

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رشته مهندسی برق گرایش مهندسی کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

بهبود بازیابی تعادل ربات انسان نما در حضور اغتشاشات خارجی

نگارنده:

امیرحسین فیضی

استاد راهنما:

دکتر محمد حداد ظریف

خرداد ۱۳۹۸

تقدیم به

پدر، مادر، خواهران و برادران عزیزم

که همواره در تمام مراحل زندگی با باورشان به من انگیزه ادامه راه را بخشیدند.

تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود لازم می دانم از تلاش ها و راهنمایی های ارزنده استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر محمد حداد ظریف صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از جناب آقای دکتر مصطفی نظری که راهنمایی های ایشان کمک شایانی در پیشبرد این پایان نامه داشتند، کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب **امیرحسین فیضی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق - کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بهبود بازیابی تعادل ربات انسان نما در حضور اغتشاشات خارجی تحت راهنمایی دکتر محمد حداد ظریف** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

در این پژوهش، به بهبود بازیابی تعادل روبات انسان‌نما نائو اچ-۲۱ پرداخته شده است. با ارائه یک تابع هدف و با استفاده از روش کنترل پیش‌بین بهبود بازیابی ربات فوق انجام پذیرفته است. متغیرهای حالت سیستم عبارتند از موقعیت نقطه جذب، موقعیت نقطه گشتاور صفر، نرخ تغییرات گشتاور زاویه‌ای بالاتنه و موقعیت مرکز جرم ربات. نرخ تغییرات گشتاور بالاتنه و نرخ تغییرات موقعیت نقطه گشتاور صفر به‌عنوان ورودی کنترلی در نظر گرفته شده‌اند. برای بازیابی تعادل از استراتژی ترکیبی مچ پا و لگن استفاده شده است؛ البته استراتژی‌های دیگر نیز مورد بررسی و آزمون قرار گرفته‌اند. مدل دینامیکی ربات به صورت پاندول معکوس به همراه چرخ دوار در نظر گرفته شده است. بازیابی تعادل ربات، با تنظیم موقعیت نقطه گشتاور صفر و گشتاور چرخشی بالاتنه با در نظر گرفتن یک تابع هزینه با قيود محدود و معین انجام شده است. با اعمال اغتشاش خارجی، نقطه جذب به خارج از چندضلعی پشتیبانی می‌رود که با کمک کنترلر پیش‌بین و تابع هزینه انتخاب شده با اعمال گشتاور چرخشی بالاتنه و مچ، نقطه جذب به درون چندضلعی پشتیبانی هدایت شده و بازیابی تعادل روبات انجام می‌پذیرد. تمامی این شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب انجام شده است و برای ارزیابی از نرم‌افزار شبیه‌ساز ویباتز استفاده شده است. در نهایت پیاده‌سازی تجربی از این الگوریتم روی ربات واقعی نائو انجام شده است. به دلیل ضعف سخت‌افزاری روبات نائو در قسمت حسگر نیرو، یک‌رویه سه‌بعدی که شامل المان فشارسنج می‌باشد طراحی و ساخته شده است که برای ارزیابی در نرم‌افزار متلب و ویباتز خروجی‌های حسگر روبات نائو و المان طراحی شده مقایسه شده است؛ که نتایج به‌دست‌آمده المان ساخته شده با دقت خوبی داده‌های مربوط به فشار وارده را برآیندگیری کرده که در این مطالعه منجر به بهبود عملکرد بازیابی تعادل روبات گشته است.

واژگان کلیدی: ربات انسان‌نما؛ بازیابی تعادل؛ کنترل پیش‌بین؛ نقطه جذب؛ نقطه گشتاور صفر؛ گشتاور چرخشی؛ چندضلعی پشتیبانی.

لیست مقالات استخراج شده از پایان نامه:

Feizi, A. H., Zarif, M. H., Nazari, M., & Varedi-Koulaei, S. M. (2018, October). PR-MPC for NAO H21 Humanoid Robot: Capture Point Approach. In *2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM)* (pp. 428-433). IEEE.

فهرست

۱	فصل اول.....
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۱-۲- ربات
۳	۱-۲-۱- هوندا
۴	۱-۲-۲- ربات‌های انسان‌نمای اندازه متوسط
۵	۱-۳- مطالعات مرتبط پیشین بر روی ربات انسان‌نما
۸	۱-۴- مطالعات مرتبط پیشین بر روی ربات نانو
۹	۱-۵- اهداف پایان‌نامه
۱۱	فصل دوم
۱۲	۲-۱- پیشگفتار
۱۲	۲-۲- معرفی ربات نانو
۱۳	۲-۳- انواع ربات نانو
۱۵	۲-۴- مشخصات نرم‌افزاری ربات نانو
۱۹	فصل سوم
۲۰	۳-۱- انواع مدل‌های ربات انسان‌نما و کاربرد آنها
۲۲	۳-۲- معیارها
۲۲	۳-۲-۱- مرکز جرم
۲۳	۳-۲-۲- تصویر مرکز جرم روی زمین
۲۳	۳-۲-۳- نقطه گشتاور صفر
۲۴	۳-۲-۴- نقطه گشتاور صفر توزیع‌شده

۲۵	..... ۳-۲-۵-نقطه گشتاور صفر موهومی
۲۵	..... ۳-۲-۶-مرکز فشار
۲۶	..... ۳-۲-۷-ناحیه‌ی چندضلعی پشتیبانی
۲۷	..... ۳-۲-۸-پایداری استاتیکی و دینامیکی
۲۸	..... ۳-۲-۹-نقطه جذب
۲۹	..... ۳-۳-بررسی مدل‌های پر کاربرد
۲۹	..... ۳-۳-۱-مدل گاری-میز
۳۱	..... ۳-۳-۲-مدل پاندول معکوس خطی
۳۱	..... ۳-۳-۳-مدل آونگ معکوس
۳۳	..... ۳-۴-مدل پیشنهادی برای ربات نائو
۳۴	..... ۳-۴-۱-پاندول معکوس خطی به‌علاوه یک چرخه دوار
۳۵	..... ۳-۴-۲-فرموله کردن نقطه جذب در مدل مورد مطالعه
۴۱	..... فصل چهارم
۴۲	..... ۴-۱-کنترل بازیابی تعادل ربات نائو
۴۲	..... ۴-۱-۱-معادلات سیستم
۴۴	..... ۴-۱-۳-کنترل مدل پیش‌بین
۴۹	..... ۴-۲-شبیه‌سازی و نتایج صحت بهینه‌سازی
۵۶	..... ۴-۳-جمع‌بندی
۵۷	..... فصل پنجم
۵۷	..... طراحی و ساخت المان فشارسنج برای ربات
۵۸	..... ۵-۱-مقدمه
۵۸	..... ۵-۲-محاسبه‌ی نقطه گشتاور صفر با استفاده از حسگرهای نیرو در کف پا
۵۹	..... ۵-۳-دلایل ضعف عملکرد این ربات

۶۰	۵-۴-روش انجام تحقیق
۶۱	۵-۵-انتخاب حسگر مناسب
۶۲	۵-۶-قالب‌گیری و آماده‌سازی حسگر
۶۳	۵-۶-۱-مراحل قالب‌گیری
۶۴	۵-۶-۲-کالیبراسیون حسگرهای سیلیکونی
۶۵	۵-۷-طراحی مدار و برد الکتریکی
۶۷	۵-۸-طراحی رویه سه‌بعدی
۶۹	۵-۹-مقایسه مقدار اندازه‌گیری مرکز فشار ربات و المان ساخته‌شده
۷۰	۵-۱۰-جمع‌بندی:
۷۱	فصل ششم
۷۲	۶-۱-نتیجه‌گیری
۷۲	۶-۲-پیشنهادها
۷۳	پیوست
۷۴	پیوست، الف
۷۸	مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) سیر تکامل ربات آسیمو ۴
- شکل (۲-۱) ربات‌های انسان‌نمای اندازه متوسط ۴
- شکل (۱-۲) انواع نسخه‌های ربات‌های نانو ساخت شرکت آلدبارن ربات یکر [۲۶]. ۱۴
- شکل (۲-۲) برنامه چورگراف، برای برنامه‌نویسی آسان ربات نانو [۲۶]. ۱۶
- شکل (۳-۲) برنامه مانیتور، برای مشاهده اطلاعات حسگرها و عملگرهای ربات نانو [۲۶]. ۱۷
- شکل (۴-۲) محیط برنامه وی باتز برای نانو، شبیه‌ساز ربات نانو [۲۶]. ۱۷
- شکل (۱-۳) سه صفحه اصلی که ربات در آن حرکت می‌کند [۲۸]. ۲۰
- شکل (۲-۳) مفهوم ۷ نقطه جذب را نشان می‌دهد [۳۹]. ۲۵
- شکل (۳-۳) چندضلعی پشتیبانی را برای ربات انسان‌نمای نانو. ۲۶
- شکل (۴-۳) مدل گاری _ میز [۳۲]. ۳۰
- شکل (۵-۳) مدل پاندول معکوس خطی [۳۴]. ۳۱
- شکل (۶-۳) مدل پاندول معکوس خطی [۳۲]. ۳۲
- شکل (۷-۳) پاندول معکوس خطی به‌علاوه یک چرخه دوار [۷]. ۳۴
- شکل (۸-۳) مدل پاندول معکوس خطی با چرخه دوار [۴۰]. ۳۶
- شکل (۹-۳) تقاطع منطقه جذب با چندضلعی پشتیبانی [۳۳]. ۳۹
- شکل (۱۰-۳) اعمال اغتشاش خارجی و تغییرات استراتژی [۴۰]. ۴۰
- شکل (۲-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بازیابی تعادل (ربات روی دو پا ایستاده) با مقادیر فشارهای الف: (۰، ۲۵۰)، ب: (۲۵۰، ۰) و ج: (۱۰۰، ۱۰۰). ۵۲
- شکل (۳-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بازیابی تعادل (ربات روی دو پا ایستاده) با مقادیر فشار (۰، ۲۵۰) در محیط ویباتز. ۵۳
- شکل (۴-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بازیابی تعادل (ربات روی دو پا ایستاده) با مقادیر فشارهای الف: (۱۰۰، ۳۰۰) و ب: نتایج حاصل. ۵۴
- شکل (۵-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بازیابی تعادل (ربات روی یک پا ایستاده) با مقادیر فشارهای الف: (۳۰۰، ۱۰۰) و ب: نتایج حاصل. ۵۵
- شکل (۱-۵) یک نمونه از حسگر نیرو [۲۶]. ۵۹
- شکل (۲-۵) حسگرهای نیروسنج کف پای ربات نانو [۲۶]. ۵۹
- شکل (۴-۵) شکل و اندازه حسگر ۶۲
- شکل (۵-۵) نحوه تخلیه گاز از سیلیکون را توسط پمپ خلأ ۶۳
- شکل (۶-۵) تزریق مخلوط سیلیکون و هاردنر در قالب ۶۴
- شکل (۷-۵) هواگیری جداگانه حسگرها در قالب ۶۴
- شکل (۸-۵) نما و اندازه نهایی بسته حسگر ۶۴

شکل (۵-۹) مشخصه خطی المان اندازه	۶۵
شکل (۵-۱۰) پروسور ESP12E.....	۶۵
شکل (۵-۱۱) شماتیک نحوه اتصال حسگرها به مالتی پلکسر، میکرو و مبدل دیجیتال در حالت کلی	۶۶
شکل (۵-۱۳) نمای اتصال لایه‌ها	۶۸
شکل (۵-۱۴) نمای از کف و جانمایی حسگرها	۶۸
شکل (۵-۱۶) مقایسه مرکز فشار ربات و المان ساخته شده	۷۰
شکل (الف-۱) نقشه شماتیک انواع ربات‌های نائو [۲۶].....	۷۴
شکل (الف-۲) مشخصات فنی ربات نائو [۲۶].....	۷۵

فهرست جداول

جدول ۴-۱ پارامترهای ربات نائو	۵۰
جدول ۴-۲ وزن‌ها تابع هزینه	۴۹
جدول الف-۱ ابعاد دست‌های نائو	۷۶
جدول الف-۲ وزن قسمت‌های ربات نائو	۷۶
جدول الف-۳ درجه آزادی و بازه حرکتی سر ربات نائو	۷۶
جدول الف-۴ درجه آزادی و بازه حرکتی دست ربات نائو	۷۶
جدول الف-۵ درجه آزادی و بازه حرکتی پای ربات نائو	۷۷
جدول الف-۶ مشخصات باتری ربات نائو	۷۷

فصل اول

مقدمه و مروری بر کارهای پیشین

۱-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا با مفاهیم ربات^۱ و ربات دوپا به‌ویژه ربات‌های انسان‌نما آشنا می‌شویم. پس از آن، به معرفی معروف‌ترین ربات‌های انسان‌نما پرداخته‌شده تا سیر پیشرفت در این زمینه نشان داده شود. همچنین، در ادامه اهداف انجام این پایان‌نامه شرح داده‌شده و پس از آن بعضی از مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته و مرتبط با این پایان‌نامه، به صورت جزئی‌تر مورد مطالعه قرار گرفته شده. در انتها، ضمن بیان نوآوری‌های این پایان‌نامه، ساختار تشکیل‌دهنده آن بیان خواهد شد.

۱-۲- ربات

امروزه ربات‌ها در انجام بسیاری از کارها به کمک انسان آمده و در برخی کارها نیز جایگزین آدمی گشته‌اند از جمله: کار در کارخانه، اکتشافات فضائی، جراحی، به‌طور کلی ربات‌ها در کارهایی استفاده می‌شوند که خطرناک بوده (مثل نیروگاه‌های هسته‌ای)، مشکل و تکراری باشند. ایده خلق ربات توسط لئوناردو داوینچی در سال ۱۵۰۰ به شکل ۱ طراحی ساده بیان شد. نخستین بار، واژه ربات در نمایشنامه‌ای در فرانسه توسط کارل چاپک^۲ که خود اهل کشور چک بود، معرفی شده است. در این نمایشنامه موجودات مصنوعی کوچکی از اربابان خود پیروی می‌کردند که در زبان روسی از واژه ربات^۳ برای آن‌ها استفاده کرد که به معنای سخت‌کوش است. طبق تعریف سازمان جهانی استاندارد در سند ۸۳۷۳ ربات: "یک مکانیسم فعال^۴ که دارای حداقل دو محور با یک درجه آزادی و قابل برنامه‌نویسی است که دارای خودمختاری^۵ برای انجام وظایف تعریف‌شده خود است." ربات‌های انسان‌نما سیستم‌های رباتیکی هستند که به انسان‌ها شباهت دارند. آن‌ها بیش از انسان‌های معمولی مانند ربات‌های معمولی مثل بازوهای صنعتی رباتیک هستند. اکثر ربات‌های انسان‌نما بر روی دو پا حرکت می‌کنند. به همین ترتیب، ویژگی‌های دیگر ممکن است شامل بازوها، دست‌ها، سر و چشم‌ها باشد. معرفی تمامی ربات‌های

¹ Robot

² Karel Capek

³ Robota

⁴ Active

⁵ Autonomous

انسان‌نما، مبحث گسترده‌ای است که در اینجا تنها سعی خواهد شد به معروف‌ترین ربات‌ها پرداخته شود.

۱-۲-۱- هوندا

شرکت هوندا^۱ با معرفی ربات انسان‌نمای خود بانام آسیمو^۲، از پیشگامان ساخت ربات انسان‌نما است. شرکت هوندا دارای نسخه‌های مختلفی از ربات انسان‌نما آسیمو می‌باشد که حاصل پژوهش چندین ساله این شرکت در این زمینه می‌باشد، با توسعه گام‌به‌گام توانسته یکی از پیشرفته‌ترین ربات‌های انسان‌نما را به دنیا معرفی کند. شکل (۱.۱)، سیر تکامل ربات آسیمو را نشان می‌دهد. این شرکت اولین ربات دوپای خود را بانام E0 در سال ۱۹۸۶ معرفی کرد و پس از معرفی E6 که آخرین نسل از ربات دوپای سری E بوده است. اولین ربات انسان‌نمای سری P را بانام p1 در سال ۱۹۹۳ رونمایی کرد. سپس تا سال ۲۰۰۰، سه نمونه دیگر از ربات انسان‌نمای خود بانام آسیمو را معرفی کرد. آخرین نسخه این ربات که در سال ۲۰۱۱ معرفی شده، دارای ویژگی‌های اصلی زیر است [۹]:

- ارتفاع ۱۳۰ سانتی‌متر

- وزن ۴۸ کیلوگرم

- سرعت گام برداشتن ۹ کیلومتر بر ساعت

- ۵۷ درجه آزادی

ربات آسیمو با مشخصات بالا، سریع‌ترین ربات انسان‌نما دنیا تا سال ۲۰۱۱ شناخته شده بود و به‌جز دویدن و گرفتن اجسام، توانسته مبتنی بر معیار نقطه گشتاور صفر^۳ بر روی یک‌پا به هوا بپرد.

¹ Honda

² Asimo

³ Zero moment point



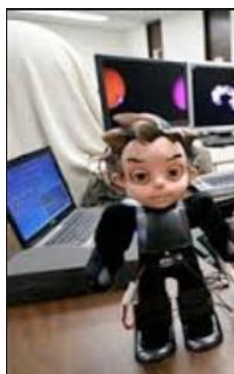
شکل (۱-۱) سیر تکامل ربات آسیمو

۱-۲-۲-ربات‌های انسان‌نمای اندازه متوسط

دسترسی به ربات‌های اندازه بزرگ که در بخش قبل معرفی شدند، یا وجود ندارد و یا هزینه‌بردار است. بنابراین علاوه بر ربات‌های با اندازه بزرگ که ربات‌های با اندازه متوسط ساخته شده که جنبه تحقیقاتی و پژوهشی دارد. از جمله پرکاربردترین و معروف‌ترین این ربات‌ها، می‌توان به سه ربات نائو^۱، زنو^۲ و داروین^۳ اشاره کرد. این ربات‌ها در شکل (۱.۲) نشان داده شده است و از آنجایی که ربات نائو در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، توضیحات کاملی از این ربات در فصل ۲ بیان خواهد شد.



(الف) ربات داروین



(الف) ربات زنو



(الف) ربات نائو

شکل (۲-۱) ربات‌های انسان‌نمای اندازه متوسط

¹ NAO^۲
² ZENO
³ Darwin

۳-۱- مطالعات مرتبط پیشین بر روی ربات انسان نما

اخیراً، ربات‌های انسان‌نما توسعه‌یافته توانسته بسیاری از فعالیت‌های انسانی را تقلید کنند، در نتیجه توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند [۱-۲]. از آنجاکه این ربات‌ها باید در محیط‌های واقعی عمل کنند، لازم است برای این کار ربات‌ها، بسیار نرم و کارآمد باشند. از آنجاکه طبیعت ربات انسان‌نما ناپایدار است، قابلیت بازیابی از اختلالات خارجی غیرمنتظره ضروری است [۳]. به‌عنوان مثال، در زندگی عادی مثلاً در یک اتاق که محیط طبیعی پر از اشیاء و موانع است که ربات با آن‌ها برخورد دارد. سطوح ناهموار پیاده‌روی مانند سطح شیب‌دار و پلکان که ربات باید بتواند روی آن‌ها گام بردارد. حتی اگر محیط کاملاً صاف و بدون موانع باشد [۴]. معیار ساده برای حصول اطمینان از تعادل دینامیکی ربات در طول گام برداشتن همان حفظ نقطه گشتاور صفر یا مرکز فشار (cop)^۱ در داخل محدوده چندضلعی پشتیبانی^۲ است و باید آن را به‌عنوان یک عامل مهم برای کنترل ربات انسان‌نما در نظر گرفت. دو رویکرد اصلی که برای حفظ تعادل ربات انسان‌نما در حضور اغتشاش خارجی استفاده شده: ۱- کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل (MPC)^۳ و ۲- کنترل نقطه جذب^۴ (CP) [۸-۱]. پارشار و همکاران [۲] چند روش مختلف برای بازیابی تعادل ربات انسان‌نما ارائه داده‌شده است که این سیستم توسط الگوریتم کی-مین^۵ آموزش داده می‌شود. با توجه به موقعیت نقطه گشتاور صفر و گشتاور چرخشی بالاتنه (CMP)^۶ برای برقراری پایداری نقطه جذب در موقعیت مطلوب از کنترلر مدل کنترل پیش‌بین استفاده شده است [۳]. علاوه بر این، یی و همکاران [۴] یک استراتژی بهبود بازیابی تعادل سلسله مراتبی پیشنهاد کرده‌اند که قابلیت استفاده برای طیف گسترده‌ای از ربات‌های انسان‌نما است. استفنز، بنجیامین و همکاران حرکت ربات دوپا را روی پاندول معکوس خطی مدل (LIPM)^۷ کرد [۵] که در فضای عمودی و افقی خطی‌سازی شده،

¹ Center of pressure

² support polygon

³ model predictive control

⁴ capture point

⁵ K-means

⁶ centroidal moment pelvic

⁷ Linear inverted pendulum model

سپس این مدل دینامیکی خطی یک‌بعدی برای حرکت ربات انسان‌نما استفاده شده. با در نظر گرفتن گشتاور مفصل مچ پا و محدودیت موقعیت نقطه گشتاور صفر و یا نقطه گشتاور صفر، می‌توان از مدل گاری_میز^۱ استفاده کرد. [۶] گوسامی و همکارانش از مدل گشتاور زاویه‌ای پاندول معکوس (AMPM)^۲ که مدل بهبودیافته مدل پاندول معکوس خطی است که در کارشان استفاده کرده‌اند که با استفاده از گشتاور غیرمترکز زاویه‌ای به مرکز جرم (COM)^۳ تولید می‌شود. هنگامی که یک فشار خارجی به یک ربات انسان‌نما اعمال می‌شود، پاسخ آن را می‌توان به سه استراتژی طبقه‌بندی: (۱) بالانس مرکز فشار، استراتژی مچ پا^۴، (۲) بالانس گشتاور چرخشی بالاتنه، استراتژی مفصل ران^۵ و (۳) استراتژی تغییر نقاط اتکا، گام برداشتن^۶ [۲-۴]. در این راه، رویکرد مدل کنترل پیش‌بین برای بازیابی تعادل توسط استراتژی گام برداشتن با استفاده از مدل کنترل پیش‌بین موردبررسی قرار گرفت [۸-۱۰]. یکی از رویکردهای کارآمد، روش ترکیب‌شده مدل کنترل پیش‌بین و حفظ تعادل الهام گرفته از عوامل زیستی است، افتاب و همکاران [۳]. پرات [۷] نشان داد که نقطه جذب نقطه جذب با تقسیم کردن مرکز جرم دینامیکی به بخش‌های پایدار و ناپایدار کارآمد است. متغیر حالت مربوط به بخش ناپایدار همان نقطه جذب می‌باشد. نقطه جذب مشخص می‌کند چه زمانی و چه جایی یک ربات انسان‌نما باید گام بردارد تا تعادل داشته باشد، باین‌وجود، برای کنترل ثبات ماهیت ناپایدار دینامیکی نقطه جذب نیاز به یک کنترل‌کننده دارد. گوسوامی، همکاران [۱۰] همچنین روش القای گشتاور غیر صفر در موردبررسی مرکز جرم در جهت حفظ تعادل پرداخت. آنها نقطه نرخ تغییرات گشتاور زاویه‌ای صفر (ZRAM)^۷ را موردبررسی قرار دادند. و کابروتویچ برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ معیاری برای راه رفتن ربات به‌صورت پایداری دینامیکی ارائه داد و این معیار را نقطه مونتوم صفر نامید [۱۱]. اگر نقطه گشتاور صفر از محدوده تماسی بین ربات و

¹ Cart_table model

² Angular Momentum inducing inverted Pendulum Model

³ Center Of Mass

⁴ Anke strategy

⁵ Hip strategy

⁶ stepping

⁷ Zero rate of angular momentum

زمین خارج شود، تعادل ربات الزاماً از دست نخواهد رفت؛ اما اگر ربات تعادل خود را از دست داد، حتماً نقطه گشتاور صفر از این محدوده خارج شده. کاتو و تاکانیشی [۱۲] نیز در سال ۱۹۸۴ این معیار را بر روی ربات واقعی پیاده‌سازی نمودند. چند روش برای اندازه‌گیری نقطه گشتاور صفر، وجود دارد که دیرکی از این مدل‌ها با استفاده از یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم می‌توان با داشتن شتاب و موقعیت مرکز جرم محل نقطه گشتاور صفر به دست آید که به آن مدل گاری-میز گفته می‌شود [۱۳]. تا زمانی که مرکز فشار و نقطه گشتاور صفر بر روی باهم انطباق دارند، ربات تعادل خود را حفظ کرده است پس روش آسان‌تر استفاده از حسگرهای نیروی کف پاست. با جایگذاری حداقل چهار حسگر نیرو در هر کف پا، محل نقطه گشتاور صفر را می‌توان به دست آورد. گوسامی [۱۴] معیار پایداری نشانگر چرخش را برای بررسی پایداری ربات انسان‌نما مورد بررسی قرارداد. این معیار اگر نشانگر چرخش پا خارج از بازه تماسی بین ربات و زمین است، پا ربات که با زمین در تماس است دارای شتاب بوده در نتیجه تماس بین ربات و زمین از بین می‌رود. این معیار تنها برای سطوح صاف و بدون اصطکاک کاربرد دارد و ساردین و بزونت [۱۵] برای رباتی که بر روی سطوح غیر صاف انجام عملیات کنند روش محاسبه‌ای ارائه دادند که البته به شرطی که هر دو پا با زمین در تماس باشند. اگر قسمتی از ربات (به جزء پاها) با محیط بیرونی مورد تماس قرار گیرد، معیار نقطه گشتاور صفر دیگر نامعتبر است. برای حل این مشکل، هارادا [۱۶] نقطه گشتاور صفر عام را مورد بررسی قرار داد. در [۱۷] انرژی مداری مدل خطی پاندول معکوس مورد بررسی قرار گرفت و در [۱۸] این‌گونه بیان شده که این انرژی یک معیار برای پایداری ربات است. یامانه و ناکامورا [۱۹] روشی به نام فیلتر دینامیکی^۱ را معرفی کردند که یک بهینه‌ساز خطای بین شتاب واقعی و شتاب مورد اجرا را حداقل می‌کند که حرکات تعیین شده به صورت آفلاین^۲ است.

^۱ Dynamic filter

^۲ offline

۴-۱- مطالعات مرتبط پیشین بر روی ربات نائو

ربات انسان نما نائو مبتنی بر معیار نقطه گشتاور صفر ساخته شده است [۲۰]. در بین تحقیقات اخیر که بر روی این ربات انجام شده می توان به چند مورد اشاره کرد. شریکوف [۲۱] برای بازیابی تعادل این ربات در حال حرکت از کنترل مدل پیش بین بهره جسته و معیار پایداری که در نظر گرفته معیار نقطه گشتاور صفر می باشد؛ که با بهبود سرعت حل معادلات سیستم راه رفتن ربات را بهبود داد. ایمز و همکاران [۲۰] با استفاده از داده های گام برداشتن انسان و الگوسازی از این اطلاعات توانسته اند گام برداشتن ربات نائو به صورت دینامیک و پایدار را بیان کنند. در این پژوهش، نشان داده شد که گام برداشتن ربات مبتنی بر اطلاعات انسان با حرکت در یک مدار تناوبی و پایدار با نقطه ثابت مطابقت دارد. ونک و روفر [۲۲] در این پژوهش با استفاده از روش دینامیک معکوس^۱ و معیار نقطه گشتاور صفر توانستند، برای شوت زدن به توپ توسط ربات نائو راهکار ارائه بدهند. در واقع، برای این امر، مسیرهای از پیش تعیین شده اجرا می شوند که سعی شده روشی مبتنی بر دینامیک معکوس ربات انتخاب شده تا شوت زدن ربات به صورت برخط باشد. آلکاراز جیمز و همکاران [۲۳] بازیابی تعادل ربات نائو در حال گام برداشتن را پیاده سازی کرده اند. در این پژوهش با استفاده از مدل ویبر [۲۴] و دو کنترلر نیز برای زمان بندی گام ها و سرعت زاویه ای ربات را کنترل می کنند، توانسته عملکرد بهینه تری برای این ربات نشان دهند. آلکاراز جیمز و همکاران [۲۵]، در این مطالعات نیز روش دفع اغتشاشات مبتنی بر کنترل پیش بین و انطباق زمان گام استفاده شده. در این پژوهش، سعی شده از کنترل پیش بین و تغییر زمان گام بر اساس سرعت دورانی مرکز جرم، اغتشاشاتی با اندازه محدود دفع شوند. در واقع، اگر اغتشاشات به اندازه ای بزرگ باشد که ربات سطح تماس کامل یک پا را از دست بدهد، کارآمد نخواهد بود.

^۱ Inverse dynamic

۵-۱- اهداف پایان نامه

تحقیق و پژوهش در زمینه بازیابی تعادل ربات‌های انسان‌نما، یکی از حوزه‌هایی است که روی ربات‌های انسان‌نما در دو دهه اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از موضوعات مهم در این حوزه، کنترل پایداری این نوع ربات‌ها و بهبود بازیابی تعادل در صورت بروز اغتشاشات خارجی است. موضوع اصلی این پژوهش، بهبود بازیابی تعادل ربات انسان‌نما در حضور اغتشاشات خارجی می‌باشد. در این پژوهش، تلاش بر این بوده تا ضمن معرفی و ارزیابی کلی روش‌ها یکی از کارآمدترین روش‌ها برای پایداری و بهبود بازیابی تعادل را با توجه به مشخصات و محدودیت‌های ربات نائو استفاده شود. مهم‌ترین اهداف مورد توجه در این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. ارائه یک مدل دینامیکی ساده و کارا برای ربات نائو
۲. بررسی انواع معیارها و استراتژی‌های مربوط به ربات‌های انسان‌نما و پیشنهاد یک استراتژی کارآمد برای مقابله با اغتشاشات خارجی برای ربات نائو
۳. بهبود بازیابی تعادل ربات انسان‌نمای نائو در حضور اغتشاشات خارجی با ارائه یک تابع هزینه کارآمد و حل مسئله کنترلی از طریق روش مدل کنترل پیش‌بین و ارزیابی روش از طریق شبیه‌سازی در محیط ویباتز^۱.
۴. طراحی و ساخت المانی کمکی برای کف پای نائو برای بهبود ارزیابی مرکز فشار و بهبود بازیابی تعادل ربات نائو.

^۱ Webots

فصل دوم

ربات نائو و معادلات حاکم بر آن

۱-۲- پیشگفتار

در این فصل، سعی بر این است تا ربات نائو به صورت جامع و کامل معرفی و مورد مطالعه قرار گیرد؛ زیرا با توجه به استفاده این پلتفرم^۱ بین‌المللی در این مطالعه، شناخت دقیق تجهیزات و کاربرد هر کدام، لازم و مهم دیده شده. همچنین، با توجه به استفاده از مدل ساده‌سازی شده این ربات در فصل ۳ لازم دیده شد تا اطلاعات کامل و مدون این فصل در پیوست الف این مطالعه آورده شود.

۲-۲- معرفی ربات نائو

ربات نائو یکی از ربات‌های انسان‌نما شناخته شده برای تحقیق و توسعه است. شرکت فرانسوی آلدباران رباتیکز^۲ آن را برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ معرفی کرد. چهار مدل از نائو وجود دارد که در ساختار متفاوت است، مانند اچ-۲۵، اچ-۲۱، تی-۲۱ و تی-۲۵ در شکل (۱-۲) نمایش داده شده است. مدل H یک بدن انسان کامل است، در حالی که مدل T تنها از قسمت‌های بدن فوقانی آن ساخته شده است. ربات مدل اچ-۲۵ دارای ۲۵ درجه آزادی است، در حالی که اچ-۲۱ فقط ۲۱ درجه آزادی دارد و نسخه‌های مختلف از هر مدل وجود دارد. در این مطالعه، از یکی از جدیدترین آن استفاده شده است نسخه مدل اچ-۲۱ نسخه 4 (V4) است. وزن آن ۴.۳ کیلوگرم است و ارتفاع آن ۵۸ سانتی‌متر است. نائو دارای دو دوربین بین‌چشمی به صورت عمودی، چهار میکروفون در وسط و اطراف سر است. دارای بلندگو با صدای بلند در گوش‌ها می‌باشد. ربات نائو مجهز به حسگرهای مختلفی است که امکان دریافت بازخورد از محیط اطراف را به آن داده مانند، چهار حسگر فشار مقاومتی (FSR)^۳ در پایین هر پا که با تغییر مقاومت میزان فشار اعمال شده به این ربات را محاسبه می‌کند همچنین دارای دو فرستنده و گیرنده سونار واقع سینه این ربات است. علاوه بر این، یک واحد اندازه‌گیری داخلی (IMU)^۴ در وسط تنه جایگذاری شده که شامل یک ژيروسکوپ سه محور و شتاب سنج سه محور است. علاوه بر این، سه حسگر خازنی به سر

¹ platform

² Aldebaran Robotics

³ Force Sensor Resistance

⁴ Internal Measurement Unit

و هر دست برای حس کردن لمس وجود دارد. جلوی هر پا دارای دو حسگر ضربه است که به شکل سوئیچ روشن / خاموش عمل می‌کند و برای تشخیص برخورد با اشیا کاربرد دارد. این ربات با استفاده از یک پردازنده Atom 1.6 GHz تحت لینوکس کار می‌کند سیستم‌عاملی با مجموع ۹ گیگابایت حافظه داخلی. باتری از جنس لیتیوم که به آن اجازه می‌دهد تا برای ۶۰ الی ۹۰ دقیقه کار کند البته بسته به وظایف تعریف‌شده. تمام مشخصات سخت‌افزار ذکر شده نائو برای تحقیقات مختلف بسیار مطلوب است.

۳-۲- انواع ربات نائو

شرکت آلدبران رباتیکز نسخه‌های مختلفی از این ربات را ارائه می‌دهد که عبارت‌اند از:

نائو تی-۲۱^۱: این نسخه از ربات نائو فقط بالاتنه و سر دارد که در شکل (۱-۲) قسمت (الف) نشان داده شده است و تنها برای تحقیقات هوش مصنوعی و مطالعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶].

۲. نائو تی-۲۵^۲: این نسخه علاوه بر بالاتنه و سر دارای دو دست است که در شکل (۱-۲) قسمت (ب) نمایش داده شده. این مدل علاوه بر مطالعات هوش مصنوعی قادر به جابه‌جایی اجسام نیز است [۲۶].

۳. نائو اچ-۲۱^۳: ربات‌های نائو سری اچ برای مسابقات روبوکاپ و تحقیقات مرتبط با ربات‌های انسان‌نما معرفی شده است. این ربات در شکل (۱-۲) قسمت (ج) نمایش داده شده، دارای ۲۱ درجه آزادی است و علاوه بر کاربردهای سری قبلی، توانایی حرکت بر روی دوپا را دارد. این نسخه علاوه بر کارایی‌های سری تی برای راه رفتن و شرکت در مسابقات روبوکاپ مناسب است [۲۶].

۴. نائو اچ-۲۵^۴: این مدل از ربات مانند سری اچ-۲۱ بوده که در شکل (۱-۲) قسمت (د) نمایش داده شده است، با این تفاوت که چهار درجه آزادی بیشتر در انگشتان دست ربات تعبیه شده است. این آخرین نسخه از ربات نائو بوده که نسبت به نسخه‌های قبلی پیشرفته‌تر بوده. البته نسخه‌های ۳/۳، ۴ و ۵ برای این ربات ارائه شده است [۲۶].

¹NAO T-21

²NAO T-25

³NAO H-21

⁴NAO H-25



(ب) نائو تی-۲۵



(الف) نائو تی-۲۱



(د) نائو اچ-۲۵



(ج) نائو اچ-۲۱

شکل (۱-۲) انواع نسخه‌های ربات‌های نائو ساخت شرکت آلدبارن ربات یکر [۲۶].

دسته‌بندی دیگری برای ربات‌های نائو سری اچ وجود دارد که بدین شکل است.

۱. پلتفرم استاندارد روبوکاپ^۱: این مدل از سری اچ-۲۱ بوده و برای شرکت در مسابقات لیگ استاندارد ربات‌های انسان‌نمای روبوکاپ ساخته شده است.

۲. پلتفرم استاندارد دانشگاهی^۲: این مدل از سری اچ-۲۵ بوده و مجهز به امکانات پیشرفته هست به همین دلیل قیمت آن بسیار بیشتر از نسخه روبوکاپ است. مهم‌ترین ویژگی‌های نسخه اچ-۲۵ نسبت به نسخه اچ-۲۱، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد بدین شرح است:

(الف) با توجه به داشتن چهار درجه آزادی در انگشتان دست‌ها توانایی نگه‌داشتن اجسام را داراست.

¹ Robocup standard platform

² Academic standard platform

(ب) دارای حسگرهای لمسی^۱ بر روی سر و دست.

(ج) با توجه به داشتن دو ماژول فرستنده/گیرنده فرسوخ^۲ می‌تواند اطلاعات را تبادل کند.

(د) دو میکروفن نیز بر روی سر آن تعبیه شده تا با دقت بیشتر فرمان‌ها صوتی را دریافت کند.

۲-۴- مشخصات نرم‌افزاری ربات نائو

سیستم‌عامل جنثو^۳ سیستم‌عامل ربات نائو است که یک نسخه انحصاری از سیستم‌عامل لینوکس^۴، به نام اپن نائو^۵ است. با اتصال به واحد ارتباطی پروتکل تبادل فایل^۶، محیط شل^۷ می‌توان به فایل‌های سیستم‌عامل دسترسی پیدا کرد. علاوه بر موارد ذکر شده این شرکت برای دسترسی آسان‌تر به منابع سیستمی، مقادیر حسگرها، ارسال فرمان‌ها و دریافت اطلاعات و همچنین برنامه‌ریزی ربات نرم‌افزارهای را ارائه داده که مورد بررسی قرار می‌دهیم:

۱. برنامه کروگراف^۸: این نرم‌افزار با برنامه‌ریزی ربات نائو با استفاده از کتابخانه‌های گرافیکی برنامه‌نویسی و اجرای یک پروژه را بدون نیاز به دانش برنامه‌نویسی حرفه‌ای میسر می‌سازد. یک نمای کلی از محیط برنامه چورگراف در شکل (۲-۲) نمایش داده شده. البته با کمک زبان برنامه‌نویسی پایتون^۹، می‌توان با جزئیات بیشتر و به صورت حرفه‌ای در این محیط برنامه‌نویسی کرد.

¹ Touch sensor

² Infrared

³ Gento operation system

⁴ linux operation system

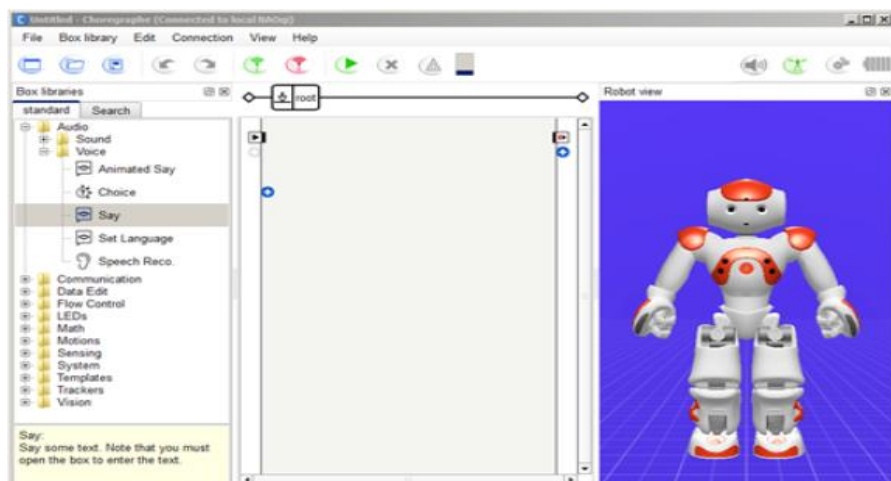
⁵ Open NAO

⁶ Application programming interface

⁷ Shell

⁸ choregraphe

⁹ Python programming language



شکل (۲-۲) برنامه چورگراف، برای برنامه‌نویسی آسان ربات نانو [۲۶].

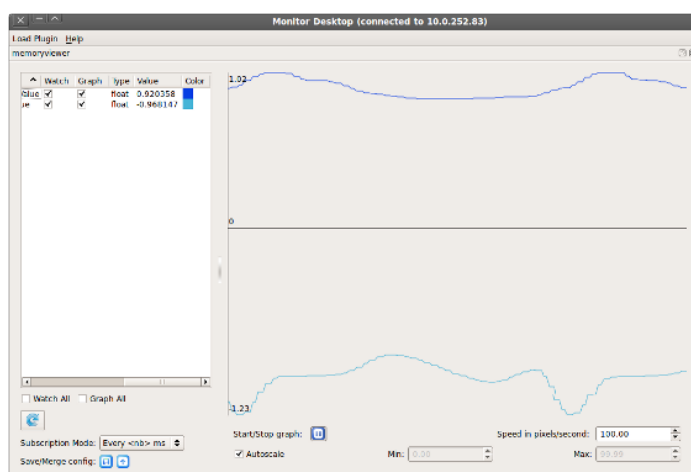
۲. نرم‌افزار مانیتور^۱: شرکت الدباران این ابزار را تنها برای نمایش وضعیت حسگرها، دوربین‌ها و عملگرها ارائه داده ولی امکان ارسال فرمان‌ها را ندارد. در شکل (۲-۳) محیط این ابزار را نشان داده شده است. برای این ربات امکان برنامه‌نویسی با زبان‌های زیر امکان‌پذیر است:

- C++^۲
- پایتون
- جاوا^۳

¹ Monitor software

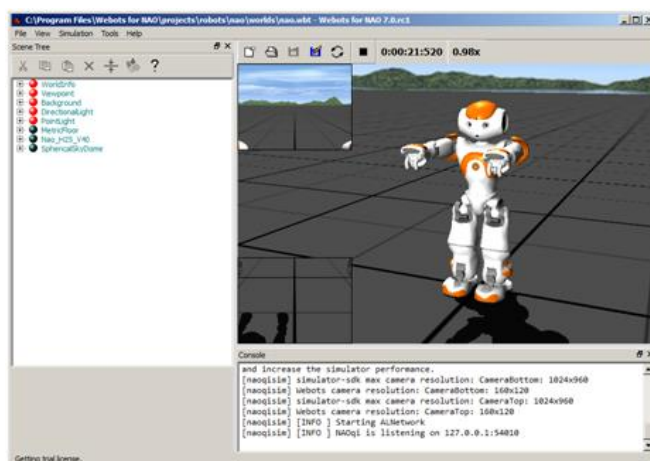
² C programming language

³ Java programming language



شکل (۳-۲) برنامه مانیتور، برای مشاهده اطلاعات حسگرها و عملگرهای ربات ناؤ [۲۶].

۳. وی باتز: یکی از نرم افزار شبیه ساز دینامیکی ربات ناؤ نرم افزار وی باتز برای ناؤ است که در شکل (۲-۴) نمایش داده شده است، این نرم افزار ایمنی برنامه های نوشته شده را تأیید می کند تا برای پیاده سازی اطمینان حاصل شود تا ربات دچار افتادن یا ضربه نشود. این شبیه ساز دینامیکی به لحاظ ساختاری و عملکردی شبیه به ربات ناؤ است. علاوه بر شبیه سازی درجات آزادی و ساختار دینامیکی مجموعه حسگرها و عملگرهای ربات واقعی نیز شبیه سازی شده.



شکل (۴-۲) محیط برنامه وی باتز برای ناؤ، شبیه ساز ربات ناؤ [۲۶].

فصل سوم

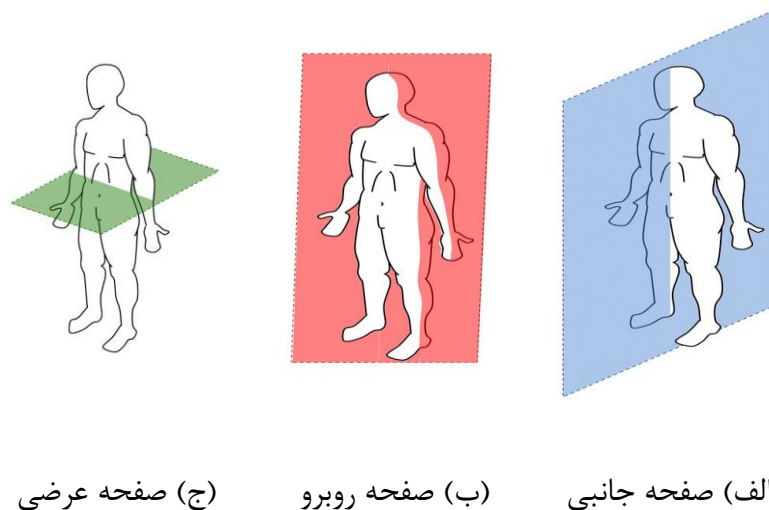
مدلسازی و بررسی معیارها و مدل‌های پرکاربرد

۱-۳- انواع مدل‌های ربات انسان‌نما و کاربرد آنها

یک مدل کامل از ربات نانو برای انجام شبیه‌سازی و تحلیل دینامیکی ربات لازم است. برای تحلیل پایداری و راه رفتن ربات انسان‌نما نیاز به تمامی درجات آزادی ربات نیست. باید حداقل امکان سرعت محاسباتی الگوریتم‌های کنترلی نزدیک به زمان واقعی^۱ باشد و هزینه محاسباتی در کمترین حالت باشد. به همین دلیل، مدل‌های ساده‌سازی شدای برای تحلیل این مدل مسائل ارائه شده که مدل‌های صفحه‌ای نیز یکی از پرکاربردترین آنها است.

مدل‌های صفحه‌ای:

اولین بار مطالعات در زمینه مدل‌های صفحه‌ای در حوضه بیومکانیک^۲ مورد بحث قرار گرفت که طی این پژوهش برای حرکت انسان و یا ربات انسان‌نما سه صفحه، تعریف شده که در شکل (۱-۳) نمایش داده شده است، [۲۷]:



شکل (۱-۳) سه صفحه اصلی که ربات در آن حرکت می‌کند [۲۸].

^۱ Real time

^۲ biomechanics

۱. صفحه جانبی^۱: بدن توسط این صفحه به دو قسم راست و چپ تقسیم می‌شود. با توجه به مشخصات ربات نائو مدل صفحه جانبی آن دارای ۱۰ درجه آزادی است.

۲. صفحه روبرو^۲: این صفحه، بدن را به دو قسمت جلو و پشت تقسیم می‌کند. مدل صفحه روبروی نائو دارای ۶ درجه آزادی است.

۳. صفحه عرضی^۳: این صفحه، بالاتنه و پایین‌تنه را از هم جدا کرده و هر دو صفحه بر یکدیگر عمود هستند.

البته در این مدل‌ها از اثر نیروهای کریولیس^۴ که ناشی از اثر دو صفحه بر هم می‌باشند صرف‌نظر می‌شود و تا زمانی که حرکت ربات به آرامی و با سرعت کم باشد این مدل‌ها معتبر می‌باشند. با توجه به ساختار غیرخطی ربات دوپا، مطالعه تعادل در حرکت کار بالارزشی است. ضروری است که مفاهیم ارزیابی پایداری را درک کنیم تا قادر به بهبود پایداری حرکت باشیم. در این فصل، مفاهیم مختلف مربوط به تعادل حرکت، مانند مرکز فشار، نقطه گشتاور صفر، چندضلعی پشتیبانی و مرکز جرم را معرفی می‌شود. تمام این مفاهیم در این مطالعه چندین بار ظاهر شده در نتیجه بسیار مهم دیده شده که خواننده با آن آشنا شود تا بتواند از کار ما مطلع شود. معیار پایداری نقطه گشتاور صفر محبوب‌ترین روش است و توسط ووکابوریچ معرفی شد [۳۱]. با استفاده از این رویکرد، اگر نقطه گشتاور صفر در داخل حوزه چندضلعی پشتیبانی باشد، ربات در تعادل باقی می‌ماند. علاوه بر این، تصویر مرکز جرم بر روی زمین شیوهی مطمئن برای پایداری ربات در حالت ثابت است. فاصله نقطه گشتاور صفر و تصویر مرکز جرم از زمین از لبه چندضلعی پشتیبانی می‌تواند برای ارزیابی پایداری دینامیکی و استاتیک ربات استفاده شود. یکی

¹ Sagittal plane

² Frontal plane

³ Transverse plane

⁴ coriolis

از معیارهای که قدرت تمیز دادن استفاده از کدام استراتژی را دارد نقطه جذب است که در سال ۲۰۰۶ توسط جری پرت و همکاران معرفی شد [۳۳].

۲-۳- معیارها

۱-۲-۳- مرکز جرم

تعریف فیزیکی مرکز جرم برای ربات جرم توزیع شده منحصر به فرد است، نقطه‌ای که موقعیت نسبی وزنی جرم توزیع شده به صفر می‌رسد [۲۹]؛ به عبارت دیگر، این یک نقطه‌ای است که تمام جرم جسم را می‌توان متمرکز فرض کرد. مرکز جرم (COM) برای تجسم حرکت یک شی چند لینیکی مانند یک ربات انسان‌نما مفید است. همچنین برای یک سیستم ساختاری پیچیده استفاده از قوانین فیزیک نیوتن ضروری است.

مرکز جرم معادل ذره‌ای از یک شی است که برای کاربرد قوانین حرکت لازم است [۲۹]. با توجه به ساختار پیچیده ربات‌های انسان‌نما و محاسبات گران برای پیدا کردن موقعیت هر یک از لینک‌های ربات در طول حرکت، استفاده از مرکز جرم به جای آن آسان‌تر است. در رابطه با جرم‌های توزیع شده دینامیکی ربات متحرک، مفید است که مرکز جرم را به عنوان نقطه مرجع برای محاسبات مکانیکی در نظر بگیریم. مرکز جرم یک ربات چند لینیکی سه بعدی را می‌توان با استفاده از معادلات (۱.۳) محاسبه کرد.

$$x = \sum_{i=1}^N \frac{m_i X_i}{M}, y = \sum_{i=1}^N \frac{m_i Y_i}{M}, z = \sum_{i=1}^N \frac{m_i Z_i}{M} \quad (1.3)$$

جایی که x ، y و z مختصات دکارتی سه‌بعدی مرکز جرم است. X_i, Y_i, Z_i مختصات دکارتی مرکز جرم لینک i ام است. m_i نشان‌دهنده جرم لینک i ام می‌باشد، M مجموع جرم ربات است و N تعداد لینک‌های ربات است.

۲-۲-۳- تصویر مرکز جرم روی زمین

تصویر مرکز جرم روی زمین (GCOM)^۱ به‌عنوان نقطه‌ای که خط عمودی از مرکز جرم را روی زمین تصویر می‌کند تعریف شده است. تصویر مرکز جرم از زمین برای ارزیابی پایداری استاتیکی^۲ راه رفتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصویر مرکز جرم از زمین افقی برای یک سیستم چند لینک با معادلات (۲.۳) و (۳.۳) ارائه می‌شود.

$$x_{GCoM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_{ci}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2.3)$$

$$y_{GCoM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_{ci}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2.3)$$

m_i نشان‌دهنده جرم لینک i است، x_{ci} و y_{ci} موقعیت مرکزی جرم برای لینک i ام است.

۲-۲-۳- نقطه گشتاور صفر

نقطه گشتاور صفر نقطه‌ای روی زمین است که در آن مجموع گشتاورهای تولیدشده به دلیل گرانش و اینرسی صفر است [۳۰]، [۳۱]. اینرسی و موقعیت لینک‌های ربات که در طول حرکت تغییر می‌کند روی موقعیت نقطه گشتاور صفر تأثیرگذار است. نقطه گشتاور صفر یک ربات چند لینک می‌تواند با معادله (۴.۳) [۳۲]. محاسبه شود، جایی که p_x و p_y موقعیت نقطه گشتاور صفر در دامنه دکارتی

¹ The Ground Projection of the Center of Mass

² Static stability

$$p_x = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{i_y} \ddot{\alpha}_{i_y}}{\sum_{i=1}^n (\ddot{z}_i + g) m_i} \quad (4.3)$$

$$p_y = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{i_y} \ddot{\alpha}_{i_y}}{\sum_{i=1}^n (\ddot{z}_i + g) m_i}$$

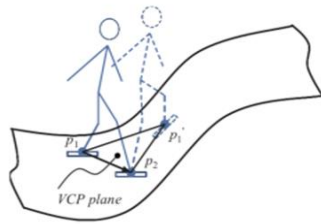
در این معادله x_i, y_i, z_i جهت‌های مرکز جرم از لینک i ام است m_i جرم لینک i ام است، g ثابت گرانشی است، I_{i_y} و $\ddot{\alpha}_{i_y}$ به ترتیب گشتاور اینرسی و جابجایی زاویه‌ای در محور x است. نقطه گشتاور صفر نقطه‌ای است که نیروی واکنش در تماس با زمین هیچ گشتاوری را در جهت افقی تولید نمی‌کند، یعنی گشتاورهای اینرسی^۱ و گرانشی منجر به گشتاور خالص صفر می‌شود. اصطلاح نقطه گشتاور صفر در دنیای رباتیک پرکاربرد و ضروری است. در بخش‌های بعدی، ارتباط نقطه گشتاور صفر با پایداری دینامیکی ربات توضیح داده می‌شود.

۳-۲-۴- نقطه گشتاور صفر توزیع شده

نقطه گشتاور صفر توزیع شده (EZMP)^۲ توسط سان و همکاران [۳۳] پیشنهاد شده است. تحلیل نقطه گشتاور صفر ربات زمانی که پاهای ربات در تماس با سطوح مختلف در مکان‌های مختلف مانند پست و بلندی کارآمد نیست. نقطه گشتاور صفر توزیع شده به‌عنوان نقطه‌ای در یک سطح تماس مجازی (V) نقطه جذب) در سطح مجازی دلخواه با شیب محدود تعریف شده است [۳۳]. نقطه گشتاور صفر توزیع شده در تعادل ربات دو پا که در محیط‌های پیچیده و خشن راه می‌رود مفید است. علاوه بر این، هنگامی که سطح کف صاف است، نقطه گشتاور صفر توزیع شده نقطه مشابه نقطه گشتاور صفر است. شکل (۳-۲) مفهوم V نقطه جذب را نشان می‌دهد.

^۱ Inertia torque

^۲ Extended Zero Moment point



شکل (۲-۳) مفهوم V نقطه جذب را نشان می‌دهد [۳۹].

۳-۲-۵- نقطه گشتاور صفر موهومی

نقطه گشتاور صفر موهومی (FZMP)^۱ نقطه گشتاور صفرای است که خارج چندضلعی پشتیبانی قرار دارد. اگر نقطه گشتاور صفر به لبه‌های چندضلعی برسد، در واقع به حاشیه پایدار نزدیک شده. با این حال، اگر نقطه گشتاور صفر در خارج از چندضلعی پشتیبانی شد، آن را نقطه گشتاور صفر نقطه گشتاور صفر موهومی می‌شود. نقطه گشتاور صفر موهومی در تحلیل افتادن ربات و همچنین برای حرکت در سطوح اصطکاک کم استفاده می‌شود. کاتیجا و همکاران با استفاده از نقطه گشتاور صفر موهومی می‌توان حرکت ربات دو پا را در سطوح اصطکاک پایین تحلیل کرد [۱۳].

۳-۲-۶- مرکز فشار

مرکز فشار (COP) را می‌توان به‌عنوان نقطه‌ای در زمین تعریف کرد که در آن نیروی واکنش زمین به وجود می‌آید [۳۲]. مرکز فشار نیز نقطه‌ای است که گشتاور حاصل آن توسط نیروهای اینرسی و گرانشی زمین در محور افقی صفر است [۱۴]. در حالت ساده، مرکز فشار توزیع فشار متوسط در سطح است. اگر ربات متعادل باشد، مرکز فشار و نقطه گشتاور صفر یک نقطه را نشان می‌دهد. دو نوع نیرو وجود دارد که بر ربات تأثیرگذار است؛ نیروهای که توسط تماس با سطح می‌باشد و نیروهای که بدون تماس می‌باشد. مرکز فشار مربوط به نوع اول است، در حالی که نقطه گشتاور صفر با دوم ارتباط دارد [۱۵]. تفاوت اصلی بین مرکز فشار و نقطه گشتاور صفر این است که مرکز فشار هرگز منطقه که تحت پوشش

^۱ Fictitious Zero moment point

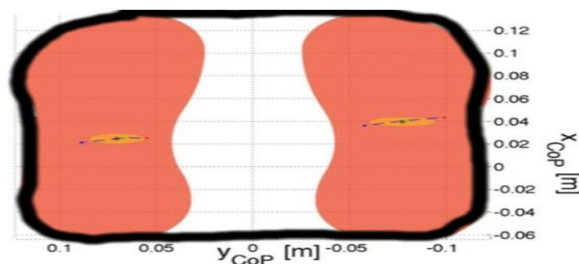
پاهای ربات می‌باشد را ترک نمی‌کند، درحالی‌که نقطه گشتاور صفر می‌تواند به‌طور موقت ترک این منطقه را ترک کند. مرکز فشار یک ربات چند لینکی را می‌توان با استفاده از معادله (۵.۳) محاسبه کرد [۳۲].

$$OP = \frac{\sum_{i=1}^N q_i F_{ni}}{\sum_{i=1}^N F_{ni}} \quad (5.3)$$

در این معادله OP، برداری از مبدأ سیستم مختصات O با موقعیت مرکز فشار است، q_i بردار نقطه‌ای است که نیروی F_{ni} عمود بر سطح در آن وجود دارد.

۳-۲-۷- ناحیه‌ی چندضلعی پشتیبانی

بسیاری از تکنیک‌های اندازه‌گیری پایداری، از راهبرد ناحیه پشتیبانی پا (کف پا) استفاده می‌کنند که به‌عنوان ناحیه‌ی چندضلعی پشتیبانی شناخته می‌شود [۳۲]. چندضلعی پشتیبانی یا تحت پوشش یک پا و یا ناحیه محدبی از سطح دو پا مورد استفاده قرار می‌گیرد. پایداری دینامیکی و استاتیک می‌تواند بر اساس فاصله یک نقطه خاص به مرز منطقه پشتیبانی باشد. اندازه چندضلعی پشتیبانی نسبتاً با پایداری ربات مرتبط است. رباتی با پاهای بزرگ راحت‌تر در حالت تعادل باقی می‌ماند. علاوه بر این، ربات انسان‌نما در ناحیه پشتیبانی دوگانه در مقایسه با پشتیبانی تکی مقاومت بیشتری دارد، در نتیجه حوزه چندضلعی پشتیبانی دوگانه مقاوم‌تر است. شکل (۳-۳)، چندضلعی پشتیبانی را برای ربات انسان‌نمای نائو در ناحیه پشتیبانی دوگانه نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳) چندضلعی پشتیبانی را برای ربات انسان‌نمای نائو.

۳-۲-۸- پایداری استاتیکی و دینامیکی

منحنی دو پا نشان‌دهنده تعادل استاتیکی می‌باشد حال اگر خط گرانشی مربوط به مرکز جرم از ناحیه محدب نشان داده شده و ناحیه پشتیبانی بیرون نیاید وضعیت در حالت تعادل می‌باشد [۱۰]؛ به عبارت دیگر، ربات دوپا زمانی تعادل استاتیکی خوبی دارد که تصویر مرکز جرم از زمین در داخل چندضلعی پشتیبانی باشد. هنگامی که ربات در حال حرکت نیست، اگر تصویر مرکز جرم از زمین ناحیه پشتیبانی چندضلعی را ترک کند، یک گشتاور روی پای پشتیبانی به وجود می‌آید که سبب افتادن ربات می‌شود. حاشیه‌ی پایداری استاتیکی با اندازه‌گیری فاصله تصویر مرکز جرم از زمین از لبه ناحیه پشتیبانی چندضلعی به دست می‌آید در نتیجه فاصله اندازه‌گیری به‌طور مستقیم با پایداری استاتیک مرتبط است.

با این حال، وضعیت برای پایداری دینامیکی متفاوت است، زیرا ممکن است با یک فشار (اغتشاش) از روبرو تصویر مرکز جرم از زمین از ناحیه چندضلعی پشتیبانی خارج شود زمانی که ربات در ناحیه پشتیبانی تکی باشد و باعث افتادن ربات شود. زمانی می‌توان گفت که ربات پایداری دینامیکی دارد که نقطه گشتاور صفر درون چندضلعی پشتیبانی باقی بماند. این معیار پایداری تضمین می‌کند که ربات در تعادل باقی می‌ماند و در هنگام حرکت نمی‌افتد. پایداری دینامیکی ربات با اندازه‌گیری فاصله نقطه گشتاور صفر با مرز چندضلعی پشتیبانی قابل تشخیص است. فاصله اندازه‌گیری ارتباط مستقیمی با حاشیه پایداری دینامیکی دارد. این مکانیسم می‌تواند برای ارائه فیدبک به ربات در مورد وضعیت تعادل آن استفاده شود. یک نقطه ضعف در استفاده از این ارزیابی پایداری این است که آن را نمی‌توان بین وضعیت پایداری حاشیه‌ای و ناپایدار تشخیص داد، زیرا در هر دو مورد نقطه گشتاور صفر در مرز چندضلعی قرار دارد [۳۲].

۹-۲-۳- نقطه جذب

نقطه جذب در واقع نقطه‌ای است روی زمین که در آنجا قادر است حرکت پایدار و مداوم از خود نشان دهد. برای کاهش هزینه محاسباتی، رابطه ساده‌تری بر اساس یک مدل ساده‌شده استفاده می‌شود [۳۳]. می‌توان با استفاده از انرژی مداری ربات نقطه جذب را به دست آورد. بر این اساس با توجه به مدل ساده‌سازی شده تمام انرژی مداری ربات در نقطه جذب صفر خواهد بود [۳۳]. حال می‌توان به نحوه محاسبه نقطه جذب پرداخت. انرژی مداری مدل ساده‌شده E_{lip} در راستای y به شکل زیر قابل تعریف است:

$$E_{lip} = \frac{1}{2} \dot{y}^2 - \frac{g}{2z_c} y^2 \quad (۶.۳)$$

همان‌گونه که پیداست، مقدار این انرژی به‌شتاب، ارتفاع مرکز جرم ربات و موقعیت مرکز جرم وابسته هست. حال با توجه به تعریف نقطه جذب، مقدار انرژی مساوی صفر باید باشد، یعنی:

$$E_{lip} = 0 \quad (۷.۳)$$

با جایگذاری در (۶.۳) و حل آن، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{1}{2} \dot{y}^2 = \frac{g}{2z_c} y^2 \quad (۸.۳)$$

حال دیگر رابطه به‌سادگی حل‌شده و حاصل برابر است با:

$$y = \dot{y} \sqrt{\frac{z_c}{g}} \quad (۹.۳)$$

$$y_{cp} = y \quad (۱۰.۳)$$

در نتیجه، در صورت بروز اغتشاش ربات باید در محل نقطه جذب باشد تا حرکت پایدار خود را حفظ کند:

$$y_{next\ step} = y_{cp} \quad (۱۱.۳)$$

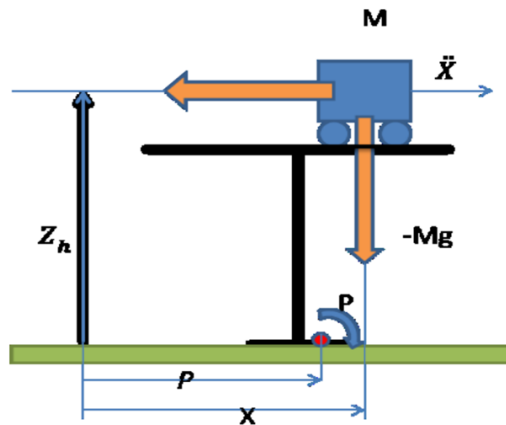
می‌توان از این معیار نیز برای انتخاب استراتژی بین گام برداشتن و دیگر استراتژی‌ها استفاده کرد. در نتیجه، اگر نقطه جذب در بین دو پا باشد، ربات دیگر نیاز به گام برداشتن ندارد و باید از استراتژی‌های دیگر استفاده کرد.

۳-۳- بررسی مدل‌های پر کاربرد

در این بخش، طبقه‌بندی‌های مختلف حرکتی ربات انسان‌نما را بررسی و مقایسه شده است. در این مطالعه، از رویکرد بازیابی تعادل مبتنی بر مدل استفاده شده است. معیار پایداری نقطه گشتاور صفر بازیابی شده است و توضیح دقیق درباره این که چگونه این معیار می‌تواند تعادل فیزیکی ربات را تضمین کند. همچنین محبوب‌ترین مدل‌های فیزیکی را که می‌توان برای ساده‌سازی دینامیک ربات استفاده کرد و همچنین راه‌حل‌های محاسباتی امکان‌پذیر را مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده که گشتاور زاویه‌ای نقش مهمی در پایداری ربات‌های انسان‌نما دارد و مدل که اجازه می‌دهد تا تغییرات گشتاور زاویه‌ای در طول حرکت بررسی شود ارائه شده است.

۳-۳-۱- مدل گاری-میز

مدل گاری - میز یک مدل فیزیکی است که دینامیک ربات را ساده کرده و یک سیستم را ایجاد می‌کند که رابطه ریاضی بین موقعیت مرکز جرم و نقطه گشتاور صفر را نشان می‌دهد. از این مدل می‌توان برای راه رفتن ربات انسان‌نما در صفحه پشتیبانی تکی استفاده کرد. این مدل فرض می‌کند همه‌ی جرم مثل یک گاری و پای پشتیبان ربات را بدون جرم فرض می‌کند. این فرض‌ها دور از واقعیت هستند، اما هنوز هم می‌تواند تقریب خوبی باشد زیرا بیشتر جرم ربات در تنه متمرکز شده است اثرات جرم پا در مقایسه با تنه کوچک است. اساس این مدل مبتنی بر پشتیبانی از مرکز جرم یک جسم می‌باشد و نقطه گشتاور صفر می‌تواند در پا حرکت کند که توسط میزی که با کف تماس دارد مدل شده است. در طی حرکت، مرکز جرم در طول هر دو پا حرکت می‌کند. اگر موقعیت مرکز جرم در امتداد یک پا بیش از منطقه پشتیبانی شده باشد، یک گشتاور افقی بر روی محور اعمال می‌شود و میز سرازیر می‌شود. شکل (۳-۴) یک دید کلی از مدل ارائه می‌دهد.



شکل (۴-۳) مدل گاری - میز [۳۲].

Z_h و x نشان‌دهنده موقعیت مرکز جرم در صفحه x - Z هست. \ddot{x} و g به ترتیب نشان‌دهنده مرکز جرم و شتاب گرانشی هستند. T_p گشتاور نوک در اطراف مرکز فشار است، و جرم مرکز جرم است. گشتاور در اطراف نقطه P می‌تواند با استفاده از معادله (۱۲.۳) محاسبه شود.

$$T_p = M_g(x - P) - M\ddot{x} Z_h \quad (12.3)$$

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، معیار پایداری دینامیکی نیاز به گشتاوری در نقطه گشتاور صفر دارد که برابر با صفر باشد. اگر $OT_p = 0$ در معادله (۱۲.۳)، معادله (۱۳.۳) و (۱۴.۳) تکرار نقطه گشتاور صفر را در محور x و y توصیف می‌کند.

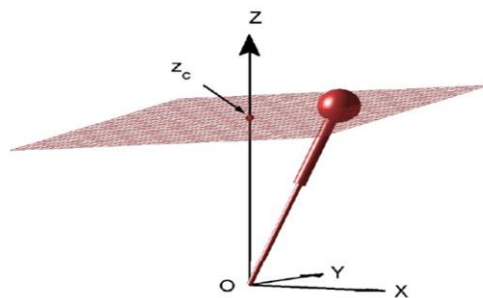
$$P_x = x - \frac{Z_h}{g} \ddot{x} \quad (13.3)$$

$$P_y = y - \frac{Z_h}{g} \ddot{y} \quad (14.3)$$

مدل گاری و میز مرکز جرم را در یک صفحه تنها توضیح می‌دهد و دو مدل گاری-میز افزایشی موردنیاز برای توصیف حرکت ربات در فضای سه‌بعدی موردنیاز است. مدل گاری - میز به تغییرات گشتاور زاویه‌ای در مرکز جرم، ارتباط ندارد.

۲-۳-۳-مدل پاندول معکوس خطی

مدل پاندول معکوس خطی یکی دیگر از مدل‌های فیزیکی است که می‌توان برای حرکت جنبشی ربات مورد استفاده قرار داد. این مدل یک مدل گاری و میز توزیع شده است و معادلات مشابه دارد. همانند مدل گاری و میز، مدل پاندول معکوس خطی نیز ربات را به عنوان یک نقطه‌ی جرمی در مرکز جرم فرض می‌کند. این حرکت آونگ را به محور افقی بدون حرکت عمودی محدود می‌کند نتایج در معادلات حالت فضای خطی تحلیل می‌شود. شکل (۳-۵) یک دید کلی از مدل ارائه می‌دهد. مدل پاندول معکوس خطی فرض می‌کند که نقطه گشتاور صفر در مبدأ O است که به میچ پا ربات مربوط است و گشتاور میچ پا صفر است [۳۴].



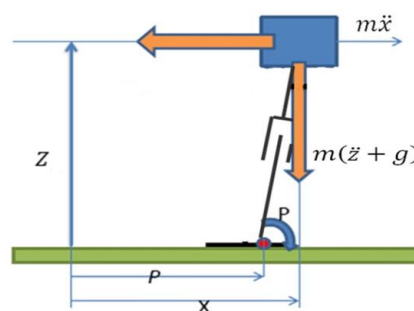
شکل (۳-۵) مدل پاندول معکوس خطی [۳۴].

در مقایسه با مدل پاندول معکوس خطی، مدل گاری - میز اجازه می‌دهد تا نقطه گشتاور صفر در پا حرکت کند توسط سطح میزی که با زمین ارتباط دارد مدل شده است و گشتاور میچ پا لازم نیست که صفر باشد [۳۲]. همچنین در مدل پاندول معکوس خطی اشکالی ندارد که هر گشتاور زاویه‌ای مرتبط با حرکت را در نظر نگیریم.

۳-۳-۳-مدل آونگ معکوس

هر دو مدل مورد بحث محدودیت ارتفاع ثابت مرکز جرم را در طول حرکت دارند که باعث می‌شود حرکت به صورت غیرطبیعی و انرژی ناکارآمد باشد. برای برطرف کردن این محدودیت نیاز به حرکت ربات از

ناحیه زانو می‌باشد که مقدار زیادی گشتاور روی مفصل زانو ایجاد می‌کند و مانع از انجام حرکت‌های پیشرفته مانند دویدن می‌شود. مدل آونگ معکوس (LPM)^۱ این مسئله را با اجازه دادن به حرکت عمودی مرکز جرم مطرح می‌کند؛ که در این مدل، اتصال بین نقطه محوری و مرکز جرم فرض می‌شود که یک میله تلسکوپی بی‌جرم است [۳۲]. شکل (۶-۳) یک نمایه اساسی از آونگ معکوس را در صفحه کناری با مرکز جرم متصل به یک میله تلسکوپی نشان می‌دهد.



شکل (۶-۳) مدل پاندول معکوس خطی [۳۲].

x و z نشان‌دهنده رأس افقی و عمودی مرکز جرم هستند. گرانش G ، \ddot{x} و \ddot{z} به ترتیب شتاب‌های افقی و عمودی مرکز جرم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در مدل پاندول معکوس خطی، پاندول معکوس یک حرکت را در یک صفحه توصیف می‌کند، از این‌رو دو مدل برای حرکت سه‌بعدی مورد نیاز است. معادله (۱۵.۳) گشتاور آونگ را در اطراف نقطه P نشان می‌دهد.

$$T_p = M(g + \ddot{z})(x - p_x) - M\dot{x}z \quad (15.3)$$

همانند مدل پاندول معکوس خطی، ربات زمانی پایدار است که مرکز فشار برابر نقطه گشتاور صفر باشد. این شرایط نیاز به یک گشتاور نوک صفر در اطراف p دارد. باید سمت چپ معادله برابر صفر است، معادله (۱۶.۳) و (۱۷.۳) نقطه گشتاور صفر را به صورت تابع موقعیت مرکز جرم و شتاب برای صفحه کناری و جلو به ترتیب ارائه می‌دهد.

^۱ Invert pendulum model

$$P_x = x - \frac{z}{g + \ddot{z}} \ddot{x} \quad (۱۶.۳)$$

$$P_y = y - \frac{z}{g + \ddot{z}} \quad (۱۷.۳)$$

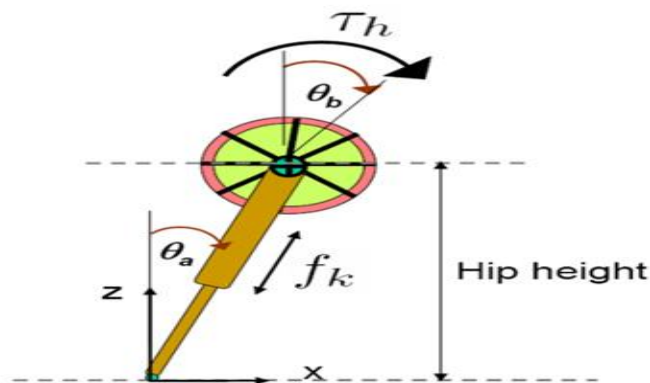
موقعیت مرکز جرم و شتاب عمودی به مدل تابع سینوسی با دامنه و فاز خاص افزوده می‌شود. مدل‌های آونگ خطی معکوس، مدل پاندول معکوس و مدل گاری - میز معرفی شده برای ساده‌سازی دینامیک ربات و توصیف حرکت مرکز جرم استفاده شده است. با این حال، این مدل‌ها فرض می‌کنند که حرکت مرکز جرم محدود به سطح افقی یا به یک صفحه افقی-عمودی محدود می‌شود. با چنین محدودیت‌هایی، نیروی واکنش زمین نمی‌تواند گشتاور زاویه‌ای ایجاد کند و همیشه از طریق مرکز جرم عبور می‌کند [۳۵]. با این حال، یک منبع اختلال یا حرکت بالاتنه ربات می‌تواند مقدار قابل توجهی از گشتاور را به مرکز جرم اعمال کند. اگر یک استراتژی تعادل نتواند گشتاور دریافت شده را مدیریت کند، ممکن است ربات نتواند تعادل را حفظ کند و در نتیجه سقوط کند. از آنجایی که مدل‌های مورد بحث هر یک از اینرسی‌های چرخشی را در نظر نمی‌گیرند، لازم است این مدل‌ها را برای تغییر گشتاور زاویه‌ای در مرکز جرم تغییر دهیم.

۳-۴- مدل پیشنهادی برای ربات نائو

با تعاریف بالا به راحتی می‌توان به ادامه این مطالعه پرداخت. همان گونه که دیدیم معادلات دینامیکی یک ربات انسان نما بسیار غیرخطی است و پاندول معکوس با پایه بی‌وزن یک مدل ساده برای دینامیک ربات انسان نما است. مدل خطی سازی شده پاندول معکوس فرض می‌کند که سرعت تغییر زاویه‌ای صفر است و مرکز جرم به صورت افقی در ارتفاع ثابت حرکت می‌کند اما در این مطالعه این مدل با یک چرخه دوار بررسی شده است تا تأثیر گشتاور زاویه‌ای بالاتنه ربات برای بهبود بازیابی تعادل ربات نائو بررسی شود. ابتدا برای حل مسئله منطقه جذب در ربات، دینامیک نقطه جذب را با مدل پاندول معکوس نوشته سپس اغتشاش خارجی را اعمال و گشتاور زاویه‌ای مربوط به چرخه دوار که بیانگر حرکت زاویه‌ای بالا تنه ربات است را به مدل اضافه می‌کنیم.

۳-۴-۱- پاندول معکوس خطی به‌علاوه یک چرخه دوار

پرات و همکاران یک پاندول معکوس خطی به‌علاوه یک چرخه دوار را به‌عنوان یک فرمت مدل پاندول معکوس خطی توسعه داده‌شده ارائه داد که گشتاور زاویه‌ای مرتبط با جرم متمرکز را در نظر می‌گیرد [۳۳]. آنها در کار خود یک چرخه دوار^۱ را برای مدل کردن گشتاور زاویه‌ای جایگزین کردند. چرخه دوار یک وسیله مکانیکی است که برای ذخیره انرژی چرخشی به‌صورت مؤثر طراحی شده است [۳۳] و می‌تواند برای چرخش اشیاء در فضا مانند ماهواره استفاده شود. مدل پرات که در شکل (۷-۳) نشان داده شده است، به‌جای یک چرخش سنتی، از یک چرخش با یک گشتاور گریز از مرکز و زاویه چرخشی استفاده می‌کند. این به این دلیل است که مدل آنها برای ربات انسان‌نما با چرخش زاویه‌ای و سرعت محدود در نظر گرفته شده است. ربات نائو نمونه‌ای از یک ربات با مفاصل و محرک است که دارای زاویه و سرعت چرخشی محدود می‌باشد.



شکل (۷-۳) پاندول معکوس خطی به‌علاوه یک چرخه دوار [۷].

این مدل در شکل (۷-۳) نشان داده شده است، صرفاً یک آونگ معکوس با یک چرخه دوار متصل به مرکز جرم است. شبیه به مدل آونگ معکوس، پای ربات بی‌وزن فرض شده است که قابل صرفه نظر است. معادلات حرکت مدل در صفحه تکی پشتیبانی عبارت‌اند از [۷]:

^۱ flywheel

$$m\ddot{x} = f_k \sin(\theta_a) - \frac{\tau_h}{l} \cos(\theta_a) \quad (18.3)$$

$$m\ddot{z} = -mg + f_k \cos(\theta_a) + \frac{\tau_h}{l} \sin(\theta_a) \quad (19.3)$$

$$J\ddot{\theta}_b = \tau_h \quad (20.3)$$

g ثابت شتاب گرانشی است، m و J جرم و اینرسی چرخشی ناحیه چرخه دوار هستند. x و z مختصات افقی و عمودی مرکز جرم است. L فاصله کف پا تا مرکز جرم، θ_a و θ_b زاویه‌های پا و چرخه دوار در محور عمودی است. τ_h گشتاور موتور در چرخه دوار است و f_k نیروی اعمال شده به پا است. پاندول معکوس خطی به اضافه یک چرخه دوار از معادلات فوق حاصل می‌شود، با تنظیم ارتفاع عمودی ثابت

$z = z_0$ شتاب عمودی به صفر می‌رسد. با در نظر گرفتن f_k از معادله (19.3) داریم [7]:

$$f_k = \frac{mg}{\cos\theta_a} - \frac{1 \sin\theta_a}{l \cos\theta_a} \tau_h \quad (21.3)$$

با جایگذاری $\sin\theta_a = \frac{x}{l}$ و $\cos\theta_a = \frac{z}{l}$ در معادله (21.3) خواهیم داشت [7]:

$$f_k = \frac{mg}{z_0} - \frac{1}{l} \frac{x}{z_0} \tau_h \quad (22.3)$$

با جایگذاری معادله (22.3) در معادله (18.3) معادلات حرکت برای پاندول خطی معکوس به اضافه یک چرخه دوار به صورت زیر است [7]:

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_0} x - \frac{1}{mz_0} \tau_h \quad (23.3)$$

$$\ddot{\theta}_b = \frac{1}{J} \tau_h$$

۳-۴-۲- فرموله کردن نقطه جذب در مدل مورد مطالعه

معادله حرکت برای مدل خطی سازی شده پاندول معکوس از مقایسه نیروهای موازی و فرم هبستگی هندسی بدست می‌آید که در فرمول (24.3) آمده که m جرم ربات، g نیروی گرانشی زمین و Z_c رأس

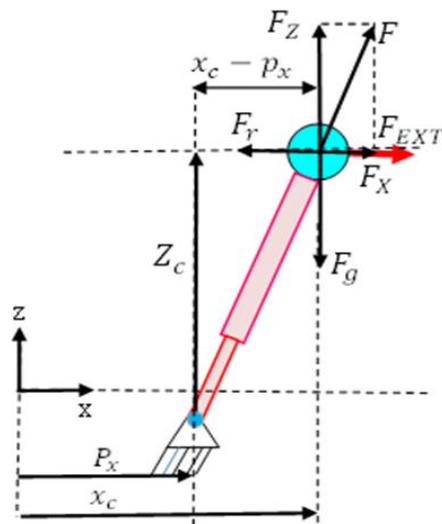
عمودی است. $\omega = \sqrt{g/z_c}$ فرکانس طبیعی پاندول معکوس مدل خطی سازی شده می باشد. $P_{com} = [x_c, y_c, z_c]^T$ ، موقعیت مرکز جرم می باشد و $P_{zmp} = [p_x, p_y, 0]^T$ ، موقعیت نقطه گشتاور صفر است. بر اساس گشتاور زاویه ای ثابت نیروی واکنش زمین و مرکز جرم باهم متضاد می باشند. همان طور که در شکل (۸-۳) نشان داده شده نیروی گرانشی زمین F_g توسط نیروی F_z که نیروی قسمت عمودی نیروی واکنش زمین است جبران می شود. نیروی اینرسی $F_r = m\ddot{x}_c$ نیز نیروها را به تعادل می رساند، معادلات

حرکت در صفحه جلو و صفحه کناری یکسان هستند.

$$\frac{F_x}{F_z} = \frac{F_r}{F_g} = \frac{m\ddot{x}_c}{mg} = \frac{x_c - p_x}{z_c} \quad (24.3)$$

با در نظر گرفتن \ddot{x}_c در معادله (۲۴.۳) داریم [۷]:

$$\begin{aligned} (m\ddot{x}_c)Z_c &= mg(x_c - p_x) \\ \ddot{x}_c &= \omega^2(x_c - p_x) \end{aligned} \quad (25.3)$$



شکل (۸-۳) مدل پاندول معکوس خطی با چرخه دوار [۴۰].

نقطه جذب بخش ناپایدار مدل خطی‌سازی شده پاندول معکوس می‌باشد، می‌توان به صورت زیر نوشته شود [۷].

$$\begin{aligned} CP_x &= x_c + \frac{\dot{x}_c}{\omega} \\ CP_y &= Y_c + \frac{\dot{y}_c}{\omega} \end{aligned} \quad (26.3)$$

حال با اعمال نیروی خارجی F (همان اغتشاش) به مدل خطی‌سازی شده پاندول معکوس (۲۵.۳) ، می‌توان معادلات دینامیکی را به صورت زیر بهبود داد:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_c &= \omega^2(x_c - p_x) + \frac{F_x}{m} \\ \ddot{y}_c &= \omega^2(y_c - p_y) + \frac{F_y}{m} \end{aligned} \quad (27.3)$$

حرکت زاویه‌ای بالاتنه و بازوها نقش مهمی در بازیابی تعادل دارند. این مفاصل می‌توانند گشتاوری را در رابطه با مرکز جرم اعمال کنند. هنگامی که گشتاور مربوط به مرکز جرم صفر است، گشتاور چرخشی بالاتنه و مرکز فشار منطبق بر هم می‌شوند. مرکز فشار همواره درون چندضلعی پشتیبانی است اما گشتاور چرخشی بالاتنه می‌تواند از لبه پا برای لحظه‌ای که مرکز جرم غیر صفر می‌باشد، حرکت کند. برای اعمال این اثرات، یک چرخه دوار (گشتاور زاویه‌ای) به مدل خطی‌سازی شده پاندول معکوس افزوده می‌شود. معادله حرکت را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\ddot{x}_c = \omega^2(x_c - p_x) + \frac{\dot{H}_y}{mz} + \frac{F}{m} \quad (28.3)$$

\dot{H} معادل نرخ تغییرات گشتاور زاویه‌ای بالاتنه است که می‌توان توسط گشتاور بازو و اجزای بالاتنه ربات تعیین شود.

موقعیت نقطه گشتاور صفر و گشتاور چرخشی بالائنه مربوط به بدین صورت است:

$$CMP_x = p_x + \frac{\dot{H}_y}{F_z} \quad (3.29)$$

$$CMP_y = p_y - \frac{\dot{H}_x}{F_z}$$

با ترکیب معادلات (27.3) و (28.3)، به دست می آید که:

$$\ddot{x}_c = \omega^2(x_c - CMP_x) + \frac{F_x}{m} \quad (3.30)$$

$$\ddot{y}_c = \omega^2(y_c - CMP_y) + \frac{F_y}{m}$$

هنگامی که یک اغتشاش خارجی اعمال می شود، گشتاور چرخشی بالائنه و نقطه گشتاور صفر انحراف پیدا می کنند و گشتاور چرخشی بالائنه می تواند چندضلعی را ترک کند تا وقتی که نقطه جذب خارج از چندضلعی پشتیبانی می شد آن را کنترل کند.

بنابراین، دینامیک مرکز جرم به صورت زیر بازنویسی خواهد شد:

$$\dot{x}_c = \omega(CP_x - x_c) \quad (31.3)$$

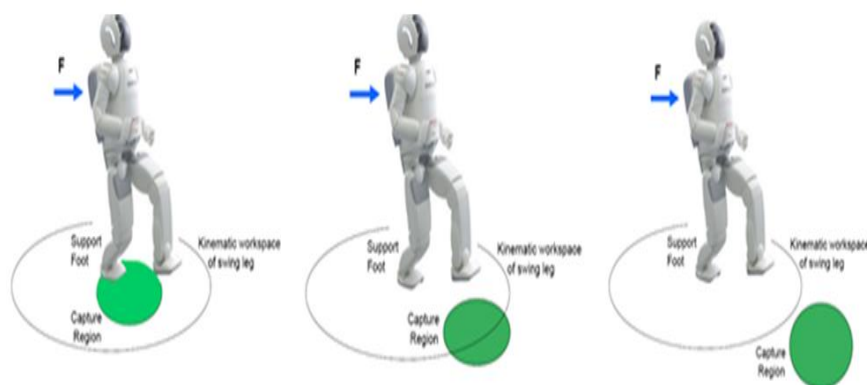
$$\dot{y}_c = \omega(CP_y - y_c)$$

با مشتق گیری از رابطه (28.3) و جایگذاری رابطه (31.3) و (25.3) در معادله (28.3) معادله زیر حاصل شده است:

$$\dot{CP}_x = \omega(CP_x - CMP_x) + \frac{F_x}{m\omega} \quad (32.3)$$

$$\dot{CP}_y = \omega(CP_y - CMP_y) + \frac{F_y}{m\omega}$$

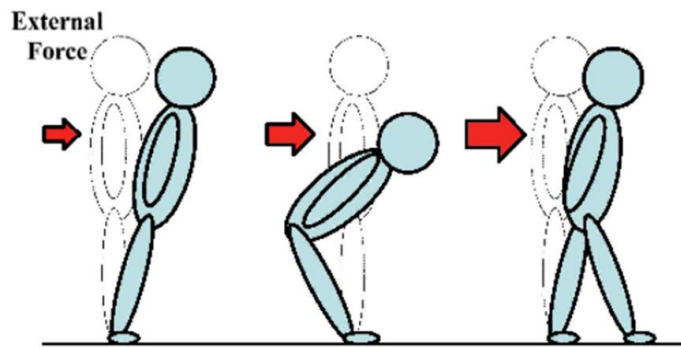
همان‌طور که در (۳۴.۳) نشان داده شده است، نقطه جذب باید به منظور بازیابی تعادل ربات، کنترل شود. هنگامی که نقطه جذب در داخل چندضلعی پشتیبانی قرار می‌گیرد، می‌تواند توسط نقطه گشتاور صفر کنترل شود، اما هنگامی که خارج از چندضلعی پشتیبانی قرار می‌گیرد، می‌توان آن را توسط گشتاور چرخشی بالاتنه یا گام برداشتن کنترل کرد. با استفاده از مفهوم نقطه جذب، ما می‌توانیم زمان و مکانی را برای بهبود تعادل ربات که ناشی از یک اغتشاش است را تعیین کنیم. اگر نقطه جذب درون چندضلعی پشتیبانی قرار گیرد، ربات قادر است بدون گام برداشتن اغتشاش خارجی را تحمل کند و به تعادل برسد. برای متوقف کردن در یک مرحله، چندضلعی پشتیبانی باید یک تقاطع با منطقه جذب داشته باشد همان‌طور که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. چنانچه در صورتی که اغتشاش وارده بسیار بزرگ بود و ربات برای دفع نیاز به تعداد بیشتری گام برداشتن دارد تا قادر شود در منطقه جذب تقاطع با فضای کاری سینماتیکی پاها پیدا کند در نتیجه نیاز به مراحل بیشتری خواهد داشت.



شکل (۳-۹) تقاطع منطقه جذب با چندضلعی پشتیبانی [۳۳].

سه راهکار برای مقابله با اغتشاش، عبارت‌اند از: (۱) استراتژی میج پا، (۲) استراتژی لگن (۳) استراتژی گام برداشتن

انسان‌ها در برخورد با اغتشاشات کوچک از استراتژی مچ پا استفاده می‌کنند به‌منظور تنظیم نقطه جذب که در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده. اگرچه ارتباط بین پا و کف زمین یک محدودیت یک‌جانبه است و اگر گشتاور مچ پا بیش از حد بزرگ شود، نقطه گشتاور صفر فراتر از لبه پا و در برخورد با اغتشاش بیشتر، نقطه جذب در جهت دفع اغتشاش با استفاده از یک گشتاور در مفصل ران یا مفصل بازو بازیابی تعادل می‌کند اما با افزایش مجدد، استراتژی گام برداشتن مفید است. با این وجود، ممکن است محدودیتی برای گام برداشتن باشد، پس باید از استراتژی دیگری برای بهبودسازی استفاده کرد که استراتژی ترکیبی مچ پا و لگن کارآمد است [۳۸].



شکل (۳-۱۰) اعمال اغتشاش خارجی و تغییرات استراتژی [۴۰].

فصل چهارم

بهینه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی

۴-۱- کنترل بازیابی تعادل ربات نائو

برای به دست آوردن تعادل ربات نائو در برابر اغتشاشات خارجی از کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل استفاده شده است. این روش می‌تواند رفتار سیستم را در برخورد با قیدها، بهینه‌سازی می‌کند. از سوی دیگر، این روش توانایی پیش‌بینی دارد. این کنترلر، عمل کنترل را به شکل یک مسئله کنترل بهینه حلقه باز معین و محدود انجام می‌دهد بدین صورت که در هر مرحله، با استفاده از وضعیت فعلی تابع هزینه که به‌عنوان حالت اولیه در نظر گرفته می‌شود گام بعدی محاسبات را پیش‌بینی می‌کند در نتیجه از کنترل‌های از پیش محاسبه شده استفاده نمی‌شود. برای این منظور، دینامیک سیستم را گسسته سازی می‌کنیم. با استفاده از برنامه حل‌کننده کوادراتیک، مسئله بهینه‌سازی مدل کنترل پیش‌بین را به یک فرم عمومی از معادله درجه دوم تبدیل می‌کنیم. ورودی کنترل پیش‌بین نرخ تغییرات گشتاور بالاتنه و نرخ تغییرات موقعیت نقطه گشتاور صفر در نظر گرفته شده‌اند. برای بازیابی تعادل ربات اعمال گشتاورها به ترتیب τ_a و $\dot{\tau}_h$ به مچ پا و لگن استفاده شده است.

۴-۱-۱- معادلات سیستم

با در نظر گرفتن معادله دینامیک مرکز جرم (۱.۴) که در آن \dot{y}_c نرخ تغییرات سرعت مرکز جرم مدل، ω فرکانس طبیعی سیستم، CP_y نقطه جذب می‌باشد با فرض این که T زمان نمونه‌برداری از سیستم است به معادله (۲.۴) می‌رسیم:

$$\dot{x}_c = \omega(CP_x - x_c) \quad (1.4)$$

$$\dot{y}_c = \omega(CP_y - y_c)$$

$$X_{t+1} = (1 - \omega T)X_t + \omega TCP_t \quad (2.4)$$

با ترکیب معادله گشتاور چرخشی بالاتنه (۳.۴) که در آن \dot{H} معادل نرخ تغییرات گشتاور زاویه‌ای بالاتنه، F_z که نیروی قسمت عمودی نیروی واکنش زمین و p_x معادل موقعیت نقطه گشتاور است و معادله نرخ

تغییرات نقطه جذب (۴.۴) که در آن اغتشاش خارجی و m جرم مدل است با فرض این که T زمان نمونه‌برداری از سیستم است به معادله (۵-۴) می‌رسیم:

$$CMP_x = p_x + \frac{\dot{H}_y}{F_z} \quad (۳.۴)$$

$$CMP_y = p_y - \frac{\dot{H}_x}{F_z}$$

$$\dot{C}p_x = \omega(CP_x - CMP_x) + \frac{F_x}{m\omega} \quad (۴.۴)$$

$$\dot{C}p_y = \omega(CP_y - CMP_y) + \frac{F_y}{m\omega}$$

$$CP_{t+1} = (1 + \omega T)CP_t \pm \omega T \left(P_{x,t} + \frac{\dot{H}_{y,t}}{mg} \right) + \frac{F_x}{m\omega} \quad (۵.۴)$$

با مشتق‌گیری از نرخ تغییرات گشتاور چرخشی بالاتنه و موقعیت نقطه گشتاور صفر است. با فرض این که T زمان نمونه‌برداری از سیستم است به معادلات (۶.۴) و (۷.۴) می‌رسیم:

$$P_{x,t+1} = P_{x,t} + \dot{P}_{x,t}T \quad (۶.۴)$$

$$\dot{H}_{y,t+1} = \dot{H}_{y,t} + \ddot{H}_{y,t}T \quad (۷.۴)$$

رفتار سیستم در هر صفحه جلویی و کناری یکسان است بنابراین با در نظر گرفتن معادلات (۲.۴) ، (۵.۴) ، (۶.۴) و (۷.۴) مدل سیستم در هر صفحه بدین صورت است:

$$X_{t+1} = (1 - \omega T)X_t + \omega T C P_t$$

$$CP_{t+1} = (1 + \omega T)CP_t \pm \omega T \left(P_{x,t} + \frac{\dot{H}_{y,t}}{mg} \right) + \frac{F_x}{m\omega}$$

$$P_{x,t+1} = P_{x,t} + \dot{P}_{x,t}T$$

$$\dot{H}_{y,t+1} = \dot{H}_{y,t} + \ddot{H}_{y,t}T \quad (۸.۴)$$

با بردن معادله (۸.۴) به شکل عمومی گسسته زیر داریم :

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= AX_k + BU_k \\ Y_k &= CX_k \end{aligned} \quad (۹.۴)$$

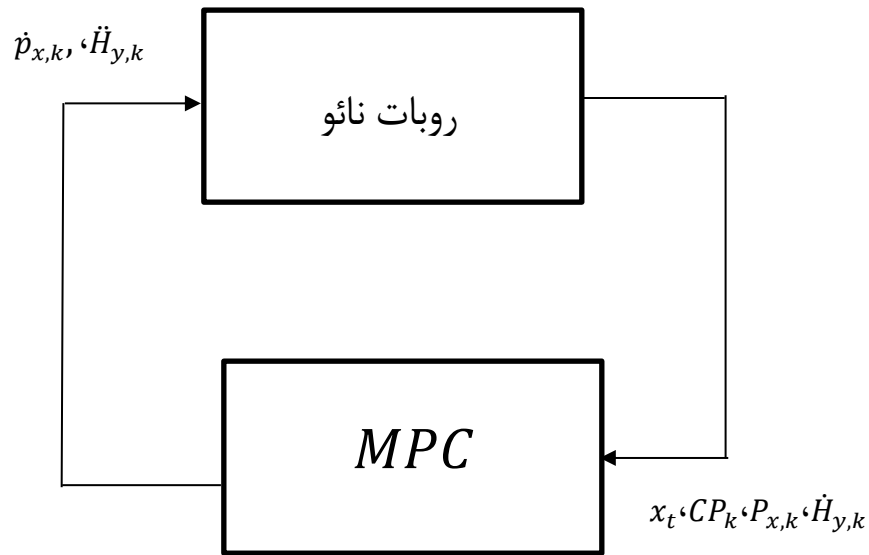
در اینجا $X_k = [x_t, CP_k, P_{x,k}, \dot{H}_{y,k}, F_{EXT}]$ بردار حالت سیستم می‌باشد و $U_t = [\dot{p}_{x,k}, \dot{H}_{y,k}]$ ورودی کنترلی است که $\dot{H}_{y,k}$ نرخ تغییرات گشتاور زاویه‌ای بالانه و $\dot{p}_{x,k}$ نرخ تغییرات موقعیت نقطه گشتاور صفر به‌عنوان ورودی کنترل در نظر گرفته شده است :

$$= \begin{bmatrix} (1 - \omega T) & \omega T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1 + \omega T) & -\omega T & \frac{-\omega T}{mg} & \frac{1}{mg} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A_t$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (۱۰.۴)$$

۴-۱-۳- کنترل مدل پیش‌بین

با در نظر گرفتن مدل سیستمی که در معادله (۸.۴) بدست آمده است. ورودی کنترل پیش‌بین نرخ تغییرات گشتاور بالانه و نرخ تغییرات موقعیت نقطه گشتاور صفر در نظر گرفته شده‌اند. برای بازیابی تعادل ربات اعمال گشتاورها به ترتیب τ_a و $\dot{\tau}_h$ به مچ پا و لگن استفاده شده است که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل (۱-۴) بلوک دیاگرام بازیابی تعادل ربات نائو

معادلات (۱۱.۴) و (۱۲.۴) دنباله‌ای از ورودی X و خروجی Y را برای N مرحله زمان جداگانه بعدی

نشان می دهد:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \tag{۱۱.۴}$$

$$\begin{aligned} x_{k+2} &= Ax_{k+1} + Bu_{k+1} \\ &= A(Ax_k + Bu_k) + Bu_{k+1} \\ &= A^2x_k + ABu_k + Bu_{k+1} \end{aligned}$$

⋮

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= Cx_{k+1} \\ &= C(Ax_k + Bu_k) \\ &= CAx_k + Bu_k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{k+2} &= Cx_{k+2} \\ &= C(A^2x_k + ABu_k + Bu_{k+1}) \end{aligned}$$

$$= CA^2x_k + CABu_k + CBu_{k+1}$$

$$\vdots$$

(۱۲.۴)

معادله (۱۳.۴) فضای حالت را با N دنباله نشان می دهد:

$$\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ \vdots \\ y_{k+N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CA^1 \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^N \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} CA^0 & 0 & \cdots & 0 \\ CA^{2-1}B & CA^{2-2}B & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & \cdots & CA^0B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_k \\ \vdots \\ u_{k+N-1} \end{bmatrix} \quad (۱۳.۴)$$

در این معادله Y در واقع هدف یا همان تعیین قید نقطه جذب (CP) است که به ماتریس خروجی C بستگی دارد. x_k همان x_0 می باشد که مقدار اولیه را تعیین می کند. معادله (۱۴.۴) شکل عمومی معادله (۱۳.۴) را نمایش می دهد.

$$Y = A_t X_0 + B_t U \quad (۱۴.۴)$$

۴-۱-۴- تشکیل تابع هزینه مدل کنترل پیش بین

الگوریتم بهینه سازی یک مسیر در آینده است که می توان با پیش بینی کردن اقدامات لازم را برای جلوگیری از نقض قیدها در آینده انجام داد در نتیجه با حداقل تلاش به بهترین عملکرد می توان رسید. معادله (۱۵.۴) تابع هدف را نشان می دهد که در آن e خطا و Q و R ماتریس های مثبت معین در نظر گرفته شده است.

$$\min_U \frac{1}{2} (e^T Q e + U^T R U) \quad (۱۵.۴)$$

$$e = Y - Y^d \quad (۴.۱۶)$$

حال با جایگذاری معادله (۱۴.۴) در (۱۶.۴) معادله خطا را به این صورت بازنویسی می کنیم:

$$\begin{aligned} e &= Y - Y^d \\ &= A_t X_0 + B_t U - Y^d \\ &= B_t U + (A_t X_0 - Y^d) \\ e &= B_t U + b \end{aligned} \quad (۴.۱۷)$$

حال با ترکیب معادله (۱۷.۴) با (۱۵.۴) داریم:

$$\begin{aligned} &\min_U \frac{1}{2} (e^T Q e + U^T R U) \\ &\min_U \frac{1}{2} (U^T B_t^T Q B_t U + 2B_t^T b U + b^T b + U^T R U) \\ &\min_U \frac{1}{2} U^T (B_t^T Q B_t + R) U + 2B_t^T b U + b^T b \\ &\min_U \frac{1}{2} U^T (B_t^T B_t Q + R) U + B_t^T b U \end{aligned} \quad (۴.۱۸)$$

همانطور که دیده شد تابع هدف بازنویسی شده به فرم کوادراتیک درآمده و در معادله (۱۸.۴) ماتریس

هسین H همان جمله $(B_t^T B_t Q + R)$ است و بردار گرادیانی C^T همان جمله $B_t^T b$ می باشد.

$$f(X) = \min \frac{1}{2} X^T H X + C^T X \quad (۴.۱۹)$$

۴-۱-۵- قیدها

قید های محدود کننده در Y در معادله (۲۰.۴) بیان شده است که با بازنویسی این معادله فرم (۲۱.۴) بدست می آید. یکی از مهم ترین مزایای رویکرد کنترل پیش بین این است که قیدهای آینده را در نظر می گیرید.

$$Y^{min} \leq Y \leq Y^{max} \quad (۲۰.۴)$$

$$Y^{min} \leq A_t X_0 + B_t U \leq Y^{max}$$

$$\begin{bmatrix} B_t \\ -B_t \end{bmatrix} U \leq \begin{bmatrix} Y^{max} - A_t X_0 \\ -(Y^{min} - A_t X_0) \end{bmatrix} \quad (۴.۲۱)$$

در معادله (۲۲.۴) CP_{xN} نقطه جذب واقعی، $\dot{H}_{y,N}$ گشتاور چرخشی بالاتنه و مرجع نقطه جذب CP_{refx} در مرکز چندضلعی پشتیبانی قرار دارد. این قیدها بیان می کنند که موقعیت نهایی نقطه جذب و نقطه گشتاور صفر باید در مرکز چندضلعی پشتیبانی قرار داشته باشند در نتیجه قیدها محدود و معین می باشند. قیدها در هر دو صفحه جلویی و کناری مشابه هستند.

$$\begin{aligned} CP_{xN} &= CP_{refx} \\ X_{C,N} &= CP_{refx} \\ P_{x,N} &= CP_{refx} \\ \dot{H}_{y,N} &= 0 \\ P_{x,i} &\in \text{support polygon} \end{aligned} \quad (۴.۲۲)$$

هسته پیشنهاد شده مدل کنترل پیش‌بین بر اساس استراتژی ترکیبی لگن و مچ پا انتخاب شده است. برای حل مسئله کوادراتیک درجه دوم، تابع هزینه زیر پیشنهاد شده است.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{K=1}^N (\alpha_{1x}(CP_{x,k+1} - CP_{xref,k+1})^2 + \alpha_{2x}(\dot{P}_{xk})^2 + \alpha_{3x}(\dot{H}_{yk})^2 + \alpha_{4x}(\ddot{H}_{yk})^2 + \alpha_{1y}(CP_{y,k+1} - CP_{yref,k+1})^2 + \alpha_{2y}(\dot{P}_{yk})^2 + \alpha_{3y}(\dot{H}_{xk})^2 + \alpha_{4y}(\ddot{H}_{xk})^2) \quad (۲۳.۴)$$

در معادله (۵.۴)، \dot{H}_{xk} و \dot{H}_{yk} بردارهای ورودی کنترل هستند. جمله $CP_{x,k+1} - CP_{xref,k+1}$ تفاوت بین نقطه جذب فعلی و مقدار مورد نظر آن را نشان می‌دهد. مدولاسیون موقعیت نقطه گشتاور صفر و نرخ تغییرات گشتاور چرخشی بالاتنه برای کنترل نقطه جذب به قسمت $\alpha_{2x}(\dot{P}_{xk})^2$ و $\alpha_{3x}(\dot{H}_{yk})^2$ بستگی دارد. برای $\alpha_{4x}(\ddot{H}_{yk})^2$ به حداقل رساندن میزان تغییرات نرخ گشتاور زاویه‌ای بالاتنه در نظر گرفته شده است. α_i وزن هر قسمت را نشان می‌دهد. در واقع نوآوری این تابع هزینه، دیدن هر دو دینامیک چرخشی و خطی برای ربات نانو می‌باشد با توجه به در نظر گرفتن قید نقطه جذب.

۲-۴- شبیه‌سازی و نتایج صحت بهینه‌سازی

شبیه‌سازی با استفاده از متلب انجام شده است کنترل‌کننده پیشنهادی در مدل انتزاعی ربات نانو در نرم‌افزار شبیه‌ساز ربات ویباتز صحنه‌گذاری شده. پارامتر مورد استفاده در شبیه‌سازی برای ربات نانو و تابع هزینه در جدول ۱-۴ و ۲-۴ نشان داده شده است. زمان بازپخش فشار ۲ ثانیه است.

جدول ۴-۱ پارامترهای ربات نائو

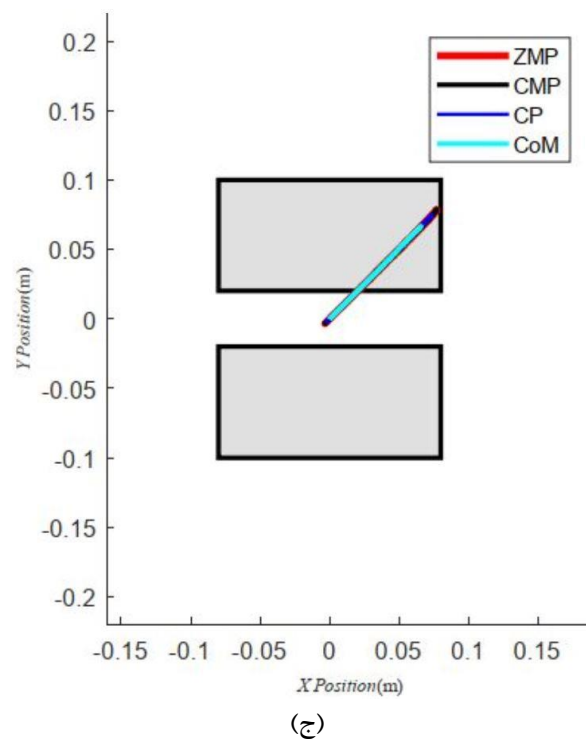
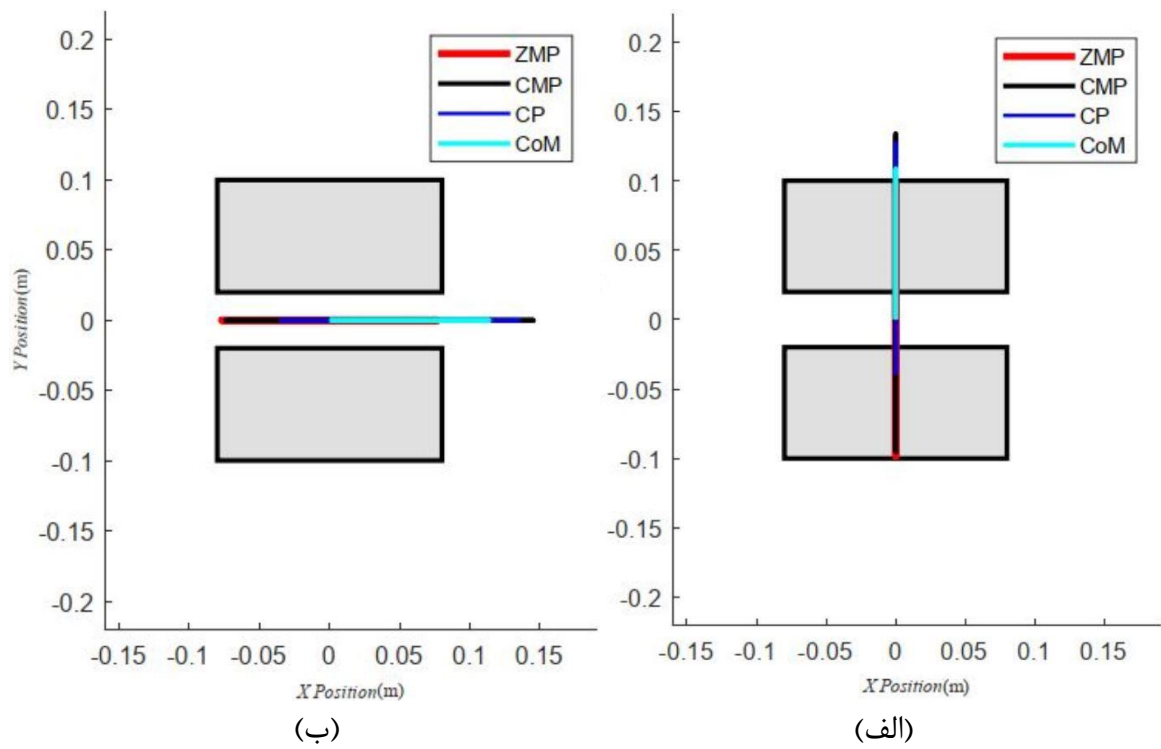
مقدار	متغیر
۰.۵۷۳ m	ارتفاع
۵.۱۸ kg	جرم
۰.۱۶	طول پا
۰.۰۹	کف پا

جدول ۴-۲ پارامترهای تابع هزینه

مقادیر	وزن
۶	α_{1x}
۶	α_{1y}
۱	α_2
۱۰	α_3
۵	α_4
۰.۰۰۵ s	T

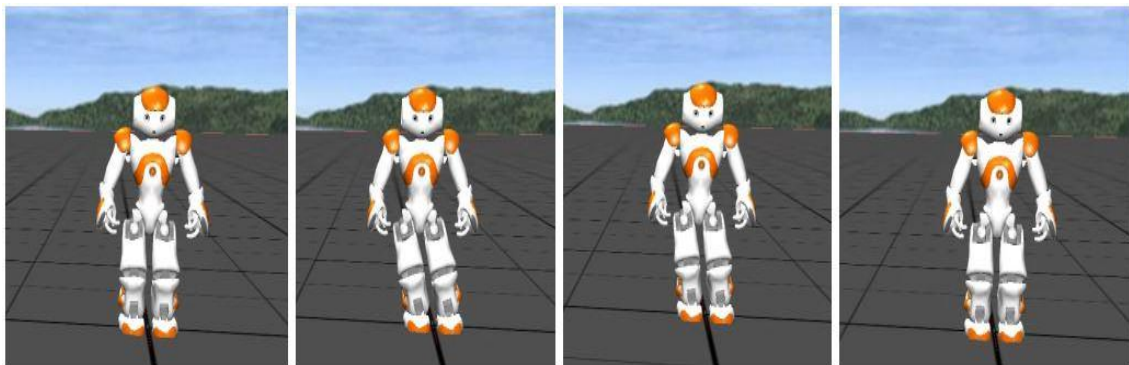
برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهاد شده تعدادی اغتشاش با اندازه و جهت متفاوت به ربات (مرکز جرم) اعمال می‌کنیم. رفتار ربات در شکل (۴-۲) و شکل (۴-۴) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که ربات می‌تواند در مقابل اغتشاش وارده بازیابی تعادل کند و به شرایط اولیه بازگردد

برای صحه گذاری نتایج حاصله مقادیر در نرم افزار شبیه ساز ویباتز اعمال شده نتایج حاصله منجر به بهبود بازیابی تعادل ربات گشته که در شکل (۳-۴) نمایش داده شده. اغتشاشات هر بار به شکل فشارهایی با مقدار ۱۰۰ نیوتن و ۲۵۰ نیوتن در هر دو صفحه کناری و جلوی به ربات اعمال شده که در هر دو مورد، ربات قادر به بازگشت به موقعیت اولیه خود بوده است. این بار اغتشاش بزرگتری با مقدار ۳۰۰ نیوتن در صفحه کناری و ۱۰۰ نیوتن در صفحه جلویی ربات اعمال می شود. این اغتشاش بزرگ نقطه جذب را از چندضلعی پشتیبانی خارج می کند. نقطه گشتاور صفر نمی تواند نقطه جذب را کنترل کند و در محدوده ی چندضلعی پشتیبانی نگه دارد. این الگوریتم با ایجاد حرکت زاویه ای در بالاتنه گشتاور چرخشی بالاتنه ای را ایجاد می کند که می تواند از چندضلعی پشتیبانی خارج شود و نقطه جذب را هدایت کند تا به موقعیت مورد نظر برگردد. حداکثر گشتاور مورد نیاز برای بازیابی تعادل حدود ۵ نیوتن است. مسیر نقطه جذب، مرکز فشار، گشتاور چرخشی بالاتنه و مرکز جرم در طی بهبود تعادل در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. علاوه بر این، فرض بر این است که ربات در یک پا ایستاده است، این سطح تماس یک نقطه است. در این مورد مدولاسیون گشتاور چرخشی بالاتنه می تواند ربات را در برابر سقوط نگه دارد؛ زیرا چندضلعی پشتیبانی کوچک است و استراتژی مچ پا در این وضعیت کارآمد نیست. در این حالت نقطه جذب از چندضلعی پشتیبانی را ترک می کند و نقطه صفر گشتاور سعی بر نگه داشتن در محدوده چندضلعی پشتیبانی را دارد و گشتاور چرخشی بالاتنه نقطه جذب را به موقعیت مورد نظر هدایت می کند. همان طور که در شکل (۴-۶) نشان داده شده است و برای صحه گذاری نتایج حاصله مقادیر در نرم افزار شبیه ساز ویباتز اعمال شده نتایج حاصله منجر به بهبود بازیابی تعادل ربات گشته که در شکل نمایش داده شده.



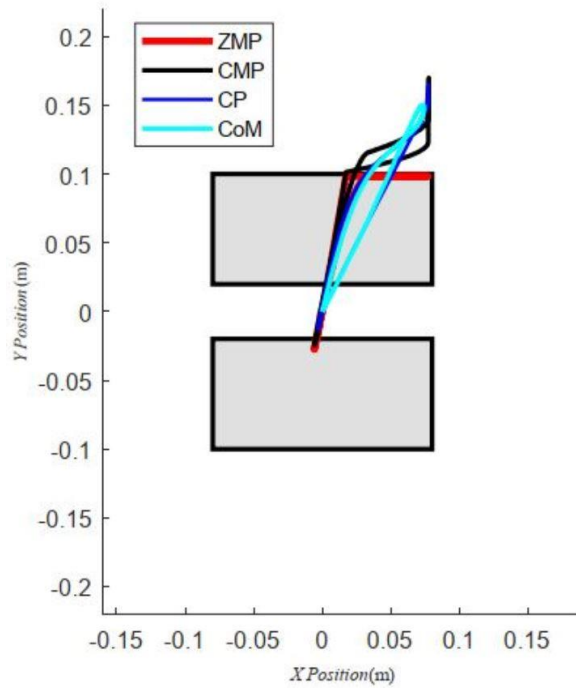
شکل (۲-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بازیابی تعادل (ربات روی دو پا ایستاده) با مقادیر فشارهای الف: (۰،۲۵۰)، ب: (۲۵۰،۰) و ج: (۱۰۰،۱۰۰).

همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است، در روش پیشنهادی تنظیم سرعت گشتاور زاویه‌ای در طی مدت اعمال اغتشاش بسیار کارآمد است. به‌خصوص در شرایطی که سطح تماس پا با زمین کوچک بود یا شرایطی که گام برداشتن برای ربات امکان‌پذیر نیست. هنگامی که اغتشاش وارده کوچک باشد استراتژی مچ پا برای بهبود تعادل استفاده شده است. در برخورد با اغتشاشات بزرگ گشتاور زاویه‌ای ایجاد شده است و از استراتژی ترکیبی مچ پا و لگن به‌طور هم‌زمان استفاده شده است.

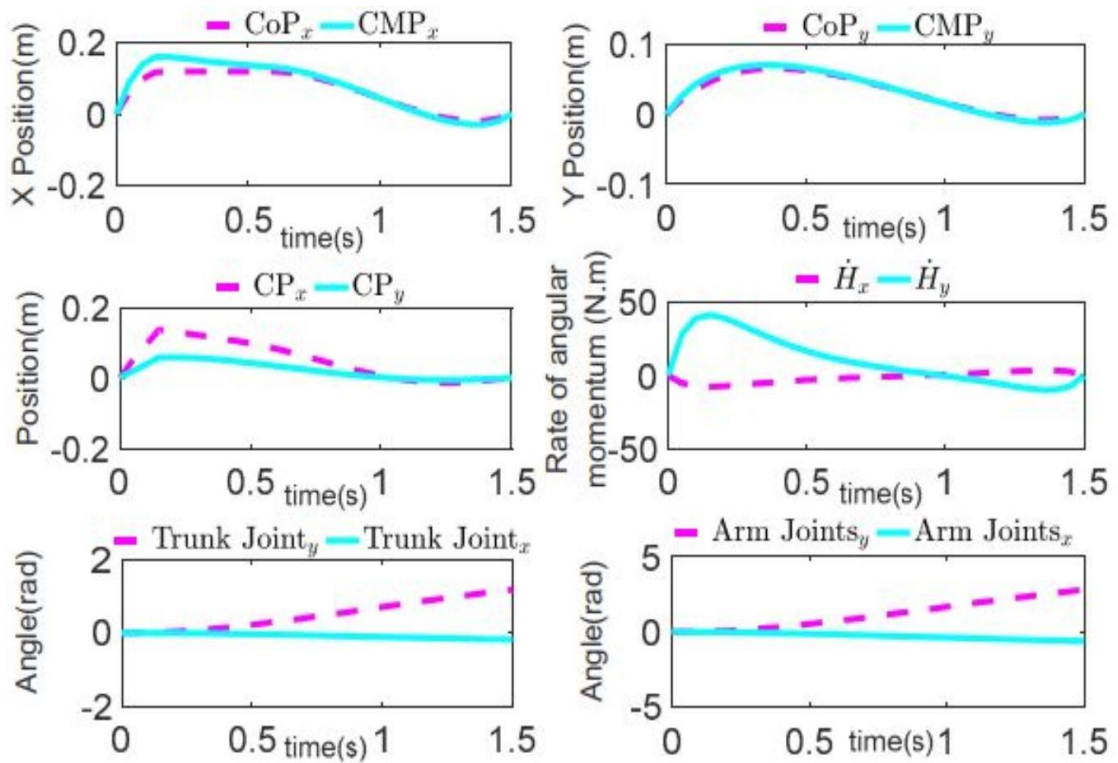


شکل (۳-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بازیابی تعادل (ربات روی دو پا ایستاده) با مقادیر فشار (۰،۲۵۰) در محیط ویباتز.

با این حال، به دست آوردن موقعیت نقطه جذب در طول پیاده‌سازی یکی از چالش‌هاست. لغزش در این مقاله در نظر گرفته نشده است.

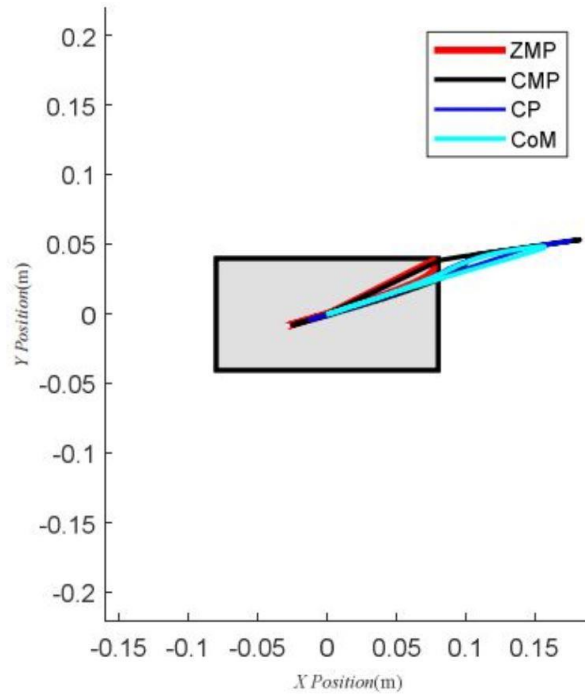


(الف)

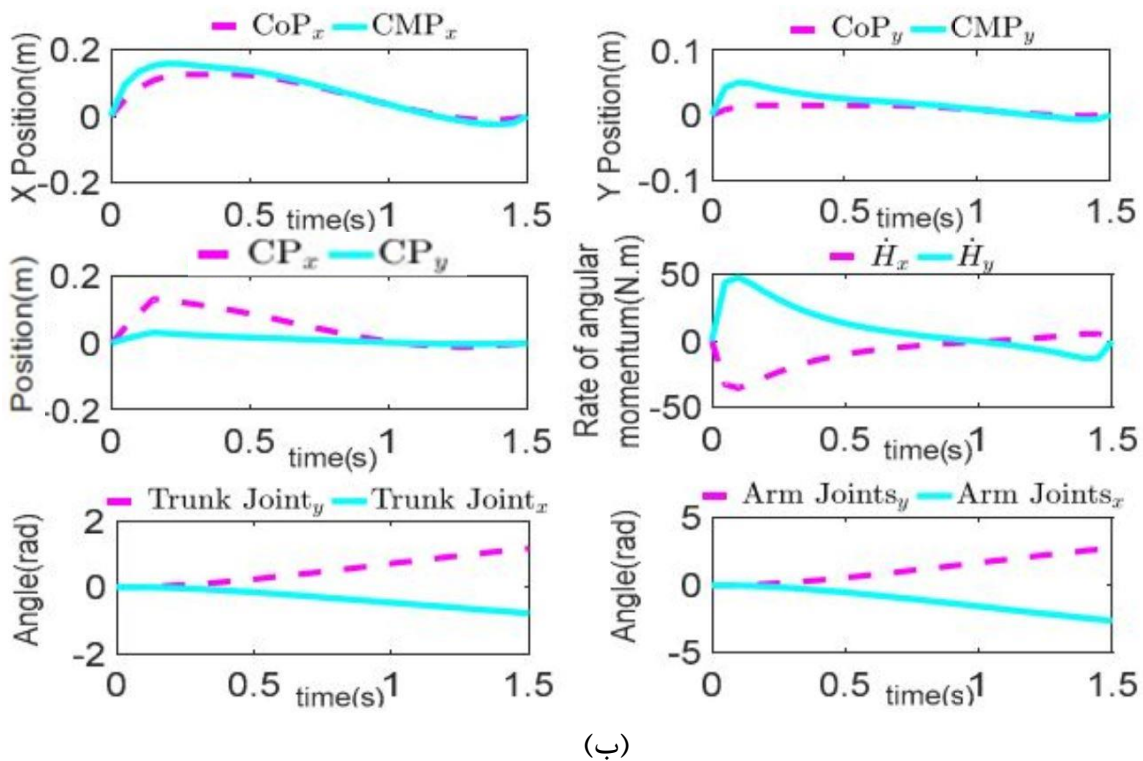


(ب)

شکل (۴-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بازیابی تعادل (ربات روی دو پا ایستاده) بامقادیر فشارهای الف: (۱۰۰،۳۰۰) و ب: نتایج حاصل.

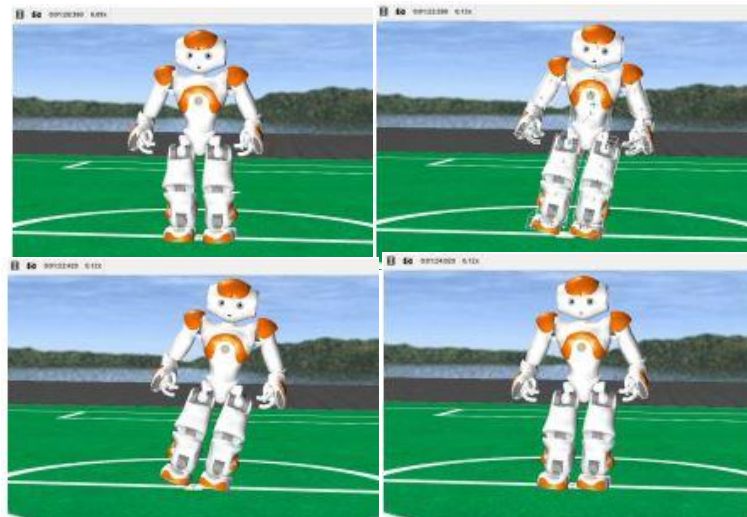


(الف)



(ب)

شکل (۴-۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بازیابی تعادل (ربات روی یک پا ایستاده) با مقادیر فشارهای الف: (۳۰۰، ۱۰۰) وب: نتایج حاصل.



شکل (۴-۶) نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بازیابی تعادل (ربات روی یک‌پا ایستاده) با مقادیر فشارهای: (۳۰۰،۱۰۰) در محیط ویب‌اتز

۳-۴- جمع‌بندی

برای دستیابی به بهبود بازیابی تعادل ربات انسان‌نما نائو، از رویکرد نقطه جذب در این مطالعه استفاده شده است. برای این منظور، یک مدل کنترل پیش‌بین استفاده شده است. با استفاده از استراتژی ترکیبی لگن و مچ پا با مدوله کردن گشتاور چرخشی بالاتنه و نقطه گشتاور صفر برای کنترل نقطه جذب مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی در مقابل اغتشاشات مختلف کارآمد و مفید است حتی زمانی که چندضلعی پشتیبانی محدود بوده و ربات مجاز به گام برداشتن نبود. در ارزیابی با نرم افزار شبیه‌ساز ویب‌اتز بر نتایج بدست آمده صحت‌گذاری شده و پیاده‌سازی تجربی از این الگوریتم روی ربات واقعی نائو انجام شده لذا با توجه به مشکلات که در این سخت‌افزار دیده شده تصمیم بر این شد تا برای بهبود بازیابی تعادل حسگرهای فشار این ربات بازطراحی شود زیرا عدم ثبات حسگرهای فشار کف پای ربات بوده یکی از مشکلات مهم بوده که در این مطالعه با آن برخورد داشتیم. با توجه به تحقیقات و مکاتبات با شرکت الدباران رباتیکز صورت گرفت برای بهبود این مشکل نیاز دیده شد تا سخت‌افزاری طراحی شود که در فصل پنجم به صورت کامل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

فصل پنجم

طراحی و ساخت المان فشارسنج برای ربات نانو

۱-۵-مقدمه

با توجه به ضعف‌های مربوط به حسگرهای فشار کف پای ربات، نیاز دیده‌شده است که با طراحی یک کفه جدید بتوان پاسخ‌های بهتری را برای تعیین نقطه گشتاور صفر از طریق برآیند مرکز فشار به دست آورد. نتیجه این تحقیقات منجر به طراحی یک‌رویه منعطف سه‌بعدی کفه پا شده است که در محیط نرم‌افزار سالی‌دورک^۱ طراحی و توسط پرینتر سه‌بعدی ساخته شده است. با استفاده از حسگرهای فشار MD_PS002 با دقت بالا یک برد با پردازنده ESP12E و قابلیت وایفای با نرم‌افزار ایگل^۲ طراحی و در این کفه جانمایی شده است که بتوان اطلاعات را از حسگرهای فشار خوانده و در محیط شبیه‌ساز و بیاتز و متلب مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۲-محاسبه‌ی نقطه گشتاور صفر با استفاده از حسگرهای نیرو در کف پا:

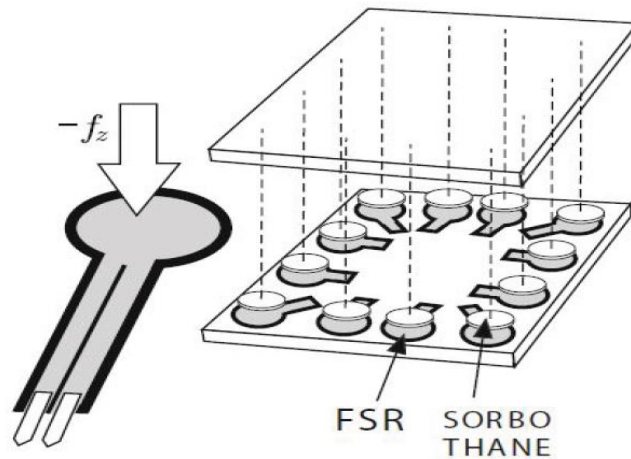
با توجه به تعاریف کامل فصل سوم، نقطه گشتاور صفر محل گذر مجموع نیروهای عکس‌العمل زمین از کف پا ربات است؛ بنابراین با استفاده از حسگرهای فشار می‌توان نیروی وارده به کف پا را حساب کرد، در نتیجه به نقطه گشتاور صفر رسید. ۴ عدد حسگر کار گذاشته در کف پای ربات نانو نیروی عکس‌العمل عمودی سطح را محاسبه می‌کند و با برآیند گیری از اطلاعات این حسگرها می‌توان نقطه‌ی تمرکز نیرو که نشان‌دهنده‌ی نقطه گشتاور صفر است محاسبه کرد. شکل (۵-۱) یک نمونه از این حسگر را نشان می‌دهد. ولی این حسگرها دقت خوبی نداشته و رنج خطی کمی دارند و تنها برای تشخیص تماس کف پا با سطح زمین تعبیه شده‌اند. این حسگرها در نشان داده شده‌اند.

¹ Solidwork software

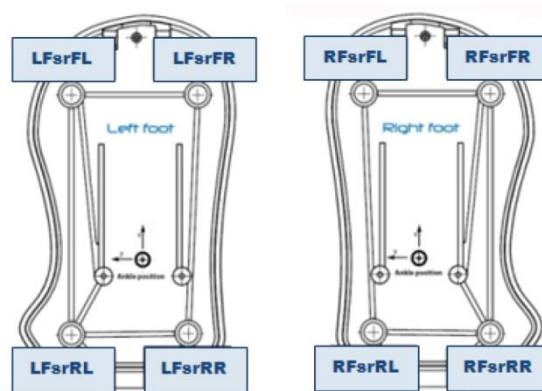
² Eagle software

۳-۵- دلایل ضعف عملکرد این ربات:

۱. ضعف حسگر: حسگرهای فشارسنج مقاومتی بکار رفته در این ربات محدوده بسیار کم خطی دارد که ناشی از هیستریزیس شدیدی است که دارد، دقت کم از دیگر معایب این نوع حسگرها است که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل (۱-۵) یک نمونه از حسگر نیرو [۲۶].

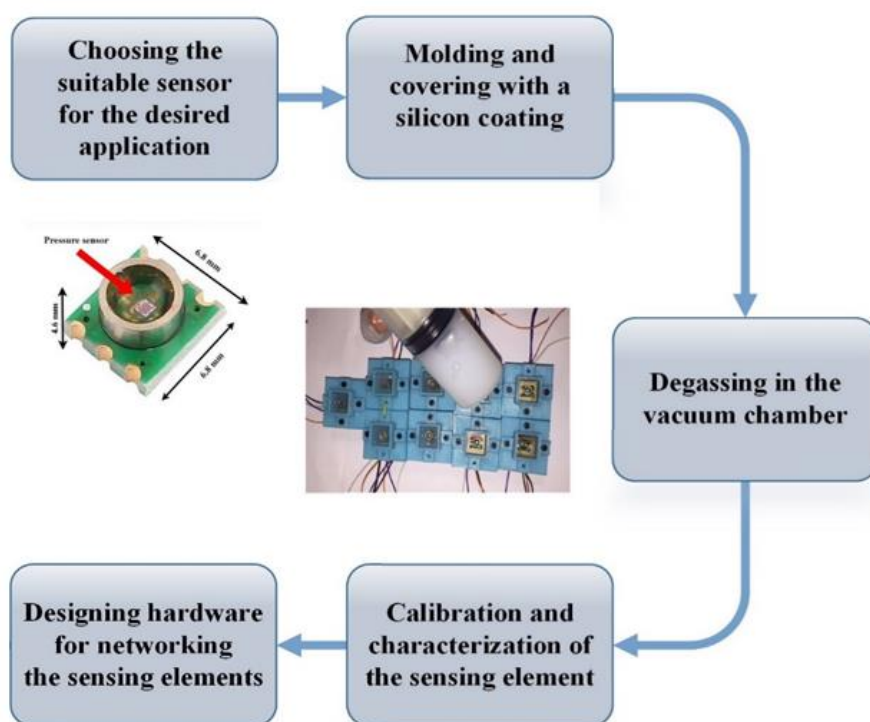


شکل (۲-۵) حسگرهای نیروسنج کف پای ربات نانو [۲۶].

۲. ضعف عدم انعطاف رویه کفه و برآیندگیری صحیح حسگرها: رویه سفت و نا منعطف کفه پای این ربات موجب شد که در فشارهای متفاوت برآیندگیری بین حسگرها دچار اشکال شود در نتیجه مرکز فشار به درستی محاسبه نشود. این بدین مفهوم است که نیروهای وارده فقط مؤلفه عمودی ایجاد نمی‌کنند بلکه در جهات دیگر نیز نیرو وارد کرده که باعث تداخل در محاسبه مرکز فشار در نتیجه نقطه گشتاور صفر می‌شود.

۵-۴- روش انجام تحقیق

با توجه به مشکلاتی که در این پژوهش روبرو شدیم، انتخاب یک حسگر مناسب و طراحی یک برد واسط و طراحی و ساخت یک کفه مناسب مراحل اصلی این قسمت می‌باشد. در ابتدا انتخاب حسگر با شرایط مطلوب و بررسی چگونگی ارتباط با سخت‌افزار واسط و کالیبراسیون نیز مورد بررسی قرار گرفت. مراحل طراحی و قالب‌گیری و کالیبره کردن در بخش‌های بعد بررسی می‌شود. مدار چاپی طراحی شده با توجه به شکل کفه پای نانو طراحی شده است که با استفاده از طراحی سه‌بعدی در محیط نرم‌افزار سالیدورک بسیار دقیق و کارآمد است. تمامی مراحل به شکل مجزا توضیح داده خواهد شد. در شکل (۵-۳) نیز مراحل طراحی حسگر نشان داده شده است.



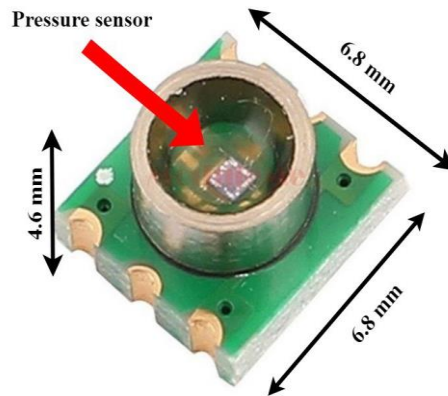
شکل (۳-۵) شمای کلی پژوهش

۵-۵- انتخاب حسگر مناسب

با توجه به حسگرهای زیادی که در بازار موجود است مانند مبدل‌های پیزومقاومتی، پیزوالکتریکی، خازنی، نوری، مغناطیسی و غیره با توجه به مزایا و معایبی که دارند حسگر فشارسنج بارومتري مورد انتخاب قرار گرفت. بارومتر ممز^۱ ارزان و دارای ابعاد کوچک و دقت بالاست و رنج نویز پذیری کمتری دارد، اما رنج کم این حسگر عیب آن است لذا با توجه به این مسئله از فشارسنج دقیقی به نام MD-PS002 استفاده شده است که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. این حسگر دارای خروجی آنالوگ تفاضلی بوده، دارای رنج بسیار بالای ۷۰۰ kpa و ابعاد کوچک ۶/۸*۶/۸*۴/۶ mm است. این فشارسنج که با فناوری ممز طراحی شده و دارای یک پل وتستون مقاومتی با خروجی تفاضلی آنالوگ می‌باشد. این حسگر نیرو با اندازه‌گیری تغییرات خروجی فشارسنج، در اثر اعمال نیروی عمودی به لایه انعطاف‌پذیر

^۱ Mems

سیلیکون که سطح آن را پوشانده است، به سنجش نیرو می‌پردازد. حسگر لمسی حاصل بسیار خطی بوده، ضریب تشخیص برابر با ۰/۹۹ و رنج اندازه‌گیری بسیار بالای دارد.



شکل (۴-۵) شکل و اندازه حسگر

۵-۶- قالب‌گیری و آماده‌سازی حسگر

به‌منظور افزایش دامنه‌ی استفاده از این حسگر از سیلیکون RTV با سختی A۲۵ به‌منظور قالب‌گیری حسگر مذکور استفاده شده است. قالب‌گیری این حسگر توسط قالب ساخته‌شده با پرینتر سه‌بعدی انجام شده است و واحد لمسی دارای ابعاد ۱۰ میلی‌متر در ۱۰ میلی‌متر بوده و سیلیکون با ضخامت ۷ میلی‌متر سطح حسگر فشار را پوشانده است. به‌منظور بالا بردن دقت و کارایی واحد لمسی پس از تزریق سیلیکون، مجموعه در خلأ قرار داده می‌شود تا هوای موجود بین سیلیکون و مکانیزم تبدیلی حسگر تخلیه شود. در نهایت حسگر قالب‌گیری به مدت ۶ ساعت در دمای محیط قرار گرفته تا سیلیکون خشک شود. این لایه سیلیکونی در برابر فشار مستقیم محافظت می‌کند و باعث افزایش دامنه‌ی استفاده از حسگر شده که دقت نمونه‌برداری از اطلاعات را بالا می‌برد. شکل (۵-۵) نحوه تخلیه گاز از سیلیکون را توسط پمپ خلأ نشان می‌دهد.

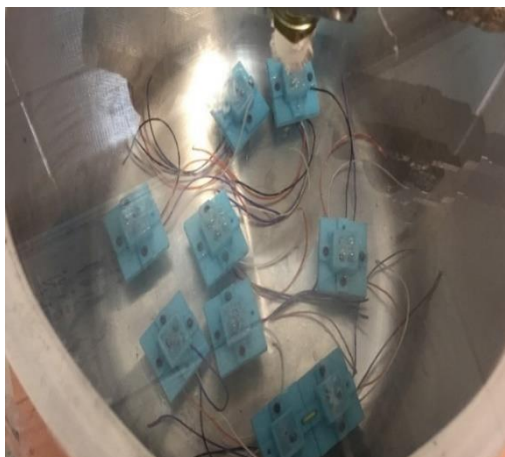


شکل (۵-۵) نحوه تخلیه گاز از سیلیکون را توسط پمپ خلأ

۵-۶-۱- مراحل قالب‌گیری

ابتدا حسگرها را بر روی مدار چاپی که طراحی شده نصب می‌کنیم بعد از سیم‌کشی پایه‌های حسگر آماده برای فرایند قالب‌گیری می‌شود. ترکیب سیلیکون مایع و مقدار تجربی سفت کننده^۱ را ابتدا به مدت ۵ دقیقه در پمپ خلأ می‌گذاریم تا با فرایند هواگیری مولکول‌های هوای محبوس شده در سیلیکون تخلیه شود. سپس آن را در قالب‌هایی از پیش طراحی شده توسط پرینتر سه‌بعدی، تزریق می‌کنیم که در شکل (۶-۵) نمایش داده شده است. مجدد قالب‌های تزریق شده را به مدت ۲۰ دقیقه به منظور هواگیری نهایی در خلأ قرار می‌دهیم که در شکل (۷-۵) نمایش داده شده است. سپس با گذشت ۶ الی ۱۰ ساعت در تماس با هوای محیط، سیلیکون تزریقی خشک شده و آماده جداسازی قالب‌های شکل‌دهی است. اندازه نهایی این حسگر در شکل (۸-۵) نشان داده شده است. جانمایی‌های حسگرها و قالب مذکور کاملاً با توجه به شکل کف پای نانو طراحی شده است تا بهترین عملکرد را داشته باشند.

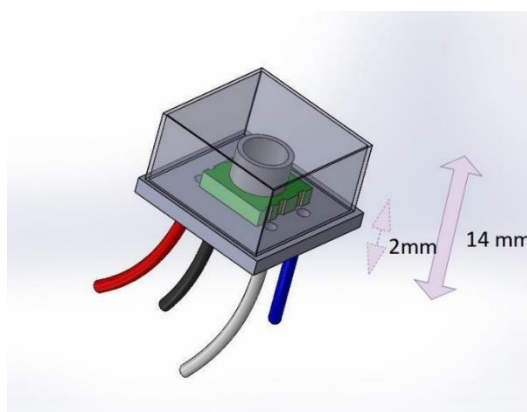
^۱ hardener



شکل (۷-۵) هواگیری جداگانه حسگرها در قالب



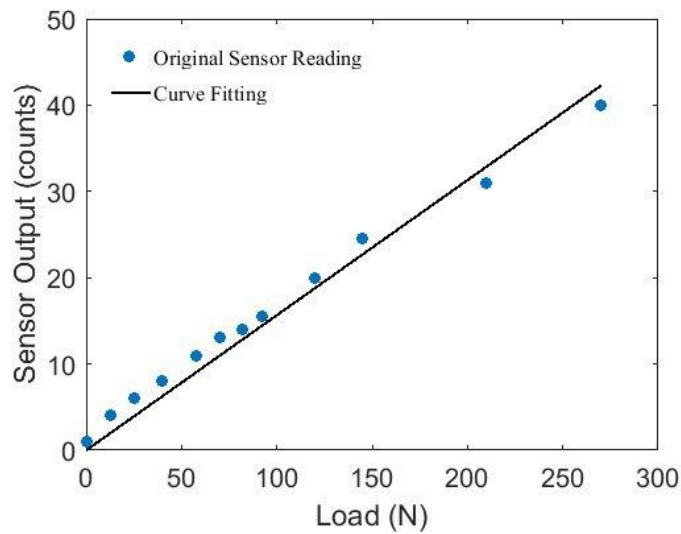
شکل (۶-۵) تزریق مخلوط سیلیکون و هاردنر در قالب



شکل (۸-۵) نما و اندازه نهایی بسته حسگر

۵-۶-۲- کالیبراسیون حسگرهای سیلیکونی

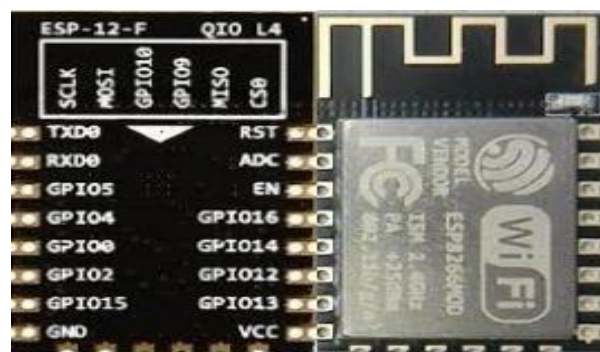
برای کالیبراسیون مقادیری نیروی مشخص تا ۳۰۰ نیوتن، به حسگرها اعمال شد و پس از آن مقادیر خروجی هر حسگر قرائت شده. مقادیر خروجی حسگر، نیروی اعمال شده و بهترین خط عبور کننده از تمامی نقاط در شکل (۹-۵) نشان داده شده است که دقتی تا ۰/۹۹ خطی دارد. همین طور اندازه گیری فشار شکست حسگر با اعمال نیرویی حدود ۱۰۰۰ نیوتن، در شرایط آزمایشگاهی انجام شده است که حسگر بدون صدمه فیزیکی خاصی و همراه با کارایی قبلی باقی ماند.



شکل (۵-۹) مشخصه خطی المان اندازه

۵-۷- طراحی مدار و برد الکترونیکی

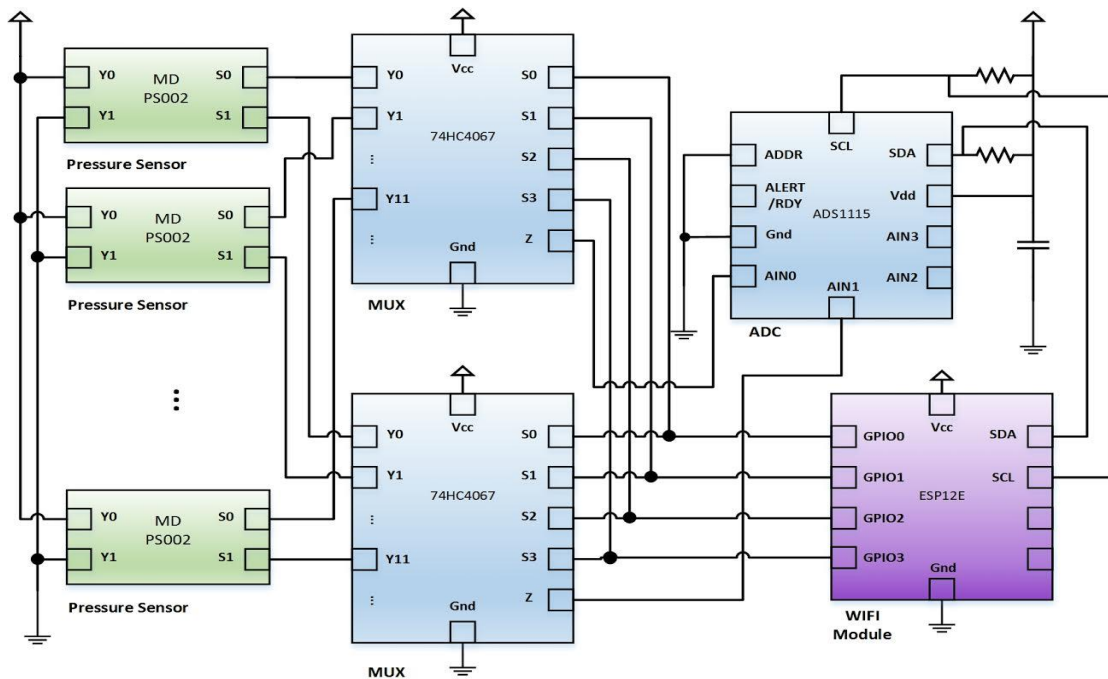
به منظور خواندن مقادیر حسگرها و انتقال داده‌ها به صورت بیسیم از پردازنده ESP12E که یک پردازنده‌ی ارزان، کوچک و دقیقی است استفاده شده است. این پردازنده با قدرت پردازش ۲/۴ گیگاهرتز، مبدل آنالوگ به دیجیتال، ارتباط اس‌پی‌ای^۱، ارتباط وای‌فای^۲ و رنج کارکرد دمایی مناسب ۴۰ الی ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد یکی از بهترین انتخاب‌ها برای این منظور است که در شکل (۵-۱۰) نمایش داده شده است.



شکل (۵-۱۰) پروسور ESP12E

¹ In-system programming

² WIFI



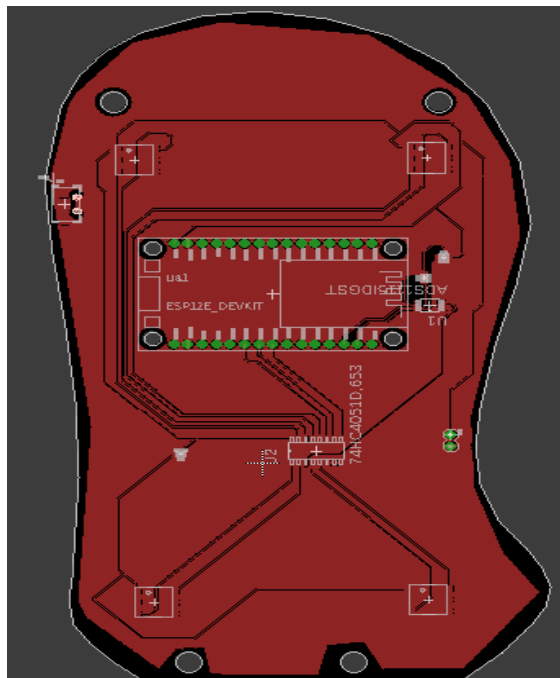
شکل (۵-۱۱) شماتیک نحوه اتصال حسگرها به مالتی پلکسر، میکرو و مبدل دیجیتال در حالت کلی

ماژول وای فای این پردازنده، می‌تواند به یک سرور شبکه خارجی متصل شود یا خود سرور باشد و کلاینت خارجی را بپذیرد. در این پژوهش میکرو به‌عنوان سرور قرار گرفته است. اطلاعات حسگرها به‌صورت پروتکل ای تو سی^۱ توسط میکرو خوانده‌شده و از طریق وای فای به شبکه‌ی ایچ دی ام ال محلی^۲ ارسال می‌شود. به‌منظور انتقال زمان-واقعی اطلاعات برخی قطعات دیگر موردنیاز است. شکل (۵-۱۱) شماتیک نحوه اتصال میکرو به حسگرها را نشان می‌دهد. خروجی حسگر بارومتر دو مقدار تفاضلی آنالوگ است به همین دلیل از یک مالتی پلکسر ۱۶ به ۱ اس ام دی استفاده می‌شود. به این دلیل که میکرو فقط یک‌پایه مبدل آنالوگ به دیجیتال دارد، اطلاعات با پروتکل ای تو سی به پردازنده ارسال می‌شوند. مبدل داخلی دارای رزولوشن ۱۶ بیت است لذا هیچ‌گونه از دست رفت اطلاعات وجود نخواهد داشت. تغذیه تمام این قطعات از یک باتری با خروجی ۵ ولت لیتیم-یون تأمین می‌شود.

¹ Inter IC Bus

² Local HTML

مدار چاپی طراحی شده همان‌طور که گفته شد به شکل پای نائو برش داده شده است همین‌طور تمام قطعات فوق‌الذکر به‌جز باتری که زیر پای ربات جانمایی شده در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است.

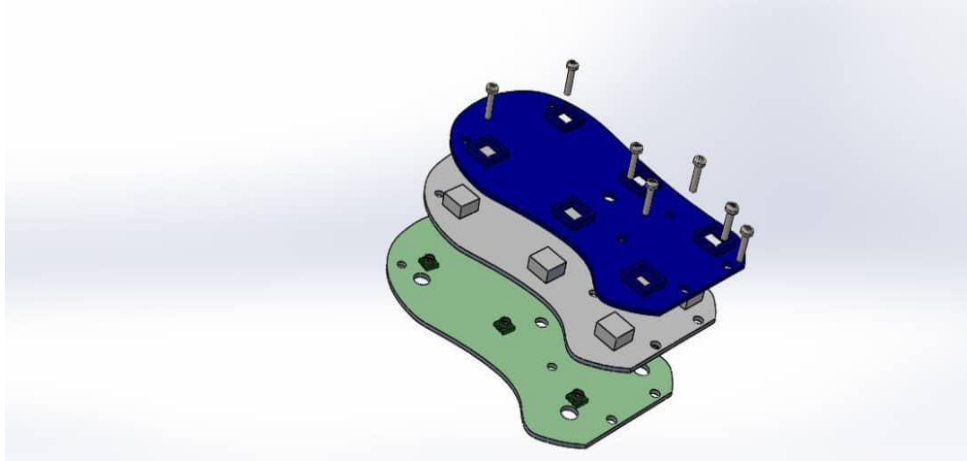


شکل (۵-۱۲) طرح مدار چاپی

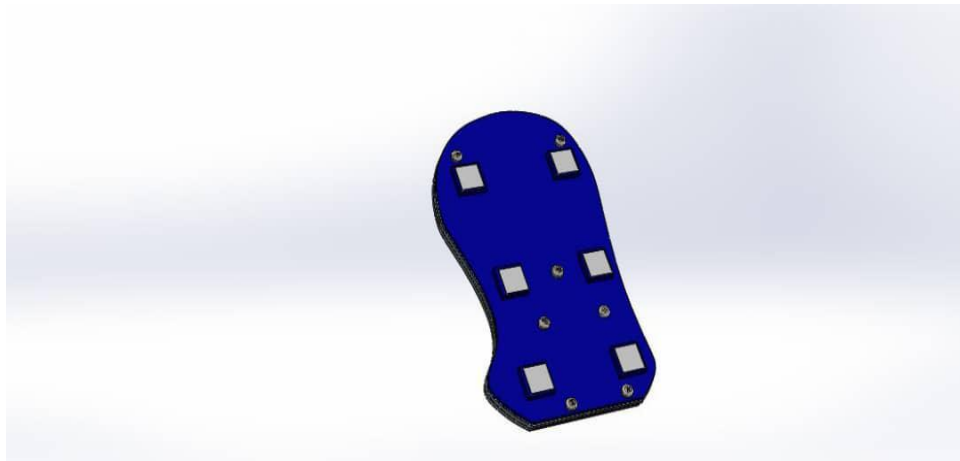
۵-۸- طراحی رویه سه‌بعدی

ابتدا با دسترسی به رویه سه‌بعدی پای نائو از شرکت الدباران رباتیکز اندازه‌های واقعی ربات را به دست آورده سپس به کمک نرم‌افزار سالی‌دورک رویه‌های موردنیاز را طراحی کرده و از طریق پرینتر سه‌بعدی رویه‌ها را ساختیم. رویه‌های طراحی شده در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است. سطح رویه زیرین برای حسگرها جانمایی شده و رویه میانی که از جنس سیلیکون است بر روی برد اصلی حسگرها نصب می‌شود که در نهایت رویه سخت که از جنس پلیمر خاص است که توسط پرینتر سه‌بعدی ساخته شده نصب می‌شود به‌گونه‌ای که فقط سطح سیلیکونی که حسگر در آن جانمای شده با سطح زمین در تماس باشد که در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است. با توجه به تماس مستقیم حسگرها با سطح زمین درصد

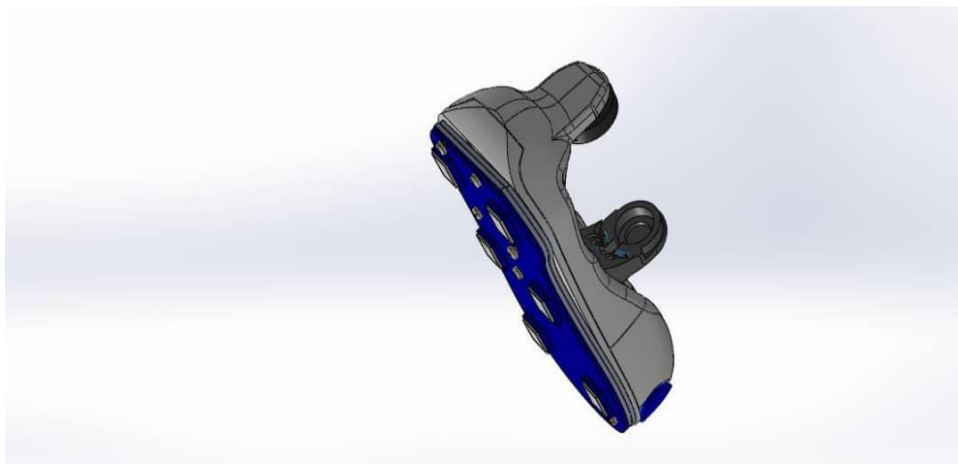
خطا کمتر و ضریب اطمینان در برآیند نیرو بیشتر شده و درنهایت با جانمایی در قالب اصلی پای ربات به شکل (۵-۱۵) در آمده است البته جانمایی باتری ۵ ولتی نیز در درون این قالب صورت گرفته است.



شکل (۵-۱۳) نمای اتصال لایه‌ها



شکل (۵-۱۴) نمای از کف و جانمایی حسگرها

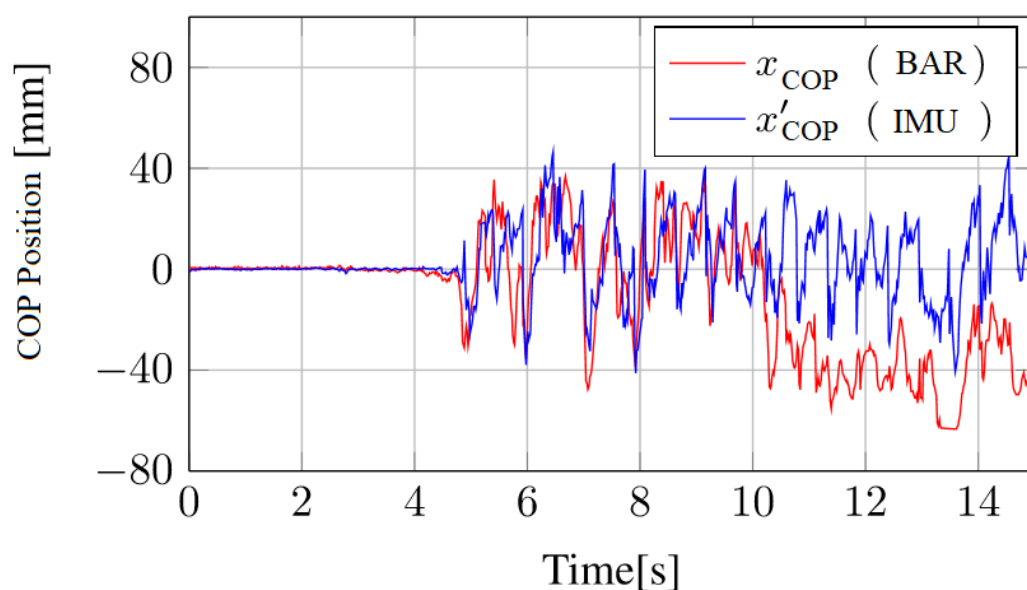


شکل (۵-۱۵) شکل کلی قالب

۵-۹- مقایسه مقدار اندازه‌گیری مرکز فشار ربات و المان ساخته‌شده

با در نظر گرفتن اغتشاشی به‌اندازه ۱۰۰ نیوتن در صفحه کناری و اعمال به المان ساخته‌شده و ربات نائو در نرم‌افزار متلب مقایسه‌ای برای به دست آوردن مرکز فشار انجام‌شده است که پاسخ حاصله مطلوب و قابل قبول بوده است. داده‌های ثبت‌شده ربات در این مقایسه، با استفاده از حسگرهای داخلی پیاده‌سازی شده است و به کمک کتابخانه‌های استاندارد ربات نائو مرکز فشار محاسبه‌شده است که با مرکز فشار به‌دست‌آمده از المان ساخته‌شده مقایسه شده است و در شکل (۵-۱۶) نشان داده‌شده است.

x_{COP} and x'_{COP} displacement



شکل (۵-۱۶) مقایسه مرکز فشار ربات و المان ساخته شده

۵-۱۰-جمع بندی:

با توجه به ارزیابی انجام شده المان ساخته شده کارآمد و با دقت خوبی داده‌های مربوط به فشار وارده را برآیندگیری کرده که در این مطالعه منجر به بهبود عملکرد بازیابی تعادل ربات گشته است با توجه به مشکلاتی همچون محاسبات در زمان واقعی این حسگر و اعمال به کنترلر ربات می‌تواند موضوع قابل بررسی باشد. با در نظر گرفتن یک پکیج برنامه‌نویسی برای این المان می‌توان ماژول جدیدی برای کتابخانه ربات نانو تعیین کرد که به شکل یک ای پی ای در سایت الدباران ارائه شود.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

۶-۱- نتیجه گیری

در فصل چهارم برای دستیابی به بهبود بازیابی تعادل ربات انسان‌نما نائو، از رویکرد نقطه جذب استفاده شده است. برای این منظور، یک مدل کنترل پیش‌بین استفاده شده است که با استفاده از استراتژی ترکیبی لگن و مچ پا با مدوله کردن گشتاور چرخشی بالاتنه و نقطه گشتاور صفر برای کنترل نقطه جذب مورد استفاده قرار گرفته است تا موقعیت نقطه گشتاور صفر همچنان در چندضلعی پشتیبانی قرار گیرد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر این است که رویکرد پیشنهادی در مقابل اغتشاشات مختلف کارآمد و مفید است حتی زمانی که چندضلعی پشتیبانی محدود بوده و ربات مجاز به گام برداشتن نبود. در ارزیابی با نرم افزار شبیه‌ساز ویباتز بر نتایج بدست آمده صحت‌گذاری شده و پیاده‌سازی تجربی از این الگوریتم روی ربات واقعی نائو انجام شده است. در فصل پنجم با توجه به ارزیابی انجام‌شده المان ساخته‌شده کارآمد و با دقت خوبی داده‌های مربوط به فشار وارده را برآیندگیری کرده که در این مطالعه منجر به بهبود عملکرد بازیابی تعادل ربات گشته است.

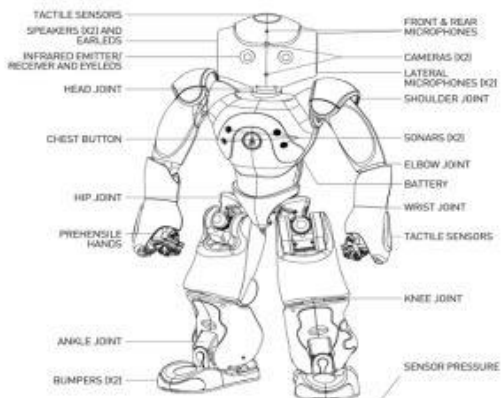
۶-۲- پیشنهادها

اصطکاک سطح کف پا با زمین در این مطالعه در نظر گرفته نشده است که در آینده می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. پیاده‌سازی از این الگوریتم با رویکرد مقاوم روی ربات واقعی نائو، چالش اصلی کار آینده ما خواهد بود. با توجه به مشکلاتی همچون محاسبات در زمان واقعی این حسگر و اعمال به کنترلر ربات می‌تواند موضوع قابل بررسی باشد. با در نظر گرفتن یک پکیج برنامه‌نویسی برای این المان می‌توان ماژول جدیدی برای کتابخانه ربات نائو تعیین کرد که به شکل یک ای پی ای در سایت الدباران ارائه شود.

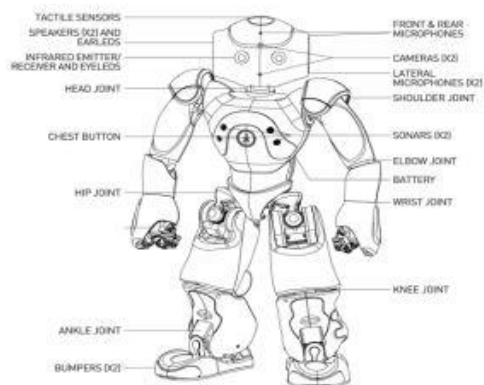
پیوست

پیوست. الف

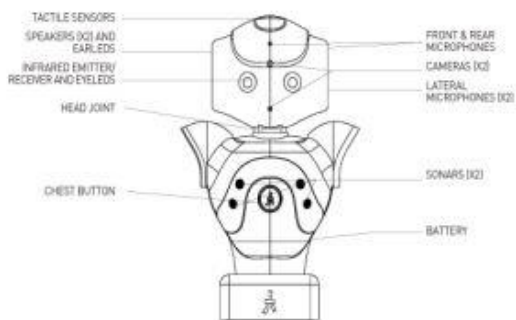
در شکل (الف. ۱) نقشه شماتیک انواع ربات‌های نائو را نشان داده شده است.



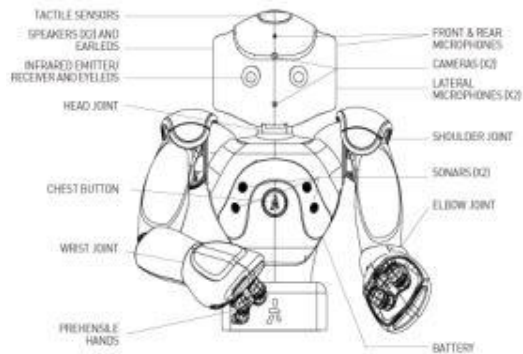
نقشه شماتیک نائو اچ ۲۵



نقشه شماتیک نائو اچ ۲۱



نقشه شماتیک نائو تی ۲۱



نقشه شماتیک نائو تی ۲۱

NAO™

شکل (الف. ۱) نقشه شماتیک انواع ربات‌های نائو [۲۶].

مشخصات فنی ربات نائو در شکل (الف.۲) نشان داده شده است.

IR

NUMBER	×2 on front
WAVELENGTH	940nm
EMISSION ANGLE	+/-60°
POWER	8mW/sr

SONAR

EMITTERS	×2 on front
RECEIVERS	×2 on front
FREQUENCY	40kHz
SENSITIVITY	-86dB
RESOLUTION	1cm
DETECTION RANGE	0.25m to 2.55m
EFFECTIVE CONE	60°

INERTIAL UNIT

GYROMETER	×2	
	Axis	1 per gyrometer
	Precision	5%
	Angular speed	-500°/s
ACCELEROMETER	×1	
	Axis	3
	Precision	1%
	Acceleration	-2g

FSR (FORCE SENSITIVE RESISTORS)

RANGE	0 to 110N
	×4 per feet

POSITION SENSORS

	NAO HUMANOID
MRE (Magnetic Rotary Encoder)	×36
	Using hall effect sensor technology
Precision:	12bits / 0.1°

SOFTWARE

OPEN NAO	Embedded GNU/Linux Distribution based on Gentoo
ARCHITECTURE	×86
PROGRAMMING	Embedded: C++ / Python Remote: C++ / Python / .NET / Java / MatLab

LEDS

PLACEMENT	QUANTITY	DESCRIPTION
Tactile Head	×12	16 Blue levels
Eyes	2×8	RGB FullColor
Ears	2×10	16 Blue levels
Chest button	×1	RGB FullColor
Feet	2×1	RGB FullColor

CONTACT SENSOR

	NAO HUMANOID
Chest Button	✓
Foot Bumper	✓
Tactile Head	✓
Tactile Hand	✓

DEGREES OF FREEDOM

	NAO HUMANOID
HEAD	×2 dof
ARM (IN EACH)	×5 dof
PELVIS	×1 dof
LEG (IN EACH)	×5 dof
HAND (IN EACH)	×1 dof

شکل (الف.۲) مشخصات فنی ربات نائو [۲۶].

مشخصات فنی مکانیکی و الکتریکی ربات نائو:

جدول الف-۱ ابعاد دست‌های نائو [۲۶].

معادل انگلیسی	طول (میلی‌متر)	مشخصه
ShoulderOffsetY	۹۸,۰۰	فاصله ارتفاعی دست
ElbowOffsetY	۱۵,۰۰	فاصله افقی دست
UpperArmLength	۱۰۵,۰۰	طول بازو
LowerArmLength	۵۵,۹۵	طول ساعد

جدول الف-۲ وزن قسمت‌های ربات نائو [۲۶].

وزن (کیلوگرم)	مشخصه
۱,۰۵۰	نیم‌تنه
۰,۶۷۰	سر
۰,۵۳	بازو (راست/چپ)
۱,۲۵	پا (راست/چپ)

جدول الف-۳ درجه آزادی و بازه حرکتی سر ربات نائو [۲۶].

درجه آزادی	نشان اختصاری	بازه حرکتی (درجه)
۱	HeadYaw	$[-119,5, 119,5]$
۲	HeadPitch	$[-38,5, 29,5]$

جدول الف-۴ درجه آزادی و بازه حرکتی دست ربات نائو [۲۶].

درجه آزادی	نشان اختصاری	بازه حرکتی (درجه)
دست راست		
۱	RShoulderPitch	$[-119,5, 119,5]$
۲	RShoulderRoll	$[-76,0, 18,0]$
۳	RShoulderRoll	$[-119,5, 119,5]$
۴	RElbowRoll	$[2,0, 88,5]$
۵	RWristYaw	$[-104,5, 104,5]$
۶	RHand	-
دست چپ		
۱	LShoulderPitch	$[-119,5, 119,5]$
۲	LShoulderRoll	$[-18,0, 76,0]$
۳	LShoulderRoll	$[-119,5, 119,5]$
۴	LElbowRoll	$[-2,0, -88,5]$
۵	LWristYaw	$[-104,5, 104,5]$
۶	LHand	-

جدول الف-۵ درجه آزادی و بازه حرکتی پای ربات نائو [۲۶].

درجه آزادی	نشان اختصاری	بازه حرکتی (درجه)
پای راست		
۱	RHipRoll	[۲۳,۷۶, -۴۲,۳۰]
۲	RHipPitch	[۲۷,۸۲, -۱۰۱,۵۴]
۳	RKneePitch	[۱۲۱,۴۷, -۵,۹۰]
۴	RAnklePitch	[۵۳,۴۰, -۶۷,۹۷]
۵	RAnkleRoll	[۲۲,۲۷, -۴۵,۰۳]
پای چپ		
۱	LHipRoll	[۴۵,۲۹, -۲۱,۷۴]
۲	LHipPitch	[۲۷,۷۳, -۱۰۱,۶۳]
۳	LKneePitch	[۱۲۱,۰۴, -۵,۲۹]
۴	LAnklePitch	[۵۲,۸۶, -۶۸,۱۵]
۵	LAnkleRoll	[۴۴,۰۶, -۲۲,۷۹]
مشترک بین دو پا		
۱	LHipYawPitch/RHipYawPitch	[۴۲,۴۴, -۶۵,۶۲]

جدول الف-۶ مشخصات باتری ربات نائو [۲۶].

مشخصه	مقدار
۱ نوع باتری	لیتیوم یون
۲ ولتاژ نامی	۲۱,۶ ولت
۳ ظرفیت توانی	۲,۱۵ آمپر ساعت
۴ ماکزیمم جریان	۲,۰ آمپر
۵ مدت زمان شارژ	۶۰ دقیقه (حالت کاری) / ۹۰ دقیقه (حالت عادی)

مراجع

- [1] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2003, September). Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422)* (Vol. 2, pp. 1620-1626). IEEE.
- [2] Parashar, A., Parashar, A., Goyal, S., & Sahjajan, B. (2016, March). Push recovery for humanoid robot in dynamic environment and classifying the data using K-mean. In *Proceedings of the Second International Conference on Information and Communication Technology for Competitive Strategies* (p. 1). ACM.
- [3] Aftab, Z., Robert, T., & Wieber, P. B. (2012, November). Ankle, hip and stepping strategies for humanoid balance recovery with a single Model Predictive Control scheme. In *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)* (pp. 159-164). IEEE.
- [4] Yi, S. J., Zhang, B. T., Hong, D., & Lee, D. D. (2011, May). Learning full body push recovery control for small humanoid robots. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2047-2052). IEEE.
- [5] Stephens, B. J., & Atkeson, C. G. (2010, December). Push recovery by stepping for humanoid robots with force controlled joints. In *2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (pp. 52-59). IEEE.
- [6] Yun, S. K., & Goswami, A. (2011, September). Momentum-based reactive stepping controller on level and non-level ground for humanoid robot push recovery. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 3943-3950). IEEE.
- [7] Pratt, J., Carff, J., Drakunov, S., & Goswami, A. (2006, December). Capture point: A step toward humanoid push recovery. In *2006 6th IEEE-RAS international conference on humanoid robots* (pp. 200-207). IEEE.
- [8] Koolen, T., De Boer, T., Rebula, J., Goswami, A., & Pratt, J. (2012). Capturability-based analysis and control of legged locomotion, Part 1: Theory and application to three simple gait models. *The International Journal of Robotics Research*, 31(9), 1094-1113.
- [9] Krause, M., Engelsberger, J., Wieber, P. B., & Ott, C. (2012). Stabilization of the capture point dynamics for bipedal walking based on model predictive control. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(22), 165-171.
- [10] Goswami, A., & Kallem, V. (2004, April). Rate of change of angular momentum and balance maintenance of biped robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004* (Vol. 4, pp. 3785-3790). IEEE.
- [11] Vukobratović, M., & Stepanenko, J. (1972). On the stability of anthropomorphic systems. *Mathematical biosciences*, 15(1-2), 1-37.
- [12] Takanishi, A., Tochizawa, M., Takeya, T., Karaki, H., & Kato, I. (1989). Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion under known external force. In *Advanced Robotics: 1989* (pp. 299-310). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [13] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2003, September). Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422)* (Vol. 2, pp. 1620-1626). IEEE.
- [14] Goswami, A. (1999). Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point. *The International Journal of Robotics Research*, 18(6), 523-533.

- [15] Sardain, P., & Bessonnet, G. (2004). Forces acting on a biped robot. Center of pressure-zero moment point. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 34(5), 630-637.
- [16] Harada, Kensuke, Kajita, Shuuji, Kaneko, Kenji, and Hirukawa, Hirohisa. (2003) Pushing manipulation by humanoid considering two-kinds of zmps. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, Vol. 2, pp1627–1632.IEEE.
- [17] Kajita, S., Yamaura, T., & Kobayashi, A. (1992). Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 8(4), 431-438.
- [18] Kajita, S., & Tani, K. (1991, April). Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain-derivation and application of the linear inverted pendulum mode. In *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1405-1411). IEEE.
- [19] Yamane, K., & Nakamura, Y. (2003). Dynamics filter-concept and implementation of online motion generator for human figures. *IEEE transactions on robotics and automation*, 19(3), 421-432.
- [20] Ames, A. D., Cousineau, E. A., & Powell, M. J. (2012, April). Dynamically stable bipedal robotic walking with NAO via human-inspired hybrid zero dynamics. In *Proceedings of the 15th ACM international conference on Hybrid Systems: Computation and Control* (pp. 135-144). ACM.
- [21] Sherikov, A. (2012). Model predictive control of a walking bipedal robot using online optimization.
- [22] Wenk, F., & Röfer, T. (2013, June). Online generated kick motions for the NAO balanced using inverse dynamics. In *Robot Soccer World Cup* (pp. 25-36). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [23] Alcaraz-Jiménez, J. J., Herrero-Pérez, D., & Martínez-Barberá, H. (2013). Robust feedback control of ZMP-based gait for the humanoid robot Nao. *The International Journal of Robotics Research*, 32(9-10), 1074-1088.
- [24] Wieber, P. B. (2006, December). Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations. In *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (pp. 137-142). IEEE.
- [25] Alcaraz-Jiménez, Juan José, Missura, Marcell, Martínez-Barberá, Humberto, and Behnke, Sven. (2013) Lateral disturbance rejection for the nao robot. In *RoboCup 2012: Robot Soccer World Cup XVI*, pp. 1–12. Springer.
- [26] Robotics, Aldebaran. (2014) Nao software documentation.
- [27] Westervelt, E. R., Grizzle, J. W., Chevallereau, C., Choi, J. H., & Morris, B. (2018). Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion.
- [28] Cink, Shane. (2011) Transverse plane.
- [29] Wikipedia, "center of mass" (2018). https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Center_of_mass&oldid=826373631.
- [30] Goswami, A. (1999). Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point. *The International Journal of Robotics Research*, 18(6), 523-533.
- [31] Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D., & Stokic, D. (1990). Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application (Scientific Fundamentals of Robotics).
- [32] Shafii, N. (2015). Development of an Optimized Omnidirectional Walk Engine for Humanoid Robots.

- [33] Pratt, J., Carff, J., Drakunov, S., & Goswami, A. (2006, December). Capture point: A step toward humanoid push recovery. In *2006 6th IEEE-RAS international conference on humanoid robots* (pp. 200-207). IEEE.
- [34] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2001). 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)* (Vol. 1, pp. 239-246). IEEE.
- [35] Kasaei, S. M., Lau, N., Pereira, A., & Shahri, E. (2017, April). A reliable model-based walking engine with push recovery capability. In *2017 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)* (pp. 122-127). IEEE.
- [36] Komura, T., Leung, H., Kudoh, S., & Kuffner, J. (2005, April). A feedback controller for biped humanoids that can counteract large perturbations during gait. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1989-1995). IEEE.
- [37] Komura, T., Nagano, A., Leung, H., & Shinagawa, Y. (2005). Simulating pathological gait using the enhanced linear inverted pendulum model. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 52(9), 1502-1513.
- [38] Kiemel, S. (2012). Balance maintenance of a humanoid robot using the hip-ankle strategy.
- [39] Sun, G., Wang, H., & Lu, Z. (2015). A novel biped pattern generator based on extended ZMP and extended cart-table model. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(7), 94.
- [40] Feizi, A. H., Zarif, M. H., Nazari, M., & Varedi-Koulai, S. M. (2018, October). PR-MPC for NAO H21 Humanoid Robot: Capture Point Approach. In *2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM)* (pp. 428-433). IEEE.
- [41] Wahid, Abdul. (2016) Improved Multi Model Predictive Control for Distillation Column. Diss. Universiti Teknologi Malaysia.

Abstract:

This thesis, a balance recovery for the humanoid robot of the Nao-21 is improve. the objective function based on the predictive model control approach and evaluation. Considering the position of capture point and position of zero moment point and the angular momentum rate of robot and position of the robot as the system mode vectors and the rate of speed changes of the trunk and zero moment rate changes as a control input is an optimization issue is designed. A combined ankle and hip strategy has been used for the recovery of the balance of other strategies and have been investigated. Considering the inverse pendulum dynamic model, along with with with with the rotary cycle and zero moment point modulation and the rotational torque of the trunk is a limited and definite cost function that forms the capture point. By applying external disturbance, the capture point has been supported outside the support polygon, which with the help of the predictive controller of the cost function in the most optimum situation, and by applying changes in the rotating torque of the trunk capture point to the support polygon was guided and the recovery of balance of the robot is possible. All of these simulations were performed in MATLAB software and were used to evaluate the software emulator. Finally, the empirical implementation of this algorithm has been done on the real robot. Due to hardware weakness of Nao robot in the pressure sensor part of a three-dimensional procedure, which includes the barometer element, is designed and manufactured for evaluation in MATLAB software and features of the sensor outputs and the designed elements are compared to the results of efficient elements And with good accuracy, it has been concluded that in this study, it has resulted in improved performance of robot balance recovery.

Keywords: Humanoid robot; balance recovery; predictive control; capture point; zero moment point; angular turqe; support polygon.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Robotics

MSc .Thesis in Control Engineering

**Improving push recovery of a humanoid robot in the presence
of external disturbances**

By:

AmirHossein Feizi

Supervisor:

Dr.Mohammad Hadad Zarif

June 2019