

لا اله الا الله محمد رسول الله



دانشکده مهندسی مکانیک

گروه جامدات

کنترل پسگام تطبیقی برای گرفتن ایمن یک جسم توسط یک گریپر ربات

حسین حسین پور کلاته

استاد راهنما:

دکتر حبیب احمدی

شهریور ۱۳۹۴

شماره: ۱۸۷-۲۹۴-۵
 تاریخ: ۷-۷-۹۴
 ویرایش:

باسمه تعالی



فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای حسین حسین پورکلاته... رشته مکانیک. گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان کنترل بسگام تطبیقی برای گرفتن ایمن یک جسم توسط یک گریپر ربات که در تاریخ ۹۴/۶/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی) امتیاز (۱۹/۷۵) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰-۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹-۱۸)

۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹) ۴- قابل قبول (۱۴-۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر حبیب احمدی	۱- استاد راهنما
			۲- استاد مشاور
	استادیار	دکتر امیر جلالی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر علی رضا الفی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر مهدی بامداد	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

امضاء



تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

تقدیر و تشکر

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قرب است و به شکر اندرش مزید نعمت.
هر نفسی که فرو می رود ممد حیات است و چون برمی آید مفرح ذاتس در هر نفس دو نعمت موجود
است و بر هر نعمتی شکری واجب.

استاد گرامی جناب آقای دکتر احمدی

با سلام

دلسوزی ، تلاش و کوشش حضرتعالی در تعلیم و تربیت و انتقال معلومات و تجربیات ارزشمند در کنار
برقراری رابطه صمیمی و دوستانه با دانشجویان و ایجاد فضائی دلنشین برای کسب علم و دانش و
درک شرایط دانشجویان حقیقتاً قابل ستایش است. اینجانب بر خود وظیفه می دانم در کسوت
شاگردی از زحمات و خدمات ارزشمند شما استاد گرانقدر تقدیر و تشکر نمایم.

از خداوند متعال برای شما سلامتی و موفقیت مسئلت دارم.

حسین حسین پور کلاته

تعهد نامه

اینجانب حسین حسین پورکلاته دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک دانشکده مکانیک صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان کنترل پسگام تطبیقی برای گرفتن ایمن یک جسم توسط یک گریپر ربات تحت راهنمایی دکتر حبیب احمدی متعهد می‌شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در این تحقیق، گرفتن ایمن جسم توسط یک ربات با استفاده از روش کنترل گام به عقب مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند جابجایی ایمن اجسام و با توجه به مانورهای ربات در طی حرکت امکان لغزش و افتادن جسم وجود دارد؛ لذا به منظور کنترل لغزش و ردیابی مسیرهای مطلوب در نظر گرفته شده از کنترل گام به عقب تطبیقی استفاده شده است. ابتدا معادلات دینامیکی ربات مورد مطالعه شامل بازوی مکانیکی با ۳ مفصل دورانی، ۱ مفصل کشویی و پنجه فک موازی به همراه دینامیک محرک‌های الکتریکی برای گرفتن یک جسم، استخراج شده است. سپس روش گام به عقب که یک تکنیک سیستماتیک بر پایه لیاپانوف است جهت طراحی سیستم کنترل پایدار برای سیستم غیرخطی مورد مطالعه بکار گرفته شده است. از آنجایی که در عمل عدم قطعیت‌های مختلفی در سیستم وجود دارد، نیاز است که کنترل کننده طراحی شده قابلیت مقابله بر این عدم قطعیت‌ها را داشته باشد. بنابراین در این تحقیق، با استفاده از روش گام به عقب تطبیقی، یک کنترل کننده پایدار جهت کنترل لغزش جسم و ردیابی مسیر در حضور نامعینی‌های پارامتری مثل جرم، اینرسی ربات و جرم جسم برای سیستم مورد مطالعه طراحی و پایداری آن بر مبنای تئوری لیاپانوف اثبات شده است. با اعمال کنترل کننده گام به عقب تطبیقی فوق به سیستم مورد مطالعه، تخمین پارامترهای نامعلوم برای استفاده در کنترل کننده انجام شده است. شبیه‌سازی سیستم با اعمال کنترل کننده پیشنهادی بر روی ربات مورد مطالعه انجام شده و نتایج نشان می‌دهد که روش گام به عقب تطبیقی به خوبی پارامترهای سیستم را تخمین زده و در حضور عدم قطعیت پارامتری ردیابی مسیر و کنترل لغزش جسم را به خوبی انجام داده است.

کلمات کلیدی: کنترل گام به عقب تطبیقی، کنترل لغزش، عمل گرفتن، جسم، پنجه ربات.

فهرست مطالب

۱	مقدمه.....
۱-۱	مقدمه.....
۲-۱	مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده.....
۴	۱-۲-۱ روش‌های مختلف جلوگیری و کنترل لغزش.....
۴	۳-۱ کنترل تطبیقی.....
۱۰	۱-۳-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده با محوریت کنترل تطبیقی.....
۱۴	۴-۱ کنترل گام به عقب.....
۱۵	۱-۴-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده با محوریت کنترل گام به عقب.....
۱۷	۵-۱ اهمیت و تفاوت موضوع تحقیق با کارهای قبلی و اهداف آن.....
۱۸	۶-۱ ساختار پایان‌نامه.....
۲۱	۲ مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا.....
۲۲	۱-۲ مقدمه.....
۲۲	۲-۲ معادلات سینماتیکی ربات.....
۲۵	۱-۲-۲ ژاکوبین بازوی ماهر ربات.....
۲۶	۲-۲-۲ سرعت زاویه‌ای.....
۲۷	۳-۲-۲ سرعت خطی.....
۲۹	۳-۲ معادلات دینامیکی ربات.....
۳۰	۱-۳-۲ انرژی پتانسیل.....
۳۰	۲-۳-۲ انرژی جنبشی.....
۳۳	۳-۳-۲ معادلات حرکت.....
۳۴	۴-۲ سینماتیک و دینامیک ربات مورد مطالعه.....
۳۴	۱-۴-۲ طرح ربات.....

- ۳۴.....انتخاب نوع پنجه. ۱-۱-۴-۱
- ۳۶.....سینماتیک ربات. ۲-۴-۲
- ۳۸.....مدل سازی. ۳-۴-۲
- ۴۱.....دینامیک محرک‌ها. ۵-۲
- ۴۳.....کنترل ردیابی مسیر ربات اسکارا بدون لحاظ پنجه. ۳
- ۴۴.....مقدمه. ۱-۳
- ۴۴.....فرم دینامیکی پسخورد. ۲-۳
- ۴۷.....قانون کنترلی به روش گام به عقب برای ردیابی مسیر ربات. ۳-۳
- ۵۰.....قانون گام به عقب تطبیقی برای ردیابی مسیر ربات. ۴-۳
- ۵۱.....تخمین پارامترها. ۱-۴-۳
- ۵۳.....استخراج ماترس وزن. ۲-۴-۳
- ۵۵.....شبیه سازی. ۵-۳
- ۵۶.....مسیر مطلوب حرکت ربات. ۱-۵-۳
- ۵۸.....نتایج شبیه سازی. ۲-۵-۳
- ۶۳.....کنترل به منظور مهار لغزش جسم گرفته شده و ردیابی مسیر ربات. ۴
- ۶۴.....مقدمه. ۱-۴
- ۶۵.....فرم دینامیکی پسخورد صریح. ۲-۴
- ۶۷.....دینامیک جسم. ۳-۴
- ۷۰.....مدل سازی دینامیکی لغزش. ۴-۴
- ۷۰.....لغزش در نقاط تماس. ۱-۴-۴
- ۷۱.....عدم لغزش. ۲-۴-۴
- ۷۲.....آستانه لغزش. ۳-۴-۴
- ۷۳.....کنترل برای مهار لغزش. ۵-۴

۷۳	۴-۵-۱ قانون کنترلی به روش گام به عقب برای ردیابی مسیر ربات.....
۷۷	۴-۵-۲ قانون گام به عقب تطبیقی.....
۷۷	۴-۵-۲-۱ تخمین پارامترها.....
۸۰	۴-۵-۲-۲ استخراج ماترس وزن \hat{Y}
۸۳	۴-۶ تعیین مسیر مطلوب برای حرکت انگشتان.....
۸۵	۴-۷ شبیه سازی.....
۸۵	۴-۷-۱ نتایج شبیه سازی.....
۹۳	۵ نتیجه گیری و پیشنهادها.....
۹۴	۵-۱ نتیجه گیری.....
۹۵	۵-۲ پیشنهادها.....
۹۷	مراجع.....

فهرست شکل ها

۳۵	شکل (۱-۲) طرح ربات در محیط.....
۳۶	شکل (۲-۲) تخصیص دستگاه های مختصات با توجه به روش دناویت- هارتنبرگ.....
۴۵	شکل (۱-۳) طرح بازوی ماهر اسکارا بدون لحاظ پنجه.....
۵۷	شکل (۲-۳) موقعیت مطلوب رباطها.....
۵۸	شکل (۳-۳) سرعت مطلوب رباطها.....
۵۸	شکل (۴-۳) شتاب مطلوب رباطها.....
۵۹	شکل (۵-۳) ردیابی مسیر مفاصل کنترل کننده تطبیقی بخش اول.....
۶۰	شکل (۶-۳) خطای ردیابی موقعیت کنترل کننده تطبیقی بخش اول.....
۶۰	شکل (۷-۳) ولتاژ مفاصل کنترل کننده تطبیقی بخش اول.....
۶۰	شکل (۸-۳) ردیابی مسیر مفاصل کنترل کننده تطبیقی بخش دوم.....
۶۱	شکل (۹-۳) خطای ردیابی موقعیت کنترل کننده تطبیقی بخش دوم.....

- شکل (۳-۱۰) ولتاژ مفاصل کنترل کننده تطبیقی بخش دوم..... ۶۱
- شکل (۴-۱) دیاگرام آزاد جسم در دو صفحه X_4-Z_4 و Y_4-Z_4 ۶۹
- شکل (۴-۲) موقعیت مطلوب انگشت..... ۸۶
- شکل (۴-۳) خطای موقعیت مفاصل ربات، الف) مفصل ۱، ب) مفصل ۲، ج) مفصل ۳، د) مفصل ۴، ه) مفصل ۵..... ۸۸
- شکل (۴-۴) ولتاژ مفاصل ربات، الف) مفصل ۱، ب) مفصل ۲، ج) مفصل ۳، د) مفصل ۴، ه) مفصل ۵..... ۸۹
- شکل (۴-۵) تخمین پارامترهای سیستم: الف) p_1 تا p_4 ، ب) p_5 تا p_8 ، ج) p_9 تا p_{12} ، د) p_{13} تا p_{16} ، ه) p_{17} تا p_{20} ۹۱

فهرست جداول

- جدول (۲-۱) مقداردهی پارامترهای دناویت-هارتنبرگ..... ۳۶
- جدول (۲-۲) مشخصات ربات اسکارای طراحی شده..... ۳۷
- جدول (۲-۳) مقادیر ممان اینرسی رابطهای ربات..... ۳۷
- جدول (۲-۴) پارامترهای الکتریکی..... ۴۱
- جدول (۳-۱) پارامترهای نامعلوم ربات..... ۵۵
- جدول (۳-۲) زمانهای به کار رفته برای مسیرهای مطلوب ربات..... ۵۷
- جدول (۴-۱) پارامترهای نامعلوم ربات..... ۸۳

فهرست علائم:

$q \in R^n$: بردار مختصات تعمیم یافته مفاصل و n نماینگر درجات آزادی سیستم می باشد .

$\dot{q} \in R^n$: بردار مختصات تعمیم یافته سرعت مفاصل

$D(q)$: ماتریس اینرسی مثبت معین و قطری

$C(q, \dot{q})$: ماتریس ناشی از اثر نیروهای کوریولیس و گریز از مرکز

$G(q)$: بردار نیروی ناشی از گرانش

τ : بردار تعمیم یافته گشتاور مفاصل

F : بردار عکس‌العمل نیروهای اعمالی از جسم به پنجه در مختصات $x_0 y_0 z_0$.

L : ماتریس $n \times n$ مثبت معین ثابت و قطری که به عنوان اندوکتانس الکتریکی استفاده می‌شود.

R : ماتریس $n \times n$ مثبت معین ثابت و قطری مقاومت الکتریکی

I : بردار $n \times 1$ جریان مفاصل

K_m : ماتریس $n \times n$ مثبت معین ثابت قطری از ضرایب محرک

V : بردار $n \times 1$ ولتاژ ورودی آرمیچر

K_f : ماتریس $n \times n$ مثبت معین و قطری است که بیانگر ضریب تبدیل الکترومکانیکی بین جریان و گشتاور بازو می‌باشد.

$\xi = [\xi_1, \xi_2]^T$: بردار حالت

f : بردار نیروی اعمالی از طرف پنجه به جسم در مختصات پنجه

N : نیروی عمودی اعمالی از طرف انگشتان

W : وزن جسم

m : جرم جسم

K_f : سختی معادل برای انعطاف‌پذیری سیستم مورد مطالعه

q_{s_0} : موقعیت اولیه انگشت است.

\hat{V} : سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم

فصل اول

مقدمه

ربات دستگاهی الکترومکانیکی برای انجام وظایف گوناگون است. یک ماشین که می تواند برای عمل به دستورهای گوناگون برنامه ریزی گردد و یا یک سری کارهای ویژه انجام دهد. مخصوصاً آن دسته از کارها که فراتر از توانایی های طبیعی و سرشتی بشر باشند. این ماشین های مکانیکی برای بهتر به انجام رساندن کارهایی چون احساس کردن، دریافت نمودن و جابجایی اشیا یا کارهای تکراری مانند جوشکاری فراوری می شوند. یکی از شاخه های مهم در علم رباتیک، مبحث کنترل ربات است. این مبحث، مطالعات پیرامون وادار ساختن ربات به انجام کارهای مطلوب و به صورت خودکار را شامل می شود که در طراحی کنترل کننده ربات در نظر گرفته می شود و معمولاً به صورت معادلات و الگوریتم های کامپیوتری به ربات داده می شود. ربات های صنعتی نیز در نتیجه ادغام همین ماشین های کنترل عددی و فن آوری دور عملگرها و تکامل و پیشرفت آنها به وجود آمدند. امروزه طیف گسترده ای از کارهای خطوط تولید و بخش های مختلف صنعتی توسط بازوی ماهر^۱ ربات ها انجام می شود و شاید بارزترین مثال آن در صنعت خودروسازی باشد. گستردگی کاربرد ربات ها در سال های اخیر موجب گشته تا موضوعات متنوع علمی در این زمینه مورد توجه محققان قرار گیرد. افزایش رقابت بین ربات های صنعتی برای انجام کارهایی که به سادگی با دست انسان انجام می شود نیاز روزافزون به تجهیزات کنترل دستی و به ویژه گرفتن را ایجاد کرده است. پنجه یکی از قسمت های مهم در یک ربات است که اغلب در محیط های صنعتی برای گرفتن اجسام در حین فرآیندهای جابجایی اجسام استفاده می شود و یا به صورت عضوی در توان بخشی به صورت دست های مکانیکی به انسان های ناتوان یاری می رساند. پنجه ها مانند لینک های فعال بین تجهیزات بازوی ربات و قطعه کار هستند و ساختارشان به کاربرد آنها بستگی دارد. اگرچه ربات ها به سادگی جایگزینی برای انسان نمی شوند اما بیشتر کاربرد خود را در کارهای فراتر از توانایی انسان نشان می دهند. استفاده از دست های مصنوعی مکانیکی در زمینه ی توان بخشی برای کمک به ناتوانان جسمی از جمله این توانایی هاست، اگرچه کاربرد این دست ها برای

¹ Robot manipulator

کاربران آن مشکلات زیادی را نیز به همراه داشته است [۱].

تاکنون پیشرفت‌های انجام‌شده در زمینه‌ی ریز الکترونیک و دستگاه‌های مکانیکی، متدهای کنترلی مختلفی را برای دست‌های مصنوعی پیشنهاد کرده است [۲].

در کاربردهای صنعتی ربات مثل صنایع مونتاژ و غیرصنعتی مثل همیاری انسان در امور جاری روزمره، فرآیند جابجایی ایمن اجسام دارای اهمیت می‌باشد. این موضوع با توجه به مانورهای ربات در طی حرکت که امکان لغزش و افتادن جسم را به وجود می‌آورد، حائز اهمیت است. گرفتن و نگهداری اجسام ظریفی چون لیوان آب توسط پنجه ربات، مفهوم گرفتن ایمن را روشن می‌سازد. برای این منظور، وقتی ربات جسم را گرفته و جابجا می‌نماید، بایستی به طریقی مناسب و با اعمال حداقل نیرو برای اجتناب از شکستگی و یا تغییر شکل جسم، از سر خوردن آن جلوگیری کرده و به‌طور پایدار آن را جابجا کند. 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^۲ 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 گرفته شده 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 [۳]. 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 [۴].

² Slip

۲-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده

با توجه به محوریت موضوع کنترل لغزش در این تحقیق، در این بخش تحقیقات انجام‌شده قبلی در خصوص روش‌های مختلف جلوگیری و کنترل لغزش جسم گرفته‌شده توسط پنجه مرور می‌شود.

۱-۲-۱ روش‌های مختلف جلوگیری و کنترل لغزش

در حوزه کنترل پنجه به‌منظور 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 جابه‌جا 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 [۵] 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 [۶] بیشتر بر مبنای استفاده از ویژگی‌های سیستم حسگری در شناسایی نیروها و کنترل لغزش می‌باشد. در تحقیقی دیگر با استفاده از کنترل نیرو، پنجه‌ی ربات صنعتی اسکارا^۳ جسم را نگه می‌دارد و پس از چند بار رهاسازی و گرفتن دوباره، لغزش را کنترل می‌کند. هر سه مرحله

³ Scara (Selective Compliance Assembly Robot Arm)

جهت پیاده‌سازی لغزش و کنترل آن توسط سیستم حسگری پنجه صورت می‌گیرد. مینگرینو و همکارانش [۷] 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.

مقاله [۸] روشی مکانیکی را برای کنترل نیروی گرفتن توسط انگشتان الاستیک مصنوعی معرفی می‌کند. در این روش ابتدا با کمک تحلیل عناصر محدود^۴، 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 قابل استفاده نیست. برای غلبه بر چنین مشکلاتی راهکارهای دیگری همچون استفاده از کنترل‌کننده فازی توسعه‌یافته استفاده می‌شود تا متغیرهای فیزیکی سیستم را اندازه‌گیری کند.

گوان لو ژانر و همکارانش [۹] 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

⁴ Finite element

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 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 [۱۰]. 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 کرده است. 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 مورد توجه بسیاری از محققین گردید. به ویژه 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 [۱۱] 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 بر⁵ RL [۱۲] 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 تعیین نشده همچون لغزش را فراهم می‌کند. سه روش یادگیری برون‌خط 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 استفاده شده 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 تعریف شده 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 [۱۳] 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 استفاده شده 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

⁵ Reinforcement learning

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 [۱۴]. 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 واقعی تر 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 [۱۵] 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 نگاه داشتن 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 میان گذر اعمالی به نیروی مماسی، شناسایی می شود 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 می کند و درعین حال به موضوع کاهش تغییر شکل ناشی شده از عملیات جلوگیری از لغزش جسم نیز می پردازد. نتیجه حاصل از آزمایش های انجام شده نشان دهنده 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 مقاله ای دیگر با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک در آستانه لغزش اجسام، نیروی گرفتن دست ربات کنترل شده است [۱۶] این روش وابسته به مدل جسم (جرم و ضریب اصطکاک) است. با توجه به رابطه ای که بین سختی و جرم برقرار می شود، کنترل کننده مود لغزشی به عنوان کنترل کننده موقعیت استفاده شده است.

در ادامه بررسی روش های بکار رفته برای کنترل لغزش، حبیب احمدی و همکارانش [۱۷] در یک ربات اسکارا به همراه پنجه فک موازی با در نظر گرفتن مدل کامل اصطکاک و تقسیم آن به چهار فاز لغزشی به صورت، فاز عدم لغزش، فاز لغزش، فاز آستانه لغزش و فاز رهایی جسم و با توجه به دینامیک جسم توانستند مسیر مطلوب برای فک موازی طراحی کنند. سپس به منظور کنترل لغزش و تضمین رفتار حلقه بسته مطلوب، از کنترل گشتاور محاسبه شده برای ردیابی مسیر مطلوب ربات و فک استفاده کردند. آن ها همچنین با اصلاح مسیر در نظر گرفته شده برای پنجه فک موازی توانستند لغزش به وجود آمده ناشی از وزن جسم و شتاب هایی که به دلیل مانور ربات به جسم وارد می شود را جبران کنند.

۳-۱ کنترل تطبیقی

در زبان روزمره کلمه « تطبیق » به معنی تغییر رفتار برای وفق یافتن با وضع جدید است. به عبارتی کنترل کننده تطبیقی، کنترل کننده‌ای است که بتواند رفتارش را در پاسخ به تغییر دینامیک فرایند و اغتشاش‌ها تغییر دهد.

در طی سال‌های متمادی، تلاش‌های زیادی برای تعریف کنترل تطبیقی صورت گرفته‌است؛ در نهایت در سال ۱۹۶۱ بحث‌های طولانی به این تعریف منتهی شد؛ « سیستم تطبیقی، هر سیستم فیزیکی است که با دیدی تطبیقی طراحی شده باشد». از دید علمی کنترل کننده تطبیقی، کنترل کننده‌ای با پارامترهای قابل تنظیم همراه با مکانیزمی برای تنظیم پارامترها، چنین کنترل کننده‌ای به دلیل وجود مکانیزم تنظیم، غیرخطی است؛ لیکن دارای ساختار ویژه‌ای است.

از آنجایی که بررسی سیستم‌های غیرخطی در حالت کلی مشکل است، در نظر گرفتن دسته‌های خاصی از سیستم‌های غیرخطی منطقی به نظر می‌رسد. می‌توان چنین در نظر گرفت که یک سیستم کنترل تطبیقی از دو حلقه تشکیل می‌شود: یک حلقه، پس‌خورد معمولی شامل فرایند و کنترل کننده و دیگری حلقه تنظیم پارامتر است. حلقه تنظیم پارامتر غالباً کندتر از حلقه پس‌خورد معمولی است.

دلیل اینکه مهندسان کنترل باید اطلاعاتی در مورد سیستم‌های تطبیقی داشته باشند آن است که این سیستم‌ها توانایی‌های سودمند و خواص جالبی دارند که می‌توان در طراحی سیستم‌های کنترل جدید بسیار مفید واقع شود.

در اوایل دهه ۱۹۵۰ تحقیقات وسیعی در زمینه کنترل تطبیقی و در خصوص طراحی اتوپایلوت‌ها برای هواپیماهای با عملکرد بالا انجام گرفت. چنین هواپیماهایی، قادر به عمل در محدوده وسیعی از سرعت و ارتفاع هستند. پیش از شروع این تحقیقات، پژوهش‌گران دریافته بودند که کنترل پس‌خورد خطی با بهره ثابت می‌تواند فقط در یک نقطه کار، کارایی خوبی داشته باشد. اما تغییراتی که در نقطه

کار به وجود می‌آید مشکلاتی را پدید آورد، در نتیجه لزوم استفاده از کنترل‌کننده پیچیده‌تری احساس می‌شد که بتواند در محدوده وسیعی از وضعیت‌های کاری به‌خوبی کار کند.

تحقیقات انجام شده در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل ۱۹۹۰ بینش‌های جدیدی را در قوام^۶ کنترل‌کننده‌های تطبیقی پدید آورد. بررسی‌های انجام‌شده روی سیستم‌های غیرخطی، درک کنترل تطبیقی را به‌طور چشمگیری افزایش داد.

آزمایش‌های زیادی روی کنترل تطبیقی در آزمایشگاه‌ها و صنایع انجام‌شده، پیشرفت ریزالکترونیک-ها^۷، ابزاری قوی برای شبیه‌سازی فراهم کرده‌است، علاوه بر این پیشرفت جنبه‌های نظری و آزمایشگاهی باعث توسعه شدید این میدان شده‌است که پیامد آن مطرح شدن تجاری کنترل‌کننده‌های تطبیقی از اواسط ۱۹۸۰ بوده‌است. این توسعه در حال حاضر شدت یافته‌است. یکی از نتایج این امر آن است که در کنترل‌کننده‌های تک حلقه‌ای، که امروز در بازار به وفور در دسترس است، روش-های تطبیقی به کار رفته‌است.

دلیل اول مطرح شدن کنترل تطبیقی، رسیدن به کنترل‌کننده‌های بود که بتواند با تغییر دینامیک فرایند و مشخصه‌های اغتشاش تطبیق یابد. این حقیقت ثابت شده که روش تطبیقی برای تنظیم خودکار کنترل‌کننده‌ها قابل استفاده است [۱۸].

۱-۳-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده به محوریت کنترل تطبیقی

با توجه به استفاده از کنترل تطبیقی به منظور تخمین پارامترهای نامعلوم در این تحقیق، در این بخش تحقیقات انجام‌شده قبلی در خصوص کنترل تطبیقی در حوزه ردیابی مسیر توسط ربات و گرفتن جسم توسط پنجه ربات مورد بررسی قرار گرفته‌است.

در تحقیقی [۱۹] کنترل‌کننده تطبیقی برای ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر طراحی شده و پایداری آن به

^۶ Robustness

^۷ Micro Electronic

اثبات رسیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که خطای موقعیت و سرعت به سمت صفر میل کرده است.

گروهی از محققین [۲۰] کنترل کننده تطبیقی به منظور ردیابی مسیر ربات اسکارای ۲ درجه آزادی طراحی کردند. قانون کنترل شامل تنظیم کننده PD به همراه قانون تطبیقی به منظور تخمین پارامترهای نامعلوم سیستم دینامیکی می‌باشد، نتایج شبیه‌سازی شامل خطای ردیابی مسیر ربات و تخمین پارامترها ارائه شده است.

در تحقیقی دیگر [۲۱] کنترل کننده تطبیقی به منظور ردیابی مسیر ربات اسکارای ۴ درجه آزادی طراحی شد و پایداری آن به اثبات رسید. قانون کنترل شامل تنظیم کننده PD به همراه قانون تطبیقی به منظور تخمین پارامترهای نامعلوم سیستم دینامیکی بوده و نتایج شبیه‌سازی شامل خطای ردیابی مسیر ربات و تخمین پارامترها، ارائه شده است.

در مقاله [۲۲] از کنترل کننده فازی عصبی تطبیقی برای کنترل بازوی ربات استفاده شده است. کنترل بازخورد خطی همراه با کنترل کننده فازی PD و کنترل کننده شبکه عصبی تطبیقی برای کنترل موقعیت ربات به کار برده شده است به نحوی که کنترلر بازخورد خطی ردیابی مسیر را انجام داده و کنترلر فازی بطور موازی به منظور کنترل اصطکاک و اغتشاش اضافه شده است، نتایج شبیه‌سازی برای ربات ۲ درجه آزادی در حضور عدم قطعیت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحقیقی دیگر [۲۳] از کنترل کننده PID تطبیقی برای ردیابی مسیر ربات در حضور عدم قطعیت‌های غیر خطی و اغتشاش استفاده شده است. از کنترل کننده کلاسیک PID به منظور ردیابی مسیر و از کنترل کننده تطبیقی برای مقابله با عدم قطعیت‌های غیر خطی سیستم بطور موازی استفاده شده است، نتایج شبیه‌سازی برای ربات ۲ درجه آزادی انجام شده و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از کنترل کننده PID مقایسه شده است.

در سال ۲۰۱۴ سنگ چولی و هوی سانگ [۲۴] استفاده از کنترل کننده تطبیقی و روش تخمین پارامترهای ربات را مورد بررسی قرار دادند، کنترل ردیابی مسیر ربات در حضور اغتشاش خارجی ناشناخته انجام شد و نتایج شبیه‌سازی شامل خطای ردیابی و تخمین پارامترهای سیستم ارائه شده است.

در ادامه به بررسی کاربردهای روش کنترلی تطبیقی در حوزه گرفتن ایمن جسم توسط پنجه ربات می‌پردازیم.

در مقاله [۲۵] کنترل کننده شبکه‌عصبی تطبیقی برای گرفتن جسم توسط پنجه سه‌انگشتی طراحی شده و پایداری آن توسط تئوری لیپانوف به اثبات رسیده است. در ادامه با توجه به اینکه شناخت کامل از سایز بافت و سختی جسم موجود نبوده نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفته است.

ریکاردو و اریک [۲۶] از کنترل نیرو و کنترل تطبیقی برای گرفتن جسم توسط دست مصنوعی استفاده کردند، به نحوی که کنترل کننده تطبیقی وظیفه تنظیم کردن و تطبیق دادن حلقه بسته نیرو براساس سختی جسم گرفته شده را برعهده دارد. و در نتایج شبیه‌سازی بهبود معنی‌دار پاسخ سیستم در هنگام استفاده از کنترل تطبیقی و همچنین کاهش نوسانات سیستم بدست آمده است.

در تحقیقی دیگر [۲۷] از کنترل کننده موقعیت مودلغزشی PID و کنترل کننده مودلغزشی تطبیقی برای گرفتن جسم توسط دست مصنوعی استفاده کردند، به نحوی که کنترل کننده تطبیقی وظیفه تنظیم کردن و تطبیق دادن حلقه بسته PID براساس سختی جسم گرفته شده را برعهده دارد. سپس در شبیه‌سازی بهبود معنی‌دار پاسخ سیستم در هنگام استفاده از کنترل تطبیقی در خطای ردیابی و خطای حالت ماندگار مشاهده می‌شود.

۱-۴ کنترل گام به عقب

در طول دهه گذشته تمرکز بر روی سیستم‌های غیرخطی قرار گرفته‌است و سیستم‌های خطی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند، یعنی ارائه الگوریتم کنترل برای سیستم‌هایی که هم کلی‌تر و هم واقعی‌تر هستند.

گروهی از محققین طراحی کنترل‌کننده را در مطالعات خود بر مبنای تئوری لیاپانوف و قضایای مربوطه به انجام رسانده‌اند. تئوری تابع لیاپانوف به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای کنترل غیرخطی و همچنین خطی شناخته می‌شود؛ در عین حال استفاده از آن در طراحی کنترل‌کننده غیرخطی با یک چالش روبرو است و آن پیدا کردن تابع لیاپانوف مناسب است، پیدا کردن چنین تابعی اغلب به تجربه و دید فیزیکی طراح بر می‌گردد که با توجه به پیچیدگی‌های زیاد در دینامیک سیستم‌های غیرخطی اهمیت و دشواری این کار مشخص می‌شود. یکی از روش‌های طراحی کنترل‌کننده بر مبنای تئوری لیاپانوف، روش گام به عقب است که بر پایه تئوری فوق، ابزاری قدرتمند برای طراحی به وجود می‌آورد. انعطاف روش گام به عقب به آن اجازه می‌دهد که تعداد زیادی از مسائل طراحی را تحت شرایطی گسترده‌تر از آن چیزی که روش‌های دیگر با آن روبرو می‌باشند، حل نماید. این روش به طور موفقیت‌آمیزی برای طیف گسترده‌ای از مسائل غیرخطی بکار برده شده است [۲۸]. روش گام به عقب یک روش طراحی کنترل سیستماتیک است که برای سیستم‌های غیرخطی به‌کار می‌رود، ایده این روش، گسترش تابع لیاپانوف از یک سیستم ساده به سیستم‌هایی شامل متغیرهای حالت اضافه و به طور همزمان طراحی کنترل پس‌خورده برای تضمین پایداری است. دلیل نام‌گذاری گام به عقب برای این روش به خاصیت بازگشتی آن در طراحی کنترل باز می‌گردد، جایی که یک قانون کنترل برای تضمین پایداری سیستم ساخته می‌شود. روش گام به عقب یک الگوریتم پله‌ای را دنبال نموده و برای دسته‌ای از سیستم‌ها به نام سیستم‌های پس‌خورده صریح کاربرد دارد که اولین بار توسط کرسستیک و همکارانش در سال ۱۹۹۵ ارائه شد. در واقع زمانی که فرآیندهای کنترل شده جزء دسته‌ای از

سیستم‌های قابل تبدیل به فرم پسخورد صریح باشند، کنترل کننده طراحی شده بر مبنای این روش، مشخصات تعقیب و تنظیم محلی یا کلی را تضمین می‌کند، یکی از مهم‌ترین مزایای روش گام به عقب این است که قابلیت جلوگیری از حذف المان‌های غیرخطی کاربردی را دارد.

۱-۴-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده به محوریت کنترل گام به عقب

با توجه به محوریت موضوع استفاده از روش کنترلی گام به عقب در این تحقیق، در این بخش تحقیقات انجام شده قبلی در خصوص کاربردهای کنترل گام به عقب در رباتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از روش کنترلی گام به عقب در سیستم‌های غیرخطی مختلفی از جمله، فضاپیماها و انواع موتورها مانند موتورهای القایی و... استفاده شده است. علاوه بر این، روش کنترل گام به عقب در رباتیک نیز مورد توجه قرار گرفته است؛ که از آن جمله می‌توان به کنترل موقعیت و کنترل مسیر برای ربات‌های متحرک، کنترل ربات‌های انعطاف پذیر و ربات‌های موازی اشاره نمود. همچنین، این روش کنترلی در حوزه‌ی کنترل ردیابی مسیر برای بازوی ماهر ربات نیز استفاده شده است.

گروهی از محققین [۲۹] روش پسخورد صریح به همراه کنترل کننده تطبیقی را برای کنترل موقعیت سیستم غیرخطی ربات با سه درجه آزادی مورد استفاده قرار دادند. در روش بکار رفته ردیابی موقعیت به خوبی انجام شد و خطای ردیابی قابل چشم‌پوشی بدست آمد.

در تحقیقی دیگر [۳۰] روش گام به عقب تطبیقی برای ردیابی مسیر بازوی ماهر ربات در فضای کار و در حضور عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش خارجی طراحی گردید. روش کنترلی توسعه یافته پایداری سراسری مجانبی ردیابی موقعیت مطلوب را تضمین نموده است. همچنین، نتایج بدست آمده مقاوم بودن این روش کنترلی به منظور ردیابی مسیر در حضور عدم قطعیت مدل و اغتشاش خارجی متغیر با زمان را به اثبات رساند.

در سال ۲۰۱۳ یانکیوا وی و همکارانش [۳۱] برای دستیابی به ردیابی دقیق مسیر ربات اسکارای ۲ درجه آزادی و به منظور مقابله با ناشناخته بودن مدل و پارامترهای اغتشاشی، روش فازی تطبیقی گام به عقب را ارائه دادند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مقاوم بودن، قابلیت حذف اغتشاشات، و ردیابی خوب مسیر از مزایای روش استفاده شده در این تحقیق بدست آمد و خطای ردیابی به‌طور مجانبی به سمت صفر میل کرد.

در ادامه بررسی کاربرد کنترل گام به عقب در ردیابی مسیر ربات، لطف آذر و همکارانش [۳۲] در حالتی که پارامترهای اینرسی ربات معلوم فرض شده‌اند، اعمال روش کنترل گام به عقب انتگرالی در حضور اغتشاش بر ربات ۵ درجه آزادی مورد مطالعه قرار داد و کنترل‌کننده مناسب را ارائه کرد. نتایج مدل‌سازی شامل ارزیابی عمل‌کرد و کارایی روش گام به عقب در پیروی مسیر و پایداری مجانبی سراسری سیستم کنترلی مداربسته بوده و نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای کنترل حرکت ربات با توجه به پیچیده‌تر شدن دینامیک سیستم که شامل قسمت‌های مکانیکی و الکتریکی است، در حضور اغتشاش بسیار مناسب می‌باشد.

رونک جانگ وای [۳۳] روش کنترلی شبکه‌ی فازی-عصبی مبتنی بر گام به عقب به منظور کنترل موقعیت ربات را طراحی کرد. در این روش، چارچوب شبکه فازی-عصبی به تقلید از قانون کنترل گام به عقب طراحی شده است و در شبیه‌سازی ارائه شده برای ربات دولینکی عملکرد آن مورد ارزیابی قرار داده است.

گروهی دیگر [۳۴] عملکرد کنترل‌کننده گام به عقب فازی تطبیقی برای ربات دو لینکی به منظور ردیابی مسیر در حضور عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش ارزیابی کرده و پایداری مجانبی آن به اثبات رسانده است.

در حوزه کنترل ربات به منظور گرفتن اجسام [۳۵] طراحی یک روش کنترل مقاوم برای ربات یک درجه آزادی با در نظر گرفتن دینامیک محرک‌ها و عدم قطعیت جسم و اپراتور به منظور گرفتن

اجسام براساس روش گام به عقب طراحی شده و عملکرد آن، در حضور نامعینی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۵ اهمیت و تفاوت موضوع تحقیق با کارهای قبلی و اهداف آن

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در حوزه گرفتن و مهار لغزش اجسام توسط ربات کمتر دینامیک محرک‌ها مورد توجه بوده است. همچنین روش کنترل گام به عقب برای سیستم رباتیک جهت گرفتن ایمن و انجام مانورهای متنوع تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. لذا موضوع مورد بررسی در این تحقیق سه تفاوت اصلی و کاربرد جدید نسبت به دیگر تحقیقات در حوزه گرفتن ایمن اجسام توسط یک ربات اسکارای مجهز شده به گریپر فک موازی دارد که در ادامه می‌آید. اولین مورد مربوط به لحاظ دینامیک محرک‌ها به دینامیک ربات اسکارا با ۳ مفصل دورانی و ۱ مفصل کشویی به همراه پنجه فک موازی می‌باشد که در ادامه با تبدیل آن‌ها به فرم پس‌خورد صریح قابلیت طراحی کنترل گام به عقب محقق می‌شود. دومین مورد استفاده از روش کنترل گام به عقب برای سیستم رباتیک جهت گرفتن ایمن و انجام مانورهای متنوع و طراحی کنترل کننده برای مهار لغزش جسم و جابه‌جایی آن توسط ربات به صورت همزمان با استفاده از رابطه بازگشتی گام به عقب و بر مبنای تئوری لیاپانوف بوده و پایداری آن به اثبات رسیده است و سومین مورد اضافه کردن کنترل کننده تطبیقی جهت تخمین پارامترهای نامعلوم ربات و جرم جسم، و اثبات پایداری آن توسط تئوری لیاپانوف می‌باشد که علاوه بر تخمین پارامترهای ربات مورد مطالعه، تخمین جرم جسم گرفته شده توسط ربات نیز به انجام می‌رسد.

لذا مسئله فوق در گام‌های زیر انجام می‌شود:

۱- بدست آوردن دینامیک ربات مورد مطالعه با لحاظ دینامیک محرک‌ها و تبدیل آن به فرم

پس‌خورد صریح به منظور استفاده در طراحی کنترل کننده گام به عقب.

۲- طراحی کنترل کننده گام به عقب برای ربات اسکارای توسعه یافته بر اساس تئوری لیپانوف به منظور ردیابی مسیرهای در نظر گرفته شده برای ربات و پنجه.

۳- اضافه کردن کنترل کننده تطبیقی به منظور تخمین پارامترهای جرم و اینرسی ربات و همچنین جرم گرفته شده توسط پنجه.

۱-۶ ساختار پایان نامه

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

فصل دوم به مدل سازی 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، مدل سازی می شوند.

در فصل سوم ابتدا معادلات دینامیکی ربات اسکارا شامل بازوی مکانیکی با ۳ مفصل دورانی، ۱ مفصل کشویی به همراه دینامیک محرک های الکتریکی استخراج شده و با تبدیل به فرم دینامیکی پس خورد صریح کنترلر گام به عقب انتگرالی به منظور ردیابی مسیر طراحی و پایداری آن بر مبنای تئوری لیپانوف اثبات می گردد. با توجه به اینکه در عمل پارامترهای جرم و اینرسی ربات به صورت دقیق مشخص نمی باشند، با اضافه کردن کنترل کننده تطبیقی، کنترل کننده گام به عقب تطبیقی برای سیستم مورد مطالعه طراحی شده و به این وسیله تخمین پارامترهای نامعلوم برای استفاده در کنترلر انجام شده است، در نتیجه مانور ربات در این فصل شبیه سازی می گردد.

در فصل چهارم معرفی مختصری از کنترلر گام به عقب ارائه می شود. سپس با اضافه کردن پنجه فک- موازی به ربات اسکارا دینامیک آن به همراه دینامیک محرک ها استخراج شده و به فرم پس خورد صریح تبدیل می گردد. پس از طراحی کنترل کننده گام به عقب به منظور کنترل لغزش جسم گرفته شده در حین مانورهای ربات و اثبات پایداری آن توسط تئوری لیپانوف، با اضافه کردن کنترل کننده تطبیقی

علاوه بر تخمین پارامترهای ناشناخته ربات، تخمین جرم جسم گرفته شده نیز انجام می گردد. بنابراین در این بخش، با استفاده از روش گام به عقب تطبیقی، یک کنترل کننده پایدار جهت کنترل لغزش جسم و ردیابی مسیر در حضور نامعینی های پارامتری مثل جرم، اینرسی ربات و جرم جسم برای سیستم مورد مطالعه طراحی و پایداری آن بر مبنای تئوری لیاپانوف اثبات می گردد. در انتها در فصل پنجم نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات ارائه می شود.

فصل دوم

مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا

۲-۱ 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 مدل‌سازی، 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 شده است. 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 نام‌گذاری اعضای ربات است. رابط پایه را رابط صفر و سپس رابط بعدی را رابط یک و به همین ترتیب همه رابطها نام‌گذاری می‌-

شوند. 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 در راستای محور مفصلی Z می‌چرخد یا مفصل کشویی در راستای آن حرکت می‌کند. محورهای 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}

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 مشخص کننده 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.

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

ماتریس همگنی که مختصات نقطه‌ای را در دستگاه Z به دستگاه i تبدیل می‌کند، به دست آورده می‌-

شود. 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:

$$T_0^n = A_1A_2\dots A_nA_{n-1} \begin{bmatrix} R_0^n & d_0^n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

که در رابطه فوق ماتریس R_0^n جهت مجری نهایی را در دستگاه آغازین نمایش می‌دهد. در معادله (2-2) مقدار A_i به صورت زیر به دست می‌آید:

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{z,\alpha_i} \quad (4-2)$$

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

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

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i}C_{\alpha_i} & S_{\theta_i}S_{\alpha_i} & a_iC_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i}C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i}S_{\alpha_i} & a_iS_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

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

$$S_i = \sin \theta_i, S_{i,j} = \sin(\theta_i + \theta_j), \\ C_i = \cos \theta_i, C_{i,j} = \cos(\theta_i + \theta_j)$$

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.

$$Y = F(x) \quad (۷-۲)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (۸-۲)$$

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

$$\dot{Y} = J(x)\dot{x} \quad (۹-۲)$$

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:

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (۱۰-۲)$$

که \dot{x} بردار سرعت خطی و زاویه‌ای مجری نهایی است و q همان بردار متغیرهای مفصلی است. از آنجاکه 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 W_0^n بیانگر سرعت زاویه‌ای مجری نهایی باشد و همچنین V_0^n بیانگر بردار سرعت خطی مجری نهایی باشد، آنگاه:

$$W_0^n = J_w \dot{q} \quad (11-2)$$

$$V_0^n = J_v \dot{q} \quad (12-2)$$

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

$$\begin{bmatrix} W_0^n \\ V_0^n \end{bmatrix} = J_0^n \dot{q} \quad (13-2)$$

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 $6 \times n$ 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:

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

که در رابطه (۲-۱۵) 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:

$$W_{i-1}^i = 0 \quad (۱۶-۲)$$

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 (۱۷-۲) ساخته می‌شود.

$$W_0^n = W_0^1 + R_0^1 W_1^2 + R_0^2 W_2^3 + \dots + R_0^{n-1} W_{n-1}^n \quad (۱۷-۲)$$

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

$$W = \rho_1 \dot{q}_1 k + \rho_2 \dot{q}_2 R_0^1 k + \dots + \rho_n \dot{q}_n R_0^{n-1} k = \sum_{i=1}^n \rho_i \dot{q}_i z_{i-1} \quad (۱۸-۲)$$

که در آن:

$$z_{i-1} = R_0^{i-1} k \quad (۱۹-۲)$$

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

بنابراین، با توجه به معادله (۱۱-۲):

$$J_w = [\rho_1 z_0 \quad \rho_2 z_1 \quad \dots \quad \rho_n z_{n-1}] \quad (۲۰-۲)$$

در رابطه فوق $z_0 = k = [0 \quad 0 \quad 1]^T$ است.

۳-۲-۲ سرعت خطی

رابطه سرعت خطی مجری نهایی عبارت است از:

$$V_0^n = \dot{d}_0^n \quad (۲۱-۲)$$

$$\dot{d}_0^n = \frac{\partial d_0^n}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_n} \dot{q}_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial d_0^n}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (۲۲-۲)$$

این رابطه همان سرعت خطی مجری نهایی است که در آن همه مفاصل به جز مفصل i ام ثابت نگه-

داشته 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:

$$d_0^n = d_0^1 + R_0^1 d_1^2 + R_0^2 d_2^3 + \dots + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + \dots + R_0^{n-1} d_{n-1}^n \quad (23-2)$$

بنابراین:

$$d_0^n = d_0^{i-1} + R_0^{i-1} d_{i-1}^n \quad (24-2)$$

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

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^n \quad (25-2)$$

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

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} (\dot{q}_i k \times d_{i-1}^n) \quad (26-2)$$

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

$$\dot{d}_0^n = \dot{q}_i z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \quad (27-2)$$

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

$$J_{v_i} = z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \quad (28-2)$$

حال اگر مفصل i ام کشویی باشد.

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

$$d_0^n = d_0^{i-1} + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + R_0^i d_i^n \quad (30-2)$$

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:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^i \quad (31-2)$$

با جایگذاری معادلات (2-29) د (2-31) می‌توان نوشت.

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_i k \quad (32-2)$$

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

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

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:

$$J_{v_i} = z_{i-1} \quad (۳۴-۲)$$

در نهایت ماتریس J_v به صورت زیر تعریف می شود:

$$J_v = [J_{v_1} \quad J_{v_2} \quad \dots \quad J_{v_n}] \quad (۳۵-۲)$$

در رابطه (۳۵-۲) 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.

$$J = [J_1 \quad J_2 \quad \dots \quad J_n] \quad (۳۶-۲)$$

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.

$$J = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (۳۷-۲)$$

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

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 رباتها و مفاصل نیاز است. برای انجام این کار پس از محاسبه مقادیر انرژی-

ها، تابع لاگرانژین سیستم که عبارت است از اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل، تشکیل 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.

۲-۳-۱ 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:

$$V_i = g^T d_0^{c_i} m_i \quad (39-2)$$

که در رابطه (۳۹-۲) متغیرهای m_i جرم رابط i ام، g^T بردار شتاب جاذبه در دستگاه، $X_0 Y_0 Z_0$ و $d_0^{c_i}$ 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:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n m_i g^T d_0^{c_i} \quad (40-2)$$

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

$$d_0^{c_i} = d_0^i + R_0^i d_i^{c_i} \quad (41-2)$$

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 عبارت است از مجموع انرژی جنبشی رابط-های ربات که برای رابط i ام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

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

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

$$I_0^i = R_0^i I_i R_0^{iT} \quad (43-2)$$

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

$$k = \frac{1}{2} m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \frac{1}{2} w_0^{iT} R_0^i I_i R_0^{iT} w_0^i \quad (44-2)$$

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

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

که در رابطه فوق x, y, z مختصات نقطه ای در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم رابط i ام می باشد. معادله بالا را می توان به فرم کلی زیر نیز نوشت:

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

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

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_0^{iT} R_0^i I_i R_0^{iT} w_0^i \quad (47-2)$$

همانگونه که در روابط (12-2) و (13-2) نشان داده شد، سرعت های خطی و زاویه ای هر نقطه از رابط به صورت جمله ای از ماتریس ژاکوبین و مشتق متغیرهای مفاصل ربات قابل بیان است. از این رو با تغییر متغیرهای مفاصل ربات در مختصات تعمیم یافته می توان گفت:

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

$$W_0^i = J_{w_i} \dot{q} \quad (49-2)$$

برای محاسبه $J_{v_{c_i}}$ باید از $d_0^{c_i}$ بجای d_0^n در معادله (29-2) استفاده نمود؛ بنابراین طبق توضیحات قبلی مجدداً به رابطه (41-2) برای محاسبه $d_0^{c_i}$ نیاز است.

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

$$k = \frac{1}{2} \dot{q} \sum_{i=1}^n \left[m_i J_{v_{c_i}}^T J_{v_{c_i}} + J_{w_i}^T R_0^i I_i R_0^{iT} J_{w_i} \right] \dot{q} \quad (50-2)$$

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

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

که در آن ماتریس $D(q)$ عبارت است از:

$$D(q) = \sum_{i=1}^n \left[m_i J_{v_{ci}}^T J_{v_{ci}} + J_{w_i}^T R_0^i J_{w_i}^{iT} \right] \quad (52-2)$$

لذا انرژی پتانسیل ربات به کمک رابطه (2-40) و انرژی جنبشی ربات به کمک رابطه (2-51) محاسبه می‌شود.

۳-۳-۲ 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:

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

که در این رابطه τ بردار گشتاور برای مفاصل لولایی و نیرو برای مفاصل کشویی است و تابع L مطابق با رابطه (2-55) از تفاضل انرژی جنبشی و پتانسیل به دست می‌آید و لاگرانژین سیستم نامیده می‌شود.

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

با جایگذاری معادلات (2-40) و (2-51) در معادله (2-54) و ساده‌سازی روابط، معادله نهایی زیر به دست می‌آید:

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

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

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

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

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

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

۲-۴ سینماتیک و دینامیک ربات مورد مطالعه

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^A 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 تعمیم یافته مفصل i ام با q_i نشان داده می‌شود، این متغیر تعمیم یافته برای مفصل‌های لولایی برحسب رادیان و برای مفصل کشویی برحسب متر بیان می‌شود.

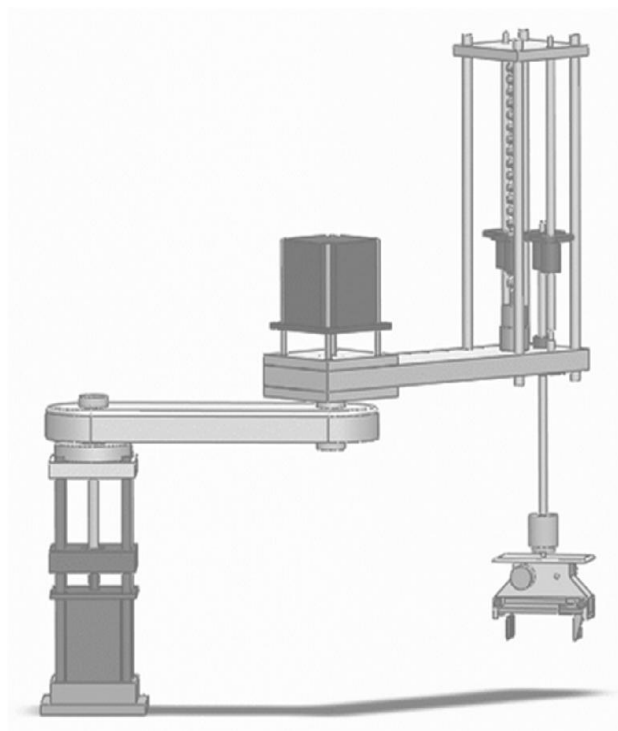
۲-۴-۱-۱ انتخاب نوع پنجه

به دلیل اینکه اندازه و شکل اجسام گرفته شده قابل تغییر است، باید پنجه بتواند اجسام مختلف را در یک بازه معین گرفته و جابه‌جا کند. پنجه باید کم حجم باشد تا به هنگام عمل کرد 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

⁸ Revolute-Revolute-Prismatic-Revolute

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 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.

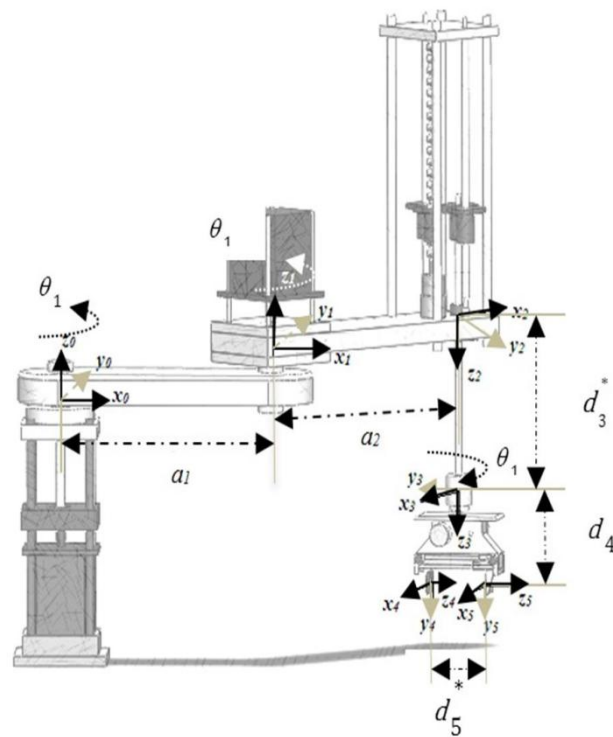
شکل (۱-۲) طرح نهایی این ربات را نشان می‌دهد. در این ربات از موتور DC مغناطیس دائم به‌عنوان محرک هر رابط استفاده شده است و وزن هر موتور در جدول مشخصات ربات، برای رابطی که موتور بر رویش نصب شده لحاظ شده است. رابط‌ها نیز به‌طور همگن و متقارن در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱-۲) طرح ربات

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 بیان شد، به صورت جدول (۱-۲) به دست می‌آید. مقادیر صحیح پارامترهای ربات در جدول (۲-۲) و ممان اینرسی رابطه‌ها در جدول (۳-۲) آمده است.

جدول (۱-۲) مقادیر پارامترهای دناویت- هارتنبرگ

رابط شماره i	α_i	a_i	d_i	θ_i
۱	0	a_1	0	θ_1^*

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 اسکرای طراحی شده

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

جدول (۳-۲) مقادیر ممان اینرسی رابطهای ربات

I_{xxi} (kgm^2)	I_{yyi} (kgm^2)	I_{zzi} (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

۲-۴-۳ مدل سازی دینامیکی

با توجه نتایج به دست آمده در بخش سینماتیک ربات، محاسبات مرتبط با دینامیک ربات انجام می-شود. بدین منظور ابتدا ماتریس های تبدیل ربات تشکیل می شود. سپس به کمک آن ها ماتریس های دوران، انتقال، ژاکوبین سرعت خطی و زاویه ای و ماتریس اینرسی محاسبه می شوند. در مرحله بعد انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی را محاسبه نموده و مدل دینامیکی ربات با توجه به توضیحات بخش ۲-۳ به دست می آید. مدل دینامیکی ربات اسکارای موردنظر به دلیل برقراری تماس با جسم، با لحاظ اثربخشی محیط به صورت زیر به دست می آید:

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

که در این رابطه D و C ماتریس های ۵×۵ و G و q بردارهای ۱×۵ می باشند. F بردار نیروی اعمالی به جسم و J ماتریس ژاکوبین ربات است. لذا مقادیر نظیر درایه های ماتریس های D, C, G و q به شرح زیر می باشد. درایه های ماتریس D که یک ماتریس ۵×۵ است به صورت زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned} D_{11} &= I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + \frac{a_1^2 m_1}{4} + \frac{a_2^2 m_2}{4} + a_1^2 (m_2 + m_3 + m_4 + m_5) + a_2^2 (m_3 + m_4 + m_5) + m_5 d_5^2 + \\ & m_5 q_5^2 - m_5 d_5 q_5 + 2a_1 a_2 (m_3 + m_4 + m_5) c_2 + a_1 a_2 m_2 c_2 + a_2 d_5 m_5 s_4 + 2a_2 m_5 q_5 s_4 - a_1 d_5 m_5 s_{2-4} + 2a_1 m_5 q_5 s_{2-4} \\ D_{12} &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + a_2^2 m_2 + a_2^2 (m_3 + m_4 + m_5) + m_5 d_5^2 + m_5 q_5^2 - m_5 d_5 q_5 + a_1 a_2 m_2 c_2 / 2 + \\ & a_1 a_2 (m_3 + m_4 + m_5) c_2 + a_2 d_5 m_5 s_4 - 2a_2 m_5 q_5 s_4 - a_1 d_5 m_5 s_{2-4} / 2 + a_1 m_5 q_5 s_{2-4} \\ D_{13} &= 0 \\ D_{14} &= m_5 d_5 q_5 - m_5 d_5^2 - m_5 q_5^2 - a_2 d_5 m_5 s_4 / 2 + a_2 m_5 q_5 s_4 - a_1 m_5 q_5 s_{2-4} + a_1 d_5 m_5 s_{2-4} / 2 - I_4 + I_5 \\ D_{15} &= -a_2 m_5 c_4 - a_1 m_5 c_{2-4} \\ D_{21} &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + a_2^2 m_2 + a_2^2 (m_3 + m_4 + m_5) + p_9 + m_5 q_5^2 - m_5 d_5 q_5 + a_1 a_2 (m_3 + m_4 + m_5) c_2 + \\ & a_1 a_2 m_2 c_2 / 2 + a_2 d_5 m_5 s_4 - 2a_2 m_5 q_5 s_4 - a_1 d_5 m_5 s_{2-4} + a_1 m_5 q_5 s_{2-4} \\ D_{22} &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + a_2^2 m_2 + a_2^2 (m_3 + m_4 + m_5) + m_5 d_5^2 + m_5 q_5^2 - m_5 d_5 q_5 + a_2 d_5 m_5 s_4 - 2a_2 m_5 q_5 s_4 \\ D_{23} &= 0 \\ D_{24} &= -m_5 d_5^2 - m_5 q_5^2 + m_5 d_5 q_5 - a_2 d_5 m_5 s_4 / 2 + a_2 m_5 q_5 s_4 - I_4 + I_5 \\ D_{25} &= -a_2 m_5 c_4 \\ D_{31} &= D_{32} = 0 \\ D_{33} &= m_3 + m_4 + m_5 \\ D_{34} &= D_{35} = 0 \\ D_{41} &= -m_5 q_5^2 + m_5 d_5^2 + m_5 d_5 q_5 - a_2 d_5 m_5 s_4 / 2 + a_2 m_5 q_5 s_4 + a_1 d_5 m_5 s_{2-4} - a_1 m_5 q_5 s_{2-4} - I_4 + I_5 \\ D_{42} &= -p_9 - p_7 q_5^2 + p_8 q_5 - p_{14} s_4 / 2 + p_{12} q_5 s_4 - p_{16} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{43} &= m_5 d_5^2 + m_5 q_5^2 - m_5 d_5 q_5 + I_4 + I_5 \\
D_{44} &= D_{45} = 0 \\
D_{51} &= -a_2 m_5 c_4 - a_1 m_5 c_{2-4} \\
D_{52} &= -a_2 m_5 c_4 \\
D_{53} &= D_{54} = 0 \\
D_{55} &= m_5
\end{aligned}$$

هچنين درايه‌های ماتريس G که یک ماتريس 1×5 است به صورت به دست می آید:

$$G_{11} = G_{21} = 0 \qquad G_{31} = -g \times p_{17} \qquad G_{41} = G_{51} = 0$$

به همین ترتیب، درايه‌های ماتريس C که یک ماتريس 5×5 است به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned}
C_{11} &= 0.25m_5q_5q_{d5} + 0.5a_1m_5q_{d5}s_{2-4} - 0.5a_2m_5q_{d5}s_4 + 0.5a_1m_5q_5q_{d2}c_{2-4} - 0.5a_1m_5q_5q_{d4}c_{2-4} - \\
&0.5a_1a_2m_2q_{d2}s_2 - a_1a_2(m_3 + m_4 + m_5)q_{d1}s_2 - 0.5a_2m_5q_5q_{d4}c_4 \\
C_{12} &= 0.25m_5q_5q_{d5} + 0.75a_1m_5q_{d5}s_{2-4} - 0.5a_2m_5q_{d5}s_4 + 0.5a_1m_5q_5q_{d1}c_{2-4} + 0.5a_1m_5q_5q_{d2}c_{2-4} - \\
&0.5a_1m_5q_5q_{d4}c_{2-4} - 0.5a_1a_2m_2q_{d1}s_2 - 0.5a_1a_2m_2q_{d2}s_2 - a_1a_2(m_3 + m_4 + m_5)q_{d1}s_2 - \\
&a_1a_2(m_3 + m_4 + m_5)q_{d2}s_2 - 0.5a_2m_5q_5q_{d4}c_4 \\
C_{13} &= 0 \\
C_{14} &= -0.25(m_5q_5q_{d5} + 3a_1m_5q_{d5}s_{2-4} - 3a_2m_5q_{d5}s_4 + 2a_1m_5q_5q_{d1}c_{2-4} + 2a_1m_5q_5q_{d2}c_{2-4} - \\
&2a_1m_5q_5q_{d4}c_{2-4} + 2a_2m_5q_5q_{d1}c_4 + 2a_2m_5q_5q_{d2}c_4 - 2a_2m_5q_5q_{d4}c_4) \\
C_{15} &= 0.25(m_5q_5q_{d1} + m_5q_5q_{d2} - m_5q_5q_{d4} + 2a_1m_5q_{d1}s_{2-4} + 3a_1m_5q_{d2}s_{2-4} - 3a_1m_5q_{d4}s_{2-4} - \\
&2a_2m_5q_{d1}s_4 - 2a_2m_5q_{d2}s_4 + 3a_2m_5q_{d4}s_4) \\
C_{21} &= 0.25m_5q_5q_{d5} - 0.25a_1m_5q_{d5}s_{2-4} - 0.5a_2m_5q_{d5}s_4 - 0.5a_1m_5q_5q_{d1}c_{2-4} + 0.5a_1a_2m_2q_{d1}s_2 + \\
&a_1a_2(m_3 + m_4 + m_5)q_{d1}s_2 - 0.5a_2m_5q_5q_{d4}c_4 \\
C_{22} &= -0.25(-m_5q_5q_{d5} + 2a_2m_5q_{d5}s_4 + 2a_2m_5q_5q_{d4}c_4) \\
C_{23} &= 0 \\
C_{24} &= -0.25(m_5q_{d5} - 3a_2m_5q_{d5}s_4 + 2a_2m_5q_5q_{d1}c_4 + 2a_2m_5q_5q_{d2}c_4 - 2a_2m_5q_5q_{d4}c_4) \\
C_{25} &= 0.25(-m_5q_5q_{d1} - m_5q_5q_{d2} + m_5q_5q_{d4} + a_1m_5q_{d1}s_{2-4} + 2a_2m_5q_{d1}s_4 + 2a_2m_5q_{d2}s_4 - 3a_2m_5q_{d4}s_4) \\
C_{31} &= C_{32} = C_{33} = C_{34} = C_{35} = 0 \\
C_{41} &= 0.25(-m_5q_5q_{d5} + a_1m_5q_{d5}s_{2-4} - a_2m_5q_{d5}s_4 + 2a_1m_5q_5q_{d1}c_{2-4} + 2a_2m_5q_5q_{d1}c_4 + 2a_2m_5q_5q_{d2}c_4) \\
C_{42} &= -0.25(m_5q_5q_{d5} + a_2m_5q_{d5}s_4 - 2a_2m_5q_5q_{d1}c_4 - 2a_2m_5q_5q_{d2}c_4) \\
C_{43} &= 0 \\
C_{44} &= 0.25m_5q_5q_{d5} \\
C_{45} &= -0.25(m_5q_5q_{d1} + m_5q_5q_{d2} - m_5q_5q_{d4} - a_1m_5q_{d1}s_{2-4} + a_2m_5q_{d1}s_4 + 2a_2m_5q_{d2}s_4) \\
C_{51} &= 0.25(-m_5q_5q_{d1} - m_5q_5q_{d2} + m_5q_5q_{d4} - 2a_1m_5q_{d1}s_{2-4} + a_1m_5q_{d2}s_{2-4} - a_1m_5q_{d4}s_{2-4} + 2a_2m_5q_{d1}s_4 + \\
&2a_2m_5q_{d2}s_4 + a_2m_5q_{d4}s_4) \\
C_{52} &= 0.25(-m_5q_5q_{d1} - m_5q_5q_{d2} + m_5q_5q_{d4} + a_1m_5q_{d1}s_{2-4} + 2a_2m_5q_{d1}s_4 + 2a_2m_5q_{d2}s_4 + a_2m_5q_{d4}s_4) \\
C_{53} &= 0
\end{aligned}$$

$$C_{54} = 0.25(+m_5 q_5 q_{d1} + m_5 q_5 q_{d2} - m_5 q_5 q_{d4} - a_1 m_5 q_{d1} s_{2-4} + a_2 m_5 q_{d1} s_4 + a_2 m_5 q_{d2} s_4)$$

$$C_{55} = 0$$

هچنين درايه‌هاي ماتريس $J^T F$ كه يك ماتريس 1×5 است و با K نام‌گذاري شده‌است به‌صورت زير به‌دست مي‌آيد:

$$K_{11} = a_1 m_{obj} ((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi)) s_1 - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi)) c_1) + m_{obj} ((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi)) (-q_5 (c_4 (s_1 s_2 - c_1 c_2) - s_4 (c_1 s_2 + c_2 s_1))) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi)) (q_5 c_4 (c_1 s_2 + c_2 s_1) + s_4 (s_1 s_2 - c_1 c_2))) + a_2 m_{obj} ((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi)) (-c_1 s_2 - c_2 s_1) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi)) (-s_1 s_2 + c_1 c_2))$$

$$K_{21} = m_{obj} ((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi)) (-q_5 (c_4 (s_1 s_2 - c_1 c_2) - s_4 (c_1 s_2 + c_2 s_1))) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi)) (q_5 c_4 (c_1 s_2 + c_2 s_1) + s_4 (s_1 s_2 - c_1 c_2))) + a_2 m_{obj} ((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi)) (-c_1 s_2 - c_2 s_1) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi)) (-s_1 s_2 + c_1 c_2))$$

$$K_{31} = m_{obj} (F_y)$$

$$K_{41} = m_{obj} ((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi)) (-q_5 (c_4 (s_1 s_2 - c_1 c_2) - s_4 (c_1 s_2 + c_2 s_1))) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi)) (q_5 c_4 (c_1 s_2 + c_2 s_1) + s_4 (s_1 s_2 - c_1 c_2)))$$

$$K_{51} = m_{obj} ((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi)) (c_4 (c_1 s_2 + c_2 s_1) + s_4 (s_1 s_2 - c_1 c_2))) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi)) (c_4 (s_1 s_2 - c_1 c_2) - s_4 (c_1 s_2 + c_2 s_1))$$

که F_x ، F_y و F_z به ترتيب منته‌ه نيروهاي وارده به جسم در جهات X_4 ، Y_4 و Z_4 مي‌باشد که ناشي از وزن جسم و شتاب وارد شده به جسم در حين مانور ربات بوده، q_{d_i} مسير در نظر گرفته شده براي مفاصل و $\phi = q_{d_1} + q_{d_2} - q_{d_4}$ مي‌باشد.

همچنين به دليل ايجاد اختصار، روابط مثلثاتي به‌صورت زير خلاصه سازي شده است:

$$s_i = \sin q_i, s_{i-j} = \sin(q_i - q_j), \quad c_i = \cos q_i, c_{i-j} = \cos(q_i - q_j),$$

۲-۵ ديناميك محرک‌ها

ديناميك محرک‌ها که شامل موتورهاي DC مي‌باشند، به‌صورت رابطه (۲-۶۰) بدست مي‌آيد.

$$L\dot{I} + RI + K_m \dot{q} = V \quad (۲-۶۰)$$

که در معادله (۲) داریم:

L : ماتریس مثبت معین ثابت و قطری که به عنوان اندوکتانس الکتریکی استفاده می‌شود

R : ماتریس مثبت معین ثابت و قطری مقاومت الکتریکی

I : بردار جریان مفاصل

K_m : ماتریس مثبت معین ثابت قطری از ضرایب محرک

V : بردار ولتاژ ورودی آرمیچر

مقادیر پارامترهای مدارات موتور در جدول (۲-۴) ارائه شده است:

جدول ۲-۴ پارامترهای الکتریکی

$K_m (V.s)$	$K_r (V.s)$	$R (\Omega)$	$L (V.s/A)$
۱,۶	۲,۱۲۴	۰,۲۶	۰,۰۱

به منظور طراحی کنترل کننده گام به عقب باید دینامیک ربات و محرک‌ها به فرم پس‌خورد صریح

تبدیل شوند، که در فصل‌های بعد این فرآیند تشریح می‌شود.

فصل سوم
کنترل ردیابی مسیر ربات اسکارا
بدون لحاظ پنجه

۳-۱ مقدمه

بسیاری از برنامه‌های کاربردی در صنعت شامل سیستم‌های مکانیکی است که با محیط در تعامل می‌باشند، یکی از مواردی که می‌توان به آن اشاره کرد استفاده از ربات‌ها در کاربردهای مختلف صنعتی می‌باشد. ربات اسکارا، از ربات‌های پرکاربرد به شمار می‌آید که علاوه بر کاربرد آن در گرفتن اجسام در فرایندهای جوش کاری، رنگ کاری و مونتاژ در صنایع مختلف و بخصوص در صنعت خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، این ربات دارای مفاصل با محورهای هم‌راستا می‌باشد. لذا به خاطر ساختار منحصر به فردش بر خلاف اکثر ربات‌های صنعتی اثرات غیرخطی ناشی از گریز از مرکز، کوریولیس و نیروهای اینرسی به مراتب مهم‌تر از نیروی اصطکاک و نیروی گرانش می‌باشد و به همین دلیل در فرایندهای سرعت بالا مانند مونتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در نتیجه با توجه به اینکه هدف این پایان‌نامه کنترل لغزش جسم در حین جابه‌جایی در مسیر مطلوب می‌باشد، در این بخش کنترل‌کننده گام به عقب تطبیقی به منظور ردیابی مسیر برای ربات اسکارا بدون لحاظ پنجه طراحی می‌گردد. سپس در فصل ۴ با اضافه کردن پنجه به ربات اسکارا کنترل لغزش بررسی می‌شود.

۳-۲ فرم دینامیکی پس‌خورد صریح

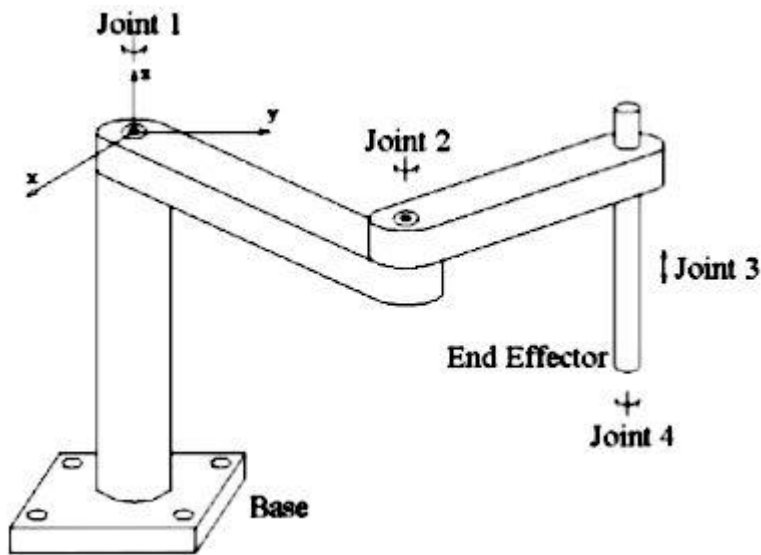
به‌منظور طراحی کنترل‌کننده گام به عقب باید دینامیک ربات و محرک‌ها به فرم پس‌خورد صریح تبدیل شوند که در ادامه این فرآیند تشریح می‌شود.

ربات مطابق شکل (۳-۱) دارای سه مفصل لولایی، یک مفصل کشویی می‌باشد. با توجه به رابطه (۲-۵۶)، معادلات حرکت دینامیکی ربات n لینکی با فرض عدم وجود انعطاف‌پذیری در مفاصل توسط معادله (۳-۱) بیان می‌شود.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1-3)$$

دینامیک محرک‌ها که شامل موتورهای DC می‌باشند با توجه به رابطه (۲-۶۰) به صورت رابطه (۲-۳) بازنویسی می‌شود.

$$L\dot{I} + RI + K_m\dot{q} = V \quad (2-3)$$



شکل (۱-۳) طرح بازوی ماهر اسکارا [۲۱]

رابطه بین بردار گشتاور مفاصل و بردار جریان آرمیچر به صورت رابطه (۳-۳) تعریف می‌شود:

$$\tau = K_r I \quad (3-3)$$

که در معادله (۳) داریم:

K_r : ماتریس $n \times n$ مثبت معین و قطری است که بیانگر ضریب تبدیل الکترومکانیکی بین جریان و گشتاور بازو می‌باشد.

با جایگذاری معادله (۳-۳) در (۱-۳)، معادله (۴-۳) بدست می‌آید:

$$K_r I = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (4-3)$$

با توجه به فرمول‌های (۲-۳) و (۴-۳) معادله دینامیکی سیستم مشتمل بر ربات و محرک‌ها را می‌توان به صورت رابطه (۵-۳) نوشت:

$$\begin{cases} D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = K_r I \\ L\dot{I} + RI + K_m \dot{q} = V \end{cases} \quad (5-3)$$

جهت تبیین روش کنترل بر مبنای گام به عقب نیاز به فرم فضای حالت می‌باشد؛ لذا برای نوشتن فرم فضای حالت سیستم دینامیکی، بردارهای حالت مطابق رابطه‌های (۶-۳) تا (۹-۳) در نظر گرفته می‌شود:

$$\xi = [\xi_1, \xi_2]^T \quad (6-3)$$

$$\xi_3 = [I_1, I_2, I_3, I_4]^T \quad (7-3)$$

$$\xi_1 = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T \quad (8-3)$$

$$\xi_2 = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4]^T \quad (9-3)$$

که ξ_1 ، ξ_2 و ξ_3 به ترتیب بردارهایی متشکل از موقعیت، سرعت و جریان موتور، برای مفاصل ربات می‌باشند. بنابراین، معادلات حرکت (۵-۳) به شکل فضای حالت با توجه به معادلات (۶-۳) تا (۹-۳) به صورت رابطه (۱۰-۳) بدست می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_2 \\ -D^{-1}C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - D^{-1}G(\xi_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D^{-1}K_r \end{bmatrix} \xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = -L^{-1}R\xi_3 - L^{-1}k_m \xi_2 + L^{-1}V \end{cases} \quad (10-3)$$

می‌توان معادلات (۱۰-۳) را به شکل کلی رابطه (۱۱-۳) نوشت:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = f(\xi) + g(\xi)\xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = f_1(\xi, \xi_3) + g_1(\xi, \xi_3)V \end{cases} \quad (11-3)$$

که در معادله (۱۱-۳)، $\xi \in R^{2n}$ ، $\xi_3 \in R^n$ و $V \in R^n$ می‌باشد.

۳-۳ قانون کنترلی به روش گام به عقب برای ردیابی مسیر ربات

برای اطمینان از پایداری سیستم در روش گام به عقب، نیاز به در نظر گرفتن یک خروجی، تثبیت یک تابع ذخیره‌ساز و به دست آوردن تابع پایدارساز معتبر برای هر مرحله می‌باشد. در سیستم مورد مطالعه و در بخش به دست آوردن تابع پایدارساز معتبر، فقط یک مرحله وجود دارد که در آن، هدف پیدا کردن قانون کنترل ولتاژ V برای ایجاد پایداری سیستم حلقه بسته با توجه به معادله (۳-۵) می‌باشد. با در نظر گرفتن خروجی به صورت معادله (۳-۱۲):

$$y = \beta(\xi_3 - \xi_{3d}) - \alpha_0(\xi) \quad (۳-۱۲)$$

و در نظر گرفتن تابع مثبت معین به صورت معادله (۳-۱۳) به عنوان تابع لیاپانوف:

$$V(\xi, \xi_3) = W(\xi) + \frac{1}{2} yy^T \quad (۳-۱۳)$$

تابع ذخیره‌سازی به صورت معادله (۳-۱۴) در نظر گرفته می‌شود:

$$W(\xi) = \frac{1}{2}(\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_1 - \xi_{1d}) \quad (۳-۱۴)$$

تابع پایدارساز نیز برابر رابطه (۳-۱۵) در نظر گرفته می‌شود:

$$\alpha_0(\xi) = \beta(\xi_3 - \xi_{3d}) - (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (۳-۱۵)$$

که در رابطه (۳-۱۵) $\beta = I_{n \times n}$ انتخاب می‌شود. برای بررسی پایداری سیستم و یافتن کنترلر مناسب نیاز به بررسی مشتق تابع لیاپانوف می‌باشد؛ لذا با استفاده از معادله (۳-۱۳) مشتق تابع لیاپانوف توسط رابطه (۳-۱۶) بدست می‌آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = \dot{W} + y^T \dot{y} \quad (۳-۱۶)$$

که در رابطه (۳-۱۶) \dot{W} و \dot{y} توسط روابط (۳-۱۷) و (۳-۱۸) تعریف شده‌است:

$$\dot{W} = (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (۳-۱۷)$$

$$\dot{y} = \beta \left(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_{3d} \right) - \frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi} \dot{\xi} \quad (18-3)$$

با جایگذاری رابطه (۱۷-۳) و (۱۸-۳) در معادله (۱۶-۳) رابطه (۱۹-۳) بدست می‌آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) + y^T \left(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_{3d} - \frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi} \dot{\xi} \right) \quad (19-3)$$

با توجه به رابطه (۱۵-۳)، رابطه (۲۰-۳) برای محاسبه $\frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi}$ بدست می‌آید:

$$\frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi} = \frac{\delta}{\delta \xi} \left((\xi_3 - \xi_{3d}) - (\xi_2 - \xi_{2d}) \right) = \{ [0]_{1 \times n}, [-1]_{1 \times n} \} \quad (20-3)$$

با جایگذاری $\dot{\xi}$ و $\dot{\xi}_3$ از (۱۰-۳) و $\frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi}$ از (۲۰-۳) در رابطه (۱۹-۳)، رابطه (۲۱-۳) برای مشتق

تابع لیاپانوف، بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\xi, \xi_3) &= (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) + \\ & y^T (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d} + \\ & D^{-1}(\xi)(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1))) \end{aligned} \quad (21-3)$$

برای اینکه سیستم پایدار باشد، باید مشتق تابع لیاپانوف در رابطه (۲۱-۳)، منفی باشد؛ لذا اگر رابطه

(۲۲-۳) برقرار باشد، پایداری سیستم برقرار می‌شود:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) \leq -y^T \cdot y \quad (22-3)$$

با توجه به رابطه‌های (۲۱-۳) و (۲۲-۳)، می‌توان رابطه (۲۳-۳) را استنتاج نمود:

$$\begin{aligned} -y^T \cdot y - (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) \geq \\ y^T (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d} + \\ D^{-1}(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1))) \end{aligned} \quad (23-3)$$

از طرفی با توجه به رابطه‌های (۱۲-۳) و (۱۵-۳)، رابطه (۲۴-۳) بدست می‌آید:

$$y = (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (24-3)$$

با جایگذاری رابطه (24-3) در (23-3)، رابطه (25-3) بدست می آید:

$$\begin{aligned} & -y^T (y + (\xi_1 - \xi_{1d})) \geq \\ & y^T (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m\xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d} + \\ & D^{-1}(K_r\xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1))) \end{aligned} \quad (25-3)$$

معادله (25-3) را می توان به شکل رابطه (26-3) بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} & -((\xi_2 - \xi_{2d}) + (\xi_1 - \xi_{1d})) \geq \\ & (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m\xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d} + \\ & D^{-1}(K_r\xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1))) \end{aligned} \quad (26-3)$$

و با توجه به روابط (10، 11)، رابطه (27-3) را داریم،

$$g_1(\xi, \xi_3) = L \neq 0 \quad (27-3)$$

زمانی که g_1 به ازای تمام مقادیر ξ_1 ، ξ_2 و ξ_3 غیر تکین باشد، قانون کنترل با توجه به رابطه (26-3)

برای معادله (10-3) به صورت رابطه (28-3) پیشنهاد می گردد:

$$\begin{aligned} V = & L(L^{-1}(R\xi_3 + k_m\xi_2) + \dot{\xi}_{3d} - (\xi_2 - \xi_{2d}) - (\xi_1 - \xi_{1d})) + \\ & D^{-1}(-K_r\xi_3 + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 + G(\xi_1)) \end{aligned} \quad (28-3)$$

با انتخاب کنترل کننده مطابق رابطه (28-3)، پایداری سیستم حلقه بسته با روش بازگشتی گام به

عقب تضمین می شود.

با فرض اینکه تمام پارامترها شناخته شده باشد و همچنین با داشتن موقعیت، سرعت و شتاب های

مطلوب و همچنین جریان مطلوب (I_d) می توان معادله (3-5) را به صورت رابطه (29-3) بازنویسی

نمود:

$$\begin{cases} D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = K_r I_d + K_r \tilde{I} \\ L\dot{I} + RI + K_m \dot{q} = V \end{cases} \quad (29-3)$$

که در معادله (29-3)، \tilde{I} خطای جریان و I_d جریان مطلوب می‌باشد. در این حالت، رابطه اول از معادله (29-3) می‌تواند به عنوان یک زیر سیستم دیده شود که دارای جمله اختلال $K_r \tilde{I}$ بوده و با جمله $K_r I_d$ کنترل می‌شود. بنابراین، با تبدیل مختصات به متغیرهای فضای حالت با توجه به رابطه (3-3) می‌توان رابطه (30-3) را برای جریان مطلوب نوشت:

$$\xi_{3d} = K_r^{-1} [\hat{D}(\xi) \xi_2^* + \hat{C}(q, \dot{q}) \xi_2^* + \hat{G}(\xi) - K_d \varepsilon] \quad (30-3)$$

که در رابطه فوق ξ_2^* و ε به صورت رابطه (31-3) و (32-3) تعریف می‌شوند:

$$\xi_2^* = \xi_{2d} - \lambda (\xi_1 - \xi_{1d}) \quad (31-3)$$

$$\varepsilon = \xi_2 - \xi_{2d} + \lambda (\xi_1 - \xi_{1d}) = \xi_2 - \xi_2^* \quad (32-3)$$

در روابط فوق، ε متغیر کمکی بر مبنای خطا و λ یک ماتریس $n \times n$ مثبت معین است. بردار خطای حالت‌های سیستم به صورت رابطه (33-3) تعریف می‌شود:

$$\tilde{\xi}_2 = \xi_2 - \xi_{2d}, \tilde{\xi}_1 = \xi_1 - \xi_{1d}, \tilde{\xi}_3 = \xi_3 - \xi_{3d} \quad (33-3)$$

3-4 قانون گام به عقب تطبیقی برای ردیابی مسیر

با توجه به وجود نامعینی‌های پارامتری مثل جرم و اینرسی در ربات‌ها، تخمین این پارامترها به منظور کنترل سیستم امری ضروری می‌باشد. برای به دست آوردن این تخمین، نیاز است که معادله دینامیکی ربات در رابطه (1) به فرم پارامتری مطابق با رابطه (34-3) نوشته شود، که جزئیات آن در بخش 3-3-

۱-۴ توضیح داده شده است.

$$D(\xi_1)\dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + G(\xi_1) = Y(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \dot{\xi}_2^*)p \quad (34-3)$$

در رابطه فوق p بردار پارامترها و Y ماتریس وزن نامیده می شود.

۱-۴-۳ تخمین پارامترها

با توجه به مدل دینامیکی (۱-۳)، تخمین پارامترها با روش تطبیقی و بر پایه‌ی استراتژی محاسبه جریان مطلوب بدست می آید، بنابراین جریان مطلوب را براساس پارامترهای نامعلوم سیستم می توان به شکل رابطه (۳۵-۳) نوشت:

$$\xi_{3d} = K_r^{-1}\hat{Y}p - K_d\varepsilon \quad (35-3)$$

که در رابطه (۳۵-۳)، فرم پارامتری دینامیک سیستم بوده و با توجه به رابطه (۳۶-۳) بدست می آید،

$$\hat{Y}p = D(\xi_1)\dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + G(\xi_1) \quad (36-3)$$

که در رابطه (۳۶-۳)، p بردار پارامترهای سیستم مورد مطالعه بصورت $p = [p_1, p_2, \dots, p_{10}]$ بوده و در ادامه تعریف خواهد شد. برای بدست آوردن قانون تطبیق، تابع لیاپانوفی با توجه به رابطه (۳۷-۳) پیشنهاد می شود:

$$V = \frac{1}{2}(\varepsilon^T D(\xi_1)\varepsilon + \tilde{p}^T \Gamma^{-1}\tilde{p}) \quad (37-3)$$

که در رابطه (۳۷-۳)، $\Gamma = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{10}]$ بردار مثبت معین، و \tilde{p} برداری 10×1 از خطای تخمین پارامترهای p_i ، مطابق رابطه (۳۸-۳) می باشد.

$$\tilde{p} = p - \hat{p} \quad (38-3)$$

با توجه به رابطه (۳۷-۳) و مثبت معین بودن Γ و D ، تابع لیاپانوف V مثبت معین خواهد بود. مشتق تابع لیاپانوف فوق نسبت به زمان، به صورت رابطه (۳۹-۳) بدست می آید.

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1)\dot{\varepsilon} + \frac{1}{2}\dot{D}(\xi_1)\varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (39-3)$$

با توجه روابط حاکم در دینامیک ربات جمله $\dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q})$ پادمتقارن می‌باشد؛ لذا عبارت $\varepsilon^T (\dot{D} - 2C)\varepsilon$ برابر صفر بوده و در نتیجه رابطه (39-3) را می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2} \varepsilon^T \dot{D}(\xi)\varepsilon = \varepsilon^T C(\xi_1, \xi_2)\varepsilon \quad (40-3)$$

با جایگذاری رابطه (40-3) در (39-3)، معادله (41-3) حاصل می‌شود:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1)\dot{\varepsilon} + C(\xi_1, \xi_2)\varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (41-3)$$

با جایگذاری ε از رابطه (32-3) و مشتق آن در (41-3)، رابطه (42-3) بدست می‌آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1)\dot{\xi}_2 - D(\xi_1)\dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (42-3)$$

با توجه به رابطه اول معادله (29-3)، می‌توان معادله (43-3) را نوشت:

$$D(\xi_1)\dot{\xi}_2 + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 + G(\xi_1) = K_r \xi_{3d} \quad (43-3)$$

با استخراج $D(\xi_1)\dot{\xi}_2$ از معادله (43-3) و جایگذاری آن در رابطه (42-3)، رابطه (44-3) بدست می‌آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (K_r \xi_{3d} - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1) - D(\xi_1)\dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (44-3)$$

با ساده‌سازی رابطه (44-3)، رابطه (45-3) حاصل می‌شود:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (K_r \xi_{3d} - G(\xi_1) - D(\xi_1)\dot{\xi}_2^* - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (45-3)$$

با جایگذاری ξ_{3d} از رابطه (30-3) در (45-3) و مرتب‌سازی رابطه (46-3) بدست می‌آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (\tilde{D}(\xi_1)\dot{\xi}_2^* + \tilde{C}(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + \tilde{G}(\xi_1) - K_d \varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (46-3)$$

که در رابطه (46-3) داریم:

$$\tilde{D} = \hat{D} - D \quad \tilde{C} = \hat{C} - C \quad \tilde{G} = \hat{G} - G$$

رابطه (۳-۳۴) را در فرم خطای پارامتری می توان به صورت رابطه (۳-۴۷) بازنویسی نمود:

$$\tilde{D}(\xi_1)\xi_2^* + \tilde{C}(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + \tilde{G}(\xi_1) = Y(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \xi_2^*)\tilde{p} \quad (۳-۴۷)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۳-۴۷) می توان (۳-۴۶) را به صورت رابطه (۳-۴۸) نوشت:

$$\dot{V} = \varepsilon^T [Y - K_d \varepsilon] + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} = -\varepsilon^T K_d \varepsilon + \tilde{p}^T [Y^T \varepsilon + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}] \quad (۳-۴۸)$$

برای آنکه \dot{V} در رابطه (۳-۴۸) منفی معین باشد، باید رابطه (۳-۴۹) برقرار باشد:

$$\tilde{p}^T [Y^T \varepsilon + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}] = 0 \quad (۳-۴۹)$$

لذا با توجه به رابطه (۳-۴۹) معادله (۳-۴۸) به صورت (۳-۵۰) تبدیل می شود.

$$\dot{V} = -\varepsilon^T K_d \varepsilon \leq 0 \quad (۳-۵۰)$$

رابطه تابع لیاپانوف (۳-۳۷) و مشتق آن (۳-۵۰) نشان می دهند که سیستم پایدار می باشد. لذا قانون تطبیق با استفاده از رابطه (۳-۴۹)، به صورت رابطه (۳-۵۱) بدست می آید:

$$\dot{\tilde{p}} = -\Gamma \hat{Y}^T \varepsilon \quad (۳-۵۱)$$

۳-۴-۲ استخراج ماتریس وزن \hat{Y}

مدل دینامیکی سیستم (۱) را به فرم پارامتری می توان به شکل رابطه (۳-۵۲) نوشت:

$$K_d I_d = D(\xi)\xi_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + G(\xi_1) = \hat{Y}(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \xi_2^*)p \quad (۳-۵۲)$$

که در (۳-۵۲)، $Y \in R^{n \times r}$ ماتریسی از توابع شناخته شده بر حسب مختصات تعمیم یافته و مشتقات مراتب بالاتر آن ها و $p \in R^r$ بردار r بعدی از پارامترهای نامعلوم ربات می باشد؛ لذا در سیستم مورد مطالعه p_1 تا p_{10} توابعی از جرم (m_i)، اینرسی (I_i) و طول لینکها (a_i) می باشند که در جدول (۳-۱) ارائه شده است. مدل دینامیکی ربات اسکارا را به شکل ماتریسی، می توان به صورت رابطه (۳-۵۳) بیان

نمود:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & 0 & D_{24} \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{d}_3 \\ \ddot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & 0 & C_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{41} & C_{42} & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_{31} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (53-3)$$

در نتیجه برای نوشتن دینامیک ربات اسکارا به فرم رابطه (۳۴) و به منظور تخمین پارامترها، دینامیک ربات بر حسب پارامترهای ثابت به شکل روابط زیر نوشته می‌شود، پارامترهای ثابت فوق در جدول (۳-۱) معرفی شده‌اند:

$$\begin{aligned} D_{11} &= p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + 2p_7C_2 + p_8C_2 \\ D_{12} &= p_2 + p_4 + p_6 + p_7C_2 + \frac{p_8C_2}{2} \\ D_{14} &= -p_{10}; D_{21} = p_2 + p_4 + p_6 + p_7C_2 + \frac{p_8C_2}{2} \\ D_{22} &= p_2 + p_4 + p_6; D_{24} = -p_{10}; D_{33} = p_9 \\ D_{41} &= -p_{10}; D_{42} = -p_{10}; D_{43} = p_{10}; G_{31} = -gp_9 \\ C_{11} &= 0.5p_8q_{d2}S_2 - p_7q_{d2}S_2; \\ C_{12} &= -0.5p_8S_2(q_{d1} + q_{d2}) - p_{10}(q_{d1} + q_{d2}) \\ C_{21} &= q_{d1}S_2(0.5p_8 + p_7); \end{aligned}$$

با توجه به روابط فوق و با توجه به رابطه (۵۳) ماتریس \hat{Y} به شکل رابطه (۵۴-۳) بدست می‌آید:

۳-۵-۱ مسیر مطلوب حرکت ربات

در این قسمت مسیر مطلوب حرکت ربات به همراه سرعت و شتاب مطلوب مفاصل ربات تعریف می-شود. 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 به صورت زیر می‌باشد.

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

$$\text{سرعت} = \begin{cases} \dot{q}_1^d = 0 \\ \dot{q}_2^d = -d(t-t_1)^2 / (2(t_1-t_2)) \\ \dot{q}_3^d = -d(t_1-2t+t_2) / 2 \\ \dot{q}_4^d = d \times t - d \times t_1 / 2 - d \times t_2 / 2 + d(t-t_3)^2 / (2(t_3-t_4)) \\ \dot{q}_5^d = -d(-t_1^2 - t_1 \times t_2 + 3t \times t_1 - t_2^2 + 3t \times t_2 + t_3^2 + t_3 \times t_4 - 3t \times t_3 + t_4^2 - 3t \times t_4) / 6 \end{cases}$$

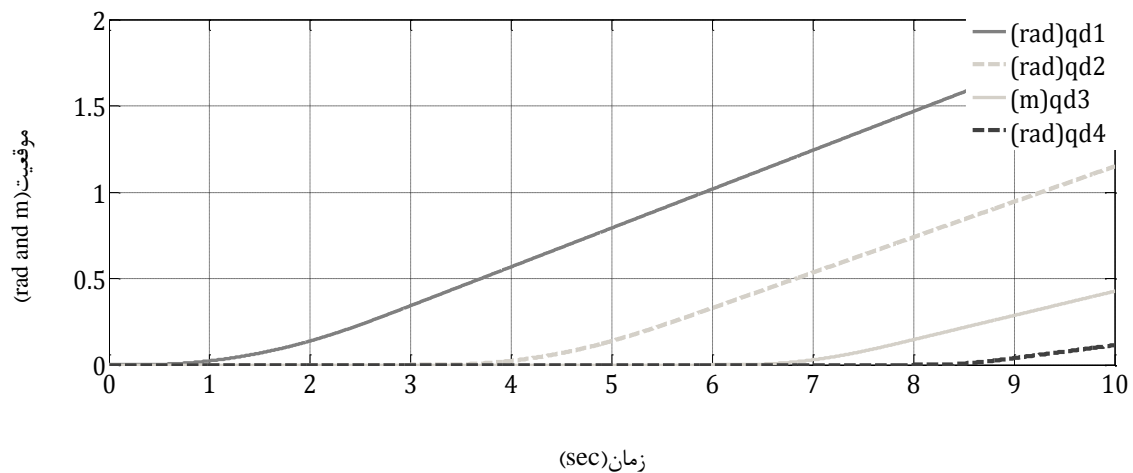
$$\text{شتاب} = \begin{cases} \ddot{q}_1^d = 0 \\ \ddot{q}_2^d = -d(t-t_1) / (t_1-t_2) \\ \ddot{q}_3^d = d \\ \ddot{q}_4^d = d(t-t_4) / (t_3-t_4) \\ \ddot{q}_5^d = 0 \end{cases}$$

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 (۳-۲) انتخاب می‌شوند.

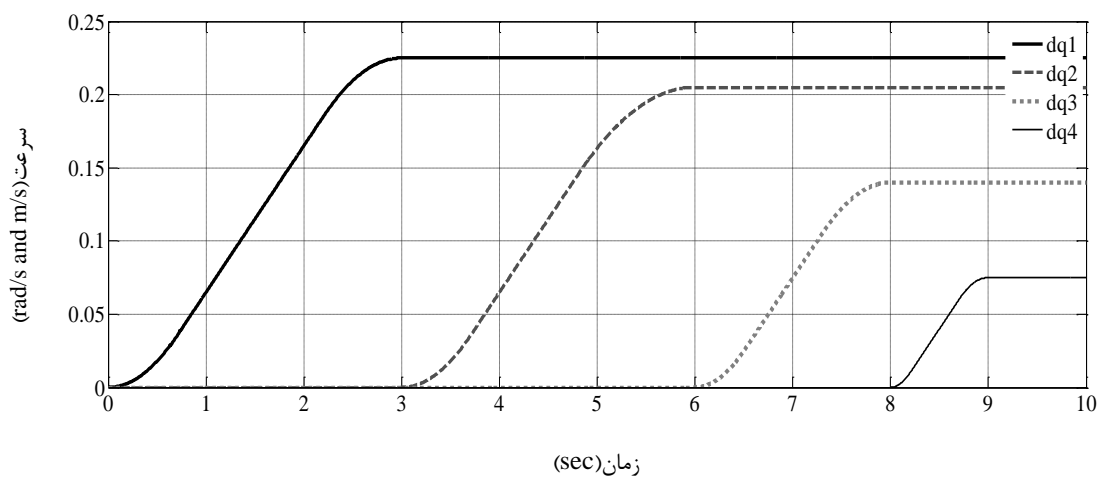
جدول (۲-۳) زمان‌های به‌کاررفته برای مسیرهای مطلوب ربات

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

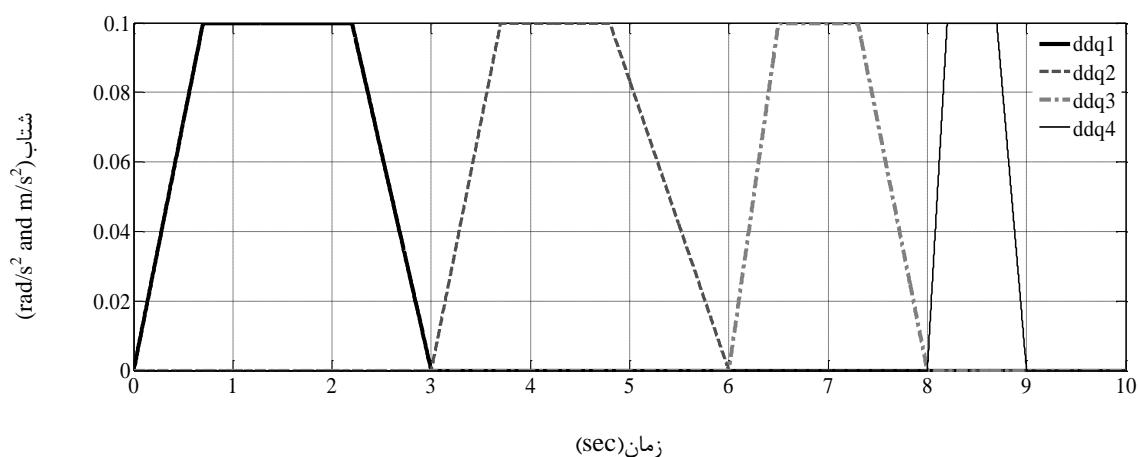
با توجه به معادلات مسیر فوق و پارامترهای مشخص شده در جدول (۲-۳)، موقعیت مطلوب رباطها در شکل (۲-۳)، سرعت مطلوب شکل (۳-۳) و شتاب مطلوب در شکل (۴-۳) برحسب زمان نمایش داده شده است.



شکل (۲-۳) موقعیت مطلوب رباطها



شکل (۳-۳) سرعت مطلوب رابطها



شکل (۴-۳) شتاب مطلوب رابطها

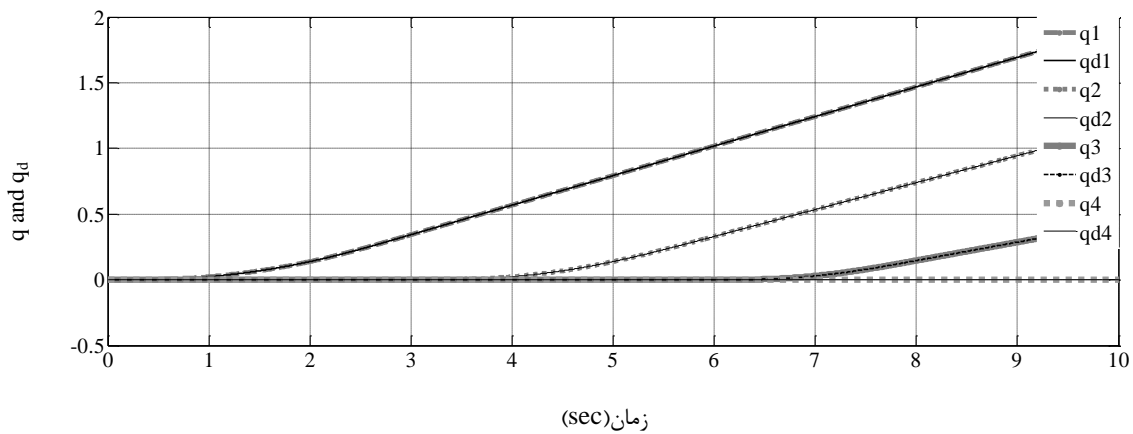
۳-۵-۲ نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه به دو بخش تقسیم شده است، بخش اول شبیه‌سازی مربوط به ردیابی مسیر توسط ربات است، زمانی که هیچ اغتشاشی وجود ندارد. در این حالت، بهره‌های کنترل-کننده یعنی K_i و K_d ماتریس‌هایی قطری با درایه‌های قطر اصلی ۱۰۰ در نظر گرفته شده‌اند.

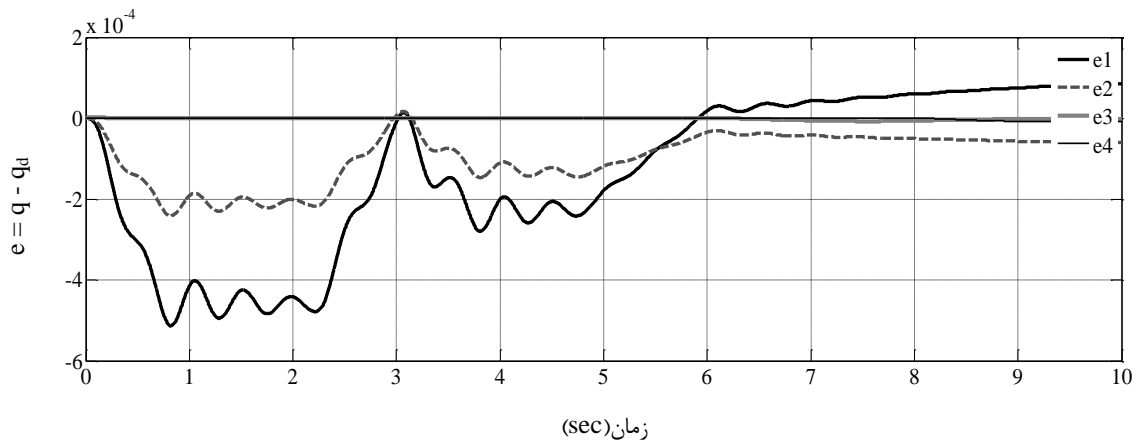
شکل (۳-۵) تا (۳-۷) به ترتیب ردیابی موقعیت، خطای ردیابی موقعیت و مقادیر تلاش کنترلی لینک-ها را در ۱۰ ثانیه برای کنترل‌کننده گام به عقب تطبیقی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۳-۳)

۵) مشاهده می‌شود، ردیابی موقعیت برای کنترلر گام به عقب تطبیقی به خوبی انجام شده است و مقادیر خطای ردیابی موقعیت در شکل (۳-۶) به مقادیر بسیار کمی محدود شده است.

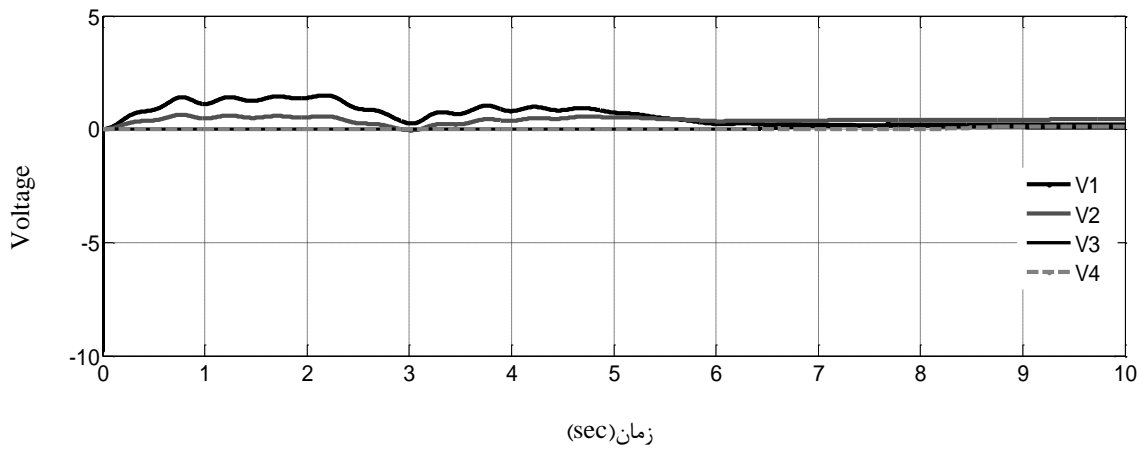
بخش دوم شبیه‌سازی به ارزیابی کنترل‌کننده در حضور اغتشاش اختصاص داده شده است. جمله اغتشاشی به مقدار $V_d = 0.1 \times \sin(\pi \cdot t / 4)$ در سیستم لحاظ شده است. در این حالت، بهره‌های کنترل‌کننده یعنی λ و K_d ماتریس‌هایی قطری با درایه‌های قطر اصلی ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۳-۸) تا (۳-۱۰) به ترتیب ردیابی موقعیت، خطای ردیابی موقعیت و مقادیر تلاش کنترلی لینک‌ها را در ۱۰ ثانیه برای کنترل‌کننده گام به عقب تطبیقی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۳-۸) مشاهده می‌شود ردیابی موقعیت برای کنترلر گام به عقب تطبیقی در حضور اغتشاش به خوبی انجام شده است و مقادیر خطای ردیابی موقعیت در شکل (۳-۹) به مقادیر بسیار کمی محدود شده است.



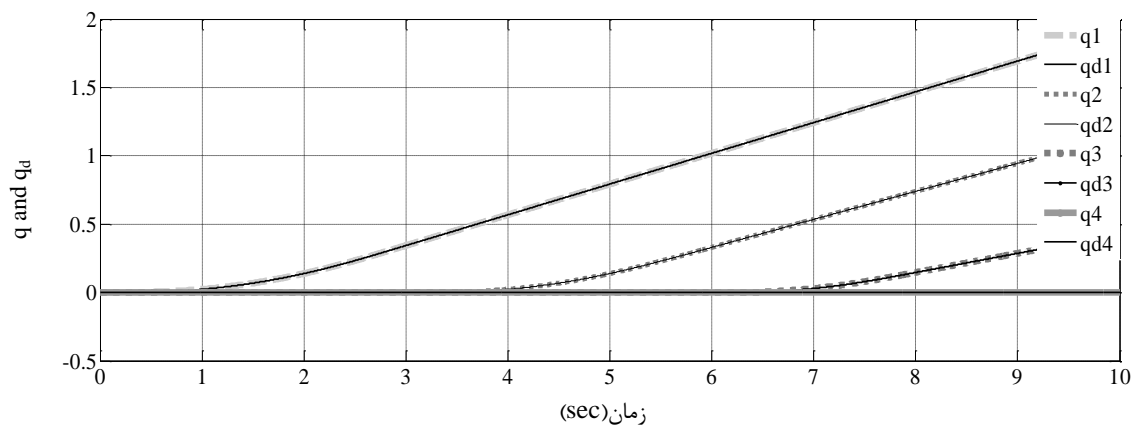
شکل (۳-۵) ردیابی مسیر مفاصل کنترل‌کننده تطبیقی بخش اول



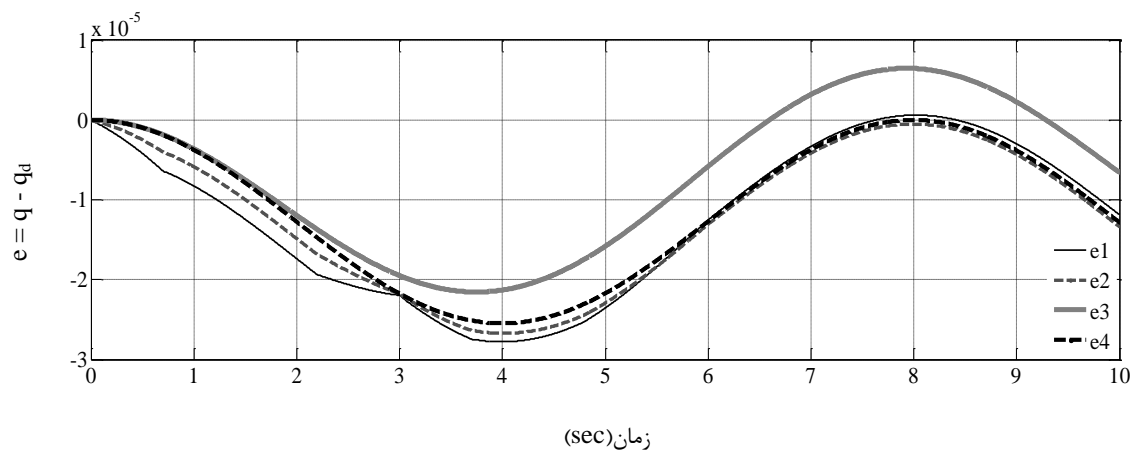
شکل (۳-۶) خطای ردیابی موقعیت کنترل کننده تطبیقی بخش اول



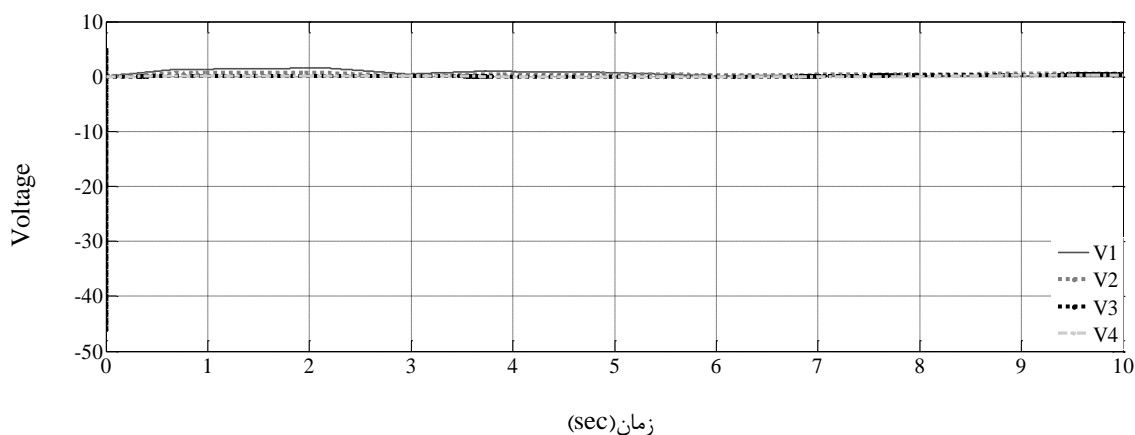
شکل (۳-۷) ولتاژ مفاصل کنترل کننده تطبیقی بخش اول



شکل (۳-۸) ردیابی موقعیت مفاصل کنترل کننده تطبیقی بخش دوم



شکل (۳-۹) خطای ردیابی موقعیت کنترل کننده تطبیقی بخش دوم



شکل (۳-۱۰) ولتاژ مفاصل کنترل کننده تطبیقی بخش دوم

به طور خلاصه با مشاهده نتایج شبیه سازی می توان دقت بالای روش کنترلی گام به عقب را مشاهده نمود. با توجه به نمودارهای ارائه شده مشاهده می شود که کنترلر طراحی شده توسط روش گام به عقب تطبیقی، تعقیب مسیر مطلوب را برای ربات به خوبی انجام داده است. کنترلر طراحی شده توسط این روش در حضور اغتشاش نیز عملکرد خوبی را از خود نشان داده است. علاوه بر این، مشاهده می شود که هیچگونه ناپایداری در نتایج شبیه سازی وجود نداشته و در مقایسه با روش کنترلی مد لغزشی، پدیده چترینگ (وزوز) در نمودارها مشاهده نمی شود؛ که این مورد یکی از مزایای کنترل گام به عقب نسبت به کنترل مد لغزشی است. بنابراین با توجه به نتایج شبیه سازی می توان نتیجه گرفت

که روش کنترل گام به عقب برای سیستم‌های غیرخطی‌ای که به فرم پسخوردصریح هستند، حتی در حضور عدم قطعیت و اغتشاش نیز دارای دقت بسیار خوبی است.

فصل چهارم

کنترل به منظور مهار لغزش جسم گرفته شده و

ردیابی مسیر ربات

یک روش شناخته شده برای کنترل سیستم‌های غیرخطی، روش کنترل گام به عقب می‌باشد. گام به عقب یک روش طراحی کنترل بازگشتی بر مبنای تئوری لیاپانوف به صورت نظام مند می‌باشد. ریشه آن در روش خطی سازی پس‌خورد است که در سال ۱۹۸۰ ارائه شد [۳۲].

طراحی گام به عقب غیرخطی به شدت به روش خطی سازی پس‌خورد نزدیک و وابسته می‌باشد، با این تفاوت که روش خطی سازی پس‌خورد تمام عبارات‌های غیرخطی را حذف می‌کند. اما می‌توان نشان داد، هنگامی که از روش‌های کنترل گام به عقب استفاده می‌شود، طراح می‌تواند با قابلیت انعطاف بالا المان‌های غیرخطی خوب را از بد جدا کرده و اثر المان‌های ناپایدارکننده سیستم را حذف نماید. به عنوان مثال، می‌توان با اضافه کردن ترم میراکننده غیرخطی به سیستم، در روش گام به عقب انتگرالی، سیستم را در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم نمود. این موضوع در سیستم‌های کنترلی در صنعت اهمیت فراوانی دارد؛ چون حذف تمام المان‌های غیرخطی احتیاج به مدل دقیق سیستم داشته و دست یافتن به مدل دقیق سیستم، در عمل کار بسیار دشواری است.

به‌طور کلی مدل دینامیکی که رفتار بازوی ماهر ربات را توصیف می‌کند، دربرگیرنده توابع غیرخطی از متغیرهای حالت است (موقعیت و سرعت مفاصل). از این رو استفاده از روش کنترلی گام به عقب به مراتب مناسب‌تر از روش‌های خطی سازی پس‌خورد مانند کنترل گشتاور محاسبه شده می‌باشد.

جدا از در نظر گرفتن هر نوع کنترل‌کننده 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 می‌شود. این شتاب بازوها بر روی شتاب جسم گرفته شده نیز اثر می‌گذارد. همین تغییرات شتاب جسم نسبت به شتاب اولیه‌ای که مطلوب حرکت آن بوده، یعنی شتاب انگشت، می‌تواند به هنگام حرکت ربات باعث تغییر وضعیت جسم نسبت به انگشتان پنجه ربات شود که در این صورت اصطلاحاً پدیده لغزش اتفاق می‌افتد؛

بنابراین کنترلر گام به عقب پیاده‌سازی شده بر روی ربات باید علاوه بر تولید ولتاژ 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 فرم دینامیکی پس‌خورد صریح

به‌منظور طراحی کنترل‌کننده گام به عقب باید دینامیک ربات و محرک‌ها به فرم پس‌خورد صریح تبدیل شوند، که در ادامه این فرآیند تشریح می‌شود.

ربات مطابق شکل (۲-۲) دارای سه مفصل لولایی، یک مفصل کشویی به همراه پنجه فک موازی می‌باشد. با توجه به رابطه (۲-۵۹)، معادلات حرکت دینامیکی ربات n لینکی در تعامل با جسم با فرض عدم وجود انعطاف‌پذیری در مفاصل توسط معادله (۴-۱) بیان می‌شود.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - J^T F = \tau \quad (۴-۱)$$

و دینامیک محرک‌ها که شامل موتورهای DC می‌باشند، با توجه به (۲-۶۰) به‌صورت رابطه (۴-۲) بازنویسی می‌شود.

$$L\dot{I} + RI + K_m \dot{q} = V \quad (۴-۲)$$

رابطه بین بردار گشتاور مفاصل و بردار جریان آرمیچر به صورت رابطه (۳-۴) تعریف می‌شود:

$$\tau = K_r I \quad (۳-۴)$$

که در معادله (۳-۴) داریم:

K_r : ماتریس $n \times n$ مثبت معین و قطری است که بیانگر ضریب تبدیل الکترومکانیکی بین جریان و گشتاور موتور می‌باشد.

با جایگذاری معادله (۳-۴) در (۱-۴)، معادله (۴-۴) بدست می‌آید:

$$K_r I = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - J^T F \quad (۴-۳)$$

با توجه به فرمول‌های (۲-۴) و (۴-۴) معادله دینامیکی سیستم مشتمل بر ربات و محرک‌ها را می‌توان به صورت رابطه (۵-۴) نوشت:

$$\begin{cases} D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - J^T F = K_r I \\ L\dot{I} + RI + K_m \dot{q} = V \end{cases} \quad (۵-۴)$$

جهت تبیین روش کنترل بر مبنای گام به عقب نیاز به فرم فضای حالت می‌باشد؛ لذا برای نوشتن فرم فضای حالت سیستم دینامیکی، بردارهای حالت مطابق رابطه‌های (۶-۴) تا (۹-۴) در نظر گرفته می‌شود:

$$\xi = [\xi_1, \xi_2]^T \quad (۶-۴)$$

$$\xi_3 = [I_1, I_2, I_3, I_4, I_5]^T \quad (۷-۴)$$

$$\xi_1 = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5]^T \quad (۸-۴)$$

$$\xi_2 = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4, \dot{q}_5]^T \quad (۹-۴)$$

که ξ_1 ، ξ_2 و ξ_3 به ترتیب بردارهایی متشکل از موقعیت، سرعت و جریان موتور، برای مفاصل ربات می‌باشند. بنابراین، معادلات حرکت (۵-۴) به شکل فضای حالت با توجه به معادلات (۶-۴) تا (۹-۴)

به صورت رابطه (۱۰-۴) بدست می آید:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_2 \\ -D^{-1}C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - D^{-1}G(\xi_1) + D^{-1}J^T F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D^{-1}K_r \end{bmatrix} \xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = -L^{-1}R\xi_3 - L^{-1}k_m\xi_2 + L^{-1}V \end{cases} \quad (10-4)$$

می توان معادلات (۱۰-۴) را به شکل کلی رابطه (۱۱-۴) نوشت:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = f(\xi) + g(\xi)\xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = f_1(\xi, \xi_3) + g_1(\xi, \xi_3)V \end{cases} \quad (11-4)$$

که در معادله (۱۱-۴)، $\xi \in R^{2n}$ ، $\xi_3 \in R^n$ و $V \in R^n$ می باشد.

۴-۳ دینامیک جسم

از آنجا که ربات اسکارای مذکور جسمی را توسط پنجه گرفته و جابه جا می نماید، در طی مانور حرکتی امکان لغزش جسم با توجه به شتاب های 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 نمی کند. در این وضعیت معادلات مسیر جسم را می توان با توجه به شرایط لغزش نوشت [۱۷]. در تحلیل و بررسی این مسئله فرض های ذیل برای سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

۱. اجسامی که توسط ربات گرفته می شوند مکعبی شکل هستند و گرفتن توسط انگشتان به صورت متقارن است.

۲. فک ها همواره طوری جسم را مهار می کنند که مرکز جرم جسم در راستای مرکز هندسی سطح آن ها باشد.

۳. ضریب اصطکاک بین جسم و انگشت ها معلوم و در دو طرف یکسان است.

۴. توزیع نیروی اصطکاک در سطح فک یکنواخت فرض می‌شود.

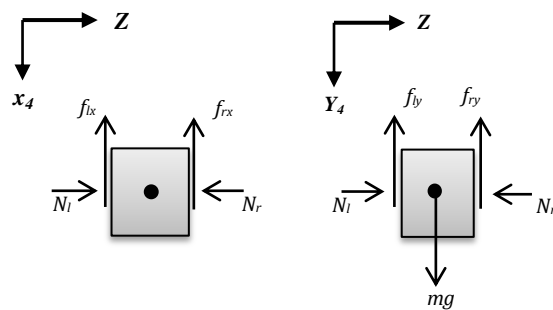
۵. جسم گرفته‌شده صلب است، اما تماس انگشت و جسم به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود. این خاصیت الاستیک می‌تواند مجموعه‌ای از انعطاف‌پذیری موجود در انگشت و یا سطح تماس باشد که نهایتاً به عنوان یک فنر معادل‌سازی شده است.

۶. نیروی اصطکاک و عمودی بین جسم و انگشت توسط حسگرهای لمسی تعبیه‌شده در انگشتان قابل اندازه‌گیری و یا محاسبه است. با توجه به فرضیات فوق، دیاگرام آزاد جسم در دستگاه مختصات پنجه ربات در شکل ۲ ترسیم می‌شود (شایان ذکر است دستگاه مختصات پنجه مطابق با شکل (۲-۲) دستگاه شماره ۴ است). در این شکل نیروهای اعمالی در دو صفحه X_4-Z_4 و Y_4-Z_4 نشان داده شده است.

بردار $f = [f_{rx} + f_{lx} \quad f_{ry} + f_{ly} \quad N_r + N_l]^T$ بردار نیروی اعمالی از طرف پنجه به جسم در مختصات پنجه است. شایان ذکر است N_r و N_l نیروی عمودی اعمالی از طرف انگشتان بر سمت چپ و راست، f_{rx} و f_{lx} نیروهای اصطکاک در نقاط تماس از سمت چپ و راست و در راستای X_4 و f_{ry} و f_{ly} نیروهای اصطکاک 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. به بیانی دیگر، تقارن نیروهای فشاری و یکسان بودن ضریب اصطکاک در دو طرف جسم در صفحه X_4-Z_4 باعث عدم چرخش حول محور Y_4 و در صفحه Y_4-Z_4 باعث عدم چرخش حول محور X_4 می‌شود. دو بازوی ابتدایی ربات اسکارا همواره در

صفحه هم‌راستا با Z_4 حرکت می‌نمایند و حرکت چرخشی مفصل شماره ۴ حول محور Y_4 است. از طرفی، با توجه به فرض گرفتن متقارن توسط پنجه و یکسان بودن ضریب اصطکاک در دو طرف و به شرط اینکه جسم طوری توسط فک‌ها گرفته شود که مرکز جرم دقیقاً در موقعیت وسط فک‌ها قرار داشته باشد، توزیع نیروهای اصطکاکی بین جسم و انگشت در طرفین جسم در صفحه X_4-Y_4 به صورت متقارن و یکنواخت صورت می‌گیرد. بنابراین، نیروهای اصطکاکی، گشتاور یکدیگر را حول محور Z_4 خنثی می‌کنند. لذا گشتاوری حول محور Z_4 بر جسم اعمال نخواهد شد و همچنین مانورهای دیگر ربات حول محور Z_4 گشتاور ایجاد نخواهد کرد؛ بنابراین جسم در این امتداد نمی‌چرخد. از این‌رو لغزش جسم بین انگشتان تنها در امتداد محورهای X_4 و Y_4 خواهد بود.



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

با توجه به مطالب فوق برای سیستم مورد مطالعه، معادلات حرکت جسم را می‌توان به صورت معادله (۱۲-۴) نمایش داد. شایان 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.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{obj} \\ \ddot{y}_{obj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{Lx} - f_{Rx} \\ -f_{Ly} - f_{Ry} + W \end{bmatrix} \quad (12-4)$$

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

۴-۴ مدل سازی دینامیکی لغزش

بررسی حالت‌های مختلف لغزش جسم نیازمند بررسی رفتار دینامیکی آن است. بنابر روابطی که در بخش مدل سازی جسم بیان شد، می توان حالت‌های مختلف لغزش جسم را براساس 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 می شود. برای محاسبه نیروی عمودی به دلیل تقارن ($N = N_l = N_r$) معادله (۴-۱۳) برقرار است.

$$N = k_f (q_s - q_{s_0}) \quad (۴-۱۳)$$

در رابطه فوق (۴-۱۳) k_f سختی معادل برای انعطاف پذیری سیستم مورد مطالعه بوده q_{s_0} موقعیت اولیه انگشت است.

با توجه به اینکه هدف مسئله نگهداری جسم با اعمال حداقل نیروست و جسم در معرض مانورهای مختلف ربات قرار می گیرد، وضعیت‌های مختلف حرکتی بین جسم و انگشتان ایجاد می شود. این وضعیت‌ها شامل رهایی جسم، آستانه لغزش بین جسم و انگشتان، لغزش بین آن‌ها و در نهایت عدم لغزش بین جسم و انگشتان است. لذا وضعیت‌های مختلف تماسی بین جسم و انگشتان را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد.

۴-۴-۱ 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 رابطه (۴-۱۴) بیان می شود.

$$|\hat{V}| = |\hat{x}i + \hat{y}j| > 0 \quad (۴-۱۴)$$

که در این رابطه \hat{V} سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم و $\hat{x} = \dot{x}_{grip} - \dot{x}_{obj}$ و $\hat{y} = \dot{y}_{grip} - \dot{y}_{obj}$ به ترتیب مؤلفه‌های آن در راستای محور X_4 و Y_4 هستند. شایان ذکر است \dot{x}_{grip} و \dot{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 $\mu_l N$ و $\mu_r N$ بدست می‌آید که در این روابط μ_l و μ_r 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 است؛ لذا می‌توان مؤلفه‌های نیروی اصطکاک را با توجه به راستای مؤلفه‌های سرعت نسبی به دست آورد. بنابراین، با توجه به اینکه $\dot{x} = \dot{x}_{grip} - \dot{x}_{obj}$ و $\dot{y} = \dot{y}_{grip} - \dot{y}_{obj}$ معرف سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم در راستاهای X_4 و Y_4 هستند، می‌توان مؤلفه‌های نیروی اصطکاکی را با معادلات (۴-۱۵) نمایش داد.

$$\begin{aligned}
 f_{lx} &= \frac{-\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \times |\mu_l N| \\
 f_{ly} &= \frac{-\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \times |\mu_l N| \\
 f_{rx} &= \frac{-\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \times |\mu_r N| \\
 f_{ry} &= \frac{-\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \times |\mu_r N|
 \end{aligned} \tag{۴-۱۵}$$

۴-۴-۲ 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، مطابق رابطه (۴-۱۶)، بر رفتار سیستم حاکم خواهد بود.

$$\begin{aligned}
 x_{obj} &= x_{grip} \\
 y_{obj} &= y_{grip}
 \end{aligned} \tag{۴-۱۶}$$

در رابطه (۴-۱۶)، x_{obj} و x_{grip} تصویر موقعیت جسم و پنجه در راستای X_4 و y_{obj} و y_{grip} تصویر موقعیت جسم و پنجه ربات در راستای Y_4 است. لذا، با توجه به برقراری قیود فوق، می‌توان شتاب جسم را به‌دست آورده و با لحاظ فرض تقارن در سیستم، معادلات حرکت جسم را برای به‌دست آوردن نیروهای اصطکاکی به‌کار برد.

۴-۳-۴ آستانه لغزش

اگر شرط $|\hat{V}| = |\dot{x}i + \dot{y}j| = 0$ و $|\hat{a}| = |\ddot{x}i + \ddot{y}j| \neq 0$ 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 به‌دست می‌آید. با توجه به اینکه اندازه برآیند نیروی اصطکاکی در هر سطح $\mu_r N$ و $\mu_l N$ است، می‌توان نیروهای اصطکاک f_{lx} ، f_{ly} و f_{rx} و f_{ry} را با توجه به راستای شتاب نسبی به‌صورت رابطه (۴-۱۷) تعریف کرد:

$$\begin{aligned} f_{lx} &= \frac{\ddot{x}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{ly} &= \frac{\ddot{y}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{rx} &= \frac{\ddot{x}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_r N| \\ f_{ry} &= \frac{\ddot{y}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_r N| \end{aligned} \quad (۴-۱۷)$$

توضیح این نکته لازم است که فاز آستانه لغزش، مرز بین لغزش و عدم لغزش است؛ از اینرو می‌توان آن 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.

۴-۵ کنترل برای مهار لغزش

در این بخش روش کنترلی گام به عقب تطبیقی برای اهداف ردیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محقق شدن این امر، با توجه به روشی که در ادامه بیان شده است، مسیر مطلوب برای انگشت با توجه شرایط مطلوب برای گرفتن ایمن جسم به‌دست آمده است.

۴-۵-۱ قانون کنترلی به روش گام به عقب برای ردیابی مسیر ربات

برای اطمینان از پایداری مجانبی سیستم در روش گام به عقب، نیاز به در نظر گرفتن یک خروجی، تثبیت یک تابع ذخیره‌ساز و به‌دست آوردن تابع پایدارساز معتبر برای هر مرحله می‌باشد. در سیستم مورد مطالعه و در بخش به‌دست آوردن تابع پایدارساز معتبر، فقط یک مرحله وجود دارد که در آن، هدف پیدا کردن قانون کنترل ولتاژ V برای ایجاد پایداری سیستم حلقه بسته با توجه به معادله (۳-۵) می‌باشد. با در نظر گرفتن خروجی به‌صورت معادله (۴-۱۸):

$$y = \beta(\xi_3 - \xi_{3d}) - \alpha_0(\xi) \quad (4-18)$$

و در نظر گرفتن تابع مثبت معین به‌صورت معادله (۴-۱۹) به‌عنوان تابع لیاپانوف:

$$V(\xi, \xi_3) = W(\xi) + \frac{1}{2} yy^T \quad (4-19)$$

تابع ذخیره‌سازی به‌صورت معادله (۴-۲۰) در نظر گرفته می‌شود:

$$W(\xi) = \frac{1}{2}(\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_1 - \xi_{1d}) \quad (4-20)$$

تابع پایدارساز نیز برابر رابطه (۴-۲۱) در نظر گرفته می‌شود:

$$\alpha_0(\xi) = \beta(\xi_3 - \xi_{3d}) - (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (4-21)$$

که در رابطه (۴-۲۱) $\beta = I_{n \times n}$

انتخاب می‌شود. برای بررسی پایداری سیستم و یافتن کنترلر مناسب نیاز به بررسی مشتق تابع لیاپانوف می‌باشد؛ لذا با استفاده از معادله (۴-۱۹) مشتق تابع لیاپانوف توسط رابطه (۴-۲۲) بدست می‌آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = \dot{W} + y^T \dot{y} \quad (۴-۲۲)$$

که در رابطه (۴-۲۲) \dot{W} و \dot{y} توسط روابط (۴-۲۳) و (۴-۲۴) تعریف شده‌است:

$$\dot{W} = (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (۴-۲۳)$$

$$\dot{y} = \beta (\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_{3d}) - \frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi} \dot{\xi} \quad (۴-۲۴)$$

با جایگذاری رابطه (۴-۲۳) و (۴-۲۴) در معادله (۴-۲۲) رابطه (۴-۲۵) بدست می‌آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) + y^T \left(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_{3d} - \frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi} \dot{\xi} \right) \quad (۴-۲۵)$$

با توجه به رابطه (۴-۲۱)، رابطه (۴-۲۶) برای محاسبه $\frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi}$ بدست می‌آید:

$$\frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi} = \frac{\delta}{\delta \xi} ((\xi_3 - \xi_{3d}) - (\xi_2 - \xi_{2d})) = \{ [0]_{1 \times n}, [-1]_{1 \times n} \} \quad (۴-۲۶)$$

با جایگذاری $\dot{\xi}_3$ از (۴-۱۰) و $\frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi}$ از (۴-۲۶) در رابطه (۴-۲۵)، رابطه (۴-۲۷) برای مشتق

تابع لیاپانوف، بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\xi, \xi_3) = & (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) + \\ & y^T (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d} + \\ & D^{-1}(\xi)(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1) + J^T F)) \end{aligned} \quad (۴-۲۷)$$

برای اینکه سیستم پایدار باشد، باید مشتق تابع لیاپانوف در رابطه (۴-۲۷)، منفی باشد؛ لذا اگر رابطه

(۴-۲۸) برقرار باشد، پایداری مجانبی سیستم برقرار می‌شود:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) \leq -y^T \cdot y \quad (28-4)$$

با توجه به رابطه‌های (27-4) و (28-4)، می‌توان رابطه (29-4) را استنتاج نمود:

$$\begin{aligned} & -y^T \cdot y - (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) \geq \\ & y^T (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d}) + \\ & D^{-1}(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1) + J^T F) \end{aligned} \quad (29-4)$$

از طرفی با توجه به رابطه‌های (18-4) و (21-4)، رابطه (30-4) بدست می‌آید:

$$y = (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (30-4)$$

با جایگذاری رابطه (30-4) در (29-4)، رابطه (31-4) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} & -y^T (y + (\xi_1 - \xi_{1d})) \geq \\ & y^T (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d}) + \\ & D^{-1}(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1) + J^T F) \end{aligned} \quad (31-4)$$

معادله (31-4) را می‌توان به شکل رابطه (32-4) بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} & -((\xi_2 - \xi_{2d}) + (\xi_1 - \xi_{1d})) \geq \\ & (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d}) + \\ & D^{-1}(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1) + J^T F) \end{aligned} \quad (32-4)$$

و با توجه به روابط (4-4، 10-11)، رابطه (33-4) را داریم،

$$g_1(\xi, \xi_3) = L \neq 0 \quad (33-4)$$

زمانی که g_1 به ازای تمام مقادیر ξ_1 ، ξ_2 و ξ_3 غیر تکین باشد، قانون کنترل با توجه به رابطه (4-4)

(32) برای معادله (4-10) به صورت رابطه (4-34) پیشنهاد می‌گردد:

$$\begin{aligned} V = & L(L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + \dot{\xi}_{3d} - (\xi_2 - \xi_{2d}) - (\xi_1 - \xi_{1d})) + \\ & D^{-1}(-K_r \xi_3 + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 + G(\xi_1) - J^T F) \end{aligned} \quad (34-4)$$

با انتخاب کنترل کننده مطابق رابطه (۴-۳۴)، پایداری سیستم حلقه بسته با روش بازگشتی گام به عقب تضمین می شود.

با فرض اینکه تمام پارامترها شناخته شده باشد و همچنین با داشتن موقعیت، سرعت و شتاب‌های مطلوب و همچنین جریان مطلوب (I_d) می توان معادله (۴-۵) را به صورت رابطه (۴-۳۵) بازنویسی نمود:

$$\begin{cases} D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - J^T F = K_r I_d + K_r \tilde{I} \\ L\dot{I} + RI + K_m \dot{q} = V \end{cases} \quad (۴-۳۵)$$

که در معادله (۴-۳۵)، \tilde{I} خطای جریان و I_d جریان مطلوب می باشد. در این حالت، رابطه اول از معادله (۴-۳۵) می تواند به عنوان یک زیر سیستم دیده شود که دارای جمله اختلال $K_r \tilde{I}$ بوده و با جمله $K_r I_d$ کنترل می شود. بنابراین، با تبدیل مختصات به متغیرهای فضای حالت با توجه به رابطه (۴-۳۵) می توان رابطه (۴-۳۶) را برای جریان مطلوب نوشت:

$$\xi_{3d} = K_r^{-1} [\hat{D}(\xi) \xi_2^* + \hat{C}(q, \dot{q}) \xi_2^* + \hat{G}(\xi) - J^T F - K_d \varepsilon] \quad (۴-۳۶)$$

که در رابطه فوق ξ_2^* و ε به صورت رابطه (۴-۳۷) و (۴-۳۸) تعریف می شوند:

$$\xi_2^* = \xi_{2d} - \lambda (\xi_1 - \xi_{1d}) \quad (۴-۳۷)$$

$$\varepsilon = \xi_2 - \xi_{2d} + \lambda (\xi_1 - \xi_{1d}) = \xi_2 - \xi_2^* \quad (۴-۳۸)$$

در روابط فوق، ε متغیر کمکی بر مبنای خطا و λ یک ماتریس $n \times n$ مثبت معین است. بردار خطای حالت‌های سیستم به صورت رابطه (۴-۳۹) تعریف می شود:

$$\tilde{\xi}_2 = \xi_2 - \xi_{2d}, \tilde{\xi}_1 = \xi_1 - \xi_{1d}, \tilde{\xi}_3 = \xi_3 - \xi_{3d} \quad (39-4)$$

۴-۵-۲ قانون گام به عقب تطبیقی برای ردیابی مسیر

با توجه به وجود نامعینی‌های پارامتری مثل جرم و اینرسی در ربات‌ها، تخمین این پارامترها به منظور کنترل سیستم امری ضروری می‌باشد. برای به دست آوردن این تخمین، نیاز است که معادله دینامیکی ربات در رابطه (۱) به فرم پارامتری مطابق با رابطه (۴۰-۴) نوشته شود، که جزئیات آن در بخش ۴-۵-۱-۲ توضیح داده شده است.

$$D(\xi_1)\ddot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\dot{\xi}_2^* + G(\xi_1) - J^T F = Y(\xi_1, \xi_2, \dot{\xi}_2^*, \ddot{\xi}_2^*)p \quad (40-4)$$

در رابطه فوق p بردار پارامترها و Y ماتریس وزن نامیده می‌شود.

۴-۵-۲-۱ تخمین پارامترها

با توجه به مدل دینامیکی (۴-۱)، تخمین پارامترها با روش تطبیقی و بر پایه‌ی استراتژی محاسبه جریان مطلوب بدست می‌آید، بنابراین جریان مطلوب را براساس پارامترهای نامعلوم سیستم می‌توان به شکل رابطه (۴۱-۴) نوشت:

$$\xi_{3d} = K_r^{-1}\hat{Y}p - K_d\varepsilon \quad (41-4)$$

که در رابطه (۴۱-۴)، $\hat{Y}p$ فرم پارامتری دینامیک سیستم بوده و با توجه به رابطه (۴۲-۴) بدست می‌آید،

$$\hat{Y}p = D(\xi_1)\ddot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\dot{\xi}_2^* + G(\xi_1) - J^T F \quad (42-4)$$

که در رابطه (۴۲-۴)، p بردار پارامترهای سیستم مورد مطالعه بصورت $p = [p_1, p_2, \dots, p_{20}]$ بوده و در ادامه تعریف خواهد شد. برای بدست آوردن قانون تطبیق، تابع لیاپانوفی با توجه به رابطه (۴۳-۴) پیشنهاد می‌شود:

$$V = \frac{1}{2}(\varepsilon^T D(\xi_1)\varepsilon + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \tilde{p}) \quad (43-4)$$

که در رابطه (3-37)، $\Gamma = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{10}]$ بردار مثبت معین، و \tilde{p} برداری 10×1 از خطای تخمین پارامترهای p_i ، مطابق رابطه (4-44) می‌باشد.

$$\tilde{p} = p - \hat{p} \quad (44-4)$$

با توجه به رابطه (4-43) و مثبت معین بودن Γ و D ، تابع لیاپانوف V مثبت معین خواهد بود. مشتق تابع لیاپانوف فوق نسبت به زمان، به صورت رابطه (4-45) بدست می‌آید.

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1)\dot{\varepsilon} + \frac{1}{2}\dot{D}(\xi_1)\varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (45-4)$$

با توجه روابط حاکم در دینامیک ربات جمله $\dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q})$ پادمتقارن می‌باشد؛ لذا عبارت $\varepsilon^T (\dot{D} - 2C)\varepsilon$ برابر صفر بوده و در نتیجه رابطه (4-46) را می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2}\varepsilon^T \dot{D}(\xi)\varepsilon = \varepsilon^T C(\xi_1, \xi_2)\varepsilon \quad (46-4)$$

با جایگذاری رابطه (4-46) در (4-45)، معادله (4-47) حاصل می‌شود:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1)\dot{\varepsilon} + C(\xi_1, \xi_2)\varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (47-4)$$

با جایگذاری ε از رابطه (4-38) و مشتق آن در (4-47)، رابطه (4-48) بدست می‌آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1)\dot{\xi}_2 - D(\xi_1)\dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (48-4)$$

با توجه به رابطه اول معادله (4-35)، می‌توان معادله (4-49) را نوشت:

$$D(\xi_1)\dot{\xi}_2 + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 + G(\xi_1) - J^T F = K_r \xi_{3d} \quad (49-4)$$

با استخراج $D(\xi_1)\dot{\xi}_2$ از معادله (4-49) و جایگذاری آن در رابطه (4-48)، رابطه (4-50) بدست می‌آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (K_r \xi_{3d} - C(\xi_1, \xi_2) \xi_2 - G(\xi_1) - D(\xi_1) \dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2) \xi_2 + J^T F - C(\xi_1, \xi_2) \xi_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (50-4)$$

با ساده‌سازی رابطه (50-4)، رابطه (51-4) حاصل می‌شود:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (K_r \xi_{3d} - G(\xi_1) - D(\xi_1) \dot{\xi}_2^* - C(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* + J^T F) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (51-4)$$

با جایگذاری ξ_{3d} از رابطه (30-3) در (45-3) و مرتب‌سازی رابطه (46-3) بدست می‌آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (\tilde{D}(\xi_1) \dot{\xi}_2^* + \tilde{C}(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* + \tilde{G}(\xi_1) - J^T \tilde{F} - K_d \varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (52-4)$$

که در رابطه (51-4) داریم:

$$\tilde{D} = \hat{D} - D \quad \tilde{C} = \hat{C} - C \quad \tilde{G} = \hat{G} - G \quad \tilde{F} = \hat{F} - F$$

رابطه (50-4) را در فرم خطای پارامتری می‌توان به صورت رابطه (53-4) بازنویسی نمود:

$$\tilde{D}(\xi_1) \dot{\xi}_2^* + \tilde{C}(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* + \tilde{G}(\xi_1) - J^T \tilde{F} = Y(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \dot{\xi}_2^*) \tilde{p} \quad (53-4)$$

با در نظر گرفتن رابطه (53-4) می‌توان (52-4) را به صورت رابطه (54-4) نوشت:

$$\dot{V} = \varepsilon^T [Y - K_d \varepsilon] + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} = -\varepsilon^T K_d \varepsilon + \tilde{p}^T [Y^T \varepsilon + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}] \quad (54-4)$$

برای آنکه \dot{V} در رابطه (54-4) منفی معین باشد، باید رابطه (55-4) برقرار باشد:

$$\tilde{p}^T [Y^T \varepsilon + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}] = 0 \quad (55-4)$$

لذا با توجه به رابطه (55-4) معادله (54-4) به صورت (56-4) تبدیل می‌شود.

$$\dot{V} = -\varepsilon^T K_d \varepsilon \leq 0 \quad (56-4)$$

رابطه تابع لیاپانوف (43-4) و مشتق آن (56-4) نشان می‌دهند که سیستم پایدار می‌باشد. لذا قانون

تطبیق با استفاده از رابطه (55-4)، به صورت رابطه (57-4) بدست می‌آید:

$$\dot{\tilde{p}} = -\Gamma \hat{Y}^T \varepsilon \quad (57-4)$$

۴-۵-۲-۲ استخراج ماتریس وزن \hat{Y}

مدل دینامیکی سیستم (۴-۱) را به فرم پارامتری می‌توان به شکل رابطه (۴-۵۸) نوشت:

$$K_d I_d = D(\xi) \dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* + G(\xi_1) - J^T F = \hat{Y}(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \dot{\xi}_2^*) p \quad (۴-۵۸)$$

که در (۴-۵۸)، $Y \in R^{n \times r}$ ماتریسی از توابع شناخته شده بر حسب مختصات تعمیم یافته و مشتقات مراتب بالاتر آن‌ها و $p \in R^r$ بردار r بعدی از پارامترهای نامعلوم ربات می‌باشد؛ لذا در سیستم مورد مطالعه p_1 تا p_{20} توابعی از جرم (m_i)، اینرسی (I_i)، طول لینک‌ها (a_i) و جرم جسم گرفته شده (m_{obj}) می‌باشند که در جدول (۴-۱) ارائه شده‌است. مدل دینامیکی ربات اسکارا را به شکل ماتریسی، می‌توان به صورت رابطه (۴-۵۹) بیان نمود:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & D_{14} & D_{15} \\ D_{21} & D_{22} & 0 & D_{24} & D_{25} \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & 0 & 0 \\ D_{51} & D_{52} & 0 & 0 & D_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{d}_3 \\ \ddot{q}_4 \\ \ddot{q}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & 0 & C_{24} & C_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{41} & C_{42} & 0 & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & 0 & C_{54} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_{31} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{21} \\ K_{31} \\ K_{41} \\ K_{51} \end{bmatrix} \quad (۴-۵۹)$$

در نتیجه برای نوشتن دینامیک ربات اسکارا به فرم رابطه (۴-۵۸) و به منظور تخمین پارامترها، دینامیک ربات بر حسب پارامترهای نامعلوم به صورت زیر بازنویسی شده‌است. با تعریف بردار پارامترهای p مطابق جدول (۴-۱) می‌توان معادلات دینامیکی ربات را به فرم پارامتری نوشت؛ لذا دینامیک ربات بر حسب پارامترهای تعریف شده بدست آمده و در ادامه درایه‌های ماتریس‌های معادله (۴-۵۹) ارائه می‌شود. با توجه به معادله (۴-۵۹) درایه‌های ماتریس D که یک ماتریس 5×5 است به-

صورت زیر بر حسب پارامترهای تعریف شده در جدول (۴-۱) به دست می آید.

$$\begin{aligned}
 D_{11} &= p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 + 2p_{10} c_2 + p_{11} c_2 + p_{14} s_4 + \\
 & 2p_{12} q_5 s_4 - p_{15} s_{2-4} + 2p_{13} q_5 s_{2-4} \\
 D_{12} &= p_2 + p_4 + p_6 + p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 + p_{11} c_2 / 2 + p_{10} c_2 + p_{14} s_4 - 2p_{12} q_5 s_4 - p_{15} s_{2-4} / 2 + p_{13} q_5 s_{2-4} \\
 D_{13} &= 0 \\
 D_{14} &= p_8 q_5 - p_9 - p_7 q_5^2 - p_{14} s_4 / 2 + p_{12} q_5 s_4 - p_{13} q_5 s_{2-4} + p_{15} s_{2-4} / 2 - p_{16} \\
 D_{15} &= -p_{12} c_4 - p_{13} c_{2-4} \\
 D_{21} &= p_2 + p_4 + p_6 + p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 + p_{10} c_2 + p_{11} c_2 / 2 + p_{14} s_4 - \\
 & 2p_{12} q_5 s_4 - p_{15} s_{2-4} + p_{13} q_5 s_{2-4} \\
 D_{22} &= p_2 + p_4 + p_6 + p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 + p_{14} s_4 - 2p_{12} q_5 s_4 \\
 D_{23} &= 0 \\
 D_{24} &= -p_9 - p_7 q_5^2 + p_8 q_5 - p_{14} s_4 / 2 + p_{12} q_5 s_4 - p_{16} \\
 D_{25} &= -p_{12} c_4 \\
 D_{31} &= D_{32} = 0 \\
 D_{33} &= p_{17} \\
 D_{34} &= D_{35} = 0 \\
 D_{41} &= -p_7 q_5^2 + p_9 + p_8 q_5 - p_{14} s_4 / 2 + p_{12} q_5 s_4 + p_{15} s_{2-4} - p_{13} q_5 s_{2-4} - p_{16} \\
 D_{42} &= -p_9 - p_7 q_5^2 + p_8 q_5 - p_{14} s_4 / 2 + p_{12} q_5 s_4 - p_{16} \\
 D_{43} &= p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 + p_{16} \\
 D_{44} &= D_{45} = 0 \\
 D_{51} &= -p_{12} c_4 - p_{13} c_{2-4} \\
 D_{52} &= -p_{12} c_4 \\
 D_{53} &= D_{54} = 0 \\
 D_{55} &= p_7
 \end{aligned}$$

هچنین با توجه به معادله (۴-۵۹) درایه های ماتریس G که یک ماتریس ۱×۵ است به صورت زیر بر

حسب پارامترهای تعریف شده در جدول (۴-۱) به دست می آید:

$$G_{11} = G_{21} = 0 \qquad G_{31} = -g \times p_{17} \qquad G_{41} = G_{51} = 0$$

به همین ترتیب، با توجه به معادله (۴-۵۹) درایه های ماتریس C که یک ماتریس ۵×۵ است به صورت

زیر بر حسب پارامترهای تعریف شده در جدول (۴-۱) به دست می آید:

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= 0.25p_7q_5q_{d5} + 0.5p_{13}q_{d5}s_{2-4} - 0.5p_{12}q_{d5}s_4 + 0.5p_{13}q_5q_{d2}c_{2-4} - 0.5p_{13}q_5q_{d4}c_{2-4} - 0.5p_{11}q_{d2}s_2 - \\
 & p_{10}q_{d2}s_2 - 0.5p_{12}q_5q_{d4}c_4 \\
 C_{12} &= 0.25p_7q_5q_{d5} + 0.75p_{13}q_{d5}s_{2-4} - 0.5p_{12}q_{d5}s_4 + 0.5p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} + 0.5p_{13}q_5q_{d2}c_{2-4} - 0.5p_{13}q_5q_{d4}c_{2-4} - \\
 & 0.5p_{11}q_{d1}s_2 - 0.5p_{11}q_{d2}s_2 - p_{10}q_{d1}s_2 - p_{10}q_{d2}s_2 - 0.5p_{12}q_5q_{d4}c_4 \\
 C_{13} &= 0 \\
 C_{14} &= -0.25(p_7q_5q_{d5} + 3p_{13}q_{d5}s_{2-4} - 3p_{12}q_{d5}s_4 + 2p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} + 2p_{13}q_5q_{d2}c_{2-4} - 2p_{13}q_5q_{d4}c_{2-4} + \\
 & 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 + 2p_{12}q_5q_{d2}c_4 - 2p_{12}q_5q_{d4}c_4) \\
 C_{15} &= 0.25(p_7q_5q_{d1} + p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d4} + 2p_{13}q_{d1}s_{2-4} + 3p_{13}q_{d2}s_{2-4} - 3p_{13}q_{d4}s_{2-4} - 2p_{12}q_{d1}s_4 - \\
 & 2p_{12}q_{d2}s_4 + 3p_{12}q_{d4}s_4) \\
 C_{21} &= 0.25p_7q_5q_{d5} - 0.25p_{13}q_{d5}s_{2-4} - 0.5p_{12}q_{d5}s_4 - 0.5p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} + 0.5p_{11}q_{d1}s_2 + p_{10}q_{d1}s_2 - 0.5p_{12}q_5q_{d4}c_4 \\
 C_{22} &= -0.25(-p_7q_5q_{d5} + 2p_{12}q_{d5}s_4 + 2p_{12}q_5q_{d4}c_4) \\
 C_{23} &= 0 \\
 C_{24} &= -0.25(p_7q_{d5} - 3p_{12}q_{d5}s_4 + 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 + 2p_{12}q_5q_{d2}c_4 - 2p_{12}q_5q_{d4}c_4) \\
 C_{25} &= 0.25(-p_7q_5q_{d1} - p_7q_5q_{d2} + p_7q_5q_{d4} + p_{13}q_{d1}s_{2-4} + 2p_{12}q_{d1}s_4 + 2p_{12}q_{d2}s_4 - 3p_{12}q_{d4}s_4) \\
 C_{31} &= C_{32} = C_{33} = C_{34} = C_{35} = 0 \\
 C_{41} &= 0.25(-p_7q_5q_{d5} + p_{13}q_{d5}s_{2-4} - p_{12}q_{d5}s_4 + 2p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} + 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 + 2p_{12}q_5q_{d2}c_4) \\
 C_{42} &= -0.25(p_7q_5q_{d5} + p_{12}q_{d5}s_4 - 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 - 2p_{12}q_5q_{d2}c_4) \\
 C_{43} &= 0 \\
 C_{44} &= 0.25p_7q_5q_{d5} \\
 C_{45} &= -0.25(p_7q_5q_{d1} + p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d4} - p_{13}q_{d1}s_{2-4} + p_{12}q_{d1}s_4 + 2p_{12}q_{d2}s_4) \\
 C_{51} &= 0.25(-p_7q_5q_{d1} - p_7q_5q_{d2} + p_7q_5q_{d4} - 2p_{13}q_{d1}s_{2-4} + p_{13}q_{d2}s_{2-4} - p_{13}q_{d4}s_{2-4} + 2p_{12}q_{d1}s_4 + \\
 & 2p_{12}q_{d2}s_4 + p_{12}q_{d4}s_4) \\
 C_{52} &= 0.25(-p_7q_5q_{d1} - p_7q_5q_{d2} + p_7q_5q_{d4} + p_{13}q_{d1}s_{2-4} + 2p_{12}q_{d1}s_4 + 2p_{12}q_{d2}s_4 + p_{12}q_{d4}s_4) \\
 C_{53} &= 0 \\
 C_{54} &= 0.25(+p_7q_5q_{d1} + p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d4} - p_{13}q_{d1}s_{2-4} + p_{12}q_{d1}s_4 + p_{12}q_{d2}s_4) \\
 C_{55} &= 0
 \end{aligned}$$

همچنین با توجه به معادله (۴-۵۹) درایه های ماتریس K که یک ماتریس 1×5 است به صورت زیر بر-

حسب پارامترهای تعریف شده در جدول (۴-۱) به دست می آید:

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= p_{18}((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi))s_1 - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi))c_1) + p_{19}((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi)) \\
 & (-q_5(c_4(s_1s_2 - c_1c_2) - s_4(c_1s_2 + c_2s_1))) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi))(q_5c_4(c_1s_2 + c_2s_1) + s_4(s_1s_2 - c_1c_2))) + \\
 & p_{20}((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi))(-c_1s_2 - c_2s_1) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi))(-s_1s_2 + c_1c_2)) \\
 K_{21} &= p_{19}((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi))(-q_5(c_4(s_1s_2 - c_1c_2) - s_4(c_1s_2 + c_2s_1))) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi)) \\
 & (q_5c_4(c_1s_2 + c_2s_1) + s_4(s_1s_2 - c_1c_2))) + p_{20}((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi))(-c_1s_2 - c_2s_1) - \\
 & (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi))(-s_1s_2 + c_1c_2))
 \end{aligned}$$

$$K_{31} = p_{19}(F_y)$$

$$K_{41} = p_{19}((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi))(-q_5(c_4(s_1s_2 - c_1c_2) - s_4(c_1s_2 + c_2s_1))) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi))(q_5 c_4(c_1s_2 + c_2s_1) + s_4(s_1s_2 - c_1c_2)))$$

$$K_{51} = p_{19}((-F_x \cos(\phi) + F_z \sin(\phi))(c_4(c_1s_2 + c_2s_1) + s_4(s_1s_2 - c_1c_2))) - (F_x \sin(\phi) + F_z \cos(\phi))(c_4(s_1s_2 - c_1c_2) - s_4(c_1s_2 + c_2s_1)))$$

که F_x ، F_y و F_z به ترتیب منتجه نیروهای وارده به جسم در جهات X_4 ، Y_4 و Z_4 می باشد که ناشی از وزن جسم و شتاب وارد شده به جسم در حین مانور ربات بوده، q_{d_i} مسیر در نظر گرفته شده برای مفاصل و $\varphi = q_{d_1} + q_{d_2} - q_{d_4}$ می باشد.

لازم به ذکر است که با توجه به رابطه (۴-۵۸)، روابط زیر و پارامترهای p که در جدول (۴-۱) آورده شده، ماتریس وزن Y استخراج می شود.

جدول ۴-۱ پارامترهای ربات

پارامترهای ۱ تا ۱۰	پارامترهای ۱۰ تا ۲۰
$p_1 = I_1$	$p_{11} = a_1 a_2 m_2$
$p_2 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5$	$p_{12} = a_2 m_5$
$p_3 = a_1^2 m_1$	$p_{13} = a_1 m_5$
$p_4 = a_2^2 m_2$	$p_{14} = a_2 d_5 m_5$
$p_5 = a_1^2 (m_2 + m_3 + m_4 + m_5)$	$p_{15} = a_1 d_5 m_5$
$p_6 = a_2^2 (m_3 + m_4 + m_5)$	$p_{16} = I_4 + I_5$
$p_7 = m_5$	$p_{17} = m_3 + m_4 + m_5$
$p_8 = m_5 d_5$	$p_{18} = a_1 m_{obj}$
$p_9 = m_5 d_5^2$	$p_{19} = m_{obj}$
$p_{10} = a_1 a_2 (m_3 + m_4 + m_5)$	$p_{20} = a_2 m_{obj}$

۴-۶ تعیین مسیر مطلوب برای حرکت انگشتان

مقدار مطلوب موقعیت انگشت جهت گرفتن ایمن جسم با توجه به شتاب اعمالی به جسم در اثر حرکت بازوها و وزن جسم محاسبه می شود. 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 (مطابق با رابطه (۴-۶۰)).

$$\begin{aligned} a_{obj-x}^d &= a_{grip-x} \\ a_{obj-y}^d &= a_{grip-y} \\ a_{obj-z}^d &= a_{grip-z} \end{aligned} \quad (۴-۶۰)$$

حال به منظور کنترل لغزش و جلوگیری از رخداد آن، می‌بایست نیروی اعمالی به جسم، جبران‌کننده مجموع نیروی وزن جسم و نیروی اینرسی حاصل از شتاب بازوها شود؛ که این نیروها با جایگذاری رابطه (۴-۶۰) در معادله دینامیکی جسم، یعنی معادله (۴-۱۲)، به صورت روابط (۴-۶۱) و (۴-۶۲) حاصل می‌شود.

$$f_{d-x} = m_{obj} a_{obj-x}^d + \varepsilon \quad (۴-۶۱)$$

$$f_{d-y} = m_{obj} g + m_{obj} a_{obj-y}^d + \varepsilon \quad (۴-۶۲)$$

که در روابط (۴-۶۱) و (۴-۶۲)، f_{d-x} و f_{d-y} به ترتیب نیروهای لازم برای کنترل لغزش در راستای X_4 و Y_4 هستند. 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 رابطه (۴-۶۳) است.

$$f_d = \sqrt{f_{d-x}^2 + f_{d-y}^2} \quad (۴-۶۳)$$

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 (۴-۶۴) به دست می‌آید.

$$N_d = \frac{f_d}{\mu} \quad (۴-۶۴)$$

همچنین، با توجه به رابطه (۴-۱۳) مقدار نیروی عمودی مطلوب انگشت به شکل رابطه (۴-۶۵) به-

دست می‌آید. حال می‌توان با استفاده از این رابطه و جایگذاری نیروی مطلوب، موقعیت مطلوب انگشت را مطابق با رابطه (۴-۶۶) محاسبه نمود.

$$N_d = k_f (q_5^d - q_{s_0}) \quad (۴-۶۵)$$

$$q_5^d = \frac{N_d}{k_f} + q_{s_0} \quad (۴-۶۶)$$

۷-۴ شبیه‌سازی

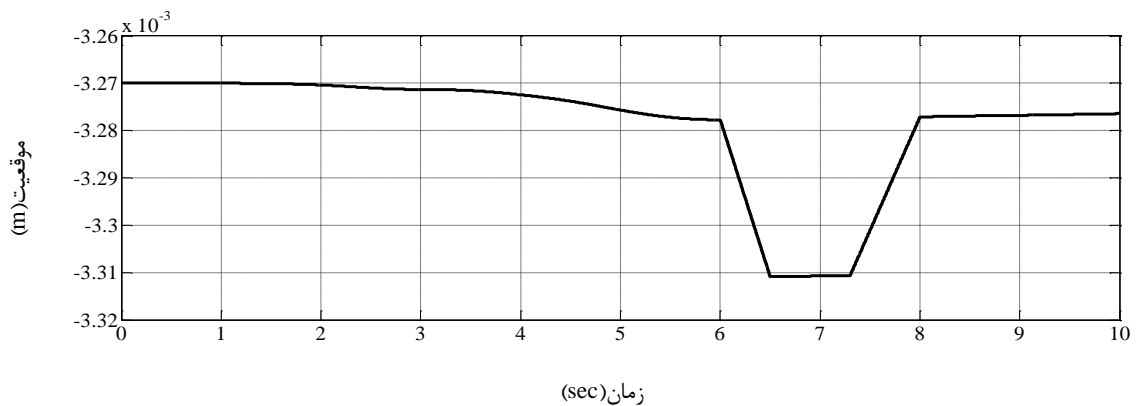
در این بخش با تعیین ضریب بهره‌های کنترل‌کننده نتایج شبیه‌سازی برای کنترل لغزش جسم گرفته شده توسط پنجه که توسط ربات اسکارا حرکت داده می‌شود ارائه می‌گردد.

۱-۷-۴ نتایج شبیه‌سازی

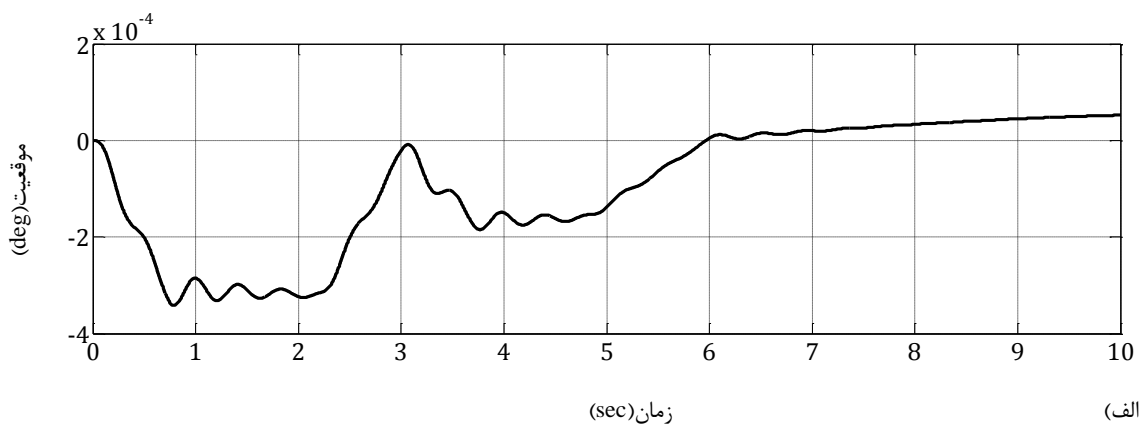
در این بخش، برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی مانوری مطابق با بخش ۳-۵-۱ برای ربات در نظر گرفته می‌شود که شرایط ایجاد لغزش را برای جسم گرفته‌شده فراهم نماید تا از این طریق قابلیت کنترل‌کننده بررسی شود. در این شبیه‌سازی، یک ربات اسکارای ۴ درجه آزادی به همراه یک درجه آزادی در پنجه با مفصل کشویی به کار برده شده است. ربات اسکارای مورد مطالعه شامل پنجه فک موازی با قابلیت حرکت انگشتان در طی مانور ربات، دارای مشخصات نشان داده شده در جدول ۴-۲ است. همچنین، جسم گرفته شده، تماماً از ویژگی‌هایی که در بخش ۴-۳ عنوان شد پیروی می‌نماید.

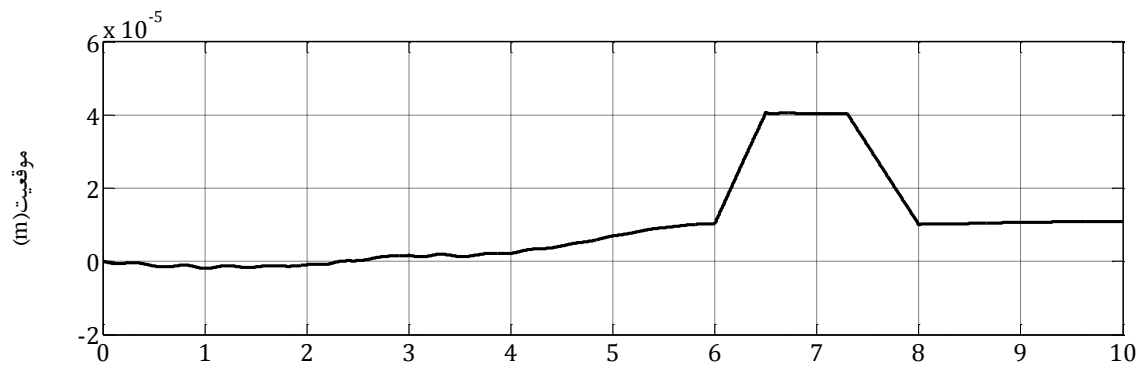
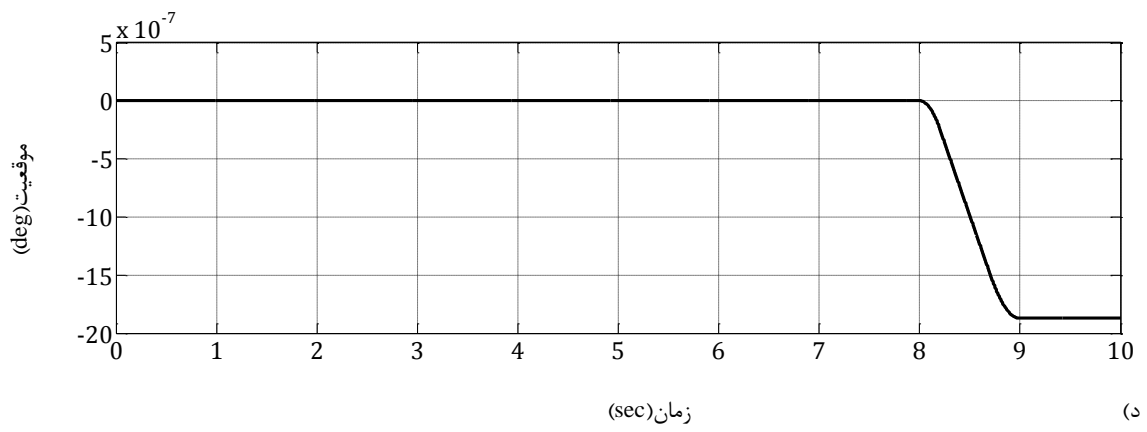
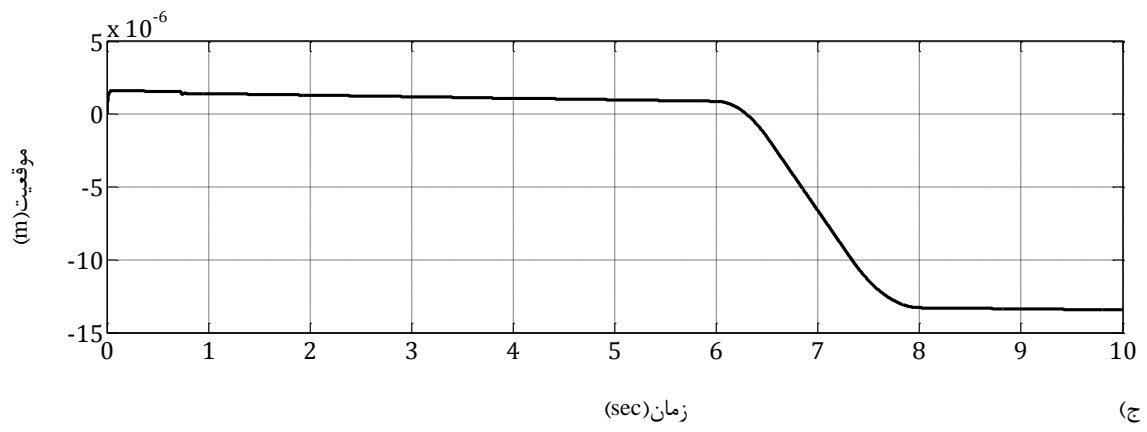
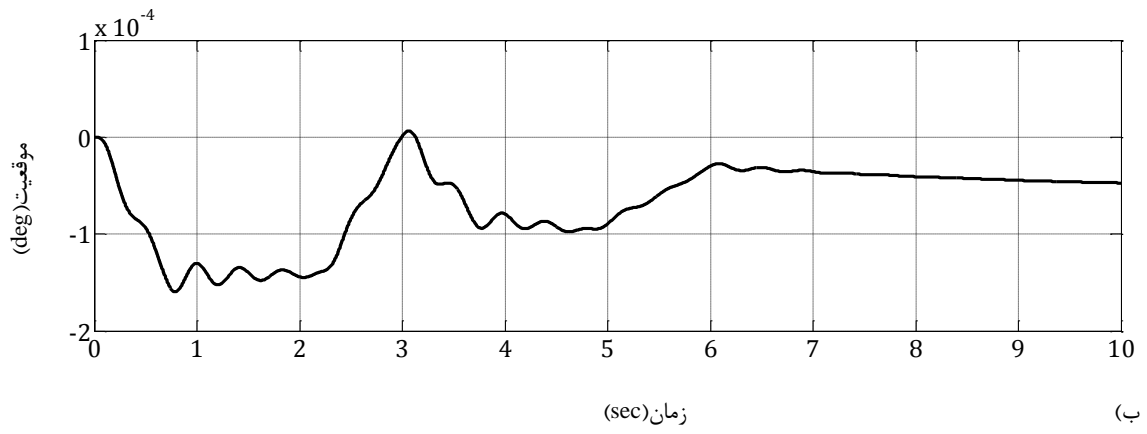
با توجه به اهداف شبیه‌سازی در کنترل و مهار لغزش، مسیر مطلوب برای مفاصل ۱ تا ۴ ربات مطابق با شکل ۳-۲ از بخش ۳-۵-۱ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، موقعیت مطلوب انگشت برای گرفتن ایمن جسم با توجه به مانورهای حرکتی تعریف شده مطابق شکل ۴-۲ بدست می‌آید. بهره‌های کنترل‌کننده یعنی λ و K_d ماتریس‌هایی قطری با درایه‌های قطر اصلی ۱۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. پس از اعمال کنترل‌کننده پیشنهادی برای گرفتن جسم و مهار لغزش آن، مقدار خطای ردیابی مسیر

برای مفاصل ۱ تا ۵ محاسبه شده است و نتایج آن در شکل ۴-۳ آمده است. همچنین تلاش کنترلی برای کنترل کننده گام به عقب تطبیقی در شکل ۴-۴ نمایش داده شده است. همان طور که از شکل ۴-۳ مشاهده می شود، با اعمال کنترل کننده گام به عقب تطبیقی هر یک از بازوهای ربات در بازه زمانی حرکت ۱۰ ثانیه ای خود مسیر مطلوب داده شده را با خطای اندک ردیابی می نماید و میزان خطا بعد از مدتی در مقدار کمی محدود می گردد. با توجه به نتایج مربوط به خطای ردیابی بازوی ۵ (پنجه) که در شکل ۴-۳ (ه) ارائه شده است، مشاهده می شود حداکثر میزان لغزش در بازه زمانی ۶ تا ۸ ثانیه اتفاق افتاده و معادل $0.4/1$ میلی متر می باشد و بعد از آن مقدار لغزش به $0.1/1$ میلی متر محدود می گردد. که نشان می دهد کنترل لغزش به خوبی انجام شده است.



شکل ۴-۲ موقعیت مطلوب انگشت

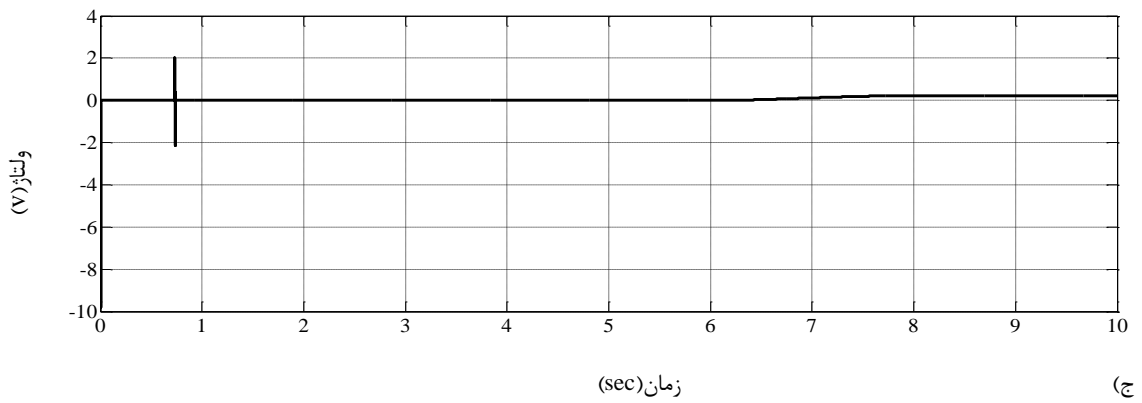
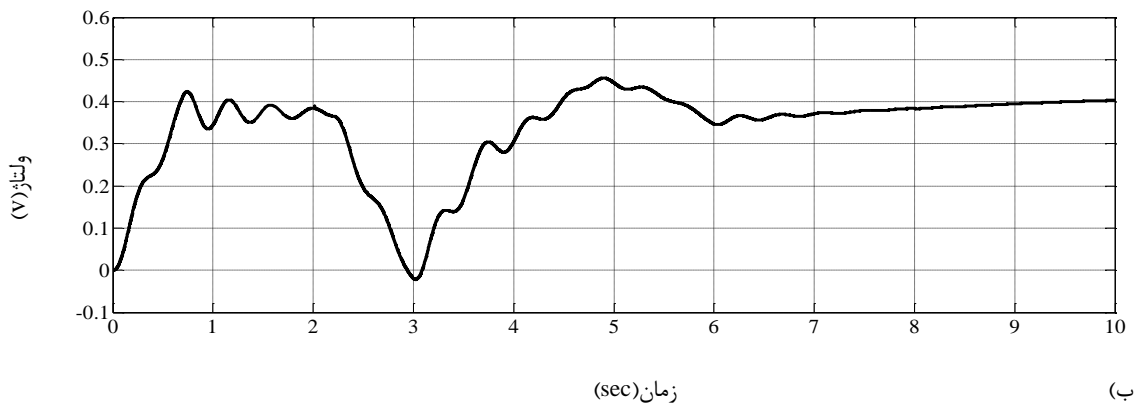
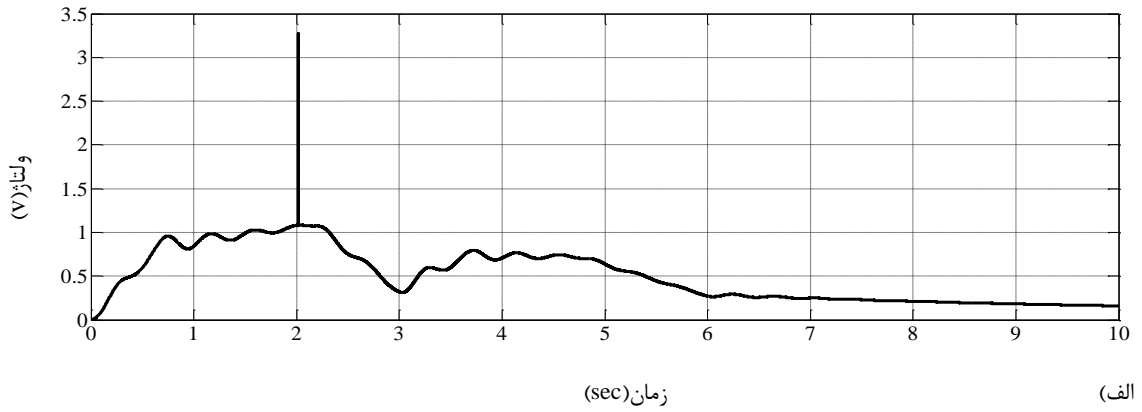


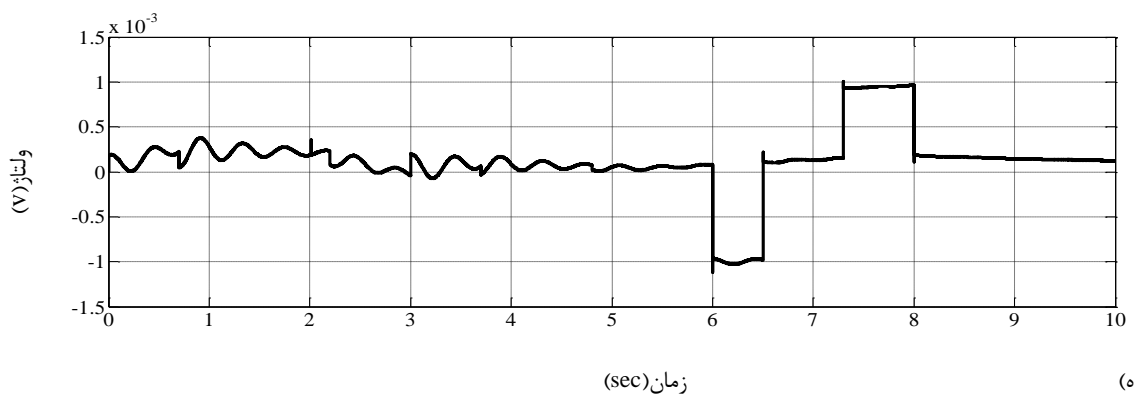
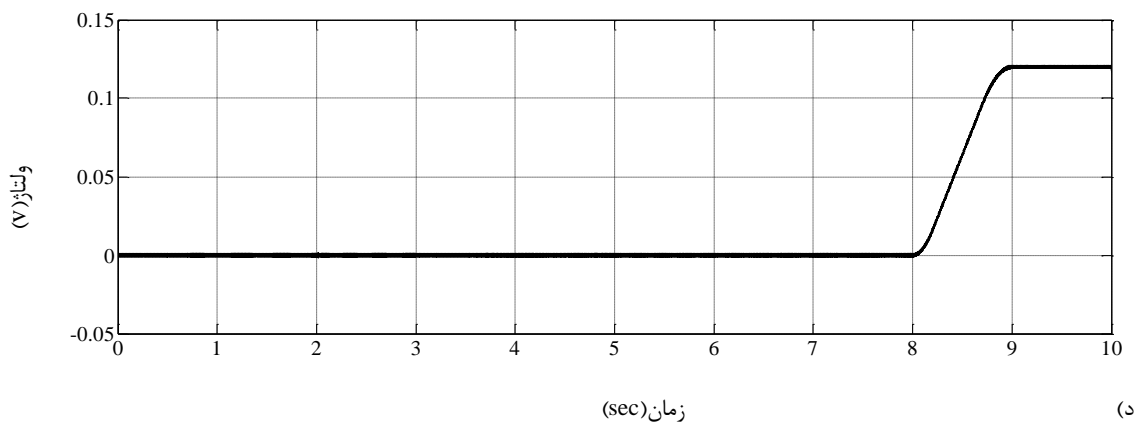


زمان (sec)

(ه)

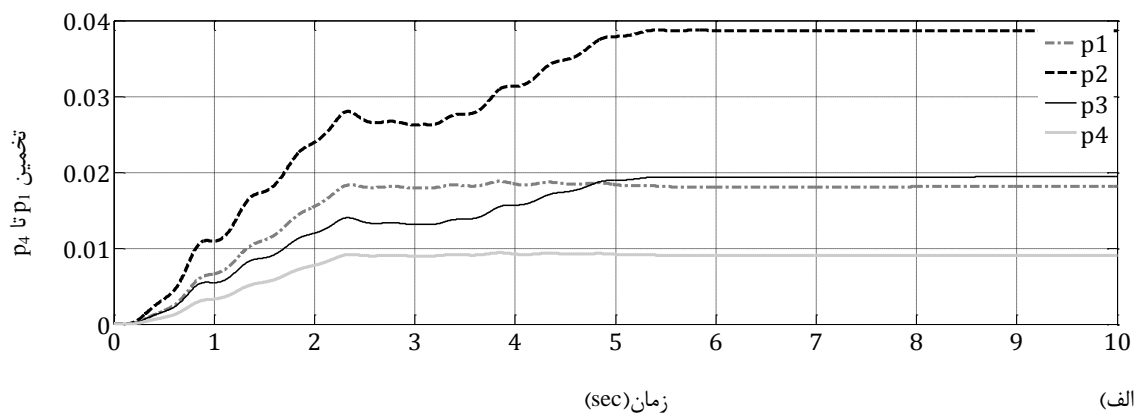
شکل ۳-۴ خطای موقعیت مفاصل ربات، الف) مفصل ۱، ب) مفصل ۲، ج) مفصل ۳
د) مفصل ۴، ه) مفصل ۵

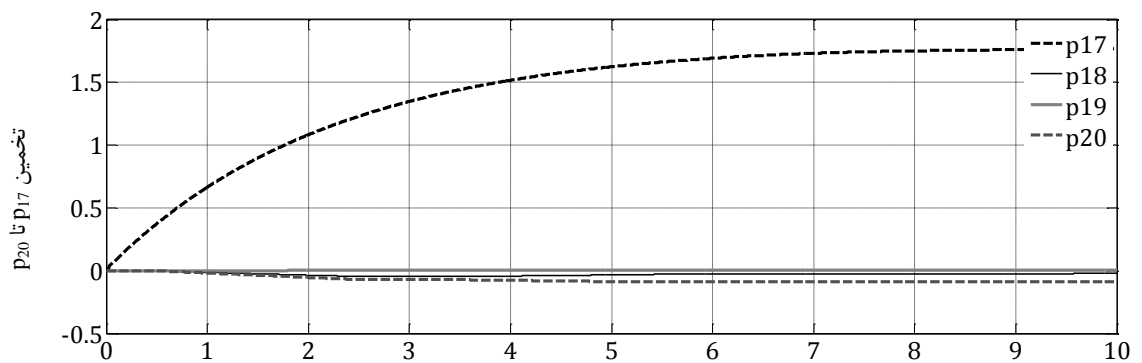
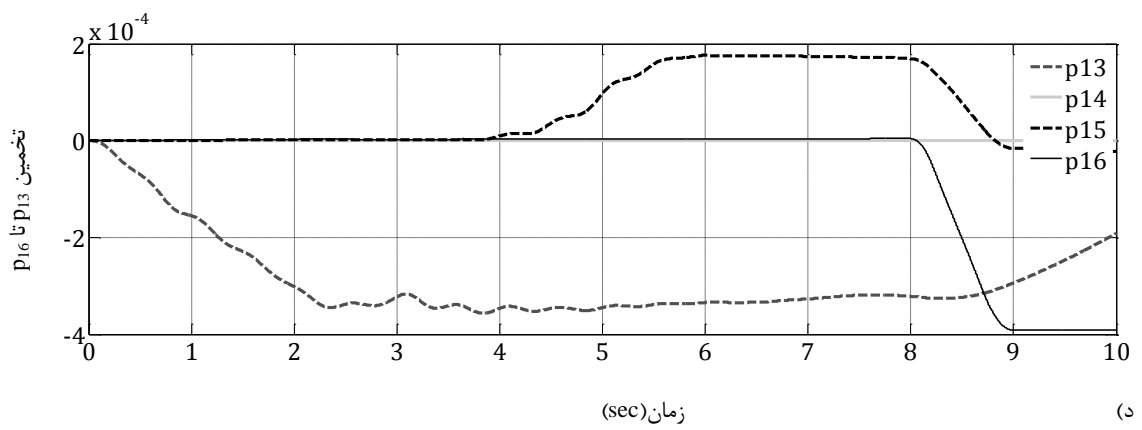
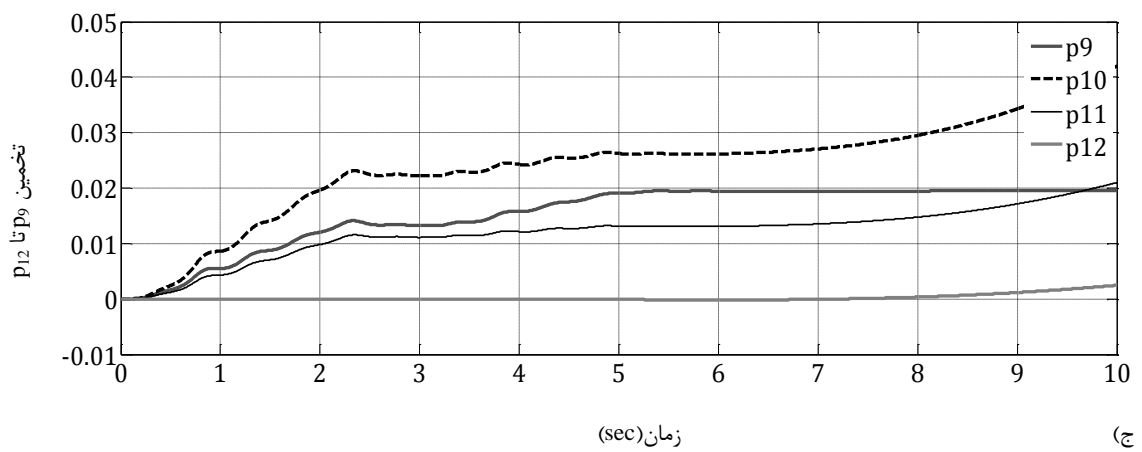
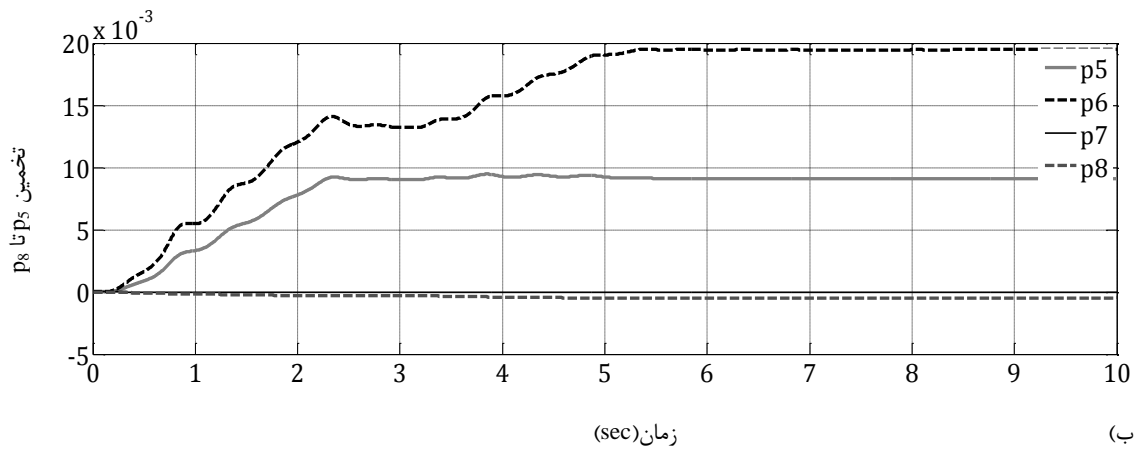




شکل ۴-۴ ولتاژ مفاصل ربات، الف) مفصل ۱، ب) مفصل ۲، ج) مفصل ۳، د) مفصل ۴، ه) مفصل ۵

نتایج تخمین پارامترها جهت استفاده در کنترلر در شکل ۴-۵ ارائه شده است. با توجه به این شکل تغییرات در پارامترها متناسب با تغییر در مانورهای حرکتی ربات مطابق با شکل ۳-۲ می باشد و نتایج نشان می دهد که روش بکار رفته در تخمین پارامترها به خوبی توانسته است تخمین مناسب پارامترها را جهت استفاده در کنترلر برای همگرایی مناسب در خطای ردیابی ایجاد نماید.





شکل ۴-۵ تخمین پارامترهای سیستم: الف) p_1 تا p_4 ، ب) p_5 تا p_8 ، ج) p_9 تا p_{12}

د) p_{13} تا p_{16} ، ه) p_{17} تا p_{20}

جهت اعتبارسنجی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج مرجع (D. Nganga-Kouya, M.Saad et al. 2001) و مراجع مشابه دیگر مقایسه شده است. به طور خلاصه با توجه به نتایج شبیه‌سازی در تحقیق حاضر و مقایسه آن با تحقیقات در مراجع فوق که از روش گام به عقب به منظور ردیابی مسیر ربات استفاده کرده‌اند مشاهده می‌شود. که ردیابی مسیر با دقت خوبی به انجام رسیده‌است. مقایسه فوق برای مبحث ردیابی مسیر انجام شده است؛ اما در مبحث گرفتن جسم و کنترل لغزش جسم، با توجه به اینکه روش گام به عقب تطبیقی برای اولین بار در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، مقدار اندک لغزش، دقت بالای این روش در کنترل لغزش جسم گرفته شده که تحت مانورهای ناشی از حرکت ربات قرار داشته است را به اثبات می‌رساند. بنابراین با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که روش کنترل گام به عقب تطبیقی برای سیستم‌های غیرخطی‌ای که به فرم پسخورد صریح هستند، حتی در حضور عدم قطعیت‌ها دارای دقت بسیار خوبی است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه گیری

در این پایان نامه، بعد از مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا با پنجه فک موازی و دینامیک محرک ها، با تبدیل فرم دینامیکی ربات و محرک ها به فرم پس خورد صریح، روش کنترلی گام به عقب به منظور گرفتن ایمن جسم و انجام مانورهای مختلف مورد توجه قرار گرفته و تخمین پارامترهای نامعلوم سیستم با اضافه کردن قانون تطبیقی به انجام رسیده است.

در فصل ۳ کنترل کننده گام به عقب تطبیقی برای ردیابی مسیر ربات اسکارای ۴ درجه آزادی با سه مفصل دورانی و یک مفصل کشویی طراحی شده و پایداری آن بر پایه لیاپانوف به اثبات رسیده است. از مقایسه نمودارهای خطای ردگیری مفاصل ربات اسکارا در فصل ۳ به خوبی می توان دریافت که روش گام به عقب تطبیقی در حضور نامعینی ها و اغتشاش خارجی ردیابی مسیر ربات را به خوبی انجام داده است و مانور مورد نظر ربات با دقت بالا به انجام رسیده است. در ادامه با اضافه کردن پنجه فک- موازی به عنوان درجه آزادی پنجم به ربات کنترل لغزش جسم گرفته شده توسط پنجه در حین مانور ربات بررسی می شود.

در بخش مدل سازی، 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 گرفته شده محاسبه گردید.

سپس به جهت بررسی دقیق وضعیت لغزش جسم، حالت های مختلف لغزش بر اساس مقدار نیروهای اعمالی بر آن و حرکت نسبی جسم نسبت به پنجه تحلیل شده است. در ادامه راهکار کنترلی برای کنترل لغزش جسم گرفته شده بیان گردیده است.

در این پایان نامه به منظور کنترل لغزش و تضمین رفتار حلقه بسته ی مطلوب، از کنترل کننده گام به عقب استفاده شده است. کنترل کننده گام به عقب به منظور مهار لغزش رخ داده برای جسم گرفته شده

توسط پنجه ربات طراحی شده و پایداری آن بر مبنای تئوری لیاپانوف به اثبات رسیده است.

سپس، کنترل گام به عقب تطبیقی برای ربات اسکارا توسعه یافته با یک پنجه فک موازی، در حضور نامعینی های ربات و جسم گرفته شده انجام شد. با توجه به دینامیک غیرخطی حاکم بر معادلات حرکت ربات، برای کنترل یک ربات اسکارا در حضور نامعینی از روش گام به عقب استفاده شد. از آنجایی که در عمل عدم قطعیت های مختلفی در سیستم وجود دارد، کنترل کننده ای طراحی شد که در برابر عدم قطعیت های پارامتری دارای عملکرد مناسبی باشد. بنابراین در این تحقیق، با استفاده از روش گام به عقب انتگرالی، یک کنترل کننده پایدار جهت گرفتن ایمن جسم و جابجایی آن در یک مسیر مطلوب برای سیستم غیرخطی ربات اسکارا توسعه یافته طراحی و پایداری آن بر مبنای تئوری لیاپانوف اثبات شد. برای غلبه بر عدم قطعیت پارامتری، با اضافه کردن کنترل کننده تطبیقی، کنترل کننده گام به عقب تطبیقی برای سیستم مورد مطالعه طراحی شد. نتایج نشان داد که روش گام به عقب، ردیابی مسیر ربات و کنترل لغزش جسم گرفته شده توسط پنجه را در حضور عدم قطعیت های پارامتری ربات و جسم گرفته شده به خوبی انجام می دهد.

۲-۵ پیشنهادها

پیشنهاد های زیر برای ادامه تحقیق ارائه می گردد:

- استفاده از روش های بهینه سازی جهت به دست آوردن ضریب بهره های کنترل کننده.
- اضافه کردن ترم دمپینگ غیرخطی به کنترل کننده به منظور مقاوم سازی در برابر عدم قطعیت ها و اغتشاش.
- استفاده از روش کنترل پسگام انفعالی و افزایش مراحل بازگشتی به منظور بهبود نتایج.

- [1] Childress, D. S. (1973). "Powered Limb Prostheses: Their Clinical Significance." Biomedical Engineering, IEEE Transactions on BME-20(3): 200-207.
- [2] 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.
- [3] Cadoret, G. and A. M. Smith (1996). "Friction, Not Texture, Dictates Grip Forces Used During Object Manipulation." Neurophysiol.
- [4] I, B., et al. (1998). "Mechanisms for force adjustments to unpredictable frictional changes at individual digits during two-fingered manipulation." Neurophysiol, 1998-2002.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Fateh, M. M. (2006). "Variable Structure Slip Control for Grasping Objects."

International Conference on Dynamical Systems and Control. Bucharest.

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

[12] 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.

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

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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*.

[17] H. Ahmadi, H. Esmaeli, M. M. Fateh, Slip compensation of grasped objects in robot gripper, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 151-162, 2015 (In Persian).

[18] K- J. Astrom, B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Second Edition, 1994.

[19] R. Lozano, B. Brogliato, *Adaptive Control of Robot Manipulators with Flexible Joints*, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 37, No. 2, February 1992.

[20] L-A. Dessaint, M. Saad, K. Al-Haddad, *An Adaptive Controller for a Direct-Drive Scara Robot*, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol 39, No 2, April 1992.

[21] L-A. Dessaint, M. Saad, *An Adaptive Controller for a Direct-Drive SCARA Robot*:

Analysis and Simulation, IEEE, pp. 414-420, 1990.

[22] V- M. Hung, U. Joo Na, Adaptive Neural Fuzzy Control for Robot Manipulator Friction and Disturbance Compensator, International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 2569-2574, 2008.

[23] H. Wang, S. Zhu, S. Liu, Adaptive PID control of robot manipulators with H_{∞} tracking Performance, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1515-1520, 2009.

[24] S-C. Lee, H-S. Ahn, Robot Manipulator Adaptive Control Using Disturbance Estimator, IEEE International Conference of control, pp. 41-46, 2014.

[25] G. Galan, S. Jagannathan, Adaptive Critic Neural Network-based Object Grasping Control Using a Three-finger Gripper, Proceedings of the 4Mh IEEE Conference on Deebion and Control Orlando, Florida USA, December 2001.

[26] R. Andrecioli, Erik D. Engeberg, Grasped Object Stiffness Detection for Adaptive Force Control of a Prosthetic Hand, Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, September 26-29, 2010.

[27] R. Andrecioli, Erik D. Engeberg, Grasped Object Stiffness Detection for Adaptive PID Sliding Mode Position Control of a Prosthetic Hand, IEEE, 2012.

[28] J.Zhou, C.Wen, Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems. Springer, 2008.

[29] D. Nganga-Kouya, M.Saad, L. Lamarche, C. Khairallah, Backstepping Adaptive Position Control for Robotic Manipulators, Proc. of ACC, Arlington, pp- 636-640, 2001.

[30] Q.Hu, L.Xu, A.Zhang, Adaptive Backstepping Trajectory Tracking Control of Robot Manipulator, J Franklin Institute, Vol.349, pp- 1087–1105, 2012.

[31] Y. Wei, L. Hou, Z. Sun, F. Jia, B. Li, Backstepping Adaptive Fuzzy Scheme for SCARA GRB400 Robot, Telkomnika, Vol. 11, No. 8, pp-4229-4237, 2013 .

[32] A. Lotfazar, M. Eghtesad and M. Mohseni, Integrator Backstepping Control of a 5

Dof Robot Manipulator With Cascaded Dynamics, IEEE, pp-1007-1012, 2003.

[33] R. J. Wai, Design of Fuzzy-Neural-Network Inherited Backstepping Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics, IEEE Trans on Fuzzy Systems, Vol. 22, No. 4, pp-709-722, 2014 .

[34] Y. Wei, J. Zhang, L. Hou, F. Jia, Q. Chang, Backstepping Adaptive Fuzzy Control for two-link robot manipulator, Vol. 10, Issue 1, No 2, pp-303-308, 2013.

[35] F. Piltan, N. Sulaiman, A. Jalali, S. Siamak, Iman Nazari, Artificial Robust Control of Robot Arm: Design a Novel SISO Backstepping Adaptive Lyapunov Based Variable Structure Control, Int J Control and Automation, Vol. 4, No. 4, pp-91-110, 2011.

[36] C. Ishii, H. Hashimoto, R. H. Gavino, Robust Control of One DOF Grasping Type Master-Slave Manipulator Systems in Consideration of Actuator Dynamics and Uncertainty for Objects and Operator, Conference on Decision and Control Maui, pp. 4090-4095, December 2003 .

[37] O. Harkegrad, Flight Control Design Using Backstepping, Ph.D Dissertation, Dept. of Elect. Eng, Linkopings Universitet, Linkoping, Sweden, 2001.

Abstract

This paper deals with the problem of safe grasping of an object. According to robot maneuvers during of movement, the slipping or falling of the objects is possible. Here, an adaptive backstepping control method is used for controlling of slipping and tracking of desirable paths. First, the robot dynamics of grasping of an object including mechanical arm with three rotational joints, one prismatic joint, jaw gripper as well as dynamic of the electrical actuators is derived. Then, backstepping technique, which is a systematic approach based on Lyapunov theory, is applied for this nonlinear system. Because of existence of different uncertainties in this system such as mass and inertia of robot and object mass, it is required to design a controller to be able to cope with these uncertainties. Accordingly, a stable controller using adaptive backstepping control methodology is also designed to estimate of these parameters' uncertainties. Stability analysis is provided based on Lyapunov theory. Simulations are carried out to evaluate the performance of the proposed controller. Results show the effectiveness of the proposed control method.

Keywords

Adaptive Backstepping Control, Slip Control, Grasping, Object, Robot Gripper



University of Shahrood
Faculty of Mechanical Engineering

**Adaptive Backstepping Control for Safe Grasping the Object By
a Robotic Gripper**

Hossein Hosseinpour Kalateh

Supervisor(s):

Dr. Habib Ahmadi

September 2015