

طراحی مسیر زمان حقیقی و بازیابی تعادل بهینه ربات انسان نمای سه بعدی

در این مقاله، طراحی مسیر زمان حقیقی ربات انسان نما در حضور اغتشاشات خارجی با استفاده از مؤلفه واگرایی حرکت بررسی گردیده است. بدین منظور از مدل سه جرمه آونگ معکوس به جای مدل کامل دینامیکی ربات استفاده شده است. ابتدا به منظور حفظ پایداری ربات، به طراحی نقطه گشتاور صفر مطلوب پرداخته شده است. در واقع بر اساس محل گام ها، نقطه گشتاور صفر مطلوب را در مرکز کف پای ربات تعریف کرده ایم تا ربات دارای حاشیه ی پایداری مطلوبی باشد. سپس بر اساس نقطه گشتاور صفر مطلوب ایجاد شده و مدل آونگ معکوس سه جرمه، مسیر حرکتی مرکز جرم ربات به کمک روش مؤلفه واگرایی حرکت که معادله دینامیکی آونگ معکوس سه جرمه را به دو معادله پایدار و ناپایدار تبدیل می کند، به دست آمده است. با بکارگیری سینماتیک معکوس، زوایای مفصلی را به عنوان ورودی موتورهای ربات محاسبه شده است. همچنین به منظور کنترل پایداری و بازیابی تعادل حرکت ربات در حضور اغتشاشات خارجی به صورت همزمان از تنظیم نقطه گشتاور صفر، تنظیم مکان و زمان گام برداری در قالب یک کنترلر پایداری حرکت استفاده گردیده است. به منظور صحت سنجی پایداری مسیرهای به دست آمده از محیط شبیه ساز با اعمال پارامترهای هندسی و فیزیکی یک ربات انسان نمای واقعی استفاده شده است. در نهایت براساس شبیه سازی ها نشان داده شد که ربات قابلیت راه رفتن پایدار با سرعت ۱/۶ متر بر ثانیه در حضور اغتشاشات ۳۴۵ نیوتنی را دارا می باشد.

امید کوچکیان فرد^۱

کارشناسی ارشد

مجید ساده دل^۲

استادیار

واژه های راهنما: ربات انسان نما، مدل آونگ معکوس سه جرمه، طراحی مسیر زمان حقیقی، بازیابی تعادل، ربات پا دار

۱- مقدمه

بخش عمده ای از سطوح زمین برای ربات های چرخ دار^۳ غیر قابل استفاده می باشد. بنابراین برای از بین بردن محدودیت حرکتی سیستم های رباتیکی، مبحث ربات های پا دار مطرح شد.

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران koochakianfardomid@modares.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران majid.sadedel@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

انسان‌ها و حیوانات پادار به راحتی بر روی زمین‌های صاف و دارای موانع حرکت می‌کنند. همچنین می‌توانند بر روی زمین‌هایی که دارای اصطکاک کمتری می‌باشد نیز پایداری خود را حفظ کنند. ربات‌های پادار دارای طیف گسترده‌ای می‌باشند که برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند به عنوان مثال ربات‌های دوپا قابلیت حرکات شبیه به انسان را دارند و همچنین توانایی راه رفتن و دویدن دارند. ربات‌های دوپا که دارای ساختاری مشابه به انسان دارند به ربات‌های انسان‌نما شهرت یافته‌اند. ربات‌های انسان‌نما علاوه بر قابلیت‌های ذکر شده دارای چالش‌های متعددی نیز می‌باشند. ربات‌های انسان‌نما به دلیل اتصال غیر فعالی که در تماس با سطح زمین دارند، ساختارهای ناپایداری دارند. همچنین این ربات‌ها با محیط‌های ناشناخته مختلف تعامل برقرار می‌کنند. این محیط‌ها می‌تواند شامل یک سطح الاستیک، چسبناک، نرم و یا سفت باشد. این امر نیازمند الگوریتم‌های قوی برای تولید مسیرهای مرجع و کنترل است. این الگوریتم‌ها باید نسبت به اختلالات احتمالی حساس باشند. در سال‌های اخیر حرکت ربات‌های دوپا و مخصوصاً داشتن حرکاتی شبیه به انسان موضوع بسیاری از مقالات بوده. در پژوهش‌هایی ساده‌دل و همکاران [۱، ۲] به بررسی اثرات اضافه شدن مفصل پنجه فعال و حرکات دورانی پنجه و پاشنه پا در ربات سورنا ۳ برای ایجاد حرکات شبیه به انسان در راه رفتن پرداختند. در واقع علاوه برداشتن حرکات نزدیک به انسان، مزایای بسیاری به طراحی مسیر ربات افزوده خواهد شد. کاهش مصرف انرژی، کاهش سرعت و گشتاور مفاصل و همچنین افزایش سرعت ربات از جمله مزایای اضافه نمودن پنجه پای فعال ربات می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های دینامیکی، استفاده از مدل‌های چند جرمی می‌باشد. در تحقیقی لو و همکاران [۳]، با استفاده از مدل پنج جرمه که دارای دینامیکی شبیه به یک انسان می‌باشد، به طراحی مسیر پادار و دارای حرکت شبیه به انسان پرداختند. علاوه بر روش‌های دینامیکی که سبب شبیه شدن دینامیک ربات به یک انسان می‌شود، روش‌هایی دیگر همچون متغیر و در حرکت بودن نقطه گشتاور صفر در طول کف پای ثابت نیز می‌تواند سبب حرکت ربات به صورت طبیعی‌تر گردد [۴، ۵].

در راه رفتن ربات‌های انسان‌نما، یکی از موضوعات اساسی که باید پیش از طراحی مسیر در نظر گرفت ایجاد یک حرکت پادار و بررسی پایداری ربات می‌باشد. نتیجه تحقیقات بسیار پیرامون پایداری برای ربات‌های انسان‌نما منجر به معرفی معیارهای متفاوتی برای این ربات‌ها گردید. ووکرابتوویچ و استپانکو [۶] معیار نقطه گشتاور صفر را معرفی کردند. در واقع آن‌ها نقطه گشتاور صفر (ZMP) را به عنوان نقطه ای در محل تماس کف پای ربات با زمین که در آن مؤلفه مماسی گشتاوری که بر ربات وارد می‌شود، صفر می‌باشد، معرفی کردند. این گشتاور ناشی از نیروهای وزن و اینرسی ربات می‌باشد. بررسی پایداری ربات بر اساس قرار گرفتن نقطه گشتاور صفر داخل چند ضلعی تکیه گاهی ربات صورت می‌گیرد، در واقع هر لحظه که ZMP درون چند ضلعی تکیه گاهی باشد ربات در آن لحظه پادار می‌باشد. گواسوامی [۷]، معیار چرخش پای اصلاح شده را معرفی نمود. این معیار در واقع معیار نقطه گشتاور صفر را گسترش داده و مطرح می‌کند که از دست دادن تعادل به دلیل یک گشتاور متعادل نشده می‌باشد که سبب دوران ربات حول لبه پای ربات خواهد شد. در حقیقت در این معیار چرخش کف پا سبب ناپایداری و واژگونی ربات معرفی می‌گردد.

علاوه بر این‌ها، معیارهای دیگری برای پایداری ربات‌های انسان‌نما در شرایط مختلف فیزیکی [۸]، با معرفی پارامترهای مربوطه مشخص شده‌اند [۹-۱۱]، اما معیار نقطه گشتاور صفر به دلیل سادگی نسبت به روش‌های دیگر بسیار پرکاربرد می‌باشد و در تحقیق صورت گرفته نیز از این معیار برای بررسی پایداری ربات استفاده

گردیده است. پس از بررسی معیارهای پایداری، مهم‌ترین موضوع مورد توجه و اهمیت محققان، طراحی مسیر برای ربات‌های انسان‌نما می‌باشد. در استفاده از معیار نقطه گشتاور صفر برای طراحی مسیر، دو دیدگاه کلی وجود دارد:

در دیدگاه اول، اطلاعات کاملی از جرم لینک‌های مختلف ربات و ممان اینرسی آن‌ها و موقعیت مرکز جرم آن‌ها برای محاسبه‌ی نقطه گشتاور صفر و طراحی مسیر حرکت ربات مورد نیاز است [۱۲]. در دیدگاهی دیگر می‌توان با فرض ساده سازی مدل ربات طراحی مسیر برای مرکز جرم ربات انجام داد. در تحقیقی کاجیتا و همکاران مدل پاندول معکوس خطی^۴ را معرفی نمودند [۱۳]. در واقع در این روش با به کارگیری مدل آونگ معکوس تک جرمه، مسیر حرکت مرکز جرم را طراحی نمودند. البته لازم به ذکر است که مسیر طراحی شده برای فاز تک تکیه گاهی بوده. همچنین در پژوهشی دیگر کاجیتا و همکاران با استفاده از کنترل مروری^۵ به طراحی مسیر برای مرکز جرم ربات پرداختند. آن‌ها در این تحقیق با مشتق گیری از معادله آونگ معکوس و ایجاد جرک^۶ آن (مشتق شتاب) به عنوان ورودی کنترلی، مسیر مطلوب را ایجاد نمودند. در این روش باید نقطه گشتاور صفر مرجع در یک مرحله زمانی بعدی را داشته باشند [۱۴]. تحقیقات بسیاری برای طراحی مسیر ربات انسان‌نما با فرض داشتن مسیری از نقاط مطلوب (نقطه گشتاور صفر) و به کارگیری مدل آونگ معکوس صورت گرفته است. هردت و همکاران [۱۵] به طراحی مسیر پایدار با به کارگیری مدل کنترل پیش بین^۷ پرداختند. روش‌هایی که برای طراحی مسیر زمان حقیقی^۸ در پژوهش‌ها بررسی شده است [۱۶، ۴] بر این اساس می‌باشد که با در اختیار داشتن مجموعه‌ای از مسیرهای نقاطی مشخص (نقطه گشتاور صفر^۹) و تقریب مدل ربات به صورت آونگ معکوس تک جرمه [۱۷، ۱۸] و سه جرمه که در واقع جرم متمرکز پاها نیز منظور گردیده بود طراحی مسیر به کمک مدل پیشین^{۱۰} [۱۹] و یا به کمک مؤلفه واگرا حرکت^{۱۱} انجام می‌پذیرد [۲۰-۲۳]. میرجلیلی و همکاران [۲۴] نیز با به کارگیری کنترل پیش بین طراحی مسیری به صورت آنلاین برای ربات انسان‌نمای سورنا انجام دادند که از نظر میزان هزینه محاسباتی با تحقیق و آزمایشات پیشین که برای ربات انسان‌نمای سورنا ۲ با به کارگیری الگوریتم ژنتیک انجام گرفته شده بود [۲۵] مقایسه گردید و میزان ۱۳ درصد گشتاور مورد نیاز برای مفصل زانو^{۱۲} با این روش کاسته شده بود. خدیو و همکاران [۲۶] با پیاده سازی الگوریتمی، تطبیق زمان حقیقی گام‌ها برای راه رفتن بر روی سطوح نامشخص را فراهم نمودند. آن‌ها تحقیقات خود را بر روی ربات سورنا ۳ پیاده سازی نمودند. تحقیقات زیادی به منظور جدایی بخش پایدار و ناپایدار دینامیک مرکز جرم تحت عنوان نقطه توقف^{۱۳} و مؤلفه واگرایی حرکت^{۱۴} انجام پذیرفت [۲۰، ۲۷-۲۹]. خدیو و همکاران [۳۰]، الگوریتم کنترلی را معرفی کردند که به صورت همزمان از استراتژی‌های تنظیم مکان و زمان گام‌برداری استفاده می‌کند و با اندازه‌گیری مؤلفه واگرایی حرکت در هر لحظه تنظیم

⁴ Linear Inverted Pendulum Model (LIPM)

⁵ Preview control

⁶ Jerk

⁷ MPC(Model Predictive Control)

⁸ Real-time pattern generation

⁹ ZMP

¹⁰ Model Predictive Control(MPC)

¹¹ Divergent Component of Motion

¹² Knee joint

¹³ Capture Point (CP)

¹⁴(DCM) Divergent Component of Motion

مکان و زمان گام‌برداری را انجام می‌دهد. همچنین خدیو به بیان آفست مؤلفه واگرایی حرکت^{۱۵} پرداخت که فاصله بین مؤلفه واگرایی حرکت و انتهای گام و مکان جای پای ربات انسان نما است. با استفاده از این تعریف، خدیو فضای حالت‌ها را به دو بخش شدنی و نشدنی تقسیم نمود و ثابت کرد که اگر آفست مؤلفه واگرایی حرکت در محدوده شدنی قرار گیرد، ربات می‌تواند تعادل خود را حفظ کند. هیوبین جونگ و همکاران [۳۱] به ارائه شیوه کنترلی گام‌برداری ربات پادار پرداختند که در آن از مزیت مچ‌های ربات و گشتاور مچ پای ربات استفاده شده است. در واقع اغتشاشات و ضربه‌های کوچک، خطای مدلسازی، همگی به کمک قابلیت جابه‌جایی نقطه گشتاور صفر در کف پا از بین خواهند رفت و الگوریتم راه رفتن بر اساس بهینه‌سازی مرتبه دوم، تنها برای اغتشاشات بزرگ فعال می‌شود. هیوبین جونگ و همکاران [۳۲] در پژوهشی دیگر، استراتژی‌های متفاوت شامل استراتژی مچ، لگن و گام‌برداری را در کنار زمان گام‌برداری، در قالب یک برنامه‌نویسی مرتبه دوم برای مدل آونگ معوس تک جرمه پیاده کردند. آن‌ها اثر هر یک از استراتژی‌های بازیابی تعادل را با بهره‌گیری از مدل آونگ معکوس تک جرمه نشان داده و عملکرد کنترلر را با شبیه‌سازی روی ربات گزل^{۱۶} نشان دادند.

بنابراین براساس تحقیقات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت، طراحی مسیر زمان حقیقی برای حالت‌هایی که ربات دارای سرعت پایین می‌باشد نیاز به استفاده از مدل دینامیک کامل نمی‌باشد. در چنین مواردی می‌توان از مدل‌های ساده شده مانند مدل آونگ معکوس استفاده نمود. اما در صورتی که به بررسی حالت‌های دویدن و حرکت‌های پرسرعت ربات نیاز است، دیگر مدل تک جرمه پایداری لازم را ایجاد نمی‌نماید. بدین منظور لازم است که از یک مدل سه جرمه استفاده گردد. همچنین یکی از موضوعات بسیار مهم در کنترل و پایداری ربات‌های انسان نما قابلیت بازیابی تعادل ربات با استفاده از استراتژی‌های مختلف مچ پا و گام‌برداری می‌باشد. اما در تحقیقات پیشین بررسی استراتژی‌های ذکر شده در سرعت‌های بالا و با استفاده از مدل‌های سه جرمه که قابلیت طراحی مسیر پایدار در سرعت‌های بالا را دارند به صورت کامل و در نظر گرفتن مدل کامل دینامیکی کامل ربات مورد بررسی قرار نگرفته است. پس در این پژوهش به بررسی راهکارهای عملی برای پیاده‌سازی طراحی مسیر زمان حقیقی در حضور اغتشاشات خارجی و شبیه‌سازی دینامیک کامل ربات خواهیم پرداخت. بدین منظور در بخش دوم مدل دینامیکی ساده شده ربات تحت عنوان آونگ معکوس سه جرمه را معرفی خواهیم کرد. پس از آن در بخش سوم طراحی مسیر برای مرکز جرم ربات انجام خواهیم داد. سپس در بخش چهارم و پنجم به ترتیب به بررسی مدل‌سازی سینماتیکی و استراتژی‌های بازیابی تعادل خواهیم پرداخت. در نهایت در بخش ششم به بررسی نتایج و نتیجه‌گیری پژوهش خواهیم پرداخت.

۲- مدل ساده شده دینامیکی سه جرمه ربات انسان نما

ربات انسان نما دارای مدل دینامیکی پیچیده‌ای می‌باشد. می‌توان با ساده‌سازی‌هایی، همچون تقریب مدل دینامیکی ربات با مدل آونگ معکوس سه جرمه به طراحی مسیر زمان حقیقی برای ربات انسان نما پرداخت. در این روش مدل دارای سه جرم، یکی در مرکز جرم ربات و دو تا در مچ هریک از پاها می‌باشد. مزیت این مدل تقریب جرم‌پاهای ربات به صورت یک جرم متمرکز در مچ پا بوده که چون قید سینماتیکی بین جرم‌ها

¹⁵ DCM offset

¹⁶ GAZELLE

وجود ندارد، معادلات همچنان خطی باقی می‌مانند؛ در نتیجه این مدل برای راه رفتن ربات با سرعت‌های بالا و حفظ تعادل در حضور اغتشاشات تقریب مناسبی است. می‌توان معادلات حاکم بر دینامیک آونگ معکوس سه جرمه نشان داده شده در شکل (۱) را استخراج نمود:

این مدل تنها سه جرم دارد، در نتیجه از قیود سینماتیکی چشم پوشی می‌شود. اگر به عنوان مثال جرم زانو نیز اضافه شود، باید قید سینماتیکی و تکینگی نیز در نظر گرفته شود. مرکز دستگاه مختصات بر روی تصویر عمودی میچ پای تکیه‌گاهی بر روی زمین وقتی در حالت تماس کامل با زمین قرار دارد، می‌باشد. این دستگاه مختصات با عنوان دستگاه مختصات پای تکیه‌گاهی یاد می‌شود و در ادامه، محاسبات نسبت به این دستگاه صورت می‌گیرد، مگر آنکه جز آن ذکر شود.

گشتاور عکس‌العملی زمین به خاطر جرم پاها حول نقطه c' ، گشتاور پا τ_{Feet} نامیده می‌شود و مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\tau_{Feet} = m_{Sup} \left((x_{Sup} - x_{c'}) (g + \ddot{z}_{Sup}) \right) - m_{Sup} \left((z_{Sup} - z_{c'}) (\ddot{x}_{Sup}) \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، m_{Sup} جرم پای تکیه‌گاهی x_{Sup} و z_{Sup} به ترتیب، موقعیت افقی و عمودی آن می‌باشد. گشتاور عکس‌العملی زمین به خاطر جرم آونگ معکوس حول نقطه c' ، گشتاور آونگ ($\tau_{pendulum}$) نامیده می‌شود و مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\tau_{pendulum} = m_{pendulum} g (x_{pendulum}^{ZMP} - x_{c'}) \quad (2)$$

در رابطه بالا، $m_{pendulum}$ جرم آونگ معکوس و $x_{pendulum}^{ZMP}$ مکان نقطه گشتاور صفر آونگ معکوس تنها می‌باشد. گشتاور عکس‌العملی زمین به خاطر هر سه جرم، گشتاور کلی (τ_{Total}) نامیده شده و مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید:

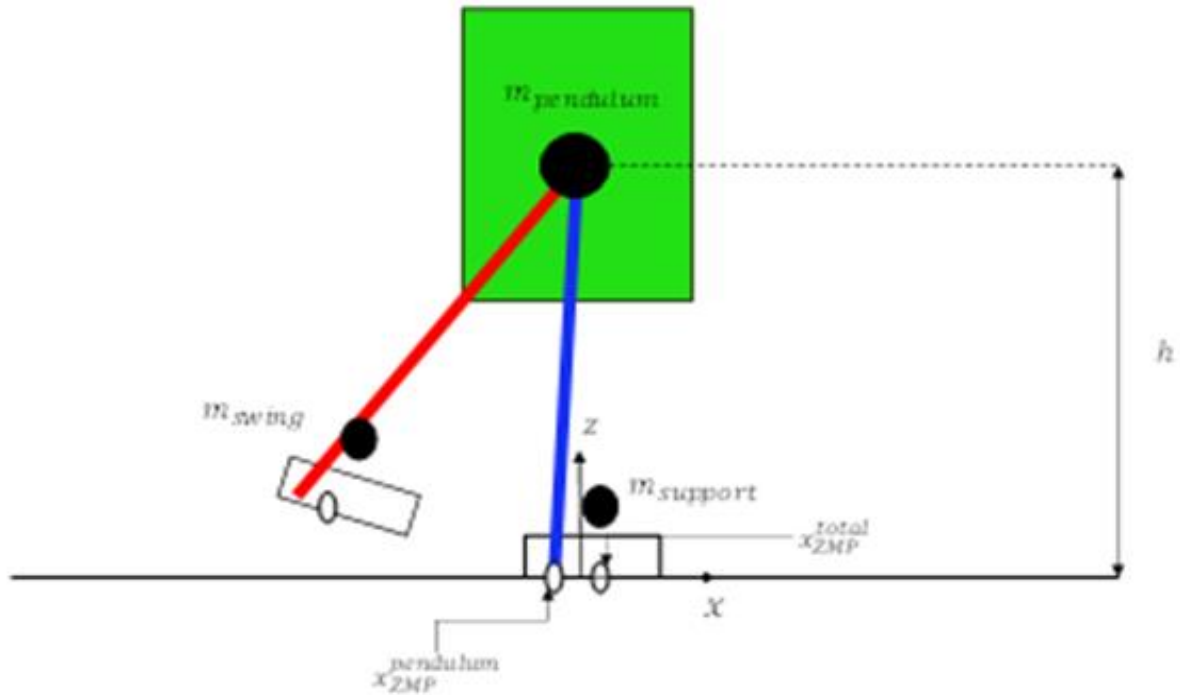
$$\tau_{Total} = \tau_{pendulum} + \tau_{Feet} \quad (3)$$

همچنین ارتباط بین گشتاور عکس‌العملی کلی هر سه جرم و مکان نقطه گشتاور صفر آن (x_{Total}^{ZMP}) به صورت رابطه (۴) است:

$$\tau_{Total} = m_{Total} \left((x_{Total}^{ZMP} - x_{c'}) (g + \ddot{z}_{c'}) \right) \quad (4)$$

که در آن $\ddot{z}_{c'}$ شتاب عمودی مرکز جرم می‌باشد. در نهایت رابطه نقطه گشتاور صفر آونگ به صورت رابطه (۵) به دست خواهد آمد:

$$x_{pendulum}^{ZMP} = \frac{m_{Total}}{m_{pendulum}} x_{Total}^{ZMP} - \frac{m_{feet}}{m_{pendulum}} x_{feet}^{ZMP} \quad (5)$$



شکل ۱- دیاگرام و نیروهای وارد بر مدل آونگ معکوس

رابطه (۵) به شدت تحت تاثیر انتخاب نقطه C' قرار دارد؛ زیرا فرضیات خطایی متناسب با $(x_{Total}^{ZMP} - x_{C'})$ تولید می‌کند؛ بنابراین نقطه C' بر روی x_{Total}^{ZMP} انتخاب می‌شود. رابطه زیر معادله آونگ معکوس را نشان می‌دهد که در آن موقعیت افقی آونگ معکوس (موقعیت افقی بالاتنه) می‌باشد:

$$\ddot{x}_{pendulum} = \frac{g}{h} (x_{pendulum} - x_{pendulum}^{ZMP}) \quad (6)$$

با داشتن $x_{pendulum}$ از رابطه (۵) و جایگذاری آن در (۶) مسیر مرکز جرم آونگ معکوس سه جرمه به دست می‌آید.

۳- طراحی مسیر زمان حقیقی

در طراحی مسیر زمان حقیقی ابتدا با استفاده از مدلی ساده شده همچون مدل آونگ معکوس خطی تک جرمه به تولید مسیر برای مرکز جرم ربات به صورت شکل (۲) خواهیم پرداخت. در نهایت با به کارگیری سینماتیک معکوس، زوایای مفاصل ربات را به دست خواهیم آورد.

۳-۱- ایجاد الگوی حرکتی بالاتنه ربات با استفاده از مؤلفه واگرای حرکت

یکی از چالش‌های طراحی مسیر زمان حقیقی برای ربات‌های انسان‌نما، طراحی مسیر مرکز جرم ربات می‌باشد. در واقع دینامیک مرکز جرم ربات از دینامیک بخش‌های دیگر ربات مجزا خواهد بود و تنها تحت تاثیر نیروی جاذبه و نیروهای خارجی وارد بر مرکز جرم ربات می‌باشد. در این بخش با استفاده از مدل آونگ معکوس سه جرمه و نقطه گشتاور صفر به طراحی مسیر برای مرکز جرم ربات و مؤلفه واگرای حرکت خواهیم پرداخت.

$$\xi(t) = p_x + e^{wt} (\xi_{initial} - p_x) \quad (9)$$

با در دست داشتن رابطه (۱۲)، می‌توان مؤلفه واگرایی حرکت را در هر گام ربات به صورت رابطه (۱۰) محاسبه نمود.

$$\xi_{end}^{j-1} = \xi_{initial}^j = p_x^j + e^{-wt_{step}} (\xi_{end}^j - p_x^j) \quad (10)$$

که در این رابطه ξ_{end}^j و $\xi_{initial}^j$ نشان دهنده مؤلفه واگرایی حرکت در ابتدا و انتهای هر بازه می‌باشد. همچنین به منظور داشتن یک مسیر حرکت طبیعی برای ربات، نیاز به طراحی مؤلفه واگرایی حرکت برای فاز دو تکیه گاهی نیز می‌باشد که به صورت روابط (۱۱) و (۱۲) بیان گردیدند.

$$\xi_{initial,DSP}^j = p_x^{j-1} + e^{-w\alpha t_{DSP}} (\xi_{end,DSP}^j - p_x^{j-1}) \quad (11)$$

$$\xi_{end,DSP}^j = p_x^j + e^{w(1-\alpha)t_{DSP}} (\xi_{end,DSP}^j - p_x^j) \quad (12)$$

که α با توجه به نسبت زمان تک تکیه گاهی به دوتکیه گاهی یک مقدار ثابت می‌باشد. در نهایت معادله مسیر مرکز جرم ربات را می‌توان به صورت رابطه (۱۳)، به دست آورد.

$$x_{com}(t) = e^{-wt} (x_{com}(0) + w \int e^{wt} \xi(t) dt) \quad (13)$$

لازم به ذکر است که تمامی مراحل را می‌توان برای طراحی مسیر در راستای دیگر حرکت مسیر مرکز جرم و مؤلفه واگرایی حرکت در راستای محور y به دست آورد.

۳-۲- ایجاد الگوی حرکتی مچ پا

حرکت مچ پا باید به نحوی پیوسته باشد که بتواند مسیرهای همواری را ایجاد کند. در واقع مسیر حرکت پای معلق علاوه بر پیوستگی در مکان باید در سرعت و شتاب نیز دارای حرکت پیوسته باشد تا حرکتی هموار توسط موتورها ایجاد گردد. برای طراحی مسیر پای معلق در جهت X از یک چندجمله‌ای درجه پنج استفاده می‌شود. برای حل این چندجمله‌ای ما نیاز به دانستن شرایط مرزی حرکت مچ پا خواهیم داشت. در واقع فرض می‌کنیم که پای متحرک ربات در هر فاز حرکتی (تک تکیه‌گاهی^{۱۷} و یا دوتکیه‌گاهی^{۱۸}) در ابتدا و انتهای حرکت سرعت و شتاب مچ پاها صفر می‌باشد. در واقع در نظر گرفتن این چهار شرط مرزی به منظور فرض حرکت پایدار می‌باشد، چون سبب می‌گردد تا مچ پای ربات به آرامی در انتهای هر فاز حرکتی بر روی زمین قرار گیرد بدون آن که ضربه‌ای به آن وارد شود. همچنین حرکت در ابتدای هر فاز درحالی شروع می‌گردد که

¹⁷ Single Support Phase (SSP)

¹⁸ Double Support Phase (DSP)

پا در حال سکون باشد. علاوه بر چهار شرط مرزی ذکر شده برای حل معادله درجه پنجم نیاز به دو شرط مرزی دیگر می باشد. برای داشتن حرکت پیوسته باید فرض شود که مکان مچ پا در انتهای هر فاز برابر با مکان مچ در ابتدای فاز بعدی می باشد، همچنین مکان قرارگیری مچ پا در انتهای هر فاز برابر با مکان ابتدایی فاز بعدی می باشد. با در نظر داشتن این شش شرط مرزی معادله درجه پنج مچ پا در هر فاز حرکتی حل خواهد شد. این معادله به صورت زیر می باشد:

$$X(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (14)$$

همچنین برای حل این معادله در [امین بازه حرکتی در زمان $[t_j, t_{j+1}]$ به صورت رابطه (15) در خواهد آمد:

$$X^j = \sum_{k=0}^5 a_k^j (t - t_j)^k \quad t_j \leq t \leq t_{j+1} \quad (15)$$

شرایط مرزی برای حرکت مچ پای ربات به صورت رابطه (16) خواهند بود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{X}^j(t_j) = 0 \\ \dot{X}^j(t_{j+1}) = 0 \\ \ddot{X}^j(t_j) = 0 \\ \ddot{X}^j(t_{j+1}) = 0 \\ X^j(t_j) = X^{j-1}(t_j) \\ X^j(t_{j+1}) = X^{j+1}(t_{j+1}) \end{array} \right. \quad (16)$$

همچنین به صورت مشابه مسیر حرکت مچ پای ربات در راستای محور Y را می توان به دست آورد. البته برای طراحی مسیر در جهت عمود بر حرکت علاوه بر فرضیات قبلی به عنوان شرایط مرزی باید بیشترین ارتفاع پای معلق را مفروض بگیریم. یکی از پارامترهای بسیار مهم در راستای عمود بر حرکت، این می باشد که حداکثر ارتفاع از کف پا چقدر باشد و کی اتفاق بیفتد. به عنوان مثال اگر مانعی در سر راه پای ربات باشد می توان زمانی که ربات به مانع می رسد ارتفاع پای ربات در بیشترین ارتفاع ممکن قرار گیرد. در طراحی مسیرهای زمان حقیقی این موضوع اهمیت بیشتری نیز پیدا خواهد کرد. پس با فرض این هفت شرط مرزی معادله حرکتی مفصل مچ پای ربات در جهت عمود بر حرکت یک معادله درجه شش خواهد بود. این معادله به صورت زیر تعریف می گردد:

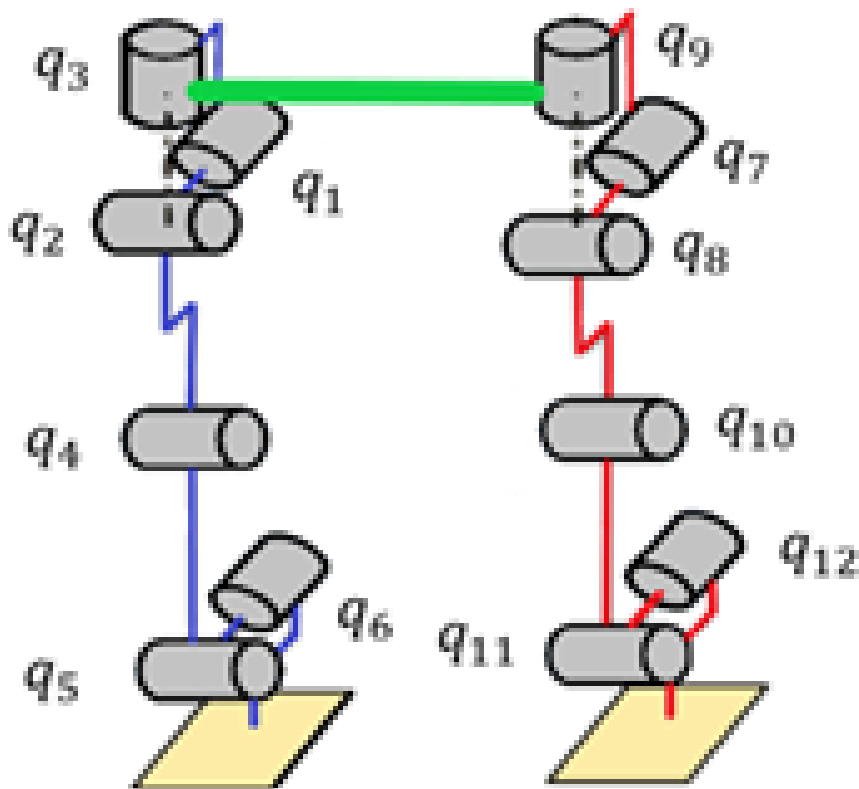
$$Z(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5 + b_6 t^6 \quad (17)$$

شرایط مرزی برای حل معادله به صورت زیر خواهد بود:

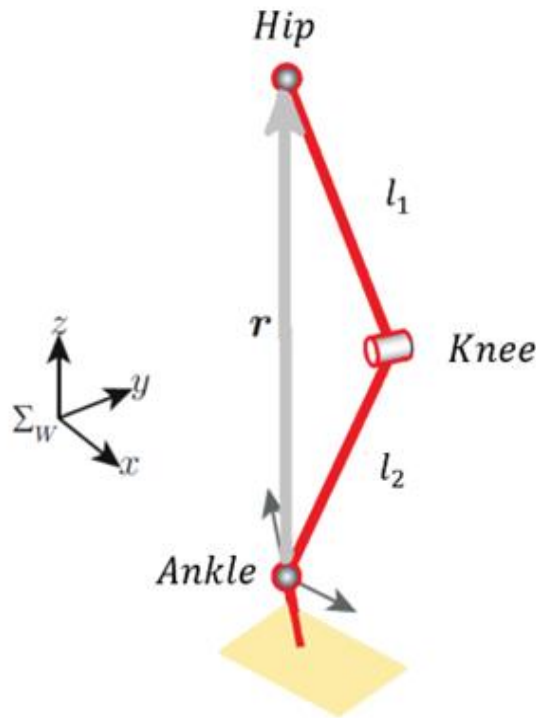
$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}^i = 0 \\ \dot{Z}^i(t_{i+1}) = 0 \\ \dot{Z}^i(t_i) = 0 \\ \ddot{Z}^i(t_{i+1}) = 0 \\ \ddot{Z}^i(t_i) = h0 \\ Z^i(t_{i+1}) = h0 \\ Z^i(t_i) = h0 \\ Z^i\left(\frac{t_i + t_{i+1}}{2}\right) = h_{Max} \end{array} \right. \quad (18)$$

۴- مدل‌سازی سینماتیکی ربات انسان‌نما

برای ایجاد مسیر در ربات‌های انسان‌نمای سه بعدی، نیاز به حل مساله سینماتیک معکوس می‌باشد. زیرا با داشتن اطلاعات مختصات نقاط انتهایی لینک‌ها یا داشتن مسیر حرکت مرکز جرم و یا میچ پای ربات نمی‌توان ربات را کنترل نمود و بلکه نیاز می‌باشد تا با حل مساله سینماتیک معکوس زوایای مفصلی را دانست و به عنوان فرمان ورودی به موتورهای ربات در مفاصلی که دارای درجه آزادی می‌باشند وارد نمود. در این پژوهش در هر پا میچ پای دارای دو درجه، زانو یک درجه و لگن سه درجه آزادی مطابق شکل (۳) می‌باشند. در این بخش تنها معادلات سینماتیکی برای یک پا را استخراج می‌کنیم و به دلیل تقارن هندسی معادلات سینماتیک برای پای دیگر دقیقاً مشابه با معادلات بیان شده خواهند بود. پای چپ ربات را می‌توان به صورت شکل (۴) برای استخراج معادلات سینماتیک معکوس ربات، نمایش داد.



شکل ۳- ربات انسان‌نمای سه بعدی دارای ۱۲ درجه آزادی حرکت



شکل ۴- شکل شماتیک پای ربات

بردار رابط بین مچ پای چپ و لگن را می‌توان به صورت مؤلفه‌های افقی و عمودی آن به صورت زیر نمایش داد:

$$\begin{cases} \vec{r}_x = \overline{x}_{COG} - \overline{x}_{Ankle,Left} \\ \vec{r}_y = \overline{y}_{COG} - \overline{y}_{Ankle,Left} \\ \vec{r}_z = \overline{z}_{COG} - \overline{z}_{Ankle,Left} \end{cases} \quad (19)$$

و همچنین اندازه بردار \vec{r} به صورت رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

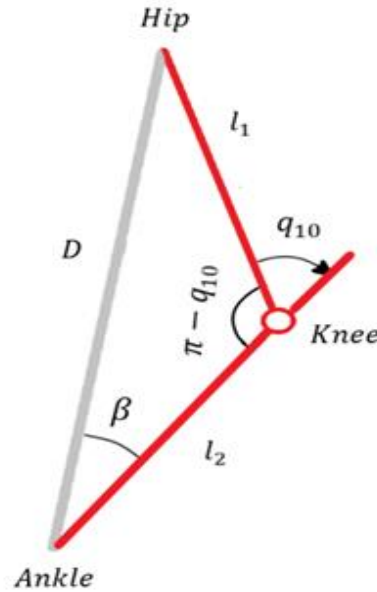
$$D = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \quad (20)$$

براساس روابط مثلثاتی می‌توان زاویه بین مفصل زانوی چپ و لینک ران پای چپ شکل (۵) را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$q_{10} = -\cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - D^2}{2l_1l_2}\right) + \pi \quad (21)$$

در اختیار داشتن زاویه q_{10} می‌توان زاویه β در مثلث شکل (۵) را به دست آورد:

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{l_1 \sin(\pi - q_{11})}{D}\right) \quad (22)$$



شکل ۵- هندسه پای ربات

برای به دست آوردن زاویای مفصل مچ پای چپ با راستای لینک قبلی (راستای عمودی و جانبی) از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\begin{cases} q_{11} = -\text{atan2}\left(r_x, \sqrt{r_z^2 + r_y^2}\right) - \beta \\ q_{12} = \text{atan2}(r_y, r_z) \end{cases} \quad (23)$$

در نهایت با در دست داشتن زاویای مفصل مچ و زانو پای چپ، زاویای مفصل لگن به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$R_z(q_9)R_x(q_7)R_y(q_8) = R_x(-q_{12})R_y(-q_{11} - q_{10}) = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (24)$$

که در رابطه بالا، ما ماتریس‌های دوران حاصل از زاویای q_6, q_5, q_4 را در اختیار داریم. بنابراین حاصل ضرب این دو بردار دوران $R_x(-q_6)R_y(-q_5 - q_4)$ برابر با یک ماتریس 3×3 خواهد شد که تمامی درایه‌های آن معلوم می‌باشند. همچنین سمت چپ که شامل زاویای مجهول لگن می‌باشد نیز براساس با حل سینماتیک معکوس به صورت زیر در خواهند آمد.

$$\begin{cases} q_4 = \text{atan2}(-R_{12}, R_{22}) \\ q_1 = \text{atan2}(R_{32}, -R_{12} \sin(q_4) + R_{22} \cos(q_4)) \\ q_2 = \text{atan2}(-R_{31}, R_{33}) \end{cases} \quad (25)$$

که در این روابط l_1 و l_2 و l_3 به ترتیب طول ران^{۱۹}، ساق^{۲۰} و فاصله کف پا تا مچ پای ربات می‌باشد.

¹⁹ thigh²⁰ shank

۵- بازیابی تعادل در حضور اغتشاشات خارجی

حفظ تعادل ربات انسان‌نما، با استفاده از گشتاور مچ پا، چرخش بالانته و تنظیم مکان و زمان قدم گذاری پای ربات انجام می‌پذیرد. هر یک از روش‌های بیان شده براساس نحوه و میزان اغتشاش وارد شده به ربات در حلقه کنترلی وارد می‌شود. الگوریتم کنترلی ارائه گردیده شده در این پژوهش، با در نظر گیری استراتژی مچ اغتشاشات ضعیف را از بین خواهد برد، همچنین با تنظیم مکان، زمان و سرعت گام‌برداری براساس یک مسئله بهینه‌سازی به حذف اغتشاشات و بازیابی تعادل ربات انسان نما می‌پردازد. بنابراین با در نظر گیری استراتژی های ذکر شده به منظور حذف اغتشاشات ایجاد شده ناشی از نیروهای خارجی معادله کنترلی به صورت رابطه (۲۶) در خواهد آمد.

$$\begin{aligned} b_{error}^{offset} + u_{t_{new,error}}^{ZMP} + \xi_{reference}^t e^{-wt} (T_{reference} - T_{new}) \\ = u_{control}^{ZMP} + (\xi_{reference}^t - u_{control}^{ZMP}) e^{w(t_{new}-t)} \end{aligned} \quad (26)$$

عبارت سوم سمت چپ رابطه (۲۶) اثر زمان گام‌برداری را در از بین بردن اغتشاشات و خطای مؤلفه واگرایی حرکت را نشان می‌دهد. عبارت دوم سمت چپ تاثیر مکان جای پا و عبارت $u_{control}^{ZMP}$ تاثیر استراتژی مچ در بازیابی تعادل را نشان می‌دهد. اگر $u_{control}^{ZMP}$ برابر با صفر قرار داده شود، تاثیر استراتژی مچ صفر خواهد شد، همچنین با صفر کردن $u_{t_{new,error}}^{ZMP}$ و $(T_{reference} - T_{new})$ به ترتیب تاثیر استراتژی گام‌برداری و زمان گام حذف خواهد شد. بنابراین برای به دست آوردن مقدار بهینه $u_{t_{new,error}}^{ZMP}$ ، $u_{control}^{ZMP}$ ، b_{error}^{offset} و $(T_{reference} - T_{new})$ در رابطه (۲۶)، به تشکیل یک مسئله بهینه‌سازی و تعریف این متغیرها به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی باید پرداخت.

۶- بهینه سازی کنترلر راه رفتن ربات انسان نما

همانگونه که در بخش قبل اشاره گردید، اغتشاش ورودی به مرکز جرم ربات، باعث انحراف مؤلفه واگرایی حرکت از مقدار رفرنس آن می‌شود و ξ_{error}^t را به وجود می‌آید. این خطا طبق رابطه (۲۶) سبب تغییر $u_{control}^{ZMP}$ ، $u_{t_{new,error}}^{ZMP}$ ، b_{error}^{offset} و $(T_{reference} - T_{new})$ می‌انجامد. برای محاسبه مقادیر بهینه این پارامترها یک مسئله بهینه‌سازی تشکیل می‌شود. همچنین به دلیل خطی بودن مدل آونگ معکوس، این مدل دینامیکی خطی دارد، پس مسئله بهینه‌سازی به برنامه‌نویسی مرتبه دوم کاهش می‌یابد. این بهینه‌سازی به صورت زمان حقیقی بر روی ربات انسان نما قابل پیاده‌سازی است. همچنین در هر لحظه براساس اغتشاش به وجود آمده، مکان و زمان گام‌برداری اصلاح می‌شود و تغییر پارامترهای بهینه‌سازی تا حذف کامل خطای مؤلفه واگرایی حرکت ادامه می‌یابد.

قید خطی مسئله بهینه‌سازی در واقع همان رابطه (۲۶) می‌باشد که در واقع معادله دینامیک خطای مؤلفه واگرایی حرکت است و تاثیر هر یک از استراتژی‌های مچ، گام‌برداری و تنظیم زمان گام را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بهینه‌سازی از قید خطی اصلی آن تجاوز نمی‌کند و متغیرهای بهینه‌سازی را به گونه‌ای تولید می‌کند تا دینامیک خطای نقطه مهار برقرار بماند. همچنین به منظور حل مساله بهینه‌سازی مرتبه دوم علاوه

بر قید خطی نیاز به تعریف محدودیت های سینماتیکی و دینامیکی ربات براساس قید نامساوی می پردازیم. در ادامه هریک از این قیود را بررسی خواهیم نمود. اولین قید نامساوی که تعریف می کنیم مربوط به ماکزیمم و مینیمم گام زمانی ربات انسان نما ($T_{reference} - T_{new}$) بر اساس محدودیت سرعت ربات طراحی شده به صورت زیر تعیین می شود.

$$t_{minimum} \leq t_{new} \leq t_{maximum} \quad (27)$$

قید نامساوی بعدی که تعریف می کنیم مربوط به استراتژی مچ می باشد که در بازه طول کف پای ربات l تعریف می شود و نمی تواند از آن تجاوز کند.

$$-l/2 \leq u_{control}^{ZMP} \leq l/2 \quad (28)$$

و در نهایت قید دیگری که تعریف می کنیم مربوط به استراتژی گام ربات می باشد که وابسته به محدودیت سینماتیکی پاهای ربات انسان نما طراحی شده می باشد و نمی تواند از بیشینه فاصله میان دو پای ربات $l_{kiematic}^{maximum}$ عبور کند.

$$-l_{kiematic}^{maximum} / 2 \leq u_{t_{new,error}}^{ZMP} + u_{t_{new,reference}}^{ZMP} \leq l_{kiematic}^{maximum} / 2 \quad (29)$$

در نهایت به منظور بهینه کردن کنترلر معرفی شده تابع هزینه شامل قیود مساوی و نامساوی معرفی شده به صورت رابطه (۳۰) تعریف می نمایم تا میزان خطا به حداقل برسد. یعنی بهترین پارامترها برای دنباله روی و پایداری در اثر اغتشاشات ورودی را تولید نماید.

$$Minimize \lambda_b \|b_{error}^{offset}\|^2 + \lambda_T \|T_{reference} - T_{new}\|^2 + \lambda_u \|u_{t_{new,error}}^{ZMP}\|^2 \quad (30)$$

در رابطه (۳۰) عبارت اول مربوط به مینیمم کردن خطای آفست مؤلفه واگرایی حرکت، عبارت دوم مربوط به مینیمم کردن خطای زمان گام برداری و عبارت آخر مربوط به مینیمم کردن خطای مکان جای پا در انتهای گام می باشد.

۷- نتایج و بحث

در این بخش با استفاده از مدل آونگ معکوس سه جرمه و مدل دینامیکی کامل ربات شبیه سازی شده در محیط سیمولینک به بررسی طراحی مسیر زمان حقیقی و بازیابی تعادل ربات انسان نما براساس استراتژی مچ، تنظیم زمان و مکان گام برداری و همچنین نقطه آفست مؤلفه واگرایی حرکت خواهیم پرداخت. بدین منظور برای صحت سنجی و مدل سازی روش ارائه شده از پارامترهای ربات انسان نما سورنا ۳ استفاده کرده ایم [۳۳]. این پارامترها به صورت جداول (۱) و (۲) و (۳) می باشند.

برای شبیه‌سازی کانتکت‌های کف پای ربات، پارامترهای فیزیکی درمحل تماس کف پای ربات با زمین را در محیط شبیه‌سازی شده سیمولینک متلب بر مبنای شرایط محیطی واقعی، به صورت یک مدل فنرو دمپر که به ترتیب در ارتباط با یک سطح که با ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی به مانند جدول (۴) تعریف کردیم، می‌باشد. با در اختیار داشتن مدل کامل دینامیکی ربات معرفی شده می‌توان به بررسی و صحت سنجی، طراحی مسیر و بازیابی تعادل ربات انسان نما پرداخت. در شکل (۵) مدل ربات مطرح شده به منظور صحت سنجی، با در نظر گرفتن شرایط واقعی نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای هندسی ربات انسان نما

تعریف	طول (cm)
طول ران	۱۶
طول ساق	۱۲
بالاتنه ربات	۱۱
پاندول معکوس	۱۰
ارتفاع اولیه مچ پا	۱۲
بیشینه ارتفاع مچ پا	۱۰

جدول ۲- جرم لینک‌های ربات

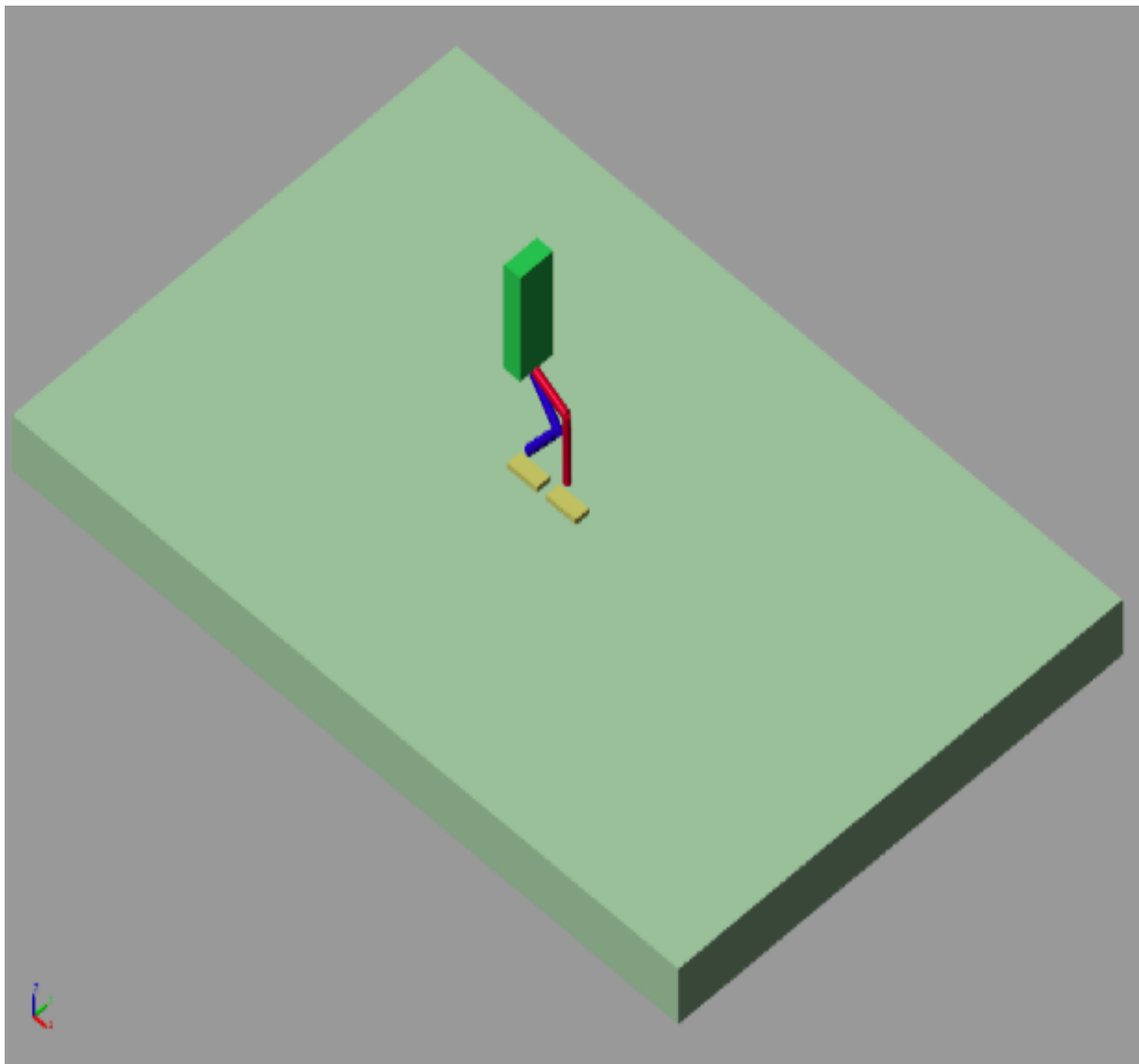
تعریف	جرم (kg)
جرم کف پا	۲/۲۳۶
جرم ساق پا	۴/۵۶۱
جرم ران پا	۶/۳۲۷
جرم بالاتنه	۳۹/۳۹۶

جدول ۳- ممان اینرسی لینک‌های ربات

تعریف	ممان اینرسی
ممان اینرسی کف پا	۰/۰۱۳۸
ممان اینرسی ساق پا	۰/۰۵۰۳
ممان اینرسی ران پا	۰/۰۷۶۱
ممان اینرسی بالاتنه	۱/۳۲۵۰

جدول ۴- پارامترهای کانتکت‌های کف پای ربات

تعریف	مقدار عددی
ضریب اصطکاک استاتیکی	۱/۵
ضریب اصطکاک دینامیکی	۱/۲
ضریب سختی کانتکت	۶۴۵۰۰۰
ضریب میرایی کانتکت	۱۰۰۰۰



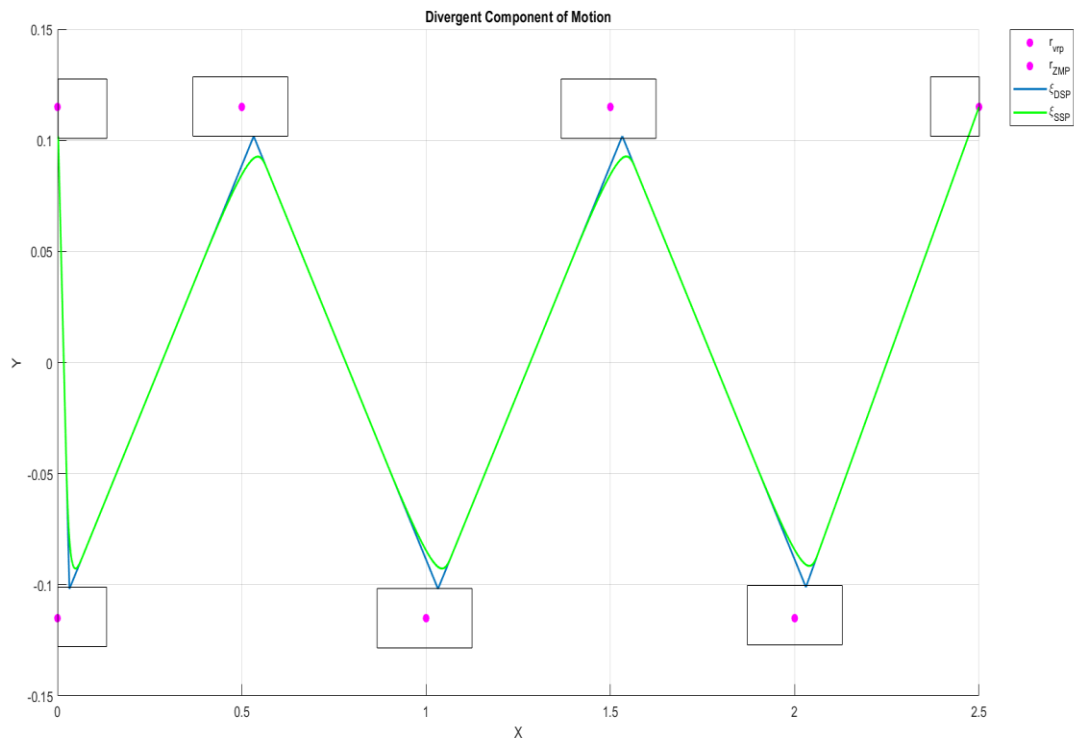
شکل ۶- مدل ربات با در نظر گرفتن شرایط دینامیکی محیط واقعی و فیزیک ربات واقعی

۷-۱- طراحی مسیر زمان حقیقی

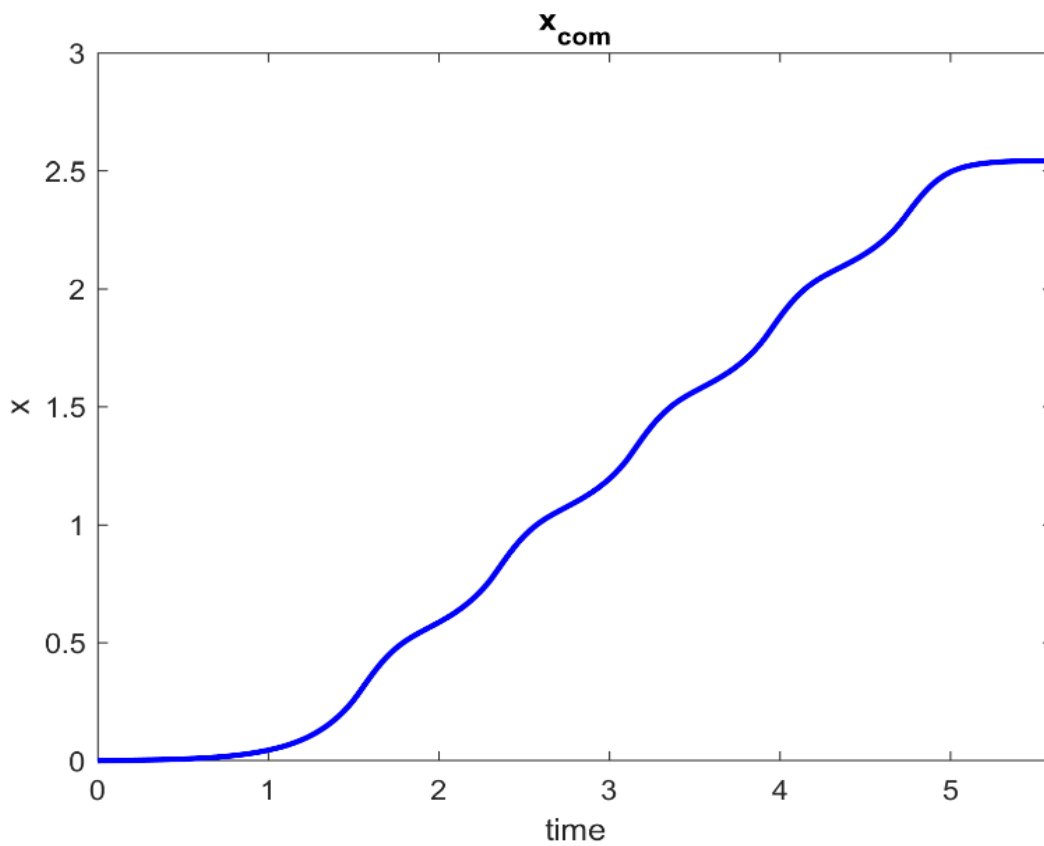
در این بخش به طراحی مسیر زمان حقیقی با توجه به روش ارائه شده خواهیم پرداخت. همچنین تمامی مسیرهای ایجاد شده و صحت سنجی‌ها براساس پارامترهای فیزیکی ذکر شده در جداول (۴-۱) خواهد بود. پیش از بررسی جامع روش‌های ارائه شده و صحت سنجی آن‌ها در ابتدا به طراحی مسیر مرکز جرم به ازای روش‌های مختلف معرفی شده طراحی مسیر مرکز جرم ربات در بخش سوم خواهیم پرداخت. بدین منظور ابتدا مسیر مؤلفه واگرایی حرکت را برای ربات انسان‌نمای سه بعدی مطابق با شکل (۷) برای آونگ معکوس یک جرعه می‌پردازیم.

حال با در اختیار داشتن مؤلفه واگرایی حرکت آونگ معکوس یک جرعه می‌توان مسیر مرکز جرم ربات را براساس معادله (۱۳) به دست آورد که مطابق با شکل (۸) در خواهد آمد.

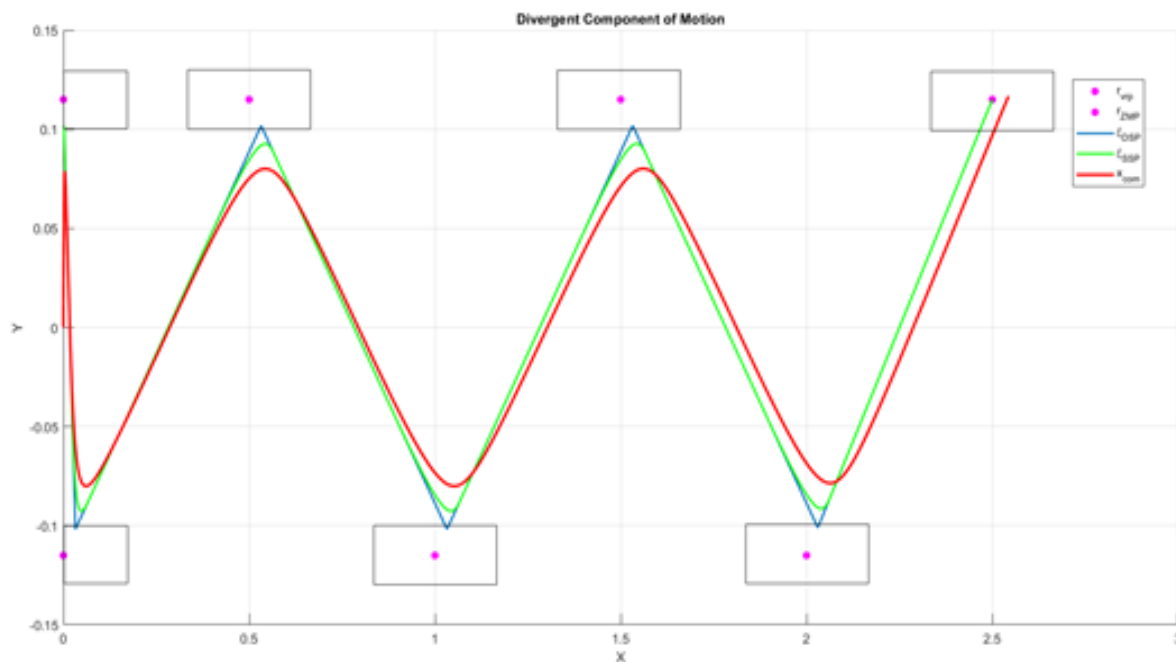
که مسیر به دست آمده از مسیر مرکز جرم و مؤلفه واگرایی حرکت در صفحه $X-Y$ به صورت شکل (۹) به دست خواهد آمد و در نهایت مسیر طراحی شده در فضای سه بعدی برای ربات انسان‌نمای ۳ بعدی به صورت شکل (۱۰) می‌گردد.



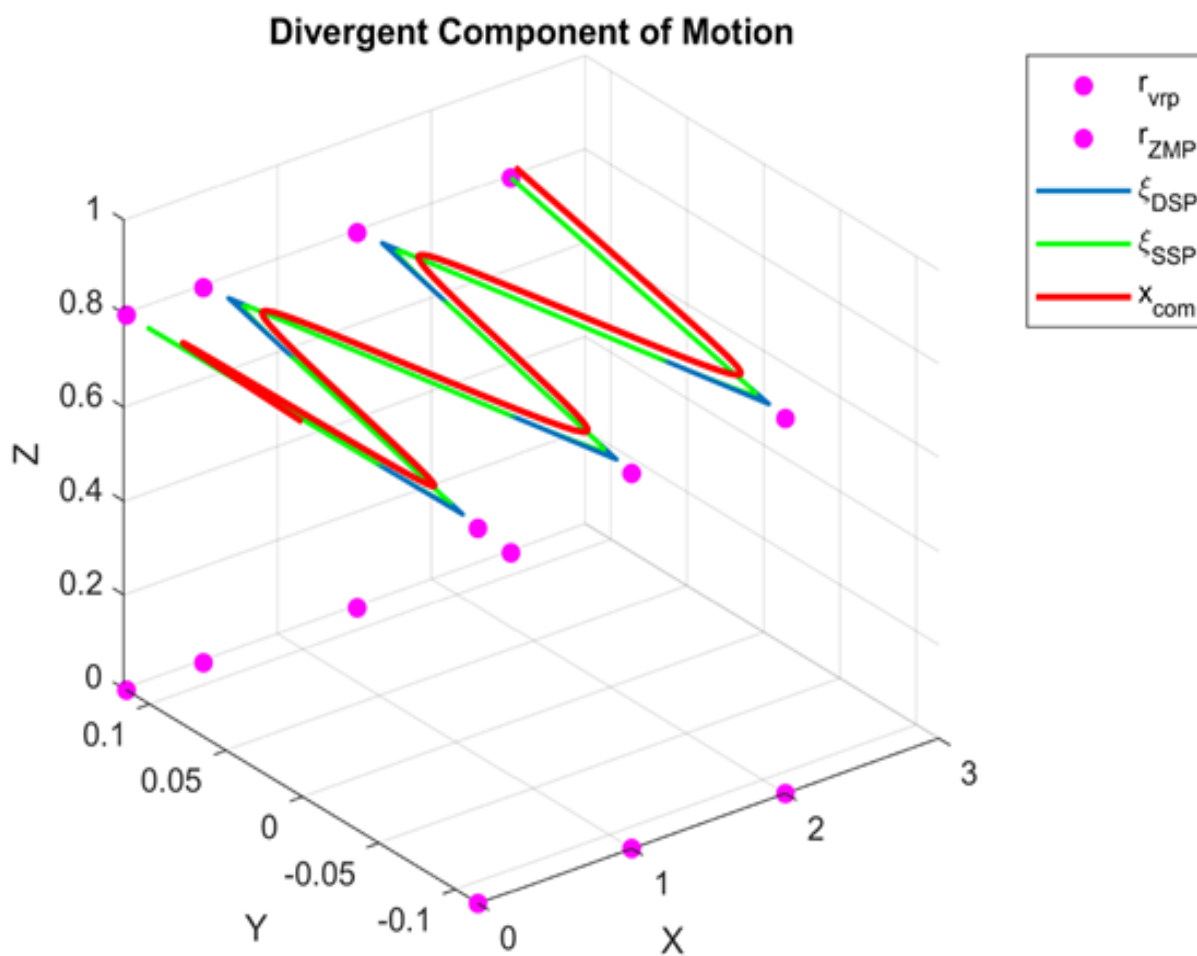
شکل ۷- طراحی مسیر مؤلفه واگرایی حرکت با زمان تک تکیه گاهی ۰/۸ ثانیه و دوتکیه گاهی ۰/۳ ثانیه



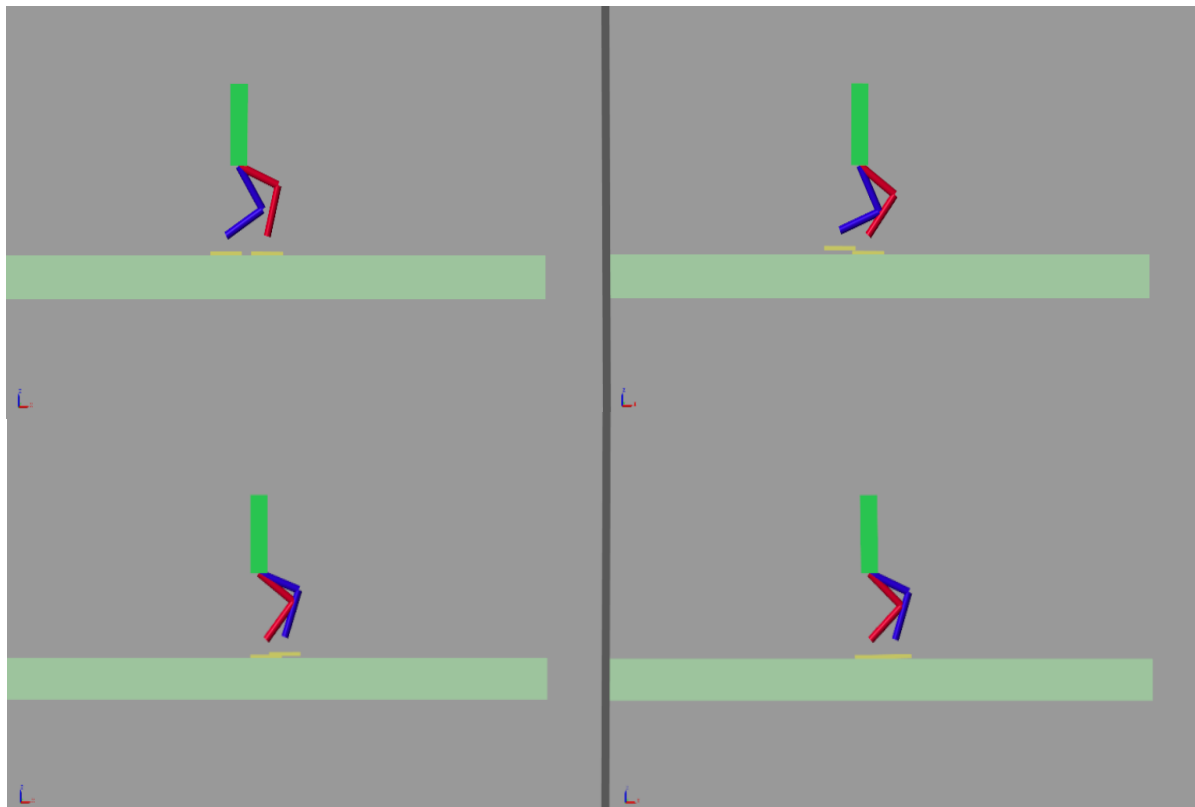
شکل ۸- طراحی مسیر زمان حقیقی برای مرکز جرم با زمان تک تکیه گاهی ۰/۸ ثانیه و دوتکیه گاهی ۰/۳ ثانیه



شکل ۹- طراحی مسیر زمان حقیقی برای مرکز جرم و مؤلفه واگرای حرکت با زمان تک تکیه گاهی ۰/۸ ثانیه و دو تکیه گاهی ۰/۳ ثانیه



شکل ۱۰- طراحی مسیر زمان حقیقی برای مرکز جرم و مؤلفه واگرای حرکت با زمان تک تکیه گاهی ۰/۸ ثانیه و دو تکیه گاهی ۰/۳ ثانیه در فضای سه بعدی



شکل ۱۱- حرکت پایدار پای چپ و راست ربات مدل شده با پارامترهای واقعی در محیط نرم افزار

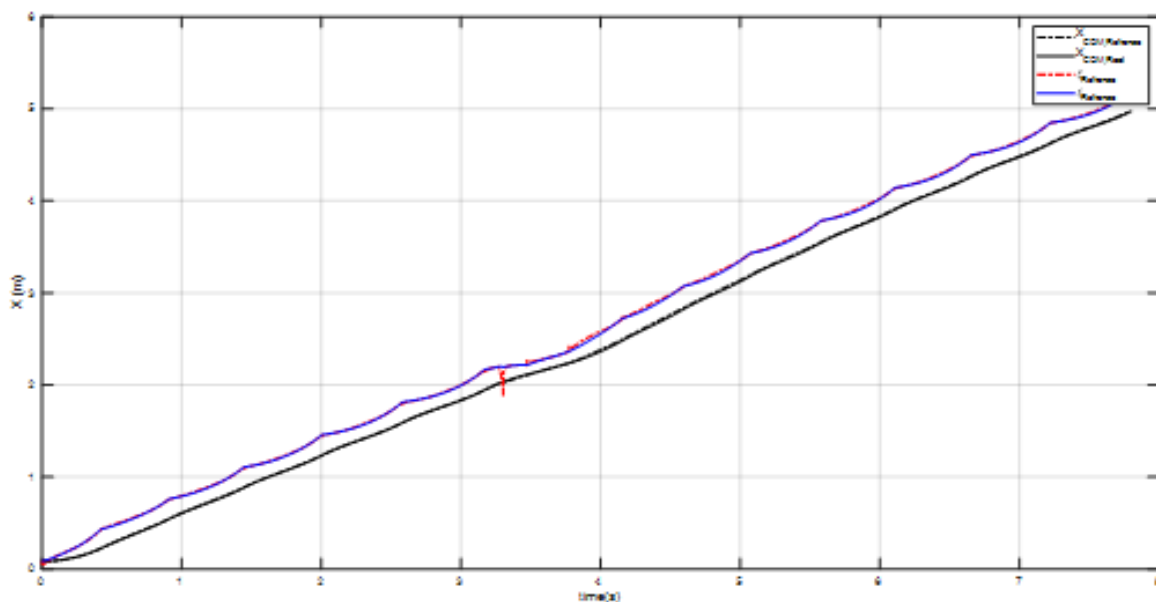
اکنون برای صحت سنجی مسیر طراحی شده از محیط سیمولینک که با پارامترهای دینامیکی مدل ربات واقعی سورنا ۳ به صورت جداول (۱-۴) طراحی شده است، استفاده خواهیم کرد. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود علاوه بر تخمین دینامیکی ربات با یک مدل ساده اما همچنان داری یک حرکت پایدار می باشد.

۷-۲- بازیابی تعادل با استفاده از مدل ربات انسان نمای سه جرمه و مساله بهینه سازی مرتبه دوم

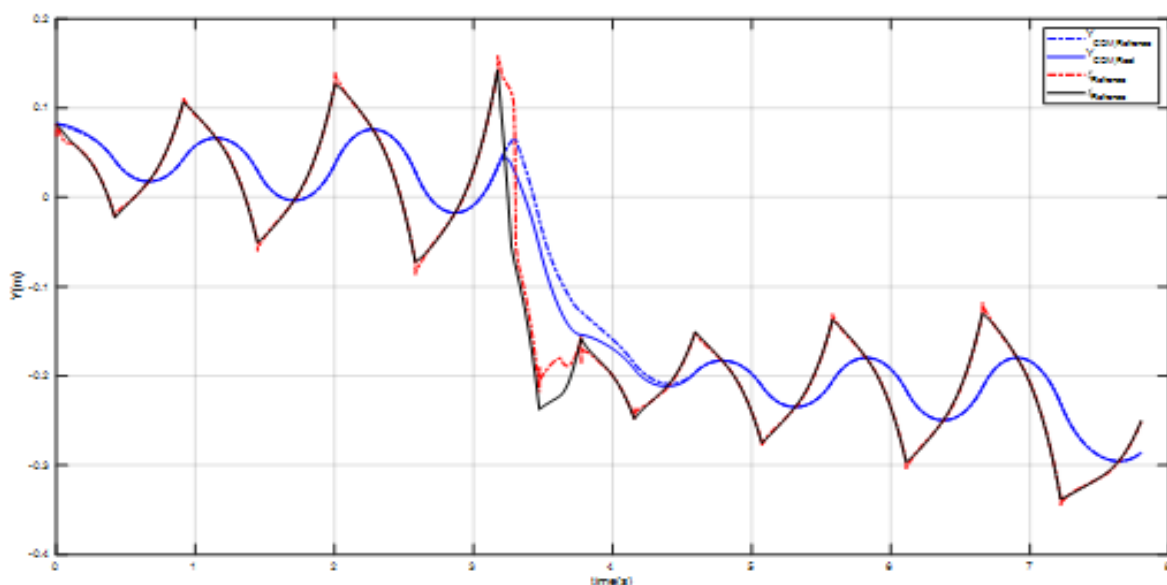
در این بخش فرض می شود که یک نیروی ناگهانی در مدت زمانی بسیار کوتاه به صورت ضربه به ربات وارد می شود. حال با تغییر مؤلفه واگرای حرکت اندازه گیری شده در هر لحظه با مؤلفه واگرای حرکت مرجع پس از اعمال ضربه، کنترلر معرفی شده در بخش (۵) به منظور خنثی ساختن این خطا فعال می شود. حال با تغییر ضرایب بهینه سازی مرتبه دوم معرفی شده اثر هریک از پارامترهای تنظیم مکان جای پا و زمان گام برداری در بازیابی تعادل ربات انسان نما را خواهیم یافت. همچنین لازم به ذکر است که برخلاف مرحله قبلی که تنها از مدل آونگ معکوس تک جرمه به منظور طراحی مسیر زمان حقیقی ربات انسان نما استفاده می شد، در این بخش از مدل سه جرمه که توانایی بازسازی مدل دینامیکی دقیق تری از ربات را دارا می باشد استفاده خواهد شد. در شبیه سازی های این بخش فرض می شود که ربات به صورت متوالی ۱۴ قدم پیاپی به سمت جلو بر می دارد اما در ۰/۱ ثانیه یک ضربه ۳۴۵ نیوتنی در راستای عرضی هنگام برداشتن قدم ششم به آن وارد می شود. ربات با استفاده از کنترلر گام برداری معرفی شده

²¹ Mean Square Error (MSE)

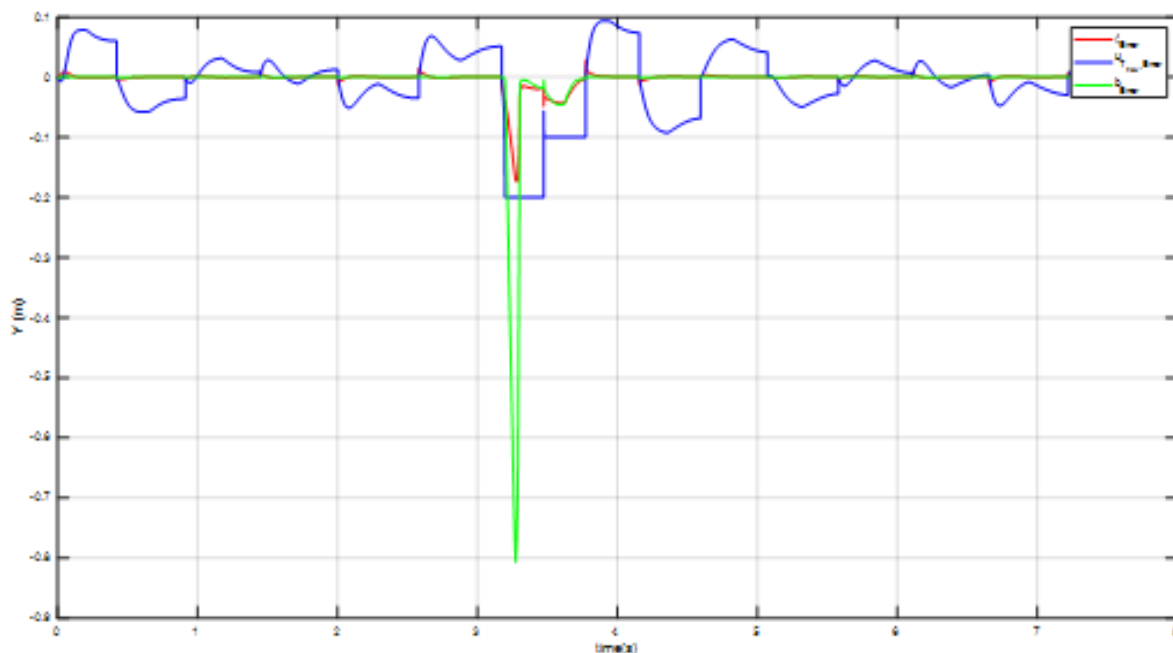
در بخش ششم معرفی گردید و با بکارگیری بهینه سازی مرتبه دوم به منظور به حداقل رساندن خطا نسبت به مقادیر مرجع با تنظیم زمان و مکان گام برداری و همچنین با استفاده از استراتژی مچ علاوه بر بازیابی تعادل به مسیر خود با بهینه‌ترین پارامترهای کنترلی به مسیر خود ادامه خواهد داد. در ادامه به بررسی تاثیر هر یک از پارامترها و استراتژی‌های بازیابی تعادل مطرح شده به صورت جداگانه خواهیم پرداخت. در این بخش فرض می‌گردد که ضرایب بهینه سازی مرتبه دوم به ترتیب $0/85$ ، $0/006$ ، $5/2$ برای λ_u ، λ_T و λ_b و سرعت ربات $0/8$ متر بر ثانیه می‌باشد. بدین صورت براساس سناریو طراحی مسیر و اغتشاش مطرح شده مسیر مرکز جرم و مؤلفه واگرای حرکت طراحی شده و حقیقی به صورت شکل (۱۲) در راستای طولی و به صورت شکل (۱۳) برای راستای عرضی در خواهد آمد.



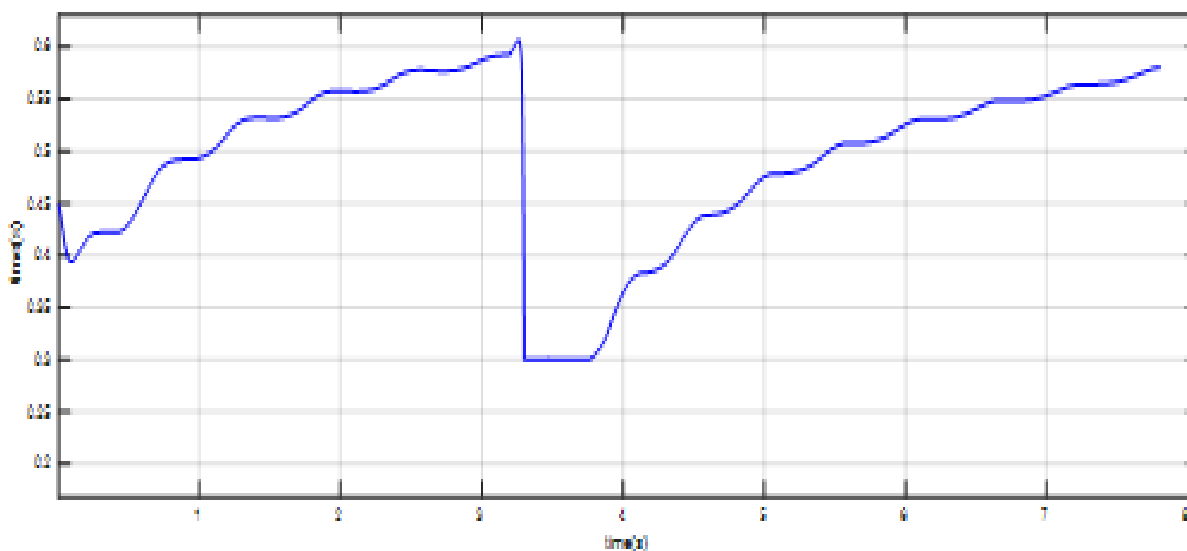
شکل ۱۲- مسیر مرکز جرم و مؤلفه واگرای حرکت طولی برای ۱۴ قدم در حضور اغتشاش 345 نیوتنی عرضی



شکل ۱۳- مسیر مرکز جرم و مؤلفه واگرای حرکت عرضی برای ۱۴ قدم در حضور اغتشاش 345 نیوتنی عرضی

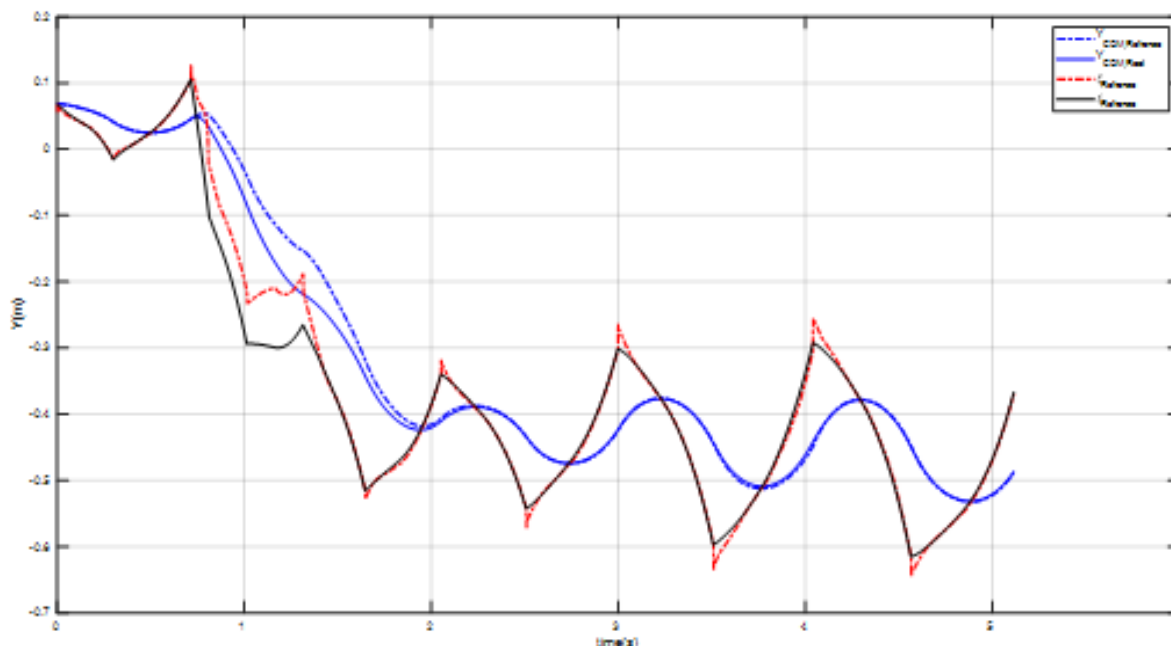


شکل ۱۴- خطای متغیرهای عرضی بازیابی تعادل برای ۱۴ قدم در حضور اغتشاش ۳۴۵ نیوتنی عرضی



شکل ۱۵- زمان گام ها در هر لحظه

همانگونه که در شکل (۱۲) مشاهده می گردد، در اثر ضربه بسیار بزرگ عرضی ربات در راستای طولی دنباله روی کاملی نسبت به مسیر مرجع خواهد داشت. اما براساس شکل (۱۳) در لحظه ۳ ثانیه که نیروی ۳۴۵ نیوتنی به ربات وارد می شود، ربات با قدم برداشتن ۲۲ سانتی متری به سمت راست سعی در بازیابی تعادل خود دارد و در نهایت پس از ثانیه ۴ به بعد مسیر مرجع و حقیقی و مرجع بر روی هم می افتند که نشان از عملکرد موفق کنترلر بازیابی تعادل دارد. اگرچه در این بخش تمرکز بیشتر کنترلر براساس ضرایب بهینه سازی مرتبه دوم بر روی تنظیم زمان گام بعدی و سرعت حرکت می باشد اما همچنان دیگر استراتژی ها با ضرایب کمتر در بازیابی تعادل به صورت شکل (۱۴) در راستای عرضی تاثیر گذار خواهند بود.



شکل ۱۶- مسیر مرکز جرم و مؤلفه واگرای حرکت عرضی برای ۱۰ قدم با سرعت ۱٫۶ متر بر ثانیه در حضور اغتشاش ۳۴۵ نیوتنی عرضی

در واقع این کنترلر طراحی شده به نحوی است که در زمان وارد شدن اغتشاش ربات با سرعت کمتری قدم‌های بعدی را برمیدارد تا به تعادل رسیده و میزان خطاها به میزان قابل توجهی کاهش یابد. بر این اساس برای درک بهتر این موضوع میزان تغییرات زمان هر گام در هر لحظه در شکل (۱۵) قابل مشاهده است. همانگونه که در شکل (۱۵) قابل مشاهده است زمان گام برداری ربات از لحظه سوم که اغتشاش وارد می‌شود کاهش می‌یابد.

۲-۷- بازیابی تعادل در حالت دویدن

در این بخش فرض می‌گردد که ربات سرعتی دو برابر قبل دارد ولی همچنان همان اغتشاش ۳۴۵ نیوتنی در راستای عرضی وارد می‌شود. در واقع در این سناریو فرض می‌کنیم که ربات ۱۰ گام پیاپی با سرعت ۱/۶ متر بر ثانیه را طی می‌کند و در گام سوم این اغتشاش و نیروی عرضی وارد می‌شود. همانطور که در شکل (۱۶) قابل مشاهده می‌باشد، ربات در اثر اغتشاش ۴۵ سانتی متر به سمت راست گام بر میدارد تا تعادل خود را با تغییر زمان گام برداری و جای گام‌ها به تعادل برسد.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش طراحی مسیر زمان حقیقی برای سرعت و طول گام‌های مختلف با بکارگیری مدل آونگ معکوس تک جرمه و سه جرمه با استفاده از مؤلفه واگرای حرکت انجام پذیرفت. همچنین بررسی گردید که ربات در حضور اغتشاشات شدید خارجی تا ۳۴۵ نیوتن و با سرعت ۱/۶ متر بر ثانیه قابلیت بازیابی تعادل با بکارگیری استراتژی مچ، تنظیم زمان و گام‌های حرکت بعدی دارا می‌باشد. همچنین به منظور صحت

سنجی مسیرهای طراحی شده از اعمال پارامترهای فیزیکی محیط واقعی در محیط شبیه ساز استفاده گردید.

در نهایت مشاهده شد که الگوریتم معرفی شده قابلیت طراحی مسیر زمان حقیقی و بازیابی تعادل را به صورت زمان حقیقی با بکارگیری استراتژی های تعادل و بهینه سازی مرتبه دوم برای به حداقل رساندن خطاها دار می‌باشد.

مراجع

- [1] M. Sadedel, A. Yousefi Koma, and F. Iranmanesh, "Heel-off and Toe-off Motions Optimization for a 2D Humanoid Robot Equipped with ActiveToe Joints (2)," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 87-97, 2016, <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1395.16.3.33.0>.
- [2] M. Sadedel, A. Yousefi-Koma, M. Khadiv, and F. Iranmanesh, "Heel-strike and Toe-off Motions Optimization for Humanoid Robots Equipped with Active Toe Joints," *Robotica*, Vol. 36, No. 6, pp. 925-944, 2018, doi:10.1017/S0263574718000140.
- [3] R. C. Luo and C. C. Chen, "Quasi-natural Humanoid Robot Walking Trajectory Generator Based on Five-mass with Angular Momentum Model," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 4, pp. 3355-3364, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2750628.
- [4] Y.-F. Ho, T.-H. S. Li, P.-H. Kuo, and Y.-T. Ye, "Parameterized Gait Pattern Generator Based on Linear Inverted Pendulum Model with Natural ZMP References," *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 32, 2017, doi:10.1017/S0269888916000138.
- [5] C.-C. Wong, S.-R. Xiao, and H. Aoyama, "Natural Walking Trajectory Generator for Humanoid Robot Based on Three-mass LIPFM," *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 228151-228162, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3046106.
- [6] M. Vukobratović and B. Borovac, "Zero-moment Point—Thirty Five Years of Its Life," *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 1, No. 01, pp. 157-173, 2004, <https://doi.org/10.1142/S0219843604000083>.
- [7] A. Goswami, "Foot Rotation Indicator (FRI) Point: A New Gait Planning Tool to Evaluate Postural Stability of Biped Robots," in *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C)*, 1999, Vol. 1, pp. 47-52: IEEE, doi: 10.1109/ROBOT.1999.769929.
- [8] Z. Zhang, L. Wang, J. Liao, J. Zhao, Z. Zhou, and X. Liu, "Dynamic Stability of Bio-inspired Biped Robots for Lateral Jumping in Rugged Terrain," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 97, pp. 113-137, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.03.050>.
- [9] A. Takhmar, M. Alghooneh, K. Alipour, S. Ali, and A. Moosavian, "MHS Measure for Postural Stability Monitoring and Control of Biped Robots," in *2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2008, pp. 400-405: IEEE, doi: 10.1109/AIM.2008.4601694.

- [10] H. Hirukawa *et al.*, "A Universal Stability Criterion of the Foot contact of Legged Robots-adios Zmp," In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, 2006, pp. 1976-1983: IEEE, doi: 10.1109/ROBOT.2006.1641995 .
- [11] W. Z. Peng, C. Mummolo, and J. H. Kim, "Stability Criteria of Balanced and Steppable Unbalanced States for Full-body Systems with Implications in Robotic and Human Gait," in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020, pp. 9789-9795: IEEE, doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196820.
- [12] A. Goswami and P. Vadakkepat, *Humanoid Robotics: A reference*. Springer, 2019.
- [13] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A Simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation," In *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180)*, 2001, Vol. 1, pp. 239-246: IEEE, doi: 10.1109/IROS.2001.973365.
- [14] S. Kajita *et al.*, "Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-moment Point," in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422)*, 2003, Vol. 2, pp. 1620-1626: IEEE, doi: 10.1109/ROBOT.2003.1241826.
- [15] A. Herdt, N. Perrin, and P.-B. Wieber, "Walking without Thinking About It," In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 190-195: IEEE, doi: 10.1109/IROS.2010.5654429.
- [16] M. S. Khan and R. K. Mandava, "A Review on Gait Generation of the Biped Robot on Various Terrains," *Robotica*, pp. 1-43, 2023, doi:10.1017/S0263574723000097.
- [17] C. Hu, S. Xie, L. Gao, S. Lu, and J. Li, "An Overview on Bipedal Gait Control Methods," *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, Vol. 5, No. 3, p. e12080, 2023, <https://doi.org/10.1049/cim2.12080>.
- [18] N. Ratre, S. Panigrahi, and S. Dubey, "Offline Trajectory Generation for Bipedal Robot using Linear Inverted Pendulum Model," *Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research/ Volume*, Vol. 6, No. 02, 2023.
- [19] N. Scianca, D. De Simone, L. Lanari, and G. Oriolo, "MPC for Humanoid Gait Generation: Stability and Feasibility," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 36, No. 4, pp. 1171-1188, 2020, doi: 10.1109/TRO.2019.2958483.
- [20] G. Mesesan, J. Engelsberger, G. Garofalo, C. Ott, and A. Albu-Schäffer, "Dynamic Walking on Compliant and Uneven Terrain using DCM and Passivity-based Whole-body Control," in *2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2019, pp. 25-32: IEEE, doi: 10.1109/Humanoids43949.2019.9035053.
- [21] R. Schuller, G. Mesesan, J. Engelsberger, J. Lee, and C. Ott, "Online Learning of Centroidal Angular Momentum Towards Enhancing Dcm-based Locomotion," In *2022*

International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022, pp. 10442-10448: IEEE, doi: 10.1109/Humanoids43949.2019.9035053.

[22] M. Shafiee, G. Romualdi, S. Daffarra, F. J. A. Chavez, and D. Pucci, "Online Dcm Trajectory Generation for Push Recovery of Torque-controlled Humanoid Robots," In *2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2019, pp. 671-678: IEEE, doi: 10.1109/Humanoids43949.2019.9034996.

[23] N. Figueroa, J. Tafur and A. Kheddar, "Reinforcement Learning-based Parameter Optimization for Whole-body Admittance Control with IS-MPC," *2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Ha Long, Vietnam, 2024, pp. 1405-1410, doi: 10.1109/SII58957.2024.10417367.

[24] R. Mirjalili, A. Yousefi-Koma, F. A. Shirazi, and S. Mansouri, "Online Path Planning for SURENA III Humanoid Robot using Model Predictive Control Scheme," In *2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, 2016, pp. 416-421: IEEE, doi: 10.1109/ICRoM.2016.7886774.

[25] M. Sadedel, A. Yousefi-koma, and M. Khadiv, "Offline Path Planning, Dynamic Modeling and Gait Optimization of a 2D Humanoid Robot," In *2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, 2014, pp. 131-136: IEEE, doi: 10.1109/ICRoM.2014.6990889.

[26] M. Khadiv, S. A. A. Moosavian, A. Yousefi-Koma, H. Maleki, and M. Sadedel, "Online Adaptation for Humanoids Walking on Uncertain Surfaces," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 231, No. 4, pp. 245-258, 2017, <https://doi.org/10.1177/0959651817692484>.

[27] J. Pratt, J. Carff, S. Drakunov, and A. Goswami, "Capture Point: A Step Toward Humanoid Push Recovery," In *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2006, pp. 200-207: IEEE, doi: 10.1109/ICHR.2006.321385.

[28] T. Takenaka, T. Matsumoto, and T. Yoshiike, "Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot-1 st Report: Walking Gait Pattern Generation," in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 1084-1091: IEEE, doi: 10.1109/IROS.2009.5354662.

[29] J. Engelsberger, G. Mesesan, and C. Ott, "Smooth Trajectory Generation and Push-recovery Based on Divergent Component of Motion," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 4560-4567: IEEE, doi: 10.1109/IROS.2017.8206324.

[30] M. Khadiv, A. Herzog, S. A. A. Moosavian, and L. Righetti, "A Robust Walking Controller Based on Online Step Location and Duration Optimization for Bipedal Locomotion," *arXiv Preprint arXiv:1704.01271*, 2017, doi: 10.1109/TRO.2020.2982584.

[31] H. Jeong, I. Lee, O. Sim, K. Lee, and J.-H. Oh, "A Robust Walking Controller Optimizing Step Position and Step Time That Exploit Advantages of Footed Robot," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 113, pp. 10-22, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.12.003>.

- [32] H. Jeong, I. Lee, J. Oh, K. K. Lee, and J.-H. Oh, "A Robust Walking Controller Based on Online Optimization of Ankle, Hip, and Stepping Strategies," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 35, No. 6, pp. 1367-1386, 2019, doi: 10.1109/TRO.2019.2926487.
- [33] M. Sadedel, A. Yousefi-Koma, M. Khadiv, and M. Mahdavian, "Adding Low-cost Passive Toe Joints to the Feet Structure of SURENA III Humanoid Robot," *Robotica*, Vol. 35, No. 11, pp. 2099-2121, 2017, doi:10.1017/S026357471600059X.
- [34] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, and H. Hirukawa, "An Analytical Method for Real-time Gait Planning for Humanoid Robots," *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 3, No. 01, pp. 1-19, 2006, <https://doi.org/10.1142/S0219843606000643>.
- [35] S. Kajita, H. Hirukawa, K. Harada, and K. Yokoi, *Introduction to Humanoid Robotics*. Springer, 2014, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54536-8>.

Real-time DCM-based Agile Locomotion and Optimum Push Recovery of a 3D Humanoid Robot

Omid Koochakianfard

M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Koochakianfardomid@modares.ac.ir

*Corresponding author: **Majid Sadedel**

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

majid.sadedel@modares.ac.ir

Abstract

This paper aims to achieve real-time optimum push recovery and high-speed pattern generation for a 3D humanoid robot. For this purpose, a divergent component of motion (DCM) based locomotion is planned using a three-mass inverted pendulum model. To improve push recovery robustness in the presence of strong disturbances during walking, a quadratic optimization strategy algorithm is introduced, including weighted step time adaption, step position adjustment, and ankle strategy. The minimum error push recovery cost function is obtained through quadratic programming. To validate our proposed model different scenarios for real-time navigation of robot considering strong disturbances in various speeds of walking from 0/8 to 1/6 meters per second are analyzed. The verification methods indicate that the proposed method recovered from 34.5 N.s disturbances at 1/6 meters per second speed, while conventional push recovery methods guaranteed lower speeds robust stable locomotion in the same disturbances. In this paper, a real humanoid robot and actual physical conditions were considered for validation of navigation and robust optimum push recovery.

Keywords: Humanoid robots, Three mass inverted pendulum model, Real-time path- planning, Push recovery, Legged robots