





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی طراحی کاربردی

مدل سازی دینامیکی، طرح ریزی مسیر و کنترل مقاوم بازوی رباتیک
اروپا

نگارنده: امین زمان زاده

استاد راهنما:

دکتر حبیب احمدی

دی ماه ۱۳۹۶

شماره:

تاریخ:

باسمه تعالی



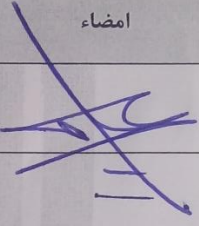
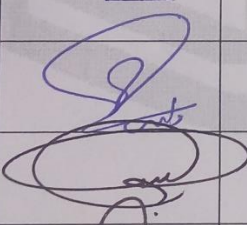
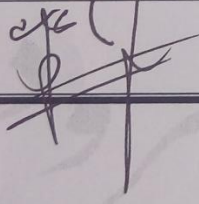
دانشگاه گیلان

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امین زمان زاده با شماره دانشجویی ۹۴۰۸۸۹۴ رشته مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان مدل سازی دینامیکی، طرح ریزی مسیر و کنترل مقاوم بازوی ربانیک اروپا. که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی.....)	☒
مردود	☐
نظری	☒
عملی	☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	حبیب احمدی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	سید مجتبی واردی کولایی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	مهدی بامداد	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	علیرضا الفی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و بزرگوارم که علیرغم تحمل سختی‌ها و
دشواری‌های فراوان، مسیر پر پیچ و خم کسب علم و
معرفت را برایم هموار نموده و از دعای خیرشان بی‌نصیب
نبوده‌ام.

و با تشکر از

اساتیدی که به من علمی آموختن و دوستانی که مشکلی را
از سر راهم برداشتند و تمام کسانی که در این راه حامی،
مشوق و کمک کننده بودند.

تعهد نامه

اینجانب **امین زمان زاده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک طراحی کاربردی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدل سازی دینامیکی، طرح ریزی مسیر و کنترل مقاوم بازوی رباتیک اروپا** تحت راهنمایی دکتر حبیب احمدی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « *Shahrood University of Technology* » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا یافته های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

فعالیت اصلی در این پژوهش؛ شبیه‌سازی سینماتیکی، دینامیکی و کنترلی کامل ربات بازویی فضایی متحرک می‌باشد. این ربات مطابق با مکانیزم کامل ربات اروپا و ربات‌های فضایی مشابه آن می‌باشد و هفت درجه آزادی چرخشی در مفاصل خود دارد. حرکت آن در فضای سه بعدی و رسیدن انتهای آن به مقصد با توجه به جهت‌گیری و مختصات جسم یا مسیر دلخواه، هدف اصلی این پژوهش بوده است. لذا بررسی کامل فضای کاری به منظور به‌دست آمدن سینماتیک معکوس و عملیات انتقال آن امری ضروری بوده که صورت پذیرفت. یک الگوریتم جدید برای سینماتیک معکوس و یک روش برای انتقال ارائه می‌شود و سینماتیک مستقیم و تمام مباحث این بخش با کمک ماتریس‌های دوران در فضای سه بعدی به‌دست می‌آید. معادلات ناشی از یک سیستم رباتیک هفت درجه آزادی به خودی خود بسیار پر حجم و سنگین می‌باشند برای همین درستی آن‌ها و نحوه‌ی به‌دست آمدن آن‌ها مهم است. معادلات دینامیکی ربات از روش لاگرانژ به دست آمده و با شبیه‌ساز دینامیکی تست می‌شود که درستی آن اثبات شود. با کمک روابط سینماتیکی و دینامیکی می‌توان سیستم کنترلی دلخواه را ارائه نمود، لذا با در نظر گرفتن نامعینی‌های درون سیستمی و اغتشاشات خارجی و همچنین اصطکاک لغزشی مفاصل، کنترل مقاوم می‌تواند اهداف کنترلی را برآورده نماید. در این راستا چند مدل کنترل مقاوم غیرخطی بر روی ربات تست می‌شود. به طور کلی، کنترل مقاوم به دو روش مود لغزشی و تخمین نامعینی برای این ربات طراحی می‌شود. این ربات از دو گریپر در ابتدا و انتهای بازوان خود استفاده می‌کند که می‌تواند فعالیت‌های مختلفی را انجام دهد. بنابراین مکانیزم و نوع گریپر برای این ربات مهم بوده و در مقالات مربوط به ربات فضایی اروپا، به عملکرد گریپر آن بیشتر پرداخته شده است. لذا یک گریپر مناسب برای کاربرد-های متفاوت‌تر، برای این ربات طراحی و ساخته شده و با یک مدل نمونه‌ی تجاری مشابه، در انتهای این پژوهش مقایسه شده است. در این پژوهش به طیف گسترده‌ای از مباحث اصلی رباتیک همراه با در نظر گرفتن برخی جزییات، به طور کامل پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: ربات بازویی فضایی هفت درجه آزادی، سینماتیک معکوس، معادلات دینامیکی،

کنترل مقاوم، گریپر انتهایی ربات

لیست مقالات مستخرج از این پایان نامه:

- زمان زاده، امین و حبیب احمدی، ۱۳۹۶، مدل سازی دینامیکی بازوی رباتیک ۷ درجه

آزادی، بیست و پنجمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، تهران، دانشگاه تربیت مدرس -

انجمن مهندسان مکانیک ایران، <https://www.civilica.com/Paper-ISME25->

[ISME25 354.html](https://www.civilica.com/Paper-ISME25-)

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ای بر ربات‌های بازویی و فضایی	۱
۱-۱ معرفی ربات‌های بازویی فضایی	۲
۱-۱-۱ ماژول بازویی آزمایشی ژاپن (JEMRMS)	۲
۱-۱-۲ سری بازوهای کانادا	۳
۱-۱-۳ بازوی رباتیک اروپا (ERA)	۶
۲-۱ بررسی و سابقه پژوهشهای بازوهای رباتیک	۸
۳-۱ ضرورت ورود به این حوزه	۲۶
۴-۱ نوآوری پژوهش	۲۷
فصل دوم: معرفی بازوی اروپا، ربات طراحی شده، ویژگی‌های آن و تعریف مسئله	۲۹
۱-۲ معرفی ربات بازویی اروپا	۳۰
۲-۲ تعریف ربات بازویی مد نظر در پژوهش پیش رو	۳۱
۳-۲ توانایی و قابلیت‌های مدل ربات بازویی متحرک در این پژوهش	۳۶
۴-۲ تعریف مسئله	۳۷
فصل سوم: سینماتیک، سینماتیک معکوس و انتقال ربات	۳۹
۱-۳ مقدمه	۴۰
۲-۳ سینماتیک مستقیم	۴۴
۳-۳ محدودیت‌های حرکتی	۴۷
۱-۳-۳ محدودیت‌های چرخش مفصل‌ها	۴۸
۲-۳-۳ محدودیت برداری در فضای سه بعدی	۵۰
۳-۳-۳ محدودیت جهت‌گیری گریپر	۵۲
۴-۳ الگوریتم سینماتیک معکوس با در نظر گرفتن جهت‌گیری جسم هدف	۶۰
۵-۳ عملیات انتقال	۷۵
۱-۵-۳ انتقال کلی در فضای سه بعدی	۷۶
۲-۵-۳ انتقال برای رسیدن به جهت‌گیری دلخواه	۷۸
۳-۵-۳ انتقال بهینه با توجه به محدودیت فضای کاری	۸۲
۶-۳ شبیه‌سازی و نتایج	۸۶
فصل چهارم: مدل‌سازی دینامیکی ربات و معادلات حرکتی به همراه اثبات آن	۹۳
۱-۴ مقدمه	۹۴

۲-۴ مدل سازی دینامیکی	۹۵
۳-۴ معادلات حرکتی	۹۸
۴-۴ تشکیل سیستم رباتیک با کمک بلوکبندی سیم اسکپ	۹۹
۵-۴ مقایسه مدل سازی ها و نتایج شبیه سازی	۱۰۳
فصل پنجم: کنترل مقاوم بازوی رباتیک فضایی در مقابل نامعینی های داخلی و خارجی	۱۰۷
۱-۵ مقدمه	۱۰۸
۲-۵ آماده سازی سیستم برای طراحی کنترلر	۱۱۲
۳-۵ کنترل غیرخطی	۱۱۴
۱-۳-۵ کنترل فیدبک خطی ساز	۱۱۴
۲-۳-۵ کنترل مقاوم بر پایه تخمین نامعینی ها	۱۱۵
۱-۲-۳-۵ تخمین نامعینی براساس تئوری گارانتی پایداری سیستم های نامعین	۱۱۶
۲-۲-۳-۵ تخمین نامعینیها بر پایه ی مدل قانون کنترلی	۱۱۸
۳-۳-۵ کنترل مقاوم به روش مود لغزشی	۱۱۹
۴-۵ شبیه سازی سیستم کنترلی و رباتیک	۱۲۲
۱-۴-۵ پارامترها و نامعینی ها	۱۲۲
۲-۴-۵ نمودارها	۱۲۴
۳-۴-۵ مقایسه نتایج و نتیجه گیری	۱۳۲
فصل ششم: طراحی و ساخت یک گریپر کاربردی به عنوان عملگر انتهایی ربات	۱۳۵
۱-۶ مدل عملگر انتهایی بازوان فضایی	۱۳۶
۲-۶ مدل عملگر انتهایی دو انگشتی تجاری	۱۳۷
۳-۶ مدل عملگر انتهایی دو انگشتی ساخته شده در این پژوهش	۱۳۸
۴-۶ مزیتها و مقایسه	۱۳۹
فصل هفتم: نتیجه گیری و بیان پیشنهادات	۱۴۱
۱-۷ نتیجه گیری نهایی	۱۴۲
۲-۷ پیشنهادات برای آینده	۱۴۳
فهرست منابع استفاده شده در پایان نامه	۱۴۵

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱ بازوی رباتیک طراحی شده ژاپنی، [۲]
۴	شکل ۲-۱ بازوی کانادا [۳] در حال کمک به فضاءنورد
۵	شکل ۳-۱ نمای بازوی کانادا ۲، [۴]
۶	شکل ۴-۱ ربات کمکی مخصوص بر روی پلتفرم بازوی کانادا، [۵]
۷	شکل ۵-۱ بازوی اروپا همراه با لوازم جانبی [۹]
۱۰	شکل ۶-۱ نمونه مباحثی که در بررسی کامل یک ربات بازویی سری دخیل هستند.
۱۰	شکل ۷-۱ ربات صنعتی <i>SMART NS16</i> [۱۰]
۱۱	شکل ۸-۱ نمونه‌ی طرح ربات (<i>gmf a-510</i>) [۱۳]
۱۲	شکل ۹-۱ ربات صنعتی (<i>KUKA</i>) در آزمایشگاه دانشگاه ریو دو ژانیرو [۱۵]
۱۲	شکل ۱۰-۱ شماتیک ربات (<i>PUMA</i>) از [۱۶]، به منظور استفاده از ماتریس انتقال (<i>D-H</i>)
۱۴	شکل ۱۱-۱ کالیبره کردن سینماتیک ربات توسط مشخص سازی نقاطی معلوم برای ربات [۲۲]
۱۵	شکل ۱۲-۱ کاربرد پردازش تصویر برای به دست آمدن مختصات کامل هدف [۲۳]
۱۶	شکل ۱۳-۱ شبیه‌سازی عملیات پهلویی توسط دو ربات بازویی، [۲۸]
۲۰	شکل ۱۴-۱ تشابه زیاد در حرکت و اعمال اغتشاش یک ربات دو پا با نمونه‌ای از ربات اروپا، عکس سمت چپ از [۴۵].
۲۳	شکل ۱۵-۱ مدل سازی یک لودر به صورت بازوی رباتیک سری با عملگرهای هیدرولیکی [۵۵]
۲۵	شکل ۱۶-۱ مدل گریپرهای بازوی فضایی <i>Era</i> ، [۹]
۲۵	شکل ۱۷-۱ جزییات یک گریپر بازوی فضایی، [۶۱]
۲۶	شکل ۱۸-۱ مدل‌های گریپرهای چنگکی از شرکت رباتیک آی کیو [۶۳]
۳۰	شکل ۱-۲ نمونه تصاویری از بررسی ربات اروپا در آزمایشگاه، [۶]
۳۱	شکل ۲-۲ مشخصات فنی ربات بازویی اروپا به همراه جزییات قطعات [۶۴]
۳۱	شکل ۳-۲ بازوی رباتیک اروپا، تصویر سمت راست و چپ [۹] و تصویر وسطی [۸]
۳۳	شکل ۴-۲ نماهای مختلف از بازوی طراحی شده برای این پژوهش
۳۴	شکل ۵-۲ نمای ربات با لینک‌ها و مفاصل مشخص شده.
۳۴	شکل ۶-۲ ممان اینرسی در نظر گرفته شده برای هر لینک دلخواه
۳۶	شکل ۷-۲ عملیات‌های مختلف در فضا [۹]
۳۷	شکل ۸-۲ ربات دارای مکانیزم <i>ERA</i> می‌تواند شامل ابزارهایی باشد که بتوان روی آن نصب کرد [۹].
۴۵	شکل ۱-۳ تعریف بردارهای بازوها و نمایش طول‌ها
۴۹	شکل ۲-۳ چرخش مفصل ۴ به همراه محدودیت زاویه برخورد دو مفصل ۳ و ۵
۵۱	شکل ۳-۳ مرزهای فضای کاری برای چرخش مفصل کلیدی ۴
۵۱	شکل ۴-۳ فضای کاری جدید در گروهی عملکرد مفصل ۳ با توجه به محدودیت اعمال شده
۵۱	شکل ۵-۳ تمام فضای کاری مسیرهای ممکن توسط ربات با توجه به شکل‌های (۱-۳ الی ۵)
۵۳	شکل ۶-۳ نمای ربات در فضا برای گرفتن یک جسم با جهت‌گیری دلخواه، با نمایش محورهای دوران جسم و مچ ربات
۵۴	شکل ۷-۳ استاندارد که گریپر برای گرفتن جسم بایستی رعایت کند.
۵۵	شکل ۸-۳ جهت‌گیری قابل وصول توسط گریپر در حالت دوم ذکر شده

- شکل ۳-۹ تصویر جسم و ربات در صفحه‌ی $X-Y$ مرجع ۵۷
- شکل ۳-۱۰ چارت شرط ورود به سینماتیک معکوس به صورت خلاصه ۵۷
- شکل ۳-۱۱ دید کلی بخش سینماتیک معکوس برای رسیدن به هدف ۶۰
- شکل ۳-۱۲ تلاش قسمت مچ ربات شامل سه مفصل مشخص شده، برای گرفتن هدف با توجه به قانون فرض شده. ۶۱
- شکل ۳-۱۳ تمامی بازوهای ربات بر روی صفحه $X-Y$ مرجع تصویر شده و امتداد آن بردارها و مفاصل مشخص شده است. ۶۲
- شکل ۳-۱۴ قسمت بزرگ شده‌ی مشخص از شکل ۳-۱۳ ۶۳
- شکل ۳-۱۵ جهت‌گیری جسم هدف و امتداد آن با مفاصل ربات، طبق شرایط فرض شده برای گرفتن جسم توسط عملگر انتهایی ۶۴
- شکل ۳-۱۶ دید کلی شکل‌های قبل با توجه به آرایش ربات، و انتقال مختصات نقطه‌ی هدف به مختصات مفصل ۶، توسط سه طول مشخص شده ۶۵
- شکل ۳-۱۷ نمایی از تصویر بخشی از ربات بر صفحه‌ی $X-Y$ مرجع ۶۷
- شکل ۳-۱۸ انتقال مختصات مفصل ۵ به ۶ ۶۸
- شکل ۳-۱۹ لینک‌های ربات از ابتدا تا مفصل ۶ همگی در صفحه‌ی واقع می‌شوند و چرخش پادساعتگرد در این صفحه مثبت در نظر گرفته شده است. ۶۹
- شکل ۳-۲۰ نام گذاری زوایای لازم برای حل مجهولات و بیان روابط هندسی ۶۹
- شکل ۳-۲۱ دو جواب موجود برای آرایش دو مفصل مشخص شده در رسیدن به یک هدف ۷۰
- شکل ۳-۲۲ حالت اولیه و ثانویه‌ی گیربر بعد از تغییر موضع اولیه‌ی ربات توسط مفصل ۱ به سمت هدف ۷۲
- شکل ۳-۲۳ حالت‌های مختلف جسم و گیربر انتهایی در هنگام همراهی بودن که برای دوران جسم حول محور-های خود، چهار حالت به دست می‌آید. ۷۳
- شکل ۳-۲۴ بردارها برای نشان دادن نسبت‌های مختصاتی ۷۷
- شکل ۳-۲۵ زمانی که ربات قابلیت گرفتن جسم هدفی را که حول محورهای X و Y خودش چرخیده باشد را دارد، که بر مرکز دایره‌ای واقع باشد که تصویر جسم بر آن مماس باشد. ۷۹
- شکل ۳-۲۶ سه حالت کلی که برای مچ ربات رخ می‌دهد در هر جهت‌گیری از جسم و توضیحات بیشتر شکل (۳-۸)، در این تصویر مفاصل ۵ و ۶ ربات هر کدام به تنهایی و باهم عمل کرده است. تصویر شکل که حول محور-های X و Y خود چرخیده در صفحه مرجع موجود است. ۸۰
- شکل ۳-۲۷ مشخص کردن نقطه‌ی مناسب برای گرفتن جسم با شرایط مورد نظر با توجه به هندسه و تقاطع خطوط گذرنده از هم. ۸۱
- شکل ۳-۲۸ انتقال در صفحه، پیدا کردن نقطه‌ی نزدیک به تصویر هدف ۸۲
- شکل ۳-۲۹ انتقال در فضای سه بعدی از مرکز مختصات تا نقطه‌ی کلیدی با تعداد $i+1$ گام. ۸۴
- شکل ۳-۳۰ محاسبه‌ی خطای مکان مسیر دلخواه و نهایی ۸۶
- شکل ۳-۳۱ نمایش منحنی رابطه‌س (۳-۵۲) در فضای سه بعدی. ۸۷
- شکل ۳-۳۲ خطای مکان آزمایش اول، که خطای کلی مختصات مکان الگوریتم سینماتیک معکوس را نشان می‌دهد. ۸۷
- شکل ۳-۳۳ خطای جهت‌گیری هدف به صورت ماتریس دوران ۸۹
- شکل ۳-۳۴ به‌دست آوردن نقاط هر گام از عملیات انتقال ۹۰
- شکل ۳-۳۵ خطای مکان و جهت‌گیری برای گام نهایی عملیات انتقال ۹۱
- شکل ۴-۱ دیاگرام هندسی ربات به همراه نیروها و سرعت‌ها ۹۶
- شکل ۴-۲ بلوک جسم به منظور استفاده به عنوان لینک‌های ربات ۱۰۰

۱۰۱	شکل ۳-۴ بلوک مفصل چرخشی ساده
۱۰۲	شکل ۴-۴ بلوک‌های پر کاربرد و مهم دیگر
۱۰۲	شکل ۵-۴ نمای کلی از مدل‌سازی ربات در قسمت سیم‌اسکیپ مکانیک متلب، تصویر سمت راست بزرگ شده‌ی قسمت مستطیل نقطه‌چین مشخص شده در شکل می‌باشد. بلوک‌های زرد نماد مفاصل، سبز نماد لینک‌ها است.
۱۰۴	شکل ۶-۴ نمودار خطای مکان دو مدل
۱۰۵	شکل ۷-۴ نمودار خطای مکان دو مدل
۱۰۵	شکل ۸-۴ نمودار خطای مکان دو مدل
۱۱۵	شکل ۱-۵ دیاگرام کنترلی فیدبک خطی‌ساز
۱۱۶	شکل ۲-۵ دیاگرام کنترلی مقاوم به همراه بخش تخمینگر نامعینی
۱۲۴	شکل ۳-۵ دنبال کردن مسیر زوایا در روش اول
۱۲۵	شکل ۴-۵ خطای مکان در روش اول
۱۲۶	شکل ۵-۵ خطای جهت‌گیری در روش اول
۱۲۶	شکل ۶-۵ تلاش کنترلی برای روش اول
۱۲۷	شکل ۷-۵ دنبال کردن مسیر زوایا برای روش دوم
۱۲۷	شکل ۸-۵ خطای مکان در روش دوم
۱۲۸	شکل ۹-۵ خطای جهت‌گیری در روش دوم
۱۲۸	شکل ۱۰-۵ تلاش کنترلی برای روش دوم
۱۲۹	شکل ۱۱-۵ دنبال کردن مسیر زوایا در روش سوم
۱۲۹	شکل ۱۲-۵ خطای مکان در روش سوم
۱۳۰	شکل ۱۳-۵ خطای جهت‌گیری در روش سوم
۱۳۰	شکل ۱۴-۵ تلاش کنترلی برای روش سوم
۱۳۱	شکل ۱۵-۵ دنبال کردن مسیر زوایا در روش چهارم
۱۳۱	شکل ۱۶-۵ خطای مکان در روش چهارم
۱۳۱	شکل ۱۷-۵ خطای جهت‌گیری در روش چهارم
۱۳۲	شکل ۱۸-۵ تلاش کنترلی برای روش چهارم
۱۳۳	شکل ۱۹-۵ مقایسه خطای زوایای مفاصل چهار مدل سیستم کنترلی. از بالا چپ: روش اول، راست: روش دوم، پایین چپ: روش سوم، و راست: روش چهارم به ترتیب رسم شده و بزرگنمایی شده است.
۱۳۶	شکل ۱-۶ مکانیزم قفل شدن عملگر انتهایی بازوی رباتیک اروپا در یک جای مشخص [۹].
۱۳۷	شکل ۲-۶ عملیات تست گریپر انتهایی در یک شبیه‌سازی فضایی، [۶۱].
۱۳۸	شکل ۳-۶ مشخصات جزئی گریپر دو انگشتی برای مقایسه از [۶۳].
۱۳۹	شکل ۴-۶ نمونه‌ی طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورکز تمامی ابعاد به میلی‌متر می‌باشد.
۱۴۰	شکل ۵-۶ عملگر انتهایی ساخته شده

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۳۵	جدول ۱-۲ مشخصات سیستم
۴۵	جدول ۱-۳ ماتریس‌های دوران
۴۶	جدول ۲-۳ تعریف بردارها در فضای سه بعد
۴۷	جدول ۳-۳ سینماتیک مستقیم بر مبنای هندسه‌ی ربات و ماتریس‌های دوران
۴۹	جدول ۴-۳ محدودیت مفاصل
۵۸	جدول ۵-۳ شرط تحقق جهت‌گیری ربات برای گرفتن جسمی با جهت‌گیری دلخواه
۵۹	جدول ۶-۳ مشخص کردن جهت گریپر و جسم هدف با زوایای ورودی
۷۳	جدول ۷-۳ بررسی حالت‌های به وجود آمده در شکل ۳-۲۳
۷۴	جدول ۸-۳ زاویه نهایی مفاصل بر حسب پارامترهای ورودی و هندسی ربات
۸۸	جدول ۹-۳ مختصات هدف
۸۹	جدول ۱۰-۳ مختصات هدفی دور
۹۰	جدول ۱۱-۳ مختصات نقاط به دست آمده.
۱۲۳	جدول ۱-۵ مقادیر پارامترهای استفاده شده

فصل اول: مقدمه ای بر ربات‌های بازویی و فضایی

۱-۱ معرفی ربات‌های بازویی فضایی

بازوهای رباتیک به علت دقت، سرعت و قدرت بی نظیری که به انسان داده‌اند، بخش جدایی‌ناپذیر در حوزه‌های مختلف هستند. بازوهای رباتیک فضایی با درجات آزادی مختلف نقش مهم و ارزشمندی را در تمام زمینه‌های توسعه فضایی به منظور تعمیر قطعات، نصب و نگهداری و یا ارتقای تجهیزات نصب شده بر روی ایستگاه‌های فضایی، ماهواره‌ها، سفینه‌ها و یا حتی در انجام مأموریت‌های دیگر، بازی می‌کنند. در حال حاضر ربات‌های بازویی چند درجه آزادی مختلفی برای این فعالیت‌ها طراحی شده است. این بازوها تاریخچه و ویژگی‌های متفاوتی دارند که به عنوان مثال برخی از آن‌ها در مرجع [۱] بیان شده است. در این مرجع به طور خلاصه ویژگی‌ها و خصوصیات کاربردی به همراه جزییات بازوهای فضایی معرفی شده است که در این بخش از مقدمه، به چند نمونه آن‌ها اشاره می‌شود. هدف آشنایی کلی با چند نمونه بازوهای فضایی می‌باشد و آنچه که در این پژوهش در نظر گرفته شده است رباتی با الهام‌گیری از بهترین این مدل‌ها می‌باشد که در ادامه بیان خواهد شد.

۱-۱-۱ ماژول بازویی آزمایشی ژاپن (*JEMRMS*)^۱

این بازوی رباتیک برای استفاده در تاسیسات ایستگاه بین‌المللی فضایی ساخته شده است که تقریباً با طول ۱۰ متر و داشتن ۶ درجه آزادی توانایی تعمیر و نگهداری تجهیزات ایستگاه را دارد. برای این ربات ابزارهای اضافی طراحی شده است که قابلیت اتصال به ربات برای انجام مأموریت‌های متفاوت را خواهند داشت. شکل (۱-۱) نمایانگر این بازوی کنترل از راه دور می‌باشد. این بازو و ربات‌های از این دست تقریباً مأموریت‌ها و اهداف یکسانی دارند و شاید شکل ظاهری آن‌ها بسیار شبیه یکدیگر باشد، این سیستم‌ها اکثراً از دو بازوی بلند تشکیل شده که در انتهای هر بازو مچ^۲‌های چند درجه آزادی وجود دارد.

^۱ Japanese Experiment Module Remote Manipulator System

^۲ Wrist



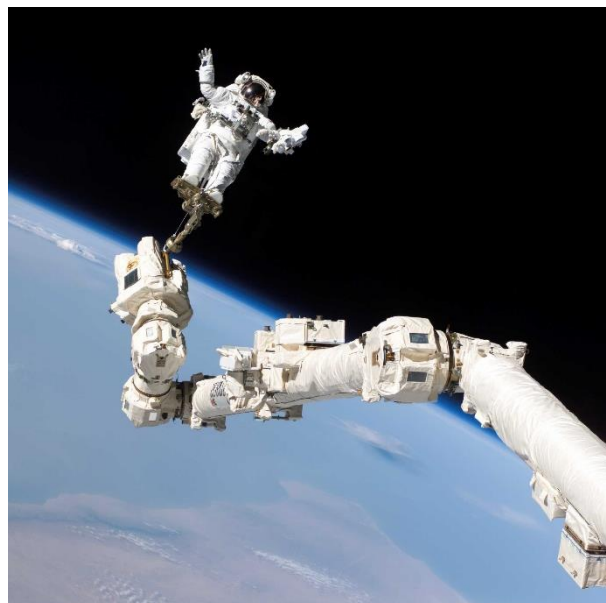
شکل ۱-۱ بازوی رباتیک طراحی شده ژاپنی، [۲]

در ایستگاه بین‌المللی فضایی، به منظور فعالیت‌های کاربردی و یا آزمایشی چند نمونه از این بازوها استفاده می‌شود یا برای آنجا در حال طراحی، ساخت و یا توسعه می‌باشند. یکی از این نمونه‌ها ساخت ژاپن و نمونه‌های کانادایی و اروپایی مشابه هم دارد که در جلوتر بیان می‌شوند.

۱-۱-۲ سری بازوهای کانادا

از دهه‌های پیش بازوهای رباتیک مثل بازوی کانادا^۱ قبلاً مورد استفاده قرار گرفته است و برای ساخت و ساز سازه‌های فضایی و جابه‌جایی بار از شاتل فضایی به سمت ایستگاه و در پهلویی و هدایت ماهواره در مدار نقش داشته‌اند. شکل (۱-۲) یکی از توانایی‌ها و قابلیت‌های این ربات را نشان می‌دهد که قادر به حمل فضاپرنده در پیاده‌روی‌های فضایی و رساندن وی به قسمت‌های مختلف ایستگاه برای کارهای مختلف می‌باشد.

^۱ Canadarm



شکل ۱-۲ بازوی کانادا [۳] در حال کمک به فضانورد

در طول دو دهه گذشته "*Canadarm*" فعال بوده است و مأموریت‌های مختلفی از قبیل موارد زیر را انجام داده است: سرویس‌های فضایی مانند بارگیری ماهواره، استقرار، مانور، سرویس دهی و بازیابی، کمک به فضانورد در حرکت، بازرسی شاتل و تعمیر و نگهداری، قرار دادن ماهواره در مدار، ساخت و ساز در مدار و مونتاژ؛ همچنین برخی از مأموریت‌های برجسته تر شامل نجات ماهواره‌های وستر^۱ و پالافا^۲، مأموریت‌های سرویس تلسکوپ هابل و جریان مأموریت‌های مونتاژ ایستگاه بین‌المللی فضایی^۳ بوده است [۱]. تا به امروز، مأموریت‌های بازوی کانادا بی وقفه انجام شده است.

مدلی دیگری از سری بازوهای کانادا به عنوان "*بازوی کانادای ۲*"^۴ شناخته می‌شود. "*SSRMS*"^۵ یک بازوی هفت درجه آزادی بر خلاف مدل قبلی خود که شش درجه را دارا بود، می‌باشد. این بازوی بلند و سنگین، قادر به حمل بارهای بزرگتری تا حداکثر ۱۰۰ هزار کیلوگرم، از جمله خود شاتل فضایی می‌باشد. پیکر بندی هفت درجه آزادی آن توانایی چرخش و مانور به نقاط دشوار را با توجه به انعطاف بیشتر میسر می‌سازد. شکل (۱-۳) نمایانگر این ربات می‌باشد، در دو سمت ربات گریپرهای مخصوص

¹ Westar

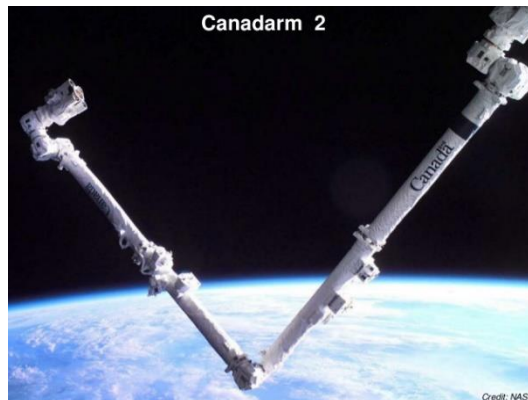
² Palapa

³ ISS

⁴ Canadarm2

⁵ International Space Station Remote Manipulator System

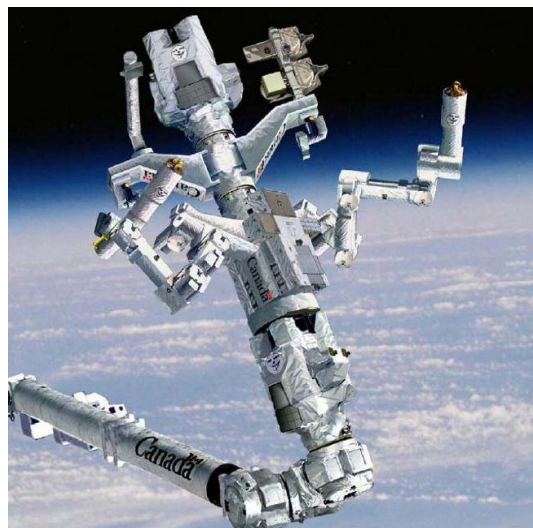
تعبیه شده است که توانایی حرکتی را به ربات برای انتقال به قسمت‌های مختلف ایستگاه فضایی را می‌دهد. این توانایی حرکت به مدل *"inchworm"* معروف است. و کارایی ربات را ارتقا بخشیده و به عنوان ربات متحرک شناخته می‌شود. در مورد این مدل حرکت و جابه‌جایی در ایستگاه فضایی در بخش بعدی برای ربات فضایی دیگری به تفصیل بحث شده است.



شکل ۱-۳ نمای بازوی کانادا ۲، [۴]

ماژول مخصوصی به نام *"SPDM"*^۱ وجود دارد که قابلیت اتصال به بازوی کانادا ۲ را دارد و در شکل (۱-۴) نمایش داده شده است. این ربات به طور کلی ۱۵ درجه آزادی دارد و با ترکیب این ربات و بازوی کانادا ۲، تقریباً هر عملیاتی که قابل برنامه‌ریزی برای ایستگاه فضایی باشد را با کمک هم می‌توانند انجام دهند. این نوع پیکربندی ربات آن را بسیار توانا و ماهر ساخته و حتی می‌تواند به عنوان نصب، حذف و تعمیر و نگهداری بارهای کوچک و یا ماهواره‌ای مختلف و در مدار قرار دادن آن‌ها نقش داشته باشند. این ماژول تمامی ابزار مورد نیاز را بر روی خود حمل می‌کند و به عنوان یک پلتفرم کامل تعمیر و نگهداری می‌توان از آن استفاده نمود.

^۱ Special Purpose Dexterous Manipulator



شکل ۱-۴ ربات کمکی مخصوص بر روی پلتفرم بازوی کانادا، [۵]

۱-۳ بازوی رباتیک اروپا^۱ (ERA)

بازوی رباتیک اروپا یا به طور اختصار همان **ERA** است که ساخت سازمان فضایی اروپا^۲ [۶] می‌باشد. در سال ۱۹۹۶ سازمان فضایی اروپا قراردادی با شرکت فوکر^۳ مبنی بر توسعه بازوی رباتیک اروپا بست [۷]، بازوی فوق بخشی از پروژه آلفا ایستگاه فضایی بین‌المللی توسط روسیه [۸] بوده است. شکل (۱-۵) نمایانگر نمایی از کل این ربات می‌باشد. این ربات تاریخچه‌ی پر فراز و نشیبی دارد و در طول سال‌های مختلفی تغییراتی داشته که برای آشنایی بیشتر با جزئیات آن، می‌توان به مراجع [۶-۸] رجوع نمود.

^۱ European Robotics Arm

^۲ ESA

^۳ Fokker



شکل ۱-۵ بازوی اروپا همراه با لوازم جانبی [۹]

بسیاری از ربات‌های بازویی علاوه بر درجه‌ی آزادی در چرخش، به صورت پریزماتیک^۱ می‌توانند حرکت نمایند و این در اکثر ربات‌هایی که در مکانی ثابت شده‌اند، قابل بیان هست. در حالی که فقط ربات‌های انسان نما و یا چرخ دار قابلیت جابه‌جایی کل ربات را دارند؛ ربات فضایی اروپا علاوه بر ۷ درجه آزادی چرخشی می‌تواند مانند یک ربات دو پا هم توسط مکانیزم بازویی خود جابه‌جا شود مانند ربات بازویی کانادا ۲ که معرفی شد، در حالی که ربات‌های دیگر نیاز به جابه‌جایی توسط مکانیزم دیگری خواهند داشت. این ربات در ابعادی بزرگ و مجهز به دو گریپر است که یکی در ابتدا و دیگری در انتها قرار دارد. برای انجام کارهای مورد نیاز ربات از یک سمت به کمک یکی از گریپرهای خود را به مکانی متصل کرده و با انتهای دیگر خود مأموریت تعیین شده را انجام می‌دهد؛ همچنین برای تغییر مکان ربات، انتهای ثابت آن آزاد شده و انتهای آزاد آن به مکان تعیین شده متصل می‌شود. این امر سبب جابه‌جایی به شکل راه رفتن ربات دو پا می‌شود؛ در نتیجه حوزه‌ی کاری ربات گسترش یافته و با کمک تجهیزاتی که بر روی آن نصب است می‌تواند فعالیت‌های مختلفی را انجام دهد که این مزیت و برتری این ربات نسبت به ربات‌های مشابه خود است. همچنین پایداری و طول عمر کاری آن در مدار بسیار زیاد می‌شود. به خاطر همین امر در این پژوهش ربات بازویی مد نظر از بازوی رباتیک اروپا الهام گرفته شده است. همچنین ربات مورد نظر با مکانیزم بازوی رباتیک اروپا همراه با ابزارهای قابل نصب بر روی

^۱ Prismatic

آن علاوه بر کاربرد در فضا، صنعت و کارایی های تعریف شده برای اکثر ربات های بازویی؛ می تواند در زمین به منظور کاربردهای فراوان به عنوان ربات بازرس از خطوط انتقال انرژی و یا رباتی که در سوانح طبیعی و ... فعالیت می کند، مورد استفاده قرار گیرد. این امر با تغییراتی که می توان بر روی مکانیزم مد نظر قرار داد، تحقق می پذیرد. قابلیت نصب دوربین و نصب انواع گریپرهای مکشی، مغناطیسی و یا چنگکی به همراه سنسورهای مختلف روی هر دو بازوی ربات فراهم است و این آزادی عمل در طراحی بسیار مفید می باشد. اصطلاحاً می توان رباتی ماژولار^۱ طراحی نمود که بتواند در شرایط مختلف و کارایی های مد نظر، مورد استفاده قرار گیرد. ربات اروپا به صورت واقعی بسیار بزرگ و دارای ابزارهای مخصوص در ایستگاه فضایی زمین می باشد و این شاید دلیل این بزرگی به خاطر عدم وجود جاذبه زمین در کنار توانایی بیشتر در فضا رخ داده است، که برای کاربردهای زمینی می توان در ابعاد کوچکتر و گوناگون نمونه ای از آن را طراحی و ساخت. همینطور در صنایع مختلف ماشین سازی و یا خط تولید خودکار انواع بازوهای رباتیک صنعتی و غیر صنعتی برای مصارف خانگی استفاده می شود که هر کدام ویژگی های منحصر به فردی را دارد.

۲-۱ بررسی و سابقه پژوهشهای بازوهای رباتیک

تحقیق انجام شده توسط کرجسن^۲ [۶]، معیار و معماری بازوی رباتیک اروپا را توصیف کرده است. به همین ترتیب، مکانیزم های حرکتی و قابلیت های مورد استفاده برای **ERA**، شرح داده شده است. همچنین این منبع شامل جزئیات بیشتر در مورد خواص این ربات می باشد. لمبوی^۳ و همکاران [۸] برخی از جنبه های طراحی کلی را مورد بحث قرار دادند و تمرکز خود را بر توسعه مکانیزم های مختلف در **ERA** و مطالعات متعدد در زمینه طراحی مکانیکی انجام دادند. بخش عمده ای از تحقیقات آن ها بر روی مکانیزم گریپر ربات است. در تحقیق بومن و هیمزکرک^۴ [۷]، علاوه بر طراحی و تاریخچه **ERA**، بهره وری این ربات ها در ایستگاه فضایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. اکثر مقالات جدید موجود

¹ Modular

² Crujjsen

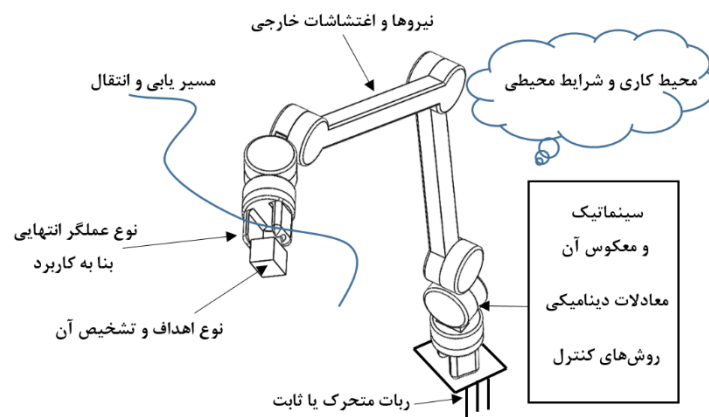
³ Lambooy

⁴ Boumans and Heemskerk

ازجمله مقالات اشاره شده در این بخش در رابطه با طراحی گریپر استفاده شده در ربات تحقیق کرده‌اند مانند پژوهش فنگ^۱ و همکاران [۹] که جدیدترین تحقیق در رابطه با نوع گریپر و محاسبه ناهمراستایی ربات در اتصال به ایستگاه فضایی، در شرایط کاری انجام داده‌اند. در این مقاله در مورد توانایی بازوهای رباتیک در مدار و همچنین کاربرد آن‌ها در عملیاتی مثل پهلویی شاتل و یا مأموریت‌ها بحث شده و اکثر پژوهش در ارتباط با طراحی و نوع گریپر استفاده شده در ربات برای مأموریت‌های تعریف شده می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که مقالاتی که به صورت مستقیم با *ERA* ارتباط دارند در همین مرزها محدود می‌شوند.

به علت اینکه در تحقیق مورد نظر نیاز است از منابعی در رابطه با تحلیل دینامیکی و سینماتیکی ربات اروپا استفاده شود و چون این منابع در اختیار نیستند، لذا پژوهش‌هایی مختلف در حوزه‌های مورد نیاز مثل سینماتیک، طراحی مسیر، کنترل و پایداری، گریپرهای استفاده شده و یا حتی بازوهای منعطف در ارتباط با ربات‌های بازویی مشابه و فضایی مرتبط با مباحث مورد نظر در این تحقیق، به عنوان نمونه بررسی شده‌اند. این منابع در چند بخش تقسیم می‌شوند که در مقدمه نمونه‌هایی از این پژوهش‌ها معرفی می‌شوند، اما در فصل‌های آتی این پایان نامه به تفصیل و با جزییات منابع مهمتر و کاربردی‌تر به گونه ای که در این پژوهش بیشتر استفاده شده‌اند بررسی می‌شوند. شکل (۱-۶) نمونه مباحثی مرتبط با بازوی رباتیک سری را معرفی می‌نماید که همگی در این پژوهش برای ربات مد نظر معرفی شده‌اند.

^۱ Feng



شکل ۱-۶ نمونه مباحثی که در بررسی کامل یک ربات بازویی سری دخیل هستند.

در بخش اول آنالیز سینماتیک ربات‌های بازویی؛ به فضای کاری و نمونه‌های ربات‌های صنعتی و کالبیره^۱ کردن دقت آن‌ها در مسیریابی پرداخته شده است. از پژوهش‌هایی که در مورد فضای کاری ربات تحقیق نموده‌اند می‌توان به پژوهش فابیریزیو^۲ [۱۰] اشاره کرد، در این مقاله نتایج به دست آمده از کنترل ربات در محیط کاری با توجه به مسیر و برخوردها بر روی یک نمونه ربات صنعتی "SMART NS16" تست شده تا به صورت عملی این قضیه بررسی گردد.



شکل ۱-۷ ربات صنعتی SMART NS16 [۱۰]

در تحقیق فرناندو^۳ [۱۱] یک ربات واقعی مورد آزمایش قرار می‌گیرد و محدودیت‌ها، احتمالات مسیر انتهایی آن در فضای کاری کلی ربات تقسیم بندی شده و آنالیز می‌گردد. پژوهش سولتیرو^۴ [۱۲] در ارتباط با روش‌های بهینه سازی طرح‌ریزی مسیر برای ربات بازویی می‌باشد. در این پژوهش بخش

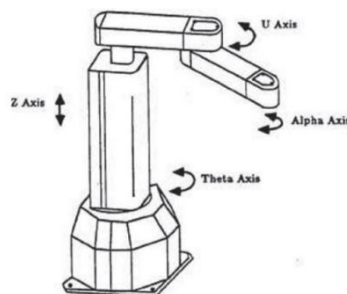
¹ Calibration

² Fabrizio

³ Fernando

⁴ Solteiro

وسیع‌ای از همین پژوهش‌ها در رابطه با مسیریابی و برخورد ربات در فضای کاری، بررسی و مقایسه شده است. ربات‌های بازویی مشخصی در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند که اکثراً صنعتی می‌باشند. مانند پژوهش کندریکز^۱ [۱۳] که ربات **"gmf a-510"** را معرفی و سینماتیک ربات را با تئوری بردارهای پایه گروبنر **"Groebner Basis"** به دست آورده و در تحقیق دیگر همین پژوهشگر علاوه بر روش قبل از روش **"Denavit-Hartenberg Matrix"** [۱۴]، برای مسأله سینماتیک معکوس ربات استفاده نموده است. شکل (۸-۱) نمایی از طرح ساده‌ی ربات [۱۳] می‌باشد که می‌توان برای هر رباتی به این صورت درجات آزادی را مشخص نمود.



شکل ۸-۱ نمونه‌ی طرح ربات (gmf a-510) [۱۳]

پژوهش دیاز^۲ [۱۵] در رابطه با ربات صنعتی **"KUKA"** مطابق شکل (۹-۱) می‌باشد؛ در مطالعه‌ی فوق، سینماتیک، سینماتیک معکوس و دینامیک معکوس این ربات به همراه کنترل سینماتیک بر پایه روش پردازش موازی به دست آمده است. سینماتیک معکوس از روش معادلات درجه دوم^۳ به دست آمده و مدل ربات به صورت کامل همراه با جزییات در کامپیوتر مدل‌سازی شده تا مواردی که گفته شده به راحتی به دست آید.

¹ Kendricks

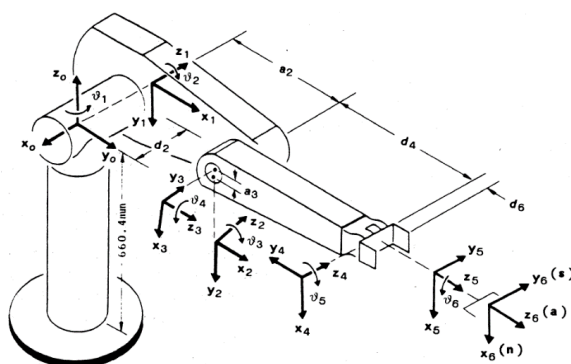
² Díaz

³ Quadratic Equation Method



شکل ۹-۱ ربات صنعتی (KUKA) در آزمایشگاه ربات دو ژانیهرو [۱۵]

در ادامه می‌توان از پژوهش لی و زیگلر^۱ [۱۶] که بر روی ربات "*PUMA*" کار کرده است، نام برد. رباتی صنعتی و ۶ درجه آزادی با اتصالات مختلف که در این تحقیق به دنبال خارج کردن روابط سینماتیک معکوس برای مسیردهی ربات در شرایط مطلوب بوده است. شکل (۱-۱۰) تصویری از مختصات مفاصل ربات می‌دهد که می‌توان توسط آن توسط ماتریس انتقال به روش‌های گوناگون مثل روش $(D-H)$ ^۲ که پیش‌تر بیان شد، استفاده نمود.



شکل ۱۰-۱ شماتیک ربات (*PUMA*) از [۱۶]، به منظور استفاده از ماتریس انتقال $(D-H)$

در این تحقیقات از روش‌های هندسی و تحلیلی و یا حتی عددی استفاده می‌شود و برای به دست آوردن سینماتیک ربات به ترتیب شکل‌های قبل عمل می‌کنند، ابتدا طبق شکل (۱-۷) یک ربات صنعتی انتخاب می‌شود، سپس طبق شکل (۱-۸) مکانیزم‌های حرکتی و مفاصل آن مشخص شده و طبق شکل (۱-۱۰) ماتریس‌های انتقال آن به دست می‌آید. گاهی اوقات حل معادلات چند مجهولی سینماتیک

¹ Lee and Ziegler

² Denavit-Hartenberg Matrix

معکوس بسیار سخت خواهد بود، زیرا حالت‌های مختلف ممکن است برای ربات رخ دهد و چند جواب برای دنبال نمودن یک مسیر حرکت باعث می‌شود قیدهایی را در نظر گرفت و یا حتی الگوریتمی کنترلی نوشت که به منظور کاهش مجهولات موجود، استفاده شود. پژوهش‌هایی در قالب پایان‌نامه‌های مختلف در حوزه‌ی ربات بازویی صورت پذیرفته مثل تحقیق ژای^۱ [۱۷] می‌باشند. در این پژوهش ربات شش درجه آزادی مشابه ربات‌های صنعتی به صورت کامل و با دقتی بالا، سینماتیک و دینامیک ربات مد نظر خود را به‌دست آورده است. در پژوهش شاهین‌پور و همکاران [۱۸] ربات شش درجه آزادی مشابه ربات‌های صنعتی به صورت کامل و با دقتی نزدیک به واقعیت، سینماتیک و دینامیک ربات مد نظر خود را به‌دست آورده است. اما در رابطه با ویژگی ربات‌های فضایی مثل *ERA* می‌توان به این نکته‌ی مهم اشاره نمود که اغلب آن‌ها می‌توانند جابه‌جا و منتقل شوند. برای همین نمونه‌هایی از مقالات مربوط به سینماتیک بازوهای متحرک را می‌توان معرفی نمود. در پژوهش هنتات^۲ [۱۹] بازویی رباتیک متحرکی که به همراه یک سیستم چهار چرخ قابلیت جابه‌جایی پیدا کرده است، بررسی شده است. در این پژوهش آنالیز سینماتیکی بازو به همراه سیستم انتقالی به طور کامل به همراه جهت‌گیری انتهای بازو و هدفی دلخواه به دست آمده است. همچنین برای مسیر حرکت ربات، ملاحظات برای جابه‌جایی در برخی از شرایط محیط کاری در نظر گرفته شده است. مقاله ژیان^۳ [۲۰] یک بازوی رباتیک فضایی ۶ درجه آزادی شبیه ربات اروپا کار شده است و سینماتیک معکوس آن را با روش اسکروز^۴ حل کرده است. پژوهش ساگارا^۵ [۲۱] یک تحقیق کامل در سینماتیک، دینامیک و کنترل یک ربات شناور فضایی می‌باشد. ربات ۶ درجه آزادی که بی شباهت به ربات اروپا نیست. تحقیق سنتولاریا^۶ [۲۲] در رابطه با کالیبراسیون سینماتیکی ربات بازویی می‌باشد؛ در این پژوهش دقت سینماتیک به دست آمده برای یک ربات ۶ درجه آزادی به روش "گوی‌های مرکز گرای فعال و غیر فعال"^۷ انجام شده است. علاوه بر این

¹ Xie

² Hentout

³ Jian

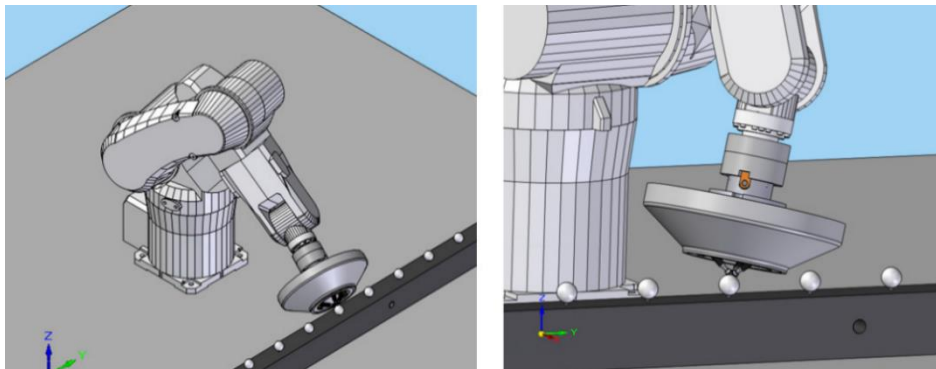
⁴ screws

⁵ Sagara

⁶ Santolaria

⁷ passive and active self-centering probes

از "الگوریتم بهینه سازی چند موقعیته"^۱ بر پایه نقاط و طول های مقید، هم استفاده شده است. به طور تجربی نقطه‌ی انتهایی سر ربات را با جهت گیری های مختلف و مشخصی با گوی های معلومی تماس می دهند. این گوی ها در فواصل و طول های مشخصی قرار دارند و اطلاعات گرفته شده از خروجی های مفاصل را در این هنگام با مختصات آن گوی ها تطابق می دهند و سیستم را کالیبره می نمایند. شکل (۱۱-۱) این عملیات را نشان می دهد که می تواند در حالات مختلف برنامه ریزی شود.



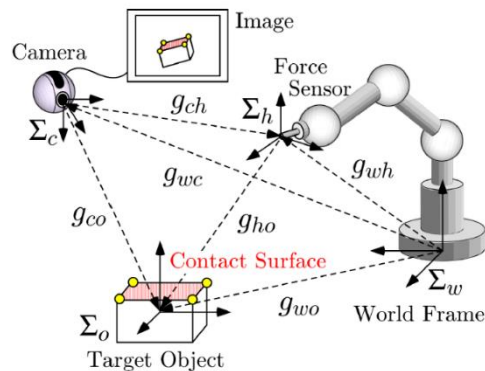
شکل ۱۱-۱ کالیبره کردن سینماتیک ربات توسط مشخص سازی نقاطی معلوم برای ربات [۲۲]

پژوهش کاوای^۲ [۲۳] در ادامه پژوهش هایی است که توسط پردازش تصویر و با کمک روابط سینماتیکی ربات را به هدف مقصود راهنمایی می کنند. در این پژوهش دوربین اطلاعات هدف را به دست می آورد و بازوی رباتیک با توجه به ورودی سیستم به هدف می رسد. در این مقاله کنترلی، سنسور نیرویی بر سر انتهایی ربات کار گذاشته شده تا نیروی اعمال شده از محیط را تشخیص دهد و به عنوان فیدبک به سیستم اصلی برساند و مسیر با توجه به موانع تشخیص داده شود. شکل (۱۲-۱) به خوبی ارتباط بین ربات، پردازش تصویر و هدف را نشان می دهد، در این پروسه تبدیلات مختصاتی از مرجع به محلی و همینطور دقت الگوریتم پردازش تصویر اهمیت بسزایی دارد. پژوهش اکیوچی^۳ [۲۴] هم با استفاده از پردازش تصویر و تشخیص شی، گریپر ربات می تواند هدف را تشخیص دهد و بگیرد. می توان اشاره کرد که پردازش تصویر به طور زیادی موثر و کاربردی در زمینه سینماتیک معکوس می باشد.

¹ multipose optimization algorithm

² Kawai

³ Ikeuchi



شکل ۱-۱۲ کاربرد پردازش تصویر برای به دست آمدن مختصات کامل هدف [۲۳]

در صورتی که بخش سینماتیک و طرح ریزی مسیر ربات بخواهد به صورت کامل انجام شود باید محیط پیرامون و موانع موجود در محیط بررسی و در طراحی مسیر لحاظ شود، به عنوان نمونه پژوهشی کامل در این قسمت برای مسیریابی در فضای کاری ربات می‌توان به پایان‌نامه‌ی دکتری وال^۱ [۲۵] اشاره کرد، در این پژوهش برای انواع بازوهای رباتیک متحرک از تئوری‌های مختلفی استفاده می‌کند، برای به دست آوردن مسیر حرکت ربات در فضای سه بعدی در میان محیط با اجسام مانع در نزدیکی مسیر ربات انجام داده است. مسیریابی ربات در محیطی واقعی و برنامه‌ریزی برای آن را می‌توان جزو مهم‌ترین کار کنترلی برای یک ربات بازویی متحرک نام برد. در گام بعدی شبیه‌سازی دینامیکی و همچنین تحقیقاتی فراتر از محاسبات هندسی سه بعدی برای به دست آوردن سینماتیک ربات بررسی شده است؛ مشاهده می‌شود مقالات و پژوهش‌ها به سمت کاربردی کردن ربات بازویی و شبیه‌سازی در شرایط تعریف مسأله پرداخته‌اند. در پژوهش چامکن^۲ [۲۶] سینماتیک و دینامیک یک ربات پنج درجه آزادی به دست آمده است. مقاله شوارتز^۳ [۲۷] از سری معادلاتی به نام بازوی معکوس^۴ و از الگوریتمی به نام بازوی رو به جلو^۵ استفاده نموده تا به صورت کامل شبیه‌سازی دینامیکی را انجام دهد. مثلاً می‌توان از بازوهای رباتیک فضایی در عملیات‌های پهلوگیری و طراحی و شبیه‌سازی مانورهای فضایی

¹ Wall

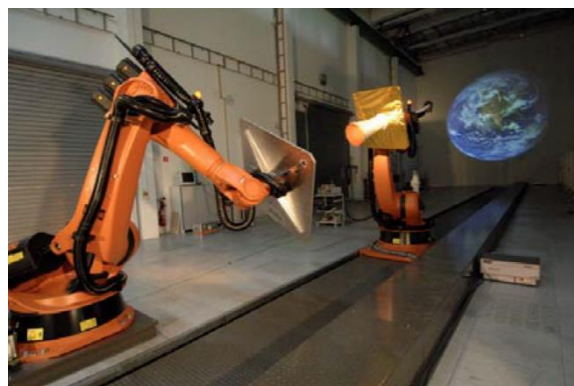
² Chamaken

³ Swartz

⁴ Inverse Arm

⁵ Forward Arm

در ایستگاه فضایی و سفینه های مورد نظر استفاده نمود که به طور مثال می توان به چند تحقیق کامل بر این زمینه اشاره کرد؛ آنتونلوو^۱ [۲۸] به صورت کامل از طراحی بازوهای مد نظرشان تا بررسی عملکرد آنها در مأموریت تحقیق شده و حتی به تحلیل تنشی ربات خود پرداخته است. در این پژوهش برای شبیه سازی عملیات های فضایی مثل حرکت در فضا و رسیدن سفینه به ماهواره و کارهایی از این قبیل، از ربات های بازویی با درجات آزادی مناسب استفاده شده است و تصویر شکل (۱-۱۳) بیانگر این است که برای رسیدن دو جسم در فضا با جهت گیری و ویژگی های مشخص، باید علاوه بر محاسبات دقیق، آن را شبیه سازی نمود تا خطایی در عملیات واقعی رخ ندهد. البته که این عملیات حتی برای ربات های فضایی ذکر شده در بخش اول به منظور همکاری در مأموریت های لازم انجام می شود. همچنین در این پژوهش علاوه بر بررسی سینماتیک و دینامیک یک ربات بازویی، نمونه ای آن ساخته شده تا در این آزمایش ها و شبیه سازی ها شرکت کند. پس می توان یک کاربرد مهم دیگر بازوهای رباتیک را ، انجام شبیه سازی هایی از این قبیل دانست.



شکل ۱-۱۳ شبیه سازی عملیات پهلوگیری^۲ توسط دو ربات بازویی، [۲۸]

در پژوهش پانیکولام^۳ [۲۹] یک مدل بازوی رباتیک مخصوص برای ایستگاه فضایی طراحی و نمونه کوچک و ساده ای آن ساخته شده است، در این تحقیق سینماتیک دینامیک و کنترل ربات به همراه مدار الکترونیک و کنترل سروو موتور به تفصیل آمده است که نمونه ای از کنترل عملی ساده یک بازوی

¹ Antonello

² Docking

³ Panikulam

رباتیک بوده است. به عنوان منبعی کامل تر می‌توان به کتاب مقدمه ای بر رباتیک^۱ [۳۰] اشاره نمود که به صورت کامل به این مباحث پرداخته است و معادلات دینامیکی ربات‌های بازویی را می‌توان به این روش به دست آورد. اما به عنوان یک منبع کامل در زمینه به دست آوردن معادلات دینامیکی می‌توان به کتاب دینامیک پیشرفته مهندسی^۲ [۳۱] اشاره نمود. در این مرجع علاوه بر روش‌های دست-یابی به روابط دینامیکی، تبدیل‌های مختصاتی و ماتریس‌های دوران اولر^۳ قابل استفاده در سینماتیک و سینماتیک معکوس ربات بیان شده است. در ادامه تقسیم بندی مقالات، در این قسمت مروری بر تحقیقات در حوزه‌ی ربات‌های رباتیک انعطاف‌پذیر ارائه شده است. زیرا این ربات‌ها به واقعیت نزدیکتر هستند و در حوزه‌ی تحقیق پیش رو که کاربرد اصلی ربات مدنظر در فضا می‌باشد و همچنین به علت دقیق بودن محاسبات در مأموریت‌های فضایی نمی‌توان کل ربات را جسم صلب در نظر گرفت. علاوه بر آن مقالات و تحقیقات در حوزه ربات‌های بازویی منعطف، مخصوصاً ربات‌های چند لینکی بیشتر کار شده و حتی در حوزه کنترل هم تحقیقات فراوانی برای استفاده در پژوهش پیش‌رو موجود می‌باشد. لذا برخی از تحقیقات در حوزه ربات‌های انعطاف‌پذیر بررسی می‌شوند؛ در مقاله کنون^۴ و همکاران [۳۲] کنترل نقطه‌ی انته‌ای یک ربات بازویی تک لینک منعطف انجام شده است. در این پژوهش آزمایشی بر روی یک ربات واقعی که در شرایط منعطف شبیه سازی شده بود، انجام گرفته است. در تحقیق بوک^۵ [۳۳] معادلات غیرخطی حرکت یک ربات بازویی منعطف توسط روش بازگشتی دینامیکی لاگرانژ انجام شده است. در پژوهش آسادا^۶ [۳۴] دینامیک معکوس یک ربات منعطف و مدل سازی و محاسبه‌ی مسیر دلخواه و کنترل ربات در مسیر انجام شده است. در تحقیق چن^۷ [۳۵] مدل سازی دینامیکی یک بازوی چند لینکی انجام شده است. همین طور مدل سازی یک اندام مثل بازوی انسان و یا ماهیچه‌ی آن را با

¹ introduction to robotic

² Advanced engineering dynamics

³ Euler Rotational matrix

⁴ Cannon

⁵ Book

⁶ Asada

⁷ Chen

یک ربات ۴ درجه آزادی منعطف توسط لنز^۱ و همکاران [۳۶] به همراه شبیه سازی و کنترل آن انجام شده است. در مقاله ساکاوا^۲ و همکاران [۳۷] کنترل فیدبک روی یک ربات منعطف بررسی شده است. در حوزه‌ی هوا فضا که کاربرد مهم این گونه ربات‌ها می‌باشد، پژوهش برانان^۳ [۳۸] به شبیه‌سازی جسم منعطف در مأموریت‌های فضایی پرداخته است. دوییدی^۴ و همکاران [۳۹] یک تحقیق کامل نموده و بیشتر مقالات در رابطه با تحلیل دینامیکی بازوهای رباتیک منعطف را انجام داده‌اند. در این پژوهش کامل نزدیک به ۴۳۳ مقاله بین سال‌های ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۵ بازبینی شده و گزارش کاری از پژوهش‌ها ارائه شده است. البته می‌توان به این نکته اشاره نمود که هر چند ربات اروپا از لحاظ ابعاد و وزن می‌تواند زیاد باشد اما در محیطی کار می‌کند که کمترین جاذبه‌ی زمینی بر روی آن می‌باشد پس وزن بالای لینک‌ها نمی‌تواند باعث خمش در بازوان و یا حتی تحلیل موتورها در تأمین گشتاور شود مگر در مقدار جزئی و قابل چشم‌پوشی و یا حتی به عنوان نامعینی سیستم می‌توان در نظر گرفت. به همین منظور می‌توان با دقت خوبی صلب بودن لینک‌های این گونه ربات را به جای محاسبات انعطاف پذیر بودن آن قرار داد، که باعث ساده‌تر شدن مسائل می‌شود. یکی از قابلیت‌های مهم بازوی رباتیک در نظر گرفته شده در پژوهش پیش رو، جابه‌جایی آن به صورت یک ربات دو پا می‌باشد، رباتی که اینبار نه به وسیله‌ی مکانیزمی مشابه به انسان که فقط بر روی سطح زمین می‌تواند راه برود، بلکه می‌تواند توسط دو گریپر خود از سازه‌های مختلفی بالا رفته و یا جابه‌جا شود و هر جایی که گریپر آن بتواند متصل شود که این بستگی به نوع طراحی آن خواهد داشت. تحقیقات زیادی بر روی پایداری ربات‌های دو پا در نگه داشتن تعادل شده است مانند پژوهش پلستان^۵ [۴۰] که بر روی پایداری ربات دو پای هفت درجه آزادی کار کرده است. و در ادامه در مقاله‌ی [۴۱] کنترل همین ربات ارائه شده در [۴۰] بوده است. همچنین روش‌های کنترلی متفاوتی بر روی ربات‌هایی که مثل انسان حرکت می‌کنند، کار شده است: مثل پژوهش

¹ Lens

² Sakawa

³ Brannan

⁴ Dwivedy

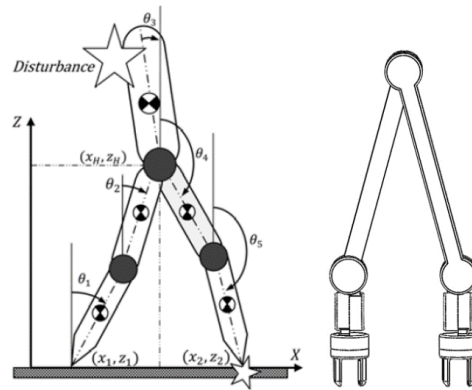
⁵ Plestan

سوگیهارا^۱ و همکاران [۴۲] که از کنترل پاندول معکوس برای این عمل استفاده کرده‌اند. و نمونه های دیگر که بر روی همین ربات‌ها اما منعطف کار شده است. اما هدف اصلی در این بخش علاوه بر پایداری ربات، استفاده از مقالاتی که ضربه ناشی از راه رفتن این ربات‌های دو پا در هنگام برخورد هر پا به سطح مورد نظر که وارد می‌شود، است. نمونه پژوهشی که استفانز^۲ [۴۳] انجام داده تا ربات انسان نمایی را در مقابل این ضربات کنترل نماید. اثر ضربه و کنترل نمودن ربات پس از آن بر روی همان ربات دو پای هفت درجه آزادی که توسط [۴۰ و ۴۱] ارائه شده بود، در پژوهش مو^۳ و همکاران [۴۴] کار شده است. در این پژوهش معادلات دینامیکی و سطح رخ داد ضربه کاملاً بیان شده است. به عنوان یک پژوهش کامل می‌توان به [۴۵] استناد کرد که یک ربات دو پا را در یک چرخه‌ی حدی ناقص عملگر مدل‌سازی نموده و سپس در مقابل اغتشاشات خارجی و ضربه کنترل نموده است. در اکثر این پژوهش‌ها نحوه‌ی عملکرد راه رفتن ربات دو پا و عملگرهای آن به عنوان پایدار کننده در شرایط تعادل به همراه ورود اغتشاشات محیطی به پلتفرم مورد نظر، می‌تواند کاملاً مشابه ربات بازویی مد نظر در این پژوهش باشد. پس می‌توان از اطلاعات مراجع مشابه ربات‌های دو پا در بحث‌های مدل‌سازی دینامیکی و یا حتی سینماتیکی به اضافه کنترل در حالت اغتشاش و ضربه بیرونی، برای بازوان متحرک رباتیک استفاده نمود با توجه به این نکته که می‌توان ضربه در هنگام رسیدن بازوی انتهایی به هدف را در نظر نگرفت چون عملکرد بازوی رباتیک برای رسیدن به هدف گام به گام طراحی می‌شود و می‌تواند با سرعتی خیلی کمتر از ربات دو پا برای مسیری برنامه ریزی شود. شکل (۱-۱۴) این دو مدل ربات را در کنار هم آورده تا تشابه‌های آن‌ها بیشتر نمایان شود. البته مدل تئوری پژوهش این دو گونه ربات باهم تفاوت بسزایی دارد و می‌توان گفت در سینماتیک مثل هم تحلیل می‌شوند و اگر ربات بازویی را متحرک در نظر گرفته شود، ممکن است در قسمت دینامیک هم مانند هم تحلیل شوند، در حالی که در مدل‌های کنترلی تفاوت زیادی خواهند داشت.

¹ Sugihara

² Stephens

³ Mu



شکل ۱-۱۴ تشابه زیاد در حرکت و اعمال اغتشاش یک ربات دو پا با نمونه‌ای از ربات اروپا، عکس سمت چپ از [۴۵].

نمونه مقاله‌های کنترلی بیشمار در حوزه بازوهای رباتیک و بازوهای فضایی مشابه موجود می‌باشد که به عنوان نمونه در این بخش می‌توان به پژوهش فارح^۱ و همکاران [۴۶] اشاره نمود، در این مقاله مسیره‌ی ربات در محیط کاری توسط استراتژی کنترل بهینه دنبال شده است و ربات در مسیر کنترل- شده است. این امر در پژوهش‌های قبلی هم صادق بود با این تفاوت که در این پژوهش‌ها استفاده از شیوه‌های مختلف کنترلی بر روی ربات بازویی می‌باشد که حتی می‌تواند بسیار ساده باشد. در حالی که در پژوهش‌های نامبرده‌ی قبلی هدف طراحی و ارائه بازوی رباتیک پیچیده بود و به دست آوردن معادلات حرکت و سینماتیک معکوس یک ربات با جزییات زیاد، بسیار پیچیده خواهد بود. در پژوهش بوآکریف^۲ [۴۷] دنبال کردن مسیر مشخص و دلخواه برای یک سیستم ربات بازویی به گونه‌ای کنترل شده است که سرعت مفاصل بدون اندازه‌گیری مستقیم، و توسط مشاهده‌گر^۳ تخمین زده شده است. مشاهده‌گر سرعت از روش پایداری صحیح کلی^۴ کنترل شده است. در پژوهش الحدیثی^۵ [۴۸] از روش کنترل فازی بهینه بر پایه‌ی تنظیم‌کننده‌ی درجه دو خطی بهینه استفاده شده است. در پژوهش شیمیزو^۶ [۴۹] سیستم بازوی رباتیک توسط کنترل پی‌آی‌دی^۷ در نمونه‌های مختلف به همراه آنالیز پایداری آن به طور

¹ Fareh

² Bouakrif

³ Observer

⁴ globally asymptotically stable

⁵ Al-Hadithi

⁶ Shimizu

⁷ PID

کامل بررسی شده است. نمونه‌های دیگری از تحقیقات در مورد کنترل بازوی رباتیک مثل کار ژانگ^۱ و همکاران [۵۰] را می‌توان اشاره کرد، در این مقاله کنترل مسیر دنبال کننده‌ی یک بازوی رباتیک در فضا آمده است که نامعینی‌ها را توسط یک شبکه عصبی تخمین می‌زدند و توسط طراحی یک کنترل تطبیقی با انتخاب گین مناسب، دنبال کردن مسیر را تنظیم کرده‌اند. در پژوهش کپیسانی^۲ [۵۱] روش کنترلی مود لغزشی^۳ مرتبه اول و دوم با استفاده از ارائه طرح ریزی ترجکتوری مسیر ربات در محیط، به منظور ممانعت از موانع محیط معرفی شده است و بر روی یک ربات صنعتی تست شده است. با استفاده از روش‌های مود لغزشی و پی دی^۴ یک کنترل چند گانه به دست آمده است که موانع موجود در محیط توسط سنسور نیرو از انتهای بازوی ربات دریافت می‌شود و به همراه اطلاعات مکان انتهای ربات در نظر گرفته شده است. هدف این تحقیق ملاحظات محیطی برای مسیر یابی بهتر ربات در محیطی پر از موانع می‌باشد. همچنین مود لغزشی مرتبه اول و دوم برای بهبود کارایی سیستم استفاده شده‌اند. در پژوهش گارسیا^۵ و همکاران [۵۲] از جمله دسته مقالاتی برای بازوهای راهبر-پیرو می‌باشند که از کنترل مد لغزشی با استفاده از مشاهده‌گر به منظور تخمین خروجی بدون استفاده از سنسور روی آورده‌اند. کنترل مد لغزشی برای تخمین‌گر در کنار خود سیستم از موضوعات جالب و مفید کنترل بازوهای رباتیک می‌باشد که در تمامی موضوعات رباتیکی یافت می‌شود. در پژوهش ژیاو^۶ [۵۳] توسط مشاهده‌گر قانون کنترلی برای یک ربات بازویی به صورتی طرح ریزی شده است که دقت بالا در دنبال کردن مسیر گارانتی شده است. در این پژوهش دینامیک نامعلوم، گشتاورهای نامعلوم و گرانشی به همراه اصطکاک‌ها، ممان اینرسی‌ها و نویزهای نامعلوم را همگی توسط مشاهده‌گر، تخمین زده شده و دو نمونه کنترل مد لغزشی مشاهده‌گر-پایه^۷ را برای این کار معرفی نموده است که با توجه به ماتریس

¹ Zhang

² Capisani

³ Sliding mode

⁴ PD, proportional derivative

⁵ García

⁶ Xiao

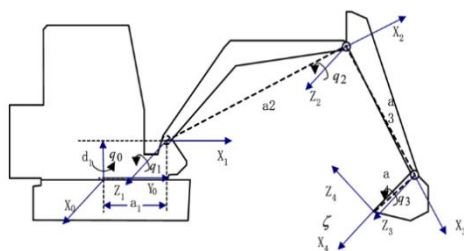
⁷ Observer-based

ژاکوبین^۱ کنترل کننده‌ی لازم طراحی شده است. همچنین در پژوهش وانگ^۲ [۵۴] کنترل یک بازوی رباتیک فضایی متصل به یک سفینه مانند فضایی، همراه با کنترل خود سفینه به روش تطبیقی برگشت پذیر ارائه شده است. ترکیبی از کنترل‌های مقاوم و تطبیقی مختلفی با روشهای مختلف مثل پایداری لیاپانوف، تضمین پایداری سیستم با حضور نامعینی و یا مدل‌های دیگر موجود بر روی بازوهای رباتیک مشابه انجام شده است که وجه تشابه اغلب آن‌ها این است که در هنگام تست سیستم کنترلی به صورت شبیه‌سازی عملی یا عددی، برای نشان دادن نمونه و اثبات روش‌های پیشنهادشان از بازوی های رباتیک دو درجه آزادی استفاده شده است و نامعین‌های محدودی در اجزای سیستم ایجاد می‌کردند. در پژوهش وونگ^۳ و همکاران [۵۵] یک مدل دستگاه لودر خاک‌بردار (شکل (۱-۱۵)) به صورت یک بازوی رباتیک مدل شده است و یک نمونه کنترل مشتقی-انتگرالی مخصوص با استفاده از عملگرهای هیدرولیکی و مشخصات فنی و هندسی دستگاه واقعی معرفی شده است. این پژوهش را می‌توان از این جهت مهم دانست که می‌توان سیستم‌های کنترلی این گونه بازوهای رباتیک را بر مدل واقعی و رباتی کاربردی تست نمود و از کارهای شبیه‌سازی که به صورت کامپیوتری صرفاً بر روی یک ربات بازویی دو درجه آزادی به عنوان نمونه می‌شود، فاصله گرفت. همچنین می‌توان از این پژوهش الگو گرفت که معادلات بازوی رباتیک سری فقط مخصوص این بازوها نمی‌باشد و با یک مدل‌سازی درست دستگاه‌های دیگر و کاربردهای دیگر این دسته از رباتیک نمایان می‌شود. گستردگی بازوان رباتیکی ماهر از فناوری‌های فضایی تا اعماق آب توسط زیر دریایی‌های کاوشگر، و بسیاری از کاربردهای مورد استفاده بر روی زمین می‌باشد که در این پژوهش فقط به مواردی از آن اشاره شده است.

¹ Jacobean Matrix

² Wang

³ Wang



شکل ۱-۱۵ مدل سازی یک لودر به صورت بازوی رباتیک سری با عملگرهای هیدرولیکی [۵۵]

پژوهش مرابت^۱ [۵۶] مدلی از کنترل مقاوم ارائه می کند به همراه بررسی نکات کاملی در حوزه ی کنترل غیرخطی پیشرفته این گونه ربات ها انجام می دهد. در این پژوهش بر روی سیستم رباتیک مشخص، کنترل غیرخطی در پس بررسی کنترل فیدبک خطی ساز، کنترل پیش بین و کنترل مقاوم بر روی حالت های مختلف بررسی شده است. مانند تابع هزینه، گارانتی کردن پایداری سیستم در مقابل نامعینی ها، تخمینگرهای غیرخطی و پایداری لیپانوف، همگی باعث شده اند که پژوهشی کامل و استوار در این زمینه باشد. فرق تخمینگرهای آن با پژوهش های دیگر غیرخطی بودن و عدم استفاده از مود- لغزشی بوده است. مدل های کنترلی و تخمینگر توسط مود لغزشی بسیار زمان گیر و پرهزینه برای سیستم های شبیه سازی می باشند. در پژوهش ایسلام^۲ [۵۷] کنترل مقاوم برای بازوی رباتیک به روش مود لغزشی به گونه ای تعریف شده است که توسط ارائه چند الگوریتم استفاده از مدل کنترل، گین تخمینگر که به صورت مود لغزشی می باشد را کاهش دهد. همین طور کنترل تطبیقی و ترکیبی از مود لغزشی و تطبیقی مختلف به همراه مشاهده گر را معرفی و ارائه نموده است که در مجموع پژوهشی کامل در این زمینه را ارائه می دهد. پژوهش ساگارا^۳ [۵۸] کنترل دیجیتال برای یک بازوی شناور در فضا می باشد که توسط روش معکوس ماتریس ژاکوبین تعمیم یافته^۴ انجام شده است که در حوزه ی کنترل بازوهای رباتیک فضایی قرار می گیرد که البته با روش پی آیدی کنترل شده است. می توان به عنوان

¹ Merabet

² Islam

³ Sagara

⁴ Generalized Jacobin Matrix

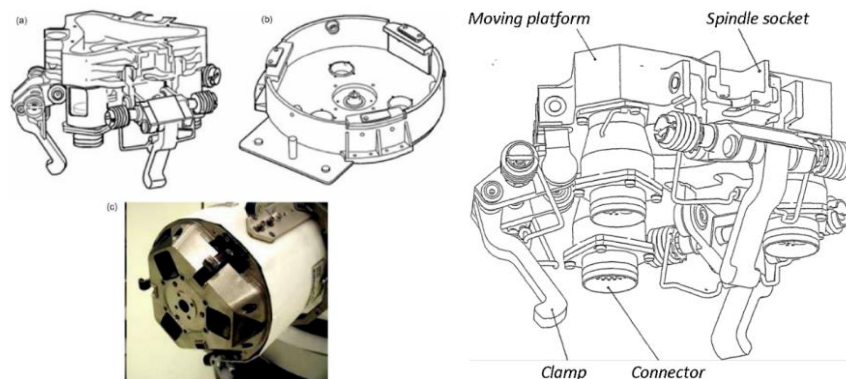
جمع‌بندی این بخش به کتاب اسلوتین^۱ [۵۹]، یکی از منابع مهم کنترل غیرخطی بازوهای رباتیک اشاره نمود که مورد ارجاع اکثر پژوهش‌های دیگر در این حوزه می‌باشد. وجه تشابه اغلب این پژوهش‌ها این است که در هنگام تست سیستم کنترلی به صورت شبیه‌سازی عملی یا عددی، برای نشان دادن نمونه و اثبات روش‌های پیشنهادی از بازوهای رباتیک دو درجه آزادی استفاده شده است و نامعین‌های محدودی در اجزای سیستم ایجاد می‌کردند. این در حالی است که شبیه‌سازی این گونه سیستم‌های کنترلی به طور مثال؛ برای بازوان هفت درجه آزادی تا به حال یا انجام نشده و یا کمتر انجام شده و برای اکثر این پژوهش‌ها فقط اثبات تئوری کنترلر طراحی شده به روش‌های مرسوم مثل پایداری لیپانوف یا غیره بسنده شده است. در اینگونه تحقیق‌ها، نیازی به آزمون کنترلر طراحی شده در شرایط سخت‌تر مثل استفاده از حجم عظیم نامعینی‌ها و پردازش کنترلی سیستم‌های پیچیده‌تر دیده نشده یا کمتر انجام شده است. کتاب اسپانگ^۲ [۶۰] هم مرجع کاملی در مدل‌سازی و کنترل بازوهای رباتیک می‌باشد؛ علاوه بر ارائه مثال‌های متنوع در حوزه سینماتیک و دینامیک، مدل کنترلی مقاوم در مقابل اغتشاشات را بیان می‌کند که پایه‌ی پژوهش‌هایی مثل مرجع [۵۶] بوده است.

در بخش آخر نوع عملگر بازوی انتهایی^۳ یا همان گریپر ربات بحث می‌شود. طراحی گریپر برای ربات مدنظر جزو بخش‌های اصلی این پژوهش می‌باشد. لذا به بررسی مدل‌های مختلف آن پرداخته شده است. این مدل‌ها برای هر کاربردی متفاوت است و به دسته‌های مکشی، مغناطیسی، مکانیکی، الکترونیکی و بیشتر از آن تقسیم بندی می‌شود. اما مهمتر از نوع عملگر آن‌ها، نوع کاربرد و استفاده آن می‌باشد. مثلاً مدل ارائه شده برای بازوهای فضایی، به صورتی است که فقط در مکان‌های مخصوصی می‌تواند اتصال برقرار کند که در مقالات [۷-۹] و شکل (۱-۱۶) به بررسی مدل معرفی شده برای ربات فضایی اروپا پرداخته‌اند. این مدل فقط در جای مشخص شده بر روی ایستگاه فضایی یا مازول‌های دیگر ثابت می‌شود و انتهای دیگر ربات به فعالیت مورد نظر خود می‌پردازد.

¹ Slotine

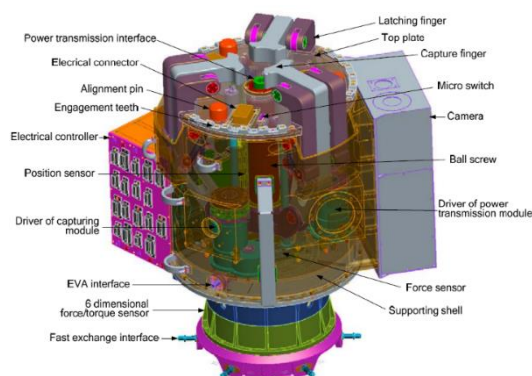
² Spong

³ End effector



شکل ۱۶-۱ مدل گریپرهای بازوی فضایی *Era*، [۹]

همین طور می توان به پژوهش سان^۱ و همکاران [۶۱] در مورد طراحی یک گریپر برای نمونه مشابه بازوی رباتیک فضایی اروپا اشاره کرد. گریپری که مانند مقالات مرتبط با بازوان فضایی، کاربرد اصلی اش در پروژه های فضایی می باشد (شکل (۱-۱۷)). اما برای هر رباتی باید نسبت به کاربردهای مورد نیاز در مورد نوع گریپر تصمیم گرفت. که در بخش آخر پایان نامه به تفصیل بیان خواهد شد.



شکل ۱۷-۱ جزئیات یک گریپر بازوی فضایی، [۶۱]

در حالی که این نوع گریپر برای اتصال به محل های مشخص بر روی ایستگاه فضایی طراحی شده است، برای انجام فعالیت های متفاوت این مدل کافی نیست و برای این منظور ابزار آلات دیگری به صورت یک ماژول جدا به این قسمت وصل می شوند. اما به طور کلی اگر یک گریپر توانا در اکثر

^۱ Sun

فعالیت‌های بازوان رباتیکی لازم باشد، قطعا مدل‌های مختلف چنگک دار خواهند بود. شکل (۱-۱۸) برخی از نمونه‌های تجاری موجود را نشان می‌دهد که با امکانات متنوعی عرضه می‌شوند و قابل اتصال به ربات‌های بازویی یونیورسال^۱ [۶۲] و مدل‌های دیگر می‌باشند.



شکل ۱-۱۸ مدل‌های گریپرهای چنگکی از شرکت رباتیک آی کیو^۲ [۶۳]

مدل‌های چنگکی برای اکثر عملیات‌های رباتیک مناسب اند و اگر پلتفرم مناسبی برای حرکت ربات منظور شود، حتی قادر به اتصال به محلی برای گام برداری مانند نمونه‌های اصلی بازوی فضایی، خواهند بود. همین‌طور مزایای دیگر این نوع گریپر مثل ساده بودن ساختار آن برای طراحی، ساخت و کاربرد در کنار قابلیت‌های دیگر، باعث شده است که این نوع گریپر به جای مدل فضایی آن در این پژوهش به منظور طراحی و ساخت یک نمونه کاربردی و عملیاتی با امکانات لازم برای هر بازوی رباتیک مناسب، انتخاب شود. نمونه‌ای تجاری که از همه لحاظ قابل رقابت باشد.

۳-۱- ضرورت ورود به این حوزه

یکی از ضرورت‌های انجام این تحقیق، گسترش حوزه‌ی ربات‌های بازویی ثابت به ربات‌های بازویی قادر به جابه‌جایی می‌باشد که علاوه بر انتقال کارایی یک ربات بازویی می‌تواند مأموریت‌های جدیدی را به انجام برساند. مزیت دیگر این دسته از ربات‌ها می‌تواند ترکیب ربات دو پا و بازویی باهم باشد که از نتایج این تحقیق می‌توان در ساخت ربات‌های انسان‌نما و یا ربات‌های مشابه، استفاده کرد. ضرورت دیگری که

¹ Universal

² IQ, ROBOTIQ

می‌توان در این خصوص ذکر کرد: این است که با وجود پیشرفت علوم هوا فضا، پژوهش‌ها در مورد ربات‌های کاربردی در فضا بسیار کمتر از حوزه‌های دیگر بوده و در کشور ما تحقیق و دانش در زمینه کاربرد رباتیک در هوا فضا نسبت به حوزه‌های دیگر هوا فضا، کمتر مورد توجه بوده است؛ لذا پژوهش در این مسیر می‌تواند گامی موثر در پیشبرد این موضوع در کشور باشد. علاوه بر حوزه‌ی هوا فضا، می‌توان برای طراحی، ارتقا و ساخت ربات‌های صنعتی، خدماتی، خانگی هم از منابع و مفاهیم ارائه شده در این پژوهش استفاده کرد. نمی‌توان کتمان کرد که در طول چند دهه‌ی اخیر الهام از مدل‌های مختلف فناوری‌های فضایی در صنعت و تکنولوژی باعث پیشرفت علوم و اختراع وسایل جدید کاربردی شده است و چه بسا به کارگیری این مدل بازوهای فضایی در کاربردهای زمینی باعث رشد این صنعت و ارائه‌ی ایده‌های جدیدی شود. با مشاهده تحقیقات انجام شده این نتیجه حاصل می‌شود که در حوزه‌ی بازوهای رباتیک مورد مطالعه، زمینه‌های متنوعی برای تحقیقات بیشتر احساس می‌شود. مباحث کنترلی، دینامیکی و سینماتیکی بر روی پلتفرم مورد مطالعه تا کنون منتشر نشده است. هرچند با وجود تعدد کتاب و منابع تحقیقاتی در رابطه با حوزه‌های تخصصی در رباتیک، بازهم متدها و تئوری‌های زیادی مخصوصاً در حوزه‌ی کنترل و مسیریابی وجود دارند که هنوز روی اینگونه ربات‌ها انجام نشده است. بنابراین تجمیع عناوین و نوآوری‌های مورد نظر از سایر پژوهش‌ها و ارائه طرح‌های جدیدتر در همین حوزه‌ها در این تحقیق نسبت به کارهای گذشته مخصوصاً داخلی را می‌توان نوآوری عنوان کرد. هم گستردگی حوزه‌ی تئوری و هم شبیه‌سازی و در نهایت طراحی عملی در بخش‌های سینماتیک، مسیر-یابی، دینامیک، کنترل و طراحی و ساخت گریپری مناسب از اقدامات این پژوهش بوده است.

۴-۱ نوآوری پژوهش

همانطور که گفته شد طرح مورد نظر از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده و هدف آن ارائه‌ی یک پژوهش نسبتاً کامل برای یک ربات بازویی محرک، مشابه با بازوی رباتیک فضایی می‌باشد. در این میان الگوریتم هندسی سینماتیک معکوس به همراه کنترل‌کننده‌های مقاوم موثر در برابر اغتشاشات اصلی ترین دستاورد بوده است. ارائه نمونه اولیه‌ی تجاری یک گریپر ماژولار و قابل اتصال به هر ربات بازویی هم

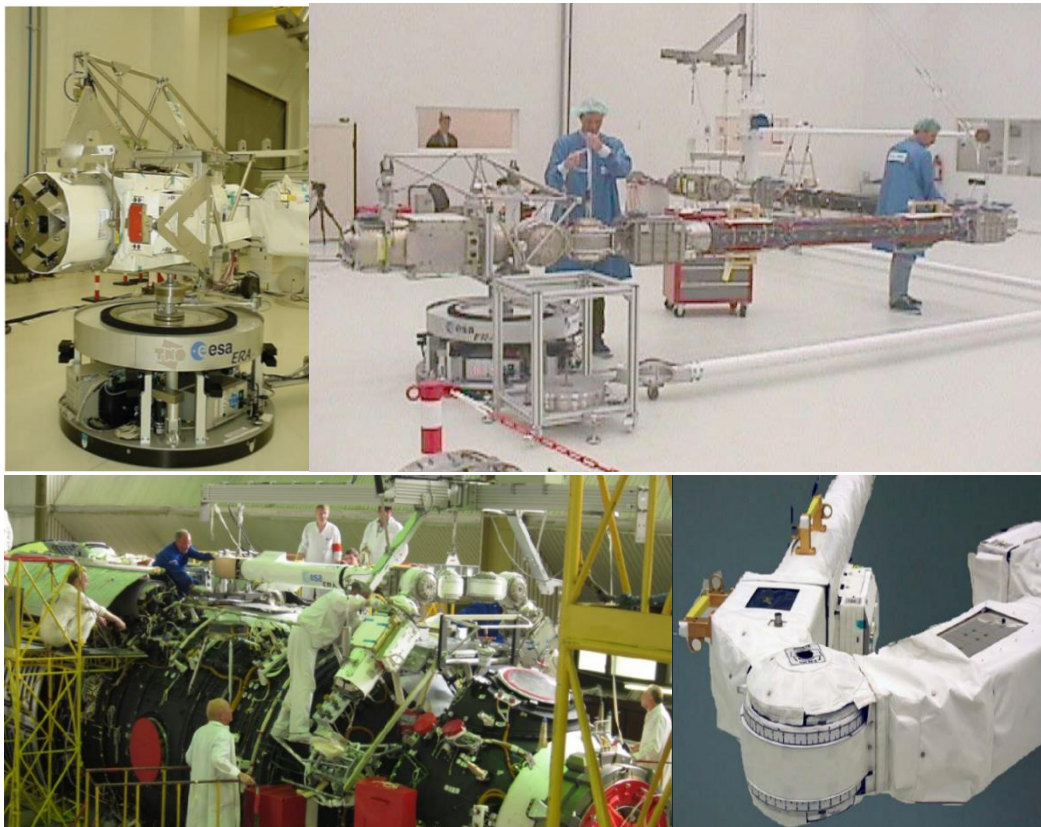
قسمت عملی این پژوهش بوده که الکترونیک و برنامه‌نویسی هم به حوزه‌ی اصلی مکانیک اضافه شده است.

- در بخش سینماتیک روش تحلیلی و هندسی ارائه شده جدید بوده و نمونه مشابهی ندارد که می‌توان برای ربات‌های مشابه با درجات آزادی مشابه بر روی مچ ربات به منظور رسیدن به مکان و جهت‌گیری مورد نظر تعمیم داد. الگوریتم دقیق بررسی فضای کاری ربات در این بخش هم تا کنون مشابهی نداشته است و همچنین برای الگوریتم انتقال ربات به صورت دو پا به این نحوی که ارائه شده، موردی یافت نشده است.
- در بخش دینامیک، مدل به دست آمده از معادلات لاگرانژ برای ربات هفت درجه آزادی با شبیه ساز دینامیکی متلب تست شده و صحت این معادلات اثبات شده است. همچنین در اکثر مقالات کنترلی برای بازوی رباتیکی، کنترل‌کننده‌ی طراحی شده فقط بر روی ربات دو درجه ساده بررسی می‌شوند که از این نظر دینامیک مورد استفاده در سیستم کنترلی ربات بازویی، فرق اساسی خواهد داشت. به دلیل آنکه سیستم‌هایی با درجات آزادی پایین تر در شبیه‌سازی کنترلی بسیار بهتر جواب داده و خطاهای کمتری در پی دارد، لذا روش کنترلی تست شده در شرایط ایده‌آل‌تری بررسی می‌شود و چالش کمتری بر آن وارد می‌شود.
- در بخش کنترل هم علاوه بر اینکه چند مدل کنترل مقاوم از پژوهش‌های دیگر استخراج شده بر روی این مدل ربات برای اولین بار تست شده، یک مدل کنترل‌کننده‌ی مقاوم مناسب هم در کنار آن‌ها طراحی شده و سپس تمامی این مدل‌ها در شرایط یکسانی باهم مقایسه شده و نقاط ضعف و قوت هر یک اعلام شده است. که نوآوری اصلی آن بررسی سیستمی خیلی پیچیده‌تر با مدل‌های ارائه شده‌ی کنترل‌کننده‌ی غیرخطی بوده است.
- در بخش پایانی هم یک گریپر کاربردی دو انگشتی طراحی و ساخته شده و با یک مدل تجاری مشابه از بهترین نوع آن‌ها مقایسه شده است.

فصل دوم: معرفی بازوی اروپا، ربات طراحی شده، ویژگی‌های آن و تعریف مسئله

۱-۲ معرفی ربات بازویی اروپا

شکل (۱-۲) نماهای مختلف ربات اروپا در آزمایشگاه سازمان فضایی اروپا را نشان می‌دهد، این ربات در حال تحقیق و توسعه که بسیار مشابه رقیبان خود است بنا به آنچه که در فصل پیش گفته شد، دارای مزایا و معایبی می‌باشد که برخی از آن‌ها در ادامه اشاره خواهد شد. این ربات تقریباً ۶۳۰ کیلوگرم و ۱۱ متر طول دارد و می‌تواند تا ۸ تن بار را جابه‌جا کند.



شکل ۱-۲ نمونه تصاویری از بررسی ربات اروپا در آزمایشگاه، [۶]

مشخصات بیشتری از این ربات به همراه قطعات مختلف ربات که به صورت باز شده نمایان شده در شکل (۲-۲) پیدا می‌شود. همانطور که پیداست این ربات از راه دور به صورت دستی کنترل می‌شود یا می‌توان آن را به صورت خودکار برنامه‌ریزی کرد. البته معمولاً برای ربات‌های فضایی از اپراتور انسانی استفاده می‌شود چون در هنگام مأموریت هیچ چیز قابل پیش‌بینی نخواهد بود.

DIMENSIONS

Total length: 11,300 mm
Reach: 9,700 mm
Tip position accuracy: 5 mm
Maximum tip speed: 100 mm/s
Mass budget launch mass: 630 kg
Max. P/L handling capability: 8,000 kg

COMMUNICATIONS INFRASTRUCTURE

Power, data and video signals cabling and special fixtures on End Effector and Base Point.

ELECTRICAL POWER

Average operation power: 475 W (120 V DC)
Peak operation power: 800 W (120 V DC)

MAIN CONSTRUCTION MATERIALS

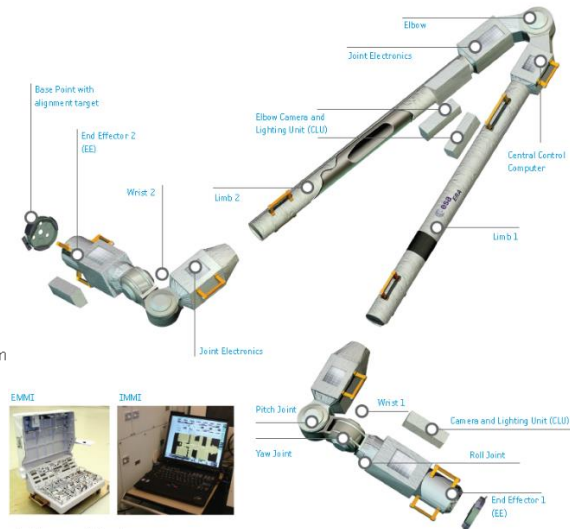
Limb: Carbon fibre tube and Aluminium interfaces

Wrist, Elbow and End Effector: Composed of many different materials

Thermal Protection: Beta Cloth Blankets

MAIN CONTRACTOR

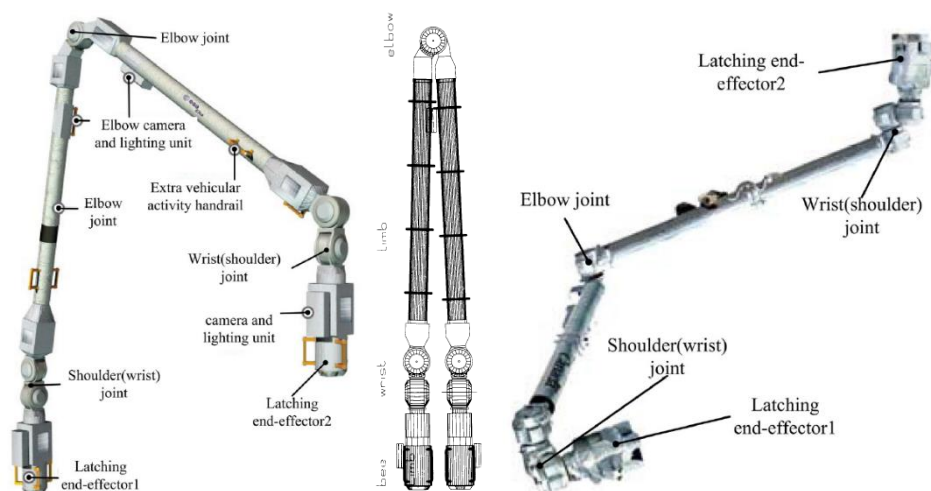
Dutch Space (Leiden, The Netherlands), leading a consortium of many subcontractors



شکل ۲-۲ مشخصات فنی ربات بازویی اروپا به همراه جزییات قطعات [۶۴]

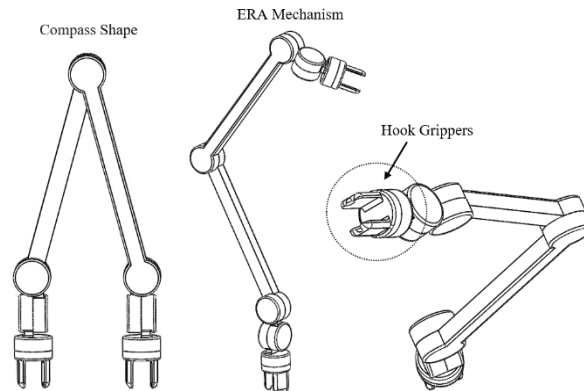
۲-۲ تعریف ربات بازویی مد نظر در پژوهش پیش رو

در شکل (۲-۳) نمای اصلی بازوی رباتیک اروپا (ERA) مشاهده می‌شود. بر روی هر مچ آن، سه درجه آزادی چرخشی توسط سه مفصل متحرک در سه جهت اصلی دستگاه مختصاتی وجود دارد. ضمناً یک درجه چرخشی هم بین دو بازو موجود می‌باشد که در مجموع هفت درجه را تشکیل می‌دهند. دو عدد گریپر موجود در دو انتهای آن مخصوص استفاده در فضا می‌باشند و برای ایستگاه فضایی طراحی شده‌اند به طوری که هنگامی که در جایگاه دایره‌ای از قبل تعیین شده‌ی خود قرار می‌گیرند توسط سه چنگک داخلی قفل می‌شوند [۹] که در فصل پیش بیان شد.



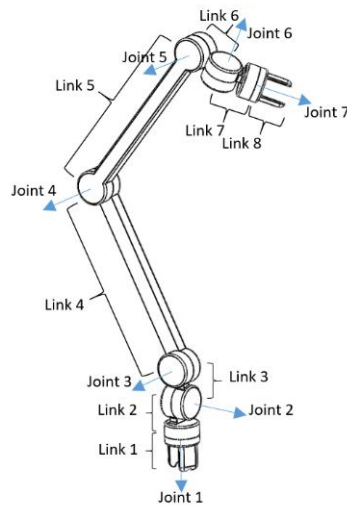
شکل ۲-۳ بازوی رباتیک اروپا، تصویر سمت راست و چپ [۹] و تصویر وسطی [۸]

این بازو توانایی‌ها و امکاناتی دارد که مخصوص اهداف استفاده از آن طراحی شده است، مثل نوع گریپر، بزرگی ابعاد واقعی آن، شکل ظاهری و غیره، که ممکن است برخی از این ویژگی‌ها باعث محدود شدن حوزه‌ی استفاده از این گونه ربات شود. به همین منظور در پژوهش پیش رو، از این ربات بخاطر توانایی‌های منحصر به فردش استفاده می‌شود اما نه صرفاً در فضا، بلکه با تغییراتی کوچک قابل شبیه‌سازی در محیط‌های دیگر و با توانایی‌های دیگر قادر شده است. این امر باعث می‌شود هم تحقیقاتی بر روی این گونه ربات فضایی انجام شود در حوزه‌های مختلف، هم بتوان از این گونه ربات در مکان‌های دیگر هم استفاده کرد. در تحقیق حاضر، ربات مد نظر دقیقاً با مکانیزم حرکتی (*ERA*) دوباره طراحی شده با توجه به تغییر نوع گریپر به صورت چنگکی (۲ انگشتی)، اندازه‌ی کوچکتر و وزنی سبک‌تر که همگی به صورت دلخواه (پارامتری) می‌تواند تغییر کند از ابعاد مینیاتوری تا مدل اصلی، و تغییر ظاهری کوچکی در جای مفصل بازویی (شکل ۲-۴) ایجاد شده است. اگر با دقت به تفاوت بین شکل (۲-۳) و ربات مورد مطالعه، در شکل (۲-۴) توجه کنید، مشاهده می‌شود که راستای مفصل بین دو بازوی بلند در (*ERA*)، هم راستای باقی مفاصل نیست در هنگامی که ربات ۱۸۰ درجه بین دو بازوی خود باز شود، این امر باعث می‌شود که بازو به طور کامل از ۰ تا ۱۸۰ باز شود. در حالی که در ربات مد نظر این پژوهش، این مفصل هم راستای باقی مفاصل جای گذاری شده است تا از پیچیدگی احتمالی و خطای زیاد در محاسبات صرف نظر شود. همچنین تغییر مدل گریپر باعث می‌شود ربات جسم‌های متفاوت بیشتری را بگیرد و یا جابه‌جا کند، اجسامی که از قبل جای گرفتن آن‌ها مشخص نیست. به طور خلاصه می‌توان گفت؛ در پژوهش مورد نظر چند تغییر در ربات اروپا داده شده است تا ربات مدنظر در این پژوهش شفاف‌تر مورد تحلیل قرار گیرد. یکی از این تغییرات، عوض کردن نوع گریپر ربات به صورت چنگکی است، این تغییر باعث می‌شود که ربات اروپا کاربردی‌تر و قادر به گرفتن اجسام شود و جهت‌گیری گریپر آن برای الگوریتم سینماتیک معکوس مهم می‌شود و تغییر دیگر از جمله هندسه و اندازه‌ی ربات می‌باشد که در ابعاد کوچکتر از نمونه اصلی مورد تحلیل قرار گرفته است.



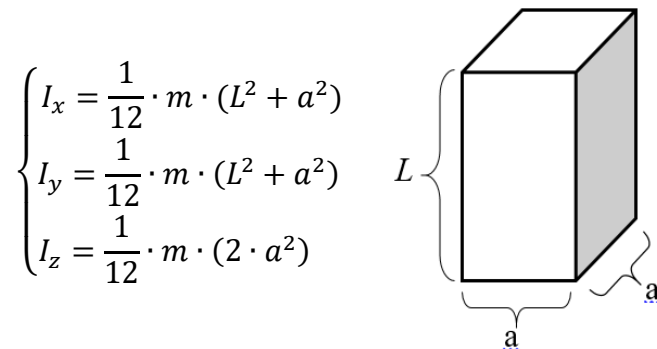
شکل ۴-۲ نماهای مختلف از بازوی طراحی شده برای این پژوهش

شکل (۴-۲) ربّاتی است که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت. لازم به توضیح است که برای این ربّات شش لینک به همراه هفت مفصل و دو گریپر در نظر گرفته شده، یعنی در مفصل میچ به جای یک مفصل یونیورسال، از سه مفصل چرخشی در سه صفحه‌ی اصلی مختصات استفاده شده و بین هر دو مفصل میچ، لینک کوچکی در نظر گرفته شده است، که این امر در نمونه اصلی ربّات (*ERA*) هم بوده صادق بوده است. با توجه به اینکه می‌توان در شبیه‌سازی‌ها از یک مفصلی که در ۳ جهت بچرخد استفاده شود اما برای شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت، به این صورت که گفته شد شش بازو که در هر میچ دو بازوی کوچک وجود خواهد داشت در نظر گرفته شده است. تمام این بازوان جرم و ممان اینرسی مخصوص خود را دارند که همگی به صورت پارامتری در نظر گرفته شده است که بتوان تغییر داد، به اضافه اینکه جرم موتورهای بر روی لینک‌ها تقسیم شده و هر مفصل به صورت یک نقطه‌ی بی‌وزن محسوب شده است. در این صورت به علت تقارن کامل این ربّات و با احتساب به اینکه تمامی موتورهای وزنی یکسان خواهند داشت، مرکز جرم هر لینک دقیقاً مرکز هندسی آن لینک در نظر گرفته شده با احتساب اینکه در قسمت شبیه‌سازی هر گریپر هم مانند یک لینک صلب دارای جرم محسوس محسوب شده است. شکل (۵-۲) به گونه‌ای نمایش داده شده است که علامت‌های بردار مفاصل، راستای محور چرخش آن‌ها را نمایش داده‌اند. و تمام اجزای این ربّات به صورت لینک در نظر گرفته شده تا جرم و ممان اینرسی هر یک در شبیه‌سازی‌ها محسوب شوند.



شکل ۵-۲ نمای ربات با لینک‌ها و مفاصل مشخص شده.

برای محاسبه‌ی ممان اینرسی، هر لینک را یک مکعب مستطیل با طول واقعی خود لینک و عرض تقریبی مشخصی، در نظر گرفته شده است. شکل (۶-۲) نحوه‌ی محاسبه‌ی سه ممان اینرسی اصلی در راستای سه مختصات اصلی لینک به مرکز جرمی متقارن واقع در مرکز حجم مکعب مستطیل و جرم m ، نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲ ممان اینرسی در نظر گرفته شده برای هر لینک دلخواه

در جدول ۱-۲ بنا به شکل (۵-۲ و ۶)، مشخصاتی به طور متناسب در نظر گرفته شده است که در انجام شبیه‌سازی‌های دینامیکی و کنترل استفاده می‌شود. چون ربات کاملاً متقارن است می‌توان طول‌ها و جرم‌های متقابل را یکسان در نظر گرفت. موارد عددی این جدول در قسمت‌های شبیه‌سازی عددی

در هر بخش استفاده می‌شود و این در حالی است که تمامی معادلات و روابط تا پایان به صورت پارامتری به دست آمده است.

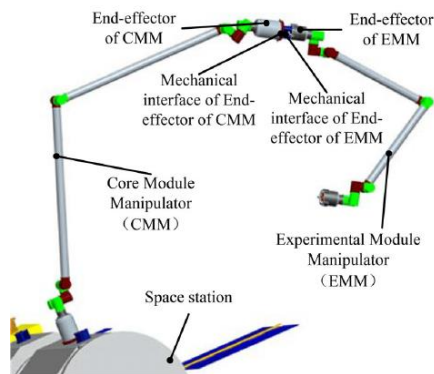
جدول ۱-۲ مشخصات سیستم

ممان اینرسی در سه راستای اصلی ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)			برای هر لینک		
I_z	I_y	I_x	جرم (kg)	طول (m)	شماره‌ی لینک
$8.33e - 4$	0.00776	0.00776	2	0.21	1
$4.16e - 4$	0.00388	0.00388	1	0.21	2
$4.16e - 4$	0.00388	0.00388	1	0.21	3
0.0020	0.6010	0.6010	5	1.2	4
0.0020	0.6010	0.6010	5	1.2	5
$4.16e - 4$	0.00388	0.00388	1	0.21	6
$4.16e - 4$	0.00388	0.00388	1	0.21	7
$8.33e - 4$	0.00776	0.00776	2	0.21	8

در این محاسبات عرض تمام لینک‌ها ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. به علت تقارن این ربات می‌توان فقط سه طول برای لینک‌ها معرفی نمود. L_1 برای طول دو گریپر، L_2 طول کوچک بین مفاصل که در مجموع چهار عدد هستند و طول L_3 که برای دو بازوی بلند وسط می‌باشند. این سه طول برای سادگی در محاسبات پارامتری استفاده شده‌اند. همچنین طول L_1 و L_2 را در عدد گذاری به مقدار ۲۱ سانتی‌متر مشابه هم در نظر گرفته شده است. سه ممان اینرسی اشاره شده در جدول ۱-۲ بیانگر ممان اینرسی هر لینک در راستای محورهای مختصاتی اصلی می‌باشد. با توجه به اینکه ابعاد و جرم لینک‌ها به صورت دلخواه و کوچکتر از مدل اصلی اروپا در نظر گرفته شده، سعی شده است که تا جای ممکن، جرم‌ها ممان اینرسی‌ها و ابعاد متناسب و معقول با نمونه‌ی در نظر گرفته شده باشد تا یک شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت به دست آید.

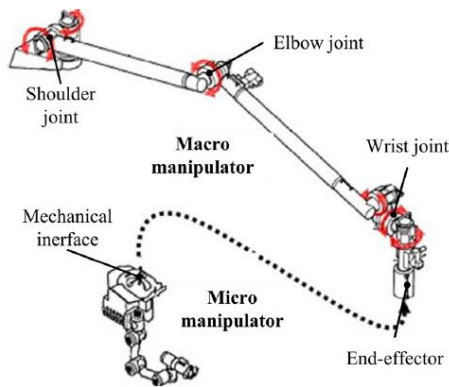
۳-۲ توانایی و قابلیت‌های مدل ربات بازویی متحرک در این پژوهش

این ربات همانطور که پیداست می‌تواند با جابه‌جایی کلی خود محدودیت‌های فضای کاری را به طور زیادی کاهش دهد. اما با اضافه شدن یک ربات دیگر مشابه خود به عنوان همکار می‌تواند از یک جای ثابت هم محدودیت‌ها را کاهش دهد. نمونه‌ی این همکاری در شکل (۷-۲) پیدا است. در این عملیات یکی از ربات‌ها به انتهای ربات قبل وصل می‌شود و درجات آزادی را افزایش می‌دهد و با سری کردن و یا موازی کردن این گونه ربات‌ها می‌توان به درجات آزادی چند برابری دست یافت و یا یک عملیات پیچیده را آسان نمود.



شکل ۷-۲ عملیات‌های مختلف در فضا [۹]

گاهی می‌توان ربات دیگر و یا ابزار کار مخصوص را به انتهای ربات افزود که پیش‌تر در فصل قبل بیان شد، نمونه‌ی آن در شکل (۸-۲) نمایان است. ربات‌های بازویی فراوانی را می‌توان در نظر گرفت که با جابه‌جایی دو پا گونه‌ی خود به همراه همکاری یکدیگر و ابزار آلات متفاوت در ایستگاه فضایی زمین، عملیات‌های مهم و دقیقی را انجام می‌دهند. که می‌توان مشابه آن را هم در ابعاد کوچکتر برای کاربردهای فراوان تر انجام داد.



شکل ۲-۸ ربات دارای مکانیزم **ERA** می تواند شامل ابزارهایی باشد که بتوان روی آن نصب کرد [۹].

می توان تصور نمود که ربات مد نظر این پژوهش می تواند فعالیت هایی در مکان های مختلف انجام دهد، علاوه بر توانایی های آن در فضا، می تواند در زمینه ی بسیاری از کاربردها به عنوان یک ربات بازرس خطوط انتقال آب و انرژی، خطوط انتقال قدرت، و یا می تواند در فاجعه های طبیعی، فن آوری های کمک رسان و شاید سایر برنامه های کاربردی دیگر مورد استفاده قرار گیرد. مثل بالا رفتن از ساختمان ها و یا سازه هایی مانند دکل برق و یا هر سازه ی فضایی و زمینی که برای انسان خطرناک و سخت باشد. به منظور عملیات های نجات در سوانح طبیعی، بازرسی و یا حتی انجام یک کار که برای انسان و سایر ربات ها ممکن نباشد، مثل جوشکاری در یک ارتفاع خطرناک و یا محیط غیر قابل دسترس می شود از این گونه ربات استفاده نمود. حتی با اضافه نمودن تجهیزات جدید که قابلیت اتصال به دو طرف ربات را دارند می توان کاربرد آن را هم افزایش داد. مثلاً می توان مازولی با داشتن چرخ یا پره برای جابه جایی بر روی زمین، هوا و آب به آن وصل نمود و کاربردهای بیشتری برای آن متصور شد.

۲-۴ تعریف مسئله

در بخش های جداگانه و بنا به خواسته ها و فرضیات مورد نظر به تحلیل هر بخش از ربات پرداخته شده است تا در هر بخش نوآوری و روشی بهتر از پژوهش های دیگر صورت پذیرد و در پایان همگی مباحث برای کنترل مناسب ربات استفاده شوند. پس مسئله ی اصلی به دست آوردن معادلات هندسی و حرکتی به همراه کنترل این گونه ربات بازویی و متحرک می باشد که در بخش های مجزا این مباحث بررسی می شوند و نوآوری هایی در به دست آوردن هر یک از این خصوصیات به همراه روش و الگوریتم

مربوطه ارائه شده است. بعد از معرفی کامل ربات در این فصل، در فصل‌های پیش رو معادلات سینماتیک مستقیم و معکوس آن به همراه مسیریابی توسط اهداف مشخص با توجه به جهت‌گیری و مکان هدف به دست آمده است. اگر بتوان الگوریتمی کامل با در نظر گرفتن بیشترین جزییات برای اکثر حرکات موجود تبیین نمود، مهم‌ترین بخش این پژوهش انجام شده است که منحصر به خود این ربات خواهد بود و در بخش‌های دیگر مورد استفاده هم می‌باشد. بعد از آن معادلات دینامیکی به روش لاگرانژ به دست آمده است و توسط مدل بازویی شبیه‌سازی شده در نرم افزار متلب (بخش سیم اسکپ)، تایید شده است. هدف اصلی به دست آوردن معادلات دینامیکی، کنترل ربات به روش‌های مختلف بوده است. در قسمت کنترل، مؤثرترین کنترل‌کننده‌ها در میان پژوهش‌های کنترلی در بازوان رباتیکی مرتبط انتخاب شده است. نمونه‌هایی از مدل‌های کنترل مقاوم با اهداف مختلف بر روی سیستم این ربات تست شده است و نتایج قابل قبولی داشته که در بخش خود به طور کلی توضیح داده شده است. کنترل‌کننده‌ی مد نظر بایستی مقاوم در برابر نامعینی‌های سیستمی و خارجی وارد شده به ربات باشد، در کنار اینکه کمترین تلاش کنترلی ممکن را به مفاصل تحمیل کند. در این صورت می‌توان حتی از ترکیب کنترل-کننده‌های متفاوت برای داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد هر یک استفاده نمود و یا حتی تخمین‌گرهایی برای کاربردهای دیگری مثل استفاده نکردن از سنسور با این روش‌های کنترلی غیرخطی طراحی نمود. در پایان گریپری با مکانیزمی ساده‌تر از آنچه که مدل اصلی داشت طراحی و ساخته شده است. به منظور ساخت یک نمونه کاربردی و عملی گریپر که بتوان اکثر اجسام مورد نیاز ربات را بگیرد و جابه‌جا کند، این گونه طراحی شده است. نتیجه‌ی اصلی در این بخش رسیدن به طراحی و ساخت کامل یک محصول با قابلیت‌های فراوان و کمترین هزینه برای پژوهش‌ها و فعالیت‌های رباتیکی – تجاری دیگر، بوده است. همچنین قابل گسترش و استفاده برای بازوی فضایی مد نظر هم می‌باشد. این در حالی است که مدل ارائه شده برای گریپر به صورت دو انگشتی و قابل ارتقا به مدل‌های دیگر دستگیره انتهایی بوده و بنا به کاربردهای بیشتری برای همین ربات در نظر گرفته شده و فقط قسمت ساخت آن جدای شبیه‌سازی و تکمیل‌کننده‌ی این پژوهش می‌باشد.

فصل سوم: سینماتیک، سینماتیک معکوس و انتقال ربات

سینماتیک معکوس به عنوان یکی از اصلی‌ترین بخش‌های پژوهش‌های رباتیک و به ویژه مکانیزم‌های فضایی قابل بیان است. بحث فضای کاری و مسیریابی در آن با توجه به موانع و شرایط مختلف یکی از بخش‌های اصلی بازوان رباتیک می‌باشد که می‌تواند به عنوان مقدمه یا پیش شرط استفاده از سینماتیک معکوس قرار گیرد. زیرا برای استفاده از روابط به دست آمده در سینماتیک معکوس هر ربات بایستی قبل از آن مطمئن شد که فضای کاری ربات و مرزهای آن به درستی بررسی شده‌اند، به همین منظور ابتدا پژوهش‌هایی در این زمینه بررسی شده‌اند. سپس به مسئله‌ی سینماتیک معکوس ربات‌های بازویی اعم از صنعتی و غیر صنعتی، ثابت و یا با قابلیت جابه‌جایی پرداخته شده است. از پژوهش‌هایی که در مورد فضای کاری ربات تحقیق نموده‌اند می‌توان به [۱۰] اشاره کرد، در این مقاله نتایج به دست آمده از کنترل ربات در محیط کاری با توجه به مسیر و برخوردها بر روی یک نمونه ربات صنعتی تست شده تا به صورت عملی این قضیه بررسی گردد. در تحقیق [۱۱] احتمالات فضای کاری ربات بررسی می‌شود. یک ربات واقعی مورد آزمایش قرار می‌گیرد و احتمالات مسیر انتهایی آن در فضای کاری کلی ربات تقسیم بندی شده و آنالیز می‌گردد. پژوهش [۱۲] در ارتباط با روش‌های بهینه‌سازی طرح‌ریزی مسیر برای ربات بازویی می‌باشد. در این پژوهش بخش وسیعی‌ای از همین پژوهش‌ها در رابطه با مسیریابی و برخورد ربات در فضای کاری، بررسی و مقایسه شده و منبع جامعی در این حوزه می‌تواند باشد. برای آنالیز سینماتیک و سینماتیک معکوس ربات‌های بازویی مشخصی در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند که اکثر این ربات‌ها صنعتی می‌باشند. مانند پژوهش [۱۳] که ربات مشخصی را معرفی و سینماتیک ربات را با تئوری بردارهای پایه گروبنر^۱ و روش دیناویت هارتنبرگ^۲ به دست آورده است. نظریه گروبنر پایه، اجازه می‌دهد تا ریاضی‌دانان سیستم‌های معادلات چند جمله‌ای را با استفاده از یک الگوریتم خاص حل کنند. در تحقیق دیگری از این پژوهشگر نشان می‌دهد که نظریه پایه گروبنر سودمند

¹ Groebner Basis

² Denavit-Hartenberg Matrix

است و علاوه بر این، در هنگام حل مسئله‌ی سینماتیک معکوس برای ربات‌های مختلف در حوزه‌ی رباتیک این روش در مقایسه با هر روشی که ریاضی‌دانان و مهندسان رباتیک استفاده کرده‌اند، بهتر بوده است [۱۴]. پژوهش [۱۵] در رابطه با ربات صنعتی (*KUKA*) می‌باشد؛ سینماتیک و دینامیک این ربات به همراه کنترل سینماتیک به روش پلتفرم پردازش موازی به دست آمده است. در این پژوهش برای مسئله‌ی سینماتیک و دینامیک ربات، از روش دینامیت هارتنبرگ استفاده شده است. این ربات صنعتی دارای ۶ درجه آزادی بوده و این پژوهش، تحقیقی کامل در تمام جنبه‌های سینماتیکی و دینامیکی این ربات بوده است. در مقاله [۱۶]، یک ربات صنعتی دیگر، (*PUMA*) مورد مطالعه قرار گرفته است. این ربات دارای شش درجه آزادی با اتصالات متفاوت و ناهم‌راستا است. روشی که برای تعریف پیکربندی‌های ممکن بازوهای مختلف برای بازوهای رباتیک انجام شده است، براساس سیستم‌های مختصات و هندسه بازوی انسان برای حل مسئله سینماتیک مورد استفاده قرار گرفته است. این پژوهش را می‌توان به عنوان یک تحقیق کامل بر روی سینماتیک معکوس یک ربات بازویی محسوب کرد که به طور کامل بررسی شده است. پژوهش‌هایی در قالب پایان‌نامه‌های مختلف در حوزه‌ی ربات بازویی صورت پذیرفته مثل تحقیق [۱۷]، ربات شش درجه آزادی مشابه ربات‌های صنعتی به صورت کامل و با دقتی نزدیک به واقعیت، سینماتیک و دینامیک ربات مد نظر خود را به دست آورده است. در پژوهش [۱۸] سینماتیک معکوس یک ربات ۶ درجه آزادی استاندارد را با داشتن دو نوع مختلف پیکربندی گریپر با دقت هندسی به دست آمده است. اما در رابطه با ویژگی ربات‌های فضایی می‌توان به این نکته‌ی مهم اشاره نمود که اغلب آن‌ها می‌توانند جابه‌جا و منتقل شوند و مانند ربات‌های بازویی دیگر در مکان خاصی برای همیشه ثابت نمی‌مانند. برای همین نمونه‌هایی از مقالات مربوط به سینماتیک بازوهای متحرک را می‌توان معرفی نمود. مقاله [۱۹] در رابطه با رباتی متحرک می‌باشد، بازویی رباتیکی که به همراه یک سیستم چهار چرخ قابلیت جابه‌جایی پیدا کرده است. در این پژوهش آنالیز سینماتیکی بازو به همراه سیستم انتقالی به طور کامل به همراه جهت‌گیری انتهای بازو و هدفی دلخواه به دست آمده و با استفاده از دوربین پردازش تصویر این اطلاعات کالیبره شده‌اند. همچنین برای مسیر حرکت ربات، ملاحظات برای

جابه‌جایی در برخی از شرایط محیط کاری در نظر گرفته شده است. در پژوهش [۲۰] یک بازوی رباتیک فضایی ۶ درجه آزادی شبیه ربات اروپا کار شده است و سینماتیک معکوس آن را حل کرده است و در این روش، معنی هندسی واضح است. علاوه بر این، می‌توان به کنترل زمان واقعی دست پیدا کرد و پیکربندی مورد نظر را از چند راه حل انتخاب کرد. پژوهش [۲۱] یک تحقیق کامل در سینماتیک، دینامیک و کنترل یک ربات شناور فضایی می‌باشد. ربات ۶ درجه آزادی که بی شباهت به ربات اروپا نیست. در این تحقیق برای کنترل ربات از ماتریس ژاکوبین آن استفاده شده است؛ این ماتریس از سینماتیک ربات به دست می‌آید.

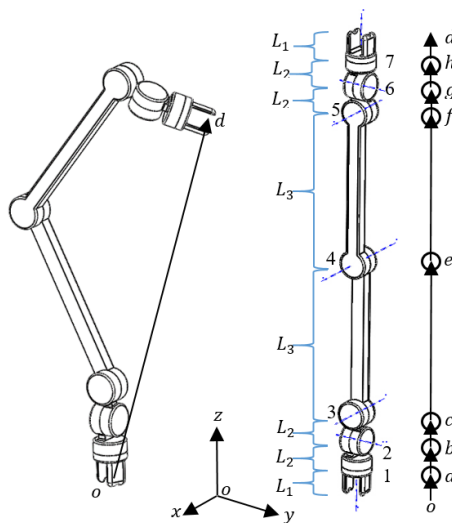
به عنوان خلاصه می‌توان گفت در اکثر پژوهش‌های سینماتیکی، یا از روش هندسی تحلیلی و یا عددی استفاده شده است و استفاده از ماتریس انتقال روش دینامیت هارتنبرگ امر معمولی بوده است. بعد از آن پردازش تصویر، ملاحظات فضای کاری و کالیبره کردن روابط بدست آمده در کنار مبحث سینماتیک و سینماتیک معکوس رباتهای ثابت و متحرک، قرار گرفته تا ربات مد نظر در هر پژوهش به نحوی قابل قبول بررسی شود و الگوریتم ارائه شده ارتقا یابد. اما در پژوهش ارائه شده روند تحقیقات به این صورت است که ابتدا سینماتیک ربات از ماتریس‌های چرخش و بردارها در محور مختصات سه بعدی با روش انتقال ارائه شده در کتاب [۳۱]، به دست می‌آید که پیچیدگی و محاسبات کمتری نسبت به روش ماتریس انتقال دینامیت هارتنبرگ دارد. سپس ملاحظات فضای کاری همراه با توجه به جهت‌گیری گیرنده‌ی انتهایی بررسی می‌شود و محدودیت‌های آن به عنوان اصل و شرط سینماتیک معکوس به دست می‌آید. دو حالت کلی برای ربات اروپا در نظر گرفته می‌شود که یکی ثابت بودن آن در مکانی به مانند بازوهای یک سر درگیر، و حالت بعدی با توانایی انتقال توسط دو سر خود ربات که باعث می‌شود فضای کاری نا محدودتری ارائه شود. شروط فضای کاری و مسیر هدف برای ربات تعیین خواهد کرد که با ثابت بودن یک سمت ربات، آن سر دیگر توانایی رسیدن به هدف را دارد یا که با چند مرحله انتقال کلی ربات به آن هدف برسد که در حالت کلی الگوریتم سینماتیک معکوس برای حالت ثابت، زیر مجموعه انتقال کلی می‌باشد که در آخرین تلاش انتهای سر ربات برای رسیدن به هدف استفاده خواهد

شد. برای حالت یک سر گیردار، سینماتیک معکوس از روش هندسی تحلیلی به مانند ربات‌های صنعتی چند درجه آزادی با دقت کاملی به دست آمده است و برای حالت انتقال هم، با فرض نبود موانع در محیط الگوریتمی پیشنهاد شده است که با توجه به مختصات و جهت‌گیری هر هدفی به آن نقطه‌ی مطلوب مورد نظر برسد. به علت اینکه گاهی اوقات حل معادلات چند مجهولی سینماتیک معکوس بسیار سخت می‌باشد و با اینکه اکثر روش‌های موجود در پژوهش‌ها عددی بود، بنا بر این شد که از روشی بسیار سریع‌تر، ساده‌تر و دقیق‌تر استفاده شود. ویژگی اصلی تحلیل هندسی دقیق بودن آن است؛ در این روش هندسی که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است، موقعیت زاویه ای اتصالات گام به گام به دست می‌آید. به طور خلاصه، تصاویر بردار از نقطه هدف به نقطه مرکزی مختصات بر روی کل صفحه مرجع بازتاب می‌شود. با اینکه پردازش تصویر برای تشخیص مکان و نگرش بدن هدف پیشنهاد می‌شود اما مسیر و جهت‌گیری هدف به عنوان داده‌ی ورودی به سیستم در نظر گرفته می‌شود. فرض بر این است که این اطلاعات در این پژوهش از قبل شناخته شده است، سپس ورودی‌های دلخواه معلوم و هدف الگوریتم ارائه شده به دست آوردن زاویه مفاصل هفت گانه ربات خواهد بود. در این مطالعه، در حال حاضر، سینماتیک معکوس ربات کاملاً هندسی و تحلیلی با توجه به جهت‌گیری هدف به دست آمده است و به طور گسترده‌ای به عنوان یک پلتفرم جدید برای تحقیقات بیشتر می‌تواند معرفی شود. در بخش‌های پیشرو، سینماتیک مستقیم به همراه سینماتیک معکوس این ربات به دست آمده است. بنابراین، پیدا کردن مختصات موقعیت و نگرش نقطه سر بازوی انتهایی موضوع کلیدی است. فرض اصلی در جهت‌گیری ربات نسبت به جهت‌گیری جسم این است که گریپر همیشه عمود بر سطح $x-y$ هدف واقع باشد، الگوریتم‌های پیشنهادی سینماتیک معکوس باید برای هدایت ربات، برای رسیدن به این هدف با دقت طراحی شده است. روش هندسی و زنجیره ای از ماتریس چرخش کمک می‌کند تا هدف مورد نظر تحقق یابد، همچنین این روش گام به گام و با شرایط مختلفی در ادامه توضیح داده شده است. با این حال، مکانیزم عملکردی سینماتیک ربات و سینماتیک معکوس برای این تحقیق بسیار مهم و کلیدی بوده است و برای ادامه این کار در بخش‌های دینامیک و تجزیه و تحلیل کنترل ربات لازم

بود. اما قبل از بخش سینماتیک معکوس لازم است، سینماتیک مستقیم و محدودیت‌های فضای کاری ربات بررسی شوند تا در خود سینماتیک معکوس اعمال شوند، در این میان فرض‌هایی در نظر گرفته خواهند شد که روند کار را قانون‌مندتر خواهند کرد و کمترین محدودیتی برای خود ربات به منظور ساده‌تر شدن الگوریتم به همراه دارند. در پایان بعد از به دست آمدن این الگوریتم‌ها، می‌توان برای ربات مسیر مشخص کرد و عملیات انتقال را با توجه به مکانیزم دوپای خود انجام دهد که خود چند الگوریتم نیاز دارد که نقاط مقصد را گام به گام شناسایی و به صورت هوشمند پیدا کند، و فقط اپراتور مقصد نهایی را به ربات دهد. این مباحث در بخش پایانی به صورت جامع تر و انجام چند آزمایش موفقیت آمیز، بررسی شده است.

۳-۲ سینماتیک مستقیم

مشخصات ربات طراحی شده در شکل (۳-۱) نمایان می‌باشد. با توجه به تعریف مختصات مرجع و راستای اولیه‌ی ربات که به صورت عمودی ایستاده در نظر گرفته شده است. هر یک از مفاصل ربات نسبت به مفصل قبلی برداری در مختصات سه بعدی در نظر گرفته شده به طوری که نقطه‌ی شروع و یا سر گریپر ابتدایی بر روی مرکز مختصات مرجع ایستاده و بردارها تا انتها بر همان راستا تشکیل شده است. نقطه‌ی d سر گریپر انتهایی می‌باشد که در محاسبات مکان این نقطه باید بر نقطه‌ی هدف منطبق شود. همچنین ربات متقارن می‌باشد و طول دو لینک بزرگتر L_3 ، طول گریپرها به همراه بازوی حمل کننده‌ی آن‌ها L_1 و طول لینک بین دو مفصل $۱و۲$ ، $۲و۳$ و متقارن آن‌ها هم L_2 در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۱ تعریف بردارهای بازوها و نمایش طول‌ها

روابط سینماتیک مستقیم ربات به روش ماتریس‌های دوران از مرجع [۳۱] (فصل ۳) استخراج شده است. ماتریس‌های دوران با توجه به دستگاه مختصاتی تعریف شده در شکل (۳-۱) و به ترتیب مفصل-های ربات در جدول (۳-۱) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۳-۱ ماتریس‌های دوران

R_1	$\begin{bmatrix} C\theta_1 & S\theta_1 & 0 \\ -S\theta_1 & C\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
R_2	$\begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & -S\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ S\theta_2 & 0 & C\theta_2 \end{bmatrix}$
R_3	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_3 & S\theta_3 \\ 0 & -S\theta_3 & C\theta_3 \end{bmatrix}$
R_4	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_4 & S\theta_4 \\ 0 & -S\theta_4 & C\theta_4 \end{bmatrix}$
R_5	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_5 & S\theta_5 \\ 0 & -S\theta_5 & C\theta_5 \end{bmatrix}$
R_6	$\begin{bmatrix} C\theta_6 & 0 & -S\theta_6 \\ 0 & 1 & 0 \\ S\theta_6 & 0 & C\theta_6 \end{bmatrix}$
R_7	$\begin{bmatrix} C\theta_7 & S\theta_7 & 0 \\ -S\theta_7 & C\theta_7 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

در اینجا S مخفف سینوس و C مخفف کسینوس زاویه‌ی مورد نظر می‌باشد. سپس بردارهای تعریف شده در شکل (۳-۱)، به صورت جدول (۳-۲) استخراج شده‌اند. بردارها را با توجه به ماتریس‌های انتقال پشت سر هم دوران داده شده‌اند تا مختصات نقطه‌ی انتهایی هر بردار با توجه به زاویه‌ای که بردار چرخیده به دست آید. چون کل ربات در حالت اولیه عمودی می‌باشد کل بردارهای تعریف شده فقط مؤلفه‌ی z دارند و وقتی در ترانهاده^۱ ماتریس دوران زاویه‌ی قبل از خود ضرب شوند مختصات اول بردار بعدی را می‌دهند [۳۱].

جدول ۳-۲ تعریف بردارها در فضای سه بعد

مقدار به دست آمده	بردارها
$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_1 \end{bmatrix}$	r_{ao}
$R_1^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_2 \end{bmatrix}$	r_{ba}
$R_1^T \cdot R_2^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_2 \end{bmatrix}$	r_{cb}
$R_1^T \cdot R_2^T \cdot R_3^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_3 \end{bmatrix}$	r_{ec}
$R_1^T \cdot R_2^T \cdot R_3^T \cdot R_4^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_3 \end{bmatrix}$	r_{fe}
$R_1^T \cdot R_2^T \cdot R_3^T \cdot R_4^T \cdot R_5^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_2 \end{bmatrix}$	r_{gf}
$R_1^T \cdot R_2^T \cdot R_3^T \cdot R_4^T \cdot R_5^T \cdot R_6^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_2 \end{bmatrix}$	r_{hg}
$R_1^T \cdot R_2^T \cdot R_3^T \cdot R_4^T \cdot R_5^T \cdot R_6^T \cdot R_7^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_1 \end{bmatrix}$	r_{dh}
$r_{ao} + r_{ba} + r_{cb} + r_{ec} + r_{fe} + r_{gf} + r_{hg} + r_{dh}$	r_{do}

بردار r_{do} ، از مرکز مختصات تا انتهای سر ربات تعریف شده است و حاصل مجموع بردارهای به دست آمده در فضای سه‌بعدی می‌باشد و در جدول (۳-۳) هر سه مؤلفه‌ی آن نمایش داده شده است.

¹ Transpose

در روش دناویت-هارتنبرگ باید هر دوران حول محور z تعریف می شد و دوران های اضافی محورهای مختصاتی به علاوه انتقال ها و طول هایی جدید، به همراه ضرب های ماتریس های چهار در چهار که جهت گیری و مکان را با هم نشان می دهند که همگی کار را پیچیده می کنند؛ این در حالی است که در روش انجام شده بدون تعریف پارامترهای یا دوران های اضافی، یک زنجیره دوران ماتریسی حول محورهای $(z-y-x-x-x-y-z)$ انجام شده و مکان انتها به همراه جهت گیری آن با کمترین محاسبات و پیچیدگی ها به صورت مجزا در جداول (۳-۳ و ۳-۳) به دست آمده است. سه مؤلفه بردار r_{do} در جدول (۳-۳) بیان گر سینماتیک مستقیم این ربات است که با توجه به زوایا، بردار مکان انتها به دست آمده است.

جدول ۳-۳ سینماتیک مستقیم بر مبنای هندسه ی ربات و ماتریس های دوران

$r_{target} = r_{do} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}$	
r_1	$C1 * S2 * L2 + (C1 * C3 * S2 + S1 * S3) * L3 + (- (C1 * S2 * S3 - C3 * S1) * S4 + (C1 * C3 * S2 + S1 * S3) * C4) * L3 + (((C1 * S2 * S3 - C3 * S1) * C4 + (C1 * C3 * S2 + S1 * S3) * S4) * S5 + (- (C1 * S2 * S3 - C3 * S1) * S4 + (C1 * C3 * S2 + S1 * S3) * C4) * C5) * L2 + C1 * C2 * S6 * L2 + (((C1 * S2 * S3 - C3 * S1) * C4 + (C1 * C3 * S2 + S1 * S3) * S4) * S5 + (- (C1 * S2 * S3 - C3 * S1) * S4 + (C1 * C3 * S2 + S1 * S3) * C4) * C5) * C6 * L3 + C1 * C2 * S6 * L1 + (((C1 * S2 * S3 - C3 * S1) * C4 + (C1 * C3 * S2 + S1 * S3) * S4) * S5 + (- (C1 * S2 * S3 - C3 * S1) * S4 + (C1 * C3 * S2 + S1 * S3) * C4) * C5) * C6 * L1$
r_2	$S1 * S2 * L2 + (C3 * S1 * S2 - C1 * S3) * L3 + (- (S1 * S2 * S3 + C1 * C3) * S4 + (C3 * S1 * S2 - C1 * S3) * C4) * L3 + (((S1 * S2 * S3 + C1 * C3) * C4 + (C3 * S1 * S2 - C1 * S3) * S4) * S5 + (- (S1 * S2 * S3 + C1 * C3) * S4 + (C3 * S1 * S2 - C1 * S3) * C4) * C5) * L2 + S1 * C2 * S6 * L2 + (((S1 * S2 * S3 + C1 * C3) * C4 + (C3 * S1 * S2 - C1 * S3) * S4) * S5 + (- (S1 * S2 * S3 + C1 * C3) * S4 + (C3 * S1 * S2 - C1 * S3) * C4) * C5) * C6 * L3 + S1 * C2 * S6 * L1 + (((S1 * S2 * S3 + C1 * C3) * C4 + (C3 * S1 * S2 - C1 * S3) * S4) * S5 + (- (S1 * S2 * S3 + C1 * C3) * S4 + (C3 * S1 * S2 - C1 * S3) * C4) * C5) * C6 * L1$
r_3	$C2 * C3 * L3 + C2 * L3 + L1 + L2 + (C2 * C3 * C4 - C2 * S3 * S4) * L3 + ((C2 * C3 * S4 + C2 * C4 * S3) * S5 + (C2 * C3 * C4 - C2 * S3 * S4) * C5) * L2 - S2 * S6 * L2 + ((C2 * C3 * S4 + C2 * C4 * S3) * S5 + (C2 * C3 * C4 - C2 * S3 * S4) * C5) * C6 * L2 - S2 * S6 * L1 + ((C2 * C3 * S4 + C2 * C4 * S3) * S5 + (C2 * C3 * C4 - C2 * S3 * S4) * C5) * C6 * L1$

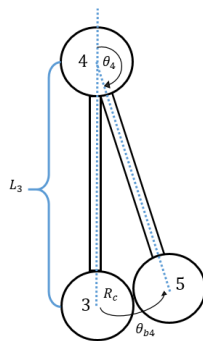
۳-۳ محدودیت های حرکتی

محدودیت های کاری ربات روی عملکرد ربات مد نظر تاثیر بسزایی دارد، به همین منظور در این پژوهش این محدودیت ها به سه قسمت تقسیم می شود تا بیشتر مورد مطالعه قرار گیرند: بخش اول شامل

محدودیت‌های چرخشی مفاصل می‌باشد. بخش دوم در رابطه با فضای برداری و مختصات ربات است و در بخش سوم، محدودیت‌های جهتی و جهت‌گیری ربات و جسم هدف بحث شده است.

۳-۱-۳ محدودیت‌های چرخش مفصل‌ها

زوایای ۱ و ۷ ربات حول محور Z و ۳، ۴ و ۵ حول محور x و ۲، ۶ حول محور y می‌چرخند. محدودیت‌های چرخش هر مفصل به شکل جدول (۳-۴) طراحی و تعریف شده است. این تعریف بنا به مشخصات هندسی ربات و توانایی حرکت آن در نظر گرفته شده است. برای مفاصل ۱ و ۷ که چرخش آن‌ها حول محور Z می‌باشند که البته گریپر را حمل می‌کنند، تمام 360° درجه چرخش می‌تواند آزاد می‌باشند. با توجه به مرجع [۸] که در آن ذکر می‌شود برای حرکت کامل به هر سمت و جهت، فقط به 6° درجه آزادی نیاز است و به همین منظور مفصل متحرک حول محور y برای مچ ثابت یعنی مفصل شماره ۲ را حرکت نمی‌دهند. همچنین برای سینماتیک معکوس دنبال کردن هر مسیر در فضای کاری ربات آن زاویه نیاز نمی‌باشد، اضافه بر اینکه در بحث پایداری ربات هم تصویر عمودی ربات هم در طول ربات بیافتد بهتر است (تعادل نقطه صفر) پس بنا به این دلایل این زاویه را صفر در نظر می‌گیرند در حالی که در قسمت بعدی برای راه رفتن ربات و یا الگوریتم‌های تشخیص موانع مثل مرجع [۲۵] و یا حتی کنترل دستی به آن زاویه نیاز پیدا می‌شود. سپس باقی مفاصل تا جایی که به مفاصل دیگر برخورد نکنند می‌توانند حرکت نمایند که این محدودیت برخورد با مفاصل دیگر برای چرخش مفصل ۴ در شکل (۳-۲) بررسی شده است. مفصل ۴ باید تا جایی که می‌تواند حرکت کند این امر باعث می‌شود محدوده‌ی بزرگی از فضا برای ربات قابل دسترسی شود اما برای مفاصل دیگر این امر صحت ندارد و با همین محدوده‌ای که برای آنها فرض شده می‌توانند فضای کاری ربات را پوشش دهند. از چرخش اضافی برای باقی مفاصل به علت مباحث کمترین گشتاور لازم برای رسیدن به مقصد و پایداری ربات در چرخش کمتر زوایا حول y ، خود داری شده است اما می‌توان برای آن‌ها هم آنچه که به عنوان محدودیت برای مفصل ۴ در شکل زیر در نظر گرفته شده را محاسبه نمود که از دایره‌ی این بخش خارج است. در پایان نتایج نهایی در جدول (۳-۴) مندرج شده است.



شکل ۳-۲ چرخش مفصل ۴ به همراه محدودیت زاویه برخورد دو مفصل ۳ و ۵

با فرض اینکه شعاع مفاصل همگی یکسان باشند و با داشتن طول L_3 و شعاع R_c می‌توان زاویه محدود کننده θ_{b4} را طبق رابطه‌ی هندسی (۳-۱) به دست آورد.

$$\theta_{b4} = 2 \times \text{atan2}\left(\frac{R_c}{2}, L_3\right) \quad (۳-۱)$$

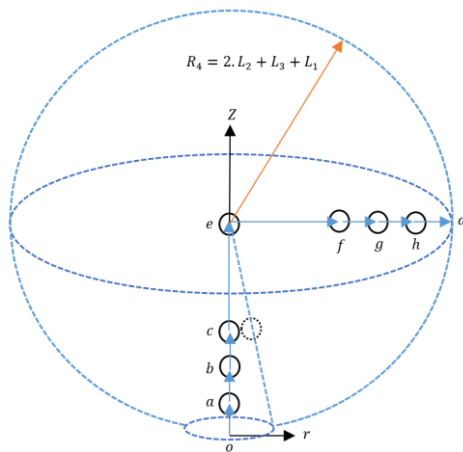
جدول (۳-۴) نمایانگر محدوده‌ی مجاز و تعریف شده‌ی چرخش مفاصل برای ربات مد نظر می‌باشد. به غیر از مفصل کلیدی ۴ که با توجه به آخرین حد چرخشی که می‌تواند انجام دهد محدود شده است. باقی مفاصل که در صفحه‌ی $z-y$ و $z-x$ می‌چرخند را برای ۹۰ درجه در جهت مثبت و منفی محدود شده‌اند و دو مفصل واقع در صفحه‌ی $x-y$ آزاد در نظر گرفته شده‌اند. این صفحات که همگی با حروف کوچک نشان داده شده است، بر اساس محورهای خود ربات تنظیم شده‌اند. نتایج در جدول (۳-۴) قابل مشاهده است.

جدول ۳-۴ محدودیت مفاصل

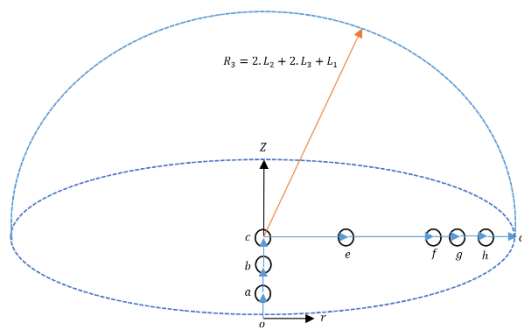
θ_1	$0 \rightarrow \pm\pi$
θ_2	$0 \rightarrow \pm\frac{\pi}{2}$
θ_3	$0 \rightarrow \pm\frac{\pi}{2}$
θ_4	$0 \rightarrow \pm(\pi - \theta_{b4})$
θ_5	$0 \rightarrow \pm\frac{\pi}{2}$
θ_6	$0 \rightarrow \pm\frac{\pi}{2}$
θ_7	$0 \rightarrow \pm\pi$

۲-۳-۳ محدودیت برداری در فضای سه بعدی

با توجه به شکل (۳-۳) بردارهای تعریف شده برای هر بازو هم محدودیت چرخش دارند که در جدول (۴-۳) تعریف شد و هم محدودیت مختصاتی دارند که به اندازه طول‌های سه گانه تعریف شده بستگی خواهند داشت. نقطه‌ی هدف مورد نظر باید همواره در محدوده‌ای قرار گیرد که مجموع این بردارها به آن نقطه برسند. این بردارها از روابطی که از شکل‌های (۳-۳) الی (۵) استخراج شده است، به دست می‌آید. در شکل (۳-۳) میزان چرخش مفصل کلیدی ۴ نمایش داده شده است. این مفصل آزادی عمل بیشتری نسبت به مفاصل همتای خود یعنی ۲،۳ و ۵،۶ دارد؛ زیرا به جای توزیع گستردگی به ۴ مفصل، خود مفصل ۴ می‌تواند فضاها را به دور از خطر عدم پایداری و... شامل شود. همچنین مفصل ۳ در شکل (۴-۳) می‌تواند محدوده‌ای بیشتر را با بردار R_3 شامل شود که مجموع دو بردار R_3 و R_4 روی هم می‌تواند مرزهای خارجی ربات را تعریف کند و می‌توان برنامه ریزی نمود که نقطه‌ای خارج از این مرز قابل قبول برای حرکت ربات زمانی که یک پای آن ثابت باشد، نیست. البته با ترکیب چرخش‌های این ۷ مفصل که بیشمار حالت ممکن است رخ دهد می‌توان فضایی بیشتر از آنچه که در این بخش محدود شده است را شامل شد. اما به دلایل گفته شده در بخش قبل برای پایداری و مسائلی که باعث سخت شدن حل مسئله می‌شود این مفاصل به این شکل‌ها محدود شده‌اند تا بتوان آن‌ها را برای سینماتیک معکوس برنامه‌ریزی نمود در حالی که در کنترل دستی می‌توان آزادی عمل فراوان داشت، و در آن حوزه می‌توان به دور از سینماتیک و سینماتیک معکوس، روی کنترل ربات در اغتشاشات و یا ضربه صحبت نمود.



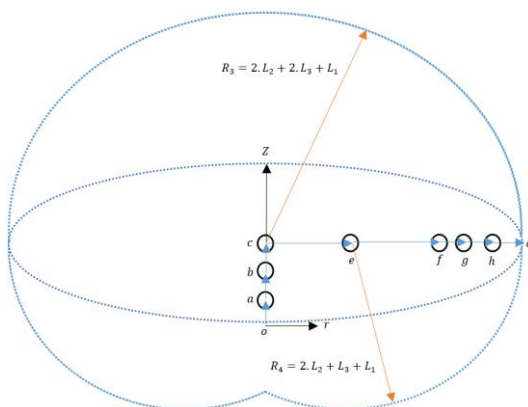
شکل ۳-۳ مرزهای فضای کاری برای چرخش مفصل کلیدی ۴



شکل ۳-۴ فضای کاری جدید در گروه عملکرد مفصل ۳ با توجه به محدودیت اعمال شده

حال مجموع فضای کاری که ای دو مفصل ۳ و ۴ با چرخش محدود خود پوشش می دهند به

شکل (۳-۵) درآمده است. که مجموعه‌ی مشترک دو شکل قبل می‌باشد.



شکل ۳-۵ تمام فضای کاری مسیرهای ممکن توسط ربات با توجه به شکل‌های (۳-۱ الی ۵)

این فضا حداقل محدودیت ربات می باشد که البته با صرف نظر از جهت گیری هدف، تمام مسیرهای واقع در این فضا تقریباً به طور کامل قابل دسترس است. به منظور به دست آمدن رابطه ریاضی، ابتدا طبق شکل (۵-۳) مختصات z به z_n طبق رابطه‌ی (۲-۳) به دلیل محدودیت طولی و انتقال مرکز مختصات فضای کاری از نقطه‌ی " o " به " c " و به منظور ساده سازی تعریف، تبدیل شده است. سپس برای z_n مثبت رابطه‌ی (۳-۳) و برای z_n منفی، رابطه‌ی (۴-۳) از شکل (۵-۳) استخراج شده است. شرط محدودیت کاری ربات در فضای مختصاتی به صورت رابطه‌ی (۵-۳) نوشته شده است. این روابط فضای کاری جزء شروط ورود به الگوریتم سینماتیک معکوس خواهد بود.

$$z_n = z - (L_1 + 2 \cdot L_2) \quad (۲-۳)$$

$$R_n = \sqrt{x^2 + y^2 + z_n^2} \quad (۳-۳)$$

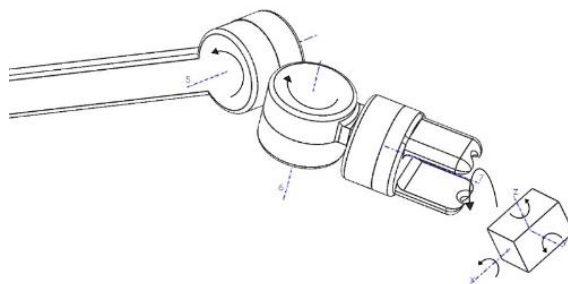
$$R_m = \sqrt{(\sqrt{x^2 + y^2} - L_3)^2 + z_n^2} \quad (۴-۳)$$

$$\begin{cases} z_n \geq 0 \rightarrow R_n \leq R_3 \\ z_n < 0 \rightarrow R_m \leq R_4 \end{cases} \quad (۵-۳)$$

۳-۳-۳ محدودیت جهت گیری گریپر

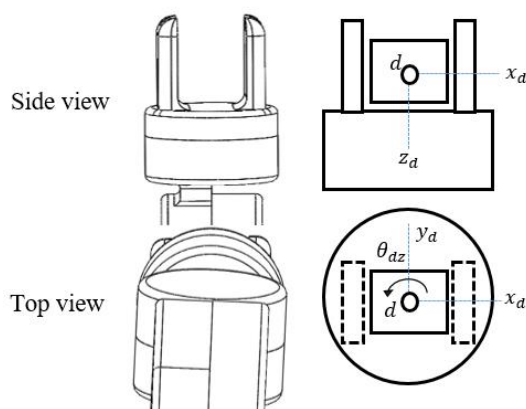
این بازوی رباتیک می تواند به صورت خودکار برنامه ریزی شود تا عملیات های مختلف گرفتن اجسام را انجام دهد. در شکل (۶-۳) فرض شده است که در حالت کلی که جسم سه دوران حول محورهای خود داشت باشد توسط گریپر ربات در حال گرفته شدن است. گریپر یا همان بازوی متصل به مچ آزاد با داشتن سه درجه آزادی متفاوت بر روی مفاصل ۵، ۶ و ۷ قابلیت به دست آوردن هر جهت گیری را دارد و توسط قاعده ای که در بخش بعدی بیان خواهد شد همان جهت گیری جسم را خواهد گرفت. زوایای چرخش جسم حول محورهای مختصات، نسبت به دستگاه مرجع می باشد. این زوایا به همراه مختصات جسم به عنوان ورودی الگوریتم سینماتیک معکوس می باشند. جسم مکعب مستطیل دلخواه که یک ضلع آن به اندازه ای است که گریپر بتواند آن را بگیرد، باید در فضا به صورتی قرار گیرد که ربات با یک پای ثابت برای گرفتن جسم با گریپر مشکلی نداشته باشد؛ به همین منظور استاندارد برای این عمل

در این پژوهش تعریف شده است. البته اگر شرایط برقرار نشد ربات می‌تواند حتماً در دو مرحله، یکی انتقال به مکان مناسب دیگر و تلاشی جدید برای گرفتن جسم با هر جهت‌گیری دلخواه، آن را بگیرد که از این نظر مشکلی نیست.



شکل ۳-۶ نمای ربات در فضا برای گرفتن یک جسم با جهت‌گیری دلخواه، با نمایش محورهای دوران جسم و مچ ربات

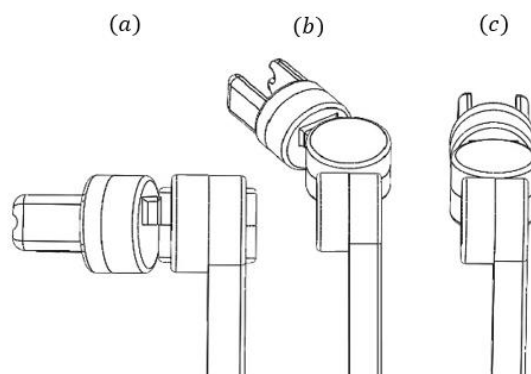
محورهای مختصاتی جسم و ربات با دستگاه مختصاتی پایه یکسان می‌باشند و محورهای محلی هر مفصل ربات از قبل تعریف شده‌اند و هر چرخشی در جسم و ربات در فضای کاری سه بعدی نسبت به مختصات مرجع قابل بیان می‌باشند. به دلیل چنگکی (۲-انگشتی بودن) گریپر و همچنین در نظر گرفتن جسم هدف به عنوان یک مکعب مستطیل قابل گرفتن توسط این نوع گریپر، در این تعریف فرض شده که گریپر همواره عمود بر یک صفحه خاص جسم و میزان چرخش حول محور عمودی آن مشخص باشد که برای گرفتن جسم با این نوع گریپر این حالت بهینه بوده و می‌تواند جسم را به صورت کامل بگیرد. به طور مفصل؛ گریپر جسم را به صورتی بگیرد که راستای z مفصل y عمود بر صفحه‌ی $x-y$ جسم و همراستا با محور z جسم و در جهت عکس آن قرار گیرد. اما یک فرض دیگری هم هست که آن مطابق شکل (۳-۷) دو سر چنگکی گریپر سمت موازی محور y جسم را بگیرند، که در هنگام شبیه سازی باید محورهای جسم جوری برای سیستم تعریف شود که گریپر قادر به گرفتن آن جسم مورد نظر باشد. مثلاً اگر آن جسم میله‌ای بلند بود باید راستای امتداد میله را y در نظر گرفت. برای این منظور باید مشخصات جسم را بنا به این تعریف و در این فرمت بیان شده به عنوان ورودی به سیستم داده شوند. اگر مختصات جسم در محدوده‌ی کاری ربات باشد و در محدوده‌ی جهت‌گیری تعریف شده در این بخش قرار گیرد؛ الگوریتم بخش بعدی جواب خواهد داد.



شکل ۳-۷ استاندارد دی که گریپر برای گرفتن جسم بایستی رعایت کند.

چرخش جسم در دستگاه مرجع به صورت ماتریس چرخشی R_{zyx} در نظر گرفته شده است. در اینجا محدودیت جهت‌گیری به ۲ حالت تقسیم می‌شود. حالت اول: در این حالت اگر جسم فقط حول محور Z خود دوران داشته باشد و حول X و Y دورانی نداشته باشد تمامی حالات ممکن در فضای محدود شده در بخش قبل جواب خواهد داد. به شرطی که محورهای جسم درست و بهینه در فضای کاری تعریف شود و یا شرایط خاصی حاکم باشد؛ این شرایط خاص شامل چرخیدن 180° درجه حول X و یا Y خواهد بود و موارد مشابهی که اتفاق می‌افتد. به صورت کلی در نهایت حول X و Y دورانی به صورت نسبی، نسبت به مختصات مرجع نداشته باشد در این حالت اول طبقه‌بندی می‌شود. به هر حال حالت اول برای فضای کاری ربات در حالی که یک گریپر آن ثابت بوده و گریپر دیگر به دنبال مسیر است، قابل قبول می‌باشد. حالت دوم: حالتی است که جسم حول X و Y یا یکی از این دو، دوران داشته باشد. در این حالت به خاطر همین ثابت بودن یک پای ربات، ربات برای گرفتن جسم دچار مشکل می‌شود. چون ممکن است که انتهای بازوی آن نتواند جهت‌گیری درخور آن موقعیت دلخواه جسم را بگیرد، به همین منظور شکل (۳-۸) با جزییات ریزتر به این مسئله می‌پردازد و اگر هیچکدام از حالات این بخش رخ نداد، مکانیزم رباتیک مد نظر برای گرفتن جهت‌گیری دلخواه می‌بایستی از عملیات انتقال در بخش بعدی استفاده کند. زیرا الگوریتم سینماتیک معکوس پیشنهادی این پژوهش مانند دیگر پژوهش‌ها برای حالتی تعریف می‌شود که یک پای ربات بازویی ثابت و بر روی زمین وصل باشد.

شکل (۸-۳) نماینگر سه حالتی می باشد که می تواند رخ دهد. حالت a: جسم حول Y خود دوران داشته باشد. b: حول Y و X باهم دوران داشته باشد و c: فقط حول X دوران داشته باشد. نتیجه گیری می شود که به ازای دوران جسم حول X مفصل ۵ ربات از مکان اولیه خود می چرخد و مفصل ۶ برای دوران جسم حول Y خود خواهد چرخید. در این صورت با توجه به ترتیب چرخش جسم که اول حول Z می چرخد سپس Y و بعد X ، چرخش Z در شروع بسیار مهم است.

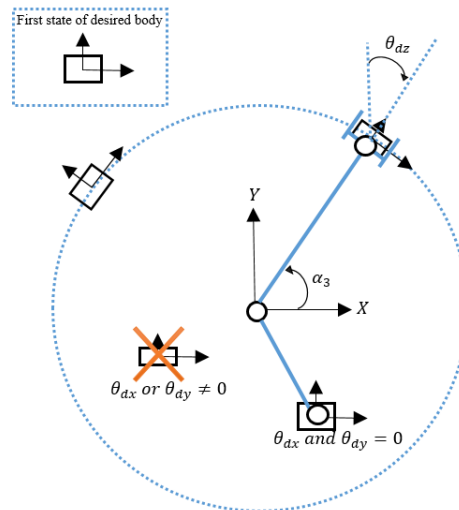


شکل ۸-۳ جهت گیری قابل وصول توسط گریپر در حالت دوم ذکر شده (برای جزئیات بیشتر به شکل (۳-۲۶) مراجعه شود).

شکل (۹-۳) شرط برقراری حالت دوم می باشد و بیانگر این است که اگر جسم بر روی دایره مشخص شده در آن شکل مماس باشد، یعنی جسم ابتدا حول محور Z خود بچرخد تا بر روی دایره متحدالمرکزی که در مختصات ربات ممکن است قرار گیرد، بیفتد یا مماس گردد؛ سپس حول محورهای X یا Y و یا هردو دوران کند مشکلی برای جهت گیری بازوی انتهایی ربات پیش نخواهد آمد و جسم را به راحتی خواهد گرفت. اما اگر این دوران اولیه مشخص حول محور Z رخ ندهد و بر روی دایره متحدالمرکز از مرجع مختصات نیفتد، با هر دوران حول X یا Y ربات نمی تواند به جهت گیری دلخواه جسم برسد. این مشکل به خاطر شکل پرگاری بودن و معماری ربات بوده و داشتن یک انتهای ثابت آن رخ می دهد که هر قدر بازوهای ربات بتوانند جابه جا شوند، بازوی انتهایی بازهم در مسیرها و منحنی های دایروی حرکت خواهد کرد و در هیچ حالتی غیر از حالت تعریف شده در شکل (۹-۳) نمی تواند جسم را بگیرند. اما همانطور که گفته شد اگر جسم دورانی حول این دو محور بحرانی نداشته باشد و یا شرایط ذکر شده در حالت دوم را داشته باشد، هیچ مشکلی در هیچ حالتی رخ نخواهد داد. در صورت عدم ارضای شروط

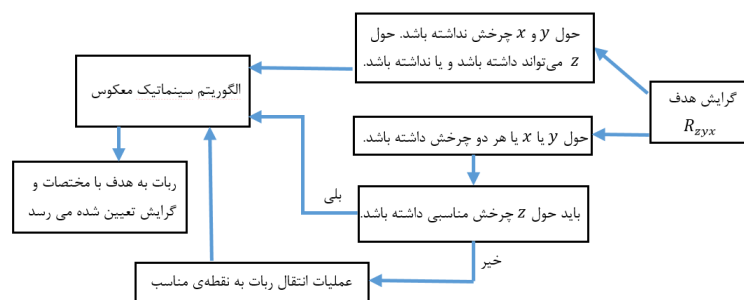
گفته شده در این بخش به عنوان شروط ورود به الگوریتم سینماتیک معکوس، ربات ابتدا به مکانی مناسب (طبق بخش ۳-۵-۳) منتقل می‌شود و سپس از آن نقطه که دارای یکی از شروط گفته شده خواهد بود با تلاشی دیگر توسط این الگوریتم، به مکان دلخواه می‌رسد. در ضمن منظور از دوران جسم حول محورهایش، به معنای این است که آن دوران دلخواه جسم و یا حتی مسیر دلخواه همگی به عنوان ورودی به سیستم خواهند بود و در هر بار اجرای الگوریتم با شرط‌های ورودی به آن، برای هر نقطه و جهت‌گیری دلخواه به صورت منحصر به فرد روند الگوریتم سینماتیک معکوس پیشنهادی اجرا می‌شود. با توجه به این نکته که در این الگوریتم هیچ دخالت و یا چرخشی به جسم دلخواه داده نمی‌شود و این خود جسم و یا مسیر است که باید شرایط را از قبل داشته باشد.

در شکل (۳-۹) حالت‌های رخ داده برای تصویر جسم در صفحه‌ی مرجع نمایان است. در ۲ حالتی که تصویر جهت‌گیری جسم بر روی دایره‌ی فرضی مماس نشده به این شرح است که اگر حول x و یا y جسم دوران کند برداشت توسط گریپر نیست و اگر فقط حول z دوران کند قابل برداشت می‌باشد. حالت کلی که همواره جواب می‌دهد هم بنا به تعریفی که گفته شد حالتی است که بر دایره‌های فرضی از مرکز مختصات مماس شوند. شکل ربات مثل یک پرگار می‌باشد و فقط می‌تواند اجسامی را که همواره مماس بر دایره متحدالمرکز خود باشند را به این صورتی که برای گرفتن جسم در بالا تعریف شد بگیرد. برای بودن در این جهت‌گیری، جسم باید به اندازه‌ی α_3 درجه نسبت به محور X مختصات اصلی که در بخش الگوریتم محاسبه شده است چرخیده باشد تا بر آن دایره متحدالمرکز مماس شود. که در غیر اینصورت شرط برآورده نمی‌شود و ربات باید انتقال به محل مناسب دیگری داشته باشد تا بتواند آن جسم ثابت با جهت‌گیری خاصش را بگیرد. θ_{dx} دوران حول محور x و به ترتیب θ_{dy} و θ_{dz} حول محورهای y و z جسم است که هم‌راستای مختصات اصلی می‌باشند.



شکل ۳-۹ تصویر جسم و ربات در صفحه‌ی $X-Y$ مرجع

در شکل (۳-۱۰) حالت‌های بیان شده (شرایط ورود به الگوریتم سینماتیک معکوس) بر روی چارتی دسته‌بندی شده‌اند تا به تفصیل مشاهده شود که روند کار الگوریتم برای غلبه بر محدودیت‌های جهت-گیری جسم هدف چگونه است.



شکل ۳-۱۰ چارت شرط ورود به سینماتیک معکوس به صورت خلاصه

پس به طور خلاصه آنچه که در چارت شکل (۳-۱۰) هویداست، به این شرح می‌باشد: اگر جسم حول X و Y چرخش نداشته باشد حول Z هر چقدر بچرخد الگوریتم سینماتیک معکوس برای رسیدن ربات به جهت‌گیری هدف جواب می‌دهد. اگر چرخش حول X یا Y یا هر دو انجام شده باشد نسبت به محور مرجع، بنابراین جسم باید نسبت به محور مختصات مرجع به اندازه‌ی مناسبی حول Z چرخیده باشد تا بر دایره شکل (۳-۹) مماس شود. سپس الگوریتم ربات درست عمل خواهد کرد. اگر جسم این چرخش مناسب حول Z را نداشته باشد پس الگوریتم سینماتیک معکوس برای این شرایط جواب نمی‌دهد و باید ربات خود را به نقطه‌ای انتقال دهد که نسبت به نقطه‌ی مرجع جدید، جسم بر روی دایره‌ی

مماس فرضی قرار داشته باشد. اینبار از نقطه‌ی مناسب جدید نسبت به هدف اولیه الگوریتم سینماتیک معکوس جواب می‌دهد که در بخش انتقال بررسی خواهد شد. در بخش بعدی (۳-۴) اثبات می‌شود که زاویه‌ای که جسم باید حول z بچرخد که در الگوریتم کار کند به اندازه‌ی α_3 نسبت به محور X مختصات می‌باشد همچنین دایره مشخص شده در شکل (۳-۹) تصویر مفصل ۶ ربات می‌باشد. این مجهولات در روند حل سینماتیک معکوس به دست می‌آید و می‌توان شرط جهت‌گیری جسم را بررسی نمود که آیا گریپر ربات با این چرخش‌های جسم در فضا، قادر به گرفتن جسم می‌باشد یا نمی‌تواند. در جدول (۳-۳) بررسی شده است که آن مقدار مناسب دوران حول z در شرایط مختلف باید چگونه باشد و به عنوان شرط ورودی به الگوریتم سینماتیک معکوس استفاده خواهد شد. θ_{dx} ، θ_{dy} و θ_{dz} همانطور که قبلاً اشاره شده بود به ترتیب زاویه دوران جسم حول z ، x و y در دستگاه مرجع می‌باشد و علامت * به معنی هر زاویه دلخواهی که می‌تواند داشته باشد، است.

جدول ۳-۵ شرط تحقق جهت‌گیری ربات برای گرفتن جسمی با جهت‌گیری دلخواه

θ_{dy}	θ_{dx}	$\rightarrow \theta_{dz}$
0	0	*
0	*	(۳-۶)
*	0	(۳-۶)
*	*	(۳-۶)
π	π	*

رابطه‌ی (۳-۶) به دست آمده از بخش ۳-۴ می‌باشد. پس اگر شرط زیر (جدول ۳-۵) برقرار باشد الگوریتم با دقت کامل به جهت‌گیری و مختصات مد نظر رسیده و اگر این شرط برقرار نباشد، ربات طبق بخش (۳-۵-۲) منتقل شده و سپس این شرط برقرار می‌شود.

$$\theta_{dz} = \pm(\alpha_3 - \frac{\pi}{2}) \quad (۳-۶)$$

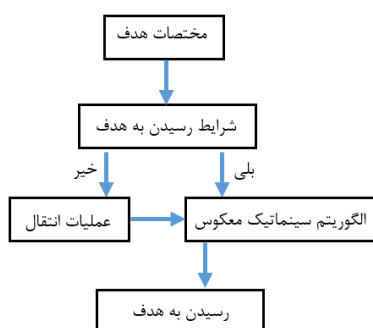
یک حالت دیگر که رخ می‌دهد و در محاسبات مهم است، روبه بالا یا پایین بودن بازوی انتهایی یا همان گریپر می‌باشد. همانطور که در معادله‌ی (۳-۶) نشان داده شده است این علامت مثبت و منفی

قبل معادله به همین موضوع بستگی دارد. اگر سر گریپر رو به پایین باشد علامت مثبت و اگر رو به بالا باشد علامت منفی استفاده خواهد شد و این موضوع از جدول (۶-۳) قابل استخراج خواهد بود. در روندی که تا به اینجا بررسی شده بود در تمامی شکل‌ها تصویر ربات و جسم هدف بر روی صفحه‌ی اصلی مختصات، منتقل می‌شد اما در این تصویر راستای عمودی جسم و گریپر مشخص نمی‌شود که به سمت بالا است یا پایین است؟. که البته بنا به تعریفی که برای جهت‌گیری جسم و گریپر شده بود این دو راستا بر خلاف هم می‌باشند و محور محلی z ربات با محور محلی z جسم هدف، هم‌مرکز و در خلاف هم تعریف شده بود و برای ربات فقط در مفصل شماره ۷ تداعی دارد. حال این جهت بالا و پایین این محور برای جسم هدف از آن جهت اهمیت دارد که اگر محور z گریپر و یا همان مفصل ۷ ربات رو به بالا باشد جهت پادساعتگرد چرخش این محور مثبت و اگر رو به پایین باشد برای اینکه جسم را بگیرد، جهت ساعت گرد چرخش حول محور z مثبت در نظر گرفته می‌شود و از این جهت با رابطه (۶-۳) که نمایانگر چرخش جسم حول محور z است، مرتبط و تعیین کننده است. حال جدول (۶-۳) این مطلب را بازگو می‌کند که اگر جسم هدف حول محورهای x و y خود بیش از ۹۰ درجه بچرخد بنا به تعریف صورت پذیرفته، چون محور z جسم رو به پایین می‌شود، گریپر باید رو به بالا بچرخد تا در زیر جسم قرار گرفته و آن را بگیرد. در این شرایط علامت معادله (۶-۳) باید بر خلاف آنچه که به دست می‌آید باشد تا شرط الگوریتم برقرار بماند. پس به طور خلاصه می‌توان گفت که نکته‌ی آخر این بخش سر تعیین یک علامت مثبت و منفی مهمی می‌باشد که فقط به چرخش جسم حول دو محور x و y خود مرتبط خواهد بود و به صورت جزئی در جدول (۶-۳) بیان شده است.

جدول ۶-۳ مشخص کردن جهت گریپر و جسم هدف با زوایای ورودی

θ_{dx}	θ_{dy}	Gripper head direction	Target z axis direction
0-90	0-90	Down	Up
0-90	90-180	Up	Down
90-180	0-90	Up	Down
90-180	90-180	Down	Up

این بخش‌هایی که در قسمت ۳-۳ فضای کاری بررسی شد همگی شرایط ورود به بخش بعدی یعنی الگوریتم سینماتیک معکوس می‌باشند. هر سه بخش گفته شده باید با یکدیگر تجمیع و قبل از شروع الگوریتم بر روی ورودی‌ها اعمال شده تا بتوان فهمید که ربات از بخش بعدی (۳-۴) به عنوان استفاده از یک گام قادر به رسیدن به هدف بوده یا از بخش بعدش (۳-۵) در چند گام قادر به گرفتن جسم خواهد بود. این استدلال در چارت شکل (۳-۱۱) نمایش داده شده است که اگر شرایط بخش (۳-۳) به طور کلی رعایت شوند یا نشود به چه ترتیبی به هدف نهایی باید رسید.



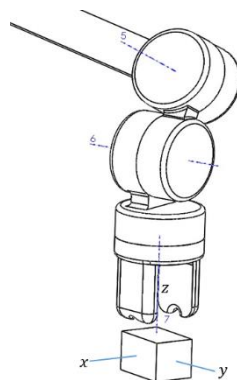
شکل ۳-۱۱ دید کلی بخش سینماتیک معکوس برای رسیدن به هدف

بعد از به دست آمدن سینماتیک مستقیم که به دست آمدن بردار مکان توسط ۷ زاویه هر مفصل بود، در ابتدا محدودیت و فضای کاری ربات و جهت‌گیری که گریپر می‌تواند در فضا بگیرد بررسی شده است، سپس الگوریتم سینماتیک معکوس با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها بیان شده است. در انتها قابلیت اصلی ربات یعنی انتقال، بررسی شده و بیان شده است که اگر ربات در محدوده‌ی مختصاتی و جهتی جسم و یا مسیر هدف نباشد خود را به محلی انتقال دهد که بتواند از آنجا هدف را بگیرد.

۳-۴ الگوریتم سینماتیک معکوس با در نظر گرفتن جهت‌گیری جسم هدف

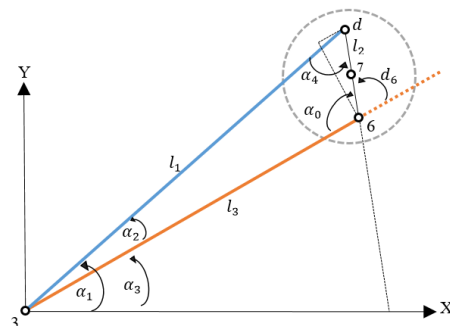
در این قسمت الگوریتمی بر پایه هندسه فضایی طرح ریزی شده است که علاوه بر مختصات هدف، می‌توان جهت‌گیری و یا چرخش جسم هدف در فضای سه بعدی نسبت به محورهای مختصاتی را به عنوان ورودی وارد کرد. در خروجی علاوه بر رسیدن به جسم هدف، جهت‌گیری گریپر انتهایی جوری تعریف شده است که بتواند عمود بر صفحه‌ی قابل گرفتن جسم هدف باشد تا به کمک آن، هدف را به

طور صحیحی بگیرد. همچنین هندسی بودن این روش به معنای دقیق بودن آن و عدم خطای حتی کوچک می باشد. بعد از اعمال محدودیت‌های تعریف شده در بخش قبل با این فرض که ربات در شرایط کاری باشد الگوریتمی که این ربات بتواند یک جسم مکعب مستطیل با ابعادی که توسط گریپر چنگکی گرفته شود و در دستگاه مختصات مرجع قرار گرفته باشد، تعریف شده است. همانطور که در شکل (۳-۱۲) پیدا است گریپر با توجه به سه مفصل قبل از خود یعنی مفاصل شماره ۵، ۶ و ۷ باید جهت‌گیری مد نظر را در فضا بگیرد، این یک چالش در به دست آمدن سینماتیک معکوس می‌باشد و اگر جسم متحرک باشد باید در هر لحظه، اطلاعات جهت‌گیری جسم به الگوریتم وارد شود. این قابلیت برای کاربری‌های دیگر ربات مثل جوشکاری در یک منحنی که نیاز است ابزار کار همواره عمود بر صفحه منحنی باشد هم مفید می باشد. پس جهت‌گیری جسم به همراه مختصات مرکز حجم آن نسبت به دستگاه مختصات مرجع، به عنوان ورودی الگوریتم سینماتیک معکوس در نظر گرفته می‌شوند. این الگوریتم قوی و دقیق در کنار آسان بودن در محاسبات نقاط پیاپی پیش رو تعریف شده است که قادر به دنبال کردن مسیرهای مختلفی باشد و مزیت و برتری آن نسبت به روش‌های مشابه و یا عددی خواهد بود. در ادامه مختصات سر انتهایی بازو را گام به گام به مفصل‌های قبلی خود به روش هندسی انتقال داده شده است، تا با داشتن سه زاویه چرخش جسم هدف $[\theta_{dx} \ \theta_{dy} \ \theta_{dz}]$ و همینطور مختصات مکان آن $[x_d \ y_d \ z_d]$ به عنوان ورودی، زوایای مفاصل ربات برحسب ورودی‌ها و مشخصات ربات مثل طول بازوها، به دست آید.

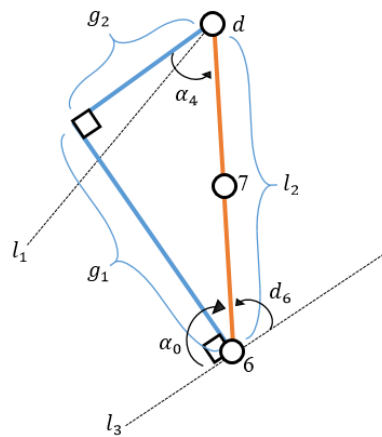


شکل ۳-۱۲ تلاش قسمت مچ ربات شامل سه مفصل مشخص شده، برای گرفتن هدف با توجه به قانون فرض شده.

روشی که در این جا صورت گرفته به این صورت می باشد که در ابتدا انداختن تصویر کل ربات بر روی صفحه $X-Y$ مختصات مرجع انجام می پذیرد. با این عمل هدف اصلی پیدا کردن زاویه ای است که تصویر بازوها از مفصل ۱ تا ۶ بر روی این صفحه با محور X دارند می باشد، زیرا زاویه مفصل ۲ همواره در این بخش صفر است (که دلیل آن در بخش ۳-۳-۱ بیان شد). پس می توان بازوهای در نظر گرفته شده را از مفصل ۱ تا ۶ بر روی صفحه $r-Z$ در ادامه تحلیل نمود این صفحه در شکل (۳-۱۸) به عنوان صفحه عمود بر $X-Y$ مرجع که ربات در آن واقع می باشد، نمایش داده شده است. گام بعدی، بعد از تعیین جهت گیری جسم، به دست آوردن زوایای موجود در شکل (۳-۱۳) می باشد. در این شکل طول l_1 تصویر برداری از مرکز مختصات تا خود نقطه ای هدف می باشد. l_3 تصویر بازوهای ربات از مفصل ۱ تا ۶ بر صفحه $X-Y$ مرجع می باشد. بردار صفحه ای l_2 بین مفصل ۶ و نقطه ای هدف بوده که تصویر بازوهای انتهایی ربات بر صفحه مرجع می باشند. زوایای نشان داده شده در شکل (۳-۱۳) در ابتدا مجهول اند و هدف پیدا کردن این مجهولات می باشد. همچنین هدف اصلی یافتن طول l_3 و زاویه ای α_3 می باشد که در انتها به گام بعدی می رساند اما چون مبنای عملکرد الگوریتم از انتها به ابتدا هست قسمتی که از شکل (۳-۱۳) با دایره نقطه چین جدا شده است که با جزئیات بیشتر در شکل (۳-۱۴) قابل رؤیت می باشد، بررسی شده است. سپس روابط هندسی و مثلثاتی برای این شکل ها به دست آمده است و مجهولات گام به گام از انتها به ابتدا به دست آمده اند. با توجه به اینکه مفصل ۲ حرکتی ندارد و مفصل ۱ در راستای Z می چرخد در تصویر ربات روی صفحه مرجع مفاصل ۱، ۲ و ۳ بر روی مرکز مختصات می افتد. برای به دست آمدن این مجهولات فقط دو صفحه $X-Y$ و $r-Z$ برای انتقال تصاویر بردارها بر روی آنها کافی هستند در حالی که در مرجع [۱۶] هنگامی که از روش هندسی برای به دست آوردن سینماتیک معکوس استفاده می شود تصویر هر بردار بر روی صفحه مختصات قبلی تصویر شده و روابط هندسی و مثلثاتی استخراج می گردد که باعث طولانی شدن و افزایش محاسبات می گردد.



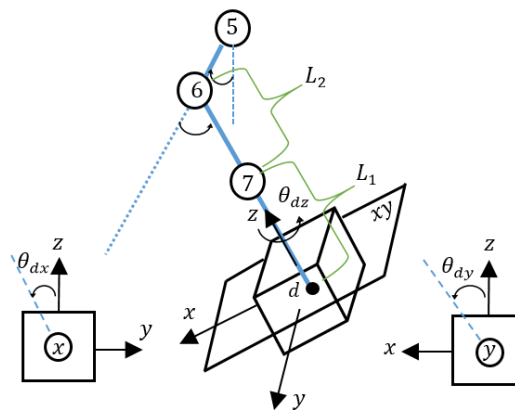
شکل ۳-۱۳ تمامی بازوهای ربات بر روی صفحه $X-Y$ مرجع تصویر شده و امتداد آن بردارها و مفاصل مشخص شده است.



شکل ۱۴-۳ قسمت بزرگ شده‌ی مشخص از شکل ۱۳-۳

شکل (۱۵-۳) نشان می‌دهد که چگونه، گریپر آزاد ربات با توجه به جهت‌گیری جسم هدف، جهت‌گیری کرده و به هدف دلخواه می‌رسد، زوایای جهت‌گیری جسم هدف در این شکل کاملاً مشخص گردیده است. همچنین می‌توان گفت که شکل (۱۴-۳) تصویر شکل (۱۵-۳) بر صفحه $X-Y$ مرجع می‌باشد، و هدف آن به دست آوردن طول دو ضلع مثلث قائم الزاویه مشخص شده از روی زوایای دوران جسم (ورودی سیستم) می‌باشد. شکل (۱۵-۳) نمایی بهتر و روشن‌تر در رابطه با چگونگی به دست آوردن طول‌های نامعلوم می‌دهد. این شکل با شکل بعدی خود (۱۶-۳) تقریباً یکسان هستند، اما به علت وجود جزئیات زیاد و اهمیت این قسمت در الگوریتم این مسئله باز تر بیان شده است تا به خوبی معلوم شود که از روی اطلاعات ورودی مثل مختصات و زاویه، می‌توان مجهولات مشخص شده را به دست آورد؛ بنابراین شکل (۱۵-۳) برای جسم و (۱۶-۳) برای ربات، در این شرایط طراحی شده‌اند. سه شکل (۱۴، ۱۵، ۱۶-۳) که نمایانگر میج انتهایی ربات به همراه گریپر متصل به آن که شامل ۳ مفصل ۵، ۶ و ۷ می‌باشند را باهم در نظر بگیرید؛ عملیات انجام شده انتقال چرخش جسم در فضا به چرخش میج ربات خواهد بود. ابتدا زوایای بین لینک‌ها در شکل (۱۶-۳) از روی زوایای جسم هدف در شکل (۳-۱۵) به دست آمده، سپس طول‌های g_1 ، g_2 از شکل (۱۴-۳) و حتی g_3 از روی این زاویه‌ها در جلوتر به دست آمده است؛ این ۳ طول مشخص برای انتقال مختصات مرکز جسم هدف به مفصل‌های ربات به کار می‌آیند تا به صورت گام به گام الگوریتم شکل گیرد و زوایای مفاصل با توجه به مختصات آنها

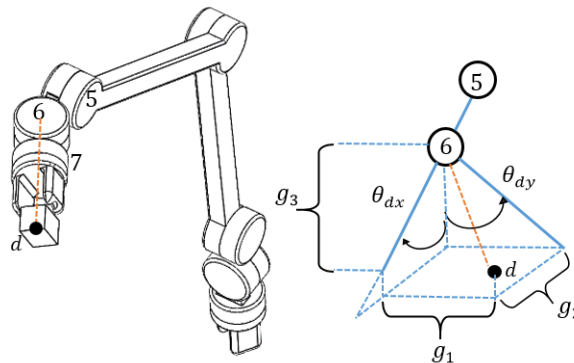
در فضای سه بعدی از انتها به ابتدا به دست آید. حال می‌توان d_6 زاویه مشخص شده در این شکل به همراه باقی مجهولات حساب کرد تا هدف نهایی که پیدا کردن مجهولات شکل (۳-۱۳) بود، تحقق یابد. در شکل (۳-۱۵) همانطور که نشان داده شده است؛ جسم از چند نما مشاهده می‌شود که نسبت به دستگاه مختصات مرجع چرخیده و گریپر با چرخش ۳ مفصل خود می‌خواهد عمود به آن راستا شود. پس باید زوایای مفصل‌های ۵ و ۶ نسبت به راستای قبلی خود به اندازه ای بچرخند که راستای عمود مفصل ۷ بر راستای عمود بر صفحه‌ی در نظر گرفته شده‌ی جسم منطبق شود و نقطه‌ی مرکزی جسم با انتهای سر گریپر هم مختصات شوند. در پایان مفصل ۷ هم باید به اندازه ای بچرخد که دو سر چنگکی گریپر بتواند موازی با اضلاع جسم مکعب شکل در آید تا بتواند جسم را بگیرد.



شکل ۳-۱۵ جهت‌گیری جسم هدف و امتداد آن با مفاصل ربات، طبق شرایط فرض شده برای گرفتن جسم توسط عملگر انتهایی

بنا به شکل (۳-۱۵) قانون چرخش و جهت‌گیری به این صورت معرفی شده است که ابتدا اولویت چرخش با محور z جسم که به اندازه ای بود که تصویر جسم مماس دایره مفصل ۶ شود (دلیل در بخش (۳-۳)). سپس حول محور y جسم بوده که به مفصل ۶ ربات مرتبط است و طول g_1 را می‌سازد و متقابلاً طول g_2 که توسط چرخش حول محور x به دست می‌آید، آخرین چرخش در نظر گرفته شده است. در شکل (۳-۱۶) سه طول g_1, g_2, g_3 مختصات تصویر نقطه ی هدف روی صفحه ی مرجع با در نظر گرفتن جهت‌گیری مد نظر جسم، نسبت به مفصل ۶ ربات می‌باشد؛ چرخش جسم در فضا به چرخش

مفاصل ۵، ۶ و ۷ تبدیل شده است. با داشتن چرخش جسم می توان طول های مشخص شده در شکل (۳-۱۶) را به دست آورد، رابطه ی (۳-۷ و ۸) این محاسبه را نشان می دهند.



شکل ۳-۱۶ دید کلی شکل های قبل با توجه به آرایش ربات، و انتقال مختصات نقطه ی هدف به مختصات مفصل ۶، توسط سه طول مشخص شده

$$g_1 = (L_1 + L_2) \cdot \sin(\theta_{dy}) \quad (۳-۷)$$

$$g_2 = (L_1 + L_2) \cdot \sin(\theta_{dx}) \cdot \cos(\theta_{dy}) \quad (۳-۸)$$

در این روابط طول های L_1 و L_2 به ترتیب طول لینک ۸ و ۷ ربات می باشند که در شکل (۳-۱۵) نمایان شده است. بنا به آنچه که از ترتیب چرخش بیان شد، راستای عمود از مفصل ۶ تا صفحه ی مرجع ابتدا حول مفصل ۶ بچرخد تا معادله (۷) را تشکیل داده و سپس حول مفصل ۵ چرخیده و (۸) به دست آید. حال سر انتهایی بازوی پایانی بر نقطه ی هدف نشسته و عمود بر جسم می تواند جسم را بگیرد. حال می توان d_6 که زاویه ی بین راستای عمود مفصل ۶ بر صفحه $X-Y$ مرجع و تصویر امتداد بازو تا هدف می باشد به همراه l_2 از شکل (۳-۱۴) را با توجه به معادلات (۳-۷ و ۸) به دست آورد (۳-۹ و ۱۰).

$$d_6 = \text{atan2}(g_1, g_2) \quad (۳-۹)$$

$$l_2 = \sqrt{(g_1)^2 + (g_2)^2} \quad (۳-۱۰)$$

با توجه به شکل (۳-۱۳) راستای l_1 برداری است که مکان هدف را به مرکز مختصات وصل کرده است، زاویه ی راستای l_3 نسبت به محور X مختصات مرجع همان زاویه است که کل ربات تا مفصل ۶ توسط مفصل ۱ باید بچرخد تا تصویر صفحه ی متشکل شده کل ربات تا مفصل ۶ بر روی صفحه ی X -

Y مرجع در آن زاویه قرار گیرد. حال می توان تمام مجهولات را از روابط به دست آمده برای شکل (۳-۱۳) محاسبه نمود که از رابطه ی (۱۱ تا ۱۹) به دست آمده است. سپس ادامه محاسبات را در صفحه ی $r-Z$ به وجود آمده در شکل (۳-۱۸) ادامه داده شده است تا زاویه ی باقی مفاصل به دست آید.

$$\alpha_0 = \pi - d_6 \quad (۳-۱۱)$$

$$\alpha_1 = \text{atan2}(y_d, x_d) \quad (۳-۱۲)$$

$$l_1 = \sqrt{(x_d)^2 + (y_d)^2} \quad (۳-۱۳)$$

$$\alpha_2 = \sin^{-1}(\sin(\alpha_0) \cdot l_2/l_1) \quad (۳-۱۴)$$

$$\alpha_3 = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (۳-۱۵)$$

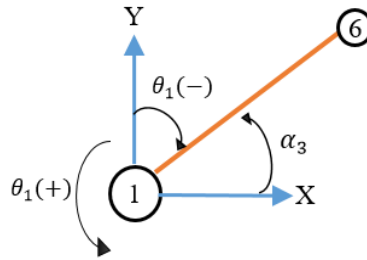
$$\alpha_4 = \pi - (\alpha_2 + \alpha_0) \quad (۳-۱۶)$$

$$l_3 = (\sin(\alpha_4) \cdot l_1 / \sin(\alpha_0)) \quad (۳-۱۷)$$

$$\theta_1 = \alpha_3 - \pi/2 \quad (۳-۱۸)$$

$$\theta_6 = -\theta_{dy} \quad (۳-۱۹)$$

طبق روابط (۳-۱۸) و (۳-۱۹) زوایای مفصل ۱ و مفصل ۶ به دست آمده است. این زوایا بر حسب دستگاه مختصات مرجع ربات که در شکل های تعریف شد، به دست آمده است و در جهت پاد ساعتگرد مثبت می باشد. برای زاویه مفصل ۱ در اینجا چرخش از محور y ملاک بود، به علت اینکه ابتدا ربات در صفحه $Z-Y$ مرجع قرار دارد و باتوجه به اینکه هندسه ی محاسبه شده در این پژوهش در سمت مثبت $X-Y$ بوده پس ربات می بایستی از راستای Y به سمت داخل طبق شکل (۳-۱۷) حرکت کند و این حرکت برای مفصل ۱ ساعتگرد و منفی خواهد بود. همچنین انتخاب دوران جسم حول محور خاص برای مفصل ۶ در رابطه ی (۳-۱۹) بر اساس اولویت چرخش جسم بوده که پیشتر بیان شد و اگر این اولویت عوض شود می توان آن را تغییر داد. به هر صورت در این الگوریتم این طور در نظر گرفته شده که اولویت دوران حول محور y مقدم بر x می باشد.



شکل ۳-۱۷ نمایی از تصویر بخشی از ربات بر صفحه‌ی $X-Y$ مرجع

در ادامه نیاز هست که تصویر ربات تا مفصل ۶ که همان r_6 می‌باشد به همراه z_6 که ارتفاع مفصل ۶ است در اختیار باشد، به طور خلاصه مختصات مصل ۶ در صفحه‌ی $r-Z$ نیاز است. به همین منظور نیاز است که l_3 ای را که به دست آمده در شرط رابطه‌ی (۳-۲۰) چک شود. زیرا در صورتی که زاویه چرخش مفصل ۶ یا همان زاویه‌ی چرخش حول محور y جسم صفر شود مقدار l_3 که تصویر ربات بر روی صفحه‌ی $X-Y$ مرجع می‌باشد باید در امتداد l_1 و l_2 بیافتد یا زاویه‌ی α_2 صفر شده و α_3 بر هم منطبق شوند. لذا برای بهینه عمل کردن الگوریتم و دوری از خطای احتمالی دو حالت طبق رابطه‌ی (۳-۲۰) تعریف می‌شود که اگر زاویه مفصل ۶ صفر باشد و یا نباشد تصویر و بردار مفصل ۶ تا مرکز مختصات مرجع به این صورت به دست می‌آید. چون راستای چرخش دو مفصل ۵ و ۶ عمود بر هم هستند این قضیه مختص به این نوع تعریف و هندسه فضایی ارائه شده در این پژوهش دارد، به همراه اولویتی که بیان شده بود و شاید در موارد دیگر نیازی به این کار نباشد. همچنین g_3 که از راستای تصویر θ_{dy} از شکل (۳-۱۶) به دست آمده، طبق رابطه‌ی (۳-۲۱) محاسبه شده است. در پایان z_6 توسط رابطه‌ی (۳-۲۲) به عنوان ارتفاع مفصل ۶ در مختصات سه بعدی حساب می‌شود.

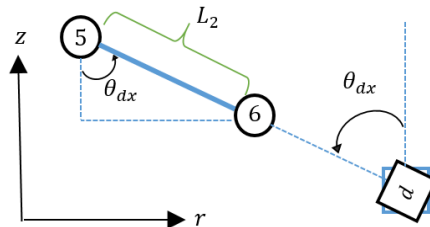
$$if: \begin{cases} \theta_{dy} = 0 \rightarrow r_6 = l_1 - l_2 \\ \theta_{dy} \neq 0 \rightarrow r_6 = l_3 \end{cases} \quad (۳-۲۰)$$

$$g_3 = (L_1 + L_2) \cdot \cos(\theta_{dy}) \cdot \cos(\theta_{dx}) \quad (۳-۲۱)$$

$$z_6 = z_d + g_3 \quad (۳-۲۲)$$

با داشتن مختصات مفصل ۶ در صفحه‌ی $r-Z$ طبق شکل (۳-۱۸)، می‌توان با یک محاسبه ساده و با توجه به جهت‌گیری جسم و قانون تعریف شده برای گرفتن آن، مختصات مفصل ۵ را هم در همین

صفحه محاسبه نمود. زاویه θ_{dx} جسم هدف به منظور عمود شدن گریپر انتهایی بر جسم در این صفحه نقش کلیدی را بازی می کند و از لحاظ هندسی می توان آن را به راستای عمود مفصل ۵ منتقل کرد.



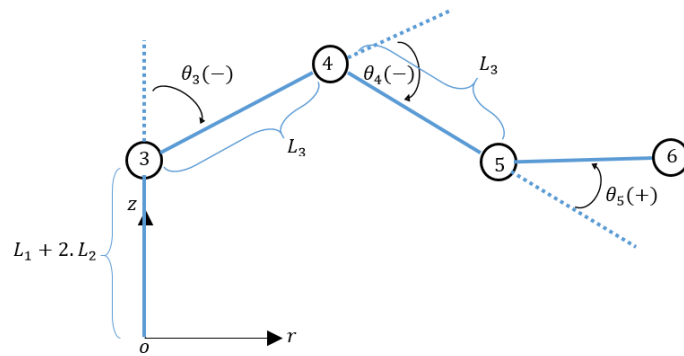
شکل ۳-۱۸ انتقال مختصات مفصل ۵ به ۶

روابط (۳-۲۳ و ۳-۲۴) با توجه به شکل (۳-۱۸) به دست آمده است.

$$z_5 = z_6 + L_2 \cdot \cos(\theta_{dx}) \quad (3-23)$$

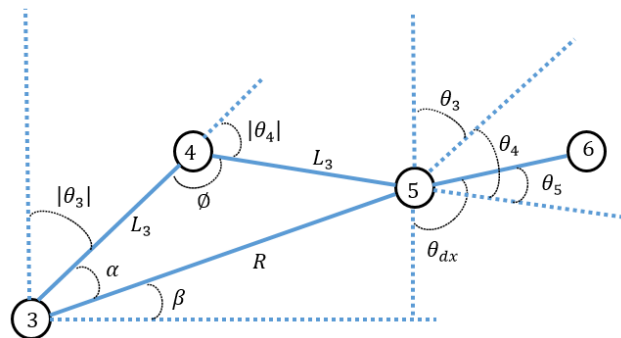
$$r_5 = r_6 - L_2 \cdot \sin(\theta_{dx}) \quad (3-24)$$

سه مفصل ۳، ۴ و ۵ همگی در یک صفحه ($r-Z$) واقع شده اند و حول محور X می توانند بچرخند. پس می توان با داشتن مختصات مفصل ۵ که در مرحله ی قبل به دست آمد، مختصات دو مفصل ۳ و ۴ را توسط یک دستگاه معادلاتی دو معادله و دو مجهول به روش هندسی به دست آورد. این دو مفصل باید به صورتی آرایش بگیرند که انتهای لینک متصل به مفصل ۴، بر مختصات مفصل ۵ قرار گیرد. در اصل میزان چرخش مفصل ۵ در این الگوریتم هم مجهول است که با توجه به جواب های زوایای ۳ و ۴ در گام بعدی محاسبه می شود. با توجه به شکل (۳-۱۹)، در اینجا روابط (۳-۲۳ و ۳-۲۴) به عنوان هدف ربات منظور می شود. به خاطر آن که چرخش مفصل ۱ حول محور Z باعث می شود که لینک های مربوطه همیشه در صفحه ی $r-Z$ قرار گیرند، و مفصل ۲ در این الگوریتم فعلاً بی حرکت در نظر گرفته شده و باعث می شود مفصل ۳ همیشه در این صفحه مرجع و در یک ارتفاع ثابت قرار گیرد، فاصله ی مرکز مختصات تا مفصل ۳ در این صفحه همیشه ثابت خواهد بود و برابر طول ۳ لینک ابتدایی که در شکل (۳-۱۹) مشخص است، می باشد.



شکل ۳-۱۹ لینک‌های ربات از ابتدا تا مفصل ۶ همگی در صفحه‌ی واقع می‌شوند و چرخش پادساعتگرد در این صفحه مثبت در نظر گرفته شده است.

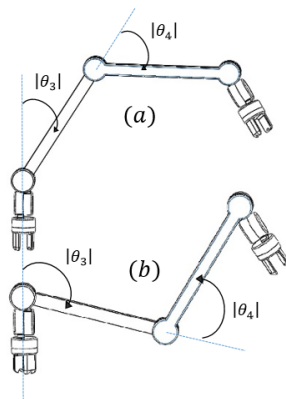
جواب دو معادله دو مجهول برای یافتن زاویه‌ی مفاصل مشخص شده توسط عبارت‌های جبری در معادلات (۲۵-۳۳) پیش رو به دست آمده است که دارای نکات و بررسی مواردی است که جلوتر بیان می‌شوند. شکل (۳-۲۰) پایه‌ی هندسی این محاسبات است و زوایای را بدون در نظر گرفتن مثبت و منفی آنها برای محاسبه جبری نمایش داده است. این زوایای مشخص شده در مثلث سه مفصل ۳، ۴ و ۵ به مفصل ۵ منتقل شده با توجه به امتداد لینک‌ها و خطوط موازی آنها، زاویه‌ای که مفصل ۵ باید نسبت به راستای خود بچرخد در رابطه‌ی (۳-۳۲) از این شکل به دست آمده است.



شکل ۳-۲۰ نام گذاری زوایای لازم برای حل مجهولات و بیان روابط هندسی

از قدر مطلق زوایا در شکل (۳-۲۰) استفاده شده است چون اکثر این زوایا بر اساس ساعت گرد در مختصات تعریف شده، می‌چرخند ماهیت منفی دارند، که در پایان محاسبات هندسی به علامت واقعی بر خواهند گشت. برای شروع محاسبات ابتدا مرکز مختصات قبل به مفصل ۳ طبق رابطه‌ی (۳-۲۵) در صفحه‌ی r-Z انتقال داده شده است. سپس R از z جدید و r مرحله‌ی قبلی تشکیل شده (۳-۲۶) و با

توجه به شکل (۳-۲۰) زوایای مجهول در رابطه های (۳-۲۸ و ۳۰) از قانون کسینوس ها و سینوس ها در مثلثات استفاده شده است. معمولاً در حل دو معادله و دو مجهول بازوهای رباتیک دو لینکی در یک صفحه [۶۵]، دو جواب وجود دارد که با توجه به شکل (۳-۲۱) جوابی بهتر است که کمترین گشتاور به موتورهای از حالت اول تعریف شده اعمال شود و کمترین دوران را داشته باشند، مخصوصاً مفصل ۳ که وزن بیشتری را تحمل می نماید باید کمترین تغییر را نسبت به حالت اولیه و کمتر از مفصل ۴ داشته باشد. در شکل (۳-۲۱) جواب حالت (a) بهینه تر از (b) می باشد پس این امر در محاسبات در نظر گرفته شده است: در رابطه ی (۳-۲۸) قانون کسینوس ها در یک منفی ضرب شده تا جواب حالت (a) به دست آید. این عمل باعث بهینه سازی الگوریتم خواهد شد و فرضی است برای آرایش ربات که می توان آن را تغییر داد، اما جواب به این صورت در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۲۱ دو جواب موجود برای آرایش دو مفصل مشخص شده در رسیدن به یک هدف

عبارت های (۳-۲۷) و (۳-۲۹) از هندسه و مثلثات شکل (۳-۲۰) استخراج شده اند و هدف به دست آمدن جواب مفاصل ۳ و ۴ بوده که در روابط (۳-۳۱ و ۲۸) به دست آمده و در (۳-۳۳) آن علامت منفی که پیش تر در مورد جهت چرخش گفته شده بود اعمال می گردد. در پایان با داشتن زوایای مفاصل ۳ و ۴ می توان زاویه مفصل ۵ را هم طبق رابطه ی (۳-۳۲) استخراج شده از شکل (۳-۲۰)، محاسبه نمود. ترتیب این روابط بر اساس ترتیب به دست آمدن آنها می باشد و روند به دست آمدن جواب مفاصل از انتها به ابتدا در آنها وجود دارد.

$$z = z_5 - (L_1 + 2.L_2) , \quad r = r_5 \quad (۳-۲۵)$$

$$R = \sqrt{r^2 + z^2} \quad (26-3)$$

$$\cos(\emptyset) = -\cos(|\theta_4|) \quad (27-3)$$

$$|\theta_4| = \cos^{-1}((R^2 - (L_3^2 + L_3^2))/(2 \cdot L_3 \cdot L_3)) \quad (28-3)$$

$$\beta = \text{atan2}(z, r) \quad (29-3)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin(\emptyset) \cdot L_3/R) \quad (30-3)$$

$$|\theta_3| = (\pi/2) - (\alpha + \beta) \quad (31-3)$$

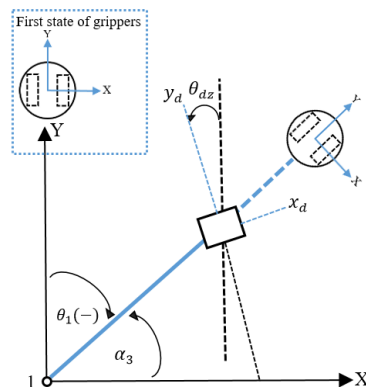
$$\theta_5 = |\theta_3| + |\theta_4| + \theta_{dx} - \pi \quad (32-3)$$

$$\theta_3 = -|\theta_3|, \theta_4 = -|\theta_4| \quad (33-3)$$

با روند محاسبات از سر گریپر تا مفصل ۳ به صورت هندسی تقریباً معادلات سینماتیک معکوس به دست آمده است. تنها جواب مفصل شماره ۷ مانده است که چون شرایطی دارد که باید بررسی شود، در انتهای این بخش بیان شده است. همانطور که در ابتدا فرض شده بود؛ قرار بود که گریپر جسم را به صورتی بگیرد که راستای Z مفصل ۷ عمود بر صفحه‌ی X-Y جسم و همراه با محور Z جسم شده و دو سر چنگکی موازی محور Y جسم شوند. با این تعریف زاویه مفصل ۷ محاسبه می‌شود. برای محاسبه‌ی میزان چرخش از رابطه‌ی استخراج شده از شکل (۲۲-۳) استفاده شده است. در این شکل با در نظر گرفتن اینکه حالت ابتدایی گریپر چگونه بوده است و این حالت در چرخش بازوها توسط مفصل‌ها که تا اینجا محاسبه شده بودند، چقدر تغییر نموده است. همچنین سر گریپر رو به پایین یا بالا باشد چرخش ساعتگرد و یا پادساعتگرد خواهد داشت که همگی این شرایط باید بررسی شوند. دو حالت کلی به شرح زیر معرفی می‌شوند:

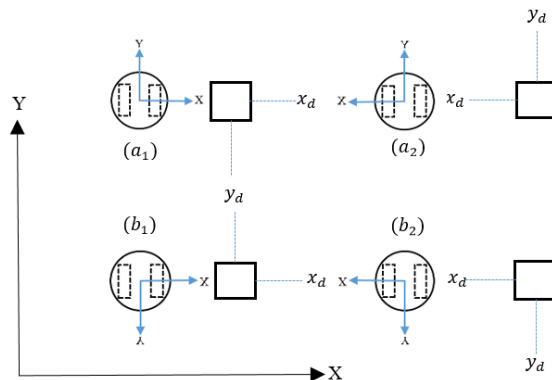
حالت اول: زمانی است که جسم در راستای Y و X خود که منطبق بر مختصات مرجع می‌باشد دورانی نداشته باشد. حال به اندازه دوران حول Z باید محاسبه شود که مفصل ۷ چقدر باید بچرخد تا منطبق بر تعریف صورت پذیرفته جهت‌گیری جسم شود. در شکل (۲۲-۳) هنگامی که ربات توسط مفصل ۱ دوران می‌کند، چون مفصل ۷ حرکتی ندارد محور Y لینک انتهایی (گریپر) هم در راستای خود ربات در صفحه‌ی مرجع دورانی مشخص به همان اندازه مفصل ۱ دارد، حال برای اینکه بتواند جسم

هدف را بگیرد، باید این اختلاف دوران ایجاد شده از حالت ابتدایی جبران شده و علاوه بر آن اگر جسم دورانی حول محور Z داشته باشد؛ مفصل ۷ علاوه بر جبران آن اختلاف اولیه بایستی دورانی بیشتر داشته باشد که بتواند جسم را بگیرد. تمامی این مورد با توجه به جهت چرخش و حالت خاصی که رخ می‌دهد در رابطه‌ی (۳-۳۴) محاسبه شده است. این حالت خاص به این صورت است که جسم حول محور Y یا X خود به اندازه 180° درجه بچرخد اتفاق می‌افتد. در این حالت هم دوباره گریپر همراه با Z محور مختصاتی می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که در این صورت سر گریپر رو به بالا خواهد بود و چرخش آن در جهت معکوس می‌بایستی محاسبه شود. پس اینکه سر گریپر رو به بالا و پایین باشد هم به مانند بخش (۳-۳-۳) در اینجا توسط جدول (۷-۳) و شکل (۳-۲۳) بررسی شده است.



شکل ۳-۲۲ حالت اولیه و ثانویه ی گریپر بعد از تغییر موضع اولیه ی ربات توسط مفصل ۱ به سمت هدف همان‌طور که بیان شد مسئله ی اصلی جهت گریپر آزاد که بر محور مفصل ۷ سوار است، می‌باشد؛ وقتی که ربات به اندازه ی θ_1 با مفصل ۱ می‌چرخد، به همین اندازه مفصل ۷ از راستای مختصات فاصله گرفته است پس مفصل ۷ علاوه بر جبران این فاصله ی چرخشی باید به اندازه ی θ_{dz} جسم هم بچرخد تا محورهای Y جسم با گریپر هم راستا شوند. طبق شکل (۳-۲۳) دو حالت کلی رخ می‌دهد: اگر سر گریپر به سمت پایین باشد پس جهت مثبت محور چرخش مفصل ۷ برعکس مفصل ۱ و ساعت گرد خواهد شد (حالت (b)). در حالت (a) هم سر گریپر رو به بالا خواهد بود، چون بنا به آنچه که در جدول (۳-۶) گفته شد، روی جسم به علت چرخش 180° درجه ای به سمت پایین بوده است. اما این حالت‌های خاص هر کدام به دو بخش تقسیم شده‌اند که در شکل (۳-۲۳) و بعد از آن در جدول (۷-۳) بررسی

شده و معادله‌ی (۳-۳۴) را تشکیل داده‌اند. اگر جسم حول محور x در حالت (a_1) و یا حول محور y در حالت (a_2) ، ۱۸۰ درجه بچرخد، علامت دوران زاویه‌ی اولیه‌ی چرخش برای جبران چرخش مفصل ۱، منفی و در غیر اینصورت مثبت خواهد بود. حالت (b_1) بیانگر این است که جسم حول هیچ محور x یا y جسم دوران نداشته و (b_2) بیانگر این است که هم‌زمان حول هر دو محور ۱۸۰ چرخش داشته است.



شکل ۳-۲۳ حالت‌های مختلف جسم و گریپر انتهایی در هنگام همراستا بودن که برای دوران جسم حول محورهای خود، چهار حالت به دست می‌آید.

جدول ۳-۷ بررسی حالت‌های به وجود آمده در شکل ۳-۲۳

حالت های شکل ۲۳	θ_{dy}	θ_{dx}	$\text{sign}(\theta_{dz})$
(b_1)	0	0	+
(a_1)	0	π	-
(a_2)	π	0	-
(b_2)	π	π	+

$$\theta_7 = \text{sign}(\theta_{dz}) \cdot \theta_1 - \theta_{dz} \quad (۳-۳۴)$$

حالت دوم: این است که جسم حول محورهای x و y خود بچرخد، به طوری که زوایای ۰ و ۱۸۰ که در حالت اول بررسی شدند، نباشد. همچنین دوران حول محور z جسم آزاد بوده و فقط شرایط ورود به الگوریتم سینماتیک معکوس بایستی از قبل لحاظ شده باشند تا هیچ مشکلی پیش نیاید. بنا به شرایط گفته شده در بخش (۳-۳-۳) شرط اصلی که جسم در این حالت قرار گیرد و بازوی انتهایی ربات بتواند به آن طبق قانون تعریف شده برسد، آن بود که θ_{dz} طبق به اندازه‌ی آنچه که در رابطه‌ی (۶)

حساب شده بود چرخش داشته باشد به علاوه‌ی شرایط بعد از آن که تعریف شد را داشته باشد. این اندازه معلوم به اندازه ی α_3 از محور X و یا θ_1 از محور Y محور مختصاتی می‌باشد. لذا ترکیب معادله‌ی (۳-۶) و (۳-۳۴)، رابطه‌ی (۳-۳۵) را حاصل می‌شود و جواب (۳-۳۴) صفر خواهد بود. برای همین از معادله‌ی (۳-۳۴) به عنوان جواب نهایی مفصل ۷ با توجه به بررسی شرط موجود، استفاده می‌شود. چنانچه در حالت دوم، θ_{dz} باعث صفر شدن رابطه‌ی (۳-۳۴) نشود، یعنی شرط ورود به الگوریتم سینماتیک معکوس در یک گام، برقرار نشده است. لذا در بخش بعدی الگوریتم انتقال بیان شده تا در تمامی شرایط و جهت‌گیری‌های جسم، ربات با یک الی چند تلاش (گام) به هدف دلخواه برسد.

$$\theta_7 = 0 \quad (3-35)$$

الگوریتم سینماتیک معکوس برای یک گام، در اینجا خاتمه می‌یابد. حال اگر جهت‌گیری جسم مهم نبود و ربات مد نظر فقط مسیر دلخواهی را خواست که دنبال کند کافی است که زوایای ورودی برای جسم دلخواه صفر در نظر گرفته شود، در اینصورت روابط ساده‌تر هم شده‌اند. در جدول (۳-۸) خلاصه و جمع بندی سینماتیک معکوس نشان داده شده است. با مشاهده‌ی این روابط، مرتبط بودن جواب مفصل‌ها به یکدیگر و کم حجم بودن و غیر عددی بودن روابط به خوبی درک می‌شود که از ویژگی‌های این روش تحلیلی و بازگشتی بودن مراحل بود، که بیان شد.

جدول ۳-۸ زاویه نهایی مفاصل بر حسب پارامترهای ورودی و هندسی ربات

θ_1	$(\alpha_1 - \alpha_2) - \pi/2$
θ_2	0
θ_3	$(\alpha + \beta) - (\pi/2)$
θ_4	$-\cos^{-1}((R^2 - (L_3^2 + L_3^2))/(2 \cdot L_3 \cdot L_3))$
θ_5	$-\theta_3 - \theta_4 + \theta_{dx} - \pi$
θ_6	$-\theta_{dy}$
θ_7	$\text{sign}(\theta_{dz}) \cdot \theta_1 - \theta_{dz}$
α_1	$\text{atan2}(y_d, x_d)$
α_2	$\sin^{-1}(\sin(\pi - d_6) \cdot l_2/l_1)$
d_6	$\text{atan2}(g1, g2)$

$$\begin{aligned}\beta & \quad atan2(z, r) \\ \alpha & \quad \sin^{-1}(\sin(\varnothing) \cdot L_3/R) \\ g_1 & \quad (L_1 + L_2) \cdot \sin(\theta_{dy}) \\ g_2 & \quad (L_1 + L_2) \cdot \sin(\theta_{dx}) \cdot \cos(\theta_{dy})\end{aligned}$$

۳-۵ عملیات انتقال

این عملیات می‌تواند وسعت زیادی را در بر داشته باشد؛ از تعیین نقاط هدف برای حرکت ربات به ترتیب تعیین شده و یا کنترل دستی آن و یا هر کاری که منجر به این شود که یک انتهای ربات که در بخش قبلی ثابت بود در این عملیات ثابت نباشد؛ به عبارتی چند گام به جای یک گام یا تلاش برای رسیدن به هدف مورد نیاز باشد. ویژگی اصلی متمایز سازی این ربات بازویی فضایی نسبت به نمونه‌های بازوهای صنعتی و کاربردی دیگر، همین عملیات می‌باشد که با داشتن دو گریپر بر سر دو انتهای خود می‌تواند اجسام و یا مکان‌هایی را بگیرد و با سر آزاد خود انتقال داشته باشد. به این صورت که یک سمت ربات در شروع حرکت ثابت شده است، با سمت آزاد خود به محل تعیین شده می‌رسد و در آنجا ثابت می‌شود. سپس سمت ثابت شده‌ی آن آزاد شده و دوباره همین روند را طی می‌کند. در هر گام، ابتدا مکان زاویه‌ای مفصل ربات صفر خواهد شد، چون برای هر گام یک نقطه‌ی هدف به همراه جهت گیری خاص آن در فضای سه بعدی تعیین می‌گردد و ربات باید در هر گام یک بار الگوریتم سینماتیک معکوس را اجرا نموده تا به هدف برسد. حال اگر اهداف چند نقطه باشند و یک عملیات کاری بزرگ مثل انتقال ربات و جابه‌جایی بار باشد، این ربات بایستی گام به گام اهداف مورد نظر را بپیماید؛ این امر سبب جابه‌جایی به شکل راه رفتن ربات دو پا می‌شود و در نتیجه حوزه‌ی کاری آن گسترش یافته و با کمک تجهیزاتی که بر روی آن می‌تواند نصب شود، کارهای مختلفی انجام دهد و این امر مزیت و برتری این ربات نسبت به ربات‌های مشابه خود، می‌باشد. تمام این مطالب در صورتی است که نقاط هدف در شرایط سینماتیک معکوس بگنجد، در غیر این صورت، نقطه‌ی هدف اصلی، با یک گام قابل دسترسی نخواهد بود و چند نقطه‌ی دیگر فرعی توسط الگوریتم ارائه شده در بخش (۳-۵-۳) تعیین می‌گردد که ربات بتواند با

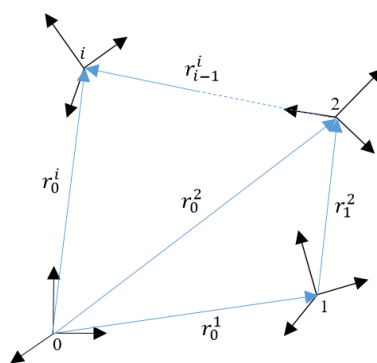
استفاده از آن نقاط و در چند تلاش به هدف اصلی برسد با این تفاوت که برای هر نقطه شرایط الگوریتم سینماتیک معکوس رعایت شده است.

به هر حال وسعت مبحث انتقال بسیار بیشتر از نوشتن یک الگوریتم ثابت برای تمام حرکات ممکن موجود می‌باشد، برای همین در این قسمت فرض شده است که مانعی در محیط موجود نباشد و تمامی محیط مناسب گرفته شدن توسط عملگر انتهایی باشد که در مجموع دو حالت بررسی شده‌اند. حالت اول: همان‌طور که گفته شد، نقاط هدفی با جهت‌گیری‌های مناسب از قبل برای ربات مشخص شده است و ربات باید به ترتیب در آن مکان‌ها قرار گیرد که در بخش (۳-۵-۱) پرداخته شده است. حالت دوم: شرایط ورود به الگوریتم یک گام در بخش (۳-۳) فضای کاری رعایت نشده است و همان‌گونه که بیان شد، ربات باید به مکان یا مکان‌هایی انتقال یابد که بتواند از آنجا شرایط را داشته باشد. برای محدودیت جهت‌گیری جسم هدف، بخش (۳-۵-۲) و برای مختصات هدف، بخش (۳-۵-۳) تبیین شده است.

۳-۵-۱ انتقال کلی در فضای سه بعدی

ابتدا فرض می‌شود که شرایط تعریف شده برای الگوریتم سینماتیک معکوس در بخش (۳-۳) برآورده شده است. هر نقطه‌ی هدف با توجه به مکان و جهت‌گیری‌های مشخص شده از قبل در فضای کاری قابل دسترس و ترتیب آن معلوم می‌باشد. به منظور یک کار مهم مثلاً در ایستگاه فضایی یا تأسیساتی مناسب برای کارایی ربات حال می‌توان این عملیات را با یک سری مختصات معلوم برنامه‌ریزی نمود. ربات در مکان صفر مشخص شده قرار می‌گیرد و باقی مختصات‌ها که اطلاعاتی در مورد مکان و جهت‌گیری اهداف نسبت به مختصات مرجعی مشخص به صورت ورودی به ربات داده می‌شود. سپس برنامه‌ی این بخش به این صورت است که برای هر مختصات یک بار الگوریتم سینماتیک معکوس معرفی شده در بخش (۳-۴) اجرا شود و در پایان رسیدن به هر هدف، قسمت ثابت آن از هدف قبلی جدا شده و تمامی مفاصل نسبت به اینکه بازوی آزاد بر روی هدف ثابت شده، بچرخند تا ربات در همان مکان و جهت‌گیری به حالت صفر خود برسد. حال تمامی زوایای مفاصل در همان حالت صفر در نظر گرفته

می‌شود و باز الگوریتم برای مختصات هدف بعدی برای ربات اجرا شود تا در انتها اهداف تمام شوند. نکته‌ای که در این بخش باید مد نظر باشد، تبدیل تمام مختصات اهداف از حالت کلی به حالت محلی می‌باشد. یعنی هر هدف جدید نسبت به هدف قبلی باید تعریف شده و هدف قبلی صفر جدید دستگاه مختصاتی است؛ چون تمام اهداف نسبت به سیستم کلی به عنوان ورودی داده شده است، باید طبق یک عملیات تبدیل مختصاتی برای هر هدف، مختصات نسبت به هدف قبلی خود در اختیار ربات قرار داده شود. این دوران و مختصات جسم هدف بعدی نسبت به قبلی برای ربات مهم است که شکل (۳-۲۴) این مسئله را نشان می‌دهد r_{i-1}^i به معنای مختصات نقطه‌ی i نسبت به مرجع مختصاتی $i-1$ ، نقطه‌ی قبلی خود می‌باشد و R_{i-1}^i دوران مختصات واقع بر هدف i نسبت به $i-1$ هست.



شکل ۲۴-۳ بردارها برای نشان دادن نسبت‌های مختصاتی

در ابتدا فقط r_0^i به عنوان مختصات و R_0^i به عنوان ماتریس دوران i نقطه یا هدف، وجود دارد. روابط (۳-۳۶ و ۳-۳۸) برای تبدیل این مختصات به مختصات محلی برای هر گام در نظر گرفته شده‌اند و همان‌طور که گفته شد استفاده می‌شوند. ماتریس دوران R دارای سه زاویه دوران (جهت‌گیری) جسم نسبت به محورهای مختصات اصلی است و طبق رابطه‌ی (۳-۳۷) با ضرب پشت سر هم این ماتریس‌ها می‌توان ماتریس دوران هر گام مورد نیاز را به دست آورد سپس به زوایای چرخش اولیو از متود [۶۶] تبدیل نمود. همچنین بعد از هر گام بایستی شماره‌ی مفاصل ۱ تا ۷ به ۷ تا ۱ در داخل سیستم تغییر نام دهد، چون عملگر انتهایی متحرک، ثابت شده و متقابلاً آن که ثابت بوده به عنوان عماگر انتهایی جدید در نظر

گرفته شده است. لذا برای روند اجرایی سینماتیک معکوس لازم است که مفاصل برعکس قبل جایگزین هم شوند.

$$r_{i-1}^i = r_0^i - (r_0^1 + r_1^2 + \dots + r_{i-2}^{i-1}) \quad (3-36)$$

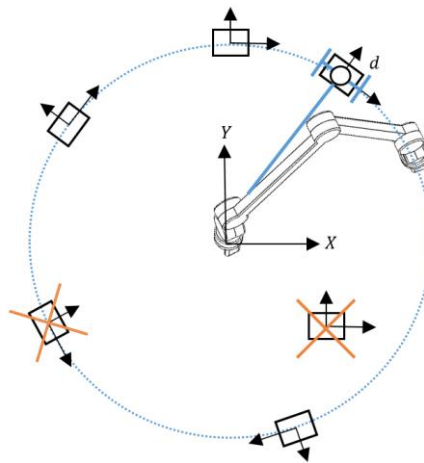
$$R_0^i = R_0^1 \cdot R_1^2 \cdot \dots \cdot R_{i-1}^i \quad (3-37)$$

$$R_{i-1}^i = R_0^i \cdot (R_0^{1T} \cdot R_1^{2T} \cdot \dots \cdot R_{i-2}^{i-1T}) \quad (3-38)$$

۳-۵-۲ انتقال برای رسیدن به جهت گیری دلخواه

این حالت زمانی است که جهت گیری جسم بنا به آنچه در قسمت (۳-۳-۳) گفته شد برای ربات دست نیافتنی باشد. برای عبور از مرز محدودیت جهت گیری گفته شده در آن بخش، برای اینکه ربات حتماً جسم را در هر جهت گیری دلخواهی بگیرد بایستی به نقطه‌ی ثانویه‌ای منتقل شود و از آنجا که مختصات جدید مرجع می‌باشد نسبت به گرفتن جسم اقدام کند. این نقطه‌ی جدید را باید از محاسبات هندسی بهینه ترین مکانی باشد که ربات بتواند با انتقال به آنجا به راحتی و بدون پیچیدگی جسم را بگیرد. همانند شکل (۳-۲۵) که حالتی است که جسم حول X و Y خود دوران داشته است که در بخش‌های قبلی به تفصیل در رابطه با آن پرداخته شد، تصویر جسم در این حالت باید بر دایره‌ای مماس شود که مرکز مختصاتش پای ثابت ربات باشد. پس اگر تصویر جسم در مختصات X-Y مرجع بر این دایره مماس نبود ربات باید به نقطه‌ای برود جسم مماس دایره‌ای به مرکز همان نقطه باشد؛ سپس از این نقطه می‌تواند به هدف طبق قانون تعریف شده برای گرفتن جسم برسد. لذا در اینجا دو گام به وجود آمده است و دو نقطه‌ی هدف که یکی مرکز دایره مماسی و دیگری هدف اصلی می‌باشند. همچنین برای رسیدن به این دو نقطه از تبدیل مختصات بخش قبلی بایستی استفاده نمود اما ابتدا باید مختصات مرکز این دایره به دست آید و هدف این بخش به دست آمدن این نقطه به عنوان مرکز مختصات جدید می‌باشد. بنابراین مرکز مختصات جدید در همان صفحه X-Y جوری معرفی می‌شود که طبق شکل (۳-۲۶) شرایط گرفتن جسم با جهت گیری خاص صورت پذیرد. اینکه مختصات این نقطه‌ی هدف در راستای Z جابه‌جا نخواهد شد تعریف و فرضی است که در این پژوهش ارائه شده تا پیچیدگی خاصی رخ ندهد

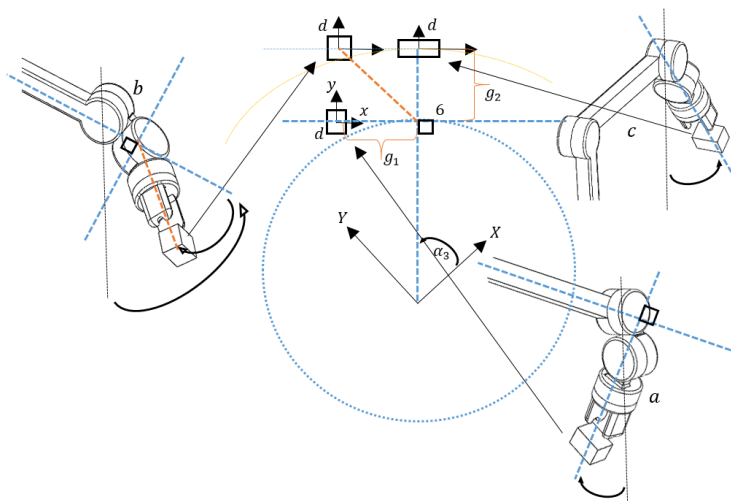
و حالت بهینه که کمترین محاسبات را در پی دارد اتفاق بیافتد. پس هدف اصلی در این بخش انتقال دستگاه مختصات مرجع به مختصات نقطه‌ی جدید به عنوان هدفی که با همان جهت‌گیری اولیه ربات می‌باشد به ربات داده شده و ربات در مکان جدید مثل حالت اولیه خود می‌ایستد و جای گریپر ثابت و متحرک خود را عوض کرده و کافی است همانطور که گفته شد عملیات بعدی نسبت به مختصات جدید انجام شود به شرطی که مختصات هدف در مختصات جدید تبدیل شده و شرایط سینماتیک معکوس برای هر گام چک شده باشد.



شکل ۳-۲۵ زمانی که ربات قابلیت گرفتن جسم هدفی را که حول محورهای X و Y خودش چرخیده باشد را دارد، که بر مرکز دایره‌ای واقع باشد که تصویر جسم بر آن مماس باشد.

شکل (۳-۲۶) سه حالت رخ داده در شکل (۳-۸) را با جزییات بیشتری در این بخش توصیف می‌کند. حالت **a** همان طور که پیشتر گفته شد زمانی است که جسم فقط حول محور Y خود می‌چرخیده و طبق این تصویر ربات هم فقط باید توسط مفصل ۶ بچرخد تا قابل گرفتن باشد، این چرخش طول g_1 را که مماس به دایره‌ی نقطه چین است و به اندازه g_1 از مکان اولیه خود فاصله می‌گیرد، را به وجود می‌آورد. همین عمل اگر فقط برای چرخیدن جسم حول محور X خود باشد، به اندازه‌ی g_2 از دایره دور شده و فقط مفصل ۵ خواهد چرخید (حالت **c** در شکل). چون در ابتدا میچ انتهایی ربات بر نقطه‌ی ۶ بر روی دایره نقطه چین عمود است و با چرخش این دو مفصل ۵ و ۶، طول‌های گفته شده به وجود می‌آیند. حتی حالت **b** هم که هر دو مفصل باهم عمل کرده اند، رخ دهد باز هم تصویر جسم بر صفحه‌ی

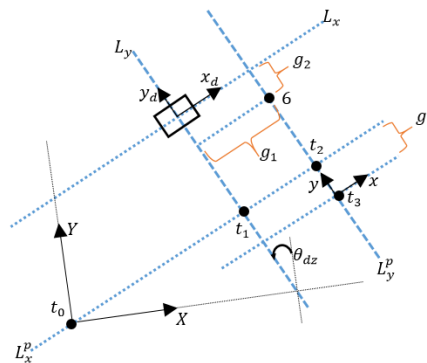
مرجع بنا به شکل (۳-۲۶) به گونه است که امتداد محور x آن بر آن دایره و یا دوایر متحد المركز به نقطه‌ی هدف، مماس می‌باشد. پس در هر حالتی می‌توان این نتیجه را گرفت که در هر جهت‌گیری جسم، و متقابلاً مفاصل ربات، یکی از حالت‌های شکل (۳-۲۶) رخ می‌دهد. لذا با پیدا کردن مرکز آن دایره‌ی نقطه چین مطمئن هستیم که ربات به هدف مد نظر بدون هیچ شرطی خواهد رسید. در این بخش مفصل ۷ مطرح نشده چون چرخش جسم حول محور z هیچ تفاوتی در این بخش ایجاد نمی‌کند و فقط باعث اعمال چرخش روی مفصل ۷ شده است؛ در این صورت بنا به ملاحظات انجام شده باز هم شکل (۳-۲۶) مشکلی نخواهد داشت چون اعمال این زاویه قبل از تشکیل این شکل صورت می‌پذیرد و با توجه به آن نقطه‌ی هدف پیدا می‌شود.



شکل ۳-۲۶ سه حالت کلی که برای مچ ربات رخ می‌دهد در هر جهت‌گیری از جسم و توضیحات بیشتر شکل (۳-۸)، در این تصویر مفاصل ۵ و ۶ ربات هر کدام به تنهایی و باهم عمل کرده است. تصویر شکل که حول محورهای x و y خود چرخیده در صفحه مرجع موجود است.

شکل (۳-۲۷) برای به دست آوردن روابط مختصاتی خطوط و نقطه‌های مشخص شده، نمایش داده شده است. نقطه‌ی هدف در همان صفحه $X-Y$ مرجع می‌باشد، به این صورت محاسبه شده است که اگر جهت‌گیری جسم حول z مناسب شرط ورود به الگوریتم سینماتیک معکوس نبود (شرط جهت‌گیری بخش (۳-۳-۳))، معادله‌ی خطوط گذرنده از جسم هم در راستای y جسم L_y و هم در راستای x ، L_x به دست آمده است. خطی موازی با خط L_x از مختصات مرجع رسم شده (L_x^p) و تلاقی آن با خط L_y در

نقطه‌ی t_1 به دست آمده است. در ادامه به ازای چرخش جسم حول محور y برای جسم g_1 تشکیل شده و این نقطه‌ی تلاقی t_1 به ازای اندازه‌ی g_1 روی خط L_x^p جلو برده و به ازای دوران حول محور x جسم که g_2 تشکیل می‌شود آن نقطه روی محور موازی از خط گذرنده از y جسم L_y^p به سمت عقب آورده شده است. به این علت نقطه‌ی t_2 به اندازه g_2 پایین آمده است که اگر در حالت خاصی محور L_x جسم از مرکز مختصات مرجع عبور کند بایستی به اندازه‌ی g_2 به سمت پایین محوری موازی برود تا جسم قابل وصول شود. در نهایت نقطه‌ی t_3 به عنوان هدف و مختصات مرکز دایره‌ی بیان شده با توجه به دوران دلخواه جسم حول محورهای خود در شکل (۳-۲۶) می‌باشد. همانطور که در شکل (۳-۲۷) مختصات نقطه‌ی هدف انتقال t_3 با این توضیحات معلوم شده است؛ انتقال به این نقطه از نقطه‌ی صفر سیستم (t_0) با توجه به الگوریتم ارائه شده در بخش (۳-۴) بهترین حالتی است که ربات می‌تواند در مرحله‌ی بعدی جسم را با توجه به دوران‌های جسم حول محورهای y و x خود، بدون هیچ محدودیتی بگیرد.



شکل ۳-۲۷ مشخص کردن نقطه‌ی مناسب برای گرفتن جسم با شرایط مورد نظر با توجه به هندسه و تقاطع خطوط گذرنده از هم.

الگوریتم دو مرحله‌ای برای حل مشکل جهت‌گیری تبیین شد. و نقطه‌ی کلیدی برای انجام درست آن همان پیدا شدن نقطه‌ی t_3 می‌باشد. ابتدا معادلات خطوط گفته شده در روابط (۳-۳۹، ۴۰ و ۴۱) به دست آمده سپس مختصات نقطه تقاطع t_1 در رابطه‌ی (۳-۴۲) و از این نقطه، به توجه به جهت‌گیری جسم نقاط t_2 و t_3 به همان ترتیبی که گفته شد توسط روابط (۳-۴۳ و ۴۴) به دست آمدند. این نقطه‌ی کلیدی با توجه به انتقال صفحه‌ای مشخص شده، با ارتفاع و جهت‌گیری صفر در نظر گرفته شده است،

سپس ربات می‌تواند یک انتقال کلی به این مختصات و سپس از آنجا به هدف اصلی اولیه بدون هیچ مشکلی برسد.

$$L_y \rightarrow (y - y_d) = \tan\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{dz}\right) \cdot (x - x_d) \quad (39-3)$$

$$L_x \rightarrow (y - y_d) = \tan(\theta_{dz}) \cdot (x - x_d) \quad (40-3)$$

$$L_x^p \rightarrow y = \tan(\theta_{dz}) \cdot x \quad (41-3)$$

$$x_{t_1} = \frac{y_d - \tan\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{dz}\right) \cdot x_d}{\tan(\theta_{dz}) - \tan\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{dz}\right)} \quad (42-3)$$

$$y_{t_1} = \tan(\theta_{dz}) \cdot x_{t_1}$$

$$y_{t_2} = y_{t_1} + g_1 \cdot \sin(\theta_{dz}), x_{t_2} = x_{t_1} + g_1 \cdot \cos(\theta_{dz}) \quad (43-3)$$

$$y_{t_3} = y_{t_2} - g_2 \cdot \cos(\theta_{dz}), x_{t_3} = x_{t_2} + g_2 \cdot \sin(\theta_{dz}) \quad (44-3)$$

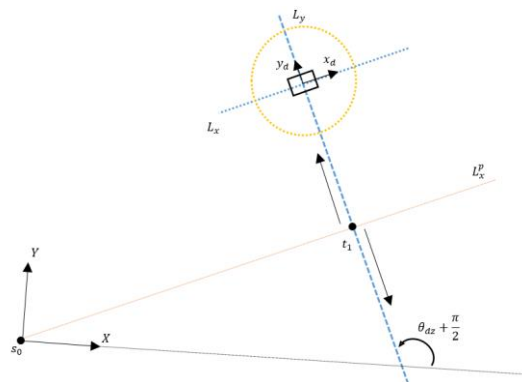
۳-۵-۳ انتقال بهینه با توجه به محدودیت فضای کاری

برای تکمیل بخش قبلی و در راستای اینکه محدودیت بیان شده در بخش (۳-۳-۲) در رابطه با فضای کاری قابل دسترس برای ربات، دور زده شود، این بخش ارائه شده است. شرایطی رخ می‌دهد که در آن نقاط هدف در محدوده‌ی کاری ربات نیستند و ربات باید به نزدیکترین نقطه به هدف حرکت کند. بازه زیادی از شرایط مختلف باید بررسی شود تا این انتقال بهینه‌ترین باشد. این شرایط شامل: انتقال در صفحه یا فضا، وجود داشتن محل اتصال در تمامی محیط، جهت‌گیری اهداف مورد نظر برای رسیدن به هدف نهایی، موانع طبیعی محیط، موانع کاری ربات در چرخش بازوها و غیره. این شرایط زیاد باعث می‌شود که نتوان الگوریتم جامع برای تمامی حالات ارائه نمود لذا در این پژوهش حالتی بررسی شده است که در ادامه بخش قبلی (۳-۵-۲) فرض شده است که جسم علاوه بر جهت‌گیری دلخواه که بحث شد این بار در محدوده‌ی کاری ربات نباشد. با تغییراتی در روند پیدا کردن نقطه‌ی کلیدی t_3 از بخش قبل می‌توان مشکل مسافت غیر قابل دسترس در یک گام را حل کرد. کافی است برای رسیدن به هدف نهایی، چندین گام مناسب طراحی شود و مسافت مورد نظر توسط ربات با توجه به قوانینی که پیش‌تر گفته شد، طی شود. پس نقطه‌ی t_1 که لازمه‌ی پیدا کردن نقاط بعدی می‌باشد، تا حد ممکن نزدیک

به هدف نهایی تبیین می‌شود. بنا به بخش قبلی ابتدا این نقطه طبق همان تقاطع دو خط گفته شده در روابط (۳-۳۹ تا ۴۲) پیدا می‌شود. سپس چون ممکن است این نقطه خیلی دور یا خیلی نزدیک به هدف اصلی باشد و با یک گام طبق بخش قبلی نتوان هدف را گرفت، یک شرطی ارائه می‌شود. این نقطه باید روی خطی که مشخص شده در شکل (۳-۲۸) هست جابه جا شده تا بر روی محدوده‌ی مشخص شده بیافتد. این محدوده توسط دایره‌ی نقطه‌چین مشخص شده و شعاع آن دلخواه با توجه به طول لینک‌های ربات فرض می‌شود. این شعاع طوری انتخاب می‌شود که مطمئن شویم ربات از نقطه‌ی t_1 جدید که بر روی این دایره افتاده، فقط یک گام برای رسیدن به هدف لازم داشته باشد. رابطه‌ی (۳-۴۵) میزان در نظر گرفته شده برای شعاع دایره برای به دست آوردن نقطه‌ی t_1 جدید، می‌باشد و بنا به فرضی که شده این محدوده باید در حدود $[0, 2.L_3]$ طول دو بازوی اصلی، حداقل باشد.

$$\Delta x = x_d - x_{t_1}, \Delta y = y_d - y_{t_1} \quad (3-45)$$

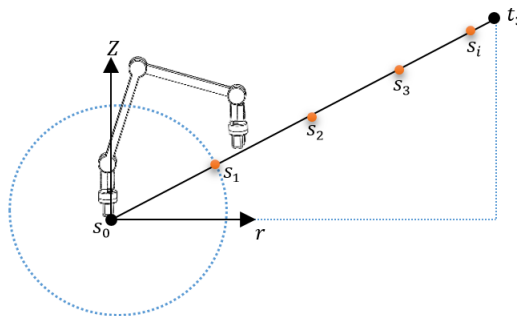
$$R_{circle} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$



شکل ۳-۲۸ انتقال در صفحه، پیدا کردن نقطه‌ی نزدیک به تصویر هدف

حال با به دست آمدن این نقطه، طبق بخش قبلی، باقی مجهولات تا رسیدن به نقطه‌ی t_3 به دست می‌آید. با داشتن t_3 ، نیاز هست که تعداد و مختصات نقاط انتقال تا این نقطه به دست آید. همچنین اینبار ارتفاع این نقطه، صفر در نظر نگرفته و هم ارز با ارتفاع خود جسم قرار داده شده است. یعنی z_d مختصه‌ی سوم این نقطه محسوب می‌شود. این کار باعث می‌شود عملگر انتهایی در گام نهایی پیچیدگی کمتر شده و با یک حرکت صفحه‌ای به جسم هدف برسد. شکل (۳-۲۹) تعداد گام‌های مورد نیاز برای

رسیدن ربات به نقطه‌ی کلیدی t_3 را نشان می‌دهد. اگر این نقطه به مرکز مختصات و نقطه‌ی شروع ربات وصل شود یک خط مستقیم در صفحه‌ی $r-Z$ جدید می‌سازد و تمامی نقاط انتقال طبق فرضی که شده است در این صفحه خواهند بود. البته هر فرض دیگری هم می‌توان در نظر گرفت اما با توجه به فرض قابل دسترس بودن تمام نقاط در فضای سه بعدی برای ربات این حالت بهینه‌ترین می‌باشد. فاصله‌ی و تعداد این نقاط در جلوتر با استفاده از روابط (۳-۴۶ تا ۵۱) به دست آمده است. با توجه به اینکه انتقال بهینه مورد نظر است، این فواصل باید بیشترین حد ممکن، بدون بروز مشکل برای شرایط حرکتی ربات باشند تا در کمترین گام ربات به نقطه‌ی کلیدی رسیده و سپس با یک گام به نقطه‌ی نهایی طبق بخش (۳-۵-۲) رسد. و همگی این مختصات نقاط بایستی طبق بخش (۳-۵-۱) به مختصات محلی در هنگام عملیات تبدیل شوند.



شکل ۳-۲۹ انتقال در فضای سه بعدی از مرکز مختصات تا نقطه‌ی کلیدی با تعداد $i+1$ گام.

اندازه‌ی طول بین نقطه‌ی مرکز مختصات و نقطه‌ی کلیدی طبق رابطه‌ی (۳-۴۶)، r_{t_3} به دست می‌آید. سپس رابطه‌ی (۳-۴۷) بیانگر میزان حداکثر باز شدن دو بازوی ربات به صورتی است که جهت‌گیری اولیه بهم نریزد، بنابراین اینطور فرض شده که به اندازه طول‌های بازوهای بلند می‌تواند جابه‌جا شود. پس می‌توان با تقسیم فاصله‌ی کلی بر حداکثر فاصله‌ی بین گام‌ها در رابطه‌ی (۳-۴۸)، تعداد نقاط لازم برای تقسیم کردن این طول به گام‌های ربات را به دست آورد. این تعداد i باید جزء اعداد صحیح باشد، پس از قسمت اعشاری آن به عنوان باقی‌مانده این تقسیم در رابطه‌ی (۳-۴۹)، به عنوان گام $i+1$ استفاده می‌شود که ربات از نقطه‌ی s_i به t_3 برسد. پس در مجموع $i+1$ مورد نیاز خواهد بود که از ۱

تا i انتقال همگنی به اندازه‌ی $r_{t(i)}$ و در گام $i+1$ انتقالی به اندازه‌ی $r_{t(i+1)}$ صورت می‌پذیرد. حال که تعداد و اندازه‌ی هر گام مشخص شد باید مختصات تک تک این نقاط پیدا گردند. نقاطی که از این روش به دست می‌آید بر فرض تغییر نکردن جهت‌گیری مقصد از ابتدا تا انتها بوده است و برای نقاطی که در فضا ممکن است جهت‌گیری متفاوتی داشته باشند باید از بخش قبل جهت‌گیری آن‌ها حساب شود.

با توجه به اینکه فقط اندازه و جهت بردار انتقال در دسترس است؛ برای محاسبه‌ی نقاط هدف باید اندازه بردارها را به نقاطی با سه مؤلفه‌ی x ، y و z تبدیل نمود. لذا باید این مختصات برداری به مختصات سه بعدی تبدیل شود و آسان‌ترین راه تبدیل دستگاه کروی به کارتزین می‌باشد که برای این منظور نیاز است که زوایای $\emptyset$ و θ ی دستگاه کروی را توسط رابطه‌ی $(3-50)$ از مختصات هدف به دست آورد. سپس از رابطه‌ی $(3-51)$ تبدیل مختصاتی با توجه به میزان انتقال در این راستا در هر بار نقطه‌ی هدف جدید به دست می‌آید، در پایان مختصات به دست آمده برای s_{i+1} همان مختصات t_3 خواهد بود.

$$r_{t_3} = \sqrt{x_{t_3}^2 + y_{t_3}^2 + z_d^2} \quad (3-46)$$

$$r_{t(i)} = 2.L_3 \quad (3-47)$$

$$i = \frac{r_{t_3}}{r_{t(i)}}, i \in \mathbb{Z} \quad (3-48)$$

$$r_{t(i+1)} = r_{t_3} - i.r_{t(i)} \quad (3-49)$$

$$\theta = \text{atan2}(y_{t_3}, x_{t_3}) \quad (3-50)$$

$$\emptyset = \text{atan2}(z_d, r_{t_3})$$

$$s_i: \text{for } i = 1 \rightarrow i + 1 : \begin{cases} x_i = r_{t(i)}. \cos(\theta). \sin(\emptyset) \\ y_i = r_{t(i)}. \sin(\theta). \sin(\emptyset) \\ z_i = r_{t(i)}. \cos(\emptyset) \end{cases} \quad (3-51)$$

عملیات انتقال می‌تواند در زمینه‌های بیشتری از فرضیات و محدودیت‌ها در فضای کاری و یا عملیات‌های پیچیده‌تر بررسی شود. در این پژوهش با ترکیب این سه بخش گفته شده که مکمل یکدیگر بوده‌اند یک انتقال بهینه و هدفمندی با اهدافی دلخواه در مکان و جهت‌گیری مد نظر به دست خواهد آمد و

می‌توان فضایی با محدودیت کمتر و انعطاف بیشتری برای ربات طراحی کرد و به صورت خودکار اهداف و مسیرهای برنامه‌ریزی شده را انجام داد.

۳-۶ شبیه سازی و نتایج

برای اثبات درستی الگوریتم پیشنهاد شده در سینماتیک معکوس به همراه روش انتقال، بادر نظر گرفتن شرایط و ویژگی‌های ذکر شده، در این بخش چند سری آزمایش در شبیه‌سازی توسط کامپیوتر انجام شده است. در ابتدا، دنبال کردن یک مسیر منحنی در فضای کاری ربات، طرح‌ریزی شده است و مکان سر عملگر انتهایی با مسیر منحنی تطبیق داده شده تا خطای آن استخراج شود. سپس هدفی مشخص با داشتن جهت‌گیری خاص برای جسم چک شده، و خطای ماتریس‌های دوران جسم و عملگر انتهایی بررسی شده تا صلاحیت این الگوریتم به طور کاملی اثبات گردد. در انتها چند هدف در خارج محدوده‌ی ربات داده شده تا از درستی روش انتقال، تستی صورت پذیرد. برای تمامی اهداف، شرایط فضای کاری و محدودیت‌های آن به همراه فرض نبودن مانع در محیط در نظر گرفته شده و نتایج به صورت نمودار در اختیار گذاشته شده است.

شکل (۳-۳۰) نحوه‌ی شبیه‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌شود که مختصات دلخواه و هدف وارد قسمت سینماتیک معکوس شده و زوایای مفاصل به دست می‌آید، حال این زوایای به دست آمده وارد سینماتیک مستقیم شده تا به صورت مختصات نقطه‌ی انتهایی (مکان و جهت‌گیری گریپر آزاد) تبدیل شود. در انتها خطای الگوریتم پیشنهادی را می‌توان با مقایسه‌ی بین این دو مختصات حساب نمود.

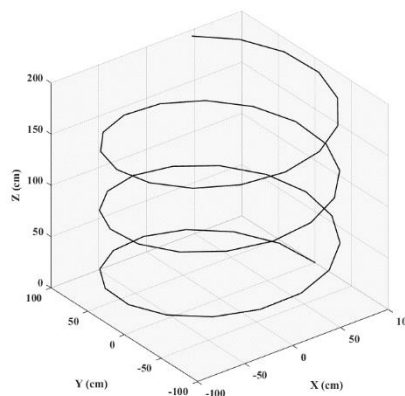


شکل ۳-۳۰ محاسبه‌ی خطای مکان مسیر دلخواه و نهایی

برای آزمایش اول، مسیر مشخصی در فضای کاری تعیین شده است که حداکثر ظرفیت حرکتی ربات در حالت یک پای ثابت را به نمایش گذاشته و در ۴ طرف محور مختصاتی مرجع حرکت نماید.

معادله‌ی (۵۲-۳) این مسیر ورودی و دلخواه را مشخص می‌نماید که منحنی آن در زمان ۲۰ ثانیه به صورت شکل (۳۱-۳) رسم شده است و در داخل فضای قابل دسترس ربات می‌باشد. این نمودار و فرمول مربوط به آن به سانتی‌متر وارد شده است که محسوس‌تر باشند.

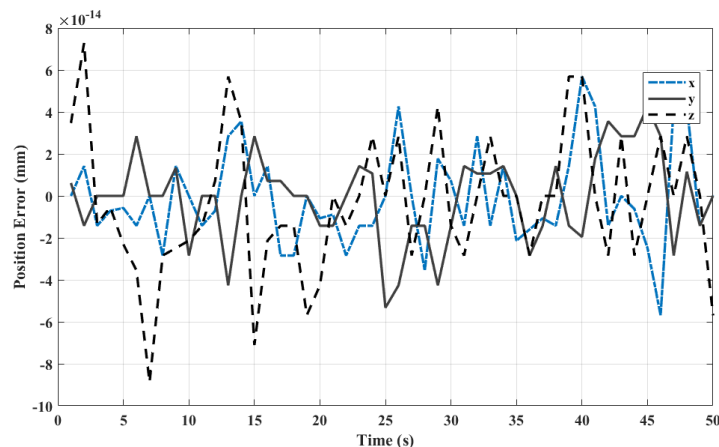
$$\begin{cases} x = 100 \cdot \cos(t) \\ y = 100 \cdot \sin(t) \\ z = 10 \cdot t \end{cases} \quad (۵۲-۳)$$



شکل ۳-۳۱ نمایش منحنی رابط‌س (۵۲-۳) در فضای سه بعدی.

نتایج شبیه‌سازی انجام شده، به عنوان خطای دو مسیر ورودی و خروجی به شرح نمودار شکل (۳-۳۲).

(۳۲) می‌باشد.



شکل ۳-۳۲ خطای مکان آزمایش اول، که خطای کلی مختصات مکان الگوریتم سینماتیک معکوس را نشان می‌دهد.

بر اساس شکل (۳۲-۳)، خطای الگوریتم سینماتیک معکوس، در حدود $8e-14$ میلی‌متر می‌باشد،

لذا می‌توان صحت درستی این روش را تأیید کرد. در آزمایش بعدی یک جسم هدف با جهت‌گیری

دلخواهش به عنوان ورودی به همین الگوریتم داده می‌شود. در انتها اگر ماتریس‌های دوران جسم و گریپر انتهایی، خطای کمی نسبت به هم داشته باشند، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم برای جهت‌گیری اهداف هم صادق است. اما طبق شرایط و قانونی که برای گرفت جسم توسط گریپر مشخص شد (بخش ۳-۳-۳) محورهای مختصاتی z این دو در خلاف جهت هم بودند. لذا لازم است که برای بررسی جهت‌گیری جسم و ربات، این اختلاف هم در نظر گرفته تا مشکلی پیش نیاید. به همین منظور بعد از محاسبه‌ی ماتریس‌های دوران جسم و گریپر، به یکی از آن دو مثلاً ماتریس دوران هدف یک دوران 180° درجه‌ای بیشتر حول یک محوری مثل x داده شده تا مقایسه ماتریس‌های دوران کلی هر دو به خوبی انجام شود و اختلاف نهایی از قانون تبیین شده به‌دست‌آید. ماتریس دوران عملگر انتهایی به صورت رابطه‌ی (۳-۵۳) از [۳۱] به‌دست‌می‌آید (جدول (۳-۱)). رابطه‌ی (۳-۵۴) ماتریس دوران جسم هدف در مختصات مرجع با توجه به دوران اضافی $R_{x,\pi}$ که برای اختلاف فاز دوران گفته‌شده، تعریف می‌شود. حال اختلاف این دو عبارت، خطای جهت‌گیری و جهت‌گیری الگوریتم سینماتیک معکوس را نشان خواهد داد (۳-۵۵). این خطا در اینجا به صورت ماتریس دوران نشان داده شده است که می‌توان با یک تبدیل ریاضی به زوایای سه گانه دوران یک بردار در فضا رسید که در هر دو صورت مهم این است که خطا به سمت صفر رود و نمایش آن به هر فرمتی مانعی نخواهد داشت.

$$R_{\text{Robot}} = R_1^T \cdot R_2^T \cdot R_3^T \cdot R_4^T \cdot R_5^T \cdot R_6^T \cdot R_7^T \quad (۳-۵۳)$$

$$R_{\text{aim}} = R_{z,\theta_{dz}}^T \cdot R_{x,\theta_{dx}}^T \cdot R_{y,\theta_{dy}}^T \cdot R_{x,\pi}^T \quad (۳-۵۴)$$

$$\text{error} = R_{\text{aim}} - R_{\text{Robot}} \quad (۳-۵۵)$$

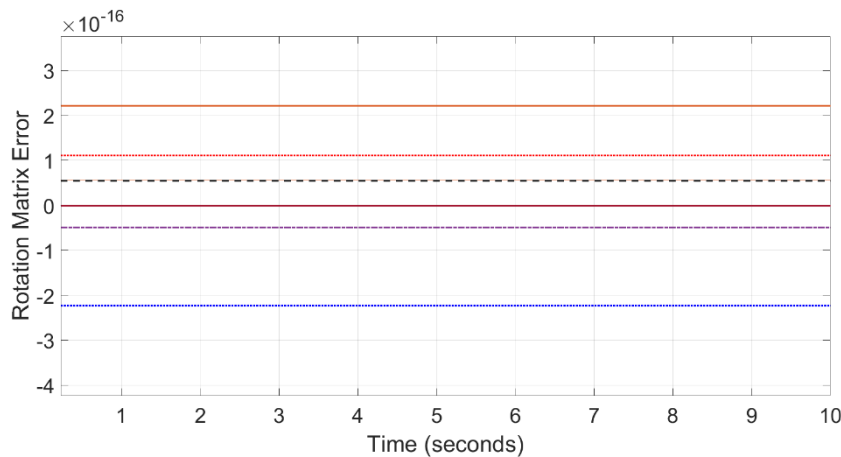
مختصات و جهت‌گیری یک جسم دلخواه، به عنوان هدف بعدی در جدول (۳-۹) ترتیب داده شده است. همچنین شرایط ورود به الگوریتم برای این مختصات هم چک شده و قابلیت رسیدن ربات به این هدف و برداشتن آن، در یک گام تضمین شده است.

جدول ۳-۹ مختصات هدف

coordinate	x	y	z	θ_{dx}	θ_{dy}	θ_{dz}
------------	-----	-----	-----	---------------	---------------	---------------

(mm & deg) -100 1500 1200 40 30 60

نمودار نشان داده شده در شکل (۳۳-۳) خطای جهت‌گیری بر مبنای نحوه‌ی محاسبه‌ای که توضیح داده شد برای هدف مشخص شده نشان می‌دهد. با توجه به مقدار خیلی پایین آن در حد $10e-16$ ، درستی الگوریتم در رسیدن جهت‌گیری به جسم اثبات شده است.



شکل ۳۳-۳ خطای جهت‌گیری هدف به صورت ماتریس دوران

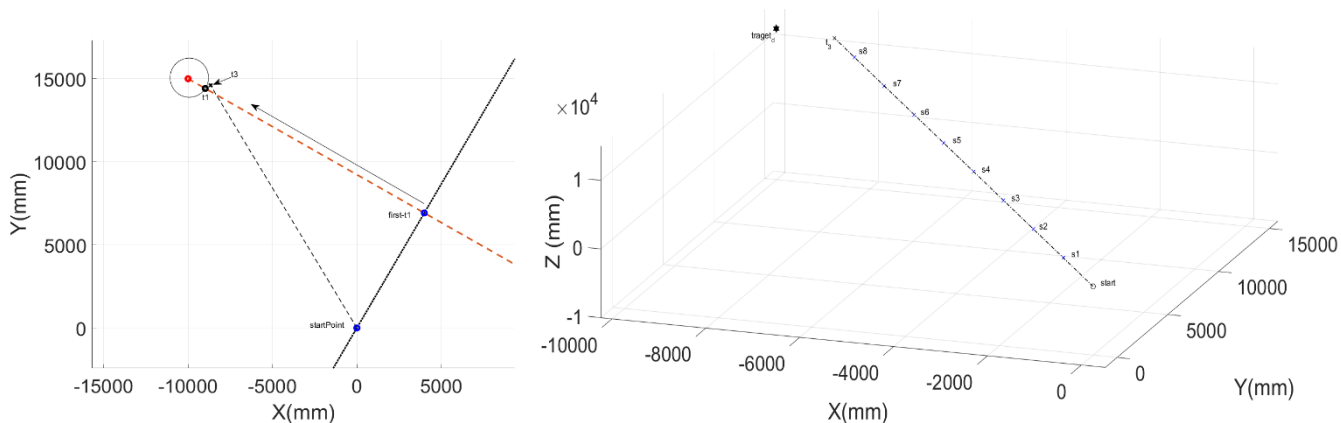
نتایج هر دو شکل نمودار (۳۲-۳ و ۳۳) با هم در مجموع، درستی الگوریتم سینماتیک معکوس را تأیید نمودند. در ادامه آزمایشی برای روش انتقال ذکر شده در بخش (۵-۳) انجام شده است. جدول (۱۰-۳) یک مختصات هدف خارج از محدوده‌ی فضای کاری و جهت‌گیری دلخواهی را نمایش می‌دهد و توسط روشی که برای انتقال مطرح شد بایستی نقاط هر گام به‌دست آید.

جدول ۱۰-۳ مختصات هدفی دور

coordinate	x	y	z	θ_{dx}	θ_{dy}	θ_{dz}
(mm & deg)	-10000	15000	12000	40	30	60

با توجه به تمامی بخش‌های مختلف مبحث انتقال، و روابط بیان شده (۳۹-۳ تا ۵۱)، تمام نقاط از صفر مبدا تا نقطه‌ی کلیدی t_3 به‌دست‌آمده است و در جدول (۱۱-۳) آمده است، بدیهی است که مختصات جهت‌گیری تمام این نقاط تا مرحله‌ی ماقبل آخر صفر خواهد بود. همچنین توسط روابط (۳-۳۶ تا ۳۸)، تمامی مختصات این نقاط به صورت محل به محل تبدیل شده است تا عملیات انتقال قابل اجرا شود. ابتدا نقطه‌ی t_1 طبق بخش ۳-۵-۳ در نزدیکی تصویر هدف در صفحه‌ی $X-Y$ مرجع پیدا

می‌شود و بعد از آن نقاط انتهایی دیگر قابل محاسبه خواهند بود. با توجه به محاسبه‌ی انجام شده برای این هدف، هشت گام به‌دست‌آمده و گام نهم برای رسیدن به t_3 می‌باشد. تا اینجا عملیات انتقال بود که در گام دهم و نهمی ربات بایستی در حالی که بر نقطه‌ی t_3 ایستاده به هدف نهایی توسط الگوریتم سینماتیک معکوس برسد. با توجه به تبدیل‌های مختصاتی برای هر گام، در گام نهایی مختصات $[1326.85 \ 394.55 \ 0]$ بر حسب میلی‌متر همراه با جهت‌گیری $[40 \ 30 \ 60]$ ، با توجه به روابط (۳-۵۶) و (۵۷) به‌دست می‌آید و وارد سینماتیک معکوس شده تا عملیات به کلی اجرا شود. پس به طور خلاصه می‌توان گفت برای این هدف، ده عدد گام نیاز بود و جزییات آن بیان شد. شکل (۳-۳۴) شکل هندسی عملیات انتقال به صورت سه بعدی و تصویر آن را بر صفحه‌ی مرجع نشان داده و مختصات‌های خروجی در جدول (۳-۱۱) نمایش داده شده است. در پایان برای مطمئن شدن در رسیدن به مقصد، نمودار خطای جهت‌گیری و مکان به شکل (۳-۳۲ و ۳-۳۳) دوباره اجرا شده و نتایج در شکل (۳-۳۵) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۳۴ به‌دست آوردن نقاط هر گام از عملیات انتقال

جدول ۳-۱۱ مختصات نقاط به‌دست آمده.

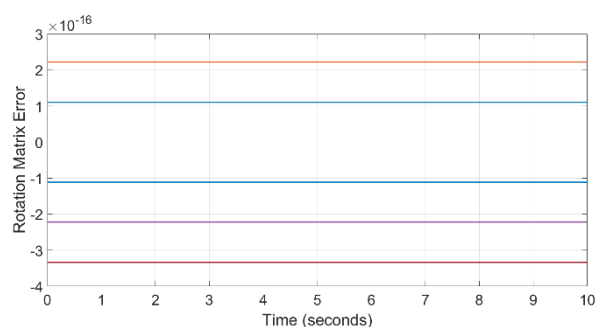
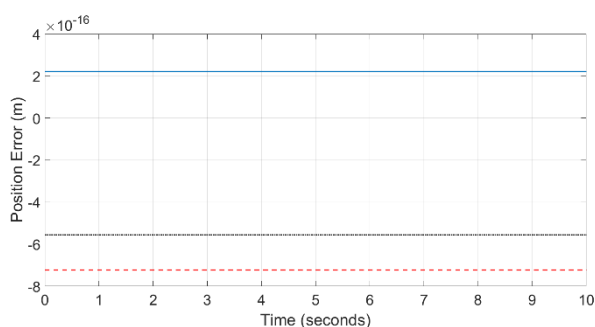
Points	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
s_1	-1000.86088126383	1685.43403505495	1384.77059827041
s_2	-2001.72176252766	3370.86807010990	2769.54119654082
s_3	-3002.58264379149	5056.30210516485	4154.31179481122

s_4	-4003.44352505531	6741.73614021980	5539.08239308163
s_5	-5004.30440631914	8427.17017527475	6923.85299135204
s_6	-6005.16528758297	10112.6042103297	8308.62358962244
s_7	-7006.02616884680	11798.0382453847	9693.39418789285
s_8	-8006.88705011063	13483.4722804396	11078.1647861633
t_1	-8984.30947161678	14413.5908000246	0
t_2	-8823.44013856180	14692.2246582556	0
t_3	-8673.15538773496	14605.4577169106	12000

روابط (۵۶-۳ و ۵۷) از رابطه‌های (۳-۳۶ تا ۳-۳۸) استخراج شده‌اند.

$$\mathbf{r}_{t_3}^{\text{target}} = \mathbf{r}_0^{\text{target}} - \mathbf{r}_0^{t_3} \quad (۵۶-۳)$$

$$\mathbf{R}_{t_3}^{\text{target}} = \mathbf{R}_0^{\text{target}} \cdot (\mathbf{R}_0^{t_3})^T \quad (۵۷-۳)$$



شکل ۳-۳۵ خطای مکان و جهت‌گیری برای گام نهایی عملیات انتقال

آزمایش اول برای یک مسیر منحنی شکل طراحی شده بود سپس در آزمایش بعدی رسیدن به جهت‌گیری مدنظر هدف اصلی بود و در آزمایش انتقال رسیدن به هدفی خارج از مکان و جهت‌گیری تعریف شده برای ربات بود. براساس نتایج به‌دست‌آمده، شبیه‌سازی با موفقیت انجام شده و در نتیجه الگوریتم سینماتیک معکوس و انتقال به درستی عمل می‌کنند.

فصل چهارم: مدل سازی دینامیکی ربات و معادلات حرکتی به همراه اثبات آن

نمونه پژوهش‌های کاملی که در رابطه با یک ربات صنعتی و یا در رابطه با مدل‌های دینامیکی و سینماتیکی ربات‌های مختلفی در فصل اول معرفی شد که می‌توان به مراجع [۲۵-۳۰] اشاره کرد. در اکثر این تحقیقات مدل دینامیکی ربات مد نظر با کمک هندسه و سینماتیک آن، به منظور بررسی کنترل ربات به دست آمده است. این امر نشان می‌دهد که داشتن معادلات حرکتی و مدل‌سازی دینامیکی هر ربات امر کلیدی در سینماتیک و کنترل ربات می‌باشد و لازمه‌ی این گونه پژوهش‌ها است. شبیه‌سازی دینامیکی و همچنین تحقیقاتی فراتر از محاسبات هندسی سه بعدی برای به‌دست‌آوردن سینماتیک ربات بررسی شده است؛ مشاهده می‌شود مقالات و پژوهش‌ها به سمت کاربردی کردن ربات بازویی و شبیه‌سازی در شرایط تعریف مسأله پرداخته‌اند. مثلاً می‌توان از بازوهای رباتیک فضایی در عملیات‌های پهلوگیری و طراحی و شبیه‌سازی مانورهای فضایی در ایستگاه فضایی و سفینه‌های مورد نظر استفاده نمود که پیشتر اشاره شد.

در این پژوهش معادلات دینامیکی به کمک روش لاگرانژ به‌دست آمده است. برای این منظور ابتدا با کمک بردارهای به‌دست آمده و طراحی شده از بخش سینماتیک، برای هر بازو سرعت‌های خطی و زاویه‌ای به دست آمده سپس با استفاده از ممان اینرسی‌های تعریف شده و جرمی که برای هر بازو به صورت پارامتری تعیین شده‌اند، انرژی جنبشی و پتانسیل کل ربات محاسبه شده است. همین‌طور محاسبه‌ی فرم لاگرانژ و مشتقات مختصات‌های تعمیم‌یافته به کمک نرم افزار میپل^۱ و ماتریس‌های بزرگ و حجیم معادلات حرکتی به‌دست آمده است. سپس با مدل‌سازی ربات در شبیه‌ساز سیم‌اسکیپ^۲ نرم‌افزار متلب^۳، درستی و صحت معادلات تأیید شده است. این معادلات در بخش کنترل به عنوان سیستم ربات استفاده می‌شوند. استفاده از مدل سیم‌اسکیپ برای اثبات درستی معادلات دینامیکی مرسوم بوده چنانکه در مرجع [۶۷]، به عنوان نمونه این کار انجام شده است. در این پژوهش بازوی ماهر

^۱ Maple

^۲ Simscape

^۳ Matlab

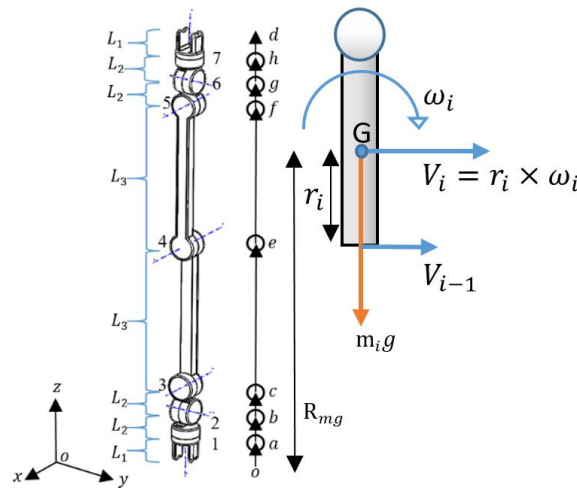
دو درجه آزادی به همراه ساختار شانه هیدرولیکی، هر دو در این محیط شبیه‌سازی شده‌اند و به صورت گام به گام تمام جزییات و نحوه‌ی چینش قطعات کنار هم به همراه توابع تعریف آن‌ها بیان شده است. در یک تحقیق مشابه [۶۸] نمونه‌های سیستم‌های دیگری شبیه سازی شده، مانند خودرو و یا سیستم تعلیق آن که به منظور بررسی این مدل شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای مختلف، انجام شده است. همچنین مانند مقاله‌ی [۶۹] می‌توان دینامیک حرکت یک انسان که به صورت دو پا راه می‌رود را شبیه‌سازی نمود که برای شبیه‌سازی ربات‌های دو پا بسیار عالی و مفید می‌باشد.

۴-۲ مدل سازی دینامیکی

نمای اصلی ربات اروپا در فصل ۲ در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. به علت عدم وجود جاذبه در مدار ایستگاه فضایی، ابعاد این ربات بسیار بزرگ بوده که در این پژوهش ابعاد آن کوچکتر و در محیطی با جاذبه‌ی زمین در نظر گرفته شده است. سرعت‌ها ممان اینرسی و پارامترهای دیگر به صورت ایده آل و مرکز هر جسم در مرکز هندسی آن فرض شده و به صورت کامل بدون جزییات هندسی خاصی در نظر گرفته شده است. همچنین یک انتهای آن ثابت و انتهای دیگر آن به عنوان یک بازوی آزاد به جای خود گریپر در نظر گرفته شده، و تمام بازوها طبق شکل (۴-۱) در حالت اولیه به صورت ایستاده و عمودی محسوب شده‌اند تا معادلات دینامیکی در بهترین شکل ممکن به دست آیند. در این حالت نیروی گرانشی بر تمام بازوان اعمال شده است و هر سرعت زاویه‌ای هر بازو وابسته با بازوان دیگر خواهد بود.

در این بخش انرژی جنبشی و پتانسیل هر لینک با توجه به قرار گرفتن لینک‌ها در فضای سه‌بعدی دلخواه به دست آمده است، سپس توسط روش لاگرانژ در بخش بعدی معادلات حرکت استخراج می‌شوند. شکل (۴-۱) نمایی از تمام ۸ بازوی در نظر گرفته شده ربات را می‌بینید که با توجه به تقارن و حالت پرجاری بودن ربات، طول هر بازو در سمت دیگر تکرار می‌شود. همچنین بردارهای آزادی برای نمایش این بازوان در نظر گرفته شده‌اند که به تفصیل در بخش سینماتیک در رابطه با آن‌ها صحبت شد. در این بخش برای هر لینک یک دیاگرام نیرویی در نظر گرفته شده که نشان می‌دهد مرکز جرم

هر بازو به همراه مفصل متصل به آن دقیقاً مرکز هندسی آن در نظر گرفته شده و اندازه‌ی طول عمودی این مرکز از مرکز مختصات برای به دست آوردن انرژی پتانسیل استفاده خواهد شد. سرعت هر لینک هم با توجه به سریالی بودن ربات و اتصال پشت سرهم بازوها، بر اساس مجموع سرعت مفاصل قبل خود و سرعت چرخشی خود لینک حساب می‌شود که برای انرژی جنبشی محاسبه شده است.



شکل ۴-۱: دیاگرام هندسی ربات به همراه نیروها و سرعت‌ها

پارامتر V_i سرعت هر لینک بوده که از ضرب خارجی فاصله مرکز دوران هر لینک تا مرکز جسم در سرعت زاویه‌ای ω_i هر لینک به صورت جداگانه به دست می‌آید. همانند به دست آمدن سینماتیک مستقیم، مختصات هر لینک با توجه به دوران مفاصل قبلی خود، در ماتریس‌های دوران قبل خود ضرب شده بود؛ در اینجا سرعت زاویه‌ای هر لینک در ماتریس‌های دوران مفاصل از قبل ضرب شده و سرعت زاویه‌ای هر لینک، مجموعه‌ای از سرعت‌های زاویه‌ای لینک‌های قبل خود را دارا است. به علت آنکه لینک‌ها به صورت سری بوده و تحرک همه‌ی آن‌ها در نظر گرفته شده است. برای جزییات بیشتری در مورد تأثیر چرخش سرعت لینک‌های سری بر روی همدیگر می‌توان به مرجع [۷۰] مراجعه نمود. در این مرجع به صورت کامل در رابطه‌ی جزییات دینامیکی یک بازوی دو درجه آزادی به روش‌های نیوتن اولر و لاگرانژ بحث شده است؛ همچنین در مورد ممان اینرسی‌ها و سرعت‌های زاویه‌ای برای هر لینک و اتفاقاتی که برای دوران آن‌ها رخ می‌دهد بیشتر توضیح داده است.

ممان اینرسی برای هر لینک به صورت معادله (۱-۴) در نظر گرفته شده است و در فرمول‌ها به صورت پارامتری گنجانده شده است که هر لحظه بتوان با تغییر پارامترهای هندسی آن را تغییر داد.

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{x_i} & 0 & 0 \\ 0 & I_{y_i} & 0 \\ 0 & 0 & I_{z_i} \end{bmatrix} \quad (۱-۴)$$

انرژی پتانسیل برای هر لینک در رابطه‌ی (۲-۴) و در مجموع به صورت K_{1-8} به دست می‌آید.

$$K_i = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot g \cdot R_i \quad (۲-۴)$$

در معادله فوق، R_i فاصله مرکز مختصات تا مرکز جرم هر لینک را در امتداد محور Z نشان می‌دهد. m_i جرم هر لینک به صورت جداگانه است و در پایان تمام انرژی‌های پتانسیل به دست آمده برای کل لینک‌ها با یکدیگر جمع می‌شوند. انرژی جنبشی هر لینک؛ برای محاسبه این انرژی نیاز به داشتن سرعت و ممان اینرسی هر لینک می‌باشد تا با استفاده از رابطه‌ی (۴-۴) انرژی جنبشی به دست آید. پارامتر V_n استفاده شده در این رابطه، سرعت هر لینک در کنار سرعت‌های لینک‌های قبلی خود می‌باشد. برای به دست آوردن ممان اینرسی هر لینک در مختصات مرجع، عبارت شماره (۳-۴) تعریف شده است، زیرا تمام عبارت‌ها نسبت به دستگاه مرجع به دست آمده است و در این رابطه M_R ماتریس-های دوران است که برای هر لینک قابل محاسبه می‌باشد.

$$I_G = M_R \cdot I_i \cdot M_R^T \quad (۳-۴)$$

$$T_i = \frac{1}{2} \cdot \left(m_i \cdot (V_n^T \cdot V_n) + \omega_i^T \cdot I_G \cdot \omega_i \right) \quad (۴-۴)$$

در پایان T_{1-8} ، انرژی جنبشی کلی ربات از مجموع تمام انرژی‌های به دست آمده، محاسبه می‌شود. با داشتن انرژی جنبشی و پتانسیل کلیه لینک‌ها می‌توان رابطه‌ی لاگرانژین (۵-۴) را تشکیل داد. سپس برای به دست آوردن معادله‌ی حرکتی ربات به این روش، تمامی زوایا، سرعت و شتاب زاویه‌ای موجود در این عبارت تغییر پارامتر داده می‌شوند و به عنوان مختصات تعمیم یافته تبیین می‌گردند.

$$K_{1-8} + T_{1-8} = E_{1-8} \quad (۵-۴)$$

۴-۳ معادلات حرکتی

با داشتن انرژی جنبشی و پتانسیل کلیه لینک‌ها می‌توان رابطه‌ی لاگرانژین (۴-۶) را تشکیل داد. سپس برای به‌دست آوردن معادله‌ی حرکتی ربات به این روش، تمامی زوایا، سرعت و شتاب زاویه‌ای موجود در این عبارت تغییر پارامتر داده می‌شوند و به عنوان مختصات تعمیم یافته تبیین می‌گردند.

$$L = T_{1-8} - K_{1-8} \quad (۴-۶)$$

مکان زاویه‌ای هر مفصل به همراه مشتق آن‌ها به عنوان مختصات تعمیم یافته و به منظور به دست آمدن فرم لاگرانژ در رابطه‌ی (۴-۷) تعریف شده‌اند. همینطور ارتباط بین این پارامترها و گشتاور ورودی به سیستم معادلات حرکتی در کنار هم در رابطه‌ی (۴-۸) آمده است. در این حالت که تعداد مختصات تعمیم یافته برابر با تعداد درجه‌ی آزادی سیستم می‌باشد، فرم لاگرانژ تشکیل شده به صورت کاملی حرکت سیستم را تعریف می‌کند. فرم معادله‌ی لاگرانژ به صورت رابطه‌ی (۴-۸) معرفی می‌شود [۳۱].

$$q_i = \theta_i, \dot{q}_i = \omega_i, \ddot{q}_i = \alpha_i \quad (۴-۷)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = \tau_i \quad (۴-۸)$$

در اینجا هفت مختصات تعمیم یافته به همراه گشتاورهای ورودی وجود خواهد داشت. همچنین معادله‌ی (۴-۶) که به طور کلی به دست آمده را در این عبارت با توجه به تغییر پارامتر جدید، جایگذاری شده است. می‌توان گفت به طور کلی معادلات ربات به دست آمده است اما باید به فرم بهتری نوشته شود. بر اساس تعریف کلی معادله‌ی حرکت سیستم‌های رباتیک باید به شکل رابطه‌ی شماره (۴-۹) باشد [۴۸ و ۵۴ و ۵۷-۵۸ و ۶۰]، اما معادله‌ی به دست آمده برای ربات مد نظر که روند آن بیان شد به شکل رابطه‌ی (۴-۱۰) به دست آمده است، زیرا عبارات غیرخطی و طولانی تشکیل شده توانایی تفکیک قسمت $G(q)$ و یا $\dot{q}$ از ماتریس $C(q, \dot{q})$ را ندارد و اصلاً عباراتی قابل تفکیک به این فرم، در معادله‌ی مد نظر این پژوهش یافت نشده است. علت آن غیرخطی بودن شدید و حجیم بودن معادله در این تعداد درجات آزادی می‌باشد، در حالی که در سیستم‌های رباتیک مشابه با درجات کمتر می‌توان این عبارات را تفکیک کرد. به هر حال مشکل خاصی رخ نداده و تمامی عبارات معادله‌ی (۴-۸) به جای سه بخش

به دو بخش اصلی در رابطه‌ی (۴-۱۰) قابل تفکیک بوده و چیزی حذف نشده است. به عبارتی قسمت $G(q)$ و تفکیک $C(q, \dot{q})$ و $\dot{q}$ این معادله همگی در ماتریس $N(q, \dot{q})$ معادله‌ی شماره (۴-۱۰) آمده اند، که در طراحی سیستم کنترلی هیچ تغییری ایجاد نمی‌کند. حتی در برخی از پژوهش‌ها مثل [۵۳] اطلاعاتی از عبارت $G(q)$ ماتریس گرانشی سیستم خود نداشته‌اند و آن را به عنوان نامعینی در نظر گرفته‌اند تا با کمک تخمین‌گر و یا کنترل تطبیقی آن عبارات حذف شده را در نظر بگیرند. این در حالی است که در این پژوهش، هیچ عبارتی حذف نشده و در قسمت بعدی این معادلات برای این سیستم اثبات می‌شوند.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (۴-۹)$$

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau \quad (۴-۱۰)$$

در معادله‌ی سیستم به دست آمده، q بردار مختصات تعمیم یافته به عنوان ماتریس زوایای مفاصل هفت‌گانه می‌باشد. τ بردار کنترلی اعمالی به سیستم یا گشتاورهای ورودی به مفاصل هستند، $M(q)$ ماتریس اینرسی و $N(q, \dot{q})$ بردار نیروهای کوریولیس، گریز از مرکز و عبارات دیگر شامل نیروهای گرانشی می‌باشند. رابطه‌ی (۴-۱۱) تعداد مختصه‌های هر ماتریس را بیان می‌کند که به علت حجم زیاد از آوردن عبارات اصلی آن‌ها خود داری شده است. ماتریس M هفت در هفت بوده و فقط مکان زاویه‌ای پارامتر اصلی آن می‌باشد. ماتریس C و τ هم هفت سطر در یک ستون می‌باشد.

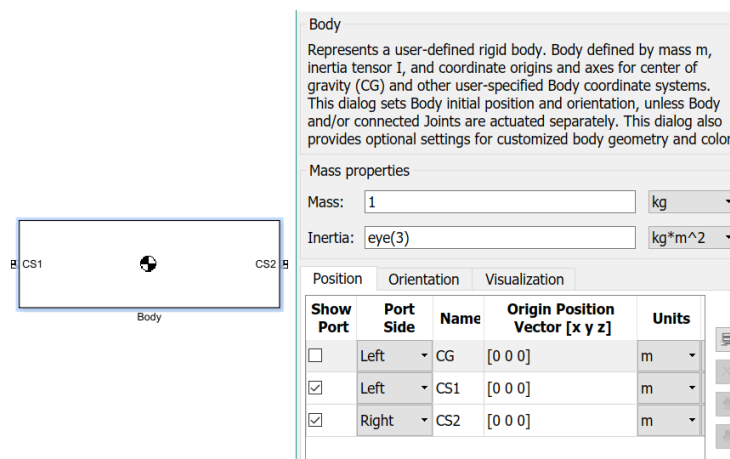
$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{71} & \cdots & m_{77} \end{bmatrix}, N(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_7 \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_7 \end{bmatrix} \quad (۴-۱۱)$$

حال که معادله‌ی سیستم به دست آمده کافی است که سیستم به کمک نرم افزار متلب شبیه سازی شود و با معادلات به دست آمده مقایسه گردد تا صحت درستی آن‌ها نمایان شود.

۴-۴ تشکیل سیستم رباتیک با کمک بلوک‌بندی سیم اسکپ

شبیه‌سازی با محیط شبیه‌ساز مکانیکی در قسمت سیم‌اسکپ نرم افزار متلب انجام شده است. در حال حاضر دو نسل اول و دوم برای این قسمت در محیط متلب وجود دارد که در این پژوهش از نسل اول

استفاده شده است. ابتدا چند بلوک مورد نیاز تعریف شده و به کمک آن‌ها ربات شبیه‌سازی می‌شود. شکل (۲-۴) نمایانگر بلوک *body* به منظور شبیه‌سازی هر جسم دلخواه در محیط مکانیکی سیم اسکپ استفاده می‌شود. از این بلوک به تعداد کافی به عنوان لینک‌های ربات استفاده شده است. که می‌توان مشخصاتی از نظیر جرم و ممان اینرسی هر لینک به همراه مختصات مرکز جرم و ابتدا و انتهای آن را بنا به شکل (۲-۴) مشخص نمود. حتی به صورت جزییات بیشتر می‌توان جهت گیری اولیه و نمونه نمایش لینک را هم در این بلوک مشخص نمود. کافی است که در قسمت شبیه‌ساز، ابتدا و انتهای این بلوک را به مفاصل و لینک‌های دیگر وصل نموده تا یک سیستم چند جسمی^۱ تشکیل گردد.



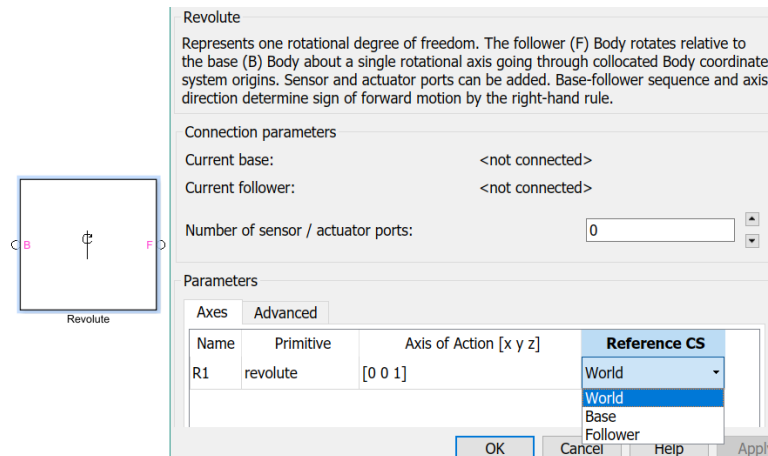
شکل ۲-۴ بلوک جسم به منظور استفاده به عنوان لینک‌های ربات

بلوک مهم دیگری که در این بخش معرفی می‌شود، مفصل چرخشی می‌باشد. برای شبیه‌سازی مفاصل هفت‌گانه ربات از این بلوک استفاده شده است، چنان‌که در شکل (۳-۴) مشاهده می‌شود می‌توان به دو سر آن که نماد B و F به عنوان پایه و دنباله‌رو^۲ می‌باشد دو لینک متصل نمود که یکی به عنوان پایه، مفصل بر روی آن سوار شده و با چرخش مفصل، لینک دیگر به عنوان دنباله‌رو بچرخد. همچنین می‌توان محور چرخش و سیستم مختصاتی چرخش را برای این مفصل تعیین کرد. که البته مرجع دوران را می‌توان در مختصات کلی و یا وابسته به لینک‌های قبل و بعد مشخص نمود. با توجه به اینکه مفاصل ربات مدنظر در این پژوهش ابتدا بر حول راستای محورهای مختصاتی مرجع دوران دارند، و بعد از آن

^۱ Multibody

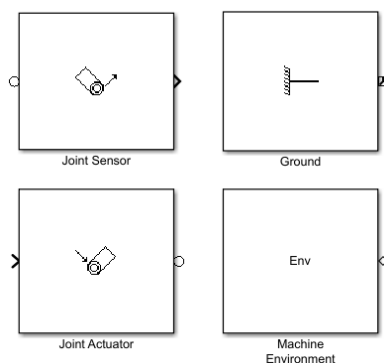
^۲ Base and follower

به خاطر سری بودن محور دوران آن‌ها به یکدیگر وابسته خواهند بود، از حالت پایه به نحوی که هر مفصل به لینک قبلی خود متصل است، به عنوان مرجع مختصات دوران استفاده می‌شود. در حالی که می‌توان طور دیگری هم طراحی و تعریف نمود و درنهایت به یک جواب رسید.



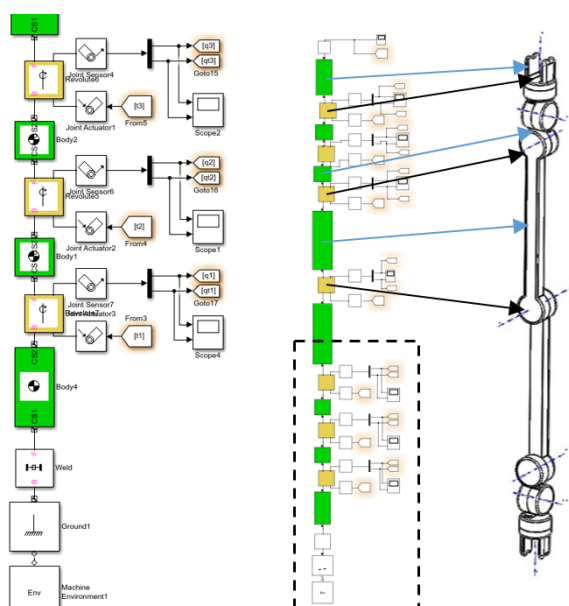
شکل ۴-۳ بلوک مفصل چرخشی ساده

نمونه بلوک‌های پر کاربرد دیگری هم استفاده می‌شود که فقط چند نمونه مهم‌تر آن توضیح داده می‌شوند. در شکل (۴-۴)، چهار نمونه از بلوک‌های استفاده شده معرفی می‌شوند. به ترتیب بلوک زمین، برای مشخص کردن محل متصل شدن ربات به زمین و صفر مختصات پایه می‌باشد. بلوک سنسور مفصل، می‌تواند به مفاصل متصل شده و اطلاعاتی نظیر مکان، سرعت و شتاب زاویه ای مفاصل را به عنوان خروجی نشان دهد. بلوک *Env* به عنوان محور اصلی شبیه سازی مکانیکی و اطلاعات محیطی استفاده شده، است. در این بلوک می‌توانید بردار گرانش در محیط را به صورت دلخواه مشخص کرده و شبیه سازی محیطی که مد نظر است را انجام دهید. در نهایت بلوک عملگر مفصل، که می‌توان نیرو و گشتاور مدنظر را مستقیم به مفصل مورد نظر انتقال دهید. البته با کمک بلوک‌های دیگری، می‌توان این اطلاعات را به فرم‌های دیگر تبدیل و قابل نمایش نمود. همچنین سنسورهای مشابه برای لینک‌ها معرفی کرده تا مختصات آن را نمایش دهند و یا بلوک‌هایی به عنوان اصطکاک و نیروی خارجی به مفاصل و لینک‌ها اعمال نمود که در این قسمت از آن چشم پوشی شده است.



شکل ۴-۴ بلوک‌های پر کاربرد و مهم دیگر

بعد از آشنایی اولیه با این بلوک‌ها و نحوه‌ی کار با آن‌ها، شبیه‌سازی سیستم اصلی توسط ترکیب مناسبی از آن‌ها انجام شده است و از بیان جزئیات بیشتر در ارتباط با نحوه‌ی چینش بلوک‌ها خودداری می‌شود. شکل (۴-۵) مفاصل و لینک‌های ربات به طور کلی بلوک بندی شده است. همچنین ورودی و خروجی هر مفصل تعیین شده تا بردارهای ورودی و خروجی شبیه‌سازی قابل اعمال شوند. چنان چه که توضیح داده شد در ابتدا بلوک‌های زمین و محیط در ابتدا مشخص شده، همچنین لینک اول به عنوان گریپر ثابت با یک بلوک *weld* به زمین جوش داده شده است و باقی مفاصل و لینک‌ها به ترتیب مدنظر، به صورت عمودی در حالت اولیه در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۴-۵ نمای کلی از مدل‌سازی ربات در قسمت سیم‌اسکیپ مکانیک متلب، تصویر سمت راست بزرگ شده‌ی قسمت مستطیل نقطه‌چین مشخص شده در شکل می‌باشد. بلوک‌های زرد نماد مفاصل، سبز نماد لینک‌ها است.

اطلاعات طول لینک‌ها و مختصات ابتدا و انتها به همراه مرکز جرم و ممان اینرسی و جرم کلی هر کدام به مانند آنچه که برای معادلات دینامیکی به دست آمده در نظر گرفته شده، به عنوان پارامترهای عددی بایستی یکسان داده شوند. برای مفاصل محور دوران به ترتیب دوران‌های بخش قبل در سینماتیک ربات، منظور شده است.

۴-۵ مقایسه مدل سازی ها و نتایج شبیه سازی

معادله‌ی دینامیکی سیستم به صورت رابطه‌ی (۴-۱۰) به دست آمده است که بایستی با مدل‌سازی انجام شده در قسمت سیم اسکپ مقایسه شود تا صحت و درستی آن به منظور استفاده برای طراحی کنترل‌کننده در بخش بعد میسر گردد. لذا کافی است این معادلات به دست آمده به همراه پارامترهای هندسی و دینامیکی دیگر در محیط سیمولینک^۱ متلب شبیه‌سازی شود و میزان ورودی یکسانی مانند گشتاور ورودی به مفاصل، به هر دو مدل سازی با شرایط یکسان وارد گردد. سپس نتایج خروجی هر دو سیستم، که به عنوان زوایای مفاصل یا همان مختصات تعمیم یافته می‌باشد، با یکدیگر مقایسه شود و اگر نتایج یکسان بود، درستی و صحت معادلات نمایان می‌گردد.

برای بیان صحت و درستی، از سینماتیک ربات استفاده می‌شود. به دو سیستم معادلاتی و شبیه‌ساز سیم اسکپ، گشتاورهای دلخواهی به ترتیب به مفاصل داده شده است و بردار مکان انتهای آزاد ربات برای سیستم معادلاتی از طریق سینماتیک مستقیم و برای شبیه‌ساز سیم اسکپ از طریق سنسور تشخیص مکان در فضای سه بعدی به دست می‌آید. اگر دو سیستم معادل هم باشند، این دو بردار مکان خروجی بایستی یک میزان را نشان دهند. پس می‌توان خطای این دو سیستم دینامیکی را اختلاف بین دو بردار خروجی در نظر گرفت که بر حسب متر بیان می‌شود. البته شاید بتوان خطای معادلات حرکتی به دست آمده برای یک سیستم را نسبت به واقعیت، به شیوه‌های دیگری بیان نمود؛ که در این پژوهش باتوجه به سری بودن ربات و امکان خطای زیاد در گشتاورهای عملگرهای هفت‌گانه، اگر به این روشی که بیان شد خطا پایین به دست آید، بهترین و قابل قبول‌ترین روش مقایسه با تقریب بسیار عالی به دست

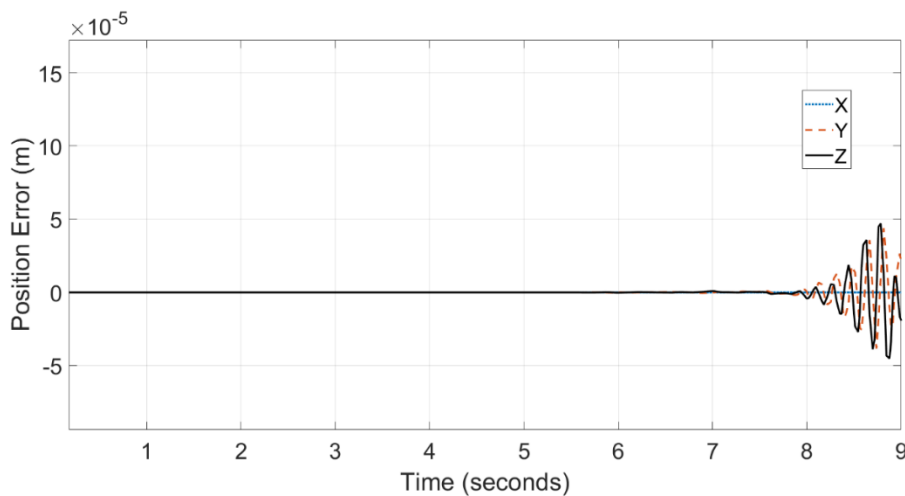
¹ Simulink

آمده است. البته باید در نظر داشت که خود سیستم شبیه‌ساز سیم‌اسکیپ با توجه به قابلیت اضافه کردن جزئیات بسیاری، هنوز با واقعیت فاصله خواهد داشت چون این شبیه‌سازی‌ها به صورت کامپیوتری انجام می‌شود. البته تمام شبیه‌سازی به صورت ایده‌آل و به دور از اغتشاشات محیطی و نامعینی خاصی انجام شده است. به‌منظور جلوگیری از خطای زیاد هنگام وارد شدن تمام گشتاورها با هم‌دیگر درون سیستم، به علت متفاوت بودن نحوه‌ی محاسبات و الگوریتم‌ها در دو مدل سیستم در هنگام شبیه‌سازی، گشتاورها را به صورت مرحله‌ی به هر دو سیستم وارد شده‌اند که هیچ تفاوتی در اصل فعالیت ایجاد نمی‌کند. به‌منظور شبیه‌سازی، سه مرحله انجام شده است که نتایج آن در سه نمودار بعد آورده شده است. گشتاور وارد شده در مجموع به مفاصل به صورت رابطه‌ی (۴-۱۲) می‌باشد.

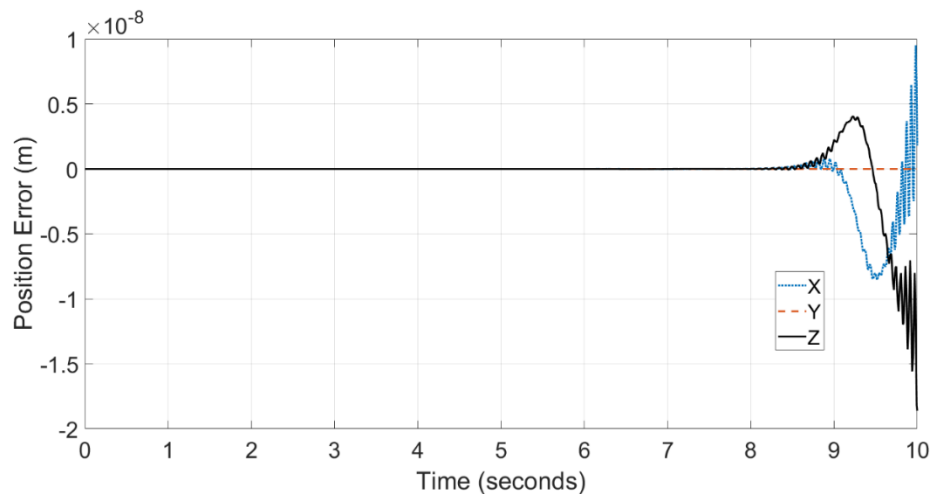
$$\tau = [4 \ 1 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.01 \ 0.5 \ 0.8]^T \quad (۴-۱۲)$$

به‌ترتیب گشتاورهای مفاصلی که حول محور x ، y و z مختصاتی می‌باشند به سیستم وارد می‌شوند،

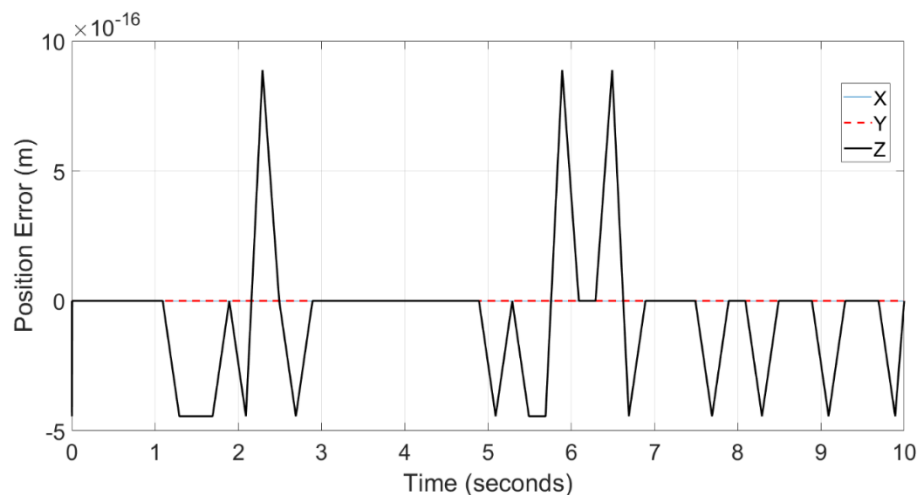
نتایج اختلاف بردار خروجی به شکل نمودارهای (۴-۶، ۷ و ۸) به‌دست می‌آید.



شکل ۴-۶ نمودار خطای مکان دو مدل



شکل ۴-۷ نمودار خطای مکان دو مدل



شکل ۴-۸ نمودار خطای مکان دو مدل

این سه نمودار، سه آزمایش مختلف از نحوه‌ی اثبات صحت معادلات توسط شبیه‌ساز مکانیکی نرم افزار متلب را با توجه به متودی که بیان شد را نشان می‌دهد. نمودار اول (۴-۶) ناشی از فعالیت مفاصل ۳، ۴ و ۵ که حول محور X محور مختصاتی می‌چرخند، می‌باشد. نمودار دوم (۴-۷) برای دو مفصل (۲ و ۶) که حول محور Y می‌چرخند و همین‌طور نمودار سوم (۴-۸) برای مفاصل قبل از دو گریپر (۱ و ۷) می‌باشد. بیان خطا به این صورت به ما این اجازه را می‌دهد که تاثیر خطا را جداگانه و عامل مهمتر آن مشخص‌تر شود، همچنین آزمایش گام به گام باعث جلوگیری از ایجاد خطای زیادی همانطور که گفته شد می‌شود. تمامی خطاها بسیار کم و کاملاً قابل قبول بوده پس می‌توان تطبیق دو سیستم و درستی معادلات حرکتی را نتیجه گرفت اما چند نکته‌ی دیگر وجود دارد. اولین نکته این است که با

گذشت زمان خطا کم کم زیاد شده و وقتی زمان به سمت بینهایت رود خطا هم زیادتر می شود که این ناشی از گشتاورهای ثابتی است که به دو سیستم داده شده است و جزییات اختلاف اجرا در سیم اسکپ در زمانی که دورانها بسیار زیاد شود، نمایان می شود. این در حالی است که در عمل و واقعیت مسیر هدف و مکان جسم هدف به گونه ای است که یک مجموعه گشتاور که با گذشت زمان به صفر (به هدف) می رسند، تغییر می کند و به هیچ وجه برای هیچ عملیاتی، اعمال گشتاور ثابت به تمام مفاصل نیاز نیست و این بدترین حالت است که امتحان شده است. نکته ی دیگر که طبیعی است که مفاصل متصل به بازوان بلندتر، و تعدد بیشتر آنها موجب خطای بیشتر می شود که با مشاهده ی نمودارها، بسیار واضح است که خطای نمودار اول بیشتر است. نکته ی نهایی تقریباً بی خطا بودن مفاصل حول محور Z است که دلیل آن این است که این مفاصل کمترین تأثیر بر جابه جایی مکان دارد. لذا می توان ادعا کرد که معادلات دینامیک حرکت و سینماتیک از هندسه ی شکل به درستی با نمونه ی آزمایش شده توسط شبیه ساز متلب تطابق دارد. در این قسمت پژوهش، هدف به دست آمدن معادلات دینامیکی و تأیید معادلات حرکت بوده است. با مشاهده ی خطای بسیار کم در نتایج بین دو مدل ارائه شده، نتیجه گیری می شود که هدف مورد نظر محقق شده است.

فصل پنجم: کنترل مقاوم بازوی رباتیک فضایی در مقابل نامعینی - های داخلی و خارجی

کنترل بازوهای رباتیک از دیرباز به صورت‌های مختلفی مطرح بوده است و مراجع تخصصی زیادی در رابطه با این بازوها تدوین شده است که در آن به مسائلی چون دنبال کردن مسیر مشخص و دلخواه تا استفاده از مشاهده‌گرها به منظور کاهش استفاده از سنسورها و تخمین نامعینی‌ها بررسی شده است. علاوه بر این موارد تنوع نوع ربات، از نمونه‌های صنعتی معروف تا نمونه‌های آزمایشگاهی خاص و ترکیب مدل‌های مختلف کنترلی و حتی ارائه چندین روش به منظور مقایسه یا بهینه‌سازی در یک پژوهش، مرسوم بوده است. در اکثر این مقالات و پژوهش‌ها وجه اشتراکی خاصی وجود دارد و آن استفاده از مدل معمول سیستم رباتیک به دست آمده از روابط اولر-لاگرانژ برای ربات سریالی n لینکی صلب می‌باشد. با بررسی آن‌ها می‌توان یک مطالعه‌ی مفید بر تاریخچه‌ی کنترل دسته‌ی اصلی سیستم‌های بازوهای رباتیک و نتایج آن‌ها انجام داد و این راه را برای بهبود و نوآوری بیشتر و یا حتی بررسی آن روش‌ها بر سیستمی پیچیده‌تر با بازوها و مفاصل بیشتر مثل همین پژوهش مورد نظر، ادامه داد.

نمونه مقالات و پژوهش‌هایی در زمینه‌ی کنترل رباتیک و مخصوصاً ربات‌های بازویی که مورد این بحث هستند موجود می‌باشد. در اکثر این پژوهش‌ها انواع مختلف کنترل بر روی یک سیستم مشخص مثل بازوی دو درجه آزادی تست شده و نتایج مختلفی به دست آمده است. ابتدا مروری بر نمونه مقالاتی مرتبط با بازوهای رباتیکی سریالی، در رابطه با انواع کنترل و روشی که استفاده کرده‌اند خواهیم داشت. در مرجع [۴۷] دنبال کردن مسیر مشخص و دلخواه برای یک سیستم ربات بازویی به گونه‌ای کنترل شده است که سرعت مفاصل بدون اندازه‌گیری مستقیم، توسط مشاهده‌گر تخمین زده شده است. این مشاهده‌گر برای تخمین سرعت از روش پایداری کلی و نیمه کلی استفاده کرده است. در مرجع [۴۸] از روش کنترل فازی بهینه بر پایه‌ی تنظیم‌کننده‌ی درجه دو خطی بهینه استفاده شده تا سیستم ربات بازویی کنترل گردد. در پژوهش [۲۹] یک مدل بازوی رباتیک مخصوص برای ایستگاه فضایی طراحی و نمونه کوچک و ساده‌ی آن ساخته شده است، در این تحقیق سینماتیک دینامیک و کنترل ربات به همراه مدار الکترونیک و کنترل سروو موتور به تفصیل آمده است که نمونه‌ای از کنترل عملی ساده یک

بازوی رباتیک بوده است. در پژوهش [۴۹] سیستم بازوی رباتیک توسط کنترلر تناسبی- انتگرالی- مشتقی^۱ در نمونه‌های مختلف به همراه آنالیز پایداری آن به طور کامل بررسی شده است. در پژوهش [۵۰]، کنترل مسیر یک بازوی رباتیک در فضا با توجه به نامعینی انجام شده است. در این مقاله، نامعینی‌ها را توسط یک شبکه عصبی تخمین می‌زدند و توسط طراحی یک کنترل تطبیقی با انتخاب ضریب مناسب، دنبال کردن مسیری مشخص را کنترل کرده‌اند. در پژوهش [۵۱] روش کنترلی مود- لغزشی مرتبه اول و دوم با استفاده از طرح ریزی مسیر ربات در محیط، به منظور ممانعت از موانع محیط معرفی شده و بر روی یک ربات صنعتی تست شده است و با استفاده از روش‌های کنترلی مود لغزشی و کنترل تناسبی- مشتقی به صورت ترکیبی ربات مدنظر را کنترل نموده‌اند. نیرویی که توسط سنسور از انتهای بازوی ربات از محیط دریافت می‌شود به همراه مکان انتهای بازو در داخل این کنترل ترکیبی وارد شده تا از برخورد به موانع محیطی صرف نظر گردد. هدف این تحقیق ملاحظات محیطی در فضای کاری ربات برای مسیریابی بهتر ربات در مکانی پر از موانع می‌باشد. همچنین مود لغزشی مرتبه اول و دوم برای بهبود کارایی سیستم استفاده شده‌اند. پژوهش [۵۲] از جمله دسته مقالاتی برای بازوهای راهبر-پیرو می‌باشند که از کنترل مود لغزشی با استفاده از مشاهده‌گر به منظور تخمین خروجی بدون استفاده از سنسور استفاده کرده است. کنترل مود لغزشی برای سیستم رباتیک و یا در طراحی تخمین‌گر، از موضوعات مورد بحث و مهم کنترل سیستم‌های گفته شده می‌باشد که می‌توان به نمونه پژوهش‌هایی در رابطه با آن، اشاره نمود. مقاله‌ی [۵۳]، که توسط یک مشاهده‌گر بر پایه‌ی قانون کنترلی برای یک ربات بازویی به صورتی طرح ریزی شده است که دقت بالا در دنبال کردن مسیر تضمین شده است. در این پژوهش دینامیک نامعلوم، گشتاورهای نامعلوم، نیروهای گرانشی، اصطکاک‌ها، ممان اینرسی‌ها و نویزهای نامعلوم؛ همگی توسط مشاهده‌گر تخمین زده شده و دو نمونه کنترل مود لغزشی بر مبنای استفاده از مشاهده‌گر را برای این کار معرفی نموده است. در این پژوهش یک تخمین‌گر، دینامیک نامعلوم به همراه اغتشاشات خارجی را تقریب می‌زند و با تخمین‌گر دیگری سینماتیک نامعلوم که در

¹ proportional-integral-derivative (PID)

ماتریس ژاکوبین سینماتیک ربات واقع شده را تخمین می‌زند. سپس با ارائه‌ی قانون کنترلی مشخصی هر دو تخمین را در یک سیستم کنترلی لحاظ کرده است. در پژوهش [۵۴] کنترل یک بازوی رباتیک فضایی متصل به یک سفینه قابل حرکت در فضا، همراه با کنترل خود سفینه به روش تطبیقی برگشت پذیر ارائه شده است. ترکیبی از کنترل‌های مقاوم و تطبیقی مختلفی با روش‌های مختلف مثل پایداری لیپانوف، تضمین پایداری سیستم با حضور نامعینی و یا مدل‌های دیگر موجود بر روی بازوهای رباتیک مشابه انجام شده است. پژوهش [۵۶] به بررسی نکات کاملی در حوزه‌ی کنترل غیرخطی پیشرفته ربات‌های بازویی می‌پردازد. در این پژوهش بر روی سیستم رباتیک مشخص، کنترل فیدبک خطی‌ساز، کنترل پیش‌بین و کنترل مقاوم بر روی حالت‌های مختلف بررسی شده است. تحلیل مواردی مثل: تابع هزینه، گارانتی پایداری سیستم در مقابل نامعینی‌ها، تخمینگرهای غیرخطی و پایداری لیپانوف، همگی باعث شده‌اند که پژوهشی کامل و مفید در این زمینه باشد. فرق تخمینگرهای این پژوهش با پژوهش‌های دیگر، غیرخطی بودن و عدم استفاده از مودلغزشی بوده است و با این وجود در مقابل نامعینی‌ها پایدار بوده است. مدل‌های کنترلی و تخمینگر برای سیستم‌های شبیه‌سازی شده توسط مودلغزشی بسیار زمان‌گیر و پرهزینه می‌باشند، مخصوصاً که سیستم از نظر معادلاتی حجیم باشد. در این صورت کوچکترین نامعینی‌ای بسیار بزرگ و غیر قابل جبران می‌باشد. در مقاله [۵۷] کنترل مقاوم برای بازوی رباتیک به روش مودلغزشی به گونه‌ای تعریف شده است که توسط ارائه چند الگوریتم و با استفاده از مدل کنترلی، ضریب تخمینگر را کاهش می‌دهد. تخمینگر به صورت مودلغزشی طراحی شده، لذا کم کردن ضریب آن باعث کاهش هزینه‌ی کنترلی خواهد شد. همین‌طور کنترل تطبیقی و ترکیبی از مودلغزشی و تطبیقی مختلف به همراه مشاهده‌گر را معرفی و در مجموع، پژوهشی کامل را در این زمینه ارائه نموده است. پژوهش [۵۸] کنترل دیجیتال برای یک بازوی شناور در فضا می‌باشد که توسط روش ماتریس معکوس ژاکوبین تعمیم یافته انجام شده است که در حوزه‌ی کنترل بازوهای رباتیک فضایی قرار می‌گیرد که البته با روش پی‌آی دی^۱ کنترل شده است.

¹ PID

در این پژوهش سعی شده است مدل‌های کنترلی مقاوم ارائه شده با تغییرات لازم بر روی ربات مد نظر پیاده‌سازی شود. مدل‌های ارائه شده به صورت غیرخطی و مقاوم در برابر نامعینی‌های سیستمی و محیطی می‌باشد. نامعینی‌ها نظیر ضربه و یا اغتشاش محیط به همراه اصطکاک لغزشی مفاصل و خطای اندازه‌گیری جرم‌ها و ممان اینرسی بازوها بوده است که به سیستم اضافه گشته‌اند. سیستم رباتیک مدنظر، معادلات حرکت بازوی رباتیک اروپا می‌باشد. همچنین این مدل‌های تست شده از کنترل مقاوم بر پایه کنترل فیدبک خطی‌ساز می‌باشد که نتایج قابل قبولی در خطی‌سازی سیستم را دارا می‌باشد. با توجه به نتایج قابل قبول مدل کنترل مقاوم در پایداری و مقابله با اغتشاش، بررسی آن برای این مدل از سیستم به همراه نامعینی‌های متنوع در نظر گرفته شده است. دو روش کلی کنترل مقاوم انتخاب شده است که اولی؛ بر پایه فیدبک خطی‌ساز و تخمین زدن نامعینی می‌باشد که به دو بخش تخمین با استفاده از تضمین پایداری سیستم و تخمین با توجه به قانون کنترلی، بوده است. مزایای این روش علاوه بر پایداری و دنبال کردن مسیر در محدوده‌ی نامعینی زیاد، سریع اجرا شدن آن و عدم اغتشاش زیاد سیگنال کنترلی می‌باشد؛ چون سیگنال مغشوش در عمل باعث ارتعاش زیاد عملکرد و حتی تامین نشدن گشتاور مورد نیاز توسط عملگر می‌باشد. در کنار این دو مدل اول، یک مشاهده‌گر هم برای آن طراحی و بررسی شده است که در زمانی که از سنسور در واقعیت استفاده نشود بایستی از این مدل استفاده گردد. مدل کلی دیگری که انتخاب شده تا با مدل‌های قبل مقایسه گردد، عبارت‌اند از روش مود لغزشی که در اکثر پژوهش‌های از این دست به کار گرفته می‌شود. دو طراحی متفاوت از دو مرجع مختلف برای مود لغزشی به کار گرفته شده است و با توجه به مدل سیستم رباتیک این تحقیق، تغییر داده شده و نامعینی‌های آن به اندازه‌ی مدل کنترل‌کننده‌ی مقاوم تخمین نامعینی همسان گشته است تا شرایط مقایسه مهیا گردد. از ویژگی‌های روش مود لغزشی دقت بیشتر در مسیریابی است که به همراه هزینه‌ی بیشتر کنترلی ارائه می‌گردد. پس چهار مدل طراحی کنترلر مقاوم در مجموع انجام شده است و در قسمت شبیه‌سازی نتایج آن‌ها در حد مقدور به‌دست آمده است. در این صورت علاوه بر آزمایش این کنترلرهای غیرخطی ارائه شده بر سیستم رباتیک مد نظر، ویژگی‌های خود روش‌ها هم با یکدیگر

مقایسه می‌شود. که در صورت لزوم و استفاده در تست واقعی این ربات و یا ربات‌های مشابه بازویی سری، می‌توان با توجه به عملکرد مورد نظر کنترل‌کننده‌ی مناسب را با توجه به نتایج این پژوهش انتخاب نمود. شاید در سیستم‌های ساده‌تر مانند ربات بازویی دو درجه آزادی اکثر روش‌های مقاوم تقریباً عملکرد مناسب و قابل قبولی را نشان دهند اما نکته‌ی مهم در این پژوهش مقایسه و استفاده از چند روش مختلف اما مناسب برای یک بازویی با معادلات پیچیده هفت درجه آزادی بوده است. این پیچیدگی ساختار سیستم و در امتداد آن طراحی کنترل‌کننده غیرخطی که از همان معادلات پیچیده‌ی سیستم استفاده می‌کند، باعث شده است که حتی روش‌های نزدیک مقاوم، با کوچکترین تغییری در ضرایب عملکرد متفاوتی را نسبت به همدیگر داشته باشند. پس در اینجا انتخاب نوع کنترل‌کننده بنا به خواسته‌های ما از سیستم، با توجه به عملکرد متفاوت هر یک، مهم می‌باشد.

۵-۲ آماده سازی سیستم برای طراحی کنترلر

معادله‌ی سیستم از فصل قبل به صورت (۵-۱) می‌باشد.

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau \quad (۵-۱)$$

در طراحی کنترل‌کننده برای این سیستم، در نظر گرفتن نامعینی‌های سیستم چه به صورت داخلی و یا خارجی و هر نوع دیگری از موارد غیر قابل محاسبه، بسیار مهم می‌باشد. به همین منظور ماتریس‌های تعریف شده در سیستم به شکل رابطه‌ی (۵-۲) به دو قسمت مشخص $\overline{M(q)}$ و نامعین ΔM تقسیم شده‌اند [۵۶].

$$\begin{cases} M(q) = \overline{M(q)} + \Delta M \\ N(q, \dot{q}) = \overline{N(q, \dot{q})} + \Delta N \end{cases} \quad (۵-۲)$$

همینطور مابقی نامعینی‌ها به همراه آن‌هایی که مشخص شد، به شکل رابطه‌ی (۳) که مدل ریاضی یک ربات بازویی همراه با نامعینی‌ها [۵۳] است، در نظر گرفته شده‌اند.

$$(\overline{M(q)} + \Delta M)\ddot{q} + \overline{N(q, \dot{q})} + \Delta N + F(\dot{q}) + H(q) = \tau + d \quad (۳-۵)$$

در این رابطه $F(\dot{q})$ نماینده گشتاورهای اصطکاکی مفاصل هستند و $H(q)$ به عنوان نامعینی های دینامیکی سیستم می باشد. d هم به عنوان اغتشاش خارجی ورودی به سیستم در نظر گرفته شده است. می توان تمام نامعینی های بیان شده را به یک سمت معادله (۴-۵) برد تا قسمت نامعلوم از معلوم سیستم جدا شوند. $D(q, \dot{q}, \ddot{q})$ به دست آمده در رابطه ی (۵-۵) به عنوان تابعی از مکان، سرعت و شتاب زاویه ای مفاصل و لینک های ربات که در اصل شامل کمیت های مدل نشده، نامعینی های پارامتری و اغتشاشات خارجی می باشد. این تابع نماینده ی تمام نامعینی ها بوده و معادله ی به دست آمده (۶-۵)، معادله اصلی سیستم می باشد که برای آن کنترل کننده ی مناسب طراحی می شود.

$$\overline{M(q)}\ddot{q} + \overline{N(q, \dot{q})} = \tau - \Delta M\ddot{q} - \Delta N - F(\dot{q}) - H(q) + d \quad (۴-۵)$$

$$D(q, \dot{q}, \ddot{q}) = -\Delta M\ddot{q} - \Delta N - F(\dot{q}) - H(q) + d \quad (۵-۵)$$

$$\overline{M(q)}\ddot{q} + \overline{N(q, \dot{q})} = \tau + D(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (۶-۵)$$

فرم حالت معادله ی (۶-۵) را می توان به شکل رابطه ی (۷-۵) نوشت [۵۶]. در این فرم حالت سیستم به صورت $x = [x_1 \ x_2]^T$ در نظر گرفته شده است که برای به دست آوردن معادلات کنترلی کاربرد دارد و در آن به جای مختصات تعمیم یافته q از x_1 و به جای $\dot{q}$ از x_2 به عنوان مکان و سرعت زاویه ای مفاصل، استفاده شده است.

$$\dot{x} = A(x) + B(x) \cdot u + B(x) \cdot \eta \quad (۷-۵)$$

دو ماتریس $A(x)$ و $B(x)$ به عنوان ماتریس های حالت سیستم به شکل رابطه ی (۸-۵) از معادله ی اصلی سیستم به دست آمده اند. همچنین u همان τ گشتاور ورودی به سیستم است. η هم نماینده عدم قطعیت ها $D(q, \dot{q}, \ddot{q})$ می باشد.

$$A(x) = \left[-\overline{M(x_1)}^{-1} \cdot \frac{x_2}{N(x_1, x_2)} \right], B(x) = \left[\frac{0_{n \times n}}{\overline{M(x_1)}^{-1}} \right] \quad (۸-۵)$$

بردار خروجی y که بردار جابجایی زاویه ای می باشد به شکل رابطه ی (۹) معرفی می شود. در این پژوهش هدف اصلی کنترل حالت مکان زاویه ای ربات بوده است و به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. البته در صورت نیاز می توان با تغییر ماتریس C هر دو کمیت را به عنوان خروجی در نظر گرفت.

$$y = h(x) = C \cdot x, \quad C = [I_{n \times n} \quad 0_{n \times n}] \quad (9-5)$$

۳-۵ کنترل غیر خطی

حوزهی کنترل غیر خطی بسیار گسترده و کاربردهای آن فراتر از مدل‌های ارائه شده می‌باشد، همین‌طور مقایسه و بررسی مدل‌های کنترلی ارائه شده بر روی سیستم‌های متنوع مورد توجه می‌باشد. ابتدا در به دست آوردن قانون کنترلی؛ برای کنترل‌کنندهی فیدبک خطی ساز، نامعینی‌های رابطه‌ی شماره (۷) در نظر گرفته نشده‌اند تا به راحتی قانون کنترلی فیدبک خطی ساز بنا به مرجع [۵۹] به دست آید. سپس با کمک این کنترل‌کنندهی غیر خطی چند مدل کنترل‌کنندهی مقاوم ارائه شده در مرجع [۵۶ و ۵۷] بر روی این سیستم با نامعینی زیاد و مدل‌های متنوع کنترلی تست شده است. نمونه‌هایی از کنترل مقاوم با تخمینگر نامعینی و همچنین مود لغزشی با ارائه یک سطح لغزش مناسب بر روی یک سیستم با نامعینی یکسان مقایسه می‌شود.

۱-۳-۵ کنترل فیدبک خطی ساز

کنترل فیدبک خطی ساز یکی از مهم‌ترین استراتژی‌های طراحی کنترل غیر خطی بوده است. در ارائه این مدل کنترل‌کننده، دینامیک‌های نامعینی‌ها لحاظ نشده‌اند تا به راحتی قانون کنترلی برای خطی کردن ماتریس‌های M و N که قسمت غیر خطی معادلات هستند، به دست آید. سپس بعد از طراحی، این کنترل‌کننده به عنوان پایه‌ای برای نمونه‌های مقاوم استفاده می‌گردد. برای این منظور ابتدا بردارهای خروجی در رابطه‌ی (۵-۱۰) مشخص شده‌اند و سیستم معادله‌ی (۵-۶) به فرم (۵-۱۱) به صورتی نوشته شده است که خروجی و ورودی سیستم هر کدام به یک سمت معادله می‌روند. سپس از مدل کنترل-کنندهی ورودی-خروجی معرفی شده در [۵۹] استفاده می‌شود تا کنترل‌کننده‌ای به فرم (۵-۱۲) تعیین شود. عبارت u را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۵-۱۲) به گونه‌ای تعریف نمود که با جای‌گذاری در عبارات قبل، هیچ عبارت غیر خطی در سیستم نماند و معادله‌ای از خطای سیستمی (۵-۱۳) تشکیل شده که با جای‌گذاری در (۵-۱۲)، در نهایت خطا به سمت صفر میل نماید.

$$\dot{y} = x_2 \rightarrow \ddot{y} = \dot{x}_2 \quad (10-5)$$

$$\ddot{y} = -\overline{M(x_1)}^{-1} \cdot \overline{N(x_1, x_2)} + \overline{M(x_1)}^{-1} \cdot u \quad (11-5)$$

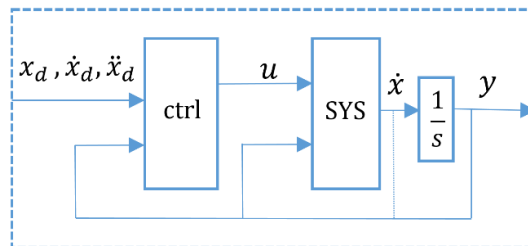
$$u = \overline{M(x_1)} \cdot (v + \overline{M(x_1)}^{-1} \cdot \overline{N(x_1, x_2)}) \quad (12-5)$$

$$v = \ddot{y}_d - K_2 \cdot (\dot{y} - \dot{y}_d) - K_1 \cdot (y - y_d) \quad (13-5)$$

در این روابط K_1 و K_2 ماتریس ضرایب هستند که دینامیک خطا را تنظیم می کنند، با افزایش آن ها می توان زودتر به جواب رسید در حالی که هزینه ی کنترلی بالاتر خواهد رفت. بردار خطای $e = y - y_d$ خروجی که در اصل بردار خطای زاویه ی مفاصل می باشد، به همراه خطای سرعت و شتاب زاویه ای رابطه ی (14-5) را می سازند که از جای گذاری مقدار کنترلی (12-5) داخل معادله سیستم ربات به دست می آید.

$$\ddot{e}(t) + K_2 \cdot \dot{e}(t) + K_1 \cdot e(t) = 0 \quad (14-5)$$

شکل (1-5) دیاگرام کنترلی فیدبک خطی ساز را نشان می دهد، هر دو حالت x_1, x_2 به عنوان فیدبک به مجموعه کنترلی و سیستم معادلات حرکت ربات وارد می شوند. بردار $x_d = y_d$ به عنوان زاویه ی دلخواه مفاصل و مشتق های آن به عنوان ورودی دلخواه به مجموعه وارد می شوند. همچنین مقدار اولیه حالت، داخل انتگرال گیر موجود بعد از باکس سیستم، تعیین می شود.



شکل ۱-۵ دیاگرام کنترلی فیدبک خطی ساز

۵-۳-۲ کنترل مقاوم بر پایه تخمین نامعینی ها

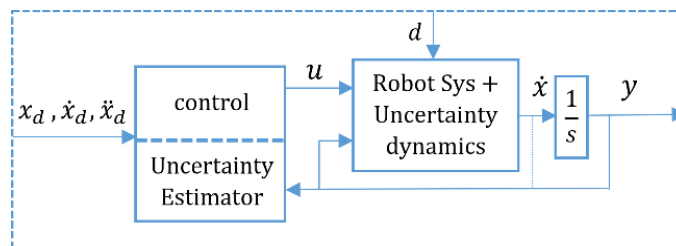
کنترل مقاوم به منظور در نظر گرفتن و کاهش اثرات عدم قطعیت های تعریف شده در رابطه (5-5) بسیار لازم است. همچنین این مدل از سیستم هفت درجه آزادی غیر خطی با معادلات پیچیده و ماتریس های M و N نیازمند کنترل کننده ی غیرخطی قوی و مقاوم می باشد تا ردیابی خطا به سمت صفر هرچه سریعتر و بهینه تر انجام شود. هدف کنترل مقاوم دستیابی به عملکردی پایدار و مطمئن

می‌باشد که معادله‌ی سیستمی (۵-۱۵) را بتواند با توجه به عدم قطعیت η کنترل نماید. کنترل‌کننده‌ای که برای خطی‌سازی در نظر گرفته شده بود (۵-۱۲)، را می‌توان با در نظر گرفتن تخمینی از نامعینی‌ها η_{est} به‌عنوان کنترل‌کننده‌ی جدید برای سیستم (۵-۱۵) معرفی کرد که بتواند علاوه بر خطی‌سازی معادله‌ی غیرخطی سیستم، نامعینی آن را هم خنثی کند. این امر زمانی تحقق می‌بخشد که این تخمین از نامعینی به حد قابل قبولی به نامعینی واقعی نزدیک باشد. برای همین ترم η_{est} کنترل‌کننده‌ی جدید (۵-۱۶) در بخش‌های بعدی با توجه به قوانین کنترلی و پایداری تخمین زده می‌شود.

$$\overline{M(x_1)}\ddot{y} + \overline{N(x_1, x_2)} = u + \eta \quad (۵-۱۵)$$

$$u(t) = \overline{M(x_1)} \cdot ((\ddot{y}_d - K_2 \cdot (\dot{y} - \dot{y}_d) - K_1 \cdot (y - y_d) + \overline{M(x_1)}^{-1} \cdot \overline{N(x_1, x_2)}) - \eta_{est}(t)) \quad (۵-۱۶)$$

با توجه به روان بودن عملکرد این گونه کنترل و وام‌دار بودن آن به کنترل خطی‌ساز، در میان مدل‌های مختلف کنترل مقاوم در پژوهش‌های گوناگون، این مدل [۵۶ و ۶۰] بر اساس تخمین زدن نامعینی‌ها انتخاب شده است. زیرا در این روش ترم‌های غیرخطی زیاد در معادلات کنترلی دخیل نمی‌شوند و سرعت رسیدن به خطای نزدیک به صفر را کاهش می‌دهد. شکل (۵-۲) شماتیک طراحی کنترلر و سیستم به همراه نامعینی‌های داخلی سیستم و اغتشاش خارجی وارد شده به سیستم d می‌باشد. کنترل فیدبک خطی‌ساز نقش مهمی را در این مدل کنترل مقاوم ایفا می‌کند.



شکل ۵-۲ دیاگرام کنترلی مقاوم به همراه بخش تخمینگر نامعینی

۵-۳-۲-۱ تخمین نامعینی براساس تئوری گارانتی پایداری سیستم‌های نامعین

تئوری گارانتی پایداری سیستم‌های نامعین بر پایه روش دوم لیاپانوف می‌باشد [۶۰]. با جایگذاری معادله‌ی (۵-۱۶) داخل (۵-۱۵)، رابطه‌ی (۵-۱۷) به دست می‌آید. در این رابطه خطای نامعینی به

صورت $e_\eta(t) = \eta(t) - \eta_{est}(t)$ تعریف شده است. این خطا باید به سمت صفر میل کند که رابطه‌ی خطی‌سازی شده مانند کنترل‌کننده‌ی فیدبک خطی‌ساز به سمت صفر میل نماید و در نتیجه خطای ردیابی در زمانی قابل قبول صفر شود.

$$\ddot{e}(t) + K_2 \cdot \dot{e}(t) + K_1 \cdot e(t) = \overline{M(x_1)}^{-1} \cdot e_\eta(t) \quad (17-5)$$

کافی است طبق روش تعریف شده برای یافتن تخمین مناسب، در گام اول معادله‌ی (۱۷-۵) به فرم حالت نوشته و سپس از روش پایدار لیپانوف، نامعینی به دست خواهد آمد. رابطه‌ی (۱۸-۵) فضای حالت تشکیل شده از خطای خروجی (ردیابی) و خطای نامعینی می‌باشد. ماتریس‌های $\bar{A}$ و $\bar{B}$ هم به فرم (۱۹-۵) معرفی می‌شوند.

$$\dot{\bar{e}} = \bar{A}\bar{e} + \bar{B}\bar{M}^{-1} \cdot e_\eta \quad (18-5)$$

$$\bar{e} = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, \bar{A} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -K_1 & -K_2 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix} \quad (19-5)$$

تا زمانی که ضرایب کنترلی K_1 و K_2 هر دو مثبت و بزرگتر از صفر باشند، ماتریس $\bar{A}$ هرویتز^۱ می‌باشد. بنابراین برای هر ماتریس Q مثبت معین متقارن، یک ماتریس P مثبت معین متقارن موجود است که رابطه‌ی لیپانوف (۲۰-۵) را ارضا می‌سازد.

$$\bar{A}^T P + P \bar{A} = -Q \quad (20-5)$$

حال تابع لیپانوف منتخب به شکل رابطه‌ی (۲۱-۵) در نظر گرفته شده است. سپس با مشتق‌گیری از آن عبارت $\dot{\bar{e}}$ در آن ظاهر می‌شود که توسط معادله‌ی (۱۸ و ۱۹-۵) جایگزین شده و رابطه‌ی (۲۲-۵) تشکیل می‌شود. پارامتر Γ هم مانند باقی ماتریس‌های در نظر گرفته شده مثبت معین محسوب شده است.

$$V = \bar{e}^T P \bar{e} + e_\eta^T \Gamma e_\eta \quad (21-5)$$

$$\dot{V} = -\bar{e}^T Q \bar{e} + 2e_\eta^T \cdot ((\bar{M}^{-1})^T \bar{B}^T P \bar{e} + \Gamma \dot{e}_\eta) \quad (22-5)$$

¹ Horwitz

برای اینکه پایداری لیاپانوف اثبات شود باید عبارت $\dot{V}$ منفی شود، برای این منظور جمله‌ی اول آن کافی بوده و لازم است جمله‌ی دوم آن صفر شود. لذا رابطه‌ی (۲۳-۵) را برای $\dot{e}_\eta$ جوری تعریف می‌شود که آن جمله‌ی دوم صفر شده و در نتیجه $\dot{V} = -\bar{e}^T \cdot Q \cdot \bar{e}$ همواره منفی نیمه معین خواهد بود و کران دار بودن خطای مسیریابی و نامعینی را تضمین می‌کند. همچنین برای خطای نامعینی؛ تا زمانی که هیچ اطلاعی از متغیرهای نامعینی در دسترس نباشد، می‌توان $\dot{\eta}(t) = 0$ را در نظر گرفت [۷۱]. به همین علت معادله‌ی (۲۴-۵) از (۲۳-۵) نشأت می‌گیرد.

$$\dot{e}_\eta = -\Gamma^{-1}(\bar{M}^{-1})^T \bar{B}^T P \bar{e} \quad (23-5)$$

$$\dot{\eta}_{est} = \Gamma^{-1}(\bar{M}^{-1})^T \bar{B}^T P \bar{e} \quad (24-5)$$

معادله‌ی تخمین نامعینی‌ها را می‌توان به شکل رابطه‌ی (۲۵-۵) با یک انتگرال گیری ساده نشان داد. کافی است این نامعینی به کنترل‌کننده‌ی مقاوم (۱۶-۵) افزوده شود تا سیستم در مقابل نامعینی‌ها پایدار و خطای مسیر به سمت صفر بگراید.

$$\eta_{est}(t) = \int \Gamma^{-1}(\bar{M}^{-1})^T \bar{B}^T P \bar{e}(t) dt \quad (25-5)$$

۵-۳-۲-۲ تخمین نامعینی‌ها بر پایه‌ی مدل قانون کنترلی

از معادله‌ی سیستمی (۶-۵) دینامیک مدل ربات، می‌توان تخمین نامعینی را به شکل رابطه‌ی (۲۶-۵) تعریف کرد. که در آن L یک ماتریس قطری مثبت ثابت می‌باشد [۵۶]. همچنین با فرض $\dot{\eta}(t) = 0$ که جلوتر بیان شد می‌توان به دینامیک خطای نامعینی، یعنی رابطه‌ی (۲۷-۵) رسید.

$$\dot{\eta}_{est}(t) = L \bar{M}^{-1} e_\eta \quad (26-5)$$

$$\dot{e}_\eta + L \bar{M}^{-1} e_\eta = 0 \quad (27-5)$$

از معادله‌ی (۲۷-۵) بر می‌آید که اگر $L \cdot \bar{M}^{-1}$ همواره مثبت باشد که به علت ضریب مثبت و ماتریس مثبت معین M همیشه مثبت خواهد بود، ردیابی خطا در این عبارت همواره به سمت صفر خواهد رفت. به همین منظور خطای نامعینی به سمت صفر می‌گراید. حال کافی است که معادله‌ی (۱۷-۵) جایگزین

(۲۶-۵) شود و عبارت (۲۸-۵) پدیدار گردد. سپس می‌توان مانند بخش قبلی از این عبارت انتگرال گرفت و خطای تخمین به شکل عبارت (۲۹-۵) در خواهد آمد.

$$\dot{\eta}_{est}(t) = L \cdot (\ddot{e}(t) + k_2 \cdot \dot{e}(t) + k_1 \cdot e(t)) \quad (28-5)$$

$$\eta_{est}(t) = L \cdot (\dot{e}(t) + k_2 \cdot e(t) + k_1 \cdot \int e(t) dt) \quad (29-5)$$

با مقایسه (۲۹-۵) و (۲۵-۵) به عنوان دو نمونه تخمین کنترلی برای نامعینی‌های سیستم، در (۵-۲۹) یک عملیات انتگرالی وجود دارد که به خطای فرم حالت، این اجازه را می‌دهد که برای ورودی و اغتشاش ثابت، به سمت صفر برود [۵۶].

۵-۳-۳ کنترل مقاوم به روش مود لغزشی

استفاده از روش مود لغزشی به دلیل مقاوم بودن آن در مقابل نامعینی و دقت و پایداری آن می‌باشد. پژوهش‌های زیادی در این زمینه صورت گرفته مانند [۵۲، ۵۷ و ۵۹]، که به صورت مستقیم یا غیر مستقیم و یا با ارائه‌ی مشاهده‌گر، از روش مود لغزشی استفاده کردند. در این بخش نمونه کنترل مودلغزشی با استفاده از روش معرفی شده در مرجع [۵۹] طراحی شده است و بعد از آن یک نمونه‌ی دیگر مدل کنترلی مود لغزشی ارائه شده در [۵۷] بازنویسی می‌شود. سپس این دو نمونه به همراه کنترل‌کننده‌های مقاوم قسمت قبلی که معرفی شده‌اند، همگی باهم مقایسه و تحلیل می‌شوند.

مدل اول از روش مودلغزشی بنا به طراحی ارائه شده در کتاب [۵۹] در اثبات پایداری و مناسب بودن دنبال کردن مسیر به این صورت برای ربات مد نظر طراحی می‌شود که ابتدا سطح لغزشی با توجه به درجه‌ی سیستم انتخاب می‌شود. اما قبل از شروع طراحی کنترل‌کننده، بار دیگر معادله‌ی سیستم (۵-۱) را به صورت دیگری در (۳۰-۵) نوشته شده است تا علاوه بر عدم اختلال با معادلات قبلی ذکر شده، نوشتن سیستم به این فرمت برای طراحی مودلغزشی امر ضروری است، در این معادله تمام عدم قطعیت‌ها η وجود دارد. همچنین رابطه‌ی (۳۱-۵) با توجه به توضیح قبل به عنوان سطح لغزش انتخاب شده است.

$$\ddot{q} = M^{-1}(\tau + \eta - N) \quad (30-5)$$

$$S = \dot{e} + \lambda \cdot e \quad (31-5)$$

در ادامه به منظور وارد کردن معادله‌ی سیستم به این رابطه‌ی سطح لغزش، مشتق آن حساب شده (32-5) و در داخل آن می‌توان عبارت خطا که به صورت (33-5) است را از معادله‌ی (30-5) جایگزین نمود. در نهایت عبارت (34-5) به دست آمده که بنا به تعریف سطح لغزش، مشتق آن بایستی $\dot{S} \rightarrow 0$ به سمت صفر میل نماید تا معادله بر روی آن سطح اصطلاحاً بلغزد و در نتیجه با کمک طراحی مناسب کنترلر در این عبارت، سیستم به خوبی مسیر دلخواه تعریف شده را دنبال نماید.

$$\dot{S} = \ddot{e} + \lambda \cdot \dot{e} \quad (32-5)$$

$$\ddot{e} = \ddot{q} - \ddot{q}_d = M^{-1}(\tau + \eta - N) - \ddot{q}_d \quad (33-5)$$

$$\dot{S} = M^{-1}(\tau + \eta - N) - \ddot{q}_d + \lambda \cdot \dot{e} = 0 \quad (34-5)$$

ورودی τ به عنوان گشتاور کنترلی باید به گونه‌ای تعریف شود که رابطه‌ی (34-5) را صفر نماید. اما اطلاعاتی که از عبارات در دست است شامل عدم قطعیت‌ها نخواهد شد، لذا این کنترلر به صورت ایده‌آل $\hat{\tau}$ به شکل (35-5) طراحی می‌شود. در این عبارت هیچ عدم قطعیت خارجی η و یا داخلی در ماتریس‌های M و N محسوب نشده و قرار است این نامعینی‌ها در داخل عبارت (36-5) به عنوان کنترل‌کننده‌ی مودلغزشی توسط تعیین علامت سطح لغزش، خنثی می‌شوند. با جایگذاری کنترل‌کننده-ی (35-5) در داخل (34-5)، جملات باقی‌مانده در (37-5) به عنوان همین نامعینی‌ها که بیان شد، به دست می‌آید، که با تنظیم پارامتر k بایستی بهترین تخمین برای این عبارت در داخل شبیه‌سازی به دست آید تا کنترل‌کننده‌ی معرفی شده، بهترین عملکرد را داشته باشد.

$$\hat{\tau} = \hat{N} + \hat{M} \cdot (\ddot{q}_d - \lambda \cdot \dot{e}) \quad (35-5)$$

$$\tau = \hat{\tau} - k \cdot \text{sign}(S) \quad (36-5)$$

$$M^{-1} \cdot (\eta + \hat{N} - N) + (\hat{M}M^{-1} - 1) \cdot (\ddot{q}_d - \lambda \cdot \dot{e}) \equiv k \cdot \text{sign}(S) \quad (37-5)$$

البته معمولاً برای نامعینی‌ها در این ارائه‌ی این مدل کنترل‌کننده، یک بازه‌ی معین مشخص می‌شود و ثابت می‌شود که در مجموع خروجی سیستم بر روی سطح لغزش، پایدار خواهد ماند. اما با توجه به

مدل سیستم تعریف شده در این پژوهش بازه‌ی مشخصی برای این حجم از نامعینی نمی‌توان فرض کرد. چنانچه نامعینی در داخل ماتریس‌های M و N بسیار کم و نزدیک به صفر باشد، می‌توان برای نامعینی‌های دیگر خارجی یک بازه‌ی مشخصی در نظر گرفت و با تعریف آن دامنه‌ی معلوم، پایداری سیستم قطعی خواهد بود. در این صورت اگر نامعینی آن ماتریس‌ها به سیستم اصلی اضافه گردد، با تغییرات لازم بر روی ضریب کنترلی می‌توان آن نامعینی کوچک دیگر هم خنثی نمود که در بخش شبیه‌سازی این عمل صورت پذیرفته است. دلیل آنکه از نامعینی داخل ماتریس‌ها صرفه نظر نمی‌شود این است که در این پژوهش بنا به طراحی کنترلی بوده است که نزدیکتر با واقعیت و متفاوت‌تر نسبت به روش اسلوتین [۵۹] باشد. همچنین برای مقایسه با کنترل‌کننده‌های دیگر در این فصل نیاز هست که تمام نامعینی‌ها در سیستم یکسان باشد، و چون در مدل قبلی این مدل عدم قطعیت وجود داشت، پس آن را در مدل مود لغزشی هم آورده شده است. اثبات پایداری مدل کنترلی ارائه شده را با توجه به منحصر به فرد بودن آنچه که طراحی شد، می‌توان در فصل ۷ کتاب [۵۹] یافت.

در پژوهشی دیگر [۵۷] کنترل مودلغزشی پیشنهادی برای معادله‌ی سیستم (۵-۶) با تغییرات لازم و به منظور مشابه‌سازی نامعینی‌ها برای مقایسه روش‌های مقاوم ارائه شده در این پژوهش به شکل رابطه‌ی (۵-۳۸) در نظر گرفته شده است.

$$u(t) = \overline{M(x_1)}\ddot{y}_r + \overline{N(x_1, x_2)} - \psi \cdot s - \chi \cdot \text{sign}(s) \quad (۵-۳۸)$$

مانند مدل قبلی، در این رابطه $s = \dot{e} + \lambda_s \cdot e$ سطح لغزش انتخابی مورد نظر با توجه به درجه سیستم بوده است. ضرایب k ، ψ و λ_s از مجموعه اعداد طبیعی و به عنوان ماتریس‌های بزرگتر از صفر در خطای مختصات‌های تعمیم یافته ضرب می‌شوند که در اصل در قانون کنترلی برای جبران نامعینی‌ها و میل سیستم بر روی سطح لغزش عمل می‌کنند. عبارت $\ddot{y}_r = \ddot{y}_d - \lambda_s \cdot \dot{e}$ به منظور ساده‌سازی رابطه زمانی که $\dot{s} \rightarrow 0$ تشکیل شده و داخل قانون کنترلی جایگزین شده است. نامعینی‌های در نظر گرفته شده به عنوان $D(q, \dot{q}, \ddot{q})$ که در رابطه‌ی (۵-۵) تعریف شده‌اند با توجه به این تعریف مود لغزشی قابل

کنترل می‌باشند؛ با توجه به اثبات پایداری لیاپانوف ارائه شده در [۵۷]. در این اثبات تابع منتخب لیاپانوف به شکل رابطه‌ی (۳۹-۵) بوده است.

$$V = \frac{1}{2} s^T M s \quad (39-5)$$

در این رابطه با توجه به مثبت معین بودن ماتریس M ، تابع لیاپانوف ارائه شده همواره مثبت خواهد بود، همچنین به راحتی اثبات می‌شود که مشتق آن با جایگذاری $\dot{s}$ و عبارت اصلی سیستم در آن، همواره منفی خواهد بود [۵۷]. بنابراین قانون کنترلی جواب خواهد داد. از ارائه جزئیات بیشتر در قسمت تئوری صرف نظر می‌شود تا در انجام شبیه‌سازی‌ها بتوان این مدل کنترل‌کننده‌های معرفی شده را مقایسه نمود.

۵-۴ شبیه سازی سیستم کنترلی و رباتیک

معمولاً در پژوهش‌های واقع در حوزه کنترل بازوهای رباتیک سری و در بخش شبیه‌سازی، یک سیستم بازویی دو درجه آزادی را در نظر می‌گیرند که در این پژوهش با استفاده از یک سیستم هفت درجه آزادی با معادلات حجیم و مشکل‌تر، شبیه‌سازی برای چالش‌های واقعی‌تر و متنوع‌تر انجام می‌شود. در این شبیه‌سازی سیستم رباتیک ثابت و مدل‌های کنترلی مختلفی به صورت جداگانه بر روی آن تست شده‌است. تمام نامعینی‌ها و اغتشاشات به سیستم اصلی ربات (معادلات حرکتی به‌دست آمده در فصل ۴) وارد شده‌اند تا شرایط یکسانی برای همه‌ی روش‌ها به وجود آید.

۵-۴-۱ پارامترها و نامعینی‌ها

در این بخش مشخصات هندسی و دینامیکی از جدول (۲-۱) استفاده شده است و برای باقی پارامترهای کنترلی و نامعینی‌های تعریف شده مقداری در نظر گرفته شده است.

برای تمامی جرم‌ها نامعینی $\Delta m = 0.1$ به جرم اصلی سیستم افزوده شده است. این نامعینی‌ها به همراه اغتشاش خارجی و اصطکاک مفصلی، تنها به خود سیستم اضافه شده‌اند تا در قسمت سیستم ربات، بیشترین و طبیعی‌ترین رفتار ممکن به وجود آید. اصطکاک ناشی از مفاصل $F(\dot{q})$ به صورت

رابطه‌ی (۴۰-۵) در نظر گرفته شده است [۵۶]. همچنین اغتشاش خارجی به صورت سیگنالی اغتشاشی بین $[-10, 10]$ در نظر گرفته شده است.

$$F(\dot{q}) = F_v \cdot \text{sign}(\dot{q}) + F_v \cdot \dot{q} \quad (۴۰-۵)$$

شرایط اولیه حاکم بر سیستم به صورت رابطه‌ی (۴۱-۵) می‌باشد. به عبارتی مقدار اولیه‌ی تمامی هفت مکان زاویه‌ای مفاصل در خروجی سیستم، به مقدار ۱ رادیان و برای سرعت زاویه‌ای، مقدار ۲ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

$$x(0) = [1_{7 \times 1}(\text{rad}) \quad 2_{7 \times 1}(\text{rad/s})]^T \quad (۴۱-۵)$$

پارامترهای دیگر از قبیل ضرایب و گین‌های کنترلی در جدول (۱-۵) آمده است. البته سعی شده است که بهترین و تنظیم‌شده‌ترین پارامترها که با مقایسه نتایج به دست آمده استفاده شود که بهترین عملکرد آن کنترلر طراحی شده را به نمایش گذارد.

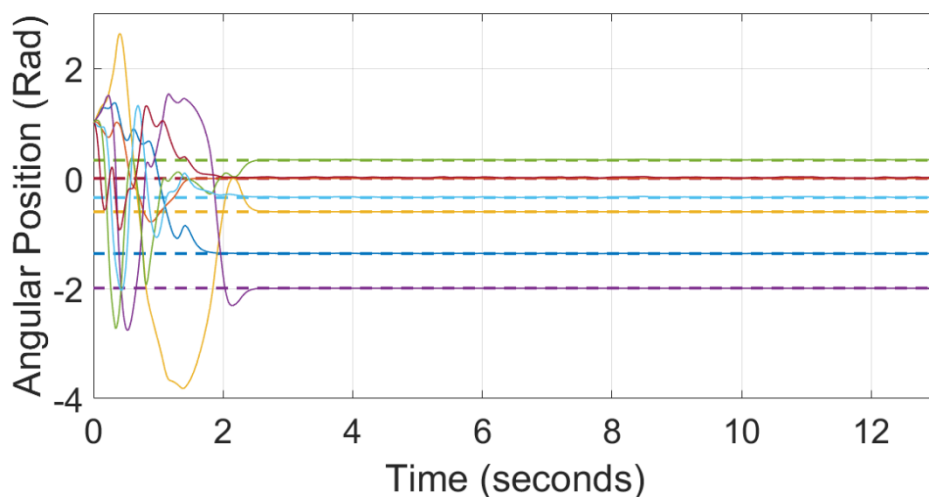
جدول ۱-۵ مقادیر پارامترهای استفاده شده

مقدار	مشخصه
$I_{7 \times 7}$	P, Γ
$[0_{7 \times 7} \quad 1_{7 \times 7}]^T$	B
35	K_1
300	K_2
5	k_1
10	k_2
40	k
2	λ
20	ψ
50	χ
1	λ_s
2	F_v

۵-۴-۲ نمودارها

برای ساده‌تر شدن بیان نتایج و نمودارها برای هر روش کنترلی استفاده شده، به اختصار و به ترتیب روش اول تا چهارم که برای مقایسه کنترلی مورد نظر بوده و ارائه شد، استفاده شده است. نتایج کنترل-کننده به روش تخمین نامعینی براساس تئوری گارانتی پایداری سیستم‌های نامعین به عنوان روش اول، روش تخمین نامعینی‌ها بر پایه‌ی مدل قانون کنترلی به عنوان روش دوم، مودلغزشی طراحی شده مخصوص ربات مدنظر در این پژوهش، به عنوان روش سوم و همچنین روش مودلغزشی استخراج شده از مرجع [۵۷] به عنوان روش چهارم، در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که قبلاً بیان شد تمامی نامعینی‌ها، شرایط محیطی و پارامترهای سیستمی برای چهار روش کنترلی، یکسان در نظر گرفته شده تا در پایان بتوان این چهار روش را مقایسه نمود. علاوه بر آن یک استاندارد یکسانی برای شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود.

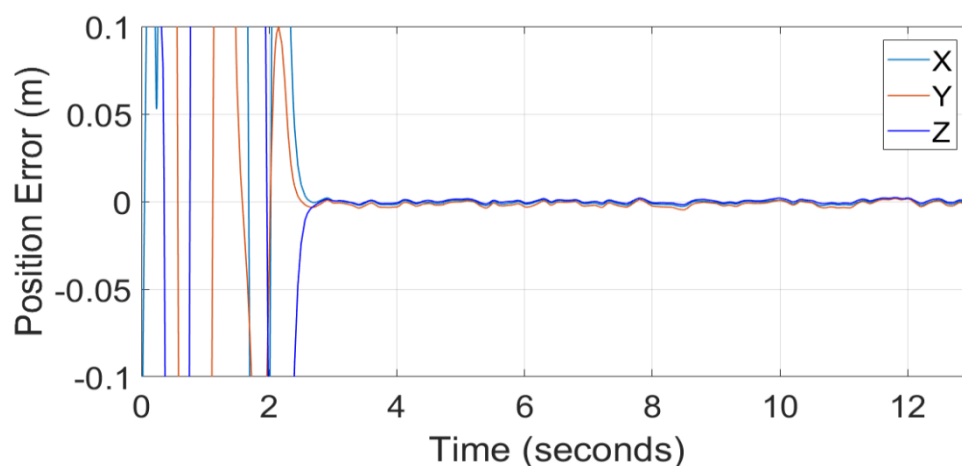
نمودار شکل (۵-۳) نتایج پاسخ سیستم رباتیک به کنترل‌کننده‌ی روش اول را نشان می‌دهد. مسیر ورودی به سیستم کنترلی مختصات $[1.7 \ 0.5 \ 0.2]$ به عنوان مکان و زوایای $[50 \ 20 \ 0]$ به عنوان جهت-گیری هدف داده شده است.



شکل ۵-۳ دنبال کردن مسیر در روش اول

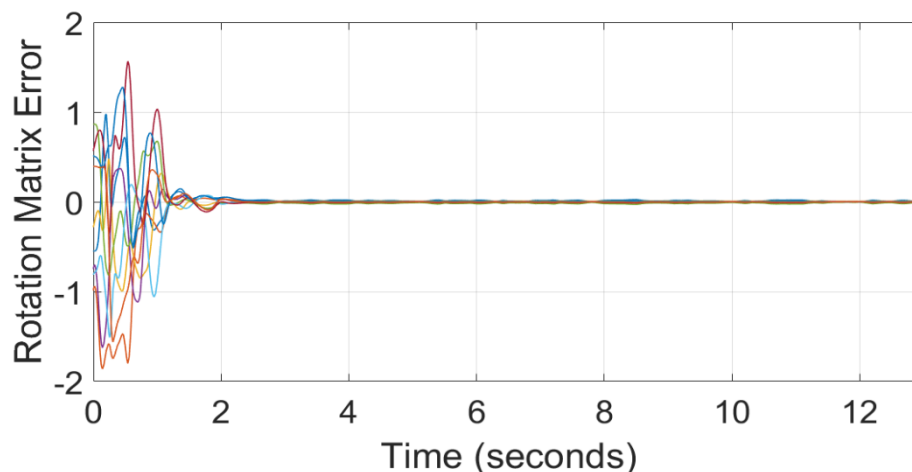
در این نمودار (۵-۳)، زوایای تولید شده از مسیر دلخواه توسط سینماتیک معکوس به شکل نقطه‌چین رسم شده و توسط هفت زاویه مفاصل خروجی از سیستم دنبال می‌شوند که در این روش با توجه به

ضرایب کنترلی بالا، خیلی سریع همگرا شده‌اند. در این شکل ۷ عدد مختصات تعمیم‌یافته باهم رسم شده‌اند که نیازی به بررسی جداگانه‌ی هر یک نبود، لذا کل همگرا شدن آن‌ها هدف اصلی ارائه‌ی این نمودار می‌باشد. نمودار شکل (۴-۵)، خطای مکان سرانتهایی عملگر در مقایسه با مقدار دلخواه را نشان می‌دهد. این مکان از سینماتیک مستقیم زوایای خروجی از سیستم گرفته شده و از مقدار مکان دلخواه مورد نظر که به عنوان ورودی داده شده است، کم شده و خطای آن برای مکان در نمودار (۴-۵) و برای جهتگیری در نمودار (۵-۵) نمایش داده شده است.



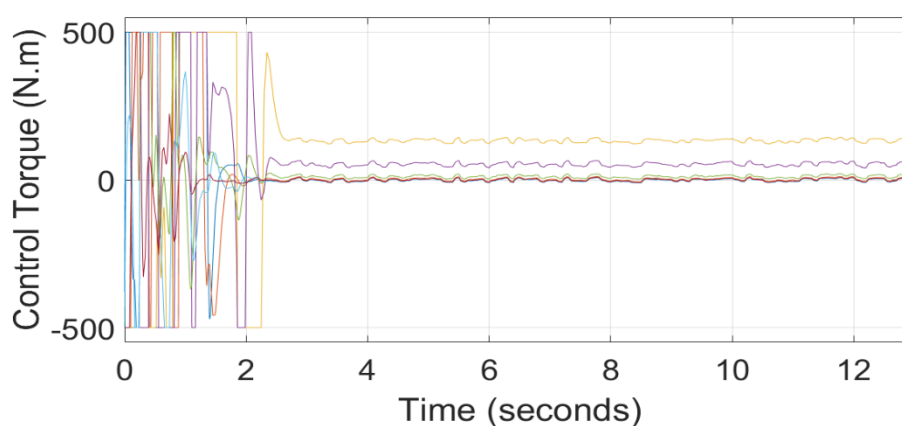
شکل ۴-۵ خطای مکان در روش اول

در این نمودار (۴-۵) مسیر در زمان حدود ۳ ثانیه به حالت پایدار رسیده و بازه‌ی خطای ماندگار آن در حدود چند میلی‌متر خواهد رسید و تا آخر ادامه دارد. نمودار شکل (۵-۵) خطای ماتریس دوران و یا همان جهت‌گیری عملگر انتهایی با جسم هدف، را در روش اول کنترلی نشان می‌دهد. این ماتریس بی بعد بوده و میزان بازه‌ی تغییرات خطای آن حتماً باید بین ۲ و ۲- باشد، زیرا ۹ پارامتر آن از ماتریس ۳ در ۳ دوران بر اساس توابع سینوس و کسینوس تشکیل شده و این توابع بین ۱ و ۱- در حال تغییراند. این نمودار هم زمانی که سیستم کنترل می‌شود یک خطای ناچیزی تا انتها دارد که در بیشترین حالت به ۱۰ درجه اختلاف می‌رسد.



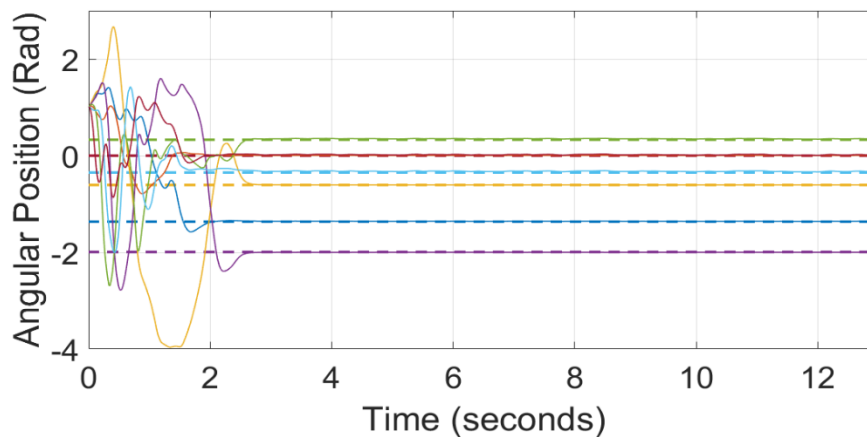
شکل ۵-۵ خطای جهت‌گیری در روش اول

یکی از مهم‌ترین نمودارهای تحلیل و بررسی سیستم کنترلی، نمودار تلاش کنترلی که همان گشتاور کنترلی ورودی به سیستم را نشان می‌دهد (شکل ۵-۶). این نمودار باید در بهترین حالت کمترین میزان اغتشاش و گشتاور مورد نیاز برای تأمین نیروی مفاصل داشته باشد، تا هم سیستم از پس کنترل به این روش برآید و هم این میزان گشتاور دستور داده شده قابل تولید توسط عملگر مفاصل باشد. برای اینکه در ابتدا سیگنال کنترلی بسیار زیاد نشود، بردار کنترلی توسط اشباع کننده، بین ۵۰۰ و -۵۰۰ محدود شده است. این مقدار به عنوان نهایت گشتاور اعمالی موتورهای ربات محسوب می‌شود و برای روش‌های بعد هم اعمال شده است.

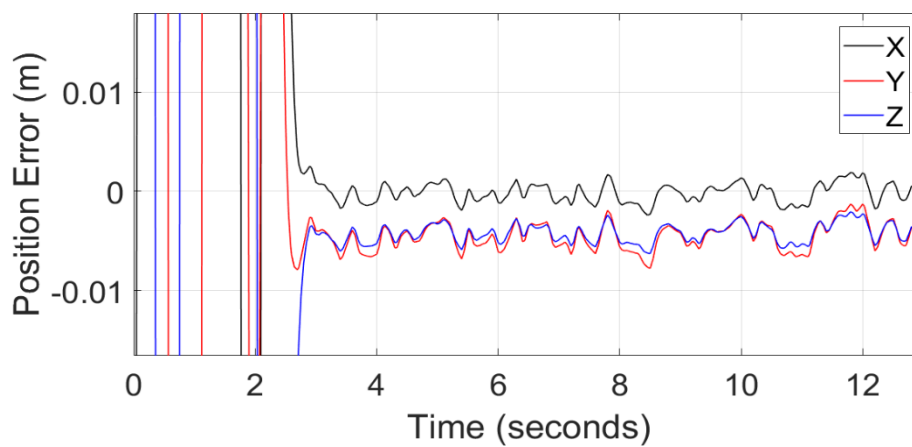


شکل ۵-۶ تلاش کنترلی برای روش اول

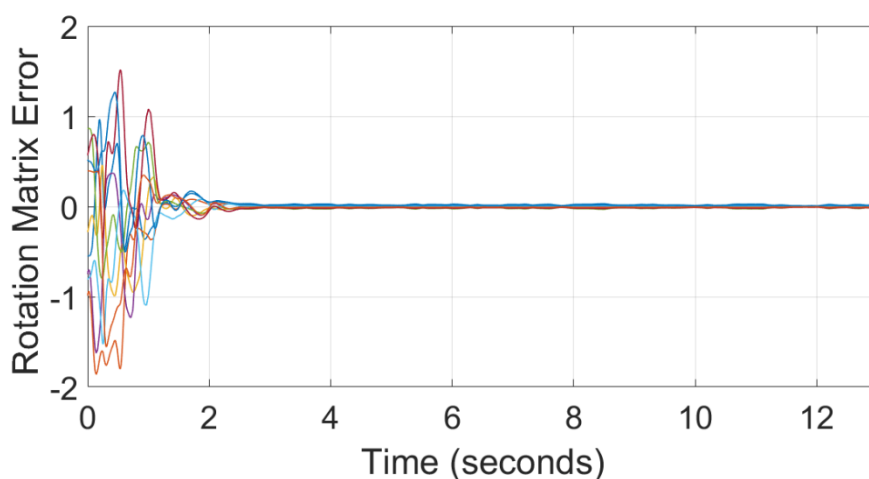
همین روند برای باقی روش‌ها تکرار می‌شود و چهار عدد نمودار مانند شکل‌های (۵-۳ تا ۶) به شرح قبل برای هر روش به ترتیب به دست آمده است. شکل‌های (۵-۷ الی ۱۰) برای روش دوم به ترتیبی که گفته شد، مشخص شده است.



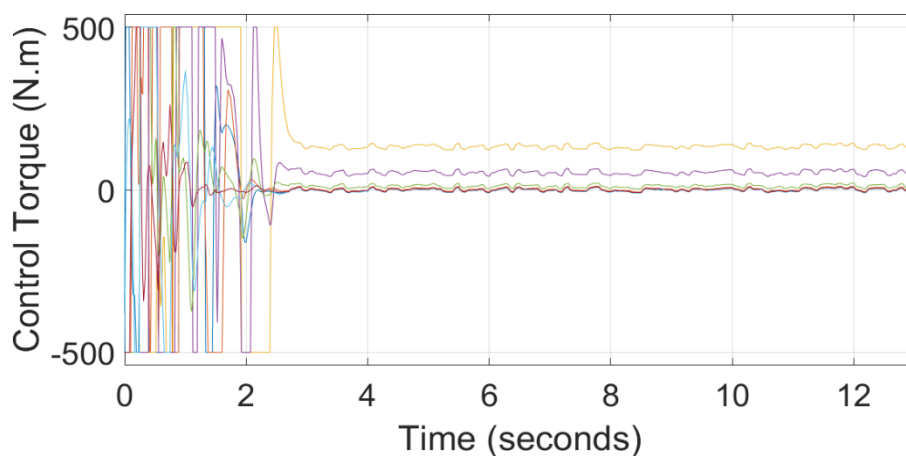
شکل ۵-۷ دنبال کردن مسیر زوایا برای روش دوم



شکل ۵-۸ خطای مکان در روش دوم

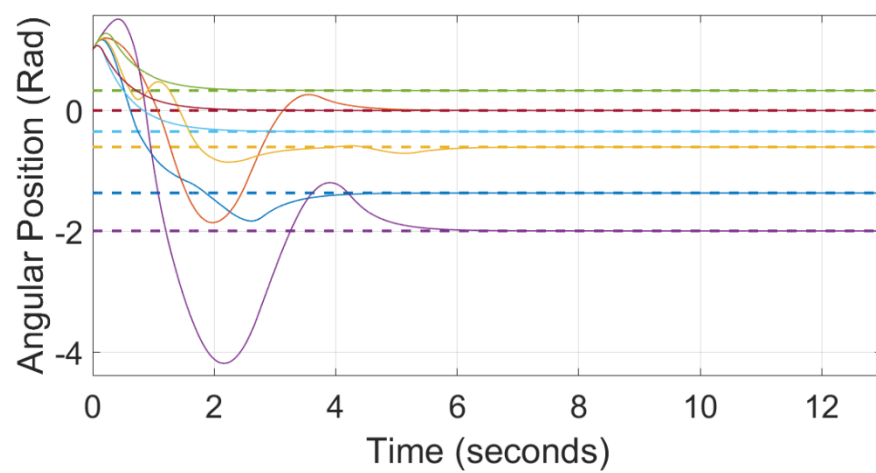


شکل ۵-۹ خطای جهت گیری در روش دوم

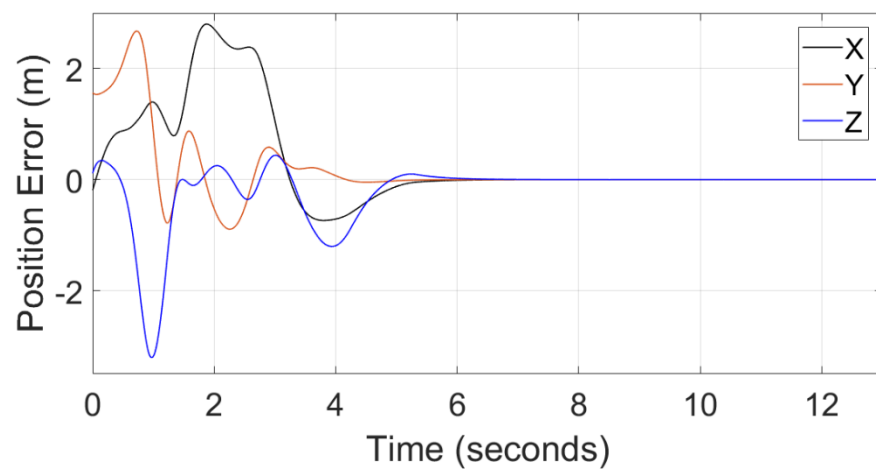


شکل ۵-۱۰ تلاش کنترلی برای روش دوم

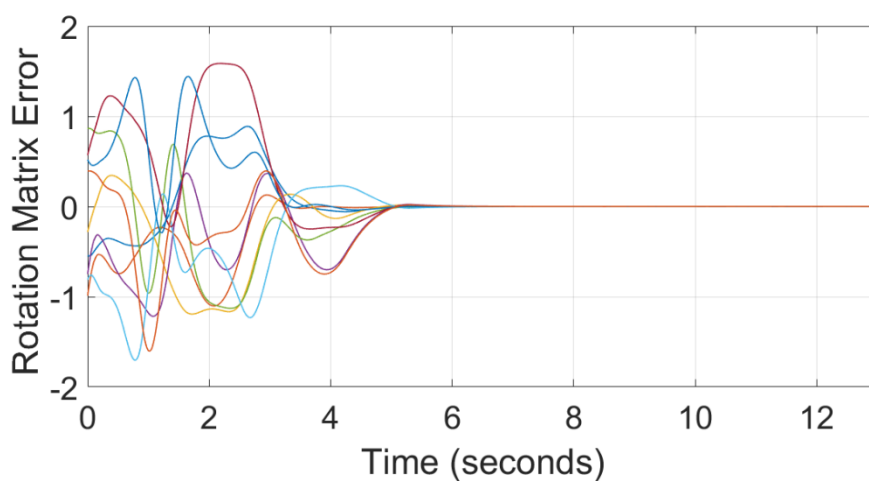
در دو روش اول سیگنال کنترلی ماکزیمم بعد از رسیدن سیستم به شرایط پایدار در حدود ۲۰۰ نیوتن در متر، می باشد. در ادامه شکل های (۵-۱۱ الی ۱۴) برای روش سوم آمده است و توضیحات این نمودارها به مانند آنچه برای روش های قبل گفته شد هست. در پایان در بخش بعدی این نمودارها در کنار هم تحلیل می شوند.



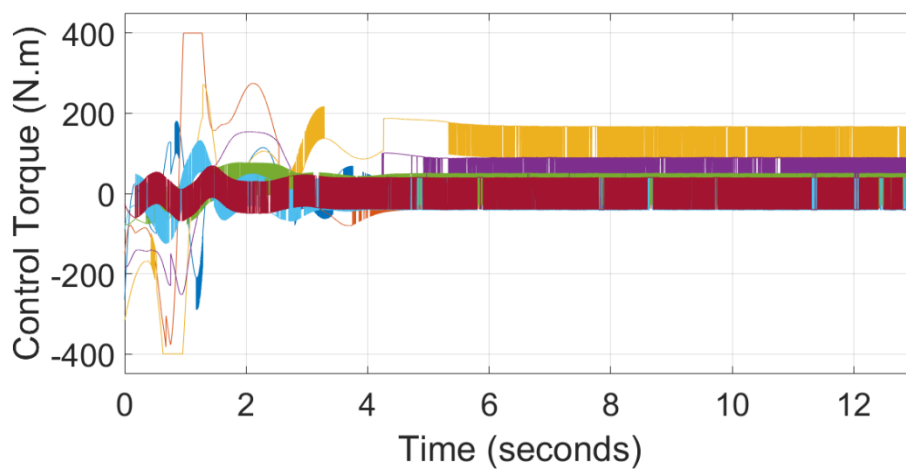
شکل ۵-۱۱ دنبال کردن مسیر زوایا در روش سوم



شکل ۵-۱۲ خطای مکان در روش سوم

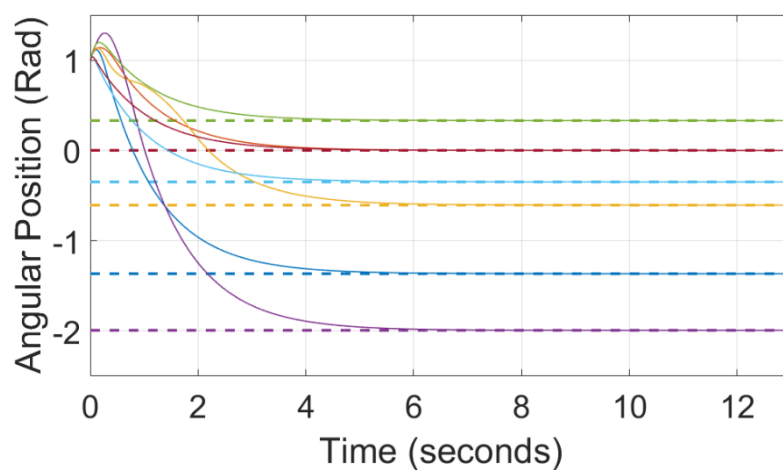


شکل ۵-۱۳ خطای جهت‌گیری در روش سوم

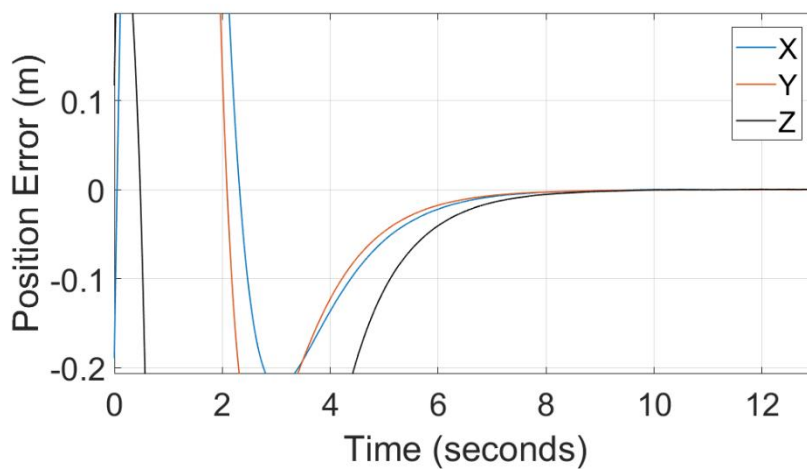


شکل ۵-۱۴ تلاش کنترلی برای روش سوم

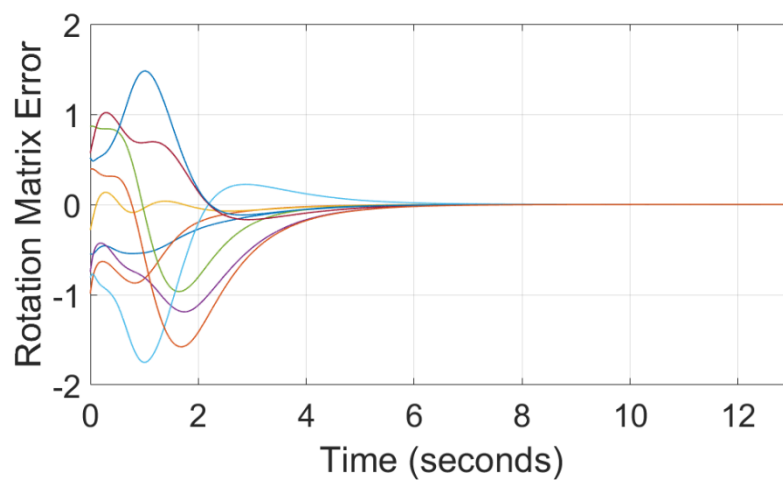
در روش سوم تمام حالت‌های سیستم تقریباً از ثانیه‌ی ششم کنترل می‌شوند که می‌توان با دستکاری ضرایب، آن را تنظیم نمود. شکل‌های (۵-۱۵ الی ۵-۱۸) در تشریح روش چهارم می‌باشد.



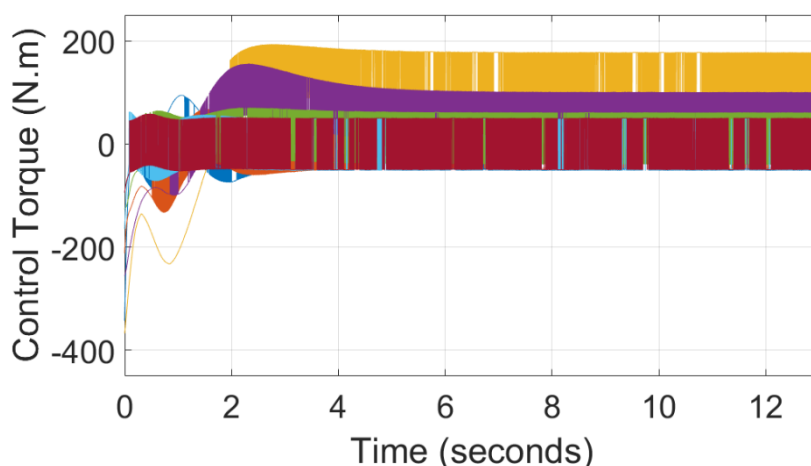
شکل ۵-۱۵ دنبال کردن مسیر زوایا در روش چهارم



شکل ۵-۱۶ خطای مکان در روش چهارم



شکل ۵-۱۷ خطای جهت گیری در روش چهارم



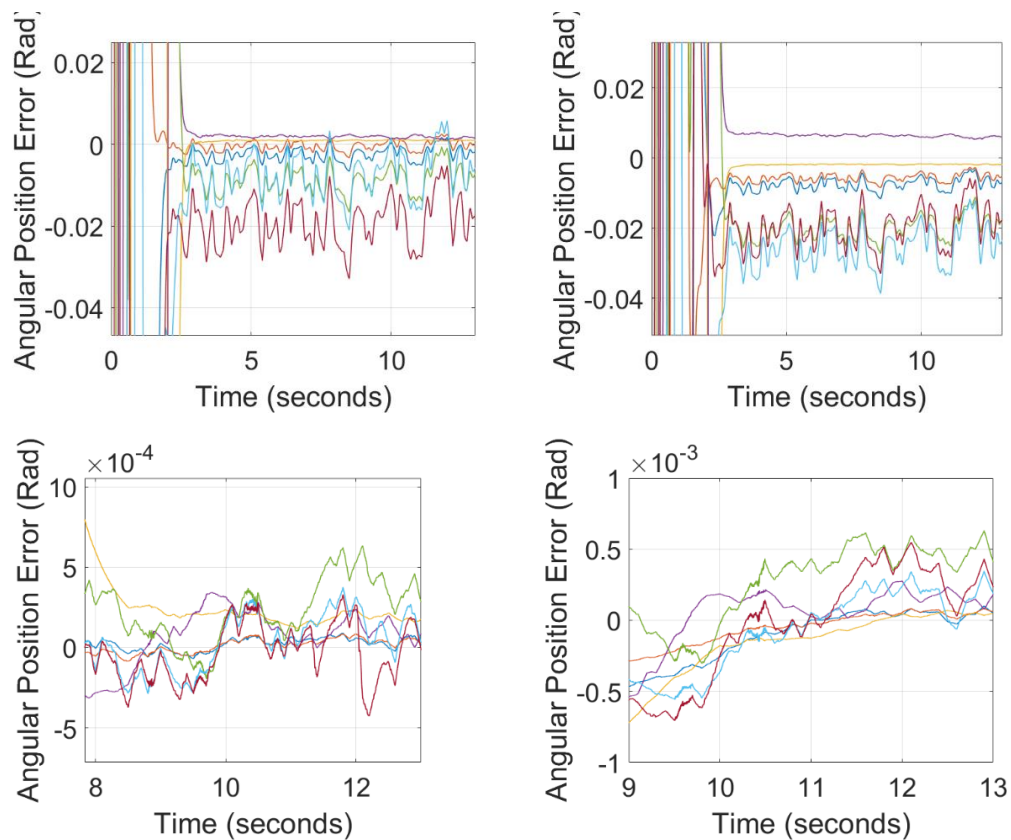
شکل ۵-۱۸ تلاش کنترلی برای روش چهارم

تلاش کنترلی روش چهارم هم مثل سوم پر نوسان است و دلیل آن استفاده از سطح لغزش و ویژگی همین مدل کنترل کننده بوده است. در این روش سیستم زودتر به حالت پایداری رسیده است، پس می توان نتیجه گرفت روش چهارم بهتر از روش سوم برای مدل مودلغزشی در این شرایط جواب داده است. در پایان نتایج حاصل از چهار روش، تا جایی که امکان داشت بیان شد. در حالی که می توان با تنظیم پارامترها، عوض کردن بازه، اندازه و نوع نامعینی ها و شرایط محیطی، و همچنین ارائه ی نمونه نمودارهای دیگری برای نمایش عملکرد کنترلی؛ کلی حالت دیگری به وجود آورد که نمی توان همگی را پوشش داد. در اینجا سعی شده است که حالت تقریباً استاندارد و یکسانی با توجه به فرضیاتی که شده بود، ارائه گردد.

۵-۴-۳ مقایسه نتایج و نتیجه گیری

ساختار کنترلی روش اول با دوم، همین طور روش سوم با چهارم یکسان می باشد، با اینکه هر چهار روش بر پایه فیدبک خطی ساز طراحی شده بودند، نیاز هست که هر دو روش اصلی و چهار روش را با هم مقایسه نمود. در باب مقایسه بین این چهار مدل، اگر ملاک تلاش کنترلی باشد، مدل های مودلغزشی از دو حالت اول در شرایط نامناسب تری می باشد و دو مدل اول تقریباً در یک نتیجه مشابه به سر می برند؛ پس می توان در ابتدا گفت که کنترل مقاوم به روش تخمین نامعینی در این شرایط نامعینی و شرایط معادلات پر حجم که همگی برای هر چهار مدل یکسان بودند، بهتر عمل می کند چون تلاش کنترلی

کمتر و کم نوسان تری را دارد. در حالی که گشتاورهای اولیه در روش تخمین نامعینی بسیار زیاد بوده و فشار اولیه زیادی به موتور ها وارد می شود. لذا از اشباع کننده استفاده شده و بر روی تمام ۷ سیگنال کنترلی اعمال شده است. اما در روش مود لغزشی تلاش اولیه بسیار پایین و محدود است و فقط یک سیگنال کنترلی توسط اشباع کننده محدود شده است. در این حالت می توان گفت مود لغزشی عملکرد بهتری داشته است. اگر ملاک مورد نظر دقت مسیر یابی ربات باشد، یعنی خطای زوایا، مکان و جهت گیری کمتر باشد شرایط فرق خواهد کرد. پارامتر اصلی همان مختصات تعمیم یافته (زاویه ی مفاصل) است که خطای آن نقش کلیدی برای خطای مسیریابی و جهت گیری دارد، چون آن دو از تبدیل زوایا در سینماتیک مستقیم به دست می آیند، و چون سینماتیک مستقیم هندسی و دقیق است، کافی است که خطای زاویه ی خروجی از سیستم نسبت به ورودی به سیستم ارزیابی شود که در شکل (۵-۱۹) برای هر چهار روش بر حسب رادیان آمده است.



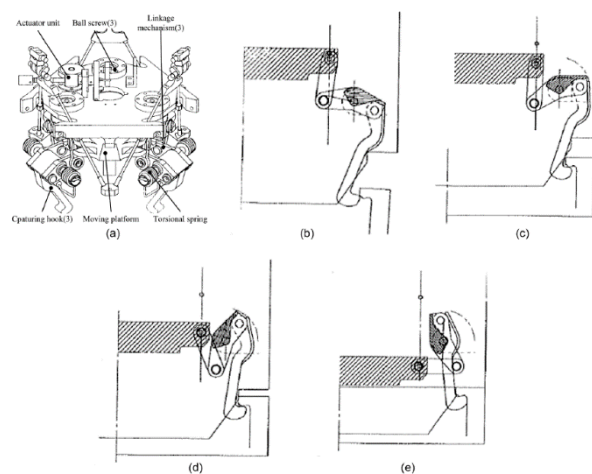
شکل ۵-۱۹ مقایسه خطای زوایای مفاصل چهار مدل سیستم کنترلی. از بالا چپ: روش اول، راست: روش دوم، پایین چپ: روش سوم، و راست: روش چهارم به ترتیب رسم شده و بزرگنمایی شده است.

اگر ماکزیمم خطای مکان زاویه هر نمودار به صورت درجه استخراج شود تا قابل درک باشد؛ بیشترین خطا بین مفاصل ربات در روش اول تقریباً ۱,۱ درجه، در روش دوم حدوداً ۲,۳ درجه، در روش سوم ۰,۰۵ درجه و ۰,۰۳ درجه در روش چهارم می‌باشد. این بدان معنی می‌باشد که اگر ربات مدنظر برای عملیات‌هایی با اندازه زوایا و مسیر دقیق برنامه‌ریزی شود، و نامعینی داخلی و خارجی هم زیاد باشد بایستی برای کنترل عملگرها از روش مود لغزشی استفاده شود. در حالی که اگر نیاز به دقت بالا نباشد می‌توان از یکی از روش‌های تخمین نامعینی بنا به کاربرد و شرایط مشابه استفاده گردد، زیرا تلاش کنترلی در این روش‌ها کمتر خواهد بود. البته با توجه به ابعاد ربات که بیشتر از سه متر می‌باشد، تمام چهار روش خطای قابل قبولی دارند و فقط می‌توان گفت که در کارهای بسیار دقیق که پارامتر دقت مهم می‌باشد می‌توان از مود لغزشی استفاده نمود. اما با همین چند نمودار و پارامترهای مشخص شده می‌توان نتیجه گرفت روش اول از دوم بهتر و روش چهارم از سوم در این شرایط و عدم قطعیت‌های تعریف شده بهتر عمل می‌کند. لازم به ذکر است چون تمامی شرایط یکسان در نظر گرفته شده است پس می‌توان به این نتایج در هر شرایط دیگری از قبیل کم یا زیاد نامعینی و تغییر پارامترهای هندسی و ضرایب کنترلی، استناد نمود.

فصل ششم: طراحی و ساخت یک
گریپر کاربردی به عنوان عملگر
انتهای ربات

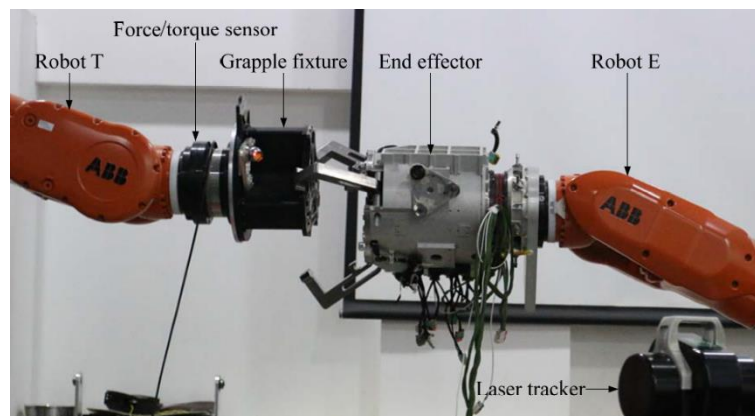
۱-۶ مدل عملگر انتهایی بازوان فضایی

بازوی فضایی اروپا و نمونه‌های مشابه آن از یک مدل گریپر انتهایی استفاده می‌کنند که برای قفل شدن انتها در یک مکانی مناسب طراحی شده است. شکل (۱-۶) مکانیزم و عملکرد این مدل گریپر را نشان می‌دهد. این مدل برای قفل شدن در یک مکانی که ربات به ایستد طراحی شده و برای فعالیت‌های دیگر بایستی تجهیزات دیگری به این مکانیزم قفل شوند، مانند مدل‌های متنوعی که در فصل ۱ و ۲ که بحث شد.



شکل ۱-۶ مکانیزم قفل شدن عملگر انتهایی بازوی رباتیک اروپا در یک جای مشخص [۹].

یکی از تست‌های گریپرهای فضایی در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. در این آزمایش یک نمونه عملگر انتهایی توسط دو ربات صنعتی معروف برای عملیات پهلویی شبیه‌سازی شده و عملکرد آن برای گرفتن یک مکان ثابت یا متحرک که می‌تواند ایستگاه فضایی یا ماهواره باشد، بررسی می‌شود. همچنین برای این عملیات از سنسورهای دیگر هم استفاده شده و توانایی ربات‌های صنعتی برای شبیه‌سازی ربات‌های فضایی را نشان می‌دهد که در این پژوهش هم از نتایج تحقیقات این گونه ربات‌ها برای بازوی فضایی مدنظر استفاده شده است.



شکل ۲-۶ عملیات تست گریپر انتهایی در یک شبیه سازی فضایی، [۶۱].

مدل‌های زیادی از انواع گریپر طراحی و ساخته شده است. آنچه که در این پژوهش در نظر بود طراحی و ساخت یک گریپر کاربردی و قابل توسعه برای ربات اروپا بوده است. از این جهت که بتوان آن را با امکانات موجود ساخت و بتوان با یک نمونه‌ی مشابه مقایسه کرد. مدل دو انگشتی بر کاربردی‌ترین مدل است، همچنین می‌توان با تعویض سر انگشتان به تعداد بیشتر و متنوع تر کارهای بیشتری تعریف کرد. همچنین این مدل می‌تواند هم اجسام را بگیرد و جا به جا کند و هم در یک جایی مثل یک میله یا دستگیره که همه جا یافت می‌شود، ربات را ساکن کند. برای همین دلایل مدل دو انگشتی انتخاب شده است.

۲-۶ مدل عملگر انتهایی دو انگشتی تجاری

مدلی از گریپرهای شرکت آی کیو ربات^۱ به عنوان نمونه‌ای برای مقایسه با گریپر طراحی شده در نظر گرفته شده است. مدل دو انگشت سائز دهانه ۸۵ در شکل (۳-۶) انتخاب شده است. مدل سائز ۱۴۰ هم در کنار این مدل در مرجع [۶۳] معرفی شده است. به دلیل شباهت زیاد این مدل با مدل طراحی شده در این پژوهش، اطلاعات هندسی آن در شکل (۳-۶) آورده شده است.

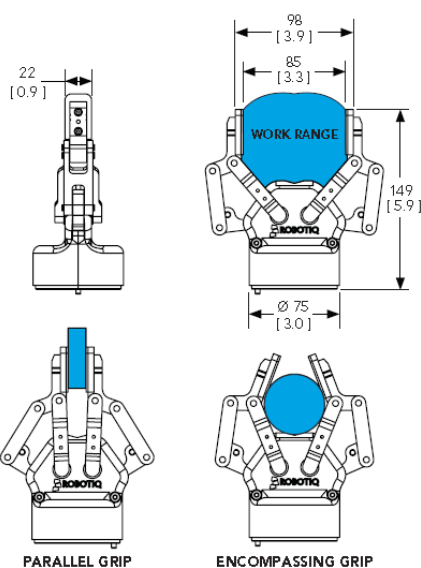
^۱ ROBOTIQ



MECHANICAL SPECIFICATIONS*

2-FINGER 85

Gripper opening (see figure)	0 to 85 mm	0 to 3.3 in
Object diameter for encompassing grip	43 to 85 mm	1.7 to 3.3 in
Gripper weight with mechanical coupling	900 g	2 lbs
Maximum recommended payload 0.3 friction coefficient between finger and steel part, safety factor of 2.6	5 kg	11 lbs
Grip force**	20 to 235 N	1.1 to 49.45 lbf
Closing speed	20 to 150 mm/s	0.8 to 5.9 in/s
Operating temperature	-10°C to 50°C	14°F to 122°F
Parallel grip repeatability	0.05 mm	0.002 in



شکل ۳-۶ مشخصات جزئی گریپر دو انگشتی برای مقایسه از [۶۳].

۳-۶ مدل عملگر انتهایی دو انگشتی ساخته شده در این پژوهش

شکل (۳-۶) مدل کامل سه بعدی گریپر طراحی شده می‌باشد. مکانیزم حرکتی آن توسط یک سروو موتور قوی که با گیربکس و تسمه انتقال قدرت تشکیل شده و گشتاور را به هر دو بازوی انگشتان، هم زمان می‌رساند. از بیان جزئیات بیشتری در مورد مکانیزم حرکتی و قطعات الکترونیکی، صرف نظر می‌شود و فقط مقایسه بین این مدل و مدل تجاری معرفی شده صورت می‌پذیرد. ارائه‌ی نقشه‌های ساخت، جزئیات آن و برنامه‌نویسی آن از موضوع این پژوهش خارج است.



شکل ۴-۶ نمونه‌ی طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورکز^۱ تمامی ابعاد به میلی‌متر می‌باشد.

۴-۶ مزیت‌ها و مقایسه

با توجه به مشخصات گریپر شرکت ربات‌آی‌کیو و در مقایسه با مشخصات گریپر ساخته شده در این پژوهش، می‌توان گفت که وزن عملکرد که بسیار مهم بوده است به کمتر از نصف رسیده (تقریباً ۴۰۰ گرم)، در حالی که ابعاد در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد بزرگتر بوده است. دهانه‌ی عملیات هم بسیار بزرگ‌تر شده که برای گرفتن اجسام پرحجم‌تر مناسب‌تر شده است. همچنین تمام قطعات این گریپر به غیر از بلبرینگ‌ها و پیچ‌ها که فلزی بوده، از جنس پلاستیک مقاوم پلی لاکتیک اسید^۲ ساخته شده که از دمای بسیار پایین تا حدود ۱۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تحمل ساختاری خواهد داشت و در نهایت رنج دمای

^۱ SolidWorks

^۲ PLA Polylactic acid

کاری بستگی به قطعات الکترونیک و موتور سرووی آن خواهد داشت که به نظر می‌رسد در مجموع رنج بیشتری از گریپر رقیب دارد. گشتاور نامی سروو موتور استفاده شده در حدود ۳ نیوتن در متر می‌باشد که توسط چرخ‌دنده و تسمه، به دو بازوی اصلی گریپر انتقال قدرت می‌دهد. با این اوصاف، نیرویی که انگشت‌های گریپر می‌توانند وارد نمایند می‌تواند در حدود ۱۵۰ نیوتن باشد. سیستم کنترلی این گریپر توسط یک آردوینو^۱ هدایت شده و توسط هر ابزار داری بلوتوث^۲ قابل تنظیم و هدایت است. بر روی خود گریپر هم کلیدهایی برای تنظیم درجه باز بودن و بسته شده شدن دو انگشت و امکانات دیگر تعبیه شده است. شکل (۵-۶) گریپر ساخته شده می‌باشد که از نماهای متفاوتی نمایش داده شده است.



شکل ۵-۶ عملکرد انتهایی ساخته شده

سر نارنجی رنگ بر روی گریپر منعطف و قابل تعویض به صورت سریع می‌باشد. همچنین شیارهایی بر روی آن تعبیه شده که اصطکاک را با سطح جسم افزایش داده و منجر به گرفتن جسم و یا محل قرار گیری با وزن بیشتری خواهد شد. می‌توان با تعویض مدل‌های متفاوت اجسام و محل‌های چفت شدن بازو با محیط پیرامون را گسترده تر و تنوع کاربردی به آن داد. برای نوآوری در ساخت آن؛ می‌توان از تمام شدن هزینه‌ی پایین، کیفیت قابل رقابت، قابل تعویض بودن نوک انگشتان برای کاربردهای متناسب و استفاده‌ی آسان و قابل برنامه‌ریزی نام برد.

^۱ Arduino

^۲ Bluetooth

فصل هفتم: نتیجه گیری و بیان پیشنهادهات

۷-۱ نتیجه گیری نهایی

در این پژوهش شرایط و محدودیت‌های فضای کاری و سینماتیک معکوس یک ربات فضایی هفت درجه آزادی مشابه ربات اروپا به روش هندسی و تحلیلی دقیق با توجه به مکان و جهت‌گیری جسم یا مسیر هدف، به همراه روشی برای انتقال در فضای سه بعدی نامحدود، بیان شد. این قسمت بدنه‌ی اصلی این پژوهش و نوآوری اصلی آن به شمار می‌آید، چنانکه از نتایج این بخش برای ادامه‌ی پژوهش استفاده شده است. در ادامه معادلات حرکتی از روش‌های دینامیک پیشرفته به دست آمد و درستی آن توسط شبیه‌ساز اثبات شد. زیرا هیچ مرجعی شامل معادلات این بازوی هفت درجه آزادی پیچیده تا به حال نبوده و این بخش لازمه‌ی ادامه‌ی پژوهش در قسمت کنترل ربات می‌باشد. کنترل مقاوم که برای عدم قطعیت‌های سیستمی و خارجی مناسب بوده است، انتخاب شده بود که با توجه به فرض شدن اغتشاشات خارجی، اصطکاک مفاصل و نامعینی‌های سیستمی در پارامترهای دخیل، این ربات معرفی شده را کنترل کند. به طور خلاصه می‌توان در رابطه با مبحث کنترل گفت که: نمونه‌هایی از کنترل پیشرفته غیرخطی برای سیستم‌های بازوی رباتیکی معرفی شد. طبق نتایج به دست آمده کنترل غیرخطی مقاوم بر پایه‌ی فیدبک خطی‌ساز روی مدل‌هایی با ویژگی‌های مشابه معادلات بازوی هفت درجه آزادی مورد مطالعه که حجم آن‌ها زیاد می‌باشد، جواب بسیار خوبی می‌دهد. در این تحقیق پیاده‌سازی مدل‌های ارائه شده بر روی یک سیستم هفت درجه آزادی ۸ بازویی همراه با آزمایش عملکرد این سیستم پیچیده از نظر معادلات با نامعینی‌ها و اغتشاشات بسیاری صورت گرفت. علاوه بر این، کارایی و درستی آن‌ها چک شده و باهم مقایسه شده‌اند. در نتایج مشاهده می‌شود که پایه روش فیدبک خطی‌ساز به منظور کنترل کردن سیستم‌های پر حجم غیرخطی مناسب، و کنترل مقاوم به روش تخمین نامعینی با هر شرایط پایداری، برای کنترلی با هزینه‌ی پایین (بعد از رسیدن به پایداری) به صورت مناسبی جواب می‌دهد. اما اگر به دنبال یک ردیابی دقیق و مناسب در شرایط نامعینی معلوم و نامعلوم باشیم، یا تلاش کنترلی اولیه‌ی کم‌تری بخواهیم؛ بایستی از روش مود لغزشی به عنوان کنترلر استفاده شود. در مجموع کنترلرهای ارائه شده با توجه به مشخصات سیستم مد نظر این پژوهش تغییراتی کرده

بودند و در پایان هر چهار روش ارائه شده قادر به کنترل ربات در شرایط مختلف به صورت مقاوم را دارا بودند. نتایج در این شرایط بسیار خوب بود و کنترل مقاوم باعث میل کردن خطا در مسیر یابی و حتی جهت گیری انتهای ربات به سمت صفر موفق شد. دو روش از کنترل مقاوم غیرخطی، تخمین نامعینی و مودلغزشی هم با جزییات بیشتر و روش های گوناگون بر روی این مدل ربات مقایسه شد که در کنار ارائه روش کنترلی مناسب برای معادلات بسیار پیچیده، یک مقایسه کلی بین روش های ذکر شده هم صورت پذیرد و تحلیلی از آن ارائه شود که جزء نوآوری های اصلی این پژوهش بود. در پایان گریپری دو انگشتی طراحی و ساخته شده است که در اصل قابلیت اضافه شدن به هر بازوی رباتیکی، و ماژولار بودن و قابل تعویض بودن سر انگشتان به شکل های گوناگون هدف اصلی بوده است. در حالی که طراحی و ساخت آن نوآوری بزرگی نیست اما سیستم الکترونیکی و کنترل از راه دور بودن آن به این محصول ساخته شده قابلیت کاربردی بودن در عملیات های مختلف را داده و ارائه ی آن به این صورت و در قالب پایان نامه در کشور ما فعالیت نو می باشد.

۷-۲ پیشنهادات برای آینده

در این پژوهش فرضیاتی در بخش محدودیت فضای کاری و انتقال بیان شد که با تغییر آن ها می توان نتیجه ی متفاوت گرفت و یا حتی روش سینماتیک مستقیم و معکوس را عوض نموده و از روش مرسوم دیناویت هارتنبرگ استفاده نمود که در این صورت نتایج نهایی یکسان خواهد بود. همچنین روش به دست آوردن معادلات دینامیکی را می توان به صورت نیوتن-اولر یا غیره تغییر داد که فرقی نخواهد کرد. اما بهترین پیشنهاد برای ادامه ی این تحقیق، زمانی که معادلات دینامیکی و سینماتیکی آن در دسترس هستند، تغییر و بررسی انواع مختلف کنترل به منظور گرفتن بازدهی بیشتر می باشد. حتی می توان در ادامه ی راه این پژوهش کنترلرهای مقاوم دیگری را با همین شرایط مقایسه نمود و به آن افزود. نوآوری جدید می تواند ترکیب مدل های کنترلی ارائه شده با یکدیگر یا ارائه ی یک راهکار به منظور تجمیع نقاط قوت هر کنترل کننده و حذف نقاط ضعف آن ها باشد، تا جوابی قابل قبول تر و یک مطالعه ی کامل تر در

این زمینه به دست آید. در قسمت ساخت هم می‌توان بدنه‌ی فلزی یا فیبر کربن برای استحکام بیشتر، ارائه مکانیزم کوچکتر و یا حتی استفاده از موتورهای قویتر و بیشتر را، پیشنهاد داد.

برای پژوهشی جدید در تکمیل این پایان‌نامه می‌توان موارد زیر را به بخش‌های مربوط به عنوان پیشنهاد بررسی و تحقیق نمود:

- استفاده از پردازش تصویر برای تشخیص مکان و جهت‌گیری جسم و یا مسیر هدف در فضای-کاری
- اضافه کردن موانع به محیط شبیه‌سازی در عملیات انتقال و سینماتیک معکوس
- اضافه نمودن معادلات حرکتی پلتفرم پایه به بازوی فضایی در هنگامی که بازو متصل به یک ماهواره هست یا مواردی از این قبیل.
- استفاده از معادلات بازوهای منعطف و در نظر گرفتن خمش برای بازوهای بلند ربات
- خطی‌سازی معادلات و استفاده از روش‌های کنترلی خطی
- کنترل سامانه‌های متصل به ربات همراه با کنترل ربات و یا استفاده از کنترلرهای چندگانه

فهرست منابع استفاده شده در پایان نامه

- [1] King, D. (2001, June). Space servicing: past, present and future. In *Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS* (pp. 18-22).
- [2] <http://iss.jaxa.jp/en/kibo/about/kibo/rms/>
- [3] https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/dictionary/Robotic_Arm.html
- [4] <https://www.slideshare.net/leifbloomquist1/uw-requirements-engineering>
- [5] http://news.softpedia.com/news/Workshop-Highlights-Advantages-of-Orbital-Refueling_139519.shtml
- [6] Cruijssen, H. J., Ellenbroek, M., Henderson, M., Petersen, H., Verzijden, P., & Visser, M. (2014). *The European Robotic Arm: A High-Performance Mechanism Finally on its way to Space*.
- [7] Boumans, R., & Heemskerk, C. (1998). The European robotic arm for the international space station. *Robotics and Autonomous Systems*, 23(1-2), 17-27.
- [8] Lambooy, P. J., Mandersloot, W. M., & Bentall, R. H. (1995). Some mechanical design aspects of the European Robotic Arm.
- [9] Feng, F., Tang, L., Xu, J., Liu, H., & Liu, Y. (2016). A review of the end-effector of large space manipulator with capabilities of misalignment tolerance and soft capture. *Science China Technological Sciences*, 1-18.
- [10] Romanelli, F. (2010). Hybrid control techniques for static and dynamic environments: a step towards robot-environment interaction. In *Robot Manipulators New Achievements. InTech*.
- [11] Cheein, F. A. A., di Sciascio, F., Toibero, J. M., & Carelli, R. (2010). Robot Manipulator Probabilistic Workspace Applied to Robotic Assistance. In *Robot Manipulators New Achievements. InTech*.
- [12] Pires, E. S., de Moura Oliveira, P. B., & Machado, J. T. (2010). Multi-criteria optimization manipulator trajectory planning. In *Robot Manipulators New Achievements. InTech*.
- [13] Kendricks, K. D. (2013). A kinematic analysis of the gmf a-510 robot: An introduction and application of groebner basis theory. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 16(2-3), 147-169.
- [14] Kendricks, K. (2007). Solving the inverse kinematic robotics problem: A comparison study of the Denavit-Hartenberg matrix and Groebner basis theory. Auburn University.
- [15] Díaz, J. F. A., Dutra, M. S., & Pinto, F. A. D. N. C. (2010). Kinematical and dynamical models of KR 6 KUKA robot, including the kinematic control in a parallel processing platform. In *Robot manipulators new achievements. InTech*.
- [16] Lee, C. S. G., & Ziegler, M. (1984). Geometric approach in solving inverse kinematics of PUMA robots. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (6), 695-706.
- [17] Xie, Z. (2013). Kinematic, dynamic and accuracy reliability analysis of 6 degree-of-freedom robotic arm. University of Missouri-Columbia.

- [18] Shahinpoor, M., Jamshidi, M., & Kim, Y. T. (1986). Exact solution to the inverse kinematics problem of a standard 6-axis robot manipulator. *Journal of Field Robotics*, 3(3), 259-280.
- [19] Hentout, A., Bouzouia, B., Akli, I., & Toumi, R. (2010). Mobile manipulation: a case study. In *Robot Manipulators New Achievements. InTech*.
- [20] Xie, J., Qiang, W., Liang, B., & Li, C. (2007, December). Inverse kinematics problem for 6-DOF space manipulator based on the theory of screws. In *Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on* (pp. 1659-1663). IEEE.
- [21] Sagara, S., & Taira, Y. (2010). Digital Control of Free Floating Space Robot Manipulators Using Transpose of Generalized Jacobian Matrix. In *Robot Manipulators New Achievements. InTech*.
- [22] Santolaria, J., & Aguilar, J. J. (2010). Kinematic calibration of articulated arm coordinate measuring machines and robot arms using passive and active self-centering probes and multipose optimization algorithm based in point and length constrains. In *Robot Manipulators New Achievements. InTech*.
- [23] Kawai, H., Murao, T., Sato, R., & Fujita, M. (2011, September). Passivity-based control for 2DOF robot manipulators with antagonistic bi-articular muscles. In *Control Applications (CCA), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 1451-1456). IEEE.
- [24] Ikeuchi, K., Horn, B. K., Nagata, S., Callahan, T., & Fein, O. (1983). Picking up an object from a pile of objects.
- [25] Wall, D. G. (2016). A graph-theory-based C-space path planner for mobile robotic manipulators in close-proximity environments.
- [26] www.vkii-fostdic.com/cms/index.../13-vkii-bsa-2007-3rd-winner-chamaken-alain
- [27] Swartz, Neil M. (1984) "Arm dynamics simulation." *Journal of Field Robotics* 1.1: 83-100.
- [28] Antonello, A. (2013). Design of a robotic arm for laboratory simulations of spacecraft proximity navigation and docking.
- [29] Panikulam, J. V. (2014). Design, Analysis and Control of a Free-Floating Robotic Arm for Spacecraft Maneuvering and Docking Test Facility.
- [30] Craig, J. J. (2005). Introduction to robotics: mechanics and control (Vol. 3, pp. 48-70). Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.
- [31] Ginsberg, J. H. (1998). Advanced engineering dynamics. Cambridge University Press.
- [32] Cannon Jr, R. H., & Schmitz, E. (1984). Initial experiments on the end-point control of a flexible one-link robot. *The International Journal of Robotics Research*, 3(3), 62-75.
- [33] Book, W. J. (1984). Recursive Lagrangian dynamics of flexible manipulator arms. *The International Journal of Robotics Research*, 3(3), 87-101.
- [34] Asada, H., Ma, Z. D., & Tokumaru, H. (1990). Inverse dynamics of flexible robot arms: modeling and computation for trajectory control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 112(2), 177-185.

- [35] Chen, W. (2001). *Dynamic modeling of multi-link flexible robotic manipulators. Computers & Structures*, 79(2), 183-195.
- [36] Lens, T., Kunz, J., & Von Stryk, O. (2010). *Dynamic modeling of the 4 DoF BioRob series elastic robot arm for simulation and control. Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, 411-422.
- [37] Sakawa, Y., Matsuno, F., & Fukushima, S. (1985). *Modeling and feedback control of a flexible arm. Journal of Field Robotics*, 2(4), 453-472.
- [38] Brannan, J. (2014). *Robotic simulation of flexible-body spacecraft dynamics in a satellite servicing testbed (Doctoral dissertation)*.
- [39] Dwivedy, S. K., & Eberhard, P. (2006). *Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review. Mechanism and machine theory*, 41(7), 749-777.
- [40] Plestan, F., Grizzle, J. W., Westervelt, E. R., & Abba, G. (2003). *Stable walking of a 7-DOF biped robot. IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(4), 653-668.
- [41] Pratt, J., Dilworth, P., & Pratt, G. (1997, April). *Virtual model control of a bipedal walking robot. In Robotics and Automation, 1997. Proceedings. 1997 IEEE International Conference on (Vol. 1, pp. 193-198). IEEE*.
- [42] Sugihara, T., Nakamura, Y., & Inoue, H. (2002). *Real-time humanoid motion generation through ZMP manipulation based on inverted pendulum control. In Robotics and Automation, 2002.Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on (Vol. 2, pp. 1404-1409). IEEE*.
- [43] Stephens, B. (2011). *Push recovery control for force-controlled humanoid robots. Carnegie Mellon University*.
- [44] Mu, X., & Wu, Q. (2006). *On impact dynamics and contact events for biped robots via impact effects. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 36(6), 1364-1372.
- [45] میری پور فرد ب، باقری ا، نریمان زاده ن. (۲۰۱۲). "مدل سازی دینامیکی ترکیبی یک ربات دوپا راه رونده چرخه حدی ناقص عملگر و کنترل آن در برابر اغتشاش خارجی ضربه ای".
- [46] Fareh, R., Saad, M., Saad, M., & Bettayeb, M. (2016). *Tracking trajectory in the workspace of rigid manipulators using distributed adaptive control strategy. Advanced Robotics*, 30(6), 361-373.
- [47] Bouakrif, F. (2010). *Trajectory tracking control for robot manipulators with no velocity measurement using semi-globally and globally asymptotically stable velocity observers. In Robot Manipulators New Achievements. InTech*.
- [48] Al-Hadithi, B. M., Jiménez, A., & Matía, F. (2010). *Fuzzy Optimal Control for Robot Manipulators. In Robot Manipulators New Achievements. InTech*.
- [49] Shimizu, K. (2010). *P-SPR-D and P-SPR-D+ I Control of Robot Manipulators and Redundant Manipulators. In Robot Manipulators New Achievements. InTech*.
- [50] Zhang, H., Wang, D., Wei, C., & Xiao, B. (2015). *End-Effector Trajectory Tracking Control of Space Robot with Gain Performance. Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- [51] Capisani, L. M., & Ferrara, A. (2012). *Trajectory planning and second-order sliding mode motion/interaction control for robot manipulators in unknown*

- environments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(8), 3189-3198.
- [52] García-Valdovinos, L. G., Parra-Vega, V., & Arteaga, M. A. (2007). Observer-based sliding mode impedance control of bilateral teleoperation under constant unknown time delay. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(8), 609-617.
- [53] Xiao, B., Yin, S., Kaynak, O., & Gao, H. (2016, April). Observer-based control for robotic manipulations with uncertain kinematics and dynamics. In *Advanced Motion Control (AMC), 2016 IEEE 14th International Workshop on* (pp. 282-288). IEEE.
- [54] Wang, H., & Xie, Y. (2012). On the recursive adaptive control for free-floating space manipulators. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 66(4), 443-461.
- [55] Wang, D., Zheng, L., Yu, H., Zhou, W., & Shao, L. (2016). Robotic excavator motion control using a nonlinear proportional-integral controller and cross-coupled pre-compensation. *Automation in Construction*, 64, 1-6.
- [56] Merabet, A., & Gu, J. (2010). Advanced Nonlinear Control of Robot Manipulators. In *Robot Manipulators New Achievements*. InTech.
- [57] Islam, S., & Liu, X. P. (2011). Robust sliding mode control for robot manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(6), 2444-2453.
- [58] Sagara, S., & Taira, Y. (2010). Digital Control of Free Floating Space Robot Manipulators Using Transpose of Generalized Jacobian Matrix. In *Robot Manipulators New Achievements*. InTech.
- [59] Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control* (Vol. 199, No. 1). Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall.
- [60] Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). *Robot modeling and control* (Vol. 3). New York: Wiley.
- [61] Sun, K., Liu, H., Xie, Z. W., & Ni, F. (2014). Structure design of an end-effector for the Chinese space station experimental module manipulator. In *Pro-ceedings of the 12th Intemational Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*. Montreal: Canadian Space Agency (pp. 1-8).
- [62] <https://www.universal-robots.com/products/>
- [63] <https://robotiq.com/products>
- [64] <https://wsn.spaceflight.esa.int/docs/Factsheets/7%20ERA%20LR.pdf>
- [65] http://robots.iit.edu/uploads/2/5/7/1/25715664/mmae540-lecture_2_manipulator_kinematics.pdf
- [66] <https://www.mathworks.com/help/robotics/ref/rotm2eul.html>
- [67] باریسی س، (۱۳۸۵)، پایان نامه کارشناسی: "مدل سازی، شبیه سازی و کنترل بازوهای مکانیکی در محیط گرافیکی"، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [68] <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/10647.pdf>
- [69] Kutilek, P., & Hajny, O. (2010). Study of human walking by Simmechanics. *Proc. The 18th Technical Computing*.
- [70] <http://www-robotics.cs.umass.edu/~qrupen/603/slides/DynamicsI.pdf>

- [71] *Chen, W. H., Ballance, D. J., Gawthrop, P. J., Gribble, J. J., & O'Reilly, J. (1999). Nonlinear PID predictive controller. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 146(6), 603-611.*

Abstract:

The main activities in this research are the complete simulation of the kinematics, dynamics, and the control of the spatial manipulator. The robot is in accordance with the “European Robotic Arm” Mechanism and similar space robots, with seven rotational degrees of freedom in its joints. Its movement is in the three-dimensional space and reaching its endpoint is according to the orientation and coordinates of the body or its desired path, which was the main purpose of this study. Therefore, it was necessary to completely study the workspace in order to achieve the inverse kinematics and transfer operations. A new algorithm for Inverse kinematics and a method for transmission is presented, and forward kinematics and all the topics of this section are obtained by utilizing the Rotational matrices in the 3D coordinates. The equations are derived from a 7-degree freedom robotics system which is very long and complex itself, so the way they are achieved and their correctness are essential. The dynamic equations of the robot are obtained with the Lagrange method and its correctness is proved using the dynamic simulator. With the help of kinematic and dynamical equations, a control system can be presented, therefore, with respect to the uncertainties in the system and the external disturbances as well as the viscous friction of the joints, a robust control can satisfy the control objectives. In this regard, several nonlinear robust control models are tested on the robot system. In general, the robust control is designed in two models “sliding mode” and “uncertain estimating”. This robot uses two grippers at the two ends of the manipulator, which can carry out various activities. Therefore, the mechanism and the type of gripper were important for this robot, and in the papers related to the European Space Robot, Gripper's performance has gained more attention towards itself. Therefore, a suitable gripper for different applications was designed and constructed for this robot and it is compared to a similar commercial model at the end of this article. In this paper a wide range of important robotic subjects has been studied in details.

Keywords: 7-DOF Robotic Arm, Inverse kinematic, Dynamic Equations, Robust Control, The end effector



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Applied Mechanics Engineering

**Dynamic Modeling, Trajectory Planning and Robust Control for
the European Robotic Arm**

By: Amin Zamanzadeh

Supervisor:

Dr. Habib Ahmadi

January 2018