بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی صنایع گرایش مدیریت سیستم و بهره‌وری

برنامه ریزی چند معیاره‌ی مسیر حرکت روبات پرنده

نگارنده

نازنین محمدنژاد

استاد راهنما

دکتر الیپس مسیحی

شهریور ۱۳۹۲

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

خانم نازنین محمد نژاد پایان نامه ٦ واحدی خود را با عنوان **برنامه ریزی چند معیاره مسیر رویات پرنده** در تاریخ ١٦ ٦ ١٣٦٢ ارائه کردند

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع - مدیریت سیستم پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر الیس مسیحی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر علی حسین زاده کاشان	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمد مهدی سپهری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مریم سادات میریان	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمد مهدی سپهری	دانشیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی

دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجوی مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب و یا نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب **نازنین محمد نژاد** دانشجوی رشته **مهندسی صنایع** ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۹ مقطع **کارشناسی ارشد** دانشکده **فنی و مهندسی** متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آیین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آیین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هرگونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله براساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هرگونه اعتراض را از خود سلب نمودم ».

امضا

تاریخ

۹۲/۸/۲۹

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مهندسی صنایع است که در سال ۱۳۹۱در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر الیپس مسیحی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **نازنین محمد نژاد** دانشجوی رشته **مهندسی صنایع** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: نازنین محمد نژاد

تاریخ و امضا:
۹۲/۹/۲۸

تقدیم به :

پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم.

و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر.

و به همسرم، اسطوره زندگیم، پناه خستگیم و امید بودنم.

تقدیر و تشکر:

ابتدا از جناب آقای دکتر مسیحی، استاد فرهیخته و گرانقدر تشکر می‌نمایم. ایشان استادی بی-نظیر هستند که پابه‌پای دانشجو در تمامی مراحل پایان‌نامه حضور داشته و کمال همکاری و کمک را می‌نمایند. بدون کمک‌های ایشان پیمودن این راه حقیقتا امکان پذیر نبود. ایشان علاوه بر استادی بی‌نظیر، انسانی نمونه هستند که خصایص والای انسانی‌شان بسیار مرا تحت تاثیر خود قرار داد و امیدوارم بتوانم همچون ایشان در راه ارتقا اخلاق و معنویات خود کوشا باشم.

در پایان از دوستان عزیزم که در مواقع سخت هیچ دریغی از همیاری و کمک به من نداشتند کمال تشکر را دارم.در اینجا تنها می‌توانم از تمامی این عزیزان تشکر کنم اما از خداوند متعال طلب کمک، جهت جبران الطاف و زحمات این عزیزان را دارم. با آرزوی سلامتی و موفقیت برای تمامی آنها.

چکیده

مسیریابی روبات عبارت است از یافتن یک توالی حرکت برای روبات که در محیطی با اشیای ثابت یا متحرک از یک نقطهٔ آغازین شروع شده و بدون برخورد با موانع به یک نقطه‌ی پایانی ختم می‌گردد. این مبحث از منظر محدودیت‌های دینامیکی به دو دسته هولونومیک و غیرهولونومیک تقسیم می‌شود. در ناحیه عاری از مانع، در حالت هولونومیک روبات آزادانه می‌تواند از هر نقطه به نقطه دیگر حرکت کند اما در حالت غیرهولونومیک به دلیل وجود محدودیت‌های سینماتیکی (و یا محدودیت‌های دینامیکی) دامنه حرکتی روبات محدودتر می‌شود، به عنوان مثال یک ماشین یا یک پهباد نمی‌توانند به پهلو حرکت کنند. علیرغم کاربردهای فراوان پهبادها، بیشتر الگوریتم‌های ارائه شده در زمینه برنامه‌ریزی حرکت مربوط به روبات‌های هولونومیک است که دلیل عمده آن نیز پیچیدگی برنامه‌ریزی حرکت روبات‌های غیرهولونومیک است. بیشتر الگوریتم‌های غیرهولونومیک موجود در برنامه‌ریزی پهبادها، ارتفاع پهباد را ثابت در نظر گرفته و به نوعی مسئله را در فضای دو بعدی حل می‌کنند.

از آنجا که پهبادها در بسیاری از ماموریت‌های محول شده می‌بایست از مکان‌های متعددی بازدید کرده و پس از به اتمام رساندن ماموریت به آشیانه‌ی خود بازگردند، در این پژوهش هدف پیدا کردن تور بهینه‌ی قابل پرواز توسط پهبادی است که بایستی از مکان‌های به خصوصی بازدید کرده و با در نظر گرفتن محدودیت‌های سینماتیکی به مکان اولیه‌ی خود باز گردد. در همین راستا الگوریتمی جهت مسیریابی سه بعدی پهباد ارائه شده است که مسیرهایی با انحنای بیشینه‌ایی کمتر از یک مقدار خاص تولید می‌کند.ابتدا چندین توالی از مکان‌هایی که بایستی بازدید شوند ایجاد شده و با استفاده از روش پیشروی سریع، مسیرهای بدون تداخل محاسبه می‌شوند. روش مذکور یک روش حل عددی برای معادله دیفرانسیل جزئی غیر خطی Eikonal است. مسیرهای به دست آمده به شکل محلی اصلاح می‌شوند تا در محدودیت انحنای بیشینه صدق کنند و با استفاده از یک مانع مجازی چنبره شکل که در هر یک از مکان‌های مورد بازدید واقع شده است، تورهای همواری تولید می‌شوند.مفهوم مانع مجازی برای اولین بار در برنامه‌ریزی حرکت روبات در سه بعد استفاده شده است. هزینه‌ی هر تور دربردارنده‌ی طول مسیرهای سازنده و بیشترین انحنای موجود در تور است، توری که کمترین هزینه را دارد توسط یک الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌شود.

مزیت دیگر روش ارائه شده این است که در آن، پهباد قادر است از میان نقاطی که در یک خوشه واقع شده‌اند، نقطه‌ای را که به مکان مورد نظر برای بازدیدش نزدیک‌تر است انتخاب کند تا بدین وسیله هزینه‌های تور کاهش بیشتری نیز داشته باشند. این امر نیازمند حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد عمومیت داده شده است.

لغات کلیدی: برنامه‌ریزی حرکت، محدودیت غیرهولونومیک، اسپلاین،پهباد، الگوریتم پیشروی سریع، مانع مجازی، چنبره.

فهرست

فصل ۱: معرفی‌وکلیات ۱

۱-۱-مقدمه ۲

۱-۲-وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین ۵

۱-۳-محدودیت‌های حرکتی روبات پرنده ۶

۱-۴-مساله تحقیق ۷

۱-۵-سوالات تحقیق ۸

۱-۶-دلایل و ضرورت انجام تحقیق ۸

۱-۶-۱سنجش ازراه دور ۹

۱-۶-۲نظارت هوایی تجاری ۱۰

۱-۶-۳اکتشاف و تولید نفت،گاز و مواد معدنی ۱۰

۱-۶-۴حمل‌ونقل ۱۱

۱-۶-۵تحقیقات علمی ۱۱

۱-۶-۶عملیات جستجو و نجات ۱۲

۱-۶-۷حفاظت از منابع طبیعی ۱۳

۱-۶-۸تشخیص آتش در جنگل ۱۳

۱-۷-چا لش‌های کار ۱۳

۱-۸-جنبه‌ی جدید بودن و نوآوری ۱۴

۱-۹-ساختار پژوهش ۱۴

فصل ۲:برنامه‌ریزی‌حرکت‌روبات‌وعامل‌های‌پرنده ۱۶

۲-۱-برنامه‌ریزی حرکت در فضای کاری سه بعدی ۱۷

۲-۱-۱برنامه‌ریزی حرکت ۱۸

۲-۱-۲فضای جهانی و فضای پیکربندی ۱۹

۲-۱-۳بیان مساله ۲۱

۲-۲-مسیریابی بدون درنظرگرفتن محدودیت‌های دینامیکی ۲۱

۲-۲-۱جستجوی شبکه‌ای ۲۲

۲-۲-۲رویکردخط مسیر ۲۲

۲-۲-۳رویکرد تجزیه سلولی ۲۳

۲-۲-۴رویکرد میدان پتانسیل ۲۴

۲-۲-۵نمونه‌برداری تصادفی ۲۵

۲-۳-محدودیت‌های دینامیکی روبات ۲۶

۲-۳-۱محدودیت‌های هولونومیک ۲۷

۲-۳-۲محدودیت‌های غیرهولونومیک ۲۸

۲-۴-مسیریابی با وجود محدودیت‌های دینامیکی ۲۹

۲-۴-۱مسیریابی مبتنی بر نمونه‌برداری تصادفی ۳۱

۲-۴-۲برنامه‌ریزی خط سیرچند مرحله‌ای ۳۴

۲-۴-۳مدل حرکتی با حالت‌های محدود: وسیلهٔ نقلیه با مانورهای محدود ۳۷

۲-۵-برنامه‌ریزی حرکت و ایجاد تور ۳۹

۲-۶-خلاصه فصل دوم ۴۱

فصل۴۳: تعریف و بیان ریاضی مسأله ۴۳

۳-۱-مقدمه ۴۴
۳-۲-سیستم‌های غیرهولونومیک و ایجادمسیرهای حرکت ۴۴
۳-۳-محاسبهٔ بهترین تور ۵۰
۳-۴-بیان مسئله ۵۲
۳-۵-شمای کلی الگوریتم ۵۴
فصل۴:توضیح اجزا یا لگوریتم پیشنهادی ۵۵
۴-۱-مقدمه ۵۶
۴-۲-نمایش محیط ۵۶
۴-۳-روش پیشروی سریع ۵۶
۴-۳-۱الگوریتم پیشروی سریع ۶۰
۴-۳-۲اجرای الگوریتم پیشروی سریع ۶۱
۴-۳-۳مسیریاب ی توسط FMM ۶۳
۴-۳-۴ایجاد یک مسیر هموار توسط *FMM* ۶۴
۴-۴-مسالهٔ ایجاد تور ۶۷
۴-۴-۱افزایش گام حرکت (گام حرکت افزوده) ۶۹
۴-۴-۲استفاده از مانع مجازی (چنبره) ۷۰
۴-۵-اسپلاین ۷۵
۴-۶-نحوهٔ محاسبه انحنا و تعریف تابع هدف ۷۶
۴-۷-خلاصه فصل چهارم ۷۹
فصل۵:نتایج محاسباتی ۸۰
۵-۱-مقدمه ۸۱
۵-۲-مسیریابی در محیط سه‌بعدی ۸۱
۵-۳-ایجاد تور ۸۷
۵-۳-۱نمایش محیط ۸۷
۵-۳-۲تولید زیرمسیرها ۸۸
۵-۳-۳تشکیل تور ۹۰
۵-۴-نتایج شبیه‌سازی ۹۴
۵-۴-۱تحلیل حساسیت ۹۹
۵-۵-خلاصه فصل پنجم ۱۰۳
فصل۶:نتیجه‌گیری وکارهای آتی ۱۰۴
۶-۱-نتیجه‌گیری ۱۰۵
۶-۲-تحقیقات آتی ۱۰۷
منابع۱۰۹
پیوست۱ ..... ۱۱۴
پیوست ۲ ..... ۱۱۷

فهرست جداول

جدول۲-۱. مقایسه‌ی الگوریتم‌های موجود برای مقایسه‌ی برنامه‌ریزی خط سیر با محدودیت‌های تفاضلی ۳۰
جدول۳-۱. اسامی و نمادهای به کارگرفته شده ۴۹
جدول۴-۱. الگوریتم پیشروی سریع ۶۰
جدول۵-۱. مقایسه‌ی زمان حل الگوریتم ارائه شده با الگوریتم موجود در مقاله‌ی(Koyuncu et al., 2009) ۸۴
جدول۵-۲. نتایج فبلتر میانگین‌روی انحنای مسیر در محیط شامل راهرو باریک ۸۶
جدول۵-۳. نتایج فبلتر میانگین‌روی انحنای مسیر در محیط مملو از موانع ۸۶
جدول۵-۴. شرح اطلاعات محیط و ویژگی‌های تور به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک ۹۹
جدول۵-۵. مقایسه‌ی انحنای بیشینه تور و طول تور با در نظرگرفتن وزن‌های متفاوت در محیط(۴) ۱۰۰
جدول۵-۶. مقایسه‌ی انحنای بیشینه تور و طول تور با درنظرگرفتن وزن‌های متفاوت در محیط(۳) ۱۰۱
جدول۵-۷. نتایج تاثیر تغییر در شعاع چنبره‌روی انحنای تور مورد نظر در محیط (۴) ۱۰۲
جدول۵-۸. نتایج تاثیر تغییر در شعاع چنبره‌روی انحنای تور مورد نظر در محیط (۱) ۱۰۲
جدول۵-۹. مقایسه عملکرد الگوریتم ژنتیک با جستجوی کامل ۱۰۲
جدول۶-۱. مقایسه الگوریتم‌های ارائه شده در بخش ۴-۴-۲ ..... ۱۰۶
جدول۶-۲. مقایسه الگوریتم پیشروی سریع و مانع مجازی با کارهای مشابه انجام شده برای روبات پرنده ۱۰۶

فهرست اشکال

شکل۱-۱. (الف) هواپیمای بدون سرنشین می‌بایست مسیرعاری از برخورد را برای رسیدن از نقطه شروع به نقطه هدف، محاسبه کند. (ب) مختصات هواپیمای بدون سرنشین در ۳ بعد. ۳
شکل۱-۲. نمایی از انواع پهباد ۶
شکل۱-۳. پهباد می‌بایست پس از عبور از مکان‌های مشخص شده به آشیانه خود باز گردد. ۸
شکل۱-۴. دوربین گرمایی سوار شده بر بال یک UAV ۹
شکل۱-۵. نمایی از یک پهباد InView ۱۱
شکل۲-۱. دسته‌بندی مسائل برنامه‌ریزی حرکت از منظر تعداد روبات، محدودیت دینامیکی و اطلاعات محیط. ۱۷
شکل۲-۲ نمایش یک مثال دو بعدی به منظور نمایش و اژگان بیان شده. (الف) وسیلۀنقلیه بایک دیسک نمایش داده شده . (ب) وسیلۀ نقلیه با یک نقطه در فضای کاری با موانع منبسط شده نمایش داده شده است. ۲۰
شکل۲-۳ (الف) دیدنگار؛ (ب) نمودار و رونویی تعمیم یافته؛ (ج) میدان‌های پتانسیل؛ و (د) تجزیه سلولی. ۲۵
شکل۲-۳- رشد الگوریتم مسیریابی RRT در محیط ۳بعدی ۲۶
شکل۲-۴ نمایش محدودیت هولونومیک و غیرهولونومیک؛ (الف)- نشان‌دهنده یک روبات با محدودیت هولونومیک است؛ (ب)- نشان دهنده محدودیت غیرهولونومیک. ۲۸
شکل۳-۱. مختصات هواپیما (Dever et al., 2004) ۴۶
شکل۳-۲ تعریف بردارهایی که مماس و عمود بر منحنی $T(t)$و $N(t)$ با استفاده از طول کمان $s(t)$ ۴۸
شکل۳-۳. وسیله نقلیه هوایی می‌بایست از آشیانه شروع به حرکت کرده و از هر یک از این کره‌ها عبور کرده و به آشیانه باز گردد. ۵۱

شکل۳-۴. یک تور نمونه درمساله GTSP ۵۲
شکل۴-۲ (الف) پارکینگ عاری از مانع؛ (ب) خطوط گسترش پیدا کرده از نقطه A که هر یک مکان هندسی نقاطی از پارکینگ هستند که فاصله زمانی برابری تا A دارند. ۵۷
شکل۴-۳ (الف) نمایش پارکینگ که قسمت آبی رنگ آن پوشیده از برف است و قسمت زرد رنگ عاری از مانع است. (ب) نمایش منحنی‌های گسترش یافته از نقطه A و حرکت رو به عقب از B عمود بر منحنی‌ها جهت پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر. ۵۸
شکل۴-۴ حرکت یک منحنی دایره‌ای شکل در جهت عمود بر منحنی با سرعت ۱ ..... ۵۸
شکل۴-۵ همسایه‌های سلول $P_{i,j}$ در حالت دو بعدی. ۶۰
شکل۴-۶ نحوه محاسبه FMM ۶۱
شکل۴-۷ جدول محاسبه شده با الگوریتم FMM ۶۲
شکل۴-۸ حل یک مساله مسیریابی روبات با دو درجه آزادی: (الف) فضای مساله مسیریابی یک روبات نقطه‌ای؛ (ب) مقدار T به دست آمده از روش FMM؛ (ج) حرکت در جهت بیشترین کاهش گرادیان جهت به‌دست آوردن مسیر. ۶۴
شکل۴-۹- نحوه اعمال فیلتر میانگین؛ (الف)- مقادیر پیکسل‌های قسمتی از یک عکس؛ (ب)- اعمال فیلتر میانگین 3×3 و تغییر مقدار پیکسل وسط به مقدار میانگین ۹ سلول نشان داده شده. ۶۵
شکل۴-۱۰- شکل سمت چپ یک جریان مغشوش را نشان می‌دهد. شکل سمت راست همان جریان پس از اعمال فیلتر میانگین است. ۶۶
شکل۴-۱۱- (الف)- مسیر ایجاد شده توسط FMM با شعاع حداقل ۱/۲۹۴۷ واحد؛ (ب)- اعمال فیلتر میانگین ۵×۵، مقدار شعاع مینیمم ۳/۳۱۸۰ واحد؛ (ج)- اعمال فیلتر میانگین ۱۹×۱۹، مقدار شعاع مینیمم ۴/۸۱۶۵ واحد؛ (د)- اعمال فیلتر میانگین ۵×۵ و افزایش مقدار 1/F به اندازه ۳ واحد، مقدار شعاع مینیمم ۷/۱۲۴۸ واحد؛ (ه)- اعمال فیلتر میانگین ۱۹×۱۹ و افزایش مقدار 1/Fبه اندازه ۳ واحد، مقدار شعاع مینیمم ۷/۸۵۴۶ واحد. ۶۷
شکل۴-۱۲- شکل سمت راست نشان‌دهندهٔ محیط کار و خوشه‌های نقاط است و شکل سمت چپ نشان‌دهندهٔ زیرمسیرهای موجود بدست آمده از روش پیشروی سریع است. ۶۸
شکل۴-۱۳- ایجاد ترتیبی از نقاط با استفاده از روش پیشروی سریع و در نظرگرفتن گام ۱ برای حرکت ۶۹
شکل ۴-۱۴- (الف)- افزایش گام حرکت باعث هموار شدن مسیر شده، ماکسیمم انحنا ۱,۳۲ (ب) حرکت با گام خیلی کوچک و اتصال نقاط با اسپلاین مکعبی، ماکسیمم انحنا ۱۱,۵ ..... ۷۰
شکل۴-۱۵- یک چنبرهٔ نمونه ۷۱
شکل۴-۱۶- نمایش انواع چنبره ۷۲
شکل۴-۱۷-چنبره از حرکت رو به پهلوی روبات در تمامی جهات جلوگیری کرده و سبب می‌شود روبات با شعاعی بیشتر از شعاع چنبره دور زند. ۷۲
شکل۴-۱۸. تور نمونه‌ی ایجاد شده با روش قرار دادن چنبره با زوایای متغیر ۷۴
شکل۴-۱۹. یک اسپلاین نمونه ۷۵
شکل۴-۲۰. با فرض "نزدیک" بودن نقطهٔ q به نقطهٔ p، $\kappa(p)=\frac{\delta}{ds}$ تقریبی برای انحنا محسوب می‌شود. ۷۸
شکل۵-۱- محیط‌های نمونه شامل: راهرو باریک، محیط شهر مانند، محیط مملو از موانع بلوکی و محیط مارپیچ ۸۱
شکل۵-۲. نمایش مسیریابی در راهرو باریک (الف) از نمای بالا (ب) از دورنمای سه بعدی ۸۲
شکل۵-۳. نمایش مسیریابی در محیط شهر مانند (الف) از نمای بالا (ب) از دورنمای سه‌بعدی ۸۳
شکل۵-۴. نمایش مسیریابی در محیطی مملو از موانع بلوکی (الف) از نمای بالا (ب) از دورنمای سه‌بعدی ۸۳
شکل۵-۵. نمایش مسیریابی در محیط مارپیچی (الف) از نمای بالا (ب) از دورنمای سه‌بعدی ۸۴

شکل۵-۶. نمایش و ووکسل‌بندی محیط (طول، عرض و ارتفاع هر ووکسل ۲ واحد است) ۸۷
شکل۵-۷. نمایش و ووکسل‌بندی محیط (طول، عرض و ارتفاع هر ووکسل ۱ واحد است) ۸۸
شکل۵-۸. (الف)نقطه‌ی شروع و خوشه‌های میانی، (ب)یکی از محدوده‌های کرهای شکل نشان داده شده است. ۹۰
شکل۵-۹. نمایش کلیه‌ی زیرمسیرهای تولید شده بین خوشه‌های میانی و همچنین نقطه‌ی شروع توسط دورنمایسه-بعدی و نمای بالا. ۹۰
شکل۵-۱۰. بهترین تور حاصل شده از الگوریتم ژنتیک و روش گام افزوده (حداکثر انحنا = $4.78\ m^{-1}$) ۹۵
شکل۵-۱۱. بهترین تور حاصل شده از الگوریتم ژنتیک و روش گام افزوده (حداکثر انحنا = $2.48\ m^{-1}$) ۹۵
شکل۵-۱۲. بهترین تور ایجاد شده توسط الگوریتم ژنتیک و روش مانع مجازی. در شکل سمت راست تور به همراه موانع مجازی(چنبره‌ها) نشان داده شده است. (حداکثرانحنا = $0.7\ m^{-1}$) ۹۶
شکل۵-۱۳. محیط(۱) بهترین تور به دست آمده از الگوریتم ژنتیک با استفاده از روش مانع مجازی (الف) از نمای بالا و (ب) از دورنمای سه‌بعدی. نقطه‌ی شروع با ستاره مشخص شده است. ۹۷
شکل۵-۱۴. محیط(۲) بهترین تور به دست آمده از الگوریتم ژنتیک با استفاده از روش مانع مجازی (الف) از نمای بالا و (ب) از دورنمای سه‌بعدی. نقطه‌ی شروع با ستاره مشخص شده است ۹۷
شکل۵-۱۵. محیط (۳) بهترین تور به دست آمده از الگوریتم ژنتیک با استفاده از روش مانع مجازی (الف) از نمای بالا و (ب) از دورنمای سه‌بعدی. نقطه‌ی شروع با ستاره مشخص شده است. ۹۸
شکل۵-۱۶. محیط (۴) بهترین تور به دست آمده از الگوریتم ژنتیک با استفاده از روش مانع مجازی (الف) از نمای بالا و (ب) از دورنمای سه‌بعدی. نقطه‌ی شروع با ستاره مشخص شده است. ۹۸
شکل۵-۱۷. نمودار تغییرات مقادیر انحنای بیشینه و طول تور به ازای تغییر در $W2$ در محیط (۴) ۱۰۰
شکل۵-۱۸. نمودار تغییرات مقادیر انحنای بیشینه و طول تور به ازای تغییر در $W2$ در محیط (۳) ۱۰۱
شکل۶-۱-(الف)- روش پیشروی سریع با جدول‌بندی محیط به ۱۰۰۰×۱۰۰۰ سلول با زمان حل ۱۰۰ ثانیه؛ (ب)- روش پیشروی سریع با ۱۴۰۰ راس مش‌بندی با زمان حل ۱ ثانیه. ۱۰۸

۱- فصل ۱

معرفی و کلیات

۱-۱- مقدمه

در دهه گذشته تغییرات قابل توجهی در زمینه برنامه‌ریزی حرکت وسایل نقلیه به خصوص پهبادها رخ داده است. برنامه ریزی حرکت پهبادها بنابر پیچیدگی‌های متعدد آن که در استراتژی‌های برنامه ریزی قبلی در نظر گرفته نشده‌اند، دشواری های خاصی دارد.

یک پهباد نمونه با در نظر گرفتن محدودیت های سرعت و شتاب(و به طور بالقوه محدودیت‌های دیفرانسیل مرتبه بالاتر در ارتباط با معادلات حرکت) مدل شده و هدف، هدایت آن به سمت هدف در فضایی شامل موانع می‌باشد.

برنامه‌ریزی حرکت وسیلهٔ نقلیه یک نمونهٔ خاص از مسأله عمومی برنامه‌ریزی حرکت بوده که بسیار سخت، قابل حل است و سختی آن با بالا رفتن درجات آزادی سیستم افزایش می‌یابد. مساله هدایت پهباد معمولا به شکل مساله‌ای در فضای سه بعدی با داشتن محدودیت‌های سرعت و شتاب و در برخی موارد (در هدایت بهنگام) با در نظر گرفتن عدم قطعیت در اطلاعات حسگر و همچنین مکان قرارگیری وسیله توصیف می‌شود.

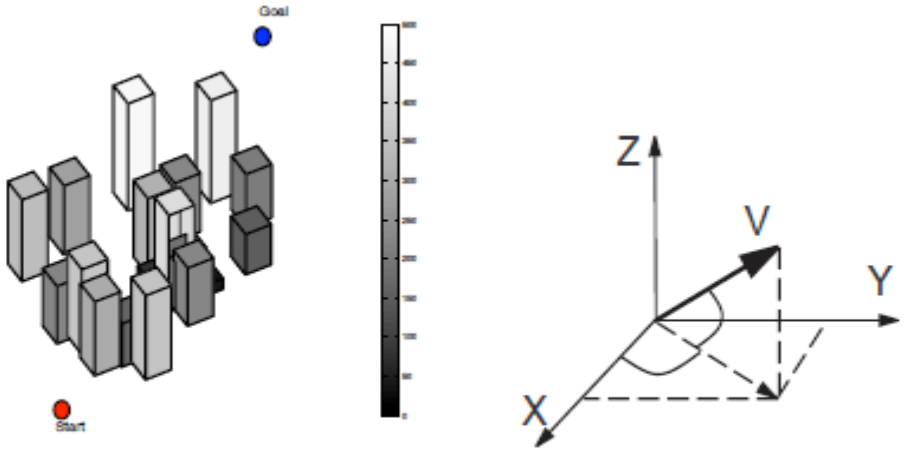
حل دقیق مسیریابی در محیطی آکنده از موانع مسئله‌ای بسیار محاسباتی است که تنها برای برخی از ساده‌ترین مسائل دارای راه حل است. بنابراین تمامی الگوریتم‌های استفاده شده برای حل این مساله در فضای ۳ بعدی، الگوریتم های تقریبی می‌باشند. بسیاری از الگوریتم‌های حل مسائل مقید از نظر دینامیکی بر پایه رویکرد تجزیه سلولی[1] هستند، ابتدا مساله مسیریابی را در محیط شبکه بندی شده حل کرده، سپس محدودیت‌های همواری مسیر را اعمال کرده، خط سیر منطبق با مسیر را تشکیل داده و از یک حلقه کنترلی[2] برای دنبال کردن این مسیر استفاده می‌کنند.

امروزه رباتهای متحرک به عنوان موجوداتی هوشمند که قادر به تصمیم‌گیری در مورد نحوه حرکت خود در محیطهای گوناگون بدون کمک انسان می باشند، کاربردهای وسیعی دارند. این

[1] Cell decomposition
[2] Control loop

روبات‌ها در محیط‌های مختلف از جمله زمین، آب و هوا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش‌های برنامه‌ریزی حرکت روبات، ابعاد محیط به عنوان فاکتوری قاطع روی پیچیدگی موضوع تاثیر می‌گذارد. به طوری که برنامه ریزی حرکت در محیط ۲ بعدی ساده ترین حالت و در محیط ۳ بعدی به عنوان یک چالش تلقی می‌شود و هنوز مسائل حل نشده زیادی در این رابطه وجود دارد. به خصوص زمانی که محدودیت‌های حرکتی روبات نیز در نظر گرفته شود، بر پیچیدگی کار بیش از پیش افزوده می‌شود. بیشتر فعالیت‌های گذشته در این زمینه بر وجود یک محدودیت خارجی تاکید داشتند و آن هم وجود موانع فیزیکی بر سر راه روبات بود و این تنها محدودیتی بود که برای روبات‌ها در نظر گرفته می‌شد. اما در دنیای واقعی روبات‌ها محدودیت‌های مکانیکی خاص خودشان را دارند.

در این مطالعه، هواپیمای بدون سرنشین(UAV[1]) مورد بررسی قرار می گیرد. وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAVs)برای ماموریت های جستجو و نجات، گشت مرز یا بندر ، نظارت، و همچنین نظارت و امداد رسانی هنگام بلایای طبیعی(زلزله، طوفانوآتش سوزیهای وسیع) مورد استفاده قرار می گیرند. همانطور که در شکل۱-۱ نشان داده شده است، یک ماموریت شامل ساختن مسیری است که هواپیما آن را به عنوان مرجع، استفاده و دنبال می کند.



(الف) (ب)

شکل ۱-۱. (الف) هواپیمای بدون سرنشین می بایست مسیر عاری از برخورد را برای رسیدن از نقطه شروع به نقطه هدف، محاسبه کند. (ب) مختصات هواپیمای بدون سرنشین در ۳ بعد.

[1]Unmanned Aerial Vehicle

مسئله برنامه ریزی مسیر، شامل بازسازی فضای جهانی بر اساس نقشه توپولوژیک، ساختن فضای پیکربندی[1] بر پایه شکل روبات و سپس تعریف فضای حالت[2] بر پایه خصوصیات دینامیکی وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین، به منظور حل مساله و پیدا کردن یک مسیر از حالت اولیه به حالت ثانویه می-باشد. سپس این مسیر یا خط سیر توسط وسیله نقلیه هوایی دنبال می شود. روشن است که این مساله از پیچیدگی های بالایی برخوردار است و نمی تواند در یک مرحله حل شود. محققان معمولا از مدل-هایی برای ساده سازی مساله استفاده می کنند و همچنین فرآیند حل مساله را به چندین مرحله تقسیم بندی می نمایند تا محاسبات آن امکان پذیر شود.(Roberge, 2010)

در زمینه برنامه‌ریزی مسیر روبات اکثر مواقع وسیله نقلیه را با یک نقطه در فضای دو بعدی یا سه بعدی مدل کرده و یک مسیر عاری از مانع را بین دو نقطه جستجو می کنند. هواپیماهای بدون سرنشین دارای محدودیت های حرکتی یا همان محدودیت های سینماتیکی و دینامیکی می باشند که عبارت است از محدودیت روی بیشینه‌ی انحنای منحنی مسیر حرکت آنها و محدودیت روی سرعت و شتاب آنها. در بدست آوردن مسیر عاری از مانع می بایست این محدودیت ها در نظر گرفته شوند(Goerzen et al., 2009).

پیدا کردن بهترین مسیر معمولا منطبق با جستجو برای کوتاه ترین مسیر است. اما در مسئله برنامه ریزی مسیر برای هواپیماهای بدون سرنشین، مسیر بهینه پیچیده تر است زیرا هر مسیری با محدودیت های حرکتی پرنده سازگار نمی باشد و همچنین معیارهای مختلفی برای بهینگی از جمله مسافت طی شده، مصرف سوخت، کل زمان پرواز و عملکرد ناوبری وجود دارد. به منظور در نظر گرفتن هر یک از این معیارها از یک تابع هزینه استفاده شده و الگوریتم برنامه ریزی مسیر تبدیل به جستجو برای مسیری می شود که تابع هزینه را مینیموم می کند. هر اندازه خصوصیات مطلوب توسط یک مسیر بیشتر تامین شود، هزینه آن مسیر کمتر می شود.

[1]Configuration space
[2]State space

در این پژوهش طول مسیر طی شده هواپیمای بدون سرنشین و انحنای این مسیر، معیارهای بهینه سازی هستند. همچنین از آنجا که در بعضی از ماموریت های نظارتی و امدادی، هواپیمای بدون سرنشین می‌بایست قبل از رسیدن به نقطه هدف از مجاورت بعضی نقاط تعیین شده عبور کند، در این پژوهش عبور از مکان‌های میانی برای انجام ماموریت در نظر گرفته شده است.

۱-۲- وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین

وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV)، که معمولا به عنوان یک هواپیمای بدون سرنشین(پهباد) شناخته می شود، یک هواپیما بدون احتیاج به خلبان است.وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین پرواز خود را توسط کامپیوترهای موجود در وسیله به طور خود کار و مستقل ، و یا توسط کنترل از راه دور یک خلبان بر روی زمین و یا در وسیله نقلیه دیگری انجام می دهد.

طیف گسترده ای از شکل ها، اندازه ها، تنظیمات و ویژگی ها برای هواپیماهای بدون سرنشین وجود دارد. از لحاظ تاریخی، پهپادها هواپیماهایی ساده بودندکه از راه دور کنترل می شدند، اما کنترل خودکار و مستقل آنهامساله‌ای است که به طور فزاینده در حال به کار گرفته شدن است. تعداد زیادی از پهپادها برای کاربردهای نظامی مستقر شده اند، اما کاربرد های مدنی و غیر نظامی آنها مانندپلیس، آتش نشانی و کار های امنیتی از جمله نظارت بر خطوط لوله، به سرعت در حال رشد می باشد. پهپادها اغلب برای ماموریت هایی که بیش از حد کسل کننده ، کثیف، و یا خطرناک هستند به هواپیمای سرنشین دار ترجیح داده می شوند.

شکل ۱-۲. نمایی از انواع پهباد

اصطلاح سیستم هواپیماهای بدون سرنشین(UAS) فراتر از خود هواپیما بر اهمیت عناصر دیگرش نیز تاکید میکند. UAS به طورمعمول متشکل است از:

- هواپیماهای بدون سرنشین (UA)
- سیستم های کنترل، از جمله ایستگاه زمینی کنترل(GCS)
- لینک کنترل، لینک تخصصی انتقال اطلاعات
- سایر تجهیزات مربوط

۱-۳- محدودیت‌های حرکتی روبات پرنده

محدودیت های برنامه ریزی حرکت فقط به محدودیت ها و موانع محیطی محدود نمی شوند. در دنیای واقعی محدودیت های مکانیکی یک روبات را نیز، باید در نظر داشت. به عنوان مثال یک روبات پرنده نمی تواند مستقلاً حرکت به پهلو داشته باشد. این محدودیت‌ها باعث می‌شوند که بعضی از نقاط

فضای پیکر بندی غیر قابل دسترس باشند، حتی اگر در این نقاط روبات با مانع برخورد نداشته باشد. به این محدودیت‌ها، محدودیت‌های تفاضلی[1] یا کینودینامیک[2] گفته می‌شود.

عنوان مقید تفاضلی (یا کینودینامیک) به معنی این است که معادلات حرکت وسیلهٔ نقلیه به شکل محدودیت روی مسیر حرکت آن عمل می‌کنند. در نتیجه وسیلهٔ نقلیه نمی‌تواند هر مسیری را دنبال کرده و مسیر مورد نظر می‌بایست تا حد مشخصی هموار و فاقد نقاط تیز باشد. در این مسائل زمان و حالت‌ها می‌بایست در معادلات حرکت صدق کنند (قانون دوم نیوتن). در نتیجه حالت‌ها به شدت به سرعت و شتاب و در برخی موارد مشتقات درجه بالاتر مکان مقید هستند. (Goerzen, et al., 2010).

برخلاف موانع فیزیکی موجود در محیط محدودیت‌های کینودینامیکی را نمی‌توان در فضای پیکربندی نشان داد. این محدودیت‌ها علاوه بر فضای پیکربندی شامل سرعت و شتاب روبات نیز هستند. برای حل این مشکل از فضای حالت[3]استفاده می‌شود. فضای حالت علاوه بر اطلاعات فضای پیکربندی شامل اطلاعات سرعت روبات نیز می‌شود (Choset et al., 2005).

محدودیت های تفاضلی به دو دسته تقسیم میشوند: ۱- محدودیت های هولونومیک[4] و ۲- محدودیت های غیر هولونومیک.

۱-۴- مساله تحقیق

هدف از این پژوهش برنامه ریزی مسیر برای هواپیمای بدون سرنشین در محیطی ۳ بعدی شامل موانع متعدد به گونه ای است که پرنده از مکان اولیه خود شروع به حرکت کرده و پس از بازدید از چند مکان میانی به آشیانهٔ خود بازگردد و در این بین با هیچ مانعی برخورد نداشته باشد، علاوه بر این مسیر به دست آمده از دید دو معیار بهینه باشد: ۱- طول مسیر طی شده توسط پرنده کمینه باشد. ۲- مسیر بدست آمده هموار بوده و انحنای آن کمینه باشد.علاوه بر این، مقدار انحنای مسیر بدست-

[1] differential
[2] kinodynamic
[3] State Space
[4] Holonomic