دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی صنایع

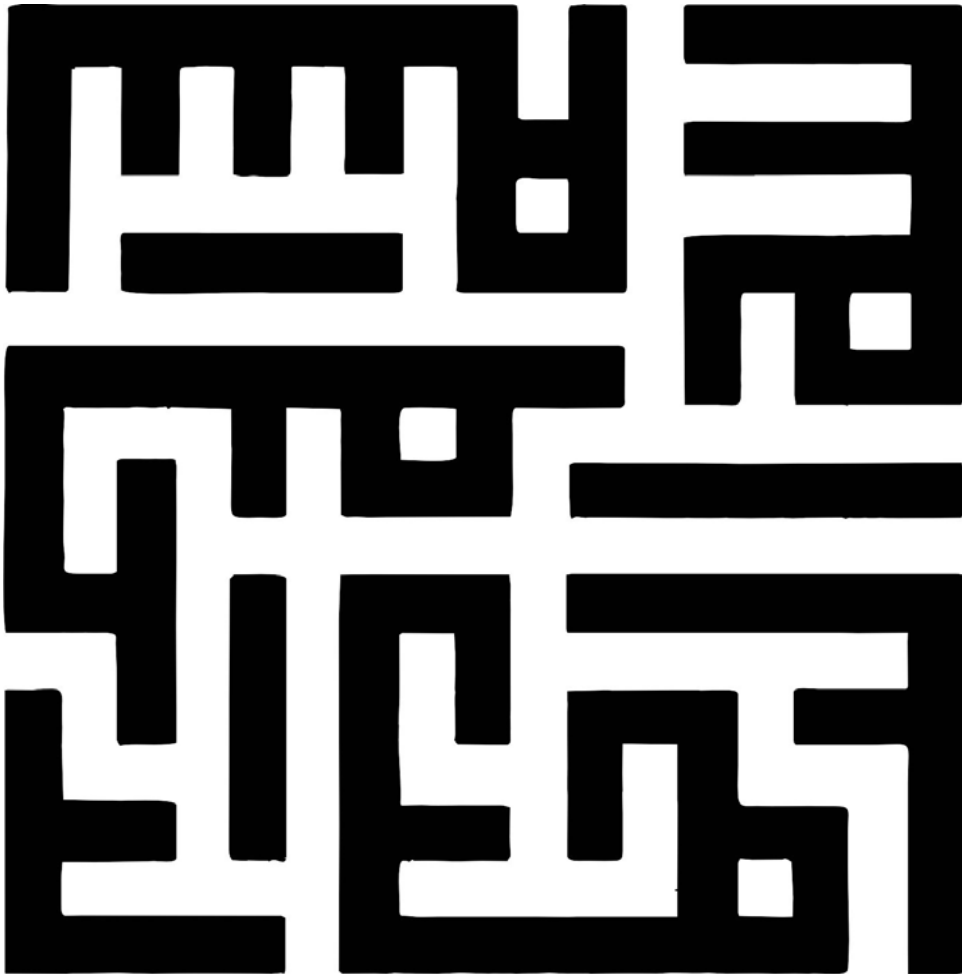
نگاشت و برنامه‌ریزی حرکت روبات متحرک در محیط‌های ناشناخته

محمد علی موفق پور

استاد راهنما:
دکتر الیپس مسیحی

استاد مشاور:
دکتر منوچهر مرادی

تابستان 1391



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای محمدعلی موفق پور رساله ۲٤ واحدی خود را با عنوان نگاشت وبرنامه ریزی حرکت روبات متحرك در محیط های ناشناخته و احتمالی در تاریخ ۱۳۹۱/٤/۲۸ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی صنایع - مهندسی صنایع پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر الیس مسیحی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر منوچهر مرادی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا امین ناصری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر غلامعلی منتظر	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد مدرس یزدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر علی محدث خراسانی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر غلامعلی منتظر	دانشیار	

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

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

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۲/۲/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء

محمدعلی سرتیپ پور

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 دانشگاه‌دانش 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/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس تحت راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر 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 درمعوض فروش قرار دهد.

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

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

ماده ۶: اینجانب محمد علی موفق پور دانشجوی رشته مهندسی صنایع مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: محمد علی موفق پور

تاریخ و امضا

۹۱/۱۱/۲۰

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده 1- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده 2- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

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

ماده 3- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده 4- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده 5- این دستورالعمل در 5 ماده و یک تبصره در تاریخ 1384/4/25 در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء

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

ماده 2: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده 3: 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 4: در صورت عدم رعایت ماده 3، 50٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده 5: دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده 4 را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده 6: اینجانب محمد علی موفق پور دانشجوی رشته مهندسی صنایع مقطع دکتری

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی صنایع

نگاشت و برنامه‌ریزی حرکت روبات متحرک در محیط‌های ناشناخته

محمد علی موفق پور

استاد راهنما:
دکتر الیپس مسیحی

استاد مشاور:
دکتر منوچهر مرادی

تابستان 1391

تقدیم به:

همسر صبور و مهربانم

آنکه بدون همراهي‌هاي دوستانه اش

پیمودن این راه سخت برایم ممکن نبود.

چکیده

در این رساله مسئله کاوش روبات مورد توجه قرار می‌گیرد. در قسمت اول یک روش کارا و جدید برای نگاشت به‌هنگام محیط‌های ناشناخته درونی با استفاده از داده‌های حسگر مسافت‌یاب که توسط یک ربات متحرک جمع‌آوری شده‌اند، ارائه می‌گردد. الگوریتم توسعه‌یافته به طور سلسله مراتبی و با بهره‌گیری از تکنیک‌های خوشه‌بندی، نقاط قرائت شده را به خوشه‌هایی از نقاط و سپس به پاره‌خط و در نهایت به خط تبدیل می‌کند. علاوه بر استفاده از الگوریتم کلاسیک K-means برای خوشه‌بندی نقاط و شناسایی خوشه‌های مرغوب، الگوریتم خوشه‌بندی ترتیب رتبه (ROC) نیز به کار رفته که در واقع این روش برای اولین بار در حوزه نگاشت مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت نسبی ROC در خوشه‌بندی این است که برخلاف سایر الگوریتم‌های خوشه‌بندی به مقدار از پیش تعیین شده‌ای برای تعداد خوشه نیازی ندارد. برای پیاده سازی ROC ماتریس شاخص شباهت (SIM) مورد نیاز توسط مجموعه‌ای از پنج تابع تعیین شباهت ساخته می‌شود. در قسمت دوم این رساله هم برنامه‌ریزی مسیر روبات در شرایطی که شناخت محدودی از محیط در دست است مورد توجه قرار می‌گیرد. شناخت ناقص به این معنی است که در زمان برنامه‌ریزی، اطلاعات دقیقی از بیشتر محیط در دست است اما در مورد وضعیت واقعی برخی از متغیرهای پنهان اطلاعات ناقصی وجود دارد. این اطلاعات ناقص به انسداد بالقوه (به عنوان مثال درب، باز / بسته یا راهرو انباشته شده با روبات و یا موانع دیگر) گلوگاه‌هایی در محیط دلالت دارند. در صورتی که روبات برای مقادیر ممکن این متغیرها توزیع احتمالی داشته باشد مسئله حاصل به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی احتمالی در نظر گرفته می‌شود و به صورت یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی مدل می‌شود. علاوه بر این اگر بر روی مقادیر مختلف متغیرهای پنهان تابع اولویتی تعریف شده باشد، با کمک الگوریتم اکتشافی توسعه داده شده که متکی بر برنامه‌ریزی فرضی خوش‌بینانه است می‌توان با کاهش فضای حل مسئله، حتی در صورت وجود متغیرهای پنهان متعدد هم به صورت کارا برنامه‌ریزی مسیر را با شکاف بهینگی قابل قبول به انجام رساند. تابع اولویتی که بر روی مقادیر مختلف متغیرهای پنهان تعریف می‌شود در واقع از وجود دانش نسبت به عواقب حاصل از آشکار شدن مقادیر مختلف نشأت می‌گیرد. دو الگوریتم نگاشت و برنامه‌ریزی حرکت در قالب یک چارچوب یکپارچه همراه با یک الگوریتمی برای تبدیل نقشه‌های هندسی به نقشه‌های توپولوژیک با متغیرهای مخفی ارائه شده‌اند.

کلمات کلیدی: روباتیک، خوشه‌بندی متوالی، استخراج خط، برنامه‌ریزی مسیر با اطلاعات ناقص ، برنامه‌ریزی فرضی خوش‌بینانه.

فهرست مطالب

چکیده ز
فهرست مطالب أ
فهرست اشکال ج
فهرست جداول ه
1. مقدمه 2
1-1. هدف از تحقیق 6
1-2. مسأله تحقیق 11
1-3. پرسش‌های اساسی تحقیق 15
1-4. جای‌گاه مسئله و کاربردها در بخش صنعت و خدمات 16
1-4-1. اهمیت نگاشت و کاربرد نتایج حاصل از اجرای رساله 16
1-4-2. اهمیت برنامه‌ریزی احتمالی در شرایط وجود اطلاعات ناقص 17
1-5. ضرورت انجام تحقیق 18
1-6. مزایا و نوآوری‌های مورد انتظار از انجام تحقیق 19
1-7. رویکرد کلی تحقیق 19
1-7. مفروضات و محدودیت‌های تحقیق 21
1-8. ساختار کلی تحقیق 23
2. پیشینه تحقیق 26
2-1. نگاشت روباتیک 27
2-2. برنامه‌ریزی مسیر روبات متحرک در محیط ناشناخته 34
2-2-1. مرور ادبیات 40
2-2-2. طرح‌های حلقه باز (طرح‌های تطبیقی) 46
2-2-3. طرح‌های حلقه بسته غیربه‌هنگام (طرح‌های شرطی یا طرح‌های احتمالی موکول) 47
2-2-4. طرح‌های حلقه بسته به‌هنگام (طرح‌های شرطی تدریجی) و کاهش سناریو 49
3. نگاشت 51
3-1. برازش منحنی با کمک بهینه سازی خطی 55
3-1-1. رویکرد اول: خطی سازی مطابق روش Ferris *et. al* (2007) 56
3-1-2. رویکرد دوم: خطی سازی مطابق روش Bradley et. al (1977) 57
3-1-3. رویکرد سوم: برنامه‌ریزی درجه دوم 57
3-2. رگرسیون پایا 59
3-3. الگوریتم خوشه‌بندی متوالی (CCA) برای نگاشت 65
3-3-1. جمع آوری اطلاعات و برنامه‌ریزی مسیر 72
3-3-2. خوشه‌بندی نقاط و رگرسیون اولیه 73
3-3-3. حذف خوشه‌های نامرغوب 75
3-3-4. تقویت خطوط مرغوب 79

3-3-5. ادغام پاره خطها (ROC روی پاره خط ها) و محاسبه لبه موانع 83
3-3-6. افزودن لبه موانع به نقشه (ROC روی خطوط نقشه) 91
3-4. کلیات الگوریتم برنامه‌ریزی مسیر 94
3-5. تحلیل پیچیدگی زمانی CCA 95
3-6. ارزیابی کارایی و نتایج محاسباتی 97
3-6-1. محیط‌های شبیه سازی شده 98
3-6-1-1. تنظیم دقیق پارامترها 103
3-6-1-2. پایداری الگوریتم 111
3-6-2. داده‌های استاندارد 117
3-6-3. حد بالای خطای الگوریتم 121
4. برنامه‌ریزی حرکت 124
4-1. برنامه‌ریزی مسیر با اطلاعات ناقص 125
4-1-1. برنامه‌ریزی بهینه در حضور اطلاعات ناقص 130
4-2. حل کردن فرایند تصمیم مارکوفی 132
4-2-1. نمادگذاری و مفروضات 132
4-2-2. حل فرآیند تصمیم مارکوفی از طریق برنامه‌ریزی پویای تصادفی 134
4-2-3. مدل برنامه‌ریزی خطی حل MDP 138
4-3. برنامه‌ریزی فرضی تدریجی در حضور اطلاعات ناقص 147
4-4. چارچوب توسعه داده شده 150
4-4-1. رویکرد فراگیر و بهینه 151
4-4-2. رویکرد تدریجی و زیربهینه 151
4-4-3. همگرایی 158
4-5. ارزیابی کارایی و نتایج محاسباتی 158
4-6. نتیجه گیری 165
5. مدل یکپارچه نگاشت و برنامه‌ریزی حرکت همزمان روبات متحرک 169
5-1. تبدیل نقشه‌های هندسی ناقص به نقشه‌های توپولوژیک دارای متغیرهای مخفی 178
5-2. تحلیل پیچیدگی زمانی IFLE 180
6. جمع بندی و نتیجه گیری 182
6 -1. یافته‌ها و نوآوری تحقیق 183
6-2. مزایا و محدودیت‌ها 184
6-3. پیشنهادهای تحقیقات آتی 185
مراجع 188
ضمیمه الف 194

فهرست اشکال

شکل 1-1. ارتباط فهم با اجزاء مختلف در شناخت و انجام عمل فیزیکی یک عامل هوشمند (Nilson, 2007) 6
شکل 1-2. وظایفی که باید یک روبات خودکار برای حرکت در یک فضای فیزیکی و یا مجازی 7
شکل 1-3. نمایی از یک نقشه متریک-توپولوژیک از یک محیط درون‌ساختمانی 10
شکل 1-4. مسئله تحقیق در حوزه نگاشت. 13
شکل 1-5. مسئله تحقیق در حوزه برنامه‌ریزی حرکت. 14
شکل 1-6. ابعاد مسئله برنامه‌ریزی حرکت نسبت به تعداد سلول‌های با وضعیت مجهول به طور نمایی رشد. 14
شکل 1-7. رابطه نوع افق برنامه‌ریزی و روش‌های حل متناسب با هر یک از مسائل حوزه روباتیک. 20
شکل 3-1. داده‌های حسگری و تبدیل آنها به خطوط نقشه. 53
شکل 3-2. نحوه اندازه‌گیری خطای رگرسیونی در راستای عمود بر خط (مجذور فاصله نقطه تا خط) 62
شکل 3-3. نحوه محاسبه نقاط پایانی تحت رویکردهای MSH و MGH 66
شکل 3-4. فلوچارت الگوریتم نگاشت CCA 68
شکل 3-5. نمای گرافیکی از نحوه انجام خوشه‌بندی‌های متوالی در CCA 70
شکل 3-6. یک تصویر نمونه از تصاویر به دست آمده از یک مسافت‌یاب لیزری دوبعدی. 71
شکل 3-7. نحوه محاسبه زاویه اتصال همسایگی برای یک نقطه. 74
شکل 3-8. یک محیط کاری نمونه. 78
شکل 3-9. ابر شامل 1001 نقطه قرائت شده در اولین تکرار CCA. 80
شکل 3-10. الگوریتم الحاق نقطه به خوشه‌های مرغوب. 81
شکل 3-11. مناطقی که بین نقاط پایانی پاره خط $Line_j$ محسوب می‌شوند هاشور خورده اند. 82
شکل 3-12. توابع شاخص برای اندازه‌گیری شباهت دو پاره‌خط 87
شکل 3-13. بیضی دربرگیرنده پاره خط بر اساس حاشیه اطمینان تطبیقی 88
شکل 3-14. شبه کد الگوریتم ROC 90
شکل 3-15. تکامل SIM در یک تکرار از CCA 91
شکل 3-16. شش خط موجود در نقشه پس از اعمال ROC همچنان بدون ادغام بیشتر باقی مانده اند. 93
شکل 3-17. در دومین تکرار از اجرای CCA. 94
شکل 3-18. شبه کد الگوریتم Tangent-Bug پیاده سازی شده برای برنامه‌ریزی مسیر روبات 95
شکل 3-19. نگاشت کردن محیط شماره 1 با $DST = 300$, $SR = 3°$, $NPC = 5$. 99
شکل 3-20. نگاشت کردن محیط شماره 2 با $DST = 500$, $SR = 3°$, $NPC = 5$ 99
شکل 3-21. نگاشت کردن محیط شماره 3. 100
شکل 3-22. نگاشت کردن محیط شماره 4. 100
شکل 3-23. نگاشت کردن محیط شماره 5. 101
شکل 3-24. مقدار متوسط سه متغیر خروجی به ازای 5 مسئله مختلف 103
شکل 3-25. نگاشت کردن یک محیط با SR = 0.5, DST = 1000, NPC = 50. 110
شکل 3-26. نگاشت کردن یک محیط با SR = 1, DST = 1000, NPC = 40. 111
شکل 3-27. نگاشت کردن یک محیط با SR = 0.5, DST = 1000, NPC = 57. 111

شکل 3-28. نگاشت کردن یک محیط شامل یک شیئ متحرک. 112
شکل 3-29. نگاشت کردن یک محیط شامل یک شیئ متحرک. 113
شکل 3-30. نگاشت کردن یک محیط با خطای حسگر دوبرابر شده (σ_r=2٪ مسافت واقعی)..... 114
شکل 3-31. نگاشت کردن یک محیط با خطای حسگر دوبرابر شده (σ_r=2٪ مسافت واقعی)..... 114
شکل 3-32. نگاشت کردن یک محیط با خطای حسگر سه‌برابر شده (σ_r=3٪ مسافت واقعی)..... 115
شکل 3-33. نگاشت کردن یک محیط با خطای حسگر سه‌برابر شده (σ_r=3٪ مسافت واقعی)..... 115
شکل 3-34. نگاشت کردن یک محیط با خطای حسگر سه‌برابر شده (σ_r=3٪ مسافت واقعی)..... 116
شکل 3-35. ابرِ نقاط قرائت شده در مجموعه داده‌های استاندارد..... 119
شکل 4-1. مسئله حرکت روبات در یک محیط ناهموار با متغیرهای پنهان دومقداره..... 126
شکل 4-2. گراف فضای پیکربندی مثال 4-1. 127
شکل 4-3. زیرگرافی از فضای حالت-باور مثال 4-1 مربوط به سناریوهای 1 تا 4. 128
شکل 4-4. گراف سناریوهای مثال 4-1..... 129
شکل 4-5. حالت‌های ممکن قرارگیری گره‌ها در گراف فضای حالت-باور 137
شکل 4-6. گراف فضای پیکره‌بندی: (الف) گراف G' فضای پیکربندی مثال 4-2؛ 145
شکل 4-7. مدل‌های برنامه‌ریزی خطی مربوط به مسائل برنامه‌ریزی احتمالی مسیر برای 145
شکل 4-8. گراف سناریوهای مثال 4-1 تحت فرض خوش‌بینانه..... 149
شکل 4-9. شبه کد فرایند تولید سناریوهای فعال جدید بر اساس متغیرهای مخفی فعال شناسایی شده..... 155
شکل 4-10. شکاف بهینگی حاصل از حل مسائل نمونه در مقابل تعداد متغیرهای پنهان..... 161
شکل 4-11. مسئله نمونه شماره 5. 162
شکل 4-12. نمودار (الف) مقدار حافظه استفاده شده توسط ISGEP در آخرین تکرار 163
شکل 4-13. شکاف نسبی بین مقدار تابع هدف گزارش شده توسط ISGEP با جواب بهینه و جواب حد پایین. ..164
شکل 4-15. پیشرفت ISGEP برای حل یک مسأله نمونه با شبکه 5×5 و 4 متغیر مخفی..... 165
شکل 5-1. داده های خام نگاشت شده از یک محیط و نقشه توپولوژیک تولید شده..... 170
شکل 5-2. مراحل تبدیل یک نقشه هندسی به نقشه توپولوژیک Thrun (1998). 171
شکل 5-3. مراحل تبدیل یک نقشه هندسی به نقشه توپولوژیک..... 172
شکل 5-4. معماری سه سطحی برای هدایت روبات (Aguirre and Gonzalez, 2002)..... 173
شکل 5-5. پاره خط های فازی و نحوه ساخت آنها بر اساس نقاط حسگری قرائت شده 173
شکل 5-6. معماری مدل برنامه‌ریزی به هنگام Nau (2007) 174
شکل 5-7. مدل مفهومی از چارچوب مورد نیاز برای حل مسئله کاوش روبات 175
شکل 5-8. مدل یکپارچه IFLE برای نگاشت و برنامه‌ریزی حرکت همزمان روبات متحرک. 176

فهرست جداول

جدول 2-1. سرعت اجرای الگوریتم‌های ابتکاری نگاشت در سه محیط متفاوت Nguyen *et al*. (2007).....33
جدول 2-1. کلیه کلاس‌های متفاوتی از مسائل. 45
جدول 3-1. نحوه محاسبه پارامترهای تطبیقی با توجه به وضعیت نسبی نقاط به خطوط نماینده‌شان 82
جدول 3-2. مقدار عددی پارامترهای به کار رفته در توابع اندازه‌گیری شباهت پاره خط ها 87
جدول 3-3. مقدار عددی پارامترهای به کار رفته در توابع اندازه‌گیری شباهت خط ها 92
جدول 3-4. مقایسه مرتبه پیچیدگی زمانی رایج‌ترین الگوریتم‌های استخراج خط. 96
جدول 3-5. پارامترهای به کار رفته در رایج‌ترین الگوریتم‌های استخراج خط.....97
جدول 3-6. پارامترهای به کار رفته در شبیه سازی حسگر مسافت یاب.....98
جدول 3-7. نتایج آزمایشات شبیه سازی.....102
جدول 3-8. مقادیر p-value اثرهای اصلی و تعاملی پارامترهای ورودی روی پارامترهای خروجی. 104
جدول 3-9. تأثیر فاکتور تصادفی بر روی پارامترهای خروجی. 106
جدول 3-10. مقدار p-value محاسبه شده در آنالیز رگرسیونی. 107
جدول 3-11. ضرائب رگرسیونی محاسبه شده فاکتورها در چندجمله‌ای برازانده شده. 107
جدول 3-12. جواب بهینه مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی P1 تا P3. 109
جدول 3-13. مشخصات محل ضبط مجموعه داده‌های انتخاب شده از RADISH.....117
جدول 3-14. جزئیات فنی و نتایج ارزیابی مجموعه داده‌های انتخاب شده از RADISH 117
جدول 3-15. مقایسه با الگوریتم‌های جدید مشابه 122
جدول 4-1. تعریف پارامترها. 133
جدول 4-2. تعریف متغیرهای تصمیم. 134
جدول 4-3. قیدهای فعال مرتبط با انتقال حالت‌های قطعی در مدل ریاضی مثال 4-1. 143
جدول 4-4. نتایج ارزیابی حاصل از حل مسائل تصادفی تولید شده.....160
جدول 4-5. نتایج ارزیابی حاصل از حل دسته دوم از مسائل تصادفی تولید شده 163

فصل اول:

مقدمه

1. مقدمه

بر طبق تعریف فرهنگ لغت آکسفورد، روباتیک عبارت است از 'شاخه ای از فناوری که مرتبط با طراحی، ساخت، راه‌اندازی و کاربرد روبات‌ها است'. از این تعریف می‌توان استنتاج کرد که روباتیک در ارتباط با خودکارسازی[1] سیستم‌های مکانیکی است که توانایی حس‌کردن، عمل‌کردن و انجام محاسبات را دارند. از این رو به عنوان معادل واژه 'سیستم‌های روباتیک'، از واژه 'سیستم‌های خودمختار'[2] نیز استفاده می‌گردد. مهم‌ترین و اساسی‌ترین چالش در روباتیک وجود الگوریتم‌هایی است که فعالیت‌های سطح بالای انسانی را به صورت دستورالعمل‌های سطح پایین ماشینی تبدیل کنند (LaValle, 2006). البته نباید این نکته را دور از ذهن داشت که روباتیک یک فناوری است که شاخه‌های مختلف مهندسی همچون برق، مکانیک، صنایع و حتی علوم کامپیوتر را در بر می‌گیرد. از این رو باید انتظار داشت که روش‌های حل مورد استفاده در حوزه روباتیک لزوماً یکی از این روش‌ها باشد:

- برنامه‌ریزی بهینه بلندمدت (مثل برنامه‌ریزی برای انتقال و ارتقای تکنولوژی ساخت توسط روبات‌ها)،
- برنامه‌ریزی بهینه میان‌مدت (مثل برنامه‌ریزی میان‌مدت برای طراحی سلول‌های تولیدی روباتیک)،
- برنامه‌ریزی بهینه کوتاه‌مدت (مثل برنامه‌ریزی مسیر روبات‌ها یا خودروهای خودهدایت شونده)، و حتی

[1] Automation
[2] Autonomous

– الگوریتم‌های حریصانه[1] و به‌هنگام[2] با افق برنامه‌ریزی بسیار کوتاه‌مدت (الگوریتم‌های ابتکاری جهت پرهیز از برخورد و یا کوتاه‌کردن زمان برنامه‌ریزی).

با توجه به گسترش روزافزون گرایش استفاده از روبات‌ها در صنایع نظامی و تولیدی، انتظار این گرایش حوزه خدمات را نیز تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به موفقیت‌های چشمگیر به دست آمده حاصل از به کارگیری روبات‌ها در بخش صنعت، پیش بینی می‌گردد این اقبال در بخش خدمات نیز حاصل گردد. در این میان مهم‌ترین مسئله‌ای که در راه رسیدن به هدف قرار دارد، تفاوت در ماهیت روبات‌های به کار گرفته شده در بخش صنعت و خدمات و همچنین پیش نیازهای هر یک است.

روبات‌های به کار گرفته شده در بخش صنعت آن گونه که تا کنون مشاهده شده است، به طور عمومی بازوهای روباتی[3] هستند که در دسته‌بندی روبات‌های ثابت قرار می‌گیرند. نمونه این گونه روبات‌ها روبات‌های مونتاژکار، روبات‌های رنگ‌پاش، روبات‌های جوش‌کار، روبات‌های جابه‌جا کننده قطعات کار درون سلول‌های تولید انعطاف پذیر، و غیره هستند. اگرچه خودروهای خودهدایت شونده[4] (AGV) که در انبارهای مکانیزه برای حمل کالا استفاده می‌شوند در دسته بندی روبات‌های متحرک قرار می‌گیرند، اما به دلیل ساده‌سازی‌هایی که در هنگام نصب و راه‌اندازی آنها صورت می‌گیرد، از نظر تئوریک برای برنامه‌ریزی حرکت بیش از آنکه نیاز به الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر[5] داشته باشند، نیاز به حل مسئله مسیریابی[6] به صورت بهینه، غیربه‌هنگام[7] و با کمک برنامه‌ریزی ریاضی دارند.

برعکسِ روبات‌های مورد نیاز در صنعت، روبات‌های به کار گرفته شده در بخش خدمات باید روبات‌هایی باشند که قدرت حرکت، مانور و تغییر موقعیت در فضای پویای سه بعدی حقیقی یا مجازی را داشته باشند. مثل روبات‌های راهنمای تور در موزه‌ها، شخصیت‌های کامپیوتری که به صورت خودکار برنامه‌ریزی حرکت می‌کنند، روبات‌های پیش‌خدمت در منازل و یا ادارات،

[1] Greedy
[2] On-line
[3] Robot Manipulator
[4] Automated Guided Vehicle
[5] Path Planning
[6] Routing
[7] Off-Line

روبات‌های امدادگر، و غیره.محیط کاری این گونه روبات‌ها به دلیل تعامل بسیار زیاد با انسان‌ها از پویایی و عدم قطعیت بالایی برخوردار است. این احتیاجات کارکردی باعث می‌گردند تا روبات‌های خدماتی ماهیتاً روبات‌های متحرک در محیط‌های پویا باشند.

متحرک بودن روبات‌های خدماتی عاملی است که به تنهایی پیچیدگی‌های طراحی و برنامه‌ریزی زیادی را بر توسعه‌دهندگان تحمیل می‌کند؛ به دلیل همین پیچیدگی، این نوع روبات‌ها در مقایسه با بازوهای روباتیک هنوز به صورت گسترده تجاری نشده‌اند. زیرا در مقایسه با روبات‌های ثابت این روبات‌ها ملزم به برنامه‌ریزی حرکت در محیط‌های پیچیده‌تر هستند. محیط کاری روبات‌های متحرک به طور عمومی محدود و قابل کنترل با سیستم‌های دید ماشینی با توانایی‌های محدود کنونی نیست. از منظر تحقیقاتی نیز اساساً روبات‌های ثابت که مهم‌ترین نوع آنها بازوهای روباتی هستند فقط محتاج تحلیل و طراحی ساختار فیزیکی و حل مسائل دینامیکی کنترل آن هم فقط یک بار هستند تا بتوان در فراخوانی‌های بعدی، برنامه‌ریزی خط سیر[1] به صورت خودکار انجام گیرد. در مورد روبات‌های متحرک نیاز است تا علاوه بر تحلیل و طراحی سیستم‌های دینامیکی (جهت برنامه‌ریزی خط سیر) که بعضا غیرهولونومیک (که دارای محدودیت‌های حرکتی هستند) هم هستند، سیستم‌های کنترلی آنها ابتدا در یک سطح کلی‌تر اقدام به تولید مسیری برای حرکت روبات در هر محیط جدید می‌کنند (برنامه‌ریزی مسیر[2])؛ سپس برای عملیاتی کردن این مسیر به سراغ در نظر گرفتن محدودیت‌های حرکتی و برنامه‌ریزی خط سیر با صدور فرامین کنترلی به موتورهای محرک می روند. علاوه بر همه این‌ها باید الگوریتم‌های کارایی توسعه داده شوند تا بتوانند دو وظیفه برنامه‌ریزی مسیر و برنامه‌ریزی خط سیر را به صورت به‌هنگام انجام دهند.

به عبارت دیگر مهم‌ترین موضوعی که همچنان به عنوان مسئله‌ای باز[3] مورد توجه محققین روباتیک است موضوع حرکت و برنامه‌ریزی حرکت روبات به صورت کاملا اتوماتیک در محیط‌های پویا است. به عنوان مثال زمانی که یک روبات خدماتی وارد یک خانه یا اداره می‌گردد، اگر کاربر انتظار یک روبات کاملا خودکار را داشته باشد، به هیچ وجه عاقلانه به نظر نمی‌رسد که لازم باشد تا

[1] Trajectory Planning
[2] Path Planning
[3] Open Problem

جهت شناساندن محیط جدید به روبات تازه وارد از برنامه نویسی و یا بارگذاری نقشه محیط به حافظه روبات استفاده کند؛ بلکه انتظار داریم تا روبات به صورت تعاملی در محیط گردش کرده و خود محیط را شناسایی کند. این امر باعث می‌گردد تا دانش روبات از محیط (حتی تحت فرض ایستا بودن محیط در یک افق زمانی) به صورت پویا تکامل یابد. برای حصول برنامه‌ریزی تماماً اتوماتیک حرکت نیز الزامی است تا روبات دارای درجه‌ای از فهم فضایی باشد. البته به‌طور عام در علوم شناختی، مدل روانشناختی که برای شناخت[1] ارائه می‌شود یک حلقه است که مشتمل بر 5 مرحله می‌شود (Konar, 1999):

- حس‌کردن[2]،
- اکتساب (داده‌ها)[3]،
- فهم[4]،
- برنامه‌ریزی[5]، و
- عمل[6].

که بین هر دو اجرای متوالی از این حلقه ارتباط متقابل تنگاتنگی حاکم است. لذا با توجه به این مدل، برای حصول عمل 'حرکت روبات' الزامی است تا حسگرهایی فضای فیزیکی را شناسایی کنند، سپس داده‌های قرائت شده در ساختار داده‌ای مناسب در اختیار پردازشگر قرار گیرند، تا مورد پردازش شوند و تصور فضایی برای روبات از محیط فیزیکی شکل گیرد و نهایتاً منجر به برنامه‌ریزی حرکت و فعال کردن سروموتورها[7] و یا موتورهای پله‌ای[8] روبات گردد. چنانچه عامل مورد نظر یک موجود زنده باشد پردازش‌های فضایی و تولید نقشه‌های توپولوژیکی در قسمت هیپوکامپ مغز صورت می‌گیرند (Tapus et al., 2004). ولی در مورد روبات‌ها هنوز تحقیقات در مراحل ابتدایی به‌سر می‌برد و هنوز سخت‌افزار خاص‌منظوره‌ای برای این کارکرد ساخته نشده است؛ البته تحقیقات

[1] Cognition
[2] Sensing
[3] Acquisition
[4] Perception
[5] Planning
[6] Action
[7] Servo Motor
[8] Stepper Motor