بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک

تاثیر مفصل پنجه در کیفیت راه رفتن و پایداری ایستادن

رساله‌ی دکتری مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

احسان کوچکی ورنوسفادرانی

استاد راهنما

دکتر محمد جعفر صدیق

۱۳۹۱

سپاس و قدردانی

اکنون که به یاری بزرگ آفریننده‌ی جهان در انجام این رساله فیروزی یافتم، بر خود بایا می‌دانم از همه‌ی بزرگوارانی که مرا در این کار یاری رساندند سپاس‌گذاری کنم.

از استاد راهنمای خود آقای دکتر محمدجعفر صدیق که همواره وقت خود را در اختیار من قرار دادند و از دانش ایشان فراوان بهره برده‌ام. بدون راهنمایی‌های ایشان انجام این رساله ممکن نبود. سپاس بی پایان از ایشان.

از آقای دکتر مهدی کشمیری استاد مشاور رساله که از نظرات سازنده ایشان در مقاطع مختلف استفاده کرده‌ام.

از خانم دکتر کریستین وو از دانشگاه منیتوبا کانادا که بخشی از این پژوهش را در دوره فرصت مطالعاتی تحت راهنمایی ایشان انجام دادم. فصل چهارم این رساله حاصل همکاری با ایشان است.

از آقای دکتر محمدتقی کریمی از دانشکده‌ی علوم توانبخشی دانشگاه علوم پزشکی اصفهان که با مشاوره‌های ارزشمند و در اختیار قرار دادن آزمایشگاه آنالیز حرکت انسان در انجام فصل دوم رساله به من یاری رساندند.

و در پایان از خانواده خودم، پدر و مادر فداکار و همسر مهربانم که با فراهم کردن شرایط مناسب و حمایت‌های بی پایان، انجام این رساله را برای من ممکن کردند.

همه‌ی حقوق مادی مترتب بر.نتایج مطالعه‌ها، ابتکارها و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

این رساله را ارمغان می‌کنم به:

پدر و مادر و همسر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان ..... **صفحه**

چکیده ۱

فصل یکم: مقدمه

۱-۱ انگیزه‌ی طرح موضوع ۲

۱-۲ راه رفتن ۴

۱-۳ پایداری ایستادن ۶

۱-۴ مرور پژوهش‌های انجام شده ۹

۱-۴-۱ نقش مفصل پنجه در راه رفتن با پید ۹

۱-۴-۲ کنترل تعادل ایستادن ۱۱

۱-۵ روش انجام تحقیق، هدف‌ها و ساختار رساله ۱۵

فصل دوم: پیش‌نیازهای نظری

۲-۱ مقدمه ۱۸

۲-۲ نماهای لیاپانف ۱۸

۲-۲-۱ مفهوم نماهای لیاپانف ۱۹

۲-۲-۲ محاسبه‌ی نماهای لیاپانف ۲۱

۲-۲-۳ مثال عددی ۲۳

۲-۳ کنترل پیش‌بین مدل ۲۹

۲-۳-۱ پیش‌بینی مدل ۲۹

۲-۳-۲ بهینه‌سازی ۳۰

۲-۳-۳ اعمال قیدها ۳۲

۲-۳-۴ مثال عددی ۳۳

فصل سوم: شاخص‌های سینماتیکی و دینامیکی راه رفتن و بررسی تاثیر مفصل پنجه

۳-۱ مقدمه ۳۷

۳-۲ تعیین شاخص سینماتیکی راه رفتن ۳۸

۳-۲-۱ سامانه‌ی آنالیز حرکت ۳۸

۳-۲-۲ جمع آوری داده‌ها ۴۰
۳-۲-۳ آنالیز داده‌ها ۴۱
۳-۲-۴ به دست آوردن شاخص سینماتیکی ۴۳
۳-۳ کارایی دینامیکی راه رفتن ۴۶
۳-۳-۱ معرفی مدل و استخراج معادله‌های حرکت ۴۶
۳-۳-۲ تولید مسیر ۴۹
۳-۳-۳ شاخص‌های دینامیکی مصرف انرژی و توان ۵۲
۳-۳-۴ نتایج عددی ۵۲
فصل چهارم: تعیین محدوده‌ی مجاز گشتاور مفصل‌ها برای حفظ تعادل ایستادن ربات دو پا
۴-۱ مقدمه ۶۱
۴-۲ معادله‌های دینامیکی مدل ربات دو پای ایستاده ۶۳
۴-۳ معادله‌های قیدها ۶۴
۴-۴ اثر جداگانه‌ی قیدها ۶۶
۴-۴-۱ اثر قید گرانش ۶۶
۴-۴-۲ اثر قید مرکز فشار ۶۹
۴-۴-۳ اثر قید اصطکاک ۷۰
۴-۴-۴ اثر همه‌ی قیدها ۷۲
۴-۵ نتایج عددی و بحث ۷۶
۴-۶ جمع بندی و خلاصه‌ی نتایج ۸۷
فصل پنجم: پایدارسازی ایستادن ربات دو پا با استفاده از راهبرد کنترل مفصل قوزک
۵-۱ مقدمه ۸۹
۵-۲ پایدارسازی ایستادن با استفاده از کنترل کننده‌ی تناسبی-مشتقی سوییچ شونده ۹۱
۵-۲-۱ آلگوریتم تعیین گشتاورها ۹۲
۵-۲-۲ نتایج شبیه‌سازی عددی ۹۵
۵-۳ پایدارسازی تعادل ایستادن با استفاده از کنترل پیش‌بین مدل ۱۰۱
۵-۴ خلاصه‌ی نتایج ۱۰۴

فصل ششم: پایدارسازی ایستادن ربات دو پا با استفاده از راهبرد کنترل قوزک- پنجه

۶-۱ مقدمه..... ۱۰۶

۶-۲ معرفی مدل و استخراج معادله‌های حرکت..... ۱۰۸

۶-۳ خطی سازی معادله‌های حرکت..... ۱۱۲

۶-۴ کنترل تعادل ایستادن با در نظر گرفتن قیدهای وضعیتی..... ۱۱۳

۶-۴-۱ معادله‌های قیدهای وضعیتی ۱۱۴

۶-۴-۲ کنترل پیش‌بین مدل ۱۱۴

۶-۵ پایدار سازی ربات بدون در نظر گرفتن قید..... ۱۱۸

۶-۵-۱ کنترل LQR..... ۱۱۸

۶-۵-۲ بررسی پایداری..... ۱۲۱

۶-۵-۳ تاثیر مفصل پنجه در پایداری ایستادن ربات با پاشنه‌ی بلند ۱۲۴

۶-۶ بحث و مقایسه‌ی نتایج..... ۱۲۶

فصل هفتم: نتیجه‌گیری

۷-۱ نوآوری‌های این رساله..... ۱۳۰

۷-۲ خلاصه‌ی نتایج..... ۱۳۱

۷-۲-۱ تاثیر مفصل پنجه در کیفیت و کارایی راه رفتن..... ۱۳۲

۷-۲-۲ کنترل تعادل ایستادن ربات دارای مفصل پنجه ۱۳۳

۷-۲ پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار..... ۱۳۵

پیوست الف: معادله‌های سینماتیک معکوس ربات دو پا..... ۱۳۷

پیوست ب: اثبات قضیه‌های مطرح شده در فصل چهارم..... ۱۳۹

مراجع..... ۱۴۱

چکیده

انتظار می‌رود ربات‌های راه رونده‌ی دو پا در آینده از نظر حرکتی به انسان‌ها شبیه‌تر شوند تا بهتر بتوانند با آن‌ها تعامل داشته باشند. در این میان به نظر می‌رسد مفصل پنجه‌ی پا نقش تعیین کننده‌ای در حرکت ربات‌های دو پا دارد. با این حال تاکنون در بیشتر پژوهش‌های حوزه‌ی ربات‌های انسان‌نما مغفول مانده است. هدف این رساله بررسی نقش مفصل پنجه در کیفیت راه رفتن و پایداری ایستادن است. در بخش راه رفتن یک مطالعه‌ی سینماتیکی و یک مطالعه‌ی دینامیکی انجام شده است. در مطالعه‌ی سینماتیکی هدف، معرفی یک شاخص سینماتیکی برای سنجش راه رفتن انسان یا ربات از نظر میزان طبیعی بودن است. به این منظور داده‌های آزمایشگاهی مربوط به راه رفتن انسان‌های سالم جهت محاسبه‌ی یک شاخص سینماتیکی جمع آوری شده است. با استفاده از این شاخص چند نمونه راه رفتن شامل راه رفتن بدون استفاده از مفصل پنجه مورد ارزیابی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده است. در مطالعه‌ی دینامیکی با تهیه‌ی یک مدل نه-میله‌ای شامل مفصل پنجه و طراحی یک مسیر پایدار برای یک گام راه رفتن روی سطح افقی و سطح شیبدار، گشتاورها و شاخص‌های مصرف انرژی و توان برای دو حالت حرکت با استفاده از حرکت پنجه و حرکت با مفصل پنجه‌ی قفل شده محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان داد استفاده از مفصل پنجه باعث کاهش حداکثر مقدار گشتاور و همچنین مصرف انرژی در ربات می‌شود.

ایستادن پایدار و توانایی حفظ تعادل در برابر ضربه‌های وارد شونده یکی از توانایی‌های مهم مورد انتظار از ربات‌های دو پا می‌باشد. در این پژوهش برای مدل کردن ایستادن ربات با فرض وجود اغتشاش‌های کوچک از راهبرد قوزک استفاده شده است. به این منظور تنه با یک پاندول وارون و کف پا با دو عضو صلب به عنوان عضوهای پاشنه و پنجه مدل شده است. بین کف پا و زمین دو نوع قید نیرویی و قید وضعیتی در نظر گرفته شده است. قیدهای نیرویی بر اساس نیروهای واکنش زمین و موقعیت نقطه اثر آن‌ها و قیدهای وضعیتی بر اساس موقعیت عمودی کف پا از روی سطح زمین تعریف شده‌اند. در مرحله‌ی نخست با تعریف سه قید نیرویی، محدوده‌های مجاز گشتاور مفصل‌های قوزک و پنجه برای برآورده شدن قیدها به دست آمده است. کنترل تعادل ایستادن ربات سپس با استفاده از دو راهبرد انجام شده است: راهبرد قوزک و راهبرد قوزک- پنجه. در راهبرد قوزک با شرط حفظ تماس کامل کف پا بر روی زمین، کنترل کننده گشتاور قوزک را برای پایدارسازی تعیین کرده و از گشتاور مفصل پنجه برای تامین حداکثر محدوده‌ی مجاز گشتاورها استفاده می‌کند. در این راهبرد با اعمال قیدهای نیرویی به مساله، پایدار سازی به دو روش کنترل تناسبی- مشتقی سوییچ شونده و کنترل پیش‌بین مدل انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان داد عملکرد کنترل تناسبی- مشتقی با نتایج پژوهش‌های انجام شده‌ی قبلی انطباق خوبی دارد و کنترل پیش‌بین مدل دارای عملکرد بهتر از نظر میزان گشتاور مفصل‌ها و تغییر زاویه‌ی تنه در طول پایدار سازی است.

در راهبرد قوزک- پنجه با فراهم شدن امکان حرکت مفصل پنجه در طول پایدار سازی، کنترل کننده‌ی طراحی شده گشتاور هر دو مفصل را محاسبه می‌کند. کنترل تعادل ایستادن با استفاده از این راهبرد در دو بخش یکی با اعمال قیدهای وضعیتی و دیگری بدون اعمال قید انجام شد. در بخش نخست از کنترل پیش‌بین مدل و در بخش دوم از کنترل بازخورد حالت بر اساس روش LQR استفاده شده است. نتایج نشان داد راهبرد قوزک- پنجه دارای عملکرد بهتری نسبت به راهبرد قوزک است. برای تحلیل پایداری سیستم کنترل در این راهبرد از مفهوم نماهای لیاپانف استفاده شده است. به این ترتیب ضمن بررسی پایداری، ناحیه‌های جذب نیز به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از مفصل پنجه باعث افزایش ناحیه‌ی جذب می‌شود. این تحلیل همچنین برای راه رفتن با کف پا با پاشنه‌ی بلند نیز انجام شده است. نتایج نشان دهنده‌ی افزایش تاثیر مثبت مفصل پنجه بر پایداری سیستم در این حالت است.

فصل یکم

مقدمه

۱-۱ انگیزه‌ی طرح موضوع

ربات‌های راه رونده‌ی دوپا[۱] از چند دهه‌ی گذشته به تدریج وارد حوزه‌های علمی، پژوهشی، صنعت و زندگی روزمره انسان‌ها شده‌اند. تنوع این ربات‌ها و قابلیت‌های آن مرتبا در حال افزایش است و از نظر کاربرد، به مرور گستره‌ی وسیعی از زندگی انسان امروز را در بر می‌گیرد. به همین دلیل در میان شاخه‌های علم رباتیک مبحث مربوط به ربات‌های دو پا دارای تازگی بوده و از نظر موضوع‌های مطرح شده پیوسته در حال رشد است.

انتظار می‌رود ربات‌های دو پا در آینده با حضور گسترده‌تر در زندگی روزمره از نظر حرکتی هر چه بیشتر به بشر شبیه شوند تا بتوانند در تعامل بهتر با انسان‌ها قرار گیرند. علاوه بر این، کسب توانایی انجام مانورهای حرکتی دیگر علاوه بر راه رفتن ساده نیز مورد انتظار می‌باشد. اگر چه به دست آوردن قابلیت‌های کامل حرکتی انسان توسط ربات به دلیل درجه‌های آزادی محدود آن امکان پذیر نیست، دست کم با اضافه کردن و فعال کردن مفصل‌های مهم می‌توان به این خواسته نزدیک شد. در این میان پنجه‌ی پا عضو مهم و تعیین کننده‌ای است که به طبیعی‌تر شدن حرکت‌ها و همچنین دادن قابلیت‌های دیگر به ربات‌های راه رونده تاثیر به سزایی دارد. بسیاری از این تاثیرها به صورت شهودی و با مطالعه‌ی آناتومی و راه رفتن انسان نیز قابل اثبات هستند. به عنوان مثال مقایسه‌ی راه رفتن با یک

---

۱. Bipeds

کفش صلب (مدلی از راه رفتن بدون دخالت پنجه‌ی پا) و راه رفتن با یک کفش نرم (مدلی از راه رفتن طبیعی انسان) نشان می‌دهد که بسیاری از حرکت‌ها مانند دویدن و یا بالا رفتن از یک سطح شیبدار در حالت اول (با کفش صلب) به آسانی میسر نیست. اما از برخی جنبه‌های دیگر مانند پایداری حرکت در راه رفتن و ایستادن و میزان مصرف انرژی نوع تاثیر مفصل پنجه و میزان آن به راحتی و به صورت شهودی قابل درک نمی‌باشد.

در ربات‌های راه رونده‌ی امروزی معمولا عضو پنجه‌ی پا وجود ندارد. دلیلی که می‌توان برای آن بیان کرد این است که مبحث ربات‌های راه رونده علمی نسبتا جدید است و با توجه به اهداف و افقی که برای دستاوردهای آینده‌ی آن پیش‌بینی می‌شود، هنوز در ابتدای راه خود قرار دارد. به این مفهوم که حرکت‌های پیچیده‌ای نظیر دویدن یا حرکت بر روی سطح شیبدار تاکنون کمتر از ربات‌های دو پا انتظار رفته و بیشتر پژوهش‌ها بر روی راه رفتن با حداقل قابلیت‌ها بر روی سطح افقی و نه لزوما شبیه به راه رفتن انسان (از نظر سینماتیکی و میزان پایداری) صورت گرفته است. به همین نسبت در پژوهش‌هایی که در زمینه‌ی ربات‌های راه رونده انجام شده است، کمتر از مدل‌های دارای مفصل پنجه استفاده شده و به بررسی نقش آن در حرکت ربات‌های دو پا کمتر پرداخته شده است. بر این اساس لزوم تعریف و انجام موضوع‌های تحقیق در این زمینه توجیه می‌شود.

موضوع‌های مطرح در انواع سیستم‌های رباتیک مسایلی همچون تحلیل‌های سینماتیکی و دینامیکی، طراحی مسیر، کنترل و تحلیل پایداری می‌باشند. در مورد ربات‌های دو پا نیز همین مسایل برای مانورهای مختلف حرکتی همچون راه رفتن روی سطح افقی، سطح شیبدار و پله، دویدن و ایستادن قابل طرح بوده و در تاریخچه‌ی علمی دستمایه‌ی پژوهش‌های زیادی قرار گرفته است. در این میان تاثیر مفصل پنجه بر روی حرکت ربات‌های دو پا از چند جنبه و برای مانورهای مختلف قابل بررسی است. با مطالعه‌ی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، بررسی تاثیر مفصل پنجه در کارایی دینامیکی و سینماتیکی راه رفتن به عنوان یک موضوع قابل طرح در این تحقیق برگزیده شد. همچنین مشخص شد در تاریخچه‌ی علمی تلاشی برای کنترل و تحلیل پایداری ایستادن ربات‌های دارای مفصل پنجه صورت نگرفته است. بر این اساس بررسی نقش پنجه در پایداری ایستادن به عنوان موضوعی دیگر در عنوان این رساله گنجانده شد.

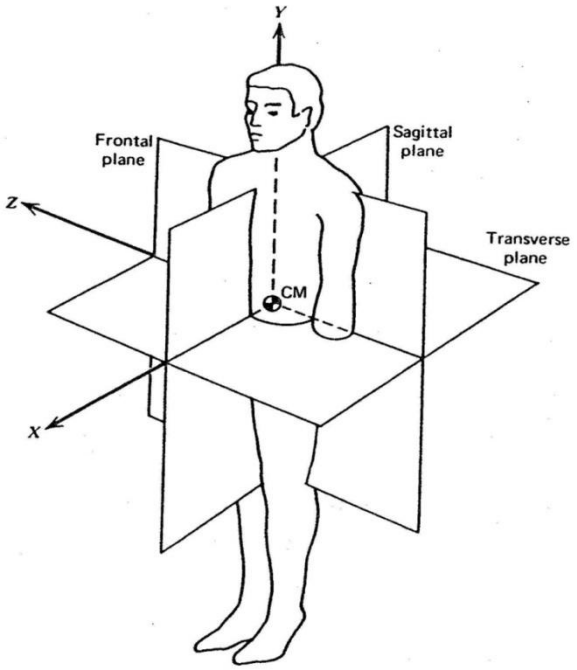
با انتخاب موضوع، در انجام تحقیق این دیدگاه در نظر گرفته شد که با توجه به موارد بیان شده در ابتدای این فصل، روی آوردن به استفاده از پنجه در ربات‌های راه رونده ممکن و بلکه دوری ناپذیر است. بنابراین انجام پژوهش‌هایی در زمینه‌ی اهمیت مفصل پنجه ضروری است و هدف اصلی انجام این تحقیق پرداختن به این مهم است. به این ترتیب که مدل‌سازی و مطالعه‌ی کارایی دینامیکی و سینماتیکی راه رفتن و همچنین پایداری ایستادن یک ربات دوپا دارای مفصل پنجه به عنوان موضوع اصلی مورد پیگیری در این پژوهش در نظر گرفته شد. در اولویت بعدی نتایج احتمالی به دست آمده در زمینه‌ی نقش مثبت مفصل پنجه در حرکت ربات دوپا می‌تواند به عنوان

دستاوردهای دیگر این رساله تلقی شود.

در ادامه‌ی این فصل نخست برای روشن شدن تعریف‌های مورد استفاده در متن رساله به بیان مفهوم‌های مهم راه رفتن و تعادل ایستادن پرداخته شده و سپس تاریخچه‌ای از مهم‌ترین پژوهش‌های مرتبط با موضوع ارایه شده است. در پایان، روش انجام تحقیق و ساختار این رساله تشریح شده است.

۱-۲ راه رفتن

حرکت‌های انسان در سه بعد را می‌توان از سه نما مطالعه کرد. این سه نما صفحه‌های حرکتی انسان هستند که صفحه‌ی طولی[۱]، صفحه‌ی عرضی[۲] و صفحه‌ی پیشانی[۳] نامیده می‌شوند. در شکل ۱-۱ این سه صفحه نشان داده شده است. صفحه‌ی طولی، بدن را به دو بخش راست و چپ تقسیم می‌کند، صفحه‌ی عرضی، بدن را به دو بخش بالایی و پایینی تقسیم می‌کند و صفحه‌ی پیشانی، بدن را به دو بخش جلویی و پشتی تقسیم می‌کند. بر اساس تعریف راه رفتن فرایندی است که هدف آن انتقال ایمن بالاتنه‌ی بدن از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر در فضاست [۱]. پیشروی انسان در راه رفتن در راستای صفحه‌ی پیشانی است. معمولا مطالعه‌ی راه رفتن در صفحه‌ی طولی انجام می‌شود و حرکت‌های جانبی در دیگر صفحه‌ها قابل مشاهده و بررسی می‌باشد.



شکل ۱-۱- صفحه‌های حرکتی راه رفتن انسان، ماخذ: [۱]

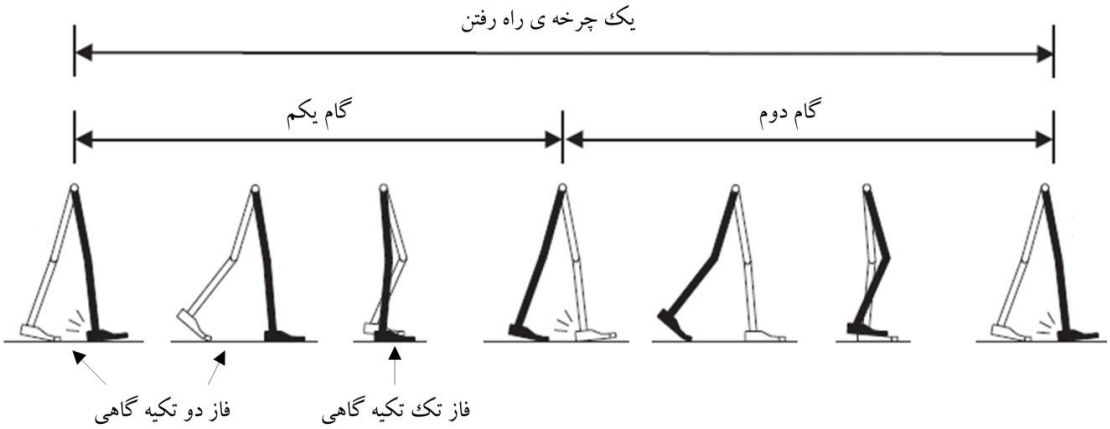
---

۱. Sagittal plane

۲. Transverse plane

۳. Frontal plane

راه رفتن یک حرکت متناوب است. یک چرخه‌ی راه رفتن را می‌توان از لحظه‌ی برخورد پاشنه‌ی یک پا با زمین تا لحظه‌ی برخورد دوباره‌ی همان پا با زمین در نظر گرفت. یک چرخه‌ی راه رفتن شامل دو گام شبیه به هم و متقارن می‌باشد که تفاوت این دو گام با یکدیگر عوض شدن نقش دو پا با هم در آن‌ها است. در شکل ۱-۲ یک چرخه‌ی کامل راه رفتن نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- مرحله‌های مختلف یک چرخه‌ی راه رفتن

یک گام از لحظه‌ی تماس پاشنه‌ی یک پا با زمین آغاز می‌شود و با تماس پاشنه‌ی پای مخالف با زمین پایان می‌یابد. در مطالعه‌ی یک گام، پایی که همواره با زمین در تماس است پای تکیه‌گاه و پای دیگر پای آویزان نامیده می‌شود. به همین دلیل از دیدگاهی دیگر و با مشاهده‌ی یکی از پاها می‌توان یک چرخه‌ی راه رفتن را به دو فاز اصلی تقسیم کرد: فاز تکیه‌گاه[۱] که در آن پای مزبور با زمین در تماس است و فاز آویزان[۲] که در آن همان پا بدون این‌که با سطح زمین در تماس باشد از لگن آویزان است.

یک گام به نوبه‌ی خود از دو مرحله‌ی اصلی تشکیل می‌شود: مرحله‌ی دو تکیه‌گاهی[۳] که در آن هر دو پا با زمین در تماس بوده و مرحله‌ی تک تکیه‌گاهی[۴] که در آن تنها پای تکیه‌گاه بر روی زمین قرار دارد. در مرحله‌ی دو تکیه‌گاهی، پای جلویی پای تکیه‌گاه نامیده می‌شود و فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی تماس پا بسته به این که کدام پا جلوتر قرار داشته باشد، طول گام راست یا طول گام چپ خوانده می‌شود. مرحله‌ی تک تکیه‌گاهی که در راه رفتن عادی حدود ۸۵ درصد از زمان یک گام را به خود اختصاص می‌دهد، از لحظه‌ی جدا شدن شست پای آویزان از زمین تا تماس پاشنه‌ی همان پا با زمین ادامه دارد.

---

۱. Stance phase
۲. Swing phase
۳. Double support phase (DSP)
۴. Single support phase (SSP)

بر اساس تعریفی که ساندرز[۱] ارایه کرد، وظیفه‌ی راه رفتن انتقال مرکز جرم بدن از نقطه‌ای در فضا به نقطه‌ای دیگر بر روی مسیری است که در آن کمترین میزان انرژی مصرف شود [۲]. به این ترتیب که در طول راه رفتن سیستم اعصاب بدن انسان همواره تولید نیرو در ماهیچه‌ها (که منبع نیروی محرکه در مفصل‌ها هستند) را طوری کنترل می‌کند که مقدار مصرف کلی انرژی کمینه شود. از این تعریف دو مشخصه از راه رفتن برداشت می‌شود: نخست این‌که خروجی عمل راه رفتن، جابه‌جایی بالاتنه‌ی بدن است. یعنی با مطالعه‌ی منحنی مسیر حرکت بالاتنه می‌توان درباره‌ی نوع راه رفتن قضاوت کرد و ملاکی از کیفیت سینماتیکی آن به دست آورد. نکته‌ی دیگر این است که میزان مصرف انرژی باید به عنوان یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی کیفیت راه رفتن تلقی شود. هر یک از این دو مشخصه را می‌توان با شاخص‌هایی ارزیابی کرد که ما آن‌ها را به ترتیب شاخص‌های سینماتیکی و شاخص‌های دینامیکی می‌نامیم.

شاخص‌های دینامیکی یا نیرویی توابعی از جنس نیرو، گشتاور، انرژی و توان مصرفی در راه رفتن یک انسان یا ربات راه رونده هستند. بیشتر این شاخص‌ها نشان دهنده‌ی میزان مصرف انرژی در مدل یا میزان اعمال گشتاور به مفصل‌ها در راه رفتن می‌باشند. اهمیت این شاخص‌ها در مرجع‌های مختلف و در تعریف‌هایی که از راه رفتن انسان شده، مورد توجه قرار گرفته و از آن برای ارزیابی مدل‌های راه رونده استفاده شده است [۳]- [۷]. شاخص‌های سینماتیکی از طرف دیگر تابعی از حرکت عضوها و مفصل‌های مدل راه رونده بوده و نشان دهنده‌ی نوع راه رفتن از نظر ظاهری و میزان نزدیک بودن آن به راه رفتن طبیعی انسان است. معرفی شاخص‌های سینماتیکی و ارزیابی راه رفتن بر اساس آن، در تاریخچه‌ی علمی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

۱-۳ پایداری ایستادن

ایستادن نخستین مرحله از حرکت است. انسان یا ربات دو پا برای داشتن قابلیت راه رفتن و سایر مانورهای حرکتی، نخست باید بتواند روی پاهای خود بایستد. ربات‌های دو پا برای کار در محیط انسانی ساخته شده‌اند و انتظار می‌رود در آینده با انسان‌ها تعامل بیشتری داشته باشند. به همین دلیل برخورد با مانع‌ها و وارد شدن ضربه‌های مختلف به آن دوری ناپذیر است. بنابراین مطالعه‌ی پایداری تعادل ایستادن آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

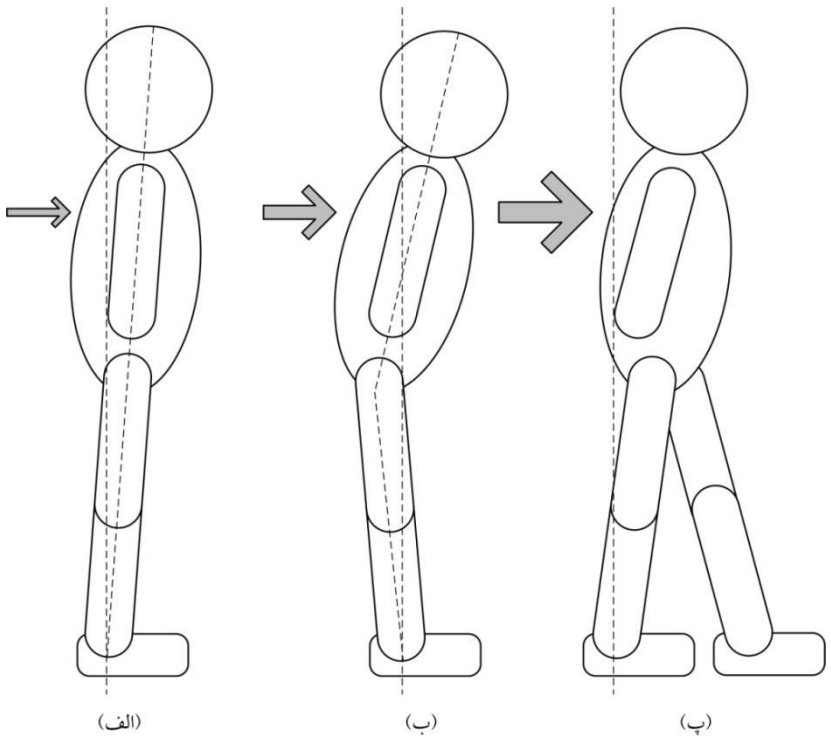
ایستادن پایدار را باید حول یک وضعیت تعادل تعریف کرد. این وضعیت همان نقطه‌ی تعادل مدل انسان یا ربات دوپا به مثابه یک سیستم دینامیکی است. نقطه‌ی تعادل تعیین کننده‌ی راستای بالاتنه و همچنین وضعیت قرارگیری کف پا بر روی زمین است. برای یک مدل ایستاده نقطه‌های تعادل بیشماری بسته به مقدار گشتاور

---

۱. Saunders

استاتیکی مفصل‌ها قابل تعریف است که هر کدام یک پیکربندی خاص را به مدل تحمیل می‌کند. در میان نقطه‌های تعادل مختلف می‌توان یکی از آن‌ها را با توجه به خواسته‌ی مساله به عنوان وضعیت تعادل اصلی در نظر گرفت و پایداری مدل را حول آن بررسی کرد. در این میان برای مدل انسان نمی‌توان یک نقطه‌ی تعادل ثابت در نظر گرفت زیرا انسان در حال ایستادن به صورت نیمه ارادی مرتبا با تغییر گشتاور مفصل‌ها وضعیت خود را تغییر می‌دهد [۸]. اما در مورد ربات دوپا هر یک از نقاط تعادل را که در آن بالاتنه در نزدیک‌ترین حالت به راستای قائم قرار گیرد می‌توان به عنوان نقطه‌ی تعادل اصلی در نظر گرفت.

مساله‌ی پایدارسازی ایستادن در تاریخچه‌ی علمی با نام "کنترل تعادل ایستادن"[۱] شناخته شده است. پژوهش‌گران با مطالعه‌ی رفتار حرکتی انسان راهبردهای مختلفی برای حفظ توازن ایستادن در برابر نیروها و ضربه‌های وارد شده به بالاتنه شناسایی کرده‌اند که به طور کلی می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: راهبرد قوزک[۲]، راهبرد کمر[۳] و راهبرد گام برداشتن[۴] [۹]. در شکل ۱-۳ این سه راهبرد و نحوه‌ی حرکت بدن در هر حالت نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ راهبردهای حفظ تعادل ایستادن؛ (الف): راهبرد قوزک، (ب): راهبرد کمر و (پ): راهبرد گام برداشتن

---

۱. Standing balance control
۲. Ankle strategy
۳. Hip strategy
۴. Stepping strategy

از راهبرد قوزک به هنگام وارد آمدن ضربه های کوچک استفاده می‌شود. در این راهبرد انسان با دوران خود حول مفصل قوزک و قفل کردن دیگر مفصل‌ها یک جابه‌جایی کوچک در مرکز جرم کل ایجاد کرده باعث پایداری ایستادن می‌شود. از راهبرد کمر هنگامی استفاده می‌شود که اغتشاش ایجاد شده در بدن در اثر ضربه‌های وارد شده بزرگتر از حدی باشد که بتوان تنها با حرکت مفصل قوزک با آن مقابله کرد. در این راهبرد استفاده از حرکت مفصل لگن علاوه بر حرکت مفصل قوزک جابه‌جایی های بزرگ‌تر و سریع‌تر در موقعیت مرکز جرم بدن ایجاد کرده باعث به دست آمدن پایداری می‌شود. در صورتی که اغتشاش‌ها باز از حدی بزرگ‌تر شود پایداری ایستادن ناگزیر با برداشتن یک گام اضافه به دست خواهد آمد.

در مورد راهبرد گام برداشتن پژوهش‌گران در یک تحقیق با معرفی نقطه‌ی تصرف[۱] شرایط و معیاری را برای انتخاب این راهبرد تعیین کرده‌اند [۱۰]. در مورد دیگر راهبردها معیار مشخصی برای این‌که ربات دوپا یا انسان در شرایط مختلف از چه راهبردی استفاده می‌کند معرفی نشده است. اگرچه موقعیت و راستای بدن در لحظه وارد شدن ضربه در انتخاب یک راهبرد توسط انسان یک عامل تعیین کننده به شمار می‌آید، عموما استفاده از این راهبردهای سه‌گانه به شدت ضربه‌های وارد شده بستگی دارد.

یکی از مسایل موجود در مطالعه‌ی تعادل ایستادن ربات‌های دو پا، وجود قیدهای بین کف پا و تکیه‌گاه (زمین) است. بر خلاف مدل‌های دینامیکی دیگر مانند پاندول وارون یا بازوهای مکانیکی، پایه‌ی ربات دوپا که کف پای آن است در هنگام ایستادن به زمین متصل نیست بلکه قیدهایی در این میان وجود دارند که برقراری یا عدم برقراری آن‌ها تعیین کننده‌ی پایداری ایستادن یا افتادن ربات می‌باشد. همین مساله باعث پیچیدگی معادله‌های حرکت ربات‌های دو پا و حل مسایل مربوط به کنترل آن‌ها شده است. دو گونه قید بین کف پا و زمین می‌توان تعریف کرد که ما آن‌ها را قیدهای نیرویی و قیدهای وضعیتی نامیده‌ایم. قیدهای نیرویی بر اساس مقدار نیروهای واکنش زمین و موقعیت نقطه اثر آن‌ها شرایطی را برای برقراری تماس پا با زمین تعیین می‌کنند. قیدهای وضعیتی از طرف دیگر مستقیما بر اساس موقعیت نقاط کف پا از زمین تعریف می‌شوند و در صورتی قابل اعمال به مساله هستند که امکان حرکت کف پا در معادله‌های دینامیکی ربات در نظر گرفته شوند.

قیدها از نظر شدت می‌توانند به گونه‌هایی متفاوت تعریف شوند. بسته به این‌که قیدها چگونه به مساله اعمال شوند، میزان محدودیت حرکت کف پا در حین تلاش برای پایدار سازی ایستادن تعیین می‌شود. به عنوان نمونه در بسیاری از موارد قیدها طوری تعریف می‌شوند که کف پا را ملزم به حفظ تماس کامل با زمین و عدم جدا شدن هیچ نقطه‌ای از آن حتا برای زمانی کوتاه در کل زمان پایدارسازی می‌کند [۱۱] و [۱۲]. از طرف دیگر با توجه به این‌که

---

۱. Capture point

دوران کف پا از روی زمین به معنای ناپایداری قطعی نیست و امکان دارد با قطع تماس کف پا با زمین برای لحظه‌ای کوتاه، ربات پایداری خود را دوباره به دست بیاورد [۱۳] و [۱۴]، می‌توان قیدها را طوری به مساله اعمال کرد که اجازه‌ی برخاستن موقتی کف پا از زمین را به ربات بدهد.

۱-۴ مرور پژوهش‌های انجام شده

همان‌گونه که در بخش نخست اشاره شد ربات‌های دو پای ساخته شده‌ی امروزی معمولا دارای مفصل پنجه نیستند و در کارهای علمی انجام شده کمتر به مدل‌های دارای مفصل پنجه پرداخته شده است [۱۵]. در این بخش با توجه به عنوان رساله مرور پژوهش‌های موجود در تاریخچه‌ی علمی در دو زیربخش ارایه شده است. نخست مدل‌های راه رونده‌ی دارای عضو پنجه و بررسی اثر مفصل پنجه در ویژگی‌های سینماتیکی و دینامیکی، کنترل و پایداری راه رفتن مرور شده است. در زیربخش بعدی به مدل‌های ایستاده اشاره شده و راهبردهای گوناگونی که پژوهش‌گران از آن برای کنترل تعادل ایستادن ربات استفاده کرده‌اند مرور شده است.

۱-۴-۱ نقش مفصل پنجه در راه رفتن ربات‌های دو پا

از نخستین پژوهش‌هایی که در زمینه‌ی مفصل پنجه انجام شده است می‌توان به کار زافستاس[۱] و همکاران اشاره کرد [۱۶] و [۱۷]. ایشان یک مدل ربات نه- میله‌ای شامل مفصل پنجه تهیه کردند و به کنترل راه رفتن آن با استفاده از کنترل مود لغزشی پرداختند. نویسندگان در این پژوهش از کار همامی الهام گرفتند که در آن از یک قوزک دو عضوی استفاده شد و در نتایج پایانی استفاده از یک عضو پنجه در کف پا برای ادامه‌ی کار پیشنهاد شده بود [۱۸]. از آن پس تعدادی از پژوهش‌گران در تحقیق‌های خود به مدل‌سازی مفصل پنجه و بررسی تاثیر آن در راه رفتن ربات از دیدگاه سینماتیکی، دینامیکی، پایداری و کنترل پرداختند. در ادامه خلاصه‌ای از بارزترین کارهای انجام شده در این زمینه ارایه شده است.

آن[۲] و همکاران با داشتن یک ربات راه رونده‌ی آزمایشگاهی، یک مدل ریاضی سه بعدی از آن تهیه کردند [۱۹]. سپس برای مطالعه‌ی اهمیت مفصل پنجه، یک عضو پنجه به مدل ریاضی ربات اضافه کردند و آن را با مدل بدون پنجه مقایسه کردند. هدف آن‌ها انجام یک تحلیل سینماتیکی و دینامیکی برای بررسی اثر پنجه بر الگوی راه رفتن و همچنین پایداری آن بود. در تحلیل سینماتیکی به مقایسه‌ی مسیر حرکت بالاتنه و مفصل قوزک در مسیر حرکت تولید شده توسط مدل بدون پنجه و مدل دارای پنجه پرداختند و برای بررسی پایداری از منحنی نقطه‌ی

---

۱. Tzafestas

۲. Ahn

گشتاور صفر[۱] (ZMP) و حاشیه‌ی پایداری استفاده کردند. نتایج شبیه سازی‌های آن‌ها نشان داد که الگوی راه رفتن مدل دارای عضو پنجه طبیعی‌تر بوده و به راه رفتن انسان نزدیک‌تر است. در مورد پایداری، استفاده از عضو پنجه باعث افزایش مدت زمان فاز دو تکیه‌گاهی و در نتیجه بهبود منحنی نقطه‌ی گشتاور صفر و پایداری بیشتر راه رفتن ربات شد. همچنین سرعت زاویه‌ای بیشینه‌ی عضوهای پایین تنه در مدل دارای پنجه مقدار زیادی کاهش پیدا کرد که این مساله موجب کاهش بار وارد بر محرک‌ها شد.

نیشیواکی[۲] و همکاران در یک مطالعه‌ی سینماتیکی با اضافه کردن یک عضو پنجه به کف پای یک ربات موجود به بررسی قابلیت‌های حرکتی به دست آمده پرداختند [۲۰]. نویسندگان با مقایسه‌ی سینماتیک مدل‌های دارای پنجه و بدون پنجه با یکدیگر نشان دادند که با اضافه شدن عضو پنجه به مدل تولید مسیر بهبود می‌یابد و سرعت راه رفتن افزایش پیدا می‌کند. همچنین در مطالعه‌ی بالا رفتن از پله، با اضافه شدن پنجه در مدل، ربات توانایی بالا رفتن از پله‌های با ارتفاع بیشتر را به دست آورد. قابلیت دیگری که نویسندگان توانستند به ربات بدهند، امکان نشستن دو زانو بر روی زمین بود.

سلائوتی[۳] و همکاران برای بررسی اثر مفصل پنجه بر الگوی راه رفتن از یک کف پا با یک عضو پنجه‌ی غیر فعال در ربات خود استفاده کردند [۲۱]. هدف آن‌ها مقایسه‌ی سینماتیکی مدل به دست آمده به مدلی مشابه با کف پای تخت بود. به این منظور نخست به طراحی مسیر برای هر دو مدل پرداختند و برای دو مدل از یک مولد الگوی حرکت که بر اساس موقعیت نقطه‌ی گشتاور صفر طراحی شده بود استفاده کردند. در مسیر حرکتی که برای مدل دارای پنجه‌ی پا طراحی شد، بخشی از فاز تک تکیه‌گاهی ربات به دلیل غیر فعال بودن مفصل پنجه کم عملگر شد. همین مساله باعث افزایش سرعت راه رفتن در این مدل شد. همچنین الگوی راه رفتن در مدل دارای مفصل پنجه هموارتر شد.

کومار[۴] و همکاران یک مدل ربات نه- میله‌ای شامل مفصل پنجه ارایه کردند [۲۲]. هدف آن‌ها مقایسه‌ی مفصل پنجه‌ی غیر فعال با مفصل پنجه‌ی ترکیبی (شامل فنر، دمپر و محرک) بود. برای این‌کار گشتاور مورد نیاز از طرف مفصل پنجه را برای حفظ نقطه‌ی گشتاور صفر در موقعیت دلخواه در راه رفتن ربات در مرحله‌ی تک تکیه‌گاهی و برای سرعت‌های مختلف راه رفتن مورد بررسی قرار دادند. پژوهش آن‌ها نشان داد که استفاده از مفصل پنجه‌ی ترکیبی برای همه‌ی سرعت‌های راه رفتن با هدف تنظیم موقعیت نقطه‌ی گشتاور صفر (به نحوی که به تدریج

---

۱. Zero moment point

۲. Nishivaki

۳. Sellaouti

۴. Kumar

به نقطه‌ی وسط عضو پنجه برسد) باعث کاهش گشتاور اعمالی از طرف مفصل پنجه و همچنین کاهش مصرف انرژی خواهد شد.

یاماموتو[۱] و همکاران یک مکانیزم چهار میله‌ای برای عضو پنجه‌ی پا طراحی کردند [۲۳]. آن‌ها در پژوهش خود به مطالعه‌ی نیروهای واکنش زمین و همچنین تغییر زاویه و سرعت زاویه‌ای مفصل‌ها در حین راه رفتن پرداختند. مکانیزم طراحی شده این امکان را فراهم می‌کرد که در راه رفتن ربات، تماس پنجه با زمین به جای یک تماس تخت در دو نقطه از مکانیزم انجام شود. این مزیت اولا باعث کاهش نیروهای قیدی شد و ثانیا در محل تماس سینه‌ی پنجه با زمین نیروی پیشرونده‌ی بزرگی برای کمک به حرکت ربات ایجاد کرد. شبیه سازی‌های آن‌ها نشان داد که با استفاده از این مکانیزم تغییرات زاویه‌ای و سرعت مفصل زانو هموارتر شد. نویسندگان همچنین مکانیزم پنجه‌ی طراحی شده را روی یک ربات مینیاتوری نیز پیاده‌سازی کردند و به بررسی حرکت آن پرداختند. مشاهده‌های آن‌ها بیان‌گر هموارتر شدن راه رفتن ربات بود.

وانگ[۲] و همکاران یک مدل ربات ۸ میله‌ای دارای مفصل پنجه در کف پا تهیه کردند و به مطالعه‌ی سینماتیکی و دینامیکی حرکت آن در فاز تک تکیه‌گاهی پرداختند [۲۴]. مدل آن‌ها شامل یک جرم متمرکز به عنوان تنه بود و عضوهای پایین تنه بدون جرم در نظر گرفته شدند. پژوهش آن‌ها شامل طراحی مسیر، مطالعه‌ی سینماتیکی و محاسبه‌ی انرژی مصرف شده در مفصل‌ها طی راه رفتن ربات و مقایسه برای دو حالت با حرکت مفصل پنجه و بدون در نظر گرفتن حرکت آن بود. با توجه به این‌که هدف آن‌ها بررسی حرکت ربات تنها در فاز تک‌تکیه‌گاهی بود، مسیر طراحی شده‌ی آن‌ها از دیدگاه معیار نقطه‌ی گشتاور صفر پایدار نبود. نتایج شبیه‌سازی‌های آن‌ها نشان داد که حرکت ربات با استفاده از مفصل پنجه موجب افزایش سرعت راه رفتن و طول گام می‌شود. همچنین منحنی‌های مصرف انرژی توسط محرک‌ها یکنواخت‌تر می‌شود.

۱-۴-۲ کنترل تعادل ایستادن

کنترل تعادل ایستادن یکی از مسایلی است که توجه پژوهشگران زیادی را در طول دو دهه‌ی گذشته به خود جلب کرده است. مدل‌های ربات دو پای استفاده شده در کنترل تعادل ایستادن همگی دارای کف پای تخت می‌باشد و نبود مفصل پنجه یکی از محدودیت‌های بزرگ این پژوهش‌ها است. در زمینه‌ی بررسی تاثیر مفصل پنجه پا در تعادل و یا تحلیل پایداری ایستادن ربات‌های دو پا شامل عضو پنجه کار قابل توجهی در تاریخچه‌ی علمی یافت نمی‌شود. تحقیق‌های انجام شده به شماری از مطالعه‌های کلینیکی محدود می‌شود که به بررسی نقش فعالیت رباط‌ها و

---

۱. Yamamoto

۲. Wang