

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی
گروه مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

کنترل بهینه ربات دو پا در صفحه جانبی برای گام برداری بر روی سطح شیبدار

از:

میلاذ طاهر خورسندی

استاد راهنما:

دکتر احمد باقری

استاد مشاور:

دکتر نادر نریمان زاده

تاریخ دفاع: ۱۳۹۰/۱۱/۲۴ ساعت: ۱۰ آمفی تئاتر دانشکده فنی

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم به:

مادر و پدر مهربانم

و

همسر عزیزتر از جانم

به پاس فداکاری ها و مهربانی هایشان

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر احمد باقری، استاد راهنمای ارجمندم، که این پایان نامه مرهون کمک های بی دریغ و دلسوزانه ایشان می باشد، کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر نادر نریمان زاده، استاد مشاور بزرگوارم، که همواره پاسخگوی پرسش های اینجانب بوده اند، بسیار سپاسگزارم.

از استاد ارجمندم، جناب آقای مهندس بهنام میری پور که با صبر و حوصله بسیار مرا در پیشبرد این پژوهش یاری کردند، تشکر فراوان دارم.

از جناب آقای مهندس محمود آبادی به پاس یاری های فراوانشان در انجام این پژوهش سپاس گذاری می کنم.

همچنین بر خود واجب می دانم که از اساتیدم، جناب آقای دکتر علی چایبخش، جناب آقای دکتر علی جمالی و جناب آقای دکتر محمد ابراهیم فلزی که از راهنمایی هایشان بهره مند گشتم و تمامی دوستانی که مرا یاری نمودند، قدر دانی نمایم.

فهرست مطالب

فهرست مطالب ث

فهرست شکل‌ها خ

فهرست جدول‌ها ذ

چکیده فارسی ر

چکیده انگلیسی ز

فصل اول: پیشگفتار ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۲-۱ ربات‌های دوپا ۳

۳-۱ ربات‌های چهارپا ۸

۴-۱ ربات‌های شش‌پا ۹

۵-۱ مروری بر تحقیقات پیشین ۱۰

۶-۱ نحوه سازمان‌دهی مطالب ارائه شده در پایان‌نامه ۱۲

فصل دوم: مدل‌سازی ربات دوپا در صفحه جانبی ۱۳

۱-۲ مقدمه ۱۴

۲-۲ الگوی راه رفتن ۱۴

۱-۲-۲ راه رفتن استاتیکی ۱۷

۲-۲-۲ راه رفتن دینامیکی ۱۸

۳-۲ مدل دینامیکی ربات دوپا در صفحه جانبی ۱۸

۴-۲ نقطه ممان صفر ۲۱

فصل سوم: کنترل مد لغزشی ۲۳

۱-۳ مقدمه ۲۴

- ۲-۳ سطوح لغزشی ۲۵
- ۳-۳ ساده سازی نمادین ۲۶
- ۴-۳ دینامیک های معادل ۲۹
- ۵-۳ پدیده لرزش ۳۲
- ۶-۳ لایه مرزی ۳۳

فصل چهارم: بهینه سازی تجمعی ذره ۴۴

- ۱-۴ مقدمه ۴۵
- ۲-۴ روش بهینه یابی تجمعی ذره استاندارد ۴۵
- ۱-۲-۴ انواع همسایگی ها ۴۷
- ۲-۲-۴ شبه برنامه روش بهینه سازی تک هدفی تجمعی ذره اصلی ۵۱
- ۳-۴ مروری بر روش های ارائه شده پیشین در بهینه سازی تک هدفه ۵۲
- ۴-۴ عملگر همگرایی ۵۳
- ۵-۴ عملگر واگرایی ۵۴
- ۶-۴ ترکیب عملگر همگرایی و واگرایی ۵۵
- ۷-۴ مفاهیم اساسی بهینه سازی چند هدفی ۵۷
- ۸-۴ بهینه سازی چند هدفی تجمعی ذره ۶۰
- ۹-۴ آرشیو خارجی ۶۲
- ۱۰-۴ مروری بر روش های ارائه شده پیشین در بهینه سازی چند هدفه ۶۴
- ۱۱-۴ بهینه سازی چند هدفه متناوب ۶۶

فصل پنجم: کنترل بهینه ربات دوپا در صفحه جانبی ۶۹

- ۱-۵ مقدمه ۷۰
- ۲-۵ کنترل مد لغزشی ربات دوپا ۷۱

۳-۵	بهبود سازی کنترل لغزشی ربات دوپا با استفاده از بهینه سازی چند هدفه تجمعی ذره.....	۷۲
۴-۵	نتیجه گیری.....	۸۵
۵-۵	پیشنهادات.....	۸۵
	مراجع	۸۶
	پیوست	۹۲

فهرست شکلها

۳	شکل ۱-۱ ربات P2
۴	شکل ۱-۲ ربات P3
۵	شکل ۱-۳ ربات ASIMO
۶	شکل ۱-۴ ربات SURENA II
۷	شکل ۱-۵ ربات WI-5
۸	شکل ۱-۶ ربات دوپای غیر فعال
۹	شکل ۱-۷ ربات سگ بزرگ
۹	شکل ۱-۸ ربات شش پا
۱۵	شکل ۱-۲ صفحات بررسی حرکت ربات دوپا
۱۶	شکل ۲-۲ گام برداری ربات دوپا در صفحه جانبی بر روی سطح شیب دار
۱۶	شکل ۲-۳ ناحیه تکیه گاهی
۱۷	شکل ۲-۴ حرکت استاتیکی
۱۸	شکل ۲-۵ حرکت دینامیکی
۱۹	شکل ۲-۶ مدل ربات دوپا در صفحه جانبی
۱۹	شکل ۲-۷ گام برداری ربات دوپا در صفحه جانبی
۲۱	شکل ۲-۸ مدل گاری-میز برای محاسبه ZMP
۲۲	شکل ۲-۹ نقطه ممان صفر
۲۷	شکل ۳-۱ شرط لغزشی
۲۸	شکل ۳-۲ تغییر هندسی معادلات (۳-۳) و (۵-۳) $n=2$
۲۹	شکل ۳-۳ لرزش حاصل از سوئیچینگ کنترل ناقص
۳۳	شکل ۳-۴ لایه مرزی
۳۴	شکل ۳-۵ درون یابی کنترل لایه مرزی
۳۵	شکل ۳-۶ خطای کنترل بر حسب زمان
۳۵	شکل ۳-۷ سطح لغزشی بر حسب زمان
۳۶	شکل ۳-۸ سیگنال کنترل بر حسب زمان
۳۷	شکل ۳-۹ خطای پاسخ بر حسب زمان
۳۷	شکل ۳-۱۰ سیگنال کنترل بر حسب زمان
۳۸	شکل ۳-۱۱ سطح لغزشی بر حسب زمان
۴۰	شکل ۳-۱۲ ساختار دینامیک های خطای حلقه- بسته
۴۲	شکل ۳-۱۳ خطای ردیابی بر حسب زمان
۴۲	شکل ۳-۱۴ سیگنال کنترل بر حسب زمان
۴۳	شکل ۳-۱۵ سطح لغزشی و لایه مرزی بر حسب زمان

شکل ۴-۱ چگونگی حرکت ذره.....	۴۷
شکل ۴-۲ ساختار همسایگی حلقه ای.....	۴۸
شکل ۴-۳ گراف متصل کامل.....	۴۹
شکل ۴-۴ ساختار ستاره ای.....	۴۹
شکل ۴-۵ ساختار درختی.....	۵۰
شکل ۴-۶ شبه برنامه بهینه سازی تک هدفی تجمعی ذره.....	۵۱
شکل ۴-۷ الگوریتم بهینه سازی تک هدفی تجمعی ذره.....	۵۲
شکل ۴-۸ فلوجارت ترکیب PSO، عملگر همگرایی و واگرایی.....	۵۶
شکل ۴-۹ مفهوم برتری در فضای دو هدفی.....	۵۸
شکل ۴-۱۰ جبهه پارتو مجموعه ای از جواب ها در فضای دو هدفی.....	۵۹
شکل ۴-۱۱ شبه برنامه الگوریتم بهینه سازی چند هدفی تجمعی ذره.....	۶۲
شکل ۴-۱۲ نمایش مفهوم ϵ - dominance.....	۶۳
شکل ۴-۱۳ مثالی از روش ϵ - dominance در فضای دو هدفی.....	۶۴
شکل ۵-۱ مقایسه جبهه پارتو بهینه سازی چند هدفه تجمعی ذره، الگوریتم ژنتیک NSGA II و سیگما.....	۷۴
شکل ۵-۲ تغییرات زاویه θ_1 بر حسب زمان برای نقاط بهینه پارتویی A، B و C.....	۷۶
شکل ۵-۳ تغییرات زاویه θ_2 بر حسب زمان برای نقاط بهینه پارتویی A، B و C.....	۷۶
شکل ۵-۴ تغییرات زاویه θ_3 بر حسب زمان برای نقاط بهینه پارتویی A، B و C.....	۷۷
شکل ۵-۵ نیروی کنترلی U_1 برای نقطه بهینه پارتویی A.....	۷۸
شکل ۵-۶ نیروی کنترلی U_2 برای نقطه بهینه پارتویی B.....	۷۸
شکل ۵-۷ نیروی کنترلی U_1 برای نقطه بهینه پارتویی C.....	۷۹
شکل ۵-۸ نیروی کنترلی U_2 برای نقطه بهینه پارتویی A.....	۷۹
شکل ۵-۹ نیروی کنترلی U_2 برای نقطه بهینه پارتویی B.....	۸۰
شکل ۵-۱۰ نیروی کنترلی U_2 برای نقطه بهینه پارتویی C.....	۸۰
شکل ۵-۱۱ نیروی کنترلی U_3 برای نقطه بهینه پارتویی A.....	۸۱
شکل ۵-۱۲ نیروی کنترلی U_3 برای نقطه بهینه پارتویی B.....	۸۱
شکل ۵-۱۳ نیروی کنترلی U_3 برای نقطه بهینه پارتویی C.....	۸۲
شکل ۵-۱۴ خطای تعقیب زاویه θ_1 بر حسب زمان برای نقاط بهینه پارتویی A، B و C.....	۸۳
شکل ۵-۱۵ خطای تعقیب زاویه θ_2 بر حسب زمان برای نقاط بهینه پارتویی A، B و C.....	۸۳
شکل ۵-۱۶ خطای تعقیب زاویه θ_3 بر حسب زمان برای نقاط بهینه پارتویی A، B و C.....	۸۴

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲ پارامترهای آنترپومتریك برای مدل..... ۲۰

جدول ۵-۱ مقادیر متغیرهای طراحی های و توابع هدف برای نقاط بهینه پارتویی A، B و C..... ۷۵

کنترل بهینه ربات دو پا در صفحه جانبی برای گام برداری بر روی سطح شیبدار

میلاذ طاهر خورسندی

مطالعات زیادی برای حرکت و کنترل ربات دوپا در صفحه ساجیتال انجام شده است، در صورتی که انتظار می رود که یک ربات دوپا در هنگام مواجه شدن با موانع بتواند منحصرأ در صفحه جانبی گام بردارد. در این پایان نامه به کنترل مد لغزشی بهینه ربات دوپایی که در صفحه جانبی گام بردارد پرداخته می شود. یک مدل مناسب سه لینیکی برای ربات در نظر گرفته شده است و هر دو فاز حرکت روی یک پا و حرکت روی دوپا برای حفظ نقطه ممان صفر درون ناحیه تکیه گاهی و حفظ پایداری در نظر گرفته شده است. انتخاب یک کنترلر مناسب به دلیل غیر خطی بودن معادلات دینامیکی، عدم قطعیت پارامتری و حضور دینامیک های مدل نشده حائز اهمیت است. از کنترل مد لغزشی به عنوان یک کنترلر مقاوم در برابر نامعینی های پارامتری سیستم برای کنترل این ربات استفاده شده است. هنگام استفاده از کنترل مد لغزشی، یک مسئله مصالحه بین خطاهای زاویه ها و ورودی های کنترل به وجود می آید. بنابراین ضرایب این کنترلر باید به صورت بهینه ای طراحی شوند. از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه تجمعی ذره برای طراحی بهینه پارامترهای کنترل مد لغزشی استفاده شده است. جبهه پارتوی به دست آمده از این الگوریتم چند هدفه با دو الگوریتم معروف و کارای، الگوریتم ژنتیک چند هدفه Modified NSGA II و الگوریتم چند هدفه سیگما مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: ربات دوپا، کنترل مد لغزشی، بهینه سازی تجمعی ذره، بهینه سازی چند هدفی، گام برداری در صفحه جانبی، شیب، نقطه ممان صفر.

Abstract

Optimal Control of Biped Robot for Lateral Stepping on Slope

Milad Taher Khorsandi

Lately, many researchers have focused on walking of the biped robots in the sagittal plane. In one hand, biped robots require the capability to step merely laterally, in confronting the obstacles such as a wall. On the other hand, the dynamic equations of a biped robot in the lateral plane are extremely nonlinear and heavy to control. Therefore, this project presents a nonlinear sliding-mode tracking control for the biped robots that step purely in the lateral plane on slope. A three-link planer model is considered as a model of the Biped robot in the lateral plane. Both single support phase and double support phase have been negotiated to take the Zero Moment Point (ZMP) inside the support polygon. Sliding-mode control is used as the method with proper performance due to its fundamental property of robustness and invariance to model parametric uncertainties. When sliding-mode control is utilized to track the desired trajectories of the joints, there has to be a trade-off between tracking errors and control efforts. Thus, the coefficients of sliding-mode control have to be determined optimally. Multi-objective particle swarm optimization algorithm is used to obtain the Pareto front of these non-commensurable objective functions to determinate the sliding-mode parameters. The obtained Pareto front by the multi-objective algorithm is contrasted with two prominent and performable algorithms, modified NSGAI and Sigma method.

Keywords: Biped Robot; Sliding-Mode Tracking Control; Particle Swarm Optimization; Multi-objective Optimization; Lateral Stepping; Slope; Zero Moment Point.

پیشگفتار

ربات یک ماشین مکانیکی دارای هوش مصنوعی است که می تواند کارها را به صورت خود کار یا تحت کنترل از راه دور انجام دهد. در تعریفی کاربردی، ربات یک ماشین الکتریکی - مکانیکی است که توسط برنامه نویسی کامپیوتری هدایت می شود. ربات ها می توانند اتوماتیک، نیمه اتوماتیک و کنترل از راه دور باشند. ربات ها از دو پا^۱ مانند آسیمو^۲ و تیپو^۳ تا نانو ربات^۴، ربات های جمعی^۵، ربات های صنعتی^۶، ربات های نظامی^۷، ربات های متحرک و خدمات^۸ دهنده تقسیم می شوند.

منافعی که در راه رفتن ربات دوپا در محیط هایی با تکیه گاه های گسسته و یا برای عبور از موانع وجود دارد، باعث شده که راه رفتن ربات دوپا و به طور کلی کنترل این ربات ها برای محققان کنونی جذاب باشد. یکی از مهمترین علل این تحقیقات سیر تکاملی طبیعت است. سیر تکاملی طبیعت و حضور مکانیزم انتخاب طبیعی سبب به وجود آمدن موجوداتی با سخت افزار و روشهای کنترلی شده، که اکنون در حال زندگی در پهنه هستی می باشند. با اعتماد به طبیعت و مکانیزم های بهینه سازی موجود در آن می توان ادعا کرد که این روش های حرکتی برای محیط های زندگی این موجودات به طور نسبی بهینه سازی شده اند. لذا منافعی در راه رفتن ربات دوپا در محیط هایی با تکیه گاه های گسسته و یا دارای موانع وجود دارد که باعث شده که تحقیقات بسیاری به راه رفتن ربات دوپا و به طور کلی کنترل این ربات ها اختصاص داده شود. همچنین تولید ربات های یاری دهنده انسان و حضور این ربات ها در محیط های زندگی بشر علاوه بر بهینگی نسبی این گونه راه رفتن، باعث می شود که انسان ها با موجوداتی شبیه خود در تعامل باشند که خو گرفتن با این موجودات را آسان تر می کند. از ربات های دوپا در عملیات امداد و نجات، کمک به سالمندان، انجام کارهای پر خطر به جای انسان، ساخت و طراحی بهتر پروتز^۹ و ارتزها^{۱۰} استفاده می شود.

¹ Bipedal robot

² ASIMO

³ TOPIO

⁴ Nano robots

⁵ Swarm robots

⁶ Industrial robots

⁷ Military robots

⁸ Mobile and servicing robots

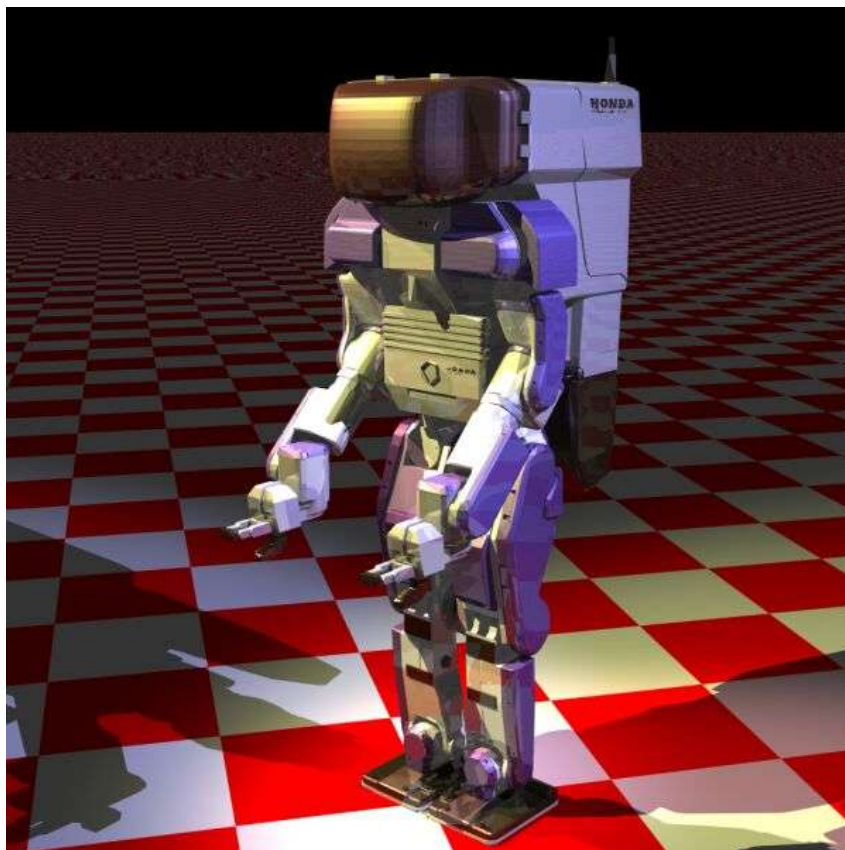
⁹ Prosthesis

¹⁰ Orthosis

۱-۲- رباتهای دوپا

مهمترین هدف در طراحی ربات های دو پا، حفظ تعادل در راه رفتن دینامیکی است. از انواع این ربات ها می توان به P3،P2، Waseda، Meltran، SURENA II، ASIMO و ربات های دوپای غیر فعال اشاره کرد.

P2 و به همراه آن P3 به وسیله Hirai، Hirose، Haijkawa در مرکز تحقیقاتی Honda wake از سال ۱۹۸۶ تاکنون در حال توسعه می باشند [۲]. این ربات دارای ۱۲ درجه آزادی است و در نیم تنه پایین خود مشتمل بر ۳ درجه آزادی در هر hip، ۱ درجه آزادی در هر زانو و ۲ درجه آزادی در مچ پا است. در این ربات سه کنترل کننده به منظور برقراری تعادل در حضور اغتشاشات و خطاهای مدلسازی و ناهمواریهای سطح در نظر گرفته شده است.



شکل ۱-۱- ربات P2.



شکل ۱-۲- ربات P3.

ربات ASIMO در سال ۲۰۰۰ طراحی شده که دارای ۱۶ مفصل می باشد. پشت این ربات صلب است و برای خم شدن بر روی دو زانو خم می شود. این ربات دارای نسخه های متعددی می باشد که آخرین نسخه آن در سال ۲۰۱۱ می باشد. از ویژگی های این نسخه می توان به بیشتر خودکار^۱ بودن و تعادل^۲ بهتر اشاره کرد. لازم به تاکید است که محققان شرکت Honda سعی بر این داشته اند که ربات های طراحی شده را از سیستم کنترل شونده^۳ به سیستم کنترل خودکار^۴ بر پایه تصمیم گیری بر اساس محیط و رفتار انسان ها سوق دهند.

¹ Autonomous

² Balance

³ Automatic machine

⁴ Autonomous machine



شکل ۱-۳- ربات ASIMO.

ربات سورنا II یک ربات دوپا است که در سال ۲۰۱۰ توسط ایران ساخته شد. بنا بر گزارش IEEE از تحلیل ربات های پیشرفته دنیا، این ربات در ردیف پنجم ربات های دوپا، بعد از به ترتیب: ASIMO ساخت ژاپن، Reem-B ساخت اسپانیا، Justin ساخت آلمان و Charli ساخت امریکا قرار گرفته است. ربات سورنا II توسط انجمن تخصصی مراکز تحقیق و توسعه صنایع و معادن و مرکز وسایل نقلیه پیشرفته دانشگاه تهران (CAV) ساخته شده است. سورنا II هم اکنون دارای ۱۲ درجه آزادی در پاها، ۸ درجه آزادی در دست ها و ۲ درجه آزادی در سر است. گام برداشتن آرام و شبیه انسان، حرکات منظم دست و پا و حرکات مشابه رفتار انسانی و همچنین ایستادن بر روی یک پا، از ویژگی های سورنا II است. همچنین از تجهیزات جانبی این ربات می توان به دوربین، میکروفن و اسپیکر اشاره کرده و سیستم های محرک این ربات نیز شامل موتور دی - سی، سرو موتور، هارمونیک درایو و گیربوکس سیاره ای است. قابل ذکر است که ربات سورنا I که در سال ۲۰۰۸ ساخته شد، دارای ارتفاع ۱۶۵ سانتی متر و وزن ۶۰ کیلوگرم بود ولی ربات سورنا II دارای ارتفاع ۱۴۵ سانتی متر و وزن ۴۵ کیلوگرم می باشد.

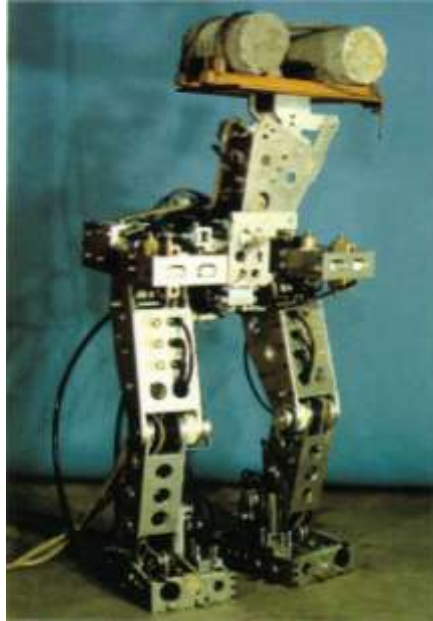


شکل ۱-۴- ربات SURENA II.

ربات Melrtan از اوایل سال ۱۹۹۰ در دانشگاه Tsukuba طراحی شده است [۳]. این ربات یک ربات صفحه ای است و دارای ۶ درجه آزادی می باشد. در این ربات پاها بدون جرم هستند و همچنین جرم بالا تنه نیز ثابت در نظر گرفته شده است. مرکز جرم این ربات همواره در یک ارتفاع ثابتی می باشد.

محققان دانشگاه Waseda از سال ۱۹۶۹ روی رباتهای دو پا فعال کار کرده اند. آن ها در ابتدا روی ربات های دوپای استاتیکی کار کردند ولی ربات های بعدی، دارای حرکت دینامیکی بودند [۴].

ربات WL-۵ یک ربات راه رونده استاتیکی با ۱۱ درجه آزادی است که هر گام ۲۰cm را در ۲ دقیقه طی می کند [۵].

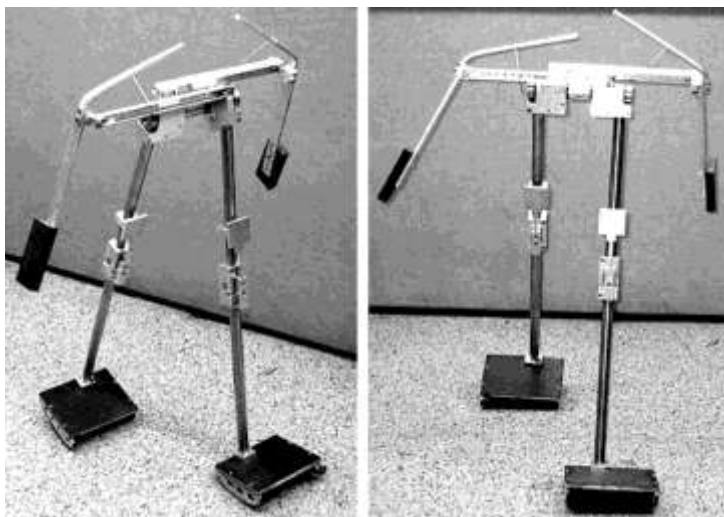


شکل ۱-۵- ربات WI-5.

ربات WL-12R-III یک ربات ۱۲ درجه آزادی است که حرکت آن بر طبق منحنی مسیر مفاصل که از قبل تعریف شده اند می باشد.

از دیگر رباتهای دوپای می توان به ربات های دوپای غیر فعال اشاره کرد که بدون هیچ کارانداز^۱ و سیستم کنترل به آرامی و با حفظ تعادل بر روی سطح شیبدار تحت تاثیر وزنشان حرکت می کنند [۶ و ۷]. مک گیر^۲ اولین فردی است که این ربات ها را مورد بررسی قرار داده است [۶].

¹ Actuator
² McGeer



شکل ۱-۶- ربات دو پای غیر فعال.

۱-۳- رباتهای چهارپا

از ربات های چهار پای ساخته شده می توان به ربات ساخته شده توسط Holland & Snaith در سال ۱۹۹۲ اشاره کرد که از محرک های پنوماتیکی برای به حرکت درآوردن آن استفاده شده است . این ربات هنگام بلند شدن نظیر خرگوش به زمین ضربه می زند [۱]. معروف ترین ربات چهارپا، ربات سگ بزرگ^۱ است. این ربات توسط شرکت دینامیک بستن^۲ و با همکاری شرکت فاستر میلر^۳ که یک شرکت ساخت ربات در امریکا با اهداف نظامی می باشد و با کمک آزمایشگاه های ناسا^۴ و دانشگاه هاروارد^۵ در سال ۲۰۰۵ ساخته شد. وزن این ربات ۱۱۰ کیلوگرم می باشد و توانایی حمل ۱۵۰ کیلوگرم را دارا می باشد. همچنین این ربات می تواند از سطحی با شیب ۳۵ درجه را بالا برود.

¹ Big Dog

² Boston Dynamics

³ Foster-Miller

⁴ NASA Jet Propulsion Laboratory

⁵ Harvard University Concord Field Station