

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



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

**بهبود عملکرد کنترل موقعیت یک ربات (ARM-ROBO V01)  
پالتایزر با استفاده از تکنیک کنترل مد لغزشی مرتبه بالا**

نگارنده: فریبا قربانیان

اساتید راهنما  
دکتر حبیب احمدی  
دکتر امیر جلالی

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۳۰۲۸/۱۲۷  
تاریخ: ۹۸/۷/۱۹

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم فریبا قربانیان با شماره دانشجویی ۹۵۱۱۷۱۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان بهبود عملکرد کنترل موقعیت یک ربات (ARM-ROBO V۰۱) پالتایزر با استفاده از تکنیک کنترل مد لغزشی مرتبه بالا که در تاریخ ۱۳۹۸/۰۶/۱۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خیلی خوب)  مردود   
نوع تحقیق:  نظری  عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر امیر جلالی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر حبیب احمدی	استادیار	
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر حمیدرضا ایبک چی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مهدی بامداد	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علیرضا الفی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

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

هرچیز که در جستن آنی، آنی...

این پایان نامه را تقدیم می‌کنم به مهربانترین همراهان زندگی‌م،  
پدر، مادر و همسر عزیزم که حضورشان همیشه گرما بخش روح  
من بوده است.

از اساتید بزرگوارم دکتر احمدی و دکتر جلالی برای تمام  
حمایت‌ها و زحمات بی‌دریغ‌شان سپاسگزاری می‌کنم.

## تعهد نامه

اینجانب فریبا قربانیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه بهبود عملکرد کنترل موقعیت یک ربات (ARM-ROBO V01) پالتایزر با استفاده از تکنیک کنترل مد لغزشی مرتبه بالا 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

امضای دانشجو فریبا قربانیان

#### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده:

در این پژوهش، به پیدا کردن یک کنترل کننده مناسب برای کنترل سیستم یک ربات ( ARM-ROBO (V01 پالتایزر، در حضور اغتشاشات خارجی و عدم قطعیت های داخلی سیستم پرداخته شده است.

برای پیاده سازی قوانین کنترلی مورد نظر روی ربات پالتایزر، ابتدا معادلات این ربات را با استفاده از نرم افزار maple18 استخراج کرده ایم. ربات مورد نظر، یک ربات سه درجه آزادی با ۹ لینک می باشد.

برای مقاوم بودن کنترل کننده نسبت به اغتشاشات خارجی و عدم قطعیت های داخلی از کنترل کننده مد لغزشی معمولی، و کنترل کننده مد لغزشی سوپر توئیستینگ که یک کنترل کننده مرتبه بالا محسوب می شود، استفاده شده است.

عملکرد کنترل کننده ارائه شده با استفاده از بخش Simulink نرم افزار متلب، شبیه سازی شده است. معادلات حرکت با استفاده از روش لاگرانژ به دست آمد. برای این منظور، پیاده سازی نتایج نشان می دهد که عملکرد خوبدر صورت عدم قطعیت وجود دارد.

کلمات کلیدی: اغتشاشات خارجی، ربات پالتایزر، معادلات دینامیکی ربات، مد لغزشی معمولی، مد لغزشی سوپر توئیستینگ

## فهرست مطالب

فصل اول	۱
مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۱-۱ انواع ربات	۳
۱-۱-۱-۱ ربات‌های زنجیره‌ی سینماتیکی باز	۳
۱-۱-۱-۲ ربات‌های زنجیره‌ی سینماتیکی بسته	۴
۱-۱-۲ ربات‌های پالتایزر	۷
۱-۱-۲-۱ ربات (ARM-ROBO V01) پالتایزر	۷
۲-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده	۹
۱-۲-۱ روش کنترلی مد لغزشی کلاسیک	۹
۲-۲-۱ روش کنترلی مد لغزشی مرتبه بالا	۹
۳-۱ ضرورت انجام تحقیق و نوآوری	۱۱
۴-۱ ساختار پایان نامه	۱۲
فصل دوم	۱۳
مدل سازی دینامیکی ربات پالتایزر سه درجه آزادی	۱۳
۱-۲ مقدمه	۱۴
۲-۲ دوران محورهای مختصات ربات	۱۴
۱-۲-۲ ماتریس‌های دوران	۱۴
۲-۲-۲ دوران بر اساس مختصات جاری	۱۵
۳-۲ محاسبه مختصات نقاط و محاسبه سرعت خطی برای یک ربات سه لینکی	۱۶
۴-۲ محاسبه سرعت زاویه‌ای	۱۸
۵-۲ معادلات دینامیکی ربات	۱۸
۱-۵-۲ انرژی پتانسیل	۱۹
۲-۵-۲ انرژی جنبشی	۱۹



۲۱	..... ۳-۵-۲ معادلات حرکت
۳۱	..... فصل سوم
۳۱	..... کنترل کننده مد لغزشی کلاسیک ربات پالتایزر
۳۲	..... ۱-۳ مقدمه
۳۳	..... ۲-۳ روش کنترل مد لغزشی
۳۶	..... ۳-۳ نمودارهای کنترل مد لغزشی
۴۲	..... ۴-۳ نتیجه گیری در خصوص استفاده از روش مد لغزشی
۴۳	..... فصل چهارم
۴۳	..... کنترل مد لغزشی مرتبه بالا ربات پالتایزر
۴۴	..... ۱-۴ مقدمه
۴۵	..... ۲-۴ الگوریتم نوین مد لغزشی مرتبه بالا
۴۹	..... ۳-۴ نمودارهای کنترل مد لغزشی مرتبه بالا
۵۵	..... فصل پنجم
۵۵	..... نتیجه گیری و پیشنهاد ها
۵۶	..... ۱-۵ نتیجه گیری:
۵۷	..... ۲-۵ پیشنهادها
۵۸	..... پیوست ۱:
۵۹	..... پیوست ۲:
۶۴	..... مراجع

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) ربات سری با مجری نهایی جوشکار مدل (6 Axis/welding machine/SA1400 series) ..... ۴
- شکل (۲-۱) ربات موازی صفحه‌ای مدل (6-Axis Hexapods / Parallel Positioners) ..... ۵
- شکل (۳-۱) نمونه ای از یک ربات پالتایزر [11] ..... ۷
- شکل (۴-۱) ربات (ARM-ROBO V01) پالتایزر ..... ۸
- شکل (۱-۲) شکل شماتیک ربات سه درجه آزادی ..... ۱۷
- شکل (۲-۲) نامگذاری لینک های ربات و مشخص کردن دستگاه مختصات ..... ۲۲
- شکل (۱-۳) خطای ردگیری برای زاویه اول ربات ( $\theta_1$ ) - زاویه دوم ربات ( $\theta_2$ ) - زاویه سوم ربات ( $\theta_3$ ) ..... ۳۸
- شکل (۲-۳) موقعیت گریپر ربات و موقعیت مطلوب آن ..... ۳۹
- شکل (۳-۳) ورودی های کنترل برای سه زاویه  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  ..... ۴۰
- شکل (۴-۳) ورودی های کنترل برای سه مختصه X, Y, Z و گریپر ربات پالتایزر ..... ۴۱
- شکل (۱-۴) موقعیت ربات و موقعیت مطلوب آن ..... ۵۰
- شکل (۲-۴) خطای ردگیری برای زاویه اول ربات ( $\theta_1$ ) - زاویه دوم ربات ( $\theta_2$ ) - زاویه سوم ربات ( $\theta_3$ ) ..... ۵۱
- شکل (۳-۴) ورودی های کنترل برای سه زاویه  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  ..... ۵۲
- شکل (۴-۴) تعقیب مسیر مطلوب مجری نهایی در سه محور X, Y, Z ..... ۵۳

## فهرست جداول

- جدول (۱-۱) مقایسه‌ای نسبی بین ربات‌های سری و موازی [2]..... ۶
- جدول (۱-۲) مشخصات ربات پالتایزر طراحی شده ..... ۲۳
- جدول (۲-۲) مقادیر ممان اینرسی رابط‌های ربات ..... ۲۳

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

رباتیک علمی است که با هدف راحتی انسان و افزایش وقت مفید او به وجود آمده است. علم رباتیک از تخیلات بشری آغاز شد و تا امروز شاخه های مختلف علمی و فناوری به ویژه رشته های مهندسی برق، مکاترونیک، علوم کامپیوتر، مهندسی مکانیک و ریاضیات کاربردی را در بر گرفته است. مفهوم ربات به نوشته نویسندگان علمی تخیلی از ایده یک انسان مصنوعی برتر گرفته شده و به صورت ماشین آلات خودکار متحرک به حقیقت پیوسته است [1].

یکی از شاخه های مهم در علم رباتیک، مبحث کنترل ربات است. کنترل ربات به معنای وادار کردن ربات به انجام کارهای مطلوب و به صورت خودکار است. رباتهای صنعتی نیز در نتیجه ادغام همین ماشینهای کنترل عددی و فناوری دور عملگرها و تکامل و پیشرفت آنها به وجود آمده اند.

برای کنترل ربات، روشهای گوناگونی ارائه شده است که مهمترین آنها در حوزه کنترل غیر خطی عبارتند از: کنترل فازی، کنترل تطبیقی، کنترل مود لغزشی، کنترل پسگام و کنترل پسخوردی. یکی از موضوعات اصلی در مسائل کنترل، مسئله کنترل در حضور عدم قطعیت در سیستم های غیر خطی است، عدم قطعیت هایی که توسط پارامتر های نامعلوم، بارگذاری های متفاوت، دینامیک های مدل نشده و اختلالات خارجی حاصل می شوند، عملکرد کنترلی را تحت تاثیر قرار می دهند. روش های کنترل مقاوم برای غلبه سیستم های کنترلی بر عدم قطعیت ها استفاده می شود. روش کنترلی مد لغزشی یکی از روش های کنترلی مقاوم می باشد. این کنترل کننده در برابر اغتشاشات و تغییر پارامتر ها و همچنین نویزهای مزاحم کاملاً مقاوم است.

همچنین کنترل کننده مد لغزشی کاربردهای فراوانی در حوزه کنترل انواع ربات های سری و موازی دارد.

## ۱-۱-۱ انواع ربات

ربات‌هایی که عموماً در صنایع استفاده می‌شوند به دو دسته‌ی زنجیره‌ی سینماتیکی باز و زنجیره‌ی سینماتیکی بسته تقسیم می‌شوند. به ربات‌ها با زنجیره‌ی سینماتیکی باز ربات سری و به ربات‌هایی با زنجیره‌ی سینماتیکی بسته ربات‌های موازی گفته می‌شود.

### ۱-۱-۱-۱ ربات‌های زنجیره‌ی سینماتیکی باز

در ربات‌های با زنجیره‌ی سینماتیکی باز حداقل یک عضو وجود دارد (معمولاً عضو انتهایی) که فقط به یک عضو دیگر متصل است و هر عملگر روی بازویی مرتبط با خود قرار دارد بطوری که موقعیت مجری نهایی<sup>۱</sup> را مشخص می‌کنند. به این نوع زنجیره سینماتیکی طبق شکل (۱-۱) ربات‌های سری می‌گویند. مجری نهایی ربات در واقع عملگر فعال یا غیر فعال ربات است که در نقطه‌ی نهایی ربات نصب می‌شود و در فضای کاری ربات نیاز کاربر را مرتفع می‌سازد. برای مثال در ربات جوشکار در صنایع خودرو سازی از مجری نهایی جوش نقطه‌ای استفاده می‌شود و یا برای جابه‌جا کردن قطعات در یک خط مونتاژ می‌توان از گریپر<sup>۲</sup> به‌عنوان مجری نهایی استفاده کرد. در ربات سری برای هر کدام از اتصالات، یک موتور به‌عنوان عملگر وظیفه‌ی حمل و به حرکت در آوردن کل اعضای بالا دستی را بر عهده دارد. یا به زبان ساده‌تر اتصالات مستقل از یکدیگر هستند. این ساختار باعث می‌شود که این‌گونه زنجیره سینماتیکی بسیار سنگین شده و مشکلاتی از قبیل ارتعاشات بالا و پایین بودن نسبت بار به وزن ربات در آن مشهود باشد. اما نقطه‌ی قوت ربات‌های سری فضای کاری بزرگ آن است، که به علت باز بودن زنجیره‌ی سینماتیکی می‌باشد.

---

<sup>1</sup> End-effector

<sup>2</sup> Greper



شکل (۱-۱) ربات سری با مجری نهایی جوشکار مدل (6 Axis/welding machine/SA1400 series)

### ۱-۱-۲ ربات‌های زنجیره‌ی سینماتیکی بسته

در ربات‌های با زنجیره‌ی سینماتیکی بسته همه اعضا حداقل به دو عضو دیگر متصل هستند. این ربات‌ها از یک سکوی ثابت و یک سکوی متحرک تشکیل شده‌اند که این دو صفحه توسط چند زنجیره (ساق) به هم متصل می‌شوند و معمولاً تمامی عملگرها روی سکوی ثابت قرار می‌گیرند. به این نوع زنجیره سینماتیکی طبق شکل ۲ ربات‌های موازی می‌گویند. ساختار فیزیکی ربات‌های موازی ظرفیت شتاب، سرعت، دقت و همچنین قدرت بالا را ایجاد می‌کنند. اما ربات‌های موازی فضای کاری محدود و کوچکتری نسبت به ربات‌های سری دارند.



شکل (۱-۲) ربات موازی صفحه‌ای مدل (6-Axis Hexapods / Parallel Positioners)

در ربات‌های موازی که از زنجیره‌ی سینماتیکی بسته تشکیل شده‌اند، چندین زنجیره‌ی سری که با یکدیگر موازی هستند، به یک سکوی متحرک (پلت فرم<sup>۳</sup>) متصل‌اند. در این ربات‌ها، موتورها و عملگرها در ابتدای هر شاخه قرار می‌گیرند و تعدادی از اتصالات به یکدیگر وابسته هستند. با توجه به ربات‌های موازی ساختار آن‌ها بسیار سبکتر و مستحکم‌تر از ربات‌های سری متناظر با خود می‌باشد. ربات‌های موازی برای کاربردهایی از قبیل سرعت، دقت و قدرت نسبت به ربات‌های سری بسیار توانمندتر هستند، اما فضای کاری بسیار کوچکی دارند. مدل‌های دینامیکی این ربات‌ها دارای پیچیدگی بسیار بالا بوده و کنترل آن‌ها نیاز به محاسبات پیچیده می‌باشد. پردازش‌گر مربوط به کنترل و عملکرد ربات به دلیل نیاز به قدرت بالا، هزینه‌ی بسیار زیادی را در پی دارد. جدول (1-۱) مقایسه‌ای نسبی بین ربات‌های سری و موازی را نشان می‌دهد.

---

<sup>3</sup> Platform



جدول (۱-۱) مقایسه‌ای نسبی بین ربات‌های سری و موازی [2]

مشخصه	ربات سری	ربات موازی
فضای کاری ربات	زیاد	کم
نسبت بار به وزن ربات	کم	زیاد
سفتی ربات	کم	زیاد
سرعت ربات	کم	زیاد
دقت ربات	کم	زیاد
تعداد نقاط تکینگی	زیاد	کم
نیاز به پردازش	کم	زیاد
سختی معادلات دینامیکی و سینماتیکی	کم	زیاد
شتاب ربات	کم	زیاد

با توجه به جدول (۱-۱) کاربرد ربات‌های موازی در فضای کاری کم و سرعت و دقت بالاست، که کاربرد ربات موازی را در صنایع بسته‌بندی [3]، پزشکی [4][5]، ماشینکاری [6] و ده‌ها کاربرد دیگر را نشان می‌دهد: در تحقیقی بر روی ربات دلتا، به سرعت و دقت بالای ربات‌های موازی اشاره شده است [7]. همچنین در پژوهشی دیگر مقایسه‌ای بین ربات‌های سری و موازی انجام شده است و نتایج این مقاله همانند جدول بالا در پایان همان مقاله نوشته شده است [8]. همچنین در مقاله‌ای که درباره ساخت یک ربات موازی است، به سرعت بالای ربات‌های موازی در خطوط صنعتی اشاره شده است [9]. در تحقیقی دیگر که بر روی یک ربات موازی کوهنوردی انجام شده، مشخصات فنی سیستم ارائه شده و طرح کنترل آنالیز شده است [10]. در این پایان‌نامه، ربات (ARM-ROBO V01) پالتایزر از نوع ربات‌های صنعتی و یک ربات سری است. در ادامه ربات‌های پالتایزر و کاربردشان در صنعت مختصر توضیحی داده می‌شود.

## ۱-۱-۲ ربات های پالتایزر

پالتایزر دستگاهی است که در انتهای خط تولید برای جابجایی کالاها و محصولات کارخانه بروی پالت استفاده می شود. هر زمان که در مورد یک ماشین پالتایزر صحبت می کنید، اولین چیزی که به ذهن می آید یک ماشین اتوماتیک یا رباتیک است که محصولات بسته بندی شده در شکل های مختلف ( کیسه، جعبه، بشکه و ..) را بروی پالت با سرعت و دقت بالا قرار می دهد. همچنین یکی از کارآمدترین سیستم های چیدمان اجسام بر روی پالت، استفاده از ربات پالتایزر می باشد.



شکل (۱-۳) نمونه ای از یک ربات پالتایزر [11]

## ۱-۱-۲-۱ ربات (ARM-ROBO V01) پالتایزر

دو نمونه از این ربات در آزمایشگاه ساخته شده است. همچنین تصمیمات زیر جهت ساخت ربات با کیفیت و دقت مناسب در نظر گرفته شده است:

- ساخت بدنه ربات از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۰۰.
- استفاده از موتورهای DC با گشتاور بالا و سرعت دور پایین.
- افزایش سرعت و بالا بردن دقت ربات با انتخاب مناسب قطعات مکانیکی، الکترونیکی و کنترل مناسب ربات روی آن امکان پذیر شده است.
- ارتباط ربات با کامپیوتر از طریق USB

در کنار پارامترهای طراحی، تعیین قابلیت‌ها و کارایی‌های ربات نیز خیلی مهم بوده است. برای بالا بردن گستره‌ی کارایی بازو و چابکی آن، سه درجه آزادی برای ربات در نظر گرفته شده است. با تعریف این سه درجه آزادی قابلیت انتقال نوک ربات به هر نقطه دلخواه در فضای کارترین متناسب با فضای کاری ربات وجود دارد.



شکل (۴-۱) ربات (ARM-ROBO V01) پالتایزر

همچنین برای تغذیه ربات، یک منبع تغذیه آزمایشگاهی تک خروجی  $30\text{ V}$  ،  $10\text{ A}$  مورد استفاده قرار گرفته و برای ارتباط بازو با اپراتور و سیستم کنترل آن از پورت USB استفاده می‌شود.

بعد از اتمام طراحی لینک‌های اصلی ربات و مشخص شدن ابعاد لینک‌ها، مکانیزم موازی ربات با نرم افزار CATIA طراحی و شبیه سازی شد تا ابعاد صحیح لینک‌های موازی محاسبه شوند.

## ۱-۲-۱ مروری بر پژوهش های انجام شده

در این پروژه، تحقیقات انجام شده قبلی در خصوص انواع روش های کنترل مد لغزشی مرتبه بالا و کنترل مد لغزشی معمولی مرور می شود و این بررسی در قالب دو محور که در ادامه می آید، ارائه گردیده است.

### ۱-۲-۱-۱ روش کنترلی مد لغزشی کلاسیک

همان طور که گفته شد، روش کنترلی مد لغزشی به طور گسترده در سیستم های گوناگون غیر خطی مورد استفاده قرار می گیرد [12][13]. روش کنترلی مد لغزشی کلاسیک در ترکیب با روش های دیگر مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می توان به طرح کنترل مد لغزشی - فازی، برای کنترل ربات اشاره نمود [14][15][16]. در تحقیقی بر روی ربات کوکا از روش فوق جهت غلبه بر نامعینی ها استفاده شده است تا کنترل ربات مدنظر مورد ارزیابی قرار گیرد [17]. طرح کنترلی دیگر بر اساس کنترل مد لغزشی انتگرالی و شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده است و این طرح کنترل جهت بهبود عملکرد ربات برای غلبه بر عدم قطعیت ها و اختلالات طراحی شده است که با غلبه بر عدم قطعیت ها باعث کاهش پدیده چترینگ نیز می شود [18].

### ۱-۲-۱-۲ روش کنترلی مد لغزشی مرتبه بالا

مد لغزشی کلاسیک یا معمولی یا مرتبه اول معایبی دارد که از آن جمله می توان به پدیده چترینگ (نوسان فرکانس بالا در سیگنال ورودی کنترل که به پدیده چترینگ یا وزوز معروف است) اشاره کرد [19]. این معایب در روش کنترلی مد لغزشی مرتبه بالاتر برطرف می شود. در واقع مد لغزشی مرتبه بالاتر نه تنها دارای محاسن مد لغزشی کلاسیک است بلکه باعث خطای ردیابی بهتر نسبت به مد لغزشی کلاسیک نیز می شود. روش کنترلی مد لغزشی مرتبه بالا در حوزه های مختلفی از جمله کنترل مقاوم ربات های دوپا، کنترل مقاوم ربات های متحرک از جمله ربات های کروی و ربات های همکار [20][21]، کنترل زنجیره های رباتیک، و... مورد

استفاده قرار گرفته است. در ادامه خلاصه ای از تحقیقات فوق در این حوزه ها ارائه می شود. در تحقیقی درباره ربات های متحرک از روش کنترلی مد لغزشی مرتبه دو جهت کنترل ردیابی مسیر و مواجه شدن با عدم قطعیت های ساختاری و پارامتری، اختلالات خارجی، و محدودیت های عملیاتی، استفاده شده است و پدیده چترینگ با طرح روش مد لغزشی مرتبه دو، کاهش پیدا کرده است [22]. در تحقیقی دیگر مسئله تعقیب مسیر برای یک ربات متحرک چرخ دار بر اساس روش مد لغزشی مرتبه دو بررسی شده است [23]. همچنین در مطالعه ای انجام شده بر روی یک ربات کروی و بررسی الگوریتم کنترل آن، جهت پایداری ربات مورد نظر در حضور عدم قطعیت پارامترها و اغتشاشات خارجی روش مد لغزشی مرتبه دوم به کار برده شده است [24].

تعدادی از محققین استفاده از روش مد لغزشی مرتبه بالا را برای کاربرد در ربات های راه رونده نیز استفاده نموده اند [25][26]. در این خصوص تخمین گری برای تعیین اندازه زوایای یک ربات دوپایی پنج عضوی طراحی شده است، این تخمین گر بر اساس روش مد لغزشی بوده و جهت بهبود خواص همگرایی در زمان محدود و مشخصه های مقاوم بودن مبتنی بر روش مد لغزشی مرتبه بالا استفاده شده است [27]. همچنین برای تشخیص و تحمل خطا بر اساس روش کنترلی مد لغزشی مرتبه بالا مطالعاتی صورت گرفته- است [28][29][30].

در مطالعه انجام شده روی یک ربات هفت درجه آزادی روش مد لغزشی مرتبه دو طراحی و شبیه سازی شده است [31]. در تحقیقی دیگر، کنترل کننده مد لغزشی مرتبه دوم تطبیقی با سطح لغزش انتگرالی برای سیستم های نامعین غیر خطی دو ورودی دو خروجی طراحی شده است و مقاوم بودن سیستم در حضور عدم قطعیت ها و اختلالات خارجی کران دار تضمین شده است [32]. محققین فوق به این نتیجه رسیدند که روش مد لغزشی با سطح لغزشی تناسبی انتگرالی در مقایسه با مد لغزشی کلاسیک دارای مزایای بسیاری است و برای سیستم هایی که خطای حالت ماندگار زیادی دارند کارایی بهتری از خود نشان می دهد [33]. روش مد لغزشی مرتبه بالا جهت غلبه بر عدم قطعیت ها و اختلالات، برای از بین بردن نامعینی های موجود در سیستم یک ربات فضایی نیز طراحی شده است. در تحقیق فوق پس از مقایسه روش ارائه شده با الگوریتم کنترلی مد لغزشی ساده، ثابت

شده است که طرح کنترل پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند از پدیده چترینگ بیشتر از حالت مد لغزشی معمولی جلوگیری کند [34]. در مقابله با عدم قطعیت های مدل دینامیکی سیستم و اختلالات خارجی که ربات های صنعتی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، همچنین جهت کنترل ردیابی موقعیت مفاصل در ربات صنعتی مد نظر، یک طرح کنترلی پیشنهاد داده شده است که در این طرح، روش کنترلی مد لغزشی مرتبه دو با روش کنترلی دینامیک معکوس ترکیب شده است [35][36]. در تحقیقی کنترل کننده مد لغزشی مرتبه دوم تطبیقی با سطح لغزش انتگرالی، برای سیستم های نامعین غیر خطی دو ورودی- دو خروجی طراحی شده و مقاوم بودن سیستم در حضور عدم قطعیت ها و اختلالات خارجی تضمین شده است. همچنین در مقاله ای دیگر برای جلوگیری از پدیده چترینگ، روش مد لغزشی مرتبه دوم پیشنهاد داده شده است [33]. در این تحقیق خاصیت مقاوم بودن سیستم در برابر نامعینی ها و اختلالات خارجی اعمال شده به سیستم و پایداری سیستم با استفاده از تابع لیاپانوف تضمین شده است. در تحقیقی دیگر کنترل کننده مد لغزشی مرتبه سه و مرتبه چهار برای ردیابی سرعت و ارتفاع هواپیما پیشنهاد داده شده است. کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالای فوق، ردیابی عملکرد را به خوبی ایجاد می کند و پدیده چترینگ را به طور قابل ملاحظه ای کاهش می‌دهد [37]. روش مد لغزشی مرتبه بالا برای کنترل یک ربات انعطاف پذیر یک درجه آزادی حامل بار، طراحی و آزمایش شده است، که روش فوق با کاهش پدیده چترینگ، دقت کنترلر را بالا می‌برد [38]. همچنین در مقاله [39] تعقیب خروجی یک سیستم رباتیک بر اساس تکنیک مد لغزشی مرتبه بالا مورد بررسی قرار داده شده و دینامیک موتور و تغییر در پارامترها لحاظ شده است.

### ۱-۳ ضرورت انجام تحقیق و نوآوری

با توجه به بررسی روی مطالعات قبلی مشخص می‌شود که ربات پالتایزر در صنعت اتوماسیون کاربرد ویژه‌ای دارد و در این خصوص انواع مختلف با مکانیزم های متفاوتی از آن تولید شده است. بر این اساس مطالعاتی بر روی مسائل سینماتیک و دینامیک این ربات ها انجام شده است. همچنین بحث کنترل این ربات ها نیز مورد

توجه بوده است؛ اما کاربرد کنترل کننده مد لغزشی کلاسیک و مد لغزشی مرتبه بالا بر روی هیچ گونه ای از این ربات ها انجام نشده است؛ فلذا در این پروژه بعد از بررسی سینماتیکی و دینامیکی ربات پالتایزر (ARM-ROBO V01) عملکرد کنترل کننده مد لغزشی کلاسیک و مد لغزشی مرتبه بالا بر روی این ربات انجام می-شود. که مسئله فوق در گام های زیر انجام شده است:

- مدل سازی سیستم شامل تحلیل و بررسی سینماتیک و دینامیک ربات پالتایزر ARM-ROBO V01
- استخراج روابط کنترل مد لغزشی کلاسیک جهت به کارگیری برای غلبه بر عدم قطعیت ها برای ربات مورد مطالعه
- طراحی کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالاتر، اثبات روابط ریاضی و آنالیز پایداری
- شبیه سازی سیستم کنترل موقعیت مرسوم و پیشنهادی در نرم افزار Matlab/Simulink
- نتیجه گیری و تهیه ی گزارش نهایی

## ۴-۱ ساختار پایان نامه

فصل های دیگر این پایان نامه به صورت زیر تنظیم شده اند:

فصل دوم به مدل سازی دینامیکی ربات و به دست آوردن معادلات آن اختصاص داده شده است. در این فصل ربات پالتایزر با سه درجه آزادی، مدل سازی می شود.

در فصل سوم روش کنترلی مد لغزشی کلاسیک بر روی ربات پیاده سازی شده و نمودارهای خطای ردیابی، کنترل کننده، خطای مختصات فضای کاری و مختصات نقطه انتهایی ربات استخراج شده است.

در فصل چهارم، قانون کنترلی مد لغزشی مرتبه بالا را ارائه و نمودارهای آن را استخراج می کنیم.

در انتها در فصل آخر، نتیجه گیری نهایی و پیشنهاد ها ارائه می شود.

## فصل دوم

### مدل سازی دینامیکی ربات پالتایزر سه درجه آزادی



## ۲-۱ مقدمه

در این فصل، ابتدا مختصات نقاط مرکز تک تک لینک های ربات پالتایزر ARM-ROBO V01، با نوشتن معادلات نقاط مرکز جرم، به دست می آید. و با مشتق گیری از این نقاط نسبت به زمان، سرعت لینک ها به دست می آید. پس از آن با جایگذاری در روابط معادلات انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل و مدل دینامیکی ربات پالتایزر سه درجه آزادی به روش لاگرانژ محاسبه می شود.

## ۲-۲ دوران محورهای مختصات ربات

جهت نوشتن معادلات مرکز لینک های ربات، نیاز به تعریف ماتریس های دوران است. بعد از تعریف کردن ماتریس های دوران برای هر لینک، مختصات نقاط تک تک لینک ها با ضرب ماتریس های مورد نظر در هم، و انجام محاسبات به دست می آید. همچنین ماتریس های دوران در محاسبه سرعت های خطی و سرعت های زاویه ای برای هر لینک ربات هم مورد نیاز هستند. ماتریس های دوران در بخش های بعدی برای یک ربات دو لینکی و برای ربات پالتایزر ARM-ROBO V01 همراه با رسم شکل نوشته می شوند. در نهایت بعد از انجام محاسبات، معادلات دینامیکی برای ربات پالتایزر ARM-ROBO V01 به دست می آیند.

## ۲-۲-۱ ماتریس های دوران

دوران محورها یا مقاطع به مسائلی در فضای دوبعدی گفته می شود که در آن دستگاه مختصات  $XY$ ، به اندازه  $\theta$  دوران کرده و به  $x'y'$  منتقل می شوند. طی این دوران، مبدأ مختصات ثابت می ماند. بنابراین می توان گفت هر نقطه در دستگاه مختصات  $x'y'$ ، به اندازه  $\theta$  نسبت به دستگاه مختصات  $XY$  دوران کرده است. این دوران با استفاده از ماتریسی انجام می شود که با ضرب شدن در معادله یک شکل یا حتی نقطه، آن را دوران می دهد.

اگر منحنی نسبت به محور مختصات در موقعیت مناسبی قرار نداشته باشد، می توان با استفاده از نگاشت دورانی موقعیت منحنی را نسبت به محورها تنظیم کرد. به این فرآیند، تبدیل مختصات گفته می شود. در قسمت بعدی

ماتریس های دوران حول محورهای مورد نظر که در محاسبات ما مورد استفاده هستند را بررسی می کنیم که تمامی ماتریس ها در جهت پادساعتگرد دوران کرده اند.

ماتریس های دوران حول سه محور  $X, Y, Z$  بر طبق محاسبات معادلات دینامیکی به صورت زیر می باشد [40]:  
ماتریس دوران حول محور  $X$  به اندازه  $\theta$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

ماتریس دوران حول محور  $Y$  به اندازه  $\theta$ :

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

ماتریس دوران حول محور  $Z$  به اندازه  $\theta$ :

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

## ۲-۲-۲ دوران بر اساس مختصات جاری

اگر دستگاه ابتدایی  $x_0 y_0 z_0$  باشد و سپس حول  $y_0$  به اندازه  $\varphi$  دوران کنیم تا به دستگاه  $x_1 y_1 z_1$  برسیم. در ادامه حول محور جاری  $z_1$  به اندازه  $\theta$  دوران کنیم تا به دستگاه  $x_2 y_2 z_2$  برسیم. آنگاه خواهیم داشت:

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$R_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

ماتریس های  $R_2^1$  و  $R_1^0$  به ترتیب دوران هایی است که ما را از دستگاه صفر به دستگاه یک و سپس از دستگاه یک به دستگاه دو می برد.

$$P^0 = R_1^0 P^1 \quad (۶-۲)$$

$$P^1 = R_2^1 P^2 \quad (۷-۲)$$

$$P^2 = R_2^0 P^2 \quad (۸-۲)$$

توجه کنید که  $P^2$ ،  $P^1$ ،  $P^0$  مختصات نقطه  $P$  با مختصه های تعیین شده نسبت به هریک از سه دستگاه فوق است.

با توجه به رابطه (۴-۲) و رابطه (۵-۲) به رابطه زیر می رسیم:

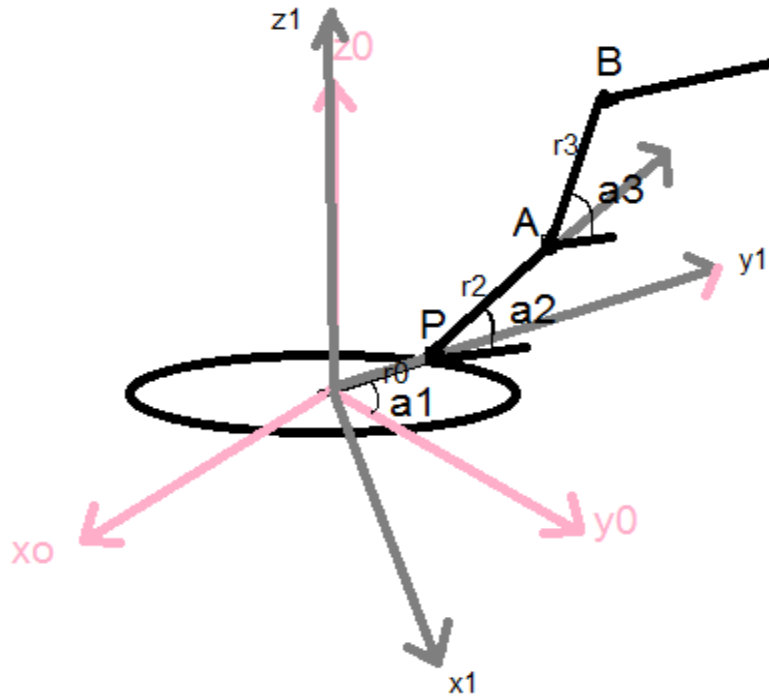
$$P^0 = R_1^0 (R_2^1 P^2) = R_1^0 R_2^1 P^2 \quad (۹-۲)$$

و در نهایت با استفاده از رابطه (۶-۲) و رابطه (۷-۲) به رابطه زیر می رسیم که  $R_2^0$ ، ماتریس تبدیل از محور مختصات صفر به محور مختصات دو است.

$$R_2^0 = R_1^0 P^2 \quad (۱۰-۲)$$

## ۳-۲ محاسبه مختصات نقاط و محاسبه سرعت خطی برای یک ربات سه لینکی

بعنوان مثال برای نوشتن مختصات نقاط  $A$  و  $B$  در شکل (۱-۲)، که شکل شماتیک یک ربات سه لینکی با سه درجه آزادی است، محاسبات به شرح زیر انجام می شود:



شکل (۲-۱) شکل شماتیک ربات سه درجه آزادی

همانطور که در شکل مشخص است؛ محورهای  $x_0y_0z_0$  محور ابتدایی است و بعد از دوران به اندازه  $a_1$  حول محور  $z_0$  به محور مختصات  $x_1y_1z_1$  میرسیم. و سپس بعد از دوران به اندازه  $a_2$  حول محور  $x_1$  به محور مختصات  $x_2y_2z_2$  میرسیم. مختصات نقطه A در محور مختصات  $x_0y_0z_0$  به شرح زیر محاسبه می شود:

$$A_0 = R_1^0 R_2^1 P^2 = \begin{bmatrix} -r_2 \times \cos a_2 \times \sin a_1 \\ r_2 \times \cos a_2 \times \cos a_1 \\ r_2 \times \sin a_2 \end{bmatrix} \quad (۱۱-۲)$$

همانطور که در بالا توضیح داده شد، ماتریس های  $R_1^0$  و  $R_2^1$  به ترتیب ماتریس های دوران حول محور z و حول محور x است.

حال در ابتدا مختصات نقطه A در شکل (۲-۲) را در مبدا  $x_0y_0z_0$  می نویسیم، سپس به بررسی ربات پالتایزر

ARM-ROBO V01 می پردازیم:

$$\vec{oA} = \vec{oP} + \vec{PA} = R_1^0 r_0 + R_1^0 R_2^1 r_2 \quad (۱۲-۲)$$

$$\vec{oA} = \begin{bmatrix} -r_0 \sin a_1 - r_2 \cos a_2 \sin a_1 \\ r_0 \cos a_1 + r_2 \cos a_2 \cos a_1 \\ r_2 \times \sin a_2 \end{bmatrix} \quad (13-2)$$

با مشتق گیری از عبارت بالا در نرم افزار میپل سرعت نقطه A به دست می آید.

در ادامه مختصات نقطه B در مبدا  $x_0y_0z_0$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\vec{oB} = \vec{oP} + \vec{PA} + \vec{AB} = \vec{oA} + R_1^0 R_3^1 B^2 \quad (14-2)$$

عبارت  $\vec{AB}$  دقیقاً مشابه  $\vec{PA}$  است با این تفاوت که در آن  $a_2$  به  $a_3$  و  $r_2$  به  $r_3$  تبدیل شده است. و همچنین

در رابطه بالا  $B^2$  مختصات نقطه B در مختصات میله AB است. در نهایت مختصات نقطه B به صورت زیر به

دست می آید:

$$\vec{oB} = \begin{bmatrix} -r_0 \sin a_1 - r_2 \cos a_2 \sin a_1 - r_3 \cos a_3 \sin a_1 \\ r_0 \cos a_1 + r_2 \cos a_2 \cos a_1 + r_3 \cos a_3 \cos a_1 \\ r_2 \times \sin a_2 + r_3 \sin a_3 \end{bmatrix} \quad (15-2)$$

با مشتق گیری از رابطه (15-2) در نرم افزار میپل، سرعت نقطه B به دست می آید. پس از محاسبه سرعت

های خطی در نرم افزار میپل و جایگذاری در روابط مربوط به انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی و معادله لاگرانژ

که در بخش بعدی توضیح داده می شود، معادلات حرکت برای ربات مد نظر به دست می آید.

## ۴-۲ محاسبه سرعت زاویه‌ای

با توجه به شکل شماتیک ربات، سرعت زاویه‌ای برای لینک دوم به صورت زیر نوشته می شود:

$$w_{r_2} = \begin{bmatrix} a_2' \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + (R_1^0 R_2^1)^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_2' \end{bmatrix} \quad (16-2)$$

## ۵-۲ معادلات دینامیکی ربات

برای محاسبه معادلات دینامیکی یک سیستم با چند درجه آزادی به روش لاگرانژ، به محاسبه انرژی پتانسیل و

انرژی جنبشی رابط ها و مفاصل نیاز است. برای انجام این کار، پس از محاسبه مقادیر انرژی ها، تابع لاگرانژین

سیستم که عبارت است از اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل، تشکیل می شود. سپس با توجه به این تابع و

استفاده از رابطه لاگرانژ، معادلات دینامیکی سیستم به دست می آید. در اینجا برای توضیح دقیق روند کار ابتدا به روابط مربوط به محاسبه انرژی ها پرداخته و سپس روابط نهایی استخراج می گردد.

## ۲-۵-۱ انرژی پتانسیل

انرژی پتانسیل رابط  $i$  ام با فرض اینکه جرم جسم در مرکز جرم آن متمرکز شده به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V_i = g^T d_0^{ci} m_i \quad (17-2)$$

که در رابطه (۲-۱۳) متغیرهای  $m_i$  جرم رابط  $i$  ام،  $g^T$  بردار شتاب جاذبه در دستگاه  $X_0 Y_0 Z_0$  و  $d_0^{ci}$  نشان دهنده موقعیت مرکز جرم رابط  $i$  ام در دستگاه  $X_0 Y_0 Z_0$  است، پس مجموع انرژی پتانسیل  $n$  رابط ربات به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n m_i g^T d_0^{ci} \quad (18-2)$$

برای محاسبه  $d_0^{ci}$  باید مکان مرکز جرم هر رابط را در دستگاه مختصات متصل به همان رابط یعنی  $d_0^{ci}$  را محاسبه کرده و سپس به کمک رابطه زیر مقدار  $d_0^{ci}$  را محاسبه کرد:

$$d_0^{ci} = d_0^i + R_0^i d_i^{ci} \quad (19-2)$$

## ۲-۵-۲ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی یک جسم صلب از دو جمله تشکیل می شود: انرژی انتقالی که از متمرکز کردن کل جرم جسم در مرکز جرم آن به دست می آید و دیگری انرژی جنبشی دورانی جسم حول مرکز جرم آن به دست می آید. بدین ترتیب انرژی جنبشی یک ربات که عبارت است از مجموع انرژی جنبشی رابط های ربات که برای رابط  $i$  ام به صورت زیر محاسبه می شود:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i V_{ci}^T V_{ci} + \frac{1}{2} w_0^{iT} I_0^i w_0^i \quad (20-2)$$

که در رابطه فوق ، برای انرژی جنبشی رابط  $i$  ام میتوان گفت که  $m_i$  جرم آن،  $V_{ci}$  بردار سرعت خطی مرکز جرم،  $w_0^i$  بردار سرعت زاویه ای نسبت به دستگاه مختصات پایه و  $I_0^i$  ماتریس ممان اینرسی رابط  $i$  ام ربات نسبت به دستگاه مختصات پایه می باشد.

برای آنکه بتوان ماتریس ممان اینرسی را مستقل از حرکت جسم محاسبه کرد، لازم است ماتریس ممان اینرسی در دستگاه متصل به همان رابط محاسبه شود، در این صورت دستگاه متصل به مرکز جرم ربات انتخاب شده است [40]. برای ممان اینرسی رابط  $i$  ام نسبت به دستگاه صفر داریم:

$$I_0^i = R_0^i I_i R_0^{iT} \quad (21-2)$$

بنابراین رابطه (2-15) به صورت زیر به دست می آید:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i V_{ci}^T V_{ci} + \frac{1}{2} w_0^{iT} R_0^i I_i R_0^{iT} w_0^i \quad (22-2)$$

که در رابطه فوق،  $R_0^i$  ماتریس دوران است که بردارها را از دستگاه مختصات جسم به دستگاه مختصات پایه تبدیل می کند.  $I_i$  ماتریس ممان اینرسی رابط  $i$  ام در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم ربات و موازی با دستگاه مختصات متصل به همان رابط است که به صورت زیر محاسبه می شود [43]:

$$I_i = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & - \int xy dm & - \int xz dm \\ - \int xy & \int (x^2 + z^2) dm & - \int yz dm \\ - \int xz & - \int yz dm & \int (y^2 + x^2) dm \end{bmatrix} \quad (23-2)$$

که در رابطه فوق X,Y,Z مختصات نقطه ای در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم رابط  $i$  ام می باشد.

معادله بالا را می توان به فرم کلی زیر نیز نوشت:

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{xxi} & -I_{xyi} & -I_{xzi} \\ -I_{xyi} & I_{yyi} & -I_{yzi} \\ -I_{xzi} & -I_{zyi} & I_{zzi} \end{bmatrix} \quad (24-2)$$

با توجه به معادله (2-17) رابطه انرژی جنبشی کلی ربات را می توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$k_i = \sum_{i=1}^n k_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i V_{ci}^T V_{ci} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_0^{iT} R_0^i I_i R_0^{iT} w_0^i \quad (25-2)$$

لذا انرژی پتانسیل ربات به کمک رابطه (۲-۱۸) و انرژی جنبشی ربات به کمک رابطه (۲-۲۵) محاسبه می شود.

## ۲-۵-۳ معادلات حرکت

در این قسمت فرم کلی معادلات حرکت سیستم از روش لاگرانژ محاسبه می شود. معادله لاگرانژ، معادله ای است که بر حسب مشتق تابع لاگرانژین نسبت به مختصات تعمیم یافته و نیز مشتق زمانی تابع لاگرانژین نسبت به سرعت های تعمیم یافته نوشته می شود و مقادیر فرمول و لاگرانژین نهایی در پیوست ۱ ارائه شده است.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial V}{\partial q} = \tau \quad (۲-۲۶)$$

که در این رابطه  $\tau$  بردار گشتاور و تابع  $L$  مطابق با رابطه (۲-۲۳) از تفاضل انرژی جنبشی و پتانسیل به دست می آید و لاگرانژین سیستم نامیده می شود.

$$L=K-V \quad (۲-۲۷)$$

در نهایت با جایگذاری روابط در معادله (۲-۲۲)، معادله دینامیکی ربات به صورت زیر به دست می آید:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) \quad (۲-۲۸)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M11 & M12 & M13 \\ M21 & M22 & M23 \\ M31 & M32 & M33 \end{bmatrix} \quad (۲-۲۹)$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} V11 \\ V21 \\ V31 \end{bmatrix} \quad (۲-۳۰)$$

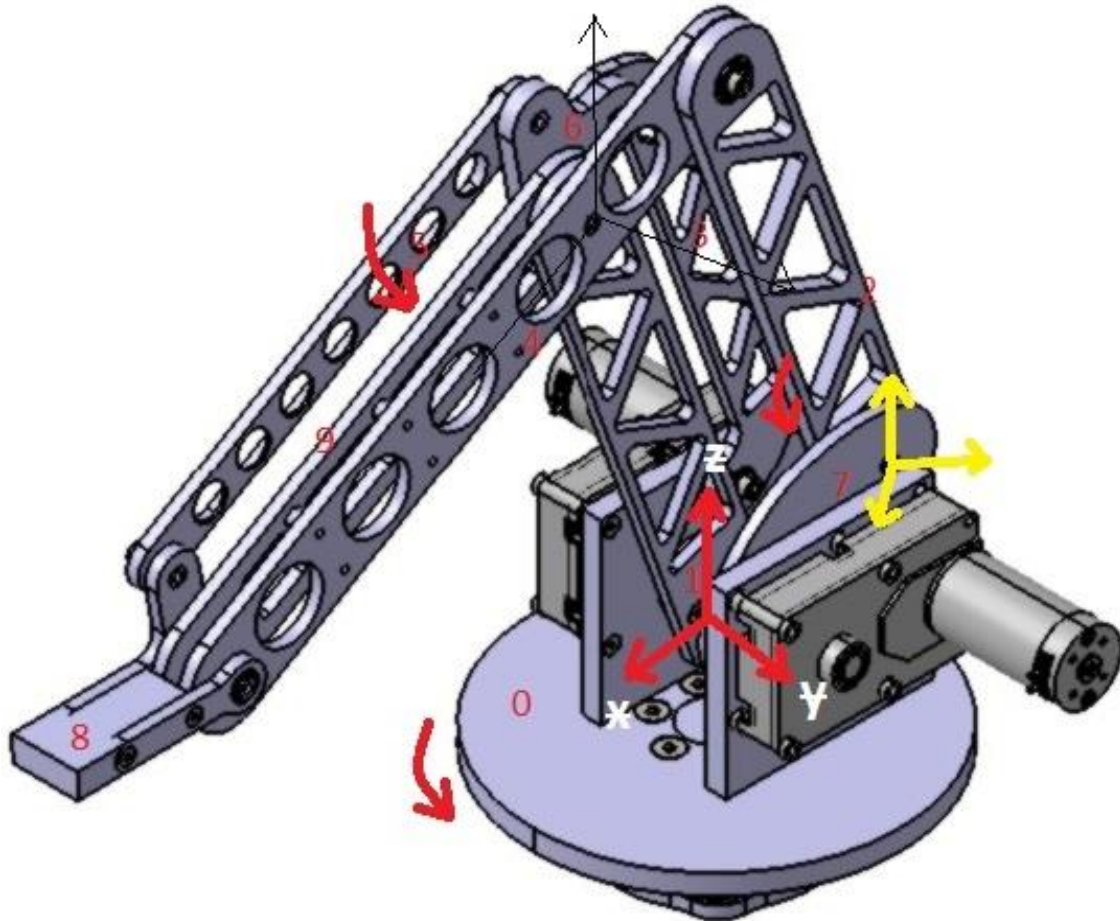
که در آن ماتریس  $M(q)$  ماتریس  $3 \times 3$  و ماتریس اینرسی ربات است و ماتریس  $V(q, \dot{q})$  شامل عبارت های ماتریس گشتاور کریولیس، جانب مرکز و بردار گرانش است.

ربات مورد بررسی در این پایان نامه، با سه درجه آزادی و ۹ لینک است که پس از وارد کردن اطلاعات لینک ها و محاسبه معادلات موجود و نوشتن ماتریس های دوران برای تمامی لینک ها و وارد کردن معادلات در نرم افزار میپل، معادله کلی ربات به دست می آید. بدین گونه که ابتدا مختصات تک تک نقاط لینک ها را محاسبه و با



مشتق گیری از این نقاط نسبت به زمان، سرعت ها را استخراج کرده، بعد از آن با نوشتن معادلات انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل، معادلات کلی برای ربات به دست می آید.

شکل (۲-۲) طرح نهایی این ربات را در محیط نرم افزار CATIA V5 نشان می دهد.



شکل (۲-۲) نامگذاری لینک های ربات و مشخص کردن دستگاه مختصات

بر روی هرکدام از مفاصل همانند قسمت (۲-۲) یک دستگاه مختصات قرار داده می شود، در شکل (۲-۲) اطلاعات لینک ها و دستگاههای مختصات نشان داده شده است، همچنین با شماره گذاری لینک ها، محاسبات مربوطه را انجام داده ایم و با توجه به دستگاههای مختصات مشخص شده در شکل (۲-۲)، جدول پارامترهای ربات با توجه به قوانینی که در قسمت قبل به دست آمد، به صورت جدول های زیر به دست می آید. مقادیر

پارامترهای ربات در نرم افزار CATIA V5، در جدول (۱-۲) و ممان اینرسی رابط ها در جدول (۲-۲) آمده

است، که تمامی این مقادیر از نرم افزار CATIA V5 استخراج شده است.

جدول(۱-۲) مشخصات ربات پالتایزر طراحی شده

$m_0$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$	$m_8$	$m_9$	جرم رابط (Kg)
۰/۴۳۷	۰/۰۵۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱۵۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۶۱	۰/۰۳۲	۰/۰۳۷	
۰/۵۲	۰/۳	۰/۳	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۳	۰/۰۷۵۱	۰/۰۸	۰/۰۷۴	۰/۰۳	طول رابط (m)

جدول(۲-۲) مقادیر ممان اینرسی رابط های ربات

$I_{xxi}$ (kgm <sup>2</sup> )	$I_{yyi}$ (kgm <sup>2</sup> )	$I_{zz_i}$ (kgm <sup>2</sup> )	$I_{xyi}$ (kgm <sup>2</sup> )	$I_{xzi}$ (kgm <sup>2</sup> )	$I_{yzi}$ (kgm <sup>2</sup> )	را ب ط i
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	.	.	$1/۲۳ \times 10^{-8}$	۰
۰/۰۰۰۵۸۱	0/00001578	۰/۰۰۰۵۷	$۶/۲۴ \times 10^{-8}$	.	$۴-/8 \times 10^{-8}$	۱
۰/۰۰۰۰۰۰۱۸۴	$1/8 \times 10^{-7}$	$1/۰.82 \times 10^{-7}$	.	.	.	۲
۰/۰۰۰۰۰۰۳۲۱	$1/8 \times 10^{-8}$	$1/81 \times 10^{-8}$	$۲-/۶ \times 10^{-23}$	$۳/۳ \times 10^{-24}$	.	۳
۰/۰۰۰۰۰۰۱۹۶	$1/۰.۳ \times 10^{-9}$	$1/۰.۳۴ \times 10^{-9}$	.	.	.	۴
۰/۰۰۰۰۰۳۱۴	$۳/8 \times 10^{-8}$	۰/۰۰۰۰۳۴	.	.	.	۵
۰/۰۰۰۰۰۰۲۱۶	$۲/۰.8 \times 10^{-9}$	$۲/۱۴۴ \times 10^{-7}$	.	.	.	۶
۰/۰۰۰۰۰۱۱۲	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۰۸۸	$1/۵ \times 10^{-8}$	$۳/۵۸ \times 10^{-9}$	-۰/۰۰۰۰۰۰۲۱۲۱	۷
۰/۰۰۰۰۰۱۵۰	۰/۰۰۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۰۱۷	.	.	.	۸
۰/۰۰۰۰۱۲۱	۰/۰۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱۱	.	.	$1/۴۶ \times 10^{-8}$	۹

با توجه به شکل (۲-۲) و توضیحاتی که درباره ماتریس های دوران در قسمت های پیش داده شد، ماتریس های دوران برای ربات مورد نظر به این شکل هستند، که زاویه  $\theta_1$ ، مقدار چرخش دیسک در محور مختصات ابتدایی (محور  $x_1y_1z_1$ ) حول محور  $Z_0$  است و زاویه  $\theta_2$ ، مقدار زاویه لینک های ۳، ۱ و ۷ با افق است، و زاویه  $\theta_3$ ، مقدار زاویه لینک های ۲، ۴، ۵، ۶ و لینک ۹ با افق است. بنابراین ماتریس های دوران برای ربات پالتایزر ARM-ROBO V01، به شکل زیر محاسبه شده اند:

ماتریس دوران حول محور  $Z_0$  در محور مختصات  $x_1y_1z_1$ :

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۳۱-۲)$$

ماتریس دوران حول محور  $x_1$  در محور مختصات  $x_2y_2z_2$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ 0 & \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (۳۲-۲)$$

ماتریس دوران حول محور  $x_2$  در محور مختصات  $x_3y_3z_3$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 \\ 0 & \sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{bmatrix} \quad (۳۳-۲)$$

سه ماتریس نوشته شده در بالا، ماتریس های هستند که با تغییرات  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ، متغیرند. چون ربات مورد نظر ما یک ربات متقارن نیست، ما ماتریس های دیگری را نیز در محاسبات مان در نرم افزار میپل تعریف کرده ایم که زوایا برای این ماتریس های تعریف شده مقادیر ثابتی هستند، و از نرم افزار CATIA V5 استخراج شده اند.

بعد از معرفی ماتریس های دوران در ربات، مختصات مرکز لینک ها را به صورت زیر می نویسیم:

مختصات مرکز جرم لینک ۱:

$$\begin{cases} x_1 = -0/05\sin(x_1(t) + 0/4) - 0/15\sin(x_1(t) + 0/4)\cos(x_3(t)) \\ y_1 = 0/05\sin(x_1(t) + 0/4) + 0/15\cos(x_1(t) + 0/4)\cos(x_3(t)) \\ z_1 = 0/068 + 0/15\sin(x_3(t)) \end{cases} \quad (۳۳-۲)$$

مختصات مرکز جرم لینک ۲:

$$\begin{cases} x_2 = -0/09\sin(x_1(t)) - 0/08\sin(x_1(t))\cos(x_2(t)) - 0/15\sin(x_1(t))\cos(x_3(t)) \\ y_2 = 0/09\cos(x_1(t)) + 0/08\cos(x_1(t))\cos(x_2(t)) + 0/15\cos(x_1(t))\cos(x_3(t)) \\ z_2 = 0/034 + 0/08\sin(x_2(t)) + 0/15\sin(x_3(t)) \end{cases} \quad (۳۴-۲)$$

مختصات مرکز جرم لینک ۳:

$$\begin{cases} x_3 = -0/04\sin(x_1(t) + 0/6) - 0/13\sin(x_1(t) + 0/6)\cos(x_3(t)) \\ y_3 = 0/04\cos(x_1(t) + 0/6) + 0/13\cos(x_1(t) + 0/6)\cos(x_3(t)) \\ z_3 = 0/132 + 0/13\sin(x_3(t)) \end{cases} \quad (۳۵-۲)$$

مختصات مرکز جرم لینک ۴:

$$\begin{cases} x_4 = -0/09\sin(x_1(t)) + 0/11\sin(x_1(t))\cos(x_2(t)) - 0/3\sin(x_1(t))\cos(x_3(t)) \\ y_4 = 0/09\cos(x_1(t)) - 0/11\cos(x_1(t))\cos(x_2(t)) + 0/3\cos(x_1(t))\cos(x_3(t)) \\ z_4 = 0/034 - 0/11\sin(x_2(t)) + 0/3\sin(x_3(t)) \end{cases} \quad (۳۶-۲)$$

مختصات مرکز جرم لینک ۵:

$$\begin{cases} x_5 = -0/04\sin(x_1(t) + 0/6) - 0/26\sin(x_1(t) + 0/6)\cos(x_3(t)) + 0/15\sin x_1(t)\cos x_2(t) \\ y_5 = 0/04\cos(x_1(t) + 0/6) + 0/26\cos(x_1(t) + 0/6)\cos(x_3(t)) - /15\cos x_1(t)\cos x_2(t) \\ z_5 = 0/132 + 0/26\sin(x_3(t)) - 0/079\sin(x_2(t) - 0/4) - 0/15\sin x_2(t) \end{cases} \quad (۳۷-۲)$$

مختصات مرکز جرم لینک ۶:

$$\begin{cases} x_6 = -0/04\sin(x_1(t) + 0/6) - 0/26\sin(x_1(t) + 0/6)\cos(x_3(t)) + 0/04\sin(x_1(t) + 0/6)\cos(x_2(t)) \\ y_6 = 0/04\cos(x_1(t) + 0/6) + 0/26\cos(x_1(t) + 0/6)\cos(x_3(t)) - 0/04\cos(x_1(t) + 0/6)\cos(x_2(t)) \\ z_6 = 0/132 + 0/26\sin(x_3(t)) - 0/04\sin(x_2(t)) \end{cases} \quad (38-2)$$

مختصات مرکز جرم لینک 7:

$$\begin{cases} x_7 = -0/09\sin(x_1(t)) - 0/04\sin(x_1(t))\cos(x_2(t)) \\ y_7 = 0/09\cos(x_1(t)) + 0/04\cos(x_1(t))\cos(x_2(t)) \\ z_7 = 0/034 + 0/04\sin(x_2(t)) \end{cases} \quad (39-2)$$

مختصات مرکز جرم لینک 8:

$$\begin{cases} x_8 = -0/09\sin(x_1(t)) + 0/3\sin(x_1(t))\cos(x_2(t)) - 0/3\sin(x_1(t))\cos(x_3(t)) + 0/037\sin(x_1(t) + 1) \\ y_8 = 0/09\cos(x_1(t)) - 0/3\cos(x_1(t))\cos(x_2(t)) + 0/3\cos(x_1(t))\cos(x_3(t)) + 0/037\cos(x_1(t) + 1) \\ z_8 = 0/034 - 0/3\sin(x_2(t)) + 0/3\sin(x_3(t)) \end{cases} \quad (40-2)$$

مختصات مرکز جرم لینک 9:

$$\begin{cases} x_9 = -0/05\sin(x_1(t) + 0/4) - 0/3\sin(x_1(t) + 0/4)\cos(x_3(t)) + 0/015\sin(x_1(t) + 0/4)\cos(x_2(t)) \\ y_9 = 0/05\cos(x_1(t) + 0/4) + 0/3\cos(x_1(t) + 0/4)\cos(x_3(t)) - 0/015\cos(x_1(t) + 0/4)\cos(x_2(t)) \\ z_9 = 0/068 + 0/3\sin(x_3(t)) - 0/015\sin(x_2(t)) \end{cases} \quad (41-2)$$

در روابط بالا کلیه ثوابت در نرم افزار میپل جایگذاری و محاسبه شده اند، جهت انجام محاسبات برای معادلات انرژی جنبشی، نیاز به محاسبه سرعت برای تک تک لینک ها است، در نرم افزار میپل با مشتق گیری از معادلات مختصات مکانی مرکز جرم، نسبت به زمان، معادلات سرعت به دست می آیند. همچنین معادله انرژی جنبشی، طبق رابطه (20-2) به شکل زیر نوشته می شود:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i V_{ci}^T V_{ci} + \frac{1}{2} w_0^{iT} I_0^i w_0^i \quad (42-2)$$

که طبق رابطه بالا، همان‌طور که گفته شد، در رابطه فوق، برای انرژی جنبشی رابط  $i$  ام میتوان گفت که  $m_i$  جرم آن است که برای تک تک لینک های ربات پالتایزر، اطلاعات جرم در جدول (۲-۱)، بر طبق نرم افزار CATIA V5، استخراج شده است. و  $V_{ci}$  بردار سرعت خطی مرکز جرم برای هر لینک است که در نرم افزار میپل محاسبه شده است، و  $w_0^i$  بردار سرعت زاویه ای نسبت به دستگاه مختصات پایه می باشد که برای هر لینک طبق حرکتی که دارد در نرم افزار میپل محاسبه و در فرمول کلی انرژی جنبشی جایگذاری شده است. و  $I_0^i$  ماتریس ممان اینرسی رابط  $i$  ام ربات نسبت به دستگاه مختصات پایه می باشد، که در فرمول (۲-۲۴) بیان شده و اطلاعات ممان اینرسی درآیه های این ماتریس برای همه لینک ها در جدول (۲-۲) از نرم افزار CATIA V5 استخراج شده است.

در نهایت معادله کلی انرژی جنبشی برای ربات پالتایزر به شکل زیر نوشته می شود:

$$K = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9 + k_0 \quad (۲-۴۳)$$

طبق رابطه نوشته شده، مقدار  $k_0$  انرژی جنبشی دیسک است، که دیسک در ربات پالتایزر فقط ترم انرژی جنبشی دورانی دارد.

طبق رابطه گفته شده در بخش قبلی، انرژی پتانسیل لینک  $i$  ام به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V_i = g^T d_0^{ci} m_i \quad (۲-۴۴)$$

که در رابطه بالا،  $m_i$  جرم لینک  $i$  ام ربات پالتایزر،  $g^T$  بردار شتاب جاذبه در دستگاه  $x_1 y_1 z_1$  و  $d_0^{ci}$  نشان دهنده موقعیت مرکز جرم لینک  $i$  ام در دستگاه  $x_1 y_1 z_1$  است. پس مجموع انرژی پتانسیل ۹ لینک ربات بعلاوه دیسک، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V = \sum_{i=1}^9 V_i = \sum_{i=1}^9 m_i g^T d_0^{ci} \quad (۲-۴۵)$$

مقادیر  $m$  برای لینک ها در جدول (۱-۲) آمده است. برای محاسبه  $d_0^{ci}$  باید مکان مرکز جرم هر رابط را در دستگاه مختصات  $x_1y_1z_1$  محاسبه کرد. که در این قسمت برای همه لینک های ربات پالتایزر، مختصه  $Z$  را نسبت به دستگاه مختصات  $x_1y_1z_1$  در نظر گرفته ایم و محاسبات برای انرژی پتانسیل به شکل زیر می نویسیم:

$$V_1 = m_1 g (0/068 + 0/15\sin(x_3(t)))$$

$$V_2 = m_2 g (0/034 + 0/08\sin(x_2(t)) + 0/15\sin(x_3(t)))$$

$$V_3 = m_1 g (0/132 + 0/13\sin(x_3(t)))$$

$$V_4 = m_1 g (0/034 - 0/11\sin(x_2(t)) + 0/3\sin(x_3(t)))$$

$$V_5 = m_1 g (0/132 + 0/26\sin(x_3(t)) - 0/079\sin(x_2(t) - 0/4) - 0/15\sin x_2(t)) \quad (۴۶-۲)$$

$$V_6 = m_1 g (0/132 + 0/26\sin(x_3(t)) - 0/04\sin x_2(t))$$

$$V_7 = m_1 g (0/034 + 0/04\sin(x_2(t)))$$

$$V_8 = m_1 g (0/034 - 0/3\sin(x_2(t)) + 0/3\sin(x_3(t)))$$

$$V_9 = m_1 g (0/068 + 0/3\sin(x_3(t)) - 0/015\sin x_2(t))$$

در قسمت آخر این بخش فرم کلی معادلات حرکت ربات پالتایزر به روش لاگرانژ محاسبه می شوند، فرمول لاگرانژین در پیوست ۱ ارائه شده است.

تابع  $L$  مطابق با رابطه بالا از تفاضل انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ربات پالتایزر، به دست می آید.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) \quad (۴۷-۲)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M11 & M12 & M13 \\ M21 & M22 & M23 \\ M31 & M32 & M33 \end{bmatrix} \quad (۴۸-۲)$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} V11 \\ V21 \\ V31 \end{bmatrix} \quad (۴۹-۲)$$

در نهایت مدل نامی ربات ارائه شده است.

که در آن ماتریس  $M(q)$  ماتریس  $3 \times 3$ ، ماتریس اینرسی ربات است و ماتریس  $V(q, \dot{q})$  شامل عبارت های ماتریس گشتاور کریولیس و جانب مرکز و بردار گرانش است. که تمامی درآیه های ماتریس ها در پیوست ۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از قسمت های قبلی، محاسبات مرتبط با دینامیک ربات انجام می شود. بدین منظور ابتدا ماتریس های تبدیل ربات محاسبه می شود. سپس به کمک آنها ماتریس های دوران، انتقال، و همچنین ماتریس های سرعت خطی و زاویه ای و ماتریس اینرسی محاسبه می شوند. در مرحله بعد انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی را محاسبه نموده و مدل دینامیکی ربات با توجه به توضیحات بخش (۲-۳) به صورت زیر به دست می آید:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) \quad (۵۰-۲)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (۵۱-۲)$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{21} \\ V_{31} \end{bmatrix} \quad (۵۲-۲)$$

که در این رابطه  $M$ ، ماتریس  $3 \times 3$  و  $V$ ، بردار  $3 \times 1$  می باشد. مقادیر نظیر درآیه های ماتریس های  $M$  و  $V$ ، در پیوست ۲ آورده شده است.

پس از محاسبه و بررسی درآیه های ماتریس های به دست آمده برای ربات پالتایزر، جهت اعتبار سنجی این ماتریس ها ابتدا درآیه های به دست آمده از نرم افزار میپل را با مقاله ای از ربات پالتایز [42] مقایسه کرده ایم و به نتایج زیر رسیدیم:

$$\begin{aligned} M_{12} &= M_{21} \\ M_{13} &= M_{31} \\ M_{23} &= M_{32} \end{aligned} \quad (۵۲-۲)$$



که برای هر دو ربات به نتایج مشابه رسیدیم.

مرحله بعدی در این بخش، اعتبار سنجی ماتریس ها در نرم افزار است، به این صورت که تمامی این ماتریس ها به روش سعی و خطا تست شده اند به این طریق که پس از شبیه سازی سیمولینک آن در نرم افزار متلب، ورودی کنترل کننده را صفر وارد کردیم و توقع داشتیم که در این تست، ربات به اصطلاح شل شود و روی صفحه شامل  $x_1 y_1$  بیفتد، و مختصه  $y_1$  برای ربات مساوی صفر شود، در حالی که مختصه های  $x_1$  و  $z_1$  گیرنده ربات متغیر هستند. . بعد از انجام این تست ها به نتایج دلخواه رسیدیم و ماتریس های این ربات مورد تایید شدند.

## فصل سوم

کنترل کننده مد لغزشی کلاسیک ربات پالتایزر

### ۳-۱ مقدمه

کنترل مد لغزشی، یک ابزار موثر برای پایدارسازی سیستم‌ها با عدم قطعیت و اغتشاشات خارجی است. با اینکه کنترل تطبیقی پیشرفت موفقی در کنترل ربات‌ها داشته است، وقتی با دینامیک‌های مدل نشده یا عدم قطعیت‌های غیر پارامتریک در ارتباط هستیم روش کنترل مد لغزشی انتخابی مناسب می‌باشد.

ایده اصلی کنترل مد لغزشی، کنترل سیستم ساختار متغیر می‌باشد. در کنترل ساختار متغیر ورودی کنترلی با توجه به وضعیت حالت‌های سیستم، ساختار خود را تغییر خواهد داد. در این صورت، ساختارهای کنترلی که هر یک به تنهایی، هدف کنترلی را برآورده نمی‌کردند، با تعویض میان ساختارهای متفاوت، هدف کنترلی را برآورده می‌کنند. در واقع رویکرد کنترل مد لغزشی برای حفظ پایداری و کنترل مناسب حالت‌های سیستم، هدایت مسیر حالت‌های سیستم به سمت سطحی از پیش تعیین شده در فضای حالت، و در ادامه نگه‌داری این سیستم حول این سطح یا در همسایگی این سطح می‌باشد. به این سطح در اصطلاح، سطح لغزش گفته می‌شود. فرآیند طراحی کنترل مد لغزشی شامل دو مرحله است. گام اول تعیین سطح لغزش مناسب می‌باشد. تابع سطح لغزش را با  $S$  نشان می‌دهند و به صورت یک معادله دیفرانسیلی از متغیرهای حالت سیستم تعریف می‌شوند. در طراحی تابع سطح لغزش باید شرط  $S=0$  برقرار باشد. در حقیقت همگرایی به سمت سطح لغزش، به منزله نزدیک شدن به سمت نقطه تعادل برای حالت‌های سیستم است.

گام دوم، طراحی ورودی کنترلی  $u$  به منظور همگرا شدن مسیرهای حالت سیستم در زمانی محدود به سمت سطح لغزش و باقی ماندن مسیرها روی این سطح یا در همسایگی آن خواهد بود

در این فصل ابتدا روش کنترلی مد لغزشی معمولی به کار برده شده برای ربات مورد نظر در این پروژه را بیان می‌کنیم، سپس نمودارهای خطای ردیابی، سرعت‌ها، خطاها، نمودارهای مختصات گریپر ربات (gripper) را نمایش می‌دهیم.

## ۳-۲ روش کنترل مد لغزشی

روش کنترل مد لغزشی از جمله روش های کنترلی مشهور در دسته کنترل کننده های مقاوم است که عملکرد مناسبی در مقابله با عدم قطعیت ها و اغتشاشات با دامنه محدود و معلوم سیستم دارد. از معایب این روش کنترلی، وجود پدیده چترینگ به عنوان یک دینامیک فرکانس بالای مدل نشده و نیاز به آگاهی از محدوده عدم قطعیت ها و اغتشاشات سیستم است.

برای اعمال این روش کنترلی به ربات، برای هر یک از متغیرهای حالت (q)، معادله خطا به صورت  $e = q_d - \dot{q}$  در نظر گرفته شده است. معادله ربات مورد نظر، طبق نتایج به دست آمده از فصل قبل، مطابق با رابطه (۱-۳) تعریف می شود:

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

$$\ddot{q} = M(q)^{-1} (\tau - V(q, \dot{q})) \quad (۲-۳)$$

$$\ddot{q} = f(q) + g(q) \tau \quad (۳-۳)$$

در رابطه بالا، q خروجی مورد نظر (در ربات مورد نظر، q زوایای متغیر ربات هستند)، و همچنین  $\tau$  ورودی کنترل (برای مثال، یک گشتاور موتور) و  $\ddot{q}$  بردار حالت است.

در معادله (۲-۳) تابع  $f(q)$  (در حالت کلی غیر خطی) دقیقاً معلوم نیست، ولی وسعت کم دقتی  $f(q)$  به وسیله یک تابع پیوسته معلوم، مشخص است، و به صورت  $\hat{F}$  تخمین زده شده است. به طور مشابه بهره  $g(q)$  دقیقاً معلوم نیست، ولی علامت آن معلوم بوده و به وسیله توابع پیوسته معلومی کران دار است.

$$f(q) = \hat{F}(\text{معلوم}) + F(\text{نامعلوم}) \quad (۴-۳)$$

$$g(q) = \hat{G}(\text{معلوم}) + G(\text{نامعلوم}) \quad (۵-۳)$$

در اینجا مسئله کنترل، وادار کردن حالت q به تعقیب یک حالت مشخص متغیر با زمان  $q_d$  در حضور نامعینی مدل روی  $f(q)$  و  $g(q)$  است و  $q_d$  به شکل زیر نوشته می شود:

$$q_d = [q_d, \dot{q}_d, \dots, q_d^{n-1}]^T \quad (۶-۳)$$

که در محاسبات بردار  $q_d$  یک بردار سه بعدی می‌باشد.

در مورد معادلات دینامیکی برای ربات‌ها، چون اثر تزویج زیاد است و همه‌ی متغیرها بر هم اثر می‌گذارند، لذا اثر تشدید متقابل وجود دارد [44]. رابطه (۲-۳) را به شکل زیر تعریف می‌کنیم تا روابط ساده‌تر شوند:

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d + \gamma(q_d - q) \quad (۷-۳)$$

هدف از این روابط این است که متغیرهای حالت ما به سمت مطلوب بروند.

همچنین  $\gamma$ ، یک ماتریس قطری  $3 \times 3$  برای ربات پالتایزر مد نظر است.

علاوه بر این، یک سطح متغیر با زمان  $S(t)$  به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$S(t) = \dot{e} + \gamma e \quad (۸-۳)$$

به طور دقیق‌تر، مسئله تعقیب بردار سه بعدی  $q_d$  را می‌توان به طور موثری با یک مسئله پایدار سازی بر حسب  $S$  جایگزین کرد. برای ظاهر شدن  $\tau$ ، فقط یک بار مشتق‌گیری از  $S$  مورد نیاز است.

$$\dot{S} = \ddot{e} + \gamma \dot{e} = (\ddot{q}_d - \ddot{q}) + \gamma \dot{e} = \ddot{q}_d + \gamma \dot{e} - \ddot{q} = \ddot{q}_r - \ddot{q} \quad (۹-۳)$$

$$\dot{S} = \ddot{q}_r - M(q)^{-1} (\tau - V(q, \dot{q})) \quad (۱۰-۳)$$

همچنین در این قسمت برای بررسی پایداری ربات، یک تابع لیاپانوف به شکل زیر معرفی می‌کنیم [45]:

$$V = \frac{1}{2} S^T M(q) S \quad (۱۱-۳)$$

از رابطه (۱۱-۳) مشتق زمانی می‌گیریم:

$$\dot{V} = S^T M(q) \dot{S} + \frac{1}{2} S^T \dot{M}(q) S = S^T (M(q) \dot{S} + \frac{1}{2} \dot{M}(q) S) \quad (۱۲-۳)$$

پس از ساده‌سازی روابط به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\dot{V} = S^T (M(q) \dot{S} + V(q, \dot{q}) S) = S^T (M(q) \ddot{q}_r + V(q, \dot{q}) \dot{q}_r - \tau) \quad (۱۳-۳)$$

طبق معادله (۱۳-۳) قانون کنترل مد لغزشی معمولی برای ربات، به شکل زیر پیشنهاد داده می‌شود، بازه برای

$M$  و  $V$  مشخص است، پس:

$$\tau = \hat{M}\ddot{q}_r + \hat{V} - K \operatorname{sgn}(s) \quad (14-3)$$

در رابطه (14-3)،  $\tau = -K \operatorname{sgn}(s)$  قانون کنترل سوئیچینگ است که برای مقابله با اغتشاشات و نامعینی پارامتری به قانون کنترل معادل اضافه می‌شود. در این رابطه بهره  $K$  بهره سوئیچینگ است که انتخاب مناسب آن، می‌تواند پدیده چترینگ را کاهش دهد.

و همچنین برای  $\dot{V}$  داریم:

$$\dot{V} = s^T (\tilde{M}\ddot{q}_r + \tilde{V}\dot{q}_r) - \sum_{i=1}^n K_i |s_i| \quad (15-3)$$

که  $\tilde{M}$  و  $\tilde{V}$  به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$M - \hat{M} = \tilde{M} \quad (16-3)$$

$$V - \hat{V} = \tilde{V} \quad (17-3)$$

برای ربات مورد نظر، جهت شبیه سازی در نرم افزار متلب، مقدار عدم قطعیت ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است، طبق رابطه زیر داریم:

$$\hat{M} = 0.8 M \quad (18-3)$$

$$\hat{V} = 0.8 V \quad (19-3)$$

برای ربات  $3 \times 3$  مد نظر، داریم:

$$[K_1 \quad K_2 \quad K_3] \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(S_1) \\ \operatorname{sgn}(S_2) \\ \operatorname{sgn}(S_3) \end{bmatrix} \quad (20-3)$$

در این قسمت از قانون، برای ربات باید کران بالای  $[\eta - K \operatorname{sgn}(S)]$  را برای  $K$ ، در نظر بگیریم، هرچقدر مقدار پارامتر  $K$  بزرگتر باشد پایداری نسبی بیشتر می‌شود [46]. ولی از طرفی اندازه سیگنال کنترل و نوسانات آن نیز بیشتر می‌شود. برای انتخاب  $K$  باید مصالحه ای صورت گیرد. به همین جهت در این پروژه مقدار مناسب  $K$  برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است.

طبق رابطه زیر اگر  $K$  بزرگتر از  $\eta_i$  انتخاب شود،  $\dot{V}$  همواره منفی و پایداری مجانبی کل سیستم تضمین می گردد و در نهایت داریم:

$$\text{If } K_i \geq [|\tilde{M} \ddot{q}_r + \tilde{V}|]_i + \eta_i$$

$$\rightarrow \dot{V} \leq -\sum_{i=1}^n \eta_i |S_i| \quad (21-3)$$

که رابطه (21-3) پایداری تابع لیپانوف معرفی شده را نمایش می دهد.

### 3-3 نمودارهای کنترل مد لغزشی

در این بخش روش کنترلی پیشنهادی را بر روی ربات مورد نظر شبیه سازی می کنیم، و نتایج حاصل از شبیه سازی را در قالب نمودارهای خطای ردیابی، سرعت ها، مختصات نقطه انتهایی گیرنده ربات (gripper)، و همچنین نمودار کنترل کننده پیشنهادی برای ربات بررسی می شود.

هر کدام از نمودارها در سه بخش نمایش داده می شوند، که به ترتیب نمودارها برای مفصل اول ( $\theta_1$ )، مفصل دوم ( $\theta_2$ ) و مفصل سوم ( $\theta_3$ ) هستند.

در این طراحی ها سیگنال های ورودی مرجع به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\theta_{1d}=0/1 \sin(\pi t) \quad , \quad \theta_{2d}=0/1 \cos(\pi t) \quad , \quad \theta_{3d}=0/1 \cos(0.5\pi t) \quad (22-3)$$

همچنین شرایط اولیه برای ربات به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$q_0=[0 \ 0/5 \ 1]^T$$

شکل های (1-3) و (3-3) نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل کننده مد لغزشی معمولی را نشان می دهد. شکل (2-3)، پاسخ ردیابی موقعیت را در 5 ثانیه اول برای هر سه زاویه  $\theta_1$ ،  $\theta_2$ ،  $\theta_3$  نشان می دهد. همان طور که از شکل پیدا است، کنترل کننده پیشنهادی عمل ردیابی موقعیت را با دقت بسیار خوبی و در کمتر از 0/1 ثانیه انجام می دهد.

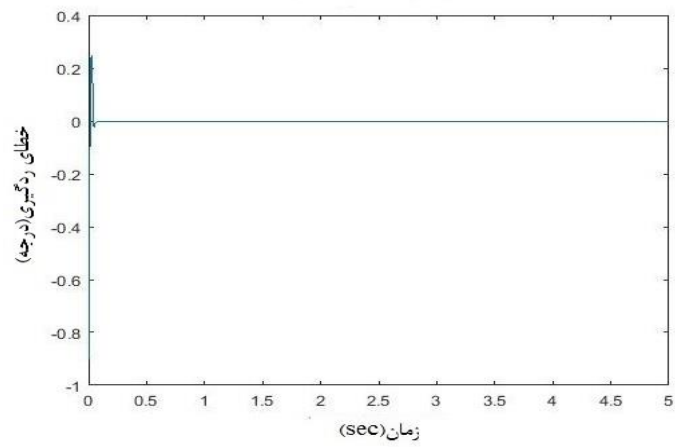
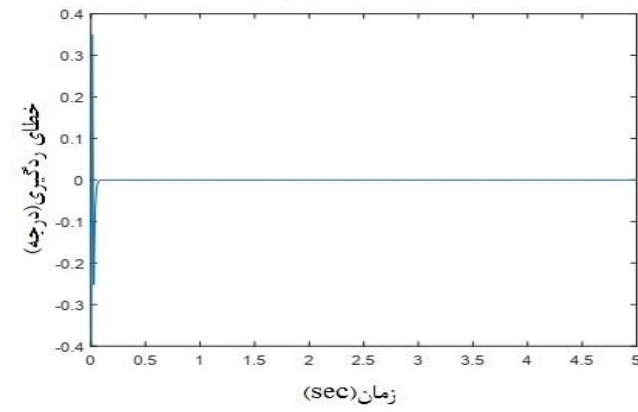
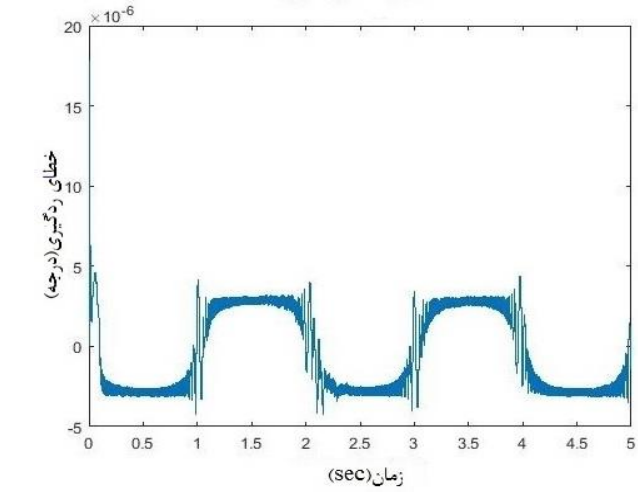
در واقع همان طور که از نمودار های شکل (۳-۲) مشخص است، خطای ردیابی کنترل کننده پیشنهادی بعد از چند نوسان میراشونده کوچک، به سمت صفر میل کرده و خطای حالت ماندگار آن صفر می شود. همچنین کنترل کننده پیشنهادی عمل ردیابی موقعیت را برای زاویه  $\theta_2$  و  $\theta_3$  بهتر از زاویه  $\theta_1$  انجام می دهد. همچنین شکل (۳-۳)، ورودی های کنترل اعمال شده به سیستم ربات مورد نظر را در مدت زمان ۵ ثانیه برای هر سه زاویه  $\theta_1$ ،  $\theta_2$ ،  $\theta_3$  نشان می دهد. با اعمال این ورودی های کنترلی طراحی شده در معادله (۳-۳)، سیستم در حضور اغتشاشات خارجی عمل ردیابی را با دقت بسیار خوبی مطابق شکل (۳-۱) انجام می دهد. و همچنین نمودار های شکل (۳-۴)، مربوط به مختصات نقطه انتهایی ربات (gripper یا گیرنده) است. در واقع مسیر حرکت مجری نهایی، مطابق معادلات زیر نوشته می شود:

$$x_e = -0/9e^{-1}\sin(x_1) + 0/3\sin(x_1)\cos(x_2) - 3\sin(x_1)\cos(x_3) + 0/37e^{-1}\sin(x_1+1) \quad (۲۳-۳)$$

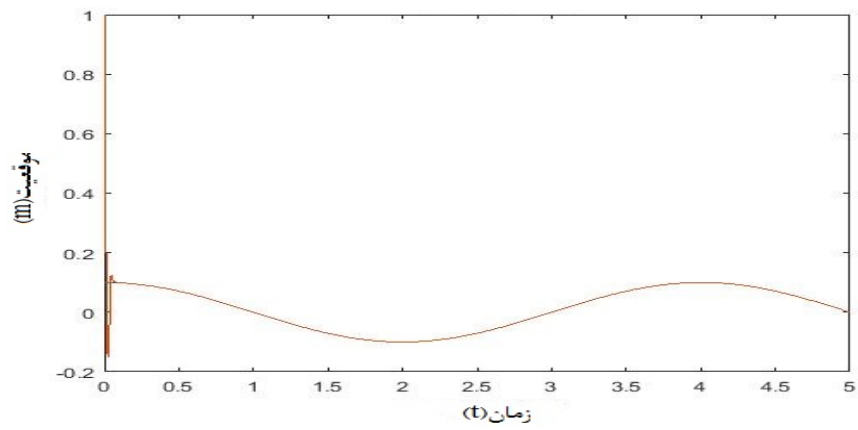
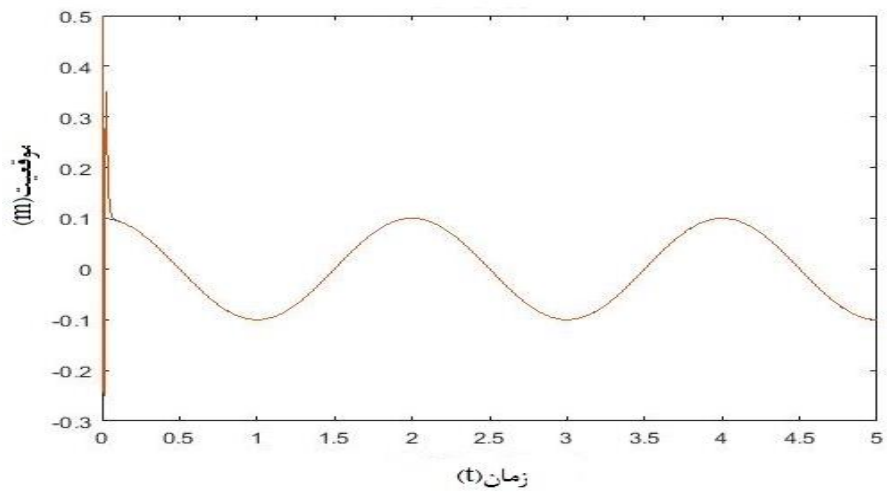
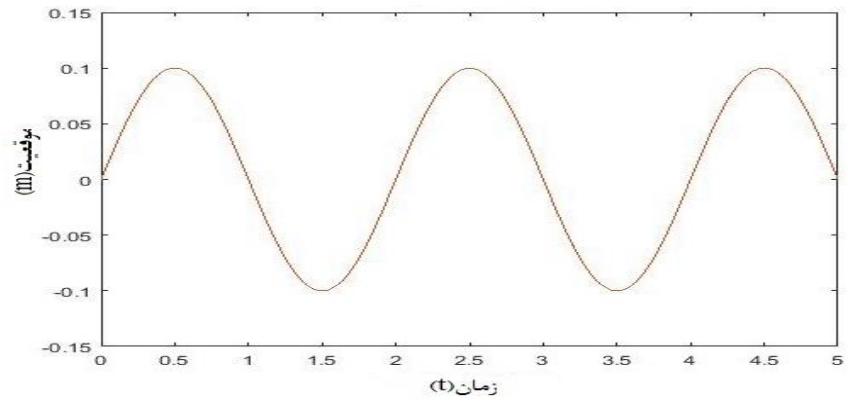
$$y_e = 0/9e^{-1}\cos(x_1) - 0/03\cos(x_1)\cos(x_2) + 3\cos(x_1)\cos(x_3) + 0/37e^{-1}\cos(x_1+1) \quad (۲۴-۳)$$

$$z_e = 0/34e^{-1} - 0/3\sin(x_2) + 0/3\sin(x_3) \quad (۲۵-۳)$$

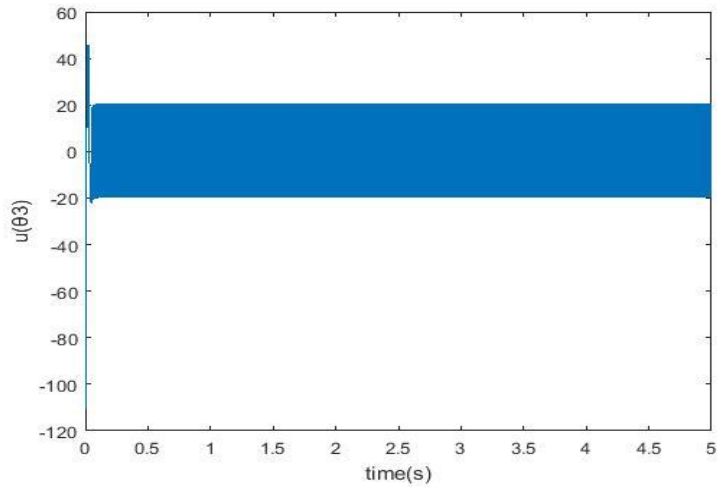
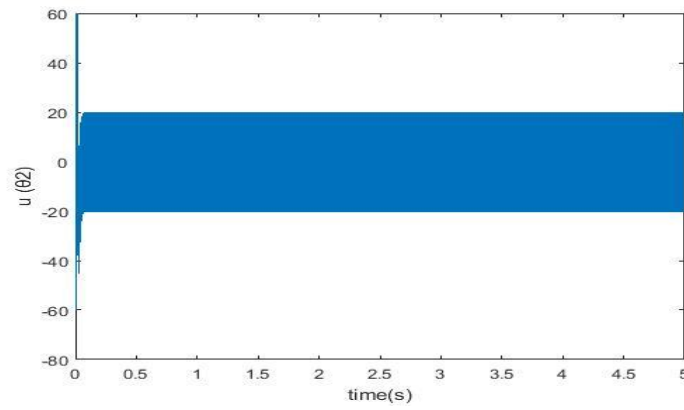
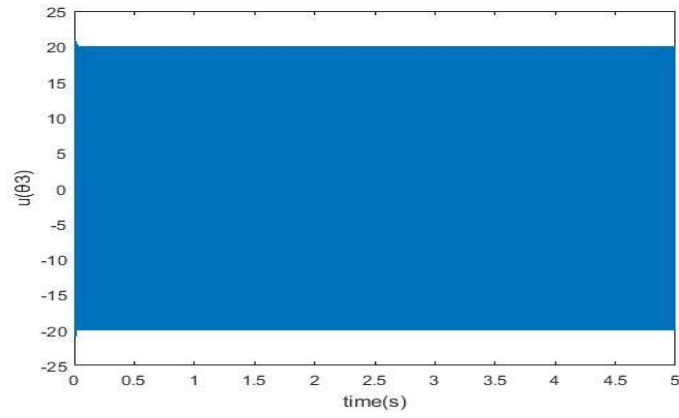




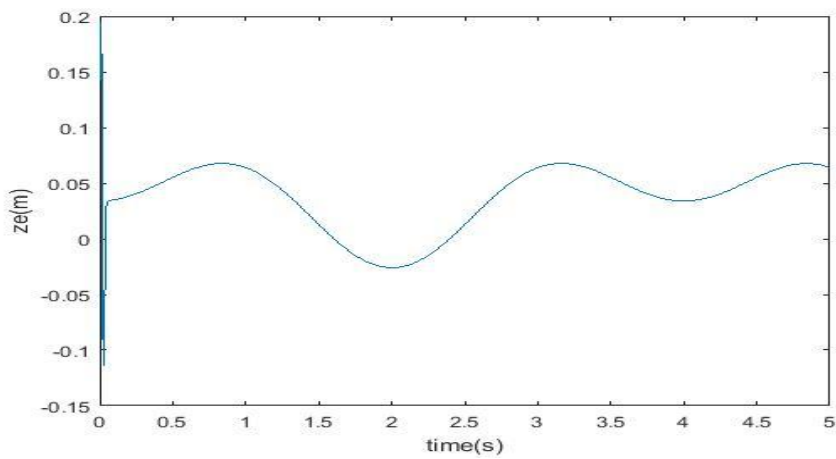
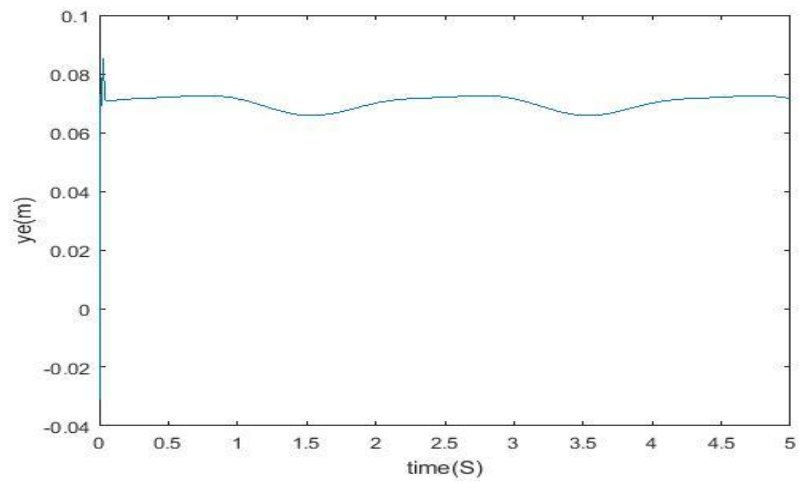
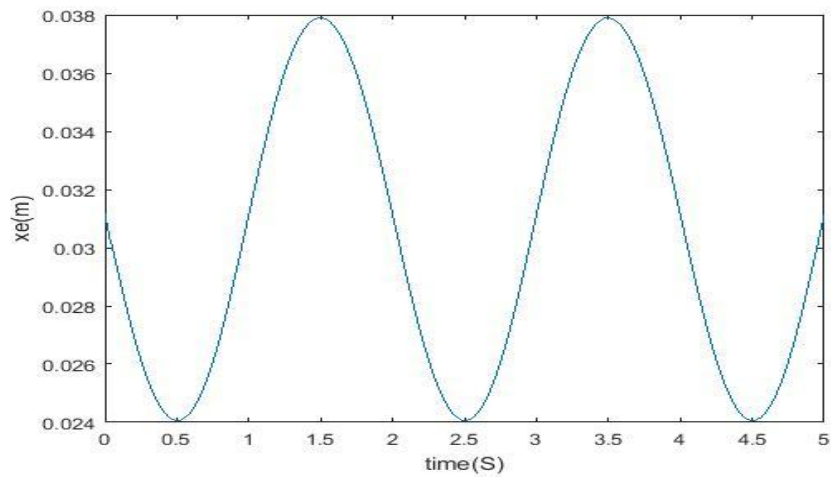
شکل (۳-۱) خطای ردگیری برای زاویه اول ربات ( $\theta_1$ ) - زاویه دوم ربات ( $\theta_2$ ) - زاویه سوم ربات ( $\theta_3$ )



شکل (۲-۳) موقعیت گریپر ربات و موقعیت مطلوب آن



شکل (۳-۳) - ورودی های کنترل برای سه زاویه  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$



شکل (۳-۴) - ورودی های کنترل برای سه مختصه  $X, Y, Z$  گریپر ربات پالتایزر

### ۳-۴ نتیجه گیری در خصوص استفاده از روش مد لغزشی

همان طور که توضیح داده شد در یک مد لغزشی ایده آل، هرچه فرکانس سوئیچینگ به سمت بی نهایت میل کند (یعنی تابع کنترلی دارای ناپیوستگی باشد)، مقاومت و دقت سیستم افزایش میابد. ولی در این صورت حرکتی زیگزاگی حول سطح لغزش با فرکانس و دامنه محدود ایجاد خواهد شد که به پدیده چترینگ معروف است [47]. پدیده چترینگ برای سیستم نامطلوب است. همچنین چترینگ باعث تحریک فرکانس های بالای سیستم می گردد. به منظور حذف یا کاهش پدیده چترینگ روش های زیادی ارائه شده است. استفاده از کنترل مد لغزشی مرتبه بالا، یکی از روش های حذف چترینگی باشد، که در آن با استفاده از توابع پیوسته، می توان علاوه بر حذف چترینگ، دقت و سرعت ردیابی و همگرایی سیستم را افزایش داد.

## فصل چهارم

### کنترل مد لغزشی مرتبه بالا ربات پالتایزر

## ۴-۱ مقدمه

در این فصل به طراحی کنترل کننده مد لغزشی مرتبه دوم بر اساس الگوریتم سوپر توئیستینگ و مقایسه آن با کنترل کننده مد لغزشی مرتبه اول پرداخته می‌شود. این روش همانند روش کنترل مد لغزشی مرتبه اول، روشی مقاوم برای کنترل سیستم‌هایی در حضور اغتشاشات خارجی همراه با عدم قطعیت است. وجود پدیده نامطلوب چترینگ در کنترل مد لغزشی مرتبه اول، انگیزه‌ای برای طراحی روش‌هایی، برای بهبود رفتار کنترل مد لغزشی مرتبه اول را فراهم می‌کند. در واقع این روش یکی از موثرترین روش‌ها برای بهبود رفتار کنترل مد لغزشی مرتبه اول و کاهش چترینگ است. انتخاب مناسب ضرایب سطح لغزش یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی کنترل کننده‌های مد لغزشی مرتبه اول و دوم است.

همان‌طور که اشاره شد، مد لغزشی کلاسیک یا معمولی یا مرتبه اول معایبی دارد که از آن جمله می‌توان به پدیده چترینگ اشاره کرد و این معایب در مد لغزشی مرتبه بالاتر برطرف می‌شود. در واقع مد لغزشی مرتبه بالاتر نه تنها دارای محاسن مد لغزشی کلاسیک است بلکه باعث خطای ردیابی بهتر نسبت به مد لغزشی کلاسیک نیز می‌شود.

در ادامه به معرفی روش سوپر توئیستینگ که یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در کنترل مد لغزشی مرتبه دوم است، می‌پردازیم و نحوه طراحی قانون کنترل را مورد بررسی قرار می‌دهیم، همچنین معادلات و نمودارهای آن را توضیح می‌دهیم. الگوریتم سوپر توئیستینگ یکی از مؤثرترین روش‌ها برای بهبود رفتار کنترل مد لغزشی مرتبه اول و کاهش چترینگ می‌باشد. انتخاب مناسب ضرایب سطح لغزش یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی کنترل کننده‌های مد لغزشی مرتبه اول و دوم است. در این فصل، پس از پیاده‌سازی روش سوپر توئیستینگ، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر روی سیستم ربات پالتایزر (ARM-ROBO V01)، بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم سوپر توئیستینگ در مقایسه با روش کنترل مد لغزشی مرتبه اول می‌باشد که

کاهش پدیده چترینگ، افزایش دقت و سرعت همگرایی حالت های سیستم و کاهش دامنه ورودی کنترلی را به همراه دارد.

#### ۴-۲ الگوریتم نوین مد لغزشی مرتبه بالا

در کنترل مد لغزشی مرتبه اول، قانون کنترلی حالت های سیستم را به سمت سطح لغزش  $S=0$  هدایت می کند.

در این بخش نوع جدیدی از الگوریتم مد لغزشی مرتبه بالا برای تضمین پایداری سیستم غیر خطی مد نظر در حضور نامعینی ارائه می گردد. این الگوریتم به صورت رابطه (۴-۲۰) تعریف می شود.

همان طور که در قبل گفته شد، سیستم دینامیکی تک ورودی- تک خروجی برای ربات مد نظر به شکل زیر تعریف می شود:

$$M(x) \ddot{x} + V(x, \dot{x}) = u \quad (۴-۱)$$

$$\ddot{x} = M^{-1}(x) (u - V(x, \dot{x})) \quad (۴-۲)$$

خروجی مورد نظر  $X$  است و  $u$  ورودی کنترل می باشد [48].

همچنین تابع غیر خطی به شکل زیر تعریف می شود، که در آن  $a(t,x)$  بخش معین و  $b(t,x)$  بخش نامعین تابع است.

$$\dot{x} = f(x, t, u) = a(t, x) + b(t, x) u(t) \quad (۴-۳)$$

هدف کنترلی رساندن  $X$  به مقدار مطلوب بوده و برای این منظور طبق تئوری کنترل مد لغزشی، متغیر لغزش  $S$  به شکل زیر تعریف می شود:

$$S = S(t,x) \quad (۴-۴)$$

با مشتق گیری زمانی از سطح لغزش:

$$\dot{S} = \frac{\partial S(t,x)}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} = \varphi_1 + \varphi_2 u \quad (۴-۵)$$



که مقدار  $\dot{x}$  از رابطه (۳-۴) جایگزین می‌شود:

$$\dot{S} = \frac{\partial S(t,x)}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x}(a(t,x) + b(t,x)u(t)) = \varphi_1 + \varphi_2 u \quad (۶-۴)$$

$$\varphi_1 = \frac{\partial S(t,x)}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x}a(t,x) \quad (۷-۴)$$

که در آن  $\varphi_1$  و  $\varphi_2$  توابع عدم قطعیت دار با کران های بالا و پایین هستند.

سپس مشتق دوم سطح لغزش به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\ddot{S} = \dot{\varphi}(t,x) + \gamma(t,x) \dot{u} \quad (۸-۴)$$

همان طور که در رابطه بالا نشان داده شده است،  $\varphi(t,x)$  و  $\gamma(t,x)$  مقادیر نامعینی هستند با کران های بالا

و پایین که حدود آنها طبق روابط زیر مشخص می‌باشد:

$$|\varphi(t,x)| \leq \phi \geq 0 \quad (۸-۴)$$

$$0 \leq \gamma \leq \gamma(t,x) \leq \gamma_m \quad (۹-۴)$$

مقادیر  $\gamma_m$  و  $\gamma$ ، ثوابتی هستند که مقدار نامعینی را برای تابع  $\gamma(t,x)$  بیان می‌کنند.

خطای ردیابی سیستم به صورت  $e = x_d - x$  تعریف می‌شود.

ایده کنترل لغزش به این ترتیب است که ابتدا سطح لغزش  $S$  برحسب خطای ردیابی سیستم تعریف می‌گردد و

ورودی کنترل را طوری طراحی می‌کنند که  $S=0$  شود، همچنین ایده اصلی در کنترل مد لغزشی مرتبه بالا،

رساندن  $S$  و  $\dot{S}$  مرتبه بالاتر به صفر است، یعنی علاوه بر صفر شدن سطح لغزش، تغییرات سطح لغزش هم باید

صفر شود. و برای این منظور طبق تئوری کنترل مد لغزشی، متغیر لغزش  $S$  براساس خطای ردیابی سیستم به

صورت زیر نوشته می‌شود:

$$S = \dot{e} + ke = \dot{x}_d - \dot{x} + k(x_d - x) \quad (۱۰-۴)$$

با مشتق گیری زمانی از سطح لغزش:

$$\dot{S} = \ddot{x}_d - \ddot{x} + k(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (11-4)$$

با جایگذاری رابطه (۲-۴) در رابطه (۱۱-۴)، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\dot{S} = \ddot{x}_d - M^{-1}(x)(u - V(x, \dot{x})) + k(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (12-4)$$

و بعد از ساده سازی :

$$\dot{S} = \ddot{x}_d + M^{-1}(x)(V(x, \dot{x})) + k(\dot{x}_d - \dot{x}) + (-M^{-1}(x)) u \quad (13-4)$$

با مشتق گیری دوم از سطح لغزش نسبت به زمان خواهیم داشت:

$$\ddot{S} = \ddot{\ddot{x}}_d + M^{-1}(x)(V(x, \dot{x})) + k(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + (-M^{-1}(x)) u + (-M^{-1}(x)) \dot{u} \quad (14-4)$$

ایده اصلی و نتیجه گیری از محاسبات بالا این است که  $u$ ، به جای اینکه در  $S$  ظاهر شود، در  $\dot{S}$  یا  $\ddot{S}$  مرتبه بالاتر ظاهر شده است. همچنین تمامی محاسبات انجام شده در بالا، به این هدف است که رابطه نهایی (۱۲-۴) با رابطه (۷-۴) که مشتق دوم از سطح لغزش است، مقایسه شده و به شکل زیر این جملات را جدا می‌کنیم:

$$\gamma(t, x) = -M^{-1}(x) \quad (15-4)$$

$$\varphi(t, x) = \ddot{\ddot{x}}_d + M^{-1}(x)(V(x, \dot{x})) + k(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + (-M^{-1}(x)) \quad (16-4)$$

در این مرحله قانون کنترل را تعریف، این روش بر اساس مد لغزشی مرتبه دو نوشته می‌شود که به الگوریتم سوپر توئیستینگ معروف است [49].

$$u_2 = -\lambda |S|^p \operatorname{sgn}(s) + u_1 \quad (17-4)$$

که  $u_1$  به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{u}_1 = -w \operatorname{sgn}(s) \quad (18-4)$$

در نتیجه با انتگرال گیری از  $\dot{u}_1$ ، تابع کنترل  $u$  به شکل زیر به دست می‌آید:

$$u = u_1 + u_2 \quad (19-4)$$

$$u = -\lambda |S|^p \operatorname{sgn}(s) - \int w \operatorname{sgn}(s) dt \quad (20-4)$$

حدود ثوابت فرمول بالا به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$w > \frac{\phi}{J_m} \quad (21-4)$$

$$\lambda^2 \geq \frac{\phi J_m (w + \phi)}{J_m^2 J_m (w - \phi)} \quad (22-4)$$

تعیین ضرایب مناسب سطح لغزش به منظور بهبود عملکرد کنترلی در کنترل کننده های مد لغزشی مرتبه اول و روش سوپر توئیستینگ، امری مهم در طراحی کنترل مد لغزشی می‌باشد.

در این قسمت، با استفاده از الگوریتم سوپر توئیستینگ، یک کنترل کننده طراحی شده و هدف از طراحی ردیابی موقعیت مطلوب برای ربات پالتایزر (ARM-ROBO V01) است. در این قسمت، فرم فضای حالت این مدل را به شکل زیر تعریف می‌کنیم [50]:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (23-4)$$

$$\dot{x}_2 = f(x) + g(x)u \quad (24-4)$$

همان طور که گفته شد توابع S و e به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$S = \dot{e} + ke, \quad e = x_{1d} - x_1 \quad (25-4)$$

سپس تابع u را برای این حالت به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

که x1 همان q و x2 همان q̇ است.

$$u = M (\ddot{x}_1^d - k \dot{e} - k_1 |S|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sgn}(s) - k_2 \int \text{sgn}(s) dt + M^{-1} V) \quad (26-4)$$

$$u = M (\ddot{x}_1^d - k \dot{e} - k_1 |S|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sgn}(s) - k_2 \int \text{sgn}(s) dt) + \hat{V} \quad (27-4)$$

$$\ddot{q} = M^{-1} (u - V) \quad (28-4)$$

با جایگذاری رابطه (۲۶-۴) در رابطه (۲۸-۴) معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\ddot{q} = \ddot{q}_1^d - k \dot{e} - k_1 |S|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sgn}(s) - k_2 \int \text{sgn}(s) dt + M^{-1} (\hat{V} - V) \quad (29-4)$$

$$\ddot{q} - \ddot{q}_1^d + k e' = -k_1 |S|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sgn}(s) - k_2 \int \text{sgn}(s) dt + M^{-1} (\hat{V} - V) \quad (30-4)$$

$$\ddot{e} + k e' = k_1 |S|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sgn}(s) + k_2 \int \text{sgn}(s) dt + M^{-1} (V - \hat{V}) \quad (31-4)$$

$$\dot{S} = k_1 |S|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sgn}(s) + k_2 \int \text{sgn}(s) dt + M^{-1} (V - \hat{V}) \quad (32-4)$$

پارامترهای  $k_1$  و  $k_2$  باید طوری تنظیم شوند که اثر نامعینی  $(V - \hat{V}) + M^{-1}$  را جبران نمایند تا عبارت  $\dot{S}$  به سمت صفر میل نماید.

### ۳-۴ نمودارهای کنترل مد لغزشی مرتبه بالا

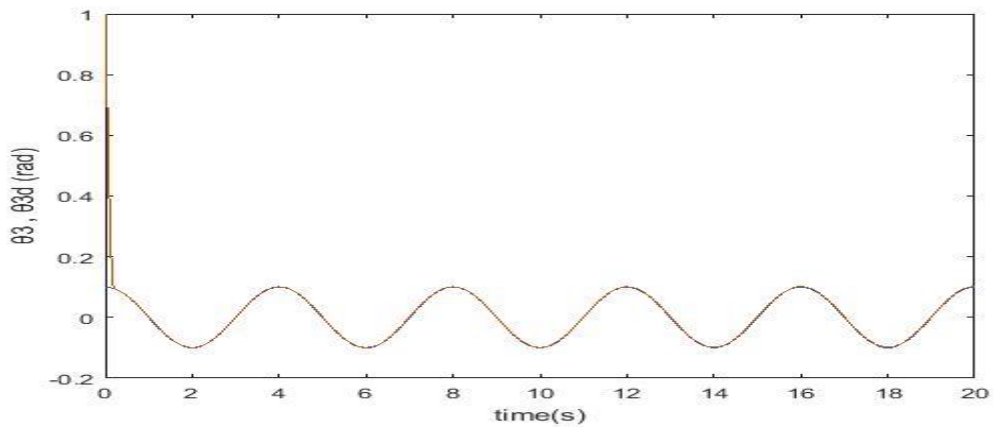
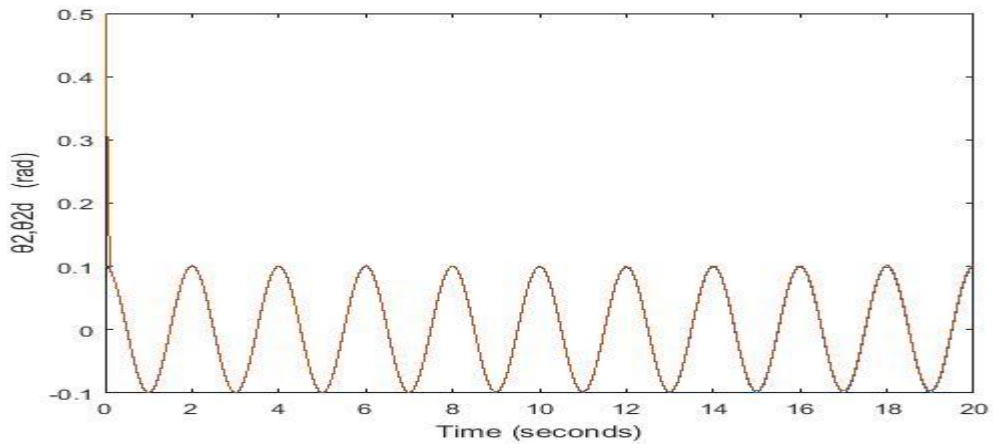
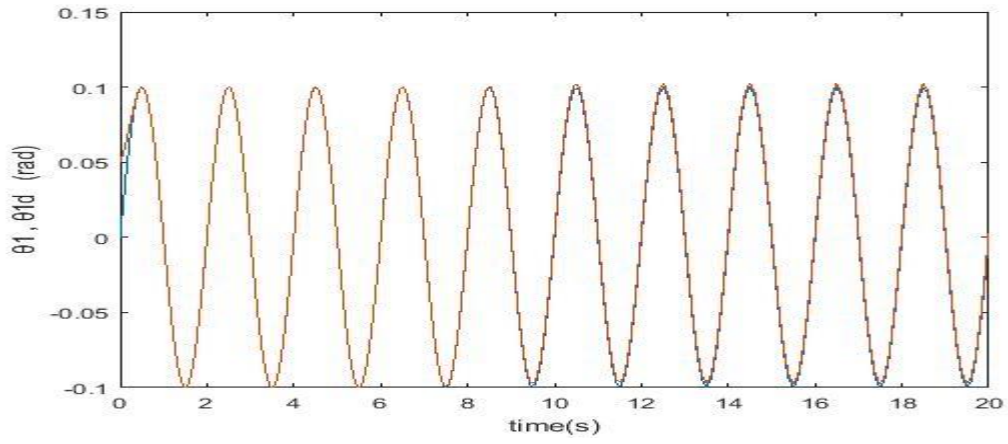
همان طور که در فصل پیش برای نمودارها توضیح داده شد: هر کدام از نمودارها در سه بخش نمایش داده می شوند، که به ترتیب نمودارها برای مفصل اول ( $\theta_1$ )، مفصل دوم ( $\theta_2$ ) و مفصل سوم ( $\theta_3$ ) هستند. در طراحی کدهای مد لغزشی مرتبه بالا نیز همانند مد لغزشی مرتبه پایین، سیگنال های ورودی مرجع به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\theta_{1d} = 0.1 \sin(\pi t) \quad , \quad \theta_{2d} = 0.1 \cos(\pi t) \quad , \quad \theta_{3d} = 0.1 \cos(0.5\pi t) \quad (33-4)$$

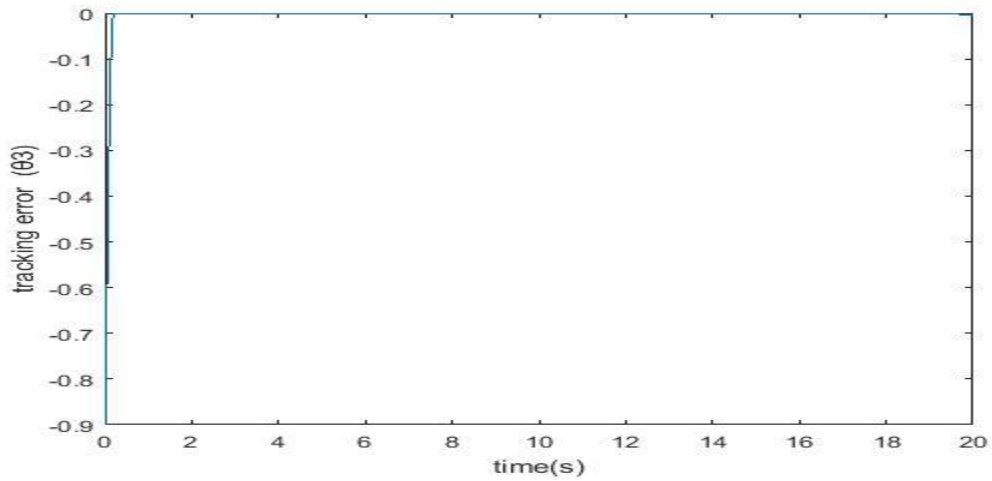
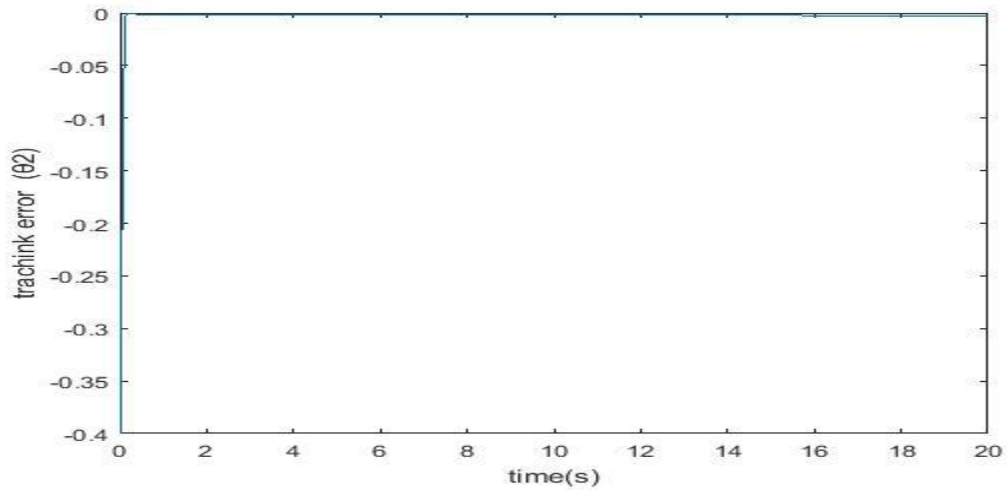
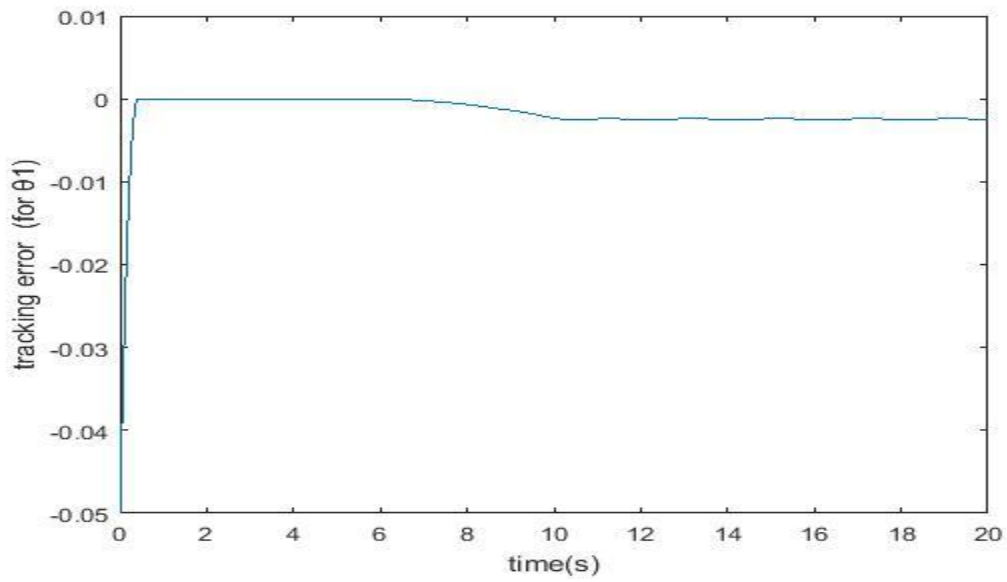
همچنین شرایط اولیه برای ربات به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$q_0 = [0 \ 0.5 \ 1]^T \quad (34-4)$$

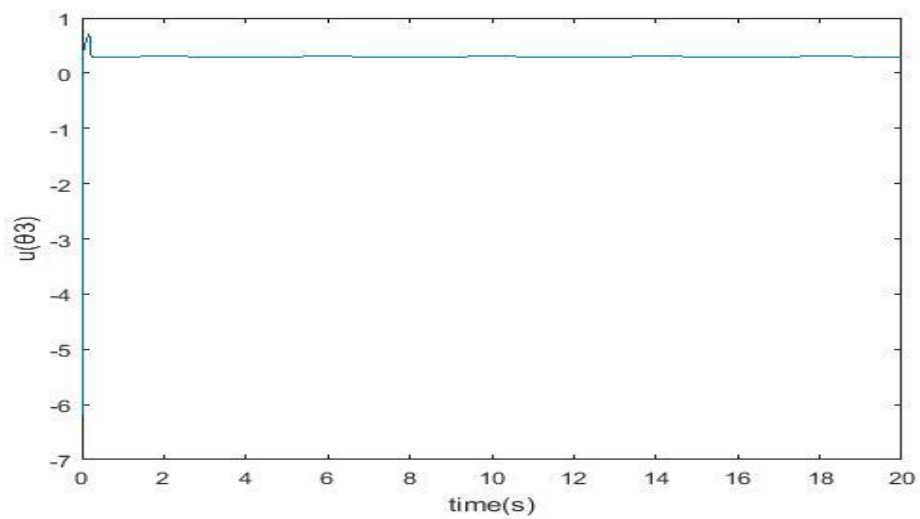
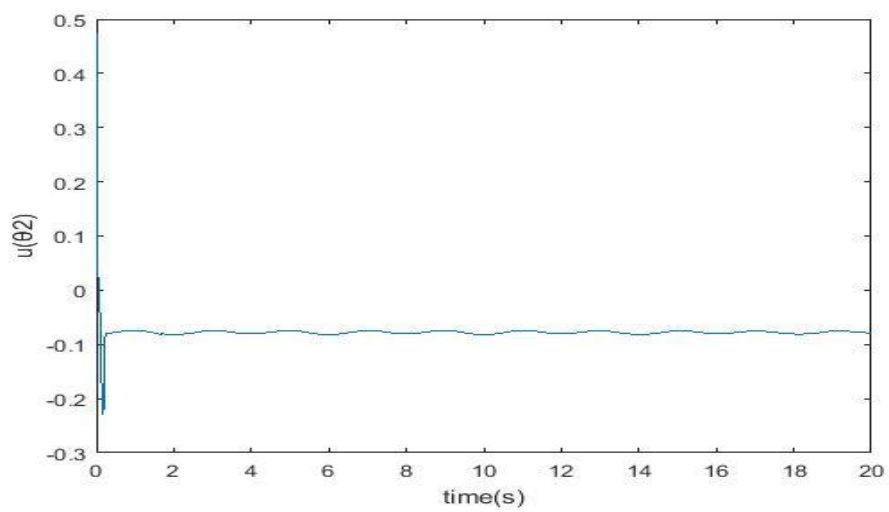
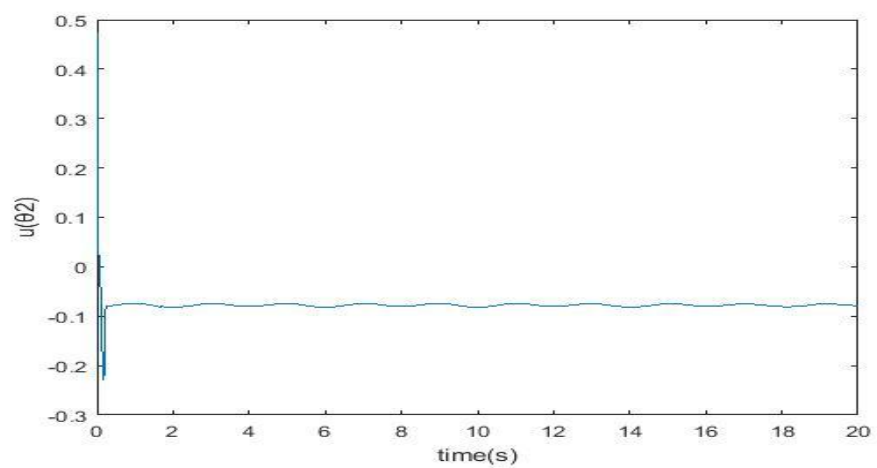
در نتیجه نمودارها به شکل های زیر در نرم افزار متلب شبیه سازی شده اند:



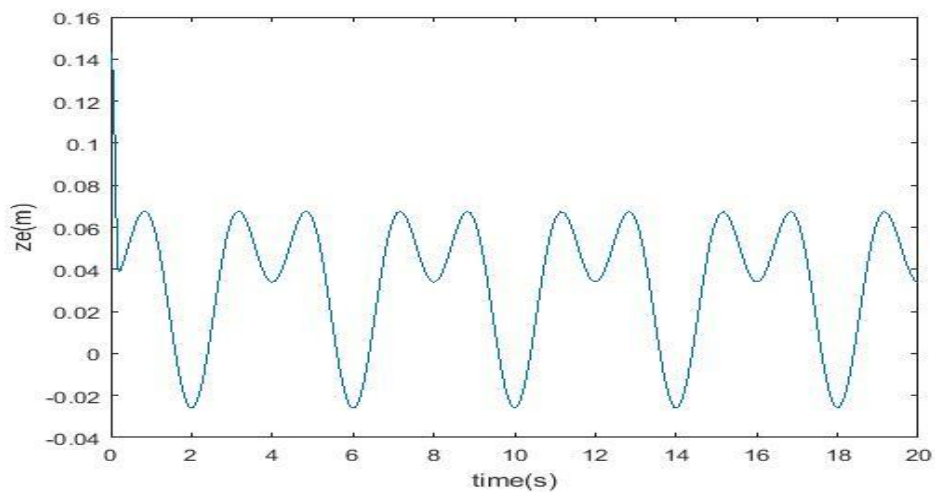
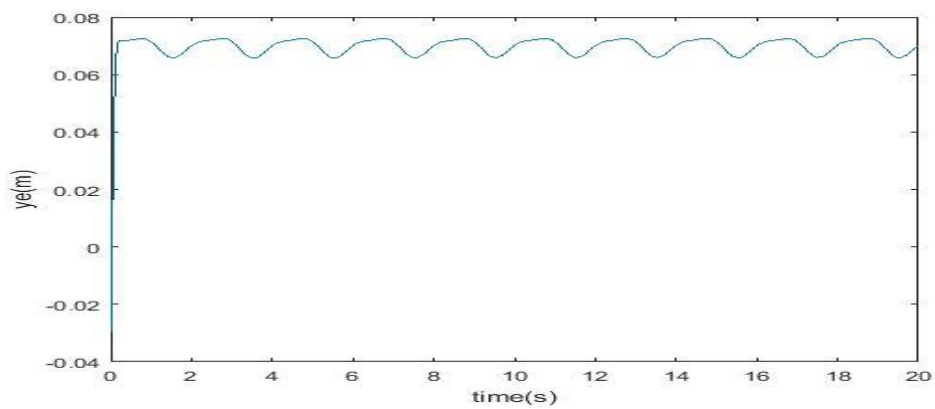
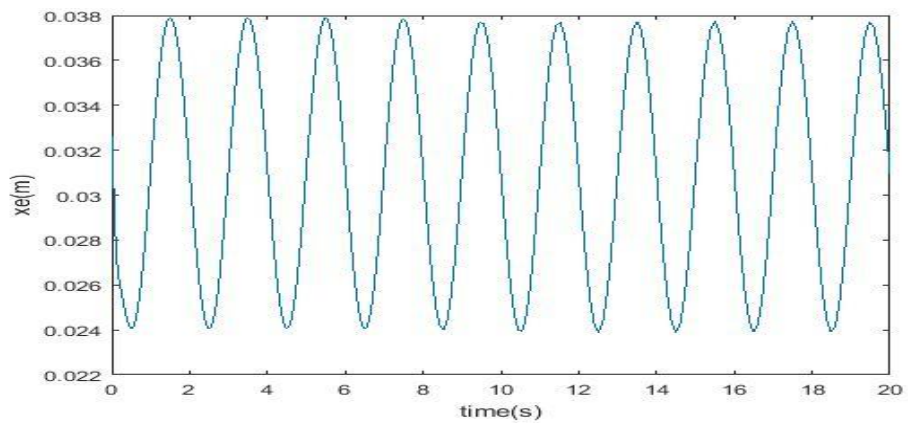
شکل (۴-۱) موقعیت ربات و موقعیت مطلوب آن



شکل (۲-۴) خطای ردگیری برای زاویه اول ربات ( $\theta_1$ ) - زاویه دوم ربات ( $\theta_2$ ) - زاویه سوم ربات ( $\theta_3$ )



شکل (۳-۴) ورودی های کنترل برای سه زاویه  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$



شکل (۴-۴) تعقیب مسیر مطلوب مجری نهایی در سه محور X, Y, Z



با توجه به نمودارهای این فصل، که برای هر سه زاویه  $\theta_1$ ،  $\theta_2$ ،  $\theta_3$  و در مدت زمان ۲۰ ثانیه اول در نرم افزار متلب شبیه سازی شده اند. مشاهده می شود که پاسخ تولید شده توسط کنترل کننده سوپر توئیستینگ، کمترین میزان خطا و چترینگ را ایجاد می کند. علاوه بر این، برتری روش سوپر توئیستینگ را می توان در سیگنال های کنترلی ایجاد شده توسط این کنترل کننده مشاهده نمود.

همچنین با توجه به نمودار شکل (۴-۳) این روش نوسانات شدید کنترلی ندارد و سیگنال کنترلی آن در مقایسه با روش مد لغزشی معمولی، به صورت پیوسته و همراه با دامنه کنترلی بسیار محدودتر می باشد.

## فصل پنجم

### نتیجه گیری و پیشنهاد ها

## ۵-۱ نتیجه گیری:

در این پایان نامه، ابتدا به مدل سازی دینامیکی ربات پالتایزر سه درجه آزادی پرداخته شده است و پس از انجام محاسبات طولانی، تمامی درآیه های ماتریس های اصلی معادله ربات استخراج شده است. تمامی این ماتریس ها اعتبار سنجی شده و بعد از انجام مراحل اعتبار سنجی، به نتایج دلخواه رسیدیم و ماتریس های این ربات مورد تایید شدند.

در ادامه پایان نامه در فصل ۳، به منظور بررسی نامعینی های ربات مورد نظر، روش مد لغزشی کلاسیک یا معمولی به کار برده شده است. و معادلات آن و پایداری این معادلات بررسی شده است، در نهایت پس از نوشتن کدها در نرم افزار متلب و استخراج نمودارهای کنترل کننده و خطاها و نمودار رد یابی موقعیت برای مفاصل که دارای زاویه  $\theta_1$ ،  $\theta_2$ ،  $\theta_3$  هستند به بررسی نمودارها پرداختیم. در این فصل تمامی نمودارها و نتایج را در ۵ ثانیه اول بررسی کردیم.

در نهایت در فصل ۴، روش مد لغزشی مرتبه بالا معروف به روش سوپر توئیستینگ را بیان کردیم و بعد به بررسی معادلات و نمودارهای آن پرداختیم، تمامی نمودارها در این فصل در ۲۰ ثانیه اول بررسی و استخراج شده اند.

از مقایسه نمودارهای خطای ردگیری مفاصل در دو فصل ۳ و ۴ به خوبی می توان دریافت که در روش سوپر توئیستینگ برای هر سه زاویه، مقدار خطای ردگیری، با نوسان کم به صفر رسیده است.

در حالی که برای روش مد لغزشی معمولی، مقدار دامنه خطا برای زاویه  $\theta_1$ ، بیشتر از دو زاویه دیگر و در حدود ۲/۵ است و برای دو زاویه دیگر در ۰/۱ ثانیه به صفر رسیده و تا پایان ۵ ثانیه صفر باقی می ماند.

همچنین با توجه به نمودار کنترل کننده پیشنهادی در فصل ۴، کنترل کننده سوپر توئیستینگ، دامنه نوسان کمتر و یکنواخت تر دارد.

## ۲-۵ پیشنهادها

پیشنهاد های زیر برای ادامه تحقیق ارائه می گردد:

- ۱- استفاده از روش های کنترلی دیگر برای مقابله با عدم قطعیت های سیستم
- ۲- اعمال تخمین گرها و مشاهده گرها بر روی ربات
- ۳ - با توجه به اینکه در این پایان نامه، معادلات ربات پالتایزر به طور کامل و برای اولین بار استخراج شده است، می توان این معادلات را بر روی تمامی کنترل کننده های دیگر پیاده سازی و شبیه سازی کرد و روی این ربات که ربات آزمایشگاهی است، به شکل عملی پیاده سازی نمود.

## پیوست ۱:

معادله لاگرانژین نهایی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$L=K-V$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial V}{\partial q} = \tau$$

در این رابطه  $\tau$  بردار گشتاور و نیروی وارد شده بر مجری نهایی و تابع  $L$  از تفاضل انرژی جنبشی و پتانسیل به دست می‌آید.

## پیوست ۲:

مقادیر نظیر درایه های ماتریس های  $M$  و  $V$  از معادله دینامیکی ربات به شرح ذیل آمده است:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M11 & M12 & M13 \\ M21 & M22 & M23 \\ M31 & M32 & M33 \end{bmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} v11 \\ v12 \\ v13 \end{bmatrix}$$

$$v1 = \dot{X}_1$$

$$v2 = \dot{X}_2$$

$$v3 = \dot{X}_3$$

$$\begin{aligned} M11 = & 5/027200 \cdot 10^{-7} \cos(x_2 - 5772156649)^2 + 0/3856045760e - 2 \cos(x_3) - \\ & 0/1304220480e-2 \cos(x_2) - 9/608 \cdot 10^{-7} \cos(x_3) \sin(x_3) - \\ & 0/6031401600e-2 \cos(x_3) \cos(x_2) + 0/3263463932e-2 \cos(x_2)^2 \\ & + 0/832497192e-2 \cos(x_3)^2 - 0/821e-4 \cos(x_3) \cos(x_2) - 0/400) - \\ & 0/6535360000e-5 \cos(x_3) \cos(x_2 - 0/5772156649) + 0/124820e-4 \\ & \cos(x_2)^2 - 0/12640e-4 \cos(x_2 - 0/40) - 0/1005440 e-5 \cos(x_2) - \\ & 0/24000e-4 \sin(x_1) \sin(x_1) \cos(x_2) - 0/2000e4 \cos(x_1) \cos(x_1) \\ & \cos(x_2) + 0/710400e-3 \cos(x_1) \cos(x_2) \cos(x_1+1) - 0/710400e-3 \cos(x_1) \\ & \cos(x_3) \cos(x_1+1) + 0/71040e-3 \sin(x_1) \cos(x_2) \sin(x_1+1) - 0/7104e-3 \\ & \sin(x_1) \cos(x_3) \sin(x_1+1) + e3 \cos(x_1+0/60) \cos(x_3) \cos(x_1) \cos(x_2) \\ & + 0/474e-4 \cos(x_1+\cos(x_2-0/4000)) \cos(x_1) \cos(x_2) - 0/1560e-3 \\ & \sin(x_1+0/600) \cos(x_3) \sin(x_1) \cos(x_2) + 0/474e-4 \sin(x_1+0/600) \end{aligned}$$

$$\cos(x_2 - 0/400) \sin(x_1) \cos(x_2) - 0/213120e-3 \cos(x_1) \cos(x_1) - 0/213120e-3 \sin(x_1) \sin(x_1) - 0/421266 e-7 \sin(x_2) \cos(x_2)$$

$$\begin{aligned} M12 = M21 = & 0/23700e-4 \cos(x_1 + 0/6) \sin(x_2 - 0/4000) \sin(x_1) \cos(x_2) \\ & - 0/7800e-4 \cos(x_1) \sin(x_2) \sin(x_1) \cos(x_3) + 0/2370e-3 \cos(x_1) \\ & \sin(x_2) \sin(x_1 + . / 600) \cos(x_2 - .400) - 0/23700e-3 \sin(x_1 + 0/600) \\ & \sin(x_2 - 0/400) \cos(x_1) \cos(x_2) + 0/78000e-3 (x_1) \sin(x_2) \cos \\ & (x_1 + . / 6000) \cos(x_3) - 0/237000e-3 \sin(x_1) \sin(x_2) \cos(x_1) \cos(x_2 - \\ & 0/40) - 0/12000e-3 \cos(x_1) \sin(x_2) \sin(x_1) + 0/120e-3 \sin(x_1) \\ & \sin(x_2) \cos(x_1 + 0/60000) - 0/355200e-3 \sin(x_1) \sin(x_2) \cos(x_1 + 10) \\ & + 0/355200e-3 \cos(x_1) \sin(x_2) \sin(x_1) + \sin(x_2) + 3/584010^{-9} \cos(x_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M13 = M31 = & - 0/78000e-3 \cos(x_1 + 6) \sin(x_3) \sin(x_1) \cos(x_2) \\ & + 0/7800e-3 \sin(x_1 + 0/60) \sin(x_3) \cos(x_1) \cos(x_2) - 0/355200e-3 \\ & \cos(x_1) \sin(x_3) \sin(x_1 + 10) + 0/355200e-3 \sin(x_1) \sin(x_3) \cos \\ & (x_1 + 10) + 6/244 \sin(x_3) + 3/30900 10^{-24} \cos(x_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M22 = & 0/3330514943e-2 + 0/4740e-3 \cos(x_2 - 0/40) \cos(x_2) + 0/4740e-4 \\ & \sin(x_1 + 0/600) \sin(x_2 - 0/400) \sin(x_1) \sin(x_2) + 0/47400e-4 \\ & \cos(x_1 + 600000) \sin(x_2 - 0/4000000) \cos(x_1) \sin(x_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M23 = M32 = & - 0/3015700800e-2 \sin(x_3) \sin(x_2) - 0/3267680e-5 \sin(x_3) \\ & \sin(x_2 - 0/5772156649) - 0/410800e-4 \sin(x_3) \sin(x_2) - 0/78e-4 \sin(x_1) \\ & \sin(x_3) \sin(x_1) \sin(x_2) - 0/780e-4 \cos(x_1) \sin(x_3) \cos(x_1) \sin(x_2) \\ & - 0/309370080e-4 \cos(x_3) \cos(x_2) - 0/410800e-4 \cos(x_3) \cos(x_2 - 0/400) \\ & - 0/32676800e-4 \cos(x_3) \cos(x_2 - 0/5772156649) \end{aligned}$$

M33=0/00835634009

v11=-0/842532000e-4 cos(x<sub>2</sub>)^2 v2 v1+0/4212660e-4 v1 v2+0/1005440  
e-4 v1 sin(x<sub>2</sub>-.5772156649) v2+0/12640e-4 v1 sin(x<sub>2</sub>-0/4)  
v2+0/15600 e-4 sin(x<sub>1</sub>+0/6) v1 sin(x<sub>3</sub>) v3 sin(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>2</sub>)-0/47400e-  
4 sin(x<sub>1</sub>+0/6) v1 sin(x<sub>2</sub>-0/4) v2sin(x<sub>1</sub>)cos(x<sub>2</sub>)+0/156 e-4  
sin(x<sub>1</sub>)v1sin(x<sub>2</sub>)v2sin(x1+0/6)cos(x<sub>3</sub>)-0/474e-4  
sin(x<sub>1</sub>)v1sin(x<sub>2</sub>)v2sin(x<sub>1</sub>+0/6)cos(x<sub>2</sub>-0/4) +0/156000e-4 cos(x<sub>1</sub>+0/6)  
v1 sin(x<sub>3</sub>)v3 cos(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>2</sub>)-0/4740e-4 cos(x<sub>1</sub>+0/6) v1 sin(x<sub>2</sub>-  
0/4)v2 cos(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>2</sub>)+0/1560e-4  
cos(x<sub>1</sub>)v1sin(x<sub>2</sub>)v2cos(x<sub>1</sub>+0/6)cos(x<sub>3</sub>)-0/474e-4  
cos(x<sub>1</sub>)v1sin(x<sub>2</sub>)v2cos(x<sub>1</sub>)cos(x<sub>2</sub>)-1/92160010<sup>-7</sup>)cos(x<sub>3</sub>) v3  
v1+0/603140160e-4 v1 sin(x<sub>2</sub>) v2 cos(x<sub>3</sub>)+0/603140160e-2 v1 sin(x<sub>3</sub>)  
v3 cos(x<sub>2</sub>)-0/3856045760e-4 sin(x<sub>3</sub>) v3 v1+0/1304220480e-4 sin(x<sub>2</sub>)  
v2 v1-0/6526927864e-4 sin(x<sub>2</sub>) v1 cos(x<sub>2</sub>) v2-0/1664994384e-4  
sin(x<sub>3</sub>) v1 cos(x<sub>3</sub>) v3+6/2440010<sup>-8</sup>cos(x<sub>3</sub>)v3^2-3/5840010<sup>-8</sup> sin(x<sub>2</sub>)  
v2<sup>2</sup>-3/3090 10<sup>-24</sup> sin(x<sub>3</sub>) v3^2+0/8216e<sup>-4</sup>v1 sin(x<sub>2</sub>) v2 cos(x<sub>3</sub>)-  
0/249640e-4 v1sin(x<sub>2</sub>) v2cos(x<sub>2</sub>)+ 0/653536e-4 v1 sin(x<sub>3</sub>)v3  
cos(x<sub>2</sub>x<sub>3</sub>-.5772156649)+0/6535360000e-4 v1 sin(x2) v2 cos(x<sub>3</sub>)-  
0/1005440000e-4 v1 sin(x<sub>2</sub>) v2 cos(x<sub>2</sub>)+0/821600e-4 v1 sin(x<sub>3</sub>) v3  
cos(x<sub>2</sub>)- 0/355200000e-4 sin(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>2</sub>) v2^2 cos(x<sub>1</sub>+1.) +0/3552  
e-4 sin(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>3</sub>) v3<sup>2</sup> cos(x<sub>1</sub>+1.)+0/3552e-4 cos(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>2</sub>)  
v2<sup>2</sup>sin(x<sub>1</sub>+1.)- 0/355200000e-4 cos(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>3</sub>) v3<sup>2</sup> sin(x<sub>1</sub>+1.) -  
0/1200e-4 cos(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>2</sub>) v2<sup>2</sup>sin(x<sub>1</sub>)+0/12e-4 sin(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>2</sub>)  
v2<sup>2</sup>cos(x<sub>1</sub>)+9/60800 10<sup>-8</sup> v3 v1+ 1/509010<sup>-8</sup>cos(x<sub>2</sub>) v3<sup>2</sup>+0/2400e-4  
sin(x<sub>1</sub>) v1 sin(x<sub>2</sub>)v2 sin(x<sub>1</sub>)-0/780e-4 cos(x<sub>1</sub>) cos(x<sub>2</sub>) v2<sup>2</sup>sin(x<sub>1</sub>+



$\cos(x_3) 0/780e-4$

$\cos(x_1) \cos(x_3) v_3^2 \sin(x_1) \cos(x_2) + 0/780 \sin(x_1) \cos(x_3) v_3^2 \cos(x_1) \cos(x_2)$

$v_{12} = 5/027200000 \cdot 10^{-7} \sin(x_2 - .5772156649) v_1^2 \cos(x_2 - .5772156649) -$   
 $5/027200000 \cdot 10^{-7} \sin(x_2 - .5772156649) v_1^2 - 0/2106330000e-5 v_1^2 -$   
 $0/410e-4 v_1^2 \cos(x_3) \sin(x_2) - 0/4108e-4 \cos(x_3) v_3^2 \sin(x_2)$   
 $+ 0/12482 e-4 v_1^2 \cos(x_2) \sin(x_2) - 0/3267680e-4 \sin(x_2 - .5772156649)$   
 $v_1^2 \cos(x_3) - 0/3267680000 e-4 \sin(x_2 - .5772156649) \cos(x_3)$   
 $v_3^2 + 0/42126600 \cos(x_2) v_1^2 + 0/309370080 \cos(x_2) \sin(x_3) v_3^2 -$   
 $0/6521102400 v_3^2 \sin(x_2) - 0/1200 e-4 \cos(x_1) v_1^2 \cos(x_1) \sin(x_2) -$   
 $0/1204 \sin(x_1) v_1^2 \sin(x_1) \sin(x_2) + 0/35520 e-4 \cos(x_1 + 1.) v_1^2 \cos(x_1)$   
 $\sin(x_2) + 0/355200 e-4 \sin(x_1 + 1.) v_1^2 \sin(x_1) \sin(x_2) + 0/237 e-4$   
 $\sin(x_1) v_1^2 \cos(x_2) \sin(x_1) \sin(x_2) + 0/237 e-4 \sin(x_1) \cos(x_2 -)$   
 $v_2^2 \sin(x_1) \sin(x_2) + 0/23700e-4 \sin(x_1) v_1^2 \cos(x_2) \sin(x_1) \sin(x_2) + 0/2370$   
 $e-4 \sin(x_1) \cos(x_2) v_2^2 \sin(x_1) \sin(x_2) - 0/78000e-4 \cos(x_1) v_3^2 \cos(x_3)$   
 $\cos(x_1) \sin(x_2) - 0/780 e-4 \cos(x_1) \cos(x_3) v_3^2 \cos(x_1)$   
 $\sin(x_2) + 0/2370 \cos(x_1) v_1^2 \cos(x_2 - 0/4000) \cos(x_1)$   
 $\sin(x_2) + 0/2370000000e-2 \cos(x_1 + . / 6000) \cos(x_2 - 0/400000) v_2^2 \cos(x_1)$   
 $\sin(x_2) + 0/2370000e-4 \cos(x_1) v_1^2 \cos(x_2) \cos(x_1 + . / 60000) \sin(x_2 -$   
 $. / 4000) + 0/200e-4 \cos(x_1) \cos(x_2) v_2^2 \cos(x_1 + . / 600000) \sin(x_2 -$   
 $. / 4000) - 0/78000e-4 \sin(x_1 + . / 60000) v_1^2 \cos(x_3) \sin(x_1) \sin(x_2) -$   
 $0/780000000e-4 \sin(x_1) \cos(x_3) v_3^2 \sin(x_1) \sin(x_2) - 0/301570080e-4 v_1^2$   
 $\cos(x_3) \sin(x_2) - 0/3015700800e-4 \sin(x_2) \cos(x_3) v_3^2 + 0/3267680000e-4$   
 $\cos(x_2 - .5772156649) \sin(x_3) v_3^2 + 0/4108000e-4 \sin(x_3) v_3^2 \cos(x_2 -$   
 $. / 4000) - 0/2370e-4 \sin(x_2 - . / 40000) v_2^2 \cos(x_2) - 0/2370000e-4 \sin(x_2)$   
 $v_2^2 \cos(x_2 - . / 4000) + 0/1560 e-4 \sin(x_1) v_1 \sin(x_3) v_3 \cos(x_1)$   
 $\sin(x_2) - 0/15600e-3 \cos(x_1) v_1 \sin(x_3) v_3 \sin(x_1) \sin(x_2) -$   
 $0/7792336000 e-4 g \cos(x_2) - 0/63200e-4 v_1^2 \sin(x_2) - 0/125680000 e-4$

$$g \cos(x_2 - .5772156649) - 0/1580e-4 \quad g \cos(x_2) + 0/3263463932e-2 \quad \sin(x_2) \\ v1^2 \cos(x_2)$$

$$v13 = 2/6470 \quad 10^{-23} \cos(x_3) \quad v3 \quad v1 - 4/8040 \quad 10^{-8} v1^2 - 0/3267680e-4 \\ v1^2 \sin(x_3) \cos(x_2 - 0/5772156649) - 0/32676800e-4 \sin(x_3) \cos(x_2 - \\ 0/5772156649) \quad v2^2 - 0/41080000e-4 \quad v1^2 \sin(x_3) \cos(x_2 - 400000) - 0/410800 \\ e-4 \sin(x_3) \cos(x_2 - 400000) \quad -0/3552000e-4 \sin(x_1) \quad v1^2 \sin(x_3) \\ \sin(x_1 + 1.) - 0/355200000 \quad e-3 \cos(x_1) \quad v1^2 \sin(x_3) \cos(x_1 + 1.) - 0/780000 \\ e-4 \sin(x_1) \sin(x_3) \sin(x_1) \cos(x_2) \quad v2^2 - 0/780 \quad e-4 \cos(x_1) \sin(x_3) \\ \cos(x_1) \cos(x_2) \quad v2^2 - 0/78000e-4 \cos(x_1) \quad v1^2 \sin(x_3) \cos(x_1) \cos(x_2) - \\ 0/7800e-4 \sin(x_1) \quad v1^2 \sin(x_3) \sin(x_1) \cos(x_2) - 0/3015700800e-2 \\ v1^2 \sin(x_3) \cos(x_2) + 0/15600e-3 \cos(x_1) \quad v1 \sin(x_3) \sin(x_1) \sin(x_2) \\ v2 - 0/1560000e-3 \sin(x_1) \quad v1 \sin(x_3) \cos(x_1) \sin(x_2) \quad v2 - \\ 0/301570080e-2 \sin(x_3) \cos(x_2) \quad v2^2 + 0/3093700800e-2 \cos(x_3) \sin(x_2) \\ v2^2 + 0/192802288e-2 \quad v1^2 \sin(x_3) + 0/832497192e-2 \cos(x_3) \\ v1^2 \sin(x_3) + 0/3267680e-5 \cos(x_3) \sin(x_2 - 0/5772156649) \quad v2^2 + 0/41080e- \\ 4 \cos(x_3) \sin(x_2) \quad v2^2 + 0/3062897200e-1g \cos(x_3) + 9/6080 \quad 10^{-8} \cos(x_3)^2 \\ v1^2$$

- [1] Cadoret, G. and Smith, A.M., 1996. Friction, not texture, dictates grip forces used during object manipulation. *Journal of Neurophysiology*, 75(5), pp.1963-1969.
- [2] Schilling, Robert J. "Fundamentals of Robotics." (1990).
- [3] Iqbal, J., Khan, Z.H. and Khalid, A., 2017. Prospects of robotics in food industry. *Food Science and Technology*, 37(2), pp.159-165.
- [4] Klamroth-Marganska, V., Blanco, J., Campen, K., Curt, A., Dietz, V., Ettl, T., Felder, M., Fellinghauer, B., Guidali, M., Kollmar, A. and Luft, A., 2014. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial. *The Lancet Neurology*, 13(2), pp.159-166.
- [5] Merlet, J. P. (2001, October). Micro parallel robot MIPS for medical applications. In *ETFA 2001. 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings (Cat. No. 01TH8597) (Vol. 2, pp. 611-619)*. IEEE.
- [6] Chablat, D. and Wenger, P., 2003. Architecture optimization of a 3-DOF translational parallel mechanism for machining applications, the Orthoglide. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(3), pp.403-410.
- [7] Pardeshi, S. M., & Doss, A. S. A. (2017, June). Kinematic and Velocity Analysis of 3-DOF Parallel Kinematic Machine for Drilling Operation. In *Proceedings of the Advances in Robotics (p. 18)*. ACM.

- [8] Pandilov, Z. and Dukovski, V., 2014. COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS BETWEEN SERIAL AND PARALLEL ROBOTS. *Acta Technica Corvininensis-Bulletin of Engineering*, 7(1).
- [9] Xie, F. and Liu, X.J., 2015. Design and development of a high-speed and high-rotation robot with four identical arms and a single platform. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(4), p.041015.
- .
- [10] Aracil, R., Saltarén, R. and Reinoso, O., 2003. Parallel robots for autonomous climbing along tubular structures. *Robotics and Autonomous Systems*, 42(2), pp.125-134.
- [11] Aburaia, M., Markl, E. and Stuja, K., 2015. New concept for design and control of 4 axis robot using the additive manufacturing technology. *Procedia Engineering*, 100, pp.1364-1369.
- [12] Zhang, B., Yang, X., Zhao, D., Spurgeon, S.K. and Yan, X., 2017. Sliding Mode Control for Nonlinear Manipulator Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), pp.5127-5132.
- [13] Loukianov, A. G., Dominguez, J. R., & Castillo-Toledo, B. (2018). Robust sliding mode regulation of nonlinear systems. *Automatica*, 89, 241-246.
- [14] Mansouri, M., Teshnehlab, M. and Shoorehdeli, M.A., 2016. Indirect adaptive hierarchical fuzzy sliding mode controller for a class of nonlinear systems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30(3), pp.1377-1391.
- [15] Wai, R. J., & Muthusamy, R. (2013, June). Fuzzy-neural-network control for robot manipulator via sliding-mode design. In *2013 9th Asian Control Conference (ASCC)* (pp. 1-6). IEEE.

- [16] Soltanpour, M.R., Khooban, M.H. and Soltani, M., 2014. Robust fuzzy sliding mode control for tracking the robot manipulator in joint space and in presence of uncertainties. *Robotica*, 32(3), pp.433-446.
- [17] Jasim, I.F., Plapper, P.W. and Voos, H., 2015. Adaptive sliding mode fuzzy control for unknown robots with arbitrarily-switched constraints. *Mechatronics*, 30, pp.174-186.
- [18] Rahmani, M., Ghanbari, A. and Etefagh, M.M., 2016. Hybrid neural network fraction integral terminal sliding mode control of an Inchworm robot manipulator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80, pp.117-136.
- [19] Kamali, M., Farhadi, M. and Askari, J., 2017. Fractional order sliding mode controller design for quadrotor system. *Modares Mechanical Engineering*, 17(5), pp.287-294.
- [20] Jia, Q., Xing, X., & Li, G. (2007, August). Formation path tracking controller of multiple robot system by high order sliding mode. In *2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics* (pp. 923-927). IEEE.
- [21] Abdelhedi, F., Bouteraa, Y. and Derbel, N., 2016. Second order sliding mode based synchronization control for cooperative robot manipulators. In *Advances and Applications in Nonlinear Control Systems* (pp. 669-683). Springer, Cham.
- [22] Martins, N.A., De Pieri, E.R. and Moreno, U.F., 2014. PD-super-twisting second order sliding mode tracking control for a nonholonomic wheeled mobile robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), pp.3827-3832.
- [23] Hamerlain, F., Achour, K., Floquet, T., & Perruquetti, W. (2005, December). Higher order sliding mode control of wheeled mobile robots in the presence of sliding effects. In *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 1959-1963). IEEE.

- [24] Chowdhury, A.R., Soh, G.S., Foong, S.H. and Wood, K.L., 2017. Experiments in Second Order Sliding Mode Control of a CPG Based Spherical Robot. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), pp.2365-2372.
- [25] Rengifo, C., Plestan, F. and Aoustin, Y., 2008. Absolute orientation angle estimation of a quadruped robot using non linear observers. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), pp.10439-10444.
- [26] Lebastard, V., Aoustin, Y. and Plestan, F., 2006. Observer-based control of a walking biped robot without orientation measurement. *Robotica*, 24(3), pp.385-400.
- [27] Lebastard, V., Aoustin, Y., Plestan, F. and Fridman, L., 2006, June. Absolute orientation estimation based on high order sliding mode observer for a five link walking biped robot. In *International Workshop on Variable Structure Systems, 2006. VSS'06.* (pp. 373-378). IEEE.
- [28] Van, M., & Kang, H. J. (2013, July). Fault tolerant control for robot manipulators using neural network and second-order sliding mode observer. In *International Conference on Intelligent Computing* (pp. 526-535). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [29] Van, M. and Kang, H.J., 2015. Robust fault-tolerant control for uncertain robot manipulators based on adaptive quasi-continuous high-order sliding mode and neural network. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 229(8), pp.1425-1446.
- [30] Van, M., Franciosa, P., & Ceglarek, D. (2016). Fault diagnosis and fault-tolerant control of uncertain robot manipulators using high-order sliding mode. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016.
- [31] Kali, Y., Saad, M., Benjelloun, K. and Fatemi, A., 2017. Discrete-time second order sliding mode with time delay control for uncertain robot manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, 94, pp.53-60.

- [32] Mondal, S. and Mahanta, C., 2014. Adaptive second order terminal sliding mode controller for robotic manipulators. *Journal of the Franklin Institute*, 351(4), pp.2356-2377.
- [33] Zare, K. and Koofigar, H.R., 2016. Adaptive Second Order Sliding Mode Controller for Two-input Two output Uncertain Nonlinear Systems and Application to a 2-DOF Helicopter Model. *Modares Mechanical Engineering*, 15(12), pp.189-199.
- [34] Zhao, Y., Huang, P. and Zhang, F., 2018. Dynamic modeling and super-twisting sliding mode control for tethered space robot. *Acta Astronautica*, 143, pp.310-321.
- [35] Capisani, L.M., Ferrara, A. and Magnani, L., 2009. Design and experimental validation of a second-order sliding-mode motion controller for robot manipulators. *International Journal of Control*, 82(2), pp.365-377.
- [36] Capisani, L. M., Ferrara, A., & Pisano, A. (2011). Second-order sliding mode control with adaptive control authority for the tracking control of robotic manipulators. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 10319-10324.
- [37] Zhang, Y., Li, R., Xue, T., Liu, Z., & Yao, Z. (2016). An analysis of the stability and chattering reduction of high-order sliding mode tracking control for a hypersonic vehicle. *Information Sciences*, 348, 25-48.
- [38] Arisoy, A., Bayrakceken, M. K., Basturk, S., Gokasan, M., & Bogosyan, O. S. (2011, June). High order sliding mode control of a space robot manipulator. In *Proceedings of 5th international conference on recent advances in space technologies-RAST2011* (pp. 833-838). IEEE.
- [39] Ramírez, H.S., Aguilar-Orduna, M.A. and Zurita-Bustamante, E.W., 2017. Sliding mode tracking controller for a non-linear single link-DC motor system: An input output approach. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), pp.11619-11624.

[40] Spong, M. W., & Vidyasagar, M. (2008). *Robot dynamics and control*. John Wiley & Sons.

[41] Derafa, L., Benallegue, A. and Fridman, L., 2012. Super twisting control algorithm for the attitude tracking of a four rotors UAV. *Journal of the Franklin Institute*, 349(2), pp.685-699.

[42] Ning, F., Yun, C. and Chen, X., 2008, October. Dynamic Analysis and Control of the MJR Robot Palletizer. In *International Conference on Intelligent Robotics and Applications* (pp. 713-722). Springer, Berlin, Heidelberg.

[43] احمدی، حبیب، اسماعیلی، هانیه، & فاتح. (۲۰۱۵). جبران سازی لغزش رخ داده در گرفتن اجسام توسط پنجه ربات. *مهندسی مکانیک مدرس*, ۱۵(۱)، ۱۵۱-۱۶۲.

[44] Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control* (Vol. 199, No. 1). Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall.

[45] Zare, K., & Koofgar, H. R. (2016). Adaptive Second Order Sliding Mode Controller for Two-input Two output Uncertain Nonlinear Systems and Application to a 2-DOF Helicopter Model. *Modares Mechanical Engineering*, 15(12), 189-199.

[46] فاضلی اصل، سید باقر، موسی پور، & سید سجاد. (۲۰۱۷). کنترل مد لغزشی ترمینال سریع بازگشت به عقب مرتبه کسری برای ژيروسکوپ سه محوره میکروالکترومکانیکی. *مهندسی مکانیک مدرس*, ۱۷(۵)، ۳۸۵-۳۹۳.

[47] Jafari Chogan, G., Ghasemi, M. H., & Dardel, M. (2015). Jacobian analysis, dynamic modeling and adaptive control of a cable robot with six degrees of freedom and six cable. *Modares Mechanical Engineering*, 15(4), 391-400.

[48] "طراحی سیستم هدایت مقاوم با استفاده از الگوریتم مد لغزشی مرتبه بالا برای تولید دستور شتاب هموار و مقابله با اهداف مانوردار" وحید بهنامگل، احمدرضا ولی، علی محمدی. *مجله کنترل، انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران - قطب علمی کنترل صنعتی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی*



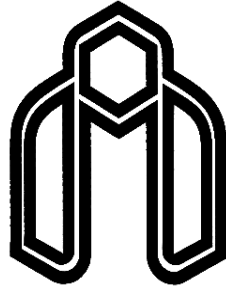
- [49] Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., & Levant, A. (2014). *Sliding mode control and observation* (pp. 163-166). New York: Springer New York.
- [50] Derafa, L., Benallegue, A., & Fridman, L. (2012). Super twisting control algorithm for the attitude tracking of a four rotors UAV. *Journal of the Franklin Institute*, 349(2), 685-699.

**Abstract:**

The aim of this paper is to develop an appropriate controller for a palletizer robot (ARM-ROBO V01) in the presence of the system's external disturbances and internal uncertainties. Equations of motion were derived utilizing the Lagrange method. To this end, to implement the desired control strategies on the palletizer robot with 3 degree of freedom and 9 links, Maple 18 was employed to establish robot's equations. For the controller to be resistant to system's external disturbances and internal uncertainties, conventional sliding mode controller and high-order super-twisting sliding mode controller were applied. The performance of the controller was simulated using MATLAB-Simulink software. Results show the good performance in presence of uncertainties. Equations of motion were derived utilizing the Lagrange method. To this end, to implement Results show the good performance in presence of uncertainties.

**Keywords:**

Palletizer robot, robot dynamic Equations, sliding mode control, external disturbances, super twisting sliding mode control.



**Shahrood University of Technology  
Engineering Department**

**Improving the Position Control Function of a Palletizer Robot Using  
High-Sliding Mode Control Technique**

**By:  
Fariba Ghorbanian**

**Supervisor(s):  
Dr. Habib Ahmadi,  
Dr. Amir Jalali**

**September 2019**