

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:

آنان که در پسِ دیوارهای بلند جامعه، مجال بالیدن و  
آموختن را نیافتند



## 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 فرمول‌بندی یکپارچه بهینه‌سازی 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

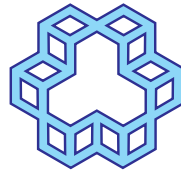
۲. استاد مشاور: دکتر فلیپ کاردو..... امضا

۳. استاد مشاور: دکتر سید احمد خلیل‌پور..... 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 فرمول‌بندی یکپارچه بهینه‌سازی 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 هیچ‌گونه 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 با راهنمایی و حمایت اساتید گرانقدر موفق به اتمام این رساله شده‌ام، بر خود واجب می‌دانم که نهایت سپاس و قدردانی را از تمامی عزیزانی که در این مسیر یار و همراه من بوده‌اند، به جا آورم: نخست، از استاد ارجمندم، دکتر تقی‌راد که با راهنمایی‌های ارزشمند خود در طی این پایان‌نامه همواره پشتیبان من بودند، صمیمانه تشکر می‌کنم. همچنین از دکتر خلیل‌پور که در تمامی مراحل این تحقیق، با مشاوره‌های خود راهگشای من بودند، صمیمانه قدردانی می‌نمایم. خالصانه، از تمامی اساتید، معلمان و مدرسانی که در طول دوره‌های مختلف تحصیلی مرا با گوهر دانش آشنا کرده و از سرچشمه علم سیراب نمودند، کمال سپاس را دارم. از صمیم قلب از دوستان عزیزم، روح‌الله خرم‌بخت، امیرسامان میرجلیلی، محمد مهدی ناظری، دانیال عبدالهی‌نژاد، مهدی وکیلی و دیگر اعضای آزمایشگاه ارس نهایت سپاسگزاری را دارم، چرا که پیشبرد این هدف بدون حضور و حمایت بی‌دریغ این عزیزان ممکن نبود.

محمد رضا دیندارلو

تابستان ۱۴۰۳





## چکیده

در دنیای امروز، تولیدکنندگان ربات‌ها به دنبال تسهیل استفاده و افزایش دقت عملکردی آن‌ها هستند، که این امر شامل کاهش فرآیندهای تکراری مانند کالیبراسیون حسگرها و ربات‌ها می‌شود. از طرفی دیگر، با توجه به اهمیت مکان‌یابی دقیق، تحقیقات اخیر به سوی روش‌های نوین مبتنی بر گراف و ترکیب داده‌های حسگرهای مختلف سوق یافته است. در این پایان‌نامه، از این نقطه آشنا آغاز کرده و روش‌های اخیر مورد بررسی قرار می‌گیرد و با استفاده از بستری که الگوریتم‌های مبتنی بر گراف فراهم می‌کنند، گرافی توسعه داده خواهد شد که نه تنها مکان‌یابی را به خوبی انجام دهد، بلکه کالیبراسیون حسگرها و حتی یک گام فراتر، کالیبراسیون ربات را نیز به صورت همزمان و بدون نیاز به فرآیندهای جداگانه انجام دهد. این روش باعث می‌شود تا مسئله‌ای یکپارچه و منعطف ایجاد شود که افزودن هر گونه قید به این مسئله، هیچ‌کدام از فرمول‌بندی‌های پیشین را تحت تأثیر قرار ندهد. الگوریتم انتخاب شده برای این فرمول‌بندی، گراف عامل است که توانایی آن در مدیریت پیچیدگی‌های محاسباتی به‌واسطه‌ی ماتریس‌های بهینه و بهره‌گیری از معماری گرافی، باعث تسریع در همگرایی حل و افزایش پایداری نتایج می‌شود. علاوه بر این، گراف‌های عامل امکان ادغام آسان داده‌های ناهمگن از حسگرهای مختلف را فراهم می‌کنند، که منجر به افزایش دقت و کاهش وابستگی به یک منبع خاص داده می‌شود. برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی، یک ربات کابلی موازی فروتحریک معلق در نظر گرفته شده است. ابتدا مسئله‌ای یکپارچه در فضای گراف ایجاد می‌شود که کالیبراسیون حسگر بینایی، مکان‌یابی و کالیبراسیون سینماتیکی ربات را به صورت همزمان و بدون نیاز به فرآیندهای پیشین انجام دهد تا مفهوم آسان-نصب تحقق یابد. سپس، برای بررسی انعطاف‌پذیری و ارزیابی گراف خود، معادلات شکم‌دهی کابل که از پیچیده‌ترین معادلات در فضای رباتیک است را به گراف اضافه کرده و نتایج بررسی خواهد شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی توانمندی بالای این روش در ایجاد یک فرمول‌بندی منعطف است که نه تنها سرعت انجام فرآیند را افزایش داده، بلکه دقت مکان‌یابی و کالیبراسیون را نیز بهبود می‌بخشد.

واژگان کلیدی    گراف عامل، کالیبراسیون، مکان‌یابی، ربات کابلی، SLAM



# فهرست مطالب

پ	فهرست تصاویر
ت	فهرست جداول
۱	فصل ۱: مقدمه
۳	فصل ۲: مروری بر پژوهش‌ها
۵	فصل ۳: کالبراسیون سینماتیکی مبتنی بر گراف
۵	۱.۳ مقدمه
۵	۲.۳ کالبراسیون سینماتیکی
۵	۳.۳ رویکرد مبتنی بر گراف برای حل مسئله کالبراسیون
۵	۴.۳ نتیجه‌گیری
۷	فصل ۴: پیاده‌سازی رویکرد مبتنی بر گراف برای کالبراسیون
۸	۱.۴ مقدمه
۸	۲.۴ توسعه گراف عامل برای ربات کابلی موازی کمال الملک
۸	۱.۲.۴ معرفی ربات
۸	۲.۲.۴ فرمول‌بندی مسئله
۸	۳.۴ تحلیل حساسیت
۸	۴.۴ نتایج پیاده‌سازی
۸	۵.۴ نتیجه‌گیری

۹	فصل ۵: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها
۱۱	مراجع
۱۳	پیوست آ: گراف عامل در رباتیک
۱۵	پیوست ب: پیاده‌سازی سخت افزار

# فهرست تصاویر

## فهرست جداول

# فصل ۱

## مقدمه





## فصل ۲

### مروری بر پژوهش‌ها



## فصل ۳

# کالیبراسیون سینماتیکی مبتنی بر گراف

۱.۳ مقدمه

۲.۳ کالیبراسیون سینماتیکی

۳.۳ رویکرد مبتنی بر گراف برای حل مسئله کالیبراسیون

۴.۳ نتیجه‌گیری





## فصل ۴

# پیاده‌سازی رویکرد مبتنی بر گراف برای کالیبراسیون

۱.۴ مقدمه

۲.۴ توسعه گراف عامل برای ربات کابلی موازی کمال الملک

۱.۲.۴ معرفی ربات

۲.۲.۴ فرمول‌بندی مسئله

۳.۴ تحلیل حساسیت

۴.۴ نتایج پیاده‌سازی

۵.۴ نتیجه‌گیری

## فصل ۵

### نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها





مراجع



پیوست آ

گراف عامل در رباطیک



پیوست ب

پیاده‌سازی سخت افزار





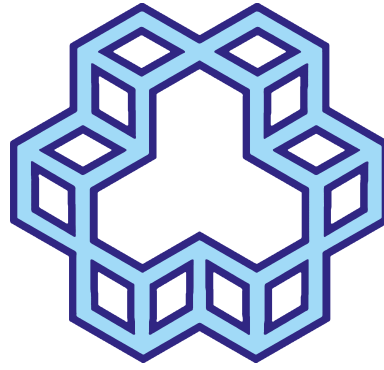
## Abstract

In today's world, robot manufacturers seek to simplify usage and enhance operational accuracy, which involves reducing repetitive processes such as sensor and robot calibration. On the other hand, given the importance of precise localization, recent research has been moving towards novel methods based on graphs and sensor data fusion. In this thesis, we start from this familiar point and review recent methods. Using a platform that graph-based algorithms provide, we will develop a graph that not only performs localization effectively but also simultaneously handles sensor calibration and, taking it a step further, robot calibration without the need for separate processes. This approach creates an integrated and flexible solution, ensuring that adding any new constraints does not affect previous formulations. The algorithm chosen for this formulation is the factor graph, whose ability to manage computational complexities through optimal matrices and the use of a graph architecture accelerates convergence and enhances the stability of the results. Furthermore, factor graphs allow for the seamless integration of heterogeneous data from various sensors, which leads to increased accuracy and reduces dependency on a single data source. To validate the proposed method, an underactuated parallel cable robot is considered. Initially, an integrated problem is formulated in the graph space to simultaneously perform vision sensor calibration, localization, and robot kinematic calibration without the need for prior processes, thereby achieving the easy-installation concept. Then, to assess the flexibility and evaluate the graph, the sagging equations of cables, which are among the most complex equations in the field of robotics, are added to the graph, and the results will be analyzed. The results demonstrate the high capability of this method in creating a flexible formulation that not only speeds up the process but also improves localization and calibration accuracy.

**Keywords** Factor Graph, Calibration, Localization, SLAM







**K. N. Toosi University of Technology**  
**Faculty of Electrical Engineering- Control Group**

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

# **Development of a Graph-Based Unified Optimization Framework for Robot Calibration and State Estimation**

By:  
**Mohammadreza Dindarloo**

Supervisor:  
**Prof. Hamid D. Taghirad**

Advisors:  
**Prof. Philippe Cardou and Dr. Seyed Ahmad Khalilpour**

Winter 2024