دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک

طراحی،شبیه‌سازی و کنترل یک ربات موازی کابلی

نگارنده

سامان اصفهانی

استاد راهنما

دکتر فرید نجفی

دی‌ماه ۱۳۹۱

تاییدیه‌ی هیات داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه

هیات داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان ..... توسط آقای/خانم ..... صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی مورد تایید قرار می‌دهند.

۱- استاد راهنما:	دکتر	امضا
۲- استاد ممتحن:	دکتر	امضا
۳- استاد ممتحن:	دکتر	امضا

تاییدیه صحت و اصالت نتایج

اینجانب ..... به شماره دانشجویی ..... دانشجوی رشته ..... مقطع تحصیلی ..... تایید می‌نمایم که کلیه نتایج این پایان‌نامه حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مولفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی و ...) با اینجانب رفتار خواهد شد. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسندگان آن می‌باشد. بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌گردد، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای همگان و با ذکر منبع، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما و با ذکر منبع، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه تا تاریخ _____ ممنوع است.

نام استاد راهنما:

تاریخ:

امضا:

قدردانی

با قدردانی از زحمات آقای دکتر **نجفی** و هم‌چنین با تشکر فراوان از آقای دکتر **مهدی طالع ماسوله** و آقای مهندس **محمد هادی فرزانه کلورزی**، که با کمک‌های بی‌دریغشان به شکل گرفتن این رساله بسیار کمک کردند.

تقدیم به پدر، مادر و برادر عزیزم

که در تمام مراحل زندگی در کنارم بوده‌اند.

چکیده

با رشد صنایع در کشورهای مختلف، بهره‌گیری از ربات‌ها نیز روز به روز بیش‌تر رواج پیدا می‌کنند؛ به ویژه در کاربردهایی که به دقت و سرعت بیش‌تری نیاز است. در این بین ربات‌های ساختار موازی به دلیل دارا بودن دقت و ظرفیت حمل بار بیش‌تر و نیز امکان دسترسی به سرعت‌ها و شتاب‌های بالاتر نسبت به ربات‌های سری، در سال‌های اخیر خیلی مورد توجه بوده‌اند. اما معایبی چون فضای کاری محدود و هزینه‌ی بالای ساخت سبب شد تا در سال ۱۹۸۵ گونه‌ی جدیدی از این ربات‌ها به نام ربات‌های موازی کابلی معرفی شود. در این‌گونه از ربات‌ها، به دلیل آن‌که طول زیادی از کابل‌ها می‌تواند برای حرکت دادن پلتفورم مورد استفاده قرار گیرد، فضای کاری بزرگ‌تری نسبت به ربات‌های موازی کلاسیک در دسترس خواهد بود و نیز بار خمشی در لینک‌ها دیگر وجود نخواهد داشت.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی طراحی و ساخت ربات‌های کابلی، قید کششی بودن نیروهای کابلی است؛ چراکه کابل‌ها تنها می‌توانند نیروی کششی را انتقال دهند و نمی‌توانند نیروی فشاری اعمال کنند. بنابراین در طراحی و محاسبه‌ی فضای کاری و هم‌چنین کنترل این‌گونه ربات‌ها، این مساله باید مورد توجه قرار گیرد. در این پروژه گونه‌ای خاص از فضای کاری ربات‌های کابلی را به نام فضای کاری دسترس‌پذیر، برای دو نوع ربات صفحه‌ای افزونه، مورد توجه قرار خواهیم داد. در ادامه نیز با معرفی یک تابع هزینه، بهینه‌سازی این دو نوع ربات صفحه‌ای را برای پوشاندن یک کانتور خاص انجام خواهیم داد. در بخش پایانی پروژه، یک کنترلر فازی کلاسیک، برای کنترل حرکت ربات صفحه‌ای چهار کابلی معرفی خواهد شد، که دارای الگوریتمی برای ارضای قید کششی بودن کابل‌ها است.

کلمات کلیدی: ربات موازی کابلی، سینماتیک، فضای کاری، ماتریس ژاکوبین، آنالیز بازه‌ای، کنترل فازی

فهرست مطالب

فهرست تصاویر ز

۱ مقدمه ۱

۱.۱ روبات‌های موازی ۲

۱.۲ ربات‌های کابلی ۴

۲ سینماتیک ۱۰

۲.۱ سینماتیک ۱۲

۲.۱.۱ دسته‌بندی ۱۲

۲.۲ سینماتیک معکوس ۱۴

۲.۳ سینماتیک مستقیم ۱۶

۳ فضای کاری ۲۰

۳.۱ فضای کاری ربات‌های موازی ۲۲

۳.۱.۱ گونه‌های مختلف فضای کاری در ربات‌های موازی ۲۳

۳.۱.۲ شیوه‌های محاسبه‌ی فضای کاری ۲۴

۳.۲ فضای کاری ربات موازی کابلی ۲۶

۳.۲.۱ ماتریس ژاکوبین و تکینگی ۲۷

۳.۲.۲ نیروهای کابلی ۲۸
۳.۲.۳ گونه‌های فضای کاری در ربات کابلی افزونه ۲۹
۳.۳ فضای کاری دسترس‌پذیر (پیچ-شدنی) ۳۳
۳.۴ آنالیز بازه‌ای ۳۸
۳.۴.۱ محاصره‌ی پاسخ معادلات ۳۸
۳.۴.۲ تعاریف ۴۰
۳.۵ تعیین فضای کاری قابل قبول با استفاده از آنالیز بازه‌ای ۴۶
۳.۵.۱ ماتریس بازه‌ای پیچ ۴۶
۳.۵.۲ جعبه‌هایی که کاملاً داخل فضای کاری دسترس‌پذیر هستند ۴۸
۳.۵.۳ جعبه‌هایی که کاملاً خارج فضای کاری دسترس‌پذیر هستند ۵۲
۳.۶ تعیین فضای کاری پیچ-شدنی با الگوریتم شاخه و حد ۵۵
۳.۶.۱ تعیین فضای کاری دسترس‌پذیر ۵۶
۳.۶.۲ فضای کاری دسترس‌پذیر ربات‌های کابلی صفحه‌ای ۵۸
۳.۷ بهینه‌سازی ۶۱

۴ دینامیک و کنترل **۶۸**

۴.۱ دینامیک ۶۹
۴.۱.۱ دینامیک ربات‌های موازی ۶۹
۴.۱.۲ مدل دینامیکی ربات با کابل‌های ایده‌آل ۷۰
۴.۱.۳ دینامیک ربات صفحه‌ای ۷۲
۴.۲ کنترل ۷۳
۴.۲.۱ طراحی کنترلر فازی ۷۴

مراجع **۹۲**

فهرست تصاویر

۱.۱ ربات سری PUMA 560 . . . . . ۲

۱.۲ ربات موازی استوارت ۳

۱.۳ ربات موازی دلتا ۴

۱.۴ شماتیک یک ربات کابلی [۱] ۶

۱.۵ ربات کابلی شارلوت ۷

۱.۶ ربات ۷ کابلی SEGESTA ۷

۱.۷ ربات کابلی SkyCam ۷

۱.۸ ربات کابلی RoboCrane ۸

۱.۹ شماتیک ربات‌های کابلی مورد استفاده در پروژه‌ی SASCO ۸

۲.۱ دسته‌بندی ربات‌های کابلی بر پایه‌ی درجات آزادی [۱۲] ۱۳

۲.۲ شماتیک یک ربات کابلی ۱۵

۲.۳ راهنمای غلطکی ۱۶

۳.۱ ربات Scara و شماتیک فضای کاری آن ۲۱

۳.۲ فضای کاری ربات ۷ کابلی SEGESTA ۲۲

۳.۳ به دست آوردن فضای کاری دوران ثابت ربات صفحه‌ای با بهره‌گیری از شیوه‌ی هندسی ۲۴

۳.۴ مکان هندسی نقاط تکین ربات استوارت ۲۵

۳.۵ مرزهای فضای کاری ربات استوارت ۲۶
۳.۶ فضای کاری کنترل‌پذیر ربات چهارکابلی صفحه‌ای ۳۰
۳.۷ ترسیمه‌ی آزاد پلتفرم ۳۶
۳.۸ ربات سه کابلی صفحه‌ای و جعبه‌ی حالت $[\mathbf{x}] = ([0.3, 0.7], [0.3, 0.7])^T$ ۴۸
۳.۹ الگوریتم شاخه و حد بازه‌ای [۳] ۵۶
۳.۱۰ الگوریتم شاخه و حد در تعیین WFW [۱] ۵۷
۳.۱۱ فضای کاری دوران تام ربات چهارکابلی صفحه‌ای WFW ۵۸
۳.۱۲ شماتیک ربات سه کابلی صفحه‌ای ۵۸
۳.۱۳ شماتیک ربات چهارکابلی صفحه‌ای ۵۹
۳.۱۴ لوگوی جعبه‌ابزار INTLAB ۶۰
۳.۱۵ فضای کاری دسترس‌پذیر ربات $2T$ ۶۰
۳.۱۶ فضای کاری دسترس‌پذیر ربات $1R2T$ به ازای $\phi = 0$ ۶۱
۳.۱۷ فضای کاری دسترس‌پذیر ربات $1R2T$ به ازای $\phi = \pi/4$ ۶۲
۳.۱۸ فضای کاری دسترس‌پذیر ربات $2T$ با فرض $A_3 = (0.5, 0.5)^T$ ۶۳
۳.۱۹ فضای کاری دسترس‌پذیر ربات $2T$ با فرض $A_3 = (0.5, [0.5, 1])^T$ ۶۴
۳.۲۰ الگوریتم شاخه و حد بازه‌ای برای بهینه‌سازی فضای کاری ۶۵
۳.۲۱ فضای کاری بهینه‌ی ربات $2T$ به ازای یک دایره‌ی تعریف شده ۶۵
۳.۲۲ فضای کاری به ازای بازه‌های A_{3y} ۶۶
۳.۲۳ فضای کاری بهینه‌ی ربات $1R2T$ به ازای یک دایره‌ی تعریف شده ۶۷

۴.۱ ترسیمه‌ی آزاد پولی i ام ۷۱
۴.۲ ابعاد ربات $1R2T$ کنترل شده ۷۵
۴.۳ شماتیک الگوریتم کنترلی استفاده شده ۷۸
۴.۴ توابع عضویت برای خطا ۷۹

۴.۵ توابع عضویت برای مشتق زمانی خطا ۷۹
۴.۶ توابع عضویت برای خروجی کنترلر ۸۰
۴.۷ سطح خروجی استنتاج سیستم فازی ۸۰
۴.۸ مسیر واقعی و مسیر مطلوب برای کنترلر فازی اولیه ۸۱
۴.۹ خطای موقعیت در جهت x برای کنترلر اولیه ۸۱
۴.۱۰ خطای موقعیت در جهت y برای کنترلر اولیه ۸۲
۴.۱۱ گشتاور موتور اول بر حسب زمان برای کنترلر اولیه ۸۲
۴.۱۲ مؤلفه‌ی x پلتفورم و خطای آن ۸۳
۴.۱۳ مؤلفه‌ی y پلتفورم و خطای آن ۸۴
۴.۱۴ خطای مولفه‌ی ϕ ۸۵
۴.۱۵ مسیر واقعی و مسیر مطلوب ۸۵
۴.۱۶ نمودار گشتاور موتورها برحسب زمان ۸۶
۴.۱۷ نمودار نیروهای کابلی برحسب زمان ۸۷

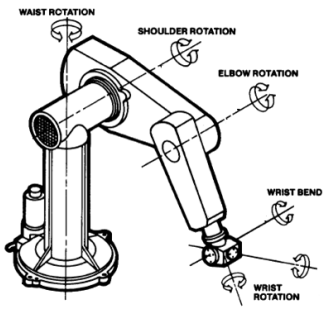
فصل ۱

مقدمه

ربات‌ها بر اساس ساختار سینماتیکی، به دو دسته‌ی عمده‌ی سری و موازی تقسیم می‌شوند. در این فصل تعریف کوتاهی از هر یک از این دسته‌ها همراه با معرفی چند ربات، آورده شده است. هم‌چنین، با توجه به آن‌که تمرکز این پروژه روی ربات‌های موازی کابلی است، تعریفی از این گونه‌ی ربات همراه با نمونه‌هایی آورده خواهد شد.

۱.۱ روبات‌های موازی

روبات‌های صنعتی متداول عمدتاً دارای ساختار سینماتیکی سری هستند. یعنی چند لینک صلب که به صورت متوالی با استفاده از مفاصل چرخشی[۱] و یا کشویی[۲] به مفصل قبل و بعد از خود متصل می‌شوند، واسط بین پایه و مجری نهایی قرار می‌گیرند. این ساختار یک زنجیره‌ی باز سینماتیکی را شکل می‌دهد. با آن که چنین مکانیزم‌هایی فضای کاری وسیع و قابلیت انعطاف و مانور زیادی دارند، معایبی چون دقت کم، انباشتگی خطا، توان و شتاب پایین و سختی کم دارند؛ در شکل ۱.۱ تصویر ربات سری PUMA560 مشاهده می‌شود.



شکل ۱.۱: ربات سری PUMA 560

در ربات‌های سری، بار وارد بر مجری نهایی تنها با یک زنجیره سینماتیکی مستقل به پایه منتقل می‌شود؛ بدین شکل بار زیادی به مفصل ابتدایی وارد می‌آید که خود یک عامل محدود کننده است. این محدودیت را می‌توان به برداشتن جسمی با یک دست تشبیه کرد که نیرو و گشتاور زیادی را به شانه تحمیل می‌کند. شاید طبیعی‌ترین فکری که برای غلبه بر این مشکل به ذهن انسان می‌رسد، برداشتن بار با

[۱] Rotational Joint
[۲] Prismatic Joint

استفاده از دو دست باشد. بدین صورت واسطه‌ی بار و پایه دیگر یک زنجیره‌ی سینماتیکی باز و مستقل نیست؛ بلکه در حقیقت یک زنجیره‌ی سینماتیکی بسته مورد استفاده قرار گرفته است. به مکانیزم‌هایی که از زنجیره‌ی سینماتیکی بسته متشکل از بیش از یک زنجیره‌ی مستقل بهره می‌برند، مکانیزم موازی گفته می‌شود. مکانیزم موازی علاوه بر توان حمل بار بیش‌تر و اعمال بار خمشی کمتر به مفاصل، دقت بالاتری نسبت به مکانیزم سری دارد و دسترسی به سرعت‌ها و شتاب‌های بیش‌تری را میسر می‌کند. در ادامه برخی از مکانیزم‌های موازی مشهور را معرفی خواهیم کرد:

- ربات استوارت[۱] که در سال ۱۹۵۴ توسط اریک گو Eric Gough برای تست تایر ماشین در کارخانه دانلپ ساخته شد. اکنون ربات استوارت یکی از پر کاربردترین ربات‌های موازی صنعتی است. همان‌گونه که در شکل (۱.۲) مشاهده می‌شود، این مکانیزم از شش عملگر کشویی استفاده می‌کند که با مفاصل کروی به پایه متصل می‌شوند. برخی از کاربردهای متداول این مکانیزم عبارتند از: شبیه‌ساز پرواز، برداشتن اجسام سنگین، تنظیم زوایای دیش‌ها، ربات‌های توان‌بخشی و ... . با وجود مزایای بسیاری که می‌توان برای مکانیزم استوارت برشمرد، وجود برخی اشکالات، مانع استفاده از این مکانیزم در برخی کاربردها می‌شود ؛ از جمله فضای کاری محدود و نقاط تکینگی بسیار.

شکل ۱.۲: ربات موازی استوارت

- ربات دلتا[۲] که درسال ۱۹۸۰ در موسسه‌ی پلی تکنیک فدرال لوزان[۳]و به سرپرستی Reymond Clavelساخته شد. این ربات بیش‌تر در زمینه‌ی برداشتن و گذاشتن اجسام[۴] و بسته‌بندی در

[۱] Stewart
[۲] Delta
[۳] EPFL
[۴] Pick and Place

شکل ۱.۳: ربات موازی دلتا

کارخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از ویژگی‌های اساسی این ربات می‌توان به سرعت بالای آن اشاره کرد. در شکل (۱.۳) تصویری از این ربات آورده شده است.

۱.۲ ربات‌های کابلی

ربات‌های موازی با وجود داشتن مزایای بسیار، فضای کاری محدودی دارند و نسبت به ربات‌های سری طراحی دشوارتر و هزینه‌ی ساخت بیش‌تری دارند. شاید وجود چنین معایبی سبب شد تا S.E. Landsbergerو T.B. Sheridanدر سال ۱۹۸۵ گونه‌ی جدیدی از این دسته مکانیزم‌ها را پیشنهاد دهند که در آن لینک‌های صلب با کابل‌های انعطاف پذیر و تحت کشش جای‌گزین شدند [۲]. این کابل‌ها روی قرقره‌هایی پیچیده می‌شوند که در قاب ربات و روی شفت موتورها تعبیه شده‌اند. بدین ترتیب عملگرها بر روی قاب(پایه) نصب شده و ثابت‌اند و کابل‌های تحت کشش (که عموماً در قیاس با مجری نهایی جرم قابل توجهی ندارند) واسط عملگرها و جرم متحرک (مجری نهایی) هستند.

ربات موازی کابلی، متشکل از یک مکانیزم موازی است که در آن مجری نهایی با کابل‌های تحت کشش به عملگرها متصل می‌شود. با تحریک این کابل‌ها می‌توان حرکت پلتفورم و یا پیچ وارد بر آن را کنترل کرد. این نوع ربات موازی ویژگی‌های دل‌خواه بسیاری دارد؛ از جمله :

- به طور بالقوه به فضای کاری بزرگی می‌تواند دسترسی پیدا کند؛ چون می‌توان از کابل‌های بلند برای

تحریک آن‌ها بهره برد.

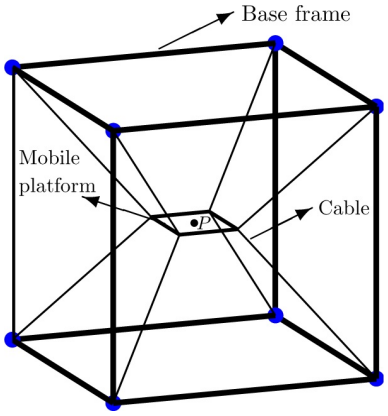
- جرم کم قسمت متحرک ربات که بهره‌برداری از عملگرهای ضعیف‌تر را ممکن می‌کند.
- سبک‌تر شدن قسمت متحرک ربات، قابلیت دستیابی به سرعت/شتاب بالا را فراهم می‌آورد.
- نسبت به ربات‌های موازی کلاسیک، هزینه‌ی ساخت پایین‌تری دارد.
- و ... .

وجود چنین مزایایی، این گونه از ربات‌ها را برای کاربردهای زیادی چون عملکرد سرعت بالا[۱][۴۷] و [۴۶]، رابط‌های لامسه‌ای[۲][۴۸]، سیستم‌های ساخت و ساز اتوماتیک[۳][۴] و رابط‌های حرکتی[۴]مناسب می‌سازد[۵۰]. با این وجود فاکتورهای گوناگونی فضای کاری را محدود می‌کند. در این بین ناتوانی کابل‌ها برای فشار دادن مجری نهایی چالش مهم و درخور توجهی است که به ویژه در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از تحقیقات بوده است.در این بین [۵۱] تا [۵۳] اولین کارهای مرتبط با این موضوع هستند. تداخل کابل‌ها[۵] عامل محدود کننده‌ی دیگری است که فضای کاری ربات موازی کابلی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طور کلی باید از برخورد کابل‌ها دوری کرد [۵۴] در حالی که برخی برای تعیین فضای کاری بزرگ‌تر، فضای کاری را بدون در نظر گرفتن قید عدم برخورد کابل به دست آورده‌اند [۵۵].

در ربات‌های کابلی، بار خمشی به پایه منتقل نمی‌شود. از جهت فضای کاری نیز این نوع ربات قابل قیاس با سایر ربات‌ها نیستند؛ چرا که می‌توان طول بسیار زیادی از کابل را بر روی استوانه‌ها پیچید و فضای قابل دسترس را حتی به اندازه‌ی یک زمین فوتبال گسترش داد؛ مانند ربات کابلی SkyCam که برای تصویربرداری در ورزشگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین هزینه‌ی ساخت این گونه از ربات‌ها نسبت به ربات‌های موازی کلاسیک کم‌تر است. در شکل ۱.۴ شماتیک یک ربات کابلی فضایی که با ۸ کابل رانده می‌شود نشان داده شده است.

در مکانیزم‌های کابلی، موقعیت و زوایای مجری نهایی تنها با تغییر طول کابل‌ها تغییر می‌کند؛ با توجه

[۱] high-speed manipulation
[۲] haptic interfaces
[۳] automated construction systems
[۴] locomotion interfaces
[۵] Cable interferences



شکل ۱.۴: شماتیک یک ربات کابلی [۱]

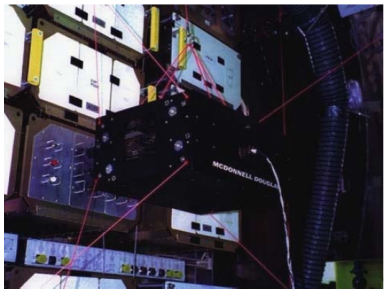
بدان که کابل تنها نیروی کششی را تحمل می‌کند و قادر به اعمال نیروی فشاری و گشتاور نیست، نمی‌توان مکانیزم موازی کلاسیک را با چشم‌داشت درجات آزادی برابر، بدون هیچ تغییری کابلی کرد. برای آن که کابل‌ها در کل فضای کاری تحت کشش باشند باید حداقل از یک محرک بیش‌تر از تعداد درجات آزادی بهره برد و یا از یک نیروی منفعل مانند جاذبه. بر همین اساس می‌توان ربات‌های کابلی را به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد: مقید کامل[۱] و مقید ناقص[۲].

در ادامه چند نمونه از ربات‌های کابلی مشهور را معرفی خواهیم کرد:

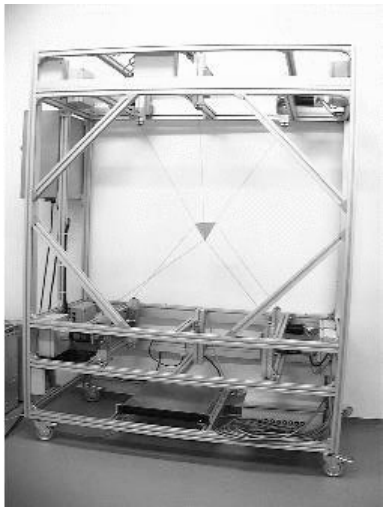
- ربات Charlotte که مجری نهایی مکعبی آن به وسیله‌ی ۸ کابل در فضای کاری حرکت داده می‌شود. این ربات در سال ۱۹۹۵ توسط شرکت مک دانل داگلاس[۳] و به عنوان یک جرثقیل رباتیک[۴] ساخته شد [۹۱]. این ربات در بازرسی‌های پس از پرواز Radiator Bays به خدمت گرفته شد. در طی ماموریت STS-60 شارلوت برای تست کنترل حرکتی شش درجه آزادی به کار رفت [۸]. تصویری از این ربات در شکل ۱.۵ دیده می‌شود.

- نمونه‌ی دیگری از ربات‌های موازی کابلی، ربات ۷ کابلی و ۸ کابلی SEGESTA است که در دانشگاه دویسبورگ آلمان ساخته شده است (شکل ۱.۶). این ربات شش درجه آزادی از یک یا دو درجه‌ی افزونگی بهره می‌برد و قادر است به شتاب ۱۰ برابر جاذبه و سرعتی برابر با ۱۰ m/s دست یابد [۹].

[۱] Fully-Constrained
[۲] Under-Constrained
[۳] McDonnell Douglas Aerospace
[۴] Gantry Robot

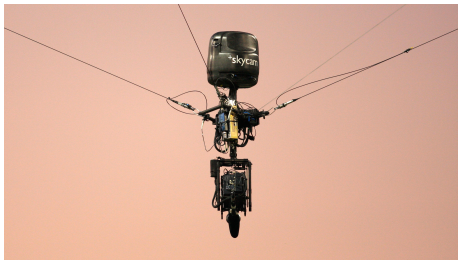


شکل ۱.۵: ربات کابلی شارلوت



شکل ۱.۶: ربات ۷ کابلی SEGESTA

- شاید یکی از مشهورترین انواع ربات‌های کابلی، ربات SkyCam باشد (شکل ۱.۷) که برای تصویر برداری در ورزشگاه‌ها استفاده می‌شود. این ربات از چهار کابل بهره می‌برد و قادر است تمام مساحت زمین فوتبال را پوشش دهد.



شکل ۱.۷: ربات کابلی SkyCam

- ربات RoboCrane از پرکاربردترین ربات‌های کابلی است که توسط James S. Albusدر انستیتو ملی استانداردها وفناوری[۱] توسعه داده شد [۱۱] . این مکانیزم شبیه مکانیزم استوارت است ولی

[۱] NIST: National Institute of Standards and Technology