بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مکانیک

گروه مکاترونیک

طراحی کنترل‌کننده تطبیقی عصبی – فازی به منظور کنترل مسیر و تعادل ربات تعادلی دوچرخ

دانشجو : محمدحسن قیصریه‌ها

اساتید راهنما :

دکتر حسین خسروی

دکتر علیرضا الفی

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریورماه سال ۱۳۹۲

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **محمدحسن قیصریه ها** رشته **مکاترونیک** گرایش **مکاترونیک** تحت عنوان **طراحی کنترل کننده تطبیقی عصبی – فازی به منظور کنترل مسیر و تعادل ربات تعادلی دوچرخ** که در تاریخ **۹۲/۰۶/۲۶** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸/۸۸) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹)
۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)
۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ ۱۶)
۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استاد راهنما اول	حسین حسنی	استادیار	
۲ـ استاد راهنما دوم	علیرضا الفی	استادیار	
۳ـ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	امیر جلالی	استادیار	
۴ـ استاد ممتحن	حمیدرضا موسوی نیاز	دانشیار	
۵ ـ استاد ممتحن	مهدی عبدلی	دستیار	

رئیس دانشکده : امضاء

دانشکده مکانیک

تقدیم به آنان که اولین آموزگارانم بودند

مادرم زهرا

پدرم غلامحسین

و پدربزرگم رستم

سپاس خدایی راکه ستودن برازنده ی اوست

زبان از بیان سپاسی شایسته قاصر است لذا به حکم ادب و با الفاظی همیشگی تشکر می کنم از همه ی کسانی که یاریم دادند.

از استادگران مایه جناب آقای دکتر خسروی که دست از حمایتم برنداشتند و همواره با راهنمایی های ارزشمند خود یاریم دادند و همچنین از

جناب آقای دکتر الفی که با اعتماد به شاگرد کوچک خود، امکان استفاده از امکانات آزمایشگاهی را برایم فراهم ساختند.

تعهدنامه

این‌جانب محمدحسن قیصریه‌ها دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکاترونیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه: طراحی کنترل‌کننده تطبیقی عصبی – فازی به منظور کنترل مسیر و تعادل ربات تعادلی دوچرخ، تحت راهنمایی دکتر حسین خسروی و دکتر علیرضا الفی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام‌شده 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 پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده‌شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده‌شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

چکیده فارسی:

پاندول معکوس به عنوان یک مسئله‌ی کلاسیک در دینامیک و کنترل شناخته می‌شود که اغلب به منظور بررسی کارایی نظریه‌های کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر، ایده‌ی ربات‌های تعادلی دوچرخ با الگو گرفتن از پاندول معکوس مطرح شده است، غیرخطی، ناپایدار و غیرهولونومیک بودن ربات موجب شده است به حجم بالایی از محاسبات برای مدل‌سازی و کنترل این سیستم نیاز باشد.

تاکنون مقالات ارائه‌شده از دیدگاه‌های مختلفی ربات تعادلی را مورد بررسی قرار داده‌اند، گروهی به معرفی این ربات به عنوان یک وسیله نقلیه پرداختند، گروهی کوشیده‌اند تا معادلات حرکتی جامعی برای آن استخراج کنند و گروهی نیز این ساختار را (چون گذشته) برای امتحان نظریه‌های کنترلی خود به‌کار برده‌اند.

در دهه‌ی گذشته روش‌های کنترل غیرخطی برای کنترل موقعیت، سرعت و تعادل ربات پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته است، همچنین در سال‌های اخیری استفاده از روش‌های هوشمند برای کنترل ربات رشد چشمگیری داشته و تا جایی پیش رفته است که الگوریتم‌های هوشمند مقاوم و بهینه، برای کنترل ربات حتی بدون در نظر گرفتن معادلات دینامیکی آن پیشنهاد شده است.

این پایان‌نامه ابتدا به معرفی ربات تعادلی کوچکی به نام «زحل» پرداخته و سپس با بهره گیری از روش‌های غیرخطی (مد لغزشی) و هوشمند (شبکه عصبی فازی) به کنترل ربات می‌پردازد. لازم به ذکر است ربات زحل نه به عنوان یک وسیله‌ی نقلیه که تحت عنوان یک ریز ربات مطرح می‌شود. در پیاده‌سازی عملی نشان می‌دهیم که روش کنترل مد لغزشی به عنوان یک کنترل‌کننده‌ی مقاوم که بر پایه‌ی مدل سیستم ساخته می‌شود، توانایی کنترل ربات در بروز اغتشاشات خارجی را دارد، اما این روش نوسانات شدیدی را به دنبال داشته و خطای ردگیری زیادی دارد. پس به سراغ طراحی یک شبکه عصبی- فازی برای کنترل همزمان تعادل و مسیر حرکت ربات رفته و نشان می‌دهیم علی‌رغم توانایی کنترلی مناسب و نوسانات کم، این کنترل‌کننده‌ها در عمل زمان لازم برای آموزش را پیدا نکرده و به علت کوچک بودن ابعاد ربات و کم بودن تاخیر مکانیکی، نمی‌توانند با اغتشاشات خارجی مواجه شوند. برای برطرف کردن این مشکل، ترکیبی خطی از کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی و شبکه عصبی- فازی ارائه‌شده است که تابع ترکیب‌کننده‌ای همواره به تلفیق خروجی کنترل‌کننده‌ها پرداخته و بر اساس ضریب خطای ورودی، درصدی از سیگنال‌های کنترلی را به خروجی منتقل می‌سازد.

کلمات کلیدی: ربات تعادلی، ربات متحرک، پاندول معکوس دوچرخ، عصبی فازی، مد لغزشی، ربات دوچرخ.

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

۱- فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مزایای ربات تعادلی در مقایسه با ربات‌های متحرک ۴

۱-۳-هدف پایان‌نامه ۷

۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۸

۱-۵- جمع‌بندی ۱۰

۲- فصل دوم : مروری بر فعالیت های پیشین ۱۱

۲-۱- مقدمه ۱۲

۲-۲- بررسی مقالات و پایان‌نامه‌های پیشین ۱۳

۲-۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۰

۳- فصل سوم : پیش زمینه ۲۲

۳-۱- روش مدولاسیون پهنای پالس ۲۳

۳-۲- روش کنترل مد لغزشی ۲۴

۳-۲-۱- مقدمه ۲۴

۳-۲-۲- سطح لغزش ۲۵

۳-۲-۳- طراحی کنترل‌کننده ۲۶

۳-۳- شبکه‌های عصبی فازی ۲۸

۳-۳-۱- شبکه‌های عصبی پیش خور ۲۸

۳-۳-۲- شبکه‌های عصبی بازگشتی ۲۹

۳-۴- منطق فازی ۲۹

۳-۴-۱- انواع شبکه عصبی-فازی و نورو-فازی ۳۰

۳-۴-۲- شبکه عصبی فازی استفاده‌شده در این پژوهش ۳۱

۳-۵- جمع‌بندی ۳۶

۴- فصل چهارم : مدل‌سازی دینامیکی و سینماتیکی ربات ۳۷

۴-۱- مقدمه ۳۸

۴-۲- استخراج معادلات سینماتیکی ربات ۳۹

۴-۳- روابط موقعیت زمان گسسته‌ی ربات ۴۱

۴-۴- استخراج معادلات دینامیکی ۴۲
۴-۵- مدل‌سازی دینامیکی موتورها ۴۸
۴-۶- جمع‌بندی ۵۰

۵- فصل پنجم: انتخاب قطعات و ساخت ربات تعادلی ۵۱
۵-۱- معرفی ساختار ۵۲
۵-۲- مراحل ساخت ۵۳
۵-۳- انتخاب قطعات ۵۵
موتور ۵۵
باتری ۵۶
حسگرها ۵۶
بدنه (شاسی) ۵۷
۵-۴- طراحی مکانیکی ۵۸
۵-۵- طراحی الکترونیکی ۵۸
۵-۶- ساخت ۶۰

۶- فصل ششم: طراحی کنترل‌کننده و شبیه‌سازی عملکرد ۶۱
۶-۱- مقدمه ۶۲
۶-۲- طراحی مسیر ۶۲
۶-۳- طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی تفکیک‌شده ۶۳
۶-۴- طراحی کنترل‌کننده عصبی – فازی ۷۴
۶-۵- تلفیق کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی و کنترل‌کننده عصبی - فازی ۸۰
۶-۶- جمع‌بندی ۸۷

۷- فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۸
۷-۱- نوآوری تحقیق ۸۹
۷-۲- نتیجه‌گیری ۸۹
۷-۳- پیشنهادها ۹۰

۸- منابع ۹۲

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ وضعیت تعادل ربات در صورت اضافه شدن بار نامتعادل ٦
شکل ۱-۲: : نمایش نحوه حرکت ربات تعادلی و ربات معمولی در سطح شیب‌دار ٦
شکل ۱-۳: ربات تعادلی طراحی‌شده در این پایان‌نامه ۷
شکل ۲-۱: ربات JOE ۱۳
شکل ۲-۲: ربات Segway ۱٤
شکل ۲-۳: ربات ساخته‌شده توسط کیم ۱٦
شکل ۲-۴: ربات تعادلی طراحی‌شده به وسیله لونگ ۱۸
شکل ۲-۵: ربات چارمر هنگام حمل یک ظرف سبک ۱۹
شکل ۲-۶: نمودار زمانی ربات های تعادلی ساخته‌شده از سال ۲۰۰۰ تاکنون ۲۱
شکل ۳-۱: شکل موج یک سیگنال PWM ۲٤
شکل ۳-۲: پدیده‌ی وزوز ۲۷
شکل ۳-۳ : نمای کلی شبکه عصبی پیشخور ۲۸
شکل ۳-۴: نمایی از یک شبکه عصبی بازگشتی ۲۹
شکل ۳-۵: شبکه عصبی فازی استفاده‌شده در این پژوهش ۳۱
شکل ۴-۱: شمای سینماتیک ربات تعادلی دوچرخ ۳۹
شکل ۴-۲: نمایش وضعیت جابه‌جایی ربات ٤۱
شکل ۴-۳: شمای سه بعدی ربات تعادلی دوچرخ ٤٤
شکل ۴-۴: مدل مداری موتور مغناطیس دائم ٤۸
شکل ۵-۱: بلوک دیاگرام ربات تعادلی زحل ۵۲
شکل ۵-۲: ربات تعادلی CPG ۵۳
شکل ۵-۳: موتور انتخاب شده برای ربات ۵٦
شکل ۵-۴: حسگرهای ربات ۵۷
شکل ۵-۵: چرخ ربات ۵۸
شکل ۵-۶: نمای از فیبر مدار چاپی طراحی شده ۵۹
شکل ۵-۷: ربات زحل ٦۰
شکل ۶-۱: : مسیر طراحی شده برای ربات تعادلی ٦۳
شکل ۶-۲: بلوک دیاگرام کنترل کننده مد لغزشی برای کنترل مسیر ٦۸
شکل ۶-۳: نتیجه ردگیری کنترل کننده مد لغزشی در محیط شبیه سازی ٦۸
شکل ۶-۴: نتیجه ردگیری کنترل کننده مدلغزشی برای ربات واقعی ٦۹
شکل ۶-۵: انحراف زاویه بدنه برای کنترل کننده مد لغزشی در محیط شبیه سازی ۷۰
شکل ۶-۶: انحراف زاویه بدنه برای کنترل کننده مد لغزشی برای ربات واقعی ۷۰
شکل ۶-۷: نمایش خطای دائمی زاویه ی بدنه ربات ایجاد شده بر اثر خطای انتگرال گیری ۷۱
شکل ۶-۸: چگونگی اصلاح خطا با ضریب اصلاح $k_q = 0.05$ ۷۲
شکل ۶-۹: چگونگی اصلاح خطا با ضریب اصلاح $k_q = 0.1$ ۷۲
شکل ۶-۱۰: ایجاد نوسانات زیاد درسیگنال زاویه ، در صورت انتخاب ضریب تصحیح بزرگ ۷۲
شکل ۶-۱۱: سیگنال اصلاح شده با انتخاب ضریب اصلاح مناسب ۷۳

شکل ۶-۱۲: نتیجه ردگیری برای کنترل کننده مد لغزشی پس از اصلاح خطای انتگرال گیری ۷۳
شکل ۶-۱۳: بلوک دیاگرام شبکه عصبی- فازی برای کنترل ربات ۷۵
شکل ۶-۱۴: نتیجه شبیه سازی ردگیری با استفاده از شبکه عصبی فازی..... ۷۵
شکل ۶-۱۵: نوسانات بدنه با استفاده از شبکه عصبی فازی در محیط شبیه سازی ۷۶
شکل ۶-۱۶: نتیجه ردگیری در استفاده از کنترل کننده عصبی- فازی برای ربات واقعی ۷۶
شکل ۶-۱۷: نوسانات بدنه در پیاده سازی عملی کنترل کننده ی فازی - عصبی ۷۷
شکل ۶-۱۸: نمایش مسئله ردگیری برای ۹ گره در لایه ی قوانین ۷۸
شکل ۶-۱۹: نمایش نوسانات بدنه در حالت استفاده از ۹ گره در لایه‌ی قوانین ۷۸
شکل ۶-۲۰: پاسخ کنترل کننده عصبی – فازی به ورود اغتشاشات نابهنگام ۷۹
شکل ۶-۲۱: پاسخ کنترل کننده مدلغزشی به ورود اغتشاشات نابهنگام ۸۰
شکل ۶-۲۲: نحوه استفاده از ترکیب کننده برای تلفیق دو کنترل کننده ۸۱
شکل ۶-۲۳: بلوک دیاگرام کنترل کننده‌ی ترکیب شده‌ی پیشنهادی ۸۳
شکل ۶-۲۴: ردگیری با استفاده از کنترل کننده ترکیبی درحضور اغتشاشات ۸۳
شکل ۶-۲۵: نوسانات بدنه در حضور اغتشاش خارجی و با بهره گیری از کنترل کننده ترکیبی..... ۸۴
شکل ۶-۲۶: نمایش سیگنال های خطا در کنار نحوه‌ی به روز رسانی وزن های ترکیب کننده..... ۸۵
شکل ۶-۲۷: نحوه ردگیری و خطای بدنه برای مسیر بیضوی..... ۸۵
شکل ۶-۲۸: نحوه ردگیری و خطای بدنه برای مسیر مارپیچ ۸۶
شکل ۶-۲۹: بلوک دیاگرام استفاده شده در متلب ۸۶

فهرست جدول‌ها

جدول ۴-۱: علامت‌های اختصاری استفاده‌شده در مدل‌سازی سینماتیکی ۳۹
جدول ۴-۲: نمادهای استفاده‌شده در مدل‌سازی دینامیکی ٤٥
جدول ۴-۳: نمادهای مورد استفاده در مدل‌سازی موتور مغناطیس دائم ٤٨
جدول ۵-۱: وزن قطعات مختلف ربات ٦٠
جدول ۶-۱ پارامترهای طراحی کنترل کننده مد لغزشی..... ٦٨
جدول ۶-۲: پارامترهای طراحی برای کنترل کننده عصبی - فازی..... ٧٤
جدول ۶-۳: نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل کننده با تعداد مختلقی گره در لایه‌ی قوانین ٧٧

۱- فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

پاندول معکوس یک مسئله‌ی سنتی و مشهور در دینامیک و کنترل به شمار می‌رود که ناپایداری و ساختار غیرخطی آن باعث شده تا به عنوان پیش الگویی[1] جهت بررسی نظریه‌های کنترلی مورد استفاده قرار گیرد [1] و [2]. گاری و آونگ برگشته[2] یکی از مسائل اصلی مطرح‌شده با استفاده از قضیه پاندول معکوس است این ساختار از یک وسیله‌ی چرخ دار تشکیل‌شده که آونگی به صورت وارونه روی آن قرارگرفته و هدف اصلی آن کنترل زاویه‌ی پاندول از طریق جابه‌جایی وسیله‌ی زیرین است. این مسئله‌ی مشهور اگرچه ممکن است مثال‌های فراوانی در دنیای واقعی داشته باشد اما تا سالیان زیادی به عنوان یک الگوی آزمایشگاهی برای برقراری تعادل اجسام ناپایدار مطرح بود و نمود عملی از آن وجود نداشت. سال‌های ابتدایی قرن ۲۱ را می‌توان شروع ارائه‌ی الگوی جدیدی تحت عنوان پاندول معکوس دوچرخ[3] دانست [3]. این مسئله به زودی تا آنجا رشد کرد که در فاصله زمانی اندکی به اختراع وسیله‌ی نقلیه دوچرخ[4] انجامید [4].

با نگاهی دقیق‌تر حتی می‌توان پاندول معکوس دوچرخ را به عنوان الگویی ساده از بدن انسان تلقی کرد که با وجود ناپایداری، همواره نیاز به حفظ تعادل در هنگام ایستادن، راه رفتن و دویدن را دارد.

مطرح‌شدن ایده‌ی ربات‌های تعادلی دوچرخ[5] که با الگو گرفتن از پاندول معکوس بوده، افق جدیدی به روی دنیای ربات‌های متحرک گشوده است. اما این ربات‌ها سیستم‌هایی غیرخطی، ناپایدار، تزویج شده[6] و درجه بالا هستند از این رو برای مدل‌سازی و کنترل آنان نیاز به حجم بالایی از محاسبات می‌باشد [5]، [6].

مسئله اصلی در کنترل ربات تعادلی، داشتن کمترین لرزش، مقابله با اغتشاشات خارجی و پیمودن مسیری مشخص شده است، اما باید در نظر داشت که کنترل این وسیله کار چندان ساده‌ای نیست

[1] Prototype
[2] Cart-Inverted pendulum
[3] Two-Wheeled inverted pendulum
[4] Two-Wheeled vehicle
[5] Two-Wheeled balancing Robot
[6] Coupled

چراکه علاوه بر غیرخطی بودن شدید معادلات سیستم و وجود عدم قطعیت‌های[1] فراوان، تعداد بازخوردهای کنترلی، کمتر از درجه‌های آزادی سیستم بوده و برخورداری از قیود غیرهولونومیک[2]، کنترل سیستم را با چالش‌های شدیدی روبه رو می‌سازد [7].

اکثر تحقیقات صورت گرفته روی ربات تعادلی، یا به منظور نشان دادن توانایی یک کنترل‌کننده در متعادل‌سازی سیستم‌های ناپایدار غیرخطی است [7]، [8]، [9]و [10]. یا این ربات را تحت عنوان یک وسیله نقلیه دوچرخ معرفی نموده است [11]، [12]. اما در این بین کمتر به معرفی این ربات تحت عنوان یک ربات متحرک خودکار[3] پرداخته شده است درحالی که ربات‌های متحرک حجم قابل توجهی از مطالعات رباتیک را به خود معطوف ساخته است [13].

ربات‌های متحرک اغلب در ساختارهای سه چرخ یا چهارچرخ معرفی می‌شوند [14] ولی در اکثر موارد تنها دو محور حرکتی برای ربات وجود دارد که مستقیم به موتورهای ربات متصل می‌شوند(به غیر از ربات‌های چند جهتی). وجود چرخ‌های هرز گرد در این‌گونه ربات‌ها اگرچه باعث برقراری تعادل است اما توانایی حرکت در مسیرهای ناهموار و همچنین امکان عبور از موانع کوچک را از ربات سلب می‌کند. علاوه بر آن به علت صرف‌نظر کردن از دینامیک چرخ‌های هرز گرد و وجود اصطکاک، عواملی چون: دینامیک‌های مدل نشده و عدم قطعیت‌های پارامتری وارد سیستم می‌شوند [15]که منجر به افزایش خطای کنترل‌کننده‌ها می‌گردد و لذا توان کنترلی بیشتری برای ردگیری می‌طلبد.

اگر ربات تعادلی دوچرخ را یک ربات متحرک خودکار در نظر بگیریم، علاوه بر حفظ تعادل، مسئله‌ی جدیدی تحت عنوان پیمایش مسیر[4]، در دستور کار قرار خواهدگرفت که فرایند کنترل را کمی پیچیده می‌نماید [8]. داشتن یک ربات متحرک با چنین پیچیدگی‌هایی چندان معقول به نظر نمیرسد بالاخص زمانی که ساختارهای سه چرخ و چهارچرخ شرایط بهتری را برای کنترل این گونه ربات‌ها رغم میزنند

[1] Uncertainty
[2] Nonholonomic
[3] Automatic Mobile Robot
[4] Tracking

اما باید در نظر داشت که اضافه شدن این پیچیدگی ها، محاسنی را نیز به دنبال خواهد داشت که در ادامه به شرح آن می‌پردازیم.

ربات‌های متحرک فراوانی وجود دارند که تحت عنوان ربات‌های هوشمند مسابقه‌ای مطرح می‌شوند، ربات تعقیب خط[1]، کاوشگر، فوتبالیست‌های سایز کوچک و سایز متوسط، امدادرسان[2]، ربات درخانه[3]، موش هوشمند[4] و.... نمونه‌هایی از این دسته به شمار می‌روند. در کنار آن دسته‌ی دیگری از ربات‌های متحرک تحت عنوان ریز ربات‌ها[5] معرفی می‌شوند که معمولاً برای مقاصد کاوشگرانه، نمایشی، جاسوسی و .... مورد استفاده هستند. اغلب این ربات‌ها اگر چه برای کاربردهای خاص و روی سطوح تقریبا هموار مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما به علت ابعاد کوچکشان همواره با مشکلاتی روبه رو هستند که لازم است پیش از مطرح کردن مزایای ساختار تعادلی، به عنوان کردن آنها بپردازیم.

داشتن ابعاد کوچک باعث می‌شود تا این ربات ها از طراحی مکانیکی ساده‌ای برخوردار باشند. معمولا کوپلینک بین موتورها و چرخ ها به صورت مستقیم صورت گرفته و ربات از مکانیزه‌هایی نظیر: تعلیق، دیفرانسیل و... بی بهره است. لذا در موارد چهارچرخ، هیچگاه نمیتوان تماس هر چهار چرخ را با زمین تظمین کرد و وجود ناهمواری‌های جزئی باعث عدم درگیری یکی از چرخ ها با زمین می‌گردد. در صورتی که چرخ درگیر نشده، به یکی از محرک‌ها کوپل شده باشد؛ عملا حرکت روی مسیر طراحی شده برای ربات ناممکن می‌گردد. یکی از دلایل مهم استفاده از ساختار سه‌چرخ توجه به همین امر می‌باشد. ساختار سه‌چرخ اغلب دارای دو چرخ محرک و یک چرخ هرزگرد است. وجود چرخ هرزگرد باعث می‌شود تا ربات در عبور از موانع کوچک و مواجهه با شیب ها و ناهمواری هرچند کم؛ با مشکل مواجه شود به علاوه به علت نیاز به برقراری تعادل مخصوصا با افزایش ارتفاع ربات، حداقل فاصله‌ای

[1] Line follower
[2] Rescue
[3] At-Home
[4] Micro mouse
[5] Micro Robot

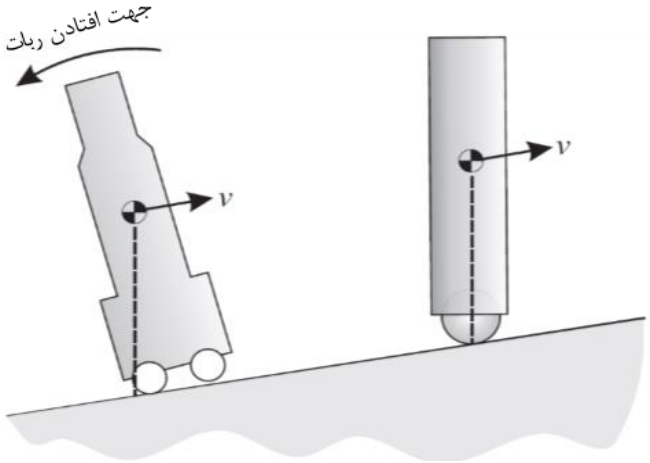
میان تکیه گاه‌های ربات باید رعایت شود که قیودی به طراحی مکانیکی اضافه کرده و سبب بالارفتن ابعاد ربات می‌گردد. با این مقدمه به سراغ معرفی مزایای ساختار تعادلی در ربات‌های متحرک می‌رویم.

۱-۲- مزایای ربات تعادلی در مقایسه با ربات‌های متحرک

استفاده از مزایای ساختار تعادلی در طراحی ربات‌های متحرک می‌تواند باعث افزایش کارایی و قابلیت‌های حرکتی آنان شود. این مزایا عبارت‌اند از:

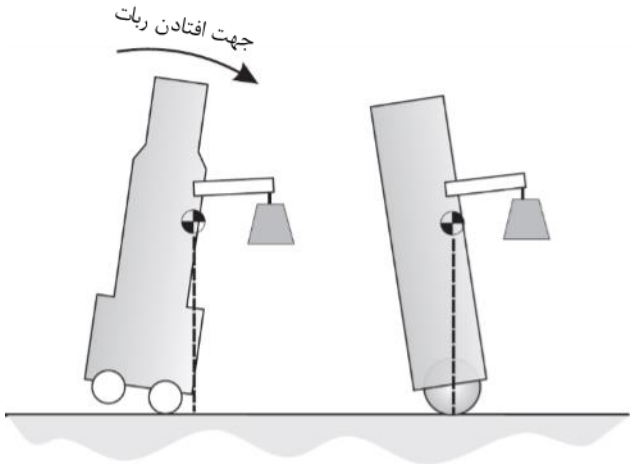
۱- تمرکز نیروی وزن روی نقاط محرک یا به عبارت دیگر حذف تکیه‌گاه‌های اضافی: به علت اینکه ربات همواره روی دو تکیه‌گاه قرارگرفته است تماس این تکیه‌گاه‌ها با زمین در حالت تضمین‌شده‌تری نسبت به حالت سه چرخ و مخصوصاً چهارچرخ دارد. به علاوه در حرکت روی مسیرهای ناهموار احتمال گیر کردن چرخ‌های هرز گرد به برآمدگی‌ها و یا افتادن این چرخ در فرورفتگی‌ها که مانع از حرکت ربات شده یا در حرکت آن اختلال ایجاد می‌کند وجود ندارد.

۲- قرار گرفتن مرکز جرم در راستای عمود: این کمک را به ربات می‌کند تا حتی در مسیرهای شیب‌دار بتواند تعادل خود را حفظ نماید. این در حالی است که در ربات‌های متحرک سه چرخ و چهارچرخ با وجود تعادل ساختاری روی زمین مسطح، در صورت حرکت در مسیرهای شیب‌دار، تعادل ربات با مشکل مواجه می‌شود، این مشکل در ربات‌های مرتفع و علی‌الخصوص در حرکت روی شیب‌های منفی به وضوح قابل‌مشاهده است. شکل(۱-۱) به درک واضح‌تری از این قضیه کمک می‌کند.



شکل ۱-۱: : نمایش نحوه حرکت ربات تعادلی و ربات معمولی در سطح شیب‌دار*[35]*

۳- امکان برقراری تعادل در صورت اضافه‌شده بار نامتعادل: به علت اهمیت مسئله حفظ تعادل و وجود فرآیند کنترلی برای دستیابی به آن، اضافه شدن بار نامتعادل تعادل ربات را برهم نخواهد زد و ربات همچنان در حالت تعادل باقی می‌ماند. این در حالی است که در نوع معمولی، به علت عدم توجه به این مسئله، بار اضافه‌شده می‌تواند باعث برهم زدن تعادل ربات گردد. این امر در شکل(۱-۲) به وضوح قابل‌مشاهده است.

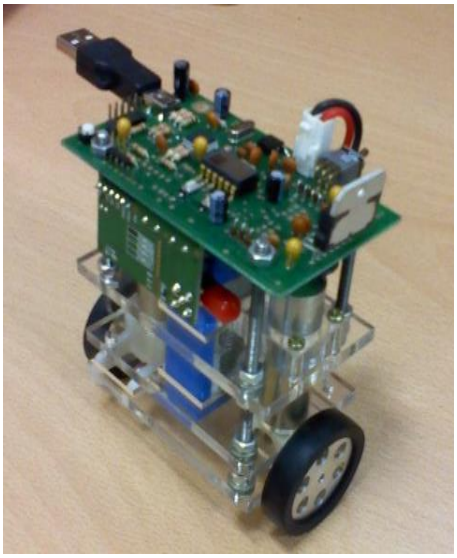


شکل ۱-۲ وضعیت تعادل ربات در صورت اضافه شدن بار نامتعادل*[35]*

۱-۳- هدف پایان‌نامه

این پژوهش دو هدف اصلی را دنبال می‌کند

۱- استفاده از مزایای ربات‌های تعادلی در طراحی ربات‌های متحرک: برای این منظور ربات تعادلی متحرکی به نام "*زحل*" معرفی شده است. این ربات دارای ساختاری کوچک، سبک و هوشمند است که علاوه بر پیمایش مسیر دلخواه قابلیت حفظ تعادل روی دو چرخ را دارد. از این رو آن را می‌توان به عنوان ساختاری جدید برای ریز ربات‌های هوشمند برشمرد. بدنه‌ی ربات از جنسی شفاف و شیشه‌ای انتخاب‌شده به گونه‌ای که تمام اتصالات و قطعات استفاده‌شده با چشم قابل رویت می‌باشد. ربات تعادلی طراحی‌شده در شکل(۱-۳) به نمایش در آمده است.



شکل ۱-۳: ربات تعادلی معرفی‌شده در این پایان‌نامه

۲- تلفیق روش‌های هوشمند و کلاسیک برای دستیابی به کنترل کننده‌ای مناسب در مواجهه با اغتشاشات خروجی: به این منظور، خروجی دوکنترل‌کننده‌ی مدلغزشی و شبکه‌ی عصبی-فازی با یکدیگر به صورت خطی ترکیب شده و بر اساس مناسب بودن جواب هر کنترل کننده در شرایط خاص، به ربات اعمال میگردد، این امر سبب می شود تا ربات علاوه بر کنترل مناسب در حالت بدون اغتشاش، بتواند در مقابل بروز اغتشاشات نیز از خود عمل مناسبی نشان دهد.

مقاصد اصلی کنترلی در ادامه بیان می‌گردد، ربات طراحی‌شده باید بتواند:

۱- تعادل خود را روی دوچرخ حفظ کند.

۲- در صورت ورود اغتشاشات محیطی محدود تعادل خود را از دست ندهد.

۳- مسیر طراحی‌شده را با کمترین خطای ممکن پیمایش کند.

۴- در حین پیمایش مسیر تعادل خود را از دست ندهد.

۵- قابلیت عبور از مسیرهای با شیب کم را داشته باشد.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه:

در ادامه و با شروع فصل دوم، مروری بر فعالیت‌های گذشته در زمینه‌ی ربات‌های تعادلی صورت گرفته و مقالات و پایان‌نامه‌های نوشته‌شده در این زمینه اجمالاً مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل سوم توضیحاتی در مورد مفاهیم اولیه‌ی به‌کاررفته در این پایان‌نامه بیان‌شده است، ابتدا روش پهنای پالس که برای کنترل محرک‌های ربات استفاده‌شده تعریف گردیده و در ادامه‌ی فصل مباحث اصلی کنترلی به ترتیب استفاده در پیاده‌سازی‌ها عنوان می‌گردد. بر این اساس: طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی به تفصیل بیان‌شده، مروری اجمالی بر مفهوم شبکه‌های عصبی-فازی انجام‌گرفته و در نهایت نحوه طراحی یک شبکه عصبی- فازی استفاده‌شده برای کنترل ربات معرفی‌شده است.

فصل چهارم به استخراج معادلات کلی سیستم اختصاص دارد. در ابتدای این فصل و برای مشخص شدن قیود سینماتیکی حاکم بر سیستم، معادلات سینماتیکی ربات استخراج‌شده است، از طرفی به علت لزوم پیاده‌سازی نتایج شبیه‌سازی روی ربات، نیاز به دانستن برخی تبدیلات مختصات و همچنین معادلات سینماتیکی ربات در فضای گسسته است لذا معادلات سینماتیکی زمان گسسته نیز به دست آمده است. پس از استخراج معادلات سینماتیک به سراغ نوشتن معادلات حرکت می‌رویم. معادلات دینامیکی ربات تعادلی بر اساس روش معروف اویلر-لاگرانژ استخراج‌شده است این معادلات ساختاری کاملاً غیرخطی دارد. در ادامه از فرم حالت معادلات استفاده شده و برای کاهش مختصات تعمیم‌یافته و حذف ضریب لاگرانژ از روشی مرسوم استفاده می‌شود و نهایتاً معادلات دینامیکی پایانی به دست می‌آید،