دانشکده مهندسی مکانیک

طراحی مسیر بهینه برای ربات کابلی فضایی معلق

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

نام دانشجو

مجتبی ریاحی وزواری

اساتید راهنما:

دکتر علی قدوسیان

دکتر امین نیکوبین

شهریور ماه ۱۳۹۳

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه

دانشکده مهندسی مکانیک

نام دانشجو: مجتبی ریاحی وزواری

عنوان پایان‌نامه: طراحی مسیر بهینه برای ربات کابلی فضایی معلق

تاریخ دفاع: ۱۳۹۳/۰۷/۲۰

رشته مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنمای اول	دکتر علی قدوسیان	دانشیار	دانشگاه سمنان	
۲	استاد راهنمای دوم	دکتر امین نیکوبین	استادیار	دانشگاه سمنان	
۳	استاد مشاور				
۴	استاد مشاور				
۵	استاد مدعو خارجی				
۶	استاد مدعو خارجی				
۷	استاد مدعو داخلی				
۸	استاد مدعو داخلی				

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب مجتبی ریاحی وزواری به شماره دانشجویی ۹۱۱۱۱۶۹۰۱۲ دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. درصورت 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 ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

چکیده

هدف این پایان‌نامه یافتن مسیر بهینه با کمترین تلاش، جهت جابجایی مجری نهایی ربات سه کابلی فضایی، در فضای کاریش می‌باشد. جهت این کار، ابتدا به مدلسازی سینماتیکی و دینامیکی ربات سه کابلی فضایی پرداخته می‌شود، سپس شبیه‌سازی و استخراج نتایج با دو روش مستقیم و غیر مستقیم انجام می‌گیرد. روش حل غیرمستقیم بر اساس روش حساب تغییرات می‌باشد. شرایط لازم بهینگی به منظور حداقل شدن گشتاور بین دو نقطه داده شده و با استفاده از اصل مینیمم پونتریاگن استخراج می‌گردد. این شرایط بهینگی، تشکیل یک مساله مقدار مرزی دو نقطه‌ای می‌دهد که با الگوریتم‌های عددی قابل حل می باشد. روش مستقیم، از ترکیب یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری و یک میانیاب چندجمله‌ای، به همراه معادلات ربات ایجاد می‌گردد. این پایان‌نامه برای روش مستقیم، دو الگوریتم بهینه‌گر مسیر ارائه می‌دهد، که اولی، از روش فراابتکاری بهینه‌سازی جام اعداد و میانیاب اسپیلاین مرتبه سه تشکیل شده و دومی، از روش فراابتکاری الگوریتم مثلث بهینه‌گر و میانیاب چندجمله‌ای درجه چهار ایجاد شده است. در ترکیب اولی، مقادیر میانی مسیر در سه جهت z,y,x به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شود و ترکیب دومی، ثابت‌های مشخصی از چندجمله‌ای‌ها را، متغیرهای طراحی جهت بهینه کردن مسیر، قرار می‌دهد. در انتها با مثال‌هایی کارایی مناسب دو روش مستقیم پیشنهادی در مقایسه با روش غیرمستقیم، که جواب دقیق را می‌دهد، مشخص می‌شود.

واژه‌های کلیدی: طراحی مسیر بهینه، ربات کابلی، بهینه‌سازی جام اعداد، الگوریتم مثلث بهینه‌گر، میانیاب چندجمله‌ای

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- معرفی ربات‌های سری، موازی و کابلی ۲

۱-۲-۱- ربات سری ۲

۱-۲-۲- ربات موازی ۳

۱-۲-۳- ربات کابلی ۵

۱-۳- مثال‌هایی از کاربرد ربات‌های کابلی ۹

۱-۴- مروری بر پایان‌نامه ۱۱

فصل ۲: مروری بر منابع ۱۳

۲-۱- مقدمه ۱٤

۲-۲- سابقه علمی مکانیزم‌های ارائه شده برای ربات‌های کابلی ۱٤

۲-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه استاتیک، سینماتیک و دینامیک ۲۰

۲-۴- روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری و مسائل بهینه سازه‌ای ۲۱

۲-۵- طراحی مسیر بهینه برای ربات‌ها ۲٤

فصل ۳: تحلیل سینماتیک، استاتیک و دینامیک ربات سه کابلی فضایی ۲۸

۳-۱- مقدمه ۲۹

۳-۲- توصیف مکانیزم ربات سه کابلی فضایی ۲۹

۳-۳- استخراج روابط سینماتیک ۳۰

۳-۴- استخراج روابط استاتیک ۳۳

۳-۵- شبیه‌سازی روابط سینماتیک و استاتیک ۳٤

۳-۶- استخراج روابط دینامیک ۳۸

۳-۷- شبیه‌سازی روابط دینامیک ٤۲

فصل ۴: طراحی مسیر بهینه با روش بهینه‌سازی جام اعداد و میانیاب اسپیلاین مرتبه سه ٤۵

۴-۱- مقدمه ٤٦

۴-۲- روش غیرمستقیم ٤٦

۴-۲-۱- مقدمه ٤٦

۴-۲-۲- کنترل بهینه ٤۷

۴-۲-۳- روش کنترل بهینه ربات کابلی فضایی ٤۹

۴-۳- روش مستقیم ۵۰

۴-۳-۱- میانیاب اسپیلاین درجه سه ۵۰

۴-۳-۲- روش فراابتکاری بهینه‌سازی جام اعداد ۵۳

۴-۳-۳- الگوریتم بهینه‌گر مسیر ٦٦

فصل ۵: طراحی مسیر بهینه با روش بهینه‌سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر و میانیاب چندجمله‌ای درجه چهار ٦٨

۵-۱- مقدمه ٦٩
۵-۲- میانیاب چندجمله‌ای درجه چهار ٦٩
۵-۳- روش بهینه‌سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر ٧١
۵-۳-۱- شرح روش ٧١
۵-۳-۲- مثال‌ها ٧٤
۵-۴- الگوریتم بهینه‌گر مسیر ٨١

فصل ۶: شبیه سازی طراحی مسیر بهینه ربات کابلی معلق ٨٤

۶-۱- مقدمه ٨٥
۶-۲- شبیه‌سازی الگوریتم بهینه‌گر مسیر، فصل چهار ٨٥
۶-۲-۱- مثال یک ٨٥
۶-۲-۲- مثال دو ٨٨
۶-۳- شبیه‌سازی الگوریتم بهینه‌گر مسیر، فصل پنج ٩١
۶-۳-۱- مثال یک ٩٢
۶-۳-۲- مثال دو ٩٤

فصل ۷: نتیجه گیری ٩٨

مراجع ١٠١

پیوست‌ها ١٠٨

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

یکی از اساسی‌ترین مسائل در رباتیک، طراحی سیستم‌های مکانیکی به منظور جابجایی دقیق بار می‌باشد. با وجودی که کاربردهای گسترده، متنوع و رو به افزایشی از بازوهای مکانیکی ماهر وجود دارد اما در همه این کاربردها نیازهای اساسی مشترکی وجود دارند که میتوان به گزینه‌های زیر اشاره نمود:

- سیستم مکانیکی باید از ساختار ساده‌ای برخوردار باشد تا بتوان با کمترین هزینه آنرا ساخت.
- سیستم از نقطه نظر مصرف انرژی باید به صورت بهینه طراحی گردد تا کمترین میزان مصرف انرژی را به خصوص در کاربردهای موبایل داشته باشد.
- برای بعضی کاربردها قابلیت جابجایی بارهای سنگین مورد نیاز است.
- مجری نهایی باید بتواند سرعت‌ها وشتاب‌های بزرگی را بدست دهد.
- مفاهیم طراحی را بتوان برای ابعاد میکرو تا بزرگ تعمیم داد.

در این فصل ابتدا ویژگی‌ها و مزایای ربات‌های سری، موازی و کابلی، بیان می‌گردد. سپس با توجه به مزایای ربات‌های کابلی، به کاربرد این ربات‌ها در صنایع مختلف پرداخته می‌شود.

۱-۲- معرفی ربات‌های سری، موازی و کابلی

۱-۲-۱- ربات سری[1]

اولین نسل ربات‌های صنعتی امروزی از بازوهای صلبی تشکیل شده‌اند که با چندین مفصل به شکل متوالی به یکدیگر متصل شده‌اند. این ساختار متداول یک بازوی مکانیکی سری یا زنجیره باز را تشکیل می‌دهد. در چنین ساختارهایی با توجه به شکل (۱-۱) عنصر نهایی با یک زنجیره سینماتیکی مستقل به پایه متصل است. در بازوهای مکانیکی ماهر سری معمولا عملگرها به صورت سری در هر مفصل قرار گرفته و یک درجه آزادی در آن مفصل ایجاد می‌کنند. این بازوهای مکانیکی هم اکنون از پرکاربردترین بازوهای مکانیکی ماهر در صنعت رباتیک می‌باشند. از نقطه نظر طراحی و ساخت، این ربات‌ها می‌توانند بسته به نوع تحریک مفاصل،

[1] Serial Robot

ساده یا پیچیده باشند. روش‌های معمول تحریک در این ربات‌ها استفاده از سیلندرهای هیدرولیکی، پنوماتیکی و یا موتورهای الکتریکی می‌باشد. قابلیت مدل سازی مناسب به همراه توان محاسباتی کم مورد نیاز در این گونه ربات‌ها باعث شده تا این ربات‌ها جای خود را در بسیاری از کاربردها باز نمایند. در نتیجه برای جابجایی بارهای سنگین، بازوهای خیلی قوی مورد نیاز است که این خود باعث بالاتر رفتن مصرف انرژی می‌شود. به همین دلیل قابلیت جابجایی بار در این گونه ربات‌ها محدود می‌باشد. در ربات‌های سری تمامی مفاصل باید کار کنند. اگر یک مفصل از کار بیفتد یا آزاد گذاشته شود، ساختار ربات به هم می‌خورد. در این حالت ربات قادر به حفظ موقعیت خود و انجام کار تعریف شده‌اش نخواهد بود. در این ربات‌ها رسیدن به سرعت‌ها و شتاب‌های بالا امکانپذیر است. به خصوص وقتی که در کاربرد مورد نظر، فضای کاری محدود باشد. البته باید دقت داشت که در فضاهای کاری بزرگ به دلیل استفاده از بازوهای بلند در این ربات‌ها، باید تاثیر خمش و ارتعاشات منتجه را در نظر گرفت.

شکل (۱-۱) ربات سری KUKA KR 360 [۱]

۱-۲-۲- ربات موازی[1]

با گسترش روز افزون استفاده از ربات‌ها در کاربردهای مختلف، نیاز به ساختارهایی که محدودیت‌های ربات-های سری را نداشته و ویژگی‌های خاص نظیر دقت و شتاب زیاد و قابلیت حمل بار زیاد را داشته باشند،

[1] Parallel Robot

بیش از پیش حس می‌شود. راه‌حل در نگاه دوباره به طبیعت و الهام گرفتن از آن است. همان گونه که انسان‌ها برای حرکت‌های دقیق و یا برداشتن اجسام سنگین از هر دو دست خود استفاده می‌کنند، میتوان چنین تصور کرد که استفاده از زنجیره‌های سینماتیکی بسته که چند بازو با هم و به صورت موازی در حرکت دخیل باشند، می تواند پاسخی مناسب برای این مشکل باشد. به همین دلیل در سال‌های اخیر مطالعات و تحقیقات فراوانی در زمینه زنجیره‌های سینماتیکی بسته و ربات‌های موازی صورت پذیرفته است. ربات موازی یک مکانیزم با زنجیره سینماتیکی بسته است که سکوی متحرک به وسیله چند زنجیره مستقل سینماتیکی به پایه متصل است. بدین ترتیب، یک ربات موازی شامل یک سکوی ساکن که توسط چند بازو به سکوی متحرک متصل است، می باشد. این بازوها غالبا شامل یک محرک کشویی بوده که توسط مفاصل کروی و یا چرخنده به سکوهای ثابت و متحرک متصل می‌باشد.

ربات‌های موازی نسبت به ربات‌های سری چندین مزیت آشکار دارند. یکی از ویژگی‌های ربات‌های موازی دارا بودن چند حلقه بسته سینماتیکی است. با این فرض، یک ربات موازی سختی بیشتری را در قیاس با ربات‌های سری، خواهد داشت. در نتیجه میتوان نیروهای بزرگتری را به آن اعمال کرد و سرعت و شتاب‌های بالاتری را انتظار داشت. از طرف دیگر در این ربات‌ها هر شاخه در تحمل قسمتی از بار سهیم است و این باعث می‌شود تا سیستم در عین مصرف انرژی کمتر، بتواند بارهای سنگین‌تری را جابجا نماید. در این مکانیزم‌ها محرک‌ها معمولا نزدیک پایه یا روی آن نصب می‌شوند، بنابراین بازوها سبکتر از بازوهای ساختار سری مشابه خواهند بود.

مهمترین ضعف ربات‌های موازی محدودیت در فضای کاری آن‌هاست. این محدودیت به دلیل برخورد بازوها به یکدیگر می‌باشد. در ضمن این ربات‌ها در موقعیت‌های تکین، سختی خود را از دست می‌دهند و به همین دلیل ممکن است یک درجه آزادی غیر قابل کنترل بدست آورند و در نتیجه حرکت‌های غیر دلخواهی را بدست دهند. همچنین در این ربات‌ها سیستم کنترلی، بدلیل تزویج شدید در دینامیک و مشکل محاسباتی در سینماتیک مستقیم که ممکن است پاسخ‌های زیادی داشته باشد، پیچیده است. از نقطه نظر عملی مهمترین مساله در این ربات‌ها نیاز به مفاصل کروی با گستره زاویه‌ای بزرگ و نیروهای تکیه‌گاهی بزرگ می‌باشد. علیرغم بعضی کاربردهای صنعتی برای این ربات‌ها، منصفانه است که بگوییم اشتیاق اولیه در استفاده از این ربات‌ها فروکش کرده است زیرا مشکلات عملی طراحی در ساخت این ربات‌ها سخت‌تر و پیچیده‌تر از آن است که تصور می‌شد. در شکل (۱-۲) نمونه‌ای از یک ربات موازی نشان داده شده است.

شکل (۱-۲) ربات موازی Moog 6 DOF [۲]

۱-۲-۳- ربات کابلی[1]

ربات‌های موازی علیرغم همه مزایایی که دارند، به دلیل محدودیت در فضای کاری، مشکلات عملی طراحی و هزینه گزاف ساخت، توفیق چندانی در کاربردهای مختلف صنعتی شبیه به آنچه در مورد ربات‌های سری رخ داد، نیافتند. برای غلبه بر این مسایل از حدود سه دهه قبل نگرش جدیدی در طراحی و ساخت ربات-های موازی رخ داد [۳]. این نگرش که علاوه بر رفع محدودیت‌های ربات‌های موازی، هدف کاهش هزینه-های طراحی و ساخت را نیز دنبال می‌کرد، مبتنی بر استفاده از کابل به جای بازوهای صلب بود. با استفاده از این ساختار موازی جدید که تنها از نیروی کششی کابل استفاده می‌کند، میتوان ربات موازی طراحی کرد که از نظر وزن، قابل مقایسه با ربات‌های دارای بازوی صلب نیست. به این ترتیب جرم متحرک ربات بسیار کاهش می‌یابد. به عنوان یک نتیجه میتوان با نیروی یکسان، شتاب بیشتر و سرعت‌های بالاتری را به مجری نهایی بخشید علاوه بر این به دلیل ماهیت موازی بودن ربات، مکانیزم قابلیت حمل بار بیشتری دارد.

بدین ترتیب بازوی مکانیکی موازی کابلی، مکانیزم حلقه بسته‌ای است که قسمت متحرک آن توسط کابل‌ها به پایه متصل است و کابل‌ها به دور یک استوانه دوار که به پایه ساکن ثابت شده است، می‌پیچند. پس در این ربات‌ها تنها قطعات متحرک عبارتند از کابل‌ها و صفحه متحرک. این نگرش که نخستین بار حدود ۳۰ سال پیش پیشنهاد شد، می‌تواند به عنوان یک ترکیب از ایده‌هایی که گفته شد (سری و موازی) در نظر گرفته شود. آنها از هر کدام از این ایده‌ها یک سری ویژگی‌های خاص را به ارث می‌برند. در واقع این ربات‌ها

[1] Cable Robot

از نقطه نظر مصرف انرژی بسیار پر بازده می‌باشند زیرا محرک‌ها ثابت بوده و هر کدام از این محرک‌ها در حمل قسمتی از بار سهیم می‌باشند. به عنوان یک نتیجه، این ربات‌ها را برای حمل و انتقال بارهای سنگین شبیه به روبوکرین[1] مناسب می‌سازد [۵و۴]. علاوه بر این آنها می‌توانند سرعت‌ها وشتاب‌های بالایی را به دست دهند. از نقطه نظر فضای کاری نیز این ربات‌ها می‌توانند برای فضاهای کاری بسیار بزرگ (تا ۵۰۰ متر شبیه به دوربین عنکبوتی[2]) مورد استفاده قرار گیرند.

در این ربات‌ها موقعیت مجری نهایی با تغییر طول کابل‌ها تغییر می‌کند، حال از آنجا که کابل‌ها فقط می توانند نیروی کششی اعمال کنند و قادر به اعمال نیروی فشاری و یا گشتاور نیستند پس نمیتوان مستقیما و بدون هیچ تغییری از مکانیزم‌های موازی قبلی استفاده کرد. برای آن که کابل‌ها در تمام جهت‌های فضای کاری در حال کشش باشند باید حداقل از یک محرک کابلی افزون بر درجات آزادی مکانیزم استفاده کرد و یا شبیه به روبوکرین‌ها از اعمال یک نیروی منفعل بر مجری نهایی سود برد. بر این مبنا ربات‌های کابلی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: مقید کامل و مقید ناقص [۶].

در ربات‌های کابلی که به صورت کامل مقید هستند درجات آزادی سیستم به وسیله کابل‌ها محدود می‌شود. بدین معنی که موقعیت دقیق مجری نهایی با دانستن اندازه طول کابل‌ها به دست می‌آید. این نوع از ربات-های کابلی با افزونگی در محرک‌ها طراحی می‌شوند به عبارت دیگر در این نوع تعداد کابل‌های فعال از تعداد درجه آزادی سیستم بیشتر است. دلیل استفاده از افزونگی در محرک‌ها اطمینان از تحت کشش بودن کابل-ها در تمام محدوده حرکتی ربات در فضای کاری است.

در مکانیزم‌هایی که به صورت ناقص مقید می‌باشند کشش کابل‌ها توسط یک نیروی منفعل شبیه به جاذبه تامین می‌شود. این بدان معنی است که در این نوع از ربات‌های کابلی موقعیت مجری نهایی بیشتر تحت تاثیر اغتشاش قرار می‌گیرد.

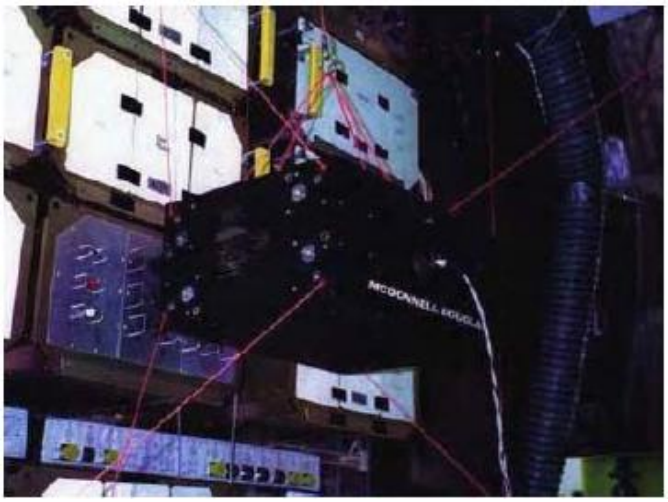
یک مثال از ربات‌های کابلی مشهور مقید کامل، ربات کابلی شارلوت می‌باشد (شکل (۱-۳))، که توسط شرکت مک دانل داگلاس (بوئینگ امروزی) توسعه داده شده است [۷]. این مکانیزم موازی ۸ کابله برای انجام آزمایشات روی ماژول اسپیس-هاب۳[3] در ایستگاه فضایی به کار می‌رود. شارلوت برای سفرهای فضایی ایده‌ال است. شکل مکعبی آن اجازه تحرک بیشتری را می‌دهد ضمن اینکه به دلیل وزن کم، هزینه فرستادن آن به فضا زیاد نخواهد بود. ربات روبوکرین که از جمله مکانیزم‌های کابلی پرکاربرد می‌باشد از نوع مقید ناقص است. این ربات جهت جبران ناتوانی کابل در تحمل نیروی فشاری، مکانیزم استوارت-گو را برعکس

1 robocrane

2 skycam

3 space-hube 3

استفاده می‌کند تا نیروی گرانش زمین، کابل‌ها را در حال کشش نگه دارد. مکانیزم موازی شش کابله استفاده شده در این طراحی باعث می‌شود تا این مکانیزم ایمن‌تر و کنترل‌پذیرتر از سایر کرین‌های معمول باشد [۳]. نمونه بهبود یافته آن در جنگ خلیج فارس به منظور اطفای حریق چاه‌های نفت کویت بکار گرفته شد [۶]. اخیرا نیز ان‌آی‌اس‌تی[1] این فن‌آوری را در کاربردهای مربوط به بازیافت پسماندهای هسته‌ای و سمی به کار برده است. این طراحی گرچه برای وظایف مربوطه مناسب است اما همیشه نیازمند یک سکوی سنگین جهت افزایش نیروی گرانش است. استفاده از نیروی گرانش، گذاشتن کانتینر بر روی کشتی را مناسب می‌نماید اما جهت کاربردهایی مثل ماشین کاری موجب کاهش نسبت بار قابل حمل بر وزن متحرک می‌شود که مزیت ربات کابلی در این مورد را کمرنگ‌تر می‌کند. همچنین چنین ساختاری تنها در شتاب‌ها و اغتشاش‌های کم می‌تواند پاسخگو باشد. در واقع در طراحی این ربات، مهارت ربات فدا شده است. در طرح تلسکوپ‌های غول پیکر رادیویی بین المللی نیز جهت اطمینان از کشش کابل‌ها، از یک بالن سبک‌تر از هوا استفاده شده است که مجری نهایی را به طرف بالا می‌کشد [۵].



شکل (۱-۳) ربات کابلی شارلوت مورد استفاده در آزمایشهای فضایی [۷]

همان‌گونه که تاکنون بیان گردید، اصلی‌ترین هدف در ربات‌های سری حرکت دقیق یک جسم می‌باشد، درحالی که در یک ربات موازی این وظیفه تحمل بار می‌باشد. از بعضی جهات میتوان گفت که ربات‌های کابلی می‌توانند هر دو منظور را براورده سازند. از نقطه نظر علمی در این ربات‌ها بر خلاف ربات‌های موازی به مفاصل کروی نیازی نیست اما ساخت نقاط اتصال هنوز یک چالش است. نقطه‌ای که کابل از استوانه دوار خارج می‌شود باید به خوبی تعریف شده و بتواند همه جهت‌ها را با کمترین اصطکاک بدست دهد. مشکل

[1] NIST

اصلی دیگر کنترل دقیق طول کابل می‌باشد که برای رسیدن به این کنترل دقیق، کابل می‌تواند دور یک استوانه با یک وضعیت منظم و از پیش تعیین شده بپیچد. یک راه‌حل جایگزین می‌تواند استفاده از سیستم-های درایو خطی باشد [۸]. با توجه به این مشکلات ارتباط مستقیمی بین دقت موقعیتی مورد نیاز و پیچیدگی سیستم مکانیکی وجود دارد. در صورتی که دقت، موضوع مهمی نباشد طراحی مکانیکی می‌تواند به صورت ساده‌ای انجام پذیرد.

۱-۲-۳-۱- مزایای ربات‌های کابلی

- نسبت بار به وزن زیاد و دارا بودن حداکثر بازده
- آسان بودن مونتاژ کردن اجزای ربات
- قابلیت تعویض و تعمیر آسان قطعات
- بزرگ بودن فضای کاری
- قابلیت حمل و نقل آسان ربات: به دلیل وزن کم‌شان، به راحتی قابل انتقال هستند.
- پایین بودن مصرف انرژی: به دلیل وزن کم قسمت‌های متحرک (کابل‌ها) و سنگینی قسمت‌های ثابت (موتورها و کنترلرها)، این نوع ربات‌ها دارای خواص اینرسی پایینی هستند که باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود.
- سختی متغیر: با تنظیم میزان انعطاف پذیری کابل‌ها بنابر وظیفه‌ای که از ربات انتظار میرود، می-توان به سختی‌های متفاوتی دست یافت.
- قابلیت شکل‌دهی مجدد: هندسه ربات به آسانی با تغییر موقعیت کابل‌ها و محرک‌ها عوض شده و می‌تواند وظایف متفاوتی انجام دهد.
- پایین بودن هزینه: از نظر نصب و راه اندازی و همچنین از نظر تعمیرات
- قابلیت استفاده در محیط‌های خطرناک و آلوده: به دلیل اینکه موتورها و تجهیزات الکترونیکی دور از مجری نهایی و کابلها قرار دارند مانند استفاده از آنها در داخل تانک‌های مخصوص زباله‌های اتمی.

۱-۲-۳-۲- معایب ربات‌های کابلی

- زمان زیاد کالیبراسیون اولیه
- دقت متوسط: به دلیل کشیده شدن کابل‌ها، گود افتادن و ارتعاش آن‌ها و عوامل دیگر

- نیروی کاربری محدود: نیروهای رو به پایین به مقدار وزن خود ربات محدود است و حتی دیگر مسیرها بوسیله هندسه ربات محدود می‌شود.
- پیچیدگی‌های کنترلی: چرخش موتورها با توجه به تغییر طول کابل‌ها، نیاز به حسگرهای[1] زیادی دارد که این موضوع کار را به لحاظ کنترل پیچیده می‌نماید.
- طراحی کنترلر: به منظور دست‌یابی به ویژگی‌های مطلوب ربات‌های قدیمی، کنترلرهای جدید مورد نیاز هستند تا توانایی ترکیب کردن محدودیت‌هایی که از جانب کابل‌ها بوجود می‌آیند را داشته باشند. محدودیت‌هایی مثل قید تک جهت بودن کابل‌ها (کششی بودن)، تداخل کابل‌ها، ارتعاش و...
- محدودیت فضای کاری: امکان تداخل کابل‌ها با یکدیگر و همچنین قید تک جهت بودن آنها، فضای کاری را محدود می‌کند.

۱-۳- مثال‌هایی از کاربرد ربات‌های کابلی

با توجه به مزایای ربات‌های کابلی نسبت به دیگر ربات‌ها، کاربردهای اینگونه ربات‌ها در سال‌های اخیر در صنایع مختلف، رو به افزایش است. شکل (۱-۴)، روبوکرین را نشان می‌دهد [۹]، مکانیزمی که شش درجه آزادی دارد و توسط شش کابل کنترل می‌شود. این ربات توسط مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا[2] ساخته شده است. شکل (۱-۵)، یک ربات کابلی را نشان می‌دهد که از آن به منظور رنگ کاری استفاده می‌شود [۱۰]. شکل (۱-۶)، یک دوربین کابلی (دوربین عنکبوتی[3]) را نشان می‌دهد که با توجه به سرعت بالای آن می‌تواند در پوشش تصویری از مسابقات ورزشی، مراسم بزرگ و... مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. شکل (۱-۷)، یک ربات کابلی چهارضلعی[4] را نشان می‌دهد که توسط چندین کابل، یک صفحه را در هوا معلق نگه می‌دارد. از این ربات به همراه یک هلیکوپتر به منظور حمل بارهای سنگین استفاده می‌شود [۳]. شکل (۱-۸)، رباتی را نشان می‌دهد که در آن با توجه به تغییر طول کابل‌ها، عملیات فیزیوتراپی انجام می‌شود. دست شخص بر روی صفحه قرمز رنگ متصل به کابل‌ها قرار می‌گیرد و با تغییر طول کابل‌ها، بازوی شخص به حرکت در می‌آید [۱۲]. شکل (۱-۹)، فالکون۷[5] را نشان می‌دهد. این ربات سرعت بالایی داشته و شش

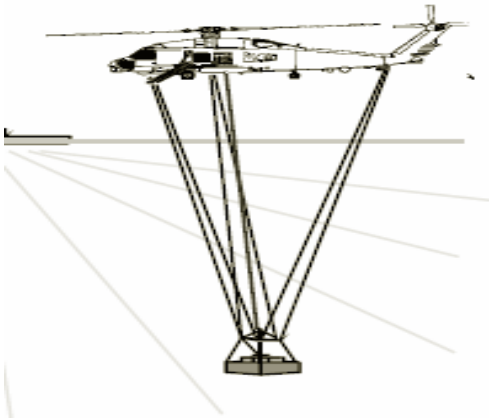
[1] Sensor
[2] NIST
[3] Sky cam (Spider cam)
[4] Tetra
[5] Falcon 7

درجه آزادی دارد و توسط هفت کابل می‌تواند اجسام را با شتاب 43g به سمت بالا حمل کند [۱۳]. شکل (۱-۱۰)، مکانیزمی را نشان می‌دهد که اساس کار آن با استفاده از کابل‌هاست. از این وسیله در بنادر به منظور جابجا کردن بار بر روی کشتی‌ها و اسکله استفاده می‌شود [۱۴]. شکل (۱-۱۱)، یک ربات کابلی را نشان می‌دهد که از آن در عملیات‌های تجسس و نجات همانند مین‌زدایی، جابجا کردن وسیله نقلیه حادثه دیده و... استفاده می‌شود [۱۵]. شکل (۱-۱۲)، ربات شارلوت[1] را نشان می‌دهد که از آن در کارهایی مثل عملیات فضایی، آموزش و تمرین فضانوردان و... استفاده می‌شود [۱۶]. شکل (۱-۱۳)، یک ماهواره دریافت امواج رادیویی را نشان می دهد که در آن، حرکت کابین که یک جسم صلب بوده و دارای شش درجه آزادی است، توسط شش کابل کنترل می‌شود [۱۷].

شکل (۱-۴) جرثقیل کابلی [۹]

شکل (۱-۵) ربات رنگ پاش [۱۰]

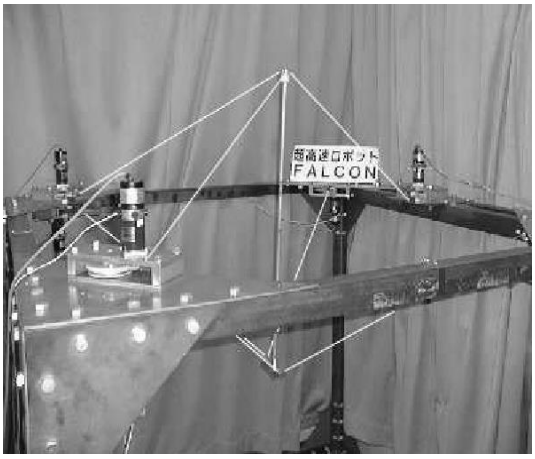
شکل (۱-۶) دوربین کابلی [۱۱]



شکل (۱-۷) ربات کابلی برای حمل بار با هلیکوپتر [۳]

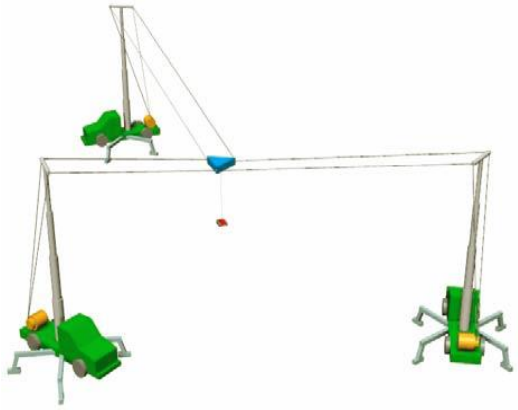
[1] Charlotte robot

شکل (۱-۸) ربات برای انجام عملیات فیزیوتراپی [۱۲]

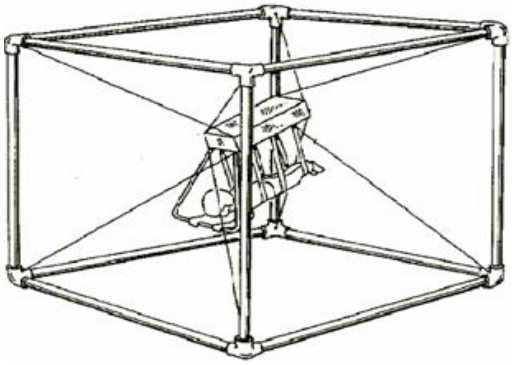


شکل (۱-۹) انتقال اجسام با شتاب بالا [۱۳]

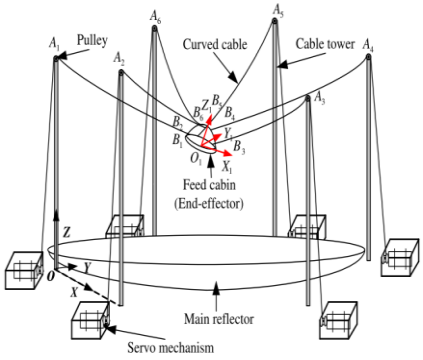
شکل (۱-۱۰) جابجا کردن بار روی کشتی و اسکله [۱۴]



شکل (۱-۱۱) ربات برای عملیات مین زدایی [۱۵]



شکل (۱-۱۲) ربات برای آموزش فضانوردان [۱۶]



شکل (۱-۱۳) ربات برای دریافت امواج رادیویی [۱۷]

۱-۴- مروری بر پایان‌نامه

این پایان نامه در هفت فصل تهیه شده که خلاصه هر فصل در اینجا بیان می‌شود.

در فصل اول، بعد از معرفی ربات‌های سری، موازی و کابلی، به مزایا و معایب ربات‌های کابلی اشاره شده و سپس به مقایسه این سه نوع ربات پرداخته شده است. در ادامه با توجه به مزایای ربات‌های کابلی، کاربرد این ربات‌ها در صنایع مختلف بیان می‌شود.

در فصل دوم، به بررسی کارهای انجام شده در زمینه ربات‌های کابلی و طراحی مسیر، پرداخته شده است. در ابتدا به معرفی مکانیزم‌هایی که برای ساخت این ربات‌ها ارائه شده، اشاره می‌شود. در بخش دوم به بررسی کارهایی که در زمینه استاتیک، سینماتیک و دینامیک ربات‌های کابلی که توسط محققین بیان شده، پرداخته می‌شود. در بخش سوم به روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری و مسائل بهینه سازه‌ای اشاره می‌گردد. در انتها به کارهای انجام گرفته در زمینه طراحی مسیر ربات‌ها اشاره می‌گردد.

در فصل سوم، معادلات سینماتیک، استاتیک و دینامیک ربات سه کابلی فضایی استخراج شده و به منظور اطمینان از روابط فوق، شبیه‌سازی آنها در دو حالت معکوس و مستقیم انجام شده است.

در فصل چهارم، نحوه ایجاد الگوریتم بهینه‌گر مسیر، تشکیل شده از روش بهینه‌سازی جام اعداد و میانیاب اسپیلاین مرتبه سه، تشریح می‌گردد. همچنین در این فصل کارایی مناسب روش فراابتکاری جام اعداد، بوسیله تابع‌های استاندارد ریاضی و بهینه‌سازی اندازه و توپولوژی سازه‌های خرپا، مشخص می‌گردد.

در فصل پنجم، توضیح یک الگوریتم بهینه‌گر مسیر دیگری، که از روش بهینه‌سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر و میانیاب چندجمله‌ای درجه چهار ایجاد شده است، ارائه می‌شود. در ضمن عملکرد مطلوب الگوریتم مثلث بهینه‌گر، توسط بهینه‌سازی اندازه و شکل سازه‌های خرپا، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در فصل ششم، شبیه‌سازی طراحی مسیر بهینه ربات کابلی معلق، توسط دو بهینه‌گر مسیر، ارائه شده در فصل‌های چهار و پنج انجام می‌گیرد و نتایج بدست آمده با نتایج روش غیرمستقیم (کنترل بهینه) مقایسه می‌شوند. همچنین هدف کمینه‌سازی گشتاور، جهت پیمایش مسیر موردنظر می‌باشد.

در فصل هفتم، نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.