بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

تحلیل و کنترل یک ربات کابلی الاستیک در حرکت صفحه‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

علیرضا حدادی

استاد راهنما

دکتر محمد جعفر صدیق

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک –طراحی کاربردی آقای علیرضا حدادی

تحت عنوان

تحلیل و کنترل یک ربات کابلی الاستیک درحرکت صفحه‌ای

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرارگرفت.

۱ – استاد راهنمای پایان نامه	دکترمحمدجعفر صدیق
۲ – استاد مشاورپایان نامه	دکتر سعید بهبهانی
۳ – استاد داور	دکتر مصطفی غیور
۴ – استاد داور	دکتر محمد دانش
۵ - سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکترمحمدرضا سلیم‌پور

تشکروقدردانی

برخود لازم می‌دانم که از توجه و راهنمایی اساتید گرامی آقای دکتر محمد جعفر صدیق و آقای دکتربهبهانی سپاسگزاری کنم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که همواره در طول زندگی مرا از

حمایت‌های بی‌دریغ خود بهره‌مند ساخته و می‌سازند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هفت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- ربات‌های کابلی ۳

۱-۲- شکل‌بندی ربات‌های کابلی ۵

۱-۳- مثال‌هایی از ربات کابلی‌های موجود ۵

۱-٤- چالش‌ها ۱۱

۱-۵- مرور سوابق و پژوهش‌های انجام شده ۱۱

۱-۵-۱- ارائهٔ تفصیلی تحقیقات پیشین ۱۱

۱-۵-۲- تشریح مقالات اصلی مورد استفاده و بیان تفاوت‌ها ۱۳

۱-٦- تعریف مسئله حول فرضیات و مرحله‌بندی انجام آن ۱۴

فصل دوم: ربات کابلی صفحه‌ای یک درجه آزادی

۲-۱- استخراج معادلات حرکت و خطی سازی ۱۷

۲-۲- یک مثال عددی در حالت عدم متقارن ۲۰

۲-۳- طراحی کنترلر برای ربات کابلی یک درجه آزادی ۲۲

فصل سوم: ربات کابلی صفحه‌ای دو درجه آزادی

۳-۱- استخراج معادلات حرکت و خطی سازی ۲۹

عنوان **صفحه**

۳-۲- یک مثال عددی ربات کابلی دو درجه آزادی غیرمتقارن ۳۳

۳-۳- پاسخ سیستم بدون کنترلر..... ۳۴

۳-٤- طراحی کنترلر برای ربات کابلی دو درجه آزادی ۳۵

فصل چهارم: ارتعاشات عرضی در ربات کابلی صفحه‌ای دو درجه آزادی

٤-۱- ارتعاشات عرضی کابل‌ها ۴۱

٤-۲- استخراج معادلات حرکت و خطی سازی ۴۴

٤-۳- طراحی کنترلر برای یک نمونهٔ عددی ۵۰

فصل پنجم: ربات کابلی صفحه‌ای پنج درجه آزادی

۵-۱- فرضیات مسئله ۵۶

۵-۲- استخراج معادلات حرکت و خطی سازی ۶۰

۵-۳- طراحی کنترلر برای یک نمونهٔ عددی پنج درجه آزادی ۶۷

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

٦-۱- نتیجه گیری ۸۲

٦-۲- پیشنهادات ۸۳

مراجع ۸۴

چکیده

ربات‌های کابلی دارای ترکیب و ساختار پایه‌ای ربات‌های موازی می‌باشند، با این ویژگی اضافی که کابل‌ها به عنوان حلقه‌های موازی و گرداننده‌ها به عنوان محرک‌ها عمل می‌کنند. یک تفاوت مهم میان ربات‌های کابلی معلق و ربات‌های کلاسیک موازی در این است که کابل‌ها فقط قدرت تحمل نیروی کششی را دارند و در نتیجه فقط می‌توانند پنجه را به سمت خود بکشند. در نتیجهٔ این ویژگی، خیلی از نتایج شاخص ربات‌های موازی را نمی‌توان به صورت مستقیم برای آن‌ها به کار برد. در این پروژه ما ابتدا به مطالعهٔ انواع مختلف ربات‌های کابلی پرداخته‌ایم و تعدادی از ربات‌های موجود را بررسی کرده‌ایم.از میان ربات‌های موجود، یک نمونه را که برای حمل دوربین فیلم برداری هوایی، معمولاً در مجموعه‌های ورزشی، کاربرد دارد انتخاب کرده و به کنترل آن پرداخته‌ایم. هدف کنترل و حذف نوسانات دوربین در صفحهٔ قائم می‌باشد . در این تحلیل حرکت صفحه‌ای فرض شده و کابل‌ها مانند فنر بدون جرم در نظر گرفته شده‌اند. پس از به دست آوردن معادلات حرکت ربات، نقطهٔ تعادل را بدست آورده و با خطی‌سازی حول نقطهٔ تعادل، کنترلر را طراحی کرده‌ایم.در هر مرحله برای کنترل حرکت ربات در صفحه، به طراحی کنترلر پرداخته و عملکرد سیستم کنترل شده را شبیه سازی کرده‌ایم.

کلمات کلیدی: ربات‌های کابلی، حرکت صفحه‌ای، کنترل

فصل اول

مقدمه

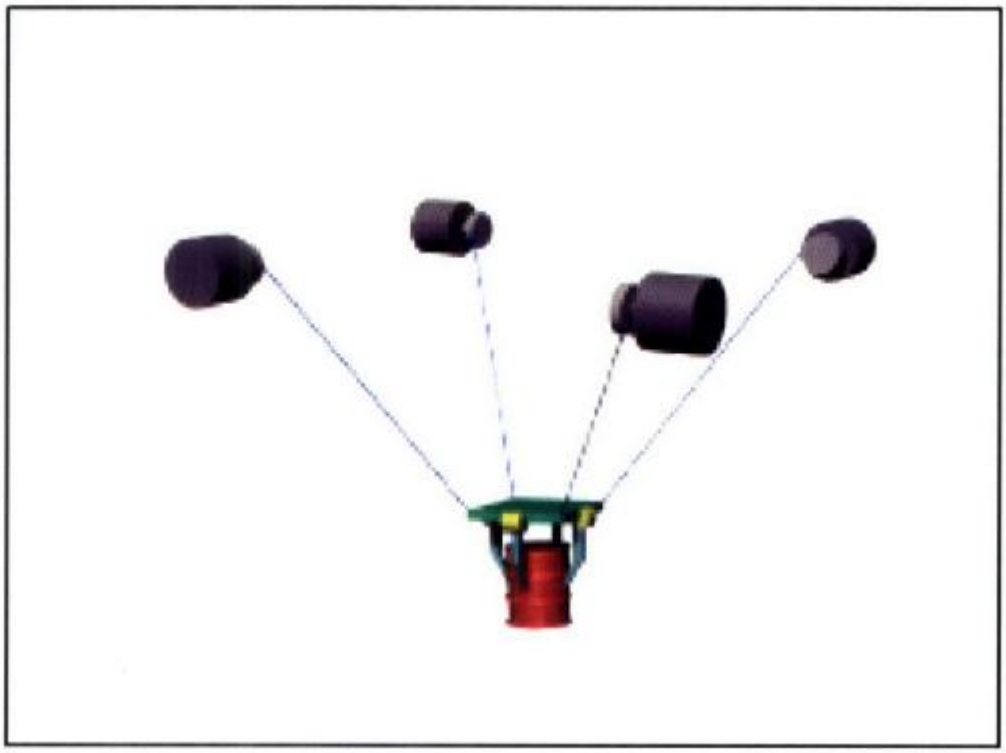
استفاده از کابل‌ها در سازه‌های مهندسی همواره مورد توجه مهندسان بوده است. کابل‌ها در حالیکه از مقاومت بالایی برخوردارند، دارای وزن کم، هزینهٔ پایین و انعطاف پذیری بالایی هستند و به همین جهت هر جا که شرایط کاری اجازه دهد، بعنوان یک گزینهٔ مقرون به صرفه و بهینه، مطرح می‌باشند. با پیشرفت علم، ربات‌های کابلی، استفاده از کابل‌ها در ربات‌ها مورد توجه قرار گرفت. ربات‌های کابلی در حقیقت نوعی از مکانیزم‌های موازی می‌باشند که اعضای آن را کابل‌ها تشکیل می‌دهند. با توجه به عدم امکان تحمل نیروی فشاری از سوی کابل، این نوع ربات‌ها باید بار خود را به صورت معلق حمل کنند. اگر بخواهیم دقیق‌تر شویم، سیستم رباتیکی معلق از چندین موتور تشکیل شده که به منظور ایجاد کشش در کابل‌هایی که از یک سمت به پنجه وصل می‌باشند به کار می‌روند. ربات موقعیت پنجه را در فضای کاری[1] معلوم، با افزایش یا کاهش همزمان طول کابل‌ها کنترل می‌کند؛ با توجه به این مطلب که همهٔ کابل‌ها باید همواره تحت کشش باشند و دچار لقی نشوند.

---

[1] Work space

۱-۱ ربات‌های کابلی

در سال‌های گذشته، ربات‌های کابلی به دلیل پتانسیل اجرایی بالا در فضاهای کاری بزرگ، علاقهٔ زیادی را در بخش صنعت بوجود آوردند؛ زمانیکه بازوهای رباتیکی سری، بر طبق رسوم گذشته جابه‌جایی اشیاء را در دامنهٔ محیطی کوچکتر میسر می‌ساختند، ربات‌های کابلی همان هدف را در فضای کاری بسیار بزرگتر مقدور کردند. در حقیقت ترکیب‌های نامحدود موتور و کابل، اجازهٔ کار در هر سایز فضای کاری را می‌دهد. ربات‌های کابلی معمولی به طور کلی از چندین کابل به جای پاهای مفصل دار برای برقراری ارتباط بین پایه و پنجه استفاده می‌کنند و حرکت پنجه توسط موتورهای متفاوتی که هر یک می‌توانند روی پایهٔ ثابت یا متحرک باشند کنترل می‌شوند. این موتورها کشش در کابل را همواره مثبت نگه می‌دارند. مثلاً در شکل ۱-۱ ربات کابلی آویخته شده با ۴ موتور را نشان می‌دهد که کابل‌های آن برای به حرکت در آوردن یک وزنه در راستاهای مختلف x,y,z استفاده شده‌اند.



شکل ۱-۱ ربات کابلی معلق با ۴ موتور [6]

در عملیات مدرن مونتاژ نیاز به سیستم‌های رباتیک پرسرعت، به صورت روزافزونی احساس می‌شود. سیستم‌های سریع مونتاژ معمول، از مسائلی نظیر وزن به شدت زیاد و اندازهٔ بزرگ به اضافه ارتعاشات، نویز و قیمت بالا رنج می-

برند. از طرفی مکانیزم‌های موازی برای سرعت‌های بالا مناسبند؛ چون در مکانیزم‌های موازی اولاً عملگرهای متعدد به یک لینک خروجی نیرو اعمال می‌کنند ثانیاً تمام عملگرهای سنگین می‌توانند روی پایه‌های ثابت قرار بگیرند.

از امتیازات ربات‌های کابلی می‌توان به افزایش سرعت و سختی اشاره کرد؛ استفاده از کابل‌های سبک و انعطاف پذیر به جای لینک‌های سنگین و صلب، دسترسی به سرعت‌های بالا را ممکن می‌ساخت در عین حال سختی بیشتر امکان اداره کردن ربات با حداکثر بار سنگین را می‌داد.

همچنین جرم این ربات‌ها در مقایسه با ربات‌های صلب، کمتر است. در ربات‌های کابلی همچنین پنجه را می‌توان به وسایل گوناگون از قبیل دوربین، چنگک، گیره مجهز کرد.علاوه بر موارد فوق کاربردهای ممکن زیادی برای این ربات‌ها را می‌توان شمرد. امتیازات ربات‌های کابلی بصورت فهرست‌وار در جدول (۱-۱) آورده شده است.

جدول ۱- ۱ امتیازات ربات کابلی

خلاصهٔ امتیازات ربات کابلی
فضای کاری بزرگتر
بالا بودن نسبت حداکثر بار به وزن سیستم
کم بودن قسمت های متحرک و سادگی
راحتی تغییر مکان
قابلیت سرهم سازی آسان
سختی بالا
اینرسی و جرم کم سیستم
مقرون به صرفهٔ اقتصادی
سرعت بالا
قابلیت تغییر پنجه

۱-۲ شکل بندی ربات‌های کابلی

ربات‌های کابلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: تماماً مقید[۱] و کم مقید[۲]. قرار گرفتن ربات کابلی در هر گروه عمدتاً به کاربرد آن و اینکه چه تعداد کابل مورد استفاده‌اند، بستگی دارد. بطور کلی یک ربات کابلی کاملاً مقید است اگر برای یک حالت تنظیم کابل‌ها، پنجه نتواند حرکت کند یا تغییر زاویه دهد و در این مورد، حالت پنجه را کاملاً معین می‌نامیم. در غیر اینصورت ربات را کم مقید گوئیم. در حقیقت برای یک ربات n درجه آزادی به n+1 کابل برای مقید کامل بودن نیاز داریم و اگر کابل‌ها از این مقدار کمتر باشد سسیستم ما کم مقید است. برای اینکه یک ربات کاملاً مقید دقت بیشتری در موقعیت داشته باشد نیاز به موتورهای قوی‌تر و تعداد کابل‌های بیشتری می‌باشد؛ که البته امکان مزاحمت کابل‌ها برای یکدیگر وجود دارد. در مقابل ربات‌های کم مقید ساده‌تر هستند و می‌توانند حرکات مختلف را با ۲ یا ۳ کابل تأمین سازند.

۱-۳ مثال‌هایی از ربات‌های کابلی موجود

تحقیقات در این زمینه محدود به بخش کوچکی از ربات‌ها نمی‌شود و با تعداد زیاد و متفاوت مکانیزم‌هایی سر وکار داردکه به تعریف ربات با عملگر کابلی منجر می‌شود. یکی از جلوه‌های اولیه این تکنولوژی، دوربین‌های هوایی می‌باشند.

در سیستم نشان داده شده‌ی شکل (۱-۲)، دوربین هوایی با افزونگی به کار گرفته شده تا فضای کاری بیشتری را بتواند پوشش دهد. در این پایان نامه هدف تحلیل ارتعاشات و کنترل حرکت و ارتعاشات یک دوربین معلق از طریق یک ربات کابلی صفحه‌ای است. همچنین از لحاظ تقسیم بندی، چون در ربات موقعیت پنجه توسط نیروی گرانش تعیین می‌شود، ربات جز دسته‌ی کم مقید قرار می‌گیرد.

---

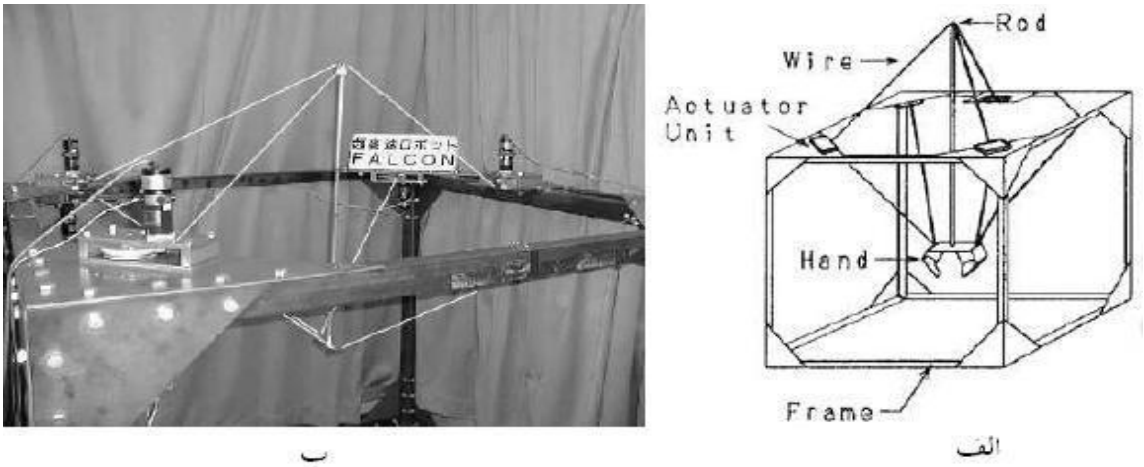
[۱] fully constrained
[۲] Under constrained

شکل ۱-۲ استفاده از دوربین هوایی در استادیوم بیسبال [6]

اوج شکوفایی این دوربین‌ها در مسابقات جام جهانی فوتبال ۲۰۱۰ آفریقای جنوبی بود که با ضبط صحنه‌هایی از تمام نقاط بازی حیرت بینندگان را برانگیخت تا جایی که به Spider Cam معروف شد

شکل ۱-۳ نمای نزدیک دوربین هوایی [6]

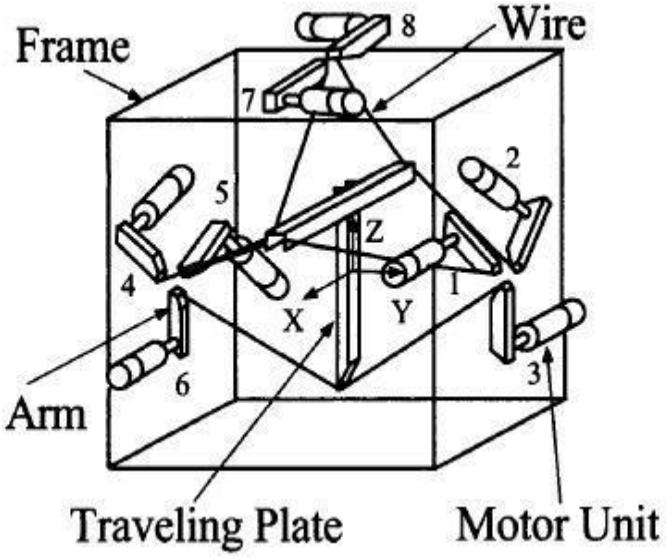
دسته‌ی دیگری از ربات‌های کابلی شامل فالکون‌ها[1] می شوند که ربات‌هایی با شتاب فوق العاده زیاد هستند. این ربات‌های فوق‌العاده سریع، دارای شتاب بیشینهٔ $43\ g$ و ماکزیمم سرعت $13\ m/s$ می‌باشند. این در صورتی است که در این ربات‌ها از موتورهای DC کوچک $60W$ استفاده شده است. در این ربات برای غلبه بر ارتعاشات، از ایجاد نیروی داخلی در کابل‌ها به وسیلهٔ اعمال پیش کشش و در نظر گرفتن فنریت غیرخطی کابل‌ها استفاده شده است. همانطور که در شکل ۱-۴ می‌بینیم در این ربات از هفت کابل استفاده شده است که سه تای آن‌ها به یک انتهای میله و بقیه به انتهای دیگر میله که پنجه در آن قرار دارد، وصل شده‌اند.



شکل ۱-۴ ربات کابلی فالکون الف) نمایش ساختار سیستم ب) یک نمونهٔ آزمایشی از ربات [6]

فالکون‌ها مشکلات زیادی از قبیل خطا در تشخیص موقعیت و اصطکاک زیاد پولی‌ها دارند که در ربات‌های WARP این مشکلات نیز مرتفع گردیده است. این ربات به وسیلهٔ هشت کابل کنترل می‌شود که به بازوهایی متصل‌اند. همانطور که در شکل ۱-۵ دیده می‌شود با حذف پولی در این سیستم، مشکلات ناشی از آن نیز از بین می‌رود.

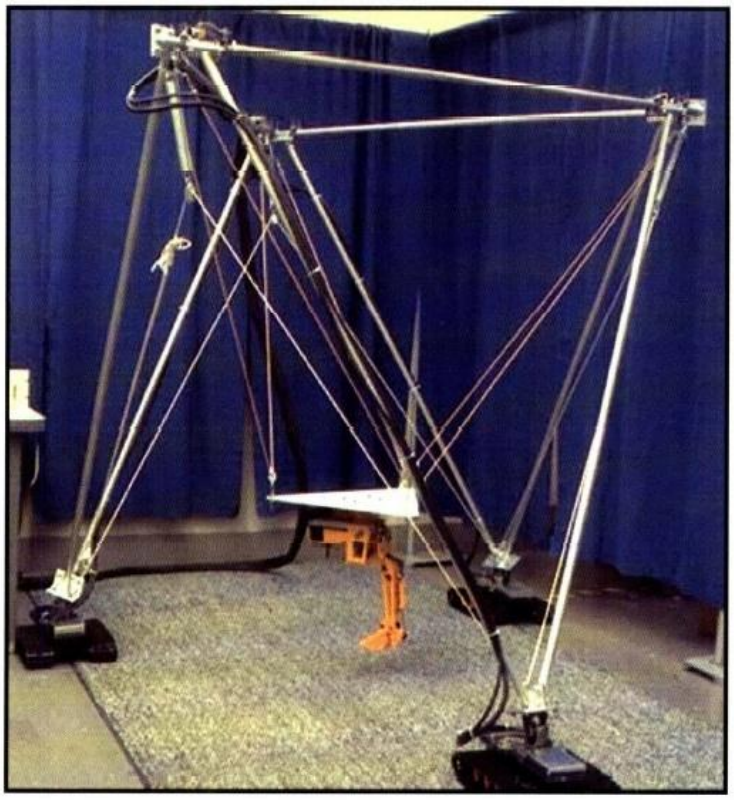
[1] Falcon



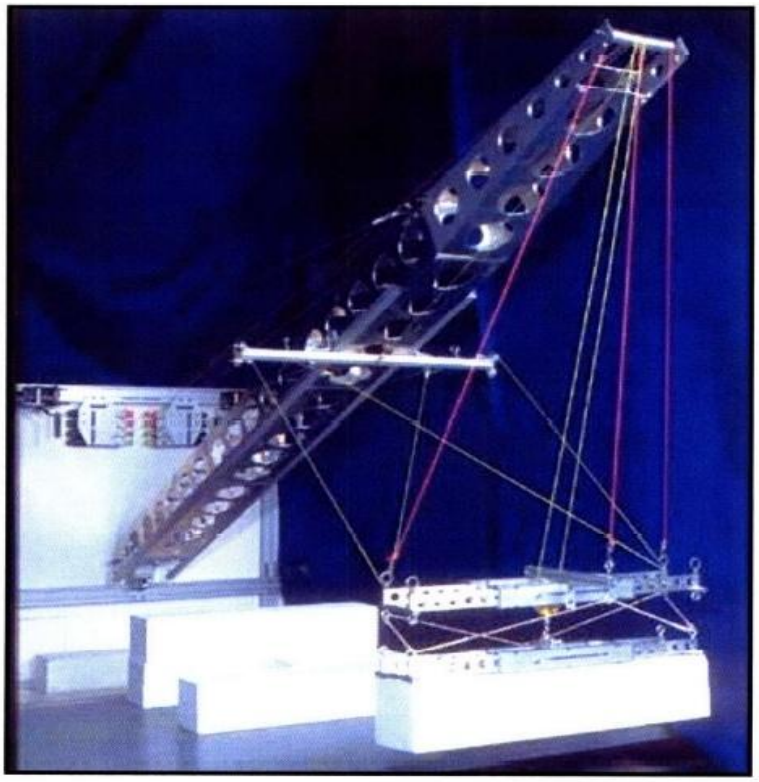
شکل ۱-۵ ربات کابلی WARP [9]

نوع دیگری از ربات‌های کابلی ربات‌های بالابر[۱] هستند؛ این ربات‌ها، ربات‌های کابلیِ مقید ۶ درجه آزادی هستند که بر پایه‌ی نظریه‌ی عملگرهای موازی صفحه‌ای استوارت شکل گرفته اند.این ربات‌ها موارد استفاده‌ی گوناگونی در زمین ، هوا و دریا دارند. در موسسه جهانی استانداردها و تکنولوژی تلاش‌های بسیاری برای توسعه‌ی **ربات های بالابر** صورت گرفته است. NIST Robocrane یک ربات ۶کابله‌ی ۶ درجه آزادی است که در شکل‌های ۱-۶ و ۱-۷، دو مورد از موارد استفاده‌ی آن که بیشتر برای حمل مواد به کار می‌روند، به تصویر کشیده شده است.

[۱] Robocrane



شکل ۱-۶ ربات نجات و کاوشگر[8]



شکل ۱-۷ باربر کانتینری[8]

یکی دیگر از کاربردهای زیاد ربات‌های کابلی، انتقال محموله‌ها به داخل کشتی و یا تخلیهٔ آنهاست. یکی از این ربات‌ها AACTS است که توسط August Design ساخته شده و در شکل ۱-۸ قابل مشاهده می‌باشد. ربات دیگر برای این منظورنوعی از ربات‌های Array است که در دانشگاه ایالت پنسیلوانیا ساخته شده است و همانطور که در شکل ۱-۹ دیده می‌شود یک ربات کابلی چهار کابله با پنجهٔ متمرکز می‌باشد.

شکل ۱-۸ ربات کابلی AACTS الف) در حال تخلیهٔ بار ب) نمای بستهٔ ربات هوشمند تخلیه [6]

شکل ۱-۹ ربات کابلی الف) نمونهٔ آزمایشی ب) در حال بارگیری [2]

۱-٤ چالش‌ها

اگرچه ربات‌های کابلی از چندین نظر مفید هستند اما ذات و طبیعت آن‌ها ما را با مشکلاتی مواجه می‌کند که در ماشین‌های سری وجود نداشت. خصوصیت متمایز ربات‌های کابلی آنست که کابل فقط می‌تواند پنجه را تحت کشش قرار دهد و بنابراین فقط قادر به تحمل بار در حالت کششی هستند. این ویژگی نیاز ما را به داشتن مدل‌های دینامیکی که کشش مثبت را در طول کابل ایجاد می‌کنند، نشان می‌دهد و از مدل‌های سنتی آنالیز ربات‌ها نمی‌توان استفاده کرد. در نتیجه توصیف سینماتیکی سیستم با در نظر گرفتن قابلیت انعطاف و افزونگی کابل‌ها، پیچیده‌تر از پیش می‌شود. نکتهٔ مهم دیگری که باعث بروز خطا در این سیستم‌ها می‌شود عدم توجه به حداکثر کشش مجاز هر کابل می باشد. در بخش مدل کردن دینامیکی سیستم این چالش‌ها به همراه فرض‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرند تا پروسهٔ مدل‌سازی راحت‌تر انجام گیرد.

از دیگر چالش‌ها که در طراحی این ربات‌ها به چشم می‌خورد، توجه به عدم تداخل کابل‌ها و همچنین مسئله‌ی کالیبراسیون کابل و پولی می‌باشد که به نوبه‌ی خود باعث محدودیت فضای کاری و مشکلات کنترلی می‌شوند.

۱-۵ مرور سوابق و پژوهش‌های انجام شده

در این بخش ما نگاهی کلی به پژوهش‌های انجام شده در زمینهٔ چالش‌های مختلف ربات‌های کابلی داریم. اگرچه ربات‌های کابلی از اکثر جهات شبیه ربات‌های موازی معمولی هستند، اما عدم تحمل فشار در آن‌ها باعث می شود که نتایج بسیاری از تحقیقات انجام شده روی ربات‌های موازی قابل تعمیم به این ربات‌ها نباشند .

۱-۵-۱ ارائهٔ تفصیلی تحقیقات پیشین

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی مدل سازی دینامیکی کابل‌ها صورت گرفته که منجر به نتایج قابل قبولی شده است.آقای تاناکا[۱] [1]، مشکل شکم زدن کابل‌ها را بررسی کرده‌اند. شکل‌بندی‌های متفاوت کابل‌ها باعث ساختارهای انعطاف پذیر مختلفی می‌شود که اگر بارِ روی کابل در مقایسه با سختی آن قابل اغماض باشد، انعطاف پذیری نادیده گرفته می‌شود وکابل بصورت مستقیم در نظر گرفته می‌شود.[2]

---

[۱] Tanaka