

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک - گروه مهندسی مکاترونیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد
مهندسی مکاترونیک

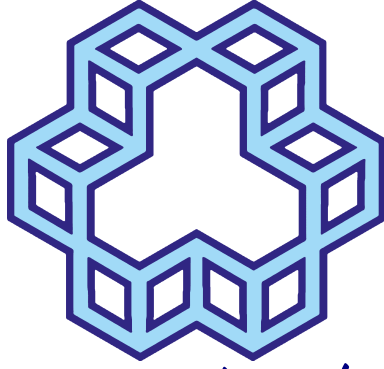
طراحی مسیر حرکتی و ساخت یک ربات کابلی فروتحریک آسان نصب

امیرسامان میرجلیلی

استاد راهنما

دکتر حمید رضا تقی راد

تابستان ۱۴۰۲



دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک - گروه مهندسی مکاترونیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد
مهندسی مکاترونیک

عنوان

طراحی مسیر حرکتی و ساخت یک ربات کابلی فروتحریک آسان نصب

نگارش

امیرسامان میرجلیلی

استاد راهنما

دکتر حمید رضا تقی راد

استاد مشاور

دکتر سید احمد خلیل پور

تابستان ۱۴۰۲



تقدیم به:

به آنان که با علم خود زندگی آزاد می‌سازند



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تأییدیه هیئت داوران جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

هیأت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده با عنوان «طراحی مسیر حرکتی و ساخت یک ربات کابلی فروتحریک آسان نصب» توسط آقای / خانم امیرسامان میرجلیلی صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک در تاریخ تابستان ۱۴۰۲ مورد تأیید قرار دادند.

۱. استاد راهنما: دکتر حمید رضا تقی راد امضا

۲. استاد مشاور: دکتر سید احمد خلیل پور امضا

۳. استاد داور داخلی: دکتر داور داخلی امضا

۴. استاد مدعو: دکتر داور خارجی امضا

۵. نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر نماینده امضا



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظهارنامه دانشجو

اینجانب امیرسامان میرجلیلی به شماره دانشجویی ۹۸۱۵۹۸۴۴ دانشجوی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک دانشکده ... دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه با عنوان:

طراحی مسیر حرکتی و ساخت یک ربات کابلی فروتحریک آسان نصب

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 هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی دانشجو: امیرسامان میرجلیلی

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 حمید رضا تقی راد 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 دکتر تقی راد که راهنمایی این پایانامه را به عهده داشته‌اند کمال تشکر را دارم. از جناب آقای دکتر سید احمد خلیل پور که استاد 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 دانشگاهیان و همراهان عزیز، دوستان خوبم آقایان محمد اسحاق حسینی ، محمدرضا دیندارلو و سید احمد خلیل پور نهایت سپاس را دارم.

و در پایان این پایان‌نامه را تقدیم می‌کنم به پدر و مادرم که با حضورشان و همراهی دلسوزانه همیشه راه را به من نشان داده و مرا در این راه استوار و ثابت قدم نموده است.

امیرسامان میرجلیلی

تابستان ۱۴۰۲

چکیده

ربات‌های کابلی، به عنوان گروهی از ربات‌های موازی، دارای مزایایی همچون سرعت و دقت بالا، قابلیت حمل بار سنگین، و فضای کاری گسترده هستند. با این حال، این ربات‌ها نیز دارای چالش‌هایی همچون پایداری، کنترل، و کالیبراسیون هستند. ربات‌های مرسوم موازی کابلی، به دلیل ساختار گسترده و توزیع شده‌ای که دارند، مراحل نصب و راه اندازی آن‌ها زمان‌بر و پرهزینه است. یکی از اهداف پروژه در این تحقیق، تلاش برای ساخت یک ربات کابلی موازی با نام ArasCam-2 جهت آسان‌نصب شدن ربات کابلی می‌باشد. بنابراین بخشی از این پژوهش طراحی و پیاده‌سازی یک ربات کابلی موازی و نامقید با نام ArasCam-2 است که قابلیت نصب سریع و ارزان را در فضای سه بعدی را دارد. جهت کاهش هزینه ساخت ربات و همچنین موثر بودن ساختار معلق ربات در کاربردهایی نظیر فیلم برداری از میدین ورزشی و سالن‌ها، تعداد عملگرهای ربات کاهش داده شده است و از آنجا که این تعداد از درجات آزادی ربات کمتر بوده، منجر به خلق ذات فروتحریکی در ربات شده است. به منظور صحت سنجی از کارایی ربات یک مسیر بین دو نقطه مشخص در فضای سه بعدی با قید کششی ماندن کابل‌ها طراحی شده است. هدف دوم از این پژوهش طراحی یک مسیر مناسب برای کاهش ارتعاشات ناشی از مختصات کنترل نشده ربات می‌باشد که ریشه در ساختار فروتحریک ربات دارد، در طراحی مسیر برای این ربات، جهت اثبات عملکرد، فرض شده که ربات درای سه کابل است و طراحی مسیر مناسب به روش نقطه به نقطه ساکن انجام شده است. در ادامه، در مورد ربات چهار کابلی که از مشخصه‌های ربات Aras-Cam-2 می‌باشد، با چالش‌های نشات گرفته از کنترل درجات آزادی زاویه‌ای کنترل‌ناپذیر ربات روبرو شده‌ایم که این چالش‌ها با روش‌های مختلف آزمایش شده و حل شدن آن در برنامه‌های آتی این پژوهش قرار دارد.

واژگان کلیدی فروتحریک، ربات‌های کابلی معلق، آسان‌نصب، طراحی در ساختار، بازوان موازی، طراحی

مسیر

فهرست مطالب

ث	فهرست تصاویر
ح	فهرست جداول
خ	فهرست الگوریتم‌ها
د	فهرست برنامه‌ها
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱.۱ ربات‌های موازی و کاربردهای آن
۶	۲.۱ ربات‌های کابلی موازی
۶	۱.۲.۱ اجزای تشکیل دهنده یک ربات کابلی موازی
۹	۲.۲.۱ طبقه‌بندی و معماری ربات‌های کابلی موازی
۱۱	۳.۲.۱ کاربردهای ربات‌های کابلی موازی
۱۳	۴.۲.۱ چالش‌های موجود و تحقیقات ربات‌های کابلی موازی
۱۴	۵.۲.۱ ربات‌های آسان‌نصب کابلی موازی ^۱
۱۹	۶.۲.۱ ربات‌های فروتحریک کابلی موازی ^۲
۲۱	۳.۱ طراحی مسیر
۲۱	۴.۱ اهداف و نوآوری‌ها
۲۲	۵.۱ ساختار پایان‌نامه

¹Depoloyable Cable Driven Parallel robots

²Underactuated Cable Driven Parallel robots

۲۳	فصل ۲: ساخت نمونه اولیه ربات آسان نصب کابلی موازی: از مفهوم تا راه اندازی
۲۳	۱.۲ مقدمه
۲۳	۲.۲ الگوی طراحی V-Model
۲۵	۳.۲ اجزای تشکیل دهنده یک ربات کابلی موازی
۲۶	۴.۲ الزامات طراحی
۲۷	۱.۴.۲ الزامات کلی طراحی یک ربات کابلی موازی آسان نصب
۲۸	۲.۴.۲ الزامات طراحی زیرسیستم های ربات کابلی موازی آسان نصب
۲۹	۵.۲ معرفی ربات Aras-Cam-1
۲۹	۶.۲ مراحل طراحی ربات Aras-Cam-2
۳۰	۱.۶.۲ فاز اول: تحلیل کاربرد سامانه
۳۱	۲.۶.۲ فاز دوم: طراحی سیستمی و جزئی سامانه ^۱
۳۵	۳.۶.۲ طرح های مفهومی و جزئی
۳۶	۱.۳.۶.۲ طراحی سامانه جمع کننده کابل
۴۰	۲.۳.۶.۲ طراحی سامانه هدایت کابل
۴۱	۳.۳.۶.۲ الزامات و مشخصه های الکتریکی و حسگرها
۴۲	۷.۲ جمع بندی و طرح نهایی
۴۵	فصل ۳: مدل سازی ربات
۴۵	۱.۳ مقدمه
۴۵	۲.۳ تعریف ها
۴۷	۳.۳ سینماتیک
۵۰	۱.۳.۳ سینماتیک مستقیم
۵۰	۲.۳.۳ سینماتیک وارون
۵۱	۳.۳.۳ انتخاب فضای طراحی مسیر
۵۱	۴.۳ سینماتیک تفاضلی

¹System Level Design

۵۳	.....	دینامیک سامانه	۵.۳
۵۶	.....	بخش بندی معادلات دینامیک و قیود مرتبه دوم	۶.۳
۵۸	.....	جمع بندی	۷.۳
۵۹		فصل ۴: طراحی مسیر	
۵۹	.....	مقدمه	۱.۴
۵۹	.....	طراحی مسیر	۲.۴
۶۰	.....	۱.۲.۴ هندسه راه و قانون حرکت	
۶۰	.....	۲.۲.۴ طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن	
۶۱	.....	۱.۲.۲.۴ طراحی قانون حرکت	
۶۲	.....	۲.۲.۲.۴ حل مسئله مقدار مرزی	
۶۴	.....	۳.۴ چالش های موجود در طراحی مسیر ربات چهارکابیل	
۶۵	.....	۴.۴ مسیرهای چند جمله ای زمانی استاندارد	
۶۶	.....	۵.۴ مراحل شبیه سازی	
۶۸	.....	۶.۴ نتایج شبیه سازی	
۷۲	.....	۷.۴ جمع بندی	
۷۳		فصل ۵: پیشنهادها و کارهای آینده	
۷۳	.....	۱.۵ مقدمه	
۷۳	.....	۲.۵ روش های مبتنی بر انتگرال گیر تغییرات ^۱	
۷۴	.....	۱.۲.۵ مزایا	
۷۵	.....	۲.۲.۵ نتیجه	
۷۵	.....	۳.۵ روش گراف های عامل ^۲ برای طراحی مسیر	
۷۶	.....	۱.۳.۵ مزایا	
۷۷	.....	۲.۳.۵ نتیجه	

¹variational integrators ²Factor-Graph

فهرست تصاویر

- ۱.۱ اولین هگزا پاد هشت وجهی (سمت چپ، سکوی اصلی استوارت گو) در سال ۱۹۵۴ توسعه
یافت. سکوی گو برای آزمودن تایر (راست) [۲] ۲
- ۲.۱ ربات شبیه ساز هواپیما با نام استوارت گو [۲] ۳
- ۳.۱ راه اندازی تجربی یک سکوی^۱ سه در آزادی با ساختار موازی [۴] ۳
- ۴.۱ ربات چاپ سه بعدی دلتا در سمت راست در مقایسه با ربات های رایج چاپ سه بعدی در
سمت چپ دارای مزایایی از قبیل سرعت بالاتر و دقت بیشتر هستند [۵] ۴
- ۵.۱ کاربرد ربات های کابلی به عنوان دسته ای از ربات های موازی در صنعت پزشکی [۶] ۴
- ۶.۱ کاربرد از ربات های موازی کابلی در ساخت و ساز و حمل بار با فضای کاری وسیع [۷] ۵
- ۷.۱ اجزای مرسوم تشکیل دهنده یک ربات کابلی موازی [۱۲] ۶
- ۸.۱ ربات کابلی موازی NIST که در آن سامانه جمع کننده کابل داخل مجری نهایی قرار گرفته
است [۱۳] ۸
- ۹.۱ مکانیزم کابلی موازی صفحه ای از نوع نامقید $m = ۲, n = ۳$ [۱۷] ۹
- ۱۰.۱ مکانیزم صفحه ای کابلی موازی مقید کامل $m = ۴, n = ۳$ [۱۷] ۱۰
- ۱۱.۱ مکانیزم سه بعدی کابلی موازی از نوع مقید افزونه $m = ۸, n = ۶$ [۱۲] ۱۱
- ۱۲.۱ یک ربات معلق چهار کابل از نوع نامقید [۱۸] ۱۱
- ۱۳.۱ چشم اندازها و چالش های موجود در ربات های کابلی موازی [۶] ۱۳
- ۱۴.۱ ربات آسان نصب ساخته شده با قطعات آماده لگو [۵۰] ۱۵
- ۱۵.۱ ربات آسان نصب موازی کابلی با قابلیت تغییر نقاط نصب اجزای ثابت خود [۵۱] ۱۶
- ۱۶.۱ ربات آسان نصب صفحه ای از نوع کابلی موازی [۲] ۱۷

^۱platform

۱۷.۱	سامانه آسان نصب کابلی موازی با قراردادن نقطه نصب اجزای ثابت روی جرثقیل های متحرک
۱۸	[۵۳]
۱۸.۱	یک ربات کابلی موازی فروتحریک که از آنجا که تعداد کابل ها (۴) کمتر از تعداد درجات آزادی (۶) است. به لحاظ پیکربندی سینماتیکی، نامقید هم محسوب می شود [۵۵].
۲۰	. . . . .
۲۵	اجزای مرسوم تشکیل دهنده یک ربات کابلی موازی [۱۲]
۲۷	نمونه ای از فضای کاری محاسبه شده برای ربات کابلی موازی IPaNema 3 [۶۳]
۲۹	ربات کابلی موازی Aras-Cam-1 [۶۴]
۳۱	فضای کاری در نظر گرفته شده برای ربات Aras-Cam-2 [۶۶]
۳۳	موتور استپر شرکت میسومی مدل PK243A1-SG18 [۶۷]
۳۳	نمونه ای از حسگر لودسل استفاده شده
۳۴	نمونه های تجاری از ربات های کابلی موازی معلق
۳۵	طرح های مفهومی و جزئی انجام شده برای ربات Aras-Cam-2
۳۶	نمونه اولیه از ربات Aras-Cam-2
۳۶	نمونه نهایی ساخته شده از ربات Aras-Cam-2
۱۲.۲	طرحی از یک سامانه جمع کننده کابل کنترل شده توسط سروو موتور با حسگر نیروی یکپارچه: (۱) تسمه انتقال، (۲) پولی راهنما، (۳) قرقره، (۴) راهنمای خطی، (۵) واحد جمع کننده، (۶) حسگر نیرو، (۷) پولی راهنما، (۸) میله، (۹) گیربکس سیاره ای، (۱۰) سروو موتور [۱۲]
۳۷	. . . . .
۳۸	ابعاد غلتک
۳۹	جای گشت های متفاوت برای حسگر نیرو جهت محاسبه کشش کابل [۱۲]
۳۹	طرح های مفهومی و جزئی انجام شده برای سامانه جمع کننده کابل Aras-Cam-2
۴۰	طرح های مختلف برای سامانه هدایت کابل [۶]
۴۰	طرح اول سامانه هدایت کابل
۴۱	طرح دوم سامانه هدایت کابل
۴۲	نقشه انفجاری ربات Aras-Cam-2
۴۳	نمونه ساخته شده از ربات Aras-Cam-2

۴۸	مدل سینماتیک استاندارد ربات Aras-Cam-2	۱.۳
۴۹	مدل سینماتیک استاندارد ربات Aras-Cam-2	۲.۳
۴۹	سینماتیک وارون و وارون ربات	۳.۳
۵۴	دیاگرام نیرویی جسم آزاد ربات Aras-Cam-2	۴.۳
۶۶	ساختار کلی مسئله طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن در نرم افزار سیمولینک	۱.۴
۶۷	ساختار بخش kappa-handling برای بررسی سازگاری قیود کششی بودن کابل	۲.۴
۶۸	ساختار بخش Model که وظیفه طراحی مسیر و حل دینامیک مسئله را برعهده دارد.	۳.۴
۶۹	طراحی مسیر خط مستقیم بین سه نقطه a,b,c	۴.۴
۷۰	مقایسه مختصات کنترل پذیر در روش طراحی مسیر چند جمله ای زمانی استاندارد (Normal) با روش طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن (Rest to Rest) برای سه مسیر با هندسه خط مستقیم	۵.۴
۷۱	مقایسه مختصات کنترل ناپذیر در روش طراحی مسیر چند جمله ای زمانی استاندارد (Normal) با روش طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن (Rest to Rest) برای سه مسیر با هندسه خط مستقیم	۶.۴
۷۱	ترسیم کلی گراف های عامل برای یک مسئله طراحی مسیر همراه با قیود، دینامیک، سینماتیک و سایر قیدهای دیگر [۸۲]	۱.۵
۷۶		

فهرست جداول

۱۲	کاربردهای رایج ربات کابلی موازی با پیکربندی‌های سینماتیکی متناظر آن [۱۹]	۱.۱
۲۸	وابستگی‌ها بین نیازمندی‌های سامانه و نیازمندی‌های زیر سامانه در یک ربات کابلی موازی	۱.۲
۳۰	روش طراحی و ساخت برای ربات کابلی موازی Aras-Cam-2	۲.۲
۶۸	مشخصات هندسی ربات	۱.۴
۶۹	مشخصات فیزیکی ربات	۲.۴

فهرست الگوریتم‌ها

۱.۴ الگوریتم پیاده‌سازی طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن ۶۴

فهرست برنامه‌ها

فصل ۱

مقدمه

هدف از این فصل، ارائه یک بررسی متمرکز از تحقیقات موجود در مورد ربات‌های کابلی موازی فروتحریک^۱ است. در کنار این بررسی به ساختارهایی که منجر به نصب آسان ربات‌های کابلی موازی می‌شوند، پرداخته می‌شود. ابتدای فصل با کاوش در ربات‌های موازی آغاز می‌شود، و تا دامنه خاصی از ربات‌های موازی کابلی کاهش می‌یابد. پس از آن، توجه به‌گونه‌ای از ربات‌های کابلی موازی که آسان نصب^۲ اطلاق می‌شوند، معطوف می‌شود. درک پیچیدگی‌های آسان‌نصبی در ربات‌های کابلی موازی، صحنه را برای کاوش در فصل مشترک آسان‌نصبی و رفتار فروتحریکی در این ربات، آماده خواهد کرد. سپس، با تأکید خاص بر طراحی مسیر برای ربات‌های کابلی موازی فروتحریک، در قلمرو این ربات‌ها پژوهش می‌کنیم. در نهایت، ما این موضوعات را برای بحث در مورد چالش‌های منحصر به فرد در طراحی مسیر ربات‌های کابلی موازی با در نظر گرفتن ذات فروتحریکی و در کنار ساختاری با ویژگی آسان‌نصبی، همگرا می‌کنیم. این بخش حوزه‌های خاصی را که این پایان‌نامه قصد پرداختن به آن‌ها را دارد، روشن می‌کند. با ارائه این مرور ادبیات، هدف ما تحلیل انتقادی از چشم‌انداز تحقیقاتی فعلی، شناسایی حوزه‌های مطالعاتی بیشتر، و هموار کردن راه برای بحث‌های پژوهشی بعدی در این پایان‌نامه است.

¹Underactuate cable-driven parallel robots (UACDPR) ²Deployable

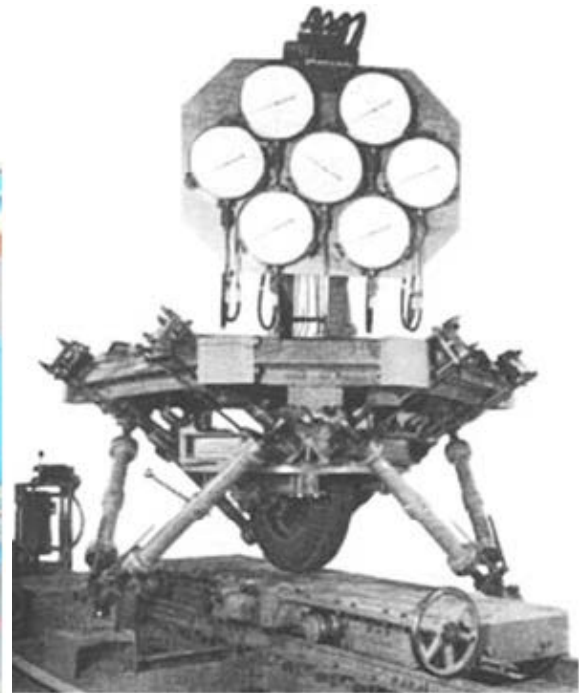
۱.۱ ربات‌های موازی و کاربردهای آن

ربات‌های موازی که به‌عنوان مکانیزم‌های موازی^۱ یا بازوان موازی^۲ نیز شناخته می‌شوند، دسته‌ای متمایز از سامانه‌های رباتیکی هستند که به دلیل مزایای ساختاری منحصر به فرد خود، توجه زیادی را در زمینه رباتیک به خود جلب کرده‌اند. این مزایا در مقایسه با ربات‌های سری شامل دقت بالا، پایداری، سرعت بالا و ظرفیت حمل بار زیاد است. آن‌ها با ساختار حلقه بسته خود مشخص می‌شوند که در آن اندام مجری نهایی توسط چندین زنجیره سینماتیکی مستقل به پایه متصل می‌شود [۱].

با مرور در تاریخ روشن می‌شود که اولین ربات موازی شناخته شده توسط گاف^۳ ساخته شده است که با توجه به شکل ۱.۱ یک ساختار کروی از این ربات‌ها به شمار می‌رفت [۲]. پس از آن، با پیشرفت فناوری. در سال



(ب)

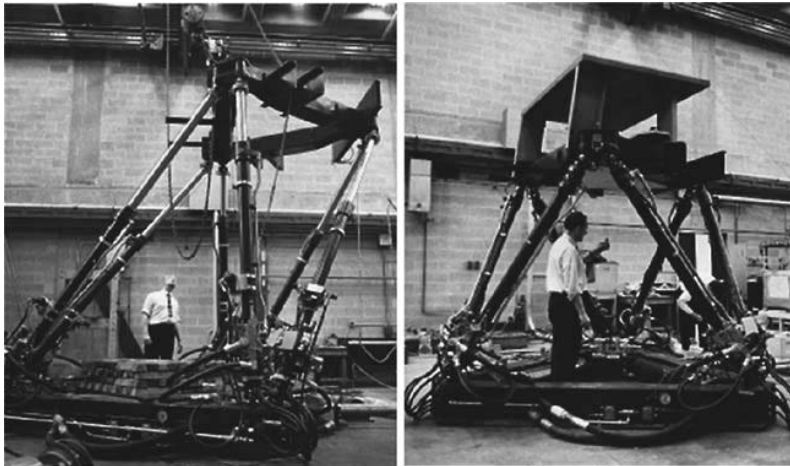


(ا)

شکل ۱.۱: اولین هگزا پاد هشت وجهی (سمت چپ، سکوی اصلی استوارت گو) در سال ۱۹۵۴ توسعه یافت. سکوی گو برای آزمودن تایر (راست) [۲]

۱۹۶۵، استوارت^۴ یک ربات موازی شش درجه آزادی را که در شکل ۲.۱ نشان داده شده برای استفاده به عنوان یک شبیه‌ساز هواپیما پیشنهاد کرد [۳].

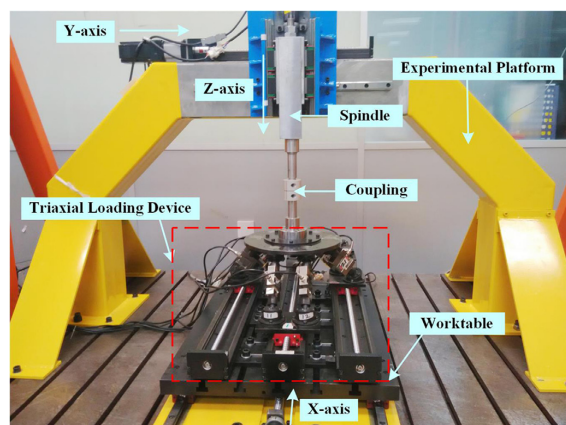
¹Parallel Mechanisms²Parallel Manipulators³Gough⁴Stewart



شکل ۲.۱: ربات شبیه‌ساز هواپیما با نام استوارت گو [۲]

توسعه ربات‌های موازی از آن زمان تا کنون ادامه داشته و نسخه‌های گوناگونی از آنها تولید شده است. ربات‌های موازی در کاربردهای مختلفی بکار گرفته شده‌اند که از انواع آن می‌توان به استفاده در ابزارهای ماشینی^۱، چاپ سه‌بعدی^۲، توان‌بخشی پزشکی^۳ و ساخت‌وساز^۴ اشاره کرد:

• **ابزارهای ماشینی:** دقت و پایداری بالای ربات‌های موازی آن‌ها را برای عملیات ماشین‌ابزاری ایده‌آل می‌سازد. آن‌ها می‌توانند وظایف را با درجه بالایی از دقت انجام دهند که در فرایندهای تولید بسیار مهم است. شکل ۳.۱ نمونه‌ای از کاربرد این ربات در ابزارهای ماشینی را نمایش می‌دهد.



شکل ۳.۱: راه‌اندازی تجربی یک سکوی^۱ سه‌در آزادی با ساختار موازی [۴]

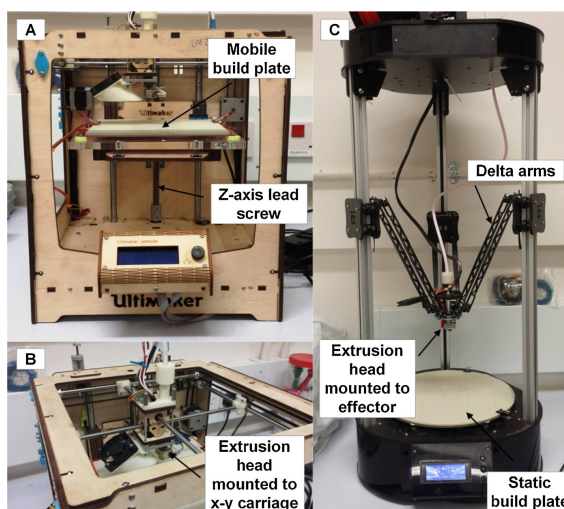
¹Machine Tools

²3d Printing

³Medical Rehabilitation

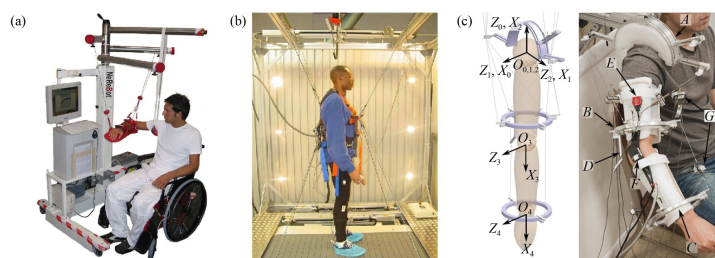
⁴Construction

- چاپ سه بعدی: در حوزه تولید افزایشی^۱، ربات های موازی بادقت و سرعت بالا، می توانند برای کنترل رسوب مواد به کار روند و باعث افزایش کیفیت خروجی چاپی شوند. در این صنعت، ساختار معروف دلتا که یک نوع ساختار موازی است، می تواند به عنوان یک نمونه کاربردی این روش نشان داده شود که در شکل ۴.۱ نمایش داده شده است.



شکل ۴.۱: ربات چاپ سه بعدی دلتا در سمت راست در مقایسه با ربات های رایج چاپ سه بعدی در سمت چپ دارای مزایایی از قبیل سرعت بالاتر و دقت بیشتر هستند [۵]

- توان بخشی پزشکی: با توجه به قابلیت های کنترل شده و سازگاری بالای ربات های موازی، این دستگاه ها به منظور توان بخشی افراد معلول و کمک در تحرک آن ها در دستگاه های توان بخشی مانند ربات های زانو، کمر و سایر اعضا، استفاده می شوند. شکل ۵.۱ نمونه ای کاربرد ربات های موازی از نوع کابلی را در این صنعت نشان می دهد.

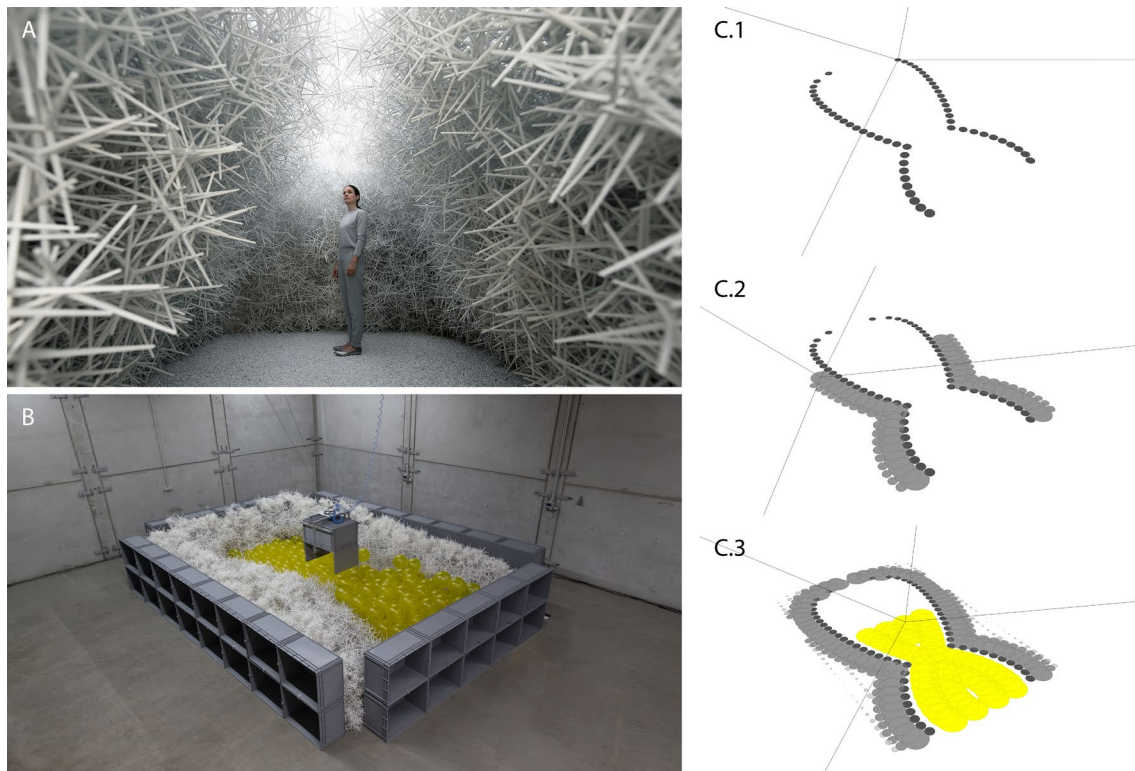


شکل ۵.۱: کاربرد ربات های کابلی به عنوان دسته ای از ربات های موازی در صنعت پزشکی [۶]

- ساخت وساز: استحکام و پایداری ربات های موازی نیز آن ها را در بخش ساخت، مفید ساخته است که

¹additive manufacturing

در آن می‌توانند بارهای سنگینی را در یک فضای کاری زیاد به طور مؤثر کنترل کنند. شکل ۶.۱ نمونه‌ای از کاربرد ربات‌های موازی کابلی را در این صنعت به تصویر می‌کشد.



شکل ۶.۱: کاربرد از ربات‌های موازی کابلی در ساخت‌وساز و حمل بار با فضای کاری وسیع [۷]

مطالعات دیگر بر روی ربات‌های موازی کابلی^۱ متمرکز شده‌اند که در آن از کابل‌ها برای کنترل حرکت رابط‌ها^۲ و جابه‌جایی مجری نهایی در فضا استفاده می‌شود با این گفتمان می‌توان نتیجه گرفت ربات‌های موازی، با مزیت‌های منحصر به فرد و گستره وسیعی از کاربردها، همچنان به عنوان یک نقطه کانونی برای تحقیقات در حال پیشرفت در رباتیک باقی می‌مانند. آن‌ها درجه بالایی از تطبیق‌پذیری را به دلیل ساختار و انعطاف‌پذیری طراحی خود نشان می‌دهند. با این حال، همانند تمام طرح‌های مهندسی، آن‌ها نیز با چالش‌هایی، به ویژه در زمینه سامانه‌های کنترل، سینماتیک و دینامیک مواجه هستند. تحقیقات و پیشرفت‌های آینده در این زمینه‌ها، قابلیت‌ها و کاربردهای ربات‌های موازی را بیشتر افزایش خواهد داد.

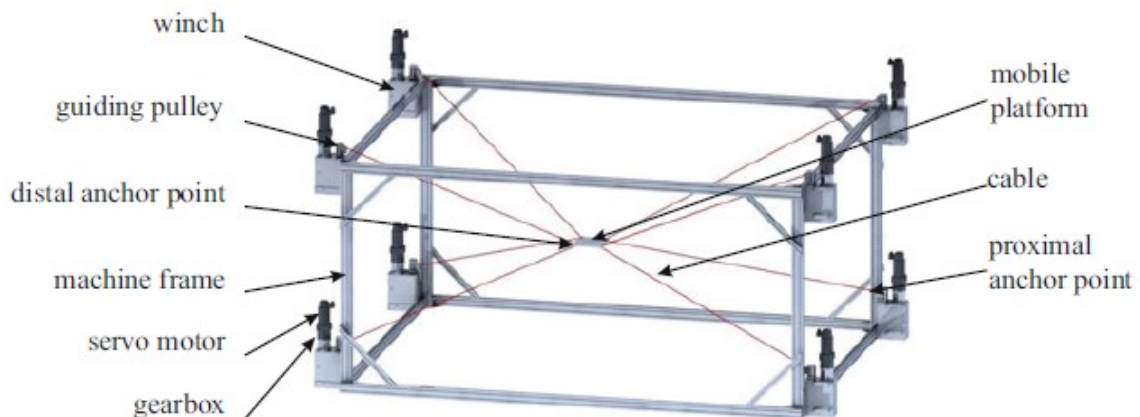
¹Cable-Driven Parallel Robots(CDPR) ²Links

۲.۱ ربات‌های کابلی موازی

ربات‌های کابلی موازی^۱ نوعی خاص از ربات‌های موازی هستند که از کابل برای حرکت استفاده می‌کنند. جرم و اینرسی بسیار کم کابل نسبت به رابط‌های صلب، فضای کاری بسیار گسترده [۸، ۹]، نسبت وزن محموله به ربات بالا [۱۰]، سرعت و شتاب‌های بسیار بالا [۱۱] و هزینه پایین تعمیر و نگهداری از ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع هستند. در اینجا به بررسی ساختار و دسته‌بندی‌های استفاده شده در ربات‌های کابلی موازی می‌پردازیم.

۱.۲.۱ اجزای تشکیل‌دهنده یک ربات کابلی موازی

یک ربات کابلی مطابق با شکل ۷.۱ به طور معمول از اجزای زیر تشکیل شده است [۱۲]:



شکل ۷.۱: اجزای مرسوم تشکیل‌دهنده یک ربات کابلی موازی [۱۲]

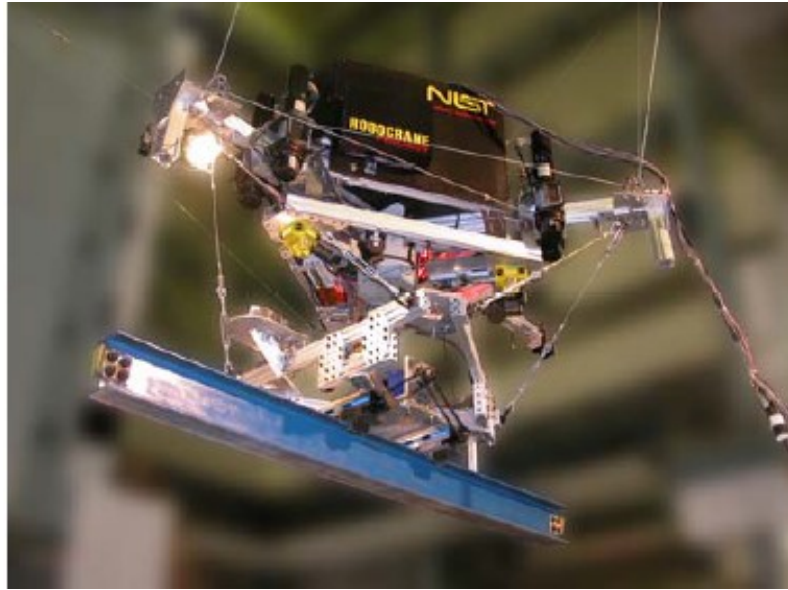
- **مجری نهایی^۲**: مجری نهایی یا همان مجری نهایی بخشی از ربات است که حرکت می‌کند. این بخش از محل نصب اجزای متحرک^۳ به کابل‌ها متصل می‌شود.
- **چارچوب ماشین^۴**: چارچوب ماشین بخشی از ربات است که در یک مکان ثابت می‌ماند. این بخش که تمام اجزای ثابت ربات را در خود قرار می‌دهد، از طریق کابل‌ها به محل نصب اجزای متحرک که روی مجری نهایی است، متصل می‌شود.

¹Cable-Driven Parallel Robots (CDPR) ²Mobile Platform ³Distal Anchor Point ⁴Machine Frame

- **کابل‌ها^۱:** کابل‌ها آن چیزی هستند که مجری نهایی را به چارچوب ماشین متصل می‌کنند. از مواد مختلف مانند فولاد، الیاف مصنوعی یا کنف ساخته شده‌اند.
- **سامانه جمع‌کننده کابل^۲:** بخشی از ربات است که طول کابل‌ها را تغییر می‌دهند. آنها معمولاً به چارچوب ماشین متصل می‌شوند، اما همچنین می‌توانند روی مجری نهایی قرار داشته باشند.
- **حسگرها^۳:** حسگرها برای اندازه‌گیری موقعیت، جهت و کشش کابل‌ها استفاده می‌شوند. آنها برای کنترل ربات و اطمینان از ایمنی آن استفاده می‌شوند.
- **کنترل‌گر^۴:** کنترل‌گر سامانه‌ای است که از داده‌های حسگر برای کنترل ربات استفاده می‌کند. آن‌ها مقدارهای تنظیم شده برای سامانه جمع‌کننده کابل تولید می‌کنند که سپس طول کابل‌ها را تغییر می‌دهد و ربات را حرکت می‌دهد.

برای درک بهتر از اینکه اجزای بالا چگونه در تعامل با همکار می‌کنند، می‌توان گفت که یک ربات کابلی موازی می‌تواند به یک مجری نهایی، یک چارچوب ماشین ثابت، m کابل که از یک طرف متصل به مجری نهایی در محل نصب اجزای متحرک و از طرف دیگر متصل به چارچوب ماشین در انتهای محل نصب اجزای ثابت، یک سامانه پیشران‌ش که وظیفه تنظیم طول کابل را دارد و به‌سادگی سامانه جمع‌کننده کابل نامیده می‌شود، حسگرها برای اندازه‌گیری طول مؤثر کابل‌ها، موقعیت و جهت مجری نهایی، تنش کابل‌ها، یک کنترل‌کننده برای تولید مقادیر تنظیم شده برای جمع‌کننده کابل‌ها، یک سامانه کنترل حلقه باز برای کنترل موقعیت، سرعت و/یا نیروی مجری نهایی، یک سامانه کنترل پیشرو برای تولید مسیرها و برنامه‌های حرکتی، و یک سامانه کنترل سطح بالا برای کنترل ربات و اطمینان از ایمنی آن تقسیم شود. برای اکثر ربات‌ها، جمع‌کننده کابل‌ها به چارچوب ماشین ثابت متصل می‌شوند تا اتصال الکتریکی با سامانه منبع قدرت ساده کنند. با این حال، طرح‌هایی که در آن جمع‌کننده کابل‌ها روی مجری نهایی قرار دارند نیز پیشنهاد شده است که در شکل ۸.۱ نمایش داده شده است [۱۳].

¹Cable ²Winch ³Sensors ⁴Controller



شکل ۸.۱: ربات کابلی موازی NIST که در آن سامانه جمع‌کننده کابل داخل مجری نهایی قرار گرفته است [۱۳]

بسیاری از ربات‌های کابلی موازی از حسگرها برای اندازه‌گیری غیرمستقیم طول مؤثر کابل‌ها استفاده می‌کنند، به عنوان مثال از طریق این یک حسگر انکودر موقعیت محور روی غلتک موتور اندازه‌گیری می‌شود، معمولاً به دلیل شکم‌دهی و شل‌شدگی کابل تعیین مستقیم طول کابل دشوار است. به عنوان جایگزین، موقعیت و جهت مجری نهایی به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود [۱۴]. برای کاربردهای مختلفی، لازم است نیروی کششی کابل‌ها نیز تعیین شود. این کار عمدتاً با استفاده از حسگرهای نیرو که به یک سر کابل یا برخی قرقه‌ها در بین آنها متصل می‌شوند، می‌تواند نیروی کششی کابل‌ها را اندازه‌گیری کند. این اندازه‌گیری‌ها به سامانه کنترل ارائه می‌شود و کنترل‌کننده مقادیر تنظیم شده برای سامانه جمع‌کننده کابل‌ها را تولید می‌کند. این مقادیر تنظیم شده برای این سامانه‌ها باعث کنترل طول کابل‌ها می‌شوند.

سامانه کنترل حلقه باز در این سامانه مسئول کنترل موقعیت، سرعت و/یا نیروی مجری نهایی است. این سامانه به طور مداوم ورودی‌های حسگری را دریافت کرده و مقادیر موردنیاز برای حرکت سکو را تولید می‌کند. سامانه کنترل پیشرو وظیفه تولید مسیرها و برنامه‌های حرکتی را بر عهده دارد. این سامانه مسیر مناسب برای ربات را تعیین کرده و دستورات لازم برای انجام حرکت‌ها را به سامانه کنترل حلقه باز ارسال می‌کند.

سامانه کنترل سطح بالا مسئول کنترل کلی ربات و اطمینان از ایمنی آن است. این سامانه از داده‌های ورودی سامانه‌های دیگر استفاده می‌کند و تصمیم‌های لازم را برای کنترل ربات اتخاذ می‌کند.

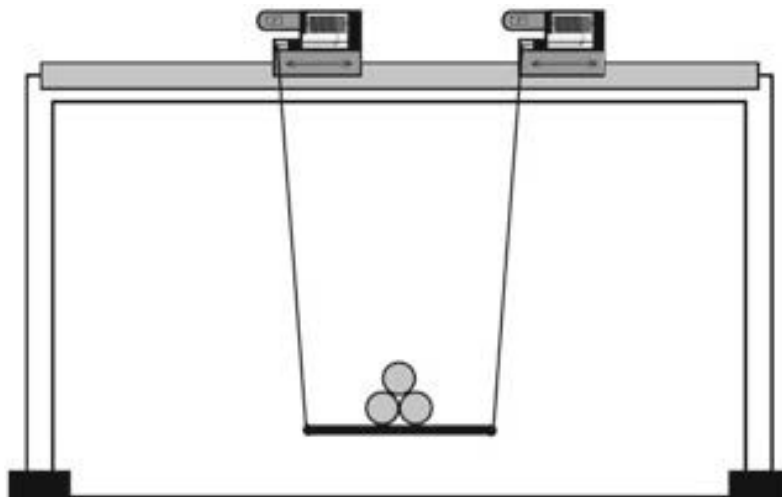
در کل، سامانه ربات کابلی موازی شامل اجزای مختلفی است که با هم همکاری می‌کنند تا حرکت، کنترل و ایمنی ربات را تضمین کنند.

کابل‌ها در ربات‌های کابلی موازی می‌توانند از مواد مختلف ساخته شوند. موادی که به طور گسترده‌ای برای کابل‌ها استفاده می‌شوند، فولاد و الیاف مصنوعی مانند فیبر پلی‌اتیلن با مدول بالا، آرامید (کولار^۱) یا پلی‌استر^۲ هستند. با این حال، مواد دیگری مانند کنف نیز می‌توانند استفاده شوند. اخیراً، کابل‌های هوشمندی با سیم‌های برق یکپارچه پیشنهاد شده و در نمونه اولیه برای تأمین انرژی الکتریکی یا سیگنال‌های فیلدباس^۳ به معجری نهایی استفاده شده‌اند.

۲.۲.۱ طبقه‌بندی و معماری ربات‌های کابلی موازی

ربات‌های کابلی موازی را نمی‌توان در یک طبقه منحصر به فرد دسته‌بندی کرد. دسته‌بندی‌های متفاوتی بر اساس معیارهای مختلف برای این ربات ارائه شده است که عبارت‌اند از: دسته‌بندی سینماتیکی، دسته‌بندی بر اساس الگوی حرکت، دسته‌بندی بر اساس سامانه پیش‌رانش. در اینجا ما تنها به توضیح دسته اول اکتفا می‌کنیم. بر اساس تقسیم‌بندی ورهون^۴ و مینگ [۱۵، ۱۶]، می‌توان ربات‌های کابلی موازی را بر اساس تعداد کابل‌های محرکه (m) و تعداد درجه آزادی (n) به چهار دسته تقسیم کرد.

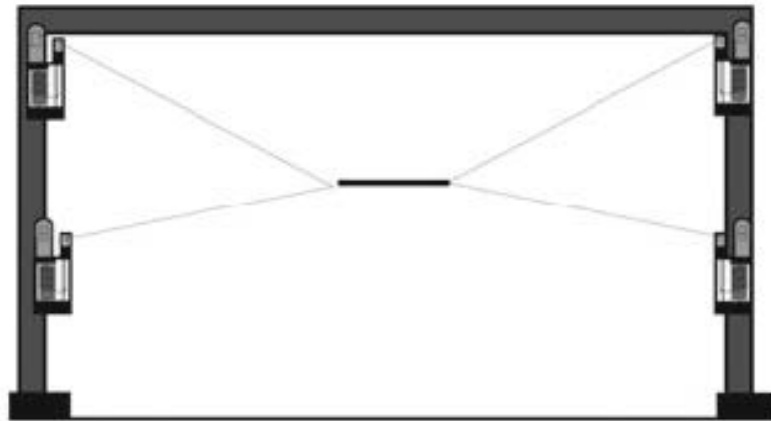
- مکانیزم نامقید^۵ ($m < n$): این نوع مکانیزم نمی‌تواند ساختار تعادلی پایداری را ایجاد کند و معجری نهایی دارای درجه آزادی غیرقابل‌کنترلی است. مثالی از این ربات در شکل ۹.۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۹.۱: مکانیزم کابلی موازی صفحه‌ای از نوع نامقید $m = 2, n = 3$ [۱۷]

^۱Kevlar ^۲Polyester ^۳Bus Field Signals ^۴verhoeven ^۵under-constrained mechanism

- مکانیزم نیمه مقید^۱ ($m = n$): این نوع مکانیزم پایدار است، اما مجری نهایی فقط دارای n درجه آزادی است که ممکن است برای برخی کاربردها کافی نباشد.
- مکانیزم مقید کامل^۲ ($m = n + 1$): این نوع مکانیزم پایدار است و دارای $n + 1$ درجه آزادی است که برای اکثر کاربردها کافی است. شکل ۱۰.۱ نمونه‌ای از این مکانیزم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰.۱: مکانیزم صفحه‌ای کابلی موازی مقید کامل $m = ۴, n = ۳$ [۱۷]

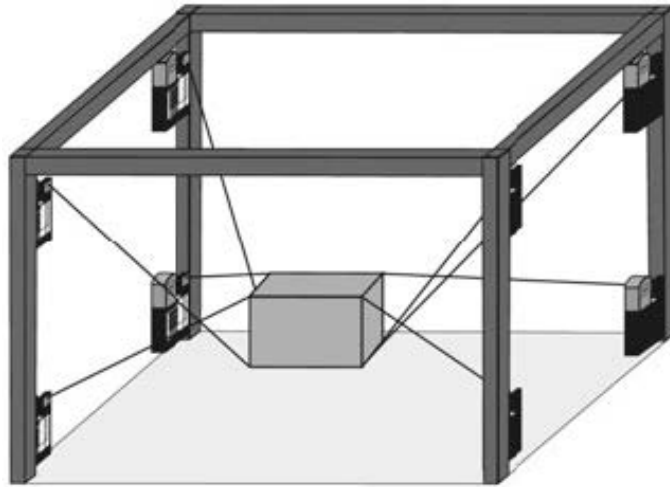
- مکانیزم مقید افزونه^۳ ($m > n + 1$): این نوع مکانیزم دارای درجات آزادی بیشتری از آنچه نیاز دارد، است که می‌تواند برای بهبود عملکرد ربات کابلی موازی استفاده شود. نمونه‌ای از این مکانیزم در شکل ۱۱.۱ قابل مشاهده است.

اگر جاذبه به‌عنوان یک کابل مجازی در نظر گرفته شود، ربات کابلی موازی نیمه مقید ($m = n$) می‌تواند به‌عنوان یک ربات کابلی موازی مقید کامل ($m = n + 1$) با شتاب محدود در نظر گرفته شود. همچنین پات [۱۲] مطابق با شکل ۱۲.۱ برای ربات‌های^۴ معلق کابلی موازی یک تعریف ریاضی مطابق با رابطه زیر ارائه می‌دهد:

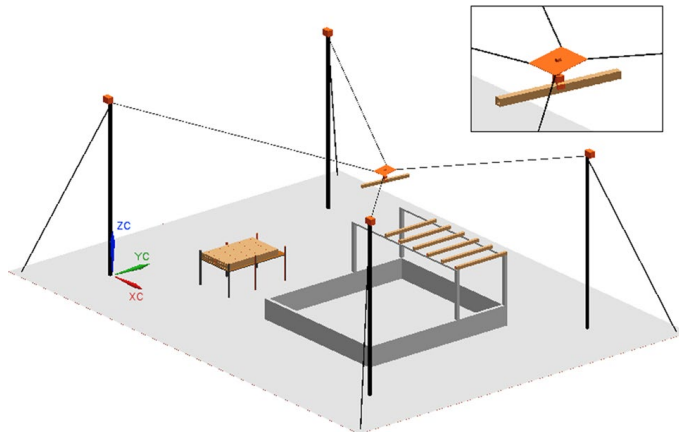
$$\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{g} < 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (۱.۱)$$

در اینجا \mathbf{g} بردار گرانش و \mathbf{u}_i بردار یکه در راستای کابل (i) می‌باشد.

^۱incompletely constrained mechanism ^۲fully constrained mechanism ^۳redundantly constrained mechanism ^۴Suspended



شکل ۱۱.۱: مکانیزم سه‌بعدی کابلی موازی از نوع مقید افزونه $m = 8, n = 6$ [۱۲]








شکل ۱۲.۱: یک ربات معلق چهار کابلی از نوع نامقید [۱۸]

۳.۲.۱ کاربردهای ربات‌های کابلی موازی

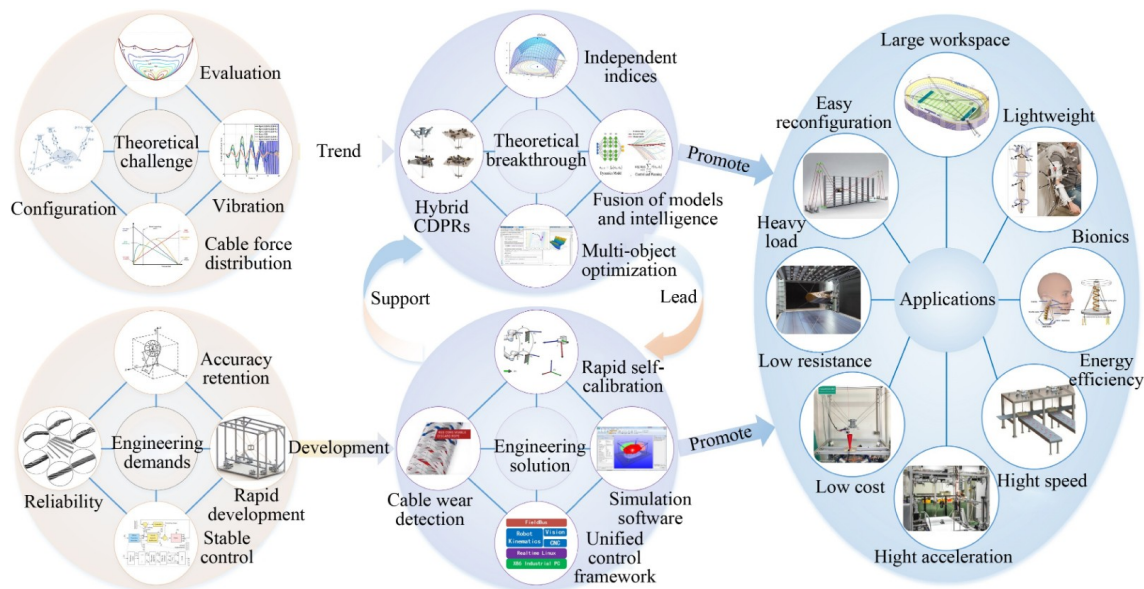
باتوجه به ویژگی‌های بیان شده در بخش ۲.۱ برای ربات‌های کابلی. استفاده از این ربات‌ها در صنایع مختلفی جذابیت پیدا کرده است. جدول ۱.۱ بخشی از کاربردهای این ربات را در صنایع مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱.۱: کاربردهای رایج ربات کابلی موازی با پیکربندی‌های سینماتیکی متناظر آن [۱۹]

عکس	مراجع	نوع مکانیزم	کاربرد
	[۲۰] [۲۱][۲۲]	صفحه‌ای مقید کامل فضایی نامقید	Pick and place
	[۲۳]	فضایی مقید کامل	Simulator
	[۲۴][۲۵]	فضایی نامقید	Radio telescope
	[۲۶][۲۷] [۲۸][۲۹]	صفحه‌ای مقید کامل فضایی نامقید	Rehabilitation
	[۳۰][۳۱] [۳۲]-[۳۳]	فضایی نامقید فضایی مقید کامل	3D printing
	[۳۴][۳۵] [۳۶][۳۷]	صفحه‌ای مقید کامل فضایی نامقید	Camera carrier and Inspection
	[۳۸][۳۹] [۴۰]	صفحه‌ای نامقید فضایی مقید افزونه	Painting and so on
	[۴۱][۴۲]	فضایی مقید افزونه	Logistics
	[۴۳][۴۴]	فضایی نامقید	Maritime
	[۴۵]-[۴۶] [۴۷]	فضایی نامقید فضایی مقید افزونه	Aerial
	[۴۸][۴۹]	فضایی نامقید	Joystick

۴.۲.۱ چالش‌های موجود و تحقیقات ربات‌های کابلی موازی

شکل ۱۳.۱ نمای کلی از چشم‌اندازها و چالش‌های موجود در ربات‌های کابلی موازی را نشان می‌دهد. شکل چالش‌های زیر را می‌توان مثال زد [۶]:



شکل ۱۳.۱: چشم‌اندازها و چالش‌های موجود در ربات‌های کابلی موازی [۶]

۱. **پیکربندی و طراحی:** ربات‌های کابلی موازی از ویژگی‌هایی نظیر فضای کاری بزرگ، گشتاور کم و سادگی، برخوردار هستند. اما ویژگی نیروی یک‌طرفه کابل‌ها منجر به ایجاد قیدهای کشش مثبت نیروی کابل و ویژگی منحصر به فرد در طراحی پیکربندی می‌شود. پیکربندی‌های هیبریدی که شامل زنجیره‌های سخت، کابل‌های موازی و عناصر تنش‌گیری غیرفعال می‌شوند، می‌توانند کارایی ربات‌های کابلی موازی را افزایش دهند. اما این حوزه نیازمند تحقیقات بیشتری است.

۲. **تحلیل استاتیک و توزیع نیروی کابل:** روش‌های موجود برای اطمینان از نیروهای کابل مثبت و محدود نیاز به اصلاح دارند. تحقیقات آینده باید عوامل بیشتری را در توزیع نیروی کابل بر اساس نیازهای زمان واقعی، مانند کارایی انرژی، یکنواختی نیروهای کابل و سفتی در نظر بگیرد. همچنین، نیازمند روش‌های سریع برای تعیین چندضلعی‌های قابل دستیابی از نیروی کابل و بهینه‌سازی چندهدفه است.

۳. **فضای کاری و شاخص‌های عملکرد:** فضای کاری ربات‌های کابلی موازی به دلیل وابستگی بالا به نیروهای کابل، چالش‌برانگیز است. شاخص‌های عملکردی که از نیروی کابل مستقل بوده و مستقیماً بر اساس پیکربندی هستند، نیاز به توسعه و تحقیقات بیشتری دارند.

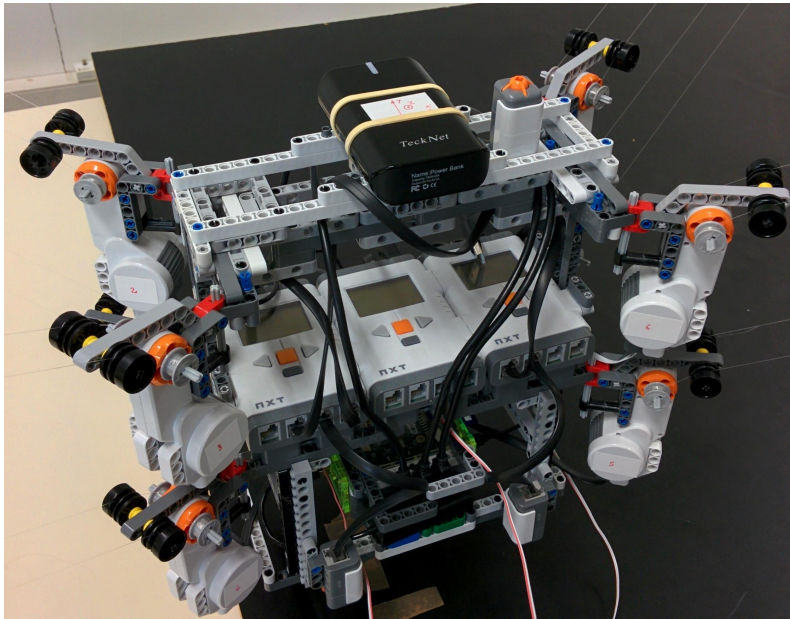
۴. کنترل: کنترل ربات‌های کابلی موازی به دلیل وجود عدم قطعیت‌ها، و تأخیرها در سامانه، چالش برانگیز است. راهبردهای کنترل امروزی باید قادر باشند در برابر این عوامل مقاومت کنند و به صورت کارا توانایی‌های ربات‌های کابلی موازی را بیشینه کنند.
۵. نرم‌افزار و ابزارهای مدل‌سازی: نرم‌افزارها و ابزارهای مدل‌سازی ربات‌های کابلی موازی هنوز در حال توسعه هستند و نیاز به بهبود دارند. برای مثال، برخی از ابزارها ممکن است نتوانند پیچیدگی‌های فیزیکی کابل را به درستی مدل کنند، یا برخی از ویژگی‌های مهم ربات‌های کابلی موازی را نادیده بگیرند.
۶. تحقیقات مربوط به کابل: با توجه به اینکه کابل‌ها جزء مهمی از ربات‌های کابلی موازی هستند، تحقیقات بیشتری بر روی خواص کابل، تأثیر نیروهای جانبی و درجه حرارت، عمر کابل و نحوه استفاده از آن‌ها در طراحی‌های مختلف ربات‌های کابلی موازی مورد نیاز است.
۷. کاربرد در محیط‌های خاص: ربات‌های کابلی موازی می‌توانند در محیط‌های چالش برانگیزی استفاده شوند، از جمله فضا، زیر آب، و محیط‌های با دمای بالا. این موضوع نیازمند تحقیقات بیشتری در مورد مواد و فناوری‌های مناسب برای این محیط‌ها است.
۸. امنیت و اعتماد: امنیت و اعتماد به سامانه‌های ربات‌های کابلی موازی می‌تواند یک چالش باشد، به خصوص در کاربردهایی که نیاز به تعامل با انسان‌ها یا محیط‌های نامطمئن وجود دارد؛ بنابراین، تحقیقات بیشتری در زمینه تشخیص خطا، پیش‌بینی شکست، و توانایی استقرار سریع نیاز دارد.
۹. قابلیت ادغام و استانداردهای صنعتی: ادغام ربات‌های کابلی موازی با سامانه‌های دیگر و پیروی از استانداردهای صنعتی می‌تواند یک چالش باشد. این موضوع می‌تواند شامل موضوعاتی نظیر ارتباطات، قابلیت‌های پیکربندی مجدد، و رابط‌های کاربر پیشرفته باشد.

۵.۲.۱ ربات‌های آسان‌نصب کابلی موازی^۱

در این بخش به بررسی ربات‌های آسان‌نصب می‌پردازیم. ربات‌های آسان‌نصب کابلی موازی به دلیل سرعت نصب بالا و پیچیدگی کم در راه‌اندازی، جذابیت بالایی برای کاربردهایی از جمله خانگی، نجات و فیلم‌برداری پیدا کرده‌اند. از ویژگی‌های مهم ربات‌های آسان‌نصب می‌توان به قرارگیری تمام سامانه‌های بیان شده در بخش ۱.۲.۱ در داخل مجری نهایی اشاره کرد، به طوری که برای نصب ربات تنها کافی است که انتهای کابل خارج شده از مجری نهایی را به نقاط نصب اجزای ثابت دلخواه متصل کرد و ربات را راه‌اندازی کرد.

¹Depolyable Cable Driven Parallel robots

ژاویر^۱ در مقاله خود [۵۰] به بررسی یک ربات آسان نصب می‌پردازد و یک کنترلر برای کاهش ارتعاشات ربات ارائه می‌دهد. شکل ۱۴.۱ نشان‌دهنده ربات آسان نصب ساخته شده با استفاده از قطعات آماده لگو^۲ است. ویژگی‌های ساختاری و سخت‌افزاری این ربات عبارتند از: در این ربات مطابق با شکل ۱۴.۱ برای تعلیق

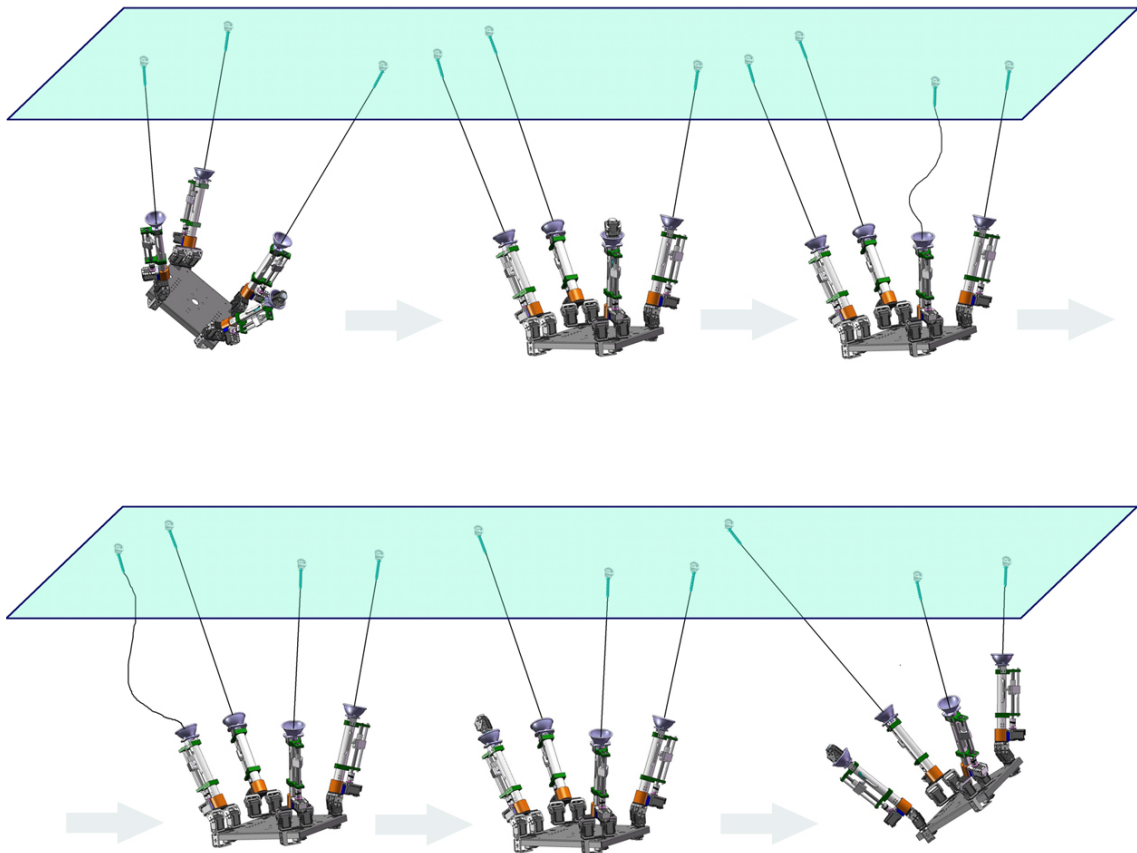


شکل ۱۴.۱: ربات آسان نصب ساخته شده با قطعات آماده لگو [۵۰]

یک سکوی محرک سبک با ۶ درجه آزادی، از ۸ عدد کابل پلاستیکی نازک استفاده شده است. کابل‌ها به‌عنوان فنرهای خطی مدل‌سازی شده‌اند و به‌صورت جفت به ۸ موتور با قرقره متصل شده‌اند که باعث ایجاد کشش برای کنترل موقعیت سکو محرک می‌شود. یک واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) برای اندازه‌گیری شتاب‌ها و سرعت‌های چرخشی سکو استفاده شده است. قطعات لگو مایندستورم شامل رایانه Raspberry Pi، بلوک‌های هوشمند NXT برای رابطه با موتورها، موتورها و قرقره‌ها برای باز و جمع کردن کابل‌ها، و باتری برای تغذیه سامانه استفاده شده‌اند. نرم‌افزار کنترل در سیمولینک بر روی رایانه Raspberry Pi طراحی و اجرا شده است. این نرم‌افزار دستورات را به بلوک‌های NXT ارسال کرده و موقعیت موتورها را کنترل می‌کند. همچنین، از کابل‌های انعطاف‌پذیر استفاده شده که سفتی و ارتعاش کم مجری نهایی را به وجود می‌آورند.

آلن^۳ در مقاله خود [۵۱] مطابق با شکل ۱۵.۱ یک ربات با نام ربات عنکبوتی^۴ طراحی کرده که علاوه بر دارابودن ویژگی‌های آسان‌نصبی قابلیت تغییر نقاط نصب اجزای ثابت خود را دارد.

^۱Xavier ^۲Lego ^۳Alen ^۴Spider-Bot

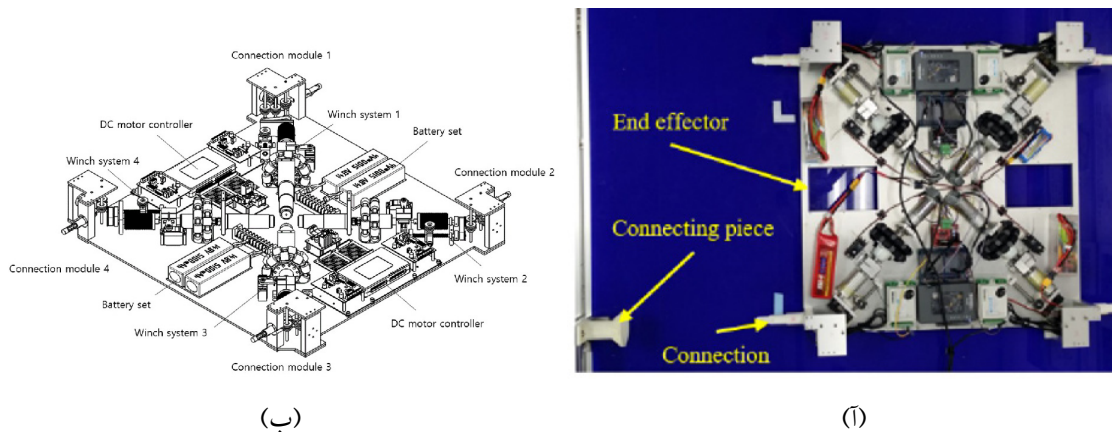


شکل ۱۵.۱: ربات آسان نصب موازی کابلی با قابلیت تغییر نقاط نصب اجزای ثابت خود [۵۱]

ربات اسپایدر بوت مطابق شکل ۱۵.۱ یک ربات معلق کابلی موازی است که برای عبور از دیوارها و سقف‌ها طراحی شده است. این ربات الهام گرفته از مرد عنکبوتی، با شلیک پین‌هایی که به کابل‌ها وصل هستند، به سطوح مختلف متصل می‌شود و با جمع کردن کابل‌ها خود را به بالا می‌کشد. اسپایدر بوت از چهار کابل استفاده می‌کند که سه پین آن برای کنترل موقعیت و یک پین آن برای اتصال پین بعدی به کار می‌روند. الگوی حرکت این ربات شامل چند مرحله است: اتصال، حرکت و جدا کردن کابل‌ها. برای دستیابی به موقعیت‌های دلخواه، طول کابل‌های مورد نیاز با استفاده از معادلات سینماتیک وارون محاسبه می‌شود. آزمایش‌های انجام شده نشان دادند که ربات قادر است بادقت قابل قبول، مسیرهای مختلف را طی کند. اسپایدر بوت کاربردهای بالقوه زیادی دارد، از جمله حمل تجهیزات در موقعیت‌های جست‌وجو و نجات، حرکت در داخل ساختمان‌ها بدون اشغال فضای

کف و انتقال بین کشتی‌ها در دریا. یک نمونه اولیه از این ربات ساخته و آزمایش شده است. نتایج تست نشان دادند که ربات‌های معلق با کابل قابل ساخت و عملکرد قابل قبول دارند. البته برای بهبود سرعت و مانورپذیری ربات، نیاز به تحقیقات و توسعه بیشتر است.

وانگ^۱ [۵۲] در مقاله خود یک ربات آسان نصب کابلی موازی از نوع صفحه‌ای را مطابق با شکل ۱۶.۱ طراحی و پیاده‌سازی کرده است.

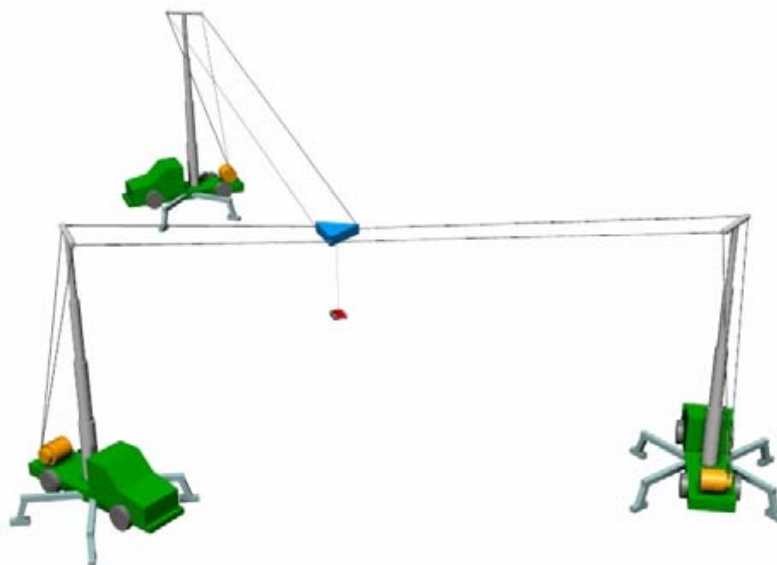


شکل ۱۶.۱: ربات آسان نصب صفحه‌ای از نوع کابلی موازی [۲]

در این مقاله، یک ربات کابلی موازی معرفی می‌شود که قابلیت نصب خودکار کابل‌های خود را با استفاده از یک مجری نهایی متحرک یکپارچه دارد. مجری نهایی شامل چرخ‌های omni و جمع‌کننده کابل‌ها است که در دو حالت عمل می‌کند: حالت متحرک برای رسیدن به نقاط اتصال کابل و حالت کابل برای تنظیم موقعیت/جهت مجری نهایی پس از نصب کابل‌ها. برای انتقال قدرت به هر دو چرخ omni یا کابل، یک سامانه جمع‌کننده کابل با مکانیزم کلاچ پیشنهاد شده است که توسط یک موتور واحد کنترل می‌شود. این سامانه وزن سکو و محرک‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین، ماژول‌های اتصال کابل در مجری نهایی به صورت خودکار به قطعات اتصال ثابت روی قاب چسبیده و کابل‌ها را نصب می‌کنند. برای رسیدن به موقعیت‌های دلخواه مجری نهایی، طول کابل‌ها با استفاده از سینماتیک وارون تعیین می‌شود. آزمایش‌های انجام شده فرایند نصب کابل را نشان داده و دقت حالت متحرک و حالت کابل را با هم مقایسه کرده‌اند (دقت حالت کابل ۴ برابر بالاتر است). ربات مذکور پیشنهادی دارای مزایای کلیدی زیر است: نصب خودکار کابل برای وظایف خطرناک/متناوب، طراحی سبک و جمع‌وجور و قابل استفاده برای فضاهای کاری بزرگ و مسطح مانند تمیزکردن پانل‌های خورشیدی. در آینده، قصد داریم تنش کابل را برای افزایش دقت کنترل و همچنین یک ماژول تمیزکردن به سامانه اضافه کنیم. مجری نهایی ربات کابلی موازی شامل ۴ سامانه انتقال قدرت کابلی قابل تنظیم است که هر کدام دارای یک موتور، چرخ، omni کابل پیچ،

¹Wang

دنده دیفرانسیل و کلاچ هستند. همچنین، ۴ ماژول اتصال کابل در مجری نهایی وجود دارد که هر کدام از یک کانکتور، قفل، تیغه و مخزن کابل تشکیل شده‌اند. این ماژول‌ها ۴ کابل را به قطعات اتصال ثابت روی یک قاب مسطح متصل می‌کنند. برای کنترل موتورها، ۲ کنترل‌کننده قابل حمل (myRIO 1900) و یک رایانه میزبان که نرم‌افزار حلقه کنترل را اجرا می‌کند، استفاده می‌شود. سامانه‌های جمع‌کننده کابل با استفاده از کلاچ قادر هستند بین حالت متحرک (با چرخ omni و حالت کابل (با کابل پیچ) تغییر دهند. وقتی مجری نهایی در حالت متحرک باشد، ماژول‌های اتصال کابل به صورت خودکار به قطعات ثابت روی قاب چسبیده و کابل‌ها را نصب می‌کنند. بوشر^۱ در مقاله خود [۵۳] که برای اولین بار اصطلاح آسان‌نصب را بکار برده است، از پیکربندی نمایش داده شده در شکل ۱۷.۱ برای ربات کابلی موازی خود استفاده کرده است.



شکل ۱۷.۱: سامانه آسان‌نصب کابلی موازی با قراردادن نقطه نصب اجزای ثابت روی جرثقیل‌های متحرک [۵۳]

در این مقاله، یک سامانه رباتیک جدید و قابل‌استقرار سریع برای جستجو و نجات شهری پیشنهاد می‌شود. این سامانه از خودروهای پشتیبانی متحرک، یک ربات کابلی (ربات "مرکزی") و ربات‌های کوچک "مطیع" متحرک تشکیل شده است. ربات کابلی را می‌توان با قراردادن خودروهای پشتیبانی در نزدیکی محل حادثه به سرعت مستقر کرد. ربات کابلی با دوربین‌های تعبیه شده یک دید هوایی از محل فراهم می‌کند و می‌تواند ربات‌های مطیع را به داخل آوار فرستاده تا بازماندگان را پیدا کند. این امر برد و کارایی ربات‌های مطیع را افزایش می‌دهد. ربات کابلی از ۶ کابل در جفت‌های موازی استفاده می‌کند که اجازه تنها حرکت انتقالی مجری نهایی را می‌دهد و سینماتیک را ساده می‌کند. برای تعیین موقعیت نقاط اتصال کابل، یک روال کالیبراسیون ارائه شده است.

¹bosscher

همچنین، برای قرارگیری در فضای کاری موردنظر ربات کابلی در محل حادثه، راهنماهای قراردادن خودروهایی پشتیبانی ارائه شده است. ربات مذکور برای ساختمان‌های بزرگ فرورفته که فضای هوای باز برای حرکت ربات کابل دارند، طراحی شده است. در صورت اینکه ساختمان‌های بلند هنوز ایستاده باشند، سامانه مناسب نخواهد بود. مزایای کلیدی سامانه عبارت‌اند از: استقرار سریع در فضای کاری بسیار بزرگ، افزایش برد/اثر بخشی ربات‌های مطیع و توانائی گرفتن نمایی هوائی با استفاده از دوربین تعبیه شده در ربات کابلی.

۶.۲.۱ ربات‌های فروتحریک کابلی موازی^۱

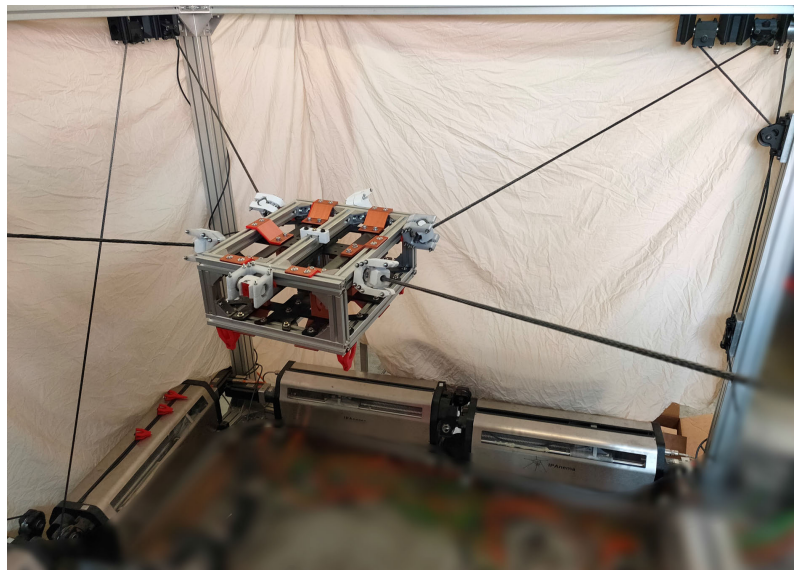
ربات‌های فروتحریک [۵۴]، ربات‌هایی هستند که تعداد عملگرهای کمتری نسبت به درجات آزادی متغیرهایی که فضای پیکربندی^۲ آنها را توصیف می‌کنند دارند. این بدان معناست که آنها نمی‌توانند جابه‌جایی‌های دلخواه را در فضای پیکربندی خود که مجموعه‌ای از همه پیکربندی‌های ممکن است که می‌تواند به دست آورند، دنبال کنند ربات‌های فروتحریک اغلب در کاربردهایی یافت می‌شوند که کاهش هزینه، وزن یا پیچیدگی عملگر مطلوب است، مانند ربات‌های راه رونده، ربات‌های پرنده و دست‌های رباتیک. این ربات‌ها مشکلات کنترل چالش‌برانگیزی را ایجاد می‌کنند، زیرا آنها نیاز به روش‌های غیرخطی و دینامیکی برای دستیابی به پایداری و برنامه‌ریزی حرکت دارند.

امروزه ربات‌های فروتحریک با تلفیق شدن با ربات‌های کابلی موازی، ربات‌های کابلی موازی فروتحریک^۳ را مطابق با شکل ۱۸.۱ تشکیل داده‌اند که از ویژگی‌های هر دو شاخه بهره می‌برند. این شاخه نسبتاً جدید از ربات‌های کابلی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با بسط تعریف ربات‌های فروتحریک، ربات‌های کابلی موازی فروتحریک را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: ربات‌هایی که در آن تعداد کابل‌ها کمتر از تعداد درجات آزادی آن است که باعث می‌شود تا همه درجات آزادی ربات قابل کنترل نباشد و در نتیجه شاهد ارتعاشات ناخواسته در مجری نهایی باشیم [۵۵].

از چالش‌های پیشرو در ربات‌های کابلی موازی فروتحریک می‌توان به موارد متعددی اشاره کرد [۵۶، ۵۵]. یکی از چالش‌های ربات‌های کابلی فروتحریک، محدودیت در کنترل حرکت‌های آن‌هاست. زیرا تعداد عملگرهای این ربات‌ها کمتر از درجات آزادی آن‌ها است و نمی‌توان هر حرکت را به صورت جداگانه کنترل کرد؛ بنابراین، برای دستیابی به حرکت مطلوب، لازم است مسیر حرکت را با دقت طراحی کرد. علاوه بر این، این ربات‌ها ممکن است با ناپایداری در نقاط پایانی مسیر حرکت روبرو شوند. این ناپایداری به دلیل ذات نامقید و فروتحریک این ربات‌ها است که باعث ایجاد نوسانات غیرقابل کنترل می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل، باید شرایط پایداری

¹Underactuated Cable Driven Parallel robots ²Configuration space or Task space

³Underactuated-Cable-Driven-Parallel-Robots(UACDPR)



شکل ۱۸.۱: یک ربات کابلی موازی فروتحریک که از آنجا که تعداد کابل‌ها (۴) کمتر از تعداد درجات آزادی (۶) است. به لحاظ پیکربندی سینماتیکی، نامقید هم محسوب می‌شود [۵۵].

را در طراحی لحاظ کرد. همچنین، مدل‌سازی ریاضی این ربات‌ها دارای پیچیدگی است. چون دینامیک یکپارچه بین مجری نهایی و کابل‌ها، تأثیر قابل توجهی بر ساختار حرکت دارد. به خصوص، تشخیص و جلوگیری از نقاط تکین، چالش بزرگی در مدل‌سازی است. علاوه بر مشکلات فوق، قید کششی کابل‌ها نیز باعث پیدایش مشکلات دیگر در کنترل این ربات‌ها می‌شود. زیرا کابل‌های ربات فروتحریک ممکن است شل شده یا نوسان پیدا کنند و منجر به ازدست‌دادن حالت خود شوند. تنظیم مناسب کشش در این ربات‌ها سخت است. فضای کار قابل استفاده این ربات‌ها نسبت به ربات‌های کابلی مقید کامل، دارای محدودیت‌های بیشتری است. زیرا برای حفظ کنترل و پایداری، نیاز به شرایط خاصی دارند. این شرایط ممکن است باعث کاهش انعطاف‌پذیری و کارآمدی این ربات‌ها شود. در ضمن، میرایی ارتعاشات باقیمانده در این ربات‌ها سخت‌تر از ربات‌های دیگر است. چون محدودیت در کنترل درجات آزادی بر روی مجری نهایی، باعث می‌شود که نتوان از روش‌های معمول استفاده کرد؛ بنابراین، باید از روش‌های خاص و پیچیده‌تری برای میرا کردن این ارتعاشات استفاده کرد. پیچیدگی سخت‌افزار نیز چالش دیگری است که با آن روبرو هستیم. برای کنترل و پایداری این ربات‌ها، نیاز به حسگرها و اجزای اضافی داریم. این عوامل، هزینه و احتمال خرابی را بالا می‌برند. ظرفیت بار در این ربات‌ها نسبت به ربات‌های کابلی موازی کاملاً مقید، کمتر است. زیرا تعداد کابل‌های تقسیم‌کننده بار در این ربات‌ها کمتر است. در نهایت، تکین‌های سینماتیک نقطه ضعیف دیگر این ربات‌هاست. زیرا به دلیل طبیعت فروتحریک، سکوی متحرک در معرض تکین هستند. تکین به حالت خاص سینماتیک گفته می‌شود که در آن ساختار حرکت قابل تغییر نباشد. تکین باعث محاسبات نادقیق و خطا در کنترل مسیر حرکت مجری نهایی می‌شود. در

در ربات Aras-Cam-2 یکی از مشکلات ربات‌های فروتحریک کابلی موازی، ارتعاشات ناخواسته در حین حرکت است که به دلیل کنترل ناپذیر بودن برخی مختصات ایجاد می‌شود. در این تحقیق، یک روش طراحی مسیر برای این ربات‌ها ارائه شده است که با رعایت قیود تعادلی و کششی در نقاط انتهایی مسیر، از وقوع این ارتعاشات جلوگیری می‌کند. این روش باعث بهبود عملکرد و دقت ربات‌های کابلی موازی می‌شود.

۳.۱ طراحی مسیر

در فضای طراحی مسیر برای ربات‌های کابلی موازی نامقید^۱ [۵۷]، [۵۸] کارهای کمی انجام شده است. همچنین در زمینه طراحی مسیر ربات‌های کابلی موازی فروتحریک [۵۶]، [۵۹] نیز تعداد محدودی پژوهش وجود دارد. به‌طورکلی ساختاری که فروتحریک باشد، ذاتاً نامقید نیز محسوب می‌شود [۶۰]. در ادبیات طراحی مسیر برای ربات‌های فروتحریک دو مختصات کنترل‌پذیر q_a ، و کنترل‌ناپذیر q_u تعریف می‌شوند. در یک ربات کابلی موازی فروتحریک زمانی که تمام کابل‌ها تحت کشش باشند، ذات فروتحریک سامانه تنها اجازه کنترل n درجه آزادی را با تغییر طول کابل‌ها می‌دهد و مابقی $\lambda = 6 - n$ توسط قوانین تعادل استاتیک [۶۰]، یا در ضمن یک مسئله طراحی مسیر، توسط قوانین دینامیک تعیین می‌شود [۵۶]. باید در نظر داشت که در یک مسئله طراحی مسیر در ربات‌های کابلی موازی، علاوه بر در نظر گرفتن دینامیک درونی^۲ سامانه [۶۱]، باید قید کششی بودن کابل‌ها را هم ارضا کند. این موضوع با چالش‌هایی مواجه می‌شود که در این پایان‌نامه به حل آن پرداخته می‌شود.

۴.۱ اهداف و نوآوری‌ها

در این پژوهش با طراحی و ساخت ربات آسان‌نصب کابلی موازی، به چالش نصب و راه‌اندازی سریع ربات‌های کابلی موازی پاسخ داده شد. از آنجاکه ساختار فروتحریک ایجاد شده امکان مسیریابی و حرکت بدون نوسان این ربات را با چالش روبه‌رو می‌کند، از دستاوردهای دیگر این پروژه طراحی یک مسیر مناسب با در نظر گرفتن ذات فروتحریک سامانه است؛ بنابراین اهداف نوآوری‌های پیاده شده در این پایان‌نامه به شرح زیر خواهد بود

- طراحی و ساخت یک ساختار نوین برای نصب سریع ربات

¹underconstrain ²Internal-Dynamics

در این پژوهش یک ربات کابلی موازی آسان‌نصب به نام Aras-Cam-2 طراحی و ساخته شده است که دارای تمام بخش‌های رایج یک ربات کابلی موازی مانند سامانه جمع‌کننده کابل، حسگرها و سامانه تأمین قدرت الکتریکی است. این ربات قابلیت استفاده در کاربردهای مختلفی همچون فیلم‌برداری در سالن‌ها یا ورزشگاه‌ها را دارد.

• پیاده‌سازی یک طراحی مسیر با در نظر گرفتن خصوصیات فروتحریک سامانه

برای ربات Aras-Cam-2 که دارای چهار کابل و فروتحریک است، اصول یک طراحی مسیر از نوع نقطه‌به‌نقطه ساکن پیاده‌سازی شده تا علاوه بر رعایت قیود کشش مثبت کابل‌ها در نقاط انتهایی مسیر جلوی هر گونه ارتعاشات ناخواسته ربات گرفته شود. به دلایلی که در بخش ۳.۴ ذکر خواهد شد، حل این مسئله برای چهار کابل با چالش روبرو است و با دانش حال نویسنده و تلاش‌های انجام شده راه‌حلی برای آن ارائه نشده است. این در حالیست که طرح مسیر برای ربات مذکور با سه کابل حل شده و نتایج آن در فصل ۴ ارائه خواهد شد.

۵.۱ ساختار پایان‌نامه

در این پژوهش ابتدا با شرح مختصری از ربات‌های کابلی موازی، از جذابیت ربات‌های آسان‌نصب کابلی موازی صحبت شده، و از مزایای ترکیب این معایب با ساختاری فروتحریک بحث شد. در فصل ۲ از الزامات طراحی کلی و جزئی چنین رباتی صحبت کرده و چندین طرح مفهومی و جزئی در این راستا بررسی شده، و در نهایت نمونه اولیه ساخته شده با نام ربات Aras-Cam-2 معرفی می‌شود. در فصل ۳ مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات مذکور انجام شده و یک مسئله طراحی مسیر با نقطه‌به‌نقطه ساکن باهدف در نظرگیری ذات فروتحریک سامانه طرح و بررسی می‌شود. در فصل ۴ طراحی مسیر انجام شده برای یک ربات سه کابل شبیه‌سازی شده و نتایج آن با یک مسیر چند جمله‌ای زمانی استاندارد مقایسه می‌شود. در فصل ۵ پیشنهاداتی برای رفع چالش‌های پیشروی یک طراحی مسیر نقطه‌به‌نقطه ساکن برای یک ربات چهار کابل، بیان می‌شود.

فصل ۲

ساخت نمونه اولیه ربات آسان نصب کابلی موازی: از مفهوم تا راه‌اندازی

۱.۲ مقدمه

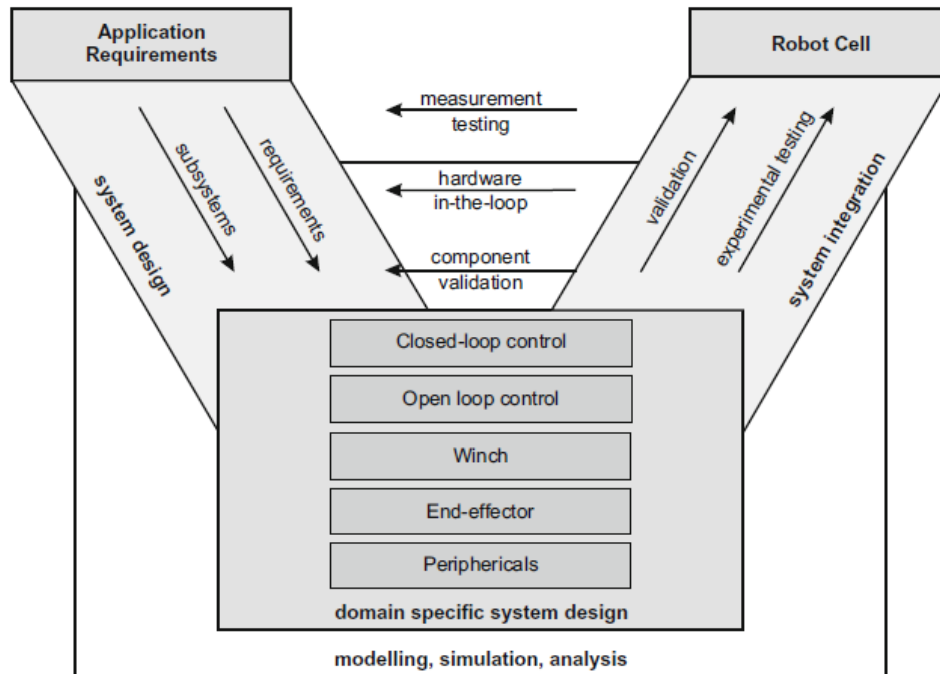
در این فصل، مراحل و طرح‌های انجام‌شده برای ساخت یک نمونه از ربات آسان نصب کابلی به نام Aras-Cam-2 بررسی می‌شود. در فرایند طراحی، آزمون و ساخت، رویکردی که اتخاذ شد استفاده از الگوی طراحی V-Model [۶۲] بوده است که یک الگوی موفق [۱۲] برای ساخت سامانه‌های مکانیکی و رباتیک می‌باشد. اندرس پات^۱ و تیمش برای ساخت ربات‌های کابلی موازی خانواده IPaNema [۶۳] از این الگو با موفقیت استفاده کرده‌اند.

۲.۲ الگوی طراحی V-Model

الگوی V-Model [۶۲] مطابق با شکل ۱.۲ یک رویکرد مرحله‌ای برای طراحی است که از بالا به پایین انجام می‌شود. فرایند با تعریف الزامات سامانه شروع می‌شود و سپس به طراحی سامانه، پیاده‌سازی سامانه و آزمایش سامانه ادامه می‌یابد. در هر مرحله، نتایج به مرحله قبل بازخورد داده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که سامانه

¹Anderes Pott

مطابق با الزامات پیش می‌رود.



شکل ۱.۲: الگوی طراحی V-Model [۶۲]

الگوی V که معمولاً در مهندسی، به‌ویژه برای سامانه‌های مکانیکی و رباتیک استفاده می‌شود، یک سلسله‌مراتبی دارد که از هفت بخش تشکیل شده است. الزامات کلی سامانه^۱، اولین قسمت این الگو بوده و مهم‌ترین قسمت در طراحی سامانه است که در آن ویژگی‌ها و قابلیت‌های موردنظر برای سامانه تعیین می‌شوند. برای نمونه، فضای کاری، سرعت، دقت و غیره از جمله الزامات کلی سامانه هستند. بعد از تعریف الزامات سامانه، سامانه را به چند زیرسیستم^۲ کوچک‌تر تقسیم می‌کنند و برای هر یک از آن‌ها الزامات دقیق‌تر را مشخص می‌کنند. این زیرسیستم‌ها معمولاً شامل بخش‌های مختلف تخصصی هستند. برای مثال، زیرسیستم‌های مکانیکی، الکترونیکی، کنترل و غیره. طراحی زیرسیستم^۳، مرحله‌ای است که در آن جزئیات فنی هر زیرسیستم را بررسی و روش‌های مناسب برای پیاده‌سازی الزامات آن را انتخاب می‌کنند. در اینجا، نحوه ساخت یا خرید اجزای مکانیکی، مدارهای الکتریکی، الگوریتم‌های کنترل و غیره را تعیین می‌کنند. پس از طراحی زیرسیستم‌ها، به پیاده‌سازی زیرسیستم^۴ می‌پردازیم که در این قسمت، زیرسیستم‌های طراحی شده ساخته یا تأمین می‌شوند. برای نمونه، تولید قطعات، نوشتن کدهای برنامه، پیاده‌سازی سخت‌افزار و غیره را انجام می‌دهیم. پس از پیاده‌سازی زیرسیستم‌ها، به تأیید زیرسیستم^۵

¹System Requirements

²Subsystem

³Subsystem Design

⁴Subsystem Implementation

⁵Subsystem Verification

می‌رسیم که در این قسمت، هر زیرسیستم به صورت مستقل آزمایش می‌شود تا اطمینان حاصل شود که با الزامات تعریف شده مطابقت دارد. بعد از تأیید زیرسیستم‌ها، به یکپارچه‌سازی سامانه^۱ می‌پردازیم که در این مرحله، زیرسیستم‌های تأیید شده به صورت تدریجی به سامانه کامل ادغام می‌شوند. در نهایت، به اعتبارسنجی سامانه^۲ می‌رسیم که در این مرحله، سامانه یکپارچه شده در برابر الزامات سامانه اصلی آزمایش می‌شود.

در این فرایند طراحی، نکته کلیدی این است که الزامات قبل از طراحی تعریف می‌شوند و تأیید قبل از یکپارچه‌سازی انجام می‌شود. در این صورت، اطمینان حاصل می‌شود که الزامات توسط سامانه یکپارچه شده برآورده می‌شوند.

الگوی V چندین مزیت دارد. اول اینکه این الگو باعث می‌شود که فرایند توسعه نرم‌افزار از مرحله تعریف الزامات تا مرحله طراحی و سپس یکپارچه‌سازی به صورت سامانمند و منظم پیش برود. دوم اینکه این الگو اجازه می‌دهد که آزمایش‌های تدریجی و زود هنگام در طول فرایند انجام شود که نسبت به آزمایش فقط در پایان، هزینه و زمان دوباره‌کاری را کاهش می‌دهد. سوم اینکه این الگو باعث می‌شود که مسائل و مشکلات ناشی از مونتاژ و ادغام قسمت‌های مختلف نرم‌افزار به صورت تدریجی و در هر مرحله شناسایی و رفع شوند و نه در پایان که همه چیز با هم قرار است ادغام شود.

۳.۲ اجزای تشکیل‌دهنده یک ربات کابلی موازی

یک ربات کابلی که ساختار آن در بخش ۱.۲.۱ نشان داده شده است، از چندین جزء اصلی تشکیل شده است [۱۲]. اولین جزء، مجری نهایی^۱ است که قسمت متحرک ربات را تشکیل می‌دهد. این قسمت با استفاده از کابل‌هایی که به آن وصل هستند، در فضای سه‌بعدی حرکت می‌کند. نقطه‌ای که کابل‌ها به مجری نهایی متصل می‌شوند، محل نصب اجزا متحرک^۲ نام دارد. دومین جزء، چارچوب ماشین^۳ است که قسمت ثابت ربات را تشکیل می‌دهد. این قسمت در یک محل ثابت قرار دارد و تمام اجزای ثابت ربات را در خود جای داده است. چارچوب ماشین با کابل‌ها به محل نصب اجزا متحرک وصل می‌شود. سومین جزء، کابل‌ها^۴ هستند که ارتباط بین قسمت‌های متحرک و ثابت ربات را برقرار می‌کنند. این قسمت از مواد مختلف ساخته شده است، به عنوان مثال فولاد، الیاف مصنوعی یا کتف. چهارمین جزء، سامانه جمع‌کننده کابل یا وینچ^۵ است که قسمت تغذیه ربات را تشکیل می‌دهد. این قسمت طول کابل‌ها را تغییر داده و توان ربات را تولید می‌کند. سامانه جمع‌کننده کابل‌ها معمولاً به چارچوب ماشین وصل هستند، اما گاهی اوقات روی مجری نهایی هم قرار دارند. پنجمین جزء، سامانه

¹System Integration ²System Validation ¹Mobile Platform ²Distal Anchor Point ³Machine Frame ⁴Cable ⁵Winch

هدایت کابل^۶ است که قسمت انتقال ربات را تشکیل می‌دهد. این قسمت شامل پولی‌ها یا چرخ‌هایی با درجات آزادی خاص است که توان کابل را به سمت مورد نظر هدایت می‌کنند. ششمین جزء، حسگرها^۷ هستند که قسمت اندازه‌گیری ربات را تشکیل می‌دهند. این قسمت موقعیت، جهت و کشش کابل‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. حسگرها برای کنترل ربات و اطمینان از ایمنی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. هفتمین و آخرین جزء، کنترلر^۸ است که قسمت کنترل ربات را تشکیل می‌دهد. این قسمت با استفاده از داده‌های حسگر، ربات را کنترل می‌کند. کنترلر مقدرهای تنظیم شده برای سامانه جمع‌کننده کابل‌ها را تولید می‌کند که سپس طول کابل‌ها را تغییر داده و مجری نهایی را حرکت می‌دهد.

۴.۲ الزامات طراحی

باتوجه به آنچه در بخش ۳.۲ گفته شد، پس از شناخت کافی از اجزای یک ربات کابلی موازی حال، نیازمند استخراج الزامات طراحی برای ساخت ربات مذکور هستیم. الزامات طراحی برای ساخت یک ربات کابلی موازی به دو بخش تقسیم می‌شود، که عبارت است از: الزامات کلی سامانه کابلی موازی و الزامات زیرسیستم‌ها که همان اجزای تشکیل‌دهنده یک ربات کابلی موازی.

۱.۴.۲ الزامات کلی طراحی یک ربات کابلی موازی آسان نصب

مطابق با الزاماتی که پات در مرجع [۱۲] برای ساخت و طراحی یک ربات کابلی موازی بیان کرده، عوامل متعددی را باید مدنظر قرارداد. این عوامل شامل فضای کاری، ظرفیت باری، نیروها، سرعت‌ها، شتاب‌ها، فضای نصب، دقت و تکرارپذیری، محیط، ایمنی، هزینه، عمر مفید، یکپارچگی و آسان‌نصبی هستند.

فضای کاری^۱ با استفاده از اشکال هندسی مانند مکعب‌ها، کره‌ها و سایر اشکال مشخص می‌شود. برای مثال، شکل ۳.۲ فضای کاری مکعبی شکل یک ربات کابلی موازی را نشان می‌دهد.

^۶Cable Drive Trains ^۷Sensors ^۸Controller ^۱Workspace



شکل ۲.۲: نمونه‌ای از فضای کاری محاسبه شده برای ربات کابلی موازی IPaNema 3 [۶۳]

ظرفیت باری^۲ اشاره به حداکثر جرم و توزیع باری دارد که باید جابه‌جا شود. نیروها شامل نیروهای خارجی و گشتاورهایی هستند که باید در حین کار اعمال یا تحمل شوند. سرعت‌ها و شتاب‌ها از جمله اطلاعاتی هستند که در طراحی و انتخاب سامانه جمع‌کننده کابل و موتور استفاده می‌شود. فضای نصب برای قراردادن سامانه جمع‌کننده کابل‌ها و باز و جمع‌کردن کابل‌ها مهم است. دقت و تکرارپذیری موردنیاز برای موقعیت‌یابی تعیین می‌شود. محیط شامل دما، رطوبت، آلودگی و سایر عوامل محیطی است. بحث ایمنی شامل هرگونه خطر ایمنی برای کارکنان یا تجهیزات است که باید مدیریت شود. هزینه، محدودیت‌های بودجه را در بر می‌گیرد. عمر مفید، دوره‌های نگهداری و چرخه‌های کاری موردنظر را تعیین می‌کند. یکپارچگی شامل هرگونه رابطه موردنیاز با سامانه‌های جمع‌آوری داده یا سامانه‌های دیگر است و نهایتاً، آسان‌نصبی که برای نصب آسان و راحت ربات کابلی، تمام اجزای مکانیکی از قبیل سامانه جمع‌کننده کابل، مدارهای الکتریکی و غیره باید به صورت یک پارچه داخل مجری نهایی قرار گیرد.

۲.۴.۲ الزامات طراحی زیرسیستم‌های ربات کابلی موازی آسان‌نصب

الزامات مختلفی باید برای طراحی زیرسیستم‌های یک ربات کابلی موازی مدنظر قرار گیرد که شامل الزامات سامانه جمع‌کننده کابل، کابل، سامانه کنترل، حسگر، قاب، مجری نهایی و عملگر می‌باشد. الزامات مربوط به سامانه جمع‌کننده کابل شامل سرعت و شتاب کابل، طول جابه‌جایی کابل و نیز ظرفیت نیرویی و کارایی مکانیکی سامانه است. این الزامات بر اساس فضای کاری و نیازهای دینامیکی مشخص می‌شوند. در الزامات مربوط به کابل، مواردی چون طول، قطر، نوع مواد، عمر خستگی و ضریب ایمنی در نظر گرفته می‌شوند که بر پایه نیروهای وارده و اهداف عمر مفید تعیین می‌شوند. الزامات سامانه کنترل شامل نرخ نمونه‌برداری، دقت، پهنای باند ارتباطی و دیگر ملزومات مرتبط است که بر پایه نیازهای کنترل حرکت مشخص می‌گردد. در الزامات مربوط به حسگرها،

²PayLoad

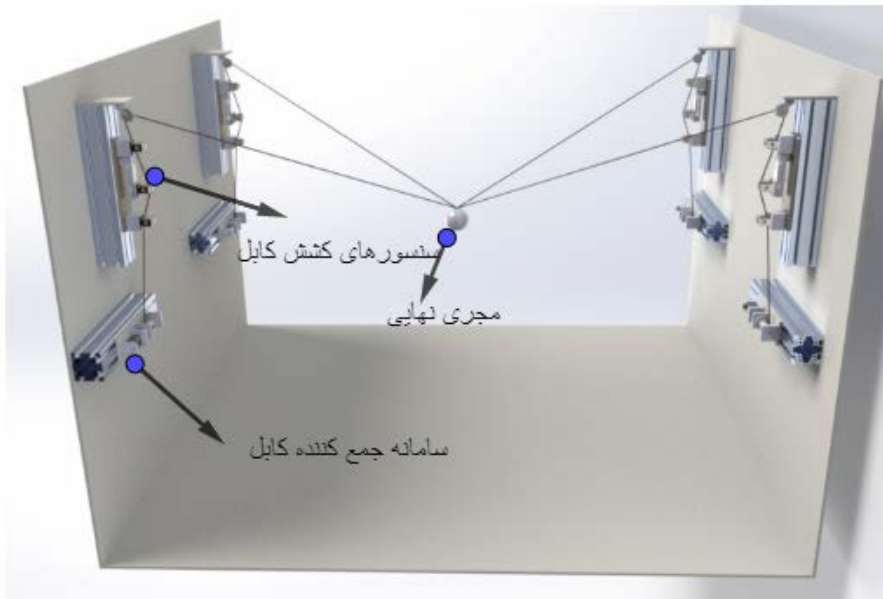
وضوح، محدوده، دقت و سایر موارد در نظر گرفته می‌شود که بر اساس نیازهای کنترلی تعیین می‌گردند. الزامات قاب شامل ابعاد، میزان تغییر شکل مجاز، سفتی و دیگر موارد است که بر مبنای فضای کاری و ظرفیت بار تعیین می‌شوند. در الزامات مربوط به مجری نهایی، اندازه، مرکز جرم، تغییر شکل‌های مجاز و گشتاورهای اینرسی در نظر گرفته می‌شود که بر اساس ظرفیت بار مشخص می‌گردند. در نهایت، الزامات عملگرها شامل توان بیشینه، محدودیت‌های حرارتی و ظرفیت گشتاوری/نیروی است که بر مبنای نیروها و شتاب‌ها تعیین می‌شوند. همان‌طور که در جدول ۱.۲ مشاهده می‌شود، ارتباط منطقی بین الزامات زیرسیستم‌ها و الزامات کلی ربات کابلی موازی وجود دارد.

جدول ۱.۲: وابستگی‌ها بین نیازمندی‌های سامانه و نیازمندی‌های زیر سامانه در یک ربات کابلی موازی

الزامات طراحی زیر سیستم‌ها							الزامات طراحی کلی سامانه
دقت	زاویه انحراف	جابه‌جایی کابل	شتاب کابل	نیروی کابل	سرعت کابل	جمع‌کننده کابل	
هیچ	متوسط	قوی	قوی	قوی	متوسط	هیچ	فضای کار
هیچ	قوی	هیچ	هیچ	هیچ	قوی	هیچ	بار مفید
ضعیف	متوسط	هیچ	هیچ	متوسط	متوسط	هیچ	نیروهای اعمالی
هیچ	هیچ	هیچ	هیچ	قوی	قوی	ضعیف	شتاب
هیچ	قوی	هیچ	هیچ	هیچ	قوی	هیچ	سرعت
هیچ	هیچ	قوی	قوی	متوسط	متوسط	هیچ	فضای نصب
قوی	قوی	قوی	هیچ	هیچ	هیچ	متوسط	دقت

۵.۲ معرفی ربات Aras-Cam-1

مطابق شکل ۴.۲ ربات کابلی موازی و معلق Aras-Cam-1 از دسته خانواده ربات‌های کابلی موازی آزمایشگاه ارس می‌باشد که به صورت چهار کابل و مقید اضافی طراحی شده است. ربات مذکور به دلیل پیچیدگی‌های نصب و وجود نامعینی سینماتیکی در محل تجهیزات نصب شده، در شرایطی که نیاز به نصب دقیق و راه‌اندازی سریع می‌باشد، مناسب نمی‌باشد، این دلایل در کنار دلایل دیگر [۶۴] انگیزه‌ای شد تا ربات Aras-Cam-2 پا به عرصه بگذارد.



شکل ۳.۲: ربات کابلی موازی Aras-Cam-1 [۶۴]

۶.۲ مراحل طراحی ربات Aras-Cam-2

طراحی و ساخت ربات Aras-Cam-2 مطابق با الگوی طراحی V-Model (بخش ۲.۲) با مراحل بیان شده در جدول ۲.۲ برنامه‌ریزی شد.

جدول ۲.۲: روند طراحی و ساخت برای ربات کابلی موازی Aras-Cam-2

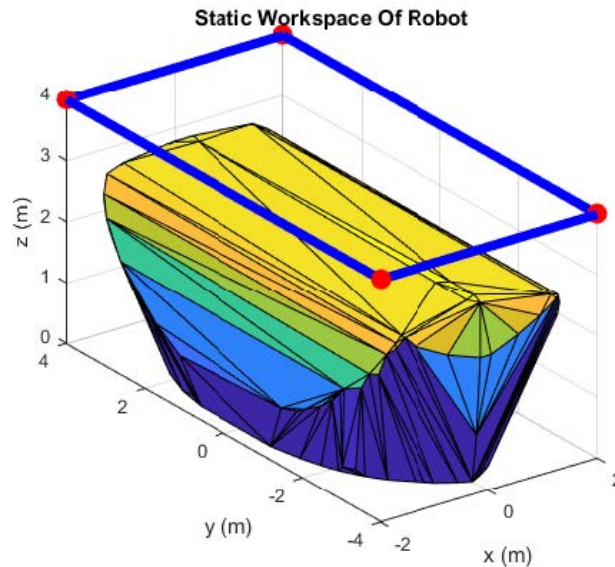
مرحله	وظایف	اسناد خروجی	ابزار، توضیحات، روش‌های استفاده شده
تحلیل کاربرد سامانه	الزامات طراحی کلی و جزئی سامانه، تقاضاهای کاربردی، توصیف فرایند ربات، توالی فرایند	مشخصات طراحی فضای کاری، سرعت، دینامیک، بار مجاز ^۳	دیتاشیت‌ها، پایان‌نامه‌های پیشین آزمایشگاه ارس، محاسبات عددی
طراحی سیستمی ^۴	طرح کلی هندسی مجری نهایی و قاب ماشین، معماری سامانه، شبیه‌سازی	نقشه‌های CAD، f_{min} d_{max} d_{min} ، f_{max}	مشخصه‌های طراحی ربات‌های موجود، Matlab/Simulink, Solidworks
طراحی جزئی سامانه	طراحی مجری نهایی، انتخاب کابل، طراحی سامانه جمع‌کننده کابل، انتخاب حسگرها، طراحی سامانه پولی برای هدایت کابل	نقشه مجری نهایی، نوع کابل، پولی‌ها و زیرسیستم‌ها	CAD زیرسیستم‌ها، فهرست تأمین‌کنندگان، فهرست مواد
توسعه نرم‌افزار و سخت‌افزار کنترل	توسعه معماری سامانه کنترل، توسعه مدل‌های کنترل‌کننده (کدهای سینماتیک، موقعیت و نیرو، فیلترکردن و پیش‌پردازش سیگنال حسگر)، تنظیم سامانه کنترل، طراحی رابط کاربری (گرافیکی)، انتخاب اجزای الکترونیکی	نرم‌افزار کنترل‌کننده، پیاده‌سازی رابط کاربری، دیاگرام مدار	Altium, MATLAB/Simulink, Designer. شبیه‌سازی دینامیکی
یکپارچه‌سازی سامانه	شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه (Hard-ware in Loop)، کالیبراسیون و کالیبراسیون و آموزش ارزیابی ریسک، مستندسازی	دفترچه راهنمای شبیه‌سازی	HIL برای کنترل حلقه باز و بهره‌برداری اولیه CAM، ابزارهای MATLAB/Simulink
ارزیابی و اعتبارسنجی	اعتبارسنجی الزامات طراحی از طریق اندازه‌گیری‌ها	پروتکل‌های اندازه‌گیری	دستگاه‌های اندازه‌گیری

در این فصل به تشریح مراحل یک تا سه، بیان شده در جدول ۲.۲ پرداخته می‌شود. مراحل ۴ و ۵ به طور کامل مورد پیاده‌سازی قرار نگرفته و بنابراین به آن اشاره نمی‌شود.

۱.۶.۲ فاز اول: تحلیل کاربرد سامانه

در این بخش، سؤالاتی درباره الزامات کلی و کاربرد ربات برای موردنظر مطرح می‌شود. ابتدا باید فضای کاری، سرعت، دقت و سایر ویژگی‌های مهم سامانه مطابق موارد بیان‌شده در بخش ۱.۴.۲ را برای کاربرد موردنظر ربات تعیین کنید. سپس باید کاربرد ربات را با توجه به بار مفید، چرخه‌های کاری و دیگر جزئیات مربوطه توصیف کرد. این توصیف به کمک می‌کند تا نوع، اندازه ربات و ویژگی زیرسیستم‌های لازم را انتخاب شود. برای ربات Aras-Cam-2 فضای کاری انتخاب شده، یک فضای کاری مشابه ربات کابلی موازی موجود در آزمایشگاه ارس [۶۴] با نام Aras-Cam-1 (۵.۲) است که در شکل ۵.۲ قابل مشاهده است. محاسبه فضای کاری برای

نسخه Aras-Cam-1 انجام شده است، که یک ربات مقید اضافی محسوب می‌شود [۶۵]. با توجه به قید هزینه،



شکل ۲.۲: فضای کاری در نظر گرفته شده برای ربات Aras-Cam-2 [۶۶]

سرعت حداکثر موتور قبل از طراحی با محدودیت انتخاب در موتور، $3 \frac{mm}{s}$ تعیین شده است. با استفاده از گشتاور و سرعت مشخص در موتورها، ظرفیت بار حداکثر $5kg$ محاسبه شده است. دقت سامانه نیز بر اساس دقت موتور و در نظرگیری نامعینی‌های سینماتیکی $1cm$ در نظر گرفته شده است.

۲.۶.۲ فاز دوم: طراحی سیستمی و جزئی سامانه^۱

در این بخش، بر اساس الزامات کلی سامانه که در بخش ۱.۶.۲ ارائه شده‌اند، معماری کلی سامانه و زیرسیستم‌های ربات کابلی تعریف می‌شوند. مسائلی که در این بخش پاسخ داده می‌شوند عبارت‌اند از: انتخاب درجه آزادی بر اساس حرکات موردنیاز مثلاً سه درجه آزادی (ربات صفحه‌ای) در مقابل شش درجه آزادی (ربات فضایی)، انتخاب تعداد کابل‌ها یعنی حداقل تعداد موردنیاز یا اضافی مطابق با الزامات طراحی کلی سامانه از جمله سفتی/ظرفیت بار موردنیاز و فضای کاری، تصمیم‌گیری درباره پیکربندی ربات یعنی کاملاً مقید در برابر معلق نامقید که این انتخاب تأثیری بر مقاومت در برابر اغتشاشات و تصادمات کابل‌ها با هم دیگر دارد، انتخاب روش اعمال قدرت مثل استفاده از محرک‌های خطی، سامانه جمع‌کننده کابل و غیره، طراحی هندسه مفهومی چارچوب، مجری نهایی و نقاط الصافی کابل که این انتخاب باید مطابق الزامات طراحی کلی از جمله فضای

¹System Level Design

کاری، تداخل کابل‌ها با هم و سفتی باشد، انتخاب یک نمونه پیش‌ساخته و الگو برداری از طرح‌های موجود مانند RoboCrane، IPAnema [۶۳] و غیره، طراحی مفهومی مجموعه و اجزاء ربات، انتخاب معماری سامانه کنترل و توسعه مدل شبیه‌سازی دینامیک و سینماتیک ربات.

پارامترهای مشخص شده در این بخش عبارت‌اند از: تعیین تعداد درجات آزادی، تعیین تعداد کابل‌ها که شامل حداقل تعداد کابل لازم برای کنترل درجات آزادی یا بیشتر برای افزایش سفتی/ظرفیت بار است، برآورد طول کابل‌ها از ابعاد فضای کاری و فضای نصب، تعیین میزان جابه‌جایی کابل بر اساس تحلیل فضای کاری و حداکثر/حداقل تغییر طول کابل، تعیین کشش کابل بر اساس وزن بار، شتاب‌ها و نیروهای خارجی، محاسبه پارامترهای سامانه جمع‌کننده کابل شامل قطر غلتک، نسبت دنده با استفاده از میزان جابه‌جایی کابل^۱ و کشش کابل، تعیین پارامترهای سامانه انتقال کابل^۲ که شامل آرایش پولی‌ها و قطر آن‌ها است و تعیین قدرت موتور با استفاده از الزامات گشتاور - سرعت از الزامات طراحی کلی مانند شتاب‌های کابل، مشخص می‌شوند. همچنین، اندازه مجری نهایی بر اساس توزیع بار، و نیازهای نصب تجهیزات تعیین می‌شود. در نهایت، بر اساس دقت و نیازهای کنترلی، نوع و دقت حسگرها انتخاب می‌شوند. با توجه به تمامی این موارد، می‌توان در این بخش دقیق‌تر به طراحی سامانه ربات کابلی پرداخت. در این بخش، بر اساس مطالب گفته شده، دستور عمل ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای لازم برای ربات مذکور مشخص می‌شوند.

ربات Aras-Cam-2 برای پوشش دادن فضای کاری خود که در فاز اول ۱.۶.۲ مشخص شده است، نیاز به حداقل ۴ کابل دارد. ساختار ربات به صورت معلق در نظر گرفته شده تا از تداخل با اشخاص و موانع تا حد ممکن جلوگیری شود. برای کاهش هزینه، از افزایش تعداد کابل و در نتیجه ساختارهای مقید اضافی و کاملاً مقید خودداری شده و تنها ۴ کابل برای این ربات استفاده شده است. چون ربات در فضا ۶ درجه آزادی دارد، با استفاده از ۴ کابل، ساختار نامقید و فروتحریک در ربات ایجاد می‌شود. برای پوشش مناسب فضای کاری، طول هر کابل ۳m در نظر گرفته شده است. میزان جابه‌جایی کابل با توجه به فضای کاری تعریف شده در الزامات طراحی کلی سامانه به صورت زیر است: فاصله کمینه $l_{min} = 0.5m$ و فاصله حداکثر $l_{max} = 2.5m$. بنابراین، یک محدوده جابه‌جایی $\Delta l = 2m$ برای هر کابل در نظر گرفته شده است.

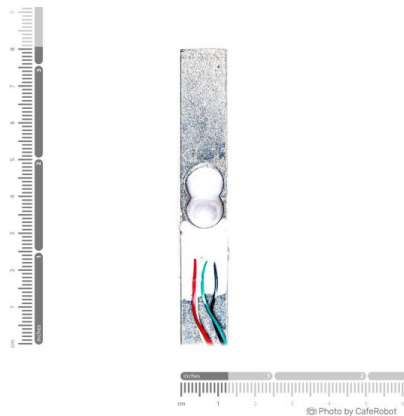
برای جلوگیری از شل شدن کابل، حداقل یک کشش کابل (f_{min}) در هر کابل لازم است [۱۲]. همچنین، کشش بیشینه در کابل توسط محدودیت‌های طراحی تعیین می‌شود. با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان ۲، الزام می‌شود که کشش اعمال شده توسط سامانه جمع‌کننده کابل از دو برابر کشش حداکثر قابل تحمل در کابل بیشتر نشود [۱۲]. البته، اغلب اوقات حداکثر کشش توسط قیدهای دیگر محدود می‌شود؛ به عنوان مثال، اگر کشش از حدی فراتر رود، ممکن است به قطعات روی مجری نهایی (مانند پولی‌ها و غیره) آسیب برساند. برای قید طراحی، $f_{max} = 20N$ و $f_{min} = 0.5N$ در نظر گرفته شده است. در ابتدا از کابل‌های جنس استیل با قطر

¹Cable Stroke ²Drive Train system



شکل ۵.۲: موتور استپر شرکت میسومی مدل PK243A1-SG18 [۶۷]

۱mm استفاده شده است که توان تحمل محدوده نیرو موردنظر را دارند؛ اما به دلیل مقاومت در برابر خمش، دچار شکست می‌شوند و در نهایت از کابل‌های کولار با فیبر آرامید و قطر ۱mm استفاده شده است. این کابل‌ها علاوه بر تحمل بالای بار (۲۰۰N – ۱۰۰) مقاومت بالایی در برابر خوردگی و پوسیدگی از خود نشان می‌دهند. باتوجه به قیدهای هزینه و اهداف پروژه که پیاده‌سازی یک الگوریتم طراحی مسیر در این ربات را شامل می‌شود، مطابق شکل ۶.۲، از موتورهای نسبتاً ارزان استپر مدل PK243A1-SG18 شرکت میسومی استفاده شده است. موتور مذکور باتوجه به نمودار گشتاور سرعت آن، گشتاور ۸N.m را در سرعت ۱۰۰rpm تحویل می‌دهد. در این پروژه، اندازه‌گیری کشش نیروی کابل برای صحت‌سنجی درستی طراحی مسیر بسیار مهم است؛ بنابراین، از حسگرهای نیروسنج لودسل مطابق شکل ۷.۲ برای محاسبه کشش کابل استفاده شد.



شکل ۶.۲: نمونه‌ای از حسگر لودسل استفاده شده

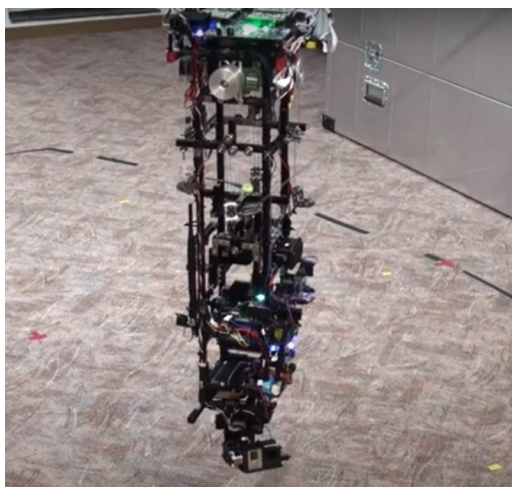
در ادامه، با بررسی نمونه‌های پیش‌ساخته از ربات‌های کابلی طرح‌های مفهومی انجام شده و بهترین ایده و الگوها انتخاب شدند.



(ب) ربات spider-cam مخصوص سالن



(آ) ربات spider-cam مخصوص سالن



(د) ربات Airnamics C1 مخصوص سالن

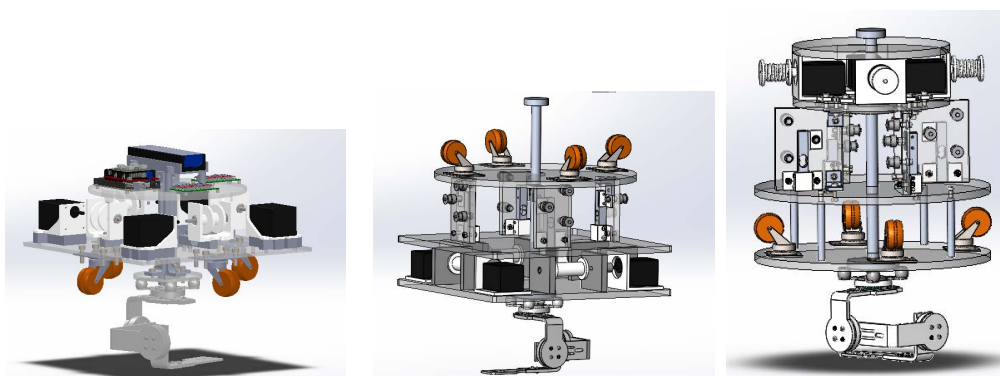


(ج) ربات spider-cam مخصوص ورزشگاه

شکل ۷.۲: نمونه‌های تجاری از ربات‌های کابلی موازی معلق

۳.۶.۲ طرح‌های مفهومی و جزئی

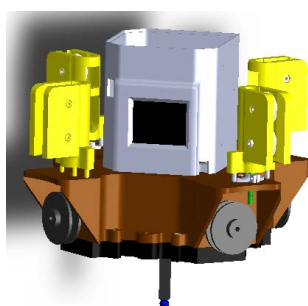
در این بخش، با الهام از ربات‌های کابلی موازی موجود مانند ربات spider-cam [۶۸] و IPaNema [۶۳] به بررسی دو طرح مفهومی ۲.۹.۲ و ۱.۹.۲ و دو طرح جزئی مشخص شده در شکل ۲.۹.۲ و ۱.۹.۲ پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که هیچ‌کدام از ربات‌های تجاری اشاره شده به جز ربات نمایش داده‌شده در شکل ۲.۸.۲ به راحتی نصب نمی‌شوند و اجزایی مانند سامانه جمع‌کننده کابل و حسگرها در خارج از مجرای نهایی قرار می‌گیرند. برای ارزیابی و تصویب هر طرح، معیارهایی بر اساس الگوی طراحی V-Model ۲.۲ تعیین شدند. در این روش، ابتدا الزامات طراحی کلی (۱.۶.۲) ربات کابلی و زیرسیستم‌های آن مانند الزامات سامانه جمع‌کننده کابل (بخش ۱.۳.۶.۲)، سامانه هدایت کابلی (بخش ۲.۳.۶.۲) و غیره مشخص شدند. سپس طرح‌های مختلف با این الزامات مقایسه و در صورت انطباق تأیید و در غیر این صورت اصلاح گردیدند. طرح ۲.۹.۲ ج اولین طرح جزئی بود که ساخته شد، اما به دلیل عدم رعایت درست الزامات طراحی، ناموفق بود. طرح نهایی ۲.۹.۲ د که در بخش ۷.۲ شرح داده شده است، پس از ساخت و آزمون، مورد پذیرش قرار گرفت.



(ج) طرح جزئی ۱

(ب) طرح مفهومی ۲

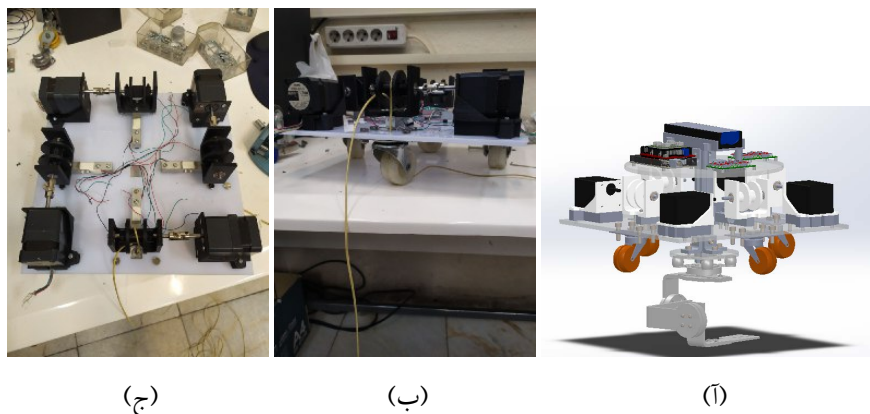
(ا) طرح مفهومی ۱



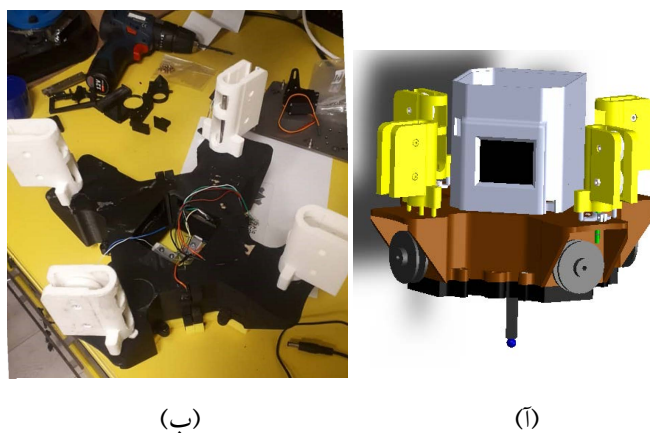
(د) طرح جزئی ۲

شکل ۲.۸: طرح‌های مفهومی و جزئی انجام شده برای ربات Aras-Cam-2

نمونه‌های ساخته شده اولیه و نهایی از ربات Aras-Cam-2 به ترتیب در شکل‌های ۱۰.۲ و ۱۱.۲ مشاهده می‌شوند.



شکل ۹.۲: نمونه اولیه از ربات Aras-Cam-2

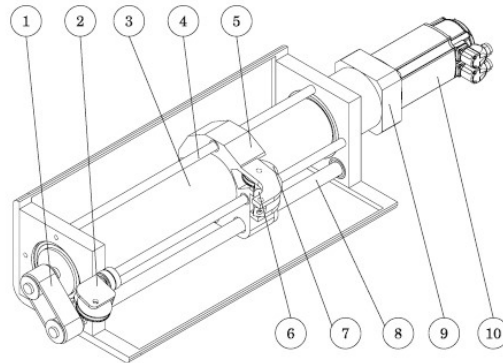


شکل ۱۰.۲: نمونه نهایی ساخته شده از ربات Aras-Cam-2

در ادامه، طراحی و الزامات زیرسیستم‌های Aras-Cam-2 مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱.۳.۶.۲ طراحی سامانه جمع‌کننده کابل

سامانه جمع‌کننده کابل در حالت کلی شامل اجزای متنوعی است که در شکل ۱۲.۲ نمایش داده شده‌اند. این اجزا شامل موارد زیر می‌شوند: موتور، غلتک، پولی (در صورت نیاز)، و حسگرها برای اندازه‌گیری کشش کابل. از الزاماتی که سامانه جمع‌کننده کابل باید پیروی کند عبارت‌اند از [۱۲]:



شکل ۱۱.۲: طرحی از یک سامانه جمع‌کننده کابل کنترل شده توسط سروو موتور با حسگر نیروی یکپارچه: (۱) تسمه انتقال، (۲) پولی راهنما، (۳) قرقره، (۴) راهنمای خطی، (۵) واحد جمع‌کننده، (۶) حسگر نیرو، (۷) پولی راهنما، (۸) میله، (۹) گیربکس سیاره‌ای، (۱۰) سروو موتور [۱۲]

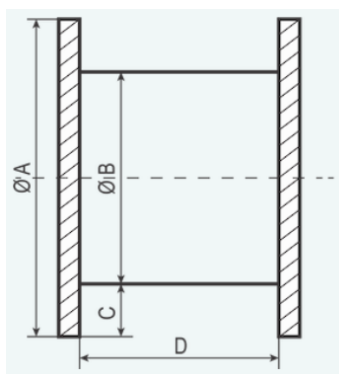
- **طول حرکت کابل:** ^۱ حداقل و حداکثر طول‌های کابل که سامانه جمع‌کننده کابل باید با توجه به ابعاد فضای کار را تحمل کند. این موضوع باعث تعیین اندازه سائز قرقره ^۲ می‌شود.
- **سرعت کابل:** حداکثر سرعتی که کابل باید در حین عملیات به صورت بازشونده/جمع‌شونده داشته باشد. این موضوع بر انتخاب موتور تأثیر می‌گذارد.
- **شتاب:** حداکثر شتاب خطی موردنیاز برای کابل. این موضوع برای تعیین اندازه موتور بسیار مهم است.
- **ظرفیت کشش کابل:** حداقل و حداکثر کشش‌های کابل که سامانه جمع‌کننده کابل باید با توجه به ظرفیت جابه‌جایی بار مجری نهایی، نیروهای خارجی و غیره تحمل کند. این موضوع بر طراحی انتقال توان تأثیر می‌گذارد.

بر اساس آنچه در بخش ۱.۶.۲ الزامات طراحی کلی سامانه بیان شد، مقدار جابه‌جایی کابل $\Delta l = 2m$ در نظر گرفته شد. برای رعایت این الزام، طول قرقره مطابق با شکل ۱۳.۲ با استفاده از رابطه (۱.۲) به دست می‌آید.

$$L = \frac{C \times D \times (d_D + C)}{d_r^2} \pi \quad (1.2)$$

در اینجا L نشان‌دهنده ظرفیت قرقره یا همان جابه‌جایی کابل است که با در نظر گرفتن ۱۰ درصد ضریب اطمینان حدود $2/5m$ است. d_r قطر کابل بوده و مابقی پارامترها ابعاد غلتک هستند که در شکل ۱۳.۲ نشان داده شده‌اند.

¹Cable-Stroke ²Drum



شکل ۱۲.۲: ابعاد غلتک

سه متغیر طراحی C , d_D , D در این رابطه مجهول هستند. قطر غلتک (d_D) با توجه به الزامات کشش و سرعت کابل محاسبه می شود. طبق الزامات کلی طراحی که در بخش ۱.۶.۲ بیان شده است، سرعت موتور انتخاب شده حدود 100rpm است. با افزایش قطر غلتک، سرعت کابل با رابطه زیر بهبود می یابد.

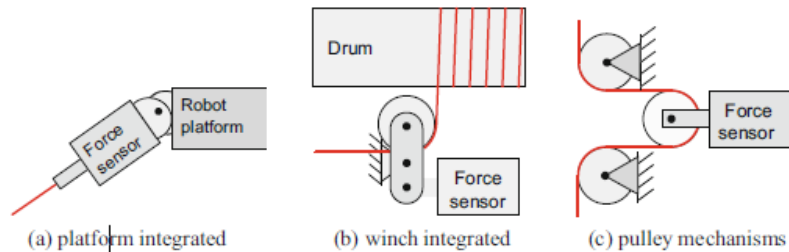
$$i = \frac{\pi d_D}{2} \omega_M \quad (2.2)$$

در رابطه (۲.۲) ω_M نشان دهنده سرعت زاویه ای موتور و d_D برابر قطر غلتک است. اگر سرعت کابل را طبق الزامات کلی سامانه $\dot{l} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ در نظر بگیریم، طبق رابطه (۲.۲) $d_D \geq 5\text{mm}$ به دست می آید. اما قطر غلتک نمی تواند به دلخواه بزرگ باشد و با رابطه گشتاور - نیرو زیر محدود می شود.

$$f = \frac{2}{\pi d_D} T_M \quad (3.2)$$

در رابطه (۳.۲) f و T_M به ترتیب کشش کابل و گشتاور موتور هستند. کشش کمینه f_{min} با تخمین یک حد پایین برای کشش کابل و در نظر گرفتن ضریب اطمینان $s.f = 2$ به صورت $f_{min} = s.f \times \frac{mg}{4} = 2 \times \frac{5 \times 9.8}{4} = 5\text{N}$ به دست می آید. با در نظر گرفتن این کشش کمینه و جاگذاری در معادله (۳.۲) برای قطر غلتک به یک حد بالای 1cm می رسیم. در نهایت برای غلتک با کمک معادله (۱.۲) ابعاد $d_D = 20\text{mm}$, $C = 18\text{mm}$, $L = 8\text{mm}$ انتخاب شد.

در ربات Aras-Cam-2 مطابق شکل ۱۵.۲، سه طرح مفهومی برای سامانه جمع کننده کابل ارائه شده و از این طرح ها، طرح های ۱۵.۲ آ و ۱۵.۲ ج ساخته و نهایتاً طرح ۱۵.۲ ج به عنوان طرح نهایی انتخاب شده است.

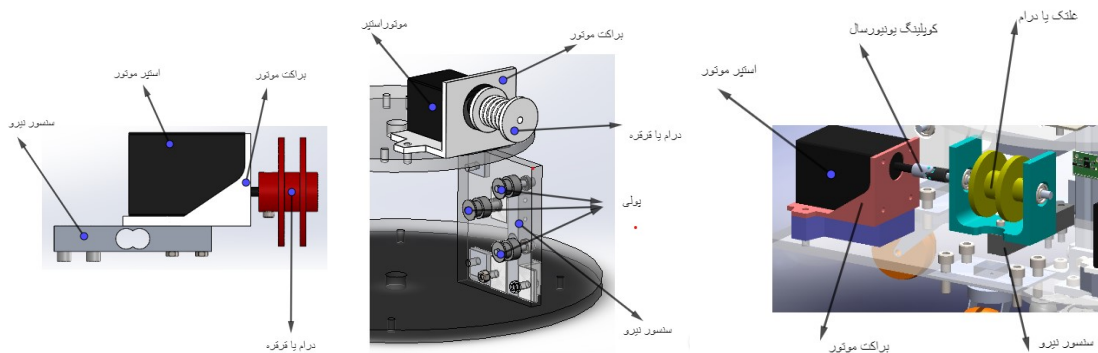


شکل ۱۳.۲: جای‌گشت‌های متفاوت برای حسگر نیرو جهت محاسبه کشش کابل [۱۲]

در این طرح‌ها جاگذاری حسگر نیرو برای بازخورد مناسب از نیرو کشش کابل مسئله مهمی بود. ایده‌های موجود [۱۲] مانند آنچه در شکل ۱۴.۲ مشاهده می‌شود شروع مناسبی برای الگوبرداری بود.

معیار مورد استفاده برای انجام ارزیابی و تصمیم‌گیری درباره طرح‌های مختلف سامانه جمع‌کننده کابل، به طور اختصاصی بر پایه مقایسه آن‌ها با الزامات طراحی کلی و جزئی سامانه و استفاده از ایده‌های موجود قرار داشت. به‌عنوان مثال، طرحی که در شکل ۱۵.۲ ب. نمایش داده شده است، اگر چه به‌ظاهر قیود لازم را برقرار می‌کند، اما به دلیل نقض الزامات طراحی کلی که بیان می‌کند که وزن نهایی مجری نهایی نباید از ۵ kg بیشتر باشد، نادیده گرفته شد.

با اعمال اصلاحات لازم، طرحی که در شکل ۱۵.۲ آ. به تصویر کشیده شده است، طراحی گردید. این طرح اگر چه با الزامات طراحی در تعارض نبود، اما به دلیل دارا بودن ضعف‌هایی نظیر استحکام پایین اجزا و ارتعاشاتی که ناشی از کوپلینگ یونیورسال بود، به‌عنوان یک گزینه مورد نظر قرار نگرفت. در نهایت، طرحی که در تصویر ۱۵.۲ ج. نمایش داده شده است، به‌عنوان طرح نهایی تأیید شد.

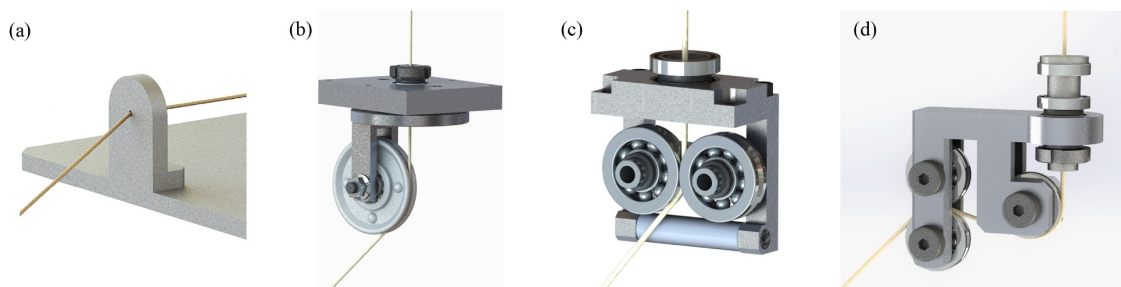


(آ) طرح سامانه جمع‌کننده کابل ۱ (ب) طرح سامانه جمع‌کننده کابل ۲ (ج) طرح سامانه جمع‌کننده کابل ۳

شکل ۱۴.۲: طرح‌های مفهومی و جزئی انجام شده برای سامانه جمع‌کننده کابل Aras-Cam-2

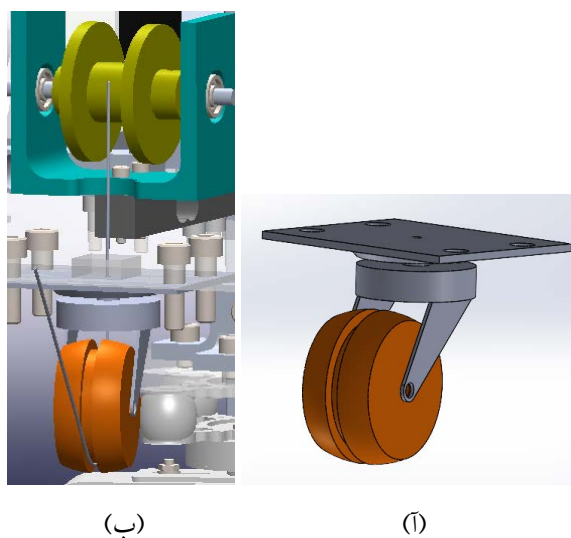
۲.۳.۶.۲ طراحی سامانه هدایت کابل

سامانه هدایت کابل، بخشی از ربات است که نقش انتقال توان، هدایت و خروج کابل از مجری نهایی را دارد. این سامانه باید به‌گونه‌ای طراحی شود که کابل را در مسیر مشخصی نگه دارد و همچنین درجات آزادی لازم با حداقل اصطکاک را برای حرکت کابل فراهم کند. برای این منظور، ایده‌های مختلفی مطرح شده‌اند که برخی از آن‌ها را می‌توان در شکل ۱۶.۲ دید. در این پروژه، دو طرح از این ایده‌ها پیاده‌سازی شده‌اند که در شکل‌های

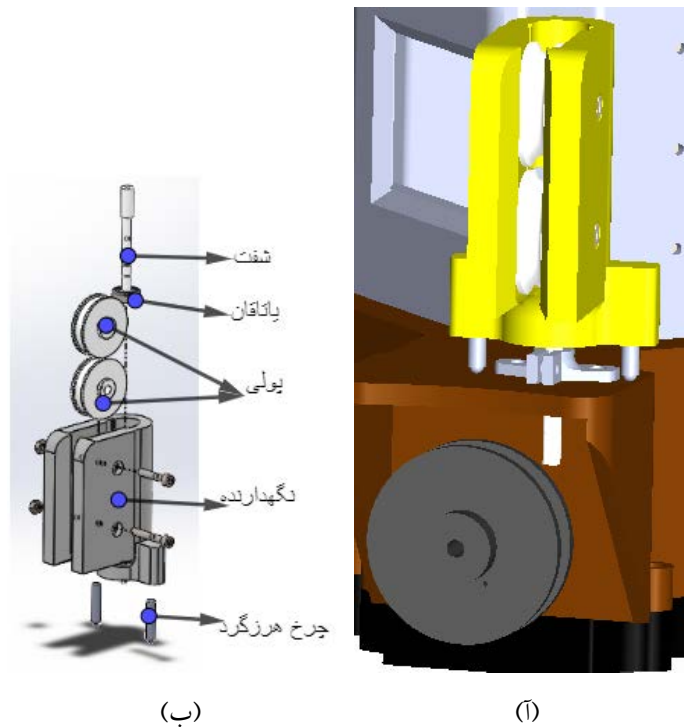


شکل ۱۵.۲: طرح‌های مختلف برای سامانه هدایت کابل [۶]

۱۷.۲ و ۱۸.۲ قابل مشاهده هستند. بین این دو طرح، طرح ۱۸.۲ به‌عنوان طرح مناسب‌تر انتخاب شده است.



شکل ۱۶.۲: طرح اول سامانه هدایت کابل



شکل ۱۷.۲: طرح دوم سامانه هدایت کابل

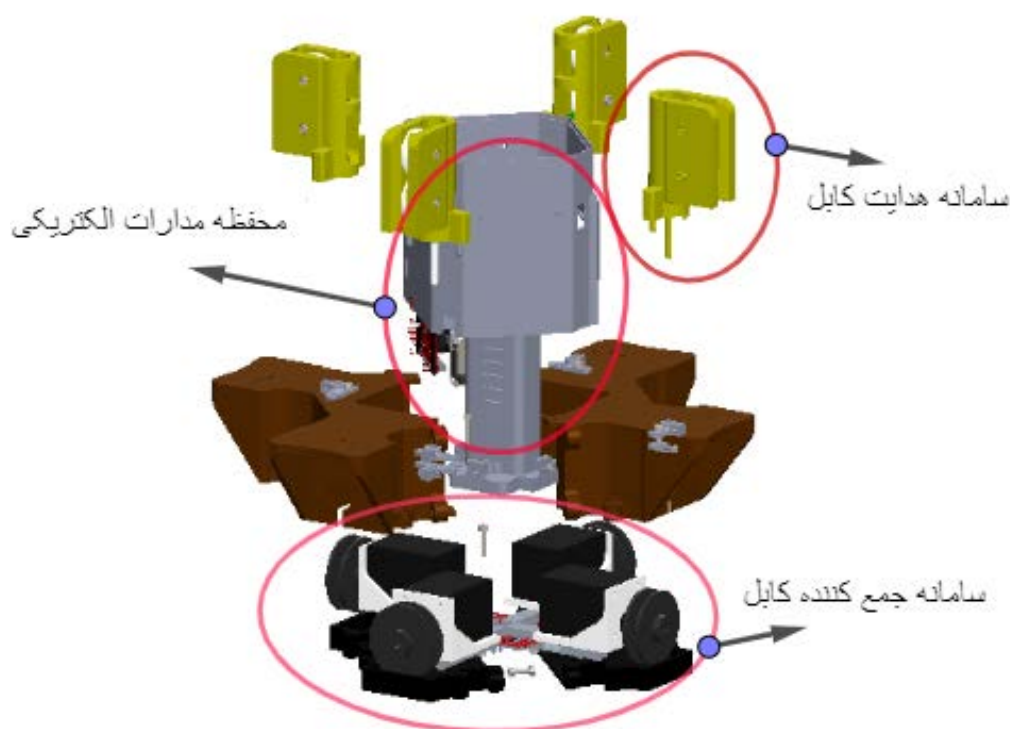
باتوجه به اینکه در طرح اول ۱۷.۲ کابل ممکن بود در هنگام شل شدن از شیار چرخ خارج شود و همچنین وزن چرخ نسبتاً زیاد بود، سامانه با استفاده از مواد سبک‌تر مانند PLA که در نمونه‌های چاپگر سه‌بعدی رایج است، طراحی مجدد شد. طرح جدید ۱۸.۲ علاوه بر سبک‌تر بودن، از خارج شدن کابل از شیار نیز جلوگیری می‌کرد.

۳.۳.۶.۲ الزامات و مشخصه‌های الکتریکی و حسگرها

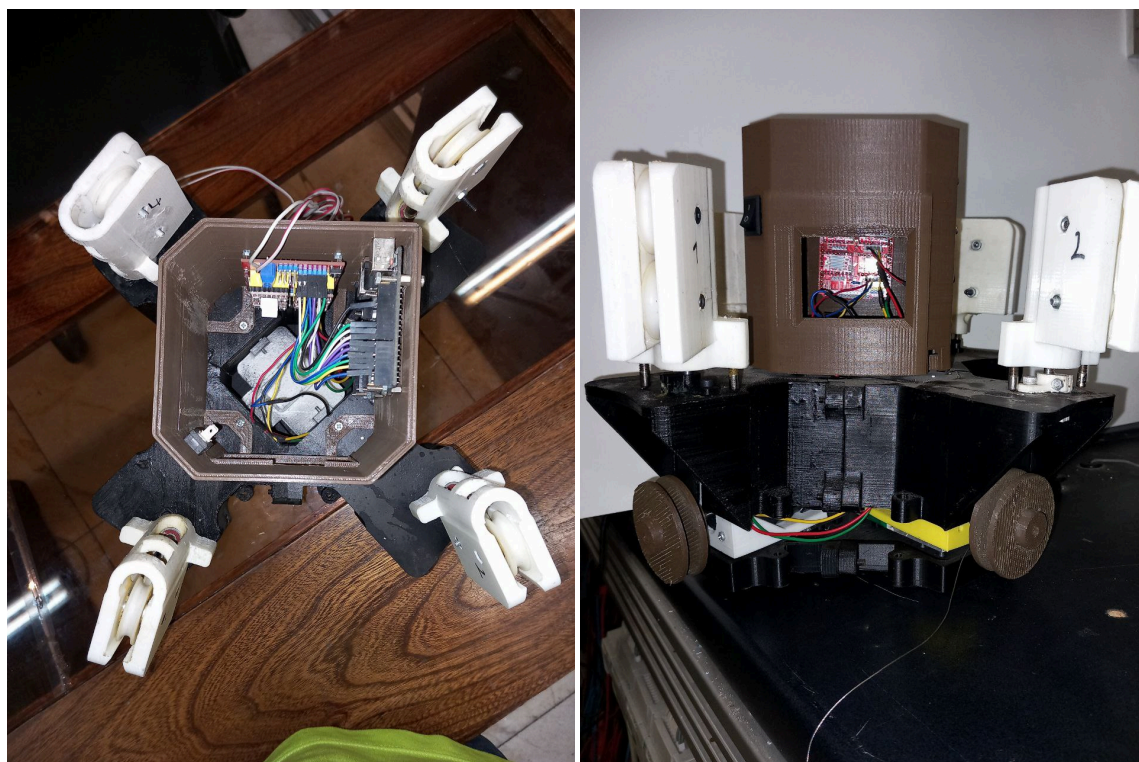
الزامات تعیین شده برای بخش الکتریکی ربات Aras-Cam-2 شامل تأمین تغذیه مناسب برای کلیه سامانه‌های الکتریکی ربات به مدت تقریباً یک ساعت، عدم نیاز به داده‌برداری با نرخ بالا از حسگرها، زیرا که سامانه کنترل در حلقه باز است و الزام خاصی در این زمینه وجود ندارد، انتقال حرارت مناسب سامانه‌های الکتریکی و داشتن صفحه نمایشگر جهت نمایش وضعیت سامانه می‌باشد. برای تأمین تغذیه ربات Aras-Cam-2 از یک باتری LIPO 5000mah استفاده شده که با شارژ کامل، قابلیت استفاده از سامانه‌های ربات را برای یک ساعت فراهم می‌کند. از جمله مشخصات کلی سامانه الکتریکی ربات می‌توان به Arduino-Mega2560 به‌عنوان میکروکنترلر اصلی، CNC-Sheild در کنار ماژول a4988 برای درایو کنترل استپر موتور، ماژول ۷۱۱HX برای داده‌برداری و پردازش از حسگر لودسل، و صفحه‌نمایش tft-3.5in اشاره کرد.

۷.۲ جمع‌بندی و طرح نهایی

همان‌طور که در این فصل گفته شده ربات Aras-Cam-2 با اتخاذ الگوی طراحی V-Model ۲.۲ طراحی و ساخته شد. روند طراحی به این صورت طی شد که ابتدا با شناسایی سامانه و زیرسیستم‌های ربات کابلی موازی ۳.۲ الزامات طراحی کلی و جزئی مناسب مطابق با اهداف پروژه برای هر بخش استخراج شده ۴.۲ و این الزامات برای کل سامانه ۱.۶.۲ و همچنین زیرسیستم‌ها ۲.۶.۲ برای ربات Aras-Cam-2 تعیین شد. سپس زیرسیستم‌ها که شامل سامانه جمع‌کننده کابل ۱.۳.۶.۲ سامانه هدایت کابل ۲.۳.۶.۲ و سامانه الکتریکی ربات ۳.۳.۶.۲ بود در تبعیت از این الزامات طراحی و تست شد. مطابق با شکل ۱۹.۲ اجزای ربات به خوبی مشخص شده است. همچنین نمونه ساخته شده ربات در شکل ۲۰.۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۸.۲: نقشه انفجاری ربات Aras-Cam-2



(ب)

(ا)

شکل ۱۹.۲: نمونه ساخته شده از ربات Aras-Cam-2

فصل ۳

مدل سازی ربات

۱.۳ مقدمه

در این بخش، ابتدا مفروضات مدل سازی برای ربات Aras-Cam-2 معرفی و سپس مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی آن ارائه می شود. در نهایت دینامیک ربات با تقسیم بندی مختصات تعمیم یافته $\mathbf{q} = (\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_u)^T$ آن به دو بخش کنترل پذیر \mathbf{q}_a و کنترل ناپذیر \mathbf{q}_u بخش بندی کرده و سپس معادلات مرتبه دوم لازم برای محاسبه مختصات کنترل ناپذیر را استخراج می کنیم.

۲.۳ تعریف ها

تعریف ۱.۲.۳. دینامیک کلی یک سامانه رباتیک را می توان به شکل بردار - ماتریسی زیر نشان داد:

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}) = B(\mathbf{q})\mathbf{u} \quad (۱.۳)$$

که در آن ماتریس‌های M و C و G به ترتیب ماتریس‌های جرم، کوریولیس و رنج^۱ حاصل از نیرو جاذبه می‌باشد. حال یک سامانه رباتیک را فروتحریک می‌گویند اگر شرط زیر برقرار باشد [۶۹].

$$m = \text{rank}(B(q)) < n \quad (2.3)$$

این شرط به این معنا است که تعداد عملگرهای کنترل m از تعداد درجات آزادی n کمتر است.

تعریف ۲.۲.۳. ماتریس پادمتقارن^۲ معادل با بردار دلخواه $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T \in \mathbb{R}^3$ به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{X}_x = \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

از آنجاکه ماتریس \mathbf{X}_x پادمتقارن می‌باشد، می‌توان نوشت:

$$\mathbf{X}_x = -\mathbf{X}_x^T \quad (4.3)$$

لم ۳.۲.۳. برای ضرب خارجی دو بردار $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ ویژگی‌های زیر برقرار است [۷۰]:

$$\mathbf{A}_x \mathbf{b} = \mathbf{a} \times \mathbf{b} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{A}_x \mathbf{B}_x = \mathbf{a} \mathbf{b}^T - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) \mathbf{I}_{n \times n} \quad (6.3)$$

$$\mathbf{A}_x \mathbf{B}_x \mathbf{A}_x = -(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) \mathbf{A}_x \quad (7.3)$$

در اینجا \mathbf{A}_x و \mathbf{B}_x طبق تعریف ۲.۲.۳ ایجاد می‌شوند.

¹Wrench ²Skew-Symmetric

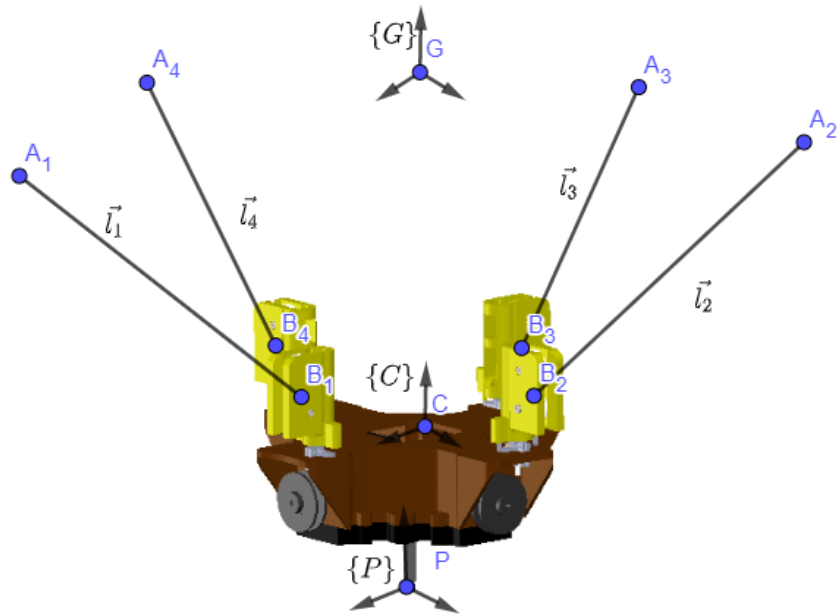
۳.۳ سینماتیک

در این بخش، قیده‌های سینماتیک ربات Aras-Cam-2 استخراج می‌شوند. برای به‌دست‌آوردن این معادلات، فرض‌های مدل استاندارد هندسی^۱ ربات کابلی موازی در نظر گرفته شده است [۵۶، ۵۵، ۱۲]. این مفروضات عنوان می‌کنند که کابل‌ها به عنوان خطوط راست بین نقاط نصب‌اجزا ثابت و متحرک^۲ در نظر گرفته شده‌اند. نقاط نصب‌اجزا به عنوان مفاصل کروی مدل شده‌اند که قابلیت چرخش آزاد دارند. کابل‌ها تنها می‌توانند طول خود را تغییر دهند و فرض شده تحت وزن خود خم نمی‌شوند و از اثرات چرخش، جرم کابل، انعطاف‌پذیری و هیستریزیس کابل‌ها صاف نظر شده است. همچنین، اثر سینماتیک پولی‌ها بر روی طول کابل‌ها در نظر گرفته نشده است. این تحلیل سینماتیک باهدف استخراج قیود هولونومیک مسئله انجام می‌شود که به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود

$$\phi(l, x) = 0 \quad (۸.۳)$$

که در آن بردار حاوی طول و جهت کابل‌ها است و فضای مفصل مسئله را تشکیل می‌دهد و $x = (p, R) \in SE(3)$ فضای پیکربندی^۳ یا فضای وظیفه^۴ را نشان می‌دهد، $R \in SO(3)$ ماتریس دوران مجری نهایی را نسبت به دستگاه مختصات مرجع $\{G\}$ تعیین می‌کند که یک دستگاه مختصات لخت^۵ در فضا است. شکل ۱.۳ نمایشی از مدل هندسی سینماتیک ربات Aras-Cam-2 است. نقاط نصب‌اجزا ثابت با A_i و نقاط نصب‌اجزا متحرک با B_i نمایش داده شده‌اند. دستگاه مرجع $\{C\}$ بر روی مرکز جرم سکوی متحرک و دستگاه مختصات $\{P\}$ یک دستگاه مختصات دلخواه بر روی مجری نهایی است.

¹Standard Geometric Model ²Movable and Fix Attach Points ³Configuration Space ⁴Task Space ⁵Inertial



شکل ۱.۳: مدل سینماتیک استاندارد ربات Aras-Cam-2

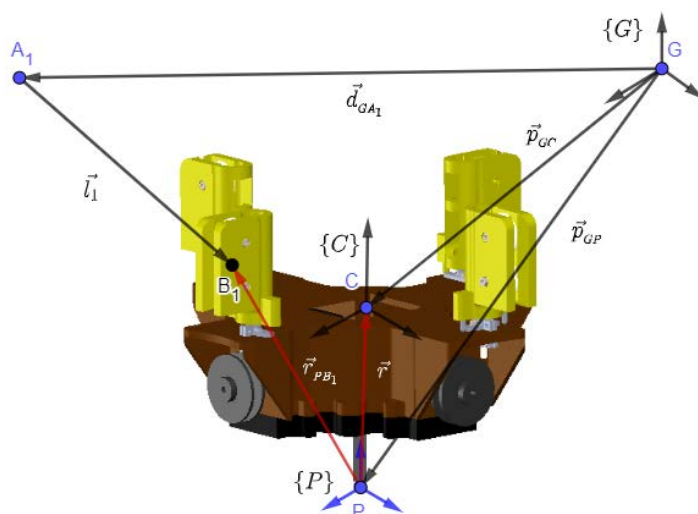
با در نظر گرفتن فرضیات بیان شده، می‌توان قیود سینماتیک مسئله با در نظر گرفتن حلقه بسته $GPBA$ مطابق با شکل ۲.۳ به شکل عمومی زیر نوشت

$$\vec{p}_{GP}(t) + \mathbf{R}(t) \vec{r}_{PB_i} = \vec{d}_{GA_i} + \vec{l}_i(t) \quad i = 1 \dots 4 \quad (9.3)$$

در این صورت قیود هولونومیک مسئله به شکل زیر به دست می‌آیند:

$$\phi(\mathbf{l}, \mathbf{x}) = \|\vec{p}_{GP}(t) + \mathbf{R}(t) \vec{r}_{PB_i} - \vec{d}_{GA_i}\| - \|\vec{l}_i(t)\| = 0 \quad (10.3)$$

که در آن رابطه (۱۰.۳) ماتریس دوران $\mathbf{R}(t)$ بر اساس قالب اویلر XYZ و زوایای اویلر $\epsilon = [\phi, \gamma, \theta]^T$ به



شکل ۲.۳: مدل سینماتیک استاندارد ربات Aras-Cam-2

شکل زیر نوشته می‌شود:

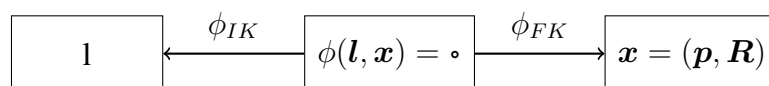
$$\mathbf{R}(t) = \begin{bmatrix} C(\gamma)C(\theta) & -C(\gamma)S(\theta) & S(\gamma) \\ C(\phi)S(\theta) + S(\phi)S(\gamma)C(\theta) & C(\phi)C(\theta) - S(\phi)S(\gamma)S(\theta) & -S(\phi)C(\gamma) \\ S(\phi)S(\theta) - C(\phi)S(\gamma)C(\theta) & S(\phi)C(\theta) + C(\phi)S(\gamma)S(\theta) & C(\phi)C(\gamma) \end{bmatrix} \quad (11.3)$$

در اینجا از تغییر متغیرهای $C = \cos$ و $S = \sin$ استفاده شده است.

در ادامه طبق شکل ۳.۳ در مورد چالش‌های پیشرو برای محاسبه سینماتیک وارون و مستقیم برای ربات Aras-Cam-2 صحبت می‌شود.

فضای مفصل

فضای عملیات



شکل ۳.۳: سینماتیک وارون و وارون ربات

۱.۳.۳ سینماتیک مستقیم

سینماتیک مستقیم عبارت است از یافتن یک تابع که با استفاده از آن می‌توان فضای مفصل را به فضای پیکربندی نگاشت کرد، یا به عبارتی می‌توان با داشتن طول کابل‌ها یک پیکربندی برای مجری نهایی به دست آورد. به صورت رسمی، این تابع را می‌توان برای نگاشت $\phi_{FK} : \mathbb{R}^m \rightarrow SE(3)$ به شکل زیر تعریف کرد.

$$\mathbf{x} = \phi_{FK}(\mathbf{l}) \quad (12.3)$$

حل مسئله سینماتیک مستقیم برای ربات‌های کابلی موازی چالش‌هایی را شامل می‌شود که در مراجعی نظیر [۷۱، ۷۲، ۱۲] بررسی شده‌اند. این چالش‌ها معمولاً ناشی از معادلات غیرخطی، وجود چندین پیکربندی معتبر با توجه به محدودیت‌های طول کابل‌ها و نیز کمبود راه‌حل‌های بسته برای هندسه پیشرو در طرح‌های کلی می‌باشد که نیازمند استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و عددی است. کاریکاتو^۱ [۷۳] مسئله سینماتیک مستقیم را برای یک ربات کابلی موازی نامقید با چهار کابل حل کرده است. راه‌حل او بر اساس فرض تعادل استاتیک مجری نهایی است و حرکت دینامیک ربات که مطلوب یک مسئله طراحی مسیر می‌باشد در نظر گرفته نشده است. این محدودیت و چالش‌های دیگر منجر شد تا از حل سینماتیک مستقیم برای ربات Aras-Cam-2 اجتناب شود.

۲.۳.۳ سینماتیک وارون

در سینماتیک وارون، بر خلاف سینماتیک مستقیم، هدف یافتن یک تابع است که فضای پیکربندی را به فضای مفصل نگاشت کند. به این معنا که با دانستن پیکربندی مجری نهایی، می‌توان با استفاده از این تابع طول کابل‌های موردنیاز را محاسبه کرد. به صورت کلی، این تابع را می‌توان برای نگاشت $\phi_{IK} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ به شکل زیر بیان کرد:

$$\mathbf{l} = \phi_{IK}(\mathbf{x}) \quad (13.3)$$

که با توجه به رابطه (۱۰.۳) به فرم اسکالر زیر نوشته می‌شود:

$$l_i = \sqrt{(\vec{p}_{GP}(t) + \mathbf{R}(t)\vec{r}_{PB_i} - \vec{d}_{GA_i}) \cdot (\vec{p}_{GP}(t) + \mathbf{R}(t)\vec{r}_{PB_i} - \vec{d}_{GA_i})} \quad (14.3)$$

¹Carricato

ربات Aras-Cam-2 با توجه به تعریف ۱.۲.۳ یک سامانه نامقید و فروتحریک است که فقط قادر به کنترل $m = 4$ درجه آزادی به صورت مستقل است و $k = n - m = 6 - 4 = 2$ درجه آزادی دیگر آن به صورت وابسته مشخص می‌شوند. اگر ماتریس دوران را در قالب اویلر XYZ در نظر بگیریم، در این صورت بردار جهت‌گیری^۱ مجری نهایی را می‌توان با سه زاویه $\epsilon = [\phi, \gamma, \theta]^T$ پارامترسازی کرد. در این حالت می‌توان اجزای فضای پیکربندی را به دو بخش فعال یا مستقل $q_a = [x, y, z, \phi]^T$ و غیرفعال یا وابسته $q_u = [\gamma, \theta]^T$ تفکیک کرد؛ بنابراین می‌توان گفت که هنگام حل سینماتیک وارون از تمام اجزای فضای پیکربندی ربات فقط بخش فعال q_a شناخته شده است و بخش غیرفعال q_u جزء مجهولات مسئله در نظر گرفته می‌شود، این به علاوه مجهول بودن طول کابل‌ها، در کل ۱۴ مجهول (۳*۴ بردار کابل + ۲ غیرفعال) را در برابر ۱۲ معادله ناشی از قیدهای سینماتیک ۹.۳ (۴ معادله برداری ۳* مؤلفه) ایجاد می‌کند که بدون فرض‌های بیشتر قابل حل نمی‌باشد.

۳.۳.۳ انتخاب فضای طراحی مسیر

اگر از فضای مفصل برای طراحی مسیر استفاده شود، برای اعتبارسنجی موقعیت و حالت مجری نهایی، نیاز است که از سینماتیک مستقیم استفاده شود. ولی طبق بحث بخش ۱.۳.۳، چالش‌های سینماتیک مستقیم باعث می‌شوند که از فضای مفصل به عنوان فضای طراحی مسیر نتوان استفاده کرد؛ بنابراین، از فضای پیکربندی به عنوان فضای طراحی مسیر استفاده می‌شود. اما در این صورت، برای حل سینماتیک وارون، در نظر گرفتن تنها مؤلفه‌های فعال q_a کافی نیست، بلکه باید مؤلفه‌های غیرفعال q_u نیز به صورت مستقل تعیین شوند. روش این محاسبات در بخش استخراج معادلات دینامیک توضیح داده شده است.

۴.۳ سینماتیک تفاضلی

در این بخش، ابتدا رابطه بین سرعت فضای مفصل $\dot{l} = [\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4]^T$ و بردار پیچش^۲ $\chi = [\dot{p}_{GP}^T, \omega^T]^T$ فضای پیکربندی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از پارامترسازی جهت‌گیری دستگاه مختصات متصل به سکوی متحرک نهایی بر اساس زوایای اویلر $\epsilon = [\phi, \gamma, \theta]^T$ ، رابطه بین سرعت مختصات تعمیم‌یافته فضای پیکربندی $\dot{q} = [\dot{p}_{GP}^T, \dot{\epsilon}^T]^T$ و دو فضای قبلی شناسایی شده است.

¹Orientation ²Twist

با در نظرگیری معادله ۸.۳ و گرفتن مشتق زمانی از آن، داریم:

$$\phi(l, x) = 0 \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial l} \dot{l} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \dot{x} = 0 \Rightarrow J_l \dot{l} = J_x \chi \quad (15.3)$$

باتوجه به رابطه بین بردار سرعت زاویه‌ای مجری نهایی و ماتریس دوران، می‌توان رابطه زیر را نوشت [۷۴]:

$$\Omega = \dot{R}R^T \quad (16.3)$$

که در آن طبق تعریف ۲.۲.۳ Ω ماتریس پادمتقارن معادل با بردار سرعت زاویه‌ای ω است.

با جاگذاری رابطه (۱۱.۳) در معادله (۱۵.۳) رابطه زیر بین بردار جهت $\epsilon = [\phi, \gamma, \theta]^T$ و بردار سرعت زاویه‌ای ω به شکل زیر استخراج می‌شود:

$$\omega = G(\epsilon)\dot{\epsilon} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi c\theta \\ 0 & s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \dot{\epsilon} \quad (17.3)$$

با جاگذاری رابطه (۱۷.۳) در بردار پیچش $\chi = [\dot{p}_{GP}^T, \omega^T]^T$ ارتباط آن با سرعت فضای تعمیم‌یافته به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\chi = J_v \dot{q} = \begin{bmatrix} I_{r \times r} & O_{r \times r} \\ O_{r \times r} & G \end{bmatrix} \dot{q} \quad (18.3)$$

حال رابطه (۱۵.۳) را می‌توان به شکل زیر تکمیل کرد:

$$J_l \dot{l} = J_x \chi = J_q \dot{q} \quad (19.3)$$

که در آن $J_q = J_x J_v$ است. روابط زیر برای سطر i ام ماتریس‌های J_l ، J_x و J_q با مشتق‌گیری از رابطه (۱۰.۳) قابل اثبات هستند [۵۵].

$$\mathbf{J}_{x,i} = \begin{bmatrix} l_i^T & -l_i^T \mathbf{A}_{x_i} \end{bmatrix} \quad (20.3)$$

$$\mathbf{J}_{q,i} = \begin{bmatrix} l_i^T & -l_i^T \mathbf{A}_{x_i} \mathbf{G} \end{bmatrix} \quad (21.3)$$

$$\mathbf{J}_{l,i} = \begin{bmatrix} 0_1 & \cdots & 0_{i-1} & l_i & 0_{i+1} & \cdots & 0_n \end{bmatrix} \quad (22.3)$$

در اینجا ماتریس \mathbf{A}_{x_i} طبق تعریف ۲.۲.۳ ایجاد می‌شود و مطابق شکل ۱.۳ بیانگر بردار نقاط نصب اجزا ثابت a_i در دستگاه مختصات عمومی G است.

۵.۳ دینامیک سامانه

در این بخش، معادلات حرکت ربات کابلی موازی معلق Aras-Cam-2 حول نقطه دلخواه P با استفاده از روش کلاسیک نیوتن - اولر^۱ و بر اساس شکل ۴.۳ استخراج می‌شود. صحت تمامی روابط استخراج شده در این بخش با نرم‌افزار میپل بررسی شده است [۷۵]. در شکل ۴.۳، نقطه C مرکز جرم ربات، نقاط B_i نقاط نصب اجزا متحرک ربات و نقاط نصب اجزا ثابت A_i نمایش داده شده‌اند.

باتوجه به شکل ۴.۳ معادلات نیوتن-اولر در دستگاه مختصات لخت $\{G\}$ به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$${}^G \vec{f}_c + {}^G \vec{f}_g = m {}^G \vec{a}_c \quad (23.3)$$

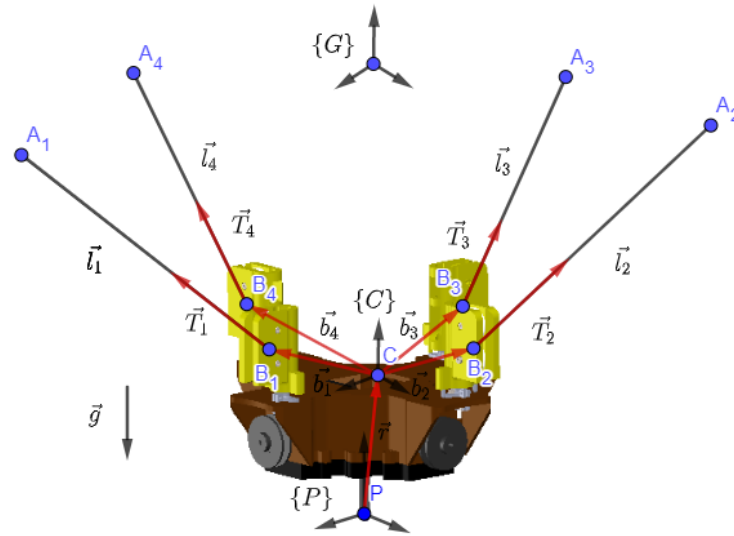
$${}^G \vec{\omega} \times {}^G I_C {}^G \vec{\omega} + {}^G I_C {}^G \vec{\dot{\omega}} + {}^G \vec{r} \times m {}^G \vec{a}_c - {}^G \vec{m}_c - {}^G \vec{r} \times ({}^G \vec{f}_c + {}^G \vec{f}_g) = 0 \quad (24.3)$$

که در آن، ${}^G \vec{f}_c = \sum_{i=1}^4 {}^G \vec{T}_i$ نیروی کابلی، ${}^G \vec{f}_g = m \vec{g}$ نیروی گرانش و ${}^G I_C = {}^G R_P {}^P I_C R^T$ که ${}^P I_C$ ماتریس ممان اینرسی حول مرکز جرم و در دستگاه مختصات $\{P\}$ است.

همچنین ${}^G \vec{a}_c$ شتاب مرکز جرم C برابر است با شتاب نقطه دلخواه P که با رابطه زیر قابل محاسبه است:

$${}^G \vec{a}_c = \vec{p}_{GC}(t) = \vec{p}_{GP}(t) + \alpha(t) \times \vec{r}_{PC} + \vec{\omega}(t) \times (\vec{\omega}(t) \times \vec{r}_{PC}) \quad (25.3)$$

¹Newton-Euler



شکل ۴.۳: دیاگرام نیرویی جسم آزاد ربات Aras-Cam-2

با جاگذاری رابطه (۲۵.۳) در معادلات نیوتن - اولر (۲۳.۳) و (۲۴.۳) معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$\vec{p}_{GP}(t) + m(\vec{\alpha}(t) \times \vec{r}) + m(\vec{\omega}(t) \times (\vec{\omega}(t) \times \vec{r})) = \vec{f}_c + \vec{f}_g \quad (۲۶.۳)$$

$$\vec{\omega}(t) \times (I_C \vec{\omega}(t)) + I_C \vec{\alpha}(t) + m(\vec{r} \times \vec{p}_{GP} + \vec{\alpha}(t) \times \vec{r} + \vec{\omega}(t) \times (\vec{\omega}(t) \times \vec{r})) \quad (۲۷.۳)$$

$$\vec{m}_c \vec{r} \times (\vec{f}_c + \vec{f}_g) = \circ$$

در نهایت معادلات (۲۶.۳) و (۲۷.۳) را می‌توان با فرض بردار پیچ $\chi = [\dot{\vec{p}}_{GP}^T, \omega^T]^T$ در قالب رنج-پیچ^۱

^۱Twist-Wrench

[۷۴] و به صورت زیر نوشت:

$$M_e \dot{\chi}(t) + C_e \chi(t) + G = F_w \quad (28.3)$$

$$M_e = \begin{bmatrix} m I_r & -m \rho_p \\ m \rho_p & -\rho_p^y m + I_C \end{bmatrix} \quad (29.3)$$

$$C_e = \begin{bmatrix} O_r & m \Omega \rho_p \\ O_r & \Omega I_C - m \Omega \rho_p^y \end{bmatrix} \quad (30.3)$$

$$G = \begin{bmatrix} \vec{f}_g \\ \rho_p \vec{f}_c + \rho_p \vec{f}_g \end{bmatrix} \quad (31.3)$$

$$F_w = -J_x^T \tau \quad (32.3)$$

در معادلات (۲۶.۳) و (۲۷.۳) بردار کشش کابل به شکل $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_4]^T$ تعریف می‌شود که در آن $\tau_i = \frac{T_i}{\|l_i\|}$ نسبت نیرو به طول کابل است. همچنین ماتریس‌های Ω و ρ_p طبق تعریف ۲.۲.۳ ماتریس‌های پادمتقارن متناظر با سرعت زاویه‌ای ω و بردار فاصله بین مرکز جرم و نقطه دلخواه P هستند. جزئیات و نحوه استخراج معادلات رنج - پیچ (۲۸.۳) در نرم‌افزار میپل [۷۵] ذکر شده است.

همان‌طور که در بخش ۳.۳.۳ صحبت شد به دلیل انتخاب فضای پیکربندی به‌عنوان فضای طراحی مسیر. معادلات (۲۸.۳) در این فضا بازنویسی می‌شوند. با انتخاب مختصات تعمیم‌یافته $q = [x, y, z, \phi, \gamma, \theta]^T$ برای فضای پیکربندی و استفاده از رابطه (۱۸.۳) معادله دینامیک (۲۸.۳) در مختصات تعمیم‌یافته به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M \ddot{q}(t) + C \dot{q}(t) + G = F_w \quad (33.3)$$

$$C = C_e J_v + M_e \dot{J}_v \quad (34.3)$$

$$M = M_e J_v \quad (35.3)$$

$$F_w = -J_x^T \tau \quad (36.3)$$

باتوجه به معادله (۳۴.۳)، ماتریس M ، ماتریس متقارن نیست. از آنجاکه معادلات دینامیک در سیمولینک متلب

به صورت عددی حل می‌شوند، متقارن بودن ماتریس M سرعت و پایداری عددی را در به دست آوردن وارون ماتریس افزایش می‌دهد [۷۶]. ثابت می‌شود که ضرب ماتریس J_v^T از سمت چپ در ماتریس M ، ماتریس نتیجه را متقارن می‌کند. این اثبات در پیوست آورده شده است.

با این فرض، معادلات دینامیک نهایی (۳۳.۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$M' \ddot{q}(t) + C' \dot{q}(t) + G' = F'_w \quad (۳۷.۳)$$

$$C' = J_v^T C_e J_v + J_v^T M_e \dot{J}_v \quad (۳۸.۳)$$

$$G' = J_v^T G \quad (۳۹.۳)$$

$$M' = J_v^T M_e J_v \quad (۴۰.۳)$$

$$F_w = -J_v^T J_x^T \tau = -J_q^T \tau \quad (۴۱.۳)$$

۶.۳ بخش‌بندی معادلات دینامیک و قیود مرتبه دوم

در این بخش به بحث درباره قیود مرتبه دوم حاکم بر یک سامانه فروتحریک و نحوه استخراج آن پرداخته می‌شود.

معادلات دینامیک یک سامانه فروتحریک با n درجه آزادی به شکل زیر است:

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + G = B u \quad (۴۲.۳)$$

که در آن B یک ماتریس با ابعاد $n \times m$ با رنک m بوده و طبق تعریف ۱.۲.۳ بیانگر این حقیقت است که ربات از m عملگر مستقل برای هدایت خود استفاده می‌کند. معادله ۴۲.۳ را می‌توان با بخش‌بندی مختصات تعمیم‌یافته $q = [q_a^T, q_u^T]^T$ به مختصات فعال و قابل کنترل $q_a \in \mathbb{R}^m$ و مختصات غیرفعال و غیرقابل کنترل $q_u \in \mathbb{R}^{n-m}$ به شکل زیر بخش‌بندی کرد [۷۷]:

$$M_{11} \ddot{q}_a + M_{12} \ddot{q}_u - c_1 - G_1 = O \quad (۴۳.۳)$$

$$M_{21} \ddot{q}_a + M_{22} \ddot{q}_u - c_2 - G_2 = u \quad (۴۴.۳)$$

در اینجا معادله (۴۳.۳) قید مرتبه دوم سامانه فروتحریرک نامیده می‌شود. بر اساس آنچه از بخش‌بندی معادلات دینامیک گفته شد، می‌توان معادله دینامیک (۳۷.۳) ربات Aras-Cam-2 با بخش‌بندی مختصات تعمیم‌یافته $\mathbf{q} = [x, y, z, \phi, \gamma, \theta]^T \in \mathbb{R}^6$ به مختصات فعال $\mathbf{q}_a = [x, y, z, \phi]^T$ و مختصات غیرفعال $\mathbf{q}_u = [\gamma, \theta]^T$ به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{au} \\ M_{ua} & M_{uu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_a \\ \ddot{\mathbf{q}}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{au} \\ C_{ua} & C_{uu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_a \\ \dot{\mathbf{q}}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_a \\ \mathbf{G}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_a \\ \mathbf{J}_u \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \quad (۴۵.۳)$$

با انجام عملیات ضرب ماتریس در معادلات فوق، دو معادله زیر به دست می‌آید:

$$M_{aa}\ddot{\mathbf{q}}_a + M_{au}\ddot{\mathbf{q}}_u + C_{aa}\dot{\mathbf{q}}_a + C_{au}\dot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{G}_a - \mathbf{J}_a\boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \quad (۴۶.۳)$$

$$M_{ua}\ddot{\mathbf{q}}_a + M_{uu}\ddot{\mathbf{q}}_u + C_{ua}\dot{\mathbf{q}}_a + C_{uu}\dot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{G}_u - \mathbf{J}_u\boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \quad (۴۷.۳)$$

حال، با حل معادله (۴۷.۳) بر حسب $\ddot{\mathbf{q}}_u$ داریم:

$$\ddot{\mathbf{q}}_u = -M_{uu}^{-1} (M_{ua}\ddot{\mathbf{q}}_a + C_{ua}\dot{\mathbf{q}}_a + C_{uu}\dot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{G}_u - \mathbf{J}_u\boldsymbol{\tau}) \quad (۴۸.۳)$$

با جاگذاری معادله (۴۸.۳) در رابطه (۴۶.۳) و حل آن بر حسب $\boldsymbol{\tau}$ معادله زیر به دست می‌آید:

$$\boldsymbol{\tau} = (M_{au}M_{uu}^{-1}\mathbf{J}_u - \mathbf{J}_a)^{-1}\boldsymbol{\mu} \quad (۴۹.۳)$$

که در آن $\boldsymbol{\mu}$ برابر است با:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu} = & (M_{au}M_{uu}^{-1}M_{ua} - M_{aa})\ddot{\mathbf{q}}_a + (M_{au}M_{uu}^{-1}C_{ua} - C_{aa})\dot{\mathbf{q}}_a \\ & + (M_{au}M_{uu}^{-1}C_{uu} - C_{au})\dot{\mathbf{q}}_u + M_{au}M_{uu}^{-1}\mathbf{G}_u - \mathbf{G}_a \end{aligned} \quad (۵۰.۳)$$

۷.۳ جمع‌بندی

در این فصل، روش‌های مدل‌سازی سینماتیک و دینامیک و استخراج قیود مرتبه دوم برای ربات چهارکابل Aras-Cam-2 ارائه شده است. ابتدا، سینماتیک مستقیم و وارون ربات Aras-Cam-2 در بخش ۳.۳ بررسی شده، سپس دلایل انتخاب فضای پیکربندی برای طراحی مسیر در بخش ۳.۳.۳ شرح داده شده است. در بخش ۴.۳، ماتریس‌های ژاکوبین که نگاشت خطی بین بردار سرعت پیچ، سرعت فضای تعمیم‌یافته و سرعت فضای مفصل هستند، استخراج شده‌اند. دینامیک ربات در فضای تعمیم‌یافته در بخش ۵.۳ محاسبه شده و قیود مرتبه دوم ربات در بخش ۶.۳ بدست آورده شده است.

فصل ۴

طراحی مسیر

۱.۴ مقدمه

در این فصل، روش طراحی مسیر نقطه‌به‌نقطه ساکن برای ربات چهارکابل Aras-Cam-2 با جزئیات شرح داده می‌شود. این روش شامل دو قدم اصلی است: اول، تعریف مبانی یک مسیر نقطه‌به‌نقطه ساکن برای چنین رباتی؛ دوم، طراحی یک مسیر خط مستقیم که با قیدهای کششی بودن نیروهای کابلی ربات سازگار باشد. همچنین، در این فصل، چالش‌ها و موانع سر راه شبیه‌سازی این مسیر برای یک ربات چهارکابل فروتحریک مورد بحث قرار گرفته و نشان داده می‌شود که این روش طراحی مسیر در عمل قابل استفاده است. به منظور اثبات این ادعا، عملکرد این روش بر روی یک ربات سه‌کابل شبیه‌سازی و نتایج آن ارائه می‌گردد.

۲.۴ طراحی مسیر

در این بخش، با استفاده از روش‌های طراحی مسیر^۱ برای ربات‌های کابلی موازی [۷۸، ۵۶]، یک مسیر نقطه‌به‌نقطه ساکن^۲ برای ربات Aras-Cam-2 پیشنهاد می‌شود. این ربات باید در طول مسیر، علاوه بر رعایت قیود سینماتیکی سکون در نقاط ابتدا و انتهای، آن را در زمان T ثانیه طی نماید. همچنین، قید کششی بودن کابل‌ها $\tau_i \geq 0$ باید در تمام طول زمان T برقرار باشد. فروتحریک بودن سامانه یک چالش برای به سکون رساندن ربات قبل از اتمام زمان T می‌باشد [۵۶].

¹Trajectory Planning ²Rest to Rest

۱.۲.۴ هندسه راه و قانون حرکت

در ادبیات رباتیک [۷۴] تابع $\Theta : [0, 1] \rightarrow \Theta$ را هندسه راه^۱ گویند اگر با افزایش $u \in [0, 1]$ ربات مسیر Θ را از نقطه ابتدایی (متناظر با $u = 0$) تا نقطه انتهایی (متناظر با $u = 1$) در فضای پیکربندی یا فضای مفصل طی کند.

معمولاً مرسوم است که خود u به صورت یک تابع زمانی به شکل $u : [0, T] \rightarrow [0, 1]$ مطرح می شود که آن را قانون حرکت^۲ نامند.

مسیر به عنوان یک تابع، تلفیق دو تابع هندسه راه و قانون حرکت بوده که به شکل زیر بیان می شود:

$$P(u(t)) = P \circ u \quad (1.4)$$

به عنوان مثال یک مسیر خط مستقیم به شکل زیر مطرح می شود:

$$P(u(t)) = P(0) + u(t)(P(T) - P(0)) \quad (2.4)$$

که در آن $P(0)$ و $P(T)$ شرایط مرزی نقاط ابتدایی و انتهایی مسیر است.

۲.۲.۴ طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن

برای ربات Aras-Cam-2، با توجه به موارد توضیح داده شده در بخش ۲.۴، مسیر نقطه به نقطه ساکن با توجه به الزامات معین طراحی می شود. این الزامات عبارت اند از: طراحی اولیه هندسه مسیر دلخواه ربات مانند خط مستقیم، دایره ای و غیره، مشخص بودن نقاط سکون یا تعادل ابتدا و انتهای ربات برای دو متغیر q_a و q_u ، مشخص بودن مدت زمان T که ربات برای طی کردن مسیر و رسیدن به حالت سکون نیاز دارد، طراحی قانون حرکت $u(t)$ به گونه ای که علاوه بر در نظر گرفتن قیود ابتدایی و انتهایی مسیر، دینامیک فروتحریک ربات برای پیمودن و رسیدن به سکون در مدت زمان T را نیز در نظر بگیرد، و در نهایت، طراحی مسیر به گونه ای که کشش کابل ها در تمام مسیر مثبت باشد. جهت طراحی چنین مسیری نیاز است که معادله (۴۸.۳) را در قالب یک مسئله مقدار مرزی^۳ بازنویسی شود، تا علاوه بر رعایت قیود تعادل در ابتدا و انتهای مسیر و کششی بودن کابل ها، مختصات وابسته یا غیرفعال $q_u = [\gamma, \theta]^T$ مناسب جهت محاسبه طول کابل ها به دست آید، بدین منظور معادله (۴۸.۳) برای حل

¹Geometric-Path ²Motion-Law ³Boundary-Value-Problem

عددی در قالب فضای حالت به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_u \\ \dot{\mathbf{q}}_u \end{bmatrix} \quad (۳.۴)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_u \\ -M_{uu}^{-1} (M_{ua}\ddot{\mathbf{q}}_a + C_{ua}\dot{\mathbf{q}}_a + C_{uu}\dot{\mathbf{q}}_u + G_u - J_u\tau) \end{bmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{q}_a, \dot{\mathbf{q}}_a, \ddot{\mathbf{q}}_a) \quad (۴.۴)$$

$$\mathbf{x}(\circ) = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_u(\circ) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{x}(T) = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_u(T) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (۵.۴)$$

مسئله شرایط مرزی فوق به دلیل داشتن ۸ شرایط مرزی و ۴ معادله به‌تنهایی قابل حل نمی‌باشد. روش‌های متفاوتی برای حل‌پذیر کردن این مسئله وجود دارد که یکی از آن‌ها [۷۹] اضافه‌کردن $4 = 8 - 4$ پارامتر آزاد $\boldsymbol{\kappa} = [\kappa_1, \dots, \kappa_4]$ به مسئله است. بردار پارامتر آزاد با پارامتری کردن مسیر مختصات کنترل‌پذیر به شکل $\mathbf{q}_a = \mathbf{q}_a(\boldsymbol{\kappa}, t)$ به معادلات فضای حالت ۴.۴ وارد می‌شود. در نهایت با پارامترسازی رابطه (۴.۴) با بردار $\boldsymbol{\kappa}$ مسئله مقدار مرزی به شکل زیر در می‌آید:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(\boldsymbol{\kappa}, t), \mathbf{q}_a(\boldsymbol{\kappa}, t), \dot{\mathbf{q}}_a(\boldsymbol{\kappa}, t), \ddot{\mathbf{q}}_a(\boldsymbol{\kappa}, t)) \quad (۶.۴)$$

$$\mathbf{x}(\circ) = \mathbf{x}_\circ \quad \mathbf{x}(T) = \mathbf{x}_T \quad (۷.۴)$$

۱.۲.۲.۴ طراحی قانون حرکت

قانون حرکت طبق آنچه در بخش ۱.۲.۴ و ۲.۲.۴ گفته شد، باید علاوه بر آنکه قیود مربوط به خود $(u(\circ) = \circ, u(T) = 1)$ را رعایت می‌کند، پارامترهای آزاد $\boldsymbol{\kappa} = [\kappa_1, \dots, \kappa_4]^T$ را هم به‌عنوان متغیرهای کمکی در مسیر داده شده به مختصات مستقل $(\mathbf{q}_a(u(\boldsymbol{\kappa}, t)))$ دخیل سازد. چنین قانون حرکتی [۵۶] می‌تواند به

شکل زیر نوشته شود:

$$u(\gamma(\kappa, t)) = \sum_{i=r+1}^{2r+1} a_i \gamma^i(\kappa, t) \quad (۸.۴)$$

$$\gamma(\kappa, 0) = 0, \quad \gamma(\kappa, T) = 1, \quad \forall \kappa \in \mathbb{R} \quad (۹.۴)$$

در معادله (۸.۴) r درجه چندجمله‌ای را مشخص می‌کند و برای این مسئله $r = 3$ در نظر گرفته شده است تا از ناپیوستگی در کشش کابل جلوگیری شود. تابع واسط $\gamma(\kappa, t)$ در اینجا نقش واردسازی پارامترهای آزاد κ را به قانون حرکت بازی می‌کند و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma(\kappa, t) = \frac{(1 - \Gamma(T) \cdot \kappa)t}{T} + \Gamma(t) \cdot \kappa \quad (۱۰.۴)$$

$$\Gamma(t) = [t^\alpha, \dots, t^\beta]^T \quad (۱۱.۴)$$

پارامتر a_i در معادله (۸.۴) نیز طبق فرمول زیر به دست می‌آید [۸۰]:

$$a_i = (-1)^{i-r-1} \frac{(2r+1)!}{i \cdot r!(i-r-1)!(2r+1-i)!} \quad (۱۲.۴)$$

حال با انتخاب یک هندسه راه به شکل خط مستقیم (۲.۴) مسیری که به مختصات کنترل‌پذیر q_a داده می‌شود، به شکل زیر است:

$$q_a(\kappa, t) = q_a(0) + u(\kappa, t)(q_a(T) - q_a(0)) \quad (۱۳.۴)$$

۲.۲.۲.۴ حل مسئله مقدار مرزی

طبق آنچه در بخش ۱.۲.۲.۴ گفته شد مسیری مناسب برای مختصات کنترل‌پذیر $q_a(\kappa, t)$ بر حسب پارامترهای آزاد κ طراحی شد. با جاگذاری مسیر مذکور در معادله حالت (۴.۴) و استفاده از روش پرتابی^۱، مسئله مقدار مرزی مذکور به ترتیب مراحل زیر حل می‌شود:

۱. یک مقدار اولیه صفر برای بردار پارامتر κ در نظر گرفته می‌شود، و با این مقادیر بعلاوه زمانی که مسیر T

¹Shooting Method

طی می‌شود یک مسیر خط صاف برای $q_a(\kappa, t)$ مطابق رابطه (۱۳.۴) طراحی می‌شود.

۲. مسئله مقدار مرزی (۴.۴) را به شکل مسئله مقدار اولیه^۱ زیر درآورده:

$$\dot{x} = f(x(\kappa, t), q_a(\kappa, t), \dot{q}_a(\kappa, t), \ddot{q}_a(\kappa, t)) \quad (14.4)$$

$$x(0) = x. \quad (15.4)$$

و با حل آن، بردار حالت $x(\kappa, t)$ محاسبه می‌شود. حال با جاگذاری زمان T در بردار حالت $x(\kappa, t)$ مقدار تابع تشکیل شده $\Delta(\kappa)$ به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta(\kappa) = x(\kappa, T) - x_T \quad (16.4)$$

۳. در مرحله دوم اگر کشش کابل‌ها بنا بر معادله (۴۹.۳) منفی بود، مقدار اولیه κ با یک عدد دیگری جایگزین می‌شود و فرایند از مرحله دوم، دوباره تکرار می‌شود.

۴. چنانچه اندازه خطا $\|\Delta(\kappa)\| \leq \zeta$ کوچک‌تر از تolerانس پیش فرض ζ بود، مقدار κ پذیرفته می‌شود، در غیر این صورت κ به صورت زیر اصلاح شده و الگوریتم از مرحله ۲ تکرار می‌شود.

$$\kappa_{i+1} = \kappa_i + J_{\Delta}^{-1}(\kappa_i) \Delta(\kappa_i) \quad (17.4)$$

خلاصه مراحل بالا در جدول ۱.۴ به شکل زیر آورده شده است.

¹Initial-Value-Problem

الگوریتم ۱.۴ الگوریتم پیاده‌سازی طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن

- ورودی: زمان T برای پیمودن مسیر بین دو نقطه
 ورودی: شرایط مرزی برای مختصات کنترل‌ناپذیر، $x(0) = x_0, x(T) = x_T$ ، طول اولیه کابل‌ها
 ورودی: مقدار اولیه κ
 ورودی: مشخصات هندسی ربات
 خروجی: کشش کابل‌ها، طول کابل‌ها و مقادیر نهایی κ
- ۱: حل مسئله مقدار اولیه ۱۴.۴
 - ۲: اگر کشش کابل منفی است آنگاه
 - ۳: مقدار دیگری برای κ جاگذاری شود.
 - ۴: پایان شرط اگر
 - ۵: اگر کشش کابل مثبت بود. آنگاه
 - ۶: مقدار $\Delta(\kappa) = x(\kappa, T) - x_T$ محاسبه شده.
 - ۷: اگر $\|\Delta(\kappa)\| \leq \zeta$ آنگاه
 - ۸: مقدار κ پذیرفته شده.
 - ۹: وگرنه
 - ۱۰: مقدار κ با رابطه $\kappa_{i+1} = \kappa_i + J_{\Delta}^{-1}(\kappa_i)\Delta(\kappa_i)$ اصلاح می‌شود.
 - ۱۱: پایان شرط اگر
 - ۱۲: پایان شرط اگر

هنگامی که مقادیر κ طبق الگوریتم بالا محاسبه شد، مسئله مقدار مرزی (۴.۴) با موفقیت حل شده و مقادیر q_u به دست می‌آید. در این صورت مختصات تعمیم یافته $q = (q_a, q_u)^T$ در طول مسیر مشخص شده، و در آخر می‌توان طول کابل‌های متناظر با این مسیر را طی عملیات سینماتیک وارون از روابط (۱۴.۳) استخراج کرد و به‌عنوان فرمان به موتورهای روی سکوی متحرک وارد کرد.

۳.۴ چالش‌های موجود در طراحی مسیر ربات چهارکابل

الگوریتم بیان شده در بخش ۲.۲.۲.۴ به پیشنهاد مقاله [۵۶] بوده، و دارای نواقصی است که در ادامه بیان می‌شود

۱. این الگوریتم شرط کششی بودن کابل‌ها را به شکل صریح اجبار نمی‌کند، و هنگامی که با مقداری از κ مواجه شد که در آن کشش کابل منفی است، صرفاً به تغییر مقدار اولیه κ اکتفا می‌کند. این موضوع سبب

طولانی شدن حل مسئله یا حتی ناهم‌گرایی می‌شود

۲. مسئله مذکور برای یک ربات سه کابل به دلیل عدم وجود مختصه زاویه در بردار مختصات مستقل $\mathbf{q}_a = [x, y, z]^T$ بدون هیچ مشکلی حل شده است. اما برای ربات چهار کابل به دلیل آنکه در ربات کابلی عموماً زاویه در یک محدوده خیلی کوچک تغییر می‌کند، جواب همگرا نمی‌شود، و نیاز به استفاده از یک روش دیگر احساس می‌شود (فصل ۵).

در اینجا راه‌حلی که می‌توان برای مشکل اول در نظر گرفت این است که مسئله ریشه‌یابی بیان شده در معادله ۱۶.۴ به شکل یک مسئله بهینه‌سازی درآمده و به صورت زیر بیان شود:

$$\min_{\kappa} \|\Delta(\kappa) = \mathbf{x}(T) - \mathbf{x}_T\| \quad (18.4)$$

$$\text{subject to} \quad (19.4)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{q}_a, \dot{\mathbf{q}}_a, \ddot{\mathbf{q}}_a) \quad (\text{دینامیک}) \quad (20.4)$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (21.4)$$

$$\tau_{\min} \leq \tau(\kappa, t) \leq \tau_{\max} \quad (\text{کشش کابل}) \quad (22.4)$$

در مرحله شبیه‌سازی مسئله بهینه فوق به کمک دستور `fmincon` در نرم‌افزار متلب حل شده است.

۴.۴ مسیرهای چندجمله‌ای زمانی استاندارد

طبق آنچه که در بخش ۱.۲.۴ در مورد طراحی مسیر گفته شد، عنوان شد که مسیرهای متفاوت، با قوانین حرکت متفاوتی از هم متمایز می‌شوند. مسیرهای چندجمله‌ای زمانی استاندارد [۸۰] به عنوان مسیرهایی رایج در رباتیک شناخته شده و با قانون حرکت زیر شناخته می‌شوند:

$$u(t) = \sum_{i=r+1}^{r+1} a_i \left(\frac{t}{T}\right)^i \quad t \in [0, T] \quad (23.4)$$

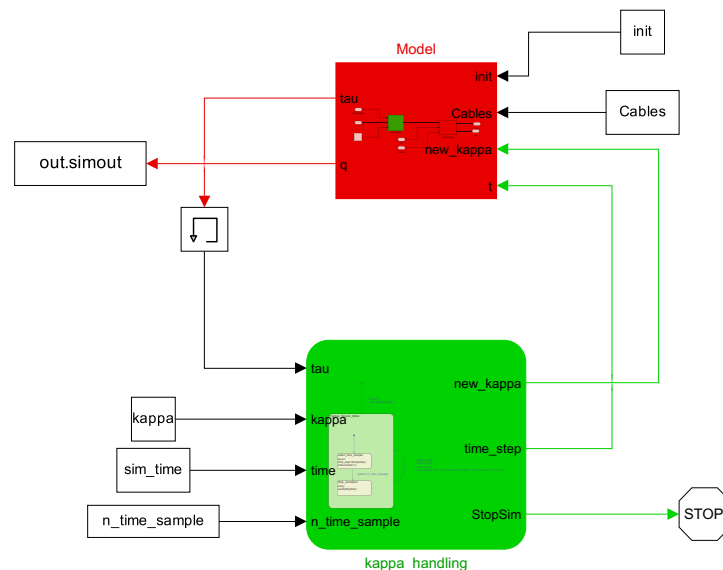
در اینجا قانون حرکت یک چندجمله‌ای از درجه $2r + 1$ بوده و a_i طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$a_i = (-1)^{i-r-1} \frac{(2r+1)!}{i \cdot r! (i-r-1)! (2r+1-i)!} \quad (24.4)$$

قانون حرکت (۲۳.۴) در طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن، به دلیل اینکه دینامیک درونی یک سامانه فروتحریک را در نظر نمی‌گیرد، باعث می‌شود مختصات کنترل نشده q_u در انتهای مسیر به تعادل نرسد و ربات شروع به نوسان کند.

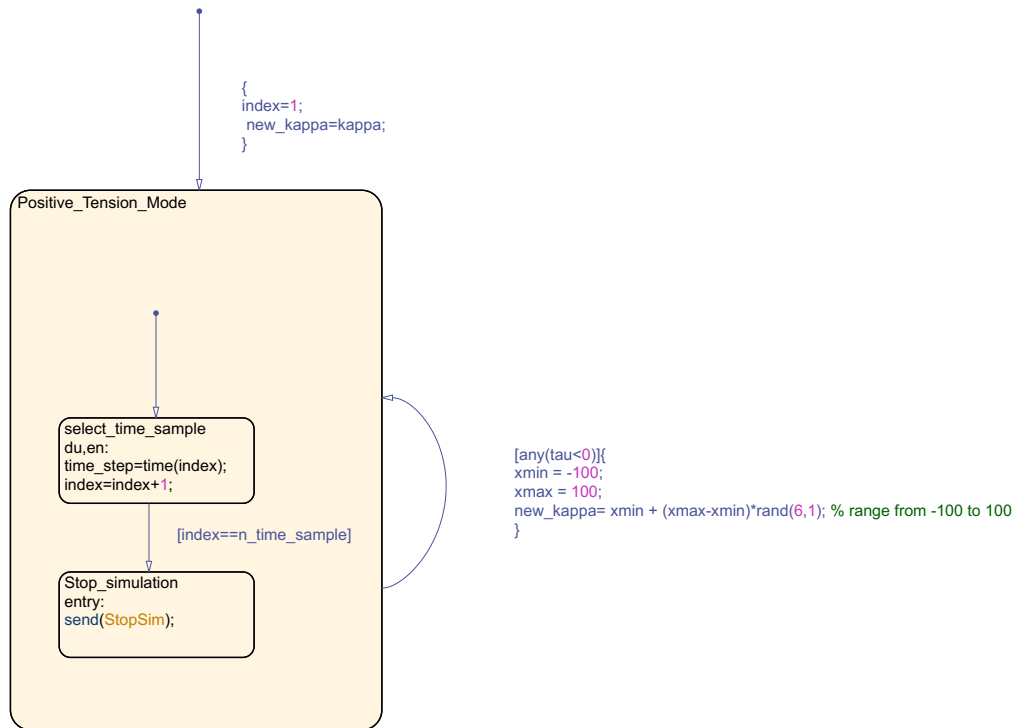
۵.۴ مراحل شبیه‌سازی

در این بخش، فرایند شبیه‌سازی روش طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن که در بخش ۲.۲.۴ ارائه شده است، بیان می‌گردد. این شبیه‌سازی با استفاده از ترکیب نرم‌افزار متلب و سیمولینک انجام شده است [۷۵]. این روش شامل دو بخش اصلی است: بخش Model (قرمز) و بخش kappa-handling (سبز) که در شکل ۱.۴ نمایش داده شده‌اند. به صورت خلاصه عملکرد شبیه‌سازی به این صورت است که ابتدا مفروضات اولیه مورد نیاز که در الگوریتم ۱.۴ توضیح داده شده‌اند، به عنوان ورودی در نظر گرفته شده و مسئله پس از حل، مختصات تعمیم یافته $q = [q_a^T, q_u^T]^T = [x, y, z, \phi, \gamma, \theta]^T$ و نیروهای کشش کابل τ در طول را مسیر محاسبه می‌کند.



شکل ۱.۴: ساختار کلی مسئله طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن در نرم‌افزار سیمولینک

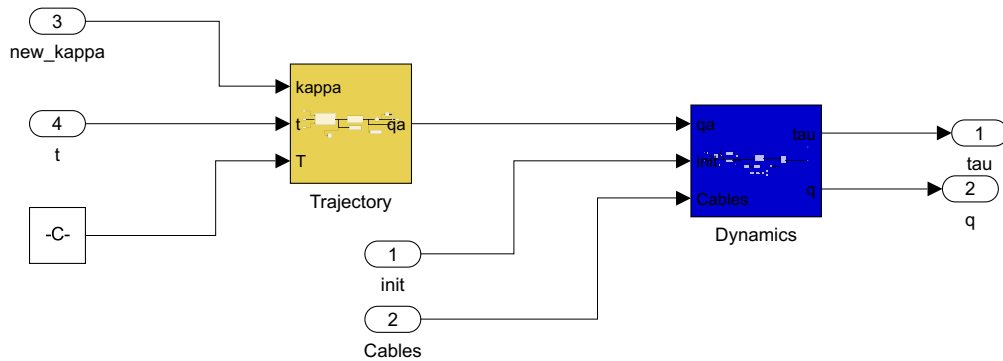
بخش سبز مسئول بررسی سازگاری قیدهای ربات با مسیر طراحی شده است. همچنین، در این بخش، سازگاری قید کششی بودن نیروهای کابلی با مسیر طراحی شده ارزیابی می‌شود. ساختار این بخش که در شکل ۲.۴ قابل مشاهده است یک ساختار جریان حالت^۱ بوده که در این مسئله منطق خوبی بین حالتی که قیود نقض می‌شود و حالی که قیود سازگار است ایجاد می‌کند.



شکل ۲.۴: ساختار بخش kappa-handling برای بررسی سازگاری قیود کششی بودن کابل

بخش Model مسئول اعمال مسیر مناسب به مختصات کنترل‌پذیر q_a و دخالت پارامترهای آزاد (بلوک زرد) در مسئله است. در این بخش، پس از تعیین مسیر مناسب، دینامیک ربات (بلوک آبی) با در نظر گرفتن پارامترهای آزاد حل شده و مسئله مقدار مرزی حاصل توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی و به کمک دستور `fmincon` متلب حل می‌گردد [۷۵]. ساختار این بخش در شکل ۳.۴ آورده شده است. در نهایت پس از اتمام محاسبات مختصات تعمیم‌یافته فضای پیکربندی ربات محاسبه شده و از آن برای محاسبه طول کابل‌ها و پیمودن مسیر استفاده می‌شود.

¹StateFlow-Chart



شکل ۳.۴: ساختار بخش Model که وظیفه طراحی مسیر و حل دینامیک مسئله را برعهده دارد.

۶.۴ نتایج شبیه‌سازی

در جداول ۱.۴ و ۲.۴ مشخصات هندسی و فیزیکی سه کابل ربات ذکر شده‌اند. برای بررسی عملی بودن طراحی مسیر با روش نقطه‌به‌نقطه ساکن، این روش با یک روش طراحی مسیر چندجمله‌ای زمانی که در بخش مقایسه شده است. مقایسه بر اساس یک هندسه راه خط مستقیم انجام شده است که در آن ربات مطابق با شکل ۴.۴ از نقطه a به نقطه b و سپس به نقطه c حرکت کرده و دوباره به نقطه a بازمی‌گردد.

جدول ۱.۴: مشخصات هندسی ربات

کابل	(نقاط اجزای نصب ثابت) $[m] \vec{d}_{GA_i}$	(نقاط اجزای نصب متحرک) $[m] \vec{r}_{PB,i}^P$	$[m] \vec{r}_{PC}^P$
۱	۰٫۱۶ ۰٫۸۳ -۰٫۰۵	۰ -۰٫۲۶۷ -۰٫۲۷۰	۰ ۰ ۰٫۱۸۲
۲	۲٫۱۲۵ ۰٫۱۸۰ -۰٫۰۳۵	۰٫۲۳۱ ۰٫۱۳۳ -۰٫۲۷۰	۰ ۰ ۰٫۱۸۲
۳	۰٫۲۶۰ ۱٫۲۹ -۰٫۰۴۳	-۰٫۲۳۱ ۰٫۱۳۳ -۰٫۲۷۰	۰ ۰ ۰٫۱۸۲

مختصات نعیم یافته تعادلی $\mathbf{q} = [x, y, z, \phi, \gamma, \theta]^T$ برای سکوی متحرک در نقاط a, b, c به ترتیب زیر

جدول ۲.۴: مشخصات فیزیکی ربات

مقدار	مشخصه
۳٫۷ [kg]	جرم
$\begin{bmatrix} ۰٫۱۴ & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۰٫۱۴ & ۰ \\ ۰ & ۰ & ۰٫۲۱۶ \end{bmatrix}$	ماتریس اینرسی $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

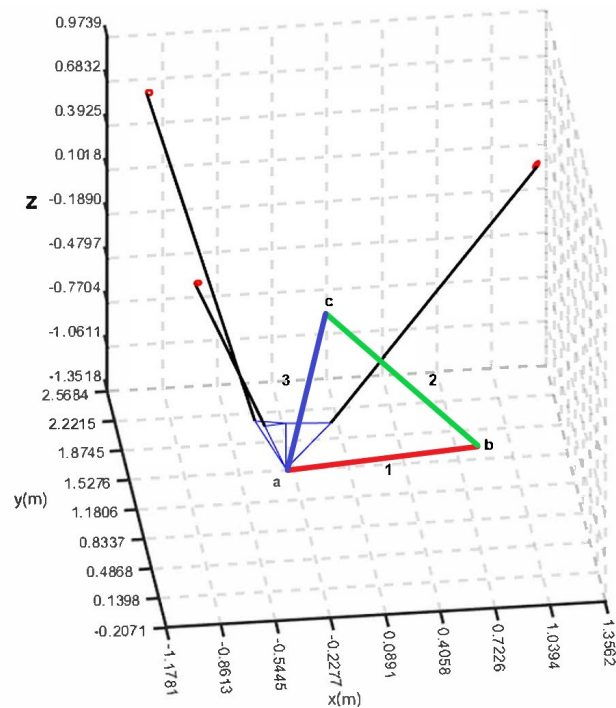
می باشد:

$$q_a = [-۰٫۳۷۹۳, ۰٫۶۶۲۷, -۰٫۸۴۷۲, ۰٫۰۵۰, ۰٫۶۰۳, ۰٫۵۷۵]^T$$

$$q_b = [۰٫۴۲۰۷, ۱٫۱۶۲۷, -۰٫۸۴۷۲, ۰٫۰۰۵, ۰٫۲۱۰, ۰٫۵۵۶]^T$$

$$q_c = [۰٫۰۲۰۷, ۱٫۰۶۲۷, -۰٫۲۴۷۲, ۰٫۰۰۹, ۰٫۲۵۵, ۰٫۵۶۲]^T$$

در اینجا مختصات کنترل پذیر $q_a = [x, y, z]$ بوده و مختصات کنترل ناپذیر $q_u = [\phi, \gamma, \theta]$ می باشد. مراحل

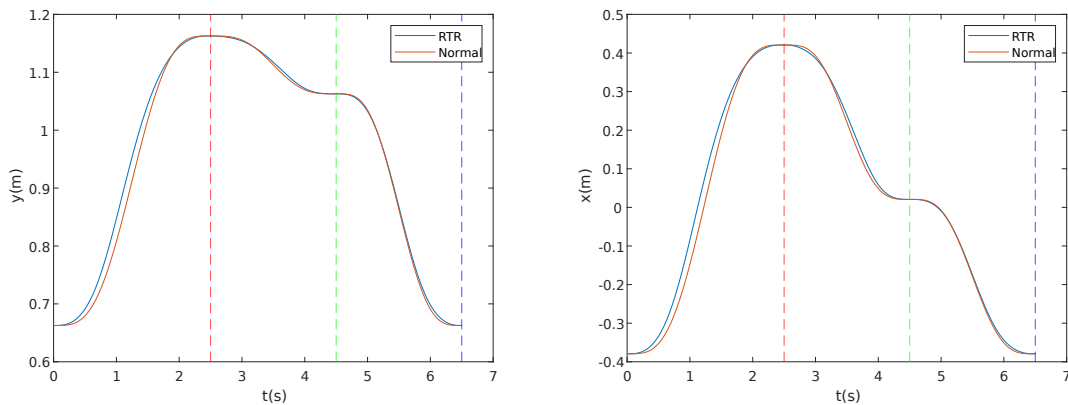


شکل ۴.۴: طراحی مسیر خط مستقیم بین سه نقطه a,b,c

که در این طراحی مسیر طبق آن انجام شده است، مطابق با الگوریتم بیان شده در بخش ۲.۲.۲.۴ بوده و طبق مراحل شبیه‌سازی بیان شده در بخش ۵.۴ انجام می‌شود. هندسه راه در هر بخش از مسیر خط مستقیم که بین دو نقطه مطابق شکل ۴.۴ طی می‌شود به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

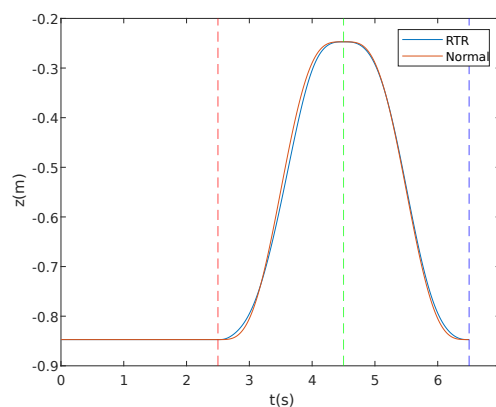
$${}^i\mathbf{p}(\mathbf{u}(t)) = {}^{i-1}\mathbf{p}(\circ) + \mathbf{u}(t)({}^i\mathbf{p}(\mathbf{T}) - {}^{i-1}\mathbf{p}(\circ)) \quad (۲۵.۴)$$

که در آن $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ مختصات کنترل‌پذیر سامانه بوده و i شماره مسیر می‌باشد. پس از انجام شبیه‌سازی مطابق با شکل ۵.۴ می‌توان دید که مختصات کنترل‌پذیر برای هر دو مسیر با خطایی اندک طی شده است. در شکل



(ب) مختصات انتقالی y

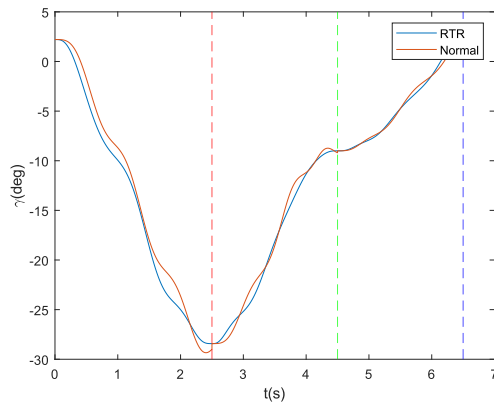
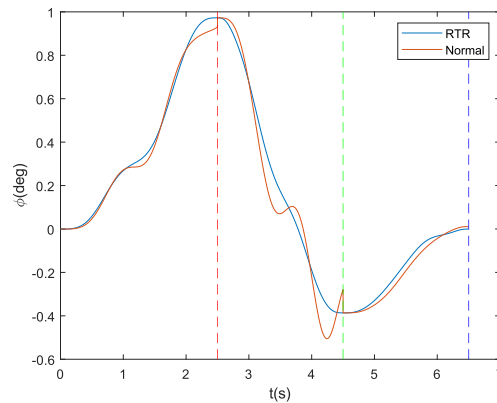
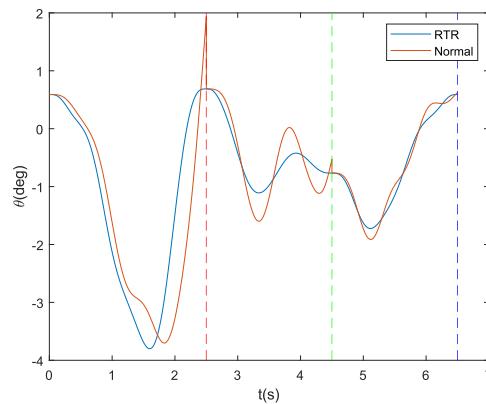
(آ) مختصات انتقالی x



(ج) مختصات انتقالی z

شکل ۵.۴: مقایسه مختصات کنترل‌پذیر در روش طراحی مسیر چند جمله‌ای زمانی استاندارد (Normal) با روش طراحی مسیر نقطه‌به‌نقطه ساکن (Rest to Rest) برای سه مسیر با هندسه خط مستقیم

۵.۴ خط چین‌های قرمز و سبز و آبی متناظر با زمان سپری شده در پایان هر یک از سه مسیر a , b , c می‌باشد. علت تفاوت بین مقادیر مختصات کنترل‌پذیر برای این دو مسیر، وجود اختلاف در محاسبه پارامتر آزاد k_0 بوده که مقدار آن برای مسیر چندجمله‌ای زمانی صفر بوده، در حالی که برای مسیر نقطه‌به‌نقطه ساکن مقداری غیر صفر محاسبه می‌شود.

(ب) مختصات زاویه‌ای γ (ا) مختصات زاویه‌ای ϕ (ج) مختصات زاویه‌ای θ

شکل ۶.۴: مقایسه مختصات کنترل‌ناپذیر در روش طراحی مسیر چندجمله‌ای زمانی استاندارد (Normal) با روش طراحی مسیر نقطه‌به‌نقطه ساکن (Rest to Rest) برای سه مسیر با هندسه خط مستقیم

اما برای مختصات کنترل‌ناپذیر و زاویه‌ای مسئله مطابق شکل ۶.۴ می‌توان مشاهده کرد که در طراحی مسیر استاندارد زمانی، به دلیل در نظر نگرفتن شرایط مرزی تعادلی برای مختصات کنترل‌ناپذیر $\mathbf{q}_{\text{u}} = [\phi, \gamma, \theta]$ مطابق با نمودارهای ۶.۴، ۶.۴ ب و ۶.۴ ج در نقاط انتهایی مسیر عدم پیوستگی رخ داده است. این موضوع در عمل به این صورت نمود پیدا می‌کند که ربات در نقاط انتهایی به تعادل نرسیده و مدتی نوسان می‌کند تا در نهایت به

تبادل برسد. این در حالی است که در طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن، مسیر طوری طراحی شده است که قیود استاتیکی در نقاط انتهایی رعایت شده، و از نوسان ربات جلوگیری می شود.

۷.۴ جمع بندی

در این بخش، ابتدا با استفاده از قانون حرکت مناسب و با در نظرگیری دینامیک فروتحریک ربات که در بخش ۱.۲.۲.۴ ارائه شده است، مسیری برای مختصات فعال q_a طراحی شده است. سپس این مسیر به عنوان ورودی به مسئله مقدار مرزی که در بخش ۲.۲.۴ صورت بندی شده است، داده شده است. با حل این مسئله با روش های بیان شده در بخش ۲.۲.۴، مختصات غیرفعال q_u و پارامترهای کمکی k محاسبه شده اند. در نهایت با داشتن مختصات تعمیم یافته و فضای پیکربندی $q = [q_a^T, q_u^T]^T$ ، طول کابل های ربات با استفاده از روابط سینماتیک وارون که در بخش ۳.۳ گفته شده اند، به دست آمده اند. در بخش ۳.۴ چالش های موجود سر راه این طراحی مسیر برای ربات های چهارکابل مورد بحث قرار گرفته اند. برای اجتناب از این چالش ها و برای اثبات عملکرد طراحی مسیر با روش نقطه به نقطه ساکن، از یک ربات فروتحریک سه کابل استفاده شده و نتایج شبیه سازی بیان شده اند. در بخش نتایج شبیه سازی ۶.۴ دو روش طراحی مسیر چند جمله ای استاندارد و روش نقطه به نقطه ساکن برای یک ربات سه کابل با هم مقایسه شده اند. نتایج نشان داده اند که روش نقطه به نقطه ساکن با رعایت قیود مرزی تعادل، نوسانات را کاهش داده، در حالی که روش استاندارد زمانی به دلیل عدم توجه به مختصات غیرفعال، قادر به رعایت قیود مرزی نبوده و این موضوع را با نوسانات ناخواسته در نقاط تعادل نشان داده است.

فصل ۵

پیشنهادها و کارهای آینده

۱.۵ مقدمه

همان طور که در بخش ۳.۴ گفته شد، روش پیاده‌سازی شده برای طراحی مسیر نقطه‌به‌نقطه ساکن، برای ربات‌های چهار کابل به دلیل وجود یک مؤلفه زاویه‌ای کنترل‌ناپذیر به‌درستی همگرا نمی‌شود، با دانش نویسنده هیچ روشی تا حال حاضر برای حل این مشکل منتشر نشده است. این در حالی است که قیود کشش مثبت کابل هم با روش‌های موجود به‌درستی در نظر گرفته نشده است. در اینجا پیشنهادها را برای حل این دو مشکل مطرح می‌کنیم.

۲.۵ روش‌های مبتنی بر انتگرال‌گیر تغییرات^۱

ماردسن^۲ [۸۱] روشی را در سال ۲۰۰۰، با نام انتگرال‌گیر تغییرات پیشنهاد داد که بر پایه اصل کمینه عمل همیلتون^۳ است، اصل همیلتون خود به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\partial \int_{t_0}^{t_f} L(q, \dot{q}) dt + \int_{t_0}^{t_f} F \cdot dq dt = 0 \quad (1.5)$$

¹variational integrators

²Marsden

³Hamilton's principle of least action

که در آن F بیانگر نیروهای خارجی وارد شده بر سامانه می‌باشد، و L لاگرانژین^۱ در مکانیک بوده و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - V(\mathbf{q}) \quad (۲.۵)$$

که در آن $M(\mathbf{q})$ ماتریس جرم سامانه و $V(\mathbf{q})$ انرژی پتانسیل سامانه می‌باشد. با گسسته‌سازی معادله همیلتون (۱.۵) می‌توان آن را به شکل زیر نوشت:

$$D_{\dot{\mathbf{q}}} L_d(\mathbf{q}_{k-1}, \mathbf{q}_k) + D_{\mathbf{q}} L_d(\mathbf{q}_k, \mathbf{q}_{k+1}) + \frac{1}{\Delta t} F_d(\mathbf{q}_{k-1}, \mathbf{q}_k) + \frac{1}{\Delta t} F_d(\mathbf{q}_k, \mathbf{q}_{k+1}) = 0 \quad (۳.۵)$$

$$L_d(\mathbf{q}_k, \mathbf{q}_{k+1}) = h L \left(\frac{\mathbf{q}_k + \mathbf{q}_{k+1}}{2}, \frac{\mathbf{q}_{k+1} - \mathbf{q}_k}{h} \right) \quad (۴.۵)$$

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - V(\mathbf{q}) \quad (۵.۵)$$

که در آن، معادله (۳.۵) به نام رابطه گسسته اولر - لاگرانژ^۲ شناخته شده، و معادله (۴.۵) شکل گسسته انتگرال لاگرانژ می‌باشد.

۱.۲.۵ مزایا

از مزیت‌های اصلی روش‌های مبتنی بر انتگرال تغییرات، باطن انطباق‌پذیر با قیود اعمال شده بر مسئله می‌باشد. به‌عنوان نمونه چنانچه فرض شود که قیود حاکم بر مسئله به شکل زیر بیان شوند:

$$\phi(\mathbf{q}) \geq 0 \quad (۶.۵)$$

¹Lagrangian ²Discrete Euler-Lagrange

آنگاه می‌توان این قیود را با اعمال شروط کارش - کوهن - تاکر^۱ به معادله (۱.۵) به شکل زیر درآورد:

$$D_2 L_d(q_{k-1}, q_k) + D_1 L_d(q_k, q_{k+1}) + \frac{1}{\nu} F_d(q_{k-1}, q_k) + \frac{1}{\nu} F_d(q_k, q_{k+1}) + N(q_{k+1})^T g_k = 0 \quad (7.5)$$

که در آن $N(q_{k+1}) = \frac{\partial \phi}{\partial q}$ ماتریس ژاکوبین بوده که جهت هل دادن قیود به بازه قابل قبول خود بر مسئله اعمال می‌شود. همچنین سه شرط اضافی زیر ناشی از شروط کارش - کوهن - تاکر برای حل مسئله در نظر گرفته می‌شود

$$g_k \geq 0 \quad (8.5)$$

$$\phi(q_{k+1}) \geq 0 \quad (9.5)$$

$$g_k^T \phi(q_{k+1}) = 0 \quad (10.5)$$

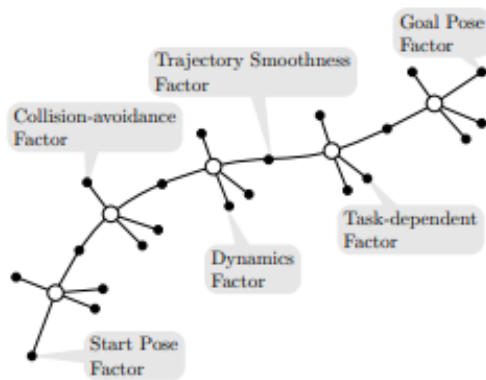
۲.۲.۵ نتیجه

همان‌طور که در بخش ۱.۲.۵ گفته شد، در کنار مزیت‌های دیگر روش انتگرال‌گیر تغییرات [۸۱] مزیتی که توجه ما را به آن جلب کرد منطبق کردن معادلات دینامیک با قیود حاکم بر مسئله بود که احتمال می‌رود پاسخی خوبی برای چالش‌های موجود ۳.۴ برای طراحی مسیر ربات فروتحریک چهار کابل باشد.

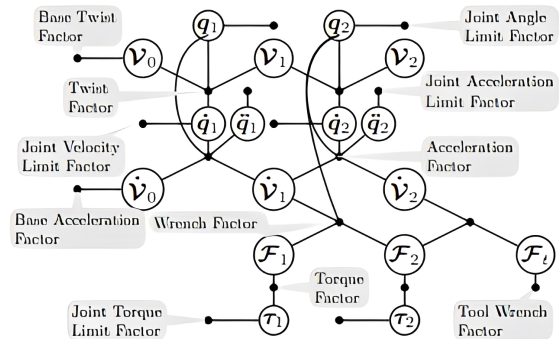
۳.۵ روش گراف‌های عامل^۲ برای طراحی مسیر

ماندی ژی^۳ و فرانک دلارت^۴ [۸۲] یک مسئله طراحی مسیر برای یک ربات سری را به روش کنترل بهینه طرح کرده و آن را با کمک روش بهینه‌سازی گراف‌های عامل حل کردند. آن‌ها از این مسئله به‌عنوان گراف‌های عامل دینامیکی^۵ یاد کرده‌اند. در این مسئله قیود دینامیک و سینماتیک یا به‌طور مختصر قیود کینودینامیک مطابق شکل ۱.۵ به شکل عامل^۶ در مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

^۱Karush-Kuhn-Tucker (KKT) ^۲Factor-Graph ^۳Mandy Xie ^۴Frank Dellaert ^۵dynamic factor graph (DFG) ^۶Factor



(ب) گراف‌های عامل برای تمام قیدها



(آ) گراف‌های عامل برای قیود دینامیکی یک ربات سریال

شکل ۱.۵: ترسیم کلی گراف‌های عامل برای یک مسئله طراحی مسیر همراه با قیود، دینامیک، سینماتیک و سایر قیدهای دیگر [۸۲]

۱.۳.۵ مزایا

روش گراف‌های عامل دینامیکی برای مسئله طراحی مسیر، از ساختار تنک^۱ مسئله بهره می‌برد. به این معنی که دینامیک و توابع هزینه باعث ایجاد یک گراف تنک و وابسته به متغیرهای خاص شده و روش گراف‌های عامل این تنکی را با استفاده از حل‌کننده‌های تنک مانند کتابخانه GTSAM برای افزایش کارایی محاسباتی انجام می‌دهند. گراف‌های عامل با استفاده از درختان بیز^۲ به صورت افزایشی ساده می‌شود تا طراحی مسیر سریع را ممکن سازد. در این حالت فقط قسمت‌هایی از نمودار که تحت تأثیر تغییرات قرار گرفته‌اند، به روزرسانی می‌شوند و از حل دوباره کل مسئله جلوگیری می‌شود. نمایش بصری گراف‌های عامل روشی بصیرت بخش برای نمایش تابع هدف^۳، هزینه‌ها و قیودها در مسئله طراحی مسیر هستند. بهینه‌سازی یک گراف عامل با استفاده از کتابخانه GTSAM، از تنک بودن و تکنیک مشتق‌گیر خودکار^۴ بهره می‌گیرد. گراف‌های عامل را می‌توان با بهره‌گیری از ویژگی توزیع‌پذیری^۵ به زیر مسائل تقسیم و حل کرد. در نهایت انعطاف‌پذیری در گراف‌های عامل باعث می‌شود، عامل‌ها یا هزینه‌های جدید را برای گسترش ساختار مسئله به راحتی اضافه کرد.

¹Sparsity²Bayes's Tree³Objective function⁴ Automatic Differentiation⁵Parallelizability

۲.۳.۵ نتیجه

بنظر می آید که با ترکیب کنترل بهینه و بهره‌گیری از روش عامل‌های گراف بتوان مسئله طراحی مسیر نقطه به نقطه ساکن را برای یک ربات فروتحریک کابلی موازی به گونه‌ای حل کرد که علاوه بر رعایت شرایط مرزی ساکن، قید کششی بودن کابل‌ها نیز در آن رعایت شود.

کتاب نامه

- [1] Alvarez, Jorge, Arceo, Juan Carlos, Armenta, Carlos, Lauber, Jimmy, and Bernal, Miguel. An extension of computed-torque control for parallel robots in ankle reeducation. *IFAC-PapersOnLine*, 52(11):1–6, 2019.
- [2] Zhang, Dan. *Parallel robotic machine tools*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [3] Liu, Kaifeng, Li, Dong, Liu, X., Zuo, Chen, and Zha, Jianjun. Study of 6-dof control of the stewart platform. *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*, 2018.
- [4] Guo, Jiangzhen, Wang, Dan, Li, Tian, Gao, Shuhua, Chen, Wuyi, and Fan, Rui. Triaxial loading device for reliability tests of three-axis machine tools. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49:398–407, 2018.
- [5] Allen, Robert JA and Trask, Richard S. An experimental demonstration of effective curved layer fused filament fabrication utilising a parallel deposition robot. *Additive Manufacturing*, 8:78–87, 2015.
- [6] Zhang, Zhaokun, Shao, Zhufeng, You, Zheng, Tang, Xiaoqiang, Zi, Bin, Yang, Guilin, Goselin, Clément, and Caro, Stéphane. State-of-the-art on theories and applications of cable-driven parallel robots. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 17(3):37, 2022.
- [7] Dierichs, Karola, Kyjánek, Ondřej, Loučka, Martin, and Menges, Achim. Construction robotics for designed granular materials: In situ construction with designed granular materials at full architectural scale using a cable-driven parallel robot. *Construction Robotics*, 3:41–52, 2019.
- [8] Taghirad, Hamid D and Nahon, Meyer. Kinematic analysis of a macro–micro redundantly actuated parallel manipulator. *Advanced Robotics*, 22(6-7):657–687, 2008.
- [9] Izard, Jean-Baptiste, Gouttefarde, Marc, Michelin, Micaël, Tempier, Olivier, and Baradat, Cedric. A reconfigurable robot for cable-driven parallel robotic research and industrial scenario proofing. in *Cable-driven parallel robots*, pp. 135–148. Springer, 2012.

- [10] Albus, J., Bostelman, R., and Dagalakis, N. New crane design utilizing six cables to suspend a load platform was first developed by the national institute of standards and technology (nist) in. *Journal of Robotic Systems*, 10(5):709–724, 1992.
- [11] Vafaei, Alaleh, Khosravi, Mohammad A, and Taghirad, Hamid D. Modeling and control of cable driven parallel manipulators with elastic cables: Singular perturbation theory. in *Intelligent Robotics and Applications: 4th International Conference, ICIRA 2011, Aachen, Germany, December 6-8, 2011, Proceedings, Part I 4*, pp. 455–464. Springer, 2011.
- [12] Pott, Andreas and Bruckmann, Tobias. *Cable-driven parallel robots*. Springer, 2013.
- [13] Proctor, Fredrick. Development of a real-time control system architecture for automated steel construction.
- [14] Dallej, Tej, Gouttefarde, Marc, Andreff, Nicolas, Michelin, Micaël, and Martinet, Philippe. Towards vision-based control of cable-driven parallel robots. in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2855–2860. IEEE, 2011.
- [15] Verhoeven, Richard. *Analysis of the workspace of tendon based Stewart platforms*. Ph.D. thesis, Duisburg, Essen, Univ., Diss., 2004, 2006.
- [16] Riechel, Andrew, Bosscher, Paul, Lipkin, Harvey, and Ebert-Uphoff, Imme. Concept paper: Cable-driven robots for use in hazardous environments. in *Proceedings of the 10th international topical meeting on robotics and remote systems for hazardous environments*, 2004.
- [17] Ming, A. and Higuchi, T. Study on multiple degree-of-freedom positioning mechanism using wires (part 2) - development of a planar completely restrained positioning mechanism. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 28(3):235–242, 1994.
- [18] Job, Jibi, Ponnann, Rikku Joseph, Chandran, Vishnu J, and Biju, N. Workspace analysis of an underconstrained cable-driven parallel robot with four cables. *Construction Robotics*, 6(2):109–119, 2022.
- [19] Zarebidoki, Mahmoud, Dhupia, Jaspreet Singh, and Xu, Weiliang. A review of cable-driven parallel robots: Typical configurations, analysis techniques, and control methods. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 29(3):89–106, 2022.
- [20] Trevisani, A. Underconstrained planar cable-direct-driven robots: A trajectory planning method ensuring positive and bounded cable tensions. *Mechatronics*, 20(1):113–127, 2010.
- [21] Albus, J., Bostelman, R., and Dagalakis, N. The NIST robocrane. *Journal of Robotic Systems*, 10(5):709–724, 1993.

- [22] Korayem, M., Yousefzadeh, M., and Susany, S. Dynamic modeling and feedback linearization control of wheeled mobile cable-driven parallel robot considering cable sag. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(11):4779–4788, 2017.
- [23] Aref, M. M., Gholami, P., and Taghirad, H. D. Dynamic and sensitivity analysis of KNTU CDRPM: A cable driven redundant parallel manipulator. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 528–533, 2008.
- [24] Yuan, Y. Y., Duan, B. Y., Wei, Q., and Du, J. L. Elimination of force singularity of the cable and cabin structure for the next generation large radio telescope. *Mechatronics*, 12(7):905–918, 2002.
- [25] Zi, B., Duan, B. Y., Du, J. L., and Bao, H. Dynamic modeling and active control of a cable-suspended parallel robot. *Mechatronics*, 18(1):1–12, 2008.
- [26] Asl, H. and Yoon, J. Stable assist-as-needed controller design for a planar cable-driven robotic system. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(6):2871–2882, 2017.
- [27] Ennaïem, F., Khedher, L., Maddouri, A., Mlika, A., Elleuch, M., and Abichou, A. Task-based design approach: Development of a planar cable-driven parallel robot for upper limb rehabilitation. *Applied Sciences*, 11(12):5635, 2021.
- [28] Zou, Y., Wang, N., Wang, X., Ma, H., and Liu, K. Design and experimental research of movable cable-driven lower limb rehabilitation robot. *IEEE Access*, 7:2315–2326, 2018.
- [29] Yang, J., Su, H., Li, Z., Ao, D., and Song, R. Adaptive control with a fuzzy tuner for cable-based rehabilitation robot. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 14(3):865–875, 2016.
- [30] Izard, J., Gouttefarde, M., Baradat, C., Dullaert, K., Janot, A., Company, O., and Guillot, F. M. Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots. *Construction Robotics*, 1(1):69–76, 2017.
- [31] Barnett, E. and Gosselin, C. Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot. *Additive Manufacturing*, 7:27–44, 2015.
- [32] Jung, J. Workspace and stiffness analysis of 3d printing cable-driven parallel robot with a retractable beam-type end-effector. *Robotics*, 9(3):65, 2020.
- [33] Zi, B., Wang, N., Qian, S., and Bao, K. Design, stiffness analysis and experimental study of a cable-driven parallel 3d printer. *Mechanism and Machine Theory*, 132:207–222, 2019.

- [34] Abdelaziz, S., Barbé, L., Renaud, P., de Mathelin, M., and Bayle, B. Control of cable-driven manipulators in the presence of friction. *Mechanism and Machine Theory*, 107:139–147, 2017.
- [35] Borgstrom, P. H., Jordan, B. L., Batalin, M. A., Kaiser, W. J., Sukhatme, G. S., and Vinayak, A. NIMS-PL: A cable-driven robot with self-calibration capabilities. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(5):1005–1015, 2009.
- [36] Tanaka, M., Seguchi, Y., and Shimada, S. Kineto-statics of skycam-type wire transport system. pp. 689–694, 1988.
- [37] Abdelaziz, S., Barbé, L., Renaud, P., de Mathelin, M., and Bayle, B. Control of cable-driven manipulators in the presence of friction. *Mechanism and Machine Theory*, 107:139–147, 2017.
- [38] Seriani, M., Seriani, S., and Gallina, P. Workspace optimization for a planar cable-suspended direct-driven robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34:1–7, 2015.
- [39] Trevisani, A. Underconstrained planar cable-direct-driven robots: A trajectory planning method ensuring positive and bounded cable tensions. *Mechatronics*, 20(1):113–127, 2010.
- [40] Gagliardini, L., Caro, S., Gouttefarde, M., Wenger, P., and Girin, A. A reconfigurable cable-driven parallel robot for sandblasting and painting of large structures. pp. 275–291, 2014.
- [41] Cuvillon, L., Weber, X., and Gangloff, J. Modal control for active vibration damping of cable-driven parallel robots. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 12(5), 2020.
- [42] Alias, C., Nikolaev, I., Correa Magallanes, E. G., and Noche, B. An overview of warehousing applications based on cable robot technology in logistics. pp. 232–239, 2018.
- [43] Horoub, M. M., Hassan, M., and Hawwa, M. A. Workspace analysis of a Gough-Stewart type cable marine platform subjected to harmonic water waves. *Mechanism and Machine Theory*, 120:314–325, 2018.
- [44] Sergiienko, N. Y., Cazzolato, B. S., Ding, B., and Arjomandi, M. An optimal arrangement of mooring lines for the three-tether submerged point-absorbing wave energy converter. *Renewable Energy*, 93:27–37, 2016.
- [45] Abdallah, F. B., Azouz, N., Beji, L., Hima, S., and Abichou, A. Modeling and control of an aerial robocrane using a wire driven system. pp. 508–513, 2018.

- [46] Takemura, F., Enomoto, M., Tanaka, T., Denou, K., Kobayashi, Y., and Tadokoro, S. Development of the balloon-cable driven robot for information collection from sky and proposal of the search strategy at a major disaster. pp. 658–663, 2005.
- [47] Abdallah, F. B., Azouz, N., Beji, L., and Abichou, A. Modeling of a heavy-lift airship carrying a payload by a cable-driven parallel manipulator. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(4):1729881419861769, 2019.
- [48] Billette, G. and Gosselin, C. Producing rigid contacts in cable-driven haptic interfaces using impact generating reels. in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 307–312. IEEE, 2009.
- [49] Brau, E., Gosselin, F., and Lallemand, J. P. Design of a singularity free architecture for cable driven haptic interfaces. pp. 208–213, 2005.
- [50] Weber, Xavier, Cuvillon, Loic, and Gangloff, Jacques. Active vibration canceling of a cable-driven parallel robot in modal space. in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1599–1604. IEEE, 2015.
- [51] Capua, Alon, Shapiro, Amir, and Shoval, Shraga. Spiderbot: A cable suspended mobile robot. in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3437–3438. IEEE, 2011.
- [52] Wang, Deri, Ahn, Jeongdo, Jung, Jinwoo, Seon, Jeong-An, Park, Jong-Oh, Ko, Seong Young, and Park, Sukho. Winch-integrated mobile end-effector for a cable-driven parallel robot with auto-installation. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15:2355–2363, 2017.
- [53] Bosscher, Paul, Williams, Robert L, and Tummino, Melissa. A concept for rapidly-deployable cable robot search and rescue systems. in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 47446, pp. 589–598, 2005.
- [54] Lynch, Kevin M. Underactuated robots. in *Encyclopedia of Systems and Control*, pp. 1–10. Springer, 2014.
- [55] Idà, Edoardo, Briot, Sébastien, and Carricato, Marco. Natural oscillations of underactuated cable-driven parallel robots. *IEEE Access*, 9:71660–71672, 2021.
- [56] Idà, Edoardo, Bruckmann, Tobias, and Carricato, Marco. Rest-to-rest trajectory planning for underactuated cable-driven parallel robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 35(6):1338–1351, 2019.

- [57] Xiang, Sheng, Gao, Haibo, Liu, Zhen, and Gosselin, Clement. Dynamic transition trajectory planning of three-dof cable-suspended parallel robots via linear time-varying mpc. *Mechanism and Machine Theory*, 146:103715, 2020.
- [58] Hwang, Sung Wook, Bak, Jeong-Hyeon, Yoon, Jonghyun, and Park, Jong Hyeon. Oscillation reduction and frequency analysis of under-constrained cable-driven parallel robot with three cables. *Robotica*, 38(3):375–395, 2020.
- [59] Idá, Edoardo, Berti, Alessandro, Bruckmann, Tobias, and Carricato, Marco. Rest-to-rest trajectory planning for planar underactuated cable-driven parallel robots. in *Cable-Driven Parallel Robots: Proceedings of the Third International Conference on Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 207–218. Springer, 2018.
- [60] Carricato, Marco and Merlet, Jean-Pierre. Stability analysis of underconstrained cable-driven parallel robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(1):288–296, 2012.
- [61] Ida, Edoardo. Dynamics of undeactuated cable-driven parallel robots. 2021.
- [62] VDI. Design methodology for mechatronic systems (vdi richtlinie 2206). tech. rep., Berlin, 2004.
- [63] Pott, Andreas, Mütherich, Hendrick, Kraus, Werner, Schmidt, Valentine, Miermeister, Philipp, and Verl, Alexander. Ipanema: a family of cable-driven parallel robots for industrial applications. *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 119–134, 2013.
- [64] Khalilpour, S Ahmad, Hassani, A, Khorambakht, R, Zahedi, AR, Bataleblu, A, and Taghirad, HD. Joint space control of a deployable cable driven parallel robot with redundant actuators. in *2022 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 748–754. IEEE, 2022.
- [65] Ida, Edoardo and Carricato, Marco. Static workspace computation for underactuated cable-driven parallel robots. *Available at SSRN 4530720*.
- [۶۶] زاده، محمد سواد. طراحی و پیاده‌سازی مسیر بهینه زمانی بر خط ربات کابلی معلق ARAS-Cam. <http://kntu.ac.ir/>. زمستان ۱۳۹۸.
- [67] Item pk243a1a-sg18, stepper motor. <https://catalog.orientalmotor.com/item/all-categories-legacy-products/categories-pk-series-2-phase-stepping-motors-legacy-/pk243a1a-sg18>, 2022. Accessed on August 17, 2023.

- [68] Spidercam GmbH. Home - Spidercam GmbH. <https://www.spidercam.tv/>. Accessed: Insert Date.
- [69] Seifried, Robert. Dynamics of underactuated multibody systems. *Switzerland: Springer*, 2014.
- [70] Díaz, Ernesto Olguín, Díaz, Olguín, and Ditzinger. *3D Motion of Rigid Bodies*. Springer, 2019.
- [71] Abbasnejad, Ghasem and Carricato, Marco. Direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with n cables. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(2):468–478, 2015.
- [72] Carricato, Marco. Direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with three cables. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 5(3):031008, 2013.
- [73] Carricato, Marco and Abbasnejad, Ghasem. Direct geometrico-static analysis of underconstrained cable-driven parallel robots with 4 cables. in *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 269–285. Springer, 2012.
- [74] Lynch, Kevin M and Park, Frank C. *Modern robotics*. Cambridge University Press, 2017.
- [75] Mirjalili, Amir Saman. Arascam2: An underactuated cable driven parallel robot, controlled using four cable. https://github.com/AmirSamanMirjalili/ArasCam2_Latest, 2023.
- [76] Golub, Gene H and Van Loan, Charles F. *Matrix computations*. JHU press, 2013.
- [77] Spong, Mark W, Hutchinson, Seth, and Vidyasagar, Mathukumalli. *Robot modeling and control*. John Wiley & Sons, 2020.
- [78] Gosselin, Clément. Global planning of dynamically feasible trajectories for three-dof spatial cable-suspended parallel robots. in *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 3–22. Springer, 2012.
- [79] Ascher, Uri M and Petzold, Linda R. *Computer methods for ordinary differential equations and differential-algebraic equations*, vol. 61. Siam, 1998.
- [80] Piazzzi, Aurelio and Visioli, Antonio. Optimal noncausal set-point regulation of scalar systems. *Automatica*, 37(1):121–127, 2001.
- [81] Marsden, Jerrold E and West, Matthew. Discrete mechanics and variational integrators. *Acta numerica*, 10:357–514, 2001.

-
- [82] Xie, Mandy and Dellaert, Frank. Batch and incremental kinodynamic motion planning using dynamic factor graphs. *arXiv preprint arXiv:2005.12514*, 2020.

