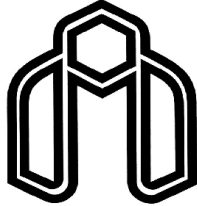


اللهم اغفر لي



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در مهندسی مکاترونیک

جبران سازی لغزش رخ داده در گرفتن اجسام توسط پنجه‌ی ربات

دانشجو:

هانیه اسماعیلی

استاد راهنما:

دکتر حبیب احمدی

استاد مشاور:

دکتر محمدمهدی فاتح

شهریور ۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود


دانشکده : مکانیک

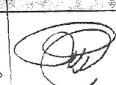

گروه : مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم هانیه اسماعیلی.....
تحت عنوان: جبران سازی لغزش رخ داده در گرفتن اجسام توسط پنجه ربات

مورد ارزیابی و با

در تاریخ ۱۳۹۳/۰۶/۰۵ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
درجه ۱۴ مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : دکتر محمد مهدی فاتح		نام و نام خانوادگی : دکتر حبیب احمدی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر امیر جلالی		نام و نام خانوادگی : دکتر مهدی بامداد
			نام و نام خانوادگی : دکتر علیرضا الهی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم،

دو برادر عزیزم.

تقدیر و تشکر

خالق زیبایی‌ها انسان را شاکر آفرید. نه از روی نیاز بلکه از روی زیباپندیش
زیرا که بنده سگرگزار، چهره زیبا و وصف ناکفتی دارد.

باعرض سپاس و تشکر از اساتید گران قدرم که آموختند و چه زیبا بنده نوازیم کردند.

ارادت و تشکر مخصوص خود را تقدیم می‌نمایم به آنانکه نه تنها دستم گرفتند که بر زمین نمانم بلکه استادان تا اوج گرفتارم را
نظاره کنند استادان گران قدر دکتر حمید احمدی و دکتر محمد مهدی فاتح

از درگاه خداوند متعال توفیقات روز افزون برای این عزیزان را مسئلت دارم.

بانیه اسماعیلی

تعهد نامه

این‌جانب هانیه اسماعیلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکترونیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با عنوان «جبران سازی لغزش رخ داده در گرفتن اجسام توسط پنجه‌ی ربات»، تحت راهنمایی دکتر حبیب احمدی و مشاوره دکتر محمد مهدی فاتح، 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 بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (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

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها 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

عمل گرفتن در پنجه ربات هم در دست‌های مصنوعی و هم در ربات‌های صنعتی انجام می‌شود که در تمام آن‌ها مسئله لغزش به‌عنوان یک پدیده نامطلوب در نظر گرفته می‌شود. در این پایان‌نامه به‌منظور کنترل لغزش و تضمین رفتار حلقه بسته‌ی مطلوب، از کنترل گشتاور محاسبه‌شده استفاده شده است. با این وجود، مانورهای مختلف برای ردیابی مسیر در فضای کار توسط ربات، باعث ایجاد شتاب بر روی جسم گرفته‌شده خواهد شد و این تغییرات شتاب باعث لغزش جسم می‌گردد. لذا اعمال کنترل‌کننده به ربات جهت ردیابی مسیر مطلوب، بر روی موقعیت جسم نسبت به پنجه اثر می‌گذارد. هرچند کنترل‌کننده گشتاور محاسبه‌شده برای تعقیب مسیر مطلوب بسیار خوب عمل می‌نماید، اما با توجه به لغزشی که در حین عملیات گرفتن رخ می‌دهد، این مسیر مطلوب در راستای لغزش دچار تغییر می‌شود. لذا در این پایان‌نامه با ارائه تمهیدی برای اصلاح مسیر مطلوب در حین عمل گرفتن نه‌تنها کنترل لغزش صورت می‌پذیرد بلکه جبران مقدار لغزش رخ داده نیز انجام می‌شود تا بدین ترتیب جسم در موقعیت مناسب خود قرار داده شود. در این تحقیق جبران سازی لغزش رخ داده به‌صورت برخط توسط پنجه ربات ارائه شده است. با این رویکرد بهبود قابلیت پنجه ربات در جابه‌جایی ایمن اجسام در فضای کار و با توجه به موقعیت جسم نسبت به انگشتان ربات تضمین می‌شود. در انتها به دلیل عدم نیاز راهبرد کنترل ولتاژ به مدل پیچیده ربات، نشان داده می‌شود که کنترل‌کننده لغزش بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ نسبت به کنترل‌کننده لغزش بر مبنای گشتاور محاسبه‌شده ترجیح داده می‌شود؛ اما در هر دو روش، جبران لغزش به‌خوبی پاسخ می‌دهد.

کلمات کلیدی: کنترل لغزش، جبران لغزش، عمل گرفتن، جسم، پنجه ربات

فهرست مطالب

۱	مقدمه.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۴	۲-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده.....
۴	۱-۲-۱ پنجه ربات و انواع مختلف آن.....
۸	۳-۱ انتخاب پنجه مناسب.....
۸	۴-۱ شناسایی و ثبت لغزش.....
۹	۱-۴-۱ ثبت لغزش با روش مستقیم.....
۱۱	۲-۴-۱ ثبت لغزش به روش غیرمستقیم.....
۱۳	۵-۱ روش‌های مختلف جلوگیری و کنترل لغزش.....
۱۹	۶-۱ جبران لغزش.....
۲۱	۷-۱ اهمیت و تفاوت موضوع تحقیق با کارهای قبلی و اهداف آن.....
۲۱	۸-۱ ساختار پایان‌نامه.....
۲۳	۲ مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا.....
۲۴	۱-۲ مقدمه.....
۲۴	۲-۲ معادلات سینماتیکی ربات.....
۲۷	۱-۲-۲ ژاکوبین بازوی ماهر ربات.....
۲۸	۲-۲-۲ سرعت زاویه‌ای.....
۲۹	۳-۲-۲ سرعت خطی.....

۳۱	.....۳-۲ معادلات دینامیکی ربات.
۳۲	.....۱-۳-۲ انرژی پتانسیل
۳۲	.....۲-۳-۲ انرژی جنبشی
۳۵	.....۳-۳-۲ معادلات حرکت
۳۶	.....۴-۲ سینماتیک و دینامیک ربات.
۳۶	.....۱-۴-۲ طرح ربات.
۳۷	.....۲-۴-۲ سینماتیک ربات.
۳۹	.....۳-۴-۲ مدل سازی دینامیکی.
۴۱	.....۳ کنترل لغزش پنجه ربات
۴۲	.....۱-۳ مقدمه
۴۲	.....۲-۳ مدل سازی ساده اصطکاک.
۴۴	.....۳-۳ مدل سازی کامل اصطکاک.
۴۵	.....۱-۳-۳ فاز عدم لغزش.
۴۶	.....۲-۳-۳ فاز آستانه لغزش.
۴۶	.....۳-۳-۳ فاز لغزش.
۴۷	.....۴-۳-۳ فاز رهایی جسم.
۴۸	.....۴-۳ شبیه سازی.
۴۸	.....۱-۴-۳ بررسی اثر به کارگیری مدل کامل دینامیکی بر روی پنجه.
۵۳	.....۴ کنترل به منظور مهار و جبران لغزش به طور همزمان.

۵۴	۱-۴ مقدمه.....
۵۵	۲-۴ دینامیک جسم.....
۵۷	۳-۴ مدل سازی دینامیکی لغزش.....
۵۸	۱-۳-۴ لغزش در نقاط تماس.....
۵۹	۲-۳-۴ عدم لغزش.....
۵۹	۳-۳-۴ آستانه لغزش.....
۶۰	۴-۴ کنترل برای مهار لغزش.....
۶۰	۱-۴-۴ کنترل گشتاور محاسبه شده.....
۶۳	۲-۴-۴ کنترل لغزش بر اساس روش کنترلی CTC.....
۶۴	۳-۴-۴ مسیر مطلوب حرکت ریات.....
۶۷	۴-۴-۴ تعیین مسیر مطلوب برای حرکت انگشتان.....
۶۹	۵-۴ کنترل به منظور مهار و جبران لغزش به طور همزمان.....
۶۹	۱-۵-۴ مقدار لغزش.....
۷۰	۲-۵-۴ جبران لغزش.....
۷۰	۶-۴ شبیه سازی.....
۷۱	۱-۶-۴ نتایج شبیه سازی با اعمال کنترل کننده برای مهار لغزش.....
۷۷	۲-۶-۴ نتایج شبیه سازی با اعمال کنترل کننده برای جبران لغزش.....
۷۹	۵ کنترل لغزش با راهبرد کنترل ولتاژ.....
۸۰	۱-۵ مقدمه.....

- ۲-۵ سیستم کنترلی..... ۸۱
- ۱-۲-۵ خطی سازی باز خوردی..... ۸۲
- ۳-۵ شبیه سازی..... ۸۶
- ۱-۳-۵ کنترل لغزش پنجه با راهبرد ولتاژ..... ۸۶
- ۴-۵ کنترل ولتاژ ربات اسکارا..... ۹۰
- ۱-۴-۵ نتایج شبیه سازی با اعمال کنترل کننده برای جبران لغزش..... ۹۶
- ۶ نتیجه گیری و پیشنهادها..... ۹۹
- ۱-۶ نتیجه گیری..... ۱۰۰
- ۲-۶ پیشنهادها..... ۱۰۲

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) پنجه فک موازی ۵
- شکل (۲-۱) پنجه با فکهای چرخشی ۵
- شکل (۳-۱) پنجه با بازوهای چهارمیله‌ای ۶
- شکل (۴-۱) پنجه به سبک سازوکار مرغکی ۶
- شکل (۵-۱) ساختار مشابه‌سازی شده دست مصنوعی انسان ۷
- شکل (۶-۱) پنجه چند-ابزاره ۷
- شکل (۱-۲) طرح ربات در محیط SolidWorks ۳۷
- شکل (۲-۲) تخصیص دستگاههای مختصات با توجه به روش دناویت- هارتنبرگ ۳۸
- شکل (۱-۳) سیستم مورد مطالعه؛ (الف) دیاگرام آزاد جسم، (ب) شماتیک انگشت ۴۳
- شکل (۲-۳) الف- موقعیت انگشت و موقعیت مطلوب آن، ب- خطای ردگیری ۵۰
- شکل (۳-۳) الف- سرعت جسم و سرعت پنجه، ب- موقعیت جسم نسبت به مرکز جرم پنجه ۵۱
- شکل (۱-۴) دیاگرام آزاد جسم در دو صفحه X_4-Z_4 و Y_4-Z_4 ۵۶
- شکل (۲-۴) بلوک- دیاگرام CTC برای بازوی ماهر ۶۲
- شکل (۳-۴) موقعیت مطلوب رابط ۳ ۶۶
- شکل (۴-۴) سرعت مطلوب رابط ۳ ۶۶
- شکل (۵-۴) شتاب مطلوب رابط ۳ ۶۶
- شکل (۶-۴) شتاب رابط‌های ربات اسکارا ۶۷
- شکل (۷-۴) بلوک- دیاگرام کنترلی در جهت مهار لغزش ۶۹
- شکل (۸-۴) موقعیت مطلوب انگشت ۷۱
- شکل (۹-۴) خطای موقعیت مفاصل ربات ۷۲
- شکل (۱۰-۴) مقدار نیروی نرمال عمودی ۷۴

- شکل (۱۱-۴) اختلاف موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4 ۷۵
- شکل (۱۲-۴) موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4 ۷۵
- شکل (۱۳-۴) اختلاف سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4 ۷۶
- شکل (۱۴-۴) سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4 ۷۶
- شکل (۱۵-۴) لغزش جسم نسبت به دستگاه پنجه ربات در راستای X_4 ۷۶
- شکل (۱۶-۴) لغزش جسم نسبت به دستگاه پنجه ربات در راستای Y_4 ۷۷
- شکل (۱۷-۴) موقعیت جسم و پنجه نسبت به ربات با اعمال جبران ساز برخط ۷۸
- شکل (۱۸-۴) میزان جبران مقدار لغزش با اعمال جبران ساز برخط ۷۸
- شکل (۱-۵) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور ربات ۸۳
- شکل (۲-۵) دیاگرام موتور مغناطیس دائم ۸۴
- شکل (۳-۵) سیستم کنترل موتور ۸۴
- شکل (۴-۵) سیستم کنترل ربات ۸۵
- شکل (۵-۵) موقعیت انگشت ۸۸
- شکل (۶-۵) خطای موقعیت انگشت ۸۸
- شکل (۷-۵) مقایسه سرعت جسم و سرعت پنجه ۸۹
- شکل (۸-۵) لغزش جسم در راستای قائم ۸۹
- شکل (۹-۵) موقعیت مطلوب انگشت ۹۰
- شکل (۱۰-۵) خطای موقعیت مفاصل ربات ۹۱
- شکل (۱۱-۵) اختلاف موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4 ۹۳
- شکل (۱۲-۵) موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4 ۹۳
- شکل (۱۳-۵) اختلاف سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4 ۹۳
- شکل (۱۴-۵) سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4 ۹۴

- شکل (۵-۱۵) لغزش جسم در راستای X_4 ۹۴
- شکل (۵-۱۶) لغزش جسم در راستای Y_4 ۹۴
- شکل (۵-۱۷) ولتاژ مفاصل ربات با اعمال راهبرد ولتاژ ۹۵
- شکل (۵-۱۸) موقعیت جسم و پنجه بعد از اعمال جبران سازی ۹۷
- شکل (۵-۱۹) لغزش محاسبه شده بعد از جبران سازی ۹۷

فهرست جداول

- جدول (۲-۱) مقداردهی پارامترهای دناویت- هارتنبرگ ۳۸
- جدول (۲-۲) مشخصات ربات اسکارای طراحی شده ۳۹
- جدول (۲-۳) مقادیر ممان اینرسی رابطهای ربات ۳۹
- جدول (۴-۱) زمانهای به کاررفته برای مسیرهای مطلوب ربات ۶۵
- جدول (۴-۲) مشخصات ربات اسکارای طراحی شده ۷۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

علم رباتیک از تخیلات بشری آغاز شد و تا امروز شاخه‌های مختلف علمی و فن‌آوری به‌ویژه رشته‌های مهندسی برق، مکاترونیک، سایبرنتیک^۱، 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 به‌صورت ماشین‌آلات خودکار متحرک به حقیقت پیوسته است.

یک از شاخه‌های مهم در علم رباتیک، مبحث کنترل ربات است. این مبحث، مطالعات پیرامون وادار ساختن ربات به انجام کارهای مطلوب و به‌صورت خودکار را شامل می‌شود که در طراحی کنترل‌کننده ربات در نظر گرفته می‌شود و معمولاً به‌صورت معادلات و الگوریتم‌های کامپیوتری به ربات داده می‌شود. ربات‌های صنعتی نیز در نتیجه ادغام همین ماشین‌های کنترل عددی و فن‌آوری دور عملگرها و تکامل و پیشرفت آن‌ها به وجود آمدند. امروزه طیف گسترده‌ای از کارهای خطوط تولید و بخش‌های مختلف صنعتی توسط بازوی ماهر^۲ ربات‌ها انجام می‌شود و شاید بارزترین مثال آن در صنعت خودروسازی باشد. گستردگی کاربرد ربات‌ها در سال‌های اخیر موجب گشته تا موضوعات متنوع علمی در این زمینه مورد توجه محققان قرار گیرد. افزایش رقابت بین ربات‌های صنعتی برای انجام کارهایی که به‌سادگی با دست انسان انجام می‌شود نیاز روزافزون به تجهیزات کنترل دستی و به‌ویژه گرفتن را ایجاد کرده است. پنجه یکی از قسمت‌های مهم در یک ربات است که اغلب در محیط‌های صنعتی برای گرفتن اجسام در حین فرآیندهای دستی استفاده می‌شود و یا به‌صورت عضوی در توان‌بخشی به‌صورت دست‌های مکانیکی به انسان‌های ناتوان یاری می‌رساند. پنجه‌ها مانند لینک‌های فعال بین تجهیزات بازوی ربات و قطعه کار هستند و ساختارشان به کاربرد آن‌ها بستگی دارد. اگرچه ربات‌ها به‌سادگی جایگزینی برای انسان نمی‌شوند اما بیشتر کاربرد خود را در کارهای فراتر از توانایی انسان نشان می‌دهند. استفاده از دست‌های

^۱ Cybernetics

^۲ Robot manipulator

مصنوعی مکانیکی درزمینه‌ی توان بخشی برای کمک به ناتوانان جسمی از جمله این توانایی‌هاست، اگرچه کاربرد این دست‌ها برای کاربران آن مشکلات زیادی را نیز به همراه داشته است (Childress 1973). تاکنون پیشرفت‌های انجام‌شده درزمینه‌ی ریز الکترونیک و دستگاه‌های مکانیکی، متدهای کنترلی مختلفی را برای دست‌های مصنوعی پیشنهاد کرده است (Engeberg, Meek et al. 2008).

عمل گرفتن^۳ توسط ربات عبارت است از مهار یک جسم توسط دست ربات به نحوی که امکان جابجا کردن آن در یک مسیر مطلوب وجود داشته باشد. گرفتن جسم توسط پنجه ربات یکی از این موضوعاتی است که در کاربردهای گوناگون از جمله حمل جسم ظریف، گرفتن جسم بی‌قاعده یا نامنظم و سرهم‌بندی قطعات استفاده می‌شود. در این تحقیق به دلیل کاربرد فراوان عمل گرفتن توسط پنجه، از آن به‌عنوان پدیده‌ی گرفتن یاد می‌شود. از جمله مشکلاتی که برای ناتوانان جسمی به هنگام استفاده از دست‌های مصنوعی مکانیکی و یا برای ربات‌های صنعتی به هنگام گرفتن قطعات صنعتی رخ می‌دهد، این است که اجسام گرفته‌شده آزادانه می‌لغزند، می‌افتند و می‌شکنند. لغزش^۴ در هنگام گرفتن بر اثر دلایل مختلفی همچون تغییرات در هندسه جسم، جرم، اینرسی و ضریب اصطکاک و یا ناشناخته بودن جسم به وجود می‌آید.

افراد سالم در تشخیص زمان لغزش و آستانه لغزش جسم گرفته‌شده مهارت ویژه‌ای دارند. همچنین ایشان در تعیین نیروی اصطکاک موجود بین اتصال دست و جسم به سرعت عمل می‌کنند؛ زیرا انسان تمایل به تعدیل نیروی بکار رفته بر اساس اصطکاک، به‌جای مدنظر قرار دادن بافت جسم را دارد (Cadoret and Smith 1996). علاوه بر این در این زمینه، انسان از یک سیستم حافظه‌دار استفاده می‌کند که در آن نیروی بکار رفته برای نگهداری اشیاء لغزنده بر اساس تجارب قبلی به‌دست‌آمده و تنظیم می‌شود (I, MK et al. 1998).

^۳ Grasping

^۴ Slip

پیچیدگی‌هایی از جمله نحوه گرفتن ماهرانه^۵ جسم توسط دست‌های چند انگشته، گرفتن ایمن اجسام ظریف، افزونگی درجات آزادی، دینامیک دستگاه‌های مقید و ماهیت چند فازی دینامیک ناشی از اصطکاک کولمبی در پنجه‌های صنعتی و نیز در دست‌های مصنوعی باعث شده محققین توجه ویژه‌ای به پدیده گرفتن داشته باشند (Daly 1986).

۲-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده

با توجه به محوریت موضوع لغزش در این تحقیق، در این بخش تحقیقات انجام‌شده قبلی در خصوص لغزیدن جسم گرفته‌شده توسط پنجه مرور می‌شود. این بررسی در قالب پنج محور که در ادامه می‌آید، ارائه گردیده است.

۱-۲-۱ پنجه ربات و انواع مختلف آن

هر سازوکار که می‌تواند اجسام مختلف را گرفته و مهار نماید، پنجه^۶ نام دارد. در واقع یک زیرسیستم از سازوکار برای پدیده گرفتن وجود دارد که تماس موقت با جسم را برقرار می‌کند. برای آنکه عمل گرفتن توسط یک ربات محقق گردد، ربات باید از دستی با هندسه متناسب و حسگرها و عملگرهای مناسب برخوردار باشد. دست یا نقطه نهایی پلی بین بازوی ماهر و محیط است. همچنین این ربات می‌باید توانایی تشخیص جسم و نحوه قرار گرفتن آن را داشته و از الگوریتم‌های مناسب برای نحوه در بر گرفتن جسم و اعمال نیروی مناسب به جسم (به نحوی که با اعمال حداقل نیرو و پرهیز از صدمه به جسم مانع از افتادن نیز گردد) برخوردار باشد.

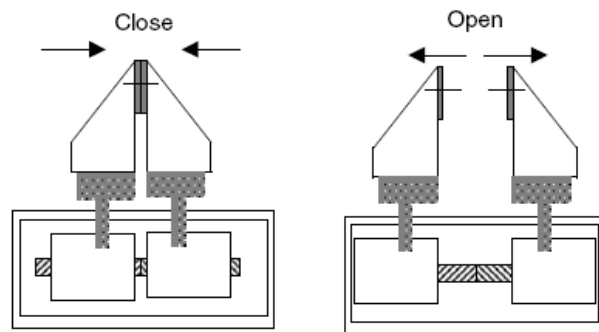
یکی از مسائل مهم در پدیده گرفتن، نحوه انتخاب در روش گرفتن و نوع پنجه است، اما تنوع در طراحی پنجه‌ها بسیار فراوان است و در این بین، مدل‌های پر کاربرد و ساده‌ای از لحاظ سینماتیکی وجود دارد که در ادامه این موارد به‌طور خلاصه تشریح می‌شوند.

^۵ Dexterous

^۶ Gripper

۱-۱-۲-۱ پنجه فک موازی دارای حرکت خطی

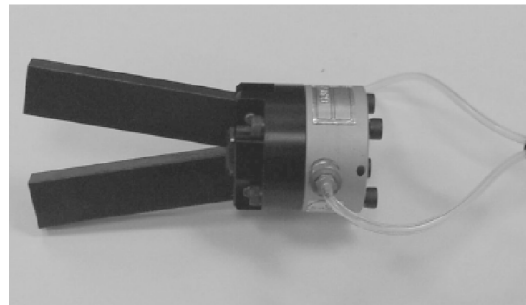
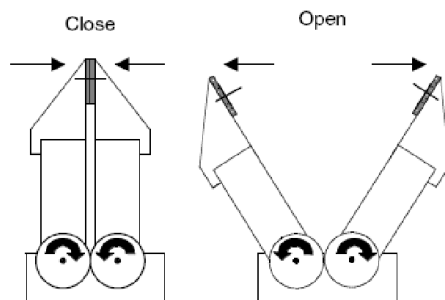
پنجه فک موازی دارای حرکت خطی، معمول‌ترین نوع پنجه است که در آن دو فک موازی به سمت یکدیگر یا در جهت معکوس حرکت می‌نمایند. برای گرفتن یک جسم به صورت متمرکز، این الزام وجود دارد که سازوکار بکار رفته یک حرکت هماهنگ را برای فک‌ها ایجاد نماید. مزیت این پنجه این است که مرکز فک‌ها در راستای عمود بر حرکت، جابجا نمی‌شود. لذا وقتی که پنجه در مرکز جسم قرار گیرد، در فرآیند بسته شدن این مرکزیت حفظ خواهد شد. در شکل (۱-۱) نمونه‌ای از ساختار پنجه فک موازی نشان داده شده است.



شکل (۱-۱) پنجه فک موازی

۲-۱-۲-۱ پنجه چرخشی

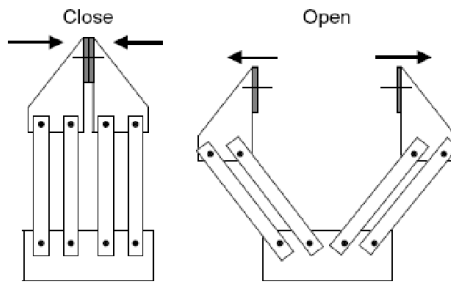
نوع دیگری از پنجه‌ها مطابق شکل (۲-۱-الف) دارای فک‌های چرخشی است. یکی از معایب این نوع پنجه این است که فک‌ها موازی نبوده و مرکز گرفتن در فرآیند بسته شدن تغییر می‌نماید.



شکل (۲-۱) پنجه با فک‌های چرخشی

۳-۱-۲-۱ پنجه چهار میله‌ای

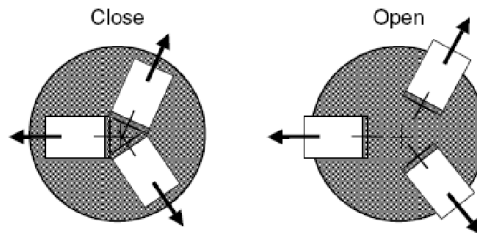
یک پنجه پر کاربرد دیگر مطابق شکل (۳-۱) سازوکار که چهار میله‌ای دارد، بدین معنی که هر فک آن یک چهار میله‌ای بوده و این فک‌ها در فرآیند بسته شدن مقابل یکدیگر و به صورت موازی هم قرار می‌گیرند. به دلیل نوع سازوکار بکار رفته در این نوع پنجه، هر دو فک پنجه از یک منبع توان استفاده می‌نمایند. این نوع ساختار به عنوان مثال در Microbot Alpha II مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۳-۱) پنجه با بازوهای چهار میله‌ای

۴-۱-۲-۱ پنجه به سبک فک-مرغکی

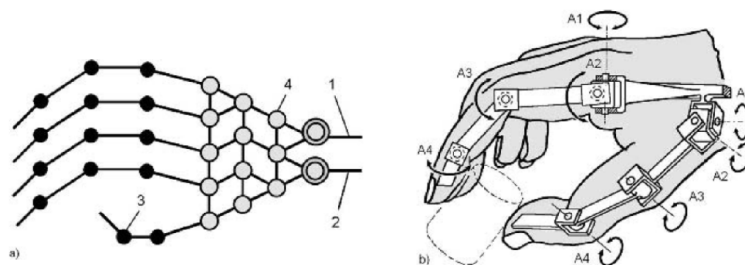
وقتی بخواهیم یک جسم میله‌ای شکل را از یک طرف مهار نماییم، از پنجه‌ای به سبک مرغکی که دارای فک‌های چندگانه (سه یا چهار) است استفاده می‌شود. فک‌های پنجه مانند فک مرغکی (چندگانه) یک ماشین ابزار، مطابق شکل (۴-۱) عمل می‌نماید. اشکال این نوع پنجه‌ها سنگینی و محدودیت‌های عملکردی آن می‌باشد.



شکل (۴-۱) پنجه به سبک سازوکار مرغکی

۵-۱-۲-۱ انگشتان مفصلی

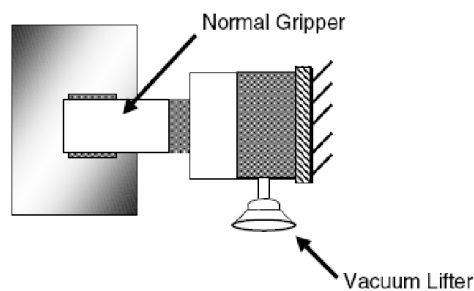
در این پنجه‌ها طراحی نوینی بر مبنای انگشتان مفصلی استفاده شده است. هدف این نوع طراحی‌ها تقلید از گرفتن و جابجایی ماهرانه انسان است. این نوع پنجه‌ها اجازه گرفتن سه‌بعدی را به کاربر یا ربات می‌دهند و یکی از مزایای آن‌ها توانمندی در گرفتن اجسام نامنظم و نامشخص می‌باشد. دست‌های مصنوعی که با الگوبرداری از دست انسان ساخته شده‌اند از این نوع‌اند (شکل (۵-۱)) که برای گرفتن نیازمند بازخورد نیرو و کنترل کامپیوتری پیشرفته است. از نمونه‌های ساخته شده آن که در حوزه تحقیقات دانشگاهی استفاده شده می‌توان به پروژه دست ماهر Utah/MIT اشاره نمود.



شکل (۵-۱) ساختار مشابه‌سازی شده دست مصنوعی انسان

۶-۱-۲-۱ پنجه‌های ترکیبی

در بعضی از کاربردهای صنعتی استفاده بیش از یک نوع پنجه در یک زنجیره مدنظر می‌باشد و یکی از کاربردهای معمول آن در فرایند ساخت فلزات است. به‌عنوان مثال در پنجه شکل (۶-۱) قسمت خلأ پنجه برای برداشتن صفحات فلزی و سپس توسط قسمت دیگر این پنجه که مجهز به پنجه معمولی است فرآیند خمش روی صفحات انجام می‌شود.



شکل (۶-۱) پنجه چند-ابزاره

۳-۱ انتخاب پنجه مناسب

در این تحقیق پنجه ربات فک موازی برای گرفتن اجسام ناشناخته با جرم‌های مختلف، ابعاد و ضریب اصطکاک متفاوت و با در نظر گرفتن سادگی و نوع مأموریت، بکار رفته است. فرآیند گرفتن موردنظر به هنگام بلند کردن اجسام و جابه‌جایی آن‌ها بر اساس لغزش در اثر عوامل مختلفی چون وزن جسم و یا مانور ربات است که استفاده از نیروی ناکافی برای جسم گرفته‌شده، باعث رخداد آن می‌شود و حتی ممکن است منجر به افتادن جسم گردد. در این میان بکار بردن نیروی اضافی به هنگام گرفتن ممکن است باعث صدمه رسیدن به جسم شود.

۴-۱ شناسایی^۷ و ثبت لغزش

در علم رباتیک، شناسایی لغزش در مراحل اولیه اهمیت قابل توجهی برای کنترل گرفتن و کارهای مهارتی^۸ دارد از این‌رو اولین گام در مواجهه با مسئله لغزش شناسایی آن است. برای شناسایی و تشخیص جسم و همچنین قرار گرفتن دست ربات در موقعیت مناسب نسبت به جسم، از روش‌هایی مثل دیداری^۹ و لمسی^{۱۰} که برگرفته از رفتار انسانی است و یا از برنامه‌های از پیش تعیین‌شده (به‌صورت برخط^{۱۱} و برون‌خط^{۱۲}) جهت حرکت دست و انگشتان استفاده می‌شود. در این تحقیق به روش‌های مبتنی بر کاربرد حسگرهای مختلف برای شناسایی و ثبت لغزش روش مستقیم و به روش‌هایی که بر پایه معادلات و روابط بین جسم و ربات حاصل می‌گردد روش غیرمستقیم ثبت لغزش گفته می‌شود.

^۷ Detection

^۸ Manipulation task

^۹ Visual

^{۱۰} Tactile

^{۱۱} On Line

^{۱۲} Off Line

۱-۴-۱ ثبت لغزش با روش مستقیم

همان‌گونه که گفته شد یکی از حوزه‌های تحقیق، به‌کارگیری حسگر بازخوردی و الگوگیری از رفتار انسان در پدیده گرفتن است. در این رابطه هماهنگی بحث حسگر بازخوردی با دینامیک کلی حرکت سیستم (حرکت جسم- انگشتان) برای گرفتن و جابجایی ایمن جسم اهمیت دارد.

حسگرهای لمسی اطلاعات مهمی همچون نیرو، بافت، شکل‌دهی یا درجه حرارت را در کارها فراهم می‌کنند. در حوزه شناسایی لغزش جسم با استفاده از حسگرهای لمسی، مسئله اصلی ارائه حسگری است که بتواند اطلاعاتی مرتبط با نحوه‌ی تماس جسم و پنجه را ایجاد نماید. در این زمینه می‌توان با کمک روش‌های بهینه‌سازی همچون شبکه عصبی و یا تمرکز بر روی نیرو یا موقعیت به هنگام لمس اجسام تا حد ممکن دقت تشخیص لغزش را افزایش داده و عملکرد حسگر را بهبود بخشید.

درزمینه‌ی شناسایی و ثبت لغزش، بعضی از محققین هدف خود را در طراحی حسگری برای شناسایی لغزش قرار داده‌اند. حسگر سرعت دست^{۱۳} اولین حسگرها برای استفاده در دست‌های مکانیکی بودند که باهدف جلوگیری خودکار از لغزش جسم گرفته‌شده طراحی شدند و به‌صورت تجاری درآمدند (Tchamna and Youn 2013).

در تحقیقی دیگر با اعمال شبکه عصبی بر حسگر لمسی، بدون نیاز به دانش اولیه نسبت به ضریب اصطکاک حسگر و جسم گرفته‌شده، لغزش در مراحل اولیه شناسایی می‌شود (Gaetano Canepa, Matteo Campanella et al. 12-16 Sep 1994). از طرفی ای.جی.ام هولوگ و همکارانش (Holweg, Hoeve et al. 1996) لغزش را به چند مرحله تقسیم کردند و با معرفی ترکیبی از حسگر لمسی- ماتریسی لغزش را پس از وقوع شناسایی نمودند. اجزای اصلی این حسگر را یک لاستیک رسانا که مقاومت آن به نیروی بکار رفته در سطح وابسته است تشکیل می‌داد.

^{۱۳} Hand Speed Sensors

در راستای استفاده از حسگرهای لغزش دینو آکوتو و همکارانش در (Dino Accoto, Maria Teresa) (Francomano et al. 2010) از حسگرهای دمایی لغزش استفاده می‌کنند. آن‌ها با استفاده از حسگر دمایی ساخته‌شده در ابعاد میکرو برای شناسایی شارش دما، حرارت همرفتی مرتبط با جابه‌جایی جسم گرفته‌شده را حس می‌کنند و هر افزایش شاری را نشانه لغزش می‌دانند. این روش وابسته به مدل، بیشتر به‌منظور بهینه‌سازی حسگر لغزشی دمایی و برای اعضای مصنوعی رباتیکی استفاده‌شده است.

گلاس‌اس^{۱۴} و اسپراگاتوس (Lee and Howard) در سال ۲۰۰۱، روشی برای کنترل یک پنجه دوانگشتی مطرح نموده‌اند که عمل گرفتن ایمن اجسام ظریف و شکننده شبیه لیوان، میوه یا سبزی‌ها را انجام می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی، حرکت انگشتان را توسط بازخوردهای لمسی طوری تنظیم می‌نماید که جسم با کمترین نیروی موردنیاز گرفته شود. در این الگوریتم کنترل‌کننده طراحی‌شده سرعت و شتاب جسم را از حسگرها دریافت می‌کند و پس از شناسایی هرگونه لغزش حرکت انگشتان را به نحوی تنظیم می‌نماید تا مانع لغزش شود.

رائول فرناندز و همکارانش (Fernandez, Payo et al. January 2014) سعی کردند تا به رفع مشکل پیچیدگی حسگرهای شناسایی لغزش با الگوریتم‌های پیچیده‌ی بکار رفته، بپردازند. آن‌ها برای رفع این مشکل الگوریتم ساده‌ای ابداع کرده‌اند که با استفاده از مشاهده‌ی ارتعاشات ریز^{۱۵} که به‌صورت مقرون‌به‌صرفه‌ای در حسگر نیرو بکار برده می‌شود مقادیر لغزش را شناسایی می‌کنند.

در سال ۲۰۰۸ ادوسوریا و همکارانش (Machado, Portugal et al. 2002) به تجزیه و تحلیل مسئله گرفتن و شناسایی لغزش از دیدگاه نیرو پرداخته‌اند. آن‌ها روش نوینی را برای شناسایی لغزش جسم گرفته‌شده توسط دست انسان انجام دادند. در این سیستم حس‌گرهای نیرو در یک دستکش متراکم قرار می‌گیرد و به کمک آن تغییرات نیرو در هنگام لغزیدن جسم گرفته‌شده معلوم می‌شود. آن‌ها مدعی

¹⁴ Glossas

¹⁵ Micro Vibration

شده‌اند که بنابراین تحلیل بهترین ناحیه از دست برای قرار دادن حسگرهای نیرو را به دست آورده‌اند. گونجی و همکارانش در نیز از نیروی خروجی از مرکز فشار این حسگر استفاده کرده‌اند و آن را حسگر COP نامیدند. این حسگر می‌تواند موقعیت مرکز جسم در حال لغزش را برای دست شناسایی کند. استفاده از حسگرها در شناسایی لغزش به اینجا محدود نشد و حسگرهایی چون حسگر پیزوالکتریک (PVDF) (Shirafuji and Hosoda 2014) و حسگر ردیابی نوری (Roberts, Singhal et al. 2011) نیز برای شناسایی لغزش طراحی شد تا ما را تنها به دانستن نیروهای اعمالی در سطوح لغزش و استفاده از حسگرهای نیرو محدود ننماید.

۱-۴-۲ ثبت لغزش به روش غیرمستقیم

به‌عنوان اولین قدم در مواجهه با لغزش مقالات زیادی به بررسی مسئله شناسایی لغزش با حسگرها، پرداخته‌اند؛ اما وقتی صحبت از ثبت لغزش می‌شود منظور روش‌هایی است که بعد از اعمال شناسایی لغزش برای کنترل دقیق آن به شیوه‌ای آن را ثبت می‌نمایند. در این روش‌ها برای ثبت میزان لغزش رخ داده غالباً از تغییرات پارامترهایی چون سرعت، شتاب، نرخ تغییرات نیروی مماسی و ... بر روی جسم، استفاده می‌شود.

ای. ام. سلیمان و همکارانش (Soliman, Zaki et al. 2009) لغزش را به‌صورت ترکیبی از تغییرات شتاب و سرعت وارد سیستم کنترلی خود می‌کنند. در این تحقیق از حسگر ارتعاشی^{۱۶} برای ثبت اطلاعات نرخ لغزش جسم استفاده شده است. آن‌ها با توجه به رابطه بین رخداد لغزش و مقادیر جرم، ضریب اصطکاک و نیروی به‌کاررفته در اجسام جامد رابطه‌ای بین لغزش و ولتاژ موتور برقرار کردند مشاهده کردند که اگر نیروی بکار رفته کافی نباشد، جسم شتابی می‌گیرد که باعث افزایش نرخ لغزش می‌گردد و قبل از رسیدن نیروی بکار رفته به مقدار مناسب، منجر به افتادن جسم گردد. بر این اساس شتاب حرکت جسم

^{۱۶} Phidget Vibrator Sensor

را بر اساس نیروی وزن و نیروهای اصطکاکی اعمالی به آن دست آوردند. با این دیدگاه وی و همکارانش الگوریتم کنترلی مناسبی برای فراهم کردن مقدار ولتاژ مرجع معرفی کردند.

گروهی از محققین دانشکده علوم الکترونیک و کامپیوتر دانشگاه ساوتهمپتون^{۱۷} با کمک تغییرات سرعت، لغزش جسم را ثبت کردند (Dominguez-Lopez, Damper et al. 2003). در این پروژه ارتباط بین سرعت و لغزش از ساختار خاص در نظر گرفته شده در نقطه نهایی به دست می‌آید. در این مقاله از یک نقطه نهایی ساده و کم‌هزینه‌ی دوانگشتی که بر روی یکی از انگشتان آن یک غلتک تعبیه شده، استفاده می‌شود. در این پنجه حسگر لغزش در انگشت چپ قرار گرفته و بر اساس مشخصات تماس چرخشی کار می‌کند. زمانی که جسم می‌لغزد، چرخنده را با خود حرکت می‌دهد که از سوی دیگر به چرخ کدگذاری شده‌ای متصل است. بدین ترتیب سرعت لغزش از طریق فرکانس شکاف چرخ کدگذاری شده به دست می‌آید که برای اعمال کنترل‌کننده مناسب استفاده می‌شود.

انسان می‌تواند به‌طور دقیقی نیروی گرفتن اجسام را مطابق با تغییرات نیروی انگشت، عمود بر جهت لغزش تغییر دهد. این افزایش و کاهش در میزان نیرو با توجه به دامنه ایمنی تغییر می‌کند. با توجه به این اصل مدلی برای تعیین نیروی گرفتن در پنجه ربات که وابسته به شتاب جسم است، توسط نوبواکی ناکازاوا و همکارانش توصیف می‌شود (Nakazawa, Kim et al. 2001). در اینجا برای ارزش‌گذاری بر روی میزان ایمنی جسم در حین جابه‌جایی و به‌منظور جلوگیری از لغزش (میزان نیرویی که برای جلوگیری از لغزش لازم است) یک ضریب ایمنی N تعریف می‌شود که از تقسیم نیروی گرفتن بر کمترین نیروی موردنیاز برای گرفتن به دست می‌آید. آن‌ها به‌صورت تجربی رابطه بین ضریب ایمنی و شتاب و زمان را به دست آورده‌اند و با اعمال این ضریب بر میزان نیروی اعمالی بر جسم از طرف انگشتان، رخداد لغزش را تعیین می‌کنند.

^{۱۷} Southampton

علاوه بر مشاهده سرعت و شتاب و برقراری ارتباط آن‌ها با نیروی گرفتن جسم، افراد دیگری چون اریک دی. انگبرگ و سنفورد جی. میک در (Engeberg and Meek 2008) مستقیماً از نیروی مماسی و عمود بر سطح، هم در شناسایی و هم در کنترل لغزش استفاده کردند. به گفته آن‌ها در طی عملیات گرفتن بعد از صفر شدن خطای نیرو، ورودی موتور صفر می‌شود. در چنین حالتی از آنجاکه یک نیروی آشوب درونی یا بیرونی اعمال شده به جسم در راستای مماسی، ورودی موتور را به سرعت افزایش نمی‌دهد لغزش ناخواسته‌ای را به جسم اعمال می‌کند. تمرکز اصلی این مقاله بر روی شناسایی لغزش جسم به وسیله عبور مشتق نیروی مماسی از پالایه میان‌گذر و تقویت ارتعاشات روی داده در هنگام رخداد لغزش است. آن‌ها با انجام آزمایش‌ها عملی بر روی دست مصنوعی پوشانده شده با دستکش پلاستیکی و گرفتن تبدیل فوریه سریع (FFT) از نیروی مماسی اعمالی مشاهده کردند؛ در حالت بدون رخداد لغزش در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰ هرتز جزئیات زیادی از FFT سیگنال ورودی مشاهده نمی‌شود و تنها یک قله در سیگنال الکتریکی ۶۰ هرتز وجود دارد؛ اما برای رویداد لغزش در اجسام سخت و یا نرم، مقادیری غیرقابل چشم‌پوشی در فرکانس‌های بالا نیز وجود دارد که در زمان عدم لغزش رؤیت نمی‌شود. با توجه به این مشاهدات و برای در نظر گرفتن این بازه‌های فرکانسی یک پالایه میان‌گذر مرتبه سه تعریف کردند که با مشتق‌گیری از نیروی مماسی از تداخل و اشتباه شدن سیگنال‌ها با دامنه بالا و فرکانس پایین در فضای حالت با پدیده لغزش جلوگیری می‌کند.

۱-۵ روش‌های مختلف جلوگیری و کنترل لغزش

در حوزه کنترل پنجه به منظور اعمال حداقل نیرو برای گرفتن اجسام، مسائل متنوعی مطرح است. اولین و ساده‌ترین روش برای کنترل لغزش، اعمال نیرویی بیشتر از حد موردنیاز جهت بلند کردن و جابجا کردن جسم هست. ولی این نیروی مازاد ممکن است باعث آسیب دیدن اجسام ظریف و شکننده شود. بنابراین ربات بایستی جسم را به روشی بگیرد که از لغزش و افتادن آن جلوگیری نماید، از طرفی

این کار باید با حداقل نیروی موردنیاز برای اجتناب از تغییر شکل جسم و یا صدمه دیدن آن، انجام شود.

از ابتدایی‌ترین راهکارهایی که برای پیشگیری و کنترل لغزش رخ داده در دست ربات انسان‌نما و یا صنعتی معرفی شده کنترل نیرو است. مارک ترمبلی و همکارانش (Tremblay and Cutkosky 1993) در سال ۱۹۹۳ با استفاده از حسگر لمسی دینامیکی، لغزش را در مرحله اولیه شناسایی کردند و برای کنترل موقعیت انتهایی انگشت دو درجه آزادی در راستای مماسی و عمودی برای کنترل ترکیبی موقعیت، نیرو بکار بردند. در این مقاله به‌طور همزمان نیروی مماسی و نرمال در انگشت به‌وسیله حسگرها اندازه‌گیری می‌شود و کنترل‌کننده‌ای بر اساس محاسبه ضریب اصطکاک در سطح تماس طراحی می‌شود.

بعضی از سیستم‌ها (Rupp and Velastin 1994) بیشتر بر مبنای استفاده از ویژگی‌های سیستم حسگری در شناسایی نیروها و کنترل لغزش می‌باشد. در تحقیقی دیگر با استفاده از کنترل نیرو، پنجه ربات صنعتی اسکارا^{۱۸} جسم را نگه می‌دارد و پس از چند بار رهاسازی و گرفتن دوباره، لغزش را کنترل می‌کند. هر سه مرحله جهت پیاده‌سازی لغزش و کنترل آن توسط سیستم حسگری پنجه صورت می‌گیرد. مینگرینو و همکارانش (Mingrino, Bucci et al. 1994) سیستم لمسی لغزشی برای اندازه‌گیری نیروی مماسی و نرمال بین پنجه ربات و جسم گرفته‌شده طراحی نمودند و راهبرد کنترلی برای جلوگیری از لغزش ارائه دادند. در این راهبرد کنترلی از یک الگوریتم برای کنترل لغزش استفاده می‌شود که در آن پس از نشان دادن لغزش توسط سیگنال دریافتی از حسگرها، فرمان بسته شدن پنجه اعمال می‌شود و از ادامه لغزش جلوگیری می‌نماید.

^{۱۸} Scara

مقاله (Maeno, Hiromitsu et al. 2000) روشی مکانیکی را برای کنترل نیروی گرفتن توسط انگشتان الاستیک مصنوعی معرفی می‌کند. در این روش ابتدا با کمک تحلیل عناصر محدود^{۱۹}، رابطه‌ی بین سطح چسبندگی و توزیع کرنش داخلی انگشت محاسبه می‌شود. سپس با کمک این رابطه روشی برای کنترل نیروی گرفتن مطرح می‌شود که بر پایه کاهش نرخ افزایش نیروی مماسی به هنگام کاهش سطح چسبندگی یا همان لغزش است.

با توجه به زمینه‌های کارکردی که تاکنون گفته شد می‌توان نتیجه گرفت که به‌عنوان بخشی از عملیات گرفتن، کنترل نیرو موردنیاز است. این کنترل از خطر لغزش جسم گرفته‌شده و هر صدمه احتمالی به آن پیشگیری می‌کند و می‌تواند به‌صورت یک مدل بهینه‌سازی مطرح شود. برای تعیین نیروی موردنیاز گرفتن تعاریف مختلفی وجود دارد. بعضی از این تعاریف تنها راهکارهای تحلیلی بوده و به‌راحتی در کاربردهای بلادرنگ پیاده‌سازی نمی‌شود. همچنین دیدگاه تحلیلی در صورت معلوم نبودن وزن و شتاب پنجه قابل‌استفاده نیست. برای غلبه بر چنین مشکلاتی راهکارهای دیگری همچون استفاده از کنترل‌کننده فازی توسعه‌یافته تا متغیرهای فیزیکی سیستم را اندازه‌گیری کند.

گوان لو ژانر و همکارانش (Guan-Lu, Ying et al. 2008) بر روی کاربرد منطق فازی در گرفتن اجسام با ویژگی‌های ناشناخته همچون صلبیت و بافت سطح، تمرکز کرده‌اند. در این مقاله کنترل‌کننده فازی به پنجه دوانگشتی که مجهز به حسگر پیزوالکتریک است، امکان گرفتن یک جسم ناشناخته را بدون دانستن اندازه، وزن، یا بافت سطح آن فراهم می‌کند. زمانی که دست روی جسم قرار می‌گیرد موتور DC با کنترل آرمیچر، انگشتان پنجه را به حرکت می‌اندازد و حرکت چرخشی در روتور به حرکت خطی تبدیل می‌شود. سیگنالی دریافتی از حسگر مرکز توزیع نیرو را تعیین می‌کند. کنترل‌کننده فازی سه سیگنال تغییرات شتاب، تغییرات سرعت خطی و مرکز توزیع نیرو را پردازش می‌کند و بر اساس قانون

^{۱۹} Finite element

فازی عمل می‌کند که سرعت بسته شدن موردنیاز را به موتور می‌دهد و حسگر لمسی پایداری آن را تأیید می‌کند.

بنا بر آنچه درزمینه‌ی کنترل فازی و مزایای آن عنوان شد و نیز با توجه به کنترل‌کننده‌های ترکیبی نیرو - موقعیت که در گذشته انجام شده است، محمدمهدی فاتح راهبرد کنترل لغزش ساختار متغیر را برای گرفتن اجسام توسط نقطه نهایی ربات گسترش داده است (Fateh 2006). او برای این منظور یک کنترل‌کننده ترکیبی متشکل از کنترل‌کننده فازی و تناسبی - انتگرالی برای دست ربات دوانگشتی با محرک موتور DC مغناطیس دائم استفاده می‌کند. زمانی که جسم گرفته شده تحت اثر نیروهای خارجی همچون آشوب بلغزد، نیروی بکار رفته در سرانگشت به سرعت افزایش می‌یابد تا لغزش را متوقف نماید و پس از آن نیرو برای نگه داشتن جسم تا حد معینی کم می‌شود. اگر لغزش از محدوده معینی بیشتر باشد، ساختار کنترل‌کننده به طور خودکار از کنترل تناسبی - انتگرالی به کنترل فازی تغییر می‌کند.

پس از ارائه روش‌های کنترل هوشمند و از آنجاکه کنترل‌کننده می‌تواند دارای قابلیت یادگیری از مشاهدات و تجربیات پیرامون خود باشد، تحقیقات درزمینه‌ی کنترل هوشمند ضمیمه کاری بسیاری از محققین گردید. به‌ویژه روش‌های عصبی فازی که بازتاب دانش قابلیت‌های یادگیری را پیشنهاد می‌دهند بیش از پیش مورد توجه واقع شد و در کنترل پنجه ربات نیز به کار گرفته شد. در (Salisbury and Roth 1983) با اعمال کنترل‌کننده عصبی فازی آموزش داده شده به روش برگشت به عقب، به پنجه ربات اجازه داده می‌شود که عملیات گرفتن را به درستی و بدون لغزش و یا صدمه دیدن جسم انجام دهد. در این روش داده‌های آموزش به صورت برون خط تولید می‌شود و از این رو همواره داده‌ها در دسترس نیست. به همین دلیل نویسندگان این مقاله روشی برخط مبتنی بر $RL^{۲۰}$ (Domínguez-López, Damper et al. 2004) برای کنترل پنجه ساده، دوانگشتی پیشنهاد داده‌اند. کنترل ربات به همراه آموزش برخط توانایی‌ها و محدودیت‌های آن، امکان پیش‌بینی وضعیت عملکرد در مواجهه با شرایط ناگهانی و از قبل

^{۲۰} Reinforcement learning

تعیین نشده همچون لغزش را فراهم می‌کند. سه روش یادگیری برون خط نظارت‌شده و دو روش برخط شامل روش یادگیری به نام یادگیری RL نظارت‌نشده و روش ترکیبی نظارت‌شده/ نظارت‌نشده برای تولید کنترل عصبی- فازی در پنجه ربات استفاده‌شده است.

سیستم عصبی فازی به‌صورت ترکیبی از کنترل‌کننده شبکه عصبی و کنترل فازی تعریف می‌شود. ورودی‌های کنترل‌کننده منطق فازی نرخ لغزش جسم (ایده آل صفر) و نیروی اعمالی (ایده آل در کمینه) و خروجی آن گشتاور موتور است. منطق فازی چنین تعریف‌شده که در عدم رخداد لغزش، نقطه نهایی فشرده نمی‌شود و باید نیروی اضافی متناسب با میزان لغزش جسم را به آن وارد کند.

استفاده از کنترل فازی به‌منظور کنترل لغزش به اینجا محدود نشد. در سال ۲۰۰۹ ای.ام.سلیمان و همکارانش در کنار افزودن قابلیت‌های پیشرفته به سیستم پنجه ربات با کنترل چندمرحله‌ای، از الگوریتم یک سیستم استنتاج عصبی- فازی (ANFIS) نیز بهره بردند (Zaki, Soliman et al. 2010). در این مقاله پنجه‌ای برای گرفتن اجسام ناشناخته با جرم‌های متفاوت، اشکال و ضرایب اصطکاک مختلف طراحی شد و الگوریتم جدید کنترل فازی بر اساس مهارت‌های لازم برای تنظیم نیروی بکار رفته به جسم بدون صدمه دیدن و افتادن استفاده‌شده است.

ایشان برای تضمین برقراری تماس بین دو انگشت با جسم به‌طور همزمان از یک نیروی فشاری استفاده کردند که توسط انگشت متحرک به جسم اعمال می‌شود و معمولاً از نیروی موردنیاز برای بلند کردن جسم کمتر است.

در این طرح سه کنترل‌کننده فازی یکپارچه‌سازی شده استفاده شد. اولین کنترل‌کننده نرخ شتاب جسم ناشی از اعمال نیرو را حدس می‌زند و مقدار مناسبی از ولتاژ مرجع را می‌دهد. کنترل‌کننده دوم نیروی فشاری را حس می‌کند. سپس با استفاده از کنترل‌کننده سوم که بر اساس شتاب جسم و نیروی بکار رفته عمل می‌کند، رفتار دو کنترل‌کننده دیگر افزایش داده می‌شود و در نهایت ولتاژ مرجع موردنیاز

برای اعمال به ANFIS را فراهم می‌کند. سیستم ANFIS از ترکیب مناسب دستگاه‌های فازی و شبکه عصبی به دست می‌آید.

در ادامه بررسی روش‌های بکار رفته برای کنترل لغزش، شهرام هادیان و همکارانش با در نظر گرفتن لغزش در نقطه نهایی دو بازوی ماهر همکار، یک مدل دینامیکی و ترکیب کنترلی جدید برای پدیده گرفتن معرفی کرده‌اند (Sh. Hadian Jazi and Keshmiri 2007). این مدل دینامیکی بر اساس فرمول‌بندی جدید از اصطکاک تماسی است که معادلات برابری و نابرابری در مدل استاندارد اصطکاک کلمب را به یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم یکتا با ضرایب متغیر تبدیل می‌کند. سپس به منظور ردیابی مسیر جسم، کنترل‌کننده گشتاور به همراه کنترل لغزش به نقطه نهایی اعمال می‌شود. آن‌ها در طرح خود از یک کنترل‌کننده چندحالتی استفاده نموده‌اند تا بتواند شرایط واقعی‌تر لغزش بین جسم و پنجه را با توجه به شرایط اصطکاکی هر فاز، شبیه‌سازی نمایند.

در سال ۲۰۱۳ اریک دی. انگبرگ و سنفورد جی. مک (Engeberg and Meek 2013) پس از مطالعه و اعمال کنترل‌کننده‌های مختلف بر روی دست مصنوعی یک درجه آزادی که بر اساس کنترل نیرو و موقعیت بین دو انگشت آن انجام می‌شد، یک الگوریتم پیشگیری از لغزش تطبیقی طراحی کردند. در ابتدا به منظور پیشگیری از لغزش کنترل‌کننده تناسبی و تناسبی-مشتقی به همراه بازخورد نیرو بررسی شده است تا از آن برای به‌روزرسانی تخمین کنترل‌کننده از ضرایب اصطکاک به محض رخ داد لغزش استفاده گردد؛ اما در این کنترل‌کننده، احتمال ناکافی بودن نیروی عمودی اولیه اعمال شده به جسم برای نگاه‌داشتن آن در نظر گرفته نشده است، از این رو بازخورد نیروی مماسی به منظور جبران سازی نیروهای حالت دائمی و مشتق نیروی مماسی برای جبران سازی اغتشاشات ناپایدار حالت گذرا و اینرسی استفاده می‌شود. لغزش رخ داده با فیلتر میان‌گذر اعمالی به نیروی مماسی، شناسایی می‌شود تا ارتعاشات رخ داده به هنگام لغزش جسم را تقویت نماید. تمرکز اصلی نویسندگان این مقاله بر روی خطای ناشی از رخداد لغزش و تغییر شکل ناشی از آن است. در این مقاله کنترل لغزش در حالت

انتگرالی، کنترل مقاومی را ایجاد می‌کند و درعین حال به موضوع کاهش تغییر شکل ناشی شده از عملیات جلوگیری از لغزش جسم نیز می‌پردازد. نتیجه حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان‌دهنده توانایی جلوگیری از لغزش با کنترل مود لغزشی انتگرالی در جلوگیری از لغزش با کمترین تغییر شکل و جلوگیری همزمان از افتادن جسم است.

در مقاله‌ای دیگر با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک در آستانه لغزش اجسام، نیروی گرفتن دست ربات کنترل شده است (Tsujiuchi, Ueyama et al. 2003). این روش وابسته به مدل جسم (جرم و ضریب اصطکاک) است. با توجه به رابطه‌ای که بین سختی و جرم برقرار می‌شود، کنترل کننده مود لغزشی به‌عنوان کنترل کننده موقعیت استفاده شده است.

۶-۱ جبران لغزش

زمانی که جسم گرفته شده توسط پنجه ربات یا دست ماهر به هر دلیل می‌لغزد، باعث تغییر موقعیت مکانی جسم نسبت به حالت قبل می‌شود. این تغییر موقعیت جسم درون پنجه ربات، زمانی که حرکت بازوهای ربات و موقعیت نهایی آن از پیش تعیین شده است، مشکل ساز خواهد بود. به‌عنوان نمونه وقتی ربات می‌بایست جسم را روی سطح معینی بگذارد، در صورت وجود لغزش، امکان برخورد جسم به سطح و آسیب‌های احتمالی به آن وجود دارد.

تاکنون روش‌هایی برای شناسایی و سپس کنترل لغزش معرفی شد. استفاده از کنترل کننده برای لغزش تنها باعث جلوگیری از لغزش پس از یک بازه زمانی مشخص می‌شود. لذا می‌بایست برای این تغییر موقعیت ناشی از لغزش جسم علاوه بر جلوگیری از لغزش راهکار دیگری اندیشید که منجر به تعریف جبران لغزش رخ داده می‌شود.

مقاله‌ای تحت عنوان «روش جدید پیش‌بینی و جبران لغزش مکانیکی بر اساس اکتشاف سطح لمسی» در سال ۲۰۱۲ به بررسی مسئله جبران سازی پرداخته است (Xiaojing, Hongbin et al. 2012). در

این مقاله یک اکتشاف سطح لمسی به صورت ساده و مفید با استفاده از انگشتان ربات انجام شده تا ویژگی‌های اصطکاکی سطح را شناسایی کند. زمانی که ویژگی‌های اصطکاکی برقرار شود، آستانه لغزش در شرایط گرفتن پیش‌بینی می‌شود و نیروهای اعمالی برای پیشگیری از لغزش تنظیم می‌شوند.

هدف اصلی در این مقاله پیش‌بینی لغزش قبل از رخداد است تا به دست ربات توانایی مدیریت به موقع جبران لغزش را بدهد. آن‌ها برای مدل‌سازی دینامیکی اصطکاک بین انگشت ربات و جسم از مدل لوگر و بر اساس تماس نقطه‌به‌نقطه دو جسم صلب استفاده نمودند. بنا به گفته ایشان زمانی که نسبت بین اصطکاک و نیروی نرمال از نسبت نیروی اصطکاک به نیروی عمودی به هنگام رویداد لغزش که در این مقاله نسبت اصطکاک جداکننده (BF)^{۲۱} نامیده شده است کمتر باشد، تماس پایدار است و در غیر این صورت لغزش رخ می‌دهد. از طرفی این نسبت با تغییرات شتاب و نیروهای آشوب اعمال شده به جسم تغییر می‌کند. تخمین بیش‌ازحد ضریب BF باعث افزایش احتمال لغزش و کمتر بودن آن باعث اعمال بیش‌ازحد نیروی گرفتن و صدمه رسیدن به جسم می‌شود که در این مقاله روشی برای کنار آمدن با این مشکل پیشنهاد شده است.

با توجه به همین نسبت متغیر و وابسته به شتاب بین نیروهای اصطکاکی و نیروی طبیعی و ترکیب استفاده از بینایی ماشین، جاوو بیمیو و همکارانش (Joao Bimbo, Xiaojing Song et al.) برداشت بلادرنگی از جسم گرفته‌شده به دست آورده‌اند. آن‌ها نیز برای مدل‌سازی اصطکاک از مدل لوگر استفاده کردند که نیاز به تخمین پارامترهای ایستایی و دینامیکی دارد. با دانستن پارامترهای اصطکاکی بین جسم و انگشت، پیش‌بینی کننده بلادرنگ لغزشی‌ای پیاده‌سازی شده است که نه تنها نیروهای فعال، بلکه تغییرات سرعت و شتاب و نیروهای آشوبی را نیز در نظر می‌گیرد. از این روش، نسبت BF محاسبه می‌شود و آستانه‌ای برای آغاز لغزش، به دست می‌آید. سپس با اعمال حاشیه ایمنی ۵ درصد جبران ساز عمل می‌کند و به کنترل کننده دست‌فرمان افزایش نیروی گرفتن و جلوگیری از لغزش را می‌دهد.

^{۲۱} Break-away friction

۷-۱ اهمیت و تفاوت موضوع تحقیق با کارهای قبلی و اهداف آن

تحقیق در این پایان‌نامه بر اساس مدل‌سازی دینامیکی ربات و نیروی‌های اعمالی به هنگام فرآیند گرفتن می‌باشد. در تمام روش‌های فوق هدف‌گذاری روی توقف لغزش رخ داده است و هیچ‌کدام از تحقیقات انجام‌شده برای محاسبه مقدار جابه‌جایی جسم در اثر لغزش و جبران آن روشی را اعمال نکرده‌اند. در حالی که در فعالیت‌های مونتاژی و کارهایی که نیازمند دقت بالایی می‌باشد، همچون جراحی با ربات، رخداد لغزش حتی برای چند میلی‌متر زیان‌آور است. از اینجا مسئله جبران سازی لغزش در پنجه‌ی ربات اهمیت می‌یابد. در این پروژه تمرکز برای ارائه روشی برای ثبت میزان لغزش رخ داده و اعمال تدابیر لازم برای جبران و کنترل آن می‌باشد که مسئله فوق در گام‌های زیر انجام شد:

۱- ارائه روشی جدید برای شناسایی مهار و کنترل لغزش بر مبنای وزن جسم و شتاب ناشی از

مانور اعمالی بر آن از طرف ربات

۲- ارائه روشی برای ثبت لغزش رخ داده شده برای جسم

۳- ارائه روشی برای جبران لغزش رخ داده و رساندن جسم به موقعیت مطلوب موردنظر

۴- بررسی امکان استفاده از روش کنترل ولتاژ در کنترل لغزش و پدیده گرفتن

۸-۱ ساختار پایان‌نامه

فصل‌های دیگر این پایان‌نامه به صورت زیر تنظیم شده‌اند:

فصل دوم به مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات و به دست آوردن معادلات آن اختصاص داده شده است. در این فصل ربات اسکارا با ۴ درجه آزادی به همراه یک درجه آزادی پنجه با محاسبه معادلات جسم در مفاصل، مدل‌سازی می‌شوند. در فصل سوم روش کنترل لغزش بر روی سیستم پنجه و جسم پیاده‌سازی با کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی و بر اساس مدل‌سازی تک‌بعدی اصطکاک پیاده‌سازی می‌شود. در فصل ۴ معرفی مختصری از کنترل گشتاور محاسبه‌شده ارائه می‌شود و کنترل لغزش ربات بر

مبنای آن انجام می‌گیرد. در این فصل مدل‌سازی دینامیکی لغزش در دو بعد انجام می‌شود و لغزش
رخ داده جبران می‌گردد. فصل ۵ نیز با توجه به قابلیت‌ها و مزایای کنترل ولتاژ، کنترل لغزش به صورت
تک‌بعدی و دوبعدی با راهبرد ولتاژ انجام می‌شود. در انتها در فصل هشتم نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادها
ارائه می‌شود.

فصل دوم

مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا

۱-۲ مقدمه

در این فصل سینماتیک و دینامیک سیستم مورد مطالعه تشریح شده است. سینماتیک مستقیم ربات، در واقع توصیف کننده موقعیت مجری نهایی ربات بر اساس زاویه‌های رابط‌ها و متغیرهای مفاصل می‌باشد؛ بنابراین، لازم است پارامترهای مورد نیاز برای توصیف کامل زوایای مفاصل انتخاب شود. زمانی که مقادیر و زاویه‌های متناظر مفصل‌های ربات شناخته شده باشد، برای محاسبه موقعیت، جهت، سرعت و شتاب مجری نهایی از سینماتیک مستقیم استفاده می‌شود. در حالی که در نقطه مقابل آن و برای محاسبه مقادیر مورد نیاز مفاصل با توجه به مقادیر معلوم مجری نهایی، از سینماتیک معکوس ربات استفاده می‌شود (Mark W. Spong, Seth Hutchinson et al. January 28, 2004) با استفاده از اطلاعات به دست آمده از سینماتیک و با استفاده از قوانین حاکم در مدل سازی، معادلات دینامیکی ربات به دست می‌آید. در این فصل، برای تعیین معادلات حرکت سیستم، از روش اویلر-لاگرانژ استفاده شده است.

در ادامه این فصل، بعد از به دست آوردن معادلات سینماتیکی، مدل دینامیکی ربات اسکرای ۴ درجه آزادی به همراه یک درجه آزادی برای پنجه کشویی به روش اویلر-لاگرانژ محاسبه می‌شود.

۲-۲ معادلات سینماتیکی ربات

برای به دست آوردن معادلات سینماتیکی ربات از (Mark W. Spong, Seth Hutchinson et al. 2004) استفاده می‌شود. ابتدا طبق قوانین دناویت-هارتنبرگ دستگاه‌های مختصات ربات انتخاب و رسم می‌شوند. در ادامه نحوه انتخاب محورهای مختصات توضیح داده خواهد شد، سپس طبق قوانین دناویت-هارتنبرگ جهت به دست آوردن معادلات سینماتیکی ربات عمل می‌گردد.

نحوه اعمال قوانین دناویت-هارتنبرگ به این صورت است: اولین گام نام گذاری اعضای ربات است. رابط پایه را رابط صفر و سپس رابط بعدی را رابط یک و به همین ترتیب همه رابط‌ها نام گذاری می‌شوند. بر

روی هر مفصل ربات یک دستگاه مختصات قرار می‌گیرد و برای تعیین محورهای آن طبق روش دناویت-هارتنبرگ به صورت زیر عمل می‌شود:

۱. محورهای مفاصل شناسایی می‌شود. محور مفصل آن محوری است که مفصل لولایی حول آن می‌چرخد یا مفصل کشویی در راستای آن حرکت می‌کند. محورهای Z در راستای محور مفصلی قرار می‌گیرند.

۲. محور X_0 به صورت اختیاری انتخاب می‌شود.

۳. محور X_i به گونه‌ای انتخاب می‌شود که محور X_i عمود و متقاطع با Z_{i-1} باشد.

۴. محور Y_i به گونه‌ای انتخاب می‌شود که همه دستگاه‌ها به صورت راست‌گرد باشند.

۵. یک جدول از پارامترهای رابطه‌ها (طول، انحراف، پیچش، زاویه) تشکیل می‌گردد که تعریف هر پارامتر عبارت است از:

a_i : فاصله از Z_{i-1} تا Z_i در جهت x_i

d_i : فاصله از x_{i-1} تا x_i در جهت Z_{i-1}

α_i : زاویه از z_{i-1} تا z_i حول x_i

θ_i : زاویه از x_{i-1} تا x_i حول z_{i-1}

۶. ماتریس همگن A_i که مختصات یک نقطه از دستگاه مختصات i را به دستگاه $i-1$ تبدیل می‌کند، تشکیل می‌شود. از آنجایی که هر مفصل دارای یک درجه آزادی است با توجه به نوع مفصل، در صورت کشویی بودن، متغیر q_i مشخص‌کننده تغییرات طول و در صورت لولایی بودن، متغیر q_i مقدار زاویه دوران مفصل را نمایش می‌دهد. بدین ترتیب A_i تابعی از یک متغیر q_i می‌باشد.

$$A_i = A_i(q_i) \quad (1-2)$$

۷. ماتریس همگنی که مختصات نقطه‌ای را در دستگاه Z به دستگاه i تبدیل می‌کند، به دست آورده می‌شود. این ماتریس، ماتریس تبدیل نامیده شده و عبارت است از:

$$T_i^j = A_{i+1} A_{i+2} \dots A_{j-1} A_j \quad (2-2)$$

حال اگر مجری نهایی در دستگاه مختصات n ام بیان شود، موقعیت هر نقطه از آن مستقل از پیکره بندی ربات است. از این رو موقعیت مجری نهایی نسبت به دستگاه آغازین یا پایه به وسیله یک بردار سه عضوی به نام **d** و یک ماتریس دوران 3×3 به نام **R** قابل نمایش است و خواهیم داشت:

$$\mathbf{T}_0^n = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \dots \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0^n & \mathbf{d}_0^n \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

که در رابطه فوق ماتریس \mathbf{R}_0^n جهت مجری نهایی را در دستگاه آغازین نمایش می دهد. در معادله (۲)-۲ مقدار \mathbf{A}_i به صورت زیر به دست می آید:

$$\mathbf{A}_i = \text{Rot}_{z, \theta_i} \text{Trans}_{z, d_i} \text{Trans}_{x, a_i} \text{Rot}_{z, \alpha_i} \quad (4-2)$$

که در رابطه فوق $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$ پارامترهای رابط و مفصل i هستند و ماتریس **Rot** ماتریس دوران و ماتریس **Trans** ماتریس انتقال می باشد. در نتیجه داریم:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} & 0 & 0 \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\alpha_i} & -S_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} S_{\alpha_i} & \alpha_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & \alpha_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

که در روابط فوق به دلیل ایجاد اختصار روابط مثلثاتی به صورت زیر خلاصه سازی شده است:

$$S_j = \sin \theta_j, S_{i,j} = \sin(\theta_i + \theta_j),$$

$$C_j = \cos \theta_j, C_{j,i} = \cos(\theta_j + \theta_i).$$

۱-۲-۲ ژاکوبین بازوی ماهر ربات

در بخش قبل معادلات سینماتیک مستقیم برای موقعیت‌های مفاصل و موقعیت و جهت مجری نهایی به دست آمد. در این بخش ژاکوبین بازوی ماهر، یعنی ارتباط سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی با سرعت مفاصل به دست می‌آید. برای محاسبه سرعت مجری نهایی در اثر حرکت‌های خطی و زاویه‌ای رابط‌ها، از مفهوم ژاکوبین استفاده می‌شود. ژاکوبین در واقع صورتی چندبعدی از مشتق است که برای تابع دلخواه Y که تابعی از متغیر X است به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$Y = F(x) \quad (7-2)$$

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (8-2)$$

که در آن $F(x) = [f_1 \dots f_n]^T$ است. با مشتق‌گیری از معادله (۷-۲) داریم:

$$\dot{Y} = J(x)\dot{x} \quad (9-2)$$

در هر لحظه خاص، X مقدار معینی دارد و $J(X)$ یک تبدیل خطی متغیر با زمان است که متناسب با تغییر X تغییر می‌کند. در اینجا برای مرتبط ساختن سرعت مفاصل به سرعت‌های دکارتی مجری نهایی از ژاکوبین استفاده می‌شود. به صورت کلی:

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (10-2)$$

که \dot{x} بردار سرعت خطی و زاویه‌ای مجری نهایی است و q همان بردار متغیرهای مفصلی است. از آنجا که سرعت مجری نهایی، حاصل سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی رابط‌هاست، بنابراین در ادامه ابتدا به محاسبه روابط سرعت زاویه‌ای و سپس سرعت خطی پرداخته می‌شود. همچنین این روابط در بخش بعد برای محاسبه معادلات دینامیکی ربات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

فرض کنید \mathbf{W}_0^n بیانگر سرعت زاویه‌ای مجری نهایی باشد و همچنین \mathbf{V}_0^n بیانگر بردار سرعت خطی مجری نهایی باشد، آنگاه:

$$\mathbf{W}_0^n = J_w \dot{\mathbf{q}} \quad (11-2)$$

$$\mathbf{V}_0^n = J_v \dot{\mathbf{q}} \quad (12-2)$$

که J_w و J_v ماتریس‌های $3 \times n$ هستند و طبق معادله (۱۰-۲) خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0^n \\ \mathbf{W}_0^n \end{bmatrix} = J_0^n \dot{\mathbf{q}} \quad (13-2)$$

که ماتریس ژاکوبین J_0^n عبارت است از:

$$J_0^n = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \quad (14-2)$$

ماتریس J_0^n یک ماتریس $3 \times n$ است که در آن n تعداد رابط‌هاست.

۲-۲-۲ سرعت زاویه‌ای

سرعت زاویه‌ای مجری نهایی نسبت به دستگاه پایه را می‌توان با بیان سرعت زاویه‌ای رابط‌ها در دستگاه پایه و سپس جمع نمودن آن‌ها تعیین کرد. چنانچه مفصل i ام از نوع لولایی باشد آنگاه q_i (متغیر مفصل i ام) برابر θ_i و z_{i-1} محور دوران است؛ بنابراین، سرعت زاویه‌ای رابط i در دستگاه $i-1$ عبارت است از:

$$\mathbf{W}_{i-1}^i = \dot{q}_i \mathbf{k} \quad (15-2)$$

که در این رابطه \mathbf{k} بردار یکه در راستای محور z_{i-1} است. چنانچه مفصل i ام از نوع کشویی باشد، حرکت دستگاه مختصات i نسبت به دستگاه مختصات $i-1$ تنها از نوع انتقالی است و در این صورت:

$$\mathbf{W}_{i-1}^i = 0 \quad (16-2)$$

اگر مفصل i ام کشویی باشد، سرعت زاویه‌ای مجری نهایی به q_i که در این حالت برابر با d_i است، بستگی ندارد؛ بنابراین، سرعت زاویه‌ای در دستگاه پایه به صورت معادله (۲-۱۷) ساخته می‌شود.

$$\mathbf{W}_0^n = \mathbf{W}_0^1 + \mathbf{R}_0^1 \mathbf{W}_1^2 + \mathbf{R}_0^2 \mathbf{W}_2^3 + \dots + \mathbf{R}_0^{n-1} \mathbf{W}_{n-1}^n \quad (۲-۱۷)$$

معادله بالا با توجه به معادلات (۲-۱۵) و (۲-۱۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\mathbf{W}_0^n = \rho_1 \dot{q}_1 \mathbf{k} + \rho_2 \dot{q}_2 \mathbf{R}_0^1 \mathbf{k} + \dots + \rho_n \dot{q}_n \mathbf{R}_0^{n-1} \mathbf{k} = \sum_{i=1}^n \rho_i \dot{q}_i \mathbf{z}_{i-1} \quad (۲-۱۸)$$

که در آن:

$$\mathbf{z}_{i-1} = \mathbf{R}_0^{i-1} \mathbf{k} \quad (۲-۱۹)$$

اگر مفصل i ام لولایی باشد $\rho_i = 1$ و اگر کشویی باشد برابر $\rho_i = 0$ است.

بنابراین، با توجه به معادله (۲-۱۱):

$$\mathbf{J}_w = [\rho_1 \mathbf{z}_0 \quad \rho_2 \mathbf{z}_1 \quad \dots \quad \rho_n \mathbf{z}_{n-1}] \quad (۲-۲۰)$$

که البته در رابطه فوق $\mathbf{z}_0 = \mathbf{k} = [0 \quad 0 \quad 1]^T$ است.

۲-۲-۳ سرعت خطی

رابطه سرعت خطی مجری نهایی عبارت است از:

$$\mathbf{V}_0^n = \dot{\mathbf{d}}_0^n \quad (۲-۲۱)$$

$$\dot{\mathbf{d}}_0^n = \frac{\partial \mathbf{d}_0^n}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial \mathbf{d}_0^n}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial \mathbf{d}_0^n}{\partial q_n} \dot{q}_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{d}_0^n}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (۲-۲۲)$$

این رابطه همان سرعت خطی مجری نهایی است که در آن همه مفاصل به جز مفصل i ام ثابت نگه‌داشته شده‌اند و مفصل i ام با سرعت واحد رانده می‌شود. این فرض در روابط بعدی نیز صدق می‌کند. چنانچه مفصل i ام لولایی باشد داریم:

$$\mathbf{d}_0^n = \mathbf{d}_0^1 + \mathbf{R}_0^1 \mathbf{d}_1^2 + \mathbf{R}_0^2 \mathbf{d}_2^3 + \dots + \mathbf{R}_0^{i-1} \mathbf{d}_{i-1}^i + \dots + \mathbf{R}_0^{n-1} \mathbf{d}_{n-1}^n \quad (۲-۲۳)$$

بنابراین:

$$\mathbf{d}_0^n = \mathbf{d}_0^{i-1} + \mathbf{R}_0^{i-1} \mathbf{d}_{i-1}^n \quad (24-2)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (24-2) خواهیم داشت:

$$\dot{\mathbf{d}}_0^n = \mathbf{R}_0^{i-1} \dot{\mathbf{d}}_{i-1}^n \quad (25-2)$$

با توجه به رابطه سرعت زاویه‌ای، این رابطه به صورت رابطه ضرب خارجی زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{\mathbf{d}}_0^n = \mathbf{R}_0^{i-1} (\dot{q}_i \mathbf{k} \times \mathbf{d}_{i-1}^n) \quad (26-2)$$

با جایگذاری معادله (2-19) در معادله فوق و با استفاده از معادله (2-24) می‌توان نوشت:

$$\dot{\mathbf{d}}_0^n = \dot{q}_i \mathbf{z}_{i-1} \times (\mathbf{d}_0^n - \mathbf{d}_0^{i-1}) \quad (27-2)$$

بنابراین اگر مفصل i ام لولایی باشد با توجه به معادلات (2-12) و (2-21) خواهیم داشت:

$$J_{v_i} = \mathbf{z}_{i-1} \times (\mathbf{d}_0^n - \mathbf{d}_0^{i-1}) \quad (28-2)$$

حال اگر مفصل i ام کشویی باشد:

$$\mathbf{d}_{i-1}^i = d_i \mathbf{k} + a_i \mathbf{i} \quad (29-2)$$

$$\mathbf{d}_0^n = \mathbf{d}_0^{i-1} + \mathbf{R}_0^{i-1} \mathbf{d}_{i-1}^i + \mathbf{R}_0^i \mathbf{d}_i^n \quad (30-2)$$

با توجه به فرض ثابت نگه‌داشته شدن همه مفاصل به جز مفصل i ام و رانده شدن آن با سرعت واحد، با

مشتق‌گیری از رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\dot{\mathbf{d}}_0^n = \mathbf{R}_0^{i-1} \dot{\mathbf{d}}_{i-1}^i \quad (31-2)$$

با جایگذاری معادلات (2-29) در (2-31) می‌توان نوشت:

$$\dot{\mathbf{d}}_0^n = \mathbf{R}_0^{i-1} \dot{d}_i \mathbf{k} \quad (32-2)$$

با استفاده از معادله (۱۹-۲) رابطه فوق به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{\mathbf{d}}_0^n = \mathbf{z}_{i-1} \dot{d}_i \quad (۳۳-۲)$$

در مفاصل کشویی $q_i = d_i$ بنابراین، اگر مفصل i ام کشویی باشد، با در نظر گرفتن معادله (۱۲-۲) ستون i ام ماتریس J_v عبارت است از:

$$J_{v_i} = \mathbf{z}_{i-1} \quad (۳۴-۲)$$

در نهایت ماتریس J_v به صورت زیر تعریف می شود:

$$J_v = \begin{bmatrix} J_{v_1} & J_{v_2} & \dots & J_{v_n} \end{bmatrix} \quad (۳۵-۲)$$

در رابطه فوق برای محاسبه J_{v_i} ، اگر مفصل i ام لولایی باشد با رابطه (۲۷-۲) و اگر کشویی باشد با رابطه (۳۴-۲) استفاده می شود؛ بنابراین ماتریس ژاکوبین ربات به صورت زیر حاصل می گردد

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & \dots & J_n \end{bmatrix} \quad (۳۶-۲)$$

که در رابطه فوق ستون i ام ماتریس ژاکوبین برای مفصل لولایی و کشویی به ترتیب بر اساس روابط (۳۷-۲) و (۳۸-۲) محاسبه می شود.

$$J = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i-1} \times (\mathbf{d}_0^n - \mathbf{d}_0^{i-1}) \\ \mathbf{z}_{i-1} \end{bmatrix} \quad (۳۷-۲)$$

$$J = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۳۸-۲)$$

با استفاده از دو رابطه آخر به سادگی می توان ژاکوبین بازوی ماهر را به دست آورد.

۳-۲ معادلات دینامیکی ربات

برای محاسبه معادلات دینامیکی یک سیستم با چند درجه آزادی به روش لاگرانژ، به محاسبه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی رابطها و مفاصل نیاز است. برای انجام این کار پس از محاسبه مقادیر انرژیها،

تابع لاگرانژین سیستم که عبارت است از اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل، تشکیل می‌شود. سپس با توجه به این تابع و استفاده از رابطه لاگرانژ معادلات دینامیکی سیستم به دست آمده می‌آید. در اینجا برای توضیح دقیق روند کار ابتدا به روابط مربوط به محاسبه انرژی‌ها پرداخته و سپس روابط نهایی استخراج می‌گردد.

۱-۳-۲ انرژی پتانسیل

در رابطه با دینامیک اجسام صلب، نیروی جاذبه تنها منبع تولید انرژی پتانسیل است. انرژی پتانسیل رابط i ام با فرض اینکه جرم جسم در مرکز جرم آن متمرکز شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_i = \mathbf{g}^T \mathbf{d}_0^{c_i} m_i \quad (39-2)$$

که در رابطه (۳۹-۲) متغیرهای m_i جرم رابط i ام، \mathbf{g}^T بردار شتاب جاذبه در دستگاه $X_0 Y_0 Z_0$ و $\mathbf{d}_0^{c_i}$ نشان‌دهنده 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 می‌شود:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{g}^T \mathbf{d}_0^{c_i} \quad (40-2)$$

برای محاسبه $\mathbf{d}_0^{c_i}$ باید مکان مرکز جرم هر رابط را در دستگاه مختصات متصل به همان رابط یعنی $\mathbf{d}_0^{c_i}$ را محاسبه کرده و سپس به کمک رابطه زیر مقدار $\mathbf{d}_0^{c_i}$ محاسبه کرد.

$$\mathbf{d}_0^{c_i} = \mathbf{d}_0^i + R_0^i \mathbf{d}_i^{c_i} \quad (41-2)$$

۲-۳-۲ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی یک جسم صلب از دو جمله تشکیل می‌شود: انرژی انتقالی که از متمرکز کردن کل جرم جسم در مرکز جرم آن به دست می‌آید و دیگری از انرژی جنبشی دورانی جسم حول مرکز جرم

آن به دست می‌آید. بدین ترتیب انرژی جنبشی یک ربات که عبارت است از مجموع انرژی جنبشی رابط‌های ربات که برای رابط i ام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i \mathbf{V}_{c_i}^T \mathbf{V}_{c_i} + \frac{1}{2} \mathbf{w}_0^{iT} \mathbf{I}_0^i \mathbf{w}_0^i \quad (42-2)$$

که در رابطه فوق، برای انرژی جنبشی رابط i ام می‌توان گفت که m_i جرم آن، \mathbf{V}_{c_i} بردار سرعت خطی مرکز جرم، \mathbf{w}_0^i بردار سرعت زاویه‌ای نسبت به دستگاه مختصات پایه و \mathbf{I}_0^i ماتریس ممان اینرسی رابط i ام ربات نسبت به دستگاه مختصات پایه می‌باشد.

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؛ که در این صورت دستگاه متصل به مرکز جرم ربات انتخاب شده است (Fateh 2007). برای ممان اینرسی رابط i ام نسبت به دستگاه صفر داریم:

$$\mathbf{I}_0^i = \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \quad (43-2)$$

بنابراین رابطه (42-2) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i \mathbf{V}_{c_i}^T \mathbf{V}_{c_i} + \frac{1}{2} \mathbf{w}_0^{iT} \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \mathbf{w}_0^i \quad (44-2)$$

که در رابطه فوق، \mathbf{R}_0^i ماتریس دوران است که بردارها را از دستگاه مختصات جسم به دستگاه مختصات پایه تبدیل می‌کند. \mathbf{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 می‌باشد؛ که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & -\int xy dm & -\int xz dm \\ -\int xy & \int (x^2 + z^2) dm & -\int yz dm \\ -\int xz & -\int yz dm & \int (y^2 + x^2) dm \end{bmatrix} \quad (45-2)$$

که در رابطه فوق x, y, z مختصات نقطه‌ای در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم رابط i ام می‌باشد. معادله بالا را می‌توان به فرم کلی زیر نیز نوشت:

$$\mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & -I_{xy_i} & -I_{xz_i} \\ -I_{xy_i} & I_{yy_i} & -I_{yz_i} \\ -I_{xz_i} & -I_{yz_i} & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (46-2)$$

با توجه به معادله (44-2) رابطه انرژی جنبشی کلی ربات را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{V}_{c_i}^T \mathbf{V}_{c_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_0^{iT} \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \mathbf{w}_0^i \quad (47-2)$$

همان گونه که در روابط (2-12) و (2-13) نشان داده شد، سرعت‌های خطی و زاویه‌ای هر نقطه از رابط به صورت جمله‌ای از ماتریس ژاکوبین و مشتق متغیرهای مفاصل ربات قابل بیان است. از این رو با تعریق متغیرهای مفاصل ربات در مختصات تعمیم یافته می‌توان گفت:

$$\mathbf{V}_{c_i} = J_{v_{c_i}} \dot{\mathbf{q}} \quad (48-2)$$

$$\mathbf{W}_0^i = J_{w_i} \dot{\mathbf{q}} \quad (49-2)$$

برای محاسبه $J_{v_{c_i}}$ باید از $\mathbf{d}_0^{c_i}$ بجای \mathbf{d}_0^n در معادله (2-29) استفاده نمود؛ بنابراین طبق توضیحات قبلی مجدداً به رابطه (2-41) برای محاسبه $\mathbf{d}_0^{c_i}$ نیاز است.

با جایگذاری روابط (2-48) و (2-49) در فرم کلی انرژی جنبشی ربات (2-47)، به صورت دیگری بازنویسی می‌شود:

$$k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_{c_i}}^T J_{v_{c_i}} + J_{w_i}^T \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} J_{w_i}] \dot{\mathbf{q}} \quad (50-2)$$

بنابراین رابطه (2-50) را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (51-2)$$

که در آن ماتریس $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ عبارت است از:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_{c_i}}^T J_{v_{c_i}} + J_{w_i}^T \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} J_{w_i}] \quad (52-2)$$

لذا انرژی پتانسیل ربات به کمک رابطه (۲-۴۰) و انرژی جنبشی ربات به کمک رابطه (۲-۵۱) محاسبه می‌شود.

۲-۳-۳ معادلات حرکت

در این قسمت فرم کلی معادلات حرکت سیستم از روش اویلر- لاگرانژ محاسبه می‌شود. رابطه لاگرانژ برای نوشتن معادلات حرکت سیستم به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} \quad (2-53)$$

که در این رابطه $\boldsymbol{\tau}$ بردار گشتاور برای مفاصل لولایی و نیرو برای مفاصل کشویی است و تابع L مطابق با رابطه (۲-۵۵) از تفاضل انرژی جنبشی و پتانسیل به دست می‌آید و لاگرانژین سیستم نامیده می‌شود.

$$L = K - V \quad (2-54)$$

با جایگذاری معادلات (۲-۴۰) و (۲-۵۱) در معادله (۲-۵۴) و ساده‌سازی روابط، معادله نهایی زیر به دست می‌آید:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{D}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}) + \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \quad (2-55)$$

در نهایت معادله دینامیکی ربات به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (2-56)$$

که در آن $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ ماتریس $n \times n$ اینرسی ربات است. بردار گشتاور کریولیس و جانب مرکز و $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ بردار گرانش است که به ترتیب زیر تعریف می‌شوند.

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{D}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}) \quad (2-57)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \quad (2-58)$$

۲-۴ سینماتیک و دینامیک ربات

۲-۴-۱ طرح ربات

ربات اسکارا اغلب برای کارهای گرفتن و جابه‌جایی اجسام استفاده می‌شود. بر اساس کاربرد و نیازهای فضای کار، یک ربات اسکارای ۴ درجه آزادی $R-R-P-R^{22}$ به همراه یک درجه آزادی پنجه با مفصل کشویی به کار برده شده است. این ربات بدون لحاظ درجه آزادی پنجه در مجری انتهایی زنجیره، ۴ درجه آزادی دارد که شامل سه درجه مفصل لولایی و یک درجه مفصل کشویی است. سه درجه آزادی برای تعیین موقعیت مچ و پنجه و درجه آزادی چهارم برای هدایت ابزار در جهت جسم به کار می‌رود. متغیر تعمیم‌یافته مفصل i ام با q_i نشان داده می‌شود، این متغیر تعمیم‌یافته برای مفصل‌های لولایی برحسب رادیان و برای مفصل کشویی برحسب متر بیان می‌شود.

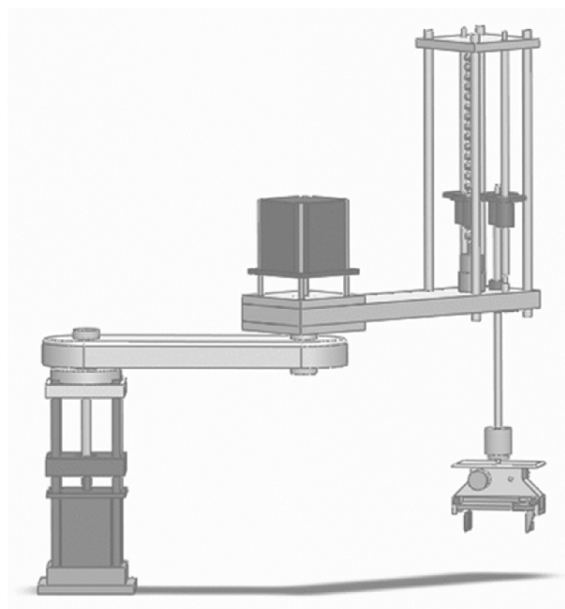
۲-۴-۱-۱ انتخاب نوع پنجه

به دلیل اینکه اندازه و شکل اجسام گرفته‌شده قابل تغییر است، باید پنجه بتواند اجسام مختلف را در یک بازه معین گرفته و جابه‌جا کند. پنجه باید کم‌حجم باشد تا به هنگام عملکرد با سایر تجهیزات تداخل نداشته باشد. اگر جسمی بزرگ‌تر از اندازه انگشتان مخروطی داشته باشیم (انگشتان سه‌تایی یا بیشتر)، پنجه نمی‌تواند جسم را به درستی نگه دارد؛ بنابراین باید سازوکاری برای حل این مشکل یافت. انگشتان متحرک موازی راهکاری است که گرفتن اجسام از درون را نیز ممکن می‌سازد. در انگشتان مخروطی شکل، از آنجاکه نیرو در یک نقطه یا خط اعمال می‌شود می‌تواند باعث پارگی و ساییدگی جسم یا انگشت شود؛ اما در ساختار انگشتان موازی، نیرو بر روی سطح تماس توزیع می‌شود. گرفتن با دو انگشت به‌عنوان ساده‌ترین پیکره‌بندی کارآمد برای گرفتن اجسام شناخته می‌شود. در این ساختار یک پنجه فک موازی در مجری نهایی ربات برای گرفتن اجسام قرار داده شده است که یک انگشت آن

²² Revolute-Revolute-Prismatic-Revolute

متحرک و انگشت دیگر برای ساده‌سازی کنترل و کمینه‌سازی هزینه ساخت ثابت است و مفصل انگشت از نوع کشویی است. انگشتان دارای سطح صاف و مستطیلی شکل هستند. در ترکیب انگشتان موازی، نیرو بر روی سطح تماس توزیع می‌شود و احتمال پارگی یا ساییدگی جسم را کاهش می‌دهد. همچنین فرض می‌شود که جسم گرفته‌شده، صلب و مکعب مستطیل شکل است که با انگشتان ربات تماس سطحی برقرار می‌کند.

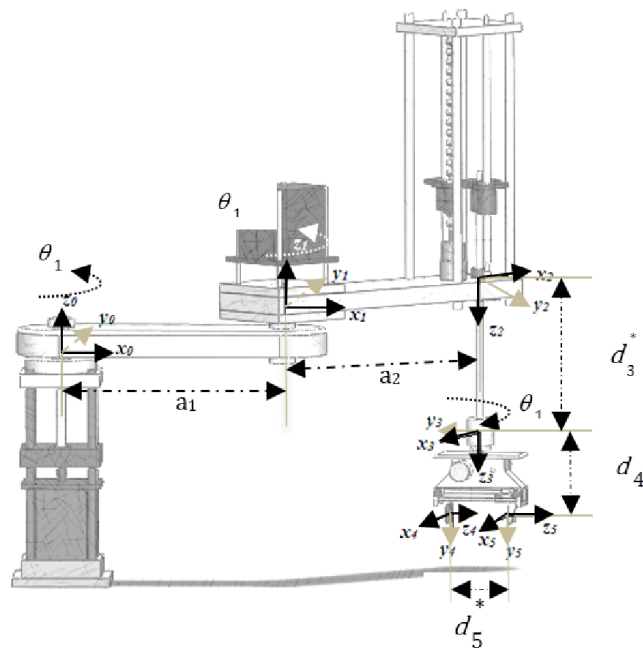
شکل (۱-۲) طرح نهایی این ربات را در محیط نرم‌افزار SolidWorks نشان می‌دهد. در این ربات از موتور DC مغناطیس دائم به‌عنوان محرک هر رابط استفاده شده است و وزن هر موتور در جدول مشخصات ربات، برای رابطی که موتور بر رویش نصب شده لحاظ شده است. رابط‌ها نیز به‌طور همگن و متقارن در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱-۲) طرح ربات در محیط SolidWorks

۲-۴-۲ سینماتیک ربات

برای تحلیل سینماتیک ربات، دستگاه‌های مختصات مطابق با شکل (۱-۲) و با توجه به قوانین دناویت-هارتنبرگ بر روی مفاصل ربات قرار داده شده‌اند.



شکل (۲-۲) تخصیص دستگاه‌های مختصات با توجه به روش دناویت- هارتنبرگ

لازم به ذکر است در شکل (۲-۲) پارامترهای متغیر ربات با علامت (*) مشخص شده‌اند. با توجه به دستگاه‌های مختصات مشخص شده در شکل (۲-۲)، جدول پارامترهای ربات با توجه به قوانینی که در قسمت معادلات سینماتیکی به دست آمد، به صورت جدول (۱-۲) به دست می‌آید. مقادیر درست پارامترهای ربات پس از ترسیم ربات در نرم‌افزار SolidWorks در جدول (۲-۲) و ممان اینرسی رابط‌ها در جدول (۳-۲) آمده است.

جدول (۱-۲) مقداردهی پارامترهای دناویت- هارتنبرگ

θ_i	d_i	a_i	α_i	رابط شماره i
θ_1^*	0	a_1	0	۱
θ_2^*	0	a_2	π	۲
π	d_3^*	0	0	۳
θ_4^*	d_4	0	$\frac{\pi}{2}$	۴
0	d_5^*	0	0	۵

جدول (۲-۲) مشخصات ربات اسکارای طراحی شده

m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	جرم رابط (kg)
۱/۲	۱/۱۶	۰/۵۶	۰/۰۲	۰/۲	
	a_1	a_2	d_4		طول رابط (m)
	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۰۴		

جدول (۳-۲) مقادیر ممان اینرسی رابطه‌های ربات

I_{xxi} (kgm^2)	I_{yyi} (kgm^2)	$I_{zz i}$ (kgm^2)	I_{xyi} (kgm^2)	I_{xzi} (kgm^2)	I_{yzi} (kgm^2)	رابط i
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۱
۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۲	۲
۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۳
۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۴
۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۵

۳-۴-۲ مدل سازی دینامیکی

با توجه نتایج به دست آمده در بخش سینماتیک ربات، محاسبات مرتبط با دینامیک ربات انجام می‌شود. بدین منظور ابتدا ماتریس‌های تبدیل ربات تشکیل می‌شود. سپس به کمک آن‌ها ماتریس‌های دوران، انتقال، ژاکوبین سرعت خطی و زاویه‌ای و ماتریس اینرسی محاسبه می‌شوند. در مرحله بعد انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی را محاسبه نموده و مدل دینامیکی ربات با توجه به توضیحات بخش ۳-۲ به دست می‌آید. مدل دینامیکی ربات اسکارای مورد نظر به دلیل برقراری تماس با جسم، با لحاظ اثر بخشی محیط به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T F \quad (۵۹-۲)$$

که در این رابطه C, D ماتریس‌های 5×5 و G و q بردارهای 5×1 می‌باشند. F بردار نیروی اعمالی به جسم و J ماتریس ژاکوبین ربات است. مقادیر نظیر درایه‌های ماتریس‌های C, D, G و q در پیوست ۱ آورده شده است.

فصل سوم

کنترل لغزش پنجه ربات

۱-۳ مقدمه

در عملیات گرفتن اجسام ظریف و شکننده، بحث ایمنی در برابر نیروی وارده از طرف پنجه به جسم گرفته شده مطرح است و به تبع، در تحقیقات رباتیک نیز مسائلی تحت عنوان گرفتن ایمن اجسام ظریف مطرح شده و تحقیقات وسیعی در این زمینه صورت گرفته است.

با توجه به اینکه در مسئله گرفتن ایمن، جسم می‌بایست با حداقل نیروی عمودی مجاز گرفته شود، لذا فرض عدم لغزش در مدل‌سازی دینامیکی فرض ناصحیحی بوده و از سوی دیگر در شرایط عدم لغزش نیز فرض تناسب نیروی اصطکاک با نیروی عمودی غیرقابل قبول است. بنابراین در این فصل ابتدا اثر ساده‌سازی دینامیکی، یعنی به‌کارگیری مدل تک‌فازی اصطکاک برای تمام وضعیت‌های حرکتی، ارائه و اشکالات مربوط به عدم به‌کارگیری بازخورد نیرو و تکیه صرف بر بازخورد سرعت و شتاب نسبی برای جلوگیری از لغزش و کاهش نیروی عمودی را برای مدل تک‌فازی اصطکاک بیان می‌شود.

در این راستا مسئله نمونه‌ای مطرح شده و اثر این ساده‌سازی با استفاده از آن مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس برای مرتفع شدن اشکالات ناشی از کاربرد مدل ساده اصطکاک و بازخورد از حرکت نسبی، مدل واقعی و کامل اصطکاک شامل چهار فاز مطرح خواهد شد. این چهار فاز کل وضعیت‌های حرکتی را پوشش داده و شامل فازهای عدم لغزش، آستانه لغزش، لغزش و رهایی می‌باشند.

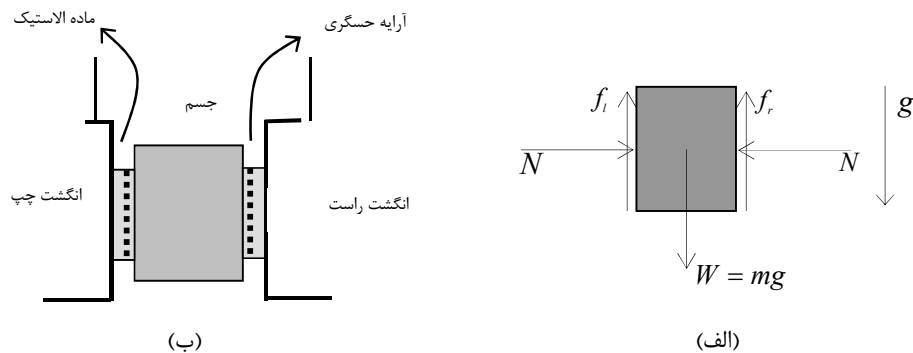
در نهایت با استفاده از یک کنترل‌کننده گشتاور محاسبه شده بر روی پنجه فک موازی، مدل‌سازی دینامیکی اصطکاک اجرا می‌شود و به‌عنوان کنترل‌کننده لغزش، در شرایط رخداد لغزش بکار می‌رود.

۲-۳ مدل‌سازی ساده اصطکاک

در بسیاری از موارد محققین از فرض تک‌فازی یا به عبارتی مدل ساده اصطکاک کولمبی برای مدل‌سازی دینامیکی بهره می‌گیرند. در این نوع مدل‌سازی فرض می‌شود در تمام وضعیت‌های حرکتی، نیروی اصطکاک همواره تابعی از نیروی عمودی اعمالی است. استفاده از این مدل‌سازی نادرست باعث خواهد شد کنترل‌کننده‌های مبتنی بر بازخورد از سرعت و شتاب نسبی، توانایی خوبی در کاهش نیروی

عمودی از خود نشان دهند، درحالی که بنا بر تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده (احمدی و صدیق ۱۳۸۹) نشان داده شده که در قسمت‌هایی از حرکت، نیروی عمودی اعمالی منفی می‌شود که این موضوع در عمل رهایی جسم از پنجه را به دنبال دارد. در این قسمت، موضوع فوق را بررسی کرده و نشان می‌دهیم نتایج مطلوب به دست آمده ولی نامعتبر فوق، ناشی از کاربرد غیر صحیح مدل‌سازی است که بر اساس مدل تک فازی اصطکاک کولمبی بنا نهاده شده است.

برای درک بهتر مطلب فوق، مدل ساده‌ای بر روی پنجه ربات فک موازی مورد مطالعه قرار داده می‌شود. در این مسئله پنجه‌ای دو انگشته جسمی را در صفحه عمودی (راستای ثقلی) مهار می‌نمایند. از آنجایی که پنجه مورد نظر دارای حرکت خطی در راستای عمود بر راستای ثقلی است، دیاگرام آزاد جسم گرفته شده را می‌توان به طوری که در شکل (۳-۱-الف) نمایش داده شده رسم نمود. پنجه مطابق شکل (۳-۱-ب) مسطح و پوشیده از ماده الاستیک است تا تماس بین پنجه و جسم به نحو مطلوبی حاصل گردد.



شکل (۳-۱) سیستم مورد مطالعه؛ (الف) دیاگرام آزاد جسم، (ب) شماتیک انگشت

در شکل (۳-۱-الف)، وزن جسم، W و نیروهای اصطکاکی بین جسم و پنجه در هر طرف و N نیروی عمودی اعمال شده به جسم از طرف پنجه می‌باشند. حرکت پنجه را خطی و در راستای شتاب ثقل (راستای محور y) در نظر گرفته و معادلات حرکت جسم را به صورت زیر ارائه نموده‌اند.

$$(f_l + f_r) - m_{obj}g = m_{obj}\ddot{y}_{obj} \quad (1-3)$$

در این تحقیق با فرض ساده کننده اصطکاک تک فازی در فاز لغزش و استفاده از رابطه $f_l = \mu_l N$ و $f_r = \mu_r N$ معادله (۳-۱) به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$\ddot{y}_{obj} = ((\mu_l + \mu_r)N - g) / m_{obj} \quad (۳-۲)$$

که در آن \ddot{y}_{obj} ، μ_l ، μ_r و m_{obj} به ترتیب شتاب جسم، ضریب اصطکاک طرف چپ، طرف راست و جرم جسم می‌باشند. همچنین با فرض رفتار خطی برای لاستیک روی پنجه، رابطه نیروی عمودی با میزان فشردگی قسمت انعطاف‌پذیر پنجه به صورت زیر بیان شده است.

$$N = K_f (\delta x_l + \delta x_r) \quad (۳-۳)$$

که در معادله فوق K_f ضریب سختی فنری معادل δx_l و δx_r میزان فشردگی پنجه را در دو طرف نشان می‌دهند.

۳-۳ مدل سازی کامل اصطکاک

همان‌طور که در مرجع (احمدی و صدیق ۱۳۸۹) نشان داده شده، استفاده از مدل تک فازی که متناسب با حالت واقعی نبوده و نشان‌دهنده حرکتی تنها در فاز لغزش می‌باشد به عنوان مدل دینامیکی در مدل سازی رفتار سیستم، صحیح نیست. در واقعیت مقدار نیروی اصطکاک بین دو جسم بسته به وضعیت حرکتی بین آن دو متفاوت بوده و هرگاه دو جسم به یکدیگر نیرویی وارد نمایند، بین آن‌ها نیروی اصطکاکی به وجود نیامده و هرگاه دو جسم نسبت به هم دارای حرکت نسبی باشند، می‌توان نیروی اصطکاک را تابع خطی از نیروی عمودی نظر گرفت و در نهایت هرگاه دو جسم به یکدیگر نیرو وارد نموده ولی سرعت و شتاب نسبی بین آن‌ها وجود نداشته باشد، رابطه اصطکاک با نیروی عمودی خطی نبوده و مقدار نیروی اصطکاک بین دو جسم با توجه به حرکت سیستم به دست خواهد آمد. بنابراین فازهای مختلف حرکتی برای سیستمی مطابق شکل (۳-۱-ب) که در آن پنجه با اعمال نیروی عمودی سعی در نگهداری جسم در راستای ثقلی دارد به صورت زیر خواهد بود:

۱. فاز عدم لغزش: در این فاز، جسم به صورت صلب توسط پنجه گرفته شده و لغزشی اتفاق نمی‌افتد.

(در این وضعیت سرعت و شتاب جسم نسبت به پنجه صفر است)

۲. فاز آستانه لغزش: در این فاز، جسم با کمینه نیروی عمودی گرفته شده و در آستانه لغزش قرار

دارد. (در این وضعیت سرعت جسم نسبت به پنجه صفر است لیکن شتاب جسم نسبت به پنجه

مخالف صفر است)

۳. فاز لغزش: در این فاز، نیروی لازم برای گرفتن کافی نبوده و جسم در حال لغزش است. (در این

وضعیت سرعت جسم نسبت به پنجه مخالف صفر است)

۴. فاز رهایی جسم: در این فاز، جسم از پنجه رها شده و شروع به سقوط می‌نماید. (در این وضعیت

نیروی عمودی بین پنجه و جسم برابر صفر است)

در ادامه با توجه به فازهای حرکتی که در بالا تعریف شد معادلات حرکت جسم در هر فاز استخراج و

جزئیات آن‌ها تشریح شده است.

۳-۱-۳ فاز عدم لغزش

در این فاز نیروی لازم جهت اعمال بر جسم و مهار آن از طرف پنجه تأمین شده و در نتیجه مجموعه

جسم و پنجه به صورت یکپارچه حرکت خواهند کرد، لذا شتاب جسم در این حالت با شتاب پنجه برابر

شده و در نتیجه شتاب آن مقدار معلومی خواهد داشت. در این فاز نیروی اصطکاک با توجه به عدم وجود

لغزش نسبی بین جسم و پنجه رابطه خطی با نیروی عمودی اعمالی از طرف پنجه نداشته و مقدار آن

مجهول خواهد بود. بنابراین معادلات زیر را برای این وضعیت خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{obj} &= \ddot{y}_{grip} \\ f_l + f_r &= m_{obj}(\ddot{y}_{grip} + g) \\ N &= k_f(\delta x_l + \delta x_r) \end{aligned} \quad (4-3)$$

با توجه به اینکه در این فاز جسم توسط پنجه به صورت صلب گرفته شده است رابطه اول در معادله فوق

شتاب جسم را می‌دهد، در این حالت با توجه به رابطه (۳-۲) و معادله اول از رابطه بالا می‌توان رابطه

دوم آن را برای به دست آوردن مجموع نیروی اصطکاکی در دو سمت جسم نوشت. در نهایت رابطه سوم نیز همواره برای به دست آوردن نیروی عمودی برقرار می‌باشد. در ضمن پارامترهای ورودی مسئله δx_i و δx_r با استفاده از کنترل‌کننده به دست می‌آیند. به‌طور خلاصه دسته روابط فوق شامل سه معادله و چهار مجهول \ddot{y}_{obj} ، f_l ، f_r و N هستند که با حل همزمان سه معادله ذکر شده و فرض تساوی نیروی اصطکاک در دو طرف جسم مجهولات مربوطه به دست خواهند آمد.

۲-۳-۳ فاز آستانه لغزش

در این فاز حرکتی، فشردگی دهانه پنجه طوری است که حداقل نیروی لازم جهت نگهداری جسم را ایجاد کرده و جسم با اندک افزایش نیروی عمودی وارد فاز عدم لغزش و یا با اندک کاهش آن وارد فاز لغزش خواهد شد. در این حالت می‌توان فرض کرد که نیروهای اصطکاکی با نیروی عمودی متناسب بوده ولی جهت آن‌ها با توجه به برآیند نیروهای وارد بر جسم به دست می‌آید، بنابراین روابط زیر را برای این وضعیت خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} N &= k_f(\delta x_l + \delta x_r) \\ f_i &= -\mu_i N \operatorname{sgn}(\ddot{y}_{obj} - \ddot{y}_{grip}); \quad i = l, r \\ \ddot{y}_{obj} &= (f_l + f_r) / m_{obj} - g \end{aligned} \quad (5-3)$$

در رابطه فوق ابتدا نیروی عمودی با توجه به مقدار بسته شدن پنجه، توسط معادله اول به دست آمده و سپس با توجه به تناسب ذکر شده در معادله دوم، نیروی اصطکاکی به دست می‌آید و در نهایت با استفاده از معادله سوم، شتاب مطلق جسم حاصل می‌گردد. بنابراین روابط فوق شامل چهار معادله و چهار مجهول \ddot{y}_{obj} ، f_l ، f_r و N می‌باشد که با حل همزمان معادلات فوق مجهولات مربوطه به دست خواهند آمد.

۳-۳-۳ فاز لغزش

در این فاز حرکتی، پنجه نیروی اصطکاکی لازم جهت نگهداری جسم را اعمال نمی‌کند و این موضوع باعث ایجاد حرکت نسبی بین جسم و پنجه شده و جسم شروع به لغزش می‌نماید، لذا طبق رابطه

اصطکاک کولمبی نیروی اصطکاک ایجادشده متناسب با نیروی عمودی اعمالی به جسم می‌باشد. لازم به ذکر است این نیرو در خلاف جهت سرعت نسبی ایجادشده بین جسم و پنجه بوده و بنابراین روابط زیر را برای این فاز خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} N &= k_f (\delta x_l + \delta x_r) \\ f_i &= -\mu_i N \operatorname{sgn}(\dot{y}_{obj} - \dot{y}_{grip}); \quad i = l, r \\ \ddot{y}_{obj} &= (f_l + f_r) / m_{obj} - g \end{aligned} \quad (6-3)$$

در رابطه فوق $(\dot{y}_{obj} - \dot{y}_{grip})$ نشان‌دهنده سرعت نسبی جسم نسبت به پنجه می‌باشد. در این حالت نیز مشابه حالت قبل نیروی عمودی با توجه به میزان بسته شدن پنجه با استفاده از معادله اول به دست می‌آید و در ادامه با توجه به تناسب ذکرشده در معادله دوم، نیروی اصطکاک به دست آمده و در نهایت با استفاده از معادله سوم، شتاب جسم محاسبه می‌شود، لذا به‌طور خلاصه می‌توان گفت روابط فوق شامل چهار معادله و چهار مجهول \ddot{y}_{obj} ، f_l ، f_r و N می‌باشد که با حل همزمان معادلات فوق مجهولات مربوطه در این فاز به دست خواهند آمد.

۳-۳-۴ فاز رهایی جسم

در این فاز پنجه نیرویی به جسم وارد نکرده و هیچ‌گونه تماسی بین پنجه و جسم وجود ندارد، لذا هم نیروی اصطکاک و هم نیروی عمودی بین جسم و دهانه صفر خواهد بود. در این حالت با توجه به اینکه جسم از پنجه رهاشده است، با شتاب ثقل شروع به حرکت می‌نماید، بنابراین به‌طور خلاصه روابط زیر را برای این وضعیت خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{obj} &= -g \\ N &= 0 \\ f_l &= f_r = 0 \end{aligned} \quad (7-3)$$

پس چهار مجهول \ddot{y}_{obj} ، f_l ، f_r و N در این فاز با توجه به معادلات فوق به دست خواهند آمد.

۳-۴ شبیه‌سازی

۳-۴-۱ بررسی اثر به‌کارگیری مدل کامل دینامیکی بر روی پنجه

در این قسمت اثر به‌کارگیری مدل کامل اصطکاکی برای مسئله ارائه‌شده در بخش ۳-۳ بررسی شده است. بدین ترتیب که شبیه‌سازی پنجه فک موازی با مشخصات در نظر گرفته‌شده در بخش ۲-۴-۱-۱ با کاربرد مدل کامل اصطکاکی ارائه‌شده در بخش‌های ۳-۳-۱ تا ۳-۳-۴ و با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی بررسی نموده و نتایج مربوطه نمایش داده‌شده است.

مقدار مطلوب موقعیت انگشت با توجه به شتاب اعمالی به جسم در اثر حرکت پنجه و وزن جسم محاسبه می‌گردد؛ که در این حالت سرعت و شتاب پنجه صفر در نظر گرفته می‌شود و شتاب جسم تنها تحت تأثیر نیروی وزن جسم است. شتاب مطلوب حرکت جسم a_{obj}^d در فاز عدم لغزش همان شتاب اعمالی به پنجه است و در حالتی که پنجه به ربات متصل شده باشد، می‌توان از معادلات دینامیکی ربات آن را محاسبه نمود. مؤلفه‌های این شتاب در شرایط این مثال تنها $a_{obj,y}^d$ می‌باشد که همان شتاب جسم در راستای محور Y_4 است و در دستگاه مختصات مرجع بیان شده‌اند.

$$a_{obj,y}^d = a_{grip,y} \quad (۳-۸)$$

برای کنترل لغزش و جلوگیری از رخداد آن می‌بایست نیروی اعمالی به جسم، جبران‌کننده‌ی نیروی وزن جسم شود. از طرف دیگر نیروی واقعی اعمال‌شده به جسم با حسگر اندازه‌گیری می‌شود. اختلاف این دونیرو بیانگر لغزش جسم است که در این تحقیق لغزش فوق در راستای Y_4 می‌باشد. لذا با توجه به معادله حرکت جسم گرفته‌شده که در رابطه (۳-۱) نشان داده شد و با توجه به فرض برابری نیروهای اصطکاکی در طرفین جسم، رابطه زیر را می‌توان برای محاسبه بیشینه نیروی مماسی لازم، جهت کنترل لغزش و برقراری ایمنی در هنگام گرفتن جسم نوشت.

$$f_d = m_{obj}g + m_{obj}a_{obj,y}^d \quad (۳-۹)$$

در رابطه (۳-۹)، f_d نیروی لازم برای کنترل لغزش در راستای Y_4 می‌باشد.

بنابراین نیروی عمودی مطلوبی که از طرف انگشت ربات و در جهت عمود بر جسم وارد می‌شود تا از لغزش در راستای Y_4 آن جلوگیری کند از تقسیم اندازه f_d بر ضریب اصطکاک سطح تماس مطابق با رابطه (۱۰-۳) به دست می‌آید.

$$N_d = \frac{f_d}{\mu} \quad (10-3)$$

همچنین با توجه به رابطه (۳-۳) مقدار نیروی عمودی مطلوب در صورتی که q_5 مجموع مقدار فشرده‌گی انگشت در دو طرف باشد، توسط رابطه (۱۱-۳) بیان می‌شود. لذا با تساوی روابط (۱۰-۳) و (۱۱-۳) موقعیت مطلوب انگشت در پنجه ربات به شکل رابطه (۱۲-۳) به دست می‌آید.

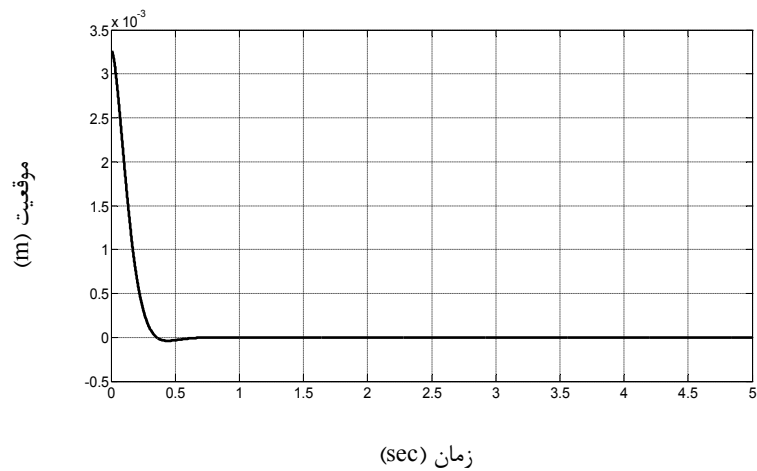
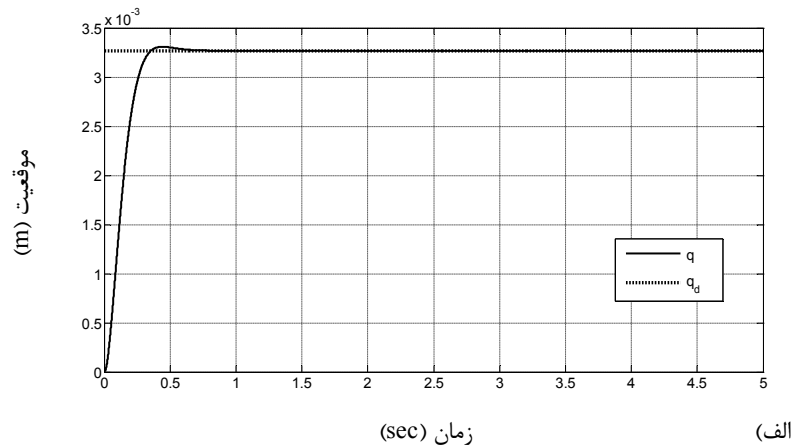
$$N_d = K_f(q_5^d - q_{5_0}) \quad (11-3)$$

$$q_5^d = \frac{N_d}{K_f} + q_{5_0} \quad (12-3)$$

پس از محاسبه موقعیت مطلوب انگشت در راستای کنترل لغزش جسم، کنترل کننده تناسبی - مشتقی به سیستم اعمال می‌شود. قانون این کنترل کننده به صورت زیر است:

$$F = m(\ddot{q}_d + k_p(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_d(q_d - q)) \quad (13-3)$$

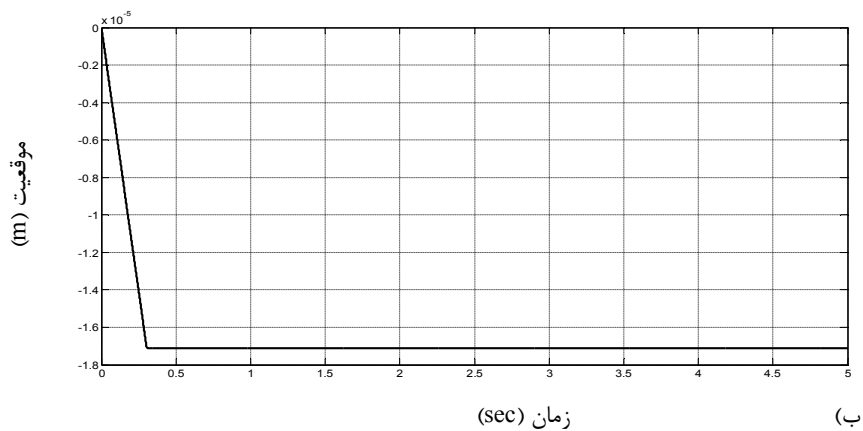
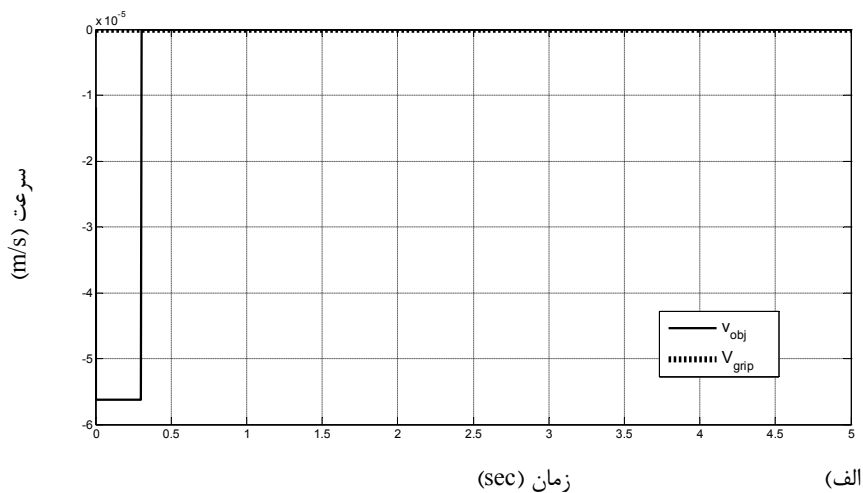
که در این معادله پارامترهای کنترلی و دینامیکی به صورت $m=0.5 \text{ kg}$, $\mu_r=0.3$, $k_f=5000 \text{ N/m}$, $k_p=20$ و $k_d=20$ در نظر گرفته شده‌اند و F نیروی اعمالی به جسم است. با اعمال کنترل کننده رابطه (۱۳-۳) مطابق با شکل (۲-۳) مشاهده می‌شود که در ابتدا انگشت شروع به حرکت می‌کند تا اینکه پس از زمان تقریبی ۱ ثانیه از حرکت به مقدار مطلوب خود می‌رسد و خطای ردگیری موقعیت انگشت به صفر میل می‌کند. معنای فیزیکی این نوسانات در انگشت بدین صورت است که در یک ثانیه که خطای سیستم صفر نشده است، انگشت مدام باز و بسته می‌شود تا بتواند خود را به موقعیت مطلوب برساند؛ اما همین تغییر موقعیت بر روی جسم نگه‌داشته شده توسط پنجه اثر می‌گذارد و باعث لغزش آن در پنجه می‌شود.



شکل (۲-۳) الف- موقعیت انگشت و موقعیت مطلوب آن، ب- خطای ردگیری

در نتیجه این حرکت، همان گونه که در شکل (۲-۳-الف) نشان داده شده سرعت جسم نسبت به سرعت پنجه ربات تغییر می کند. علاوه بر آن جسم نیز در همان بازه زمانی ۰ تا ۰/۸ ثانیه، نسبت به مرکز ثقل پنجه لغزش می یابد (شکل ۲-۳-ب)).

همان طور که گفته شد در این قسمت از شبیه سازی هیچ حرکت از پیش تعریف شده ای برای پنجه در نظر گرفته نشده است، لذا در این حالت جسم تنها به خاطر اثر وزن خود در راستای Y حرکت کرده است. از این رو به منظور بررسی رخ داد لغزش، موقعیت جسم تنها در راستای قائم بررسی می شود.



شکل (۳-۳) الف- سرعت جسم و سرعت پنجه، ب- موقعیت جسم نسبت به مرکز جرم پنجه

با توجه به نمودار سرعت و موقعیت جسم نسبت به پنجه می‌توان گفت که جسم گرفته‌شده در ابتدا لغزیده است؛ اما پس از عملکرد کنترل‌کننده، موقعیت پنجه به مقدار مطلوب خود رسیده است و پس‌از آن با تنظیم دهانه، پنجه لغزش جسم را تحت کنترل خود قرار داده و آن را متوقف کرده است. در این حالت نمودار لغزش جسم نیز برابر با مقدار جابه‌جایی جسم می‌باشد که در شکل (۳-۳-ب) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار جسم در بازه زمانی $0/8$ ثانیه اول حرکت نسبت به موقعیت اولیه خود لغزش داشته است و پس‌از آن با توجه به مهار جسم توسط پنجه، میزان لغزش در مقدار ثابت $0/017$ میلی‌متر باقی می‌ماند.

فصل چهارم

کنترل به منظور مهار و جبران لغزش به طور همزمان

۴-۱ مقدمه

یک روش شناخته شده برای ردیابی مسیر توسط بازوی ماهر، روش کنترل گشتاور محاسبه شده است. کنترل گشتاور محاسبه شده که به اختصار CTC نامیده می شود، کنترل کننده قویاً غیرخطی است که به طور گسترده ای در کنترل بازوی ماهر ربات استفاده شده است. این کنترل کننده بر اساس خطی سازی پس خوردی عمل می کند و گشتاور مورد نیاز بازوهای ربات را به کمک قانون کنترل پس خورد غیرخطی محاسبه می کند. در زمانی که تمام پارامترهای فیزیکی و دینامیکی شناخته شده باشد، این کنترل کننده به خوبی عمل می کند.

به طور کلی مدل دینامیکی که رفتار بازوی ماهر ربات را توصیف می کند، دربرگیرنده توابع غیرخطی از متغیرهای حالت است (موقعیت و سرعت مفاصل). این ویژگی مدل سازی دینامیکی این تصور را ایجاد می کند که در هر کنترل کننده، معادلات دیفرانسیل توصیف کننده سیستم در حالت حلقه بسته می - بایست شامل توابع غیرخطی متناظر با متغیرهای حالت باشد. هر چند CTC نسبت به متغیرهای حالت رفتار غیرخطی دارد ولی سیستم کنترل حلقه بسته ای ایجاد می کند که با معادلات دیفرانسیل خطی توصیف می گردد. به طور کلی، این کنترل کننده قادر به برآورده ساختن هدف کنترل حرکت است و این کار را به کمک انتخاب پارامترهای طراحی به راحتی انجام می دهد.

جدا از در نظر گرفتن هر نوع کنترل کننده جهت انجام عملیات ردیابی مسیر، حرکت ربات و برداشتن جسم از نقطه اولیه تا رساندن آن به مقصد مورد نظر نیازمند انجام چندین حرکت شتاب دار است. در نتیجه این حرکات به هر یک از مفاصل رابطهای ربات شتابی اعمال می شود. این شتاب بازوها بر روی شتاب جسم گرفته شده نیز اثر می گذارد. همین تغییرات شتاب جسم نسبت به شتاب اولیه ای که مطلوب حرکت آن بوده، یعنی شتاب انگشت، می تواند به هنگام حرکت ربات باعث تغییر وضعیت جسم نسبت به انگشتان پنجه ربات شود که در این صورت اصطلاحاً پدیده لغزش اتفاق می افتد؛ بنابراین CTC پیاده سازی شده بر روی ربات باید علاوه بر تولید گشتاور مناسب برای ردیابی مسیر هر یک از مفاصل

ربات، قابلیت کنترل لغزش جسم گرفته‌شده را نیز دارا باشد تا بتواند به‌عنوان کنترل‌کننده لغزش نیز استفاده شود.

به‌منظور مهار جسم توسط کنترل‌کننده، نیروهای اصطکاکی و عمودی بین جسم و انگشت می‌بایست به‌طور شفاف‌تری بررسی گردد. در این خصوص به هنگام کنترل سیستم با فازهای حرکتی مختلفی مواجه خواهیم شد. محاسبه نیروها با توجه به وجود فازهای حرکتی بین جسم و پنجه و به دلیل اینکه جسم در بعضی از این فازهای حرکتی توسط پنجه گرفته می‌شود ما را به دانستن معادلات حرکت جسم وامی‌دارد.

۲-۴ دینامیک جسم

از آنجاکه ربات اسکارای مذکور جسمی را توسط پنجه گرفته و جابه‌جا می‌نماید، در طی مانور حرکتی امکان لغزش جسم با توجه به شتاب‌های اعمالی وجود دارد؛ لذا در لحظاتی از حرکت که جسم توسط پنجه گرفته و لغزشی ندارد، شتاب آن با شتاب پنجه ربات یکسان است و در لحظاتی که جسم در حال لغزش بین انگشتان است، شتاب آن در جهات لغزش از شتاب پنجه تبعیت نمی‌کند. در این وضعیت معادلات مسیر جسم را می‌توان با توجه به شرایط لغزش نوشت (Habib Ahmadi and Sadigh 2008). در تحلیل و بررسی این مسئله فرض‌های ذیل برای سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

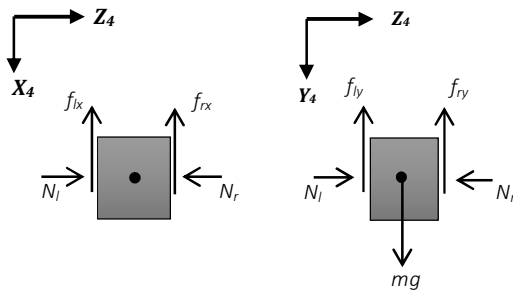
۱. اجسامی که توسط ربات گرفته می‌شوند مکعبی شکل می‌باشند و پدیده گرفتن توسط انگشتان به‌صورت متقارن است.

۲. ضریب اصطکاک بین جسم و انگشت‌ها معلوم و در دو طرف یکسان است.

۳. جسم گرفته‌شده صلب است اما تماس انگشت و جسم به‌صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود. این خاصیت الاستیک می‌تواند مجموعه‌ای از انعطاف‌پذیری موجود در انگشت و یا سطح تماس باشد که نهایتاً به‌عنوان یک فنر معادل‌سازی شده است.

۴. نیروی اصطکاکی و عمودی بین جسم و انگشت توسط حسگرهای لمسی تعبیه شده در انگشتان قابل اندازه گیری و یا محاسبه است.

با توجه به فرضیات فوق دیاگرام آزاد جسم در دستگاه مختصات پنجه ربات مطابق با شکل (۴-۱) ترسیم می شود. (لازم به ذکر است دستگاه مختصات پنجه مطابق با شکل (۲-۲)، دستگاه شماره ۴ می باشد). در این شکل نیروهای اعمالی در دو صفحه X_4-Z_4 و Y_4-Z_4 نشان داده شده است.



شکل (۴-۱) دیاگرام آزاد جسم در دو صفحه X_4-Z_4 و Y_4-Z_4

بردار $\mathbf{F} = [f_{rx} + f_{lx}, f_{ry} + f_{ly}, N_r - N_l]^T$ بردار نیروی اعمالی از طرف پنجه به جسم در مختصات پنجه می باشد. لازم به ذکر است N_l و N_r نیروی عمودی اعمالی از طرف انگشتان بر سمت چپ و راست، f_{lx} و f_{rx} نیروهای اصطکاکی در نقاط تماس از سمت چپ و راست در راستای X_4 و f_{ly} و f_{ry} نیروهای اصطکاکی در نقاط تماس بر سمت چپ و راست جسم در راستای محور Y_4 هستند.

در حالت کلی جسم در فضا شش درجه آزادی دارد اما با توجه نوع سازوکاری که در این تحقیق برای گرفتن توسط دو فک موازی در پنجه ربات اسکارا در نظر گرفته شده است، یک درجه آزادی آن در امتداد محور Z_4 با مؤلفه حرکتی پنجه یکسان بوده و با توجه به فک موازی بودن انگشتان پنجه امکان چرخش جسم در امتداد محورهای X_4 و Y_4 وجود ندارد.

با توجه به فرض گرفتن متقارن توسط پنجه و یکسان بودن ضریب اصطکاک در دو طرف، توزیع نیروهای اصطکاکی بین جسم و انگشت در طرفین جسم در صفحه X_4-Y_4 به صورت متقارن صورت می گیرد، لذا گشتاوری حول محور Z_4 بر جسم اعمال نخواهد شد، بنابراین جسم در این امتداد نمی چرخد. لازم

به ذکر است که با توجه ساختار ربات اسکارا، هیچ مانور حرکتی توسط آن باعث چرخش جسم نیز حول محور Z_4 نخواهد شد، زیرا دو بازوی ابتدایی ربات اسکارا همواره در صفحه هم‌راستا با Z_4 حرکت می‌نمایند و حرکت چرخشی مفصل شماره ۴ حول محور Y_4 می‌باشد. لذا لغزش جسم بین انگشتان تنها در امتداد محورهای X_4 و Y_4 خواهد بود.

با توجه به مطالب فوق برای سیستم مورد مطالعه، معادلات حرکت جسم را می‌توان به صورت معادله (۴-۱) نمایش داد. لازم به ذکر است که به دلیل سهولت در اندازه‌گیری مقدار لغزش رخ داده برای جسم، معادلات حرکت آن در امتداد محورهای پنجه (البته در مختصات مرجع) نوشته شده است.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{obj} \\ \ddot{y}_{obj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{lx} - f_{rx} \\ -f_{ly} - f_{ry} + W \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

که در معادله فوق W و m به ترتیب معرف وزن و جرم جسم می‌باشند. X_{obj} و Y_{obj} نیز به ترتیب معرف تصویر موقعیت مطلق جسم در امتداد محورهای X_4 و Y_4 هستند.

۴-۳ مدل سازی دینامیکی لغزش

بررسی حالت‌های مختلف لغزش جسم نیازمند بررسی رفتار دینامیکی آن است. بنا بر روابطی که در بخش مدل سازی جسم بیان شد، می‌توان حالت‌های مختلف لغزش جسم را بر اساس مقدار نیروهای اعمالی بر آن و حرکت نسبی جسم نسبت به پنجه تحلیل کرد. بدین منظور از تمامی نیروهای عمودی اعمالی و اصطکاکی وارد به جسم استفاده می‌شود.

برای محاسبه نیروی عمودی به دلیل تقارن ($N=N_l=N_r$) معادله زیر برقرار است:

$$N = k_f(q_5 - q_{5_0}) \quad (2-4)$$

در رابطه فوق k_f سختی معادل برای انعطاف‌پذیری سیستم مورد مطالعه بوده و موقعیت انگشت q_5 و q_{5_0} موقعیت اولیه انگشت است.

با توجه به اینکه هدف مسئله نگهداری جسم با اعمال حداقل نیرو است و جسم در معرض مانورهای مختلف ربات قرار می‌گیرد، وضعیت‌های مختلف حرکتی بین جسم و انگشتان ایجاد می‌شود. این وضعیت‌ها شامل رهایی جسم، آستانه لغزش بین جسم و انگشتان، لغزش بین آن‌ها و در نهایت عدم لغزش بین جسم و انگشتان می‌باشند. لذا وضعیت‌های مختلف تماسی بین جسم و انگشتان را برای لغزش در دو جهت می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد.

۱-۳-۴ لغزش در نقاط تماس

در صورت لغزش در نقاط تماس سرعت نسبی جسم نسبت به انگشتان مخالف صفر خواهد بود که این شرط به صورت زیر بیان می‌شود:

$$|\hat{\mathbf{V}}| = |\dot{\mathbf{x}}_i + \dot{\mathbf{r}}_j| > 0 \quad (3-4)$$

که در این رابطه $\hat{\mathbf{V}}$ سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم و $\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}}_{grip} - \dot{\mathbf{x}}_{obj}$ و $\dot{\mathbf{y}} = \dot{\mathbf{y}}_{grip} - \dot{\mathbf{y}}_{obj}$ به ترتیب مؤلفه‌های آن در راستای محور X_4 و Y_4 می‌باشند. لازم به ذکر است $\dot{\mathbf{x}}_{grip}$ و $\dot{\mathbf{y}}_{grip}$ مؤلفه‌های سرعت پنجه در راستای محورهای X_4 و Y_4 هستند. شرط فوق به معنی وجود لغزش بین جسم و پنجه بوده و در نتیجه برآیند نیروهای اصطکاکی در هر سطح با استفاده از رابطه اصطکاک کولمبی یعنی $\mu_r N$ و $\mu_l N$ به دست می‌آیند که در این روابط μ_r و μ_l به ترتیب ضریب اصطکاک سمت راست و چپ جسم است. حال برای اینکه بتوان مؤلفه‌های نیروی اصطکاکی را در جهات X_4 و Y_4 به دست آورد باید به این نکته توجه کرد که به علت وجود سرعت نسبی بین جسم و انگشتان، راستای نیروی اصطکاکی و سرعت نسبی در هر سمت هم‌ارز می‌باشد، لذا می‌توان مؤلفه‌های نیروی اصطکاک را با توجه به راستای مؤلفه‌های سرعت نسبی به دست آورد. بنابراین با توجه به اینکه $\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}}_{grip} - \dot{\mathbf{x}}_{obj}$ و $\dot{\mathbf{y}} = \dot{\mathbf{y}}_{grip} - \dot{\mathbf{y}}_{obj}$ معرف سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم در راستاهای X_4 و Y_4 می‌باشند، می‌توان مؤلفه‌های نیروی اصطکاکی را با معادلات زیر نمایش داد.

$$f_{lx} = \frac{-\dot{\hat{x}}}{\sqrt{\dot{\hat{x}}^2 + \dot{\hat{y}}^2}} \times |\mu_l N|$$

$$f_{ly} = \frac{-\dot{\hat{y}}}{\sqrt{\dot{\hat{x}}^2 + \dot{\hat{y}}^2}} \times |\mu_l N|$$

(۴-۴)

$$f_{rx} = \frac{-\dot{\hat{x}}}{\sqrt{\dot{\hat{x}}^2 + \dot{\hat{y}}^2}} \times |\mu_r N|$$

$$f_{ry} = \frac{-\dot{\hat{y}}}{\sqrt{\dot{\hat{x}}^2 + \dot{\hat{y}}^2}} \times |\mu_r N|$$

۴-۳-۲ عدم لغزش

در حالتی که نیروی عمودی کافی جهت مهار جسم توسط انگشتان اعمال شود، شتاب جسم با شتاب پنجه برابر شده و در نتیجه حرکت انگشتان مستقیماً به جسم اعمال می‌شود. بنابراین در این وضعیت دو قید زیر بر رفتار سیستم حاکم خواهد بود.

$$x_{obj} = x_{grip}$$

(۵-۴)

$$y_{obj} = y_{grip}$$

در روابط فوق x_{obj} و x_{grip} تصویر موقعیت جسم و پنجه در راستای X_4 ، y_{obj} و y_{grip} تصویر موقعیت جسم و پنجه ربات در راستای Y_4 می‌باشد.

لذا با توجه به برقراری قیود فوق می‌توان شتاب جسم را به دست آورده و با لحاظ فرض تقارن در سیستم، معادلات حرکت جسم را برای به دست آوردن نیروهای اصطکاکی بکار برد.

۴-۳-۳ آستانه لغزش

اگر شرط $|\hat{\mathbf{V}}| = |\dot{\hat{\mathbf{x}}} + \dot{\hat{\mathbf{r}}}| = 0$ و $|\hat{\mathbf{a}}| = |\ddot{\hat{\mathbf{x}}} + \ddot{\hat{\mathbf{r}}}| \neq 0$ برقرار باشد علی‌رغم سرعت نسبی صفر بین جسم

و پنجه مجموع نیروهای اعمالی بر جسم از ظرفیت اصطکاکی در نقاط تماس بیشتر شده و با ایجاد یک شتاب نسبی، جسم را در آستانه لغزش قرار می‌دهد. در این وضعیت نیز رابطه اصطکاک کولمبی برای محاسبه نیروی اصطکاکی برقرار خواهد بود با این تفاوت که روش تعیین جهت و راستای آن با توجه به

اینکه سرعت نسبی صفر است از روی شتاب جسم نسبت به انگشتان به دست می‌آید. با توجه به اینکه اندازه برآیند نیروی اصطکاکی در هر سطح $\mu_r N$ و $\mu_l N$ می‌باشد، می‌توان نیروهای اصطکاک f_{lx} ، f_{ly} ، f_{rx} و f_{ry} را با توجه به راستای شتاب نسبی به صورت زیر تعریف کرد:

$$f_{lx} = \frac{\ddot{x}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_l N|$$

$$f_{ly} = \frac{\ddot{y}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_l N|$$

$$f_{rx} = \frac{\ddot{x}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_r N|$$

$$f_{ry} = \frac{\ddot{y}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_r N|$$

(۴-۶)

لازم به توضیح است، با توجه به اینکه فاز آستانه لغزش، مرزی است بین فاز لغزش و عدم لغزش می‌توان این فاز را معادل با فاز عدم لغزش و یا لغزش فرض نمود، لذا هر دودسته معادلات در فازهای فوق برای فاز آستانه لغزش نیز صادق خواهند بود.

۴-۴ کنترل برای مهار لغزش

در این بخش روش کنترلی گشتاور محاسبه شده برای اهداف ردیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محقق شدن این امر، پس از تفکیک فاز حرکتی لغزش بر اساس معادلات بخش قبل، با توجه به روشی که در ادامه بیان شده است مسیر مطلوب برای انگشت با توجه شرایط مطلوب برای گرفتن ایمن جسم به دست آمده است.

۴-۴-۱ کنترل گشتاور محاسبه شده

دینامیک بازوی ماهر ربات شدیداً غیرخطی است و به همین دلیل طراحی کنترل کننده کارآمد برای آن مشکل است. در میان روش‌های کنترلی، روش‌های کنترل کلاسیک به خوبی شناخته شده است، اگرچه در حضور شرایط غیرخطی شدید، به خوبی عمل نمی‌کنند و از طرف دیگر روش‌های

کنترل‌کننده‌های غیرخطی (Machado, Portugal et al. 2002) بهتر جواب می‌دهند اما طراحی و تحلیل‌های غیرخطی به شفافیت و سازگاری روش‌های خطی نیست.

یک روش شناخته‌شده برای بهبود رفتار بازوی ماهر برای اهداف ردیابی، روش کنترل گشتاور محاسبه‌شده است و از این‌پس برای رعایت اختصار CTC^{23} نامیده می‌شود. در این روش، قانون کنترل به‌منظور جبران جملات غیرخطی در روابط دینامیک ربات و تضمین رفتار حلقه بسته‌ی مطلوب، صریحاً بر اساس مدل به دست می‌آید. با استفاده از کنترل گشتاور محاسبه‌شده می‌توان به معادلات حلقه بسته خطی دست‌یافت که با انتخاب مناسب ضرایب، پایداری حل تضمین خواهد شد. در این کنترل‌کننده با در نظر گرفتن موقعیت و سرعت فعلی ربات تمام عوامل غیرخطی حذف می‌شود و گشتاور موردنیاز برای غلبه بر اینرسی محرک‌ها به کار می‌رود.

$$\tau = D(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - J^T F \quad (7-4)$$

با جایگذاری این قانون کنترل در معادلات دینامیکی ربات (رابطه (۲-۵۷)) نتیجه می‌دهد:

$$D(q)\ddot{q} = D(q)\ddot{q}_d \quad (8-4)$$

و از آنجا که $D(q)$ ماتریس مثبت معین یکنواخت است:

$$\ddot{q} = \ddot{q}_d \quad (9-4)$$

از این جهت، اگر موقعیت و سرعت اولیه ربات با موقعیت و سرعت مطلوب ربات تطبیق یابد، ربات از مسیر مطلوب پیروی خواهد کرد. اگر مسیر مطلوب حرکت ربات با $q_d(t)$ نشان داده شود، آنگاه خطای ردیابی به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (10-4)$$

ویژگی‌های ردیابی از قانون کنترل (۷-۴) با افزودن پس‌خورد حالت بهبود می‌یابد. در نهایت خطی بودن

معادله (۱۰-۴) قانون کنترل گشتاور محاسبه‌شده را به صورت زیر پیشنهاد می‌دهد:

$$\tau = D(q) [\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e] + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) \quad (11-4)$$

بدین ترتیب خطای موقعیت مفصل ربات به صورت، $e(t) = q_d(t) - q(t)$ و خطای سرعت $\dot{e}(t) = \dot{q}_d(t) - \dot{q}(t)$ تعریف می‌شود.

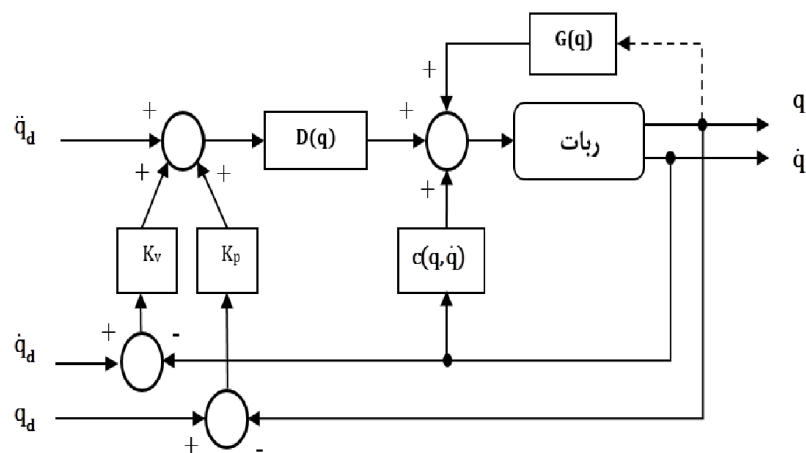
با جایگذاری قانون کنترل (۱۱-۴) در معادله دینامیکی ربات (۵۶-۲) رابطه دینامیک خطای کنترل به دست می‌آید:

$$D(q)(\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e) = 0 \quad (12-4)$$

به دلیل اینکه ماتریس $D(q)$ همواره مثبت معین است، داریم:

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (13-4)$$

با توجه به معادله (۱۳-۴) و بنا بر نظریه پایداری سیستم‌های خطی، با انتخاب K_p و K_v به عنوان ماتریس‌های متقارن مثبت، همگرایی خطای ردیابی به صفر تضمین می‌شود. رابطه (۱۳-۴) معادله دیفرانسیل خطی را نشان می‌دهد که خطا را بین مسیرهای واقعی و مطلوب کنترل می‌کند. بلوک-دیگرام نشان‌دهنده CTC برای بازوی ماهر در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.



شکل (۲-۴) بلوک-دیگرام CTC برای بازوی ماهر

قانون کنترل (۴-۱۱) از دو قسمت تشکیل شده است که می توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$\tau = \underbrace{\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q})}_{\tau_{ff}} + \underbrace{\mathbf{D}(\mathbf{q})(\mathbf{K}_v\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p\mathbf{e})}_{\tau_{fb}} \quad (۴-۱۴)$$

جمله τ_{ff} بخش روبه جلو است. این قسمت نیروی گشتاور مورد نیاز برای راه اندازی سیستم به هنگام

ردیابی مسیر نامی ربات را فراهم می کند. جمله τ_{fb} قسمت پس خوردی قانون کنترل است. این قسمت

گشتاورهای اصلاحی مورد نیاز برای کاهش هرگونه خطا در طی مسیر ربات را فراهم می کند.

قانون کنترل (۴-۱۴) در بردارنده جمله $\mathbf{K}_v\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p\mathbf{e}$ است که خود از نوع کنترل کننده تناسبی- مشتقی

می باشد؛ اما پس از ضرب این جمله در ماتریس اینرسی $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ ، دیگر بهره موقعیت و سرعت ثابت نبوده

که این خود، ماتریس بهره را به صورت مناسب در وضعیت های کشیدگی با مقدار بیشتر و در وضعیت های

جمع شدگی با مقدار کمتر، تنظیم می نماید و مقدار این عبارت به خطای موقعیت بستگی می یابد،

از این رو نمی توان آن را یک کنترل کننده خطی همچون تناسبی- مشتقی به حساب آورد؛ بلکه این

کنترل کننده به طور مناسب ضرایب را تنظیم می نماید.

۴-۴-۲ کنترل لغزش بر اساس روش کنترلی CTC

برای گرفتن و مهار لغزش جسم توسط پنجه ربات لازم است نیروی مورد نیاز از طرف آن بر جسم

اعمال شود، لذا با توجه این که کنترل کننده CTC تابعی از موقعیت، سرعت و شتاب مطلوب مفاصل

ربات است می توان با وابسته کردن نیروی گرفتن جسم به این مقادیر مطلوب در پنجه ربات، هر لحظه

لغزش را کنترل نمود. لازمه نداشتن لغزش این است که مقادیر مطلوب سرعت و شتاب جسم نسبت به

ربات صفر گردد، لذا برای برقراری کنترل لغزش، نیروی گرفتن جسم تنها به موقعیت مطلوب انگشت

در پنجه ربات وابسته می شود.

برای رسیدن به این هدف دو راهکار متفاوت وجود دارد. در راهکار اول، پس از شناسایی لغزش به کمک یکی از روش‌های شناسایی گفته‌شده در فصل ۱، لغزش از جنس نیرو یا شتاب شناسایی می‌شود و سپس با قرار دادن یک کنترل‌کننده نیرو یا شتاب مناسب، موقعیت مطلوب پنجه با ورودی شتاب یا نیرو کنترل می‌شود. در راهکاری دیگر، می‌توان با توجه به مودهای مختلف لغزشی ارائه‌شده در قسمت قبل و استفاده از روابط مربوطه لغزش را شناسایی نمود و بین نیروی اعمالی و موقعیت مطلوب پنجه رابطه‌ای منطقی برقرار کرد. در روش پیشنهادی این مقاله راهکار دوم بکار برده شده است. به‌منظور پیاده‌سازی این راهکار کنترلی نیازمند طراحی و ترسیم مسیر مطلوب برای بازوهای ربات و پنجه هستیم.

۳-۴-۴ مسیر مطلوب حرکت ربات

در این قسمت مسیر مطلوب حرکت ربات به همراه سرعت و شتاب مطلوب مفاصل ربات تعریف می‌شود. مسیر مطلوب این ربات به‌گونه‌ای تعریف می‌گردد که بتواند به‌خوبی نشان‌دهنده رخداد لغزش در اثر جابه‌جا شدن جسم باشد. برای بررسی جامع شرایط و اثرگذاری حرکت بازوهای ربات بر روی لغزش جسم گرفته‌شده، برای تمام مفاصل ربات مسیر مطلوبی تعریف می‌شود که باعث ایجاد شتاب متغیر در هریک از بازوها گردد. کل بازه زمانی حرکت ربات به ۵ مرحله تقسیم می‌گردد و حرکت مفاصل ربات به ترتیب در همین ۵ مرحله انجام می‌شود.

فرم کلی معادله مسیر مطلوب برای بازه حرکتی بازوهای ربات، بین ۰ تا ۱۰ ثانیه به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\text{موقعیت} = \begin{cases} q_1^d = 0 \\ q_2^d = -d(t-t_1)^3 / (6(t_1-t_2)) \\ q_3^d = d(3t^2 - 3t \times t_1 - 3t \times t_2 + t_1^2 + t_2^2) / 6 \\ q_4^d = d(t^3 - 3t_4 \times t^2 - 3t \times t_1 \times t_3 + 3t_4 \times t \times t_1 - 3t \times t_2 \times t_3 + 3t_4 \times t \times t_2 + 3t \times t_3^2 + \\ \dots t_1^2 \times t_3 - t_4 \times t_1^2 + t_1 \times t_2 \times t_3 - t_4 \times t_1 \times t_2 + t_2^2 \times t_3 - t_4 \times t_2^2 - t_3^3) / (6(t_3 - t_4)) \\ q_5^d = -d(-t_1^2 - t_1 \times t_2 + 3t \times t_1 - t_2^2 + 3t \times t_2 + t_3^2 + t_3 \times t_4 - 3t \times t_3 + t_4^2 - 3t \times t_4) / 6 \end{cases}$$

$$\text{سرعت} = \begin{cases} \dot{q}_1^d = 0 \\ \dot{q}_2^d = -d(t-t_1)^2 / (2(t_1-t_2)) \\ \dot{q}_3^d = -d(t_1-2t+t_2) / 2 \\ \dot{q}_4^d = d \times t - d \times t_1 / 2 - d \times t_2 / 2 + d(t-t_3)^2 / (2(t_3-t_4)) \\ \dot{q}_5^d = -d(t_1+t_2-t_3-t_4) / 2 \end{cases}$$

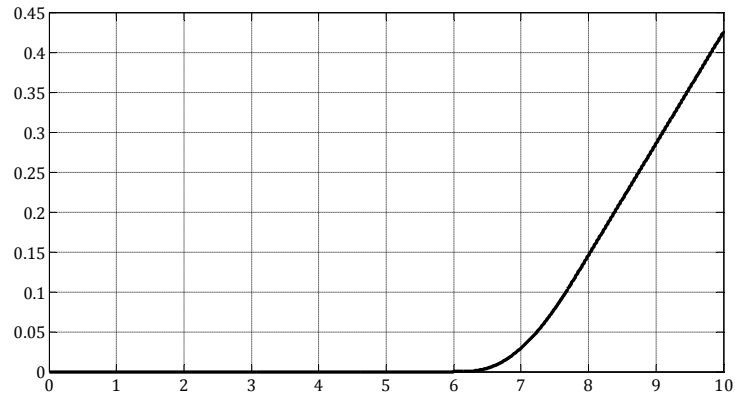
$$\text{شتاب} = \begin{cases} \ddot{q}_1^d = 0 \\ \ddot{q}_2^d = -d(t-t_1) / (t_1-t_2) \\ \ddot{q}_3^d = d \\ \ddot{q}_4^d = d(t-t_4) / (t_3-t_4) \\ \ddot{q}_5^d = 0 \end{cases}$$

که در معادلات فوق، t متغیر زمانی بین ۰ تا ۱۰ ثانیه و d بیشینه شتاب و برابر با ۰/۱ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. زمان‌های t_1 تا t_4 نیز متغیرهای زمانی برحسب ثانیه بوده و بنا به شماره رابط ربات به مشروح جدول (۱-۴) انتخاب می‌شوند.

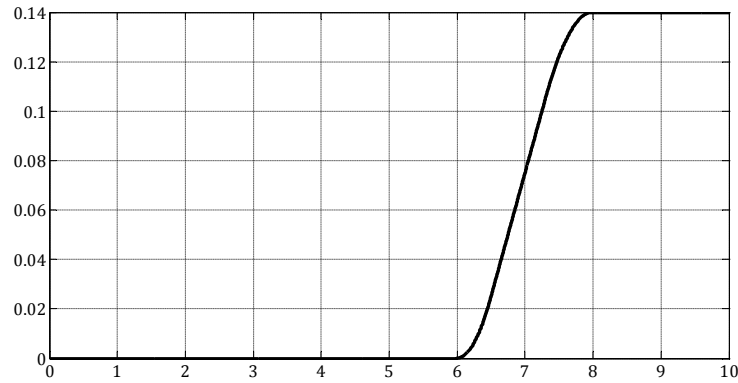
جدول (۱-۴) زمان‌های به‌کاررفته برای مسیرهای مطلوب ربات

رابط	t_1	t_2	t_3	t_4
۱	۰	۰/۷	۲/۲	۳
۲	۳	۳/۷	۴/۸	۶
۳	۶	۶/۵	۷/۳	۸
۴	۸	۸/۲	۸/۷	۹

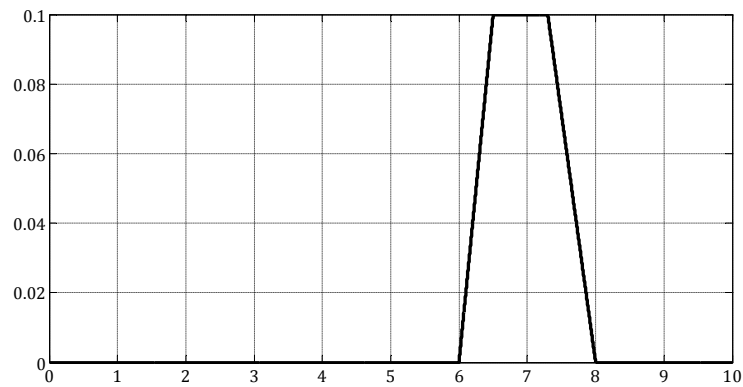
با توجه به معادلات مسیر فوق و پارامترهای مشخص شده در جدول (۱-۴)، مسیر مطلوب نمونه برای بازوی سوم ربات، برحسب زمان در شکل‌های (۳-۴) تا (۵-۴) ترسیم شده است.



شکل (۳-۴) موقعیت مطلوب رابط ۳



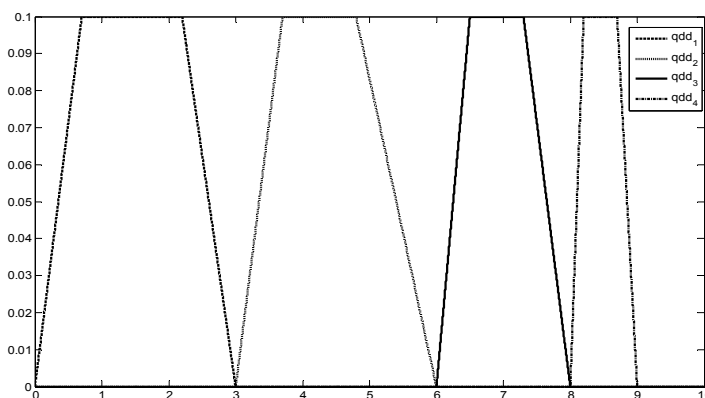
شکل (۴-۴) سرعت مطلوب رابط ۳



شکل (۵-۴) شتاب مطلوب رابط ۳

به طور مشابه برای سایر مفاصل، شتاب‌های متوالی در بازه ۰ تا ۱۰ ثانیه اعمال می‌شود که در شکل

(۶-۴) نشان داده شده است.



شکل (۴-۶) شتاب رابط‌های ربات اسکارا

۴-۴-۴ تعیین مسیر مطلوب برای حرکت انگشتان

همان‌طور که نشان داده شد، موقعیت مطلوب مفاصل ۱ تا ۴ به صورت دلخواه و با رعایت قیود عملکرد اعمال می‌شود. ولی مقدار مطلوب موقعیت انگشت با توجه به شتاب اعمالی به جسم در اثر حرکت بازوها و وزن جسم محاسبه می‌گردد.

شتاب مطلوب حرکت جسم a_{obj}^d در فاز عدم لغزش همان شتاب اعمالی به پنجه در زمانی است که مفصل‌های ۱ تا ۴ در موقعیت مطلوب خود قرار دارند و از معادلات دینامیکی ربات به دست می‌آید. مؤلفه‌های این شتاب $a_{obj_x}^d$ ، $a_{obj_y}^d$ و $a_{obj_z}^d$ می‌باشند که تصویر شتاب‌های مطلق جسم به ترتیب در راستای X_4 ، Y_4 و Z_4 هستند.

$$a_{obj_x}^d = a_{grip_x}$$

$$a_{obj_y}^d = a_{grip_y} \quad (15-4)$$

$$a_{obj_z}^d = a_{grip_z}$$

حال به منظور کنترل لغزش و جلوگیری از رخداد آن می‌بایست نیروی اعمالی به جسم، جبران‌کننده‌ی مجموع نیروی وزن جسم و نیروی اینرسی حاصل از شتاب بازوها شود؛ که این نیروها با جایگذاری رابطه (۱۵-۴) در معادله دینامیکی جسم یعنی معادله (۴-۱) به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$f_{d_x} = m_{obj} a_{obj_x}^d + \varepsilon \quad (16-4)$$

$$f_{d,y} = m_{obj}g + m_{obj}a_{obj,y}^d + \varepsilon \quad (17-4)$$

که در روابط فوق، $f_{d,x}$ و $f_{d,y}$ به ترتیب نیروهای لازم برای کنترل لغزش در راستای X_4 و Y_4 می‌باشند. ε نیز نیروی فشردگی^{۲۴} اولیه توسط انگشتان قبل از کامل کردن تماس به جسم اعمال می‌شود.

به این ترتیب اندازه بیشینه نیروی مماسی مطلوب برای کنترل لغزش جسم و برقراری ایمنی در هنگام گرفتن جسم در تمام جهتهای احتمالی لغزش به صورت زیر است.

$$f_d = \sqrt{f_{d,x}^2 + f_{d,y}^2} \quad (18-4)$$

بنابراین نیروی عمودی مطلوبی که از طرف انگشت ربات و در جهت عمود بر جسم وارد می‌شود تا از لغزش آن جلوگیری کند از تقسیم اندازه f_d بر ضریب اصطکاک سطح تماس مطابق با رابطه (۱۹-۴) به دست می‌آید.

$$N_d = \frac{f_d}{\mu} \quad (19-4)$$

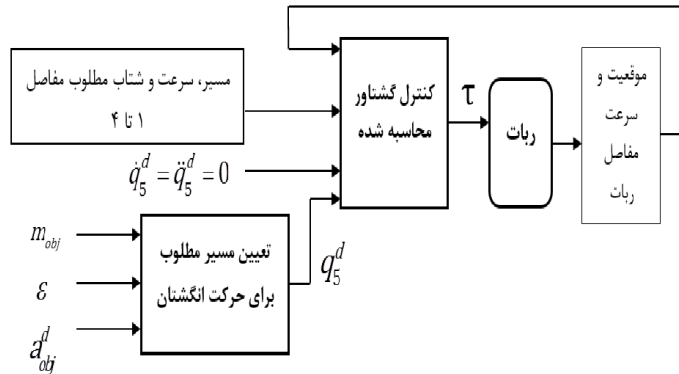
همچنین با توجه به رابطه (۲-۴) مقدار نیروی عمودی مطلوب انگشت به شکل رابطه (۲۰-۴) به دست می‌آید. حال می‌توان با استفاده از این رابطه و جایگذاری نیروی مطلوب از رابطه (۱۹-۴)، موقعیت مطلوب انگشت را توسط رابطه (۲۱-۴) محاسبه نمود.

$$N_d = K_f(q_5^d - q_{5_0}) \quad (20-4)$$

$$q_5^d = \frac{N_d}{K_f} + q_{5_0} \quad (21-4)$$

با توجه به آنچه در این بخش عنوان شد، دیاگرام کنترلی ربات برای کنترل لغزش به صورت شکل (۴-۷) طراحی می‌شود.

^{۲۴} Pushing Force



شکل (۷-۴) بلوک-دیگرام کنترلی در جهت مهار لغزش

۴-۵ کنترل به منظور مهار و جبران لغزش به طور همزمان

۴-۵-۱ مقدار لغزش

با استفاده از روش کنترلی بخش (۴-۴)، شناسایی و کنترل لغزش انجام می‌شود؛ اما اعمال هرگونه تغییرات شتاب بر روی مفاصل ربات به منظور ایجاد مانور موردنیاز و تا زمان مهار لغزش جسم توسط کنترل کننده اعمالی، تغییرات موقعیت جسم را نسبت به پنجه به دنبال دارد. این تغییر موقعیت نسبی جسم به عنوان مقدار لغزش در نظر گرفته می‌شود.

قبل از اعمال روش موردنظر برای جبران لغزش به محاسبه مقدار لغزش جسم و موقعیت جدید پس از لغزش نیاز است تا بتوان با توجه به مقدار فوق تمهیدات لازم را جهت جبران آن لحاظ کرد؛ لذا مقدار لغزش جسم در انگشتان ربات در راستاهای رخ داده لغزش با توجه به روابط زیر به دست می‌آید.

$$slip_x = x_{obj} - x_{grip} \quad (۲۲-۴)$$

$$slip_y = y_{obj} - y_{grip} \quad (۲۳-۴)$$

که در روابط فوق $slip_x$ و $slip_y$ به ترتیب مقادیر لغزش در راستای x_4 و y_4 است.

۴-۵-۲ جبران لغزش

همان‌طور که در بخش (۳-۴) اشاره شد لغزش جسم در امتدادهای X_4 و Y_4 رخ می‌دهد. راهکاری که در این مقاله برای جبران لغزش ارائه می‌شود اصلاح مسیر برای جبران لغزش در امتدادهای فوق است. با توجه به امتداد محورهای پنجه نسبت به مختصات مرجع جبران لغزش ایجاد شده در امتداد محور Y_4 را می‌توان با اصلاح مسیر مفصل کشویی ۳ جبران نمود. همچنین برای جبران لغزش رخ داده در امتداد محور X_4 بایستی مسیر مفاصل ۱ و ۲ را طوری اصلاح نمود که این لغزش را در امتداد X_4 جبران نماید. در این خصوص لازم است که مقدار لغزش در امتداد X_4 را در مختصات مرجع بیان نمود و از طریق سینماتیک معکوس مقادیر لازم برای اصلاح مسیر مفصل ۱ و ۲ را به دست آورد. از طرف دیگر تغییر مسیر مطلوب مفاصل ۱ و ۲ باعث تغییر جهت‌گیری نهایی موردنظر در پنجه می‌شود؛ لذا لازم است مسیر مطلوب مفصل چرخشی ۴ نیز با توجه به تغییرات فوق به نحوی اصلاح شود که این انحراف از جهت‌گیری نهایی پنجه را جبران نماید.

۴-۶ شبیه‌سازی

در این بخش برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی و روش جبران سازی لغزش بیان شده در بخش (۴-۵) مانوری برای ربات در نظر گرفته می‌شود که شرایط ایجاد لغزش را برای جسم گرفته شده فراهم نماید؛ تا از این طریق قابلیت کنترل‌کننده و روش ارائه شده جهت جبران لغزش بررسی شود. در این شبیه‌سازی بر اساس کاربرد و نیازهای فضای کار، یک ربات اسکارای ۴ درجه آزادی با پیکره‌بندی $R-R-P-R^{25}$ به همراه یک درجه آزادی در پنجه با مفصل کشویی به کار برده شده است. این ربات اسکارای توسعه یافته توسط پنجه فک موازی، با قابلیت حرکت انگشتان در طی مانور ربات، دارای مشخصات نشان داده شده در جدول (۴-۲) می‌باشد. همچنین جسم گرفته شده، صلب و مکعب مستطیل شکل می‌باشد

²⁵ Revolute-Revolute-Prismatic-Revolute

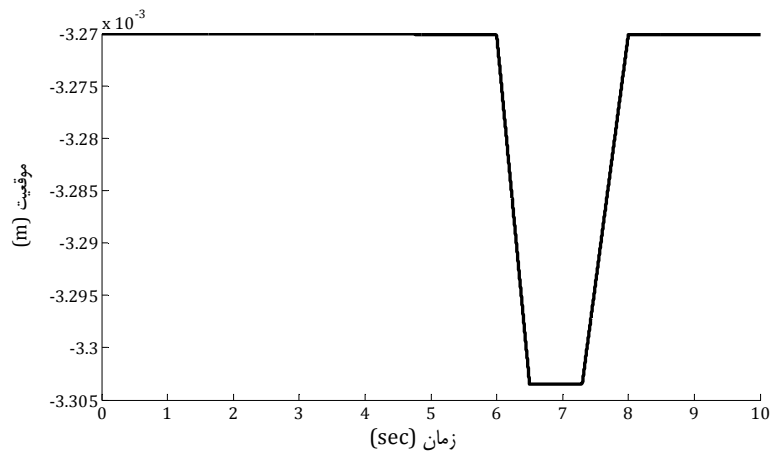
که با انگشتان ربات تماس سطحی برقرار می‌کند و تماماً از ویژگی‌هایی که در بخش (۲-۴) عنوان شد پیروی می‌نماید.

۴-۶-۱ نتایج شبیه‌سازی با اعمال کنترل‌کننده برای مهار لغزش

با توجه به اهداف شبیه‌سازی در کنترل و مهار لغزش، مسیر مطلوب برای مفاصل ۱ تا ۴ ربات مطابق با پیوست ۲ در نظر گرفته می‌شود؛ همچنین، موقعیت مطلوب انگشت (شکل (۴-۸)) نیز برای کاربرد در کنترل‌کننده CTC مطابق با رابطه (۴-۲۱) تولید می‌شود.

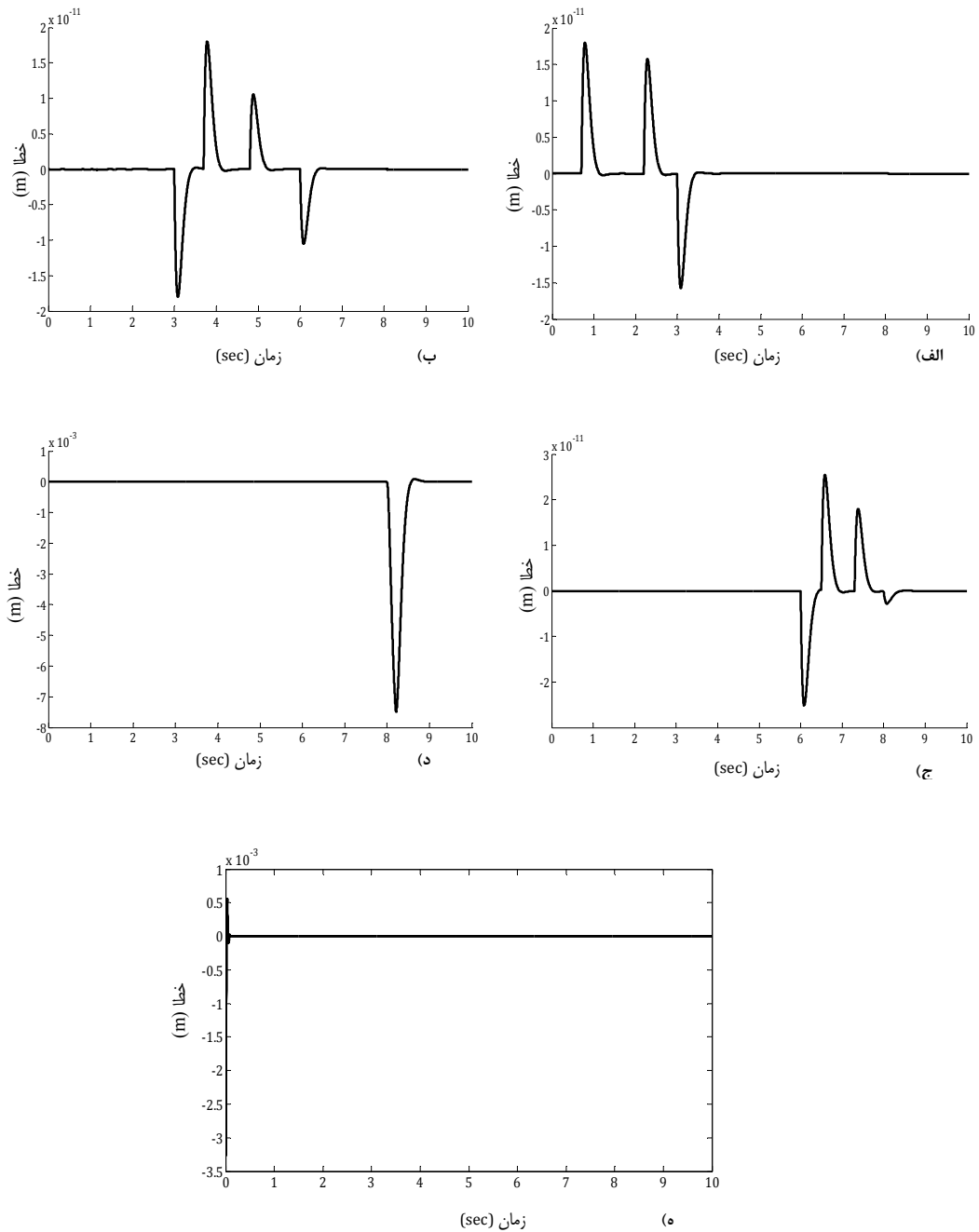
جدول (۲-۴) مشخصات ربات اسکارای طراحی شده

شماره رابط	جرم رابط (kg)	طول رابط (m)
۱	$m_1 = 1/2$	$a_1 = 0/35$
۲	$m_2 = 1/16$	$a_2 = 0/37$
۳	$m_3 = 0/56$	$d_3 = \text{متغیر}$
۴	$m_4 = 0/02$	$d_4 = 0/04$
۵	$m_5 = 0/2$	$d_5 = \text{متغیر}$



شکل (۴-۸) موقعیت مطلوب انگشت

پس اعمال کنترل‌کننده برای گرفتن جسم و مهار لغزش آن، مقدار خطای ردیابی مسیر برای مفاصل ۱ تا ۵ محاسبه شده است و نتایج آن در شکل (۴-۹) آمده است.



شکل (۹-۴) خطای موقعیت مفاصل ربات؛ الف) مفصل ۱، ب) مفصل ۲، ج) مفصل ۳، د) مفصل ۴، ه) مفصل ۵ همان‌طور که در شکل (۹-۴) نشان داده‌شده، با اعمال کنترل‌کننده (۴-۱۱)، هر یک از بازوهای ربات در بازه زمانی حرکت ۱۰ ثانیه‌ای خود مسیر مطلوب داده‌شده را با انحراف بسیار کمی ردیابی می‌نماید.

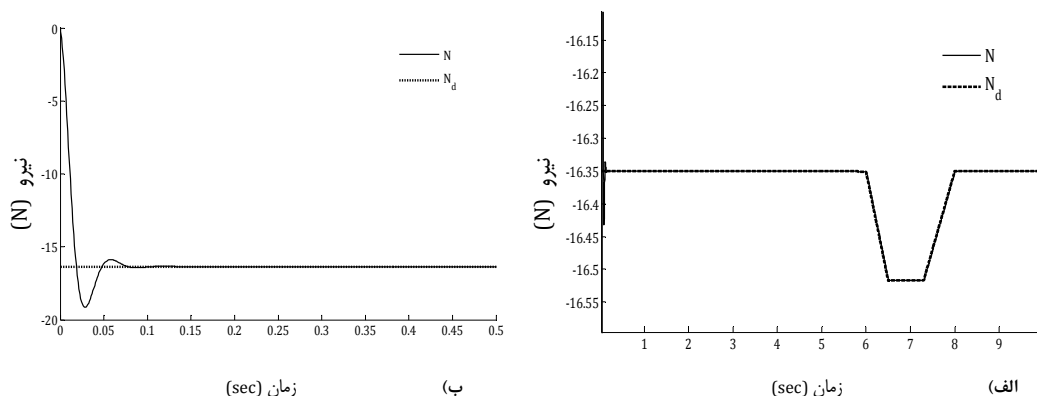
به منظور کنترل سیستم مورد مطالعه، از کنترل کننده طراحی شده در شکل (۷-۴) استفاده شده است که در آن مقادیر K_p و K_v به ترتیب ماتریس‌های قطری با عناصر قطر اصلی ۱۵۰ و ۲۰ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایج مربوط به خطای ردیابی بازوی ۵ که در شکل (۴-۹-۵) ارائه شده است، مشاهده می‌شود که پس از گذشت ۰/۱ ثانیه اول، ردیابی مسیر انگشت به خوبی انجام شده است؛ اما همین مقدار خطا در لحظات اولیه حرکت می‌تواند در حین حرکت و یا در انتهای کار در زمان گذاشتن جسم توسط ربات صدماتی برای جسم، محل گذاشتن یا ربات در پیش داشته باشد.

به منظور بررسی وضعیت لغزش و بررسی مقدار نیروی عمودی جهت گرفتن، پس از اعمال کنترل کننده، نمودار آن در مقایسه با مقدار مطلوبش در شکل (۴-۱۰) ترسیم می‌گردد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار نیروی N از زمان تماس با جسم افزایش می‌یابد تا پس از گذشت زمان تقریبی ۰/۵ ثانیه به مقدار مطلوب خود برای نگه‌داشتن و مهار لغزش جسم برسد. همچنین؛ در نقاطی که بیشترین مقدار شتاب از سمت ربات به جسم وارد می‌شود (بین بازه زمانی ۶ تا ۸ ثانیه)، نیروی N متناسب با مقدار مطلوب افزایش می‌یابد و از افتادن جسم در اثر لغزش جلوگیری می‌نماید.

با توجه به مباحثی که در بخش (۴-۳) توضیح داده شد، لغزش جسم در دو راستای X_4 و Y_4 ایجاد می‌شود؛ لذا نمودار موقعیت جسم و انگشت ربات در دو راستای X_4 و Y_4 پس از رخ داده لغزش و مهار آن در شکل (۴-۱۱) و (۴-۱۲) ترسیم شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص شده، مقادیر x_{obj} و y_{obj} باگذشت زمان از رفتار انگشت در راستای X_4 و Y_4 تبعیت می‌کنند. با این تفاوت که خطای ردیابی موقعیت جسم از پنجه در راستای محور X_4 بسیار ناچیز است. درحالی‌که این اختلاف در راستای Y_4 غیرقابل چشم‌پوشی است.

سرعت‌های جسم و پنجه ربات در راستای X_4 و Y_4 به‌طور جداگانه در اشکال (۴-۱۳) و (۴-۱۴) با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل (۴-۱۳) مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت در راستای X_4 به مقدار ۰/۵ سانتی‌متر است و در این حالت سرعت جسم به خوبی از سرعت انگشت ربات تبعیت

می‌کند. درحالی‌که مطابق با شکل (۴-۱۴)، این اختلاف در راستای محور Y_4 همواره صفر نیست و در بعضی از لحظات سرعت جسم با سرعت پنجه برابری نمی‌کند؛ که این خود بیان‌کننده لغزش جسم در این لحظات است.

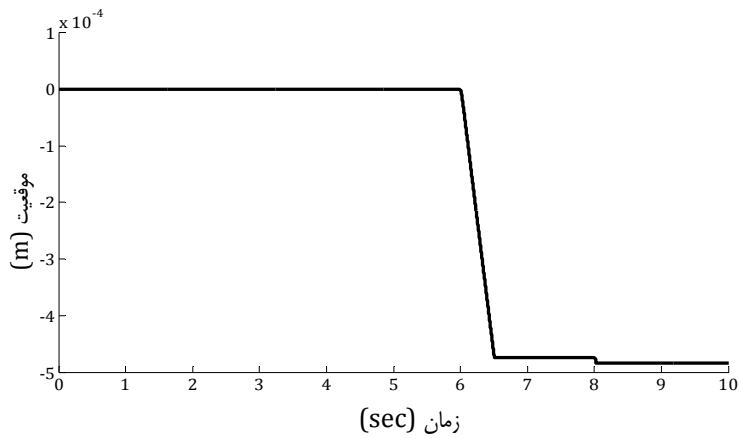


شکل (۴-۱۰) مقدار نیروی نرمال عمودی؛ الف) بزرگنمایی محور نیرو، ب) بزرگنمایی محور زمان

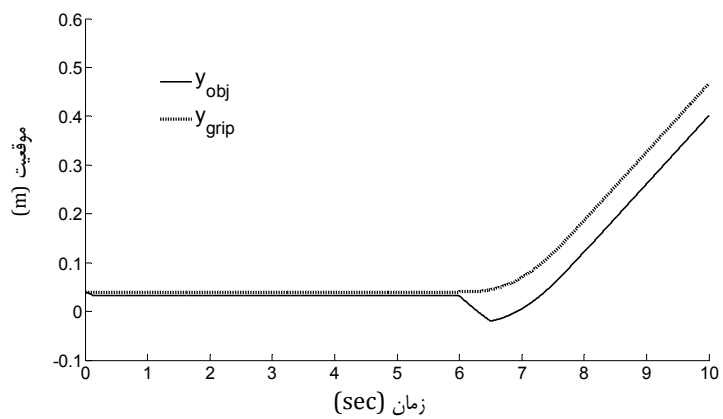
از مقایسه شکل (۴-۱۳) و (۴-۱۰) مشاهده می‌شود که الزاماً در زمان‌هایی که سرعت جسم از سرعت پنجه تبعیت نمی‌کند، نیروی عمودی جهت گرفتن افزایش می‌یابد تا از افتادن جسم جلوگیری نماید؛ که این مسئله نشان می‌دهد کنترل‌کننده بکار رفته دارای قابلیت مناسب برای افزایش نیروی عمودی اعمالی بر جسم در زمان لغزش آن است. لازم به توضیح است که نیروی عمودی بعد از حذف شتاب‌های اعمالی بر جسم بر اثر مانور ربات به مقدار حداقل خود کاهش می‌یابد تا از آسیب رسی به جسم جلوگیری نماید.

با توجه به مطالب فوق می‌توان گفت مانور حرکتی برای ربات باعث لغزش جسم مطابق با شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) می‌شود. از مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود که پس از مدت زمان ۱۰ ثانیه از حرکت، جسم در هر دو راستای X_4 و Y_4 دچار لغزش شده است. مقدار لغزش در راستای X_4 حدود ۰/۵ سانتی‌متر بوده درحالی‌که لغزش جسم در راستای Y_4 به اندازه تقریبی ۸ سانتی‌متر می‌باشد و این مقدار با توجه به معیار در نظر گرفته‌شده ۱ سانتی‌متری برای جبران لغزش بنا بر شرایط کاری در نظر گرفته‌شده ربات و ابعاد جسم و پنجه مقدار قابل توجهی است؛ لذا بایستی با تمهید مناسبی که در بخش

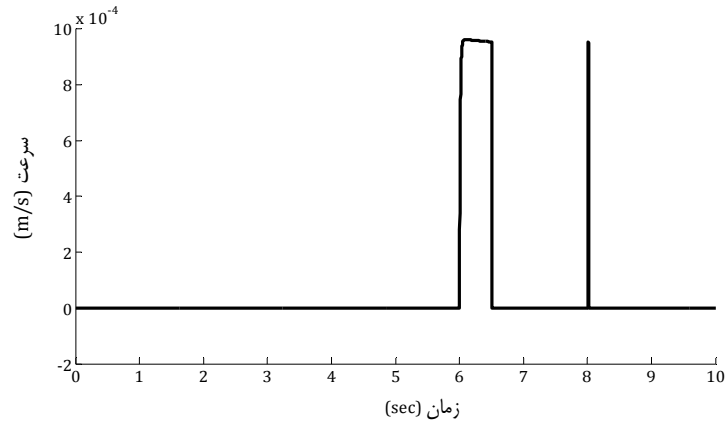
۵ بیان شد، این مقدار لغزش رخ داده در راستای Y_4 را همان طور که در قسمت بعدی نشان داده شده است، جبران نمود.



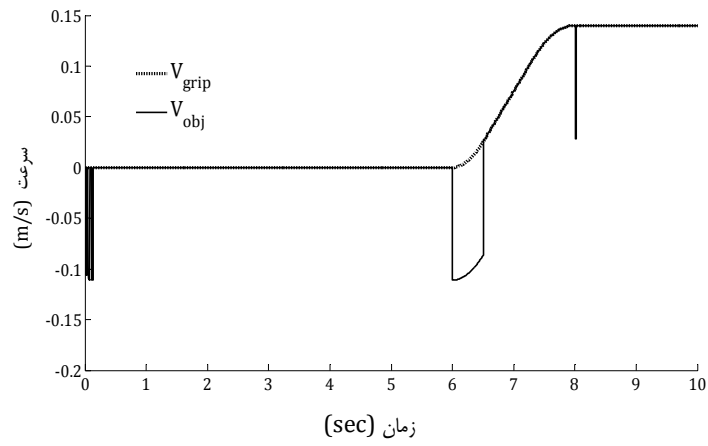
شکل (۴-۱۱) اختلاف موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4



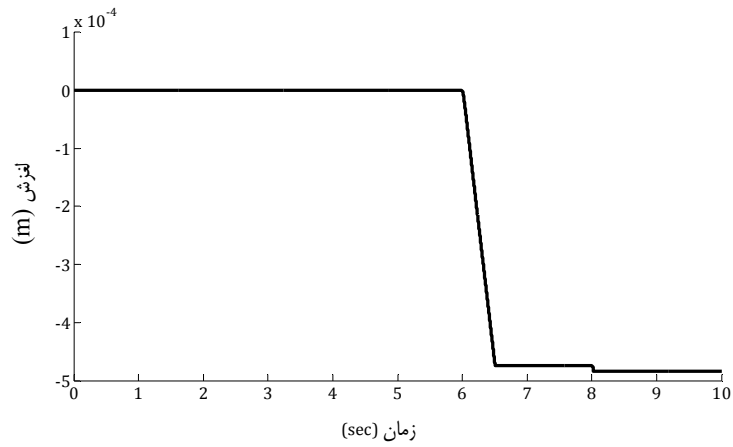
شکل (۴-۱۲) موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4



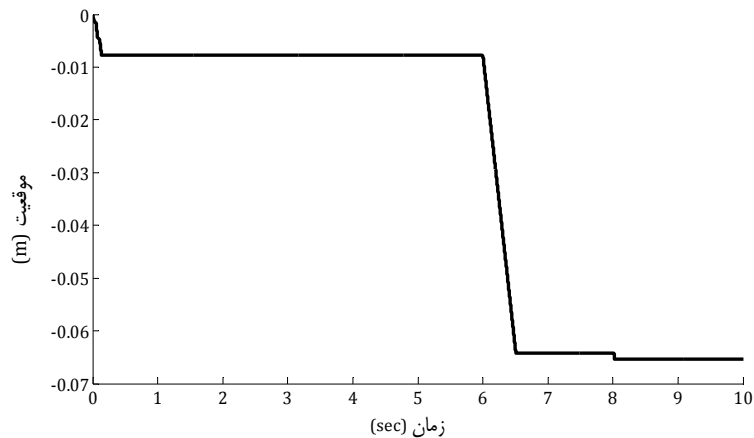
شکل (۱۳-۴) اختلاف سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4



شکل (۱۴-۴) سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4



شکل (۱۵-۴) لغزش جسم نسبت به دستگاه پنجه ربات در راستای X_4



شکل (۴-۱۶) لغزش جسم نسبت به دستگاه پنجه ربات در راستای Y_4

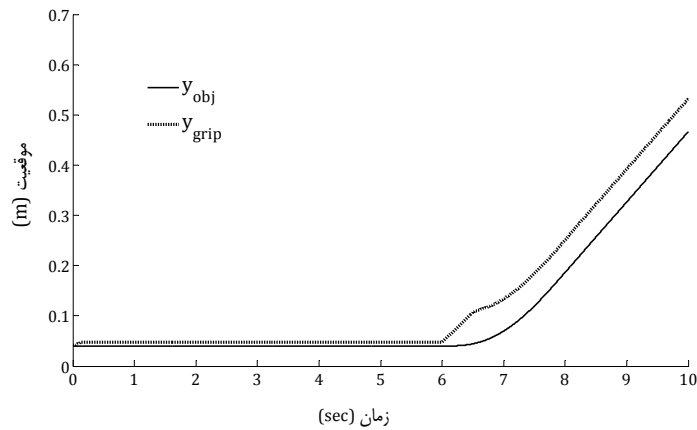
۴-۶-۲ نتایج شبیه‌سازی با اعمال کنترل‌کننده برای جبران لغزش

همان‌گونه که در بخش قبل نشان داده شد، میزان لغزش در راستای X_4 کمتر از معیار لازم برای جبران سازی بوده و نسبت به لغزش در راستای Y_4 قابل صرف‌نظر است. لذا با توجه به روش‌های جبران لغزش بیان‌شده در بخش ۲-۵، تنها لغزش رخ‌داده در راستای محور Y_4 جبران می‌گردد، هرچند با راهکاری که در این بخش ارائه شد امکان جبران لغزش در جهت X_4 هم امکان‌پذیر است. بدین منظور با مقایسه امتداد محورهای پنجه نسبت به مختصات مرجع، جبران لغزش ایجادشده در امتداد محور Y_4 از طریق اصلاح مسیر مفصل کشویی ۳ انجام می‌شود. نتایج این جبران سازی در شکل (۴-۱۷) و (۴-۱۸) نشان داده‌شده است.

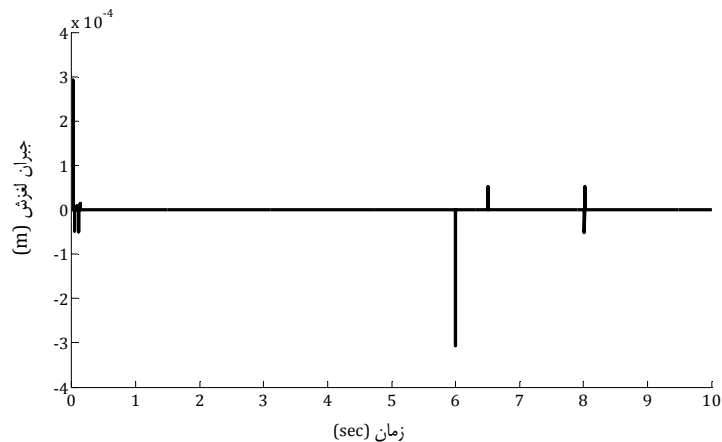
همان‌گونه که در شکل (۴-۱۷) آمده، پس از اعمال جبران ساز لغزش در راستای محور Y_4 ، موقعیت رابط ۳ با توجه به موقعیت پنجه ربات تغییر می‌کند و دیگر مسیر مطلوب قدیمی خود را تعقیب نکرده؛ بلکه مسیر اصلاح‌شده را تعقیب خواهد نمود تا بر اساس این ردیابی جدید جسم در موقعیت موردنظر قرار گیرد.

با توجه به شکل (۴-۱۷) و باوجود رخداد لغزش نمودار موقعیت جسم، مسیر مطلوب قدیمی مفصل کشویی ۳ ربات؛ که جسم را در محل مناسب خود قرار می‌دهد، ردیابی کرده است؛ لذا می‌توان گفت در

این حالت لغزش رخ داده توسط کنترل کننده و با اصلاح مسیر مفصل کشویی ۳ جبران شده است. در شکل (۴-۱۸) نمودار لغزش جسم در راستای Y_4 و پس از اعمال جبران ساز نشان داده شده است، مشاهده می شود پس از هر بار رخداد لغزش که در اثر مانور ربات ایجاد می شود، کنترل کننده با اصلاح مسیر بازوی سوم ربات و به صورت برخط لغزش را جبران نموده و به صفر می رساند. این وضعیت تا رویداد لغزش بعدی پایدار می ماند به طوری که در لحظات پایانی مقدار لغزش کاملاً جبران شده است.



شکل (۴-۱۷) موقعیت جسم و پنجه نسبت به ربات با اعمال جبران ساز برخط



شکل (۴-۱۸) میزان جبران مقدار لغزش با اعمال جبران ساز برخط

فصل پنجم

کنترل لغزش با راهبرد کنترل ولتاژ

۵-۱ مقدمه

اخيراً راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل مستقل از مدل ربات معرفی شده است (Fateh 2008). از آنجاکه مدل موتور بسیار ساده‌تر از مدل ربات است طراحی کنترل‌کننده بر مبنای آن بسیار ساده‌تر است. در این طراحی ربات به‌عنوان بار موتور در نظر گرفته می‌شود. برای کنترل هر مفصل در واقع موتور آن کنترل می‌شود بدین ترتیب کنترل سیستم چند متغیره ربات به کنترل موتورهای آن تبدیل می‌شود و با کنترل جداگانه هر مفصل به راحتی می‌توان ربات را کنترل کرد. از آنجاکه ربات‌ها به وسیله موتورهای کنترل می‌شوند، راهبرد کنترل ولتاژ به وجود آمد. در صورت استفاده از این روش کنترل ربات به کنترل موتورهای مفاصل آن تبدیل می‌شود و به جای کنترل گشتاور مفاصل به کنترل ولتاژ موتورهای مفاصل پرداخته می‌شود. در این صورت سیگنال ورودی به سیستم ولتاژ موتورها است.

از آنجاکه موتورهای الکتریکی با منبع ولتاژ تغذیه می‌شوند حتی برای کنترل جریان آن‌ها نیز باید ولتاژ آن را کنترل کرد. اگر در ربات‌ها از موتورهای مغناطیس دائم استفاده شود به دلیل داشتن دینامیک خطی، به آسانی قابل کنترل هستند. دینامیک موتور بسیار ساده‌تر از دینامیک ربات است در نتیجه به راحتی می‌توان یک کنترل‌کننده بر مبنای مدل موتور طراحی کرد. در این نوع طراحی، ربات به‌عنوان بار موتور در نظر گرفته می‌شود و برای کنترل موقعیت مفصل ربات، موقعیت موتور کنترل می‌شود. البته در ربات‌هایی با مفاصل انعطاف‌پذیر این طراحی پیچیده‌تر از ربات‌هایی با مفاصل صلب است.

در این فصل از راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل موتورهای ربات استفاده می‌شود. این روش نسبت به راهبرد مرسوم کنترل گشتاور ساده‌تر و کاربردی‌تر می‌باشد و از دقت و سرعت و سهولت اجرای بیشتری برخوردار است. با این روش هر مفصل به‌طور جداگانه کنترل می‌شود.

به‌وسیله این راهبرد کنترلی، سیستم چند متغیره ربات را می‌توان به‌صورت کاملاً مجزا کنترل کرد. راهبرد کنترل ولتاژ ربات بر مبنای مدل موتور و مستقل از مدل ربات برای نخستین بار در مقاله‌ی (Fateh 2008) معرفی شده است.

در این فصل رویکرد کنترل ولتاژ را برای اولین بار در پدیده گرفتن مورد استفاده قرار گرفته است تا روش کنترل لغزش جسم گرفته شده بهبود داده شود و برخلاف آنچه تاکنون استفاده شده، به مدل ربات وابسته نباشد.

۲-۵ سیستم کنترلی

همان گونه که در فصل ۲ عنوان شد، معادلات حرکت ربات n لینکی در تعامل با جسم با فرض عدم وجود انعطاف پذیری در مفاصل توسط معادله (۱-۵) بیان می شود.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - J^T F = \tau \quad (1-5)$$

فرض می شود هر یک از مفاصل ربات توسط یک موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم راه اندازی می شود. گشتاور اعمالی بر مفاصل ربات به عنوان گشتاور بار موتور در نظر گرفته می شود و از رابطه زیر به دست آمده می آید:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + r \tau_l = \tau_m \quad (2-5)$$

در رابطه فوق θ_m بردار موقعیت روتور، $\tau_m \in R^n$ بردار گشتاور موتورها، J_m, B_m, r ماتریس های قطری $n \times n$ هستند که به ترتیب مجموع اینرسی محرک ها و چرخ دنده ها، ضرایب میرایی و ضریب کاهش چرخ دنده ها هستند. $\tau_l \in R^n$ نیز بردار گشتاور بار موتور است. بردار موقعیت مفاصل ربات و موقعیت روتور به وسیله معادله زیر به یکدیگر تبدیل می شود.

$$q = r \theta_m \quad (3-5)$$

همان گونه که در مقدمه اشاره شد در این راهبرد کنترلی به جای کنترل گشتاور مفاصل به کنترل ولتاژ موتورهای مفاصل پرداخته می شود. در این صورت سیگنال ورودی به سیستم ولتاژ موتورها است.

برای به دست آوردن معادلات سیستم ربات بر اساس ولتاژ موتورها به عنوان ورودی‌های کنترلی، می‌توان از معادله الکتریکی موتورهای DC مغناطیس دائم استفاده کرد. فرم کلی این معادله به صورت زیر می‌باشد.

$$\mathbf{R}\mathbf{I}_a + \mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_a + \mathbf{k}_b\dot{\theta}_m = \mathbf{u} \quad (4-5)$$

که در رابطه فوق \mathbf{u} بردار ولتاژ دو سر آرمیچر موتورها، \mathbf{I}_a بردار جریان موتورها، \mathbf{R} ، \mathbf{L} ماتریس‌های $n \times n$ به ترتیب معرف مقاومت، اندوکتانس (ضریب خودالقا) سیم‌پیچ‌های آرمیچر و \mathbf{k}_b ماتریس $n \times n$ شامل ضریب نیرومحرکه القایی در موتور می‌باشند. این ضریب‌های القا برای موتورهای DC با جریان تحریک ثابت، مقداری ثابت دارد. بردار گشتاور تولیدی موتور τ_m با جریان آرمیچر موتور از طریق رابطه زیر تولید می‌گردد.

$$\mathbf{k}_m \mathbf{I}_a = \tau_m \quad (5-5)$$

در رابطه فوق \mathbf{k}_m ماتریس قطری شامل ضریب‌های ثابت گشتاور می‌باشند.

۵-۲-۱ خطی سازی بازخوردی

همان‌گونه که در قسمت قبل بیان شد رابطه (۴-۵) از مدار معادل الکتریکی موتور به دست آمده می‌آید. به منظور حذف عامل جریان، قانون کنترل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{L}\frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{k}_b\mathbf{f} \quad (6-5)$$

که در این حالت \mathbf{f} ورودی جدید کنترل کننده است. با جایگذاری رابطه (۶-۵) در معادله الکتریکی موتور سیستم خطی مستقل از زمان به صورت زیر به دست آمده می‌آید:

$$\mathbf{f} = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (7-5)$$

در رابطه (۷-۵)، \mathbf{f} ورودی سیستم و $\boldsymbol{\theta}_m$ خروجی سیستم است. این سیستم به عنوان یک انتگرال گیر شناخته می شود که به صورت معادلات خطی مجزا از هم نشان داده می شود؛ بنابراین قانون کنترل به منظور ردگیری مسیر به صورت زیر انتخاب می شود:

$$\mathbf{f} = \dot{\boldsymbol{\theta}}_{md} + \mathbf{k}_p (\boldsymbol{\theta}_{md} - \boldsymbol{\theta}_m) \quad (۸-۵)$$

که در رابطه فوق $\boldsymbol{\theta}_{md}$ موقعیت مطلوب روتور، $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{md}$ سرعت مطلوب روتور و \mathbf{k}_p بهره تناسبی است. با جایگذاری رابطه (۸-۵) در (۷-۵) داریم:

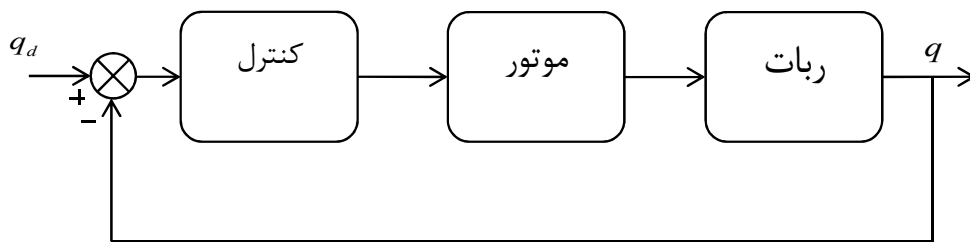
$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{md} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{k}_p (\boldsymbol{\theta}_{md} - \boldsymbol{\theta}_m) = \mathbf{0} \quad (۹-۵)$$

که اگر $\mathbf{e} = \boldsymbol{\theta}_{md} - \boldsymbol{\theta}_m$ خطای ردیابی باشد، معادله دینامیک خطا به صورت زیر به دست می آید.

$$\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e} = \mathbf{0} \quad (۱۰-۵)$$

سیستم کنترل حلقه بسته فوق به عنوان دینامیک خطا، خطی می باشد و تنها در صورتی که $\mathbf{k}_p > \mathbf{0}$ باشد پایداری سیستم تضمین می شود. در این صورت با افزایش زمان، خطا به سمت صفر میل می کند و موقعیت روتور به مقدار مطلوب آن همگرا می شود.

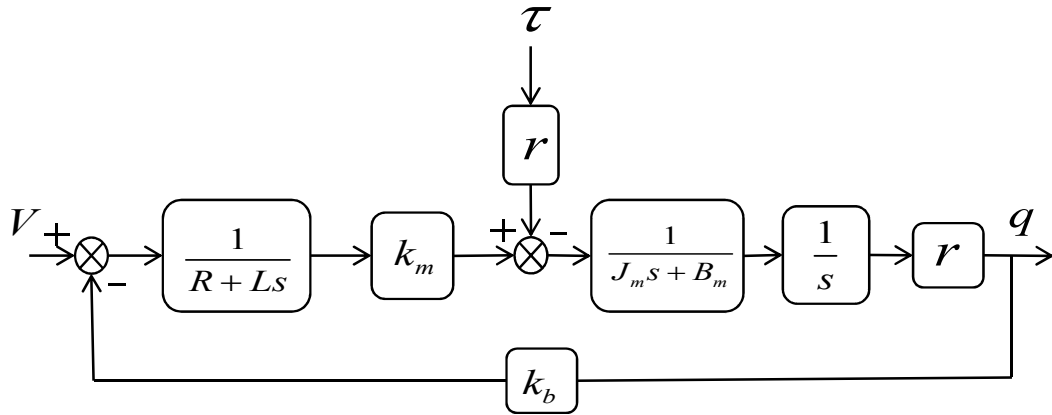
با توجه به آنچه در بالا گفته شد دیاگرام کنترل ولتاژ موتور مفصل ربات به صورت شکل (۱-۵) است.



شکل (۱-۵) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور ربات

دیاگرام موتور DC مغناطیس دائم نیز با توجه به روابط (۲-۵) و (۴-۵) در شکل (۲-۵) رسم شده است.

در این شکل ولتاژ u ورودی سیستم کنترلی است. ورودی τ نیز گشتاور بار ربات می‌باشد.



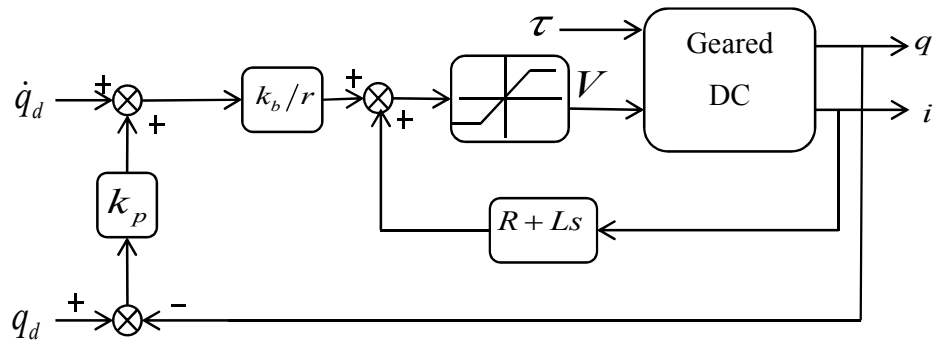
شکل (۲-۵) دیاگرام موتور مغناطیس دائم

شکل (۳-۵) سیستم کنترل موتور و شکل (۴-۵) سیستم کنترل ربات را نشان می‌دهد. به‌منظور

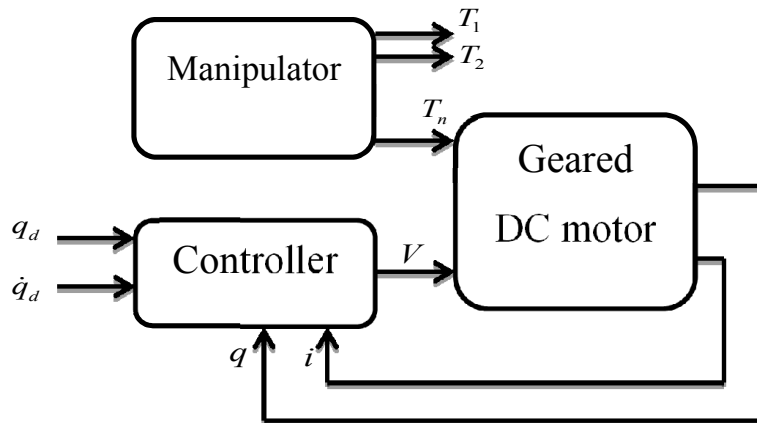
محافظت موتور از محدودکننده ولتاژ استفاده می‌شود. در این صورت مقادیر حدی ولتاژ به محدودکننده

اعمال می‌شود. در صورت به‌کارگیری از این محدودکننده باید توجه نمود که در وضعیت اشباع، قانون

کنترل پیشنهادی دیگر عمل نمی‌کند و ولتاژ موتور روی مقادیر حدی باقی می‌ماند.



شکل (۳-۵) سیستم کنترل موتور



شکل (۴-۵) سیستم کنترل ربات

به این ترتیب می‌توان با استفاده از معادلات (۱-۵) و (۲-۵) تا (۵-۵) مدل فضای حالت را برای ربات با تحریک الکتریکی به صورت زیر به دست آورد:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b} \mathbf{u} \quad (۱۱-۵)$$

که در آن \mathbf{u} بردار ورودی سیستم، \mathbf{x} بردار متغیرهای حالت سیستم و $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ ماتریس فضای حالت سیستم می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{L}} \mathbf{X}_1 - \frac{\mathbf{k}_b}{\mathbf{L}} \mathbf{X}_3 \\ \mathbf{X}_3 \\ \mathbf{k}_m \mathbf{X}_1 - (\mathbf{B}_m + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \times \mathbf{r}^2) \mathbf{X}_3 - \mathbf{G}(\mathbf{q}) \times \mathbf{r} / (\mathbf{J}_m + \mathbf{D}(\mathbf{q}) \times \mathbf{r}^2) \end{bmatrix} \quad (۱۲-۵)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \\ \boldsymbol{\theta}_m \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}^{-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۱۳-۵)$$

مدل فضای حالت (۱۱-۵) یک سیستم چند متغیره غیرخطی با تزویج سنگین را نشان می‌دهد. در بسیاری از کارهای تحقیقاتی از دینامیک موتورها صرف نظر می‌شود ولی دینامیک موتورها نقش مهمی در کنترل ربات در حرکت‌های سریع و دقیق ایفا می‌کند.

با توجه به معادلات غیرخطی دینامیکی که در فصل ۲ برای ربات اسکارا به دست آمده آمد و بنا بر مزایایی که در ابتدای این فصل درباره روش کنترل ولتاژ بیان شد، در ادامه این فصل روش‌های کنترلی که در فصل‌های قبل برای کنترل لغزش ربات پیاده‌سازی شد، در نظر گرفته شده و با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ بازسازی می‌گردند.

۳-۵ شبیه‌سازی

۱-۳-۵ کنترل لغزش پنجه با راهبرد ولتاژ

در ابتدای شبیه‌سازی، عملکرد راهبرد کنترل ولتاژ بر روی یک پنجه فک موازی پیاده‌سازی می‌شود. در این مرحله به جای روش کنترل گشتاور محاسبه شده که در فصل ۳ بر روی پنجه ربات فک موازی اعمال گردید، راهبرد کنترل ولتاژ استفاده می‌شود.

همان‌طور که در بخش مدل‌سازی دینامیکی مطرح شد و با توجه به مختصات در نظر گرفته شده برای جسم و ربات، سیستم پنجه مورد مطالعه به تنهایی ثابت بوده و حرکت آن توسط دو انگشت پنجه به صفحه $X_4 - Z_4$ محدود می‌باشد. جهت بررسی عملکرد کنترل کننده در فرآیند گرفتن جسم، شبیه‌سازی برای حالت گرفتن جسمی که تنها تحت تأثیر نیروی وزن خود شروع به حرکت می‌کند در نظر گرفته شده است. این حرکت برای جسم در راستای قائم است. سایر مشخصات پنجه مذکور مطابق با آنچه در فصل ۲ بیان شد، در نظر گرفته می‌شود.

در تمامی شبیه‌سازی‌ها ربات تک مفصلی و موتور آن ثابت است و جداول پارامترهای موتور به صورت زیر می‌باشد:

r	B_m $\left(\frac{Nm.s}{rad}\right)$	J_m $\left(\frac{Nm.s^2}{rad}\right)$	L (H)	k_b $\left(\frac{V.s}{rad}\right)$	R (Ω)	k_m
۵۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۲۶	۱/۶

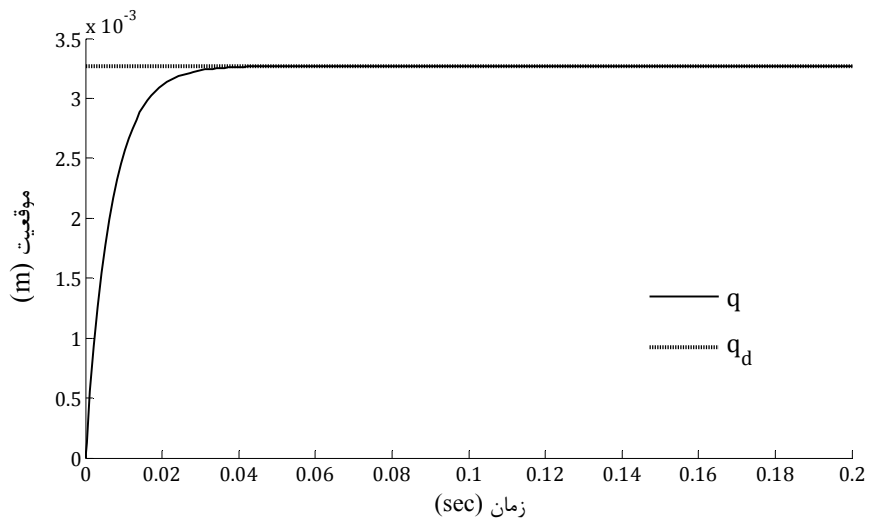
فرض بر این است که انگشتان در لحظه شروع حرکت، فشردگی نداشته و در تماس با جسم قرار داشته باشند. در ادامه نتایج شبیه‌سازی برای مسئله فوق ارائه شده است.

با توجه به موتور قرار داده شده برای حرکت بازوی ربات، کنترل لغزش پنجه بر مبنای راهبرد ولتاژ انجام می‌شود. مشابه با کنترل CTC، برای ساخت این کنترل کننده به اصلاح موقعیت انگشت بر اساس رابطه زیر نیاز می‌باشد.

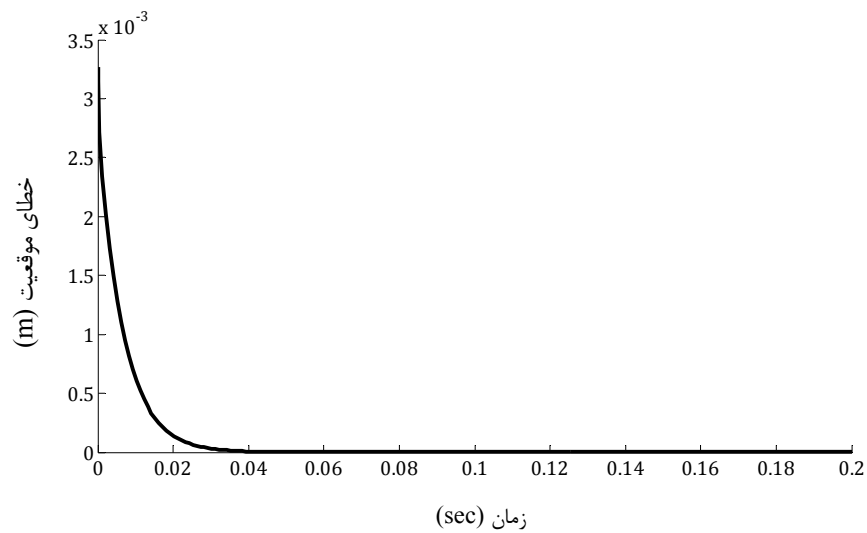
$$q^d = \frac{N_d}{K_f} + q_0 \quad (۱۴-۵)$$

همان‌طور که گفته شد در این قسمت از شبیه‌سازی هیچ حرکت از پیش تعریف شده‌ای برای پنجه در نظر گرفته نشده است، در این حالت جسم تنها به خاطر اثر وزن خود در راستای قائم حرکت می‌نماید. لذا به منظور بررسی رخ داد لغزش، موقعیت جسم تنها در راستای قائم بررسی می‌شود. بدین منظور کنترل کننده بایستی انگشتان را به سمت جسم حرکت داده تا نیروی عمودی مناسب برای مهار لغزش جسم ایجاد شود.

همان‌گونه که در شکل (۵-۵) مشاهده می‌شود، در ابتدا پنجه شروع به حرکت می‌کند تا اینکه بین بازه زمانی ۰ تا ۰/۱ ثانیه از شروع حرکت به مقدار مطلوب خود می‌رسد. در شکل (۶-۵) نمودار خطای ردگیری انگشت با اعمال کنترل ولتاژ نشان داده شده است.

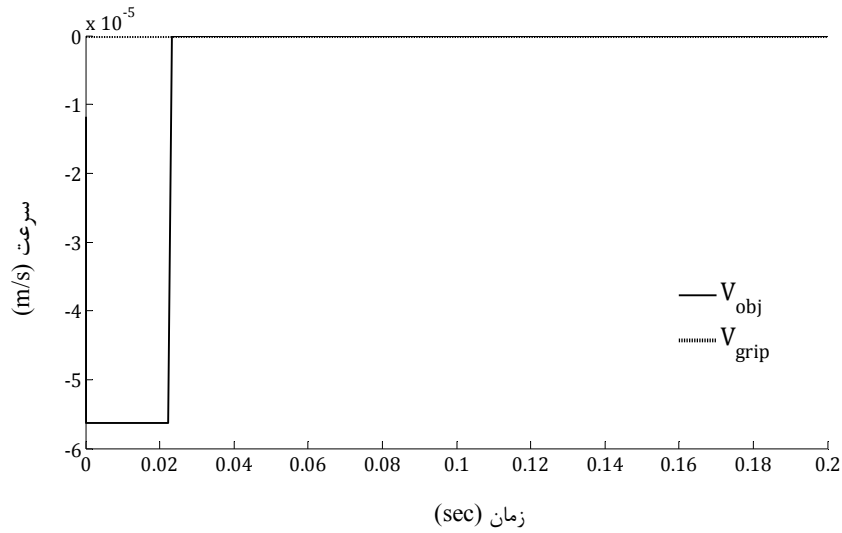


شکل (۵-۵) موقعیت انگشت

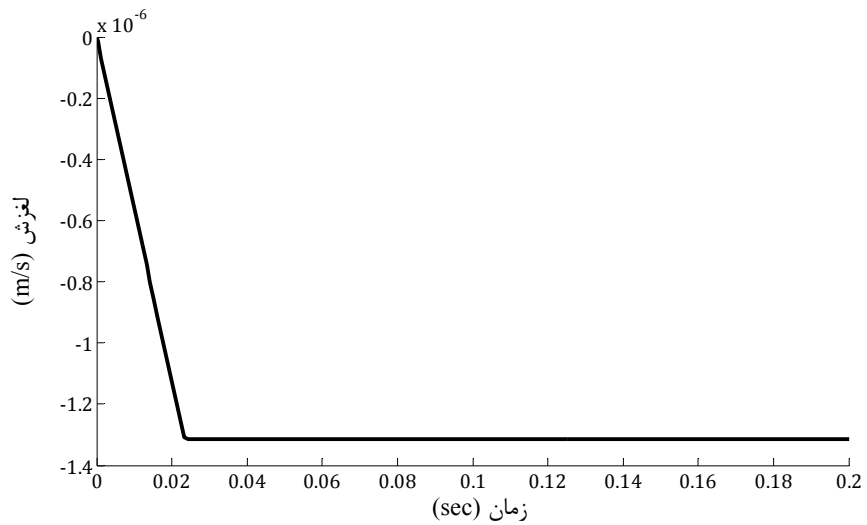


شکل (۶-۵) خطای موقعیت انگشت

در نتیجه این حرکت، همان گونه که در شکل (۷-۵) نشان داده شده سرعت جسم نسبت به سرعت پنجه در بازه زمانی رخ داده لغزش تغییر می کند. علاوه بر آن جسم نیز در همان بازه زمانی ۰ تا ۰/۱ ثانیه، نسبت به مرکز ثقل پنجه لغزش می یابد (شکل (۸-۵)).



شکل (۷-۵) مقایسه سرعت جسم و سرعت پنجه

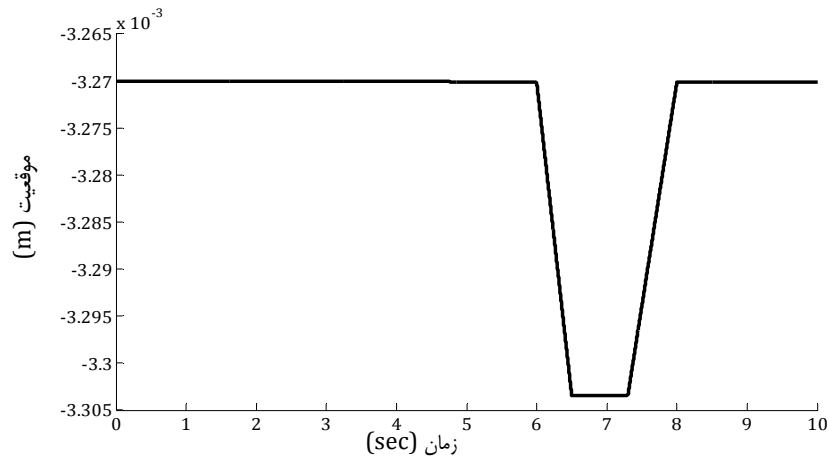


شکل (۸-۵) لغزش جسم در راستای قائم

با توجه به نمودار سرعت و موقعیت جسم نسبت به پنجه می‌توان گفت که جسم گرفته شده در ابتدا لغزیده است؛ اما پس از عملکرد کنترل کننده، پنجه به موقعیت مطلوب خود رسیده و لغزش جسم را تحت کنترل خود قرار داده و آن را متوقف کرده است.

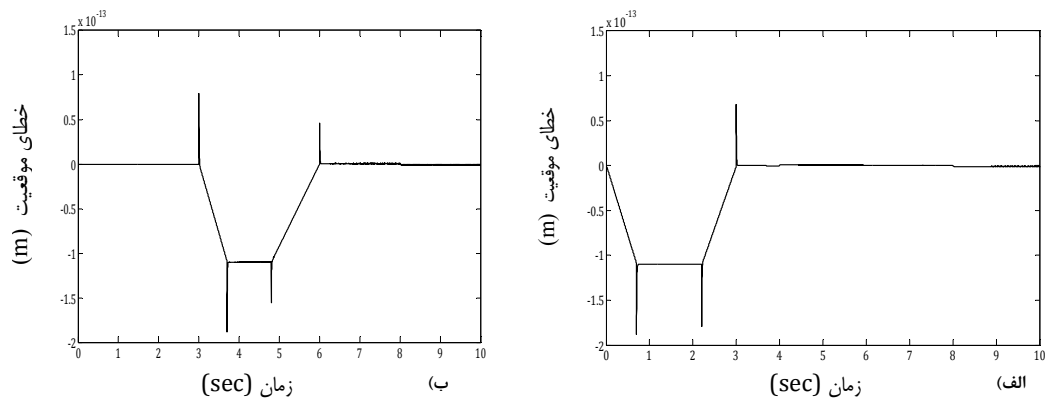
۴-۵ کنترل ولتاژ ربات اسکارا

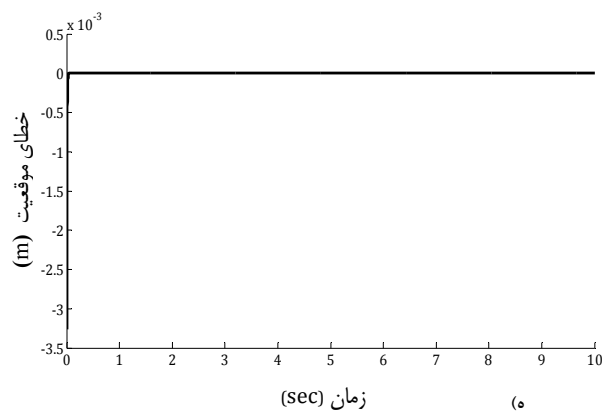
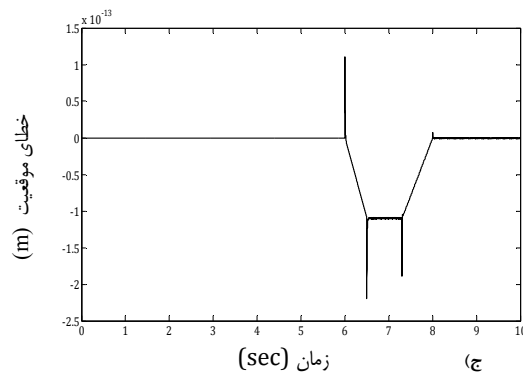
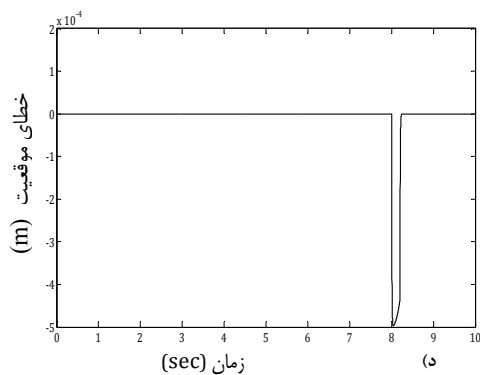
مشابه روندی که برای کنترل لغزش جسم گرفته شده توسط پنجه با راهبرد ولتاژ انجام شد، در این قسمت برای کل ربات اسکارای ۴ درجه آزادی به همراه پنجه ربات اجرا می‌گردد. در این قسمت معادلات پیچیده تر شده و فرم غیرخطی به خود می‌گیرند. موقعیت مطلوب انگشت مشابه با حالت قبل در شکل (۹-۵) ترسیم می‌گردد.



شکل (۹-۵) موقعیت مطلوب انگشت

پس از اعمال کنترل کننده برای گرفتن جسم و مهار لغزش آن، مقدار خطای ردیابی مسیر برای مفاصل ۱ تا ۵ محاسبه شده است و نتایج آن در شکل (۱۰-۵) آمده است.





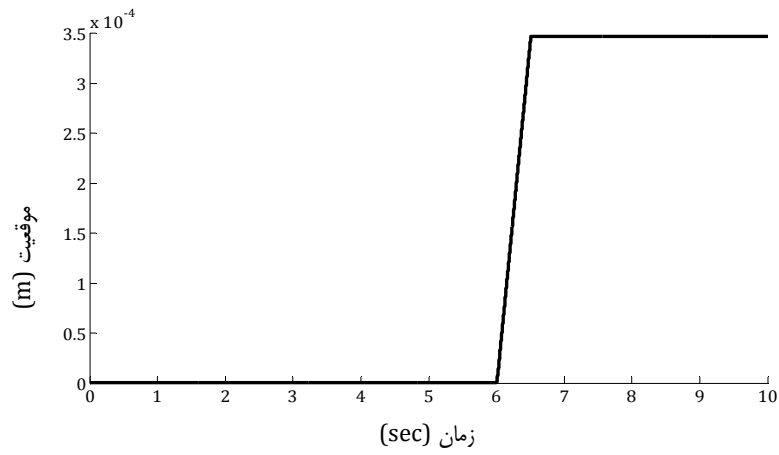
شکل (۵-۱۰) خطای موقعیت مفاصل ربات؛ الف) مفصل ۱، ب) مفصل ۲، ج) مفصل ۳، د) مفصل ۴، ه) مفصل ۵ همان‌طور که در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است، با اعمال کنترل کننده (۵-۶)، هر یک از بازوهای ربات در بازه زمانی حرکت ۱۰ ثانیه‌ای خود مسیر مطلوب داده شده را به خوبی ردیابی می‌نماید. با وجود انجام کنترل لغزش، انگشت ربات در ثانیه اول حرکت ۳۵ میلی‌متر جابه‌جایی ناگهانی دارد که این مقدار تغییرات ناگهانی در مدت‌زمان کوتاه می‌تواند بر موقعیت جسم اثر گذارد.

در این کنترل کننده پارامترهای طراحی به صورت مقادیر K_p و K_v به ترتیب ماتریس‌های قطری با عناصر قطر اصلی ۱۵۰ و ۲۰ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایج مربوط به خطای ردیابی بازوی ۵ که در شکل (۵-۱۰-ه) ارائه شده است، مشاهده می‌شود که بعد از گذشت زمان بین ۰ تا ۰/۱ ثانیه ردیابی مسیر انگشت به خوبی انجام شده است.

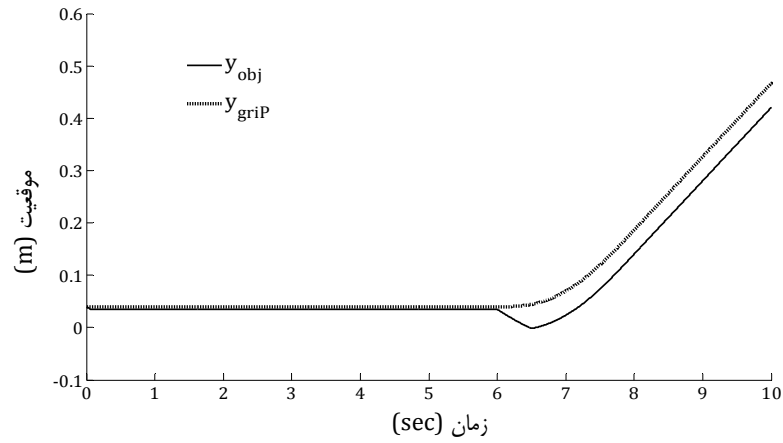
نمودار موقعیت جسم و انگشت ربات در دو راستای X_4 و Y_4 برای مقایسه و نشان دادن لغزش رخ داده در شکل (۵-۱۱) و (۵-۱۲) ترسیم شده است. همان گونه که در این شکل ها مشخص شده، مقادیر Y_{obj} و X_{obj} باگذشت زمان از مقادیر موقعیت انگشت در راستای X_4 و Y_4 تبعیت می کنند. با این تفاوت که خطای ردیابی موقعیت جسم از پنجه در راستای محور X_4 قابل صرف نظر است. درحالی که این اختلاف در راستای Y_4 غیر قابل چشم پوشی است.

سرعت های جسم و پنجه ربات در راستای X_4 و Y_4 به طور جداگانه در اشکال (۵-۱۳) و (۵-۱۴) با یکدیگر مقایسه شده است. همان گونه که در شکل (۵-۱۳) مشاهده می شود، تغییرات سرعت در راستای X_4 بسیار ناچیز است و در این حالت سرعت جسم به خوبی از سرعت انگشت ربات تبعیت می کند. درحالی که مطابق با شکل (۵-۱۴)، این اختلاف در راستای محور Y_4 همواره صفر نیست و در بعضی از لحظات سرعت جسم با سرعت پنجه برابری نمی کند؛ که این خود بیان کننده لغزش جسم در این لحظات است. از مقایسه شکل (۵-۱۴) و (۵-۱۱) مشاهده می شود که الزاماً در زمان هایی که سرعت جسم از سرعت پنجه تبعیت نمی کند، نیروی عمودی جهت گرفتن افزایش می یابد تا از افتادن جسم جلوگیری نماید.

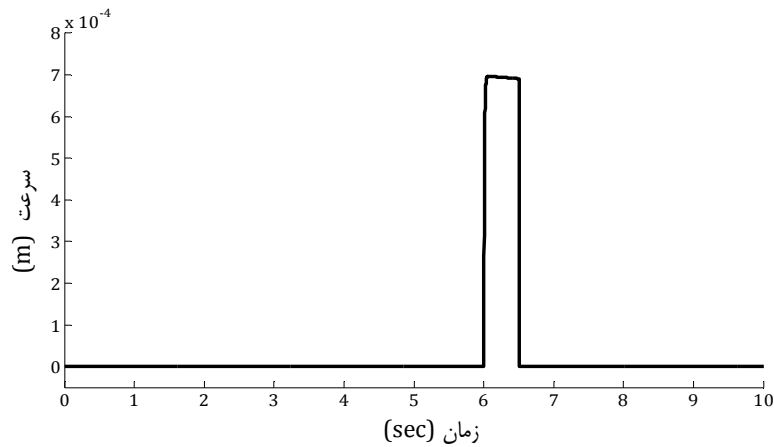
با توجه به مطالب فوق می توان گفت مانور حرکتی برای ربات باعث لغزش جسم مطابق با شکل های (۵-۱۴) و (۵-۱۵) می شود. از مقایسه این دو شکل مشاهده می شود که پس از مدت زمان ۱۰ ثانیه از حرکت، جسم در هر دو راستای X_4 و Y_4 دچار لغزش شده است. مقدار لغزش در راستای X_4 کمتر از معیار لازم برای جبران سازی است درحالی که لغزش جسم در راستای Y_4 به اندازه تقریبی $3/5$ سانتی متر می باشد و این مقدار با توجه به شرایط کاری در نظر گرفته شده ربات و ابعاد جسم و پنجه مقدار قابل توجهی است؛ لذا بایستی با تمهید مناسبی که در فصل ۴ بیان شد، این مقدار لغزش را همان طور که در قسمت بعدی نشان داده شده است، جبران نمود.



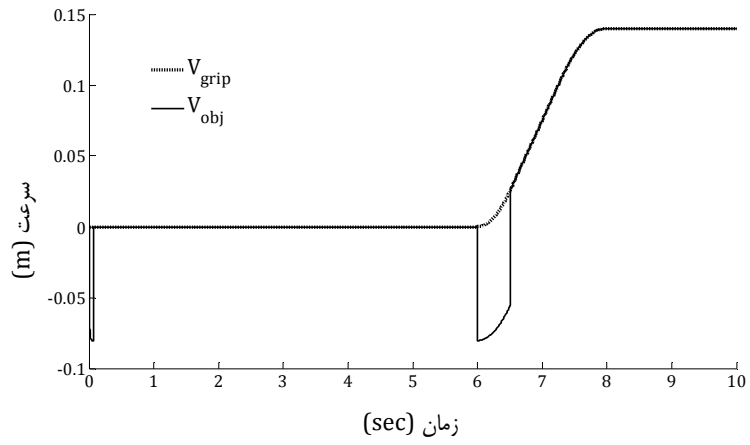
شکل (۱۱-۵) اختلاف موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4



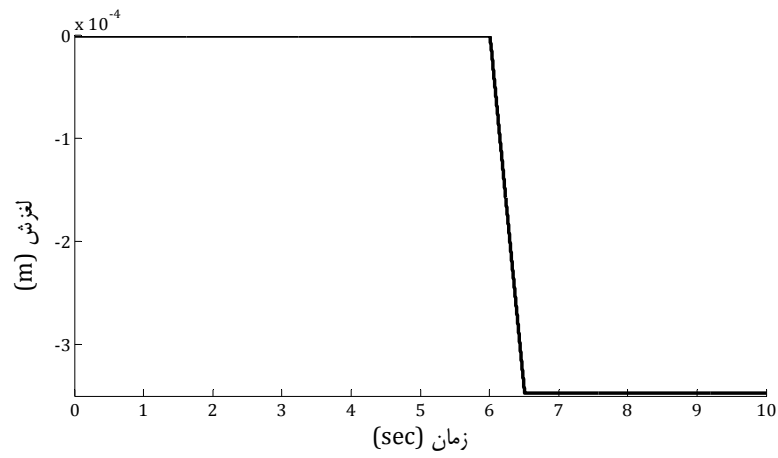
شکل (۱۲-۵) موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4



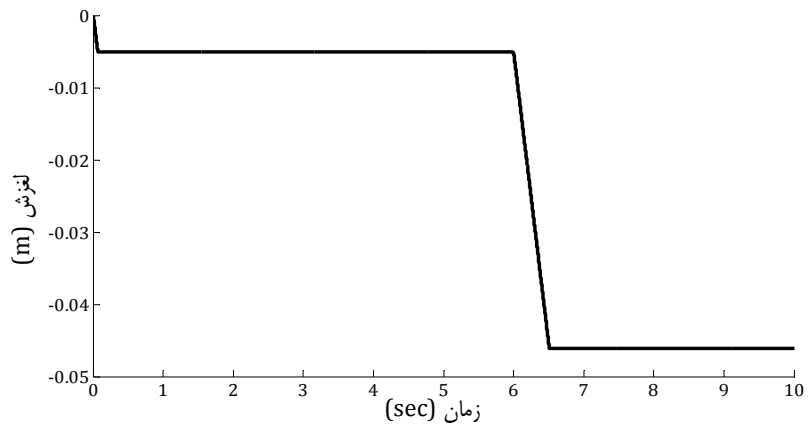
شکل (۱۳-۵) اختلاف سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4



شکل (۱۴-۵) سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4

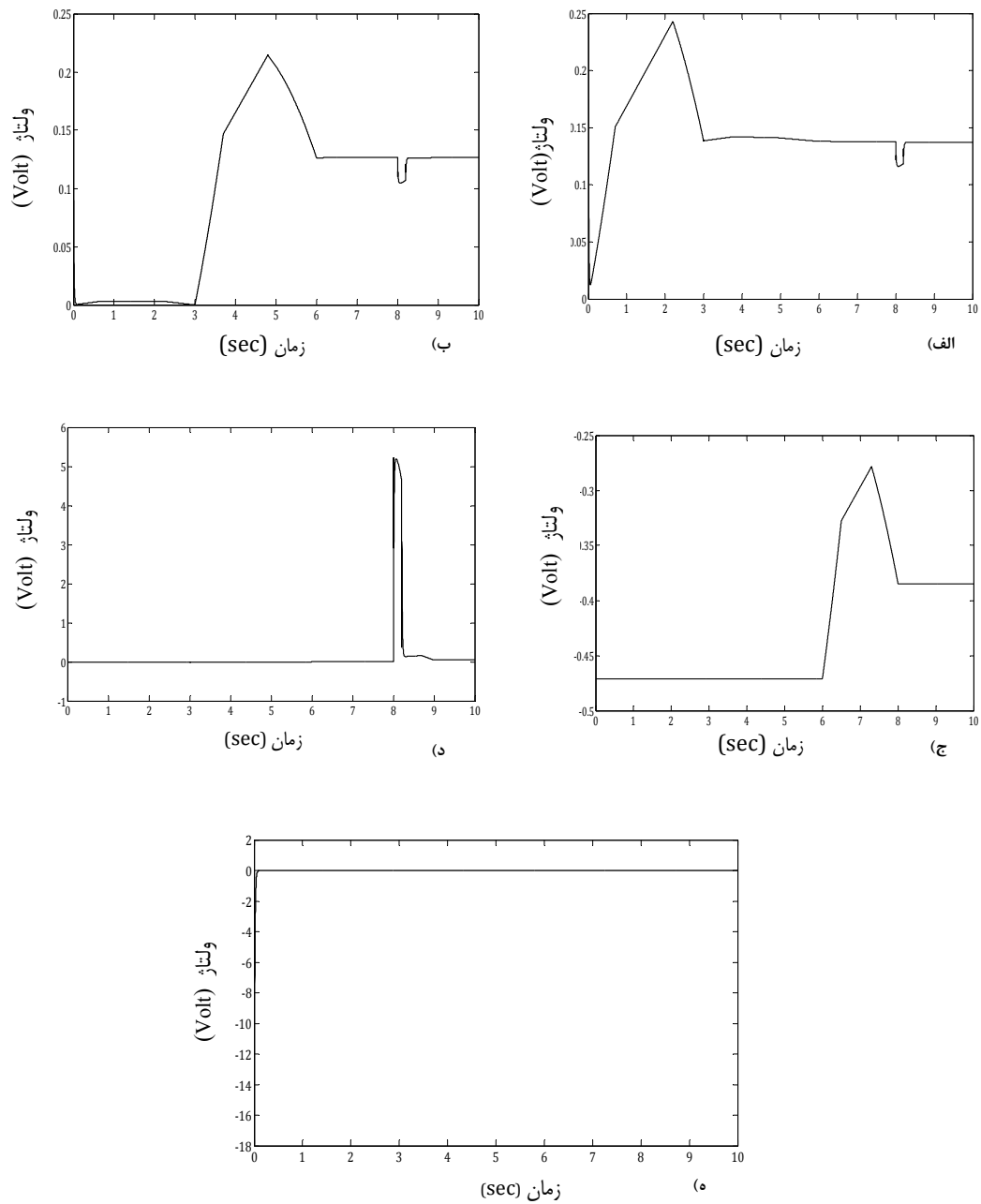


شکل (۱۵-۵) لغزش جسم در راستای X_4



شکل (۱۶-۵) لغزش جسم در راستای Y_4

در انتها ولتاژ تولیدشده به وسیله کنترل کننده که به موتور اعمال می شود در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است.



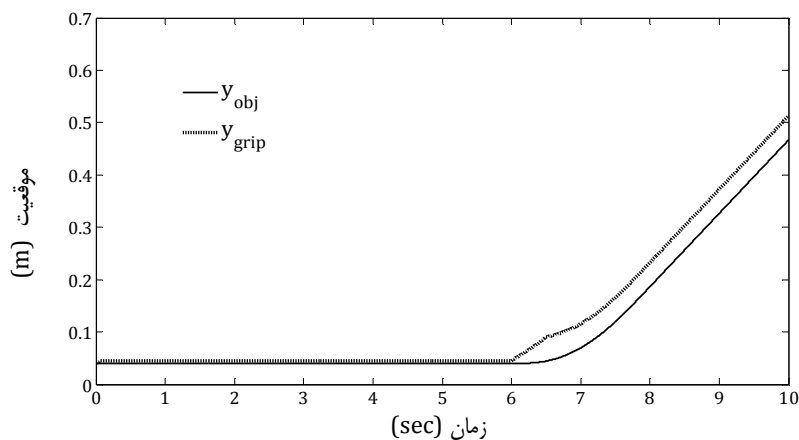
شکل (۵-۱۷) ولتاژ مفاصل ربات با اعمال راهبرد ولتاژ؛ الف) مفصل ۱، ب) مفصل ۲، ج) مفصل ۳، د) مفصل ۴، ه) مفصل ۵

۵-۴-۱ نتایج شبیه‌سازی با اعمال کنترل‌کننده برای جبران لغزش

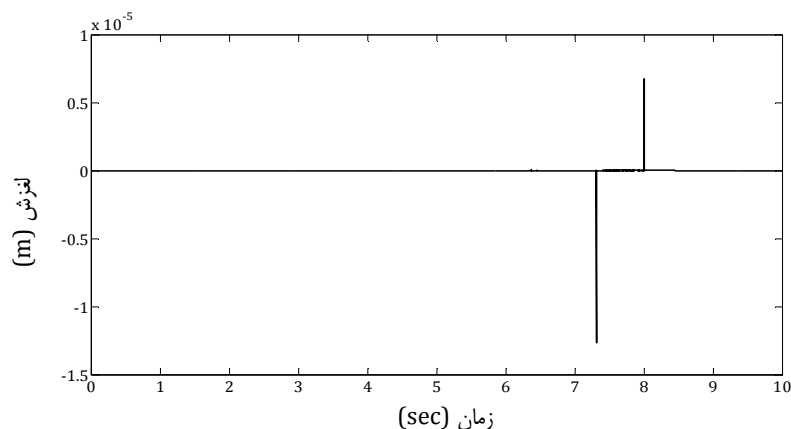
همان‌گونه که در بخش قبل نشان داده شد، میزان لغزش در راستای X_4 نسبت به لغزش در راستای Y_4 بسیار ناچیز است. لذا با توجه به روش‌های جبران لغزش بیان‌شده در بخش ۵-۲، تنها لغزش رخ داده در راستای محور Y_4 جبران می‌گردد، هرچند با راهکاری که در این بخش ارائه شد امکان جبران لغزش در جهت X_4 هم امکان‌پذیر است. بدین منظور با مقایسه امتداد محورهای پنجه نسبت به مختصات مرجع، جبران لغزش ایجادشده در امتداد محور Y_4 از طریق اصلاح مسیر مفصل کشویی ۳ انجام می‌شود. نتایج این جبران‌سازی در شکل (۵-۱۸) و (۵-۱۹) نشان داده‌شده است.

همان‌گونه که در شکل (۵-۱۸) آمده، پس از اعمال جبران‌سازی لغزش در راستای محور Y_4 ، موقعیت رابط ۳ با توجه به موقعیت پنجه ربات تغییر می‌کند و دیگر مسیر مطلوب قدیمی خود را تعقیب نکرده؛ بلکه مسیر اصلاح‌شده را تعقیب خواهد نمود تا بر اساس این ردیابی جدید، جسم در موقعیت موردنظر قرار گیرد.

با توجه به شکل (۵-۱۹) و باوجود رخداد لغزش نمودار موقعیت جسم، مسیر مطلوب قدیمی مفصل کشویی ۳ ربات؛ که جسم را در محل مناسب خود قرار می‌دهد، ردیابی کرده است؛ لذا می‌توان گفت در این حالت لغزش رخ داده توسط کنترل‌کننده و با اصلاح مسیر مفصل کشویی ۳ جبران شده است. در شکل (۵-۱۹) نمودار لغزش جسم در راستای Y_4 و پس از اعمال جبران‌سازی نشان داده‌شده است، مشاهده می‌شود پس از رخداد لغزش که در اثر مانور ربات ایجاد می‌شود، کنترل‌کننده با اصلاح مسیر بازوی سوم ربات و به‌صورت برخط لغزش را جبران نموده و به صفر می‌رساند. این وضعیت تا رویداد لغزش بعدی پایدار می‌ماند به‌طوری‌که در لحظات پایانی مقدار لغزش جبران شده است.



شکل (۱۸-۵) موقعیت جسم و پنجه بعد از اعمال جبران سازی



شکل (۱۹-۵) لغزش محاسبه شده بعد از جبران سازی

از مقایسه نتایج شبیه سازی برای کاربرد دو روش کنترل ولتاژ و کنترل CTC مشاهده می شود که در روش کنترل ولتاژ خطای ردگیری بازوها تا حد زیادی کاهش داشته است. در هر دو نوع شبیه سازی، یعنی پیاده سازی بر روی پنجه منفرد و نیز پیاده سازی بر روی پنجه متصل به ربات مشاهده می شود که به دلیل ردگیری سریع تر در کنترل ولتاژ، میرایی سیستم افزایش داشته و تغییرات موقعیت بازوی ۵ از مقدار مطلوب آن تا حد زیادی کاهش می یابد (در اینجا یکبار نوسان نموده است). این کاهش نوسانات و کم شدن زمان رخ داده لغزش، متقابلاً در نمودار سرعت جسم نسبت به سرعت پنجه نیز نشان داده شده است. در نتیجه مقدار تغییر لغزش ایجاد شده در هر دو راستا نیز نسبت به کنترل کننده گشتاور محاسبه شده کاهش می یابد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، بعد از مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا با پنجه فک موازی، کنترل به‌منظور مهار لغزش رخ‌داده برای جسم گرفته‌شده توسط پنجه ربات انجام‌شده و روشی جدید برای جبران سازی مقدار لغزش و تغییر موقعیت جسم نسبت به انگشتان ربات معرفی و پیاده‌سازی شده است.

در بخش مدل‌سازی، به جهت فرض گرفتن ایمن جسم در تحقیق حاضر و اثرگذاری وزن جسم و یا تحریکی که ممکن است توسط مانور ربات در جابجایی جسم ایجاد شود، مدل دینامیکی جسم بر اساس فرضیات در نظر گرفته‌شده محاسبه گردید.

سپس به جهت بررسی دقیق وضعیت لغزش جسم، حالت‌های مختلف لغزش بر اساس مقدار نیروهای اعمالی بر آن و حرکت نسبی جسم نسبت به پنجه تحلیل‌شده است. در ادامه راهکارهای کنترلی برای کنترل لغزش جسم گرفته‌شده بیان گردیده است.

در راهکار اول این پایان‌نامه به‌منظور کنترل لغزش و تضمین رفتار حلقه بسته‌ی مطلوب، از کنترل‌کننده گشتاور محاسبه‌شده استفاده‌شده است. در این کنترل‌کننده تعقیب مسیر مطلوب بازوهای ربات به‌خوبی انجام می‌شود، اما با توجه به لغزشی که در حین عملیات گرفتن رخ می‌دهد، به‌ناچار مسیر مطلوب در راستای لغزش دچار تغییراتی می‌گردد.

در ادامه به‌منظور بررسی بهتر ابعاد لغزش در مانورهای مختلف، مسئله مطرح‌شده ابتدا بر روی سیستم جسم و پنجه پیاده‌سازی شده و سپس برای حالت متصل شده به ربات اسکارای ۴ درجه آزادی تحلیل گردیده است. سیستم حالت اول دارای لغزش تک‌بعدی و در حالت دوم دارای لغزش دوبعدی در راستای قائم و افق می‌باشد. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از فصل ۳، لغزش رخ‌داده در راستای قائم مقدار

قابل توجهی دارد و ما را ملزم به جبران آن می‌نماید. با این وجود در هر دو سیستم کنترل کننده گشتاور محاسبه شده در زمینه‌ی ردگیری مسیر مفاصل ربات و نیز در جهت مهار لغزش به خوبی عمل می‌کند. راهکاری که در این پایان نامه برای جبران لغزش ارائه شده اصلاح مسیر برای جبران لغزش در امتدادهای قائم و افق است. با اعمال روش کنترلی پیشنهادی، جبران لغزش برخط به خوبی انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به خوبی اصلاح موقعیت بازوی سوم ربات به اندازه مقدار لغزش جسم را نشان می‌دهد؛ که به موجب آن پس از اعمال جبران ساز، جسم در موقعیت نهایی مطلوب قرار داده می‌شود. در این سیستم به دلیل کوچکی مقدار لغزش در راستای افق، جبران سازی بر روی آن پیاده‌سازی نشده است؛ اما با استفاده از سینماتیک معکوس و اصلاح مسیر به مفاصل لولایی تمهیداتی برای جبران آن معرفی گردیده است.

در نهایت، فصل ۵ روند کنترل لغزش به منظور مهار و جبران لغزش در دو سیستم مذکور با راهبرد کنترل ولتاژ پرداخته است. روش‌های کنترل ولتاژ وابسته به مدل ربات نبوده و کنترل مفاصل ربات به صورت مجزا صورت می‌گیرد. با استفاده از این روش، به جای استفاده از معادلات پیچیده دینامیکی ربات، با معادلات خطی محرک‌های مفاصل ربات سروکار داریم که علاوه بر سادگی، سهم بسزایی در کاهش محاسبات دارد. لازم به ذکر است که معادلات دینامیکی ربات به عنوان اغتشاشی در مدل جدید در نظر گرفته شده‌اند.

از مقایسه نمودارهای خطای ردگیری مفاصل در دو فصل ۴ و ۵ به خوبی می‌توان دریافت که در روش کنترل ولتاژ با وجود کاهش بهره تناسبی کنترل کننده، زمان پاسخ در مقایسه با کنترل گشتاور محاسبه شده تا حد زیادی کاهش می‌یابد و ردگیری به خوبی انجام می‌شود. از طرفی این امر در ردیابی موقعیت مطلوب انگشت ربات نیز اثر گذاشته و زمان رخ داده لغزش را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. در نتیجه مقدار تغییر لغزش ایجاد شده در هر دو راستا نیز نسبت به کنترل کننده گشتاور محاسبه شده کاهش می‌یابد.

در نهایت می‌توان گفت ضعف روش‌های مبتنی بر کنترل گشتاور این است که دینامیک محرکه‌ها را در نظر نمی‌گیرند ولی در مقابل روش‌های مبتنی بر استراتژی کنترل ولتاژ به نقش موتورها توجه اساسی دارند. روش‌های مبتنی بر کنترل ولتاژ دارای عملکرد مناسب‌تری هستند. از آنجاکه در راهبرد کنترل ولتاژ نیازی به مدل پیچیده ربات نیست می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کنترل‌کننده لغزش بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ نسبت به کنترل‌کننده لغزش بر مبنای گشتاور محاسبه‌شده ترجیح داده می‌شود. با این وجود، مستقل از نوع راهبرد به‌کاررفته در کنترل لغزش، روش استفاده‌شده به‌منظور جبران سازی لغزش در هر دو حالت به‌خوبی پاسخ می‌دهد.

۶-۲ پیشنهادها

پیشنهادهای زیر برای ادامه تحقیق ارائه می‌گردد:

- استفاده از بینایی ماشین در شناسایی لغزش به‌جای استفاده از حسگرهای موقعیت فعلی
- اعمال اثر عدم قطعیت‌ها در سیستم
- استفاده از روش‌های بهینه‌سازی جهت به دست آوردن ضرایب کنترل‌کننده
- جبران و ثبت لغزش با تغییر ساختار پنجه

پیوست ۱:

مقادیر نظیر درایه‌های ماتریس‌های C ، D ، G و q از معادله دینامیکی ربات به شرح ذیل آمده است:

$$D_{11} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + \frac{a_1^2 m_1}{4} + a_1^2 m_2 + a_1^2 m_3 + \frac{a_2^2 m_2}{4} + a_1^2 m_4 + a_2^2 m_3 + a_1^2 m_5 + a_2^2 m_4 + a_2^2 m_5 + \frac{d_5^2 m_5}{4} + m_5 q_5^2 - d_5 m_5 q_5 + a_1 a_2 m_2 \cos(q_2) + 2a_1 a_2 m_3 \cos(q_2) + 2a_1 a_2 m_4 \cos(q_2) + 2a_1 a_2 m_5 \cos(q_2) + a_2 d_5 m_5 \sin(q_4) - 2a_2 m_5 q_5 \sin(q_4) - a_1 d_5 m_5 \sin(q_2 - q_4) + 2a_1 m_5 q_5 \sin(q_2 - q_4)$$

$$D_{12} = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + \frac{a_2^2 m_2}{4} + a_2^2 m_3 + a_2^2 m_4 + a_2^2 m_5 + \frac{d_5^2 m_5}{4} + m_5 q_5^2 - d_5 m_5 q_5 + \frac{a_1 a_2 m_2 \cos(q_2)}{2} + \dots a_1 a_2 m_3 \cos(q_2) + a_1 a_2 m_4 \cos(q_2) + a_1 a_2 m_5 \cos(q_2) + a_2 d_5 m_5 \sin(q_4) - 2a_2 m_5 q_5 \sin(q_4) - \frac{a_1 d_5 m_5 \sin(q_2 - q_4)}{2} + a_1 m_5 q_5 \sin(q_2 - q_4)$$

$$D_{13} = 0$$

$$D_{14} = d_5 m_5 q_5 - I_5 - \frac{d_5^2 m_5}{4} - m_5 q_5^2 - I_4 - \frac{a_2 d_5 m_5 \sin(q_4)}{2} + a_2 m_5 q_5 \sin(q_4) + \frac{a_1 d_5 m_5 \sin(q_2 - q_4)}{2} - a_1 m_5 q_5 \sin(q_2 - q_4)$$

$$D_{15} = -a_2 m_5 \cos(q_4) - a_1 m_5 \cos(q_2 - q_4)$$

$$D_{21} = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + \frac{a_2^2 m_2}{4} + a_2^2 m_3 + a_2^2 m_4 + a_2^2 m_5 + \frac{d_5^2 m_5}{4} + m_5 q_5^2 - d_5 m_5 q_5 + \frac{a_1 a_2 m_2 \cos(q_2)}{2} + \dots a_1 a_2 m_3 \cos(q_2) + a_1 a_2 m_4 \cos(q_2) + a_1 a_2 m_5 \cos(q_2) + a_2 d_5 m_5 \sin(q_4) - 2a_2 m_5 q_5 \sin(q_4) - \dots \frac{a_1 d_5 m_5 \sin(q_2 - q_4)}{2} + a_1 m_5 q_5 \sin(q_2 - q_4)$$

$$D_{22} = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + \frac{a_2^2 m_2}{4} + a_2^2 m_3 + a_2^2 m_4 + a_2^2 m_5 + \frac{d_5^2 m_5}{4} + m_5 q_5^2 - d_5 m_5 q_5 + a_2 d_5 m_5 \sin(q_4) - \dots 2a_2 m_5 q_5 \sin(q_4)$$

$$D_{23} = 0$$

$$D_{24} = -\frac{m_5 d_5^2}{4} + m_5 d_5 q_5 - \frac{a_2 m_5 \sin(q_4) d_5}{2} - m_5 q_5^2 + a_2 m_5 \sin(q_4) q_5 - I_4 - I_5$$

$$D_{25} = -a_2 m_5 \cos(q_4)$$

$$D_{31} = 0$$

$$D_{32} = 0$$

$$D_{33} = m_3 + m_4 + m_5$$

$$D_{34} = 0$$

$$D_{35} = 0$$

$$D_{41} = d_5 m_5 q_5 - I_5 - \frac{d_5^2 m_5}{4} - m_5 q_5^2 - I_4 - \frac{a_2 d_5 m_5 \sin(q_4)}{2} + a_2 m_5 q_5 \sin(q_4) +$$

$$\dots \frac{a_1 d_5 m_5 \sin(q_2 - q_4)}{2} - a_1 m_5 q_5 \sin(q_2 - q_4)$$

$$D_{42} = -\frac{m_5 d_5^2}{4} + m_5 d_5 q_5 - \frac{a_2 m_5 \sin(q_4) d_5}{2} - m_5 q_5^2 + a_2 m_5 \sin(q_4) q_5 - I_4 - I_5$$

$$D_{43} = \frac{m_5 d_5^2}{4} - m_5 d_5 q_5 + m_5 q_5^2 + I_4 + I_5$$

$$D_{44} = 0$$

$$D_{45} = 0$$

$$D_{51} = -a_2 m_5 \cos(q_4) - a_1 m_5 \cos(q_2 - q_4)$$

$$D_{52} = -a_2 m_5 \cos(q_4)$$

$$D_{53} = 0$$

$$D_{54} = 0$$

$$D_{55} = m_5$$

$$c_{11} = 0.25 m_5 q_5 q d_5 + 0.5 a_1 m_5 q d_5 \sin(q_2 - 1.0 q_4) - 0.5 a_2 m_5 q d_5 \sin(q_4) + 0.5 a_1 m_5 q_5 q d_2 \cos(q_2 - 1.0 q_4) -$$

$$\dots 0.5 a_1 m_5 q_5 q d_4 \cos(q_2 - 1.0 q_4) - 0.5 a_1 a_2 m_2 q d_2 \sin(q_2) - 1.0 a_1 a_2 m_3 q d_2 \sin(q_2) - 1.0 a_1 a_2 m_4 q d_2 \sin(q_2) -$$

$$\dots 1.0 a_1 a_2 m_5 q d_2 \sin(q_2) - 0.5 a_2 m_5 q_5 q d_4 \cos(q_4)$$

$$c_{12} = 0.25 m_5 q_5 q d_5 + 0.75 a_1 m_5 q d_5 \sin(q_2 - 1.0 q_4) - 0.5 a_2 m_5 q d_5 \sin(q_4) + 0.5 a_1 m_5 q_5 q d_1 \cos(q_2 - 1.0 q_4) +$$

$$\dots 0.5 a_1 m_5 q_5 q d_2 \cos(q_2 - 1.0 q_4) - 0.5 a_1 m_5 q_5 q d_4 \cos(q_2 - 1.0 q_4) - 0.5 a_1 a_2 m_2 q d_1 \sin(q_2) -$$

$$\dots 0.5 a_1 a_2 m_2 q d_2 \sin(q_2) - 1.0 a_1 a_2 m_3 q d_1 \sin(q_2) - 1.0 a_1 a_2 m_3 q d_2 \sin(q_2) - 1.0 a_1 a_2 m_4 q d_1 \sin(q_2) -$$

$$\dots 1.0 a_1 a_2 m_4 q d_2 \sin(q_2) - 1.0 a_1 a_2 m_5 q d_1 \sin(q_2) - 1.0 a_1 a_2 m_5 q d_2 \sin(q_2) - 0.5 a_2 m_5 q_5 q d_4 \cos(q_4)$$

$$c_{13} = 0.0$$

$$c_{14} = -0.25 m_5 \left(\begin{array}{l} q_5 q d_5 + 3.0 a_1 q d_5 \sin(q_2 - 1.0 q_4) - 3.0 a_2 q d_5 \sin(q_4) + 2.0 a_1 q_5 q d_1 \cos(q_2 - 1.0 q_4) + \\ \dots 2.0 a_1 q_5 q d_2 \cos(q_2 - 1.0 q_4) - 2.0 a_1 q_5 q d_4 \cos(q_2 - 1.0 q_4) + 2.0 a_2 q_5 q d_1 \cos(q_4) + \\ \dots 2.0 a_2 q_5 q d_2 \cos(q_4) - 2.0 a_2 q_5 q d_4 \cos(q_4) \end{array} \right)$$

$$c_{15} = 0.25 m_5 \left(\begin{array}{l} q_5 q d_1 + q_5 q d_2 - 1.0 q_5 q d_4 + 2.0 a_1 q d_1 \sin(q_2 - 1.0 q_4) + 3.0 a_1 q d_2 \sin(q_2 - 1.0 q_4) - \\ \dots 3.0 a_1 q d_4 \sin(q_2 - 1.0 q_4) - 2.0 a_2 q d_1 \sin(q_4) - 2.0 a_2 q d_2 \sin(q_4) + 3.0 a_2 q d_4 \sin(q_4) \end{array} \right)$$

$$c_{21} = 0.25m_5 q_5 q d_5 - 0.25a_1 m_5 q d_5 \sin(q_2 - 1.0q_4) - 0.5a_2 m_5 q d_5 \sin(q_4) - 0.5a_1 m_5 q_5 q d_1 \cos(q_2 - 1.0q_4) + \dots 0.5a_1 a_2 m_2 q d_1 \sin(q_2) + a_1 a_2 m_3 q d_1 \sin(q_2) + a_1 a_2 m_4 q d_1 \sin(q_2) + a_1 a_2 m_5 q d_1 \sin(q_2) - 0.5a_2 m_5 q_5 q d_4 \cos(q_4)$$

$$c_{22} = -0.25m_5 (2.0a_2 q d_5 \sin(q_4) - 1.0q_5 q d_5 + 2.0a_2 q_5 q d_4 \cos(q_4))$$

$$c_{23} = 0.0$$

$$c_{24} = -0.25m_5 (q_5 q d_5 - 3.0a_2 q d_5 \sin(q_4) + 2.0a_2 q_5 q d_1 \cos(q_4) + 2.0a_2 q_5 q d_2 \cos(q_4) - 2.0a_2 q_5 q d_4 \cos(q_4))$$

$$c_{25} = -0.25m_5 (q_5 q d_4 - 1.0q_5 q d_2 - 1.0q_5 q d_1 + a_1 q d_1 \sin(q_2 - 1.0q_4) + 2.0a_2 q d_1 \sin(q_4) + 2.0a_2 q d_2 \sin(q_4) - 3.0a_2 q d_4 \sin(q_4))$$

$$c_{31} = 0$$

$$c_{32} = 0$$

$$c_{33} = 0$$

$$c_{34} = 0$$

$$c_{35} = 0$$

$$c_{41} = 0.25m_5 \left(a_1 q d_5 \sin(q_2 - 1.0q_4) - 1.0q_5 q d_5 - 1.0a_2 q d_5 \sin(q_4) + 2.0a_1 q_5 q d_1 \cos(q_2 - 1.0q_4) + \dots 2.0a_2 q_5 q d_1 \cos(q_4) + 2.0a_2 q_5 q d_2 \cos(q_4) \right)$$

$$c_{42} = -0.25m_5 (q_5 q d_5 + a_2 q d_5 \sin(q_4) - 2.0a_2 q_5 q d_1 \cos(q_4) - 2.0a_2 q_5 q d_2 \cos(q_4))$$

$$c_{43} = 0.0$$

$$c_{44} = 0.25m_5 q_5 q d_5$$

$$c_{45} = -0.25m_5 (q_5 q d_1 + q_5 q d_2 - 1.0q_5 q d_4 - 1.0a_1 q d_1 \sin(q_2 - 1.0q_4) + a_2 q d_1 \sin(q_4) + a_2 q d_2 \sin(q_4))$$

$$c_{51} = 0.25m_5 \left(q_5 q d_4 - 1.0q_5 q d_2 - 1.0q_5 q d_1 - 2.0a_1 q d_1 \sin(q_2 - 1.0q_4) + \dots a_1 q d_2 \sin(q_2 - 1.0q_4) - 1.0a_1 q d_4 \sin(q_2 - 1.0q_4) + 2.0a_2 q d_1 \sin(q_4) + \dots + 2.0a_2 q d_2 \sin(q_4) + a_2 q d_4 \sin(q_4) \right)$$

$$c_{52} = 0.25m_5 \left(q_5 q d_4 - 1.0q_5 q d_2 - 1.0q_5 q d_1 + a_1 q d_1 \sin(q_2 - 1.0q_4) + 2.0a_2 q d_1 \sin(q_4) + \dots + 2.0a_2 q d_2 \sin(q_4) + a_2 q d_4 \sin(q_4) \right)$$

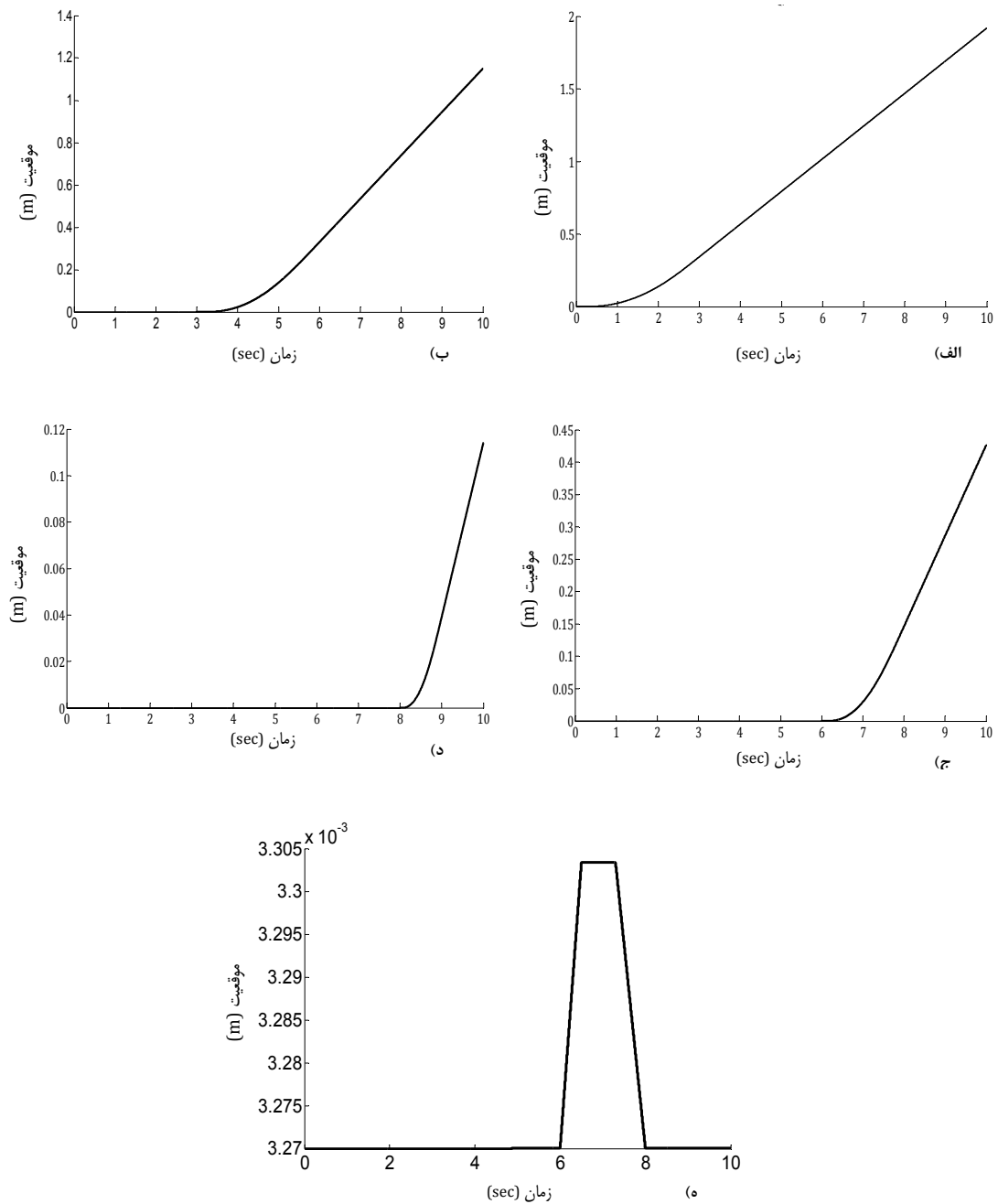
$$c_{53} = 0.0$$

$$c_{54} = 0.25m_5 (q_5 q d_1 + q_5 q d_2 - 1.0q_5 q d_4 - 1.0a_1 q d_1 \sin(q_2 - 1.0q_4) + a_2 q d_1 \sin(q_4) + a_2 q d_2 \sin(q_4))$$

$$c_{55} = 0.0$$

پیوست ۲:

مسیر مطلوب برای مفاصل ۱ تا ۴ ربات مطابق با شکل زیر می‌باشد.



شکل (الف) مسیرهای مطلوب ربات؛ (الف) رابط ۱، (ب) رابط ۲، (ج) رابط ۳، (د) رابط ۴، (ه) رابط ۵

Cadoret, G. and A. M. Smith (1996). "Friction, Not Texture, Dictates Grip Forces Used During Object Manipulation." *Neurophysiol.*

Childress, D. S. (1973). "Powered Limb Prostheses: Their Clinical Significance." *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on BME-20(3): 200-207.*

Daly, T. P. (1986). Slip sensitive robot gripper system, Google Patents.

Dino Accoto, et al. (2010). "Optimization of a Thermal Slip Sensor using FEM and Dimensional analysis." *International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics. The University of Tokyo.*

Domínguez-López, J. A., et al. (2004). "Adaptive neurofuzzy control of a robotic gripper with on-line machine learning." *Robotics and Autonomous Systems 48(2-3): 93-110.*

Dominguez-Lopez, J. A., et al. (2003). "Optimal object grasping using fuzzy logic." *International Conference on Robotics, Vision, Information and Signal Processing. Penang, Malaysia, Universiti Sains Malaysia: 367-372.*

Engeberg, E. D. and S. G. Meek (2008). "Adaptive object slip prevention for prosthetic hands through proportional-derivative shear force feedback." *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on.*

Engeberg, E. D. and S. G. Meek (2013). "Adaptive Sliding Mode Control for Prosthetic Hands to Simultaneously Prevent Slip and Minimize Deformation of Grasped Objects." *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on 18(1): 376-385.*

Engeberg, E. D., et al. (2008). "Hybrid Force&Velocity Sliding Mode Control of a Prosthetic Hand." *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on 55(5): 1572-1581.*

Fateh, M. M. (2006). "Variable Structure Slip Control for Grasping Objects." *International Conference on Dynamical Systems and Control. Bucharest.*

Fateh, M. M. (2007). "A novel formulation of inertia tensor using skew symmetric matrices." *WSEAS Transaction on systems 1: 229-234.*

Fateh, M. M. (2008). "On the voltage-based control of robot manipulators." *International Journal of Control, Automation, and Systems 6: 702-712.*

Fernandez, R., et al. (January 2014). "Micro-Vibration-Based Slip Detection in Tactile Force Sensors." *Sensors (14248220) 14: 709.*

Gaetano Canepa, et al. (12-16 Sep 1994). "Slip detection by a tactile neural network." Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World ', IROS '94. , IEEE. **1**: 224 - 231 vol.221

Guan-Lu, Z., et al. (2008). "Knowledge-based grasping of unknown objects in unstructured urban environments." Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on.

Habib Ahmadi and M. J .Sadigh (2008). "Safe Grasping in Presence of Multi Phase Friction." 2008 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision. Hanoi, Vietnam, IEEE.

Holweg, E. G. M., et al. (1996). "Slip detection by tactile sensors: algorithms and experimental results." Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on.

I, B., et al. (1998). "Mechanisms for force adjustments to unpredictable frictional changes at individual digits during two-fingered manipulation." Neurophysiol, 1998-2002.

Joao Bimbo, et al. "Active Perception of Objects for Robot Grasping", Centre for Robotics Research.

Lee, M. and N. Howard. "Tactile Sensing for Mechatronics: A State of the Art Survey." Mechatronics 311.

Machado, J. A. T., et al. (2002). "Analysis of robot dynamics and compensation using classical and computed torque techniques." **36** (4): 372 - 379.

Maeno, T., et al. (2000). "Control of grasping force by detecting stick/slip distribution at the curved surface of an elastic finger." Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on.

Mark W. Spong, et al. (2004). "**Robot Dynamics and Control.**", Vol. 1, Wiley Press, UK.

Mark W. Spong, et al. (January 28, 2004). "**Forward Kinematics: the Denavit-Hartenberg Convention.**" Robot Dynamics and Control. Wiley, Germany.

Mingrino, A., et al. (1994). "Slippage control in hand prostheses by sensing grasping forces and sliding motion." Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS '94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on.

Nakazawa, N., et al. (2001). "Force control of a robot gripper based on human grasping schemes." Control Engineering Practice **9**(7): 735-742.

Roberts, L., et al. (2011). "Slip detection and grip adjustment using optical tracking in prosthetic hands." Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE.

Rupp, A. and S. A. Velastin (1994). "A gripper and sensor system for controlled slip and force." Industrial Electronics, 1994. Symposium Proceedings, ISIE '94., 1994 IEEE International Symposium on.

Salisbury, J. K. and B. Roth (1983). "Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands." Journal of Mechanical Design **105**(1): 35-41.

Sh. Hadian Jazi and M. Keshmiri (2007). "A New Approach on Object Slippage Control in a Cooperating Manipulators System." International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Las Vegas, Nevada, USA, ASME.

Shirafuji, S. and K. Hosoda (2014). "Detection and prevention of slip using sensors with different properties embedded in elastic artificial skin on the basis of previous experience." Robotics and Autonomous Systems **62**(1): 46-52.

Soliman, A. M., et al. (2009). "A robotic gripper based on advanced system set-up and fuzzy control algorithm." Automation and Logistics, 2009. ICAL '09. IEEE International Conference on.

Tchamna, R. and I. Youn (2013). "Yaw rate and side-slip control considering vehicle longitudinal dynamics ."International Journal of Automotive Technology **14**(1): 53-60.

Tremblay, M. R. and M. R. Cutkosky (1993). "Estimating friction using incipient slip sensing during a manipulation task." Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on.

Tsujiuchi, N., et al. (2003). "Grasp control using compliance control with variable stiffness matrix." Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference.

Xiaoqing, S., et al. (2012). "A novel dynamic slip prediction and compensation approach based on haptic surface exploration." Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference.

Zaki, A. M., et al. (2010). "Design and implementation of efficient intelligent robotic gripper." Modelling, Identification and Control (ICMIC), The 2010 International Conference.

احمدی. ح و صدیق. ج (۱۳۸۹). "جابه جایی اجسام دو بعدی توسط یک پنجه با دو انگشت سه بندی " مجله کنترل دانشگاه خواجه نصیرالدین توسی ۴(۲): ۲۰-۳۵.

Abstract

Grasping in robot gripper is an operation that is inevitably performed by prosthetic hands or industrial robots. Meanwhile, slipping of the grasped object is considered as an undesirable phenomenon in any kind of grasping. Here, the computed torque control is used in order to slip control and also guarantee the desired behavior of the closed loop system. Nevertheless, any acceleration changes of the robot's joints before completing the response time of the slip controller influence directly on the object position relative to the robot and causes slip phenomenon. However, the applied computed torque controller is proper for tracking trajectory but this desired trajectory will be altered according to slip occurrence. This thesis introduces a method to modify the desired trajectory during grasping an object. The modification is done according to the measured slip. These methods not only control the slip of the grasped object, but also compensate it. So the object could be handled and placed in its proper position in the task space. This approach guarantees the safe grasping and moving objects according to object position relative to the gripper.

Finally, due to voltage control strategy is free of manipulator model, the voltage-based slip control is preferred comparing to computed torque control which is used to control slip phenomenon. But either way, the slip compensation response occurs as well

Keywords

Slip Control, Slip Compensation, Grasping, Object, Robot Gripper



*University of
Shahrood*

Faculty of Mechanical Engineering

Mechatronic branch

Slip compensation of grasped objects in robot gripper

Thesis Submitted in Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
Mechanical Engineering, Mechatronic Branch.

By:

Hanieh Esmaeeli

Supervisor:

Dr. Habib Ahmadi

Advisor:

Dr. Mohammad Mehdi Fateh

September 2014