|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| download_UT_arm | | | |
| دانشكده علوم و فنون نوین | | | |
| گروه بین رشته­ای فناوری | | | |
|  | | | |
| عنوان پایان­نامه | | | |
| توسعه و بهبود کنترلرهای سینماتیکی  برای پایدارسازی و تعقیب مسیر ربات­های پایه متحرک چرخدار  نام دانشجو:  پویا پناهنده  استادان راهنما:  دكتر بهرام تارویردی­زاده  دكتر خلیل عالی­پور  استاد مشاور:  دکتر علیرضا هادی  پايان‌نامه براي دريافت درجه کارشناسي ارشد  در رشته مهندسی مکاترونیک  شهریور 1398 | | | |
|  | | | |



|  |
| --- |
| download_UT_arm |
| دانشكده علوم و فنون نوین |
| گروه بین رشته­ای فناوری |

عنوان پایان­نامه

توسعه و بهبود کنترلرهای سینماتیکی   
برای پایدارسازی و تعقیب مسیر ربات­های پایه متحرک چرخدار

نام دانشجو:

پویا پناهنده

استادان راهنما:

دكتر بهرام تارویردی­زاده

دكتر خلیل عالی­پور

استاد مشاور:

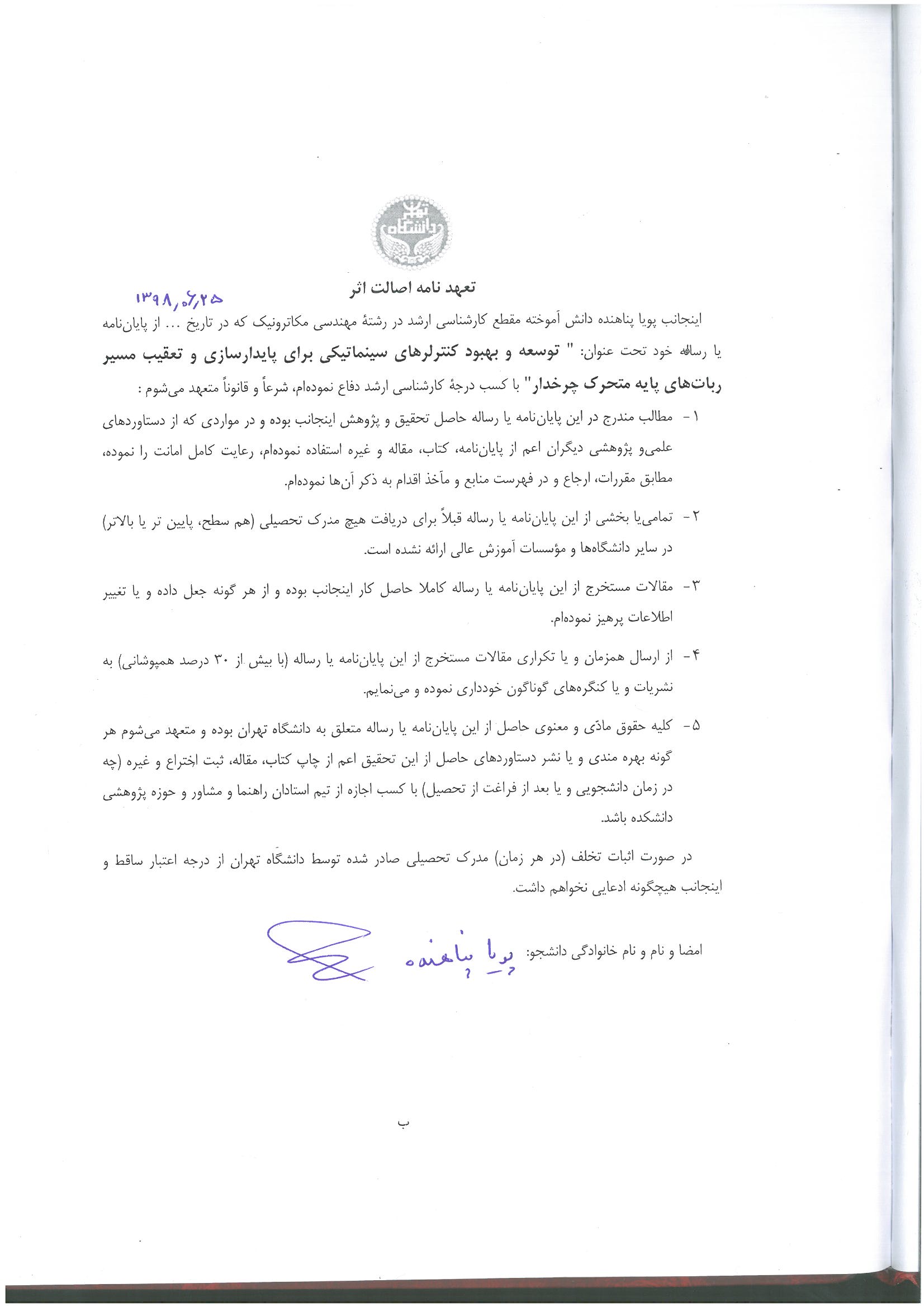
دکتر علیرضا هادی

پايان‌نامه براي دريافت درجه کارشناسي ارشد

در رشته مهندسی مکاترونیک

شهریور 1398





تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که همواره بی ادعا مرا یاری کرده‌اند.

با تشکر و تقدیر از:

اساتید راهنما ی گرامی ، که راه گشای من در مسیر انجام این پایان نامه بودند و خانواده ی عزیزم که این فرصت را برای من فراهم کردند.همچنین از همه ی دوستان و عزیزانی که در این مدت در زمینه های مختلف، یاریگر بنده بودند

چکیده

ربات­های متحرک چرخدار به طور حتم نقش مهمی در آینده ایفا خواهند کرد. بنابراین، کنکاش در محدوده چالش­های تئوری و عملی آنان که در حوزه­های مختلف کاربرد آن­ها بروز می­کند، الزامی به نظر می­رسد. یکی از این چالش­ها، کنترل خودکار حرکت ربات است. این مسئله خود از دو منظر کلی قابل بررسی است: تعقیب مسیر و پایدارسازی نقطه­ای ربات. این مسائل همچنین باید به صورت جداگانه برای هر یک از انواع ربات­های متحرک چرخدار، شامل ربات متحرک چرخدار با دو چرخ دیفرانسیلی[[1]](#footnote-2)، ربات­های متحرک چرخدار خودرو-مانند[[2]](#footnote-3) و ربات­های شامل چند پلتفرم مانند ربات ترکتور-تریلر[[3]](#footnote-4) مورد پژوهش قرار گیرد. از لحاظ تئوری پژوهش­های صورت گرفته به دو دسته­ی کلی قابل تقسیم است. یکی تحقیقاتی که با استفاده از سینماتیک ربات انجام پذیرفته و دیگر پژوهش­هایی که با توجه به دینامیک حاکم بر ربات صورت گرفته است. اصولا پژوهش در حوزه سینماتیک ربات از یک سو با سهولت بیشتری همراه هست و همچنین در زمان پیاده سازی آن بر روی ربات در عمل، در دسترس­تر است و از طرف دیگر با خطا و مشکل کم­تری روبرو خواهد بود. بنابراین در این پایان­نامه سعی شده است که عمده فعالیت­های انجام شده در حوزه سینماتیک باشد. در این پایان نامه در ابتدا، مسئله پایدار سازی نقطه­ای از طریق تبدیلات هندسی در مختصات کارتزین تشریح شده است که هدف اصلی در آن رسیدن به دو قانون کنترلی مجزا است که شرایطی را فراهم می­کند تا ربات را از شرایط اولیه به موقعیت و جهت­گیری مطلوب با دو مانور متفاوت انتقال دهد. در واقع وجود دو جواب مجزا باعث اضافه شدن یک درجه آزادی به مسئله پایدارسازی نقطه­ای می­شود. این مزیت می­تواند در شرایط وجود موانع و یا همکاری چندین ربات مفید فایده باشد. بعلاوه که عملکرد کنترلر در وجود موانع نیز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. سپس برای نخستین بار یک روش مبتنی بر شبکه عصبی برای تنظیم خودکار و برخط ضرایب موجود در یک کنترلر برای مسئله تعقیب مسیر ارائه شده است. روش پیشنهادی دخالت انسان برای تنظیم ضرایب را کاهش داده، پاسخ سیستم را بهینه می­کند و همچنین نرخ همگرایی خطاهای مربوط به موقعیت ربات را افزایش می­دهد. همچنین پایداری کلی روش پیشتهادی شامل روش تنظیم ضرایب و کنترلر اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. روش ارائه شده شامل دو شبکه عصبی با ساختار ساده و حجم محاسبات کم است. در نهایت نیز، کنترلر سینماتیکی برای ربات ترکتور-تریلر ارائه شده است که برای هر دو وضعیت اتصال بر روی محور یا خارج از آن برای ربات و کشنده­های متفاوت کاربرد دارد و خواسته مورد نظر در مورد تریلر را که دنبال کردن مسیر زمانی خاصی است، برآورده می­کند. در ضمن محدود بودن ورودی­ها و حالت­های کنترلی برای ترکتور نیز تضمین می­شود تا به پایداری کل سیستم لطمه­ای وارد نشود.

کلمات کلیدی: پایدارسازی، تعقیب مسیر، ربات پایه متحرک چرخدار، تابع لیاپانوف، شبکه عصبی.

**فهرست مطالب**

[1- فصل اول 16](#_Toc26564838)

[1-1- مقدمه 17](#_Toc26564839)

[1-2- انواع ربات­های چرخدار 17](#_Toc26564840)

[1-2-1- ربات­های دارای یک چرخ 17](#_Toc26564841)

[1-2-2- ربات­های دارای دو چرخ 18](#_Toc26564842)

[1-2-3- ربات­های دارای سه چرخ 19](#_Toc26564843)

[1-2-4- ربات­های دارای چهار چرخ 19](#_Toc26564844)

[1-2-5- ربات­های دارای پنج چرخ و بیشتر 21](#_Toc26564845)

[1-3- کاربردهای ربات­های چرخدار 22](#_Toc26564846)

[1-4- مرور ادبیات 22](#_Toc26564847)

[1-4-1- ادبیات مسئله پایدارسازی ربات متحرک چرخدار دیفرانسیلی 23](#_Toc26564848)

[1-4-2- ادبیات مسئله مربوط به بروز رسانی ضرایب و ثوابت موجود در قوانین کنترلی 24](#_Toc26564849)

[1-4-3- ادبیات مربوط به ربات متحرک چرخدار ترکتور-تریلر 25](#_Toc26564850)

[1-5- خلاصه سایر فصول 27](#_Toc26564851)

[2- فصل دوم 28](#_Toc26564852)

[2-1- مقدمه 29](#_Toc26564853)

[2-2- مدل سازی ربات 29](#_Toc26564854)

[2-3- طراحی قانون کنترلی 31](#_Toc26564855)

[2-4- شبیه سازی­های عددی 37](#_Toc26564856)

[2-5- آزمایشات عملی 45](#_Toc26564857)

[2-6- پایدار سازی نقطه­ای همراه با اجتناب از موانع 47](#_Toc26564858)

[2-7- نتیجه‌‌گیری 51](#_Toc26564859)

[3- فصل سوم 52](#_Toc26564860)

[3-1- مقدمه 53](#_Toc26564861)

[3-2- کنترلر سیتماتیکی پایه ربات 53](#_Toc26564862)

[3-3- الگوریتم برخط بروز رسانی ضرایب 55](#_Toc26564863)

[3-4- شبیه سازی­های عددی 60](#_Toc26564864)

[3-5- آزمایشات تجربی 70](#_Toc26564865)

[3-6- تعمیم روش کنترلی به ربات شبه-خودرو 73](#_Toc26564866)

[3-7- نتیجه‌‌‌گیری 74](#_Toc26564867)

[4- فصل چهارم 75](#_Toc26564868)

[4-1- مقدمه 76](#_Toc26564869)

[4-2- مدل‌سازی سیستم سینماتیکی ربات 76](#_Toc26564870)

[4-3- معرفی کنترلر سینماتیکی 78](#_Toc26564871)

[4-4- ترکتور همراه یک تریلر با اتصال بر روی محور ترکتور 79](#_Toc26564872)

[4-5- ترکتور همراه با یک تریلر با اتصال خارج از محور 82](#_Toc26564873)

[4-6- ترکتور همراه با چندین تریلر با اتصال بر روی محور 83](#_Toc26564874)

[4-7- ترکتور شبه-خودرو همراه با یک تریلر متصل بر روی محور 84](#_Toc26564875)

[4-8- شبیه سازی­های عددی و آزمایشات تجربی 85](#_Toc26564876)

[4-9- نتیجه‌‌گیری 93](#_Toc26564877)

[5- فصل پنجم 95](#_Toc26564878)

[6- مراجع 97](#_Toc26564879)

فهرست شکل‌ها

[شکل ‏1‑1ربات یک چرخ موراتا [1] 18](#_Toc26564670)

[شکل ‏1‑2 نمونه­ای از یک ربات دو چرخ 18](#_Toc26564671)

[شکل ‏1‑3 استفاده از سه چرخ برای انتقال قدرت در ربات [1] 19](#_Toc26564672)

[شکل ‏1‑4 ربات چهار چرخ 20](#_Toc26564673)

[شکل ‏1‑5 ربات چهار چرخ مدل تانکی 20](#_Toc26564674)

[شکل ‏1‑6 ربات چهار چرخ مدل خودرو 21](#_Toc26564675)

[شکل ‏1‑7 شماتیکی از ربات مریخ نورد [1] 21](#_Toc26564676)

[شکل ‏2‑1 پیکربندی هدف و کنونی ربات متحرک چرخدار رانده شده دیفرانسیلی 30](#_Toc26564677)

[شکل ‏2‑2 خطای موقعیت ربات در دستگاه مختصات محلی چسبیده به ربات 30](#_Toc26564678)

[شکل ‏2‑3 مسیر کنترلر (2-17). 37](#_Toc26564679)

[شکل ‏2‑4 ورودی­های کنترلر (*2-17*). 37](#_Toc26564680)

[شکل ‏2‑5 خطای کنترلر (*2-17*). 38](#_Toc26564681)

[شکل ‏2‑6 مسیر کنترلر (2-20). 38](#_Toc26564682)

[شکل ‏2‑7 ورودی­های کنترلر (2-20). 38](#_Toc26564683)

[شکل ‏2‑8 خطای کنترلر (2-20). 38](#_Toc26564684)

[شکل ‏2‑9 مسیر کنترلر (*2-20*). شبیه سازی مقایسه­ای نخست. 41](#_Toc26564685)

[شکل ‏2‑10 ورودی­های کنترلر (2-20). شبیه سازی مقایسه­ای نخست. 41](#_Toc26564686)

[شکل ‏2‑11 مسیر کنترلر (2-17). شبیه سازی مقایسه­ای نخست. 41](#_Toc26564687)

[شکل ‏2‑12 ورودی­های کنترلر (2-17). شبیه سازی مقایسه­ای نخست. 41](#_Toc26564688)

[شکل ‏2‑13 مسیر کنترلرهای VFO و FT. شبیه سازی مقایسه­ای نخست. 42](#_Toc26564689)

[شکل ‏2‑14 ورودی­های کنترلرهای VFO و FT. شبیه سازی مقایسه­ای نخست. 42](#_Toc26564690)

[شکل ‏2‑15 مسیر کنترلرهای VFO و FT. شبیه سازی مقایسه­ای دوم 44](#_Toc26564691)

[شکل ‏2‑16 ورودی­های کنترلرهای VFO و FT. شبیه سازی مقایسه­ای دوم. 44](#_Toc26564692)

[شکل ‏2‑17 مسیر کنترلر (2-17). شبیه سازی مقایسه­ای دوم 44](#_Toc26564693)

[شکل ‏2‑18 ورودی­های کنترلر (2-17). شبیه سازی مقایسه­ای دوم. 45](#_Toc26564694)

[شکل ‏2‑19 مسیر کنترلر (2-20). شبیه سازی مقایسه­ای دوم. 45](#_Toc26564695)

[شکل ‏2‑20 ورودی­های کنترلر (2-20). شبیه سازی مقایسه­ای دوم. 45](#_Toc26564696)

[شکل ‏2‑21 مسیر ربات در فرآیند پارک موازی. کنترلر (2-17). 46](#_Toc26564697)

[شکل ‏2‑22 ورودی­های کنترلر (2-17) در پارک موازی. 46](#_Toc26564698)

[شکل ‏2‑23 مسیر ربات در فرآیند پارک موازی. کنترلر (2-20). 47](#_Toc26564699)

[شکل ‏2‑24 ورودی­های کنترلر (2-20) در پارک موازی. 47](#_Toc26564700)

[شکل ‏2‑25 ربات با چرخ­های دیفرانسیلی 47](#_Toc26564701)

[شکل ‏2‑26 موقعیت مانع در مختصات محلی متصل به ربات 49](#_Toc26564702)

[شکل ‏2‑27 فرامین بازدارنده برای ربات در محوطه اثر مانع. 49](#_Toc26564703)

[شکل ‏2‑28 مسئله پایدار سازی نقطه­ای همراه با وجود موانع. 51](#_Toc26564704)

[شکل ‏3‑1 پیکربندی­های حقیقی و مرجع ربات 54](#_Toc26564705)

[شکل ‏3‑2 خطای پیکربندی و مختصات محلی ربات 55](#_Toc26564706)

[شکل ‏3‑3 شماتیک مربوط به شبکه­های عصبی پیشنهادی 57](#_Toc26564707)

[شکل ‏3‑4 بلوک دیاگرام مربوط به شبکه­های عصبی 57](#_Toc26564708)

[شکل ‏3‑5 سناریو اول. 63](#_Toc26564709)

[شکل ‏3‑6 ورودی­های کنترلی. سناریو اول. 63](#_Toc26564710)

[شکل ‏3‑7 تغییرات خطا. سناریو اول. 63](#_Toc26564711)

[شکل ‏3‑8 تغییرات ضرایب. سناریو اول. 64](#_Toc26564712)

[شکل ‏3‑9 سناریو دوم. 64](#_Toc26564713)

[شکل ‏3‑10 سناریو سوم. 64](#_Toc26564714)

[شکل ‏3‑11سناریو چهارم. 65](#_Toc26564715)

[شکل ‏3‑12سناریو پنجم. 65](#_Toc26564716)

[شکل ‏3‑13سناریو ششم. 65](#_Toc26564717)

[شکل ‏3‑14 عملکرد کنترلر در مسیر مربعی شکل 67](#_Toc26564718)

[شکل ‏3‑15 شبیه سازی مقایسه­ا­­ی 69](#_Toc26564719)

[شکل ‏3‑16 خطاها در شبیه سازی مقایسه­ای 69](#_Toc26564720)

[شکل ‏3‑17 ربات متحرک چرخدار 70](#_Toc26564721)

[شکل ‏3‑18 آزمایش اول. 72](#_Toc26564722)

[شکل ‏3‑19 ورودی­های کنترلی. 72](#_Toc26564723)

[شکل ‏3‑20 خطای پیکربندی ربات. ضرایب بروز شونده. آزمایش اول. 72](#_Toc26564724)

[شکل ‏3‑21 خطای پیکربندی ربات. ضرایب ثابت. آزمایش اول. 72](#_Toc26564725)

[شکل ‏3‑22 تغییرات ضرایب. آزمایش اول. 72](#_Toc26564726)

[شکل ‏3‑23 آزمایش دوم. 72](#_Toc26564727)

[شکل ‏3‑24 ربات متحرک چرخدار شبه-خودرو 74](#_Toc26564728)

[شکل ‏4‑1 ترکتور-تریلر با اتصال خارج از محور 77](#_Toc26564729)

[شکل ‏4‑2 ترکتور-تریلر با اتصال بر روی محور 77](#_Toc26564730)

[شکل ‏4‑3 پیکربندی مرجع و حقیقی تریلر 79](#_Toc26564731)

[‏ شکل ‏4‑4 مختصات محلی تریلر و نمایش خطای تعقیب مسیر در آن 79](#_Toc26564732)

[شکل ‏4‑5 ترکتور و سرعت­های تعریف شده برای آن 80](#_Toc26564733)

[شکل ‏4‑6 حرکتهای مختلف ترکتور برای یک حرکت مشخص تریلر 81](#_Toc26564734)

[شکل ‏4‑7 سرعت­های ترکتور و تریلر در پین اتصال 83](#_Toc26564735)

[شکل ‏4‑8 سیستم شامل چندین تریلر و یک ترکتور 83](#_Toc26564736)

[شکل ‏4‑9 ترکتور شبه-خودرو و تریلر در حالت اتصال بر روی محور 85](#_Toc26564737)

[شکل ‏4‑10 سیستم همسان سینماتیکی با سیستم ترکتور شبه-خودرو و تریلر در حالت اتصال بر روی محور 85](#_Toc26564738)

[شکل ‏4‑11 مسیر ربات در شبیه­سازی نخست. 88](#_Toc26564739)

[شکل ‏4‑12 سرعت­های ترکتور در شبیه­سازی نخست. 88](#_Toc26564740)

[شکل ‏4‑13 خطای تریلر در شبیه­سازی نخست. 88](#_Toc26564741)

[شکل ‏4‑14 مسیر ربات در شبیه­سازی دوم. 88](#_Toc26564742)

[شکل ‏4‑15 سرعت­های ترکتور در شبیه­سازی دوم. 88](#_Toc26564743)

[شکل ‏4‑16 خطای تریلر در شبیه­سازی دوم. 88](#_Toc26564744)

[شکل ‏4‑17 مسیر ربات در شبیه­سازی نخست. کنترلر KhM. 89](#_Toc26564745)

[شکل ‏4‑18 سرعت­های ترکتور در شبیه­سازی نخست. کنترلر KhM . 89](#_Toc26564746)

[شکل ‏4‑19خطای تریلر در شبیه­سازی نخست. کنترلر KhM. 89](#_Toc26564747)

[شکل ‏4‑20 ربات ترکتور-تریلر 91](#_Toc26564748)

[شکل ‏4‑21 مسیر ربات در آزمایش نخست. 92](#_Toc26564749)

[شکل ‏4‑22 سرعت زاویه­ای چرخ­های ترکتور در آزمایش نخست. 92](#_Toc26564750)

[شکل ‏4‑23 خطای تریلر در آزمایش نخست. 92](#_Toc26564751)

[شکل ‏4‑24 مسیر ربات در آزمایش دوم. 92](#_Toc26564752)

[شکل ‏4‑25 سرعت زاویه­ای چرخ­های ترکتور در آزمایش دوم. 92](#_Toc26564753)

[شکل ‏4‑26 خطای تریلر در آزمایش دوم. 92](#_Toc26564754)

[شکل ‏4‑27 مسیر ربات در آزمایش نخست. کنترلر KhM. 93](#_Toc26564755)

[شکل ‏4‑28 سرعت زاویه­ای چرخ­های ترکتور در آزمایش نخست. 93](#_Toc26564756)

[شکل ‏4‑29 خطای تریلر در آزمایش نخست. کنترلر KhM. 93](#_Toc26564757)

فهرست جداول

[جدول ‏2‑1 ضرایب کنترلی در شبیه سازی نخست 38](#_Toc26564758)

[جدول ‏2‑2 ضرایب کنترلر VFO در شبیه سازی­های مقایسه­ای 40](#_Toc26564759)

[جدول ‏2‑3 ضرایب کنترلر FT در شبیه سازی­های مقایسه­ای 40](#_Toc26564760)

[جدول ‏2‑4 ضرایب کنترلرهای (2-17) و (2-20) در شبیه سازی مقایسه­ای نخست 40](#_Toc26564761)

[جدول ‏2‑5 معیار عملکرد الگوریتم­های کنترلی در شبیه سازی مقایسه­ای نخست 40](#_Toc26564762)

[جدول ‏2‑6 ضرایب کنترلرهای (2-17) و (2-20) در شبیه سازی مقایسه­ای دوم 42](#_Toc26564763)

[جدول ‏2‑7 معیار عملکرد الگوریتم­های کنترلی در شبیه سازی مقایسه­ای دوم 42](#_Toc26564764)

[جدول ‏2‑8 ضرایب کنترلرهای (2-17) و (2-20) در شبیه سازی مقایسه­ای سوم 43](#_Toc26564765)

[جدول ‏2‑9 معیار عملکرد الگوریتم­های کنترلی در شبیه سازی مقایسه­ای سوم 43](#_Toc26564766)

[جدول ‏2‑10 پارامترهای ربات 47](#_Toc26564767)

[جدول ‏2‑11 ضرایب کنترلرهای (2-17) و (2-20) در پارک موازی 47](#_Toc26564768)

[جدول ‏3‑1 محاسبات مربوط به پارامترهای دخیل در فرآیند بروز رسانی 58](#_Toc26564769)

[جدول ‏3‑2 شرایط اولیه برای مسیر دایروی 61](#_Toc26564770)

[جدول ‏3‑3 شرایط اولیه برای مسیر دایروی با موج سینوسی 61](#_Toc26564771)

[جدول ‏3‑4 مقادیر اولیه ضرایب کنترلی در شبیه سازی­ها 61](#_Toc26564772)

[جدول ‏3‑5 پارامترهای مربوط به شبکه­های عصبی 61](#_Toc26564773)

[جدول ‏3‑6 معیار عملکرد محاسبه شده برای تمام سناریوها 62](#_Toc26564774)

[جدول ‏3‑7 مقادیر اولیه ضرایب کنترلی در شبیه سازی­ها 66](#_Toc26564775)

[جدول ‏3‑8 پارامترهای مربوط به شبکه­های عصبی 66](#_Toc26564776)

[جدول ‏3‑9 شرایط اولیه مسیر مربعی 66](#_Toc26564777)

[جدول ‏3‑10 معیار عملکردی برای مسیر مربعی 66](#_Toc26564778)

[جدول ‏3‑11 شرایط اولیه برای شبیه سازی مقایسه­ای 68](#_Toc26564779)

[جدول ‏3‑12 مقادیر انتخاب شده برای ضرایب کنترلر [60] 68](#_Toc26564780)

[جدول ‏3‑13 معیار عملکردی برای شبیه سازی مقایسه­ای 69](#_Toc26564781)

[جدول ‏3‑14 پارامترهای مربوط به ربات 70](#_Toc26564782)

[جدول ‏3‑15 شرایط اولیه در آزمایشات تجربی 71](#_Toc26564783)

[جدول ‏3‑18 معیار عملکردی برای آزمایشات عملی 73](#_Toc26564784)

[جدول ‏4‑1 پارامترهای سیستم 86](#_Toc26564785)

[جدول ‏4‑2 شرایط اولیه برای شبیه­سازی­ها 87](#_Toc26564786)

[جدول ‏4‑3 ثوابت کنترلی در شبیه­سازی­ها 87](#_Toc26564787)

[جدول ‏4‑4 ضرایب کنترلر KhM 87](#_Toc26564788)

[جدول ‏4‑5 شرایط اولیه برای آزمایشات 90](#_Toc26564789)

[جدول ‏4‑6 ضرایب کنترلر برای آزمایشات 90](#_Toc26564790)

[جدول ‏4‑7 ضرایب کنترلر KhM در آزمایشات 91](#_Toc26564791)

[جدول ‏4‑8 شرایط اولیه برای آزمایشات کنترلر KhM 91](#_Toc26564792)

فهرست علائم

|  |  |
| --- | --- |
|  | سرعت خطی |
|  | سرعت زاویه­ای |
|  | سرعت مطلوب خطی |
|  | سرعت مطلوب زاویه­ای |
|  | پیکربندی مطلوب مرکز محور چرخ­های ربات در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت طولی مطلوب ربات در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت عرضی مطلوب ربات در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت دورانی مطلوب ربات در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت طولی حقیقی ربات در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت عرضی حقیقی ربات در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت دورانی حقیقی ربات در دستگاه اینرسی |
|  | پیکربندی حقیقی مرکز محور چرخ­های ربات در دستگاه اینرسی |
|  | خطای طولی ربات در دستگاه اینرسی |
|  | خطای عرضی ربات در دستگاه اینرسی |
|  | خطای دورانی ربات در دستگاه اینرسی |
|  | خروجی شبکه عصبی |
|  | خروجی شبکه عصبی |
|  | ورودی تابع سیگموید |
|  | ورودی تابع سیگموید |
|  | پارامتر مرتبط با شکل تابع سیگموید |
|  | ثوابت کنترلی |
|  | ثوابت کنترلی |
|  | ثوابت کنترلی |
|  | تابع هزینه |
|  | نرخ تغییرات ضرایب کنترلی |
|  | نرخ یادگیری شبکه عصبی |
|  | نرخ یادگیری شبکه عصبی |
|  | نرخ یادگیری شبکه عصبی |
|  | سرعت طولی چرخ­های عقب ربات شبه خودرو |
|  | سرعت طولی چرخ­های جلو ربات شبه خودرو |
|  | سرعت دورانی شاسی ربات شبه خودرو |
|  | جهت­گیری چرخ­های جلو ربات شبه خودرو |
| *LD* | فاصله بین محور چرخ­های عقب و جلوی ربات شبه خودرو |
|  | پیکربندی اولیه مرکز محور چرخ­های ربات در دستگاه اینرسی |
| m | جرم ربات |
| I | لختی دورانی |
|  | انرژی مصرف شده ربات |
|  | ثابت کنترلی |
|  | سرعت خطی تریلر |
|  | سرعت زاویه­ای تریلر |
|  | سرعت خطی ترکتور |
|  | سرعت زاویه­ای ترکتور |
| *L* | فاصله مرکز محور چرخ­های تریلر تا پین اتصال با ترکتور |
| *d* | فاصله مرکز محور چرخ­های ترکتور تا پین اتصال با تریلر |
|  | پیکربندی مرکز محور چرخ­های تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | پیکربندی مرکز محور چرخ­های ترکتور در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت طولی تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت عرضی تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت دورانی تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت طولی ترکتور در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت عرضی ترکتور در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت دورانی ترکتور در دستگاه اینرسی |
| *r* | شعاع هر چرخ |
| *b* | نصف فاصله بین دو چرخ |
|  | سرعت دورانی چرخ راست ربات |
|  | سرعت دورانی چرخ چپ ربات |
|  | پیکربندی مطلوب مرکز محور چرخ­های تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت طولی مطلوب تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت عرضی مطلوب تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | وضعیت دورانی مطلوب تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | سرعت مطلوب خطی تریلر |
|  | سرعت مطلوب زاویه­ای تریلر |
|  | پیکربندی خطا در دستگاه اینرسی |
|  | خطای طولی تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | خطای عرضی تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | خطای دورانی تریلر در دستگاه اینرسی |
|  | ثوابت کنترلی |
|  | ثوابت کنترلی |
|  | ثوابت کنترلی |
|  | زاویه­ی بین ترکتور و تریلر |

# فصل اول

مقدمه و کلیات

## مقدمه

چرخ­ها يكى از اجزاى مهم حركتى ربات ها هستند. ربات ها با استفاده از چرخ ها مى­توانند گوى سبقت را از انسان­ها ربوده و سرعت خود را افزايش دهند. ربات‌های چرخ‌دار یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین ربات‌های متحرک هستند. ربات‌های چرخ‌دار ربات­هایی هستند که با استفاده از چرخ‌های موتوردار روی زمین حرکت می‌کنند. این نوع از طراحی در مقایسه با پا داشتن و راه رفتن، راحت‌تر است، ضمناً استفاده از چرخ، طراحی، ساخت و برنامه‌ریزی این ربات‌ها را برای زمین‌های مسطح و نه زمین‌های ناهموار، تسهیل کرده است. یکی از نقطه ضعف‌های این ربات­ها این است که حرکت آن‌ها در شرایطی که مانع وجود داشته باشد، مثل زمین‌های ناهموار سنگی، شیب‌های تند، سطوح لغزنده، نمی‌تواند بدون افزودن یک قابلیت مکانیکی یا کنترلی، حرکت مطلوب را داشته باشد. اما با این وجود در کل این نوع ربات‌ها معمولاً کنترل‌پذیری بالایی دارند، انرژی کمی را برای جابه­جا شدن مصرف می­کنند و معمولاً سریع‌تر از انواع دیگر ربات­های سیار حرکت می­کنند. ربات­های متحرک چرخدار خود نیز دارای انواع و اشکال مختلفی هستند که تفاوت آن‌ها در مواردی چون سیستم حرکتی ربات، تعداد و انواع چرخ‌های ربات، توانایی و مکانیزم­های ربات در عبور از روی ناهمواری‌ها و بسیاری دیگر از موارد ساختاری و عملکردی آن‌هاست.

## انواع ربات­های چرخدار

در سيستم حركتى چرخدار مى توان چرخ­ها را به گونه­هاى متفاوتى استفاده كرد:

* ربات­هاى داراى يك چرخ
* ربات­هاى داراى دو چرخ
* ربات­هاى داراى سه چرخ
* ربات­هاى داراى چهار چرخ
* ربات­هاى با چرخ­هاى بيشتر از چهار

### ربات­های دارای یک چرخ

از آنجايى كه كنترل ربات­هاى يك چرخ به آسانى نيست و ناپايدار هستند، به همين دليل رواج كمترى دارند ولى از لحاظ هزينه و بقيه موارد به صرفه هستند. هنگامى كه از يك چرخ براى حركت يك ربات استفاده مى شود، ربات فقط با استفاده از يك نقطه چرخ با زمين در تماس است. بنابراين پايدارى آن به سختى صورت مى­گيرد. استفاده از چرخ­هاى كروى براى ربات يك چرخ به نسبت آسان­تر از چرخ­هاى ديگر است، زيرا که ربات دسترسى راحت­ترى به همه جهات دارد. در شكل ذیل ربات يك چرخ موراتا را مشاهده مى­كنيد كه توانسته است با استفاده از تنها يك چرخ تعادل مناسبى را رقم بزند.

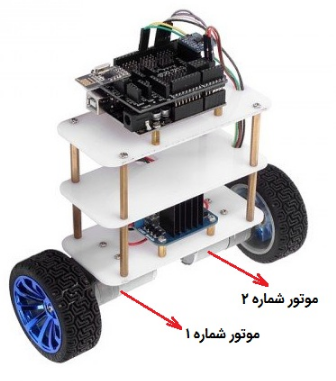


شکل ‏1‑1ربات یک چرخ موراتا [1]

### ربات­های دارای دو چرخ

ربات­هاى دو چرخ، داراى دو چرخ مى­باشند كه به صورت موازى در طرفين ربات قرار مى­گيرند. كنترل ربات­هاى دو چرخ شايد در نگاه اول آسان­تر از ربات­هاى يك چرخ باشد ولى حفظ پايدارى آن­ها آسان نيست. براى اين كه بتوانيم تعادل را بهتر كنيم قطعا بايد مركز ثقل ربات را در يك نقطه پايين نگه داريم، به همين منظور در ربات­هاى دو چرخ باترى را در پايين بدنه قرار مى دهند تا مركز ثقل كلى ربات در زير محور مركزى چرخ­ها قرار گيرد. همان­طور كه در اسكوترهاى برقى مشهود است، مركز ثقل آن­ها در پايين وسیله مى­باشد.

براى چرخش يك ربات دو چرخ همان­طور كه مشاهده مى­كنيد كافى است دور موتور يكى از موتورها را افزايش دهيم تا در جهت مخالف بچرخد. مثلا براى چرخش به سمت راست كافى است كه دور موتور سمت چپ را افزايش دهيم و براى چرخش به سمت راست كافى است كه دور موتور سمت راست را افزايش دهيم.



شکل ‏1‑2 نمونه­ای از یک ربات دو چرخ

### ربات­های دارای سه چرخ

ربات­هاى سه چرخ همان­طور كه از نامشان پيداست داراى سه چرخ مى باشند و نيز به دو دسته تقسيم مى شوند. دسته اول ربات­هايى هستند كه دو چرخ آن­ها به موتور متصل است و كار انتقال قدرت را انجام مى­دهند و چرخ سوم نيز صرفا هرزگرد است و فقط به اين طرف و آن طرف كشيده مى­شود تا تعادل ربات را حفظ كند. در صورتی که دور موتور هر كدام از موتورها را افزايش دهيم ربات در جهت مخالف شروع به چرخيدن مى­كند. دسته دوم ربات­هايى هستند كه از هر سه چرخ براى انتقال قدرت بهره مى­برند و چرخ هرزگردى وجود ندارد. همان­طور كه در شكل زیر مشاهده مى­كنيد به هر چرخ يك موتور متصل شده است و هر سه چرخ قدرت موتورها را منتقل مى­كنند.

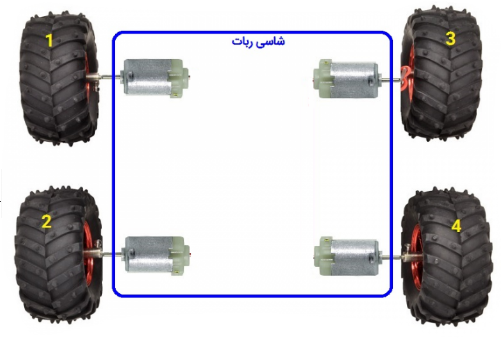


شکل ‏1‑3 استفاده از سه چرخ برای انتقال قدرت در ربات [1]

### ربات­های دارای چهار چرخ

ربات­هاى چهار چرخ مزاياى زيادى نسبت به بقيه ربات­ها دارند كه مهم­ترين آن پايدارى ربات است. همان­گونه كه آشکار است تمامى ماشين­ها داراى چهار چرخ هستند و به دليل پايدارى بالاى چهار چرخ، ديگر براى تعيين مركز ثقل نيز كمى دستمان بازتر است. از معايب ربات­هاى چهار چرخ نسبت به سه چرخ و دو چرخ و يك چرخ اين است كه به دليل افزايش تعداد موتورها و ديگر متعلقات آن، هزينه­ها افزايش مى يابد كه بار مالى دارد. در مورد دسته بندى آن­ها بر اساس كنترل چرخ­ها و انتقال قدرت به سه صورت دسته بندى مى­شوند.

دسته اول بدين صورت است كه چهار موتور را به چهار چرخ به صورت مستقل متصل مى­كنيم. يعنى اينكه براى چرخش به سمت راست مى بايست دور موتورهاى سمت چپ (1و2) را افزايش دهيم و براى چرخش به سمت چپ دور موتورهاى سمت راست (3و4) را افزايش دهيم. در اين روش كنترلى ما از هيچ ديفرانسيلى استفاده نمى­كنيم و موتورها به صورت مستقل عمل مى­كنند.



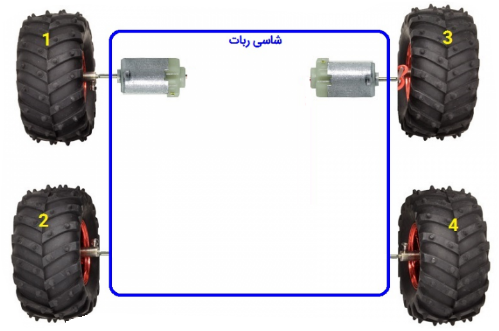
شکل ‏1‑4 ربات چهار چرخ، هر چرخ به صورت مستقل به موتور متصل است.

دسته دوم بدين صورت است كه دو چرخ که در كنار یکدیگر واقع شده­اند، به هم متصل هستند و براى چرخش به سمت راست كافى است كه دور موتور سمت چپ را افزايش دهيم و براى چرخش به سمت چپ كافى است تا دور موتور سمت راست را افزايش دهيم. به این نوع سیستم حرکتی سیستم کنترل تانکی گفته می­شود. همانطور که در شکل 1-5 مشاهده می­کنید برای کنترل ربات و چرخش به طرفین می­بایست از سیستم تانکی استفاده نمود و برای حرکت به سمت چپ باید دور موتور راست را افزایش داد و دور موتور سمت چپ را کاهش داد تا ربات به سمت چپ بچرخد و اگر هم سر پیچ بخواهید دور بزنید و به سمت چپ بپیچید می­بایست چرخ سمت چپ کمی به عقب حرکت کند و چرخ سمت راست نیز به جلو حرکت کند تا سرپیچ دور بزند. سیستم تانکی برای دور زدن سریع­ بسیار مناسب است. چرخ­هاى كنارى را مى­توان به وسيله گيربكس و يا تسمه و… به هم متصل نمود. دليل اين كه چرخ­هاى كنارى به هم متصل هستند این است که در هنگام بالاروى از صخره­ها و موانع، بالارفتن يك چرخ موجب بالا رفتن چرخ ديگر مى­شود. به همين دليل در طراحى بدنه بايد نكات خاصى را مد نظر قرار داد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

شکل ‏1‑5 ربات چهار چرخ مدل تانکی

دسته سوم بدين صورت است كه دو چرخ كار انتقال قدرت را انجام مى­دهند و دو چرخ ديگر نيز به صورت هرزگرد به اين طرف و آن طرف كشيده مى شوند.



شکل ‏1‑6 ربات چهار چرخ مدل خودرو

### ربات­های دارای پنج چرخ و بیشتر

استفاده از پنج چرخ يا بيشتر فقط براى موارد خاص كاربرد دارد. استفاده از تعداد چرخ­هاى بيشتر و تعداد موتورهاى بيشتر علاوه بر افزايش هزينه ها پيچيدگى طراحى را نيز بيشتر مى­كند و ربات نيز مصرف بالاترى دارد.



شکل ‏1‑7 شماتیکی از ربات مریخ نورد [1]

استفاده از تعداد چرخ هاى بالاتر مزايا و معايب خاص خودش را دارد كه در ادامه به آن مي پردازيم.

در ربات­هاى 6 چرخ در صورتى كه يكى از چرخ ها از كار بيفتد بقيه چرخ ها كار آن را جبران مى­كنند و ربات به حركت خود ادامه مي­دهد، ولى اگر ربات چهار چرخ باشد و يكى از چرخ هاى آن به هر دليلى خراب شود ربات از حركت باز مى ايستد.

فرض كنيد دو ربات داريد كه وزن هر دو يكى است ولى يكى 4 چرخ دارد و ديگرى 6 چرخ دارد. رباتى كه 6 چرخ دارد فشار كمترى را بر روى هر چرخ وارد مى­كند و بالطبع چرخ نيز فشار كمترى به زمين وارد مى­كند. اين بدين معنى است كه در زمين­هاى باتلاقى و يا شنى ربات 6 چرخ بهتر از ربات 4 چرخ عمل مى­كند چرا که تمركز تنش در ربات 4 چرخ بيشتر است. البته در صورتى كه ابعاد دو ربات 4 چرخ و 6 چرخ يكسان باشد، قطعا وزن ربات شش چرخ بيشتر است، زيرا دو چرخ اضافه تر و سيستم تعليق و متعلقات ديگر هم باعث وزن بيشتر مى­شوند كه يك نقص مهم محسوب مى­شود.

در صورتى كه وزن دو ربات 4 چرخ و 6 چرخ برابر باشد، نيرويى كه براي پيشرانش هر چرخ ربات 6 چرخ لازم است كمتر است زيرا نيروى عمود بر سطح هر چرخ نيز كمتر است. نكته ديگر هم اين كه هنگام توقف قابليت ترمزگيرى به دليل دارا بودن 6 چرخ بيشتر از 4 چرخ مى­شود. همچنین لازم به ذکر است که به دليل چسبندگى بيشتر تايرها به زمين دور زدن در گوشه ها نيز سريع تر است.

## کاربردهای ربات­های چرخدار

این ربات‌ها در زمینه‌هایی نظیر ربات‌های مین‌یاب، ربات‌های زنده‌یاب و ربات‌های آتش‌نشان پیش‌تر مورد توجه بوده‌اند، اما تحقیقات زیادی برای استفاده از خودروهای هدایت شونده خودکار عمدتاً در صنایع خودروسازی و نظامی و کشاورزی انجام گرفته است و اکنون ربات‌های چرخدار در این صنایع مورد استفاده‌اند. ربات‌های چرخ‌دار به دلیل قابلیت جابجایی، امکان حمل بازوهای رباتیک و توانایی انجام مأموریت‌های حمل به صورت خودکار، کاربرد عمده‌ای در عرصۀ اکتشافات سیاره‌ای و مأموریت‌های متنوع زیرآبی همچون شناسایی، عیب‌یابی و تعمیر لوله‌های نفتی، خدمات در بیمارستان­ها، خطوط تولید بزرگ و حتی در منازل به عنوان خدمتکار یا پرستار بیماران یافته‌اند. گونه‌ای از ربات‌های سیار که با نام خودروهای هدایت شونده خودکار شناخته می‌شوند به علت پیچیدگی کمتر در ناوبری، قابلیت اطمینان بالا، انعطاف‌پذیری در حمل و نقل و ارتباط اتوماتیک با دیگر سیستم‌ها مورد توجه خاص صنایع تولیدی و مونتاژ قرار گرفته است. این‌گونه ربات‌ها برای تعیین مسیر حرکتشان از یک راهنمای خارجی کمک می‌گیرند و قابلیت حمل بار زیاد با سرعت مناسب را دارند. از دیگر کاربردهای عمده این گونه ربات‌ها می­توان به جابجایی مواد و قطعات بین کارخانجات و انبارها، جابجایی قطعات در قسمت‌های مختلف خطوط تولید، کار در محیط‌های خطرناک نظیر نیروگاه‌های هسته‌ای و صنایع نظامی اشاره کرد.

## مرور ادبیات

تحقیقات پیشین انجام‌شده در سه‌گام بررسی خواهد شد؛ نخست آن دسته از تحقیقاتی که به بررسی، مدل‌سازی و کنترل مسئله­ی پایدارسازی ربات­های چرخ‌دار با دو چرخ دیفرانسیلی از یک پیکربندی به پیکربندی مطلوب می­پردازند. دسته دوم، پژوهش­هایی را مدنظر قرار می­دهیم که به حوزه بروز رسانی ضرایب و ثوابت موجود در قانون­های کنترلی به منظور بهینه­سازی و ارتقاء عملکرد سیستم اختصاص یافته است. در گام آخر نیز ادبیات مربوط به مدل‌سازی و کنترل ربات ترکتور-تریلر بررسی خواهد شد.

### ادبیات مسئله پایدارسازی ربات متحرک چرخدار دیفرانسیلی

ربات­های متحرک چرخدار به طور حتم نقش مهمی در آینده ایفا خواهند کرد. بنابراین، کنکاش در محدوده چالش­های تئوری و عملی آنان که در حوزه­های مختلف کاربرد آن­ها بروز می­کند، الزامی به نظر می­رسد. یکی از این چالش­ها، کنترل خودکار حرکت ربات است. این مسئله خود از دو منظر کلی قابل بررسی است: تعقیب مسیر و پایدارسازی نقطه­ای. این مسائل همچنین باید به صورت جداگانه برای هر یک از انواع ربات­های متحرک چرخدار، شامل ربات متحرک چرخدار رانده شده تفاضلی، ربات­های خودرو-مانند و ربات­های شامل چند پلتفرم مانند ترکتور-تریلر مورد پژوهش قرار گیرد.

در مسائل پایدارسازی نقطه­ای یا پیکربندی (موقعیت و جهت­گیری) در نبود موانع، هدف حرکت دادن ربات به پیکربندی مطلوب با حرکت از یک پیکربندی آغازین است. در نظر گرفتن شرایط غلتش خالص بر روی چرخ­های ربات موجب بوجود آمدن محدودیت­های خاصی در سینماتیک ربات می­شود که آن را جزئی از سیستم­های غیر هلونومیک دسته بندی می­کند. این محدودیت مسئله پایدارسازی نقطه­ای را چالش برانگیز می­کند چراکه نمی­توان برای آن یک کنترل فیدبک حالت مشتق پذیر و یا کاملا پیوسته برای پایدار سازی ربات در پیکربندی مطلوب طراحی کرد [2].

گام نخست برای رسیدن به قانون کنترلی در بسیاری از پژوهش­ها تبدیل دستگاه مختصات یا متغیرهای حالت به یک فرم خاص است. این تغییر برای این منظور صورت می­گیرد تا پروسه حصول به قانون کنترلی را آسان و امکان پذیر کند. فرم زنجیره­ای یکی از معروف­ترین رویکردها برای تبدیل ورودی­ها و حالت­های سیستم است. این روش در انواع ربات­های ترکتور-تریلر و ربات­های شبه-خودرو نیز کارایی دارد. رویکردهای متفاوتی برای پایدارسازی سیستم­های غیر هلونومیک در فرم زنجیره­ای [3-4-5-6] پیشنهاد شده است. یکی دیگر از انواع تبدیلات شامل تبدیل مختصات کارتزین به مختصات قطبی می­شود. استفاده از این نگاشت موجب ارتقاء پاسخ­های سیستم و بهینه شدن نتایج آن می­گردد [7-8-9-10]، اما در برخی از موارد قانون کنترل ایجاد شده دارای نقاط منفرد است [10].

در پژوهش فعلی که به صورت مبسوط در فصل دوم به آن پرداخته خواهد شد، پیکربندی ربات در دستگاه مختصات کارتزین توصیف شده است. به صورت دقیق­تر موقعیت و جهت­گیری ربات در دستگاه مختصات متصل به بدنه ربات تعریف شده است. این شیوه توصیف پیشتر برای مسئله تعقیب مسیر ربات نیز مورد استفاده قرار گرفته است  
[11-12-13-14]. بعد از انتخاب دستگاه مختصات مناسب، روش­های متفاوتی برای طراحی قانون کنترلی مناسب در تحقیقات پیشین به کار گرفته شده است. پایدار سازی وابسته به زمان [15-16]، پایدارسازی مرکب (هایبرید) [6] و پایدارسازی مسقل از زمان گسسته [17]، سه استراتژی اصلی هستند که به سیستم­ها اعمال شده­اند. اما نکته­ای که در تحقیقات پیشین به چشم می­خورد نبود سادگی و عملکرد مناسب همزمان است.

برای سنجش توانایی الگوریتم پیشنهادی در فصل دوم، دو پژوهش مشابه برای مقایسه انتخاب شده­اند. یکی از آن­ها قانون کنترلی زمان محدود است که در [18] ارائه شده است. قانون کنترلی تحقیق مذکور دارای دو بخش است. در فاز اول آن یکی از خطاهای موقعیت و خطای جهت­گیری به صفر همگرا می­شود و در فاز دوم خطای باقی مانده صفر خواهد شد. بنابراین، طبیعت دو فازی این روش منجر به دور شدن مسیر طی شده از میزان بهینه آن می­گردد و هم چنین ناپیوستگی در زمان تعویض قانون کنترلی آن پیش می­آید. روش­های مشابه این تحقیق در مواردی همچون [19] یافت می­شود. الگوریتم دوم انتخابی که برای مقایسه انتخاب شده است براساس پژوهشی است که در [20] پیشنهاد شده است. در این کار یک کنترل فیدبک جهت­گیری-میدان-بردار[[4]](#footnote-5) طراحی شده است. مسیر طی شده ناشی از به کارگیری این کنترلر به حالت بهینه نزدیک است، اگر چه که قانون کنترلی آن بسیار پیچیده است. از سوی دیگر، برخی تحقیقات نیز وجود دارند که یک کنترل و چارچوب مشترک برای مسئله پایدارسازی نقطه­ای و تعقیب مسیر ارائه می­دهند [21-22]. در [21] یک استراتژی کنترلی بر مبنای روش کمینه سازی زاویه به نقطه[[5]](#footnote-6) و در [22] اعمال همزمان روش بازگشتی و دینامیک عصبی (نئورال) مورد استفاده قرار گرفته است. مسئله پایدار سازی نقطه­ای اخیرا برای سایر پلتفرم­های ربات متحرک چرخدار از جمله ربات ترکتور-تریلر [23] نیز مور پژوهش قرار گرفته است، اگرچه که دو مرحله­ای بودن کنترلر مانع از همگرا شدن ربات به موقعیت مورد نظر توسط یک مانور یکتا می­شود.

### ادبیات مسئله مربوط به بروز رسانی ضرایب و ثوابت موجود در قوانین کنترلی

همانطور که در زیر بخش قبل مورد توجه قرار گرفت عرصه­ی مهم دیگر در کنترل حرکت ربات­های پایه متحرک چرخدار، حوزه مسائل مربوط به تعقیب مسیر در آنان است. جدا از تلاش­هایی که معطوف به یافتن الگوریتم­های نوین است، لازم است که در حوزه بهبود و بهینه سازی روش­های گذشته نیز تحقیقاتی صورت بگیرد. بررسی قانون­های کنترلی نشان می­دهد که ثوابت کنترلی نقش مهمی در پاسخ و عملکرد ربات در کاربردهای موجود در محیط­های واقعی ایفا می­کند. تنظیم مناسب ثوابت کنترلی نیازمند سعی و خطای بسیاری است که موجب صرف میزان زیادی انرژی و زمان می­شود. از سوی دیگر، انتخاب ثوابت برای کنترلرها به صورت دستی از خودکار بودن کنترلر مربوطه می­کاهد. بنابراین مهم است که راه حلی یافت شود تا قانون کنترلی را مستقل و همپنین عملکرد ربات را ارتقاء دهد.

تا حال کنترلرهای بسیاری [24-25] برای مسئله تعقیب مسیر ربات­های متحرک چرخدار پیشنهاد شده است. یکی از اساسی­ترین و با سابقه­ترین کنترلرها در این حوزه­ها در [11] ارائه شده است. کارایی کنترلر غیر خطی مذکور وابسته به چندین ضریب است که باید به صورت دستی توسط طراح انتخاب گردد. بسیاری از کنترلرها  
[12-13-26-27-28-29-30] در زمینه تعقیب مسیر ربات­های متحرک چرخدار براساس کنترلر موجود در [11] توسعه یافته­اند. در نتیجه، هر روشی که منجر به تنظیم خودکار ثوابت کنترلر مذکور شود، قابل استفاده برای سایر کنترلرهای اشاره شده نیز خواهد بود و بهبود عملکرد آنان را نیز در پی خواهد داشت. در [12-13-26] کنترلرهای پسخور حالت بر اساس روش بازگشتی برای هر دو مدل سینماتیکی و دینامیکی ربات متحرک چرخدار پیشنهاد شده است. در [27] یک کنترلر تعقیب مسیر تطابقی با پارامترهای نا مشخص برای ربات ارائه شده است. همچنین یک کنترلر دینامیکی مد لغزشی تطابقی بر روی ربات در [28] اعمال شده است. یک مدل پیش بین با استفاده از بهینه سازی دینامیکی-عصبی برای پیشنهاد یک کنترلر جدید در [29] مورد توجه قرار گرفته است. برای حل مشکل پرش سرعت در کنترلر [11]، یک روش الهام گرفته شده از طبیعت با رویکرد دینامیکی-عصبی برای تولید سیگنال­های کنترلی پیوسته و هموار در [30] ارائه شده است. همچنین باید مورد توجه قرار گیرد که در مقایسه با سایر سیستم­های غیر خطی، برخی از قیود و ویژگی­های خاص مانند قیود غیر هولونومیک در [31]، پژوهش و تحقیق را در عرصه ربات­های متحرک چرخدار پیچیده­تر می­کند.

تنظیم ضرایب کنترلرهای پی-آی-دی[[6]](#footnote-7) به صورت مبسوط در تحقیقات گذشته مورد توجه قرار گرفته است. روش­های پیشنهادی، ضرایب را به صورت برخط یا غیر برخط به روز می­کنند. یادگیری ماشین و منطق فازی روش­هایی هستند که عمدتا در تحقیقات مذکور مورد استفاده قرار گرفته­اند. روش بهینه سازی ازدحام ذرات[[7]](#footnote-8) برای تنظیم ثوابت کنترلرهای پی-آی[[8]](#footnote-9) و پی-آی-دی در [32-33] به کار رفته است. تنظیم ضرایب به صورت برخط بر اساس الگوریتم ژنتیک برای یک کنترلر پی-آی در [34] تشریح شده است. رویکرد منطق فازی برای بروز رسانی ضرایب یک کنترلر پی-آی-دی -فازی در [35] برای یک فرآیند گرمایشی و در [36] برای یک سیستم با چندین ورودی و خروجی به کار گرفته شده است. چالش مهم در زمینه بروز رسانی ضرایب در حوزه طراحی و کنترل سیستم­های غیر خطی، پایداری سیستم حلقه بسته کلی است. شیوه بروز رسانی باید به گونه­ای انجام شود تا ناپایداری را به سیستم تحمیل نکند. بنابراین، دینامیک تغییرات ضرایب باید همراه با دینامیک اصلی سیستم در زمان بررسی پایداری سیستم مورد توجه قرار گیرد. پیچیدگی ساختار الگوریتم­های یادگیری ماشین و منطق فازی به حدی است که مطالعه برهم کنش بین الگوریتم تنظیم ضرایب و کنترلر غیرخطی اصلی را مشکل و یا حتی در برخی مواقع غیر ممکن می­کند.

پژوهش­های دیگری نیز در حوزه تنظیم و بروز رسانی ضرایب به چشم می خورد که از تئوری­های موجود در زمینه کنترل غیر خطی استفاده می­کنند مانند استفاده از روش بازگشتی در [37] و رویکردهای مبتنی بر لیاپانوف در [38]. اما نکته حائز اهمیت این است که روش به کار گرفته شده برای تنظیم ضرایب نباید زمان بر و یا دارای محاسبات سنگین برای اجرا باشد، چرا که در این صورت عملکرد کنترلر اصلی را مختل می­کند. شبکه عصبی روشی است که توانایی رفع مشکلات اشاره شده را داراست. ایده استفاده از شبکه عصبی با ساختاری ساده برای تنظیم و بروز رسانی ضرایب کنترلرهای پی-آی-دی و توابع غیر خطی در [39-40-41] قابل مشاهده است.

### ادبیات مربوط به ربات متحرک چرخدار ترکتور-تریلر

یکی از فاکتورهای مهم در تجارت، جا به جایی کالا و تجهیزات است. کشتی و هواپیما وسایل حمل و نقل رایج برای مسافت­های طولانی هستند. با این وجود وسایل نقلیه چرخدار همچون کامیون­­ها برای مسافت­های کوتاه بسیار پرکاربرد است. در کنار محموله­های متنوع، کامیون­ها معمولا بارهای مهمی از جمله سوخت، مواد فاسد شدنی، غذا و محصولات کشاورزی را جا به جا می­کنند. بنابراین خودکارسازی این وسائل می­تواند ریسک تصادفات جاده­ای را به طور قابل ملاحظه­­ای کاهش دهد و از سوی دیگر موجب حفظ وقت و انرژی شود. نیاز به خودکارسازی وسائل حمل و نقل بار در جاده­ها و ماشین­های کشاورزی موجب شد تا حوزه­ای جدید در عرصه ربات­های متحرک چرخدار به نام ربات ترکتور-تریلر ایجاد شود. مانند سایر ربات­های متحرک چرخدار، مسئله پایدارسازی ربات و تعقیب مسیر در آن از جمله چالش­های مشابهی است که برای ربات ترکتور-تریلر نیز مطرح است. علاوه بر این، با توجه به ساختار ربات ترکتور-تریلر و تنوع در نحوه اتصال ترکتور به تریلر، چالش­های منحصر به فردی مانند برهم کنش بین بار و ربات و اثر بار بر روی پایداری ربات و همچنین اثر جکنایف[[9]](#footnote-10) که به برخورد بین اجزا ربات مربوط می­شود، در حوزه کاربرد ترکتور-تریلر یافت می­شود.

مسئله تعقیب مسیر سال­هاست که نظر پژوهشگران را به خود معطوف کرده است. این چالش برای ربات ترکتور-تریلر کاربرد زیادی از جمله در زمینه ماشین­های کشاورزی داراست. در [42] بر مبنای یک مدل برگرفته شده از یک ماشین کشاورزی و تریلر متصل به آن، یک کنترلر پیش بین خطی برای تعقیب مسیر طراحی شده است. در [43] یک کنترلر تطبیقی پیشنهاد شده است. مدلی که بر اساس آن کنترلر طراحی شده است، بسیار شبیه به مدل سینماتیکی ربات شبه-خودرو است. بنابراین این قانون کنترلی در زمانی که ترکتور-تریلر به صورت خارج از محور به یکدیگر متصل شده باشند قابلیت پیاده سازی ندارد. هم­چنین زمانی که زاویه بین ترکتور و تریلر به 90 درجه می­رسد، قانون ارائه شده وارد نقطه تکین می­شود. در [44] وجود چرخ­های کروی در ساختار تریلر ربات ترکتور-تریلر و تاثیر آن در کنترل و مدل­سازی ربات بررسی شده است. [45] کنترلی غیر مبتنی بر مدل برای ترکتور همراه با دو تریلر متصل به آن پیشنهاد داده است.

در [46] محدودیت­های ناشی از حرکت یک ترکتور همراه با چندین تریلر بررسی و روشی ارائه شده تا از برخورد بین اجزا سیستم در هنگام طی مسیر جلوگیری شود. در مقالات [47-48] مسئله کنترل پذیری ربات ترکتور-تریلر به صورت خاص مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [49] برای یک ترکتور و سه تریلر همراه آن یک کنترلر فازی طراحی کرده است. [50] برای طی مسیرهای دایروی و خط راست ربات ترکتور-تریلر الگوریتمی بر اساس تابع لیاپانوف پیشنهاد کرده است. مقاله [51] روشی را برای حرکت رو به عقب و دنبال کردن یک خط با استفاده از فرمان­دهی مجازی برای سیستم ترکتور-تریلر توضیح داده است. برخی دیگر از پژوهش­ها همانند [52-53] مسائل مربوط به کنترل، طراحی و تعقیب مسیر را برای سیستم متشکل از چندین تریلر مورد بررسی قرار داده­اند. در [54-55-56] برای سیستم خودرو-تریلر موضوع طراحی و تعقیب مسیر واکاوی شده است. ربات­ ترکتور-تریلر با توجه به نحوه­ی اتصال بین ترکتور و تریلر و همچنین انواع کشنده­های متفاوت از نوع شبه-خودرو و یا متحرک با دو چرخ دیفرانسیلی، که این قابلیت را دارا هستند به عنوان ترکتور به کار برده شوند، ساختار و مدل­های گوناگونی را می­تواند داشته باشد. در بیشتر پژوهش­های قبلی روش کنترلی ارائه شده وابسته به ساختار ربات است. بنابراین روش پیشنهادی با تغییر ساختار ربات توانایی خود را از دست می­دهد.

## خلاصه سایر فصول

طرح کلی پایان‌نامه از این بخش به بعد به این صورت است:

در فصل دوم مسئله پایدارسازی ربات مد نظر قرار می­گیرد. در ابتدا مقدمه­ای کوتاه ارائه می­شود. سپس در بخش دوم، مدل سینماتیکی ربات تشریح شده است. بخش سوم شامل پروسه استخراج قوانین کنترلی برای پایدار سازی نقطه­ای ربات می­شود. بخش چهارم شبیه سازی­های عددی و مقایسه نتایج حاصل از آن با دو تحقیق در همین زمینه را در برمی­گیرد. در بخش پنجم، دو آزمایش عملی برای سنجش توانایی الگوریتم­های پیشنهادی طراحی شده است. مسئله اجتناب از موانع در بخش ششم بررسی شده است. در بخش آخر نیز نتیجه گیری پژوهش ارائه گردیده است.

در فصل سوم ارائه یک روش برای بروزرسانی ضرایب یک کنترلر تعقیب مسیر توضیح داده خواهد شد. در ابتدا مقدمه­ای کوتاه ارائه می­شود. بعد در بخش دوم کنترلر سینماتیکی موجود در [11] تشریح می­شود. در بخش سوم، الگوریتم بروز رسانی پیشنهادی توضیح داده خواهد شد. در بخش چهارم چندین شبیه سازی رایانه­ای برای اثبات عملکرد کنترلر انجام گرفته است. در بخش پنجم، آزمایشات تجربی برای سنجش توانایی الگوریتم پیشنهادی در عمل صورت گرفته است. در بخش ششم، توسعه الگوریتم پیشنهادی برای ربات شبه-خودرو بررسی خواهد شد. در پایان نیز در بخش آخر، تحقیق صورت گرفته جمع بندی و نتیجه گیری خواهد شد.

در فصل چهارم کنترلر سینماتیکی برای ربات ترکتور-تریلر تشریح می­شود. در ابتدا مشابه قبل مقدمه­ای بیان می­شود. در بخش دوم و سوم به تشریح مسئله و سیستم تحت بررسی پرداخته شده است. در بخش چهارم و پنجم روش کنترلی برای ترکتور-تریلر در دو وضعیت اتصال بر روی محور و خارج از آن بررسی می­شود. در بخش ششم و هفتم رویکرد کنترلی برای سیستم متشکل از چندین تریلر در حالت اتصال بر روی محور و همچنین الگوریتم کنترلی برای ربات ترکتور-تریلر برای وضعیتی که ترکتور از مدل شبه-خودرو باشد، پیشنهاد شده است. در بخش بعدی هم شبیه سازی­های عددی و آرمایش­های تجربی انجام گرفته و نتایج مربوط به آن ارائه شده است. در این بخش همچنین روش کنترلی ارائه شده با یک کنترلر سینماتیکی مقایسه شده است. در بخش آخر نیز این پژوهش نتیجه گیری شده است.

در فصل پنجم نیز پیشنهادات ارائه می­گردد.

# فصل دوم

طراحی کنترلر   
پایدارسازی نقطه­ای

## مقدمه

در این بخش از پایان نامه، دو استراتژی کنترل سینماتیکی غیر یکنواخت برای مسئله پایدارسازی نقطه­ای برای ربات متحرک چرخدار رانده شده تفاضلی پیشنهاد شده است. رویکرد ارائه شده بر مبنای تبدیلات سینماتیک برای مختصات پیکربندی ربات و تکنیک­های پایداری شبه لیاپانوف توسعه یافته است. قانون­های کنترلی پیشنهادی می­توانند سیستم را در نقطه هدف پایدار کنند و همچنین دو مانور متفاوت را برای آن ارائه دهند. بعلاوه آن پاسخ الگوریتم­های پیشنهادی با دو تحقیق پیشین نیزدر همین زمینه مقایسه شده است. در بعد قانون کنترلی به گونه­ای ارتقاء یافته است تا مسئله اجتناب از برخورد با موانع محیط نیز در حین نزدیک شدن ربات به پیکربندی نهایی در نظر گرفته شود. نتایج بدست آمده از شبیه­ سازی­ها مانند آزمایشات تجربی کارایی روش پیشنهادی را اثبات می­کند.

## مدل سازی ربات

موقعیت و جهت­گیری یک ربات متحرک که در صفحه­ی مختصات قرار گرفته است بوسیله­ی یک بردار قابل تعیین است. این بردار دارای سه مؤلفه در دستگاه مختصات کارتزین است. دو عدد از این مؤلفه­ها موقعیت ربات و مؤلفه­ی دیگر جهت­گیری ربات را مشخص می­کنند. در مسئله پایدارسازی نقطه­ای، دو دسته از مختصات دارای اهمیت هستند. دسته­ی اول متعلق به پیکربندی ربات در زمان حال، ، و دسته­ی دوم پیکربندی مطلوب ربات،  
، *است که کنترلر تلاش می­کند ربات را به آن حالت منتقل کند.*

*از نقطه نظر کنترل حرکت، یک ربات متحرک چرخدار دارای دو سیگنال ورودی به صورت و* است که سرعت رو به جلو و سرعت زاویه­ای ربات است.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑1) |  |

این ورودی­های سینماتیکی با سرعت زاویه­ای چرخ­های فعال ربات به صورت زیر مرتبط هستند:

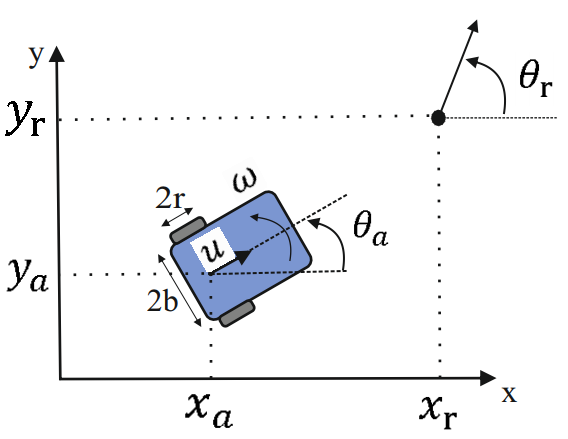
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| (‏2‑2) | |  | | --- | |  | |  | |

که *r* شعاع چرخ­ها، *b2* فاصله میان دو چرخ فعال ربات مطابق شکل 2-1 است. **و**  **نیز به ترتیب سرعت زاویه­ای چرخ­های راست و چپ ربات هستند. سرعت خطی و زاویه­ای ربات به طور کامل توانایی کنترل حرکت ربات را دارا هستند. بنابراین ضروری است که رابطه بین این دو ورودی و تغییرات موقعیت و جهت­گیری ربات در مختصات کارتزین شناسایی شود. این ارتباط سینماتیک ربات را شکل می­دهد.**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑3) |  |

**توجه به این نکته ضروری است که فرض عدم لغزش چرخ­های ربات و غلتش خالص آن­ها سینماتیک ربات را تحت تأثیر قرار می­دهد و یک درجه آزادی از حرکت ربات را حذف می­کند. این فرض منجر به رابطه­ای به شکل زیر می­شود:**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑4) |  |

  
شکل ‏2‑1 پیکربندی هدف و کنونی ربات متحرک چرخدار رانده شده دیفرانسیلی

*لازم به ذکر است که و که در شکل 2-1 به نمایش درآمده­اند، سرعت­های خطی و زاویه­ای کنونی ربات هستند. این دو سرعت بوسیله قانون کنترلی تعیین شده و سپس به ربات اعمال می­شوند.*

*حال زمان تعریف خطای پیکربندی ربات، ، است که در واقع تشریح موقعیت هدف، ، در دستگاه مختصات محلی به مرکزیت* که جهت محور X آن در راستای مطابق شکل 2-2 است. سیگنال­های کنترلی که پیشتر مورد اشاره قرار گرفت، *و* ، تلاش می­کنند تا خطای موقعیت ربات را کاهش داده و ربات را به سمت پیکربندی مطلوب هدایت کنند.



شکل ‏2‑2 خطای موقعیت ربات در دستگاه مختصات محلی چسبیده به ربات

خطای پیکربندی ربات به شکل ذیل تعریف می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑5) |  |

و مشتق خطای موقعیت نیز به شکل ذیل قابل محاسبه است:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑6) |  |

در محاسبه­ی معادلات زیر، شرط عدم لغزش در (4-2) مورد استفاده قرار گرفته است و باید توجه شود که , **و**  **برابر صفر هستند چرا که**, **و**  **ثابت هستند.**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑7) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑8) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑9) |  |

**برای استخراج مشتق تابع شبه-لیاپانوف در قسمت بعد، محاسبات فوق مورد استفاده قرار می­گیرند.**

## طراحی قانون کنترلی

**در این قسمت، قوانین کنترلی استخراج می­شوند و اثبات پایدار سازی ربات در پیکربندی مطلوب توضیح داده خواهد شد. برای این منظور، یک تابع شبه-لیاپانوف مطابق ذیل در نظر گرفته می­شود:**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑10-الف) |  |

**مشتق تابع بالا به شکل زیر قابل محاسبه است.**

|  |  |
| --- | --- |
| **(2-10-ب)** |  |

**با در نظر گرفتن دینامیک خطا در معادلات (2-7) و (2-8)،**  به شکل ذیل نوشته می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (2-10-ج) |  |

**اگر فرض شود که**  محدود است و سرعت خطی ربات نیز برابر با *، که ، انتخاب شود، سپس مشتق تابع شبه-لیاپانوف به شکل زیر تبدیل می­شود:*

|  |  |
| --- | --- |
| (2-10-د) |  |

***با توجه به این حقیقت که*** *، بنابراین و نتیجه خواهیم گرفت که* ومحدود خواهند بود. حال نیاز است تا محاسبه گردد.

|  |  |
| --- | --- |
| (2-10-ر) |  |

یک تابع از پایین کراندار است، منفی نیمه معین است و نیز محدود است، بنابراین با توجه به لم باربالا  
[57]، نتیجه می­شود که ، که به معنای است. اگر فرض شود که  *به صورت یکنواخت به سمت صفر همگرا شود، داریم که . این نکته بدین معنی است که:*

|  |  |
| --- | --- |
| (2-10-س) |  |

***فرض کنید که***  *یک مقدار غیر صفر دارد و یک متغیر محدود است. این فرض منجر به این نتیجه می­شود که . حال تنها نیاز است تا سرعت دورانی مناسبی پیدا کنیم که شرط محدود بودن را ارضا کند.*

***به طور کلی، جهت­گیری ربات،***  *،*  ***یک تابع متناوب با دوره تناوب*** π***2 است. بنابراین، این جهت­گیری می­تواند در ناحیه (***π***2***,***0***[ ***محدود شود بدون آن که هیچ تغییری در کلیت مسئله ایجاد کند. این اصلاح برای هر دو جهت­گیری مطلوب و واقعی ربات در زمان اعمال الگوریتم، باید صورت بگیرد. این ایده از این حقیقت سرچشمه می­گیرد که در زمان انجام آزمایشات نیز از تابع "***Atan2(.) " که در محدوده [π,π-) کراندار است، برای تعیین جهت­گیری ربات استفاده می­شود. بنابراین در عمل، جهت­گیری واقعی ربات می­تواند به آسانی در محدوده مذکور توصیف شود. رابطه­ی ذیل نحوه­ی نگاشت جهت­گیری ربات به محدوده مورد نظر را تشریح می­کند.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑11-الف) | ***اگر***  *سپس*  *اگر*  *سپس*  *در غیر اینصورت* |

***چنین تبدیلاتی در پژوهش­های گذشته نیز مورد استفاده قرار گرفته است [20]. با توجه به رابطه (2-5) و نگاشت در رابطه (2-11-الف)، خطای جهت­گیری،*** *، در محدوده (*π*2،*π*2-)* ***قرار می­گیرد. از* آن جا که خطای جهت­گیری،** ، نیز مانند جهت­گیری ربات، ، **متناوب بوده و دارای *دوره تناوب*** π***2 است، می­تواند*** *در محدوده* ***(***π***2***,***0***[ ***تعریف شود. این نگاشت توسط رابطه­ی زیر قابل اجرا است:***

|  |  |
| --- | --- |
| (2-11-ب) | ***اگر***  *سپس*  *در غیر اینصورت* |

***برای استخراج سرعت زاویه­ای مناسب، یک تابع شبه-لیاپانوف در ادامه تعریف می­شود، که از پایین کراندار بوده و در حالی که خطاهای پیکربندی در محدوده*** *، و قرار دارند، اینفیموم تابع برابر یک است.*

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑12-الف) |  |

***مشتق تابع پیشنهادی به شکل زیر قابل محاسبه است.***

|  |  |
| --- | --- |
| (2-12-ب) |  |

***با توجه به روابط (2-7)، (2-8) و (2-9) و انتخاب سرعت خطی به صورت*** ، مشتق تابع شبه-لیاپانوف تبدیل به شکل ذیل می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (2-12-د) |  |

**اگر سرعت زاویه­ای مانند ذیل در نظر گرفته شود:**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑13) |  |

**که**  و به شکل ذیل تبدیل می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑14) |  |

**این بدان معنی است که**  و با توجه به پرش احتمالی در ، که پیشتر در معادله (2-11-ب) مورد توجه قرار گرفت، می­توان استنتاج نمود که تابع در محدوده زیر قرار خواهد گرفت:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑15) |  |

**در نتیجه،**  *و* محدود هستند و با توجه به شروط موجود در روابط (2-11)، که بر روی اعمال شده­اند، *نیز محدود خواهد بود. بنابراین شرط محدود بودن* ارضا شده و بر اساس روابط (2-10)، خواهیم داشت که و . بعلاوه که شرط موجود در (2-16) برای سرعت زاویه­ای انتخابی نیز صادق خواهد بود.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑16) |  |

**در نهایت با توجه به روابط (2-9)، (2-11)، (2-13) و (2-16)، تا زمانی که**  و ، از 2 به سمت صفر می­رود. در نتیجه، به طور حتم می­تواند در همسایگی صفر قرار گیرد. کنترلر (2-17)، با توجه به آن چه که تشریح شد، ربات را به پیکربندی مطلوب می­رساند.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑17) |  |

**در این قسمت، به بررسی پرش محتمل در خطای جهت­گیری ربات و اثر آن بر روی سرعت زاویه­ای پرداخته خواهد شد. با در نظر گرفتن تبدیلات در (2-11-ب) برای** ، انتظار می­رود تا پرشی در سرعت زاویه­ای در معادله (2-17) داشته باشیم. حداکثر این پرش زمانی رخ می­دهد که مقدار با مقدار جایگزین می­گردد. مقدار این سرعت­های زاویه­ای برای دو حالت مذکور به شکل زیر قابل محاسبه است.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑18-الف) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| (2-18-ب) |  |

**فرض شده است که در زمان تعویض مقدار**  *ثابت مانده است. بیشینه میزان پرش از تفاوت این دو سرعت حاصل می­شود.*

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑19) |  |

***این نکته حائز اهمیت است که گسستگی تشریح شده در معادلات (2-18) و (2-19) کلی است، بدین معنی که با توجه به ضرایب انتخاب شده،*** *،*  و ، و همچنین شرایط اولیه ربات می­تواند رخ بدهد یا رخ ندهد. در نتیجه این پرش با توجه به فاکتورهای ذکر شده گاهی اوقات رخ می­دهد و گاهی رخ نمی­دهد. بعلاوه که این پرش ریشه در شرایط "براکت" دارد. بنابراین کنترلر (2-17) یک قانون کنترلی فیدبک غیر یکنواخت است. ولی باید خاطر نشان گردد که میزان پرش اتفاق افتاده با تنظیم مقادیر مناسب برای و بر اساس مشخصات موتور قابل کنترل است.

سری دیگری از ورودی­های کنترلی که منجر به پایدار سازی ربات می­شوند به شکل ذیل هستند.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑20) |  |

**برای اثبات این کنترلر می­توان پروسه مشابه با معادلات (2-10-الف) تا (2-11-الف) طی کرد. سپس خطای جهت­گیری ربات،** ، را به محدوده نگاشت کرد. این تبدیل بوسیله­ی رابطه زیر قابل انجام است.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑21) | ***اگر***  *سپس*  *در غیر اینصورت* |

***با در نظر گرفتن محدوده­ها برای*** *، و ، تابع شبیه-لیاپانوف به شکل زیر در نظر گرفته می­شود.*

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑22) |  |

***انتخاب ورودی­های کنترلی در (2-20)، تابع***  *غیر مثبت می­شود.* ***این حقیقت به شکل زیر قابل بیان است.***

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑23-الف) |  |

***در نتیجه، تابع شبه-لیاپانوف***  *در کران ذیل محدود خواهد شد.*

|  |  |
| --- | --- |
| (2-23-ب) |  |

***با به کار بردن روش مشابه قبل برای کنترلر قبلی، نتیجه گرفته می­شود که*** و *به صفر همگرا می­شوند. با توجه به معادلات (2-20)، قید زیر برای سرعت زاویه­ای ربات قابل استخراج است.*

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑24) |  |

***بنابراین، با توجه به روابط (2-9)، (2-20)، (2-21) و (2-24)، تا زمانی که***  *و ، از مقدار  
 2- به سمت صفر می­رود. درنتیجه، در همسایگی صفر قرار خواهد گرفت.*

***مقایسه قوانین کنترلی ارائه شده در این تحقیق با پژوهش­های پیشین، دو نکته­ی مهم را نتیجه می­دهد. اول این که استفاده از تابع شبه-لیاپانوف به کار برده شده به صورت آشکار مراحل بدست آوردن قانون کنترلی را ساده می­کند و هم­چنین بسیاری از دشواری­هایی که در مطالعات پیشین وجود داشته را بر طرف می­کند. مزیت دیگر روش حاضر این است که برای مسئله پایدار سازی نقطه­ای دو قانون کنترلی مجزا در اختیار خواهیم داشت، که وجود این دو قانون در بخش­های بعد در شبیه سازی­های عددی و آزمایش­های تجربی به خوبی قابل مشاهده خواهد بود. بعلاوه، با توجه به سرعت­های زاویه­ای در ورودی­های کنترلی (2-17) و (2-20)، در خواهیم یافت که جهت یکی از سرعت­های زاویه­ای همواره ساعتگرد و دیگری همواره پادساعتگرد است. به بیان دیگر، استفاده از کنترلر (2-17) باعث می­شود که ربات به صورت پادساعتگرد به موقعیت هدف نزدیک شود و از طرف دیگر، کنترلر (2-20) ربات را به صورت ساعتگرد به پیکربندی مطلوب هدایت می­کند. بنابراین، ربات با بهره­گیری از هر کنترلر مسیری متفاوت را طی کرده و به مقصد می­رسد.***

## شبیه سازی­های عددی

***برای سنجش قانون­های کنترلی پیشنهادی، ابتدا یک شبیه­ سازی با پیکربندی­های اولیه و نهایی متفاوت با به کارگیری دو کنترلر (2-17) و (2-20) پیاده سازی شده است. سپس، عملکرد دو روش پیشین در مسئله­ی پایدارسازی نقطه­ای در سال­های اخیر [18-20] با تحقیق حاضر در سه شرایط متفاوت مقایسه شده و نتایج حاصل از آن گزارش شده است.***

***در شبیه سازی ابتدایی، دو قانون کنترلی به کار گرفته شده و بواسطه­ی آن­ها ربات از موقعیت اولیه*** [0،4،1.57]به موقعیت نهایی [1.57-**،**5-**،**5-] هدایت شده است. در شبیه سازی نخست، تنها بر روی توانایی دو قانون کنترلی پیشنهادی تمرکز شده و عملکرد آنان در مسئله پایدارسازی نقطه­ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شامل مسیر طی شده ، سرعت­های زاویه­ای و خطی و هم­چنین خطای موقعیت و جهت­گیری ربات در مسیر گزارش شده­اند. زمان نمونه گیری در تمام شبیه سازی­های رایانه­ای برابر با 01/0 ثانیه در نظر گرفته شده است. این نتایج در اشکال 2-3 تا 2-8 برای هر دو کنترلر نمایش داده شده است. ضرایب کنترلی نیز در جدول *2-1* گزارش شده است.

لازم به ذکر است که در تمام شبیه سازی­های انجام شده برای کنترلرهای پیشنهادی و یا سایر کنترلرها، ضرایب کنترلی در نظر گرفته شده براساس سعی و خطا انتخاب شده­اند. به همین منظور، ضرایب کنترلی به صورت اتفاقی تغییر داده شده و نتایج حاصل از آن بدست آمده است. سپس ضرایبی که برای هر کنترلر منجر به یک پاسخ مطلوب شده­اند، که این پاسخ شامل کم­ترین فاصله طی شده و کم­ترین انرژی مصرف شده است، به عنوان ضرایب نهایی گزارش شده­اند. انرژی مصرف شده در معادله (*2-25*) تشریح شده است.

|  |  |
| --- | --- |
|  | D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\VFO\112.png |
| شکل ‏2‑3 مسیر کنترلر (2-17). جهت­گیری ربات با مثلث در مسیر نمایش داده شده است. | شکل ‏2‑4 ورودی­های کنترلر (2-17).  (--) . (-) . |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\VFO\113.png |  |
| شکل ‏2‑5 خطای کنترلر (2-17). (..) . (--) . (-) . | شکل ‏2‑6 مسیر کنترلر (2-20). جهت­گیری ربات با مثلث در مسیر نمایش داده شده است. |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\VFO\162.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\VFO\163.png |
| شکل ‏2‑7 ورودی­های کنترلر (2-20).  (--) . (-) . | شکل ‏2‑8 خطای کنترلر (2-20).  (…) . (--) . (-) . |

جدول ‏2‑1 ضرایب کنترلی در شبیه سازی نخست

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| کنترلر |  |  |  |
| (2-17) | 6/2 | 5/1 | 5/1 |
| (2-20) | 1/2 | 25/1 | 25/1 |

همان­طور که در شکل­ها مشخص است، وجود دو کنترلر، دو مسیر متفاوت را مهیا می­کند که بر اساس انتظارات مختلف از کنترلرها قابل انتخاب است. این واقعیت می­تواند در مواردی همچون وجود موانع و همکاری بین ربات­ها کار گشا باشد.

موضوع دیگر که از نتایج قابل برداشت است این است که در کنترلر (2-20) در طی فرآیند نزدیک شدن ربات به موقعیت هدف، ربات همواره ساعتگرد می­چرخد و در کنترلر (2-17)، ربات پادساعتگرد می­چرخد. بنابراین سرعت زاویه­ای در (2-17) همواره مثبت و در (2-20) همواره منفی است. این اطلاعات در مورد رفتار ربات در شرایط خاص مانند حمل و نقل اشیاء و بار مفید است. تغییرات سرعت در (2-17) یکنواخت­تر از (2-20) است در نتیجه نیروهای کم­تری به پلتفرم ربات اعمال می­شود.

در ادامه شبیه سازی­های عددی، سه حالت مقایسه­ای طراحی شده تا عملکرد کنترلرهای ارائه شده در این پژوهش و کنترلرهای [18] و [20] مورد مقایسه قرار بگیرند. در [20] یک کنترلر پسخور بر مبنای جهت-میدان-برداری[[10]](#footnote-11) برای مسئله تعقیب مسیر و پایدارسازی نقطه­ای ارائه شده است که در این پژوهش به اختصار با VFO به آن اشاره می­شود. کنترلر VFO مسیر به نسبت بهینه­ای را طی می­کند، اگر چه که قانون کنترلی تنها یک پاسخ برای مسئله پایدار سازی نقطه­ای فراهم می­کند. در [18]، یک کنترلر زمان معین[[11]](#footnote-12) ارائه شده، که به اختصار با FT به آن اشاره می­شود، که از نقاط ضعف آن یکی وجود نقطه منفرد در زاویه 90 درجه در جهت­گیری ربات و دیگری ناپایداری آن در زمان تعویض قانون کنترلی­اش است. برای مقایسه روش­های متفاوت، سه المان برای اندازه­گیری شامل انرژی مصرف شده، که در   
(2-25) تعریف شده است، مسافت طی شده و زمان انجام فرآیند در نظر گرفته شده است. انرژی مصرف شده برای رباتی با جرم m=1 kg و لختی دورانی I=1 kg.m2 مطابق زیر محاسبه شده است. همچنین فرض شده است که مرکز دوران و مرکز جرم ربات بر روی هم منطبق هستند.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑25) |  |

در اولین شبیه سازی مقایسه­ای، 4 کنترلر برای یک مسئله شبیه سازی که در [20] طراحی شده است، به کار گرفته شده­اند. در مسئله مذکور ربات باید از محل ابتدایی [0**،**2**،**0] به موقعیت نهایی [785/0**،** 1- **،**2] منتقل شود. ضرایب کنترلر VFO، که مشابه مقاله اصلی است، در ردیف اول جدول 2-2 و ضرایب کنترلر FT، که با سعی و خطا بدست آمده­اند، در ردیف اول جدول 2-3 گزارش شده­اند. ضرایب کنترلرهای (2-20) و (2-17) نیز در جدول 2-4 مشخص شده­اند. مسیر طی شده در دستگاه مختصات کارتزین و سرعت­های خطی و زاویه­ای ربات در نخستین شبیه سازی مقایسه­ای در شکل­های 2-9 تا 2-14 به نمایش درآمده­اند. معیارهای عددی عملکرد کنترلرها نیز محاسبه شده و در جدول 2-5 گزارش شده­اند. پرش اشاره شده در سرعت زاویه­ای ربات، که در معادلات (2-18) و (2-19) نیز مورد توجه قرار گرفت، در شبیه سازی مقایسه­ای در حالت اول برای کنترلر (2-17) رخ می­دهد. لحظه­ای که پرش رخ می­دهد در شکل 2-12 بزرگ نمایی شده است.

جدول ‏2‑2 ضرایب کنترلر VFO در شبیه سازی­های مقایسه­ای

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| شماره  شبیه سازی |  |  |  |
| I | 10 | 5 | 3 |
| II | 1 | 4 | 1/0 |
| III | 1 | 8 | 1 |

جدول ‏2‑3 ضرایب کنترلر FT در شبیه سازی­های مقایسه­ای

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| شماره  شبیه سازی |  |  |  |  |  |  | T |
| I | 2 | 2 | 2 | 2 | 02/1 | 5/0 | 52/2 |
| II | 5/1 | 1/1 | 3 | 2 | 67/0 | 5/0 | 2 |
| III | 3 | 2 | 3 | 2 | 9/0 | 5/0 | 1/2 |

جدول ‏2‑4 ضرایب کنترلرهای (2-17) و (2-20) در شبیه سازی مقایسه­ای نخست

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| کنترلر |  |  |  |
| (2-20) | 6/9 | 25 | 29 |
| (*2-17*) | 3 | 1/4 | 13 |

جدول ‏2‑5 معیار عملکرد الگوریتم­های کنترلی در شبیه سازی مقایسه­ای نخست

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| کنترلر | انرژی مصرف شده | مسافت پیموده شده (m) | زمان  (sec) |
| VFO | 4653/28 | 083/4 | 68/1 |
| FT | 7916/10 | 0006/5 | 81/3 |
| (2-20) | 3805/51 | 6886/4 | 48/1 |
| (2-17) | 7516/27 | 0454/6 | 24/5 |

نتایج نشان می­دهد که کنترلرهای VFO و FT رفتار مشابهی دارند. نتایج عددی به دست آمده نیز بیانگر این واقعیت است که کنترلر FT کم­ترین انرژی مصرف شده و کنترلر VFO کم­ترین مسافت را برای رسیدن به هدف طی می­کند. حائز اهمیت است که کنترلر (2-20) در کم­ترین زمان ربات را به مقصد می­رساند. در این شبیه سازی، کنترلر FT بهترین عملکرد را میان سایرین داراست. اگر چه که سادگی و درجه آزادی اضافی کنترلرهای ارائه شده در مقابل مقداری انرژی مصرف شده و مسافت طی شده بیشتر، استفاده از آنان را توجیه می­کند. شرایطی را در نظر بگیرید که در شبیه سازی مقایسه­ای نخست نیاز است که ربات به موقعیت مذکور انتقال داده شود و یک حصار در پایین آن قرار گرفته باشد. در این شرایط کنترلرهای VFO و FT توانایی انجام مأموریت را به علت وجود مانع دارا نیستند. در این جاست که درجه آزادی اضافی کنترلرهای ارائه شده به کمک آمده و مشکل را بر طرف می­سازند. در این حالت خاص با استفاده از کنترلر   
(2-20) مسئله تشریح شده حل خواهد شد.

|  |  |
| --- | --- |
|  | D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\VFO\2.png |
| شکل ‏2‑9 مسیر کنترلر (2-20). جهت­گیری ربات با مثلث در مسیر نمایش داده شده است. شبیه سازی مقایسه­ای نخست. | شکل ‏2‑10 ورودی­های کنترلر (2-20). شبیه سازی مقایسه­ای نخست.  (--) . (-) . |
|  |  |
| شکل ‏2‑11 مسیر کنترلر (2-17). جهت­گیری ربات با مثلث در مسیر نمایش داده شده است. شبیه سازی مقایسه­ای نخست. | شکل ‏2‑12 ورودی­های کنترلر (2-17). شبیه سازی مقایسه­ای نخست.  (--) . (-) . |
|  | D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\Point stabilization\Finite time\VFOFT2.png |
| شکل ‏2‑13 مسیر کنترلرهای VFO و FT. جهت­گیری ربات با مثلث در مسیر نمایش داده شده است. شبیه سازی مقایسه­ای نخست. | شکل ‏2‑14 ورودی­های کنترلرهای VFO و FT. شبیه سازی مقایسه­ای نخست.  (--) . (-) . |

در شبیه سازی مقایسه­ای دوم، عملکرد چهار کنترلر در مسئله­ای که در [18] طراحی شده، امتحان شده است. در این حالت، ربات باید به گونه­ای رانده شود تا از پیکربندی آغازین [2/0-**،**1**،**4] به مبدأ مختصات برود. ضرایب کنترلرها و معیارهای عملکردی آنان در جداول *2-2*، 2-3، *2-6* و 2-7 گزارش شده است. نتایج نیز در شکل­های 2-15 تا 2-20 نمایش داده شده­اند.

جدول ‏2‑6 ضرایب کنترلرهای (2-17) و (2-20) در شبیه سازی مقایسه­ای دوم

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| کنترلر |  |  |  |
| (2-20) | 5/3 | 7 | 5 |
| (*2-17*) | 4 | 4/1 | 13 |

جدول ‏2‑7 معیار عملکرد الگوریتم­های کنترلی در شبیه سازی مقایسه­ای دوم

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| کنترلر | انرژی مصرف شده | مسافت پیموده شده (m) | زمان  (sec) |
| VFO | 2113/32 | 5393/6 | 23/3 |
| FT | 1446/20 | 1738/12 | 06/4 |
| (2-20) | 2143/20 | 6986/7 | 37/8 |
| (2-17) | 9899/29 | 6017/4 | 95/5 |

عملکرد کنترلرها در شبیه سازی مقایسه­ای دوم حاکی از برتری کنترلر (2-17) است بخصوص در معیاری مانند میزان مسافت طی شده، البته باید به این نکته توجه داشت که تلاش­های کنترلی کنترلرها به یکدیگر نزدیک هستند. در حقیقت، عملکرد کنترل (2-17) به طور کامل به کارکرد بهینه نزدیک است. کنترلر VFO این شبیه سازی را در کم­ترین زمان انجام می­دهد اما انرژی بیشتری نیز مصرف می­کند. وجود ناپیوستگی در سرعت خطی کنترلر FT در زمان سویچینگ آن، یک نقطه بحرانی برای این کنترلر قلمداد می­شود چرا که در پی آن شتاب زیاد و در نتیجه نیروی زیاد به ربات اعمال می­شود. طبیعت دو مرحله­ای بودن کنترلر FT نیز در زمان همگرایی آن به مبدأ، موجب ازدیاد مسافت پیموده شده آن می­شود.

در آخرین شبیه سازی مقایسه­ای، فرآیند طراحی شده بدین صورت است که ربات باید از نقطه با مشخصات [0**،**2**،**0] به موقعیت نهایی [0**،** 2-**،**0] انتقال داده شود. این تغییر مکان به عنوان پارک کردن موازی نیز شناخته می­شود. در این شبیه سازی، تنها معیارهای عملکردی محاسبه شده و در جدول*2-9* گزارش شده­اند. ضرایب مربوط به کنترلرها نیز در جداول 2-3، 2-2 و 2-8 ارائه شده­اند.

جدول ‏2‑8 ضرایب کنترلرهای (2-17) و (2-20) در شبیه سازی مقایسه­ای سوم

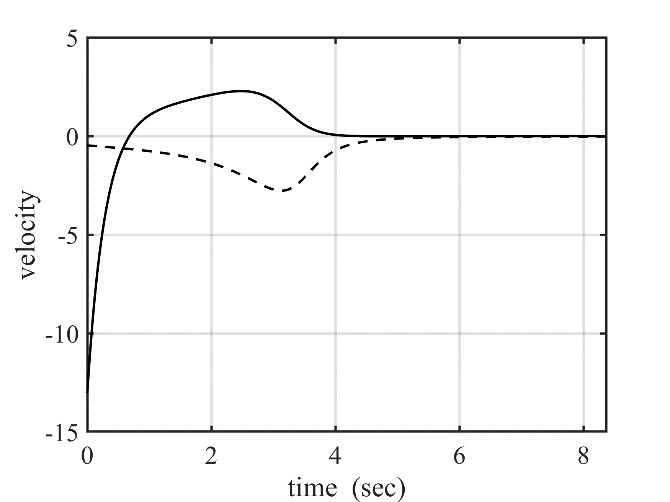
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| کنترلر |  |  |  |
| (2-20) | 2 | 6 | 6 |
| (2-17) | 6/0 | 9/2 | 4/2 |

جدول ‏2‑9 معیار عملکرد الگوریتم­های کنترلی در شبیه سازی مقایسه­ای سوم

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| کنترلر | انرژی مصرف شده | مسافت پیموده شده (m) | زمان  (sec) |
| VFO | 8254/45 | 6685/7 | 68/1 |
| FT | 1554/52 | 0394/18 | 37/3 |
| (*2-20*) | 6625/59 | 648/4 | 11/4 |
| (2-17) | 6138/15 | 4498/5 | 93/10 |

معیارهای عملکردی گزارش شده برای شبیه سازی سوم نشان دهنده برتری کنترلر (2-17) در این پژوهش در قیاس با کنترلرهای VFO و FT است. کنترلر VFO کم­ترین زمان و کنترلر (2-20) کم­ترین مسافت طی شده را داراست. اگر چه که مقادیر این معیار برای کنترلر (2-17) نیز نزدیک به کنترلر (2-20) است.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| شکل ‏2‑15 مسیر کنترلرهای VFO و FT.  جهت­گیری ربات با مثلث در مسیر نمایش داده شده است. شبیه سازی مقایسه­ای دوم | |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\Point stabilization\Finite time\new4.png |  |
| شکل ‏2‑16 ورودی­های کنترلرهای VFO و FT. شبیه سازی مقایسه­ای دوم.  (--) . (-) . | شکل ‏2‑17 مسیر کنترلر (2-17). جهت­گیری ربات با مثلث در مسیر نمایش داده شده است. شبیه سازی مقایسه­ای دوم |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\Finite time\4.png |  |
| شکل ‏2‑18 ورودی­های کنترلر (2-17). شبیه سازی مقایسه­ای دوم.  (--) . (-) . | شکل ‏2‑19 مسیر کنترلر (2-20). جهت­گیری ربات با مثلث در مسیر نمایش داده شده است. شبیه سازی مقایسه­ای دوم |

  
شکل ‏2‑20 ورودی­های کنترلر (2-20). شبیه سازی مقایسه­ای دوم.

(--) . (-) .

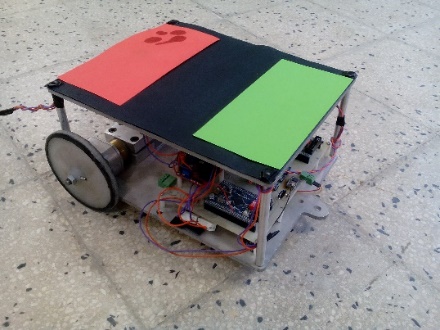
## آزمایشات عملی

در این قسمت، برای سنجش توانایی کنترلرهای ارائه شده در عمل، این کنترلرها به یک ربات با چرخ­های فعال دیفرانسیلی اعمال شده­اند. پارامترهای مربوط به این ربات در جدول 2-10 تشریح شده­اند. چرخ­های فعال این ربات با دو موتور مجزا 24 ولت تحریک می­شوند. سیگنال­های کنترلی که به عنوان ورودی به ربات داده می­شوند، سرعت چرخش چرخ­های راست و چپ آن هستند. رابطه­ی بین ورودی­های مذکور و سرعت خطی و زاویه­ای ربات، که از طرف کنترلر تعیین می­شود، در معادله (2-2) مورد اشاره قرار گرفت. موقعیت و جهت­گیری ربات بوسیله­ی دوربین یک موبایل با سیستم عامل اندروید و برنامه آی-پی وبکم[[12]](#footnote-13) شناسایی می­شود. تلفن همراه در بالای محیط آزمایش قرار داده شده است. جعبه ابزار پردازش تصویر نرم افزار متلب نیز برای آنالیز تصاویر دریافتی که توسط موبایل به رایانه میزبان منتقل می­شود، به کار گرفته شده است. محیط آزمایش، محوطه­ای مستطیل شکل با ابعاد 2/2×9/1 متر مربع است. سطح محیط آزمایش با کاشی پوشانده شده است. زمان نمونه گیری در هنگام آزمایش نیز در حدود 1/0 ثانیه است.

پارک کردن موازی یک مسئله­ی مهم و پرکاربرد در زمینه وسایل نقلیه چرخدار است. بنابراین، این چالش برای سنجش توانایی کنترلرها انتخاب شده است. در آزمایش عملی ربات از موقعیت [0**،** 5/0-**،**0] به پیکربندی هدف با مشخصات [0**،** 5/0**،**0]باید انتقال داده شود. ضرایب کنترلرها در جدول *2-11* گزارش شده­اند. نتایج شامل مسیر طی شده، سرعت چرخشی چرخ­های راست و چپ ربات در شکل­های *2-*21 تا *2-*24 گزارش شده­اند.

همان­طور که در نتایج مشخص است، مسیر پیموده شده تحت اثر کنترلر (2-17) به طور کامل در نیمه­ی راست دستگاه مختصات کارتزین واقع شده است و ربات در طول فرآیند اعمال کنترلر همواره به صورت پادساعتگرد می­چرخد. بنابراین سرعت زاویه­ای چرخ راست آن همواره بزرگتر از چرخ چپ است. در حالی که مسیر کنترلر (2-20) در نیمه­ی سمت چپ دستگاه مختصات قرار گرفته و ربات همواره به صورت ساعتگرد می­چرخد. بنابراین، سرعت زاویه­ای چرخ چپ همواره بزرگتر از چرخ راست است. در نتیجه، براساس نیازمندی­ها و شرایط هر یک از کنترلرها ممکن است که انتخاب شوند. برای مثال، شرایطی را در نظر بگیرید که برخی محدودیت­ها ربات را از حرکت در نیمه­ی راست و یا چپ دستگاه مختصات بازدارد. ویزگی دوگانگی کنترلرها انجام این مأموریت با شرایط ذکر شده را ممکن می­کند.

|  |  |
| --- | --- |
|  | D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\VFO\EXresult2.png |
| شکل ‏2‑21 مسیر ربات در فرآیند پارک موازی. کنترلر (2-17). | شکل ‏2‑22 ورودی­های کنترلر (2-17) در پارک موازی.  (-) . (--) . |
|  | D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\VFO\EXresult4.png |
| شکل ‏2‑23 مسیر ربات در فرآیند پارک موازی. کنترلر (2-20). | شکل ‏2‑24 ورودی­های کنترلر (2-20) در پارک موازی.  (-) . (--) . |



شکل ‏2‑25 ربات با چرخ­های دیفرانسیلی

جدول ‏2‑10 پارامترهای ربات

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| پارامترها | توضیحات | مقادیر | واحدها |
| r | شعاع چرخ | 05/0 | [m] |
| b | نصف فاصله میان دو چرخ فعال ربات | 135/0 | [m] |

جدول ‏2‑11 ضرایب کنترلرهای (17-2) و (20-2) در پارک موازی

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| کنترلر |  |  |  |
| (2-17) | 57/0 | 8/1 | 4/2 |
| (2-20) | 3/1 | 3/1 | 55/1 |

## پایدار سازی نقطه­ای همراه با اجتناب از موانع

در بخش حاضر، کاربرد روش ارائه شده در حضور موانع به صورت اختصاری برای کنترلر (2-20) توضیح داده می­شود. برای پرهیز از موانع، برخی اصلاحات به کنترلر باید افزوده گردد. اصلاحات به صورت مشابه قابل اعمال به کنترلر (2-17) نیز هستند.

ساختمان ساده کنترلرهای ارائه شده امکان استفاده از آن­ها در محیط واقعی و با وجود موانع را فراهم می­کند. با توجه به (2-20)، فرمان کنترلری دارای دو قسمت است. بخش اول سرعت خطی ربات را تعیین می­کند. بوسیله این ورودی، کنترلر تلاش می­کند تا فاصله­ی طولی خود با موقعیت هدف، ، که در مختصات محلی ربات تعریف می­شود، کم کند (مطابق شکل *2-*2). اگر مقداری مثبت باشد در نتیجه سرعت خطی متناظر با آن نیز مثبت می­شود. این سرعت خطی موجب می­شود که ربات به موقعیت هدف نزدیک­تر شود. از طرف دیگر، اگر دارای مقداری منفی باشد، سرعت خطی متناظر با آن نیز منفی بوده و را کاهش می­دهد.

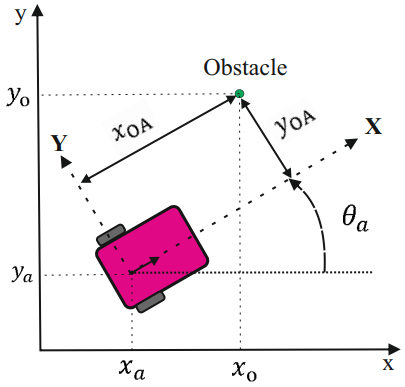
اگر کنترلر به صورت عکس عمل کند، ربات از موقعیت هدف دور می­شود. این موضوع به این معتی است که اگر دارای مقداری مثبت باشد، کنترلر سیگنال ورودی برابر با را به عنوان سرعت خطی ورودی برای ربات در نظر بگیرد. روشن است که این سرعت خطی دارای مقداری منفی است و موجب افزایش هرچه بیشتر می­شود. بنابراین از این ویژگی برای اجتناب از موانع نیز می­توان استفاده کرد. در حقیقت، اگر فاصله­ی طولی بین موقعیت واقعی ربات و یک نقطه با علامت عکس به عنوان سرعت خطی به ربات اعمال شود، ربات از نقطه مذکور دور خواهد شد.

فرض کنید که مانعی در فضای کاری ربات در موقعیت در دستگاه مختصات کارتزین قرار بگیرد. بنابراین در گام ابتدایی لازم است تا موقعیت مانع در دستگاه مختصات متصل به ربات توصیف شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏2‑26) |  |

حال اگر ضابطه­ای به صورت که مقداری ثابت و مثبت است در بخش سرعت خطی به کنترلر افزوده گردد، ربات را از مانع دور می­کند. اما باید توجه شود که با نزدیک شدن ربات به مانع، ضابطه بازدارنده­ی کوچک می­شود. بنابراین برای تضمین عدم برخورد بین ربات و مانع ضابطه­ی جایگزین می­شود. توجه به این نکته ضروری است که با نزدیک شدن ربات به مانع، ضابطه بازدارنده بیشتر و بیشتر می­شود. در نتیجه، قانون کنترلی جدید به شکل ذیل تبدیل می­شود:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| (‏2‑27) | |  |  | | --- | --- | | + | | |  | |



شکل ‏2‑26 موقعیت مانع در مختصات محلی متصل به ربات

به منظور عدم تغییر در پایداری قانون کنترلی، یک ناحیه­ی دایره­ای شکل در اطراف مانع به عنوان ناحیه عمل ضابطه بازدارنده در نظر گرفته می­شود. در حقیقت، اگر ربات به این ناحیه ورود کند، قانون کنترلی از (2-20) به (2-27) تغییر می­کند. در ضمن موقعیت هدف باید خارج از محوطه­ی اثر موانع قرار بگیرد. با این فرض، اثبات قانون کنترلی معتبر است چرا که اگر ربات به محوطه­ی اثر موانع داخل شود، قانون کنترلی جدید آن را از محوطه­ی اثر خارج می­کند. سپس قانون کنترلی اصلی، ربات را به سمت موقعیت هدف که خارج از محوطه­ی اثر موانع است، هدایت می­کند. قابل توجه است که خارج از محوطه­ی اثر موانع، قانون کنترلی ثابت است وتغییری در آن ایجاد نمی­شود. از آن جا که رویکرد ارائه شده برای پرهیز از برخورد با موانع بیشتر حالت بصری دارد، بنابراین کارکرد و توانایی آن بوسیله­ی شبیه سازی رایانه­ای اثبات می­شود، همانند آن چه که در تحقیقات مشابه نیز صورت پذیرفته است [58-59]. تأثیر قانون کنترلی اصلاح شده در محوطه­ی اثر مانع در شکل *2-*27 نمایش داده شده است. خاطر نشان می­گردد که شعاع محوطه­ی اثر برای مانع مطابق با ابعاد آن وعملکرد ربات انتخاب می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (الف) | (ب) |

شکل ‏2‑27 فرامین بازدارنده برای ربات در محوطه اثر مانع  
(الف) حرکت رو به جلو ربات (ب) حرکت رو به عقب ربات

شرایط در آخرین شبیه سازی مقایسه­ای بخش قبل برای اثبات توانایی رویکرد پیشنهادی انتخاب شده است. دو مانع ثابت در فضای کاری ربات قرار گرفته­اند. در هر شبیه سازی انجام شده، مکان یکی از موانع ثابت و موقعیت مانع دیگر تغییر می­کند. ضرایب کنترلی مشابه جدول*2-*8 هستند. نتایج بدست آمده حاکی از توانایی روش پیشنهادی در دور کردن ربات از مانع و رساندن آن به موقعیت هدف است. محوطه­ی اثر موانع، دایره­ای به شعاع یک متر در نظر گرفته شده است. مقدار برابر با 4 در نظر گرفته شده است. در هنگام انجام شبیه سازی، ربات همواره ساعتگرد می­چرخد، مانع را دور می­زند و به سمت هدف می­رود. همان­طورکه مشخص است فرامین بازدارنده ربات را از نزدیک شدن به موانع باز می­دارند. هم­چنین جهت ثابت گردش ربات از گیر کردن آن در یک حلقه تکراری جلوگیری می­کند. توجه کنید که روش پیشنهادی قابل استفاده در یک محیط پویا با موانع متحرک نیز هست.

|  |  |
| --- | --- |
| 1 (الف) | 2 (ب) |
| 3 (پ) | 4 (ت) |
| 5 (ث) | 6 (ج) |

شکل ‏2‑28 مسئله پایدار سازی نقطه­ای همراه با وجود موانع. ربات بوسیله مثلث­هایی نشان داده شده است.

## نتیجه‌‌گیری

در این بخش، دو قانون کنترلی برای پایدار سازی ربات متحرک چرخدار ارائه شد. نتایج بدست آمده توانایی قوانین را که با به کار بردن تابع شبه-لیاپانوف و لم باربالا بدست آمده­اند، اثبات می­کند. وجود دو قانون کنترلی مجزا که منجر به وجود دو مسیر متفاوت می­شوند و هم­چنین عملکرد مناسب کنترلرها از مهم­ترین مزیت­های روش­های ارائه شده است. هر دو قانون کنترلی فاقد هرگونه نقطه منفرد در دستگاه مختصات کارتزین هستند. ساختار ساده قوانین کنترلی شرایطی را مهیا می­کند تا روش­های پیشنهادی بوسیله­ی پردازشگرهای ساده مورد استفاده قرار گیرد، چرا که از حجم محاسبات کمی برخوردار هستند. اصلاح قوانین کنترلی برای استفاده در محیطی با داشتن موانع نیز مورد بررسی قرار گرفت و در نتیجه آن روش­های پیشنهادی دارای این توانایی هستند که در محیط کاملا واقعی به کار گرفته شوند.

# فصل سوم

طراحی کنترلر بروز شونده برخط برای تعقیب مسیر

## مقدمه

تعقیب مسیر یک مسئله مشترک در حوزه ربات­های متحرک است که در طول دو دهه گذشته موضوع بسیاری از پژوهش­ها بوده است. بنابراین در کنار تلاش برای یافتن کنترلرهایی که عملکرد بهتری داشته باشند، بهبود و بهینه سازی قوانین کنترلی موجود ضروری به نظر می­رسد. قانون­های کنترلی مربوط به تعقیب مسیر معمولا دارای ثوابتی هستند که عملکرد ربات تا حد زیادی وابسته به آن­ها است. در این بخش یک روش مبتنی بر شبکه­های عصبی پیشنهاد می­شود تا ثوابت یک قانون کنترلی معروف در زمینه ربات­های متحرک چرخدار را به صورت خودکار به روز بکند. روش پیشنهادی سرعت همگرایی قانون کنترلی اصلی را افزایش می­دهد. همچنین، شبیه­سازی­ها و آزمایشات تجربی نیز برای سنجش قابلیت الگوریتم ارائه شده انجام خواهد شد. نتایج بدست آمده از این آزمایشات مؤید توانایی روش پیشنهادی خواهد بود.

## کنترلر سیتماتیکی پایه ربات

ربات متحرک چرخدار رانده شده تفاضلی یک وسیله نقلیه چرخدار است که دو چرخ آن به صورت مجزا قابلیت تحریک را دارا هستند. حرکت این ربات می­تواند بوسیله سرعت خطی، و سرعت زاویه­ای آن تعریف شود. این دو سرعت نیز به نوبه خود قابل استخراج از سرعت­های زاویه­ای چرخ­های ربات هستند.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑1) |  |

که *b* بیانگر نصف فاصله میان چرخ­های فعال ربات متحرک است و *r* نیز شعاع چرخ­هاست. بعلاوه این­که **سرعت زاویه­ای چرخ چپ و به طور مشابه**  **نیز سرعت زاویه­ای چرخ راست است.**

**در مسئله تعقیب مسیر، هدف تعقیب پیکربندی مرجع و سرعت­هایی است که توسط طراح مسیر تدوین شده است. لازم به ذکر است که خروجی­های طراح مسیر شامل سرعت­های مرجع، *، و پیکربندی مرجع،*** *، می­شود. در ضمن جهت­گیری مرجع و سرعت­های خطی و زاویه­ای مرجع نیز به صورت زیر به مشتقات موقعیت ربات مرجع وابسته هستند.*

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑2) |  |
|  |
|  |

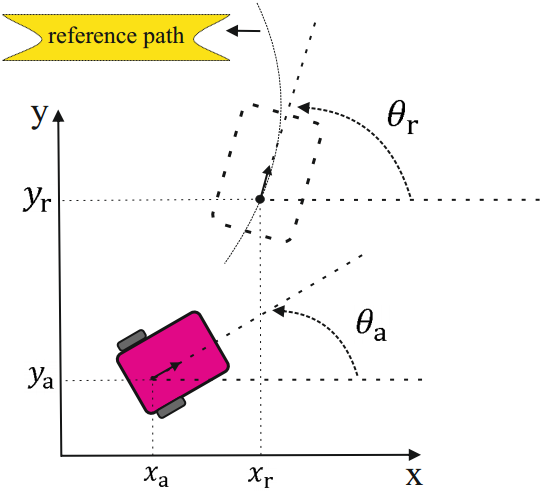
***از دیدگاه کنترل حرکت ربات، مدل سینماتیکی حرکت ربات در مختصات کارتزین، تحت قیود غیرهولونومیک مربوط به غلتش خالص به شکل ذیل قابل بیان است.***

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑3) |  |

فرض مربوط به عدم لغزش جانبی به شکل زیر نیز یک قید به معادله­ی بالا اضافه می­کند.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑4) |  |

قانون کنترلی موقعیت حقیقی ربات، ، را دریافت می­کند، سپس خطای موقعیت ربات را محاسبه می­کند. در نهایت تلاش می­کند تا خطای محاسبه شده را در طول مسیر بوسیله اعمال یک سیگنال کنترلی مناسب به ربات کمینه کند. پیکربندی حقیقی و مرجع در شکل 3-1 نمایش داده شده است.



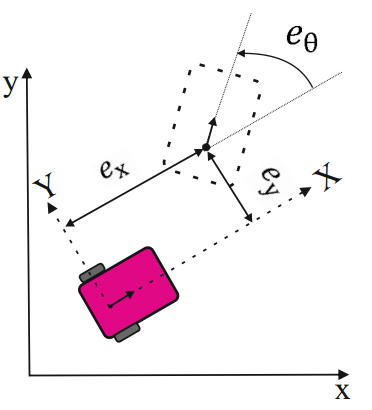
شکل ‏3‑1 پیکربندی­های حقیقی و مرجع ربات

حال ضروری است تا خطای تعقیب مسیر به درستی شناسایی شود. خطای پیکربندی ربات مشابه [11]، در دستگاه مختصات متصل به بدنه ربات تعریف می­شود. محور X در مختصات محلی متصل به ربات در راستای جهت­گیری حقیقی ربات، **، میزان شده است. خطای موقعیت و مختصات محلی ربات در شکل 3-2 مشهود است.**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑5) |  |

**معادله (3-5) در واقع تفاوت میان موقعیت و جهت­گیری ربات مرجع و ربات حقیقی را نشان می­دهد. نرخ تغییرات خطا نیز از محاسبه مشتق معادله (3-5) بدست می­آید.**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑6) |  |



شکل ‏3‑2 خطای پیکربندی و مختصات محلی ربات

**تمام معادلات و روابطی که تا بدین مرحله بیان شد، در نهایت منجر به تعریف قانون کنترلی غیر خطی می­شود. قانون کنترلی سعی می­کند تا خطای پیکربندی ربات نسبت به مقادیر مرجع در طی عملکرد ربات را در مسیر کاهش دهد. قانون کنترلی پیشنهادی در (3-7) تمام خطاهای پیکربندی ربات را به سمت صفر همگرا می­کند [11].**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑7) |  |

**که** ، و ضرایب مثبت هستند و همچنین داریم که: .

بحث در مورد پایداری قانون کنترلی، تاثیرات الگوریتم بروز رسانی ضرایب بر روی کنترلر و همگرایی خطاها فعلا به بعد موکول می­شود و پس از توضیح الگوریتم تنظیم ضرایب در بخش بعد مورد بررسی قرار می­گیرد.

## الگوریتم برخط بروز رسانی ضرایب

برای ارتقاء نرخ همگرایی قانون کنترلی و بهینه سازی پاسخ سیستم، در این بخش روشی تشریح می­شود تا ضرایب کنترلر را به صورت برخط بروز رسانی کند. شبکه عصبی که دارای مزیت­هایی همچون توانایی یادگیری، انطباق و انعطاف پذیری بالاست، به عنوان ابزاری قدرتمند برای کنترل سیستم­های غیرخطی و پیچیده شناخته می­شود. شبکه عصبی به کار رفته در این پژوهش، قابل قسمت کردن به دو شبکه عصبی مجزا است. هر دوی این شبکه­ها دارای یک لایه (نورون) هستند و از طریق یادگیری بوسیله الگوریتم انتشار پسخور تابع هزینه تعریف شده در (3-12) را کمینه می­کند. در مقایسه با شبکه­های عصبی مرسوم چند لایه، ساختار پیچیده و محاسبات سنگین برای بروز رسانی اوزان موجود در شبکه، در شبکه­ی عصبی­های به کار گرفته شده در این پایان نامه، ساده سازی شده­اند. ساختار ساده شبکه­های عصبی مطالعه پایداری کل کنترلر را امکان پذیر می­کند و همچنین موجب می­شود تا روش مذکور زمان بر نباشد. ساختار الگوریتم تنظیم و بروز رسانی ضرایب پیشنهادی برای مسئله تعقیب مسسیر ربات متحرک چرخدار در اشکال 3-3 و 3-4 نمایش داده شده است. در گام ابتدایی شبکه­ها مسیر مطلوب و پیکربندی خطا را به عنوان ورودی دریافت می­کنند. با توجه به تابع هزینه و استفاده از روش گرادیان نزولی، تغییرات مربوط به ضرایب محاسبه می­شود. تغییرات محاسبه شده ضرایب کنترلر را به روز می­کنند و سپس ضرایب جدید قانون کنترلی جدید را تشکیل می­دهند. در انتها، قانون کنترلی جدید از طریق سیگنال­های کنترلی به ربات اعمال می­شود. فرآیند طی شده در ضمن بروز رسانی ضرایب موجب کاهش تابع هزینه می­شود که این امر در [39] اثبات شده است. برای پی بردن به ساختار شبکه عصبی بهتر است که از انتها به بررسی آن بپردازیم. خروجی هر شبکه عصبی به صورت مشخص می­شود که i=1,2.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑8) |  |

که ، و مثبت و متغیر با زمان و وابسته به خطاهای مسئله تعقیب مسیر هستند. در واقع قانون کنترلی بروز شده است. آخرین بخش در خود ساختار شبکه­های عصبی، تابع سیگموید است. در نتیجه، رابطه بین **و تابع سیگموید به شکل زیر انتخاب شده است.**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑9) |  |

**که**  ورودی تابع سیگموید، ، است که به شکل ذیل انتخاب شده است.

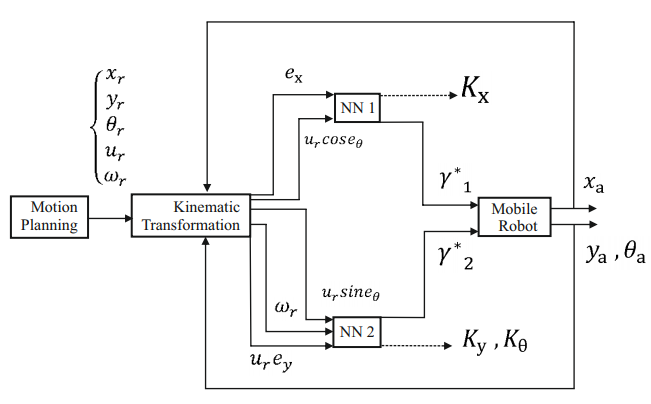
|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑10) |  |

**که**  پارامتری است که شکل تابع سیگموید را تعیین می­کند. ورودی تابع سیگموید شامل خطای موقعیت و مسیر مرجع طراحی شده توسط طراح مسیر و تبدیلات سینماتیکی است که به شکل ذیل انتخاب می­شود.

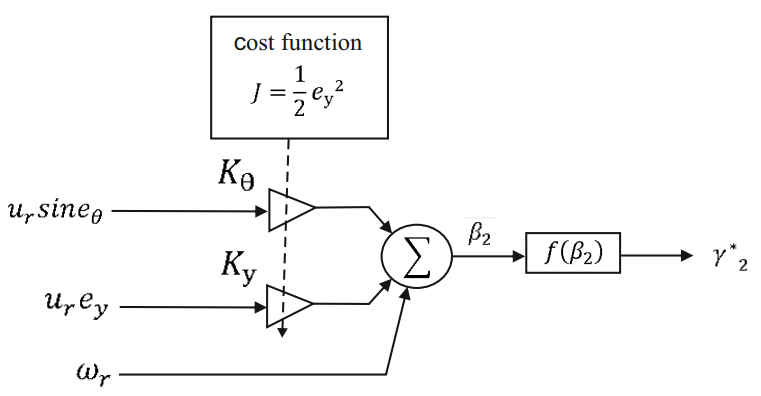
|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑11) |  |

**توجه به این نکته ضروری است که** ، و ضرایب کنترلر قبل از اعمال روش تنظیم خودکار هستند. همان­طور که پیشتر نیز اشاره شد، در واقع قانون کنترلی پیش از انجام فرآیند بروز رسانی ضرایب است که به عنوان ورودی به شبکه عصبی داده می­شود و قانون کنترلی پس از انجام فرآیند بروز رسانی است که به سیستم ربات اعمال می­شود. در طی فرآیند بروز رسانی ضرایب، و به گونه­ای تنظیم می­شوند تا تابع هزینه به شکل زیر را کمینه کنند.

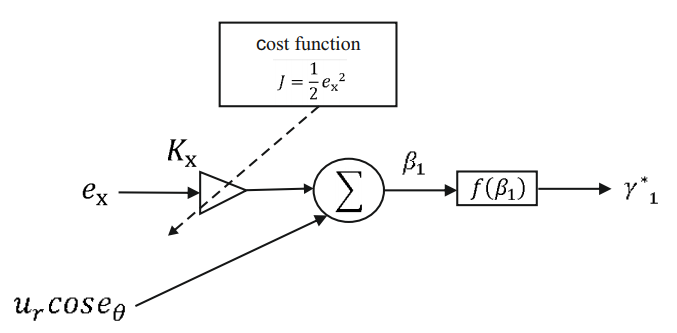
|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑12) |  |



شکل ‏3‑3 شماتیک مربوط به شبکه­های عصبی پیشنهادی



(الف)



(ب)

شکل ‏3‑4 بلوک دیاگرام مربوط به شبکه­های عصبی

روابط ذیل نشان دهنده فرآیندی است که مبتنی بر روش گرادیان نزولی برای هر گام و مرحله، مقادیر ضرایب کنترلی بروز رسانی می­شوند:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑13) |  |
| (‏3‑14) |  |
| (‏3‑15) |  |

که نشان دهنده نرخ تغییرات ضرایب است ( برای اطلاع بیشتر پیوست 3 [39] مطالعه شود) و **فاصله­ی زمانی میان هر یک از مراحل انجام فرآیند تنظیم ضرایب است. قاعده­ی زنجیره­ای برای استخراج نرخ تغییرات ضرایب به شکل زیر به کار گرفته شده است.**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑16) |  |
| (‏3‑17) |  |
| (‏3‑18) |  |

که ، و نرخ یادگیری شبکه عصبی هستند که باید غیرمنفی باشند. به منظور راحتی بیشتر در استخراج معادلات، در این جا در نظر می­گیریم که و . مشابه این فرض در منابع  
[37-40-41] نیز یافت می­شود. محاسبات مورد نیاز مربوط به معادلات (3-16) تا (3-18) انجام شده و در جدول 3-1 ارائه می­گردد. با اعمال محاسبات موجود در جدول 3-1 به معادلات (3-16) تا (3-18)، در نهایت تغییرات ضرایب به شکل زیر به دست می­آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑19) |  |
| (‏3‑20) |  |
| (‏3‑21) |  |

جدول ‏3‑1 محاسبات مربوط به پارامترهای دخیل در فرآیند بروز رسانی

|  |  |
| --- | --- |
| پارامترها | مقادیر |
|  |  |
|  |  |
|  | 1 |
|  | 1 |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

با توجه به روابط بدست آمده از معادلات (3-19) تا (3-21)، واضح است که و همواره دارای روند صعودی هستند، هر چند که می­تواند صعودی یا نزولی باشد. در شبیه سازی­های رایانه­ای و عملی باید قیدی به تغییرات افزوده گردد تا مانع از منفی شدن آن شود ( بنابراین کمترین مقدار مجاز برای برابر با 1/0 در نظر گرفته شده است). توجه به این نکته ضروری است که مقادیر منفی برای موجب ناپایدار شدن قانون کنترلی می­شود.

حال زمان آن رسیده است که پایداری قانون کنترلی مورد بررسی قرار گیرد. تابع شبه-لیاپانوفی که در این پایان نامه پیشنهاد شده است به طور تقریبی مشابه تابعی است که پیشتر در [11] مطرح شده است با یک تفاوت که از آن حذف شده است. این کار موجب ساده سازی فرآیند اثبات می­گردد و همچنین به کلیت فرآیند اثبات نیز صدمه­ای وارد نمی­کند. با این توضیحات تابع شبه-لیاپانوف زیر را در نظر بگیرید.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑22) |  |

مشخص است که *L* یک تابع از پایین کراندار با مقدار کمینه صفر است. با در نظر گرفتن لم باربالا  
 [57]، در ادامه اثبات می­گردد که تمامی خطاهای پیکربندی به سمت صفر همگرا می­شوند. برای این منظور مشتق تابع شبه-لیاپانوف به شکل زیر محاسبه می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑23) |  |

سپس با اعمال نرخ خطاهای محاسبه شده در (3-6) به خواهیم داشت:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑24) |  |

با انتخاب سرعت خطی و زاویه­ای در (3-8)، منفی نیمه معین می­شود. این رابطه در معادله (3-25) بیان شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑25) |  |

شرط سوم در لم باربالا، **باید به صورت یکنواخت در زمان پیوسته باشد، نیز باید مد نظر قرار گیرد. برای برآورده شدن این منظور باید اثبات گردد که**  همواره محدود است. بنابراین با مشتق گیری از رابطه (3-25)، امکان محاسبه فراهم می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑26) |  |

**با توجه به (3-25) داریم که و بنابراین**  و همواره محدود هستند. همچنین باید توجه شود که و اساسا همواره محدود هستند. در نتیجه، ورودی­های کنترلی (3-8) و (3-11) و قواعد مربوط به بروز رسانی ضرایب در (3-19) تا (3-21) که متشکل از ترم های ،، و و ورودی­های طراح مسیر هستند، همگی همواره محدود هستند. با توجه به معادلات (3-6)، (3-8)، (3-11)، (3-19)، (3-20) و (3-21)، از آن جا که تمامی ترم­های موجود در (3-26) محدود هستند، در نتیجه نیز محدود بوده و تمامی شرایط در لم باربالا ارضا می­گردد. در نهایت بنابر همین لم، و به سمت صفر همگرا می­شوند. در صورتی که فرض شود که به صورت یکنواخت به سمت صفر میل می­کند آن گاه باید برابر صفر گردد. با توجه به ردیف آخر معادله (3-6) خواهیم داشت که . بنابراین با استفاده از (3-8) خواهیم داشت که . در نتیجه سه ترم خطای ، و به صفر همگرا می­شوند.

## شبیه سازی­های عددی

**برای سنجش توانایی الگوریتم بروز رسانی پیشنهادی، ابتدا شش سناریو شبیه سازی برنامه ریزی شده است که شامل دو مسیر متفاوت و سه شرایط اولیه متفاوت برای هر کدام می­شود. در گام بعد یک مسیر مربعی شکل برای بررسی عملکرد الگوریتم در نظر گرفته شده است. سپس، یک آنالیز مقایسه­ای با یک قانون کنترلی که اخیرا در** [60] پیشنهاد شده است، ترتیب داده شده است.

مسیرهای طراحی شده برای شش سناریو ابتدایی شامل یک مسیر دایروی و یک مسیر دایروی با موج سینوسی می­شوند. معادلات مربوط به این دو مسیر به شکل ذیل در نظر گرفته شده است:

* مسیر دایروی

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑27) |  |

* مسیر دایروی با موج سینوسی

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑28) |  |

**شرایط اولیه برای هر دو ربات مرجع و حقیقی در جدول 3-2 و 3-3 ذکر شده­اند. هر شبیه سازی برای دو حالت انجام گرفته است: در حالت اول، ضرایب کنترلر ثابت هستند و در طول فرآیند تغییر نمی­کنند. در حالت دوم، پروسه بروز رسانی ضرایب به کار گرفته شده و این ضرایب با بهره گیری از شبکه­ی عصبی تشریح شده، بروز می­شوند. مقادیر اولیه ضرایب کنترلی در جدول 3-4 ذکر شده­اند. برای تمام شش شبیه سازی صورت گرفته، تنها یک بار فرآیند آموزش شبکه عصبی صورت گرفته و پارامترهای مربوط به آن مشخص شده و در جدول 3-5 بیان شده­اند. بنابراین روشن است که ساختار شبکه عصبی در هر شش شبیه سازی یکسان است. گام زمانی، ، برای تمام شبیه سازی­های عددی برابر با**  **ثانیه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در اشکال مرتبط با مسیر طی شده توسط ربات، ربات بوسیله مثلث نمایش داده شده است.**

جدول ‏3‑2 **شرایط اولیه برای مسیر دایروی**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| سناریو | مرجع | حقیقی |
| I | [0 , 0.4 , π] | [0.1 , 0.3 ,] |
| II | [0.3 , 0.5 , π] |
| III | [0 , 0.3 , ] |

جدول ‏3‑3 **شرایط اولیه برای مسیر دایروی با موج سینوسی**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| سناریو | مرجع | حقیقی |
| IV | [0.4 , 0 , ] | [0.3 , -0.1 ,] |
| V | [0.5 , -0.2, ] |
| VI |  |
| [0.32 , 0 ,1.6] |

جدول ‏3‑4 **مقادیر اولیه ضرایب کنترلی در شبیه سازی­ها**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *ضرایب* |  |  |  |
| *مقادیر* | 1 | 1 | 1 |

جدول ‏3‑5 **پارامترهای مربوط به شبکه­های عصبی**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *پارامتر* |  |  |  |  |
| *مقادیر* | 100 | 3000 | 4500 | 2/0 |

**نتایج شبیه سازی­ها شامل مسیر طی شده، سرعت­های خطی و زاویه­ای ربات، خطاهای تعقیب مسیر و تغییرات ضرایب در طول شبیه سازی برای سناریو اول برای هر یک از دو حالت اشاره شده در اشکال 3-5 تا 3-8 نمایش داده شده­اند. اما برای سایر سناریوها تنها مسیر طی شده برای هر حالت در اشکال 3-9 تا 3-13 نشان داده شده است. یک معیار عملکرد،** *E***، نیز برای ساده­تر کردن مقایسه دو حالت ضرایب ثابت و ضرایب بروز شونده در هر سناریو مطابق ذیل تعریف شده است.**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑29) |  |

**در حقیقت** *E* به گونه­ای بیانگر تابع هزینه انتخاب شده، *J،* است که با به کار گیری الگوریتم بروز رسانی ضرایب سعی در کاهش آن داریم. از توجه به اشکال 3-5 و 3-9 تا 3-13 این­گونه برداشت می­شود که روش پیشنهادی نرخ همگرایی مسیر حقیقی به مسیر مرجع را افزایش داده و در نتیجه ربات مسیر نزدیک­تری به مسیر مطلوب را طی می­کند. شکل 3-7 به وضوح نشان می­دهد که زمان همگرایی خطاها تا حدود 5 ثانیه کاهش می­یابد. با توجه به جدول 3-6، الگوریتم پیشنهادی میزان معیار عملکردی را تا حدود 40 درصد و یا بیشتر کاهش می­دهد. بنابراین روش ارائه شده عملکرد ربات را بهبود می­دهد. از سوی دیگر، روش پیشنهادی به گونه­ای دخالت انسان یا اپراتور را در عملکرد کنترلر کاهش می­دهد. عموما، نرخ همگرایی کنترلر به طور همزمان وابسته به عواملی همچون مقادیر ضرایب، شرایط اولیه ربات و مسیر مطلوب است. اگر ضرایب در طی فرآیند عملکرد کنترلر بروز نشوند، تعداد زیادی سعی و خطا باید برای هر مسیر منحصر به فرد و هر شرط اولیه صورت پذیرد تا عملکرد و ضرایب مناسب ربات حاصل شود. از آن­جا که بوسیله الگوریتم بروز رسانی ضرایب، نرخ همگرایی افزایش می­یابد، دیگر نیازی به انتخاب ضرایب برای هر شبیه سازی و برای هر شرایط متفاوت نیست. در شبیه سازی­های این بخش، به جای انجام شش فرآیند سعی و خطا برای یافتن ضرایب مناسب، تنها یک بار برای یکی از شبیه سازی­ها فرآیند آموزش صورت می­گیرد و سپس برای تمام شبیه سازی­ها مورد استفاده قرار می­گیرد.

جدول ‏3‑6 معیار عملکرد محاسبه شده برای تمام سناریوها

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| روش | ضرایب بروز شده | ضرایب ثابت |
| *E* (I) | 4938/7 | 9274/91 |
| *E* (II) | 2530/9 | 9939/13 |
| *E* (III) | 6429/11 | 2678/13 |
| *E* (IV) | 3797/13 | 6570/76 |
| *E* (V) | 4158/4 | 4487/9 |
| *E* (VI) | 3399/13 | 4506/15 |

|  |
| --- |
| شکل ‏3‑5 ضرایب ثابت (راست). ضرایب بروز شونده (چپ). مرجع (--). حقیقی (-) سناریو اول. |
| شکل ‏3‑6 ورودی­های کنترلی. **ضرایب ثابت (آبی). ضرایب بروز شونده (قرمز). سناریو اول.**  (-) . (--) . |
| شکل ‏3‑7 ضرایب ثابت (راست). ضرایب بروز شونده (چپ). سناریو اول.  (.) (m). (--) (m). (-) (rad) |
| شکل ‏3‑8 تغییرات ضرایب. سناریو اول.  (.) . (--) . (-) |
| شکل ‏3‑9 ضرایب ثابت (راست). ضرایب بروز شونده (چپ). مرجع (--). حقیقی (-). سناریو دوم. |
| شکل ‏3‑10 ضرایب ثابت (راست). ضرایب بروز شونده (چپ). مرجع (--). حقیقی (-). سناریو سوم. |
| شکل ‏3‑11ضرایب ثابت (راست). ضرایب بروز شونده (چپ). مرجع (--). حقیقی (-). سناریو چهارم. |
| شکل ‏3‑12 ضرایب ثابت (راست). ضرایب بروز شونده (چپ). مرجع (--). حقیقی (-). سناریو پنجم. |
| شکل ‏3‑13 ربات بوسیله مثلث نمایش داده شده است.  ضرایب ثابت (راست). ضرایب بروز شونده (چپ). مرجع (--). حقیقی (-). سناریو ششم. |

**در شبیه سازی بعد یک مسیر مربعی شکل که طی کردن آن برای ربات به علت وجود گوشه­های نوک تیز بسیار می­تواند چالشی باشد، انتخاب می­گردد. معادله مسیر به شکل زیر ارائه می­گردد:**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (‏3‑30) |  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

**مقادیر اولیه ضرایب کنترلر و پارامترهای مربوط به شبکه عصبی به ترتیب در جداول 3-7 و 3-8 ارائه گردیده است. شرایط اولیه برای مسیر نیز در جدول 3-9 تعریف شده است. عملکرد دو کنترلر مذکور در شکل 3-14 نمایش داده شده و معیار عملکردی نیز در جدول 3-10 محاسبه شده است.**

جدول ‏3‑7 **مقادیر اولیه ضرایب کنترلی در شبیه سازی­ها**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *ضرایب* |  |  |  |
| *مقادیر* | 10 | 10 | 10 |

جدول ‏3‑8 **پارامترهای مربوط به شبکه­های عصبی**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *پارامتر* |  |  |  |  |
| *مقادیر* | 300 | 9000 | 600 | 2/0 |

جدول ‏3‑9 شرایط اولیه مسیر مربعی

|  |  |
| --- | --- |
| مرجع | حقیقی |
| [0.5 , 0.5 , π] | [0.6 , 0.3 , π/2] |

جدول ‏3‑10 معیار عملکردی برای مسیر مربعی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| مسیر مربعی | ضرایب بروز شده | ضرایب ثابت |
| *E* | 4532/39 | 8784/163 |



(الف) کنترلر با ضرایب بروز شونده

****

(ب) کنترلر با ضرایب ثابت

شکل ‏3‑14 عملکرد کنترلر در مسیر مربعی شکل

**همانطور که در شکل 3-14 مشهود است، الگوریتم پیشنهادی موجب نزدیکی هرچه بیشتر ربات به مسیر مرجع گردیده است.**

**در شبیه سازی آخر، یک شبیه سازی مقایسه­ای اجرا می­شود تا عملکرد روش پیشنهادی را بیازماید. سه کنترلر دخیل در این شبیه سازی شامل قانون کنترلی ارائه شده در [11]**، الگوریتم پیشنهادی در این پایان­نامه و قانون کنترلی مطرح شده توسط [60] می­شوند. آخرین قانون کنترلی یک کنترلر وابسته به زمان است و ورودی­های آن مطابق ذیل انتخاب گردیده­اند:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑31) |  |

در معادلات فوق، و به ترتیب سرعت­های خطی و زاویه­ای هستند. ، و ثوابت کنترلر هستند. ، و *توابع وابسته به زمان هستند. ، و* خطاهای پیکربندی هستند که با خطاهای تعریف شده در معادله   
(3-5) به شکل زیر مربوط می­شوند.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑32) |  |

شبیه سازی در نظر گرفته شده برای این قسمت پیشتر در [60] طراحی شده است که در آن ربات باید یک مسیر دایروی را با سرعت خطی و زاویه­ای ثابت طی کند.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏3‑33) |  |

شرایط اولیه برای هر دو پیکربندی مرجع و حقیقی در جدول 3-11 گزارش شده است. مسیر مطلوب توسط سرعت­های تعریف شده در معادله (3-33) تعریف می­شوند. مقادیر ضرایب کنترلر در رابطه (3-31) متفاوت با مقادیری هستند که در [60] انتخاب شده­اند. این ضرایب بر اساس سعی و خطا به گونه­ای انتخاب شده­اند که تا حد امکان معیار عملکرد تعریف شده، *E*، کم­ترین مقدار ممکن را داشته باشد. این ضرایب بدست آمده در جدول 3-12 گزارش شده­اند. ضرایب ابتدایی کنترلر و پارامترهای مربوط به شبکه­های عصبی برای فرآیند بروز رسانی مشابه جداول 3-7 و 3-8 انتخاب شده و تنها مقدار *برابر با 60 انتخاب شده است. مسیر طی شده ربات و خطاهای مربوط به موقعیت ربات برای هر سه کنترلر در اشکال 3-15 و 3-16 نمایش داده شده­اند. معیارهای عملکردی محاسبه شده نیز در جدول 3-13 ارائه شده­اند. گام زمانی،* ***، در این شبیه سازی­ها نیز برابر با 01/0 ثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل شده نشان می­دهد که الگوریتم بروز رسانی ضرایب عملکرد کنترلر [11]*** را ارتقاء می­بخشد، نرخ همگرایی خطاها را افزایش می­دهد و در مقایسه با کنترلر [60] *زمان همگرایی به مسیر مطلوب را کاهش می­دهد.*

جدول ‏3‑11 شرایط اولیه برای شبیه سازی مقایسه­ای

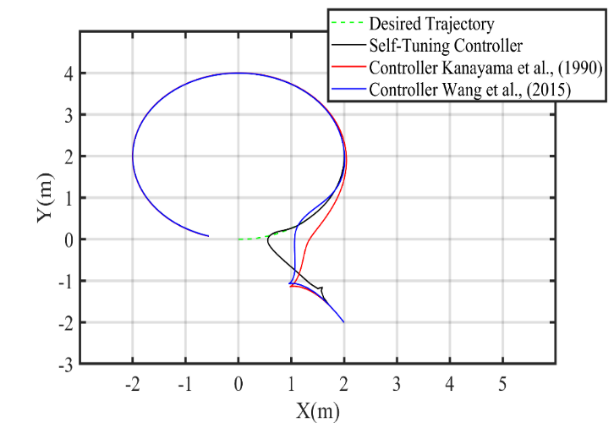
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| سناریو | مرجع | حقیقی |
| شبیه سازی مقایسه­ای | [0 , 0 , ] | [2 , -2 ,] |

جدول ‏3‑12 مقادیر انتخاب شده برای ضرایب کنترلر [60]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *ضرایب کنترلی* |  |  |  |
| *مقادیر* | 10 | 10 | 6 |

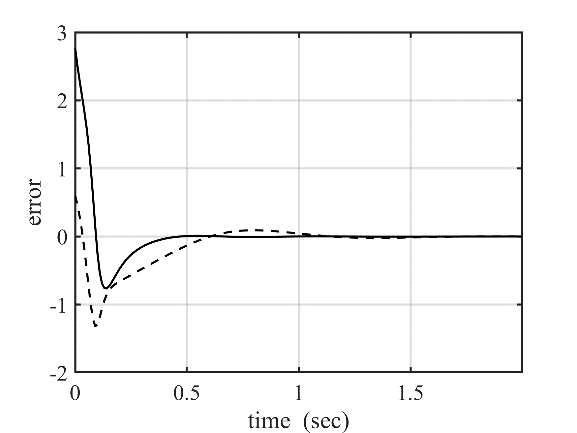
جدول ‏3‑13 معیار عملکردی برای شبیه سازی مقایسه­ای

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| روش | الگوریتم بروز شونده ضرایب | Controller Kanyama  et al., (1990) | Controller Wang et al., (2015) |
| *E* | 8617/29 | 1970/74 | 8579/45 |



شکل ‏3‑15 شبیه سازی مقایسه­ای

|  |  |
| --- | --- |
| C1 | GT |
| (-) (m). (--) (m).  (ب) کنترلر [11] | (-) (m). (--) (m).  (الف) الگوریتم ضرایب بروز شونده |



(-) (m). (--) (m).

(د) کنترلر [60]

شکل ‏3‑16 خطاها در شبیه سازی مقایسه­ای

## آزمایشات تجربی

در این بخش، روشی که در بخش­های قبل توضیح داده شد به یک ربات متحرک چرخدار اعمال می­شود تا توانایی الگوریتم در عمل مورد سنجش قرار گیرد. ربات در شکل 3-17 نمایش داده شده و پارامترهای مربوط به ساختار آن در جدول 3-14 ارائه شده است. ربات بوسیله دو موتور جداگانه 24-ولت به حرکت درمی­آید و یک چرخ کروی نیز برای حفظ تعادل آن در زیر ربات قرار دارد. سیگنال­های کنترلی که به ربات داده می­شود شامل سرعت­های زاویه­ای چرخ­های راست و چپ می­شوند. با در نظر گرفتن رابطه (3-1)، این دو ورودی اعمالی به ربات از سرعت­های خطی و زاویه­ای پلتفرم ربات بدست می­آید. یک واحد آنالیز تصویر برخط برای تشخیص و اندازه­گیری مکان ربات مورد استفاده قرار گرفته است. تصاویر بدست آمده بوسیله یک تلفن همراه با سیستم عامل اندروید و نرم افزار آی-پی وبکم به رایانه از طریق ارتباط وای-فای ارسال می­گردد. تلفن همراه در بالای محوطه آزمایش نصب شده است. جعبه ابزار مربوط به پردازش تصویر نرم افزار متلب برای آنالیز و استخراج پیکربندی ربات به کار گرفته شده است. یک رایانه همراه با مشخصات  
 (64 bit, intel core i7, 2.2 GHz with 6GB RAM) به عنوان رایانه میزبان و مرجع برای فرآیند پردازش تصویر، محاسبات کنترلی و تبادل اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته است. محوطه آزمایشگاهی یک فضای مستطیل شکل با مساحت 4.2 متر مربع بر روی یک سطح کاشی است. گام­های زمانی در هنگام آزمایش، **، به طور متوسط برابر با 0.1 ثانیه است. در آزمایشات مانند شبیه سازی­های عددی دو حالت ضرایب ثابت در کنترلر و استفاده از الگوریتم بروز شونده با یکدیگر مقایسه شده­اند. در این آزمایشات، دو مسیری که در معادلات (3-27) و (3-28) انتخاب شده است، مورد استفاده قرار گرفته­اند. شرایط اولیه برای هر حالت و مسیر در جدول 3-15 تشریح شده است. سناریو اول متعلق به مسیر دایروی و سناریو دوم متعلق به مسیر دایروی با موج سینوسی است.**

جدول ‏3‑14 **پارامترهای مربوط به ربات**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| پارامتر | مقدار | واحدها |
| r | 05/0 | [m] |
| b | 135/0 | [m] |

شکل ‏3‑17 ربات متحرک چرخدار

جدول ‏3‑15 شرایط اولیه در آزمایشات تجربی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| سناریو | مرجع | حقیقی |
| I | [0, 0.4 , π] | [-0.05 , 0.3 , -3.1] |
| II | [0.42 , 0 , ] | [0.32 , -0.03 , 1.6] |

با توجه به قانون کنترلی (3-7)، مقادیر ، و به طور مستقیم بر روی ورودی­های کنترلی ربات تاثیر می­گذارند. مقادیر زیاد خطا در کنار ضرایب کنترلی زیاد در حالت کلی موجب افزایش ورودی­های کنترلی می­شود. این ورودی­های کنترلی زیاد ممکن است که از دسترس موتورهای ربات خارج باشد. بنابراین، بهتر است که با ضرایب با مقادیر کوچک، ربات شروع به حرکت کند و در ادامه پروسه بروز رسانی ضرایب، به تنظیم ضرایب و انتخاب مقادیر مطلوب برای آن­ها بپردازد. پارامترهای مربوط به شبکه عصبی و ضرایب اولیه کنترلر در جداول 3-4 و 3-5 ارائه شده­اند.

برای اولین آزمایش، تمام جزئیات شامل مسیر طی شده، سرعت زاویه­ای چرخ­ها، خطاهای تعقیب مسیر و تغییرات ضرایب کنترلی در طی حرکت ربات در اشکال 3-18 تا 3-22 نمایش داده شده است. شکل 3-23 نیز عملکرد ربات در مسیر دایروی با موج سینوسی را نشان می­دهد. شکل­های 3-18 و 3-23 نشان می­دهند که الگوریتم پیشنهادی موجب می­شود تا ربات مسیر نزدیک­تری به مسیر مطلوب را طی کند. در این آزمایشات اگر مقادیر انتخاب شده برای ضرایب کنترلر بیشتر از مقادیر در جدول 3-4 باشد، سرعت زاویه­ای چرخ­های ربات بیشتر از 55 rpm می­شود که از حد مجاز و قابل دسترس برای موتورهای ربات بیشتر می­شود. بنابراین، این ضرایب مطابق جدول 3-4 انتخاب شده­اند و الگوریتم بروز رسانی مقادیر مناسب برای آن­ها را در طی فرآیند ایجاد می­کند. همچنین از شکل 3-19 این گونه برمی­آید که ربات برای طی مسیر نیاز به سرعت­های زاویه­ای بیشتری برای چرخ­هایش نسبت به کنترلر با ضرایب ثابت دارد که الگوریتم پیشنهادی بروز رسانی ضرایب این افزایش در سرعت را فراهم می­کند. شکل 3-22 نشان می­دهد همانطور که از پیش انتظار داشتیم مقادیر و افزایش می­یابند در حالی که سیر صعودی و نزولی دارد. با توجه به جدول  
 3-18، معیار عملکرد، *E*، بیان می­کند که الگوریتم پیشنهادی فاصله از مسیر مطلوب را در عمل تا 30 درصد کاهش می­دهد. این نتیجه در کنار واقعیت در دسترس بودن سرعت­ها برای موتورها کارایی روش پیشنهادی را ثابت می­کند.

|  |  |
| --- | --- |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\SelfGain tunnig\experiment\EXresult1.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\SelfGain tunnig\experiment\EXresult2.png |
| شکل ‏3‑18 ربات بوسیله مثلث نمایش داده شده است. ضرایب ثابت (راست). ضرایب بروز شونده (چپ).  مرجع (--). حقیقی (-) آزمایش اول. | شکل ‏3‑19 ورودی­های کنترلی.  ضرایب ثابت (آبی). ضرایب بروز شونده (قرمز).  آزمایش اول. (-) . (--) . |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\SelfGain tunnig\experiment\EXresult3.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\SelfGain tunnig\experiment\EXresult5.png |
| شکل ‏3‑20 خطای پیکربندی ربات. ضرایب بروز شونده. آزمایش اول(.) (m). (--) (m). (-) (rad). | شکل ‏3‑21 خطای پیکربندی ربات. ضرایب ثابت. آزمایش اول.  (.) (m). (--) (m). (-) (rad). |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\SelfGain tunnig\experiment\EXresult4.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\D.D exprience\SelfGain tunnig\experiment\EXresult6.png |
| شکل ‏3‑22 تغییرات ضرایب. آزمایش اول.  (.) . (--) . (-) . | شکل ‏3‑23 ربات بوسیله مثلث نمایش داده شده است. ضرایب ثابت (راست). ضرایب بروز شونده (چپ).  مرجع (--). حقیقی (-) آزمایش دوم. |

جدول ‏3‑16 معیار عملکردی برای آزمایشات عملی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| روش | ضرایب بروز شونده | ضرایب ثابت |
| *E* (I) | 5287/5 | 1737/9 |
| *E* (II) | 7095/5 | 5405/8 |

## تعمیم روش کنترلی به ربات شبه-خودرو

در این بخش، به طور مختصر توضیح داده خواهد شد که چگونه روش پیشنهادی برای ربات شبه-خودرو به کار می­رود. مدل این نوع از ربات در شکل 3-24 نشان داده شده است. توجه کنید که و به ترتیب نشان دهنده سرعت طولی چرخ­های عقب و جلو ربات با فرض غلتش خالص هستند. همچنین سرعت دورانی شاسی ربات، نمایانگر جهت­گیری چرخ­های جلو ربات و *LD* فاصله بین محور چرخ­های عقب و جلوی ربات است. به طور مشابه هدف در این بخش نیز مشابه بخش قبل دنبال کردن یک مسیر مرجع است. میانه­ی چرخ­های عقب ربات نقطه­ای است که باید مسیر مطلوبی را طی کند. مدل ربات شبه-خودرو در سطح سینماتیک می­تواند به دو بخش مجزا مانند شکل 3-24 قسمت (ب) تقسیم شود. قسمت آبی مشابه ربات متحرک چرخدار رانده شده تفاضلی است. بنابراین و می­توانند از و از رابطه (3-8) بدست بیایند. برای مشخص کردن نیز سرعت­های بدست آمده در قسمت آبی به میانه محور چرخ­های جلو انتقال داده می­شوند. و تغییرات آن، ، در معادله (3-34) تشریح شده­اند. و ورودی­های کافی برای هدایت ربات هستند. با توجه به مقادیر اندک انتخاب شده برای در رابطه (3-8)، این ویژگی به ربات این اجازه را می­دهد تا مسیرش را با سرعت کم آغاز کند و به مرور آن را افزایش دهد. با توجه به شکل 3-24 و استفاده از آنالیز سینماتیکی، روابط ذیل بدست می­آیند:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (‏3‑34) |
|  |
|  |

که گام زمانی را مشخص می­کند. همچنین جهت­گیری چرخ­های جلوی ربات در گام *k*th است. به طور مشابه، مقدار را در گام ()th مشخص می­کند. توجه شود که پایداری معادلات فوق به آسانی قابل اثبات است.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| ب) مدل مجزا شده | الف) مدل اصلی ربات |

شکل ‏3‑24 ربات متحرک چرخدار شبه-خودرو

## نتیجه‌‌‌گیری

در این بخش از پایان نامه، یک روش برای بروز رسانی ضرایب برای بهینه سازی عملکرد یک کنترلر غیر خطی برای مسئله تعقیب مسیر ارائه شده است. قانون کنترلی عمدتا بر روی ربات متحرک چرخدار رانده شده تفاضلی پیاده سازی شده اما قابل تعمیم به ربات متحرک چرخدار شبه-خودرو است. الگوریتم بروز رسانی از دو شبکه عصبی با ساختار ساده و با محاسبات سبک در زمان اجرا تشکیل شده است. بوسیله آن دو شبکه عصبی، نرخ همگرایی خطاهای مربوط به موقعیت ربات در طی فرآیند حرکت آن افزایش می­یابد. بعلاوه که الگوریتم پیشنهادی تلاش می­کند تا دخالت انسانی در عملکرد کنترلر را کاهش داده و آن را خودکارتر گرداند. این روش همچنین امکان شروع به حرکت ربات را با سرعت کمتر فراهم می­کند. برهم کنش بین الگوریتم پیشنهادی و کنترلر اصلی نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که روش پیشنهادی به پایداری آن لطمه وارد نمی­کند. تمام شبیه سازی­های رایانه­ای و آزمایشات تجربی برتری پاسخ روش پیشنهادی را تایید می­کند.

# فصل چهارم

طراحی کنترلر سینماتیکی برای ربات ترکتور-تریلر

## مقدمه

ترکتور-تریلر یک ربات متحرک چرخدار است که کاربردهای فراوان از جمله در کشاورزی و حمل و نقل کالا دارد. مدل سینماتیکی ترکتور-تریلر، با توجه به وجود کشنده­های مختلف از جمله ربات متحرک شبه-خودرو یا ربات متحرک با دو چرخ دیفرانسیلی و هم­چنین در نظر گرفتن انواع مختلف اتصال بین ترکتور و تریلر، می­تواند بنا بر مدل­های متفاوتی تعریف شود. در این مقاله روشی برای تعمیم دادن کنترلر تعقیب مسیر زمانی برای یک ربات متحرک چرخدار به ربات ترکتور-تریلر ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی این توانایی را دارد تا برای طیف وسیعی از انواع ربات­های ترکتور-تریلر و هم­چنین برای هر دو نوع اتصال در ربات بین ترکتور و تریلر، اتصال بر روی محور و یا خارج آن، قابل اجرا باشد. با پیاده­سازی روش ارائه شده، تریلر این توانایی را پیدا می­کند تا مسیر خاصی را تعقیب کند. در حین اعمال روش مذکور به تریلر محدود بودن حالت­ها و ورودی­های کنترلی ترکتور نیز تحت بررسی قرار می­گیرد. نتایج حاصل از شبیه سازی­های عددی و آرمایشات عملی انجام شده مؤثر بودن کنترلر ارائه شده را تایید می­کند.

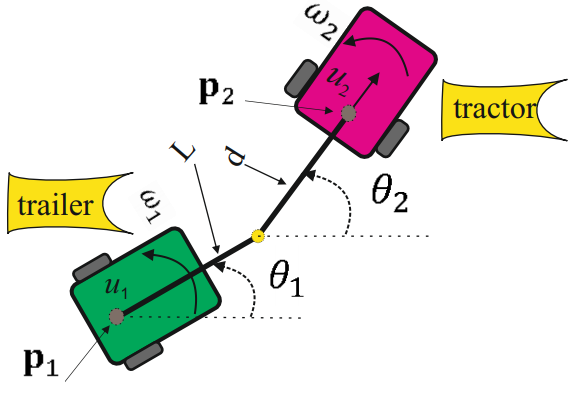
## مدل‌سازی سیستم سینماتیکی ربات

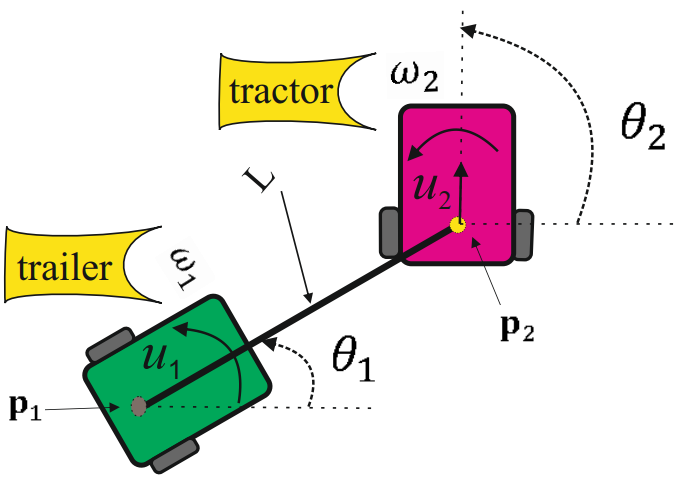
ترکتور-تریلر یک ربات متحرک چرخدار است و مدل­های سینماتیکی متنوعی با توجه به ساختار آن می­توان برای این ربات در نظر گرفت. مدلی که در این بخش مورد بررسی قرار می­گیرد، مدلی متشکل از دو ربات با دو چرخ دیفرانسیلی است که به دو صورت متصل روی محور و یا خارج آن به یکدیگر متصل شده­اند. در مورد مدل متشکل از چند تریلر با دو چرخ دیفرانسیلی و مدل شامل یک ترکتور شبه-خودرو و یک تریلر با دو چرخ دیفرانسیلی متصل به آن، به علت شباهت به دو مدل قبلی در این بخش به آن­ها پرداخته نمی­شود و به صورت مجزا در بخش­های بعدی مورد بررسی قرار می­گیرند.

در ربات ترکتور-تریلر ربات جلویی، ترکتور، که فعال و دارای موتور است، نقش کشنده را بازی می­کند و تریلر را که رباتی غیرفعال و فاقد موتور است، با خود حمل می­کند. در بیشتر اوقات، یک لینک ترکتور را به تریلر متصل می­کند. این لینک معمولا در یک طرف به یکی از ترکتور و یا تریلر جوش است و به طرف دیگر پین شده است و آزادانه می­تواند بچرخد. حال اگر لینک رو محور چرخ ربات به آن پین شده باشد به آن اتصال بر روی محور و در غیر اینصورت به آن اتصال خارج از محور می­گویند. شکل ربات در دو وضعیت مذکور در اشکال 4-1 و 4-2 نشان داده است.

در اشکال 4-1 و 4-2 پین با دایره زرد رنگ نمایش داده شده است. سرعت خطی و سرعت زاویه­ای تریلر است و به همین ترتیب سرعت خطی و سرعت زاویه­ای ترکتور است. *L* فاصله مرکز محور چرخ­های تریلر تا پین اتصال با ترکتور و در واقع بیانگر اندازه لینکی است که از یک طرف به بدنه تریلر جوش داده شده و از طرف دیگر متصل به پین است. *d* نیز فاصله مرکز محور چرخ­های ترکتور تا پین و در واقع بیانگر اندازه لینکی است که از یک طرف به بدنه ترکتور جوش داده شده و از طرف دیگر متصل به پین است. پیکربندی هر یک از دو قسمت ربات، ترکتور و تریلر، به صورت مجزا قابل تعریف است. بیانگر مختصات مرکز محور چرخ­های تریلر و جهت­گیری آن و مختصات مرکز محور چرخ­های ترکتور و جهت­گیری آن در دستگاه مختصات جهانی است. مدل سینماتیکی حاکم بر هر دو قسمت نیز مطابق با مدل سینماتیکی ربات متحرک با دو چرخ دیفرانسیلی به شکل زیر قابل تعریف است [11].

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑1) |  |

  
شکل ‏4‑1 ترکتور-تریلر با اتصال خارج از محور

  
شکل ‏4‑2 ترکتور-تریلر با اتصال بر روی محور

مشابه معادلات ذکر شده در (4-1) برای ترکتور نیز قابل بیان است. نکته­ای که باید به معادلات بالا افزوده گردد این است که در مقاله حاضر فرض عدم لغزش برای کلیه چرخ­های ربات در نظر گرفته شده است. در نتیجه معادله زیر نیز در معادلات سینماتیکی تریلر و به طور مشابه در ترکتور باید مدنظر قرار بگیرد.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑2) |  |

ورودی­های اصلی که توسط آن ربات کنترل می­شود سرعت دورانی چرخ­های ترکتور است. این دو ورودی از سرعت خطی و دورانی ترکتور قابل محاسبه هستند.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑3) |  |

در معادلات بالا *r* شعاع هر چرخ، *b* نصف فاصله بین دو چرخ ترکتور، سرعت دورانی چرخ راست و سرعت دورانی چرخ چپ ترکتور است.

## معرفی کنترلر سینماتیکی

به طور کلی در مسئله تعقیب مسیر زمانی برای ربات­های متحرک، هدف دنبال کردن یک مسیر مرجع است. در برخی از کاربردها عملی ربات ترکتور-تریلر موضوع مهم و اصلی آن است که تریلر مسیر خاصی را دنبال کند و مسیر طی شده توسط ترکتور اهمیت چندانی ندارد. در این بخش به دنبال روشی هستیم تا با استفاده از آن سرعت چرخ­های ترکتور را به گونه­ای بیابیم تا مرکز محور چرخ­های تریلر موفق شود مسیر مشخصی را بپیماید. بنابراین در ابتدا لازم است تا مسیری که انتظار می­رود تریلر آن را دنبال کند، مشخص گردد. این مسیر به وسیله بردار در مختصات جهانی تعریف می­شود. با تعریف این مسیر، سرعت­های خطی و زاویه­ای که ربات با دارا بودن آن­ها موفق به پیمایش مسیر مطلوب می­گردد، قابل استخراج است.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑4) |  |

در معادله­ی بالا علامت مثبت برای حرکت رو به جلو و علامت منفی برای حرکت رو به عقب است. با در اختیار داشتن مسیر مرجع می­توان فاصله از مسیر مرجع را در هر لحظه برای تریلر تعریف کرد. خطای تعقیب مسیر در دستگاه مختصات محلی متصل به تریلر با نگاشت تفاوت بین موقعیت مرجع و فعلی تریلر به صورت زیر قابل تعریف است:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑5) |  |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| شکل ‏4‑3 پیکربندی مرجع و حقیقی تریلر | ‏  شکل ‏4‑4 مختصات محلی تریلر و  نمایش خطای تعقیب مسیر در آن |

دینامیک خطای حرکت تریلر نیز با محاسبه مشتق زمانی معادله­ی خطای ذکر شده به دست می­آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑6) |  |

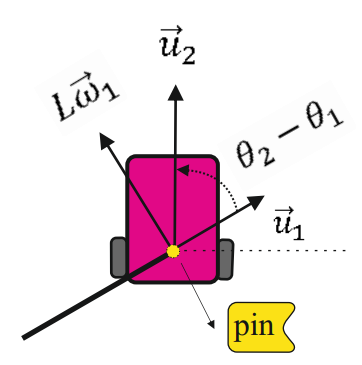
قانون کنترلی پیشنهادی در [11] که در ادامه ارائه می­شود باعث می­شود که تمام خطاهای مذکور به صفر همگرا شوند و در نتیجه تریلر مسیر مطلوب را بپیماید.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑7) |  |

که در آن ، و ثوابت مثبت هستند و فرض می­شود که همواره . سرعت­های بدست آمده در رابطه (4-7) در واقع پایه­ای هستند که سرعت ترکتور در بخش­های بعدی از طریق آن­ها محاسبه می­شود.

## ترکتور همراه یک تریلر با اتصال بر روی محور ترکتور

در قسمت قبل بیان شد که با اعمال سرعت­های زاویه­ای و خطی در (4-7) به تریلر، مسیر مرجع توسط آن پیموده می­شود. اما توجه به این نکته ضروری است که ورودی­های کنترلی اصلی که موجب هدایت ربات می­گردند توسط ترکتور تولید می­شود. بنابراین لازم است که از این سرعت­ها به گونه­ای سرعت ترکتور محاسبه شود. در این قسمت سعی شده است که این سرعت­ها برای ربات ترکتور-تریلر در وضعیت متصل به هم بر روی محور ترکتور بدست آید. در ابتدا سرعت­های خطی و زاویه­ای تریلر را به محل پین بر روی ترکتور منتقل می­کنیم.

  
شکل ‏4‑5 ترکتور و سرعت­های تعریف شده برای ­آن

همانطور که در شکل 4-5 مشخص است روابط زیر بین سرعت­ها برقرار است.

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑8) |  |

از این پس برای راحتی در نوشتن تعریف می­کنیم:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑9) |  |

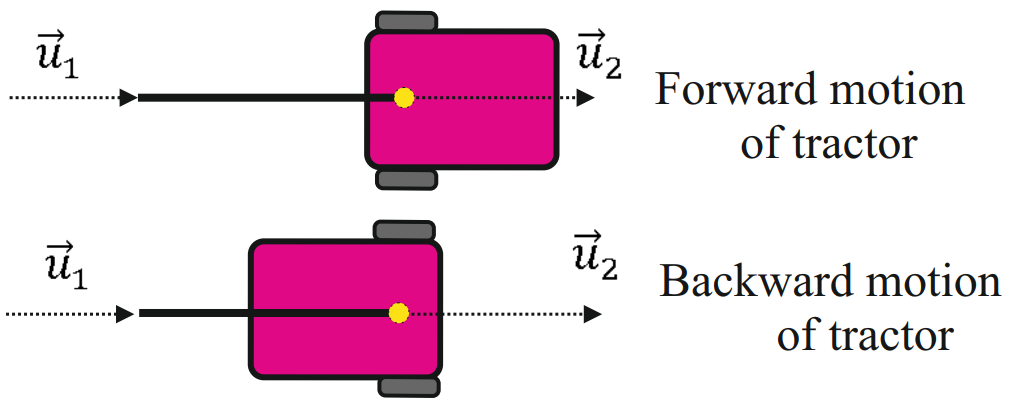
که زاویه­ی بین ترکتور و تریلر است. با توجه به تعاریف فوق سرعت خطی ترکتور، ، **به راحتی مشخص می­شود:**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑10) |  |

**و در مورد سرعت زاویه­ای آن نیز می­توان به شکل زیر عمل کرد.**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑11) |  |

در روابط فوق بیانگر گام زمانی در حین انجام آزمایش است. نیز زاویه­ی بین ترکتور و تریلر پس از گذشت یک گام زمانی و به صورت مشابه بیانگر همین زاویه پیش از سپری شدن یک گام زمانی است. با توجه به خاصیت عملگر Atan(.) در واقع جهت گیری بین ترکتور و تریلر محدود می­شود و در بازه­ی قرار می­گیرد. این نکته از آن جایی صحیح است که برای هر حرکت تریلر دو حرکت از ترکتور قابلیت انجام دارد. فرض کنید که تریلر بدون حرکت زاویه­ای قصد دارد که رو به جلو حرکت کند. در این صورت ترکتور مطابق شکل زیر در صورتی که الزامات ساختاری به آن اجازه دهد، دو حرکت می­تواند انجام دهد. یک حرکت رو به جلو در جهت محور x مختصات جهانی و دیگری با 180 در جه چرخش و حرکت رو به عقب.

  
شکل ‏4‑6 حرکت­های مختلف ترکتور برای یک حرکت مشخص تریلر

همانطور که از شکل 4-6 برداشت می­شود برای هر حرکت تریلر دو دسته پاسخ وجود دارد یکی حرکت رو به جلوی ترکتور و دیگری با حرکت رو به عقب آن. بنابراین با محدود کردن جهت گیری ترکتور نسبت به تریلر، هیچ محدودیتی در پاسخ به حرکت­های تریلر توسط ترکتور ایجاد نمی­شود.

در ادامه به بررسی محدود بودن حالت­ها و ورودی­های کنترلی برای ترکتور و تریلر پرداخته می­شود. از آن­جا که با اعمال سرعت­ها در (4-7) به تریلر ، و به صفر همگرا می­شوند و با فرض محدود بودن و ، سرعت خطی و زاویه­ای تریلر، و ، و هم چنین بردار موقعیت آن، ، همواره محدود است. با توجه به (4-8) و محدود بودن سرعت خطی تریلر، نیز محدود است (البته باید اشاره شود زمانی که ، آن­گاه داریم  
 *و* ). با در نظر داشتن بحث هایی که در مورد جهت گیری ترکتور نسبت به تریلر، ، صورت گرفت این مقدار همواره محدود و بین قرار دارد. با در نظر گرفتن (4-11)، **کمترین سرعت برای**  **برابر صفر و بیشترین سرعت برای آن برابر** **است.** بنابراین سرعت زاویه­ای ترکتور و جهت گیری آن با توجه به محدود بودن جهت­گیری تریلر، محدود بودن جهت­­گیری ترکتور نسبت به تریلر، محدود بودن سرعت زاویه­ای تریلر و محدود بودن ، همواره محدود است. از آن جا که موقعیت ترکتور و تریلر به شکل زنجیر به یکدیگر وابسته است در نتیجه بردار موقعیت ترکتور، ، نیز محدود است.

سرعت زاویه­ای ترکتور به گونه­ای دیگر نیز قابل تعیین است. مطابق با رابطه (4-7) و (4-8) داریم:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑12) |  |

با محاسبه مشتق عبارت 4-12 خواهیم داشت:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑13) |  |

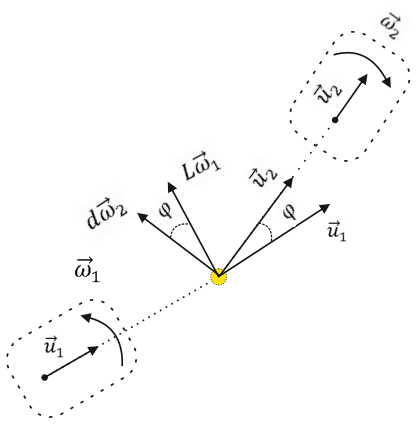
با محاسبه **سرعت زاویه­ای ترکتور از (4-11)** **قابل محاسبه است.** از رابطه (4-13) در جایی می­توان استفاده کرد که باشد و تمام آنچه پیشتر در مورد محدود بودن حالت­ها و ورودی­های کنترلی گفته شد برای آن نیز برقرار است چون با فرض محدود و موجود بودن **و** ، تمام عبارات تشکیل دهنده آن محدود هستند.

## ترکتور همراه با یک تریلر با اتصال خارج از محور

در این قسمت چگونگی استخراج سرعت ترکتور در وضعیت اتصال خارج از محور مورد بررسی قرار می­گیرد. مطابق شکل 4-7 به ازای یک حرکت مشخص تریلر سرعت­های مورد نیاز در ترکتور برای ایجاد حرکت در تریلر قابل استخراج است. در این حالت فرض می­شود که تریلر بخواهد به سمت جلو حرکت کند و در همین حین به صورت پاد ساعتگرد بچرخد. توجه به این نکته ضروری است که با هم جهت انتخاب کردن سوی حرکت در ترکتور با جهت حرکت در تریلر (حرکت هر دو به سمت جلو)، جهت گیری ترکتور نسبت به تریلر مطابق آن چیزی که در بخش قبل توضیح داده شد همواره بین باقی می­ماند. در صورتی که به ازای حرکت رو به جلو تریلر حرکت رو به عقب ترکتور مد نظر قرار می­گرفت دسته­ی دیگر از پاسخ­ها برای حرکت ترکتور و تریلر انتخاب شده بود. حال با انتقال سرعت­های مرکز محور چرخ­های ترکتور و تریلر به پین، سرعت ترکتور بر اساس سرعت­های تریلر به صورت زیر قابل بیان است.

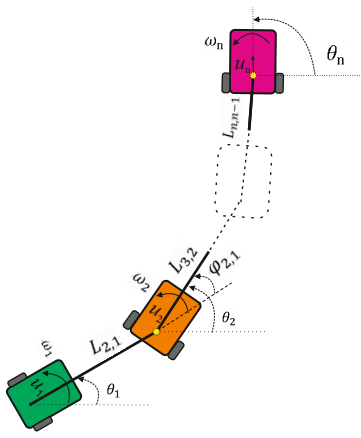
|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑14) |  |

با در نظر گرفتن توضیحات بخش قبل و محدود بودن سرعت­های خطی و زاویه­ای تریلر و محدود بودن عملگر­ها *و* *سرعت­های خطی و زاویه­ای ترکتور نیز محدود باقی می­ماند. با توجه به محدود بودن جهت گیری ترکتور نسبت به تریلر و بردار موقعیت تریلر، بردار موقعیت ترکتور نیز محدود باقی می­ماند.*

  
شکل ‏4‑7 سرعت­های ترکتور و تریلر در پین اتصال

## ترکتور همراه با چندین تریلر با اتصال بر روی محور

در این قسمت به بررسی سیستم­هایی متشکل از چندین تریلر و یک ترکتور پرداخته خواهد شد. بر مبنای یافته­های قبلی روشی پیشنهاد می­شود که بواسطه آن چرخ­های ترکتور به گونه­ای انتخاب شوند تا مرکز محور بین چرخ­های آخرین تریلر موجود در سیستم این توانایی را پیدا ­کند تا مسیر خاصی را تعقیب کند. سیستم در نظر گرفته شده شامل یک ترکتور و n-1 تریلر است که به صورت اتصال بر روی محور به یکدیگر متصل شده اند و در شکل 4-8 نمایش داده شده­اند. نامگذاری به این شکل است که آخرین تریلر در زنجیره، تریلر شماره یک و تریلر ماقبل ترکتور شماره n-1 است. ترکتور نیز با شماره n شناخته می­شود. سرعت خطی و زاویه­ای و بردار موقعیت هر جزء نیز با این شماره گذاری مشخص می­شود.

  
شکل ‏4‑8 سیستم شامل چندین تریلر و یک ترکتور

فاصله بین مرکز محور چرخ­های تریلر i تا تریلر i-1 به صورت به ازای نمایش داده می­شود. همچنین زاویه­ی بین هر تریلر با تریلر بعدی نیز به صورت زیر تعریف می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑15) |  |

با استفاده از رابطه­هایی که در ادامه ارائه می­شود سرعت خطی و دورانی ترکتور قابل محاسبه است.

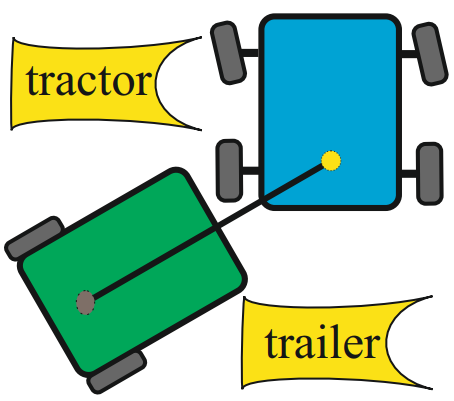
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (‏4‑16) |  |  |

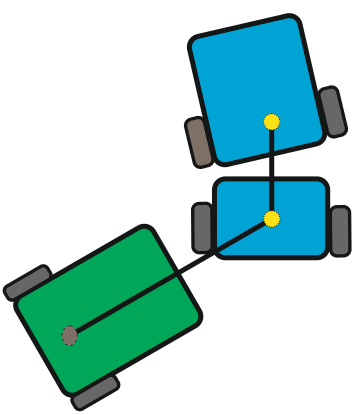
در روابط بالا توجه به این نکته ضروری است که زاویه­ی بین تریلر iام و تریلر i-1ام پس از گذشت گام زمانی و به صورت مشابه بیانگر همین زاویه پیش از سپری شدن گام زمانی است. در ابتدا با استفاده از (4-7) سرعت خطی و دورانی آخرین تریلر، و ، تعیین می­شود. سپس با استفاده از (4-15) و (4-16) سرعت­های سایر تریلرها به ترتیب به صورت زنجیروار محاسبه می­شود و در نهایت سرعت ترکتور بدست می­آید. مواردی که در مورد محدود بودن ورودی­ها و حالت­های کنترلی در بخش ترکتور و یک تریلر متصل بر روی محور آن، توضیح داده شد به راحتی قابل تعمیم در وضعیت چندین تریلر همراه با ترکتور است.

## ترکتور شبه-خودرو همراه با یک تریلر متصل بر روی محور

در این قسمت سیستمی را در نظر می­گیریم که در آن یک کشنده از نوع ربات شبه-خودرو یک تریلر از نوع ربات با دو چرخ دیفرانسیلی را با خود حمل می­کند. در این سیستم تریلر به صورت متصل بر روی محور به ترکتور متصل شده است. این سیستم در شکل 4-9 نمایش داده شده است. در این ربات هدف آن است که ربات شبه-خودرو به گونه­ای کنترل شود تا نقطه مرکز محور چرخ­های تریلر مسیر مشخصی را طی کند. حداقل از نظر سینماتیکی، مدل ربات شبه-خودرو را می­توان مشابه با دو ربات با دو چرخ دیفرانسیلی که به صورت متصل بر روی محور به یکدیگر متصل شده اند در نظر گرفت و این موضوع قابل اثبات است. بنابراین سیستم موجود در شکل 4-9 قابل تبدیل به سیستمی متشکل از یک ترکتور و دو تریلر است که همگی دارای مدل ربات با دو چرخ دیفرانسیلی بوده و به صورت متصل بر روی محور به یکدیگر متصل شده­اند. این مدل مشابه در شکل 4-10 ارائه شده است.

با برقراری این همانندی سیستم مذکور در واقع تبدیل به سیستم ترکتور به همراه چندین تریلر متصل بر روی محور می­شود و برای کنترل آن می­توان روشی را که قبلا در بخش قبل توضیح داده شد را استفاده کرد. سیستم­های شامل یک کشنده شبه-خودرو و چندین تریلر نیز به همین صورت قابل تعمیم هستند. در این حالت زمانی که کشنده شبه خودرو باشد تنها نیاز است که یک تریلر مجازی به تعداد تریلرها افزوده گردد و سپس سیستم تحلیل شود.

  
شکل ‏4‑9 ترکتور شبه-خودرو و تریلر در حالت اتصال بر روی محور

  
شکل ‏4‑10 سیستم همسان سینماتیکی با سیستم ترکتور شبه-خودرو و تریلر در حالت اتصال بر روی محور

## شبیه سازی­های عددی و آزمایشات تجربی

برای آزمایش روش پیشنهادی شبیه­سازی­های عددی و آزمایش­های عملی در نظر گرفته شده تا کارایی کنترلر مورد سنجش قرار گیرد. هم­چنین یک کنترلر سینماتیکی در [43] که برای یک ربات ترکتور-تریلر در وضعیت اتصال بر روی محور پیشنهاد شده است، برای مقایسه با عملکرد کنترلر موجود در این گزارش انتخاب شده است (از این پس نام کنترلر مذکور به صورت خلاصه به شکل KhM بیان می­شود). مقادیر عددی برخی از پارامترها که در شبیه سازی­ها و آزمایشات عملی به کار برده شده است، به صورت جدول 4-1 می­باشد. **در آزمایشات انجام گرفته دو مسیر متفاوت برای مسئله­ی تعقیب مسیر در نظر گرفته شده است: یک مسیر دایره­ای و یک مسیر دایروی با موج سینوسی که در ادامه معادلات مربوط به آن­ها بیان می­شود. این دو مسیر متفاوت به این علت انتخاب شده­اند تا عملکرد کنترل ارائه شده را به خوبی مورد سنجش قرار دهند.**

* **مسیر دایروی**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑17) |  |

* **مسیر دایروی با موج سینوسی**

|  |  |
| --- | --- |
| (‏4‑18) |  |

سرعت­های مرجع برای دنبال کردن مسیر مطلوب را نیز می­توان با استفاده از رابطه (4-4) بدست آورد.

جدول ‏4‑1 پارامترهای سیستم

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| پارمترها | مقادیر | واحدها |
| r | 05/0 | [m] |
| L | 41/0 | [m] |
| d | 06/0 | [m] |
| b | 135/0 | [m] |

همانطور که در قسمت­های قبل نیز توضیح داده شده هدف از اعمال الگوریتم پیشنهادی به سیستم ترکتور-تریلر دنبال کردن مسیری خاص برای تریلر است. شبیه­سازی­های عددی برای ربات ترکتور-تریلر که هر دو از نوع ربات با دو چرخ دیفرانسیلی هستند برای هر دو وضعیت اتصال بر روی محور و اتصال خارج از محور انجام گرفته است. در شبیه­سازی نخست مسیر دایره­ای برای وضعیت اتصال بر روی محور و در شبیه­سازی دوم مسیر دایروی با موج سینوسی برای وضعیت اتصال خارج از محور تریلر در نظر گرفته شده است. نتایج شامل مسیر طی شده تریلر، سرعت دورانی و خطی ترکتور، و ، و خطاهای موقعیت مرکز محور چرخ­های تریلر و جهت­گیری آن است که در اشکال 4-11 تا 4-16 نمایش داده شده­اند. عملکرد کنترلر KhM نیز در شبیه­سازی نخست برای مسیر دایره­ای بدست آمده و در اشکال 4-17 تا 4-19 ارائه شده است. در این قسمت سرعت خطی و زاویه­ای ترکتور در حین شبیه­سازی­ها ارائه می­شود چون که مستقل از شعاع چرخ­ها و فاصله چرخ­ها از یکدیگر است و بنابراین نتایج بدست آمده عمومیت بیشتری پیدا می­کنند. اما در قسمت آزمایش تجربی سرعت دورانی چرخ­های ترکتور به عنوان ورودی­های اصلی به ربات، به نمایش در می­آید. برای سنجش بهتر کنترلر، موقعیت اولیه مسیر مرجع و جهت گیری آن با موقعیت ابتدایی تریلر و جهت گیری آن، متفاوت با یکدیگر انتخاب می­شوند. این مقادیر به همراه جهت نسبی ترکتور نسبت به تریلر در جدول 4-2 گزارش شده است. در قانون کنترلی نیز ثوابتی وجود دارند که بوسیله سعی و خطا انتخاب شده­اند و در جدول 4-3 گزارش شده­اند. ثوابت موجود در کنترلر KhM نیز در جدول 4-4 ارائه شده­اند. با توجه به نتایج ارائه شده، به طور کلی الگوریتم پیشنهادی به خوبی توانسته است هدف مورد نظر را در تعقیب مسیر تریلر برای هر دو مسیر انتخابی برآورده کند. در مورد مسیر دایره­ای در شبیه سازی نخست با مقایسه روش پیشنهادی این مقاله با کنترلر KhM این نتیجه بدست می­آید که کنترلر این مقاله سریع­تر خطاهای موجود در فرآیند تعقیب مسیر را جبران می­کند و به مسیر مطلوب می­رسد و هم­چنین سرعت­های خطی و زاویه­ای آن در قیاس با کنترلر KhM مقدار کم­تری در طول فرآیند تعقیب اختیار می­کند. یک تفاوت عمده کنترلر KhM با الگوریتم ارائه شده در این مقاله که نباید از یاد برد این است که کنترلر KhM تنها قابلیت پیاده­سازی بر روی یک مدل از ربات ترکتور-تریلر را داراست اما روش پیشنهادی ما بر روی مدل­های متفاوت این ربات قابل پیاده سازی است. لازم به ذکر است که شبیه­سازی با فرض عدم لغزش صورت گرفته است. در ضمن در شبیه­سازی برابر ثانیه در نظر گرفته شده است.

جدول ‏4‑2 شرایط اولیه برای شبیه­سازی­ها

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| سناریو | شبیه سازی | مرجع | حقیقی |
| I | مسیر دایروی/  اتصال بر روی محور تریلر |  |  |
| II | مسیر دایروی با موج سینوسی/ اتصال خارج از محور تریلر |  |  |

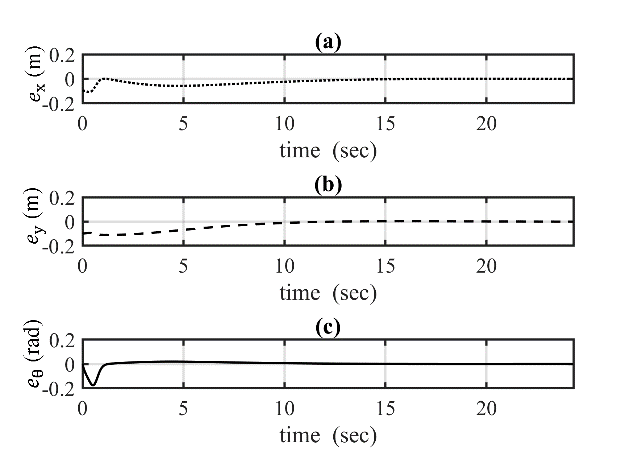
جدول ‏4‑3 ثوابت کنترلی در شبیه­سازی­ها

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *ثوابت کنترلی* |  |  |  |
| مسیر دایروی/  اتصال بر روی محور تریلر | 1 | 25 | 8 |
| مسیر دایروی با موج سینوسی/ اتصال خارج از محور تریلر | 15 | 30 | 8 |

جدول ‏4‑4 ضرایب کنترلر KhM

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *ثوابت کنترلی* |  |  |  |
| مسیر دایروی/  اتصال بر روی محور تریلر | 10 | 250 | 10 |

|  |  |
| --- | --- |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Numerical simulation\1.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Numerical simulation\2.png |
| شکل ‏4‑11 مسیر ربات در شبیه­سازی نخست. ربات با مثلث در مسیر مشخص شده است. مرجع (--). حقیقی(-). | شکل ‏4‑12 سرعت­های ترکتور در شبیه­سازی نخست. (-) . (...) . |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Numerical simulation\3.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Numerical simulation\4.png |
| شکل ‏4‑13 خطای تریلر در شبیه­سازی نخست. (a) (...) . (b) (--) . (c) (-) . | شکل ‏4‑14 مسیر ربات در شبیه­سازی دوم. ربات با مثلث در مسیر مشخص شده است. مرجع (--). حقیقی(-). |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Numerical simulation\5.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Numerical simulation\6.png |
| شکل ‏4‑15 سرعت­های ترکتور در شبیه­سازی دوم. (-) . (...) . | شکل ‏4‑16 خطای تریلر در شبیه­سازی دوم. (a) (...) . (b) (--) . (c) (-) . |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Kmasi\simulation\1.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Kmasi\simulation\2.png |
| شکل ‏4‑17 مسیر ربات در شبیه­سازی نخست. ربات با مثلث در مسیر مشخص شده است.  کنترلر KhM مرجع (--). حقیقی(-). | شکل ‏4‑18 سرعت­های ترکتور در شبیه­سازی نخست. کنترلر KhM  (-) . (...) . |



شکل ‏4‑19خطای تریلر در شبیه­سازی نخست.  
کنترلر KhM

(a) (...) . (b) (--) . (c) (-) .

حال برای سنجش توانایی الگوریتم پیشنهادی، روش کنترلی به صورت عملی بر روی یک سیستم ترکتور-تریلر پیاده سازی می­شود. تریلر در این سیستم به صورت اتصال بر روی محور به ترکتور متصل شده است بنابراین از قوانین کنترلی متناسب برای هدایت ربات متحرک چرخدار استفاده شده است. سیگنال­های کنترلی اصلی که به عنوان ورودی به سیستم داده می­شود سرعت دورانی چرخ­های راست و چپ ترکتور است که با استفاده از رابطه (4-3) قابل استخراج از سرعت دورانی و خطی ترکتور، و ، هستند. موقعیت و جهت­گیری ترکتور و تریلر به وسیله یک دوربین که در بالای محوطه آزمایش قرار داده شده است و بهره­گیری از پردازش تصویر در نرم­افزار متلب، به دست می­آید. سطح محوطه آزمایش از کاشی پوشیده شده و به صورت طبیعی دارای فراز و نشیب­هایی در محل اتصال کاشی­ها است. چرخ­های ترکتور و تریلر دارای لاستیک نمی­باشند بنابراین وجود لغزش طولی و عرضی در حین انجام آزمایش دور از انتظار نیست. این در حالی است که قانون کنترلی با فرض عدم لغزش تعریف شده است. سیستم ترکتور-تریلر و محیط آزمایش در شکل 4-20 نمایش داده شده است. دو مسیر برای انجام آزمایش در نظر گرفته شده است که پیشتر در معادلات (4-17) و (4-18) تعریف شده اند. در آزمایش اول مسیر دایره­ای و در آزمایش دوم مسیر دایروی با موج سینوسی به عنوان مسیر مرجع برای تعقیب مسیر تریلر در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه مسیر و ربات برای هر دو آزمایش در جدول 4-5 گزارش شده است. ثوابت موجود در قانون کنترلی نیز در جدول 4-6 ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمایش شامل مسیر طی شده تریلر، سرعت زاویه­ای چرخ­های ترکتور و خطای موقعیت و جهت­گیری تریلر در اشکال 4-21 تا 4-26 گزارش شده است. هم­چنین فاصله زمانی موجود در زمان آزمایش، ، در حدود 0.2 ثانیه بوده است. مشابه بخش شبیه­سازی عددی برای مقایسه عملکرد روش ارائه شده در این مقاله با کارهای پیشین، پاسخ کنترلر  
KhM در مسیر دایره­ای بدست آورده شده و در اشکال 4-27 تا 4-29 ارائه شده است. ثوابت موجود در قانون کنترلی و شرایط اولیه آزمایش در جداول 4-7 و 4-8، به ترتیب، گزارش شده­اند.

جدول ‏4‑5 شرایط اولیه برای آزمایشات

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| سناریو | آزمایش | مرجع | حقیقی |
| I | مسیر دایروی/ اتصال بر روی محور تریلر |  |  |
| II | مسیر دایروی با موج سینوسی/ اتصال بر روی محور تریلر |  |  |

جدول ‏4‑6 ضرایب کنترلر برای آزمایشات

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *ضرایب کنترلر* |  |  |  |
| مسیر دایروی/ اتصال بر روی محور تریلر | 1 | 13 | 8 |
| مسیر دایروی با موج سینوسی/ اتصال بر روی محور تریلر | 5/0 | 3 | 5 |

جدول ‏4‑7 ضرایب کنترلر KhM در آزمایشات

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *ضرایب کنترلر* |  |  |  |
| مسیر دایروی/ اتصال بر روی محور تریلر | 5/3 | 70 | 7 |

جدول ‏4‑8 شرایط اولیه برای آزمایشات کنترلر KhM

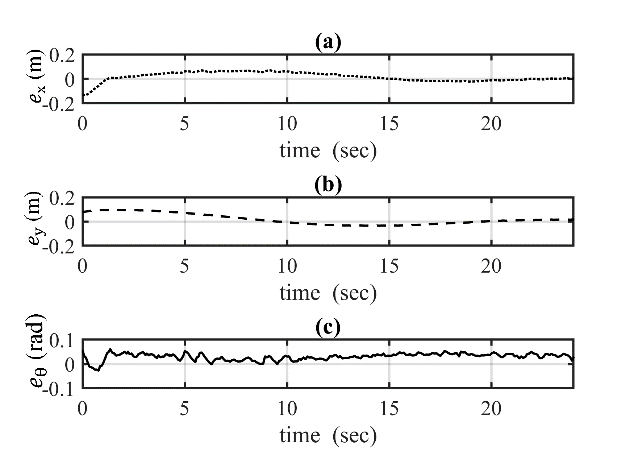
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| سناریو | آزمایش | مرجع | حقیقی |
| I | مسیر دایروی/ اتصال بر روی محور تریلر |  |  |



شکل ‏4‑20 ربات ترکتور-تریلر

با توجه به نتایج آزمایش در هر دو مسیر، روش کنترلی پیشنهادی عملکرد قابل قبولی در دنبال کردن مسیر از خود به نمایش گذاشته است. عواملی همچون نامساعد بودن زمین محیط آزمایش، وجود لغزش طولی و عرضی، عدم استفاده از لاستیک برای چرخ­ها، لقی در محل اتصال تریلر با ترکتور در محل پین موجب می­شود تا اندازه­ای نمایش کنترلر از میزان ایده­آل آن فاصله بگیرد. این عوامل در مسیر دایروی با موج سینوسی با توجه به سخت تر شدن مسیر مرجع و احتمال لغزش بیشتر در مسیر موجب پر رنگ تر شدن این تفاوت می­شود. عملکرد کنترلرKhM نیز به صورت تقریبی همانند پاسخ بدست آمده حاصل از به کارگیری الگوریتم موجود در این پایان­نامه است اما یادآوری این نکته ضروری است که الگوریتم موجود درKhM تنها برای یک مدل از ربات ترکتور-تریلر کاربرد دارد حال آن که الگوریتم پیشنهادی در این پایان­نامه قابل توسعه به مدل­ها گوناگون ربات است.

|  |  |
| --- | --- |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Experiment\Circle\1.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Experiment\Circle\2.png |
| شکل ‏4‑21 مسیر ربات در آزمایش نخست.  ربات با مثلث در مسیر مشخص شده است. مرجع (--). حقیقی(-). | شکل ‏4‑22 سرعت­ زاویه­ای چرخ­های ترکتور در آزمایش نخست(...) . (-) . |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Experiment\Circle\3.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Experiment\Hexa3\1.png |
| شکل ‏4‑23 خطای تریلر در آزمایش نخست. (a) (...) . (b) (--) . (c) (-) . | شکل ‏4‑24 مسیر ربات در آزمایش دوم.  ربات با مثلث در مسیر مشخص شده است. مرجع (--). حقیقی(-). |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Experiment\Hexa3\2.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Experiment\Hexa3\3.png |
| شکل ‏4‑25 سرعت­ زاویه­ای چرخ­های ترکتور در آزمایش دوم.  (...) . (-) . | شکل ‏4‑26 خطای تریلر در آزمایش دوم. (a) (...) . (b) (--) . (c) (-) . |
| D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Kmasi\experiment\1.png | D:\pouya MS course\M.S Thesis\T.T exprience\DD TO TT\Kmasi\experiment\2.png |
| شکل ‏4‑27 مسیر ربات در آزمایش نخست.  ربات با مثلث در مسیر مشخص شده است. مرجع (--). حقیقی(-). کنترلر KhM | شکل ‏4‑28 سرعت­ زاویه­ای چرخ­های ترکتور در آزمایش نخست(...) . (-) .  کنترلر KhM |



شکل ‏4‑29 خطای تریلر در آزمایش نخست. کنترلر KhM  
(a) (...) . (b) (--) . (c) (-) .

## نتیجه‌‌گیری

در این مقاله سعی شد تا روشی ارائه شود تا توسط آن یک نقطه مشخص از تریلر، مرکز محور بین چرخ­های آن، در سیستم ترکتور-تریلر موفق شود تا مسیر مشخصی را تعقیب کند. کنترلر ارائه شده بر مبنای قانون کنترلی ارائه شده برای ربات متحرک چرخدار با دو چرخ دیفرانسیلی توسعه یافته است. کنترلر پیشنهادی محدود بودن ورودی­ها و حالت­های سیستم ترکتور-تریلر را تضمین می­نماید. این الگوریتم برای هر دو وضعیت اتصال بر روی محور و یا خارج آن بین ترکتور و تریلر و هم­چنین ترکتور با مدل­های متفاوت کاربرد خود را حفظ می­کند. روش پیشنهادی برای سیستمی متشکل از یک ترکتور با چندین تریلر متصل به آن نیز ،همانطور که نشان داده شد، قابلیت اجرا دارد. نتایج بدست آمده از شبیه­سازی­های عددی و آزمایش­های عملی قابلیت روش پیشنهادی را به اثبات می­رساند. با وجود آن که قانون کنترلی با فرض عدم لغزش در چرخ­ها بیان شده است اما پاسخ­های مناسبی از محیطی با احتمال وجود لغزش بدست آمده است. در کارهای آینده سعی بر این است تا روش پیشنهادی با در نظر گرفتن لغزش­های طولی و عرضی توسعه پیدا کند.

# فصل پنجم

نتیجه­گیری و پیشنهادات

در این پایان­نامه به چالش­های مربوط به کنترل حرکت ربات­های متحرک چرخدار پرداخته شد. در ابتدا دو قانون کنترلی سینماتیک بر پایه­ی روش­های لیاپانوف برای پایدارسازی ربات متحرک با دو چرخ دیفرانسیلی از یک وضعیت به وضعیت مطلوب ارائه گردید. ویژگی این قوانین این بود که به آسانی قابل پیاده سازی هستند و از طرف دیگر نیز از قابلیت تطبیق در محیط­های دارای موانع برخوردار هستند. از طرف دیگر با افزایش یک درجه­ی آزادی به عملکرد ربات در محیط واقعی، برای هر مسئله پایدارسازی دو مانور متنوع برای آن فراهم می­کند. الگوریتم پیشنهادی همچنین در مقام قیاس با دو الگوریتم مشابه قرار گرفت و نتایج قابل قبولی از این مقایسه بدست آمد. کارهای آینده در این رابطه می­تواند شامل مطالعه و گسترش کنترلر پیشنهادی برای سایر پلتفرم­های ربات متحرک از جمله ربات شبه-­خودرو و ترکتور-تریلر شود. همچنین استفاده همزمان از دو قانون کنترلی به منظور پیمایش مسیر بهینه نیز می­تواند مد نظر قرار گیرد.

در بخش بعد الگوریتمی ارائه گردید تا با استفاده از آن ضرایب یک قانون کنترلی مشهور در حوزه تعقیب مسیر برای ربات متحرک با دو چرخ دیفرانسیلی به صورت برخط و خودکار بروز شوند. برای این منظور از دو شبکه عصبی با ساختاری ساده و محاسبات سبک استفاده شد و همچنین برهم کنش بین الگوریتم بروز رسانی و قانون کنترل غیر خطی اصلی نیز مورد بررسی قرار گرفت. این کار در کنار افزایش نرخ همگرایی خطاها در طی پیمایش مسیر مورد نظر توسط ربات، بهبود پاسخ ربات را در پی دارد. عملکرد این روش نوین با روشی که اخیرا در حوزه مربوطه ارائه گردیده است مقایسه گردید و پاسخ­های مطلوبی از این مقایسه بدست آمد. از جمله اقداماتی که می­توان در آینده انجام شود این است که احتمال استفاده از چنین الگوریتمی برای سایر قوانین کنترلی در حوزه ربات­های متحرک مورد بررسی قرار گیرد. مهم­ترین کار در این زمینه می­تواند استفاده از این روش برای قانون کنترلی برای پایدارسازی ربات باشد که در فصل دوم مطرح شد.

در بخش آخر نیز روشی برای تعمیم کنترلر ربات متحرک با دو چرخ دیفرانسیلی برای ربات ترکتور-تریلر پیشنهاد شد تا بواسطه آن تعقیب مسیر برای انواع مختلف اتصال بین ترکتور و تریلر و همچنین انواع ترکتور فراهم شود. در این باره نیز پزوهش­های آینده می­تواند به در نظر گرفتن لغزش در سطح سینماتیک برای این ربات معطوف شود. البته حوزه­ی دیگری که تا اندازه زیادی بکر است و کم­تر تحقیقی در آن انجام شده مربوط به برهم کنش بین بار و ربات و اثر بار بر روی پایداری ربات ترکتور-تریلر است.

# مراجع

[1] "<http://robouav.org/>."

[2] Brockett, R. W. (1983). Asymptotic stability and feedback stabilization. *Differential geometric control theory*, *27*(1), 181-191.

[3] Samson, C. (1995). Control of chained systems application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots. *IEEE transactions on Automatic Control*, *40*(1), 64-77.

[4] Samson, C. (1997). Control of chained systems application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots. *IEEE, Trans. Automat. Control*, *42*(5), 698.

[5] Lucibello, P., & Oriolo, G. (1996, December). Stabilization via iterative state steering with application to chained-form systems. In *Decision and Control, 1996., Proceedings of the 35th IEEE Conference on* (Vol. 3, pp. 2614-2619). IEEE.

[6] Sordalen, O. J., & Egeland, O. (1995). Exponential stabilization of nonholonomic chained systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *40*(1), 35-49.

[7] Aicardi, M., Casalino, G., Bicchi, A., & Balestrino, A. (1995). Closed loop steering of unicycle like vehicles via Lyapunov techniques. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, *2*(1), 27-35.

[8] Guldner, J., & Utkin, V. I. (1994, December). Stabilization of non-holonomic mobile robots using Lyapunov functions for navigation and sliding mode control. In *Decision and Control, 1994., Proceedings of the 33rd IEEE Conference on* (Vol. 3, pp. 2967-2972). IEEE.

[9] Mukherjee, R., Chen, D., & Song, G. (1999). Feedback control strategies for a nonholonomic mobile robot using a nonlinear oscillator. *Journal of Robotic Systems*, *16*(4), 237-248.

[10] Amar, K., & Mohamed, S. (2013). Stabilized feedback control of unicycle mobile robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *10*(4), 187.

[11] Kanayama, Y., Kimura, Y., Miyazaki, F., & Noguchi, T. (1990). A stable tracking control method for an autonomous mobile robot.

[12] Fierro, R., & Lewis, F. L. (1997). Control of a nonholomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics. *Journal of Robotic Systems*, *14*(3), 149-163.

[13] Dierks, T., & Jagannathan, S. (2007, October). Control of nonholonomic mobile robot formations: Backstepping kinematics into dynamics. In *Control Applications, 2007. CCA 2007. IEEE International Conference on* (pp. 94-99). IEEE.

[14] Yang, S. X., Zhu, A., Yuan, G., & Meng, M. Q. H. (2012). A bioinspired neurodynamics-based approach to tracking control of mobile robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *59*(8), 3211-3220.

[15] Samson, C. (1993). Time-varying feedback stabilization of car-like wheeled mobile robots. The International journal of robotics research, 12(1), 55-64.

[16] Pomet, J. B. (1992). Explicit design of time-varying stabilizing control laws for a class of controllable systems without drift. Systems & control letters, 18(2), 147-158.

[17] Astolfi, A. (1996). Discontinuous control of nonholonomic systems. Systems and Control Letters, 27(1), 37-46.

[18] Thomas, M., Bandyopadhyay, B., & Vachhani, L. (2016). Posture stabilization of unicycle mobile robot using finite time control techniques.  *IFAC-PapersOnLine*, *49*(1), 379-384.

[19] Guerra, M., Efimov, D., Zheng, G., & Perruquetti, W. (2014, August). Finite-time supervisory stabilization for a class of nonholonomic mobile robots under input disturbances. In 19th IFAC World Congress.

[20] Michalek, M., & Kozlowski, K. (2010). Vector-Field-Orientation feedback control method for a differentially driven vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *18*(1), 45-65.

[21] Zeiaee, A., Soltani-Zarrin, R., Jayasuriya, S., & Langari, R. (2015, October). A uniform control for tracking and point stabilization of differential drive robots subject to hard input constraints. In ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference (pp. V001T04A005-V001T04A005). American Society of Mechanical Engineers.

[22] Cao, Z., Zhao, Y., & Wang, S. (2010, October). Trajectory tracking and point stabilization of noholonomic mobile robot. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 1328-1333). IEEE.

[23] Khalaji, A. K., & Moosavian, S. A. A. (2016). Stabilization of a tractor-trailer wheeled robot. Journal of Mechanical Science and Technology, 30(1), 421-428.

[24] Kassaeiyan, P., Tarvirdizadeh, B., & Alipour, K. (2019). Control of tractor-trailer wheeled robots considering self-collision effect and actuator saturation limitations. Mechanical Systems and Signal Processing, 127, 388-411.

[25] Alipour, K., Robat, A. B., & Tarvirdizadeh, B. (2019). Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip. Mechanism and Machine Theory, 138, 16-37.

[26] Jiang, Z. P., & Nijmeijer, H. (1997). Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping. Automatica, 33(7), 1393-1399.

[27] Fukao, T., Nakagawa, H., & Adachi, N. (2000). Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot. IEEE transactions on Robotics and Automation, 16(5), 609-615.

[28] Chen, C. Y., Li, T. H. S., Yeh, Y. C., & Chang, C. C. (2009). Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots. Mechatronics, 19(2), 156-166.

[29] Li, Z., Deng, J., Lu, R., Xu, Y., Bai, J., & Su, C. Y. (2016). Trajectory-tracking control of mobile robot systems incorporating neural-dynamic optimized model predictive approach. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 46(6), 740-749.

[30] Yang, S. X., Zhu, A., Yuan, G., & Meng, M. Q. H. (2012). A bioinspired neurodynamics-based approach to tracking control of mobile robots. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(8), 3211-3220.

[31] Huang, K., Shao, K., Zhen, S., & Sun, H. (2017). A novel approach for modeling and tracking control of a passive-wheel snake robot. Advances in Mechanical Engineering, 9(3), 1687814017693944.

[32] Thangaraj, R., Chelliah, T. R., Pant, M., Abraham, A., & Grosan, C. (2011). Optimal gain tuning of PI speed controller in induction motor drives using particle swarm optimization. Logic Journal of the IGPL, 19(2), 343-356.

[33] Kim, T. H., Maruta, I., & Sugie, T. (2008). Robust PID controller tuning based on the constrained particle swarm optimization. Automatica, 44(4), 1104-1110.

[34] Lin, F. J., Shieh, H. J., Shyu, K. K., & Huang, P. K. (2004). On-line gain-tuning PI controller using real-coded genetic algorithm. Electric Power Systems Research, 72(2), 157-169.

[35] Mansour, S. E., Kember, G. C., Dubay, R., & Robertson, B. (2005). Online optimization of fuzzy-PID control of a thermal process. ISA transactions, 44(2), 305-314.

[36] Gil, P., Lucena, C., Cardoso, A., & Palma, L. B. (2015). Gain tuning of fuzzy PID controllers for MIMO systems: a performance-driven approach. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 23(4), 757-768.

[37] Lee, J. Y., Jin, M., & Chang, P. H. (2014). Variable PID Gain Tuning Method Using Backstepping Control With Time-Delay Estimation and Nonlinear Damping. IEEE Trans. Industrial Electronics, 61(12), 6975-6985.

[38] Chang, W. D., Hwang, R. C., & Hsieh, J. G. (2002). A self-tuning PID control for a class of nonlinear systems based on the Lyapunov approach. Journal of Process Control, 12(2), 233-242.

[39] Yamada, T., & Yabuta, T. (1992). Neural network controller using autotuning method for nonlinear functions. IEEE Transactions on Neural Networks, 3(4), 595-601.

[40] Thanh, T. D. C., & Ahn, K. K. (2006). Nonlinear PID control to improve the control performance of 2 axes pneumatic artificial muscle manipulator using neural network. Mechatronics, 16(9), 577-587.

[41] Le, T. D., Kang, H. J., Suh, Y. S., & Ro, Y. S. (2013). An online self-gain tuning method using neural networks for nonlinear PD computed torque controller of a 2-dof parallel manipulator. Neurocomputing, 116, 53-61.

[42] Kayacan, E., Ramon, H., & Saeys, W. (2016). Robust trajectory tracking error model-based predictive control for unmanned ground vehicles. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 21(2), 806-814.

[43] Khalaji, A. K., & Moosavian, S. A. A. (2014). Robust adaptive controller for a tractor–trailer mobile robot. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 19(3), 943-953.

[44] Khanpoor, A., Khalaji, A. K., & Moosavian, S. A. A. (2017). Modeling and control of an underactuated tractor–trailer wheeled mobile robot. Robotica, 35(12), 2297-2318.

[45] Keymasi Khalaji, A., Rahimi Bidgoli, M., & Moosavian, S. A. A. (2015). Non-model-based control for a wheeled mobile robot towing two trailers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 229(1), 97-108.

[46] Martínez, J. L., Morales, J., Mandow, A., & García-Cerezo, A. (2008). Steering limitations for a vehicle pulling passive trailers. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 16(4), 809-818.

[47] Lamiraux, F., & Laumond, J. P. (2000). Flatness and small-time controllability of multibody mobile robots: Application to motion planning. IEEE Transactions on Automatic Control, 45(10), 1878-1881.

[48] Laumond, J. P. (1993). Controllability of a multibody mobile robot. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 9(6), 755-763.

[49] Tanaka, K., Hori, S., & Wang, H. O. (2002). Multiobjective control of a vehicle with triple trailers. IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 7(3), 357-368.

[50] Astolfi, A., Bolzern, P., & Locatelli, A. (2004). Path-tracking of a tractor-trailer vehicle along rectilinear and circular paths: A Lyapunov-based approach. IEEE transactions on robotics and automation, 20(1), 154-160.

[51] Matsushita, K., & Murakami, T. (2008). Nonholonomic equivalent disturbance based backward motion control of tractor-trailer with virtual steering. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(1), 280-287.

[52] Altafini, C. (2001). Some properties of the general n-trailer. International Journal of Control, 74(4), 409-424.

[53] Lee, J. H., Chung, W., Kim, M., & Song, J. B. (2004). A passive multiple trailer system with off-axle hitching. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2(3), 289-297.

[54] Rouchon, P., Fliess, M., Levine, J., & Martin, P. (1993, June). Flatness and motion planning: the car with n trailers. In Proc. ECC’93, Groningen (pp. 1518-1522).

[55] Divelbiss, A. W., & Wen, J. T. (1997). Trajectory tracking control of a car-trailer system. IEEE Transactions on Control systems technology, 5(3), 269-278.

[56] Roh, J. I., Lee, H., & Chung, W. (2011, December). Control of a Car with a Trailer using the Driver Assistance System. In Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on (pp. 2890-2895). IEEE.

[57] Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control*(Vol. 199, No. 1). Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall.

[58] Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. In Autonomous robot vehicles (pp. 396-404). Springer, New York, NY.

[59] Kim, C. J., & Chwa, D. (2015). Obstacle avoidance method for wheeled mobile robots using interval type-2 fuzzy neural network. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 23(3), 677-687.

[60] Wang, Y., Miao, Z., Zhong, H. and Pan, Q., 2015. Simultaneous stabilization and tracking of nonholonomic mobile robots: A Lyapunov-based approach. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 23(4), pp.1440-1450.

Abstract:

In this thesis firstly, two non-smooth kinematic control strategies are proposed for the posture stabilization of a differentially driven wheeled mobile robot. The developed approach is based on kinematic coordinate transformation and Lyapunov-like stability technique. The presented control laws can stabilize the system asymptotically at a desired target and offer two different manoeuvers. Further, the response of the suggested algorithms is compared against recent previous studies. Next, the control laws are modified to tackle the obstacle avoidance problem while the robot approaches the final desired posture. The obtained simulation results as well as experimental tests prove the effectiveness of the presented techniques.

Then, a method based on neural networks is introduced to automatically upgrade the gains of a well-known trajectory tracking controller of wheeled mobile robots. The suggested method speeds up the convergence rate of the main controller and improve and optimize the performance of the system. Simulations and experiments are performed to assess the ability of the suggested scheme. The obtained results show the effectiveness of the proposed method.

Finally, for the first time, a technique will be developed to generalize the trajectory tracking controller of the unicycle type wheeled mobile robots to the tractor-trailer ones. The developed algorithm is capable to be applied to the various types of the Tractor-Trailer Wheeled Robots. It can be utilized in the mentioned systems with both types of on-axel and off-axel configurations connections between the tractor and trailer. The desired trajectory tracking by the trailer is the aim of the control algorithm, in this study. Also, state variables and control inputs limitations are considered during applying the mentioned approach to the system. Both conducted simulation and experimental tests reveal the effectiveness of the developed technique.

**Keywords:** Mobile Robot; Robot Kinematics; Posture Stabilization; Trajectory tracking; Gain tuning



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| University of Tehran  Faculty of New Sciences and Technologies   1. Department of Mechatronics | | |
| Title:  Optimization and improvement of kinematic controller related to point stabilization and trajectory tracking of wheeled mobile robots | | | |
| By:  Pouya Panahandeh | | | |
| Supervisors:  Dr. Bahram Tarvirdizadeh  Dr. Khalil Alipour  Advisor:  Dr. [Alireza Hadi Hosseinabadi](http://fnst.ut.ac.ir/en/~hrhadi) | | | |
|  | | | |
| A thesis submitted to the Graduate Office in Fulfillment  of Requirements for the Degree of Master of Science   1. in Mechatronics | | | |
| September 2019 | | | |

1. Differentially driven wheeled mobile robot [↑](#footnote-ref-2)
2. Car-like wheeled mobile robot [↑](#footnote-ref-3)
3. Tractor-trailer wheeled mobile robot [↑](#footnote-ref-4)
4. Vector-Field-Orientation [↑](#footnote-ref-5)
5. Pointwise Angle Minimization method [↑](#footnote-ref-6)
6. Proportional-Integral-Derivative( PID) [↑](#footnote-ref-7)
7. Particle-Swarm-Optimization (PSO) [↑](#footnote-ref-8)
8. Proportional-Integral (PI) [↑](#footnote-ref-9)
9. jackknife [↑](#footnote-ref-10)
10. Vector-Field-Orientation (VFO) [↑](#footnote-ref-11)
11. Finite Time (FT) [↑](#footnote-ref-12)
12. IP Webcam [↑](#footnote-ref-13)