مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1397، دوره 18، شماره 02، ص‌ص 342-350

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

کنترل نیروی فعال ترکیبی مقاوم بهینه یک ربات اسکلت خارجی پایین تنه

مجید مختاری[1]، مصطفی تقی‌زاده[2*]، محمود مزارع[1]

1- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
* تهران، صندوق پستی:1743524155 mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 08 آذر 1396
پذیرش: 25 دی 1396
ارائه در سایت: 21 بهمن 1396

کلید واژگان:
ربات اسکلت خارجی
مدل‌سازی دینامیکی
کنترل مد لغزشی
کنترل فعال نیرو
الگوریتم جستجوی هارمونی

چکیده

در این تحقیق یک کنترل‌کننده نیروی فعال ترکیبی مقاوم بهینه بر مبنای الگوریتم جستجوی هارمونی برای ربات اسکلت خارجی پایین تنه طراحی شده است. معادلات دینامیکی به کمک روش لاگرانژ با در نظرگرفتن سه عملگر برروی مفاصل ران، زانو و قوزک به منظور تعقیب یک مسیر مشخص استخراج شده است. عدم هماهنگی حرکات و تبادل نیرو بین ربات با بدن انسان که به صورت اغتشاش به ربات اعمال می‌شود از جمله مشکلات عمده ربات‌های اسکلت خارجی می‌باشد. به منظور کاهش اثر اغتشاش و افزایش دقت، از ترکیب کنترل فعال نیرو (حلقه اصلاحی ورودی کنترلی) با کنترل موقعیت به‌عنوان روشی کارآمد و مقاوم استفاده می‌شود. در روش کنترل فعال نیرو، برای استخراج ورودی کنترلی مقاوم در برابر اغتشاشات اعمال شده، ممان اینرسی لینک‌های رابط در هر لحظه با مینیمم کردن معیار انتگرال خطا و نرخ تغییرات ورودی کنترلی، به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی تخمین زده شده و بر مبنای تخمین حاصل، ورودی کنترلی اصلاح می‌شود. برای حلقه کنترل موقعیت نیز دو کنترل کننده مد لغزشی وخطی سازی پسخورد طراحی شده است. به منظور اعتبارسنجی، ربات در نرم افزار آدامز مدل شده و ورودی کنترلی حاصل از کنترل‌کننده‌های نیرو و موقعیت طراحی شده به مدل استخراجی از آدامز اعمال شده است. برای مقایسه منطقی، پارامترهای کنترلی با الگوریتم جستجوی هارمونی بهینه شده و سپس عملکرد کنترل‌کننده‌های موقعیت در حالت ترکیبی و معمولی (بدون حلقه کنترل نیرو) با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده بیانگر برتری روش کنترل مد لغزشی ترکیبی ارائه شده نسبت به دیگر کنترل‌کننده‌های فوق می‌باشد.

Optimal robust hybrid active force control of a lower limb exoskeleton

Majied Mokhtari, Mostafa Taghizadeh*, Mahmood Mazare

School of Mechanical engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
* P.O.B. 1743524155 Tehran, Iran, mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 November 2017
Accepted 15 January 2018
Available Online 10 February 2018

Keywords:
Exoskeleton
Dynamic modeling
Sliding mode control
Active force control
Harmony search algorithm

ABSTRACT

In this paper, an optimal robust hybrid active force controller based on Harmony Search Algorithm is designed for a lower limb exoskeleton robot. Dynamic equations are derived using Lagrange method by considering three actuators on the hip, knee and ankle joints to track a specific trajectory. One of the major problems of exoskeleton robots is non-synchronization of movements and transfer of power between the robot and human body which affects the robot in form of disturbance. In order to mitigate the effect of disturbances and increase precision, combination of active force control (Corrective loop of control input) with position control is used as an effective and robust method. In the active force control, to elicit robust input control against disturbances, the moment of inertia of the links is estimated at each instant by minimizing the Criteria of ITAE and the control input rate, using the Harmony Search algorithm and the control input is modified. Also, two controllers are designed for the position control loop using sliding mode and feedback linearization methods. In order to validate the performance of the designed controllers, the robot is modeled in ADAMS and control inputs are applied to the Adams model. For appropriate comparison, all control parameters are optimized using the harmony search algorithm and then performance of position controllers are compared in hybrid and conventional (without the force control loop). Results indicate the outperforming of the hybrid sliding mode controller rather than to the other designed controllers.

1- مقدمه

ربات‌های اسکلت خارجی پوشیدنی برای کمک به افرادی که از مشکل اختلال در اعضای بدن خود رنج می‌برند و همچنین برای کمک به انسان‌های سالم و عادی به منظور افزایش کارآیی و توان افراد بدون اینکه نیاز به تحمل بارهای زیاد و اضافه توسط اعضای بدن وجود داشته باشد، به کار می‌روند. این تجهیزات عموما ظاهری شبیه به انسان و یا بخشی از اعضای بدن انسان دارند و توسط یک شخص پوشیده شده و حرکاتی هماهنگ با حرکات بدن انجام می‌دهند. ربات‌های پوشیدنی از حیث میزان تطابق با بدن انسان، محل به کارگیری در بدن انسان، استراتژی‌های کنترلی و غیره بررسی می‌شوند[1].

مطالعات اولیه درمورد ربات‌های اسکلت خارجی اندام‌های پایین تنه برای

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Optimal robust hybrid active force control of a lower limb exoskeleton, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 342-350, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.53.2]

کمک به حرکت به سال‌های 1960 درایالات متحده [2] و یوگسلاوی سابق [3] برای اهداف پزشکی و نظامی باز می‌گردد [4]. از آن به بعد ربات‌های اسکلت خارجی به شدت در انواع مختلفی از ساختارهای مکانیکی، محرک‌ها و رابط‌ها رشد نموده‌اند و امروزه به عنوان ابزارهای توانبخشی، کمک به افراد برای بدست آوردن مجدد قابلیت حرکت، سیستم‌های تقویت کننده و قدرت دهنده به افراد سالم برای حمل بارهای سنگین و ایجاد قدرت اضافی برای راه رفتن یا بالا رفتن از پله در افراد دچارضعف عضلانی (افراد مسن) ارائه شده‌اند. اولین ربات اسکلت خارجی در عمل توسط فیک و همکارانش در سال 1971 با نام هاردمن که توان خود را با استفاده از فشارآب به دست می‌آورد، مدل‌سازی، کنترل و ساخته شد [5].

جزرنیک و همکاران در سال 2003 یک ربات اسکلت خارجی پایین تنه را مدل‌سازی و کنترل کردند. این ربات دارای دو محرک خطی برگشت‌پذیر، یکی در مفصل ران و دیگری در مفصل زانو بوده که توسط موتورهای DC به حرکت در می‌آیند [6]. مکانیزم کنترل آن بر اساس کنترل موقعیت مسیرهای از پیش تعیین شده زاویه مفاصل به همراه کنترل امپدانس به منظور کنترل راحت‌تر و سازگارپذیرتر با کاربر می‌باشد. در سیستم کنترل این ربات راه حل مناسبی برای مقابله با اغتشاشات در نظر گرفته نشده است [7].

در سال 2004 ربات بلیکس با تحقیقات فعالانه کازرونی و همکاران در آزمایشگاه رباتیک دانشگاه برکلی به منظور تقویت نیروی انسانی و استقامت انسان در هنگام حرکت برای کارهای نظامی ارائه شد. الگوریتم کنترلی آن به صورت کنترل مبتنی بر مدل با استراتژی کمکی افزایش حساسیت به نیروها و گشتاورهای خارجی می‌باشد. این روش کنترل هم در مقابله با اغتشاشات ضعیف عمل می‌کند [8].

پس از مطالعات کازرونی بر روی بلیکس، در نهایت در فوریه 2005، بهبود یافته و تکمیل شده آن را که برای حمل بارهای سنگین در مدت زمان طولانی ماموریت و برای حرکت در سطوح با شیب کم طراحی شده بود را با عنوان اگزوهیکر عرضه کردند. استراتژی کنترلی این ربات بسیار ساده‌تر از ربات بلیکس و به صورت استراتژی کنترل فعال تعقیب مفصل است [9].

والش و همکاران یک ربات پوشیدنی دارای محرک‌های فعال و غیرفعال ارائه دادند. اجزای مفصلی این دستگاه متشکل از یک محرک با قابلیت کنترل نیرو بر روی مفصل ران، یک مکانیزم دمپر متغیر بر روی زانو و یک فنر غیرفعال بر روی قوزک پا می‌باشد [10].

از طریق تطابق سینماتیکی درجات آزادی ربات با بدن انسان قرارگیری مفاصل ربات دقیقاً بر روی مفاصل شخص باعث می‌شود که سینماتیک ربات کاملاً از سینماتیک کاربر تبعیت کند. این روش بسیاری از مشکلات طراحی را حل می‌کند. این رویکرد در طراحی را می‌توان در سری ربات‌های هال که توسط کاواموتو و همکاران [11] و یا کایاو و همکاران [12] ارائه شده است، مشاهده کرد. مدل استفاده شده در این مقاله شامل سه لینک و سه مفصل برای مفاصل ران، زانو و قوزک در هر پا می‌باشد که از نظر تطابق سینماتیکی با بدن انسان مدل مناسبی می‌باشد.

عملکرد مناسب ربات اسکلت خارجی رابطه مستقیم با کنترل‌کننده طراحی شده برای آن دارد. کنترل‌کننده علاوه بر تعیین ورودی‌های کنترلی مناسب به منظور تعقیب منحنی مفاصل از پیش تعریف شده، باید بتواند بر اغتشاشات وارد شده به ربات در اثر نیروی اعمال شده از طرف انسان و محیط و همچنین بر دینامیک‌های مدل نشده و عدم قطعیت‌های سیستم غلبه کند. در این مقاله از یک روش کنترل ترکیبی مبتنی بر کنترل مد لغزشی و کنترل فعال نیرو برای کنترل ربات اسکلت خارجی استفاده شده است.

یکی از روش‌های حذف اغتشاشات ناشی از نیروهای اعمالی از انسان به ربات و یا عوامل محیطی وارد شده به ربات، روش کنترل فعال نیرو می‌باشد [13]. روش کنترل فعال نیرو یک روش کنترل فیدبک بوده که ردیابی ورودی مرجع تا زمان اعمال اغتشاش محدود به سیستم را تضمین می‌نماید [15,14].

از میان کنترل‌کننده‌های طراحی شده، روش کنترل فعال نیرو یک روش جذاب برای کنترل فیدبک سیستم‌ها می‌باشد. این روش به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته که نتایج موفقی به‌همراه داشته است. از روش کنترل فعال نیرو در مواردی مانند راه‌اندازی و کنترل ربات سریال [16]، کنترل ارتعاشات تجهیزات صنعتی [17]، کنترل ربات‌های دقیق [18] و کاربردهای مربوط به خودرو [19] استفاده شده است. به عنوان نمونه رملیا و همکاران در سال 2012 به کنترل یک سیستم چند متغیره چرخان دوقلو در حضور اغتشاشاتی نظیر باد پرداختند. آن‌ها موقعیت زوایای پیچ و یاو را به طور جداگانه به کمک روش ترکیبی کنترل فعال نیرو و کنترل فازی، کنترل کردند [20]. حسینی و همکاران به کمک روش کنترل فعال نیرو لرزش‌های موجود در دست بیماران پارکینگسونی را کنترل کردند [21]. در روش کنترل فعال نیرو، به منظور مقابله با اغتشاشات، ممان اینرسی لینک‌های رابط در هر لحظه متناسب با اغتشاش وارد شده تخمین زده می‌شود.

در این مقاله با استفاده از روش لاگرانژ معادلات مدل دینامیکی سه درجه آزادی ربات استخراج و ربات در محیط نرم افزار آدامز شبیه سازی شده است. به منظور کنترل موقعیت مفاصل ربات مذکور، با استفاده از روش کنترل مد لغزشی بهینه و کنترل فعال نیرو، یک کنترل‌کننده مقاوم ترکیبی (SM-AFC) طراحی شده است. کنترل کننده طراحی شده با کمینه کردن یک تابع خطا به صورت ترکیب معیار خطای انتگرالی و نرخ تغییر سیگنال کنترلی توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی مقادیر تانسور ممان اینرسی برای مقابله با اغتشاشات را تخمین می‌زند. به منظور اعتبارسنجی، ورودی کنترلی به مدل شبیه سازی شده در آدامز اعمال شده است. در ادامه به منظور مقایسه کنترل‌کننده طراحی شده با کنترل‌کننده‌های مد لغزشی بهینه و PD معمولی بهینه و کنترل‌کننده ترکیبی PD بهینه و کنترل فعال نیرو (PD-AFC)، پارامترهای کنترلی این کنترل‌کننده‌ها بر مبنای تابع هزینه درنظرگرفته شده، به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی استخراج شده‌اند. نوآوری این مقاله عبارتست از: 1- طراحی کنترل‌کننده ترکیبی مد لغزشی بهینه و کنترل فعال نیرو (SM-AFC) برای این نوع ربات اسکلت خارجی برای اولین بار 2- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی 3- قابلیت مقابله با اغتشاشات در کنترل‌کننده طراحی شده 4- پیاده سازی کنترل‌کننده طراحی شده روی مدل استخراجی از نرم‌افزار آدامز.

ساختار این مقاله بدین ترتیب است: در قسمت 2 مکانیزم مورد مطالعه توصیف شده است. سپس به مدل‌سازی دینامیکی ربات پرداخته شده است. در قسمت 3 روش کنترل ارائه شده و در قسمت 4 شرح الگوریتم جستجوی هارمونی بیان شده است. در قسمت 5 شبیه‌سازی مدل دینامیکی به همراه مسیر مطلوب مفاصل و کنترل‌کننده آورده شده و در آخر نتایج حاصل از مقاله در بخش 6 ذکر شده است.

2- معرفی و مدل‌سازی مکانیزم پیشنهادی

در شکل 1 شماتیک ربات اسکلت خارجی مورد مطالعه در این مقاله نشان داده شده است. مکانیزم مورد نظر از سه لینک متوالی برای ران، ساق و کف به منظور تطابق بهتر حرکات انسان و ربات تشکیل شده است. موقعیت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.53.2]

مفاصل موجود در این مدل منطبق بر مفاصل انسان می‌باشد. مفاصل به صورت لولایی در نظر گرفته شده‌اند که بر روی هر کدام یک عملگر فعال قرار دارد.

در ربات شکل 1، L_1، L_2 و L_3 به ترتیب طول لینک‌های ران، ساق و کف پا می‌باشند. همچنین θ_1، θ_2 و θ_3 به ترتیب زوایای لینک‌های ران، ساق و کف پا می‌باشند. C_{m1}، C_{m2} و C_{m3} به ترتیب مرکز جرم لینک‌های ران، ساق و کف پا می‌باشند. با توجه به شکل 1 روابط سینماتیکی ربات به صورت روابط (1 تا 3) است.

$$X_1 = C_{m1}\cos(\theta_1)$$
$$y_1 = C_{m1}\sin(\theta_1) \quad (1)$$
$$X_2 = L_1\cos(\theta_1) + C_{m2}\cos(\theta_2)$$
$$y_2 = L_1\sin(\theta_1) + C_{m2}\sin(\theta_2) \quad (2)$$
$$X_3 = L_1\cos(\theta_1) + L_2\cos(\theta_2) + C_{m3}\cos(\theta_3)$$
$$y_3 = L_1\sin(\theta_1) + L_2\sin(\theta_2) + C_{m3}\sin(\theta_3) \quad (3)$$

که در آن X_1 و y_1 مختصات مرکز جرم لینک ران، X_2 و y_2 مختصات مرکز جرم لینک ساق و X_3 و y_3 مختصات مرکز جرم لینک کف پا می‌باشد. با مشتق گیری از موقعیت‌های فوق نسبت به زمان و تشکیل لاگرانژین، در نهایت با ساده‌سازی روابط ریاضی حاکم، معادلات مدل دینامیکی سیستم مورد مطالعه به فرم ماتریسی نشان داده شده در رابطه (4) قابل بیان می‌باشد [22].

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta,\dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_d \quad (4)$$

که در آن τ گشتاور مربوط به عملگرها، $M(\theta)$ ماتریس ممان اینرسی، $C(\theta,\dot{\theta})$ ماتریس اثرات گریز از مرکز و ژیروسکوپی، $G(\theta)$ بردار نیروهای گرانشی و τ_d گشتاور اغتشاش می‌باشند و می‌توان روابط (5) را نوشت:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}$$
$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$
$$G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3- طراحی کنترل کننده

در این مقاله به منظور تعقیب مسیر تعیین شده برای مفاصل توسط ربات و همچنین مقابله با اغتشاشات وارد شده به ربات از ترکیب یک کنترل‌کننده مد لغزشی بهینه به همراه کنترل‌کننده فعال نیرو استفاده شده است.

3-1- روش کنترلی خطی‌سازی پسخور

در این بخش با اعمال روش خطی‌سازی پسخور روی معادلات ربات، معادلات مذکور به حالت خطی در آمده و در ادامه کنترل کننده PD به سیستم اعمال شده است. در ابتدا معادلات دینامیکی به فرم فضای حالت نوشته می‌شوند.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (6)$$
$$\dot{x}_2 = M^{-1}(-C(\theta,\dot{\theta}) - G(\theta) + \tau - \tau_d) \quad (7)$$

اگر ورودی به شکل رابطه (8) انتخاب شود، سیستم به فرم خطی در می‌آید.

$$\tau = M[v + M^{-1}(C(\theta,\dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_d)] \quad (8)$$

با جایگذاری رابطه (8) در رابطه (7) معادله (9) حاصل می‌شود.

$$\ddot{q} = v \quad (9)$$

برای رسیدن به هدف طراحی، ابتدا بردار خطا به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$e = q - q_d \quad (10)$$

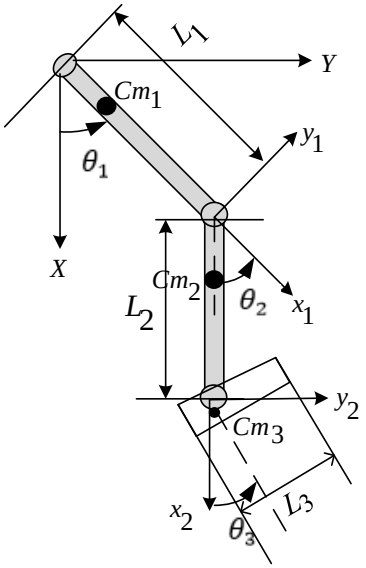

Fig. 1 Schematic of a 3DOF lower limb exoskeleton

شکل 1 شماتیک ربات اسکلت خارجی پایین تنه سه درجه آزادی

با در نظر گرفتن ورودی معادل به صورت رابطه (11) معادله دیفرانسیل خطا به دست می‌آید.

$$v = \dot{x}_{2d} - \mathrm{K_d}\dot{e} - \mathrm{K_P}e \quad (11)$$

اگر ورودی معادل v به شکل فوق درنظر گرفته شود و ضرایب K_d و K_P مثبت انتخاب شوند، خروجی حول خروجی مطلوب پایدار شده و خطا به سمت صفر میل می‌کند.

$$\ddot{e} + \mathrm{K_d}\dot{e} + \mathrm{K_P}e = 0 \quad (12)$$

در نتیجه قانون کنترلی به شکل رابطه (13) بیان می‌شود.

$$\tau = M[\dot{x}_{2d} - \mathrm{K_d}\dot{e} - \mathrm{K_P}e + M^{-1}(C(\theta,\dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_d)] \quad (13)$$

مدل دینامیکی حاصل بیانگر مدل دقیق سیستم نمی‌باشد، از این‌رو سیستم دارای عدم قطعیت پارامتری و غیر ساختار یافته است، که این مهم باعث کاهش حاشیه پایداری و حساسیت به اغتشاش خارجی در روش خطی-سازی پسخور می‌شود. البته وجود کنترل‌کننده PD در ورودی خطی‌سازی پسخور تا حدودی این عوارض ناخواسته را تعدیل می‌کند. بنابراین در کل کارآیی این روش به میزان خطا در مدل‌سازی وابسته بوده که در شبیه‌سازی‌ها میزان اثر پذیری آن نسبت به پارامترها بررسی شده است.

3-2- کنترل کننده مد لغزشی

رویکرد کنترل مقاوم از روش‌های مهم برای مقابله با عدم قطعیت در مدل است.از جمله روش‌های کنترلی که در دسته کنترل‌های مقاوم قرار می‌گیرد، روش کنترل مود لغزشی می‌باشد [23]. یکی از معایب این روش کنترلی که معمولاً کاربردآن را برای کنترل سیستم‌های مکانیکی محدود می‌کند، پدیده چترینگ می‌باشد.

در این روش کنترلی، خطا متغیر حالت q را به صورت $e = q - q_d$ در نظر گرفته و یک سطح متغیر با زمان در فضای حالت n بعدی با رابطه (14) تعریف شده است که در آن λ یک ثابت اکیداً مثبت می‌باشد. هدف از این تعریف، نگه‌داشتن شیب سطح لغزش در نزدیکی صفر است.

$$S(q,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \quad (14)$$

در رابطه (14)، $n = 3$ می‌باشد. با مشتق‌گیری نسبت به زمان، رابطه (15) بدست می‌آید.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.53.2]

$$\dot{S} = (\ddot{q} - \ddot{q}_d) + \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d) \quad (15)$$

قانون کنترلی $\hat{\tau}(t)$جهت رسیدن به $\dot{S} = 0$ به صورت رابطه (16) بیان شده است.

$$\hat{\tau}(t) = C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_d + M(\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)) \quad (16)$$

به منظور مقابله با پدیده چترینگ، یک جمله ناپیوسته به $\hat{\tau}(t)$ اضافه شده است.

$$\tau(t) = \hat{\tau}(t) - \mathrm{K}\tanh(S) \quad (17)$$

که در آن K یک ثابت مثبت قطری است. با توجه به شرایط پایداری تابع لیاپانوف و با استفاده از معادله سطح لغزش در نظر گرفته شده، با ساده سازی ریاضی، قانون کنترل مد لغزشی برای ربات به صورت رابطه (18) استخراج شده است.

$$\hat{\tau}(t) = C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_d + M(\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)) - \mathrm{K}\tanh(S) \quad (18)$$

3-3- کنترل کننده فعال نیرو

نظریه AFC برای اولین بار در اوایل دهه 1980 بر پایه قانون دوم نیوتن ارائه شد. پس از آن مایلا و همکاران اثربخشی روش کنترل فعال نیرو با استفاده از روش‌های هوشمند در کنار تکنیک‌های تخمین اولیه برای تخمین ماتریس اینرسی مدل دینامیکی که توسط کنترل‌کننده به طور خودکار اصلاح می‌شود را توسعه دادند [24].

در این روش نشان داده شده که سیستمی که در معرض اغتشاشات قرار می‌گیرد، می‌تواند پایدار باقی بماند. به عبارت دیگر روش کنترل نیرو یک روش موثر و سریع در حذف اغتشاشات ناخواسته سیستم است. همچنین کلیه غیر خطی‌های سیستم نیز می‌تواند به صورت اغتشاش در نظر گرفته شود و از دینامیک ربات صرف‌نظر شود [25].

بر اساس قانون دوم نیوتن برای یک جسم در حال دوران، مجموع تمام گشتاورهایی که به جسم اعمال می‌شود برابر با ضرب ممان اینرسی جسم در شتاب زاویه‌ای جسم در جهت اعمال گشتاور مطابق رابطه (19) است.

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

این روش کنترل بر اساس تقریب اغتشاش استوار است. به این منظور از رابطه (20) استفاده شده است.

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

که درآن $\hat{Q}$ گشتاور اغتشاشی تخمین زده شده و I' ممان اینرسی تقریب زده شده سیستم است که هر چه بهتر تخمین زده شود کنترلر بهتر عمل می‌کند. α' شتاب زاویه‌ای می‌باشد و τ گشتاور اعمال شده به عملگرها می‌باشد. گشتاور اغتشاشی تخمین زده شده با سیگنال ورودی عملگر جمع شده تا اثر اغتشاش حذف شود. سیگنال ورودی خود می‌تواند از یک کنترل دیگر که در این مقاله کنترل مد لغزشی می‌باشد، حاصل شود.

در روش کنترل فعال نیرو در هر لحظه ماتریس ممان اینرسی به صورت یه یک ماتریس قطری تخمین زده شده است. به منظور تخمین ماتریس ممان اینرسی از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی برای کمینه کردن یک تابع هدف انتخابی، استفاده شده است. بدین منظور یک تابع هزینه مطابق رابطه (21) پیشنهاد شده است.

$$\mathrm{Obj} = (\mathrm{ITAE}) + (|\dot{\tau}|)$$
$$\mathrm{ITAE} = \int t|e(t)|dt \quad (21)$$

که $e(t)$ بیانگر خطا و $|\dot{\tau}|$ نرخ سیگنال کنترلی می‌باشند. ازجمله مزایای الگوریتم جستجوی هارمونی می‌توان به مواردی مانند آسان بودن درک، آسان بودن برای پیاده‌سازی و بی‌نیاز از مسائل و فرمول‌های سخت ریاضی اشاره کرد. همچنین برخلاف دیگر الگوریتم‌ها از تمام بردارهای موجود برای تولید نسل جدید استفاده می‌کند.

مقادیر ممان اینرسی‌های تخمین زده شده I' سپس در بردار شتاب زاویه‌ای ضرب شده و از مقادیر گشتاورهای ورودی حاصل از کنترل مد لغزشی به سیستم کم می‌شود تا $\hat{Q}$ حاصل شود. در شکل 2 بلوک دیاگرام روش کنترلی آورده شده است.

4- الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA)

الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) برای اولین بار توسط گیم و همکاران، با الهام از پدیده‌های موسیقی ارائه شده است [26]. در موسیقی نوازندگان برای به دست آوردن هارمونی بیشتر و صدای بهتر، سازهای خود را مرحله‌به‌مرحله به صدا درمی‌آورند و به این روش سازهای خود را تنظیم می‌کنند. فرآیند فوق به‌صورت یک فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌شود. در این الگوریتم بردار حل، برداری است که اجزای آن مقادیر اختصاص داده‌شده به متغیرهای تصمیم‌گیری یک مسئله می‌باشند. درصورتی‌که مسئله بهینه‌سازی دارای Nمتغیر باشد، بردار هارمونی نیز دارای N جزء خواهد بود [27]. این الگوریتم شامل 5 مرحله به شرح زیر است.

1- تعیین اولیه مسئله و پارامترهای الگوریتم.
2- تعیین اولیه حافظه هارمونی با بردارهای حل تصادفی.
3- تولید یک بردار هارمونی جدید.
4- به‌روز نمودن حافظه هارمونی.
5- بررسی معیار توقف الگوریتم و تکرار مراحل 3 و 4.

در ادامه به توضیح مراحل الگوریتم پرداخته می‌شود.

1- تعیین اولیه مسئله و پارامترهای الگوریتم

در این الگوریتم $f(x)$ تابع هدف، $h(x)$ تابع قیود مساوی و $g(x)$ تابع قیود غیر تساوی، x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری، X_i مجموعه محدوده ممکن مقادیر هر متغیر تصمیم‌گیری، که $X_{iL} \le X_i \le X_{iU}$ و X_{iL} و X_{iU} به ترتیب حدود پایینی و بالایی برای هر متغیر تصمیم‌گیری می‌باشند. در نهایت الگوریتم بهینه‌سازی به‌صورت رابطه (22) بیان می‌شود.

مینیمم: $\{f(x)|x \in X\}$
بطوریکه: $g(x) \ge 0$ و $h(x) = 0$ (22)

در حافظه هارمونی (HM) دسته متغیرهای تصمیم‌گیری ذخیره می‌شوند. اندازه حافظه هارمونی (تعداد بردارهای جواب در حافظه هارمونی) HMS و نرخ ملاحظه حافظه هارمونی HMCR نامیده شده است. نرخ تنظیم صدادهی باPAR، تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری با پارامتر N، تعداد بردار هارمونی جدید با پارامتر NI و فاصله پهنای باند با پارامتر BW مشخص شده‌است.

2- تعیین اولیه حافظه هارمونی با بردارهای حل تصادفی

در این مرحله ماتریس HM با تعداد بسیار زیادی بردار جواب تولیدشده به‌صورت تصادفی و با توجه به اندازه حافظه هارمونی مطابق رابطه (23) تولید شده است.

$$\mathrm{HM} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (23)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.53.2]

3- تولید یک بردار هارمونی جدید

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

$$x'_i = \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{\mathrm{HMS}}\}; & \text{با احتمال } ([\mathrm{HMCR}]) \\ x'_i \in X_i; & \text{با احتمال } ([1-\mathrm{HMCR}]) \end{cases} \quad (24)$$

HMCR، نرخ انتخاب از مقادیر محاسبه شده قبلی است، که در HM ذخیره‌شده است و (1-HMCR) نرخ گزینش تصادفی از محدوده ممکن مقادیر است. هر جز به‌دست‌آمده توسط ملاحظات حافظه برای تعیین اینکه تنظیم صدادهی مناسب‌تر است یا خیر امتحان می‌شود. این عمل با استفاده از پارامتر PAR انجام می‌گیرد که با استفاده از رابطه (25) تعریف شده است.

$$x'_i = \begin{cases} x'_i + \mathrm{rand} \times \mathrm{BW}; & \text{با احتمال } (\mathrm{PAR}) \\ x'_i; & \text{با احتمال } ([1-\mathrm{PAR}]) \end{cases} \quad (25)$$

در رابطه (25)، مقدار $[1 - \mathrm{PAR}]$ نرخ انجام هیچ عمل را مشخص می‌کند. اگر نتیجه تصمیم‌گیری، تنظیم صدادهی مثبت باشد $\mathrm{X_i^{new}}$ صدادهی جدید با توجه به رابطه (26) جایگزین شده است.

$$X_i^{\mathrm{new}} = X_i^{\mathrm{old}} \pm \mathrm{BW} \times \varepsilon \quad (26)$$

که در آن X_i^{old} صدادهی موجود انتخاب شده از HM و ε یک عدد تصادفی در محدوده (1,1-) می‌باشند. درصورتی که بردار هارمونی تولید شده از بدترین بردار هارمونی در HM بر مبنای تابع هدف انتخابی بهتر باشد، بردار هارمونی جدید جایگزین بدترین بردار هارمونی که در داخل HM قرارگرفته است، می‌شود. روند این فرآیند توسط رابطه (27) بیان شده است.

$$\mathrm{X_{worst}} = \mathrm{X_{new}} \quad \text{اگر } f(\mathrm{X_{new}}) < f(\mathrm{X_{worst}}) \quad (27)$$

اگر ناحیه توقف الگوریتم (حداکثر تولید بردار هارمونی جدید) برآورده شود، محاسبات پایان‌یافته و در غیر این صورت مراحل تا رسیدن به حداکثر تولید بردار هارمونی جدید تکرار می‌گردند. شکل 3 نمایش دهنده فلوچارت اجرای الگوریتم جستجوی هارمونی می‌باشد.

5- شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی حرکت ربات پایین تنه، منحنی تغییرات موقعیت زاویه‌ای هر یک از مفاصل ران، زانو و قوزک در حالت بیشینه مقدار حرکت به صورت روابط (28) آورده شده است[28].

$$\begin{aligned} \theta_{\mathrm{hip}} &= 1 \cdot 265 \sin(2\pi t - 0 \cdot 9159) \\ \theta_{\mathrm{knee}} &= 1 \cdot 091 \sin(2\pi t - 0 \cdot 8633) \\ \theta_{\mathrm{ankle}} &= 0 \cdot 5679 \sin(2\pi t - 0 \cdot 3948) \end{aligned} \quad (28)$$

این روابط در بردارنده حرکات مورد نیاز برای مفاصل ران، زانو و قوزک یک شخص معلول در مراحل اولیه فرایند توانبخشی می‌باشد. ابتدا به کمک مدل‌سازی انجام شده، ورودی کنترلی مناسب برای هر یک از روش‌های کنترلی استخراج شده و سپس این ورودی کنترلی به بلوک استخراج شده ربات از نرم‌افزار آدامز اعمال شده است. بلوک دیاگرام طراحی شده نرم‌افزار سیمولینک در شکل 4 نشان داده شده است. همچنین پارامترهای ربات اسکلت خارجی در جدول 1 آورده شده است.

در مرحله شبیه‌سازی، ربات مورد مطالعه به روش‌های کنترل SM-AFC، PD-AFC، مد لغزشی بهینه و PD بهینه کنترل شده است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، سه اغتشاش متغیر با زمان با دامنه‌های 0.8، 0.7، و 0.5 و فرکانس‌های 1.5، 2.5 و 3.5 در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار انرژی مصرفی بر ای هر مفصل در روش کنترلی ارائه شده بررسی شده است. لازم به ذکر است که در تمامی شبیه‌سازی‌ها نویز هم در نظرگرفته شده است. در طراحی همه کنترل کننده‌ها از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی به منظور بهینه کردن پارامترهای کنترلی استفاده شده است. چگونگی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی در شکل 5 نشان داده شده است. پارامترهای کنترلی بهینه شده در جداول 2 آورده شده است.

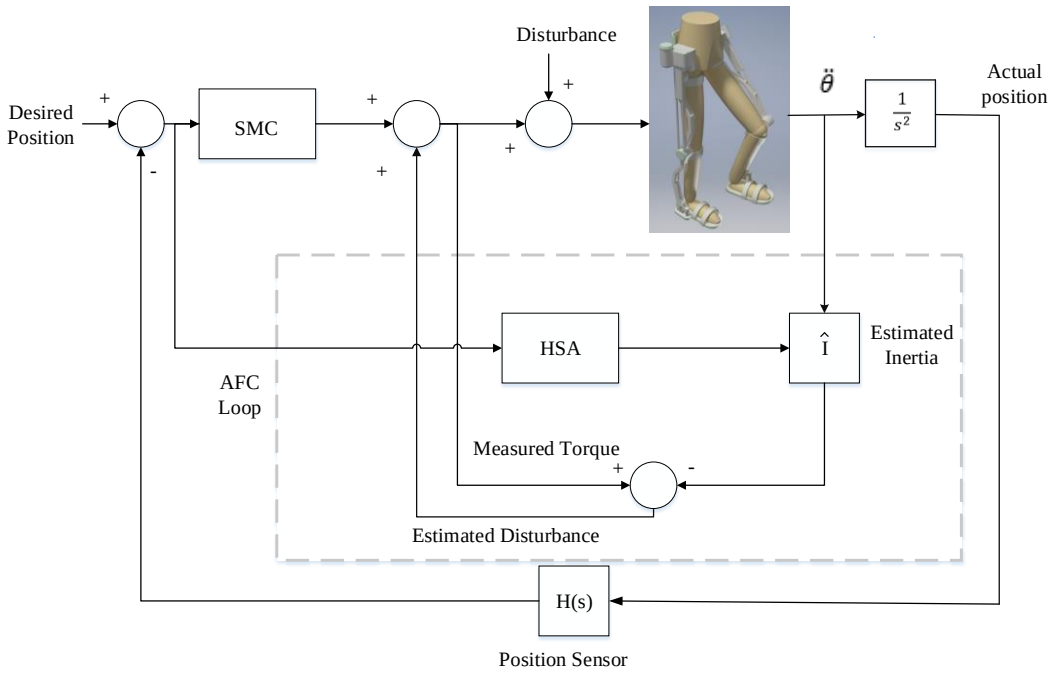

Fig. 2 The block diagram of the hybrid AFC and optimal SMC

شکل 2 بلوک دیاگرام روش کنترل ترکیبی مد لغزشی بهینه و کنترل فعال نیرو

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.53.2]

نتایج پیاده سازی سیستم حلقه بسته کنترل کننده SM-AFC روی ربات مورد مطالعه، به منظور تعقیب مسیر از پیش تعریف شده، برای مفاصل ران، زانو و قوزک در شکل‌های 6، 7 و 8 آورده شده است. لازم به ذکر است

جدول 1 پارامترهای ربات اسکلت خارجی پایین تنه

Table 1 Parameters of lower limb exoskeleton robot

پارامتر	واحد	مقدار
m_1	kg	5.74
m_2	kg	2.54
m_3	kg	0.84
I_1	kg m^2	0.0583
I_2	kg m^2	0.0435
I_3	kg m^2	0.0281
L_1	m	0.314
L_2	m	0.425
L_3	m	0.225
Cm_1	m	0.1360
Cm_2	m	0.1840
Cm_3	m	0.0244

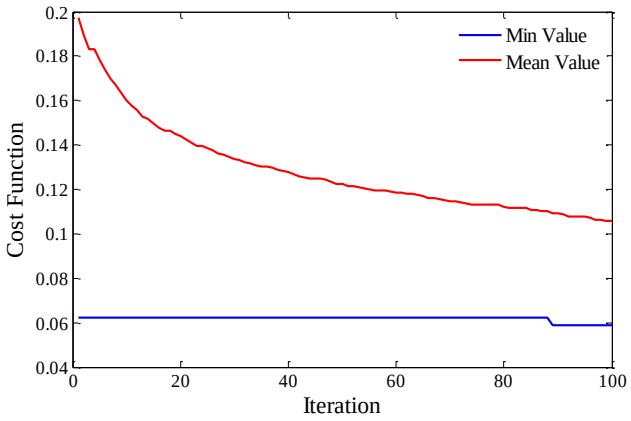

Fig. 5 Diagram of HSA

شکل 5 نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی

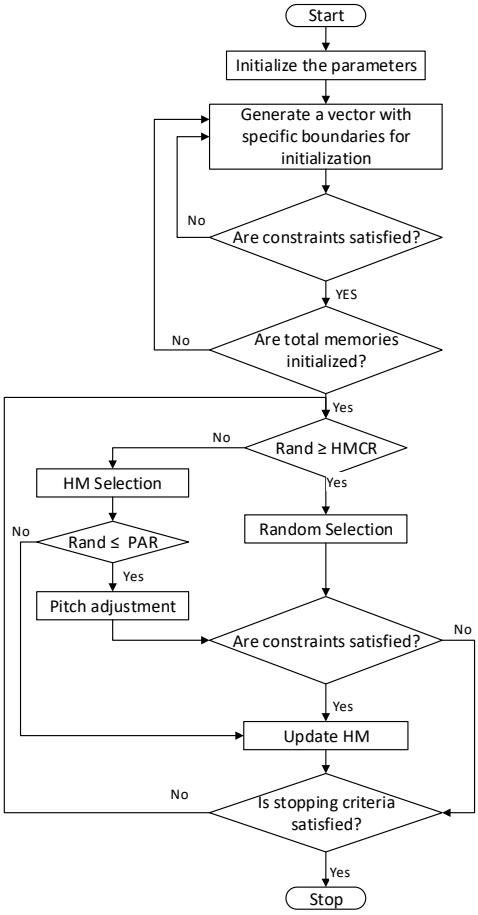

Fig. 3 Harmony search algorithm

شکل 3 فلوچارت الگوریتم جستجوی هارمونی

همچنین به کمک الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی تابع خطای ITAE به منظور تخمین تانسور قطری ممان اینرسی در کنترل‌کننده‌های SM-AFC و PD-AFC بهینه شده است. ممان اینرسی‌های تخمین زده شده در جدول 3 آورده شده است.

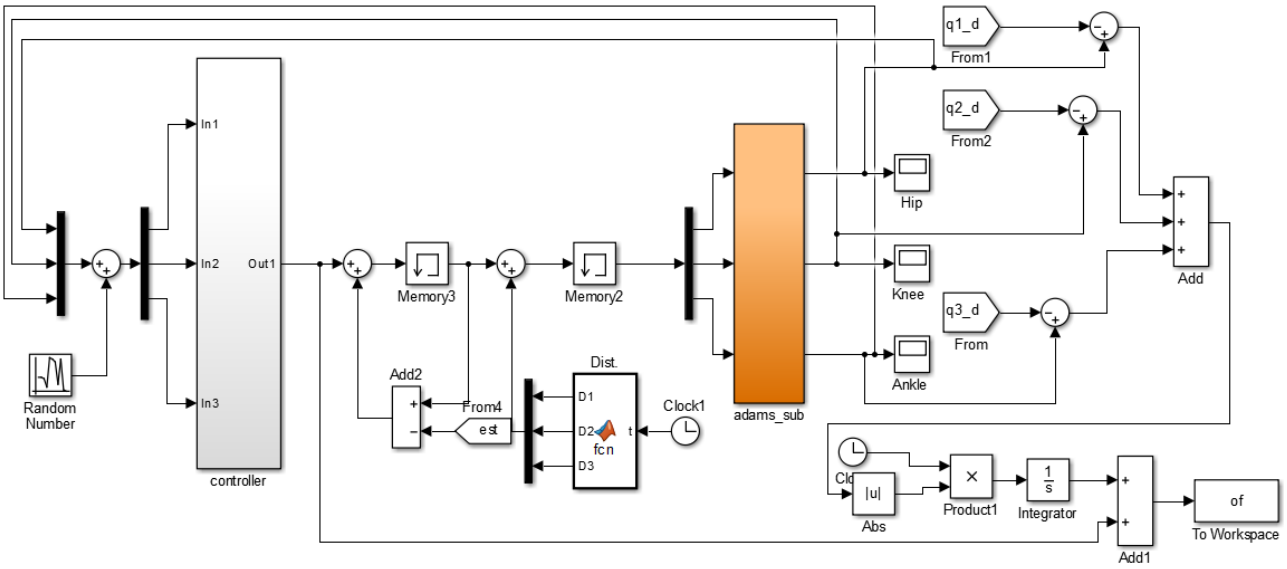

Fig. 4 The block diagram of Simulink

شکل 4 بلوک دیاگرام سیمولینک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.53.2]

جدول 2 مقادیر پارامترهای بهینه‌سازی

Table 2 Optimal parameters of controllers

کنترل‌کننده	پارامتر	مقدار
خطی‌سازی فیدبک (FLC)	K_{P1}	492.8223
	K_{P2}	1261.700
	K_{P3}	818.3135
	K_{D1}	172.7875
	K_{D2}	1.0491
	K_{D3}	290.4843
مود لغزشی (SMC)	λ_1	319.4085
	λ_2	432.1929
	λ_3	81.3732
	K_1	243.3095
	K_2	859.2117
	K_3	322.4512

جدول 3 ممان اینرسی‌های تخمین زده شده

Table 3 Estimated moment of inertia

کنترل‌کننده	پارامتر	واحد	مقدار
SM-AFC	$\acute{I}_1$	kg m^2	0.2196
	$\acute{I}_2$	kg m^2	0.2675
	$\acute{I}_3$	kg m^2	0.1223
PD-AFC	$\acute{I}_1$	kg m^2	0.1961
	$\acute{I}_2$	kg m^2	0.3128
	$\acute{I}_3$	kg m^2	0.3581

که نمودار تعقیب مسیر مفاصل ران، زانو و قوزک برای کنترل‌کننده‌های PD-AFC، مد لغزشی بهینه و PD بهینه به دلیل نزدیکی پاسخ‌ها، ارائه نشده است و برای مقایسه نتایج از معیارهای خطا استفاده شده که در ادامه آورده شده‌اند.

رفتار کیفی حاصل از شکل‌های 6، 7 و 8 نشان‌دهنده عملکرد مناسب کنترل کننده ارائه شده در حضور عدم قطعیت و اغتشاش خارجی می‌باشد. در شکل‌های 9 تا 11 سیگنال‌های خطای مربوط به سه مفصل ران، زانو و قوزک برای کنترل کننده‌های SM-AFC و PD-AFC نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های 9 تا 11 قابل مشاهده است، سیگنال خطای حاصل از کنترل‌کننده پیشنهادی و کنترل‌کننده PD-AFC علاوه

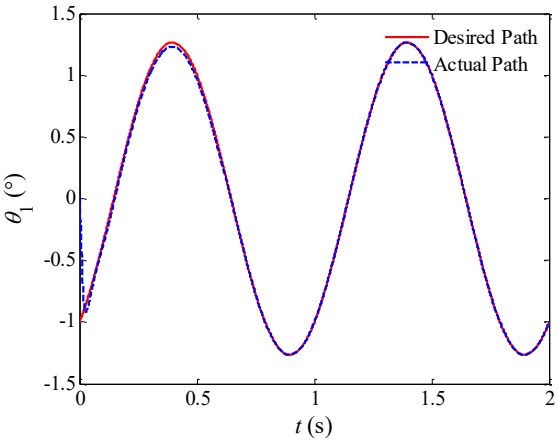

Fig. 6 Desired and actual Path of hip joint

شکل 6 مسیر مطلوب و واقعی مفصل ران

بر داشتن مقدار کوچکتر، نوسان‌های کمتری نیز دارند. در شکل 12 سیگنال کنترلی کنترل‌کننده طراحی شده برای سه مفصل ران، زانو و قوزک نشان داده شده است.

چنان‌که دیده می‌شود سیگنال‌های کنترلی، هموار بوده و به محدوده اشباع خود نرسیده‌اند. با قرار گرفتن سیگنال‌ها از نظر دامنه و فرکانس در محدوده کارکرد عملگرها، اعمال سیگنال‌ها امکان‌پذیر است.

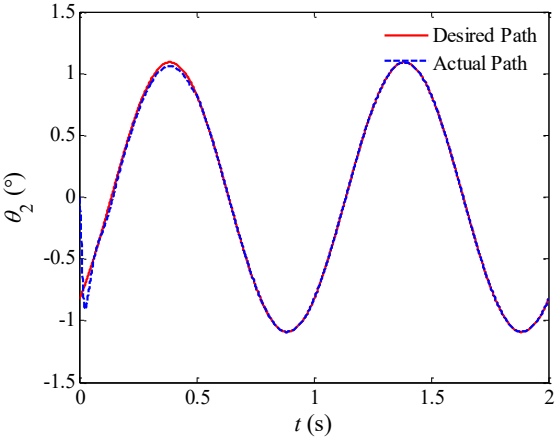

Fig. 7 Desired and actual Path of knee joint

شکل 7 مسیر مطلوب و واقعی مفصل زانو

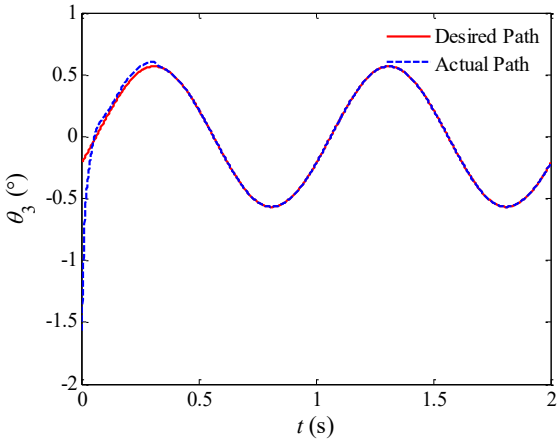

Fig. 8 Desired and actual Path of ankle joint

شکل 8 مسیر مطلوب و واقعی مفصل قوزک

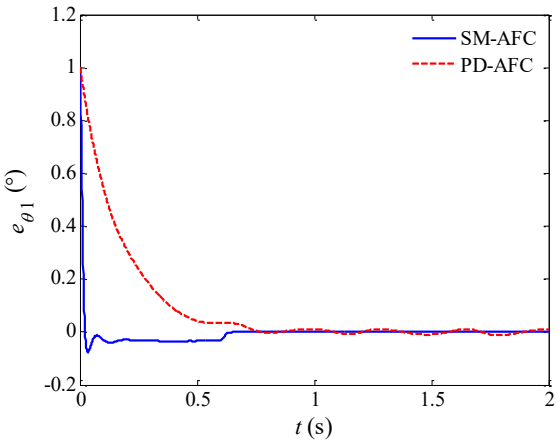

Fig. 9 Error signal of hip angle

شکل 9 سیگنال خطای زاویه مفصل ران

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.53.2]

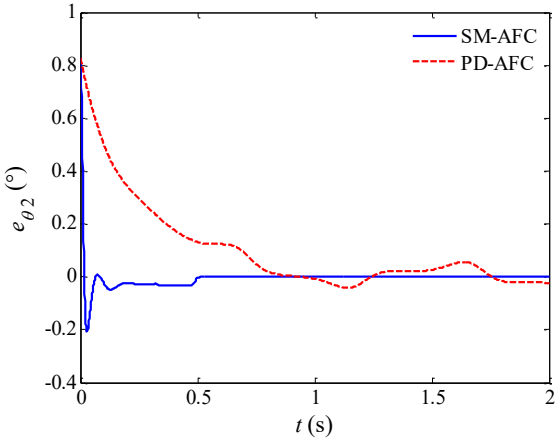

Fig. 10 Error signal of knee angle

شکل 10 سیگنال خطای زاویه مفصل زانو

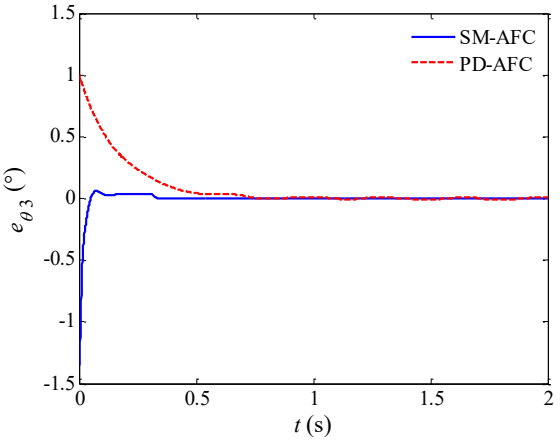

Fig. 11 Error signal of ankle angle

شکل 11 سیگنال خطای زاویه مفصل قوزک

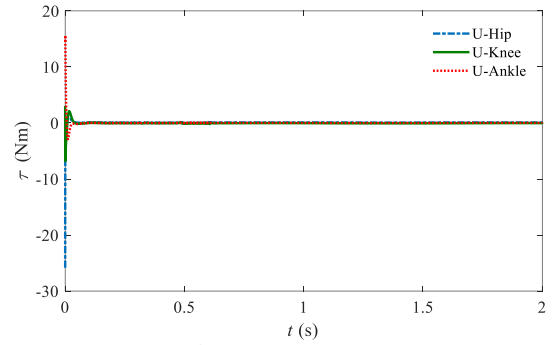

Fig. 12 Control signals of SM-AFC

شکل 12 سیگنال‌های کنترلی کنترل کننده SM-AFC

به منظور مقایسه بین عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده از معیارهای انتگرالی خطا استفاده شده است. در شکل‌های 13، 14 و 15 نمودارهای ستونی این معیارهای خطا برای کنترل‌کننده‌های طراحی شده نشان داده شده است.

با توجه به شکل 13 مشخص می‌شود که عملکرد کنترل‌کننده بهینه PD-AFC در مقایسه با کنترل‌کننده بهینه PD به دلیل وجود حلقه اصلاح کننده ورودی کنترلی مناسب‌تر است.

همان‌طور که در شکل 14 نشان داده شده است، عملکرد کنترل‌کننده

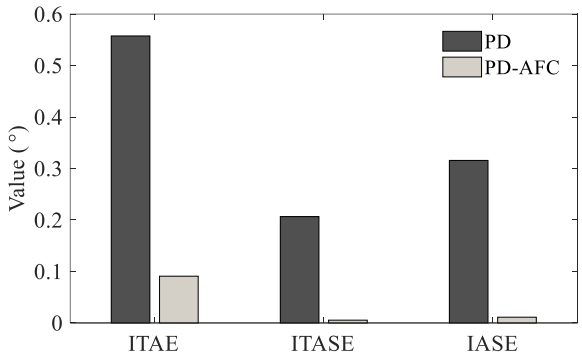

Fig. 13 Error deviation for PD and PD-AFC controller

شکل 13 انحراف معیار خطای کنترل‌کننده‌های PD و PD-AFC

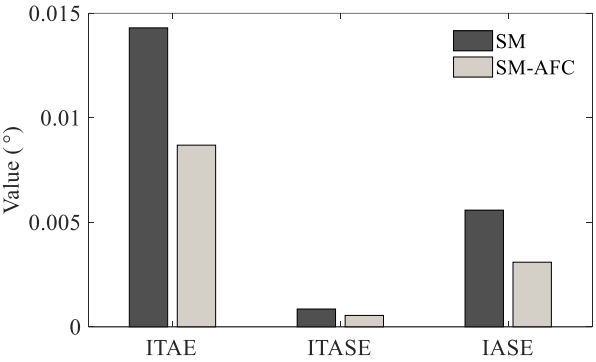

Fig. 14 Error deviation for SMC and SM-AFC controller

شکل 14 انحراف معیار خطای کنترل کننده‌های SMC و SM-AFC

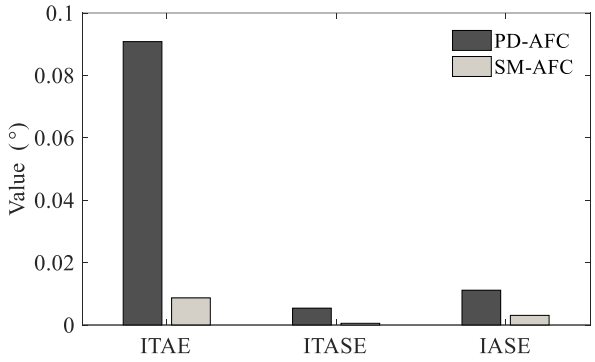

Fig. 15 Error deviation for PD-AFC and SM-AFC controller

شکل 15 انحراف معیار خطای کنترل کننده‌های PD-AFC و SM-AFC

بهینه SM-AFC در مقایسه با کنترل‌کننده بهینه SMC مناسب‌تر است. با توجه به توانایی کنترل‌کننده بهینه SMC در حذف اغتشاشات و مقابله با عدم قطعیت‌ها، حلقه کنترلی AFC می‌تواند با تخمین تانسور ممان اینرسی و اصلاح ورودی کنترلی، توانایی کنترل‌کننده SMC را در حذف اغتشاشات و مقابله با عدم قطعیت‌ها افزایش دهد.

همان‌طور که در شکل 15 نشان داده شده است، عملکرد کنترل‌کننده بهینه SM-AFC در مقایسه با کنترل‌کننده بهینه PD-AFC مناسب‌تر است که این امر به دلیل توانایی بالاتر کنترل‌کننده معمولی SMC نسبت به کنترل‌کننده معمولی PD در حذف اغتشاشات و مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت‌های سیستم می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.53.2]

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش کنترل ترکیبی بهینه و مقاوم که شامل یک کنترل کننده مد لغزشی بهینه و یک کنترل‌کننده فعال نیرو (به صورت اصلاح کننده ورودی کنترلی به کمک تخمین تانسور ممان اینرسی)، برای مقابله با اغتشاشات، عدم قطعیت‌ها و نویزهای سیستم ارائه شده و عملکرد آن در مقایسه با کنترل‌کننده‌های PD-AFC، مد لغزشی بهینه و کنترل بهینه PD در حضور اغتشاش و نویز بررسی شده است. بدین منظور در مرحله شبیه‌سازی، برای مقایسه پاسخ کنترل‌کننده پیشنهادی، با کنترل‌کننده‌های طراحی شده، یک تابع هزینه به صورت ترکیبی از نرخ سیگنال کنترلی و معیار خطای انتگرالی در نظر گرفته شد و به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی مینیمم شده و پارامترهای بهینه کنترلی و مؤلفه‌های تانسور ممان اینرسی استخراج شد.

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص می‌شود که نقش کنترل‌کننده فعال نیرو در اصلاح ورودی کنترلی می‌تواند تأثیر بسزایی در مقابله با اغتشاشات و نویزهای وارد شده به سیستم داشته باشد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، کنترل‌کننده PD-AFC در مقایسه با کنترل‌کننده بهینه PD و همچنین کنترل‌کننده SM-AFC در مقایسه با کنترل‌کننده بهینه SMC به دلیل وجود حلقه کنترلی فعال نیرو عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند.

عملکرد کنترل‌کننده بهینه مد لغزشی در کنترل ربات مورد مطالعه مطلوب بوده که این امر نشان‌دهنده توانایی کنترل‌کننده بهینه SMC در حذف اغتشاشات و مقابله با عدم قطعیت‌ها در سیستم می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از حلقه کنترلی فعال نیرو می‌تواند با تخمین تانسور ممان اینرسی و اصلاح ورودی کنترلی، توانایی کنترل‌کننده SMC در حذف اغتشاشات و مقابله با عدم قطعیت‌ها را افزایش دهد.

روش کنترلی ارائه شده (SM-AFC) یک راه حل اثر بخش و مفید در حذف اغتشاشات و مقابله با عدم قطعیت‌های سیستم نسبت به کنترل‌کننده‌های PD-AFC، مد لغزشی بهینه و کنترل بهینه PD را پیشنهاد می‌کند.

7- مراجع

[1] R. Bogue, Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 36 Issue. 5 pp. 421-427, 2009.
[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*, First Edittion, pp. 1-349. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
[4] A.M. H. Herr, challenges and state-of-the-art Lower Outhouses extremity exoskeletons and active, *IEEE Transactions Robot*, Vol.24, pp.144–158, 2008.
[5] E. Khurana, T. Harsha S. Cupta, Development of an augmented exoskeleton, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 8, Issue 8, pp. 1247–1253, 2017.
[6] S. Jezernik, G. Colombo, T. Kelly, H. Frueh, M. Morari, Robotic OrthosisLokomat: A rehabilitation and research tool, *Technology at the Neural Interface*, Vol. 6, PP. 108–115, 2003.
[7] 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, Sept, 22-26, 2008.
[8] H. Kazerooni, Hybrid Control of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), *The International Journal of Robotics*, Vol. 25, Issue 5-6, pp. 561-573, 2006.
[9] B. Siciliano, O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 773-793, 2008.
[10] C.J. Walsh, K. Pasch, H. Herr,An autonomous, under actuated exoskeleton for load-carrying augmentation, *in: Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on, IEEE*, pp.1410–1415, 2006.
[11] H. Kawamoto, Y. Sankai, Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for HAL, *Advanced Robotics*, Vol. 19, pp.717-734, 2005.
[12] O. Cruciger, T. A. Schildhauer, R. C. MeindlM. Tegenthoff, P. Schwenkreis, M. CitakM. AachImpact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQOL) in chronic SCI: a case study, *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, Vol. 11, Issue 6, pp. 529-534, 2016.
[13] D. Ferris, K. Gordon, J. Beres-Jones, Muscle activation during unilateral stepping occurs in the no stepping limb of humans with clinically complete spinal cord injury, *Spinal Cord*,42,Vol. 42, pp. 14–23, 2004.
[14] M. Mailah, *Intelligent Active Force Control of a Rigid Robot Arm Using Neural Network and Iterative Learning Algorithms*, PhD Thesis, Faculty of mechanical engineering, University of Dundee, Scotland, 1998.
[15] M. Mailah, J. R. Hewit, S. Meeran, Active force control applied to a rigid robot arm, *Jurnal Mekanikal*, Vol. 2, pp. 52–68, 1996.
[16] S. B. Hussein, H. Jamaluddin, M. Mailah, A. M. S. Zalzala, A hybrid intelligent active force controller for robot arms using evolutionaryneural networks, *Proceedings of the 20th Congress on Evolutionary Computation*, Washington, USA, December, 2000.
[17] M. F. Hassan, M. Mailah, R. Junid, N. A. Alang, Vibration suppression of a handheld tool using intelligent active force control(AFC), *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, June 30 - July 2, 2010.
[18] M. H. M. Ramli, M. N. A. A. Patar, M. S. Meon, A. K. Makhtar, Dynamics characterization of a high precision MM3A micro manipulator system, *Proceedings of Humanities, Science and Engineering (CHUSER), IEEE Colloquium on*, pp.158-161, 2011.
[19] M. Mohamad, M. Mailah, A. H. Muhaimin, Vibration control of mechanical suspension system using active force control, *Proceedings of 1st International Conference on Natural Resources Engineering and Technology INRET*, 2006.
[20] H. Ramlia, M.S. Meona, T.L.T. Mohameda, A.A.M. Isaa, Z. Mohameda, A Fuzzy-Active force control architecture based in characterizing nonlinear systems' behavior, *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*, Vol. 41, pp. 1389-1397, 2012.
[21] M. F. Hassan, M. Mailah, R. Junid, N. A. Alang, Vibration suppression of a handheld tool using intelligent active force control(AFC),*Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. 2, pp.1636-1641, 2010.
[22] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, London, 2005.
[23] M. Mazare, M. Taghizadeh, M. R. Najafi, Sliding mode control of 3-RPR parallel robot on the optimal path using cuckoo optimization algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 147-158, 2015. (in Persian فارسی)
[24] H. Jahanabadi, M. Mailah, M.Z.M. Zain, H. M. Hooi, Active force with fuzzy logic control of a two-link arm driven by pneumatic artificial muscles, *Journal of Bionic Engineering*, Vol.8, pp. 474-484,2011.
[25] H. Jahanabadi, M. Mailah, and M. Z. M. Zain, Active force control of a fluidic muscle system using fuzzy logic, *Proceedings of Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME International Conference on*, pp.1970-1975, 2009.
[26] M. Ruby, R. M. Botez,Trajectory optimization for vertical navigation using the harmony search algorithm,*IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, Issue. 17, pp. 11-16, 2016.
[27] M.Khalili, R.Kharrat, K.Salahshoor, M.HaghighatSefat, Global Dynamic Harmony Search algorithm*:* GDHS", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 228, pp. 195-219, 2014.
[28] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 4th Edition, Wiley, pp.276-315, 1990.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.53.2]