

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه طراحی کاربردی

گرایش دینامیک ارتعاشات کنترل

تحلیل دینامیکی و پیاده سازی کنترلی ربات موازی فضایی 3PSS

نگارنده:

علی قاسمی

استادهای راهنما

دکتر مهدی بامداد

دکتر حبیب احمدی

استاد مشاور

دکتر مجتبی واردی کولائی

مهر ۱۴۰۰

شماره: ۲۰۹-۲۴/۲۰۱
تاریخ: ۲۷/۹/۱۴۰۰
ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای علی قاسمی با شماره دانشجویی ۹۶۳۵۱۴۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان تحلیل دینامیکی و پیاده سازی کنترلی ربات موازی فضایی 3PSS که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰		☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸	
☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶		☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴	
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد			
☒ نظری ☐ عملی			
نوع تحقیق:			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهدی بامداد	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر حبیب احمدی	دانشیار	
۳- استاد مشاور	دکتر سیدمجتبی واردی کولابی	استادیار	
۴- استاد داور اول	دکتر مصطفی نظری	استادیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر مسعود مهدی زاده رخی	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید علی سینا	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که هرچه دارم از اوست. به امید آن که توفیق یابم جز در راه آزادی و خدمت به کشورم نکوشم.

از همسر عزیزم نهایت تشکر را دارم که با صبوری و لطف انتهای ناپذیرش در تمامی مراحل این راه همیشه همگام، مشوق و دلگرمی من بوده و هست

و از عموی عزیزم که به سان پدری مهربان با نصیحت، راهنمایی و کمک‌های بی‌دریغش باعث قدم نهادنم در عرصه دانش شد.

در نهایت، کمال تشکر را دارم از استاد عزیز دکتر مهدی بامداد که زمینه ساز علاقه من به رشته تحصیلی و بانی تحصیل و علم‌اندوزی من در زمینه رباتیک شد و در تمامی مراحل پایان نامه مرا راهنمایی کرده و چراغ این مسیر را برایم روشن ساخت.

به امید آن که باعث سربلندی شما عزیزان باشم ...

علی قاسمی

۲۳ فروردین ۱۴۰۱

شاهرود

تعمدنامه

اینجانب **علی قاسمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته طراحی کاربردی - گرایش دینامیک ارتعاشات کنترل دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترومیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "تحلیل دینامیکی و پیاده سازی کنترلی ربات موازی فضایی 3PSS" تحت راهنمایی دکتر مهدی بامداد متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

ربات‌های موازی مکانیزم‌هایی با زنجیره سینماتیکی بسته هستند که در فرم‌های مختلف توسعه داده شده‌اند؛ این ربات‌ها دارای معادله‌های سینماتیکی و دینامیکی پیچیده هستند که کنترل آن‌ها را مشکل کرده‌است. ربات‌های موازی با سه درجه‌آزادی دورانی به‌خاطر سرعت بالا و دقت خوب مورد مطالعه و توجه بسیاری در صنعت و پزشکی هستند. در این پایان‌نامه ربات موازی فضایی 3PSS که دارای سه درجه‌آزادی دورانی است و عملگرهای پنوماتیکی آن روی صفحه ثابت قرار دارد، بررسی خواهد شد. ابتدا ربات در نرم‌افزار سالیدورک شبیه‌سازی می‌شود، روابط سینماتیک معکوس و مستقیم از روش تحلیل هندسی استخراج می‌شود، سپس با تحلیل سرعت ربات، ماتریس ژاکوبین و تحلیل تکینگی و فضای کاری تعیین خواهد شد. در ادامه معادله‌های دینامیکی حاکم بر سیستم به روش نیوتن-اولر استخراج شده‌است، روابط به دست‌آمده با شبیه‌سازی نرم‌افزاری اعتبار سنجی می‌شود. در نهایت از روش کنترل PID برای کنترل این ربات در ردیابی مسیر مرجع استفاده می‌شود.

کلمات کلیدی: ربات 3PSS، ربات موازی، ربات سه درجه‌آزادی، سینماتیک ربات، دینامیک ربات، اعتبار سنجی ربات، کنترل ربات

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱
۱-۱- معرفی ربات موازی 3PSS	۲
۲-۱- اهمیت ربات 3PSS	۱۰
۳-۱- اهداف تحقیق و نوآوری ها	۱۰
۴-۱- ساختار پایان نامه	۱۱
۲- سینماتیک ربات	۱۳
۱-۲- شرح مکانیزم	۱۴
۲-۲- هندسه ربات	۱۵
۳-۲- سینماتیک معکوس	۱۸
۴-۲- سینماتیک مستقیم	۲۱
۵-۲- اعتبارسنجی سینماتیک	۲۲
۳- ژاکوبین و استاتیک	۲۷
۱-۳- آنالیز ژاکوبین ربات 3PSS	۲۸
۱-۱-۳- سرعت حلقه بسته	۲۹
۲-۱-۳- ژاکوبین عملگرهای بازویی	۳۰
۳-۱-۳- ژاکوبین لینک غیر فعال	۳۰
۴-۱-۳- بررسی تکنیکی و فضای کاری ربات	۳۲
۲-۳- نیروی استاتیکی ربات 3PSS	۳۳
۴- دینامیک	۳۷

۳۸	۱-۴- فرمول نویسی دینامیکی
۳۸	۱-۱-۴- آنالیز شتاب
۳۹	۲-۴- فرمول نویسی دینامیک پاها
۴۱	۳-۴- فرمول نویسی دینامیک صفحه متحرک
۴۳	۵- طراحی مسیر و کنترل
۴۴	۱-۵- طراحی مسیر
۴۴	۱-۱-۵- چندجمله‌ای مکعبی
۴۵	۲-۱-۵- طراحی مسیر به روش چندجمله‌ای مکعبی و مقایسه با دینامیک ربات
۵۳	۳-۱-۵- چندجمله‌ای مرتبه پنج
۵۴	۴-۱-۵- طراحی مسیر به روش چندجمله‌ای مرتبه پنج و مقایسه با دینامیک ربات
۵۸	۵-۱-۵- طراحی مسیر به روش چندجمله‌ای مرتبه پنج و مقایسه با مدل CAD ربات
۶۹	۲-۵- کنترل سیستم
۷۷	۶- نتیجه گیری و پیشنهادها
۷۸	۱-۶- نتیجه‌گیری
۷۹	۲-۶- پیشنهادها
۸۱	۷- مراجع
۸۵	۸- پیوست‌ها

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱) ربات ردیاب کانتربری [۱۲].....	۳
شکل (۲-۱) ربات آم‌نی [۱۳].....	۴
شکل (۳-۱) ربات موازی 3-PUS&S [۱۵].....	۵
شکل (۴-۱) ربات موازی استوارت با شش درجه‌آزادی [۲۳].....	۶
شکل (۵-۱) ربات شانه‌ای [۲۰].....	۷
شکل (۶-۱) ربات 3-DoFs RPM سوار شده روی لوکوموتیو اصلی در خط مونتاژ [۳۰].....	۸
شکل (۷-۱) ربات 3-DoFs RPM [۳۰].....	۹
شکل (۸-۱) اولین نمونه ربات 3PSS [۳۶].....	۱۰
شکل (۱-۲) مدل CAD ربات 3PSS در الف) وضعیت اولیه و ب) وضعیت باز بودن کامل عملگرها. ۱۵.....	۱۵
شکل (۲-۲) مدل هندسی ربات موازی 3PSS.....	۱۶
شکل (۳-۲) هندسه ربات در حالت باز شدن کامل عملگرها.....	۱۹
شکل (۴-۲) رابطه هندسی بین بردارهای پای ربات.....	۲۰
شکل (۵-۲) یک مسیر ساده θ_x سینماتیک مستقیم و θ_{xd} خروجی مدل CAD.....	۲۳
شکل (۶-۲) یک مسیر ساده θ_y سینماتیک مستقیم و θ_{yd} خروجی مدل CAD.....	۲۳
شکل (۷-۲) یک مسیر ساده θ_z سینماتیک مستقیم و θ_{zd} خروجی مدل CAD.....	۲۴
شکل (۸-۲) حل سینماتیک معکوس برای ربات 3PSS با مسیر داده شده.....	۲۴
شکل (۹-۲) دقت سینماتیک مستقیم و معکوس ربات 3PSS.....	۲۵
شکل (۱-۳) فضای کاری ربات.....	۳۳
شکل (۲-۳) دیاگرام آزاد برای استاتیک.....	۳۴
شکل (۱-۴) دیاگرام آزاد پاها و مجری نهایی ربات.....	۴۰
شکل (۱-۵) شتاب معادله چندجمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۱-۵).....	۴۸
شکل (۲-۵) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله‌ای مکعبی برای جدول (۱-۵).....	۴۸

- شکل (۳-۵) شتاب معادله چندجمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۳-۵) ۵۰
- شکل (۴-۵) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله ای مکعبی برای جدول (۳-۵) ... ۵۰
- شکل (۵-۵) شتاب معادله چندجمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۵-۵) ۵۲
- شکل (۶-۵) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله ای مکعبی برای جدول (۵-۵) ... ۵۳
- شکل (۷-۵) شتاب معادله چندجمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۱-۵) ۵۴
- شکل (۸-۵) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله ای مکعبی برای جدول (۱-۵) ... ۵۵
- شکل (۹-۵) شتاب معادله چندجمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۳-۵) ۵۶
- شکل (۱۰-۵) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله ای مکعبی برای جدول (۳-۵) ۵۶
- شکل (۱۱-۵) شتاب معادله چندجمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۵-۵) ۵۷
- شکل (۱۲-۵) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله ای مکعبی برای جدول (۵-۵) . ۵۸
- شکل (۱۳-۵) جابجایی دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۱-۵) ۵۹
- شکل (۱۴-۵) خطای بین جابجایی دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۱-۵) ۵۹
- شکل (۱۵-۵) سرعت دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۱-۵) ۶۰
- شکل (۱۶-۵) خطای بین سرعت دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۱-۵) ۶۰
- شکل (۱۷-۵) شتاب دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۱-۵) ۶۱
- شکل (۱۸-۵) خطای بین جابجایی دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۱-۵) ۶۱
- شکل (۱۹-۵) جابجایی دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۳-۵) ۶۲
- شکل (۲۰-۵) خطای بین جابجایی دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۳-۵) ۶۳
- شکل (۲۱-۵) سرعت دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۳-۵) ۶۳
- شکل (۲۲-۵) خطای بین سرعت دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۳-۵) ۶۴
- شکل (۲۳-۵) شتاب دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۳-۵) ۶۴
- شکل (۲۴-۵) خطای بین شتاب دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۳-۵) ۶۵
- شکل (۲۵-۵) جابجایی دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵) ۶۶
- شکل (۲۶-۵) خطای بین جابجایی دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵) ۶۶
- شکل (۲۷-۵) سرعت دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵) ۶۷
- شکل (۲۸-۵) خطای بین سرعت دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵) ۶۷

شکل (۵-۲۹) شتاب دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵).....	۶۸
شکل (۵-۳۰) خطای بین شتاب دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵).....	۶۸
شکل (۵-۳۱) PID فیدبک کنترل	۷۱
شکل (۵-۳۲) ردیابی نقطه شروع دوران یاو در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر	۷۱
شکل (۵-۳۳) ردیابی نقطه شروع دوران پیچ در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر	۷۲
شکل (۵-۳۴) ردیابی نقطه شروع دوران رول در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر	۷۲
شکل (۵-۳۵) ردیابی مسیر دورانی یاو طی شده در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر	۷۳
شکل (۵-۳۶) ردیابی مسیر دورانی پیچ طی شده در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر	۷۴
شکل (۵-۳۷) ردیابی مسیر دورانی رول طی شده در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر	۷۴
شکل (۵-۳۸) خطای ردیابی بین مسیرهای دورانی طی شده در مدل CAD و PID کنترلر	۷۵
شکل (۸-۱) مشخصات ربات موازی 3PSS	۸۵

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۳) مشخصات فیزیکی ربات 3PSS	۳۵
جدول (۱-۵) ورودی‌های داده‌شده به عملگرهای خطی ربات در سالی‌دورک برای مسیر اول	۴۶
جدول (۲-۵) مشخصات لحظه t_0 و t_f گرفته شده از مدل سالی‌دورک ربات برای مسیر اول	۴۶
جدول (۳-۵) ورودی‌های داده‌شده به عملگرهای خطی ربات در سالی‌دورک برای مسیر دوم	۴۹
جدول (۴-۵) مشخصات لحظه t_0 و t_f گرفته شده از مدل سالی‌دورک ربات برای مسیر دوم	۴۹
جدول (۵-۵) ورودی‌های داده‌شده به عملگرهای خطی ربات در سالی‌دورک برای مسیر سوم	۵۱
جدول (۶-۵) مشخصات لحظه t_0 و t_f گرفته شده از مدل سالی‌دورک ربات برای مسیر سوم	۵۱

١- مقدمه

۱-۱- معرفی ربات موازی 3PSS

علت به وجود آمدن ربات‌های موازی، پخش کردن کار روی لینک‌ها و حل کردن برخی از مشکل‌هایی است که در سیستم‌های سری دیده می‌شود. این مزیت‌ها منجر به توزیع نیروی بهتر و دارا بودن سرعت‌ها و شتاب‌های بالاتر در این ربات‌ها می‌شود. از سوی دیگر، فضای کاری محدودتر، روابط سینماتیک مستقیم پیچیده و تحلیل‌های دینامیکی دشوارتر، از جمله معایب ربات‌های موازی می‌باشد. بار خارجی به طور معمول روی صفحه متحرک قرار می‌گیرد. این صفحه می‌چرخد و جابه‌جا می‌شود؛ پایه ممکن است کاملاً منفعل یا فعال باشد و ممکن است به وسیله موقعیت یا نیرو و یا ترکیبی کنترل شود. بسیاری از مطالعات راجع به دوران وضعی یا^۱ یا دوران وضعی رول^۲ معطوف شده‌است [۱، ۲]؛ اما چند مقاله هم متمرکز روی دوران وضعی پیچ^۳ شده‌اند. از سوی دیگر به تازگی دستگاه‌ها و پروتکل‌های پیچیده‌تری برای ارزیابی کردن واکنش به آشفتگی‌های چند محوری پیشنهاد شده‌اند [۳، ۴]. به ویژه، کارپنتر و هم‌کاران اظهار داشتند که ارتعاش تحمیل شده به دوران وضعی پیچ جفت‌شده با دوران وضعی رول انحراف اساسی در تفاوت شناسایی مشاهده‌پذیری الگوهای فعال‌سازی است [۵]. درنیک و هم‌کاران یک صفحه چهار درجه‌آزادی را ارائه کردند که سطح کف برای تجزیه و تحلیل و مطالعه موقعیت طراحی شده‌است [۶، ۷]. سیستم تعادل دینامیکی PROPRIO 5000 دستگاهی که در ابتدا برای ورزشکاران طراحی شده بود، حرکت‌های دورانی پیچ و رول را امکان‌پذیر می‌کند و می‌تواند برای پیش‌بینی حرکت، حرکت تصادفی با سرعت متغیر و دامنه حرکت برنامه‌ریزی شود [۸]. کارن^۴، متشکل از یک ربات استوارت هم‌گام شده با یک محیط کامل واقعیت مجازی است که؛ اجازه می‌دهد هدف روی پایه متحرک قرار گیرد و می‌تواند برنامه‌ریزی شود که حول هر محور دلخواه دوران کند [۹].^۵ ROTOPOD، دارای ساختار مکانیکی مشابه بوده و علاوه بر آن دوران کامل و پیوسته حول محور عمودی دارد [۱۰]. مزایای اصلی هر دو ربات موازی، دقت بالا و ظرفیت بارگذاری هستند و معایب آن‌ها، کاهش و ناهمسان‌گردی فضای کاری است. واضح است یک صفحه مشخص شده به وسیله شش درجه‌آزادی می‌تواند هر الگوی حرکتی دلخواه را انجام دهد و چنین وسیله‌ای می‌تواند به طور موثر در زمینه‌های مختلف نه تنها به

^۱ Yaw

^۲ Roll

^۳ Pitch

^۴ CAREN

^۵ Parallel Robotics Systems Corporation

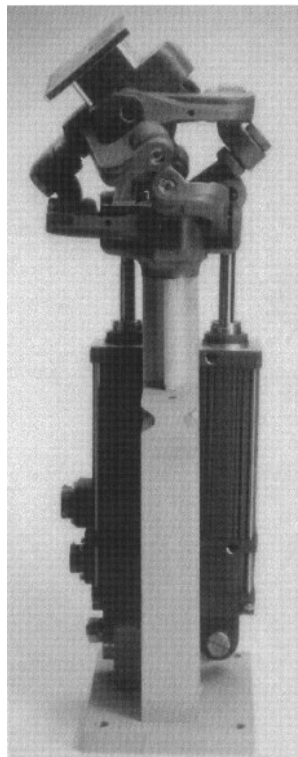
عنوان یک شبیه‌ساز حرکت برای ارزیابی‌ها بلکه برای برنامه‌های واقعیت مجازی مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه پاتانه و هم‌کاران یک پلت‌فرم جدید طراحی کردند، که نمایان‌گر تلفیقی بین دستگاه‌های شرح داده شده است [۱۱]. در این ربات آن‌ها، تصمیم به بهبود یک دستگاه مشخص همراه با ضوابط طراحی زیر گرفتند: (۱) کاملاً حرکتی؛ (۲) سه درجه آزادی دورانی هم‌زمان رول، پیچ و یاو حول یک نقطه ثابت؛ (۳) ماکزیمم دامنه از ۱۰- تا ۱۰ درجه برای هر محور؛ (۴) ماکزیمم سرعت از حداقل ۵۰ درجه بر ثانیه؛ (۵) ارتفاع کم و (۶) قابل پیکربندی هندسی مجدد مطابق با فضای کاری برای زمینه‌های مختلف کاربرد. در نهایت هدف آن‌ها توصیف این ربات موازی جدید، برای ارزیابی دقت جهت‌گیری به‌عنوان تابعی از زمان و توصیف یک کاربرد بالینی مطرح از این ربات در موقعیت دینامیکی بود.

در سال‌های اخیر بازوهای موازی دورانی به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه و در زمینه‌های گسترده‌ای مثل جوشکاری و رنگ‌آمیزی، دستگاه‌های اشاره‌گر، دستگاه‌های جراحی با حداقل تهاجم، میچ دست و... استفاده شده‌اند.



شکل (۱-۱) ربات ردیاب کانتربری [۱۲]

در شکل (۱-۱) ربات ردیاب کانتربری^۱ برای ردیابی ماهواره است [۱۲]. این مکانیزم برای اتصال پایه ثابت به سه بازو خود از مفصل لولایی^۲ فعال استفاده می‌کند. سه پای بالایی ربات برای اتصال به صفحه متحرک^۳ از سه مفصل لولایی غیرفعال بهره می‌برد و در نهایت اتصال بین این سه پای پایینی ربات و پاهای بالایی به وسیله مفصل کرووی اتفاق می‌افتد. مرکز صفحه متحرک نیز به وسیله مفصل کرووی به پایه ثابت متصل است بنابراین دودرجه آزادی نسبت به پایه خواهد داشت. در شکل (۲-۱) ربات مچ، پایه سنسور آمنی^۴ که ساز و کار مجری نهایی^۵ آن شبیه به گیمبال^۶ می‌باشد را مشاهده می‌کنیم [۱۳].



شکل (۲-۱) ربات آمنی [۱۳]

پیکربندی‌های متفاوت ربات 6PUS و 6PSS برای شبیه‌ساز فک مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۴]. در

^۱ Canterbury tracker

^۲ revolute joint

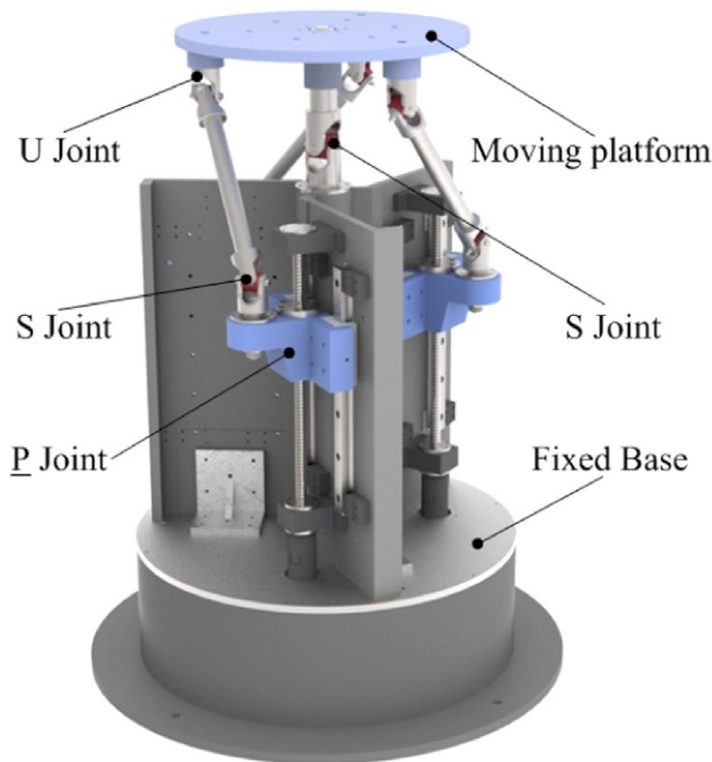
^۳ moving platform

^۴ Omni

^۵ end effector

^۶ gimbal

این ربات‌ها از مفاصل S (کروی)^۱، U (یونیورسال)^۲ و P (کشویی)^۳ و جک‌های بادی استفاده می‌شود. بازوهای موازی دورانی سه درجه‌آزادی با استفاده از چندین بازوی حلقه‌باز برای پیوند یک سکوی متحرک و یک سکوی ثابت شکل (۳-۱) به‌تازگی مورد توجه دانشگاه و صنعت قرار گرفته است [۱۵].



شکل (۳-۱) ربات موازی 3-PUS&S [۱۵]

در سه دهه گذشته ربات‌های موازی یکی از مهم‌ترین موضوعات تحقیقاتی در زمینه رباتیک بوده‌اند. در یک ربات موازی صفحه متحرک به‌وسیله پاها به پایه ثابت متصل است. در این ربات حداقل تعداد پاها با آزادی صفحه متحرک یکی است و هر پا توسط بیشتر از یک محرک هدایت نمی‌شود و همه‌ی محرک‌ها می‌توانند نزدیک یا روی پایه ثابت نصب شوند. در حال حاضر این ربات‌ها در برنامه‌های کاربردی مثل ربات‌های حسگر نیرو، دستگاه‌های موقعیت‌یابی و کاربردهای پزشکی استفاده می‌شوند [۱۶، ۱۷].

در تحقیقات، بیشتر ربات‌های شش درجه‌آزادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۸]؛ به هر حال ربات‌های با سه درجه‌آزادی برای برنامه‌هایی که ربات شش درجه‌آزادی شکل (۴-۱) مورد نیاز نیست مانند

^۱ Spherical

^۲ Universal

^۳ Prismatic

ماشین آلات سرعت بالا استفاده می شوند.

به تازگی ربات با سه درجه آزادی با بیش از سه پا مورد بررسی قرار گرفته است که پای اضافی به طور مجزا تابع عملکرد محدود در افزایش پیچیدگی مکانیکی است [۱۹]. این ربات سه درجه آزادی با عملکرد هیدرولیکی توسط هیوارد [۲۰] طراحی شده که در شکل (۵-۱) دیده می شود. ایده طراحی ربات زیستی از شانه^۱ انسان گرفته شده است، ویژگی های جالب این مکانیزم و شباهت آن به شانه انسان طراحی آن را منحصر به فرد کرده است که می تواند به عنوان پایه برای بررسی و تحقیقات ربات موازی مفید باشد [۲۱]. [۲۲].



شکل (۴-۱) ربات موازی استوارت با شش درجه آزادی [۲۳]

به مدل سازی سینماتیکی کامل و تحلیل ژاکوبین این مدل ربات توجه زیادی نکرده اند و هنوز به عنوان یک مشکل در تحقیقات ربات موازی در نظر گرفته می شود [۲۴]. مشخص است که برخلاف ربات های سری برای ربات های موازی، سینماتیک معکوس معمولاً ساده تر و سرراست تر است. در بیشتر موارد ممکن است متغیرهای مشترک به طور مستقل با استفاده از مشخصات موقعیت صفحه متحرک محاسبه

^۱ shoulder

شوند و راه حل این مسائل در بیشتر موارد مشخص است.



شکل (۵-۱) ربات شانه‌ای [۲۰]

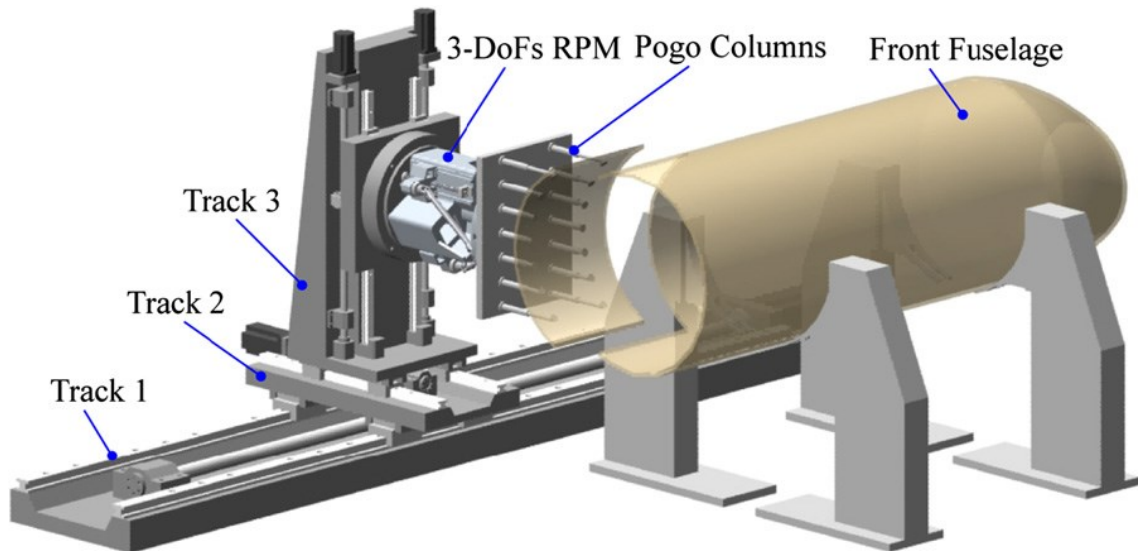
اما به طور کلی سینماتیک ربات موازی بسیار پیچیده است. راه حل معمول این سیستم‌ها حل معادلات غیرخطی است که بسیار در هم تنیده شده‌اند و راه حل به فرم بسته و منحصر به فردی ندارند. موارد متعددی هم وجود دارد که حل این مسائل به طور ویژه برای این مورد به دست آمده است [۲۵-۲۹].

در فرآیند مونتاژ سازه‌های بزرگ برای مثال اتصال بدنه جلو و میانی هواپیما در خط تولید مسئله چالش برانگیزی است. چنین کارهایی بیشتر به وسیله بالابرهایی که در امتداد یک دروازه بزرگ حرکت می‌کنند انجام می‌شود؛ که نه تنها ایمنی، کیفیت بهره‌وری و قابلیت اطمینان لازم را ندارد بلکه مساحت زیادی را اشغال می‌کند و بسیار بی‌ثبات است.

یکی از راه‌های حل این موضوع استفاده از لوکوموتیوهای بزرگ برای جابجایی افقی در خط تولید که روی آن یک دکل بالابر برای جابجایی خطی عمودی نصب شده است و در امتداد آن ربات 3-DoFs^۱ با تجهیزات قابل تنظیم است می‌باشد؛ در این سیستم مکانیزم و قطعه مونتاژی به هم متصل

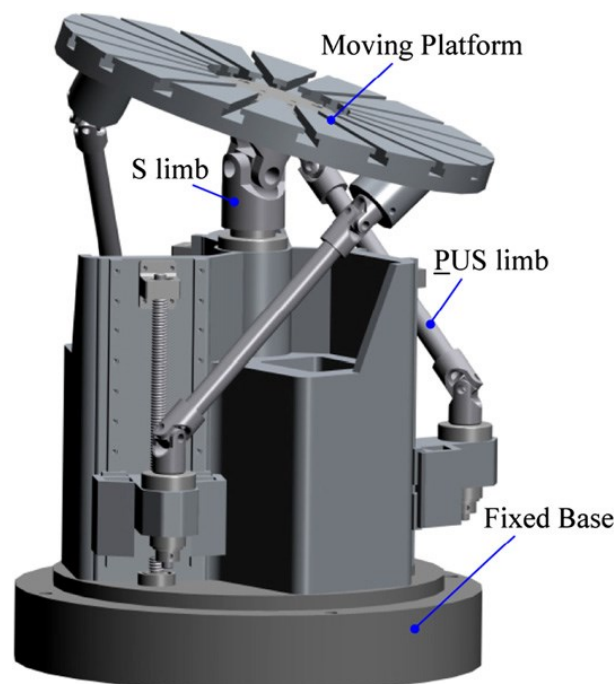
^۱ 3 degree of freedom rotational parallel mechanism

هستند و با هم حرکت می‌کنند [۳۰]. در شکل (۶-۱) ربات در حال جابجایی قطعه مونتاژی برای قرارگیری دقیق روی بدنه میانی و پانچ شدن را مشاهده می‌کنید.



شکل (۶-۱) ربات 3-DoFs RPM سوار شده روی لوکوموتیو اصلی در خط مونتاژ [۳۰]

در شکل (۷-۱) مکانیزم ربات 3-DoFs RPM شامل سه عملگر خطی که برای اتصال آن‌ها به پاهای میانی از سه مفصل کرووی استفاده شده‌است را مشاهده می‌کنیم. برای اتصال پاها به صفحه متحرک سه مفصل یونیورسال به کار برده شده‌است و در نهایت برای اتصال هریک از پاها به صفحه متحرک از مفصل یونیورسال استفاده شده‌است. برای اتصال صفحه متحرک به پایه ثابت نیز از یک مفصل کرووی استفاده شده‌است. این ربات به شکلی طراحی شده‌است که سه درجه‌آزادی دورانی دارد.



شکل (۷-۱) ربات 3-DoFs RPM [۳۰]

سختی بالا، دقت خوب و کارایی دینامیکی بهتر باعث شده تا این بازوهای موازی به طور بالقوه در زمینه‌های ردیابی و موقعیت‌یابی استفاده شوند [۲۳، ۳۱، ۳۲]. ربات 3PSS که در شکل (۸-۱) اول بار توسط پاتانه و همکاران ساخته شده که سینماتیک معکوس از طراحی و سینماتیک مستقیم را با حل عددی استخراج کرده‌اند [۳۳-۳۵]. حرکت‌های دورانی خالص وقتی با سرعت بالا هم‌زمان می‌شود قابلیت‌های منحصر به فردی را برای ربات موازی ایجاد می‌کند که سابقاً در ربات‌های خطی با درجات آزادی انتقالی وجود داشت. بنابراین پرداختن به دینامیک این ربات به لحاظ در نظر گرفتن شتاب‌های بالا و سرعت‌های قابل توجه در کنار معادلات غیرخطی سیستم بادی ارزشمند است. برای ربات مذکور سابقه‌ای از این حیث وجود ندارد. تنها کنترلی که روی این ربات پیاده‌سازی شده است استراتژی کنترل امپدانس است که براساس سینماتیک این ربات طراحی شده است [۳۶].



شکل (۸-۱) اولین نمونه ربات 3PSS [۳۶]

۲-۱- اهمیت ربات 3PSS

ربات 3PSS به لحاظ مکانیزم ویژه خود کاربرد گسترده‌ای در شرایط ویژه و حساسی مانند پایه ماهواره و موقعیت یابی، مونتاژ و میکرومونتاژ در خط تولیدهای حساس که نیاز به سرعت، دقت و صحت بالایی دارند، ماشین‌آلات سرعت بالا و دوران پنل‌های خورشیدی بسیار ایده‌آل هست و می‌تواند در شرایط‌های کاری مختلف با دقت و سرعت بالای خود با قدرت مانور بالاتر و دوران بیشتر سیستم را به نقطه هدف برساند.

۳-۱- اهداف تحقیق و نوآوری‌ها

باتوجه به گستره وسیع استفاده از ربات‌های موازی با سه درجه‌آزادی دورانی در صنعت، پزشکی، توان‌بخشی و تحقیق‌های دانشگاهی همچنان به مدل‌سازی سینماتیکی، تحلیل ژاکوبین و تحلیل دینامیکی و در نهایت کنترل‌های مبتنی بر دینامیک این ربات‌ها توجه زیادی نشده‌است و بیشتر مدل‌سازی‌های موجود مبتنی بر حل عددی است.

ربات موازی 3PSS سرعت و شتاب بالایی نیاز دارد؛ لذا عملکرد دینامیکی ربات از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی در ربات موازی 3PSS، فضای کاری نسبت به ربات‌های سری محدود می‌باشد؛ از این‌رو

با تمرکز بر دو حوزه سینماتیک و دینامیک، رفتار عملکردی ربات در فضای کار مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور انجام تحلیل سینماتیک، با استفاده از روش هندسی، معادلات قید استخراج و سپس با تحلیل سرعت، ماتریس‌های ژاکوبین تعیین شده‌اند. فضای کار ربات با لحاظ نمودن معادلات قید و محدودیت مفاصل به صورت جستجوی نقطه به نقطه فضا، به دست آمده و با مطالعه ماتریس‌های ژاکوبین معکوس و مستقیم، وضعیت و نوع تکیه‌گی‌ها درون فضای کار تعیین شده است. در ادامه، معادلات دینامیکی حاکم بر ربات به روش نیوتن استخراج، و نتایج حل مسائل سینماتیک و دینامیک با خروجی شبیه‌سازی مکانیزم در نرم‌افزار سالیدورک اعتبارسنجی شده است.

در این تحقیق سعی شده است پس از اندازه‌گیری دقیق ربات موازی موجود در آزمایشگاه این مدل در نرم‌افزار سالیدورک با همان شرایط موجود از نظر وزن و ابعاد شبیه‌سازی شود.

تمامی تحلیل‌های گفته شده در زمینه سینماتیک، استاتیک و دینامیک سیستم به صورت معادلاتی ارائه می‌شود و در نهایت پس از مدل‌سازی در نرم‌افزار متلب با خروجی‌های مدل سالیدورک آن مقایسه و اعتبار سنجی می‌شود.

پس از بررسی روابط و خطاهای آنها یک کنترلر برای کنترل موقعیت این ربات طراحی می‌شود و این کنترلر با مدل‌سازی اعتبار سنجی می‌شود.

۴-۱- ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم این پایان‌نامه تحلیل سینماتیکی انجام شده و پس از به دست آوردن سینماتیک معکوس و روابط حاکم بر آن؛ سینماتیک مستقیم بررسی می‌شود، در نهایت مدل‌سازی سینماتیکی با شبیه‌سازی مقایسه و اعتبار سنجی می‌شود.

در فصل سوم تحلیل و بررسی ژاکوبین و استاتیک ربات موازی 3PSS ارائه می‌شود. پس از به دست آوردن این معادلات تمامی آن‌ها مدل‌سازی و با شبیه‌ساز اعتبار سنجی می‌شوند.

در فصل چهارم ابتدا شتاب سیستم تحلیل می‌شود و روابط حاکم استخراج شده، سپس دینامیک ربات و پاها به صورت یک رابطه بیان می‌شود؛ برای اعتبار سنجی مدل‌سازی دینامیکی با شبیه‌سازی ربات مقایسه و بررسی می‌شود.

در فصل پنجم پیاده‌سازی کنترلی بر روی مدل دینامیکی انجام می‌شود و یک مسیر دلخواه که در بر دارنده تمامی دوران‌های موجود ربات است هم‌زمان روی مدل سیمولینک در متلب و شبیه‌سازی سالی‌دورک بررسی می‌شود.

۲- سیمائیک ربات

در این بخش به تجزیه و تحلیل سینماتیکی ربات موازی 3PSS با سه درجه آزادی دورانی می‌پردازیم. تحلیل سینماتیکی ربات به مطالعه هندسی ربات بدون در نظر گرفتن نیروها و گشتاورهای موثر در حرکت اشاره دارد.

تحلیل سینماتیکی ربات‌ها از پایه‌ای‌ترین مسائل مورد بررسی در علم رباتیک است. در تحلیل سینماتیک، هندسه حرکت اجزا مختلف ربات و رابطه آن‌ها (صرف نظر از نیروی به وجود آورنده حرکت‌ها) بررسی می‌شوند. در ربات موازی برخلاف ربات‌های سری تحلیل سینماتیکی وارون ساده‌تر است و عموماً، روابط مستقلی بین هریک از پارامترهای مفصلی و موقعیت مجری نهایی به دست می‌آید [۳۷].

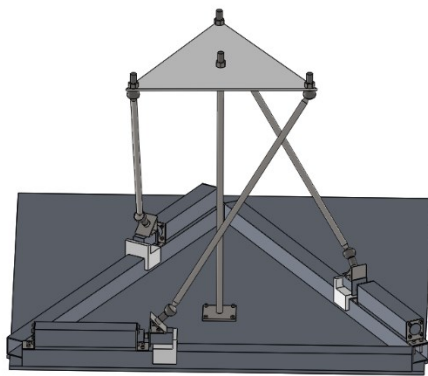
سینماتیک معکوس ربات‌های موازی از پیچیدگی خاصی که در سینماتیک مستقیم وجود دارد برخوردار نیست و قابل محاسبه‌تر است؛ اما سینماتیک مستقیم در این مکانیزم‌ها از جمله مسائل باز محسوب می‌شود [۱۷].

در این تحلیل، پارامترهای هندسی ربات همراه با حرکت نهایی صفحه متحرک آنالیز و محاسبه می‌شود. یک ربات موازی مکانیزمی با چند زنجیره سینماتیکی بسته است و صفحه متحرک و صفحه ثابت به وسیله چندین زنجیره سینماتیکی به هم متصل هستند؛ ابتدا ساختار سینماتیکی مکانیزم توضیح داده خواهد شد و سپس هندسه سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. بعد از آن سینماتیک معکوس و سینماتیک مستقیم حل شده و دقت حل سینماتیک مستقیم بررسی می‌شود.

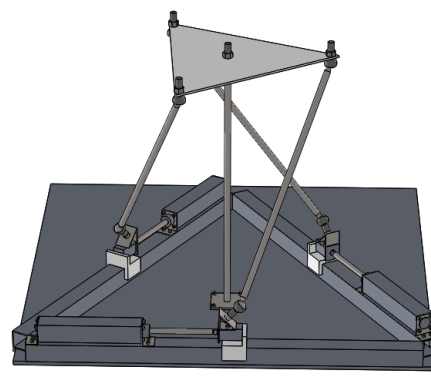
۲-۱- شرح مکانیزم

در این بخش، سینماتیک ربات موازی سه درجه آزادی با عملگرهای یک درجه آزادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ربات دارای یک صفحه متحرک $\{B\}$ هست که به وسیله سه مفصل کروی به سه پای متحرک متصل می‌شود. این سه پا واسط اتصال صفحه متحرک و عملگرها هستند. از سمت دیگر عملگرها نیز به وسیله سه مفصل کروی به پاهای ربات متصل می‌شوند. این سه عملگر روی سه ضلع مثلث صفحه ثابت پایین $\{A\}$ متصل شده است. یک پای ثابت نیز به وسیله مفصل کروی به مرکز صفحه متحرک متصل می‌شود، تا جابه‌جایی ربات موازی را محدود به درجه آزادی دورانی نماید.

در مدل سالیدورک نشان داده شده در شکل (۱-۲) تصویری از دوران و خروج کامل عملگرها نشان داده شده است. جک‌های پنوماتیک به عنوان عملگر در صفحه ثابت قرار دارند و به وسیله دو مفصل کروی و یک لینک به صفحه متحرک متصل شده‌اند. ربات موازی 3PSS از روی نمونه ساخته شده با ابعاد مشخص و وزن دقیق لینک‌ها در نرم‌افزار سالیدورک مدل‌سازی و در نهایت برای اعتبار سنجی بخش‌های مختلف پایان نامه از آن استفاده گردیده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱-۲) مدل ربات 3PSS در (الف) وضعیت اولیه و (ب) وضعیت باز بودن کامل عملگرها

۲-۲- هندسه ربات

شکل (۲-۲) یک مدل هندسی از ربات 3PSS را نشان می‌دهد. پارامترهای سینماتیکی را می‌توان به صورت زیر مشخص کرد:

برای دوران صفحه متحرک از ماتریس های دورانی حول محورها که به شکل زیر تعریف می شوند بهره می بریم:

$$R_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_x & -s\theta_x \\ 0 & s\theta_x & c\theta_x \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

$$R_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} c\theta_y & 0 & s\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_y & 0 & c\theta_y \end{bmatrix}$$

$$R_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} c\theta_z & -s\theta_z & 0 \\ s\theta_z & c\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

علاوه بر این ماتریس دوران ${}^A R_B$ برای مشخص کردن موقعیت صفحه متحرک بر حسب صفحه ثابت استفاده می شود:

$$\begin{aligned} {}^A R_B &= R_z(\theta_z) R_y(\theta_y) R_x(\theta_x) \\ &= \begin{bmatrix} c\theta_z c\theta_y & c\theta_z s\theta_y s\theta_x - s\theta_z c\theta_x & c\theta_z s\theta_y c\theta_x + s\theta_z s\theta_x \\ s\theta_z c\theta_y & s\theta_z s\theta_y s\theta_x + c\theta_z c\theta_x & s\theta_z s\theta_y c\theta_x - c\theta_z s\theta_x \\ -s\theta_y & c\theta_y s\theta_x & c\theta_y c\theta_x \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-2)$$

زاویه های θ_x ، θ_y و θ_z به ترتیب زوایه های دوران صفحه متحرک نسبت به محوره های ثابت X ، Y و Z

که بر روی صفحه متحرک ثابت هستند. به علاوه $c\theta$ و $s\theta$ به ترتیب کوتاه شده ی نمادهای مثلثاتی

$\cos(\theta)$ و $\sin(\theta)$ می باشند. از طرفی درست است که زاویه اوایلر برای نشان دادن دوران رول، یاو و پیچ

صفحه متحرک مناسب هستند اما برای حل سینماتیک مستقیم زیاد مناسب نیست. برای ماتریس دوران

مفصل های کروی طبق [۳۸] از سه مفصل دوتایی عمود برهم استفاده می کنیم. ماتریس دوران، برای

دوران مرکز مفصل کروی پایه ثابت با مختصات جاری uvw نسبت به صفحه متحرک با مختصات جاری

XYZ به صورت زیر تعریف میشود:

$$R_{uvw}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = R_u(\theta_1)R_v(\theta_2)R_w(\theta_3) \quad (5-2)$$

$$= \begin{bmatrix} c3c2 & -s3c2 & s2 \\ s3c1 + c3s2s1 & c3c1 - s3s2s1 & -c2s1 \\ s3s1 - c3s2c1 & c3s1 + s3s2c1 & c2c1 \end{bmatrix}$$

۲-۳- سینماتیک معکوس

آنچه که سینماتیک معکوس نامیده می‌شود، رابطه‌ای است که متغیرهای فضای مفصل‌ها را برحسب متغیرهای فضای کاری بیان کند. یا به عبارت دیگر، بیان طول تغییر جک‌ها براساس موقعیت قرارگیری صفحه متحرک است [۳۹].

در این بخش هدف به‌دست آوردن معادله تغییر طول عملگرها برحسب تابعی از تغییر زاویه‌های صفحه متحرک یعنی θ_x ، θ_y و θ_z هست. مطابق شکل (۲-۳) معادله حلقه بسته برای هر پای متصل کننده عملگر به صفحه متحرک ربات به صورت زیر است:

$$\vec{D}_i = d_i \hat{u}_{di} = {}^A P + {}^A P_{bi} - \vec{h}_i \quad (6-2)$$

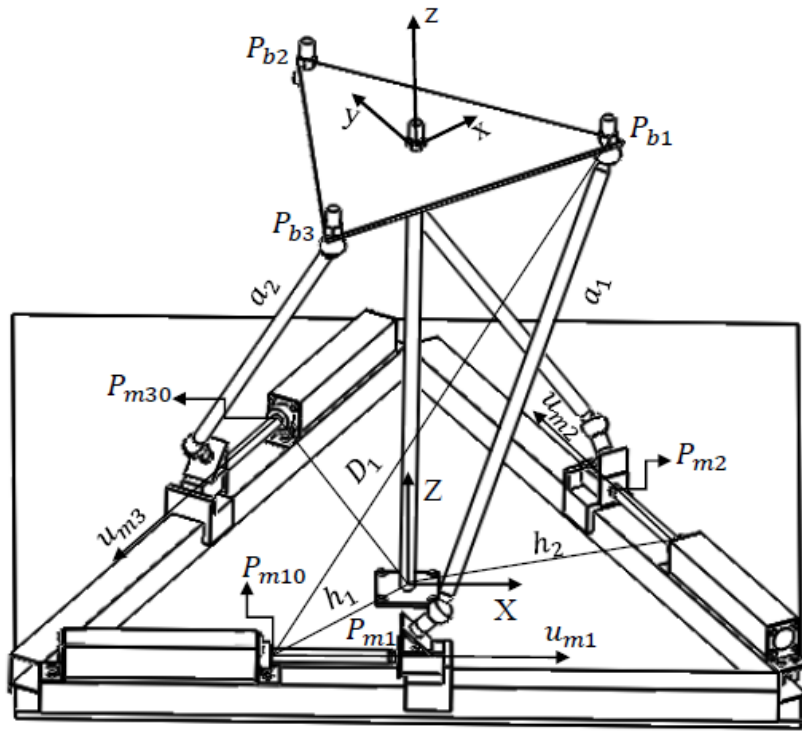
از طرفی طبق رابطه بین مختصات متحرک و ثابت داریم:

$${}^A P_{bi} = {}^A R_B {}^B P_{bi} \quad (7-2)$$

با جایگذاری (۷-۲) در (۶-۲) داریم:

$$\vec{D}_i = d_i \hat{u}_{di} = {}^A P + {}^A R_B {}^B P_{bi} - \vec{h}_i \quad (8-2)$$

که در آن d_i فاصله ابتدای عملگر i ام از صفحه متحرک در نقطه P_{bi} نسبت به مختصات ثابت هست، $\hat{u}_{di}$ بردار یکه راستای d_i است، ${}^A R_B$ ماتریس دوران صفحه متحرک و ${}^A P$ بردار موقعیت مرکز ربات است.



شکل (۳-۲) هندسه ربات در حالت باز شدن کامل عملگرها

$${}^A P = R_{uvw} [0 \quad 0 \quad l_p]^T \quad (۹-۲)$$

در نتیجه ${}^A P$ به شکل معادله:

$${}^A P = l_p [s2 \quad -c2s1 \quad c2c1]^T \quad (۱۰-۲)$$

نمایش داده می‌شود. علاوه بر این همان‌طور که در شکل (۲-۲) مشخص است بردارهای $\vec{h}_i$ و $\overrightarrow{P^B P_{bi}}$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\vec{h}_1 = l_b [s\beta c(\alpha - 120) \quad s\beta s(\alpha - 120) \quad c\beta]^T \quad (۱۱-۲)$$

$$\vec{h}_2 = l_b [s\beta c\alpha \quad s\beta s\alpha \quad c\beta]^T$$

$$\vec{h}_3 = l_b [s\beta c(\alpha + 120) \quad s\beta s(\alpha + 120) \quad c\beta]^T$$

9

$$\overrightarrow{P^B P_{b1}} = l_d [c\gamma \quad s\gamma \quad 0]^T \quad (۱۲-۲)$$

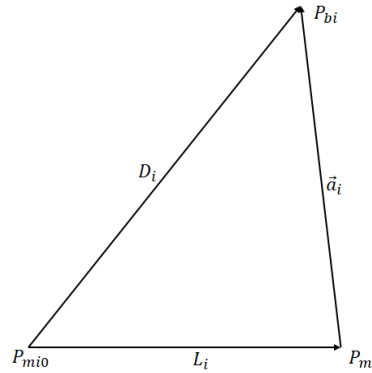
$$\overrightarrow{P^B P_{b2}} = l_d [c(\gamma + 120) \quad s(\gamma + 120) \quad 0]^T$$

$$\overrightarrow{P^B P_{b3}} = l_d [c(\gamma - 120) \quad s(\gamma - 120) \quad 0]^T$$

طول d_i از رابطه زیر به دست می آید:

$$D_i^T D_i = d_i^2 = [{}^A P + {}^A R_B {}^B P_{bi} - \vec{h}_i]^T [{}^A P + {}^A R_B {}^B P_{bi} - \vec{h}_i] \quad (۱۳-۲)$$

حال برای محاسبه d_i برحسب زاویه های θ_x ، θ_y و θ_z به دلیل گستردگی از نرم افزار استفاده می شود که مقادیر d_1 ، d_2 و d_3 در بخش پیوست ها آورده شده است.



شکل (۴-۲) رابطه هندسی بین بردارهای پای ربات

پس از به دست آوردن مقادیر d_i از رابطه (۱۳-۲) برای به دست آوردن تغییر طول جک ها طبق شکل (۴-۲) داریم:

$$\vec{D}_i = \vec{L}_i + \vec{a}_i \quad (۱۴-۲)$$

حال از طرفی برای بردار $\vec{a}_i$ می توان نوشت:

$$\vec{a}_i = a_i \hat{u}_{ai} = {}^A R_B {}^B P_{bi} - P_{mi} \quad (۱۵-۲)$$

و با توجه به تغییر طول جک ها در راستای u_{mi} می توانیم بردار تغییر طول جک را به صورت:

$$\vec{L}_i = l_i \hat{u}_{mi} \quad (۱۶-۲)$$

پس رابطه (۱۴-۲) به صورت پایین بازنویسی می شود

$$l_i \hat{u}_{mi} = d_i \hat{u}_{di} - a_i \hat{u}_{ai} \quad (۱۷-۲)$$

پس در نهایت رابطه (۸-۲) در رابطه (۱۷-۲) جایگذاری می‌شود و سینماتیک معکوس ربات موازی 3PSS را به شکل زیر می‌توان نوشت:

$$l_i \hat{u}_{mi} = {}^A P + {}^A R_B {}^B P_{bi} - \vec{h}_i - a_i \hat{u}_{ai} \quad (۱۸-۲)$$

که بردار یک‌ه‌های $\hat{u}_{mi}$ دارای جهت‌های ثابتی هستند و همانطور که در شکل (۲-۲) راستای آن‌ها هم‌جهت با عملگرها می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\hat{u}_{m1} = [1 \ 0 \ 0]^T \quad (۱۹-۲)$$

$$\hat{u}_{m2} = \left[-\cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \ \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \ 0 \right]^T$$

$$\hat{u}_{m3} = \left[-\cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \ -\sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \ 0 \right]^T$$

$$l_i = ({}^A P + {}^A R_B {}^B P_{bi} - \vec{h}_i) \cdot \hat{u}_{mi} - a_i \hat{u}_{ai} \cdot \hat{u}_{mi} \quad (۲۰-۲)$$

بنابراین تغییر طول عملگرها از رابطه (۲۰-۲) به صورت تابعی از دوران‌های صفحه متحرک به دست می‌آید.

۴-۲- سینماتیک مستقیم

استخراج مختصات صفحه متحرک در صورت معلوم بودن تغییر طول جک‌ها در سینماتیک مستقیم ربات بررسی می‌شود. پیچیدگی این مسئله در بیشتر ربات‌های موازی مشاهده می‌شود. سینماتیک مستقیم ربات‌های موازی توسط روش‌های مختلف عددی و تحلیلی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. مطابق مطالعات انجام شده از روش‌های مختلف، آن‌چه که مشهود است عدم یکتایی حل این مسئله و وجود جواب‌های مختلف برای آن است [۴۰].

در تجزیه و تحلیل سینماتیک مستقیم ربات موازی 3PSS باید تمام دوران‌های ممکن صفحه متحرک برای یک مجموعه معین از تغییر طول جک‌ها را پیدا کنیم. ممکن است از معادله‌های (۲۰-۲) برای به‌دست آوردن حل سینماتیک مستقیم ربات 3PSS به عنوان ورودی عملگرها استفاده کنیم. در حقیقت

ما با حل این سه معادله غیر خطی، ورودی عملگر ربات را با توجه به تغییرات داده شده در صفحه متحرک به دست آورده‌ایم.

برای حل سینماتیک مستقیم بخاطر گسترده بودن ترم‌های موجود در سینماتیک معکوس صرفاً به حل عددی بسنده کرده و آن را به وسیله مقایسه نمودارهای دوران صفحه متحرک ربات در فضای سالی‌دورک و معادلات شبیه‌سازی شده در متلب اعتبارسنجی کرده که در بخش بعد به توضیح آن می‌پردازیم.

۲-۵- اعتبارسنجی سینماتیک

باتوجه به مدل سالی‌دورک برای اعتبار سنجی سینماتیک معکوس و مستقیم به این ترتیب عمل شد که ابتدا در نرم افزار سالی‌دورک به عملگرها یک سری از داده‌های حرکتی l_1 ، l_2 و l_3 داده می‌شود و سپس فایل اکسل دوران صفحه متحرک یعنی زاویه‌های θ_x ، θ_y و θ_z گرفته می‌شود. این خروجی نرم افزار سالی‌دورک به عنوان ورودی مرجع یعنی θ_{xd} ، θ_{yd} و θ_{zd} به معادلات سینماتیک معکوس شبیه‌سازی شده در متلب داده شد. سپس مقادیر تغییر طول عملگر l_1 ، l_2 و l_3 به عنوان ورودی معادلات سینماتیک مستقیم ربات دوباره به مدل سینماتیکی شبیه‌سازی شده متلب وارد شد و زاویه‌های θ_x ، θ_y و θ_z محاسبه می‌شود، بعد از آن این زاویه‌ها و زاویه‌های خوانده شده از مدل سالی‌دورک θ_{xd} ، θ_{yd} و θ_{zd} در شکل (۲-۵) و شکل (۲-۶) و شکل (۲-۷) آورده شده است. بعد از آن هم خطای بین مدل سالی‌دورک و سینماتیک ربات موازی 3PSS در شکل (۲-۹) گزارش شده است.

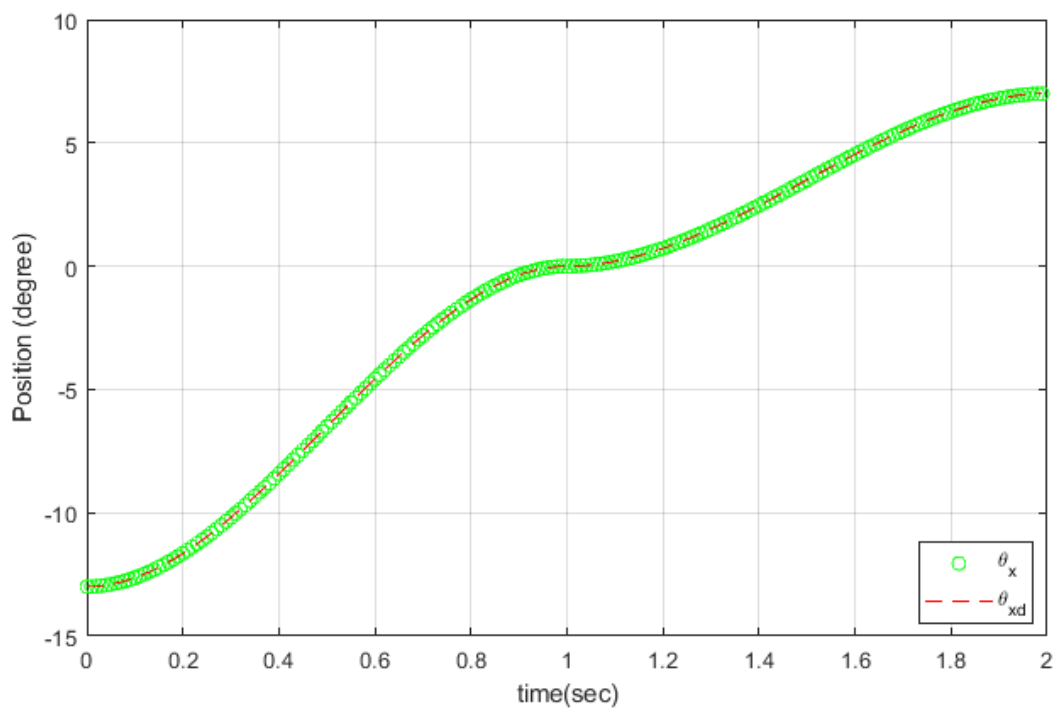
$$e_\theta = \theta_d - \theta \quad (2-21)$$

$$\theta_d = [\theta_{xd}, \theta_{yd}, \theta_{zd}]^T \quad (2-22)$$

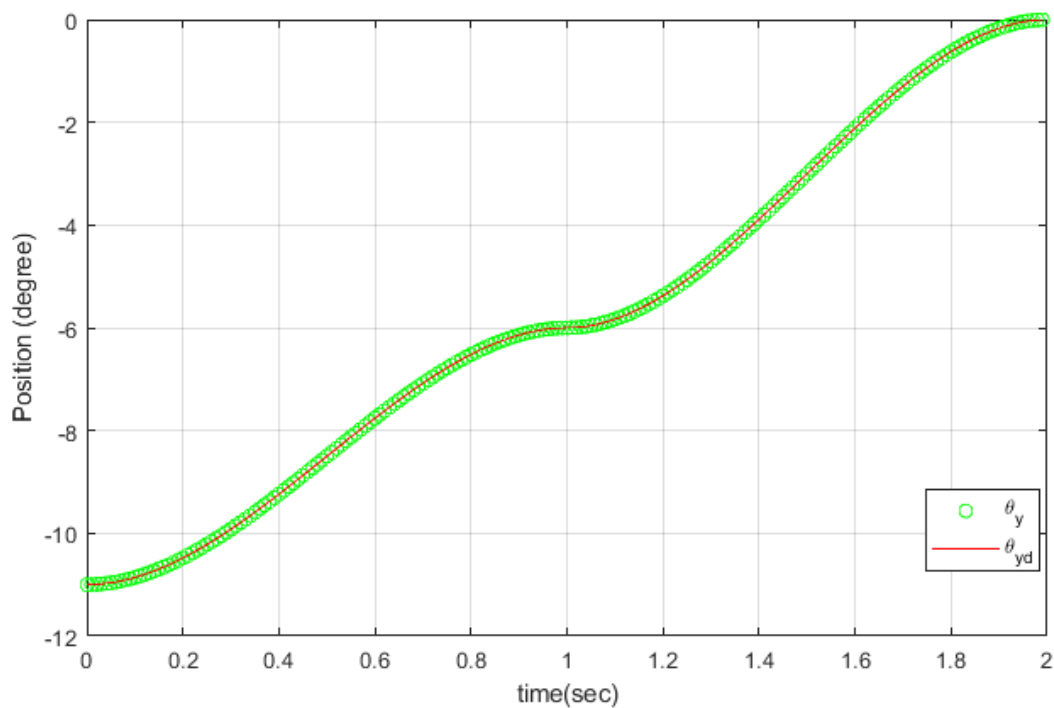
$$\theta = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]^T \quad (2-23)$$

در معادله (۲-۲۱) منظور از θ_d دوران‌های صفحه متحرک در نرم‌افزار سالی‌دورک است و θ نیز دوران‌های صفحه متحرک باتوجه به معادله‌های شبیه‌سازی شده در نرم افزار متلب است.

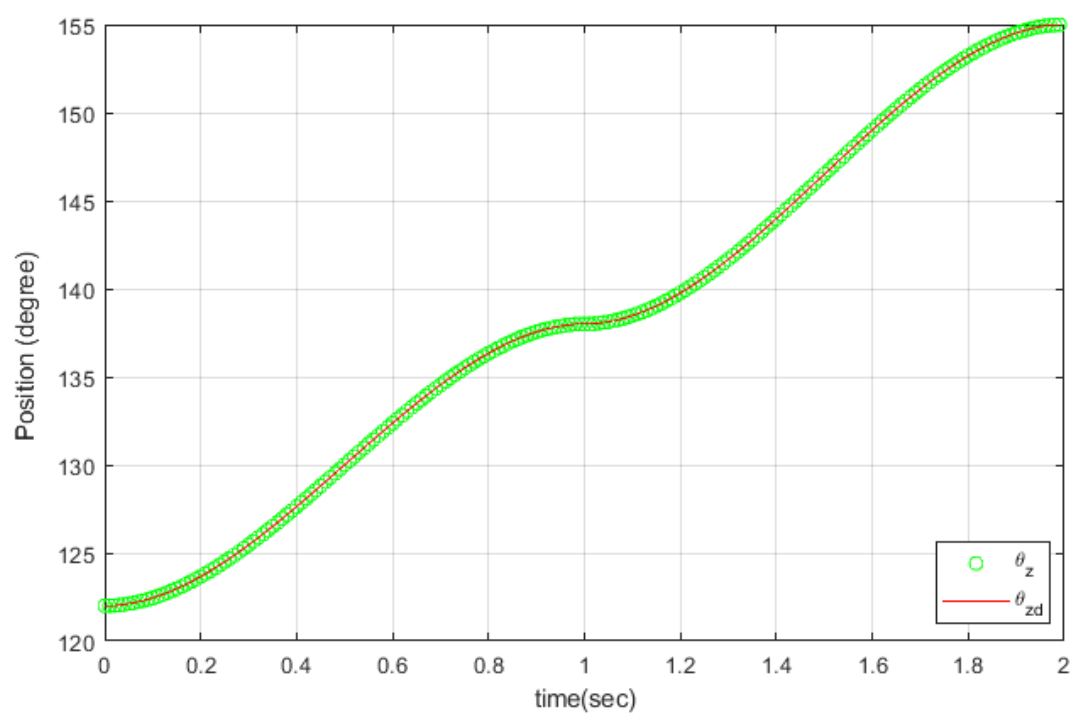
همانطور که در شکل (۲-۵) مشاهده می‌کنید دوران یاو سینماتیک مستقیم محاسبه شده در نرم افزار متلب با دوران یاو که از سالی‌دورک روی هم قرار گرفته اند و خطای آن صفر درجه است.



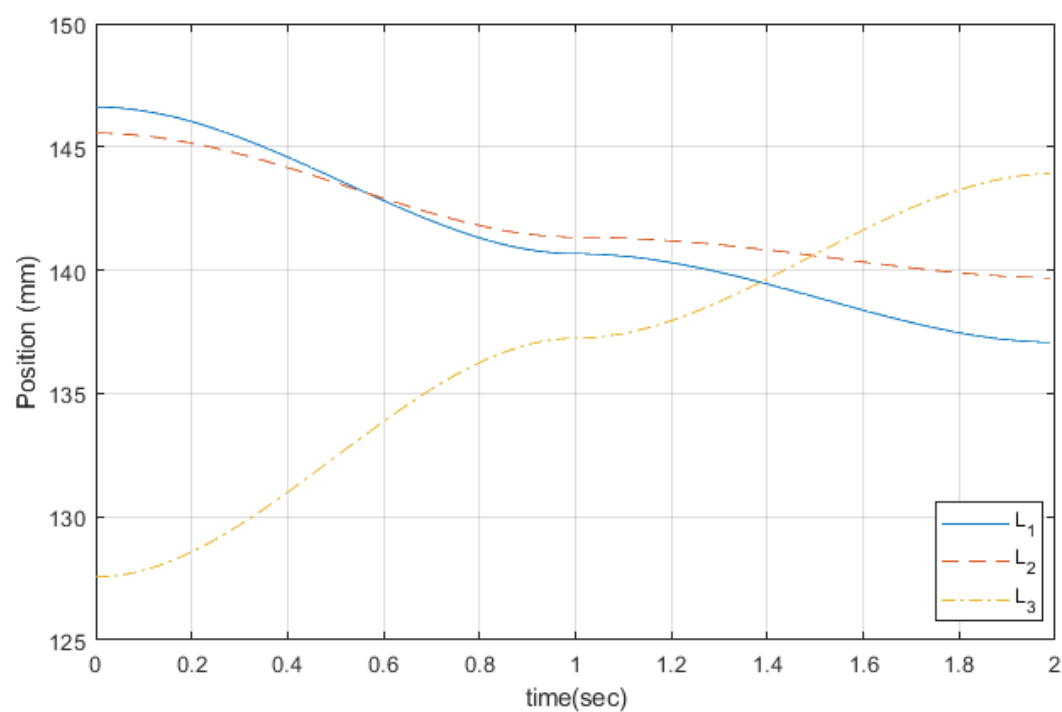
شکل (۵-۲) یک مسیر ساده θ_x سینماتیک مستقیم و θ_{xd} خروجی مدل CAD



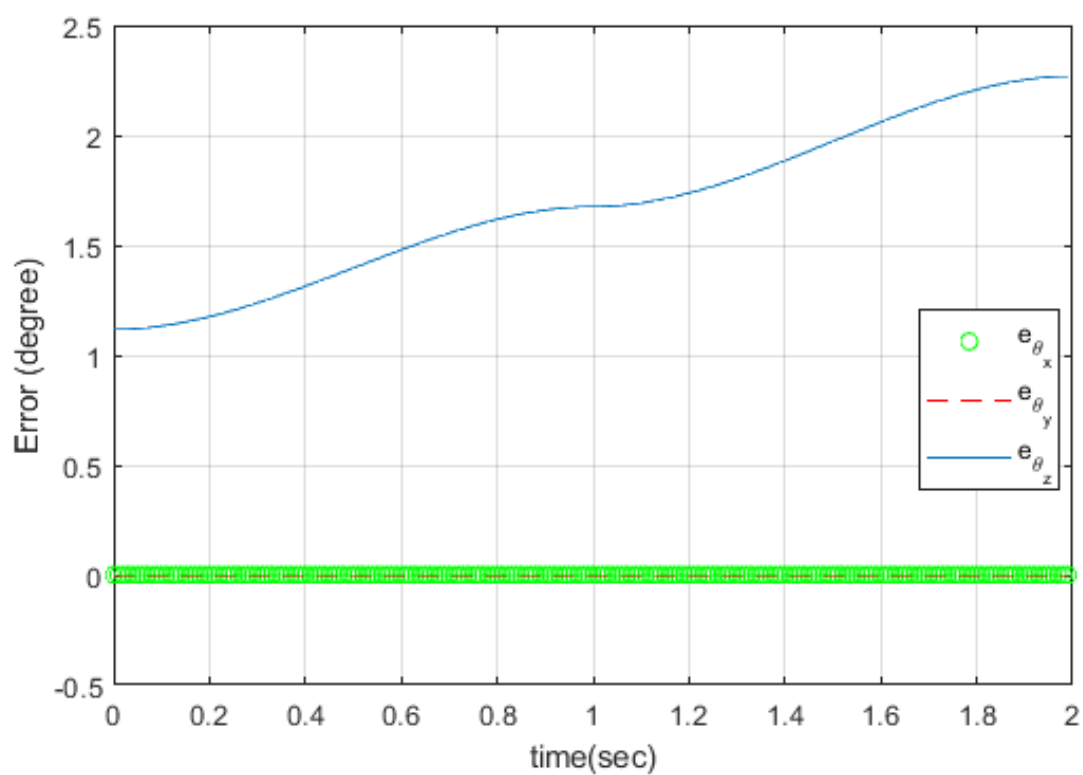
شکل (۶-۲) یک مسیر ساده θ_y سینماتیک مستقیم و θ_{yd} خروجی مدل CAD



شکل (۷-۲) یک مسیر ساده θ_z سینماتیک مستقیم و θ_{zd} خروجی مدل CAD



شکل (۸-۲) حل سینماتیک معکوس برای ربات 3PSS با مسیر داده شده



شکل (۹-۲) دقت سینماتیک مستقیم و معکوس ربات 3PSS

بررسی‌های بالا نشان می‌دهد که معادله سینماتیک محاسبه شده برای هندسه ربات با خطای خوبی

اعتبار سنجی شده و می‌تواند به جای روش عددی مورد استفاده قرار بگیرد.

۳- ژاکوبین و استاتیک

۳-۱- آنالیز ژاکوبین ربات 3PSS

آنالیز ماتریس ژاکوبین نقش اساسی در تحلیل و مطالعه ربات‌ها بازی می‌کند. این ماتریس مختصات فضای مفصلی را به مختصات فضای کاری مرتبط کرده ضمن این‌که بین نیروهای فضای کاری و گشتاورهای عملگرها ارتباط برقرار می‌کند. هم‌چنین با آنالیز ماتریس ژاکوبین می‌توان به نقاط تکین دست پیدا کرده و روش مناسبی برای به‌دست آوردن فضای کاری ربات و مهارت ربات در این فضا هم به حساب می‌آید.

همین موضوع‌ها باعث شده تا آنالیز ژاکوبین یکی از موارد مهم در مطالعه ربات‌ها باشد. در بیشتر بازوهای مکانیکی، به ازای مقادیری از متغیرها ماتریس ژاکوبین تکین می‌شود. در ربات‌های سری، ربات یکی از درجه‌های آزادی خود را از دست می‌دهد. در چنین وضعیتی راستایی وجود دارد که به ازای اعمال نیرو توسط عملگرهای مفاصل، حرکتی در آن راستا انجام نمی‌پذیرد. به این حالت، تکینگی سری گفته می‌شود. ربات‌های موازی علاوه بر تکینگی مزبور تکینگی دیگری تحت عنوان تکینگی موازی دارند. در این حالت سرعت‌های غیر صفر برای مجری نهایی در حالی‌که عملگرها ساکن هستند، امکان‌پذیر می‌شود. ربات در این حالت یک درجه آزادی به‌دست می‌آورد که عملگری برای کنترل آن ندارد. بخش دیگری از تکینگی ربات‌های موازی در مطالعه رابطه بین سرعت‌های مفصل‌های غیر فعال با سرعت‌های مفصل‌های فعال یا صفحه متحرک حاصل می‌شود. تکینگی ژاکوبین تبدیل این مفصل‌ها موجب بروز تکینگی مفصل‌های غیرفعال می‌شود.

در این بخش تجزیه و تحلیل ژاکوبین ربات سه درجه آزادی دورانی موازی فضایی با جزئیاتش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این آنالیز ابتدا ماتریس ژاکوبین را محاسبه می‌کنیم و سپس تکینگی بررسی خواهد شد.

همان‌طور که از شکل (۲-۱) مشخص است صفحه متحرک ربات موازی 3PSS دارای چرخش محدود

است. در این طراحی سه عملگر با یک درجه آزادی خطی متصل به صفحه ثابت؛ سه درجه آزادی برای صفحه متحرک ایجاد می کنند.

در این ربات از هفت مفصل کروی ساده استفاده شده است، که ساختار سینماتیکی یکسانی دارند؛ سه پای فعال PSS و یک پای غیر فعال S ساختار سینماتیکی را با چهار نقطه صفحه متحرک به اشتراک گذاشته اند. شکل (۲-۲) یک مدل هندسی برای مکانیزم را نشان می دهد و شرح هندسه ربات در بخش قبل داده شده است. در این بخش ماتریس ژاکوبین را برای بررسی مبتنی بر تکنیکی استخراج می کنیم. ماتریس ژاکوبین ربات موازی 3PSS سرعت زاویه ای صفحه متحرک $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$ را برحسب نرخ تغییرات بردار سرعت عملگرها $\dot{l} = [\dot{l}_1 \ \dot{l}_2 \ \dot{l}_3]^T$ بیان می کند. به معنای کامل رابط بین سرعت مجری نهایی و عملگرهاست. باتوجه به تعریف بالا مشاهده می شود که ژاکوبین ربات یک ماتریس 3×3 هست.

۳-۱-۱- سرعت حلقه بسته

برای ورودی، سرعت عملگرها به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$\dot{L} = [\dot{L}_1, \dot{L}_2, \dot{L}_3]^T \quad (۱-۳)$$

طبق تعریف ماتریس ژاکوبین از بخش قبل، رابطه بین سرعت عملگر و سرعت دورانی صفحه متحرک به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{L} = J\omega \quad (۲-۳)$$

استفاده یکسان از نظریه مدل کردن بین مفصل و فضای کاری ربات به طور واضح نشان می دهد که ماتریس ژاکوبین به لینک های فعال a_i و لینک A_P غیر فعال پشتیبان بستگی دارد. بنابراین بایستی ابتدا ماتریس ژاکوبین لینک های فعال را به دست آورد، سپس ژاکوبین لینک غیر فعال محاسبه می شود و در نهایت ماتریس ژاکوبین ربات، از ضرب این دو ماتریس ژاکوبین نوشته می شود:

$$J = J_v J_p \quad (۳-۳)$$

۳-۱-۲- ژاکوبین عملگرهای بازویی

ژاکوبین لینک‌های فعال J_v بردار پیچش شش بعدی صفحه متحرک را به عملگرهای فعال مربوط می‌کند:

$$\dot{L} = J_v \dot{X} \quad (۴-۳)$$

در صفحه متحرک پیچش می‌تواند این‌گونه تعریف شود:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} {}^A v_p \\ \omega \end{bmatrix} = [v_{px} \ v_{py} \ v_{pz} \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T \quad (۵-۳)$$

رابطه برداری طبق شکل (۲-۲) نوشته می‌شود:

$$\vec{L}_i = l_i \hat{u}_{mi} = {}^A P + {}^A R_B {}^B P_{bi} - \vec{h}_i \quad (۶-۳)$$

از رابطه (۶-۳) مشتق گرفته می‌شود:

$$\dot{l}_i \hat{u}_{mi} + (\omega_i \times \hat{u}_{mi}) l_i = {}^A v_p + \omega \times {}^A R_B {}^B P_{bi} \quad (۷-۳)$$

در این رابطه باتوجه به این که عملگر فقط یک درجه آزادی در راستای $\hat{u}_{mi}$ دارد پس رابطه تغییر جهت صفر شده و رابطه به شکل معادله:

$$\dot{l}_i = \hat{u}_{mi} {}^A v_p + [({}^A R_B {}^B P_{bi}) \times \hat{u}_{mi}]^T \omega \quad (۸-۳)$$

درنهایت رابطه به شکل زیر حساب می‌شود:

$$J_v = \begin{bmatrix} {}^A \hat{u}_{d1}^T & ({}^A P_{b1} \times {}^A \hat{u}_{d1})^T \\ {}^A \hat{u}_{d2}^T & ({}^A P_{b2} \times {}^A \hat{u}_{d2})^T \\ {}^A \hat{u}_{d3}^T & ({}^A P_{b3} \times {}^A \hat{u}_{d3})^T \end{bmatrix}_{3 \times 6} \quad (۹-۳)$$

۳-۱-۳- ژاکوبین لینک غیر فعال

برای پیدا کردن ژاکوبین ربات باید رابطه بین بردار شش بعدی پیچش صفحه متحرک $\dot{X}$ و سرعت زاویه‌ای صفحه متحرک ω را پیدا کنیم. این رابطه از طریق ژاکوبین لینک غیرفعال تعریف می‌شود:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} {}^A v_p \\ \omega \end{bmatrix} = J_p \omega \quad (۱۰-۳)$$

ابتدا رابطه بردار موقعیت لینک غیرفعال را از فصل قبل بازنویسی می‌کنیم:

$${}^A P = l_p [s2 \quad -c2s1 \quad c2c1]^T \quad (۱۱-۳)$$

از رابطه مشتق گرفته می‌شود:

$${}^A v_p = \begin{bmatrix} 0 & c2 & 0 \\ -c2c1 & s2s1 & 0 \\ -c2s1 & -s2c1 & 0 \end{bmatrix} l_p \dot{\theta} \quad (۱۲-۳)$$

که $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T$ برداری از نرخ تغییر زاویه اوایلر است. سرعت زاویه‌ای صفحه متحرک همچنین می‌تواند به عنوان تابعی از نرخ تغییر زاویه اوایلر با استفاده از رابطه در ماتریس دوران بیان شود:

$$\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s2 \\ 0 & c1 & -c2s1 \\ 0 & s1 & c2c1 \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (۱۳-۳)$$

از معادله (۱۳-۳) به دست می‌آید

$$\dot{\theta} = \frac{1}{c2} \begin{bmatrix} c2 & s2s1 & -s2c1 \\ 0 & c2c1 & c2s1 \\ 0 & -s1 & c1 \end{bmatrix} \omega \quad (۱۴-۳)$$

و با جایگذاری معادله (۱۴-۳) در معادله (۱۲-۳):

$${}^A v_p = \begin{bmatrix} 0 & c2c1 & c2s1 \\ -c2c1 & 0 & s2 \\ -c2s1 & -s2 & 0 \end{bmatrix} l_p \omega \quad (۱۵-۳)$$

سرانجام ماتریس ژاکوبین لینک غیرفعال برای ربات به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$J_p = \begin{bmatrix} 0 & l_p c2c1 & l_p c2s1 \\ -l_p c2c1 & 0 & l_p s2 \\ -l_p c2s1 & -l_p s2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۶-۳)$$

حال به راحتی معادله (۷-۲) به شکل معادله زیر بازنویسی می‌شود:

$$J_{3 \times 3} = J_v J_p = \begin{bmatrix} ({}^A P_{iz} - l_p c 2 c 1) {}^A s_{iy} - ({}^A P_{iy} - l_p c 2 s 1) {}^A s_{iz} \\ ({}^A P_{ix} - l_p s 2) {}^A s_{iz} - ({}^A P_{iz} - l_p c 2 c 1) {}^A s_{ix} \\ ({}^A P_{iy} - l_p c 2 s 1) {}^A s_{ix} - ({}^A P_{ix} - l_p s 2) {}^A s_{iy} \end{bmatrix}_{i=1,2,3}^T \quad (۱۷-۳)$$

۳-۱-۴- بررسی تکینگی و فضای کاری ربات

عامل‌های مختلفی حرکت‌های مکانیزم‌های موازی را محدود می‌نمایند. از آن جمله می‌توان محدودیت‌های مکانیکی مفصل‌های غیرفعال، تداخل و برخورد سایر عضوها، محدودیت‌های محرک‌ها و تکینگی‌هایی که فضای کاری مکانیزم را به چند قسمت جدا می‌نمایند، برشمرد. به همین دلیل در این ربات‌ها که در مقایسه با مکانیزم‌های سری به داشتن فضای کاری محدود مشهورند، حجم قابل توجهی از تحقیق‌ها بر روی الگوریتم‌های مختلف یافتن فضای کاری آن تمرکز دارند. در تحلیل فضای کاری این مکانیزم‌ها، مشکل اصلی در به تصویر کشیدن فضای کاری آن‌ها و ارتباط و وابستگی درجه‌های آزادی به یکدیگر است.

در این بخش تجزیه و تحلیل تکینگی ربات 3PSS انجام می‌شود. تجزیه و تحلیل تکینگی ربات با مطرح کردن معادله ماتریس ژاکوبین J همراه است. از این رو سینماتیک معکوس دارای تکینگی نیست، اما سینماتیک مستقیم ممکن است تکینگی داشته باشد.

$$\det(J) = 0 \quad (۱۸-۳)$$

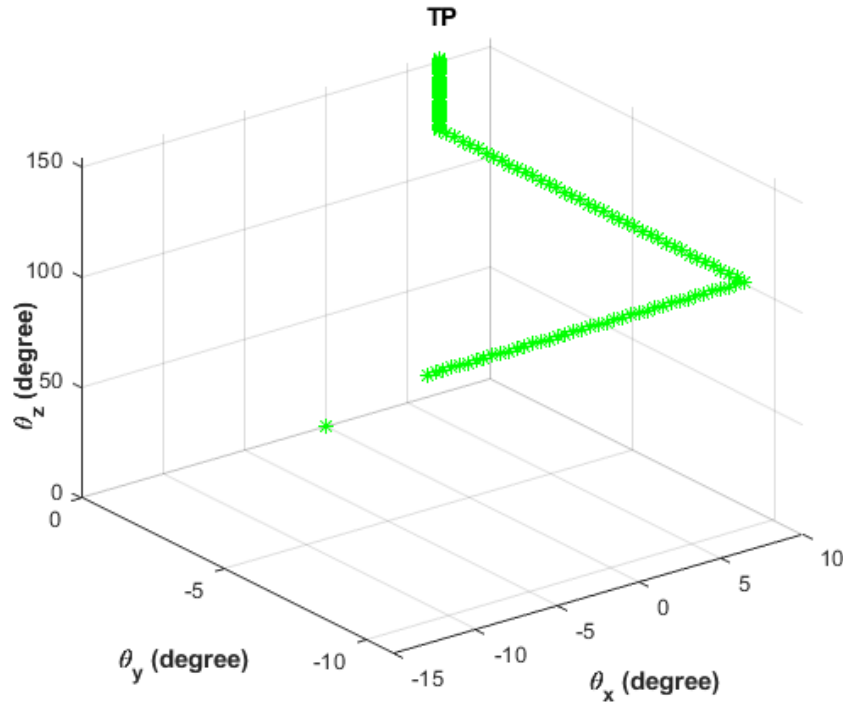
برای بررسی تکینگی ربات موازی 3PSS ابتدا از نرم افزار سالیدورک بازه دوران‌های وضعی رول، یاو و پیچ صفحه متحرک را به عنوان یک فایل اکسل ذخیره می‌کنیم، پس از شبیه‌سازی ماتریس ژاکوبین در نرم‌افزار متلب و وارد کردن فایل اکسل دوران‌های صفحه متحرک مقدار ماتریس ژاکوبین به ازای دوران‌های مختلف به دست می‌آید با بررسی دترمینان آن به این نتیجه می‌رسیم که ربات در این نقاط تکینگی ندارد.

پس تمامی زوایای دورانی صفحه متحرک جز فضای کاری ربات می‌باشد که در شکل (۱-۳) نمایش داده شده است. بازه دوران وضعی صفحه‌ی متحرک نسبت به پایه ثابت به شکل زیر است:

$$-13^\circ < \theta_x < 7^\circ$$

$$-11^\circ < \theta_y < 0^\circ$$

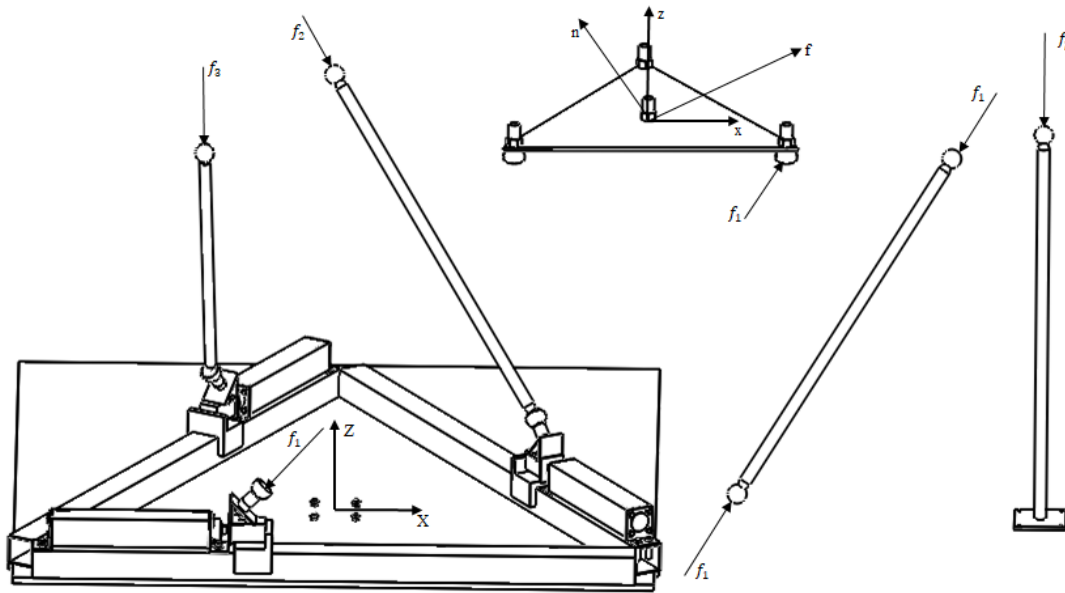
$$122^\circ < \theta_z < 155^\circ$$



شکل (۱-۳) فضای کاری ربات

۳-۲- نیروی استاتیکی ربات 3PSS

نیروی محرک با $\tau = [f_1, f_2, f_3]^T$ و نیروی لینک ثابت با f_p و نیروی خارجی و گشتاور در نقطه P به ترتیب با f و n نمایش داده می‌شود. فرض می‌شود که هیچ نیروی خارجی غیر از نیروهای عمل‌گر بر پاهای ربات اعمال نمی‌شود و از نیروی وزن پاهای متحرک صرف نظر شده‌است؛ بنابراین دیاگرام آزاد ربات به صورت زیر نمایش داده می‌شود [۳۸].



شکل (۲-۳) دیاگرام آزاد برای استاتیک

از رابطه تعادل استاتیکی $\sum F = 0$ داریم:

$$f + \sum_{i=1}^3 f_i \hat{u}_{ai} + f_p \hat{u}_p = 0 \quad (۱۹-۳)$$

و از رابطه تعادل استاتیکی گشتاور $\sum M = 0$ هم خواهیم داشت:

$$n + \sum_{i=1}^3 E_i \times f_i \hat{u}_{ai} = 0 \quad (۲۰-۳)$$

دراین معادله E_i به صورت زیر تعریف می شود:

$$E_i = {}^A P_{bi} - {}^A P \quad (۲۱-۳)$$

حال گشتاور خارجی n در معادله (۲۰-۳) را F نامگذاری میکنیم:

$$F = n = - \sum_{i=1}^3 f_i [({}^A P_{bi} - {}^A P) \times \hat{u}_{ai}] \quad (۲۲-۳)$$

$${}^A P_{bi} - {}^A P = \begin{bmatrix} {}^A P_{ix} - l_p s_2 \\ {}^A P_{iy} + l_p c_2 s_1 \\ {}^A P_{iz} - l_p c_2 c_1 \end{bmatrix} \quad (23-3)$$

پس از جایگذاری معادله (23-3) در (22-3) و ساده‌سازی خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} ({}^A P_{iz} - l_p c_2 c_1) {}^A s_{iy} - ({}^A P_{iy} - l_p c_2 s_1) {}^A s_{iz} \\ ({}^A P_{ix} - l_p s_2) {}^A s_{iz} - ({}^A P_{iz} - l_p c_2 c_1) {}^A s_{ix} \\ ({}^A P_{iy} - l_p c_2 s_1) {}^A s_{ix} - ({}^A P_{ix} - l_p s_2) {}^A s_{iy} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = F \quad (24-3)$$

از مقایسه معادله (24-3) با معادله (17-3) خواهیم داشت:

$$F = J^T \tau \quad (25-3)$$

مشخصات فیزیکی ربات به صورت جدول زیر می‌باشد که جزییات بیشتر اجزا ربات در بخش پیوست‌ها آورده شده است:

جدول (1-3) مشخصات فیزیکی ربات 3PSS

وزن (گرم)	طول (میلی‌متر)	
946.71	706.51	پای متحرک
1164.41	651.34	پای ثابت
591.56	425.19	مجری نهایی
193.05	152	شفت عملگر فستو

۴- دینامیک

۴-۱- فرمول نویسی دینامیکی

برخلاف بازوهای مکانیکی ماهر سری، مدل سازی دینامیکی بازوهای مکانیکی موازی بسیار پیچیده است. برخلاف تحقیق‌های زیادی که در زمینه سینماتیک ربات‌های موازی انجام پذیرفته، کارهای انجام شده در زمینه دینامیک این ربات‌ها محدود می‌باشد. رایج ترین روش برای به دست آوردن معادله‌های دینامیکی حرکت در ربات‌های موازی استفاده از روش نیوتون اولر است. با این روش می‌توان به درک شهودی بهتری از فیزیک مساله دست یافت زیرا همه نیروهای داخلی، قیود و ... در این روش دیده می‌شوند اما پیچیدگی معادلات و حجم زیاد آن‌ها باعث می‌شود حتی برای مسئله‌های ساده نتوان به شکل دلخواه معادله‌ها دست یافت.

در این بخش دینامیک ربات 3PSS مورد بررسی قرار می‌گیرد. برخلاف زنجیره باز ربات‌های سری تجزیه و تحلیل دینامیک ربات‌های موازی به خاطر زنجیره سینماتیکی بسته از یک پیچیدگی ذاتی برخوردار است. با این اوصاف مدل سازی دینامیکی به ویژه برای کنترل ربات بسیار مهم است، در جاهایی که موقعیت دقیق و عملکرد دینامیکی مطلوب موجود است کنترل سیستم بسیار دقیق خواهد بود.

برای به دست آوردن دینامیک ربات موازی 3PSS از روش سنتی نیوتن-اولر استفاده شده است در این فرمول معادله‌های حرکت برای هر پای سیستم و سکوی متحرک به ناچار باید انجام شود، که موجب شکل گیری تعداد زیادی معادله و محاسبات زیاد می‌شود. از طرفی هم می‌توان تمام نیروهای ربات را بررسی کرد که در طراحی بسیار مفید است.

۴-۱-۱- آنالیز شتاب

در این جا محاسبه شتاب لینک‌ها و صفحه متحرک به روش نیوتن-اولر انجام می‌شود. در آنالیز شتاب خطی و زاویه‌ای لینک‌ها به صورت تابعی از شتاب زاویه‌ای صفحه‌ی متحرک استخراج می‌شود.

ابتدا رابطه حلقه بسته سینماتیک را بازنویسی می‌کنیم (۸-۲):

$${}^A P + {}^A R_B {}^B P_{bi} = \vec{h}_i + \vec{D}_i \quad (۱-۴)$$

از رابطه‌ی (۱۴-۲) در (۱-۴) جایگذاری می‌کنیم:

$${}^A P + {}^A R_B {}^B P_{bi} = \vec{h}_i + \vec{L}_i + \vec{a}_i \quad (۲-۴)$$

با مشتق‌گیری از رابطه خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} {}^A v_p + {}^A \dot{R}_B {}^B P_{bi} + {}^A R_B {}^B \dot{P}_{bi} \\ = \dot{h}_i \hat{u}_{hi} + h_i \dot{\hat{u}}_{hi} + \dot{l}_i \hat{u}_{mi} + l_i \dot{\hat{u}}_{mi} + \dot{a}_i \hat{u}_{ai} + a_i \dot{\hat{u}}_{ai} \end{aligned} \quad (۳-۴)$$

باتوجه به شکل (۲-۲) می‌دانیم ${}^A R_B {}^B \dot{P}_{bi} = 0$ و $\dot{h}_i \hat{u}_{hi} + h_i \dot{\hat{u}}_{hi} = 0$ ، $\dot{l}_i \hat{u}_{mi} = 0$ ، $\dot{a}_i \hat{u}_{ai} = 0$ حال مشتق ماتریس دوران به صورت:

$${}^A \dot{R}_B {}^B P_{bi} = \dot{\theta} \times ({}^A R_B {}^B P_{bi}) = \omega \times {}^A P_{bi} \quad (۴-۴)$$

و مشتق راستای $\hat{u}_{ai}$ هم نوشته می‌شود:

$$a_i \dot{\hat{u}}_{ai} = a_i (\omega_i \times \hat{u}_{ai}) \quad (۵-۴)$$

با جایگذاری رابطه‌های (۴-۴) و (۵-۴) در (۳-۴) خواهیم داشت:

$${}^A v_p + \omega \times {}^A P_{bi} = \dot{l}_i \hat{u}_{mi} + a_i (\omega_i \times \hat{u}_{ai}) \quad (۶-۴)$$

حال با مشتق‌گیری دوبار از رابطه (۶-۴) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} {}^A a_p + \dot{\omega} \times {}^A P_{bi} + \omega \times (\omega \times {}^A P_{bi}) \\ = \ddot{l}_i \hat{u}_{mi} + a_i (\dot{\omega}_i \times \hat{u}_{ai}) + a_i (\omega_i \times (\omega_i \times \hat{u}_{ai})) \end{aligned} \quad (۷-۴)$$

۲-۴- فرمول نویسی دینامیک پاها

برای به دست آوردن دینامیک ربات موازی 3PSS ربات را به دو قسمت اصلی معادله دینامیکی صفحه متحرک و معادله‌های دینامیکی پا تقسیم می‌کنیم. در شکل (۱-۴) دیاگرام آزاد ربات نمایش داده

شده است که باتوجه به آن برداری عمود بر لینک های متحرک خواهیم داشت:

$$\vec{t}_i = \frac{\hat{u}_{a_i} \times \vec{h}_i}{|\hat{u}_{a_i} \times \vec{h}_i|} \quad (۸-۴)$$

و بردار $\vec{r}_i$ را عمود بر این دو بردار:

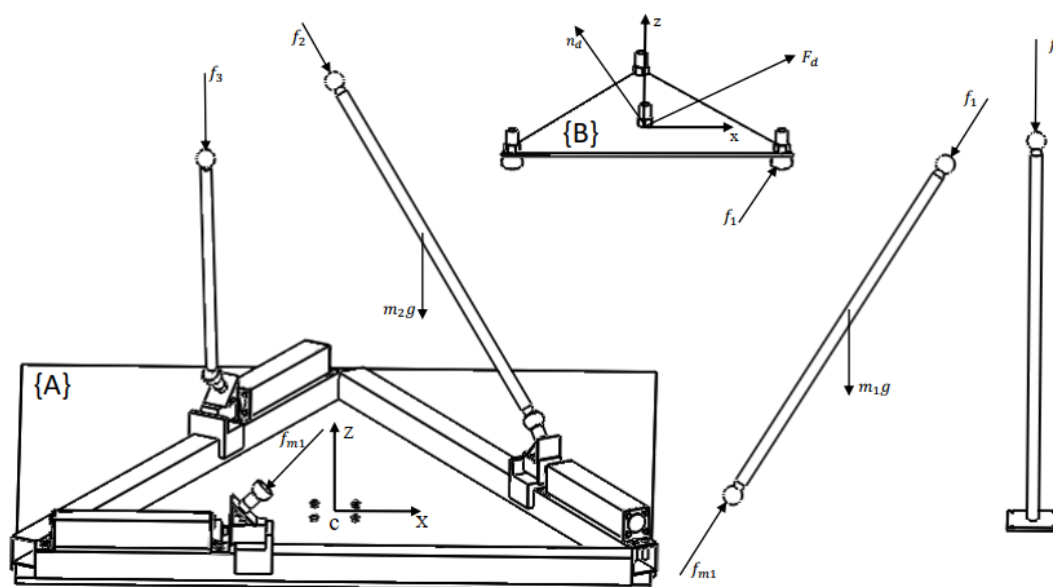
$$\vec{r}_i = \hat{u}_{a_i} \times \vec{t}_i \quad (۹-۴)$$

حال با استفاده از روش نیوتن داریم:

$$\sum \vec{F} = m_{a_i} \vec{a}_{a_i} \quad (۱۰-۴)$$

در نهایت دینامیک پاها به صورت زیر نوشته می شود:

$$\vec{f}_{mi} + \vec{f}_i + m_{a_i} \vec{g} = m_{a_i} \vec{a}_{a_i} \quad (۱۱-۴)$$



شکل (۱-۴) دیاگرام آزاد پاها و مجری نهایی ربات

برای گشتاور از روش نیوتن نیز:

$$\sum \vec{\tau} = I \dot{\omega} \quad (۱۲-۴)$$

که این معادله برای پاها به صورت:

$$\sum \vec{\tau} = I_{c_{a_i}} \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_{c_{a_i}} \omega_i) = |\vec{a}_i| (\hat{u}_{a_i} \times \vec{f}_i) \quad (13-4)$$

ممان اینرسی پاها به صورت:

$$I_{c_{a_i}} = R_{a_i}^B I_{c_{a_i}} R_{a_i} \quad (14-4)$$

ماتریس دوران نیز به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$R_{a_i} = \begin{bmatrix} \hat{u}_{a_i} \cdot \hat{x} & \hat{t}_i \cdot \hat{x} & \hat{r}_i \cdot \hat{x} \\ \hat{u}_{a_i} \cdot \hat{y} & \hat{t}_i \cdot \hat{y} & \hat{r}_i \cdot \hat{y} \\ \hat{u}_{a_i} \cdot \hat{z} & \hat{t}_i \cdot \hat{z} & \hat{r}_i \cdot \hat{z} \end{bmatrix} \quad (15-4)$$

$${}^B I_{c_{a_i}} = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy_i} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (16-4)$$

۴-۳- فرمول نویسی دینامیک صفحه متحرک

برای صفحه متحرک از روش نیوتن و شکل (۱-۴) خواهیم داشت:

$$\sum \vec{F} = \sum_{i=1}^3 \vec{f}_i + \vec{F}_d + m\vec{g} = m\vec{a}_p \quad (17-4)$$

با جایگذاری معادله (۱۱-۴) در (۱۷-۴) معادله‌ی دینامیکی مجری نهایی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\sum \vec{F} = \sum_{i=1}^3 (m_{a_i} \vec{a}_{a_i} - \vec{f}_{mi} - m_{a_i} \vec{g}) + \vec{F}_d + m\vec{g} = m\vec{a}_p \quad (18-4)$$

برای معادله گشتاور نیز داریم:

$$\sum \vec{\tau} = \vec{\tau}_d + \sum_{i=1}^3 ({}^B P_{bi} \times \vec{f}_i) = I_p \ddot{\theta} + \dot{\theta} \times (I_p \dot{\theta}) \quad (19-4)$$

گشتاور مجری نهایی نیز با جایگذاری معادله (۱۱-۴) در (۱۹-۴) به صورت زیر نوشته می‌شود

$$\sum \vec{\tau} = \vec{\tau}_d + \sum_{i=1}^3 \left({}^B P_{bi} \times (m_{a_i} \vec{a}_{a_i} - \vec{f}_{mi} - m_{a_i} \vec{g}) \right) = I_p \ddot{\theta} + \dot{\theta} \times (I_p \dot{\theta}) \quad (20-4)$$

ممان اینرسی صفحه متحرک نسبت به مختصات ثابت از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$I_p = {}^A R_B {}^B I_p {}^A R_B^T \quad (21-4)$$

رابطه نیرو با ورودی به شکل زیر است:

$$\vec{f}_{mi} \cdot \hat{u}_{mi} = (m_{Ti} \ddot{l} \hat{u}_{mi}) \cdot \hat{u}_{mi} \quad (22-4)$$

$$\hat{f}_{mi} = (\vec{f}_{mi} \cdot \hat{u}_{mi}) \hat{u}_{ai} \quad (23-4)$$

۵- طراحی مسیر و کنترل

۵-۱- طراحی مسیر

به منظور استفاده از ربات در فعالیتهای صنعتی، طراحی مسیر از اهمیت خاصی برخوردار است. طراحی مسیر ربات به وسیله تعدادی نقطه دقت که نشان‌دهنده موقعیت مجری نهایی در چند لحظه از زمان می‌باشند؛ صورت گرفته است. طراحی مسیر در ربات‌های موازی مستلزم در نظر گرفتن ویژگی‌های سینماتیکی ربات برای تشخیص تکنیکی و بررسی ساختار دینامیکی آن برای تعیین محدودیت‌های عملگری می‌باشد.

طراحی مسیر بخش مهمی از فرآیند کنترل در سیستم‌های رباتیکی است. هدف اصلی از طراحی مسیر بهینه برای ربات موازی، یافتن مسیری است که از یک نقطه ابتدایی شروع و به یک نقطه انتهایی برسد به شرطی که دارای کم‌ترین طول باشد و به مانع‌های احتمالی موجود برخورد نکند. همچنین، حرکت روی مسیر مورد نظر باید تا حد امکان آرام و پیوسته باشد، تا تغییرات ناگهانی در موقعیت، سرعت و شتاب رخ ندهد. توابع ریاضی متعددی از جمله منحنی‌های چندجمله‌ای، منحنی‌های اسپلاین برای طراحی مسیر وجود دارد.

طراحی مسیر؛ موقعیت، سرعت و شتاب را برای هر درجه‌آزادی به یک تاریخچه زمانی ارجاع می‌دهد. به منظور حرکت مطلوب ربات توسط اپراتور، طراحی مسیرها با توصیفات ساده تعامل انسان و ربات ایجاد شده است.

برای ایجاد و طراحی مسیر ربات چندروش وجود دارد در این مبحث از دوروش چندجمله‌ای مکعبی^۱ و چندجمله‌ای مرتبه پنج^۲ استفاده می‌شود و به تحلیل کیفی این مسیرهای درجه سوم و پنجم پرداخته می‌شود

۵-۱-۱- چندجمله‌ای مکعبی

در این روش موقعیت و سرعت اولیه و نهایی داده شده‌است، این چهار محدودیت به وسیله یک

^۱ Cubic Polynomials

^۲ Quintic Polynomials

چندجمله‌ای مرتبه سه مدل می‌شود

چندجمله‌ای مکعبی مورد نیاز باتوجه به زمان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (۱-۵)$$

برای ربات موازی 3PSS داریم $q = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]$ پس سرعت مسیر داده شده است:

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (۲-۵)$$

موقعیت‌ها و سرعت‌های اولیه و نهایی در معادله‌های (۱-۵) و (۲-۵) جای گذاری می‌شود و چهار معادله به دست آمده به صورت ماتریس زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_f \\ \omega_0 \\ \omega_f \end{bmatrix} \quad (۳-۵)$$

با جایگذاری شرایط اولیه در معادله (۳-۵) معادله طراحی دوران به شکل معادله پایین می‌شود:

$$q(t) = q_0 + 3(q_f - q_0)t^2 - 2(q_f - q_0)t^3 \quad (۴-۵)$$

از رابطه (۴-۵) مشتق گرفته می‌شود:

$$\dot{q}(t) = 6(q_f - q_0)t - 6(q_f - q_0)t^2 \quad (۵-۵)$$

و با مشتق گیری دوباره رابطه شتاب به دست می‌آید:

$$\ddot{q}(t) = 6(q_f - q_0) - 12(q_f - q_0)t \quad (۶-۵)$$

۲-۱-۵- طراحی مسیر به روش چندجمله‌ای مکعبی و مقایسه با دینامیک ربات

در این بخش برای بررسی مسیر طراحی شده و اعتبار سنجی با دینامیک ربات ابتدا یک بار دیگر معادله

(۲۰-۴) مدل دینامیکی ربات بازنویسی می‌شود:

$$\sum \vec{\tau} = \vec{\tau}_d + \sum_{i=1}^3 \left({}^B P_{bi} \times (m_{a_i} \vec{a}_{a_i} - \vec{f}_{mi} - m_{a_i} \vec{g}) \right) = I_p \ddot{\theta} + \dot{\theta} \times (I_p \dot{\theta}) \quad (۷-۵)$$

این معادله در نهایت به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$I_p \ddot{\theta} + \dot{\theta} \times (I_p \dot{\theta}) - \tau_d = \sum_{i=1}^3 \left({}^B P_{bi} \times (m_{a_i} \vec{a}_{a_i} - \vec{f}_{mi} - m_{a_i} \vec{g}) \right) \quad (۸-۵)$$

در این رابطه $\theta = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]$ می‌باشد.

حال برای طراحی مسیر یک حرکت دوثانیه‌ای به ربات با دقت طبق جدول (۱-۵) در مدل سالدورک وارد می‌شود و سپس موقعیت، سرعت و شتاب صفحه متحرک در $t_0 = 0$ و $t_f = 2$ (s) در یک فایل اکسل با دقت داده برداری چهارصدم ثانیه ذخیره می‌شود:

$$\theta_{DYN} = \theta \quad (۹-۵)$$

برای مسیر اول طبق جدول های پایین داده‌های ورودی برای مدل سالدورک تعریف می‌شود:

جدول (۱-۵) ورودی‌های داده‌شده به عملگرهای خطی ربات در سالدورک برای مسیر اول

	t_0	t_f
l_1	2	152
l_2	2	152
l_3	2	152

موقعیت، سرعت و شتاب دورانی صفحه متحرک ربات موازی در سالدورک برای ثانیه صفر و ثانیه دوم در جدول زیر گزارش می‌شود:

جدول (۲-۵) مشخصات لحظه t_0 و t_f گرفته شده از مدل سالدورک ربات برای مسیر اول

	Yaw	Pitch	Roll
θ_0	0.13	-0.13	122.02
θ_f	0.17	-0.05	154.41

$\dot{\theta}_0$	0.01	0.04	18.47
$\dot{\theta}_f$	0.01	0.04	12.25
$\ddot{\theta}_0$	0	0.01	-0.78
$\ddot{\theta}_f$	0	0	-5.04

حال برای طراحی مسیر پس از نوشتن معادلات طراحی مسیر در نرم افزار متلب و اعمال ورودی‌ها موقعیت، سرعت و شتاب دورانی صفحه متحرک ربات موازی در سالی‌دورک برای ثانیه صفر و ثانیه دوم در جدول زیر گزارش می‌شود:

جدول (۵-۲) موقعیت، سرعت و شتاب به دست می‌آید سپس از همان داده‌های سالی‌دورک در دینامیک ربات جای گذاری می‌شود و مسیر طراحی شده و دینامیک در شکل (۵-۱) به دست می‌آید.

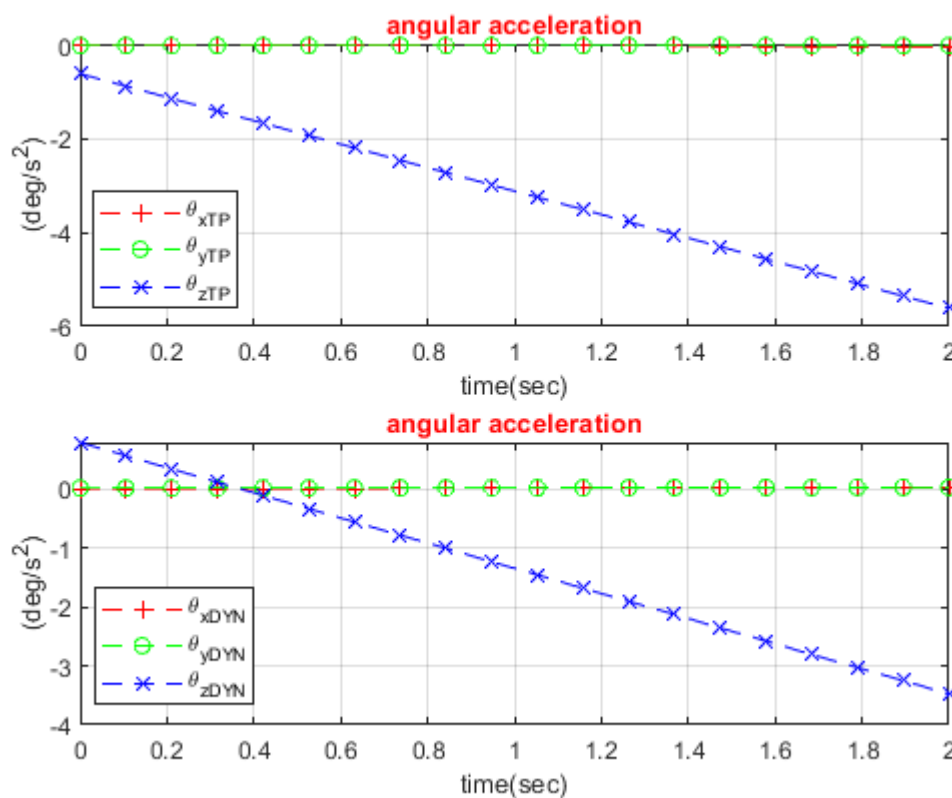
حال برای صحت سنجی دینامیک ربات از اختلاف شتاب به دست آمده از طراحی مسیر به عنوان شتاب هدف θ_{TP} و شتاب معادله دینامیکی به عنوان شتاب طی شده داریم:

$$\theta_{TP} = q \quad (۵-۱۰)$$

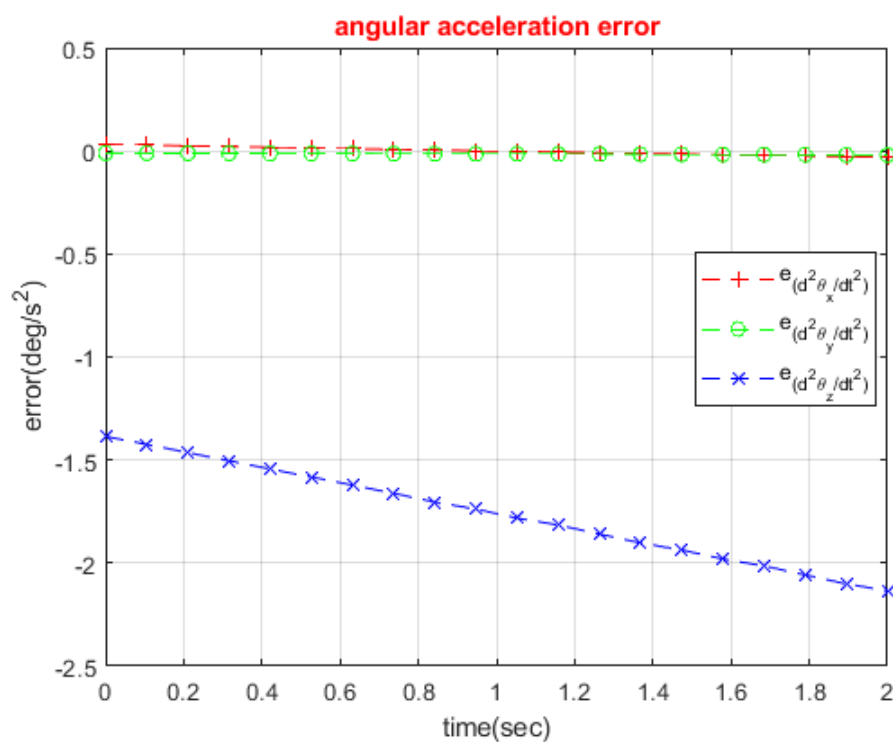
$$e = \theta_d - \theta_{DYN} \quad (۵-۱۱)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_{TP} - \dot{\theta}_{DYN}$$

$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_{TP} - \ddot{\theta}_{DYN}$$



شکل (۱-۵) شتاب معادله چند جمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۱-۵)



شکل (۲-۵) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله‌ای مکعبی برای جدول (۱-۵)

همان‌طور که از شکل (۲-۵) مشخص است به خاطر دوران رول داشتن این ربات در این مسیر حرکتی خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله درجه صفر در اندازه پایینی قرار دارد و نشان می‌دهد وارد کردن دوران‌ها به صورت انفرادی برای طراحی مسیر، سیستم را با خطای کمتری مواجه می‌کند.

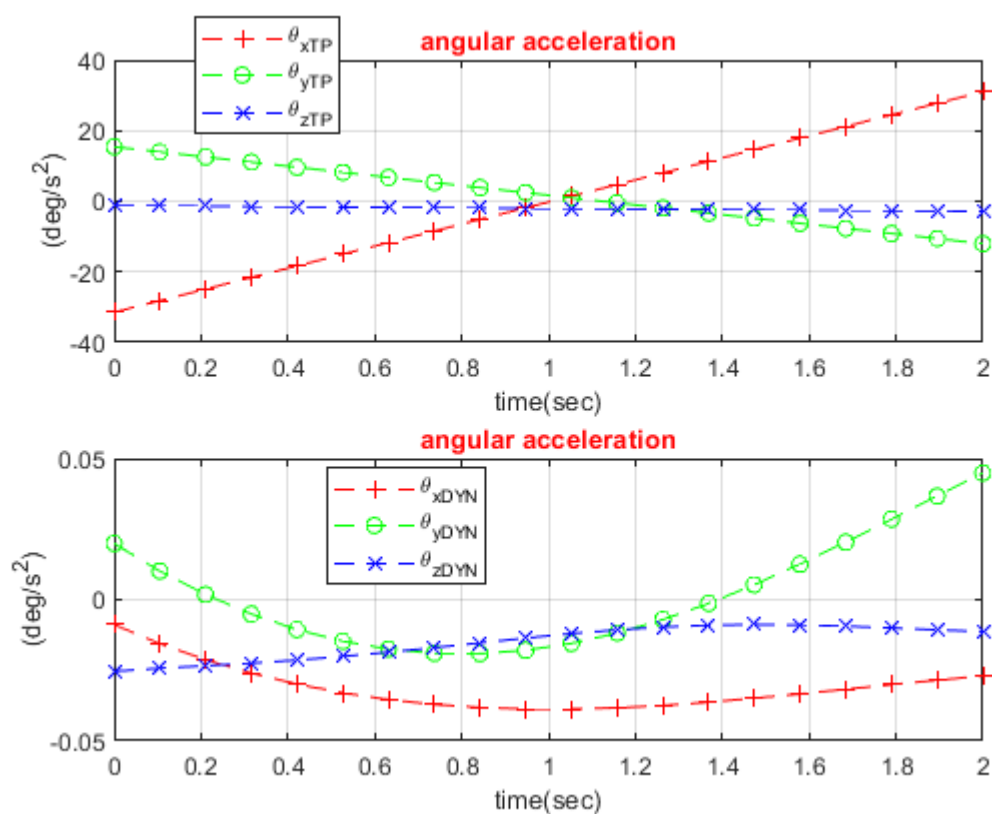
حال از روش‌های قبل برای مسیر دوم که سیستم را دچار دوران وضعی رول و یاو میکند استفاده می‌شود:

جدول (۳-۵) ورودی‌های داده‌شده به عملگرهای خطی ربات در سالی‌دورک برای مسیر دوم

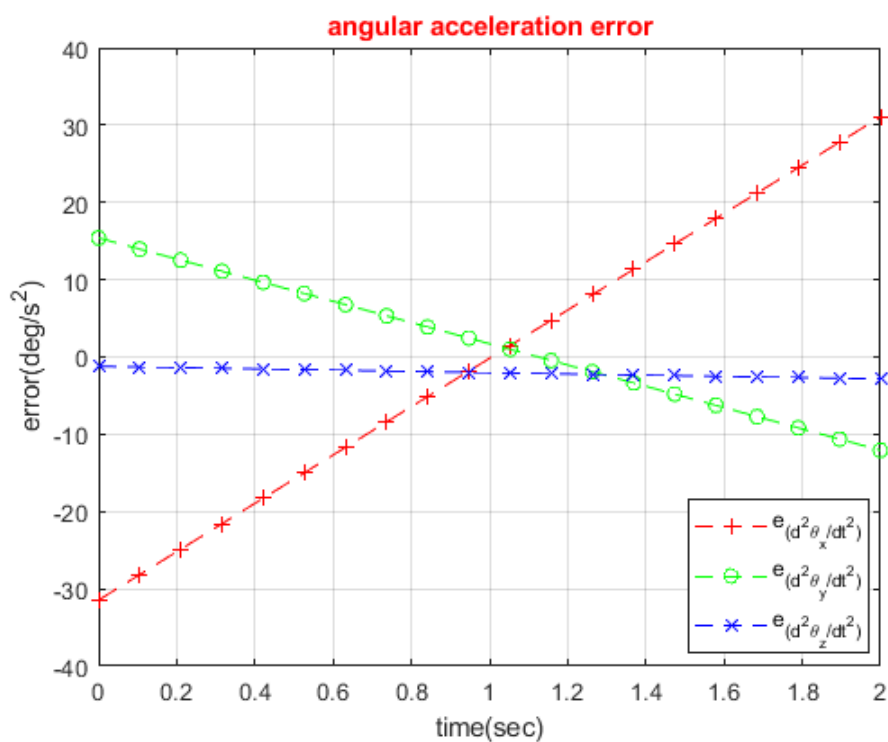
	t_0	t_f
l_1	2	152
l_2	2	152
l_3	2	4

جدول (۴-۵) مشخصات لحظه t_0 و t_f گرفته شده از مدل سالی‌دورک ربات برای مسیر دوم

	Yaw	Pitch	Roll
θ_0	0.13	-0.13	122.02
θ_f	-12.86	-0.47	143.74
$\dot{\theta}_0$	4.14	0.22	12.39
$\dot{\theta}_f$	3.71	0.22	8.3
$\ddot{\theta}_0$	0.8	0.01	-1.35
$\ddot{\theta}_f$	-1.14	1.7	-2.75



شکل (۳-۵) شتاب معادله چند جمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۳-۵)



شکل (۴-۵) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله‌ای مکعبی برای جدول (۳-۵)

اختلاف خطای حاصل شده در این طراحی مسیر خطای بالایی است و نشان می‌دهد که معادله درجه سوم برای طراحی مسیر دقت کافی را ندارد.

حال مسیر سوم برای بررسی تحلیلی به مدل سالیدورک طبق جدول (۵-۵) داده می‌شود.

در این روش صفحه متحرک شامل هر سه دوران وضعی رول، یاو و پیچ می‌شود.

جدول (۵-۵) ورودی‌های داده شده به عملگرهای خطی ربات در سالیدورک برای مسیر سوم

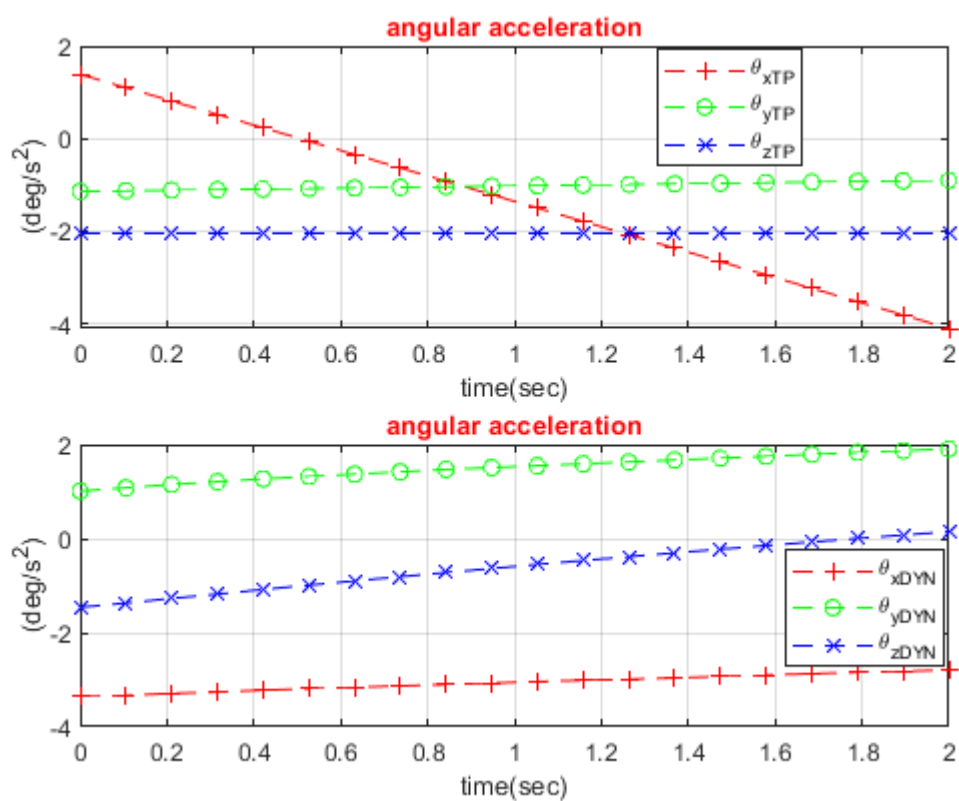
	t_0	t_f
l_1	2	4
l_2	2	152
l_3	2	152

جدول (۶-۵) مشخصات لحظه t_0 و t_f گرفته شده از مدل سالیدورک ربات برای مسیر سوم

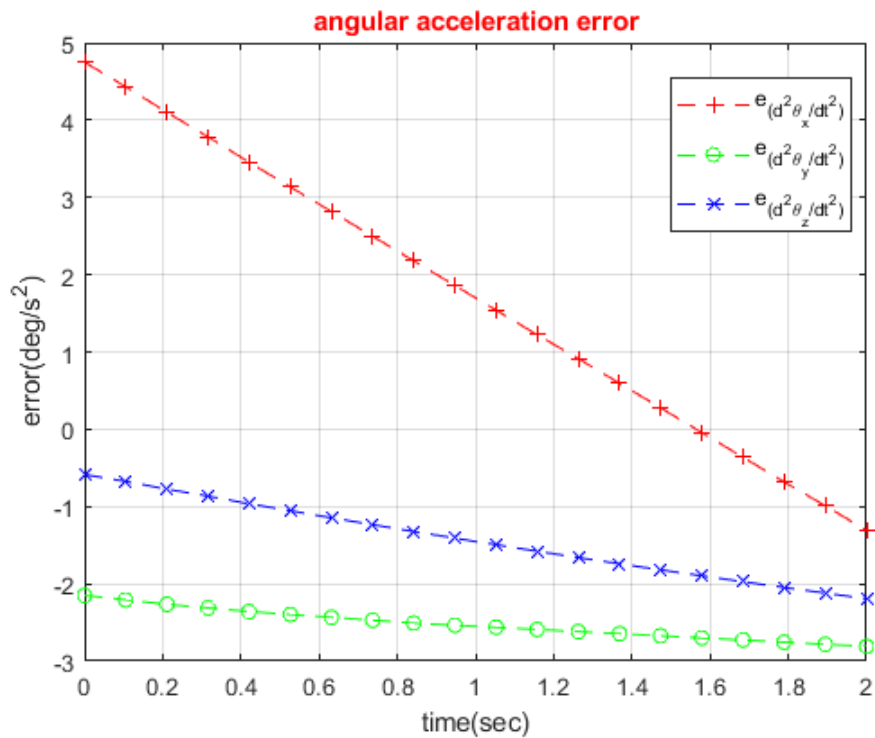
	Yaw	Pitch	Roll
θ_0	0.13	-0.13	122.51
θ_f	6.35	11.37	143.18
$\dot{\theta}_0$	3.55	6.85	12.31
$\dot{\theta}_f$	0.84	4.77	8.3
$\ddot{\theta}_0$	-1.45	0.1	-1.34
$\ddot{\theta}_f$	-0.9	1.83	-2.75

همان‌طور که در شکل (۵-۵) مشخص هست به ازای ورودی‌هایی که از معادله درجه سوم طراحی مسیر به دینامیک وارد شده شتابی تقریباً ثابت برای ربات در طول مسیر در پی داشته‌است، این حالی که شتاب طراحی شده برای دوران یاو بسیار تغییر کرده‌است. با توجه به خطای این مسیر که برای دوران وضعی پیچ و رول قابل قبول ولی برای دوران یاو خطایی بالا است، می‌توان به همان نتیجه از شکل‌های مسیر

قبل رسید و به سراغ طراحی مسیر مرتبه پنج رفت.



شکل (۵-۵) شتاب معادله چندجمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۵-۵)



شکل (۵-۶) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله ای مکعبی برای جدول (۵-۵)

۵-۳-۱- چند جمله ای مرتبه پنج

طراحی مسیر به کمک معادله مکعبی موقعیت‌ها و سرعت‌های پیوسته را در ابتدا و انتهای مسیر فراهم می‌کند اما در شتاب دچار ناپیوستگی‌هایی هم هست. در این روش طراحی مسیر علاوه بر داده های روش قبل باید شتاب ابتدا و انتها را نیز داشته باشیم، با این شش محدودیت یک معادله مرتبه پنج می‌نویسیم:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (۵-۱۲)$$

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4 \quad (۵-۱۳)$$

$$\ddot{q}(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3 \quad (۵-۱۴)$$

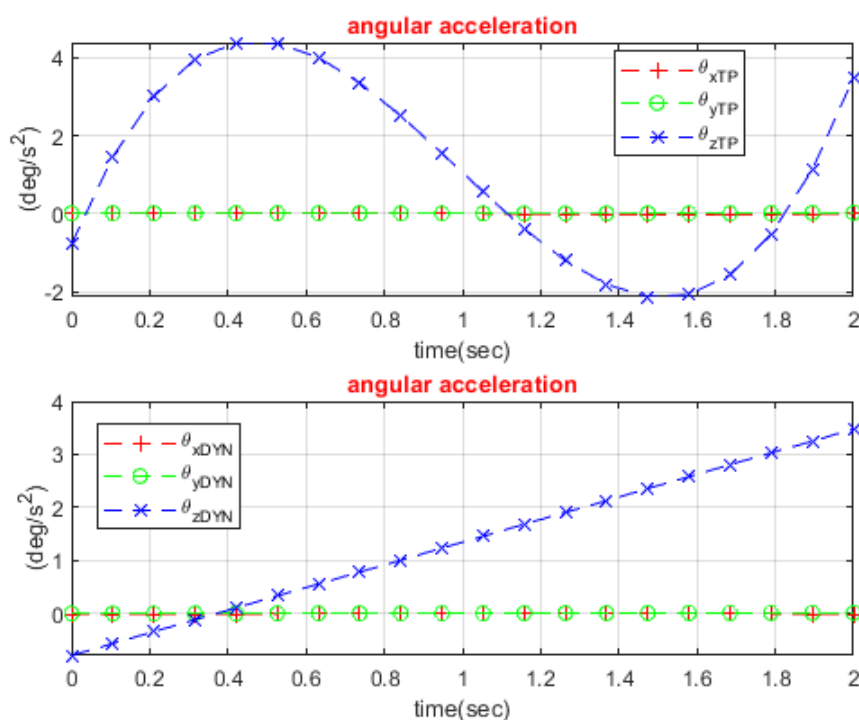
حال با قرار دادن $\dot{q} = \omega$ و $\ddot{q} = \alpha$ مانند بخش قبل به شکل ماتریسی نوشتن این معادلات داریم:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 & t_0^4 & t_0^5 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 & t_f^4 & t_f^5 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 & 4t_0^3 & 5t_0^4 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 & 4t_f^3 & 5t_f^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_0 & 12t_0^2 & 20t_0^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_f & 12t_f^2 & 20t_f^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_f \\ \omega_0 \\ \omega_f \\ \alpha_0 \\ \alpha_f \end{bmatrix} \quad (15-5)$$

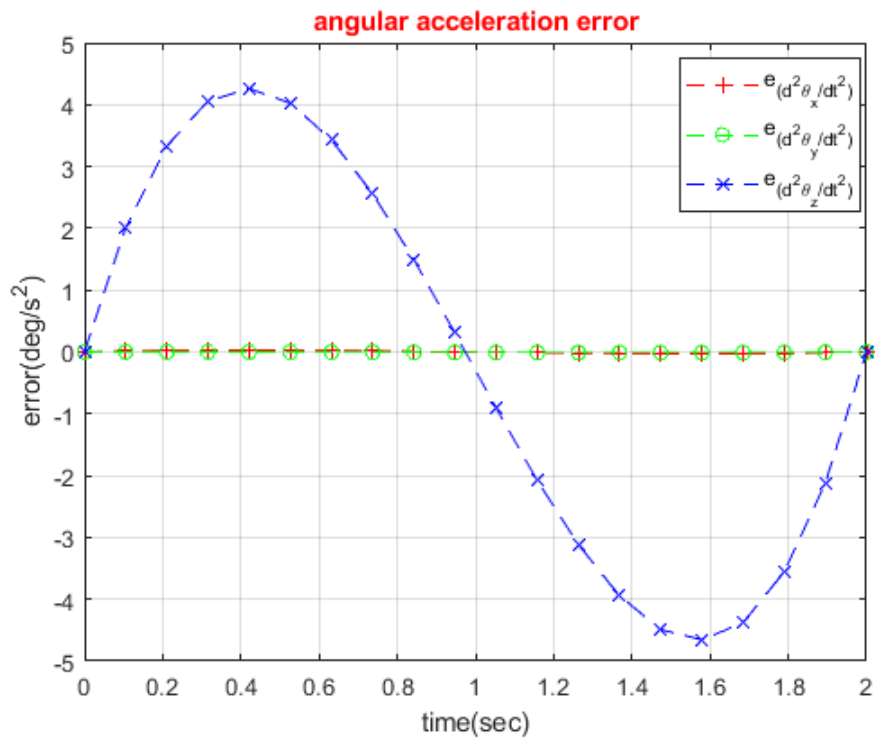
۵-۱-۴- طراحی مسیر به روش چندجمله‌ای مرتبه پنج و مقایسه با دینامیک ربات

در این بخش هم از معادله (۸-۵) و جدول های بخش ۵-۱-۲- استفاده می‌شود و نمودارهای شتاب حاصل از معادله طراحی مسیر با شتاب دینامیکی به صورت تحلیل کیفی بررسی می‌شود.

ابتدا از جدول (۱-۵) نمودارهای زیر گزارش می‌شود که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود.



شکل (۷-۵) شتاب معادله چندجمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۱-۵)

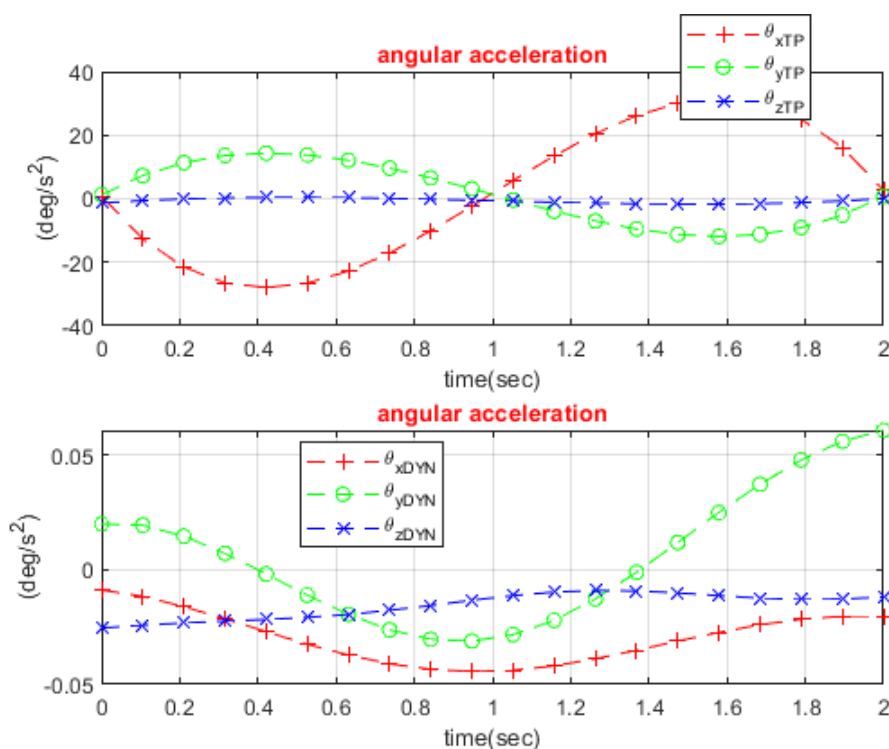


شکل (۵-۸) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله ای مکعبی برای جدول (۵-۱)

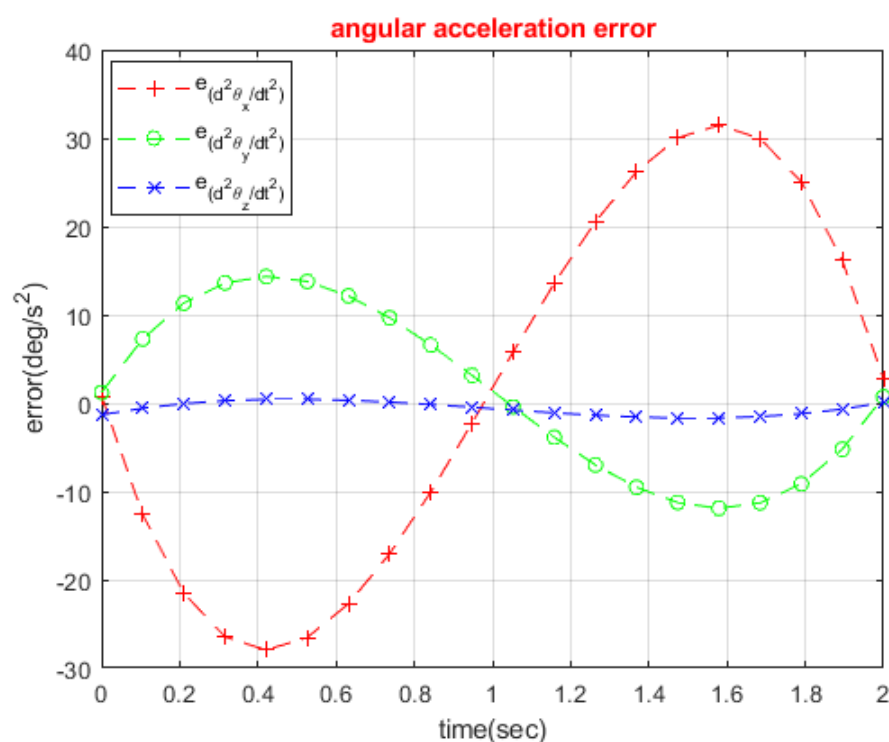
در این روش به خاطر این که ورودی شتاب هم برای طراحی مسیر استفاده شده مشاهده می شود که در دوران وضعی رول خطای ابتدا و انتها صفر شده ولی در طول مسیر ربات با خطای نسبتاً قابل قبولی روبرو هست، این خطای حین مسیر به خاطر نبود اطلاعات از موقعیت، سرعت و شتاب ربات در طول مسیر به عنوان داده برای طراحی مسیر است.

حال از جدول (۵-۳) نمودارهای زیر از دوران وضعی یاو و رول گزارش می شود.

همانطور که مشخص است اختلاف شتاب طراحی شده و شتاب دینامیکی در طول بسیار زیاد است و حتی دقیق در دوران پیچ مسیر طراحی شده شتاب ایجاد کرده پس شتابهای دورانی مسیر طراحی شده قابل قبول نیست.



شکل (۵-۹) شتاب معادله چند جمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۵-۳)



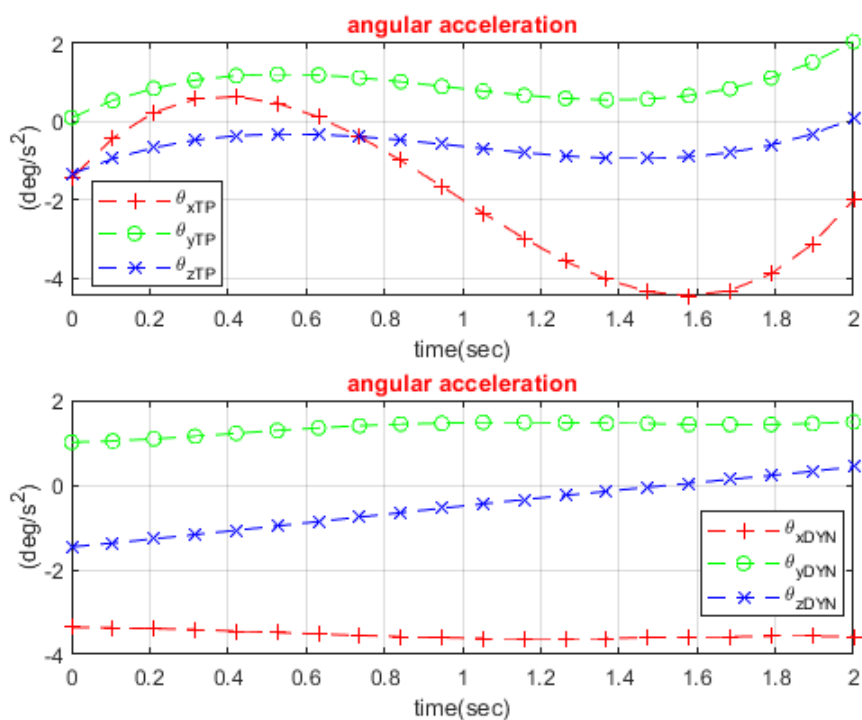
شکل (۵-۱۰) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله‌ای مکعبی برای جدول (۵-۳)

نکته جالب در بررسی خطای این وضعیت صفر بودن خطای ابتدا و انتهای مسیر است. که نشان دهنده

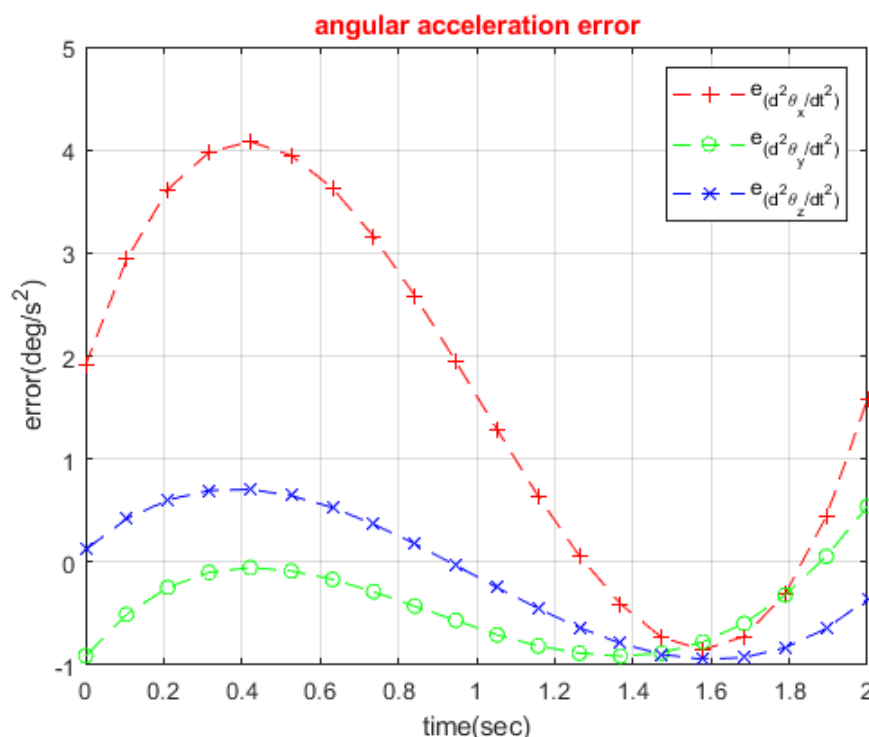
صحت این طراحی مسیر برای نقاط ابتدا و انتها است.

برای سومین مسیر مورد بررسی مسیر جدول (۵-۵) شامل دوران‌های رول، یاو و پیچ انتخاب می‌شود.

همان‌طور که مشخص است شتاب طراحی شده برای دوران وضعی یاو از خطای بیشتری نسبت به دو دوران دیگر برخوردار است. این مسئله نشان می‌دهد که طراحی مسیر در حالت کلی به‌خاطر طراحی شدن صرفاً براساس مشخصات ابتدا و انتهای مسیر حرکت، از دقت و صحت لازم برخوردار نیست این به‌خاطر شرایط حین مسیر است.



شکل (۵-۱۱) شتاب معادله چندجمله‌ای مکعبی و شتاب دینامیکی برای جدول (۵-۵)



شکل (۵-۱۲) خطای بین شتاب مدل دینامیکی و معادله چند جمله ای مکعبی برای جدول (۵-۵)

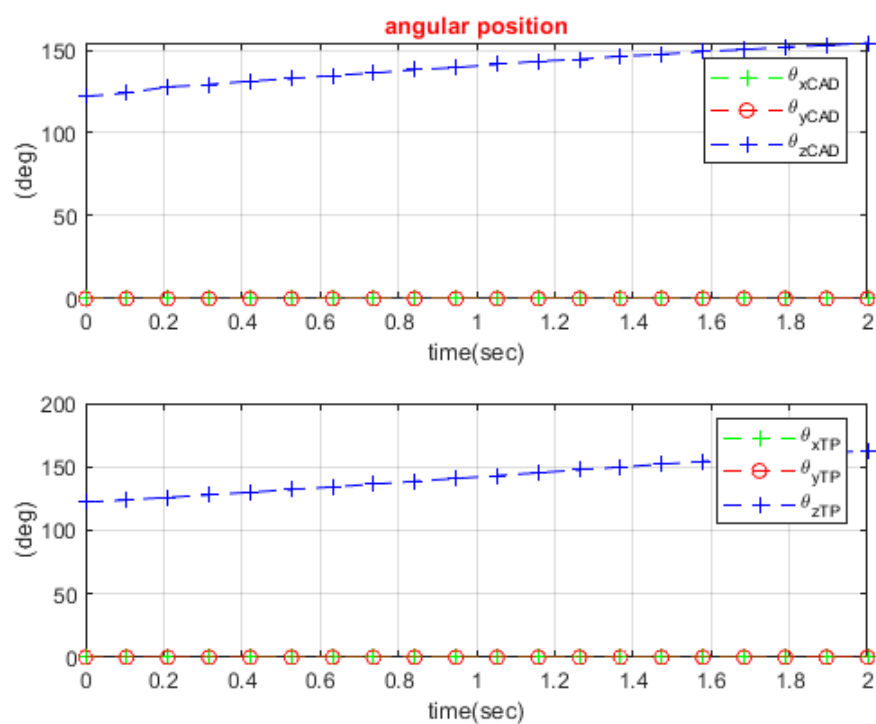
۵-۱-۵- طراحی مسیر به روش چندجمله‌ای مرتبه پنج و مقایسه با مدل CAD ربات

پس از این مقایسه ما می‌توان برای بررسی معادلات طراحی مسیر و اعتبار سنجی آن‌ها این معادلات را با مسیری که توسط ربات در نرم افزار انجام شده مقایسه و مقادیر خطای جابجایی سرعت و شتاب را به صورت پلات هایی گزارش کرد.

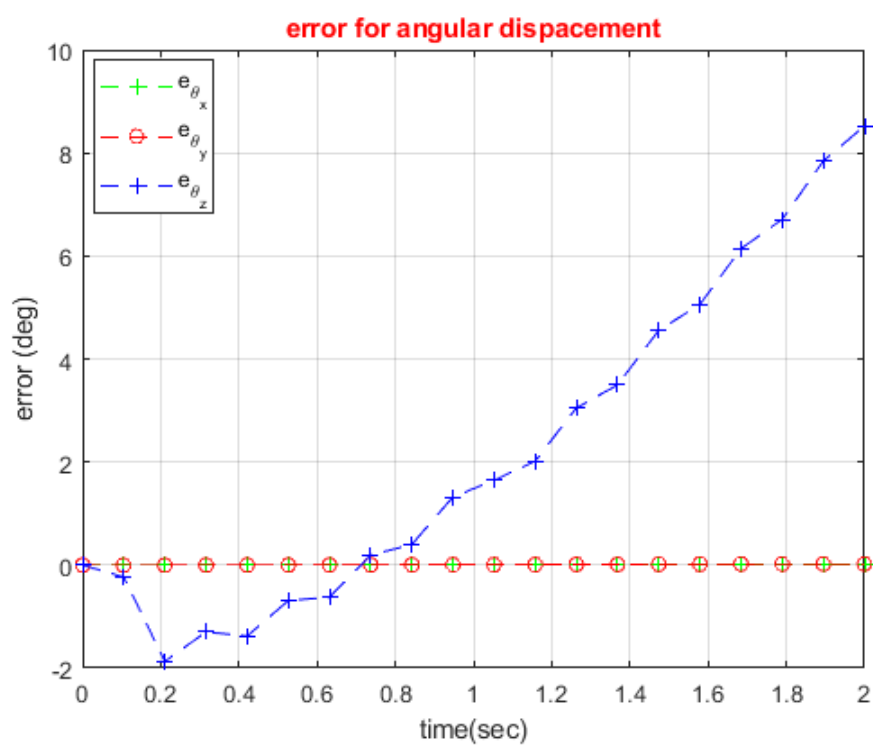
$$e = \theta_{TP} - \theta_{CAD} \quad (۵-۱۶)$$

در مسیر اول جدول (۵-۱) دوران رول فقط انجام شده است که در شکل (۵-۱۴) مشاهده می‌شود خطای مسیر مقدار قابل قبولی را دارد.

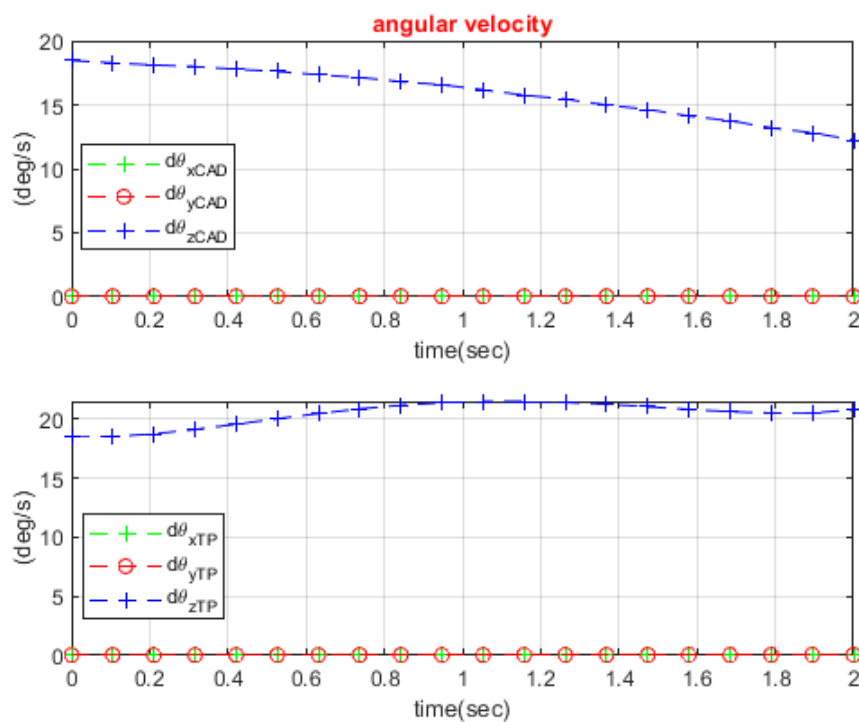
همانطور که از شکل (۵-۱۶) مشخص است سرعت در مسیر مدل سالی‌دورک کاهش پیدا کرده ولی در طراحی مسیر روندی افزایشی دارد و این باعث ایجاد خطای غیرقابل قبولی در سرعت و احتمال اغتشاش در دوران‌های دیگر در صورت داشتن دوران در آن جهت‌ها می‌شود.



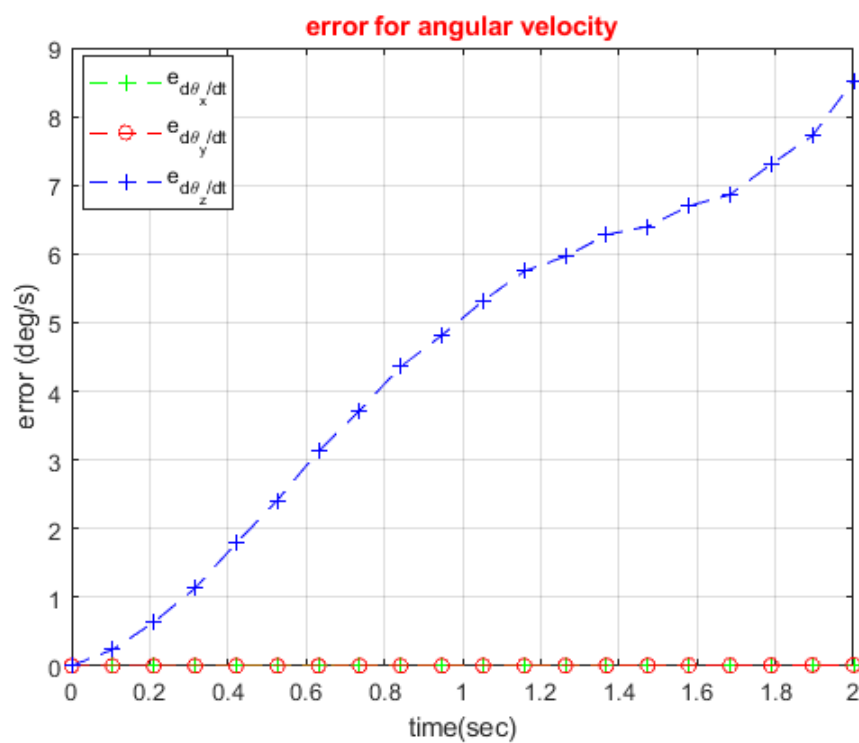
شکل (۵-۱۳) جابجایی دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۱)



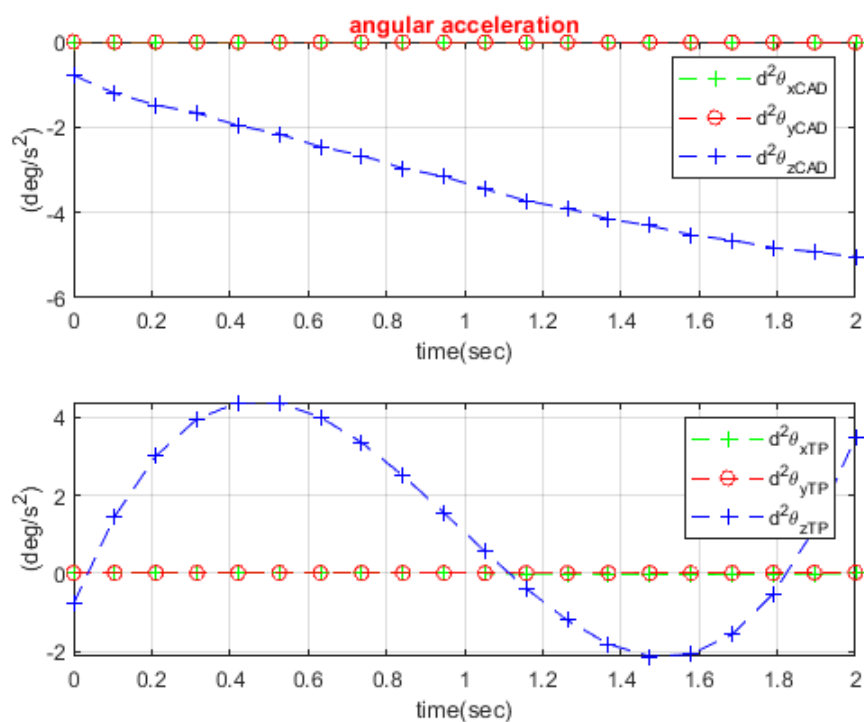
شکل (۵-۱۴) خطای بین جابجایی دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۱)



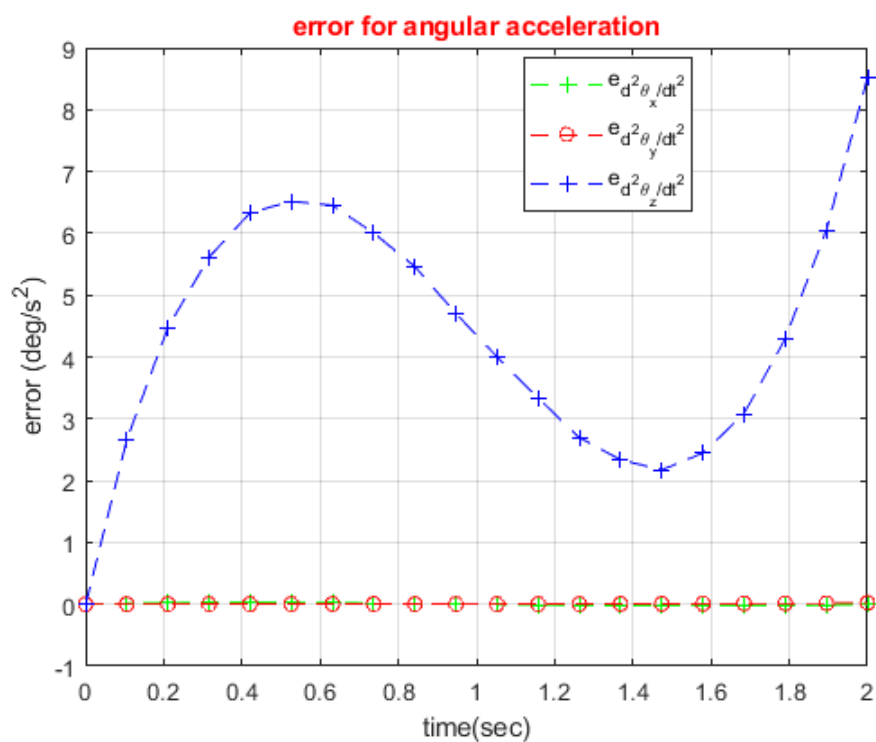
شکل (۱۵-۵) سرعت دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۱-۵)



شکل (۱۶-۵) خطای بین سرعت دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۱-۵)



شکل (۵-۱۷) شتاب دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی جدول (۵-۱)

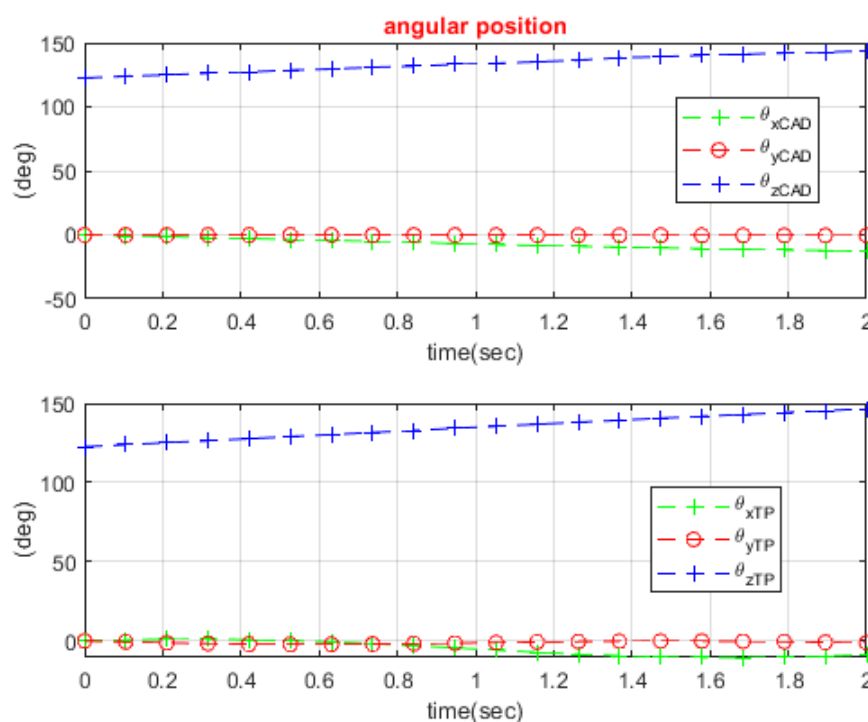


شکل (۵-۱۸) خطای بین جابجایی دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۱)

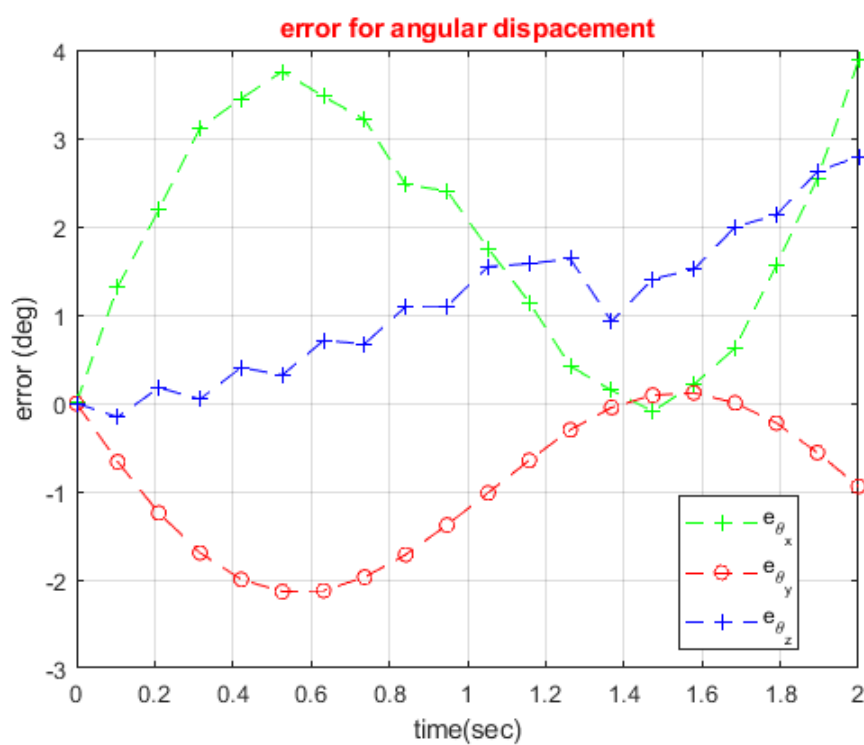
همان‌طور که پیش‌بینی شد مغایرت سرعت طراحی شده برای مسیر با سرعت مدل سالی‌دورک در نمودار شکل (۵-۱۸) شتاب یک خطای غیر قابل قبول حول محور Z ایجاد کرده‌است.

حالا مسیر دوم مطابق جدول (۵-۳) بررسی می‌شود. همان‌طور که مشخص است در این قسمت دوران حول محور رول و یاو هست.

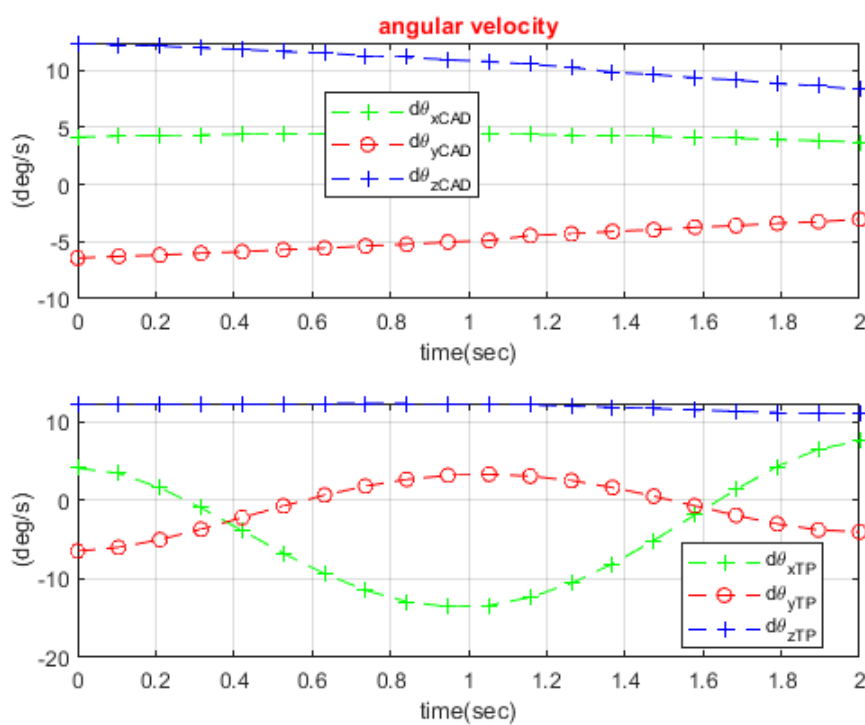
خطای مسیر طراحی شده و مسیر طی شده در مدل سالی‌دورک این مسیر خطای پایینی است، همان‌طور که در شکل (۵-۲۲) مشخص است سرعت دورانی پیچ برای مسیر طراحی شده و نمودار سرعت حول محور X و Y خطای غیر قابل قبولی ایجاد کرده است که قابل نظر نمی‌باشد، در مورد خطای شتاب هم همین اتفاق مشابه افتاده است و همان‌طور که در شکل (۵-۲۴) دیده می‌شود این خطا بسیار بالاست.



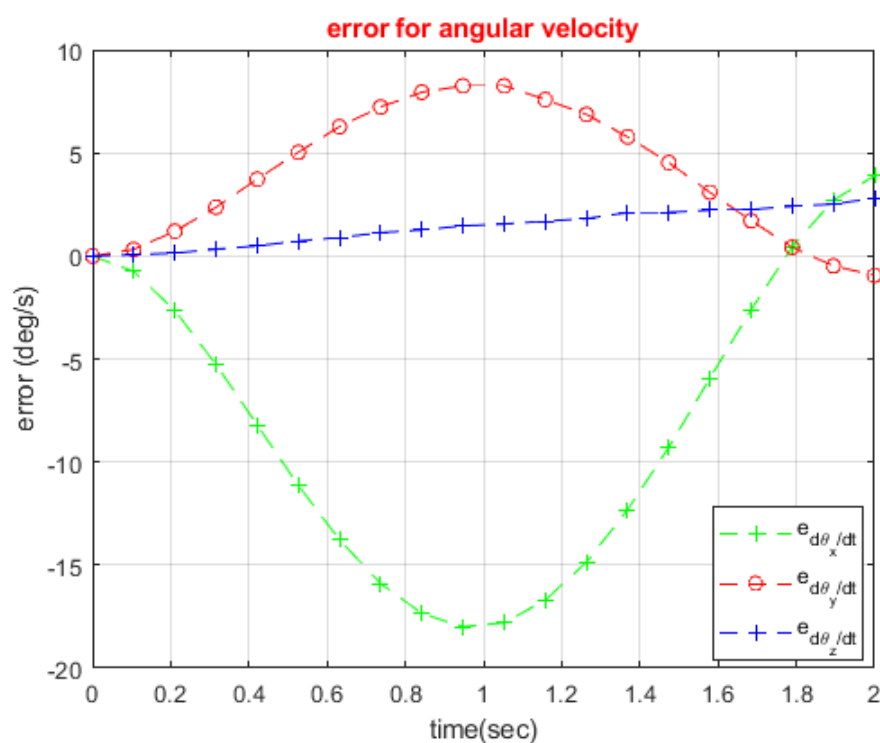
شکل (۵-۱۹) جابجایی دورانی مدل سالی‌دورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۳)



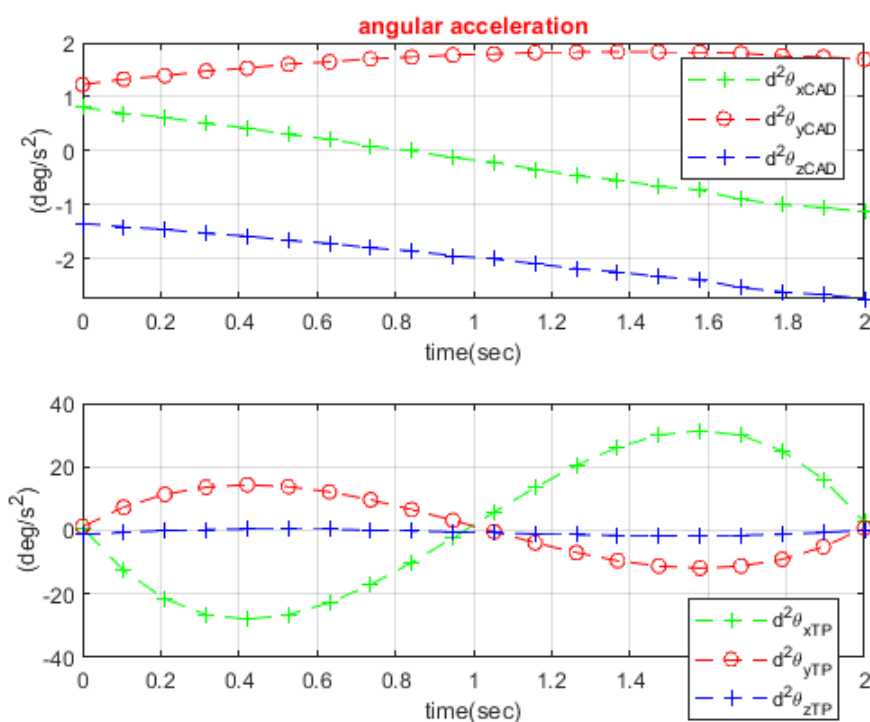
شکل (۵-۲۰) خطای بین جابجایی دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۳)



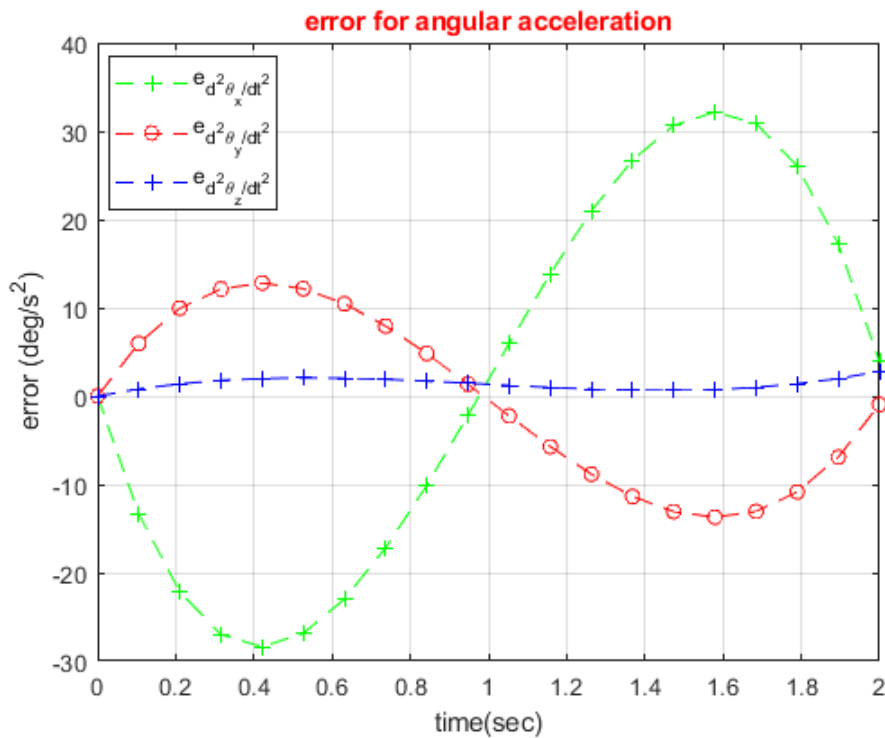
شکل (۵-۲۱) سرعت دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۳)



شکل (۵-۲۲) خطای بین سرعت دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۳)



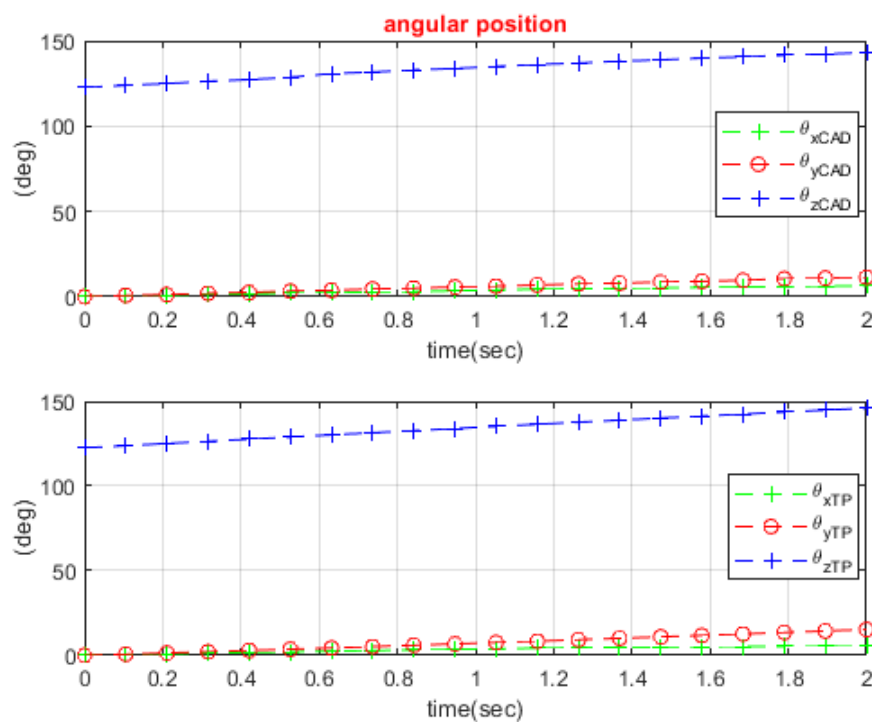
شکل (۵-۲۳) شتاب دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۳)



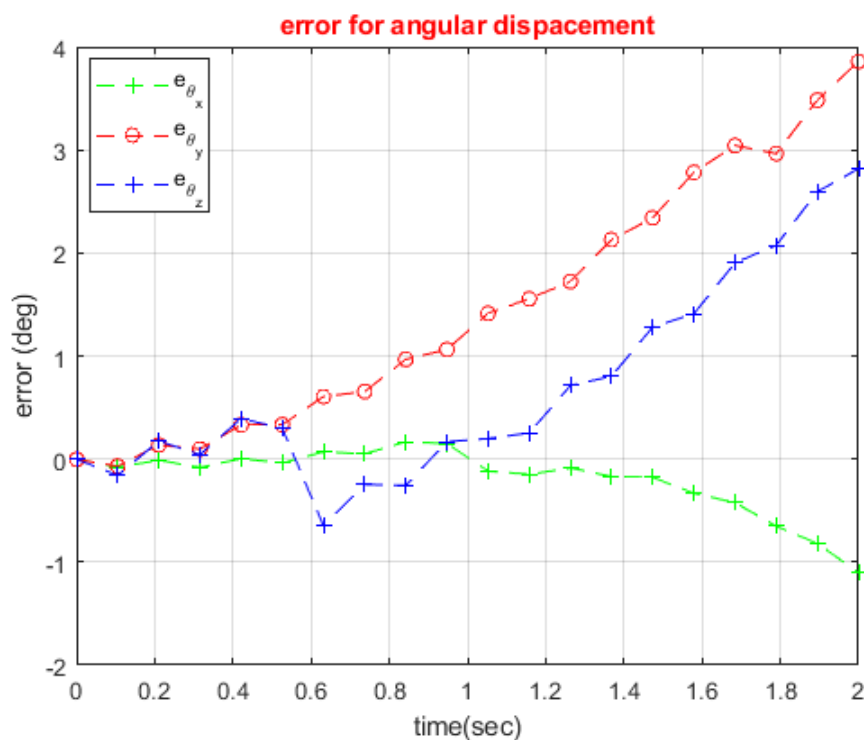
شکل (۲۴-۵) خطا بین شتاب دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۳-۵)

در نهایت مسیر سوم بررسی می‌شود، در این مسیر صفحه متحرک ربات در مدل سالیدورک دوران وضعی رول، یاو و پیچ را انجام می‌دهد.

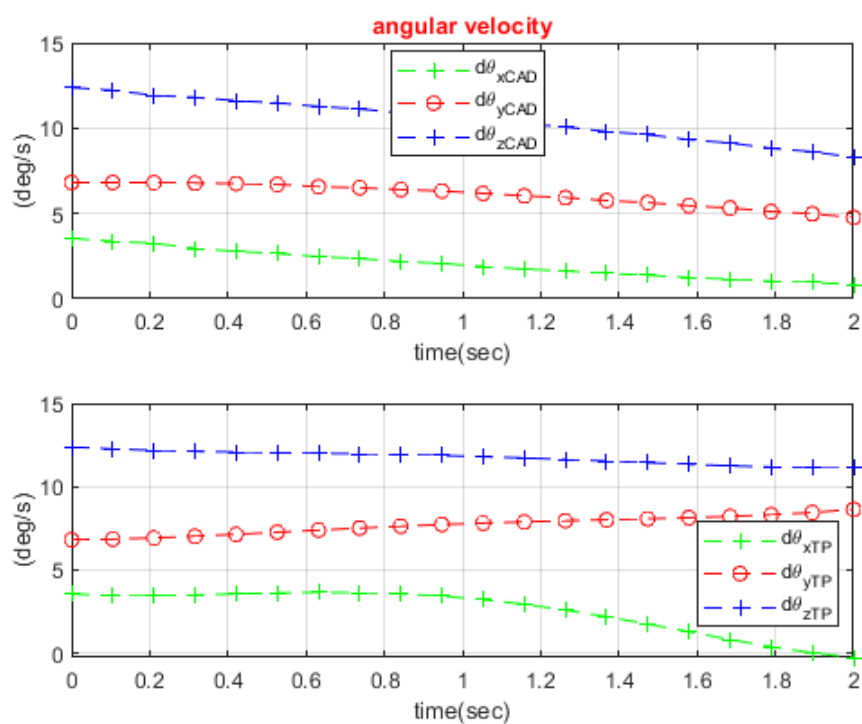
در این مسیر هم مثل مسیرهای قبل خطای جابجایی دورانی به نسبت کم و قابل قبول است، از طرفی همان‌طور که در شکل (۲۸-۵) دیده می‌شود خطای بین سرعت‌های دورانی هم به نسبت دومسیر قبلی قابل قبول‌تر است، خطای شتاب شکل (۳۰-۵) در سه راستا به نسبت قبل کاهش داشته ولی باز هم خطای بالایی برای شتاب یک سیستم است و می‌تواند منجر به اتفاق‌های پیش‌بینی نشده در سیستم شود.



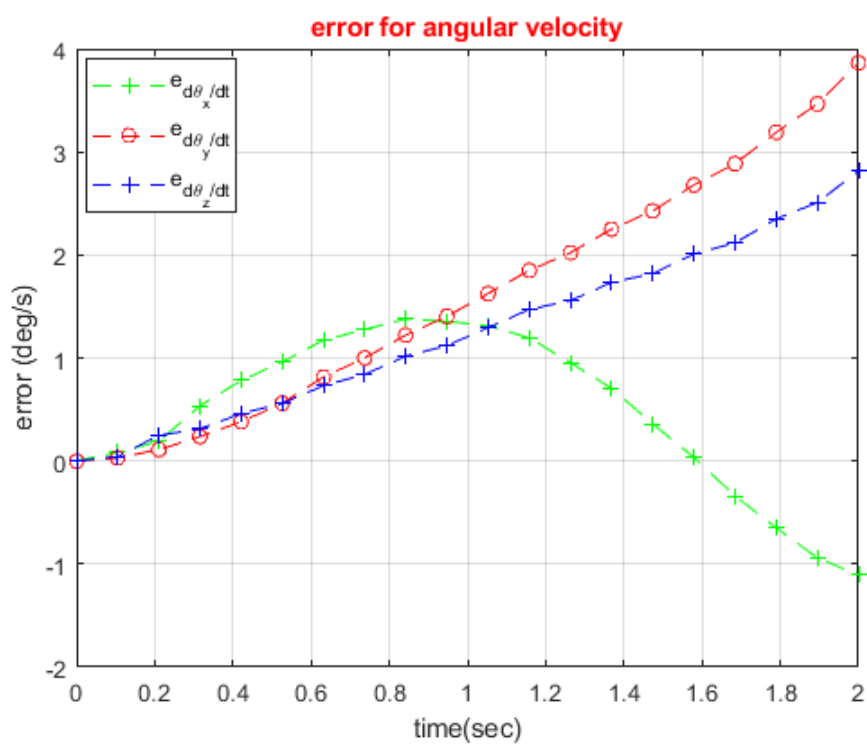
شکل (۵-۲۵) جابجایی دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵)



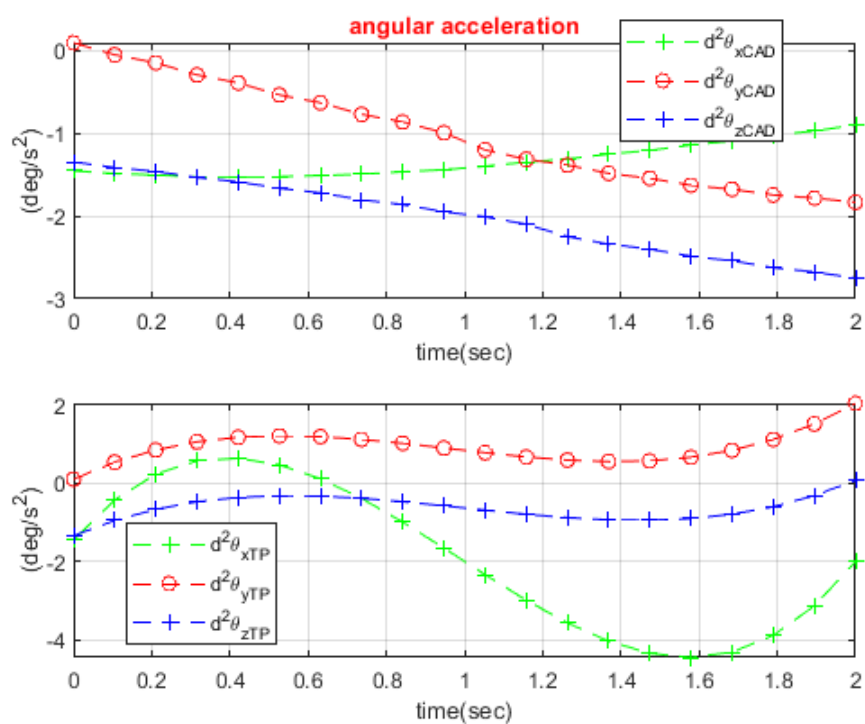
شکل (۵-۲۶) خطای بین جابجایی دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵)



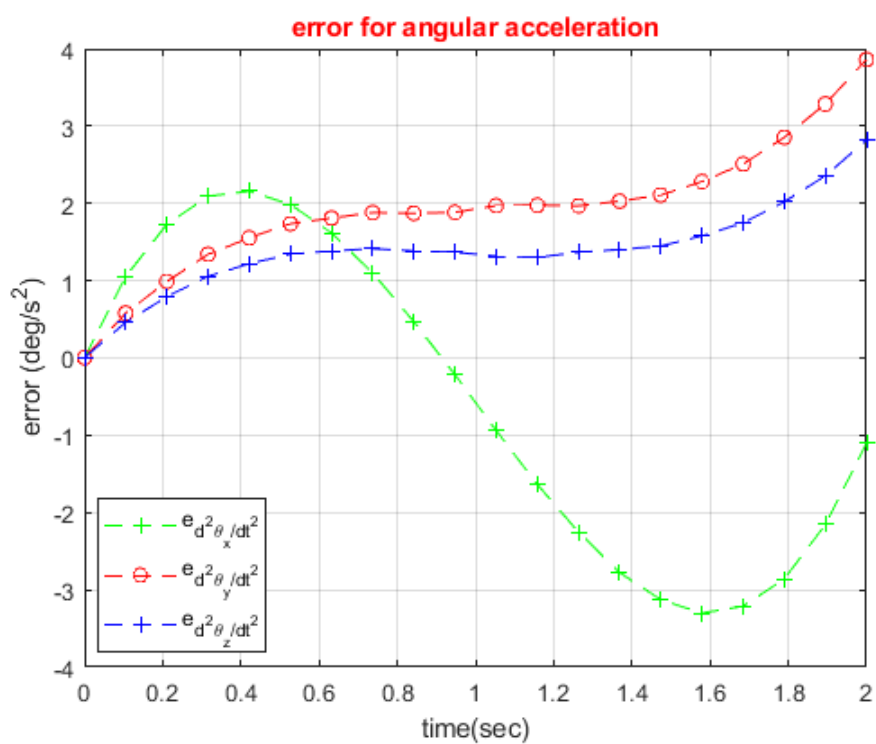
شکل (۲۷-۵) سرعت دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵)



شکل (۲۸-۵) خطای بین سرعت دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵)



شکل (۵-۲۹) شتاب دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵)



شکل (۵-۳۰) خطای بین شتاب دورانی مدل سالیدورک و مسیر طراحی شده جدول (۵-۵)

۵-۲- کنترل سیستم

از اوایل دهه هفتاد که مهندس‌های کنترل وارد عرصه کنترل حلقه بسته ربات‌ها شدند، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای کنترل ربات‌ها پیشنهاد شده‌اند به طوری که هم‌اکنون می‌توان گفت مسئله کنترل ربات‌های موازی به خوبی فهمیده شده‌است. از جمله این روش‌های کنترلی می‌توان به کنترل PID، روش‌های غیرخطی نظیر گشتاور محاسبه شده، مقاوم، تطبیقی و روش‌های هوشمند اشاره کرد.

کنترل سیستم‌های با حلقه‌های بسته سینماتیکی به دلیل پیچیده بودن معادله‌های دینامیکی و وجود قیدهای سینماتیکی در متغیرهای مفصلی از دیرباز مورد توجه محقق‌ها قرار گرفته است. بسیاری از روش‌های کنترلی که برای ربات‌های سری پیشنهاد شده‌اند برای استفاده در این ربات‌ها تطبیق داده شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به کنترل خطی، ساده و غیر متمرکز PID که عملی‌ترین روش کنترلی در ربات‌های سری است، اشاره کرد.

اولین مرحله در طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم حلقه‌بسته کنترل، اندازه‌گیری صحیح و دقیق هدف کنترلی است. بدون یک اندازه‌گیری درست حتی پیشرفته‌ترین کنترل‌کننده‌ها نیز از کنترل دقیق باز خواهند ماند.

در مقایسه با حجم زیاد پژوهش‌های انجام‌شده که در زمینه کنترل ربات‌های سری و موازی معمول به انجام رسیده، متأسفانه تعداد محدودی به بحث کنترل ربات‌های موازی سه درجه آزادی دورانی پرداخته‌اند که در بسیاری از آن‌ها الگوریتم‌های کنترلی که برای ربات‌های سری و موازی دیگر توسعه داده شده‌اند برای استفاده در ربات‌های موازی با سه درجه آزادی دورانی تطبیق داده شده‌اند.

ربات‌های موازی برای کاربردهای مختلف طراحی شده‌اند. در نوع اول صفحه متحرک به‌طور دقیق موقعیت و مسیر هدف را در یک بازه زمانی بدون نیازی به نیروی متقابل محیط دنبال می‌کند. کاربرد معمولی چنین موردی را می‌توان در حرکت شبیه‌ساز پرواز مشاهده کرد که در این برنامه موقعیت مورد نظر و جهت صفحه متحرک با توجه به شرایط شبیه‌سازی شده و دستورات خلبان تغییر می‌کند.

کنترل‌کننده ربات باید تاریخچه زمان ورودی‌های مورد نیاز را تعیین کند تا باعث این حرکت شود.

نوع دوم شامل وضعیتی است که حرکت صفحه متحرک ربات در تماس با محیط سخت قرار دارد، این نوع ربات موازی برای ماشین‌کاری دقیق، سنگ زنی دقیق یا میکرومونتاز و برنامه‌های مشابه استفاده

می‌شود. در چنین برنامه‌هایی نیروی تماس حالت اثر برخورد را بهتر از موقعیت و دوران صفحه متحرک توصیف می‌کند.

برای کنترل موقعیت نهایی و زوایای ربات، مدل دینامیکی ربات مورد نیاز است.

پس از صحت سنجی رابطه دینامیکی حال به کنترل سیستم به روش کنترل PID می‌پردازیم. در بخش دینامیک معادله دینامیکی ربات به شکل معادله (۵-۲۰) بود با استاندارد سازی این معادله به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$M(x)\ddot{x} + C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) = F \quad (۵-۱۷)$$

کنترلر PID به صورت:

$$F = K_P e(t) + K_V \dot{e}(t) + K_I \int_0^t e(s) ds = Ky \quad (۵-۱۸)$$

رابطه خطای موقعیت دورانی صفحه متحرک و ضرایب کنترلی را به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$$e(t) = x_d(t) - x(t) \quad (۵-۱۹)$$

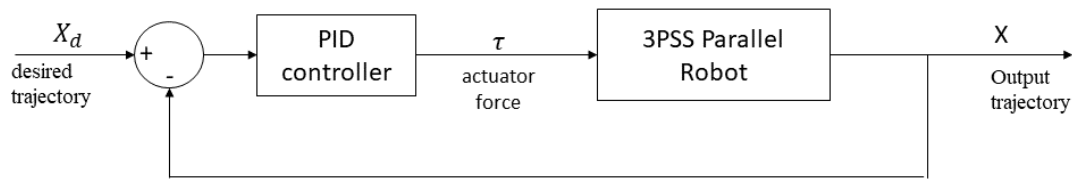
$$K = [K_I, K_P, K_V] \quad (۵-۲۰)$$

$$y = \left[\int_0^t e^T(s) ds, e^T(t), \dot{e}^T(t) \right]^T \quad (۵-۲۱)$$

رابطه (۵-۱۷) بازنویسی می‌شود:

$$M(x)\ddot{x} + C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) = Ky \quad (۵-۲۲)$$

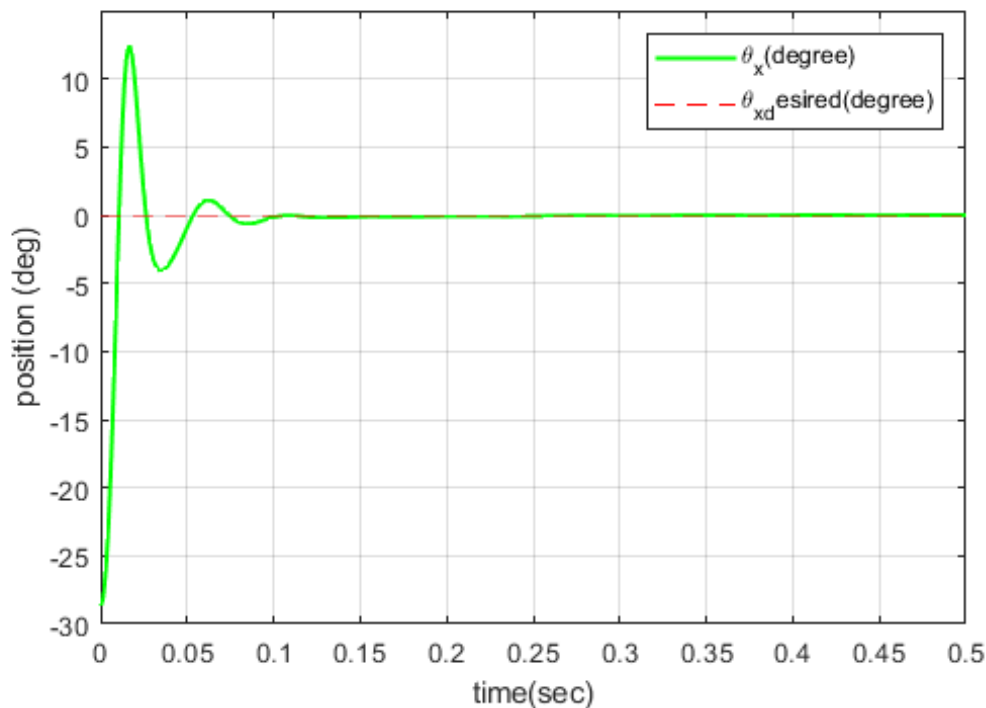
در این رابطه $x = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$ می‌باشد:



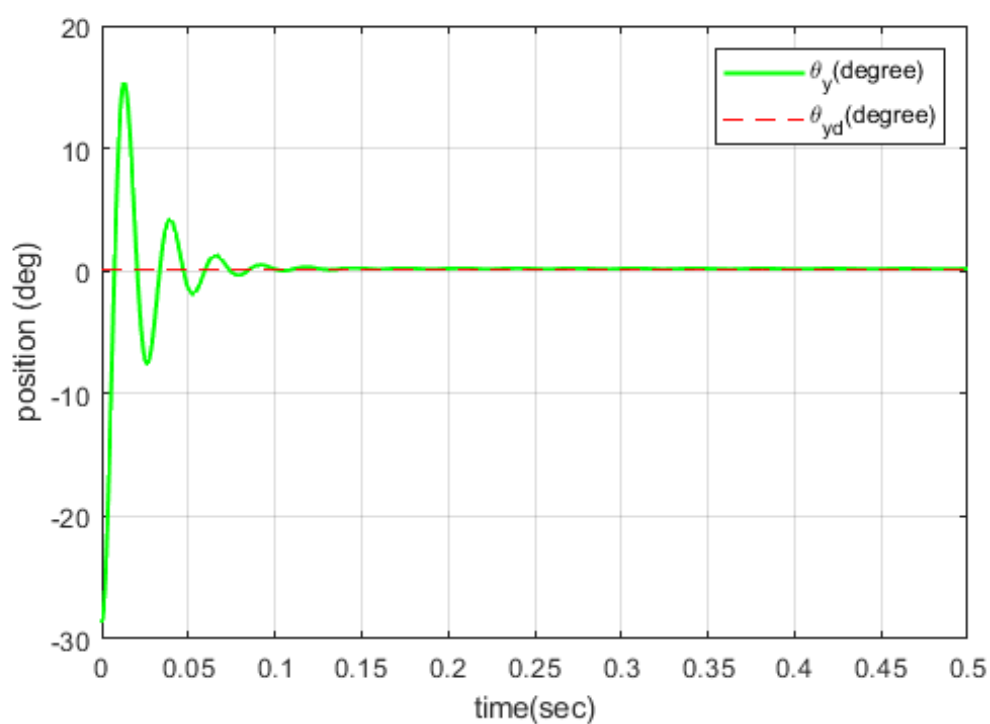
شکل (۳۱-۵) PID فیدبک کنترل

در این رابطه موقعیت ربات به وسیله نیروی عملگر کنترل می‌شود. دوران هدف (x_d) همان دوران انجام شده ربات در شبیه‌ساز است که به عنوان یک فایل اکسل با دقت چهارصدم ثانیه به مدل‌سازی کنترلی وارد می‌شود، کنترلر نیروی عملگر را تخمین زده و به دینامیک ربات وارد می‌کند، اختلاف بین شبیه‌ساز و مدل به عنوان خطا به کنترلر وارد می‌شود.

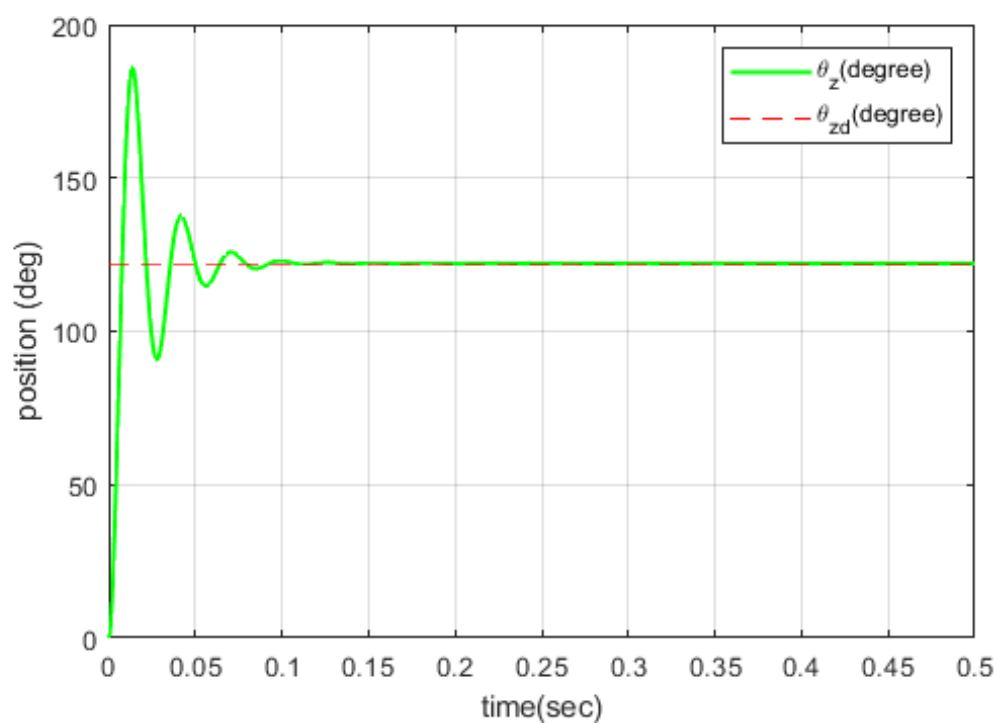
حال با اعمال شرایط اولیه غیر صفر به سیستم ابتدا درستی کنترلر بررسی می‌شود؛ سپس ردیابی مسیر توسط این کنترلر انجام خواهد شد و خطای ردیابی مسیر گزارش می‌شود.



شکل (۳۲-۵) ردیابی نقطه شروع دوران یو در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر



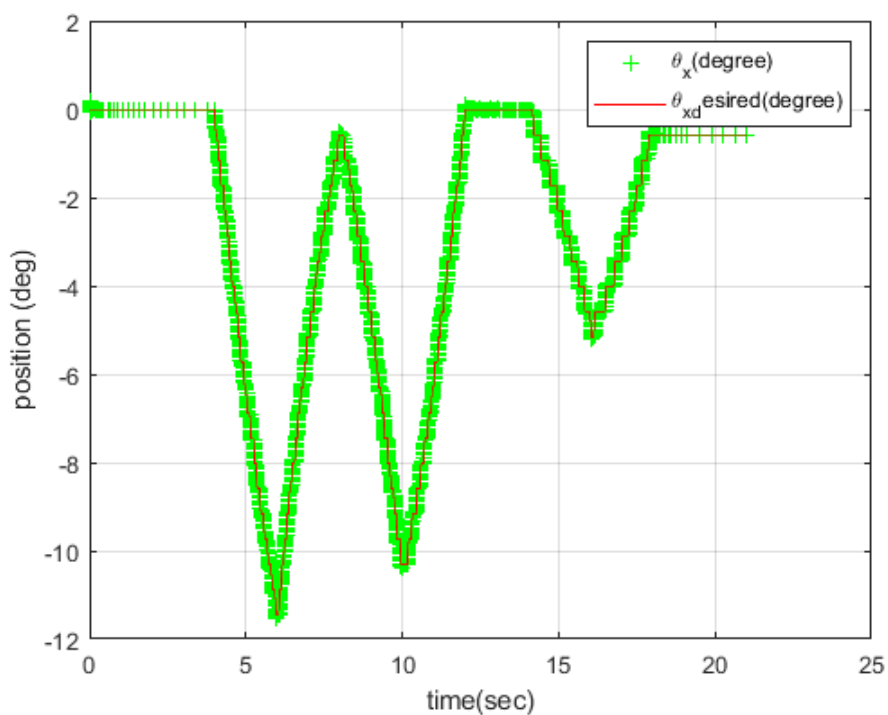
شکل (۳۳-۵) ردیابی نقطه شروع دوران پیچ در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر



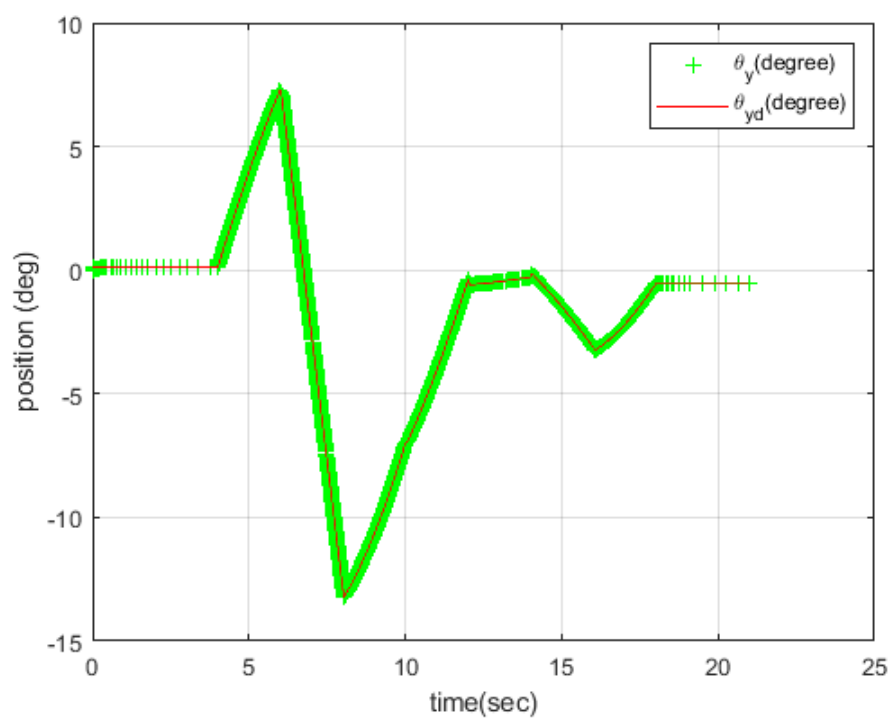
شکل (۳۴-۵) ردیابی نقطه شروع دوران رول در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر

شکل‌های پایین ردیابی مسیر شبیه‌سازی شده به وسیله مدل کنترلی را برای اعتبار سنجی مدل کنترلی

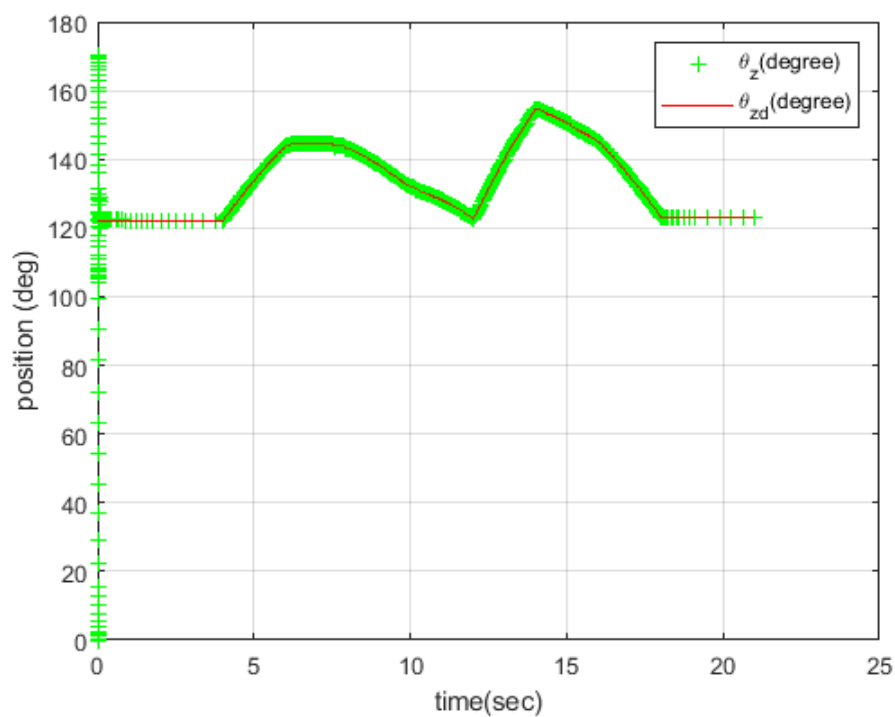
نشان می‌دهد که برای واضح بودن این ردیابی شکل (۵-۳۸) خطای بین شبیه ساز و مدل کنترلی را گزارش می‌کند.



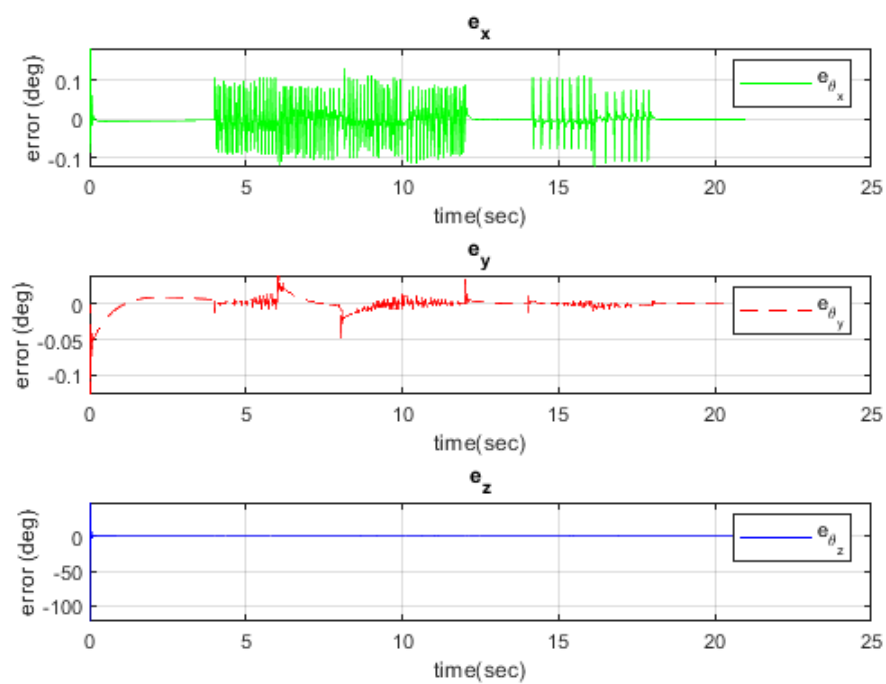
شکل (۵-۳۵) ردیابی مسیر دورانی یاو طی شده در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر



شکل (۵-۳۶) ردیابی مسیر دورانی پیچ طی شده در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر



شکل (۵-۳۷) ردیابی مسیر دورانی رول طی شده در مدل CAD و کنترل توسط PID کنترلر



شکل (۵-۳۸) خطای ردیابی بین مسیرهای دورانی طی شده در مدل CAD و PID کنترلر

۶- نتیجه گیری و پیشنهادها

۶-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه با استفاده از عملگرهای خطی پنوماتیکی و مفاصل کروی، ساختار جدیدی از یک ربات موازی با سه درجه آزادی دورانی ارائه و مورد مطالعه قرار گرفت. ربات 3PSS در مقایسه با مکانیزم‌های مشابه، به خاطر قرار گرفتن عملگرها روی پایه ثابت ربات دارای مانور بهتر و سرعت و شتاب بالاتر می‌باشد.

باتوجه به گستره وسیع کاربردهای ربات موازی با درجه آزادی دورانی در صنعت، تحقیق‌های دانشگاهی و پزشکی به مدل‌سازی سینماتیکی کامل و تحلیل ژاکوبین و درنهایت مدل‌سازی دینامیکی این مدل ربات به دلیل پیچیدگی محاسباتی توجه زیادی نکرده‌اند و بیشتر از سنسورها برای رفع این مشکل استفاده شده است؛ به همین خاطر هنوز به عنوان یک مشکل در تحقیقات ربات موازی در نظر گرفته می‌شود. هدف این پایان نامه ارزیابی مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات 3PSS و اعتبار سنجی این مدل‌سازی و درنهایت پیاده سازی کنترلی بر مبنای دینامیک بود. مطالعه با استخراج سینماتیک معکوس ربات بر مبنای روش هندسی آغاز و سپس روابط سینماتیک مستقیم بر مبنای عددی بررسی شد؛ این روابط پس از مدل‌سازی در متلب با شبیه ساز سالدورک اعتبار سنجی شدند و درنهایت به تحلیل سرعت پرداخته شد.

ژاکوبین ربات که رابط سرعت عملگرها و مجری نهایی است، محاسبه شد و سپس با بررسی ژاکوبین فضای کاری ربات به دست آمد. تکینگی ربات در فضای کاری بررسی شد، ربات در این فضای کاری هیچ تکینگی نداشت.

در گام بعدی از آن جایی که مکانیزم ربات یک سیستم مقید است؛ معادله‌های حاکم بر دینامیک این مکانیزم با استفاده از روش نیوتن-اولر برای سیستم‌های مقید استخراج شد. سپس برای اعتبار سنجی ربات در محیط نرم افزار سالدورک شبیه سازی و نتایج حاصل از مقداردهی به معادله‌های مذکور با خروجی سالدورک مقایسه شد.

درنهایت برای کنترل ربات از یک کنترلر PID برای ردیابی یک مسیر دلخواه استفاده شد؛ این کنترلر ربات را به خوبی کنترل کرد و ردیابی مسیر با دقت بالایی انجام پذیرفت.

به طور خلاصه دست آوردهای این پروژه عبارتند از:

- طراحی و شبیه سازی ربات در نرم افزار سالیدورک برای اعتبار سنجی
- به دست آوردن معادله سینماتیکی به روش هندسی و اعتبار سنجی سینماتیک
- بررسی فضای کاری و تکینگی ها
- به دست آوردن معادله دینامیکی حاکم بر ربات به روش نیوتن و اعتبار سنجی دینامیک
- پیاده سازی کنترلی بر مبنای دینامیک ربات

۲-۶- پیشنهادها

باتوجه به این که ربات موازی فضایی 3PSS ربّاتی با کاربری های وسیع است

- بهینه سازی دوران های وضعی یاو و پیچ
 - پیاده سازی های کنترلی وسیع
 - بهینه سازی فضای کاری ربات
- از جمله کارهایی است که در آینده برای این ربات می توان انجام داد.

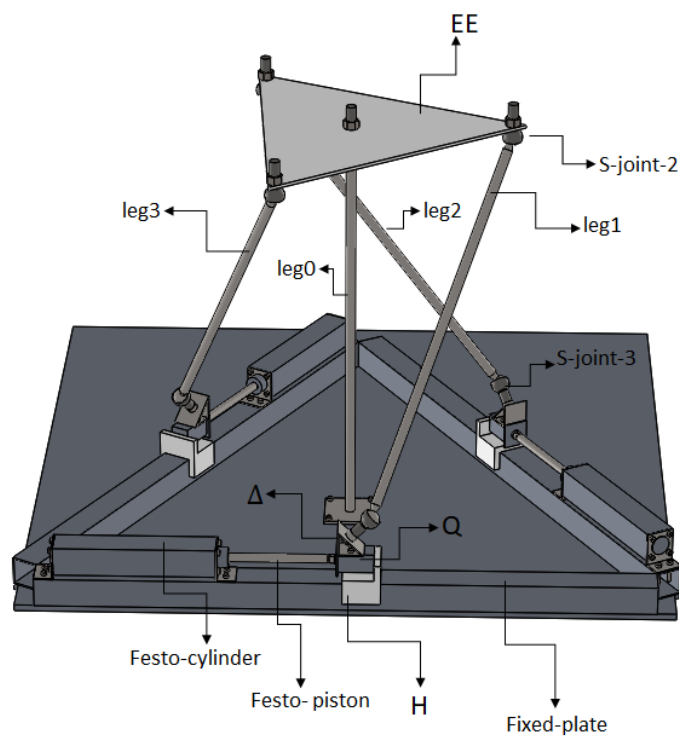
٧- مراجع

- [1] R. Jürgens, G. Nasios, and W. J. E. b. r. Becker, "Vestibular, optokinetic, and cognitive contribution to the guidance of passive self-rotation toward instructed targets," vol. 151, no. 1, pp. 90-107, 2003.
- [2] P. Cappa *et al.*, "Effect of changing visual condition and frequency of horizontal oscillations on postural balance of standing healthy subjects," vol. 28, no. 4, pp. 615-626, 2008.
- [3] J. H. Allum, M. G. Carpenter, F. J. I. e. i. m. Honegger, and b. magazine, "Directional aspects of balance corrections in man," vol. 22, no. 2, pp. 37-47, 2003.
- [4] M. Bakker *et al.*, "Postural responses to multidirectional stance perturbations in cerebellar ataxia," vol. 202, no. 1, pp. 21-35, 2006.
- [5] M. Carpenter, J. Allum, and F. J. E. b. r. Honegger, "Vestibular influences on human postural control in combinations of pitch and roll planes reveal differences in spatiotemporal processing," vol. 140, no. 1, pp. 95-111, 2001.
- [6] J. van Doornik and T. J. I. t. o. b. e. Sinkjær, "Robotic platform for human gait analysis," vol. 54, no. 9, pp. 1696-1702, 2007.
- [7] U. Laessoe, M. J. G. Voigt, and posture, "Anticipatory postural control strategies related to predictive perturbations," vol. 28, no. 1, pp. 62-68, 2008.
- [8] S. P. Broglio, J. J. Sosnoff, K. S. Rosengren, K. J. A. o. p. m. McShane, and rehabilitation, "A comparison of balance performance: computerized dynamic posturography and a random motion platform," vol. 90, no. 1, pp. 145-150, 2009.
- [9] A. Lees, J. Vanrenterghem, G. Barton, M. J. M. e. Lake, and physics, "Kinematic response characteristics of the CAREN moving platform system for use in posture and balance research," vol. 29, no. 5, pp. 629-635, 2007.
- [10] C. L. Yau, "Systems and methods employing a rotary track for machining and manufacturing," ed: Google Patents, 2001.
- [11] P. Cappa and F. J. E. P. A. E. A. Patane, "Motorized platform for the therapeutic treatment of patients," 2006.
- [12] G. Dunlop, T. J. M. Jones, and M. Theory, "Position analysis of a two DOF parallel mechanism—the Canterbury tracker," vol. 34, no. 4, pp. 599-614, 1999.
- [13] M. E. Rosheim and G. F. Sauter, "New high-angulation omnidirectional sensor mount," in *Free-Space Laser Communication and Laser Imaging II*, 2002, vol. 4821, pp. 163-174: International Society for Optics and Photonics.
- [14] J. Jiang, Y. Han, Y. Zhang, X. Yu, and X. J. R. P. o. M. E. Guo, "Recent advances on masticatory robot," vol. 9, no. 3, pp. 184-192, 2016.
- [15] T. Sun, Y. Zhai, Y. Song, J. J. R. Zhang, and C.-I. Manufacturing, "Kinematic calibration of a 3-DoF rotational parallel manipulator using laser tracker," vol. 41,

- pp. 78-91, 2016.
- [16] J.-P. Merlet, "Still a long way to go on the road for parallel mechanisms," in *Proc. ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exhibition*, 2002, pp. 95-99.
 - [17] J.-P. Merlet, "Parallel robots: Open problems," in *Robotics research*: Springer, 2000, pp. 27-32.
 - [18] S. A. Joshi and L.-W. J. J. M. D. Tsai, "The kinematics of a class of 3-DOF, 4-legged parallel manipulators," vol. 125, no. 1, pp. 52-60, 2003.
 - [19] S. Joshi, L.-W. J. I. T. o. R. Tsai, and Automation, "A comparison study of two 3-DOF parallel manipulators: One with three and the other with four supporting legs," vol. 19, no. 2, pp. 200-209, 2003.
 - [20] V. Hayward, "Design of a hydraulic robot shoulder based on a combinatorial mechanism," in *Experimental Robotics III*: Springer, 1994, pp. 295-309.
 - [21] V. Hayward and R. Kurtz, "Modeling of a parallel wrist mechanism with actuator redundancy," in *Advances in Robot Kinematics*: Springer, 1991, pp. 444-456.
 - [22] V. J. R. Hayward and B. System, "Borrowing some design ideas from biological manipulators to design an artificial one," 1993.
 - [23] S. J. R. Staicu and C.-I. Manufacturing, "Dynamics of the 6-6 Stewart parallel manipulator," vol. 27, no. 1, pp. 212-220, 2011.
 - [24] H. Sadjadian and H. Taghirad, "Kinematic analysis of the hydraulic shoulder: a 3-DOF redundant parallel manipulator," in *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, 2005, 2005, vol. 3, pp. 1442-1446: IEEE.
 - [25] L. Baron, J. J. I. T. o. R. Angles, and Automation, "The kinematic decoupling of parallel manipulators using joint-sensor data," vol. 16, no. 6, pp. 644-651, 2000.
 - [26] J.-P. Merlet, "Closed-form resolution of the direct kinematics of parallel manipulators using extra sensors data," in *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1993, pp. 200-204: IEEE.
 - [27] J.-P. Merlet, "Direct kinematics of planar parallel manipulators," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, vol. 4, pp. 3744-3749: IEEE.
 - [28] S.-K. Song and D.-S. Kwon, "Efficient formulation approach for the forward kinematics of the 3-6 Stewart-Gough platform," in *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180)*, 2001, vol. 3, pp. 1688-1693: IEEE.
 - [29] I. A. Bonev, J. Ryu, S.-G. Kim, S.-K. J. I. T. o. R. Lee, and Automation, "A closed-form solution to the direct kinematics of nearly general parallel manipulators with optimally located three linear extra sensors," vol. 17, no. 2, pp. 148-156, 2001.
 - [30] T. Sun, Y. Song, G. Dong, B. Lian, J. J. R. Liu, and C.-I. Manufacturing, "Optimal design of a parallel mechanism with three rotational degrees of freedom," vol. 28, no. 4, pp. 500-508, 2012.
 - [31] S. Staicu, D. J. R. Zhang, and C.-I. Manufacturing, "A novel dynamic modelling approach for parallel mechanisms analysis," vol. 24, no. 1, pp. 167-172, 2008.
 - [32] B. Lian, T. Sun, Y. Song, Y. Jin, M. J. I. J. o. M. T. Price, and Manufacture, "Stiffness analysis and experiment of a novel 5-DoF parallel kinematic machine considering gravitational effects," vol. 95, pp. 82-96, 2015.
 - [33] F. Patanè, P. J. I. T. o. n. s. Cappa, and r. engineering, "A 3-DOF parallel robot with spherical motion for the rehabilitation and evaluation of balance performance," vol. 19, no. 2, pp. 157-166, 2010.
 - [34] C. J. Robinson, M. C. Purucker, and L. W. J. I. T. o. R. E. Faulkner, "Design,

- control, and characterization of a sliding linear investigative platform for analyzing lower limb stability (SLIP-FALLS)," vol. 6, no. 3, pp. 334-350, 1998.
- [35] S. J. Richerson, S. M. Morstatt, K. K. O'Neal, G. Patrick, C. J. J. J. o. n. Robinson, and rehabilitation, "Effect of lateral perturbations on psychophysical acceleration detection thresholds," vol. 3, no. 1, pp. 1-9, 2006.
 - [36] F. Patane, S. Rossi, and P. Cappa, "Experimental validation of an impedance controlled parallel robot for postural rehabilitation," in *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2012, pp. 1077-1080: IEEE.
 - [37] J. J. Craig, "Introduction to Robotics," 2005.
 - [38] H. D. Taghirad, *Parallel robots: mechanics and control*. CRC press, 2013.
 - [39] A. Zarif Loei, M. A. Khosravi, and H. D. J. J. o. C. Taghirad, "Cable Driven Parallel Robots: Kinematics, Dynamics and Control," vol. 8, no. 3, pp. 87-117, 2014.
 - [40] J. Merlet, "Still a long way to go to the road for parallel manipulator," in *ASME 2002 DETC Conference, Montréal, Canada*, 2002.

۸- پیوست



شکل (۸-۱) مشخصات ربات موازی 3PSS

در این بخش مشخصات قطعه‌های مختلف ربات مثل وزن، اندازه‌ها و اینرسی نسبت به مختصات ثابت آورده شده‌است

Mass properties of **fixed-plate**

Configuration: Default

Coordinate system: **fixed coordinate**

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of

RoBot_3PSS_Full_color

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 2991.60 grams

Volume = 1095824.31 cubic millimeters

Surface area = 976752.13 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = 1.00

Y = -0.57

Z = 17.50

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

Px = 237828300.71

Ix = (-0.47, 0.88, 0.00)

Py = 238402272.55

Iy = (-0.88, -0.47, 0.00)

Pz = 474479840.62

Iz = (0.00, 0.00, 1.00)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxz = 4.23 Lxy = -237387.21 Lxx = 238276557.32

Lyz = 2.25 Lyy = 237954015.94 Lyx = -237387.21

Lzz = 474479840.62 Lzy = 2.25 Lzx = 4.23

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

Ixz = 52411.19 Ixy = -239083.78 Ixx = 239193210.62

Iyz = -29641.62 Iyy = 238872708.93 Iyx = -239083.78

Izz = 474483799.64 Izy = -29641.62 Izx = 52411.19

Mass properties of EE

Configuration: Default

Coordinate system: **fixed coordinate**

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of

RoBot_3PSS_Full_color

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 591.56 grams

Volume = 455048.68 cubic millimeters

Surface area = 189799.12 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = 0.01

Y = 0.05

Z = 648.84

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

Px = 5161720.95

Ix = (0.71, 0.71, 0.00)

Py = 5161720.95

Iy = (-0.71, 0.71, 0.00)

Pz = 10320977.05

Iz = (0.00, 0.00, 1.00)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxz = -3576.74 Lxy = -10.88 Lxx = 5161723.43

Lyx = -15695.36 Lyy = 5161768.69 Lyy = -10.88

Lzz = 10320926.82 Lzy = -15695.36 Lzx = -3576.74

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

Ixz = 857.01 Ixy = -10.53 Ixx = 254207431.30

Iyz = 3760.68 Iyy = 254207475.13 Iyx = -10.53

Izz = 10320928.42 Izy = 3760.68 Izx = 857.01

Mass properties of **leg1**

Configuration: Default

Coordinate system: **fixed coordinate**

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of

RoBot_3PSS_Full_color

Density = 0.01 grams per cubic millimeter

Mass = 946.70 grams

Volume = 121371.50 cubic millimeters

Surface area = 31889.30 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = 52.35

Y = -204.85

Z = 385.72

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

Px = 31658.83 Ix = (0.53, 0.29, 0.80)

Py = 36458388.20 Iy = (0.63, -0.77, -0.14)

Pz = 36458388.20 Iz = (0.57, 0.57, -0.59)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxz = 15397179.61 Lxy = 5601317.16 Lxx = 26199818.24

Lyz = 8407067.15 Lyy = 33399993.69 Lyx = 5601317.16

Lzz = 13348623.29 Lzy = 8407067.15 Lzx = 15397179.61

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

Ixz = 34514086.23 Ixy = -4551453.51 Ixx = 206775640.03

Iyz = -66396081.05 Iyy = 176843389.33 Iyx = -4551453.51

Izz = 55670391.69 Izy = -66396081.05 Izx = 34514086.23

Mass properties of **leg2**

Configuration: Default

Coordinate system: **fixed coordinate**

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of

RoBot_3PSS_Full_color

Density = 0.01 grams per cubic millimeter

Mass = 946.70 grams

Volume = 121371.50 cubic millimeters

Surface area = 31889.30 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = 151.44

Y = 146.92

Z = 385.25

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

Px = 31658.83 Ix = (-0.52, 0.32, 0.79)

Py = 36458388.20 Iy = (0.50, -0.64, 0.58)

Pz = 36458388.20 Iz = (0.70, 0.70, 0.17)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxz = -14970020.05 Lxy = -5977545.18 Lxx = 26724062.75

Lyz = 9192621.69 Lyy = 32787764.42 Lyx = -5977545.18

Lzz = 13436608.05 Lzy = 9192621.69 Lzx = -14970020.05

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

Ixz = 40260714.11 Ixy = 15084860.29 Ixx = 187663503.67

Iyz = 62774884.41 Iyy = 195003844.93 Iyx = 15084860.29

Izz = 55580759.56 Izy = 62774884.41 Izx = 40260714.11

Mass properties of **leg3**

Configuration: Default

Coordinate system: **fixed coordinate**

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of

RoBot_3PSS_Full_color

Density = 0.01 grams per cubic millimeter

Mass = 946.70 grams

Volume = 121371.50 cubic millimeters

Surface area = 31889.30 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = -202.75

Y = 56.84

Z = 385.89

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

Px = 31658.83 Ix = (-0.02, -0.60, 0.80)

Py = 36458388.20 Iy = (0.78, -0.50, -0.36)

Pz = 36458388.20 Iz = (0.62, 0.62, 0.48)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxz = -496605.09 Lxy = 376116.36 Lxx = 36447731.36

Lyz = -17526899.14 Lyy = 23183950.12 Lyx = 376116.36

Lzz = 13316753.74 Lzy = -17526899.14 Lzx = -496605.09

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

Ixz = -74563541.76 Ixy = -10534049.59 Ixx = 180479442.26

Iyz = 3238614.21 Iyy = 203071515.64 Iyx = -10534049.59

Izz = 55290188.14 Izy = 3238614.21 Izx = -74563541.76

Mass properties of **leg0**

Configuration: Default

Coordinate system: **fixed coordinate**

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of

RoBot_3PSS_Full_color

Density = 0.01 grams per cubic millimeter

Mass = 1164.41 grams

Volume = 149283.51 cubic millimeters

Surface area = 45522.47 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = 0.00

Y = 0.00

Z = 261.42

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

Px = 288091.42 Ix = (0.00, 0.00, 1.00)

Py = 55473226.43 Iy = (0.00, -1.00, 0.00)

Pz = 55473226.43 Iz = (1.00, 0.00, 0.00)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxz = 0.00 Lxy = 0.00 Lxx = 55473226.43

Lyx = 0.00 Lyy = 55473226.43 Lzz = 288091.42

Lzy = 0.00 Lzx = 0.00

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

Ixz = 0.00 Ixy = 0.00 Ixx = 135049259.46

Iyx = 0.00 Iyy = 135049259.46 Izz = 288091.42

Izy = 0.00 Izx = 0.00

Mass properties of **Festo-cylinder**

Configuration: Default

Coordinate system: **fixed coordinate**

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of

RoBot_3PSS_Full_color

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 1323.65 grams

Volume = 484852.97 cubic millimeters

Surface area = 60392.79 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = -316.88

Y = -294.58

Z = 70.50

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

Px = 454008.79	Ix = (1.00, 0.00, 0.00)
Py = 7196686.30	Iy = (0.00, 0.00, -1.00)
Pz = 7196686.30	Iz = (0.00, 1.00, 0.00)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxz = 0.00	Lxy = 0.00	Lxx = 454008.79
Lyz = 0.00	Lyy = 7196686.30	Lyx = 0.00
Lzz = 7196686.30	Lzy = 0.00	Lzx = 0.00

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

Ixz = -29570592.54	Ixy = 123560344.63	Ixx = 121898240.39
Iyz = -27489701.32	Iyy = 146689057.58	Iyx = 123560344.63
Izz = 254975560.31	Izy = -27489701.32	Izx = -29570592.54

Mass properties of **festo-shaft**

Configuration: Default

Coordinate system: **fixed coordinate**

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of

RoBot_3PSS_Full_color

Density = 0.01 grams per cubic millimeter

Mass = 193.05 grams

Volume = 24750.46 cubic millimeters

Surface area = 7956.18 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = -233.28

Y = -294.58

Z = 70.50

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

Px = 4175.60 Ix = (1.00, 0.00, 0.00)

Py = 554528.37 Iy = (0.00, 1.00, 0.00)

Pz = 554542.64 Iz = (0.00, 0.00, 1.00)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxz = 0.00 Lxy = 0.00 Lxx = 4175.60

Lyx = 0.00 Lyy = 554528.37 Lyy = 0.00

Lzz = 554542.64 Lzy = 0.00 Lzx = 0.00

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

Ixz = -3174988.19 Ixy = 13266647.76 Ixx = 17716767.08

Iyz = -4009361.69 Iyy = 12019827.61 Iyx = 13266647.76

Izz = 27813383.99 Izy = -4009361.69 Izx = -3174988.19

Mass properties of **balljointorg**

Configuration: Default

Coordinate system: **fixed coordinate**

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of

RoBot_3PSS_Full_color

Density = 0.01 grams per cubic millimeter

Mass = 69.67 grams

Volume = 9001.93 cubic millimeters

Surface area = 5844.72 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = 216.71

Y = -115.03

Z = 660.15

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

Px = 3800.77 Ix = (0.00, 0.00, 1.00)

Py = 20187.77 Iy = (0.71, -0.71, 0.00)

Pz = 20187.77 Iz = (0.71, 0.71, 0.00)

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxz = 11.36 Lxy = 0.03 Lxx = 20187.76

Lyz = 49.85 Lyy = 20187.62 Lyx = 0.03

Lzz = 3800.93 Lzy = 49.85 Lzx = 11.36

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

Ixz = 9967837.03 Ixy = -1736947.36 Ixx = 31305937.43

Iyz = -5290998.41 Iyy = 33656185.29 Iyx = -1736947.36

Izz = 4198036.34 Izy = -5290998.41 Izx = 9967837.03

Abstract:

Parallel robots are closed kinematic chain mechanisms developed in different forms, with complex kinematics and dynamic equations that make them difficult to control. Parallel robots with three degrees of rotational freedom are studied and paid much attention in the industry and medicine because of their high speed and good accuracy. In this thesis, parallel space robot 3PSS which has three degrees of rotational freedom and its pneumatic actuators are located on the fixed base will be investigated. First, the robot is simulated in SolidWorks software, inverse kinematics and forward kinematics equations are extracted from geometric analysis method, then by analyzing the speed of the robot, Jacobin matrix and singularity analysis and workspace will be determined. Then, the dynamic equations governing the system are extracted by Newton-Euler method, the obtained relationships are validated by software simulation. Finally, PID control method is used to control this robot in tracking the reference path.

Keywords: Robot 3PSS, Parallel Robot, Three Degree of Freedom Robot, Robot Kinematics, Robot Dynamics, Robot Validation, Robot Control



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.S. thesis

**Dynamic Analysis and Control Implementation
for a Parallel Spatial Robot 3PSS**

by:

Ali Ghasemi

Supervisors:

Dr. Mahdi Bamdad

Dr. Habib Ahmadi

Advisor:

Dr. Mojtaba Varedi Koulaei

October 2021