



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

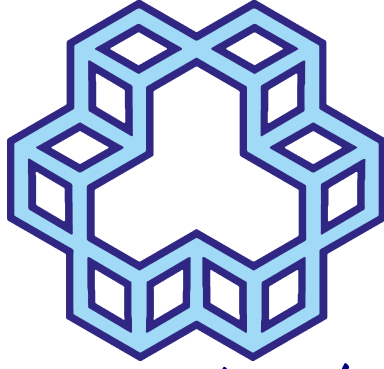
محمد رضا دیندارلو

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
۵	فصل ۳: رویکرد گراف مبنا موقعیت‌یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان
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 موقعیت‌یابی به صورت
۱۲	همزمان

۴.۱.۳ نتیجه‌گیری . . . . . ۱۵

#### فصل ۴: پیاده سازی رویکرد گراف مبنا جهت موقعیت‌یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان

برای ربات کابلی . . . . . ۱۷

۱.۴ انتخاب ربات مناسب جهت توسعه الگوریتم . . . . . ۱۷

۲.۴ توسعه گراف عامل برای یک ربات چهار کابلی با فرض کابل صلب . . . . . ۱۸

۱.۲.۴ معرفی ربات کابلی ARASCam . . . . . ۱۹

۲.۲.۴ بیان فرمول‌بندی مسئله و فرضیات . . . . . ۲۰

#### فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای آینده

۲۳

#### مراجع

۲۵

#### پیوست آ: آشنایی سریع با برخی دستورات لاتک

۲۷

#### پیوست ب: جدول، نمودار و الگوریتم در لاتک

۲۹

#### پیوست پ: مراجع، واژه‌نامه و حاشیه‌نویسی

۳۱

## فهرست تصاویر

۶ . . . . .	۱.۳
۱۳ . . . . .	۲.۳
۱۴ . . . . .	۳.۳
۱۵ . . . . .	۴.۳
۱۹ . . . . .	۱.۴

## 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

# رویکرد گراف مبنا موقعیتیابی و کالیبراسیون به صورت همزمان

### 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، هم‌ثبت کردن داده‌ها [۱] اولین گام اساسی است. به عبارت دیگر، حسگرها باید اندازه‌گیری‌های خود را در یک مختصات یکپارچه ارائه دهند. اهمیت هم‌ثبت 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 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





شکل ۱.۳

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 فرمول‌بندی مناسب مسئله مطرح شده در شکل ۱.۳ خواهیم داشت:

$$\tilde{\phi} = \arg \min_{\phi} \sum_{n=1}^N \text{error}_i[n] = \arg \min_{\phi} \sum_{n=1}^N \|F_i(\mathbf{q}[n], \phi) - X_i[n]\|_{\Sigma}^2 \quad (۱.۳)$$

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

با نگاهی دیگر به دیاگرام مطرح شده در ۱.۳ و همچنین معادله ۱.۳، مشاهده می شود که افزایش دقت اندازه گیری و همچنین برآورده کردن تمامی قیود مدل می تواند 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 می شود، معرفی می شوند. ترکیب این حسگرها باید به گونه ای 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 می تواند منجر به حل پیچیده تری از مسئله شود. در ادامه، نگاهی به فرمول بندی مسئله کالیبراسیون با در نظر گرفتن این ترکیب ها 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 می باشد. فرمول بندی ساختاری که به صورت همزمان از چندین حسگر در راستای ایجاد تابع هزینه استفاده

نماید می تواند 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 می باشد.

### ۲.۱.۱.۳ ترکیب شبه اندازه گیری ها

اندازه گیری های حسگری تنها منبع اطلاعات برای حل مسئله نیستند. ساختار ربات و توجه به هندسه آن برای حل مسئله تعریف شده می تواند مفید واقع شود. برای مثال فاصله های بین برخی از نقاط می تواند با توجه به ساختار ربات می تواند ویژگی هایی نسبی و یا مطلق داشته باشند. این اطلاعات با عنوان داده های شبه اندازه گیری شناخته می شوند. این دسته از اطلاعات که از قبل مشخص هستند، می توانند به صورت قیود به مسئله اضافه شوند. بنابراین مسئله کلی بهینه سازی کالیبراسیون ۲.۳ در حضور این قیود به صورت زیر باز نویسی می شود.

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

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

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

### ۲.۱.۳ روش های مرسوم مسئله موقعیت یابی

موقعیت یابی<sup>۱</sup> ربات فرآیند تعیین مکان ربات نسبت به محیط اطراف آن می باشد. دانستن موقعیت دقیق ربات در محیط، پیش نیازی اساسی برای اتخاذ تصمیمات صحیح و حرکت های بعدی مؤثر است. بدون اطلاعات موقعیتی دقیق، ربات نمی تواند مسیریابی<sup>۲</sup> و یا ردیابی<sup>۳</sup> مناسبی را داشته باشد و ممکن است با موانع برخورد کند یا مسیر بهینه ای را طی نکند [۸]. علاوه بر این، سیستم های کنترلی ربات ها نیازمند اطلاعات دقیق و لحظه ای

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 مسافت پیمایی<sup>۱</sup>، موقعیت‌یابی جهانی<sup>۲</sup> و مکان‌یابی و نقشه‌یابی به صورت همزمان<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> نیز شناخته می‌شوند، در دو دهه اخیر فعالیت‌های زیادی را به خود اختصاص داده‌اند. پایه این روش‌ها بر قانون بیز<sup>۵</sup> بنا نهاده شده است. مقاله [۱۱] دسته‌بندی جامعی از روش‌های فیلتر مبنا برای تخمین موقعیت ارائه کرده است. از میان روش‌های بیان شده، کالمن فیلتر و فیلترهای ذرات<sup>۶</sup> 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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<sup>۱</sup> تا برنامه‌ریزی حرکت<sup>۲</sup>، 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  $\phi_i$  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  $\psi_i$  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  $\psi$  از تک تک اجزای سیستم می‌باشد:

$$\psi(\phi) = \prod_i \psi_i(\phi_i) \quad (۴.۳)$$

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

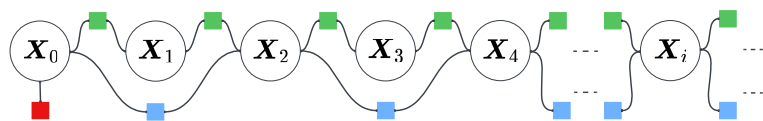
همانطور که بیان شد، استفاده از گراف‌های عامل در موقعیتیابی ربات‌ها مزایای متعددی دارد. یکی از مزایای اصلی این است که گراف عامل می‌تواند به طور مؤثری اطلاعات نامطمئن را مدیریت کرده و تخمین‌های دقیق‌تری ارائه دهد. همچنین، این روش به دلیل ساختار گرافی خود، قابلیت انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری بالایی دارد، 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<sup>۱</sup> و یک حسگر فاصله‌پیمایی چشمی<sup>۲</sup> را به عنوان داده‌های اندازه‌گیری سیستم با فرکانس‌های متفاوت در نظر می‌گیریم.

شکل ۲.۳ نشان‌دهنده گراف عاملی است که برای حل مسئله موقعیتیابی با فرضیات در نظر گرفته شده می‌توان ارائه کرد. دایره‌ها نشان‌دهنده متغیرهای مسئله هستند که در اینجا موقعیت ربات می‌باشند و آن‌ها را با ماتریس  $X_i$  در زمان  $i$  نمایش می‌دهد. مربع‌های رنگی نشان‌دهنده محدودیت‌ها و داده‌های حسگری هستند که با گذر زمان به سیستم وارد می‌شوند و زنجیره موقعیت ربات را نیز امتداد می‌دهند. چارچوب پایه تعیین شده که می‌تواند نقطه شروع یا نقطه استراحت ربات باشد، توسط یک عامل واحد<sup>۳</sup> (در اینجا مربع قرمز رنگ)، موقعیتیابی ربات را مقید می‌کند. همچنین داده‌های حسگری با توجه به فرکانس داده‌برداری آن‌ها می‌توانند به صورت عامل‌های دودویی که بین دو یا چند متغیر قیدی را ایجاد می‌کنند، وارد مسئله شوند. در این گراف،



شکل ۲.۳

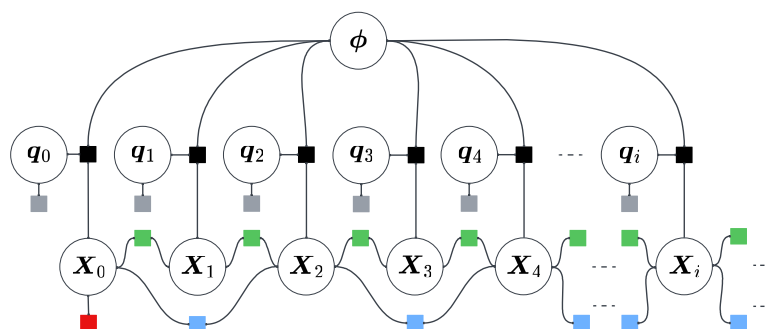
عامل‌های مشخص شده با رنگ سبز نشان‌دهنده اندازه‌گیری‌های حسگر اینرسی و همچنین اطلاعات حسگر فاصله‌پیمایی چشمی با عامل‌هایی به رنگ آبی وارد مسئله می‌شوند. با توجه به نرخ اضافه شدن این اطلاعات به سیستم، می‌توان دریافت که فرکانس داده‌برداری از حسگر اینرسی دو برابر حسگر فاصله‌پیمایی است.

در این گراف، آنچه باعث حل یکپارچه و استفاده بهینه 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 به‌روز رسانی تمامی گره‌ها به صورت یکجا می‌شود و این باعث ایجاد یک راه‌حل ارزشمند برای یک مسئله تنک می‌گردد. در این بخش، هدف تعریف پایه‌ای یک مسئله موقعیت‌یابی برای ربات است. گراف‌های متنوع و فرمول‌بندی‌شده برای اهداف خاص‌تر در [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] قابل مطالعه هستند.

افزودن حسگرهای جدید با ایجاد گره‌های عامل با مدل نویزهای مناسب در فواصل زمانی منظم، می‌تواند نتیجه موقعیت‌یابی را بهبود بخشد. این ترکیب حسگرها می‌تواند در فواصل زمانی‌ای که حسگرها به دلیل شرایط محیطی از سیستم خارج می‌شوند، از توقف موقعیت‌یابی جلوگیری کند. به عنوان مثال، الگوریتم‌هایی که از داده‌های دوربین استفاده می‌کنند، زمانی که ویژگی‌های محیط برای پردازش تصاویر نامناسب است یا ربات وارد محدوده‌ای تاریک می‌شود، قادر به ارائه نتایج مناسبی نیستند. به عنوان نمونه‌ای دیگر، زمانی که سیستم موقعیت‌یابی جهانی<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد، مکان‌هایی همچون تونل‌ها می‌توانند این سیستم جمع‌آوری داده را با مشکل مواجه کنند. بدین ترتیب، با خروج برخی از حسگرها موقعیت‌یابی با استفاده از داده‌های دیگر انجام می‌شود و با ورود مجدد حسگرها، نتایج رو به بهبود خواهند رفت.

آنچه تا بدین جای حل مسئله مشاهده شده است، توانایی بالای الگوریتم گراف عامل در ایجاد مسئله‌ای انعطاف‌پذیر بوده است. مقیدسازی این مسئله می‌تواند از قیود فضای کار ربات فراتر رفته و مسئله را در فضای مفصلی و ساختار سینماتیک ربات نیز مقید کند. وجود پارامترهای سینماتیکی در فرمول‌بندی می‌تواند با در نظر گرفتن آنها به عنوان متغیرهایی که همواره در ربات ثابت هستند یا متغیرهایی که با گذر زمان تغییر می‌کنند، به عنوان پارامترهای کالیبراسیون، مقادیر بهینه آنها را به دست آورد. به عبارتی، در حالی که مسئله موقعیت‌یابی در حال انجام است، مسئله کالیبراسیون نیز حل شود. همچنین اضافه شدن این قیود سینماتیکی می‌تواند موقعیت‌یابی ربات را بهبود بخشد.





شکل ۳.۳

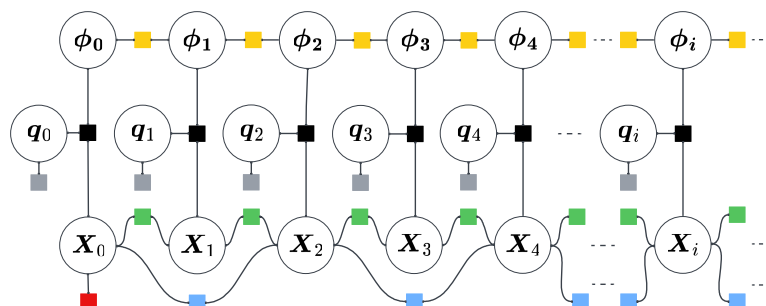
مطابق فرمول‌بندی‌های مرسوم ارائه شده، معادلات سینماتیک نگاشت‌های غیرخطی بین فضای مفصل و فضای کار ربات ایجاد می‌شوند. بدین ترتیب:

$$X = FK(q, \phi), \quad q = IK(X, \phi) \quad (۶.۳)$$

که  $X$  موقعیت ربات در فضای کار و  $q$  بردار مقدار زاویه‌ای/طولی مفصل‌های ربات هستند. در این معادله  $\phi$  بردار پارامترهای سینماتیکی ربات است که به هندسه ساختاری ربات مربوط می‌شود.

در ادامه، با فرض آنکه ربات مسیری تصادفی را در فضای کاری خود طی می‌کند و همچنین داده‌های سنسوری در هر دو فضای معرفی شده در حال جمع‌آوری هستند، قصد داریم گراف ۲.۳ را به گونه‌ای بسط دهیم که کالیبراسیون سینماتیکی ربات در کنار موقعیتیابی در یک گراف یکپارچه حل شود. برای این کار از قیود سینماتیکی ۶.۳ استفاده کرده و آنها را به صورت عامل به مسئله می‌افزاییم. ابتدا فرض کالیبراسیون را بر ثابت بودن پارامترهای سینماتیکی و عدم تغییر آنها در طول زمان می‌گذاریم. شکل ۳.۳ بیانگر یک گراف برای حل این مسئله با این فرض بیان شده می‌باشد. در این گراف، قسمت موقعیتیابی همانند آنچه پیشتر بیان شد می‌باشد. همچنین عامل‌های مشخص شده با مربع‌های سیاه رنگ بیانگر روابط سینماتیکی ربات هستند که تابعی از مقادیر متغیرهای مفصل، موقعیت ربات در فضای کار و بردار پارامترهای سینماتیکی ربات  $\phi$  می‌باشند. همچنین عامل‌های خاکستری رنگ بیانگر مقادیر اندازه‌گیری شده در فضای مفصل ربات از حسگرهای آن می‌باشند.

شکل ۴.۳ نشان دهنده گراف قابل استفاده دیگری می‌باشد که عاری از فرض ثابت بودن پارامترهای کالیبراسیون سینماتیکی بوده و این پارامترها با گذر زمان تغییر می‌کند و در مسائل زمان واقعی چالش برانگیز هستند. عامل‌های زرد ایجاد شده در بین پارامترهای کالیبراسیون در زمان‌های متوالی قیودی هستند که از نوسانات و تغییرات ناگهانی و زیاد این پارامترهای جلوگیری کنند. وجود این قید از آنجایی است که در دنیای واقع انتظار بر تغییر آهسته و منطقی این پارامترهای هندسی می‌باشد. با این بیان صورت گرفته، افزودن قیود متفاوت به مسئله بدون



شکل ۴.۳

نیاز به تغییر فرمول‌بندی دیگر بخش‌ها قابل انجام خواهد بود. در نهایت، این گراف‌های عامل می‌توانند با استفاده از حل‌کننده‌های افزایشی که کتابخانه GTSAM در اختیار ما قرار می‌دهد، به صورت زمان واقعی حل شوند.

### ۴.۱.۳ نتیجه‌گیری

در این فصل، رویکرد گراف مبنا برای حل همزمان مسئله کالیبراسیون و موقعیت‌یابی ربات‌ها مورد بررسی قرار گرفت. این روش با استفاده از گراف‌های عامل، امکان مدیریت بهینه داده‌ها و افزایش دقت محاسبات را فراهم می‌آورد و به راحتی قابل گسترش با قیود و حسگرهای جدید است.

ابتدا مروری بر روش‌های مرسوم موقعیت‌یابی و کالیبراسیون انجام شد. این روش‌ها، اگرچه ساده و سریع هستند، اما نیاز به بازتعریف مکرر فرمول‌بندی‌ها و خطی‌سازی‌های پیچیده دارند که باعث کاهش دقت و افزایش پیچیدگی محاسبات می‌شود. سپس، رویکردی جدید، بر مبنای گراف‌ها، برای حل این مسئله با توانایی رفع معایب روش‌های مرسوم، مطرح شد.

در معرفی این رویکرد گراف مبنا، مفاهیم پایه‌ای گراف‌های عامل و کاربرد آنها در مدل‌سازی روابط پیچیده بین متغیرها و قیود بیان شد. سپس، با استفاده از معادلات سینماتیکی ربات و داده‌های حسگری، گراف‌های عامل یکپارچه‌ای برای حل مسئله طراحی گردید. این گراف‌ها با توانایی فرمول‌بندی همزمان کالیبراسیون و موقعیت‌یابی نتایج مطلوبی در بهبود دقت و کارایی ربات را به دست می‌آورند.



## فصل ۴

# پیاده سازی رویکرد گراف مبنا جهت موقعیت یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان برای ربات کابلی

در فصل قبل رویکردی بر مبنای ساختار گراف برای انجام مسئله کالیبراسیون و موقعیت یابی ربات به صورت زمان واقعی ارائه شد. ویژگی هایی برای این رویکرد ارائه شد که حل این مسئله پیچیده و پرکاربرد رباتیکی را تسهیل کرده و باعث بهبود نتایج بهینه سازی شده است. در این فصل پیاده سازی کاملی از گراف های معرفی شده بر روی یک ربات خواهیم داشت. سعی بر آن بوده که ربات انتخاب شده برای این پیاده سازی از نظر سینماتیک و دینامیک دارای معادلاتی نسبتاً پیچیده باشد تا قدرت و سرعت این الگوریتم را مورد بررسی کافی قرار دهیم.

### ۱.۴ انتخاب ربات مناسب جهت توسعه الگوریتم

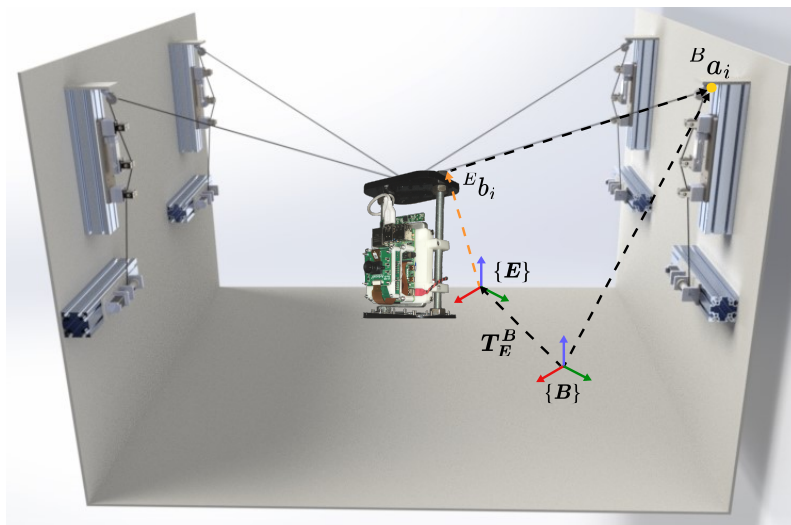
ربات نمونه انتخاب شده برای ارائه این فرمول بندی، یک ربات چهار کابلی فروتحریک آسان نصب می باشد. علت انتخاب این نوع ربات آسان نصب به عنوان موضوع مورد بررسی، قابلیت استفاده زیاد آنها در کارکردهای متنوع رباتیکی می باشد، به شرطی که هر بار پس از نصب در هر محیط دلخواه فرآیند کالیبراسیون بدون زمان بر و با کمترین زحمت انجام شود. فرمول بندی 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 می شود. نتیجه این رویکرد علاوه بر افزایش دقت نهایی این فرآیندها، مفهومی حقیقی تر به آسان نصب بودن به این دسته از ربات های کابلی می بخشد.

آنچه تا کنون بیشتر مورد بررسی قرار گرفته حل مسئله کالیبراسیون برای ربات هایی است که کابل آنها به عنوان جسمی صلب در نظر گرفته می شود. این فرض اساسی حل مسئله را آسان تر می کند. در ادامه ی این فصل ما با استفاده از رویکرد بیان شده، کالیبراسیون و موقعیت یابی را برای یک ربات کابلی با فرض یاد شده انجام می دهیم و نتایج را مورد بررسی قرار می دهیم. علی رغم اینکه این فرض حل مسئله را تا نگاهی ساده تر می کند، زمانی که نسبت جرم پنجه ربات به جرم کابل ها زیاد شود، این فرض قابل قبول نخواهد بود. نشان خواهیم داد که با افزایش این میزان شکم دهی که معمولاً در ربات هایی با ابعاد بزرگتر دیده می شود، کالیبراسیون و موقعیت یابی با مشکل مواجه خواهد شد.

تاکنون تحقیقات زیادی بر روی مدل سازی کابل های شکم دار انجام شده است که نتایج ارائه شده برای این مدل سازی ها از دقت بالایی برخوردار بوده اند. ما نیز برای حل مشکل کالیبراسیون و موقعیت یابی خود نیاز به وارد کردن این قیدها به مسئله هستیم. پیچیدگی های زیاد این مدل ها باعث شده است که کارهای اخیر در این حوزه نسبت به حل مسئله با این معادلات، از شبکه های عمیق برای این مدل سازی ها استفاده کنند که خود دارای مشکلاتی بوده و از دقت و اطمینان کافی بهره مند نیستند. روشی که ما برای حل این مشکل ارائه خواهیم کرد، مقیدسازی همان مسئله حل شده برای کابل های صلب بوده است. در انتها باری دیگر با حل این مسئله خواهیم دید که تمام آنچه که به عنوان مزیت های این رویکرد بیان کرده ایم در حل مسئله نمود پیدا می کنند و با سرعت و قدرت بالایی مسئله کالیبراسیون و موقعیت یابی به صورت همزمان برای این نوع ربات ها، بدون فرض صلب بودن کابل ها، که حل آنها در روش های مرسوم کاری بس دشوار بوده است، را حل می کنند.

## ۲.۴ توسعه گراف عامل برای یک ربات چهار کابلی با فرض کابل صلب

در این بخش، انجام فرآیند کالیبراسیون و موقعیت یابی به صورت همزمان برای یک ربات کابلی با در نظر گرفتن فرض صلب بودن کابل ها با رویکرد گراف-مبنا انجام می شود. برای این فرآیند، ابتدا ربات چهار کابلی ARASCam معرفی می گردد. سپس فرضیاتی بر روی ساختار ربات ایجاد شده و با در نظر گرفتن این فرضیات، فرمول بندی جامعی برای ربات ارائه می شود. در نهایت، از این فرمول بندی برای پیاده سازی گراف عامل معرفی شده استفاده می شود و نتایج مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۱.۴

#### ۱.۲.۴ معرفی ربات کابلی ARASCam

ربات ARASCam که در گروه تحقیقاتی رباتیک ARAS توسعه یافته است، یک ربات معلق فروتحریک موازی با کابل های محرک و با شش درجه آزادی می باشد. شکل ۱.۴ نسخه اولیه این ربات که برای یک فضای کاری نسبتاً کوچک آزمایشگاهی طراحی شده است را نشان می دهد. همانطور که در تصویر مشاهده می شود، پنجه ربات که مجهز به یک دوربین تعبیه شده بر روی پردازنده Raspberry PI می باشد، توسط چهار کابل در فضا معلق شده است.  $B$  بیانگر دستگاه مختصات پایه و همچنین  $E$  نشانه دهنده دستگاه مختصات پنجه ربات می باشد.  $i$  امین کابل در نقطه  $Bb_i$  در مختصات پنجه به ربات و در نقطه  $Ea_i$  در مختصات پایه به پولی متناظر آن متصل می شود. ماتریس انتقال از دستگاه مختصات پایه به پنجه با  $T_E^B$  نشان داده شده است.

در این ربات، کابل ها با استفاده از یک سیستم مکانیکی درام جمع و باز می شوند. هر یک از کابل ها پس از خروج از درام، توسط مکانیزم مکانیکی از روی سنسور نیرو عبور کرده و سپس به پولی منتقل می شود. در نهایت، از نقطه مشخصی در پولی به ربات متصل می شود. همچنین از آنجایی که در این ربات نسبت جرم پنجه به جرم کابل های ربات مقدار زیادی است، می توان از شکم دهی کابل های آن صرف نظر کرد و کابل های آن را به عنوان اجسام صلب مدل کرد.

## ۲.۲.۴ بیان فرمول بندی مسئله و فرضیات

برای فرمول بندی مسئله از هندسه بیان شده در شکل ۱.۴ استفاده می کنیم. برای یک ربات با کابل های صلب، مدل اندازه گیری طول کابل  $\hat{z}_i$  با استفاده از حسگر انکودر روی ربات برای نمونه  $k$ ، به صورت زیر می تواند فرمول بندی شود:

$$l_i^*[k] \triangleq \|R_E^B b_i + {}^B t_E^B - {}^B a_i\|^2 \quad (۱.۴)$$

$$\hat{z}_i[k] = l_i^*[k] + l_i^o + w_{\text{enc}}[k]$$

که در آن  $(R_E^B, {}^B t_E^B)$  نشان دهنده ماتریس جهت گیری و بردار انتقال پنجه در دستگاه مختصات پایه،  $l_i^o$  نشان دهنده مقدار جابجایی اولیه انکودر، و  $w_{\text{enc}}[k]$  نشان دهنده نویز اندازه گیری طول است. اگر انعطاف پذیری کابل نیز در نظر گرفته شود، نیروی  $T_i$  در کابل، طول اندازه گیری شده کابل را به صورت زیر تغییر می دهد:

$$\hat{z}_i[k] = \left(1 - \frac{T_i[k] + w_T[k]}{EA}\right) l_i^*[k] + l_i^o + w_{\text{enc}}[k] \quad (۲.۴)$$

که در آن  $E$  مدول یانگ کابل،  $A$  سطح مقطع کابل، و  $w_T[k]$  نویز اندازه گیری نیرو است. معادله ۲.۴ بیان می کند که اگر نیروی کابل صفر باشد،  $T_i[k] = 0$ ، طول اندازه گیری شده توسط انکودر با فاصله واقعی بین  $a_i$  و  $b_i$  مطابقت دارد. با این حال، در پیکربندی ای که موتور در محل قفل شده و انکودر مقدار ثابتی را می خواند، جابجایی طول به دلیل کشیدگی توسط انکودر دیده نمی شود اما نسخه مقیاس شده وابسته به نیرو از فاصله واقعی  $l_i^*[k]$  اندازه گیری می شود. با افزایش  $E$  (کابل های سفت)، اهمیت این مقیاس بندی وابسته به نیرو به صفر کاهش می یابد و معادله ۲.۴ به معادله ۱.۴ ساده می شود. در مورد ربات با کابل های انعطاف پذیر، فرض می کنیم که حسگرهای نیروی کابل در نزدیکی عملگرها قرار گرفته اند. با این حال، برای بسیاری از کاربردها که به ربات های کابلی با اندازه متوسط نیاز دارند، انعطاف پذیری کابل ممکن است با انتخاب مناسب کابل ها قابل صرف نظر باشد.

علاوه بر فرمول بندی سینماتیک، مطابق شکل ۱.۴ ربات با یک دوربین روی انتهای ربات، متصل به پنجه، تجهیز شده است. در اینجا ما تصاویر دریافتی از این دوربین را با استفاده از الگوریتم SVO برای تولید اندازه گیری های

موقعیت ربات در فضای  $SE(3)$  به سیستم وارد می کنیم که بدین ترتیب موقعیت یابی ربات انجام شود:

$$\Delta T_{k-1}^k = \begin{bmatrix} R_{k-1}^k & t_{k-1}^k \\ \mathbf{o} & s^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

در طول مرحله کالیبراسیون و موقعیت یابی با استفاده از این الگوریتم، فرض می کنیم محیط دارای نور خوب با بافت های غنی از ویژگی بوده و دوربین به آرامی حرکت می کند. مسئله کالیبراسیون و مکان یابی به تخمین مشترک موقعیت های ربات  $T_E^B[k]$ ، موقعیت های نقاط اتصال کابل ها به پولی های متناظر  $a_i$ ، طول های اولیه کابل ها  $l_i^\circ$  و مقیاس الگوریتم مسافت پیمایی  $s$  با استفاده از اندازه گیری های الگوریتم مسافت پیمایی  $\Delta T_{k-1}^k$ ، انکودرهای طول کابل  $z_i[k]$  و برای ربات ها با کابل های انعطاف پذیر، اندازه گیری های نیرو  $T_i$  کاهش می یابد. این به حداقل رسانی عدم تطابق مدل-اندازه گیری سینماتیک به صورت زیر ترجمه می شود:

$$\min_{a_i, l_{\circ i}, T_E^B[k], s} \sum_k \|h(a_i, l_{\circ i}, T_E^B[k], s) - z_i[k]\|^2$$

که مدل اندازه گیری،  $h(\cdot)$ ، به صورت زیر تعریف می شود:

$$h(a_i, l_{\circ i}, T_E^B[k], s) = s \left( 1 - \frac{\tau_i[k] + w_T[k]}{EA} \right) l_i^*[k] + l_{\circ i} + w_{enc}[k]$$





## 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









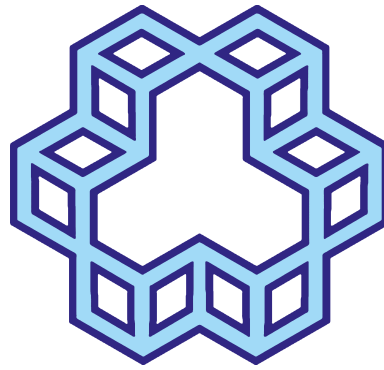
## Abstract

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

**Keywords** Writing Thesis, Template, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, X<sub>Y</sub>Y 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