



دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق - گروه کنترل

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی برق

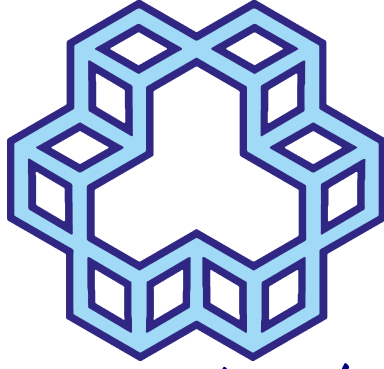
ارائه فرمول بندی یکپارچه بهینه سازی مبتنی بر گراف به منظور کالیبراسیون و تخمین حالت ربات

محمد رضا دیندارلو

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا تقی راد

تابستان ۱۴۰۳



دانشگاه خواجہ نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق - گروه کنترل

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد
مهندسی برق

عنوان

ارائه فرمول بندی یکپارچه بهینه سازی مبتنی بر
گراف به منظور کالیبراسیون و تخمین حالت ربات

نگارش

محمد رضا دیندارلو

استاد راهنما

دکتر حمید رضا تقی راد

استادان مشاور

دکتر فلیپ کاردو و دکتر سید احمد خلیل پور

تابستان ۱۴۰۳



تقدیم به:

به آنان که با علم خود زندگی آزاد می سازند



تأییدیه هیئت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

هیأت داوران پس از مطالعه‌ی پایان‌نامه و شرکت در جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه تهیه‌شده با عنوان «ارائه فرمول بندی یکپارچه بهینه سازی مبتنی بر گراف به منظور کالیبراسیون و تخمین حالت ربات» توسط آقای / خانم محمدرضا دیندارلو صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق در تاریخ تابستان ۱۴۰۳ مورد تأیید قرار دادند.

۱. استاد راهنما: دکتر حمیدرضا تقی راد..... امضا

۲. استاد مشاور: دکتر فلیپ کاردو..... امضا

۳. استاد مشاور: دکتر سید احمد خلیل پور..... امضا

۴. استاد داور داخلی: دکتر داور داخلی..... امضا

۵. استاد مدعو: دکتر داور خارجی..... امضا

۶. نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر نماینده..... امضا



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظهارنامه دانشجو

اینجانب محمدرضا دیندارلو به شماره دانشجویی ۴۰۰۳۰۸۲۴ دانشجوی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق دانشکده برق دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه با عنوان:

ارائه فرمول بندی یکپارچه بهینه سازی مبتنی بر گراف به منظور کالیبراسیون و تخمین حالت ربات

توسط اینجانب انجام و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی و غیره) با اینجانب رفتار خواهد شد. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی دانشجو: محمدرضا دیندارلو

تاریخ و امضای دانشجو:



حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسندگان آن می باشد. بهره برداری از این پایان نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می گردد، بلامانع است:

☐ بهره برداری از این پایان نامه برای همگان و با ذکر منبع، بلامانع است.

☐ بهره برداری از این پایان نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما و با ذکر منبع، بلامانع است.

☐ بهره برداری از این پایان نامه تا تاریخ _____ ممنوع است.

استاد راهنما: دکتر حمیدرضا تقی راد امضا

استاد مشاور: دکتر فلیپ کاردو امضا

استاد مشاور: دکتر سید احمد خلیل پور امضا

قدردانی

اکنون که به یاری پروردگار و یاری و راهنمایی اساتید بزرگ موفق به پایان این رساله شده‌ام وظیفه خود دانسته که نهایت سپاسگزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده‌اند را به عمل آورم: در آغاز از استاد بزرگ و دانشمند جناب آقای/سرکار خانم که راهنمایی این پایانامه را به عهده داشته‌اند کمال تشکر را دارم. از جناب آقایان/ خانم‌ها که اساتید مشاور این پایانامه بوده‌اند نیز قدردانی می‌نمایم. از داوران گرامی ... که زحمت داوری و تصحیح این پایانامه را به عهده داشتند کمال سپاس را دارم. خالصانه از تمامی اساتید و معلمان و مدرسانی که در مقاطع مختلف تحصیلی به من علم آموخته و مرا از سرچشمه دانایی سیراب کرده‌اند متشکرم. از کلیه هم دانشجویان و همراهان عزیز، دوستان خوبم خانم‌ها و آقایان نهایت سپاس را دارم. و در پایان این پایان‌نامه را تقدیم می‌کنم به که با حضورش و همراهی اش همیشه راه را به من نشان داده و مرا در این راه استوار و ثابت قدم نموده است.

محمد رضا دیندارلو

تابستان ۱۴۰۳

چکیده

واژگان کلیدی

فهرست مطالب

پ	فهرست تصاویر
ت	فهرست جداول
ث	فهرست الگوریتم‌ها
ج	فهرست برنامه‌ها
۱	فصل ۱: مقدمه
۳	فصل ۲: مروری بر مطالعات انجام شده
	فصل ۳: موقعیت‌یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان یک ربات کابلی با در نظر گرفتن کابل‌ها
۵	به صورت جسم صلب
۵	۱.۳ مقدمه
۶	۱.۱.۳ روش‌های مرسوم مسئله کالیبراسیون
۷	۱.۱.۱.۳ ترکیب حسگرها
۸	۲.۱.۱.۳ ترکیب شبه اندازه‌گیری‌ها
۸	۲.۱.۳ روش‌های مرسوم مسئله موقعیت‌یابی
۱۰	۳.۱.۳ رویکرد گراف مبنا برای حل مسئله کالیبراسیون و موقعیت‌یابی به صورت همزمان
۱۱	۱.۳.۱.۳ بیان الگوریتم گراف عامل

۲.۳.۱.۳	گراف عامل پیشنهادی برای کالیبراسیون و موقعیت یابی به صورت
۱۲	همزمان
۴.۱.۳	انتخاب ربات مناسب جهت توسعه الگوریتم
۵.۱.۳	توسعه گراف عامل برای یک ربات چهار کابلی فروتحریک با فرض کابل صلب . ۱۴
فصل ۴:	موقعیت یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان یک ربات کابلی با در نظر گرفتن شکم
۱۵	دهی کابل ها
فصل ۵:	نتیجه گیری و پیشنهادات برای آینده
۱۷	
۱۹	مراجع
۲۱	پیوست آ: آشنایی سریع با برخی دستورات لاتک
۲۳	پیوست ب: جدول، نمودار و الگوریتم در لاتک
۲۵	پیوست پ: مراجع، واژه نامه و حاشیه نویسی

فهرست تصاویر

۱.۳ ۶

فهرست جداول

فهرست الگوریتم‌ها

فهرست برنامه‌ها

فصل ۱

مقدمه

در این بخش، به مرور کارهای انجام شده پیشین در این موضوع پرداخته‌ایم. سپس، به بررسی ضعف‌ها و خلأهای موجود در این حوزه می‌پردازیم. پس از آن، فرضیات مطرح شده در تحقیق حاضر توضیح داده می‌شوند. در ادامه، به معرفی دقیق تحقیقات انجام شده توسط خودمان می‌پردازیم، که شامل بخش‌هایی است که به عنوان novelty در نظر گرفته شده‌اند. باید توجه داشت که موارد مطرح شده در این فصل باید مختصر و کلی باشند، و جزئیات بیشتر به فصل‌های آتی اختصاص داده شود.

فصل ۲

مروری بر مطالعات انجام شده

این بخش باید حداکثر شامل ۲۵ صفحه باشد و به پیشینه تحقیق و استناد به کارهای پیشین در این حوزه بپردازد. این بخش متشکل از سه قسمت است که به ترتیب به کالیراسیون، موقعیت یابی، و فکتور گراف می پردازند.

فصل ۳

موقعیت‌یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان یک ربات کابلی با در نظر گرفتن کابل‌ها به صورت جسم صلب

۱.۳ مقدمه

همانطور که در فصل قبل ذکر شد، اگرچه حسگرهای فضای مفصل سریع و ارزان هستند، اما زمانی که از آنها برای اندازه‌گیری مقادیر مجری نهایی استفاده می‌شود، دقت مدل سینماتیکی برای تعیین دقت قابل دستیابی بسیار مهم است. علاوه بر این، در زمینه همجوشی و ترکیب اندازه‌گیری‌ها، هم‌ثابت کردن داده‌ها [۱] اولین گام اساسی است. به عبارت دیگر، حسگرها باید اندازه‌گیری‌های خود را در یک مختصات یکپارچه ارائه دهند. اهمیت هم‌ثابت به دلیل فرض اساسی نویز گاوسی با میانگین صفر در الگوریتم‌های ترکیب داده‌ها است.

نکته قابل توجه دیگر برای ربات‌های آسان نصب، لزوم بی‌نیازی الگوریتم کالیبراسیون پیشنهادی به حسگرهای گران‌قیمت و یا حسگرهایی که نیاز به تعمیر و نگهداری سطح بالایی دارند، می‌باشد. علاوه بر این، فرآیند کالیبراسیون باید به اندازه‌ای ساده باشد که اجرای آن در مکان‌های مختلف آسان و سریع باشد. با اینکه کالیبراسیون موضوعی است که بسیاری از پژوهشگران به آن علاقه‌مند هستند، اما مفهوم بهره‌گیری از چندین حسگر برای بهبود نتایج کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

از طرفی دیگر، افزون بر مفهوم و ضرورت کالیبراسیون در حوزه ربات‌ها، موقعیت‌یابی آنها نیز مورد توجه



شکل ۱.۳

بسیاری قرار گرفته است. همانطور که پیش‌تر بیان شد، الگوریتم‌های بسیاری در راستای ترکیب حسگرها و همچنین کاهش زمان پردازش برای موقعیت‌یابی ربات به صورت زمان-واقعی در انواع دیگر ربات‌ها همچون ربات‌های خودران مورد استفاده قرار گرفته است.

در این فصل مروری بر روش‌های مرسوم کالیبراسیون و موقعیت‌یابی ربات‌ها خواهیم داشت. سپس نگاهی به معایب این روش‌ها خواهیم داشت و برای حل آن‌ها رویکردی را ارائه خواهیم داد که معایب این روش‌ها را برطرف کند. در نهایت با استفاده از این رویکرد، یک ربات کابلی را در نظر خواهیم گرفت و با اعمال رویکرد مطرح شده، نتایج کالیبراسیون و موقعیت‌یابی را به صورت همزمان ارائه خواهیم داد.

۱.۱.۳ روش‌های مرسوم مسئله کالیبراسیون

به صورت کلی، انتظار می‌رود چنانچه به یک ربات در دنیای واقع یک ورودی مشخص اعمال شود، با اعمال همان ورودی به مدل پاسخی یکسان دریافت شود. با این حال همواره وجود نامعینی‌ها و عدم دقیق بودن پارامترهای مدل در واقعیت ما را از رسیدن به چنین پاسخی ایده‌آل باز می‌دارد. این نامعینی‌ها می‌تواند ناشی از تقریب‌هایی باشد که در مدل داریم و یا پدیده‌هایی که در مدل‌سازی مورد توجه کامل قرار نگرفته‌اند. جنس این نامعینی‌ها می‌تواند ریشه در سینماتیک ربات و یا دینامیک آن باشد. فرآیند کالیبراسیون می‌تواند این نامعینی‌ها را در جهتی کاهش دهد که پاسخ‌هایی که از مدل و ربات در پیاده‌سازی واقعی دریافت می‌کنیم، کاهش پیدا کند. آنچه در این کار مورد بررسی قرار گرفته است کالیبراسیون سینماتیکی می‌باشد. شکل ۱.۳ نمایش بلوکی از یک فرآیند کالیبراسیون سینماتیکی بنا بر تعریف بیان شده می‌باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود آنچه به عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود تفاوت موقعیت فضایی ربات است که ناشی از مدل سینماتیکی ربات (در اینجا سینماتیک مستقیم) و ربات واقعی در فضای کاری ربات، با یک ورودی مشترک در فضای مفصلی آن می‌باشد.

با نگاهی به آخرین تحقیقات بر روی مسئله کالیبراسیون ربات‌ها، ایجاد یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی

و حل آن برای یافتن مقادیر دقیق این پارامترهای سینماتیکی و دینامیکی ربات مرسوم می‌باشد [۲، ۳، ۴، ۵]. مطابق این رویکردهای مرسوم، برای ایجاد فرمول بندی مناسب مسئله مطرح شده در شکل ۱.۳ خواهیم داشت:

$$\tilde{\phi} = \arg \min_{\phi} \sum_{n=1}^N \text{error}_i[n] = \arg \min_{\phi} \sum_{n=1}^N \|F_i(\mathbf{q}[n], \phi) - X_i[n]\|_{\Sigma}^2 \quad (1.3)$$

در این معادله، بردار پارامترهای سینماتیکی و $\tilde{\phi}$ تخمین آن است. علاوه بر این، $X_i[n]$ مقدار اندازه گیری شده توسط حسگر فضای کار ربات، و $\mathbf{q}[\cdot]$ مقادیر اندازه گیری‌های متقابل حسگری در مفاصل می‌باشد. تابع مدل ربات $F[\cdot]$ بیانگر مدل سینماتیک مستقیم ربات می‌باشد. تابع هزینه هدف، بر روی مجموعی از N نمونه داده جمع‌آوری شده در فرآیند کالیبراسیون می‌باشد. افزون بر این، Σ نیز بیانگر ماتریس کوواریانس اندازه گیری می‌باشد که به عنوان عامل نرمال سازی برای محاسبه هزینه عمل می‌کند. هر چه مقدار کوواریانس بیشتر باشد، میزان تاثیر گذاری خطای متقابل آن بر روی تابع هزینه کمتر خواهد بود. همچنین برای محاسبه نرم روش‌های زیادی ارائه شده است که آنچه بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد نرم‌های هابر^۱ می‌باشد [۶]. معادله بهینه سازی غیر خطی بیان شده در ۱.۳ می‌تواند با روش‌های بازگشتی الگوریتم‌های غیر خطی حداقل مربعات^۲ همچون لونبرگ-مارکوارت^۳ و یا روش‌های گاوس-نیوتون^۴ می‌باشد [۷].

با نگاهی دیگر به دیاگرام مطرح شده در ۱.۳ و همچنین معادله ۱.۳، مشاهده می‌شود که افزایش دقت اندازه‌گیری و همچنین برآورده کردن تمامی قیود مدل می‌تواند منجر به بهبود نتیجه کالیبراسیون شود. به منظور دستیابی به این هدف، رویکردهایی همچون ترکیب چندین حسگر و یا افزودن قیود جدید که از ساختار هندسی ربات استخراج می‌شود، معرفی می‌شوند. ترکیب این حسگرها باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر کاهش خطای نهایی کالیبراسیون، خروج هر کدام از حسگرها منجر به توقف فرآیند کالیبراسیون نشود. همچنین واضح است که افزودن این قیود می‌تواند منجر به حل پیچیده‌تری از مسئله شود. در ادامه، نگاهی به فرمول‌بندی مسئله کالیبراسیون با در نظر گرفتن این ترکیب‌ها خواهیم داشت.

۱.۱.۱.۳ ترکیب حسگرها

در معادله ۱.۳، زیرنویس i بیانگر وجود یک حسگر و خطایی که از مقادیر اندازه گیری حسگر در هر نمونه بوده می‌باشد. فرمول بندی ساختاری که به صورت همزمان از چندین حسگر در راستای ایجاد تابع هزینه استفاده

نماید می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$\tilde{\phi} = \arg \min_{\phi} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^M W_i \text{error}_i[n] \quad (2.3)$$

در این معادله W_i ها یک پارامتر وزن برای ترکیب چندین منبع اطلاعاتی با توجه به میزان کیفیت و اهمیت آنها می‌باشد.

۲.۱.۱.۳ ترکیب شبه اندازه‌گیری‌ها

اندازه‌گیری‌های حسگری تنها منبع اطلاعات برای حل مسئله نیستند. ساختار ربات و توجه به هندسه آن برای حل مسئله تعریف شده می‌تواند مفید واقع شود. برای مثال فاصله‌های بین برخی از نقاط می‌تواند با توجه به ساختار ربات می‌تواند ویژگی‌هایی نسبی و یا مطلق داشته باشند. این اطلاعات با عنوان داده‌های شبه اندازه‌گیری شناخته می‌شوند. این دسته از اطلاعات که از قبل مشخص هستند، می‌توانند به صورت قیود به مسئله اضافه شوند. بنابراین مسئله کلی بهینه‌سازی کالیبراسیون ۲.۳ در حضور این قیود به صورت زیر باز نویسی می‌شود.

$$\tilde{\phi} = \arg \min_{\phi} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^M W_i \text{error}_i[n] \quad (3.3)$$

$$g_j(\phi) = 0 \quad \text{where } j = 1, \dots, K$$

که در اینجا $g_j(\phi) = 0$ قیود هندسی معلوم بر روی پارامترهای سینماتیکی ربات می‌باشند.

۲.۱.۳ روش‌های مرسوم مسئله موقعیت‌یابی

موقعیت‌یابی^۱ ربات فرآیند تعیین مکان ربات نسبت به محیط اطراف آن می‌باشد. دانستن موقعیت دقیق ربات در محیط، پیش‌نیازی اساسی برای اتخاذ تصمیمات صحیح و حرکت‌های بعدی مؤثر است. بدون اطلاعات موقعیتی دقیق، ربات نمی‌تواند مسیریابی^۲ و یا ردیابی^۳ مناسبی را داشته باشد و ممکن است با موانع برخورد کند یا مسیر بهینه‌ای را طی نکند [۸]. علاوه بر این، سیستم‌های کنترلی ربات‌ها نیازمند اطلاعات دقیق و لحظه‌ای

از موقعیت و جهت‌گیری ربات هستند تا بتوانند فرمان‌های مناسب را صادر کنند. بدون داده‌های دقیق موقعیتی، کنترلرها نمی‌توانند حرکات دقیقی را تولید کنند که منجر به عملکرد نامناسب و ناپایداری ربات می‌شود [۹]. فرآیند کالیبراسیون ربات که در بخش ۱.۱.۳ مورد بررسی قرار گرفت نیز یازمند داشتن اطلاعات دقیق از موقعیت ربات است. با داشتن داده‌های موقعیتی دقیق، می‌توان خطاهای سیستماتیک را شناسایی و تصحیح کرد و به این ترتیب دقت و کارایی ربات را بهبود بخشید. این امر به ویژه در ربات‌هایی که نیاز به انجام وظایف حساس و دقیق دارند، حیاتی است.

موقعیت‌یابی دقیق ربات باعث کاهش عدم قطعیت در تصمیم‌گیری‌ها و عملیات ربات می‌شود. این امر نه تنها به افزایش اعتمادپذیری ربات در انجام وظایف محوله منجر می‌شود، بلکه احتمال بروز خطاها و حوادث ناشی از اشتباهات موقعیتی را نیز کاهش می‌دهد. همچنین در سیستم‌هایی که شامل چندین ربات هستند، اطلاعات دقیق موقعیتی هر ربات برای هماهنگی و همکاری بین ربات‌ها ضروری است. این اطلاعات به ربات‌ها کمک می‌کند تا از موقعیت یکدیگر آگاه باشند و بتوانند به صورت هماهنگ وظایف مشترک را انجام دهند. در این راستا توسعه و بهبود تکنیک‌های موقعیت‌یابی به منظور افزایش دقت و کارایی ربات‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۰].

روش‌های ارائه شده برای موقعیت‌یابی ربات را می‌توان به سه دسته اصلی مسافت‌پیمایی^۱، موقعیت‌یابی جهانی^۲ و مکان‌یابی و نقشه‌یابی به صورت همزمان^۳ تقسیم کرد. این روش‌ها با توجه به نوع حسگرهای تعبیه شده بر روی ربات می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. ترکیب داده‌ها برای همانند آنچه در بخش ۱.۱.۳ مورد توجه قرار گرفت، در موقعیت‌یابی و تخمین حالت ربات نیز می‌تواند نقش موثری را ایفا کند. حسگرهای استفاده شده از نظر جنس داده‌ها و فرکانس داده برداری نیز می‌تواند متفاوت باشد که در ترکیب داده‌ها خصوصاً زمانی که اجرای الگوریتم به صورت زمان واقعی می‌باشد، چالش برانگیز خواهد بود. طیف وسیعی از روش‌های مرسوم ارائه شده برای ترکیب داده‌ها در راستای تخمین حالت، رویکردهای بر مبنای فیلتر هستند. این روش‌ها که به رویکردهای آماری^۴ نیز شناخته می‌شوند، در دو دهه اخیر فعالیت‌های زیادی را به خود اختصاص داده‌اند. پایه این روش‌ها بر قانون بیز^۵ بنا نهاده شده است. مقاله [۱۱] دسته‌بندی جامعی از روش‌های فیلتر مبنای تخمین موقعیت ارائه کرده است. از میان روش‌های بیان شده، کالمن فیلتر و فیلترهای ذرات^۶ به عنوان فراگیرترین رویکرد مورد استفاده قرار گرفته شده است. این فیلترها با استفاده از فرض مارکوفی برای حالت‌ها و به کارگیری اطلاعات پیشین، تخمینی از حالت جدید ارائه می‌کنند.

۳.۱.۳ رویکرد گراف مبنا برای حل مسئله کالیبراسیون و موقعیت‌یابی به صورت همزمان

روش‌های مرسوم کالیبراسیون و موقعیت‌یابی ربات‌ها که تا به اینجا معرفی شده‌اند، فرمول‌بندی‌های مشخصی برای حل این دو مسئله ارائه داده‌اند. همانطور که در فصل قبل مشاهده شد، سادگی و سرعت بالای این روش‌ها باعث پیاده‌سازی گسترده آن‌ها گردیده است. با این حال، این روش‌ها دارای معایبی نیز هستند. اول اینکه برای هر مسئله کالیبراسیون و ربات، فرمول‌بندی مسئله باید از ابتدا توسعه داده شود. دوم اینکه این روش‌ها از تنگ بودن ذاتی مسئله‌ها برای سرعت بخشیدن به محاسبات استفاده نمی‌کنند. بزرگ شدن و پیچیده شدن فرمول‌بندی این مسائل باعث می‌شود که از حل آن‌ها به صورت زمان واقعی فاصله گرفته شود. همچنین، این روش‌ها برای حل مسائل غیرخطی نیاز به خطی‌سازی دارند که نه تنها به پیچیدگی‌های محاسباتی می‌افزاید، بلکه باعث کاهش دقت نیز می‌شود. سومین موضوع، روش‌های مرسوم فیلتر مبنا از داده‌های جاری و لحظه‌ای استفاده می‌کنند که باعث می‌شود علاوه بر مشکلات در مدیریت داده‌هایی که با تأخیر به سیستم می‌رسند، نتوانند داده‌های تاریخی را به صورت کامل در یک مسئله بهینه‌سازی دسته‌ای وارد کنند. این مشکل در مسائل موقعیت‌یابی باعث ایجاد مشکلات جدی همچون لغزش^۱ و کاهش دقت تا حد قابل توجهی می‌شود. چهارمین عیب این روش‌ها، عدم انعطاف‌پذیری آن‌ها برای بسط دادن مسئله با افزودن قیود به سیستم یا داده‌های حسگری به آن است. با توجه به این معایب، روش‌های مرسوم ممکن است در برخی کاربردهای پیشرفته رباتیک کارایی لازم را نداشته باشند.

در این فصل، رویکردی گراف مبنا برای حل مسئله کالیبراسیون و موقعیت‌یابی ربات بیان می‌گردد که با فرمول‌بندی یکپارچه، هر دو مسئله را به صورت همزمان در یک مسئله بهینه‌سازی حل می‌کند. ویژگی‌های ذاتی این رویکرد در حل این مسئله واحد به تمامی معایب مطرح شده در روش‌های مرسوم پاسخ می‌دهد و باعث ایجاد حلی کامل و قابل بسط می‌شود. این رویکرد گراف مبنا به دلیل استفاده از ساختارهای گرافی، قادر به مدیریت بهینه‌تر داده‌های مختلف است. با ادغام تمامی داده‌های تاریخی و جاری در یک مسئله بهینه‌سازی دسته‌ای، این روش از داده‌های ورودی به صورت کامل استفاده کرده و به مشکلات مدیریت داده‌های تأخیر دار و لحظه‌ای غلبه می‌کند. همچنین، به دلیل عدم نیاز به خطی‌سازی مکرر، دقت محاسبات افزایش یافته و پیچیدگی‌های محاسباتی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، انعطاف‌پذیری بالای این رویکرد امکان افزودن قیود و داده‌های حسگری جدید را فراهم می‌کند، بدون آن که نیاز به بازتعریف کلی فرمول‌بندی باشد. این ویژگی‌ها، در کنار توانایی بهره‌گیری از تنگ بودن ذاتی مسئله‌ها برای بهینه‌سازی محاسبات، این رویکرد گراف مبنا را به یک ابزار قدرتمند برای کالیبراسیون و موقعیت‌یابی ربات‌ها تبدیل می‌کند.

الگوریتم گراف مبنا استفاده شده برای این فرمول‌بندی در این پایان‌نامه، الگوریتم گراف عامل^۲ می‌باشد. در ادامه، ابتدا نگاهی بر ریاضیات مرتبط با الگوریتم گراف عامل خواهیم داشت و سپس گراف عامل یکپارچه‌ای را

برای حل مسئله مطرح شده معرفی خواهیم کرد. گراف عاملی که در ادامه پیشنهاد خواهد شد، حلی سیستماتیک برای کنار هم قرار دادن بلوک‌های ساختاری (عامل‌ها) در راستای تعریف یک مسئله کالیبراسیون در کنار مسئله موقعیت‌یابی به صورت یکپارچه است، که قابلیت گسترش به حسگرهای بیشتر و قیود اضافی را نیز دارا می‌باشد. علاوه بر این، از آنجایی که پیاده‌سازی‌های منابع باز و بهینه‌سازی شده برای این روش وجود دارد، مسئله کالیبراسیون و موقعیت‌یابی همزمان مطرح شده می‌تواند بر روی سیستم‌های نهفته بر روی ربات نیز پیاده‌سازی گردد. در این پایان‌نامه برای پیاده‌سازی گراف عامل پیشنهاد داده شده، از کتابخانه GTSAM استفاده شده است.

۱.۳.۱.۳ بیان الگوریتم گراف عامل

مسئله غیرخطی تعریف شده در ۳.۳ می‌تواند به صورت یک مدل گرافی که متشکل از گره‌هایی است که بیانگر متغیرهای تصمیم‌گیری هستند و یال‌هایی که ارتباط بین قیود و این متغیرها را نشان می‌دهند، بیان شود. در جامعه رباتیک، گراف عامل نمونه‌ای از این بیان است. این گراف‌ها یک چارچوب قوی و قابل انطباق برای بیان مسائل متنوع از تخمین حالت^۱ تا برنامه‌ریزی حرکت^۲، ارائه می‌دهند. این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌سازی که شامل متغیرهای مختلف و قیود پیچیده است، مناسب می‌باشد. یکی از روش‌های بیان این مدل، استفاده از نمودارهای دو بخشی $F = (\mathcal{U}, \mathcal{V}, \mathcal{E})$ است که عامل‌ها (\mathcal{U}) با استفاده از یال‌ها (\mathcal{E}) روابط و قیودی را بین گره‌ها (\mathcal{V}) ایجاد می‌کنند. بدین ترتیب بخش اول، یعنی گره‌ها، نمایانگر متغیرهای ناشناخته یا پارامترهای مدل هستند که آنها را با ϕ_i نشان می‌دهیم. به عنوان مثال، در مسئله کالیبراسیون و موقعیت‌یابی، گره‌ها می‌توانند نمایانگر موقعیت‌های مختلف ربات یا پارامترهای کالیبراسیون باشند. همچنین بخش دوم، یعنی عامل‌ها، نشان‌دهنده قیود یا روابط بین متغیرها می‌باشد که آنها را با ψ_i نشان می‌دهیم. این قیود می‌توانند شامل معادلات غیرخطی یا روابط پیچیده‌ای باشند که باید در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته شوند. بدین ترتیب یک گراف عامل F بیان‌کننده نحوه ایجاد یک تابع انرژی کلی ψ از تک تک اجزای سیستم می‌باشد:

$$\psi(\phi) = \prod_i \psi_i(\phi_i) \quad (4.3)$$

کمینه‌سازی لگاریتم تابع $\psi(\phi)$ منجر به ایجاد یک مسئله غیرخطی معادل می‌شود که مسئله بهینه‌سازی مورد نظر را مشخص می‌کند.

۲.۳.۱.۳ گراف عامل پیشنهادی برای کالیبراسیون و موقعیت‌یابی به صورت همزمان

همانطور که بیان شد، استفاده از گراف‌های عامل در موقعیت‌یابی ربات‌ها مزایای متعددی دارد. یکی از مزایای اصلی این است که گراف عامل می‌تواند به طور مؤثری اطلاعات نامطمئن را مدیریت کرده و تخمین‌های دقیق‌تری ارائه دهد. همچنین، این روش به دلیل ساختار گرافی خود، قابلیت انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری بالایی دارد، به طوری که می‌توان به راحتی اندازه‌گیری‌های جدید را به گراف اضافه کرده و تخمین‌ها را به‌روزرسانی کرد. در مسئله‌ی موقعیت‌یابی ربات‌ها، هدف اصلی تخمین دقیق موقعیت و جهت ربات در محیط است. برای این منظور، از اطلاعات مختلفی مانند داده‌های حسگرها، اندازه‌گیری‌های فاصله و داده‌های اینرسی استفاده می‌شود. گراف عامل این اطلاعات را به شکلی یکپارچه و هماهنگ ترکیب می‌کند.

برای مدل‌سازی مسئله موقعیت‌یابی با گراف عامل، ابتدا باید متغیرهای حالت ربات و محدودیت‌های مرتبط با آنها تعریف شوند. متغیرهای حالت می‌توانند شامل موقعیت و جهت پنجه ربات در نقاط مختلف زمانی نسبت به یک چارچوب پایه مشخص باشند. برای تعریف این متغیرهای حالت در زمان i با کمک ماتریس انتقال پنجه ربات در فضای $SE(3)$ به صورت زیر خواهد بود:

$$X_i = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & \mathbf{t}_i \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

که $X_i^{4 \times 4}$ بیانگر ماتریس انتقال شامل ماتریس چرخش $\mathbf{R}_i^{3 \times 3}$ و بردار انتقال $\mathbf{t}_i^{3 \times 1}$ نسبت به چارچوب پایه می‌باشد. علاوه بر تعیین چارچوب پایه در حل مسئله موقعیت‌یابی، محدودیت‌ها نیز می‌توانند شامل اندازه‌گیری‌های حسگرهای متفاوت باشد. ما در این فرمول بندی حسگر اندازه‌گیری‌های اینرسی^۱ و یک حسگر فاصله‌پیمایی چشمی^۲ را به عنوان داده‌های اندازه‌گیری سیستم با فرکانس‌های متفاوت در نظر می‌گیریم.

ادامه رو بده چت جی پی تی شکل — نشان دهنده گراف عاملی است که برای حل این مسئله موقعیت‌یابی با فرض‌های در نظر گرفته شده می‌توان ارائه کرد. دایره‌ها نشان دهنده متغیرهای مسئله هستند که در اینجا موقعیت ربات می‌باشند که آن را با ماتریس

X_i در زمان i نمایش می‌دهد. مربع‌های رنگی نشان دهنده محدودیت‌ها و داده‌های حسگری می‌باشند که با گذر زمان این اطلاعات به سیستم وارد می‌شوند و زنجیره موقعیت ربات را نیز امتداد می‌دهند. چارچوب پایه تعیین شده که می‌تواند نقطه شروع و یا نقطه استراحت ربات باشد که توسط یک عامل واحد^۳ (در اینجا مربع قرمز رنگ)، موقعیت‌یابی ربات را مقید می‌کند. همچنین داده‌های حسگری با توجه به فرکانس داده بردای آنها

می‌توانند به صورت عامل‌های دودویی که بین دو یا چند متغیر قیدی را ایجاد می‌کنند، وارد مسئله شوند. در این گراف، عامل‌های مشخص شده با رنگ سبز نشان‌دهنده اندازه‌گیری‌های حسگر اینرسی و همچنین اطلاعات حسگر فاصله‌پیمایی چشمی با عامل‌هایی به رنگ آبی وارد مسئله می‌شوند. با توجه به نرخ اضافه شدن این اطلاعات به سیستم می‌توان دریافت که فرکانس داده برداری از حسگر اینرسی دو برابر حسگر فاصله‌پیمایی است.

آنچه در این گراف باعث حلی یکپارچه و استفاده از تمامی اطلاعات مسئله می‌شود، زنجیره‌ای است که میان متغیرهای مسئله ایجاد شده است. با دریافت هر داده جدید از حسگر، یک متغیر موقعیت جدید برای ربات ایجاد می‌شود که حل مسئله بهینه‌سازی برای پیدا کردن این متغیر منجر به به روزرسانی تمامی پنجره به صورت یکجا می‌شود که حلی ارزشمند را برای یک مسئله تنگ ایجاد می‌کند. آنچه در این قسمت مورد نظر است تعریف پایه یک مسئله موقعیت یابی برای ربات می‌باشد. گراف‌های متنوع و فرمول‌بندی شده برای اهداف خاص‌تر در [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] قابل مطالعه هستند.

تا اینجا دیدیم تاثیر فکتور گراف و توانایش برای ادغام سنسور، حالا می‌خواهیم قيود سینماتیکی را به عنوان داده‌ای وارد مسئله کنیم که بسیار راه‌گشا خواهد شد. نه تنها باعث افزایش دقت می‌شود بلکه کالیبراسیون روهم حل می‌کند.

۴.۱.۳ انتخاب ربات مناسب جهت توسعه الگوریتم

ربات نمونه انتخاب شده برای ارائه این فرمول‌بندی، یک ربات چهار کابلی فروتحریک آسان نصب می‌باشد. در این فصل حل کامل مسئله موقعیت یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان برای یک ربات کابلی فروتحریک با در نظر گرفتن فرض اساسی صلب بودن کابل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. علت انتخاب این نوع ربات آسان نصب به عنوان موضوع مورد بررسی، قابلیت استفاده زیاد آنها در کاربردهای متنوع رباتیکی می‌باشد به شرطی که هر بار پس از نصب در هر محیط دلخواه فرآیند کالیبراسیون بدون زمان برب و با کمترین زحمت انجام شود. فرمول‌بندی انجام شده برای این ربات به نحوی است که منجر به یک کالیبراسیون خودکار در کنار موقعیت یابی تنها با همان حسگرهایی که ربات برای موقعیت یابی تعبیه شده است بدون زحمت اضافی برای کاربر انجام می‌شود. نتیجه این رویکرد علاوه بر افزایش دقت نهایی این فرآیندها، مفهومی حقیقی‌تر به آسان نصب بودن به این دسته از ربات‌های کابلی می‌بخشد.

صلب بودن کابل‌ها در حل این مسئله منجر می‌شود استفاده از این الگوریتم برای ربات‌هایی امکان‌پذیر باشد که نسبت جرم پنجه ربات به جرم کابل‌ها زیاد باشد به عبارتی دیگر میزان شکم‌دهی کابل‌ها قابل صرف نظر باشد. بزرگ شدن فضای کاری این ربات برای محیط‌هایی همچون یک استودیو فوتبال باعث ایجاد شکم

دهی غیر قابل چشم پوشی می شود. بنابراین نیاز است فرمول بندی جدیدی ارائه شود که این شکم دهی را به خوبی مدل سازی کند. تا کنون تحقیقات زیادی برای توسعه این مدل انجام شده است و نتایج خوبی را برای این مدل سازی ارائه کرده اند. فرمول بندی های ارائه شده برای مدل بر مبنای توزیع نیرو در کابل ها می باشد که دارای پیچیدگی زیادی می باشند. به عبارتی افزودن این ویژگی کابل برای کالیبراسیون و موقعیت یابی یک ربات کابلی ضروری می باشد در حالی که میزان پیچیدگی حل مسئله به اندازه ای زیاد می شود که تا کنون برای محیط های بزرگ و کابل های شکم دار این موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است.

در ادامه این فصل، ابتدا فرمول بندی این مسئله برای یک ربات کابلی که کابل های آن صلب فرض می شود و حل می شود. در فصل آینده سپس با بزرگ کردن ابعاد ربات مسئله پیچیده ای را تعریف و فرمول بندی خواهیم کرد و سپس با گسترش دادن این رویکرد، مسئله جدید ایجاد شده که حل آن در روش های مرسوم کاری بسیار دشوار خواهد بود را حل خواهیم کرد.

۵.۱.۳ توسعه گراف عامل برای یک ربات چهار کابلی فروتحریک با فرض کابل صلب

فصل ۴

موقعیت‌یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان یک ربات کابلی با در نظر گرفتن شکم دهی کابل‌ها

در فصل قبل کالیبراسیون و موقعیت‌یابی ربات کابلی با فرض در نظر گرفتن کابل‌های ربات به صورت جسمی صلب مورد بررسی قرار گرفت. علی‌رغم اینکه در نظر گرفتن این فرض موجب کاهش یافتن بار محاسباتی و ساده‌تر شدن مسئله می‌شود، این فرض تا زمانی صادق خواهد بود که مطابق معیار ارایه شده در [۱۵] نسبت جرم کابل به جرم مجری نهایی ربات قابل صرف نظر باشد. به عبارتی دیگر

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای آینده

باید بیان کنیم به چه چیزایی رسیدیم و تلفیق‌های ما برای چه چیزی مناسب است. و چرا جذاب و خوب و مناسب و مفید است. اینها باید با زبان نتیجه‌گیری بیان شوند. نباید بازگویی کنیم مثل یک ربات.

مراجع

- [1] Hall, David L and Llinas, James. An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1):6–23, 1997.
- [2] Elatta, AY, Gen, Li Pei, Zhi, Fan Liang, Daoyuan, Yu, and Fei, Luo. An overview of robot calibration. *Information Technology Journal*, 3(1):74–78, 2004.
- [3] Idá, Edoardo, Merlet, Jean-Pierre, and Carricato, Marco. Automatic self-calibration of suspended under-actuated cable-driven parallel robot using incremental measurements. in *Cable-Driven Parallel Robots: Proceedings of the 4th International Conference on Cable-Driven Parallel Robots 4*, pp. 333–344. Springer, 2019.
- [4] Idà, Edoardo, Briot, Sébastien, and Carricato, Marco. Identification of the inertial parameters of underactuated cable-driven parallel robots. *Mechanism and Machine Theory*, 167:104504, 2022.
- [5] Ida, Edoardo. Dynamics of undeactuated cable-driven parallel robots. 2021.
- [6] Chang, Lubin, Li, Kailong, and Hu, Baiqing. Huber’s m-estimation-based process uncertainty robust filter for integrated ins/gps. *IEEE Sensors Journal*, 15(6):3367–3374, 2015.
- [7] Dellaert, Frank, Kaess, Michael, et al. Factor graphs for robot perception. *Foundations and Trends® in Robotics*, 6(1-2):1–139, 2017.
- [8] Ahmad, Aamir, Tipaldi, Gian Diego, Lima, Pedro, and Burgard, Wolfram. Cooperative robot localization and target tracking based on least squares minimization. in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5696–5701. IEEE, 2013.
- [9] Guibas, Leonidas J, Motwani, Rajeev, and Raghavan, Prabhakar. The robot localization problem. *SIAM Journal on Computing*, 26(4):1120–1138, 1997.
- [10] Aragues, Rosario, Carlone, Luca, Calafiore, G, and Sagues, C. Multi-agent localization from noisy relative pose measurements. in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 364–369. IEEE, 2011.

- [11] Panigrahi, Prabin Kumar and Bisoy, Sukant Kishoro. Localization strategies for autonomous mobile robots: A review. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(8):6019–6039, 2022.
- [12] Yang, Lyuxiao, Wu, Nan, Li, Bin, Yuan, Weijie, and Hanzo, Lajos. Indoor localization based on factor graphs: A unified framework. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(5):4353–4366, 2022.
- [13] Song, Yang and Hsu, Li-Ta. Tightly coupled integrated navigation system via factor graph for uav indoor localization. *Aerospace Science and Technology*, 108:106370, 2021.
- [14] Leitingner, Erik, Meyer, Florian, Tufvesson, Fredrik, and Witrisal, Klaus. Factor graph based simultaneous localization and mapping using multipath channel information. in *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pp. 652–658. IEEE, 2017.
- [15] Pott, Andreas and Bruckmann, Tobias. *Cable-driven parallel robots*. Springer, 2013.

پیوست آ

آشنایی سریع با برخی دستورات لاتک

پیوست ب

جدول، نمودار و الگوریتم در لاتک

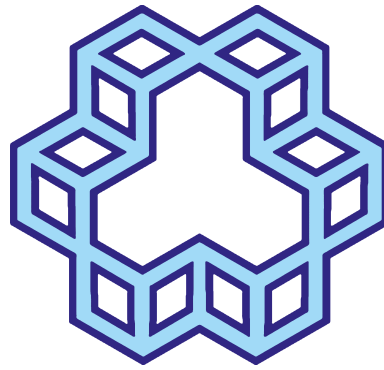
پیوست پ

مراجع، واژه‌نامه و حاشیه‌نویسی

Abstract

This thesis studies on writing projects, theses and dissertations using kntu-thesis class.
It ...

Keywords Writing Thesis, Template, L^AT_EX, X_YY Persian



K. N. Toosi University of Technology
Faculty of ...- ... Group

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in ... Engineering

Prepared template for writing projects, theses, and dissertations of K. N. Toosi university of technology

By:
Mohammad Sina Allahkaram

Supervisors:
First Supervisor and Second Supervisor

Advisors:
First Advisor and Second Advisor

Winter 2023