بسم الله الرحمن الرحيم

٣٤٤٨٨

۱۳۸۰ /۴/ ۲۰

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

دانشگاه تربیت مدرس

011557

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک(طراحی کاربردی)

طراحی کنترلر مقاوم موقعیت و نیرو برای ربات راهرونده

نگارنده:

شهریار بزرگمهری

استاد راهنما:

دکتر مجید محمدی مقدم

استاد مشاور:

دکتر حمیدرضا تقی راد

خرداد ۱۳۸۰

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای شهریار بزرگمهری پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان طراحی کنترلر مقاوم موقعیت و نیرو برای ربات راهونده در تاریخ ۸۰/۳/۱۳ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان‌نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک با گرایش طراحی کاربردی پیشنهاد می‌کنند.

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما :	آقای دکتر محمدی‌مقدم	
۲ـ استاد مشاور :	آقای دکتر تقی راد	
۳ـ استادان ممتحن :	آقای دکتر اسماعیل‌زاده	
	آقای دکتر آریا الستی	
۴ـ مدیر گروه :	آقای دکتر قدیری	
(یا نمایندهٔ گروه تخصصی)		

بسمه‌تعالی

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ مهندسی مکانیک است که در سال ۱۳۸۰ در دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر صادق مقدم ، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر محمد شاهقلی راد و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب [redacted] دانشجوی رشته [redacted] مقطع [redacted] تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی: [redacted]

تاریخ و امضا: ۷۹/۳/۱۰

تقدیم

این پایان‌نامه را به پدر و مادر گرامیم تقدیم می‌کنم شاید به این وسیله ذره‌ای از زحمات ایشان را سپاس گفته باشم.

همچنین از راهنمایی‌ها و کمک‌های فراوان برادر و خواهر عزیزم در انجام این پروژه تشکر فراوان می‌نمایم.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم که از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر مجید محمدی مقدم به خاطر راهنمایی‌های ارزنده و زحمات بی‌دریغ‌شان در انجام این پایان‌نامه تشکر و قدردانی فراوان بنمایم.

همچنین از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر حمیدرضا تقی راد که از نظرات ارزشمند ایشان در به ثمر رساندن این پایان‌نامه استفاده بسیار شده است کمال تشکر و سپاسگزاری را می‌نمایم.

چکیده:

رباتهای راهرونده از پیچیده‌ترین محصولات تکنولوژی امروز می‌باشند که تحقیقات فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند. در این پایان‌نامه، یک مکانیزم مناسب برای تحلیل این‌گونه رباتها ارائه گردیده است. این مکانیزم، یک ربات P2R می‌باشد که بعنوان یک پا از ربات راهرونده چندپایی یا یک ربات پا - چرخ (Leg-Wheel Robot) با توجه به امکانات ساخت و آزمایش در این پروژه مورد استفاده قرارگرفته است. معادلات دینامیکی ربات مذکور با استفاده از روش کین (kane) بدست آمده است. معادلات فوق سپس خطی شده و در دو حالت دینامیک مستقیم و معکوس حل شده‌اند و حرکت ربات بصورت مدار باز شبیه‌سازی شده است. در مرحلهٔ بعد، معادلات حالت سیستم با استفاده از معادلات دینامیکی خطی شده بدست آمده و بهمراه تابع تبدیل موتور DC و مدل زمین به صورت مدار بسته در نرم‌افزار Simulink شبیه‌سازی شده است. در ادامه یک کنترلر مقاوم PID براساس ضرایب محک Integral Time Absolute Error (ITAE) طراحی شده است. علاوه بر کنترلر PID، یک کنترلر H_∞ نیز برای ربات طراحی شده است که علی‌رغم داشتن شرایط پایداری مناسب، عملکرد لازم را فراهم نمی‌سازد. در انتها ربات مورد مطالعه ساخته شده و در عمل کنترلر PID در حالتهای مختلف مورد آزمایش قرارگرفته است و برای بررسی پایداری مقاوم،دینامیک ربات با استفاده از تغییر وزن مورد آزمایش قرارگرفته که از عملکرد و پایداری مناسب برخوردار بوده است.

کلید واژه: ربات راهرونده، ربات پا - چرخ، کنترل موقعیت و نیرو، دینامیک کین

فهرست مطالب

عنوان صفحه

چکیده .....

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مروری بر تاریخچه تحقیقات ۳

۱-۲-۱- کنترل نیروی ربات ۳

۱-۲-۲- رباتهای راهرونده ۶

۱-۳- تحقیقات انجام گرفته در این پایان‌نامه ۸

فصل دوم: مدلسازی حرکت و دینامیک ربات ۱۰

۲-۱- مدل دینامیک ربات ۱۱

۲-۲- قیود ۱۲

۲-۲-۱- قیود حرکت غیرهولونومیک ۱۲

۲-۲-۲- قیود نیرو ۱۳

۲-۳- روش کین ۱۵

۲-۴- استخراج معادلات دینامیکی ۱۷

۲-۴-۱- دستگاههای مختصات ۱۷
۲-۴-۲- معادلات دینامیکی ۱۸
۲-۵- بدست آوردن معادلات خطی حرکت ۲۱
۲-۶- حل معادلات و شبیه‌سازی حرکت ۲۳
فصل سوم: کنترل ربات ۲۷
۳-۱- معادلات حالت ربات ۲۸
۳-۲- تابع تبدیل و معادلات DC موتور ۳۰
۳-۳- مدل زمین ۳۳
۳-۴- کنترل سیستم ۳۳
۳-۵- طراحی کنترلر مقاوم PID ۳۴
۳-۶- نتایج شبیه‌سازی سیستم در حالت مدار بسته ۳۶
۳-۷- طراحی کنترلر H_∞ و سنتز μ ۴۱
فصل چهارم: دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده و نتایج تجربی ۴۵
۴-۱- مشخصات دستگاه آزمایشگاهی ۴۶
۴-۲- آزمایشهای تجربی ۴۹
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۵۶
نتیجه‌گیری ۵۷
پیشنهادات ۵۸
مراجع و منابع ۵۹
واژه‌نامه ۶۳

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول ۲-۱. پارامترهای دناویت - هارتنبرگ ربات ۱۸

جدول ۴-۱. مشخصات مکانیکی ربات راهرونده ۴۶

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۲-۱. ربات P2R مدّل ربات راهرونده ۱۲

شکل ۲-۲. ممان تولید شده توسط نیرو اعمالی به پای ربات ۱۳

شکل ۲-۳. محاسبهٔ ضریب اصطکاک ۱۴

شکل ۲-۴. دستگاههای مختصات ربات ۱۷

شکل ۲-۵. ربات P2R ۱۹

شکل ۲-۶. ربات P2R در حالت تعادل ۲۱

شکل ۲-۷. دینامیک مستقیم ۲۳

شکل ۲-۸. دینامیک معکوس ۲۳

شکل ۲-۹. مقادیر q۱، q۲ و q۳ در حالت دینامیک معکوس ۲۵

شکل ۲-۱۰. شبیه‌سازی حرکت ۲۵

شکل ۲-۱۱. شبیه‌سازی حرکت در حالت ایستاده‌در حالت گام برداشتن ۲۵

شکل ۲-۱۲. حل معادلات دیفرانسیل خطی و غیرخطی حرکت به روش دینامیک مستقیم ۲۶

شکل ۳-۱. مدل DC موتور ۳۰

شکل ۳-۲. الگوریتم کنترل موقعیت و نیرو ۳۴

شکل ۳-۳. مدل ساده شده ربات راهرونده ۳۵
شکل ۳-۴. مدلسازی ربات راهرونده در Simulink ۳۷
شکل ۳-۵. مقدار زاویه q۲ در شبیه‌سازی مدار بسته ۳۸
شکل ۳-۶. مقدار نیرو عمودی FN در شبیه‌سازی مدار بسته ۳۹
شکل ۳-۷. مقدار خطاء زاویه q۲ در شبیه‌سازی مدار بسته ۴۰
شکل ۳-۹. مدلسازی ربات راهرونده در mu-tools ۴۱
شکل ۳-۸. عدم قطعیت q۲ ..... ۴۳
شکل ۳-۱۰. پایداری مقاوم و عملکرد نامی سیستم ۴۴
شکل ۴-۱. نقشه مونتاژ ربات راهرونده P2R ۴۸
شکل ۴-۲. برنامه کنترل و اندازه‌گیری موقعیت و نیرو ۵۰
شکل ۴-۳. نتایج آزمایش حرکت ربات بصورت مدار باز ۵۱
شکل ۴-۴. نتایج آزمایش کنترلر PID با ضرایب (۴-۲) ۵۲
شکل ۴-۵. نتایج آزمایش کنترلر PID با ضرایب (۴-۳) ۵۳
شکل ۴-۶. نتایج آزمایش کنترلر PID با وزنه ۵۲۵gr ۵۴
شکل ۴-۷. تصویر ربات P2R ساخته شده ۵۵

فصل اول
مقدمه

۱-۱- مقدمه

یکی از آرزوهای بزرگ بشر ساخت رباتهای همانند انسان[1] و استفاده از آنها بوده است. امّا مشکلات اساسی در برابر این هدف وجود دارد که اهم آنها عبارتند از:

هوشمندی لازم برای ربات، قابلیت درک و حس نسبت به محیط اطراف، قدرت بینایی و تکلم و همچنین ابتدایی‌تر از همه توانایی راه رفتن مانند انسان.

حل معضل اساسی حرکت ربات راهرونده در قالب بسیاری از پروژه‌ها و تحقیقات دینامیک و کنترل ربات‌های راهرونده در حال انجام می‌باشد. قابلیت‌های حرکتی بالای یک ربات راهرونده در انواع مختلف زمینها و محیطها با موانع مختلف باعث گسترش ساخت رباتهای دوپا[2]، چهارپا[3]، شش‌پا[4] و انجام تحقیقات مختلف بر روی آنها شده است.

کنترل نیرو از دیگر مباحث علم رباتیک می‌باشد که استفاده گسترده ربات‌های صنعتی را در عملیات مونتاژ، سنگزنی، پرداخت سطوح و مته‌زنی امکان‌پذیر ساخته است، کنترل ربات راهرونده بر روی یک سطح سخت تنها با کنترل موقعیت بخوبی انجام می‌گیرد ولی زمانیکه ربات راهرونده بر روی یک سطح نرم مانند زمین خاکی گام برمی‌دارد، کنترل نیرو برای نگهداری یک

---

1. Humanoid robot
2. biped
3. quadruped
4. Hexapod

حرکت هموار ضروری می‌باشد. نکته بسیار مهم در کنترل نیرو وابستگی نیروی عکس‌العمل با سطح تماس (سنگفرش، شن‌زار، زمین خاکی، زمین ماسه‌ای و غیره) می‌باشد.

وجود پارامترهای متغیر ذکر شده، عدم قطعیت‌های ساختار یافته[۱] و ساختار نیافته[۲] مدلسازی و اغتشاشات محیط ضرورت طراحی کنترل خاص را می‌طلبد.

در تحقیقات مختلف انواع کنترلرهای PID، مقاوم، تطبیقی[۳]، شبکه عصبیِ[۴] (NN)، فازی[۵] و یا ترکیبی از این کنترلرها مورد استفاده قرار گرفته است. در این پروژه مدل مناسبی برای تحلیل ربات راهرونده درنظر گرفته شده است. سپس معادلات دینامیکی این ربات بروش Kane بدست آمده است و این معادلات به دو روش دینامیک مستقیم و معکوس حل گردیده‌اند و در بخش کنترل، کنترلر مقاوم مناسب برای ربات طراحی گردیده است و سیستم بشکل مدار بسته با کنترلر طراحی شده شبیه‌سازی گردیده است و در آخرین مرحله، این ربات ساخته شده و بطور تجربی کنترلر مقاوم آزمایش شده است.

۱-۲- مروری بر تاریخچه تحقیقات

۱-۲-۱- کنترل نیروی ربات[۶]

در طی چندین سال گذشته، کنترل حرکت انعطاف‌پذیر[۷] بعنوان یکی از مباحث پُرجاذبه

---

1. Structured uncertainty
2. Unstructured uncertainty
3. Adaptive
4. Neural networks
5. Fuzzy
6. Robot force Control
7. Compliant motion control