بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مکانیک

طراحی گام پایدار و کنترل حرکت ربات دوپای فاقد مچ پا

رساله دکتری

رضا دهقانی

استاد راهنما

دکتر عباس فتاح

۱۳۸۹

سپاس بیکران پروردگار یکتا را که هستمی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمودمان کرد. اکنون که به لطف خداوند متعال توانسته‌ام این تحقیق را به انجام برسانم و قدمی هر چند کوچک در پیشبرد علم بردارم برخود لازم می‌دانم از کسانی که در انجام این رساله مرا یاری کردند تشکر نمایم. ابتدا از زحمات بی‌دریغ استاد ارجمندم جناب آقای دکتر فتاح که از راهنمایی‌های مفیدشان در انجام این رساله بهرمند شدم و به حق استادی دلسوز است کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از جناب آقای دکتر کشمیری که به عنوان استاد مشاور رساله بودند و در طول تحصیل افتخار شاگردی ایشان را داشتم صمیمانه تشکر می‌نمایم. از اساتید بزرگوار آقایان دکتر غیور، دکتر شیخ الاسلام و دکتر موسویان که زحمت داوری این رساله را پذیرفتند و با دقت نظر این رساله را مورد مطالعه قرار دادند قدردانی می‌کنم. از تمامی اساتید بزرگوارم که در دوران تحصیل افتخار شاگردیشان را داشتم کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از تمامی دوستانی که مرا در انجام این کار یاری کردند صمیمانه تشکر می‌کنم. در پایان از پدر و مادر مهربانم و همچنین همسر فداکارم صمیمانه تشکر می‌کنم که اگر تشویق و حوصله ایشان نبود به یقین انجام این کار امکان‌پذیر نبود.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتـایج مطالعـات، ابتکـــارات و نوآوریهـــای ناشـــی از تحقیـــق موضوع این رساله متعلق به دانشـگاه صـنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

و

همسر فداکارم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- پیشگفتار ۲

۱-۲- مفاهیم و اصطلاحات ۳

۱-۳- تقسیم بندی ربات‌های دوپا ۴

۱-۳-۱- ربات‌های دوپای فعال ۵

۱-۳-۲- ربات‌های دوپای غیر فعال ۵

۱-۴- سینماتیک ربات‌های دوپا ۷

۱-۵- دینامیک ربات‌های دوپا ۸

۱-۶- کنترل ربات‌های دوپا ۹

۱-۷- مروری بر تحقیقات انجام شده ۱۲

۱-۸- تعریف مسئله ۲۲

۱-۹- روند تدوین رساله ۲۸

فصل دوم: طراحی گام متناوب و کنترل یک ربات دوپای کم عملگر بالانس‌شده

۲-۱- تعریف مسئله ۳۰

۲-۲- مدل دینامیکی مرحله‌ی تک تکیه‌گاهی ۳۱

۲-۳- مدل تقریباً خطی ربات دوپا ۳۲

۲-۴- مدل ضربه ۳۵

۲-۵- مشخصات حرکت رو به جلو و پریودیک ۳۷

۲-۶- طراحی گام پریودیک ۴۰

۲-۷- طراحی کنترلر ۴۱

۲-۸- نتایج شبیه سازی ۴۲

فصل سوم: تحلیل پایداری و کنترل مقاوم یک ربات دوپای کم‌عملگر

۳-۱- تعریف مسئله ۴۷

۳-۲- دینامیک ربات دوپا ۴۸

۳-۳- مسیرهای پریودیک و نگاشت پوانکاره ۴۹

۳-۴- تحلیل پایداری و تعیین شرایط وجود حرکت پریودیک ۵۵

۳-۵- طراحی گام پایدار ۶۱

۳-۶- طراحی کنترلر ۶۳

۳-۶-۱- شبیه سازی عددی ۶۴

۳-۶-۲- تاثیر طول گام بر محدوده‌ی جذب نگاشت پوانکاره ۶۹

۳-۷- طراحی کنترل کننده‌ی مقاوم ۷۰

۳-۷-۱- نتایج شبیه سازی ۷۳

۳-۷-۲- کارایی ربات دوپا ۷۹

فصل چهارم : بررسی پایداری حرکت ربات دوپای کم عملگر در حین عبور از بستر حرکت ناهموار و نَرم

۴-۱- مدل دینامیکی ربات دوپای پنج عضوی ۸۲

۴-۲- طراحی گام متناوب و پایدار ۸۵

۴-۳- طراحی کنترلر ۸۶

۴-۴- نتایج شبیه سازی ۸۶

۴-۵- تاثیر عضو بالاتنه بر کارایی ربات ۸۹

۴-۶- حرکت ربات روی سطح ناهموار ۹۰

۴-۷- حرکت ربات روی سطح نَرم ۹۵

فصل پنجم: طراحی مشاهده‌گر غیر خطی جهت تخمین متغیرهای غیر قابل اندازه گیری

۵-۱- مقدمه ۱۰۰

۵-۱-۱- کارهای تحقیقاتی انجام شده ۱۰۱

۵-۲- تعریف مسئله ۱۰۲

۵-۳- طراحی مشاهده گر ۱۰۴

۵-۳-۱- تحلیل مشاهده پذیری ۱۰۴

۵-۳-۲- مشاهده‌گر مد لغزشی مرتبه دو ۱۰۶
۵-۴- طراحی مشاهده‌گر در طول گام کامل ۱۱۱
۵-۵- بررسی پایداری حرکت ربات دوپا ۱۱۲
۵-۶- نتایج شبیه سازی ۱۱۲
فصل ششم: طراحی گام پریودیک و کنترل ربات دوپا در طول فازهای تکیه‌گاهی و دو تکیه‌گاهی
۶-۱- مدل دینامیکی ربات ۱۱۸
۶-۱-۱- مدل تک تکیه‌گاهی ۱۱۸
۶-۱-۲- مدل دو تکیه‌گاهی ۱۱۹
۶-۲- طراحی گام سیکلیک ۱۲۱
۶-۲-۱- طراحی گام در فاز دو تکیه‌گاهی ۱۲۱
۶-۲-۲- طراحی گام در فاز تک تکیه‌گاهی ۱۲۲
۶-۲-۳- ملاحظات عملی برای طراحی گام پریودیک ۱۲۵
۶-۳- طراحی کنترل کننده ۱۲۸
۶-۳-۱- طراحی کنترل کننده در فاز دو تکیه‌گاهی ۱۲۸
۶-۳-۲- طراحی کنترل کننده در فاز تک تکیه‌گاهی ۱۳۲
۶-۴- نتایج شبیه سازی ۱۳۶
۶-۵- تحلیل پایداری حرکت ربات ۱۳۸
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۷-۱- جمع‌بندی مباحث بررسی شده ۱۴۳
۷-۲- پیشنهادات ۱۴۶
پیوست الف ۱۴۷
پیوست ب ۱۵۱
پیوست ج ۱۵۲
پیوست د ۱۵۳
مراجع ۱۵۵

چکیده

در ربات‌های دوپا کم بودن تعداد عملگرها از تعداد درجات آزادی در طول حرکت باعث ناپایداری ذاتی این ربات‌ها می‌شود. در این تحقیق به مسائلی که کم عملگری در ربات‌های دوپا ایجاد می‌کند پرداخته می‌شود. برای این منظور مدل ربات دوپای فاقد مچ پا که مدل مناسبی برای بررسی کم عملگری در ربات‌های دوپا است انتخاب شده است و طراحی گام پایدار و کنترل حرکت این ربات دوپا در صفحه سهموی بررسی می‌گردد. در این ربات دوپا تماس پای تکیه‌گاه با زمین در صفحه حرکت بصورت نقطه‌ای است از این رو معیارهای پایداری قبلی نظیر نقطه ممان صفر که بر پایه‌ی وجود چند ضلعی تکیه‌گاه استوار هستند قابل استفاده نمی‌باشند و در طراحی گام معیارهای دیگری بایستی جهت تضمین پایداری حرکت در نظر گرفته شوند. در این تحقیق طراحی گام متناوب و پایدار به وسیله تحلیل نقاط ثابت نگاشت پوانکاره ارائه می‌شود و مسئله دنبال کردن گام پایدار، به منظور همگرایی سریع‌تر به حرکت متناوب، برای ربات دوپای فاقد مچ پا بررسی می‌گردد. ابتدا با تحلیل پایداری حرکت یک ربات دوپای فاقد مچ پا در طول فاز تک تکیه‌گاهی و ضربه، معیاری جهت نشان دادن پایداری حرکت استخراج می‌گردد. سپس گام پایدار و متناوب برای این ربات دوپا طراحی می‌شود در این قسمت بهینه سازی مصرف انرژی در طول حرکت نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. با در دست داشتن گام پایدار به عنوان مسیر مرجع، به منظور دنبال کردن مسیر مرجع در طول گام‌های متوالی، کنترل حرکت ربات با توجه به کم عملگری ربات ارائه می‌شود. سپس با استفاده از نگاشت پوانکاره پایداری حرکت ربات دوپا در حین عبور از سطوح غیر هموار و نَرم بررسی می‌شود. در مرحله‌ی بعد یک مشاهده‌گر غیر خطی جهت تخمین متغیرهای زاویه‌ای عضو غیر فعال(ساق پا) طراحی می‌گردد. این متغیرهای باید در زمان کمتر از پریود گام تخمین زده شوند از این رو مشاهده‌گر با در نظر گرفتن همگرایی در زمان محدود طراحی می‌شود. در مرحله‌ی بعد این تحقیق، طراحی گام پایدار و متناوب برای ربات دوپای فاقد مچ پا مادامی که حرکت ربات شامل فازهای تک تکیه‌گاهی و دو تکیه‌گاهی می‌باشد ارائه می‌شود. در این حالت ربات دوپا در فاز تک تکیه‌گاهی و دو تکیه‌گاهی به ترتیب با کمبود عملگر و افزونگی عملگر مواجه است از این رو پایدار سازی ربات در فاز دو تکیه‌گاهی انجام می‌شود. با اعمال کردن کنترل مینیمم زمان در فاز دو تکیه‌گاهی، مسئله‌ی همگرایی به گام پریودیک در اولین قدم نشان داده می‌شود. علاوه بر آن مسئله‌ی شروع به حرکت این ربات از حالت سکون مورد بررسی قرار می‌گیرد و پایداری حرکت ربات نشان داده می‌شود.

کلمات کلیدی: ربات دوپا، کم عملگری، تحلیل پایداری، نگاشت پوانکاره، کنترل مقاوم.

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

ربات‌های پایه‌متحرک کاربردهای زیادی دارند مثلاً در معادن و یا در نزدیکی کوره‌های ذوب مواد که برای انسان خطرات بسیاری وجود دارد مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ربات‌ها در حالت کلی به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند: دسته‌ی اول از ربات‌های پایه‌متحرک دارای چرخ هایی هستند که پایه‌ی ربات را حرکت می‌دهند. از آنجایی که این گونه ربات‌ها برای عملکرد خود نیازمند بستری مناسب بر روی زمین هستند بنابراین در جاهایی که سطوح ناهموار و یا بستر حرکت نامشخص باشد این ربات‌ها کارایی خوبی نخواهند داشت. دسته‌ی دوم ربات‌های پایه متحرک، ربات‌های پادار هستند که در آنها حرکت پایه با چند پا تأمین می‌شود. ربات‌های پا دار در گونه‌های مختلفی ارائه شده‌اند از جمله ربات‌های شش پا، چهار پا، دوپا و یک پا. در این دسته از ربات‌های پایه متحرک لازم نیست بستر حرکت از قبل برای آنها آماده شده باشد چون آنها قابلیت حرکت بر روی سطوح ناهموار را دارند. مشکل اصلی این ربات‌ها ناپایداری حرکت آنها است. ربات‌هایی که دارای چهار پا یا بیشتر هستند به طور ذاتی نسبت به ربات‌های دوپا پایدارترند درصورتی که ربات‌های دوپا دارای کارایی انرژی[1] بیشتری هستند. ربات‌های دوپا از جهت حرکت شباهت زیادی با حرکت انسان دارند و قابلیت حرکت بر روی سطوح مختلف شامل موانع، پله و سطوح ناهموار را

[1] energy efficiency

دارند. مشکلاتی که این ربات‌ها با آنها مواجه هستند عبارتند از: متغیر بودن دینامیک ربات در طول حرکت، ناپایداری ذاتی، نداشتن نقطه‌ی ثابت به عنوان پایه و کم‌عملگری. تحقیق در زمینه‌ی ربات‌های دوپا از دو جنبه اهمیت دارد:

۱- جایگزین کردن ربات‌های دوپا به جای انسان.

۲- توانمند سازی اعضای آسیب دیده پای انسان. این بدان معناست که با تکمیل کردن الگوریتم‌های کنترلی بر روی این ربات‌ها و رفع مشکلات آنها بتوان این الگوریتم‌ها را با وسایل کمکی به عضو آسیب دیده پای انسان اعمال کرد و حرکت آن عضو را بهبود بخشید.

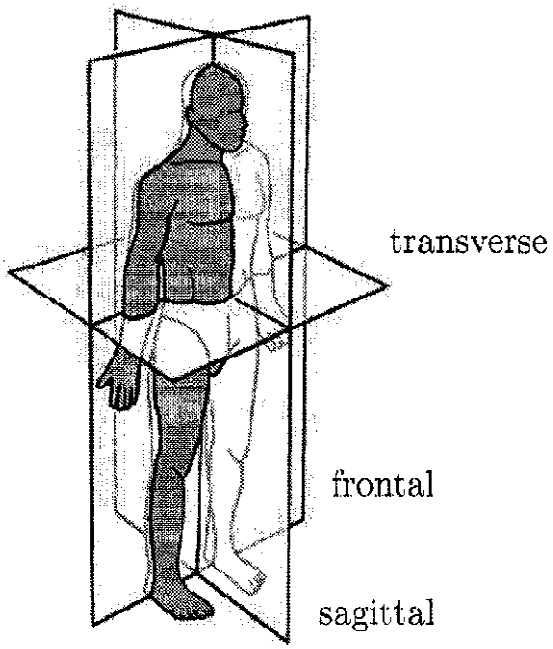
اگر چه پیچیدگی ربات بستگی به تعداد درجات آزادی آن دارد ولی در ربات‌های دوپا حتی مدل‌های بسیار ساده مشکلات اساسی برای تضمین حرکت خود دارند به عنوان مثال در سال ۱۹۹۸ گرکیا[1] و همکارانش [۱] یک ربات دوپا با سه جرم متمرکز و عضوهای بدون جرم طراحی کردند که علیرغم سادگی مدل، ولی پیچیدگی تحلیل آن مشهود بود از این رو محققین سعی می‌کنند با مدل‌های ساده‌ای از ربات دوپا بتوانند در رفع مشکلات پایداری و کنترل آن گام‌های مثبتی بردارند. تقریبا از سال ۱۹۷۰ تحقیق بر روی ربات‌های دوپا شروع شد که وکوبراتویک[2] از اولین کسانی بودکه در این زمینه فعالیت کرد[۲]. از آن زمان تا به حال محققین در این زمینه فعالیت‌های علمی زیادی انجام داده‌اند ولی هنوز مشکلات این ربات‌ها بصورت کامل حل نشده است و تا زمانی که مدل دینامیکی برای این‌گونه ربات‌ها کاملاً مشخص نشود نمی‌توان مشکل کنترل آنها را حل نمود. همچنین پارامترهای مکانیکی ربات دوپا (طول عضوها، توزیع جرم) تاثیر زیادی در نحوه راه رفتن وکیفیت و پایداری گام‌ها دارند بنابراین برای مطالعه دقیق این ربات‌ها نه تنها کنترل و عملکرد آنها، بلکه تمام سیستم به طور کامل بایستی شناسایی شود.

۱-۲ مفاهیم و اصطلاحات

در این بخش اصطلاحات بکارگرفته شده در این تحقیق توضیح داده می‌شوند. یک پا در حین راه رفتن می‌تواند در موقعیت‌های مختلفی قرار داشته باشد زمانی که پا در تماس با زمین است گفته می‌شود که آن پا در مرحله تکیه‌گاهی[3] قرار دارد در غیر این صورت پا در مرحله‌ی آونگی[4] قرار دارد. با توجه به این تعاریف می‌توان برای حرکت ربات دوپا اصطلاحاتی را تعریف کرد. اگر یک پا در تماس با زمین باشد ربات دوپا در مرحله تک‌تکیه‌گاهی[5] و اگر هر دو پا در تماس با زمین باشند ربات دوپا در مرحله دو تکیه‌گاهی[6] قرار دارد. همچنین اگر هیچکدام از پاها در تماس با

[1] Garcia
[2] Vukobratovic
[3] stance phase
[4] swing phase
[5] single support phase
[6] double support phase

زمین نباشند ربات دوپا در مرحله پرواز[1] قرار دارد. علاوه بر آن در مرحله تک تکیه‌گاهی پایی که در تماس با زمین است پای تکیه‌گاه[2] و پای دیگر را پای آونگی[3] می‌نامند. برخی از اصطلاحات کالبد شناسی انسان برای ربات‌های دوپا نیز بکار گرفته می‌شوند. شکل(۱-۱) سه صفحه سهموی[4]، تمام‌رُخ[5] و عرضی[6] را نشان می‌دهد. صفحه‌ی سهموی، بدن را به دو قسمت راست و چپ تقسیم می‌کند در صورتی که صفحه‌ی تمام‌رُخ، بدن را به دو قسمت جلو و عقب تقسیم می‌کند. همچنین صفحه‌ی عرضی، بدن را به دو قسمت بالا و پایین تقسیم می‌کند.



شکل(۱-۱) صفحات مرجع بدن انسان. اقتباس شده از مرجع [۳].

۱-۳ تقسیم بندی ربات‌های دوپا

ربات‌های دوپا معمولاً از لحاظ دینامیکی به دو دسته فعال[7] و غیر فعال[8] تقسیم می‌شوند. منظور از واژه فعال این است که در هر مفصل ربات یک موتور محرک قرار دارد و حرکت نسبی اعضاء ربات را فراهم می‌کند. همچنین واژه غیر فعال به این معنی است که در هیچ کدام از مفاصل ربات موتور محرکی وجود ندارد. در ادامه این قسمت خصوصیات هر کدام از این ربات‌ها شرح داده می‌شود.

---

[1] flight phase
[2] stance leg
[3] swing leg
[4] sagittal plane
[5] frontal plane
[6] transverse plane
[7] active
[8] passive

۱-۳-۱ ربات‌های دوپای فعال

چون در این ربات‌ها هر مفصل دارای یک محرک است بنابراین ربات می‌تواند حرکت پایدار و متناوب از قبل تعیین شده را دنبال کند. اکثر محققین با استفاده از معیار نقطه ممان صفر[1] (ZMP) حرکت پایداری را برای این ربات‌ها طراحی می‌کنند. در بیشتر مدل‌هایی که آنها مورد بحث قرار داده‌اند فرض شده است که پاشنه پا به اندازه کافی بزرگ باشد و بر اساس آن تحلیل پایداری را انجام داده‌اند. برای ارضای این فرض و اجتناب از افتادن ربات، ربات می‌بایست شرط پایداری ZMP را در طول حرکت برآورده سازد[۴]. این ربات‌ها می‌توانند اغتشاشات وارد شده از محیط را تا حدی دفع کنند و دارای قابلیت مانور حرکتی زیادی هستند. در شکل(۱-۲) یک نمونه از این ربات‌ها نمایش داده شده است.

شکل(۱-۲) ربات انسان نمای ASIMO [۵]

۱-۳-۲ ربات‌های دوپای غیر فعال

در محیط اطراف ما سیستم های فیزیکی متعددی وجود دارند که بدون هیچ بازخوردی[2]، حرکت‌های پایداری از خود نشان می‌دهند به عنوان مثال سورتمه یا بوم‌رنگ که با انرژی اولیه و بدون هیچ محرکی، حرکت‌های پایداری دارند.

از جمله موضوعات مهمی که محققین در زمینه ربات‌های دوپا مورد بحث قرار می‌دهند حرکت ربات دوپای بدون محرک است که اصطلاحاً به آن غیر فعال گفته می‌شود. با قرار دادن ربات بر روی یک سطح شیبدار و یا میدان جاذبه به گونه‌ای که اتلاف انرژی در حین حرکت جبران شود می‌توان ربات را روی یک سیکل حدی[3] قرار داد تا به به حرکت خود ادامه دهد. در این حالت با استفاده از روش‌های لیاپانوف[4] یا نگاشت پوانکاره[5] سیکل حدی بدست می‌آید و ربات بدون هیچ محرکی روی این سیکل حدی قرار داده می‌شودکه پس از آن ربات بصورت متناوب

---

[1] Zero Moment Point
[2] feedback
[3] limit cycle
[4] Lyapunov
[5] Poincaré map

حرکت خود را ادامه می‌دهد. در شکل(۱-۳) نمونه‌ای از این ربات‌ها نمایش داده شده است. تحلیل سیکل حدی این نوع سیستم‌ها در حالت ساده امکان پذیر است ولی اگر قدری ربات پیچیده در نظر گرفته شود برای محاسبه سیکل حدی از حل‌های عددی و شبیه سازی‌های عددی باید کمک گرفت[۶].

شکل(۱-۳) ربات دوپای غیر فعال [۷]

در سال ۱۹۸۹ مک‌گیر[1] طرحی برای راه رفتن ربات دوپای غیرفعال ارائه کرد او توانست یک ربات دوپا با دو درجه آزادی را بر روی سطح شیبدار به حرکت درآورد به گونه‌ای که رفتار متناوب و یکنواختی داشته باشد. مشکلی که این گونه ربات‌ها (غیر فعال) دارند این است که هیچ گونه کنترلی بر حرکت آنها نیست و با کوچکترین اغتشاشی ناپایدار می‌شوند ولی از طرفی کارایی بسیار بالایی دارند[۸]. علاوه بر آن در صورتی که سیکل حدی پایداری برای ربات دوپا درحالت غیر فعال بدست آمد می‌توان مسیر حرکت بدست آمده را به عنوان مسیری که کمترین مصرف انرژی را داراست در حالت فعال بکار برد.

با توجه به ویژگی‌های ربات‌های دوپای فعال و غیرفعال، هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. ربات‌های دوپای فعال در مقابل ربات‌های غیرفعال دارای مزایا و معایب زیر می‌باشند:

- پایداری حرکت آنها بیشتر است.
- مقاومت بالایی در مقابل اغتشاشات وارد شده از محیط خارج دارند.
- دامنه‌ی وسیع‌تری برای حرکت دارند.
- نیاز به بستر مناسب و شرایط لازم برای حرکت ندارند.
- انرژی و توان بیشتری برای حرکت خود نیاز دارندکه باعث پایین بودن کارایی این ربات‌ها می‌شود.
- تجهیزات بیشتر و پیچیده‌تری برای عملکرد خود احتیاج دارند.

[1] McGeer

همچنین مزایا و معایب ربات‌های غیرفعال در مقابل ربات‌های فعال را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

- دارای کارایی بالایی هستند که این به علت پایین بودن مصرف انرژی آنها است.
- بسیار مقرون به صرفه هستند چون نیاز به تجهیزات پیچیده‌ای برای عملکرد خود ندارند.
- حرکت آنها بسیار محدود است.
- نیاز به بستری مناسب برای حرکت دارند.
- در حضور اغتشاشات خارجی کاملاً ناپایدار می‌شوند.

۱-۴ سینماتیک ربات‌های دوپا

در ربات‌های دوپا، هم سینماتیک ربات‌های سری و هم سینماتیک ربات‌های موازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالتی که فقط یک پا روی زمین قرار دارد سینماتیک ربات مشابه سینماتیک ربات‌های سری است و زمانی که هر دوپا با زمین در تماس هستند سینماتیک ربات مشابه سینماتیک ربات‌های موازی خواهد بود. زمانی که یکی از پاها در تماس با زمین است ربات دوپا دارای افزونگی[1] درجات آزادی است که سینماتیک معکوس ربات دارای جواب‌های متعددی خواهد بود. در این حالت می‌توان با اضافه کردن قیود دیگری مسیر حرکت مورد نظر را برای ربات طراحی کرد. از جمله قیودی که برای طراحی گام ربات دوپا در نظر می‌گیرند معیار پایداری است. معیار پایداری ZMP یکی از مهمترین معیارهای پایداری برای ربات‌های انسان نما است و ربات‌های دوپایی که اخیرا ساخته شده‌اند با استفاده از همین معیار، تضمین پایداری حرکت آنها انجام شده است. ولی به هر حال معیار پایداری به تنهایی برای راه رفتن مناسب نیست از این رو محققین به سمت روش‌هایی جهت کاهش مصرف انرژی در این ربات‌های روی آوردند و سعی کردند معیار دیگری که همان مصرف انرژی است برای راه رفتن این ربات‌ها در نظر بگیرند بدین ترتیب ایجاد مسیرهای بهینه و پریودیک مطرح شد و محققین از دو معیار بهینه سازی و پایداری در تحلیل‌های خود بهره گرفتند و الگوریتم‌های عددی نظیر الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی و منطق فازی را به کار گرفته‌اند[۹]. بنابراین با در نظر گرفتن الگوی مناسبی در فضای کار[2] و همچنین استفاده از سینماتیک معکوس و معیار بهینه سازی می‌توان مسیرهای مورد نظر برای ربات دوپا در فضای مفاصل را استخراج کرد.

طراحی مسیر برای این گونه ربات‌ها هنوز به عنوان یک مسئله باز مطرح است. برخی از محققین با انتخاب الگوهای راه رفتن طبیعی مسیرهای مورد نظر را طراحی می‌کنند و از داده‌های آزمایشگاهی بهره می‌گیرند و گروهی دیگر با استفاده از روش بهینه سازی طراحی گام را انجام می‌دهند به گونه‌ای که یک تابع هدف در طول حرکت بهینه شود. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن موانع و یا الگوهای غیر لغزشی و سرعت حرکت، مسیر حرکت مفاصل ربات را

[1] redundancy
[2] work space

طراحی نمود[۶].

۱-۵ دینامیک ربات‌های دوپا

دینامیک ربات‌های دوپا بستگی به نوع راه رفتن ربات دارد در این قسمت نحوه مدل سازی دینامیکی این ربات‌ها بیان می‌شود. در حالت معمولی الگوی راه رفتن از مراحل مختلفی تشکیل می‌شود که عبارتند از:

- مرحله‌ی دو تکیه‌گاهی:

در طول این مرحله، هر دوپا در تماس با زمین هستند. این مرحله با برخورد پای آونگی با زمین شروع و با جدا شدن انگشتان پای تکیه‌گاه از زمین پایان می‌پذیرد.

- مرحله‌ی تک تکیه‌گاهی:

در طول این مرحله تنها یک پا در تماس با زمین است و مرکز جرم سیستم شبیه یک پاندول معکوس حول نقطه تماس دوران می‌کند و پای دیگر از عقب به جلو حرکت می‌کند و زمانی که این پا با زمین برخورد می‌کند این مرحله به پایان می‌رسد و مرحله دو تکیه‌گاهی شروع می‌شود.

در حالت دویدن یک مرحله دیگر نیز به حرکت اضافه می‌شود که مرحله پرواز نامیده می‌شود. در این مرحله ربات هیچ گونه تماسی با زمین ندارد با جدا شدن پای عقبی از زمین شروع و با فرود آمدن آن روی زمین پایان می پذیرد.

مدل دینامیکی ربات‌های دوپا به سه صورت در نظر گرفته می‌شود:

۱- مدل تک تکیه‌گاهی به همراه ضربه: در این مدل به طور شهودی مدل دینامیکی ربات بصورت یک مرحله تک تکیه‌گاهی در نظر گرفته می‌شود که در انتهای این مرحله یک ضربه اتفاق می‌افتد و دوباره بعد از ضربه مدل تک تکیه‌گاهی تکرارمی‌شود.

۲- مدل تک تکیه‌گاهی و دو تکیه گاهی به همراه ضربه: در این مدل، دینامیک ربات بصورت دو فاز حرکتی در نظر گرفته می‌شود به این ترتیب که در پایان مرحله تک تکیه‌گاهی یک ضربه اتفاق می‌افتد و بعد از آن، مدل بصورت دو تکیه گاهی می‌شود که در انتهای این مرحله دوباره به مدل تک تکیه‌گاهی تبدیل می‌گردد و این سیکل ادامه پیدا می‌کند. ربات در این مدل ابتدا بصورت کم عملگر[1] (در مرحله تک تکیه‌گاهی) و سپس بصورت افزونگی عملگر[2] (در فاز دو تکیه‌گاهی) است.

۳- مدل دویدن که شامل دو فاز حرکتی است اول فاز تک تکیه‌گاهی و دوم فاز پرواز، حرکت به این ترتیب شروع می‌شود که در پایان مرحله تک تکیه‌گاهی ربات از زمین جدا شده و هیچ گونه تماسی با زمین ندارد و فاز پرواز آن شروع می‌شود و در انتهای فاز پرواز (وقتی که ربات روی زمین فرود می‌آید) یک ضربه اتفاق می‌افتد و دوباره فاز

[1] underactuated
[2] overactuated

تک تکیه‌گاهی آغاز می‌گردد. در این حالت ارتباط مختصات تعمیم یافته قبل از بلند شدن و مختصات بعد از بلند شدن، ارتباط یک به یکی نیست بلکه درجات آزادی بعد از ضربه افزایش می‌یابند و در حالت فرود آمدن بعد از ضربه درجات آزادی نسبت به حالت پرواز کم می‌شوند و ربات در طی این حرکت بصورت کم عملگر است.

وقتی یکی از مدل‌های فوق به عنوان مدل مورد نظر انتخاب شد دینامیک مربوط به هر فاز حرکتی در آن مدل با استفاده از معادلات لاگرانژ بدست می‌آید که هنگام حل در لحظه مناسب بین دینامیک‌های مختلف سوئیچ می‌شود.

طبیعت ناگهانی ضربه باعث می‌شود که آن را به طور مستقیم در کنترلر نتوان مدل کرد. حتی یک مدل ضربه دیراک[1] باعث می‌شود ورودی‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابند و محرک‌ها آسیب جدی ببینند. در بسیاری از مدل‌ها، مدل برخورد پا با زمین فقط به عنوان اغتشاش در سرعت‌ها در نظر گرفته می‌شود و کنترلر بر اساس این اغتشاشات طراحی می‌شود. عده‌ای از محققین سعی کردند به گونه‌ای این ضربه را در مدل خود از بین ببرند و در نتیجه از اثر آن صرف‌نظر کردند. در صورت وجود ضربه، باید به این سؤال پاسخ داد که در زمان برخورد قدم‌های بعدی با چه سرعت اولیه‌ای شروع می‌شود[۶].

۱-۶ کنترل ربات‌های دوپا

در علم رباتیک کنترلر وظیفه دنبال کردن مسیرهای مورد نظر را به عهده دارد که معمولاً در فضای مفاصل بیان می‌شوند اما در کنترل ربات‌های دوپا علاوه بر آن تولید قدم‌های پایدار نیز به عهده‌ی کنترلر است. بنابراین در قسمت کنترل ربات‌های دوپا چندین بحث مد نظر است اول اینکه تعیین گشتاورهای مورد نیاز برای دنبال کردن مسیرهای مورد نظر و دوم تضمین پایداری حرکت [۶].

ربات‌های دوپا ناپایداری ذاتی دارند از این رو کنترل آنها از دید پایداری بسیار مشکل است. به منظور درک پایداری ربات دوپا لازم است مدل دینامیکی ریاضی استخراج شود و سپس با شبیه سازی و تحلیل عملکرد، سیستم پایداری آن بررسی شود. حرکت ربات‌های دوپا با طی شدن فازهای مختلف حرکت انجام می‌شود که این فازها در نتیجه دینامیک مختلف آن در حین حرکت ایجاد می‌شوند. بنابراین در هر فاز باید کنترلر مربوط به آن قسمت مورد استفاده قرار گیرد و وقتی پارامترها از مقادیر اصلی خود انحرافی داشته باشند و یا دینامیک به شدت غیر خطی باشد باید کنترلر به گونه‌ای طراحی شود که به اندازه کافی مقاوم باشد تا این انحراف در موقع تغییر فاز سیستم، عملکرد آن را مختل نکند[۱۰].

بعضی از مشکلاتی که باعث شده است مسئله کنترل ربات‌های دوپا به طور کامل حل نشود عبارتند از:

۱- غیر خطی بودن دینامیک که باعث می‌شود کنترلرهای خطی قابل پیاده سازی بر روی آنها نباشند و کنترلرهای غیر

[1] Dirac

خطی هم محدودیت حل در زمان واقعی را ارضا نکند.

۲- زیاد بودن درجات آزادی که باعث پیچیدگی دینامیک ربات می‌شود. معمولاً محققین درجات آزادی محدودی برای ربات در نظر می‌گیرند.

۳- متغیر بودن دینامیک سیستم در طول حرکت. چون دینامیک ربات های دوپا به طور ناگهانی در طول حرکت تغییر می‌کند ربات‌های دوپا مشخصات سیستم‌های پیوسته و ناپیوسته را دارا هستند و این باعث پیچیدگی کنترلر می‌شود.

۴- ناپایداری ذاتی حرکت از مشکلات اساسی کنترل این ربات‌هاست و این بدلیل ثابت نبودن پای ربات روی زمین است.

۵- کم عملگر بودن مشکل دیگر کنترل این ربات‌ها است. چون پای ربات فقط می‌تواند روی زمین قرار گیرد و هیچ گونه محرکی برای هول دادن یا کشیدن پای تکیه‌گاه روی زمین بکار نمی‌رود. بنابراین در مرحله تک تکیه‌گاهی تعداد محرک‌ها کمتر از تعداد درجات آزادی ربات خواهد بود.

از آنجایی که کنترل ربات‌های دوپا بصورت کامل حل نشده است اکثر محققین با روش‌های ابتکاری سعی در کنترل این گونه ربات‌ها دارند. روش هایی که برای کنترل این سیستم ها استفاده می‌شود بر اصول زیر بنا شده‌اند:

۱- مدل فیزیکی ساده از ربات دوپا

۲- تقسیم رفتار مدل به چند رفتار ساده

۳- تعیین یک یا چند روش کنترلی برای هر قسمت

۴- تعیین ضرایب کنترلی به گونه‌ای که حرکت مورد نظر برای هر قسمت ایجاد شود.

کنترلرهایی که بر اساس اصول فوق طراحی می‌شوند معمولاً از سه پارامتر طول قدم، ارتفاع پاشنه پای آونگی و زمان تناوب استفاده می‌کنند. از جمله روش‌هایی که برای کنترل ربات‌های دوپا به کار گرفته شده است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد[۶]:

۱-کنترل خطی: در این روش با خطی سازی مدل دینامیکی حول نقطه تعادل که مرکز جرم در راستای قائم روی تکیه گاه قرار گیرد مدل خطی شده حاصل می‌شود و سپس با یک کنترلر PD، کنترل خطی ربات بصورت نقطه به نقطه انجام می‌شود. بنابراین محدوده عملکرد این کنترلر بسیار کم است و نمی‌توان برای راه رفتن دینامیکی با گام‌های بلند از آن استفاده کرد. از این روش در مراجع [۱۵- ۱۱] استفاده شده است.

۲- کنترل گشتاور[1]: در این روش گشتاور مفاصل به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که مفاصل ربات مسیرهای مورد نظر را دنبال کنند. این روش به طور وسیعی در ربات های دوپا استفاده می‌شود [۱۹- ۱۶].

[1] computed torque control

۳-کنترل بهینه: بر اساس روش‌های کنترل بهینه، حرکت ربات دوپا بهینه سازی و کنترل می‌شود. معمولاً به دو صورت انجام می‌شود یا بر اساس بهینه سازی تابع انرژی [۲۳-۲۰] و یا بر اساس روش‌های حساب تغییرات [۲۷-۲۴] یک تابع هدف در راستای کنترل، بهینه سازی می‌گردد. این روش کنترلی معمولاً به علت زیاد بودن حجم محاسبات بصورت کنترل برون-خط[1] انجام می‌شود.

۴- کنترل تطبیقی[2]: در بین روش‌های کنترلی این روش در ربات‌های دوپا کمتر مورد توجه قرار گرفته است شاید به خاطر کار آمد نبودن این روش برای این گونه ربات‌ها مورد توجه قرار نگرفته است و یا بدلیل مشکلات فراوان این‌گونه ربات‌ها است که پس از رفع آنها می‌توان از این کنترلرها استفاده کرد. در [۲۸] و [۲۹] کنترل تطبیقی روی ربات‌های دوپای ساده شده‌ای اعمال شده است.

۵- کنترل مقاوم[3]: در این روش قانون کنترلی به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که دنبال کردن مسیرهای مورد نظر علیرغم نامعینی در پارامترهای ربات تضمین شود. همچنین در این حالت کنترلر باید به گونه‌ای طراحی شود که ربات دوپا مسیر پایداری را در طی گام‌های متوالی با وجود ضربه طی کند[۳۰، ۳۱].

۵- استفاده از شبکه‌های عصبی و منطق فازی روش‌های دیگری هستند که در کنترل ربات‌های دوپا مورد استفاده قرار می‌گیرند[۳۲].

با توجه به اینکه مشکل کم‌عملگری در مرحله تک تکیه‌گاهی مشکل اصلی ربات‌های دوپا به شمار می‌رود در ادامه تعدادی از روشهایی‌که محققین برای کنترل سیستم‌های کم عملگر ارائه کردند توضیح داده می‌شود.

۱- یک روش برای بر طرف کردن مشکل کم عملگری استفاده از کنترلرهای مجازی می‌باشد. در این روش مسیرهای مورد نظر بصورت تابعی از یک پارامتر بیان می‌شوندکه به طور غیر مستقیم آن پارامتر، سیستم را کنترل می‌کند اگر این پارامتر p باشد در این صورت مشتق دوم پارامتر p به عنوان یک کنترلر مجازی روی ربات کم عملگر اعمال می‌شود و مشکل کنترل این ربات را حل می‌کند[۳۳].

۲- روش دوم، استفاده از قیود مصنوعی[4] و دینامیک صفر[5] مربوط به آنها است. ابتدا به نحوی مناسب، به تعداد ورودی‌ها، خروجی‌هایی برای سیستم تعریف می‌شود سپس با طراحی کنترلر بر اساس این خروجی‌ها، می‌توان خروجی‌های مورد نظر را به خوبی دنبال کرد به شرط اینکه دینامیک صفر سیستم پایدار باشد. دینامیک صفر، دینامیک مقید بر خروجی صفر است. این روش بر مطالعه تحلیلی دینامیک صفر سیستم استوار است و دینامیک صفر نیز به انتخاب خروجی‌های تنظیم شده بستگی دارد. اگر فرم حلقه بسته معادلات، بصورت پارامتری شده باشد از بهینه

---

[1] offline
[2] adaptive control
[3] robust control
[4] artificial constraints
[5] zero dynamics

سازی برخط[1] برای پایداری دینامیک صفر می‌توان بهره گرفت. شکل خاصی از این روش برای موقعی است که دینامیک صفر با یک ماهیت دینامیک ترکیبی مواجه می‌شود که موضوع مورد علاقه محققین است[۳۴].

۳- کنترل پیش‌بینی کننده[2]، روش دیگری برای کنترل سیستم‌های کم عملگر است. در حقیقت روش پیش‌بینی، بر اساس اطمینان از پایداری با کنترل رفتار تمام حالت‌های سیستم در بعضی زمانهای بعدی انجام می‌شودکه روش‌های N مرحله جلوتر نامیده می‌شوند در این روش مسیر حرکت به N قسمت تقسیم می‌شود و در انتهای هر قسمت کنترلر به گونه‌ای طراحی می‌شود که متغیرهای بدون عملگر در انتهای قسمتN ام کمترین خطا را داشته باشند. و به عنوان مثال اگر تعداد محرک‌ها r باشد تا زمانی که درجات آزادی کنترل شده$(r \times N)$ از تعداد درجات آزادی سیستم بیشتر باشد$(rN \geq n)$ مشکل کم عملگر بودن حل خواهد شد[۳۵].

۴- روش کنترل نقطه به نقطه[3]، روش دیگری است که برای کنترل ربات‌های کم عملگر مورد استفاده قرار می‌گیرد و جاههایی که بصورت پیوسته نمی‌توان هر مسیر دلخواهی را کنترل کرد بکار گرفته می‌شود. در این روش متغیرهای مفاصل طی دو مرحله به موقعیت‌های مورد نظر می‌رسند. ابتدا کنترلر موقعیت‌های غیر فعال را به موقعیت مورد نظر رسانده و سپس این متغیرها قفل شده و متغیرهای فعال به موقعیت‌های مورد نظر هدایت می‌شوند[۳۶].

به هر حال چون ربات‌های دوپا دارای ناپایداری ذاتی هستند باید روش‌های فوق را با در نظر گرفتن این موضوع بکار گرفت به همین دلیل هنوز یک دستورالعمل کلی برای کنترل این گونه ربات‌ها به عنوان یک مسئله باز مطرح است.

۱-۷ مروری بر تحقیقات انجام شده

تیم‌های تحقیقاتی زیادی در زمینه سینماتیک ، دینامیک و کنترل ربات‌های دوپا فعالیت می‌کنند. در این قسمت برخی از این تحقیقات آورده می‌شود. به طور کلی زمینه‌های تحقیقاتی به دو دسته اصلی تقسیم بندی می‌شوند: ربات‌های دوپای غیر فعال و ربات‌های دوپای فعال. برای هر کدام زمینه‌های مطالعاتی متعددی وجود دارد و مورد توجه محققین قرار گرفته است که در ادامه به برخی از این تحقیقات اشاره می‌شود.

مک‌گیر در سال ۱۹۹۰ یک ربات دوپای غیر فعال را مورد بررسی قرار داد. او کف پاها را بصورت نیم‌دایره‌ای و بستر حرکت ربات را سطح شیبدار در نظر گرفت. سپس توانست بدون استفاده از کنترلر و انرژی خارجی، حرکت پریودیکی را برای ربات دوپا بدست آورد. او با خطی سازی معادلات حالت، پایداری ربات را مورد مطالعه قرار داد و تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل شیب سطح، جرم ربات، موقعیت مرکز جرم و دمپینگ مفاصل را بر پایداری ربات بدست آورد[۸].

---

[1] on line
[2] predictive control
[3] Point-To-Point