دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین

گروه مهندسی مکاترونیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکاترونیک

عنوان

طراحی، ساخت و کنترل ربات کابلی موازی

استاد راهنما

دکتر احمد قنبری

استاد مشاور

دکتر جعفر کیقبادی

پژوهشگر

سینا عقلی

بهمن ۹۰

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خود گذشتگان، به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

و تقدیم به کسانی که تمام عمر خود را در جهت بالا بردن فرهنگ و دانایی انسان‌ها صرف نمودند و در این راه رضایت پروردگار عالم را بر هر چیز مقدم دانستند.

تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش خدای را، همان کسی که ما را بدین راه رهنمون شد و اگر ما را راهنمایی نفرموده بود، ما خود هدایت نمی‌یافتیم.

پس از سپاس و ستایش خداوند بر خود لازم می‌دانم از تلاش‌های بی دریغ استاد گرامی جناب آقای دکتر احمد قنبری که در تمامی مراحل انجام تحقیق راهنما و راه گشای من بودند و زحمات زیادی را متحمل شدند، صمیمانه تشکر نمایم.

همچنین از کمک‌های ارزشمند دکتر جعفر کیقبادی که در جهت رفع موانع کار مساعدت بسیار نمودند قدردانی می‌نمایم.

نام خانوادگی دانشجو: عقلی **نام:** سینا

عنوان پایان‌نامه: طراحی، ساخت و کنترل ربات کابلی موازی

استاد راهنما: دکتر احمد قنبری

استاد مشاور: دکتر جعفر کیقبادی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکاترونیک

دانشکده: مهندسی فناوری‌های نوین **دانشگاه:** تبریز

کلید واژه‌ها: ربات‌های ماهر، سینماتیک و دینامیک، مدل سازی، کنترل بهینه، شبکه، میکروکنترلر.

چکیده: ربات‌های ماهر یکی از پر کاربردترین ربات‌ها در صنعت می‌باشند که وظیفه انجام کارهای تکراری و یا خطرناک با دقت زیاد را بر عهده دارند. در این میان ربات‌های موازی کابلی به دلیل استفاده از کابل‌ها به جای اتصالات صلب، در جابجایی اجسام بیشتر مورد توجه می‌باشند. از جمله کاربردهای مهم این ربات در کنترل موقعیت دوربین‌های فیلم‌برداری معلق می‌باشد که تکنولوژی ساخت این ربات محدود به چند کشور بوده و استفاده از آن ملزم به صرف هزینه بسیاری برای سایر کشورها می‌باشد. وجود این مشکلات ما را بر آن داشت تا در جهت ساخت یک نمونه آزمایشگاهی از این ربات و همچنین ایجاد تکنولوژی ساخت و کنترل آن گام برداریم. پیاده‌سازی روش‌های تئوری در سیستم‌های عملی یکی از مشکلاتی می‌باشد که محققان همواره با آن مواجه بوده‌اند و به همین منظور در این پایان نامه سعی به ایجاد ارتباط بین محاسبات تئوریک، شبیه سازی‌های کامپیوتری و پیاده‌سازی سیستم عملی شده است. در ساخت ربات، ساختاری با دقتی حدود ۵ میلی‌متر برای انجام تحقیق و با صرف هزینه کم طراحی گشته است. همچنین در طراحی برد های الکترونیکی و طراحی الگوریتم‌ها، قابل تعمیم بودن به ربات‌های صنعتی مورد نظر بوده است. همچنین روش‌های کنترلی متنوعی توسط محققین در سراسر دنیا برای کنترل این نوع ربات به کار رفته که در این پایان نامه استفاده از روش کنترلی ساختاری بهینه برای کنترل ربات پیشنهاد گردیده است. بعلاوه با تشخیص تابع شاخص هزینه مناسب برای کنترلر، در نهایت تعادلی بین تلاش کنترلی و پاسخ سیستم ایجاد شده است.

فهرست

فصل اول : بررسی منابع

مقدمه		۲
۱-۱	پیشینه کار دیگران	۴
۱-۱-۱	روبات سریال اسکای واش	۶
۱-۱-۲	ربات موازی هگزابوت	۷
۱-۱-۳	رباتهای کابلی	۷
۱-۱-۳-۱	مزایای استفاده از کابل‌ها	۸
۱-۱-۳-۲	ساختارها	۸
۱-۱-۳-۳	کنترل ربات	۱۳

فصل دوم : مواد و روش‌ها

۲-۱	سخت افزار	۱۷
۲-۱-۱	سیستم مکانیکی	۱۸
۲-۱-۱-۱	ربات تحقیقاتی	۱۸
۲-۱-۱-۱-۱	چهارچوب ثابت	۱۸
۲-۱-۱-۱-۲	طراحی اجزا	۱۹
۲-۱-۱-۱-۳	شبیه سازی استاتیکی	۲۲
۲-۱-۱-۲	ربات صنعتی	۲۶
۲-۱-۲	سیستم الکترونیکی	۳۰
۲-۱-۲-۱	ربات تحقیقاتی	۳۰
۲-۱-۲-۱-۱	برد الکترونیکی	۳۰
۲-۱-۲-۱-۲	برنامه سخت افزاری	۳۵
۲-۱-۲-۱-۲-۱	الگوریتم‌های ارسال و دریافت داده‌ها از طریق شبکه	۳۵

۲-۱-۲-۱-۲-۲	الگوریتم‌های استخراج داده سنسورها	۳۹
۲-۱-۲-۱-۲-۳	الگوریتم‌های محاسبه تلاش کنترلی برای موتور	۵۰
۲-۱-۲-۲	ربات صنعتی	۵۰
۲-۱-۲-۲-۱	برد پردازنده	۵۱
۲-۲	نرم افزار	۵۴
۲-۳	سینماتیک روبات	۵۶
۲-۳-۱	سینماتیک موقعیت	۵۶
۲-۳-۲	سینماتیک سرعت	۵۸
۲-۴	کنترل ربات	۵۹
۲-۴-۱	مدل سازی در فضای حالت	۵۹
۲-۴-۲	بررسی رویت پذیری سیستم	۶۵
۲-۴-۳	بررسی کنترل پذیری سیستم	۶۶
۲-۴-۴	قطب‌ها و صفر های انتقال	۶۷
۲-۴-۵	پایداری داخلی	۶۹
۲-۴-۶	طراحی کنترلر LQR	۶۹
۲-۴-۷	انتخاب ماتریس‌های وزنی مناسب	۷۳

فصل سوم : نتایج و پیشنهادات

۳-۱	نتایج حاصل از کنترلر	۷۸
۳-۱-۱	نتایج تغییرات طول کابل	۷۸
۳-۱-۲	نتایج تغییرات سرعت غلتک	۸۰
۳-۱-۳	نتایج تغییرات جریان محرک	۸۱
۳-۲	نتایج انتخاب شاخص بهینه سازی ضرایب کنترلی	۸۴
۳-۳	نتایج تعقیب مسیر	۸۴
۳-۲	پیشنهادات	۸۶
	مراجع	۸۷

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ : نمونه‌ای از رباتهای سریال (چپ) و موازی (راست) ۶

شکل ۱-۲ : ربات سریال اسکای واش ۶

شکل ۱-۳ : ربات موازی هگزابوت ۷

شکل ۱-۴ : استفاده از کابل به عنوان لینک ۷

شکل ۱-۵ : اولین ربات کابلی موازی ساخته شده ۹

شکل ۱-۶ : ربات روبوکرین ۹

شکل ۱-۷ : ربات اسکای‌کم ۱۰

شکل ۱-۸ : ربات سجستا ۱۱

شکل ۱-۹ : طبقه‌بندی رباتهای موازی با توجه به درجات آزادی و تعداد عملگرها ۱۲

شکل ۱-۱۰ : طبقه‌بندی بر اساس درجات آزادی مجری نهایی ۱۲

شکل ۱-۱۱ : نمای بلوکی کنترلر طراحی شده توسط بروکمن ۱۴

شکل ۱-۱۲ : نمای بلوکی Decentralized Controller ۱۴

شکل ۱-۱۳ : میزان خطای زاویه (راست) و موقعیت (چپ) مجری نهایی برای Decentralized Controller ۱۵

شکل ۲-۱ : سیستم محرک طراحی شده ۱۹

شکل ۲-۲ : اجزای سیستم محرک ۲۰

شکل ۲-۳ : خروجی کابل از غلتک ۲۲

شکل ۲-۴ : تحلیل تنش سازه ۲۳

شکل ۲-۵ : تحلیل میزان جابجایی سازه ۲۴

شکل ۲-۶ : نتایج تحلیل ضریب اطمینان ۲۵

شکل ۲-۷ : سیستم‌های محرک ساخته شده ۲۵

شکل ۲-۸ : ربات مونتاژ شده نهایی ۲۶

شکل ۲-۹ : نتایج طراحی سیستم محرک صنعتی ۲۹

شکل ۲-۱۰ : مکانیزم تست، شناسایی و کنترل برای سیستم صنعتی ۳۰

شکل ۲-۱۱ : ساختار بلوکی اجزای برد الکترونیکی تحقیقاتی ۳۳

شکل ۲-۱۲ : نقشه PCB مدار کنترلر ۳۴

شکل ۲-۱۳ : برد الکترونیکی کنترلی ربات ۳۴
شکل ۲-۱۴ : مدار باس مشترک ۳۸
شکل ۲-۱۵ : مسیرهای انتخابی از معماری داخلی میکروکنترلر برای تنظیم واحد مبدل آنالوگ به دیجیتال ۴۰
شکل ۲-۱۶ : خروجی سنسور جریان قبل از فیلتر (بالا)، خروجی سنسور جریان بعد از فیلتر (پایین) ۴۲
شکل ۲-۱۷ : خروجی سنسور انکودر در چرخش موتور با سرعت ثابت ۴۳
شکل ۲-۱۸ : ماشین میلی برای تشخیص جهت چرخش موتور ۴۴
شکل ۲-۱۹ : خروجی زمان‌سنج سنسور نسبت به سرعت چرخش آن ۴۹
شکل ۲-۲۰ : برد CPLD ۵۲
شکل ۲-۲۱ : برد SPARTAN3 ۵۴
شکل ۲-۲۲ : پارامتر های سازه ربات ۵۶
شکل ۲-۲۳ : نمای کنترلر ساختاری طراحی شده ۵۹
شکل ۲-۲۴ : پارامترهای موتور DC با گیربکس ۶۱
شکل ۲-۲۵ : نمودار کالیبراسیون پارامتر K ۶۴
شکل ۲-۲۶ : طرح بلوکی کنترلر LQR ۷۶
شکل ۳-۱ : شبیه سازی متغیر حالت موقعیت غلتک به ازای ورودی پله موقعیت ۷۸
شکل ۳-۲ : خروجی سنسور موقعیت غلتک به ازای اعمال پله موقعیت به ورودی کنترلر ۷۹
شکل ۳-۳ : خروجی سنسور موقعیت غلتک به ازای اعمال پله موقعیت به ورودی کنترلر با ضرایب نا مناسب ۸۰
شکل ۳-۴ : شبیه سازی متغیر حالت سرعت غلتک به ازای ورودی پله موقعیت ۸۰
شکل ۳-۵ : خروجی سرعت غلتک به ازای اعمال پله موقعیت به ورودی کنترلر ۸۱
شکل ۳-۶ : شبیه سازی متغیر حالت جریان موتور به ازای ورودی پله موقعیت ۸۲
شکل ۳-۷ : خروجی جریان موتور به ازای اعمال پله موقعیت به ورودی کنترلر ۸۲
شکل ۳-۸ : شبیه سازی خروجی کنترلر به ازای ورودی پله موقعیت ۸۴
شکل ۳-۹ : نتایج حاصل از تعقیب مسیر دایره‌ای توسط مجری نهایی ۸۵

فهرست جداول

جدول ۱-۱ : نام‌گذاری بر اساس درجات آزادی ۱۳

جدول ۱-۲ : محتوی بسته‌های داده ارسالی از کامپیوتر ۳۶

جدول ۲-۲ : محتوی بسته‌های داده دریافتی توسط کامپیوتر ۳۸

جدول ۳-۲ : داده‌های فرکانس سیگنال انکودر و زمان اندازه گیری شده ۴۸

جدول ۴-۲ : داده‌های شناسایی ضریب K ۶۳

فهرست علائم اختصاری

DOF	Degree of freedom
EF	End Effector
3R3P	3Revolute 3Prismatic
CRPM	Compelitely Restrained Positioning Mechanism
IRPM	Incompelitely Restrained Positioning Mechanism
RRPM	Redundantly Restrained Positioning Mechanism
LQR	Linear Quadratic Regulator

فصل اول

بررسی منابع

مقدمه

رباتها همواره یکی از مفیدترین ماشینها برای کمک به بشر در زمینه های مختلف بوده اند. از جمله می‌توان به استفاده از آنها در عملیات امداد و نجات، کار با مواد خطرناک برای انسان نظیر مواد مذاب و رادیواکیو، انجام کارهای تکراری و خسته کننده و نیز انجام کاری با دقت بالا اشاره کرد. از انواع رباتهای پر کاربرد در صنعت رباتهای محاسبه‌گر[1] می‌باشند که در دو گروه رباتهای سریال و موازی قرار می‌گیرند. رباتهای موازی به دلیل دارا بودن به ویژگی های خاصی در عملیات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی از بزرگترین و مشهورترین رباتهای موازی کابلی در ساختار یک تلسکوپ رادیویی در کشور کانادا مورد استفاده قرار گرفته است که بدنه منعکس کننده در داخل یک دره می‌باشد و گیرنده آن به مجری نهایی[2] ربات کابلی متصل است. همچنین مجری نهایی به یک بالون هیدروژنی متصل است و این بالون نیروی وزن مجری نهایی و کابلها را خنثی می‌کند. مهندسان با کنترل طول کابلها موقعیت مجری نهایی را در کانون سطح منعکس کننده قرار می‌دهند تا سیگنال مناسب را در یافت کنند. این تلسکوپ در حال حاضر بزرگترین تلسکوپ ساخت بشر می‌باشد و همچنین کنترل مجری نهایی جز توسط ربات پارالل کابلی نمی‌توانست تحقق بپذیرد.

یک نمونه دیگر از کاربرد رباتهای موازی استفاده برای کنترل یک دوربین در فضا جهت عملیات فیلمبرداری می‌باشد. این دوربین که با نام دوربین عنکبوتی[3] مشهور می‌باشد در کشورهای مختلف در ورزشگاه ها نصب گردیده و از بالای زمین مسابقه تصاویر مهیجی را فیلمبرداری می‌کند. ساختار این ربات به این صورت می‌باشد انتهای چهار الی شش کابل مقاوم در برابر کشش به یک سیستم تعادلی مجهز به دوربین متصل می‌شود و همچنین هر کابل برروی یک سیستم مکانیکی جمع می‌شود و هر سیستم با آزاد یا جمع کردن کابلها موجب تغییر موقعیت دوربین در فضا می‌گردد. در یک سطح بالاتر از کنترل کننده‌های اتوماتیک یک کاربر که معمولا یک کارگردان تلویزیونی می‌باشد با استفاده از نرم افزارها و کلیدها دستورات مربوط به نحوه حرکت دوربین را صادر می‌کند.

از کشورهای دارای تکنولوژی ساخت این ربات می‌توان به آمریکا، آلمان و اتریش اشاره کرد. به دلیل قیمت بسیار بالای این ربات، معمولا کشورهای آسیایی اقدام به خرید این ربات نمی‌کنند و تنها در مسابقات مهم این ربات را اجاره می‌کنند. قیمت تخمینی ربات با توجه به خبرگزاری های داخل کشور حدود دو میلیارد تومان برآورد می‌شود.

---

[1] Manipulator Robot
[2] End-Effector
[3] Spider Cam

ایران به عنوان اولین کشور در خاورمیانه اقدام به خرید این ربات نموده در ورزشگاه آزادی تهران نصب کرده است ولی با توجه به بوجود آمدن مشکلات فنی در ربات و نیز وجود تحریم‌ها این ربات به صورت غیر قابل استفاده درآمده است. در نهایت مشکلات بوجود آمده ما را بر آن داشت تا گامی در جهت ساخت این ربات و ایجاد تکنولوژی آن در کشور برداریم تا شاید نتایج حاصل موجب رفع مشکلات استفاده از این ربات، خروج ارز و حتی صادرات به کشورهای دیگر گردد.

این پایان نامه از سه فصل مجزا تشکیل یافته است. در فصل اول که با نام پیشینه کار دیگران نام برده شده، ابتدا به انواع رباتهای موازی و مزیتها و مشکلات استفاده از آن اشاره و سپس تاریخچه استفاده از رباتهای کابلی موازی بررسی گردیده و در نهایت روشهای کنترلی مختلف استفاده شده در ساختارهای مختلف بررسی شده است. در فصل دوم با نام مواد و روشها، به توصیف اجزای داخلی ربات، طراحی‌های انجام شده و الگوریتمهای کنترلی پرداخته‌ایم که بیانگر تکنولوژیهای استفاده شده در این ربات می‌باشد. در فصل آخر نیز نتایج حاصل از طراحی این ربات وکنترلرها با استفاده از نمودارها به نمایش گذاشته شده‌اند.

۱-۱ پیشینه کار دیگران

ربات ماهر به رباتی گفته می شود که در آن یک مجری نهایی که به مجموعه ای از لینک ها و موتورها متصل است وظیفه انجام عملیاتی را در یک محیط محدود و مشخص بر عهده دارد. تعدادی از ویژگیهای این رباتها مورد توجه مهندسین طراح و همچنین کاربران آنها می باشد. بدیهی است که هرچه توانایی های ربات در هر یک از این ویژگی ها بیشتر باشد آن ربات بیشتری مورد توجه خواهد بود. در زیر تعدادی از این پارامترها را نام برده و در ادامه به بررسی آنها می پردازیم.

۱- رفتار قابل کنترل

۲- دقت

۳- تکرارپذیری

۴- میزان مصرف انرژی

۵- میزان توانایی جابجایی اجسام سنگین

۶- سرعت و شتاب مجری نهایی

۷- میزان فضای کاری مجری نهایی

یکی از پارامتر های مهم این رباتها برای مهندسین طراح، ایجاد یک مکانیزم غیر پیچیده و قابل کنترل می باشد. ایجاد ساختارهای بسیار پیچیده می‌تواند منجر به دو مشکل اساسی گردد. اول اینکه مدل ریاضی که برای ربات استخراج می شود می تواند غیر قابل کنترل باشد یا با استفاده از روشهای موجود برای طراحی کنترلر ها نتوان کنترلر مناسب طراحی کرد. در حالت دیگر ممکن است معادلات استخراج شده کنترل پذیر بوده اما با استفاده از پردازنده های موجود توانایی انجام پردازش های لازم برای اجرای الگوریتم های کنترلی را نداشته باشیم.

دقت حرکت مجری نهایی ربات پارامتر مهم دیگر آن می باشد. دقت مجری نهایی به این معنا است که کوچکترین میزان جابجایی مجری نهایی در راستا های X، Y و Z چه مقدار می باشد. این پارامتر برای رباتهایی که عملیاتی مانند جوشکاری، برشکاری و یا سوراخکاری انجام می دهند بسیار مهم است. برای مثال برشهایی با دقت کمتر از ۰.۱ میلیمتر در محفظه کیسه هوای یک اتومبیل می تواند منجر به باز نشدن کیسه هوا در تصادفات و صدمه دیدن راننده گردد. مثال دیگر رباتهای مورد استفاده در کارخانه های ریخته گری می‌باشند که در آنها از رباتهایی با دقت ۱ میلیمتر استفاده می‌گردد و به دقت بسیار بالا برای انتقال مواد مذاب نیاز نیست. از این رو رباتهای متفاوتی با دقت های متفاوت برای عملیات مختلف طراحی و مورد استفاده قرار می گیرند.

قابلیت تکرار پذیری به میزان خطایی که در موقعیت مجری نهایی در حرکت از نقاط مختلف در فضای کاری به یک نقطه مرجع ایجاد می شود گفته می شود. بالا بودن تکرار پذیری ربات نشان می دهد که در عملیات تکراری مجری نهایی با دقت بالاتری به نقطه مقصد خواهد رسید.

میزان مصرف انرژی سیستم ها از جمله بحث های مهم در قرن حاضر می باشد. به دلیل بالا بودن هزینه انرژی، کاربران این رباتها تمایل دارند از سیستم‌هایی با میزان مصرف انرژی کمتر استفاده نمایند. ممکن است ساختار های متفاوتی برای انجام یک عملیات مناسب باشند اما تنها یکی از این رباتها می‌تواند دارای مصرف بهینه‌تر نسبت به سایر رباتها در آن عملیات خاص باشد. از این رو مهندسان نیز در سالهای گذشته سعی در ایجاد الگوریتمهای جدید برای کاهش مصرف انرژی داشته اند.

توانایی جابجایی اجسام سنگین که با عبارت وزن قابل تحمل[4] مشخص می‌گردد عامل دیگری در دسته بندی رباتها می باشد. هرچه ربات دارای وزن قابل تحمل بیشتری باشد اجسام سنگینتری را می تواند جابجا کند. این پارامتر با پارامتر های دیگر ارتباط نزدیکی دارد، به صورتی که برای داشتن وزن قابل تحمل بالا ربات باید به لینک های بزرگتر ونیز محرک های قویتر مجهز باشد و این خود باعث افزایش اندازه ربات و مصرف انرژی بیشتر می شود. در ادامه خواهیم دید که این مسئله برای رباتهای کابلی چندان مشکل ساز نمی‌باشد و این از جمله مزیتهای رباتها با لینک های کابلی می باشد.

سرعت، شتاب و فضای کاری ربات در عملیات مختلف از جمله پارامتر های مهم می باشند. مجری نهایی هرچه سرعت و شتاب بیشتری داشته باشد بازه وسیعتری از عملیات را پوشش می دهد این در حالی است که وجود چنین خاصیتی منوط به افزایش میزان انرژی مصرفی و بالا رفتن میزان استهلاک ربات می باشد.

در تمامی موارد ذکر شده مشاهده می شود که برای کاربرد های مختلف بایستی از مکانیزم های مختلف استفاده شود تا یک تعادل بین هزینه و میزان کارایی برای کاربر برقرار شود. اما وجود ساختاری که از اکثر مزیت های یا ربات ماهر برخوردار باشد بیشتر مورد توجه است.

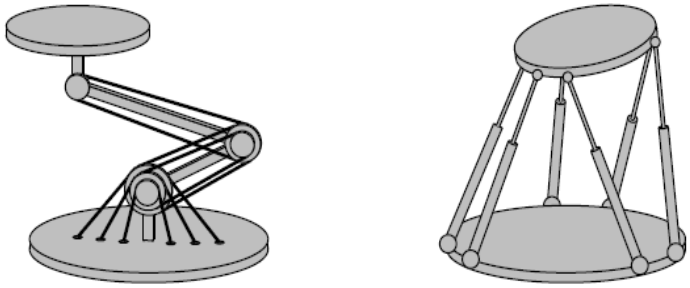
به طور کلی رباتهای ماهر به دو دسته اصلی تقسیم بندی می شوند.

۱- رباتهای ماهر سریال

۲- رباتهای ماهر موازی

[4] Payload

رباتهای ماهر سریال رباتهایی هستند که در آنها لینک ها به صورت سری به یکدیگر متصل می شوند و ابتدای لینک اول به یک پایه ثابت و انتهای لینک آخر به مجری نهایی متصل است و نیز هر یک از نقاط اتصال[۵] توسط یک محرک کنترل می شوند. رباتهای موازی رباتهایی می باشند که در آنها هریک از لینکها ها به طور مستقیم به پایه ثابت و مجری نهایی متصل می باشند هر کدام از آنها می توانند دارای یک محرک باشند و یا به صورت غیر فعال[۶] قرار گیرند. در زیر تصویری از هر کدام از این رباتها را مشاهده می کنید.



شکل ۱-۱ : نمونه‌ای از رباتهای سریال (چپ) و موازی (راست) [۵]

نمونه های بسیار زیادی از این دو ساختار طراحی شده اند که به معرفی یک نمونه مشهور از هر نوع ربات می پردازیم.

۱-۲-۱ ربات سریال اسکای واش[۷]

این ربات که یکی از نمونه های پر کاربرد در صنعت هواپیما می باشد یک ربات سریال با ۶ لینک است که برای شست و شوی بدنه هواپیما ها و همچنین بررسی آن به کار می رود. دلیل استفاده از تعداد لینک های بیشتر ایجاد قابلیت حرکت[۸] برای مجری نهایی می باشد. از پارامتر های دیگر این ربات می توان به فضای کاری زیاد، دقت و تکرارپذیری کم، قابلیت تحمل وزن کم نسبت به وزن خود ربات و مصرف بالای انرژی آن اشاره کرد.

شکل ۲-۱ : ربات سریال اسکای واش [۳۶]

[5] Joints
[6] Passive
[7] Sky Wash
[8] Redundancy

۱-۲-۲ ربات موازی هگزابوت[9]

این ربات دارای مکانیزمی با ۶ در جه آزادی در مجری نهایی است که یک نمونه از رباتهای موازی بسیار پرکاربرد نیز می باشد. مهمترین مزیت این ربات دقت بسیار بالا در حرکت و همچنین قابلیت تحمل وزن زیاد نسبت به وزن خود ربات می‌باشد. البته می توان گفت این مزیت ها در اکثر رباتهای موازی وجود دارد ولیکن عیب عمده ای ربات کم بودن فضای کاری آن است. در تصویر زیر ربات زاویه سطح مناسب را برای قطعه متصل به آن جهت انجام عمل فرزکاری ایجاد می کند.

شکل ۳-۱ : ربات موازی هگزابوت [۳۲]

۱-۲-۳ رباتهای کابلی

کابلها به دلیل ویژگی های خاصی که دارند به طور متعدد در رباتهای ماهر سریال و موازی مورد استفاده قرار می گیرند که در ادامه به بررسی مزایا و معایب استفاده از آنها خواهیم پرداخت. در تصویر زیر دو نمونه استفاده از کابلها در جرثقیل ها (رباتهای سریال) را مشاهده می کنید.

شکل ۴-۱ : استفاده از کابل به عنوان لینک [۳۱]

[9] Hexabot

۱-۲-۳-۱ مزایای استفاده از کابلها

لینک ها در رباتها با توجه به خواص استاتیکی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از این خواص عبارتند از:

- چگالی ماده استفاده شده و وزن نهایی لینک
- مقاومت کششی لینک
- مقاومت فشاری لینک
- مقاومت پیچشی لینک
- مقاومت خمشی لینک

در مقایسه لینکهای صلب و لینکهای کابلی کاملا مشهود است که مقاومت فشاری، کششی، پیچشی و خمشی در لینکهای صلب به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از کابلهای فولادی می‌باشد ولی در پارامتر وزن کابلها برتری دارند. همانطور که قبلا اشاره شد استفاده از لینکهای صلب در ابعاد بزرگ باعث تلف شدن توان محرکها برای تحمل وزن خود لینکها می‌شود و طراحی ساختار رباتی که از نیاز به مقاومت فشاری، پیچشی و خمشی فارغ باشد موجب می‌شود تا بتوانیم از کابلها به جای لینکهای صلب استفاده کنیم و در نتیجه با صرف توان کمتری به فضای کاری بیشتر دسترسی داشته باشیم. از مزایای دیگر می‌توان به انتقال محرکه ها به یک چهارچوب ثابت اشاره کرد. برای مثال در ربات سریال در شکل ۱-۱ گشتاور اعمالی به هر مفصل توسط کابلها اعمال میگردد که محرک هر کابل نیز در پایه ثابت ربات قرار گرفته است.

از معایب لینکهای کابلی می توان به اعمال نیرو تنها در یک جهت، لزوم وجود یک نیروی حداقل در انتهای کابل، غیر قابل استفاده بودن در ابعاد بسیار ریز و پایین بودن دقت مجری نهایی در ابعاد بسیار بزرگ اشاره کرد.

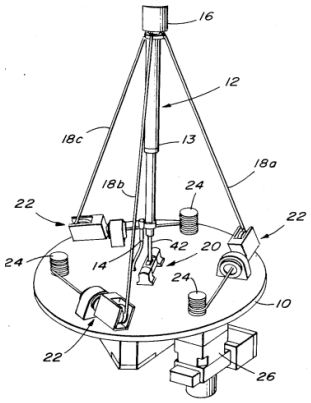
۱-۲-۳-۲ ساختارها

برای اولین بار ساموئل لندزبرگر[10] و همکارانش در سال ۱۹۸۷ در دانشگاه ماساچوست آمریکا از کابلها برای کنترل موقعیت نهایی یک ربات موازی استفاده کردند. در این ربات که دارای مجری نهایی با سه درج آزادی می‌باشد از سه لینک کابلی دارای محرک و یک لینک صلب بدون محرک است که وظیفه لینک صلب اعمال نیروی حداقل به مجری نهایی در جهت خلاف کشش کابلها می‌باشد تا کابلها دائما در حال کشش باشند. این عمل توسط فنری که در

[10] Samuel E.Landsberger

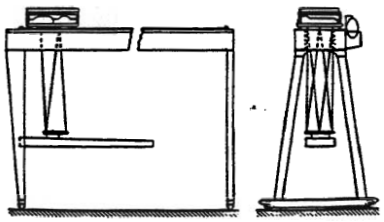
داخل آن تعبیه شده انجام می‌گیرد. این پروژه پس از ساخت در مرکز ثبت اختراعات امریکا به ثبت رسیده و سپس در کارخانه های صنعتی جهت انجام عملیات جاگذاری قطعات مورد استفاده قرار گرفته است.[۳۴]

همانطور که در تصویر زیر مشاهده می‌شود موتورها در پایه ثابت ربات قرار گرفته‌اند و کابلها به راحتی توسط پولی ها تا مجری نهایی انتقال یافته اند.



شکل ۵-۱ : اولین ربات کابلی موازی ساخته شده[۳۴]

ربات دیگری که به کرات در تعمیرات و رنگ کردن بدنه کشتی ها مورد استفاده قرار گرفته ربوکرین[11] نام دارد. این ربات که یک جرثقیل با مجری نهایی شش درجه آزادی می‌باشد برای اولین بار توسط جیمز آلبس[12] و همکارانش در سال ۱۹۸۹ طراحی و ساخته شد و تا سال ۲۰۰۰ مدل های مشابه توسط طراحان دیگر طراحی گردید. ساختار این ربات به این صورت می‌باشد که یک بدنه ثابت وظیفه تحمل وزن کابلها و تجهیزات متصل به مجری نهایی و نیز حرکت دادن مجری نهایی در محورهای x و y را بر عهده دارد و کابلها نیز وظیفه کنترل موقعیت مجری نهایی در محور z و نیز زوایای رول و پیچ را عهده دارد هستند.[۳]



شکل ۶-۱ : ربات روبوکرین [۳]

[11] Robocrane
[12] James Albus