نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۲، سال ۱۳۹۹، صفحات ۳۵۳۳ تا ۳۵۴۸
DOI: 10.22060/mej.2019.16292.6321

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

مجید مختاری، مصطفی تقی‌زاده*، محمود مزارع

مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

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

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

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

۱- مقدمه

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

اگزواسکلتون‌ها از سال ۱۹۶۰ در آمریکا[۲]، ژاپن و اروپا [۳]مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۰۳ یک ربات اسکلت خارجی پایین تنه با دو محرک خطی برگشت‌پذیر، یکی در مفصل ران و دیگری در مفصل زانو، مدل‌سازی و کنترل شده است. در این ربات از روش کنترل موقعیت مسیرهای از پیش تعیین شده، استفاده شده است [۴ و ۵]. به منظور تقویت نیروی انسانی و استقامت انسان در هنگام حرکت برای کاربردهای نظامی، ربات بلیکس ارائه شد. الگوریتم کنترلی این ربات به صورت کنترل مبتنی بر مدل با استراتژی کمکی افزایش حساسیت به نیروها و گشتاورهای خارجی می‌باشد [۶]. برای حمل بارهای سنگین در مدت زمان طولانی و برای حرکت در سطوح با شیب کم، رباتی با عنوان اگزوهیکر طراحی شده است. استراتژی کنترلی این ربات به صورت استراتژی کنترل فعال تعقیب مفصل است [۷]. در سال ۲۰۱۲ یک اگزواسکلتون در زمینه پزشکی و برای کمک به افراد معلول برای راه رفتن، ارائه شده است که کنترل آن بر مبنای کنترل‌کننده موقعیت طبق مسیر از پیش تعیین شده می‌باشد [۸].

طراحی کنترل‌کننده مناسب تاثیر مستقیم بر عملکرد ربات اسکلت خارجی دارد. کنترل‌کننده علاوه بر تعیین ورودی‌های کنترلی مناسب به‌منظور تعقیب منحنی مطلوب مفاصل، باید بتواند بر اغتشاشات وارد شده به ربات در اثر نیروی اعمال شده از طرف انسان و محیط و همچنین بر دینامیک‌های مدل نشده و عدم قطعیت‌های سیستم غلبه کند. کنترل‌کننده‌هایی مانند کنترل‌کننده خطی‌سازی پسخوراند، کنترل‌کننده مقاوم، کنترل‌کننده تطبیقی [۹]، کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی [۱۰]، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روئیت‌گر

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

و کنترل‌کننده مد لغزشی [۱۱] برای مقابله با اغتشاشات خارجی و همچنین عدم قطعیت‌های داخلی ارائه شده‌اند. این روش‌ای کنترل به لحاظ نظری به محبوبیت فراوان دست یافته‌اند، اما اکثر آن‌ها فقط پایداری نسبی را تضمین می‌کنند. 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. در نتیجه، یک کنترل کننده مقاوم با همگرایی سریع برای کاربردهای نظری و عملی لازم می‌باشد. امروزه روش‌های کنترلی که پایداری حالت‌های سیستم‌های غیرخطی را به نقاط تعادل در زمان محدود تضمین می‌کنند، مانند کنترل‌کننده مد لغزشی فراپیچشی [۱۲]، کنترل‌کننده مدلغزشی ترمینالی [۱۳] توسعه یافته‌اند.

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

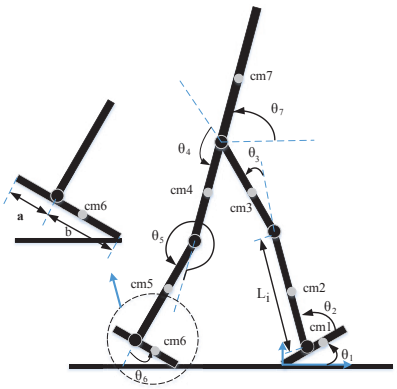
به‌منظور بهبود عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی، نسل جدیدی از کنترل‌کننده‌های حالت لغزشی با مرتبه بالاتر مانند کنترل مد لغزشی فراپیچشی پیشنهاد شده است که قانون کنترل آن‌ها ذاتا و بدون تعریف لایه مرزی سعی در کاهش پدیده چترینگ دارد؛ درحالی که توانایی کنترل‌های مد لغزشی سنتی را در مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات حفظ می‌کند [۱۷]. کنترل مد لغزشی فراپیچشی یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌های کنترل مد لغزشی حالت پیوسته مرتبه دوم است. این روش کنترلی، تابع کنترلی پیوسته‌ای تولید می‌کند که متغیر لغزشی و مشتق آن را در زمان محدود در حضور اغتشاشات هموار با دامنه محدود به مقدار صفر میل می‌دهد. از آنجا که این روش کنترلی دارای انتگرال ناپیوسته است، بنابراین پدیده چترینگ حذف نشده اما به مقدار قابل قبولی کاهش می‌یابد. اساس این روش کنترلی در سال ۲۰۰۸ توسط مورنو و اوسوریو [۱۸] ارائه شد. روش کنترل مد لغزشی فراپیچشی به‌منظور کنترل دقیق و مقابله با غیرخطی‌ها و نامعینی‌های سیستم توربین باد مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹]. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج یک کنترل‌کننده بهینه مقاوم مقایسه شده است که نتایج، برتری روش کنترل مد لغزشی فراپیچشی را نشان داده است. یک ربات سریال به روش کنترل مد لغزشی فراپیچشی به منظور حذف سریع خطای ردیابی و مقابله با عدم قطعیت‌ها کنترل شده است که نتایج شبیه‌سازی دقت و سرعت در ردیابی مسیر مرجع، اعتبار سنجی اثر کنترل‌کننده و کاهش انرژی مصرفی را تایید کرده‌اند [۲۰].

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

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

در این مقاله، ابتدا به‌منظور طراحی مسیرهای مطلوب مفاصل ربات از الگوریتم ارائه شده در مرجع [۲۷] استفاده شده است. سپس با استفاده از روش لاگرانژ معادلات مدل دینامیکی ربات استخراج و به منظور کنترل موقعیت مفاصل ربات، از روش کنترل مد لغزشی بهینه کلاسیک و کنترل تطبیقی بهینه مد لغزشی فراپیچشی استفاده شده است. همچنین مسیر مطلوب مفصل بالا تنه در هر لحظه به‌گونه‌ای تعیین شده است که پایداری ربات بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر تامین شود. به‌منظور دستیابی به حداکثر پایداری و کمترین خطا در تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل ربات، پارامترهای کنترل‌کننده پیشنهادی و پارامترهای مسیر مطلوب بالا تنه، به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی [۲۸] بهینه شده است. در ادامه عملکرد کنترل‌کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی با کنترل‌کننده مد لغزشی[1] بهینه مقایسه شده است. نوآوری این مقاله عبارتست از: ۱- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی بهینه مد لغزشی فراپیچشی برای ربات اسکلت خارجی هفت درجه آزادی ۲-استفاده از حرکت مفصل بالا تنه به‌عنوان جبرانساز پایداری ربات ۳-قابلیت مقابله با اغتشاشات با دامنه نامعلوم و پدیده چترینگ ۴- بهینه‌سازی همزمان پارامترهای کنترل‌کننده و پارامترهای مسیر مطلوب

1 Sliding Mode Control (SMC)



شکل ۱: شماتیک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه هفت درجه آزادی

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

بالاتنه با الگوریتم جستجوی هارمونی.

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

۲- معرفی و مدل‌سازی مکانیزم پیشنهادی

تطابق سینماتیکی درجات آزادی ربات با بدن انسان و قرارگیری مفاصل ربات دقیقا بر روی مفاصل شخص باعث تبعیت کامل سینماتیک ربات از سینماتیک کاربر می‌شود. این روش بسیاری از مشکلات طراحی را حل می‌کند. این رویکرد در طراحی را می‌توان در سری ربات‌های هال مشاهده کرد [۲۹ و ۳۰]. در این مقاله، مدل استفاده شده شامل هفت لینک و هفت مفصل می‌باشد. در شکل ۱ شماتیک ربات اسکلت خارجی مورد مطالعه نشان داده شده است.

در شکل ۱، θ_i، L_i و C_{m_i} برای i از ۱ تا ۷ به ترتیب زوایای لینک‌ها، طول لینک‌ها و مرکز جرم لینک‌های ربات می‌باشد. a و Error! Bookmark not defined. نیز ابعاد کف پای ربات می‌باشد. برای استخراج روابط دینامیکی حاکم بر ربات از روش لاگرانژ به‌صورت رابطه (۱) استفاده شده است.

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

که در آن θ_i متغیر تعمیم یافته، K انرژی جنبشی تمام لینک‌های ربات،Error! Bookmark not defined. انرژی پتانسیل تمام لینک‌های ربات و τ_i گشتاور وارد شده به هر یک از مفاصل می‌باشد. با استخراج روابط سینماتیکی و استفاده از روش لاگرانژ معادلات دینامیکی حاکم بر ربات به‌صورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۳۱].

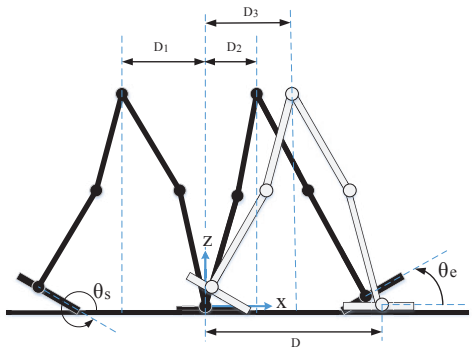
$$\tau = M(\theta)\theta'' + C(\theta,\theta') + G(\theta) + \tau_d \qquad (۲)$$

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

۳- طراحی مسیر مطلوب قدم‌زنی

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

در شکل ۲، $\grave{e}_s$ زاویه شروع فاز دو تکیه‌گاهی، $\grave{e}_e$ زاویه پایان فاز دو تکیه‌گاهی، D طول یک گام، D_1 فاصله طولی مفصل ران در ابتدای فاز



شکل ۲: پارامترهای مسیر پایین تنه

Fig. 2. Design parameters of the lower limb trajectory

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

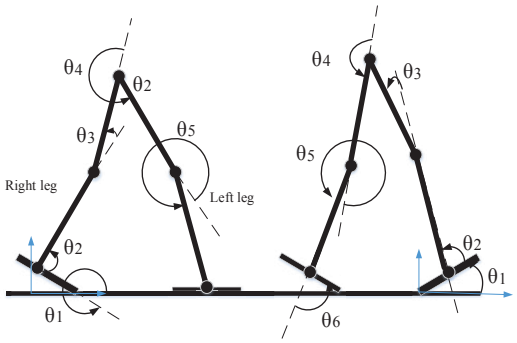
برای مشخص کردن مسیر کف پا در هر لحظه به دو مؤلفه در راستای X و z و یک مؤلفه θ که معرف زاویه کف پا باشد، نیاز است. اولین گام حرکت را پای راست ربات انجام می‌دهد و پای چپ به عنوان تکیه‌گاه عمل می‌کند. در مرحله یک تکیه‌گاهی حرکت با جدا شدن پنجه پای راست از زمین شروع شده و با تماس پاشنه پای راست با سطح زمین به انتها می‌رسد. این فاز از حرکت در مدت زمان Ts انجام می‌شود. در این مرحله پای چپ به طور کامل با سطح زمین در تماس می‌باشد. فاز دو تکیه‌گاهی با تماس پاشنه پای راست با سطح زمین شروع می‌شود. در این مرحله همزمان با فرود آمدن پای راست، پای چپ از سطح زمین بلند می‌شود. این فاز از حرکت در مدت زمان Td انجام می‌شود. با استفاده از سینماتیک معکوس ربات در دو فاز تک و دو تکیه‌گاهی و همچنین معلوم بودن مسیرهای کف پا و مفصل ران ربات مسیرهای حرکت مطلوب مفاصل ربات به‌صورت یکتا بدست می‌آید [۲۷]. مسیرهای مچ پا و مفصل ران با گذراندن منحنی مناسب از چند نقطه که مچ پا و مفصل ران از آن‌ها می‌گذرند بدست می‌آید.

$$
\begin{aligned}
{}_{ankle-r} &= \begin{cases} \theta_s & t=0 \\ \theta_e & t=Ts \\ 0 & Ts<t<Ts+Td \end{cases} \\
{}_{ankle-r} &= \begin{cases} -D+b(1-\cos(\theta_s)) & t=0 \\ x_{\max} & t=0.5\,Ts \\ D-a(1-\cos(\theta_e)) & t=Ts \\ D-a(1-\cos(\theta_{ankle-r})) & Ts<t<Ts+Td \end{cases} \\
{}_{ankle-r} &= \begin{cases} -b\sin(\theta_s) & t=0 \\ z_{\max} & t=0.5\,Ts \\ a\sin(\theta_e) & t=Ts \\ a\sin(\theta_{ankle-r}) & Ts<t<Ts+Td \end{cases} \\
{}_{ip} &= \begin{cases} D_1 & t=0 \\ D_2 & t=Ts \\ D_3 & t=Ts+Td \end{cases} \\
{}_{ip} &= z_h = \text{constant} \quad Ts<t<Ts+Td
\end{aligned}
\tag{۳}
$$

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

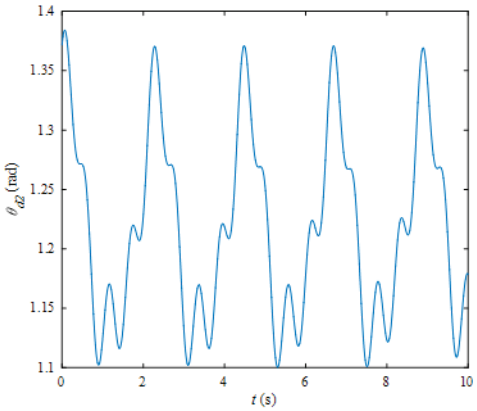
$$
\begin{aligned}
\theta_{ankle-l} &= \begin{cases} 0 & 0<t<Ts \\ \theta_s & t=Ts+Td \end{cases} \\
x_{ankle-l} &= \begin{cases} 0 & 0<t<Ts \\ b(1-\cos(\theta_{ankle-l})) & Ts<t<Ts+Td \end{cases} \\
z_{ankle-l} &= \begin{cases} 0 & 0<t<Ts \\ -a\sin(\theta_{ankle-l}) & Ts<t<Ts+Td \end{cases}
\end{aligned}
\tag{۴}
$$

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



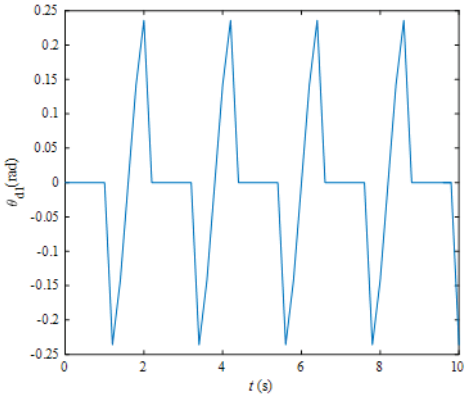
شکل ۳: فاز دو و تک تکیه‌گاهی ربات

Fig. 3. single and double support phases



شکل ۵: مسیر مطلوب مفصل شماره ۲

Fig. 5. desired trajectory of the second joint



شکل ۴: مسیر مطلوب مفصل شماره ۱

Fig. 4. desired trajectory of the first joint

Table 1. Hip and Ankle parameters

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مسیر مفاصل مچ و ران ربات

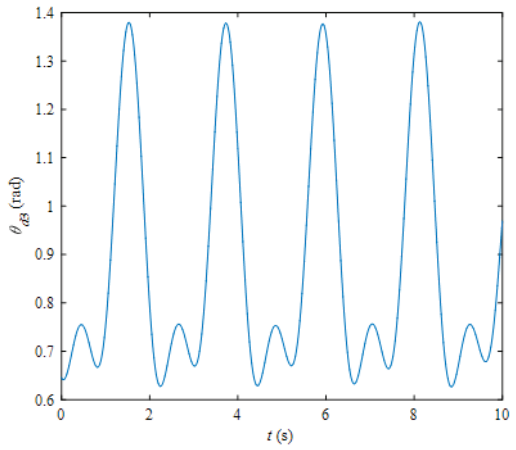
پارامتر	واحد	مقدار
Ts	S	۱
Td	S	۰/۱
D	M	۰/۵
D_1	M	-۰/۲۵
D_2	M	۰/۲۰
D_3	M	۰/۲۵
x_{max}	M	۰/۲۵
z_{max}	M	۰/۲۰
z_h	M	۱
$\theta_{\check{e}}$	R̃ad	۰/۲۵

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

۴- کنترل‌کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی[1]

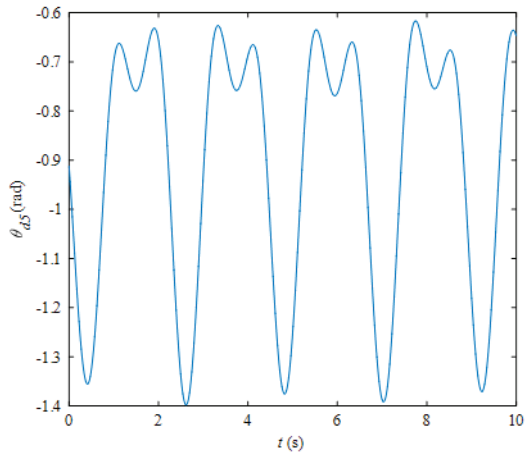
در این مقاله به منظور تعقیب مسیر تعیین شده برای مفاصل توسط ربات و همچنین مقابله با اغتشاشات، نامعینی‌ها و دینامیک‌های مدل نشده از کنترل‌کننده تطبیقی مدلغزشی فراپیچشی استفاده شده است. روش کنترل مد لغزشی یکی از روش‌های کنترلی است که در دسته کنترل‌های مقاوم قرار می‌گیرد [۳۲]. به‌منظور طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی، برای هر متغیر حالت q خطا به صورت $e = q - q_d$ در نظر گرفته شده و یک سطح متغیر با زمان مطابق با رابطه (۵) تعریف شده است.

1 .Adaptive Super Twisting Sliding Mode Controller (ASTSMC)



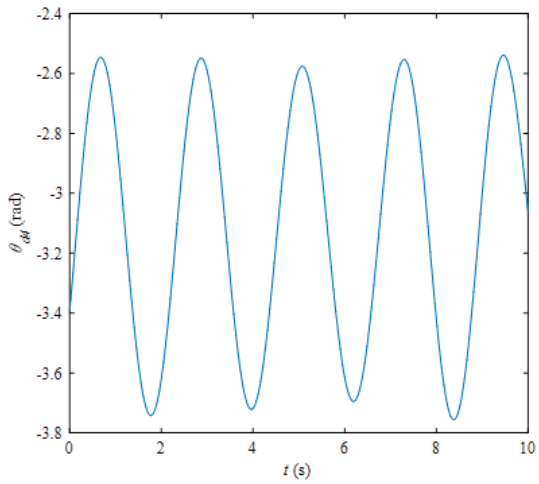
شکل ۶: مسیر مطلوب مفصل شماره ۳

Fig. 6. desired trajectory of the third joint



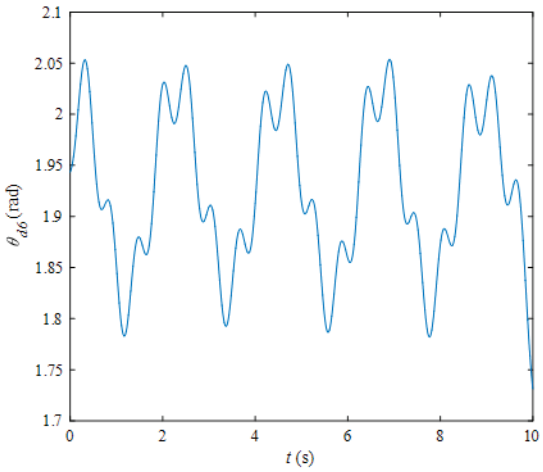
شکل ۸: مسیر مطلوب مفصل شماره ۵

Fig. 8. desired trajectory of the fifth joint



شکل ۷: مسیر مطلوب مفصل شماره ۴

Fig. 7. desired trajectory of the fourth joint



شکل ۹: مسیر مطلوب مفصل شماره ۶

Fig. 9. desired trajectory of the sixth joint

$$S(q,t)=(\frac{d}{dt}+\lambda)^{n-1}e \qquad (۵)$$

که در آن $\dot{e}$ یک ثابت اکیداً مثبت و n بعد فضای حالت است که برای ربات مورد مطالعه برابر با ۳ می‌باشد. هدف از طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی، قرار دادن شیب سطح متغیر با زمان در نزدیکی صفر است. با مشتق‌گیری نسبت به زمان، شیب سطح متغیر با زمان از رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$S'=(q''-q_d'')+\lambda(q'-q_d') \qquad (۶)$$

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

$$\hat{\tau}(t)=C(\theta,\theta')+G(\theta)+M(q_d''-\lambda(q'-q_d'))+\tau_d \qquad (۷)$$

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

$$\tau(t) = \hat{\tau}(t) - K\ \mathrm{sign}(S) \tag{۸}$$

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

$$\begin{aligned} &\tau_i(t) = \hat{\tau}_i(t) + \omega_i \\ &\omega_i = A_i\sqrt{|S_i|}\,\mathrm{sign}(S_i) + \nu_i \\ &\nu_i' = -\frac{\beta}{2}\mathrm{sign}(S_i) \end{aligned} \tag{۹}$$

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

$$A_i' = \begin{cases} W_1\sqrt{\frac{\gamma_1}{2}}\,\mathrm{sign}(|S_i| - \mu) & A > a_m \\ \eta & A < a_m \end{cases} \tag{۱۰}$$

که در آن W_1، γ_1، ε، μ، a_m و η ثابت می‌باشند. به‌منظور بررسی پایداری روش کنترلی تابع لیاپانوف مثبت معین به‌صورت رابطه (۱۱) در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. با مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف و ساده سازی ریاضی رابطه (۱۲) استخراج شده است.

$$\begin{aligned} &V_i = \delta_i^T P_i \delta_i \\ &\delta_i = \begin{bmatrix} \sqrt{|S_i|}\,\mathrm{sign}(S_i) & \nu_i \end{bmatrix}^T \\ &P_i = \begin{bmatrix} -\frac{4\beta_i}{2} + A_i^2 & -A_i \\ -A_i & 2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{۱۱}$$

$$\begin{aligned} &V_i' = \frac{1}{\sqrt{|S_i|}}(\delta_i^T P_i \delta_i + \tau_{di} q_i^T \delta_i) \\ &Q_i = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} -\frac{4\beta_i}{2} + A_i^2 & -A_i \\ -A_i & 1 \end{bmatrix} \\ &q_i^T = -\frac{4\beta_i}{2} + \frac{A_i^2}{2} - \frac{A_i}{2} \end{aligned} \tag{۱۲}$$

با جایگذاری Q و q^T در رابطه V' داریم:

$$\begin{aligned} &V_i' = \frac{1}{\sqrt{|S_i|}}(\delta_i^T \hat{Q}_i \delta_i) \\ &\hat{Q}_i = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} -\frac{4\beta_i}{2} + A_i^2 - (\frac{8\beta_i}{A_i} + A_i)\Delta_i & -A_i - 2\Delta_i \\ -A_i - 2\Delta_i & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{۱۳}$$

در صورت برقراری شرط رابطه (۱۴)، V_i' منفی معین شده و سیستم حلقه بسته پایدار است.

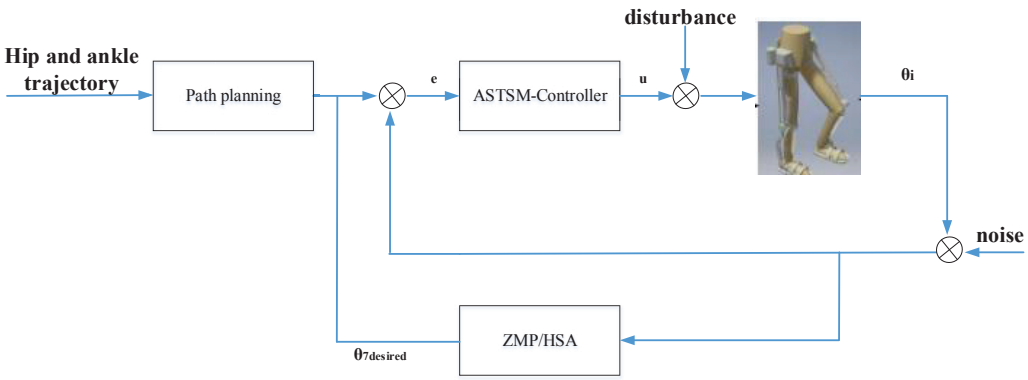
$$A_i > 2\Delta_i \quad , \quad -\frac{\beta_i}{2} > A_i\ \frac{5A_i\,\Delta_i}{2A_i - 4\Delta_i} \tag{۱۴}$$

۵- معیار پایداری نقطه گشتاور صفر[1]

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

$$\begin{aligned} x_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)x_i - \sum_{i=1}^{n} m_i x_i'' z_i - \sum_{i=1}^{n} I_{iy}\theta_{iy}''}{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)} \\ y_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)y_i - \sum_{i=1}^{n} m_i y_i'' z_i - \sum_{i=1}^{n} I_{ix}\theta_{ix}''}{\sum_{i=1}^{n} m_i(z_i'' + g)} \end{aligned} \tag{۱۵}$$

1 .Zero Momentum Point (ZMP)



شکل ۱۰: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پیشنهادی

Fig. 10. Block diagram of the proposed controller

در رابطه (۱۵)، x، y و z مختصات مرکز جرم لینک‌های ربات می‌باشد. همچنین θ''_{ix} و θ''_{iy} به ترتیب شتاب زاویه‌ای لینک‌ها در راستای افقی و عمودی می‌باشد. در تعیین حرکت پایین‌تنه ربات پایداری ربات در نظر گرفته نشده است. بنابراین از حرکت بالاتنه ربات در جهت جبران پایداری استفاده می‌شود. برای این منظور مسیر حرکت مفصل بالا تنه ربات به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که در هر لحظه معیار پایداری نقطه گشتاور صفر برای ربات برقرار باشد. پارامترهای زاویه، سرعت و شتاب زاویه‌ای بالاتنه به‌منظور استخراج الگوی حرکتی پایدار به‌گونه‌ای تعیین شده که در هر لحظه بتوان با اتخاذ مقادیر مناسب برای آن‌ها ربات را در حالت پایدار قرار داد. مسیر مطلوب مفصل کمر با استفاده از چند نقطه معلوم در یک بازه حرکتی توسط یک منحنی مرتبه پنج معرفی شده و سپس پارامترهای مسیر با کمینه‌سازی یک تابع هدف مناسب بهینه شده است. رابطه (۱۶) چند نقطه معلوم از یک بازه حرکتی مفصل بالا تنه را بیان می‌کند.

$$\theta_7 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \alpha & t = 0 \\ \gamma & t = 0.5Ts \\ \frac{\pi}{2} - \alpha & t = Ts \\ \sigma & t = Ts + Td \end{cases} \qquad (۱۶)$$

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

$$\begin{aligned} \theta'_7(0) &= \theta'_7(Ts + Td) \\ \theta''_7(0) &= \theta''_7(Ts + Td) \end{aligned} \qquad (۱۷)$$

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

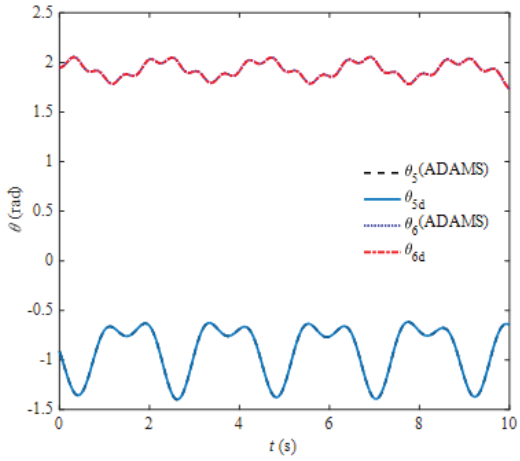
$$CF = \int \left| ZMP - ZMP_{desird} \right|^2 + \sum_{i=1}^{7} \int \left| e_i \right|^2 \qquad (۱۸)$$

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

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

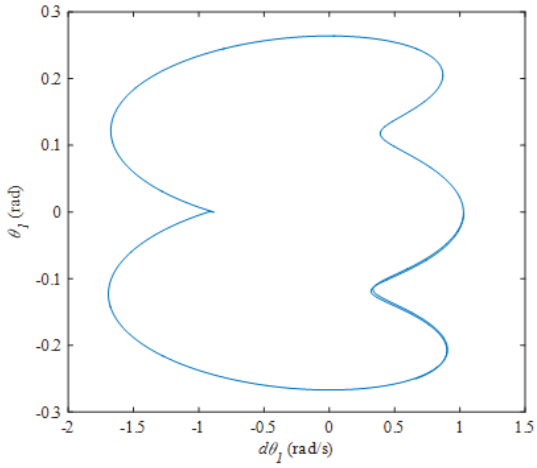
۶- شبیه‌سازی

در این مقاله با استفاده از روش لاگرانژ معادلات دینامیکی حرکت ربات پایین تنه و سپس مسیرهای مرجع استخراج شده برای هر یک از مفاصل ربات با کنترل‌کننده‌های تطبیقی بهینه مدلغزشی فراپیچشی و مدلغزشی



شکل ۱۱: مسیر مفاصل ۵ و ۶ در مدل دینامیکی و آدامز

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



شکل ۱۲: نمودار صفحه فاز مفصل اول

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

بهینه ردیابی شده است. همچنین مسیر مرجع مفصل بالا تنه ربات به‌عنوان جبرانساز پایداری بر اساس معیار نقطه گشتاور صفردر هر لحظه تعیین شده است. پارامترهای کنترل‌کننده‌ها و همچنین پارامترهای مسیر مفصل بالا تنه به‌منظور دستیابی به حداکثر پایداری و کمترین خطای ردیابی ممکن توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی تعیین شده‌اند. مقاوم بودن کنترل‌کننده‌ها در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم با در نظر گرفتن اغتشاشاتی با دامنه‌ای معادل ۲۰ درصد ماکزیمم دامنه حرکت هر یک از مفاصل و با فرکانس ۳ هرتز و همچنین عدم قطعیت‌هایی به‌صورت ۲۰ درصد مقدار نامی هر یک از پارامترها بررسی شده است. در شبیه‌سازی‌ها با توجه به عملگرهای موجود، محدوده مجاز برای تلاش کنترلی ۸۰- تا ۸۰+ نیوتن متر و حد بالای سرعت زاویه‌ای مفاصل ربات ۲۰۰ درجه بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به‌منظور مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده در این مقاله نمودارهای خطا، نمودار انرژی مصرفی و نمودار نقطه گشتاور صفر برای هر یک از کنترل‌کننده‌ها ارائه شده است. به‌منظور اعتبارسنجی مدل دینامیکی استخراج شده از روش لاگرانژ، ربات در نرم‌افزار آدامز مدل‌سازی شده و نتایج روش لاگرانژ با نتایج حاصل از آدامز مقایسه شده است. در جدول ۲ پارامترهای ربات اسکلت خارجی پایین تنه ارائه شده است. همچنین به‌عنوان نمونه مسیرهای حاصل از دینامیک معکوس مفصل ۵ و ۶ ربات حاصل از روش لاگرانژ و نرم‌افزار آدامز در شکل ۱۱ مقایسه شده است.

با توجه به شکل ۱۱، منحنی‌های مسیر برای مدل لاگرانژ و نرم‌افزار آدامز تطابق خوبی با یکدیگر دارند. برای مقایسه بهتر، مجموع مجذور خطاهای بین مسیرهای مدل لاگرانژ و نرم‌افزار آدامز محاسبه شده است که مقدار خطا برای مفصل ۵ برابر با ۰/۰۱۹ (مجذور رادیان) و برای مفصل زانو برابر با ۰/۰۰۸ (مجذور رادیان) می‌باشد که دقت معادلات دینامیکی بدست آمده برای ربات را نشان می‌دهد. در جدول ۳ پارامترهای بهینه کنترل‌کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی و پارامترهای مسیر مفصل بالا تنه ارائه شده است.

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

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

جدول ۲: Table 2. Lower limb exoskeleton robot parameters

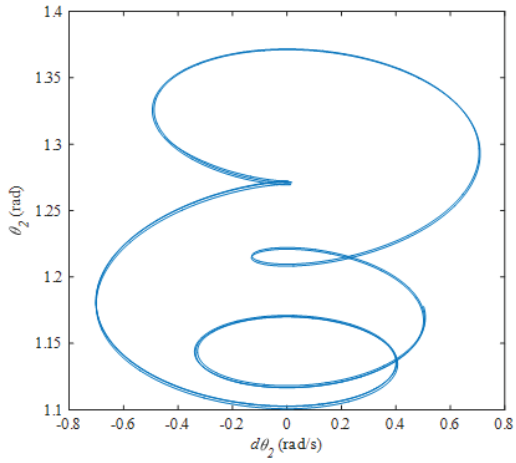
مقادیر پارامترهای مسیر مفاصل مچ و ران ربات

پارامتر	واحد	مقدار
m_1	Kg	۰/۸
m_2	Kg	۳/۲
m_3	Kg	۳/۸
m_4	Kg	۳/۸
m_5	Kg	۳/۲
m_6	Kg	۰/۸
m_7	Kg	۴۰
I_1	kg m^2	۰/۱۰
I_2	kg m^2	۰/۷۵
I_3	kg m^2	۰/۸۳
I_4	kg m^2	۰/۸۳
I_5	kg m^2	۰/۷۵
I_6	kg m^2	۰/۱۰
I_7	kg m^2	۴/۸
a	M	۰/۰۷۵
b	M	۰/۲۷۵
L_2	M	۰/۴۴
L_3	M	۰/۴۸
L_4	M	۰/۴۸
L_5	M	۰/۴۴
L_7	M	۰/۵
c_{m1}	M	۰/۱۲
c_{m2}	M	۰/۲۳
c_{m3}	M	۰/۲۳۸
c_{m4}	M	۰/۲۳۸
c_{m5}	M	۰/۲۳
c_{m6}	M	۰/۱۲
c_{m7}	M	۰/۲۳۵

Table 3. optimal control parameters and upper limb trajectory parameters

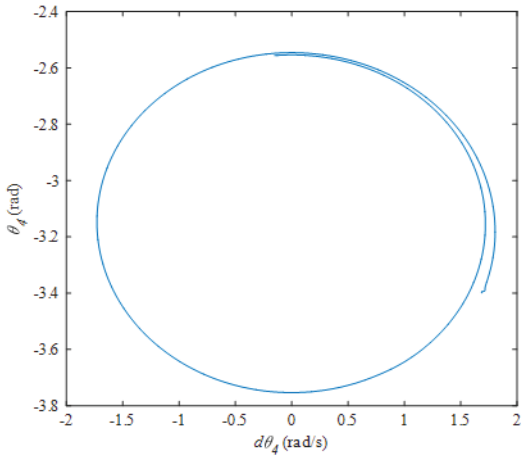
جدول ۳: پارامترهای بهینه کنترل‌کننده و پارامترهای مسیر مفصل بالا تنه

پارامتر	واحد	مقدار
λ	-	۶۳
W_1	-	۲/۸
γ_1	-	۰/۶
a_m	-	۰/۸
μ	-	۱/۳
η	-	۱/۶۴
α	Rad	-۰/۱۵
γ	Rad	۱/۱۸
σ	Rad	۱/۴۷



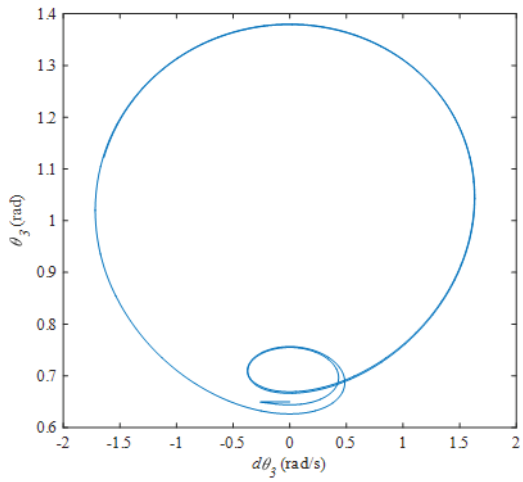
شکل ۱۳: نمودار صفحه فاز مفصل دوم

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



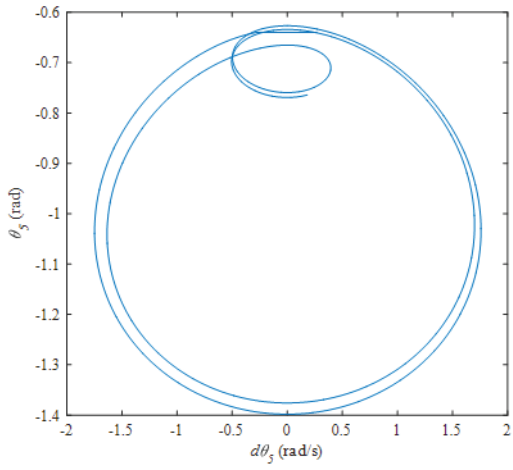
شکل ۱۵: نمودار صفحه فاز مفصل چهارم

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



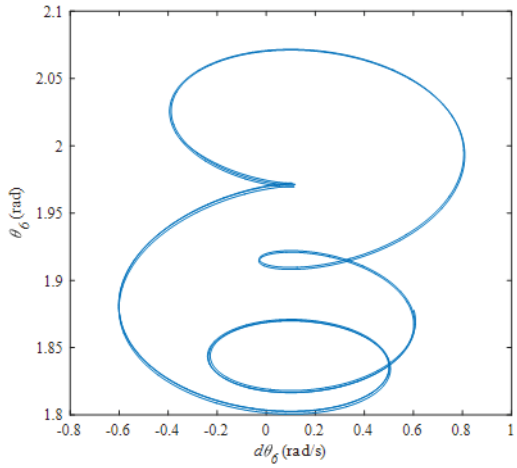
شکل ۱۴: نمودار صفحه فاز مفصل سوم

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



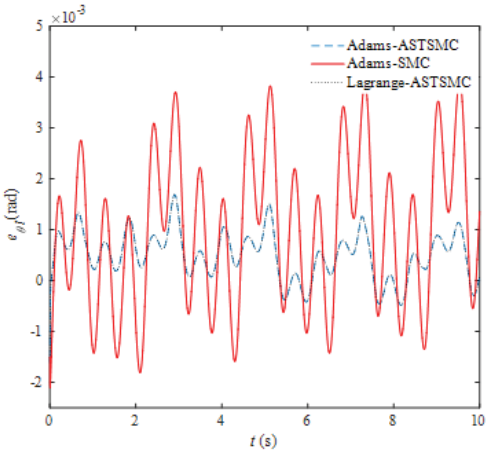
شکل ۱۶: نمودار صفحه فاز مفصل پنجم

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



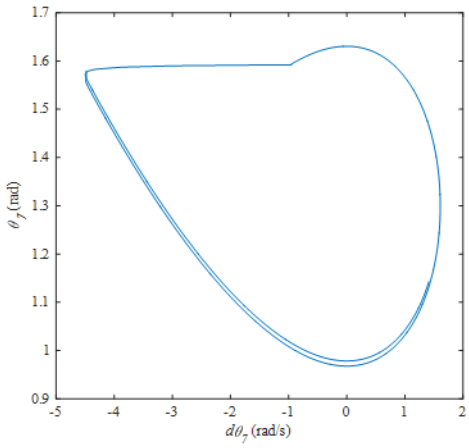
شکل ۱۷: نمودار صفحه فاز مفصل ششم

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



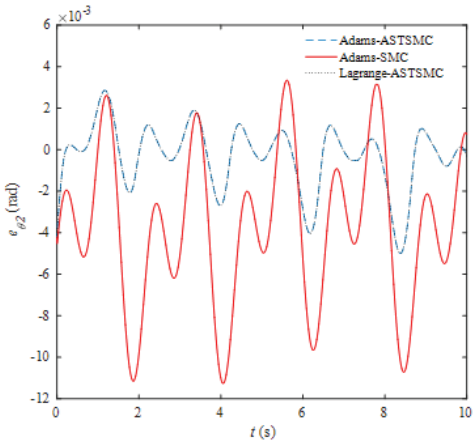
شکل ۱۹: خطای ردیابی مسیر مطلوب مفصل اول

Fig. 19. Tracking error of the first joint



شکل ۱۸: نمودار صفحه فاز مفصل هفتم

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

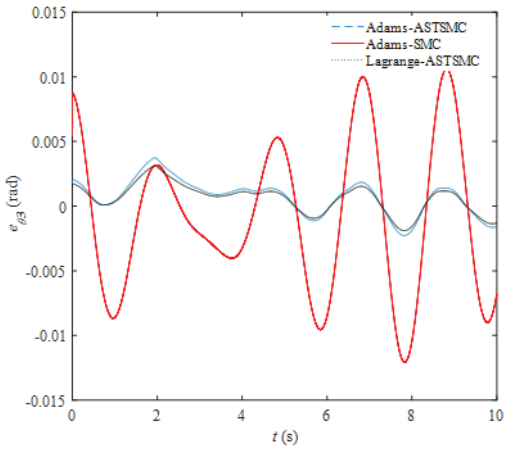


شکل ۲۰: خطای ردیابی مسیر مطلوب مفصل دوم

Fig. 20. Tracking error of the second joint

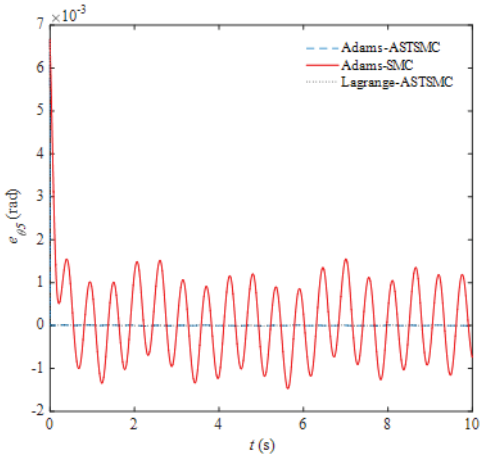
شده است.

با توجه به شکل‌های ۱۹ تا ۲۵ مشخص می‌شود که خطای تعقیب مسیرهای مرجع مفاصل برای کنترل‌کننده‌های طراحی شده در محدوده قابل قبولی قرار دارد. همچنین سیگنال‌های خطای حاصل از مدل بدست آمده از روش لاگرانژ و نرم افزار آدامز بسیار نزدیک به هم می‌باشند. دامنه سیگنال‌های خطا در کنترل‌کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی به میزان قابل توجهی کمتر از کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی می‌باشد. همچنین سرعت همگرایی به مقدار صفر در کنترل‌کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی بالاتر از کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی می‌باشد. یکی از ویژگی‌های کنترل‌کننده‌های مد لغزشی فراپیچشی همگرایی در زمان محدود می‌باشد که در کنترل ربات مورد مطالعه در این مقاله نیز این ویژگی دیده می‌شود. مجموع خطای تعقیب مسیرهای مرجع مفاصل برای کنترل‌کننده تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی برابر با ۰/۰۰۲۴۸ (مجذور درجه) و برای کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی برابر با ۰/۰۸۲۳ (مجذور درجه) می‌باشد. در در شکل ۲۶



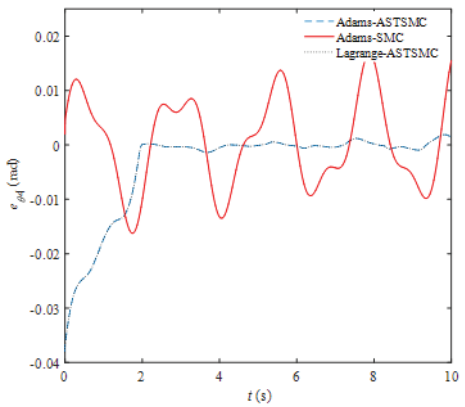
شکل ۲۱: خطای ردیابی مسیر مطلوب مفصل سوم

Fig. 21. Tracking error of the third joint



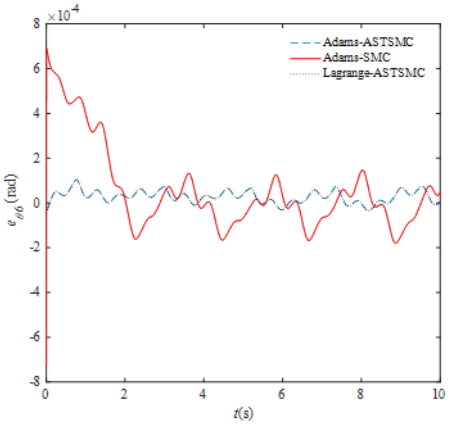
شکل ۲۳: خطای ردیابی مسیر مطلوب مفصل پنجم

Fig. 23. Tracking error of the fifth joint



شکل ۲۲: خطای ردیابی مسیر مطلوب مفصل چهارم

Fig. 22. Tracking error of the fourth joint



شکل ۲۴: خطای ردیابی مسیر مطلوب مفصل ششم

Fig. 24. Tracking error of the sixth joint

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

سیگنال‌های کنترلی برای هر دو کنترل‌کننده، در محدوده مناسب و کمتر از اشباع عملگرها قرار گرفته‌اند. بنابراین امکان انتخاب عملگر مناسب و اعمال سیگنال‌های کنترلی به عملگرها وجود دارد. مقدار میانگین دامنه سیگنال کنترلی برای کنترل‌کننده تطبیقی بهینه مد لغزشی فراپیچشی برابر با ۳۷/۹۳۱ نیوتن متر و کنترل کننده بهینه مد لغزشی معمولی برابر با ۵۱/۱۷۸ نیوتن متر می‌باشد. دامنه سیگنال‌های کنترلی حاصل از روش تطبیقی مد لغزشی فراپیچشی نه تنها مقادیر کمتری نسبت به سیگنال‌های کنترلی روش مد لغزشی بهینه معمولی دارد، بلکه دارای شکل هموارتری نیز می‌باشند و برخلاف کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی پدیده چترینگ در آن دیده نمی‌شود. در شکل ۲۷ نمودار نقطه گشتاور صفربرای دو کنترل‌کننده ارائه شده است.

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

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

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

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

۷- نتیجه‌گیری

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

منابع

[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. Lünenburger, R. Riener, Adaptive support for Patient-Cooperative gait rehabilitation with the lokomat, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Acropolis Convention Center Nice, France, 2008.

[6]H. Kazerooni, Hybrid Control of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), The International Journal of Robotics, 25(2) (2006) 561-573.

[7]B. Siciliano, O. Khatib, Springer Handbook of Robotics, Springer-Verlag, Berlin, (2008) 773-793.

[8] T. Yan, M. Cempini, C. M. Oddo, N. Vitiello, Review of assistive strategies in powered lower-limb orthosis and exoskeletons, Robotics and Autonomous Systems, 64(1) (2015) 120-136.

[9] X. Wanga, X. Li, J. Wang, X. Fang, X. Zhub, model-free adaptive sliding mode control for the multi degree-of-freedom robotic exoskeleton,Information Sciences, 327(1) (2015) 246-257 .

[10] S. Chen, B. Yao, X. Zhu, Z. Chen, Q. Wang, S. Zhu, Y. Song, Adaptive Robust Backstepping Force Control of 1-DOF Joint Exoskeleton for Human Performance Augmentation, IFAC, 48(1) (2015) 142–147.

[11] S. Han, H. Wang, Y. Tian, Advances in Engineering Software journal Model-free based adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control with time-delay estimation for a 12 DOF multi-functional lower limb exoskeleton, Advances in Engineering Software, 119(1) (2018) 38–47.

[12] A. Goel, A. Swarup, MIMO Uncertain Nonlinear System Control via Adaptive High-Order Super Twisting Sliding Mode and its Application to Robotic Manipulator, J Control Autom Electr Syst, 28(1) (2018) 36–49.

[13] T. Madani, B. Daachi, K. Djouani, Non-singular terminal sliding mode controller: Application to an actuated exoskeleton, Mechatronics, 33(1) (2016) 136–145.

[14] C. Edwards, E. F. Colet, L. Fridman, Advances in variable structure and sliding mode control, Springer, Berlin, (2006) 50-280.

[15] A. Sabanovic, L. M. Fridman, S. K. Spurgeon, Variable structure systems: from principles to implementation, IEEE Transactions digital library, 66 (7) (2004) 445-456.

[16] G. Bartolini, A. Ferrara, E. Usai, V. I. Utkin, On multi-input chattering-free second-order sliding mode control, IEEE transactions on automatic control, 45(9) (200) 1711-1717.

[17] Y. Shtessel, C. Edward, L. Fridman, A. Levant, Sliding Mode Control and Observation, Springer, New York, (2014) 135-255.

[18] A. Moreno, M. Osorio, A Lyapunov approach to second order sliding mode controllers and observer, 47th IEEE Conference on Decision and Control, Mexico, Cancun, 2008.

[19] F. Zargham, A. H. Mazinan, Super-twisting sliding mode control approach with its application to wind turbine systems, Springer, 11(1) (2018) 1-19.

[20] A. Goel, A. Swarup, MIMO Uncertain Nonlinear System Control via Adaptive High-Order Super Twisting Sliding Mode and its Application to Robotic Manipulator,Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 28(1) (2017) 36–49.

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

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

[30] P.K. Kyaw, K. Sandar, M. Khalid, W. Juan, Y. Li, Z. Chen, Opportunities in robotic exoskeletons hybrid assistive limbSUIT (MT5009), Robotic Exoskeletons: Becoming Economically Feasible, 21(1) (2013).

[31] J.J. Craig,Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Hall, London, (2005) 85-310.

[32] V. Hasani, M. Taghizadeh, M. Mazare, Modeling and position controller design of a servo-hydraulic actuator under variable loads using sliding mode control, Modares Mechanical Engineering, 17(6) (2016) 295-302 (in Persian).

[33] M. Doakhan, M. Kabganian, R.Nadafi, A. K. Eigoli, Trajectory Tracking of a Quadrotor for Obstacle Avoidance Using Super-Twisting Sliding Mode Controller and Observer, Modares Mechanical Engineering, 17(8) 333-342, 2017 (in Persian).

[34]X. Yu, M. Ö. Efe, Recent Advances in Sliding Modes: From Control to Intelligent Mechatronics, Springer-Verlag, Berlin, (2015) 90-310.

[35] A. Gocwami, Postural stability of Biped Robots and the Foot-Rotation lndicator (FRI) point. The International Journal of Robotics Research, 18(6) (1999) 523-533.

[21] D. Liang, L. Jian, Q. Ronghai, Super-Twisting Algorithm Based Sliding-Mode Observer with Online Parameter Estimation for Sensor less Control of Permanent Magnet Synchronous Machine,IEEE, 53(4) (2016) 3672 – 3682.

[22] Y. Shtessel, M. Taleb, F. Plestan, a novel adaptive-gain super twisting sliding mode controller: Methodology and application, Automatica, 48(5) (2012).

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

[24] D. Messuri, C. Klein, Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion. Robotics and Automation, IEEE, 1(3) (1985) 141-132.

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

[26] A. Takhmar, MHS measure for postural stability monitoring and control of bipad robts. In Advanced lntelligent Mechatronics, 2008 .AIM 2008. IEEE/ ASME lnternational Conference on, China, 2008.

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

[28]M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Optimal Robust Hybrid Active Force Control of a Lower Limb