بسم الله الرحمن الرحیم

۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک

تخمین دقیق موقعیت مجری‌نهایی ربات KNTU CDRPM با استفاده از سنسورهای موقعیت و نیروی کابلها

توسط:

رضا افتاده

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا تقی‌راد

تابستان ۱۳۸۹

تأییدیّه هیات داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: رضاافتاده

را با عنوان: تخمین دقیق موقعیت مجری‌نهایی ربات KNTU CDRPM با استفاده از سنسورهای موقعیت و نیروی کابلها

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی/ کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکترحمیدرضا تقی‌راد	دانشیار	
۲- استاد مشاور			
۳- استاد مشاور			
۴- استاد ممتحن	دکتر علی موسویان	استاد	
۵- استاد ممتحن	دکتر مجید مقدم	دانشیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی			

اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان نامه: تخمین دقیق موقعیت مجری نهایی ربات KNTU CDRPM با استفاده از سنسورهای موقعیت و نیروی کابل‌ها

استاد راهنما: دکتر حمیدرضا تقی‌راد

نام دانشجو: رضاافتاده

شماره دانشجویی: ۸۶۰۴۱۶۴

اینجانب رضاافتاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است .به علاوه گواهی م ینمایم که مطالب مندرج در پایا ننامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه رعایت شده است.

رضاافتاده

شهریور ۱۳۸۹

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد . هرگونه نسخه برداری از کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

چکیده

ربات‌های موازی‌کابلی با توجه به وسعت فضای‌کاری، بالا بودن نسبت بار قابل حمل به وزن ربات و امکان تولید شتاب‌های بسیار زیاد به عنوان گزینه مناسبی برای انجام بسیاری از عملیات‌های صنعتی درنظر گرفته‌می‌شوند. این پایان‌نامه دو رویکرد تئوری و عملی را برای پیشبرد هرچه بیشتر زمینه‌های تئوری و فنی این دسته از ربات‌ها پیگیری می‌کند. در رویکرد تئوری، بررسی سینماتیکی دقیقی از ربات‌های موازی کابلی افزونه در دو مدل صفحه‌ای و فضایی صورت می‌گیرد. همچنین حل تحلیلی جدیدی برای معادلات سینماتیک مستقیم مدل صفحه‌ای این ربات با استفاده از داده‌های حسگرهای نیرو ارائه می‌گردد که سرعت و دقت به مراتب بالاتری نسبت به حل‌های پیشین این مسأله دارا می‌باشد. در تحلیل دینامیکی این ربات‌ها ابتدا شیوه نوینی برای استخراج معادلات دینامیکی به فرم‌بسته ربات‌های موازی کابلی در فرم کلی و با فرض صلب بودن کابل‌ها ارائه می‌گردد. در این بخش با استفاده از دینامیک سیستم‌های جرم‌متغیر، ورود و خروج کابل به فضای‌کاری مدل‌می‌شود. معادلات دینامیکی ربات از دو روش نیوتن-اویلر و لاگرانژ استخراج گردیده و یکسان بودن معادلات به دست‌آمده از هر دو روش، نشان داده‌می‌شود. سپس مدل دینامیکی جامعی با در نظرگرفتن کشسانی کابل‌ها استخراج گردیده که برای طیف گسترده‌ای از ربات‌های کابلی قابل استفاده‌می‌باشد. به منظور اعتبارسنجی معادلات به دست‌آمده نشان داده‌می‌شود که بسیاری از مدل‌های کشسانی ارائه‌شده برای بازوهای کابلی حالت خاصی از این معادلات جامع می‌باشند. در آخر رویکرد عملی این پایان‌نامه که طراحی و ساخت سیستم‌های مکانیکی ربات کابلی KNTU CDRPM می‌باشد، بیان‌شده و نحوه انتخاب کابل، حسگرهای نیروی و چهارچوب نگهدارنده این ربات با توجه به اهداف پروژه شرح داده‌می‌شود. همچنین طرح جدیدی برای سیستم کابل جمع‌کن این ربات معرفی و شمایی از نمونه ساخته‌شده آن همراه با نقشه ساخت قطعات، ارائه می‌گردد.

کلید واژه: ربات موازی، ربات موازی‌کابلی، معادلات دینامیکی صریح، سیستم‌های جرم‌متغیر، معادلات کشسانی کابل.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د

فهرست شکل‌ها ..... ه

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ز

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- ربات‌های سری ۳

۱-۳- ربات‌های‌موازی ۶

۱-۴- ربات‌های موازی کابلی ۹

۱-۴-۱- ربات Skycam ۱۱

۱-۴-۲- ربات Robocrane ۱۲

۱-۵- مقایسه ۱۴

۱-۶- معرفی ربات موازی کابلی افزونه دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ۱۵

۱-۷- رویکرد پایان‌نامه ۱۶

فصل ۲- تحلیل سینماتیکی ربات CDRPM ۱۸

۲-۱- مقدمه ۱۸

۲-۲- یادآوری چند رابطه مهم ریاضی ۲۰

۲-۳- مکانیزم ربات ۲۰

۲-۳-۱- فرم فضایی ربات CDRPM ۲۱

۲-۳-۲- فرم صفحه‌ای ربات CDRPM ۲۲

۲-۴- سینماتیک معکوس ۲۴

۲-۴-۱- ماتریس ژاکوبین ربات ۲۴

۲-۵- سینماتیک مستقیم ۲۷

۲-۵-۱- حل بسته سینماتیک مستقیم ربات صفحه‌ای با کمک حسگرهای نیرو ۳۰

۲-۵-۲- مقایسه و شبیه‌سازی ۳۳

۲-۶- جمع‌بندی ۳۷

فصل ۳- مدل دینامیکی فرم‌بسته ربات‌های کابلی با کابل‌های صلب ۳۸
۳-۱- مقدمه ۳۸
۳-۲- دینامیک سیستم‌های جرم‌متغیر ۴۰
۳-۳- تحلیل سرعت و شتاب ۴۲
۳-۴- استخراج معادلات ضمنی ربات با روش نیوتن-اویلر ۴۴
۳-۴-۱- معادلات کابل در فضای‌کاری ۴۶
۳-۴-۲- معادلات کابل خارج از فضای‌کاری ۴۸
۳-۴-۳- معادلات مجری‌نهایی ۵۰
۳-۵- استخراج معادلات ربات به فرم‌بسته ۵۱
۳-۵-۱- فرم بسته معادلات دینامیکی کابل ۵۱
۳-۵-۲- فرم بسته معادلات دینامیکی مجری‌نهایی ۵۲
۳-۵-۳- فرم بسته معادلات دینامیکی کل ربات ۵۳
۳-۵-۴- بررسی اثر اصطکاک درنقطه ورود و خروج کابل به فضای‌کاری ۵۵
۳-۶- استخراج برخی روابط سودمند ماتریسی ۵۷
۳-۷- بررسی ویژگی‌های اساسی معادلات فرم‌بسته استخراج شده ۵۹
۳-۷-۱- متقارن بودن و مثبت معین بودن ماتریس جرمی ۵۹
۳-۷-۲- مشخصه پادمتقارنی معادلات دینامیک به فرم‌بسته ۶۰
۳-۸- استخراج معادلات از روش لاگرانژ ۶۱
۳-۸-۱- استخراج ماتریس جرمی بازوی کابلی و مجری‌نهایی ۶۲
۳-۸-۲- استخراج ماتریس شتاب‌های گریز ازمرکز و کریولیس بازوی کابلی و مجری‌نهایی ۶۳
۳-۸-۳- استخراج بردارهای نیروی تعمیم‌یافته و وزن بازوی کابلی و مجری‌نهایی ۶۵
۳-۹- شبیه‌سازی ۶۶
۳-۱۰- جمع‌بندی ۷۰

فصل ۴- استخراج مدل جامع دینامیکی ربات‌های کابلی با کابل‌های کشسان ۷۱
۴-۱- مقدمه ۷۱
۴-۲- مدل کشسان یک کابل سه‌بعدی ۷۳
۴-۲-۱- استخراج مدل ۷۴
۴-۲-۲- مقایسه و اعتبار سنجی مدل استخراج شده ۸۰
۴-۳- مدل دینامیکی ربات موازی کابلی با کابل‌های کشسان ۸۶
۴-۴- جمع‌بندی ۸۷

فصل ۵- طراحی و ساخت سیستم‌های مکانیکی ربات موازی کابلی KNTU CDRPM ۸۸

۵-۱- مقدمه ۸۸

۵-۲- سرو موتور و گیربکس انتخاب‌شده ۸۹

۵-۳- سیستم کنترل رایانه‌ای ۹۱

۵-۴- انتخاب کابل و حسگرهای نیرو ۹۲

۵-۵- طراحی وساخت کابل جمع‌کن ۹۸

۵-۵-۱- نحوه کار کابل جمع کن ۹۹

۵-۵-۲- برینگ های خطی ۱۰۱

۵-۵-۳- کوپلینگ بین گیربکس و کابل جمع‌کن ۱۰۲

۵-۵-۴- فلنج‌های جلو و عقب ۱۰۳

۵-۵-۵- پیچ راهنما ۱۰۴

۵-۵-۶- درام اصلی ۱۰۵

۵-۵-۷- مهره پیچ راهنما ۱۰۵

۵-۶- طراحی وساخت مجری‌نهایی ۱۰۶

۵-۷- طراحی و ساخت چهارچوب ربات ۱۰۷

۵-۸- جمع‌بندی ۱۰۹

فصل ۶- نتیجه‌گیری وپیشنهادات ۱۱۱

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۱

۶-۲- پیشنهادات ۱۱۲

ضمیمه أ -مجری‌نهایی ۱۱۴

ضمیمه ب -نقشه‌های ساخت کابل جمع‌کن ۱۱۵

مقالات استخراج شده ۱۳۱

فهرست مراجع ۱۳۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: مزایا و معایب عملگرهای موازی..... ۹
جدول ۱-۲: مقایسه ویژگی‌های مختلف ربات‌های سری، موازی و کابلی افزونه با یکدیگر..... ۱۴
جدول ۱-۳: مشخصات فنی فاز یک ربات KNTU CDRPM..... ۱۶
جدول ۲-۱: مقادیر عددی پارامترهای ساختاری ربات در شبیه‌سازی..... ۳۵
جدول ۵-۱: مشخصات فنی کابل‌های فلزی هواپیما..... ۹۴
جدول ۵-۲: مشخصات کابل Spectra انتخاب‌شده..... ۹۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: نمایی از ربات M-2000*i*A شرکت فانوک ۵
شکل ۱-۲: فضای کاری ربات M-2000*i*A شرکت فانوک ۵
شکل ۱-۳: نمونه‌ای از یک ربات موازی ۷
شکل ۱-۴: نمونه‌ای از مکانیزم SGP به کاررفته دریک شبیه‌ساز پرواز ۸
شکل ۱-۵: نمونه ای از ربات موازی استفاده شده در ماشینکاری بسیار دقیق ۸
شکل ۱-۶: شمایی از ربات کابلی رادیوتلسکوپ LAR ۱۰
شکل ۱-۷: ربات موازی SkyCam در تصویربرداری از یک استادیوم ورزشی ۱۲
شکل ۱-۸: نمایی از ربات موازی Robocarne ۱۳
شکل ۲-۱: نمای شماتیکی از ربات CDRPM ۲۱
شکل ۲-۲: نمای شماتیکی از ربات CDRPM در فرم صفحه‌ای ۲۳
شکل ۲-۳: دیاگرام حل سینماتیک مستقیم ربات با استفاده از تابع fsolve ۲۸
شکل ۲-۴: منحنی‌های مسیر انتخاب شده برای مجری‌نهایی ۲۹
شکل ۲-۵: اختلاف منحنی‌های به دست آمده از حل سینماتیک معکوس با منحنی‌های اصلی ۲۹
شکل ۲-۶: منحنی‌های مسیر انتخابی برای مجری‌نهایی ۳۴
شکل ۲-۷: طول کابل‌ها حاصل از حل سینماتیک معکوس ۳۵
شکل ۲-۸: منحنی نیروهای وارد بر مجری‌نهایی و نیروهای کششی وارد بر کابل‌ها ۳۵
شکل ۲-۹: نمودار خطای حل سینماتیک مستقیم به روش پیشنهادی ۳۶
شکل ۲-۱۰: نمودار خطای حل سینماتیک مستقیم به روش مرسوم ۳۶
شکل ۳-۱: حجم کنترلی یک سیستم جرم‌متغیر ۴۰
شکل ۳-۲: مدل جرم‌متغیر Cveticanin ۴۱
شکل ۳-۳: دیاگرام جسم‌آزاد بازوی کابلی در فضای‌کاری ۴۶
شکل ۳-۴: دیاگرام آزاد کل کابل یک بازوی کابلی ۴۹
شکل ۳-۵: ساختار هندسی ربات شبیه‌سازی شده ۶۶
شکل ۳-۶: زاویای اویلر مجری‌نهایی ۶۸
شکل ۳-۷: بردار مقعیت مجری‌نهایی ۶۸
شکل ۳-۸: نمودار اثر نیروی اینرسی بازوهای کابلی ۶۹

شکل ۴-۱: بازوی کابلی کشسان ۷۴
شکل ۴-۲: تغییرات المان‌های کابل ۷۵
شکل ۵-۱: شمایی از موتور، درایور و گیربکس انتخاب شده برای ربات ۹۰
شکل ۵-۲: ارتباط بین اجزای سخت‌افزاری در یک حلقه کنترل ۹۱
شکل ۵-۳: شمایی از کابل‌های فلزی تابیده شده ۹۳
شکل ۵-۴: الگوهای بافت تارها در کابل‌های فلزی هواپیما ۹۳
شکل ۵-۵: شمایی از کابل‌های Spectra ۹۵
شکل ۵-۶: منحنی تنش-کرنش فیبرهای کابل Spectra ۹۶
شکل ۵-۷: حسگر نیروی Flexiforce ۹۷
شکل ۵-۸: نگهدارنده حسگر ۹۷
شکل ۵-۹: شمایی از کابل جمع‌کن طراحی‌شده ۹۸
شکل ۵-۱۰: شمایی از کابل جمع‌کن ساخته‌شده ۹۹
شکل ۵-۱۱: نقشه انفجاری سیستم کابل جمع‌کن ۱۰۰
شکل ۵-۱۲: نمونه‌ای از یک برینگ خطی ۱۰۱
شکل ۵-۱۳: نحوه‌های مختلف جازنی یک برینگ خطی ۱۰۲
شکل ۵-۱۴: کوپلینگ‌های طراحی شده بین گیربکس و کابل جمع‌کن ۱۰۳
شکل ۵-۱۵: به ترتیب از راست به چپ، شمایی از فلنج‌های جلو و عقب ۱۰۳
شکل ۵-۱۶: پیچ راهنما ۱۰۴
شکل ۵-۱۷: درام اصلی کابل جمع‌کن ۱۰۴
شکل ۵-۱۸: مهره پیچ راهنما ۱۰۵
شکل ۵-۱۹: مجری‌نهایی طراحی شده برای ربات ۱۰۶
شکل ۵-۲۰: استفاده از پروفیل‌های آلومینیوم در صنایع مختلف ۱۰۷
شکل ۵-۲۱: پایه‌های استفاده شده در فریم ۱۰۸
شکل ۵-۲۲: صفحه واسط بین فریم و پایه ۱۰۸
شکل ۵-۲۳: تصویری از فریم ساخته‌شده ۱۰۹
شکل ۵-۲۴: تصویری از فریم ربات و کابل جمع‌کن‌های سوار شده برروی آن ۱۱۰

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
کرنش خطی	ε
تنش	σ
ضریب کشسانی	E
چگالی	ρ
تعداد درجات آزادی سیستم	n
تعداد بازوهای کابلی روبات CDRPM	m
تانسور اینرسی	$\boldsymbol{I}$
ماتریس دوران	$\boldsymbol{R}$
فرکانس طبیعی	ω_n

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

امروزه، نقش اساسی ربات‌ها در اکثر قریب به اتفاق فرآیندهای صنعتی برکسی پوشیده نیست. استفاده از ربات‌ها در بخش‌های مختلف اتوماسیون صنعتی، از ساخت و مونتاژ قطعات گرفته تا بسته بندی و انتقال محصولات، سبب افزایش انعطاف‌پذیری در ساخت و در نتیجه کاهش چشمگیر زمان و هزینه تولید شده‌است. پیشرفت فن‌آوری در زمینه علم رباتیک سبب شده که ربات‌ها پا به حوزه‌هایی فراتر از کارخانجات و صنایع گذاشته و در بسیاری از فرآیندهای خدماتی، تجاری، پزشکی و... در کنار انسان و یا حتی در تعامل با او به فعالیت بپردازند [۱, ۲].

تعریف یکتایی برای ربات که به‌صورت عمومی قابل قبول‌باشد، وجود ندارد و این واژه از دیدگاه‌های مختلفی تعریف شده‌است، به عنوان مثال استاندارد بین‌المللی ایزو[1] ۸۳۷۳ واژه ربات را بدین گونه تعریف می‌کند: "یک عملگر با کنترل اتوماتیک، چندمنظوره، قابل برنامه‌ریزی با بیش از سه محور که ثابت یا متحرک بوده و درفرآیندهای اتوماسیون صنعتی به کارگرفته می‌شود". از سوی دیگر کلمه ربات توسط واژه‌نامه کمبریج[2] به صورت "یک ماشین برای انجام عملیات‌های خودکار که توسط رایانه کنترل می‌شود." بیان می‌گردد. تعریف جامع‌تری از واژه ربات را متعلق به انجمن رباتیک آمریکا ست که در آن ربات به صورت زیر تعریف می‌گردد:

" ربات، یک عملگر چند منظوره با قابلیت برنامه‌ریزی‌های مختلف بوده که برای انتقال اشیاء، قطعات و ابزارها توسط حرکت‌های مختلف برنامه‌ریزی شده وانجام طیف گسترده‌ای از وظایف به کار گرفته می‌شود."

نکته قابل توجه در این زمینه این است که با وجود نبود یک تعریف واحد و جهانشمول از ربات، در اکثرقریب به اتفاق موارد، یک درک عمومی در بین مهندسان و صنعتگران از آنچه که یک ربات باید باشد و آنچه که می‌بایست انجام دهد، وجود دارد. به صورت خاص آنچه که یک ربات را از یک عملگر مکانیکی ساده و یایک ماشین متمایز می‌کند، انعطاف‌پذیری و قابلیت سپردن وظایف مختلف به آن می‌باشد.این امر به واسطه وجود یک سیستم قابل برنامه‌ریزی که عموما به صورت الکترونیکی در ربات تعبیه

[1] ISO
[2] Cambridge

گردیده‌است، صورت می‌پذیرد. به طورخلاصه می‌توان گفت درمقایسه با یک عملگر ساده همواره از یک ربات حدی از هوشمندی را می‌توان انتظار داشت[۳].

همان‌طور که گفته‌شد، در سالهای اخیر ربات ها نقش بزرگی در صنعت بازی کرده‌اند. این موضوع به شکلی دو طرفه هم در پیشرفت صنعت و هم علم رباتیک اثر داشته به گونه‌ای که استفاده از ربات‌ها سبب پیشرفت چشمگیر صنایع مختلف شده و همچنین این پیشرفت صنعتی سبب تقاضای بیشتر برای ربات‌هایی با کیفیت و به صورت کلی مشخصات بهتر شده که این امر سبب پیشرفت درعلم رباتیک گردیده‌است. این موضوع سبب شده که مواردی زیادی در صنعت پیش آید که دیگر ربات‌های استاندارد موجود پاسخ گوی نیازها نبوده و شکل‌های جدیدی از ربات‌ها نسبت به تصویر کلاسیک آنها مطرح و ساخته شوند تا بتوانند هرچه بهتر نیازهای صنایع مختلف را برآورده سازند.

ربات‌ها را از دیدگاه‌های متفاوتی از قبیل صفحه‌ای یا فضایی بودن، تعداد درجات آزادی، نوع عملگرها و...، می‌توان تقسیم‌بندی نمود. یکی از این تقسیم‌بندی‌ها، طبقه‌بندی ربات‌ها از حیث ساختار زنجیره‌های سینماتیکی به کار رفته در آنها می‌باشد. از این منظر می توان ربات‌ها را به سه دسته سری ، موازی و ربات‌های پایه متحرک طبقه بندی کرد. بدین منظور در اینجا تعاریف زیر برای یک زنجیره سینماتیکی ارائه می‌گردد[۴]:

- *درجه اتصال*[۱] : برای هر رابط[۲] از زنجیره سینماتیکی، تعداد رابط‌های صلبی دیگری که توسط مفاصل به آن رابط متصل شده‌اند، اصطلاحا درجه اتصال آن رابط گفته می‌شود.
- *زنجیره سینماتیکی ساده*[۳]: زنجیره‌های سینماتیکی هستند که هر عضو از آنها دارای درجه اتصال کمتر یا مساوی دو می باشد.
- *زنجیره سینماتیکی باز*[۴]: زنجیره‌های سینماتیکی ساده‌ای هستند که همه اعضای آنها به جز اعضاء دو سر این زنجیره، دارای درجه اتصال دو می‌باشند. همچنین اعضاء دو سر دارای درجه اتصال یک بوده که اصطلاحا زمین و مجری‌نهایی خوانده می‌شوند.
- -*زنجیره سینماتیکی بسته*[۵]: به زنجیره سینماتیکی اطلاق می‌شود که همه اعضاء آن به غیر از زمین دارای درجه اتصال بزرگتر یا مساوی سه باشند.

[1] Connectivity degree
[2] Link
[3] simple kinematic chain
[4] open-loop kinematic chain
[5] closed-loop kinematic chain

ربات‌های سری در واقع زنجیره‌های سینماتیکی باز هستند. در این عملگرها مجری‌نهایی توسط یکسری رابط که به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند، به زمین متصل می‌شود. ازسوی دیگر عملگرهای موازی، از چند زنجیره سینماتیکی بسته تشکیل شده‌اند که به صورت موازی مجری نهایی را به زمین متصل می‌کنند. مزایا و معایب این ربات‌ها در ادامه توضیح داده می‌شود.

۱-۲- ربات‌های سری

همان‌طورکه پیشتر گفته‌شد، ربات‌های سری، زنجیره‌های سینماتیکی باز می‌باشند که بیشترین شباهت را به بازوی انسان دارند. هدف از طراحی این‌گونه از ربات‌ها ساخت ماشین‌هایی با عملکرد مشابه با بازوی انسان بوده و عملا بیشترین کاربرد را نسبت به انواع دیگر ربات‌ها در صنایع مختلف دارا می‌باشند، به گونه‌ای که در بین صنعتگران واژه ربات عموما تدایی‌گر ربات‌های سری است.

از مزایای اصلی ربات‌های سری می‌توان به فضای‌کاری نسبتا وسیع، قابلیت انعطاف و مانور زیاد اشاره کرد. با این حال شکل قرارگیری مفاصل به صورت متوالی بر روی یکدیگر سبب به وجود آمدن معایب قابل‌توجهی در این‌گونه از ربات‌ها شده‌است. این معایب را به صورت زیر می‌توان دسته‌بندی نمود[۴]:

- سختی[1] کم، به دلیل زنجیره باز سینماتیکی.
- به وجود آمدن خطای انباشته، به سبب تجمیع خطای هر مفصل با مفاصل قبل از خود.
- لزوم حمل وزن اکثر بخش‌های خود از قبیل موتورها و... در هنگام حرکت که سبب کاهش قابلیت حمل بار مؤثر آنها می‌شود.

کمبود بار قبل حمل و دقت، در ربات‌های سری به دلیل پیکربندی مکانیکی عملگر آنها و به طور مشخص سری بودن رابط‌ها می‌باشد. این امر سبب می‌شودکه هر رابط مجبور باشد وزن رابط‌های بعد از خود را به علاوه بار مورد نیاز تحمل‌کند و این سبب به وجود آمدن گشتاورهای خمشی بزرگی درعملگر می‌شود. این گشتاورهای خمشی بزرگ سبب به وجود آمدن تغییر شکل‌های نامطلوبی در رابط‌های عملگر می‌گردد. برای حل این مشکل رابط‌ها باید بزرگتر انتخاب شوند که این مساله سبب سنگین شدن کلی عملگر می‌گردد.

از سوی دیگر دقت عملگر به شدت از تغییر شکل‌های غیر صلب رابط‌ها که توسط حسگرها داخلی عملگر نیز قابل اندازه گیری نیستند اثر می‌گیرد. مساله اصلی که در عملگرهای سری دقت را کاهش می‌دهد، به وجود آمدن خطای جمع شونده یا انباشته است. بدین معنی که هر انعطاف پذیری یا خطا در

[1] Stiffness

حسگر، در رابط یا مفصل اول به صورت سری بر رابط و مفصل بعدی اثر گذاشته و با خطای آنها جمع می‌شود. به این ترتیب یک خطای کوچک در رابط یا مفصل اول تاثیر زیادی در مکان نهایی مجری‌نهایی و در نهایت دقت کلی عملگر می‌گذارد. به عنوان مثال برای یک مفصل دورانی که به یک رابط به طول یک متر وصل شده باشد خطای ۰,۰۶ درجه در اندازه گیری زاویه مفصل به خطای ۱ میلی‌متر در موقعیت نهایی سر رابط منجر می‌شود. همچنین حضور یک جعبه دنده بر سر موتور این مفصل که عموما دارای لقی می‌باشد، این مساله را به شدت تشدید می‌کند.

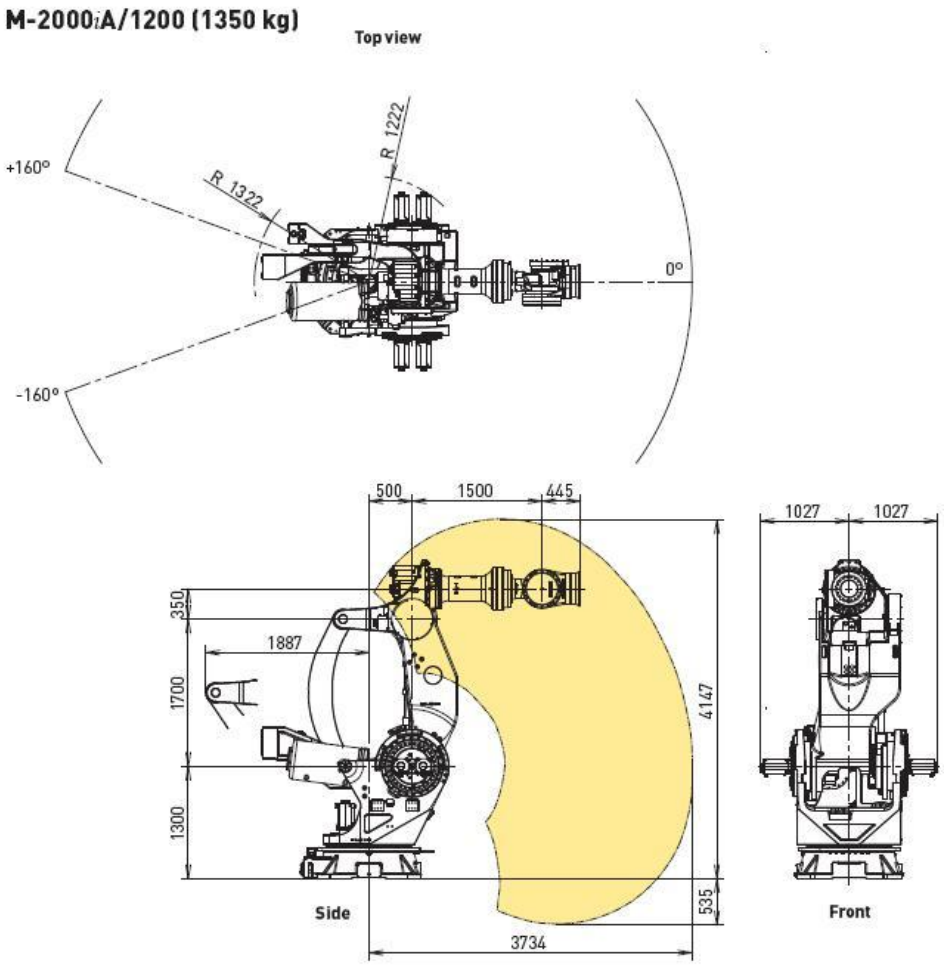
همچنین تخطی از قیدهای هندسی مشخص شده در طراحی در ساخت عملگر سری تاثیر زیادی در دقت عملگر می‌گذارد به عنوان مثال کمی انحراف در عمود بودن دو محور دورانی اول یک عملگر کروی سبب می‌شود که تمام حرکت‌های مجری نهایی این عملگر در راستای عمودی دچار مشکل شود.

باید توجه داشت که دقت در قرار گرفتن رابط‌های عملگرها و جلوگیری از تغییر شکل‌های غیر صلب آنها زمانی میسر می‌شود که رابط‌ها را بزرگتر و حجیم تر در نظر گرفت که این امر خود سبب سنگین‌تر شدن رابط‌ها شده و در نتیجه در طول حرکت‌های سریع این اینرسی زیاد شتاب‌های کریولیس و عمودی زیادی را تولید می‌کند که خود کنترل عملگر را پیچیده تر و سخت تر می‌کند.

در ادامه مزایا و معایب ذکرشده در بالا برای یک ربات سری و به عنوان نمونه بیان می‌گردد. ربات‌های سری M-2000*i*A متعلق به شرکت فانوک[1] بزرگترین وقدرتمندترین ربات‌های سری ساخته‌شده تا به امروز می‌باشندکه قابلیت حمل بار تا ۱۳۵۰ کیلوگرم در شعاعی در حدود ۴ متر با تکرارپذیری ۰,۳ میلیمتر را دارا می‌باشند[۵]. شکل ۱-۱ نمایی از یکی از این ربات‌ها را نشان می‌دهد. همچنین درشکل ۱-۲ فضای کاری این ربات نشان داده‌شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فضای کاری و قدرت مانور این ربات به نسبت ابعاد آن به مراتب بزرگتر و بهتر می‌باشد. از سوی دیگر باتوجه به اینکه وزن متوسط این ربات در حدود ۸۳۷۶ کیلوگرم می‌باشد، نسبت وزن به بار قابل حمل آن در حدود ۰,۱۵ می‌باشد، که به نسبت مقدار بسیارکمی است و عملا این ربات قادر است، تنها باری معادل ۱۵٪ از وزن خود را حمل نماید. که از جمله معایب اصلی این ربات می‌باشد.

[1] FANUC

شکل ۱-۱: نمایی از ربات M-2000*i*A شرکت فانوک



شکل ۱-۲: فضای کاری ربات M-2000*i*A شرکت فانوک

۱-۳- ربات‌های‌موازی

بسیاری از معایب ذکر شده دربالا برای ربات‌های سری می‌تواند با تغییر پیکربندی مکانیکی عملگر آن حل‌شود. یک نگاه ساده به اندام‌های بیولوژیکی، راه حل غلبه بر این مشکلات را به سادگی پیشنهاد می‌کند. همان‌گونه که انسان برای حمل اشیاء سنگین از هر دو دست خود استفاده می‌کند و یا برای انجام کارهایی مثل نوشتن یا گرفتن اجسام از سه انگشت به عنوان عملگر استفاده می‌کند، استفاده از زنجیره‌های بسته سینماتیکی راه کار مناسبی برای رفع مشکلات بازوهای سری می‌باشد. بدین شکل که چندین بازو مجری نهایی را به زمین وصل کرده و بدین‌سان هر بازو تنها بخشی از بار را تحمل کند. دراین‌حالت زنجیره‌های سینماتیکی بسته‌ای به وجود می‌آید که از چندین جهت مجری‌نهایی را هدایت کرده و باری که عملگر باید حمل کند را بین خود تقسیم می‌کنند.

از دیدگاه محرک‌ها، موتورها معمولاً نزدیک پایه یا روی آن نصب می‌شوند که سبکی بازوها و کاهش ابعاد موتورها را به همراه دارند. بدین ترتیب بازوها در ساختار موازی معمولاً بار محرک‌ها را به دوش نمی‌کشند و لذا سبکتر از بازوهای ساختار سری مشابه، قابل طراحی هستند.

با توجه به موارد ذکر شده در بالا، یک عملگر موازی، در حالت کلی یک زنجیره سینماتیکی بسته است که مجری‌نهایی آن توسط چندین زنجیره سینماتیکی مستقل به زمین متصل شده است. این تعریف بسیار کلی بوده و بسیاری از مکانیزم‌های افزونه و یا مکانیزم‌هایی که به شکل مشارکتی با هم کار می‌کنند را شامل می‌شود. از این رو یک مکانیزم علاوه بر این تعریف می‌بایست قیود زیر را ارضاء کند، تا بتوان آن را یک عملگر موازی دانست[۴, ۶].

- حداقل دو زنجیره سینماتیکی به مجری نهایی متصل باشد که هر کدام باید دارای حداقل یک محرک و یک حسگر برای اندازه گیری اندازه محرک باشند.
- تعداد محرک‌ها برابر با درجه آزادی مجری‌نهایی است.
- زمانی که محرک‌ها قفل شوند، قابلیت حرکت مجری‌نهایی ازبین می‌رود.

در نهایت عملگر موازی را می‌توان بدین‌گونه تعریف نمود: "یک عملگر موازی از یک مجری‌نهایی تشکیل شده که دارای n درجه آزادی می‌باشد و توسط حداقل دو زنجیره سینماتیکی به یک زمین ثابت متصل شده‌است و حرکت توسط n محرک ساده به وجود می‌آید". همچنین اگردر یک عملگر موازی،