل یک کف پا و در فاز دو تکیهگاهی چند ضلعی بسته حاصل از دو پا است. روابط مربوط به نقطه گشتاور صفر به صورت رابطه (۱۵) می باشد.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i (z_i'' + g) x_i - \sum_{i=1}^{n} m_i x_i'' z_i - \sum_{i=1}^{n} I_{iy} \theta_{iy}''}{\sum_{i=1}^{n} m_i (z_i'' + g)}$$
(12)

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i (z_i'' + g) y_i - \sum_{i=1}^{n} m_i y_i'' z_i - \sum_{i=1}^{n} I_{ix} \theta_{ix}''}{\sum_{i=1}^{n} m_i (z_i'' + g)}$$

^{1 .}Zero Momentum Point (ZMP)



Fig. 10. Block diagram of the proposed controller

$$\theta_7'(0) = \theta_7'(Ts + Td)$$

$$\theta_7''(0) = \theta_7''(Ts + Td)$$
(1V)

تابع هدف به گونه ای در نظر گرفته شده است که در هر لحظه بالاترین حاشیه پایداری را برای ربات و حداقل اختلاف در مسیر حرکت مفاصل ربات نسبت به مسیرهای مرجع را ایجاد کند. همچنین محدوده مجاز برای حرکت لینک کمر بین ۱۱۰ تا ۶۵ درجه در نظر گرفته شده است.

$$CF = \int \left| ZMP - ZMP_{desind} \right|^2 + \sum_{i=1}^7 \int \left| e_i \right|^2 \tag{1A}$$

ZMP، نقطه ممان صفر در هر لحظه از حرکت ربات میباشد. ZMP_{desird} نقطه ممان صفر مطلوب در فاز دو و تک تکیهگاهی است که بر اساس بیشینه مقدار پایداری ربات تعریف شده و *ق*برای i از ۱ تا ۷، خطای تعقیب مسیرهای مرجع مفاصل ربات است. در نهایت بلوک دیاگرام کنترلی به صورت شکل ۱۰ ارائه شده است.

u در شکل ۱۰، heta برای i از ۱ تا ۷ موقعیت زاویهای مفاصل ربات، u سیگنال کنترلی و e سیگنال خطا میباشد.

۶- شبیهسازی

در این مقاله با استفاده از روش لاگرانژ معادلات دینامیکی حرکت ربات پایین تنه و سپس مسیرهای مرجع استخراج شده برای هر یک از مفاصل ربات با کنترلکنندههای تطبیقی بهینه مدلغزشی فراپیچشی و مدلغزشی در رابطه (۱۵)، x, y و z مختصات مرکز جرم لینکهای ربات میباشد. همچنین \mathcal{H}_{ix} و \mathcal{H}_{iy} به ترتیب شتاب زاویهای لینکها در راستای افقی و عمودی میباشد. در تعیین حرکت پایین تنه ربات پایداری ربات در نظر گرفته نشده است. بنابراین از حرکت بالاتنه ربات در جهت جبران پایداری استفاده میشود. برای این منظور مسیر حرکت مفصل بالا تنه ربات به گونهای تعیین میشود که در هر لحظه معیار پایداری نقطه گشتاور صفر برای ربات برقرار باشد. پارامترهای زاویه، سرعت و شتاب زاویهای بالاتنه به منظور استخراج الگوی حرکتی پایدار به گونهای تعیین شده که در هر لحظه بتوان با اتخاذ مقادیر مناسب برای آن ها ربات را در حالت پایدار قرار داد. مسیر مطلوب مفصل کمر با استفاده از چند نقطه معلوم در یک بازه حرکتی توسط یک منحنی مرتبه پنج معرفی شده و سپس پارامترهای مسیر با کمینه سازی یک تابع هدف مناسب بهینه شده است. رابطه (۱۶) چند نقطه معلوم از یک بازه حرکتی مفصل بالا تنه را بیان میکند.

$$\theta_{7} = \begin{cases}
\frac{\pi}{2} - \alpha & t = 0 \\
\gamma & t = 0.5 Ts \\
\frac{\pi}{2} - \alpha & t = Ts \\
\sigma & t = Ts + Td
\end{cases}$$
(15)

که در آن γ ، α و δ پارامترهای ثابت میباشد. همچنین برای داشتن مسیری هموار، متناوب و پیوسته داریم:



Fig. 11. Trajectories of fifth and sixth joints in ADAMS



Fig. 12. Phase-plan diagram of the first joint

بهینه ردیابی شده است. همچنین مسیر مرجع مفصل بالا تنه ربات بهعنوان جبرانساز پایداری بر اساس معیار نقطه گشتاور صفردر هر لحظه تعیین شده است. پارامترهای کنترل کنندهها و همچنین پارامترهای مسیر مفصل بالا تنه بهمنظور دستیابی به حداکثر پایداری و کمترین خطای ردیابی ممکن توسط الگوريتم بهينهسازي جستجوي هارموني تعيين شدهاند. مقاوم بودن کنترل کنندهها در برابر اغتشاشات و عدم قطعیتهای سیستم با در نظر گرفتن اغتشاشاتی با دامنه ای 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. در شبیهسازیها با توجه به عملگرهای موجود، محدوده مجاز برای تلاش کنترلی ۸۰- تا ۸۰+ نیوتن متر و حد بالای سرعت زاویهای مفاصل ربات ۲۰۰ درجه بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه عملکرد کنترل کننده های طراحی شده در این مقاله نمودارهای خطا، نمودار انرژی مصرفی و نمودار نقطه گشتاور صفر برای هر یک از کنترل کنندهها ارائه شده است. بهمنظور اعتبارسنجی مدل دینامیکی استخراج شده از روش لاگرانژ، ربات در نرمافزار آدامز مدلسازی شده و نتایج روش لاگرانژ با نتایج حاصل از آدامز مقایسه شده است. در جدول ۲ پارامترهای ربات اسکلت خارجی پایین تنه ارائه شده است. همچنین بهعنوان نمونه مسیرهای حاصل از دینامیک معکوس مفصل ۵ و ۶ ربات حاصل از روش لاگرانژ و نرمافزار آدامز در شکل ۱۱ مقایسه

شده است.

با توجه به شکل ۱۱، منحنیهای مسیر برای مدل لاگرانژ و نرمافزار آدامز تطابق خوبی با یکدیگر دارند. برای مقایسه بهتر، مجموع مجذور خطاهای بین مسیرهای مدل لاگرانژ و نرمافزار آدامز محاسبه شده است که مقدار خطا برای مفصل ۵ برابر با ۲۰۱۹ (مجذور رادیان) و برای مفصل زانو برابر با ۲۰۰۸ (مجذور رادیان) میباشد که دقت معادلات دینامیکی بدست آمده برای ربات را نشان میدهد. در جدول ۳ پارامترهای بهینه کنترل کننده تطبیفی مد لغزشی فراپیچشی و پارامترهای مسیر مفصل بالا تنه ارائه شده است.

برای بررسی عملکرد کنترلکننده بهینه تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی نمودار صفحه فاز برای هفت مفصل ربات در شکلهای ۱۲ تا ۱۸ ارائه شده است.

در شکلهای ۱۲ تا ۱۸ نمودار صفحه فاز بهصورت یک چرخه حدی تشکیل شده است که عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی را در تعقیب پایدار و پیوسته مسیرهای مرجع مفاصل ربات نشان میدهد. بهمنظور مقایسه عملکرد دو کنترل کننده طراحی شده، نمودارهای خطای تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل، سیگنالهای کنترلی، مسیر مطلوب مفصل بالا تنه و نقطه گشتاور صفر ارائه شده است. در شکلهای ۱۹ تا ۲۵ نمودارخطای تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل ربات برای دو کنترل کننده طراحی شده نشان داده

Table 2. Lower limb exoskeleton robot parameters :۲ جدول

مقدار	واحد	پارامتر
• / \	Kg	m_{1}
٣/٢	Kg	m_{2}
Υ/λ	Kg	m_{3}^{2}
Υ/λ	Kg	m,
٣/٢	Kg	<i>m</i> ₅
• / A	Kg	m_{ϵ}
۴.	Kg	m_7
•/\•	kg m ²	I_{I}
• /Y۵	kg m ²	I_{2}
٠/٨٣	kg m ²	I_{2}^{2}
٠/٨٣	kg m ²	Ī
• /Y۵	kg m ²	I_{5}^{4}
•/\•	kg m ²	I,
۴/۸	kg m ²	I_{τ}°
•/•Y۵	М	a
•/YYQ	М	b
•/44	М	L
•/۴٨	М	L_2^2
•/۴٨	М	L^{3}
•/44	М	L_{z}
•/۵	М	L_{τ}
•/17	М	$\frac{2}{c}$
• / ۲ ۳	М	C_{m}
•/٣٣٨	Μ	C_{m2}
۰/۲۳۸	Μ	$c m_3$
• / ۲ ۳	Μ	C_{m4}
•/17	Μ	- ms C
• /۳۳۵	М	C_{m7}

مقادیر پارامترهای مسیر مفاصل مچ و ران ربات

Table 3. optimal control parameters and upper limb trajectory parameters جدول ۳: پارامترهای بهینه کنترل کننده و پارامترهای مسیر مفصل بالا تنه

مقدار	واحد	پارامتر
۶۳	-	λ
χ/χ	-	W_1
• /۶	-	γ_1
• / A	-	a_m
۲/۲	-	μ
1/84	-	η
- • / \ \	Rad	α
1/18	Rad	γ
١/۴٧	Rad	σ



Fig. 15. Phase-plan diagram of the fourth joint



Fig. 16. Phase-plan diagram of the fifth joint



شکل ۱۳: نمودار صفحه فاز مفصل دوم

Fig. 13. Phase-plan diagram of the second joint



Fig. 14. Phase-plan diagram of the third joint



Fig. 19. Tracking error of the first joint



Fig. 20. Tracking error of the second joint

2.1 2.05 2 2 1.95 1.95 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.85 1.851.

Fig. 17. Phase-plan diagram of the sixth joint



Fig. 18. Phase-plan diagram of the seventh joint

شده است.

با توجه به شکلهای ۱۹ تا ۲۵ مشخص می شود که خطای تعقیب مسیرهای مرجع مفاصل برای کنترل کنندههای طراحی شده در محدوده قابل قبولی قرار دارد. همچنین سیگنالهای خطای حاصل از مدل بدست آمده از روش لاگرانژ و نرم افزار آدامز بسیار نزدیک به هم می باشند. دامنه سیگنالهای خطا در کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی به میزان قابل توجهی کمتر از کنترل کننده مد لغزشی معمولی می باشد. همچنین

سرعت همگرایی به مقدار صفر در کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی بالاتر از کنترل کننده مد لغزشی معمولی میباشد. یکی از ویژگیهای کنترل کنندههای مد لغزشی فراپیچشی همگرایی در زمان محدود میباشد که در کنترل ربات مورد مطالعه در این مقاله نیز این ویژگی دیده میشود. مجموع خطای تعقیب مسیرهای مرجع مفاصل برای کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی برابر با ۲۰/۰۲۲۴ (مجذور درجه) و برای کنترل کننده مد لغزشی معمولی برابر با ۲۰/۰۸۲۴ (مجذور درجه) میباشد. در در شکل ۲۶



Fig. 23. Tracking error of the fifth joint



Fig. 21. Tracking error of the third joint



شکل ۲۴: خطای ردیابی مسیر مطلوب مفصل ششم





شکل ۲۲: خطای ردیابی مسیر مطلوب مفصل چهارم

Fig. 22. Tracking error of the fourth joint

سیگنالهای کنترلی برای کنترل کننده بهینه تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی ارائه شده است.

سیگنالهای کنترلی برای هر دو کنترل کننده، در محدوده مناسب و کمتر از اشباع عملگرها قرار گرفتهاند. بنابراین امکان انتخاب عملگر مناسب و اعمال سیگنالهای کنترلی به عملگرها وجود دارد. مقدار میانگین دامنه سیگنال کنترلی برای کنترل کننده تطبیقی بهینه مد لغزشی فراپیچشی برابر با ۲۷/۹۳۱ نیوتن متر و کنترل کننده بهینه مد لغزشی معمولی برابر با ۵۱/۱۷۸ نیوتن متر میباشد. دامنه سیگنالهای کنترلی حاصل از روش تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی نه تنها مقادیر کمتری نسبت به سیگنالهای کنترلی روش مد لغزشی بهینه معمولی دارد، بلکه دارای شکل هموارتری نیز میباشند و برخلاف کنترل کننده مد لغزشی معمولی پدیده چترینگ در آن دیده نمی شود. در شکل ۲۷ نمودار نقطه گشتاور صفربرای دو کنترل کننده ارائه شده است.

همانطور که در شکل ۲۷ قابل مشاهده است، هر دو کنترل کننده به کمک حرکت زاویه بالا تنه میتوانند حرکت پایداری برای ربات ایجاد کنند. مسیر نقطه گشتاور صفر تولید شده توسط کنترل کننده بهینه تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی اختلاف کمتری با مسیر نقطه گشتاور صفر مطلوب دارد بنابراین حاشیه پایداری بالاتری را ایجاد خواهد کرد. این موضوع بهدلیل دقت بالا در تعقیب مسیرهای مرجع مفاصل ربات و همچنین وجود سیگنالهای کنترلی هموارتر و بدون نوسان و چترینگ است. میزان خطای نقطه گشتاور صفرنسبت به نقطه گشتاور صفر مطلوب برای کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی برابر با ۲/۵۳ (مجذور متر) و برای کنترل کننده مد لغزشی معمولی برابر با ۳/۱۹ (مجذور متر) میباشد. در شکل ۲۸ مسیر مفصل بالا تنه برای دو کنترل کننده طراحی شده، ارائه شده است.

در شکل ۲۸ دو کنترل کننده طراحی شده، مسیر مفصل بالا تنه دارای دامنه قابل قبول در محدوده زاویه ۹۰ درجه میباشد. همچنین دامنه حرکت مفصل بالا تنه در کنترل کننده بهینه تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی کمتر میباشد. در ادامه بهمنظور بررسی مقاومت کنترل کنندههای پیشنهادی در برابر اغتشاشات و عدم قطعیتهای سیستم، با افزایش میزان اغتشاشات و عدم قطعیتهای سیستم، معیار خطای مجموع مجذور خطاهای تعقیب مفاصل سیستم برای آنها در شکلهای ۲۹ و ۳۰ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۲۹ مشخص می شود که تا اغتشاشات حدود ۴۰ درصد سیگنال کنترلی هر دو کنترلکننده دارای عملکرد ثابتی هستند. برای اغتشاشات بالای ۴۰ درصد عملکرد کنترلکننده مد لغزشی بهینه معمولی نسبت به کنترلکننده بهینه تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی تضعیف می شود.

با توجه به شکل ۳۰ مشخص می شود که تا عدم قطعیت حدود ۲۵ درصد پارامترهای نامی سیستم هر دو کنترل کننده دارای عملکرد ثابتی هستند. برای عدم قطعیتهای بالای ۲۵ درصد عملکرد کنترل کننده مد لغزشی بهینه معمولی نسبت به کنترل کننده بهینه تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی تضعیف می شود.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله روش کنترل بهینه تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی بهمنظور مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیتهای با دامنه نامعلوم سیستم و همچنین پدیده چترینگ که یکی از معایب کنترل کنندههای مد لغزشی میباشد، ارائه شد. در کنترل کنندههای بهینه مد لغزشی معمولی برای کاهش اثرات پدیده چترینگ از لایه مرزی استفاده می شود. در این حالت نه تنها پدیده چترینگ بهطور كامل حذف نمى شود بلكه خاصيت مقاوم بودن كنترل كننده در مقابله با عدم قطعیتها و اغتشاشات کاهش مییابد. کنترلکنندههای مد لغزشی معمولی در مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیتهای با دامنه معلوم دارای کارایی مناسبی هستند. با توجه به اینکه دستیابی به محدوده اغتشاشات و عدم قطعیتهای سیستم همواره ممکن نیست بنابراین در روش کنترلی پیشنهاد شده از یک مکانیزم تطبیق برای مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیتهای با دامنه نامعلوم سیستم استفاده شد. همچنین برای ایجاد یک حرکت پایدار در ربات بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر، از حرکت مفصل بالا تنه ربات بهعنوان جبرانساز پایداری ربات استفاده شده است. نتایج بدست آمده از روش كنترل بهينه تطبيقي مد لغزشي فراپيچشي با نتايج كنترل كننده مد لغزشي بهینه مقایسه شد که برتری روش کنترل بهینه تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی در میزان خطای تعقیب مفاصل، مدت زمان همگرایی خطای به سمت صفر، میزان انرژی مصرفی، میزان پایداری بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر و همچنین میزان مقاومت در برابر اغتشاشات و عدم قطعیتهای سیستم، قابل مشاهده است.

منابع

- R. Bogue, Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments, Industrial Robot: An International Journal, 36(5) (2009) 421-427.
- [2] R. S. Mosher, Handy man to Hardiman, Technical Report, SAE Technical Paper, (1967).

(2018) 38-47.

- [12] A. Goel, A. Swarup, MIMO Uncertain Nonlinear System Control via Adaptive High-Order Super Twisting Sliding Mode and its Application to Robotic Manipulator, J Control Autom Electr Syst, 28(1) (2018) 36–49.
- [13] T. Madani, B. Daachi, K. Djouani, Non-singular terminal sliding mode controller: Application to an actuated exoskeleton, Mechatronics, 33(1) (2016) 136–145.
- [14] C. Edwards, E. F. Colet, L. Fridman, Advances in variable structure and sliding mode control, Springer, Berlin, (2006) 50-280.
- [15] A. Sabanovic, L. M. Fridman, S. K. Spurgeon, Variable structure systems: from principles to implementation, IEEE Transactions digital library, 66 (7) (2004) 445-456.
- [16] G. Bartolini, A. Ferrara, E. Usai, V. I. Utkin, On multiinput chattering-free second-order sliding mode control, IEEE transactions on automatic control, 45(9) (200) 1711-1717.
- [17] Y. Shtessel, C. Edward, L. Fridman, A. Levant, Sliding Mode Control and Observation, Springer, New York, (2014) 135-255.
- [18] A. Moreno, M. Osorio, A Lyapunov approach to second order sliding mode controllers and observer, 47th IEEE Conference on Decision and Control, Mexico, Cancun, 2008.
- [19] F. Zargham, A. H. Mazinan, Super-twisting sliding mode control approach with its application to wind turbine systems, Springer, 11(1) (2018) 1-19.
- [20] A. Goel, A. Swarup, 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, 28(1) (2017) 36–49.

- [3] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, D. Stokic, Biped Locomotion, Springer-Verlag, Berlin, (1990) 1-349.
- [4] S. Jezernik, G. Colombo, T. Kelly, H. Frueh, M. Morari, Robotic Orthosis Lokomat: A rehabilitation and research tool, Technology at the Neural Interface, 6(1) (2003) 108–115.
- [5] A. Duschau-Wicke, T. Brunsch, L. Lünenburger, R. Riener, Adaptive support for Patient-Cooperative gait rehabilitation with the lokomat, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Acropolis Convention Center Nice, France, 2008.
- [6]H. Kazerooni, Hybrid Control of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), The International Journal of Robotics, 25(2) (2006) 561-573.
- [7]B. Siciliano, O. Khatib, Springer Handbook of Robotics, Springer-Verlag, Berlin, (2008) 773-793.
- [8] T. Yan, M. Cempini, C. M. Oddo, N. Vitiello, Review of assistive strategies in powered lower-limb orthosis and exoskeletons, Robotics and Autonomous Systems, 64(1) (2015) 120-136.
- [9] X. Wanga, X. Li, J. Wang, X. Fang, X. Zhub, modelfree adaptive sliding mode control for the multi degreeof-freedom robotic exoskeleton, Information Sciences, 327(1) (2015) 246-257.
- [10] S. Chen, B. Yao, X. Zhu, Z. Chen, Q. Wang, S. Zhu, Y. Song, Adaptive Robust Backstepping Force Control of 1-DOF Joint Exoskeleton for Human Performance Augmentation, IFAC, 48(1) (2015) 142–147.
- [11] S. Han, H. Wang, Y. Tian, Advances in Engineering Software journal Model-free based adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control with time-delay estimation for a 12 DOF multi-functional lower limb exoskeleton, Advances in Engineering Software, 119(1)

Exoskeleton, ModaresMechanical Engineering, 99(9) (2017) 1-11. (in Persian)

- [29] H. Kawamoto, Y.Sankai, Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for HAL, Advanced Robotics, 19(7) (2005) 717-734.
- [30] P.K. Kyaw, K. Sandar, M. Khalid, W. Juan, Y. Li, Z. Chen, Opportunities in robotic exoskeletons hybrid assistive limbSUIT (MT5009), Robotic Exoskeletons: Becoming Economically Feasible, 21(1) (2013).
- [31] J.J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Hall, London, (2005) 85-310.
- [32] V. Hasani, M. Taghizadeh, M. Mazare, Modeling and position controller design of a servo-hydraulic actuator under variable loads using sliding mode control, Modares Mechanical Engineering, 17(6) (2016) 295-302 (in Persian).
- [33] M. Doakhan, M. Kabganian, R.Nadafi, A. K. Eigoli, Trajectory Tracking of a Quadrotor for Obstacle Avoidance Using Super-Twisting Sliding Mode Controller and Observer, Modares Mechanical Engineering, 17(8) 333-342, 2017 (in Persian).
- [34]X. Yu, M. Ö. Efe, Recent Advances in Sliding Modes: From Control to Intelligent Mechatronics, Springer-Verlag, Berlin, (2015) 90-310.
- [35] A. Gocwami, Postural stability of Biped Robots and the Foot-Rotation Indicator (FRI) point. The International Journal of Robotics Research, 18(6) (1999) 523-533.

- [21] D. Liang, L. Jian, Q. Ronghai, Super-Twisting Algorithm Based Sliding-Mode Observer with Online Parameter Estimation for Sensor less Control of Permanent Magnet Synchronous Machine, IEEE, 53(4) (2016) 3672 – 3682.
- [22] Y. Shtessel, M. Taleb, F. Plestan, a novel adaptive-gain super twisting sliding mode controller: Methodology and application, Automatica, 48(5) (2012).
- [23] H. Hemami, C.L. Golliday, The inverted pendulum and biped stability, Mathematical Biosciences, (2) (1977) 95-110.
- [24] D. Messuri, C. Klein, Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion. Robotics and Automation, IEEE, 1(3) (1985) 141-132.
- [25] S.A.A. Moosavian, K. Alipour, Y. Bahramzadeh, Dynamics modaling and tip-over stability of suspended wheeled mobile robots with multiple arms. In Intelligent robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ Internatiinal Conference, USA, 2007.
- [26] A. Takhmar, MHS measure for postural stability monitoring and control of bipad robts. In Advanced Intelligent Mechatronics, 2008 .AIM 2008. IEEE/ ASME International Conference on, China, 2008.
- [27]S.A.A. Moosavian, A. Takhmar. Stable Gait Planning for Humanoids Motion, in ISME, Iran, 2007.
- [28]M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Optimal Robust Hybrid Active Force Control of a Lower Limb