



دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی برق - گروه کنترل

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی برق

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

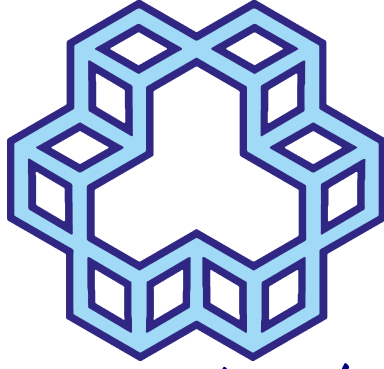
محمد رضا دیندارلو

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا تقی راد

تابستان ۱۴۰۳





دانشگاه خواجہ نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی برق - گروه کنترل

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد  
مهندسی برق

عنوان

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

نگارش

محمد رضا دیندارلو

استاد راهنما

دکتر حمید رضا تقی راد

استادان مشاور

دکتر فلیپ کاردو و دکتر سید احمد خلیل پور

تابستان ۱۴۰۳



تقدیم به:

به آنان که با علم خود زندگی آزاد می سازند



## تأییدیه هیئت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

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

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

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

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

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

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

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



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## اظہارنامہ 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 کرده ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی و غیره) با اینجانب رفتار خواهد شد. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی دانشجو: محمدرضا دیندارلو

تاریخ و امضای دانشجو:



## حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

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

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

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

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

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

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

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



## قدردانی

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

محمد رضا دیندارلو

تابستان ۱۴۰۳



چکیده

واژگان کلیدی



# فهرست مطالب

پ	فهرست تصاویر
ت	فهرست جداول
ث	فهرست الگوریتم‌ها
ج	فهرست برنامه‌ها
۱	فصل ۱: مقدمه
۳	فصل ۲: مروری بر مطالعات انجام شده
۵	فصل ۳: موقعیت‌یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان یک ربات کابلی با در نظر گرفتن کابل‌ها به صورت جسم صلب
۵	۱.۳ مقدمه
۶	۲.۳ روش‌های مرسوم موقعیت‌یابی و کالیبراسیون
۹	فصل ۴: موقعیت‌یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان یک ربات کابلی با در نظر گرفتن شکم دهی کابل‌ها
۱۱	فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای آینده
۱۳	مراجع

- پیوست آ: آشنایی سریع با برخی دستورات لاتک ۱۵
- پیوست ب: جدول، نمودار و الگوریتم در لاتک ۱۷
- پیوست پ: مراجع، واژه‌نامه و حاشیه‌نویسی ۱۹

# فهرست تصاویر

۱.۳ ..... ۷

## فهرست جداول



## فهرست الگوریتم‌ها

## فهرست برنامه‌ها



# فصل ۱

## مقدمه

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



## فصل ۲

# مروری بر مطالعات انجام شده

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



## فصل ۳

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

### ۱.۳ مقدمه

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



از طرفی دیگر، افزون بر مفهوم و ضرورت کالیبراسیون در این ربات‌ها، موقعیت‌یابی این ربات‌ها 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 ربات‌های خودران مورد استفاده قرار گرفته است.

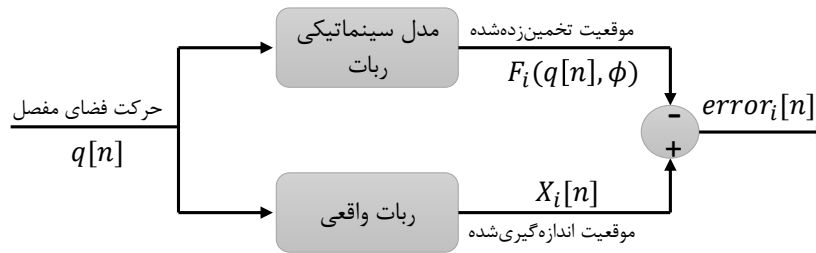
آنچه در ادامه این رساله مورد توجه قرار می‌گیرد، آدرس‌دهی جامع برای حل تمامی موارد بیان شده در بالا می‌باشد. بدین منظور، رویکردی معرفی می‌شود که در وهله اول مسائل کالیبراسیون و موقعیت‌یابی را به صورت یک مسئله یکپارچه در یک قاب ببیند و سپس انعطاف‌پذیری الگوریتم مجال افزودن حسگرهای اضافی را فراهم نماید. چنین رویکردی نه تنها انجام دو فرآیند مجزای کالیبراسیون و موقعیت‌یابی را به یک فرآیند ترکیب شده و همزمان تبدیل می‌کند، بلکه به راحتی می‌تواند به دیگر الگوریتم‌های ادبیات موضوع افزوده شود. نتیجه این رویکرد علاوه بر افزایش دقت نهایی این فرآیندها، مفهومی حقیقی‌تر به آسان نصب بودن به این دسته از ربات‌های کابلی می‌بخشد. الگوریتم پیشنهادی برای فرمول‌بندی این مسئله با آدرس‌دهی آنچه مورد نیاز ما است، الگوریتم گراف عامل می‌باشد. ویژگی‌های منحصر به فرد این الگوریتم در حل مسائل تنک مانند مسئله موقعیت‌یابی و نقشه‌برداری به صورت بر خط باعث استفاده زیادی از این فرمول‌بندی برای طیف وسیعی از کاربردهای رباتیکی در سال‌های اخیر شده است.

در این فصل حل مسئله موقعیت‌یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان برای یک ربات کابلی فروتحریک با در نظر گرفتن فرض اساسی صلب بودن کابل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالی که فرمول‌بندی مسئله با در نظر گرفتن این فرض بسیار ساده‌تر می‌شود، تا زمانی که شکم‌دهی کابل‌ها ناشی از جرم آنها بسیار ناچیز باشد، قابل قبول خواهد بود. حل این مسئله برای کابل شکم‌دار منجر به ایجاد چالش‌هایی می‌گردد که در فصل آتی به صورت مفصل به آنها پرداخته می‌شود و در نهایت با رویکرد پیشنهادی بار دیگر حل می‌گردد.

## ۲.۳ روش‌های مرسوم موقعیت‌یابی و 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.

فصل ۳: موقعیت‌یابی و کالیبراسیون به صورت همزمان یک ربات کابلی با در نظر گرفتن کابل‌ها به صورت جسم صلب ۷



شکل ۱.۳

آنچه در این کار مورد بررسی قرار گرفته است کالیبراسیون سینماتیکی می باشد. شکل فلان نمایش بلوکی از یک فرآیند کالیبراسیون سینماتیکی بنا بر تعریف بیان شده می باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود آنچه به عنوان خطا در نظر گرفته می شود تفاوت خروجی هایی می باشد 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 می باشد. با نگاهی به آخرین تحقیقات بر روی مسئله کالیبراسیون ربات ها، ایجاد یک مسئله بهینه سازی و حل آن برای یافتن مقادیر دقیق این پارامترهای سینماتیکی و دینامیکی ربات مرسوم می باشد [۲، ۳، ۴، ۵].



## فصل ۴

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

در فصل قبل کالیبراسیون و موقعیت‌یابی ربات کابلی با فرض در نظر گرفتن کابل‌های ربات به صورت جسمی صلب مورد بررسی قرار گرفت. علی‌رغم اینکه در نظر گرفتن این فرض موجب کاهش یافتن بار محاسباتی و ساده‌تر شدن مسئله می‌شود، این فرض تا زمانی صادق خواهد بود که مطابق معیار ارایه شده در [۶] نسبت جرم کابل به جرم مجری نهایی ربات قابل صرف نظر باشد. به عبارتی دیگر



## فصل ۵

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای آینده

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



## مراجع

- [1] Hall, David L and Llinas, James. An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1):6–23, 1997.
- [2] Elatta, AY, Gen, Li Pei, Zhi, Fan Liang, Daoyuan, Yu, and Fei, Luo. An overview of robot calibration. *Information Technology Journal*, 3(1):74–78, 2004.
- [3] Idà, 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] Pott, Andreas and Bruckmann, Tobias. *Cable-driven parallel robots*. Springer, 2013.





پیوست آ

آشنایی سریع با برخی دستورات لاتک



پیوست ب

جدول، نمودار و الگوریتم در لاتک



پیوست پ

مراجع، واژه‌نامه و حاشیه‌نویسی









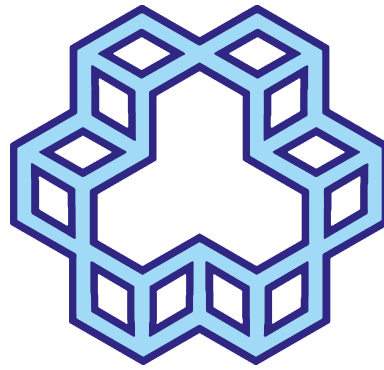


## Abstract

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

**Keywords** Writing Thesis, Template,  $\text{\LaTeX}$ ,  $\text{\Xy}$ 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