

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

رشته‌ی مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی کنترل مد لغزشی با پیاده‌سازی الگوریتم فوق پیچشی برای ربات

موازی دلتا

نگارنده: اشکان هراتی نژاد

استاد راهنما:

دکتر حبیب احمدی

دکتر امیر جلالی

بهمن ۱۳۹۹

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم...

آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند...

سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلائی

مشکلات و ناملایمات کردند ...

تا من به جایگاهی که اکنون ایستاده‌ام برسم...

تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درخشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

و با سپاس بی کران از خانواده نازنینم که مرا در رسیدن به این جایگاه همراهی کردند.

و تقدیر و تشکر شایسته از استادان ارجمند، جناب آقای دکتر احمدی و جناب آقای دکتر جلالی که به نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صیقله سخن را علم-پرور نمودند و همواره راهنما و راه‌گشای بنده در اتمام و اكمال پایان‌نامه بوده اند.

همچنین از مهندس عبدالحمیدی تشکر ویژه می‌کنم که مرا در این راه مساعدت نمودند.

تعهدنامه

اینجانب اشکان هراتی‌نژاد دانشجوی دوره کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی- کاربرد دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با موضوع طراحی کنترل مد لغزشی با پیاده‌سازی الگوریتم فوق‌پیشگی برای ربات موازی دلتا تحت راهنمایی دکتر حبیب احمدی و دکتر امیر جلالی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 :

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

قابلیت‌هایی که در اکثر ربات‌های موازی وجود دارد، باعث افزایش کارایی آن‌ها در صنعت و نیز باعث افزایش توجه به آن‌ها در پژوهش‌های علمی گردیده است. در این پژوهش، هدف طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی با پیاده‌سازی الگوریتم فوق‌پیچشی برای ربات موازی دلتا می‌باشد. برای استخراج معادلات دینامیکی ربات دلتا از روش معروف لاگرانژ، استفاده گردیده است. با توجه به روابط هندسی زنجیره ربات دلتا و همچنین زنجیره سینماتیکی موازی، معادلات سینماتیک معکوس به فرم حلقه بسته محاسبه شده است. با توجه به وجود نامعینی‌ها در مدل‌سازی دینامیکی ربات، برای کنترل موقعیت ربات جهت تعقیب مسیر دلخواه، استراتژی کنترلی مد لغزشی در نظر گرفته شده است. این استراتژی به دلیل مقاوم‌بودن در مقابل اغتشاشات ناشی از بار و همچنین عدم قطعیت‌های دینامیکی طراحی گردیده است. در بخش شبیه‌سازی، برای مقایسه، کنترل‌کننده فیدبک خطی‌ساز هم بر روی ربات دلتا پیاده‌سازی شده است. روش کنترلی مد لغزشی استفاده شده ردیابی مسیر را به خوبی انجام می‌دهد، اما در برابر اغتشاشات عملکرد خوبی ندارد. در ادامه، برای رفع اغتشاشات از روش کنترلی مد لغزشی مرتبه بالا (الگوریتم فوق‌پیچشی) استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی دارای عملکرد مطلوبی نسبت به مد لغزشی مرتبه اول می‌باشد.

کلمات کلیدی: کنترل ربات، ربات دلتا، کنترل فیدبک خطی‌ساز، استراتژی مد لغزشی، الگوریتم

فوق‌پیچشی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

...

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱ پیش گفتار.....	۲
۲-۱ ادبیات موضوع.....	۴
۳-۱ مروری بر کارهای پیشین.....	۵
فصل ۲: تحلیل سینماتیک و دینامیک ربات.....	۱۱
۱-۲ ربات موازی دلتا.....	۱۲
۲-۲ سینماتیک معکوس.....	۱۳
۳-۲ سینماتیک مستقیم.....	۱۷
۴-۲ دینامیک.....	۲۳
فصل ۳: فیدبک خطی ساز.....	۲۹
۱-۳ طراحی فیدبک خطی ساز.....	۳۰
۲-۳ شبیه سازی و نتایج.....	۳۱
فصل ۴: کنترل مد لغزشی.....	۳۷
۱-۴ طراحی کنترل مد لغزشی.....	۳۸
۲-۴ طراحی الگوریتم فوق پیچشی.....	۴۴
۳-۴ شبیه سازی و نتایج.....	۴۵
فصل ۵: بررسی نتایج.....	۵۷
۱-۵ مقایسه نتایج کنترل کننده ها.....	۵۸
۲-۵ پیشنهادات.....	۵۹
منابع.....	۵۹

فهرست جداول

جدول ۱-۲- مقایسه ربات سری و موازی ۳

جدول ۱-۳- جدول پارامترهای هندسی ربات دلتا ۳۲

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲. ربات دلتای مورد مطالعه پارک و همکاران [۶]..... ۱۲
- شکل ۲-۲. حلقه سینماتیکی بسته..... ۱۶
- شکل ۳-۲. دو کره متقاطع در یک دایره و کره سوم که دایره را در رو مکان قطع می‌کند..... ۲۰
- شکل ۴-۲. پیکربندی انتخاب شده برای تجزیه و تحلیل سینماتیک مستقیم..... ۲۰
- شکل ۱-۳. ردیابی مسیر مطلوب در جهت x برای فیدبک خطی ساز..... ۳۲
- شکل ۲-۳. ردیابی مسیر مطلوب در جهت y برای فیدبک خطی ساز..... ۳۳
- شکل ۳-۳. ردیابی مسیر مطلوب در جهت z برای فیدبک خطی ساز..... ۳۳
- شکل ۴-۳. خطای ردیابی مسیر در جهت x برای فیدبک خطی ساز..... ۳۴
- شکل ۵-۳. خطای ردیابی مسیر در جهت y برای فیدبک خطی ساز..... ۳۴
- شکل ۶-۳. خطای ردیابی مسیر در جهت z برای فیدبک خطی ساز..... ۳۵
- شکل ۷-۳. گشتاور کنترلی اول برای فیدبک خطی ساز..... ۳۵
- شکل ۸-۳. گشتاور کنترلی دوم برای فیدبک خطی ساز..... ۳۶
- شکل ۹-۳. گشتاور کنترلی سوم برای فیدبک خطی ساز..... ۳۶
- شکل ۱-۴. ردیابی مسیر مطلوب در جهت x برای مد لغزشی مرتبه اول..... ۴۶
- شکل ۲-۴. ردیابی مسیر مطلوب در جهت y برای مد لغزشی مرتبه اول..... ۴۶
- شکل ۳-۴. ردیابی مسیر مطلوب در جهت z برای مد لغزشی مرتبه اول..... ۴۷
- شکل ۴-۴. خطای ردیابی مسیر در جهت x برای مد لغزشی مرتبه اول..... ۴۷
- شکل ۵-۴. خطای ردیابی مسیر در جهت y برای مد لغزشی مرتبه اول..... ۴۸
- شکل ۶-۴. خطای ردیابی مسیر در جهت z برای مد لغزشی مرتبه اول..... ۴۸
- شکل ۷-۴. گشتاور کنترلی اول برای مد لغزشی مرتبه اول..... ۴۹
- شکل ۸-۴. گشتاور کنترلی دوم برای مد لغزشی مرتبه اول..... ۴۹

- شکل ۴-۹ گشتاور کنترلی سوم برای مد لغزشی مرتبه اول..... ۵۰
- شکل ۴-۱۰ ردیابی مسیر مطلوب در جهت x برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۰
- شکل ۴-۱۱ ردیابی مسیر مطلوب در جهت y برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۱
- شکل ۴-۱۲ ردیابی مسیر مطلوب در جهت z برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۱
- شکل ۴-۱۳ خطای ردیابی مسیر در جهت x برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۲
- شکل ۴-۱۴ خطای ردیابی مسیر در جهت y برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۲
- شکل ۴-۱۵ خطای ردیابی مسیر در جهت z برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۳
- شکل ۴-۱۶ گشتاور کنترلی اول برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۳
- شکل ۴-۱۷ گشتاور کنترلی دوم برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۴
- شکل ۴-۱۸ گشتاور کنترلی سوم برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۴
- شکل ۴-۱۹ حرکت در صفحه (e_1, e_1) برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۵
- شکل ۴-۲۰ حرکت در صفحه (e_2, e_2) برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۵
- شکل ۴-۲۱ حرکت در صفحه (e_3, e_3) برای الگوریتم فوق‌پیچشی..... ۵۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱- پیش‌گفتار

ربات‌ها جزئی از سیستم‌های مکاترونیکی هستند که از سه شاخه الکترونیک، مکانیک و کامپیوتر تشکیل شده‌اند. ربات‌ها طبق زنجیره سینماتیکی خود به دو گروه سری و موازی تقسیم می‌شوند. به ربات‌های با زنجیره سینماتیکی باز ربات سری و ربات‌هایی با زنجیره سینماتیکی بسته را ربات موازی نام‌گذاری می‌کنند. از مزیت‌های ربات موازی نسبت به ربات سری می‌توان به دقت بالا، سفتی زیاد و نسبت بار به وزن بالا اشاره کرد و از معایب آن فضای کاری محدود، روابط سینماتیک مستقیم پیچیده و تحلیل‌های دینامیکی دشوار می‌باشد. مزایای موجود در مکانیزم موازی سبب توزیع نیروی بهتر و بالا رفتن سرعت و شتاب ربات می‌گردد [۱]. پیشینه ربات‌ها مربوط به زمانی است که ازخوطس یک پرنده مکانیکی ابداع کرد که عامل حرکت آن بخار بود. بیشتر پیشرفت رباتیک به قرن بیستم برمی‌گردد. با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده توسط پژوهشگران فعالیت روی ربات‌ها را می‌توان به سه دسته طراحی مسیر، تخمین موقعیت و کنترل تقسیم کرد. ربات‌های سری دارای فضای کاری زیاد و ساده‌ای هستند. این مزیت سبب می‌شود این‌گونه ربات‌ها در کارخانه‌ها بیش‌تر مورد استفاده قرار گیرند. از معایب این ربات‌ها می‌توان به سرعت پایین آن‌ها اشاره کرد. علت این امر این است که در هر لینک ربات به دلیل ساختار سری این ربات هر موتور باید بر وزن و اینرسی موتورهای پیشین غلبه کند که این امر سبب کاهش سرعت آن می‌گردد. مقایسه نقاط قوت و ضعف ربات‌های سری و موازی، در قالب جدول (۱-۱) آورده شده است.

جدول ۱-۱- مقایسه ربات سری و موازی [۲۵]

ویژگی	ربات موازی	ربات سری
سفتی	زیاد	کم
مدل سازی و تحلیل دینامیک	خیلی پیچیده	دارای روابط ساده
شتاب و سرعت	بالا	پایین
فضای کاری	کوچک و پیچیده	بزرگ
سینماتیک مستقیم	سخت	آسان
سینماتیک معکوس	آسان	سخت
خطای نیرو	متراکم	عادی
خطای موقعیت	عادی	متراکم و انباشته
بیشترین نیرو	مجموع همه نیروهای عملگر	محدود شده توسط نیروی عملگر
اینرسی	کوچک	بزرگ
مشخصه های دینامیکی	خیلی زیاد	کم
نسبت ظرفیت بار به وزن ربات	بالا	پایین
نسبت فضای کاری به اندازه ربات	پایین	بالا
کالیبراسیون	پیچیده	روابط ساده
دقت	بالا	پایین

در این پایان نامه، در فصل دوم به تحلیل و بررسی سینماتیک و دینامیک ربات پرداخته شده است. در فصل سوم، طراحی کنترل فیدبک خطی ساز انجام گرفته است. فصل چهارم به طراحی کنترل مد لغزشی و پس از آن، پیاده سازی الگوریتم فوق پیچشی صورت گرفته است. در فصل پنجم نیز نتایج ارائه شده است.

۱-۲- ادبیات موضوع

ربات دلتا یکی از پرکاربردترین و مهم ترین ربات های موازی می باشد که شامل سه درجه آزادی است. این ربات متشکل از یک صفحه ثابت می باشد که سه موتور روی آن قرار می گیرد. حرکت سه بازو توسط این سه موتور صورت می گیرد. حرکت این سه بازو که هندسه ای متوازی الاضلاع گونه دارند، باعث می گردد که صفحه متحرک همیشه در موازات صفحه ثابت حرکت داشته باشد. استفاده از سه متوازی- الاضلاع در مکانیزم این ربات به طور کامل جهت گیری صفحه متحرک را حذف و ربات تنها سه درجه آزادی انتقالی دارد. لینک های ورودی سه متوازی الاضلاع بر روی بازوهای چرخشی با مفاصل دورانی متصل می گردد. متوازی الاضلاع این امکان را می دهد که حرکت لینک خروجی با توجه به حرکت لینک ورودی در یک راستا ثابت بماند.

برای هر ربات، باید معادلات سینماتیک معکوس و مستقیم و همچنین معادلات دینامیک ربات را استخراج کرد. چون ربات موازی دارای زنجیره سینماتیکی بسته می باشد، برای یافتن معادلات سینماتیک معکوس ربات های موازی معمولاً از روش معادلات حلقه بسته استفاده می گردد. با در نظر داشتن معادلات سینماتیک معکوس و مستقیم، ماتریس ژاکوبین ربات نیز حاصل می گردد. ماتریس ژاکوبین مستقیم و معکوس ربات شامل اطلاعاتی می باشد که کمک می کند تا بتوان برخی از پیکربندی های ویژه را شناسایی نمود. برای به دست آوردن معادلات دینامیکی ربات ها راه های مختلفی از جمله روش لاگرانژ، قانون دوم نیوتن و کار مجازی وجود دارد. روش لاگرانژ مناسب ترین روش موجود برای

حل معادلات دینامیکی ربات است. به دلیل وجود قیود اضافی در این گونه ربات‌ها، روش لاگرانژ تعمیم-یافته یک روش کاربردی برای یافتن معادلات دینامیکی آن‌ها است.

بسیاری از سیستم‌های غیرخطی که باید کنترل گردند، دارای پارامترهای نامعلوم می‌باشند که یا ثابت هستند و یا به آرامی دچار تغییر می‌شوند. برای مثال، ربات‌های حامل قطعات و مواد ممکن است جسم‌های بزرگی را که دارای پارامترهای اینرسی نامعلوم هستند، حمل کنند. هدف اصلی از طراحی کنترل‌کننده در این شرایط، این است که با وجود داشتن عدم قطعیت در برخی از پارامترهای ربات نظیر ممان اینرسی و جرم، بتوان موقعیت ربات را کنترل کرد [۲]. کنترل مقاوم یکی از کارآمدترین ابزارهای کنترلی می‌باشد که می‌تواند با عدم قطعیت‌هایی با اندازه کراندار مانند اغتشاش خارجی و دینامیک‌های مدل نشده، مقابله کند.

۱-۳- مروری بر کارهای پیشین:

طرح ربات موازی دلتا برای نخستین بار در سال ۱۹۸۰ توسط تیمی به سرپرستی ریموند کلاول در موسسه‌ای در سوئیس ارائه گردید و هفت سال بعد به نام ربات ویپو ثبت شد. از مهم‌ترین اهداف طراحی این ربات جابجا کردن اشیاء کوچک و سبک با سرعت بالا بود. این ربات به دلیل داشتن سرعت بالا برای گذاشت و برداشت اجسام سبک در صنایع مختلف به کارگرفته می‌شود [۳]. نمونه دیگری از ربات دلتا در سال ۱۹۸۹ توسط تیم EPFL طراحی گردیده است. آن‌ها تلاش کردند با لحاظ کردن پارامترهای سینماتیکی و طرح چند فرض برای ساده‌سازی مدل دینامیکی و استاتیکی آن سینماتیک و دینامیک نهایی ربات دلتا را ارائه کنند [۴]. لوپز و همکاران، به تحلیل سینماتیک ربات دلتا پرداختند تا سرعت مجری نهایی از ترم سرعت زاویه‌ای مفاصل به دست آید. آن‌ها از برابر قراردادن ماتریس ژاکوبین با صفر چندین موقعیت تکینگی از ربات استخراج کردند. بررسی ژاکوبین معکوس بیان می‌دارد که تکینگی‌ها زمانی صورت می‌گیرد که عضوهای متعلق به زنجیره سینماتیکی روی یک صفحه قرارگیرد و این در صورتی است که ربات به طور کامل باز یا بسته شده باشد [۵]. در سال ۲۰۱۳ پارک و همکاران، ربات

دلتایی را شبیه‌سازی کردند و سینماتیک معکوس آن را از معادلات حلقه بسته و دینامیک آن را به روش لاگرانژ تعمیم‌یافته محاسبه کردند. معمولاً صفحه متحرک ربات را در پایین و صفحه ثابت ربات دلتا و همچنین موتورها در بالا قرار می‌گیرد. اما در برخی از انواع ربات دلتا، صفحه متحرک در بالا قرار دارد [۶]. ویلیامز و همکاران، روابط جامع سینماتیکی و دینامیکی یک نوع ربات دلتا ۴ درجه آزادی را استخراج کرده‌اند. ۳ درجه آزادی این ربات برای حرکت انتقالی در سه جهت و نیز یک ساق درونی چهارم برای کنترل یک درجه آزادی چرخشی صفحه مجری نهایی لحاظ کرده‌اند [۷].

سیستم‌های فیزیکی ماهیتی غیرخطی دارند و برای کنترل آن‌ها باید از روش‌های غیرخطی استفاده نمود. در این زمینه راجدی و همکاران، دو طرح شامل کنترل مقاوم H و کنترل گشتاور محاسبه شده CTC را بر روی ربات دلتا پیاده‌سازی نموده‌اند و عملکرد کنترل‌کننده‌ها را برای یک مسیر مطلوب سهموی مقایسه کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی بر روی ربات حاکی از آن است که کنترل‌کننده H عملکرد مطلوب و استحکام بیشتری نسبت به CTC دارد [۸]. لو و لیو در سال ۲۰۱۷ جهت ردیابی مسیر مطلوب ربات دلتا یک ایده کنترل خودکار شبکه عصبی فازی نوع ۲ پیشنهاد دادند. این کنترل‌کننده دارای ساختار موازی است که ترکیبی از یک کنترل‌کننده شبکه عصبی برای جبران عملکرد گذرای سیستم PD سنتی است. از کنترل‌کننده PD و یک کنترل‌کننده (IT2FNN2) نوع ۲ برای یافتن پارامترهای دینامیکی سیستم استفاده می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که کنترل‌کننده شبکه عصبی فازی دارای عملکرد کنترلی بهتری نسبت به کنترل‌کننده سنتی ردیابی مسیر از نظر دقت ردیابی و استحکام می‌باشد [۹]. ژانگ و همکاران، یک کنترل‌کننده مد لغزشی بر روی ربات‌های متحرک پیاده‌سازی کرده‌اند. روش کنترلی پیشنهادی آن‌ها می‌تواند در مقاومت و بهبود پاسخ‌ها علی‌رغم عدم قطعیت‌ها و آشفتگی‌های موثر نقش داشته باشد. آن‌ها این روش کنترلی را بر اساس چارچوب هدایت‌گر و پیرو مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰]. چمز و همکاران، یک کنترل‌کننده مد لغزشی را برای ردیابی مسیر ربات توسعه داده‌اند. آن‌ها کنترل‌کننده پیشنهادی را از ترکیب کنترل‌کننده PD و مد لغزشی تنظیم کرده‌اند. آن‌ها کنترل‌کننده PD را به منظور افزایش نرخ همگرایی و مد لغزشی را برای

از بین بردن آشفتگی‌های خارجی استفاده کرده‌اند. همچنین پایداری سیستم را با استفاده از قضیه لیاپانوف اثبات کرده‌اند. آن‌ها نتایج خود را بر روی ربات دلتا پیاده‌سازی کرده‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که ترکیب کنترل‌کننده PD و مد لغزشی می‌تواند در کنترل آشفتگی‌های خارجی و تعقیب مسیر مطلوب بسیار موثر واقع شود [۱۱]. خانگ و همکاران، سه کنترل‌کننده متفاوت شامل کنترل-کننده PD بر پایه گشتاور محاسبه شده، کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه اول و کنترل‌کننده مد لغزشی با کمک شبکه عصبی را بر روی ربات دلتا تست کرده‌اند و نتایج به دست آمده را با هم مقایسه نموده‌اند. بررسی‌ها حاکی از آن است که روش کنترل PD فقط برای زمانی دارای پاسخ مناسب است که پارامترهای مدل دقیقاً شناسایی شده باشد و در مورد پارامترهای نامعلوم از دو روش دیگر استفاده می‌شود. شبیه-سازی آن‌ها نشان می‌دهد کنترل مد لغزشی به کمک شبکه عصبی نسبت به دو روش دیگر برتری دارد [۱۲].

دقت ردیابی و قابلیت اطمینان در کنترل ربات‌ها بسیار حائز اهمیت است. کنترل مد لغزشی مرتبه اول مساله ردیابی دقیق را حل می‌کند اما به دلیل پدیده‌های لرزش به اندازه کافی قدرتمند نیست. پیاده‌سازی مد لغزشی مرتبه بالاتر نظیر الگوریتم فوق‌پیچشی باعث افزایش قابلیت اطمینان می‌گردد. چیانگ و همکاران، روش کنترلی فوق‌پیچشی برای سیستم‌های غیرخطی همراه با اختلالات سازگار ارائه کرده‌اند. در این روش ابتدا سطح لغزش را طراحی کرده‌اند، سپس طراحی الگوریتم فوق‌پیچشی را پیاده‌سازی نموده‌اند. پارامترهای تخمین زده شده و اغتشاشات نیز در طرح کنترل‌کننده پیشنهادی تعبیه کرده‌اند. استراتژی کنترلی پیشنهادی آن‌ها حالت‌های کنترل شده را ابتدا به سطح لغزش و سپس به نقطه تعادل تبدیل می‌کند. در نهایت یک مثال عددی و یک کاربرد عملی برای صحت سنجی استراتژی کنترلی پیشنهادی ارائه کرده‌اند [۱۳]. مین ون و همکاران، به بررسی کنترل‌کننده مقاوم ردیابی بازخورد خروجی با تعیین موقعیت برای ربات‌هایی که دارای نامعینی هستند، پرداخته‌اند. در ابتدا، یک نوع کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه بالا (QC)^۱ برای زمان محدود طراحی کرده‌اند. سپس یک کنترل‌کننده مد

^۱ Quasi-continuous

لغزشی را با استفاده از الگوریتم فوق‌پیچشی با کنترل‌کننده قبلی مقایسه کرده‌اند. برای کاهش پدیده لرزش یک مشاهده‌گر جهت تخمین نامعینی استفاده کرده‌اند. آن‌ها برای از بین بردن پدیده لرزش و به‌دست آوردن پاسخ گذرا و برای دقت ردیابی بالا دو کنترل‌کننده را با هم ادغام نموده‌اند. در نهایت روش پیشنهادی را بر روی یک ربات puma شبیه‌سازی کرده‌اند [۱۴]. دان‌لی و همکاران، به بررسی کنترل مقاوم در برابر خطا برای یک بازوی ربات بر اساس ترکیب یک رویکرد خطی خارجی و الگوریتم فوق‌پیچشی پرداخته‌اند. آن‌ها برای تشخیص خطا از مشاهده‌گر خارجی استفاده کرده‌اند. در نهایت کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی خود را با شبیه‌سازی و پیاده‌سازی بر روی یک ربات ۳ درجه آزادی بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که کنترل‌کننده پیشنهادی به دلیل طراحی رویکرد می‌تواند خطاهای نسبتاً بزرگتری را کاهش دهد [۱۵]. طیبی و همکاران، به بررسی کنترل مد لغزشی مرتبه‌بالا برای یک ربات سری پرداخته‌اند. آن‌ها از یک کنترل مد لغزشی به عنوان کنترل‌کننده اصلی و یک ناظر مد لغزشی مرتبه‌بالا به عنوان تخمین‌گر برای تخمین پارامترهای دارای عدم قطعیت استفاده کرده‌اند. پیشنهاد تحقیقات آن‌ها بهبود بخشیدن به کنترل‌کننده مد لغزشی مرسوم و همچنین تخمین‌گر برای کاهش لرزش است [۱۶]. کالی و همکاران، به بررسی الگوریتم فوق‌پیچشی با تخمین زمان تاخیر برای مساله مسیریابی با دقت بالا برای ربات سری در حضور نامعینی‌ها و اغتشاشات پرداخته‌اند. این روش را برای تخمین عدم قطعیت بدون اطلاع دقیق از دینامیک سیستم استفاده کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از عدم قطعیت تخمین زده شده، یک قانون کنترلی برای اطمینان از مقاوم‌بودن، هم‌گرایی زمان محدود و کاهش پدیده لرزش طراحی کرده‌اند. آن‌ها پایداری سیستم حلقه‌بسته و هم‌گرایی زمان محدود را با استفاده از تئوری لیاپانوف اثبات کرده‌اند. آن‌ها به منظور نشان‌دادن کارایی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی را به ترتیب بر روی بازوی ربات ۲ درجه آزادی و بازوی ربات ۷ درجه آزادی انجام داده‌اند [۱۷]. ژئونگ و همکاران به بررسی ردیابی مسیر و کاهش پدیده لرزش یک ربات با مفصل انعطاف‌پذیر پرداخته‌اند. برای این منظور، آن‌ها کنترل‌کننده انتگرالی مد لغزشی با استفاده از الگوریتم فوق‌پیچشی را پیشنهاد کرده‌اند. برای طراحی این کنترل‌کننده، ابتدا کنترل‌کننده خطی درجه

دوم (LQR) را برای بررسی عملکرد و مقابله با پدیده لرزش طراحی کرده‌اند. با توجه به وجود برخی نامعینی و اغتشاشات در سیستم آن‌ها، برای از بین بردن لرزش، از کنترل‌کننده فوق‌پیچشی استفاده کرده‌اند. در نهایت آن‌ها ارزیابی مقایسه‌ای به منظور تایید برتری های روش پیشنهادی انجام داده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد با استفاده از این روش می‌توان پدیده لرزش را تا حد زیادی کاهش داد [۱۸].

اووالی و همکاران، به بررسی کنترل مقاوم برای ردیابی موقعیت بر روی ربات متحرک پرداخته‌اند. بدین منظور استراتژی مد لغزشی برای این سیستم پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها فرض کرده‌اند که موقعیت و جهت سیستم تنها اطلاعات موجود در مورد سیستم باشد. برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده به عنوان کنترل‌کننده فیدبک خروجی، یک مشاهده‌گر^۱ مد لغزشی مرتبه بالا برای هر سیگنال خروجی پیاده سازی کرده‌اند. استراتژی‌های کنترل پیشنهادی آن‌ها قادر خواهد بود تا در مقابل برخی از اغتشاشات خارجی مقاومت کند. پایداری حلقه بسته هر کنترل‌کننده را با استفاده از تئوری لیاپانوف ثابت کرده‌اند [۱۹]. سالگادو و همکاران، به بررسی کنترل‌کننده بازخورد خروجی بر اساس الگوریتم فوق‌پیچشی پرداخته‌اند، طوری که خطای ردیابی مسیر یک ربات متحرک را کاهش می‌دهد. الگوریتم فوق‌پیچشی اصلاح شده آن‌ها با تخمین مرحله به مرحله سرعت و شتاب عمل می‌کند. سپس یک الگوریتم فوق-پیچشی ثانویه برای قسمت ردیابی مسیر از پیش تعیین شده طراحی کرده‌اند. نتایج تجربی و عددی الگوریتم فوق‌پیچشی ارائه شده در قیاس با کنترل‌کننده فیدبک حالت و یک کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه اول، طرح کنترلی آن‌ها را توجیه می‌کند [۲۰]. مارتین و همکاران، به بررسی کنترل ردیابی مسیر برای ربات متحرک با وجود عدم قطعیت‌ها و اختلالات خارجی پرداخته‌اند. برای این کار، کنترل مد لغزشی مرتبه اول یک راه حل مناسب و رایج است، اما در این مسئله مقاومت چندانی برای کاهش ارتعاشات وجود ندارد. برای این منظور، آن‌ها از کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه دوم استفاده کرده‌اند. بنابراین یک الگوریتم فوق‌پیچشی به همراه کنترل‌کننده تناسبی مشتقی برای دستیابی به مقاومت

^۱Observer

مناسب در برابر اغتشاشات ارائه کرده‌اند. در انتها با نتایج آزمایشگاهی اثربخشی این استراتژی را بررسی نموده‌اند [۲۱]. سولی و همکاران، رویکرد جدیدی از کنترل مد لغزشی فوق‌پیچشی برای ربات‌های متحرک ارائه کرده‌اند. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در زمان واقعی را بر روی یک ربات متحرک مشخص با عدم قطعیت‌ها و آشفتگی‌های خارجی پیاده‌سازی کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های واقعی عملکرد بهبود یافته کنترل‌کننده پیشنهادی را به لحاظ زمان نشست و مقاوم بودن در برابر اغتشاشات در مقایسه با کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی نشان می‌دهد [۲۲]. بورلاگ و همکاران، به بررسی کنترل‌کننده مد لغزشی فوق‌پیچشی برای کنترل و ردیابی مسیر ربات‌های زیردریایی پرداخته‌اند. آن‌ها همچنین یک مشاهده‌گر مرتبه‌بالا را نیز برای تخمین پارامترها پیشنهاد کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که این روش نسبت به کنترل‌کننده PD اولویت دارد [۲۳]. شنک و همکاران، یک کنترل‌کننده جدید مد لغزشی با استفاده از الگوریتم فوق‌پیچشی برای ربات‌های موازی ارائه داده‌اند. آن‌ها این روش را برای تخمین سرعت مجری نهایی پیاده‌سازی کرده‌اند. روش ارائه شده آن‌ها در زمان محدود قابل اجرا بوده و توان مقاوم‌بودن در برابر اختلالات و نویز را دارا می‌باشد. سیستم استفاده‌شده آن‌ها برای پیاده‌سازی این روش، یک ربات ۶ درجه آزادی بوده است [۲۴].

فصل دوم

تحليل سینماتیک و

دینامیک ربات

۲-۱- ماهیت ربات دلتا:

ربات دلتا از دسته ربات‌های موازی می‌باشد. ربات‌های موازی اتصالاتی چندگانه دارند که برای انجام حرکت به مجری نهایی وصل می‌باشند. در بیش‌تر مواقع موتورهایی که برای به حرکت درآوردن ربات استفاده می‌شوند، در بخش ثابتی طراحی شده‌اند. زمانی که برای جابجایی و حمل کردن اشیا نیاز به سرعت عمل باشد، این‌گونه ربات‌ها می‌توانند بسیار مفید ظاهر شوند. شکل (۲-۱) یک ربات موازی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل اجزای تشکیل‌دهنده ربات عبارتند از:

۱- پایه یا صفحه ثابت

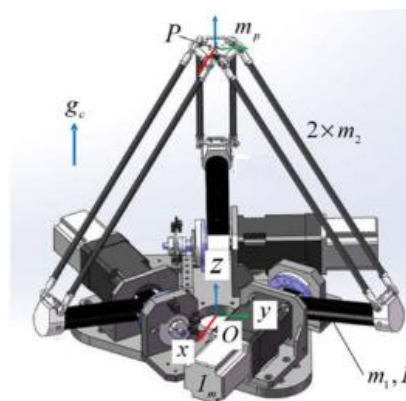
۲- بازوهای بالای ربات

۳- بازوهای پایین ربات

۴- صفحه متحرک

۵- محرک یا عملگر (موتورها)

لینک‌های بالایی ربات به صورت مسقیم به صفحه متحرک وصل هستند. سه موتور (محرک) روی صفحه ثابت آرایش ۱۲۰ درجه دارند. هر یک از سه بازوی بالا شامل دو میله موازی است که این لینک‌ها بازوهای پایینی را به صفحه متحرک متصل می‌کند.



شکل (۲-۱) ربات دلتای مورد مطالعه پارک و همکاران [۶]

۲-۲- تحلیل سینماتیک معکوس

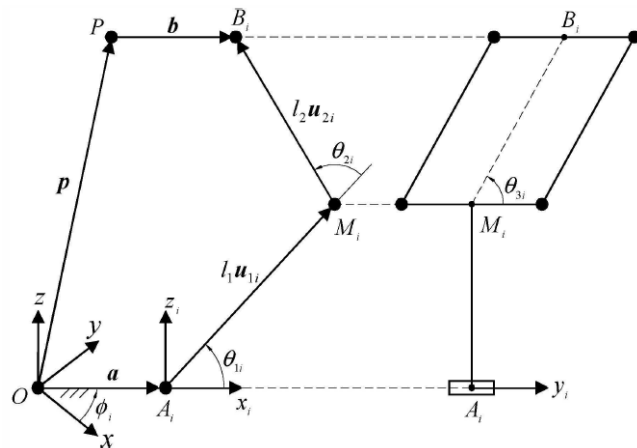
با استفاده از تحلیل سینماتیک معکوس ربات موازی دلتا موقعیت عملگرها در هر نقطه خاص از مجری نهایی به دست می‌آید. بنابراین در این تحلیل با نظر گرفتن موقعیت مجری نهایی باید موقعیت عملگرها را به دست آوریم. استخراج این معادلات از طریق هندسه ربات و با روش معادلات حلقه بسته صورت می‌پذیرد.

برای ساده‌سازی مدل و کم کردن تعداد پارامترها فرض‌های زیر لحاظ شده است:

۱- دو صفحه ربات (صفحه متحرک و صفحه پایه) همیشه موازی هستند و جهت‌گیری آن حول محور عمود بر صفحه پایه پیوسته صفر است.

۲- مفاصل دورانی (چه مفاصل بالایی و چه مفاصل پایینی) همگی در یک دایره قرار دارند. همچنین مطابق شکل (۲-۲) صفحه متحرک را با یک نقطه p که سه ساعد متصل به آن قرار دارد جایگزین می‌شود.

جهت تحلیل سینماتیک معکوس هر زنجیره سینماتیک به طور جداگانه لحاظ می‌گردد. معادلات هر ساق را می‌توان برای هر سه ساق تعمیم داد چرا که هندسه هر سه ساق ربات دلتا عیناً مشابه هم در نظر گرفته شده است. تنها تمایز ساق‌ها با هم در زنجیره سینماتیکی ربات، زاویه آن‌ها با دستگاه مرجع است که φ_i زاویه هر ساق را با دستگاه مرجع نمایش می‌دهد. برای راحتی کار می‌توان دستگاه مرجع را روی یک ساق در نظر گرفت و معادلات را برای ساق اول با زاویه صفر به دست آورد. سپس با توجه به این که هر ساق با هم در زنجیره سینماتیکی ۱۲۰ درجه اختلاف دارد، می‌توان معادلات را برای دو ساق دیگر محاسبه کرد. شکل (۲-۲) زنجیره سینماتیکی مربوط به هر کدام از ساق‌های ربات دلتا را نمایش می‌دهد.



شکل (۲-۲) حلقه سینماتیکی بسته

با توجه به هندسه ربات، معادله حلقه بسته به صورت (۱-۲) می باشد [۶]:

$$l_1 \vec{u}_1 + l_2 \vec{u}_2 = \vec{p} + \vec{b} - \vec{a} \quad (۱-۲)$$

که در آن،

$$\vec{u}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \\ 0 \\ \sin(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (۲-۲)$$

$$\vec{u}_2 = \begin{bmatrix} \sin(\theta_3) \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (۳-۲)$$

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}, \vec{a} = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{b} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۴-۲)$$

$$P = R^T \vec{p} \quad (۵-۲)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۶-۲)$$

همانطور که بیان شد در سینماتیک معکوس، هدف به دست آوردن موقعیت عملگرها می باشد که

متغیرهای θ_i این موقعیتها را نمایش می دهد. برای رسیدن به این مجهولات، باید دستگاه معادلات زیر

حل شود. برای حل یک ساق ابتدا با جایگذاری پارامترهای بالا در معادله (۱-۲) معادلات (۷-۲)، (۸-۲)

و (۹-۲) حاصل می‌گردد.

$$a - b - p_1 \cos(\varphi) - p_2 \sin(\varphi) + l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3) = 0 \quad (۷-۲)$$

$$p_1 \sin(\varphi) - p_2 \cos(\varphi) + l_2 \cos(\theta_3) = 0 \quad (۸-۲)$$

$$l_1 \sin(\theta_1) - p_3 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3) = 0 \quad (۹-۲)$$

به جهت ساده‌سازی پارامترهای زیر لحاظ می‌گردد:

$$\begin{aligned} b_{1i} &= \cos \varphi_i p_1 + \cos \varphi_i p_2 + b - a \\ b_{2i} &= -\sin \varphi_i p_1 + \cos \varphi_i p_2 \\ b_{3i} &= p_3 \\ w_{1i} &= l_1 + l_2 \cos \theta_{2i} \sin \theta_{3i} \\ w_{2i} &= l_2 \sin \theta_{2i} \sin \theta_{3i} \\ F_i &= (b_{1i}^2 + b_{2i}^2 + b_{3i}^2 - l_1^2 - l_2^2) / (2l_1 l_2 \sin \theta_{3i}) \end{aligned} \quad (۱۰-۲)$$

از معادله (۸-۲) داریم:

$$l_2 \cos(\theta_3) = -p_1 \sin(\varphi) + p_2 \cos(\varphi) \quad (۱۱-۲)$$

از آنجایی که $b_2 = -\sin \varphi p_1 + \cos \varphi p_2$ معادله (۱۲-۲) حاصل می‌گردد و ماحصل آن معادله،

یکی از مجهولات مساله که در حقیقت یکی از موقعیت‌های عملگرهاست محاسبه می‌گردد.

$$l_2 \cos(\theta_3) = b_2 \quad (۱۲-۲)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{b_2}{l_2} \right) \quad (۱۳-۲)$$

معادلات (۷-۲) و (۹-۲) با توجه به پارامترهای تعریف شده به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$b_1 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3) \quad (۱۴-۲)$$

$$b_3 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3) \quad (۱۵-۲)$$

اگر مربع دو طرف معادلات فوق را با هم جمع کنیم حاصل می‌شود:

$$(l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3))^2 + (l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3))^2 = b_1^2 + b_3^2 \quad (۱۶-۲)$$

پس از ساده‌سازی معادله به فرم زیر درمی‌آید:

$$b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 - l_1^2 - l_2^2 = 2l_1 l_2 \sin \theta_3 \cos \theta_2 \quad (۱۷-۲)$$

از معادله (۱۷-۲) یکی دیگر از مجهولات مساله به دست می‌آید:

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2 \sin(\theta_3)} \quad (۱۸-۲)$$

به کمک روابط مثلثاتی معادله (۷-۲) به صورت (۱۹-۲) بازنویسی می‌شود و از آن معادله (۲۱-۲)

نتیجه می‌دهد.

$$l_1 \cos \theta_1 + l_2 \sin \theta_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - l_2 \sin \theta_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2 = b_1 \quad (۱۹-۲)$$

$$\cos \theta_1 (l_1 + l_2 \sin \theta_3 \cos \theta_2) = b_1 + l_2 \sin \theta_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (۲۰-۲)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{b_1 + l_2 \sin \theta_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \sin \theta_3 \cos \theta_2} \quad (۲۱-۲)$$

به کمک روابط مثلثاتی معادله (۹-۲) به صورت (۲۲-۲) بازنویسی می‌شود و از آن معادله (۲۴-۲) نتیجه

می‌دهد.

$$l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_3 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_3 \sin \theta_3 \sin \theta_2 = b_3 \quad (۲۲-۲)$$

$$\sin \theta_1 (l_1 + l_2 \sin \theta_3 \cos \theta_2) = b_3 - l_2 \sin \theta_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \quad (۲۳-۲)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{b_3 - l_2 \sin \theta_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \sin \theta_3 \cos \theta_2} \quad (۲۴-۲)$$

با توجه به پارامترهای تعریف شده در (۱۰-۲) معادله (۲۰-۲) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$w_1 \cos \theta_1 = b_1 + w_2 \sin \theta_1 \quad (۲۵-۲)$$

پس از جایگذاری معادله (۲۴-۲) در (۲۵-۲) و ساده‌سازی معادله (۲۵-۲) به صورت (۲۶-۲) در

می‌آید.

$$(w_1^2 + w_2) \cos \theta_1 = b_1 w_1 + b_3 w_2 \quad (26-2)$$

همچنین با توجه به پارامترهای تعریف شده در (۱۰-۲) معادله (۲۳-۲) به صورت معادله (۲۷-۲)

بازنویسی می‌شود:

$$w_1 \sin \theta_1 = b_3 - w_2 \cos \theta_1 \quad (27-2)$$

پس از جایگذاری معادله (۲۱-۲) در (۲۷-۲) و ساده‌سازی معادله (۲۷-۲) به صورت (۲۸-۲) در

خواهد می‌آید.

$$(w_1^2 + w_2) \sin \theta_1 = b_3 w_1 - b_1 w_2 \quad (28-2)$$

حال با تقسیم (۲۸-۲) بر (۲۶-۲) مجهول آخر مساله نیز حاصل می‌گردد:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{b_3 w_1 - b_1 w_2}{b_1 w_1 + b_3 w_2} \right) \quad (29-2)$$

نتیجه تحلیل سینماتیکی مساله برای سه ساق تعمیم داده شده به صورت زیر می‌باشد:

$$\theta_{3i} = \cos^{-1}(b_{2i} / l_2) \quad (30-2)$$

$$\theta_{2i} = \cos^{-1}(F_i) \quad (31-2)$$

$$\theta_{1i} = a \tan 2(-w_{2i} b_{1i} + w_{1i} b_{3i}, w_{1i} b_{1i} + w_{2i} b_{3i}) \quad (32-2)$$

۳-۲- تحلیل سینماتیک مستقیم

هدف از تحلیل سینماتیک مستقیم، به دست آوردن موقعیت (x, y, z) مجری نهایی با معلوم بودن

موقعیت عملگرها (θ_i) می‌باشد. برای این کار، در مرحله اول سه کره هر کدام با مرکزیت در آرنج B_i از

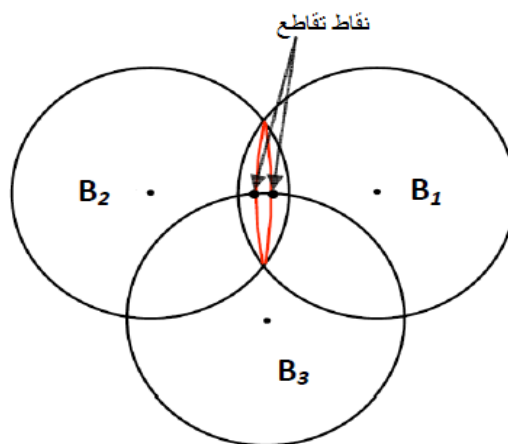
هر زنجیره بازوی ربات و با طول ساعد l_b با عنوان شعاع لحاظ شده است. تحلیل سینماتیک مستقیم

برای یک ربات موازی دلتا می‌تواند بر حسب تقاطع بین سه کره مذکور بیان شود. هنگام تجسم این سه

کره آن‌ها در دو مکان در وسط متقاطع می‌شوند. یک نقطه تقاطع زمانی است که z منفی می‌باشد، و

یک نقطه دیگر جایی است که Z مثبت است. بر حسب دستگاه مختصات پایه که در آن محور Z مثبت می‌باشد (رو به سمت بالا) وقتی که مختصات Z منفی باشد، مرکز صفحه متحرک نقطه تقاطع در نظر گرفته می‌شود.

شکل (۳-۲) تقاطع سه کره را نمایش می‌دهد، زمانی که دو کره در یک دایره متقاطع‌اند سپس کره سوم این دایره را در دو مکان قطع می‌کند.

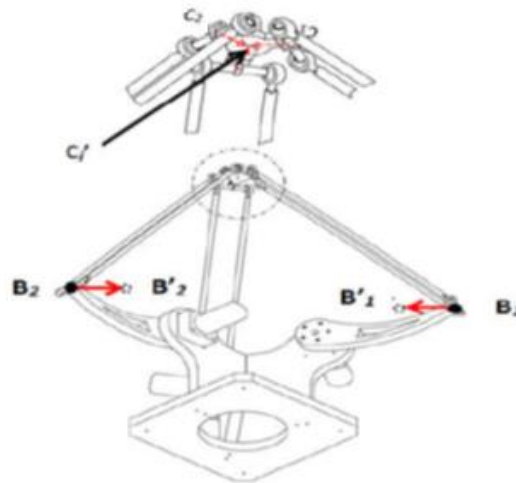


شکل (۳-۲) دو کره متقاطع در یک دایره و یک کره سوم که دایره را در دو مکان قطع می‌کند.

بر طبق مدل پیشنهادی طراحی شده، بردار B_i که مختصات آرنج را نمایش می‌دهد، برای سه بازو به صورت معادله (۳۳-۲) می‌باشد [۲۶].

$$B_i = [f + l_a \cos \theta_i \quad 0 \quad l_a \sin \theta_i]^T \quad (۳۳-۲)$$

شکل (۴-۲) پیکر بندی انتخاب شده برای تجزیه و تحلیل سینماتیک مستقیم را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲) پیکربندی انتخاب شده برای تجزیه و تحلیل سینماتیک مستقیم

برای تحلیل سینماتیک مستقیم، مرکز کره‌ها به داخل حرکت داده می‌شود (از نقطه B_i به نقاط B'_i) به ترتیب برای $i = 1, 2, 3$ پس از این انتقال سه کره در نقطه مرکز صفحه متحرک متقاطع می‌شوند.

$$B'_i = [(f - e) + l_a \cos \theta_i \quad 0 \quad l_a \sin \theta_i]^T \quad (۳۴-۲)$$

مقدار $e = B_1B'_1 = B_2B'_2 = B_3B'_3$ طول جابجایی می‌باشد که در شکل (۴-۲) نمایش داده شده است.

برای رسیدن به یک ماتریس که سه نقطه در مختصات پایه را شرح می‌دهد باید B_i در ماتریس R_z^0 ضرب گردد.

$$R_z^0 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۳۵-۲)$$

در نتیجه ماتریس B'_i :

$$B' = R_z^0 B_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [(f - e) + l_a \cos \theta_i \quad 0 \quad l_a \sin \theta_i]^T \quad (۳۶-۲)$$

و سپس:

$$B' = \begin{bmatrix} \cos \varphi B'_{i,x} \\ \sin \varphi B'_{i,y} \\ B'_{i,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi (f - e) + l_a \cos \theta_i \\ \sin \varphi (f - e) + l_a \cos \theta_i \\ l_a \sin \theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{i,x} \\ S_{i,y} \\ S_{i,z} \end{bmatrix} \quad (37-2)$$

سپس می‌توان سه کره را با طول l_b به عنوان شعاع و مراکز آنها در B_i ایجاد نمود. معادله کلی برای یک کره به صورت (38-2) است.

$$(x - S_{i,x})^2 + (y - S_{i,y})^2 + (z - S_{i,z})^2 = r^2 \quad (38-2)$$

این معادلات برای سه لینک $i = 1, 2, 3$ قابل محاسبه است. برای لینک (۱) بازو به سمت بالا به موازات محور x و عمود بر محور y است. بنابراین زاویه چرخش $\varphi_1 = 0$ ، اما دو لینک دیگر دارای زاویه چرخش $\varphi_2 = 120$ برای لینک (۲) و $\varphi_3 = -120$ برای لینک (۳) هستند.

$$(x - \cos \varphi_1 [(f - e) + l_a \cos \theta_1])^2 + (y - \sin \varphi_1 [(f - e) + l_a \cos \theta_1])^2 + (z - l_a \sin \theta_1)^2 = l_b^2 \quad (39-2)$$

$$(x - \cos \varphi_2 [(f - e) + l_a \cos \theta_2])^2 + (y - \sin \varphi_2 [(f - e) + l_a \cos \theta_2])^2 + (z - l_a \sin \theta_2)^2 = l_b^2 \quad (40-2)$$

$$(x - \cos \varphi_3 [(f - e) + l_a \cos \theta_3])^2 + (y - \sin \varphi_3 [(f - e) + l_a \cos \theta_3])^2 + (z - l_a \sin \theta_3)^2 = l_b^2 \quad (41-2)$$

پس از جایگذاری مقدارهای $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 120, \varphi_3 = -120$ در معادلات بالا معادلات سه کره حاصل می‌گردد:

$$(x - [(f - e) + l_a \cos \theta_1])^2 + (y)^2 + (z - l_a \sin \theta_1)^2 = l_b^2 \quad (42-2)$$

$$(x + \frac{1}{2}[(f - e) + l_a \cos \theta_2])^2 + (y - \frac{\sqrt{3}}{2}[(f - e) + l_a \cos \theta_2])^2 + (z - l_a \sin \theta_2)^2 = l_b^2 \quad (43-2)$$

$$(x + \frac{1}{2}[(f - e) + l_a \cos \theta_3])^2 + (y + \frac{\sqrt{3}}{2}[(f - e) + l_a \cos \theta_3])^2 + (z - l_a \sin \theta_3)^2 = l_b^2 \quad (44-2)$$

با مرتب کردن معادلات فوق، نتیجه می‌دهد:

$$(x + m_{11})^2 + (y + m_{12})^2 + (z + m_{13})^2 = l_b^2 \quad (45-2)$$

$$(x + m_{21})^2 + (y + m_{22})^2 + (z + m_{23})^2 = l_b^2 \quad (46-2)$$

$$(x + m_{31})^2 + (y + m_{32})^2 + (z + m_{33})^2 = l_b^2 \quad (47-2)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}
m_{11} &= (f - e) + l_a \cos \theta_1 \\
m_{12} &= 0 \\
m_{13} &= -l_a \sin \theta_1 \\
m_{21} &= \frac{1}{2}[(f - e) + l_a \cos \theta_2] \\
m_{22} &= -\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)[(f - e) + l_a \cos \theta_2] \\
m_{23} &= -l_a \sin \theta_2 \\
m_{31} &= \frac{1}{2}[(f - e) + l_a \cos \theta_3] \\
m_{32} &= -\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)[(f - e) + l_a \cos \theta_3] \\
m_{33} &= -l_a \sin \theta_3
\end{aligned} \tag{۴۸-۲}$$

پس از باز کردن معادلات (۴۵-۲) و (۴۶-۲) و (۴۷-۲) معادله (۴۹-۲) حاصل می‌گردد:

$$x^2 + y^2 + z^2 + 2m_{11}x + 2m_{12}y + 2m_{13}z = l_b^2 - (m_{i1}^2 + m_{i2}^2 + m_{i3}^2) \quad i = 1, 2, 3 \quad -۲) \tag{۴۹}$$

با کم کردن (۴۹-۲) با $i = 2$ از معادله (۴۹-۲) با $i = 1$ نتیجه می‌دهد:

$$2(m_{11} - m_{21})x + 2(m_{12} - m_{22})y + 2(m_{13} - m_{23})z = (m_{21}^2 + m_{22}^2 + m_{23}^2) - (m_{11}^2 + m_{12}^2 + m_{13}^2) \quad -۲) \tag{۵۰}$$

همچنین با کم کردن (۴۹-۲) با $i = 3$ از معادله (۴۹-۲) با $i = 1$ نتیجه زیر حاصل می‌گردد:

$$2(m_{11} - m_{31})x + 2(m_{12} - m_{32})y + 2(m_{13} - m_{33})z = (m_{31}^2 + m_{32}^2 + m_{33}^2) - (m_{11}^2 + m_{12}^2 + m_{13}^2) \quad -۲) \tag{۵۱}$$

با ساده‌سازی، معادلات (۵۰-۲) و (۵۱-۲) به صورت زیر می‌شود:

$$\begin{aligned}
a_1x + b_1y + c_1z &= d_1 \\
a_2x + b_2y + c_2z &= d_2
\end{aligned} \tag{۵۲-۲}$$

که در آن :

$$\begin{aligned}
a_1 &= 2(m_{11} - m_{21}) \\
b_1 &= 2(m_{12} - m_{22}) \\
c_1 &= 2(m_{13} - m_{23}) \\
a_2 &= 2(m_{11} - m_{31}) \\
b_2 &= 2(m_{12} - m_{32}) \\
c_2 &= 2(m_{13} - m_{33}) \\
d_1 &= (m_{21}^2 + m_{22}^2 + m_{23}^2) - (m_{11}^2 + m_{12}^2 + m_{13}^2) \\
d_2 &= (m_{31}^2 + m_{32}^2 + m_{33}^2) - (m_{11}^2 + m_{12}^2 + m_{13}^2)
\end{aligned} \tag{۵۳-۲}$$

با نوشتن معادلات (۵۲-۲) به فرم ماتریسی داریم:

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 - c_1 z \\ d_2 - c_2 z \end{bmatrix} \tag{۵۴-۲}$$

و تعریف می‌گردد $\Delta = a_1 b_1 - a_2 b_1$ و برای $\Delta \neq 0$ ،

$$\begin{aligned}
\Delta x &= (d_1 - c_1 z) b_2 - (d_2 - c_2 z) b_1 = (b_2 d_1 - b_1 d_2) + (b_1 c_2 - b_2 c_1) z \\
\Delta y &= (d_2 - c_2 z) a_1 - (d_1 - c_1 z) a_2 = (a_1 d_2 - a_2 d_1) + (a_2 c_1 - a_1 c_2) z
\end{aligned} \tag{۵۵-۲}$$

و در نتیجه:

$$\begin{aligned}
x &= \frac{\Delta x}{\Delta} = \frac{b_2 d_1 - b_1 d_2}{\Delta} + \frac{b_1 c_2 - b_2 c_1}{\Delta} z \\
y &= \frac{\Delta y}{\Delta} = \frac{a_1 d_2 - a_2 d_1}{\Delta} + \frac{a_2 c_1 - a_1 c_2}{\Delta} z
\end{aligned} \tag{۵۶-۲}$$

با فرض:

$$\begin{aligned}
f_1 &= \frac{b_2 d_1 - b_1 d_2}{\Delta} \\
f_2 &= \frac{a_1 d_2 - a_2 d_1}{\Delta} \\
f_x &= \frac{b_1 c_2 - b_2 c_1}{\Delta} \\
f_y &= \frac{a_2 c_1 - a_1 c_2}{\Delta}
\end{aligned} \tag{۵۷-۲}$$

سپس معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned}
x &= f_1 + f_x z \\
y &= f_2 + f_y z
\end{aligned} \tag{۵۸-۲}$$

با جایگذاری معادله (۵۸-۲) در معادله (۴۵-۲) و (۴۶-۲) و (۴۷-۲) برای $i=3$ نتیجه زیر به دست

می آید:

$$(1+f_x^2+f_y^2)z^2+2([f_x f_1+f_x m_{31}]+[f_y f_2+f_y m_{32}]+m_{33})z+f_{11}^2+f_{22}^2+m_{33}^2-l_b^2 \quad (۵۹-۲)$$

عبارت زیر تعریف می شود:

$$A = (1+f_x^2+f_y^2)$$

$$B = 2([f_x f_1+f_x m_{31}]+[f_y f_2+f_y m_{32}]+m_{33}) \quad (۶۰-۲)$$

$$C = f_{11}^2+f_{22}^2+m_{33}^2-l_b^2$$

که در آن:

$$f_{11} = f_1 + m_{31}$$

$$(۶۱-۲)$$

$$f_{22} = f_2 + m_{32}$$

برای حل معادله $Az^2+Bz+C=0$ از معادله زیر استفاده می گردد:

$$z = \frac{-B \pm \sqrt{B^2-4AC}}{2A} \quad (۶۲-۲)$$

که به این صورت، مجهول سوم هم به دست می آید.

۴-۲- تحلیل دینامیک

در این قسمت، مدل دینامیکی ربات بر مبنای مدل سینماتیکی مطرح شده در قسمت پیشین،

به دست می آید. معادلات دینامیک ربات معمولاً به فرم زیر نوشته می شود [۶]:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (۶۳-۲)$$

که $M(q)$ ماتریس جرم $n \times n$ ، $C(q, \dot{q})$ یک بردار $n \times 1$ کریولیس و نیروی گریز از مرکز $G(q)$

بردار $n \times 1$ نیروی گرانش می باشد. n تعداد عملگرها را نمایش می دهد که در این پژوهش، هر دو ترم

$G(q)$ و $C(q, \dot{q})\dot{q}$ در قالب یک ماتریس $n \times 1$ با نام $C(q, \dot{q})$ آورده شده است.

برای به دست آوردن مدل دینامیکی ربات دلتا جهت اعمال کنترل کننده پیشنهادی، از روش لاگرانژ

استفاده می گردد. با توجه به این که معادلات قید مکانیزم موازی، در مختصات تعمیم یافته می باشند،

فرمول بندی معادلات لاگرانژ برای سیستم مقید همانند رابطه زیر به کار گرفته می شود.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j + \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} \quad (۶۴-۲)$$

که در آن λ_i ضرایب لاگرانژ و Γ_i قیود معادله هستند. معادلات قید ربات موازی از طریق هندسه ربات با توجه به شکل (۴-۲) به صورت زیر به کار برده شده است.

$$\Gamma_i = \overline{M_i B_i}^2 - l_2^2 \quad (۶۵-۲)$$

که $\overline{M_i B_i}$ یک بردار شامل مولفه های x, y, z است که در شکل (۴-۲) قابل رویت می باشد.

$$\Gamma_i = (M_i B_i)_x^2 + (M_i B_i)_y^2 + (M_i B_i)_z^2 - l_2^2 \quad (۶۶-۲)$$

مطابق شکل (۴-۲) بردار به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$\Gamma_i = (p_1 + b \cos \varphi_i - a \cos \varphi_i - l_1 \cos \varphi_i \cos \theta_i)^2 + (p_2 + b \sin \varphi_i - a \sin \varphi_i - l_1 \sin \varphi_i \cos \theta_i)^2 + (p_3 - l_1 \sin \theta_i)^2 - l_2^2 \quad (۶۷-۲)$$

تحلیل و بررسی دینامیک این ربات را می توان با استفاده از سه مختصه تعمیم یافته محاسبه نمود. با این شرایط، با توجه به سینماتیک مسئله، سه مختصات فرعی (p_1, p_2, p_3) به مختصات اصلی که در واقع موقعیت عملگرها می باشند، اضافه گردیده است، بنابراین مختصات تعمیم یافته برای سیستم به فرم (۶۸-۲) می باشد.

$$q = [p \quad \theta]^T \quad (۶۸-۲)$$

که p شامل مولفه های مجری نهایی یعنی x, y, z می باشد و θ مولفه های موقعیت عملگرها است.

برای به دست آوردن تابع لاگرانژین نیاز به محاسبه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی ربات می باشد.

$$L = K - U \quad (۶۹-۲)$$

که K انرژی جنبشی و U انرژی پتانسیل کل ربات است. برای محاسبه انرژی جنبشی، باید انرژی جنبشی های هر سابق که شبیه هم هستند و انرژی جنبشی مجری نهایی را تعیین و با هم جمع نمود. انرژی جنبشی کل به صورت (۷۰-۲) خواهد بود.

$$K = K_p + \sum_{i=1}^3 (K_{1i} + K_{2i}) \quad (۷۰-۲)$$

با جایگذاری انرژی جنبشی هر جز معادله زیر نتیجه می‌دهد:

$$K = \frac{1}{2} m_p \sum_{i=1}^3 \dot{P}_i^2 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1}{2} (\gamma^2 I_m + l_1) \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2} m_2 \sum_{i=1}^3 \dot{P}_i^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \theta_i^2 \right) \quad (۷۱-۲)$$

و برای به‌دست آوردن انرژی پتانسیل نیز باید انرژی پتانسیل تک‌تک اجزا را تعیین و با هم جمع

نمود که به فرم (۷۲-۲) می‌باشد.

$$U = U_p + \sum_{i=1}^3 (U_{1i} + U_{2i}) \quad (۷۲-۲)$$

با جایگذاری انرژی پتانسیل هر جز معادله زیر حاصل می‌گردد:

$$U = -m_p g_c p_3 - \sum_{i=1}^3 (m_1 g l_{c1} \sin \theta_i + m_2 g (p_3 + l_1 \sin \theta_i)) \quad (۷۳-۲)$$

پس با توجه به معادله (۶۹-۲) با کم کردن انرژی پتانسیل از انرژی جنبشی، تابع لاگرانژین به صورت

زیر به‌دست می‌آید:

$$L = \frac{1}{2} m_p \sum_{i=1}^3 \dot{P}_i^2 + m_p g_c p_3 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1}{2} (\gamma^2 I_m + l_1) \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2} m_2 \sum_{i=1}^3 \dot{P}_i^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \theta_i^2 \right) + \sum_{i=1}^3 (m_1 g l_{c1} \sin \theta_i + m_2 g (p_3 + l_1 \sin \theta_i)) \quad (۷۴-۲)$$

برای استخراج معادله دینامیکی ربات دلتا، ابتدا نیاز به محاسبه ضرایب لاگرانژ می‌باشد. برای پیدا

کردن این ضرایب از رابطه لاگرانژ به صورت (۷۵-۲) استفاده می‌شود.

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} - \hat{Q}_j \quad (۷۵-۲)$$

که در آن $\hat{Q}_j$ نیروهای خارجی را نمایش می‌دهد. برای به‌کار بردن این معادله، متغیر z از ۱ تا ۳

می‌باشد و باید از سه مختصات تعمیم‌یافته استفاده نمود.

$$j = 1 \quad (۷۶-۲)$$

$$q_1 = p_1$$

با جایگذاری روابط (۷۶-۲) در معادله (۷۵-۲)، معادله زیر حاصل می‌گردد.

$$2 \sum_{i=1}^k \lambda_i (p_1 + b \cos \varphi_i - a \cos \varphi_i - l_1 \cos \varphi_i \cos \theta_i) = \frac{d}{dt} ((m_p + 3m_2) \dot{p}_1) - 0 - f_1 \quad (77-2)$$

پس از ساده‌سازی معادله بالا نتیجه می‌شود:

$$2 \sum_{i=1}^k \lambda_i (p_1 + b \cos \varphi_i - a \cos \varphi_i - l_1 \cos \varphi_i \cos \theta_i) = (m_p + 3m_2) \ddot{p}_1 - f_1 \quad (78-2)$$

سپس برای مختصات دوم روابط زیر برقرار است:

$$j = 2 \quad (79-2)$$

$$q_2 = p_2$$

با جایگذاری روابط، معادله زیر حاصل می‌گردد:

$$2 \sum_{i=1}^k \lambda_i (p_2 + b \sin \varphi_i - a \sin \varphi_i - l_1 \sin \varphi_i \cos \theta_i) = \frac{d}{dt} ((m_p + 3m_2) \dot{p}_2) - 0 - f_2 \quad (80-2)$$

پس از ساده‌سازی معادله فوق نتیجه می‌دهد:

$$2 \sum_{i=1}^k \lambda_i (p_2 + b \sin \varphi_i - a \sin \varphi_i - l_1 \sin \varphi_i \cos \theta_i) = (m_p + 3m_2) \ddot{p}_2 - f_2 \quad (81-2)$$

و برای مختصات سوم روابط زیر برقرار است:

$$j = 3 \quad (82-2)$$

$$q_3 = p_3$$

با جایگذاری روابط، معادله زیر حاصل می‌شود.

$$2 \sum_{i=1}^k \lambda_i (p_3 - l_1 \sin \theta_i) = \frac{d}{dt} ((m_p + 3m_2) \dot{p}_3) - (m_p + 3m_2)g - f_3 \quad (83-2)$$

پس از ساده‌سازی معادله فوق نتیجه می‌دهد:

$$2 \sum_{i=1}^k \lambda_i (p_3 - l_1 \sin \theta_i) = (m_p + 3m_2)(\ddot{p}_3 - g) - f_3 \quad (84-2)$$

حال با استفاده معادلات بالا، ضرایب لاگرانژ استخراج می‌گردد.

پس از به‌دست آوردن ضرایب، مجموعه دوم معادلات مربوط به نیروهای فعال به صورت زیر استخراج

می‌گردد:

$$Q_j = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} - \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} \quad (۸۵-۲)$$

که در آن Q_j گشتاور محرک‌ها و متغیر j از ۴ تا ۶ می‌باشد. با استفاده از ضرایب لاگرانژ حاصل و جای‌گذاری آن‌ها در معادله (۸۵-۲) در آخر معادله دینامیکی ربات به صورت سه معادله دیفرانسیل غیر خطی به صورت (۸۶-۲) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \tau_i = & \frac{d}{dt} ((\gamma^2 I_m + l_1 + m_1 l_1^2) \dot{\theta}_i) - (g \cos \theta_i (m_1 l_{c1} + m_2 l_1)) \\ & - 2\lambda_i ((p_1 + b \cos \varphi_i - a \cos \varphi_i - l_1 \cos \varphi_i \cos \theta_i)(l_1 \cos \varphi_i \sin \theta_i) \\ & + (p_2 + b \sin \varphi_i - a \sin \varphi_i - l_1 \sin \varphi_i \cos \theta_i)(l_1 \sin \varphi_i \sin \theta_i) \\ & + (p_3 - l_1 \sin \theta_i)(-l_1 \cos \theta_i)) \end{aligned} \quad (۸۶-۲)$$

که در آن i از ۱ تا ۳ می‌باشد. پس از مشتق‌گیری و ساده‌سازی، معادله فوق به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \tau_i = & (\gamma^2 I_m + l_1 + m_1 l_1^2) \ddot{\theta}_i - ((m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos \theta_i) \\ & - 2\lambda_i l_1 ((p_1 \cos \varphi_i + p_2 \sin \varphi_i + b - a) \sin \theta_i + p_3 \cos \theta_i) \end{aligned} \quad (۸۷-۲)$$

به طور معمول معادلات دینامیکی ربات به شکل ماتریسی نوشته می‌شود و همچنین برای اهداف کنترلی نیز از این فرم متعارف استفاده می‌گردد. معادله دینامیکی ربات دلتا به فرم متعارف ماتریسی در (۸۸-۲) نمایش داده شده است.

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \quad (۸۸-۲)$$

که در این معادله، $M(\theta)$ ماتریس اینرسی است و $C(\theta, \dot{\theta})$ یک بردار 3×1 می‌باشد.

فصل سوم

کنترل فیدبک خطی ساز

۳-۱- مقدمه

فیدبک خطی ساز یکی از شیوه‌های کنترل غیرخطی می‌باشد. شیوه این روش بدین گونه است که به دینامیک یک سیستم غیرخطی به خطی آن تبدیل گردد، به طوری که بتوان از راهکارهای خطی استفاده نمود.

طرح ساده‌سازی دینامیک سیستم با تعیین یک توصیف متفاوت حالت، کاملاً گمنام نیست، روش‌های خطی‌سازی با فیدبک را می‌توان به عنوان تکنیک‌های تبدیل مدل‌های سیستم اصلی به مدل‌های معادل به شکل ساده‌تر لحاظ کرد [۲].

به طور کلی معادله دینامیکی ربات مورد نظر که در فصل قبل شرح داده شد، به فرم زیر است:

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \quad (۳-۱)$$

که M ماتریس اینرسی و C یک ماتریس 3×3 می‌باشد.

۳-۲- طراحی کنترل فیدبک خطی ساز

فرم کلی معادله خطا در روش کنترلی فیدبک خطی ساز به صورت زیر می‌باشد [۲]:

$$\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e + k_I = 0 \quad (۳-۲)$$

که در آن

$$e = \theta_d - \theta \quad (۳-۳)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \quad (۳-۴)$$

$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} \quad (۳-۵)$$

با جایگذاری معادله (۵-۳) در معادله (۲-۳) داریم:

$$\ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + k_d \dot{e} + k_p e + k_I = 0 \quad (۶-۳)$$

از طرفی با توجه به معادله (۱-۳) داریم:

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(\tau - C \dot{\theta}) \quad (۷-۳)$$

با جایگذاری معادله (۷-۳) در (۶-۳) داریم:

$$\ddot{\theta}_d - M^{-1}(\tau - C \dot{\theta}) + k_d \dot{e} + k_p e + k_I = 0 \quad (۸-۳)$$

با ساده‌سازی روابط فوق، قانون کنترلی زیر به دست می‌آید:

$$\tau = M (\ddot{\theta}_d + k_d \dot{e} + k_p e + k_I) + C \dot{\theta} \quad (۹-۳)$$

۳-۳ شبیه‌سازی و نتایج

در این قسمت به شبیه‌سازی ربات و اعمال کنترل‌کننده فیدبک خطی‌ساز بر روی آن پرداخته می‌شود و نتایج شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته برای کنترل ربات دلتا ارائه می‌گردد. پارامترهای هندسی مورد نیاز ربات موازی دلتا جهت شبیه‌سازی در جدول (۱-۳) آورده شده‌است.

همچنین برای شبیه‌سازی، نیاز به مسیری دلخواه داریم که در معادله (۱۰-۳) آورده شده است:

$$x_d = 0.1 \cos(\pi / 3) \quad (۱۰-۳)$$

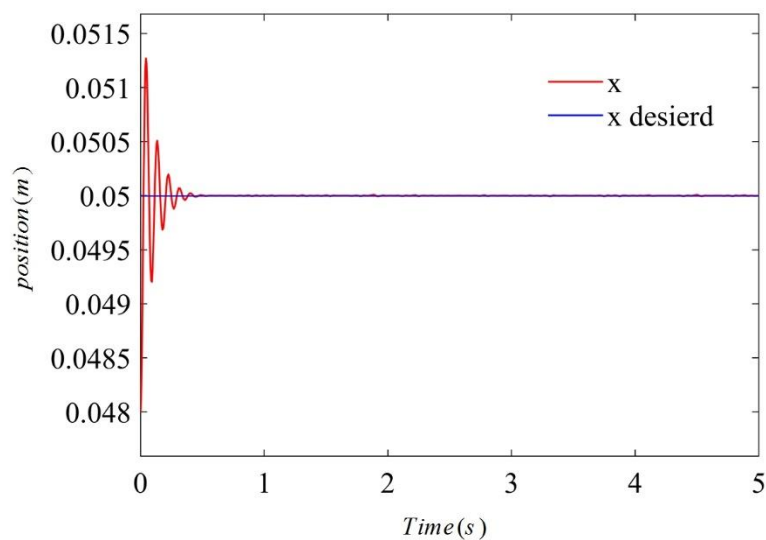
$$y_d = 0.1 \sin(\pi / 3)$$

$$z_d = 0.5$$

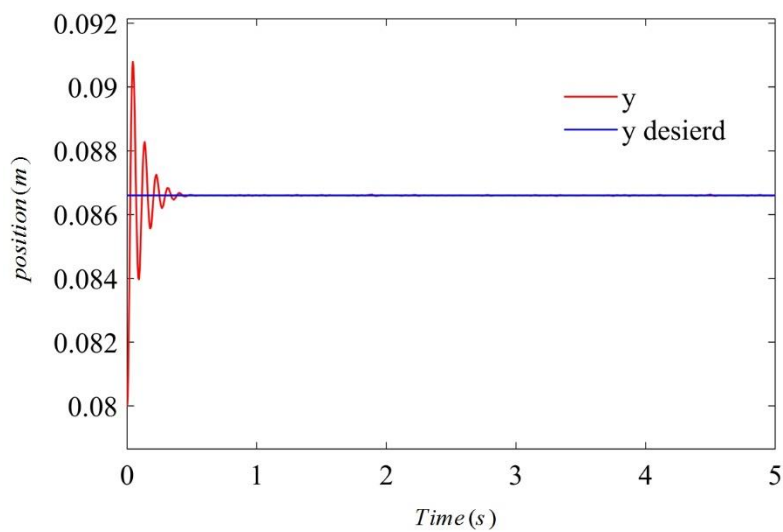
جدول ۳-۱: جدول پارامترهای هندسی ربات دلتا [۶]

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	L_1	0.171 m
۲	L_2	0.396 m
۳	a	0.1 m
۴	b	0.0225 m
۵	m_p	0.096 kg
۶	m_1	0.426 kg
۷	m_2	0.069 kg

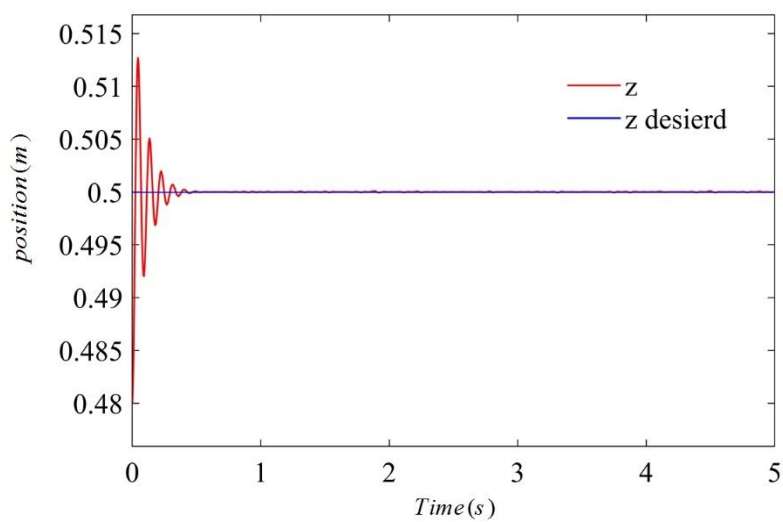
نتایج شبیه‌سازی جهت بررسی عملکرد ردیابی در نمودارهای زیر آورده شده است. منحنی‌های (۱-۳) (۲-۳) و (۳-۳) نمودارهای ردیابی مسیر مطلوب که معادله آن به صورت (۳-۱۰) می‌باشد، برای مختصات x ، y و z می‌باشد.



شکل (۳-۱) ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات x



شکل (۳-۲) ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات y

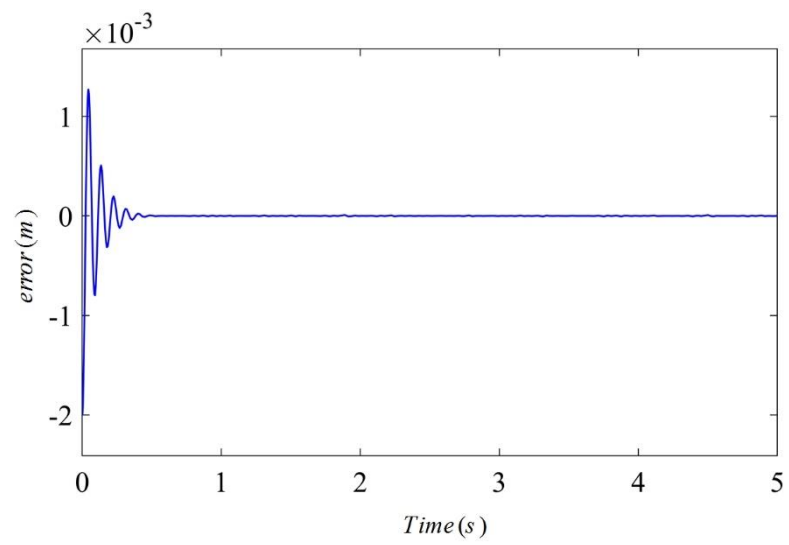


شکل (۳-۳) ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات z

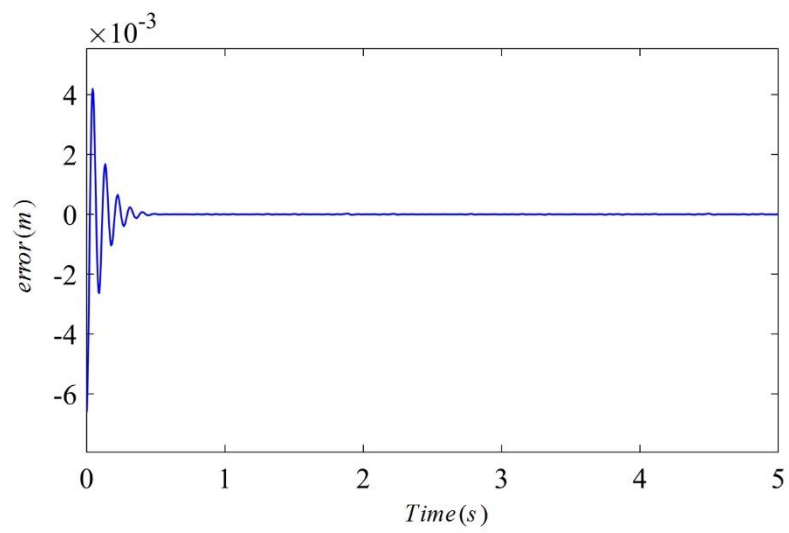
نتایج حاکی از آن است که کنترل فیدبک خطی ساز عملکرد مطلوبی را در ردیابی مسیر دارد و در

کمتر از ۰,۴ ثانیه مسیر پیشنهادی را ردیابی می کند.

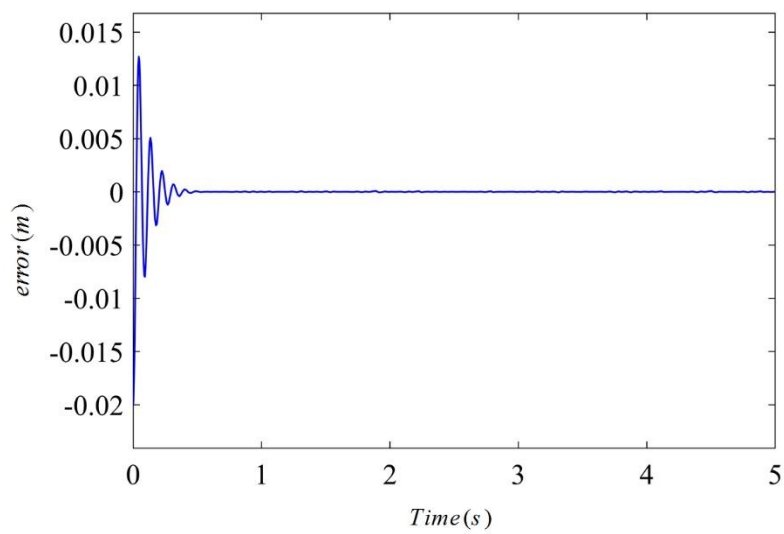
در نمودارهای (۳-۴) و (۳-۵) و (۳-۶) اختلاف بین مسیر مطلوب و مسیر ربات دلتا ارائه شده است.



شکل (۳-۴) خطای ردیابی مسیر در جهت x

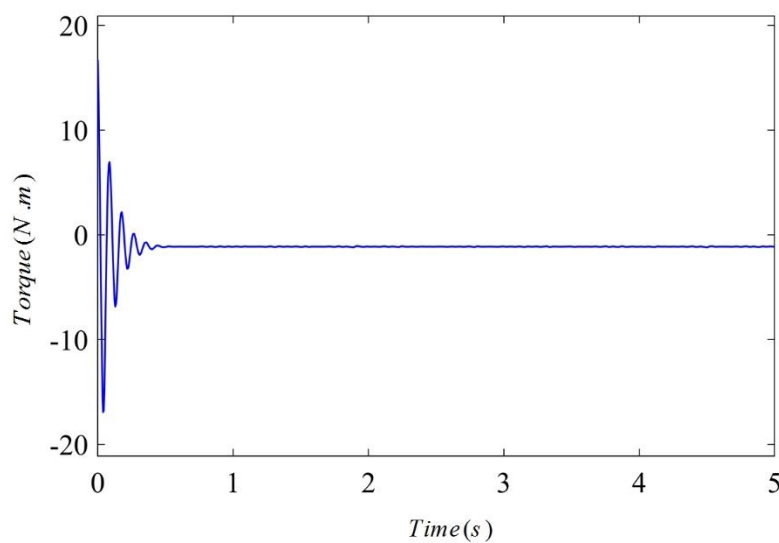


شکل (۳-۵) خطای ردیابی مسیر در جهت y

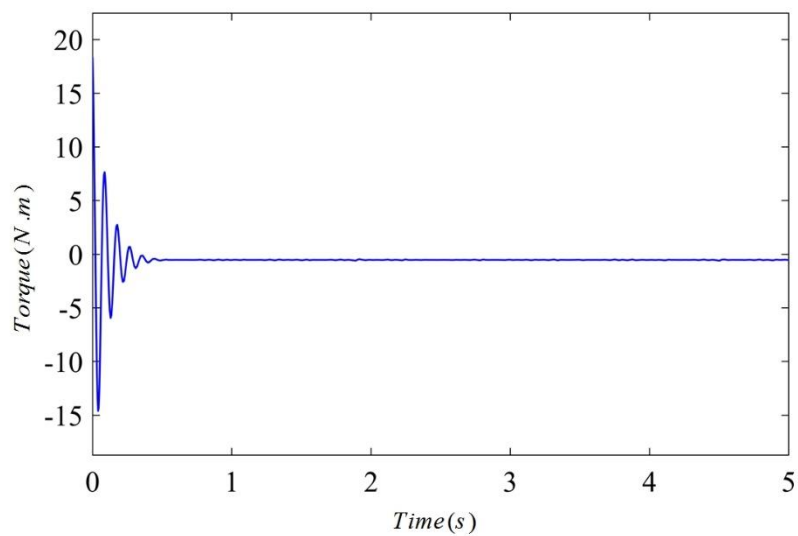


شکل (۶-۳) خطای ردیابی مسیر در جهت z

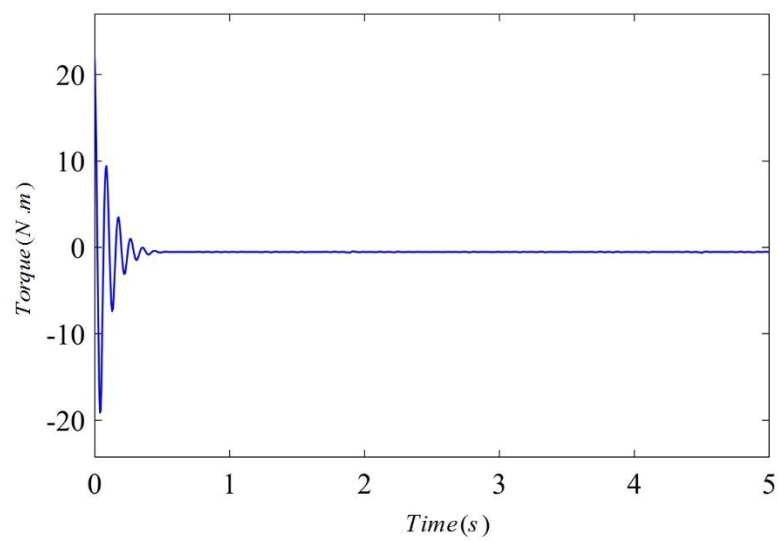
همچنین خطای ردیابی نیز در کمتر از ۰,۵ ثانیه به صفر می‌سد. و این نشان‌دهنده آن است که با اعمال این کنترل‌کننده بر روی سیستم با کمترین نوسان خطا به سمت صفر میل می‌کند. شکل‌های (۷-۳)، (۸-۳) و (۹-۳) گشتاورهای کنترلی به‌دست‌آمده برای ربات دلتا می‌باشد.



شکل (۷-۳) گشتاور کنترلی اول



شکل (۸-۳) گشتاور کنترلی دوم



شکل (۹-۳) گشتاور کنترلی سوم

از نمودارهای بالا مشاهده می‌شود گشتاور اعمالی نتایج مطلوبی را با اعمال کنترل فیدبک خطی‌ساز از خود نشان می‌دهد.

فصل چهارم

کنترل مد لغزشی

۴-۱ طراحی کنترل مد لغزشی

از بین روش‌های کنترل مقاوم، کنترل مد لغزشی به خاطر مقاومت در مقابل عدم قطعیت‌های دینامیکی، سهولت در محاسبات، لرزش ناشی از بار و ... قابل توجه است. در این قسمت با توجه به عدم قطعیت‌ها، برای ردیابی مسیر مطلوب طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی برای ربات دلتا صورت می‌گیرد. از اشکالات این روش، لرزشی است که به وجود می‌آید و در فرکانس‌های بالا سبب عملکرد ضعیف سیستم می‌گردد. به همین خاطر برای از بین بردن این لرزش، از الگوریتم‌های مد لغزشی نظیر الگوریتم فوق‌پیچشی استفاده شده است. برای طراحی کنترل‌کننده، نیاز به ضرایب کنترل‌کننده می‌باشد که اثر مستقیمی بر نتیجه ردیابی دارد. در این قسمت، ضرایب به روش سعی و خطا انتخاب شده‌اند.

در ابتدا برای طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی، باید یک سطح خطی یا غیرخطی به نام S که به سطح لغزش معروف است تعریف گردد. از ویژگی‌های این سطح دینامیک پایدار آن می‌باشد یعنی پاسخ معادله $S=0$ دارای محدودیت باشد، زیرا ورودی کنترلی باید به گونه‌ای حاصل گردد که مسیرهای حالت را به سمت این سطح کشانده و ثابت و بدون تغییر بر روی آن نگه دارد. در این شرایط به خاطر دینامیک پایدار سطح لغزش، سیستم به طرف نقطه تعادل حرکت خواهد نمود و سیستم پایدار می‌گردد. این موضوع در مورد مساله ردیابی نیز صادق است.

هدف از کنترل‌کننده مد لغزشی جدای از ردیابی مسیر دلخواه، جبران عدم قطعیت‌ها، عدم دقت‌ها در ثابت‌های گشتاور، عدم دقت در خواص جرم و اینرسی یا بارها، اصطکاک و ... می‌باشد. همچنین دینامیک‌های مدل نشده را نیز لحاظ کند.

به خاطر بزرگ بودن درایه‌های ماتریس‌های به وجود آورنده معادله دینامیکی ربات دلتا تنها فرم کلی آن‌ها بیان گردیده است. در این پژوهش، همه پارامترهای سیستم، دارای نامعینی با کران معلوم هستند که به صورت کلی ماتریس‌های دینامیک سیستم به شکل زیر خواهند بود.

$$M = \hat{M} + \Delta M \quad (۴-۱)$$

$$C = \hat{C} + \Delta C$$

که $\hat{C}$ و $\hat{M}$ به ترتیب بخش معلوم ماتریس‌های M و C و نیز ماتریس‌های ΔM و ΔC عدم قطعیت‌های سیستم هستند. همان‌طور که اشاره شد، برای طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی به یک سطح لغزش احتیاج است که برای سیستم‌های مرتبه دو به صورت (۲-۴) تعریف می‌شود.

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (2-4)$$

که در آن s مجموعه‌ای از خطای سرعت و خطای موقعیت می‌باشد و λ یک عدد ثابت مثبت می‌باشد. چون مقدار خطا و سطح لغزش به فرم ماتریسی بوده، λ نیز یک ماتریس قطری می‌باشد.

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

به طور معمول سطح لغزش به فرم (۴-۴) تعریف می‌شود.

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (4-4)$$

که در آن n مرتبه سیستم را نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای سیستم مرتبه دوم معادله فوق به صورت معادله (۲-۴) درمی‌آید. همچنین برای کنترل کردن، یک شرط لغزش به فرم زیر نیاز است:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} s^2 \right) \leq -\eta |s| \quad (5-4)$$

که η یک بردار ستونی شامل مولفه‌های مثبت است.

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

اگر مشتق مربوط به عبارت بالا لحاظ شود، رابطه زیر برقرار می‌گردد.

$$s\dot{s} \leq -\eta s \quad (7-4)$$

با توجه به تعریف سطح لغزش برای سیستم، پس مشتق آن به فرم معادله (۸-۴) خواهد بود.

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} \quad (۸-۴)$$

و از آن جایی که

$$\text{sign}(s) = \frac{s}{|s|} \quad (۹-۴)$$

پس عبارت (۷-۴) به شکل زیر درمی آید.

$$\dot{s} \text{ sign}(s) \leq -\eta \quad (۱۰-۴)$$

در حالت کلی اگر سیستم به صورت زیر باشد:

$$\ddot{\theta} + f = u \quad (۱۱-۴)$$

و مجموع عدم قطعیت‌ها به شکل معادله (۱۲-۴) در ترم Δf می‌باشد.

$$f = \hat{f} + \Delta f \quad (۱۲-۴)$$

با اشاره به معادله (۸-۴) و نیز تعریف خطای شتاب، می‌توان شرط سطح لغزش را به صورت (۱۳-۴)

نوشت.

$$(\ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + \lambda \dot{e}) \text{sgn}(s) \leq -\eta \quad (۱۳-۴)$$

حال با جایگذاری معادله سیستم در معادله (۱۳-۴) معادله (۱۴-۴) حاصل می‌گردد.

$$(\ddot{\theta}_d - u + f + \lambda \dot{e}) \text{sign}(s) \leq -\eta \quad (۱۴-۴)$$

حال، قانون کنترلی زیر بیان می‌گردد

$$u = \ddot{\theta}_d - \hat{f} + \lambda \dot{e} + k \text{sign}(s) \quad (۱۵-۴)$$

که بخش $k \text{sgn}(s)$ برای از بین بردن عدم قطعیت‌های سیستم در نظر گرفته شده است و باقی

بخش‌ها برای کنترل قسمت‌های معلوم سیستم لحاظ گردیده است.

با جایگذاری قانون کنترلی پیشنهادی و ساده‌سازی داریم:

$$(\Delta f - k \text{sign}(s)) \text{sign}(s) \leq -\eta \quad (۱۶-۴)$$

برای به دست آوردن مقدار k ، معادله (۱۶-۴) به فرم (۱۷-۴) نوشته می شود.

$$\Delta f \text{sign}(s) - \eta \leq k \quad (۱۷-۴)$$

اگر $|\Delta f| \leq F$ ، پس می توان مقدار k را به صورت (۲۰-۴) نوشت.

$$k = F + \eta \quad (۱۸-۴)$$

مطابق با قانون کنترلی پیشنهادی برای سیستم کلی، قانون کنترلی برای ربات مورد نظر به صورت

زیر پیشنهاد می گردد.

$$\tau = u_{eq} + k \text{sign}(s) \quad (۱۹-۴)$$

که u_{eq} مربوط به قسمت معلوم دینامیک است و بخش دوم آن برای از بین بردن عدم قطعیت های

سیستم است.

با توجه به مقدار k که برای سیستم کلی در معادله (۱۸-۴) بدست آمد و با توجه به شکل

دینامیک ربات دلتا، می توان مقدار k را برای ربات مورد نظر به صورت (۲۰-۴) بیان کرد.

$$k = \Delta M \ddot{\theta}_d + \Delta C + \eta \quad (۲۰-۴)$$

هدف به صفر رساندن سطح لغزش و مشتق آن است که برای به دست آوردن u_{eq} ، از همین

ویژگی سطح لغزش استفاده می گردد.

$$\dot{s} = 0 \quad (۲۱-۴)$$

با جایگذاری خطای شتاب در مشتق سطح لغزش، معادله (۲۴-۴) حاصل می گردد.

$$\dot{s} = (\ddot{\theta}_d - \ddot{\theta}) + \lambda \dot{e} \quad (۲۲-۴)$$

از معادله دینامیکی ربات دلتا، معادله (۲۳-۴) حاصل می شود.

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(\tau - C) \quad (۲۳-۴)$$

چون هدف محاسبه ورودی مربوط به قسمت معلوم مساله است، پس از معادله دینامیکی به

صورت زیر استفاده می‌گردد.

$$\ddot{\theta} = \hat{M}^{-1}(u_{eq} - \hat{C}) \quad (24-4)$$

و همچنین با جایگذاری معادله دینامیکی سیستم در معادله (24-4) عبارت (25-4) حاصل می‌گردد.

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_d - \hat{M}^{-1}(u_{eq} - \hat{C}) + \lambda \dot{e} \quad (25-4)$$

پس از ساده‌سازی، معادله (25-4) به فرم (26-4) بیان می‌گردد.

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_d - \hat{M}^{-1}u_{eq} + \hat{M}^{-1}\hat{C} + \lambda \dot{e} \quad (26-4)$$

با جایگذاری معادله $\dot{s} = 0$ بر حسب معادله (26-4) در شرط $\dot{s} = 0$ ، می‌توان معادله (27-4) را محاسبه کرد.

$$\ddot{\theta}_d - \hat{M}^{-1}u_{eq} + \hat{M}^{-1}\hat{C} + \lambda \dot{e} = 0 \quad (27-4)$$

و سپس مقدار u_{eq} حاصل می‌گردد.

$$u_{eq} = \hat{M}(\ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e}) + \hat{C} \quad (28-4)$$

حال طبق قانون کنترلی مطرح شده برای ربات دلتا و نیز با توجه به مقدار u_{eq} که در معادله (4-

28) قابل رویت است و همچنین با توجه به مقدار k که قبل از این به‌دست آمد، معادله زیر برای کنترل مد لغزشی ربات دلتا قابل استفاده است.

$$\tau = \hat{M}(\ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e}) + \hat{C} + (\Delta M \ddot{\theta}_d + \Delta C + \eta) \text{sign}(s) \quad (29-4)$$

برای اثبات پایداری سیستم از تابع لیپانوف استفاده می‌گردد. تابع لیپانوف پیشنهادی به فرم (4-

30) می‌باشد:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (30-4)$$

همانطور که رویت می‌گردد، تابع‌ای را انتخاب می‌کنیم که مثبت باشد. برای پایداری باید مشتق این

تابع منفی معین گردد. بدین منظور مشتق تابع لیپانوف به فرم زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{V} = s\dot{s} \quad (31-4)$$

با جایگذاری معادله (22-4) در معادله (31-4)، عبارت (32-4) حاصل می‌گردد.

$$\dot{V} = s(\ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + \lambda\dot{e}) \quad (32-4)$$

و سپس با جایگذاری معادله (23-4) در معادله (32-4)، داریم:

$$\dot{V} = s(\ddot{\theta}_d - M^{-1}(\tau - C) + \lambda\dot{e}) \quad (33-4)$$

بعد از جایگذاری قانون کنترلی به‌دست آمده در عبارت (33-4) و ساده‌سازی، معادله (34-4)

حاصل می‌گردد:

$$\dot{V} = s(\ddot{\theta}_d - M^{-1}(u_{eq} + k\text{sign}(s)) - M^{-1}C + \lambda\dot{e}) \quad (34-4)$$

و اگر به جای u_{eq} مقدار $M(\ddot{\theta}_d + \lambda\dot{e}) + C$ قرار داده شود:

$$\dot{V} = s(\ddot{\theta}_d - M^{-1}(M\ddot{\theta}_d + M\lambda\dot{e} + C + k\text{sign}(s)) - M^{-1}C + \lambda\dot{e}) \quad (35-4)$$

پس از ساده‌سازی نتیجه به فرم معادله (36-4) حاصل می‌گردد:

$$\dot{V} = sM^{-1}k\text{sign}(s) \quad (36-4)$$

اکنون یک متغیر جدید تعریف می‌شود

$$k' = M^{-1}k \quad (37-4)$$

از طرفی رابطه زیر برقرار است

$$|s| = s \text{sign}(s) \quad (38-4)$$

در نهایت مشتق تابع لیاپانوف به فرم زیر خواهد بود

$$\dot{V} = -k'|s| \quad (39-4)$$

که k' مثبت است، و در نتیجه مشتق تابع لیاپانوف منفی معین می‌شود.

$$\dot{V} \leq 0 \quad (40-4)$$

۴-۲- طراحی الگوریتم فوق پیچشی

همانطور که اشاره شد مد لغزشی مرتبه اول در برابر اغتشاشات عملکرد مطلوبی ندارد. به همین

خاطر برای کاهش این پدیده از مد لغزشی مرتبه بالاتر (الگوریتم فوق پیچشی) استفاده شده است.

این الگوریتم از ترکیب چند الگوریتم برای رسیدن و ماندن به سطح s استفاده می کند [۲۷].

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= \begin{cases} u & |u| > 1 \\ w \operatorname{sign}(s) & |u| \leq 1 \end{cases} \quad (4-41) \\ u_2 &= \begin{cases} \lambda |s_0|^\rho \operatorname{sign}(s) & |s| > s_0 \\ \lambda |s|^\rho \operatorname{sign}(s) & |s| \leq s_0 \end{cases} \end{aligned}$$

که ضرایب این الگوریتم به صورت (۴-۴۲) مشخص می شود تا همگرایی به سمت صفر به درستی

صورت پذیرد [۲۸]:

$$\begin{aligned} w &> \frac{\Phi}{\Gamma_m} > 0 \quad (4-42) \\ \lambda^2 &\geq \frac{4\Phi\Gamma_m(w + \Phi)}{\Gamma_m^3(w - \Phi)} \\ 0 &< \rho < 0.5 \end{aligned}$$

همان طور که در معادله (۴-۴۱) مشاهده شد، قانون کنترلی پیشنهادی توسط دو ترم تشکیل می -

شود. اولی به وسیله مشتق زمانی تعریف می گردد، در حالی که دیگری تابعی پیوسته از متغیر لغزشی

موجود است. الگوریتم فوق چرخشی به هیچ اطلاعاتی در مورد مشتق زمانی متغیر لغزشی نیازی ندارد.

در نتیجه قانون کنترلی بر پایه این الگوریتم به فرم زیر می باشد

$$u = u_{eq} + \hat{g}^{-1}(\int \dot{u}_1 dt + u_2) \quad (4-43)$$

۴-۳- شبیه‌سازی و نتایج

در این قسمت به شبیه‌سازی ربات و اعمال کنترل‌کننده مد لغزشی و همچنین الگوریتم فوق‌پیچشی پرداخته می‌شود و نتایج شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته برای کنترل ربات دلتا ارائه می‌گردد. پارامترهای مسیر دلخواه برای ربات همان مسیر پیشین می‌باشد:

$$x_d = 0.1 \cos(\pi / 3) \quad (4-46)$$

$$y_d = 0.1 \sin(\pi / 3)$$

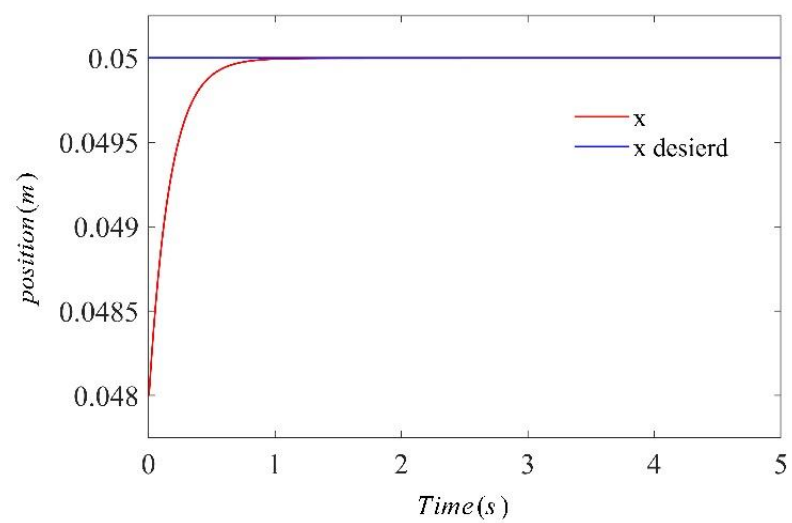
$$z_d = 0.5$$

همچنین مقادیر ضرایب λ و η که از روش سعی و خطا به دست آمده‌اند، در معادله (۴-۴۵) و (۴-۴۶) قابل مشاهده می‌باشند.

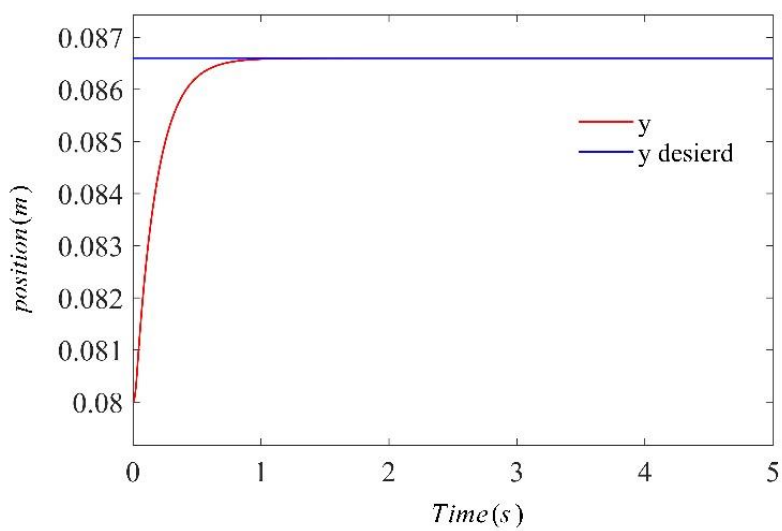
$$\lambda_1 = 6, \lambda_2 = 6, \lambda_3 = 6 \quad (4-45)$$

$$\eta_1 = 10, \eta_2 = 10, \eta_3 = 10 \quad (4-46)$$

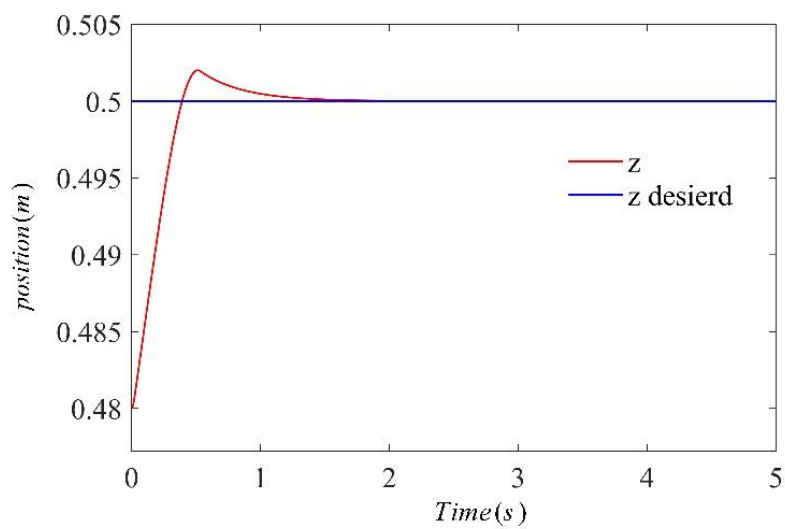
نتایج شبیه‌سازی جهت بررسی عملکرد ردیابی برای کنترل مد لغزشی مرتبه اول در نمودارهای زیر ارائه گردیده‌است. منحنی شکل (۴-۱) نمودار ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات x ، شکل (۴-۲) نمودار ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات y و شکل (۴-۳) نمودار ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات z می‌باشد.



شکل (۴-۱) ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات x

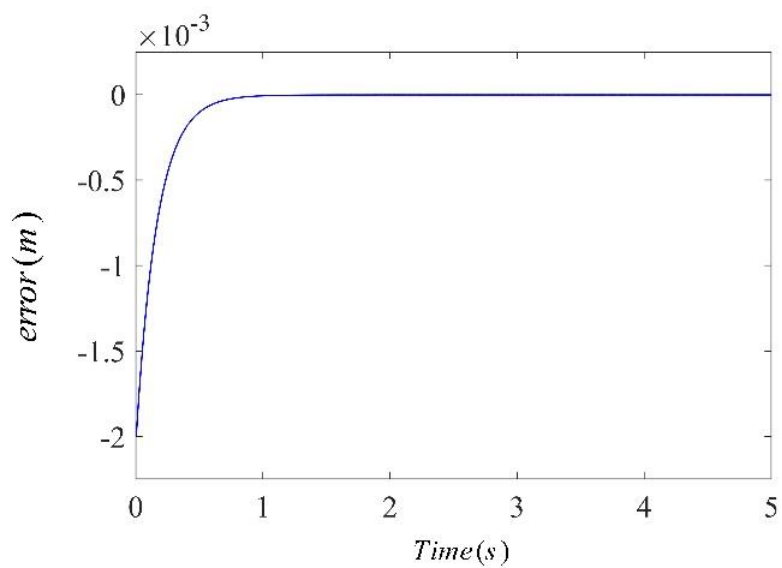


شکل (۴-۲) ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات y

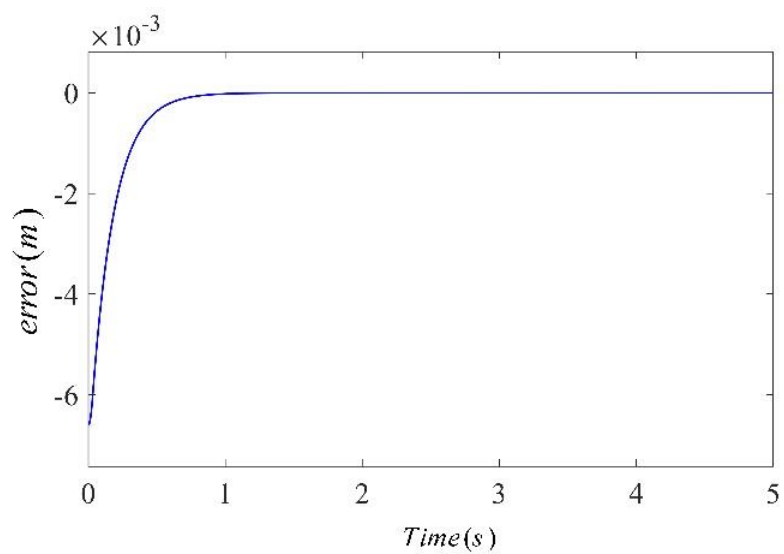


شکل (۴-۳) ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات z

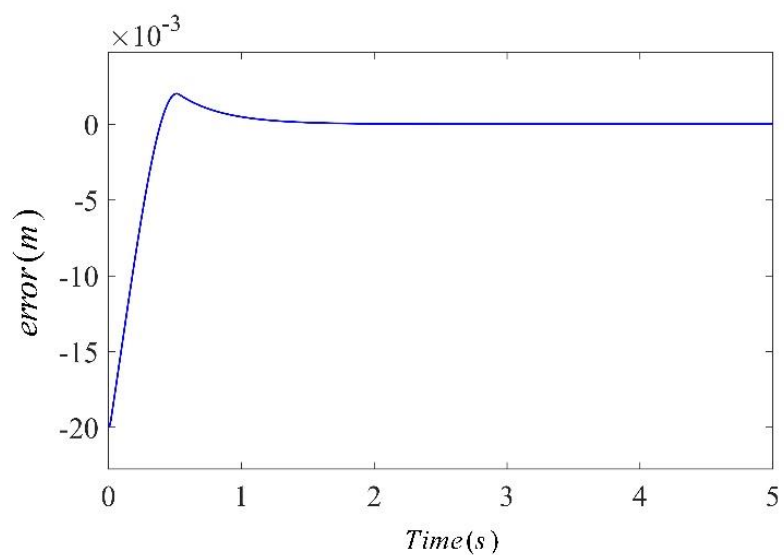
در نمودارهای (۴-۴) و (۴-۵) و (۴-۶) اختلاف بین مسیر مطلوب و مسیر ربات دلتا ارائه شده است.



شکل (۴-۴) خطای ردیابی مسیر در جهت x

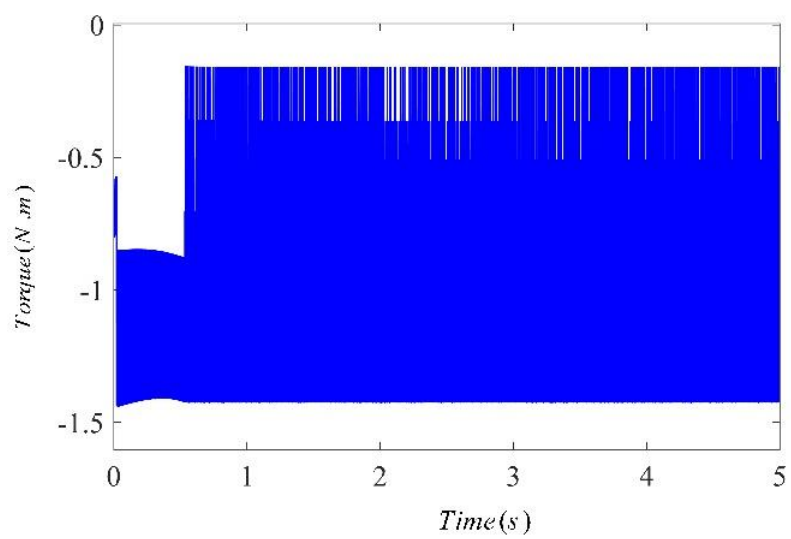


شکل (۵-۴) خطای ردیابی مسیر در جهت y

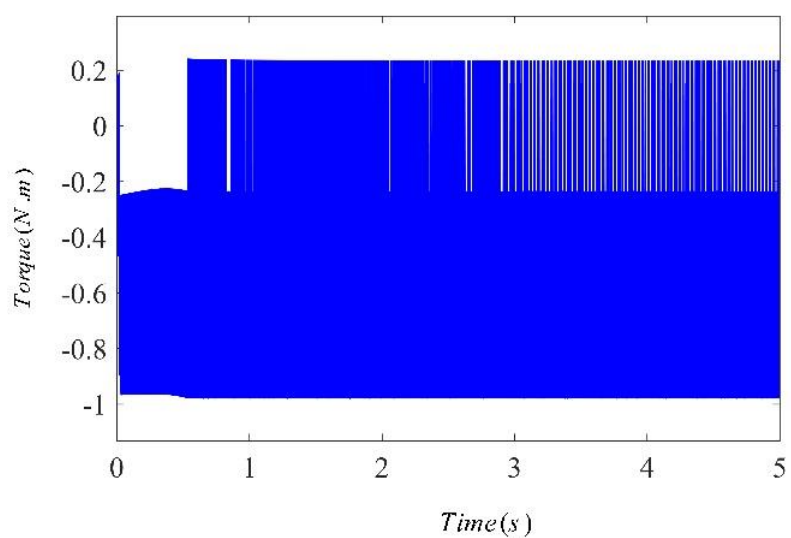


شکل (۶-۴) خطای ردیابی مسیر در جهت z

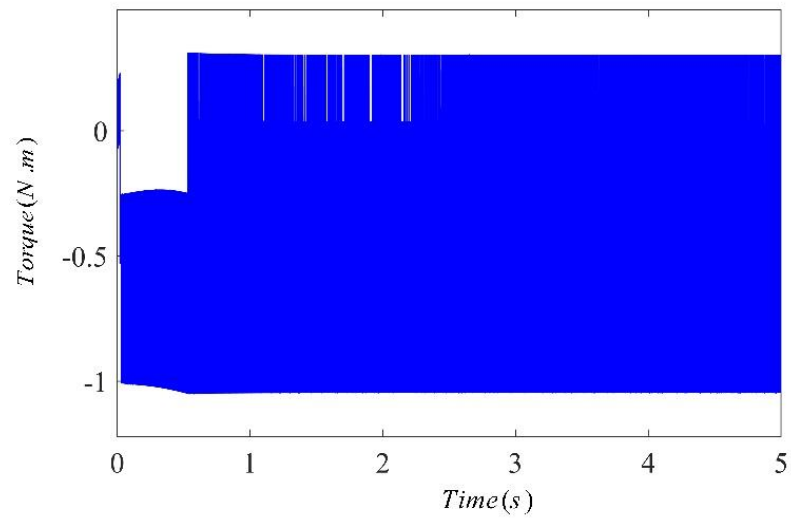
همچنین شکل‌های (۷-۴) ، (۸-۴) و (۹-۴) گشتاورهای کنترلی به‌دست‌آمده برای ربات دلتا می-باشد.



شکل (۷-۴) گشتاور کنترلی اول

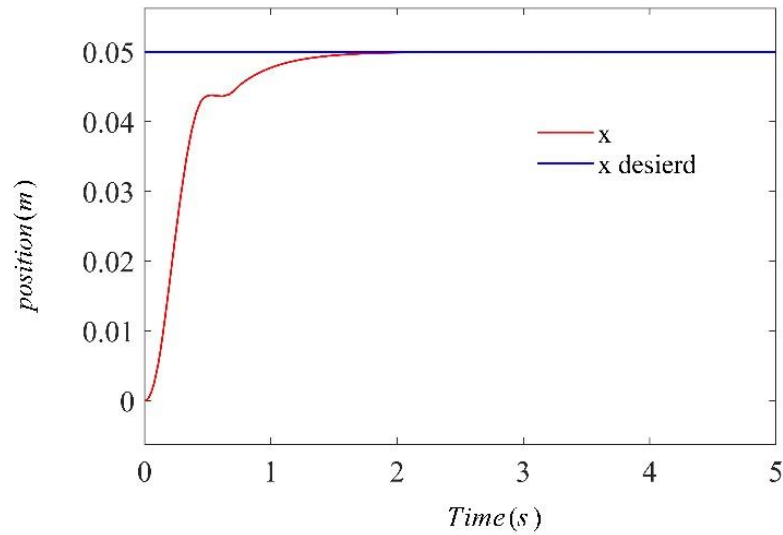


شکل (۸-۴) گشتاور کنترلی دوم

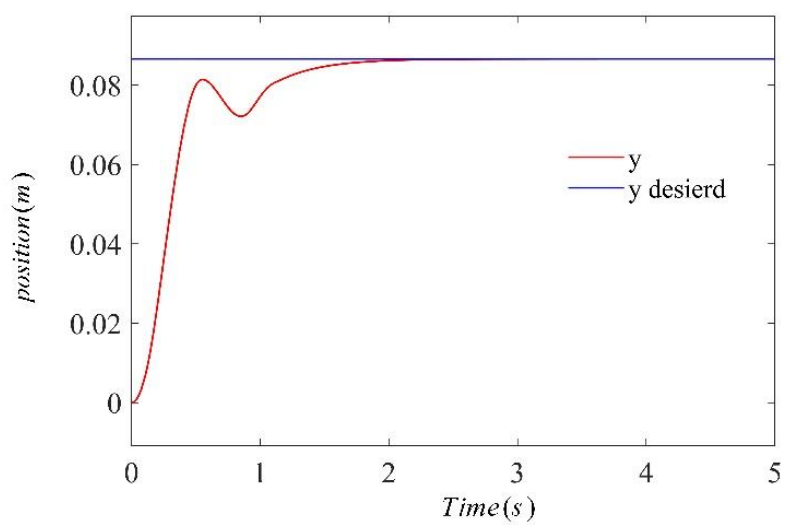


شکل (۴-۹) گشتاور کنترلی سوم

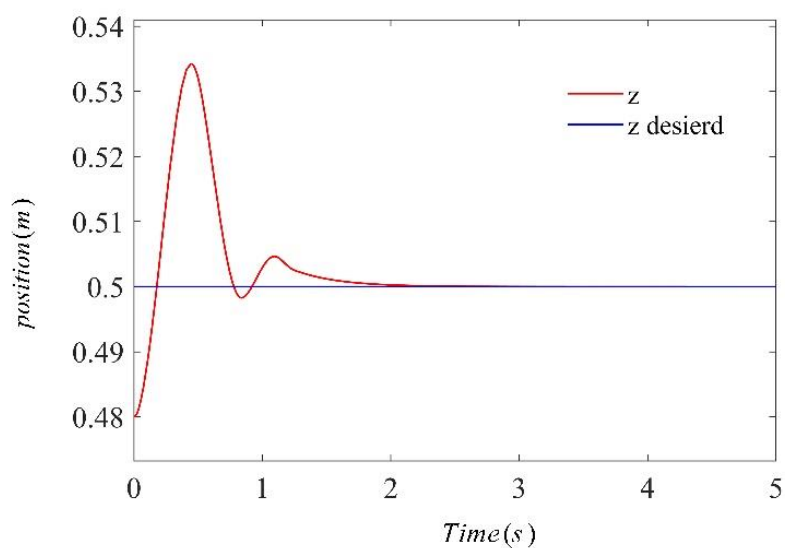
در این بخش، نتایج شبیه‌سازی شده با اعمال کنترل کننده مد لغزشی با الگوریتم فوق‌پیشگی ارائه گردیده است. شایان ذکر است مسیر دلخواه همان مسیر (۴-۴۴) می‌باشد. شکل‌های (۴-۱۰) و (۴-۱۱) و (۴-۱۲) به ترتیب نمودار ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات x ، y و z می‌باشد.



شکل (۴-۱۰) ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات x

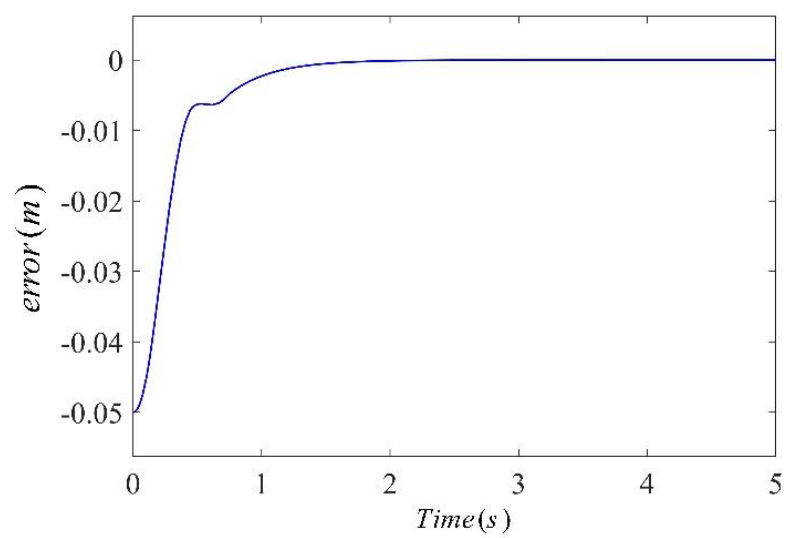


شکل (۴-۱۱) ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات y

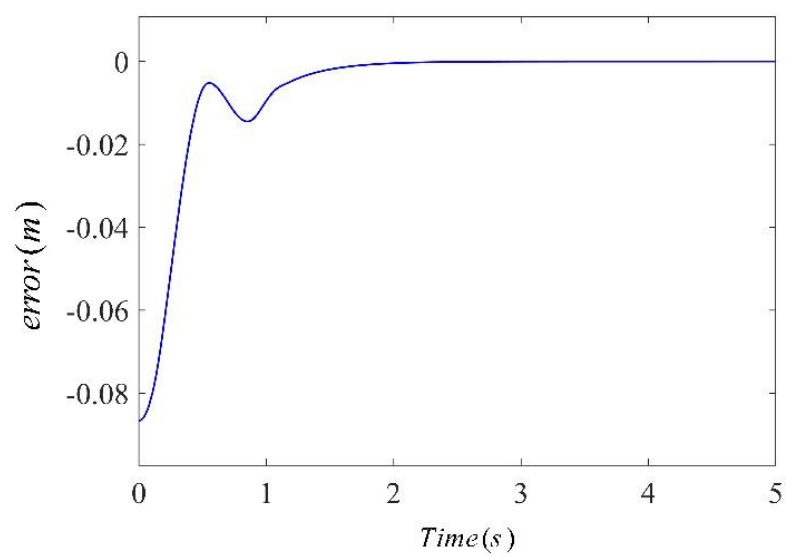


شکل (۴-۱۲) ردیابی مسیر مطلوب برای مختصات z

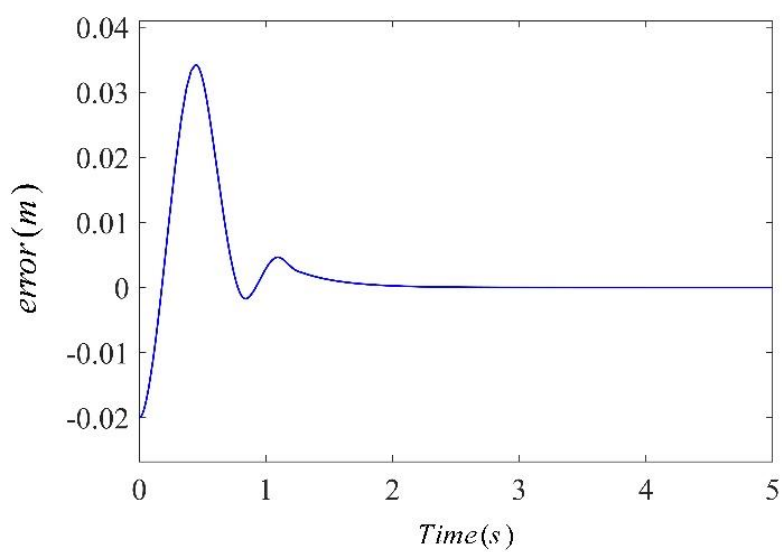
نمودار خطای ردیابی مسیر در شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) و (۴-۱۵) آورده شده است.



شکل (۴-۱۳) خطای ردیابی مسیر در جهت x

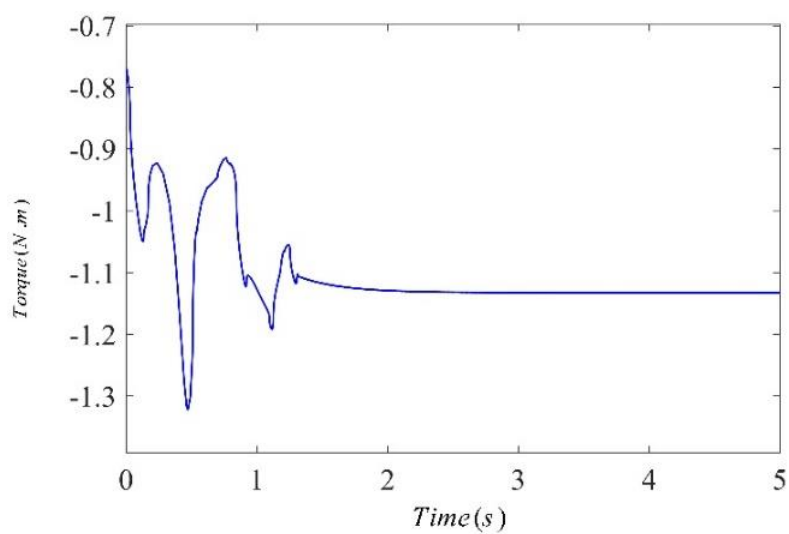


شکل (۴-۱۴) خطای ردیابی مسیر در جهت y

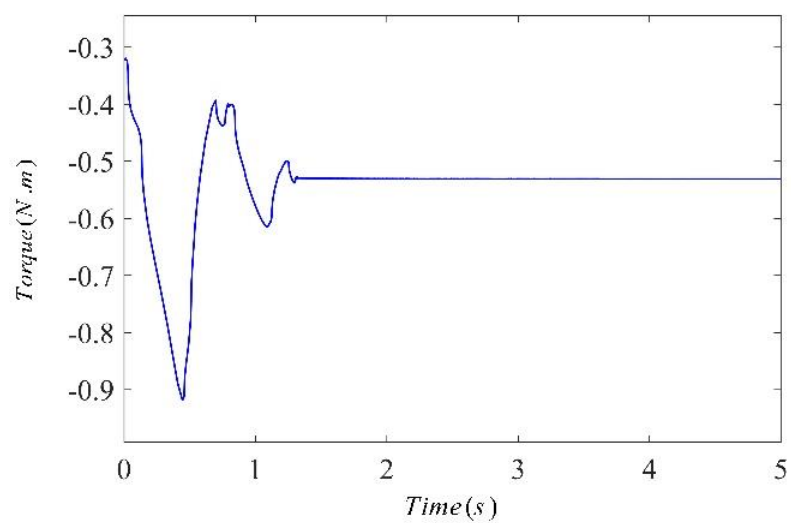


شکل (۴-۱۵) خطای ردیابی مسیر در جهت Z

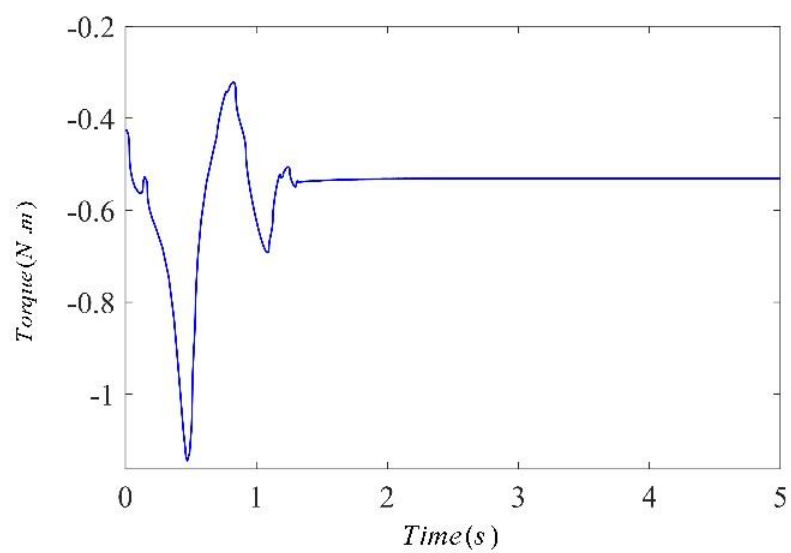
همچنین شکل‌های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) و (۴-۱۸) مربوط به گشتاورهای کنترلی به‌دست‌آمده برای ربات دلتا می‌باشد.



شکل (۴-۱۶) گشتاور کنترلی اول

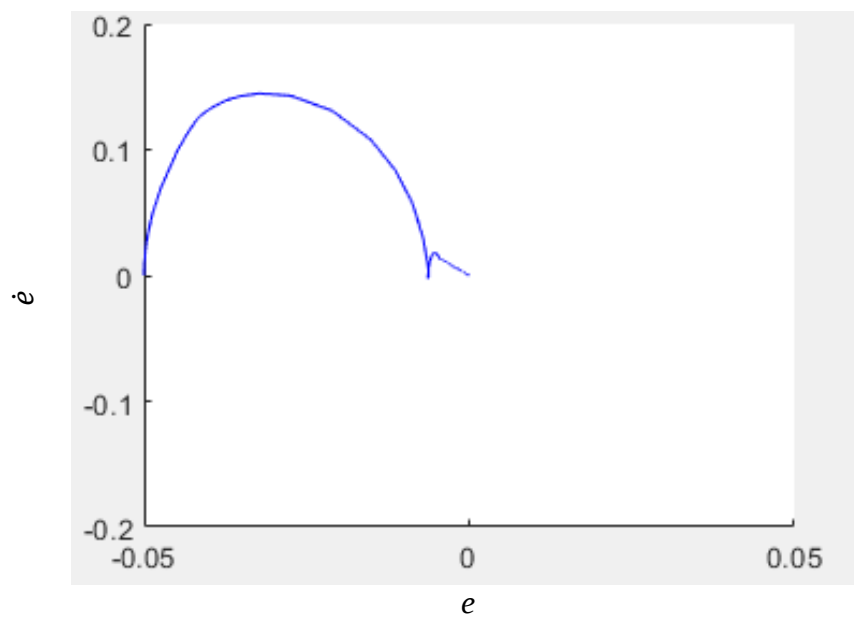


شکل (۴-۱۷) گشتاور کنترلی دوم

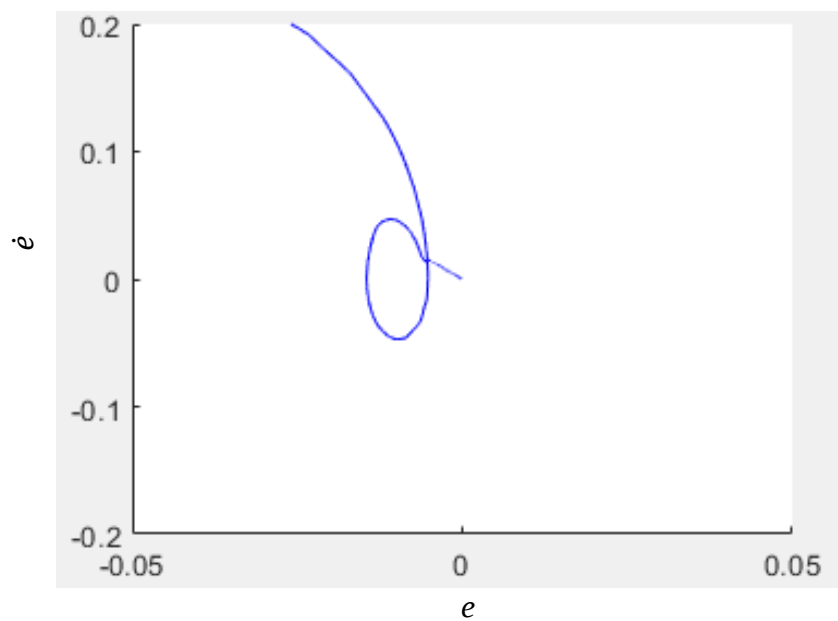


شکل (۴-۱۸) گشتاور کنترلی سوم

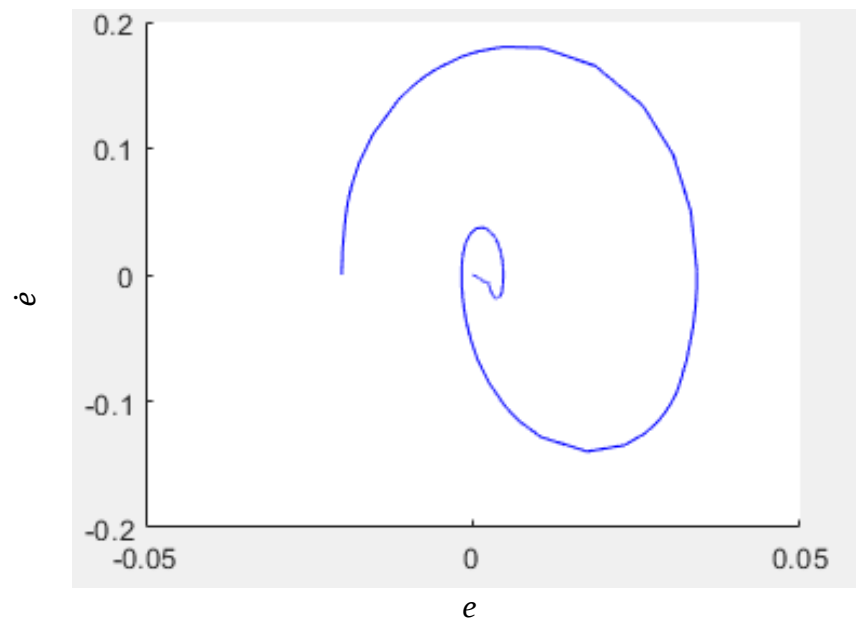
همچنین نمودارهای (۴-۱۹) و (۴-۲۰) و (۴-۲۱) نمایانگر حرکت در صفحه $(e, \dot{e})$ و نحوه رسیدن به سطح لغزش را برای الگوریتم فوق پیچشی می باشد.



شکل (۴-۱۹) حرکت در صفحه $(e_1, \dot{e}_1)$



شکل (۴-۲۰) حرکت در صفحه $(e_2, \dot{e}_2)$



شکل (۴-۲۱) حرکت در صفحه $(e_3, \dot{e}_3)$

فصل پنجم

بررسی نتایج

۵-۱- مقایسه نتایج کنترل کننده‌ها و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، علاوه بر طراحی کنترل فیدبک خطی‌ساز و کنترل کننده مد لغزشی، به پیاده‌سازی الگوریتم فوق‌پیچشی پرداخته شده‌است که بتوان مقایسه‌ای میان این کنترل کننده‌ها انجام داد. همانطور که مشاهده گردید، نتایج شبیه‌سازی برای هر کنترل کننده، شامل نتایج ردیابی مسیر توسط مجری نهایی، خطای ردیابی و همچنین گشتاور کنترلی در هر بخش ارائه گردید. برای شبیه‌سازی ربات مسیر مطلوبی که در قبل ذکر شد، انتخاب گردیده‌است. این مسیر برای تمامی کنترل کننده‌ها یکسان بوده تا بتوان عملکردهای آن‌ها را با هم مقایسه کرد. همچنین پارامترهای هندسی ربات دلتا نیز برای تمامی شبیه‌سازی‌ها یکسان لحاظ شده‌است.

نتایج مربوط به ردیابی مسیر مشخص می‌کند که کنترل مد لغزشی عملکرد بهتری نسبت به فیدبک خطی‌ساز از خود نشان داده‌است. به عبارت دیگر، سرعت ردیابی مسیر در کنترل مد لغزشی بالاتر از فیدبک خطی‌ساز می‌باشد.

همچنین نتایج مربوط به خطاهای ردیابی برای این سه مدل کنترلی ارائه گردید. این نتایج هم نشان‌دهنده این است که خطای ردیابی در کنترل مد لغزشی کمتر از فیدبک خطی‌ساز است. به بیان دیگر، خطا سریع‌تر به صفر میل کرده‌است.

در ادامه، گشتاور کنترلی برای این سه کنترل کننده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به گشتاور کنترلی مشخص می‌کند که گشتاور کنترلی که توسط کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالا (با پیاده‌سازی الگوریتم فوق‌پیچشی) به ربات اعمال می‌شود، دارای اندازه بسیار کمتری نسبت به گشتاور کنترلی اعمالی توسط کنترل کننده فیدبک خطی‌ساز و حتی مد لغزشی مرتبه اول می‌باشد.

۵-۲-پیشنهادات

با توجه به تحقیقات گذشته در خصوص ربات دلتا مطالب زیر جهت تحقیقات پیشنهاد می‌شود:

- استفاده از الگوریتم مد لغزشی ترمینال
- استفاده از الگوریتم مد لغزشی پیچشی بهینه

منابع

- [1] Castañeda, Luis Angel, Alberto Luviano-Juárez, and Isaac Chairez. "Robust trajectory tracking of a delta robot through adaptive active disturbance rejection control." *IEEE Transactions on control systems technology* 23, no. 4 (2014): 1387-1398.
- [2] Slotine, Jean-Jacques E., and Weiping Li. *Applied nonlinear control*. Vol. 199, no. 1. Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall, 1991.
- [3] Bonev, Ilian. "Delta Robot—The story of success." *ParalleMIC* (2001).
- [4] Pierrot, François, C. Reynaud, and Alain Fournier. "DELTA: a simple and efficient parallel robot." *Robotica* 8, no. 2 (1990): 105-109.
- [5] López, M., E. Castillo, G. García, and A. Bashir. "Delta robot: inverse, direct, and intermediate Jacobians." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 220, no. 1 (2006): 103-109.
- [6] Park, Shi Baek, Han Sung Kim, Changyong Song, and Kyunghwan Kim. "Dynamics modeling of a delta-type parallel robot (isr 2013)." In *IEEE ISR 2013*, pp. 1-5. IEEE, 2013.
- [7] Robot, ABB FlexPicker Delta. "The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions Robert L. Williams II, Ph. D., williar4@ ohio. Edu Mechanical Engineering, Ohio University, October 2016."
- [8] Rachedi, Meryam, Boualem Hemici, and Mohamed Bouri. "Design of an H_{∞} controller for the Delta robot: experimental results." *Advanced Robotics* 29, no. 18 (2015): 1165-1181.
- [9] Lu, Xingguo, Yue Zhao, and Ming Liu. "Self-learning interval type-2 fuzzy neural network controllers for trajectory control of a Delta parallel robot." *Neurocomputing* 283 (2018): 107-119.
- [10] Qian, Dianwei, Guigang Zhang, Jiarong Chen, Jian Wang, and Zhimin Wu. "Coordinated Formation Design of Multi-Robot Systems Via an Adaptive-Gain Super-Twisting Sliding Mode Method." *Applied Sciences* 9, no. 20 (2019): 4315.
- [11] Boudjedir, Chems Eddine, Djamel Boukhetala, and Mohamed Bouri. "Nonlinear PD plus sliding mode control with application to a parallel delta robot." *Journal of Electrical Engineering* 69, no. 5 (2018): 329-336.
- [12] Van Khang, Nguyen, Nguyen Quang Hoang, Nguyen Duc Sang, and Nguyen Dinh Dung. "A comparison study of some control methods for delta spatial parallel robot." *Journal of Computer Science and Cybernetics* 31, no. 1 (2015): 71-81.
- [13] Cheng, Chih-Chiang, and Jyun-Jie Lee. "Design of Adaptive Terminal Super Twisting Controllers for Nonlinear Systems with Mismatched Perturbations." *International Journal of Control* just-accepted (2019): 1-21.

- [14] Van, Mien, Hee-Jun Kang, and Kyoo-Sik Shin. "Novel quasi-continuous super-twisting high-order sliding mode controllers for output feedback tracking control of robot manipulators." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 228, no. 17 (2014): 3240-3257.
- [15] Le, Quang Dan, and Hee-Jun Kang. "Real Implementation of an Active Fault Tolerant Control Based on Super Twisting Technique for a Robot Manipulator." In *International Conference on Intelligent Computing*, pp. 294-305. Springer, Cham, 2019.
- [16] Tayebi-Haghighi, Shahnaz, Farzin Piltan, and Jong-Myon Kim. "Robust composite high-order super-twisting sliding mode control of robot manipulators." *Robotics* 7, no. 1 (2018): 13
- [17] Kali, Yassine, Maarouf Saad, Khalid Benjelloun, and Charles Khairallah. "Super-twisting algorithm with time delay estimation for uncertain robot manipulators." *Nonlinear Dynamics* 93, no. 2 (2018): 557-569.
- [18] Rsetam, Kamal, Zhenwei Cao, and Zhihong Man. "Super-twisting based integral sliding mode control applied to a rotary flexible joint robot manipulator." In *2017 11th Asian Control Conference (ASCC)*, pp. 2905-2910. IEEE, 2017.
- [19] O valle, L., H. Ríos, M. Llama, V. Santibáñez, and A. Dzul. "Omnidirectional mobile robot robust tracking: Sliding-mode output-based control approaches." *Control Engineering Practice* 85 (2019): 50-58.
- [20] Salgado, I., D. Cruz-Ortiz, O. Camacho, and I. Chairez. "Output feedback control of a skid-steered mobile robot based on the super-twisting algorithm." *Control Engineering Practice* 58 (2017): 193-203.
- [21] Martins, Nardênio Almeida, Edson Roberto De Pieri, and Ubirajara Franco Moreno. "PD-super-twisting second order sliding mode tracking control for a nonholonomic wheeled mobile robot." *IFAC Proceedings Volumes* 47, no. 3 (2014): 3827-3832.
- [22] Solea, Razvan, and Daniela Cernega. "Super twisting sliding mode controller applied to a nonholonomic mobile robot." In *2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, pp. 87-92. IEEE, 2015.
- [23] Borlaug, Ida Louise G., Jan Tommy Gravdahl, Jørgen Sverdrup-Thygeson, Kristin Y. Pettersen, and Antonio Loria. "Trajectory tracking for underwater swimming manipulators using a super twisting algorithm." *Asian Journal of Control* 21, no. 1 (2019): 208-223.
- [24] Schenk, Christian, Carlo Masone, Andreas Pott, and Heinrich H. Bühlhoff. "Application of a differentiator-based adaptive super-twisting controller for a redundant cable-driven parallel robot." In *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 254-267. Springer, Cham, 2018.
- [25] Pandilov, Zoran, and Vladimir Dukovski. "COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS BETWEEN SERIAL AND PARALLEL ROBOTS." *Acta Technica Corvinensis-Bulletin of Engineering* 7, no. 1 (2014).
- [26] Alashqar, H. A. H. "Modeling and high precision motion control of 3 DOF Parallel Delta Robot Manipulator." The Islamic University of Gaza (2007): 1-98.
- [27] Levant, Arie. "Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control." *International journal of control* 58, no. 6 (1993): 1247-1263.
- [28] Levant, Arie. "Robust exact differentiation via sliding mode technique." *automatica* 34, no. 3 (1998): 379-384.
- [۲۹] حسن‌شاهی، ز، احمدی، ح، و اردی، م، (۱۳۹۸)، پایان‌نامه‌اشد: "طراحی یک استراتژی کنترل بهینه برای کنترل ریدیابی مسیر در فضای کار برای ربات دلتا"، دانشکده مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Abstract

The capabilities of the parallel robots increase their efficiency in the industry as well as increasing their attention to scientific research. In this thesis, we present the super twisting sliding mode control algorithm for a parallel delta robot. The Lagrange method has been applied to extract the dynamic equations of the delta robot. Due to the geometrical relations of the Delta robot and the parallel kinematic chain, the inverse kinematics equation is calculated as a closed loop form. In this work, a sliding mode control strategy, due to dynamics uncertainties, is used to control of the robot on a desired trajectory. This strategy is designed, according to robustness properties of this method against the dynamic uncertainties and load disturbance. In the simulation section, for comparison purposes, the feedback-linearization controller is utilized for the delta robot. The applying sliding mode control method is good trajectory tracking, but it has no good performance against disturbances. In the following, a high-order sliding mode control (super twisting algorithm) is used to resolve this problems. Simulation results show that the proposed algorithm has good performance in trajectory tracking in presence of uncertainties and disturbances.

Keywords: Delta robot, robot control, feedback linearization control, sliding mode control, super twisting algorithm.



Shahrood University of Technology
Mechanic and Mechatronic Engineering

Sliding mode control using super twisting algorithm for parallel Delta
robot

By: Ashkan Haratinezhad

Supervisor:
Dr. Habib Ahmadi
Dr. Amir Jalali

February 2021

