



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

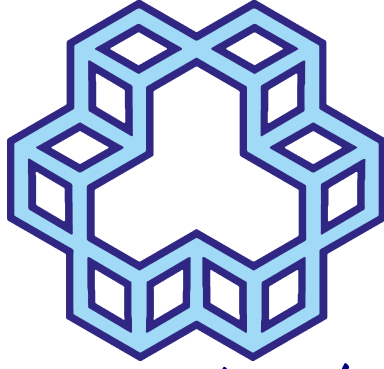
محمد رضا دیندارلو

استاد راهنما

دکتر حمید رضا 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

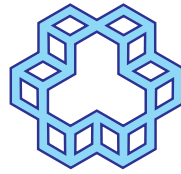
۲. استاد مشاور: دکتر فلیپ کاردو..... امضا

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.

محمدرضا دیندارلو

تابستان ۱۴۰۳



چکیده

واژگان کلیدی



# فهرست مطالب

ت	فهرست تصاویر
ث	فهرست جداول
ج	فهرست الگوریتم‌ها
ح	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	۲.۳ روش‌های مرسوم مسئله کالیبراسیون
۷	۱.۲.۳ ترکیب حسگرها
۸	۲.۲.۳ ترکیب شبه اندازه‌گیری‌ها
۸	۳.۳ روش‌های مرسوم مسئله موقعیت‌یابی
۱۰	۴.۳ رویکرد گراف مبنا برای حل مسئله کالیبراسیون و موقعیت‌یابی به صورت همزمان
۱۱	۱.۴.۳ بیان الگوریتم گراف عامل
۱۲	۲.۴.۳ گراف عامل پیشنهادی برای کالیبراسیون و موقعیت‌یابی به صورت همزمان
۱۷	۵.۳ نتیجه‌گیری

## فصل ۴: پیاده سازی رویکرد گراف مبنا جهت موقعیت یابی و کالیبراسیون همزمان برای ربات

کابلی صلب	۱۹
انتخاب ربات مناسب جهت توسعه الگوریتم	۱۹
توسعه گراف عامل برای یک ربات چهار کابلی با فرض کابل صلب	۲۰
معرفی ربات کابلی ARASCam	۱۰۲.۴
بیان فرمول بندی مسئله و فرضیات	۲۱
رویت پذیری	۳۰۲.۴
بهینه سازی پارامترها با استفاده از گراف های عاملی	۲۴
نتایج پیاده سازی	۴.۴
راه اندازی سیستم و فرضیات	۱۰۴.۴
کالیبراسیون خودکار بدون پارامترهای اولیه	۲۰۴.۴
ترکیب بینایی-سینماتیک و استفاده از گراف عامل معرفی شده	۲۷
انتشار عدم قطعیت	۴۰۴.۴
بحث و گفت و گو	۵۰۴.۴

## فصل ۵: پیاده سازی رویکرد گراف مبنا جهت مکان یابی و کالیبراسیون همزمان برای ربات

کابلی خم شده	۳۳
نمادها و تعاریف	۱۰۵
معادلات مدل کابل خم شده	۲۰۵
سینماتیک ربات	۳۰۵
گراف عامل کالیبراسیون و مکان یابی همزمان سینماتیک-ایستا	۳۸
عامل طول کابل خم شده	۱۰۴.۵
عامل مکان اتصال کابل به پولی	۲۰۴.۵
عامل اندازه گیری نیرو	۳۰۴.۵
عامل پیشین مکان	۴۰۴.۵
نتایج شبیه سازی	۵۰۵

۴۱ . . . . .	۱.۵.۵	صحت‌سنجی مدل
۴۳ . . . . .	۲.۵.۵	نتایج نهایی کالیبراسیون با گراف عامل توسعه داده‌شده
۴۵ . . . . .	۶.۵	بحث
۴۵ . . . . .	۱.۶.۵	اهمیت در نظر گرفتن اثر خم‌شدگی کابل
۴۵ . . . . .	۲.۶.۵	نکات مربوط به روش مقداردهی اولیه
۴۶ . . . . .	۷.۵	نتیجه‌گیری
۴۹	فصل ۶:	نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای آینده
۴۹ . . . . .	۱.۶	نتیجه‌گیری
۵۰ . . . . .	۲.۶	پیشنهادات برای آینده
۵۵		مراجع

## فهرست تصاویر

۶ . . . . .	۱.۳
۱۳ . . . . .	۲.۳
۱۴ . . . . .	۳.۳
۱۵ . . . . .	۴.۳
۱۶ . . . . .	۵.۳
۱۶ . . . . .	۶.۳
۲۱ . . . . . ARAS-CAM معلق	۱.۴
۲۴ . . . . . صلب	۲.۴
۳.۴	پالایش متوالی یک باور یکنواخت بر روی پارامترهای سینماتیکی از طریق الگوریتم مونت-کارلو
۲۷ . . . . .	۴.۴
۴.۴	راست: توزیع خطای پنجه قبل و بعد از بهبود پارامترها، چپ: خطای مکان‌یابی در دستگاه
۲۸ . . . . .	کارتزین
۲۹ . . . . .	۵.۴
۳۴ . . . . .	۱.۵
۳۸ . . . . .	۲.۵
۴۱ . . . . .	۳.۵
۴۲ . . . . .	۴.۵



## فهرست جداول

۱.۴	خطای مکان‌یابی با روش‌های مختلف (واحد متر)	۲۸
۲.۴	سازگاری آماری عدم قطعیت‌های تخمین زده شده	۳۰
۱.۵	صحت‌سنجی مدل	۴۲
۲.۵	نتایج میانگین خطای مطلق کالیبراسیون با استفاده از گراف عامل توسعه داده شده	۴۴



## 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.

## ۲.۳ 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 رویکرد های مرسوم، برای ایجاد فرمول بندی مناسب مسئله مطرح شده در شکل ۱.۳ خواهیم داشت:

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

در این معادله،  $\phi$  بردار پارامتر های سینماتیکی و  $\tilde{\phi}$  تخمین آن است. علاوه بر این،  $X_i[n]$  مقدار اندازه گیری شده توسط حسگر فضای کار ربات، و  $\mathbf{q}[.]$  مقادیر اندازه گیری های متقابل حسگری در مفاصل می باشد. تابع مدل ربات  $F[.]$  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 گaus-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.

### ۱.۲.۳ ترکیب حسگرها

در معادله ۱.۳، زیر نویس  $i$  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 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.

### ۲.۲.۳ 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.

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

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

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

### ۳.۳ روش‌های مرسوم مسئله موقعیت‌یابی

موقعیت‌یابی<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> و یا ردیابی<sup>۳</sup> 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 ۲.۳ 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 می‌توانند مورد استفاده قرار گیرد. ترکیب داده‌ها برای همانند آنچه در بخش ۲.۳ 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.

## ۴.۳ 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>۱</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.

### ۱.۴.۳ 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>۲</sup> تا برنامه‌ریزی حرکت<sup>۳</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:

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

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



### ۲.۴.۳ گراف عامل پیشنهادی برای کالیبراسیون و موقعیت‌یابی به صورت همزمان

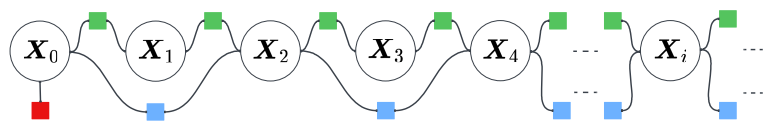
همانطور که بیان شد، استفاده از گراف‌های عامل در موقعیت‌یابی ربات‌ها مزایای متعددی دارد. یکی از مزایای اصلی این است که گراف عامل می‌تواند به طور مؤثری اطلاعات نامطمئن را مدیریت کرده و تخمین‌های دقیق‌تری ارائه دهد. همچنین، این روش به دلیل ساختار گرافی خود، قابلیت انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری بالایی دارد، 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 فرمول‌بندی 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،



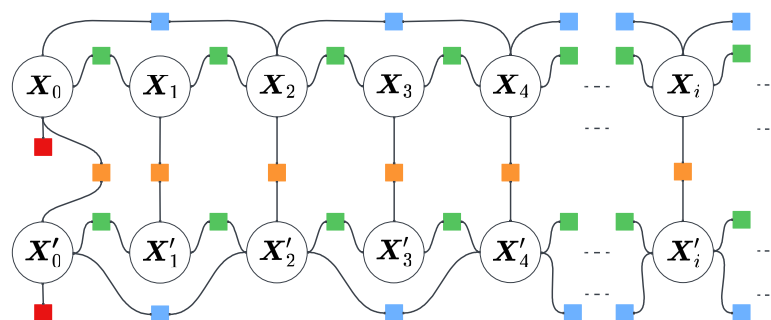
شکل ۲.۳

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. استفاده از این رویکرد محدود به نوع ربات و یا حسگرهای آن نبوده است. از ربات‌های خودران [۱۵] تا ربات‌های پرنده [۱۶] و یا ربات‌های جراح مورد استفاده در اتاق‌های عمل می‌توانند از این روش استفاده کنند.

استفاده از گراف در مسئله مکان‌یابی برای ربات‌های چندعاملی می‌تواند کلیدی برای بهبود نتایج و فرمول‌بندی ساده‌تر باشد. سامانه آموزش جراحی چشم ARASH:ASiST در تیم آزمایشگاهی ارس توسعه یافته است [۱۷]. این سامانه از دو دستگاه ربات مجزا برای تسهیل فرآیند آموزش جراحی تشکیل شده است. در این سامانه، ربات دوم باید حرکات ربات اول را دنبال کند تا آموزش جراحی با استفاده از این سامانه انجام پذیرد. پیدا کردن چارچوب این ربات‌ها در یک دستگاه مختصات می‌تواند یکی از ابزارهایی باشد که در پیاده‌سازی الگوریتم‌های متنوع کنترلی



شکل ۳.۳

در فرآیند یادگیری مهارت مورد استفاده قرار گیرد. یکی از روش های پیشنهادی برای این هدف می تواند استفاده از گراف شکل ۳.۳ باشد. در این گراف، مکان یابی برای هر کدام از این ربات ها با به روز رسانی  $X_i$  و  $X'_i$  برای هر یک از ربات ها به صورت مجزا، انجام می شود. هم چارچوب سازی این دو ربات می تواند توسط قیود عاملی که در اینجا با رنگ نارنجی نشان داده شده است، انجام شود. دیگر عامل ها با رنگ های مشخص شده همانند تعاریف بیان شده در شکل ۲.۳ می باشند.

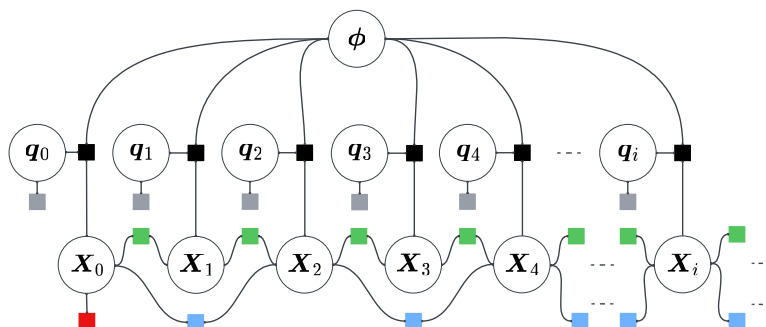
آنچه تا بدین جای حل مسئله مشاهده شده است، توانایی بالای الگوریتم گراف عامل در ایجاد مسئله ای انعطاف پذیر بوده است. مقیدسازی این مسئله می تواند از قیود فضای کار ربات فراتر رفته و مسئله را در فضای مفصلی و ساختار سینماتیک ربات نیز مقید کند. وجود پارامترهای سینماتیکی در فرمول بندی می تواند با در نظر گرفتن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

مطابق فرمول بندی های مرسوم ارائه شده، معادلات سینماتیک نگاشت های غیرخطی بین فضای مفصل و فضای کار ربات ایجاد می شوند. 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 زاویه ای/طولی مفصل های ربات هستند. در این معادله  $\phi$  بردار پارامترهای سینماتیکی ربات است که به هندسه ساختاری ربات مربوط می شود.

در ادامه، با فرض آنکه ربات مسیری تصادفی را در فضای کاری خود طی می کند و همچنین داده های سنسوری در هر دو فضای معرفی شده در حال جمع آوری هستند، قصد داریم گراف ۲.۳ را به گونه ای بسط



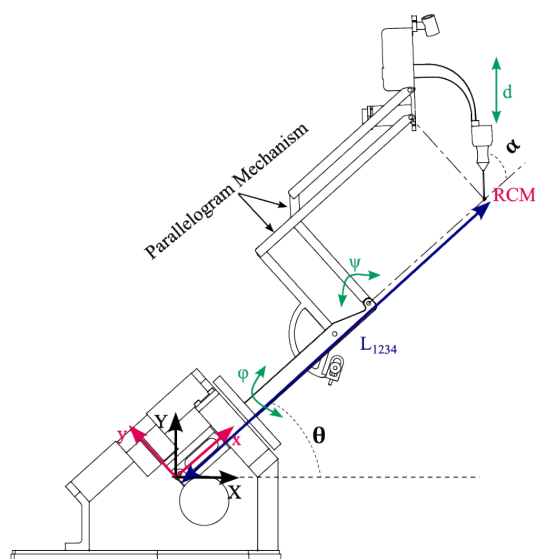
شکل ۴.۳

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 ۴.۳ 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.

فرمول‌بندی سینماتیک بیان شده در ۶.۳ می‌تواند طیف وسیعی از ربات‌ها را در بر داشته باشد. به عنوان نمونه، برای روشن‌سازی بهتر مسئله، نمونه موردی ربات ARASH:ASiST را باری دیگر در نظر می‌گیریم. شکل ۵.۳ شمایی از هندسه با ساختاری متوازی‌الاضلاع از این ربات را نشان می‌دهد. پارامترهای سینماتیک این ربات با بردار  $\phi = \{\alpha, \theta, l_{1234}\}$  مطابق اندازه‌های بیان شده بر روی این شکل تعریف می‌شود. همچنین با توجه به مقادیری که بردار مفاصل ربات  $q = \{\phi, \psi, d\}$  دارند، مکان پنجه ربات  $X$  در نقطه دوران از راه دور مشخص شده است. با استفاده از این بیان، ساختار سینماتیکی این ربات می‌تواند به فرمول‌بندی سینماتیک مستقیم زیر مطابق آنچه در [۱۷] استخراج شده است، منجر شود:

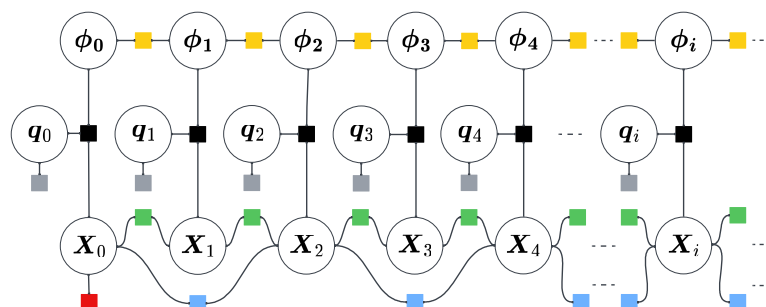
$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{\theta}(l_{1234} + dc_{\alpha+\psi}) - ds_{\theta}c_{\phi}s_{\alpha+\psi} \\ s_{\theta}(l_{1234} + dc_{\alpha+\psi}) + dc_{\theta}c_{\phi}s_{\alpha+\psi} \\ ds_{\phi}s_{\alpha+\psi} \end{pmatrix} \quad (۷.۳)$$

که  $s$  و  $c$  به ترتیب بیانگر توابع  $\sin(\cdot)$  و  $\cos(\cdot)$  هستند. تفسیر مکان‌یابی و کالیبراسیون سینماتیکی بیان شده در گراف ۴.۳، استفاده از معادله ۷.۳ در عامل‌های بیان شده به عنوان قیود سینماتیکی ربات (عامل‌های سیاه) است.



شکل ۵.۳

شکل ۶.۳ نشان دهنده گراف قابل استفاده دیگری می باشد که عاری از فرض ثابت بودن پارامترهای کالیبراسیون سینماتیکی بوده و این پارامترها با گذر زمان تغییر می کند و در مسائل زمان واقعی چالش برانگیز هستند. عامل های زرد ایجاد شده در بین پارامترهای کالیبراسیون در زمان های 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 می باشد. با این بیان صورت گرفته، افزودن قیود متفاوت به مسئله بدون نیاز به تغییر فرمول بندی دیگر بخش ها قابل انجام خواهد بود. در نهایت، این گراف های عامل می توانند با استفاده از حل کننده های افزایشی که کتابخانه GTSAM در اختیار ما قرار می دهد، به صورت زمان واقعی حل شوند.



شکل ۶.۳

## ۵.۳ 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 همزمان برای ربات کابلی صلب

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 در 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.



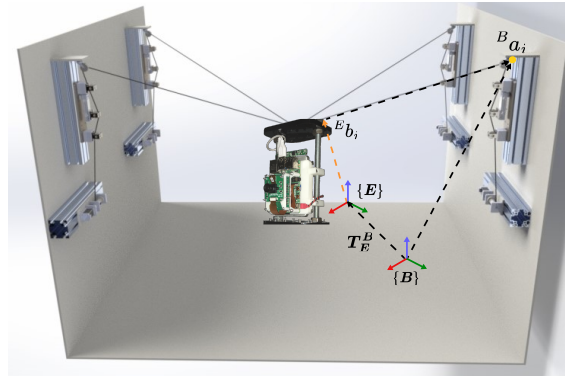
آنچه تا کنون بیشتر مورد بررسی قرار گرفته حل مسئله کالیبراسیون برای ربات هایی است که کابل آنها به عنوان جسمی صلب در نظر گرفته می شود. این فرض اساسی حل مسئله را آسان تر می کند. در ادامه ی این فصل ما با استفاده از رویکرد بیان شده، کالیبراسیون و موقعیت یابی را برای یک ربات کابلی با فرض یاد شده انجام می دهیم و نتایج را مورد بررسی قرار می دهیم. علی رغم اینکه این فرض حل مسئله را 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 خم شدگی که معمولاً در ربات هایی با ابعاد بزرگتر دیده می شود، کالیبراسیون و موقعیت یابی با مشکل مواجه خواهد شد. راه حل ارائه شده برای حل این مشکل، ایجاد مسئله ای شامل قیدهای دینامیکی پیچیده کابل ها هستند. در این فصل سعی بر ایجاد گرافی خواهیم داشت که مسئله تعریف شده برای ربات کابلی صلب را حل کند. در فصل بعد، با مقیدسازی این گراف، مسئله ای کامل تر را فرمول بندی خواهیم کرد که مشکل مطرح شده را نیز آدرس دهی کند.

## 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.

### ۱.۲.۴ معرفی ربات کابلی ARASCam

ربات ARASCam که در گروه تحقیقاتی رباتیک ARAS توسعه یافته است، یک ربات معلق فروتنحریک 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  ${}^B b_i$  در مختصات پنجه به ربات و در نقطه  ${}^E a_i$  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.



شکل ۱.۴: نمایی از ربات چهار کابلی فروتحریک معلق ARAS-CAM

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 خم شدگی 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:

$$l_i^*[k] \triangleq \| \mathbf{R}_E^B \mathbf{b}_i + \mathbf{t}_E^B - \mathbf{a}_i \|^2 \quad (۱.۴)$$

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

که در آن  $(\mathbf{R}_E^B, \mathbf{t}_E^B)$  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  $w_T[k]$  نويز اندازه گیری نیرو است. چنانچه نیروی کابل صفر باشد،  $T_i[k] = 0$ ، در معادله ۲.۴ 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 و 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 [۱۸] برای تولید اندازه گیری های موقعیت ربات در فضای  $SE(3)$  به سیستم وارد می کنیم که بدین ترتیب برای موقعیت یابی ربات زنجیره ای از تغییرات مسافت پیمایی با فرمول بندی زیر به هم وصل می شوند:

$$\Delta T_{k-1}^k = \begin{bmatrix} R_{k-1}^k & t_{k-1}^k \\ 0 & s^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

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  $l_i^0$ ، 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 تصویر از تخمین مشترک به حل یک مسئله بهینه سازی منجر می شود که مدل سینماتیکی را به اندازه گیری های انجام شده نزدیک تر کند. به عبارتی دیگر، فرمول بندی که در ۳.۳ ایجاد شد، در اینجا به فرمول بندی زیر بازنویسی می شود:

$$\min_{a_i, l_i^0, T_E^B[k], s} \sum_k \|h(a_i, l_i^0, T_E^B[k], s) - z_i[k]\|^2 \quad (4.4)$$

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

$$h(\mathbf{a}_i, l_i^*, \mathbf{T}_E^B[k], s) = s \left( 1 - \frac{T_i[k] + w_T[k]}{EA} \right) l_i^*[k] + l_i^* + w_{\text{enc}}[k] \quad (5.4)$$

با این فرمول بندی، مقادیر بهینه نقاط پولی های ربات  $\mathbf{a}_i^*$  و موقعیت های پنجه ربات  $\mathbf{t}_E^{B*}$  با پارامتر بزرگنمایی  $s$  به دست می آید.

### ۳.۲.۴ ریت پذیری

برای تحلیل مشاهده پذیری، از روش ارائه شده در [۱۹] الهام گرفته ایم که از سیستم های مکان یابی UWB<sup>۱</sup> برای مقادیر اولیه الگوریتم بهینه سازی خود استفاده کرده است. با توجه به مدل اندازه گیری در معادله ۲.۴، می توان مسئله حداقل مربعات را به صورت خطی زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{bmatrix} -2t_x[1]\alpha[1] & \cdots & -2t_x[k]\alpha[k] \\ -2t_y[1]\alpha[1] & \cdots & -2t_y[k]\alpha[k] \\ -2t_z[1]\alpha[1] & \cdots & -2t_z[k]\alpha[k] \\ d_t^*[1]\alpha[1] & \cdots & d_t^*[k]\alpha[k] \\ 2z_i[1] & \cdots & 2z_i[k] \\ \alpha[1] & \cdots & \alpha[k] \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} s^* a_x \\ s^* a_y \\ s^* a_z \\ s^* \\ l_{o_i} \\ s^*(d_a^* - l_{o_i}^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i[1]^2 \\ z_i[2]^2 \\ \vdots \\ z_i[k]^2 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

که در آن  $d_a$ ،  $d_t[k]$  و  $\alpha[k]$  به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\alpha[k] \triangleq \left( 1 - \frac{\tau_i[k]}{EA} \right) \quad (7.4)$$

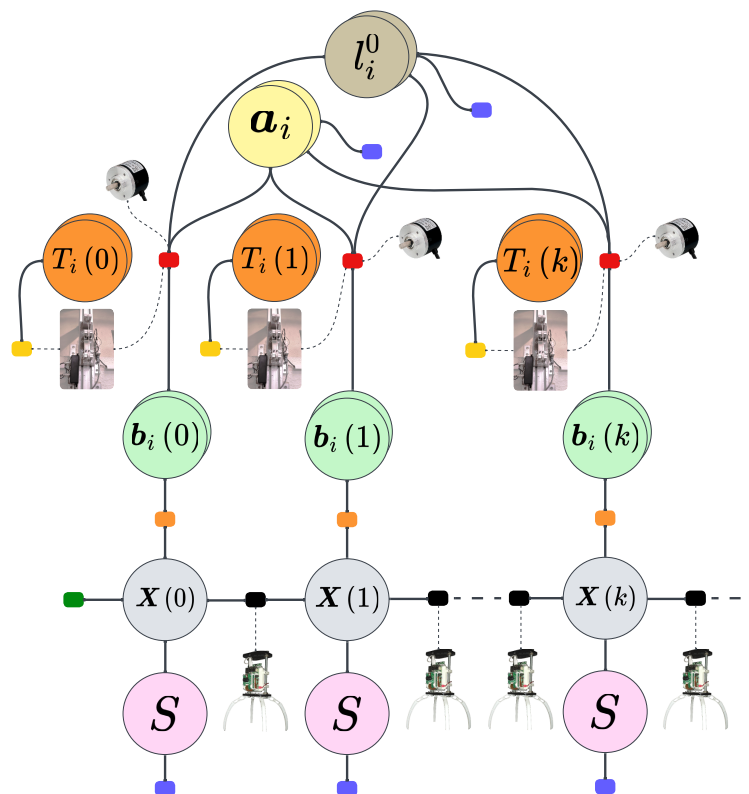
$$d_t^*[k] \triangleq t_x^*[k] + t_y^*[k] + t_z^*[k], \quad d_a^* \triangleq t_x^* + a_y^* + a_z^*$$

همان طور که در [۱۹] اشاره شده است، سیستم خطی در معادله ۶.۴ معمولاً در عمل خوش تعریف<sup>۲</sup> و

منجر به پاسخ های ضعیف خواهد شد. ما به جای این روش معرفی شده برای نقطه شروع، از چارچوب احتمالی استفاده می کنیم تا راه حل های با کیفیت بالاتری به دست آوریم. با این حال، وجود یک پاسخ برای این سیستم خطی، مشاهده پذیری پارامترهای سینماتیکی را با توجه به مجموعه اندازه گیری های تعریف شده در بخش قبلی اثبات می کند.

### ۳.۴ بهینه سازی پارامترها با استفاده از گراف های عاملی

برای حل مسئله مکان یابی و کالیبراسیون ربات کابلی ارائه شده در شکل ۱.۴ در ساختار گراف، ما یک گراف عامل با گره های متغیر  $l_i^0, a_i, T_i(k), b_i(k), X(k), S$  و  $T_i(k), S \in \mathbb{R}, l_i^0, X(k) \in SE(3)$  تعریف می کنیم که به ترتیب نمایانگر موقعیت دوربین، انحراف طول کابل (یا طول اولیه کابل)، نیروهای کابل، موقعیت نقاط پولی و نقاط اتصال کابل ها بر روی پنجه ربات هستند. شکل ۲.۴ نشان دهنده این گراف می باشد.



شکل ۲.۴: گراف عامل پیشنهادی برای حل مسئله کالیبراسیون و مکان یابی ربات کابلی صلب

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، گره های  $X(k)$  با عامل های مسافت پیمایی<sup>۱</sup> مقیاس بندی شده (نشان داده شده با رنگ سیاه) که نشان دهنده موقعیت های نسبی و مقیاس دهی مسیر براساس مقدار گره مقیاس  $S$  است، به هم متصل می شوند. از سوی دیگر، هر موقعیت دوربین  $X(k)$  به چهار نقطه اتصال کابل های در پنجه ربات  $b_i(k)$  از طریق عامل های موقعیت نسبی (نشان داده شده با رنگ نارنجی) که با تبدیل های تعریف شده در مدل CAD پنجه ربات اولیه سازی شده اند، متصل می شود (که مشمول پارامترهای کالیبراسیون در این کار نیستند). هر یک از گره های  $b_i(k)$  به نقاط اتصال پولی  $a_i(k)$  از طریق عامل های سینماتیکی (نشان داده شده با رنگ قرمز) که طبق بخش ۲.۲.۴ و با استفاده از مدل اندازه گیری ۵.۴ تعریف شده اند، متصل می شوند.

همچنین، این عامل های سینماتیکی نیز به گره های نیروی کابل  $T_i(k)$  و پارامتر متغیر طول اولیه کابل  $l_i$  متصل هستند. هر یک از این گره های نیرو کابل، توسط عامل های پیشین (نشان داده شده با رنگ زرد) با اندازه گیری های حسگر نیروسنج، محدود شده اند. همچنین، با استفاده از عامل پیشین متصل شده به اولین موقعیت پنجه ربات (نشان داده شده با رنگ سبز)، نقطه صفر مکان یابی ربات را می توان معین کرد. توجه داشته باشید که برای ربات های کابلی که کابل های با کیفیت بالا توسعه پیدا کرده اند، نیاز به اندازه گیری نیروی کابل ممکن است حذف شود و گره های  $T_i(k)$  از گراف عاملی حذف شوند. در این حالت، عوامل سینماتیکی باید براساس معادله ۱.۴ تعریف شوند.

در نهایت، با انتخاب مقادیر مناسبی برای میانگین و ماتریس های گوسی مقادیر اولیه عامل های متصل به گره های مقیاس دهی (در بخش ۲.۴.۴ روشی برای این انتخاب مناسب ارائه خواهد شد)، محل پولی ها و مقادیر اولیه طول کابل ها (نشان داده شده با رنگ آبی) که به عنوان پارامترهای کالیبراسیون نقش بازی می کنند، گراف نهایی را تشکیل می دهیم. با استفاده از یک حل کننده مناسب می توان تابع بهینه احتمالاتی نهایی را بهینه کرد. مقادیر گره های سینماتیکی بهینه شده و عدم قطعیت های به حاشیه رفته مربوطه خروجی نهایی چارچوب ما هستند.

## ۴.۴ نتایج پیاده سازی

این بخش به ارزیابی کاربردی بودن گراف پیشنهادی در تخمین مشترک پارامترهای سینماتیک و موقعیت های پنجه ربات، مستقل از دستگاه های اندازه گیری خارجی یا مقادیر اولیه پارامترها می پردازد. علاوه بر این، مزایای ترکیب بینایی-سینماتیک<sup>۲</sup> نیز در این بخش مورد بررسی قرار می گیرد.

#### ۱.۴.۴ راه اندازی سیستم و فرضیات

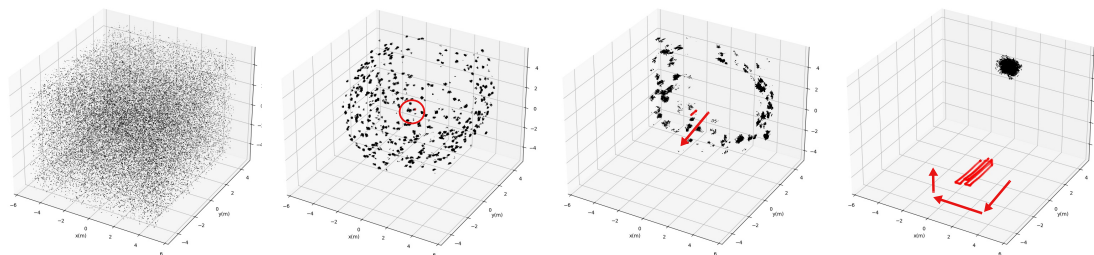
ما آزمایشات خود را با استفاده از ربات، ARAS-CAM یک ربات کابلی با اندازه متوسط و مساحت کاری  $7 \times 3 \times 4$  مترمکعب که توسط گروه رباتیک ARAS در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی توسعه داده شده است، انجام می دهیم. این ربات، به یک مجموعه کامل از حسگرهای سینماتیک و بینایی-اینرسی<sup>۱</sup> مجهز شده است تا تحقیقات برآورد حالت برای ربات های کابلی را ممکن سازد. به طور خاص، هر واحد عملگر کابلی به یک حسگر نیرو با وضوح  $25^\circ$  نیوتن و یک انکودر اندازه گیری طول نسبی با دقت ۱ میلی متر مجهز شده است. از سوی دیگر، پنجه ربات دارای یک سیستم تعبیه شده با دوربین تک چشمی OV9281<sup>۲</sup> و واحد اندازه گیری اینرسی BMI088 است. برای پیش برد اهداف تحقیقات، ۱۲ رشته داده با اندازه گیری های داده مرجع سه بعدی با استفاده از سیستم ردیابی موقعیتی توسعه یافته در این آزمایشگاه، از این ربات با عنوان مجموعه داده ARAS-CAM ضبط کرده ایم. برای پیاده سازی های انجام شده، ما از رشته داده ۰۱ این مجموعه به عنوان نماینده حرکات پویاتر و از رشته داده ۱۲ به عنوان یک همتای هموارتر استفاده می کنیم.

به دلیل اندازه متوسط ARAS-CAM و انتخاب کابل های کولار بسیار سخت، تقریب کابل صلب که پیش تر مورد بحث قرار گرفت، در تمام آزمایشات ما حفظ می شود. علاوه بر این، فرض می کنیم که تقریب طول کابل اولیه در محدوده  $\pm 50$  سانتی متر مقدار واقعی قرار دارند که در عمل با آزاد کردن کابل ها از یک پیکربندی اولیه شناخته شده قابل دستیابی است.

برای تولید اندازه گیری های بینایی حرکتی، از الگوریتم SVO [۱۸] استفاده شده است که از نظر محاسباتی کارآمد بوده و به طور گسترده در کاربردهایی از جمله پرواز خودران تا واقعیت مجازی مورد استفاده قرار می گیرد. ما از اندازه گیری های مرجع برای اندازه گیری عدم قطعیت بینایی حرکتی الگوریتم SVO در پیاده سازی خود استفاده می کنیم.

#### ۲.۴.۴ کالیبراسیون خودکار بدون پارامترهای اولیه

برای راه اندازی گراف فرمول بندی شده، باید حدس نسبتا مناسبی از مقادیر اولیه پارامترهای شناسایی و ماتریس های کوواریانس نویز در دست داشته باشیم. روشی که برای دستیابی به این موارد معرفی می کنیم، الگوریتمی مبتنی بر روش مونت-کارلو می باشند. این الگوریتم و نحوه کارکرد آن به صورت مفصل در [۲۰] توضیح داده شده است. در این بخش، ما از این الگوریتم ابتدایی مونت-کارلو برای شناسایی مکان های نقاط پولی، مقادیر اولیه طول کابل، و مقیاس بینایی حرکتی استفاده می کنیم. پس از شروع کارکرد SVO، کاربر یک چارچوب مختصات



شکل ۳.۴: پالایش متوالی یک باور یکنواخت بر روی پارامترهای سینماتیکی از طریق الگوریتم مونت-کارلو

صفر اختیاری با قرار دادن انتهای ربات در آن حالت و شروع الگوریتم انتخاب می‌کند. سپس، انتهای ربات بر اساس جهت عدم قطعیت بیشتر یا با دنبال کردن هنجار حرکت انتهای ربات در امتداد سه محور انتقالی و پوشش حجم بزرگ حرکت می‌کند.

همانطور که در شکل ۳.۴ نشان داده شده است، در ابتدا وقتی اطلاعاتی به فیلتر تزریق نمی‌شود، ذرات به طور یکنواخت در منطقه پخش می‌شوند (اولین نمودار از چپ). اما، همانطور که در شکل (نمودار دوم از چپ) نشان داده شده است، پس از کمی حرکت دادن دوربین در طول یک خط مستقیم، توزیع یکنواخت به یک پوسته کروی تبدیل می‌شود که تمامی مکان‌های ممکن برای مکان پولی را نشان می‌دهد و ضخامت آن عدم قطعیت بر طول اولیه کابل را نشان می‌دهد. به تدریج، با حرکت طولانی‌تر انتهای ربات و در امتداد جهت‌های دیگر، کره به یک حلقه تبدیل می‌شود همانطور که در شکل (نمودار سوم از چپ) نشان داده شده است. در نهایت به یک خوشه بیضوی از ذرات که مکان شناسایی شده نقطه پولی و عدم قطعیت مربوطه آن را نشان می‌دهد تبدیل می‌شود که در شکل (نمودار چهارم از چپ) نشان داده شده است.

#### ۳.۴.۴ ترکیب بینایی-سینماتیک و استفاده از گراف عامل معرفی شده

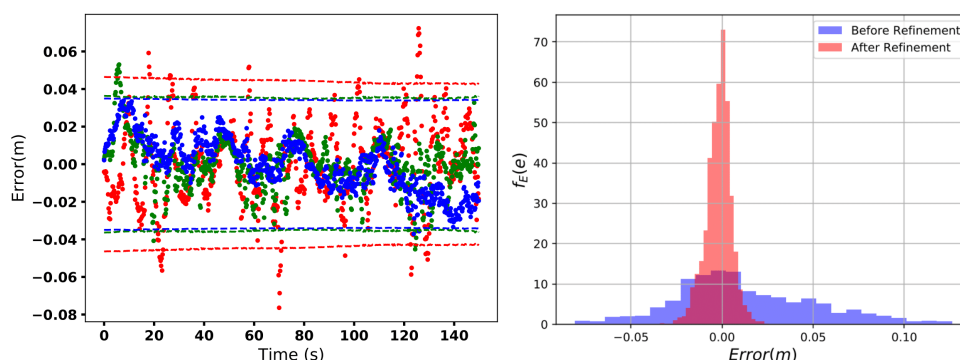
در این بخش، ما گراف عامل را که در بخش ۳.۴ بیان شده است، پیاده‌سازی می‌کنیم تا پارامترهای مراحل قبل را با در نظر گرفتن تأثیر متقابل تمام حالت‌ها بهبود دهیم. ما این گراف عامل را با استفاده از کتابخانه GT-SAM [۲۱] که یک حل‌کننده معروف در جامعه SLAM است و حالت‌های اجرای افق متحرک و افزایشی بسیار کارآمدی دارد، پیاده‌سازی می‌کنیم. گراف‌های عامل این گراف به صورت دستی در کلاس‌های C++ نوشته شده و به حل‌کننده این کتابخانه متصل شده‌است.

مزایای ترکیب سینماتیک و حسگر بینایی در بهبود نتایج نقش موثری داشته است. جدول ۱۰.۴ خلاصه‌ای از این نتیجه را در هر حالت ارائه می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، دقت کلی با ترکیب این دو حالت بهبود می‌یابد. به ویژه برای رشته داده ۵۱، ترکیب بینایی-سینماتیک به بهبود دقت ۲۳ درصدی در مقایسه با سینماتیک مستقیم و



جدول ۱.۴: خطای مکان یابی با روش های مختلف (واحد متر)

رشته	خطای MSE سینماتیک مستقیم	خطای MSE بینایی حرکتی	خطای MSE روش پیشنهادی
۰۱	۰/۰۳۶	۰/۰۵	۰/۰۲۹
۱۲	۰/۰۳۵	۰/۰۳	۰/۰۲۸
میانگین	۰/۰۳۵۵	۰/۰۴	۰/۰۲۸۵



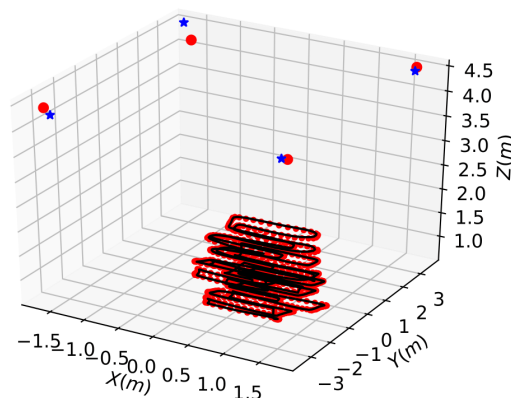
شکل ۴.۴: راست: توزیع خطای پنجه قبل و بعد از بهبود پارامترها، چپ: خطای مکان یابی در دستگاه کارترین

۷۲ درصدی در مقایسه با بینایی حرکتی منجر می شود. این اعداد به ترتیب برای رشته داده ۱۲ برابر با ۲۵ درصد و ۷ درصد است. بهبود عملکرد در رشته داده ۰۱ بیشتر است، که با این واقعیت همخوانی دارد که انتهای ربات در این رشته داده حرکات پویاتری دارد و در نتیجه بینایی حرکتی در معرض تخریب بیشتری قرار می گیرد. از سوی دیگر، این حرکات پویا نوسانات بزرگی ایجاد می کنند که از حالت های سینماتیک قابل مشاهده نیستند و منجر به خطاهای نسبتاً بزرگی می شوند که در [۲۲] نیز نشان داده شده است.

در ادامه، کاهش خطای پنجه ربات را پس از بهبود پارامترهای اولیه بررسی می کنیم. این خطا را به عنوان میانگین مربع خطا بین طول کابل محاسبه شده از معادله ۱.۴ و مقادیر داده های انکودر از ربات تعریف می کنیم. ما از این خطا به عنوان یک معیار جانشین برای مکان های نقاط پولی استفاده می کنیم زیرا در پیاده سازی ما، قرقره ها در خارج از میدان دید سیستم ردیابی ما (سیستم داده های مرجع<sup>۱</sup>) قرار دارند و بنابراین مقادیر واقعی متناظر در نسخه فعلی مجموعه داده در دسترس نیستند.

شکل ۴.۴ (نمودار سمت راست) توزیع خطای پنجه ربات را قبل و بعد از بهبود پارامترها نشان می دهد. همان طور که دیده می شود، میانگین و واریانس این خطا به طور قابل توجهی پس از بهبود کاهش یافته است. به طور خاص، برای رشته داده ۰۱، مقدار خطا قبل از بهبود ۰/۰۴۳ متر و پس از بهبود ۰/۰۰۴۹ متر است که نشان دهنده یک کاهش مرتبه ای در خطا است. این مقادیر برای رشته داده ۱۲ به ترتیب ۰/۰۳ متر قبل و ۰/۰۰۵۳ متر

<sup>۱</sup>truth ground



شکل ۵.۴: مسیر طی شده توسط ربات در کنار مکان اولیه و نهایی (بهبودیافته) پولی ها

متر بعد از بهبود هستند. همچنین شکل ۴.۴ (نمودار سمت چپ) نشان دهنده خطای مکان یابی پنجه ربات در دستگاه کارترین در واحد متر می باشد. این خطا بیانگر اختلاف مقادیر مکان پنجه در سه جهت از حل گراف عامل نسبت به مقادیر داده های مرجع می باشد.

در نهایت، نتایج کیفی اجرای الگوریتم ما بر روی رشته داده ۰۱ در شکل ۵.۴ نشان داده شده است. در این شکل، مسیر سیاه رنگ نمایانگر داده های مرجع و نقاط قرمز نشان دهنده موقعیت های اصلاح شده ربات توسط الگوریتم ما هستند. علاوه بر این، ستاره های آبی در شکل مکان های پولی قبل از بهبود و دایره های قرمز، آن ها را پس از بهینه سازی مشترک گراف عامل را نشان می دهند.

#### ۴.۴.۴ انتشار عدم قطعیت

یکی از مزایای چارچوب پیشنهادی، توانایی آن در حفظ و در نظر گرفتن عدم قطعیت و نویز حسگر در طول فرآیند تخمین است. در پیاده سازی های ما، از مقادیر میانگین و ماتریس های کواریانس از برای راه اندازی الگوریتم با مقید کردن گراف عامل با استفاده از عامل های پیشین استفاده می کنیم. نتیجه این کار شباهت عدم قطعیت نهایی گراف عامل به توزیع خطای واقعی است. ما این سازگاری را با تعیین درصد مقادیر خطا در محدوده های  $\sigma$ ،  $2\sigma$  و  $3\sigma$  بررسی می کنیم.

همانطور که در جدول ۲.۴ نشان داده شده است، تقریباً ۶۰ درصد از خطاها در محدوده  $\sigma$ ، ۹۰ درصد در محدوده  $2\sigma$  و تقریباً ۹۸ درصد در محدوده  $3\sigma$  قرار دارند. نتایج جدول ۲.۴ نزدیک به محدوده های تئوریک  $\sigma$  هستند اما نشان دهنده یک پاسخ کمی بیش از حد مطمئن است. باید توجه داشت که سازگاری به شدت به مدل های حسگر مفروض و همچنین عدم قطعیت بینایی حرکتی تجربی برای الگوریتم SVO وابسته است. ما

جدول ۲.۴: سازگاری آماری عدم قطعیت های تخمین زده شده

محور	$\sigma$	$2\sigma$	$3\sigma$
$x$	۵۳٪	۸۲٪	۹۵٪
$y$	۷۱٪	۹۲٪	۹۷٪
$z$	۵۱٪	۸۸٪	۹۹٪

بررسی دقیق تر سازگاری عدم قطعیت را به کارهای آینده موکول می کنیم.

## ۵.۴.۴ بحث و گفت وگو

روش پیشنهادی در این فصل یک دیدگاه منعطف و یکپارچه در مورد کالیبراسیون و برآورد حالت برای ربات های کابلی صلب ارائه می دهد. این یکپارچگی در جامعه SLAM به شکل اجرای موازی تنظیم مجموعه <sup>۱</sup> و ردیابی دوربین <sup>۲</sup> به خوبی شناخته شده است. به ویژه برای عملکرد بلادرنگ <sup>۳</sup>، مرحله گراف عامل الگوریتم ما ممکن است به صورت افق متحرک حل شود و حالت های قدیمی به فاکتورهای پیشین حاشیه سازی شوند. از سوی دیگر، کالیبراسیون اولیه ممکن است بدون محدودیت بلادرنگ و با استفاده از اجرای دسته ای گراف روی رشته داده طولانی تری انجام شود.

پیاده سازی فعلی ما در Python روی یک لپ تاپ شخصی با پردازنده Core-i۷ Intel و ۱۶ گیگابایت RAM کمتر از یک دقیقه برای هر کابل زمان می برد تا روش ابتدایی مونت-کارلو را اجرا کند (برای ۷۵۰ موقعیت دوربین و ۵۰۰۰ ذره) و حدود ۳۰ ثانیه زمان برای بهبود آن ها توسط گراف عامل. حالت های اجرای افق متحرک حل کننده های بسیار کارآمد برای گراف های عامل مانند [۲۱] و [۲۳] از جامعه SLAM می توانند فرکانس برآورد موقعیت را به نرخ فریم دوربین افزایش دهند که برای بیشتر کنترل کننده های حلقه خارجی مناسب است. ما بررسی بیشتر عملکرد بلادرنگ الگوریتم خود را به کارهای آینده موکول می کنیم.

یکی دیگر از جنبه های مهم الگوریتم پیشنهادی، ماژولار بودن آن است. به ویژه، این فرمول بندی اجازه می دهد تا دیگر حالت ها از جمله اما نه محدود به، UWB IMU و حسگرهای سیستم به راحتی به گراف عامل اضافه شوند. علاوه بر این، اندازه گیری های شبه هندسی مانند هم سطحی نقاط پولی (به عنوان مثال دو پولی در همان دیوار) یا فاصله بین مکان های پولی (قابل اندازه گیری با استفاده از ابزارهای اندازه گیری کم هزینه) به راحتی در مسئله گنجانده می شوند که به طور قابل توجهی به دقت کلی تخمین کمک می کند.

در نهایت، سیستم پیشنهادی ممکن است به طور مستقیم برای کالیبراسیون سیستم های موقعیت یابی UWB استفاده شود. در این سیستم ها، مدل اندازه گیری فاصله بین تگ و انکرها دقیقاً با مدل کابل صلب در نظر گرفته شده در این فصل یکسان است. ما قصد داریم این موضوع را به عنوان کارهای آینده بیشتر بررسی کنیم.



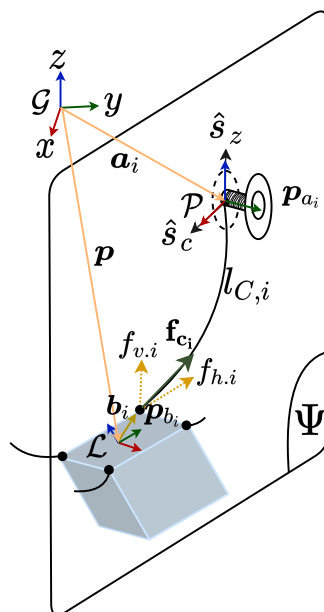
## فصل ۵

# پیاده سازی رویکرد گراف مبنا جهت مکان‌یابی و کالیبراسیون همزمان برای ربات کابلی خم شده

این پایان‌نامه به بررسی دقیق رویکردهای مختلف در حوزه رباتیک برای فرمول‌بندی ریاضی یک مسئله بهینه‌سازی مقید پرداخته است. از تحلیل مزایا و معایب روش‌های مرسوم تا رویکردهای جدید مبتنی بر گراف، روشی جامع برای فرمول‌بندی و حل مسئله بهینه‌سازی کالیبراسیون و مکان‌یابی همزمان ربات‌ها ارائه شده است. در فصل گذشته، عملکرد این روش بر روی یک ربات کابلی مقید که کابل‌های آن به صورت صلب در نظر گرفته شده بود، ارزیابی شد. پس از معرفی فرمول‌بندی سینماتیکی، گراف مربوط به آن ساخته و نتایج پیاده‌سازی بررسی شد. آنچه از ابتدای این پایان‌نامه به عنوان هدفی مهم معرفی گردید، ماژولاریتی و انعطاف‌پذیری روش، با قیدهای متفاوت و گسترده بود. انتخاب ربات کابلی به عنوان مورد مورد مطالعه، نیز به دلیل امکان پیاده‌سازی و ارزیابی همین هدف بوده است.

در این فصل، بدون تغییر در فرمول‌بندی‌های ارائه شده در فصل قبل، به مسئله قیدهای دینامیکی کابل افزوده خواهد شد. علیرغم پیچیدگی این مدل‌ها، حل‌کننده همچنان با دقت و سرعت بالا به نتایج مطلوب دست خواهد یافت. تاکنون تحقیقات بسیاری بر مدل‌سازی کابل‌های خم شده انجام شده است که نتایج دقیقی به دست داده‌اند. ما نیز برای حل مسئله کالیبراسیون و مکان‌یابی نیازمند افزودن این قیدها به مسئله هستیم. با این حال، پیچیدگی‌های این مدل‌ها باعث شده است که در برخی کارهای اخیر به جای حل مستقیم مسئله با این معادلات، از شبکه‌های عمیق استفاده شود که به دلیل مشکلات خاص خود، دقت و اطمینان کافی ندارند.

روش ما برای حل این چالش، استفاده از همان مقیدسازی‌هایی است که برای کابل‌های صلب انجام شده بود. در پایان، با حل این مسئله، مزایای این رویکرد را بار دیگر خواهیم دید؛ رویکردی که با دقت و قدرت بالا،



شکل ۱.۵: دیاگرام پنجه ربات متصل به یک کابل خم شده

مسئله کالیبراسیون و مکان یابی همزمان ربات ها را، حتی در شرایطی که کابل ها صلب نیستند، به نحوی که حل آنها در روش های مرسوم دشوار است، به سرانجام می رساند.

## ۱.۵ نمادها و تعاریف

این فصل یک ربات موازی کابلی معلق با شش درجه آزادی ( $m = 6$ ) و چهار کابل فعال ( $n = 4$ ) را مورد بررسی قرار می دهد. از آنجایی که  $m > n$ ، این ربات فروتحریک<sup>۱</sup> است و یک ساختار نامقید<sup>۲</sup> تشکیل می دهد [۲۴]. شکل ۱.۵ ساختار این ربات را نشان می دهد که برای وضوح بیشتر تنها یک کابل در آن نمایش داده شده است. دستگاه مختصات  $\mathcal{L}$  به بدنه متحرک ربات متصل است، در حالی که دستگاه مختصات جهانی  $\mathcal{G}$  به طور ثابت به پایه ربات متصل شده است. مکان پنجه ربات نسبت به دستگاه مختصات جهانی با  $(p, R) \in SE(3)$  نشان داده می شود، که در آن  $p \in \mathbb{R}^3$  بردار انتقال از  $\mathcal{G}$  به  $\mathcal{L}$  است و  $R \in SO(3)$  جهت گیری  $\mathcal{L}$  نسبت به  $\mathcal{G}$  است. کابل  $i$  از پایه ربات در نقطه  $p_{a_i}$  که در دستگاه مختصات جهانی تعریف شده است، جدا می شود و به پنجه ربات در نقطه  $p_{b_i}$  که در دستگاه مختصات بدنه محلی بیان شده است، متصل می شود.

ما تغییر شکل کابل را در یک صفحه عمودی دو بعدی  $\Psi$  مدل سازی می کنیم که پولی  $p_{a_i}$  و نقطه اتصال  $p_{b_i}$

در پنجه ربات را در بر می گیرد. دستگاه مختصات  $\mathcal{P}$  روی این صفحه در نقطه  $p_{a_i}$  قرار دارد و با بردارهای واحد  $\hat{s}_z$  که موازی با محور  $z$  جهانی است و  $\hat{s}_c$  که در جهت کابل بر روی صفحه  $x_P - y_P$  دستگاه مختصات  $\mathcal{P}$  قرار دارد، تعریف می شود. به طور خاص،  $\hat{s}_c = \frac{b_{xy_i} - a_{xy_i}}{\|b_{xy_i} - a_{xy_i}\|}$ ، که در آن  $b_{xy_i}$  و  $a_{xy_i}$  به ترتیب اجزای  $x - y$  بردارهای  $b_i$  و  $a_i$  در دستگاه مختصات جهانی هستند.

## ۲.۵ معادلات مدل کابل خم شده

معادلات زنجیره ای اثر خم شدن کابل غیرقابل ارتجاع با جرم غیر قابل اغماض را همانطور که در [۲۵] توصیف شده است، به صورت زیر است:

$$z_i(x_c) = \frac{f_{h,i}}{g_c} \cdot \left( \cosh \left( \frac{g_c}{f_{h,i}} \cdot (x_c + C_{\backslash,i}) \right) - C_{\uparrow,i} \right) \quad (۱.۵)$$

در این معادله، شکل خم شدن کابل با تابع  $z_i(x_c)$  تعریف شده است. ثابت های زنجیره ای،  $C_{\backslash,i}$  و  $C_{\uparrow,i}$  با توجه به شرایط مرزی نقطه انتهایی  $(p_a)_z = z_i(\circ) = -\frac{f_v}{f_h}$  و  $z'_i(L_i) = -\frac{f_v}{f_h}$  تعیین می شوند، که در آن  $z'_i(L_i)$  شیب معادله (۱.۵) در  $x_c = L_i = \|(b)_{xy_i} - (a)_{xy_i}\|$  است و به صورت زیر دارای حل بسته هستند:

$$C_{\backslash,i} = \frac{f_{h,i}}{g_c} \cdot \operatorname{asinh} \left( \frac{-f_{v,i}}{f_{h,i}} \right) - L_i \quad (۲.۵)$$

$$C_{\uparrow,i} = \cosh \left( C_{\backslash,i} \cdot \frac{g_c}{f_{h,i}} \right) - \frac{g_c}{f_{h,i}} \cdot (p_a)_z \quad (۳.۵)$$

همانطور که در شکل ۱.۵ نشان داده شده است،  $f_{h,i}$  و  $f_{v,i}$  اجزای افقی و عمودی نیروی کابل  $f_{c_i}$  در دستگاه مختصات  $\mathcal{P}$  هستند. علاوه بر این،  $g_c = g \cdot \rho_c$  است که در آن  $g$  و  $\rho_c$  به ترتیب شتاب گرانشی و جرم در واحد طول کابل هستند. در نهایت، طول منحنی معادله (۱.۵) به عنوان طول واقعی کابل  $l_{C,i}$  تعریف می شود و به صورت زیر محاسبه می شود:



$$\begin{aligned}
 l_{C,i} &= \int_0^{L_i} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx \\
 &= \frac{f_{h,i}}{g_c} \cdot \left( \sinh \left( \frac{g_c}{f_{h,i}} (L_i + C_{v,i}) \right) - \sinh \left( \frac{g_c}{f_{h,i}} \cdot C_{v,i} \right) \right)
 \end{aligned} \quad (۴.۵)$$

### ۳.۵ سینماتیک ربات

تحلیل سینماتیکی یک ربات موازی کابلی فروتحریک شامل هر دو معادلات هندسی و حالت ایستای آن است، که به طور معروف به تحلیل سینماتیک-ایستا معروف است [۲۶]. نیروی پیچشی<sup>۱</sup> پنجه ربات  $\mathbf{w}_{ee} \in \mathbb{R}^6$  به نیروهای کابل  $\mathbf{f}_c \in \mathbb{R}^4$  از طریق ماتریس ژاکوبی  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{4 \times 6}$  مرتبط می شود:

$$\mathbf{w}_{ee} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_c \quad (۵.۵)$$

در این اینجا، فرض می کنیم که  $\mathbf{w}_{ee}$  تنها توسط گرانش ایجاد شده است و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\mathbf{w}_{ee} = m_e g \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_z \\ \mathbf{b}_{com} \times \hat{\mathbf{s}}_z \end{bmatrix} \quad (۶.۵)$$

که در آن  $m_e$  جرم پنجه ربات و  $\mathbf{b}_{com}$  جابجایی بین مبدا دستگاه مختصات  $\mathcal{L}$  و مرکز جرم (CoM) انتهای ربات است. برای پیوند دادن این معادلات حالت ایستا با مدل زنجیره ای در معادله (۴.۵)، هر جزء نیروی کابل به عنوان یک جفت افقی و عمودی نمایش داده می شود:

$$\mathbf{f}_{c_i} = \begin{bmatrix} f_{h,i} & f_{v,i} \end{bmatrix}^T \quad (۷.۵)$$

برای هر  $f_{c_i}$  ستون  $i$  مربوطه از ماتریس ژاکوبی  $J^T$  به صورت زیر بیان می شود:

$$J_i^T = \begin{bmatrix} -\hat{s}_{c,i} & \hat{s}_z \\ -Rb_i \times \hat{s}_{c,i} & Rb_i \times \hat{s}_z \end{bmatrix} \quad (۸.۵)$$

که در آن، ماتریس چرخش  $R$ ، بردارهای واحد  $\hat{s}_{c,i}$ ،  $\hat{s}_z$  و بردار اتصال پنجه  $b_i$  در مختصات محلی، در بخش ۱.۵ تعریف شده اند. توجه داشته باشید که معادلات حالت ایستا در ۵.۵ یک مسئله نامعین<sup>۱</sup> است که در آن تعداد معادلات کمتر از تعداد متغیرها است. همانطور که در [۲۲] پیشنهاد شده است، ما تمام نیروهای کابل را بر اساس یک کابل مرجع بیان می کنیم. همانطور که در بخش ۴.۵ مشاهده خواهد شد، این انتخاب، تعداد حسگرهای نیرو مورد نیاز را به تنها یک عدد کاهش می دهد که برای ما نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. همانطور که در [۲۲، ۲۷] ارائه شده است، با تقسیم ماتریس ژاکوبین و بردار نیرو، می توان ۵.۵ را به صورت زیر نوشت:

$$w_{ee} = \begin{bmatrix} J_{ref}^T & J_{res}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{c_{ref}} \\ f_{c_{res}} \end{bmatrix} \quad (۹.۵)$$

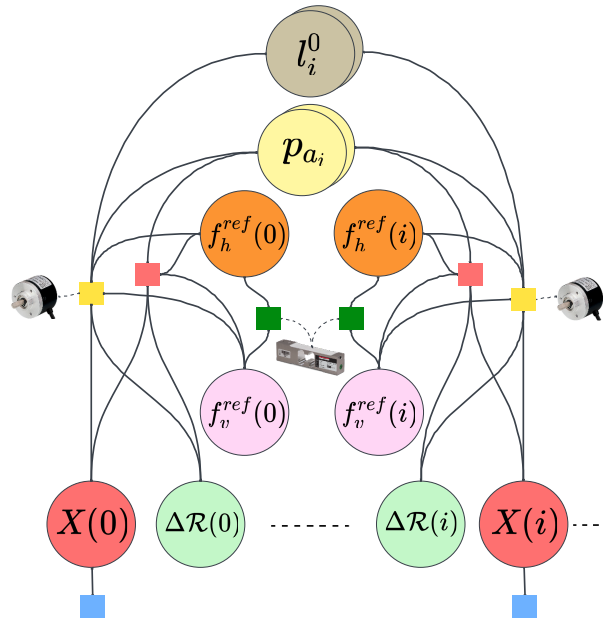
که نتیجه می دهد:

$$w_{ee} = J_{ref}^T \cdot f_{c_{ref}} + J_{res}^T \cdot f_{c_{res}} \quad (۱۰.۵)$$

که در آن، نمایانگر یک زیرماتریس  $2 \times 6$  شامل دو ستون اول  $J^T$  است که مربوط به نیروی کابل مرجع  $f_{c_{ref}}$  است. به دنبال آن،  $J_{res}^T$  به عنوان زیرماتریس باقی مانده  $6 \times 6$  تعریف می شود و  $f_{c_{res}}$  نمایانگر نیروهای کابل باقی مانده است. ما می توانیم  $f_{c_{res}}$  را در معادله (۱۰.۵) به صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$f_{c_{res}} = (J_{res}^T)^{-1} (w_{ee} - J_{ref}^T \cdot f_{c_{ref}}) \quad (۱۱.۵)$$

با این فرمول بندی، تعداد متغیرها از ۸ به ۲ کاهش می یابد، در حالی که معادلات حالت ایستا به طور ضمنی در معادله (۵.۵) نهفته می شود و نیاز افزودن یک قید جداگانه را حذف می کند [۲۷].



شکل ۲.۵: گراف عامل کالیبراسیون و مکان یابی همزمان ربات کابلی با کابل های خم شده

## ۴.۵ گراف عامل کالیبراسیون و مکان یابی همزمان سینماتیک-ایستا

در این بخش، با استفاده از روابط استخراج شده در قسمت قبل، و همچنین فرمول بندی سینماتیکی تعریف شده در فصل پیشین، رویکردی با یک فرمول بندی یکپارچه ایجاد می شود. رویکرد ما یک گراف عامل با گره های متغیر  $(f_h^{ref}(k), f_v^{ref}(k) \in \mathbb{R}, \Delta R(k) \in SO(3), p_{a_i} \in \mathbb{R}^3, l_i^0, X(k) \in SE(3))$  تعریف می کند. این گره ها به ترتیب، نمایانگر مکان های پنجه ربات، مقادیر اولیه طول کابل ها، مکان های نقاط پولی، و تغییرات در جهت گیری ربات، و همچنین نیروی کابل مرجع در محورهای افقی و عمودی در حالت های ایستا ربات هستند. در ساختار فروتحریک ما، همه ترکیب های مکانی و جهت گیری قابل اجرا نیستند. در اینجا،  $\Delta R(k)$  متغیری است که مقدار اولیه چرخش پنجه ربات را تغییر می دهد. علاوه بر این، کابل مرجع به عنوان کابلی که کاربر حسگر نیرو برای مقاصد کالیبراسیون بر روی آن تعبیه شده است، تعیین می شود.

شکل ۲.۵ ساختار این گراف عامل در راستای کالیبراسیون خودکار و همچنین مکان یابی همزمان برای ساختار تعریف شده را که برای دو نمونه از وضعیت های ایستا ۰ و  $i$  نمایش داده شده است، نشان می دهد. متغیرهای بهینه سازی در این گراف با دایره های برچسب خورده با نام های پارامترها در رنگ های مختلف نمایان شده اند. علاوه بر این، عامل ها با مربع های رنگی به تصویر کشیده شده اند، که عامل انکودر و یا همان طول کابل خم شده به رنگ زرد، عامل مکان اتصال کابل به پولی به رنگ قرمز، عامل اندازه گیری نیرو به رنگ سبز، و عامل پیشین مکان

به رنگ آبی است. هر عامل بر اساس معادلات سینماتیک و مدل ریاضی تعریف شده برای کابل توصیف شده در بخش ۲.۵ فرمول بندی شده و به شرح زیر تعریف می شوند:

### ۱.۴.۵ عامل طول کابل خم شده

این عامل رابطه ای بین اندازه گیری های انکودر و طول واقعی کابل از معادله ۴.۵ ایجاد می کند. این قید اندازه گیری برای کابل  $i$  به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$f(z_i^{enc}, \zeta)[k] = l_{C,i}[k] + l_i^* - z_i^{enc}[k] \quad (12.5)$$

که در آن  $l_{C,i}$  نمایانگر طول واقعی کابل در اثر خم شدگی از نیروی وزن آن به طوریکه در معادله ۴.۵ تعریف شده است، می باشد. همچنین  $l_i^*$  نشان دهنده مقدار طول اولیه کابل است، و  $z_i^{enc}$  نمایانگر اندازه گیری نسبی انکودر مربوط به کابل  $i$  است. علاوه بر این،  $k$  بیان کننده شاخص نمونه داده های زمانی است.

### ۲.۴.۵ عامل مکان اتصال کابل به پولی

این عامل تضمین می کند که ارتفاع محاسبه شده نقطه اتصال کابل روی پنجه ربات، که از مکان پنجه ربات استنتاج شده، با ارتفاع کابل خم شده پیش بینی شده از پولی مربوطه مطابقت داشته باشد. تابع خطا برای پولی  $i$  به صورت زیر بیان می شود:

$$f(\zeta)[k] = (p_{b,i})_z[k] - z_i(L_i)[k] \quad (13.5)$$

که در آن،  $(p_{b,i})_z$  به ارتفاع نقطه اتصال کابل  $i$  در مختصات جهانی اشاره دارد، و  $z_i(L_i)$  نمایانگر شکل خم شدگی کابل در  $L_i$  به طوریکه در معادله ۱.۵ توصیف شده است.

### ۳.۴.۵ عامل اندازه گیری نیرو

این عامل نرم نیروی افقی و عمودی را به گونه ای محدود می کند که نزدیک به اندازه گیری نیرو از حسگر تعبیه شده روی کابل مرجع، در نزدیکی پنجه ربات باشد. توجه داشته باشید که این محدودیت تنها برای کابل

مرجع با یک تابع هزینه به صورت زیر مورد نیاز است:

$$f(f^m, \zeta)[k] = \|[f_h^{ref}[k] \ f_v^{ref}[k]]^T\| - f^m[k] \quad (14.5)$$

در اینجا،  $f_h^{ref}$  و  $f_v^{ref}$  به ترتیب نمایانگر نیروهای مرجع کابل در جهت های افقی و عمودی هستند،  $\|\cdot\|$  نشان دهنده نرم اقلیدسی است، و  $f^m$  مقدار نیروی کابل مرجع است که توسط حسگر نیرو اندازه گیری شده است.

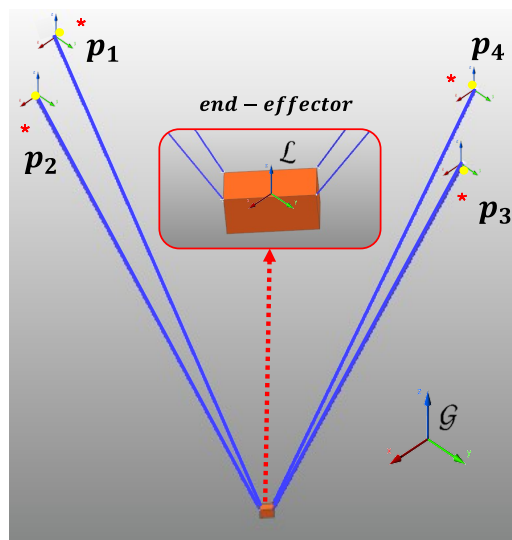
#### ۴.۴.۵ عامل پیشین مکان

عوامل انکودر و اندازه گیری نیرو با گره های متغیر مکان  $X(k)$  مرتبط هستند که نمایانگر وضعیت های ایستا ربات در فرآیند کالیبراسیون به طوریکه توسط یک سیستم محلی سازی مبتنی بر بینایی اندازه گیری شده است. هر مکان به حالات تعادلی مربوط می شود که در آن ربات از طریق چهار کابل خود ثابت است. نمونه هایی از وضعیت های ایستا در شکل ۲.۵ با نشانگرهای  $o$  و  $i$  برچسب گذاری شده اند. این عامل پیشین مکان نیز برای تعریف صفر ربات مورد استفاده قرار می گیرد.

### ۵.۵ نتایج شبیه سازی

این بخش به منظور اعتبارسنجی مدل و روش کالیبراسیون پیشنهادی از طریق شبیه سازی اجزای محدود<sup>۱</sup> سیستم ارائه شده است. ابتدا اعتبار فرمول بندی های سینماتیک-ایستا بررسی می شود و سپس نتایج کالیبراسیون برای دو ربات کابلی کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس نشان داده می شود. برای شبیه سازی های اجزای محدود از نرم افزار RecurDyn [۲۸] استفاده خواهیم کرد، مدل گراف عامل خود را با استفاده از کتابخانه GTSAM [۲۱] پیاده سازی می کنیم و همچنین از SymForce [۲۹] برای استخراج مشتق عامل ها و ژاکوبین های مربوطه استفاده می کنیم.

<sup>۱</sup>element finite



شکل ۳.۵: سناریوی ربات کوچک مقیاس در محیط شبیه ساز RecurDyn

## ۱.۵.۵ صحت سنجی مدل

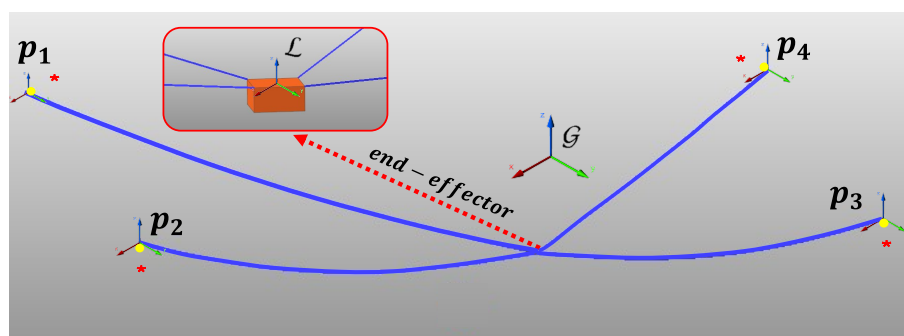
برای صحت سنجی دقت مدل سینماتیک-ایستا، همان طور که در بخش ۲.۵ توضیح داده شده است، گراف عامل سینماتیک-ایستا توسعه داده شده را با استفاده از عامل های پیشین بر روی متغیرهای استخراج شده از شبیه ساز مقید می کنیم. دو سناریوی ربات کابلی معلق کوچک و بزرگ مقیاس برای صحت سنجی این مدل انجام شده است. هدف از طراحی این دو سناریوی مجزا، بررسی دقت الگوریتم برای طیف وسیعی از پیاده سازی ها می باشد. شکل ۳.۵ و شکل ۴.۵ این سناریوهای ربات ها را در محیط شبیه ساز RecurDyn نشان می دهند. هر دو ربات چهار کابل را به چهار گوشه بالای یک جعبه مستطیلی متصل کرده اند. همچنین ابعاد ربات که از فواصل بین پولی ها که در شکل مشخص شده اند به دست آمده،  $(۵/۲۸, ۵/۴, ۵/۱۲)$  متر برای ربات کوچک و  $(۵۰, ۲۲۰, ۲۴۰)$  متر برای ربات بزرگ تر در نظر گرفته شده است. همان طور که در جدول ۱.۵ ذکر شده است، جرم پنجه برای ربات بزرگ  $۳۴\text{Kg}$  و برای ربات کوچک  $۴/۴\text{Kg}$  تنظیم شده است. چگالی طول کابل ها برای ربات کوچک  $۱۰/۲\text{g/m}$  و برای ربات بزرگ تر  $۷۲/۴\text{g/m}$  است، که به نسبت جرم پنجه ربات به کابل  $۴/۱۴$  برای ربات کوچک و  $۰/۶۲$  برای ربات بزرگ تر نتیجه می دهد. همان طور که در [۲۵] پیشنهاد شده است، این شرایط نشان دهنده تأثیر قابل توجه خم شدگی برای ربات بزرگ تر است.

دو ردیف اول جدول ۱.۵ درصد خطاهای میانگین در طول کابل پیش بینی شده (MPE-L) و همچنین این خطا برای نیرو (MPE-F) محاسبه شده در ۵ مکان ایستای تصادفی را ارائه می دهد. این مقادیر نشان دهنده تطابق نزدیک بین نیروی کابل و مقادیر طول کابل خم شده محاسبه شده از مدل ریاضی ارائه شده و مقادیر مربوطه

جدول ۱.۵: صحت سنجی مدل

کوچک مقیاس	بزرگ مقیاس	سناریو
$7/3595 \times 10^{-3}$	$8/8947 \times 10^{-3}$	MPE-L (%)
0/9046	0/9154	MPE-F (%)
$[10/8, 25/9]$	$[134/7, 200/7]$	$[l_{\min}, l_{\max}](m)$
$[12/4, 26/2]$	$[489/1, 954/3]$	$[f_{\min}, f_{\max}](N)$
$12/5 \times 4/5 \times 28/5$	$240 \times 220 \times 50$	اندازه ربات ( $m^3$ )
4/4	34/0	جرم پنجه ربات (Kg)
$\rho = 1/44 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\rho = 1/44 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	مشخصات کابل
شعاع = 1/5 (mm)	شعاع = 4/0 (mm)	

از شبیه ساز می باشد. به طور خاص، برای ربات بزرگ مقیاس، این خطاهای MPE-F و MPE-L به ترتیب برابر با ۰/۰۰۸۹٪ و ۰/۹۱۵۴٪ ارزیابی شده است، که بسیار کوچک تر از دامنه های طول کابل و نیروهای ایجاد شده برای هر کابل، مطابق مقادیر گزارش شده در جدول، می باشد. همان طور که به طور شهودی انتظار می رود، این تطابق برای ربات کابلی کوچک تر دقیق تر است. مقادیر مربوط به طول کابل و نیروهای پیش بینی شده در ستون سوم این جدول نشان دهنده این موضوع می باشند.



شکل ۴.۵: سناریوی ربات بزرگ مقیاس در محیط شبیه ساز RecurDyn

### ۲.۵.۵ نتایج نهایی کالیبراسیون با گراف عامل توسعه داده شده

در قسمت، روش کالیبراسیون را که در بخش ۴.۵ توضیح داده شده است، پیاده سازی می کنیم و اهمیت مدل سازی خم شدگی کابل را از طریق نتایج شبیه سازی نشان می دهیم. علاوه بر این، به طور خلاصه به مسئله مقداردهی اولیه کالیبراسیون پرداخته و یک راه حل احتمالی را همچون فصل قبل، پیشنهاد می کنیم.

هدف ما در فرآیند کالیبراسیون سینماتیکی، تعیین مکان های نقطه های پولی و طول اولیه کابل ها با استفاده از اندازه گیری های مجموعه ای از مکان های پنجه ربات، اندازه گیری های طول نسبی کابل و تنها مقادیر کشش کابل مرجع در نقطه اتصال پنجه است. طبق آزمایشات و نتایجی که از طیف وسیعی از داده ها استخراج شده است، توزیع نمونه ها بایستی به طور جامع فضای کاری ربات را پوشش دهد. تحلیل و توسعه مسیر مناسب برای جمع آوری کمترین تعداد داده در جهت انجام فرآیند کالیبراسیون موفق، به موضوع تحقیق آینده برای تکمیل این کار محول می شود.

ما داده های حسگر شبیه سازی شده خود را از نرم افزار RecurDyn دریافت کردیم و تغییرات نویز گاوسی میانگین صفر را برای وارد کردن نویز پیش بینی شده حسگر معرفی کردیم. به طور خاص، ما انحراف استاندارد<sup>۱</sup> ۱۰mm برای طول کابل، ۵N برای حسگر نیرو در ربات بزرگ مقیاس و ۱N برای حسگر ربات کوچک مقیاس اعمال کردیم. مکان های پنجه ربات با  $\Delta T = \exp(\xi)$  که در آن  $\xi \in \mathfrak{se}(3)$  عنصر جبر لی<sup>۲</sup> متناظر با بردار پیچش<sup>۳</sup>  $\xi \in \mathbb{R}^6$  است، دچار تغییر شده اند. این بردارهای پیچش تغییرات، از توزیع گاوسی میانگین صفر  $\xi \sim \mathcal{N}(0, \Sigma)$  با ماتریس کوواریانس  $\Sigma$  با انحراف ۰/۰۰۵ متر در درجات انتقالی و ۰/۰۱ رادیان در درجات آزادی چرخشی نمونه برداری شده اند. برای مقداردهی اولیه گراف عامل، مکان های نقطه های پولی از شبیه ساز به عنوان داده های مرجع را با دامنه ۱ متر برای ربات کوچک و ۱۰ متر برای ربات بزرگ دچار تغییر کردیم. علاوه بر این، این تغییرات برای مقادیر اولیه طول کابل ها، ۱۰ متر و ۸۰ متر برای ربات کوچک و بزرگ، به ترتیب، تنظیم شد. ما تخمین اولیه برای نیروی کابل مرجع در محور عمودی را به عنوان:

$$f_{v_s}^{ref} = \frac{m_e g}{4} \quad (15.5)$$

در نظر گرفتیم و برای محور افقی نیز به صورت زیر:

$$f_{h_s}^{ref} = \frac{f_{v_s}^{ref}}{\tan(\alpha)} \quad (16.5)$$



جدول ۲.۵: نتایج میانگین خطای مطلق کالیبراسیون با استفاده از گراف عامل توسعه داده شده

میانگین خطا (متر)	مقیاس بزرگ (۹ داده)	مقیاس بزرگ (۱۸ داده)	مقیاس بزرگ (۳۵ داده)	مقیاس کوچک (۸ داده)
پولی (متر)	۰/۳۸۷	۰/۲۲۶	۰/۱۹۱	۰/۱۴۹
طول اولیه کابل (متر)	۰/۳۸۰	۰/۲۱۷	۰/۱۷۳	۰/۱۱۵

که در آن  $\alpha$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\alpha = \arccos \left( \frac{\hat{s}_{ref}^T \cdot [p_{bref} - p_{aref}]}{\|p_{bref} - p_{aref}\|} \right) \quad (۱۷.۵)$$

در این تعریف،  $\hat{s}_{ref}$  بردار واحدی است که در بخش ۲.۵ تعریف شده است و از تخمین های اولیه مکان پولی استفاده می کند. این نقاط باید به پولی های مربوط به کابل مرجع متقابل مربوط شوند.

نتایج کالیبراسیون برای مکان های پولی و طول اولیه کابل در جدول ۲.۵ ارائه شده است. این نتایج مربوط به سناریوهای نشان داده شده در شکل ۳.۵ و شکل ۴.۵ است، که در آن مکان های اولیه پولی با ستاره های قرمز و مکان های بهبود یافته پولی با دایره های زرد برای هر دو مورد نشان داده شده است. در این جدول، سه سناریوی مختلف کالیبراسیون برای ربات بزرگ مقیاس با تعداد مختلف نقاط نمونه برداری شده (یا همان تعداد داده ها برای کالیبراسیون) برای فرآیند بهینه سازی گزارش شده است. همان طور که انتظار می رود، دقت کالیبراسیون با افزایش تعداد داده های نمونه برداری بهبود می یابد. بنابراین جدول ۲.۵ نتایج دقیق تری را با ۳۵ نمونه داده برای ربات بزرگ و ۸ نمونه برای ربات کوچک ارائه می دهد. ما معتقدیم که برای ربات بزرگ تر، پارامترهای مربوط به خم شدگی کابل تأثیر عمیق تری بر دقت کالیبراسیون دارند. این موضوع به نوبه خود تعداد مؤثر پارامترهای مدل را افزایش می دهد و نیاز به نقاط نمونه برداری بیشتری برای شناسایی مناسب دارد.

حل شدن مسئله بهینه سازی کالیبراسیون در کنار زنجیره ای از پارامترهای مکان یابی که به مدل کابل، داده های حسگری پنجه ربات و وضعیت مفصل های ربات مقید شده است، حلی دقیق تر از مسئله را برای ما فراهم می کند. حرکت ربات در فضا می تواند منجر به ایجاد وضعیت های ایستا شود که در هر کدام از این وضعیت ها، قیدهای مربوط به سینماتیک به زنجیره مکان یابی متصل می شود. وجود تعدادی محدود از این قیود می تواند نقش مهمی در بهبود مکان ربات پس از مدتی حرکت در فضا را ایجاد کند و از خطاهای جمع شونده که از نویز حسگرها القا می شود، جلوگیری شود. عملکرد این قید همچون نشانگرهایی که در SLAM مورد استفاده قرار می گیرند، در اینجا نیز بسیار کارآمد هستند. از آنجایی که هدف ما در این فصل توسعه پایه و اساس الگوریتم مد نظر و

مقیدسازی آن با قیدهای پیچیده تر بود، از ایجاد پیچیدگی بیشتر در قسمت مکان یابی اجتناب گردید. افزودن قیود مکان یابی و توسعه بیشتر الگوریتم در این راستا، کار دشواری نخواهد بود.

موضوع دیگری که در فرمول بندی تعریف شده مورد توجه قرار دارد، صادق بودن معادلات طول خم شده کابل در حالت ایستای ربات است. به همین دلیل، داده هایی که برای کالیبراسیون مورد استفاده قرار داده شد، داده های حالت های ایستای ربات بودند. البته، حل مسئله در فضایی جامع تر، و نه محدود به داده های ایستا، نیازمند تغییر فرمول بندی به معادلات در فضای اجزای محدود می باشد. این توسعه و تحقیق به کارهای آینده سپرده شده است.

## ۶.۵ بحث

### ۱.۶.۵ اهمیت در نظر گرفتن اثر خم شدگی کابل

برای بررسی اهمیت در نظر گرفتن اثر خم شدگی کابل، فرآیند کالیبراسیون را برای ربات بزرگ تر با استفاده از گراف عامل ساده سازی شده که مدل کابل بی وزن صلب را که در فصل پیشین معرفی شد استفاده می شود. به عبارتی دیگر، گراف عامل مربوط به خم شدگی کابل را از گراف توسعه یافته در این فصل حذف می شود. در نتیجه، به دلیل این ساده سازی، خطای میانگین مطلق به طور قابل توجهی از  $0.19$  به  $0.34/2$  متر افزایش یافته است که نشان دهنده کاهش قابل توجهی در دقت کالیبراسیون است. این تفاوت قابل توجه در کیفیت کالیبراسیون اهمیت حیاتی در نظر گرفتن خم شدگی کابل را تاکید می کند.

### ۲.۶.۵ نکات مربوط به روش مقداردهی اولیه

همان طور که در [۲۰] ذکر شده است، یکی از نگرانی های اصلی در حل مسئله بهینه سازی کالیبراسیون غیر مقعر و غیر خطی، مقداردهی اولیه صحیح آن است. اگر مقادیر اولیه به اندازه کافی نزدیک به راه حل جهانی مسئله نباشند، نتیجه ممکن است به شدت منحرف شود یا بهینه ساز حتی ممکن است واگرا شود. چارچوب ارائه شده در [۲۰] که در فصل پیشین نیز مورد استفاده قرار گرفت، تلاش می کند تا این مسئله مقداردهی اولیه را با استفاده از خروجی تقریبی یک الگوریتم بهینه سازی جهانی مونت کارلو حل کند. با این حال، [۲۰] مدل کابل صلب بدون اثرات خم شدگی را فرض می کند. ما معتقدیم که این الگوریتم به طور مستقیم می تواند برای مقداردهی اولیه مسئله کالیبراسیون توسعه یافته ارائه شده در این فصل به کار رود. همان طور که قبلاً ذکر شد، دقت کالیبراسیون ربات کابل بزرگ با مدل کابل ساده شده  $0.34/2$  متر بود. این مقدار به طور قابل توجهی کوچکتر

از تغییرات ما در طول آزمایشات کالیبراسیون (۱۰ متر) است. این نشان می دهد که ما می توانیم با خیال راحت الگوریتم بهینه سازی خود را با خروجی های الگوریتم مشابهی که در [۲۰] ارائه شده است، مقداردهی اولیه کنیم. تأیید این فرضیه برای موارد خاص ارائه شده در این فصل به دلیل محدودیت های شبیه ساز مورد استفاده برای تولید تصاویر/داده های حسگر LiDAR مورد نیاز برای اجرای این الگوریتم امکان پذیر نبود. بررسی این ایده با استفاده از شبیه سازهای واقع گرایانه موضوع تحقیق آینده ی ما است.

## ۷.۵ نتیجه گیری

این فصل با هدف توسعه گراف عامل معرفی شده در فصل قبل، بررسی میزان دشواری افزودن قید به یک مسئله فرمول بندی شده در فضای گراف، ایجاد شد. همانطور که نشان داده شد، مقیدسازی این مسئله، حتی با وجود قیدهای بسیار پیچیده، در این فضای گراف پایه کاری نه چندان دشوار است. این فصل در راستای القای این هدف، شرایطی از کالیبراسیون و مکان یابی یک ربات واقعی را ایجاد کرده و نتایج بسیار ارزشمندی را برای اولین بار در فضای کابلی مقیاس بزرگ با استفاده از روش های بهینه سازی گراف پایه ارائه داده است.

نتایج به دست آمده در این فصل نشان می دهد که مدل سازی دقیق اثر خم شدگی کابل ها در ربات های کابلی، تأثیر قابل توجهی در بهبود دقت کالیبراسیون و مکان یابی دارد. با استفاده از گراف عامل پیشنهادی، امکان بررسی و مدل سازی دقیق تر شرایط واقعی کابل های خم شده فراهم شده است که در نهایت منجر به کاهش خطاهای ناشی از فرضیات ساده سازی شده در مدل های پیشین شده است. این امر، اهمیت استفاده از مدل های دقیق و جامع تر را در حل مسائل کالیبراسیون و مکان یابی ربات ها نشان می دهد.

فرمول بندی توسعه داده شده در این فصل، با بهره گیری از معادلات سینماتیک-ایستا و استفاده از گراف عامل، توانسته است مکان های پولی و طول های اولیه کابل ها را با دقت بالایی تخمین بزند. نتایج شبیه سازی ها نشان داده است که دقت کالیبراسیون به تعداد داده های نمونه برداری شده بستگی دارد و با افزایش این داده ها، نتایج دقیق تری به دست می آید. این رویکرد نه تنها توانسته است عملکرد ربات های کابلی را در شرایط مختلف بهبود بخشد، بلکه نشان دهنده اهمیت توجه به اثرات پیچیده تر دینامیکی مانند خم شدگی کابل در فرآیندهای کالیبراسیون در نهایت، تحقیقات انجام شده در این فصل، راه را برای مطالعات بیشتر در زمینه بهبود الگوریتم های کالیبراسیون ربات ها با در نظر گرفتن اثرات دینامیکی هموار کرده است. با این حال، در این فصل علیرغم ایجاد یک شالوده محکم برای پیش برد اهداف تحقیقاتی آینده، برخی از مسائل مانند ادغام داده های حسگری اضافه با دقت بالا برای اهداف همجوشی حسگرها و بهبود روش های مقداردهی اولیه با استفاده از راه حل های کارآمد معرفی شده در این حوزه، به تحقیق و بررسی های آینده موکول گردیده است.





## فصل ۶

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای آینده

### ۱.۶ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، در فصل اول و دوم، ابتدا مروری بر مسائل بهینه‌سازی در ادبیات ربات‌ها صورت گرفت. مشاهده شد که این مسائل با توجه به اهداف کاربردی ربات‌ها، می‌توانند دارای ماهیت‌های متفاوت، اما ضروری باشند. با نگاهی اجمالی به ادبیات موضوع، مشخص شد که این مسائل بهینه‌سازی می‌توانند در راستای فرمول‌بندی یک مسئله کالیبراسیون دینامیکی یا سینماتیکی، مکان‌یابی، ردیابی، نقشه‌برداری، یا ترکیبی از این موارد باشند. در فصل سوم، با آغاز فرمول‌بندی‌های مرسوم برای ایجاد یک مسئله کالیبراسیون و مکان‌یابی همزمان، به نقطه ضعف‌هایی برخوردیم که نه تنها ایجاد فرمول‌بندی مورد نظر را دشوار می‌کردند، بلکه در حل چنین مسائل پیچیده‌ای به صورت زمان واقعی با تعداد بسیار زیادی داده، ناتوان بودند. از سوی دیگر، انعطاف‌پذیری الگوریتم برای افزودن قیود جدید به مسئله بدون تغییر در فرمول‌بندی، برای ما بسیار حائز اهمیت بود، زیرا مقیدسازی سینماتیکی می‌تواند دقت مکان‌یابی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. با در نظر گرفتن تمامی این نکات و استفاده از آخرین روش‌ها و حل‌کننده‌های موجود در رباتیک، الگوریتم‌های گراف مبنا را به‌عنوان راه‌حلی مناسب در فضای حل احتمالاتی این مسائل انتخاب کردیم. بدین ترتیب، از مکان‌یابی یک ربات شروع کردیم و با توسعه گراف عامل مناسب، مسائل کالیبراسیون در سطوح مختلف و همچنین قیود ضروری، به گراف توسعه‌یافته متصل گردید. در انتهای این فصل، گراف عامل جامع پیشنهادی خود برای حل مسئله کالیبراسیون و مکان‌یابی ربات‌ها، با تمرکز بر رفع مشکلات روش‌های مرسوم، معرفی شد.

در ادامه، برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی، از میان ربات‌های موجود، ربات کابلی آسان‌نصب انتخاب گردید. علت این انتخاب، اهمیت انجام همزمان فرآیند کالیبراسیون و مکان‌یابی این ربات‌ها در کوتاه‌ترین زمان

ممکن برای ایجاد مفهوم یک ربات آسان نصب بود. بدین ترتیب، در فصل چهارم، با استفاده از ربات کابلی صلب توسعه‌یافته در مجموعه آزمایشگاهی ارس، الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. در این پیاده‌سازی، اهمیت قیود سینماتیکی در بهبود نتایج مکان‌یابی یکی از چالش‌های مورد بررسی بود. علاوه بر این، کالیبراسیون سینماتیکی به‌صورت خودکار برای ربات، در حالی که مکان‌یابی در حال انجام بود، صورت گرفت و نتایج قابل قبولی از نظر سرعت الگوریتم و توانایی آن در برآورد اهداف ما به‌دست آمد.

در نهایت، برای محک‌زدن روش پیشنهادی و همچنین نمایش انعطاف‌پذیری آن، گامی جدید در ادبیات ربات‌های کابلی برداشته شد. فصل پنجم، به حل همان مسئله ربات‌های کابلی که در فصل چهارم مطرح شده بود، می‌پردازد. اما آنچه به‌عنوان نوآوری این فصل و نقطه پایانی کار معرفی گردید، افزودن یکی از پیچیده‌ترین قیود دینامیکی به مسئله ربات‌های کابلی برای مدل‌سازی واقعی‌تر کابل و گسترش روش موردنظر برای همه ربات‌های کابلی بدون نگرانی از ابعاد ربات و مسئله خم‌شدگی کابل‌ها بود. نتایج کالیبراسیون برای دو دسته ربات کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس در یک شبیه‌ساز اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. بررسی و مقایسه این نتایج با به‌کارگیری روش‌های فصل چهارم، علاوه بر بهبود قابل توجه، نقطه عطفی برای تحقیقات در زمینه ترکیب سنسورها و کاربرد آن‌ها در مسائل ربات‌های کابلی بود.

## ۲.۶ پیشنهادات برای آینده

در مسیر انجام این پایان‌نامه، موانع متعددی به وجود آمد که گذر از آنها افق‌های جدیدی را برای نویسنده نمایان کرد و چشم‌اندازهای تازه‌ای را در جهت ایجاد نقطه‌ای مفید در این حوزه مشخص ساخت. علاوه بر نظراتی که در راستای توسعه الگوریتم ایجاد شده است، نظرات متعددی نیز در بخش پیاده‌سازی به وجود آمدند، چرا که پیچیدگی حل چنین مسائلی در ربات‌های کابلی باعث شده است تحقیقات مفید و کارآمدی در این زمینه کمتر صورت گیرد. برخی از این پیشنهادات در گروه در حال پیش‌برد می‌باشند و برخی به عنوان کارهای بعدی مدنظر خواهند بود.

- ایجاد گراف‌های عامل با استفاده از کتابخانه **SymForce**: در این پایان‌نامه، از کتابخانه **GTSAM** برای ایجاد گراف‌های عامل استفاده شده است. یکی از چالش‌برانگیزترین بخش‌های حل مسئله، محاسبه ژاکوبین مدل بود. نرم‌افزارهای متعددی مانند **Maple** و **MATLAB** و همچنین کتابخانه‌های مختلفی همچون **SymPy** در پایتون و **AutoDiff** در **C++** مورد استفاده قرار گرفتند. با این حال، حجم بسیار بالای معادلات دینامیکی کابل‌ها، مانع از به دست آوردن پاسخ در این بسترها شد.

در نهایت، با استفاده از کتابخانه SymForce که مشتق‌گیری‌ها را با روش‌های مشتق‌گیری خودکار<sup>۱</sup> انجام می‌دهد، موفق شدیم تمامی مشتق‌های مورد نیاز را در زمانی کمتر از ۳۰ ثانیه محاسبه کنیم. پیشنهاد ما در این بخش، نه تنها استفاده از این کتابخانه برای به دست آوردن ژاکوبین‌های مورد نیاز است، بلکه پیشنهاد می‌شود که گراف‌های عامل توسعه‌یافته نیز با استفاده از روش‌هایی که به تازگی توسط این کتابخانه ارائه شده، ایجاد شوند. ما معتقدیم که این رویکرد می‌تواند فرآیند ایجاد گراف‌های عامل را به طور قابل توجهی ساده‌تر کند.

#### • پیاده‌سازی ماژول بهینه‌ساز سینماتیک-استاتیک ربات کابلی توسعه‌یافته در راستای بهبود دقت

ردیابی: در زمینه ربات‌های کابلی، ادغام داده‌های سینماتیکی می‌تواند به طور قابل توجهی در بهبود نتایج ردیابی کمک کند. در فصل چهارم این پایان‌نامه، بخشی از نتایج این موضوع را اثبات کردند. وقتی به حوزه ربات‌های مقیاس‌بزرگ وارد می‌شویم، در نظر گرفتن دینامیک کابل، همانطور که در فصل پنجم مشاهده شد، بسیار حائز اهمیت می‌شود.

در همین راستا، مقاله [۲۲] در سال‌های اخیر سعی در توسعه روشی برای ردیابی ربات‌های کابلی با در نظر گرفتن جرم کابل، به صورت منابع باز داشته است. حل‌کننده‌ی پیشنهادی آنها، CERES<sup>۱</sup> علی‌رغم توانایی بالای خود در حل مسئله، عیوب روش‌های مرسوم را دارد.

در قسمتی از کارهای انجام شده توسط ما، بررسی حل‌کننده مورد استفاده توسط این مقاله برای ربات‌های مقیاس‌بزرگ بوده است. در حالی که نتایج حل بهینه‌سازی توسط گراف عامل پیشنهادی ما و حل پیشنهادی این مقاله برای ربات‌های کوچک مقیاس مشابه بود، افزایش ابعاد ربات باعث واگرایی در الگوریتم ارائه شده در مقاله می‌شود. این در حالی است که گراف عامل پیشنهادی به خوبی برای ربات‌های مقیاس‌بزرگ نتیجه را دنبال می‌کند.

علاوه بر این، در این مقاله برای ادغام نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی با حسگرهای مختلف از فیلتر کالمن استفاده شده است که خود نیاز به ایجاد ساختاری جدا و اتصال این دو، و همچنین ادغام مناسب داده‌های حسگر اینرسی-بینایی دارد. روش پیشنهادی ما استفاده از ماژول طراحی شده است. استفاده از این ماژول نه تنها منجر به همگرایی در ربات‌های با ابعاد بزرگ‌تر می‌شود، بلکه ادغام حسگرها برای قسمت ردیابی بسیار راحت‌تر و منجر به حل دقیق‌تری می‌شود. افزون بر این موارد، گره‌هایی که به تازگی برای ادغام حسگرهای اینرسی در این حوزه معرفی شده‌اند، بسیار ارزشمند خواهند بود. لازم به ذکر است که این ماژول با استفاده از معادلات ارائه شده در فصل پنجم ایجاد شده است که یکی از ویژگی‌های مهم آن حذف نیاز به حسگر نیرو، با استفاده از قیدهای سینماتیک وارون می‌باشد.

<sup>۱</sup> Differentiation Automatic



• **کالیبراسیون حسگر UWB با استفاده از گراف عامل پیشنهادی:** حسگرهای UWB به دلیل ویژگی‌های خاص خود در کاربردهای مختلف تعیین مکان در حوزه‌های نقشه‌برداری و رباتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این حسگرها را می‌توان در دو سطح کالیبراسیون بررسی کرد.

سطح اول، حذف بایاس‌های اولیه است. این نوع کالیبراسیون، مشابه روش ارائه‌شده در فصل چهارم است. به عبارتی، اگر در گراف عامل فصل چهارم حسگرهای نیرو حذف شوند و مقادیر اندازه‌گیری حسگرهای UWB جایگزین مقادیر اندازه‌گیری انکودر شوند، نه تنها قادر به تعیین این آفست‌ها خواهیم بود، بلکه مکان اتصال آن‌ها می‌تواند به عنوان مکان پولی‌ها در نظر گرفته شده و یک مسئله بهینه‌سازی ایجاد شود.

سطح دوم کالیبراسیون این حسگرها، در نظر گرفتن این بایاس اولیه به عنوان پارامتری متغیر با زمان است. به عبارتی، گراف عامل فصل چهارم را در حالتی ایجاد کنیم که بایاس حسگر UWB همانند متغیر سینماتیکی مجموعه، همانطور که در انتهای فصل سوم بررسی شد، در حال تغییر باشد. بدین ترتیب، کالیبراسیون با دقت بالایی به صورت زمان واقعی انجام می‌شود. انجام این سطح کالیبراسیون نسبت به سطح اول، حذف بایاس‌های متغیر با زمان سیستم می‌باشد که در سطح اول از آنها صرف نظر می‌شود. این پیشنهاد در مرحله اجرا توسط اعضای تیم آزمایشگاهی ارس می‌باشد.

• **پیاده‌سازی الگوریتم گراف پیشنهادی برای ربات‌های واقعی مقیاس بزرگ:** تمامی موارد بررسی شده در فصل چهارم بر روی ربات کابلی واقعی توسعه‌یافته در تیم آزمایشگاهی ارس پیاده‌سازی شده‌اند. در فصل پنجم، این پیاده‌سازی واقعی نیازمند یک ربات در ابعاد ورزشگاه بزرگ است که با توجه به امکانات فعلی، پیاده‌سازی واقعی برای ما مقدور نبوده است. همچنین هیچ‌گونه دیتاستی از چنین ربات با ابعاد بزرگ در اینترنت نیز در دسترس نیست. به همین دلیل، از داده‌های شبیه‌سازی نرم‌افزار RecurDyn استفاده کردیم. البته که نتایج خود، نویزهای شدیدی که برای نزدیک شدن به یک پیاده‌سازی واقعی در نظر گرفته ایم. پیشنهاد ما پیاده‌سازی مجدد روش‌های پیشنهادی در فصل پنجم بر روی یک ربات واقعی است. تمامی کدهای مورد نیاز برای این پیاده‌سازی به صورت منابع باز در Github قرار داده شده است.

• **ایجاد شبیه‌ساز مناسب ربات کابلی با استفاده از توابع آماده شده:** ما برای توسعه یک ربات کابلی با ابعاد بزرگ نرم‌افزارهای متعددی مورد بررسی قرار دادیم که از انجام این شبیه‌سازی باز ماندند. بهترین نرم‌افزاری که با محاسبات بسیار طولانی و زمان‌بر ما را به جواب رساندند، نرم‌افزار RecurDyn بوده است. پیشنهاد ما توسعه یک محیط گرافیکی مناسب برای معرفی یک نرم‌افزار شبیه‌ساز کابل با در نظر گرفتن جرم کابل، با استفاده از توابع سینماتیکی و مکان‌یابی معرفی شده در فصل‌های اخیر می‌باشد. چنین نرم‌افزاری که دارای سرعت بالا باشد طبق آخرین تحقیقات ما توسعه نیافته است.

- ایجاد یک شبیه‌ساز مناسب ربات کابلی با استفاده از توابع آماده‌شده: ما برای توسعه یک ربات کابلی با ابعاد بزرگ، نرم‌افزارهای متعددی را مورد بررسی قرار دادیم، اما اغلب آن‌ها نتوانستند شبیه‌سازی مورد نظر ما را انجام دهند. بهترین نرم‌افزاری که با وجود محاسبات طولانی و زمان‌بر، توانست به نتایج مطلوب برسد، نرم‌افزار RecurDyn بود. پیشنهاد ما توسعه یک محیط گرافیکی مناسب برای معرفی یک نرم‌افزار شبیه‌ساز کابل با در نظر گرفتن جرم کابل، و استفاده از توابع سینماتیکی و مکان‌یابی معرفی‌شده در فصل‌های اخیر است. تاکنون، طبق آخرین تحقیقات ما، چنین نرم‌افزاری که دارای سرعت بالا باشد، توسعه نیافته است.
- توسعه فرمول‌بندی ریاضی بیان‌شده به ریاضیات اجزای محدود به جای مدل‌های استاتیک معرفی‌شده: مدل توسعه‌یافته برای کابل‌ها در این پایان‌نامه، مبتنی بر مدل‌های ریاضی است که در حالت استاتیک ربات و ثابت بودن کابل‌ها ایجاد شده‌اند. ادغام این الگوریتم با بیان ریاضی فعلی و قیدهای دینامیکی در ربات‌های کابلی به صورت مستقیم امکان‌پذیر نخواهد بود. یکی از پیشنهادها مناسب در امتداد این کار، تغییر فرمول‌بندی به مدلی جامع‌تر است که قابلیت ادغام با تمامی قیدهای دینامیکی ربات را داشته باشد. این تغییر می‌تواند به استفاده مؤثرتر از ریاضیات اجزای محدود به جای مدل‌های استاتیک منجر شود که راه‌حلی برای ما خواهد بود.
- بررسی مسیر مناسب برای جمع‌آوری داده کافی برای کالیبراسیون دقیق: همان‌طور که در نتایج مشاهده شد، برای ربات کابلی با مقیاس بزرگ، افزایش تعداد داده‌ها منجر به نتیجه‌ای بهتر در کالیبراسیون خواهد شد، چرا که پارامترهای غیرخطی بسیاری در مدل درگیر هستند. مسیری که در آزمایشات ما طی شد، یک مسیر تصادفی بود که شامل قسمت‌های مختلفی از فضای کاری ربات می‌شد. پیشنهاد ما بررسی این موضوع برای یافتن مسیری بهینه، و نه تصادفی، جهت تسریع فرآیند کالیبراسیون است. این موضوع می‌تواند به بهبود دقت و کاهش زمان کالیبراسیون کمک شایانی کند.
- ترکیب حسگرها و ماژول‌های آماده مختلف: در نهایت، این پایان‌نامه بستری کامل برای حل مسائل کالیبراسیون و مکان‌یابی ربات‌ها ایجاد کرده است. بررسی تحقیقات تکمیلی جهت بهبود نتایج و استفاده از ماژول‌های معرفی‌شده در حوزه رباتیک و به‌ویژه شاخه SLAM می‌تواند نقطه عطف تازه‌ای بین روش‌های موجود در ربات‌های کابلی و روش‌های موجود در دیگر ربات‌ها مانند ربات‌های خودران باشد. این نکته به‌عنوان پیشنهاد ما مطرح می‌شود زیرا اولین هدف ما، حرکت به سمت الگوریتمی منعطف بوده است تا تحقیقات در این حوزه‌ها بیشتر به هم متصل شوند.



## 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] Leitinger, 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] Wilbers, Daniel, Merfels, Christian, and Stachniss, Cyrill. Localization with sliding window factor graphs on third-party maps for automated driving. in *2019 International conference on robotics and automation (ICRA)*, pp. 5951–5957. IEEE, 2019.
- [16] Dai, Jun, Liu, Songlin, Hao, Xiangyang, Ren, Zongbin, and Yang, Xiao. Uav localization algorithm based on factor graph optimization in complex scenes. *Sensors*, 22(15):5862, 2022.
- [17] Hassani, A, Dindarloo, MR, Khorambakht, R, Bataleblu, A, Sadeghi, H, Heidari, R, Iranfar, A, Hasani, P, Hojati, NS, Khorasani, A, et al. Kinematic and dynamic analysis of arash asist: Toward micro positioning. in *2021 9th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, pp. 59–65. IEEE, 2021.
- [18] Forster, Christian, Pizzoli, Matia, and Scaramuzza, Davide. SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry. in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014.
- [19] Blueml, Julian, Fornasier, Alessandro, and Weiss, Stephan. Bias compensated uwb anchor initialization using information-theoretic supported triangulation points. in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5490–5496. IEEE, 2021.
- [20] Khorrambakht, Rooholla, Damirchi, Hamed, Dindarloo, MR, Saki, A, Khalilpour, SA, Taghirad, Hamid D, and Weiss, Stephan. Graph-based visual-kinematic fusion and monte carlo initialization for fast-deployable cable-driven robots. in *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1832–1839. IEEE, 2023.

- [21] Dellaert, Frank. Factor graphs and gtsam: A hands-on introduction. *Georgia Institute of Technology, Tech. Rep*, 2:4, 2012.
- [22] Allak, Eren, Khorrambakht, Rooholla, Brommer, Christian, and Weiss, Stephan. Kinematics-inertial fusion for localization of a 4-cable underactuated suspended robot considering cable sag. in *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4989–4996. IEEE, 2022.
- [23] Martiros, Hayk, Miller, Aaron, Bucki, Nathan, Solliday, Bradley, Kennedy, Ryan, Zhu, Jack, Dang, Tung, Pattison, Dominic, Zheng, Harrison, Tomic, Teo, et al. Symforce: Symbolic computation and code generation for robotics. *arXiv preprint arXiv:2204.07889*, 2022.
- [24] Idà, Edoardo, Briot, Sébastien, and Carricato, Marco. Natural oscillations of underactuated cable-driven parallel robots. *IEEE Access*, 9:71660–71672, 2021.
- [25] Pott, Andreas and Bruckmann, Tobias. *Cable-driven parallel robots*. Springer, 2013.
- [26] Carricato, Marco. Direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with three cables. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 5(3):031008, 2013.
- [27] Borgstrom, Per Henrik, Jordan, Brett L, Borgstrom, Bengt J, Stealey, Michael J, Sukhatme, Gaurav S, Batalin, Maxim A, and Kaiser, William J. Nims-pl: A cable-driven robot with self-calibration capabilities. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(5):1005–1015, 2009.
- [28] FunctionBay, Inc. Recurdyn: Multi-body dynamics cae software. <https://functionbay.com/en/page/single/2/recurdyn-overview>, 2023.
- [29] Martiros, Hayk, Miller, Aaron, Bucki, Nathan, Solliday, Bradley, Kennedy, Ryan, Zhu, Jack, Dang, Tung, Pattison, Dominic, Zheng, Harrison, Tomic, Teo, Henry, Peter, Cross, Gareth, VanderMey, Josiah, Sun, Alvin, Wang, Samuel, and Holtz, Kristen. SymForce: Symbolic Computation and Code Generation for Robotics. in *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, 2022.





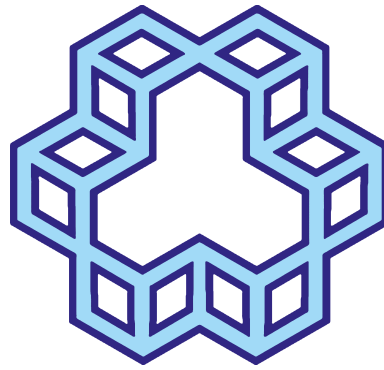


## Abstract

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