



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک

کنترل راه رفتن ربات دوپای سه بعدی با در نظر گرفتن دوران پنجه پا

دانشجو

حسام خوافی

استاد راهنما

دکتر حبیب احمدی

استاد مشاور

دکتر مهدی بامداد

شهریور ۹۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به دو وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا من به توانایی رسیدم...

مواهبشان سپید شد تا من رو سفید شدم...

پدر و مادر عزیزم

## تشکر و قدردانی

جناب آقای دکتر حبیب احمدی استاد راهنمای گرامی،

چگونه سپاس گویم تأثیر علم آموزی شما را که چراغ روشن هدایت را بر کلبه‌ی محقر وجودم فروزان ساخته است. همچنین از جناب آقای دکتر بامداد که به عنوان استاد مشاور قبول زحمت فرموده‌اند از صمیم قلب سپاس گزارم.

از دوست عزیزم جناب آقای مهندس اسکندری و دیگر دوستانی که از راهنمایی‌ها و محبتشان بهره‌مند شدم، کمال تشکر را دارم.

## تعهد نامه

این جانب حسام خوافی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه "کنترل راه رفتن ربات دوپای سه بعدی با در نظرگیری دوران پنجه پا" تحت راهنمایی دکتر حبیب احمدی متعهد می‌شوم.

- 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 شاهرود هست و مقالات مستخرج با نام <دانشگاه شاهرود> و یا <Shahrood University> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافته ای آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شد است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل راز داری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

### امضای دانشجو

### تاریخ

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد هست. 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 نمی‌باشد.

## چکیده

امروزه ربات‌های پادار، یکی از موارد مورد توجه پژوهشگران علم رباتیک می‌باشند. این ربات‌ها به دلیل قابلیت مانور بهتر نسبت به انواع دیگر ربات‌ها، توانایی عبور از موانع موجود در محیط زندگی انسان را دارند. ربات‌های دوپا یکی از انواع ربات‌های پادار بوده که مهم‌ترین و اساسی‌ترین مسئله در آن‌ها، ایجاد مسیر پایدار برای حرکتشان است. در بسیاری از منابع علمی، ربات دوپا به صورت دو بعدی و بدون حرکت فعال پنجه پا مدل‌سازی و تحلیل شده است. به‌منظور نزدیک‌تر شدن مدل‌سازی حرکت ربات به حرکت پای انسان در این پایان‌نامه، ربات به صورت سه بعدی و همراه با در نظرگیری حرکت فعال پنجه پا بررسی شد. در این میان، از کاربردی‌ترین معیار پایداری در ربات‌های دوپا یعنی، معیار نقطه گشتاور صفر بهره گرفته شد.

در این پژوهش، ابتدا به معرفی ربات‌های دوپا، تاریخچه، ویژگی‌ها، اصول و اصطلاحات رایج مربوط به آن‌ها پرداخته شده و همچنین نگاهی اجمالی به منحنی‌های حرکتی انسان به‌منظور درک بهتر راه رفتن صورت گرفته است. سپس به طراحی مسیر گام پایدار برای یک ربات ۹ عضوی فعال به کمک پایداری نقطه گشتاور صفر اقدام شده است. یکی از ویژگی‌های گام برداشتن انسان به‌منظور ایجاد گام‌های بلندتر، وجود حالتی است که در آن کف پا حول مفصل پنجه پا دوران می‌کند. از این رو در این پایان‌نامه از گامی استفاده می‌شود که همانند انسان در لحظاتی از حرکت، پای تکیه‌گاه ربات حول مفصل پنجه پا به صورت فعال دوران می‌کند. روش مورد استفاده برای حل معادلات حرکت این ربات استفاده از قیدی فرضی برای نقطه گشتاور صفر است. با استفاده از این روش معادله اولیه قابل قبولی برای حرکت ربات به دست می‌آید و به کمک الگوریتمی مسیر حرکت مفاصل ربات محاسبه می‌شود. سپس با بررسی پایداری نقطه گشتاور صفر ربات و به کمک الگوریتم دیگری مبتنی بر آزمون و خطا، حرکت مطلوب ربات و مسیرهای مطلوب حرکت مفاصل حاصل می‌شود. در نهایت برای کنترل

ربات دوپای فوق از روش کنترل گشتاور محاسبه شده برای ردگیری مسیرهای مطلوب حرکت مفاصل ربات استفاده شده است. ضرایب بهره تناسبی و مشتقی این کنترل کننده به کمک روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات که الگو گرفته از زندگی اجتماعی حیوانات است، بدست آمد.

**کلمات کلیدی:** ربات دوپا، سینماتیک و دینامیک ربات، نقطه گشتاور صفر، کنترل گشتاور

محاسبه شده، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات.

## فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۲
۱-۱ مقدمه .....	۲
۲-۱ کاربردهای ربات‌های انسان‌نما .....	۴
۳-۱ ربات‌های خدمتکار .....	۴
۴-۱ ربات‌ها و انجام مأموریت‌های مخاطره آمیز .....	۶
۱-۴-۱ ربات‌های پوشش خارجی .....	۶
۲-۴-۱ ربات‌های دفاعی .....	۷
۵-۱ خلاصه‌ای از سیر تکاملی ربات‌های دوپا .....	۸
۱-۵-۱ ربات‌های شرکت صنعتی هوندا .....	۱۲
۲-۵-۱ ربات‌های شرکت تویوتا .....	۱۳
۳-۵-۱ ربات‌های ساخته‌شده در AIST .....	۱۳
۴-۵-۱ ربات‌های شرکت سونی .....	۱۴
۶-۱ طراحی ربات دوپا .....	۱۵
۷-۱ بیومکانیک دوپاها و نگاهی اجمالی به منحنی‌های حرکت انسان .....	۱۸
۱-۷-۱ سیستم‌های بیومکانیکی .....	۱۹
۲-۷-۱ مشخصات راه رفتن و دویدن در انسان .....	۲۱
۲-۷-۱ منحنی‌ها و نمودارهای حرکت انسان .....	۲۲
۸-۱ انگیزه و نوآوری تحقیق .....	۲۶
۹-۱ طرح‌بندی فصول پایان‌نامه .....	۲۶



فصل دوم: اصول و مفاهیم اولیه در ربات‌های دوپا .....	۳۰
۱-۲ مقدمه .....	۳۰
۲-۲ ربات‌های دوپا و تقسیم‌بندی آن‌ها .....	۳۰
۱-۲-۲ ربات‌های دوپای دارای مفاصل فعال .....	۳۰
۱-۲-۲ ربات‌های دوپا با مفصل غیر فعال .....	۳۳
۴-۲ تعادل و معیارهای بررسی آن در یک ربات دوپا .....	۳۸
۱-۴-۲ محدوده تعادل کف پا یا چند ضلعی تکیه‌گاهی .....	۳۸
۲-۴-۲ ناحیه پایداری و حاشیه پایداری .....	۳۹
۳-۴-۲ مرکز فشار .....	۳۹
۳-۴-۲ مرکز جرم .....	۳۹
۳-۲ انواع معیارهای پایداری و مفاهیم آن .....	۴۰
۱-۳-۲ معیار پایداری مرکز ثقل .....	۴۰
۲-۳-۲ معیار پایداری نقطه گشتاور صفر یا ZMP .....	۴۰
۴-۲ معیار نقطه گشتاور صفر [۵۶] .....	۴۱
۱-۴-۲ مفهوم نقطه گشتاور صفر .....	۴۲
۵-۲ صفحات حرکتی در راه رفتن ربات دوپا .....	۴۷
۶-۲ فازهای حرکتی در راه رفتن ربات .....	۴۸
فصل سوم: سینماتیک ربات دوپا .....	۵۲
۱-۳ مقدمه .....	۵۲
۲-۳ معرفی ربات مورد مطالعه .....	۵۲

۵۵	۳-۳ معادلات سینماتیک ربات دوپا [۶۵]
۵۷	۴-۳ به دست آوردن مسیر حرکت مفاصل
۶۶	۵-۳ روش حل مسئله سینماتیک ربات دوپا
۶۹	۶-۳ نتایج مسیره‌های حرکت مفاصل
<b>۷۶</b>	<b>فصل چهارم: دینامیک و کنترل ربات دوپا</b>
۷۶	۱-۴ مقدمه
۷۶	۲-۴ تشریح معادلات نقطه گشتاور صفر
۸۱	۳-۴ دینامیک ربات
۸۱	۱-۳-۴ مختصات و نیروهای تعمیم یافته در ربات
۸۲	۲-۳-۴ معادلات لاگرانژ ربات
۸۴	۳-۳-۴ ژاکوبین ربات دوپا
۹۰	۴-۴ کنترل ربات دوپا
۹۰	۱-۴-۴ روش کنترل گشتاور محاسبه شده
۹۳	۲-۴-۴ الگوریتم بهینه اجتماع ذرات
۹۶	۳-۴-۴ نتایج بهینه‌سازی برای کنترل ربات
<b>۱۰۶</b>	<b>فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات</b>
۱۰۶	۱-۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۰۷	۲-۵ پیشنهادات
<b>۱۰۸</b>	<b>پیوست</b>
<b>۱۰۹</b>	<b>منابع</b>

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ربات کمک‌کننده به سالمندان در دانشگاه واسادا ژاپن [۸]..... ۵
- شکل ۲-۱: صندلی مرکز تحقیقات کایست [۸]..... ۶
- شکل ۳-۱: پوشش خارجی بلیکس دانشگاه برکلی [۸]..... ۷
- شکل ۴-۱: ربات لند واکر [۸]..... ۸
- شکل ۵-۱: ربات طراحی شده به وسیله لئوناردو داوینچی [۱۳]..... ۸
- شکل ۶-۱: ربات انسان‌نمای وابوت-۱ و وابوت-۲ [۱۵]..... ۹
- شکل ۷-۱: (الف) دوپای دابلیو-ال-۱ و (ب) دابلیو-ال-۳ [۱۵]..... ۱۰
- شکل ۸-۱: ربات‌های انسان‌نمای (الف) "وابیان" و (ب) "وابیان-آر-وی" [۱۵]..... ۱۱
- شکل ۹-۱: ربات بایپر ۴ [۱۲]..... ۱۲
- شکل ۱۰-۱: ربات آسیمو [۱۵]..... ۱۳
- شکل ۱۱-۱: ربات انسان‌نمای تویوتا [۱۵]..... ۱۳
- شکل ۱۲-۱: ربات HRP-2 [۲۳]..... ۱۴
- شکل ۱۳-۱: ربات QRio و قابلیت آن در حفظ تعادل و پرتاب توپ [۲۷]..... ۱۴
- شکل ۱۴-۱: انواع پیکربندی‌های ربات دوپا در صفحه پیکانی [۸]..... ۱۵
- شکل ۱۵-۱: پیکربندی ربات مورد مطالعه در صفحه پیکانی..... ۱۶
- شکل ۱۶-۱: انواع پیکربندی‌های ربات‌های دوپا در صفحه جلویی [۸]..... ۱۶

- شکل ۱-۱۷: انواع پیکربندی ربات‌های دوپا در صفحه عرضی [۸]..... ۱۷
- شکل ۱-۱۸: پیکربندی ربات مورد مطالعه در صفحه عرضی..... ۱۷
- شکل ۱-۱۹: ساختار اسکلتی پایین تنه انسان، پای راست [۱۳]..... ۲۰
- شکل ۱-۲۰: دستگاه ماهیچه‌ای پایین تنه انسان [۱۳]..... ۲۰
- شکل ۱-۲۱: ارتفاع لگن پای چپ در چرخه راه رفتن..... ۲۳
- شکل ۱-۲۲: مدل راه بدون زانو و کف پا [۳۵]..... ۲۴
- شکل ۱-۲۳: چرخش لگن الف) حول محور عمودی ب) حول محور امتداد راه رفتن [۳۵]..... ۲۴
- شکل ۱-۲۴: جابجایی عرضی لگن در حین راه رفتن [۳۵]..... ۲۵
- شکل ۲-۱: راه رفتن استاتیکی، الف و ب) فازهای پایدار ج) فاز ناپایدار..... ۳۱
- شکل ۲-۲: موقعیت مرکز جرم برای ربات چهارپا [۳۶]..... ۳۲
- شکل ۲-۳: ربات ربیت [۳۶]..... ۳۳
- شکل ۲-۴: اسباب‌بازی قدیمی الهام بخش مک ماهان [۴۳]..... ۳۵
- شکل ۲-۵: ربات دوپای صفحه‌ای مک گیر [۴۱]..... ۳۶
- شکل ۲-۶: ربات راه رونده دینامیکی صفحه‌ای کم محرک با زانو [۴۱]..... ۳۶
- شکل ۲-۷: راه رونده سه بعدی کم محرک [۴۳]..... ۳۷
- شکل ۲-۸: ربات دانشگاه کرنل دارای عملگر بر اساس حرکت غیرفعال [۴۴]..... ۳۷
- شکل ۲-۹: چندضلعی بسته حاصل از اتصال نقاط تماس پا با زمین..... ۳۹
- شکل ۲-۱۰: ناحیه پایداری و حاشیه پایداری..... ۳۹

- شکل ۲-۱۱: پا و نیروهای عکس‌العمل وارد بر آن [۵۰]..... ۴۴
- شکل ۲-۱۲: الف) گام متعادل دینامیکی ب) گام نامتعادل دینامیکی ج) بالستیک [۵۰]... ۴۷
- شکل ۲-۱۳: صفحات حرکتی در راه رفتن..... ۴۸
- شکل ۲-۱۴: فاز دو تکیه‌گاهی در راه رفتن..... ۴۹
- شکل ۳-۱: ربات دوپای مورد مطالعه..... ۵۴
- شکل ۳-۲: مسیر مطلوب مفصل ۱..... ۵۹
- شکل ۳-۳: مسیر مطلوب مفصل ۱۶..... ۶۰
- شکل ۳-۴: نمای جانبی ربات دو پای مورد مطالعه در ابتدا و انتهای گام..... ۶۲
- شکل ۳-۵: مسیر حرکت مچ پا در راستای محور  $X_{s.a.}$ ..... ۶۳
- شکل ۳-۶: مسیر حرکت مچ پا در راستای محور  $Y_{s.a.}$ ..... ۶۴
- شکل ۳-۷: مسیر حرکت مچ پا در صفحه  $y - x$ ..... ۶۴
- شکل ۳-۸: فلوجارت روش حل مسئله برای یافتن مسیر حرکت مفاصل..... ۶۸
- شکل ۳-۹: منحنی زاویه مچ پای تکیه‌گاه حول محور  $x_0$  بر حسب زمان در طول یک گام..... ۶۹
- شکل ۳-۱۰: منحنی زاویه مچ پای تکیه‌گاه حول  $z_0$  بر حسب زمان در طول یک گام..... ۷۰
- شکل ۳-۱۱: منحنی زاویه زانوی پای تکیه‌گاه حول  $z_0$  بر حسب زمان در طول یک گام..... ۷۰
- شکل ۳-۱۲: منحنی زاویه بین لگن و ران پای تکیه‌گاه حول  $z_0$  بر حسب زمان..... ۷۰
- شکل ۳-۱۳: منحنی زاویه بین لگن و ران پای تکیه‌گاه حول محور  $x_0$  بر حسب زمان..... ۷۱

- شکل ۳-۱۴: منحنی زاویه بین لگن و ران پای تاب خورنده حول محور  $x_0$  بر حسب زمان ۷۱
- شکل ۳-۱۵: منحنی زاویه بین لگن و ران پای تاب خورنده حول محور  $z_0$  بر حسب زمان ۷۱
- شکل ۳-۱۶: منحنی زاویه زانوی پای تاب خورنده حول محور  $z_0$  بر حسب زمان ..... ۷۲
- شکل ۳-۱۷: منحنی زاویه مچ پای تاب خورنده حول محور  $z_0$  بر حسب زمان ..... ۷۲
- شکل ۳-۱۸: منحنی زاویه مچ پای تاب خورنده حول محور  $x_0$  بر حسب زمان ..... ۷۲
- شکل ۴-۱: موقعیت محورهای  $x_0$  و  $z_0$  نسبت به کف پا ..... ۷۸
- شکل ۴-۲: مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور  $x_0$  در حین گام ..... ۷۹
- شکل ۴-۳: مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور  $z_0$  در حین گام ..... ۸۰
- شکل ۴-۴: مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور  $x_0$  بدون پنجه پا ..... ۸۰
- شکل ۴-۵: مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور  $z_0$  بدون پنجه پا ..... ۸۱
- شکل ۴-۶: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱ ..... ۸۶
- شکل ۴-۷: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۳ ..... ۸۶
- شکل ۴-۸: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۴ ..... ۸۶
- شکل ۴-۹: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۵ ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۰: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۶ ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۱: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۷ ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۲: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۰ ..... ۸۸
- شکل ۴-۱۳: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۱ ..... ۸۸

- شکل ۴-۱۴: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۲ ..... ۸۸
- شکل ۴-۱۵: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۳ ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۶: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۴ ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۷: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۶ ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۸: مقایسه نتایج گشتاور لازم برای تعقیب مسیر مطلوب در مفاصل تحقیق حاضر  
با مرجع [۶۹]: (الف) مفصل ۳، (ب) مفصل ۴، (ج) مفصل ۵ ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۹: بلوک دیاگرام سیستم کنترلی ربات دوپا ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۰: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_1$  ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۱: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_3$  ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۲: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_4$  ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۳: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_5$  ..... ۹۸
- شکل ۴-۲۴: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_6$  ..... ۹۸
- شکل ۴-۲۵: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_7$  ..... ۹۸
- شکل ۴-۲۶: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{10}$  ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۷: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{11}$  ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۸: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{12}$  ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۹: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{13}$  ..... ۱۰۰

شکل ۴-۳۰: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{14}$  ..... ۱۰۰

شکل ۴-۳۱: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{16}$  ..... ۱۰۰

شکل ۴-۳۲: منحنیهای تعقیب مسیر مطلوب متغیر مفصلی ۴ توسط منحنیهای با ضرایب

بهره تناسبی و مشتقگیر متفاوت حاصل از PSO ..... ۱۰۲

شکل ۴-۳۳: منحنی خطای بین مسیر مطلوب متغیر مفصلی ۴ و مسیر ردیابی حاصل از

کنترلر در سه حالت بهینهسازی توسط PSO ..... ۱۰۴



## فهرست جداول

- جدول ۱-۱: وضعیت تکیه‌گاهی پاها حین یک گام الف) راه رفتن ب) دویدن..... ۲۲
- جدول ۱-۲: داده‌های مربوط به ربات دوپا در نرم‌افزار [36] CosmosMotion..... ۲۵
- جدول ۱-۳: جدول پارامترهای دنویت- هارتنبرگ..... ۵۹
- جدول ۱-۴: جرم اعضای ربات دوپای مورد مطالعه..... ۸۳
- جدول ۲-۴: نتایج حاصل از بهینه‌سازی در دو حالت برای متغیر مفصلی ۴..... ۱۰۱
- جدول ۳-۴: مقایسه نتایج حاصل از سه حالت بهینه‌سازی برای دو متغیر  $t_{e \rightarrow 0}$  و  $Max\left(\frac{\Delta\tau}{D}\right)$ ..... ۱۰۳

## فهرست علائم

$a_1$	فاصله‌ی افقی بین پنجه و مچ
$a_i$	طول عضوی از ربات
$a$ و $n$ ، $s$	بردارهای یکه ماتریس جهت‌گیری پنجه پا نسبت به دستگاه مختصات اینرسی
$c$	نماد تابع مثلثاتی COS
$D_s$	نصف طول گام
$d_0$	طول پنجه
$d_i$	انحراف عضوی از ربات
$\overline{F_A}$	نیروهای معادل وارده به مچ پا
$G$	نقطه‌ی مرکز جرم
$g$	بردار گرانش
$H$	نماد راستای افق
$hip$	نماد لگن
$I$	ممان اینرسی
$J$	نماد ژاکوبین
$J_{\omega_i}$ و $J_{v_i}$	ژاکوبین خطی و زاویه‌ای اعضای ربات
$K$	انرژی جنبشی
$K_v$ و $K_p$	ضرایب سیستم کنترلی
$L$	نماد لاگرانژین
$L_1$	ارتفاع مچ پا

$L_p$	طول پا.....
$l_p$	عرض پا .....
$\bar{M}$	گشتاور وارد شده از زمین به ربات .....
$\bar{M}_A$	گشتاورهای معادل وارده به مچ پا .....
$\bar{M}_{friction}$	گشتاور حاصل از نیروی اصطکاک .....
$MSE_{R,i}$	میانگین مربعات خطای متغیر مفصلی $\dot{\alpha}_m$ .....
$m_i$	جرم لینک هر لینک .....
$m_s$	جرم پا .....
$n$	تعداد درجه آزادی .....
$n_p$	مجموعه ذرات.....
$num$	تعداد داده‌ها در محدوده زمان یک گام .....
$O_0$	مبدأ مختصات پنجه پا .....
$O_j^i$	ماتریس موقعیت یک دستگاه مختصات نسبت به دستگاه دیگر .....
$o_i x_i y_i z_i$	دستگاه مختصات هر رابط .....
$P$	انرژی پتانسیل کل سیستم.....
$P_i$	موقعیت هر نقطه در دستگاه مختصات .....
$P_{COM}$	موقعیت مرکز جرم ربات .....
$P_{GCOM}$	موقعیت تصویر عمودی مرکز جرم ربات .....
$P_g$	بهترین مقدار تابع هدف در بین ذرات.....
$p_i$	موقعیت مرکز جرم هر لینک.....
$q$	متغیر مفصلی .....

$\dot{q}$ .....	مشتق زمانی مرتبه اول متغیر مفصلی .....
$\ddot{q}$ .....	مشتق زمانی مرتبه دوم متغیر مفصلی .....
$q^d$ .....	متغیر مفصلی مطلوب .....
$\dot{q}^d$ .....	مشتق زمانی مرتبه اول متغیر مفصلی مطلوب .....
$\ddot{q}^d$ .....	مشتق زمانی مرتبه دوم متغیر مفصلی مطلوب .....
$\bar{R}$ .....	نیروی وارد شده از زمین به ربات .....
$R_j^i$ .....	ماتریس دوران دستگاه $j$ نسبت به دستگاه $i$ .....
$Rot$ .....	ماتریس دوران .....
$r_{c_i}$ .....	بردار مرکز جرم هر عضو ربات .....
$s$ .....	نماد تابع مثلثاتی $\sin$ .....
$s.a.$ .....	نماد قوزک پای تاب خورنده .....
$T$ .....	نماد ترانهاده .....
$T_m$ .....	زمان ماکزیمم ارتفاع پای تاب خورنده .....
$T_s$ .....	زمان یک گام .....
$Trans$ .....	ماتریس .....
$T_j^i$ .....	ماتریس تبدیل همگن .....
$t$ .....	مؤلفه‌ی زمان .....
$U$ .....	انرژی پتانسیل .....
$V_n^0$ .....	سرعت‌های خطی هر عضو نسبت دستگاه مختصات پایه اینرسی .....
$V_i^t$ .....	سرعت ذره .....
$w$ .....	فاکتور اینرسی .....
$X_0Y_0Z_0$ .....	دستگاه مختصات پنجه پا .....

- $X_g$  ..... بهترین موقعیت در بین ذرات.
- $Z_{hip}$  و  $Y_{hip}$  ،  $X_{hip}$  ..... مؤلفه‌های حرکت انتقالی لگن
- $Y_{s.a.}$  و  $X_{s.a.}$  ..... مؤلفه‌های حرکت مچ پا در راستای افقی و عمودی
- $Z_{zmp}$  و  $X_{zmp}$  ..... مؤلفه‌های نقطه‌ی گشتاور صفر
- $\dot{Y}_{s.a.}$  و  $\dot{X}_{s.a.}$  ..... مؤلفه‌های سرعت حرکت مچ پا در راستای افقی و عمودی
- $z_{s.a.}$  ..... فاصله‌ی دو مچ پا
- $\alpha_i$  ..... پیچش عضوی از ربات
- $\theta_i$  ..... زاویه هر مفصل
- $\xi$  ..... خطای کوچک بین جهت‌گیری دو دستگاه مختصات
- $\xi_{hip}$  ..... دوران لگن
- $\tau_i$  ..... گشتاور وارده بر هر عضو ربات
- $\omega_n^0$  ..... سرعت‌های زاویه‌ای هر عضو نسبت دستگاه مختصات پایه اینرسی

# فصل اول: مقدمه

## فصل اول: مقدمه

### ۱-۱ مقدمه

با نزدیک شدن به اوایل قرن بیستم و دوران صنعتی شدن، زندگی اجتماعی مردم به شدت تحت تاثیر پیشرفت فناوری قرار گرفت. در این دوره یک نویسنده چک، داستانی تخیلی علمی با عنوان RUR<sup>۱</sup> نوشت [۱]. وی برای اولین بار واژه ربات را به کار برد. این واژه از یک واژه چک Robota به معنی کار اجباری گرفته شده است.

داشتن این دید که ربات موجودی با قدرت و نیروی فکری فوق‌العاده باشد، باعث ترس بسیاری از مردم در آن زمان گردید. در سال ۱۹۵۰ ایزاک آسیموف کتابی با عنوان I Robot نوشت [۲]. آسیموف برای از بین بردن این ترس و همزیستی بین انسان و ربات، سه قانون اخلاقی رباتیک را به صورت زیر بیان کرد:

الف) یک ربات نباید به انسان صدمه بزند و یا با تنبلی خود اجازه دهد که به انسان آسیب برسد.

ب) یک ربات باید به تمامی دستوراتی که انسان به او می‌دهد، عمل کند مگر دستوراتی که با قانون الف در تعارض باشد.

پ) یک ربات باید از وجود خود محافظت کند، مگر این حفاظت با قانون های الف یا ب در تعارض باشد.

---

<sup>1</sup> Rossum's Universal Robot

بر پایه این رویکرد از حدود ۱۰۰ سال پیش تلاش‌های زیادی برای ساخت ربات‌های دوبا صورت گرفته است. این دسته از ربات‌ها به دلیل توانایی حرکتی خود، قابلیت‌های خاص و منحصر به فردی مانند بالا رفتن از پله، حرکت در زمین‌های ناهموار و کار کردن در شرایط زندگی انسان را در بین ربات‌های متحرک دارا می‌باشند. در واقع از آنجایی که این ربات‌ها نیاز به جای پای جداگانه برای حرکت دارند، قابلیت حرکت آن‌ها در محیط ناهموار بیشتر از ربات‌های چرخ‌دار است که برای حرکت نیاز به یک محیط کم و بیش صاف و مسطح دارند [۳-۵]. همچنین شباهت ساختاری این دسته ربات‌ها به انسان، امکان انجام وظایف پیچیده حرکتی را که تنها به وسیله یک انسان قابل انجام است، به آن‌ها می‌دهد.

ربات‌های چرخ‌دار در سطوح هموار، دارای سرعت زیاد، کارایی بالا، کنترل آسان و مناسب برای مسافت‌های طولانی می‌باشند، درحالی‌که ربات‌های پادار دارای ساختار مکانیکی پیچیده بوده و اغلب ناپایدار می‌باشند و برای ایجاد مسیر در آن‌ها نیاز به الگوریتم پیشرفته‌ای است. لذا همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، ربات‌های راه‌رونده دارای خصوصیات و مزایای منحصر به فردی می‌باشند که استفاده از آن‌ها را در بسیاری از موارد اجتناب‌ناپذیر و غیرقابل جایگزین می‌نماید، به همین دلیل تحقیقات در این زمینه ضروری است.

از انگیزه‌های دیگر تحقیقات در زمینه ربات‌های دوبا پی بردن به مکانیزم راه رفتن انسان است [۶]، چراکه داشتن دیدی مکانیکی از مدل ساده بدن و شبیه‌سازی حرکت انسان به ساخت اندام‌های مصنوعی بهتر، چه به صورت فعال و چه به صورت غیرفعال کمک می‌کند.



## ۱-۲ کاربردهای ربات‌های انسان‌نما

در جوامع امروزی صنعت رباتیک به یک نیاز غیرقابل اجتناب تبدیل شده است. به طوری که با بالا رفتن سن جوامع، نیاز به خدمات و فناوری پیشرفته ربات دوبا<sup>۱</sup> بیش از پیش احساس می‌شود. زمینه‌های کاربردی فراوانی برای ربات‌ها وجود دارد بطوریکه یورون<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۵ در گزارشی دوشاخه اصلی برای کاربردهای رباتیک ارائه داده است: ربات‌های خدمتکار در خانه و ربات‌های خدمتکار صنعتی. از جمله موارد مستعد در زمینه‌ی استفاده از ربات‌های دوپای خدمتکار صنعتی عبارتند از: ربات‌های کشاورز، ربات‌های شيردوش، ربات‌های معدن‌کار، ربات‌های آتش‌نشان، ربات‌های رفتگر، ربات‌های بازرس، ربات همیار پزشک، ربات‌های جراح، ربات‌های توان‌بخش، ربات‌های نظامی [۷]. ربات‌های خدمتکار در خانه نیز عبارتند از ربات‌های نظافتچی و ربات‌های دستیار که به سالمندان و افراد خانواده خدمت می‌کنند.

## ۱-۳ ربات‌های خدمتکار

بسیاری از شرکت‌های بزرگ ربات‌سازی ژاپن بر روی ربات‌های انسان‌نمای<sup>۳</sup> مختلف تمرکز کرده‌اند. اکثر این ربات‌ها با هدف کار در بیمارستان یا محیط خانه ساخته شده‌اند. مهم‌ترین این پروژه‌ها مربوط به شرکت‌های سونی<sup>۴</sup> و هوندا<sup>۵</sup> می‌باشند. این شرکت‌ها هدف خود از طراحی و ساخت این چنین ربات‌ها را تولید انبوه برای عرضه در بازار به منظور کمک به سالمندان و بیماران و انجام کارهای

---

<sup>۱</sup> Biped robot

<sup>۲</sup> EURON (European Robotics Network of Excellence)

<sup>۳</sup> humanoid robot

<sup>۴</sup> SONY

<sup>۵</sup> HUNDA

روزمره در منزل بیان کرده‌اند. ربات‌های دوپا همخوانی بیشتری با محیط پیرامون انسان نسبت به سایر ربات‌ها دارند، چراکه محیط زندگی با توجه به نیازهای انسان و هماهنگی با فیزیولوژی حرکتی بدن انسان ساخته شده‌اند. به علاوه شکل انسان‌گونه ربات‌های دوپا به آن‌ها مقبولیت و پذیرش عمومی‌تری می‌دهد. محققین دانشگاه واسادا به منظور کمک به افراد سالمند و معلول صندلی محرکی طراحی کرده‌اند که دارای دوپا است (شکل ۱-۱) [۸].



شکل ۱-۱: ربات کمک‌کننده به سالمندان در دانشگاه واسادا ژاپن [۸].

مرکز تحقیقات کایست<sup>۱</sup> نیز در آزمایشگاه هوبو<sup>۲</sup> صندلی دوپایی به منظور کمک به ناتوانان حرکتی

طراحی کرده است (شکل ۲-۱) [۸].

---

<sup>۱</sup> KAIST

<sup>۲</sup> HUBO



شکل ۱-۲: صندلی مرکز تحقیقات کایست [۸].

## ۱-۴ ربات‌ها و انجام مأموریت‌های مخاطره آمیز

کاربردهای رباتیک در زمینه‌ی علوم هسته‌ای، در نواحی دارای اشعه بالا به وسیله تیم‌های بین‌المللی زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است [۹]. همچنین در مکان‌های دچار حریق، استفاده از ربات مار مانند مجهز به نازل از گام‌های جدید در این زمینه محسوب می‌شود. یکی از پروژه‌های اساسی در زمینه‌ی ربات‌های آتش‌نشان در توکیو صورت گرفته است [۱۰]. ربات‌های دوپایی که توانایی حرکت با سرعت بالا را دارند، برای کمک به فعالیت‌های انسانی بسیار مفید می‌باشند [۱۱]. ربات‌های امدادگر نیز در هنگام وقوع زلزله توانایی جست‌وجوی اجساد و آسیب دیدگان و کمک به آن‌ها را دارند. یکی از اساسی‌ترین نواحی مخاطره آمیز، مناطق دچار فاجعه هسته‌ای است که حضور انسان در این مناطق امکان‌پذیر نبوده و در این‌گونه مناطق ربات‌ها بسیار کمک‌کننده هستند [۱۲].

### ۱-۴-۱ ربات‌های پوشش خارجی<sup>۱</sup>

حمل اجسام سنگین یکی از مشکلاتی است که گاهی انسان با آن روبه‌رو می‌شود. ربات‌های پوشش خارجی، سیستم‌های رباتیکی هستند که نظامیان و امدادگران جهت حمل بارهای سنگین آن‌ها را

---

<sup>۱</sup> Exoskeleton

پوشیده و بدون تحمل وزن زیاد به انجام کارها و وظایفشان می‌پردازند. به عنوان مثال بلیکس<sup>۱</sup> از تکامل یافته ترین این‌گونه ربات‌هاست که به وسیله مکانیزم‌هایی به پاها متصل می‌شود. شخص با پوشیدن این ربات تنها با اعمال نیرویی معادل وزنه ۲,۵ کیلوگرمی، می‌تواند کوله‌پشتی ۴۵ کیلوگرمی را حمل کند (شکل ۳-۱) [۸].



شکل ۳-۱: پوشش خارجی بلیکس دانشگاه برکلی [۸].

### ۱-۴-۲ ربات‌های دفاعی

در آمریکا، پنتاگون پیش‌بینی کرده است تا سال‌های آینده، ربات‌ها بخش اصلی ارتش این کشور باشند. بودجه هنگفت ۱۲۷ میلیارد دلاری به پروژه "سیستم‌های جنگی آینده"<sup>۲</sup> تعلق گرفته است. نسل دوم این ربات‌های جنگ‌جو را ربات‌های انسان‌نما تشکیل می‌دهند که به صورت خودکار عمل می‌کنند. یکی از توانایی‌های این ربات‌ها قدرت تشخیص افراد خودی از غیرخودی است. در ژاپن نیز ربات دوپای نظامی لند واکر<sup>۳</sup> توسط کیکای ساخته شده است، این ربات قادر به راه رفتن با سرعت ۱,۵ کیلومتر در ساعت است (شکل ۴-۱) [۸].

---

<sup>۱</sup> BLEEX

<sup>۲</sup> Future Combat System

<sup>۳</sup> Land walker



شکل ۱-۴: ربات لند واکر [۸].

## ۱-۵ خلاصه‌ای از سیر تکاملی ربات‌های دویا

انسان همواره در طول تاریخ به ساخت موجودی شبیه به خود علاقه‌مند بوده است. شاید از لئوناردو داوینچی بتوان به عنوان اولین فردی که به طراحی یک مکانیزم انسان‌نما پرداخته است نام برد (شکل

۱-۵) [۱۳].



شکل ۱-۵: ربات طراحی شده به وسیله لئوناردو داوینچی [۱۳].

ربات‌های راه رونده در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ به‌طور جدی شروع به گسترش نمودند. عمده این ربات‌ها در کشور ژاپن ساخته شده‌اند. در روسیه، در دانشگاه لومونوسف<sup>۱</sup> مسکو و دانشگاه سن پترزبورگ

---

<sup>۱</sup> Lomonosov

نمونه‌هایی از ربات‌های دوپا ساخته‌شده است [۱۴]. از سال ۱۹۸۰ در دانشگاه MIT نیز کارهایی بر روی ربات‌های دوپا صورت گرفته است [۱۶-۱۸]. اولین گروه فعال در این زمینه، دانشگاه واسادا<sup>۱</sup> است است که با شروع فعالیتش در سال ۱۹۷۰، در سال ۱۹۷۳ و ابوت-۱<sup>۲</sup> را ارائه کرد که توانایی راه رفتن داشت (شکل ۱-۶) [۱۵].



شکل ۱-۶: ربات انسان‌نمای ابوت-۱ و ابوت-۲ [۱۵].

تیم رباتیک دانشگاه واسادا ربات‌های خانواده دابلیو-ال<sup>۳</sup> را گسترش دادند و بعد از عرضه ربات ابوت-۱ در سال ۱۹۸۶، ربات نوازنده ابوت - ۲ را عرضه و سپس در سال ۱۹۹۷ ربات واپیان<sup>۴</sup> را ارائه کردند.

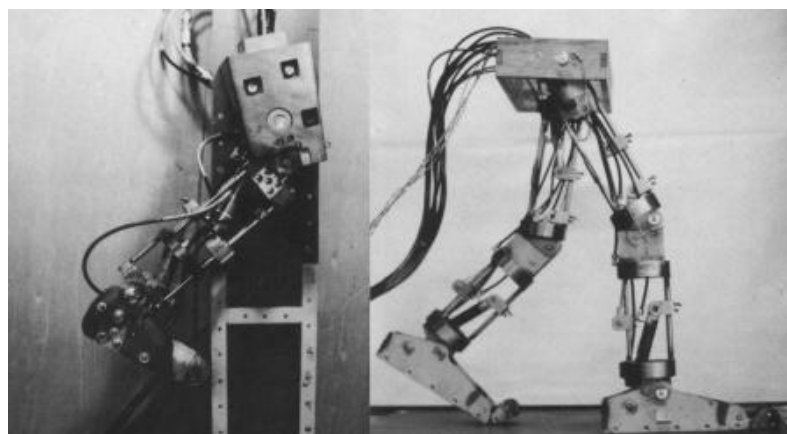
به‌طور خلاصه در دانشگاه واسادا ربات‌های دوپای دابلیو-ال - ۱ در بین سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۶۷، دوپای دابلیو-ال - ۳ در سال ۱۳۶۸ (شکل ۱-۷)، دوپای وپ - ۱ در سال ۱۹۶۹، وپ-۲ در سال ۱۹۷۰ و مدل وپ - ۳ در سال ۱۹۷۱ بر اساس تحلیل حرکت پای انسان که قابلیت بالا رفتن از پله را داشت ساخته شد [۱۵].

<sup>1</sup> WASEDA

<sup>2</sup> WABOT

<sup>3</sup> WL

<sup>4</sup> WABIAN

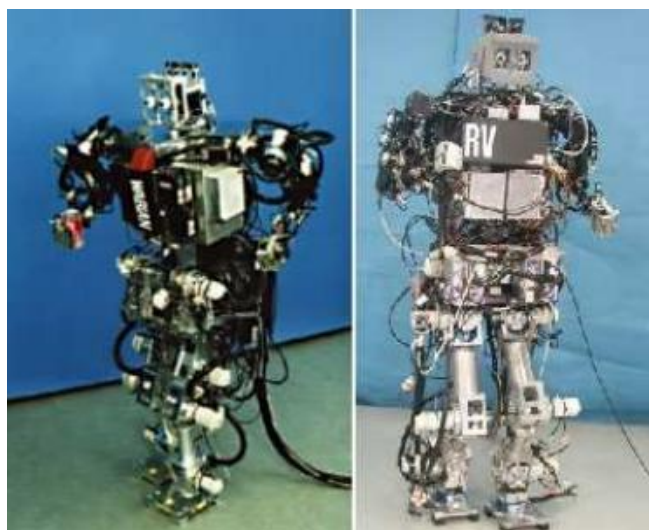


(الف) (ب)

شکل ۱-۷: (الف) دوپای دابلیو-ال-۱ و (ب) دابلیو-ال-۳ [۱۵].

همچنین در بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۷۲ از ربات دوپای دابلیو-ال - ۵ به عنوان پای ربات و ابوت - ۱ استفاده شد که هرگام این ربات ۴۵ ثانیه به طول می‌انجامید. در بین سال‌های ۱۹۷۹ تا ۱۹۸۰ اولین ربات دوپای نیمه دینامیکی با نام دابلیو-ال - ۹-دی-آر ساخته شد که این ربات هر گام را تنها در ۱۰ ثانیه می‌پیمود. سپس در سال ۱۹۸۳ ربات دابلیو-ال - ۱۰-آر با ۱۰ مفصل محرک ارائه شد، این ربات که توانایی حرکت به جلو، عقب و چرخش را داشت و هرگام را تنها در ۴/۴ ثانیه می‌پیمود موفقیت بزرگی به حساب می‌آمد و بالاخره مدل بهبود یافته دبلیو ال - ۱۰-آر با نام دابلیو - ال - ۱۰-آر-دی در سال ۱۹۸۴ با زمان ۱/۳ ثانیه برای هرگام، اولین موفقیت در ساخت ربات کاملاً دینامیکی بود.

ربات وایبان نیز که با ۳۵ درجه آزادی، توانایی راه رفتن مثل انسان را داشت، با چهار درجه در چشم‌ها، سه درجه در بالاتنه، ۱۲ درجه در پاها، ۱۴ درجه در دست‌ها و ۲ درجه در گردن، به منظور ارزیابی یک گام دینامیکی گسترش یافت. نمونه جدیدتر این ربات با نام وایبان -آر-وی با ۴۳ درجه آزادی توانایی تولید آنی مسیر را نیز داشت (شکل ۱-۸) [۱۵].



(ب)

(الف)

شکل ۱-۸: ربات‌های انسان‌نمای (الف) "وابیان" و (ب) "وابیان-آر-وی" [۱۵]

یکی از آخرین دستاوردهای دانشگاه واسادا ربات وابیان ۲- آر است، این ربات یکی از نمونه‌های کامل ربات‌های انسان‌نما با قد ۱۴۷ سانتی‌متر و وزن ۶۴/۵ کیلوگرم است. هدف از ساخت این ربات تقلیدی از حرکات مختلف انسان است. این ربات دارای دو درجه آزادی رول<sup>۱</sup> و یاو<sup>۲</sup> در کمر است که باعث شبیه‌تر شدن حرکات ربات به حرکات انسان می‌شود [۱۵].

یکی از کارهای جالب دیگر در ژاپن که می‌توان از آن یاد کرد، کارهای صورت گرفته توسط سانو<sup>۳</sup> و فروشو<sup>۴</sup> است [۱۹-۲۰]، آن‌ها در طول سال‌های ۱۹۸۴ تا ۱۹۸۸ ربات BLR-G-۲ که توسط موتورهای DC حرکت می‌کرد را مورد مطالعه قرار دادند.

در دهه ۱۹۸۰، میورا<sup>۵</sup> و شیمویاما<sup>۶</sup> ربات‌های دوطای خانواده بایپر را ساختند که به‌طور استاتیکی ناپایدار ولی در حالت دینامیکی پایدار بودند [۲۱]، برای مثال ربات بایپر-۴ (شکل ۱-۹)، فاقد نیروی

<sup>۱</sup> roll

<sup>۲</sup> yaw

<sup>۳</sup> Sano

<sup>۴</sup> Furusho

<sup>۵</sup> Miura

<sup>۶</sup> Shimoyama



محركه در قوزك پاها بوده و داراي كف پاى بزرگى است. اين ربات در زانو نيز فاقد مفصل است و براى توصيف مسير آن از آناليز پاندول معكوس استفاده شده است.



شكل ۱-۹: ربات بايپر ۴- [۱۲].

#### ۱-۵-۱ ربات‌های شرکت صنعتی هوندا

شرکت هوندا ژاپن یکی از پیشتازان طراحی و ساخت ربات‌های انسان‌نما است. این شرکت از سال ۱۹۸۶، شروع به ساخت ربات‌های انسان‌نما کرده است. این شرکت E0 تا E6 را در اوایل مطالعات خود عرضه کرد و سپس P1 تا P3 را در نسل بعدی عرضه نمود و در نهایت از شاهکار خود، ربات آسیمو در سال ۲۰۰۰ رونمایی کرد (شكل ۱-۲۲). این ربات انسان‌نما با ۱/۴ متر قد و ۲۶ درجه آزادی در حال حاضر، یکی از پیشرفته‌ترین ربات‌های انسان‌نماست و مانند انسان توانایی حرکت در تمامی جهات را دارد. این ربات توانایی بالا رفتن از پله، لی‌لی کردن، دویدن و تشخیص چهره را دارد (شكل ۱-۱۰) [۱۵].



شکل ۱-۱۰: ربات آسیمو [۱۵].

### ۱-۵-۲ ربات‌های شرکت تویوتا

شرکت تویوتا نیز در سال ۲۰۰۵ دو ربات همکار را برای کمک به انسان و استفاده از ابزارها ارائه کرد. یکی از این ربات‌ها نه تنها توانایی راه رفتن داشت بلکه می‌توانست آلات موسیقی را بنوازد (شکل ۱-۱۱) [۲۲].

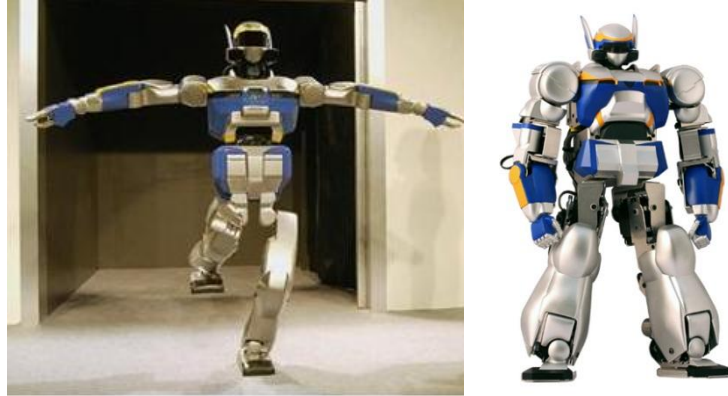


شکل ۱-۱۱: ربات انسان‌نمای تویوتا [۱۵].

### ۱-۵-۳ ربات‌های ساخته‌شده در AIST

جدیدترین مدل ربات‌های ساخته‌شده در موسسه AIST ربات HRP-2 است. تحقیقات زیادی در مورد حرکات و عکس‌العمل‌های مختلف این ربات انجام گرفته است (شکل ۱-۱۲). از جمله این تحقیقات می‌توان به راه رفتن بر روی مسیرهای ناهموار، دیدن، قابلیت ایستادن در صورت برخورد با مانع، کنترل افتادن ربات، بلند شدن ربات از روی زمین، عبور از موانع گوناگون و حمل اجسام نام برد [۲۴-۲۵]. ربات HRP-2 دارای قدی برابر با ۱۵۴ سانتی‌متر و جرم ۵۸ کیلوگرم است. این ربات با ۳۰

درجه آزادی (۷ درجه در هر دست دو درجه در کمر و دو درجه در سر و بقیه درجات آزادی در پاها) قابلیت حرکت با سرعت ۲ کیلومتر در ساعت را دارد [۲۳].



شکل ۱-۱۲: ربات HRP-2 [۲۳].

#### ۱-۵-۴ ربات‌های شرکت سونی

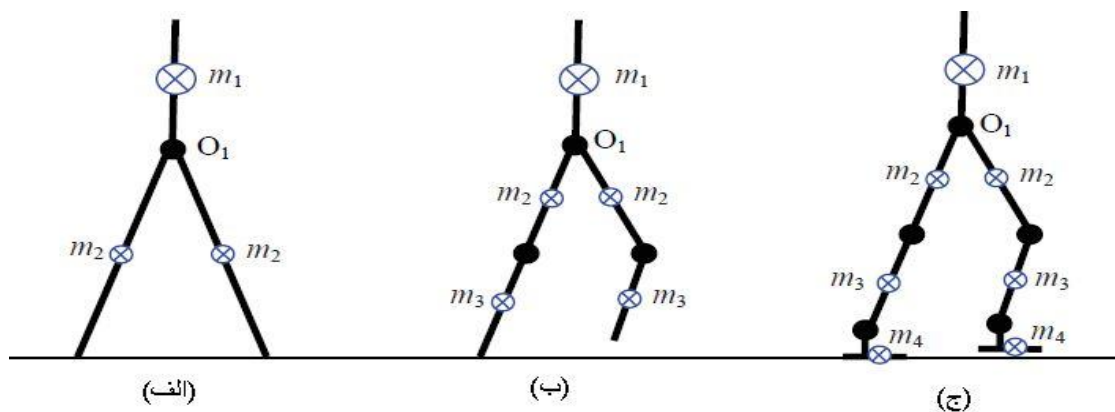
شرکت سونی ربات کوچکی با نام QRio باهدف ساخت یک ربات اسباب‌بازی طراحی و ساخته است [۲۶] (شکل ۱-۱۳). این ربات به کمک یک سیستم کنترل تعادلی پیشرفته می‌تواند تعادل خود را حتی روی تخته اسکی یا اسکیت حفظ کند. این ربات همچنین می‌تواند یک توپ را در هوا بگیرد یا آن را پرتاب کند.



شکل ۱-۱۳: ربات QRio و قابلیت آن در حفظ تعادل و پرتاب توپ [۲۷].

## ۱-۶ طراحی ربات دوپا

ایده طراحی ربات‌های دوپا به ویژه ربات‌های انسان‌نما از حرکت بدن انسان الهام گرفته شده است. ولی طبیعت پیچیده اسکلت‌بندی و سیستم ماهیچه‌ای انسان مانع از ایجاد رباتی کاملاً مشابه انسان می‌شود. به همین دلیل مدل‌هایی که در مورد ربات‌های دوپا استفاده می‌شوند تفاوت‌هایی با بدن انسان دارند و همواره طراحان مجبورند تعداد درجات آزادی سیستم را کاهش دهند. حرکت ربات دوپا معمولاً در سه صفحه عرضی، پیکانی و جلویی رخ می‌دهد که مفاهیم آن در فصل بعد توضیح داده شده است؛ اما راه رفتن معمولاً در صفحه پیکانی<sup>۱</sup> رخ می‌دهد و به همین دلیل بیشترین درجات آزادی در ربات‌های دوپا در این صفحه قرار دارد. شکل (۱-۱۴) ساختار مرسوم یک ربات در صفحه پیکانی را نشان می‌دهد. مرکز جرم‌ها معمولاً به‌طور متمرکز و نقطه‌ای فرض می‌شوند و مفاصل با دایره‌های سیاه نشان داده شده‌اند. ساختار (شکل ۱-۱۴ الف) متناظر با ساده‌ترین رباتی است که تنها دارای دو مفصل در لگن<sup>۲</sup> است. ساختار (شکل ۱-۱۴ ب) نسبت به شکل الف دارای دو مفصل اضافی به عنوان زانو و (شکل ۱-۱۴ ج) نیز نسبت به ساختار (ب) دارای دو مفصل بیشتر به عنوان مچ پا است [۸].

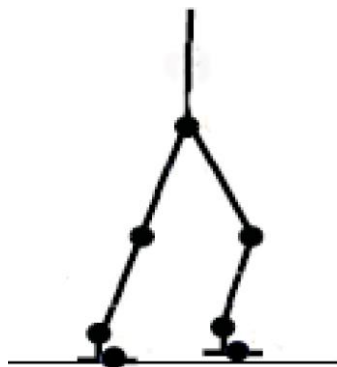


شکل ۱-۱۴: انواع پیکربندی‌های ربات دوپا در صفحه پیکانی [۸]

<sup>۱</sup> sagittal  
<sup>۲</sup> hip

ساختار (شکل ۱۵-۱) با دو مفصل در پاشنه پا به انسان واقعی نزدیک تر است. این مدل، ربات

مورد بررسی در این تحقیق در صفحه پیکر بندی نمایش می دهد.



شکل ۱۵-۱: پیکر بندی ربات مورد مطالعه در صفحه پیکر بندی

بررسی موقعیت های زاویه ای مفاصل در صفحه پیشانی نیز برای بررسی پایداری ربات حائز اهمیت

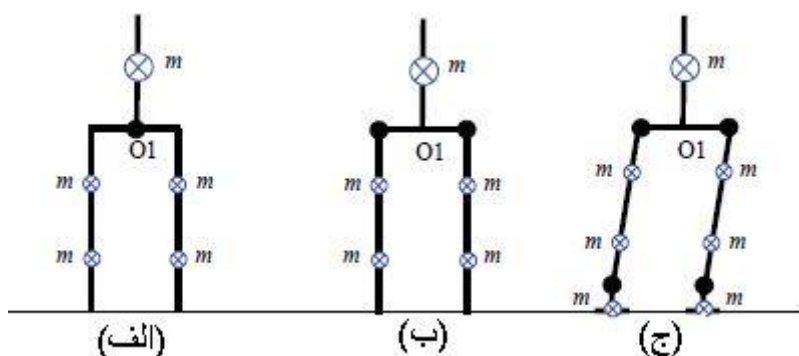
است. در ساختار شکل (۱۶-۱ الف) یک مفصل لگن اجازه حرکت بالاتنه در صفحه پیشانی را می دهد.

شکل (۱۶-۱ ب) با استفاده از دو مفصل لگن، پیکر بندی ربات در صفحه پیشانی را شکل می دهد. در

این ساختار، پای نوسانی (تاب خورنده) به طور مستقل از پای تکیه گاهی در صفحه پیشانی حرکت

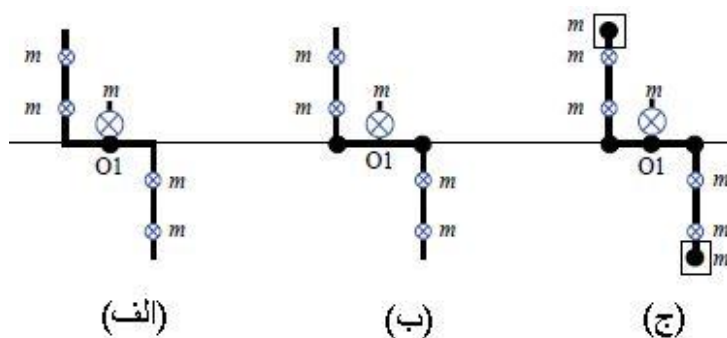
می کند. شکل (۱۶-۱ ج) حالت پیچیده تری است که حرکت جانبی ربات را با ترکیب مفاصل های لگن

و مچ ایجاد می نماید. ربات مورد بحث در صفحه پیشانی چنین ساختاری دارد.



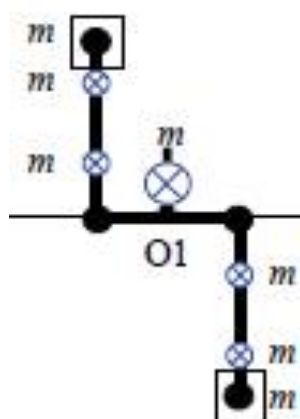
شکل ۱۶-۱: انواع پیکر بندی های ربات های دو پا در صفحه جلویی [۸].

مفاصل ربات در صفحه عرضی، فقط در ربات‌های پیشرفته انسان‌نما وجود دارد، این ربات‌ها در صفحه عرضی معمولاً بین یک تا پنج مفصل دارند. (شکل ۱۷-۱) ساختارهای معمول در این صفحه را نشان می‌دهد. (شکل ۱۷-۱ الف) تنها دارای یک مفصل برای دوران بالاتنه دارد که می‌تواند عکس‌العمل حاصل از پای نوسانی را جبران کند. (شکل ۱۷-۱ ب) دارای دو مفصل در لگن است که به ربات اجازه دوران برای حفظ تعادل را می‌دهد. (ساختار ۱۷-۱ ج) با پنج مفصل در صفحه عرضی پیچیده‌ترین حالت معمول است که باعث چرخش کف پا نیز می‌شود.



شکل ۱۷-۱: انواع پیکربندی ربات‌های دویا در صفحه عرضی [۸].

در تحقیق حاضر چهار مفصل در صفحه عرضی برای کنترل ربات در صفحه عرضی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۸-۱: پیکربندی ربات مورد مطالعه در صفحه عرضی.

در بسیاری از مدل‌های ربات دوپا، کف پا نادیده گرفته می‌شود؛ اما در عمل، کف پا از نظر جذب نیروی ضربه در هنگام بلند شدن و برخورد با زمین و تغییر نقش پاها در فازهای مختلف تکیه‌گاهی، نقش اساسی ایفا می‌کند، در این مطالعه نیز کف پا در ربات دوپا در نظر گرفته شده است.

## ۷-۱ بیومکانیک دوپاها و نگاهی اجمالی به منحنی‌های حرکت انسان

بررسی راه رفتن موجودات دوپا در مطالعه راه رفتن آن‌ها دارای اهمیت زیادی است. از زمان باستان و فیلسوفانی همچون ارسطو تا دوره رنسانس دانشمندان به مطالعه تاثیر حرکت دوپا بر تکامل انسان پرداخته‌اند. بورلی<sup>۱</sup> در رساله خود که در سال ۱۶۸۰ منتشر کرد [۱۳]، گونه‌های مختلف حرکت دوپا و اهمیت حرکت آونگی پا را بررسی نمود و مدل جرم و فنر را به منظور درک راه رفتن در انسان پیشنهاد کرد. در قرن ۱۸، دیون<sup>۲</sup> یک مجموعه راه رونده خودکار ابداع نمود [۱۳]. این تحقیقات و تحقیقات مشابه به ما کمک می‌کند تا قوانین مربوط به فرمان دادن، پایداری و تولید مسیر برای ربات دو پای انسان‌نما را بهتر درک کنیم.

مطالعه عملکرد سیستم‌های بیولوژیکی با استفاده از روش‌های مکانیکی، بیومکانیک نامیده می‌شود. این علم ما را قادر ساخته است تا دینامیک و سینماتیک راه رفتن و نیروهای داخلی را با مطالعه سیستم‌های بیولوژیکی که در هنگام برهم کنش با زمین شبیه‌سازی می‌شوند، تولید و بررسی نماییم. شاید بتوان گفت یکی از بهترین تعاریف بیومکانیک را هربرت هتزه در سال ۱۹۷۴ میلادی ارائه کرده است: بیومکانیک مطالعه ساختار و عملکرد سیستم‌های بیولوژیکی با استفاده از روش‌های مکانیکی است ([۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]).

---

<sup>1</sup> Borelli

<sup>2</sup> Doyon

## ۱-۷-۱ سیستم‌های بیومکانیکی

در میان موجودات زنده تنها انسان‌ها و پرندگان، دوپا می‌باشند. ساختار پای تمامی موجودات دوپا بسیار شبیه به هم و شامل ران، ساق و کف پا است.

موجودات دوپا دو نوع حرکت دارند که شامل قدم زدن و دویدن می‌باشد. هنگام راه رفتن یا همان قدم زدن، همواره حداقل یکی از پاها بر روی زمین قرار دارد؛ اما در هنگام دویدن، یک نیروی لحظه‌ای شدید از سطح زمین بر یکی از پاها که باعث حرکت روبه‌جلوی ربات می‌شود اعمال می‌شود. در ادامه این عمل، پای دیگر به زمین رسیده تا مرحله بعدی راه رفتن با وارد شدن یک نیروی ضربه‌ای دیگر به آن تکرار شود.

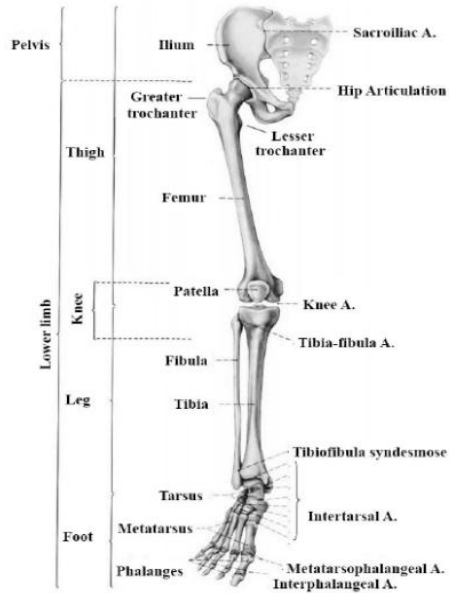
ستون فقرات انسان از قسمت‌های در حال حرکت بسیاری تشکیل شده است که با حرکت بالاتنه نقش اساسی در تعادل بدن هنگام راه رفتن ایفا می‌کند. انسان برای تمامی حرکات بدن خود از ۳۵۰ ماهیچه استفاده می‌کند. مدل کردن رباتی به صورت دقیق مشابه بدن انسان عملاً غیر ممکن است و باید با ساده‌سازی‌هایی قابل قبول در ربات‌های دوپا مدل‌سازی را انجام داد.

ساختار بدنی پایین تنه انسان بسیار پیچیده است (شکل ۱-۱۹). اسکلت پایین تنه شامل ۴۴ استخوان با ۶۰ درجه آزادی است که این استخوان‌ها شامل استخوان ران، قصبه کبری، قصبه صغری و کاسه زانو است و بقیه استخوان‌ها کف پا را می‌سازند. این درجات آزادی عبارتند از: ۳ درجه آزادی برای مفصل ران، ۲ درجه برای زانو، ۳ درجه مفصل مچ و ۲۲ درجه برای هر کف پا [۱۳].

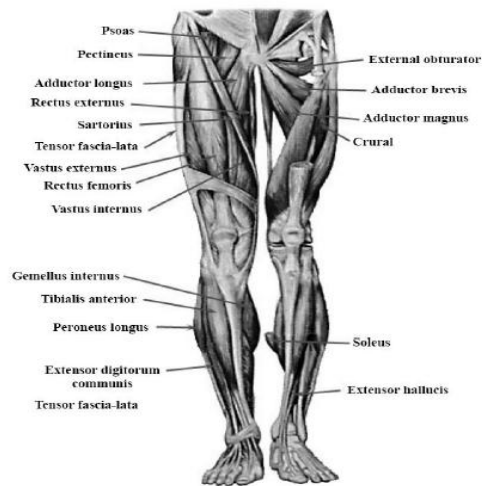
دستگاه ماهیچه‌ای پایین تنه انسان از ۴۶ ماهیچه اسکلتی تشکیل شده است (شکل ۱-۲۰). ماهیچه‌های بسیاری به‌طور همزمان در حرکت مفاصل نقش دارند. این ماهیچه‌ها حرکت را ممکن می‌سازند و همواره به صورت جفت در ارتباط با ماهیچه‌های متقابل خود عمل می‌کنند. ماهیچه‌هایی که در حرکت رو به جلوی انسان نقش دارند به نسبت بلندتر از ماهیچه‌های دیگر هستند. در حرکت



موجودات دویا انرژی جنبشی و پتانسیل در ساختمان پا و ماهیچه‌ها دائماً به یکدیگر تبدیل می‌شوند که این امر کمک شایانی به سهولت حرکت می‌کند [۸].



شکل ۱- ۱۹: ساختار اسکلتی پایین تنه انسان، پای راست [۱۳].



شکل ۱- ۲۰: دستگاه ماهیچه‌ای پایین تنه انسان [۱۳].

## ۱-۷-۲ مشخصات راه رفتن و دویدن در انسان

در حالت عادی، حرکت انسان را می‌توان به یک چرخه محدود کرد، در این چرخه در حین ثابت بودن سرعت، مفاصل به طور متوالی حرکت خود را تکرار می‌کنند. به‌طور کلی حرکت انسان با سرعت عادی دومرحله‌ای است، یک مرحله که ۸۵٪ چرخه راه رفتن را تشکیل می‌دهد مرحله‌ای است که یکی از پاها بر روی زمین بوده و پای دیگر در حال نوسان از عقب به سمت جلو است. مرحله دوم نیز که ۱۵٪ درصد دیگر چرخه را تشکیل می‌دهد، مرحله‌ای است که دو پا بر روی زمین قرار دارند و فاز دو تکیه‌گاهی را تشکیل می‌دهد که خود به چند زیر مرحله تقسیم می‌شود [۳۲-۳۳].

راه رفتن و دویدن از اصلی‌ترین حرکت‌ها در دپوها هستند. همواره در هنگام راه رفتن حداقل یک پا بر روی زمین قرار دارد، این مرحله در انسان بالغ در سرعت بیش از ۲/۱ متر بر ثانیه محو می‌شود. در آستانه انتقال حرکت از قدم زدن به دویدن، فاز دو تکیه‌گاهی به صورت آنی رخ می‌دهد، به این معنی که به محض اصابت پای در حال حرکت به زمین، پای تکیه‌گاه از زمین بلند شده و زمان قرارگیری هر دو پا بر روی زمین لحظه‌ای می‌شود. در (شکل ۱-۲۱) وضعیت قرارگیری پاها روی زمین حین راه رفتن و دویدن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی صفر تا ۶۵ درصد از یک گام، یک پا بر روی زمین قرار گرفته و پای دوم، سه وضعیت را تجربه می‌کند. در وضعیت اول، این پا بر روی زمین قرار دارد، سپس از زمین بلند شده و به سمت جلو حرکت می‌کند. در این حین، تنها پای اول روی زمین قرار دارد که ابتدا این پا به‌طور کامل روی زمین است و بعد شروع به دوران حول پنجه می‌کند. در نهایت پای دوم در وضعیت سوم بر روی زمین می‌نشیند و پای اول که حول پنجه دوران کرده است از زمین بلند می‌شود. این حرکت به تناوب برای پای دیگر هم اتفاق می‌افتد. این وضعیت در دویدن و راه رفتن متفاوت است. در دویدن حداکثر یک پا بر روی زمین قرار دارد و فاز دو تکیه‌گاهی از بین می‌رود [۸].

جدول ۱-۱: وضعیت تکیه‌گاهی پاها حین یک گام الف) راه رفتن ب) دویدن

پای راست	درصد گام	۶۵ درصد		۳۵ درصد
	وضعیت کف پا	روی زمین		روی هوا
پای چپ	درصد گام	۱۵ درصد	۳۵ درصد	۵۰ درصد
	وضعیت کف پا	روی زمین	روی هوا	روی زمین
(الف)				
پای راست	درصد گام	۵۰ درصد		۵۰ درصد
	وضعیت کف پا	روی زمین		روی هوا
پای چپ	درصد گام	۵۰ درصد		۵۰ درصد
	وضعیت کف پا	روی هوا		روی زمین
(ب)				

مطالعات نشان می‌دهد که فاصله‌ای که انسان در هر گام می‌پیماید، با افزایش سرعت به‌طور خطی افزایش می‌یابد تا اینکه به حداکثر ممکن می‌رسد. وان امریک<sup>۱</sup> و واگنار<sup>۲</sup> نشان داده‌اند که این مقدار به‌طور میانگین در محدوده ۰/۶ تا ۱/۴ متر برای سرعت‌های ۰/۳ تا ۱/۳ متر بر ثانیه، تغییر می‌کند [۳۴].

### ۱-۷-۲ منحنی‌ها و نمودارهای حرکت انسان

راه رفتن حرکت متناوبی است که موجب به‌جلو رانده شدن بدن می‌شود. حرکت انسان فرآیندی است که در آن بدن در حال حرکت، لحظه‌ای توسط یک پا و سپس توسط پای دیگر حمل می‌شود و

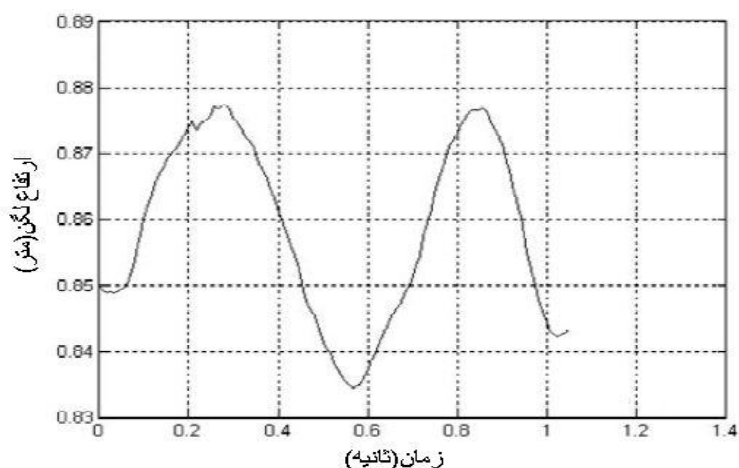
<sup>1</sup> Van Emmerik

<sup>2</sup> Wagenaar

حداقل یک پا همواره روی زمین قرار دارد و در لحظه‌ای که پاها نقش خود را عوض می‌کنند، در مدت کوتاهی هردو پا روی زمین قرار می‌گیرند. هنگامی که بدن از روی پای تکیه‌گاه عبور می‌کند، ارتفاع آن به تدریج اوج می‌گیرد و در لحظه عبور از بالای نقطه تکیه‌گاه به بالاترین میزان خود می‌رسد و پس از آن به تدریج پایین می‌آید. کمترین سرعت بدن در لحظه‌ای است که بیشترین ارتفاع را از سطح زمین دارد و بیشترین سرعت آن هنگامی است که کمترین ارتفاع از سطح زمین را دارد [۳۵].

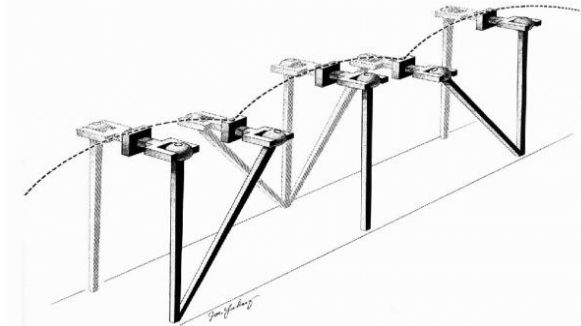
در طول مرحله یک تکیه‌گاهی بدن در صفحه پیشانی به سمت جانب منحرف شده، بطوریکه لگن اندکی پس از میانه حرکت به بیشترین جابه‌جایی عرضی رسیده و دوباره به جای اول خود باز می‌گردد.

در راه رفتن عادی، تصویر مرکز جرم بر صفحه پیشروی، یک منحنی سینوسی را نمایش می‌دهد. دامنه این حرکت سینوسی، در یک فرد بالغ در حدود ۵ سانتی‌متر است. نقطه اوج مرکز جرم در این جابه‌جایی در میانه راه مرحله یک تکیه‌گاهی، به وقوع می‌پیوندد. همچنین مرکز جرم در حالت دو تکیه‌گاهی در کمترین ارتفاع خود قرار می‌گیرد. از اپتوالکترونیک برای تحلیل حرکت سه بعدی سیستم‌های مفصل‌دار مانند بدن انسان استفاده می‌شود و شکل ۱-۲۱ تغییرات ارتفاع لگن به روش اپتوالکترونیک در یک چرخه از راه رفتن را نشان می‌دهد [۸].



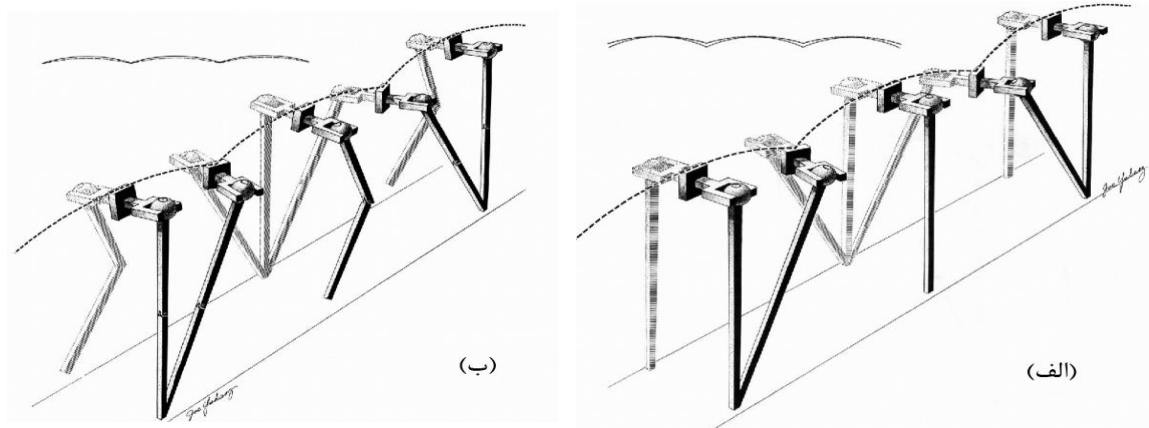
شکل ۱-۲۱: ارتفاع لگن پای چپ در چرخه راه رفتن

با یک مدل ساده دوپا می‌توان این حرکت سینوسی را در صفحه پیشروی به نمایش گذاشت، بطوریکه پاها با دو عضو مستقیم و بدون مکانیزم زانو، مچ و کف پا در نظر گرفته می‌شوند و تنها حول لگن نوسان می‌کنند. این مدل‌سازی در واقع شبیه حالتی است که بر روی پاشنه پا راه رفته درحالی‌که زانو کاملاً مستقیم است (شکل ۱-۲۲).



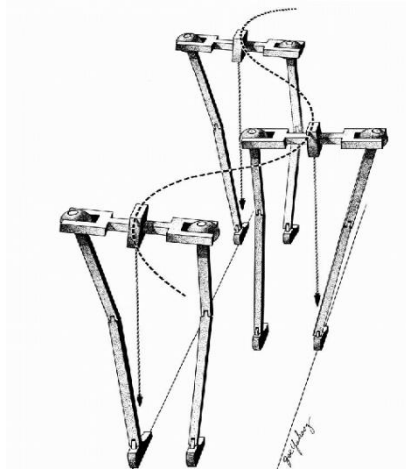
شکل ۱-۲۲: مدل راه بدون زانو و کف پا [۳۵].

همچنین در حین راه رفتن، دوران لگن حول محور عمودی در حدود ۸ درجه و حول محور "امتداد راه رفتن" در حدود ۵ درجه است (شکل‌های ۱-۲۳).



شکل ۱-۲۳: چرخش لگن (الف) حول محور عمودی (ب) حول محور امتداد راه رفتن [۳۵].

مرکز جرم انسان که تقریباً در لگن واقع است در هنگام راه رفتن در حدود ۴ تا ۵ سانتی‌متر به سمت چپ و راست حرکت رفت‌وبرگشتی نیز دارد (شکل ۱-۲۴) [۳۵].



شکل ۱-۲۴: جابجایی عرضی لگن در حین راه رفتن [۳۵].

با استفاده از یک مدل هفت لینکی ساده، یک ربات دوپا در نرم‌افزار CosmosMotion توسط نقیبه طراحی شده است، داده‌های مربوط به حرکت این ربات دوپا در نقاط ابتدایی، میانی و انتهایی برای لگن و قوزک پای تاب خورنده به صورت جدول (۱-۲) استخراج شده است. در این جدول اندیس  $h$  مربوط به مفصل لگن و اندیس  $s.a.$  مربوط به مفصل قوزک تاب خورنده است. اندیس‌های  $x$  و  $y$  نیز به ترتیب معرف امتداد حرکت و امتداد قائم در صفحه پیکانی است.  $T_m$  نیز لحظه‌ای را نشان می‌دهد که قوزک پای در حال حرکت به بالاترین ارتفاع خود از سطح زمین می‌رسد.  $T_s$  زمان سپری شده حین یک گام کامل است [۳۶].

جدول ۱-۲: داده‌های مربوط به ربات دوپا در نرم‌افزار CosmosMotion [۳۶].

$\dot{q}(T_s)$	$\dot{q}(0)$	$q(T_s)$	$q(T_m)$	$q$	زمان حرکت مفصل
۰/۳	۰/۲۲	۰/۱۵	۰	-۰/۱۵	$q_{h,x}$
-۰/۵	-۰/۰۲۹	۱	۱/۰۴	۱	$q_{h,y}$
-۰/۰۵	۰/۰۱۴	۰/۳	۰	-۰/۳	$q_{a,x}$
-۰/۱۵	۰/۰۲۶۶	۰	۰/۰۳	۰	$q_{a,y}$
۰	۰	$\pi/۲$	$\pi/۲$	$\pi/۲$	$q_t$

از اطلاعات حاصل از منحنی‌های حرکت انسان و نتایج حاصل از نرم‌افزار CosmosMotion در این مطالعه به‌منظور محاسبه مسیرهای مطلوب ربات در فصل سه استفاده شده است.

## ۸-۱ انگیزه و نوآوری تحقیق

یکی از مشخصات راه رفتن انسان وجود حالت تک تکیه‌گاهی پنجه پا است. در واقع انسان به‌منظور دارا بودن طول گام بلندتر، از عضو پنجه‌اش در هنگام راه رفتن کمک می‌گیرد. در این مطالعه نیز حرکت این مفصل به صورت فعال در نظر گرفته شده تا حرکت ربات هرچه بیشتر به حرکت واقعی انسان نزدیک شود. ویژگی‌هایی نظیر فازهای مختلف حرکت در حین راه رفتن و یا دویدن، درجات آزادی بالا و به تبع آن نیاز به عملگرهای فراوان، دینامیک غیرخطی و طبیعت ناپایدار این ربات‌ها که ناشی از نقاط محدود تماس با زمین است، باعث شده تا تحقیقات انجام گرفته در این زمینه به چند شاخه اصلی طراحی و ساخت ربات، طراحی مسیر، پایداری، مدل‌سازی دینامیکی و کنترل متمرکز شود.

همچنین در این مطالعه به کمک الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات به کنترل بهینه مسیر حرکت ربات پرداخته شده است.

## ۹-۱ طرح‌بندی فصول پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، در فصلی که گذشت، اول به بیان مقدماتی راجع به دوپاها و ربات‌های انسان‌نما، انواع پروژه‌های انجام‌شده در زمینه‌ی ربات‌های دوپا، بیومکانیک دوپاها، و نیز مشخصات راه رفتن انسان پرداخته‌شد. در فصل دوم مفاهیم و اصول ربات‌های دوپا، بیان شده و سپس معیارهای پایداری ربات

توضیح داده شده است؛ در ادامه فصل انواع صفحات حرکتی در ربات نام‌گذاری شده و فازهای حرکت ربات دوپا نیز توضیح داده شده است. در فصل سوم به سینماتیک ربات دوپا و قیدهای سینماتیکی با توجه به مسیرهای حرکت در انسان پرداخته شده و معادله‌های مسیرهای مطلوب حرکت ربات بدست آمده است. در فصل چهارم، دینامیک ربات دوپا بیان شده و به قیدهای پایداری ربات و کنترل آن به روش گشتاور محاسبه شده است. برای محاسبه مقادیر بهینه ضرایب بهره تناسبی و مشتق‌گیر از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات استفاده شده است. در فصل انتهایی نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه شده است.





# فصل دوم: اصول و مفاهیم اولیه در ربات‌های دوپا

## فصل دوم: اصول و مفاهیم اولیه در ربات‌های دوپا

### ۱-۲ مقدمه

در این فصل، ابتدا به معرفی انواع ربات‌های دوپا از نظر نوع مفصل پرداخته شده و بعد از آن سپس مباحث اولیه پایداری و معیارهای پایداری معرفی می‌شوند، در ادامه صفحات تعیین حرکت ربات معرفی شده و نهایتاً انواع فازهای حرکتی در ربات دوپا تعریف می‌شود.

### ۲-۲ ربات‌های دوپا و تقسیم‌بندی آن‌ها

ربات‌های دوپا را با توجه به نوع مفصل به کار رفته در آن می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱- ربات‌های دوپای دارای مفصل فعال

۲- ربات دوپا با مفصل غیر فعال

که در ادامه به تشریح این دو دسته پرداخته شده است.

#### ۱-۲-۲ ربات‌های دوپای دارای مفاصل فعال<sup>۱</sup>

در این نوع ربات‌ها، ایجاد حرکت توسط عملگرهایی صورت می‌گیرد که به مفاصل ربات اعمال می‌شوند. حرکت بسیاری از ربات‌ها بر این اساس حاصل می‌شود. این ربات‌ها خود به دو گروه تقسیم می‌شوند، در گروه اول مسیر حرکت مفاصل از قبل تعیین شده است و ربات صرفاً حرکت را تکرار می‌کند. گروه دوم به کمک روش‌های کنترلی هوشمند در هر لحظه به تولید مسیر پرداخته و به‌طور فعال

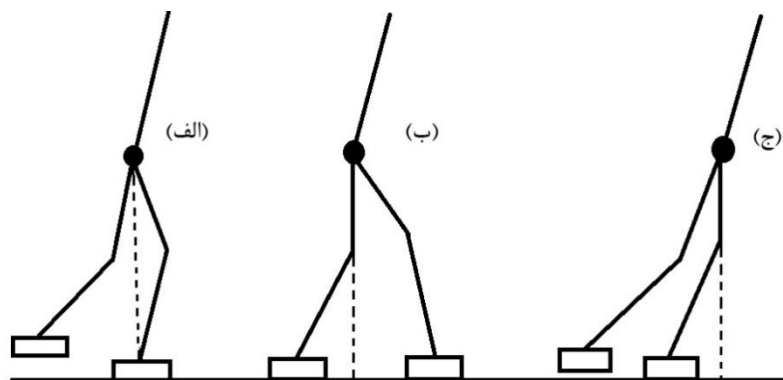
---

<sup>1</sup> Powered robots

کنترل می‌شوند. مشکل گروه اول این است که با تغییر نوع زمین، تولید مسیر مناسب صورت نگرفته و ربات با مشکل روبه‌رو خواهد شد.

در فرآیند حرکت ربات دوپا مهم‌ترین مسئله، بحث تعادل است که از این نظر ربات‌های راه رونده با مفاصل فعال به سه دسته که در ادامه تشریح شده است، طبقه‌بندی می‌شوند [۳۷].

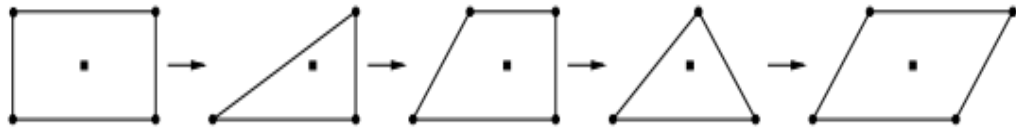
راه رونده‌های استاتیکی: این ربات‌ها به صورت شبه استاتیکی و با سرعت کم حرکت می‌کنند لذا دارای تعادل نسبتاً پایدار بوده و با کنترل حرکتی مفاصل امکان راه رفتن دارند. در راه رونده‌های استاتیکی مرکز جرم ربات مورد توجه است بطوریکه دائماً تصویر مرکز جرم خود را داخل چندضلعی تکیه‌گاهی خود نگاه داشته و اجازه خروج به آن را نمی‌دهد. مادامی که تصویر مرکز جرم ربات (GCOM) درون چندضلعی تکیه‌گاهی قرار می‌گیرد، ربات دارای پایداری استاتیکی است. دیدگاه استاتیکی در مواقعی که اثرات اینرسی قابل صرف‌نظر کردن باشد، برای بررسی پایداری ربات مناسب بوده و به همین دلیل در این حالت سیستم دارای چنان شتاب‌های کوچکی است که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱: راه رفتن استاتیکی، الف و ب) فازهای پایدار ج) فاز ناپایدار

در شکل ۲-۲ نمونه‌ای از حفظ تعادل برای ربات چهارپا نشان داده شده است. در این شکل چندضلعی حاصل از تماس پاها با زمین در طول فرآیند راه رفتن نمایش داده شده. همان‌طور که مشاهده می‌شود تصویر مرکز جرم همواره در طول مسیر، درون این چندضلعی باقی می‌ماند. قابل توجه

است که در این ربات‌ها مرکز جرم بدون انجام عملیات کنترلی و به صورت خودکار داخل چندضلعی پاهای در تماس با زمین قرار می‌گیرد و نیازی به کنترل تعادل نمی‌باشد.



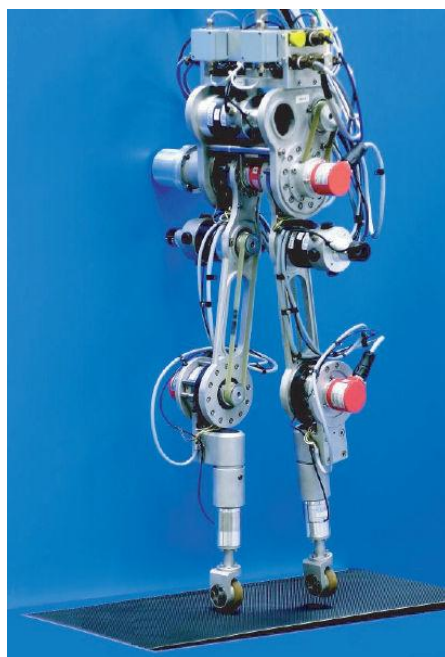
شکل ۲-۲: موقعیت مرکز جرم برای ربات چهارپا [۳۶].

اما در ربات‌های دوپا دو مشکل وجود دارد. اول اینکه، این پیچیدگی وجود دارد که چندضلعی تکیه‌گاهی بسیار کوچک و در اندازه کف پاست. این نیاز به کنترل بسیار دقیقی دارد. دوم اینکه در هنگام تعویض پا، در حین گام برداشتن، مسئله انتقال تصویر مرکز جرم ربات از یک پا به پای دیگر به‌طوری‌که از مقطع کف پا تجاوز نکند، مشکل است.

۲- راه روندهای دینامیکی: راه روندهای دینامیکی دارای کف پای گسترده و مفصل متحرک بوده و تعادل آن‌ها تابعی از سرعت مفاصل و شتاب است، مانند ربات آسیمو.

۳- راه روندهای کاملاً دینامیکی: این راه روندها فاقد کف پا بوده و دارای تماس نقطه‌ای با زمین می‌باشند. لذا در این ربات‌ها تعادل استاتیکی بی‌معنی است و صرفاً در حالت دینامیکی با سرعت‌ها و شتاب‌های بالا می‌توانند متعادل باشند. ربات ربیت<sup>۱</sup> یک راه رونده کاملاً دینامیکی است  
شکل (۳-۲) [۳۶].

<sup>1</sup> Rabbit Robot



شکل ۲-۳: ربات ربیت [۳۶].

در ربات‌های دارای کف پا که ربات دارای سرعت بالا و شتاب بالا است (راه رفتن دینامیکی) و اثرات اینرسی غیرقابل چشم پوشی است، حفظ تعادل از طریق حفظ تصویر مرکز جرم در چندضلعی پای تکیه‌گاه به دست نمی‌آید، بلکه در این حالت برای حفظ تعادل، باید نقطه‌ای که برآیند گشتاورهای وارد به ربات حول آن صفر می‌شود، یعنی نقطه گشتاور صفر<sup>۱</sup> را در چندضلعی پای نگاه‌دار قرار دهیم. به این نوع تعادل، تعادل دینامیکی می‌گویند که از مزایای استفاده از آن می‌توان سرعت بیشتر ربات، معنی‌دارتر بودن حرکت، امکان استفاده از گام‌های بلندتر و کارایی بیشتر ربات را نام برد.

## ۲-۲-۲ ربات‌های دوپا با مفصل غیرفعال

یکی از مشکلات درزمینه‌ی ساخت ربات دوپای فعال مصرف بالای انرژی آن‌هاست. به عنوان مثال ربات P3 شرکت هندو ۱۳۰ کیلوگرم وزن دارد و توان مصرفی آن در طول حرکت ۲ کیلووات است، این یعنی بیست برابر بیشتر از توانی که یک انسان با همین وزن هنگام راه رفتن مصرف می‌کند [۳۸].

---

<sup>۱</sup> Zero Moment Point

یکی از دلایل ایده ساخت ربات بدون استفاده از عملگرها، همین موضوع می‌باشد. این ربات‌ها، در اصل گروهی از مکانیزم‌ها هستند که به آرامی و پایدار بر روی یک سطح شیب‌دار به پایین می‌آیند و فاقد هرگونه محرک، حس‌گر و کنترل‌کننده می‌باشند، بطوریکه دارای یک حرکت متناوب آرام و طبیعی هستند.

همزمان با انتشار نتایج آزمایشات ای ام جی<sup>۱</sup> توسط باسماجیان<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۳، بر روی انسان و گوریل و اثبات حداقل فعالیت ماهیچه‌ای در پا به هنگام راه رفتن، ایده‌هایی راجع به ربات‌های غیرفعال بدون هرگونه تحریک مفصلی<sup>۳</sup> شکل گرفت. این ایده اولین بار توسط مک‌ماهان<sup>۴</sup> و موچون<sup>۵</sup> در سال ۱۹۸۰ تحت عنوان راه رفتن بالستیک<sup>۶</sup> مطرح شد. آن‌ها با تحقیق بر روی راه رفتن انسان پی بردند که ماهیچه‌های پای معلق در فاز تک تکیه‌گاهی فقط در ابتدا و انتهای این فاز، فعال هستند. به این معنی که شرایط اولیه‌ای به پای معلق داده شده و سپس پای معلق تحت اثر نیروی وزن خود و شرایط اولیه، حرکت می‌کند [۴۰، ۳۹]. بعد از آن نیز مفهوم راه رفتن با دینامیک غیرفعال مطرح گردید. ماشین‌هایی با دینامیک غیرفعال<sup>۷</sup> که قادر به راه رفتن بر سطح با شیب ملایم بودند توسط تد مک‌گیر<sup>۸</sup> برای اولین بار طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شدند [۴۱]. این ماشین‌ها که شامل بدنه صلب به هم لولا شده‌ای هستند و دارای تماس ضربه‌ای و غلتشی با یک سطح شیب‌دار می‌باشند، تنها از گرانش و مکانیزم‌های غیرفعال مانند فنر، نیرو می‌گیرند و فارغ از هر نوع کنترل‌کننده‌ی فعالی، هستند. نتایج حاصله از تحقیقات مک‌گیر از ماشین‌های راه‌رونده با دینامیک غیرفعال این موضوع را

---

<sup>1</sup>AMJ

<sup>2</sup>Basmajian

<sup>3</sup>Joint actuation

<sup>4</sup>Mc Mohon

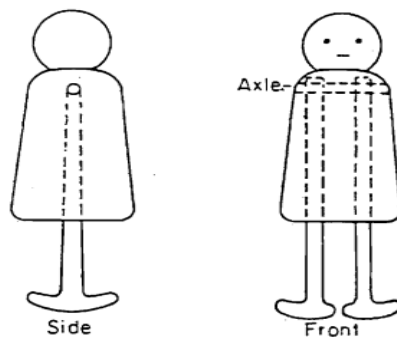
<sup>5</sup>Mochon

<sup>6</sup>Ballestic walking

<sup>7</sup>Passive dynamic walking machines

<sup>8</sup>Tad Mc Geer

یادآوری می‌کند که پارامترهای مکانیکی و بیومکانیکی بدن انسان تأثیری بیش از آنچه تصور می‌شد در وقوع و کیفیت گام به هنگام راه رفتن دارد که این خود ضرورت مطالعه بیشتر بر روی بیومکانیک بدن انسان را روشن می‌سازد. علی‌رغم اینکه این ربات‌ها دارای بیشترین بازده انرژی هستند اما قادر به انجام حرکات و رفتارهای گوناگونی نمی‌باشد و به دلیل وابستگی به گرانش تنها می‌توانند با سرعت مشخصی حرکت کنند. لذا به منظور ایجاد تنوع در رفتار، افزودن برخی عناصر فعال مانند موتور به آن‌ها ضروریست [۳۶]. مک‌گیر ماشین‌های راه‌رونده با دینامیک غیرفعال را مشابه گلايدر بی‌موتور دانسته است، یعنی دینامیک بین پا و زمین به منظور راه رفتن به دینامیک بین بال‌ها و هوا برای پرواز کردن شبیه شده است [۴۱]. در سال ۱۹۸۴ مک‌ماهون به شباهت بین راه رفتن انسان و یک اسباب‌بازی دوپا توجه کرد [۴۲]. این اسباب‌بازی قدیمی الهام بخش او در تئوری گام برداشتن بالستیک بود. این اسباب‌بازی با یک ضربه در مسیر شیب‌دار و انحراف بدن به چپ و راست، بدون هیچ نیروی خارجی شروع به حرکت می‌کند. منبع انرژی حرکت، ناشی از تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی در حین پایین آمدن از شیب است (شکل ۲-۴).



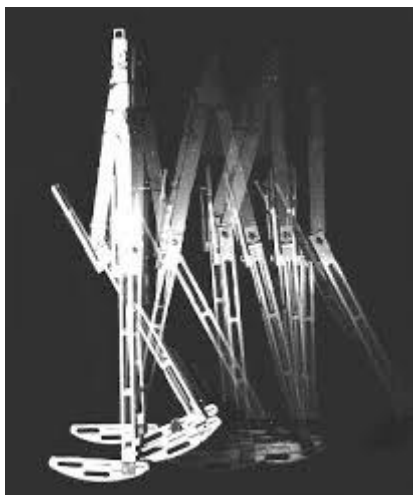
شکل ۲-۴: اسباب‌بازی قدیمی الهام بخش مک‌ماهون [۴۳].





شکل ۲-۵: ربات دوپای صفحه‌ای مک‌گیر [۴۱].

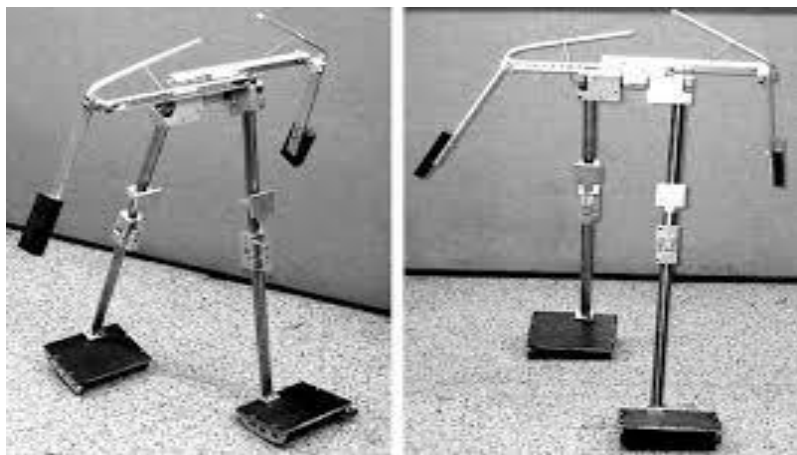
در سال ۱۹۹۰، مک‌گیر از یک ربات دوپای صفحه‌ای رونمایی کرد (شکل ۲-۵) [۴۱]. در طی دو دهه گذشته شمار زیادی از مکانیزم‌های راه‌رونده با دینامیک غیرفعال طراحی شده‌اند. مک‌گیر، گارسیا و دیگران به طراحی راه‌رونده‌های دوپای صفحه‌ای غیرفعال پرداخته‌اند که در شکل ۲-۶ یکی از آنها نمایش داده شده است [۴۱]. اخیراً کولینس، ویسه و رینا از راه‌رونده‌های کم‌محرك<sup>۱</sup> سه بعدی برای اولین بار رونمایی کرده‌اند. این ربات دارای زانو و دو دست است (شکل ۲-۷) [۴۳].



شکل ۲-۶: ربات راه‌رونده دینامیکی صفحه‌ای کم‌محرك با زانو [۴۱].

---

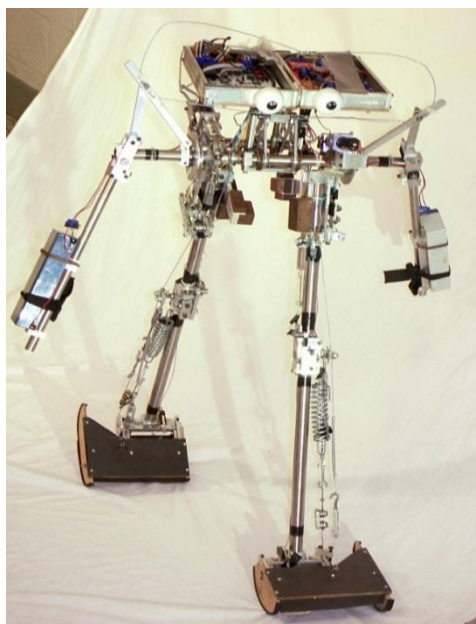
<sup>1</sup> Under actuated



شکل ۷-۲: راه رونده سه بعدی کم محرک [۴۳].

یکی از چالش‌های اصلی درزمینه‌ی راه رفتن غیرفعال، ایجاد ارتباط بین راه رفتن فعال و غیرفعال است، به عبارت دیگر استفاده همزمان از دینامیک طبیعی سیستم، مانند نیروی وزن، همراه با یک کنترلر فعال است تا علاوه بر داشتن سیستمی پایدار بازده انرژی سیستم نیز بالا رود (شکل ۸-۲)

[۴۴-۴۵].



شکل ۸-۲: ربات دانشگاه کرنل دارای عملگر بر اساس حرکت غیرفعال [۴۴].

خوشبختانه محققان توانسته‌اند یک چنین ربات‌هایی که قادرند در سطوح صاف و سربالایی نیز حرکت کنند را بسازند. در دانشگاه کورنل<sup>۱</sup>، دانشگاه دلفت<sup>۲</sup> و ماساچوست<sup>۳</sup>، ربات‌های فعال بر اساس اصل دینامیک کم محرک ساخته شده است [۴۶]، که این ربات‌ها نیازمند عملگر برای غلبه بر نیروی جاذبه هنگام راه رفتن بر سطح صاف یا سربالایی هستند [۴۷].

## ۲-۴ تعادل و معیارهای بررسی آن در یک ربات دوپا

راه رفتن ربات دوپا دارای ویژگی‌ها و نکاتی است که وجه تمایز آن با راه رونده‌های دیگر است. مهم‌ترین آن‌ها حفظ تعادل ربات حین راه رفتن می‌باشد. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، ربات‌های دوپا به‌طور طبیعی ناپایدار می‌باشند، به همین دلیل برای این نوع ربات‌ها امکان کوچک‌ترین حرکتی بدون بررسی تعادل وجود ندارد. ابتدا مفاهیم و اصطلاحات رایج درزمینه‌ی تعادل و پایداری را بیان کرده و سپس معیارهای پرکاربرد تعادل معرفی می‌شوند.

### ۲-۴-۱ محدوده تعادل کف پا یا چند ضلعی تکیه‌گاهی

به چند ضلعی بسته‌ای که از اتصال نقاط تماس ربات با زمین ایجاد می‌شود، چندضلعی تکیه‌گاهی گویند. این چندضلعی در فاز یک تکیه‌گاهی (SS)<sup>۴</sup> شامل یک کف پا و در فاز دو تکیه‌گاهی (DS)<sup>۵</sup> منحنی بسته حاصل از دوپا است. شکل ۲-۹ چند ضلعی تکیه‌گاهی را در فازهای یک تکیه‌گاهی و دو تکیه‌گاهی نشان می‌دهد.

---

<sup>1</sup> Cornell

<sup>2</sup> Deift

<sup>3</sup> MIT

<sup>4</sup> Single support

<sup>5</sup> Double support

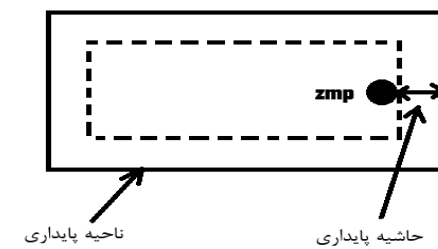


شکل ۲-۹: چندضلعی بسته حاصل از اتصال نقاط تماس پا با زمین.

## ۲-۴-۲ ناحیه پایداری و حاشیه پایداری<sup>۱</sup>

ناحیه پایداری همان مرز چند ضلعی تکیه‌گاهی است و حاشیه پایداری کمترین فاصله بین نقطه

گشتاور صفر و مرز چند ضلعی تکیه‌گاهی می‌باشد (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰: ناحیه پایداری و حاشیه پایداری.

## ۲-۴-۳ مرکز فشار<sup>۲</sup>

مرکز فشار نقطه‌ای روی زمین است که برآیند نیروهای عکس‌العمل زمین از آن نقطه به کف پای

ربات اعمال می‌شود [۴۸].

## ۲-۴-۳ مرکز جرم<sup>۳</sup>

تصویر عمودی موقعیت مرکز جرم ربات، معیاری برای تعادل استاتیکی آن است [۴۸]، موقعیت

مرکز جرم ربات از رابطه زیر بدست می‌آید:

<sup>۱</sup> Stability Margin

<sup>۲</sup> Center of pressure (CoP)

<sup>۳</sup> Center of mass (CoM)

$$P_{COM} = \frac{\sum_i m_i p_i}{\sum_i m_i} \quad (1-2)$$

در این رابطه  $m_i$  جرم لینک شماره  $i$  و  $p_i$  موقعیت مرکز آن لینک است. موقعیت تصویر عمودی مرکز جرم ربات بر روی زمین نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sum ((P_{GCOM} - P_i) \times m_i g) = 0 \quad (2-2)$$

## ۲-۳ انواع معیارهای پایداری و مفاهیم آن

از زمان شروع مطالعه بر روی حرکت ربات دوپا، مطالعه معیارهای پایداری دینامیکی نیز آغاز شده است. دریک تقسیم‌بندی کلی، معیارهای پایداری به سه گروه نقطه گشتاور صفر، انرژی مبنا و نیرو زاویه تقسیم می‌شوند. نقطه گشتاور صفر رایج‌ترین معیار پایداری است که مطالعات مفهومی انجام شده در آن در این بخش ارائه می‌شود. ابتدا نگاهی اجمالی به انواع معیارهای پایداری انداخته می‌شود.

### ۲-۳-۱ معیار پایداری مرکز ثقل

این معیار توسط مک‌گی و فرانک در سال ۱۹۶۸ ارائه شد [۴۹]. طبق این معیار حاشیه پایداری استاتیکی برای یک چند ضلعی تکیه‌گاهی برابر با کمترین فاصله تصویر عمودی مرکز جرم تا هر نقطه‌ای روی مرز چندضلعی است. در حالت پایداری استاتیکی، حاشیه پایداری، مثبت و در حالت ناپایداری، این مقدار منفی خواهد بود.

### ۲-۳-۲ معیار پایداری نقطه گشتاور صفر یا ZMP

در سال ۱۹۷۰، واکوبراتویچ<sup>۱</sup> این معیار پایداری را پیشنهاد داد و آن را در مورد سیستم‌ها و ربات‌ها با نام نقطه گشتاور صفر معرفی کرد [۵۰]. این معیار مبنای کنترل پایداری تقریباً تمام ربات‌های دوپا

---

<sup>1</sup> Miomir Vukobratovic

هست. ZMP به بیانی ساده نقطه‌ای است روی زمین که برآیند تمام گشتاورها حول این نقطه صفر باشد.

این تئوری اولین بار در سال ۱۹۸۴ در دانشگاه واسادا بر روی اولین ربات دوپای پایدار به کار گرفته شد. اشخاص مختلف تعریف‌های متعددی از نقطه گشتاور صفر ارائه داده‌اند که به‌طور خلاصه عبارتند از:

- همامی: در صورت پایداری، نقطه گشتاور صفر، برآیند نیروهای عکس‌العمل ربات با زمین می‌باشد [۵۱].
  - تاکانیشی<sup>۱</sup>: نقطه‌ای روی زمین است که برآیند تمام گشتاورهای حاصل از نیروهای خارجی و اینرسی ربات برابر با صفر باشد [۵۲].
  - هیرای<sup>۲</sup>: نقطه‌ای بر سطح زمین هست به گونه‌ای که گشتاور نیروی کلی در آن صفر است.
- معیارهای دیگر که تنها به ارائه اسم آن‌ها اکتفا می‌کنیم عبارتند از: معیار پایداری نشان‌گر چرخش پا<sup>۳</sup> [۵۳]، معیار پایداری انرژی مبنا [۵۴]، معیار پایداری نیرو-زاویه [۵۵]. در ادامه به تفصیل به معیار پایداری نقطه گشتاور صفر پرداخته می‌شود.

## ۲-۴ معیار نقطه گشتاور صفر [۵۶]

در این بخش تحقیقات دکتر واکوبراتویچ و همکارانش را جهت درک مفهوم نقطه گشتاور صفر به‌طور مختصر بیان می‌کنیم. مشخصه حرکت دوپاها را صرف‌نظر از ساختار و تعداد درجات آزادی‌شان می‌توان به چند بخش تقسیم کرد. اول آنکه دوران ربات حول یکی از لبه‌های پا وجود دارد. این امر

---

<sup>1</sup> Takanishi

<sup>2</sup> Hirai

<sup>3</sup> Foot Rotation Indicator(FRI)

باعث ظهور یک درجه آزادی اضافی بدون محرک می‌شود، دوم آنکه حرکت دوپاها با گام‌های باقاعده، تکرارپذیر است و سوم آنکه فازهای یک تکیه‌گاهی و دو تکیه‌گاهی به صورت منظم و متوالی رخ می‌دهند.

تمام مفاصل ربات دوپا به جز نقطه تماس زمین و پا موتوردار بوده و قابل کنترل هستند. در نقطه تماس با زمین، عکس‌العمل متقابل، بین ربات و محیط رخ می‌دهد. این تماس برای تحقق راه رفتن ضروری است چرا که موقعیت ربات نسبت به محیط، به نقطه تماس پا و زمین بستگی دارد. از آنجایی که نمی‌توان کف پا را مستقیماً کنترل کرد، از این رو به طور غیرمستقیم با استفاده از حرکت‌های مناسب در قست‌های بالایی پای ربات آن را کنترل می‌کنند.

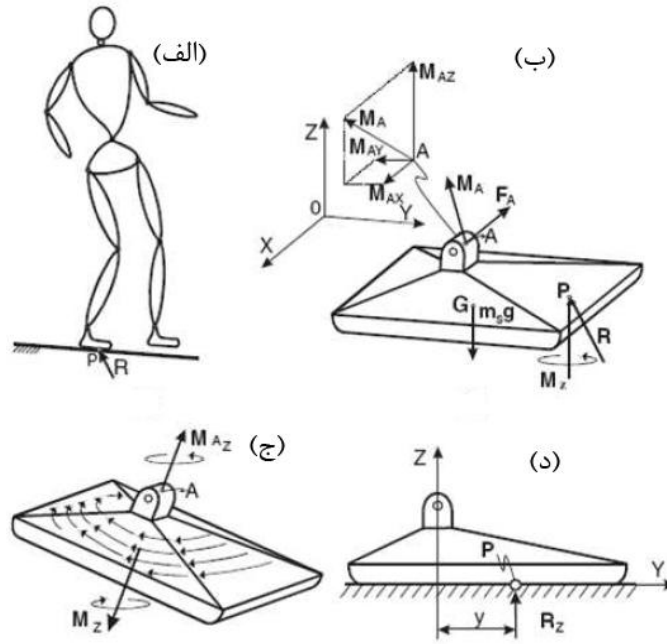
بنابراین شاخص کلی رفتار تعادلی ربات را می‌توان تنها توسط یک نقطه به نام نقطه گشتاور صفر بیان کرد که بر ایند نیروهای خارجی وارد بر ربات در حال تعادل به این نقطه وارد می‌شوند [۱۵]. نقطه گشتاور صفر نقطه عطفی در طراحی و کنترل گام ربات دوپا ایجاد کرده است و این روش تا مدت‌های زیادی تنها روش موجود در طراحی گام بوده است [۵۰].

## ۲-۴-۱ مفهوم نقطه گشتاور صفر

صرف‌نظر از محقق شدن حرکت ربات دوپا، مهم‌ترین وظیفه مکانیزم حرکتی آن، حفظ تعادل دینامیکی است. تعادل دینامیکی وقتی حاصل می‌شود که نه تنها لبه پا بلکه تمام سطح حداقل یک پا برای بازه زمانی کوتاهی در تماس با زمین بماند. در حین این تماس پا آزادانه روی زمین نشسته است و تماس زمین و پا از طریق نیروی اصطکاک و نیروی عکس‌العمل زمین با فرض اینکه ربات در فاز یک تکیه‌گاهی باشد، محقق می‌شود (شکل ۲-۱۱ الف). در وضعیتی که کف پای تکیه‌گاه در تماس کامل با زمین است، مکانیزم بالاتر از مچ پا با جایگذاری نیروها و گشتاورهای معادل آن یعنی  $F_A$  و  $M_A$

بیان می‌شود (شکل ۲-۱۱ ب). نیروی عکس‌العمل زمین در نقطه  $P$  بر پا وارد می‌شود که این عکس‌العمل شامل نیروی  $\bar{R} = (R_x, R_y, R_z)$  و گشتاور  $\bar{M} = (M_x, M_y, M_z)$  است و مرکز جرم پا در نقطه  $G$  قرار دارد. در وضعیت تعادل، مؤلفه افقی نیروها و مؤلفه در راستای  $Z$  گشتاورهای اعمال شده از طرف زمین به کف پا به وسیله نیروهای اصطکاک کف پا خنثی می‌شوند؛ بنابراین نیروهای اصطکاکی  $(R_x, R_y)$ ، مؤلفه افقی نیروی  $\bar{F}_A$  را خنثی می‌کنند. مؤلفه عمودی گشتاور عکس‌العمل زمین  $M_z$  (گشتاور نیروهای اصطکاک)، مؤلفه عمودی گشتاور  $\bar{M}_A$  و گشتاور حاصل از مؤلفه افقی  $\bar{F}_A$  را خنثی می‌کند (شکل ۲-۱۱ ج)؛ بنابراین در شرایطی که اصطکاک به قدری باشد که پا نلغزد، اصطکاک ایستایی نیروهای افقی  $(R_x, R_y)$  و گشتاور عمودی  $M_z$  را خنثی می‌کند.  $R_z$  مؤلفه نیروی عکس‌العمل زمین در جهت عمودی است که باعث خنثی کردن نیروهای حاصل از وزن ربات دوپا می‌شود. حال تنها مؤلفه‌های نیرو و گشتاور خنثی نشده در ربات دوپا عبارتند از مؤلفه‌های افقی گشتاور  $M_A$  یعنی  $M_{Ax}$  و  $M_{Ay}$ ، گشتاور حاصل از مؤلفه عمودی نیروی  $F_A$ ، گشتاور حاصل از نیروی وزن پای ربات و مؤلفه‌های افقی گشتاور عکس‌العمل زمین  $(M_x, M_y)$ . با توجه به ماهیت یک‌سویه ارتباط بین زمین و پا (واضح است که مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل زمین همواره به سمت بالاست) مؤلفه‌های افقی تمام گشتاورها را می‌توان با تغییر موقعیت محل نیروی  $\bar{R}$  در داخل چندضلعی تکیه‌گاهی خنثی کرد؛ که در واقع مفهوم ZMP از همین‌جا حاصل می‌شود، بطوریکه بتوان با جابه‌جا کردن محل نیروی  $\bar{R}$  به نقطه‌ای رسید که مؤلفه افقی گشتاور اعمالی از سمت زمین به پا صفر شود (چراکه در واقعیت زمین در راستای محور افقی نمی‌تواند هیچ گشتاوری به کف پا وارد کند). اگر این نقطه درون چندضلعی کف پا باشد عملاً زمین قادر است که از این نقطه به کف پا نیرو وارد کند و ربات متعادل می‌شود. این موضوع در (شکل ۲-۱۱ د) برای ساده‌سازی، به صورت صفحه‌ای نشان داده شده است.





شکل ۲-۱۱: پا و نیروهای عکس‌العمل وارد بر آن [۵۰].

گشتاور  $M_{Ax}$  با جابه‌جایی مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل زمین  $\bar{R}_z$  در جهت  $y$  به تعادل می‌رسد و همین‌طور گشتاور  $M_{Ay}$  با جابه‌جایی مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل زمینی  $\bar{R}_z$  در جهت  $x$  به تعادل می‌رسد. لازم به تأکید است که برای حفظ تعادل در همه زمان‌ها، نیروی عکس‌العمل باید در داخل منطقه تکیه‌گاهی قرار بگیرد. با افزایش گشتاور مچ، محل اعمال نیروی عکس‌العمل زمین تغییر می‌کند تا بتواند آن گشتاور را خنثی کند. پس از تغییر محل اثر نیرو و انتقال آن به نقطه گشتاور صفر، گشتاورهای افقی  $M_x$  و  $M_y$  از بین می‌روند. به هر حال اگر چندضلعی تکیه‌گاهی به اندازه کافی بزرگ نباشد نیروی  $\bar{R}$  در محل لبه پا قرار گرفته و بخشی از گشتاور که خنثی نشده است باعث دوران ربات حول لبه پا می‌شود که در نتیجه ربات واژگون می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت شرط تعادل دینامیکی حرکت این است که نقطه اثر نیروی عکس‌العمل زمین در داخل محدوده کف پا باقی بماند و از این محدوده تجاوز نکند. در این صورت روابط زیر برقرار است:

$$\bar{M}_x = 0 \quad (۳-۲)$$

$$\bar{M}_y = 0 \quad (4-2)$$

از آنجایی که برای تعادل دینامیکی، دو گشتاور مذکور  $(\bar{M}_x, \bar{M}_y)$  صفر هستند، نقطه  $P$  را نقطه گشتاور صفر می‌نامند؛ به عبارت دیگر عکس‌العمل زمین، با نیروی  $\bar{R}$  و مؤلفه‌های عمودی گشتاور  $M_z$  جایگزین می‌شود. نقطه  $P$ ، نقطه‌ی گشتاور صفر است که نیروی عکس‌العمل زمین در آنجا به پا وارد می‌شود. حال به منظور حفظ تعادل دینامیکی ربات موقعیت نقطه گشتاور صفر محاسبه می‌شود. پیش‌نیاز تعادل دینامیکی ربات تماس کامل پای ربات با سطح زمین است؛ لذا معادلات تعادل برای پای تکیه‌گاه به دیانگرام آزاد نیرویی شکل (شکل ۲-۱۱ ب) عبارتست از:

$$\bar{R} + \bar{F}_A + m_s g = 0 \quad (5-2)$$

$$\overline{OP} \times \bar{R} + \overline{OG} \times m_s \bar{g} + \bar{M}_A + \bar{M} + \overline{OA} \times \bar{F}_A = 0 \quad (6-2)$$

در این روابط  $\overline{OP}$  و  $\overline{OG}$  و  $\overline{OA}$  به ترتیب بردارهای محل اعمال نیروها نسبت به مبدا دستگاه مختصات  $O_{xyz}$  می‌باشند. با انتقال مبدأ دستگاه مختصات به نقطه  $P$  و دوباره نوشتن معادله (۲-۶) در امتداد محور  $z$ ، گشتاور عکس‌العمل زمین به صورت زیر خواهد بود:

$$\bar{M}_z = \bar{M}_{friction} = -\left(\left(\bar{M}_A\right)_z + \left(\overline{OA} \times \bar{F}_A\right)_z\right) - \left(\overline{OG} \times m_s \bar{g}\right)_z \quad (7-2)$$

از آنجایی که نیروی وزن پا نمی‌تواند گشتاوری در راستای خود تولید کند، در نتیجه مقدار گشتاور آن در راستای محور  $Z$  برابر با صفر خواهد بود و معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$\bar{M}_z = \bar{M}_{friction} = -\left(\left(\bar{M}_A\right)_z + \left(\overline{OA} \times \bar{F}_A\right)_z\right) \quad (8-2)$$

در حالت عمومی، مقدار این گشتاور صفر نیست و می‌توان با افزودن یک حرکت دینامیکی مناسب مکانیزم ربات، آن را به صفر رساند. معادله (۲-۶) در صفحه افقی عبارت است از:

$$\left(\overline{OP} \times \bar{R}\right)_H + \left(\overline{OG} \times m_s \bar{g}\right)_H + \left(\bar{M}_A\right)_H + \bar{M}_H + \left(\overline{OA} \times \bar{F}_A\right)_H = 0 \quad (9-2)$$

از آنجاکه  $P$  نقطه گشتاور صفر است، پس، اندازه  $M_H$  برابر با صفر است.

بر اساس این رابطه که معادله تعادل پا است، موقعیت نیروی عکس‌العمل زمین (نقطه  $P$ ) محاسبه می‌شود. اگر موقعیت نقطه  $P$  که از رابطه فوق به دست آمد، درون چند ضلعی تکیه‌گاهی

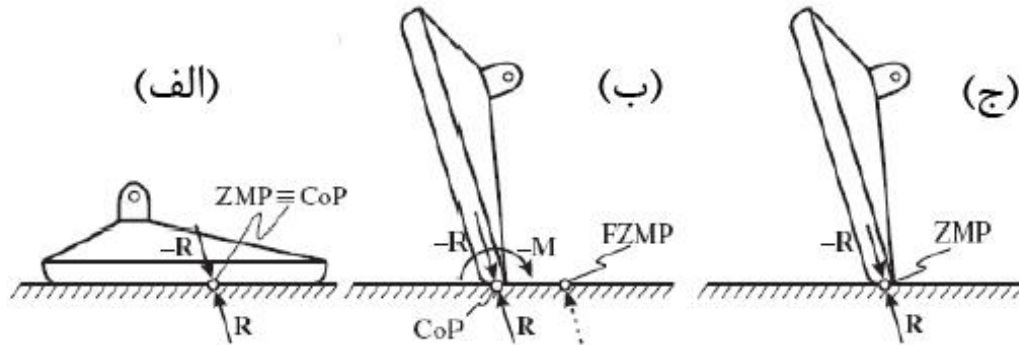
باشد، سیستم تعادل دینامیکی دارد. در هر صورت نقطه  $P$  نمی‌تواند خارج از منطقه تکیه‌گاهی پا باشد، چراکه نیروی  $R$  نمی‌تواند در خارج از محدوده تکیه‌گاهی به پا اعمال شود و خارج بودن این نقطه از چندضلعی تکیه‌گاهی به معنی عدم تعادل دینامیکی است. اگر در یک لحظه، نقطه  $P$  خارج از منطقه تکیه‌گاهی واقع شود، در این صورت این نقطه که نقطه گشتاور صفر است، غیرواقعی خواهد بود و به آن، نقطه گشتاور صفر مجازی<sup>۱</sup> می‌گویند؛ بنابراین اگر در واقعیت نقطه گشتاور صفر در داخل منطقه تکیه‌گاهی قرار گیرد، این نقطه، نقطه گشتاور صفر نامیده شده و ربات تعادل خواهد داشت؛ اما در شرایطی که نقطه گشتاور صفر به مرز تکیه‌گاه می‌رسد، یک گشتاور اضافی در مفصل مچ می‌تواند باعث دوران ربات حول لبه پا و واژگون شدن آن شود. در این شرایط، محل اعمال نیروی عکس‌العمل زمین بر خط مرزی پا قرار می‌گیرد و از آنجا که دو شرط  $M_x = 0$  و  $M_y = 0$  به‌طور هم‌زمان ارضا نمی‌شود نقطه اثر نیروی عکس‌العمل زمین متناظر با نقطه گشتاور صفر نخواهد بود که این نامطلوب است.

در واقع با کنترل حرکت قسمت‌های مختلف ربات دوپا، نقطه گشتاور صفر چنان کنترل می‌شود که همواره در چند ضلعی پا قرار گیرد و این تضمین کننده تعادل ربات خواهد بود. پروفیسور واکو براتویچ و همکارانش به بررسی تفاوت مرکز فشار و نقطه گشتاور صفر نیز پرداختند. تفاوتی آشکار بین این دو نقطه وجود دارد و نباید آن‌ها را یکسان در نظر گرفت. عمل و عکس‌العمل بین پا و زمین همواره می‌تواند با یک نیرو در مرکز فشار جایگزین شود؛ اما در صورتی این نقطه همان نقطه ZMP خواهد بود که ربات دارای تعادل باشد. به بیانی دیگر، هنگام راه رفتن متعادل دینامیکی، مرکز فشار و نقطه گشتاور صفر منطبق برهم هستند؛ اما زمانی که ربات تعادل دینامیکی نداشته باشد، نقطه گشتاور صفر وجود نخواهد داشت و ربات حول لبه پا دوران خواهد کرد. به هر دلیلی اگر نقطه گشتاور

---

<sup>۱</sup> FZMP

صفر به مرز پا منتقل شود ربات حول مرز پا، دارای یک مفصل غیرفعال می‌شود و این حرکت را می‌توان با حرکت دوپا بر روی نوک پا تصویر کرد. این حرکت بالستیک نامیده می‌شود.



شکل ۲-۱۲: الف) گام متعادل دینامیکی ب) گام نامتعادل دینامیکی ج) بالستیک [۵۰].

در این حالت اگرچه تعادل وجود دارد و نقطه گشتاور صفر و مرکز فشار برهم منطبق شده‌اند، ولی این نوع حرکت عادی نیست. به‌طور دقیق می‌توان گفت نقطه گشتاور صفر در صورت وجود همواره بر نقطه مرکز فشار منطبق است، اما نقطه مرکز فشار همواره بر نقطه گشتاور صفر منطبق نیست. در نتیجه هیچ‌گاه نقطه گشتاور صفر مجازی با مرکز فشار تلاقی ندارد، چراکه مرکز فشار نمی‌تواند از چندضلعی تکیه‌گاهی خارج شود.

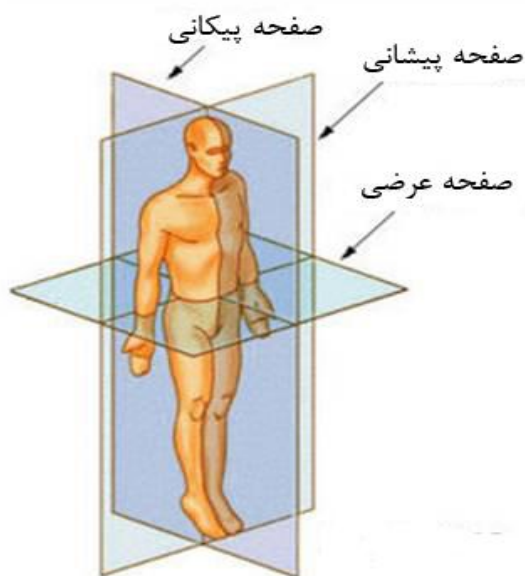
## ۲-۵ صفحات حرکتی در راه رفتن ربات دوپا

حرکت ربات‌ها را می‌توان در سه صفحه مختلف در نظر گرفت که عبارتند از صفحه پیکانی<sup>۱</sup>، صفحه پیشانی<sup>۲</sup> و صفحه عرضی<sup>۳</sup>. مهم‌ترین صفحه در ایجاد حرکت، صفحه پیکانی است. از این رو ربات در این صفحه باید حتماً دارای مفصل باشد. به رباتی که تنها در این صفحه دارای حرکت باشد، ربات صفحه‌ای می‌گویند (شکل ۲-۱۳).

<sup>۱</sup> Sagittal

<sup>۲</sup> Frontal

<sup>۳</sup> Transverse



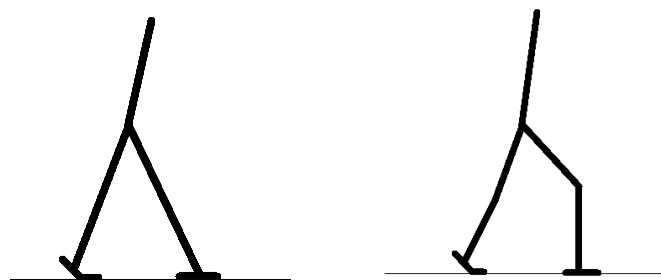
شکل ۲-۱۳: صفحات حرکتی در راه رفتن.

## ۲-۶ فازهای حرکتی در راه رفتن ربات

راه رفتن یک الگوی تکرارشونده برای ربات است. یک سیکل راه رفتن دارای دو فاز تماس با زمین است که بسته به نوع تماس به آن‌ها فاز یک تکیه‌گاهی یا دو تکیه‌گاهی می‌گویند. در فاز یک تکیه‌گاهی یک پا روی زمین ثابت است که آن پای تکیه‌گاه<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. پای دیگر که در حال حرکت از عقب به جلو است، پای تاب خورنده<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. به حالتی که دو پا در تماس با زمین باشند، فاز دو تکیه‌گاهی می‌گویند (شکل ۲-۱۴) [۵۷-۵۸].

<sup>1</sup> Stance foot

<sup>2</sup> Swing foot



شکل ۲-۱۴: فاز دو تکیه‌گاهی در راه رفتن.

هریک از فازهای نامبرده نشان‌دهنده ساختار سینماتیکی متفاوتی در پاها است. همان‌طور که دنک و اشمیت بیان می‌کنند، در فاز یک تکیه‌گاهی که یک پا بر روی زمین ثابت بوده و پای دیگر در هوا معلق است، کل ربات یک زنجیره باز سینماتیکی را تشکیل می‌دهد. از سوی دیگر در فاز دو تکیه‌گاهی که هر دو پا بر روی زمین قرار دارند، مکانیزم پاهای ربات یک زنجیره بسته سینماتیکی را تشکیل می‌دهند [۵۸]. در بسیاری از مقالات، ربات فقط در حالت یک تکیه‌گاهی بررسی شده و فاز حرکتی دو تکیه‌گاهی به صورت آنی در نظر گرفته می‌شود [۵۹-۶۰]. اخیراً برخی از محققان این فاز را نیز بررسی کرده‌اند [۶۱]. علاوه بر این دو فاز، بسیاری از محققان یک فاز دیگر به نام فاز ضربه را نیز در نظر می‌گیرند. در فاز ضربه، در اثر نیروی ضربه‌ای وارد بر کف پای ربات سرعت زاویه‌ای مفاصل ربات قبل و بعد از نیروی ضربه‌ای تغییر ناگهانی می‌کنند، اما موقعیت مفاصل بدون تغییر باقی می‌ماند [۶۲]. لذا برای تکرارپذیری حرکت ربات دوپا لازم است که سرعت و موقعیت ربات در ابتدا و انتهای یک گام یکی باشند. فاکونتی<sup>۱</sup> این شرط را، شرط تکرارپذیری حرکت نامیده است [۶۳، ۶۴].

<sup>۱</sup> Faconti



فصل سوم:

سینماتیک ربات دوپا



## فصل سوم: سینماتیک ربات دوپا

### ۳-۱ مقدمه

در این فصل به سینماتیک و معرفی ربات دوپای مورد مطالعه، پرداخته شده است. ابتدا ربات مورد مطالعه معرفی و سپس ویژگی‌های آن بیان می‌شود. سپس با توجه به منحنی‌های آماری حرکتی انسان مسیرها و قیدهای لازم برای حرکت ربات، تعیین می‌شود تا گام برداشتن ربات نزدیک به حرکت انسان شود. در نهایت به کمک روابط سینماتیک معکوس، مسیر مناسب برای مفاصل ربات، با توجه به قیدهای فوق به دست می‌آید.

### ۳-۲ معرفی ربات مورد مطالعه

در این مطالعه، ربات دارای ۱۶ درجه آزادی فعال در فضای سه بعدی است. بدین معنی که ربات دارای ۱۶ مفصل دورانی فعال در فضا می‌باشد که مشابه پایین‌تنه‌ی بدن انسان بوده و از نه عضو تشکیل شده است. این ربات شامل کمر و دو پای مشابه به هم می‌باشد. هر پای کامل، از عضوهای ران، ساق و پا تشکیل شده است. پاها هرکدام خود شامل دو عضو پاشنه و پنجه می‌باشند.

در مطالعه حاضر از این پس به قسمت مفصل لگن تا انتهای پنجه پا «پای کامل»<sup>۱</sup> و از قسمت میچ پا تا انتهای پنجه را «پا»<sup>۲</sup> می‌نامیم.

درجه آزادی ربات نیز برگرفته از درجات آزادی پایین‌تنه‌ی انسان می‌باشد به گونه‌ای که هر مفصل لگن<sup>۳</sup> شامل سه درجه آزادی دورانی، هر زانو دارای یک درجه آزادی و هر میچ پای ربات نیز سه درجه آزادی دورانی دارد، که با در نظرگیری یک درجه آزادی در هر پنجه<sup>۴</sup>، مجموع درجات ربات به ۱۶ می‌رسد.

از آنجا که حرکت تک تکیه‌گاهی حین تکیه‌گاه بودن پای چپ و راست مشابه است و راه رفتن یک حرکت تکراری است که در آن فقط نقش پاها عوض می‌شود، به‌منظور ساده‌تر شدن محاسبات در این پایان‌نامه، تنها به مطالعه یک گام پرداخته‌شده و با فرض اینکه پای راست، پای تکیه‌گاه بوده و پای چپ، حرکت تاب خورنده از عقب به جلو را انجام می‌دهد، حرکت ربات بررسی می‌شود. ربات مورد مطالعه در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که تمامی مفاصل ربات دارای عملگر بوده و این بدین معنی است که در هر لحظه می‌توان تمامی مفاصل را به صورت مستقل کنترل کرد.

بردار متغیرهای مفاصل بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$q = [q_1, q_1, \dots, q_{16}]^T \quad (1-3)$$

به‌طوری که  $q_j$  دوران هر مفصل حول محور  $z_j$  در دستگام مربوطه می‌باشد.

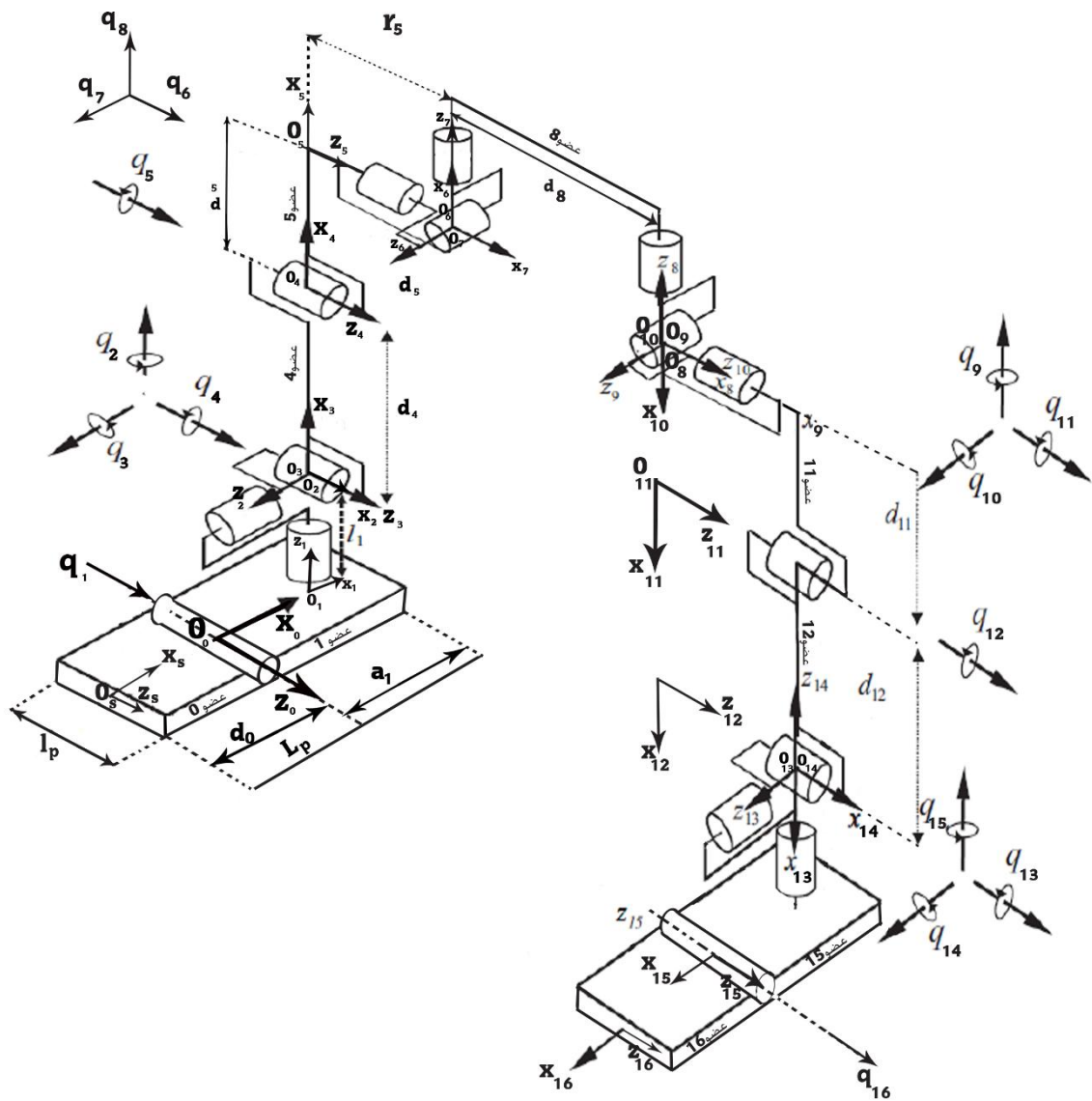
---

<sup>1</sup> Leg

<sup>2</sup> Foot

<sup>3</sup> Hip

<sup>4</sup> Metatarsal



شکل ۳-۱: ربات دوپای مورد مطالعه.

دستگاه مختصات  $X_0Y_0Z_0$  با مرکز  $O_0$ ، بر روی مفصل پنجه پای سمت راست متصل به عضو صفر هست. دستگاه‌های مختصات عضوهای دیگر، با توجه به قاعده دنویت- هارتنبرگ<sup>۱</sup> به دست می-

<sup>۱</sup> Denevit- Hartenberg

آید. از آنجا که در حین یک گام، پنجه پای راست بدون حرکت بر روی زمین قرار دارد، دستگاه مختصات  $O_0$  متصل به آن را دستگاه پایه یا اینرسی ربات می‌نامند. طول‌های اعضای ربات مورد مطالعه در جدول ۳-۱ لیست شده است. لازم به ذکر است که در این ربات فرض می‌شود، تمامی اعضا صلب و همگن می‌باشند.

### ۳-۳ معادلات سینماتیک ربات دوپا [۶۵]

حرکت یک جسم در فضا را از دو دیدگاه می‌توان بررسی کرد. به‌طور کلی می‌توان گفت حرکت شامل دو بخش سینماتیک و سینتیک است که در بخش سینماتیک، از علت حرکت صحبتی به میان نمی‌آید و حرکت بدون توجه به عامل ایجاد کننده‌ی آن بررسی می‌شود و در بخش سینتیک، نیروها و گشتاورهای عامل حرکت بررسی می‌شوند. این فصل به مبحث سینماتیک در ربات دوپا می‌پردازد. هنگامی که یک پا روی زمین است در صورتی که ربات دارای تعادل باشد و پنجه پای تکیه‌گاه بدون حرکت روی زمین قرار گرفته باشد، ربات تشکیل یک زنجیره سینماتیکی باز را می‌دهد و مانند یک بازوی مکانیکی ۱۶ درجه آزادی می‌توان به آن نگاه کرد.

برای به دست آوردن سینماتیک ربات دو پا از دو روش هندسی و محاسباتی می‌توان استفاده کرد. در ربات‌های صفحه‌ای که درجات آزادی کمتری دارند، به کمک تجسم و اندازه‌گیری‌های هندسی به راحتی می‌توان معادلات سینماتیک ربات را استخراج کرد. ولی در ربات‌های سه بعدی که درجات آزادی زیادی دارند، نیازمند استفاده از روش‌های محاسباتی می‌باشیم. برای استفاده از روش‌های محاسباتی، ابتدا مفاصل ۳ درجه آزادی ربات، یعنی مفاصل مچ پا و لگن ربات را به صورت سه مفصل یک درجه آزادی در نظر می‌گیریم که با اعضای به طول صفر به هم متصل شده‌اند. در نتیجه؛ عمل هر مفصل را می‌توان با یک عدد حقیقی توصیف کرد. با این فرض، با توجه به قاعده دنویت هارتنبرگ می‌توان دستگاه‌های مختصات متناظر با هر عضو ربات را تعیین کرد. در این تحقیق

ربات با ۱۶ مفصل فعال دارای ۱۷ عضو می‌باشد که با شماره‌گذاری از صفر شروع می‌شود و شماره صفر به پنجه پای تکیه‌گاه تعلق می‌گیرد. از آنجاکه مفصل  $i$  رابط  $i$  را به حرکت درمی‌آورد، رابط صفر در طول یک گام در صورت برقراری شرایط تعادل بدون حرکت خواهد ماند.

برای تحلیل سینماتیک، به هر رابط یک دستگاه مختصات متصل می‌شود، یعنی دستگاه  $o_i x_i y_i z_i$  را به رابط  $i$  نسبت می‌دهیم. در نتیجه با تحریک مفصل  $i$ ، رابط مربوطه به حرکت در می‌آید. هر دو دستگاه مختصات متصل به دو عضو را می‌توان توسط ماتریس تبدیل همگن به هم مربوط کرد و رابطه ماتریس تبدیل همگن به صورت زیر است:

$$T_j^i = \begin{bmatrix} R_j^i & O_j^i \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

در این ماتریس  $R_j^i$ ، ماتریس دوران با بعد  $3 \times 3$  بوده و بیانگر جهت‌گیری دستگاه مختصات  $j$  نسبت به دستگاه مختصات  $i$  می‌باشد.  $O_j^i$  ماتریسی با اندازه  $3 \times 1$  بوده و موقعیت دستگاه مختصات  $j$  را در دستگاه مختصات  $i$  بیان می‌کند.  $0_{1 \times 3}$  نیز یک ماتریس سطری با درایه‌های صفر است.

با استفاده از ماتریس تبدیل همگن، موقعیت و جهت‌گیری هر نقطه در دستگاه مختصات  $i$  که با نماد  $P_i$  نشان داده می‌شود، در دستگاه مختصات  $j$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_j = T_j^i P_i \quad (3-3)$$

طبق قاعده دنویت- هارتنبرگ هر ماتریس تبدیل بین دو دستگاه متوالی را می‌توان به صورت حاصل ضرب چهار تبدیل اساسی به صورت زیر نوشت:

$$A_i = \left[ Rot_{z, \theta_i} \times Trans_{z, d_i} \times Trans_{x, a_i} \times Rot_{x, \alpha_i} \right] \quad (4-3)$$

در این رابطه  $Rot_{z, \theta_i}$  و  $Rot_{x, \alpha_i}$ ، به ترتیب دوران حول محور  $z$  به اندازه  $\theta_i$  و دوران حول محور  $x$  به اندازه  $\alpha_i$  می‌باشد. همچنین  $Trans_{z, d_i}$  و  $Trans_{x, a_i}$  به ترتیب انتقال در راستای محور  $z$  به اندازه  $d_i$  و انتقال در راستای محور  $x$  به اندازه  $a_i$  می‌باشند. ماتریس فوق را می‌توان به صورت کلی زیر نوشت:

$$A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

در رابطه فوق،  $c$  و  $s$  به ترتیب معرف توابع مثلثاتی  $\cos$  و  $\sin$  است. در ماتریس فوق، پارامترهای

$d_i$ ،  $a_i$ ،  $\theta_i$  و  $\alpha_i$  به ترتیب نمایانگر انحراف عضو، طول عضو، زاویه مفصل و پیچش عضو می‌باشند.

در ربات حاضر تنها مقدار زوایای مفاصل متغیر است.

پس از تعریف دستگاه‌های مختصات اعضای ربات، جدول پارامترهای دنویت- هارتنبرگ ربات

مذکور تشکیل داده می‌شود (جدول ۳-۱).

حال با استفاده از ماتریس‌های انتقال همگن، موقعیت و جهت‌گیری هر نقطه از ربات را می‌توان

به دست آورد.

### ۳-۴ به دست آوردن مسیر حرکت مفاصل

با فرض حرکت مستقیم برای ربات در این مطالعه، دوران مفاصلی را که باعث انحراف ربات از خط

مستقیم شده و موجب دور زدن و تغییر مسیر حرکت آن می‌شوند، صفر فرض شده‌اند. این مفاصل که

عامل حرکت حول محور عمودی یا همان یاو ربات می‌باشند عبارتند از:  $q_2$ ،  $q_8$ ،  $q_9$  و  $q_{15}$ . با توجه

به آنچه بیان شد، در فرآیند دستیابی به مسیرهای مناسب مفاصل چهار معادله از مجموع معادلات به

صورت زیر می‌باشند:

$$q_2 = 0, \quad q_8 = 0, \quad q_9 = 0, \quad q_{15} = 0 \quad (6-3)$$

جدول ۱-۳: جدول پارامترهای دنویت- هارتنبرگ

$i$	رابطه $a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$a_1$	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_1$
2	0	$\frac{\pi}{2}$	$L_1$	$\theta_2 - \frac{\pi}{2}$
3	0	$\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_3 + \frac{\pi}{2}$
4	$d_4$	0	0	$\theta_4$
5	$d_5$	0	0	$\theta_5$
6	0	$-\frac{\pi}{2}$	$r_5$	$\theta_6$
7	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_7 - \frac{\pi}{2}$
8	$d_8$	0	0	$\theta_8$
9	0	$\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_9$
10	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_{10} - \frac{\pi}{2}$
11	$d_{11} = d_5$	0	0	$\theta_{11}$
12	$d_{12} = d_4$	0	0	$\theta_{12}$
13	0	$\frac{\pi}{2}$	$r_{11} = r_5$	$\theta_{13}$
14	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_{14} + \frac{\pi}{2}$
15	$a_{15} = a_1$	$-\frac{\pi}{2}$	$-L_{15} = -L_1$	$\theta_{15} - \frac{\pi}{2}$
16	$d_{16} = d_1$	0	0	$\theta_{16}$

برای داشتن گام‌های بلندتر و ایجاد نیروی رانش به سمت جلو برای ربات، منحنی مسیر حرکت مفاصل پنجه‌ی پا به صورت دو ضابطه‌ای با شرایط مرزی زیر تعریف می‌شود که برای مفصل پنجه پای تکیه‌گاه (پنجه‌ی پای راست) داریم:

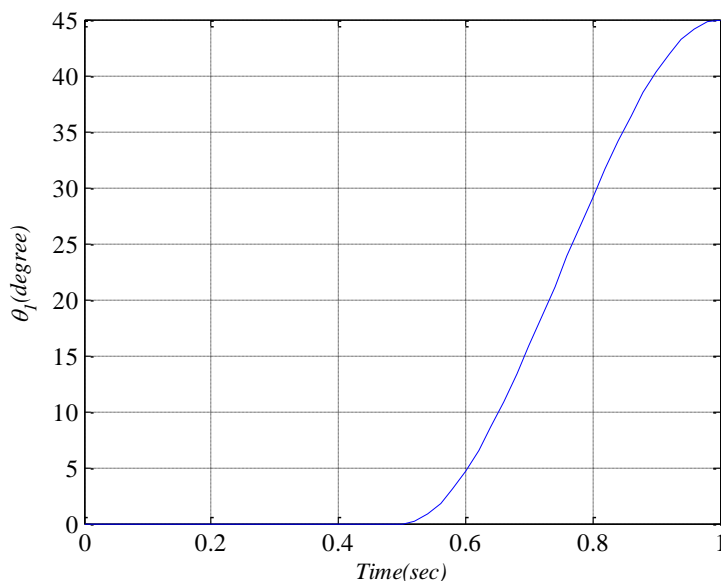
$$q_1 = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < \frac{T_s}{2} \\ \frac{\pi}{4} & t = T_s \end{cases} \quad (7-3)$$

$$\dot{q}_1 = \begin{cases} 0 & t = \frac{T_s}{2} \\ 0 & t = T_s \end{cases} \quad (8-3)$$

در این شرایط مرزی،  $T_s$  زمان یک گام است. این شرایط بدین معنی هستند که در حین حرکت پای تاب خورنده، برای نیمی از زمان حرکت، پنجه و پاشنه‌ی پای تکیه‌گاه تماماً بر روی زمین قرار دارند. در نیمه زمانی دوم حرکت پای تاب خورنده، پاشنه‌ی پای تکیه‌گاه با سرعت صفر شروع به بلند شدن از سطح زمین کرده و با سرعت صفر به مقدار نهایی زاویه‌ی  $\frac{\pi}{4}$  می‌رسد. با توجه به این شرایط مرزی و استفاده از چندجمله‌ای درجه ۳ معادله حرکت مفصل ۱ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$q_1(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < \frac{T_s}{2} \\ -\frac{4\pi}{T_s^3}t^3 + \frac{9\pi}{T_s^2}t^2 - \frac{6\pi}{T_s}t + \frac{5\pi}{4} & \frac{T_s}{2} \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (9-3)$$

با توجه به توضیحات فوق، منحنی مسیر دوران مفصل ۱ به شکل زیر است:



شکل ۳-۲: مسیر مطلوب مفصل ۱



برای مفصل پاشنه پای تاب خورنده شرایط مرزی بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$q_{16} = \begin{cases} -\frac{\pi}{4} & t=0 \\ 0 & \frac{T_s}{2} \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (10-3)$$

$$\dot{q}_{16} = \begin{cases} 0 & t=0 \\ 0 & t=\frac{T_s}{2} \end{cases} \quad (11-3)$$

شرایط فوق بدین معنی است که مفصل پنجه‌ی پای تاب خورنده، ابتدا با زاویه  $-\frac{\pi}{4}$  از زمین بلند

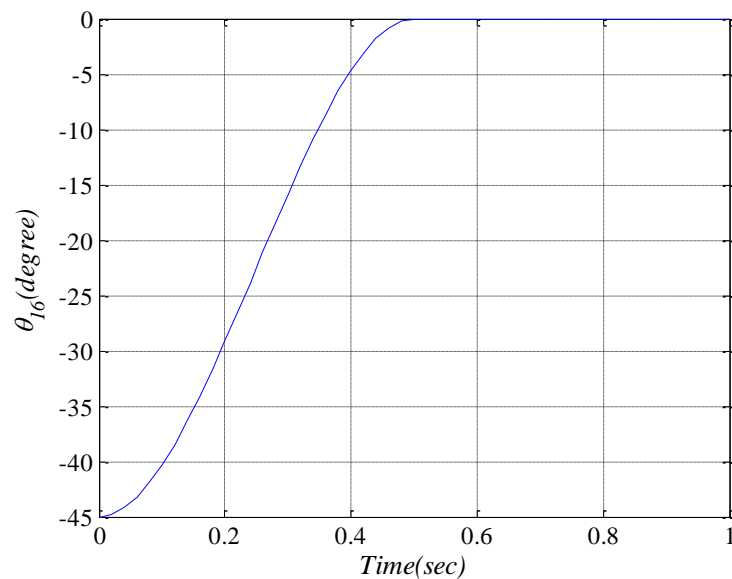
شده و در انتهای نیمه‌ی اول زمانی حرکت با سرعت صفر به زاویه صفر می‌رسد و نیمه دوم زمانی

حرکت را با همان زاویه صفر ادامه می‌دهد. با توجه به این فرضیات معادله حرکت مفصل ۱۶ به صورت

زیر است:

$$q_{16}(t) = \begin{cases} -\frac{4\pi}{T_s^3}t^3 + \frac{3\pi}{T_s^2}t^2 - \frac{\pi}{4} & 0 \leq t < \frac{T_s}{2} \\ 0 & \frac{T_s}{2} \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (12-3)$$

منحنی مسیر این مفصل در شکل ۳-۱ نشان داده شده است:



شکل ۳-۳: مسیر مطلوب مفصل ۱۶

در این تحقیق فرض شده است، حرکت ربات در فاز دو تکیه‌گاهی به صورت لحظه‌ای رخ می‌دهد. این حالت بدین معنی است که به‌طور لحظه‌ای پای تاب خورنده بر روی زمین قرار می‌گیرد و در همان لحظه پای تکیه‌گاه از زمین بلند شده و حرکت با تفاوت در نقش پاها، تکرار می‌شود. از آنجاکه ربات بر روی زمین هموار و مسطح حرکت می‌کند؛ لازم است تا پای تاب خورنده به صورت موازی با سطح زمین فرود آید؛ تا پای تاب خورنده، در هنگام رسیدن به زمین در تماس کامل با زمین قرار گیرد. این قید با نام قید جهت‌گیری کف پا شناخته می‌شود. به‌منظور جهت‌گیری مناسب دستگاه متصل به پنجه‌ی پای تاب خورنده و زمین لازم است تا مؤلفه‌های جهت‌گیری این دو دستگاه مختصات حول  $x_0$  و  $z_0$  صفر باشد. با توجه به این موارد، دو معادله دیگر برای بدست آوردن مسیر حرکت مفاصل به دست می‌آید. اختلاف کوچک بین جهت‌گیری‌های این دو دستگاه مختصات را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۶۶].

$$\xi_{3 \times 1} = \frac{1}{2}(s \times s^d + n \times n^d + a \times a^d) \quad (13-3)$$

که در این رابطه  $s$ ،  $n$  و  $a$  به ترتیب ستون‌های ماتریس جهت‌گیری دستگاه متصل به پنجه پای تاب خورنده نسبت به دستگاه مختصات اینرسی می‌باشند. ماتریس جهت‌گیری مذکور عبارت است از:

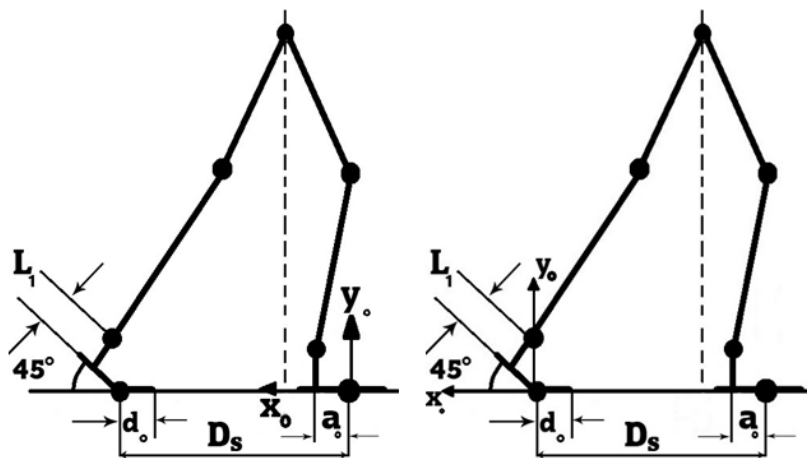
$$R_{16}^0 = [s \quad n \quad a] \quad (14-3)$$

در رابطه فوق  $\xi$  خود دارای سه مؤلفه است که مؤلفه  $y$  آن، حول محور یابو ربات بوده و تأثیری بر جهت‌گیری پای تاب خورنده نسبت به زمین ندارد. در نتیجه با برابر صفر قرار دادن مؤلفه‌های  $x$  و  $z$  آن، دو معادله‌ای که اشاره شد، به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\begin{cases} \xi_x = 0 \\ \xi_z = 0 \end{cases} \quad (15-3)$$

با توجه به هندسه ربات و سرعت متوسط راه رفتن عادی یک انسان با قد پایین تنه‌ای برابر با قد ربات مورد مطالعه، زمان یک گام ( $T_s$ ) برابر با یک ثانیه و طول گام ( $2D_s$ ) برابر با ۷۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در ادامه به تعیین حرکت مچ پای تاب خورنده پرداخته شده است. جهت تعیین

حرکت میچ پا در هر لحظه به دو مؤلفه‌ی  $X_{s.a.}$  و  $Y_{s.a.}$  که نشان‌دهنده حرکت قوزک پا هستند، نیاز است. گام حرکت ربات برای پای چپ و پای راست به عنوان تکیه‌گاه در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه در مرحله‌ی یک تکیه‌گاهی که در مدت زمان  $T_s$  انجام می‌گیرد، حرکت با جدا شدن پنجه‌ی پای چپ از زمین شروع شده و با تماس کامل همان پا به زمین به انتها می‌رسد. میچ پا در حین حرکت از نقاطی با موقعیت و سرعت مشخص عبور می‌کند که از هندسه ربات به دست آمده و با توجه به آن‌ها مسیر حرکت میچ پا مشخص می‌شود. این نقاط به صورت زیر می‌باشند.



شکل ۳-۴: نمای جانبی ربات دو پای مورد مطالعه در ابتدا و انتهای گام

با توجه به طول‌های اعضای ربات و شکل فوق، شرایط مرزی زیر برای میچ پا وجود دارد ( $a_0 = a_1$ ):

$$X_{s.a.} = \begin{cases} D_s + a_1 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - L_1 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) & t = 0 \\ 0 & t = T_m \\ -D_s + a_1 & t = T_s \end{cases} \quad (15-3)$$

$$Y_{s.a.} = \begin{cases} a_1 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + L_1 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) & t = 0 \\ 0.13 & t = T_m \\ L_1 & t = T_s \end{cases} \quad (16-3)$$

$$\dot{X}_{s.a.} = \begin{cases} 0 & t = 0 \\ 0 & t = T_s \end{cases} \quad (17-3)$$

$$\dot{Y}_{s.a.} = \begin{cases} 0 & t=0 \\ 0 & t=T_m \\ -0.1 & t=T_s \end{cases} \quad (18-3)$$

همانطور که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است،  $a_1$  طول پاشنه پای ربات،  $d_0$  طول پنجه پای ربات و  $L_1$  ارتفاع قوزک پا می‌باشد؛ پارامتر  $T_m$  نشان‌دهنده‌ی زمانی است که مچ پای ربات در بالاترین ارتفاع خود از سطح زمین قرار می‌گیرد. در این مطالعه مقدار  $T_m$  برابر با  $0.5$  ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

با آگاهی از این شرایط و بهره‌گیری از چندجمله‌ای‌های درجه ۴ و ۵ به ترتیب برای  $X_{sa}$  و  $Y_{sa}$ ،

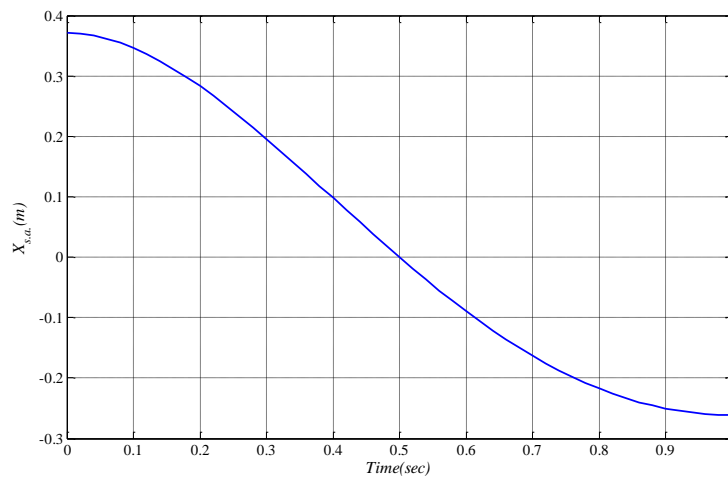
ضابطه تقریبی برای مسیر حرکت مچ پا به صورت زیر بر حسب مؤلفه زمان به دست می‌آید.

$$X_{s.a.}(t) = -0.8803t^4 + 3.0247t^3 - 2.7764t^2 + 0.3710 \quad (19-3)$$

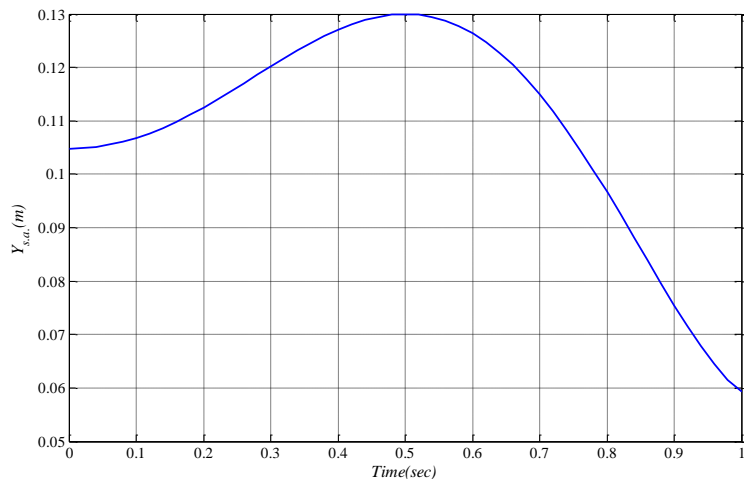
$$Y_{s.a.}(t) = 0.6939t^5 - 1.1673t^4 + 0.2442t^3 + 0.1837t^2 + 0.1048 \quad (20-3)$$

منحنی حرکت مچ پای سمت چپ در حین گام برداشتن ربات در دو راستای محورهای  $x$  و  $y$

نسبت به زمان در شکل‌های ۳-۵ و ۳-۶ نشان داده شده است.

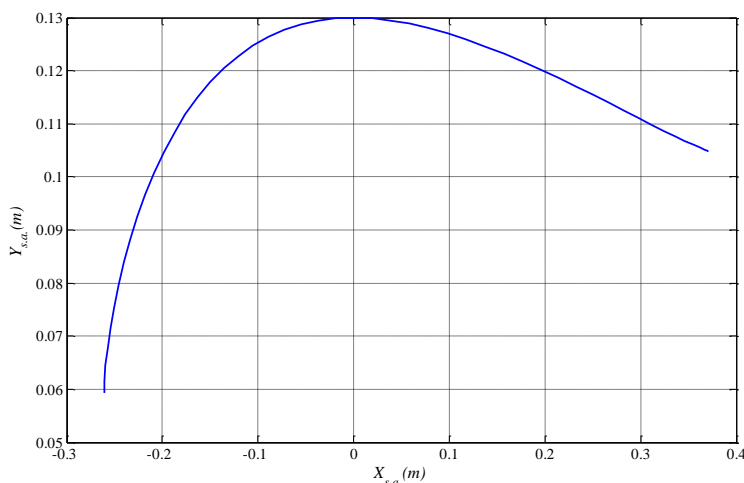


شکل ۳-۵: مسیر حرکت مچ پا در راستای محور  $X_{s.a.}$



شکل ۳-۶: مسیر حرکت مچ پا در راستای محور  $Y_{s.a.}$

با توجه به مسیرهای  $x$  و  $y$ ، حرکت مچ در صفحه  $x-y$  به صورت شکل زیر است.



شکل ۳-۷: مسیر حرکت مچ پا در صفحه  $x-y$

با توجه به منحنی‌های آماری حرکت انسان که در فصل ۱ به آن اشاره شد و نیز شباهت گام

حرکت ربات به گام انسان، فاصله‌ی دو مچ پا در حین حرکت در راستای محور  $z_0$  با نماد  $z_{s.a.}$  ثابت

فرض شده و همچنین دوران لگن حول محور  $z_0$  با نماد  $\xi_{hip,z}$ ، نیز برابر با صفر فرض می‌شود. این دو

فرض بصورت دو معادله زیر بیان می‌شوند:

$$z_{s.a.} = const. \quad (۲۱-۳)$$

$$\xi_{hip,z} = 0 \quad (۲۲-۳)$$

یکی دیگر از فرضیات در این تحقیق، در نظرگیری حرکت نیم سینوسی لگن بصورت رابطه زیر در راستای محور  $y_0$  است که با نماد  $Y_{hip}$  نمایش داده شده است.

$$Y_{hip}(t) = A \sin(\pi t) + B \quad (23-3)$$

در رابطه فوق  $A$  و  $B$  ثوابتی هستند که در حین حل مسئله تعیین می‌شود. در نهایت همان‌گونه که در فصل اول بیان شد، حرکت دورانی لگن حول محور  $x_0$ ،  $\xi_{hip,x}$  مقدار کمی بوده و در این فصل برای محاسبه مسیر حرکت مفاصل ربات از آن صرف‌نظر می‌شود و به عبارت دیگر مقدار آن صفر فرض می‌شود.

$$\xi_{hip,x} = 0 \quad (24-3)$$

با توجه به مباحث فوق، در مجموع ۱۲ معادله غیر خطی برای محاسبه مسیر حرکت مفاصل باقی می‌ماند. با در نظرگیری قید پایداری نقطه گشتاور صفر برای حرکت ربات، دو معادله دیفرانسیل مرتبه دو غیرخطی با ۱۲ مجهول که همان متغیرهای مفصلی است، حاصل می‌شود. با حل همزمان این ۱۲ معادله، معادلات مسیر حرکت مفاصل ربات به صورت تابعی از زمان بدست می‌آید. بنابراین ۱۶ معادله برای بدست آوردن مسیر حرکت مفاصل ربات بصورت زیر می‌باشد:

$$q_2 = 0, \quad q_8 = 0, \quad q_9 = 0, \quad q_{15} = 0$$

$$q_1(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < \frac{T_s}{2} \\ -\frac{4\pi}{T_s^3}t^3 + \frac{9\pi}{T_s^2}t^2 - \frac{6\pi}{T_s}t + \frac{5\pi}{4} & \frac{T_s}{2} \leq t \leq T_s \end{cases}$$

$$q_{16}(t) = \begin{cases} -\frac{4\pi}{T_s^3}t^3 + \frac{3\pi}{T_s^2}t^2 - \frac{\pi}{4} & 0 \leq t < \frac{T_s}{2} \\ 0 & \frac{T_s}{2} \leq t \leq T_s \end{cases}$$

$$\begin{cases} \xi_x(q_1, q_2, q_3, \dots, q_{16}) = 0 \\ \xi_z(q_1, q_2, q_3, \dots, q_{16}) = 0 \end{cases} \quad (25-3)$$

$$X_{s.a.}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_{16}) = X_{s.a.}(t)$$

$$Y_{s.a.}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_{16}) = Y_{s.a.}(t)$$

$$z_{s.a.}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_{16}) = const.$$

$$\xi_{hip,z}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_8) = 0$$

$$\xi_{hip,x}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_8) = 0$$

$$Y_{hip}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_8) = Y_{hip}(t)$$

برای بدست آوردن مسیر حرکت مفاصل و حل معادلات فوق از الگوریتم موسویان، القونه و تخمار [۶۷] برای حل مسئله استفاده شد. این الگوریتم با فرض مشخص بودن مسیر حرکت لگن و پای تاب خورنده‌ی ربات، به کمک سینماتیک معکوس، مسیر حرکت مفاصل را تعیین می‌کند. در این تحقیق، هرچند حرکت مچ پای ربات مشخص است. ولی حرکت لگن ربات در راستای محورهای  $x_0$ ،  $y_0$  و  $z_0$  معلوم نمی‌باشد. بدین منظور الگوریتم بیان شده با یک سری تغییرات، برای حل مسئله استفاده شد. در بخش بعدی این فصل، روش حل مسئله به صورت تفصیلی بیان می‌شود.

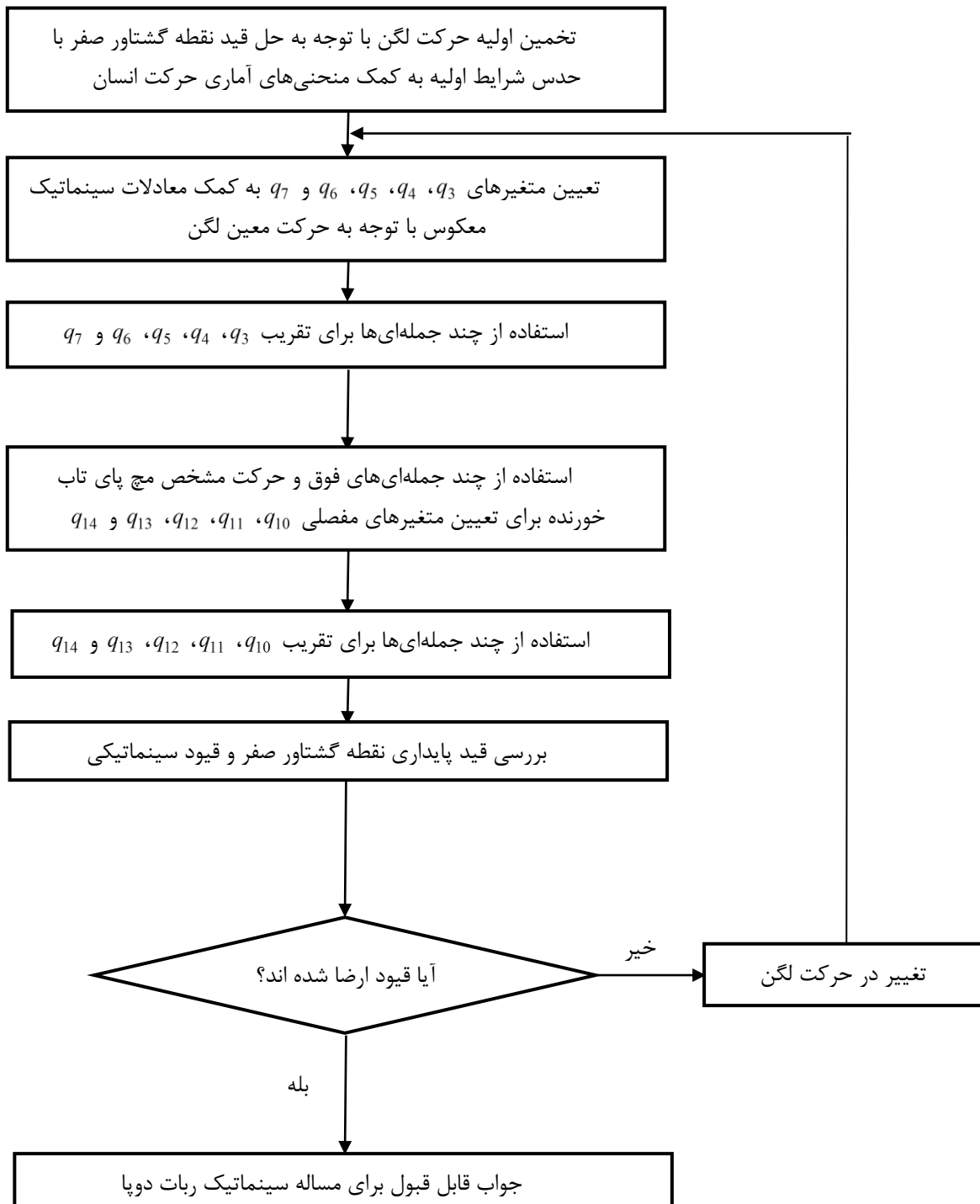
### ۳-۵ روش حل مسئله سینماتیک ربات دو پا

روش مورد استفاده برای حل مسئله سینماتیک ربات با توجه به مشخص نبودن حرکت لگن، یک روش مبتنی بر سعی و خطا است. ابتدا یک حرکت و یک دوران برای لگن در راستاهای مختلف و در نظر گرفته می‌شود و سپس در روند حل مسئله که در ادامه بیان می‌شود، این حرکت‌ها به گونه‌ای تغییر داده می‌شوند تا معادلات قید نقطه گشتاور صفر ارضا شود. اولین فرض برای شروع فرآیند حل مسئله، تعیین حرکت لگن به کمک معادلات قید نقطه گشتاور صفر با فرض چشم پوشی از تاثیر جرم عضوهای دیگر ربات و در نظر گرفتن جرم لگن و بالا تنه به عنوان جرم متمرکز در معادله مذکور است. با این شرایط معادله نقطه گشتاور صفر، با در نظرگیری حرکت در راستاهای  $x_0$  و  $z_0$  و صرف نظر از تاثیر حرکت در راستای محور  $y_0$ ، به دو معادله دیفرانسیل و دو مجهول تبدیل می‌شود. پس از حل این دو معادله، حرکت تقریبی لگن در دو راستای اشاره شده در حین فرآیند حل مسئله، به دست آمد.

برای حرکت لگن در راستای  $y_0$ ، توابع مختلفی اعم از توابع ثابت با مقادیر مختلف و توابع نیم سینوسی با ضرایب متنوع به عنوان فرض انتخاب شد. همچنین برای حل معادلات نقطه گشتاور صفر

نیز شرایط اولیه متفاوتی امتحان شد. با مشخص شدن حرکت لگن در راستای محورهای  $x_0$ ،  $y_0$  و  $z_0$  و فرض صفر بودن دوران لگن حول دو محور  $x_0$  و  $z_0$ ، یک دستگاه ۵ معادله و ۵ مجهول با مجهولات:  $q_3$ ،  $q_4$ ،  $q_5$ ،  $q_6$  و  $q_7$  به دست آمد. این معادلات غیرخطی و به روش عددی حل شدند. از آنجایی که نتیجه‌ی حل با روش‌های محاسبات عددی، مجموعه‌ای از نقاط برای هرکدام از مجهولات در بازه‌ای از زمان است، جهت ادامه روند حل، برای هرکدام از مجهولات که اکنون توسط مجموعه‌ای از نقاط مشخص شده‌اند، یک تابع چندجمله‌ای تقریبی انتخاب شد. پس از تعیین مجهولات پای راست که همان ۵ متغیر مفصلی فوق می‌باشند با استفاده از حرکت معلوم میچ پای تاب خورنده، متغیرهای مفصلی پای دیگر به روش عددی، مشابه آنچه برای پای راست انجام گرفت، محاسبه شد. پس از تخمین چندجمله‌ای مناسب برای هرکدام از متغیرهای مفصلی  $q_{10}$ ،  $q_{11}$ ،  $q_{12}$ ،  $q_{13}$  و  $q_{14}$  معادلات قید نقطه‌ی گشتاور صفر مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر این معادلات توسط متغیرهای مفصلی فوق ارضا شوند، مسیرهای مطلوب حرکت ربات به دست آمده‌اند و در غیر این صورت حرکت لگن و شرایط اولیه معادلات نقطه گشتاور صفر، تغییر کرده و روند فوق تا رسیدن به جواب قابل قبول تکرار می‌شود. فرآیند حل مسئله در فلوچارت شکل زیر خلاصه شده است.

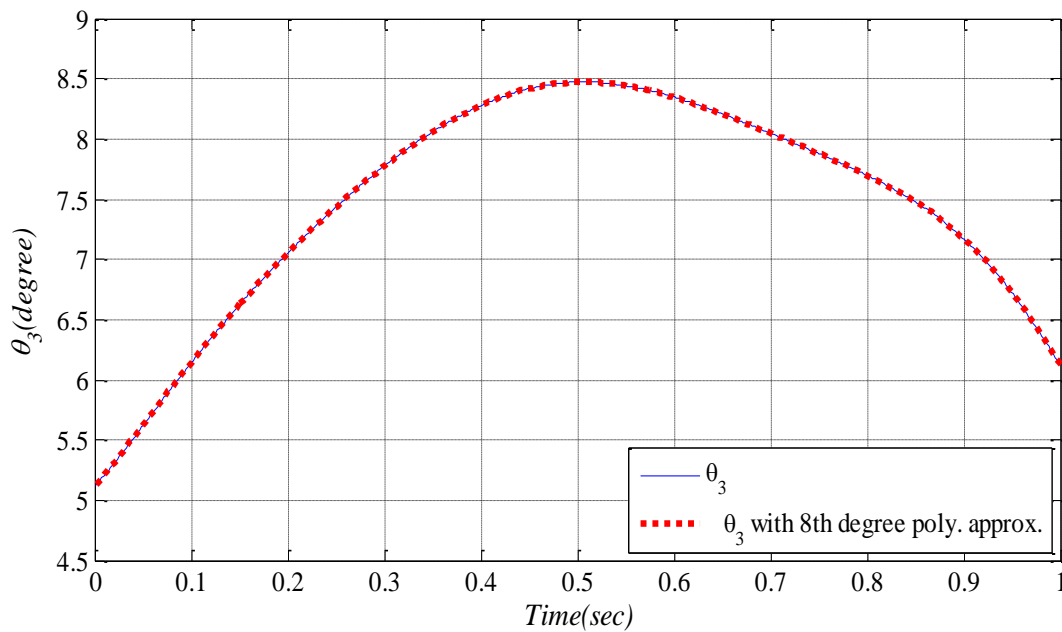




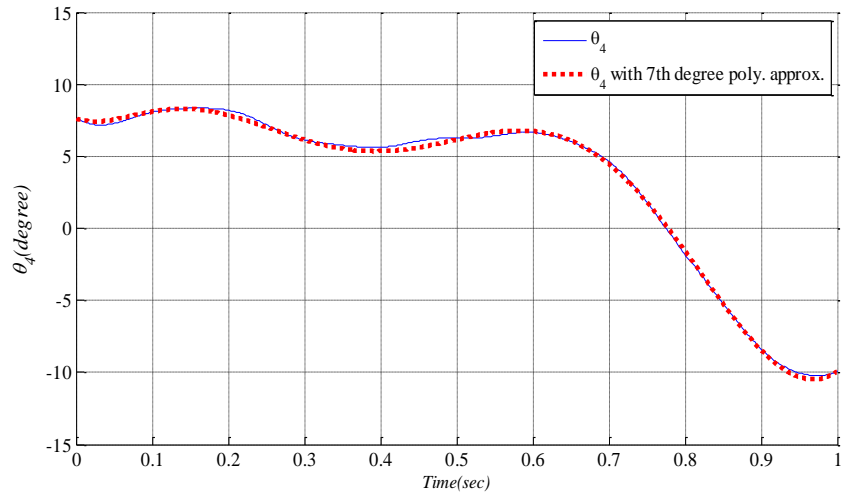
شکل ۳-۸: فلوچارت روش حل مسئله برای یافتن مسیر حرکت مفاصل

### ۳-۶ نتایج مسیرهای حرکت مفاصل

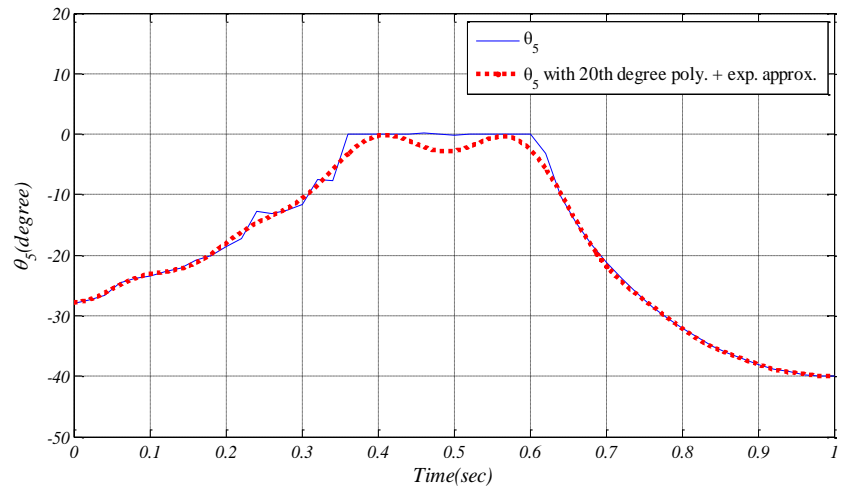
با توجه به فلوجارتی که در بخش قبل ارائه شد، فرآیند حل مسئله آغاز و پس از حل مسئله با توجه به فلوجارت فوق، نتایج مربوط به مسیرهای مطلوب مطابق با شکل‌های ۳-۹ تا ۳-۱۸ برای متغیرهای مفصلی به دست آمد. از آنجا که در بحث دینامیک و پایداری ربات نیاز به مشتقات متغیرهای مفصلی می‌باشد، لازم است تا یک تابع چندجمله‌ای مناسب برای متغیرهای مفصلی تخمین زده شود؛ به همین علت در این شکل‌ها، هر متغیرهای مفصلی با دو منحنی نشان داده شده‌است. یکی از منحنی‌ها جواب حاصل از روش عددی بوده و دیگری، تخمینی از آن جواب به کمک توابع چندجمله‌ای برای استفاده در محاسبات بعدی است.



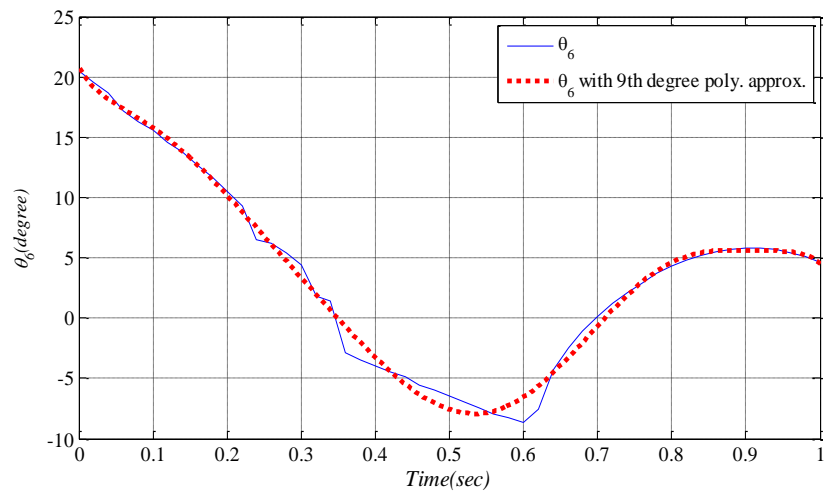
شکل ۳-۹: منحنی زاویه مچ پای تکیه‌گاه حول محور  $x_0$  بر حسب زمان در طول یک گام



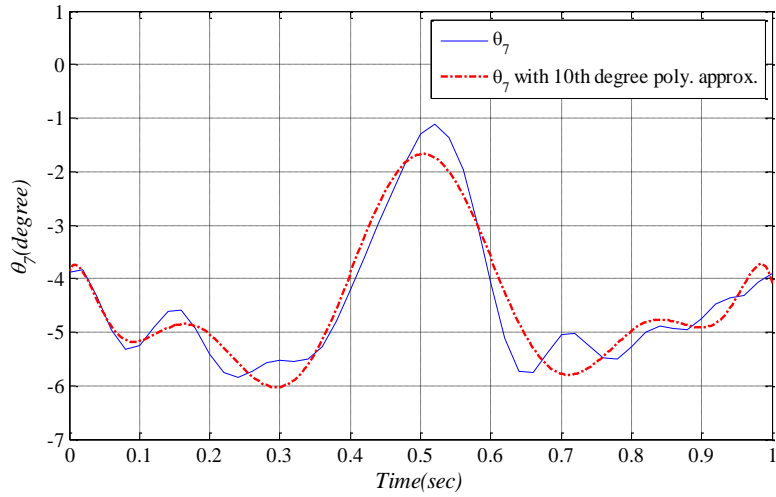
شکل ۳-۱۰: منحنی زاویه میچ پای تکیه‌گاه حول  $z_0$  بر حسب زمان در طول یک گام



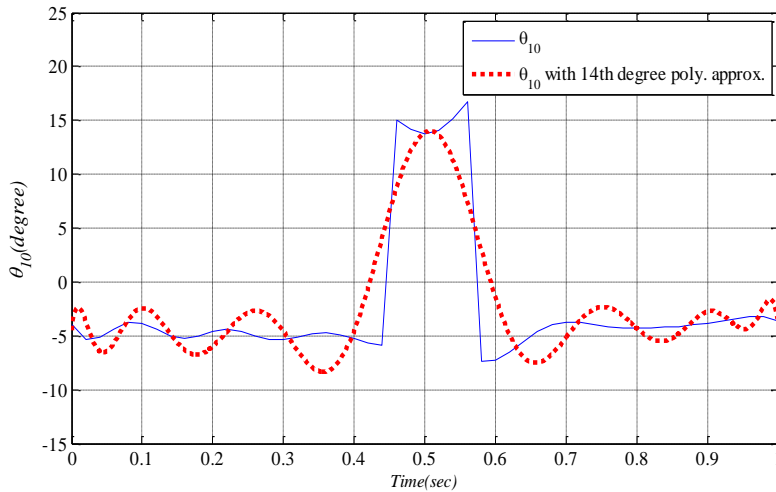
شکل ۳-۱۱: منحنی زاویه زانوی پای تکیه‌گاه حول  $z_0$  بر حسب زمان در طول یک گام



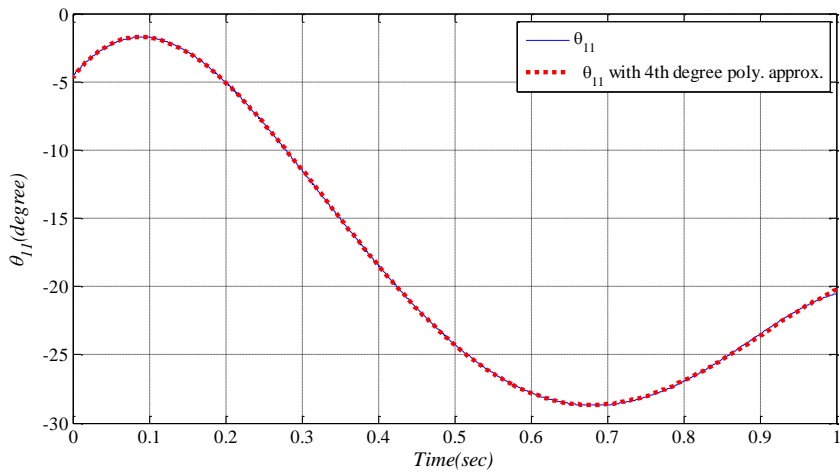
شکل ۳-۱۲: منحنی زاویه بین لگن و ران پای تکیه‌گاه حول  $z_0$  بر حسب زمان



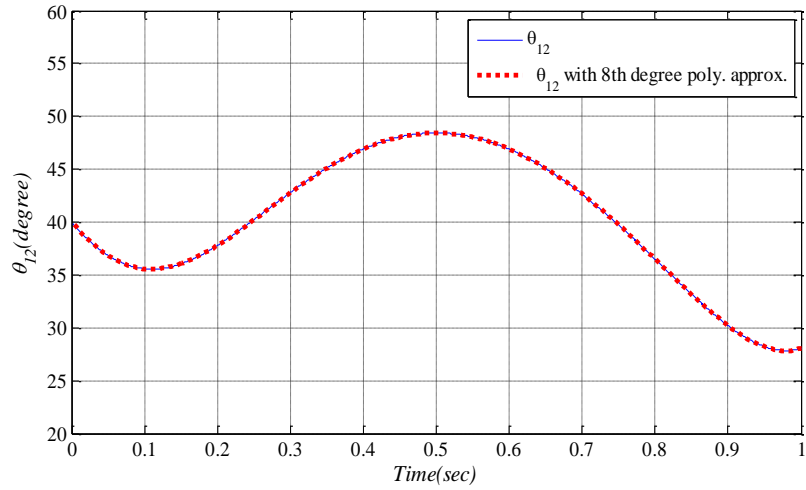
شکل ۳-۱۳: منحنی زاویه بین لگن و ران پای تکیه‌گاه حول محور  $x_0$  بر حسب زمان



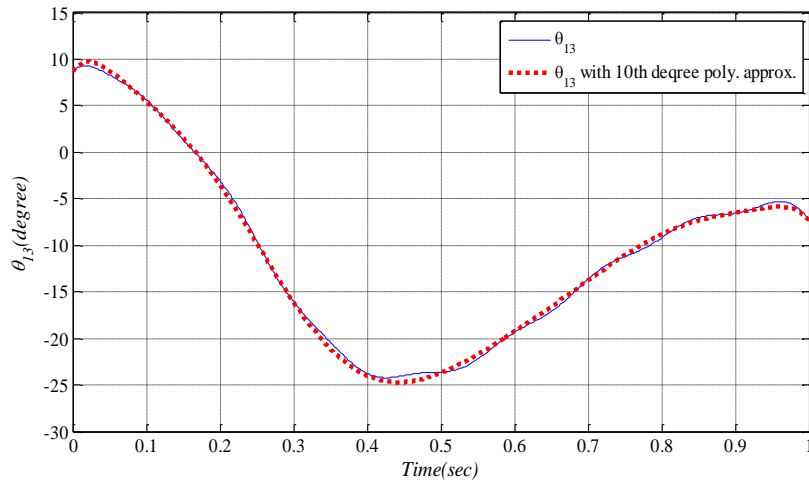
شکل ۳-۱۴: منحنی زاویه بین لگن و ران پای تاب خورنده حول محور  $x_0$  بر حسب زمان



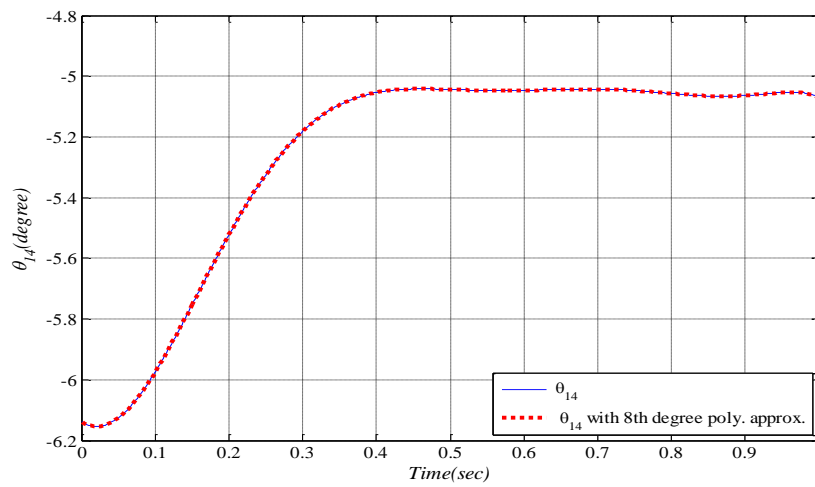
شکل ۳-۱۵: منحنی زاویه بین لگن و ران پای تاب خورنده حول محور  $z_0$  بر حسب زمان



شکل ۳-۱۶: منحنی زاویه زانوی پای تاب خورنده حول محور  $z_0$  بر حسب زمان



شکل ۳-۱۷: منحنی زاویه مچ پای تاب خورنده حول محور  $z_0$  بر حسب زمان



شکل ۳-۱۸: منحنی زاویه مچ پای تاب خورنده حول محور  $x_0$  بر حسب زمان

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در بیشتر شکل‌ها هر دو منحنی به‌خوبی به هم منطبق می‌باشند و تنها در شکل‌های ۳-۴، ۳-۵ و ۳-۶ تفاوت بین دو منحنی به میزان بیشتری وجود دارد. در اینجا توابع چندجمله‌ای با درجات مختلف برای تقریب منحنی‌ها بکار گرفته شده است و برای اینکه منحنی تقریبی، بتواند به‌خوبی منحنی حرکت اعضای ربات را مدل‌سازی کند، درجه چندجمله‌ای افزایش داده می‌شود. در مورد شکل‌های مذکور که دارای اختلاف می‌باشند، باید گفت که با افزایش درجه چندجمله‌ای منحنی تقریب به منحنی متغیر مفصلی نزدیک می‌شود اما در دو انتها، منحنی تقریب دچار نوسان‌های زیادی می‌شود که این عاملی بود تا درجه چندجمله‌ای تا محدوده‌ی خاصی افزایش داده شود. همچنین مشاهده می‌شود که وضعیت ابتدایی هر مفصل با اندازه منفی وضعیت انتهایی مفصل متناظر در پای دیگر برابر است که این به معنی ارضا قید سینماتیکی مسیر مفاصل و تناوب حرکت است و همچنین نشان می‌دهد که پای تاب خورنده در انتهای گام به وضعیت پیکربندی پای تکیه‌گاه در ابتدای گام می‌رسد که این اعتباری برای صحت مسیر مفاصل بدست آمده است.



فصل چہارم:

دینامیک و کنٹرل ربات دوپا



## فصل چهارم: دینامیک و کنترل ربات دوپا

### ۴-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی دینامیک و کنترل ربات دوپا و مفاهیم کلی آن پرداخته می‌شود. در ابتدا، معیار پایداری نقطه‌ی گشتاور صفر به عنوان قیدی برای تعادل ربات و تعیین مسیر مطلوب حرکت اعضای ربات با جزئیات مطرح می‌شود. در ادامه دینامیک ربات بررسی شده و گشتاورهای مطلوب برای دستیابی به حرکت مناسب ربات محاسبه می‌شوند. در نهایت امر، مباحث کنترل ربات دوپا با استفاده از روش کنترل گشتاور محاسبه شده، مطرح شده است. در این روش، ضرایب بهره تناسبی و مشتقی به کمک الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات بدست آمده است.

### ۴-۲ تشریح معادلات نقطه گشتاور صفر

بنا بر آنچه در فصل ۲ به تفصیل بیان شد، به‌منظور پایدار بودن ربات در حین گام برداشتن، لازم است تا قید نقطه‌ی گشتاور صفر ارضا شود. علاوه بر این، همان‌گونه که در فصل ۳ نیز عنوان شد، جهت کامل شدن معادلات لازم برای محاسبه مسیرهای مطلوب مفاصل ربات از این قید برای تشکیل دو معادله دیگر نیز استفاده شد. با تشکیل این دو معادله مجموعاً یک دستگاه ۱۶ معادله، ۱۶ مجهول به دست آمد. معادله‌های مذکور در دو راستای  $x_0$  و  $z_0$  می‌باشند که عبارتند از [۶۸]:

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^{16} m_i \ddot{x}_i y_i - \sum_{i=1}^{16} m_i (\ddot{y}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^{16} I_{iz} \ddot{\theta}_{iz}}{\sum_{i=1}^{16} m_i (\ddot{y}_i + g)} \quad (1-4)$$

$$Z_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^{16} m_i (\ddot{y}_i + g) z_i - \sum_{i=1}^{16} m_i \ddot{z}_i y_i - \sum_{i=1}^{16} I_{ix} \ddot{\theta}_{ix}}{\sum_{i=1}^{16} m_i (\ddot{y}_i + g)} \quad (2-4)$$

که در معادلات فوق،  $g$  بردار گرانش،  $m_i$ ،  $I_{ix}$  و  $I_{iz}$  به ترتیب جرم و ممان اینرسی عضو  $i$  ام ربات حول دو راستای  $x_0$  و  $z_0$ ، همچنین  $\ddot{x}_i$ ،  $\ddot{y}_i$ ،  $\ddot{z}_i$ ،  $\ddot{\theta}_{ix}$  و  $\ddot{\theta}_{iz}$  به ترتیب شتابهای خطی اعضاء در راستای محورهای  $x_0$ ،  $y_0$  و  $z_0$  و شتابهای زاویه‌ای آنها حول محورهای  $x_0$  و  $z_0$  می‌باشند. شتابهای خطی و زاویه‌ای اعضاء ربات از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\ddot{X} = J(q)\ddot{q} + \left(\frac{d}{dt} J(q)\right)\dot{q} \quad (3-4)$$

به طوری که

$$\ddot{X} = [\ddot{x} \quad \ddot{y} \quad \ddot{z} \quad \ddot{\theta}_x \quad \ddot{\theta}_y \quad \ddot{\theta}_z]^T \quad (4-4)$$

رابطه‌های (1-4) و (2-4)، به ترتیب برابر با نقطه گشتاور صفر مطلوب در راستاهای  $x_0$  و  $z_0$  قرار می‌گیرند. از آنجاکه نقطه گشتاور صفر جهت پایداری ربات باید درون چند ضلعی تکیه‌گاهی پای ربات قرار گیرد (شکل 1-4)؛ لازم است تا در طول گام مؤلفه‌ی  $Z_{zmp}$  نقطه‌ی گشتاور صفر در بازه زیر باشد:

$$-\frac{l_p}{2} < Z_{zmp} < \frac{l_p}{2} \quad (5-4)$$

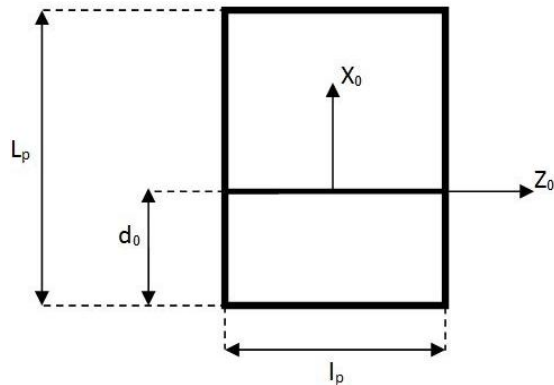
همچنین مؤلفه‌ی  $X_{zmp}$  نقطه‌ی گشتاور صفر نیز، در نیمه زمانی اول گام در بازه‌ی،

$$-d_0 < X_{zmp}(t) < L_p - d_0 \quad 0 < t < \frac{T_s}{2} \quad (6-4)$$

بوده و در نیمه زمانی دوم که پای تکیه‌گاه روی پنجه بلند شده است. این نقطه باید در محدوده

زیر باشد:

$$-d_0 < X_{zmp}(t) < 0 \quad \frac{T_s}{2} < t < T_s \quad (7-4)$$



شکل ۴-۱: موقعیت محورهای  $x_0$  و  $z_0$  نسبت به کف پا

همان طور که از نامساوی‌های (۴-۶) و (۴-۷) مشخص است، انتخاب‌های متعددی برای نقطه‌ی گشتاور صفر مطلوب وجود دارد. در این پژوهش، نقطه‌ی گشتاور صفر با در نظرگیری شرایط مرزی زیر در راستای محور  $x_0$  انتخاب می‌شود:

$$X_{zmp} = \begin{cases} \frac{a_1}{2} & t = 0 \\ 0 & t = \frac{T_s}{2} \\ -\frac{d_0}{2} & t = T_s \end{cases} \quad (۴-۸)$$

از آنجاکه  $Z_{zmp} = 0$  در وسط محدوده‌ی قابل قبول قرار دارد، می‌تواند به عنوان گزینه‌ی دلخواه در راستای محور  $z_0$  فرض شود.

با توجه به شرایط مرزی بیان شده در رابطه (۴-۸) و استفاده از چندجمله‌ای درجه ۳، عبارت زیر برای مسیر نقطه‌ی گشتاور صفر در این راستا به دست می‌آید:

$$X_{zmp}(t) = 0.171t^3 - 0.2635t^2 + 0.0445 \quad (۴-۹)$$

همان طور که در فصل قبل بیان شد، برای حل مسئله یافتن مسیرهای مطلوب مفاصل ربات از یک روش مبتنی بر سعی و خطا استفاده شد. علاوه بر این، در آنجا عنوان شد که مسیر حرکت لگن نیز لازم است تا به عنوان یک قید در یافتن مسیرهای مطلوب مفاصل بکار گرفته شود. برای تخمین اولیه‌ی مسیر حرکت لگن از قید نقطه گشتاور صفر اصلاح شده استفاده شد. به بیان دیگر با فرض‌های

ساده کننده‌ای چون چشم پوشی از تاثیر جرم‌های دیگر در مقایسه با جرم لگن و همچنین تاثیر

حرکت لگن در راستای  $y_0$  ، معادلات نقطه گشتاور صفر به دو معادله دیفرانسیل زیر تبدیل می‌شود:

$$\ddot{X}_{hip}(t)Y_{hip}(t) - X_{hip}(t)g_y = X_{zmp}(t)g_y \quad (10-4)$$

$$g_y Z_{hip}(t) - Y_{hip}(t)\ddot{Z}_{hip}(t) = 0 \quad (11-4)$$

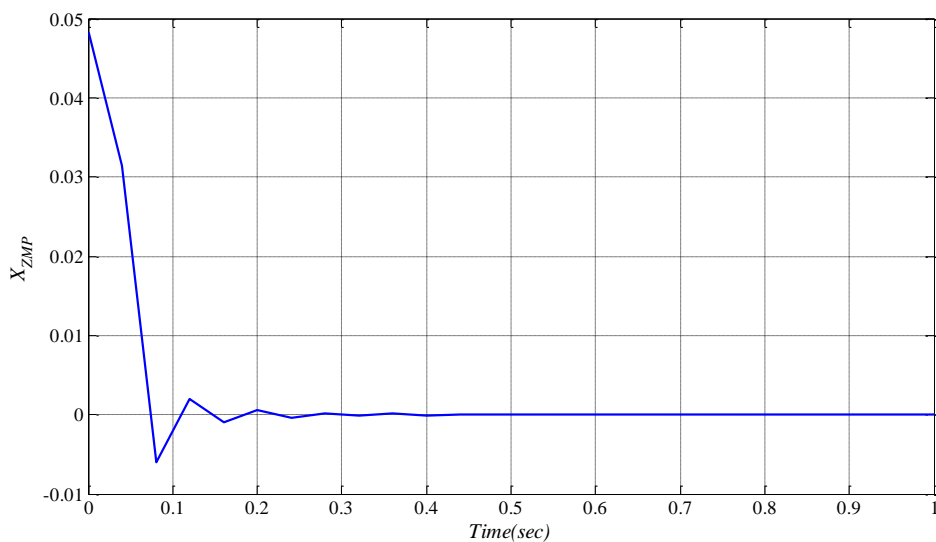
با حل دو معادله‌ی فوق تخمین اولیه مسیر حرکت لگن در دو راستای  $x_0$  و  $z_0$  به دست می‌آید.

ادامه حل مسئله یافتن مسیره‌های مطلوب مفاصل ربات نیز در فصل قبل تشریح شد.

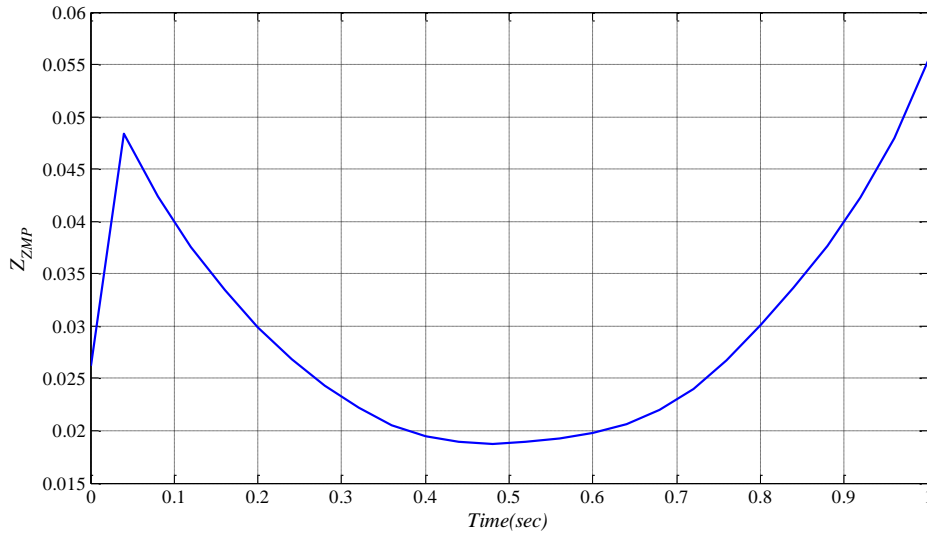
پس از اجرای فرآیند حل مسئله، متغیرهای مفصلی مطلوب به دست آمد. در نهایت نتایج اعمال

این متغیرهای مفصلی در معادلات قید نقطه‌ی گشتاور صفر منتج به منحنی‌های زیر در دو راستای

$x_0$  و  $z_0$  شد.

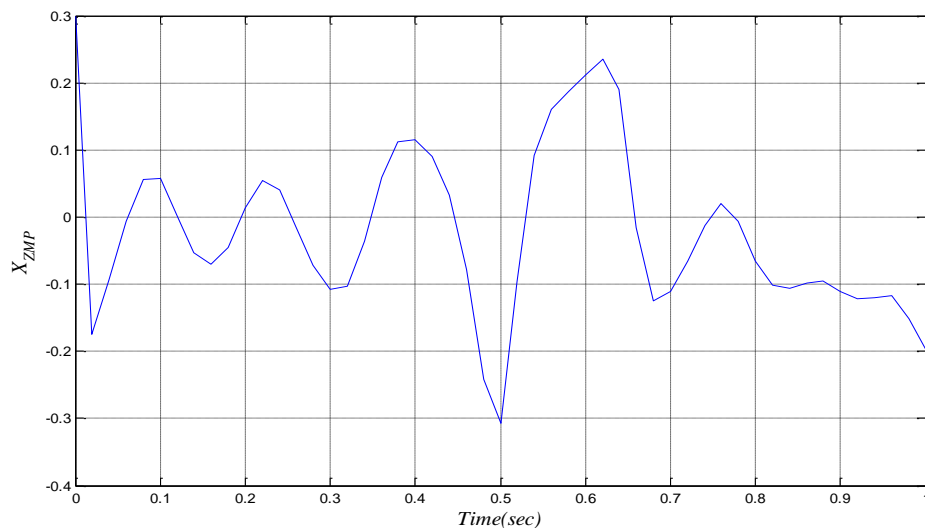


شکل ۴-۲: مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور  $x_0$  در حین گام

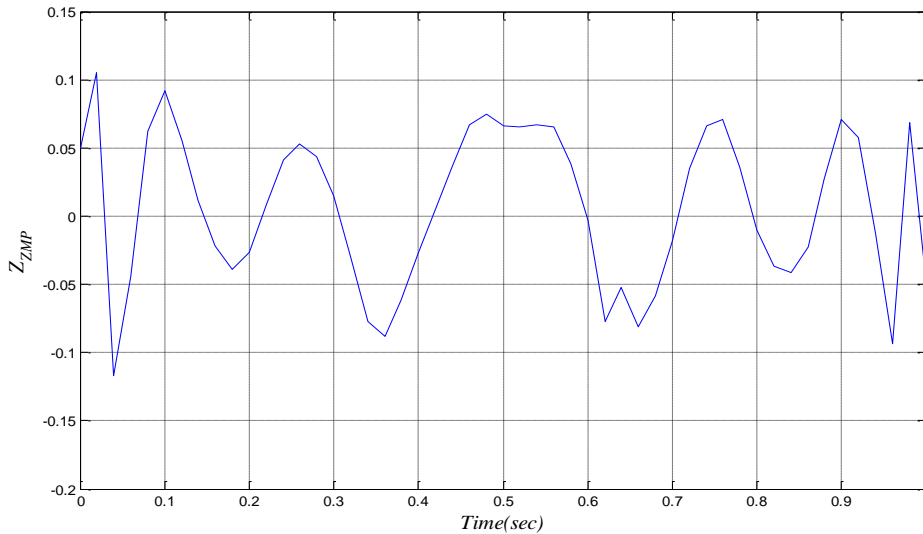


شکل ۳-۴: مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور  $z_0$  در حین گام

همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، با توجه به روابط (۱-۴) و (۲-۴)، منحنی‌های نقطه‌ی گشتاور صفر از محدوده‌ی چند ضلعی پای تکیه‌گاهی ربات تجاوز نکرده و این به معنای پایداری ربات در گام حرکت بوده و حاشیه پایداری در حین گام تقریباً برابر صفر است. از آن‌جا که وجود پنجه پا باعث بلندتر شدن طول گام می‌شود، ربات مشابه بدون پنجه پا با اندازه گام یکسان با توجه به منحنی‌های نقطه گشتاور صفر ناپایدار است.



شکل ۴-۴: مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور  $x_0$  بدون پنجه پا



شکل ۴-۵: مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور  $Z_0$  بدون پنجه پا

### ۳-۴ دینامیک ربات

برای استخراج معادلات دینامیکی سیستم‌هایی که دارای قید هستند، مانند قید مفصلی، معادلات اوپلر- لاگرانژ معرفی می‌شوند. نمایش دیگری از معادلات دینامیک ربات با نام روش نیوتن- اوپلر وجود دارد که یک فرمول بازگشتی از معادلات دینامیکی است و اغلب در محاسبات عددی از آن استفاده می‌شود. در این فصل معادلات اوپلر- لاگرانژ به کار گرفته شده‌اند.

#### ۱-۳-۴ مختصات و نیروهای تعمیم یافته در ربات

برای مشخص کردن حرکت کامل یک سیستم ذرات متشکل از  $n$  ذره در فضا به  $3n$  مختصه نیاز است. اگر محدودیت‌ها و قیدهایی به سیستم اعمال شود، تعداد مختصه لازم برای تعیین حرکت سیستم کمتر از  $3n$  خواهد بود. در حالت کلی برای مشخص کردن پیکربندی یک ربات با  $n$  مفصل یک درجه آزادی به  $n$  مختصه نیاز است که به آن مختصات تعمیم یافته می‌گویند. در سیستم مختصات تعمیم یافته، مرتبط با هر مختصه، مختصه نیرویی تعریف می‌شود که با نام نیروهای تعمیم یافته شناخته می‌شود. این کمیات که با استفاده از تعریف کار محاسبه می‌شوند؛ بدین صورت می‌باشند که حاصل ضرب آن‌ها در مختصه تعمیم یافته دارای بعد کار است. از آنجاکه در این مطالعه

همه‌ی مختصه‌های تعمیم یافته از نوع زاویه هستند، نیروهای تعمیم یافته باید از جنس گشتاور باشند تا حاصل ضرب آن‌ها از جنس کار باشد و عبارتند از:

$$\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \dots \quad \tau_{16}] \quad (12-4)$$

که در آن  $\tau_i$ ,  $i=1,2,\dots,16$  گشتاور وارد بر مفصل  $i$  است.

#### ۴-۳-۲ معادلات لاگرانژ ربات

در صورتی که درجات آزادی سیستم زیاد باشد، استفاده از قوانین نیوتن دشوار است. در این حالت از یک روش عمومی و بسیار دقیق که به همت ریاضی‌دان فرانسوی لویی لاگرانژ ابداع شده است، استفاده می‌شود. در واقع، معادلات حرکت اویلر-لاگرانژ، دستگاه معادلات دیفرانسیل کلی توصیف‌کننده‌ی رفتار زمانی سیستم‌های مکانیکی است و که برای تعیین این معادلات لازم است، لاگرانژین سیستم ( $L$ ) که اختلاف بین انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم است و به ترتیب با نمادهای  $K$  و  $U$  نشان داده می‌شوند، تشکیل گردد (رابطه ۴-۲).

$$L = K - U \quad (13-4)$$

سپس این مقدار در معادله‌ای که به معادله‌ی لاگرانژ معروف است، قرار داده می‌شود. معادله لاگرانژ بر حسب مشتقات تابع لاگرانژی نسبت به مختصات تعمیم یافته و نیز مشتق زمانی مشتقات تابع لاگرانژی نسبت به سرعت‌های تعمیم یافته بصورت رابطه (۴-۳) نوشته می‌شود.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = \tau_k \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (14-4)$$

که در آن  $n$   $q_k$  و  $\dot{q}_k$  به ترتیب تعداد درجات آزادی سیستم، مختصات تعمیم یافته و سرعت‌های تعمیم یافته می‌باشند. به کارگیری معادلات اویلر-لاگرانژ منجر به دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه دوم می‌شود. برای استفاده از معادلات اویلر-لاگرانژ در ربات مذکور در هر عضو، کل جرم آن در مرکز جرمش به صورت متمرکز در نظر گرفته شده است. جرم‌های اعضای ربات مورد مطالعه در جدول ۴-۱ بیان شده‌اند.

جدول ۴-۱: جرم اعضای ربات دوپای مورد مطالعه

$m_i$	$m_0$	$m_1$	$m_4$	$m_5$	$m_8$	$m_{11}$	$m_{12}$	$m_{15}$	$m_{16}$
مقدار جرم (kg)	۰/۱۴۴	۰/۱۶۴	۰/۳۸۸	۰/۵۲۵	۳۵/۹۲	۰/۵۲۵	۰/۳۸۸	۰/۱۶۴	۰/۱۴۴

با توجه به فرض همگن بودن اعضا و مشخص بودن ابعاد اعضای ربات و جرم آن‌ها، مقادیر ممان

اینرسی اعضا ربات مشخص است. معادلات اوپلر- لاگرانژ برای ربات‌ها منجر به معادله‌ی زیر می‌شود:

$$\sum_{j=1}^n d_{kj}(q)\ddot{q}_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ijk}(q)\dot{q}_i\dot{q}_j + g_k(q) = \tau_k \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (15-4)$$

رابطه فوق، معادله‌ی کلی حرکت ربات است که در این مطالعه  $n$  برابر با ۱۶ می‌باشد. در این

معادلات سه نوع عبارت وجود دارد. عبارت اول شامل مشتق دوم مختصات تعمیم یافته است. عبارت

دوم شامل صورت درجه دوم از مشتقات مرتبه اول  $q$  است که در آن ضرایب نیز می‌توانند به  $q$

وابسته باشند. این جملات خود به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند؛ جملاتی که حاوی حاصل ضرب‌هایی

به صورت  $\dot{q}^2$  هستند و جملاتی که حاوی حاصل ضرب‌هایی از نوع  $\dot{q}_i\dot{q}_j$ ،  $i \neq j$  می‌باشند. جملات از

نوع  $\dot{q}^2$  مرکز گرا و جملات نوع  $\dot{q}_i\dot{q}_j$  کوریولیس نامیده می‌شوند. نوع سوم جملات آن‌هایی هستند

که تنها شامل  $q$  می‌باشند و از مشتق‌گیری انرژی پتانسیل حاصل می‌شوند. معادله‌ی فوق به فرم

دیگری به صورت زیر نیز نمایش داده می‌شود:

$$D(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (16-4)$$

که در آن،  $D(q)$  ماتریس اینرسی نامیده می‌شود. در ادامه به محاسبه ماتریس‌های  $D(q)$ ،  $C(q,\dot{q})$

و  $g(q)$  برای ربات موردنظر به‌منظور به دست آوردن معادله دینامیک ربات پرداخته می‌شود. از آنجاکه

ربات دارای ۱۶ درجه آزادی است، ماتریس  $D(q)$  آن، ماتریسی با ابعاد  $16 \times 16$  بوده و از رابطه زیر به

دست می‌آید.

$$D(q) = \left[ \sum_{i=1}^n \left\{ m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{\omega_i}(q)^T R_i(q)^T J_{\omega_i}(q) \right\} \right] \quad (17-4)$$



در رابطه‌ی فوق،  $J_{\omega_i}$  و  $J_{v_i}$  ژاکوبین‌های اعضای ربات دوپا می‌باشند. ماتریس  $C(q, \dot{q})$  بیانگر

مجموع جملات مرکز گرا و کوریولیس بوده که درایه  $(k, j)$  آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$c_{kj} = \sum_{i=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \quad (18-4)$$

ماتریس  $g(q)$  نیز از مشتق انرژی پتانسیل کل سیستم ( $P$ ) نسبت به متغیرهای مفصلی به

صورت زیر به دست می‌آید:

$$P = \sum_{i=1}^{16} m_i g^T r_{c_i} \quad (19-4)$$

$$g_i(q) = \frac{\partial P}{\partial q_i} \quad i = 1, 2, \dots, 16 \quad (20-4)$$

$$g(q) = [g_1(q) \quad g_2(q) \quad \dots \quad g_{16}(q)]^T \quad (21-4)$$

در روابط فوق  $g$  بردار گرانش بوده و برابر با  $[0 \quad -9.81 \quad 0]^T$  می‌باشد.  $r_{c_i}$  نیز بردار مرکز جرم

عضوهای ربات نسبت به دستگاه اینرسی می‌باشد.

### ۳-۳-۴ ژاکوبین ربات دوپا

ژاکوبین ربات، در واقع ماتریسی است که سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی را به سرعت‌های

متغیر مفصلی مرتبط می‌سازد و رابطه‌ی آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\zeta_{6 \times 1} = J_{6 \times 16} \dot{q}_{16 \times 1} \quad (22-4)$$

در رابطه‌ی بالا،  $J$  ماتریس ژاکوبین ربات است که برای ربات این تحقیق، ماتریسی با ابعاد  $6 \times 16$

می‌باشد. این ماتریس از دو بخش تشکیل شده است که سه سطر اول آن، سرعت‌های خطی و سه

سطر دوم، سرعت‌های زاویه‌ای ربات را تعیین می‌کنند. ماتریس‌های  $J$  و  $\zeta$  به صورت زیر می‌باشند:

$$\zeta = \begin{bmatrix} V_n^0 \\ \omega_n^0 \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (23-4)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix}_{6 \times 16}$$

ماتریس  $\dot{q}$ ، نیز ماتریسی  $16 \times 1$  بوده و نشان‌دهنده مشتقات زمانی متغیرهای مفصلی ربات هستند. از آنجاکه در این ربات، تمامی مفاصل دورانی هستند، نیمه‌ی بالایی ماتریس ژاکوبین،  $J_v$  عبارت است از:

$$J_v = [J_{v_1}, J_{v_2}, \dots, J_{v_{16}}]^T \quad (24-4)$$

و  $J_{v_i}$  در هر ستون عبارت است از:

$$J_{v_i} = Z_{i-1} \times (O_n - O_{i-1}) \quad (25-4)$$

و نیمه پایینی ژاکوبین  $J_\omega$ ، نیز به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$J_\omega = [J_{\omega_1}, J_{\omega_2}, \dots, J_{\omega_n}]^T \quad (26-4)$$

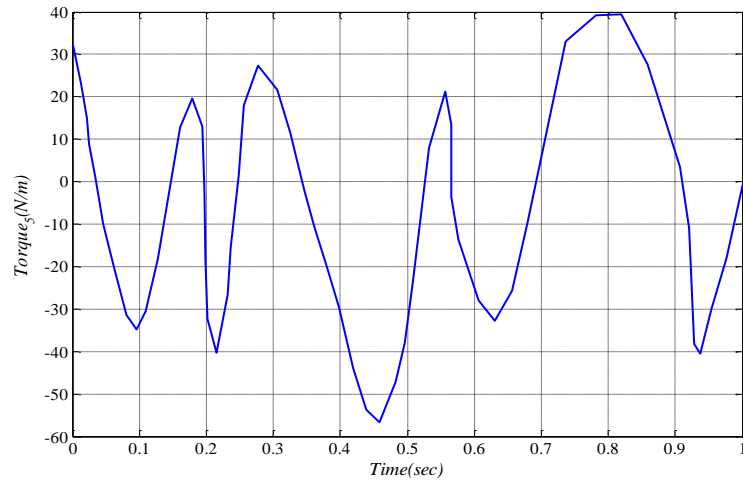
و  $J_{\omega_i}$  در هر ستون آن برابر است با:

$$J_{\omega_i} = Z_{i-1} \quad (27-4)$$

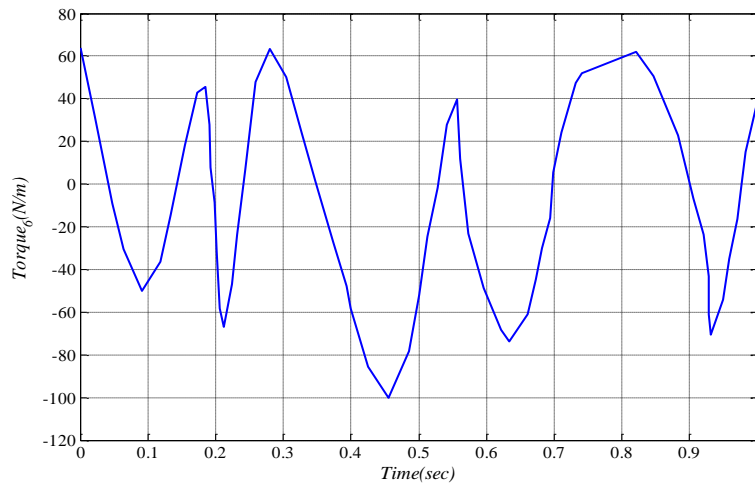
هنگامی که سینماتیک مستقیم حل شده باشد، همه کمیت‌های موردنیاز در دسترس هستند و تنها کمیت‌های موردنیاز جهت محاسبه‌ی ماتریس ژاکوبین، بردارهای  $Z_i$  و مختصات مبدأهای  $O_1, O_2, \dots, O_n$  هستند. مختصات  $Z_i$  نسبت به چارچوب پایه از سه درایه اول در سومین ستون  $T_i^0$  حاصل می‌شود. در حالی که  $O_i$  از سه درایه‌ی اول چهارمین ستون  $T_i$  به دست می‌آید. روال فوق، برای محاسبه سرعت مراکز جرم هر عضو در ربات برای تعیین معادلات دینامیک نیز استفاده می‌شود. حال با توجه به ماتریس‌های  $D(q)$ ،  $C(q, \dot{q})$  و  $g(q)$  که در بالا تشریح شدند و با استفاده از رابطه (۴-۱۶) مقادیر گشتاور در هر مفصل ربات در حین راه رفتن آن به دست می‌آید.

با استفاده از روابط بیان شده برای دینامیک ربات، گشتاور مفاصل به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۱۷ نمایش داده شده است.

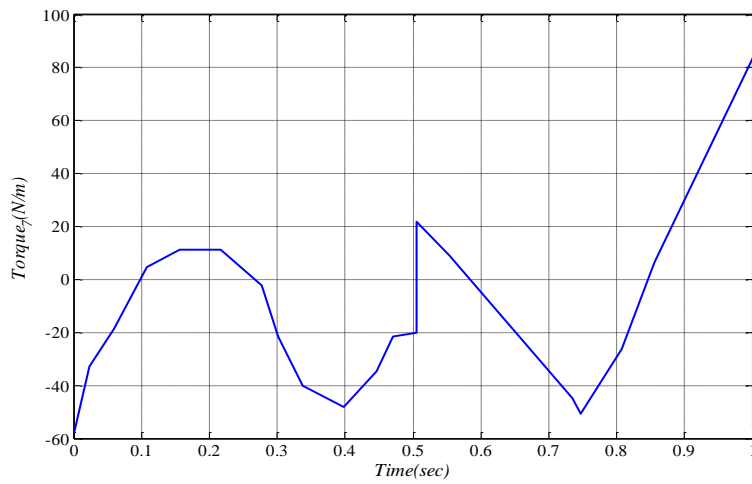




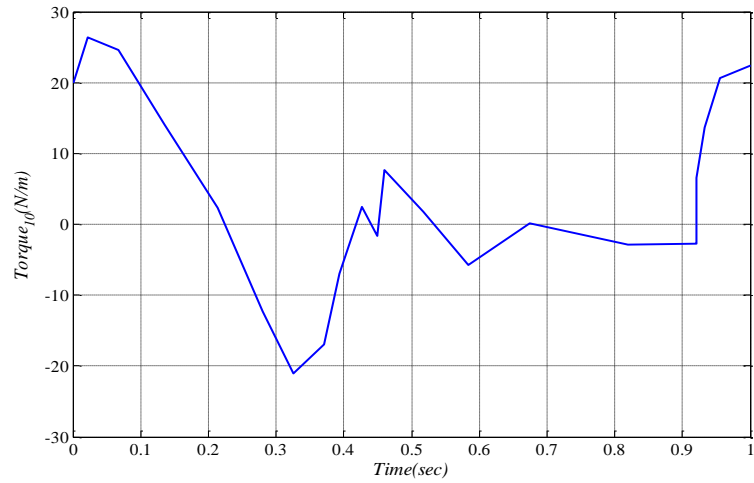
شکل ۴-۹: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۵



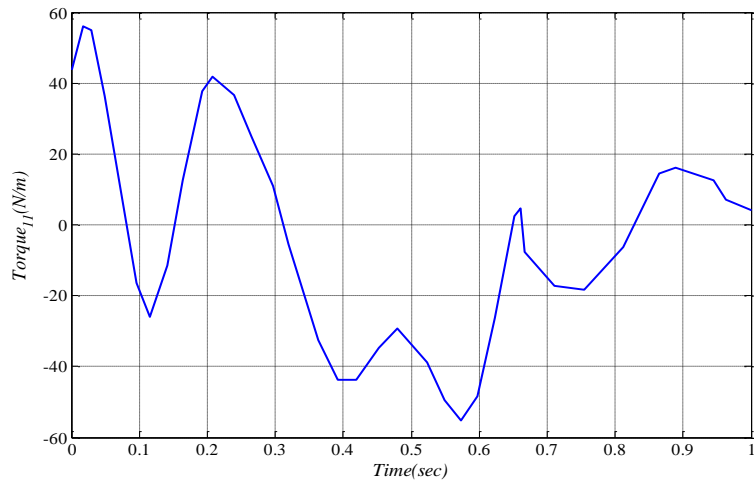
شکل ۴-۱۰: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۶



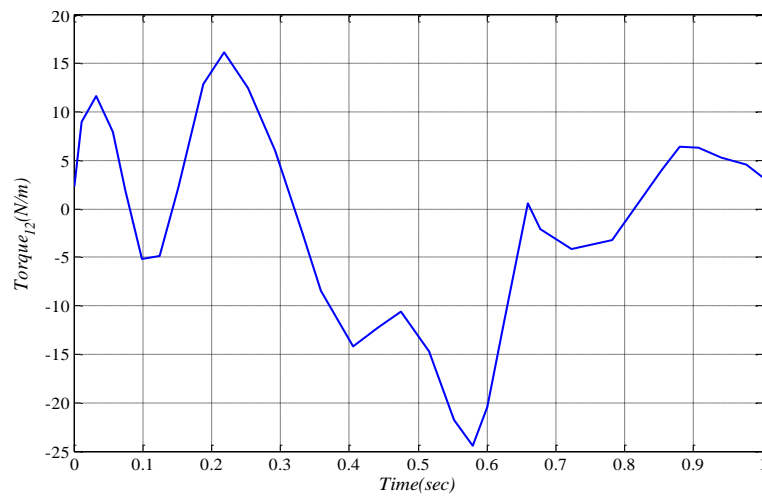
شکل ۴-۱۱: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۷



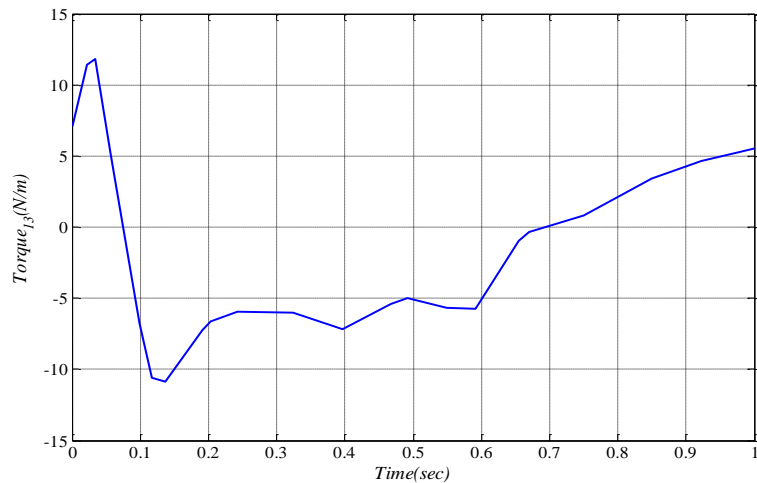
شکل ۴-۱۰: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۰



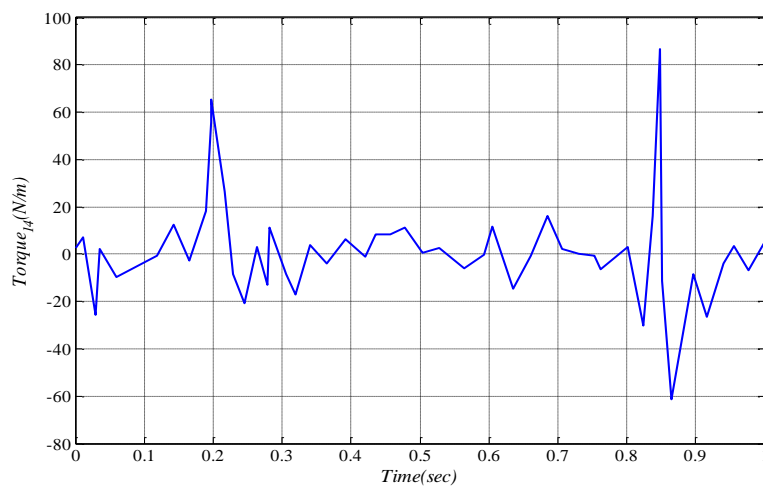
شکل ۴-۱۱: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۱



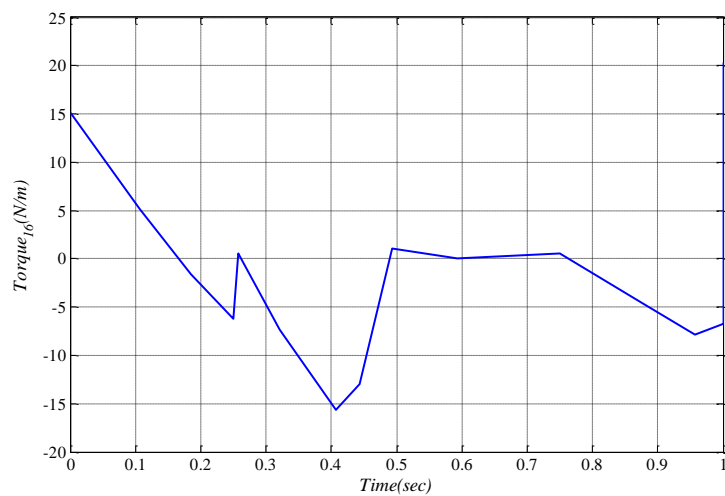
شکل ۴-۱۲: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۲



شکل ۴-۱۵: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۳



شکل ۴-۱۶: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۴



شکل ۴-۱۷: گشتاور لازم به ازای مقادیر مطلوب مختصات تعمیم یافته در مفصل ۱۶

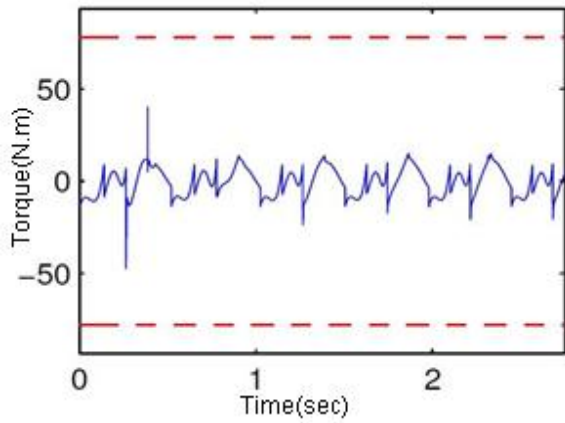
همان‌گونه که از شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۱۷ مشاهده می‌شود، گشتاور مفاصل در طول گام کران‌دار می‌باشند. در شکل ۴-۱۸ نتایج منحنی‌های گشتاور مفاصل ۳، ۴ و ۵ ربات مورد مطالعه با گشتاور مفاصل متناظر ارائه شده در تحقیق تینگ وانگ [۶۹] مقایسه شده است. به دلیل تفاوت در جرم اعضای ربات، تعداد درجات آزادی و مسیرهای طی شده در مفاصل، تفاوت‌هایی در منحنی گشتاورها وجود دارد؛ اما همانطور که مشاهده می‌شود گشتاورهای هر دو تحقیق از حیث اندازه در یک مرتبه هستند و روند تغییرات در آن‌ها نسبتاً مشابه است. همانطور که در شکل ۴-۱۸ دیده می‌شود، به دلیل نتایج گشتاورهای لازم برای تعقیب مسیرهای مطلوب در تحقیق حاضر در مقایسه با گشتاورهای متناظر آن در کار تینگ وانگ دارای مرتبه بزرگی یکسان می‌باشند. از آن‌جا که تفاوت‌هایی در مسیر-های مطلوب، درجات آزادی و جرم‌های کار حاضر با کار تینگ وانگ وجود دارد، تفاوت‌هایی در گشتاورها وجود دارد.

#### ۴-۴ کنترل ربات دو پا

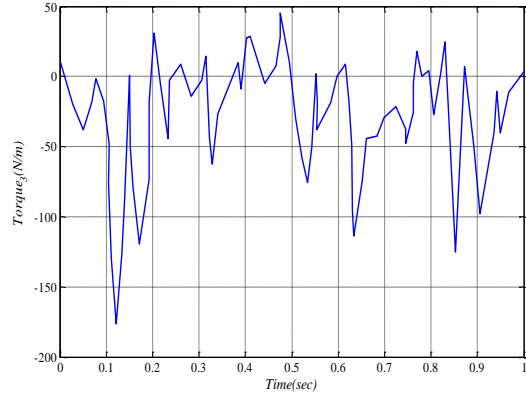
در این بخش کنترل ربات در سه مرحله تشریح می‌شود. ابتدا روش کنترل مورد استفاده در این تحقیق معرفی شده و سپس به روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات، ضرایب بهینه تناسبی و مشتق‌گیر محاسبه می‌شود؛ در نهایت نتایج حاصل از کنترلر به منظور مشاهده تعقیب مسیرهای مطلوب ارائه می‌شود.

#### ۴-۴-۱ روش کنترل گشتاور محاسبه شده

در این بخش، بحث چگونگی کنترل ربات دو پا برای تعقیب مسیرهای مطلوب متغیرهای مفصلی مطرح است. روش کنترلی که در این تحقیق استفاده شده است، روش کنترل گشتاور محاسبه شده (CTC) است. مفهوم این روش کنترل در سال ۱۹۷۲ توسط پاول پیشنهاد شد [۷۰]. روش CTC، یک روش کنترل بر پایه مدل است. روش گشتاور محاسبه شده، یک کاربرد خاص از خطی سازی

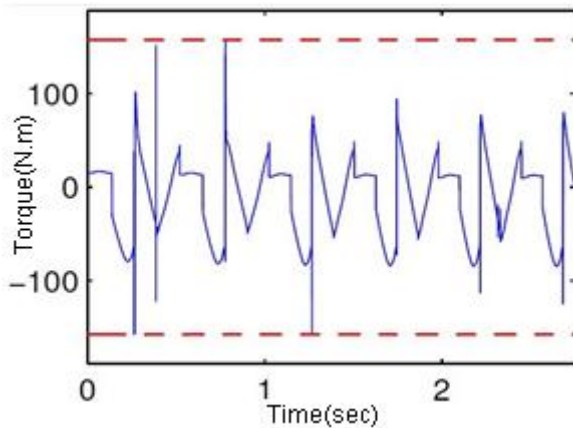


مرجع [۶۹]

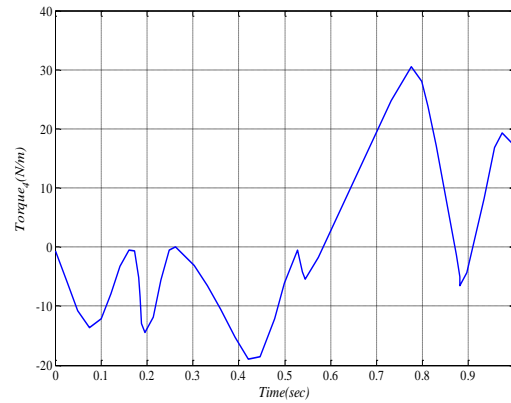


تحقیق حاضر

(الف)

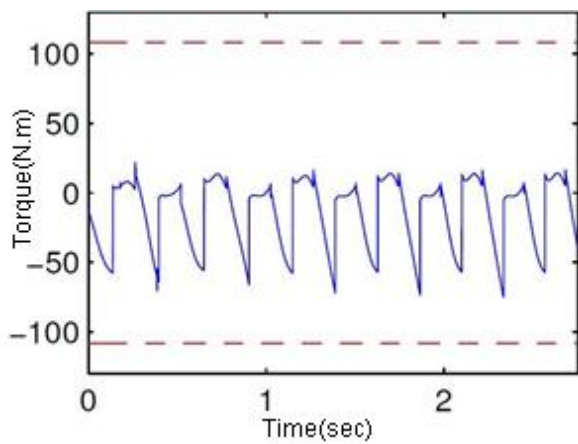


مرجع [۶۹]

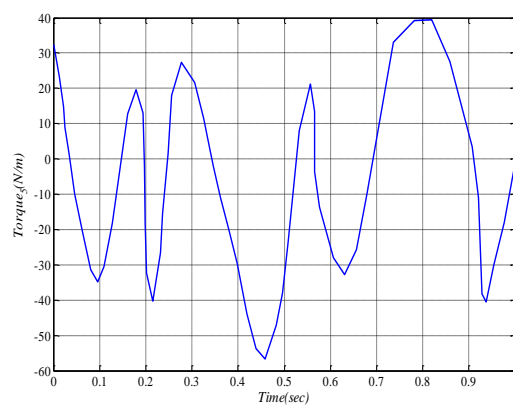


تحقیق حاضر

(ب)



مرجع [۶۹]



تحقیق حاضر

(ج)

شکل ۴-۱۸: مقایسه نتایج گشتاور لازم برای تعقیب مسیر مطلوب در مفاصل تحقیق حاضر با مرجع [۶۹]: (الف) مفصل ۳، (ب) مفصل ۴، (ج) مفصل ۵.



فیدبک سیستم‌های غیرخطی است که در آن سیستم غیرخطی در طول یک مسیر کنترل می‌شود. روش کنترل محاسبه شده به صورت زیر است.

$$\tau = D(\ddot{q}^d - K_v(\dot{q} - \dot{q}^d) - K_p(q - q^d)) + C\dot{q} + g \quad (28-4)$$

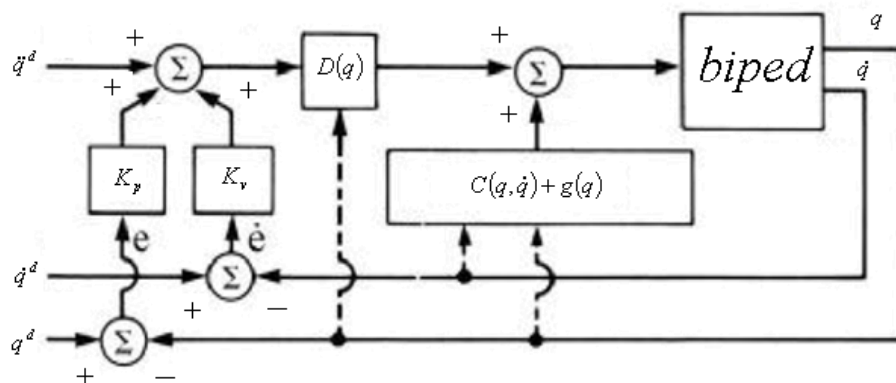
با اعمال کنترلر معرفی شده در رابطه‌ی (۲۸-۴) به سیستم، نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۴-۱۷) تا (۲۸-۴) نمایش داده شده است. همچنین با جایگذاری کنترل کننده فوق در معادلات حرکت مستقیم (۴-۱۶)، دینامیک خطا به صورت زیر بدست می‌آید:

$$(\ddot{q} - \ddot{q}^d) + K_v(\dot{q} - \dot{q}^d) + K_p(q - q^d) = 0 \quad (29-4)$$

با تعریف  $e = q - q^d$  خواهیم داشت:

$$\ddot{e} + K_v\dot{e} + K_p e = 0 \quad (30-4)$$

که در رابطه فوق، با انتخاب ماتریس‌های مثبت متقارن  $K_p$  و  $K_v$  خطای ردیابی زوایا با گذشت زمان به سمت صفر میل می‌کنند. برای انتخاب بهینه ماتریس‌های فوق به منظور کاهش خطای ردیابی، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات استفاده شده است. این الگوریتم در بخش بعدی تشریح می‌شود.



شکل ۴-۱۹: بلوک دیاگرام سیستم کنترلی ربات دوپا

در شکل (۴-۱۹) نمودار جعبه‌ای (بلوک دیاگرام) سیستم کنترلی ربات مربوطه نشان داده شده است.

#### ۴-۴-۲ الگوریتم بهینه اجتماع ذرات

برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات با نام اختصاری PSO توسط ابره‌ارت (Eberhart) و کندی (Kennedy) به عنوان یک روش جستجوی غیر قطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح گشت. این الگوریتم از حرکت دسته جمعی حیواناتی همچون پرندگان، ماهی‌ها و... که به دنبال غذا می‌باشند، الهام گرفته شده است.

در ایران بیشتر با الگوریتم پرندگان شناخته شده است. بر همین فرض، گروهی از پرندگان را در نظر بگیرید که در فضایی مشخص به صورت تصادفی دنبال غذا می‌گردند. تنها یک تکه غذا در فضای مورد بحث وجود دارد و هیچ یک از پرندگان محل غذا را نمی‌دانند. یکی از بهترین استراتژی‌ها در این مساله، می‌تواند دنبال کردن پرنده‌ای باشد که کمترین فاصله را تا غذا داشته باشد. این استراتژی در واقع اساس کار الگوریتم PSO است. هر راه حل که به آن یک ذره گفته می‌شود در الگوریتم، معادل یک پرنده در الگوریتم حرکت جمعی پرندگان می‌باشد. هر ذره یک مقدار شایستگی دارد که توسط یک تابع شایستگی محاسبه می‌شود. هر چه ذره در فضای جستجو به هدف- غذا در مدل حرکت پرندگان- نزدیکتر باشد، شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر ذره دارای یک سرعت است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد. هر ذره با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به حرکت خود در فضای مسأله ادامه می‌دهد. الگوریتم PSO به این شکل است که گروهی از ذرات در آغاز کار، به صورت تصادفی به وجود می‌آیند و با به روز کردن نسل‌ها سعی در یافتن راه حل بهینه می‌نمایند.

اگر مکان و سرعت ذره  $i$ ام از مجموعه  $n_p$  عضوی از ذرات در فضای جستجوی  $d$  بعدی در تکرار  $t$  به ترتیب با  $X_i^t = (x_{i,1}^t, x_{i,2}^t, \dots, x_{i,d}^t)^T$  و  $V_i^t = (v_{i,1}^t, v_{i,2}^t, \dots, v_{i,d}^t)^T$  مشخص شود. در هر تکرار، موقعیت هر ذره در فضای جستجو با استفاده از دو مقدار بهترین به روز می‌شود. یکی بهترین موقعیت

فردی هر ذره، مثلاً برای ذره  $i$  ام که با بهترین مقدار تابع هدف برای آن ذره تا تکرار  $t$  یعنی  $P_{b,i}$  و با نماد  $X_{b,i} = (x_{i,1b}, x_{i,2b}, \dots, x_{i,db})^T$  است و دیگری، بهترین موقعیتی که در بین ذرات تا تکرار  $t$  و متناظر با بهترین مقدار تابع هدف در کل مجموعه یعنی  $P_g$  و با نماد  $X_g = (x_{1g}, x_{2g}, \dots, x_{dg})^T$  می باشد.

پس از یافتن این مقادیر، سرعت و موقعیت جدید هر ذره با استفاده از روابط (۲-۶۳) و (۲-۶۴) محاسبه می شود.

$$v_{i,j}^{t+1} = w.v_{i,j}^t + c_1 r_{i,j}^1 (x_{jg} - x_{i,j}^t) + c_2 r_{i,j}^2 (x_{i,jb} - x_{i,j}^t), \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (۳۱-۴)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n_p \quad (۳۲-۴)$$

جایی که  $c_1$  و  $c_2$  ثابت‌هایی به نام ضرایب شتاب هستند که معمولاً هر دو برابر ۲ در نظر گرفته می شوند.  $r_{i,j}^1$  و  $r_{i,j}^2$  هر دو اعدادی می باشند که به صورت تصادفی یکنواخت در بازه [۰ و ۱] انتخاب می شوند.  $w$  فاکتور اینرسی بوده و در بهینه سازی تک هدفه در بازه [۰٫۴ و ۱] پیشنهاد شده است. مطالعات زیادی در گذشته نشان داده است که، اگر  $w$  به صورت خطی در روند اکتشاف کاهش یابد، عملکرد همگرایی به شدت اصلاح می شود. معادله این تغییرات به صورت رابطه (۲-۶۵) می باشد:

$$w = w_{\max} - n_t \times \frac{(w_{\max} - w_{\min})}{n_{\max}} \quad (۳۳-۴)$$

جایی که  $w_{\max}$  و  $w_{\min}$  به ترتیب ماکزیمم و مینیمم وزن،  $n_t$  تعداد تکرار اجرا شده و  $n_{\max}$  ماکزیمم تکرار ارزیابی در روند بهینه سازی می باشد. معمولاً الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات براساس اعداد واقعی اجرا می شود و به علت عدم استفاده از عملگرهای تقاطع<sup>۱</sup> و جهش<sup>۲</sup> نسبت به الگوریتم ژنتیک سرعت اجرای بالایی دارد. در کل میزان سرعت باید در یک محدوده  $[V_{\min}, V_{\max}]$  قرار داده شود تا از جستجوی نقطه بهینه در خارج از محدوده مورد بررسی جلوگیری شود. در این مقاله با توجه

<sup>1</sup> Cross

<sup>2</sup> Mutation

به مرجع [۷۱] میزان ۱۰٪ محدوده هر کدام از بازه‌های انتخابی برای پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده است. تغییر در مکان و سرعت هر ذره تا رسیدن به ماکزیمم تکرار، ادامه دارد. مراحل اجرای الگوریتم در گام‌های زیر خلاصه می‌شود:

گام ۱: یک جمعیت اولیه از ذرات با موقعیت و سرعت‌های تصادفی در نظر بگیرید.

گام ۲: مقدار تابع هدف را برای تمام ذرات ارزیابی کنید.  $P_{b,i}$  و  $X_{b,i}$  هر ذره را برابر با همین ارزیابی جاری هر ذره قرار دهید. از میان این مقادیر، بهترین مقدار تابع هدف و موقعیت متناظر به ترتیب برابر با  $P_g$  و  $X_g$  تنظیم شود.

گام ۳: مقادیر سرعت و موقعیت جدید هر ذره را مطابق با روابط (۲-۶۳) و (۲-۶۴) محاسبه کنید.

گام ۴: مقادیر تابع هدف تمام ذرات مرحله قبل را محاسبه کنید.

گام ۵:  $P_{b,i}$  و  $X_{b,i}$  هر ذره را با مقدار تابع هدف در تکرار جاری مقایسه کنید. اگر مقدار تابع هدف جاری بیشتر بود،  $P_{b,i}$  و  $X_{b,i}$  هر ذره را به روز رسانی کنید.

گام ۶: بهترین موقعیت از نظر مقدار تابع هدف برای ذرات را از میان  $P_{b,i}$  ها بدست آورده و با  $P_g$  مقایسه کنید. اگر این مقدار از  $P_g$  بیشتر باشد،  $P_g$  و  $X_g$  را مطابق موقعیت و مقدار هدف به روز رسانی کنید.

گام ۷: اگر تعداد تکرار کمتر از  $n_{max}$  گام ۳ برگرد وگرنه به گام ۸ بروید.

گام ۸: خروجی موقعیت و مقدار متناظر آن را که برابر با  $P_g$  و  $X_g$  می‌باشد، مشخص می‌شود و برنامه تمام می‌شود.

#### ۳-۴-۴ نتایج بهینه‌سازی برای کنترل ربات

فرآیند بهینه‌سازی با در نظرگیری ۱۰٪ خطا برای موقعیت متغیرهای مفصلی در شبیه‌سازی انجام گرفت. در سیستم کنترلی برای تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل ربات معیار میانگین مربعات خطا استفاده می‌شود. این معیار به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی انتخاب و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSE_{R,i} = \frac{\sum_{j=1}^{num} e_{j,i}^2}{num} \quad i = 1, 2, \dots, 12 \quad (34-4)$$

که در رابطه فوق  $MSE_{R,i}$  و  $num$  به ترتیب میانگین مربعات خطای متغیر مفصلی  $i$ ام ربات و تعداد داده‌های در نظر گرفته شده در محدوده زمان یک گام هستند.

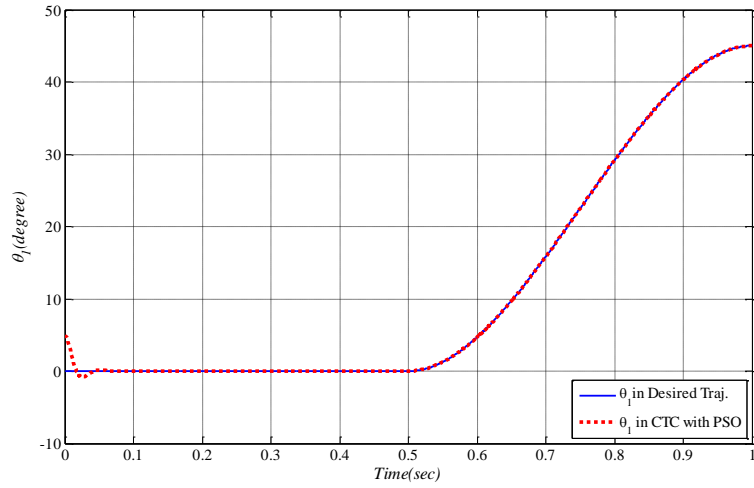
در این تحقیق، خطا، اختلاف بین مسیرهای سیستم کنترلی و مسیرهای مطلوب مفاصل ربات را نشان می‌دهد. همچنین  $K_p$  و  $K_v$  به عنوان متغیرهای طراحی بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. به منظور بهینه‌سازی، همانگونه که در زیر بخش ۳-۴-۴ بیان شد، از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات بهره گرفته می‌شود. برای اجرای این روش بر روی مساله حاضر از جمعیتی با تعداد ۵۰ و تعداد تکرار ماکزیمم ۱۰۰ استفاده شده است. همچنین محدوده ضرایب بهره تناسبی و مشتق‌گیر به ترتیب به صورت  $0 \leq K_p \leq 20000$  و  $0 \leq K_v \leq 5000$  در نظر گرفته شد.

پس از اجرای بهینه‌سازی مقادیر ضرایب فوق به صورت زیر می‌باشند:

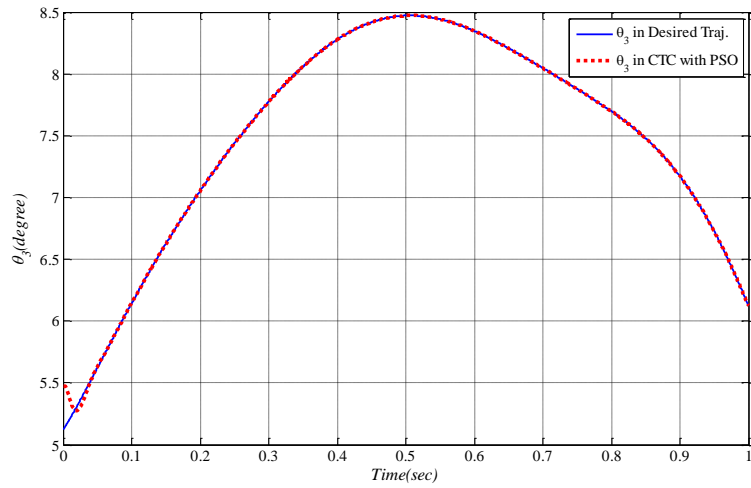
$$K_p = 10^4 \text{diag}(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2) \quad (35-4)$$

$$K_v = \text{diag}(141.38, 141, 141.34, 141, 141.56, 141.37, 141.37, 141.4, 141.4, 141.47, 141) \quad (36-4)$$

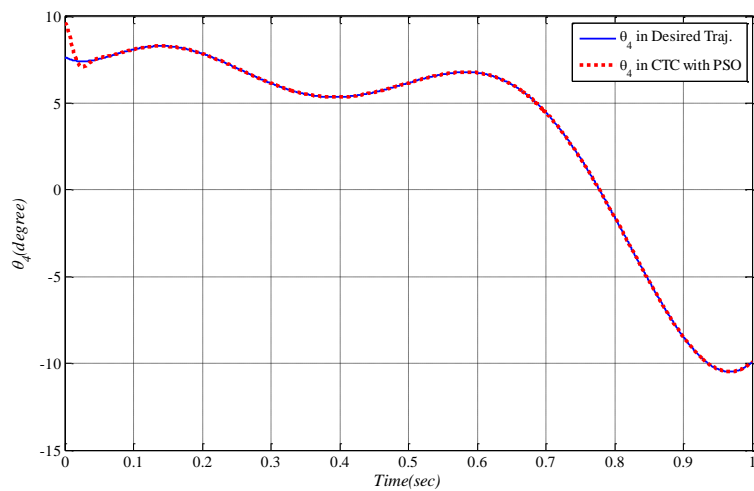
نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۳۰-۴ تا ۳۱-۴ ارائه شده است.



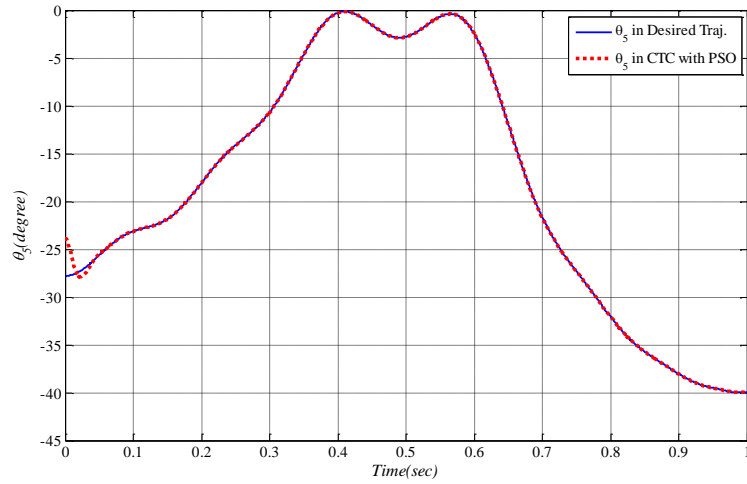
شکل ۴-۲۰: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_1$



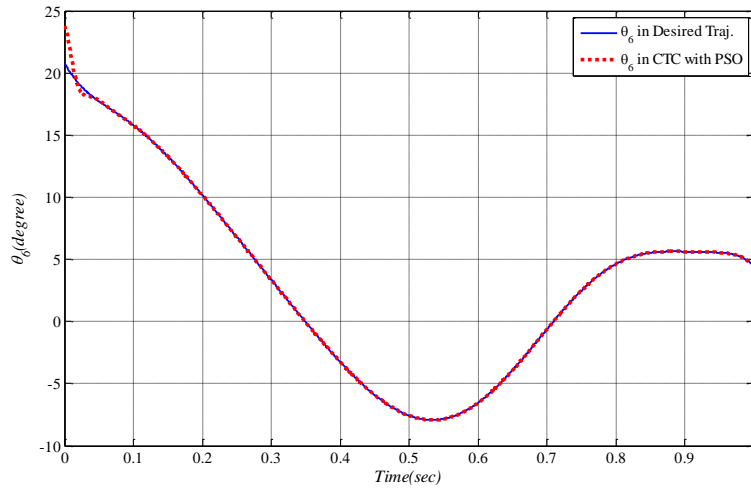
شکل ۴-۲۱: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_3$



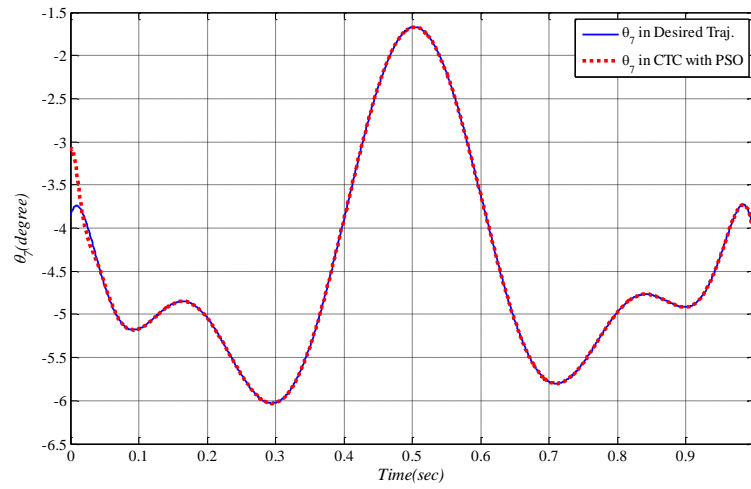
شکل ۴-۲۲: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_4$



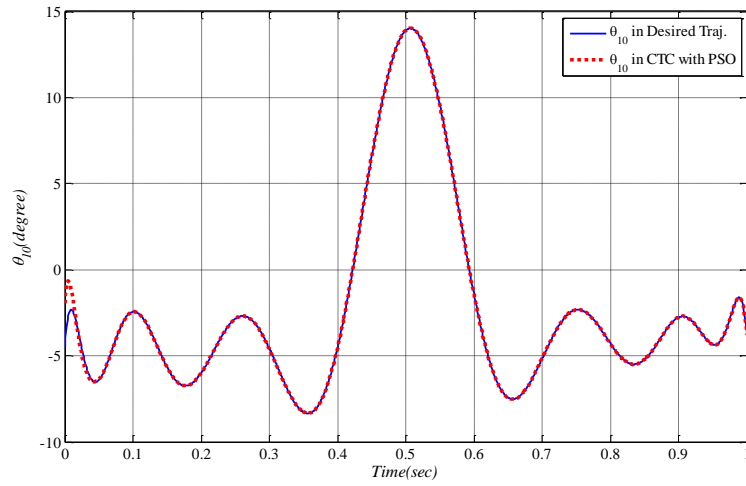
شکل ۴-۲۳: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_5$



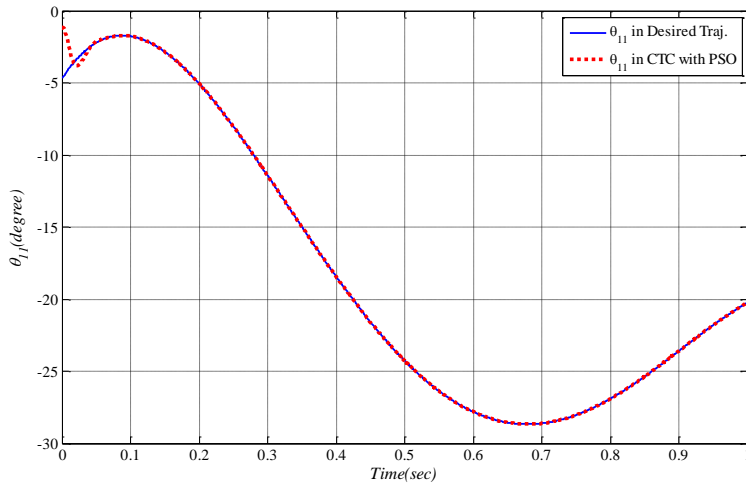
شکل ۴-۲۴: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_6$



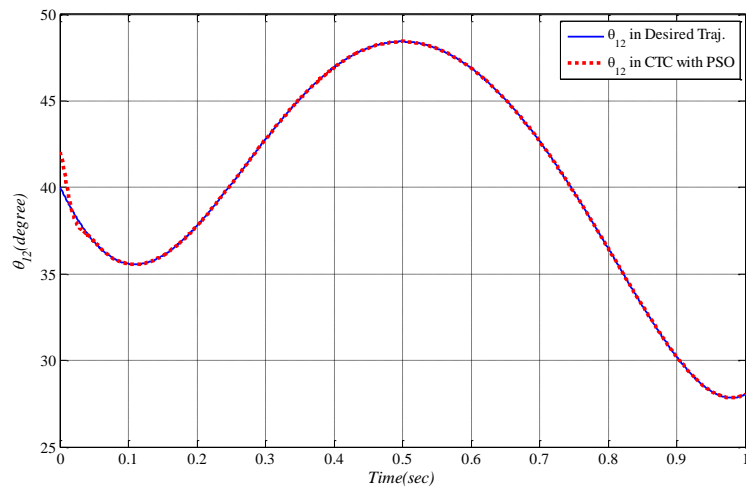
شکل ۴-۲۵: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_7$



شکل ۴-۲۶: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{10}$

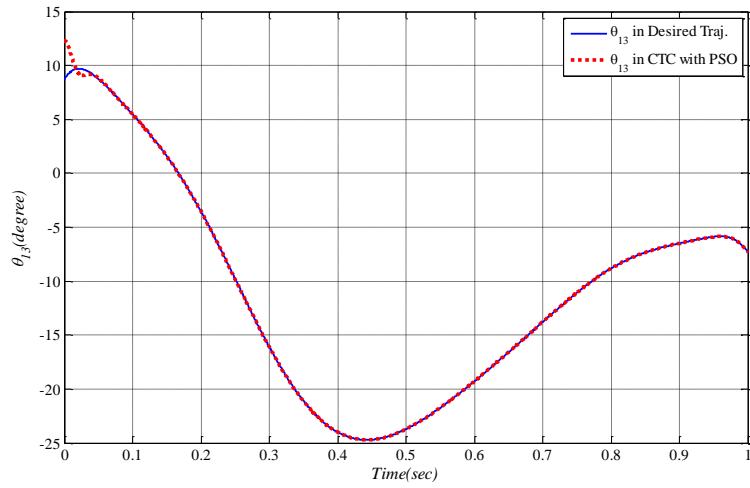


شکل ۴-۲۷: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{11}$

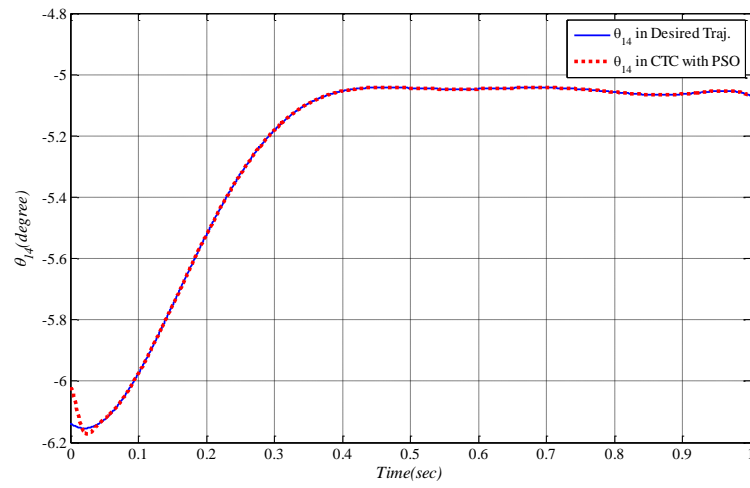


شکل ۴-۲۸: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{12}$

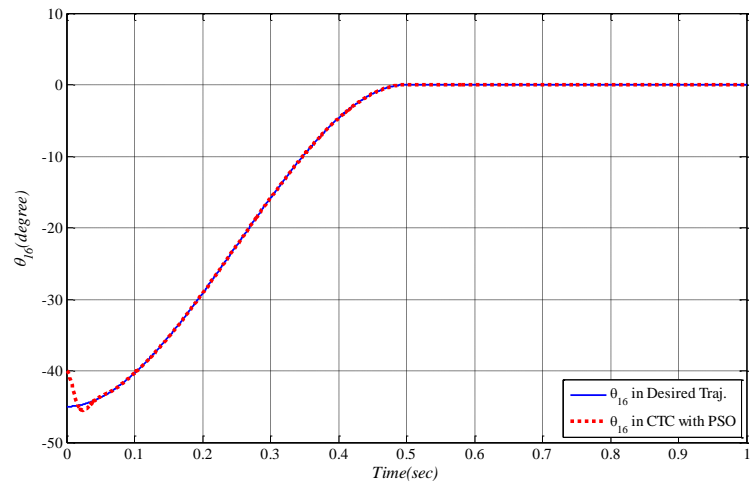




شکل ۴-۲۹: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{13}$



شکل ۴-۳۰: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{14}$



شکل ۴-۳۱: ردیابی مسیر مطلوب برای مفصل  $\theta_{16}$

همان طور که از شکل‌های ۴-۲۰ تا ۴-۳۱ مشاهده می‌شود، ردیابی مسیر مطلوب برای مفاصل به خوبی صورت گرفته است.

در بخش دیگری، محدوده‌ی متغیرهای طراحی یعنی محدوده‌ی ضرایب بهره‌ی تناسبی و مشتق-گیر به عنوان نمونه، برای متغیر مفصلی ۴ در دو حالت دیگر با حدود  $0 \leq K_p \leq 2000$ ،  $0 \leq K_v \leq 5000$  و همچنین  $0 \leq K_p \leq 200$ ،  $0 \leq K_v \leq 5000$  تغییر داده شد. مقادیر  $K_p$  و  $K_v$  حاصل از بهینه‌سازی در این دو حالت در مقایسه با حالت اول که دارای محدوده‌ی  $0 \leq K_p \leq 20000$ ،  $0 \leq K_v \leq 5000$  بود، بصورت زیر می‌باشد:

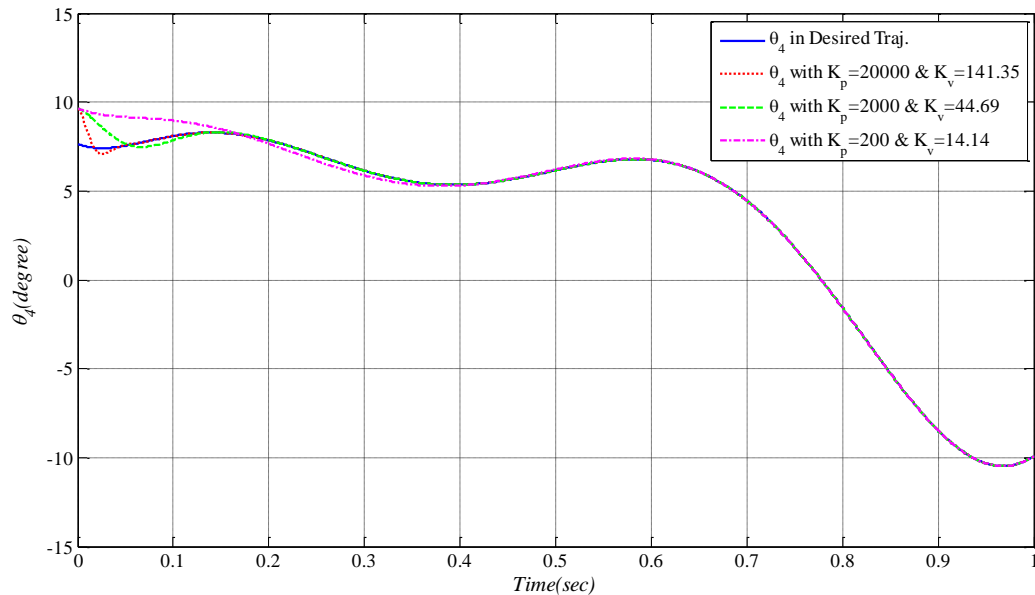
جدول ۴-۲: نتایج حاصل از بهینه‌سازی در دو حالت برای متغیر مفصلی ۴

محدوده متغیرهای طراحی	$K_v$	$K_p$	$R_k = \frac{K_p}{K_v}$	$MSE_{R,i}$
$0 \leq K_v \leq 5000$ ، $0 \leq K_p \leq 20000$	۱۴۱/۳۵	۲۰۰۰۰	۱۴۱/۴۹	$9/21 \times 10^{-6}$
$0 \leq K_v \leq 5000$ ، $0 \leq K_p \leq 2000$	۴۴/۶۹	۲۰۰۰	۴۴/۷۴۴	$2/78 \times 10^{-5}$
$0 \leq K_v \leq 5000$ ، $0 \leq K_p \leq 200$	۱۴/۱۴	۲۰۰	۱۴/۱۴	$8/66 \times 10^{-5}$

با بررسی داده‌های جدول ۴-۲، با کاهش محدوده  $K_p$ ، نسبت  $K_p$  به  $K_v$  که با نماد  $R_k$  نشان داده می‌شود، کاهش می‌یابد؛ اما مقدار  $MSE_{R,i}$  افزایش می‌یابد. به عبارتی با کاهش  $K_p$  مسیر مفاصل کمی دیرتر به مسیر مطلوب مفاصل همگرا می‌شود، در نتیجه میانگین مربعات خطا بزرگ‌تر می‌شود.

در ادامه نتایج این سه حالت بهینه‌سازی، همچنین در قالب دو شکل برای متغیر مفصلی ۴ آورده می‌شود. شکل اول، منحنی‌های تعقیب مسیر مطلوب متغیر مفصلی ۴ را توسط منحنی‌هایی با ضرایب

بهره تناسبی و مشتق‌گیر جدول ۴-۲ نشان می‌دهد؛ شکل دوم نیز، منحنی خطای بین مسیر مطلوب متغیر مفصلی ۴ و مسیر ردیابی حاصل از کنترلر را در سه حالت بهینه‌سازی مشخص می‌کند.



شکل ۴-۳۲: منحنی‌های تعقیب مسیر مطلوب متغیر مفصلی ۴ توسط منحنی‌هایی با ضرایب بهره تناسبی و مشتق‌گیر PSO متفاوت حاصل از

با توجه به شکل ۴-۳۲، مشاهده می‌شود که با افزایش  $K_p$  زمان میل کردن منحنی ردگیری

مسیر به مسیر مطلوب کاهش می‌یابد.

همانطور که بیان شد، شکل ۴-۳۳ منحنی خطای بین مسیر مطلوب و مسیر ردیابی برای متغیر

مفصلی ۴ را نشان می‌دهد. با توجه به آن، واضح است که با کاهش  $K_p$  زمان رسیدن میزان خطا به

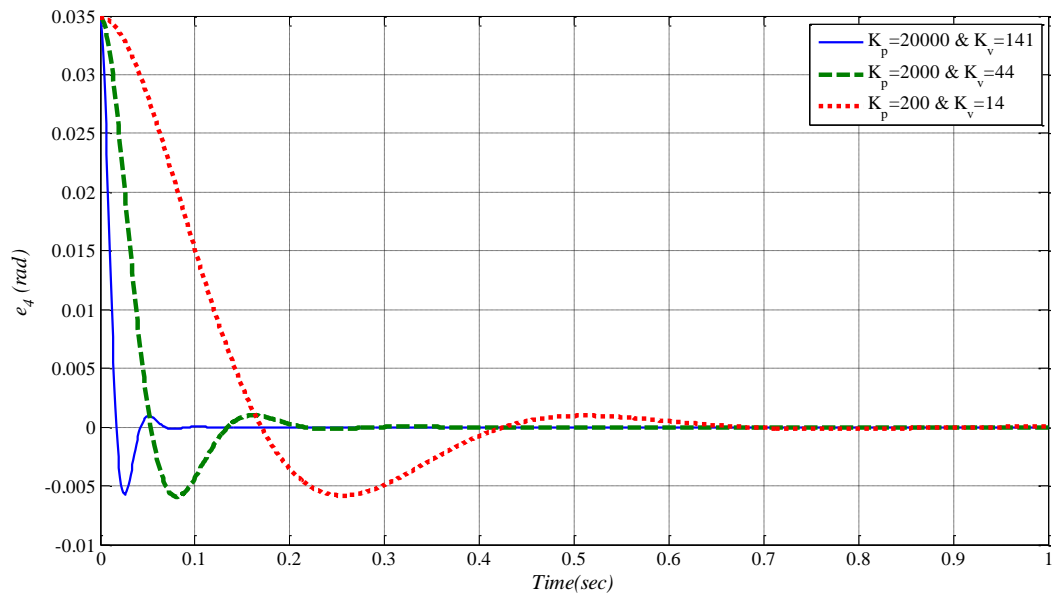
صفر کاهش می‌یابد. جدول ۴-۳ بیان‌گر این موضوع است که با کاهش  $K_p$  زمان رسیدن میزان خطا

به صفر، افزایش یافته و در مقابل میزان تغییرات گشتاور اعمالی مورد نیاز در سیستم کنترلی کاهش

می‌یابد.

جدول ۴-۳: مقایسه نتایج حاصل از سه حالت بهینه‌سازی برای دو متغیر  $Max\left(\frac{\Delta\tau}{D}\right)$  و  $t)_{e \rightarrow 0}$

متغیرهای مفصلی	$0 \leq K_p \leq 20000$ $0 \leq K_v \leq 5000$		$0 \leq K_p \leq 2000$ $0 \leq K_v \leq 5000$		$0 \leq K_p \leq 200$ $0 \leq K_v \leq 5000$	
	$Max\left(\frac{\Delta\tau}{D}\right)$	$t)_{e \rightarrow 0}$	$Max\left(\frac{\Delta\tau}{D}\right)$	$t)_{e \rightarrow 0}$	$Max\left(\frac{\Delta\tau}{D}\right)$	$t)_{e \rightarrow 0}$
$q_1$	۳۱۸۰/۸۹	۰/۰۷	۱۳۳۱/۳۱	۰/۲۲	۵۲۰/۶۷	۰/۶۶
$q_3$	۲۲۲/۶۷	۰/۰۶	۹۳/۱۹	۰/۲۲	۳۶/۴۵	۰/۶۵
$q_4$	۱۲۷۲/۳۸	۰/۰۶	۵۳۲/۵۳	۰/۲۲	۲۰۸/۲۷	۰/۶۶
$q_5$	۲۵۴۴/۷۲	۰/۰۶	۱۰۶۵/۰۵	۰/۲۲	۴۱۶/۵۳	۰/۶۶
$q_6$	۱۹۰۸/۵۵	۰/۰۶	۷۹۸/۷۹	۰/۲۲	۳۱۲/۴	۰/۶۶
$q_7$	۴۷۷/۱۴	۰/۰۶	۱۹۹/۷	۰/۲۱	۷۸/۱	۰/۶۶
$q_{10}$	۱۵۹۰/۴۵	۰/۰۶	۶۶۵/۶۶	۰/۲۲	۲۶۰/۳۳	۰/۶۶
$q_{11}$	۲۲۲۶/۶۵	۰/۰۶	۹۳۱/۹۳	۰/۲۱	۳۶۴/۴۷	۰/۶۵
$q_{12}$	۱۲۷۲/۳۸	۰/۰۶	۵۳۲/۵۳	۰/۲۱	۲۰۸/۲۷	۰/۶۵
$q_{13}$	۲۲۲۶/۶۵	۰/۰۶	۹۳۱/۹۳	۰/۲۱	۳۶۴/۴۷	۰/۶۵
$q_{14}$	۷۶/۳۴	۰/۰۶	۳۱/۹۵	۰/۲۱	۱۲/۵	۰/۶۶
$q_{16}$	۳۱۸۰/۸۹	۰/۰۶	۱۳۳۱/۳۱	۰/۲۱	۵۲۰/۶۷	۰/۶۶



شکل ۴-۳۳: منحنی خطای بین مسیر مطلوب متغیر مفصلی ۴ و مسیر ردیابی حاصل از کنترلر در سه حالت بهینه-سازی توسط PSO

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۵-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در بسیاری از تحقیقات گذشته حرکت ربات دوپا در حالت صفحه‌ای و گاهی سه بعدی، بدون در نظرگیری حرکت فعال پنجه پا در نظر گرفته شده است. در این مطالعه مسئله کنترل راه رفتن ربات ۹ عضوی مورد بررسی قرار گرفت و قیده‌های حرکتی ربات به منظور پایداری راه رفتن بررسی گردید. هدف، یافتن گام پایدار و کنترل راه رفتن ربات دوپای سه بعدی با ۱۶ درجه آزادی بود؛ که برای سیستم مورد مطالعه مسیرهای پایدار و مقید ربات دوپا به کمک قید فرضی نقطه گشتاور صفر برای حالت وجود مفصل فعال به عنوان پنجه پا به دست آمد. با توجه به حرکت راه رفتن انسان حرکت مفصل متاتارسال به صورت دو ضابطه‌ای تعریف شد به طوری که در نصف بازه زمانی گام کف پا به طور کامل بر روی زمین قرار دارد و در نیم بازه زمانی دیگر پای تکیه‌گاه تنها بر روی پنجه روی زمین قرار می‌گیرد. همچنین برای تولید مسیر این مفاصل، گشتاورهای کراندار بدست آمد که به کمک مجموعه موتور- گیربکس قابل تولید است.

جهت کنترل ربات و تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل، روش CTC به کار گرفته شد؛ به کمک این روش کنترلی، تعقیب و ردگیری مسیرهای مطلوب ربات به خوبی صورت گرفت. در نهایت ضرایب بهره تناسبی و مشتق‌گیر در این روش کنترل به کمک PSO محاسبه گردید.

## ۲-۵ پیشنهادات

- بررسی حرکت تناوبی ربات دوپا با احتساب فاز دو تکیه‌گاهی غیر آنی.
- بررسی حرکت تناوبی ربات دوپا با احتساب ضربه در حین تغییر گام.
- در نظر گرفتن حرکات یاو مفاصل ربات به‌منظور بررسی حرکت دور زدن ربات دوپا.
- مکانیزه کردن الگوریتم یافتن حرکت بهینه لگن.



## پیوست

توابع تخمین برای متغیرهای مفصلی به دست آمده در فصل ۳ عبارتند از:

$$\theta_3(t) = 622.2t^8 - 2480t^7 + 3935t^6 - 3182t^5 + 1408t^4 - 347.3t^3 + 36.88t^2 + 8.563t + e^{(3365)} + 4.12$$

$$\theta_4(t) = -3131t^7 + 12233t^6 - 18033t^5 + 12500t^4 - 4130t^3 + 564.6t^2 - 21.61t + 7.657$$

$$\begin{aligned} \theta_5(t) = & -8.969 \times 10^{10} t^{20} + 8.863 \times 10^{11} t^{19} - 4.031 \times 10^{12} t^{18} + 1.119 \times 10^{13} t^{17} - \\ & 2.117 \times 10^{13} t^{16} + 2.891 \times 10^{13} t^{15} - 2.943 \times 10^{13} t^{14} + 2.273 \times 10^{13} t^{13} - 1.344 \times 10^{13} t^{12} \\ & + 6.097 \times 10^{12} t^{11} - 2.114 \times 10^{12} t^{10} + 5.552 \times 10^{11} t^9 - 1.09 \times 10^{11} t^8 + 1.573 \times 10^{10} t^7 \\ & - 1.636 \times 10^9 t^6 + 1.202 \times 10^8 t^5 - 6.032 \times 10^6 t^4 + 1.846 \times 10^5 t^3 - 2153t^2 - 2e^{(-64(t-0.5)^2)} \\ & + 25.87t - 27.86 \end{aligned}$$

$$\theta_6(t) = -44355t^9 + 1.95e^5t^8 - 3.541e^5t^7 + 3.446e^5t^6 - 1.962e^5t^5 + 67288t^4 - 13511t^3 + 1389t^2 - 104.6t + 20.81$$

$$\theta_7(t) = -2.689e^5t^{10} + 1.344e^6t^9 - 2.836e^6t^8 + 3.279e^6t^7 - 2.258e^6t^6 + 9.418e^5t^5 - 2.321e^5t^4 + 31455t^3 - 1982t^2 + 28.07t - 3.854$$

$$\begin{aligned} \theta_{10}(t) = & -3.178 \times 10^8 t^{14} + 2.242 \times 10^9 t^{13} - 7.045 \times 10^9 t^{12} + 1.3 \times 10^{10} t^{11} - 1.564 \times 10^{10} t^{10} + \\ & 1.286 \times 10^{10} t^9 - 7.377 \times 10^9 t^8 + 2.96e^9 t^7 - 8.205e^8 t^6 + 1.528e^8 t^5 - 1.818e^7 t^4 \\ & + 1.27e^6 t^3 - 44600t^2 + 548.3t - 4.46 \end{aligned}$$

$$\theta_{11}(t) = -4.901t^4 + 12.08t^3 - 8.718t^2 + 1.269t - 0.08195$$

$$\theta_{12}(t) = -26.47t^8 + 128.1t^7 - 246.3t^6 + 241.3t^5 - 120.1t^4 + 19.11t^3 + 5.535t^2 - 1.423t + 0.6988$$

$$\begin{aligned} \theta_{13}(t) = & -1.941 \times 10^5 t^{10} + 1.003 \times 10^6 t^9 - 2.211 \times 10^6 t^8 + 2.704 \times 10^6 t^7 - 1.997 \times 10^6 t^6 \\ & + 9.081 \times 10^5 t^5 - 2.49 \times 10^5 t^4 + 39622t^3 - 3622t^2 + 109.5t + 8.691 \end{aligned}$$

$$\theta_{14}(t) = -335.4t^8 + 1300t^7 - 1961t^6 + 1391t^5 - 390.2t^4 - 39.7t^3 + 38.12t^2 - 1.514t - 6.138$$

## منابع

- [1] Capek, K., R.U.R. (Rossum's Universal Robots) 2001: Dover Publications.
- [2] Asimo, I., I, Robot1991: Spectra.
- [3] Jong Hyeon, P. and C. Hyun Chul. An online trajectory modifier for the base link of biped robots to enhance locomotion stability. In Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on. 2000.
- [4] Qiang, H., et al. A high stability, smooth walking pattern for a biped robot. In Robotics and Automation, 1999. Proceedings, 1999. Proceedings. 1999IEEE International Conference on. 1999.
- [5] Qiang, H., et al., Planning walking patterns for a biped robot. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 2001. 17(3): p.280-289.
- [6] Raibert, M., Legged Robots That Balance 1986: MIT Press.
- [7] Euron,"Contribution to world Robotics 2005," Report of European Robotics Network of Excellence, pp. 300-368, 2005.
- [8] Chevallereau, C., Bipedal Robots Modeling, Design and Walking Synthesis. 2007. Concentrated model, 2009, Universidad Carlos III de Madrid.
- [9] R.H.T.Gelhaus F.E., "Robot Applications in nuclear power plants," Progress in Nuclear Energy, vol. 23(1, p), pp. 1-33, 1990.
- [10] Miyazawa K., "Fire robots developed by the Tokyo Department," Advanced Robotics, Brill Academic Publishers, vol. 16(6), pp. 553-556, 2002.
- [11] Amano H., "Present status and problems of fire fighting robots," Proceedings of the 41th SICE annual Conference, vol. 2, pp. 880-885, 2002.
- [12] B.P.Briones L., Serna M.A, "Robicen: A wall-climbing pneumatic robot for inspection in nuclear power plants," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 11(4), pp. 287-292, 1998.
- [13] G. B. Christine Chevallereau, Gabriel Abba and Yannick Aoustin, Bipedal Robots: John Wiley & sons, Inc, 2009.
- [14] F. A. M. Grishin A.A., Lensk A.V., Zhtomrsky S.V, "Dynamical walking of a vehicle with two telescopic legs vontrolled by two drives," International journal of Robotics Research, vol. 13(2), pp. 137-147, 1994.

- [15] Balaguer Bernaldo de Quiro's, C., stable locomotion of humanoid robots based on mass
- [16] R. M. H. Murphy K.N., "Trotting and bounding in a planar two-legged model," Proceedings of the 5<sup>th</sup> CISM-IFTToMM Symposium, Romansy'84, 1984.
- [17] S. I. E. Raibert M.H., "Machines that walk," Scientific American, vol. 294(2), pp. 44-53, 1983.
- [18] S. I. E. Raibert M.H., Legged Robots that Balance: Cambridge, 1986.
- [19] F. J. Sano A., "Control of torque distribution for the BLR-G2 biped robot," 5<sup>th</sup> International Conference of Advanced Robotics in Unstructured, vol. 1, pp. 729-734, 1991.
- [20] F. L. Suno A., "Realization of natural dynamic walking using the angular momentum information," proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3, p, pp. 1476-1481, 1990.
- [21] S. I. Miura H., "Dynamic walk of a biped," International Journal of Robotics Research," vol. (2)3.pp. 60-74, 1984.
- [22] Toyota Motor Corp. Partner Robots.; Available from:  
<http://www.toyota.co.jp/en/news>.
- [23] Kenji KANEKO, Kensuke HARADA (2008) "Humanoid Robot HRP-3" International Conference on intelligent Robots and Systems, IEEE
- [24] Yisheng, G., et al. Feasibility of humanoid robots stepping over obstacles. In Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on. 2004.
- [25] Fujiwara, K., et al. Safe knee landing of a human-size humanoid robot while falling forward. In Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on. 2004.
- [26] Ishida, T., Y. Kuroki, and J. Yamaguchi. Mechanical system of a small biped entertainment robot. In intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS200.Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on.2003).
- [27] Tatsuzo Ishida, Yoshihiro Kuroki "Mechanical System of a Small Biped Entertainment Robot" Proceeding of the 2003 IEEE/RSJ, Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003.
- [28] Alexander, R.M., Mechanics and scaling of terrestrial locomotion. Scale effects in animal locomotion, 1977: p. 93-110.

[29] Brown, W.L. and I. Parsons, Storage and release of elastic strain energy: the driving force for low temperature reactivity and alteration of alkali feldspars. Defects and Processes in the Solid State: Geoscience Applications, The McLaren Volume (Developments in Petrology 14), 1993: p. 267-290.

[30] Alexander, R., Bipedal animals, and their differences from humans. Journal of anatomy, 2004.204(5):p. 321-330.

[31] Alexander, R.M.N., Models and the scaling of energy costs for locomotion. Journal of Experimental Biology, 2005. 208(9): p. 1645-1652.

[32] G.JR,"An overview of normal walking," AAOS instructional Courses Lecture American nature, vol. 121, pp. 571-585, 1990.

[33] T. A. Nillson J., "Ground reaction forces at different speeds of human walking and running," Acta Physiologica Scandinavica vol. 136, pp. 217-227, 1989.

[34] W. R. C. Van emmeik R.E.A., "Effects of walking velocity on relative phase dynamics in the trunk in human walking," journal of Biomechanics, vol. 29(9),pp. 1175-1184, 1996.

[35] J. G. G. Jessica Rose, Human Walking. Philadelphia: Lippincott Williams & wilkins, 2006.

[۳۶] رضا نقیبی، "بررسی سینماتیک، دینامیک و طراحی ربات دوپای صفحه‌ای با استفاده از منحنی‌های آماری حرکت انسان" دانشگاه فردوسی مشهد، بهمن ۱۳۸۹.

[۳۷] امید جهانیان، "بهینه نمودن سیستم حرکتی ربات‌های راه رونده دوپا با بهره‌گیری از طراحی‌های هوشمند مکانیکی و لحاظ نمودن عناصر بیولوژیک" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد مشهد، بهمن ۱۳۸۸.

[38] Collins, S. H., Wisse, M., Ruina, A., A three-Dimensional Passive-Dynamic walking Robot with Two Legs and Knees. International Journal of Robotics Research, 2001. Vol. 20, No. 2: p. Pages 607-615.

[39] Mochon, S. and T.A. McMahon, Ballistic walking. Journal of Biomechanics, 1980. 13(1): p. 49-57.

[40] Mochon, S. and T.A. McMahon, Ballistic walking: an improved model. Mathematical Biosciences, 1980. 52(3-4): p. 241-260.

- [41] T. McGeer, "Passive Dynamic Walking," *International Journal of Robotics Research*, vol.9, pp. 62-82, 1990.
- [42] McMahon, T.A., *Mechanics of locomotion. The International Journal of Robotics Research*, 1984. 3(2): p. 4-28.
- [43] Garcia, M.S., *stability, scaling, and chaos in passive-dynamic gait models*, 1999, Cornell University.
- [44] Dankowicz, H. and P.T. piironen, *exploiting discontinuities for stabilization of recurrent motions. Dynamical Systems: An International Journal*, 2002.1: (4) 7p. 317-342.
- [45] Suzuki, S., et al. *Biped walking robot control with passive walker model by new VSC servo. In American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001.*
- [46] Wisse, M., *Essentials of dynamic walking; Analysis and design of two-legged robots*. 2004.
- [47] Holm, J.K., *Gait regulation for bipedal locomotion*. 2008: ProQuest.
- [48] Wolherr, D., *Design and Control Aspects of Humanoid Walking Robots*, 2005.
- [49] McGhee, R. B. and A.A. Frank, *on the stability properties of quadruped creeping gaits. Mathematical Biosciences*, 1968. 3(0): p. 331-351.
- [50] Vukobratović, M., B. Borovac, and V. Potkonjak, *ZMP: A review of some basic misunderstandings. International Journal of Humanoid Robotics*, 2006. 3(02): p. 153-175.
- [51] Hemami, H. and C.L. Golliday Jr, *The inverted pendulum and biped stability. Mathematical Biosciences*, 1977. 34(1-2): p. 95-110.
- [52] Takanishi, A., Ishida, M., Ymazaki, Y., & Kato, I. *The Realization of Dynamic Walking by the Biped Walking Robot WL-10RD. in Proceedings of the international Conference on advanced robotics*. 1985. Tokyo.
- [53] Goswami, A., *Postural Stability of Biped Robots and the Foot-Rotation Indicator (FRI) Point. The International Journal of Robotics Research*, 1999. 18(6): p. 523-533.
- [54] Messuri, D. and C. Klein, *Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion. Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 1985. 1(3): p 141-132.
- [55] Papadopoulos, E. G. and D.A. Rey. *A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators. In Robotics and Automation, 1996. Proceedings, 1996 IEEE International Conference on*. 1996.

- [56] Vukobratovic, M., et al., Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application (Scientific Fundamentals of Robotics) Author: M. Vukobratovic. 1990.
- [57] Kajita, S., et al. A realtime pattern generator for biped walking. In Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on. 2002.
- [58] Schmidt, J.D.A.G., Synthesis of a walking Primitive Database for a Humanoid Robot using Optimal Control Techniques. 2001.
- [59] Wu, Q. and C.Y.A. Chan. Design of energy efficient joint profiles for a planar five-link biped robot. In Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 IEEE International Symposium on. 2001.
- [60] Cheng, M.-Y., C.-S. Lin, Dynamic biped robot locomotion on less structured surfaces. *Robotica*, 2000. 18(2): p. 163-170.
- [61] S. Ali A. Moosavian, M.A.,A. Tokhmar, stable trajectory planning, dynamics modeling and fuzzy regulated sliding model control of a biped robot in IEEE-RSA 7<sup>th</sup> International Conference on Humanoid Robots, Pittsburgh, Pennsylvania, USA2007.
- [62] Hurmuzlu, Y., Dynamics of Bipedal Gait Part I: Objective Functions and the Contact Event of a Planar Five-Link Biped. *Journal of Applied Mechanics*, 1998. 60: p. 331-336.
- [63] M. Vukobratovic, B.B., D. Surla, D. Stokic Biped locomotion: Dynamics, stability, control and application 1990: Springer-Verlag.
- [64] Faconti, D.I., Theoretical analysis and implementation of a humanoid robot, in Politecnico of Torino 2003, Chalmers University of Technology: Turin, Italy.
- [65] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control, first edition, New York.
- [66] Wang T, Christine Chevallereau and David Tlalolini (2013) "Stable walking control of a 3D biped robot with foot rotation" *Robotica*: page 1 of 20.
- [67] Moosavian, S.A.A., K. Alipour, and Y. Bahramzadeh. Dynamics modeling and tip-over stability of suspended wheeled mobile robots with multiple arms. In Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on. 2007.
- [68] Ming-Yuan shieh, Chien-sheng chen, chen-Hsin chuang, Yi-Rong Liou, jeng-Han Li (2012) "Gait detection based stable locomotion control system for biped robots" *Computers and Mathematics with Applications* p. 1431-1440.
- [69] Wang T., (2011), PhD.thesis, "Contribution a la commande de robots marcheurs bipeds".

[70] Paul, RP. "Technical Repotr" AIM-177, Stanford Artificail intelligence Laboratory 1972.

[71] Khare A., Rangnekar S. (2013) "A reviw of particle swarm optimization and its applications in Solar Photovoltaic system"

## **Abstract**

Today, legged-robots are the subject of interest by researchers. Due to their basic design, legged-robots, avoid obstacles on floors, and therefore provide more useful service for human being. Biped robots are one of the legged-robots and the most important problem of them is to find a stable trajectory for their movement. In many studies, bipeds are analyzed as a planer robot and in there, toe rotation is not considered. In this thesis with a view to approach to human legged movement, the biped is considered with active toe rotation and as a 3D model. A common criteria used in stability analysis of bipedal robots, is the Zero Moment Point criteria which is also used in this thesis.

In this thesis, first the two-legged robots, history, features, principles and common phrases associated with them are discussed. Also there's a glimpse to the Curves of the human motion in order to better understanding the walking method. Then with use of the Zero Moment Point constrain, the stable trajectory of gaits for a 9 link robot is designed. To create longer strides, humans use a phase in which the foot is rotated about its toe. So in this thesis a gait type is used which the entire sole of the support foot, first touches the ground but then it rotates about its metatarsal axis as an active joint. For solving of the equations of motion of the Robot, is used a fiction Zero Moment Point as a virtual constrain. With this method, the basic acceptable equation is obtained for robot movements and by using an algorithm, trajectory for joints is calculated. Then with examination of Zero Moment Point and by using another algorithm, the desired trajectory of the biped is obtained. Finally, by using the computed torque control method, the trajectory of the robot joints in order to have stable gait are tracked. The coefficient of proportional and derivational of this controller is calculated with help of particle swarm optimization algorithm which is spired from animal society's life.

**Keyword:** Bipedal Robot, Kinematics and Dynamics of Robot, Zero Moment Point, Computed Torque Control (CTC), and particle swarm optimization (PSO).





**Shahrood University**

**Department of Mechanical Engineering**

A Thesis for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering

Title

**Walking Control for a 3D Biped Robot by Considering Rotation about  
Metatarsal Axis**

By:

**Hessam Khafi**

Supervisor:

**Dr. Habib Ahmadi**

June, 2014