

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه مکاترونیک

طراحی مسیر بهینه برای جرثقیل بهبود یافته با عدم قطعیت بار خارجی

دانشجو: فرزین طاهری

استاد راهنما:

دکتر مهدی بامداد

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:  
تاریخ:  
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای فرزین طاهری رشته مکترونیک گرایش مکترونیک تحت عنوان طراحی مسیر بهینه برای جرثقیل بهبود یافته با عدم قطعیت بارهای خارجی که در تاریخ ۱۳۹۳/۶/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول ( با درجه : عالی ) امتیاز ( ۱۹ )  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی ( ۲۰ - ۱۹ )

۲- بسیار خوب ( ۱۸/۹۹ - ۱۸ )

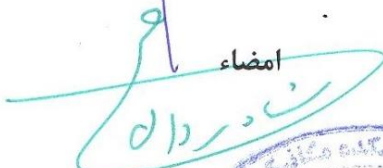

۳- خوب ( ۱۷/۹۹ - ۱۶ )

۴- قابل قبول ( ۱۵/۹۹ - ۱۴ )

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر مهدی بامداد	۱- استاد راهنما
			۲- استاد مشاور
	استادیار	دکتر امیر جلالی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر محمد اعظم خسروی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر حبیب احمدی	۵- استاد ممتحن

امضاء  
رئیس دانشکده : محمد محسن شاه مردان

با تشکر از زحمات شایان ذکر استاد ارجمند جناب آقای دکتر مهدی بامداد که در طول مدت پایان نامه با رهنمودهای دلسوزانه خود اینجانب را یاری نمودند.

## تعهد نامه

اینجانب فرزین طاهری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکترونیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی مسیر بهینه برای جرثقیل بهبود یافته با عدم قطعیت بار خارجی تحت راهنمایی دکتر مهدی بامداد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

## امضای دانشجو

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

جرثقیل بهبودیافته نوع پیشرفته جرثقیل‌های سنتی است که در آن علاوه بر حمل بار امکان کنترل دقیق آن نیز وجود دارد. جرثقیل بهبودیافته اولین بار توسط سازمان ملی استاندارد و تکنولوژی<sup>1</sup> آمریکا معرفی شده است. از مزایای این نوع ربات می‌توان به پوشش فضای کاری وسیع، قابلیت حمل بار زیاد و اشغال فضای کم تجهیزات آن اشاره کرد.

در این تحقیق، دو مدل ربات موازی کابلی و سه مدل ربات مرکب از ربات‌های موازی کابلی معرفی شده و روابط دینامیک و سینماتیک استخراج گردیده است. از آنجایی که مدل‌های مطرح شده در این تحقیق همگی از نوع زیرمقید می‌باشند، مسئله سینماتیک و استاتیک در این مدل‌ها همزمان حل شده است. همچنین برای مدل مرکب فضایی، عدم قطعیت ناشی از تلاطم سیال و عدم قطعیت ناشی از تأثیر بخش سری و بخش موازی بر روی یکدیگر مدل‌سازی و روابط آن استخراج شده است. با استفاده از یک روش جدید در طراحی ربات جبران‌سازی دینامیکی صورت گرفته است. در انتها مسیر بهینه برای حرکت بین دو نقطه با توجه به معیار عملکرد موردنظر طراحی شده است. در طراحی مسیر، از روش جدید ترکیبی استفاده شده است.

**کلیدواژه:** ربات موازی کابلی، سینماتیک-استاتیک وارون، عدم قطعیت بار، طراحی مسیر بهینه.

---

<sup>1</sup> NIST (National Institute of Science and Technology )

## فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه	۱
۲- فصل دوم: مدل‌های صفحه‌ای	۱۵
۱-۲ مقدمه	۱۵
۲-۲ ربات موازی کابلی صفحه‌ای	۱۶
۱-۲-۲ شماتیک	۱۶
۲-۲-۲ سینماتیک-استاتیک وارون	۱۷
۳-۲-۲ سینماتیک-استاتیک مستقیم	۲۱
۴-۲-۲ دینامیک	۲۲
۳-۲ ربات کابلی صفحه‌ای با بازوی آکروبات	۲۲
۱-۳-۲ شماتیک	۲۳
۲-۳-۲ سینماتیک-استاتیک مستقیم	۲۴
۳-۳-۲ سینماتیک-استاتیک وارون	۲۵
۴-۳-۲ دینامیک	۲۷
۴-۲ ربات کابلی صفحه‌ای با بازوی دو درجه آزادی	۲۹
۱-۴-۲ شماتیک	۲۹
۲-۴-۲ سینماتیک-استاتیک مستقیم	۳۰
۳-۴-۲ سینماتیک-استاتیک وارون	۳۱
۴-۴-۲ دینامیک	۳۴
۳- فصل سوم: مدل مرکب فضایی	۳۷
۱-۳ مقدمه	۳۸
۲-۳ طراحی جرثقیل بهبودیافته	۳۸

۳۹	..... ربات کابلی فضایی	۳-۳
۳۹	..... شماتیک	۱-۳-۳
۴۰	..... هندسه	۲-۳-۳
۴۲	..... حل مسئله سینماتیک- استاتیک وارون	۳-۳-۳
۴۸	..... دینامیک	۴-۳-۳
۴۹	..... بازوی ربات پیوسته	۴-۳-۳
۴۹	..... طراحی و فرضیات مدل سازی	۱-۴-۳
۵۱	..... تحلیل سینماتیکی	۲-۴-۳
۵۳	..... تحلیل دینامیکی	۳-۴-۳
۵۸	..... عدم قطعیت ها	۵-۳
۵۹	..... جبران سازی اثر بار خارجی بر روی قسمت موازی	۱-۵-۳
۶۲	..... جبران سازی اثر نوسانات سیال بر روی بخش موازی	۲-۵-۳
۶۷	..... شبیه سازی	۶-۳
۷۷	..... فصل چهارم: طراحی مسیر بهینه	۴-۴
۷۸	..... مقدمه	۱-۴
۷۹	..... بیان ریاضی مسئله	۲-۴
۸۰	..... حل مسئله کنترل بهینه	۳-۴
۸۰	..... روش حل غیرمستقیم	۱-۳-۴
۸۱	..... استخراج شرایط بهینگی بدون محدودیت ورودی های کنترلی	۱-۱-۳-۴
۸۳	..... استخراج شرایط بهینگی با محدودیت ورودی های کنترلی	۲-۱-۳-۴
۸۵	..... روش حل مستقیم	۲-۳-۴
۹۰	..... شبیه سازی	۴-۴



۹۲	..... ربات کابلی صفحه‌ای ۱-۴-۴
۹۵	..... ربات کابلی صفحه‌ای با بازوی دو درجه آزادی ۲-۴-۴
۹۸	..... ربات کابلی صفحه‌ای با بازوی آکروبات ۳-۴-۴
۱۰۱	..... ربات موازی کابلی فضایی ۴-۴-۴
۱۰۵	..... ربات موازی کابلی فضایی حامل مخزن سیال ۵-۴-۴
۱۱۰	..... صحت‌سنجی مسیر بهینه ۵-۴
۱۱۳	..... ۵- فصل پنجم: ساخت مدل تجربی ۱۱۳
۱۱۴	..... ۱-۵ مقدمه ۱۱۴
۱۱۴	..... ۲-۵ شماتیک طرح ۱۱۴
۱۱۵	..... ۳-۵ اجزای طرح ۱۱۵
۱۱۵	..... ۱-۳-۵ موتورها ۱۱۵
۱۱۷	..... ۲-۳-۵ انکودر ۱۱۷
۱۱۸	..... ۳-۳-۵ کارت داده‌گیری ۱۱۸
۱۱۹	..... ۴-۳-۵ برد مدار چاپی ۱۱۹
۱۲۰	..... ۴-۵ پیاده‌سازی ۱۲۰
۱۲۷	..... ۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۷
۱۲۸	..... ۱-۶ نتیجه‌گیری ۱۲۸
۱۲۹	..... ۲-۶ ارائه پیشنهادات ۱۲۹
۱۳۱	..... منابع ۱۳۱
۱۳۵	..... پیوست ۱ ۱۳۵
۱۳۸	..... پیوست ۲ ۱۳۸

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ ربات موازی کابلی زیرمقید با نقاط اتصال غیر ثابت ..... ۵
- شکل ۲-۱ انواع مفاصل در ساختار ربات‌ها ..... ۶
- شکل ۳-۱ مکانیزم هیبرید 3-UPU ..... ۷
- شکل ۴-۱ مکانیزم هیبرید ..... ۸
- شکل ۵-۱ مکانیزم هیبرید مرکب از دو ماژول ..... ۹
- شکل ۶-۱ مکانیزم هیبرید 3-PRS ..... ۹
- شکل ۷-۱ ربات کمک جراح ..... ۱۱
- شکل ۸-۱ مکانیزم هیبرید مرکب از ربات کابلی صفحه‌ای و بازو ..... ۱۱
- شکل ۹-۱ مکانیزم هیبرید مرکب از ربو جرتقیل و emma ..... ۱۳
- شکل ۱-۲ ربات موازی کابلی صفحه‌ای ..... ۱۷
- شکل ۲-۲ زاویه میله انتهایی در موقعیت‌های مختلف بار انتهایی ..... ۱۹
- شکل ۳-۲ فضای کاری ربات کابلی صفحه‌ای ..... ۲۱
- شکل ۴-۲ ربات کابلی صفحه‌ای با بازوی آکروبات ..... ۲۳
- شکل ۵-۲ مقادیر مورد نیاز زوایای بازو برای ایجاد زوایای مختلف برای بار انتهایی ..... ۲۵
- شکل ۶-۲ الگوریتم حل مسئله سینماتیک-استاتیک وارون ..... ۲۶
- شکل ۷-۲ بازوی آکروبات با مفصل ابتدایی متحرک ..... ۲۷
- شکل ۸-۲ ربات کابلی صفحه‌ای تحت بارگذاری خارجی ..... ۲۸
- شکل ۹-۲ ربات کابلی صفحه‌ای با بازوی دو درجه آزادی ..... ۳۰
- شکل ۱۰-۲ الگوریتم حل مسئله سینماتیک-استاتیک وارون ..... ۳۳
- شکل ۱۱-۲ بازوی دو درجه آزادی با مفصل ابتدایی متحرک ..... ۳۴
- شکل ۱۲-۲ ربات کابلی صفحه‌ای تحت بارگذاری و ترک خارجی ..... ۳۵

- شکل ۳-۱ ربات مرکب از ربات کابلی فضایی و بازوی پیوسته ..... ۳۹
- شکل ۳-۲ ربات کابلی فضایی ..... ۴۰
- شکل ۳-۳ الگوریتم حل مسئله سینماتیک- استاتیک وارون برای ربات کابلی فضایی ..... ۴۳
- شکل ۳-۴ زوایای یاو و پیچ و رول صفحه متحرک ..... ۴۵
- شکل ۳-۵ کشش کابل‌ها ..... ۴۶
- شکل ۳-۶ حالت‌های صفحه متحرک ..... ۴۷
- شکل ۳-۷ شماتیک بازوی ربات پیوسته ..... ۵۰
- شکل ۳-۸ مدل هندسی بازوی ربات پیوسته ..... ۵۱
- شکل ۳-۹ حجم کنترلی مورد تحلیل ..... ۵۴
- شکل ۳-۱۰ ربات کابلی فضایی تحت بارگذاری خارجی ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۱ نحوه اتصال بازوی پیوسته به صفحه متحرک ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۲ دیاگرام آزاد ظرف محتوی سیال بدون جبران‌سازی ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۳ ربات موازی کابلی فضایی همراه با مخزن سیال و موتورهای جبران‌ساز ..... ۶۵
- شکل ۳-۱۴ موقعیت مرکز صفحه متحرک ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۵ مقادیر کشش کابل‌ها ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۶ مقادیر زوایای صفحه متحرک ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۷ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۸ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۹ موقعیت مرکز صفحه متحرک ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۰ مقادیر کشش کابل‌ها ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۱ مقادیر زوایای صفحه متحرک ..... ۷۲
- شکل ۳-۲۲ سرعت محور موتورهای کشنده کابل‌ها ..... ۷۲

- شکل ۳-۲۳ گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها ..... ۷۲
- شکل ۳-۲۴ گشتاور موتورهای جبران‌ساز ..... ۷۳
- شکل ۳-۲۵ زوایای خمش و چرخش بازوی پیوسته ..... ۷۴
- شکل ۳-۲۶ تغییرات طول ستون‌های فقرات ثانویه ..... ۷۵
- شکل ۳-۲۷ نیروی کشش ستون‌های فقرات ثانویه ..... ۷۵
- شکل ۳-۲۸ گشتاور موتورهای جبران‌ساز ..... ۷۵
- شکل ۴-۱ موقعیت مرکز صفحه متحرک در جهت محور X ..... ۹۳
- شکل ۴-۲ موقعیت مرکز صفحه متحرک در جهت محور Y ..... ۹۳
- شکل ۴-۳ زاویه میله انتهایی ..... ۹۳
- شکل ۴-۴ کشش کابل اول ..... ۹۴
- شکل ۴-۵ کشش کابل دوم ..... ۹۴
- شکل ۴-۶ موقعیت مرکز میله انتهایی ..... ۹۶
- شکل ۴-۷ زاویه میله انتهایی ..... ۹۶
- شکل ۴-۸ زوایای بازو ..... ۹۷
- شکل ۴-۹ گشتاور موتورهای بازو ..... ۹۷
- شکل ۴-۱۰ کشش کابل‌ها ..... ۹۷
- شکل ۴-۱۱ موقعیت بار انتهایی ..... ۹۸
- شکل ۴-۱۲ موقعیت مرکز میله انتهایی ..... ۹۹
- شکل ۴-۱۳ زاویه میله انتهایی ..... ۹۹
- شکل ۴-۱۴ زوایای بازو ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۵ کشش کابل‌ها ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۶ گشتاور موتور بازو ..... ۱۰۰

- شکل ۴-۱۷ موقعیت بار انتهایی ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۸ کشش کابل اول ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۹ کشش کابل دوم ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۰ کشش کابل سوم ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۱ موقعیت مرکز صفحه متحرک در جهت محور X ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۲ موقعیت مرکز صفحه متحرک در جهت محور Y ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۳ موقعیت مرکز صفحه متحرک در جهت محور Z ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲۴ زاویه صفحه متحرک نسبت به محور X ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲۵ زاویه صفحه متحرک نسبت به محور Y ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲۶ زاویه صفحه متحرک نسبت به محور Z ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۲۷ موقعیت X مرکز صفحه متحرک ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۸ موقعیت Y مرکز صفحه متحرک ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۹ موقعیت Z مرکز صفحه متحرک ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۰ کشش کابل اول ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۱ کشش کابل دوم ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۲ کشش کابل سوم ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۳ گشتاور موتورهای جبران ساز ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۴ زاویه یاو صفحه متحرک ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۳۵ زاویه پیچ صفحه متحرک ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۳۶ زاویه رول صفحه متحرک ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۳۷ موقعیت X مرکز صفحه متحرک ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۳۸ موقعیت Y مرکز صفحه متحرک ..... ۱۱۱

- شکل ۴-۳۹ موقعیت Z مرکز صفحه متحرک ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۴۰ مقدار کشش کابل‌ها در سه مسیر مختلف ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱ نمونه تجربی ساخته شده ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۲ موتور DC مدل Landa به شماره ۲۱-۳۷۰ ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۳ نمودار سرعت-گشتاور موتور ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۴ نمودار جریان-گشتاور موتور ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۵ انکودر مکانیکی با ۲۵ شیار ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۶ سنسور فرستنده و گیرنده مادون قرمز HY860D ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۷ مدار راه‌انداز سنسور فرستنده و گیرنده مادون قرمز ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۸ کارت داده‌گیری PCI-1710 ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۹ واسطه کارت داده‌گیری از نوع PCLD 8712 ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۱۰ برد مدار چاپی استفاده شده ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۱۱ نحوه ساخت پالس کنترلی در کامپیوتر ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۱۲ الگوریتم کنترل سیستم و گرفتن خروجی از آن ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۱۳ مسیر مورد نظر برای مدل تجربی ..... ۱۲۲
- شکل ۵-۱۴ ولتاژ کنترلی موتورها ..... ۱۲۳
- شکل ۵-۱۵ جریان‌های عبوری از موتورها ..... ۱۲۳
- شکل ۵-۱۶ گشتاور واقعی و تئوری موتورها ..... ۱۲۴

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲ پارامترهای ربات موازی کابلی با بازوی آکروبات..... ۲۵
- جدول ۱-۳ فهرست علائم سینماتیکی..... ۵۲
- جدول ۲-۳ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی..... ۶۸
- جدول ۳-۳ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی با مخزن سیال..... ۷۰
- جدول ۴-۳ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی با بازوی پیوسته..... ۷۴
- جدول ۱-۴ پارامترهای ربات کابلی صفحه‌ای..... ۹۲
- جدول ۲-۴ پارامترهای ربات کابلی صفحه‌ای با بازوی دو درجه آزادی..... ۹۵
- جدول ۳-۴ پارامترهای ربات کابلی صفحه‌ای با بازوی آکروبات..... ۹۸
- جدول ۴-۴ پارامترهای ربات کابلی فضایی..... ۱۰۱
- جدول ۵-۴ پارامترهای ربات کابلی فضایی همراه با مخزن سیال..... ۱۰۶
- جدول ۶-۴ مقایسه نتایج مسیرها..... ۱۱۱
- جدول ۱-۵ ویژگی‌های کارت داده‌گیری PCI-1710..... ۱۱۸
- جدول ۲-۵ پارامترهای مدل تجربی..... ۱۲۲

# فصل اول

## مقدمه و تاریخچه



امروزه استفاده از ربات‌ها در بسیاری از کاربردهای صنعتی، پزشکی، نظامی و تفریحی در حال گسترش است. با توجه به نیاز روزافزون استفاده از ربات‌ها در بخش‌های مختلف، تحقیقات زیادی بر روی ربات‌ها در زمینه طراحی، مدل‌سازی دینامیکی، مدل‌سازی سینماتیکی، کنترل و تحلیل دقت صورت گرفته است. ربات‌ها به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱. ربات‌های سری

۲. ربات‌های موازی

۳. ربات‌های ترکیبی

در ربات‌های سری، چندین لینک به صورت پشت سرهم به یکدیگر متصل می‌گردند. ربات‌های موازی، بر پایه پلتفرم استوارت<sup>۱</sup> می‌باشند که در آن یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک به وسیله عضوهایی به یکدیگر متصل می‌شوند و کنترل صفحه متحرک، با کنترل همزمان عضوهای اتصال‌دهنده انجام می‌گیرد. اعضای استفاده‌شده در اتصال صفحه ثابت و صفحه متحرک می‌توانند پیستون‌های خطی یا کابل باشند. ربات موازی کابلی<sup>۲</sup> به رباتی گفته می‌شود که در آن از کابل به جای پیستون‌های خطی برای کنترل موقعیت مجری نهایی<sup>۳</sup> استفاده می‌گردد. ربات‌های موازی کابلی به دو دسته کاملاً مقید و زیرمقید تقسیم‌بندی می‌شوند. یک ربات موازی کابلی، در صورتی به عنوان مقید کامل شناخته می‌شود که اگر موتورهای حرکت نکنند و طول کابل‌ها مشخص باشد، بتوان موقعیت دقیق قسمت انتهایی را مشخص کرد. برای چنین سیستمی با  $n$  درجه آزادی، حداقل تعداد کابل که برای کنترل کامل حرکت تولیدی نیاز است برابر با تعداد  $n+1$  است. به هر حال از آنجایی که کابل‌ها فقط می‌توانند نیروی کشش محوری اعمال کنند، برای تضمین اینکه هیچ کابلی شل نمی‌باشد و برای کنترل کامل تحت بارگذاری مشخص، معمولاً یک عامل کنترلی

---

<sup>1</sup> Stewart platform

<sup>2</sup> cable driven parallel robot (CDRR)

<sup>3</sup> End-effector

اضافه نیاز است [۱-۵]. از طرفی یک ربات موازی کابلی به‌عنوان زیرمقید شناخته می‌شود، در صورتی که اگر موتورها حرکت نکنند و طول کابل‌ها مشخص باشند باز قسمت انتهایی تعدادی درجه آزادی مهار نشده دارد. این اتفاق زمانی می‌افتد که تعداد کابل‌های استفاده‌شده از تعداد درجات آزادی کمتر باشد. استفاده از ربات موازی کابلی با تعداد کابل‌های کمتر در چندین کاربرد توجیه شده است [۶-۱۰]. از ربات موازی کابلی با تعداد کابل‌های کمتر، زمانی استفاده می‌شود که وظیفه‌ای که قرار است انجام گردد نیازمند کنترل درجات آزادی محدودی است یا به خاطر عوامل کاهش هزینه، زمان برپایی، پیچیدگی و کاهش امکان تداخل کابل‌ها، استفاده از این نوع ربات قابل قبول باشد. بعلاوه یک ربات موازی کابلی که به‌عنوان مقید کامل شناخته می‌شود، ممکن است در قسمت‌های محسوسی از فضای کاری به‌عنوان ربات زیرمقید کار کند، یعنی به دلیل نیاز به منفی بودن نیروی یک یا چند کابل قیود کامل نباشند. مباحث فوق، باعث انجام تحقیقات دقیق در مورد ربات موازی کابلی زیرمقید شده است. چالش اصلی در تحقیق درباره ربات‌های زیرمقید، ارتباط تنگاتنگ بین سینماتیک و استاتیک است. برای یک ربات موازی کابلی کاملاً مقید که در محدوده مجاز فضای کاری عمل می‌کند، با مشخص بودن طول کابل‌ها، با استفاده از روش‌های هندسی، موقعیت قسمت انتهایی تعیین می‌شود. برعکس برای یک ربات موازی کابلی زیرمقید، در حالتی که موتورها ثابت هستند و طول کابل‌ها مشخص است، قسمت انتهایی هنوز قابلیت تحرک دارد، بنابراین آرایش ربات به مقدار نیروی خارجی اعمالی بستگی دارد. به‌عنوان یک نتیجه برای ربات موازی کابلی زیرمقید، موقعیت قسمت انتهایی هم به طول کابل‌ها و هم به معادلات تعادل بستگی دارد. سروکار داشتن با سینماتیک و استاتیک به‌طور همزمان پیچیدگی مسئله را افزایش می‌دهد که هدف تعیین پیکربندی کلی ربات با مشخص بودن  $n$  متغیر است. راه‌حل این مسائل برای ربات موازی کابلی زیرمقید، هنگامی که وظیفه مشخصه یکی است، به‌طور قابل توجهی سخت‌تر از مدل با دارا بودن محرک‌های صلب است. به همین دلیل، اغلب مطالعات صورت گرفته درباره ربات موازی کابلی زیرمقید، کاملاً بر راه‌حل‌های عددی موضعی تکیه می‌کنند. در مراجع

[۱۲و۱۱] برای تحلیل سینماتیک، استاتیک و پایداری یک ربات موازی کابلی زیرمقید، یک متد اصلی برای ربات موازی که در آن صفحه متحرک توسط  $n$  کابل به صفحه ثابت متصل است پیشنهاد داده شده است، که در آن  $n \leq 5$  و نقاط مرجع بر روی صفحه متحرک و صفحه ثابت مجزا می‌باشند. کریکاتو و مرلت<sup>۱</sup> یک پروسه حل مستقیم مسئله سینماتیک-استاتیک برای یافتن کشش کابل‌ها و پیکربندی کلی ربات، زمانی که طول  $n$  کابل مشخص است، طراحی کرده‌اند که در آن با استفاده از یک روش حذف‌سازی، مسئله سینماتیک-استاتیک مستقیم<sup>۲</sup> حل می‌شود [۱۳]. در روش ارائه‌شده، ماتریس حاوی بردارهای نرمالیزه شده پلاکر با تعریف گشتاور حول مرکز دستگاه مختصات مطلق بدست آمده و نتیجه می‌شود که ضرب ماتریس فوق در بردار حاوی نیروهای خارجی و کشش کابل‌ها باید مساوی صفر باشد. درنهایت، نتیجه می‌شود برای اینکه سیستم با درجه  $n$  پایدار باشد، باید مرتبه ماتریس  $n+1$  بدست آمده کمتر از  $n$  باشد که در نتیجه باید دترمینان ماتریس‌های کهاد ماتریس صفر گردند. با استفاده از این روش علاوه بر روابط موجود برای طول کابل‌ها، روابط دیگری حاصل می‌گردد که در آن پارامترهای نیروی کشش کابل حذف شده‌اند. با حل معادلات بدست آمده همراه با معادلات مربوط به طول کابل‌ها، می‌توان زوایا و موقعیت قسمت انتهایی را بدون نیاز به محاسبه کشش کابل‌ها بدست آورد. همچنین آن‌ها برای ربات موازی با سه کابل شرایط پایداری را بررسی کرده‌اند [۱۴]. کریکاتو برای ربات موازی کابلی با سه کابل، الگوریتمی جهت حل مسئله سینماتیک-استاتیک معکوس<sup>۳</sup> ارائه داده است که در آن پیکربندی ربات زمانی که موقعیت صفحه انتهایی مشخص است بدست آورده می‌شود [۱۵]. در این تحقیق نیز الگوریتم حذفی مانند الگوریتم حذفی ارائه شده در تحقیق مربوط به مسئله سینماتیک-استاتیک مستقیم است و معادلات کلی یکسان است و تنها پارامترهای مجهول و

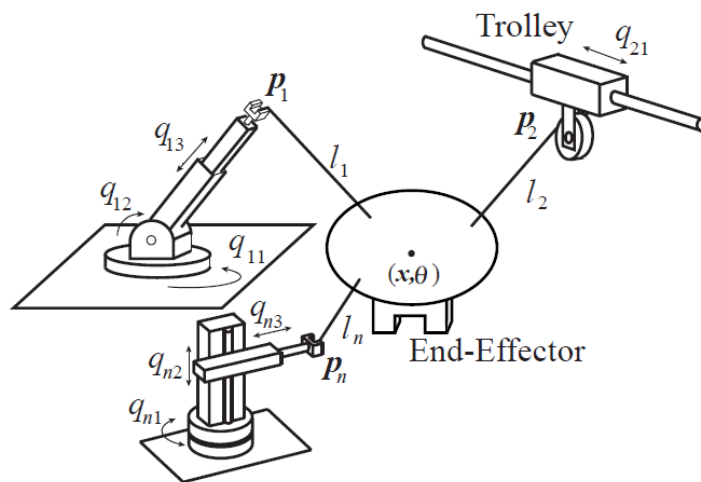
<sup>1</sup> Caricato, Merlet

<sup>2</sup> direct geometry-static problem (DGP)

<sup>3</sup> inverse geometry-static problem (IGP)

پارامترهای معلوم تغییر کرده‌اند.

یان‌آی و یاماموتو<sup>۱</sup> برای ربات‌های زیرمقید، یک روش کلی جهت بدست آوردن دینامیک معکوس ارائه کرده‌اند و بر پایهٔ تحلیل‌های صورت گرفته بر روی دینامیک وارون سیستم، شرط موردنظر برای یک تولید یک مسیر مطلوب ارائه شده است [۱۶]. در این تحقیق، ابتدا فرم کلی معادلات دینامیک برای ربات‌های موازی کابلی بدست آورده شده است. همچنین با استفاده از اصل کار مجازی در ربات‌های موازی، رابطهٔ بین تغییر طول و بردار مختصات‌های تعمیم‌یافتهٔ ربات موازی کابلی بدست آورده شده و نتیجه گرفته می‌شود که برای ربات‌های زیرمقید، زمانی که تعداد کابل‌ها کمتر از تعداد درجات آزادی است، کنترل همزمان موقعیت و زاویهٔ قسمت انتهایی امکان‌پذیر نیست. در ادامه پیشنهاد شده برای اینکه بتوان با تعداد کابل‌های کمتر از درجه آزادی، موقعیت و زاویه را کنترل کرد، می‌توان از نقاط اتصال غیرثابت برای کابل‌ها استفاده کرد که مدل پیشنهاد شدهٔ آن‌ها در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ ربات موازی کابلی زیرمقید با نقاط اتصال غیرثابت

در ادامه، آن‌ها برای مدل مطرح شده فرم بستهٔ دینامیک را برحسب مختصات‌های تعمیم‌یافتهٔ مکانیزم‌های کشندهٔ کابل‌ها ( $q_{ni}$ ) بدست آورده‌اند و از روی دینامیک بدست آمده نیروهای تعمیم یافتهٔ مکانیزم‌های کشندهٔ کابل محاسبه می‌گردد که نیروهای تعمیم یافتهٔ بدست آمده تابعی از

<sup>1</sup> Yanai, Yamamoto