



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

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 هیفیلد

معیار پایداری نقطه گشتاور صفر

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 از مفاصل ربات از ترکیب هفت عدد نوسانگر هیفیلد 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.

۱- مقدمه

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 آگروهیکر 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 آگروکلایمب با استراتژی کنترلی مشابه با آگروهیکر و ربات هالک با استراتژی کنترلی مشابه ربات بلیکس نیز در دانشگاه برکلی طراحی شده است [۷ و ۸].

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

الگوهای حرکتی پایه در بسیاری از سیستم‌های بیولوژیکی مثل تنفس، توسط الگوریتم الگوی مولد مرکزی^۱ تولید می‌شوند. الگوی مولد مرکزی شبکه عصبی می‌باشد که می‌تواند الگوهای حرکتی

1 Central Pattern Generator (CPG)

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



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. مسیرهای تولید شده توسط این روش کاملاً هموار می‌باشند. همچنین به کمک استفاده از سیگنال‌های بازخوردی این امکان ایجاد می‌شود که الگوی مولد مرکزی بتواند 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 هیفیلد می‌باشد که توسط سانتوس و ماتوس ارائه شده است [۱۵]. استفاده از چند نوسان‌ساز هیفیلد و ایجاد کوپلینگ بین آنها باعث عملکرد مطلوب‌تر الگوریتم شده است [۱۶]. نوسان‌ساز هیفیلد 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 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

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^۳ [۳۳]، معیار پایداری نشان‌گر چرخش پا^۴ [۳۴]، معیارهای پایداری بر مبنای انرژی [۳۵] و معیار پایداری ارتفاع - گشتاور^۵ [۳۶] برای بررسی پایداری ربات‌های راه رونده ارائه شده است. در این میان معیار پایداری نقطه گشتاور صفر^۶ 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 نوسان‌ساز هیفیلد 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 دیگر مرتبط 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

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 فرایچه‌چی [۲۵].

به دلیل مزایای کنترل مد لغزشی در برابر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم، کنترل کننده‌های 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^۱ 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 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 راه‌حل‌های 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^۲ قابلیت مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم

3 Center of mass

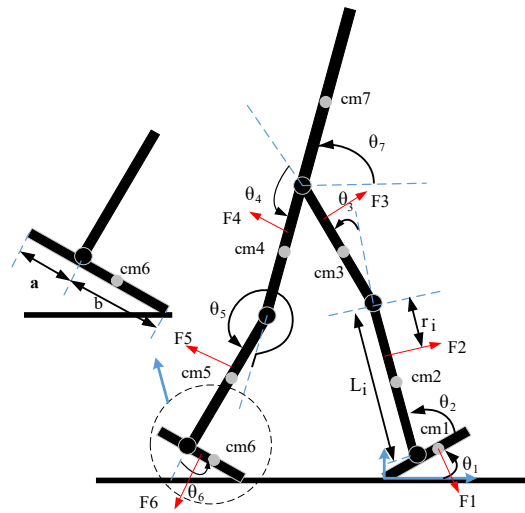
4 Foot-rotation indicator

5 Moment-Height stability

6 Zero Moment Point (ZMP)

1 Dynamic Sliding Mode (DSM)

2 Adaptive Dynamic Fast Terminal Sliding Mode control (ADFTSMC)



شکل ۱. شماتیک ربات اسکلت خارجی پایین تنه هفت درجه آزادی [۳۶]
 Fig. 1. Schematic of a 7-DOF lower limb exoskeleton

۲- معرفی و مدل سازی 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 حال 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 تبدالی 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 ژاکوپین مناسب استفاده شده است.

در شکل ۱، θ_i ، L_i ، F_i ، r_i و cm_i برای i از ۱ تا ۷ به ترتیب زوایای لینک‌های ربات، طول لینک‌های ربات، نیروی تبدالی 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 b نیز 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.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} + \frac{\partial U}{\partial \theta_i} \quad (1)$$

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 تطبیق پذیر برای ربات اسکلت خارجی هفت درجه آزادی ۳- تغییر برخط مسیره‌های 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 مسیره‌های 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 مسیره‌های 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.

براساس مسیرهای مطلوب ارائه شده در مرجع [۳۸]. و با استفاده از ترکیب هفت عدد نوسان ساز 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^۱ 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].

$$\dot{r} = \rho(\mu - r^2)r \quad (6)$$

$$\dot{\varphi} = \omega$$

در رابطه (۶) شعاع r و 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].

$$\dot{r}_i = \rho(\mu - r_i^2)r_i + \delta F(t) \cos \varphi_i$$

$$\dot{\varphi}_0 = \omega_0 - \frac{\dot{\delta}}{r_0} F(t) \sin \varphi$$

$$\dot{\varphi}_i = \omega_i - \frac{\dot{\delta}}{r_i} F(t) \sin \varphi + h, \forall i > 0$$

$$h = [z_i \sin(R_i - \varphi_{i,\Delta} - \varphi_i)]$$

$$\dot{\omega}_i = -\dot{\delta} F(t) \sin \varphi_i$$

$$\dot{\alpha}_i = \eta F(t) \cos \varphi_i r_i$$

$$\dot{\varphi}_{i,\Delta} = \varepsilon_i \sin(R_i - \varphi_{i,\Delta} - \varphi_i), \forall i > 0 \quad (7)$$

$$R_i = \frac{\omega_i}{\omega_0} \varphi_i$$

$$F(t) = \theta - \hat{\theta}$$

$$\hat{\theta} = \sum_{i=1}^N \arccos \varphi$$

که در آن θ_i متغیر تعمیم‌یافته، K انرژی 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.

$$k = \sum_{i=1}^7 k_i \quad (2)$$

$$U = \sum_{i=1}^7 u_i$$

$$k_i = 0.5 m_i v c_i^2 + 0.5 I_i \omega_i^2$$

$$u_i = m_i g y c_i$$

در رابطه (۲) m_i جرم هر یک از لینک‌ها، I_i ممان اینرسی هر یک از لینک‌ها حول مرکز جرم، $v c_i$ سرعت مرکز جرم هر یک از لینک‌ها، $y c_i$ ارتفاع مرکز جرم هر یک از لینک‌ها و ω_i سرعت زاویه‌ای هر یک از لینک‌ها می‌باشند. در نهایت معادلات دینامیکی ربات به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود.

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

که در آن τ گشتاور مربوط به عملگرها، $M(\theta)$ ماتریس ممان اینرسی، $C(\theta, \dot{\theta})$ 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.

$$J = \frac{\delta v}{\delta \dot{q}} = \frac{\delta r}{\delta q} \quad (4)$$

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

$$F = k_{pf}(\theta_{desired} - \theta)d \quad (5)$$

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

۱-۲- طراحی مسیر مطلوب قدم‌زنی

در این مقاله مسیرهای مرجع مفاصل ربات به صورت برخط و

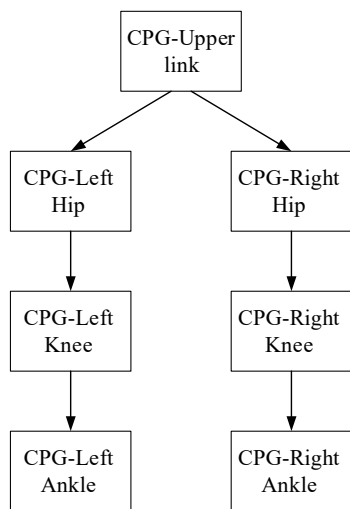
استخراج شده از الگوی مولد مرکزی می‌باشد. همچنین مدت T زمان در نظر گرفته شده برای راه رفتن ربات است که برابر با ۵ ثانیه می‌باشد. در شکل ۲ ترکیب نوسان‌سازها برای یک الگوی مولد مرکزی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳ ارتباط بین الگوی مولد مرکزی هفت مفصل ربات نشان داده شده است.

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

در این مقاله برای افزایش مقاومت کنترل کننده مدل لغزشی، 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].

$$s_i = \dot{e}_i + \alpha e_i + \beta |e_i|^\gamma \operatorname{sgn}(e_i) \quad (10)$$

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

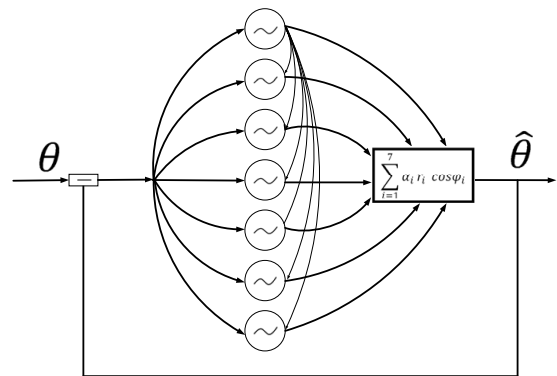
در رابطه (۷) عبارت h خروجی فاز نوسان‌سازهای ۲ تا ۷ را به نوسان‌ساز اول متصل می‌کند. φ_i فاز خروجی نوسان‌ساز اول و φ_i فاز خروجی نوسان‌سازهای ۲ تا ۷ می‌باشد. η به عنوان یک متغیر یادگیری عمل می‌کند که از نوسان α جلوگیری می‌کند. η باید به نحوی انتخاب شود که شرط $0 < \eta < 1$ را در طی فرآیند یادگیری ارضا نماید. $\dot{\theta}$ ، τ_i 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 $\hat{\varphi}$ به صورت رابطه (۸) بازنویسی شده است.

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_0 &= \omega_0 - \frac{\dot{\theta}}{r_0} F(t) \sin \varphi_0 + [z_{ext} \sin(R_{ext} - \varphi_\Delta - \varphi_0)] \\ \dot{\varphi}_{i,\Delta} &= \varepsilon_{ext} \sin(R_{ext} - \varphi_\Delta - \varphi_0) \\ R_{ext} &= \frac{\omega_0}{\omega_0^k} \varphi_0^k \end{aligned} \quad (8)$$

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 ضرایب ثابت هستند. تمام ضرایب 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.

$$Cost\ function_1 = \int_0^T (\theta_{des} - \hat{\theta})^2 dt \quad (9)$$

در رابطه (۹) θ_{des} مسیر مطلوب مفاصل ربات است و $\hat{\theta}$ مسیر



شکل ۲. ترکیب نوسانگرها برای یک الگوی مولد مرکزی

Fig. 2. Combining the oscillators of each joint

$$\dot{v} = \dot{s} + s = \ddot{e} + (\gamma \beta |e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda \alpha e + \lambda \beta |e|^\gamma \operatorname{sgn}(e) \quad (16)$$

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 $e = 0$ و $\dot{e} \neq 0$ و $\gamma - 1$ منفی باشد تکنیکی اتفاق خواهد افتاد. با استفاده از رابطه (۱۳) داریم:

$$\begin{aligned} \gamma \beta |e|^{\gamma-1} \dot{e} &= \gamma \beta |e|^{\gamma-1} (-\alpha e - \beta |e|^\gamma \operatorname{sgn}(e)) \\ \gamma \beta |e|^{\gamma-1} \dot{e} &= -\alpha \gamma \beta |e|^\gamma - \beta |e|^{2\gamma-1} \operatorname{sgn}(e) \end{aligned} \quad (17)$$

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

$$\begin{aligned} u &= M\ddot{q}_d + C\dot{q} + G + D - M(\gamma \beta |e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda \alpha e + \lambda \beta |e|^\gamma \operatorname{sgn}(e) \quad (18) \\ D &= \tau_d + J^T F_i \end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned} u_A &= M\ddot{q}_d + C\dot{q} + G + D - M(\gamma \beta |e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda \alpha e + \lambda \beta |e|^\gamma \operatorname{sgn}(e) \\ &\quad - M(\hat{\psi} \operatorname{sgn}(v)) + kv \\ \hat{\psi} &= \eta |v| \end{aligned} \quad (19)$$

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

$$V = \frac{v^2}{2} + \eta^{-1} \frac{\hat{\psi}^2}{2} \quad (20)$$

$$V_s(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2(t) \quad \forall t \geq t_r, V_s(t) \geq 0 \quad (11)$$

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

$$\dot{V}_s(t) = \sum_{i=1}^n e_i \dot{e}_i \quad (12)$$

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

$$s_i = 0 \Rightarrow \dot{e}_i = -\alpha e_i - \beta |e_i|^\gamma \operatorname{sgn}(e_i) \quad (13)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{V}_s(t) &= \sum_{i=1}^n e_i (-\alpha e_i - \beta |e_i|^\gamma \operatorname{sgn}(e_i)) \\ \dot{V}_s(t) &\leq -\alpha \sum_{i=1}^n e_i^2 - \beta \sum_{i=1}^n |e_i|^{\gamma+1} \\ \dot{V}_s(t) &\leq -\alpha \sum_{i=1}^n e_i^2 - \beta (\sum_{i=1}^n e_i^2)^{\frac{\gamma+1}{2}} \\ \dot{V}_s(t) &\leq -2\alpha V_s - 2 \frac{\beta}{\alpha} V_s^{\frac{\gamma+1}{2}} \end{aligned} \quad (14)$$

با توجه به رابطه (۱۴) مشتق تابع لیاپانوف 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].

$$v = s + \lambda \int_0^t s(\tau) d\tau \quad (15)$$

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.

با مشتق گیری از سطح لغزش داریم:

$$\dot{V} = v\dot{v} + \eta^{-1}\dot{\psi}\dot{\psi} \quad (21)$$

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

$$\dot{V} = v(\ddot{e} + (\gamma\beta|e|^{\gamma-1} + \lambda + \alpha)\dot{e} + \lambda\alpha e + \lambda\beta|e|^{\gamma} \operatorname{sgn}(e)) + \eta^{-1}\dot{\psi}\dot{\psi} \quad (22)$$

با جایگزینی رابطه (۱۹) در رابطه (۲۲) و ساده سازی، رابطه (۲۳) بدست می آید.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -v\dot{\psi} \operatorname{sgn}(v) - kv^2 - M^{-1}vD + \eta^{-1}\dot{\psi}\dot{\psi} \\ \dot{V} &\leq -\dot{\psi}|v| - kv^2 - M^{-1}|v|D + \eta^{-1}\dot{\psi}\eta|v| \\ \dot{V} &\leq -kv^2 - M^{-1}|v|D \end{aligned} \quad (23)$$

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

$$k \geq M^{-1}D \frac{|v|}{v^2} \quad (24)$$

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 می توان 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) می باشد [۴۸].

$$\begin{aligned} x_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=1}^n m_i(z_i'' + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i x_i'' z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy} \theta_{iy}''}{\sum_{i=1}^n m_i(z_i'' + g)} \\ y_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=1}^n m_i(z_i'' + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i y_i'' z_i - \sum_{i=1}^n I_{ix} \theta_{ix}''}{\sum_{i=1}^n m_i(z_i'' + g)} \end{aligned} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)، θ_{ix}'' و θ_{iy}'' به ترتیب شتاب زاویه‌ای لینک‌های ربات در راستای افقی و عمودی می باشد. 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 می شوند 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 می شوند. رابطه (۲۶) چند نقطه معلوم از یک بازه حرکتی را برای مفصل کمر بیان می کند.

$$\theta_7 = \begin{cases} \frac{\delta}{2} - \delta & t=0 \\ q & t=0.5Ts \\ \frac{\delta}{2} - \delta & t=Ts \\ p & t=Ts+Td \end{cases} \quad (26)$$

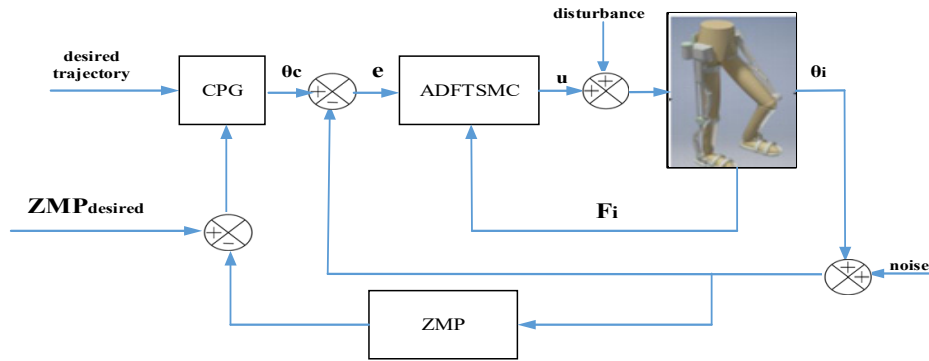
در رابطه (۲۶) Ts مدت زمان فاز تک تکیه گاهی و Td مدت زمان فاز دو تکیه گاهی حرکت ربات می باشد. δ ، q و p نیز پارامترهای ثابت می باشند. برای داشتن مسیری هموار در مفصل کمر، از رابطه (۲۷) استفاده شده است.

$$\begin{aligned} \theta_7'(0) &= \theta_7'(Ts+Td) \\ \theta_7''(0) &= \theta_7''(Ts+Td) \end{aligned} \quad (27)$$

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

$$Cost \ function_2 = \int_0^T (ZMP - ZMP_{desird}) dt \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، T برابر با ۵ ثانیه می باشد 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

$$Cost\ function_3 = \int_0^T [(\theta_{desired} - \theta)^2 + (ZMP_{desired} - ZMP)^2] dt \quad (29)$$

۵- شبیه‌سازی

در این مقاله مسیره‌های 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، مسیره‌های 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 به صورت 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.

$$Fault = \beta(t - T_f) \Omega(\theta, \dot{\theta}, \tau) \quad (30)$$

$$\beta(t - T_f) = \begin{cases} 0 & t \leq T_f \\ 1 - e^{-\xi(t - T_f)} & t > T_f \end{cases}$$

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 $ZMP_{desired}$ ربات در نظر گرفته شده است. همچنین محدوده مجاز حرکت مفصل بالا تنه ۷۵ تا ۱۱۵ درجه در نظر 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 مسیره‌های تولید شده توسط الگوی مولد مرکزی و مسیره‌های تولید شده توسط ربات و θ_c مسیره‌های 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) مدت زمان راه رفتن ربات برابر با ۵ ثانیه است.

شکل ۷ نشان دهنده عملکرد مناسب کنترل کننده‌های پیشنهادی در تعقیب مسیرهای حاصل از الگوی مولد مرکزی می‌باشد. کنترل کننده‌های مبتنی بر سطح 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 کنترل کننده 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

در رابطه (۳۰)، T_r 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.

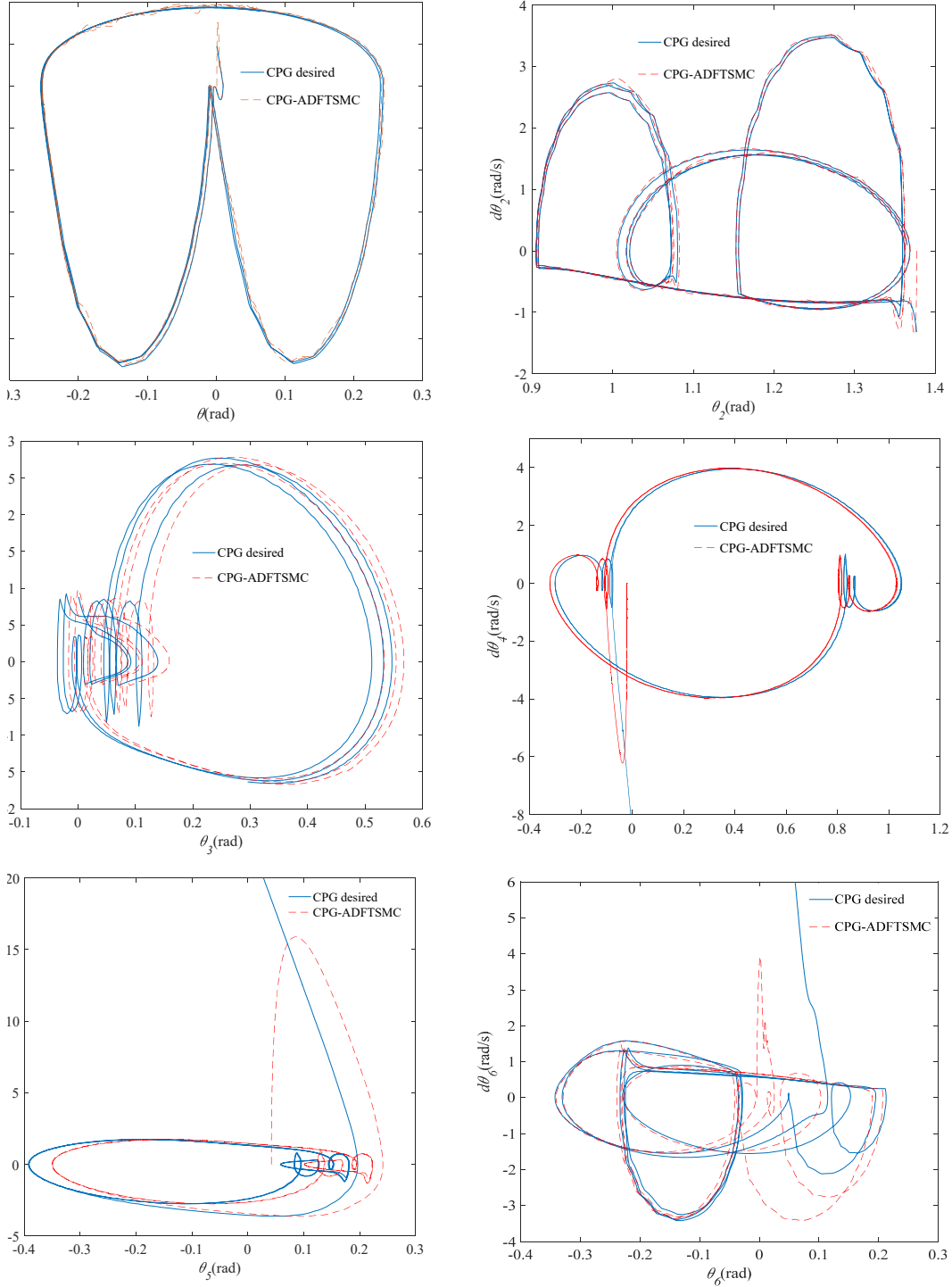
جدول ۱. پارامترهای ربات اسکلت خارجی پایین تنه

Table 1. The parameters of the lower limb exoskeleton

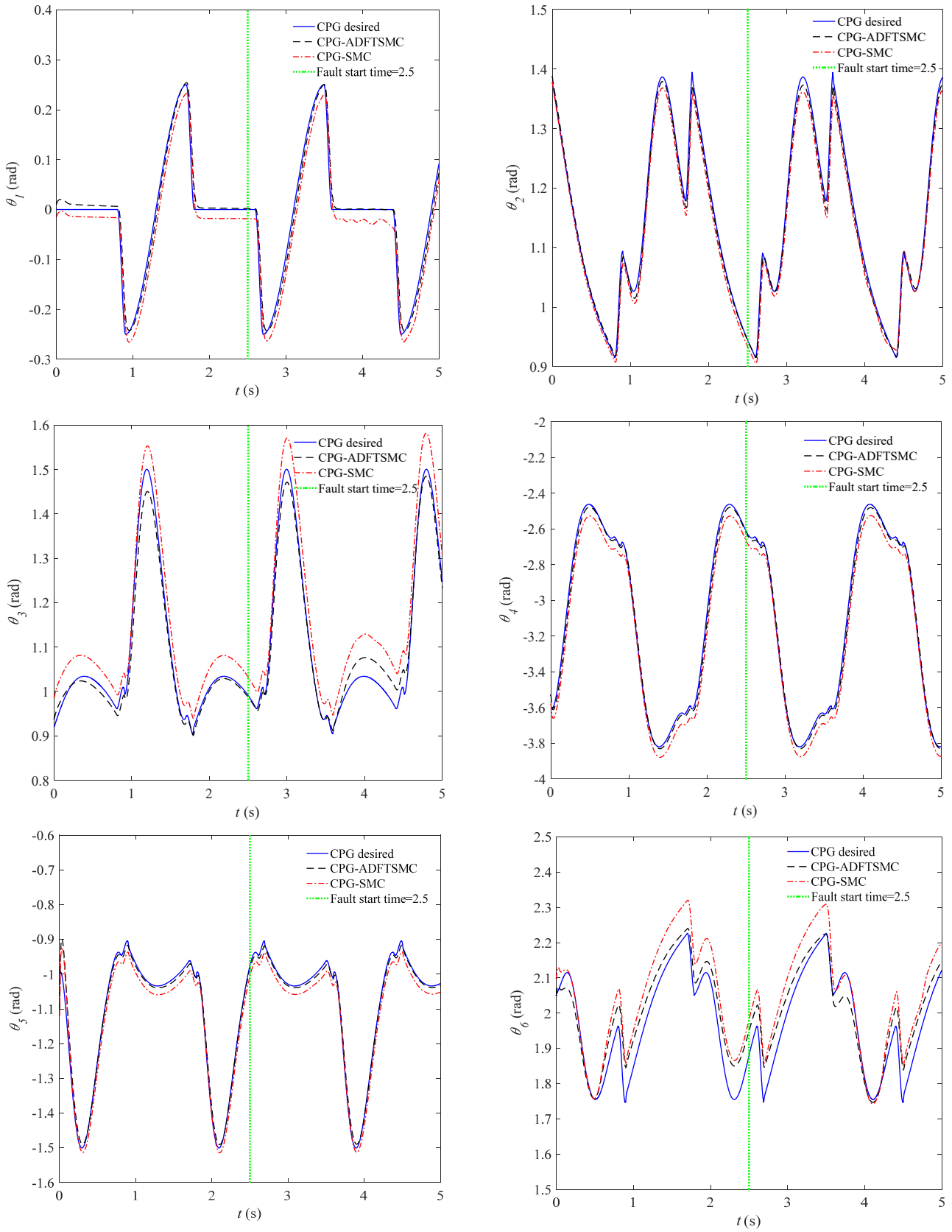
پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
m_1	kg	۰/۸	a	m	۰/۰۷۵
m_2	kg	۳/۲	b	m	۰/۲۷۵
m_3	kg	۳/۸	L_2	m	۰/۴۴
m_4	kg	۳/۸	L_3	m	۰/۴۸
m_5	kg	۳/۲	L_4	m	۰/۴۸
m_6	kg	۰/۸	L_5	m	۰/۴۴
m_7	kg	۴۰	L_6	m	۰/۵
I_1	kg	۰/۱۰	mc_1	m	۰/۱۲
I_2	kg	۰/۷۵	mc_2	m	۰/۲۳
I_3	kg	۰/۸۳	mc_3	m	۰/۲۳۸
I_4	kg	۰/۸۳	mc_4	m	۰/۲۳۸
I_5	kg	۰/۷۵	mc_5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

مزایای استفاده از روش کنترل تطبیقی مد لغزشی دینامیکی سریع
ترمیالی حذف پدیده چترینگ در سیگنال کنترلی است که در شکل
۹ مشاهده می‌شود. اما این پدیده در سیگنال کنترلی روش کنترل

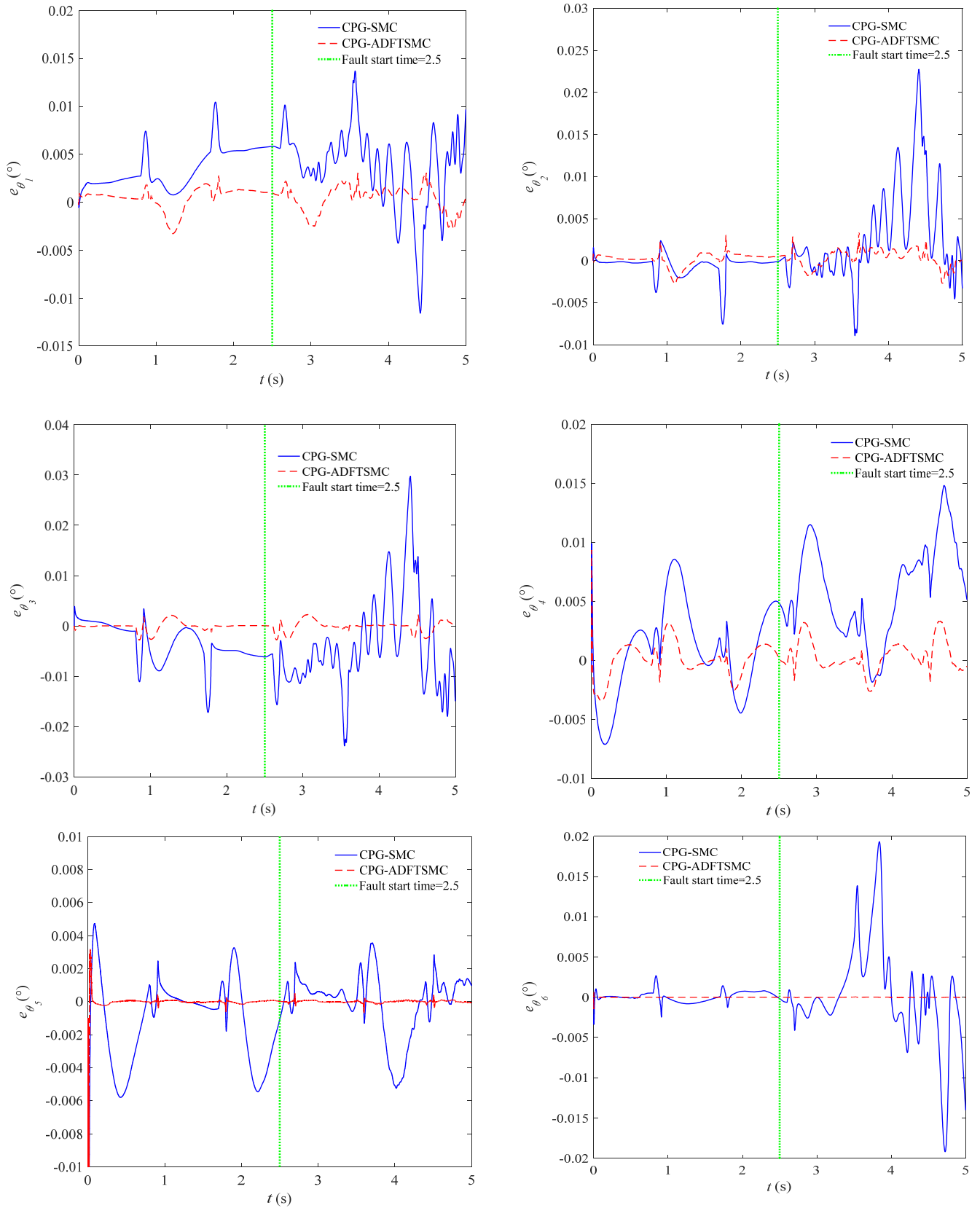
۹ سیگنال کنترلی برای دو کنترل کننده ارائه شده است.
شکل ۹ نشان می‌دهد که سیگنال‌های کنترلی هر دو کنترل
کننده در محدوده مناسب برای انتخاب عملگر قرار دارند. یکی از



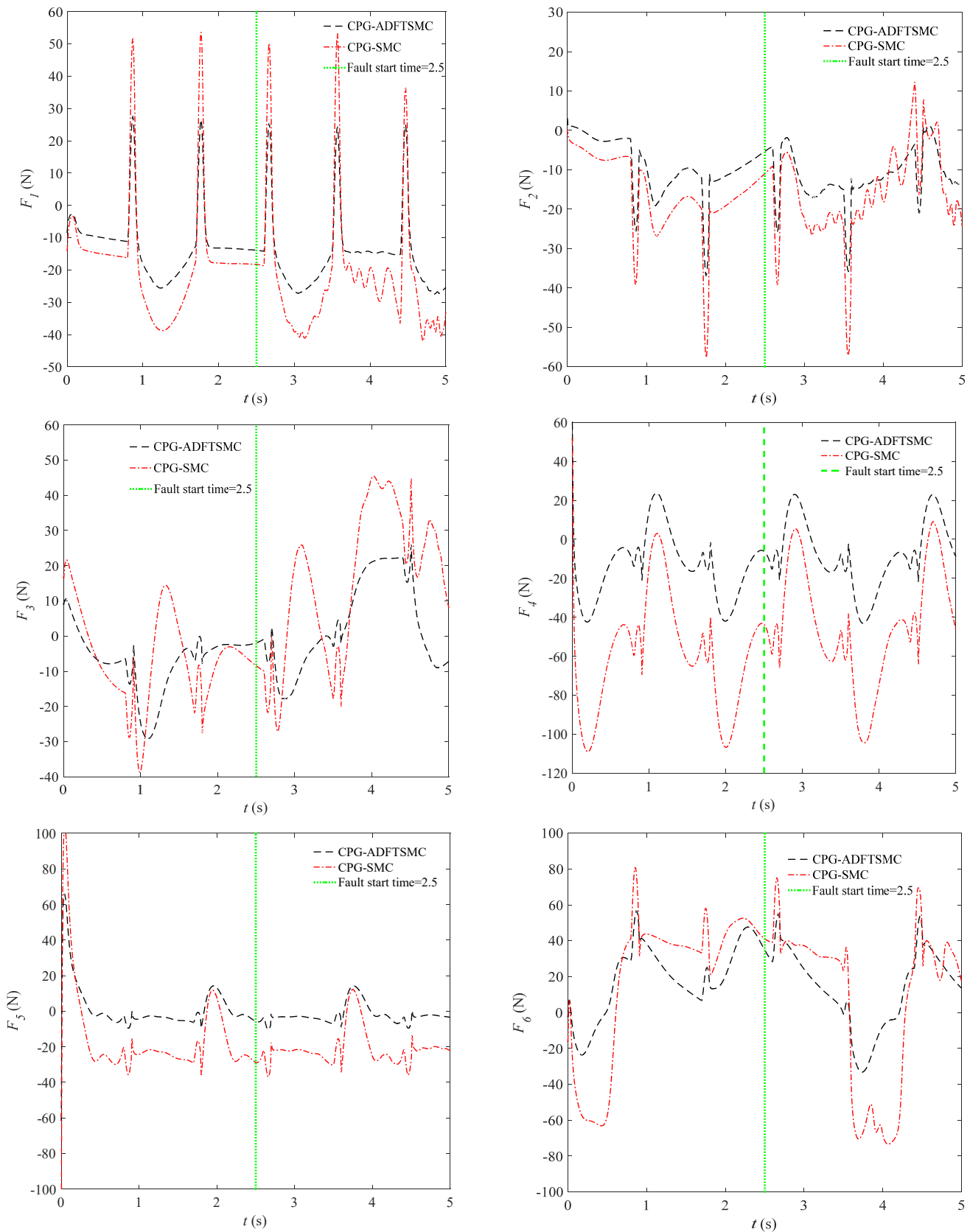
شکل ۵. نمودار صفحه فاز مفاصل ربات
Fig. 5. phase portrait of the joints



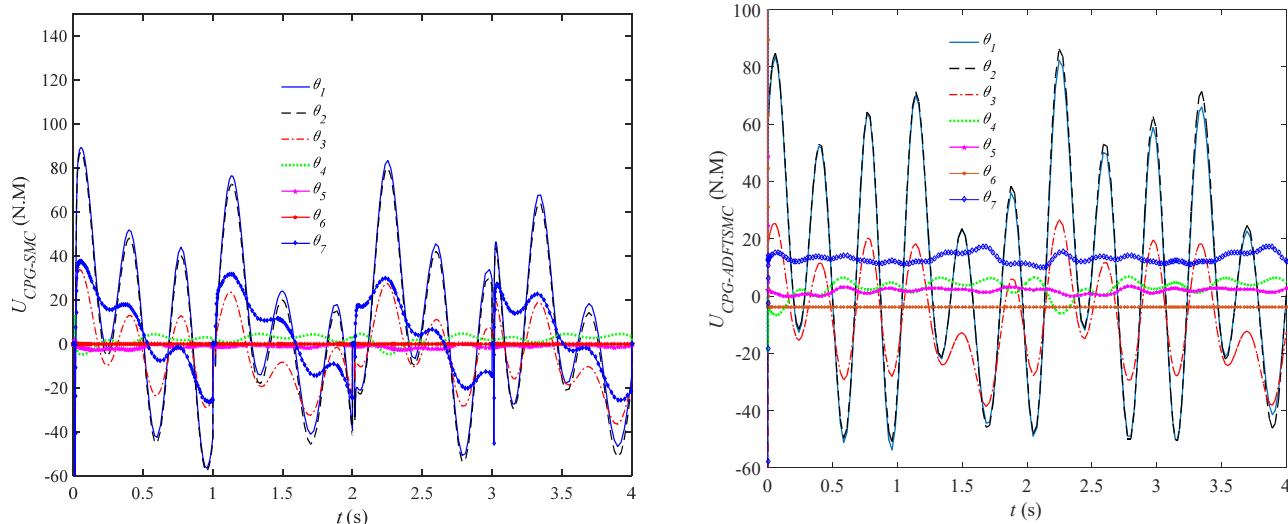
شکل ۶. تعقیب مسیرهای مطلوب ربات
 Fig. 6. Trajectory tracking of joints



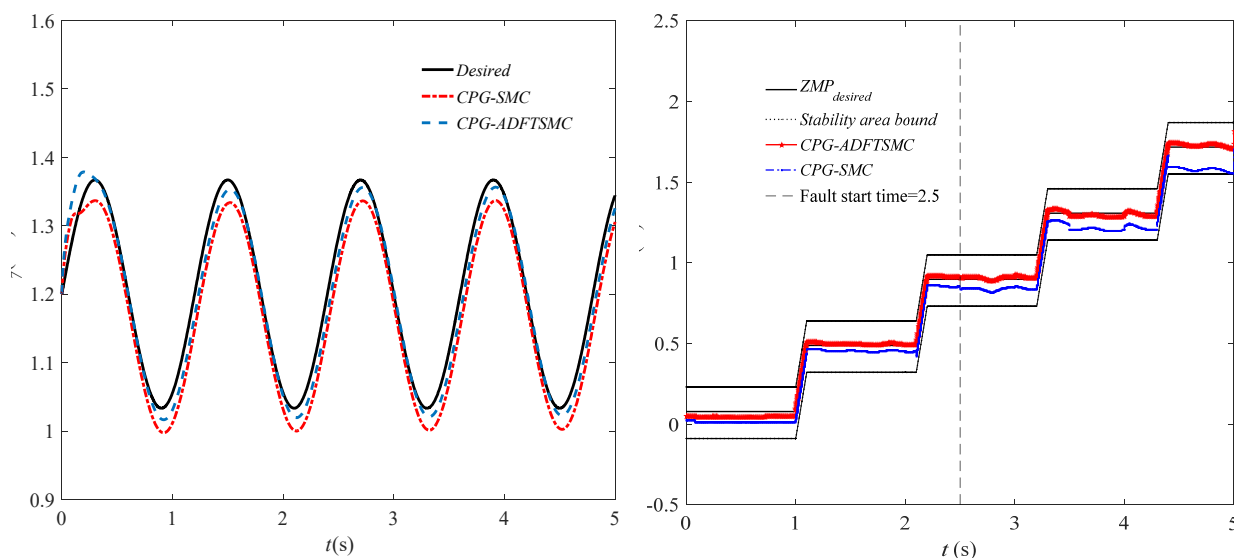
شکل ۷. خطای ردیابی مفاصل
Fig. 7. Tracking error of joints



شکل ۸. نیروی تبادلی کاربر و ربات
Fig. 8. interaction force between human and robot



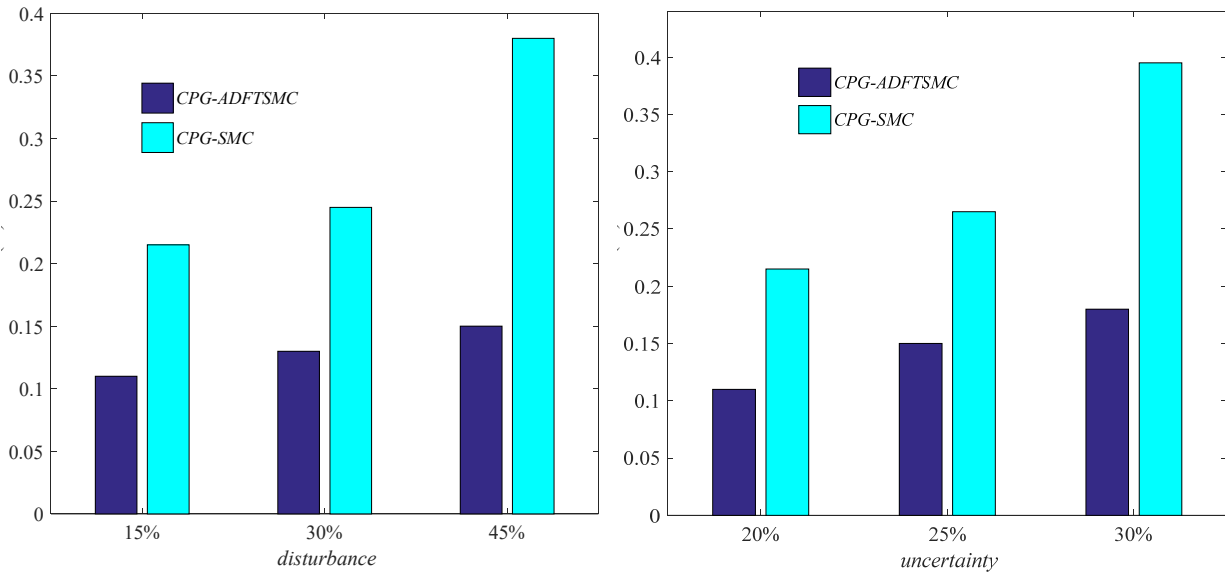
شکل ۹. سیگنال‌های کنترلی
Fig. 9. Control signals



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

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

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 مطلوب، مطابقت



شکل ۱۱. خطای تعقیب در حضور اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مختلف
Fig. 11. Tracking error in the presence of different disturbances and uncertainties

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

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

- 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*
- 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.

- 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

- 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.
- 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] Ö. 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

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](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19761.7106)



