

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی بهینه و کنترل ربات موازی استوارت با کاربری شبیه‌ساز پرواز

نگارنده: شهرام یعقوبی

استاد راهنما:

دکتر علی اکبر پویان

استاد مشاور:

دکتر سید مجتبی واردی کولایی

شهریور ۱۳۹۶



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای شهرام یعقوبی به شماره دانشجویی: ۹۳۱۸۵۲۴

تحت عنوان: طراحی بهینه و کنترل ربات موازی استوارت با کاربری شبیه ساز پرواز

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی

مکاترونیک مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : دکتر سید مجتبی واردی		نام و نام خانوادگی : دکتر علی اکبر پویان

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیر و شکر

تعهد نامه

اینجانب **شهرام یعقوبی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکترونیک دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک دانشگاه شاهرود، نویسنده پایان نامه "طراحی بهینه و کنترل ربات موازی استوارت با کاربری شبیه ساز پرواز" تحت راهنمایی دکتر علی اکبر پویان متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه 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 بافت 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 اخلاقی 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 افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه 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.

چکیده:

این پایان‌نامه طراحی بهینه و کنترل ربات موازی استوارت را با کاربری سکوی حرکتی یک شبیه‌ساز پرواز هدف قرار داده است. سکوی حرکتی یک شبیه‌ساز پرواز باید فضای کاری انتقالی و دورانی مشخصی داشته باشد تا بتواند حالت پرواز واقعی را در محدوده حرکت خود برای خلبان تداعی کند. طراحی بهینه ربات موازی استوارت برای یک فضای کاری دلخواه نیازمند روشی سریع با دقت قابل قبول برای محاسبه فضای کاری در حلقه‌های بهینه‌سازی است. از آنجا که فضای کاری ربات موازی استوارت در دو زیر فضای انتقالی و دورانی به هم وابسته است، عموماً مسئله به دست آوردن فضای کاری و طراحی بهینه ربات، به صورت سلسله مراتبی در دو زیر فضای انتقالی دوران-ثابت یا دورانی انتقال-ثابت صورت می‌پذیرد. در همین راستا، پژوهش حاضر با ترکیب روش هندسی و گسسته‌سازی، روشی سریع با دقت قابل قبول برای محاسبه فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت ارائه کرده است. در ادامه، مسئله طراحی بهینه ربات موازی استوارت برای یک فضای کاری مکعبی شکل درون فضای کاری دوران ثابت ربات مطرح شده است. در مسئله بهینه‌سازی نسبت حجم فضای کاری دلخواه به حجمی که ربات در موقعیت خانگی خود اشغال می‌کند، برای بهینه‌سازی اندازه فیزیکی ربات در نظر گرفته شده است. همچنین، بررسی چالاکای ربات بر اساس معیار عدد حالت در مسئله بهینه‌سازی وارد شده است. مسئله بهینه‌سازی چند هدفه ربات به صورت تابعی از جمع وزن دار معیارهای ذکر شده در نرم افزار متلب حل شده و نتایج آن ارائه شده است. در آخر، روش کنترل تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه و روش کنترل مقاوم مد لغزشی برای سکوی بهینه ربات موازی استوارت طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند.

کلمات کلیدی:

شبیه‌ساز حرکتی پرواز، ربات موازی استوارت، بهینه‌سازی سینماتیکی، فضای کاری دوران ثابت، معیار چالاکای، طراحی مسیر، کنترل مد لغزشی

لیست مقالات چاپ شده و پذیرفته شده

- ✓ Sh. Yaghuobi, A. A. Pouyan and S. M. Varedi, “**Optimum Design of Gough-Stewart Parallel Robot for a Desired Cubic volume in the Constant-Orientation Workspace**“, 1St International Conference on New Achievements in Science and Technology, 24 August 2017, Tehran, Iran. (In Persian)

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵	فهرست شکل‌ها
۷	فهرست جدول‌ها
۱	۱- فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- معرفی شبیه‌سازهای حرکتی
۷	۱-۲- اهمیت و تاثیر استفاده از شبیه‌سازهای حرکتی
۷	۱-۳- اهداف پژوهش حاضر و بیان نوآوری‌ها
۸	۱-۴- ساختار پایان‌نامه
۱۱	۲- فصل دوم: تاریخچه شبیه‌سازهای پرواز
۱۲	۲-۱- ظهور شبیه‌سازهای پرواز
۱۶	۲-۲- بخش‌های مختلف یک شبیه‌ساز تجاری
۱۷	۲-۳- انواع مکانیزم‌های حرکتی در شبیه‌سازهای پرواز
۲۰	۲-۴- انواع مانورهای پرواز و ویژگی‌های آنها
۲۵	۳- فصل سوم: ربات موازی استوارت
۲۶	۳-۱- معرفی ربات موازی استوارت
۲۹	۳-۲- سینماتیک ربات موازی استوارت
۳۷	۳-۳- ژاکوبین ربات موازی استوارت
۳۹	۳-۴- استاتیک و دینامیک ربات موازی استوارت
۴۷	۳-۵- اعتبارسنجی مدل‌سازی کامپیوتری ربات موازی استوارت
۵۱	۴- فصل چهارم: طراحی بهینه ربات موازی استوارت
۵۲	۴-۱- مقدمه‌ای در بحث طراحی بهینه ربات‌های موازی
۵۳	۴-۲- فضای کاری ربات
۶۳	۴-۳- شاخص چلاکی ربات

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۶۷	۴-۴- اندازه فیزیکی ربات
۶۹	۴-۵- طرح و حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه ربات
۸۱	۵- فصل پنجم: کنترل سکوی استوارت در شبیه‌سازی مانورهای پرواز
۸۲	۵-۱- طراحی مسیر برای مانورهای پرواز
۸۹	۵-۲- مقدمه‌ای در بحث کنترل ربات‌های موازی
۹۳	۵-۳- طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه
۱۰۲	۵-۴- طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی
۱۰۸	۵-۵- مقایسه نتایج و بحث
۱۱۱	۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۱۲	۶-۱- جمع‌بندی و بیان دست‌آوردها
۱۱۴	۶-۲- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها
۱۱۸	۷- پیوست‌ها
۱۱۹	۸- فهرست مراجع

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ شش درجه آزادی یک جسم صلب در فضای دکارتی	۳
شکل ۲-۱ تفاوت میان سوارِ فعال و سوارِ غیرفعال در شبیه‌سازهای حرکتی	۵
شکل ۳-۱ تصویر چند نمونه از شبیه‌سازهای حرکتی	۶
شکل ۴-۱ ساختار پایان نامه	۹
شکل ۱-۲ تصویری از یک شبیه‌ساز اولیه پرواز	۱۳
شکل ۲-۲ تصویری از شبیه‌ساز پرواز لینک‌ترینر	۱۳
شکل ۳-۲ شبیه‌ساز پرواز کامت ۴	۱۴
شکل ۴-۲ نمونه‌های موفق امروزی شبیه‌سازهای پرواز	۱۵
شکل ۵-۲ بخش‌های مختلف یک شبیه‌ساز تجاری پرواز	۱۶
شکل ۶-۲ تصویری از سکوهایی حرکتی با مکانیزم‌های متفاوت	۱۸
شکل ۷-۲ تعریف محورهای دوران رول ، پیچ و یاو برای یک هواپیما	۲۱
شکل ۸-۲ نمایش مانورهای دورانی هواپیما در سه سکانس متفاوت	۲۲
شکل ۹-۲ نمایش مانورهای انتقالی هواپیما در سه سکانس متفاوت	۲۳
شکل ۱-۳ تصویری از ربات‌های گاف در صنعت تولید تایر خودرو	۲۶
شکل ۲-۳ تصویری از ربات موازی شش‌پا کلاس کاپل	۲۷
شکل ۳-۳ طرح پیشنهادی استوارت و داوران برای سکوی حرکتی شبیه‌ساز پرواز	۲۸
شکل ۴-۳ معماری‌های متداول ربات موازی استوارت	۲۹
شکل ۵-۳ نمایی شماتیک از یک ربات موازی استوارت	۳۰
شکل ۶-۳ نمایی شماتیک از ربات موازی استوارت با صفحه ثابت و متحرک مشابه	۳۲
شکل ۷-۳ نمودار جسم آزاد صفحه متحرک ربات و یکی از بازوهای آن	۴۰
شکل ۸-۳ نمودار جسم آزاد صفحه متحرک و یک بازوی ربات موازی استوارت	۴۲
شکل ۹-۳ موقعیت و دوران صفحه متحرک ربات در فضای دکارتی	۴۸
شکل ۱۰-۳ نرخ زمانی موقعیت و دوران صفحه متحرک ربات در فضای دکارتی	۴۹
شکل ۱-۴ تصویر سه بُعدی ربات موازی استوارت دلخواه جدول ۲-۳	۵۷
شکل ۲-۴ تصویر شش جفت کره‌های فضای کاری ربات موازی استوارت دلخواه جدول ۲-۳	۵۸
شکل ۳-۴ نمای کامل مقاطع دو بُعدی از کره‌های فضای کاری	۵۹
شکل ۴-۴ نمایی از مقاطع دو بُعدی کره‌های فضای کاری	۶۰
شکل ۵-۴ تصویر فضای کاری ربات در صفحات افقی و عمودی با گسسته‌سازی در دو بُعد	۶۰
شکل ۶-۴ فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه با جهتگیری مبدا	۶۱
شکل ۷-۴ فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه با گسسته‌سازی در سه بُعد	۶۲
شکل ۸-۴ چالاکي دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه بر اساس معیار عدد حالت	۶۶
شکل ۹-۴ چالاکي دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه با معکوس معیار عدد حالت	۶۶

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۶۷	شکل ۴-۱۰ نمونه فضای کاری مطلوب با حجم معکبی شکل
۶۸	شکل ۴-۱۱ نمایی دو بعدی در صفحه $x-z$ از مقطع ربات موازی استوارت در موقعیت خانگی
۷۱	شکل ۴-۱۲ تعریف پارامترهای بهینه‌سازی بر روی صفحات ربات موازی استوارت
۷۲	شکل ۴-۱۳ رسم چیدمان شش ضلعی منتظم و MSSM از نمای بالا
۷۶	شکل ۴-۱۴ فضای کاری دوران ثابت و مطلوب نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی ربات استوارت
۷۷	شکل ۴-۱۵ نسبت طول اعضای ربات موازی استوارت به ازای نتایج جدول ۴-۲
۷۷	شکل ۴-۱۶ چالاک‌ی ربات استوارت با معکوس معیار عدد حالت برای نتایج جدول ۴-۲
۸۵	شکل ۵-۱ مسیر حرکت ربات در دو نمای سه بعدی و نمای بالا
۸۶	شکل ۵-۲ موقعیت، سرعت و شتاب مسیر طراحی شده حرکت در راستای سه محور
۸۸	شکل ۵-۳ ساختار کلی سیستم کنترل در ربات‌های موازی
۸۹	شکل ۵-۴ ساختار کنترل ربات‌های موازی در فضای مفصلی و بازخورد سینماتیک مستقیم
۸۹	شکل ۵-۵ ساختار کنترل ربات‌های موازی مبتنی بر سینماتیک معکوس
۹۰	شکل ۵-۶ ساختار کنترلی ربات‌های موازی مبتنی بر ترانهاده معکوس ماتریس ژاکوبین
۹۱	شکل ۵-۷ ساده‌ترین ساختار کنترل‌کننده تناسبی - مشتقی برای ربات‌های موازی
۹۲	شکل ۵-۸ ساختار کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌کننده پیش‌خور
۹۳	شکل ۵-۹ ساختار کنترل دینامیک معکوس
۹۵	شکل ۵-۱۰ کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه
۹۸	شکل ۵-۱۱ ردیابی مسیر در نمای سه‌بعدی کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی و جبران‌ساز جاذبه
۹۹	شکل ۵-۱۲ خطای ردیابی مسیر حرکت با کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی و جبران‌ساز جاذبه
۹۹	شکل ۵-۱۳ نیروی محرکه‌های خطی ربات با کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی و جبران‌ساز جاذبه
۱۰۴	شکل ۵-۱۴ ساختار کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی
۱۰۴	شکل ۵-۱۵ ردیابی مسیر حرکت در فضای سه‌بعدی با کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی
۱۰۵	شکل ۵-۱۶ خطای ردیابی مسیر حرکت با کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی
۱۰۵	شکل ۵-۱۷ نیروی محرکه‌های خطی ربات با کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ مقایسه مهمترین شاخصه‌های ربات‌های سری و موازی	۲۰
جدول ۲-۲ رنج حرکت چند نمونه از شبیه‌سازهای حرکتی	۲۴
جدول ۱-۳ نام و نماد پارامترهای استفاده شده در فرم بسته معادلات دینامیکی ربات	۴۳
جدول ۲-۳ پارامترهای دلخواه ربات موازی استوارت در اعتبار سنجی معادلات دینامیکی	۴۸
جدول ۱-۴ مقدار پارامترهای ΘA و ΘB برای سه چیدمان متفاوت ربات موازی استوارت	۷۲
جدول ۲-۴ نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی ربات موازی استوارت با وزن‌های متفاوت	۷۵
جدول ۱-۵ متداول‌ترین توابع چندجمله‌ای برای طراحی مسیر حرکت ربات‌ها	۸۲
جدول ۲-۵ نمونه‌هایی از مسیر هارمونیک و سیکلوئید	۸۳
جدول ۳-۵ بهره‌های کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه	۹۷
جدول ۴-۵ بهره‌های کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی	۱۰۴
جدول ۵-۵ مقایسه شاخصه‌های عملکرد کنترل‌کننده‌ها	۱۰۷

فصل اول:

مقدمہ

فصل اول با بیان کلیات و مفاهیم مقدماتی در بحث شبیه‌سازهای حرکتی، فضا سازی لازم برای ورود به موضوع شبیه‌سازهای پرواز را ایجاد می‌کند و با تکیه بر اهمیت و تاثیر استفاده از شبیه‌سازها، ارزش علمی و اهمیت این موضوع پژوهشی را مطرح می‌کند. همچنین در ادامه، اهداف و نوآوری‌هایی که در این تحقیق دنبال می‌شوند را معرفی کرده و ساختار کلی پایان‌نامه را در راستای تحقق اهداف پژوهش، تشریح می‌کند.

۱-۱- معرفی شبیه‌سازهای حرکتی

یک شبیه‌ساز حرکت^۱ در واقع مکانیزمی است که شخص یا اشخاصی را درون خود جای داده و اثر و احساس حرکت در یک وسیله نقلیه متحرک را برای آنها ایجاد می‌کند. شخص یا اشخاصی که درون یک شبیه‌ساز حرکتی جای می‌گیرند عموماً سوار شبیه‌ساز^۲ خطاب می‌شوند. هدف یک شبیه‌ساز حرکتی این است که حس قابل لمسی از حرکت برای سوار خود ایجاد کند. هنگامیکه حرکت شبیه‌ساز با صدا و تصویری از حرکت وسیله نقلیه مورد نظر همگام شود نتیجه بهتری ایجاد می‌کند که در واقع ترکیبی از حس بینایی، شنوایی و لامسه از حرکت است [۱]. این نشانه‌های حرکتی ذهن سوار را به نحوی فریب می‌دهد که احساس کند درون محیط شبیه‌سازی وارد شده است و در حال تجربه تغییرات سینماتیکی از قبیل موقعیت، سرعت و شتاب است. چنانچه ذهن سوار نتواند تجربه حرکتی مورد نظر را بپذیرد دچار بیماری حرکت‌زدگی^۳ [۲] (احساسی مشابه با دریازدگی یا خودرو زدگی) می‌شود. سکوه‌های حرکتی^۴ در شبیه‌سازها می‌توانند تا شش درجه آزادی را در فضای دکارتی برای یک جسم صلب فراهم کنند که شامل سه انتقال و سه دوران مطابق تصویر نشان داده شده در شکل ۱-۱ است. با این حال، از جنبه فیزیکی غیرممکن است که بتوان نفس حقیقی حرکت یک وسیله نقلیه را به طور دقیق در محیط

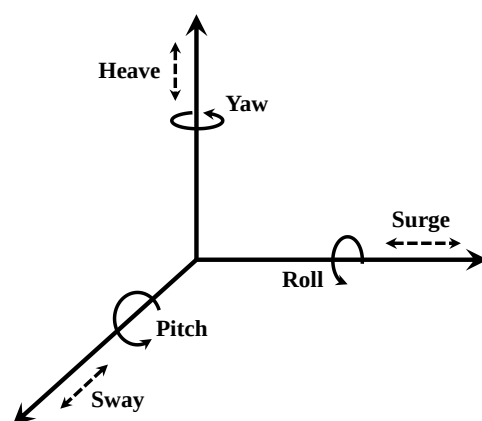
^۱ Motion Simulator

^۲ Simulator Ride

^۳ Motion Sickness

^۴ Motion Platforms

محدود آزمایشگاه شبیه‌سازی کرد. برای مثال، به لحاظ فیزیکی نمی‌توان انتقال وسیله نقلیه را مگر در محدوده‌ای مشخص شبیه‌سازی کرد، چراکه سکوی‌های حرکتی مقید بوده و رنج حرکتی محدودی دارند. خوشبختانه با تکیه بر عیوب سیستم حسی و ادراکی انسان می‌توان بستری ایجاد کرد که بدن انسان حرکت را در محدوده‌ای وسیع درک کند بدون اینکه لازم باشد بیش از مقدار معینی جابجا شود [۳]. در واقع این به معنی استفاده از فریب‌های حرکتی^۱ در شبیه‌سازها است.



شکل ۱-۱ شش درجه آزادی یک جسم صلب در فضای دکارتی

نگرش استاندارد به مسئله شبیه‌سازی حرکت، تلاش برای شبیه‌سازی هر چه نزدیکتر آن دسته از نشانه‌های حرکتی است که درک حرکت را تسهیل می‌کنند. جابجایی و سرعت را نمی‌توان به تنهایی با استفاده از نشانه‌های نسبی درک کرد به این معنی که بدون دریافت نشانه‌های بصری، درک انسان از حرکت با سرعت ثابت تفاوتی با سکون ندارد. حال آنکه تغییرات سرعت به شکل شتاب توسط بدن درک می‌شوند و اثر آن به شکل نیرویی که به بدن وارد می‌شود قابل لمس است. به همین خاطر تمرکز بر روی شتاب به عنوان مهمترین نشانه تغییر در وضعیت حرکت بیشتر است. از طرف دیگر نشانه‌های بصری و شنوایی به سوار کمک می‌کند تا موقعیت خود را در فضای حرکت بهتر درک کند. از جمله فریب‌هایی که با هدف تداعی کردن حرکت انتقالی در مقیاس بزرگ به کار گرفته می‌شود استفاده از جابجایی و حرکت در فضای واقعیت مجازی^۲ بر روی نمایشگرهای سامانه شبیه‌ساز حرکتی است. اما

^۱ Motion Tricks

^۲ Virtual Reality

مسئله در ارتباط با دوران کاملاً متفاوت است و استفاده از فریب‌های حرکتی واقعیت مجازی برای تداعی کردن دوران ممکن نیست. این تفاوت از سیستم پایداری و تعادل انسان معروف به وستیبولار سیستم^۱ ناشی می‌شود که در گوش میانی واقع شده است. وستیبولار سیستم شتاب‌های زاویه‌ای را از طریق سه کانال نیم‌دایره‌ای^۲ درک می‌کند که دو به دو بر هم عمودند. در حالی که شتاب‌های خطی در سیستم وستیبولار از ساختاری به نام اوتولیتس^۳ درک می‌شود. درک شتاب‌های خطی فرایندی ساده‌تر و سریع‌تر دارد در حالی که درک شتاب‌های زاویه‌ای فرایند پیچیده‌تر و طولانی‌تری دارد. تفاوت در عملکرد ارگان‌هایی که شتاب‌های خطی و زاویه‌ای را درک می‌کنند باعث می‌شود تا درک شتاب‌های زاویه‌ای نسبت به حس بینایی، شنوایی و لامسه با تاخیر همراه بوده و دارای آستانه ادراک باشد [۴]. در نتیجه برای تداعی کردن دوران‌های بزرگ و پیوسته، شبیه‌ساز حرکت پس از انجام یک دوران با شتابی زیر آستانه ادراک به وضعیت اولیه خود باز می‌گردد تا برای انجام دوران بعد قابلیت حرکت داشته باشد. به این ترتیب می‌توان دوران‌های بزرگ و پیوسته وسیله نقلیه را در رنج حرکتی محدود شبیه‌ساز برای سوار تداعی کرد. البته استفاده از این فریب حرکتی برای دوران‌های سریع ممکن نیست چرا که شتاب برگشت به وضعیت اولیه با شتاب آستانه ادراک انسان محدود شده است. به همین خاطر است که در اکثر شبیه‌سازهای حرکت تلاش می‌شود تا از دوران‌های سریع و بزرگ دوری کنند. شایان ذکر است که این ترفند مناسب دوران یابو می‌باشد که تاثیری در ایجاد مولفه‌های خطی شتاب ناشی از گرانش ندارد. برای دوران‌های رول و پیچ که باعث می‌شود بردار گرانش مولفه‌هایی در شتاب خطی حرکت ایجاد کند، پیاده‌سازی این ترفند دشوارتر است. در نتیجه اغلب شبیه‌سازهای حرکت حداقل‌های حرکت دورانی وسیله نقلیه را در نظر می‌گیرند و از فریب‌های حرکتی برای تداعی کردن دوران کمتر استفاده می‌کنند. در پیاده‌سازی فریب‌های حرکتی فیلترهای واش‌آوت^۴ نقش کلیدی ایفا می‌کنند [۵]. هنگام حرکت پایدار

^۱ Vestibular System

^۲ Semicircular Canals

^۳ Otoliths

^۴ Washout Filters

بدن، سیستم وستیبولار انسان همواره خود را به صورت خودکار به عنوان مبدا حرکت متمرکز می‌کند. فیلترهای واش‌آوت سینگال‌های فرکانس پایین را هنگامیکه شبیه‌ساز با شتابی زیر آستانه ادراک انسان به موقعیت اولیه خود باز می‌گردد، حذف می‌کنند تا فریب‌های حرکتی به درستی برای سوار تداعی شده و متوجه حرکت پنهان شبیه‌ساز نشود [۶]. شبیه‌سازهای حرکتی را بر اساس دخالت سوار در کنترل حرکت سکو، به دو دسته تقسیم می‌کنند. دسته اول شبیه‌سازهایی هستند که سوار حرکت آنها را کنترل می‌کند (سوار فعال^۱ نامیده می‌شوند) و دسته دوم شبیه‌سازهایی هستند که سوار در کنترل حرکت سکو دخالتی ندارد و سکو بر مبنای الگویی از پیش تعیین شده حرکت داده می‌شود (سوار غیرفعال^۲ نامیده می‌شوند) [۱]. شکل ۱-۲ تفاوت میان سوار فعال و سوار غیرفعال را در دو نمونه از شبیه‌سازهای حرکتی نشان می‌دهد.



(ب) سوار فعال در یک شبیه‌ساز حرکتی هلیکوپتر

(الف) سوار غیرفعال

شکل ۱-۲ تفاوت میان سوار فعال و سوار غیرفعال در شبیه‌سازهای حرکتی

به طور کلی سکوه‌های حرکتی بنا به مقیاس و قیمت بسیار گسترده‌اند. نمونه‌های صنعتی و نظامی در بالاترین سطح از طیف شبیه‌سازهای حرکتی قرار دارند در حالی که نمونه‌های تفریحی، آزمایشگاهی و خانگی به لحاظ قیمت و مقیاس در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرند [۷]. ابتدایی‌ترین شبیه‌سازهای

^۱ Active Rider

^۲ Passive Rider

حرکتی، شبیه‌سازهای پرواز^۱ بودند [۸]. در حالی که امروزه علاوه بر شبیه‌سازهای پرواز [۹، ۱۰]، شبیه‌سازهای حرکتی در زمینه شبیه‌ساز رانندگی [۱۱، ۱۲]، شبیه‌ساز قایق [۱۳]، شبیه‌ساز موتورسیکلت [۱۴]، شبیه‌ساز تانک جنگی [۱۵] و غیره معرفی شده‌اند. شکل ۱-۳ نمونه‌هایی از این شبیه‌سازهای حرکتی را نشان می‌دهد.



(ب) شبیه‌ساز ارزان قیمت پرواز هلیکوپتر [۱۰]



(الف) شبیه‌ساز پرواز دیاموند [۹]



(د) شبیه‌ساز کامل مسابقات رانندگی [۱۲]



(ج) شبیه‌ساز رانندگی برای اتوبوس شهری [۱۱]

^۱ Flight Simulators



و) شبیه‌ساز حرکتی تانک [۱۵]

ه) شبیه‌ساز حرکتی موتور سیکلت [۱۴]

شکل ۱-۳ تصویر چند نمونه از شبیه‌سازهای حرکتی

۱-۲- اهمیت و تاثیر استفاده از شبیه‌سازهای حرکتی

اولین هدف استفاده از شبیه‌سازهای حرکتی، به وجود آوردن فرصتی ایمن و کم هزینه برای تجربه هدایت وسایل نقلیه متفاوت است. با استفاده از یک شبیه‌ساز حرکتی می‌توان تجربه هدایت یک وسیله نقلیه را به طور واقعی برای سوار تداعی کرد به طوری که بتواند با چالش‌ها و خطرات هدایت وسیله نقلیه رو به رو شده و با بدست آوردن تجربه‌های متعدد و کم هزینه مهارت کنترل و هدایت وسیله نقلیه مورد نظر را بدست آورد. اگرچه طراحی و ساخت شبیه‌سازهای کامل و تجاری هزینه‌های زیادی دارد اما در مقایسه با هزینه‌های جانی و مالی سوانح واقعی ناشی از خطاهای انسانی و مهندسی، بسیار مقرون به صرفه است. استفاده از شبیه‌سازها غالباً در زمینه‌های پر خطر رواج دارد که نمی‌توان عملکرد سیستم را در یک آزمایش واقعی بررسی کرد و از طرفی تحلیل عملکرد سیستم نیاز حیاتی به انجام این آزمایش دارد. از طرف دیگر، از شبیه‌سازهای حرکتی می‌توان برای آزمایش و ارزیابی تکنولوژی‌های جدید در زمینه محرکه‌ها^۱ و پیش‌رانها^۲، حساسه‌ها^۳، سیستم‌های کنترل و هدایت^۴ استفاده کرد. به عنوان مثال، تاثیر استفاده از یک سیستم ترمز جدید را می‌توان بررسی کرد. استفاده از شبیه‌سازهای حرکتی بستر

^۱ Actuators

^۲ Thrusters

^۳ Sensors

^۴ Navigation and Control Systems

مناسبی برای تحلیل و تصدیق بازدهی و طراحی وسایل نقلیه به وجود آورده است. با استفاده از شبیه-سازهای حرکت بدون اینکه نیاز به ساختن نمونه‌سازی‌های گران قیمت باشد می‌توان دینامیک وسیله نقلیه مورد نظر را به شکل مدل کامپیوتری درآورده و پاسخ دینامیکی سیستم را به ورودهای کنترلی متفاوت در رفتار سکوی شبیه‌ساز بررسی کرد.

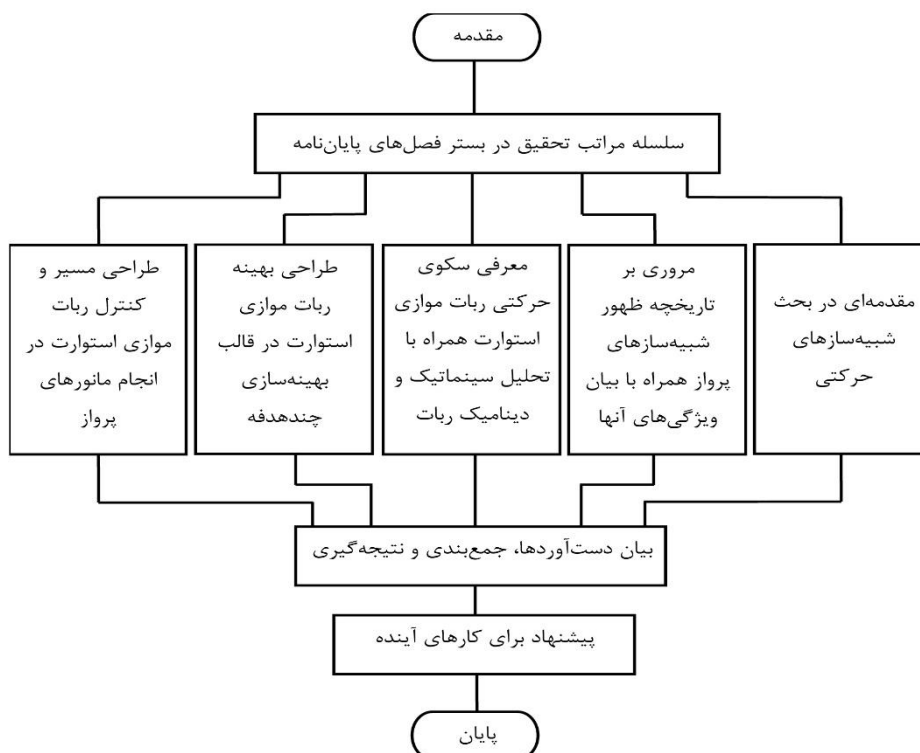
۱-۳- اهداف پژوهش حاضر و بیان نوآوری‌ها

پژوهش حاضر در گام اول مطالعه جامع تعاریف، مفاهیم و نیازمندی‌های یک شبیه‌ساز پرواز را مد نظر قرار داده است. سپس بر پایه‌ی مطالعات انجام شده، طراحی بهینه و کنترل سکوی حرکتی ربات موازی استوارت را با کاربری شبیه‌ساز پرواز به عنوان هدف اصلی این پژوهش مطرح کرده است. ویژگی‌هایی از قبیل ساختار و هندسه ربات، نوع محرکه‌ها، ابعاد و فضای کاری مورد نیاز باعث می‌شود که طراحی بهینه ربات موازی استوارت به عنوان سکوی حرکتی یک شبیه‌ساز پرواز مسئله چالش برانگیزی باشد. بنابراین با توجه به لازمه‌ها و نیازهای هر کاربرد می‌توان طراحی متفاوتی برای مکانیزم موازی استوارت ارائه کرد. در واقع چالش اصلی، تعریف مسئله بهینه‌سازی متناسب با کاربری ربات و حل آن است. در مسئله بهینه‌سازی، معیارهای یک طراحی بهینه، قیودی که به مسئله اعمال می‌شود و روش حل مسئله بیشترین اهمیت را دارد. نوآوری پژوهش حاضر در طراحی بهینه ربات موازی استوارت، طرح یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه و حل آن با استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب^۱ به روش ترکیبی هندسی و گسسته‌سازی فضای کاری در سه بُعد است. با اتکا به قابلیت‌های محاسباتی نرم‌افزار متلب، تلاش شده است تا در روش ترکیبی مزیت‌های هر دو روش حفظ شده و در عین حال محدودیت‌های آنها به حداقل رسیده باشد. در واقع از این دو روش به نحو مکمل یکدیگر استفاده شده است و هر کدام از روش‌ها در مراحل استفاده شده‌اند که مزیت بیشتری در دقت و سرعت انجام محاسبات دارند.

^۱ MATLAB Software

۴-۱- ساختار پایان نامه

ساختار پایان نامه در نمودار درختی شکل ۴-۱ به تصویر کشیده شده است. در ابتدای فصل دوم، تاریخچه ظهور و گسترش شبیه‌سازهای پرواز مرور می‌شود. پس از آن، بخش‌های مختلف یک شبیه‌ساز کامل و تجاری معرفی می‌شود. سپس انواع مکانیزم‌های سکوی حرکتی به عنوان مهم‌ترین بخش یک شبیه‌ساز پرواز معرفی شده و بایکدیگر مقایسه می‌شوند. در ادامه نیز مانورهای پرواز در یک چارچوب کلی معرفی می‌شوند. فصل سوم با معرفی ربات موازی استوارت آغاز می‌شود. پس از آن به ترتیب سینماتیک معکوس، سینماتیک مستقیم، تحلیل ژاکوبین، استاتیک و دینامیک ربات موازی استوارت به شکل تحلیلی بیان می‌شود. در انتهای فصل سوم، بر پایه معادلات و روابط تحلیلی سینماتیک و دینامیک، یک ربات موازی استوارت با پارامترهای دلخواه به شکل کامپیوتری مدل سازی شده تا صحت مدل سازی ریاضی ربات تحقیق گردد. در فصل چهارم ابتدا مقدمه‌ای در ارتباط با بهینه‌سازی ربات‌های موازی بیان می‌شود. پس از آن بحث فضای کاری ربات موازی استوارت همراه با بیان چالش‌ها و راه حل‌ها مطرح شده است.



شکل ۴-۱ ساختار پایان نامه

سپس در ارتباط با مفهوم چالاکي و معيارهاي اندازه‌گيري آن صحبت شده است. در ادامه اندازه فيزيكي ربات در قالب حجم فضاي اشغال شده توسط ربات بررسي شده است. طراحي بهينه ربات در قالب يك مسئله بهينه‌سازي چند هدفه با دو معيار اندازه فيزيكي و شاخص چالاکي طرح شده است در حالي كه قرار گرفتن فضاي كاري دلخواه در فضاي كاري ربات قيد مسئله بهينه‌سازي است. در انتهاي فصل چهارم، مسئله بهينه‌سازي چندهدفه ربات با استفاده از ابزارهاي بهينه‌سازي نرم افزار متلب به چند روش حل شده و نتايج آن با هم مقايسه شده است. در فصل پنجم ابتدا روش‌هاي طراحي مسير مانورهاي پرواز مطرح شده است. در ادامه كنترل‌كننده‌هاي تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه و مد لغزشی مقاوم بر پایه معادلات ديناميكي ربات طراحي شده است. سپس عملکرد سكوي بهينه استوارت در انجام مانورهاي پرواز با كنترل‌كننده‌هاي تناسبی-مشتقی و كنترل‌كننده مقاوم مد لغزشی بدست آمده و باهم مقايسه شده‌اند. در فصل ششم به دستاوردهاي پژوهش حاضر اشاره شده و جمع بندي و نتيجه‌گيري بيان شده است. در انتهاي فصل ششم، پيشنهادهايي نيز براي ادامه كار مطرح شده‌اند.

فصل دوم:

تاریخچه شیوه‌های پرواز

فصل دوم ابتدا تاریخچه ظهور و توسعه شبیه‌سازهای حرکتی پرواز را تا رسیدن به نمونه‌های امروزی این شبیه‌سازها مرور می‌کند و بخش‌های اساسی یک شبیه‌ساز پرواز را برای رسیدن به یک نمونه تجاری توسعه‌یافته و کارآمد بیان می‌کند. پس از آن، مرسوم‌ترین مکانیزم‌های سکوی حرکت را از لحاظ ساختاری و ویژگی‌های حرکتی با هم مقایسه می‌کند. در آخر، مانورهای پرواز را برای یک سکوی موازی حرکت معرفی کرده و حدود آن را در سایر نمونه‌های پیشین بررسی می‌کند.

۲-۱- ظهور شبیه‌سازهای پرواز

ابتدایی‌ترین شبیه‌ساز حرکتی پرواز معروف به ساندرز تیچر^۱ است که در سال ۱۹۱۰ ساخته شد [۱۶]. این شبیه‌ساز در واقع یک سازه بود که صفحات قابل کنترل آن با مفصل یونیورسال^۲ به زمین متصل شده بود و سوار تنها زمانی که باد می‌وزید می‌توانست با تنظیم وضعیت صفحات، سازه را در سه جهت دورانی بچرخاند. بیشتر شبیه‌سازهای بدوی پرواز در دوره جنگ جهانی اول تنها با هدف آموزش هدف-گیری در مانور هواپیماهای جنگی طراحی و ساخته شدند. شکل ۲-۱ تصویری از یک شبیه‌ساز اولیه پرواز را در دهه ۱۹۱۰ نشان می‌دهد. سرشناس‌ترین شبیه‌ساز بدوی پرواز معروف به لینک ترینر^۳ است [۱] که در فاصله سال‌های ۱۹۲۷ تا ۱۹۳۰ توسط ادوین لینک^۴ در آمریکا طراحی، ساخته و ثبت اختراع شده است. شکل ۲-۲ تصویری از اولین نمونه ساخته شده لینک ترینر را نشان می‌دهد که در موزه هوایی نامپا^۵ نگهداری می‌شود. در شبیه‌ساز لینک ترینر که حرکت دورانی هواپیماهای جنگی را شبیه‌سازی می‌کرد، دوران رول و پیچ از طریق دو محرکه خطی نیوماتیکی تامین می‌شد در حالی که دوران یاو با بهره‌گیری از یک موتور مکش هوا ایجاد می‌شد [۸]. البته معرفی لینک ترینر با استقبال چندانی رو به رو نشد تا زمانی که تعداد قابل توجهی از خلبان‌هایی که مجبور بودند در هر شرایط آب

^۱ Sanders Teacher

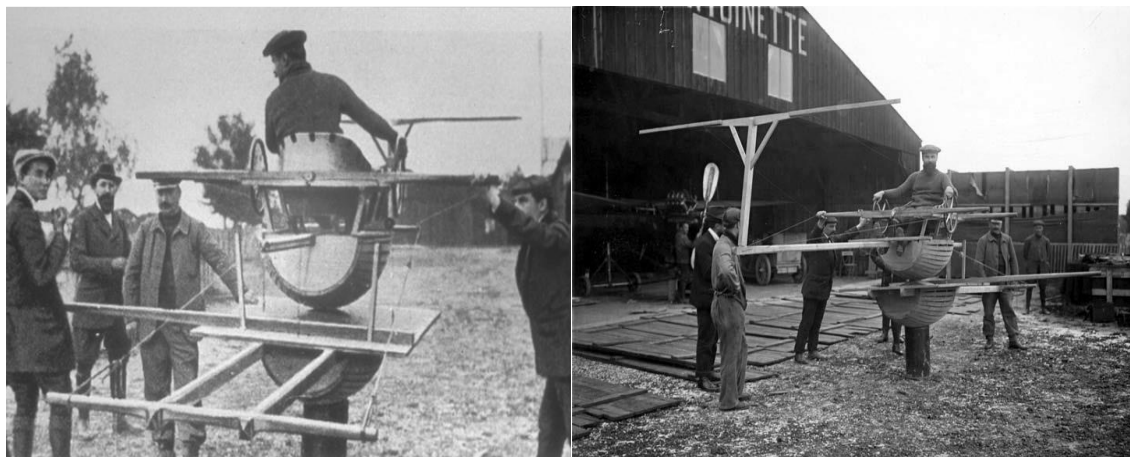
^۲ Universal Joint

^۳ Link Trainer

^۴ Edwin Link

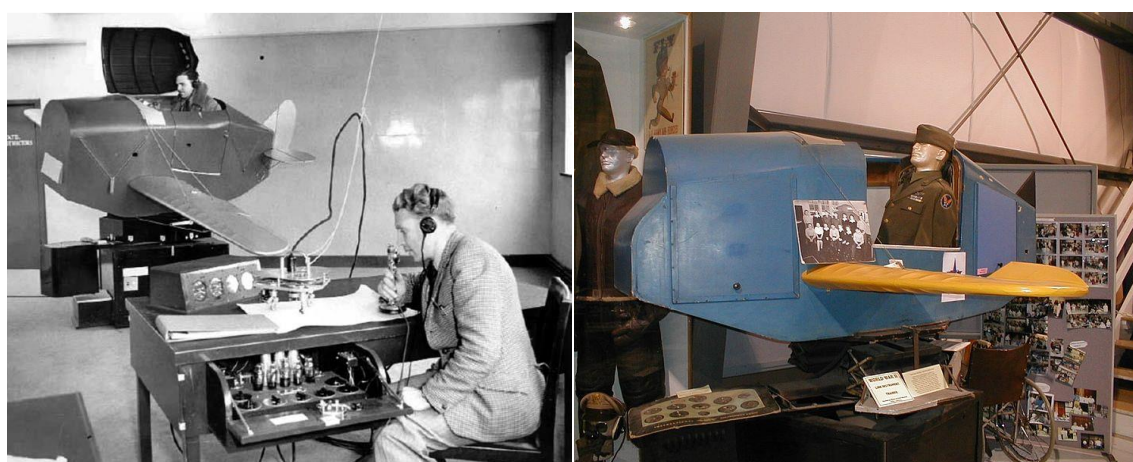
^۵ Nampa

و هوایی پرواز کنند، در مواجهه با سرعت های زیاد باد، هوای بد و طوفانی به خاطر نداشتن تجربه و مهارت کنترل هواپیما کشته شدند.



شکل ۱-۲ تصویری از یک شبیه‌ساز اولیه پرواز [۸، ۱]

در این زمان توجه نیروی هوایی ارتش آمریکا به ادوین ترینر و شبیه‌ساز پرواز او معطوف شد. ادوین لینک مسافت زیادی را با وجود بینایی محدود خود با هواپیما پرواز کرد تا یک ملاقات حضوری با فرماندهان نیروی هوایی ارتش آمریکا داشته باشد. مهارت ادوین در کنترل هواپیما حتی با دید محدود از تمرین‌های مکرر با لینک ترینر نشأت می‌گرفت و همین امر باعث شد تا فرماندهان ارتش تحت تاثیر قرار بگیرند و شش فروند از این شبیه‌ساز های پرواز را برای ارتش خریداری کنند.



شکل ۲-۲ تصویری از شبیه‌ساز پرواز لینک ترینر [۱]

در جریان جنگ جهانی دوم، رایج ترین شبیه‌ساز آموزش خلبان لینک ترینر بود به طوری که شرکت ادوین لینک ۱۰ هزار دستگاه از آن را برای آموزش خلبان‌های کشور آمریکا و کانادا تولید کرد. در

سال‌های جنگ جهانی دوم تقریباً تمام خلبان‌های ارتش آمریکا با شبیه‌ساز پرواز لینک‌ترینر آموزش می‌دیدند [۸]. در سال ۱۹۵۴ هواپیمایی آمریکا سه شبیه‌ساز پرواز به ارزش ۳ میلیون دلار خریداری کرد که به لحاظ سازه‌ی حرکتی با شبیه‌سازهای دیگر مشابه بود اما از تصویر و صدای هماهنگ شده با حرکت در شبیه‌سازی پرواز استفاده کرده بود. این نقطه آغاز تولید شبیه‌سازهای پرواز مشابه آنچه که امروزه تولید می‌شود بوده است. تصویر نشان‌داده شده در شکل ۲-۳ شبیه‌ساز پرواز کامت^۱ را نشان می‌دهد که در سال ۱۹۵۸ ساخته شده است. در این شبیه‌ساز که مربوط به هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ است، دماغه هواپیما به طور کامل بر روی سکوی حرکتی شبیه‌ساز قرار گرفته است و مستقیماً نقش اتاق خلبان را دارد. در سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ سازندگان شبیه‌سازهای پرواز در سراسر دنیا با مشکلات و مسائل حل نشده طراحی، ساخت و افزایش بهره‌بری این شبیه‌سازها دست و پنجه نرم می‌کردند. مسائلی از قبیل معادلات حرکت و دینامیک مجموعه، کنترل سکوی حرکت و حتی به تصویر کشیدن فضای حرکت در میدان دید وسیع و پیوسته برای خلبان‌های تحت آموزش از مهم‌ترین مسائل مورد توجه آن زمان بودند [۱۷].



شکل ۲-۳ شبیه‌ساز پرواز کامت ۴ [۳]

در سال ۱۹۷۰ گروهی از تولیدکنندگان شبیه‌سازهای پرواز با هدف ایجاد یک انجمن تخصصی دور هم جمع شدند. علی‌رغم برگزاری چندین نشست و انجام بحث و تبادل نظر، بعضی از شرکت‌های تولید

^۱ COMET 4

کننده واکنش مثبتی نسبت به ایجاد یک انجمن جهانی نشان ندادند. در سال ۱۹۷۳ با وساطت انجمن جهانی حمل و نقل هوایی^۱ (IATA)، نشست مجددی برای گروه‌ها فراهم شد و در خلال آن کمیته فنی شبیه‌سازهای پرواز^۲ (FSTSC) زیر نظر انجمن تشکیل شد. ایجاد این کمیته فنی بستر مناسبی برای فعالیت در زمینه انتشار استانداردهای شبیه‌سازهای پرواز به وجود آورد. در سایه‌ی این کمیته فنی، تحقیق و پژوهش در زمینه طراحی و ساخت شبیه‌سازهای پرواز به طور سازمان یافته به سمت حل مسائل روز هدایت شد [۱۸]. پیشرفت روز افزون در زمینه شبیه‌سازهای پرواز، نمونه‌های بسیار کارآمد و موفق‌تری را به جامعه جهانی معرفی کرد که از این قبیل می‌توان به نمونه‌های نشان داده شده در شکل ۴-۲ اشاره کرد.



ب) شبیه‌ساز پرواز سی‌ای (CAE)



الف) شبیه‌ساز پرواز کانتاس (QANTAS)



د) شبیه‌ساز پرواز ناسا (NASA)



ج) شبیه‌ساز پرواز تالس (THALES)

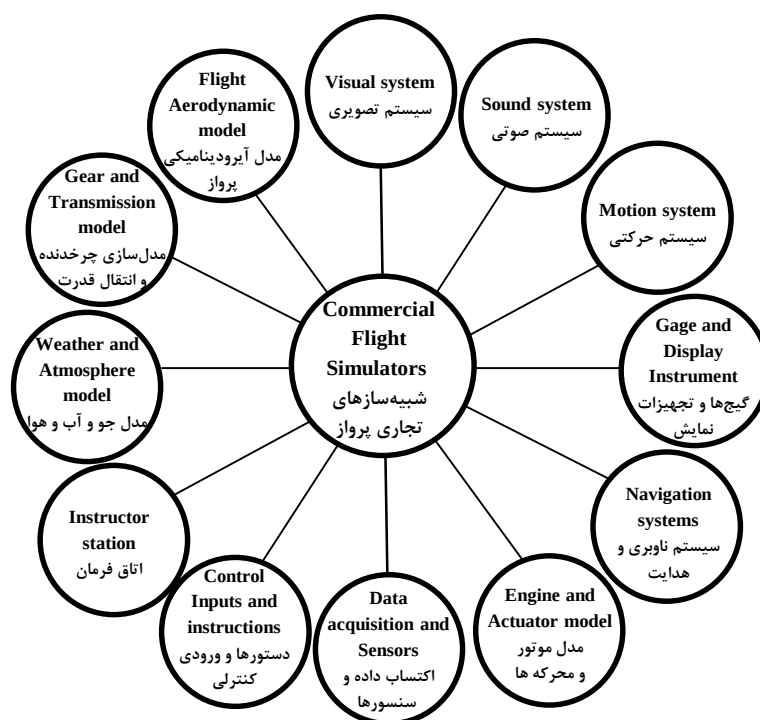
^۱ International Air Transport Association

^۲ Flight Simulator Technical Sub-Committee

شکل ۲-۴ نمونه‌های موفق امروزی شبیه‌سازهای پرواز

۲-۲- بخش‌های مختلف یک شبیه‌ساز تجاری پرواز

اغلب نمونه‌های آزمایشگاهی و تحقیقاتی شبیه‌سازهای حرکتی با هزینه‌های محدود و با هدف ارتقا علم و تکنولوژی در بخش خاصی از یک شبیه‌ساز طرح ریزی شده و اغلب در اندازه‌های کوچک ساخته می‌شوند. در حالی که شبیه‌سازهای تجاری عموماً با هزینه‌های بالا و با هدف پیاده‌سازی هر چه دقیق‌تر کلیه عناصر یک پرواز واقعی طراحی و ساخته می‌شوند. مواردی که در شکل ۲-۴ معرفی شده‌اند موفق‌ترین شبیه‌سازهای تجاری امروزی پرواز هستند که کلیه عناصر یک پرواز واقعی را برای سوار تداعی می‌کنند. با اینکه شبیه‌سازهای تجاری بر مبنای جدیدترین پیشرفت‌های علمی روز تولید می‌شوند با این حال جزئیات طراحی، ساخت و تجهیز آنها کمتر منعکس می‌شود. چرا که شبیه‌سازهای تجاری پرواز از تکنولوژی‌های پیشرفته روز به شمار می‌روند و بیشتر در پروژه‌های نظامی، امنیتی و محرمانه از آنها استفاده می‌شود. بخش‌های مختلف یک شبیه‌ساز تجاری پرواز اعم از بخش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در شکل ۲-۵ نام برده شده‌اند.



شکل ۲-۵ بخش‌های مختلف یک شبیه‌ساز تجاری پرواز

هر کدام از بخش‌هایی که در شکل ۲-۵ به آنها اشاره شده خود به تنهایی زمینه وسیعی برای تحقیق و پژوهش هستند و همواره توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند که از این دست می‌توان به مطالعات سیستم‌های تصویری [۱۹، ۲۰]، سیستم‌های صوتی و کامپیوتری [۲۱، ۲۲]، سیستم‌های حرکتی و کنترل [۲۳، ۲۴ و ۲۵]، مدل آیرودینامیکی پرواز [۲۶] و مدل‌سازی شرایط آب و هوایی [۲۷] اشاره کرد.

۲-۳- انواع مکانیزم‌های حرکتی در شبیه‌سازهای پرواز

سکوهای حرکتی یکی از مهم‌ترین بخش‌های یک شبیه‌ساز پرواز به شمار می‌روند چرا که به شبیه‌ساز قابلیت حرکت در بُعد و محدوده مورد نیاز پرنده را می‌دهند. از ابتدا تا کنون، مکانیزم‌های متنوع و متفاوتی به عنوان سکوی حرکتی شبیه‌سازها به کار رفته‌اند که هر کدام مزیت‌ها و محدودیت‌هایی دارند. گاه مکانیزم‌های سکوی حرکتی به صورت درجه‌های آزادی مستقل از هم [۲۸] و گاه با ساختار سری^۱ [۲۹، ۳۰] یا ساختار موازی^۲ [۳۱، ۳۲] استفاده شده‌اند. گاهی نیز به صورت ترکیبی با قرار دادن سکوی حرکت بر روی ریل‌های انتقالی سعی شده است تا رنج حرکت انتقالی سکو افزایش یابد [۳۳، ۳۴]. شکل ۲-۶ تصویری از سکوهای حرکتی با مکانیزم‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

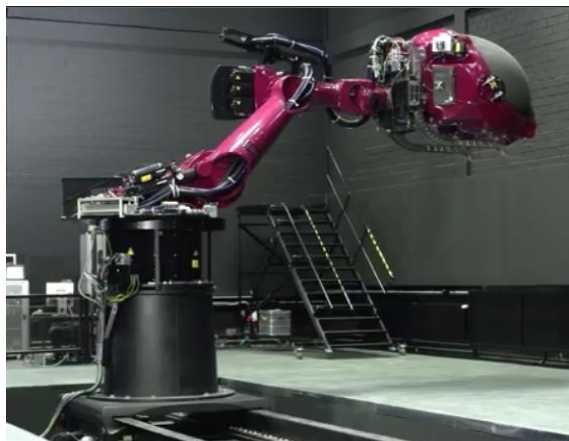
تجربه نشان داده است از مکانیزم‌هایی که درجه آزادی مستقل دارند کمتر به عنوان سکوهای شبیه‌ساز استفاده می‌شود چون با افزایش تعداد درجه‌های آزادی، طراحی و تجهیز سکو با مشکلات بسیاری مواجه خواهد شود.

امروزه بیشتر از مکانیزم‌هایی با ساختار موازی استفاده می‌شود. با این حال نمونه‌های موفقی از شبیه‌سازهای حرکتی وجود دارد که از مکانیزم‌هایی با ساختار سری برای سکوی حرکتی استفاده کرده‌اند.

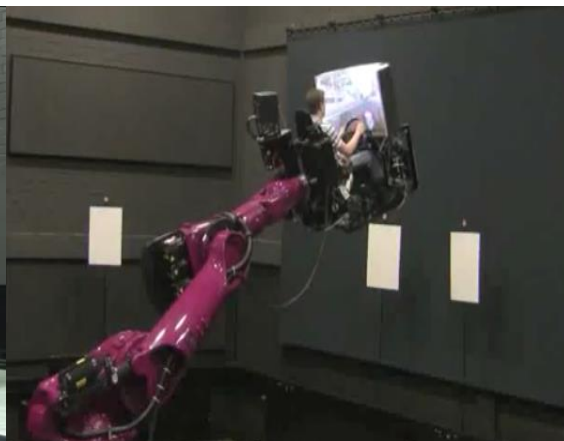
^۱ Serial Structure

^۲ Parallel Structure

در واقع مزیت‌های ساختاری مکانیزم‌های موازی است که باعث شده است تا به عنوان سکوی‌های حرکتی در شبیه‌سازها رواج داشته باشند.



شبیه‌ساز پرواز و رانندگی [۳۰]



شبیه‌ساز رانندگی فرمول یک [۲۹]



شبیه‌ساز حرکتی DLR [۳۲]



شبیه‌ساز حرکتی Chalmers [۳۱]



شبیه‌ساز حرکتی Ultimate [۳۴]



شبیه‌ساز حرکتی پژو-سیتروئن [۳۳]

شکل ۶-۲ تصویری از سکوه‌ای حرکتی با مکانیزم‌های متفاوت

ساختار ربات‌های موازی از یک یا چندین زنجیره سینماتیکی بسته^۱ تشکیل شده است در حالی که ساختار ربات‌های سری تنها شامل یک زنجیره سینماتیکی باز^۲ است. تفاوت ساختاری ربات‌های موازی با ربات‌های سری، بستر اصلی وجود تمایز میان ویژگی‌های آنها است. با توجه به ساختار ربات‌های موازی، عموماً محرکه‌ها بر روی صفحه ثابت ربات قرار می‌گیرند، در نتیجه وزن و اینرسی اعضای متحرک به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در حالی که در ساختار ربات‌های سری، قرار گرفتن پشت سر هم محرکه‌ها بر روی اعضای متحرک، باعث افزایش وزن و اینرسی ربات می‌شود. هر چقدر که وزن و اینرسی یک ربات کمتر باشد می‌تواند با سرعت و شتاب بیشتری حرکت کند. در نتیجه معمولاً ربات‌های موازی سطح کاری سرعت و شتاب بالاتری نسبت به ربات‌های سری دارند. در ربات‌های موازی، عضو نهایی^۳ یا همان صفحه متحرک ربات با چندین زنجیره سینماتیکی مقید می‌شود همین مسئله باعث می‌شود تا ربات‌های موازی صرفه نظر از سختی محرکه‌ها به لحاظ ساختاری سختی بیشتری نسبت به ربات‌های سری داشته باشند. از طرف دیگر، وجود لقی^۴ در مفاصل و محرکه‌ها تقریباً اجتناب ناپذیر است. با اینکه در ربات‌های سری از مفاصل غیرفعال^۵ استفاده نمی‌شود، اثر لقی در زنجیره سینماتیکی ربات‌های سری بر هم افزوده شده و صحت^۶ ربات را کاهش می‌دهد. در حالی که در ربات‌های موازی اثر لقی مفاصل و محرکه بر هم افزوده نمی‌شود و در بیان کلی صحت ربات‌های موازی بیشتر است. از طرفی مقید کردن عضو نهایی توسط چندین زنجیره سینماتیکی بسته، اگرچه در برخی موارد بعد فضای کاری ربات را کاهش نمی‌دهد اما به طور چشمگیری باعث کاهش حجم فضای کاری ربات‌های موازی می‌شود. همین امر باعث می‌شود تا ربات‌های سری در مقایسه با ربات‌های موازی حجم فضای کاری بزرگتری داشته باشند. نکته حائز اهمیت دیگر در ربات‌ها، مبحث تکینگی^۷ است.

^۱ Closed Kinematic Chains

^۲ Open Kinematic Chain

^۳ End Effector

^۴ Backlash

^۵ Passive Joints

^۶ Precision

^۷ Singularity

تکینگی در ربات‌های سری تنها روی مرز داخلی و خارجی فضای کاری آنها قرار می‌گیرد اما در ربات‌های موازی، تکینگی لزوماً در مرز فضای کاری نیست و معمولاً درون فضای کاری ربات قرار می‌گیرد. زنجیره سینماتیکی متفاوت باعث می‌شود تا حل مسئله سینماتیک معکوس در ربات‌های سری چالش برانگیز و همراه با جواب‌های چندگانه باشد در حالی که برای ربات‌های موازی حل مسئله سینماتیک مستقیم چالش برانگیز و همراه با جواب‌های چندگانه است. در مجموع طراحی و تولید ربات‌های موازی پیچیده‌تر بوده و هزینه بالاتری دارد. جدول ۱-۲ به طور خلاصه ربات‌های سری و موازی را بر اساس مهم‌ترین شاخص‌ها مقایسه می‌کند. در مجموع باید خاطر نشان کرد که ربات‌های موازی به دلیل قابلیت حمل بار بیشتر، سرعت، سختی و صحت بالاتر گزینه مناسب‌تری برای شبیه‌سازهای حرکتی هستند که در آنها نیاز به سرعت‌های بالا و فضای کافی برای نصب و تجهیز اتاق سوار است. ربات‌های سری به دلیل قابلیت حمل بار محدود، معمولاً در شبیه‌سازهایی که تجهیزات سبک و کوچکی برای اتاق سوار دارند استفاده می‌شوند.

جدول ۱-۲ مقایسه مهم‌ترین شاخصه‌های ربات‌های سری و موازی

نوع ربات	اینرسی	سرعت	سختی	صحت	فضای کاری	تکینگی	سینماتیک
ربات سری	بیشتر	کمتر	کمتر	کمتر	بزرگتر	روی مرز فضای کاری	حل تحلیلی سینماتیک معکوس مشکل با جواب‌های چندگانه
ربات موازی	کمتر	بیشتر	بیشتر	بیشتر	کوچکتر	درون فضای کاری	حل تحلیلی سینماتیک مستقیم مشکل با جواب‌های چندگانه

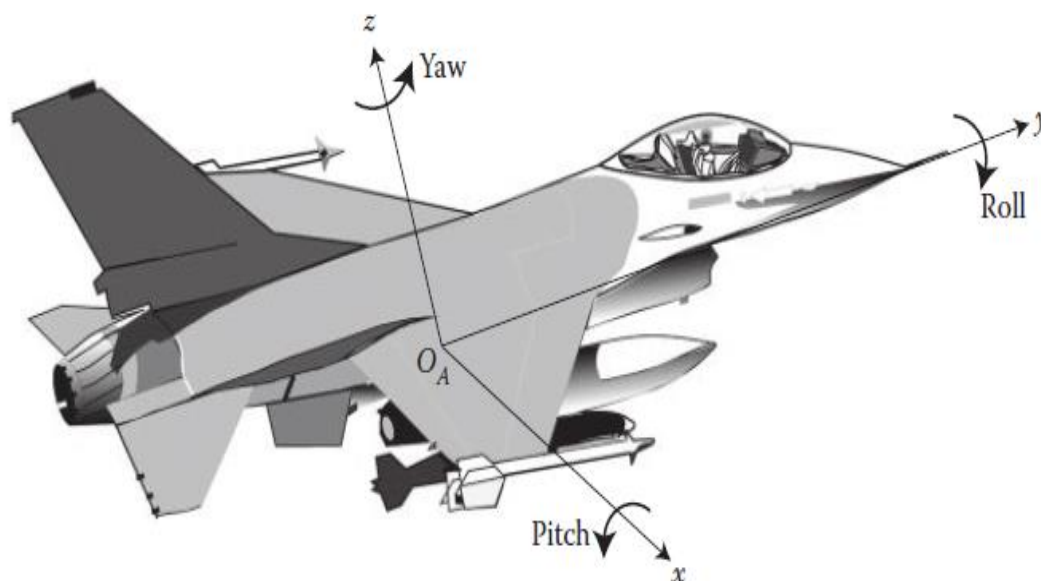
۲-۴- انواع مانورهای پرواز و ویژگی‌های آنها

زاوایای اوپلر^۱ یکی از متداول‌ترین روش‌های توصیف دوران یک جسم در فضای دکارتی است که با سه دوران متوالی حول محورهای ثابت یا چرخان بیان می‌شود. دوران حول محورهای ثابت عرضی^۲ (X)،

^۱ Euler Angles

^۲ Lateral Axis

طولی^۱ (y) و عمودی^۲ (z) به ترتیب به عنوان دوران‌های پیچ (Pitch)، رول (Roll) و یاو (Yaw) معرفی می‌شوند. شکل ۷-۲ تعریف محورهای دوران رول، پیچ و یاو را برای یک هواپیما نشان می‌دهد. در حالی که شکل ۸-۲ مانورهای دورانی هواپیما را بر روی یک سکوی حرکتی موازی در سه سکانس متفاوت نمایش داده است.



شکل ۷-۲ تعریف محورهای دوران رول، پیچ و یاو برای یک هواپیما [۳۵]

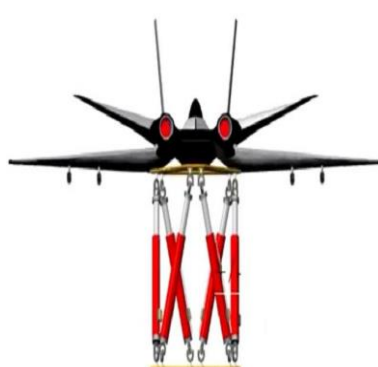


^۱ Longitudinal Axis

^۲ Vertical Axis



بیشترین دوران در جهت مثبت



دوران پیچ صفر



بیشترین دوران در جهت منفی

(ب) مانور دورانی پیچ هواپیما



بیشترین دوران در جهت منفی



دوران یاو صفر



بیشترین دوران در جهت مثبت

(ج) مانور دورانی یاو هواپیما

شکل ۸-۲ نمایش مانورهای دورانی هواپیما در سه سکانس متفاوت

مانورهای انتقالی هواپیما نیز در امتداد محورهای عرضی، طولی و عمودی به ترتیب سوا (Sway)، سورج (Surge) و هیو (Heave) نامیده می‌شوند. شکل ۹-۲ مانورهای انتقالی هواپیما را بر روی یک سکوی حرکتی موازی در سه سکانس متفاوت نمایش داده است.



بیشترین انتقال در جهت منفی

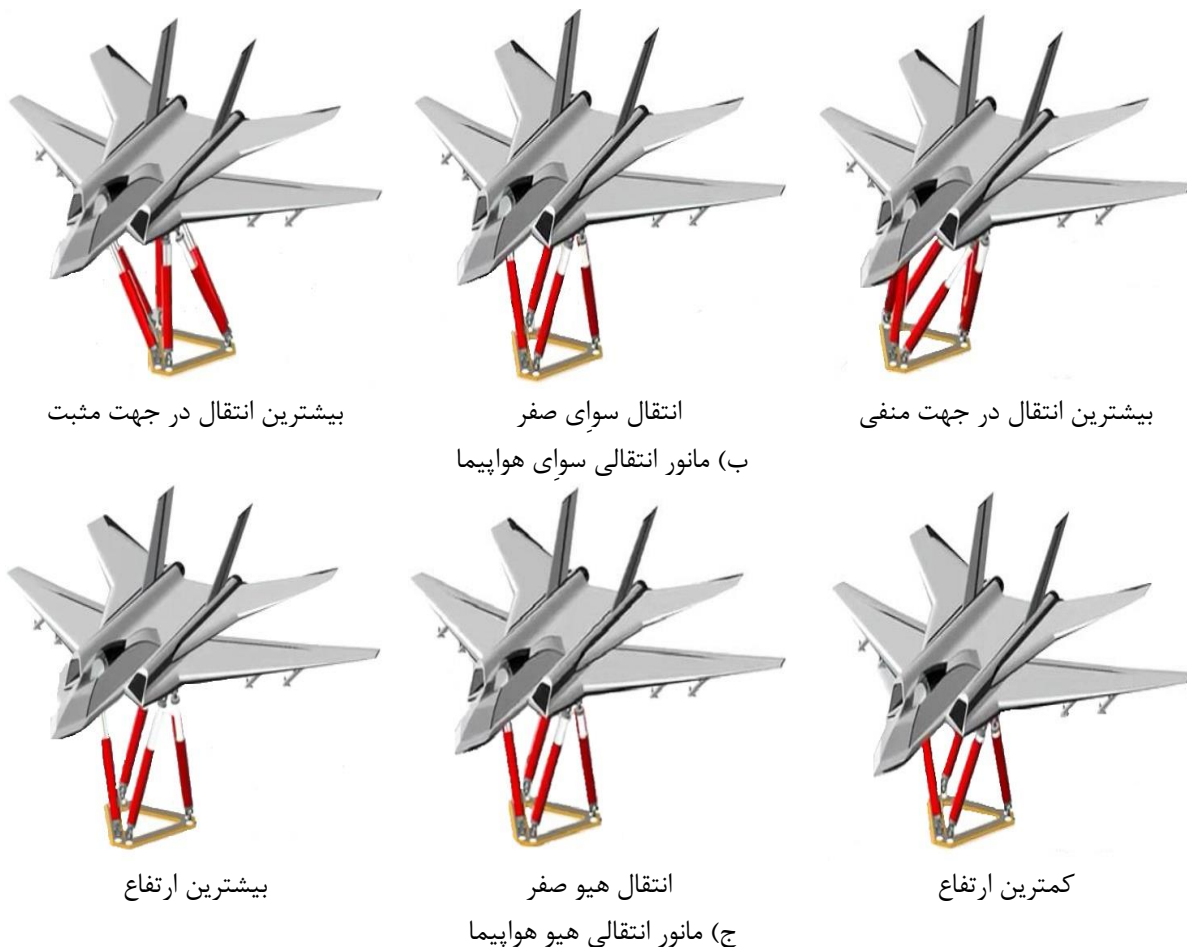


انتقال سورج صفر



بیشترین انتقال در جهت مثبت

(الف) مانور انتقالی سورج هواپیما



شکل ۲-۹ نمایش مانورهای انتقالی هواپیما در سه سکانس متفاوت

در حالت کلی مانورهای حرکتی پرواز، ترکیبی از این دوران‌ها و انتقال‌ها خواهد بود. شایان ذکر است که مانورهای انتقالی در پرواز واقعی مقید نبوده و در گستره خاصی محدود نمی‌شوند با این حال مانورهای انتقالی سکوه‌ای حرکتی در شبیه‌سازی پرواز محدود هستند، به همین خاطر با بهره‌گیری از واش‌آوت فیلتر فریب‌های حرکتی در شبیه‌سازی مانورهای انتقالی پیاده‌سازی می‌شوند. گستره مانورهای دورانی بنا به نوع و قابلیت‌های پرنده (مانند هواپیماهای جنگی، مسافربری و تفریحی یا انواع هلیکوپترها) متفاوت است.

مانورهای دورانی پیچ و رول به دلیل تاثیر در آیرودینامیک^۱ پرواز و پایداری پرنده [۳۶] همواره در گستره خاصی محدود می‌شوند. در ارتباط با مانور دورانی یاو اگرچه در آیرودینامیک پرواز تغییری ایجاد نمی‌کند، با این حال بنا به قابلیت‌های پرنده در گستره مشخصی محدود می‌شد. همانطور که پیش از این به آن اشاره شد، فریب حرکتی در زمینه مانورهای دورانی کمتر استفاده می‌شود و اغلب سکوهایی حرکتی شبیه‌سازهای پرواز به گونه‌ای طراحی می‌شوند که قابلیت انجام مانورهای دورانی مجاز پرنده مورد نظر را داشته باشند. جدول ۲-۲ رنج حرکت چند نمونه از شبیه‌سازهای حرکتی را نشان می‌دهد و می‌تواند راهنمای خوبی برای تعیین رنج حرکت سکوهایی حرکتی در طراحی بهینه شبیه‌سازها باشد.

جدول ۲-۲ رنج حرکت چند نمونه از شبیه‌سازهای حرکتی

نام شبیه‌ساز حرکتی	سورج (Surge)	سواي (Sway)	هيو (Heave)	رول (Roll)	پیچ (pitch)	یاو (Yaw)
	متر (m)	متر (m)	متر (m)	درجه (°)	درجه (°)	درجه (°)
شبیه‌ساز سبک و کوچک CKAS [۳۷]	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 10	± 10	± 10
شبیه‌ساز نیمه سنگین CKAS [۳۷]	± 0.15	± 0.15	± 0.15	± 24	± 24	± 24
شبیه‌ساز هواپیمای XFA-49	± 0.45	± 1	± 1	± 30	± 25	± 45
شبیه‌ساز رانندگی پژو و سیتروئن [۳۳]	± 2.75	± 5	± 0.2	± 18	± 18	± 23
شبیه‌ساز رانندگی DLR [۳۲]	± 1.5	± 1.4	± 1.4	± 21	± 21	± 21

^۱ Aerodynamic

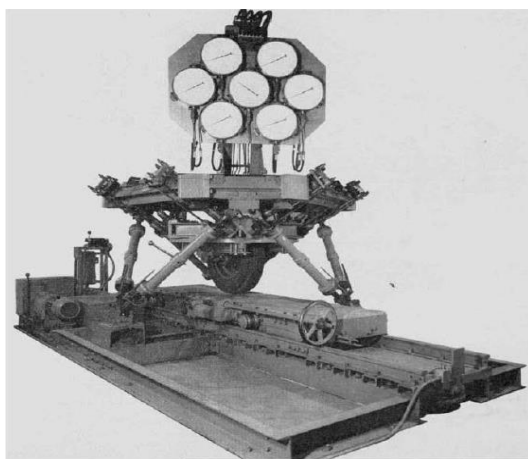
فصل سوم:

رباط موازی استورات

در این فصل از پژوهش، تاریخچه کاربردی ربات موازی استوارت به عنوان سکوی حرکتی شبیه‌ساز پرواز بیان شده و متداول‌ترین معماری‌های امروزی آن معرفی می‌شود. سپس به ترتیب سینماتیک معکوس، سینماتیک مستقیم و ژاکوبین برای ساختار کلی ربات موازی استوارت تحلیل می‌شوند. در ادامه استاتیک و دینامیک ربات موازی استوارت بررسی شده و پس از آن فرم بسته معادلات دینامیکی ربات به دست می‌آیند. در انتها، مدل‌سازی ریاضی ربات که بر پایه معادلات دینامیکی به دست آمده است، از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری اعتبار سنجی می‌شوند.

۳-۱- معرفی ربات موازی استوارت

همانطور که در مرور تاریخچه ربات‌های موازی به آن اشاره شده [۳۸]، آنچه که امروزه به عنوان ربات موازی استوارت^۱ معروف شده است در واقع طرحی است که اولین بار توسط گاف^۲ در صنعت تولید تایر در بخش آزمایش کیفیت تحت بارهای دینامیکی ارائه شد. شکل ۳-۱ تصویری از ربات‌های گاف را در صنعت تولید تایر نشان می‌دهد.

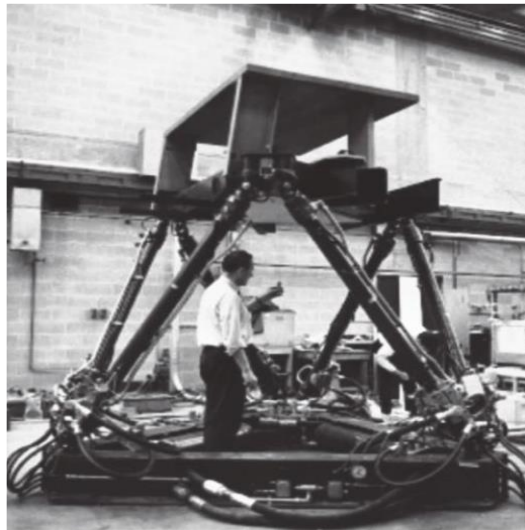


شکل ۳-۱ تصویری از ربات‌های گاف در صنعت تولید تایر خودرو

^۱ Stewart Parallel Robot

^۲ V. E. Gough

در طرح پیشنهادی گاف از شش جک هیدرولیکی به عنوان محرکه‌های خطی^۱ برای حرکت دادن مجری نهایی در فضای شش بُعدی بهره گرفته شده بود. به همین خاطر طرح گاف در دسته ربات‌های شش‌پا^۲ جای گرفت. ربات‌های شش‌پا قدمت بیشتری نسبت به طرح گاف داشتند و در آن زمان هم شناخته شده بودند. ایده نوآورانه گاف در واقع چیدمان و پیکربندی^۳ جدیدی بود که برای یک ربات شش‌پا معرفی کرده بود در حالی که پیش از آن ربات‌های شش‌پا با چیدمان سه محرکه خطی افقی و سه محرکه خطی عمودی شناخته می‌شدند [۳۹]. از آنجایی که گاف محدوده حرکتی نسبتاً بزرگی را نیاز داشت به طور ذاتی چیدمانی قرینه برای محرکه‌های خطی روی یک صفحه هشت ضلعی در نظر گرفت. ربات موازی گاف در ابتدای سال ۱۹۵۰ ساخته شد و تا سال ۱۹۵۴ به شکلی کاملاً کاربردی درآمد [۴۰]. اگرچه گاف اولین کسی بود که این ربات شش‌پا معروف را اختراع کرد و ساخت، اما کلاس کاپل^۴ نیز نمونه مشابه آن را به طور کاملاً مستقل طراحی و ثبت کرد. همچنین امتیاز بهره‌برداری از آن را در اختیار اولین شرکت‌های تولیدکننده شبیه‌سازهای پرواز قرار داد [۴۱]. شکل ۲-۳ تصویری از ربات موازی شش‌پا کلاس کاپل را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ تصویری از ربات موازی شش‌پا کلاس کاپل

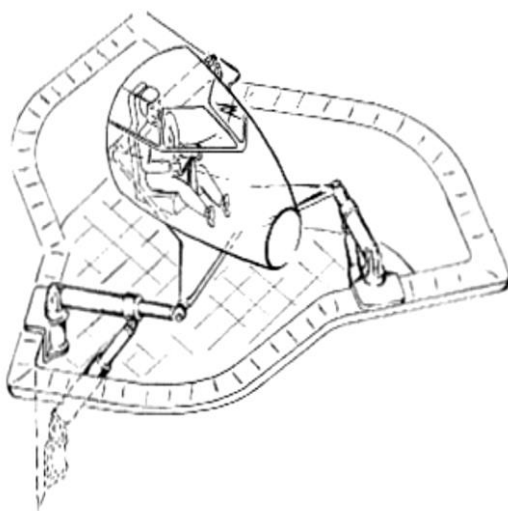
^۱ Linear Actuators

^۲ Hexapod Robots

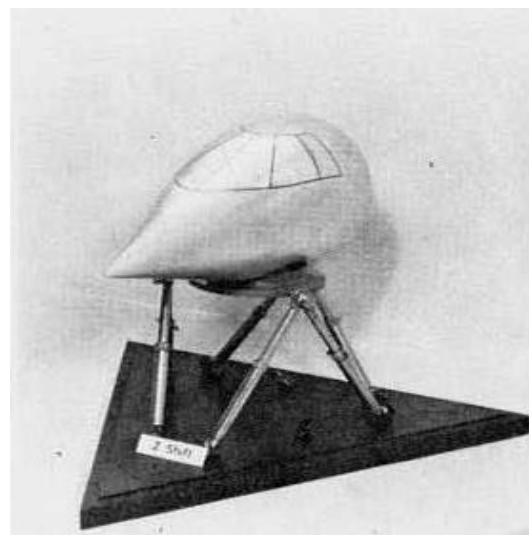
^۳ Arrangement and Configuration

^۴ Klaus Cappel

استوارت در سال ۱۹۶۵ با انتشار مقاله‌ای ساختار جدیدی از یک ربات موازی ارائه کرد که مخصوص شبیه‌سازهای پرواز طراحی شده بود. مکانیزم اصلی استوارت سه زنجیره سینماتیکی مشابه داشت که هر کدام، از دو محرکه خطی برای حرکت دادن مجری نهایی استفاده می‌کرد. مکانیزم اصلی استوارت با آنچه که امروزه به عنوان ربات موازی استوارت شناخته می‌شود، متفاوت است. در واقع توجه روزافزون به مقاله استوارت در حالی که تصویری از مکانیزم گاف در بخش نظرات داوران آمده بود باعث شد که مکانیزم گاف به اشتباه با نام ربات موازی استوارت منعکس گردد [۴۲]. در انتهای مقاله استوارت، طرحی دیگری برای شبیه‌ساز پرواز از نظر داوران منعکس شده بود که مشابه با مکانیزم گاف بود. مقاله استوارت توجه بسیاری از محققان را به ربات‌های شش درجه آزادی به عنوان سکوی حرکتی شبیه‌سازهای پرواز جلب کرد و همین امر باعث شد تا مکانیزم گاف به ربات موازی گاف-استوارت یا ربات موازی استوارت شهرت پیدا کند. شکل ۳-۳ طرح پیشنهادی استوارت را در کنار طرح پیشنهادی داوران نشان داده است.



ب) مکانیزم طراحی شده استوارت

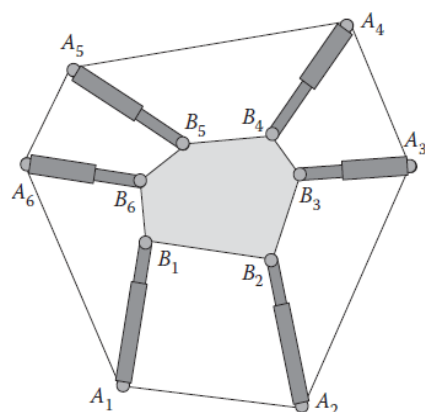


الف) طرح پیشنهادی داوران

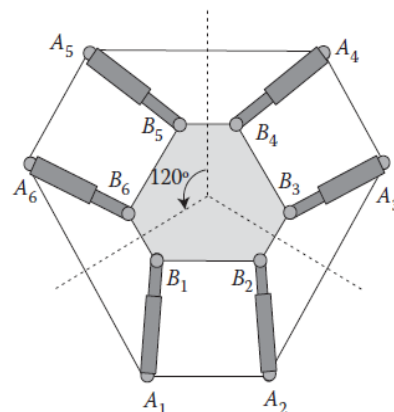
شکل ۳-۳ طرح پیشنهادی استوارت و داوران برای سکوی حرکتی شبیه‌ساز پرواز

پس از مقاله استوارت، بسیاری از محققان به مطالعه چیدمان و پیکربندی‌های متفاوت مکانیزم‌های مشابه استوارت روی آوردند [۴۳] و ویژگی‌های آنها را بررسی کردند. از میان معماری‌های متعدد ربات موازی گاف-استوارت، طرح‌هایی که متداول‌تر هستند در شکل ۴-۳ معرفی شده‌اند [۳۵]. با اینکه مطالعه

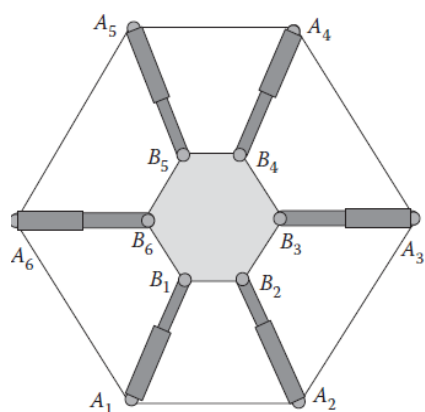
ربات‌های موازی استوارت در کانون توجه قرار دارد اما همچنان مسائل باز مختلفی در ارتباط با سینماتیک، ژاکوبین، سختی، استاتیک و دینامیک ربات‌های موازی وجود دارد [۴۴].



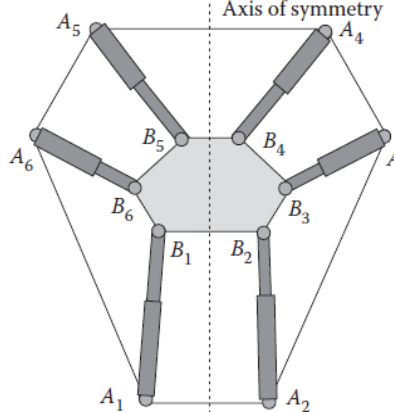
a) Irregular hexagons



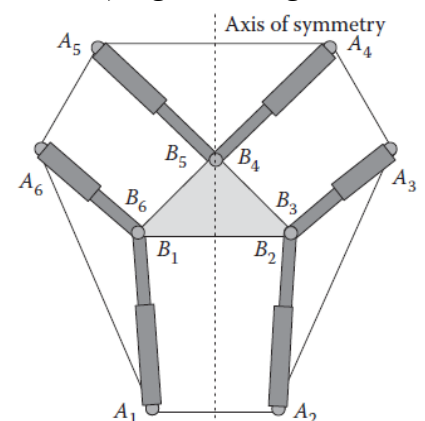
b) semi-regular hexagons



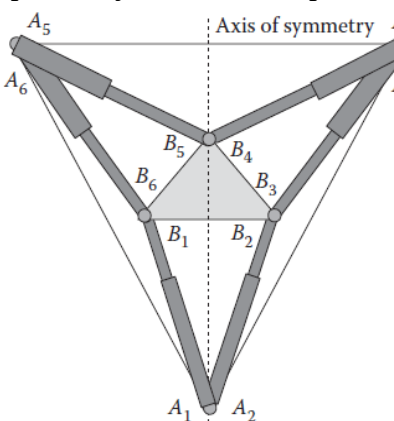
c) regular hexagons



d) simplified symmetric manipulator (SSM)



e) triangle simplified symmetric manipulator (TSSM)

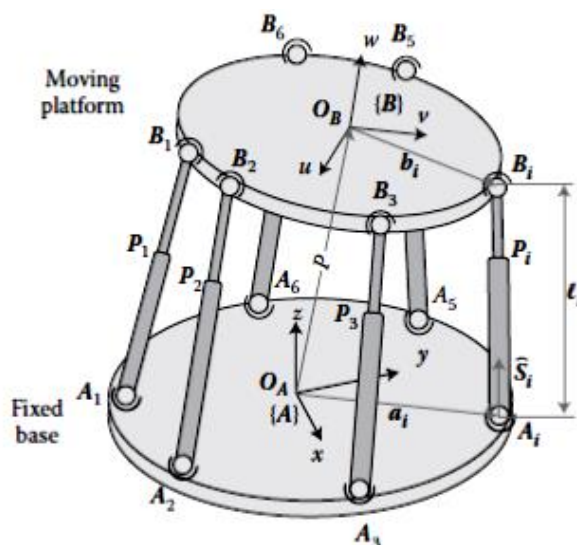


f) minimal simplified symmetric manipulator (MSSM)

شکل ۳-۴ معماری‌های متداول ربات موازی استوارت [۳۵]

۳-۲- سینماتیک ربات موازی استوارت

مسئله سینماتیک ربات موازی استوارت همواره یکی از چالش برانگیزترین زمینه‌های پژوهشی بوده است و توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۴۵]. مهم ترین چالش ها در رابطه با سینماتیک ربات‌های موازی، حل سینماتیک مستقیم به فرم بسته و بدست آوردن تمامی پاسخ‌های ممکن و صحیح است [۴۶، ۴۷]. برای حل دقیق سینماتیک ربات موازی استوارت در کنار محاسبات و معادلات جبری [۴۸] گاه از ابزارهایی مانند آنالیز بازه‌ای [۴۹] و شبکه‌های عصبی [۵۰] نیز استفاده شده است. در این بخش، سینماتیک ربات موازی استوارت با جزئیات بررسی و تحلیل شده است. ابتدا ساختار سینماتیکی ربات تشریح شده و سپس هندسه ربات نمایش داده شده است. پس از آن، سینماتیک معکوس و مستقیم ربات حل شده است. شکل ۳-۵ نمایی شماتیک از یک ربات موازی استوارت نشان می‌دهد که در آن حرکت فضایی صفحه متحرک ربات با استفاده از شش جک نیوماتیک همسان تولید می‌شود. جک‌های نیوماتیک با استفاده از مفاصل کروی به صفحه ثابت و متحرک ربات متصل شده‌اند.



شکل ۳-۵ نمایی شماتیک از یک ربات موازی استوارت [۳۵]

نقاط A_i محل اتصال جک‌ها به صفحه ثابت ربات هستند و همگی در یک صفحه واقع شده‌اند. نقاط B_i نیز محل اتصال جک‌ها به صفحه متحرک ربات هستند و همگی در یک صفحه واقع شده‌اند البته باید توجه داشت که در حالت کلی لزومی ندارد که حتما همه نقاط اتصال در یک صفحه قرار بگیرند. دستگاه مختصات مبدا $\{A\}$ در مرکز صفحه ثابت ربات و دستگاه مختصات محلی $\{B\}$ در مرکز صفحه

متحرک ربات در نظر گرفته شده‌اند. در نمونه‌ی نشان داده شده در شکل ۳-۱، صفحه متحرک دارای شش درجه آزادی (سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی) است و از طرفی با شش محرکه راه‌اندازی می‌شود، که این ساختار ربات موازی کامل نامیده می‌شود. ویژگی دیگر این ساختار این است که هیچگونه گشتاور پیچشی ای نمی‌تواند از طریق محرکه‌ها منتقل شود چرا که محرکه‌ها از طریق مفاصل کروی به صفحات ثابت و متحرک ربات متصل شده‌اند. همین مسئله باعث می‌شود تا محرکه‌ها تنها در راستای محوری خودشان به صفحه متحرک نیرو وارد کنند.

۳-۲-۱- سینماتیک معکوس

مسئله سینماتیک معکوس ربات موازی استوارت، بدست آوردن طول محرکه‌ها به ازای هر موقعیت و دوران دلخواه صفحه متحرک است. موقعیت مرکز صفحه متحرک در دستگاه مختصات مبدا با ${}^A P$ نشان داده می‌شود و دوران صفحه متحرک در مختصات دستگاه مبدا با ماتریس دوران ${}^A R_B$ معرفی می‌شود. در حالی که بردار طول محرکه‌های ربات $L = [\ell_1, \dots, \ell_6]^T$ با شش المان به ازای هر محرکه تعریف شده است. با توجه به هندسه ربات، معادله بسته شدن حلقه سینماتیکی برای هر محرکه مطابق رابطه (۳-۱) بیان می‌شود:

$$\ell_i {}^A \hat{s}_i = {}^A P + {}^A b_i - {}^A a_i = {}^A P + {}^A R_B {}^B b_i - {}^A a_i \quad (۳-۱)$$

که در آن بردارهای ${}^A a_i$ و ${}^A b_i = {}^A R_B {}^B b_i$ به ترتیب نشان‌دهنده بردار موقعیت نقاط A_i و B_i در دستگاه مختصات مبدا هستند. بردار ${}^A \hat{s}_i$ بردار یکه‌ای است که امتداد محرکه i ام را در مختصات دستگاه مبدا نشان می‌دهد. برای بدست آوردن طول محرکه باید اندازه رابطه برداری (۳-۱) را حساب کرد:

$$\ell_i^2 [{}^A \hat{s}_i^T {}^A \hat{s}_i] = [{}^A P + {}^A R_B {}^B b_i - {}^A a_i]^T [{}^A P + {}^A R_B {}^B b_i - {}^A a_i] \quad (۳-۲)$$

با محاسبه اندازه برداری در رابطه (۳-۲)، با توجه به اینکه اندازه بردار یکه ${}^A \hat{s}_i$ برابر با یک است، طرفین رابطه از حالت برداری خارج شده و نشان‌دهنده یک رابطه برابری دو عدد اسکالر است:

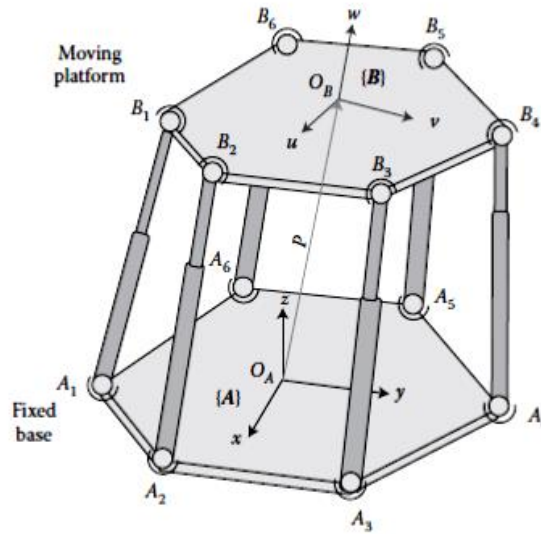
$$\ell_i^2 = {}^A P^T A P + {}^B b_i^T B b_i + {}^A a_i^T A a_i - 2 {}^A P^T A a_i + 2 {}^A P^T [{}^A R_B^B b_i] - 2 [{}^A R_B^B b_i]^T A a_i \quad (3-3)$$

با ساده سازی می توان طول هر یک از محرکه های خطی ربات استوارت را از طریق رابطه (3-4) محاسبه کرد:

$$\ell_i = [{}^A P^T A P + {}^B b_i^T B b_i + {}^A a_i^T A a_i - 2 {}^A P^T A a_i + 2 {}^A P^T [{}^A R_B^B b_i] - 2 [{}^A R_B^B b_i]^T A a_i]^{1/2} \quad (3-4)$$

در نتیجه مسئله سینماتیک معکوس ربات موازی استوارت به ازای هر موقعیت و دوران دلخواه صفحه متحرک ربات قابل حل است و پاسخی منحصر به فرد دارد. چنانچه پاسخ به دست آمده حقیقی مثبت و در محدوده طول کورس مجاز محرکه باشد، موقعیت و دوران دلخواه صفحه متحرک مجاز بوده و در فضای کاری ربات قرار دارد. اما اگر پاسخ موهومی به دست آمد نشان می دهد که موقعیت یا دوران مورد نظر برای ربات قابل دسترسی نیست. در ادامه روابط حل سینماتیک معکوس ربات برای یک حالت خاص توسعه داده شده است. در این حالت خاص نقاط اتصال محرکه ها روی صفحه ثابت و متحرک منطبق بر رئوس یک شش ضلعی منتظم می باشند و صفحه ثابت و متحرک مشابه هستند. تصویر این ربات موازی استوارت در شکل 3-6 نشان داده شده است. مشابه بودن صفحه ثابت و متحرک باعث میشود تا روابط سینماتیک ربات ساده شده و در قالب ماتریسی نشان داده شود. با تعریف پارامتر μ به عنوان ضریب مقیاس صفحه ثابت و متحرک، رابطه (3-5) برقرار خواهد شد:

$$b_i = \mu a_i \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (3-5)$$



شکل ۶-۳ نمایی شماتیک از ربات موازی استوارت با صفحه ثابت و متحرک مشابه [۳۵]

در حالت کلی بردار a_i مطابق رابطه (۶-۳) تعریف می‌شود. با توجه به اینکه رئوس شش ضلعی در صفحه ثابت هم صفحه هستند ($a_{zi} = 0$)، روابط (۷-۳) و (۸-۳) از رابطه (۵-۳) ناشی می‌شوند:

$$a_i = a_{x_i}\hat{x} + a_{y_i}\hat{y} + a_{z_i}\hat{z} \quad (۶-۳)$$

$$a_i = a_{x_i}\hat{x} + a_{y_i}\hat{y} \quad (۷-۳)$$

$$b_i = \mu(a_{x_i}\hat{x} + a_{y_i}\hat{y}) \quad (۸-۳)$$

در نتیجه رابطه (۱-۳) می‌تواند به شکل رابطه (۹-۳) بیان شود که در آن $I_{3 \times 3}$ ماتریس همانی و پارامترهای ${}^A P$ و ${}^A R_B$ به اختصار با P و R نمایش داده شده‌اند.

$$\ell_i \hat{s}_i = P + (\mu R - I) \quad (۹-۳)$$

بر اساس رابطه (۹-۳)، طول هر محرکه خطی را می‌توان از رابطه (۱۰-۳) محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} \ell_i^2 &= [(\mu R - I) a_i + P]^T [(\mu R - I) a_i + P] \\ &= P^T P + a_i^T [(\mu R^T - I)(\mu R - I)] a_i + a_i^T (\mu R^T - I) P \end{aligned} \quad (۱۰-۳)$$

با وارد کردن روابط (۷-۳) و (۸-۳) و انجام محاسبات، رابطه (۱۱-۳) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}\ell_i^2 = & P^T P + a_{x_i} [\hat{x}^T (\mu R^T P - P)] + 2a_{y_i} [\hat{y}^T (\mu R^T P - P)] \\ & + 2\mu \{ a_{x_i}^2 (\hat{x}^T R \hat{x}) + a_{x_i} a_{y_i} (\hat{x}^T R \hat{y} + \hat{y}^T R \hat{x}) + a_{y_i}^2 (\hat{y}^T R \hat{y}) \} \\ & + (1 + \mu^2) (a_{x_i}^2 + a_{y_i}^2)\end{aligned}\quad (۱۱-۳)$$

با تعریف W ، Q و d می‌توان سینماتیک معکوس ربات را در قالب ضرب ماتریسی بیان کرد. بردار $W = [W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6]^T$ مطابق رابطه (۱۲-۳) تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}W_1 &= P^T P \\ W_2 &= \hat{x}^T (\mu R^T P - P) \\ W_3 &= \hat{y}^T (\mu R^T P - P) \\ W_4 &= \hat{x}^T R \hat{x} \\ W_5 &= \hat{x}^T R \hat{y} + \hat{y}^T R \hat{x} \\ W_6 &= \hat{y}^T R \hat{y}\end{aligned}\quad (۱۲-۳)$$

ماتریس $Q = [Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6]^T$ نیز مطابق رابطه (۱۳-۳) محاسبه می‌شود. با به کار بردن رابطه (۱۴-۳) و استفاده از تعریف بردار $d = [d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6]^T$ در رابطه (۱۵-۳) می‌توان طول هر محرکه خطی ربات را بدست آورد.

$$Q_i = [1, 2a_{x_i}, 2a_{y_i}, -2\mu a_{x_i}^2, -2\mu a_{x_i} a_{y_i}, -2\mu a_{y_i}^2] \quad (۱۳-۳)$$

$$QW = d \quad (۱۴-۳)$$

$$d_i = \ell_i^2 - (1 + \mu^2) (a_{x_i}^2 + a_{y_i}^2) \quad (۱۵-۳)$$

۳-۲-۲- سینماتیک مستقیم

مسئله سینماتیک مستقیم ربات در واقع بدست آوردن موقعیت و دوران مجری نهایی به ازای هر طول دلخواه محرکه های خطی در محدوده طول کورس آنهاست. برای محاسبه سینماتیک مستقیم ربات موازی استوارت نشان داده شده در شکل ۳-۶، چنانچه ماتریس Q غیر منفرد باشد می‌توان بردار W را با به کار بردن رابطه (۱۶-۳) بدست آورد:

$$W = Q^{-1} d \quad (۱۶-۳)$$

با مشخص شدن مقدار بردار W با استفاده از رابطه (۳-۱۲) می توان موقعیت و دوران صفحه متحرک ربات را بدست آورد. با در نظر گرفتن اینکه دوران صفحه متحرک ربات از طریق محور پیچش با بردار چهار مولفه ای $\{\hat{s} = [s_x \ s_y \ s_z]^T, \theta\}$ بیان شود، ماتریس دوران متناظر آن از رابطه (۳-۱۷) به دست خواهد آمد.

$$R = \begin{bmatrix} s_x^2 v\theta + c\theta & s_y s_x v\theta - s_z s\theta & s_x s_z v\theta + s_y s\theta \\ s_y s_x v\theta + s_z s\theta & s_y^2 v\theta + c\theta & s_y s_z v\theta - s_x s\theta \\ s_z s_x v\theta - s_y s\theta & s_z s_y v\theta + s_x s\theta & s_z^2 v\theta + c\theta \end{bmatrix} \quad (۳-۱۷)$$

توجه عبارتهای $s\theta$ ، $c\theta$ و $v\theta$ به ترتیب به منزله $\sin(\theta)$ ، $\cos(\theta)$ و $1 - \cos(\theta)$ می باشد. با توجه به این که سه المان آخر بردار W تنها تابعی از ماتریس دوران هستند، و اینکه بردار محور پیچش، یکه است (اندازه واحد دارد) می توان چهار پارامتر مجهول پیچش را بدست آورد. چهار معادله و چهار مجهول مورد نظر در رابطه (۳-۱۸) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} W_4 &= \hat{x}^T R \hat{x} = r_{11} = s_x^2 v\theta + c\theta \\ W_5 &= \hat{x}^T R \hat{y} + \hat{y}^T R \hat{x} = r_{12} + r_{21} = 2s_x s_y v\theta \\ W_6 &= \hat{y}^T R \hat{y} = r_{22} = s_y^2 v\theta + c\theta \\ 1 &= s_x^2 + s_y^2 + s_z^2 \end{aligned} \quad (۳-۱۸)$$

با توجه به رابطه W_4 و W_6 می توان s_x^2 و s_y^2 را مطابق رابطه (۳-۱۹) بدست آورد:

$$s_x^2 = \frac{W_4 - c\theta}{v\theta}, \quad s_y^2 = \frac{W_6 - c\theta}{v\theta} \quad (۳-۱۹)$$

با جایگذاری رابطه (۳-۱۹) در رابطه W_5 و با ساده سازی، یک معادله مرتبه دوم بر حسب $\cos(\theta)$ بدست می آید که ضرایب آن بر اساس رابطه (۳-۲۱) محاسبه می شود.

$$\cos^2 \theta - B \cos \theta + C = 0 \quad (۳-۲۰)$$

$$B = W_4 + W_6, \quad C = W_4 W_6 - W_5^2 / 4 \quad (۳-۲۱)$$

با استفاده از رابطه (۳-۲۰) مقدار $\cos(\theta)$ به صورت یکتا بدست می آید. توجه شود که برای پرهیز از پاسخ های موهومی باید از ریشه های مثبت $B^2 - 4C$ صرفه نظر کرد.

$$\cos \theta = \frac{1}{2} (B - \sqrt{B^2 - 4C}) \quad (22-3)$$

برای المان‌های بردار پیچش $\hat{s} = [s_x \ s_y \ s_z]^T$ سه حالت متفاوت پیش می‌آید. حالت زمانی است که $W_4 \neq c\theta$:

$$s_x = \sqrt{\frac{W_4 - c\theta}{v\theta}}, s_y = \frac{W_5}{2s_x v\theta}, s_z = \sqrt{1 - s_x^2 - s_y^2} \quad (23-3)$$

حالت دوم زمانی است که $W_6 \neq c\theta$:

$$s_x = \frac{W_5}{2s_y v\theta}, s_y = \sqrt{\frac{W_6 - c\theta}{v\theta}}, s_z = \sqrt{1 - s_x^2 - s_y^2} \quad (24-3)$$

حالت سوم وقتی است که $W_4 = W_6 = c\theta$:

$$s_x = s_y = 0, s_z = 1 \quad (25-3)$$

هر کدام از حالت‌های فوق که واقع شوند، چهار پاسخ برای بردار پیچش وجود خواهد داشت که در رابطه (26-3) بیان شده‌اند. با قراردادن مقادیر به دست آمده در رابطه (3-17)، چهار ماتریس دوران متفاوت برای دوران صفحه متحرک ربات بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} 1) s &= [s_x \ s_y \ s_z]^T \\ 2) s &= [s_x \ s_y \ -s_z]^T \\ 3) s &= [-s_x \ -s_y \ s_z]^T \\ 4) s &= [-s_x \ -s_y \ -s_z]^T \end{aligned} \quad (26-3)$$

تا به اینجا سینماتیک مستقیم ربات موازی استوارت شکل 3-6 برای دوران صفحه متحرک حل شده است و چهار پاسخ متفاوت دارد. برای حل سینماتیک مستقیم موقعیت ربات، باید از سه المان ابتدایی بردار W استفاده کرد. بردارهای U و V به ترتیب مطابق رابطه (3-27) و (3-28) تعریف می‌شوند. با توجه به اینکه این روابط تابعی از ماتریس دوران هستند در نتیجه بردارهای U و V نیز چهار مقدار متفاوت خواهند داشت.

$$U^T = \hat{x}^T (\mu R^T - I) \quad (27-3)$$

$$V^T = \hat{y}^T (\mu R^T - I) \quad (28-3)$$

با این تعریف، سه المان ابتدایی بردار W مطابق رابطه (29-3) بیان خواهند شد:

$$\begin{aligned} W_1 &= P^T P \\ W_2 &= U^T P \\ W_3 &= V^T P \end{aligned} \quad (29-3)$$

مقادیر W_2 و W_3 ، مکان هندسی دو صفحه را نشان می‌دهد که تقاطع آنها خطی با معادله:

$$P = r_0 + tr_1 \quad (30-3)$$

است که در آن t پارامتر خط و r_0 یک خط در صفحه‌ای است که بردارهای U و V آن را تشکیل می‌دهند. رابطه (31-3) و رابطه (32-3) به ترتیب نحوه محاسبه r_0 و r_1 را نشان می‌دهند. r_1 بردار یک عمود بر هر دو بردار U و V است. مشخصا بردار r_1 و r_0 بر هم عمود خواهند بود و رابطه (33-3) میان آنها برقرار خواهد بود.

$$r_0 = \frac{(V^T V) W_2 - (U^T V) W_3}{(U^T U)(V^T V) - (U^T V)^2} U + \frac{(U^T V) W_2 - (U^T U) W_3}{(U^T U)(V^T V) - (U^T V)^2} V \quad (31-3)$$

$$r_1 = \frac{U \times V}{\|U \times V\|} \quad (32-3)$$

$$r_0^T r_1 = r_1^T r_1 = 0 \quad (33-3)$$

معادله خطی که در رابطه (30-3) معرفی شده، کره $w_1 = P^T P$ را در دو نقطه قطع می‌کند که در واقع پاسخ سینماتیک مستقیم موقعیت ربات هستند. مقدار پارامتر t نیز از رابطه (35-3) محاسبه می‌شود.

$$P_1 = r_0 + tr_1 \quad (34-3)$$

$$P_2 = r_0 - tr_1$$

$$t = \sqrt{W_1 - r_0^T r_1} \quad (35-3)$$

در نهایت مسئله سینماتیک مستقیم موقعیت ربات حل شده است و دارای دو پاسخ متفاوت است. در مجموع سینماتیک مستقیم ربات موازی استوارت شکل ۳-۶ هشت جواب خواهد داشت که بر گرفته از دو موقعیت متفاوت با چهار دوران متمایز است.

۳-۳- ژاکوبین ربات موازی استوارت

ژاکوبین ربات‌های موازی، شاخصه‌ها و نگاشت‌هایی که بر مبنای ماتریس ژاکوبین تعریف می‌شوند یکی دیگر از مسائل مورد توجه پژوهشگران است [۵۱]. در این بخش ژاکوبین ربات موازی استوارت با جزئیات تحلیل شده و ماتریس ژاکوبین آن به صورت تحلیلی محاسبه می‌شود. در یک بیان ساده ژاکوبین نگاشتی است که میان سرعت محرکه‌ها و سرعت نقطه مرجع از صفحه متحرک ربات ارتباط ایجاد می‌کند. بردار سرعت محرکه‌ها با $\dot{L} = [\dot{\ell}_1, \dot{\ell}_2, \dot{\ell}_3, \dot{\ell}_4, \dot{\ell}_5, \dot{\ell}_6]^T$ معرفی می‌شود و بردار سرعت صفحه متحرک با $\dot{\mathcal{H}} = [{}^A v_p, {}^A \omega]^T$ معرفی می‌شود که شامل دو بخش سرعت‌های خطی و زاویه‌ای است. برای بدست آوردن ماتریس ژاکوبین ربات باید حلقه بسته شدن سرعت در هر زنجیره را تشکیل داد. حلقه بسته شدن موقعیت در هر شاخه از زنجیره سینماتیکی دوباره در رابطه (۳-۳۶) باز نویسی شده است.

$${}^A P + {}^A R_B {}^B b_i = \ell_i {}^A \hat{s}_i + {}^A a_i \quad (۳-۳۶)$$

مشتق زمانی رابطه (۳-۳۶)، در رابطه (۳-۳۷) محاسبه شده است. باید توجه کرد که مشتق زمانی بردار ${}^B b_i$ نسبت به دستگاه مختصات $\{B\}$ صفر است و همچنین به طور مشابه مشتق زمانی ${}^A a_i$ در دستگاه مختصات مبدا نیز صفر است. از طرف دیگر رابطه (۳-۳۸) برای مشتق زمانی عبارت ${}^A \dot{R}_B {}^B b_i$ برقرار است.

$${}^A v_p + {}^A \dot{R}_B {}^B b_i + {}^A R_B {}^B \dot{b}_i = \dot{\ell}_i {}^A \hat{s}_i + \ell_i {}^A \dot{\hat{s}}_i + {}^A a_i \quad (۳-۳۷)$$

$${}^A \dot{R}_B {}^B b_i = {}^A \omega \times {}^A R_B {}^B b_i = {}^A \omega \times {}^A b_i \quad (۳-۳۸)$$

عبارت ${}^A\omega$ بیانگر سرعت زاویه‌ای صفحه‌ی متحرک ربات در دستگاه مختصات مبدا است. به طور مشابه مشتق زمانی بردار $\hat{S}_i$ در رابطه (۳۹-۳) محاسبه شده است که در آن ${}^A\omega_i$ سرعت زاویه‌ای عضو i ام در دستگاه مختصات مبدا است.

$$\ell_i {}^A\dot{\hat{S}}_i = \ell_i ({}^A\omega_i \times \hat{S}_i) \quad (۳۹-۳)$$

با در نظر گرفتن روابط (۳۸-۳) و (۳۹-۳)، رابطه (۳۷-۳) به شکل رابطه (۴۰-۳) ساده خواهد شد:

$${}^A v_p + {}^A\omega \times {}^A b_i = \dot{\ell}_i {}^A\hat{S}_i + \ell_i ({}^A\omega_i \times \hat{S}_i) \quad (۴۰-۳)$$

که در آن ${}^A v_p = [\dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{z}_p]^T$ سرعت خطی صفحه متحرک در نقطه P است. برای حذف نرخ زمانی حرکت مفاصل غیرفعال طرفین رابطه (۴۰-۳) در $\hat{S}_i$ ضرب داخلی شده و سپس با اعمال قاعده جابجایی ضرب داخلی و خارجی که در پیوست الف آمده است، به فرم رابطه (۴۱-۳) خواهد رسید که در آن اندیس A برای اختصار از تمامی پارامترها حذف شده است.

$$\hat{S}_i v_p + (b_i \times \hat{S}_i) \omega = \dot{\ell}_i \quad (۴۱-۳)$$

محاسبه رابطه (۴۱-۳) برای هر عضو و مرتب سازی آنها در قالب ماتریس، به بیان مختصر رابطه (۴۲-۳) ختم می شود که در آن ماتریس ژاکوبین یک ماتریس مربعی مطابق رابطه (۴۳-۳) است.

$$\dot{L} = J \dot{x} \quad (۴۲-۳)$$

$$J = \begin{bmatrix} \hat{S}_1^T & (b_1 \times \hat{S}_1)^T \\ \hat{S}_2^T & (b_2 \times \hat{S}_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ \hat{S}_6^T & (b_6 \times \hat{S}_6)^T \end{bmatrix} \quad (۴۳-۳)$$

با مشخص شدن ماتریس ژاکوبین، تکنیکی‌های ربات موازی استوارت قابل به ازای هر موقعیت و دوران دلخواه در فضای کاری ربات قابل بررسی است. تکنیکی ربات موازی استوارت بر اساس دترمینان ماتریس ژاکوبین و مطابق رابطه (۴۴-۳) بررسی می‌شود.

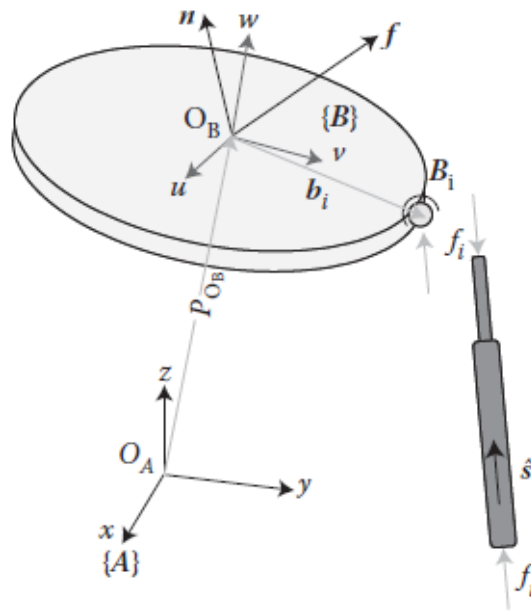
$$\det(J) = 0 \quad (۴۴-۳)$$

۴-۳- استاتیک و دینامیک ربات موازی استوارت

بدست آوردن یک مدل ریاضی برای بیان رفتار دینامیکی مکانیزم‌های حرکتی همواره از اهمیت بسیاری برخوردار بوده است. معادلات دینامیکی هر مکانیزم حرکتی به زنجیره سینماتیکی آن وابسته است به طوری که با پیچیده تر شدن زنجیره سینماتیکی بدست آوردن فرم صریح و بسته معادلات دینامیکی مشکل تر می‌شود [۵۲]. ربات‌های موازی نیز معادلات دینامیکی پیچیده‌ای دارند و اغلب بدست آوردن معادلات آنها به روش‌های معمول مانند نیوتن-ویلر کار آسانی نیست [۵۳]. همین امر باعث می‌شود تا از روش‌های مبتنی بر انرژی [۵۴] و کار مجازی [۵۵] برای آن استفاده شود.

۳-۴-۱- استاتیک ربات موازی استوارت

استاتیک ربات در واقع بررسی نیروها و گشتاورهایی است که ربات در حالت تعادل استاتیکی هنگام تماس با محیط اطراف رد و بدل می‌کند. با فرض اینکه ربات بردار نیرویی $F = [f, n]^T$ را در نقطه O_B (مرکز صفحه متحرک ربات) به محیط وارد کند که در آن f به منزله نیروها و n به منزله گشتاور-هایی است که ربات به محیط وارد می‌کند. نمودار جسم آزاد بازوها و صفحه متحرک ربات در شکل ۳-۷ نشان داده شده است که برای سادگی و اختصار با توجه به اینکه ربات دارای شش محرکه یکسان است، تنها نمودار جسم آزاد یک بازوی ربات رسم شده است. با فرض اینکه هیچ نیروی خارجی به جز نیروی محرکه‌ها به بازوهای ربات وارد نمی‌شود می‌توان نتیجه گرفت که نیروهای استاتیکی بازوهای ربات در امتداد محور هر بازو $\hat{g}_i$ و به صورت کششی یا فشاری است. سپس نیروهایی که به صفحه متحرک ربات وارد می‌شود در نظر گرفته می‌شوند. در حالت تعادل استاتیکی باید مجموع نیروهایی که به صفحه متحرک وارد می‌شود مطابق رابطه (۳-۴۵) برابر صفر باشد.



شکل ۷-۳ نمودار جسم آزاد صفحه متحرک ربات و یکی از بازوهای آن [۳۵]

$$-f + \sum_{i=1}^6 f_i \hat{s}_i = 0 \quad (45-3)$$

همچنین مجموع گشتاورهایی که بر صفحه متحرک ربات وارد می شود نیز باید برابر صفر باشد:

$$-n + \sum_{i=1}^6 b_i \times f_i \hat{s}_i = 0 \quad (46-3)$$

که در آن b_i بردار موقعیت نقطه B_i نسبت به نقطه O_B است. با نوشتن معادلات (۴۵-۳) و (۴۶-۳) در کنار هم و مرتب سازی آنها در قالب روابط ماتریسی، رابطه (۴۷-۳) نتیجه می شود:

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_1 & \dots & \hat{s}_6 \\ b_1 \times \hat{s}_1 & \dots & b_6 \times \hat{s}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ n \end{bmatrix} \quad (47-3)$$

با مقایسه سمت چپ رابطه (۴۷-۳) با رابطه ژاکوبین ربات (۴۳-۳) به روشنی می توان دریافت که ماتریس سمت چپ ترانهاده ماتریس ژاکوبین است. در نتیجه می توان رابطه (۴۷-۳) را به صورت رابطه کلی (۴۸-۳) بیان کرد که در آن $\tau = [f_1, \dots, f_6]^T$ بردار نیروی محرکه های ربات است و $\mathcal{F} = [f, n]^T$ بردار نیرویی شش بعدی نیروها و گشتاورهای وارد شده به محیط از طرف ربات است.

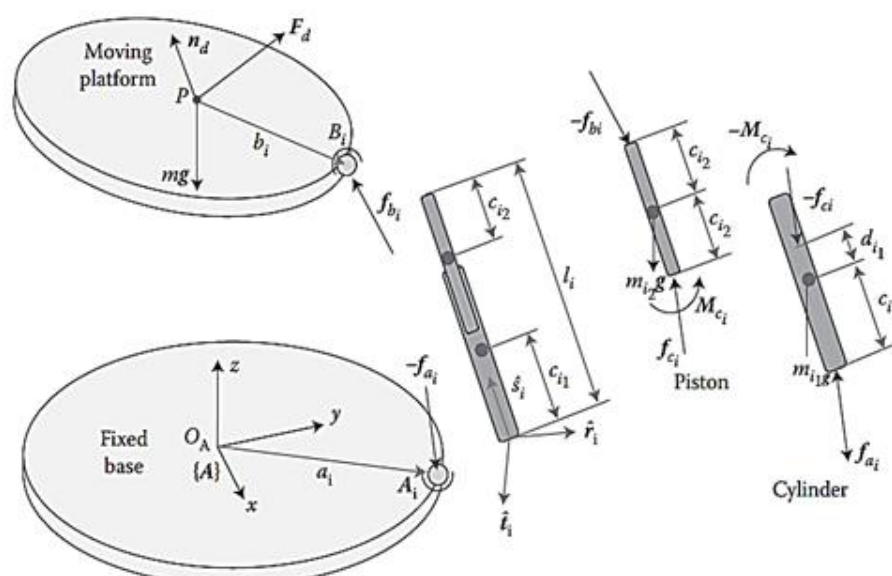
$$\mathcal{F} = J^T \tau \quad (48-3)$$

۳-۴-۲- دینامیک ربات موازی استوارت

در بخش ۳-۲ سینماتیک ربات موازی استوارت بررسی شد و در ادامه در بخش ۳-۳ ژاکوبین ربات به صورت تحلیلی به دست آمد. در این بخش دینامیک ربات موازی استوارت با جزئیات بررسی خواهد شد. دینامیک ربات‌های موازی را می‌توان به روش‌های متفاوتی از جمله روش نیوتن-اولر، روش لاگرانژ یا با استفاده از معادلات کین بدست آورد. استفاده از روش نیوتن-اولر به دلیل وارد شدن پارامترهای متعدد در معادلات که نهایتاً در فرم بسته معادلات حذف می‌شوند (مانند نیروهای داخلی بین تک تک اعضای ربات) رواج ندارد و معمولاً از روش‌هایی که بر پایه انرژی یا کار مجازی هستند استفاده می‌شود. هدف از تحلیل دینامیک ربات، دستیابی به معادلاتی است که رفتار دینامیکی ربات را در فضای دکارتی تحت تاثیر نیروی محرکه‌ها و نیروهای خارجی مطابق رابطه (۳-۴۹) توصیف کند.

$$M(\kappa)\ddot{\kappa} + C(\kappa, \dot{\kappa})\dot{\kappa} + G(\kappa) = F(\kappa) \quad (۳-۴۹)$$

$M(\kappa)$ ماتریس اینرسی $C(\kappa, \dot{\kappa})$ ، ماتریس اثرات کریولیس و گریز از مرکز و $G(\kappa)$ ماتریس گرانش ربات است. $F(\kappa)$ برداری متشکل از اثر نیروهای خارجی و نیروی محرکه‌هاست. $\kappa = [P, \theta]^T$ نیز بردار مختصات تعمیم یافته ربات در فضای دکارتی است که نشان دهنده موقعیت $P = [P_x, P_y, P_z]^T$ و دوران $\theta = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$ صفحه متحرک ربات در دستگاه مختصات مبدا است. در واقع دینامیک ربات موازی استوارت مجموعه‌ای از دینامیک تک تک اعضای متحرک آن است. اعضای متحرک ربات شامل بازوهای ربات و صفحه متحرک آن می‌شود. شکل ۳-۸ نمودار جسم آزاد اعضای متحرک ربات موازی استوارت را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۸ نمودار جسم آزاد صفحه متحرک و یک بازوی ربات موازی استوارت [۳۵]

علی رغم دشواری‌هایی که روش نیوتن-اوایلر دارد، مرتب سازی معادلات و دستیابی به فرم بسته نشان داده شده در رابطه (۳-۴۹) در این روش ساده‌تر است. بر اساس روش نیوتن-اوایلر معادلات تعادل برای تک تک اعضای متحرک ربات به فرم باز نوشته می شود و معمولاً روابط پیچیده، متعدد و طولانی دارد. با بدست آوردن فرم باز معادلات تعادل، گام بعدی تفکیک و مرتب سازی معادلات به فرم بسته است. در نتیجه برای تبیین صریح و روشن معادلات دینامیکی، در این بخش برای اختصار تنها فرم بسته معادلات تشریح شده است. فرم باز معادلات تعادل به تفصیل در مرجع [۳۵] شرح داده شده است. ابتدا فرم بسته دینامیک بازوهای ربات و سپس دینامیک صفحه متحرک ربات بررسی خواهد شد. به طور کلی پارامترهایی که در فرم بسته معادلات دینامیکی ربات وارد می شود در جدول ۳-۱ معرفی شده‌اند.

جدول ۳-۱ نام و نماد پارامترهای استفاده شده در فرم بسته معادلات دینامیکی ربات موازی استوارت

نماد پارامتر	توصیف پارامتر
F_d	بردار نیروهای خارجی
n_d	بردار گشتاورهای خارجی
f_{a_i}	بردار نیروهای داخلی میان بازوی i ام ربات و صفحه ثابت ربات
f_{b_i}	بردار نیروهای داخلی میان بازوی i ام ربات و صفحه متحرک ربات
f_{c_i}	بردار نیروهای داخلی میان سیلندر و پیستون عملگر خطی i ام ربات (جک‌های ربات)
M_{c_i}	بردار گشتاورهای داخلی میان سیلندر و پیستون عملگر خطی i ام ربات (جک‌های ربات)
g	شتاب جاذبه برابر با $9.82 \left(\frac{m}{s^2}\right)$
m	جرم صفحه متحرک ربات

${}^A I_P$	اینرسی صفحه متحرک ربات در دستگاه مختصات مبدا $\{A\}$
m_{i_1}	جرم سیلندر در عملگر خطی $\dot{l}$ ام ربات
$I_{c_{i_1}}$	اینرسی سیلندر در عملگر خطی $\dot{l}$ ام ربات
c_{i_1}	مرکز جرم سیلندر در عملگر خطی $\dot{l}$ ام ربات
m_{i_2}	جرم پیستون در عملگر خطی $\dot{l}$ ام ربات
$I_{c_{i_2}}$	اینرسی پیستون در عملگر خطی $\dot{l}$ ام ربات
c_{i_2}	مرکز جرم پیستون در عملگر خطی $\dot{l}$ ام ربات

در حالت کلی معادله دینامیکی بازوی ربات مطابق با رابطه (۵۰-۳) بیان می‌شود که در آن M_i ماتریس اینرسی، C_i ماتریس اثر کریولیس و گریز از مرکز و G_i ماتریس گرانش بازوی $\dot{l}$ ام ربات است. F_i نیز نیروهایی هستند که در مختصات تعمیم یافته میانی x_i به بازوی ربات وارد می‌شوند.

$$M_i \ddot{x}_i + C_i \dot{x}_i + G_i = F_i \quad (۵۰-۳)$$

ماتریس اینرسی هر بازو M_i بر اساس رابطه (۵۱-۳) محاسبه می‌شود که شامل پارامترهایی است که در روابط (۵۲-۳) و (۵۳-۳) معرفی شده‌اند. عملگر a_x نیز برای بردار مفروض $a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ مطابق رابطه (۵۴-۳) تعریف می‌شود. تشریح کامل عملگر a_x نیز در پیوست ب آورده شده است.

$$M_i = m_{i_2} \hat{s}_i \hat{s}_i^T - \frac{1}{l_i^2} I_{xx_i} \hat{s}_{i_x}^2 - m_{c_e} \hat{s}_{i_x}^2 \quad (۵۱-۳)$$

$$I_{xx_i} = I_{eq}(1,1), \quad {}^A I_{eq} = ({}^A I_{c_{i_1}} + {}^A I_{c_{i_2}}) \quad (۵۲-۳)$$

$$m_{c_e} = \frac{1}{\rho_i^2} (m_{i_1} c_{i_1}^2 + m_{i_2} c_{i_2}^2) \quad (۵۳-۳)$$

$$a_x = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad (۵۴-۳)$$

ماتریس اثر کریولیس و گریز از مرکز C_i در رابطه (۵۵-۳) معرفی شده است و شامل پارامترهایی است که در رابطه (۵۶-۳) محاسبه شده است.

$$C_i = -\frac{2}{l_i} m_{c_o} \dot{l}_i s_{i_x}^2 - \frac{1}{\ell_i^2} m_{i_2} c_{i_2} \hat{s}_i \dot{x}_i^T s_{i_x}^2 \quad (۵۵-۳)$$

$$m_{c_o} = \frac{1}{\ell_i} m_{i_2} c_{i_2} - \frac{1}{l_i^2} (I_{xx_i} + \ell_i^2 m_{c_e}) \quad (۵۶-۳)$$

$$\dot{l}_i = \hat{s}_i^T \dot{x}_i$$

ماتریس گرانش G_i در رابطه (۵۷-۳) محاسبه شده و شامل پارامتری است که در رابطه (۵۸-۳) معرفی شده است.

$$G_i = (m_{ge} s_{i_x}^2 - m_{i_2} \hat{s}_i \hat{s}_i^T) g \quad (۵۷-۳)$$

$$m_{ge} = \frac{1}{\ell_i} (m_{i_1} c_{i_1} + m_{i_2} (\ell_i - c_{i_2})) \quad (۵۸-۳)$$

بردار نیرویی F_i نیز در رابطه (۵۹-۳) معرفی شده است که در آن τ_i نیروی محرکه $\dot{l}_i$ ام در امتداد محور $\hat{s}_i$ است.

$$F_i = -f_{b_i} + \tau_i \hat{s}_i \quad (۵۹-۳)$$

باید توجه کرد که معادله دینامیکی بازوی i ام ربات در مختصات تعمیم یافته میانی x_i تعریف شده است و باید به مختصات تعمیم یافته ربات در فضای دکارتی $\mathcal{H} = [P, \theta]^T$ منتقل گردد. ماتریس ژاکوبین J_i نگاشتی است میان سرعت‌ها در مختصات تعمیم یافته میانی x_i و فضای دکارتی $\mathcal{H}$ که مطابق رابطه (۶۰-۳) تعریف شده و روابط (۶۱-۳) و (۶۲-۳) را برقرار می‌سازد. $I_{3 \times 3}$ ماتریس همانی است.

$$J_i = [I_{3 \times 3} \quad -b_{i_x}] \quad (۶۰-۳)$$

$$\dot{x}_i = J_i \dot{\mathcal{H}} \quad (۶۱-۳)$$

$$\ddot{x}_i = J_i \ddot{\mathcal{H}} + \dot{J}_i \dot{\mathcal{H}} \quad (۶۲-۳)$$

$\dot{J}_i$ مشتق زمانی ماتریس ژاکوبین J_i بوده و مطابق رابطه (۶۳-۳) بدست می‌آید.

$$\dot{J}_i = [0_{3 \times 3} \quad -(\omega_x b_i)_x] = [0_{3 \times 3} \quad -\omega_x b_{i_x} + b_{i_x} \omega_x] \quad (۶۳-۳)$$

جایگذاری روابط (۶۱-۳)، (۶۲-۳) در رابطه (۵۰-۳) و ضرب $(J_i)^T$ از سمت چپ در طرفین رابطه، نتیجه می‌دهد:

$$\begin{aligned} J_i^T M_i (J_i \ddot{x} + \dot{J}_i \dot{x}) + J_i^T C_i J_i \dot{x} + J_i^T G_i &= J_i^T F_i \\ (J_i^T M_i J_i) \ddot{x} + (J_i^T M_i \dot{J}_i + J_i^T C_i J_i) \dot{x} + J_i^T G_i &= J_i^T F_i \end{aligned} \quad (۶۴-۳)$$

به این ترتیب معادله دینامیکی بازوی i ام ربات در مختصات تعمیم یافته فضای دکارتی $\mathcal{H}$ تعریف شده و پارامترهای آن مطابق رابطه (۶۶-۳) محاسبه خواهد شد.

$$M_{li} \ddot{x} + C_{li} \dot{x} + G_{li} = \mathcal{F}_{li} \quad (۶۵-۳)$$

$$\begin{aligned} M_{li} &= J_i^T M_i J_i \\ C_{li} &= J_i^T M_i \dot{J}_i + J_i^T C_i J_i \\ G_{li} &= J_i^T G_i \\ \mathcal{F}_{li} &= J_i^T F_i \end{aligned} \quad (۶۶-۳)$$

با توجه به رابطه (۶۰-۳) می توان مقدار $\mathcal{F}_{li}$ را مطابق رابطه (۶۷-۳) به شکل صریح تری بدست آورد:

$$\mathcal{F}_{li} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} \\ -b_{i \times} \end{bmatrix} [-f_{b_i} + \tau_i \hat{s}_i] = - \begin{bmatrix} f_{b_i} \\ b_{i \times} f_{b_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_i \hat{s}_i \\ \tau_i b_{i \times} \hat{s}_i \end{bmatrix} \Rightarrow \mathcal{F}_{li} = \tau_i \begin{bmatrix} \hat{s}_i \\ b_{i \times} \hat{s}_i \end{bmatrix} \quad (۶۷-۳)$$

پس از دینامیک بازوهای ربات، باید دینامیک صفحه متحرک ربات را بدست آورد. دینامیک صفحه

متحرک ربات در مختصات تعمیم یافته فضای دکارتی $\mathcal{H} = \begin{bmatrix} P \\ \theta \end{bmatrix}$ ، $\dot{\mathcal{H}} = \begin{bmatrix} v_p \\ \omega \end{bmatrix}$ ، $\ddot{\mathcal{H}} = \begin{bmatrix} a_p \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}$ با رابطه (۳-

۶۸) بیان می شود که در آن M_p ماتریس اینرسی، C_p ماتریس اثر کریولیس و گریز از مرکز و G_p ماتریس گرانش هستند. $\mathcal{F}_p$ نیز نیروهایی است که در مختصات تعمیم یافته $\mathcal{H}$ به صفحه متحرک ربات وارد می شود.

$$M_p \ddot{\mathcal{H}} + C_p \dot{\mathcal{H}} + G_p = \mathcal{F}_p \quad (۶۸-۳)$$

ماتریس اینرسی صفحه متحرک ربات M_p براساس رابطه (۶۹-۳) محاسبه می شود که در آن $^A I_p$ اینرسی و m جرم صفحه متحرک در دستگاه مختصات مبدا است. ماتریس C_p ، ماتریس G_p و بردار $\mathcal{F}_p$ به ترتیب در روابط (۷۰-۳)، (۷۱-۳) و (۷۲-۳) تعیین شده اند. $0_{3 \times 3}$ ماتریس مربعی صفر با ابعاد 3×3 است.

$$M_p = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & A I_P \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (۶۹-۳)$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \omega \times A I_P \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (۷۰-۳)$$

$$G_p = \begin{bmatrix} -mg \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (۷۱-۳)$$

$$\mathcal{F}_p = \begin{bmatrix} F_d + \sum f_{b_i} \\ n_d + \sum b_i \times f_{b_i} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (۷۲-۳)$$

معادله دینامیکی ربات در فضای دکارتی که در رابطه (۴۹-۳) معرفی شد، اکنون با استفاده از ترکیب معادلات (۶۸-۳) و (۶۵-۳) محقق خواهد شد و پارامترهای آن در روابط (۷۳-۳)، (۷۴-۳)، (۷۵-۳) و (۷۶-۳) معرفی شده‌اند.

$$M(\mathcal{K}) = M_p + \sum_{i=1}^{i=6} M_{li} \quad (۷۳-۳)$$

$$C(\mathcal{K}, \dot{\mathcal{K}}) = C_p + \sum_{i=1}^{i=6} C_{li} \quad (۷۴-۳)$$

$$G(\mathcal{K}) = G_p + \sum_{i=1}^{i=6} G_{li} \quad (۷۵-۳)$$

$$\mathcal{F}(\mathcal{K}) = \mathcal{F}_p + \sum_{i=1}^{i=6} \mathcal{F}_{li} \quad (۷۶-۳)$$

باید توجه داشت که نیروها f_{b_i} و گشتاورهای $b_i \times f_{b_i}$ داخلی هنگام ترکیب معادلات اثر یکدیگر را خنثی کرده و از معادلات حذف می‌شوند. در نتیجه بردار $\mathcal{F}(\mathcal{K})$ تنها شامل اثر نیروهای خارجی و نیروی عملگرهای ربات است.

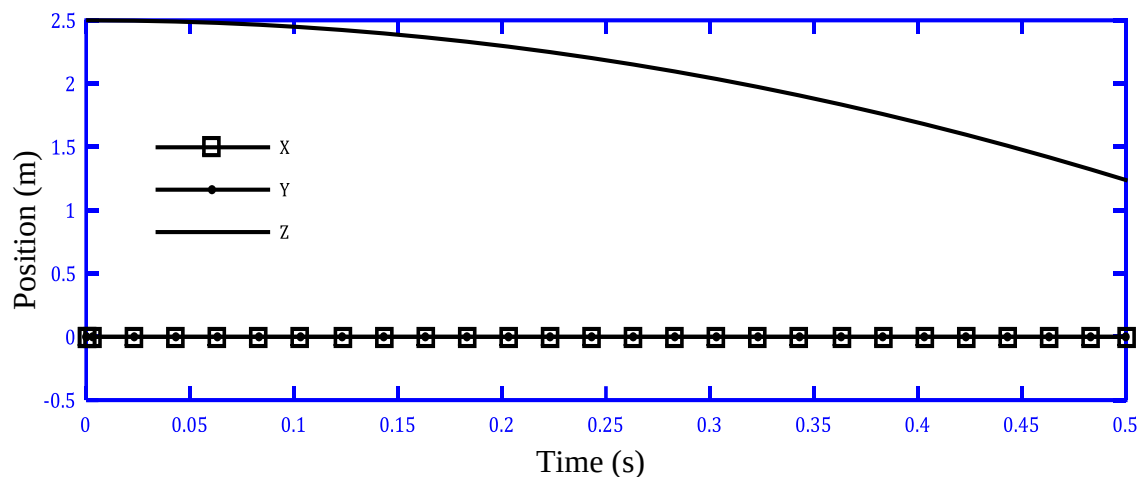
۳-۵- اعتبارسنجی مدل‌سازی کامپیوتری ربات موازی استوارت

معادلات سینماتیک و دینامیک ربات به ازای مقادیر دلخواه جدول ۳-۲، با استفاده از دستورهای پیش فرض نرم‌افزار متلب کد نویسی شده‌اند و مدل کامپیوتری ربات محقق شده است. برای اینکه صحت

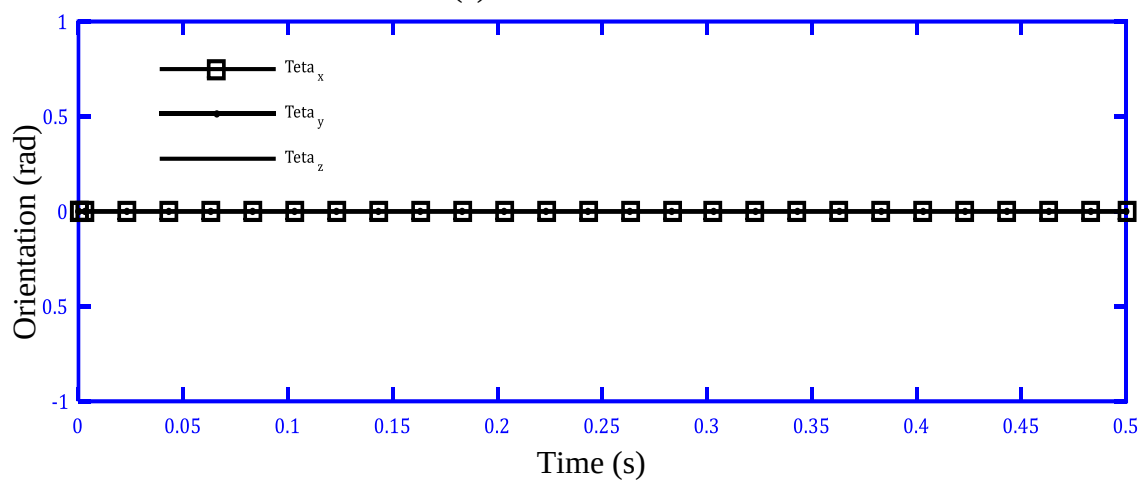
مدل سازی ریاضی ربات تعیین شود باید با استفاده از شبیه سازی های کامپیوتری رفتار ربات بر مبنای معادلات دینامیکی تدوین شده، با رفتار طبیعی یک مدل واقعی تطابق داده شود. ساده ترین و مرسوم ترین روش اعتبار سنجی ربات های موازی مطالعه رفتار دینامیکی آنها در اثر بارهای گرانشی است. در این حالت هیچ نیروی از سوی محرکه های ربات به آن وارد نمی شود و ربات تنها در اثر نیروی وزن خود از موقعیت خانگی اش (حالت اولیه) جا به جا خواهد شد. برای آزمایش ربات تحت بار گرانشی معمولاً ربات در حالتی قرار می گیرد که صفحه متحرک موازی صفحه ثابت باشد و طول اولیه محرکه های خطی ربات بیشتر از کمترین طول ممکن آنها باشد. در واقع با این کار صفحه متحرک ربات از ارتفاع مشخصی رها می شود و طبیعتاً انتظار می رود که بدون دوران و منحرف شدن، ارتفاع ربات تا رسیدن به کمترین ارتفاع ممکن کاهش یابد. در بیانی ساده تر حرکت ربات باید تنها در راستای محور قائم Z بوده و روند کاهشی داشته باشد. چنانچه ربات در جهات دیگر حرکت داشته باشد نشان گر این است که قیود و روابط سینماتیکی یا دینامیکی ربات به درستی مدل سازی نشده اند. اعتبار سنجی مدل سازی دینامیکی ربات با پارامترهای جدول ۳-۲ در نرم افزار متلب انجام شده و نتایج آن در شکل ۳-۹ و شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۳-۲ پارامترهای دلخواه ربات موازی استوارت برای اعتبار سنجی معادلات دینامیکی

نماد	توصیف	مقدار
R_A	شعاع دایره صفحه ثابت ربات	$2 (m)$
R_B	شعاع دایره صفحه متحرک ربات	$1 (m)$
θ_{A_i}	زاویه نقاط A_i روی دایره صفحه ثابت ربات	$[0, 60, 120, 180, 240, 300] (deg)$
θ_{B_i}	زاویه نقاط B_i روی دایره صفحه متحرک ربات	$[30, 30, 150, 150, 270, 270] (deg)$
m	جرم صفحه متحرک ربات	$1150 (Kg)$
m_{i_1}	جرم سیلندر عملگرهای خطی ربات	$85 (Kg)$
m_{i_2}	جرم پیستون عملگرهای خطی ربات	$22 (Kg)$
C_{i_1}	مرکز جرم سیلندر عملگرهای خطی ربات	$0.75 (m)$
C_{i_2}	مرکز جرم پیستون عملگرهای خطی ربات	$0.75 (m)$
I_P	ممان اینرسی صفحه متحرک ربات	$diag(570, 285, 285) Kg.m^2$
I_{Ci_1}	ممان اینرسی سیلندر عملگرهای خطی ربات	$diag(16, 16, 0) Kg.m^2$
I_{Ci_2}	ممان اینرسی پیستون عملگرهای خطی ربات	$diag(401, 401, 0) Kg.m^2$

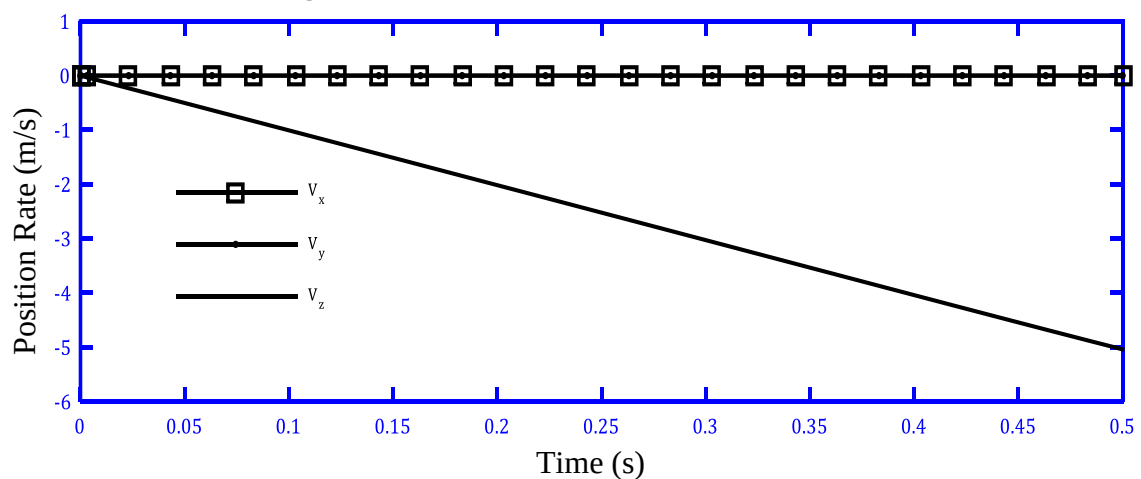


(a) Cartesian Position

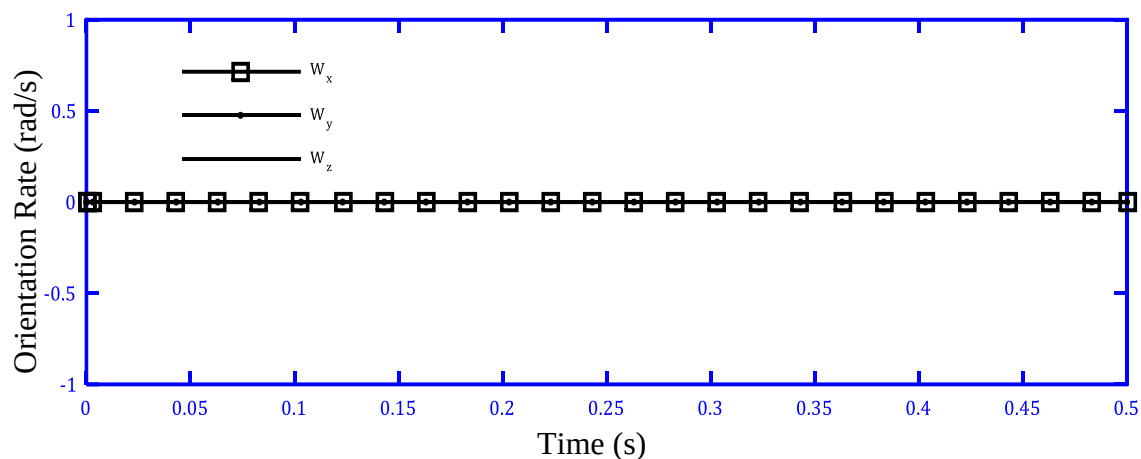


(b) Cartesian Orientation

شکل ۳-۹ موقعیت و دوران صفحه متحرک ربات در فضای دکارتی



(a) Cartesian Position Rate



(b) Cartesian Orientation Rate

شکل ۳-۱۰ نرخ زمانی موقعیت و دوران صفحه متحرک ربات در فضای دکارتی

بررسی نتایج نشان می‌دهد که رفتار دینامیکی ربات بر اساس مدل ریاضی توسعه داده شده، مطابق انتظار بوده است. به این ترتیب صحت معادلات بدست آمده تحقیق شده است و می‌تواند در مباحث بهینه‌سازی و کنترل ربات استفاده شود.

فصل چهارم:

طراحی بهینه ربات موازی استوارت

در فصل چهارم ابتدا مقدمه‌ای در بحث طراحی بهینه ربات‌های موازی مطرح می‌شود. در ادامه، با مطالعه فرصت‌ها و چالش‌ها، روشی تحلیلی-عددی برای به دست آوردن فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت ارائه شده است که می‌تواند به راحتی در تکرار حلقه‌های بهینه‌سازی استفاده شود. پس از آن شاخص‌های ارزیابی مهارت و چالاکی ربات در فضای کاری ربات به عنوان یکی از معیارهای بهینه‌سازی بررسی و معرفی شده‌اند. شاخص نسبی حجم نیز به عنوان معیار دوم بهینه‌سازی معرفی می‌شود. در انتها براساس معیار چالاکی و معیار نسبی حجم، یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه برای ربات موازی استوارت مطرح و حل شده است.

۴-۱- مقدمه‌ای در بحث طراحی بهینه ربات‌های موازی

در طراحی بهینه ربات‌های موازی همواره تلاش می‌شود که محدودیت‌های ساختاری مانند فضای کاری و تکینگی وابسته به کاربری ربات در حد امکان برطرف گردد. معمولاً یک فضای کاری دلخواه از ضروری-ترین نیازهای یک ربات موازی در کاربردهای عملی است. علاوه بر این، داشتن اندازه فیزیکی کوچک نسبت به این فضای کاری دلخواه برای ربات از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین نیاز است تا بازدهی سینماتیکی^۱ ربات و پرهیز از تکینگی با استفاده از یک معیار چالاکی^۲، زیر نظر گرفته شود. در مواردی نیز حتی لازم است تا سختی ربات برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شود. در نتیجه، بهینه‌سازی پارامترهای هندسی در طراحی ساختار و پیکربندی ربات با هدف تامین فضای کاری دلخواه و بیشینه‌سازی بازدهی سینماتیکی آن انجام می‌پذیرد.

مرلت^۳ در سال ۱۹۹۷ ابتدا روشی مبتنی بر فضای کاری برای طراحی ربات‌های موازی معرفی کرد [۵۶] و سپس روشی برای طراحی ربات موازی گاف-استوارت با فضای کاری دلخواه ارائه کرد [۵۷]. انجام بهینه‌سازی سینماتیکی ربات‌های موازی تنها با هدف دستیابی به بزرگترین فضای کاری معمولاً منجر به

^۱ Kinematic Performance

^۲ Dexterity Index

^۳ J. P. Merlet

بازدهی سینماتیکی نامطلوبی می‌شود [۵۸]. در واقع کیفیت فضای کاری ربات باید از نظر چالاکي و تکینگی در نظر گرفته شود. همین امر موجب می‌شود تا مسئله طراحی بهینه ربات‌های موازی تبدیل به یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه شود. لو^۱ و همکاران، مفهوم فضای کاری منظم-موثر را با هدف بیشینه‌سازی کیفیت فضای کاری گسترش دادند [۵۹]. در این مفهوم، لازمه‌های شکل و کیفیت فضای کاری برای یک طراحی بهینه مشخص شده است. استاک و میلر^۲ نیز روشی برای بهینه‌سازی سینماتیکی یک ربات موازی با سه درجه آزادی انتقالی معرفی کردند که در آن تابع هدف به صورت ترکیبی از حجم فضای کاری و معیار قابلیت دستکاری^۳ شکل گرفته بود [۶۰]. بدست آوردن رابطه میان پارامترهای طراحی و توابع هدف، اهمیت بسیاری در مسئله بهینه‌سازی دارد. در همین راستا، لیو^۴ روش چارت بازدهی را برای بهینه‌سازی سینماتیکی ربات‌های موازی ارائه کرد [۶۱]. رابطه بین پارامترهای هندسی و چندین شاخص بازدهی در این چارت آمده است. با استفاده از این چارت می‌توان چندین شاخص عملکرد را برای تابع هدف در نظر گرفت و پارامترهای هندسی را از روی آن انتخاب کرد [۶۲، ۶۳].

در ادامه کار، لیو و همکاران با تعریف بزرگترین فضای کاری احاطه شده^۵، روشی برای بهینه‌سازی ربات موازی دلتا^۶ ارائه کردند که در واقع هدف آنها پیدا کردن بزرگترین حجم فضای کاری خالی از تکینگی بود [۶۴]. اگرچه تلاش‌های بسیاری در این زمینه انجام شده است اما مسئله طراحی بهینه ربات‌های موازی هنوز چالش‌های بسیاری دارد که امروزه قدم به قدم در حال توسعه است. در ادامه جزئیات روند توسعه علمی در زمینه بدست آوردن فضای کاری، محاسبه معیارهای چالاکي و مهارت، محاسبه اندازه فیزیکی ربات و طرح یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه برای ربات‌های موازی مطرح شده است.

^۱ Y. Lou

^۲ M. Stock and K. Miller

^۳ Manipulability Index

^۴ X. J. Liu

^۵ Maximum Inscribed Workspace

^۶ Delta Parallel Robot

۴-۲- فضای کاری ربات

فضای کاری ربات‌ها در فضای دکارتی شش بُعدی، شامل سه انتقال و سه دوران است. همواره بدست آوردن فضای کاری یک ربات به تعیین فضای کاری انتقالی و فضای کاری دورانی آن معطوف می‌شود. در حالت کلی فضای کاری ربات‌های شش درجه آزادی در شش بُعد یکامتعامد تعریف می‌شود که با ابزارهای امروزی نمی‌توان ترسیمی از آن را به تصویر کشید. با این حال مادامی که بتوان فضای کاری انتقالی و دورانی را از هم تفکیک کرد می‌توان فضای کاری ربات را در دو زیر فضای سه بُعدی رسم کرد. در ربات‌های سری، مچ ربات وظیفه تعیین جهت‌گیری ابزار را به عهده دارد و به تعبیری جهت‌گیری‌های مچ ربات، فضای کاری دورانی آن را تعیین می‌کند. فضای کاری انتقالی ربات‌های سری بر اساس موقعیت مرکز مچ ربات بدست می‌آید که مستقل از جهت‌گیری ابزار است. در نتیجه در ربات‌های سری فضای کاری انتقالی مستقل از فضای کاری دورانی است و همین امر باعث می‌شود تا بدست آوردن فضای کاری ربات‌های سری ساده‌تر باشد و بتوان فضای کاری ربات را در تمامی نقاط و با تمامی جهت‌گیری‌ها در دو زیر فضای سه بُعدی مستقل به تصویر کشید [۶۵]. برخلاف ربات‌های سری در ربات‌های موازی بدست آوردن فضای کاری و ترسیم آن مسئله بسیار دشوارتری است. فرض کنید مسئله سینماتیک معکوس یک ربات موازی بر اساس رابطه (۴-۱) بیان شود:

$$q = f(x, \omega) \quad (4-1)$$

که در آن $q = [q_1, \dots, q_n]^T$ بردار متغیر محرکه‌های ربات و $x = [P_x, P_y, P_z, \alpha, \beta, \gamma]^T$ بردار مختصات تعمیم یافته ربات در فضای دکارتی است. ω بردار متغیر مفاصل غیرفعال است که خود به صورت یک تابع مطابق رابطه (۴-۲) تعریف می‌شود. تابع f نیز تابعی است که رابطه سینماتیک معکوس ربات را بر اساس پارامترها و متغیرهای فوق‌الذکر توصیف می‌کند.

$$\omega = g(x) \quad (4-2)$$

فضای کاری قابل دسترس^۱ ربات «تمامی موقعیت‌هایی است که توسط یک نقطه مشخص از صفحه متحرک ربات حداقل با یک دوران در دسترس باشد». در بیان ریاضی، فضای کاری قابل دسترس W_r یک ربات موازی مطابق رابطه (۳-۴) تعیین می‌شود:

$$W_r = \left\{ (P_x, P_y, P_z) \in R^3 \mid \begin{aligned} &\omega_{min} \leq g(x) \leq \omega_{max}, \\ &q_{min} \leq f(x, \omega) \leq q_{max}, \\ &d(L_p, L_q) \geq D_{min} \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

که در آن کلیه نقاط در مختصات سه بعدی فضای دکارتی عضو فضای قابل دسترس ربات خواهند بود اگر سه قید هندسی مکانیزم برقرار باشد. قید محدودیت حرکت محرکه‌ها بر روی تابع $f(x, \omega)$ ، قید محدودیت حرکت مفاصل غیرفعال بر روی تابع $g(x)$ و قید عدم تداخل فیزیکی اعضای ربات بر روی تابع $d(L_p, L_q)$ اعمال شده است. $d(L_p, L_q)$ بیانگر تابعی است که فاصله میان عضو p ام و q ام از ربات را تعیین می‌کند. D_{min} نیز کمترین فاصله مجاز بین اعضای ربات است و برای پیشگیری از تداخل فیزیکی اعضای ربات مقدار تابع $d(L_p, L_q)$ باید همواره بزرگتر از کمترین مقدار مجاز باشد. مفهوم فضای کاری ماهر^۲ یا فضای کاری عملی^۳ ربات نیز در دل فضای کاری قابل دسترس آن تعریف می‌شود. فضای کاری عملی ربات به عنوان «تمامی موقعیت‌هایی که توسط یک نقطه مشخص از صفحه متحرک ربات با تمامی دوران‌های ربات در بازه‌ای مشخص، قابل دسترس باشد» تعریف می‌شود. این تعریف در بیان ریاضی به صورت رابطه (۴-۴) تعیین می‌شود:

$$W_f = \left\{ (P_x, P_y, P_z) \in W_r \mid \forall \alpha \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}], \beta \in [\beta_{min}, \beta_{max}], \gamma \in [\gamma_{min}, \gamma_{max}], \right. \\ \left. \omega_{min} \leq g(x) \leq \omega_{max}, q_{min} \leq f(x, \omega) \leq q_{max}, d(L_p, L_q) \geq D_{min} \right\} \quad (4-4)$$

که در آن $[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$ ، $[\beta_{min}, \beta_{max}]$ و $[\gamma_{min}, \gamma_{max}]$ بازه‌های مورد نظر برای دوران صفحه متحرک ربات هستند. باید توجه داشت که فضای کاری عملی ربات همواره زیر مجموعه‌ای از فضای کاری

^۱ Reachable Workspace

^۲ Dexterous Workspace

^۳ Feasible Workspace

قابل دسترس آن است. با توجه به تعاریف، در ساده ترین حالت فضای کاری ربات موازی نقاطی از فضای دکارتی است که در آنها رابطه سینماتیک معکوس ربات برقرار باشد. از طرفی سینماتیک معکوس ربات یک پاسخ یکتا به ازای هر موقعیت و دوران منحصر به فرد صفحه متحرک ربات دارد و بنا به دوران‌های متفاوت صفحه متحرک ربات، نقاطی از فضا که ربات می‌تواند در آن موقعیت قرار بگیرد با هم فرق می‌کند. در نتیجه فضای کاری انتقالی و دورانی ربات‌های موازی به هم وابسته هستند. به همین دلیل همواره برای بدست آوردن فضای کاری ربات‌های موازی از فرض‌های ساده شونده (ثابت گرفتن موقعیت یا دوران مجری نهایی ربات) استفاده می‌شود [۶۶]. با ثابت گرفتن دوران یا موقعیت می‌توان فضای کاری ربات‌های موازی را در دو زیر فضای سه بعدی در قالب فضای کاری دوران ثابت^۱ یا فضای کاری دورانی نقطه به نقطه^۲ ترسیم کرد [۶۷]. فضای کاری دوران ثابت در واقع بیانگر موقعیت‌هایی است که ربات با حفظ یک دوران ثابت و مشخص می‌تواند در آنها قرار بگیرد. فضای کاری دورانی نقطه به نقطه نیز در واقع دوران‌های ممکن ربات را در یک موقعیت ثابت و مشخص نشان می‌دهد. علی رغم اینکه بدست آوردن فضای کاری دورانی [۶۸] یا شش بعدی [۶۹] ربات‌های موازی با در نظر گرفتن قید محدودیت حرکت مفاصل غیرفعال و قید عدم تداخل فیزیکی مسائل مهم‌تری هستند ولی کمتر به آنها توجه شده است. در سال‌های اخیر، تلاش بیشتر پژوهشگران بر روی بدست آوردن بزرگترین حجم خالی از تکینگی در فضای کاری دوران ثابت ربات‌های موازی متمرکز شده است [۷۰ و ۷۱]. در این روش ابتدا فضای کاری ربات موازی مورد نظر به ازای دوران ثابت و مشخص صفحه متحرک ربات به دست آمده و نقاط تکین فضای کاری آن در این وضعیت نیز بررسی می‌شود [۷۲]. پس از آن، مسئله پیدا کردن بزرگترین فضای کاری خالی از تکینگی ماهیت هندسی پیدا می‌کند. این مسئله هندسی معمولاً در قالب یافتن بزرگترین مکعب، کره یا بیضی درون فضای کاری ربات و خارج از نقاط تکین بیان می‌شود. قرار گرفتن هندسه مورد نظر درون فضای کاری و اینکه هیچ نقطه تکینی را شامل نشود به

^۱ Constant Orientation Workspace^۲ Point wise Orientation Workspace

عنوان قیود مسئله در نظر گرفته می‌شوند در حالی که بیشینه سازی حجم هندسه مورد نظر تابع هدف مسئله بهینه‌سازی است [۷۳]. چنانچه تابع هدف و قیود مسئله همگی توابع محدب باشد می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی محدب^۱ برای یافتن بزرگترین حجم خالی از تکینگی در فضای کاری ربات‌های موازی استفاده کرد [۷۴]. گوسلین^۲ در ابتدا روشی را برای بدست آوردن فضای کاری دوران ثابت ربات‌های موازی شش درجه آزادی توسعه داد که بر مبنای یافتن اشتراک چندین مکان‌هندسی کره‌ای شکل عمل می‌کرد و در واقع مطالعه‌ای بر روی فضای کاری نمونه اولیه ربات اینریا^۳ بود [۷۵]. مزیت دیگر روش گوسلین این بود که می‌توانست حجم فضای کاری دوران ثابت ربات را اندازه‌گیری کند. در ادامه مرلت نیز روشی ترسیمی برای بدست آوردن فضای کاری دورانی یک ربات موازی شش درجه آزادی توسعه داد [۶۸]. در سال‌های اخیر روش‌های متفاوتی برای بدست آوردن فضای کاری دوران ثابت ربات مانند آنالیز بازه‌ای [۷۶] و شبکه‌های عصبی انتشار گاز [۷۷] معرفی شده است همچنان که روش‌های بدست آوردن فضای کاری دورانی نیز گسترش یافته‌اند [۷۸].

از لحاظ هندسی، فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت، اشتراک فضای کاری نقاطی است که صفحه متحرک ربات را تشکیل می‌دهند (B_i). هنگامیکه همگی به اندازه فاصله خود از نقطه مرجع (O_B) در دستگاه مختصات مبدا جا به جا شوند. فضای کاری نقاط B_i در ربات موازی استوارت با مفاصل غیرفعال کروی، فضای محدود بین دو کره به مرکز نقاط A_i است. برای اینکه فضای کاری نقطه مرجع تنها بر اساس زنجیره سینماتیکی نام به دست بیاید باید مرکز کره‌ها را به اندازه بردار b_i در دستگاه مختصات مبدا جابجا کرد. مکان هندسی نقاط روی دو کره بر اساس روابط (۴-۵) و (۴-۶) تعیین می‌شود:

$$(x - u_i)^2 + (y - v_i)^2 + (z - w_i)^2 = \rho_{min}^2 \quad (4-4)$$

^۱ Convex Optimization

^۲ C. Gosselin

^۳ ESRF INRIA

$$(x - u_i)^2 + (y - v_i)^2 + (z - w_i)^2 = \rho_{max}^2 \quad (5-4)$$

که در آن $C_i = [u_i, v_i, w_i]^T$ مرکز کره‌های مورد نظر است و از رابطه (۴-۶) بدست می‌آید. رابطه (۴-۴)

(۴) مکان هندسی کره درونی است که به ازای کمترین طول محرکه (ρ_{min}) به دست آمده و رابطه (۴-۴)

(۵) مکان هندسی کره بیرونی است که به ازای بیشترین طول محرکه (ρ_{max}) بدست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = a_i - Rb_i \quad (6-4)$$

با توجه به اینکه برای هر زنجیره سینماتیکی ربات دو کره بدست می‌آید، در مجموع برای ربات موازی

استوارت ۱۲ کره به دست خواهد آمد که فضای مشترک میان شش کره بزرگ مرز خارجی فضای کاری

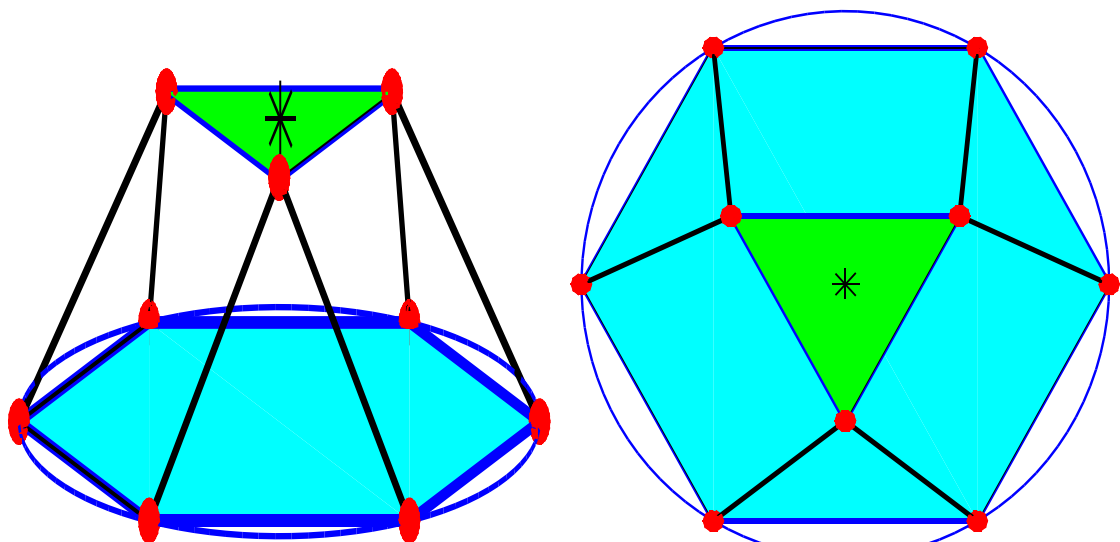
و اجتماع فضای شش کره کوچک مرز داخلی فضای کاری را تعیین می‌کند. این روند برای ربات موازی

استوارت دلخواه جدول ۳-۲ با در نظر گرفتن محدوده حرکت محرکه‌های خطی به صورت $1.5 \leq q_i \leq$

۳ انجام شده است. شکل ۴-۱ تصویر سه بُعدی ربات را در پیکره خانگی^۱ $P = [0,0,1.118]^T, R =$

$I_{3 \times 3}$ نشان می‌دهد. شکل ۴-۲ نیز شش جفت کره‌های هم مرکز درونی و بیرونی را در حالی نشان

می‌دهد که هر جفت کره با یک رنگ رسم شده‌اند.

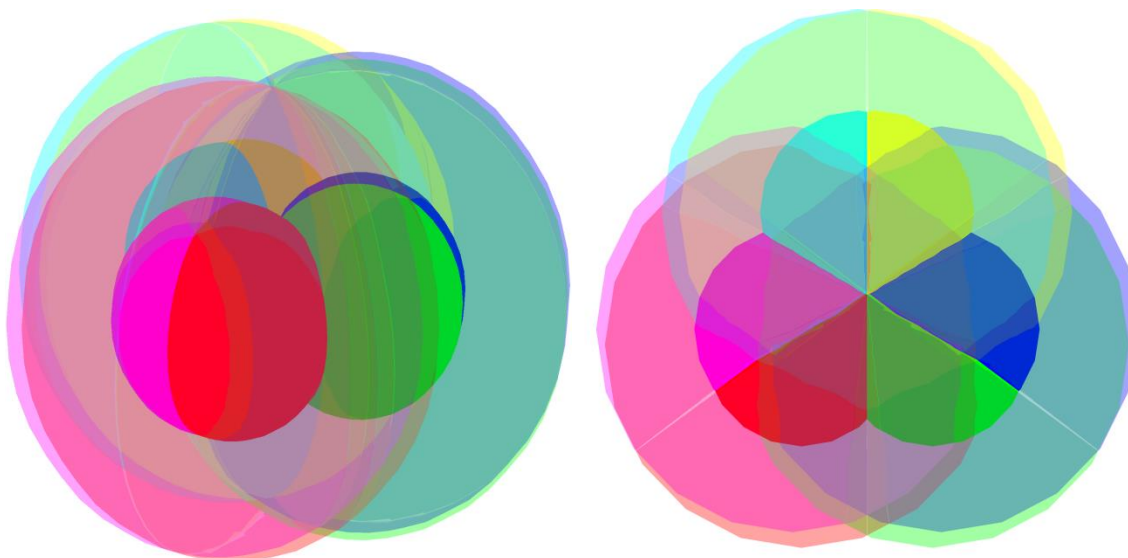


ب) نمای سه بُعدی

الف) نمای بالا

شکل ۴-۱ تصویر سه بُعدی ربات موازی استوارت دلخواه جدول ۳-۲

^۱ Home Configuration



ب) نمای سه بُعدی

الف) نمای بالا

شکل ۲-۴ تصویر شش جفت کره های فضای کاری ربات موازی استوارت دلخواه جدول ۲-۳

بدست آوردن مرزهای فضای کاری در فضای سه بُعدی دشوار است و معمولاً از تکنیک‌های تصویر سازی برای نمایش مقطعی از فضای کاری در دو بُعد استفاده می‌کنند. برای بدست آوردن تصویر کره کوچک و بزرگ در صفحه x-y به ترتیب از رابطه (۷-۴) و (۸-۴) استفاده می‌شود. ارتفاع مقطع مورد نظر از صفحه x-y است.

$$(x - u_i)^2 + (y - v_i)^2 = R_{min,i}^2 \quad \text{where} \quad R_{min,i}^2 = \begin{cases} \rho_{min}^2 - (z_H - w_i)^2, & \text{if } \rho_{min}^2 - (z_H - w_i)^2 > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7-4)$$

$$(x - u_i)^2 + (y - v_i)^2 = R_{max,i}^2 \quad \text{where} \quad R_{max,i}^2 = \begin{cases} \rho_{max}^2 - (z_H - w_i)^2, & \text{if } \rho_{max}^2 - (z_H - w_i)^2 > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8-4)$$

به طور مشابه می‌توان نمایش مقطع دو بُعدی فضای کاری ربات را در صفحه x-z با استفاده از روابط (۹-۴) و (۱۰-۴) بدست آورد. y_H عمق مقطع مورد نظر از صفحه x-z است.

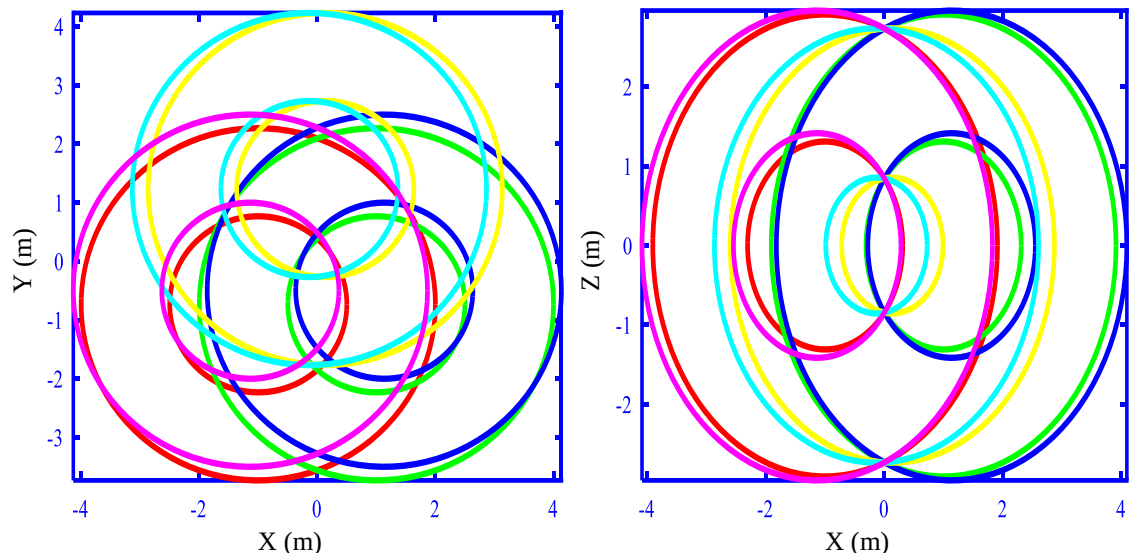
$$(x - u_i)^2 + (z - w_i)^2 = R_{min,i}^2 \quad \text{where} \quad R_{min,i}^2 = \begin{cases} \rho_{min}^2 - (y_H - v_i)^2, & \text{if } \rho_{min}^2 - (y_H - v_i)^2 > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9-4)$$

$$(x - u_i)^2 + (z - w_i)^2 = R_{max,i}^2 \quad \text{where} \quad R_{max,i}^2 = \begin{cases} \rho_{max}^2 - (y_H - v_i)^2, & \text{if } \rho_{max}^2 - (y_H - v_i)^2 > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10-4)$$

شکل ۳-۴ و شکل ۴-۴ تصاویری از مقاطع دو بعدی کره‌های فضای کاری ربات موازی استوارت دلخواه را نشان می‌دهند. در نمای دو بعدی مرزهای فضای کاری به خوبی قابل تشخیص است. فضای کاری دوران ثابت ربات در واقع مکان‌هندسی نقاطی است که درون دایره‌های بزرگ و خارج از دایره‌های کوچک‌تر هستند. البته باید در نظر داشت که صفحه متحرک ربات به ازای کمترین و بیشترین طول محرکه‌های خطی، کمترین و بیشترین ارتفاع ممکن را خواهد داشت که همواره فضای کاری ربات به این حدود، محدود می‌شود. روابط (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نحوه محاسبه این حدود را نشان می‌دهد. بنابراین در هنگام یافتن مکان‌هندسی نقاطی که فضای کاری را تشکیل می‌دهند باید حدود مذکور را حتما لحاظ کرد. برای یافتن مکان‌هندسی نقاطی که فضای کاری را تشکیل می‌دهند می‌توان از روش گسسته‌سازی^۱ استفاده کرد. در این روش، فضای مورد نظر با تعداد مشخصی نقطه تعریف می‌شود و سپس شرایط هر نقطه برای ارضای قیدهای فضای کاری ربات بررسی می‌شود. به این ترتیب هر نقطه از فضای دکارتی که قیود هندسی را برآورده کند بخشی از فضای کاری ربات خواهد بود.

$$H_{min} = \sqrt{\rho_{min}^2 - (r_a - r_b)^2} \quad (۴-۱۱)$$

$$H_{max} = \sqrt{\rho_{max}^2 - (r_a - r_b)^2} \quad (۴-۱۲)$$

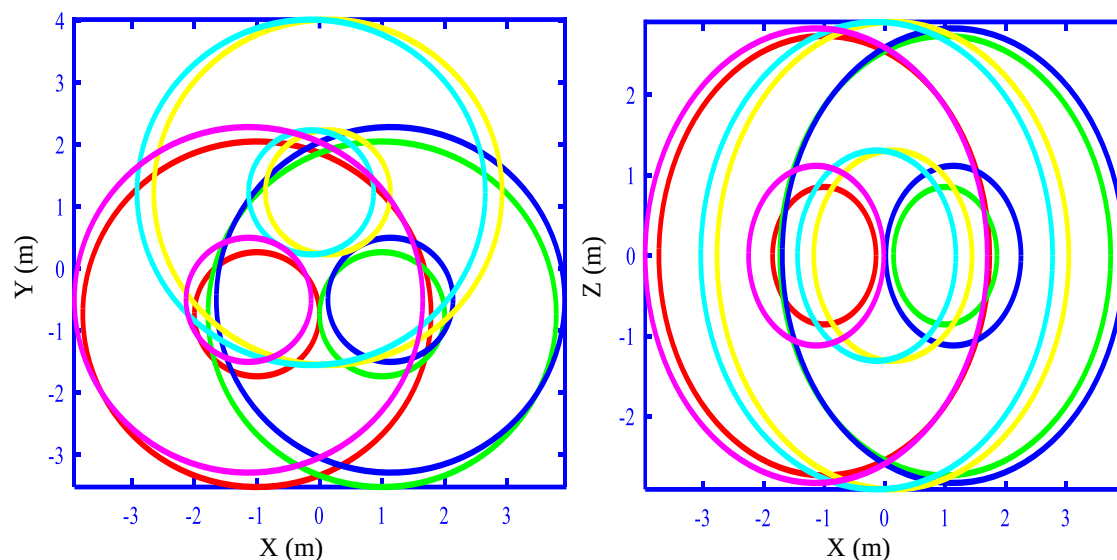


ب) نمای مقطع دو بعدی x-y در $z_H = 0$

الف) نمای مقطع دو بعدی x-z در $y_H = 0$

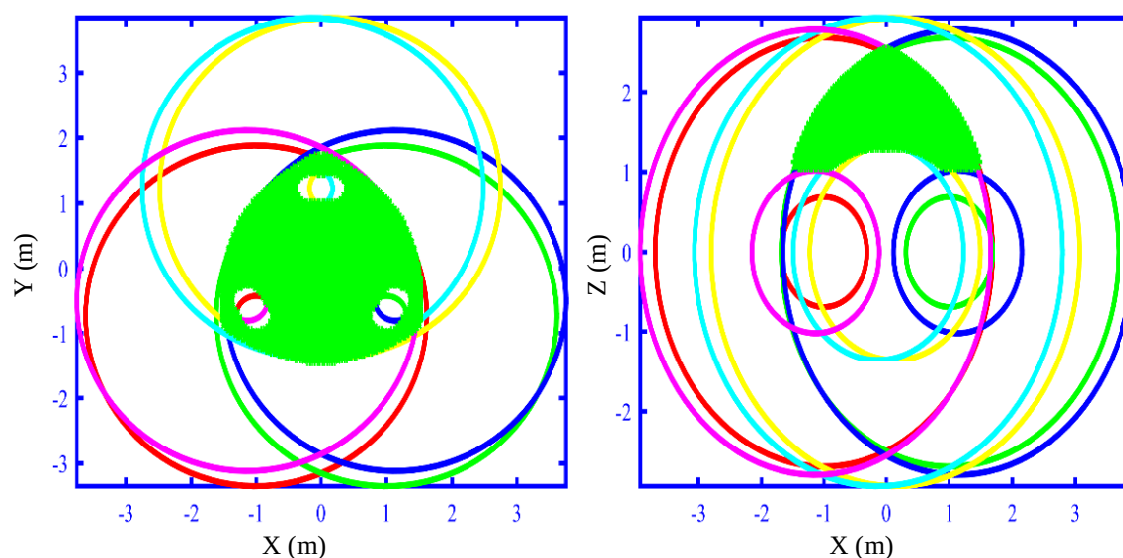
شکل ۳-۴ نمای کامل مقاطع دو بعدی از کره‌های فضای کاری

^۱ Discretization Method



الف) نمای مقطع دو بعدی x-z در $y_H = 0.5$ ب) نمای مقطع دو بعدی x-y در $z_H = 1.118$
 شکل ۴-۴ نمایی از مقاطع دو بعدی کره‌های فضای کاری

در ادامه تصویر فضای کاری ربات در صفحات افقی (صفحه x-y) و عمودی (صفحه x-z) با استفاده از روش گسسته سازی بدست آمده و در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

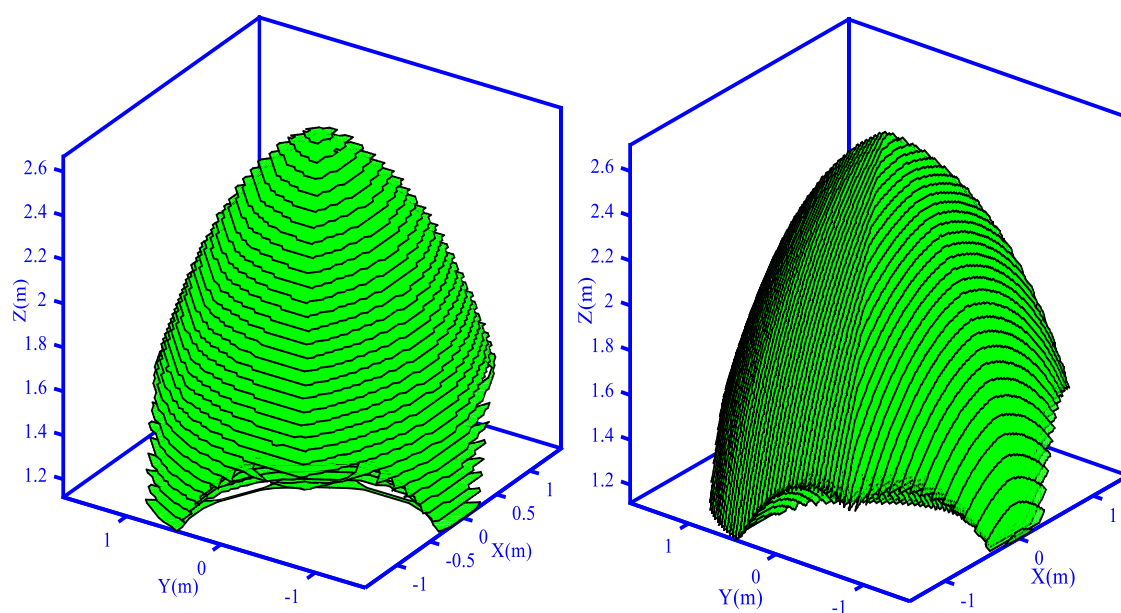


الف) نمای مقطع دو بعدی x-z در $y_H = 0.6$ ب) نمای مقطع دو بعدی x-y در $z_H = 1.468$
 شکل ۴-۵ تصویر فضای کاری ربات در صفحات افقی و عمودی با استفاده از روش گسسته‌سازی در دو بُعد

نتایج شکل ۴-۵ به ازای ۴۰ هزار نقطه و با دقت 12mm^2 در صفحه افقی و 1mm^2 در صفحه عمودی بدست آمده است. مدت زمان محاسبات برای یافتن نقاط در نرم‌افزار متلب^۱ بر روی پلتفرم

^۱ MATLAB R2015a 64bit

یک رایانه شخصی با پردازش گر ۷ هسته‌ای ۲٫۲ گیگاهرتزی اینتل^۱ و حافظه محاسباتی ۶ گیگابایتی^۲ تنها یک ثانیه است. در حالی که رسم تصویری که از این نقاط بدست می‌آید حدود ۲۰ ثانیه طول می‌کشد. روش گسسته‌سازی را می‌توان در دو بُعد یا سه بُعد استفاده کرد. با اینکه این روش فرایند ساده‌ای دارد اما برای بررسی با دقت‌های بالا نیازمند تعداد نقاط و داده‌های بیشتری است که باعث می‌شود حجم و زمان محاسبات افزایش پیدا کند و از طرفی نیز ساماندهی و مدیریت این حجم داده نیز کار آسانی نیست. با این حال روش گسسته‌سازی در دو بُعد به عنوان روش مکمل روش هندسی در تعیین فضای کاری ربات‌های موازی رایج است. با تکرار این روند در صفحات افقی یا عمودی متعدد و در کنار هم قرار دادن نتایج می‌توان فضای کاری دوران ثابت ربات را در نمای سه بعدی متشکل از تصویر ۴-۶ فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه را در دو نمای سه‌بعدی متشکل از تصویر صفحات افقی و عمودی نشان می‌دهد.

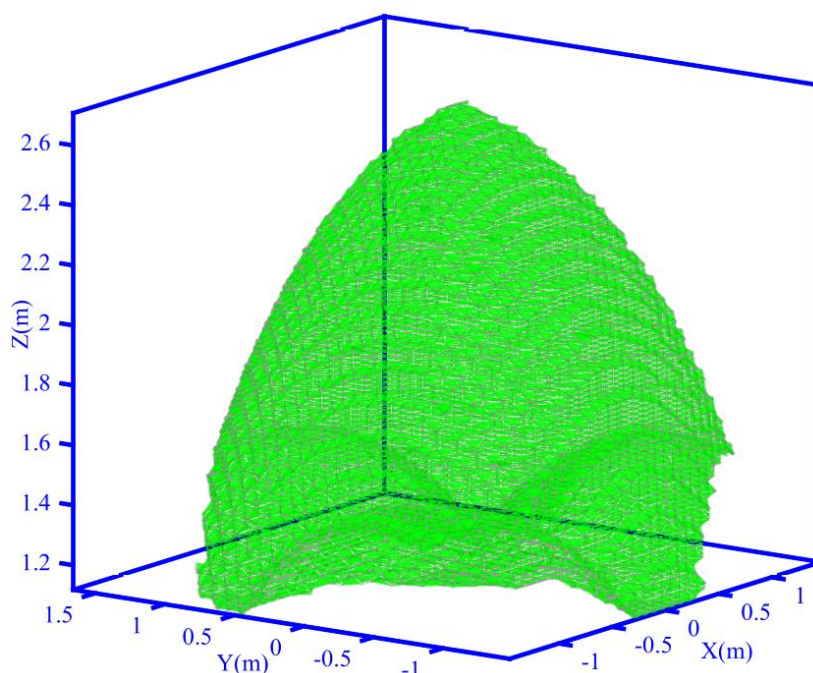


الف) نمای سه‌بعدی فضای کاری با صفحات x-z
 ب) نمای سه‌بعدی فضای کاری با صفحات x-y
 شکل ۴-۶ فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه با جهت‌گیری مبدا $Roll = Pitch = Yaw = 0$

^۱ Intel Core i7 2.2 GHz Processor

^۲ RAM 6 GB

نتایج شکل ۴-۶ به ازای ۳۳ صفحه افقی با فواصل ۵ سانتی متری و ۶۵ صفحه عمودی با فواصل ۵ سانتی متری بدست آمده است. با توجه به اینکه دقت بررسی در صفحه عمودی بیشتر بوده در نتیجه تصویری که نمای سه بعدی فضای کاری ربات را با صفحات عمودی نشان می‌دهد، بیان دقیق‌تری دارد. در ادامه با استفاده از روش گسسته‌سازی در سه بعد نیز فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه مطابق شکل ۴-۷ بدست آمده است.



شکل ۴-۷ فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه به روش گسسته‌سازی در سه بعد

نتیجه شکل ۴-۷ با تراکم یک میلیون نقطه در ۹۶ متر مکعب بدست آمده است که مدت زمان محاسبات آن در روش محاسبه موازی^۱ با چهار هسته پردازنده ۴۰ ثانیه است. حجم فضای کاری ربات نیز ۵,۷۴ مترمکعب محاسبه شده است.

در این روش مرز فضای کاری دوران ثابت ربات به صورت مجموعه‌ای از نقاط در فضای دکارتی مشخص می‌شود و در مرحله بهینه‌سازی برای بررسی در بر گرفتن فضای کاری دلخواه ربات از آنها استفاده می‌شود. بدست آوردن روشی دقیق و سریع برای محاسبه فضای کاری در حل مسئله بهینه‌سازی طراحی

^۱ Parallel Computing Method

ربات‌های موازی بسیار اهمیت دارد چرا که در هر حلقه بهینه‌سازی فضای کاری ربات برای برآوردن قیود مسئله محاسبه می‌شود.

۴-۳- شاخص چلاکی ربات

استامپر^۱ و همکاران معیار سراسری عدد حالت^۲ (GCI) را به عنوان یک شاخص برای بررسی کیفیت فضای کاری ربات از نظر چالاکی معرفی کردند [۵۸]. استفاده از این معیار با محدودیت‌هایی همراه است. زمانی که ربات درجه آزادی انتقالی و دورانی داشته باشد یا از محرکه‌های دورانی و انتقالی در ساختار خود استفاده کند، المان‌های ماتریس ژاکوبین واحدهای فیزیکی متفاوتی خواهند داشت که باعث می‌شود هرگونه طراحی بر مبنای عدد حالت به نتایج گمراه‌کننده‌ای منجر شود. این مطلب اولین بار توسط لیپکین و دافی^۳ مطرح شد [۷۹]. راه حل اول برای حل این مشکل، معرفی مفهوم طول مشخصه^۴ بود. در این روش ماتریس ژاکوبین ربات با تقسیم تمامی المان‌های انتقالی آن به طول مشخصه، نرمالیزه می‌شوند [۸۰]. راه حل دوم و مشابه که بهترین شاخص عملکرد را برای بهینه‌سازی ایجاد می‌کند، مفهوم طول طبیعی است [۸۱]. زمانی که مقدار طول طبیعی قابل محاسبه نباشد، بر اساس شعاع میانگین سکو تقریب زده می‌شود. بر اساس این مفهوم، برای یک ربات موازی کامل با محرکه‌های یکسان، المان‌های انتقالی ماتریس ژاکوبین در هر سطر آن بر فاصله مفصل غیرفعال تا نقطه مرجع روی صفحه متحرک تقسیم می‌شوند. در نتیجه ماتریس ژاکوبینی به دست می‌آید که به صورت ابعادی همگن است. عدد حالت (CN) ماتریس ژاکوبین بر اساس رابطه (۴-۱۳) محاسبه می‌شود. علاوه بر این رابطه (۴-۱۴) نیز برای عدد حالت بر قرار است:

$$CN = \|J(x)\| \|J^{-1}(x)\| \quad (4-13)$$

^۱ R. E. Stamper

^۲ Global Conditioning Index

^۳ H. Lipkin and J. Duffy

^۴ Characteristics Length

$$CN = \frac{\sigma_{\max}(x)}{\sigma_{\min}(x)} = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(J^T(x)J(x))}{\lambda_{\min}(J^T(x)J(x))}} \quad (14-4)$$

که در آن $\sigma_{\max}$ معرف بزرگترین مقدار ویژه و $\sigma_{\min}$ معرف کوچکترین مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین $(J(x))$ هستند. $\lambda_{\min}$ و $\lambda_{\max}$ نیز به ترتیب بزرگترین و کوچکترین مقدار ویژه ماتریس مربعی $J^T(x)J(x)$ هستند. بخش دوم رابطه (۱۴-۴) بیشتر در مواردی کاربرد دارد که ماتریس ژاکوبین ربات غیر مربعی است و محاسبه دترمینان آن ممکن نیست. با توجه به روابط، مقدار عدد حالت همواره در محدوده $1 \leq CN$ قرار می‌گیرد. بهترین عدد حالت برای ماتریس ژاکوبین عدد یک است در حالی که در نواحی نزدیک به نقاط منفرد، مقدار عدد حالت به بینهایت میل می‌کند. باید توجه کرد که روابط (۱۳-۴) و (۱۴-۴) بیان محلی از عدد حالت ربات است چرا که هر دو وابسته به موقعیت ربات در فضای دکارتی (x) هستند. معیار سراسری عدد حالت (GCI) به صورت تابعی از عدد حالت ماتریس ژاکوبین در تمام گستره فضای کاری قابل دسترس ربات مطابق روابط (۱۵-۴) تا (۱۷-۴) تعریف می‌شود [۸۲]:

$$A = \int_{W_r} \frac{1}{CN} dW \quad (15-4)$$

$$B = \int_{W_r} dW \quad (16-4)$$

$$\eta = \frac{A}{B} \quad (17-4)$$

که در آن CN عدد حالت ماتریس ژاکوبین در موقعیت مشخص (x) و W_r فضای کاری قابل دسترس ربات است. مقدار رابطه (۱۶-۴) معرف حجم فضای کاری قابل دسترس ربات است. در محاسبه معیار سراسری عدد حالت، به دلیل برد نامناسب تابع عدد حالت از معکوس آن استفاده شده است که همواره در محدوده $0 \leq \frac{1}{CN} \leq 1$ قرار می‌گیرد. در این تعریف بهترین مقدار معیار سراسری عدد حالت نیز عدد یک خواهد بود با این تفاوت که در نزدیکی نقاط تکین مقدار معیار سراسری عدد حالت به صفر میل می‌کند. به این ترتیب معیار سراسری عدد حالت نیز همواره در محدوده $0 \leq \eta \leq 1$ قرار می‌گیرد.

استفاده از رابطه (۴-۱۷) و به دست آوردن مقدار دقیق انتگرال به لحاظ محاسباتی مشکل و زمان بر است به همین دلیل مناسب پیاده‌سازی در الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیست. برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیاز به معیاری است که بتواند چالاک‌ی ربات را با سرعت و دقت مناسب حداقل در گستره فضای کاری مطلوب مسئله محاسبه کند. روابط (۴-۱۸) و (۴-۱۹) نمونه‌هایی هستند که در مسائل بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن عدد حالت ماتریس ژاکوبین در گستره فضای کاری مطلوب ربات به کار رفته‌اند [۸۳ و ۸۴]. رابطه (۴-۱۸) در واقع بزرگترین عدد حالت ماتریس ژاکوبین را در گستره فضای کاری دلخواه ربات W_d مد نظر قرار می‌دهد در حالی که رابطه (۴-۱۹) میانگین عدد حالت ماتریس ژاکوبین را در تعداد مشخصی نقطه از فضای کاری دلخواه ربات را به عنوان عدد سراسری حالت در نظر می‌گیرد.

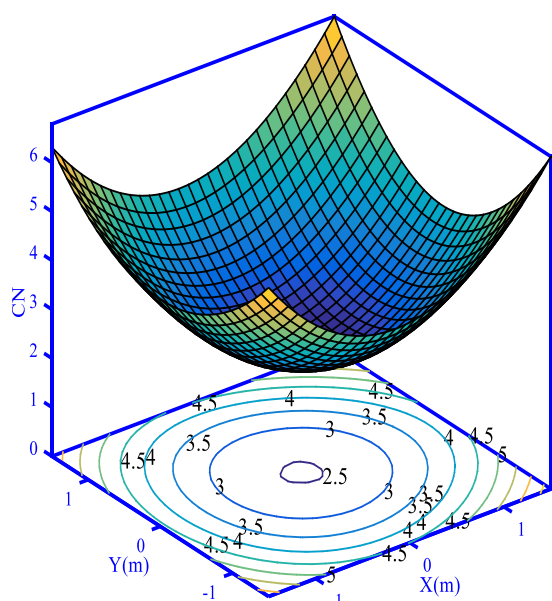
$$GCN = \max c(x); \quad x \in W_d \quad (۴-۱۸)$$

$$GCN = \frac{\sum_{i=1}^n (CN(x_n))}{n} \quad (۴-۱۹)$$

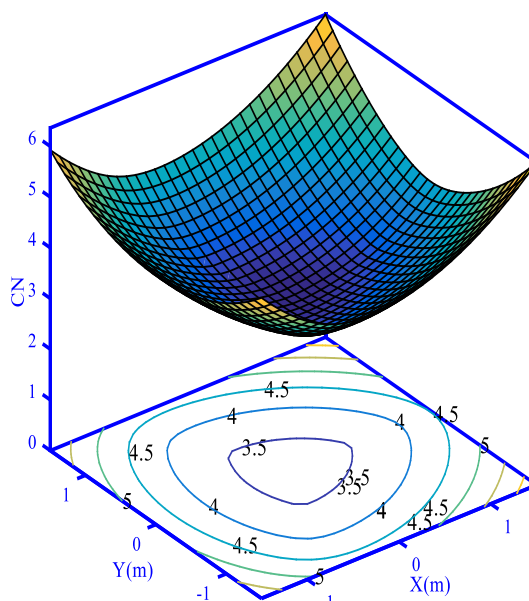
شکل ۴-۸ و ۴-۹ به ترتیب میزان چالاک‌ی دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه را بر اساس معیار عدد حالت و معکوس آن در دو صفحه موازی صفحه $x-y$ در سطوح مختلف نشان می‌دهد. در محاسبه عدد حالت، ماتریس ژاکوبین ربات موازی استوارت از رابطه (۳-۴۳) بدست آمده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که چالاک‌ی دوران ثابت ربات در نقاط درونی فضای کاری بیشتر است و هر چه به مرزهای فضای کاری نزدیک می‌شود چالاک‌ی ربات کاهش می‌یابد. در مسائل بهینه‌سازی که با هدف طراحی سینماتیکی ربات‌های موازی برای داشتن یک فضای کاری مشخص و ماهر طرح می‌شوند عموماً چالاک‌ی ربات در نقاط مختلف فضای کاری مطلوب مسئله مد نظر قرار می‌گیرد. با این حال نقاطی که مرز فضای کاری مطلوب را تشکیل می‌دهند از اهمیت بیشتری برخوردار هستند چرا که معمولاً چالاک‌ی ربات در مرزهای فضای کاری کمترین مقدار را دارد.

مد نظر قرار دادن نقاط مرزی باعث می‌شود تا الگوریتم بهینه‌سازی مقادیری را برای طراحی سینماتیکی ربات انتخاب کند که در آن چالاک‌ی ربات حتی در مرزهای فضای کاری مطلوب، بیشترین مقدار ممکن

باشد و از طرفی نیز سبب می‌شود تا مرزهای فضای کاری مطلوب همواره درون مرزهای فضای کاری دوران ثابت ربات واقع شده و فاصله‌ای مناسب با آن داشته باشند. کمینه‌سازی مقدار عدد حالت بر روی مرزهای فضای کاری مطلوب باعث می‌شود تا نقاط کاری ربات که درون این فضا هستند تا جایی که ممکن است از نقاط تکین فاصله بگیرند.

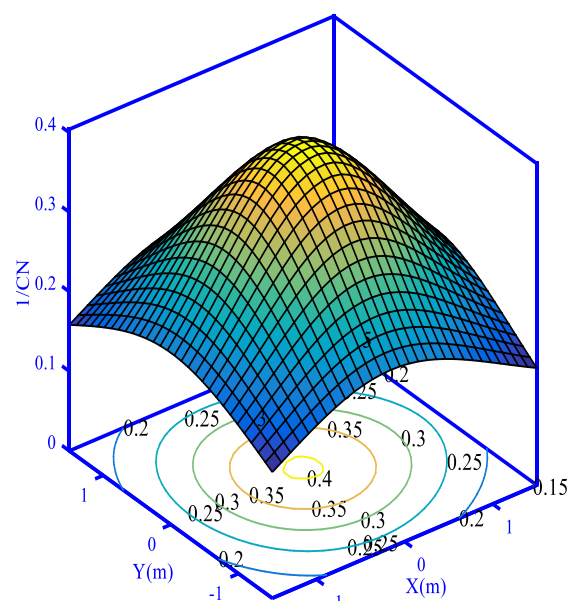


ب) توزیع صفحه‌ای عدد حالت در $z = 1.5$

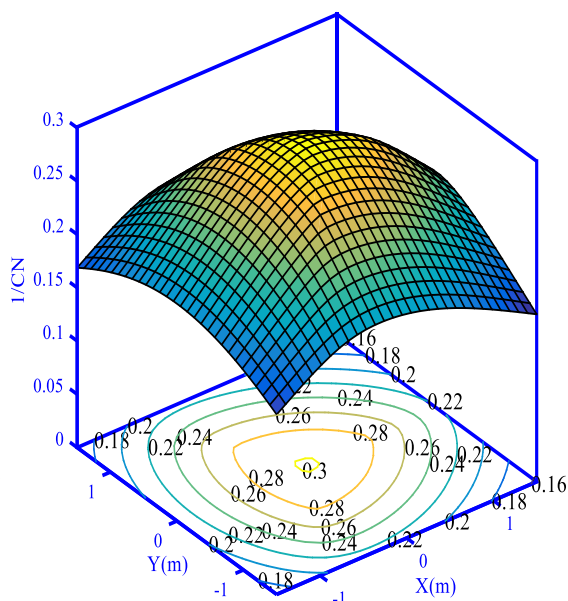


الف) توزیع صفحه‌ای عدد حالت در $z = 2.2$

شکل ۴-۸ چالاک‌ی دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه بر اساس معیار عدد حالت در صفحه‌های X-Y



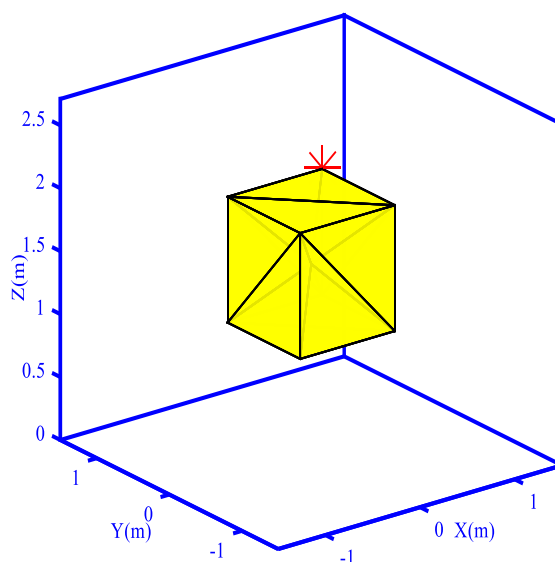
ب) توزیع صفحه‌ای معکوس عدد حالت در $z = 1.5$



الف) توزیع صفحه‌ای معکوس عدد حالت در $z = 2.2$

شکل ۴-۹ چالاک‌ی دوران ثابت ربات موازی استوارت دلخواه بر اساس معیار عدد حالت در صفحه X-Y

شکل ۴-۱۰ نمونه‌ای از فضای کاری مطلوب W_d را با حجم مکعب نشان می‌دهد. که بر اساس نقاط مرزی آن در فضای دکارتی رسم شده است. ضلع مکعب واحد در نظر گرفته شده و موقعیت مرکز مکعب $O = [0, 0, 1.5]^T$ است. در ادامه مقدار بیشینه و میانگین عدد حالت ربات موازی استوارت دلخواه به ترتیب بر اساس روابط (۴-۱۸) و (۴-۱۹) محاسبه شده است. موقعیت نقطه مرزی که بیشترین مقدار عدد حالت را دارد در تصویر نشان داده شده است. بیشترین مقدار عدد حالت در حجم مکعبی شکل ۳،۴ و مقدار میانگین عدد حالت بر روی نقاط مرزی آن ۳ است.



شکل ۴-۱۰ نمونه فضای کاری مطلوب با حجم مکعبی شکل (*) بیشینه عدد حالت ربات بر روی نقاط مرزی یک مکعب)

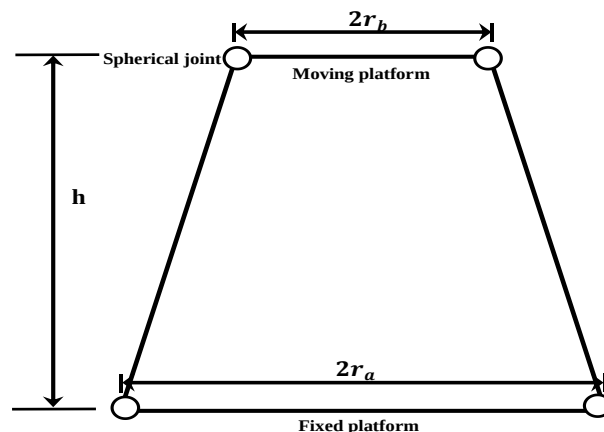
۴-۴- اندازه فیزیکی ربات

بدیهی است هر چه اندازه فیزیکی ربات در مقابل فضای کاری مطلوب بزرگتر باشد و فاصله مرزهای فضای کاری مطلوب از مرزهای فضای کاری ربات بیشتر باشد، چالاک‌ی و مهارت ربات در فضای کاری مطلوب بیشتر خواهد بود. با این وجود همواره در طراحی و ساخت ربات‌های موازی برای کاربردهای مشخص، بهینه بودن حجمی که ربات برای انجام وظیفه‌اش اشغال می‌کند و همچنین هزینه ساخت

اهمیت بسیاری دارد. هزینه ساخت ربات با حجمی که ربات اشغال می کند رابطه مستقیمی دارد به این معنی که هر چه پیکره یک ربات در وضعیت خانگی اش بزرگتر باشد هزینه ساخت بیشتری نیز خواهد داشت. برای اینکه بتوان کوچکترین رباتی را پیدا کرد که وظیفه اش را در فضای کاری مطلوب مسئله با مهارت انجام دهد نیاز به تابعی است که اندازه فیزیکی ربات را در مقابل اندازه فضای کاری مطلوب در نظر گرفته و آن را تا حد ممکن بهینه کند. در رابطه با قیود هندسی مسئله بهینه سازی طراحی ربات های موازی بحث های مفصلی وجود دارد [۸۵] که در این بخش به راهکار ذیل اکتفا شده است [۸۴]. اندازه فیزیکی ربات در قالب حجم فضای اشغال شده توسط صفحه ثابت، صفحه متحرک و بازوهای ربات در موقعیت خانگی خود، سنجیده خواهد شد. شکل ۴-۱ مقطعی از ربات موازی استوارت را در موقعیت خانگی خود نشان می دهد که در صفحه X-Z تصویر شده است. با توجه به هندسه شکل ۴-۱۱، حجم اشغال شده توسط ربات از رابطه (۴-۲۰) محاسبه می شود. h ارتفاع صفحه متحرک از صفحه ثابت ربات است که از رابطه (۴-۲۱) بدست می آید. q_0 طول اولیه محرکه های خطی ربات است.

$$V = \frac{1}{3}\pi h(r_a^2 - r_a r_b + r_b^2) \quad (4-20)$$

$$h = \sqrt{q_0^2 - (r_a - r_b)^2} \quad (4-21)$$



شکل ۴-۱۱ نمای دو بعدی در صفحه X-Z از مقطعی از ربات موازی استوارت در موقعیت خانگی خود

شاخص نسبی V_r که نسبت حجم ربات به حجم فضای کاری مطلوب را می سنجد، به عنوان تابعی برای کمینه سازی اندازه فیزیکی ربات مطابق رابطه (۴-۲۲) تعریف شده است [۸۴]. باید توجه کرد که V_d

حجم فضای کاری مطلوب ربات است و بر اساس هندسه فضای کاری مطلوب تعیین می شود. V_d به راحتی برای هندسه یک مکعب یا کره به ترتیب از طریق روابط (۴-۲۳) و (۴-۲۴) قابل محاسبه است. متغیر a ضلع مکعب و متغیر r شعاع کره است.

$$V_r = \frac{V}{V_d} \quad (۴-۲۲)$$

$$V_c = a^3 \quad (۴-۲۳)$$

$$V_s = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (۴-۲۴)$$

۴-۵- طرح و حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه ربات

در این بخش، هدف طرح کردن یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی سینماتیکی ربات موازی استوارت است. در یک بیان عمومی، هدف مسائل بهینه‌سازی می‌تواند پیدا کردن بهترین آرایش یا چیدمان هندسی ربات برای در بر گرفتن حجم مشخصی در فضای کاری یا داشتن بزرگترین فضای کاری خالی از تکینگی باشد [۵۷، ۶۴، ۸۶]. همان‌طور که پیش‌تر هم به آن اشاره شد مسائل بهینه‌سازی در بیشتر موارد با هدف رفع محدودیت‌های ساختاری ربات‌های موازی در ارتباط با اندازه فضای کاری و کیفیت آن از لحاظ تکینگی مطرح می‌شود [۸۷]. اما در بسیاری از موارد اینرسی منعکس شده^۱، سختی و مزیت مکانیکی^۲ ربات‌ها در ارتباط با ایجاد نیروهای عمل‌کننده مد نظر قرار می‌گیرد [۸۸].

هدف مسئله بهینه‌سازی در این پژوهش، پیدا کردن کوچکترین ربات موازی است که فضای کاری مطلوبی به اندازه یک مکعب را درون فضای کاری دوران ثابت خود جای دهد و بهترین چالاکی ممکن را در گستره آن داشته باشد. فضای کاری مطلوب مسئله مکعبی به ضلع یک متر ($a = 1$) و به مرکز $O = [0, 0, 2]^T$ است که محدوده معین $x = [-0.5, 0.5]$, $y = [-0.5, 0.5]$, $z = [1.5, 2.5]$ را در فضای دکارتی در بر می‌گیرد. در راستای بر آوردن این هدف در بخش‌های پیشین شاخص معیار سراسری عدد

^۱ Reflected Inertia

^۲ Mechanical Advantage

حالت و شاخص نسبی حجم معرفی شده‌اند. تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی بر اساس این دو شاخص تعریف می‌شود. شاخص نسبی حجم در جهت کمینه کردن اندازه فیزیکی ربات نسبت به فضای کاری مطلوب عمل می‌کند. در حالی که شاخص معیار سراسری عدد حالت در جهت بهبود کیفیت فضای کاری از لحاظ چالاکي، تلاش می‌کند که فضای کاری مطلوب از مرزهای فضای کاری دوران ثابت ربات فاصله بگیرد. در واقع معیار سراسری عدد حالت باعث گسترش مرزهای فضای کاری دوران ثابت ربات می‌شود و در نتیجه اندازه فیزیکی ربات را افزایش می‌دهد. بنابراین میان شاخص‌هایی که تابع هدف را در مسئله بهینه‌سازی شکل می‌دهند تقابل^۱ وجود دارد به این معنی که کمینه شدن هر شاخص در جهت افزایش شاخص دیگر عمل می‌کند. در مواجهه با این قبیل مسائل معمولاً از روش جمع وزن‌دار^۲ برای تعریف تابع هدف استفاده می‌شود [۸۹]. انتخاب مناسب وزن‌ها، میزان تاثیر و تقدم هر شاخص را در فرایند بهینه‌سازی تعیین می‌کند. شایان ذکر است که استفاده از بردار وزن‌های یکه در بهینه‌سازی نتایج بهتری را ترتیب می‌دهد. مسئله بهینه‌سازی چند هدفه ربات موازی استوارت به صورت جمع وزن‌داری از شاخص‌های معیار سراسری عدد حالت و حجم نسبی ربات مطابق رابطه (۴-۲۵) تعریف می‌شود [۸۴]:

$$\min \Phi(\xi) = w_1 V_r + w_2 C_{mean} \quad (25-4)$$

$$\text{Subject to: } W_a \subset W_{co}$$

که در آن $\xi = [r_a, r_b, \theta_A, \theta_B, q_0]^T$ بردار پارامترهای طراحی ربات است. جای گرفتن فضای کاری مطلوب درون فضای کاری دوران ثابت ربات نیز به عنوان قید مسئله در نظر گرفته شده است. q_0 کمترین طول محرکه‌های خطی است و بر اساس آن محدوده طول محرکه‌های خطی $q_0 \leq q_i \leq 2q_0$ در بهینه‌سازی لحاظ می‌شود تعریف سایر پارامترهای بهینه‌سازی بر روی شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. r_a و r_b به ترتیب شعاع دایره‌ی صفحه ثابت و متحرک ربات است. θ_A و θ_B نیز به ترتیب زاویه بین

^۱ Trade Off^۲ Weighted Sum

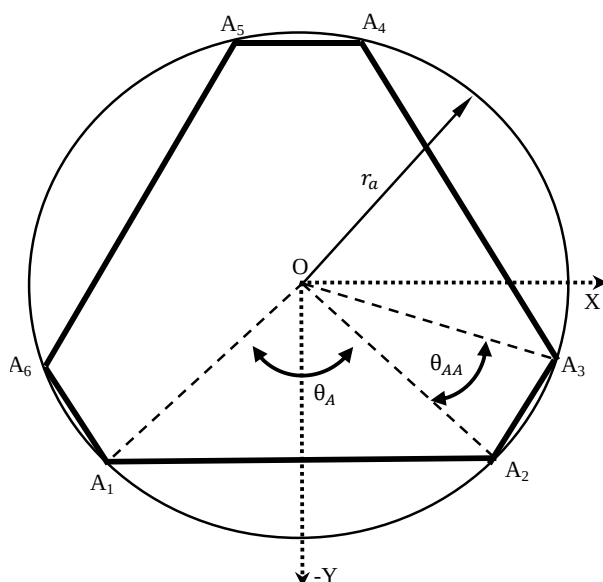
نقطه اتصال فرد i ام با نقطه اتصال بعدی مفاصل روی صفحه ثابت و متحرک ربات هستند که مطابق رابطه (۲۶-۴) و (۲۷-۴) تعریف می‌شوند. زاویه‌های مکمل θ_{AA} و θ_{BB} نیز از روابط (۲۸-۴) و (۲۹-۴) محاسبه می‌شوند.

$$\theta_A = \angle (A_i, A_{i+1}) \quad i = 1, 3, 5 \quad (26-4)$$

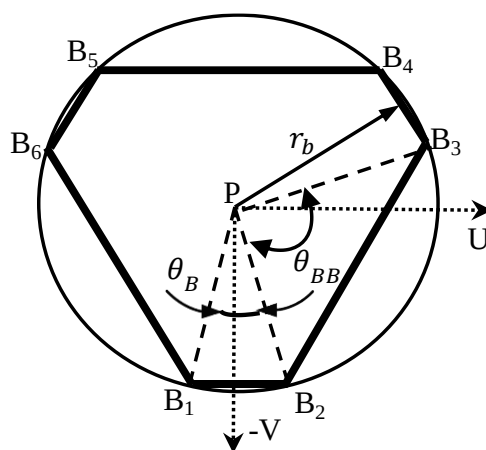
$$\theta_B = \angle (B_i, B_{i+1}) \quad i = 1, 3, 5 \quad (27-4)$$

$$\theta_{AA} = \frac{360 - (3 \times \theta_A)}{3} = \angle (A_i, A_{i+1}) \quad i = 2, 4, 6 \quad (28-4)$$

$$\theta_{BB} = \frac{360 - (3 \times \theta_B)}{3} = \angle (B_i, B_{i+1}) \quad i = 2, 4, 6 \quad (29-4)$$



(ب) صفحه ثابت ربات از نمای بالا



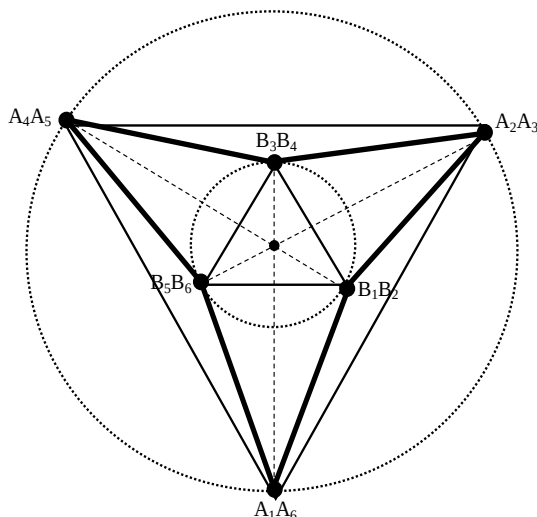
(الف) صفحه متحرک ربات از نمای بالا

شکل ۴-۱۲ تعریف پارامترهای بهینه‌سازی بر روی صفحات ربات موازی استوارت

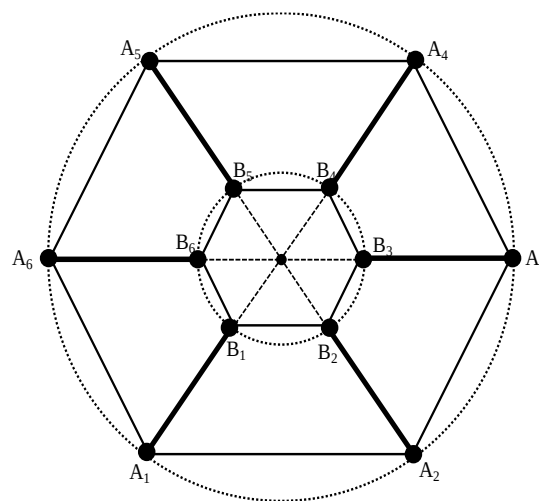
با انتخاب مقادیر مشخص θ_B و θ_A می‌توان چیدمان‌های متفاوت ربات موازی استوارت را بدست آورد که در جدول ۴-۱ برای سه نمونه بیان شده‌اند. چیدمان شش ضلعی منتظم و MSSM ربات موازی استوارت نیز برای مثال به ترتیب به ازای مقادیر $[\theta_A = 60, \theta_B = 60]$ و $[\theta_A = 120, \theta_B = 0]$ در شکل ۴-۱۳ از نمای بالا نشان رسم شده است. این انتخاب پارامترهای طراحی باعث می‌شود تا الگوریتم بهینه‌سازی از میان چیدمان‌ها و اندازه‌های متفاوت بهترین ساختار هندسی ربات موازی استوارت را جستجو کند.

جدول ۴-۱ مقدار پارامترهای θ_B و θ_A برای سه چیدمان متفاوت ربات موازی استوارت

نام چیدمان	θ_A°	θ_B°	θ_{AA}°	θ_{BB}°
شش ضلعی نیمه منتظم ^۱	۹۰	۳۰	۳۰	۹۰
SSM	۳۰	۶۰-۳۰	۹۰	۹۰-۶۰
TSSM	۳۰	۱۲۰	۹۰	۰



ب) MSSM



الف) شش ضلعی منتظم

شکل ۴-۱۳ رسم چیدمان شش ضلعی منتظم و MSSM از نمای بالا

برای حل مسئله بهینه‌سازی از ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب^۲ و تابع بهینه‌سازی مقید^۳ استفاده شده است. تابع بهینه‌سازی مقید مطابق رابطه (۴-۳۰) بر روی تابع هدف تعریف می‌شود که در آن قیود خطی و غیرخطی، حدود و شرایط اولیه بر اساس رابطه (۴-۳۱) تنظیم شده است. باید در نظر داشت که قیود خطی برابری و نابرابری همچنین قید غیرخطی برابری در مسئله وجود ندارد به همین دلیل توابع آنها بدون مقدار لحاظ شده‌اند.

$$\min \Phi(\xi) =$$

$$\text{fmincon} \left(@(\xi) (w_1 V_r + w_2 C_{mean}), \xi_0, A, B, A_{eq}, B_{eq}, LB, UB, @(\xi)(W_d \right. \quad (30-4)$$

$$\left. \subseteq W_{co}) \right)$$

$$\xi_0 = [2, 0.5, 60, 0, 1.8] \quad (31-4)$$

^۱ Semi-Regular Hexagons

^۲ MATLAB Optimization Toolbox

^۳ Constrained Optimization Function (fmincon)

$$A = [\quad]; B = [\quad]; A_{eq} = [\quad]; B_{eq} = [\quad]$$

$$LB = [1, 0.5, 0, 0, 1.5]$$

$$UB = [3, 1.5, 120, 120, 2]$$

الگوریتم نقطه-داخلی^۱ [۹۰] به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی انتخاب شده و به روش محاسبه موازی بر روی چهار هسته پردازنده ۲،۲ گیگاهرتزی پیاده‌سازی شده است. در فرایند بهینه‌سازی تابع هدف نسبت حجم اشغال شده توسط ربات را به حجم فضای کاری دلخواه حساب می‌کند. محاسبه عدد حالت نیز به صورت نقطه به نقطه بر روی مرزهای فضای کاری دلخواه انجام می‌شود و در آخر میانگین عدد حالت از رابطه (۴-۱۹) به عنوان معیار سراسری عدد حالت بدست می‌آید. مقدار دو شاخص بر اساس رابطه (۴-۲۵) تابع هدف را شکل می‌دهد. در هر تکرار حلقه بهینه‌سازی، مقدار تابع هدف چندین بار در همسایگی مقادیر کنونی پارامترهای بهینه‌سازی بدست می‌آید و برآوردن قیود مسئله نیز بررسی می‌شود.

قید مسئله به صورت یک تابع کد نویسی شده است که در واقع پاسخی منطقی را به عنوان خروجی بر می‌گرداند. چنانچه فضای کاری دوران ثابت ربات فضای کاری مطلوب مسئله را کاملاً شامل شود، تابع پاسخ منطقی یک را به عنوان خروجی بر می‌گرداند در غیر این صورت خروجی تابع صفر است. فرایند محاسباتی این تابع به روش هندسی و عددی است. ابتدا به روش تحلیلی، مکان هندسی کره‌های فضای-کاری محاسبه می‌شوند و حدود اشتراک آنها برای یافتن مرزهای فضای کاری دوران ثابت استخراج می‌شود. یافتن حدود اشتراک به روش هندسی به طور چشم‌گیری حجم محاسبات را کاهش می‌دهد و باعث افزایش سرعت انجام مراحل بهینه‌سازی می‌شود. با معلوم شدن حدود اشتراک، فضای مورد نظر به روش گسسته‌سازی در سه بعد برای یافتن نقاط فضای کاری بررسی می‌شوند. محاسبه نقاطی که فضای کاری دوران ثابت ربات را تشکیل می‌دهند نیز به روش محاسبه موازی بر روی چهار هسته انجام می‌شود تا سرعت محاسبات را افزایش دهد. فرایند کلی در بررسی برآورده شدن قید مسئله، محاسبه

^۱ Interior-Point

نقاط مرزی فضای کاری دوران ثابت ربات و بررسی تغییر مرزها با اضافه کردن نقاط فضای کاری دلخواه به مجموعه آن نقاط است. چنانچه مرزهای فضای کاری دوران ثابت ربات با اضافه شدن نقاط فضای کاری دلخواه ثابت بماند به این معنی است که نقاط مذکور درون آن مرزها واقع شده‌اند. در حالی که اگر مرزهای مجموعه نقاط تغییر کند، مشخص می‌شود که یک یا چندین نقطه خارج از مرزهای فضای کاری ربات قرار دارند. روش گسسته‌سازی در سه بعد در این بخش مزیت بسیاری نسبت به روش‌های تحلیلی دارد. بدست آوردن روش‌های تحلیل برای در برگرفتن حجم‌هایی که معادله مکان‌هندسی مشخصی ندارند بسیار مشکل و زمان‌بر است و عموماً دقت و سرعت محاسبات را کاهش می‌دهد. به این ترتیب به کارگیری یک روش ترکیبی هندسی-عددی (گسسته‌سازی نقاط) دقت و سرعت مناسبی را برای انجام محاسبات در حلقه‌های بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. الگوریتم بهینه‌سازی پارامترهای طراحی را به سمتی حرکت می‌دهد (یا در جهتی تغییر می‌دهد) که ضمن برآوردن قیود مسئله، مقدار تابع هدف کاهش یابد. همواره پارامترهای بهینه‌سازی فضای یکامتعامدی تشکیل می‌دهند که تغییر پارامترها در این فضای برداری صورت می‌پذیرد و محدود به حدود تعیین شده است. در فضای یکا متعامد پارامترهای طراحی، مجموعه‌ای از نقاط که قیود مسئله بهینه‌سازی را بر آورده می‌کنند، زیر فضایی به نام فضای امکان‌پذیر^۱ تشکیل می‌دهند. برای اینکه الگوریتم بهینه‌سازی حداقل به یکی از نقاط بهینه محلی^۲ همگرا شود لازم است که شرایط اولیه همواره از فضای امکان‌پذیر انتخاب شده باشد.

موقعیت شرایط اولیه در فضای امکان‌پذیر نیز در سرعت و دقت رسیدن به بهینه‌ترین جواب تاثیر بسزایی دارد. چنانچه شرایط اولیه خارج از فضای امکان‌پذیر در نظر گرفته شود الگوریتم بهینه‌سازی به نقاط بهینه محلی همگرا خواهد شد که در آنها قید مسئله برآورده نمی‌شود. گاهی نیز ممکن است شرایط اولیه بر روی مرز فضای امکان‌پذیر یا نزدیک به آن باشد و پس از چند تکرار حلقه بهینه‌سازی، تغییر

^۱ Feasible Space

^۲ Local Minimum Points

پارامترها به مسیری منحرف شود که خارج از فضای امکان پذیر است. در نتیجه باز هم به نقاط ناممکن^۱ همگرا خواهد شد. علاوه بر این در تعیین حدود باید تحقق فیزیکی و روابط میان پارامترهای هندسی را در نظر گرفت تا از جوابهای مختلط و تعریف نشده یا بی نهایت پرهیز شود. در این پژوهش نکات مذکور با انجام محاسبات و سعی - خطا رعایت شده است تا نتایج بهتری بدست آید. جدول ۲-۴ نتایج حاصل از اجرای بهینه سازی را به ازای وزنهای مختلف نشان می دهد. در بیان نتایج اعداد به اختصار تا دو رقم اعشار درج شده اند و برای زاویه ها، مقادیر نزدیک به یک درجه به سمت صفر گرد شده اند.

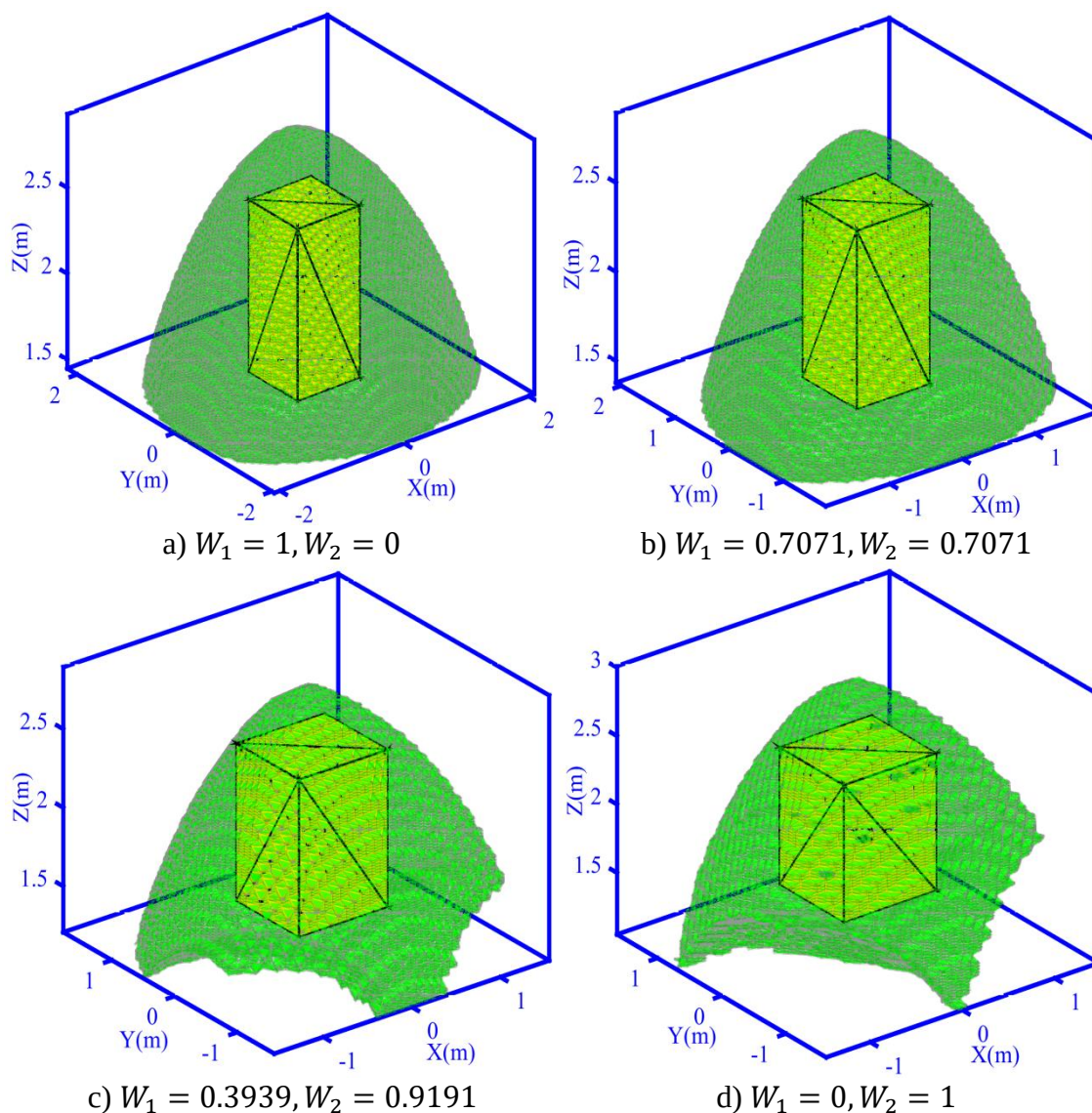
جدول ۲-۴ نتایج بهینه سازی سینماتیکی ربات موازی استوارت با وزنهای متفاوت

Time (s)	Total Coun.	Iter.	C_{mean}	V_r	r_a (m)	r_b (m)	θ_A (°)	θ_B (°)	q_0 (m)	وزن ها
440	99	4	6.96	1.26	1.02	0.63	60	0	1.50	$W_1 = 1, W_2 = 0$
194	63	3	4.31	2.64	1.53	0.89	60	0	1.52	$W_1 = 0.70, W_2 = 0.70$
3342	838	12	3.23	4.35	2.13	1.08	60	0	1.60	$W_1 = 0.39, W_2 = 0.91$
339	451	10	2.71	5.97	2.69	1.29	65	5	1.75	$W_1 = 0, W_2 = 1$

شکل ۴-۱۴ فضای کاری مطلوب و فضای کاری دوران ثابت را در موقعیت خانگی ربات به ازای نتایج جدول ۲-۴ نشان داده است. برای نمایش بهتر تصاویر در راستای قائم کشیده شده اند. بررسی نتایج به دست آمده برای فضای کاری ربات ها مبین این است که با کاهش وزن شاخص نسبی حجم، نسبت اندازه فیزیکی ربات به اندازه فضای کاری مطلوب افزایش داده است.

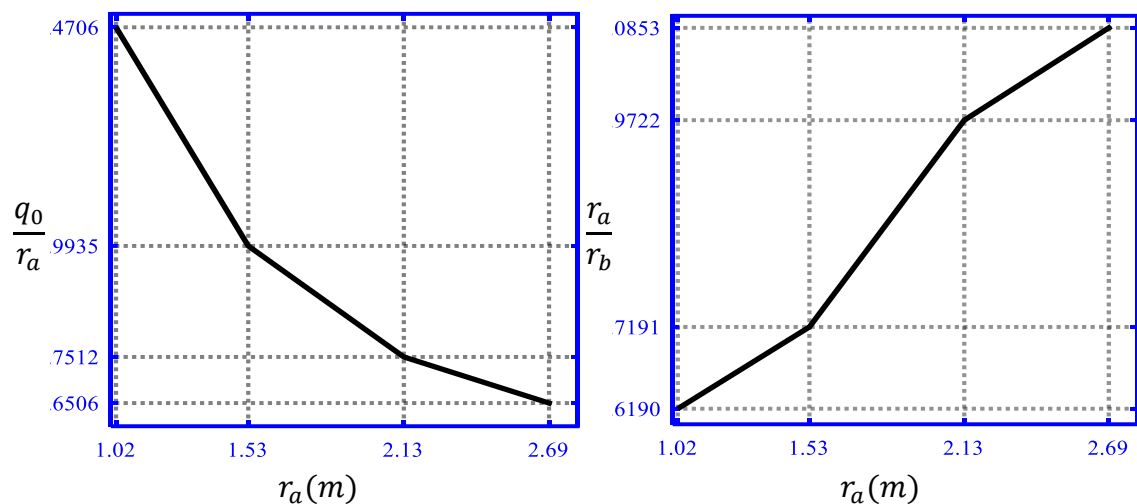
همچنین نسبت اندازه فیزیکی ربات به فضای کاری دوران ثابت نیز افزایش پیدا کرده است. علت این مسئله در شکل ۴-۱۵ بررسی شده است. شکل ۴-۱۵ نسبت طول اعضای ربات را برای نتایج جدول ۴-۲ محاسبه کرده است. روند افزایشی نسبت شعاع صفحه ثابت به صفحه متحرک ربات باعث می شود که مرکز کره هایی که فضای کاری ربات را تشکیل می دهند از هم دورتر شوند.

^۱ Infeasible Points

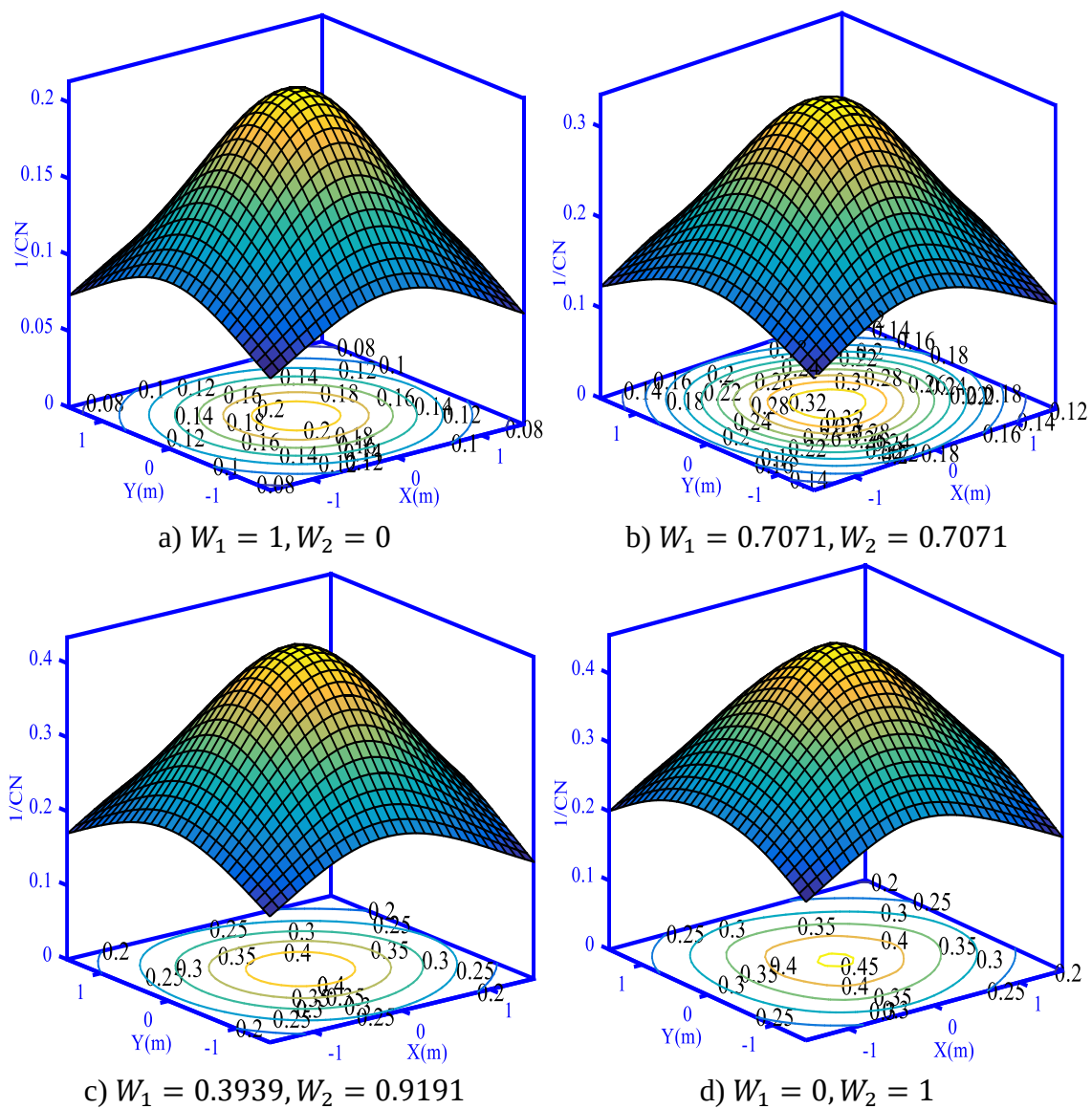


شکل ۴-۱۶ فضای کاری دوران ثابت و مطلوب برای نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی ربات استوارت

از طرف دیگر روند کاهش نسبت کمترین طول محرکه خطی به شعاع صفحه ثابت ربات باعث افزایش هم پوشانی فضای درونی کره‌های هم مرکز می‌شود. در نتیجه این دو عامل در کنار هم موجب کوچکتر شدن فضای مشترک بین کره‌های بزرگ می‌شوند که باید خارج از کره‌های کوچکتر باشند. بنابراین فضای کاری دوران ثابت ربات کاهش پیدا کرده است. نتایج بدست آمده در جدول ۴-۲ به خوبی عملکرد تقابلی میان شاخص نسبی حجم و معیار سراسری عدد حالت را نشان می‌دهد. چالاکي ربات موازی استوارت بر اساس معکوس معیار سراسری عدد حالت به ازای نتایج جدول ۴-۲ در صفحه x-y در ارتفاع ۱,۵ متری بدست آمده و در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵ نسبت طول اعضای ربات موازی استوارت به ازای نتایج جدول ۴-۲



شکل ۴-۱۶ چالاکي ربات موازي استوارت بر اساس معيار سراسري عدد حالت به ازای نتایج جدول ۴-۲

نتایج حاصل موکد افزایش چالاکي ربات در ازای وزنهای بیشتر شاخص معیار سراسری عدد حالت است. تقابل میان دو شاخصی که تابع هدف را تشکیل می‌دهند باعث شده است تا مصالحه بین میزان چالاکي و اندازه فیزیکی ربات هنگامیکه بر بهبود چالاکي تاکید بیشتری می‌شود، روند طولانی‌تری داشته باشد. با تغییر وزن‌ها به نحوی که تعیین‌کننده اهمیت و تاکید بر هر شاخص باشد می‌توان نتایج بهینه دلخواه را بدست آورد. با این حال چون مقدار دو شاخص با اعمال وزن‌ها مقدار واحدی را در تابع هدف شکل می‌دهند لزوماً بهینه‌ترین مقدار تابع هدف، جواب دلخواه طراح نخواهد بود و انتخاب مناسب وزن‌ها در بدست آوردن جواب دلخواه ضرورت دارد. با توجه به اهمیت بیشتر چالاکي ربات در فضای کاری نسبت به اندازه فیزیکی آن، نتیجه‌ای که به ازای وزن‌های $W_1 = 0.3939, W_2 = 0.9191$ بدست آمده است، در فصل‌آتی به عنوان ساختار هندسی بهینه ربات موازی استوارت در نظر گرفته خواهد شد. روش‌های کنترل ربات برای انجام مانورهای شبیه‌ساز پرواز نیز با توجه به این ساختار بهینه طراحی و پیاده‌سازی می‌شوند.

فصل پنجم:

کنترل سکوی استوارت در شیه سازی

مانورهای پرواز

در این بخش از پژوهش حاضر، ضمن بررسی تئوری و روش‌های طراحی مسیر حرکت ربات‌ها، مسیری در فضای کاری سکوی بهینه ربات موازی استوارت طراحی خواهد شد. پس از آن مقدمه‌ای در بحث کنترل ربات‌های موازی مطرح می‌شود که در آن چالش‌های طراحی یک کنترل‌کننده کارآمد و قابل اطمینان را بررسی کرده است. در ادامه دو کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی با جبران‌ساز جاذبه^۱ و کنترل-کننده مقاوم مد لغزشی^۲ برای ربات طراحی خواهند شد. در آخر نتایج عملکرد دو کنترل‌کننده در ردیابی مسیر طراحی‌شده با هم مقایسه می‌شوند.

۵-۱- طراحی مسیر برای مانورهای پرواز

طراحی مسیر برای ربات‌ها را می‌توان بنا به کاربرد آن‌ها به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: در دسته اول، سکوی متحرک ربات با دقت موقعیت و جهت‌گیری یک مسیر مشخص را بر حسب زمان دنبال می‌کند در حالی که در طول مسیر هیچ تعامل نیرویی با محیط اطراف خود ندارد [۹۱]. از این دسته می‌توان عملیات‌های رنگ‌آمیزی پاششی^۳ و جابه‌جایی را نام برد [۹۲، ۹۳ و ۹۴]. در دسته دوم، سکوی متحرک ربات هنگام دنبال کردن مسیر با محیط اطراف خود در تماس است و با آن تعامل نیرویی دارد. مادامی که تعامل نیرویی ربات با محیط به عنوان تبادل نیرو حین حرکت (تغییر موقعیت یا تغییر جهت‌گیری) تفسیر شود، می‌توان عملیات‌های گذاشتن و برداشتن^۴، سوراخ‌کاری^۵ و جوش نقطه‌ای^۶ را در دسته اول به شمار آورد چرا که تبادل نیرویی ربات با محیط در حالت سکون انجام می‌شود و نیروی تعامل از سوی ابزار کار^۷ ربات تأمین می‌شود نه محرکه‌های ربات. با همین تفسیر عملیات برش‌کاری، ماشین‌کاری و جوش خطی در دسته دوم جای می‌گیرند [۹۵]. در کاربری ربات‌های موازی به عنوان

^۱ Proportional-Derivative plus Gravity Compensation (PD+Gravity)

^۲ Robust Sliding Mode Control (RSMC)

^۳ Spray Painting

^۴ Pick and Place

^۵ Drilling

^۶ Point Welding

^۷ Gun

شبیه‌سازهای پرواز، عملیات شبیه‌سازی مانورهای پرواز در دسته اول جای می‌گیرد چرا که ربات تنها وظیفه‌ی موقعیت‌دهی و جهت‌دهی مناسب کابین پرواز را به عهده دارد که بر روی سکوی متحرک ربات نصب شده است [۹۶]. موقعیت و جهت‌گیری مطلوب در مانورهای پرواز بر اساس شرایط شبیه‌سازی شده پرواز و فرمان‌های دستوری-کنترلی سوار در هر لحظه تعیین می‌شود. در واقع دینامیک پرواز است که با گرفتن ورودی‌های کنترلی از سوی سوار و ورودی‌های اغتشاشی شرایط جوی پرواز، وضعیت وسیله پرنده را تعیین می‌کند. در یک شبیه‌ساز تجاری با توجه به نوع وسیله پرنده، دینامیک پرواز مدل‌سازی می‌شود و خروجی‌های مدل دینامیکی برای طراحی مسیر سکوی متحرک و همگام‌سازی صدا و تصویر بر روی نمایشگرهای شبیه‌ساز استفاده می‌شود [۹۷]. استخراج ویژگی‌های یک وسیله پرنده، مدل‌سازی ریاضی و کامپیوتری دینامیک پرواز، مدل‌سازی اثر آب و هوا، مدل‌سازی پیش‌ران‌ها و سکان هدایت دارای مفاهیمی ژرف و درخور نگرشی ریزبینانه هستند که در بستر این پژوهش نمی‌گنجد. به همین دلیل طراحی و شبیه‌سازی مسیرهای یک پرواز واقعی را فروگذارده و مسیرهای مستقلی به روش‌های معمول طراحی خواهند شد تا هدف اصلی پژوهش در این بخش که بررسی و تأمین کنترل‌پذیری، پایداری و ردیابی دقیق مسیر برای سکوی بهینه ربات موازی استوارت هستند، محقق شود.

طراحی مسیر حرکت ربات‌ها در حالت کلی شامل سه بخش است. بخش اول، تعیین موقعیت ابتدایی و انتهای مسیر حرکت مجری نهایی است. بخش دوم تعیین جهت‌گیری اولیه و نهایی ربات در ابتدا و انتهای مسیر است و بخش سوم نیز تعیین تابع متغیر با زمانی است که مسیر حرکت را بر حسب زمان بین نقاط ابتدایی و انتهای توصیف می‌کند [۹۸]. طراحی مسیر در واقع به دست آوردن همان تابع متغیر با زمان است که پارامترهای آن بر اساس شرایط زمانی و مکانی بخش اول و دوم تعیین می‌شوند. توابع

متعددی برای طراحی پروفیل مسیر حرکت ربات‌ها معرفی شده که مهم‌ترین آن‌ها شامل توابع خطی و غیرخطی چند جمله‌ای^۱ و توابع هارمونیک^۲ و سیکلوئید^۳ هستند [۹۹، ۱۰۰].

تعداد پارامترهایی که در تابع مسیر وجود دارد در واقع تعیین‌کننده تعداد قیودی است که می‌توان در طراحی پروفیل مسیر حرکت لحاظ کرد. این قیود می‌تواند موقعیت، سرعت، شتاب و حتی جرک^۴ در نقاط مشخصی از مسیر حرکت باشد. جدول ۵-۱ متداول‌ترین توابع چندجمله‌ای را برای طراحی مسیر حرکت ربات‌ها معرفی می‌کند.

جدول ۵-۱ متداول‌ترین توابع چندجمله‌ای برای طراحی مسیر حرکت ربات‌ها			
درجه تابع	معادله مسیر	قیود مسیر	نوع حرکت
درجه اول ^۵	$X(t) = a_1 t + a_0$	$X(t_0), \dot{X}(t) = \text{Cons.}$	حرکت با سرعت ثابت
		$X(t_0), X(t_f)$	حرکت با ۲ نقطه دقت
درجه دوم ^۶	$X(t) = a_2 t^2 + a_1 t + a_0$	$X(t_0), \dot{X}(t_0), \ddot{X}(t) = \text{Cons.}$	حرکت با شتاب ثابت
		$X(t_0), X(t_m), X(t_f)$	حرکت با ۳ نقطه دقت
درجه سوم ^۷	$X(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0$	$X(t_0), X(t_f), \dot{X}(t_0) = \dot{X}(t_f) = 0$	حرکت سکون به سکون
		$X(t_0), X(t_f), \dot{X}(t_0), \dot{X}(t_f) = 0$	حرکت اولیه به سکون
		$X(t_0), X(t_f), \dot{X}(t_0), \dot{X}(t_f)$	حرکت اولیه به ثانویه
		$X(t_0), X(t_1), X(t_2), X(t_f)$	حرکت با ۴ نقطه دقت
درجه پنجم ^۸	$X(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0$	$X(t_0), \dot{X}(t_0), \ddot{X}(t_0), \dot{X}(t_f), \ddot{X}(t_f), \ddot{X}(t_f)$	حرکت اولیه به ثانویه
		$X(t_0), X(t_1), X(t_2), X(t_3), X(t_4), X(t_f)$	حرکت با ۶ نقطه دقت
درجه هفتم ^۹	$X(t) = a_7 t^7 + a_6 t^6 + a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0$	$X(t_0), \dot{X}(t_0), \ddot{X}(t_0), \ddot{X}(t_0), \dot{X}(t_f), \ddot{X}(t_f), \ddot{X}(t_f), \ddot{X}(t_f)$	حرکت اولیه به ثانویه
		$X(t_0), X(t_1), X(t_2), X(t_3), X(t_4), X(t_5), X(t_6), X(t_f)$	حرکت با ۸ نقطه دقت

^۱ Linear and Non-Linear Polynomial Functions

^۲ Harmonic Functions

^۳ Cycloid

^۴ Jerk (Derivative of Acceleration)

^۵ Linear Polynomial (First Order)

^۶ Quadratic Polynomial (Second Order)

^۷ Cubic Polynomial (Third Order)

^۸ Quintic Polynomial (Fifth Order)

^۹ Zero-Jerk Polynomial Path

لازم به ذکر است که توابع چندجمله‌ای با درجه N همواره به تعداد $N+1$ پارامتر دارند که به ازای هر پارامتر می‌توان یک قید بر روی مسیر تعریف کرد. توابع چندجمله‌ای را می‌توان با هر درجه‌ای و برای هر تعداد نقطه دقت به کار برد. با این حال، افزایش تعداد نقاط دقت یا قیود مسیر، درجه تابع چندجمله‌ای را افزایش می‌دهد. مشکل عمده توابع مسیر با چند جمله‌ای‌های درجه بالا این است که حتی تغییر ناچیز ضرایب، تفاوت چشمگیری در خروجی توابع مسیر ایجاد می‌کند و اغلب لازم است تا ضرایب با دقت ۵ تا ۱۰ رقم اعشار به کار بروند. برای حل این مشکل توابع چندجمله‌ای با حداقل مربعات خطا^۱ معرفی شده‌اند. در این توابع، یک چندجمله‌ای درجه بالا توسط یک چندجمله‌ای درجه پایین به نحوی تقریب زده می‌شود که خطای تقریب میان دو چندجمله‌ای حداقل مقدار ممکن باشد. راه حل دیگر استفاده از توابع مسیر تکه‌ای است. در این روش مسیر حرکت به تعداد مشخصی تکه تقسیم می‌شود و هر تکه با توجه به قیودی که دارد می‌تواند با یک تابع چندجمله‌ای از جدول ۵-۱ تعریف شود. در طراحی مسیر به روش تکه‌ای باید همواره به پیوستگی پروفیل‌های موقعیت، سرعت و شتاب توجه داشت و پیوستگی را به عنوان یک قید در طراحی توابع تکه‌ای لحاظ کرد. از پر کاربردترین مسیرهای تکه‌ای، مسیرهای خطی با انتهای سهموی^۲ هستند که از حالت سکون با شتاب افزاینده به سرعت ثابت می‌رسند و مسیری مشخصی را با سرعت ثابت طی می‌کنند و در نهایت با شتاب کاهنده در نقطه مشخصی متوقف می‌شوند [۱۰۱].

نمونه‌هایی از مسیر هارمونیک و سیکلوئید نیز در جدول ۵-۲ معرفی شده است. علاوه بر این، توابع دیگری مانند توابع فوریه^۳، لژاندر^۴ و چبی‌شف^۵ وجود دارد که در طراحی مسیر حرکت ربات‌ها کاربرد دارند [۱۰۲، ۱۰۳]. تولید مسیر به روش میدان پتانسیل^۶ در فضای کاری یکی دیگر از روش‌های متداول

^۱ Least Square Error Polynomials

^۲ Linear Segments with Parabolic Blends (LSPB)

^۳ Fourier

^۴ Legendre

^۵ Chebyshev

^۶ Potential Field

طراحی مسیر ربات‌ها است که عموماً در راستای پرهیز از برخورد با موانع^۱ به کار می‌رود [۱۰۴، ۱۰۵]. با این وجود، توابع چندجمله‌ای و مثلثاتی به دلیل سرعت و سهولتی که در طراحی مسیر دارند، رایج‌تر هستند.

جدول ۵-۲ نمونه‌هایی از مسیر هارمونیک و سیکلوئید

نوع مسیر	معادله مسیر	قیود مسیر	نوع حرکت
هارمونیک	$X(t) = a_3 \sin(a_2 t) + a_1 \cos(a_2 t) + a_0$	$\dot{X}(t_0) = \dot{X}(t_f) = 0$	حرکت سکون به سکون
سیکلوئید	$X(t) = -a_2 \sin(a_3 t) + a_1 t + a_0$	$\dot{X}(t_0) = \dot{X}(t_f) = 0$	حرکت سکون به سکون

برای ارزیابی مدل سکوی بهینه ربات موازی استوارت و کنترل‌کننده‌ها در شرایط ردیابی مسیر، با استفاده از توابع مثلثاتی و نمایی مسیر دلخواهی برای حرکت ربات در سه بعد طراحی شده است که به صورت شهودی تضمین می‌کند که درون فضای کاری دوران ثابت سکوی بهینه ربات موازی استوارت جای می‌گیرد. این حرکت شامل سه انتقال در راستای سه محور است که در رابطه (۵-۱) توابع آن‌ها $x_d = [x(t), y(t), z(t), \theta_x(t), \theta_y(t), \theta_z(t)]^T$ بر حسب زمان (t) معرفی شده‌اند. با توجه به اینکه توابع مثلثاتی و نمایی از هر درجه مشتق پذیر هستند، در نتیجه تابع پروفیل‌های سرعت و شتاب به صورت تحلیلی و به ترتیب مطابق روابط (۵-۲) و (۵-۳) به دست می‌آیند. تصویر شکل ۵-۱ مسیر حرکت را در دو نمای سه‌بعدی و نمای بالا نشان می‌دهد که به طور شهودی اثبات می‌کند، مسیر طراحی شده همواره درون فضای کاری دوران ثابت ربات جای دارد. در ادامه، در شکل ۵-۲ موقعیت، سرعت و شتاب مسیر طراحی شده حرکت در راستای سه محور بر حسب زمان رسم شده‌اند.

$$\begin{aligned} x(t) &= \sin\left(\frac{\pi t}{60}\right) \cos\left(\frac{\pi t}{4}\right); \quad \theta_x(t) = 0 \\ y(t) &= \sin\left(\frac{\pi t}{60}\right) \sin\left(\frac{\pi t}{4}\right); \quad \theta_y(t) = 0 \end{aligned} \quad (۵-۱)$$

$$\begin{aligned} z(t) &= 1.5 \exp\left(\frac{t}{100}\right); \quad \theta_z(t) = 0 \\ \dot{x}(t) &= \frac{\pi}{60} \cos\left(\frac{\pi t}{60}\right) \cos\left(\frac{\pi t}{4}\right) - \frac{\pi}{4} \sin\left(\frac{\pi t}{60}\right) \sin\left(\frac{\pi t}{4}\right) \end{aligned} \quad (۵-۲)$$

^۱ Obstacle Avoidance

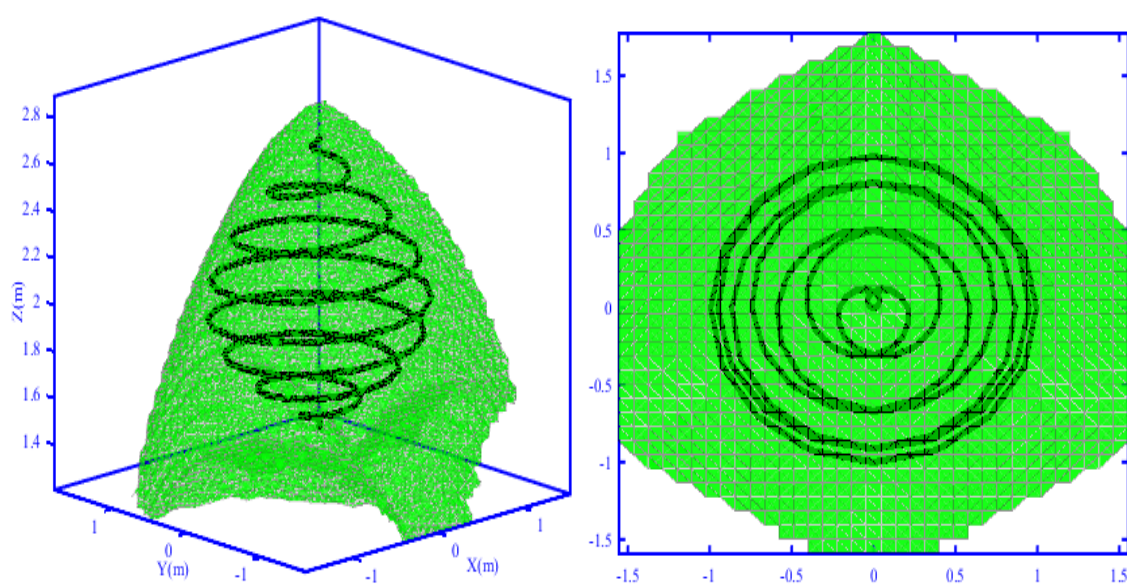
$$\dot{y}(t) = \frac{\pi}{60} \cos\left(\frac{\pi t}{60}\right) \sin\left(\frac{\pi t}{4}\right) + \frac{\pi}{4} \sin\left(\frac{\pi t}{60}\right) \cos\left(\frac{\pi t}{4}\right)$$

$$\dot{z}(t) = 0.015 \exp\left(\frac{t}{100}\right)$$

$$\ddot{x}(t) = -\frac{\pi^2}{60^2} \sin\left(\frac{\pi t}{60}\right) \cos\left(\frac{\pi t}{4}\right) - \frac{2\pi^2}{240} \cos\left(\frac{\pi t}{60}\right) \sin\left(\frac{\pi t}{4}\right) - \frac{\pi^2}{4^2} \sin\left(\frac{\pi t}{60}\right) \cos\left(\frac{\pi t}{4}\right)$$

$$\ddot{y}(t) = -\frac{\pi^2}{60^2} \sin\left(\frac{\pi t}{60}\right) \sin\left(\frac{\pi t}{4}\right) + \frac{2\pi^2}{240} \cos\left(\frac{\pi t}{60}\right) \cos\left(\frac{\pi t}{4}\right) - \frac{\pi^2}{4^2} \sin\left(\frac{\pi t}{60}\right) \sin\left(\frac{\pi t}{4}\right) \quad (3-5)$$

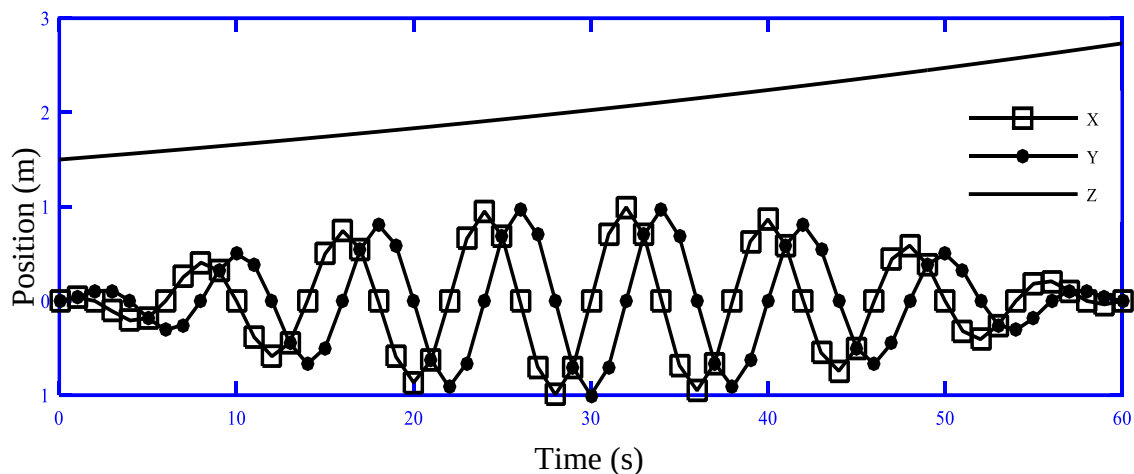
$$\ddot{z}(t) = 0.00015 \exp\left(\frac{t}{100}\right)$$



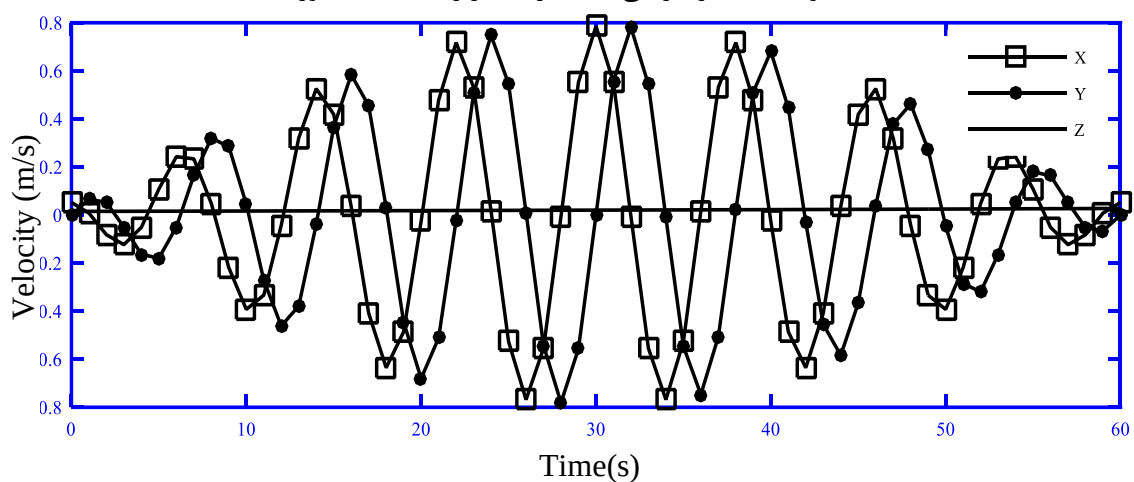
ب) نمای سه بعدی

الف) نمای بالا

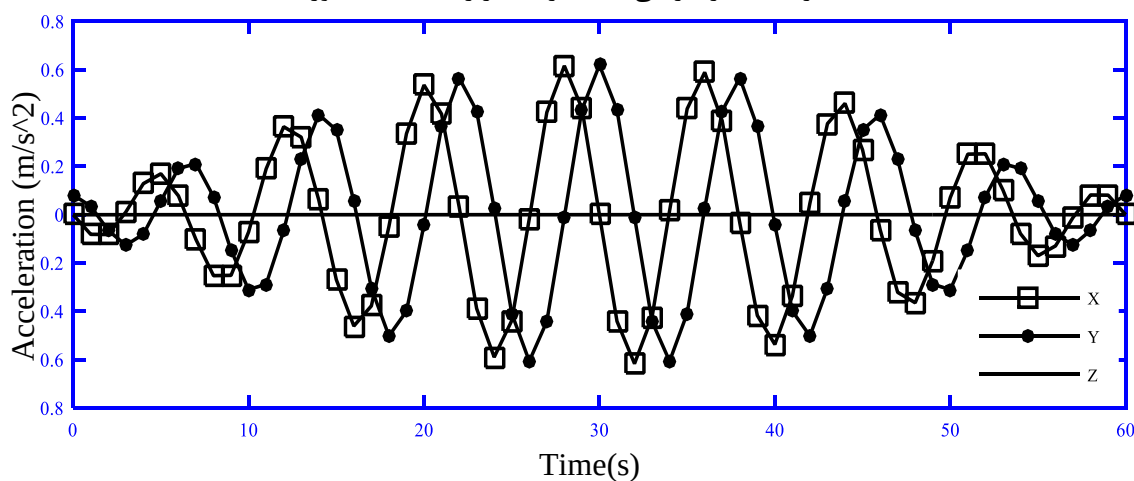
شکل ۵-۱ مسیر حرکت ربات در دو نمای سه بعدی و نمای بالا



الف) موقعیت مسیر طراحی شده حرکت در راستای سه محور



ب) سرعت مسیر طراحی شده حرکت در راستای سه محور



ج) شتاب مسیر طراحی شده حرکت در راستای سه محور

شکل ۵-۲ موقعیت، سرعت و شتاب مسیر طراحی شده حرکت در راستای سه محور

دوران صفحه متحرک ربات حول هر سه محور صفر در نظر گرفته شده است چرا که مسیر طراحی شده باید همواره درون فضای کاری ربات قرار داشته باشد. برای سکوی بهینه، فضای کاری دوران ثابت در

وضعیت جهت‌گیری خانگی به دست آمده است و از طرفی فضای کاری انتقالی ربات همواره وابسته به دوران صفحه متحرک آن است، در نتیجه برای دوران‌های متفاوت و متوالی صفحه متحرک، حجم‌های متفاوت و متعددی به دست می‌آید. اشتراک حجم‌های به دست آمده، بیانگر نقاطی از فضا است که صفحه متحرک ربات می‌تواند با تمامی جهت‌گیری‌های بررسی‌شده به آن‌ها دسترسی داشته باشد و در واقع فضای کاری انتقالی- دورانی یا فضای کاری عملی ربات است. استفاده از این روش برای به دست آوردن فضای کاری عملی ربات حجم محاسباتی بالایی دارد. از طرفی به دست آوردن اشتراک چندین حجم در فضای سه بعدی علی‌الخصوص حجم‌هایی که شکل هندسی منظمی ندارند و نمی‌توان آن‌ها را با معادلات توصیف کرد، خود به تنهایی مسئله چالش‌برانگیزی است که به عنوان یک مسئله باز توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۱۰۶]. تا کنون روش مبتنی بر ترسیم در نرم‌افزارهای مدل‌سازی سه بعدی، روش‌های بهینه‌سازی محدب و روش‌های مبتنی بر آنالیز بازه‌ای در این خصوص معرفی شده‌اند [۱۰۷]. با توجه به حجم محاسباتی و پیچیدگی‌های آن‌ها، ناگزیر از پیاده‌سازی این روش‌ها چشم‌پوشی شده و توجه پژوهش بر روی تحقق اهداف کنترلی ربات متمرکز شده است.

۵-۲- مقدمه‌ای در بحث کنترل ربات‌های موازی

تا کنون ساختارهای متعددی برای کنترل انواع سیستم‌ها ارائه شده است. همچنین با توجه به نوع ساختار کنترلی و نوع سیستم، روش‌های کنترلی متفاوتی توسعه داده شده‌اند. سیستم‌های چند درجه آزادی مانند ربات‌ها به شکل سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی^۱ مدل‌سازی می‌شوند که در قیاس با سیستم‌های تک ورودی - تک خروجی^۲ یا حتی سیستم‌های چند ورودی - تک خروجی^۳ ساختار پیچیده‌تری دارند و کنترل آن‌ها پیچیده‌تر و دشوارتر است [۱۰۸]. برای اکثر ربات‌های صنعتی با ساختار سری (بازوهای مکانیکی) علی‌رغم اینکه ساختار سیستم چند ورودی - چند خروجی غیرخطی است،

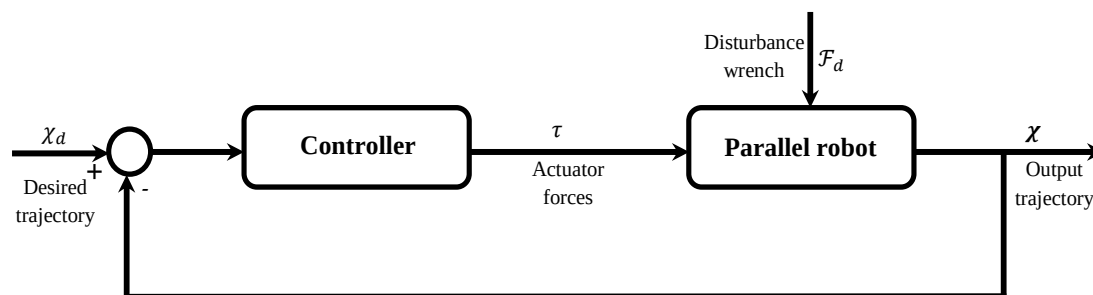
^۱ Multi Input-Multi Output (MIMO)

^۲ Single Input-Single Output (SISO)

^۳ Single Input-Multi Output (SIMO)

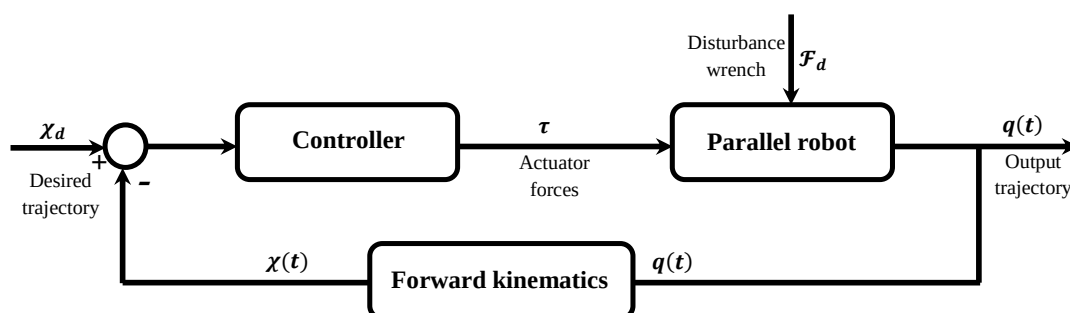
کنترل‌کننده‌های خطی غیرمتمرکز پیاده‌سازی شده است که در عمل هم کارآمد بوده‌اند. در واقع وجود گیربکس‌های قدرتی در مفاصل آن‌هاست که باعث می‌شود اثر کوپلینگ دینامیکی و اثرات غیرخطی از مفاصل بالادست به مفاصل پیشین منتقل نشود. در واقع نسبت تبدیل گیربکس باعث می‌شود تا نیروهایی که از مفاصل بالادست به یک مفصل وارد می‌شوند به مقدار چشمگیری کاهش یابند و تأثیر ناچیزی بر عملکرد کنترل‌کننده مفصل داشته باشد. با این حال این ویژگی و مزیت مربوط به ربات‌های صنعتی سری است. در ربات‌های موازی حتی با قرار دادن این گیربکس‌های قدرتی به این دلیل که مفاصل در یک زنجیره موازی به هم متصل شده‌اند نمی‌توان از اثر کوپلینگ دینامیکی صرفه نظر کرد. به همین دلیل تحلیل دینامیکی و طراحی کنترل‌کننده‌ها بر مبنای مدل دینامیکی برای ربات‌های موازی دشوارتر است [۱۰۹]. ساختار کلی سیستم کنترل در ربات‌های موازی در شکل ۵-۳ رسم شده است [۳۵]. در این ساختار معادلات دینامیکی ربات در فضای ابزار در نظر گرفته شده است. در نتیجه خروجی معادلات دینامیکی متغیرهای فضای ابزار خواهند بود و به طبع آن نیز مسیر مطلوب حرکت باید در فضای ابزار طراحی شود. مسئله چالش برانگیز در این ساختار کنترلی پیاده‌سازی عملی حلقه بازخورد^۱ است. اغلب سنسورهایی که برای اندازه‌گیری جابجایی و دوران مرکز صفحه متحرک ربات استفاده می‌شوند مبتنی بر تصاویر دوربین و پردازش تصویر، دیود نوری و دوربین‌های مادون قرمز یا کینکت^۲ هستند. دقت و سرعت پاسخگویی مهم‌ترین محدودیت این دسته از سنسورها هستند. سنسورهای با سرعت و دقت تشخیص بالا بسیار گران‌قیمت و کم‌یاب هستند به همین دلیل در پیاده‌سازی عملی رایج نیستند. در این ساختار کنترلی ورودی و خروجی کنترل‌کننده هر دو به صورت بردار هستند در نتیجه ساختار کنترل‌کننده به صورت یک سیستم چند ورودی - چند خروجی است که تعیین هر یک از خروجی‌ها در هر لحظه ممکن است به دو یا چندین ورودی سیستم وابسته باشد.

^۱ Feedback^۲ Kinect



شکل ۳-۵ ساختار کلی سیستم کنترل در ربات‌های موازی [۳۵]

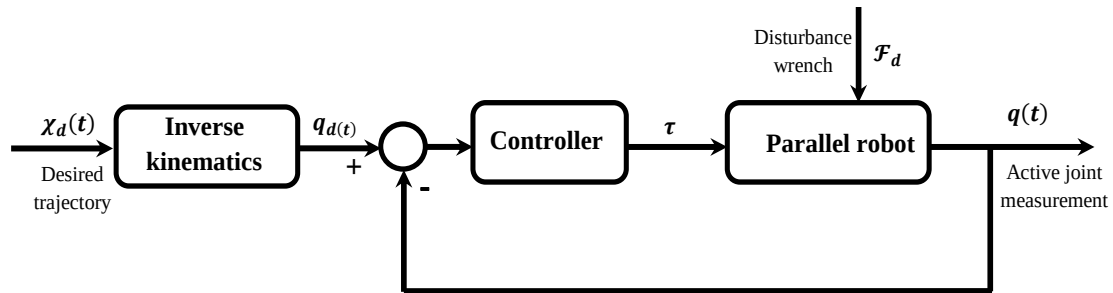
ساختار دیگری که برای کنترل ربات‌های موازی معرفی شده است بر مبنای معادلات دینامیکی ربات در فضای مفصلی عمل کرده و از سینماتیک مستقیم برای ایجاد حلقه بازخورد استفاده می‌کند. این ساختار در شکل ۴-۵ نشان داده شده است [۳۵]. با توجه به اینکه خروجی معادلات دینامیکی ربات در فضای مفصلی، متغیر مفاصل و در واقع طول راه‌اندازها هستند می‌توان به راحتی با استفاده از سنسورهای القایی خطی^۱ تغییر طول آن‌ها را محاسبه کرد. اگر چه در این ساختار مشکل اندازه‌گیری خروجی معادلات دینامیکی حل شده است اما مسائل و پیچیدگی‌ها مرتبط با سینماتیک مستقیم ربات را وارد کرده است. حل تحلیلی سینماتیک مستقیم ربات‌های موازی فرایندی پیچیده و زمان‌بر دارد که برقرای ارتباط بدون وقفه و همگام با سایر اجزای سیستم کنترل را مختل می‌کند. از طرفی وجود جواب‌های چندگانه برای سینماتیک مستقیم ربات‌های موازی مشکل دیگری است که استفاده از این ساختار کنترلی را محدود می‌کند.



شکل ۴-۵ ساختار کنترل ربات‌های موازی در فضای مفصلی و حلقه بازخورد سینماتیک مستقیم [۳۵]

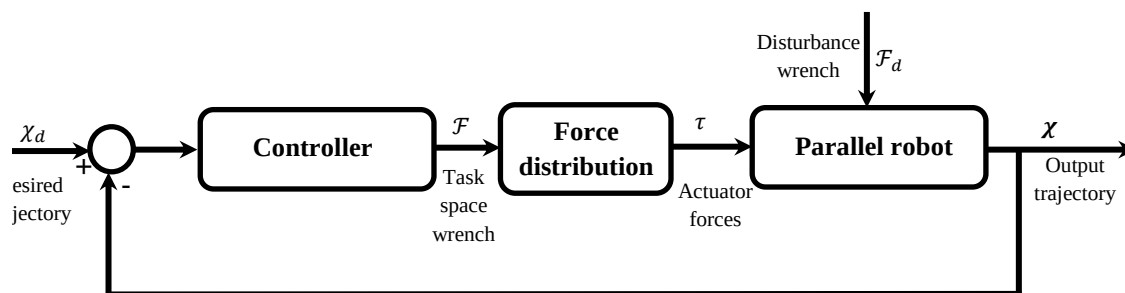
^۱ Linear Variable differential Transformer

در عوض استفاده از ساختار کنترلی که در آن از سینماتیک معکوس استفاده شده باشد بهتر است چون سینماتیک معکوس ربات‌های موازی اغلب پاسخی تحلیلی و یکتا دارند. در همین راستا، ساختار کنترلی شکل ۵-۵ معرفی شده است [۳۵].



شکل ۵-۵ ساختار کنترل ربات‌های موازی مبتنی بر سینماتیک معکوس [۳۵]

در این ساختار کنترل مسیر طراحی شده در فضای ابزار با استفاده از معادلات سینماتیک معکوس به صورت لحظه به لحظه به فضای مفصلی راه‌اندازها نگاشت می‌شود و حلقه کنترل با بازخورد موقعیت راه‌اندازهای خطی بسته می‌شود. در این ساختار، کنترل‌کننده همچنان یک سیستم چند ورودی-چند خروجی است. البته باید در نظر داشت که معادلات دینامیکی ربات نیز باید در فضای راه‌اندازها مدل‌سازی شده باشد. با توجه به این که این ساختار کنترلی کاملاً در فضای مفصلی طراحی شده است در نتیجه می‌توان کنترل‌کننده‌های غیرمتمرکز و مستقل برای هر راه‌انداز طراحی کرد و در واقع این مزیتی است که نسبت به دو ساختار کنترلی پیشین دارد. البته می‌توان ساختار کنترلی را به طوری طراحی کرد که کاملاً در فضای ابزار باشد. به این ترتیب که ورودی مطلوب، مسیر حرکت در فضای ابزار باشد، مدل دینامیکی ربات در فضای ابزار معادله نویسی شده باشد و خروجی آن متغیرهای فضای ابزار باشد. در نتیجه خطای ردیابی مسیر در فضای ابزار به عنوان ورودی کنترل‌کننده شکل می‌گیرد. کنترل‌کننده بر مبنای پارامترهای فضای ابزار طراحی شده و نیروهای لازم برای ردیابی مسیر را در فضای ابزار محاسبه می‌کند. با توجه به اینکه خروجی کنترل‌کننده در فضای ابزار است باید این نیروها را از طریق نگاشت ترانزفاده معکوس ماتریس ژاکوبین به فضای مفصلی برد. این ساختار کنترلی را می‌توان در شکل ۵-۶ به تصویر کشید [۳۵].



شکل ۵-۶ ساختار کنترلی ربات‌های موازی مبتنی بر ترانهاد معکوس ماتریس ژاکوبین [۳۵]

اگر چه ساختار معرفی شده ایده‌آل به نظر می‌رسد با این حال محدودیت‌هایی نیز دارد. با توجه به اینکه معکوس ماتریس ژاکوبین برای نگاشت نیروها از فضای ابزار به فضای مفصلی استفاده شده است در نقاط تکین که دترمینان ماتریس ژاکوبین صفر است، ترانهاد معکوس ماتریس ژاکوبین به بینهایت میل کرده و عملکرد سیستم کنترل را مختل می‌سازد. محدودیت دیگر این ساختار زمانی است که ربات ساختاری کاملاً موازی^۱ نداشته باشد (تعداد محرکه‌ها با تعداد درجه‌های آزادی در فضای ابزار برابر نباشد مانند ربات‌های موازی افزونه^۲ و ربات‌های کابلی^۳)، نگاشت انتقال نیروها از فضای ابزار به فضای مفصلی پیچیده‌تر خواهد شد و محاسبه آن زمان‌بر می‌شود. وجود وقفه‌های متعدد و ناهمگام مهم‌ترین مسائلی هستند که پیاده‌سازی عملی یک کنترل‌کننده را با مشکل رو به رو می‌کنند.

۵-۳- طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه:

ساده‌ترین ساختار کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی برای ربات‌های موازی در شکل ۵-۷ نشان داده شده است [۳۵]. در این ساختار، خطای ردیابی مسیر حرکت بر اساس رابطه (۵-۴) به دست می‌آید و بر اساس قانون کنترل، سیگنال خروجی کنترل‌کننده را مطابق رابطه (۵-۵) شکل می‌دهد که در آن k_d ماتریس بهره مشتقی^۴ و k_p ماتریس بهره تناسبی^۵ کنترل‌کننده هستند. پارامتر s معرف عملگر لاپلاس

^۱ Full Parallel Manipulator

^۲ Redundant Parallel Robots

^۳ Cable Robots

^۴ Derivative Gain

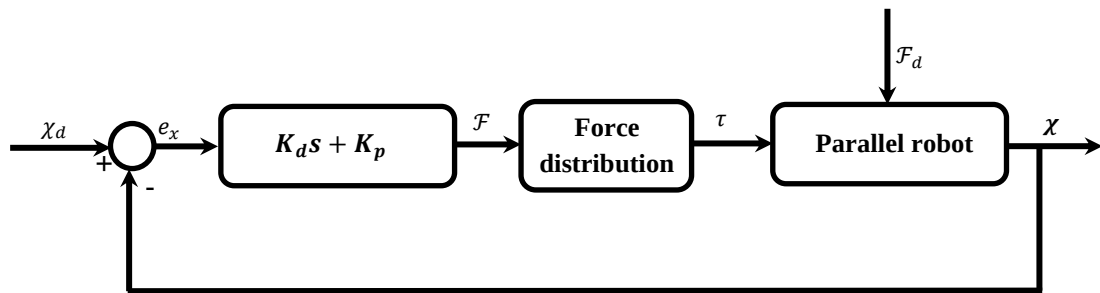
^۵ Proportional Gain

است. هنگامی که کنترل‌کننده به صورت غیرمتمرکز و مستقل بر روی هر راه‌انداز طراحی شود ماتریس-های k_p و k_d مربعی خواهند شد به این معنی که کلیه عناصر غیر قطری برای حذف اثر کوپلینگ‌های استاتیکی و دینامیکی صفر خواهند بود. برای اینکه خروجی کنترل‌کننده را در فضای مفصلی و برای راه‌اندازها به دست بیاید، باید از ترانهاده معکوس ماتریس ژاکوبین ربات مطابق رابطه (۵-۶) استفاده کرد.

$$\tilde{x} = x_d - x \quad (۴-۵)$$

$$F = (k_d s + k_p) \tilde{x} \quad (۵-۵)$$

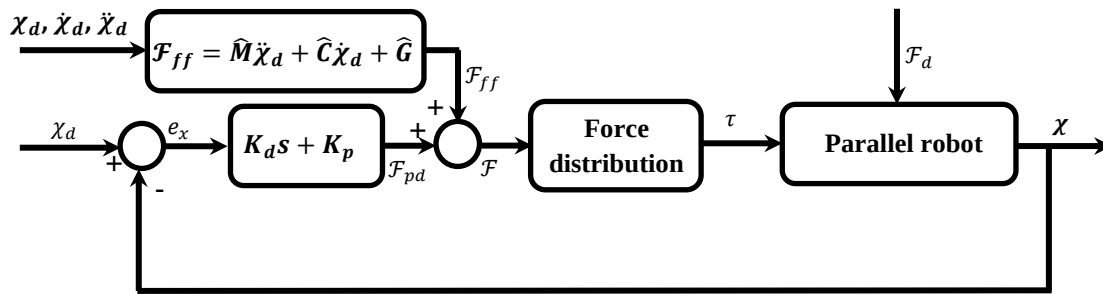
$$\tau = (J^T)^{-1} (k_d s + k_p) \tilde{x} \quad (۶-۵)$$



شکل ۵-۷ ساده‌ترین ساختار کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی برای ربات‌های موازی [۳۵]

استفاده از قانون کنترل تناسبی-مشتقی به تنهایی برای کنترل ربات‌های موازی ایده مناسبی نیست. با توجه به اینکه کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی برای سهولت به صورت غیرمتمرکز پیاده‌سازی می‌شود، تأثیر عوامل غیرخطی و کوپلینگ‌های استاتیکی و دینامیکی در معادله ربات سبب می‌شود که عملکرد ردیابی با دقت مناسبی انجام نشود و حتی در مواردی کنترل‌کننده قادر به تضمین پایداری ربات نباشد. اگر چه ویژگی مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاش‌های بیرونی برای کنترل‌کننده تناسبی مشتقی ثابت شده است، اما میزان این مقاومت کاملاً وابسته به نوع مدل و پیچیدگی‌ها آن است. به این تعبیر که برای مدل‌هایی که معادلات خطی یا ساده‌تری دارند مقاومت کنترل‌کننده در برابر تغییرات و اغتشاش‌های وارد شده به مدل بیشتر است اما با پیچیده‌تر شدن مدل و افزوده شدن بخش-های غیرخطی بزرگ و موثر، مقاومت کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی کاهش پیدا می‌کند. برای همین در

اغلب کنترل‌کننده‌های تناسبی-مشتقی نیاز است که بخش‌های غیرخطی معادله ربات که تأثیر چشمگیری در پاسخ دینامیکی سیستم دارند به یکی از روش‌های پیش‌خور^۱ یا پس‌خور^۲ خطی‌سازی شوند. به این ترتیب، اثر دینامیکی این بخش‌های خنثی شده و عملکرد کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی بر روی باقی‌مانده مدل دینامیکی بهبود می‌یابد. ساختار کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌کننده پیش‌خور در شکل ۸-۵ نشان داده شده است [۳۵]. قانون کنترل در این ساختار علاوه بر کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی، تمام یا بخشی از مدل‌سازی ریاضی سیستم را شامل می‌شود که با گرفتن ورودی‌های مطلوب مسیر، نیروهای لازم برای ایجاد حرکت را محاسبه می‌کند. نیروی لازم برای حرکت ربات روی مسیر طراحی شده بر اساس رابطه (۷-۵) محاسبه می‌شود. در این رابطه، نیروی جبران‌کننده پیش‌خور است.



شکل ۸-۵ ساختار کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌کننده پیش‌خور [۳۵]

$$F = F_{PD} + F_{ff} = (k_d s + k_p) \tilde{x} + \hat{M}(X_d) \ddot{X}_d + \hat{C}(X_d, \dot{X}_d) \dot{X}_d + \hat{G}(X_d) \quad (۷-۵)$$

چنانچه رابطه (۷-۵) در معادله دینامیکی ربات جایگذاری شود، رابطه (۸-۵) به دست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} M(X) \ddot{X} + C(X, \dot{X}) \dot{X} + G(X) &= F \\ &= k_d \dot{\tilde{x}} + k_p \tilde{x} + \hat{M}(X_d) \ddot{X}_d + \hat{C}(X_d, \dot{X}_d) \dot{X}_d + \hat{G}(X_d) \end{aligned} \quad (۸-۵)$$

در صورتی که مدل‌سازی ریاضی ربات دقیق باشد به طوری که بتوان در نظر گرفت که $\hat{C} = \hat{M} = M$ و $\hat{G} = G$ است، آنگاه رابطه (۹-۵) را می‌توان از آن نتیجه گرفت. بر اساس رابطه (۹-۵) ربات موازی

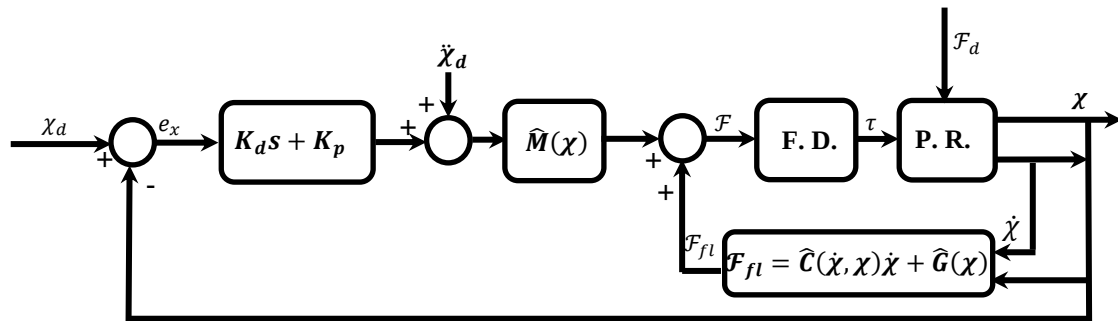
^۱ Feedback Linearization

^۲ Feedforward Linearization

استوارت با کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی و جبران‌ساز پیش‌خور پایدار مجانبی است به شرطی که ماتریس‌های k_p و k_d مثبت معین باشند.

$$M(X)(\ddot{X}_d - \ddot{X}) + K_d\dot{\tilde{X}} + K_p\tilde{X} = M(X)(\ddot{\tilde{X}}) + K_d\dot{\tilde{X}} + K_p\tilde{X} = 0 \quad (9-5)$$

استفاده از جبران‌ساز پیش‌خور هنگامی که که تفاوت‌های قابل‌توجهی میان پارامترهای مدل‌سازی و پارامترهای واقعی سیستم باشد نتیجه‌بخش نخواهد بود. به همین دلیل از روش‌های خطی‌سازی پس‌خور یا کنترل دینامیک معکوس^۱ استفاده می‌شود. ساختار کنترل دینامیک معکوس برای ربات‌های موازی در شکل ۹-۵ نشان داده شده است [۳۵].



شکل ۹-۵ ساختار کنترل دینامیک معکوس [۳۵]

سیگنال کنترل در رابطه (۵-۱۰) بر اساس توپولوژی ساختار کنترل به دست آمده است که در آن مقدار پارامتر a از رابطه (۵-۱۱) محاسبه می‌شود.

$$F = \hat{M}(X)a + \hat{C}(X, \dot{X})\dot{X} + \hat{G}(X) \quad (10-5)$$

$$a = \ddot{X}_d + K_d\dot{\tilde{X}} + K_p\tilde{X} \quad (11-5)$$

در ادامه، با نوشتن معادله سیستم حلقه بسته می‌توان پایداری سیستم کنترل طراحی‌شده را بررسی کرد. رابطه (۵-۱۲) با جایگذاری سیگنال کنترل درون معادله دینامیکی ربات، به معادلات حلقه بسته سیستم رسیده است. در این معادله حلقه بسته چنانچه مقادیری که برای ماتریس‌های جرم، کریولیس

^۱ Inverse Dynamics Control

و گریز از مرکز و گرانش محاسبه شده با مقادیر حقیقی سیستم فیزیکی برابر باشد، می‌توان معادله حلقه بسته را به فرم رابطه (۱۳-۵) ساده‌سازی کرد. رابطه (۱۳-۵) بیان می‌کند که به ازای ماتریس‌های مثبت و معین k_p و k_d سیستم حلقه بسته به صورت مجانبی پایدار است.

$$M(X)\ddot{X} + C(X, \dot{X})\dot{X} + G(X) = F \quad (12-5)$$

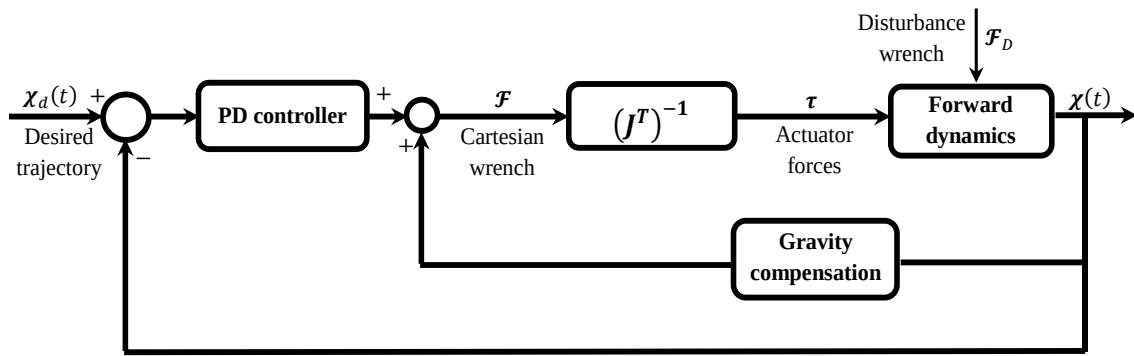
$$= \hat{M}(X)(\ddot{X}_d + K_d\dot{\tilde{X}} + K_p\tilde{X}) + \hat{C}(X, \dot{X})\dot{X} + \hat{G}(X)$$

$$\hat{M}(X)(\ddot{\tilde{X}} + K_d\dot{\tilde{X}} + K_p\tilde{X}) = 0 \rightarrow \ddot{\tilde{X}} + K_d\dot{\tilde{X}} + K_p\tilde{X} = 0 \quad (13-5)$$

اما در بیشتر موارد مقادیر محاسبه شده با مقدار پارامترهای حقیقی سیستم برابر نیستند. در این شرایط رابطه (۱۳-۵) به شکل رابطه (۱۴-۵) تغییر می‌کند.

$$\ddot{\tilde{X}} + K_d\dot{\tilde{X}} + K_p\tilde{X} = (\hat{M}(X))^{-1} \{ (M - \hat{M})\ddot{X} + (C - \hat{C})\dot{X} + (G - \hat{G}) \} \quad (14-5)$$

رابطه (۱۴-۵) بیان می‌کند سیستم حلقه بسته کنترل مادامی که اختلاف میان پارامترهای محاسبه شده و حقیقی سیستم کراندار باشد، پایداری سیستم تضمین شده است و در صورتی که این اختلاف به صفر میل کند پایداری مجانبی برای سیستم کنترل حلقه بسته فراهم می‌شود. پیاده‌سازی این ساختار کنترلی در عمل نیازمند اطلاعات کامل و هر چه دقیق‌تر از سیستم فیزیکی است که به سادگی قابل اندازه‌گیری و محاسبه نیست. از طرفی پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر اساس روابط تحلیلی و متغیر با زمان ماتریس‌های جرمی، کریولیس و گریز از مرکز و گرانش امری زمان‌بر است و باعث ایجاد وقفه در سیستم کنترل می‌شود. به همین دلیل اغلب به جای خطی‌سازی کامل پس‌خورد تنها بخشی از سیستم که شناسایی و محاسبه آن ساده‌تر است را به روش خطی‌سازی تکه‌ای پس‌خورد وارد ساختار کنترل می‌کنند. عموماً بخش اثر گرانش به عنوان خطی‌سازی تکه‌ای مورد نظر قرار می‌گیرد چون علاوه بر محاسبه سریع‌تر و راحت‌تر، تأثیر بسزایی نیز در دینامیک ربات دارد. به همین دلیل در این پژوهش، ساختار کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه به عنوان ایده کنترل خطی‌سازی تکه‌ای پس‌خورد مطابق الگوی شکل ۵-۱۰ مد نظر قرار گرفته است.



شکل ۵-۱۰ کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه [۳۵]

سیگنال کنترل در روش تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه مطابق رابطه (۵-۱۵) به دست می‌آید. برای اثبات پایداری کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه از روش تحلیل پایداری لیاپانوف^۱ استفاده می‌شود. در این روش با تعریف یک تابع اسکالر مثبت به عنوان تابع لیاپانوف سیستم حلقه بسته، پایداری سیستم بر اساس مشتق زمانی تابع لیاپانوف بررسی می‌شود. چنانچه مشتق زمانی تابع لیاپانوف منفی معین باشد، سیستم حلقه بسته پایدار است اما برای تضمین پایداری مجانبی باید حتماً مشتق تابع لیاپانوف معین منفی باشد. تابع لیاپانوف بر اساس انرژی سیستم حلقه بسته کنترل در رابطه (۵-۱۶) معرفی شده است.

$$\tau = (J^T)^{-1}(K_d \dot{\tilde{x}} + K_p \tilde{x} + G(x)) \quad (۵-۱۵)$$

$$V = \frac{1}{2} \dot{\tilde{x}}^T M \dot{\tilde{x}} + \frac{1}{2} \tilde{x}^T K_p \tilde{x} \quad (۵-۱۶)$$

مشتق زمانی رابطه (۵-۱۶)، رابطه (۵-۱۷) را نتیجه می‌دهد. در ادامه با جایگذاری $M\ddot{\tilde{x}}$ از معادله دینامیکی ربات، رابطه (۵-۱۸) بسط پیدا می‌کند که در آن به ازای ورودی کنترلی ثابت ($\dot{x}_d = \text{Cons.}$)، $\dot{\tilde{x}}_d = 0$ در نظر گرفته شده است.

$$\dot{V} = \dot{\tilde{x}}^T M \ddot{\tilde{x}} + \frac{1}{2} \dot{\tilde{x}}^T \dot{M} \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T K_p \tilde{x} \quad (۵-۱۷)$$

$$\dot{V} = \dot{\tilde{x}}^T (K_d \dot{\tilde{x}} + K_p \tilde{x} + G(x) - C\dot{\tilde{x}} - G(x)) + \frac{1}{2} \dot{\tilde{x}}^T \dot{M} \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T K_p \tilde{x} \quad (۵-۱۸)$$

^۱ Lyapunov Stability Theory

با اعمال فرض مذکور، انجام محاسبات و ساده‌سازی رابطه (۵-۱۹) به دست می‌آید. باید توجه کرد که عبارت $\dot{M} - 2C$ همواره یک ماتریس پاد متقارن است پس تابع مربع این ماتریس برابر با صفر خواهد بود. رابطه (۵-۱۹) اثبات می‌کند که مشتق زمانی تابع لیاپانوف منفی نیمه معین است. بنابراین پایداری لیاپانوفی ربات با کنترل کننده طراحی شده تضمین شده است.

$$\dot{V} = \dot{X}^T K_p \tilde{X} - \dot{X}^T K_d \dot{X} + \frac{1}{2} \dot{X}^T (\dot{M} - 2C) \dot{X} - \dot{X}^T K_p \tilde{X} = -\dot{X}^T K_d \dot{X} \leq 0 \quad (۵-۱۹)$$

در ادامه برای تحقیق پایداری مجانبی لیاپانوفی برای کنترل کننده طراحی شده، از قضیه لاسال^۱ استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تابع لیاپانوف همواره کاهشی است ($\dot{V} \leq 0$)، قضیه لاسال امکان متوقف شدن ربات را در نقطه‌ای به جز نقطه دلخواه بررسی می‌کند ($\dot{X} = 0$ & $X \neq X_d$). با فرض اینکه ربات در نقطه‌ای به جز نقطه مطلوب متوقف شده باشد از رابطه (۵-۱۹) نتیجه می‌شود که:

$$\dot{V} = -\dot{X}^T K_d \dot{X} = 0 \rightarrow \dot{X} = 0 \quad (۵-۲۰)$$

سرعت ربات در همه راستاها برابر صفر است پس شتاب ربات نیز صفر خواهد بود. با بررسی مجدد معادله حلقه بسته ربات در شرایطی که سرعت و شتاب ربات صفر است، مشخص می‌شود که:

$$M(X)\ddot{X} + C(X, \dot{X})\dot{X} = K_d \ddot{X} + K_p \tilde{X} = 0 \rightarrow K_p \tilde{X} = 0 \rightarrow \tilde{X} = 0 \rightarrow X = X_d \quad (۵-۲۱)$$

ربات تنها در نقطه دلخواه متوقف خواهد شد و هیچ نقطه‌ای وجود ندارد که ربات در آن متوقف شود. در نتیجه با استفاده از قضیه لاسال پایداری مجانبی لیاپانوفی ربات به اثبات می‌رسد. البته باید متذکر شد که کنترل‌پذیری ساختار ارائه شده وابسته به غیر تکین بودن ماتریس ژاکوبین ربات است و پایداری سیستم حلقه بسته مشروط به کنترل‌پذیری ربات در سراسر مسیر طراحی شده است.

در ادامه کنترل کننده غیرمتمرکز تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه مطابق شکل ۵-۱۰ بر روی مدل دینامیکی سکوی بهینه ربات موازی استوارت با پارامترهای دینامیکی جدول ۳-۱ پیاده‌سازی شده است.

^۱ Lasalle Theorem

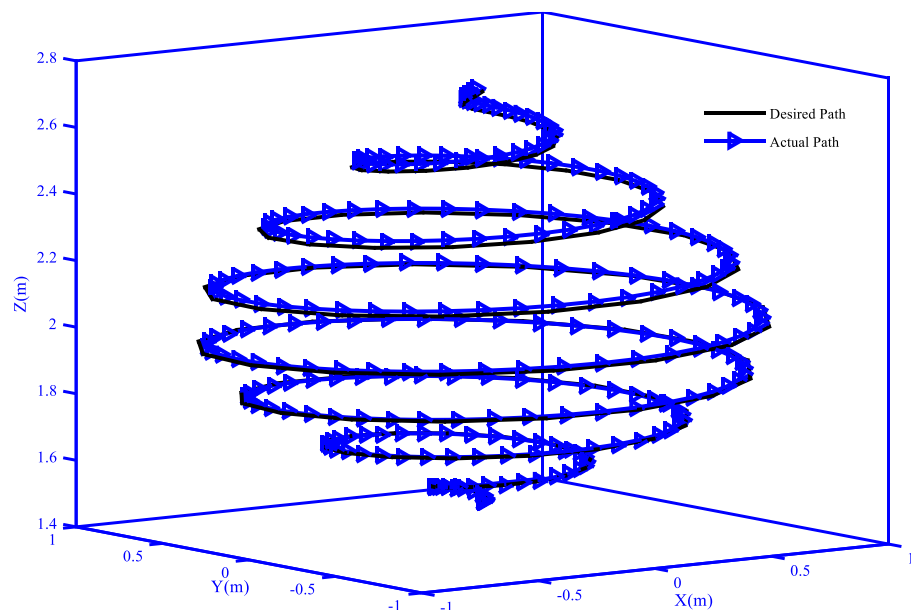
هدف این سیستم کنترل ردیابی دقیق مسیر طراحی شده در شکل ۵-۱ است. بدین منظور بهره‌های کنترلی برای هر یک از درجه‌های آزادی ربات در فضای دکارتی مطابق جدول ۵-۳ تنظیم شده‌اند. علت اینکه بهره‌های مشتقی در برابر بهره‌های تناسبی بزرگ در نظر گرفته شده‌اند این است که بهره‌های مشتقی سهم اصلی را در تأمین و تضمین پایداری و ردیابی مسیر دارند و همین موضوع در رابطه (۵-۲۰) به اثبات رسیده است.

جدول ۵-۳ بهره‌های کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه

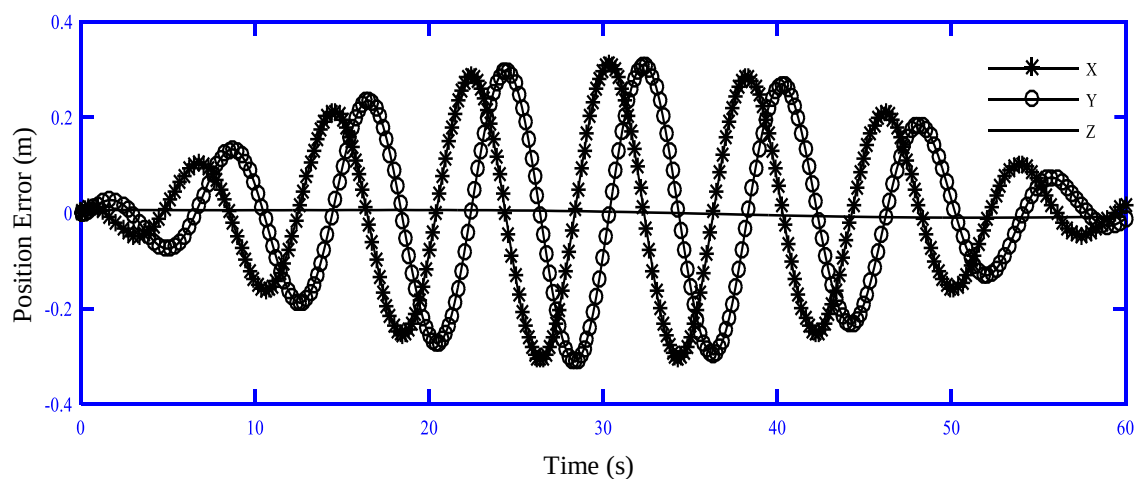
PD Gain	X	Y	Z	Θ_x	Θ_y	Θ_z
K_p	100	100	100	100	100	100
K_d	3000	3000	3000	2000	2000	2000

شکل ۵-۱۱ نمایی از ردیابی مسیر حرکت را در فضای سه‌بعدی نشان می‌دهد. خطای ردیابی مسیر حرکت نیز در شکل ۵-۱۲ برای حرکت انتقالی و دورانی ربات نشان داده شده است. شکل ۵-۱۳ نیرویی را که هر محرکه خطی برای ردیابی مسیر تولید کرده است را نشان می‌دهد.

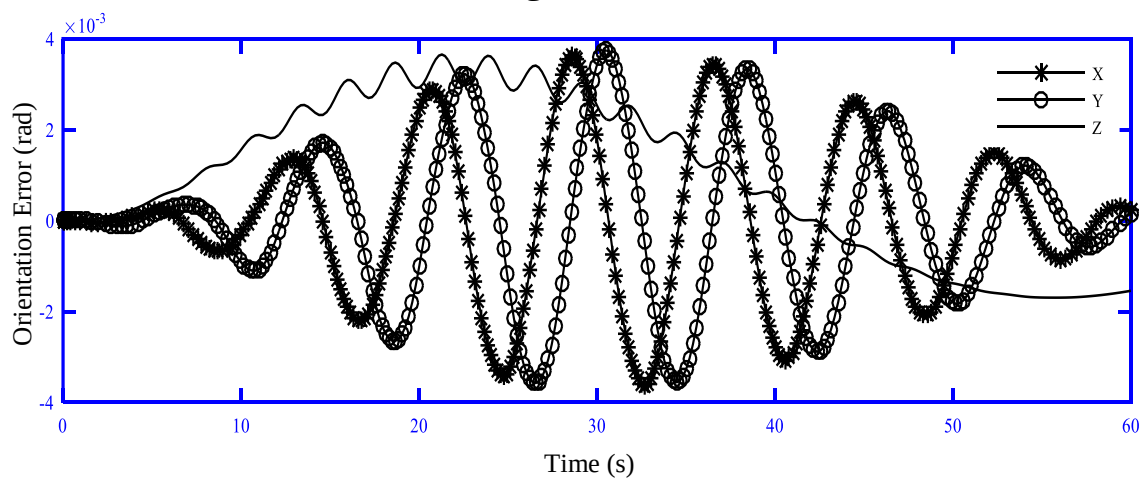
اگر چه پایداری مجانبی ربات با کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی و جبران‌ساز جاذبه به روش لیاپانوفی برای ورودی ثابت به اثبات رسیده است، اما با توجه به اینکه مسیر حرکت در راستای محورهای افقی نوسانی است، عملکرد ردیابی در این دو راستا ضعیف‌تر بوده است. در راستای عمودی چون مسیر حرکت شیب ملایمی دارد عملکرد ردیابی با دقت بهتری انجام شده است همچنین تنظیم دوران صفر صفحه متحرک ربات در طول مسیر با استفاده از این کنترل‌کننده به خوبی انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه برای غلبه بر بخش‌های غیرخطی معادله دینامیکی ربات و ارائه عملکردی قابل قبول در ردیابی مسیر حرکت، نیروی بسیاری زیادی را در محرکه‌های خطی ربات به کار گرفته است. در واقع افزایش سطح نیروی محرکه‌ها متأثر از افزایش چشمگیر بهره مشتقی در ساختار کنترل‌کننده است.



شکل ۵-۱۱: نمایشی از ردیابی مسیر حرکت در فضای سه‌بعدی با کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی و جبران‌ساز جاذبه

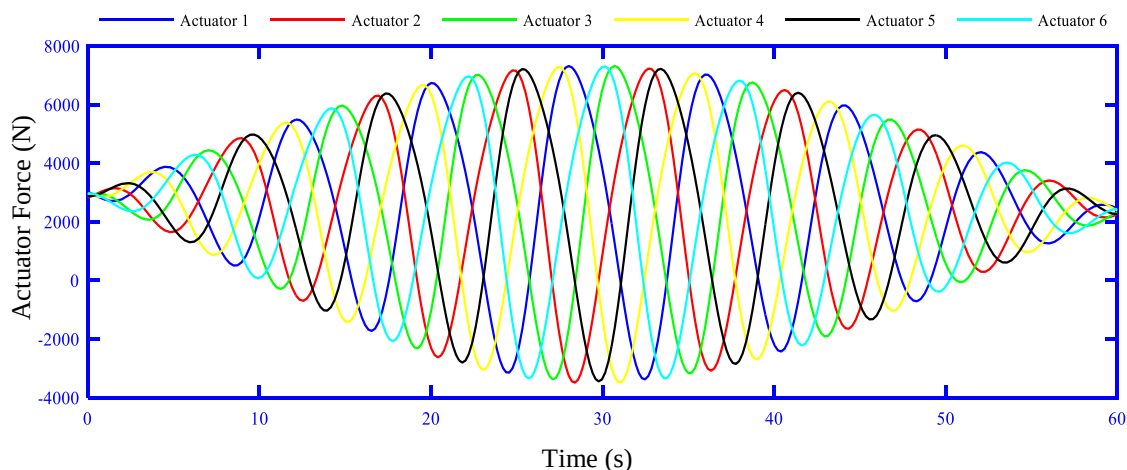


الف) خطای ردیابی موقعیت



ب) خطای ردیابی دوران

شکل ۵-۱۲: خطای ردیابی مسیر حرکت با کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی و جبران‌ساز جاذبه



شکل ۵-۱۳ نیروی محرکه‌های خطی ربات با کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی و جبران‌ساز جاذبه

اینکه بهبود عملکرد ردیابی مسیر در کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی مستقیماً وابسته به افزایش بهره‌های کنترلی است دو محدودیت مهم در پیاده‌سازی عملی آن ایجاد می‌کند. اول اینکه بدون در نظر گرفتن محدودیت محرکه‌ها در ایجاد نیرو، همواره باعث می‌شود که دستورهای کنترلی، محرکه‌ها را به ناحیه اشباع وارد کند در نتیجه عملکرد ردیابی تنزل می‌یابد.

دوم اینکه افزایش بهره مشتقی باعث تقویت نویزهای موجود در سیگنال خطا می‌شود و اثر منفی بر روی عملکرد کنترل‌کننده دارد. از طرفی مقابله با نویزهای موجود در سیگنال خطا به فیلترهای پایین-گذر دقیق نیاز دارد که در اغلب موارد طراحی و پیاده‌سازی پیچیده و هزینه‌بری دارند.

۵-۴- طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی

طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی و مقاوم راه حل مناسبی برای کنترل دقیق ربات‌های موازی بر اساس مدل‌های ریاضی تخمینی و غیر دقیق است [۱۱۰، ۱۱۱]. کنترل‌کننده مد لغزشی به عنوان یک روش کنترلی مقاوم شامل یک بخش خطی‌ساز بر اساس مدل تخمینی سیستم و یک بخش ناپیوسته است که برای غلبه بر عدم قطعیت‌های موجود در دینامیک سیستم و اغتشاش‌های خارجی در نظر گرفته شده است. فرم بسته معادله دینامیکی ربات موازی استوارت به صورت رابطه (۵-۲۲) بیان می‌شود:

$$\hat{M}(X)\ddot{X} + \hat{C}(X, \dot{X})\dot{X} + \hat{G}(X) = F \quad (22-5)$$

$\hat{M}(X)$ ، $\hat{C}(X, \dot{X})$ و $\hat{G}(X)$ تخمینی از مقدار واقعی پارامترهای موجود در دینامیک اصلی سیستم است. در ساختار این کنترل‌کننده، خطای ردگیری در فضای ابزار مطابق رابطه (23-5) تعریف می‌شود [112].

$$\tilde{X} = X - X_d \quad (23-5)$$

سپس سطح لغزش^۱ براساس خطای ردگیری و مشتقش مطابق با رابطه (24-5) تعریف خواهد شد [23].

$$s = \dot{\tilde{X}} + \lambda \tilde{X} \quad (24-5)$$

λ پارامتری همواره مثبت است که سرعت همگرایی سیستم را به ورودی مطلوب تعیین می‌کند. با تعریف پارامتر s به عنوان سطح لغزش که تابعی از خطای ردگیری سیستم و مشتق آن است، همواره باقی ماندن سطح لغزش بر روی مقدار صفر، همگرایی متغیرهای حالت سیستم را به مقدار مطلوب و صفر شدن خطای ردگیری مطابق رابطه (25-5) نتیجه می‌دهد [112].

$$s = 0 \Rightarrow \dot{\tilde{X}} = -\lambda \tilde{X} \Rightarrow \tilde{X}(t) = e^{-\lambda t} \tilde{X}(0) \quad (25-5)$$

بنابراین سیگنال کنترل باید به نحوی تعیین شود که سطح لغزش را در صفر نگه دارد و خارج از سطح لغزش، همواره مربع فاصله تمامی مسیرهای حالت سیستم را تا سطح لغزش کاهش دهد. به این شرط، شرط لغزشی^۲ می‌گویند که در رابطه (26-5) به صورت ریاضی بیان شده است [112]. η یک پارامتر اکیداً مثبت است که تضمین می‌کند چنانچه مقدار پارامتر s در لحظه ابتدایی مخالف صفر باشد، با اعمال گشتاور کنترلی پس از طی یک زمان محدود، سطح لغزش به صفر می‌رسد.

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d}{dt} s^2 \right) \leq -\eta |s| \quad (26-5)$$

^۱ Sliding Surface

^۲ Sliding Condition

سیگنال کنترل (F) در مشتق اول سطح لغزش ظاهر خواهد شد و به این ترتیب با مساوی صفر قرار دادن مشتق سطح لغزش می‌توان مقدار سیگنال کنترل را به گونه‌ای تعیین کرد که تأمین‌کننده شرط لغزشی باشد. سیگنال کنترل از طریق روابط (۲۷-۵) تا (۳۰-۵) محاسبه شده است.

$$\dot{s} = 0 \Rightarrow \ddot{X} - \ddot{X}_d + \lambda(\dot{X} - \dot{X}_d) = 0 \quad (27-5)$$

$$\ddot{X} = \frac{1}{\hat{M}}(F - \hat{C} - \hat{G}) \quad (28-5)$$

$$F_{fl} = \hat{M}(\ddot{X}_d - \lambda(\dot{X} - \dot{X}_d)) + \hat{C} + \hat{G} \quad (29-5)$$

$$F = F_{fl} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (30-5)$$

جمله ناپیوسته $k \operatorname{sgn}(s)$ به منظور تأمین شرط لغزشی در حضور عدم قطعیت‌های موجود در دینامیک سیستم یا بار اغتشاشی خارجی به جمله خطی‌ساز F_{fl} با علامت منفی افزوده شده است. عموماً به منظور کاهش پدیده لرزش^۱ در سیگنال کنترل به جای استفاده از تابع علامت^۲ از تابع اشباع^۳ با پهنای باند ۰/۱ استفاده می‌شود. انتخاب پارامتر k در تأمین پایداری و همگرایی خطا به صفر علی‌الخصوص غلبه بر نامعینی‌های مدل اهمیت ویژه‌ای دارد. در واقع این پارامتر باید به گونه‌ای انتخاب شود که از بیشینه نامعینی موجود در مدل همواره بزرگتر باشد. به همین منظور مقدار k مطابق رابطه (۳۱-۵) انتخاب می‌شود که در آن Δ کران بالای خطای موجود در مدل دینامیکی سیستم است [۱۱۲]. لازم به ذکر است که نحوه تعیین پارامتر Δ با توجه به بحث اثبات پایداری در ادامه ارائه خواهد شد.

$$k = \Delta + \eta \quad (31-5)$$

^۱ Chattering Phenomenon

^۲ Sign Function

^۳ Saturation Function

برای اثبات پایداری کنترل‌کننده مد لغزشی، از روش تحلیل پایداری با تابع لیپانوف استفاده شده است. تابع لیپانوف بر اساس سطح لغزش، که تابعی از خطای ردگیری سیستم و معیاری از عملکرد ردگیری است، مطابق رابطه (۳۲-۵) تعریف شده است [۱۱۲].

$$V(t) = \frac{1}{2} [s^T M s] \quad (۳۲-۵)$$

در تابع لیپانوف، M همان ماتریس اینرسی ربات است. مشتق زمانی تابع لیپانوف در رابطه (۳۳-۵) محاسبه شده و در رابطه (۳۴-۵) بسط داده شده است.

$$\dot{V}(t) = s^T M \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s \quad (۳۳-۵)$$

$$\dot{V}(t) = s^T M (\ddot{X} - \ddot{X}_d + \lambda \dot{\tilde{X}}) + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s = s^T \left(M \ddot{X} - M (\ddot{X}_d - \lambda \dot{\tilde{X}}) \right) + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s \quad (۳۴-۵)$$

با جایگذاری $M \ddot{X}$ از معادله دینامیکی اصلی سیستم و استفاده از رابطه (۳۵-۵) در رابطه (۳۴-۵)، رابطه (۳۶-۵) به دست می‌آید.

$$s = \dot{\tilde{X}} + \lambda \tilde{X} = \dot{X} - (\dot{X}_d - \lambda \tilde{X}) = \dot{X} - \dot{X}_r \quad (۳۵-۵)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = s^T \left(F - C(X, \dot{X})(s + \dot{X}_r) - G(X) - M (\ddot{X}_d - \lambda \dot{\tilde{X}}) \right) + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s = \\ s^T \left(F - C(X, \dot{X}) \dot{X}_r - G(X) - M (\ddot{X}_d - \lambda \dot{\tilde{X}}) \right) + \frac{1}{2} s^T (\dot{M} - 2C) s \end{aligned} \quad (۳۶-۵)$$

با توجه به خاصیت ماتریس‌های پاد متقارن، توابع مربع ماتریس $\dot{M} - 2C$ ، که همواره پاد متقارن است، برابر با صفر خواهد بود. جایگذاری گشتاور کنترل‌کننده مد لغزشی که در رابطه (۳۰-۵) به دست آمده، در رابطه (۳۶-۵) رابطه (۳۷-۵) را نتیجه می‌دهد.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = s^T \left(\hat{M} (\ddot{X}_d - \lambda \dot{\tilde{X}}) + \hat{C} - C + \hat{G} - G - M (\ddot{X}_d - \lambda \dot{\tilde{X}}) \right) \\ - s^T K \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (۳۷-۵)$$

با تعریف پارامترهای $\tilde{M} = \hat{M} - M$ و $\tilde{C} = \hat{C} - C$ ، $\tilde{G} = \hat{G} - G$ به عنوان خطای مدل‌سازی دینامیکی، مشتق تابع لیاپانوف مطابق رابطه (۳۸-۵) ساده می‌شود.

$$\dot{V}(t) = s^T (\tilde{M}(\ddot{X}_d - \lambda \dot{X}) + \tilde{C}(X, \dot{X})\dot{X} + \tilde{G}(X)) - K|s| \quad (38-5)$$

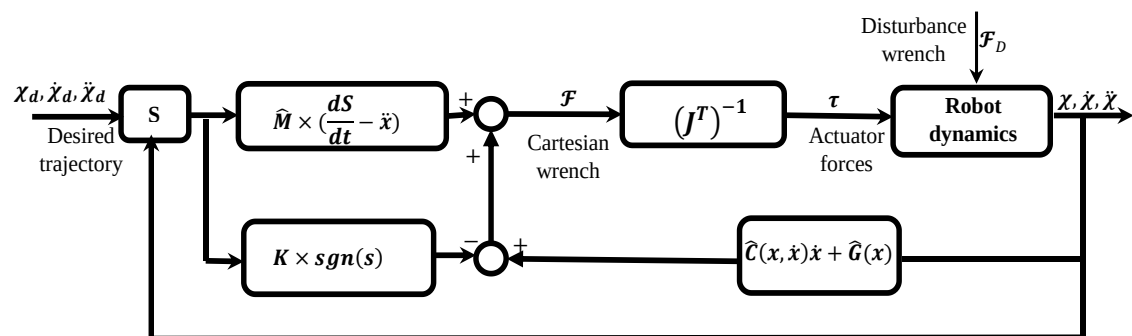
با توجه به رابطه به دست آمده برای مشتق تابع لیاپانوف برای اینکه مقدار آن همواره نیم معین منفی باشد، مقدار پارامتر k باید بر اساس باند خطای مدل‌سازی مطابق با رابطه (۳۹-۵) تعیین شود.

$$K \geq |\tilde{M} * (\ddot{X}_d - \lambda \dot{X}) + \tilde{C}(X, \dot{X})\dot{X} + \tilde{G}(X)| + \eta \quad (39-5)$$

انتخاب پارامتر k بر اساس رابطه (۳۹-۵) تضمین می‌کند که مشتق زمانی تابع لیاپانوف سیستم مطابق رابطه (۴۰-۵) همواره نیم معین منفی باشد.

$$\dot{V}(t) \leq -\eta|s| \leq 0 \quad (40-5)$$

تا به اینجا پایداری لیاپانوفی سیستم با تضمین نیم معین منفی بودن مشتق تابع لیاپانوف اثبات شد. با توجه به اینکه مشتق تابع لیاپانوف تابعی از سطح لغزش است و تنها زمانی مشتق آن صفر خواهد شد که $s=0$ باشد، بنابراین شرایط تئوری لاسال را دارد. در نتیجه طبق این قضیه پارامتر s که تابعی از خطای ردگیری سیستم است، به صورت مجانبی پایدار خواهد بود و دینامیک حلقه بسته ربات با کنترل‌کننده مد لغزشی به صورت مجانبی پایدار خواهد بود. کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی برای ربات بهینه موازی استوارت به صورت غیرمترکز و بر اساس ساختار شکل ۱۴-۵ پیاده‌سازی شده است.

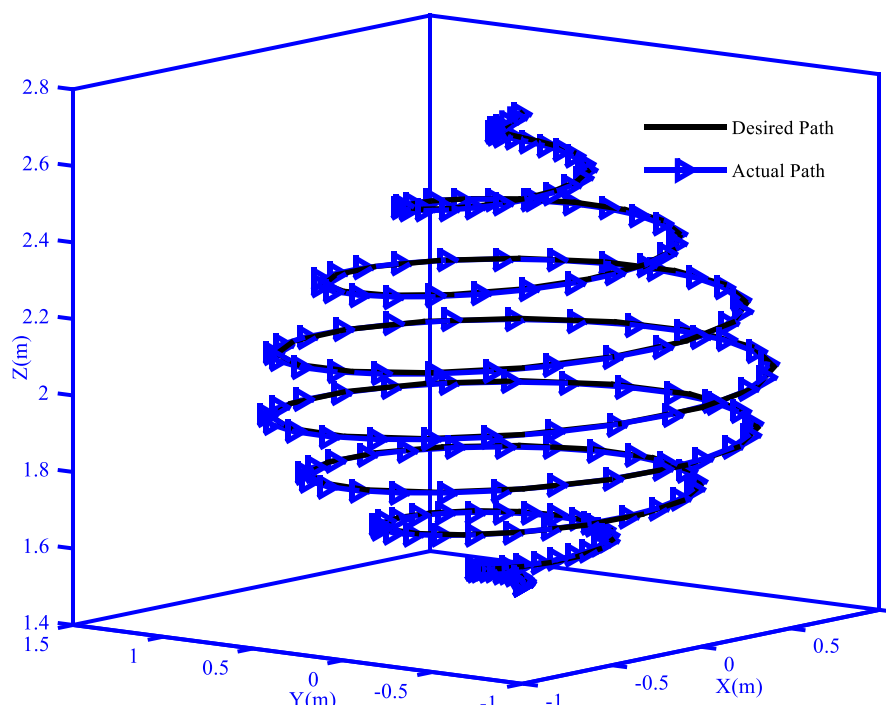


شکل ۱۴-۵ ساختار کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی

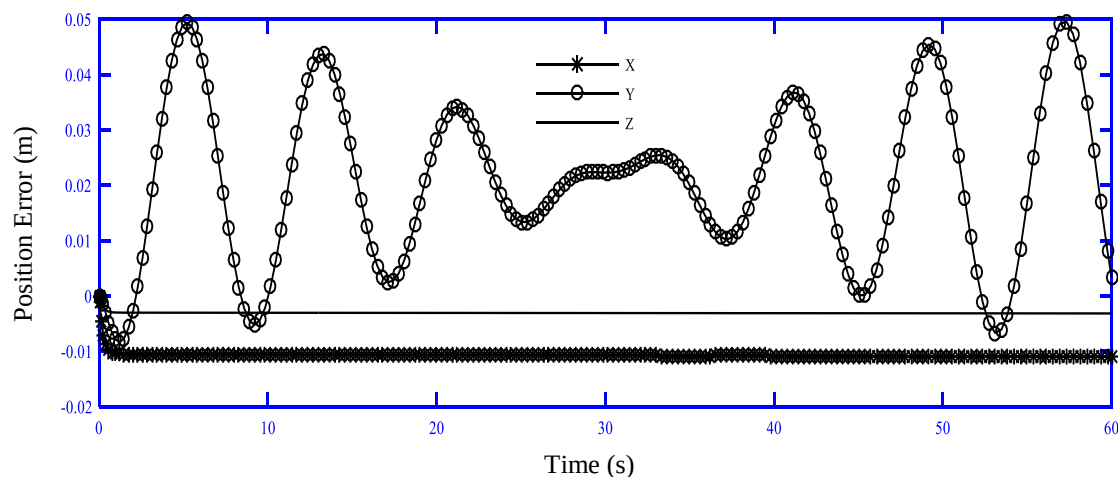
پارامترهای کنترل‌کننده در اجرای شبیه‌سازی براساس جدول ۴-۵ تنظیم شده است. عملکرد ربات با کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی در ردیابی مسیر طراحی شده در شکل ۱۵-۵ و شکل ۱۶-۵ به ترتیب بر اساس نمای سه‌بعدی و خطای ردیابی نشان داده شده است. نیروهایی که کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی برای انجام حرکت توسط محرکه‌ها ایجاد کرده است نیز در شکل ۱۷-۵ نشان داده شده است.

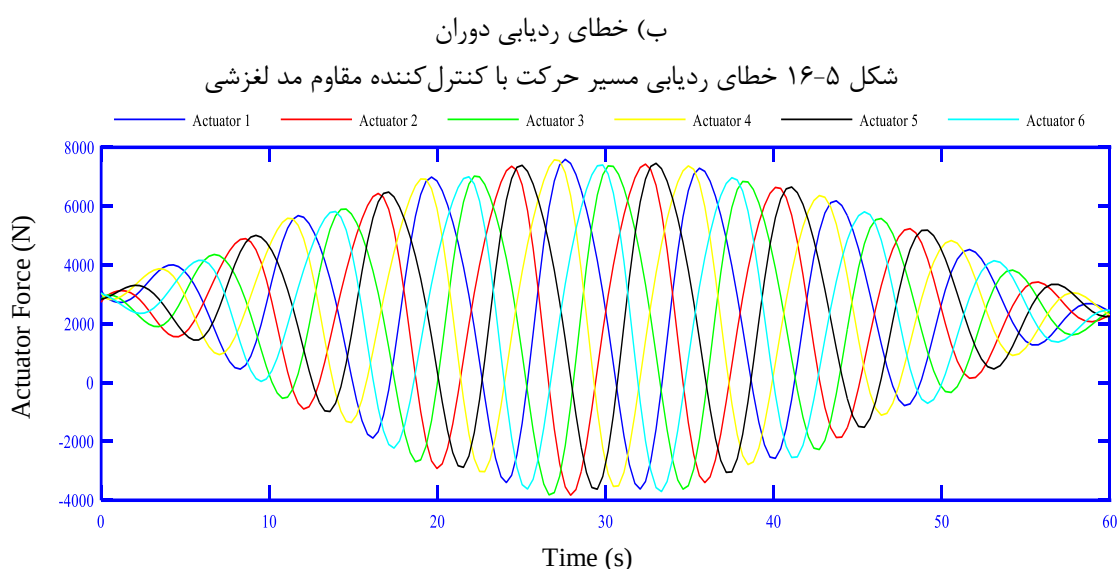
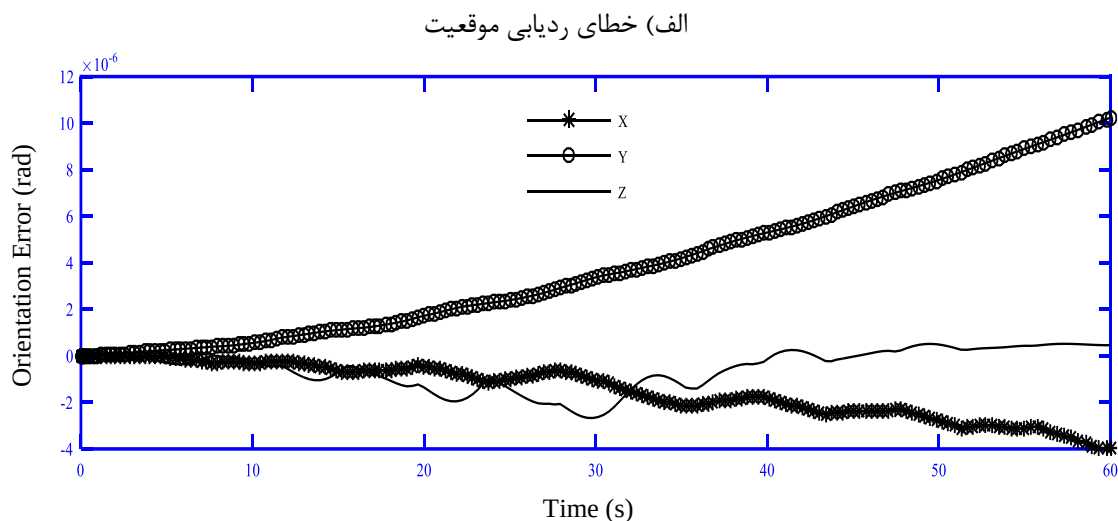
جدول ۴-۵ بهره‌های کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی

SMC Gain	X	Y	Z	Θ_X	Θ_Y	Θ_Z
λ	5	5	5	5	5	5
K	1	1	1	1	1	1



شکل ۱۵-۵ نمایشی از ردیابی مسیر حرکت در فضای سه‌بعدی با کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی





شکل ۵-۱۷ نیروی محرکه‌های خطی ربات با کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی

نتایج بدست آمده بهبود قابل توجهی را در دقت ردیابی مسیر مطلوب طراحی شده حرکت نشان می‌دهد. علی‌رغم اینکه سطح نیروهای ایجادشده در محرکه‌ها با کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی و جبران‌ساز جاذبه تفاوت چندانی ندارد اما بهره‌های کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی بسیار کوچک‌تر هستند که مزیت مهمی در پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده‌ها محسوب می‌شود. چرا که تولید بهره‌های بزرگ نیازمند طراحی مدارهای پیچیده‌تر و گران‌قیمت‌تر هستند.

۵-۵-۵ بحث و مقایسه نتایج

مهم‌ترین شاخصه برای ارزیابی و مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ها شامل دقت ردیابی مسیر، بیشترین تلاش کنترلی به کار گرفته شده، مقدار بهره‌های کنترل‌کننده، پیچیدگی و مدت زمان انجام محاسبات برای به دست آوردن خروجی کنترل‌کننده است. علی‌رغم اینکه پیچیدگی و مدت زمان انجام محاسبات در شبیه‌سازی چندان محسوس و حائز اهمیت نیست، اما در پیاده‌سازی عملی حجم محاسبات، نقش تأثیرگذاری در عملکرد سیستم کنترل دارد. چرا که به‌روزرسانی سریع خروجی کنترل‌کننده در سیستم-هایی که با سرعت بالا کار می‌کنند بسیار ضروری است. سرعت به‌روزرسانی تا حد زیادی وابسته به فرکانس ارسال بازخورد از سنسورها و سرعت دریافت و پردازش آن است. از طرفی تعداد و نوع سنسورها نیز نقشی تعیین‌کننده دارند. برای کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با توجه به ساختار آن، تنها اندازه‌گیری موقعیت ضرورت دارد و تنها با استفاده از بازخورد موقعیت، تابع جاذبه به راحتی محاسبه می‌شود. اما در پیاده‌سازی کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی علاوه بر موقعیت، به اندازه‌گیری سرعت حرکت در شش بعد نیاز است و از طرفی محاسبه ماتریس اینرسی و ماتریس کریولیس و گریز از مرکز نیز وابسته به بازخوردهای موقعیت و سرعت هستند. اندازه‌گیری سرعت حرکت هم از طریق سنسور و هم از طریق رویت‌گرهای حالت^۱ امکان‌پذیر است که استفاده از رویت‌گرها مرسوم‌تر هستند. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی به لحاظ پیچیدگی و سرعت انجام محاسبات نسبت به کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی مزیت بیشتری دارد با این حال سایر شاخصه‌ها برای این دو کنترل‌کننده می‌تواند تعیین‌کننده‌تر باشد.

به همین دلیل، در جدول ۵-۵ شاخصه‌های عملکرد هر دو کنترل‌کننده مقایسه و ارزیابی شده‌اند.

جدول ۵-۵ مقایسه شاخصه‌های عملکرد کنترل‌کننده‌ها

Controller	Max Position Error (m)	Max Orientation Error (rad)	Max Controller Effort (N)	Max Controller Gains
PD+Gravity	0.38	0.004	7316	3000

^۱ State Estimators(Observers)

SMC	0.05	0.000001	7591	5
-----	------	----------	------	---

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی با افزایش اندک بیشینه نیروی اعمال شده توانسته خطای ردیابی موقعیت و جهت‌گیری را به طور چشمگیری کاهش دهد و آن را به سطح قابل قبولی برای ردیابی مسیرهای مانورهای پرواز برساند. البته باید در نظر داشت که کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه برای تأمین همین دقت در ردیابی مسیر نیازمند افزایش چند برابری بهره‌های کنترلی و به طبع آن نیروی محرکه‌های ربات است. با توجه به اینکه در کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی بهره کنترل‌کننده مقادیر معمول و کوچک‌تری نسبت به کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه دارد بنابراین در پیاده‌سازی عملی ساده‌تر و مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. از طرفی ویژگی مقاوم بودن در کنترل‌کننده مد لغزشی نسبت به کنترل‌کننده کلاسیک تناسبی-مشتقی برای سیستم‌های غیرخطی و دارای عدم قطعیت مانند ربات‌های موازی تأثیرگذارتر بوده و به راحتی می‌تواند در برابر عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاش‌های خارجی کیفیت عملکرد ربات را حفظ کند. بنابراین استفاده از کنترل-کننده مقاوم مد لغزشی برای کنترل ربات موازی استوارت در شبیه‌سازی مانورهای پرواز انتخاب مناسب‌تری خواهد بود و نتیجه بهتری برای شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر پرواز آموزشی به دست می‌دهد.

فصل ششم:

تنظیم گیری و پیشنهادها

فصل ششم مطالب مطرح شده در فصل‌های پیشین تحقیق را در یک نگاه اجمالی مورد بررسی قرار داده و جمع‌بندی می‌کند. به این ترتیب دست‌آوردهای پژوهشی هر فصل به طور صریح و روشن معرفی شده و مجموعه این دست‌آوردها به عنوان یافته اصلی این تحقیق بیان می‌شود. در ادامه چالش‌ها و فرصت‌هایی که در بخش‌های مختلف تحقیق به وجود آمده است، بازنگری و بررسی می‌شوند تا با ارائه راه-کارهای مناسب راه‌گشای ادامه پژوهش برای دستیابی به نتایج بدیع‌تر و دقیق‌تر باشند.

۶-۱- جمع‌بندی و بیان دست‌آوردها

پژوهش حاضر با بیان کلیات و مفاهیم مقدماتی در بحث شبیه‌سازهای حرکتی در فصل اول آغاز شده و فضاسازی لازم برای ورود به موضوع شبیه‌سازهای پرواز را ایجاد کرده است. در ادامه با تکیه بر اهمیت و تاثیر استفاده از شبیه‌سازها، ارزش علمی و اهمیت این موضوع پژوهشی را متذکر شده است. همچنین در ادامه، اشاره‌ای به اهداف و نوآوری‌های دنبال شده در این تحقیق داشته است و ساختار کلی پایان‌نامه را در راستای تحقق اهداف پژوهش، تشریح کرده است.

پس از آن، فصل دوم را با مروری بر تاریخچه ظهور و توسعه شبیه‌سازهای حرکتی پرواز تا رسیدن به نمونه‌های امروزی این شبیه‌سازها آغاز کرده و بخش‌های اساسی یک شبیه‌ساز پرواز را برای رسیدن به نمونه تجاری توسعه‌یافته آن بیان کرده است. پس از آن، مرسوم‌ترین مکانیزم‌های سکوی حرکت را از لحاظ ساختاری و ویژگی‌های حرکتی با هم مقایسه کرده است. در انتهای فصل دوم، مانورهای پرواز را برای یک سکوی موازی حرکت معرفی کرده و حدود آن را در چند نمونه‌ی پیشین ارائه کرده است. فصل سوم با بیان تاریخچه کاربردی ربات موازی استوارت به عنوان سکوی حرکتی شبیه‌ساز پرواز آغاز شده و متداول‌ترین معماری‌های امروزی آن معرفی شده‌اند. سپس به ترتیب سینماتیک معکوس، سینماتیک مستقیم و ژاکوبین برای ساختار کلی ربات موازی استوارت تحلیل شده است. در ادامه فصل سوم، استاتیک و دینامیک ربات موازی استوارت بررسی شده و پس از آن فرم بسته معادلات دینامیکی ربات به دست آمده‌اند. در انتهای فصل سوم، مدل‌سازی ریاضی ربات که بر پایه معادلات دینامیکی به

دست آمده است، از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری اعتبار سنجی شده است. در ابتدای فصل چهارم، مقدمه‌ای در بحث طراحی بهینه ربات‌های موازی مطرح شده و در ادامه، با مطالعه فرصت‌ها و چالش‌ها، روشی تحلیلی-عددی برای به دست آوردن فضای کاری دوران ثابت ربات موازی استوارت ارائه شده است که می‌تواند به راحتی در تکرار حلقه‌های بهینه‌سازی استفاده شود.

پس از آن شاخص‌های ارزیابی مهارت و چالاک‌ی ربات در فضای کاری ربات به عنوان یکی از معیارهای بهینه‌سازی بررسی و معرفی شده‌اند. شاخص نسبی حجم نیز به عنوان معیار دوم بهینه‌سازی معرفی شده است. در انتهای فصل چهارم، براساس معیار چالاک‌ی و معیار نسبی حجم، یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه برای ربات موازی استوارت مطرح و حل شده است.

فصل پنجم از پژوهش حاضر، در ابتدا به بررسی تئوری و روش‌های طراحی مسیر حرکت ربات‌ها پرداخته و مسیری برای مانور حرکتی ربات در فضای کاری سکوی بهینه استوارت ارائه کرده است. پس از آن مقدمه‌ای در بحث کنترل ربات‌های موازی بیان کرده که در آن چالش‌های طراحی یک کنترل‌کننده کارآمد و قابل اطمینان را بررسی کرده است. در ادامه فصل پنجم، طراحی و تحلیل پایداری دو کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه و کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی را برای ربات بررسی کرده است.

در انتهای فصل پنجم نیز نتایج عملکرد دو کنترل‌کننده در ردیابی مسیر طراحی شده با هم مقایسه شده‌اند. در بیانی جامع و مختصر یافته‌های اصلی این پژوهش را می‌توان ابتدا ارائه روند و راه حلی کارآمد برای طراحی بهینه ربات موازی استوارت به عنوان سکوی حرکتی شبیه‌سازهای پرواز بر اساس معیار فضای کاری دوران ثابت و معیار چالاک‌ی بر شمرده. سپس تحلیل و تأمین کنترل‌پذیری، پایداری و ردیابی دقیق مسیر حرکت توسط کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با جبران‌ساز جاذبه و کنترل‌کننده مقاوم مد لغزشی دانست.

۶-۲- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

در این پژوهش مفاهیم و مراحل طراحی بهینه و کنترل ربات موازی استوارت به عنوان سکوی حرکتی یک شبیه‌ساز پرواز به صورت بنیادی تبیین و تشریح شده است. با این حال، بخش‌هایی در روند پژوهش وجود دارد که برای طراحی و تولید شبیه‌سازهای تجاری پرواز، شایسته نگاهی دقیق و ریز بینانه در قالب چند پژوهش مستقل هستند. از این رو در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

شبیه‌سازی فریب‌های حرکتی و نشانه‌های صوتی-تصویری از حرکت، موضوعی است که نیازمند توسعه یک فضای سه‌بعدی واقعیت مجازی است. به شکلی که در آن نشان‌های حرکت به صورت همگام با صدا و تصویر، پرواز در یک دنیای مجازی را برای خلبان تداعی کند. طراحی واقعیت مجازی همراه با فیلترهای واش‌آوت و پیاده‌سازی فریب‌های حرکتی و نشانه‌های بصری پرواز، زمینه مناسبی برای تحقیق و توسعه پژوهش حاضر در حوزه مهندسی کامپیوتر و نرم‌افزار است. همچنین طراحی و شبیه‌سازی کابین خلبان همراه با کلیه علائم و نشان‌گرهای وضعیت پرواز که برای تصمیم‌گیری خلبان در هدایت و ناوبری پرنده ضروری هستند، جزئیاتی هستند که عموماً در طراحی و ساخت شبیه‌سازهای تجاری پرواز مد نظر قرار می‌گیرند.

از آنجایی که استفاده از فریب‌های حرکتی برای حرکت‌های دورانی پرنده چندان میسر نیست به همین دلیل ضروری است که سکوی حرکتی قابلیت اجرای مانورهای دورانی را در بازه‌ای معین داشته باشد. برای طراحی بهینه یک سکوی حرکتی با فضای کاری انتقالی و دورانی معین و دلخواه، به دست آوردن فضای کاری عملی ربات با در نظر گرفتن قیود طول محرکه‌ها، محدوده حرکت مفاصل غیرفعال و عدم تداخل فیزیکی اجزای ربات مهم‌ترین و چالش برانگیزترین قدم است.

این مسئله همچنان به عنوان یک مسئله باز مطرح بوده و توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. وسعت و پیچیدگی آن سبب می‌شود که مطلوب مسئله با تعریف چند مسئله ساده‌تر به صورت سلسله‌مراتبی دنبال شود. در همین راستا به دست آوردن فضای کاری دوران ثابت ربات موازی

استوارت با در نظر گرفتن قید طولی محرکه‌ها به عنوان یکی از این سلسله مراتب در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه این سلسله مراتب، بدست آوردن فضای کاری دوران ثابت با اضافه کردن قیود محدوده حرکت مفاصل غیرفعال و تداخل فیزیکی میله‌ها به عنوان یک زمینه پژوهشی مهم پیشنهاد می‌شود. در انتهای این سلسله مراتب، بدست آوردن فضای کاری عملی عاری از تکینگی برای ربات موازی استوارت مطرح است که پس از مراتب پیشین، می‌تواند به عنوان یک موضوع تحقیقاتی جداگانه تعریف شود. البته باید متذکر شد که روش‌های حل این سلسله مراتب باید از نظر سرعت و دقت انجام محاسبات و به دست آوردن فضای کاری عملی قابل پیاده‌سازی در تکرار حلقه‌های بهینه‌سازی باشند.

پس از به دست آوردن فضای کاری عملی برای ربات‌های موازی، تعریف و حل مسئله بهینه‌سازی جدی‌ترین چالش پیش روست. تعریف مسئله بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس معیارهای مختلف و شکل‌دهی تابع هزینه در حل مسئله بهینه‌سازی و جواب‌هایی که به دست می‌دهد، بسیار موثر است. در پژوهش حاضر تابع هزینه به صورت یک تابع اسکالر از جمع وزن‌دار دو معیار چالاک‌کی و حجم نسبی شکل گرفته است. با این حال، تابع هزینه می‌توانست به صورت یک تابع برداری با دو خروجی تعریف شود و از روش‌های دیگر بهینه‌سازی چند هدفه مانند دستور $fminimax$ و $goalattainment$ در نرم‌افزار متلب برای حل آن استفاده شود. از این رو، حل همین مسئله با روش‌های مذکور و مقایسه نتایج حاصل از آنها با نتایج به دست آمده در این پژوهش به عنوان یک موضوع تحقیقاتی حائز اهمیت بوده و برای ادامه کار پیشنهاد می‌شود.

چالشی که در تعریف تابع اسکالر هزینه از جمع وزن‌دار دو معیار با تعبیر فیزیکی متفاوت به وجود می‌آید، دستیابی به میزان کاهش مطلوب برای هر یک از معیارهای بهینه‌سازی به صورت جداگانه است. اگر چه اهمیت و میزان تاثیر هر یک از معیارها بر اساس سهم هر معیار از مقدار تابع هزینه توسط وزن‌ها مشخص می‌شود با این حال، نیاز هست که علاوه بر وزن‌ها، خروجی معیارهایی که تابع هزینه را

تشکیل می‌دهند، نرمالیزه شوند. در پژوهش حاضر علی‌رغم اینکه وزن‌ها به صورت نرمالیزه در انجام بهینه‌سازی استفاده شده‌اند خروجی معیارها نرمالیزه نیستند بنابراین در ادامه پژوهش استفاده از معیارهای نرمالیزه در بهینه‌سازی به عنوان راه‌کاری برای دستیابی به نتایج بهتر توصیه می‌شود. در مسائل بهینه‌سازی که دو یا چند معیار از تابع هزینه در تقابل با یکدیگر عمل می‌کنند به این معنی که کاهش هر کدام از آنها منوط به افزایش دیگری است، دست یافتن به نقطه مینیمم مطلق برای هر دو تابع در آن واحد میسر نیست. در واقع در این نوع از مسائل، حل بهینه‌سازی از یک زیر فضای ممکن در بردار پارامترها، همواره به سمت یکی از نقاط بهینه پارتو^۱ همگرا می‌شود. مجموعه نقاط بهینه پارتو، سطحی را به نام پارتو فرانت^۲ تشکیل می‌دهند و در حقیقت رسیدن به هر یک از نقاط این سطح، وابسته به نقطه شروع در بهینه‌سازی است. مشخص کردن اینکه کدام یک از نقاط این سطح بهینه‌ترین پاسخ برای طراحی است به عهده یک تصمیم‌گیرنده^۳ خواهد بود.

در حقیقت طراح با قرار گرفتن در مقام تصمیم‌گیرنده با در نظر گرفتن خواسته‌های طراحی و تعابیر فیزیکی معیارهای بهینه‌سازی، بهترین جواب دلخواه را به عنوان حل مسئله بهینه‌سازی انتخاب می‌کند. در پژوهش حاضر اجرای بهینه‌سازی با وزن‌های مختلف هر بار به یک پاسخ بهینه پارتو همگرا شد و در نهایت از میان چندین پاسخ بدست آمده، بهترین مورد به عنوان حل مسئله بهینه‌سازی انتخاب شد. برای ادامه تحقیق، پیشنهاد می‌شود که سطح پارتو فرانت کاملاً به دست بیاید و با مقایسه کامل میان تمامی پاسخ‌های بهینه پارتو، بهترین جواب از نظر طراح مجدداً انتخاب گردد. نکته تأمل برانگیز دیگر، انتخاب زیر فضای تاثیر گذار از فضای برداری پارامترهای طراحی است. همانطور که نتایج بهینه‌سازی در این پژوهش نشان می‌دهد، ممکن است تغییر یک یا چند پارامتر از فضای برداری پارامترهای طراحی تاثیری در تغییر و کاهش تابع هزینه نداشته باشد. به همین دلیل با حذف این پارامترها و اجرای مجدد

^۱ Pareto Optimal Solution

^۲ Pareto Front

^۳ Decision Maker

بهینه‌سازی با بردار پارامترهای کاهش یافته، الگوریتم بهینه‌سازی با سرعت و دقت بیشتری به سوی مجموعه جواب‌های بهینه پارتو میل می‌کند. همچنین حذف پارامترهای اضافی طراحی باعث حذف پاسخ‌های نادرست که از تصویرسازی مسئله چند پارامتری به مسئله تک پارامتری به وجود می‌آیند، می‌شود.

در نتیجه برای ادامه کار به عنوان یک راه‌کار افزایش سرعت و دقت بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شود که موقعیت زاویه‌ای اتصال عملگرها به سکوی ثابت و متحرک به عنوان پارامترهای غیر تاثیر گذار از فضای برداری پارامترها حذف شده و نتایج به دست آمده با نتایج این پژوهش مقایسه شوند. همانطور که در بخش طراحی مسیر به نحوه تولید مسیر برای سکوی حرکتی شبیه‌سازهای پرواز اشاره شد، پرداختن به این موضوع با سلسله مراتب، تحلیل دینامیک پرنده، شبیه‌سازی دینامیک‌های داخلی پرنده مانند اثر پیش‌رانها و سکان هدایت، مدل‌سازی اثر اغتشاشی وضعیت آب و هوا، و در نهایت مدل‌سازی سیستم حلقه‌بسته کنترل پرواز^۱ با هدف پایدارسازی و ردیابی مسیر پرواز برای ادامه پژوهش پیشنهاد می‌شود.

^۱ Flight Control

پیوست‌ها

پیوست الف)

قاعده جابجایی ضرب داخلی و خارجی برای سه بردار a, b, c مطابق رابطه (الف-۱) و (الف-۲) بیان می‌شود:

$$a \cdot (b \times c) = (a \times b) \cdot c \quad \text{الف-۱}$$

$$a \times (b \times c) = (a \cdot c)b - (a \cdot b)c \quad \text{الف-۲}$$

پیوست ب)

عملگر $a_{\times}$ برای بردار $a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ مطابق رابطه (ب-۱) تعریف می‌شود. همچنین ضرب خارجی دو بردار a و $b = [b_x \ b_y \ b_z]^T$ را می‌توان بر اساس تعریف این عملگر با رابطه (ب-۲) انجام داد.

$$a^{\times} = a_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad \text{ب-۱}$$

$$a \times b = a_{\times} b = -b_{\times} a \quad \text{ب-۲}$$

فهرست مراجع

- [1] Allerton, David, "**Principles of flight simulation**", *John Wiley & Sons*, 2009.
- [2] A. T. Stoffregen, et al., "**Postural instability and motion sickness in a fixed-base flight simulator**", *Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 42, No.3, pp. 458-469, 2000.
- [3] M. Von der Heyde and E. R. Bernhard, "**How to cheat in motion simulation comparing the engineering and fun ride approach to motion cueing**", *Max-Planck*, 2001.
- [4] M. Barnett-Cowan and R. H. Laurence, "**Perceived timing of vestibular stimulation relative to touch, light and sound**" *Experimental brain research* , Vol. 198, No..2-3, pp. 221-231, 2009.
- [5] A. N. Meyer and D. R. Lloyd, "**Simulator motion-drive algorithms-A designer's perspective**" *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 13, No. 2, pp. 356-362, 1990.
- [6] D. Ariel and S. Raphael, "**False cue reduction in moving flight simulators**," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 665-671, 1984.
- [7] A. N. Pouliot and et al., "**Motion simulation capabilities of three-degree-of-freedom flight simulators**," *Journal of Aircraft*, Vol. 35, No. 1, pp. 9-17, 1998.
- [8] L. R. Page, "**Brief history of flight simulation**," *SimTecT 2000 Proceedings*, pp. 11-17, 2000.
- [9] J. Pradipta and et al., "**Development of a pneumatically driven flight simulator Stewart platform using motion and force control**," *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE, 2013.
- [10] H. B. Gu, D. S. Wu, and H. Liu, "**Development of a novel low-cost flight simulator for pilot training**," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 60, pp. 685-689, 2009.
- [11] A. Jaber, and et al., "**Design and Kinematic Analysis of A 4-Dof Serial-Parallel Manipulator for A Driving Simulator**," pp. 29-37, 2015.
- [12] **Full racing simulator**, "www.motionsimulation.com".

- [13] A. Pirouzfard and J. Enferadi, "**Introduction and Inverse Kinematic Analysis of A Parallel Manipulator for a Fast Boat Motion Simulator**", *Darya Fonoun*, No. 1, pp. 1-11, 2014.
- [14] **Motorcycle motion simulator**, "www.motorbikesimulator.com".
- [15] **Army tank motion simulator**, "www.pica.army".
- [16] D. M. Haward, "**The Sanders Teacher**", *Flight*, Vol. 2, No. 50, pp 1006-1007, 1910.
- [17] R. J. Yates, "**Management Problems with Simulators**", *International Simulation Conference*, Los Angeles, March, 1963.
- [18] P. Adorian, W. N. Staynes, and M. Bolton, "**The Evolution of Flight Simulators**", *Presented at the Royal Aeronautical Society Conference*, pp. 23-25, 1979.
- [19] G. Hellings and E.T. Emms, "**A Visual System for Flight Simulators**", *British Communications and Electronics*, Vol. 7, No. 5, pp. 334-337, 1960.
- [20] A. M. Spooner, "**Collimated Displays for Flight Simulation**" *Optical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp 215-219, 1976.
- [21] W. H. Dunn, C. Eldert, and P.V. Levonian, "**A Digital Computer for use in an Operational Flight Trainer**" *IRE Transactions on Electronic Computers*, pp 55-63, 1955.
- [22] A. E. Cutler, "**Environmental Realism in Flight Simulators**" *The Radio and Electronic Engineer*, pp 1-12, 1966.
- [23] R. J. A. W. Hosman, S. Advani, and N. Haeck, "**Integrated design of flight simulator motion cueing systems.**" *Royal Aeronautical Society Conference on Flight Simulation*, London. 2002.
- [24] Houck, Jacob A., Robert J. Telban, and Frank M. Cardullo. "**Developments in human centered cueing algorithms for control of flight simulator motion systems.**" *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, AIAA-99-4328 (1999).
- [25] Koekebakker, Sjirk Holger. "**Model based control of a flight simulator motion system**", *TU Delft, Delft University of Technology*, 2001.
- [26] Pamadi, Bandu N., et al. "**Aerodynamic characteristics, database development, and flight simulation of the X-34 vehicle.**" *Journal of Spacecraft and Rockets* 38.3 (2001): 334-344.
- [27] T. S. Daniels, and et al. "**Motion-based piloted flight simulation test results for a realistic weather environment.**" *2013 IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, IEEE, 2013.
- [28] M. Wentink, and et al. "**Design & evaluation of spherical washout algorithm for Desdemona simulator.**" *Proc. of AIAA Modeling and Simulation Technologies*, 2005.
- [29] P. R. Giordano and et al. "**A novel framework for closed-loop robotic motion simulation-Part II: Motion cueing design and experimental validation.**" *Robotics and Automation (ICRA)*, 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010.

فهرست مراجع

- [30] P. R. Giordano, and et al. "**A novel framework for closed-loop robotic motion simulation-Part I: Inverse kinematics design**", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2010.
- [31] N. Murgovski, "**Vehicle modelling and washout filter tuning for the chalmers vehicle simulator.**" *Lund University, IEA*. 2007.
- [32] M. Bruenger-Koch, "**Motion parameter tuning and evaluation for the DLR automotive simulator.**" *2005 DSC NA CD-ROM Proceedings*, 2005.
- [33] T. Chapron, and J. P. Colinot, "**The new psa peugeot-citroen advanced driving simulator overall design and motion cue algorithm.**" *Proceedings of Driving Simulation Conference*. 2007.
- [34] F. Colombet, and et al., "**Motion cueing: What is the impact on the driver's behavior.**" *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. 2008.
- [35] H. D. Taghirad, "**Parallel robots: mechanics and control**", *CRC press*, 2013.
- [36] A. Scamps, and P. Gibbens, "**Development of a Variable Stability Flight Simulator as a Research/Education Tool.**" *AIAA modeling and simulation technologies conference and exhibit*. 2003.
- [37] **Flight Simulators**, "www.ckas.com".
- [38] I.A. Bonev, "**The true origins of parallel robots**", <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>, January, 24, 2003.
- [39] C. W. French and et. al., "**Multi-axial subassemblage testing (MAST) system: Description and capabilities.** In *13th World Conf. on Earthquake Engineering*, pages 2146–51, Vancouver, Canada, August 2004.
- [40] V. E. Gough, "**Contribution to discussion of papers on research in Automobile Stability, Control and Tyre performance**". *Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng.*, pp. 392–394, 1956–1957.
- [41] K. L. Cappel, "**Motion simulator**", *US Patent No. 3,295,224*, January 3, 1967.
- [42] D. Stewart, "**A platform with six degrees of freedom**", *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, Vol. 180, No.1, pp. 371-386, 1965.
- [43] D. Lazard, and J. P. Merlet, "**The (true) Stewart platform has 12 configurations**", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1994.
- [44] J. P. Merlet, "**Parallel robots: open problems**" *Robotics Research-International Symposium*, Vol. 9, 2000.

- [45] D. Jakobović, and L. Jelenković, "**The forward and inverse kinematics problems for Stewart parallel mechanisms.**" *8th International Scientific Conference on Production Engineering (CIM 2002)*. 2002.
- [46] M. L. Husty, "**An algorithm for solving the direct kinematics of general Stewart–Gough platforms**", *Mechanics and Machine Theory*, Vol. 31, No. 4, pp. 365–379, 1996.
- [47] P. Dietmaier, "**The Stewart—Gough platform of general geometry can have 40 real postures**", *In Proceedings of ARK*, Strobl, Austria, pp. 7–16, 1998.
- [48] C. Innocenti, "**Forward kinematics in polynomial form of the general Stewart platform**", *Journal of Mechanism and Design*, Vol. 123, No. 2, pp. 254–260, 2001.
- [49] J. P. Merlet, "**Solving the forward kinematics of a Gough-type parallel manipulator with interval analysis**", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 3, pp. 221–235, 2004.
- [50] Z. Geng and L. S. Haynes. "**Neural network solution for the forward kinematics problem of a Stewart platform**", *Robotics Computation Integration Manufacturing*, Vol. 9, No. 6, pp. 485–495, 1992.
- [51] J. P. Merlet, "**Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots**", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 128, No. 1, pp. 199–206, 2006.
- [52] Z. Bingul, and O. Karahan, "**Dynamic modeling and simulation of Stewart Platform**", *INTECH Open Access Publisher*, 2012.
- [53] B. Dasgupta and T.S. Mruthyunjaya, "**A Newton–Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator**", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 33, No. 8, pp. 1135–1152, 1998.
- [54] C. C. Nguyen, and F. J. Pooran, "**Dynamic analysis of a 6 DOF CKCM robot end-effector for dual-arm tele-robot systems**", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 377–394, 1989.
- [55] J. Wang and C. M. Gosselin. "**A new approach for the dynamic analysis of parallel manipulators**", *Multibody System Dynamics*, Vol. 2, No. 3, pp. 317–334, 1998.
- [56] J. P. Merlet, "**Workspace-oriented methodology for designing a parallel manipulator**", *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Springer Netherlands, pp. 215–224, 1997.

- [57] J. P. Merlet, "**Designing a parallel manipulator for a specific workspace**" *International Journal of Robotics Research*, Vol. 16, No. 4, pp. 545-556, 1997.
- [58] R. E. Stamper, L. W. Tsai, and G. C. Walsh, "**Optimization of a three DOF translational platform for well-conditioned workspace**", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, pp. 3250-3255, 1997.
- [59] Y. Lou, G. Liu, N. Chen and Z. Li, "**Optimal design of parallel manipulators for maximum effective regular workspace**", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intel. Robots Syst. Alberta*, pp. 785-800, 2005.
- [60] M. Stock and K. Miller, "**Optimal kinematic design of spatial parallel manipulators: Application to linear delta robot**", *J. Mech. Design, T. ASME.*, Vol. 125, pp. 292-301, 2003.
- [61] X. J. Liu and J. S. Wang, "**A new methodology for optima kinematic design of parallel mechanisms**", *Mech. Mach. Theory.*, Vol. 42, pp. 1210-1224, 2007.
- [62] X.J Liu, J.S Wang and G. Pritschow, "**on the optimal kinematic design of the PRRRP 2-DoF parallel mechanism**", *Mech. Mach. Theory.*, Vol. 41, pp. 1111-1130. 2006.
- [63] F. Xie, L. Wang, X. J. Liu and J. S. Wang, "**Optimal kinematic design of the 4R 2-DOF parallel mechanism**", *Tsinghua Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 663-668, 2009.
- [64] X. J. Liu, J. S. Wang, K. K. Oh and J. Kim, "**A new approach to the design of a DELTA robot with a desired workspace**", *Journal Intelligent Robotic Systems*, Vol. 39, pp. 209-225, 2004.
- [65] O. Bohigas, M. Manubens, and L. Ros, "**A complete method for workspace boundary determination on general structure manipulators.**" *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 28, No. 5, pp. 993-1006, 2012.
- [66] J. P. Merlet, "**Geometrical determination of the workspace of a constrained parallel manipulator**", *Advances in Robot Kinematics*, Ferrare, Italy, Sept 7-9. 1992.
- [67] J. P. Merlet, "**Parallel robots**", *Solid Mechanics and Its Applications*, 2nd ed., Springer, The Netherlands, 2006.
- [68] J. P. Merlet, "**Determination of the orientation workspace of parallel manipulators**", *Journal of intelligent and robotic systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 143-160, 1995.

- [69] J. P. Merlet, "**Determination of 6D workspaces of Gough-type parallel manipulator and comparison between different geometries**", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 18, No. 9, pp. 902-916, 1999.
- [70] A. H. Karimi, M. T. Masouleh, and P. Cardou, "**Obtaining the Maximal Singularity-free Workspace of 6-UPS Parallel Mechanisms via Convex Optimization.**" *Computational Kinematics*. Springer Netherlands, pp. 239-247, 2014.
- [71] M. A. Mousavi, M. T. Masouleh, and A. H. Karimi, "**On the maximal singularity-free ellipse of planar 3-RPR parallel mechanisms via convex optimization.**" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 30, No. 2, pp. 218-227, 2014.
- [72] H. Bayani, and et al., "**On the determination of the maximal inscribed ellipsoid in the Wrench-Feasible Workspace of the cable-driven parallel robots.**" *Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014 Second RSI/ISM International Conference on*. IEEE, 2014.
- [73] M. A. Mousavi, A. H. Karimi, and M. T. Masouleh, "**On the approximated and maximal singularity-free workspace of 6-UPS parallel mechanisms using convex optimization.**" *Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2013 First RSI/ISM International Conference on*. IEEE, 2013.
- [74] A. H. Karimi, M. T. Masouleh, and P. Cardou, "**Singularity-free workspace analysis of general 6-UPS parallel mechanisms via convex optimization.**" *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 80, pp. 17-34, 2014.
- [75] C. Gosselin, "**Determination of the workspace of 6-DOF parallel manipulators**", *Journal of mechanical design*, Vol. 112, No.3, pp. 331-336, 1990.
- [76] J. K. Pickard, and J. A. Carretero, "**An Interval Analysis Method for Wrench Workspace Determination of Parallel Manipulator Architectures.**" *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 40, No. 2, 2016.
- [77] R. S. Novin, M. T. Masouleh, and M. Yazdani. "**A new neural gas network approach for obtaining the singularity-free workspace of 3-DOF planar parallel manipulators.**" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016.
- [78] I. A. Bonev, and J. Ryu, "**A new approach to orientation workspace analysis of 6-DOF parallel manipulators.**" *Mechanism and machine theory*, Vol. 36, No. 1, pp. 15-28. 2001.

- [79] H. Lipkin and J. Duffy, "**Hybrid twists and wrench control for a robotic manipulator**". *Transactions of ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 110, No. 2, pp. 138–144, 1988.
- [80] M. Tandirci, J. Angeles, and F. Ranjbaran, "**The characteristic point and characteristic length of robotic manipulator**", *In Proc. ASME 22nd Biennial Conf. Robot., Spatial Mech. Mech. Syst.*, Scottsdale, AZ, Sept. 13-16, pp. 203–208, 1992.
- [81] O. Ma and J. Angeles, "**Optimum architecture design of platform manipulators**", *In Proceedings of the Fifth International Conference on Advanced Robotics*, pp. 1130 – 1135, 1991.
- [82] C. Gosselin, and J. Angeles, "**A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators**", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 113, No. 3, pp. 220-226, 1991.
- [83] P. K. Jamwal, S. Hussain, and S. Q. Xie, "**Three-stage design analysis and multi criteria optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using genetic algorithm**". *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 1433-1446, 2015.
- [84] Z. Yang, S. Ming-Lei, and S. Dong-Ik, "**Kinematic Optimization of Parallel Manipulators with a desired workspace**." *Applied Mechanics & Materials*, 2015.
- [85] I. Fassi, G. Legnani, and D. Tosi, "**Geometrical conditions for the design of partial or full isotropic hexapods**", *Journal of Robotic Systems*, Vol. 22, No. 10, pp. 507-518, 2005.
- [86] R. Cao, F. Gao, Y. Zhang, and D. Pan, "**A key point dimensional design method of a 6-DOF parallel manipulator for a given workspace**", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 85, pp. 1-13, 2015.
- [87] T. Arai, K. Cleary, T. Nakamura, H. Adachi, and K. Homma, "**Design, analysis and construction of a prototype parallel link manipulator**", *In Intelligent Robots and Systems' 90. 'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS'90. IEEE International Workshop on*, IEEE. pp. 205-212, 1990.
- [88] F. Hao, J. P. Merlet, "**Multi-criteria optimal design of parallel manipulators based on interval analysis**", *Mechanism and machine theory*, Vol. 40, No. 2, pp. 157-171, 2005.
- [89] R. Kelaiaia, O. Company, and A. Zaatri, "**Multiobjective optimization of a linear Delta parallel robot**", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 50, pp. 159-178, 2012.

- [90] R. A. Waltz, J. L. Morales, J. Nocedal, and D. Orban, "**An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps**," *Mathematical Programming*, Vol. 107, No. 3, pp. 391–408, 2006.
- [91] J. C. Latombe, "**Robot motion planning**", Vol. 124, Springer Science & Business Media, 2012.
- [92] W. Sheng, and et al. "**Automated CAD-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces**", *Intelligent Robots and Systems, IROS Proceedings. IEEE/RSJ International Conference on*. Vol. 3. IEEE, 2000.
- [93] L. P. Tomás, and et al. "**Task-level planning of pick-and-place robot motions**" *Computer*, Vol. 22, No. 3, pp. 21-29, 1989.
- [94] L. P. Tomás, and L. P. Kaelbling, "**A constraint-based method for solving sequential manipulation planning problems**," *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2014.
- [95] K. Gupta, and A. P. Pobil, "**Practical motion planning in robotics: Current approaches and future directions**", John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [96] P. W. Caro, "**The relationship between flight simulator motion and training requirements**," *Human Factors*, Vol. 21, No. 4, pp. 493-501, 1979.
- [97] J. A. Schroeder, "**Helicopter flight simulation motion platform requirements**" 1999.
- [98] J. J. Craig, "**Introduction to robotics: mechanics and control**." Vol. 3. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [99] N. R. Jazar, "**Theory of applied robotics: kinematics, dynamics, and control**." Springer Science & Business Media, 2010.
- [100] R. J. Schilling, "**Fundamentals of robotics: analysis and control**." Simon & Schuster Trade, 1996.
- [101] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, "**Robot modeling and control**." Vol. 3. New York: wiley, 2006.
- [102] R. Bhattacharya, "**OPTRAGEN: A Matlab toolbox for optimal trajectory generation**." *Decision and Control*, 2006 45th IEEE Conference on. IEEE, 2006.
- [103] F. Fahroo, and I. M. Ross, "**Direct trajectory optimization by a Chebyshev pseudospectral method**." *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 1, pp. 160-166, 2002.

- [104] B. Kovács, and et al. "**A novel potential field method for path planning of mobile robots by adapting animal motion attributes.**" Robotics and Autonomous Systems, Vol. 82, pp. 24-34, 2016.
- [105] Zhou, Li, and Wei Li. "**Adaptive artificial potential field approach for obstacle avoidance path planning.**" Computational Intelligence and Design (ISCID), 2014 Seventh International Symposium on. Vol. 2. IEEE, 2014.
- [106] Zhao, C. J., and W. S. Cheung. "**Volume difference inequalities for the projection and intersection bodies.**" Bulletin of the Iranian Mathematical Society, Vol. 41, No. 3, pp. 581-590, 2015.
- [107] B. Danaei, N. Karbasizadeh, M. Tale Masouleh, "**A general approach on collision-free workspace determination via triangle-to-triangle intersection test,**" Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 44, No. 1, pp. 230-241, 2017.
- [108] I. Buzurovic, "**Advanced Control Methodologies in Parallel Robotic Systems.**" Adv Robot Autom, Vol. 6, No. 1, 2012.
- [109] B. Dasgupta and T. S. Mruthyunjaya. "**The Stewart platform manipulator: a review.**" Mechanism and machine theory, Vol. 35, No. 1, pp. 15-40, 2000.
- [110] Dongsu, Wu, and Gu Hongbin. "**Adaptive sliding control of six-DOF flight simulator motion platform.**" Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 20, No. 5, pp. 425-433, 2007.
- [111] M. Ghorbani, S. K. Hosseini Sani, "**Nonlinear model predictive control of Stewart platform 6 dof,**" Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 41-50, 2016 (in Persian).
- [112] J. J. E. Slotine and Weiping Li. "**Applied nonlinear control.**" Vol. 199. No. 1. Englewood Cliffs, NJ: prentice-Hall, 1991.

Abstract:

This thesis aims at the optimum design and control of the Stewart parallel manipulator as a motion platform of a flight simulator. A flight simulator's motion platform has to provide a specified translational-orientational workspace to resemble real flight in its range of motion for the pilot. Optimum design of the Stewart parallel manipulator for a desired workspace needs a fast and accurate method to determine workspace during optimization loops. Since the fact that workspace of the Stewart parallel manipulator is dependent in the two translational-orientational subspace. Usually workspace determination and design optimization of the robot is performed in the two subspace of constant-orientation translational workspace or constant-position orientational workspace sequentially.

In this Way, current research has proposed a fast and accurate method for constant-orientation workspace determination with integrating geometric and discretization methods. In the following optimum design problem of the Stewart parallel manipulator is demonstrated for a desired cubic shape in the constant orientation workspace. In the optimization problem relative volume of the desired workspace respect to the occupied volume of the robot in the home configuration is considered for physical size optimization. Also, dexterity analysis of the robot is included in the optimization process according to the condition number criterion. Multi-objective optimization problem of the robot is solved as a weighted sum of the mentioned criterions using MATLAB software and results are reported. Finally, proportional-derivative control method with gravity compensation and robust sliding mode control are designed and are simulated for optimized platform of the Stewart parallel manipulator.

Keywords:

Flight Motion Simulator, Stewart Parallel Robot, Kinematic Optimization, Constant-Orientation Work space, Dexterity Index, Path Planning, Sliding Mode Control



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

**Optimal Design and Control of the Stewart Parallel Robot Applicable
to Flight Simulator**

Shahram Yaghubi

Supervisor:

Dr. A. A. Pouyan

Adviser:

Dr. S. M. Varedi Koulayi

August 2017