Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(12) (2022) 1455-1458
DOI: 10.22060/mej.2021.19761.7106

Robust and Adaptive Control of an Exoskeleton Robot For Tracking Modified Desired Trajectory Based on Zero Moment Point Stability Theory

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

Department of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: The Creation of reference trajectories and the ability to track them in the presence of disturbances and uncertainties are important issues in investigating the exoskeleton performance. One of the methods of trajectory planning is the central pattern generation algorithm. This algorithm will behave in a limit cycle and the temporal disturbances have quickly removed the system and created harmonious trajectories. In this paper, for the creation of reference trajectories of each joint, a combination of seven modified Hopfield oscillators is used which provides the ability to change the frequency and domain of walking. Online modification of robot joint reference trajectories is done by using the feedback error signal between desired zero momentum point and zero momentum point of the robot at any moment. In order to cope with the disturbances and uncertainty with the uncertain domain and achieve maximum efficiency in tracking robot reference trajectories, an adaptive dynamic fast terminal sliding mode controller is used due to the elimination of chattering phenomena, and finite-time convergence. Also, by moving the Upper link the maximum stability of the robot based on the zero momentum point criterion is guaranteed. To achieve maximum performance, controller parameters, oscillator coefficients, and connections between them are optimized. Finally, the performance of the proposed method is compared with a sliding mode controller. The results demonstrate the superiority of the proposed method.

Review History:
Received: Mar. 19, 2021
Revised: Aug. 29, 2021
Accepted: Oct. 09, 2021
Available Online: Oct. 20,2021

Keywords:
Exoskeleton
Adaptive dynamic fast terminal sliding mode controller
Central pattern generation
Hopfield oscillator
Zero moment point stability theory

1. INTRODUCTION

Exoskeletons are used for augmentation and rehabilitation purposes [1]. A basic locomotor pattern of many walker robots is produced by Central Pattern Generator (CPG). Central Pattern Generator is a neural circuit that can produce various motion patterns, like walking, breathing, chewing, flying, and swimming [2]. If feedback signals are exerted, CPG can produce flexible motions in unknown environments[2].

A variety of oscillators are used for CPG modeling. Hopfield Oscillator is one of the most eminent oscillators [3]. This oscillator is developed by adding some terms to match the actual phase and amplitude of motion specifically for motion generation in the realm of walking robots [4]. In the CPG method, Fourier decomposition is the governing theory for the combination of several oscillators to learn a desired periodic signal with oscillatory input[5].

In this paper, reference trajectories are generated online by combining seven Hopfield oscillators which frequencies and amplitudes are adjustable according to the input signal. To achieve the maximum level of zero moment point criterion stability [6], at each time step reference trajectories of robot joints are modified based on error signal between the position of the desired and real zero moment points.

Due to the advantages of Sliding Mode Control (SMC), various sliding-based controllers have been proposed such as dynamic sliding mode control [7]. In this method, adding an additional dynamic to the sliding surface improves the closed-loop response and robustness.

2. PROBLEM STATEMENT

Reference trajectories of robot joints are generated online by combining seven Hopfield oscillators so that frequencies and amplitudes are adjustable according to the input signal. This approach results in stable rhythmic locomotion of the robot. In the next step, an Adaptive dynamic sliding mode control scheme with a fast terminal sliding manifold is applied to track the reference trajectories. To achieve the maximum level of Zero Moment Point (ZMP)-based stability at each time step, reference trajectories are modified based on the error signal between the position of the desired and real zero moment points.

To reach a harmonious motion between the robot and the user, in this paper a 7-DOF mechanism is chosen that its joints are placed on the user's hip, knee, and ankle joints. The dynamic model of the exoskeleton lower limb can be expressed as:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q}) + G(q) + \tau_d + J^T F_i \quad (1)$$

*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.

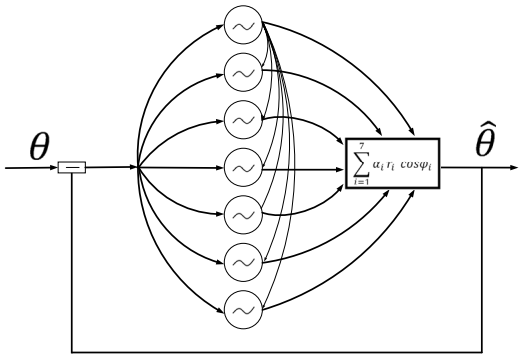


Fig. 1. The combination of the oscillators for each CPG

Where τ and τ_d represent actuator and disturbance torques, and M, C, and G are inertia, Coriolis and centrifugal, and gravity matrices, respectively. Also F_i and J are interaction force and Jacobian matrix, respectively.

3. DESIRED GAIT PATTERN GENERATION

T online determination of desired joint trajectories. seven modified Hopfield oscillators are combined such that the generated trajectories give the opportunity to adjust the amplitude and frequency of the motion according to the input signal. A modified Hopfield oscillator is defined as [8]:

$$\begin{aligned}
&\dot{r}_i = \rho\left(\sqrt{\mu} - r_i^2\right) r_i + \epsilon F(t)\cos\varphi_i \\
&\dot{\varphi}_0 = \omega_0 - \frac{\epsilon}{r_0} F(t) sin\varphi \\
&\dot{\varphi}_i = \omega_i - \frac{\epsilon}{r_i} F(t) sin\varphi + h, \forall i > 0 \\
&h = \left[Z_i \sin(R_i - \varphi_{i,\Delta} - \varphi_i) \right] \\
&\dot{\omega}_i = -\epsilon F(t) \sin\varphi_i \\
&\dot{\alpha}_i = \eta F(t) \cos\varphi_i . r_i \\
&\dot{\varphi}_{i,\Delta} = \varepsilon_i \sin\left(R_i - \varphi_{i,\Delta} - \varphi_i\right), \forall i > 0 \\
&R_i = \frac{\omega_i}{\omega_0}\varphi_0 \\
&F(t) = \theta - \hat{\theta} \\
&\hat{\theta} = \sum_{i=0}^{N} \alpha r cos\varphi
\end{aligned} \tag{2}$$

where, r and φ are radius and phase of the system, respectively. ρ shows the power of attraction of the limit cycle. It can be shown that $\sqrt{\mu}$ corresponds to the radius of this limit cycle. ω represents the frequency of the oscillation. ϵ, ε_i, and Z_i are constant parameters. The term h joins the output of all oscillators to the first one and φ_0 is the output phase of the first oscillator. The combination of the oscillators for each CPG is shown in Fig. 1.

4. ADAPTIVE DYNAMIC SLIDING MODE CONTROL ON THE BASIS OF FAST TERMINAL SLIDING MANIFOLD

An adaptive dynamic sliding mode control scheme with a fast terminal sliding manifold has been proposed in this section. Modified sliding manifold is defined as:

$$\begin{aligned}
&\upsilon = s + \lambda \int_0^t s(\tau)\, d\tau \\
&s_i = \dot{e}_i + \alpha e_i + \beta |e_i|\, \gamma\, sgn(e_i)
\end{aligned} \tag{3}$$

where, α, β, and γ are positive constants. e_i is tracking error of the i^{th} joint. λ is a positive constant. To extract the control law, the time derivative of the sliding manifold is equalized to zero.

$$\begin{aligned}
&\dot{\upsilon} = \dot{s} + s = \ddot{e} + (\gamma\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} \\
&+\lambda\alpha e + \lambda\beta|e|^{\gamma} sgn(e)
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
&u = M\ddot{q}_d + C\dot{q} + G + D - M(\gamma\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} \\
&+\lambda\alpha e + \lambda\beta|e|^{\gamma} sgn(e)) \\
&D = \tau_d + J^T F_i
\end{aligned} \tag{5}$$

In order to guard against uncertainties and disturbances, an adaptive control law is added to the law defined in Eq. (5), which results in,

$$\dot{\hat{\psi}} = \eta|\upsilon| \tag{6}$$

5. RESULTS AND DISCUSSION

In this paper, white noise with 20 percent amplitude of the control signal is applied to each joint, and 20% uncertainties in parameters are applied. To investigate the performance of the controller, ZMP and the desired trajectory of the upper limb joint for adaptive dynamic sliding mode control and sliding mode control are illustrated in Figs. 2 and 3, respectively.

As is shown in Figs. 9 and 10, the ZMP trajectory produced by the Adaptive Dynamic Sliding Mode Control is closer to the desired one despite small upper limb joint movement altitude.

6. CONCLUSION

In this paper, the performance of the proposed method has been compared with CPG based- SMC. The results show that the proposed scheme outperforms the others in tracking the desired joint trajectories, convergence rate, interacting forces between humans and the robot, control effort, motion stability based on ZMP criterion, as well as robustness against disturbances, uncertainties, and faults.

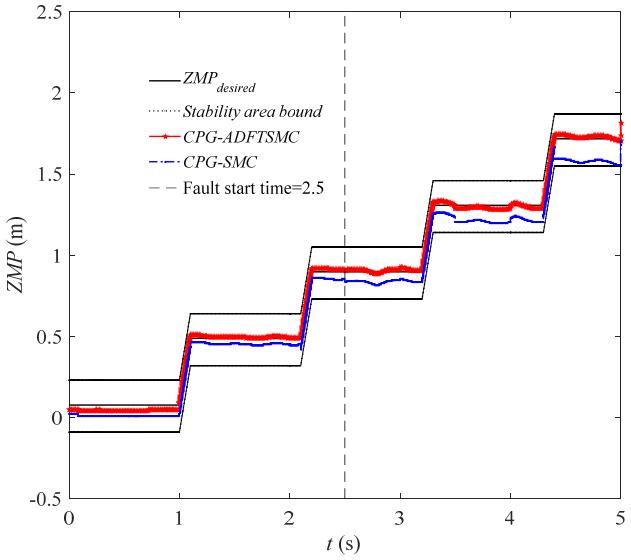


Fig. 2. ZMP position

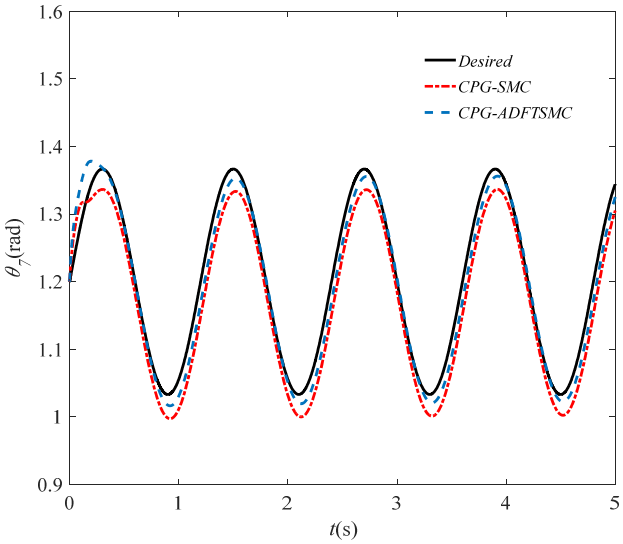


Fig. 3. The trajectory for the upper limb joint

REFERENCES

[1] R. Bogue, Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments, Industrial Robot: An International Journal, 36(5) (2009) 421-427.

[2] A. J. Ijspeert. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review, Neural Networks, 21(2008) 642–653.

[3] Q. D. Wu, C. J. Liu, J. Q. Zhang, Q. J. Chen, Survey of locomotion control of legged robots inspired by biological concept. Science in China Series F: Information Sciences, 52 (2009) 1715–1729.

[4] M. E. Abardeh, Unsymmetrical Path Planning for Biped Robot Passing through Obstacles, MS Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, (2012).

[5] L. Righetti, A. J. Ijspeert, Programmable central generators: an application to biped locomotion control. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, Florida - May 2006.

[6] J. Yang, J. Su, S. Li, X. Yu, High-order mismatched disturbance compensation for motion control systems via a continuous dynamic sliding-mode approach, IEEE Trans. Ind. Inf. 610 (2014) 604–614.

[7] M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Optimal adaptive super twisting sliding mode control base on zero momentum point stability criterion of a lower limb exoskeleton, Amir Kabir journal of mechanical engineering, 50 (4) (2020) 525-532(in Persian).

[8] Y. Farzaneh, A. Akbarzadeh, A. Akbari, New automated learning CPG for rhythmic patterns. Intelligent Service Robotics, 5(3) (2012) 169-177.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Robust and Adaptive Control of an Exoskeleton Robot For Tracking Modified Desired Trajectory Based on Zero Moment Point Stability Theory, Amirkabir J. Mech Eng., 53(12) (2022) 1455-1458.

DOI: 10.22060/mej.2021.19761.7106

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱۲، سال ۱۴۰۰، صفحات ۵۸۳۱ تا ۵۸۵۰
DOI: 10.22060/mej.2021.19761.7106

کنترل مقاوم و تطبیقی ربات اسکلت خارجی برای تعقیب مسیرهای مطلوب اصلاح شده بر اساس معیار پایداری نقطه گشتاور صفر

مجید مختاری، مصطفی تقی‌زاده*، محمود مزارع

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

خلاصه: ایجاد مسیرهای مرجع و توانایی تعقیب مسیرهای ایجاد شده در حضور اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها از مسائل مهم در بررسی عملکرد ربات اسکلت خارجی می‌باشد. یکی از روش‌های طراحی مسیر ربات‌های راه رونده الگوریتم تولید الگوی مرکزی می‌باشد. این الگوریتم به صورت چرخه حدی رفتار می‌کند و اغتشاشات وارده را به سرعت از سیستم حذف کرده و مسیرهای موزونی را ایجاد می‌کند. در این مقاله برای ایجاد مسیرهای مرجع هر یک ازمفاصل ربات از ترکیب هفت عدد نوسانگر هپفیلد اصلاح شده با قابلیت تغییر در مشخصه‌های فرکانس و دامنه راه رفتن استفاده شده است. اصلاح برخط مسیرهای مرجع مفاصل ربات به کمک سیگنال خطای بازخوردی بین محل نقطه گشتاور صفر مطلوب و نقطه گشتاور صفر ربات در هر لحظه انجام شده است. به منظور مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها با دامنه نامعلوم سیستم و دستیابی به حداکثر کارایی در تعقیب مسیرهای مرجع ربات، از کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی با قابلیت حذف پدیده چترینگ، همگرایی زمان محدود و افزایش مقاومت نسبت به کنترل کننده مد لغزشی معمولی استفاده شده است. همچنین با حرکت لینک کمر حداکثر پایداری حرکت ربات بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر ایجاد شده است. برای دستیابی به بهترین عملکرد، پارامترهای کنترل کننده، ضرایب نوسانگرها و اتصال بین آن‌ها بهینه شده‌اند. عملکرد روش ارائه شده با کنترل کننده مد لغزشی مقایسه شده است که نتایج برتری روش ارائه شده را نشان داده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۹
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

کلمات کلیدی:
ربات اسکلت خارجی
کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی
دینامیکی سریع ترمینالی
الگوریتم تولید الگوی مرکزی
نوسان‌سازهای هپفیلد
معیار پایداری نقطه گشتاور صفر

۱- مقدمه

ربات‌های اسکلت خارجی در دو دسته کلی ربات‌های توانبخشی و توان افزایی قرار می‌گیرند. چگونگی تعیین مسیرهای مرجع مفاصل ربات، هماهنگی حرکات ربات با حرکت انسان و نحوه تعامل بین انسان و ربات از مسائل مهم در بررسی ربات‌های اسکلت خارجی می‌باشد. همچنین توسعه استراتژی‌های کنترلی مناسب به منظور مقابله با اغتشاشات، دینامیک‌های مدل نشده و نامعینی‌های سیستم در این ربات‌ها همواره مدنظر بوده است [۱].

مطالعات اولیه در مورد ربات‌های اسکلت خارجی در آمریکا، ژاپن و اروپا انجام شده است [۲ و ۳]. در سال ۲۰۰۳ یک ربات اسکلت خارجی پایین تنه با استراتژی کنترل موقعیت مسیرهای از پیش تعیین شده و کنترل امپدانس با هدف افزایش راحتی کاربر طراحی شده است [۴ و ۵]. در یک نمونه عملی ربات بلیکس به منظور تقویت نیرو و استقامت کاربر نظامی با روش کنترل مبتنی بر مدل و با استراتژی کمکی افزایش حساسیت به نیروها و گشتاورهای خارجی طراحی و ساخته شده است [۶]. ربات اگزوهیکر با قابلیت حمل بارهای سنگین در مدت زمان طولانی و حرکت در سطوح شیب‌دار با روش کنترل فعال تعقیب مسیرهای مفاصل ربات طراحی شده است. ربات اگزوکلایمبر با استراتژی کنترلی مشابه با اگزوهیکر و ربات هالک با استراتژی کنترلی مشابه ربات بلیکس نیز در دانشگاه برکلی طراحی شده است [۷ و ۸].

الگوهای حرکتی پایه در بسیاری از سیستم‌های بیولوژیکی مثل تنفس، توسط الگوریتم الگوی مولد مرکزی[1] تولید می‌شوند. الگوی مولد مرکزی شبکه عصبی می‌باشد که می‌توانند الگوهای حرکتی

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

1 Central Pattern Generator (CPG)

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

متنوعی همچون راه رفتن، نفس کشیدن، جویدن، پرواز کردن و شنا کردن تولید کند [۹]. الگوی مولد مرکزی رفتار چرخه حدی از خود نشان می‌دهد. به این معنا که اغتشاشات موقتی به سرعت از سیستم حذف می‌شوند. مسیرهای‌تولید شده توسط این روش کاملاً هموار می‌باشند. همچنین به کمک استفاده از سیگنال‌های بازخوردی این امکان ایجاد می‌شود که الگوی مولد مرکزی بتوانند حرکت‌های انعطاف‌پذیر را در محیط‌های ناشناخته ایجاد کند [۹ و ۱۰].

مدل‌های متعددی از نوسان‌سازها در مدل سازی الگوی مولد مرکزی استفاده شده است. ماتسوکا برای اولین بار به یک الگوریتم الگوی مولد مرکزی دست یافت که تنها قادر به ایجاد خروجی‌های مثبت بود که عموماً برای استفاده در کارهای مهندسی با مشکل همراه بود [۱۱]. براساس مدل ارائه شده توسط ماتسوکا، کیمورا با در نظر گرفتن دو عدد الگوی مولد مرکزی که معرف فازهای حرکت عضله می‌باشند، حرکت عضله را برای به کارگیری در الگوریتم راه رفتن یک حیوان چهارپا مدل کرده است [۱۲]. او همچنین عملکرد نوسان‌ساز خود را با استفاده از سیگنال فیدبک از کنترل کننده بهبود داده است. کارهای مشابهی توسط بیلی برای شبیه‌سازی حرکت یک حشره و لیو برای به دست آوردن حرکات مناسب یک ربات راه رونده انجام شده است [۱۳ و ۱۴]. یکی از نوسان‌سازهای معروف نوسان‌ساز هپفیلد می‌باشد که توسط سانتوس و ماتوس ارائه شده است [۱۵]. استفاده از چند نوسان‌ساز هپفیلد و ایجاد کوپلینگ بین آنها باعث عملکرد مطلوب‌تر الگوریتم شده است [۱۶]. نوسان‌ساز هپفیلد با اضافه کردن ترم‌هایی به منظور تطبیق دادن فاز و دامنه حرکت واقعی و حرکت ربات جهت استفاده در ربات راه رونده توسعه یافته است [۱۷]. ویلسون- کوان نیز از جمله نوسان‌سازهای معروفی است که توسط لی و همکاران [۱۸] ارائه شده و برای ایجاد مسیرهای مطلوب برای راه رفتن استفاده شده است. اسیلاتور ون-در-پل نیز که توسط بی و همامی ارائه شده است به صورت کوپل شده در کنترل حرکت یک ربات راه رونده استفاده شده است [۱۹].

دو روش عمومی برای طراحی الگوی مولد مرکزی به‌منظور تولید یک الگوی موزون وجود دارد که تحت عنوان یادگیری نظارت شده و یادگیری غیر نظارت شده بیان می‌شوند. تکنیک‌های مرتبط با یادگیری نظارت نشده در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که سیگنال متناوبی که باید توسط الگوی مولد مرکزی تولید شود از قبل مشخص نباشد. معیارهای کارایی و بازدهی وجود دارند که مسیرهای مطلوب را ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال این معیار می‌تواند حرکت پایدار و یا حداقل‌سازی مصرف انرژی باشد، که باید ارضا شوند. در این روش استفاده از الگوریتم‌های تکاملی برای طراحی الگوی مولد مرکزی مرسوم است [۱۷ و ۱۹].

تکنیک‌های مرتبط با یادگیری نظارت شده در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که سیگنال متناوبی که باید توسط الگوی مولد مرکزی تولید شود، از قبل مشخص باشد. در این روش با استفاده از سیگنال متناوب مطلوب یک تابع خطای صریح تعریف شده و مینیمم می‌شود. از روش‌های مهم مورد استفاده در یادگیری نظارت شده روش الگوی مولد مرکزی برنامه‌پذیر می‌باشد. روش الگوی مولد مرکزی برنامه‌پذیر از تعدادی نوسانگر برای یادگیری سیگنال متناوب مطلوب استفاده می‌کنند. تئوری حاکم بر ترکیب چند نوسانگر برای یادگیری یک سیگنال مطلوب ورودی نوسانی دلخواه با عنوان تجزیه فوریه معروف است[۲۰].

به منظور بهینه‌سازی پارامترهای الگوی مولد مرکزی از الگوریتم‌های تکاملی استفاده می‌شود [۲۱]. این پارامترها شامل پارامترهای هریک از نوسانگرها و اتصال بین آن‌هاست. سیگنال‌های تولید شده توسط الگوی مولد مرکزی به طراحی ورودی‌های مرجع که متناسب با حرکات انسان است کمک می‌کنند. این سیگنال‌ها میزان زوایای مفصل‌ها را در ربات اسکلت خارجی بدون در نظر گرفتن معادلات دینامیکی حرکت ربات مشخص می‌کند [۱۹].

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 کنترل کننده در مقابله با اغتشاشات وارد شده از محیط و انسان به ربات و همچنین دینامیک‌های مدل نشده و عدم قطعیت‌های سیستم دارد. کنترل کننده‌هایی مانند کنترل کننده خطی‌سازی پسخوراند، کنترل کننده مقاوم، کنترل کننده تطبیقی، کنترل کننده مقاوم تطبیقی و کنترل کننده مد لغزشی برای مقابله با اغتشاشات خارجی و همچنین عدم قطعیت‌های سیستم ارائه شده‌اند. این کنترل کننده‌ها اکثراً پایداری نسبی را تضمین می‌کنند [۲۲]. 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 می‌باشد که

گاهی اوقات این موضوع عملی نیست. امروزه روش‌های کنترلی که پایداری حالت‌های سیستم‌های غیرخطی را به نقاط تعادل در زمان محدود تضمین می‌کنند، توسعه یافته‌اند. مانند رویکرد زمان محدود پایداری لیاپانوف [۲۳]، روش مد لغزشی ترمینالی [۲۴] و روش مد لغزشی فراپیچشی [۲۵].

به دلیل مزایای کنترل مد لغزشی در برابر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم، کنترل‌کننده‌های مختلف بر مبنای آن توسعه یافته‌اند [۲۶]. پدیده چترینگ که ناشی از تابع ناپیوسته علامت در کنترل کننده مد لغزشی می‌باشد، دینامیک فرکانس بالای نامطلوب ناخواسته‌ای را تحریک می‌کند و به محرک آسیب می‌رساند. بنابراین روش‌هایی برای حذف پدیده چترینگ مانند روش لایه مرزی [۲۷]، کنترل مرتبه بالای مد لغزشی [۲۸] و روش کنترل مد لغزشی دینامیکی[1] پیشنهاد شده است [۲۹ و ۳۰].

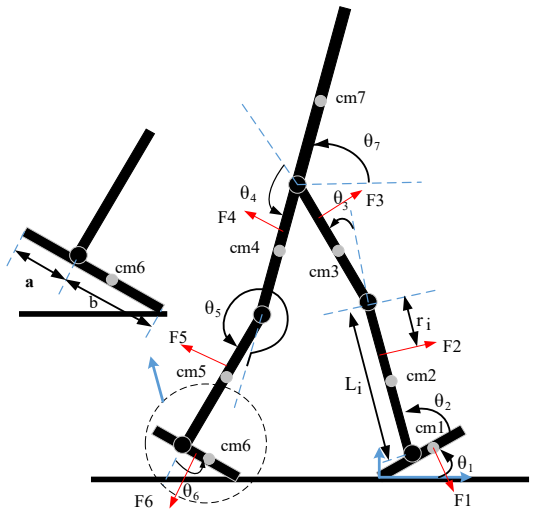
در روش کنترل مد لغزشی دینامیکی با افزودن یک دینامیک اضافی در سطح لغزش نه تنها پدیده چترینگ کاهش می‌یابد بلکه دینامیک حالت لغزشی و پاسخ حلقه بسته بهبود خواهد یافت و کنترل مد لغزشی دینامیکی به شدت مقاوم خواهد شد. از این روش در کنترل یک اتومبیل برقی به منظور کنترل موقعیت استفاده شده است که نتایج، برتری روش پیشنهادی در کاهش پدیده چترینگ و افزایش دقت سیستم نسبت به کنترل کننده مد لغزشی معمولی را نشان می‌دهد [۳۰]. همچنین برای کنترل یک موتور سنکرون مغناطیسی از کنترل کننده مد لغزشی دینامیکی تطبیقی استفاده شده است [۳۱]. در این مقاله براساس کنترل کننده‌های مد لغزشی دینامیکی و کنترل مد لغزشی ترمینالی سریع، کنترل کننده مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی با قابلیت حذف پدیده چترینگ، همگرایی زمان محدود و مقاومت بالا در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم ارائه شده است. یکی از راه حل‌های مطرح در دستیابی به همگرایی زمان محدود، استفاده از روش کنترل مد لغزشی ترمینالی سریع می‌باشد [۳۲]. از آنجا که تعیین محدوده و دامنه اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم عملاً غیر ممکن است با استفاده از یک قانون تطبیق مناسب با طراحی کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی ترمینالی سریع[2] قابلیت مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم به کنترل کننده افزوده شده است.

حفظ تعادل از مهم‌ترین مشخصه‌های ربات‌های اسکلت خارجی در هنگام راه رفتن می‌باشد. معیارهایی مانند پایداری مرکز ثقل[3] [۳۳]، معیار پایداری نشان‌گر چرخش پا[4] [۳۴]، معیارهای پایداری بر مبنای انرژی [۳۵] و معیار پایداری ارتفاع - گشتاور[5] [۳۶] برای بررسی پایداری ربات‌های راه رونده ارائه شده است. در این میان معیار پایداری نقطه گشتاور صفر[6] برای بررسی پایداری در ربات‌هایی که مفاصل آن فعال هستند و در هر لحظه ربات حداقل روی یک پا می‌ایستد، مورد استفاده قرار گرفته است [۳۷].

در این مقاله، در ابتدا معادلات دینامیکی ربات به کمک روش لاگرانژ استخراج شده است. نیروی تبادلی بین ربات و کاربر در هر لحظه محاسبه و به معادلات ربات اضافه شده است. سپس مسیرهای مرجع مفاصل ربات به صورت برخط و براساس مسیرهای مطلوب ارائه شده در مرجع]۳۸[و با استفاده از ترکیب هفت عدد نوسان‌سازهپفیلد متصل شده با قابلیت تغییر در دامنه و فرکانس حرکت براساس سیگنال ورودی تولید شده‌اند. روش ارائه شده در تعیین مسیرهای ربات قابلیت ایجاد حرکات موزون و پایدار برای ربات را دارا می‌باشد. حرکات مسیرهای مطلوب حاصل از الگوی مولد مرکزی برای هر مفصل توسط اتصال مناسب به مسیرهای مطلوب مفاصل دیگرمرتبط شده است. در ادامه کنترل ربات، با استفاده از روش کنترل مد لغزشی دینامیکی مبتنی بر سطح لغزش سریع ترمینالی برای تعقیب مسیرهای مطلوب حاصل از روش ارائه شده، انجام شده است. به منظور دستیابی به حداکثر پایداری بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر، ابتدا مسیر مطلوب مفصل بالا تنه ربات برای دستیابی به حداکثر پایداری استخراج شده و سپس مسیر مطلوب آن بر اساس سیگنال خطای بین محل نقطه گشتاور صفر مطلوب و نقطه گشتاور صفر ربات در هر لحظه اصلاح شده است. با اصلاح مسیر مفصل کمر، مسیر سایر مفاصل ربات بدلیل اتصال الگوریتم الگوی مولد مرکزی مفصل کمر با الگوی مولد مرکزی سایر مفاصل ربات، تغییر خواهد کرد. همچنین به منظور دستیابی به حداکثر پایداری و کمترین خطا در تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل، به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی پارامترهای کنترل کننده و پارامترهای الگوی مولد مرکزی

1 Dynamic Sliding Mode (DSM)
2 Adaptive Dynamic Fast Terminal Sliding Mode control (ADFTSMC)

3 Center of mass
4 Foot-rotation indicator
5 Moment-Height stability
6 Zero Moment Point (ZMP)



شکل ۱. شماتیک ربات اسکلت خارجی پایین تنه هفت درجه آزادی [۳۶]

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

بهینه شده است [۳۹]. عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده مد لغزشی ترکیبی با الگوی مولد مرکزی مقایسه شده است. نوآوری این مقاله عبارتست از: ۱- طراحی کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی مبتنی بر سطح لغزش سریع ترمینالی ۲- طراحی الگوریتم الگوی مولد مرکزی تطبیق‌پذیر برای ربات اسکلت خارجی هفت درجه آزادی ۳-تغییر برخط مسیرهای مطلوب مفاصل ربات براساس سیگنال خطای بین محل نقطه گشتاور صفر مطلوب و نقطه گشتاور صفر ربات در هر لحظه ۴- بهینه‌سازی همزمان پارامترهای کنترل کننده و پارامترهای الگوی مولد مرکزی به منظور دستیابی همزمان به حداکثر پایداری و کمترین خطا در تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل.

ساختار این مقاله بدین ترتیب است: در قسمت ۲ ربات اسکلت خارجی مورد نظر معرفی شده، معادلات دینامیکی آن با استفاده از روش لاگرانژ استخراج شده و مسیرهای مطلوب مفاصل ربات به صورت برخط تولید 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 به منظور برقراری پایداری تعیین شده است. در قسمت ۵ شبیه‌سازی‌ها انجام شده و کنترل کننده‌های طراحی شده بر روی مدل استخراجی اعمال شده است. در آخر نتایج حاصل از پژوهش در بخش ۶ بیان شده است.

۲- معرفی و مدل‌سازی مکانیزم پیشنهادی

در طراحی ربات‌های اسکلت خارجی قرارگیری مفاصل ربات بر روی مفاصل کاربر بسیاری از مشکلات طراحی را حل می‌کند. این رویکرد در طراحی را می‌توان در سری ربات‌های هال مشاهده کرد [۴۱ و ۴۲]. در این مقاله، به منظور دستیابی به حرکات هماهنگ ربات و کاربر از یک مدل ۷ درجه آزادی که دارای مفاصلی منطبق بر ران، زانو و قوزک انسان می‌باشد، استفاده شده است. در شکل ۱ شماتیک ربات اسکلت خارجی مورد مطالعه نشان داده شده است. نیروی تبادلی بین انسان و ربات در هر لحظه محاسبه شده و به مدل ربات اعمال شده است. به منظور در نظر گرفتن تأثیر نیروی وارده به هر لینک بر لینک‌های دیگر از یک ژاکوبین مناسب استفاده شده است.

در شکل ۱، θ_i ،L_i ،F_i ،r_i و cm_iبرای i از ۱ تا ۷ به ترتیب زوایای لینک‌های ربات، طول لینک‌های ربات، نیروی تبادلی بین انسان و ربات در محل اتصال لینک‌های ربات به کاربر، فاصله مفصل ربات تا محل اتصال لینک‌های ربات به کاربر و مرکز جرم لینک‌های ربات می‌باشند. a و bنیز ابعاد کف پای ربات می‌باشند. در ادامه از روش لاگرانژ با فرم کلی رابطه (۱) برای استخراج روابط دینامیکی حاکم بر ربات استفاده شده است.

$$\tau_i = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i}\right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} + \frac{\partial U}{\partial \theta_i} \qquad (۱)$$

که در آن θ_i متغیر تعمیم‌یافته، Kانرژی جنبشی لینک‌های ربات، U انرژی پتانسیل لینک‌های ربات و τ_i گشتاور وارد شده به مفاصل می‌باشند. K و U از رابطه (۲) به دست می‌آیند.

$$\begin{aligned} k &= \sum_{i=1}^{7} k_i \\ U &= \sum_{i=1}^{7} u_i \\ k_i &= 0.5\, m_i\, vc_i^2 + 0.5\, I_i\, \omega_i^2 \\ u_i &= m_i\, g\, yc_i \end{aligned} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) m_iجرم هر یک از لینک‌ها، I_i ممان اینرسی هر یک از لینک‌ها حول مرکز جرم، vc_i سرعت مرکزجرم هر یک از لینک‌ها، yc_i ارتفاع مرکزجرم هر یک از لینک‌ها و ω_i سرعت زاویه‌ای هر یک از لینک‌ها می‌باشند. در نهایت معادلات دینامیکی ربات به‌صورت رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q}) + G(q) + \tau_d + J^T F_i \qquad (۳)$$

که در آن τ گشتاور مربوط به عملگرها، $M(\theta)$ ماتریس ممان اینرسی، $C(\theta,\theta')$ ماتریس اثرات گریز از مرکز، $G(\theta)$ بردار نیروهای گرانشی و τ_d گشتاور اغتشاش می‌باشند. در رابطه (۳)، J ماتریس ژاکوبین است که از رابطه (۴) محاسبه شده است.

$$J = \frac{\delta v}{\delta \dot{q}} = \frac{\delta r}{\delta q} \qquad (۴)$$

در این مقاله از رابطه (۵) برای محاسبه نیروی تعاملی بین انسان و ربات استفاده شده است [۴۲].

$$F = k_{\mathrm{pf}}(\theta_{desired} - \theta)d \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، F نیروی تبادلی بین انسان و ربات برای هر مفصل، k_{pf} ماتریس ضریب سختی و d فاصله مفاصل ربات از محل اثر نیروی تبادلی می‌باشد. مقدار k_{pf} برابر با ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شده‌است [۴۲].

۲-۱- طراحی مسیر مطلوب قدم‌زنی

در این مقاله مسیرهای مرجع مفاصل ربات به صورت برخط و براساس مسیرهای مطلوب ارائه شده در مرجع [۳۸]. و با استفاده از ترکیب هفت عدد نوسان‌ساز هپفیلد کوپل شده با قابلیت تغییر در دامنه و فرکانس حرکت براساس سیگنال ورودی تولید شده‌اند. داده‌های لازم برای راه رفتن انسان با بهره‌مندی از آنالیز کلینیکی گیت[1] قابل دسترسی است. براساس نتایج این آنالیز، راه رفتن انسان در دو فاز تک و دو تکیه گاهی صورت می‌پذیرد که سهم فاز تک تکیه گاهی حدود ۹۰ درصد و سهم فاز دو تکیه گاهی حدود ۱۰ درصد در هر گام حرکت می‌باشد [۴۳]. در تعیین مسیرهای مطلوب ربات، این نسبت در نظر گرفته شده است [۳۸]. یک نوسانگر ساده هپفیلد در دستگاه مختصات قطبی توسط معادله دیفرانسیل (۶) تعریف می‌شود [۱۵]..

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \rho\left(\mu - r^2\right)r \\ \dot{\varphi} &= \omega \end{aligned} \qquad (۶)$$

در رابطه (۶) rشعاع و φ فاز خروجی دو بعدی سیستم در هر لحظه است. پارامتر ρ قدرت جذب چرخه حدی است و تعیین کننده سرعت بازگشت نوسانگر به چرخه، بعد از یک اغتشاش تعریف می‌شود. می‌توان نشان داد که $\sqrt{\mu}$ متناظر با شعاع این چرخه حدی نسبت به چارچوب مختصات سیستم است. ω فرکانس نوسان است. به منظور تغییر مشخصات فرکانس و دامنه راه رفتن ربات در اثر ورود اغتشاشات و ناهمواری‌های موجود در مسیر راه رفتن و ایجاد شرایط پایدار راه رفتن، رابطه (۶) به صورت رابطه (۷) بازنویسی شده است [۴۴].

$$\begin{aligned} \dot{r}_i &= \rho\left(\mu - r_i^2\right)r_i + \eth F(t)\cos\varphi_i \\ \dot{\varphi}_0 &= \omega_0 - \frac{\eth}{r_0}F(t)\sin\varphi \\ \dot{\varphi}_i &= \omega_i - \frac{\eth}{r_i}F(t)\sin\varphi + h, \forall i > 0 \\ h &= \left[z_i \sin(R_i - \varphi_{i,\Delta} - \varphi_i)\right] \\ \dot{\omega}_i &= -\eth F(t)\sin\varphi_i \\ \dot{\alpha}_i &= \eta F(t)\cos\varphi_i . r_i \\ \dot{\varphi}_{i,\Delta} &= \varepsilon_i \sin\left(R_i - \varphi_{i,\Delta} - \varphi_i\right), \forall i > 0 \\ R_i &= \frac{\omega_i}{\omega_0}\varphi_i \\ F(t) &= \theta - \hat{\theta} \\ \hat{\theta} &= \sum_{i=0}^{N} \alpha \arccos\varphi \end{aligned} \qquad (۷)$$

1 Clinical Gait Analysis (CGA)

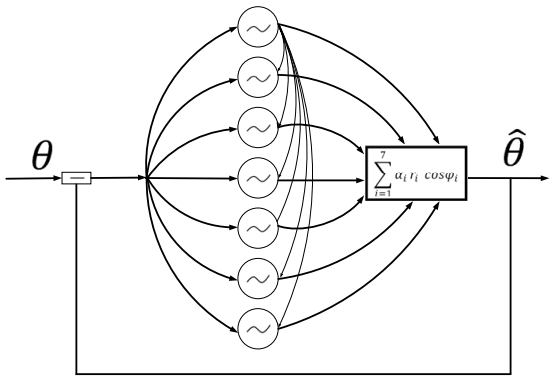
در رابطه (۷) عبارت h خروجی فاز نوسان‌سازهای ۲ تا ۷ را به نوسان‌ساز اول متصل می‌کند. φ_i فاز خروجی نوسان‌ساز اول و φ. فاز خروجی نوسان‌سازهای ۲ تا ۷ می‌باشد. η به عنوان یک متغیر یادگیری عمل می‌کند که از نوسان α جلوگیری می‌کند. η باید به نحوی انتخاب شود که شرط $0<\eta<1$ را در طی فرآیند یادگیری ارضا نماید. τ_i، $\dot{\theta}$ و ε_i نیز ثابت هستند. $\hat{\theta}$ مسیر استخراج شده از الگوی مولد مرکزی و θ مسیر هر مفصل می‌باشد. برای ایجاد اتصال بین الگوی مولد مرکزی هر مفصل با مفاصل دیگر $\dot{\varphi}$. به صورت رابطه (۸) بازنویسی شده است.

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}_0 &= \omega_0 - \frac{\dot{\theta}}{r_0}F(t)\sin\varphi_0 + \left[z_{ext}\sin(R_{ext}-\varphi_\Delta-\varphi_0)\right]\\ \dot{\varphi}_{i,\Delta} &= \varepsilon_{ext}\sin\left(R_{ext}-\varphi_\Delta-\varphi_0\right)\\ R_{ext} &= \frac{\omega_0}{\omega_0^k}\varphi_0^k\end{aligned} \quad (۸)$$

در رابطه (۸) ω. و ω^k. پارامترهای الگوی مولد مرکزی متصل شده به الگوی مولد مرکزی مورد نظر هستند. z_{ext} و ε_{ext} نیز ضرائب ثابت هستند. تمام ضرائب به جز z_{ext} و ε_{ext} و z_i که پارامترهای اتصال هستند توسط روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونی و با کمینه‌سازی تابع هزینه رابطه (۹) برای هر مفصل حاصل شده است.

$$Cost\ function_1 = \int_0^T (\theta_{des}-\hat{\theta})^2 dt \quad (۹)$$

در رابطه (۹) θ_{des} مسیر مطلوب مفاصل ربات است و $\hat{\theta}$ مسیر استخراج شده از الگوی مولد مرکزی می‌باشد. همچنین T مدت زمان در نظر گرفته شده برای راه رفتن ربات است که برابر با ۵ ثانیه می‌باشد. در شکل ۲ ترکیب نوسان‌سازها برای یک الگوی مولد مرکزی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳ ارتباط بین الگوی مولد مرکزی هفت مفصل ربات نشان داده شده است.



شکل ۲. ترکیب نوسانگرها برای یک الگوی مولد مرکزی

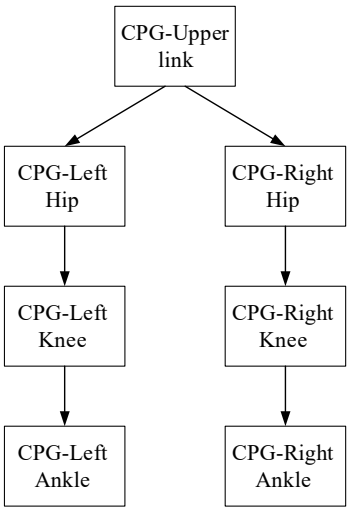
Fig. 2. Combining the oscillators of each joint

۳- کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی مبتنی بر سطح لغزش سریع ترمینالی

در این مقاله برای افزایش مقاومت کنترل کننده مدلغزشی، همگرایی زمان محدود به مقادیر مطلوب و همچنین حذف پدیده چترینگ از کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی مبتنی بر سطح لغزش سریع ترمینالی استفاده شده است. برای اطمینان از همگرایی زمان محدود به مقادیر مطلوب مفاصل سطح لغزش رابطه (۱۰) به عنوان سطح لغزش ترمینالی سریع در نظر گرفته شده است [۳۲].

$$s_i = \dot{e}_i + \alpha e_i + \beta |e_i|^{\gamma} sgn(e_i) \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰) α، β و γ ثابت و مثبت هستند. e_i خطای تعقیب مسیرهای مطلوب ربات می‌باشد. به منظور اثبات همگرایی زمان محدود تابع لیاپانوف به صورت رابطه (۱۱) تعریف شده است.



شکل ۳. ارتباط بین نوسانگرهای مفاصل

Fig. 3. Connection between joint oscillators

$$V_s(t)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}e_i^2(t) \quad \forall t\geq t_r ,V_s(t)\geq 0 \tag{۱۱}$$

که در آن t_r زمان رسیدن به سطح لغزش می‌باشد. با مشتق گیری از تابع لیاپانوف داریم:

$$\dot{V_s}(t)=\sum_{i=1}^{n}e_i\dot{e}_i \tag{۱۲}$$

در همگرایی زمان محدود تضمین s_i صفر خواهد شد. بنابراین خواهیم داشت [۳۲]:

$$s_i=0\Rightarrow \dot{e}_i=-\alpha e_i-\beta|e_i|^{\gamma}sgn(e_i) \tag{۱۳}$$

با جایگزاری رابطه (۱۳) در رابطه (۱۲)، رابطه (۱۴) حاصل شده است.

$$\begin{aligned}
&\dot{V_s}(t)=\Sigma_{i=1}^{n}e_i\,(-\alpha e_i-\beta|e_i|^{\gamma}\,\mathrm{sgn}(e_i))\\
&\dot{V_s}(t)\leq -\alpha\Sigma_{i=1}^{n}e_i^2-\beta\Sigma_{i=1}^{n}|e_i|^{\gamma+1})\\
&\dot{V_s}(t)\leq -\alpha\Sigma_{i=1}^{n}e_i^2-\beta(\Sigma_{i=1}^{n}e_i^2)^{\frac{\gamma+1}{2}}\\
&\dot{V_s}(t)\leq -2\alpha V_s-2^{\frac{\gamma+1}{2}}\beta V_s^{\frac{\gamma+1}{2}}
\end{aligned} \tag{۱۴}$$

با توجه به رابطه (۱۴) مشتق تابع لیاپونوف منفی شده و همگرایی زمان محدود حاصل شده است. به منظور بهبود بیشتر عملکرد و دقت سیستم حلقه بسته، یک سطح لغزشی دینامیکی با اضافه کردن یک متغیر دینامیکی به سطح لغزش رابطه (۱۰) در نظر گرفته شده است. در این حالت نه تنها پدیده چترینگ کاهش می‌یابد، بلکه دقت ردیابی نیز افزایش می‌یابد [۴۵].

$$\upsilon=s+\lambda\int_0^t s(\tau)\,d\tau \tag{۱۵}$$

در رابطه (۱۵) λ یک ثابت مثبت است. به منظور دستیابی به قانون کنترلی مشتق سطح لغزش برابر با صفر قرار داده شده است. رابطه (۱۶)، مشتق سطح لغزش را نشان می‌دهد.

$$\dot{\upsilon}=\dot{s}+s=\ddot{e}+(\gamma\beta|e|^{\gamma-1}+\lambda+\alpha)\dot{e}+\lambda\alpha e+\lambda\beta|e|^{\gamma}sgn(e) \tag{۱۶}$$

همانطور که از رابطه (۱۶) مشخص است، در ترم $\gamma\beta|e|^{\gamma-1}\dot{e}$ توان $\gamma-1$ می‌تواند منفی باشد. در صورتی که $\dot{e}\neq 0$ و $e=0$ باشد و $\gamma-1$ منفی باشد تکینگی اتفاق خواهد افتاد. با استفاده از رابطه (۱۳) داریم.

$$\begin{aligned}
&\gamma\beta|e|^{\gamma-1}\dot{e}=\gamma\beta|e|^{\gamma-1}(-\alpha e-\beta|e|^{\gamma}sgn(e))\\
&\gamma\beta|e|^{\gamma-1}\dot{e}=-\alpha\gamma\beta|e|^{\gamma}-\beta|e|^{2\gamma-1}sgn(e)
\end{aligned} \tag{۱۷}$$

در رابطه (۱۷) در صورتی که $0<\gamma<\frac{1}{2}$ باشد تکینگی وجود نخواهد داشت. در ادامه قانون کنترل با برابر صفر قرار دادن مشتق سطح لغزش υ، حاصل شده است.

$$\begin{aligned}
&u=M\ddot{q}_d+C\dot{q}+G+D-M(\gamma\beta|e|^{\gamma-1}+\lambda+\alpha)\dot{e}+\lambda\alpha e+\lambda\beta|e|^{\gamma}sgn(e))\\
&D=\tau_d+J^T F_i
\end{aligned} \tag{۱۸}$$

به منظور مقابله با عدم قطعیت‌ها و نامعینی‌های سیستم، یک قانون تطبیقی به قانون کنترلی رابطه (۱۸) اضافه شده و قانون کنترلی مطابق رابطه (۱۹) بازنویسی شده است.

$$\begin{aligned}
&u_A=M\ddot{q}_d+C\dot{q}+G+D-M(\gamma\beta|e|^{\gamma-1}+\\
&\lambda+\alpha)\dot{e}+\lambda\alpha e+\lambda\beta|e|^{\gamma}sgn(e))\\
&-M(\hat{\psi}\,\mathrm{sgn}(\upsilon))+k\upsilon\\
&\dot{\hat{\psi}}=\eta|\upsilon|
\end{aligned} \tag{۱۹}$$

در رابطه (۱۹) k و η ثوابت مثبت هستند. به منظور اثبات پایداری تابع لیاپانوف به صورت رابطه (۲۰) در نظر گرفته شده است.

$$V=\frac{\upsilon^2}{2}+\eta^{-1}\frac{\tilde{\psi}^2}{2} \tag{۲۰}$$

با مشتق گیری از سطح لغزش داریم:

$$\dot{V} = \upsilon\dot{\upsilon} + \eta^{-1}\hat{\psi}\dot{\hat{\psi}} \quad (۲۱)$$

با جایگزاری رابطه (۱۶) در رابطه (۲۱)، رابطه (۲۲) حاصل شده است.

$$\dot{V} = \upsilon(\ddot{e} + (\gamma\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda\alpha e + \lambda\beta|e|^{\gamma} sgn(e)) + \eta^{-1}\hat{\psi}\dot{\hat{\psi}} \quad (۲۲)$$

با جایگزاری رابطه (۱۹) در رابطه (۲۲) و ساده سازی، رابطه (۲۳) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\upsilon\hat{\psi}\,\mathrm{sgn}(\upsilon) - k\upsilon^2 - M^{-1}\upsilon D + \eta^{-1}\hat{\psi}\dot{\hat{\psi}} \\ \dot{V} &\le -\hat{\psi}|\upsilon| - k\upsilon^2 - M^{-1}|\upsilon|D + \eta^{-1}\hat{\psi}\eta|\upsilon| \\ \dot{V} &\le -k\upsilon^2 - M^{-1}|\upsilon|D \end{aligned} \quad (۲۳)$$

مطابق با رابطه (۲۳)، مشتق تابع لیاپانوف با شرط (۲۴) منفی شده و پایداری روش کنترلی اثبات می‌شود.

$$k \ge M^{-1}D\frac{|\upsilon|}{\upsilon^2} \quad (۲۴)$$

۴- معیار پایداری نقطه گشتاور صفر

نقطه گشتاور صفر، نقطه‌ای بر روی سطح تماس پای ربات و زمین است که در آنجا برآیند تمام نیروهای وارد بر ربات را می‌توان بایک نیروی تک جایگزین کرد [۳۳ و ۴۶] شرط پایداری ربات قرار گرفتن نقطه گشتاور صفر در درون محدوده تعادل ربات است. محدوده تعادل در فاز تک تکیه گاهی شامل یک کف پای ربات و در فاز دو تکیه گاهی چند ضلعی بسته حاصل از دو پاست. روابط مربوط به نقطه گشتاور صفر به صورت رابطه (۲۵) می‌باشد[۴۸].

$$\begin{aligned} x_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)x_i - \sum_{i=1}^{n} m_i x_i'' z_i - \sum_{i=1}^{n} I_{iy}\theta_{iy}''}{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)} \\ y_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)y_i - \sum_{i=1}^{n} m_i y_i'' z_i - \sum_{i=1}^{n} I_{ix}\theta_{ix}''}{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)} \end{aligned} \quad (۲۵)$$

در رابطه (۲۵)، θ_{ix}'' و θ_{iy}'' به ترتیب شتاب زاویه‌ای لینک‌های ربات در راستای افقی و عمودی می‌باشد. در تعیین مسیرهای مطلوب مفاصل پایین تنه ربات، پایداری ربات در نظر گرفته نشده است. در این مقاله از حرکت بالاتنه ربات برای دستیابی به حداکثر پایداری استفاده شده است. بنابراین مسیر مطلوب مسیر بالاتنه ربات به گونه‌ای تعیین می‌شوند که در هر لحظه ربات در حداکثر پایداری قرار گیرد. 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 که در ادامه ارائه شده است، بهینه می‌شوند. رابطه (۲۶) چند نقطه معلوم از یک بازه حرکتی را برای مفصل کمر بیان می‌کند.

$$\theta_7 = \begin{cases} \frac{\delta}{2} - \delta & t = 0 \\ q & t = 0.5Ts \\ \frac{\delta}{2} - \delta & t = Ts \\ p & t = Ts + Td \end{cases} \quad (۲۶)$$

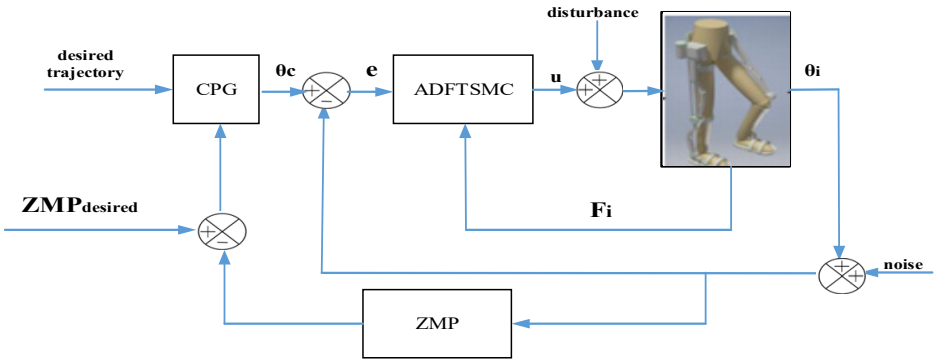
در رابطه (۲۶) Ts مدت زمان فاز تک تکیه گاهی و Td مدت زمان فاز دو تکیه گاهی حرکت ربات می‌باشد. δ، q و p نیز پارامترهای ثابت می‌باشند. برای داشتن مسیری هموار در مفصل کمر، از رابطه (۲۷) استفاده شده است.

$$\begin{aligned} \theta_7'(0) &= \theta_7'(Ts + Td) \\ \theta_7''(0) &= \theta_7''(Ts + Td) \end{aligned} \quad (۲۷)$$

در نهایت ضرائب معادلات مسیربر اساس مقادیر δ ، q و p استخراج می‌شوند که با تغییر مقادیر δ، q و p در طی فرایند بهینه سازی مقادیر بهینه ضرائب معادلات مسیر کمر حاصل می‌شود. تابع هدف به صورت رابطه (۲۸) در نظر گرفته شده است.

$$Cost\ function_2 = \int_0^T (ZMP - ZMP_{desird})\,dt \quad (۲۸)$$

در رابطه (۲۸)، T برابر با ۵ ثانیه می‌باشد که مدت زمان راه رفتن است. ZMP_{desird} نقطه ممان صفر مطلوب در فاز تک و دو تکیه گاهی است که بر اساس بیشینه مقدار پایداری ربات در هر فاز تعریف شده



شکل ۴. بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی

Fig. 4. The block diagram of the proposed control scheme

است. میزان حاشیه پایداری در روش نقطه گشتاور صفر براساس محل قرارگیری نقطه گشتاور صفر در محدوده تکیه گاهی ربات تعیین می‌شود. قرار گرفتن محل نقطه گشتاور صفر در مرکزیت نواحی تکیه گاهی ربات حداکثر پایداری ربات را ایجاد خواهد کرد. بنابراین مرکز این نواحی به عنوان محل ZMP_{desird} ربات در نظر گرفته شده است. همچنین محدوده مجاز حرکت مفصل بالا تنه ۷۵ تا ۱۱۵ درجه درنظر گرفته شده است. پس از تعیین مسیر مطلوب کمر، الگوی مولد مرکزی مربوط به آن مطابق با سایر مفاصل ربات ایجاد شده است. سیگنال بازخوردی برای اصلاح الگوی مولد مرکزی مفصل کمر خطای بین محل نقطه گشتاور صفر مطلوب و نقطه گشتاور صفر ربات در هر لحظه می‌باشد. با توجه به ارتباط بین الگوی مولد مرکزی مفصل کمر با الگوی مولد مرکزی سایر مفاصل سیگنال خطای مربوط به نقطه گشتاور صفر علاوه بر مفصل کمر سایر مفاصل ربات را تغییر خواهد داد. در شکل ۴ بلوک دیاگرام کنترلی ارائه شده است.

در شکل ۴، F_i نیروی حاصل از اثر تداخل بین کاربر و ربات می‌باشد، $ZMP_{desired}$ نقطه گشتاور صفر مطلوب، e_c خطای بین مسیرهای تولید شده توسط الگوی مولد مرکزی و مسیرهای تولید شده توسط ربات و θ_c مسیرهای تولید شده توسط الگوی مولد مرکزی می‌باشد. در نهایت پارامترهای کنترل کننده و پارامتر اتصال داخلی و خارجی نوسان‌سازهای الگوی مولد مرکزی به منظور دستیابی به حداکثر پایداری و حداقل خطا در تعقیب مفاصل ربات توسط الگوریتم تکاملی جستجوی هارمونی براساس تابع هزینه رابطه (۲۹) بهینه شده است. در رابطه (۲۹) T مدت زمان راه رفتن ربات برابر با ۵ ثانیه است.

$$Cost\ function_3 = \int_0^T [(\theta_{desired} - \theta)^2 + (ZMP_{desired} - ZMP)^2]dt \quad (۲۹)$$

۵-شبیه‌سازی

در این مقاله مسیرهای مرجع مفاصل ربات توسط الگوی مولد مرکزی استخراج شده، سپس معادلات دینامیکی ربات شبیه‌سازی شده و با استفاده از روش کنترل تطبیقی مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی، مسیرهای مرجع مفاصل ردیابی شده‌اند. همچنین به کمک حرکت مفصل بالا تنه ربات پایداری بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر در هر لحظه تأمین شده است. بهینه‌سازی همزمان پارامترهای کنترل کننده و پارامترهای الگوی مولد مرکزی به منظور دستیابی به حداکثر پایداری و کمترین خطای ردیابی توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی انجام شده است. به منظور نشان دادن مقاوم بودن کنترل کننده‌ها در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم، اغتشاشاتی با دامنه‌ای معادل ۲۰ درصد ماکزیمم سیگنال کنترلی هر یک از مفاصل و با فرکانس ۳ هرتز و همچنین عدم قطعیت‌هایی به‌صورت ۲۰ درصد مقدار نامی هر یک از پارامترها در نظر گرفته شده است. همچنین عیب عملگرها در شبیه‌سازی به صورت رابطه (۳۰) اعمال شده است. عملکرد کنترل کننده‌های طراحی شده برای ۵ ثانیه حرکت ربات با نمودارهای تعقیب مفاصل، نمودارهای خطای ردیابی، نمودار انرژی مصرفی، نمودار نقطه گشتاور صفر و نمودار نیروی وارد شده به ربات و کاربر بررسی شده است. در جدول ۱ پارامترهای ربات ارائه شده است.

$$Fault = \beta(t - T_f)\Omega(\theta, \dot{\theta}, \tau)$$
$$\beta(t - T_f) = \begin{cases} 0 & t \le T_f \\ 1 - e^{-\xi(t - T_f)} & t > T_f \end{cases} \quad (۳۰)$$

در رابطه (۳۰)، T_f زمان شروع عیب عملگر، ξ یک پارامتر ثابت و Ω تابعی براساس موقعیت زاویه‌ای مفاصل، سرعت زاویه‌ای مفاصل و سیگنال کنترلی می‌باشد. زمان شروع عیب در این شبیه‌سازی در ثانیه ۲/۵ می‌باشد.

در شکل ۵ نمودارهای صفحه فاز مفاصل ربات در حالت مطلوب و حاصل از روش کنترل پیشنهادی نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود نمودار صفحه فازهای مطلوب و صفحه فازهای حاصل از کنترل کننده پیشنهادی چرخه‌های حدی را تشکیل می‌دهند که نتیجه به کارگیری الگوریتم الگوی مولد مرکزی می‌باشد. بنابراین رفتار ربات رفتاری موزون و همراه با پایداری بوده است. در شکل ۶ نمودار تعقیب مفاصل ربات برای دو کنترل کننده ارائه شده است.

همانگونه که در شکل ۶ قابل مشاهده است، کنترل کننده پیشنهادی با دقت بالاتری نسبت به کنترل کننده ترکیبی الگوی مولد مرکزی- کنترل مد لغزشی، منحنی‌های مطلوب مفاصل را تعقیب کرده است. این برتری بدلیل سیگنال کوچکتر حاصل از خطای بین محل نقطه گشتاور صفر مطلوب و نقطه گشتاور صفر ربات و دقت بالاتر کنترل کننده پیشنهادی می‌باشد. شکل ۷ خطای تعقیب مسیرهای مرجع ربات را نشان می‌دهد.

شکل ۷ نشان دهنده عملکرد مناسب کنترل کننده‌های پیشنهادی در تعقیب مسیرهای حاصل از الگوی مولد مرکزی می‌باشد. کنترل کننده‌های مبتنی برسطح لغزش ترمینالی سریع قابلیت همگرایی سرعت بالا به مسیرهای مرجع را دارا می‌باشند که این موضوع در شکل ۷ قابل مشاهده است. همچنین توانمندی کنترل کننده پیشنهادی در تحمل عیب سیستم و اغتشاشات وارده به سیستم نسبت به کنترل کننده مد لغزشی قابل توجه است. کیفیت تعقیب مفاصل ربات در کنترل کننده مد لغزشی بعد از وقوع عیب در سیستم به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و تضعیف شده است. در شکل ۸ نیروهای تبادلی بین انسان و ربات ارائه شده است.

با توجه به شکل ۸ مشخص می‌شود که میزان نیروی تبادلی بین انسان و ربات در کنترل کننده پیشنهادی بدلیل تغییر کمتر مسیرهای مرجع ربات در اثر سیگنال بازخوردی خطای مسیر نقطه گشتاور صفر و همچنین به دلیل دقت بالای ردیابی نسبت به کنترل کننده ترکیبی الگوی مولد مرکزی- کنترل مد لغزشی کمتر می‌باشد. با وقوع عیب در سیستم نیروی تبادلی در کنترل کننده‌ها تغییر کرده که این تغییرات در کنترل‌کننده ترکیبی الگوی مولد مرکزی- کنترل مد لغزشی بیشتر است. افزایش نیروی تبادلی در کنترل کننده پیشنهادی بدلیل قابلیت تحمل عیب سیستم کمتر می‌باشد. در شکل

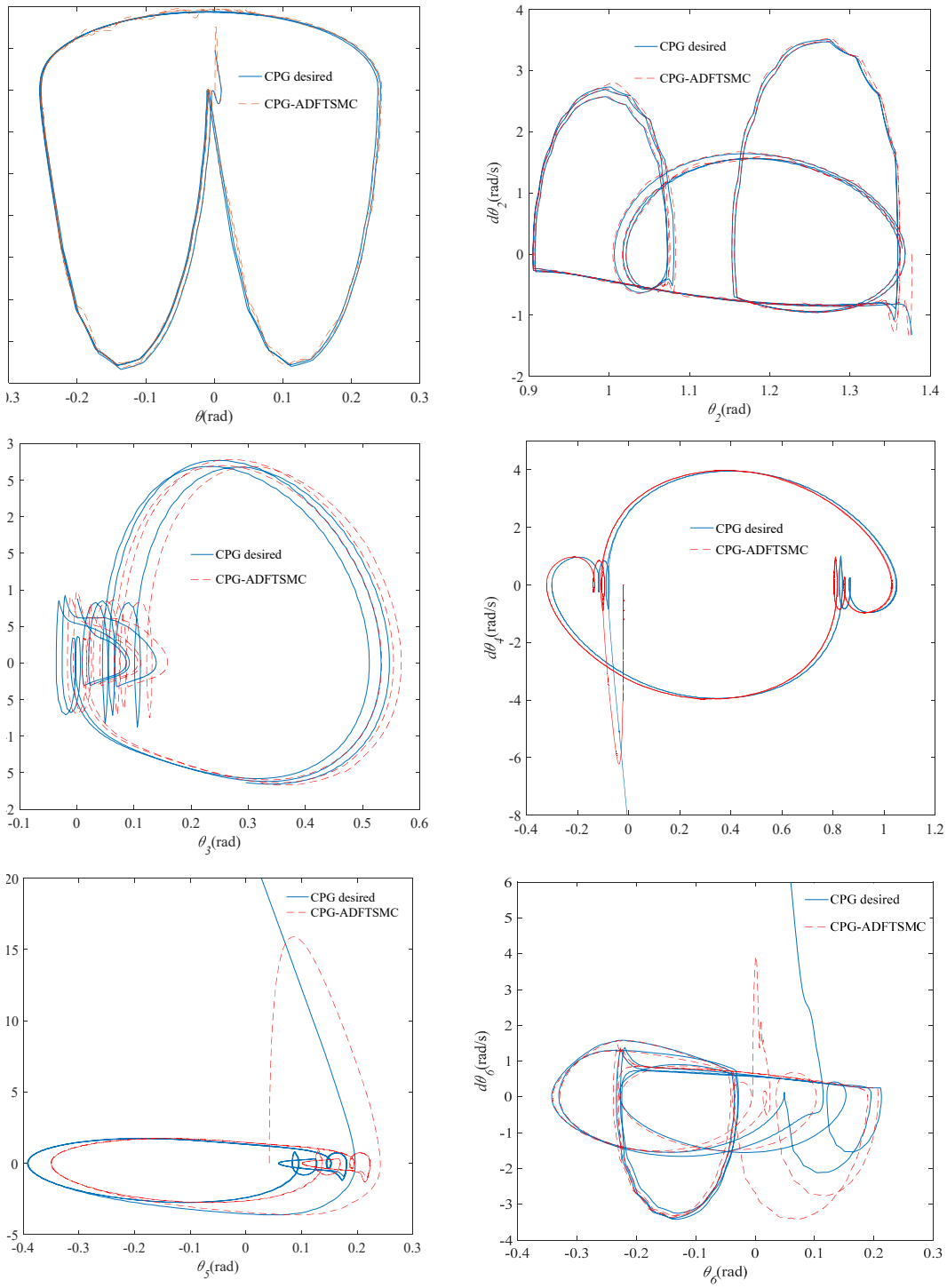
جدول ۱. پارامترهای ربات اسکلت خارجی پایین تنه

Table 1. The parameters of the lower limb exoskeleton

پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
m_1	kg	۰/۸	a	m	۰/۰۷۵
m_2	kg	۳/۲	b	m	۰/۲۷۵
m_3	kg	۳/۸	L_2	m	۰/۴۴
m_4	kg	۳/۸	L_3	m	۰/۴۸
m_5	kg	۳/۲	L_4	m	۰/۴۸
m_6	kg	۰/۸	L_5	m	۰/۴۴
m_7	kg	۴۰	L_6	m	۰/۵
I_1	kg	۰/۱۰	mc_1	m	۰/۱۲
I_2	kg	۰/۷۵	mc_2	m	۰/۲۳
I_3	kg	۰/۸۳	mc_3	m	۰/۲۳۸
I_4	kg	۰/۸۳	mc_4	m	۰/۲۳۸
I_5	kg	۰/۷۵	mc_5	m	۰/۲۳
I_6	kg	۰/۱۰	mc_6	m	۰/۱۲
I_7	kg	۴/۸	mc_7	m	۰/۲۳۵

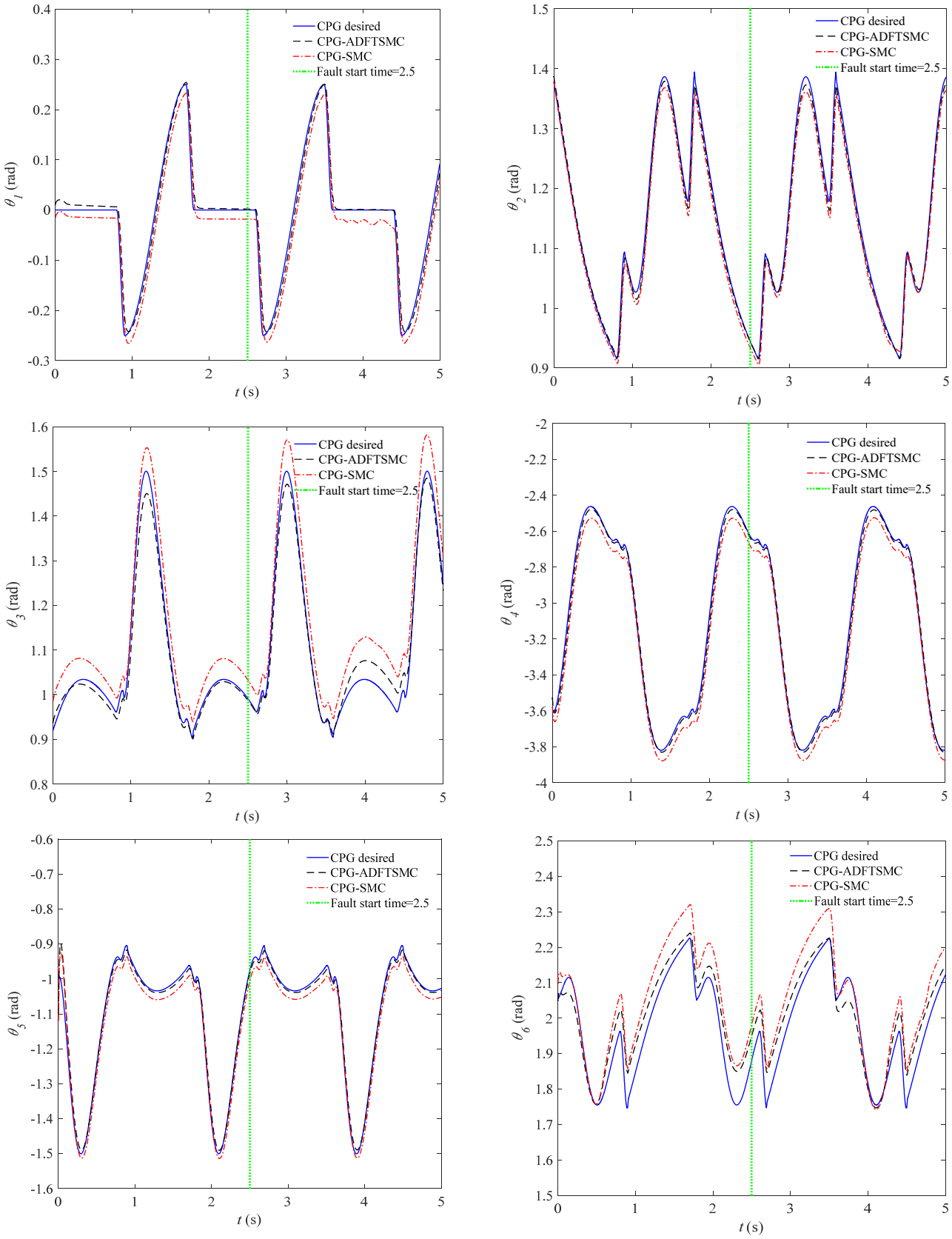
۹ سیگنال کنترلی برای دو کنترل کننده ارائه شده است.

شکل ۹ نشان می‌دهد که سیگنال‌های کنترلی هر دو کنترل کننده در محدوده مناسب برای انتخاب عملگر قرار دارند. یکی از مزایای استفاده از روش کنترل تطبیقی مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی حذف پدیده چترینگ در سیگنال کنترلی است که در شکل ۹ مشاهده می‌شود. اما این پدیده در سیگنال کنترلی روش کنترل



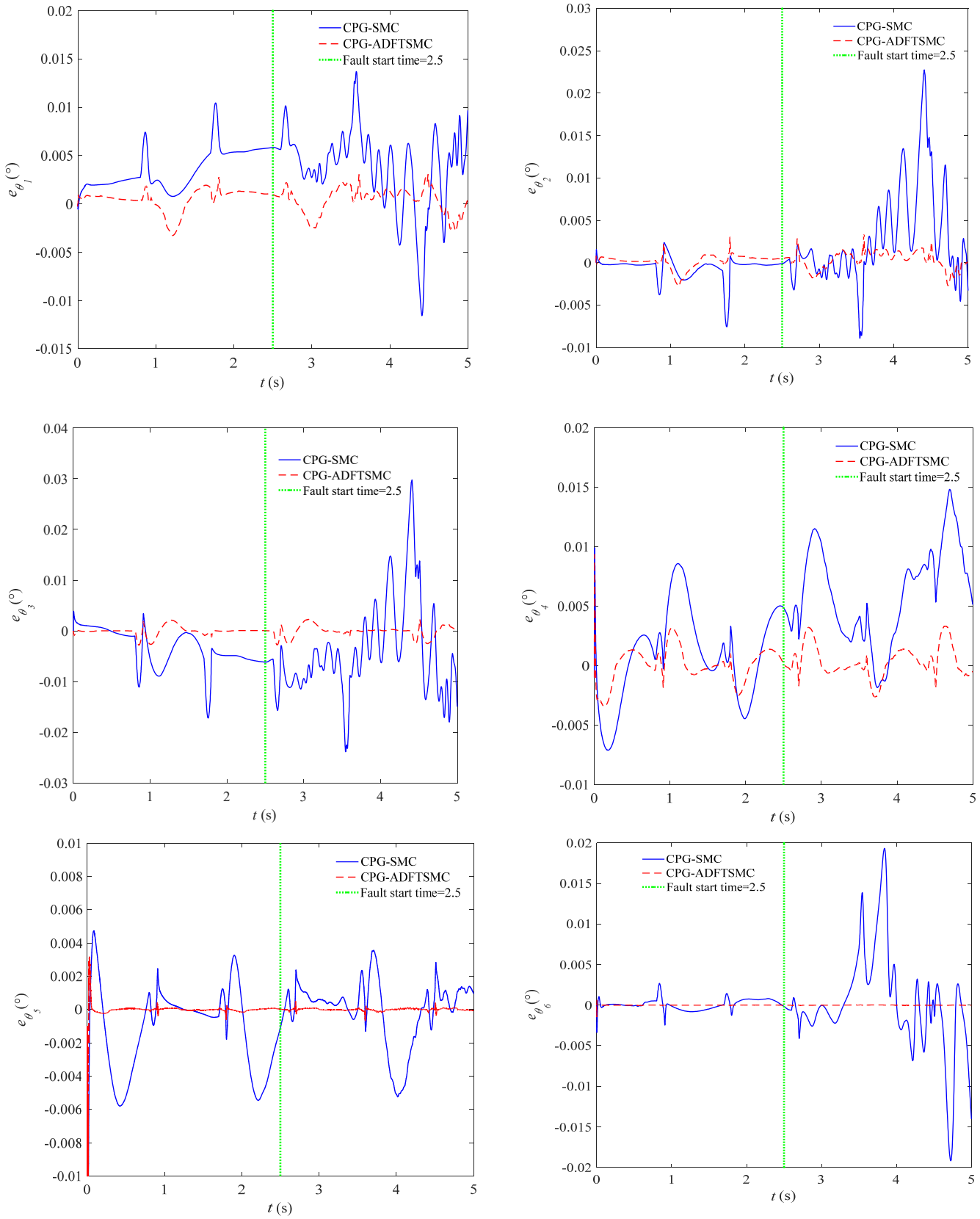
شکل ۵. نمودار صفحه فاز مفاصل ربات

Fig. 5. phase portrait of the joints



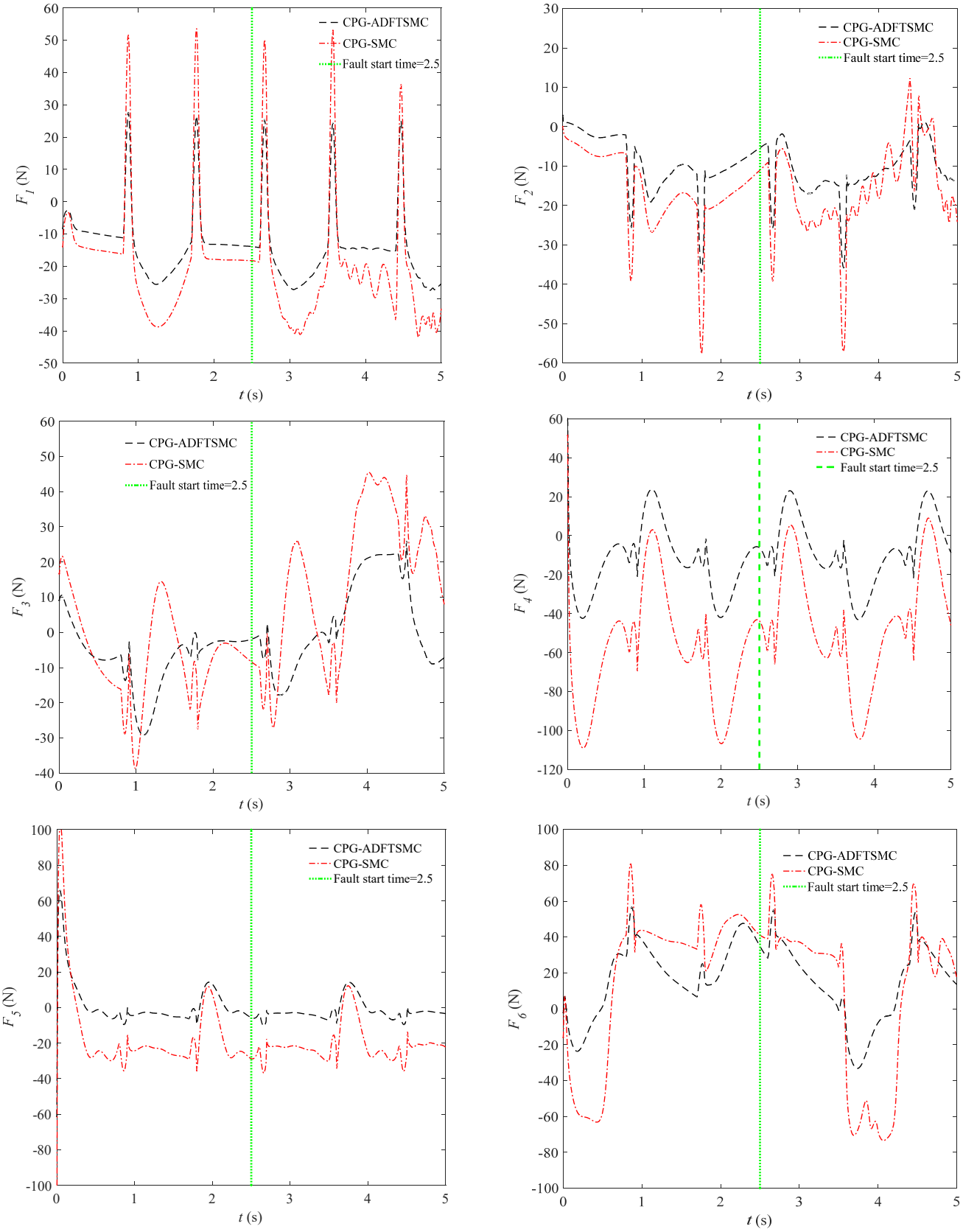
شکل ۶. تعقیب مسیرهای مطلوب ربات

Fig. 6. Trajectory tracking of joints



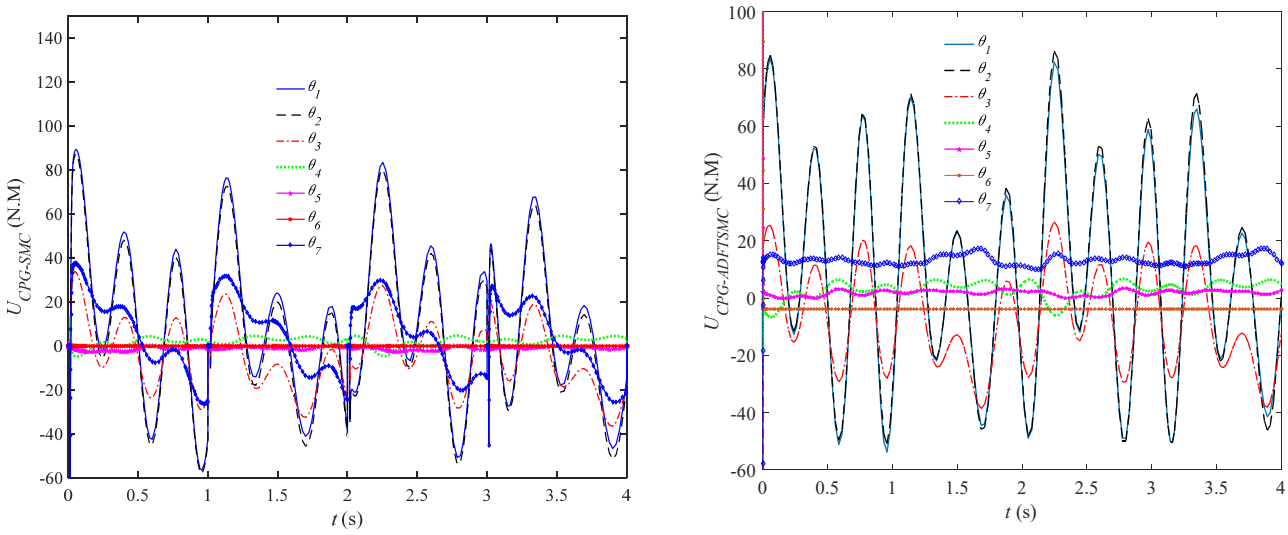
شکل ۷. خطای ردیابی مفاصل

Fig. 7. Tracking error of joints



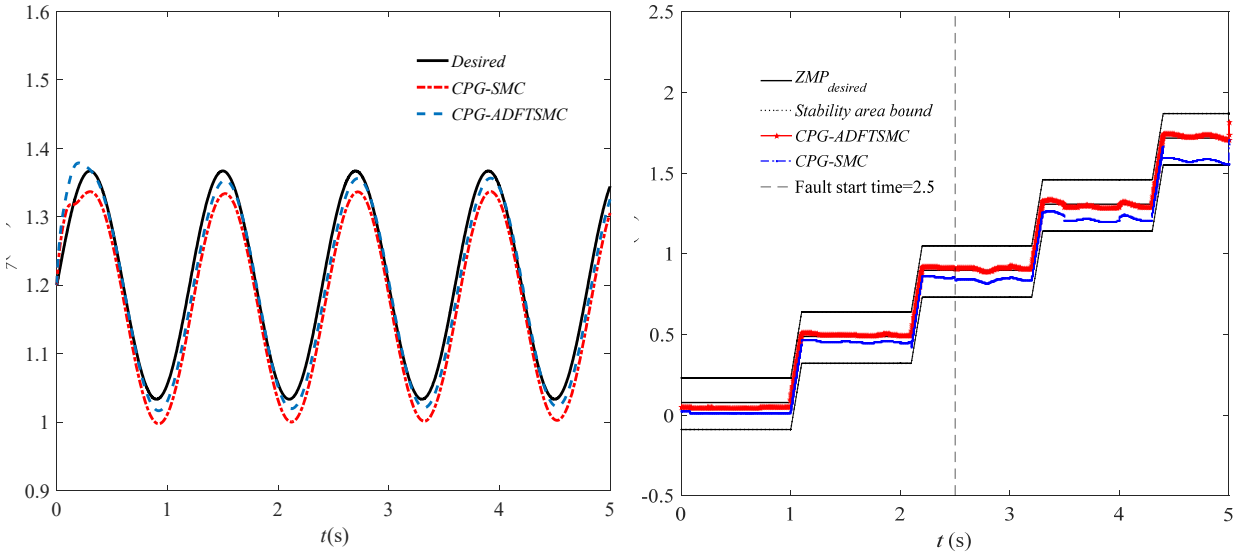
شکل ۸. نیروی تبادلی کاربر و ربات

Fig. 8. interaction force between human and robot



شکل ۹. سیگنال‌های کنترلی

Fig. 9. Control signals

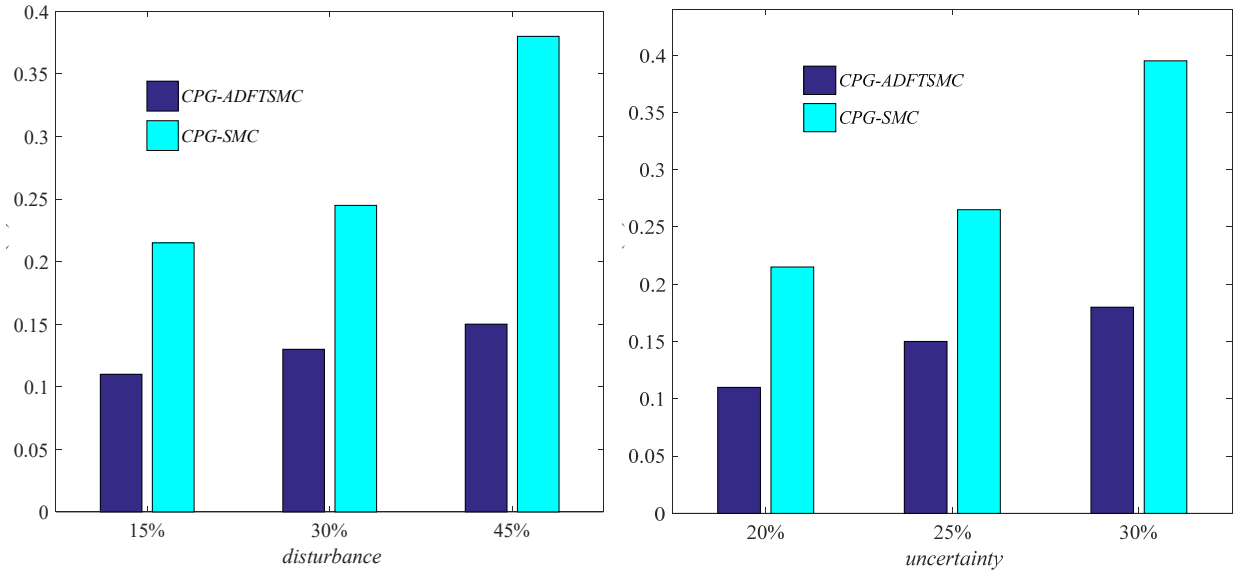


شکل ۱۰. مسیر مطلوب مفصل کمر و محل نقطه گشتاور صفر ربات

Fig. 10. Desired path of joint 7 and the location of Zero moment point

مدلغزشی دیده می‌شود. در شکل ۱۰ مسیر مطلوب مفصل کمر که وظیفه تأمین پایداری ربات را برعهده دارد و همچنین نمودار نقطه گشتاور صفر برای دو کنترل کننده نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که هر دو کنترل کننده با استفاده از حرکت بالا تنه ربات می‌توانند حرکت پایداری را ایجاد کنند. نقطه گشتاور صفر تولید شده توسط کنترل کننده پیشنهادی با تغییرات کمتر مسیر مفصل کمر نسبت به مسیر کمر مطلوب، مطابقت بیشتری با نقطه گشتاور صفر مطلوب دارد. میزان مجموع قدرمطلق اختلاف نقطه گشتاور صفر ربات نسبت به نقطه گشتاور صفر مطلوب برای کنترل کننده پیشنهادی برابر با ۰/۰۴۱ (متر) و برای کنترل کننده مد لغزشی برابر با ۰/۹۲۱ (متر) می‌باشد. در هر دو کنترل کننده دامنه حرکت مفصل بالا تنه دارای مقدار قابل قبول در محدوده زاویه ۹۰ درجه می‌باشد. از زمان ۲/۵ ثانیه به بعد پایداری کنترل کننده ترکیبی الگوی مولد مرکزی- کنترل مد لغزشی، بدلیل وقوع



شکل ۱۱. خطای تعقیب در حضور اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مختلف

Fig. 11. Tracking error in the presence of different disturbances and uncertainties

عیب در سیستم کاهش یافته است. در ادامه مقاوم بودن هر دو کنترل کننده با افزایش میزان اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم و محاسبه معیار خطای مجموع مجذور خطاهای تعقیب مفاصل بررسی شده و در شکل ۱۱ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۱ مشخص می‌شود که تا اغتشاشات حدود ۳۰ درصد سیگنال کنترلی، هر دو کنترل کننده دارای عملکرد ثابتی هستند. کنترل کننده پیشنهادی به دلیل خاصیت ذاتی کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی دارای مقاومت بالاتری نسبت به کنترل کننده مد لغزشی می‌باشد. برای اغتشاشات بالای ۳۰ درصد کنترل کننده پیشنهادی عملکرد مناسبی نسبت به کنترل کننده دیگر دارد که علت آن استفاده از یک قاعده تطبیق مناسب در کنترل کننده پیشنهادی به منظور مقابله با اغتشاشات با دامنه نامعلوم و نامحدود سیستم است. همچنین مشاهده می‌شود که تا عدم قطعیت حدود ۲۵ درصد پارامترهای نامی سیستم، هر دو کنترل کننده دارای عملکرد نسبتاً ثابتی هستند. برای عدم قطعیت‌های بالای ۲۵ درصد عملکرد کنترل کننده مد لغزشی نسبت به کنترل کننده پیشنهادی تضعیف می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با ترکیب الگوریتم الگوی مولد مرکزی و کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی روشی مؤثر در کنترل ربات‌های اسکلت خارجی به منظور مقابله با عیوب، اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم، دستیابی به حداکثر پایداری در راه رفتن ربات و همچنین کاهش پدیده چترینگ، ارائه شده است. به منظور افزایش پایداری ربات، با اعمال سیگنال بازخوردی حاصل از معیار پایداری نقطه گشتاور صفر به الگوریتم الگوی مولد مرکزی مربوط به مفصل کمر، مسیر مطلوب مفصل کمر و سپس مسیرهای مطلوب سایر مفاصل ربات که الگوی مولد مرکزی آن‌ها با الگوی مولد مرکزی مفصل کمر در ارتباط است، اصلاح شده است. به منظور دستیابی به حداکثر پایداری و حداقل خطای تعقیب مفاصل ربات، پارامترهای کنترل کننده‌ها و پارامترهای الگوریتم الگوی مولد مرکزی مفاصل بهینه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی برای ۵ ثانیه حرکت ربات نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم الگوی مولد مرکزی با قابلیت اصلاح دامنه و فاز حرکت و همچنین استفاده از کنترل کننده تطبیقی مد لغزشی دینامیکی سریع ترمینالی باعث افزایش مقاومت سیستم و کاهش پدیده چترینگ نسبت به کنترل کننده ترکیبی الگوی مولد مرکزی-کنترل مد لغزشی شده است. استفاده از قاعده تطبیق مناسب قابلیت مقابله با اغتشاشات با دامنه نامعلوم و نامحدود در سیستم را افزایش داده است. دست آورد اصلی این مقاله دستیابی به روشی است که در آن با استفاده از الگوریتم الگوی مولد مرکزی با قابلیت اصلاح

دامنه و فاز، یک ربات اسکلت خارجی می‌تواند در حضور اغتشاشات، عدم قطعیت‌ها و عیب سیستم یک مسیر از پیش تعیین شده را به صورت پایدار بپیماید. با توجه به تعیین پارامترهای الگوی مولد مرکزی براساس مسیر پیش فرض، در صورت تغییر در مسیر پیش فرض لازم است پارامترهای الگوی مولد مرکزی مجدداً تعیین گردند. همچنین در این پژوهش مدل ربات به صورت تک تکیه گاهی در نظر گرفته شده است که برای افزایش دقت نتایج، اعمال روش کنترلی پیشنهادی به مدل دو فازی ربات پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

[1] 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).

[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. L. ünenburger, 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] A. J. Ijspeert. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review, Neural Networks, 21(2008) 642–653.

[10] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoi, H. Saito, K. Harada, K. Kaneko and H. Hirukawa. The first human-size humanoid that can fall over safely and stand up again. In F. Kanehiro, editor, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS, 2 (2003) 1920–1926.

[11] C. Li, R. Lowe, T. Ziemke, A novel approach to locomotion learning: Actor-critic architecture using central pattern generators and dynamic motor primitives. Frontiers in Neuro robotics, 8(3) (2014) 1–17.

[12] A. J. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko, From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model. Science, 315 (2007) 1416–1420

[13] M. H. Chiang, F. R. Chiang. Anthropomorphic design of the human-like walking robot. Journal of Bionic Engineering, 10 (2) (2013) 186–193.

[14] J. Yu, R. Ding, Q. Yang, M. Tan, W. Wang, J. Zhang, On a bio-inspired amphibious robot capable of multimodal motion. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 17 (2012) 847–856.

[15] Q. D. Wu, C. J. Liu, J. Q. Zhang, Q. J. Chen, Survey of locomotion control of legged robots inspired by biological concept. Science in China Series F: Information Sciences, 52 (2009) 1715–1729.

[16] C. P. Santos, V. Matos, CPG modulation for navigation and omni directional quadruped locomotion. Robotics and Autonomous Systems, 60 (2012) 912–927.

[17] M. E. Abardeh, Unsymmetrical Path Planning for Biped Robot Passing through Obstacles, MS Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, (2012).

[18] C. Liu, D. Wang, E. D. Goodman, Qijun Chen. Adaptive Walking Control of Biped Robots Using Online Trajectory Generation Method Based on Neural Oscillators, Journal of Bionic Engineering, 13 (2016) 572–584.

[19] M. O. Ajayi, Modeling and control of actuated lower limb exoskeletons : a mathematical application using central pattern generators and nonlinear feedback control techniques, PHD Thesis, University Paris-Est, (2016).

[20] L. Righetti, A. J. Ijspeert, Programmable central generators: an application to biped locomotion control. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference

Signal Processing, 135 (2020) 106375.

[31] G. Shuai, H. J B, Adaptive Dynamic Terminal Sliding Mode Control Method, Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, IEEE, (2009) 735-738.

[32] T. Madani, B. Daachi, K. Djouani, Modular -Controller-Design-Based Fast Terminal Sliding Mode for Articulated Exoskeleton Systems, IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, 25(3) 2017.

[33] H. Hemami and C. L. Golliday, The inverted pendulum and biped stability, Mathematical Biosciences, (2) (1977) 95-110.

[34] 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.

[35] S. A. A. Moosavian, K. Alipour, Y. Bahramzadeh. Dynamics modeling and tip-over stability of suspended wheeled mobile robots with multiple arms. In intelligent robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference, USA, 2007.

[36] A. Takhmar, MHS measure for postural stability monitoring and control of biped robots. In Advanced intelligent Mechatronics, 2008 .AIM 2008. IEEE/ASME international Conference on, China, 2008.

[37] S. A. A. Moosavian, A. Takhmar. Stable Gait Planning for Humanoids Motion, in ISME, Iran, 2007.

[38] M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Optimal adaptive super twisting sliding mode control base on zero moment point stability criterion of a lower limb exoskeleton, Amir Kabir journal of mechanical engineering, 50 (4) (2020) 525-532(in Persian).

[39] M. Ruby, R. M. Botez, Trajectory Optimization for vertical navigation using the harmony search algorithm, IFAC-Papers On Line, 49 (17) (2016).

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

[41] P. K. Kyaw, K. Sandar, M. Khalid, W. Juan, Y. Li, Z. Chen, Opportunities in robotic exoskeletons hybrid assistive on Robotics and Automation Orlando, Florida - May 2006.

[21] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoi, H. Saito, K. Harada, K. Kaneko and H. Hirukawa, Evolution of central pattern generators for the control of a five-link bipedal walking mechanism, PALADYN Journal of Behavioral Robotics, 3(1) (2012) 45-53.

[22] Z. Qu, J. Dorsey, Robust tracking control of robots by a linear feedback law. IEEE Transactions on Automatic Control, 36 (1991) 1081–1084.

[23] Y. Hong, Finite-time stabilization and stability of a class of controllable systems. Systems & control letters,46 (2002) 231–236.

[24] S. Venkataraman, S. Gulati, Terminal sliding modes: A new approach to nonlinear control synthesis, Advanced Robotics, 43(1991) 443–448.

[25] G. Bartolini, A. Ferrara, A. Levant and E. Usai, On second order sliding mode controllers. In Variable structure systems, sliding mode and nonlinear control, Springer, 247 (1999) 329–350.

[26] H. Wang, L. Shi, Z. Man, J. Zheng, S. Li, M. Yu, C. Jiang, H. Kong, Z. Cao, Continuous fast nonsingular terminal sliding mode control of automotive electronic throttle systems using finite-time exact observer, IEEE Trans. Ind. Electron. 65 (2018) 7160–7172.

[27] H. Wang, Z. Man, W. Shen, Z. Cao, J. Zheng, J. Jin, M.T. Do, Robust control for steer-by-wire systems with partially known dynamics, IEEE Trans. Ind. Inf. 10 (2014) 2003–2015.

[28] M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Impedance Control Based on Optimal Adaptive High Order Super Twisting Sliding Mode for a 7-DOF Lower Limb Exoskeleton, meccanica, 56 (2021) 538-548.

[29] J. Yang, J. Su, S. Li, X. Yu, High-order mismatched disturbance compensation for motion control systems via a continuous dynamic sliding-mode approach, IEEE Trans. Ind. Inf. 610 (2014) 604–614.

[30] Y. Hu, H. Wang, Robust tracking control for vehicle electronic throttle using adaptive dynamic sliding mode and extended state observer Mechanical, Systems and

limb SUIT (MT5009), Robotic Exoskeletons: Becoming Economically Feasible, 21(1) (2013).

[42] N. Karavas, A. Ajoudani, N. Tsagarakis, Tele-impedance based assistive control for a compliant knee exoskeleton, Robotics and Autonomous Systems, 73 (2015) 78–90.

[43] Õ. S. Davis, P. A. DeLuca, M. J. Romness, Clinical Gait Analysis and Its Role in Treatment Decision-Making, Medscape Orthopaedics & Sports Medicine Journal, 2 (1998).

[44] Y. Farzaneh, A. Akbarzadeh, A. Akbari, New automated learning CPG for rhythmic patterns. Intelligent Service Robotics, 5(3) (2012) 169-177.

[45] T. Madani, B. Daachi, K. Djouani, Modular -Controller-Design-Based Fast Terminal Sliding Mode for Articulated Exoskeleton Systems, IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, 25 (3) 2017.

[46] J. Yang, J. Su, S. Li, X. Yu, High-order mismatched disturbance compensation for motion control systems via a continuous dynamic sliding-mode approach, IEEE Trans. Ind. Informt. 610 (2014) 604–614.

[47] R. C. Richardson, Actuation and control for robotic physiotherapy, PHD thesis, School of Mechanical Engineering University of Leeds, March 2001.

[48] P. N. Mousavi, A. Bagheri, Mathematical Simulation of a Seven Link Biped Robot on Various Surfaces and ZMP Considerations, Applied Mathematical Modeling, Elsevier, 31 (1) (2007) 18-37.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Robust and Adaptive Control of an Exoskeleton Robot For Tracking Modified Desired Trajectory Based on Zero Moment Point Stability Theory, Amirkabir J. Mech Eng., 53(12) (2022) 5831-5850.

DOI: 10.22060/mej.2021.19761.7106

این صفحه عمداً خالی است