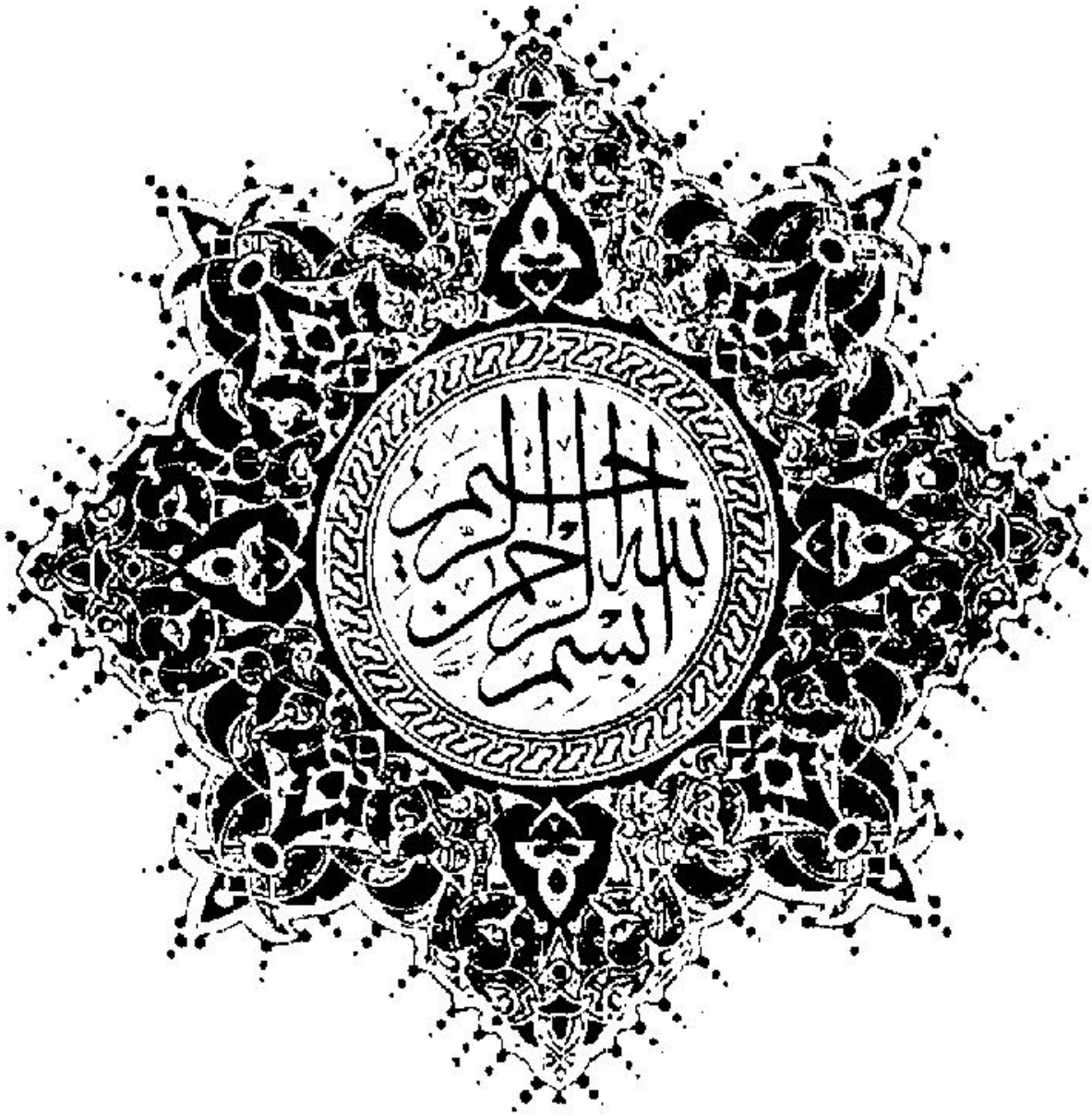

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده برق و کامپیوتر

گروه مکاترونیک، کنترل و قدرت

طراحی مسیر بهینه برای روبات متحرک دارای بازو

محقق: مجتبی مرادی

اساتید راهنما:

دکتر ساسان آزادی

دکتر امین نیکوبین

شهریور 1389

بنام خدا

دانشگاه سمنان
دانشکده مهندسی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

پایان نامه آقای / خانم حبیب مرادی ---- برای اخذ کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات

تحت عنوان طراحی مسیریابی مبتنی بر روابط متقابل ایران بازو

در جلسه مورخ ۸۹/۷/۲۵ بررسی و با نمره بیست و یک مورد تایید قرار گرفت.

هیئت داوران :

استاد راهنما : دکتر ... امضاء .....

استاد مشاور : دکتر ... امضاء .....

استاد داور : دکتر ... امضاء .....

استاد داور : دکتر ... امضاء .....

مسئول تحصیلات تکمیلی : ... امضاء .....

لا اله

الا اللّه

محمد

الرسول اللّه

على ولى اللّه

اللهم صل

على فاطمه

و ابيها و

بعلها و

بنيها

بِسْمُهُ

فِي سَاحِهِ اللّه تَعَالَى

وَ مَعَ التَّأيِيدِ مِنْ وَاسِطَهِ فِيْضِهِ

مَهْدِيِّ الْمُنْتَظَرِ الْقَائِمِ عَجَّلَ اللّه تَعَالَى فَرَجَهُ

أُهْدِي هَذَا الْبَحْثِ اِلَى الاَعَزِّ مَعَانِي الاَرْضِيَهِ وَ الْمِلْكِيَهِ

أُمِّيَ الْمَحْبُوبَهِ، حَبِيبَتِي الْحَوَّاءِ الْمِينَارَهِ الْعَزِيزَهِ، وَ إِحْدَى النُّجُومُ السَّبْعِ لِلْكَوْنِ

وَ أبِي، عَبْدُاللّهِ وَخَلِيلِهِ وَ الْوَاسِطَهِ لِخِلْقَتِي وَإِلَى الْمُؤْمِنِينَ وَ المُؤْمِنَاتَ كُلُّهُمْ وَ بِحَقِّ مُحَمَّدٍ وَ آلِهِ الطَّيِّبِينَ الطَّاهِرِينَ

مَتَى تَفْهَمْ ؟ مَتَى يَا سَيِّدى تَفْهَمْ ؟ مَتَى تَفْهَمْ ؟ بِأَنَّكَ لَنْ تَخَدَّرْنِي.. بِجَاهِكَ أَوْ إِمَارَاتِكْ وَلَنْ تَتَمَلَّكَ الدُّنْيَا.. بِنَفْطِكَ وَامْتِيَازَاتِكْ

مَتَى تَفْهَمْ ؟ مَتَى يَا أَيُّهَا الْمُتْخَمْ ؟ مَتَى تَفْهَمْ؟ بِأَنِّي لَسْتُ مَنْ تَهْتَمْ بِنَارِكَ أَوْ بِجَنَّاتِكْ مَتَى تَفْهَمْ ؟ عَلَى الأَشْجَارِ فِي يَافَا

وَفِي حَيْفَا وَبِئْرَ السَّبْعِ لَيْسُوا مِنْ سُلالاتِكْ تَغُوصُ الْقُدْسُ فِي دَمِهَا وَأَنْتَ صَرِيعُ شَهْوَاتِكْ تَنَامُ كَأَنَّمَا الْمَأْسَاةُ لَيْسَتْ بَعْضَ مَأْسَاتِكْ

مَتَى تَفْهَمْ ؟ مَتَى يَسْتَيْقَظُ الإِنْسَانُ فِي ذَاتِكْ ؟ نزار قباني.

تقدیر و تشکر

در این‌جا لازم می‌بینم از تمامی کسانی که مرا در انجام این پایان‌نامه کمک کرده‌اند تشکر کنم. الله متعال را شکرگزارم که عزت قلبی به نعمتی چنین به بنده ناچیز عطا فرمود. مسبب این خدمت وجود مبارک امام عصر(عج) که همواره چون دوستی عزیز از سکنات خلق محافظت می‌نمایند. این خدمت، در مقابل خدمت پدر و مادرم ناچیز بوده و تشکر لسانی بنده نیز، از آن هم ناچیزتر.

از اساتید محترم راهنما جناب آقای دکتر ساسان آزادی و جناب آقای دکتر امین نیکوبین تشکر ویژه‌ای خواهم داشت که محبت این عزیزان در لحظات انجام پروژه بر قلب حقیر بوده است. تشکری دوباره از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر امین نیکوبین دارم که نه تنها کسب فیضی شد از کلاس درس ایشان، بلکه نحوه تحقیق را از ایشان به ارمغان دارم و تمامی تلاش بنده حقیر در راستای کسب دانش، با وجود کمبود بسیار متناسب با خواسته‌های رفیع ایشان بوده است. از اساتید محترم گروه مکاترونیک و کنترل، آقایان دکتر علی‌نژاد، دکتر عباس دیدبان، دکتر کوروش کیانی تشکر دیگری خواهم داشت که دروس دوره کارشناسی ارشد را برای اینجانب خاطره‌انگیز کرده، بنده را در کسب علمشان مستفید کردند.

از هم‌کلاسی‌های عزیزم، مهندس اسماعیل پورجم، مهندس علی اسماعیلی، مهندس پیام ناظم‌زاده، مهندس حمیدرضا رمضانی، مهندس سپهرفردوس‌زاد، نهایت تشکر را دارم که در مدت این دو سال خاطرات شورانگیزی برایم به جای گذاردند. همچنین دوستان هم‌خوابگاهی مهندس علی عسگرزارع، مهندس ابوالقاسم رحیمی، مهندس رضا مهدیه، مهندس سید رضا ابراهیمی، مهندس مهدی مرادی، مهندس محمدحسین مختاری، مهندس آرش محمدزاده، مهندس یونس قاسمیان، مهندس حمید راستگو که زندگی دوساله بنده را سراسر مهربانی کرده و از فیض وجودشان نهایت لذت را مقدم نمودند. همواره یاد هم-صحبتی دیگر دوستان، دکتر میثم زارعی، دکتر عبدالحسین رضائی نیز در خاطر بنده خواهد ماند.

در پایان از جناب آقای دکتر علی قدوسیان و آقای دکتر علیرضا ثنایی نیز به عنوان داوران داخلی و خارجی غایت تشکر را خواهم داشت.

خلاصه تحقیق

طراحی مسیر در روباتیک موضوع بسیار مهمی است که عموما به عنوان کنترل سطح بالا برای حرکت روبات مطرح می‌شود. روش‌های طراحی مسیر متعددی برای بازوها و پلت‌فرم‌ها با در نظر گرفتن قیود موجود و مدلسازی‌های مختلف وجود دارد و از این منظر، محققین این روش‌ها را به دو قسمت مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌کنند. هر دو این روش در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل سرعت زیاد در طراحی مسیر به روش مستقیم این روش برای حالت طراحی مسیر دینامیکی با موانع دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفت. برای در نظر گرفتن دینامیک در روش مستقیم در این پایان‌نامه دینامیک غیرمستقیم پیشنهاد شده و با استفاده از این تکنیک طراحی مسیر با در نظر گرفتن مدل دینامیکی و فرض شرایط سینماتیکی حل شد. در روش دیگر یا روش غیرمستقیم، با استفاده از تئوری کنترل بهینه غیرخطی و اصل حداکثری پونتریاگین، معادلات بهینگی برای طراحی مسیر بهینه استخراج شد. اما به دلیل همگرایی ضعیف درحل این معادلات مشکلات عدیده‌ای به وجود آمد. در این پایان‌نامه مشکلات موجود با استفاده از تکنیک‌های معرفی شده، تا حدودی رفع شده‌اند. با استفاده از تئوری هموتوپی در حل کنترل بهینه مشکل همگرایی جواب و نزدیک بودن حدس اولیه به جواب نهایی رفع شد. و با تخمین شبه‌حالت‌ها برای مشکل استخراج سمبولیک معادلات دیفرانسیل در حل مسئله کنترل بهینه برای طراحی مسیر مرتفع گردید. در این پایان‌نامه موضوع بالانسینگ بهینه برای روبات‌های بازویی معرفی و با معرفی روش بالانسینگ تکراری برای روبات‌های متحرک در ادامه شبیه‌سازی‌های موجود به بالانسینگ بهینه روبات متحرک گسترش داده شد. استفاده از بالانسر دینامیکی بهینه توسط محقق در ادامه مطرح گردیده و طراحی مسیر و کنترل بهینه آن به روش غیرمستقیم انجام شده است. همچنین در ادامه، مسائل متعددی نظیر رد مانع برای روبات متحرک دارای بازو، نیز در این زمینه حل‌گردید. در پایان، تمامی شبیه‌سازی‌ها و مدلسازی‌های مربوط به طراحی مسیر مستقیم و غیرمستقیم و نمایش سه‌بعدی روبات‌ها و مسیر، در مجموعه‌ای تحت عنوان جعبه‌ابزار GeTool در نرم‌افزار MATLAB ارائه شده است.

1 فهرست

1 فهرست د

فهرست جداول ی

1 مقدّمه و تاریخچه تحقیق 0

1.1 مقدمه ای بر طراحی مسیر در روباتیک 0

1.1.1علم روباتیک 0

1.1.2تقسیم بندی طراحی مسیر 1

1.1.3طراحی مسیر توسط متخصصین کامپیوتر 2

1.1.4طراحی مسیر توسط متخصصین کنترل 5

1.1.5مروری کلی بر تحقیقات در طراحی مسیر هندسی 6

1.1.6طراحی مسیر بلادرنگ در محیط دینامیک 8

1.1.7ورودی بر طراحی مسیر سینماتیکی و دینامیکی 9

1.2تاریخچه کنترل بهینه 9

1.2.1حساب تغییرات 9

1.2.2کنترل بهینه توسط ریاضیون 11

1.2.3کنترل بهینه ابزاری برای مهندسین 12

1.2.4پیاده سازی عددی مسائل طراحی مسیر 16

1.3تاریخچه مدلسازی روباتهای متحرک دارای بازو 18

1.4اهداف پایان نامه در یک نگاه 21

2مدلسازی مسئله 22

2.1مدلسازی سینماتیکی روبات 22

2.2مدلسازی دینامیکی روبات 23

2.2.1روبات متحرک دارای بازو در سطح هموار 24
2.2.2مدلسازی روبات متحرک دارای بالانسر در سطح شیبدار 27
2.3طراحی مسیر به روش مستقیم تصادفی 35
2.3.1انتخاب هسته جستجوی تصادفی برای طراحی مسیر 35
2.3.2محاسبه تابع هزینه با استفاده از دینامیک غیرمستقیم 36
2.3.3گسسته سازی مسیر و محاسبه تابع هزینه با استفاده از روش دینامیک غیرمستقیم 38
2.4طراحی مسیر غیرمستقیم، تئوری کنترل بهینه 40
2.4.1استخراج معادلات بهینگی 40
2.4.2بررسی روشهای معمول حل عددی معادلات بهینگی 42
2.4.3موضوع زمانبندی مسیر 44
2.5بالانسینگ بهینه در روباتیک 46

3انجام طراحی مسیر: روش مستقیم 48

3.1طراحی مسیر پلتفرم 48
3.1.1روش نگاشت 48
3.1.2روش انتگرالی 51
3.1.3روش مشتقی 53
3.1.4روش بیزیر 55
3.2بررسی روش دینامیک مستقیم 56
3.3پیاده سازی روش طراحی مسیر بهینه مستقیم برای طراحی مسیر دینامیکی 56
3.4طراحی مسیر بهینه مستقیم برای روبات متحرک دارای بازو 65

4طراحی مسیربروش غیرمستقیم 66

4.1رفع مشکلات حل غیرمستقیم 67
4.1.1تخمین عددی برای شبه حالتها 67
4.1.2در نظر گرفتن قیود در بهینه سازی 68

4.1.3استفاده از هموتوپی برای افزایش شعاع همگرایی 69
4.2نمونه حل غیرمستقیم در طراحی مسیر و بالانسینگ بهینه برای روباتهای بازویی 71
4.2.1طراحی مسیر زمان بهینه برای روبات دولینکی 71
4.2.2آنالیز بالانسینگ بهینه برای یک روبات دولینکی 75
4.2.3طراحی مسیر و بالانسینگ بهینه- جرمی برای روبات فضایی 81
4.3مسیر و بالانسینگ روبات متحرک با قید پایداری 82
4.4بالانسینگ بهینه روبات متحرک 86
4.5زمانبندی مسیر برای روبات متحرک 89
4.6بازو به عنوان بالانسر روبات متحرک در سطح شیبدار 92
4.7حل مسئله طراحی مسیر برای روبات متحرک دارای بازو 94

5بحث و نتیجه گیری 97

5.1نتیجه گیری کلی 97
5.2نتایج پژوهشی 98
5.3کارهای آینده و ادامه پژوهش 100

6پیوست 101

6.1جعبه ابزار طراحی شده در GETool - MATLAB 101

7مراجع 102

فهرست اشکال

شکل 1-1- روشهای تقسیم بندی روشهای طراحی مسیر هندسی 2
شکل 1-2-تقسیم بندی روشهای طراحی مسیر هندسی 8
شکل 1-3-طراحی مسیر دینامیکی برای روبات (83).....13

شکل 2-1-چرخ های استاندارد و هولونومیک(سوئدی، یونیورسال، کستر،آفست،زاویه دار و ثابت) (137) 23
شکل 2-2-شمای کلّی از روبات 27
شکل 2-3-انواع بالانسر در روباتهای متحرک (187) 27
شکل 2-4-بردار نقاط اتصالی روبات و زمین 28
شکل 2-5-نمایش زوایا و نقاط اتصال روبات 28
شکل 2-6- هندسه روبات از دید بالا 30
شکل 2-7-تغییر موقعیت اتّصالی نسبت به تغییر زاویه 30
شکل 2-8-رابطه زاویه شیب و خطای نسبی 31
شکل 2-9-شرط عدم لغزش در چرخ محرک 31
شکل 2-10-آنالیز دینامیکی دالامبر برای روبات متحرک در سطح شیبدار و بالانسر آن 34
شکل 2-11- مقایسه عدد تناسب برای الگوریتمهای موجود 36
شکل 2-12-روابط انرژی در یک سیستم روباتیکی 37
شکل 2-13- نمونه یک منحنی بیزیر صفحه ای و فضایی و نقاط کنترل آنها 39
شکل 3-1- نمونه مسیر مناسب طراحی شده 51
شکل 3-2- نمونه مسیر نامناسب طراحی شده 51
شکل 3-3- پلت فرمهای معمول برای روبات متحرک، چرخ دیفرانسیلی(راست)، شبه ماشین(چپ) 52
شکل 3-4-طراحی مسیر به روش انتگرالی برای روبات متحرک چرخ دیفرانسیلی 53
شکل 3-5- طراحی مسیر به روش انتگرالی برای روبات متحرک شبه ماشین 53
شکل 3-6- طراحی مسیر به روش مشتقی برای روبات متحرک 55
شکل 3-7- مسیر طراحی شده توسط روش بیزیر 55
شکل 3-8-خطای مسیر بهینه طراحی شده با استفاده از روش دینامیک غیرمستقیم 56
شکل 3-9-مانع سرعتی و تقریب آن با استفاده از یک بیضی 57
شکل 3-10-نمونه یک مانع دینامیکی تقریب زده شده با بیضی و تابع هزینه آن 58
شکل 3-11-دیاگرام کنترلی نمونه با کنترل جستجوی تصادفی 58
شکل 3-12- طراحی دینامیکی برای یک روبات متحرک برای یک حالت 59

شکل 3-13- تناوب زمانی برای تشخیص مانع و طراحی مسیر 61
شکل 3-14- الگوریتم ارائه شده برای طراحی مسیر بلادرنگ 61
شکل 3-15- حرکت روبات و مانع متحرک 61
شکل 3-16- شبیه سازی برای طراحی حرکت دینامیکی با روش جستجوی تصادفی 63
شکل 3-17- فاصله روبات از مانع و مسیر طی شده در هر دوشبیه سازی 64
شکل 3-18- ورودی های کنترلی به چرخها 64
شکل 3-19- طراحی مسیر مستقیم برای روبات متحرک دارای بازو به همراه زمانبندی سرعت 65
شکل 4-1-الگوریتم فوروارد-بکوارد برای حل هموتوپیک مسئله کنترل بهینه 71
شکل 4-2- روبات دولینکی برای حرکت زمان بهینه 71
شکل 4-3-همگرایی هموتوپیک برای مسئله زمان بهینه 74
شکل 4-4-همگرایی هموتوپیک برای موقعیت و سرعت لینک اول 74
شکل 4-5-همگرایی هموتوپیک برای لینک دوم 75
شکل 4-6-مسیر زمان بهینه برای روبات دولینکی 75
شکل 4-7-روبات دولینکی با وزنه های مجهول 78
شکل 4-8-مسیرهای بهینه برای حالات مختلف 78
شکل 4-9-کنترل بهینه برای حالات مختلف 78
شکل 4-10-همگرایی وزنه ها به حالت استاتیکی در اثر افزایش زمان 79
شکل 4-11-اثر مقدار زمان وزنه ها بر انرژی مصرفی 80
شکل 4-12-اثرات شرایط مرزی بر مقادیر وزنه های بهینه(راست – وزنه اول و چپ وزنه دوم) 80
شکل 4-13-شمایی از روبات فضایی مورد بررسی 81
شکل 4-14-مسیرهای بهینه برای حالتهای مختلف 81
شکل 4-15-کنترل بهینه برای حالتهای نابالانس، استاتیکی بالانس و بالانس بهینه 82
شکل 4-16-تحلیل نیرویی برای پایداری یک روبات متحرک 84
شکل 4-17- کران بالا و هزینه مصرفی به ازای جرم اضافه شده 84
شکل 4-18- همگرایی در بالانسینگ تکراری روبات متحرک 85
شکل 4-19-مسیرهای طراحی شده 85

شکل 4-20- نیروی عکسالعمل چرخ کستر برای حالات مختلف.....85
شکل 4-21-کنترل بهینه 86
شکل 4-22-الگوریتم ارائه شده برای اعمال بالانسینگ بهینه برای روبات متحرک 87
شکل 4-23-تابع روزنبرگ و بهینه سازی آن توسط الگوریتم صعود 87
شکل 4-24-عملکرد الگوریتم صعود برای بالانسینگ 87
شکل 4-25-مقایسه بالانسینگ بهینه و روشهای دیگر.....88
شکل 4-26-موقعیت و سرعت روبات 88
شکل 4-27-کنترل بهینه پس از اعمال بالانسینگ بهینه و نیروهای عکس العمل چرخها.....89
شکل 4-28-نیروهایی وارد بر روبات متحرک 91
شکل 4-29-مسیرهای تک انحنایی و دوانحنایی (272).....91
شکل 4-30-زمان بندی دینامیکی در یک مسیر ربع دایره برای روبات متحرک 92
شکل 4-31-کنترل بهینه برای حالات ناپایدار، پایدار، بالانس دینامیکی.....93
شکل 4-32-موقعیت و جهت گیری روبات.....93
شکل 4-33-اختلاف مقادیر عکس العمل چرخها با حدپایداری(بایستی مقدار مثبتی باشد).....93
شکل 4-34-مسیرهای طراحی شده برای حالات مختلف 93
شکل 4-35-مسیر طراحی شده بدون مانع 94
شکل 4-36-رشد هموتوپیک برای مانع 94
شکل 4-37- مسیر بهینه با در نظر گرفتن مانع.....95
شکل 4-38-مسیر طراحی شده با در نظر گرفتن مانع.....95
شکل 4-39-اجزای مسیر طراحی شده روبات متحرک دارای بازو با مانع و بدون مانع 95
شکل 4-40-کنترل بهینه در حالتهای با مانع و بدون مانع 96

فهرست جداول

جدول 1-1- روش های طراحی مسیر هندسی به ترتیب تاریخی 7
جدول 1-2- روش های طراحی بهینه سازی به ترتیب تاریخی 14
جدول 4-1- پارامترهای روبات دولینکی 70
جدول 4-2-مقایسه هزینه برای حالات مختلف.....79
جدول 4-3-مقادیر استفاده شده برای شبیه سازی 79
جدول 4-4-پارامترهای مورد بررسی برای روبات سه لینکی فضایی 81
جدول 4-5-توابع هزینه برای حالات مختلف.....82
جدول 4-6-همگرایی مقادیر جرم و موقعیت وزنه بالانس در بالانسینگ تکراری 85

فصل اول

مقدمه و تاریخچه تحقیق

1 مقدّمه و تاریخچه تحقیق

1.1 مقدمه ای بر طراحی مسیر در روباتیک

1.1.1 علم روباتیک

روباتیک علم اتوماتیک کردن حرکت و عمل بوده و اغلب جهان آینده را با انگیزه‌های متفاوت مادی، صنعتی، نظامی و علمی از آن روباتیک می‌دانند(1) . روبات در نمایشنامه سال 1920 توسط کارل کاپک[1] متولد شد اما، در صنعت به بازوی مکانیکی ماهر یا منیپیولاتور معروف بوده واجزاء آن با نام سینه، بازو، ساعد، شانه، آرنج و مچ نامگذاری می‌شوند(2) . تحرک به طراحی حرکت خودکار و هوش مصنوعی -سهل و متنع- نیازمند است. انجام وظایفی مانند جوشکاری نقطه‌ای، رنگ‌پاشی ، جابجایی مواد، و مونتاژ قطعات و بصورت اتوماتیک نیاز به طراحی مسیر دارند(3) . طراحی مسیر را می‌توان همینطور درجاگذاری بردهای مدارچاپی، بازرسی و تعمیر در محیط‌های هسته‌ای، زیردریایی، و حتی کشاورزی مشاهده کرد(4) . طراحی مسیر در ابتدا توسط انسان می‌شده سروومکانیزم تنها وظیفه انجام عمل را داشته است. با جایگزینی رابط‌ها با هیدرولیک یا الکتریک، روبات‌های اولیه توسط چند شرکت مانند جنرال میلز یا جنرال الکتریک با اعمال فیدبک در سال 1949 ساخته شدند(5) . در موازات با توسعه ماشین‌ابزارهای کنترل عددی کامپیوتری (CNC)، اولین روبات‌ها توسط جورج دول[2] در سال 1954 با جایگزینی بازوی ماهر کنترلر ماشین‌ابزار CNC قابل برنامه‌ریزی توسعه داده شدند. سپس جوزف انگلبرگ[3] شرکت یونیمیشن را در سال 1956

---

[1] Karel Capek
[2] George Devol
[3] Joseph Engelberger

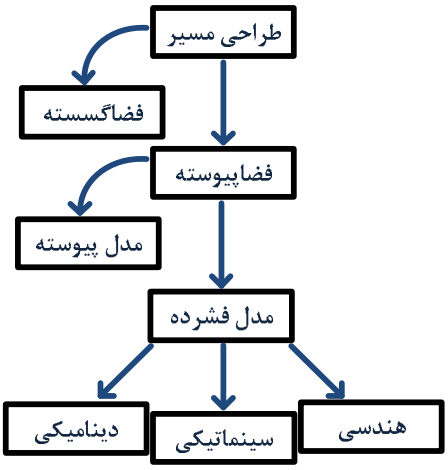
تاسیس کرد و اولین روبات خود را در کارخانه جنرال موتور در سال 1961 نصب نمود. نوآوری مهم در اینجا قابلیت برنامه‌ریزی ماشین بود که می‌توانست، با هزینه نسبتا پایین دوباره برنامه‌ریزی شده و دوباره مجهز گردد. بنابراین ماشین را برای انجام یک دامنه وسیع از وظایف قادر می‌سازد(6) . ساختار مکانیکی بازوی روبات یونیمیشن یک انحراف از طراحی مکانیکی متداول را ارائه نمود که در آن از یک زنجیره سینماتکی حلقه باز استفاده شده بود: بدین معنی که دارای یک ساختار تیر کنسولی با درجات آزادی زیاد می‌باشد(8) (7) . در اواسط دهه هفتاد بجزی[1] در آزمایشگاه رانش جت یک برنامه شبه-عملگری برای بازوهای ماهر فضایی را آغاز نمود. در 1979 روبات SCARA (روبات مفصلی مطیع انتخابگر برای مونتاژ) در ژاپن و سپس در ایالات متحده معرفی گردید. بسته به توسه کاربردهای روبات‌ها، انواع مختلفی از روبات‌ها با تفاوت متناسب در روش راه‌اندازیشان گسترش یافتند(10) (9) . طراحی مسیر در روباتیک، اجرای حرکت روبات از مبداء به مقصد بدون برخورد به مانع می‌باشد(11) . بعد از رشد کامپیوتر، کاربردهای متنوع طراحی مسیر در زمینه‌های نظامی، پزشکی، انیمیشن و بازی‌های کامپیوتری، صنعتی، روباتیک و بسیاری زمینه‌های دیگر دنبال گردید و به تبع آن راه‌حل‌های مختلفی نیز برای این‌گونه مسایل ارائه شده است (12).

1.1.2 تقسیم بندی طراحی مسیر

مسئله طراحی مسیر در کلی‌ترین رده تقسیم‌بندی با توجه به نوع فضای سیستم به دو قسمت کاملا مجزای فضا پیوسته و فضاگسسته تقسیم شده است. طراحی مسیر در فضای گسسته در اکثر موارد به حل یک مسئله ترتیبی منجر می‌شود که در هوش‌مصنوعی معمولاً به جستجو در فضای گراف تبدیل می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به حل مسئله روبیک اشاره کرد که نمونه یک سیستم حالت گسسته با ورودی گسسته می‌باشد (13).

همان‌طور که در شکل 1-1 مشهود است، می‌توان طراحی مسیر در فضای پیوسته به سه قسمت اساسی طراحی مسیر هندسی(پیوسته مکانی)، طراحی مسیر سینماتیک(مسیر مشتق‌پذیر) و طراحی مسیر دینامیک(پیوستگی مراتب بالاتر) (12) تقسیم کرد. به ترتیب شاهد افزایش پیچیدگی مسئله بوده که با دخول عدم قطعیت در مسئله و تغییرپذیری در ساختار روبات، بیشتر می‌شود. پیچیده‌تر شدن مسئله برای افزایش کارایی بازوها مورد نیاز طراحان می‌باشد(14) .

[1] Bejczy



شکل 1-1- روشهای تقسیم بندی روش‌های طراحی مسیر هندسی

علی‌رغم ارائه روش‌های متعدد برای طراحی مسیر، هنوز روش مناسب طراحی مسیر که تمامی مطالبات مهندسین را شامل شود، بوجود نیامده است. برای بررسی این روش‌ها به کتاب پروفسور لاوال (12)و نیز کتاب پروفسور لتمب (13) مراجعه کنید. مرادی نیز روش‌های مختلف طراحی مسیر هندسی، سینماتیکی و دینامیکی را مرور کرده است (15). همچنین، گلدمن با بررسی کلی روش‌ها، ایرادات آنها را بیان کرده و مسئله طراحی مسیر را ناشی از محدودیت‌های مکانی-زمانی بیان کرده است(16) . طراحی مسیر در فضای گسسته بیشتر موضوع هوش مصنوعی بوده و آنچه که بیشتر در روباتیک مطرح است، طراحی مسیر در فضای پیوسته می‌باشد. در طراحی مسیر فضاپیوسته به دلیل پیچیدگی بسیار زیاد و بروز معادلات دیفرانسیل جزئی، معمولا سیستم‌های روباتیکی را بصورت مدل‌های فشرده در نظر می‌گیرند. در این پایان‌نامه منظور از طراحی مسیر، طراحی مسیر یک سیستم فشرده در فضای پیوسته می‌باشد. به دلیل اهمیت موضوع، تاکنون محققین برای حل این موضوع روش‌های بسیاری را پیشنهاد داده‌اند که اکثرا برای حل مسائل طراحی مسیر هندسی استفاده می‌شود. طراحی مسیر هندسی به دلیل نبود قیود دیفرانسیلی، پیچیدگی بسیار کمتری نسبت به روش‌های سینماتیکی و دینامیکی دارد.

1.1.3 طراحی مسیر توسط متخصصین کامپیوتر

تحقیقات در مورد طراحی مسیر در ابتدا در مسائل الگوریتمی مورد توجه قرار گرفت. در اواسط دهه 60 میلادی، زمانی که لوزانو نظریه انقلابی خود را در زمینه کاربردهای فضایی ارائه داده و باعث توجه به مسئله طراحی حرکت شد، محققین شروع به بررسی روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف نمودند (17). از دهه 60 تا دهه 90 که خطیب روش نسبتا جامع خود را ارائه دهد، تحقیقات اولیه زیادی در طراحی مسیر انجام گرفت. به دلیل پیچیدگی موضوع طراحی مسیر، سال‌ها طول کشید تا اینکه مسئله بطور مناسبی بیان شود و در نهایت تیلور مسئله طراحی حرکت را به شکل

امروزی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مطرح نمود. وی روشی را که به پالایش نازک‌سازی[1] شناخته شد نیز، بر مبنای تکنیک‌های بازگشتی عددی عدم قطعیت ارائه نمود(18) . توسعه‌ای از این روش به روش سمبولیک توسط بروکس ارائه گردید(19) . نیلسون (20) یک سیستم روبات متحرک(Shakey) را با توانایی‌های طراحی مسیر اتوماتیک پیاده-سازی کرد. وی البته روش گراف دید[2] را نیز برای طراحی حرکات این روبات معرفی نمود. آدوپا[3] ایده کاهش روبات به یک نقطه را در یک فضای مناسب قبل از ایده فضای استقرار[4] ارائه نمود (21). لیبرمن و وسلی (22)و لوزانو پرز (17) اولین تلاش‌ها را برای ایجاد سیستم‌های یکپارچه، جهت برنامه‌ریزی بازوهای روباتیکی ارائه نموده-اند. این روش بعدها به مجموعه بزرگتری از روابط و کاربردشان به عنوان بخشی از زبان برنامه‌ریزی سطح بالای روبات، توسعه داده شد(23) . آمبلر و پاپلستون روشی را برای استنتاج موقعیت عددی اشیاء در ترم ماتریس‌های مختصات همگن، از روابط سمبلیک فضایی مربوط به ویژگی‌های اشیاء، ارائه نموده‌اند(24) .لوزانو و وسلی این ایده را در یک روش سیستماتیک بهتر بکار بردند و اولین الگوریتم طراحی مسیر را برای روبات‌ها و موانع چند سطحی و چند وجهی بدون چرخش، ارائه نمودند(25) . بعدها لوزانو عبارت فضای استقرار که از مکانیک سرچشمه گرفته بود را در طراحی حرکت بکار برد(26) . براساس این نظریه می‌توان همه روبات‌ها را می‌توان به روبات نقطه‌ای تبدیل کرد (27). وایز مروری کلی بر روش‌های نگاشت روبات به روبات نقطه‌ای ارائه کرده است(28) . وی همچنین این مفاهیم را توسعه داده و قوانین مربوط به روش سلول‌بندی تخمینی را معرفی نمود(29) . ریف اولین بررسی تئوریک پیچیدگی ذاتی محاسباتی را برای مسئله طراحی مسیر ارائه نمود، که نشان می‌داد که طراحی یک مسیر آزاد در فضای استقرار با ابعاد بالا، از میان موانع ثابت، یک مسئله سخت پرحافظه است(30) . این کار، دانشمندان تئوری کامپیوتر را به طراحی حرکت متمایل نمود. و ناگهان مقالات متعددی برای انواع مختلفی از مسایل طراحی حرکت ارائه گردید. بعدها، ریف این بخش از روباتیک را به عنوان بخش جدید به نام روباتیک محاسباتی نامید(31) . چتیلا طراحی حرکت را با داده‌های ناقص برای روبات متحرک، که به صورت یک نقطه در یک فضای کاری دو بعدی فرض شده است، بررسی نمود(32) . او در ابتدا این طراح را بر روی تقسیم‌بندی دقیق زیرمجموعه خالی فضای کاری به سلول‌های محدب (ایده‌ای که بعدها به فضای آزاد در فضای استقرار توسعه داده شد.)، بنا نهاد. طراح به صورت بلادرنگ کار کرده، و سلول‌بندی به صورت دوره‌ای به منظور در نظر گرفتن اطلاعات جدید بدست آمده توسط سنسورها، به روز می‌گردد. ماسون اهمیت حرکات هل دادنی را در انواع وظایف روبات، مورد توجه قرار داد

---

[1] Skeleton Refinement
[2] Visibility Graph
[3] Udupa
[4] Configuration Space

(33). اگرچه کار اولیه وی بطور کلی در مدلسازی مکانیک هل دادن، تحت فرضیات شبه استاتیک، قرار داشت اما توسط مقالات دیگر ماسون و دیگران به صورت مستقیم به طراحی حرکت مرتبط گردید. دالاینگ و یاپ انقباض را به عنوان یک روش تئوریک جدید برای طراحی مسیر معرفی نمودند(34) . بروکس به صورت کاملا جداگانه و البته مشابه، یک روش طراحی عملی‌تر شبه‌انقباضی[1] را که به عنوان روش شاهراه شناخته شد، ارائه نمود (35). در سال 1983 و 1984، شوارتز، شریر و آریل شفی مجموعه‌ای از پنج مقاله که سری مسئله حرکت دهنده پیانو نامیده شد، را ارائه نمودند(36) . برای بررسی روش‌های قدیمی به کتاب لتمب مراجعه کنید. غالب روش‌هایی که ارائه شد برای طراحی مسیر هندسی در فضای استقرار بود. در فضای استقرار آزاد که به یک شبکه از خطوط یک بعدی نگاشت شده طراحی حرکت به یک مسئله جستجوی گراف تبدیل می‌گردد. جستجوی گراف در تمامی روش‌های طراحی مسیر با الگوریتمهای دیجکسترا و*A مسیر طراحی و بهینه می‌گردد. گراف دید نیلسون روش جاده محوری است که از نظر هندسی مسیر کمترین فاصله را ارائه خواهد داد(20) . دولاینگ و همکاران روش انقباضی براساس دیاگرام ورونوی ارائه کرد(34) .این روش در سال 2000 توسط کوزت و همکاران بصورت مرحله‌ای گسترش یافت (37). استفاده از اتّصال مناطق آزاد در فضای استقرار روبات توسط بروکس ارائه شد (35). کنی نمای روشن را بیان و پیاده‌سازی نمود(38) . روش جاده‌ای احتمالاتی کاوراکی پس از ارائه، به یک روش قابل اعتمادتر و مهم‌تری تبدیل شد که با استفاده از تکنیک‌های نمونه‌برداری تصادفی سرعت همگرایی خوبی در مسائل سنگین دارد(39) . هدف کلی ارائه یک پلت‌فرم قوی نرم‌افزاری است که بتواند تمام مسائل طراحی مسیر را انجام دهد. جرارت و همکاران روش‌های نمونه‌برداری را بررسی و یک سیستم مناسب(SAMPLE)[2] برای طراحی مسیر ابداع نمودند(40) . سیستم CoPP نیز توسط این گروه بعدا پیاده سازی (41). روش درخت تصادفی توسط کوفنر و لاوال ارائه گردید(42) که براساس نمونه‌برداری تصادفی انجام می‌شود. پس از ارائه روش درخت تصادفی در دانشگاه ایلنویس سیستم MSL[3] در برنامه‌نویسی C++ ایجاد گردید. سیستم‌های دیگر همچون OXSIM در دانشگاه آکسفورد (43)، Move3D توسط سیمون(44) نیز تاکنون ارائه شده‌اند. برای مطالعه بیشتر در مورد سیستم‌های پیاده‌سازی شده به تزدکتری استرندبرگ مراجعه کنید(45) . روش‌های جاده‌ای هنوز هم مورد تحقیق محققین می‌باشد. چن و همکاران روشی بر اساس یک نخ الاستیک برای طراحی مسیر ارائه کرده‌اند(46) . به دلیل تغییرات تند مسیر طراحی شده توسط روش چن، ژو مسیر یک روبات را بصورت یک تیر انعطاف‌پذیر و موانع را بصورت نیروی وارد بر تیر در نظر گرفته و طراحی

[1] Retraction-like
[2] System for Advanced Motion PLanning Experiments
[3] Motion Strategy Library: available at: msl.cs.uiuc.edu/msl

مسیر را با حل مسئله شرط مرزی برای یک تیر بدست آورد(47) . روشهای طراحی مسیر با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و جستجوی تصادفی نیز روش‌هایی مبتنی بر ارائه مسیر با چند پارامتر محدود و سپس جستجو برای یافتن مقادیر مناسب برای پارامترهای بیان شده ارائه می‌دهند. روشهای سلول‌بندی رده دیگری از روشهای طراحی مسیر می‌باشند که در ابتدا توسط چتیلا ارائه شد(48) . در این روش‌ها ابتدا فضای آزاد قرارگیری سلول‌بندی شده و سپس از اتّصال این سلولها کانال یا مجموعه‌ای از مسیرهای ممکن با استفاده از جستجوی گراف طراحی می‌گردد. در ادامه این روش، آونایم با سلولی کردن مرز فضای آزای به جای فضای آزاد الگوریتم طراحی مسیر بهتری ارائه کرد(49) .

1.1.4 طراحی مسیر توسط متخصصین کنترل

بسیاری از این روش‌ها برای پیاده‌سازی در روبات‌های موجود برای کنترل آنها مناسب نبودند، تا اینکه مفهوم طراحی به روش میدان پتانسیل نخستین بار توسط خطیب ارائه شد (50). یک روبات نقطه‌ای توسط یک میدان پتانسیل در فضای استقرار کنترل می‌شود. کدستیک مفهوم تابع پیمایش، که یک تابع پتانسیل عاری از حداقل‌های نسبی بود، را ارائه نمود (51). با استفاده از روشهای مختلف میدان پتانسیل، فورجان[1] و ترناسود سیستم عملی را پیاده نمودند، که روباتی با هشت مفصل را می‌توانست، میان میله‌های عمودی طراحی مسیر نماید(52) . باراکواند[2] و لتمب روش میدان پتانسیل را با یک تکنیک تصادفی برای فرار از حداقل‌های نسبی ترکیب نمودند، و این روش برای روبات‌هایی با درجات آزادی بالا اجرا گردید (53). لموند[3] روش طراحی مسیر برای روبات شبه-خودرو را ارائه نمود(54) . وی روشی مناسب برای حل مسایل دو بعدی برای روبات‌های شبه-خودرو با معرفی مسیرهای ذخیره‌ای، ارائه نمود. لی و کنی برای اولین بار تئوری کنترل‌پذیری برای سیستم‌های غیرخطی برای روبات ناهولونومیک، پیاده‌سازی کرده‌اند، که روش لموند با این پیاده‌سازی تعمیم یافت (55). روش بیان شده توسط خطیب دارای مشکل حداقل‌های موضعی بوده است که برای حل این مشکل پیشنهادهای مختلفی ارائه گردیده شد. کودیتشاک تغییر تابع پتانسیل(51) ، کیم و خوسلا ارائه تابع پتانسیل هارمونیک(56) ، باراکواند و لتمب استفاده از حرکت تصادفی برای فرار از حداقل نسبی (53)، کنی و لین ترکیب روش جاده‌ای و پتانسیل (57)، ونگ و چریکجان استفاده از تابع پتانسیل حرارتی (58) را پیشنهاد نمودند.

---

[1] Faverjon
[2] Barraquand
[3] Laumond

روباتیک محاسباتی طرفداران بسیاری را در زمینه کنترل به طرف خود جذب کرد و از دهه 90 بعد طراحی مسیر با موضوع کنترل ترکیب گردید. روش‌های کلاسیک، مانند روش‌های نقشه مسیر، سلول‌بندی، میدان پتانسیل و برنامه-ریزی خطی و غیرخطی توسعه داده شدند. از این پس، طراحی مسیر سینماتیکی و دینامیکی مورد توجه قرار گرفتند. بدین منظور، روش‌های طراحی مسیر با مسائل کنترل بهینه که به دلیل نظامی بودن موضوع، سابقه طولانی‌تری در تحقیقات داشتند، ترکیب شدند. از طرفی روش‌های طراحی هندسی هم با طبقه‌بندی بیشتر و مناسب‌تری از حالت اطلاعات کامل به روش‌های نمونه‌برداری و تصادفی گرایش پیدا کردند. روش‌های قدیمی که اغلب بدون نام ارائه می‌شدند در سرفصل‌های جداگانه مورد بررسی قرارگرفتند. در ادامه این بخش روش‌های طراحی مسیر هندسی با نگرش جدید مورد بررسی قرار خواهندگرفت.

1.1.5 مروری کلی بر تحقیقات در طراحی مسیر هندسی

در مقیاس بزرگ فضا و زمان ، دینامیک روبات و حتی سینماتیک آن قابل صرف‌نظر کردن است و مسئله به طراحی مسیر هندسی تبدیل می‌شود. علاوه بر روش‌های کلاسیک اشاره شده، روش‌های متفاوت دیگری هم براساس شبکه عصبی و منطق‌فازی و دیگر مباحث هوش مصنوعی ارائه شده‌اند(59) . هندزل روشی براساس شبکه عصبی کوهونن ارائه کرده است(60) . این روش قبلا توسط لاو و همکاران در حالت خاصی نیز بررسی شده است(61) . زالزالا و موریس روش شبکه عصبی را برای کنترل و طراحی مسیر همزمان بررسی کلی کرده‌اند(62) . جونگلوا از این روش برای کنترل و طراحی مسیر همزمان برای روبات متحرک استفاده و پیاده‌سازی با نتایج قابل قبول ارائه کرده است (63). روش سیستم ایمنی[1] نیز روش جدید هوش‌مصنوعی با استفاده از محاسبات موازی می‌باشد(64) . به منظور بهبود کارایی روشهای کلاسیک، الگوریتم‌های احتمالاتی شامل نقشه‌های مسیر احتمالاتی [2] (PRM) ، و درخت‌های تصادفی سریع[3] (RRT)، با مزیت جستجو در محیط بزرگ، کاربرد در سرعت‌های بالا، توسعه داده شدند. همچنین روشهای دیگری نیز در طراحی حرکت تصادفی مانند مجموعه سطح[4] (65)، و هندسه زبانی[5] (66) وجود دارند. برای حل کردن مسئله حداقل‌های نسبی، الگوریتم‌های ابتکاری و شبه ابتکاری بسیاری در طراحی حرکت تصادفی استفاده شده‌اند. به عنوان مثال، ترکیبی از دستگاه بولتزمن (SA) با میدان پتانسیل، این مشکل را حل نمود. روش‌های دیگری مانند الگوریتم‌های ژنتیک (GA) ، بهینه‌سازی ذرات انبوه (PSO) ، کلنی مورچگان (ACO) ، و بسیاری تکنیک‌های

---

[1] Immune system
[2] Probabilistic Roadmaps
[3] Rapidly- exploring Random Trees
[4] Level Set
[5] Linguistic Geometry