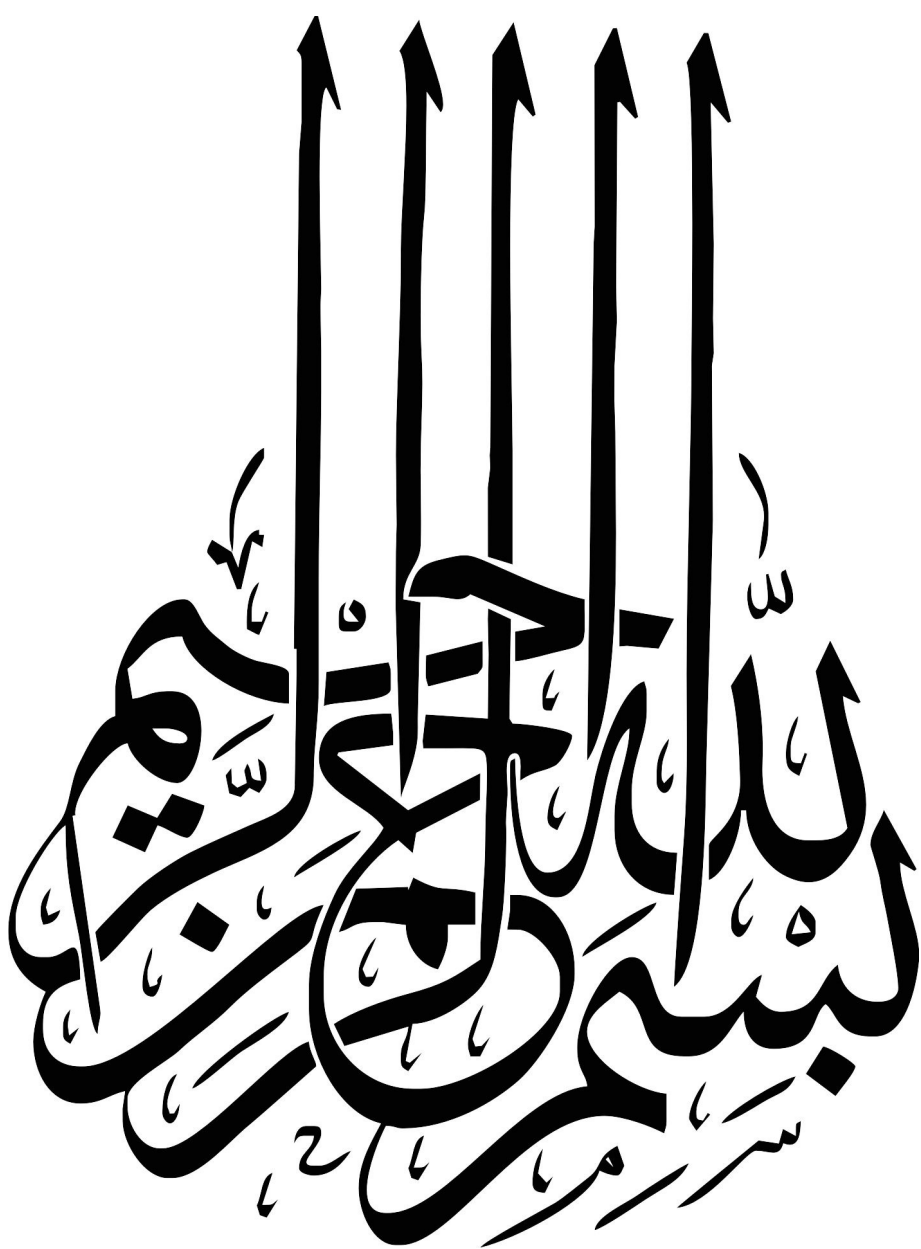
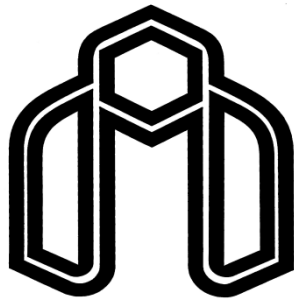






دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک
گروه مکاترونیک

کنترل مقاوم موقعیت ربات مجهز به موتورهای الکتریکی با روش
تخمین و جبران عدم قطعیت

دانشجو:

سید محمد احمدی

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی فاتح

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تابستان ۱۳۹۲



دانشگاه علمی کاربردی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه 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 آقای سید محمد احمدی رشته مکانیک گرایش مکترونیک تحت عنوان کنترل مقاوم موقعیت ربات مجهز به موتورهای الکتریکی با روش تخمین و جبران عدم قطعیت که در تاریخ ۱۳۹۲/۴/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

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

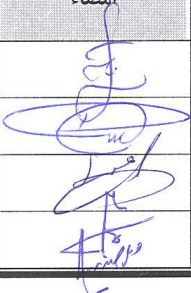
۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر محمد مهدی فاتح	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر مهدی بامداد	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر حسین خسروی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر محمدعلی صدرنیا	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده: 

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

به حرمت حضور مومن توست که هنوز فکر می کنم ... حتما خدایی هست که تو می پرستیش .
به سبب عشق بی پایان توست که هنوز فکر می کنم ... حتما عشقی هست که می توان نثار کرد.
به خاطر وجود توست که هنوز فکر می کنم ... می توان بود و بود و بود .

تشکر و قدردانی

از زحمات پدران و راهنمایی‌های ارزنده و دلسوزانه استاد بزرگواریم جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح در طول دوره کارشناسی ارشد، به ویژه در انجام این پایان نامه کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

در این جا لازم است از راهنمایی‌ها و کمک‌های دوست خوبم جناب آقای سعید خراشادی زاده تشکر و قدردانی نمایم.

تعهد نامه

اینجانب سید محمد احمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- گرایش مکترونیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " کنترل مقاوم موقعیت ربات مجهز به موتورهای الکتریکی با روش تخمین و جبران عدم قطعیت" تحت راهنمایی دکتر محمد مهدی فاتح متعهد می‌شوم:

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

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 نمی‌باشد.

چکیده

یکی از ضعف‌های روش‌های کنترلی مبتنی بر مدل، وجود عدم قطعیت در مدل سیستم می‌باشد. بنابراین، تخمین و جبران عدم قطعیت می‌تواند عملکرد سیستم کنترلی را بهبود بخشد. در این پایان نامه، سه روش جدید تطبیقی برای تخمین و جبران عدم قطعیت در کنترل مقاوم بازوی رباتیک ارائه می‌شود. در روش اول از سری تیلور و در روش دوم از شبکه‌های عصبی برای تخمین عدم قطعیت و از راهبرد کنترل ولتاژ به جای روش مرسوم کنترل گشتاور در طراحی کنترل کننده استفاده می‌شود. روش سوم، مستقل از مدل بوده و عدم قطعیت توسط شبکه عصبی شعاعی تخمین زده می‌شود. مزیت روش‌های کنترلی پیشنهادی این است که در طراحی آن‌ها نیازی به تعیین حدود عدم قطعیت یا تشکیل توابع محدودیت نیست. در نتیجه، یکی از مسائل مهم در طراحی کنترل مقاوم بازوی ربات حل می‌شود که انتخاب صحیح حدود عدم قطعیت و تشکیل توابع محدودیت می‌باشد. در کنترل مقاوم مرسوم، اگر حدود عدم قطعیت کوچکتر از مقدار واقعی انتخاب شود، خطای ردگیری افزایش می‌یابد و چنانچه بزرگتر انتخاب شود، باعث اشباع ورودی و لرزش سیگنال کنترل در کنترل کننده های سوئیچ زنی می‌شود. مزیت دیگر آن است که لرزش سیگنال کنترل نیز در روش‌های پیشنهادی وجود ندارد. از بازوی رباتیک اسکارا مجهز به موتورهای الکتریکی مغناطیس دائم برای کنترل ردگیری استفاده شده است. در این پژوهش، سینماتیک و دینامیک ربات مطرح و روش‌های کنترلی مقاوم مجهز به تخمین‌گرهای تطبیقی عدم قطعیت معرفی می‌شوند. در تمامی روش‌های پیشنهادی، پایداری سیستم حلقه بسته اثبات می‌شود. در ادامه برای بررسی نحوه عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی، کنترل کننده‌ها توسط نرم افزار متلب شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی، کارایی مناسب روش‌های کنترلی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: تخمین و جبران عدم قطعیت، کنترل مقاوم، سری تیلور، شبکه عصبی، بازوی رباتیک، راهبرد کنترل ولتاژ.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

1. Fateh M.M. and Ahmadi S.M. " Robust Control of Robot Manipulators Using Adaptive Uncertainty Estimation", ISA Transactions (revised)
 2. Fateh M.M. Ahmadi S.M. and Khorashadizadeh S. Adaptive RBF Network Control for Robot Manipulators", Journal of AI and Data Mining (submitted)
۳. محمد مهدی فاتح و سید محمد احمدی " کنترل مقاوم بازوی رباتیک با بکارگیری تخمین گر تطبیقی عصبی عدم قطعیت " مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها (under review)

فهرست مطالب

فصل ۱. مقدمه و پیشینه تحقیق	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- اهداف تحقیق	۱۱
۱-۳- مروری بر ساختار پایان نامه	۱۲
فصل ۲. طراحی تخمین‌گر عدم قطعیت‌ها توسط بسط تیلور برای کنترل مقاوم ربات با راهبرد کنترل ولتاژ	۱۴
۱-۲- مقدمه	۱۵
۲-۲- طراحی کنترل مقاوم	۱۶
۱-۲-۲ تخمین‌گر تطبیقی عدم قطعیت‌ها	۱۷
۲-۳- آنالیز پایداری	۲۰
۲-۴- نتایج شبیه‌سازی	۲۳
فصل ۳. کنترل مقاوم بازوی رباتیک با تخمین‌گرهای تطبیقی شبکه‌های عصبی با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ	۲۷
۱-۳- مقدمه	۲۸
۲-۳- طراحی کنترل مقاوم	۲۹
۱-۲-۳ تخمین‌گر تطبیقی عصبی چند لایه عدم قطعیت‌ها	۳۱
۲-۲-۳ تخمین‌گر تطبیقی عصبی شعاعی عدم قطعیت‌ها	۳۵
۲-۳- آنالیز پایداری	۳۶
۲-۴- نتایج شبیه‌سازی	۳۹
۱-۴-۳ کنترل ردگیری کنترل‌کننده مجهز به تخمین‌گر عصبی چند لایه	۳۹
۲-۴-۳ کنترل ردگیری کنترل‌کننده مجهز به تخمین‌گر عصبی شعاعی	۴۲
فصل ۴. کنترل مقاوم مستقل از مدل بازوی رباتیک با تخمین‌گر تطبیقی عصبی شعاعی	۴۵
۱-۴- مقدمه	۴۶
۲-۴- طراحی کنترل مقاوم	۴۷
۱-۲-۴ طراحی تخمین‌گر عدم قطعیت‌ها	۴۸
۲-۴- آنالیز پایداری	۵۱
۲-۴- نتایج شبیه‌سازی	۵۲
۱-۴-۴ کنترل ردگیری	۵۳
۲-۴-۴ کنترل تنظیم	۵۵
فصل ۵. کنترل مقاوم عصبی بازوی ربات	۵۸
۱-۵- مقدمه	۵۹

۵۹.....	۵-۲- طراحی کنترل مقاوم عصبی
۶۲.....	۵-۳- نتایج شبیه سازی
۶۵.....	فصل ۶. نتیجه گیری و پیشنهادات
۶۶.....	۶-۱- نتیجه گیری.....
۶۷.....	۶-۲- پیشنهادات
۶۸.....	پیوست الف.....
۶۸.....	الف-۱ سینماتیک ربات.....
۷۱.....	الف-۲ دینامیک ربات.....
۷۱.....	الف-۲-۱ انرژی پتانسیل برای ربات با n رابط.....
۷۱.....	الف-۲-۲ انرژی جنبشی برای ربات با n رابط.....
۷۴.....	الف-۳ دینامیک موتورها.....
۷۵.....	الف - ۴ مدلسازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا.....
۷۵.....	الف-۴-۱ استخراج پارامترهای دینامیکی و دناویت- هارتنبرگ بازوی ربات اسکارا.....
۷۸.....	پیوست ب.....
۸۱.....	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور مفصل ربات بصورت مفصل مستقل..... ۱۵
- شکل (۲-۲) مسیر مطلوب ردگیری..... ۲۵
- شکل (۳-۲) خطای ردگیری کنترل کننده مقاوم مجهز به تخمین گر تطبیقی تیلور..... ۲۵
- شکل (۴-۲) عملکرد تخمین عدم قطعیت های سیستم توسط تخمین گر تطبیقی تیلور..... ۲۵
- شکل (۵-۲) تطبیق پارامترهای تخمین گرهای تطبیقی تیلور..... ۲۶
- شکل (۶-۲) سیگنال های کنترل ولتاژ سیستم کنترل مجهز به تخمین گر تطبیقی تیلور..... ۲۶
- شکل (۱-۳) ساختار کلی یک شبکه عصبی چند لایه..... ۲۹
- شکل (۲-۳) ساختار کلی یک شبکه عصبی شعاعی..... ۳۰
- شکل (۳-۳) طرح تخمین گر عصبی چند لایه عدم قطعیت ها..... ۳۲
- شکل (۴-۳) طرح تخمین گر عصبی شعاعی پیشنهادی..... ۳۵
- شکل (۵-۳) مسیر مطلوب ردگیری..... ۴۰
- شکل (۶-۳) خطای ردگیری کنترل کننده مقاوم مجهز به تخمین گر عصبی چند لایه..... ۴۱
- شکل (۷-۳) ولتاژ موتورهای سیستم کنترل کننده مجهز به تخمین گر عصبی چند لایه..... ۴۱
- شکل (۸-۳) عملکرد تخمین عدم قطعیت های سیستم توسط تخمین گر عصبی چند لایه..... ۴۱
- شکل (۹-۳) تطبیق پارامترهای تخمین گرهای عصبی چند لایه..... ۴۲
- شکل (۱۰-۳) خطای ردگیری کنترل کننده مقاوم مجهز به تخمین گر عصبی شعاعی..... ۴۳
- شکل (۱۱-۳) ولتاژ موتورهای سیستم کنترل کننده مجهز به تخمین گر عصبی شعاعی..... ۴۳
- شکل (۱۲-۳) تطبیق پارامترهای تخمین گرهای عصبی شعاعی..... ۴۴
- شکل (۱۳-۳) عملکرد تخمین عدم قطعیت های سیستم توسط تخمین گر عصبی شعاعی..... ۴۴
- شکل (۱-۴) دیاگرام کنترل مقاوم مستقل از مدل ولتاژ موتور مفصل ربات..... ۴۸
- شکل (۲-۴) خطای ردگیری سیستم کنترل مقاوم مجهز به تخمین گر تطبیقی..... ۵۴
- شکل (۳-۴) سیگنال های کنترل ولتاژ سیستم کنترل مقاوم مجهز به تخمین گر تطبیقی..... ۵۴
- شکل (۴-۴) همگرایی پارامترهای ولتاژ سیستم کنترل مقاوم در حالت ردگیری..... ۵۴
- شکل (۵-۴) عملکرد تخمین تخمین گرهای عصبی تمامی مفاصل در حالت ردگیری..... ۵۵
- شکل (۶-۴) خطای تنظیم سیستم کنترل مقاوم..... ۵۶
- شکل (۷-۴) ولتاژ موتورها در سیستم کنترل مقاوم پیشنهادی در حالت تنظیم (کنترل ولتاژ)..... ۵۶
- شکل (۸-۴) همگرایی پارامترهای تطبیقی تخمین گرهای عصبی در حالت تنظیم..... ۵۷
- شکل (۱-۵) بلوک دیاگرام روش کنترلی مرجع [۵۷]..... ۶۲
- شکل (۲-۵) سیگنال های کنترل ولتاژ سیستم کنترل مرجع [۵۷]..... ۶۳
- شکل (۳-۵) خطای ردگیری کنترل کننده مرجع [۵۷]..... ۶۳
- شکل (الف-۱) دیاگرام مفصلی ربات اسکارا ۴ رابط..... ۶۹

شکل (الف-۲) نمایی از ربات اسکارا در محیط Solidworks ۷۷

فهرست جداول

جدول (۱-۳) پارامترهای موتور ۲۳

جدول (الف-۱) پارامترهای ربات ۷۶

جدول (الف-۲) پارامترهای ربات اسکارا ۷۶

فصل ۱. مقدمه و پیشینه‌ی تحقیق

۱-۱- مقدمه

بازوی ماهر صنعتی، یک بازوی چند منظوره، قابل برنامه ریزی و با قابلیت کنترل خودکار است که در کاربردهای اتوماسیون صنعتی، ثابت یا متحرک باشد [۱].

در کاربردهای صنعتی، عمدتاً از بازوهای رباتیک برای انجام وظایف تکراری استفاده می‌شود. از دلایل اصلی به کارگیری بازوهای رباتیک در صنعت می‌توان به کاهش هزینه‌ی تولید، بهبود کیفیت، دقت و افزایش تولید اشاره نمود که در مقایسه با دیگر ماشین‌آلات تخصصی از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار است. علاوه بر این، از بازوهای رباتیک برای یکسری کاربردهای خاص در شرایط خطرناک کاری شامل محیط‌های رادیواکتیو، مناطق سمی و یا مکان‌هایی که خطر انفجار وجود دارد؛ نیز استفاده می‌شود. با این حال امروزه عملیات مونتاژ پرکاربردترین وظیفه‌ی بازوهای رباتیک می‌باشد [۲].

امروزه با پیشرفت علوم، فناوری و صنعتی شدن جوامع، بازوهای رباتیک نقش بسیار بزرگی را در صنعت بر عهده دارند. از آن جا که دو عامل سرعت و دقت در کارهای صنعتی از اهمیت بالایی برخوردار است، بنابراین، صاحبان صنایع در جستجوی بازوهایی هستند که بتوانند این فاکتورها را تضمین نمایند. به همین دلیل کنترل بازوهای ربات میدان تحقیقاتی وسیعی را برای پژوهشگران فراهم نموده است.

یکی از پرکاربردترین کنترل کننده های کلاسیک در فضای مفصلی ربات، کنترل تناسبی- مشتقی- انتگرالی^۱ می‌باشد. این کنترل کننده نه تنها ساده و قابل پیاده سازی است، بلکه در برابر عدم قطعیت های بازوی رباتیک در حالت تنظیم، پایدار و مقاوم نیز می‌باشد [۳]. پس از آن، با استفاده از استراتژی مفصل مستقل، این روش و روش کنترل تناسبی- مشتقی با جبران گشتاور گرانشی^۲ به عنوان روش های مرسوم در کنترل تنظیم نقطه موقعیت بازوی رباتیک، مورد استفاده قرار گرفتند [۴]. بر همین

^۱ PID

^۲ Gravity Torque Compensation

اساس بعضی از کارهای صنعتی نظیر جوشکاری نقطه ای، جابجایی اجسام، مونتاژکاری و رنگ کاری را می توان به کمک این کنترل کننده ها انجام داد.

ماهیت غیرخطی و تزویج شدید دینامیک های یک بازوی رباتیک، شرایط را برای کنترل ردگیری دقیق به خصوص برای سرعت های بالا، با مشکل مواجه می سازد. بنابراین، برای این که کنترل کننده عملکرد مطلوبی داشته باشد، باید تاثیر این عوامل لحاظ گردد. روش های کنترل خطی بر پایه ی فرض اصلی عملکرد در محدوده ی کوچک برای مدل خطی بنا نهاده شده است. هنگامی که محدوده ی عملکرد مورد نیاز وسیع باشد، کنترل کننده ی خطی عملکردی ضعیف و یا ناپایدار دارد، زیرا اثرات غیرخطی در سیستم را نمی توان به طور مناسب جبران نمود. بنابراین، کنترل غیرخطی قادر است اثرات غیرخطی در دامنه ی وسیع را پاسخگو باشد [۵]. برای حل این مشکل، طرح های کنترلی فراوانی پیشنهاد شده است. برای حذف دینامیک های غیر خطی، روش های کلاسیک اولیه شامل روش گشتاور محاسباتی^۱ [۶] یا کنترل پسخورد غیرخطی^۲ [۷]، به عنوان جبران گرهای غیرخطی پیشنهاد گردید. این روش های کنترلی بر اساس داشتن شناخت کامل از مدل دینامیکی ربات طرح شده اند، که نیازمند محاسبات سنگین می باشند. این روش ها را مبتنی بر مدل^۳ می نامند. در عمل، پارامترهای سیستم از قبیل بارهای گرانشی با توجه به وظایف گوناگون ربات، متفاوت خواهد بود و بنابراین، در کاربردهای عملی تعیین دقیق آن امکان پذیر نخواهد بود. بعلاوه سیستم تحت اغتشاش خارجی^۴، اصطکاک مفاصل و دیگر دینامیک های مدل نشده^۵ می باشد. کارهای صنعتی مختلفی وجود دارد که بر اساس ردگیری انجام می شود. در این حالت مسئله ی کنترل، غلبه بر عدم قطعیت های ساختاری و غیر ساختاری^۶ است که در وضعیت ردگیری مطرح می شوند، در حالی که در وضعیت

¹ Computed Torque Technique

² Nonlinear Feedback Control

³ Model-based Control

⁴ External Disturbance

⁵ Un-model Dynamics

⁶ Structural and Unstructural Uncertainties

تنظیم نقطه تاثیرگذار نیستند. در چنین شرایطی، روش‌های کنترل کلاسیک و روش‌های مبتنی بر مدل برای انجام ردگیری کارآمد نمی‌باشند [۸، ۹].

خطی سازی فیدبکی^۱ یکی از روش‌های رایج استفاده شده در روش‌های کنترل غیرخطی می‌باشد. با استفاده از خطی سازی فیدبکی می‌توان سیستم غیرخطی چند ورودی- چند خروجی را به سیستم های تک ورودی- تک خروجی بدون تزویج خطی تبدیل کرد. هر چند استفاده از این روش به خاطر عواملی مانند عدم قطعیت‌های سیستم و محاسبات اضافی در روند کنترلی با مشکل روبروست. به علاوه عملکرد استراتژی‌های کنترل که از خطی‌سازی فیدبکی استفاده می‌کنند به مدل دینامیکی سیستم بستگی دارند [۱۰، ۱۱].

با طرح مسئله‌ی کنترل موقعیت بازوی رباتیک با وجود عدم قطعیت، کنترل‌کننده های پیشرفته‌ای برای ردگیری موقعیت در فضای مفصلی ارائه شد. از میان کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، کنترل تطبیقی^۲ و کنترل مقاوم^۳ بیشتر مورد توجه قرار گرفتند. هر چند این کنترل کننده ها نیز دارای مزایا و معایبی می‌باشند. امروزه در کارهای صنعتی، ابزارهای مختلفی جابجا می‌شوند و در این جابجایی ها از بازوهای رباتیک استفاده‌های زیادی می شود. از آن جا که این ابزار و وسایل دارای ابعاد و اشکال مختلفی هستند، بنابراین، در کنترل بازوی رباتیک برای غلبه بر این عدم قطعیت ها، باید از روش‌های پیشرفته‌ی کنترلی استفاده نمود. در بازوهایی که وظیفه‌ی انتقال و جابجایی بارهای مختلفی را بر عهده دارند، باید این تغییر بار در طراحی سیستم کنترل مد نظر قرار گیرد. زیرا بی توجهی به این امر ممکن است سیستم حلقه بسته را ناپایدار کند.

کنترل تطبیقی نظریه ای پرتطرفدار است که برای کنترل سیستم هایی مورد استفاده قرار می گیرد که دارای دینامیک های معلوم، اما با پارامترهای نامعلوم باشند. هدف اصلی کنترل تطبیقی، پیدا کردن یک الگوریتم تخمین زن است که به این الگوریتم، قانون تطبیقی^۴ می‌گویند. به عبارتی می‌توان گفت

¹ Feedback Linearization

² Adaptive Control

³ Robust Control

⁴ Adaptive Law

که کنترل تطبیقی با این قانون تطبیقی، توانایی یادگیری از تجربیات کنترل سیستم را بدست می آورد. کنترل تطبیقی را تنها برای سیستم های غیر خطی می توان به کار گرفت که دینامیک های آن نسبت به پارامترهای سیستم، خطی است [۱۲]. استفاده از این روش برای کنترل موقعیت بازوهای صنعتی کارآمد، اما پرهزینه است. زیرا در ساخت این گونه بازوها، از رابط های بسیار محکمی استفاده می شود و تا جایی که مقدور است، لقی های موجود در بازو را کاهش می دهند. در صورت مهیا نشدن شرایط فوق، عدم قطعیت های غیر ساختاری نظیر اغتشاش خارجی و دینامیک مدل نشده، در دینامیک های بازوی رباتیک ظاهر می گردد. حساس بودن کنترل تطبیقی به عدم قطعیت های غیر ساختاری، محدودیت دیگری است که باعث می شود روش تطبیقی در کنترل این گونه سیستم ها دارای نمایشی ضعیف باشد [۱۳].

وجود عدم قطعیت های غیرساختاری در دینامیک های بازوی رباتیک موجب شد تا کنترل مقاوم مورد توجه قرار گیرد. کنترل مقاوم در دفع اغتشاش خارجی و دینامیک های مدل نشده عملکردی درخشان دارد و پایداری سیستم حلقه بسته را با وجود این عوامل تضمین می کند. برای طراحی کنترل کننده های مقاوم، باید کران عدم قطعیت ها^۱ معلوم باشد. بنابراین، در این روش، طراحان باید احتیاط های لازم را به عمل آورند تا پایداری سیستم حلقه بسته تضمین شود [۱۴، ۱۵].

در سال های اخیر، توجه فراوانی بر روی تئوری کنترل ساختار متغیر^۲ به عنوان کنترل کننده ی مقاوم برای بازوهای رباتیک گردیده است. این روش کنترلی مزایای فراوانی از قبیل سادگی و مقاوم بودن نسبت به عدم قطعیت های ساختاری و غیر ساختاری اما با کران های معلوم را داراست. در طراحی کنترل ساختار متغیر، قانون کنترل شامل تابع کلید زنی می باشد که باعث ایجاد لرزش^۳ سیگنال کنترل در طی اجرای آن می باشد. در واقع لرزش سیگنال کنترل مرتبط با ماهیت ناپیوسته روش کنترلی می باشد و تحریک دینامیک های مدل نشده از آثار نامطلوب این پدیده می باشد

^۱ Uncertainty Bounding

^۲ Variable Structure

^۳ Chattering

[۱۷،۱۶]. بنابراین، الگوریتم های هموارسازی از قبیل روش لایه مرزی^۱ [۱۶] و الگوریتم های تطبیقی کاهش لرزش سیگنال کنترل [۱۸] پیشنهاد شد. هر چند سیستم حلقه بسته با اعمال این راهکارها، دارای پایداری محدود یکنواخت^۲ می شود [۱۹].

ترکیب کنترل تطبیقی و مقاوم توانست از مزایای هر دو نوع کنترل کننده برخوردار باشد و احتیاط های لازم در زمینه ی طراحی کنترل مقاوم را کاهش دهد و عملکرد گذرای پاسخ سیستم را نیز بهبود بخشد. در شرایطی که اطلاعات لازم از دینامیک های غیرساختاری در دسترس نیستند، کنترل تطبیقی مقاوم راهکار مناسبی برای کنترل ردگیری موقعیت بازوی ربات محسوب می شود. در صورتی که دینامیک های عدم قطعیت های غیرساختاری در دسترس باشند، استفاده از کنترل مقاوم تطبیقی توصیه شده است. اما هر دو روش کنترلی به دلیل استفاده از قوانین تطبیقی لحظه ای، دارای حجم محاسبات بالایی هستند [۲۰،۲۱].

یکی دیگر از روش های کنترل غیرخطی، روش کنترل مقاوم پسگام^۳ می باشد. در واقع این روش کنترلی، یک روش بازگشتی است که با پسخور گرفتن از حالت های سیستم و اعمال آنها به ورودی کنترل، سیستم ناپایدار را پایدار نموده و تابع لیاپانوف^۴ سیستم نیز بدست می آید. برای کنترل ردگیری موقعیت بازوی رباتیک، روش کنترل مقاوم پسگام با دیگر روش های کنترلی ترکیب شد و نتایج درخشانی بدست آمد. در طراحی کنترل مقاوم پسگام، لرزش سیگنال کنترل جایگاهی ندارد، به همین دلیل پیاده سازی این روش، ساده تر از کنترل مد لغزشی می باشد. هر چند در این روش کنترلی نیز مثل سایر روش های کنترل مقاوم، باید کران عدم قطعیت ها معلوم باشد [۲۲].

یکی دیگر از روش های کنترلی، کنترل یادگیری تکرارشونده^۵ می باشد. کنترل یادگیری تکرارشونده، روش کنترل پیشخوردی می باشد برای بهبود عملکرد سیستم هایی که وظایف تکراری انجام می دهند که کاهش خطای ردگیری به صورت مرحله به مرحله صورت می گیرد. عملکرد گذرای مطلوب از

¹ Boundry Layer Method

² Uniform Ultimate Boundedness Stability

³ Backstepping

⁴ Lyapunov Function

⁵ Iterative Learning Control

مزایای این روش کنترلی می باشد. اصولاً در این روش کنترلی، ورودی جبرانی در هر تکرار، تخمین زده می شود تا خطا در هر مرحله کاهش یابد و نهایتاً خطای ردگیری مینیمم گردد. طراحی مناسب مسیر پیشخورد، باعث کاهش پیچیدگی های کنترل کننده های پسخورد می شود. بنابراین، در این روش کنترلی علاوه بر این که کنترل کننده ی پسخورد پایداری سیستم را تضمین می کند، کنترل یادگیری تکرارشونده عملکرد سیستم را بهبود می بخشد [۲۴،۲۳].

در کنار کنترل کننده های پیشرفته معرفی شده، کنترل کننده های هوشمندی از قبیل کنترل فازی، عصبی و فازی- عصبی نیز برای کنترل ردگیری بازوی رباتیک مورد استفاده قرار گرفت و نتایج چشمگیری از آن ها بدست آمد. کنترل فازی^۱، روش کنترلی مقاومی است که به مدل دینامیکی سیستم بستگی ندارد و می توان از این ساختار ساده ی کنترلی، برای کنترل سیستم های پیچیده استفاده نمود. به این نوع کنترل کننده ها، مستقل از مدل می گویند. در این روش کنترلی از قوانین زبان شناختی فازی که از اطلاعات افراد خبره بدست آمده، برای غلبه بر عدم قطعیت ها، غیرخطی ها و تزویج استفاده می شود. آنالیز پایداری کنترل فازی بازوی رباتیک به علت پیچیدگی ارتباط دینامیک های بازوی ربات و کنترل فازی، یکی از مشکلات اساسی پیش روی محققین می باشد [۲۷-۲۵].

تحقیقات فراوانی بر روی شبکه های عصبی^۲ به عنوان کنترل کننده های مستقل از مدل برای سیستم های غیرخطی انجام گرفت. الگوریتم پس انتشار^۳ دینامیکی با به کارگیری پرسپترون چند لایه^۴ برای شناسایی سیستم و کنترل آن مورد استفاده قرار گرفت [۲۸]. هم چنین روش کنترلی نرو- فازی مقاوم مستقل از مدل، برای دستیابی به کنترل موقعیت مفصلی با دقت بالا بر روی یک ربات دو رابط مجهز به محرکه پیاده سازی شد [۲۹]. از طرفی چون ساختار یک پرسپترون چند لایه پیچیده و سرعت یادگیری آن عمدتاً پایین است، از روش شبکه های شعاعی^۵ استفاده شد [۳۰]. ساختار پیوندگرایانه یک شبکه عصبی توانایی های منحصر به فردی از قبیل یادگیری تطبیقی، تحمل خطا و

¹ Fuzzy Control

² Neural Networks

³ Back Propagation Algorithm

⁴ Multi Layer Perceptron

⁵ Radial-Basis-Function Networks

قابلیت تعمیم به کنترل فازی را داراست. هر چند، این روش‌های کنترلی نیازمند ساختار از پیش تعیین شده و ثابت قوانین فازی یا شبکه عصبی می‌باشد که باعث کاهش انعطاف و توانایی پردازش عددی کنترل کننده می‌شود. از این رو تضمین کردن پایداری و مقاوم بودن سیستم‌های کنترل شبکه عصبی با مشکل روبروست [۳۱]. برای رفع این مشکل، کنترل مقاوم مستقل از مدل با پسخورد حالت خطی، برای بازوی رباتیک شش محوره پیشنهاد شد [۳۲].

یکی از مزایای اکثر روش‌های کنترلی، اعمال روش لیاپانوف برای رسیدن به اهداف پایداری قوانین کنترلی پیشنهادی، در حضور عدم قطعیت‌ها می‌باشد [۵]. بر خلاف این که روش‌های کنترل پیشنهادی از نظر تئوری بسیار قدرتمند می‌باشند، ولی از لحاظ پیاده‌سازی عملی با مشکل مواجه هستند. قوانین کنترلی پیشنهاد شده، با معایبی از قبیل محدودیت‌های سیستم، تجهیزات سنسوری، اشباع محرکه‌ها، لرزش سیگنال کنترل و زمان طولانی پردازش روبرو هستند [۳۳]. بسیاری از طرح‌های کنترلی پیشرفته که برای کنترل بازوهای رباتیک پیشنهاد شده‌اند، به وسیله‌ی کنترل گشتاورهای مفاصل توسعه و گسترش یافته‌اند. هر چند عدم توانایی کنترل گشتاورهای مفاصل در ربات‌های صنعتی از مشکلات اساسی پیش روی محققین می‌باشد [۳۴]. اجرای راهبرد کنترل گشتاور به علت پیچیدگی معادلات دینامیکی بازوی رباتیک، با مشکل مواجه است. در کاربردهای عملی از آن جا پیاده سازی فرمان کنترل گشتاور، یک مشکل اساسی تلقی می‌شود که نمی‌توان آن را مستقیماً برای حرکت دادن بازوی رباتیک به ورودی محرکه‌ها اعمال کرد. بنابراین، قانون کنترل دیگری برای محرکه‌ها به منظور فراهم کردن گشتاور مورد نیاز مفاصل پیشنهاد شد. در راهبرد کنترل گشتاور، از دینامیک محرکه‌ها صرف نظر می‌شود، درحالی‌که محرکه‌ها با عدم قطعیت روبروست. بنابراین، راهبرد کنترل گشتاور معایبی از قبیل پیچیدگی دینامیک‌های بازوی رباتیک، مشکلات پیاده سازی و نادیده گرفتن نقش محرکه‌ها را دارد. بنابراین، راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل بازوی رباتیک مجهز به موتور الکتریکی پیشنهاد شد. در واقع بازوی رباتیک توسط محرکه‌ها، حرکت داده می‌شوند. بنابراین، به منظور کنترل بازوی رباتیک، محرکه‌های آن باید کنترل شوند. موتورهای الکتریکی به وسیله ولتاژ-

های اعمالی به عنوان ورودی سیستم کنترل می‌شوند. بر همین اساس راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل بازوهای رباتیک مجهز به موتورهای الکتریکی پیشنهاد گردید. از مزایای راهبرد کنترل ولتاژ نسبت به راهبرد کنترل گشتاور، می‌توان به سادگی، دقت بالا، سرعت محاسبات بالاتر اشاره نمود. در واقع معادلات دینامیکی موتور الکتریکی بسیار ساده تر از معادلات دینامیکی بازوی رباتیک می‌باشد [۳۶،۳۵].

همانطور که گفته شد، برای طراحی اکثر کنترل کننده‌های مقاوم، باید کران عدم قطعیت‌ها معلوم باشد. از آن جایی که تخمین دقیق این کران‌ها آسان نیست، یکسری قوانین برورسانی [۳۸،۳۷] برای عدم نیاز به حدود عدم قطعیت‌ها پیشنهاد شد، هر چند در این گونه روش‌ها مشکلات مرتبط با انحراف پارامتر وجود دارد [۳۹]. روش‌های متعددی برای تخمین و مشاهده اغتشاشات در سیستم کنترل با به کارگیری کنترل مود لغزشی پیشنهاد شد. اما در هیچ کدام از این روش‌ها، از ساختار منحصر به فرد سیستم‌های ساختار متغیر استفاده نشده است [۴۱،۴۰]. یک ایده‌ی جدید برای تخمین سیگنال اختلال سیستم (عدم قطعیت ساختاری و اغتشاش خارجی) از دینامیک‌های مد لغزشی معرفی گردید [۴۲]. در ادامه‌ی این پژوهش از جبران کننده‌ای برای کاهش تاثیر عدم قطعیت‌ها استفاده شد. تخمین سیگنال اختلال سیستم از دینامیک‌های مد لغزشی برای بازوی رباتیک طوری مورد استفاده قرار گرفت، به نحوی که اندازه‌ی کنترل ناپیوسته، به کمک کنترل جبران اختلال به طور چشمگیری کاهش یافت و در نتیجه لرزش سیگنال کنترل کاهش یافت [۴۳].

شناسایی دینامیک‌های مرتبه بالا دشوار است. از این رو معمولاً در مدل تئوری سیستم گنجانده نمی‌شود، که اساساً همین کار باعث ایجاد ناپایداری در سیستم می‌شود. بنابراین، در مرجع [۴۴] سیستم کنترل مد لغزشی بر اساس تخمین عدم قطعیت ساختاری و اغتشاش خارجی برای سیستم‌های خطی پیشنهاد شد. به علاوه از یک فیلتر خارجی پایین گذر برای فیلتر کردن نویز فرکانس بالا استفاده شد، تا حساسیت به نویز سنسور و تاثیرات ناپایدارکنندگی به علت دینامیک‌های مدل نشده کاهش یابد.

در مرجع [۴۵] سیستم کنترلی شامل جبران گر پیشخورد دینامیکی با پارامترهای ثابت، جبران کننده‌ی پیشخورد دینامیکی مقاوم و قسمت پسخورد تناسبی - مشتقی برای جبران عدم قطعیت های پارامتری طوری پیشنهاد شد که حد بالای این عدم قطعیت‌ها توسط توابع مثلثاتی از سینماتیک ربات، پارامترهای اینرسی و خطای ردگیری تخمین زده می‌شد.

در مرجع [۴۶] تخمین و جبران عدم قطعیت پارامتری برای سیستم‌های غیرخطی پیشنهاد شده است. در این پژوهش، از دو نوع تخمین گر مجزا استفاده می‌شود. اولین تخمین گر وظیفه‌ی تخمین سیگنال اختلال را بر عهده دارد و سپس تخمین گر ثانویه به صورت یک قانون بروزرسانی طوری طراحی می‌شود، که عدم قطعیت های پارامتری از روی سیگنال اختلال معلوم تخمین زده شود.

در مرجع [۴۷] تخمین و جبران عدم قطعیت ساختاری و اغتشاش خارجی با بهره گیری از کنترل مد لغزشی برای کنترل ردگیری فشار یک شیر الکترو هیدرولیکی پیشنهاد گردید. عدم قطعیت‌های سیستم از روی اولین مشتق تابع لغزشی محاسبه و تخمین زده می‌شود، و سپس توسط یک کنترل معادل تعریف شده به سیستم اعمال می‌شوند. در ادامه عدم قطعیت های مورد نظر به وسیله ی یک کنترل کننده‌ی پیشنهادی و روش سنتی لایه مرزی، جبران می‌شوند.

در مرجع [۴۸] روش کنترل مقاوم تاخیر زمانی، که توانایی جبران اغتشاش‌های پیش بینی نشده و دینامیک های مدل نشده سیستم با استفاده از تخمین گر تاخیر زمانی را دارا بود، پیشنهاد شد. ساختار کنترلی تاخیر زمانی ساده تر از انواع دیگر کنترل کننده های مقاوم می‌باشد، با این وجود این کنترل کننده عملکرد مناسبی در جبران اغتشاش و تغییرات پارامتری بازوی رباتیک از خود نشان داده است. روش کنترل مقاوم تاخیر زمانی، در سیستم‌هایی که دارای عوامل غیرخطی سخت مثل اصطکاک کولمب می‌باشند، با مشکل روبروست. اصولاً بسیاری از سیستم‌های غیرخطی از قبیل بازوهای رباتیک زمان زیادی برای مدل سازی نیاز دارند. به همین خاطر یکی از نقاط ضعف این روش کنترلی وابستگی آن به مدل سیستم می‌باشد [۴۹].

یکی از مسائل مهم در طراحی کنترل مقاوم بازوی رباتیک، انتخاب صحیح و منطقی حدود عدم قطعیت ها است. اگر بازه‌ی عدم قطعیت ها خیلی کوچک انتخاب شود، خطای ردگیری بازوی ربات افزایش می‌یابد؛ و چنانچه بزرگ انتخاب شود، این کار باعث اشباع ورودی و لرزش در کنترلرهای سوئیچ زنی می‌شود. بنابراین، روشن است که انتخاب صحیح حدود عدم قطعیت‌ها برای اطمینان از عملکرد خوب سیستم حلقه بسته، تا چه اندازه اهمیت دارد. بر همین اساس برای تخمین حدود عدم قطعیت های بازوی رباتیک، یک روش جدید بر پایه‌ی مدل نامی سیستم پیشنهاد شد. داشتن اطلاعات بیشتر از مدل دینامیکی سیستم، اندازه گیری حالت های سیستم و شناخت از مسیر مطلوب ردگیری به تخمین بهتر مقدار حدود عدم قطعیت‌ها در این روش کمک می‌کند [۵۰].

در مرجع [۵۱] برای کنترل بازوهای رباتیک مجهز به موتورهای الکتریکی، یک روش کنترلی مفصل مستقل مقاوم با استفاده از تخمین و جبران گر فازی تطبیقی پیشنهاد شد. در این روش کنترلی، از راهبرد کنترل ولتاژ استفاده شده است. یکی از مزایای سیستم فازی تطبیقی این است که برای تخمین عدم قطعیت ها، نیازی به اندازه گیری تمام حالات سیستم نمی‌باشد.

۲-۱- اهداف تحقیق

موضوع این پایان نامه کنترل ردگیری بازوی رباتیک مجهز به موتورهای الکتریکی با روش جبران و تخمین عدم قطعیت‌ها می باشد. در این خصوص، مدلسازی سیستم کنترل، طراحی کنترل کننده های مقاوم و تحلیل پایداری سیستم کنترل انجام می‌شود. با توجه به پیچیده بودن سیستم رباتیک، غلبه بر عدم قطعیت ها شامل عدم قطعیت پارامتری، دینامیک مدل نشده و اغتشاش خارجی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پایان نامه، روش‌های جدید تطبیقی برای تخمین و جبران عدم قطعیت‌ها در کنترل مقاوم بازوهای رباتیک مجهز به موتورهای الکتریکی ارائه شده است. در تمامی این روش‌های کنترلی پیشنهادی، نیازی به تعیین حدود عدم قطعیت‌ها و تشکیل توابع محدودیت وجود ندارد. برای اجرای کنترل، در دو فصل از راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل موتورهای ربات استفاده می کنیم. با بهره گیری از راهبرد کنترل ولتاژ، قانون کنترل پیشنهادی به مدل دینامیکی

بازوی رباتیک نیز بستگی ندارد. با این روش هر مفصل را بصورت مستقل کنترل می‌نماییم. در ادامه روشی نوین برای کنترل مقاوم مستقل از مدل ارائه خواهیم کرد. در تمامی روش‌های پیشنهادی، پایداری سیستم کنترل نیز بررسی و تضمین می‌شود.

۱-۳- مروری بر ساختار پایان نامه

فصل‌های دیگر این پایان نامه به ترتیب زیر تنظیم شده‌اند:

در فصل دوم، عدم قطعیت‌های سیستم توسط اولین مرتبه سری تیلور در نقاطی با المان‌های خطای ردگیری و مشتق آن به صورت تطبیقی، تخمین زده شده و سپس به کمک کنترل مقاوم پیشنهادی جبران می‌شوند. به دلیل استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ، سیستم کنترل مقاوم پیشنهادی به مدل دینامیکی ربات نیز وابستگی ندارد. از مزایای راهبرد کنترل ولتاژ نسبت به راهبرد کنترل گشتاور، می‌توان به سادگی، دقت بالا، سرعت محاسبات بالاتر اشاره نمود. در فصل سوم، روشی نوین برای کنترل مقاوم بازوی رباتیک با راهبرد کنترل ولتاژ پیشنهاد شده است. روش کنترلی پیشنهادی مجهز به تخمین گر تطبیقی عصبی عدم قطعیت‌ها می‌باشد. در این فصل، از دو شبکه عصبی چند لایه و شعاعی به عنوان تخمین گرهای عصبی برای تخمین و جبران عدم قطعیت‌ها در سیستم حلقه بسته کنترلی استفاده می‌شود. اثبات می‌گردد که سیگنال خطای عدم قطعیت که سیگنال خطای خروجی تخمین گر نام دارد؛ تابعی از خطای ردگیری و مشتق آن بر حسب زمان می‌باشد. این سیگنال در دسترس بوده و با استفاده از الگوریتم پس انتشار برای تنظیم پارامترهای تخمین گر، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فصل چهارم، روشی جدید برای کنترل مستقل از مدل مقاوم ولتاژ ربات با استفاده از شبکه عصبی شعاعی به عنوان تخمین گر عدم قطعیت‌ها معرفی می‌گردد. روش کنترلی پیشنهادی علاوه بر این که به حدود عدم قطعیت‌ها و توابع محدودیت بستگی ندارد، مستقل از مدل بوده و مشکل لرزش سیگنال نیز در آن وجود ندارد. در فصل پنجم، روش کنترلی ارائه شده در مرجع [۵۷] شبیه سازی می‌گردد و با روش‌های کنترلی پیشنهادی در این پایان نامه مقایسه می‌شود. نهایتاً در فصل ششم، نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات ارائه می‌شود. هم چنین در پیوست الف، مدل سازی

سینماتیکی و دینامیکی ربات مطرح می‌شود و در پیوست ب فرمول بندی سینماتیکی و دینامیکی مربوط به ربات اسکارا ۴ محوره آورده شده است.

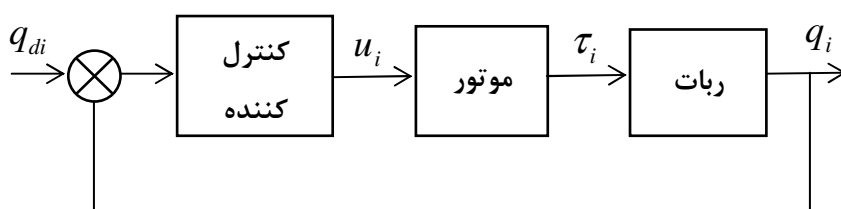
در تمامی روش‌های کنترلی پیشنهادی، پایداری سیستم حلقه بسته اثبات می‌شود. در ادامه برای بررسی نحوه عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی، کنترل‌کننده توسط نرم افزار متلب شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه سازی، کارایی مناسب روش کنترلی را نشان می‌دهد.

فصل ۲. طراحی تخمین گر تطبیقی عدم قطعیت ها به کمک بسط تیلور
برای کنترل مقاوم ربات با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ

۲-۱- مقدمه

ایده اصلی راهبرد کنترل ولتاژ از آن جا نشأت می‌گیرد که به ربات و موتورهای آن بصورت یک سیستم واحد بنام سیستم رباتیک توجه شود. آن گاه، در واقع کنترل ربات به کنترل مفاصل ربات تبدیل می‌گردد. از آن جا که مفاصل ربات توسط موتورهای آن به حرکت در می‌آیند، مسئله کنترل ربات تبدیل به مسئله کنترل موتورهای آن می‌شود. با این دیدگاه کنترلی، به جای کنترل گشتاور مفاصل می‌توان به کنترل ولتاژ موتورهای مفاصل پرداخت. در این صورت سیگنال ورودی، ولتاژ موتورهای ربات خواهد بود.

مدل موتور بصورت کلی بسیار ساده تر از مدل ربات است. بنابراین، طراحی کنترل‌کننده بر مبنای مدل موتور، بسیار ساده تر از طراحی آن بر مبنای مدل ربات است. در این نوع طراحی، ربات به عنوان بار موتور دیده می‌شود. برای کنترل موقعیت هر مفصل، در واقع زاویه موتور آن مفصل کنترل می‌شود. بدین ترتیب، کنترل سیستم چند متغیره ربات، تبدیل به کنترل موتورهای آن می‌شود که یک سیستم یک ورودی- یک خروجی است و با کنترل جداگانه هر مفصل بسادگی می‌توان ربات مورد نظر را کنترل نمود. راهبرد کنترل ولتاژ ربات بر مبنای مدل موتور و آزاد از مدل ربات نخستین بار در مقاله [۳۷] معرفی شده است. شکل (۱-۲) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور مفصل ربات را نمایش می‌دهد. در این فصل، روشی جدید برای تخمین عدم قطعیت‌ها در کنترل مقاوم ربات با بهره‌گیری از بسط تیلور با راهبرد کنترل ولتاژ را معرفی، طراحی، تحلیل و شبیه سازی خواهیم نمود و عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. پایداری سیستم کنترل را تحلیل و بررسی نموده و در نهایت آن را تضمین می‌نماییم.



شکل (۱-۲) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور مفصل ربات بصورت مفصل مستقل

۲-۲- طراحی کنترل مقاوم

فرم اسکالر معادله ولتاژ (الف-۳۱) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$RI_a + L\dot{I}_a + k_b r^{-1} \dot{q} + \phi = v \quad (۱-۲)$$

که مطابق پیوست الف، v ولتاژ موتور، I_a جریان موتور، $\dot{q}$ سرعت مفصل، ϕ اغتشاش خارجی، R ، L و k_b به ترتیب معرف مقاومت سیم پیچ، اندوکتانس سیم پیچ و ضریب ثابت القا می‌باشد. به منظور پیشنهاد قانون کنترل، مدل نامی را بدین صورت انتخاب می‌کنیم:

$$\hat{R}I_a + \hat{k}_b \hat{r}^{-1} \dot{q} = v \quad (۲-۲)$$

طبق رابطه (۲-۲) مدل نامی سیستم معلوم می‌باشد و پارامترهای نامی $\hat{R}$ ، $\hat{k}_b$ و $\hat{r}$ به ترتیب تخمین های پارامترهای R ، k_b و r می‌باشد. در مقایسه با مدل واقعی سیستم (۱-۲)، ترم های $L\dot{I}_a$ و ϕ در رابطه (۲-۲) استفاده نشده است. رابطه (۱-۲) را به صورت زیر فرض می‌کنیم:

$$v = \hat{R}I_a + \hat{k}_b \hat{r}^{-1} \dot{q} + F \quad (۳-۲)$$

طبق روابط (۱-۲) تا (۳-۲)، F از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F = (R - \hat{R})I_a + L\dot{I}_a + (k_b r^{-1} - \hat{k}_b \hat{r}^{-1})\dot{q} + \phi \quad (۴-۲)$$

در واقع F بیانگر عدم قطعیت‌های سیستم می‌باشد. این عدم قطعیت‌ها شامل اغتشاش خارجی ϕ ، دینامیک مدل نشده $L\dot{I}_a$ و عدم قطعیت پارامتری $(k_b r^{-1} - \hat{k}_b \hat{r}^{-1})\dot{q}$ می‌باشد. با استفاده از رابطه (۳-۲)، قانون کنترل مقاوم را بصورت زیر پیشنهاد می‌کنیم:

$$v = \hat{R}I_a + \hat{k}_b \hat{r}^{-1} (\dot{q}_d + k_p (q_d - q)) + \hat{F} \quad (۵-۲)$$

که در آن $\hat{F}$ مقدار تخمینی F می‌باشد که در بخش بعدی معرفی می‌شود. q_d مسیر مطلوب مفصل و k_p پارامتر طراحی کنترل می‌باشد. مقدار F نامعلوم است، بنابراین، از $\hat{F}$ در قانون کنترل استفاده می‌شود.

برای محافظت از موتور، ولتاژ اعمالی به آن باید کمتر از $v_{\max}$ باشد. بنابراین، از یک محدود کننده ولتاژ برای هر موتور استفاده می‌شود. اگر تعریف کنیم:

$$u = \hat{R}I_a + \hat{k}_b \hat{r}^{-1}(\dot{q}_d + k_p(q_d - q)) + \hat{F} \quad (۶-۲)$$

بنابراین، قانون کنترل (۵-۲) را به صورت زیر اصلاح می‌کنیم:

$$v(t) = u \quad \text{for } |u| \leq v_{\max} \quad (۷-۲)$$

$$v(t) = v_{\max} \operatorname{sgn}(u) \quad \text{for } v_{\max} < |u| \quad (۸-۲)$$

۲-۲-۱- تخمین گر تطبیقی عدم قطعیت‌ها

فرض کنیم برای کنترل سیستم داشته باشیم $|u| \leq v_{\max}$ ، آن‌گاه با اعمال قانون کنترل (۸-۲) به سیستم (۳-۲) خواهیم داشت:

$$\hat{R}I_a + \hat{k}_b \hat{r}^{-1} \dot{q} + F = u_{\max} \operatorname{sgn}(u) \quad (۹-۲)$$

در این حالت، موتور برای کاهش خطا با ماکزیمم ولتاژ ممکن کار می‌کند. بنابراین، در این ناحیه تاثیر تخمین عدم قطعیت‌ها دیده نمی‌شود.

فرض کنیم برای کنترل سیستم داشته باشیم $|u| \leq v_{\max}$ ، آن‌گاه با اعمال قانون کنترل (۷-۲) به سیستم (۳-۲) خواهیم داشت:

$$\hat{R}I_a + \hat{k}_b \hat{r}^{-1} \dot{q} + F = \hat{R}I_a + \hat{k}_b \hat{r}^{-1}(\dot{q}_d + k_p(q_d - q)) + \hat{F} \quad (۱۰-۲)$$

رابطه (۱۰-۲) را می‌توان بصورت زیر در نظر گرفت:

$$\dot{e} + k_p e = \hat{k}_b^{-1} \hat{r} (F - \hat{F}) \quad (۱۱-۲)$$

که در آن e خطای ردگیری می‌باشد.

$$e = q_d - q \quad (۱۲-۲)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۱۱-۲)، می‌توان نتیجه گرفت که $\hat{F}$ می‌تواند تابعی از e و $\dot{e}$ باشد. در این فصل، یک ساختار ساده برای تخمین گر $\hat{F}$ با استفاده از مرتبه اول بسط سری تیلور به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\hat{F}(e, \dot{e}) = \hat{F}(0, 0) + \left. \frac{\partial \hat{F}}{\partial e} \right|_{(0,0)} e + \left. \frac{\partial \hat{F}}{\partial \dot{e}} \right|_{(0,0)} \dot{e} \quad (۱۳-۲)$$

فرض می‌کنیم $\dot{e}$ وجود دارد. به منظور تخمین ضرایب، رابطه (۲-۱۳) را به صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$\hat{F}(e, \dot{e}) = \hat{p}_1 + \hat{p}_2 e + \hat{p}_3 \dot{e} \quad (2-14)$$

که در آن $\hat{p}_1$ ، $\hat{p}_2$ و $\hat{p}_3$ ضرایبی هستند که با استفاده از قانون بروزرسانی تعیین می‌شوند. می‌توان رابطه (۲-۱۴) به صورت زیر بیان نمود:

$$\hat{F}(e, \dot{e}) = \sum_{l=1}^3 \hat{p}_l \zeta_l = \hat{\mathbf{p}}^T \boldsymbol{\zeta} \quad (2-15)$$

که در آن $\boldsymbol{\zeta}$ برابرست با:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\zeta}^T &= [\zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \zeta_3] \\ &= [1 \quad e \quad \dot{e}] \end{aligned} \quad (2-16)$$

و

$$\hat{\mathbf{p}}^T = [\hat{p}_1 \quad \hat{p}_2 \quad \hat{p}_3] \quad (2-17)$$

تابع F طبق رابطه (۲-۱۱)، بدین صورت بیان می‌گردد:

$$F = \hat{r}^{-1} \hat{k}_b (\dot{e} + k_p e) + \hat{F}(e, \dot{e}) \quad (2-18)$$

طبق رابطه بالا، F می‌تواند به صورت تابعی از e و $\dot{e}$ در نظر گرفته شود. بنابراین، اگر تخمین گر $\hat{F}(e, \dot{e})$ که بر اساس رابطه (۲-۱۵) و با استفاده از مرتبه اول بسط تیلور تعریف شد، بتواند تابع $F(e, \dot{e})$ را تخمین بزند، آنگاه خواهیم داشت:

$$|F(e, \dot{e}) - \hat{F}(e, \dot{e})| \leq \rho \quad (2-19)$$

که در آن ρ یک عدد ثابت مثبت است. فرض کنیم که بتوان $F(e, \dot{e})$ را به صورت زیر مدلسازی نمود:

$$F(e, \dot{e}) = \mathbf{p}^T \boldsymbol{\zeta} + \varepsilon \quad (2-20)$$

که در آن ε خطای تقریب و بردار $\mathbf{p}$ ثابت باشد. فرض کنیم:

$$|F(e, \dot{e}) - \mathbf{p}^T \boldsymbol{\zeta}| \leq \beta \quad (2-21)$$

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ε طبق رابطه $|\varepsilon| \leq \beta$ محدود می‌باشد، که در آن β حد بالای خطای تقریب می‌باشد.

با جایگذاری روابط (۲-۱۵) و (۲-۲۰) در رابطه (۲-۱۸) می‌توان دینامیک خطای ردگیری را به صورت زیر بدست آورد:

$$\dot{e} + k_p e = \hat{k}_b^{-1} \hat{r} (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) \zeta + \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \varepsilon \quad (2-22)$$

برای بدست آوردن یک مکانیزم تطبیقی، تابع مثبت معین V را به صورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$V(e) = 0.5e^2 + \frac{1}{2\gamma} (\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}})^T (\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}) \quad (2-23)$$

که در آن γ یک عدد ثابت مثبت می‌باشد. سپس برای $\dot{V}$ خواهیم داشت:

$$\dot{V}(e) = e\dot{e} - \frac{1}{\gamma} (\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}})^T \dot{\mathbf{p}} \quad (2-24)$$

از رابطه (۲-۲۲) داریم:

$$\dot{e} = \hat{k}_b^{-1} \hat{r} (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) \zeta + \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \varepsilon - k_p e \quad (2-25)$$

با جایگذاری (۲-۲۵) در (۲-۲۴) نتیجه می‌شود:

$$\dot{V}(e) = -k_p e^2 + (\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}})^T \left(e \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \zeta - \frac{1}{\gamma} \dot{\mathbf{p}} \right) + e \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \varepsilon \quad (2-26)$$

بنابراین، اگر قانون تطبیق به صورت زیر انتخاب شود:

$$\dot{\mathbf{p}} = \alpha e \zeta \quad (2-27)$$

که در آن:

$$\alpha = \gamma \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \quad (2-28)$$

در این صورت داریم:

$$\dot{V}(e) = -k_p e^2 + \hat{k}_b^{-1} \hat{r} e \varepsilon \quad (2-29)$$

اگر $\dot{V}(e) < 0$ آنگاه خطای ردگیری کاهش می‌یابد. بنابراین، زمانی همگرایی e تضمین شده می‌باشد که:

$$\hat{k}_b^{-1} \hat{r} e \varepsilon < k_p e^2 \quad (30-2)$$

با استفاده از نامساوی کوشی-شوارتز و $|\varepsilon| \leq \beta$ ، داریم:

$$\hat{k}_b^{-1} \hat{r} e \varepsilon \leq \hat{k}_b^{-1} \hat{r} |e| |\varepsilon| < \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \beta |e| \quad (31-2)$$

بنابراین، به منظور برقراری رابطه (30-3)، کفایت که $\hat{k}_b^{-1} \hat{r} \beta |e| < k_p e^2$ ، یا می توان گفت:

$$\hat{k}_b^{-1} \hat{r} \beta / k_p \triangleq \delta_0 < |e| \quad (32-2)$$

که در آن δ_0 یک ثابت مثبت می باشد. بنابراین، تا زمانی که $|e| < \delta_0$ باشد، $\dot{V}(e) < 0$ برقرار است. رابطه (32-2) به این معنی است که خطای ردگیری در خارج از دایره ای به شعاع δ_0 کاهش می یابد، تا زمانی که خطای ردگیری نهایتاً وارد دایره می شود. در نتیجه خطای ردگیری محدود خواهد ماند. می توان گفت:

نتیجه ۱: خطای ردگیری e محدود می ماند و در نهایت وارد دایره ای به شعاع δ_0 می شود.

به منظور ارزیابی کردن مقدار نهایی خطا، باید خاطر نشان کرد که خطای ردگیری به حد بالای خطای تقریب β و پارامتر طراحی کنترل k_p بستگی دارد. انتخاب k_p بزرگتر، خطای ردگیری کوچکتری را به همراه دارد. برای ارزیابی اندازه خطای تخمین ρ در رابطه (2-19)، با جایگذاری رابطه (2-20) در (2-19) داریم:

$$|p^T \zeta + \varepsilon - \hat{p}^T \zeta| \leq |(p^T - \hat{p}^T) \zeta| + |\varepsilon| \quad (33-2)$$

بنابراین، برای برقراری رابطه (2-19)، ρ می تواند برابر با:

$$\rho = |(p^T - \hat{p}^T) \zeta| + \beta \quad (34-2)$$

۳-۲- آنالیز پایداری

اثبات محدودیت متغیرهای حالت θ ، $\dot{\theta}$ و I_a توسط آنالیز پایداری امکان پذیر می باشد. به منظور اثبات پایداری، فرضیات زیر در نظر گرفته می شود:

فرضیه ۱: مسیر مطلوب حرکت بازوی ربات q_d باید هموار باشد، به این معنی که q_d و مشتقات آن

تا مرتبه مورد نیاز در دسترس و همگی محدود باشند [۱۰].

فرضیه ۲: برای طراحی کنترل مقاوم، اغتشاش خارجی باید محدود باشد یعنی $|\phi(t)| \leq \phi_{\max}$.

فرضیه ۳: ولتاژ موتورها محدود باشند یعنی $|v| \leq v_{\max}$.

فرضیه ۴: $|RI_a + L\dot{I}_a + k_b r^{-1} \dot{q}_d + \phi| \leq v_{\max}$

از رابطه (۱۲-۲) داریم $q = q_d - e$. با استفاده از فرضیه ۱ و نتیجه ۱، مشاهده می‌شود که سمت راست معادله $q = q_d - e$ محدود است. بنابراین،

نتیجه ۲: موقعیت مفصل q محدود است.

با حاصلضرب دو طرف رابطه (۱-۲) در I_a ، معادله انرژی به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$vI_a = RI_a^2 + L\dot{I}_a I_a + k_b r^{-1} \dot{q} I_a + \phi I_a \quad (۳۵-۲)$$

در واقع، موتور با دریافت انرژی الکتریکی vI_a ، انرژی مکانیکی $k_b r^{-1} \dot{q} I_a$ را تولید می‌کند. توان RI_a^2 بیانگر اتلاف سیم پیچ‌ها و توان $L\dot{I}_a I_a$ ، تغییرات زمانی انرژی مغناطیسی می‌باشد. با انتگرال‌گیری از دو طرف رابطه (۳۵-۲) برای $t \geq 0$ داریم:

$$\int_0^t (v - \phi) I_a dt = \int_0^t RI_a^2 dt + \int_0^t L\dot{I}_a I_a dt + \int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt \quad (۳۶-۲)$$

با $I_a(0) = 0$ داریم:

$$\int_0^t (v - \phi) I_a dt = RI_a^2 t + 0.5LI_a^2 + \int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt \quad (۳۷-۲)$$

با توجه به این که $RI_a^2 t \geq 0$ و $0.5LI_a^2 \geq 0$ داریم:

$$\int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt \leq \int_0^t (v - \phi) I_a dt \quad (۳۸-۲)$$

ترم $\int_0^t (v - \phi) I_a dt$ ، حد بالای انرژی مکانیکی $\int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt$ می‌باشد. بنابراین، در حد بالای انرژی مکانیکی می‌توان گفت:

$$\int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt = \int_0^t (v - \phi) I_a dt \quad (۳۹-۲)$$

$$\int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt = \int_0^t (v - \phi) I_a dt \quad (۴۰-۲)$$

بنابراین،

$$k_b r^{-1} \dot{q} = v - \phi \quad (۴۱-۲)$$

نتیجه ۳: سرعت مفصل $\dot{q}$ به صورت زیر محدود است:

$$|\dot{q}| \leq (|\phi| + |v|) r / k_b \quad (۴۲-۲)$$

با استفاده از فرضیات ۲ و ۳ می‌توان گفت:

$$|\dot{q}| \leq (v_{\max} + \phi_{\max}) r / k_b \triangleq \dot{q}_{\max} \quad (۴۳-۲)$$

که در آن $\dot{q}_{\max}$ ماکزیمم سرعت موتور می‌باشد.

با استفاده از رابطه (۱-۲) داریم:

$$R I_a + L \dot{I}_a = w \quad (۴۴-۲)$$

که در آن

$$w = v - k_b r^{-1} \dot{q} - \phi \quad (۴۵-۲)$$

متغیرهای $\dot{q}$ ، ϕ و v به ترتیب طبق نتیجه ۳، فرضیه ۲ و فرضیه ۳، محدود هستند. بنابراین، ورودی

w در رابطه (۴۴-۲) محدود می‌باشد. معادله دیفرانسیل خطی (۴۴-۲) طبق معیار راث-هرویتز یک

سیستم خطی پایدار است. با توجه به این که ورودی w محدود می‌باشد، بنابراین، خروجی I_a نیز محدود است.

نتیجه ۴: جریان I_a محدود است.

با توجه به نتایج گرفته شده، موقعیت مفصلی q ، سرعت مفصلی $\dot{q}$ و جریان موتور I_a محدود می

باشند. بنابراین، حالات سیستم $\mathbf{q}$ ، $\dot{\mathbf{q}}$ و $\mathbf{I}_a$ همگی محدود هستند و پایداری سیستم تضمین می شود.

از رابطه (۴۴-۲) داریم:

$$L \dot{I}_a = w - R I_a \quad (۴۶-۲)$$

در سمت راست معادله (۴۶-۲)، w و I_a محدود و ضرایب L و R ثابت هستند. بنابراین:

نتیجه ۵: تغییرات زمانی جریان $\dot{I}_a$ محدود است. شایان ذکر است که روش کنترلی پیشنهادی، محدودیت عدم قطعیت F در رابطه (۴-۲) را تضمین می‌کند. در رابطه (۴-۲)، $R-\hat{R}$ ، L و $k_b r^{-1} - \hat{k}_b \hat{r}^{-1}$ ثابت هستند. متغیرهای $\dot{q}$ ، I_a ، $\dot{I}_a$ و ϕ به ترتیب مطابق نتیجه ۳، نتیجه ۴، نتیجه ۵ و فرضیه ۲ محدود هستند. بنابراین،

نتیجه ۶: عدم قطعیت F محدود است.

خارج از دایره با شعاع δ_0 که $\dot{V} < 0$ است و با در نظر گرفتن رابطه (۲۳-۲)، می‌توان نتیجه گرفت که $p - \hat{p}$ محدود است. با توجه به رابطه (۲۲-۲)، خطای تقریب بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$\varepsilon = \hat{k}_b \hat{r}^{-1} (\dot{e} + k_p e) - (p^T - \hat{p}^T) \zeta \quad (۴۷-۲)$$

در سمت راست معادله (۴۷-۲)، $\zeta = [1 \ e \ \dot{e}]^T$ و تمامی متغیرها شامل e ، $\dot{e}$ و $p^T - \hat{p}^T$ محدود هستند. بنابراین، محدود بودن ε تضمین شده و حد بالای آن یعنی β وجود دارد. بعلاوه خطای تخمین یعنی $F - \hat{F}$ ، نیز محدود است و حد بالای آن یعنی ρ ، طبق رابطه (۳۴-۲) وجود دارد.

۴-۲- نتایج شبیه سازی

جهت بررسی عملکرد سیستم کنترل ربات، قانون کنترل را روی ربات اسکارا ۴ رابط شبیه سازی می‌نماییم. سیستم کنترل بصورت مفصل مستقل به ربات اعمال می‌گردد. بنابراین، برای هر مفصل از یک کنترل کننده مجزا استفاده می‌شود. مسیر مطلوب ردگیری برای همه مفاصل در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. موقعیت مطلوب برای تمامی مفاصل با تابع زیر تعریف شده است:

$$q_d = 0.5(1 - \cos(\pi t / 2.5)) \quad \text{for} \quad 0 \leq t \leq 5 \quad (۴۸-۲)$$

پارامترهای موتور برای هر کنترل کننده یکسان و به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

جدول (۱-۲) پارامترهای موتور

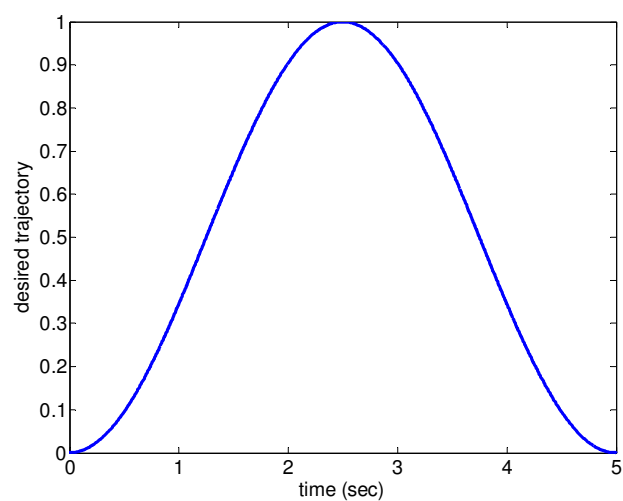
Motors	$u_{\max}$ (V)	R (Ω)	K_b ($\frac{V.s}{rad}$)	L (H)	J_m ($\frac{Nm.s^2}{rad}$)	B_m ($\frac{Nm.s}{rad}$)	r
1,2,3,4	40	1.26	0.26	0.001	0.0002	0.001	0.01

قانون کنترل (۷-۲) ، (۸-۲) و قانون تطبیق (۲۷-۲) به ربات اسکارا جهت شبیه سازی سیستم کنترل اعمال شده است. پارامترهای مورد نیاز در کنترل ردگیری ربات برای همه مفاصل بصورت یکسان و بصورت زیر انتخاب شده اند:

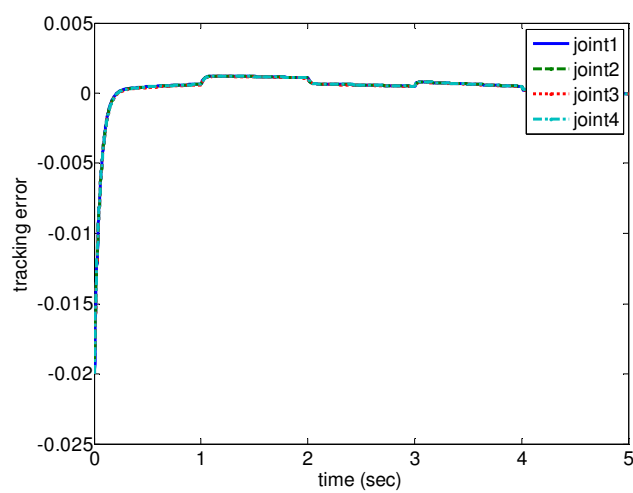
$$\gamma=500, \quad k_p=100, \quad \hat{p}(0)=0 \quad (۴۹-۲)$$

زمان اجرای شبیه سازی ۵ ثانیه انتخاب شده است. خطای اولیه برای مفاصل اول، دوم و چهارم ۰.۰۲ رادیان و برای مفصل سوم ۰.۰۲ متر در نظر گرفته شده است. اغتشاش خارجی توسط یک تابع تولید پالس با پریود زمانی ۲ ثانیه، تاخیر ۱ ثانیه، دامنه ۱ و پهنای پالس ۱ ثانیه به سیستم کنترل اعمال می شود.

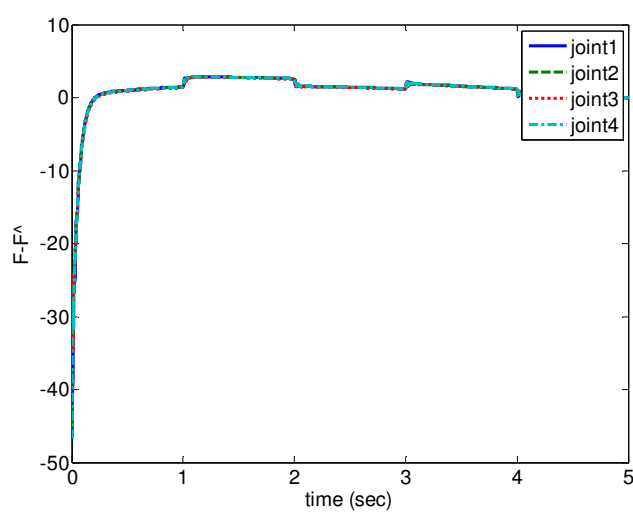
شکل (۳-۲) خطای ردگیری سیستم کنترل پس از انجام شبیه سازی با حضور اغتشاش خارجی را نمایش می دهد. همانطور که مشاهده می شود، مقدار خطای ردگیری بدون فراجاهش در انتهای شبیه سازی برای همه مفاصل به کمتر از 8.2×10^{-5} می رسد. واحد خطای موقعیت برای مفاصل لولایی رادیان و برای مفصل کشویی، متر است. شکل (۴-۲) عملکرد تخمین عدم قطعیت را برای همه مفاصل نشان می دهد. برای تمامی مفاصل، مقدار خطای تخمین عدم قطعیت در نهایت به کمتر از 0.06 V می رسد. شکل (۵-۲) تطبیق پارامترها را برای تمامی مفاصل نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود پارامتر $\hat{p}_1$ متغیر است در حالی که پارامترهای $\hat{p}_2$ و $\hat{p}_3$ به مقادیر ثابت همگرا شده اند. این طور می توان گفت که پارامتر $\hat{p}_1$ ، تمام اثرات جمله های مرتبه بالا را در بسط تیلور پوشش می دهد. شکل (۶-۲) سیگنال کنترل ولتاژ موتورهای هر مفصل را نشان می دهد. ولتاژ موتورها نرم و در محدوده مجاز است. ولتاژ موتور سوم به دلیل غلبه بر نیروی گرانشی در انتهای مسیر صفر نمی باشد. نتایج شبیه سازی، کارایی موثر روش کنترلی را نشان می دهد.



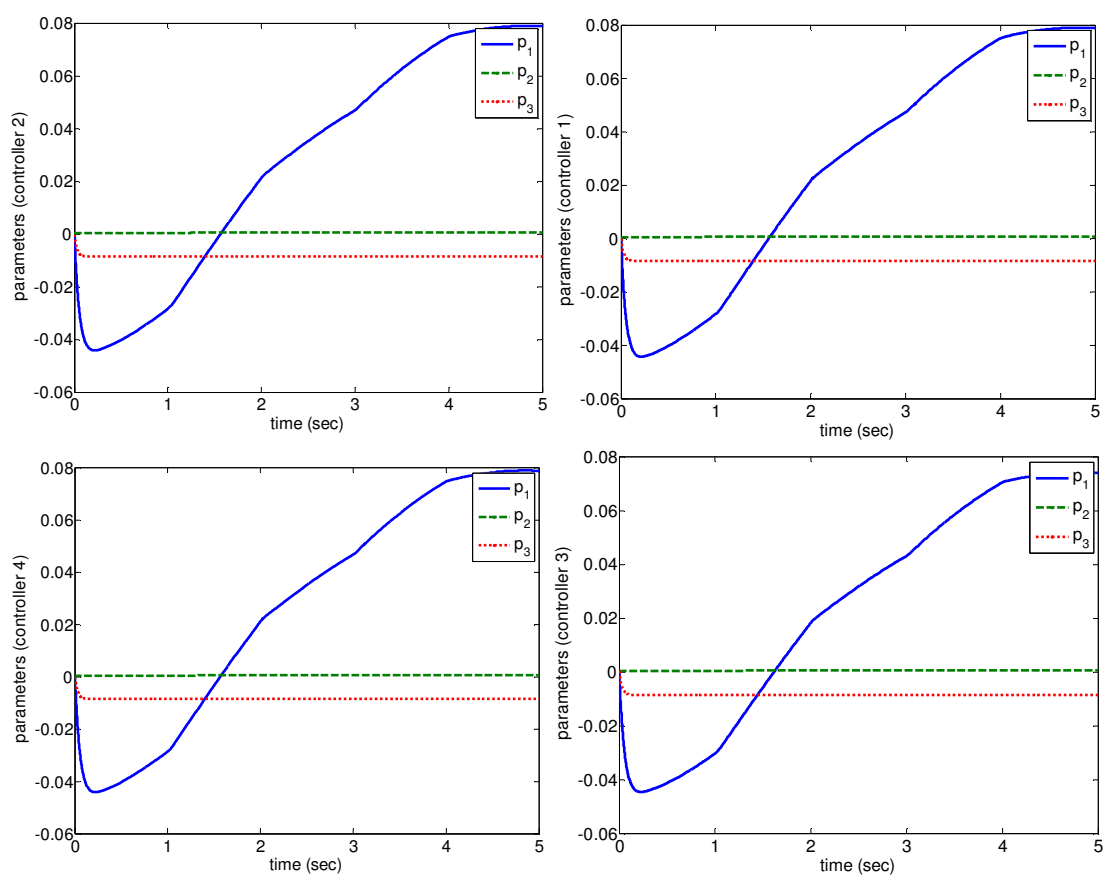
شکل (۲-۲) مسیر مطلوب ردگیری



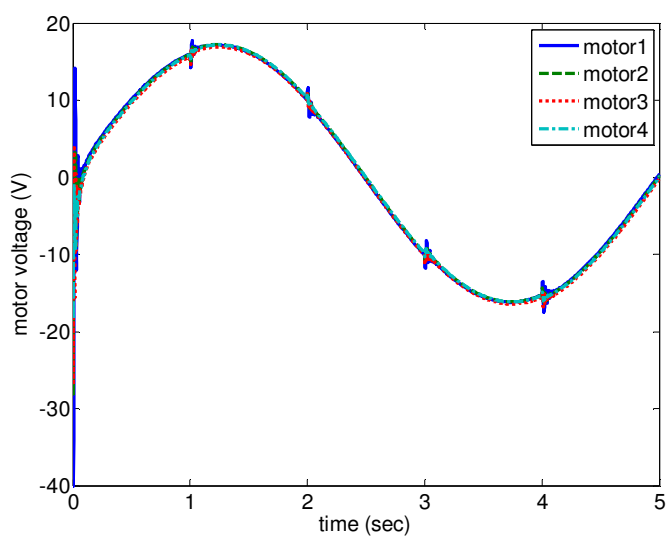
شکل (۳-۲) خطای ردگیری کنترل کننده مقاوم مجهز به تخمین گر تطبیقی تیلور



شکل (۴-۲) عملکرد تخمین عدم قطعیت های سیستم توسط تخمین گر تطبیقی تیلور



شکل (۲-۵) تطبیق پارامترهای تخمین گرهای تطبیقی نیلور



شکل (۲-۶) سیگنال های کنترل ولتاژ سیستم کنترل مجهز به تخمین گر تطبیقی نیلور

فصل ۳. کنترل مقاوم بازوی رباتیک با تخمین گرهای تطبیقی شبکه های عصبی با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ

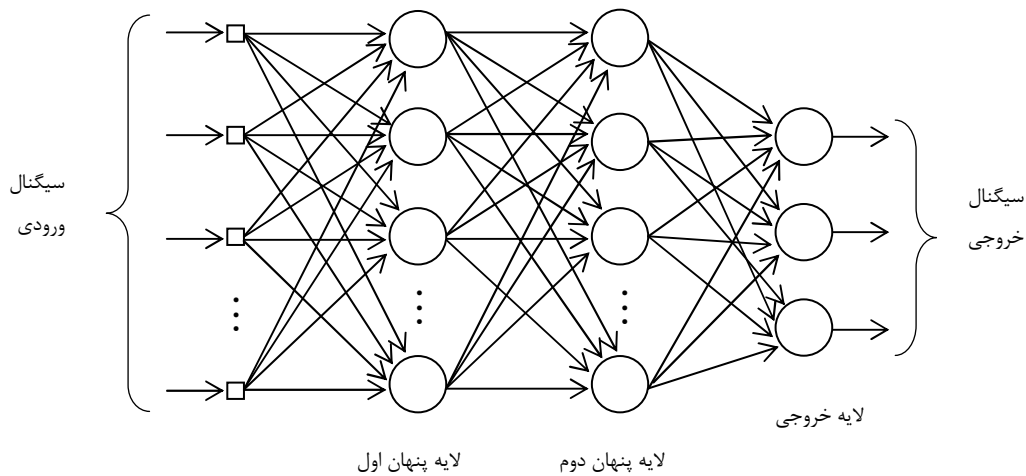
۳-۱- مقدمه

شبکه‌های عصبی چند لایه، شامل لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی می‌باشد. سیگنال ورودی در سراسر شبکه و در جهت مستقیم پخش می‌شود. به این شبکه‌های عصبی، عمدتاً پرسپترون‌های چند لایه نیز اطلاق می‌شود. طرح کلی یک شبکه چند لایه با دو لایه مخفی و یک لایه خروجی در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. پرسپترون‌های چند لایه با به کارگیری الگوریتم آموزشی مشهور پس انتشار خطا به طور چشمگیری برای حل مسایل پیچیده و متنوع استفاده شده است. به طور کلی یادگیری پس انتشار خطا شامل دو مسیر متفاوت در طول شبکه می‌باشد [۵۴]:

۱. مسیر مستقیم: در این مسیر، الگوی فعال (بردار ورودی) به شبکه اعمال می‌شود و اثر آن در طول شبکه، لایه به لایه پخش می‌شود. در نهایت مجموعه خروجی به عنوان پاسخ واقعی شبکه تولید می‌شود. شایان ذکر است که در طول مسیر مستقیم، تمامی وزن‌های شبکه ثابت باقی می‌مانند.

۲. مسیر برگشت: در این مسیر، تمامی وزن‌های شبکه بر اساس قانون تصحیح خطا تنظیم می‌گردد. هم چنین سیگنال خطا، از تفاضل پاسخ واقعی شبکه از پاسخ مطلوب (هدف) بدست می‌آید. سپس، سیگنال خطای تولید شده در مسیر برگشت شبکه پخش می‌شود. در واقع وزن‌ها باید طوری تنظیم شوند تا حتی الامکان پاسخ واقعی شبکه به پاسخ مطلوب نزدیک شود.

یکی دیگر از انواع شبکه عصبی مشهور، شبکه عصبی شعاعی می‌باشد. ساختار کلی یک شبکه عصبی شعاعی سه لایه در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. اولین لایه، لایه ورودی نام دارد. نرون‌های لایه ورودی به طور کامل به نرون‌های لایه دوم که لایه پنهان نامیده می‌شود، متصل هستند. در لایه پنهان، با استفاده از یکسری توابع غیر خطی، فضای ورودی را به یک فضای ویژگی تبدیل می‌کنیم که در نهایت ترکیب خطی از عناصر فضای ویژگی، خروجی شبکه را نتیجه می‌دهد.



شکل (۱-۳) ساختار کلی یک شبکه عصبی چند لایه

در این فصل به طور جداگانه از دو تخمین گر عدم قطعیت ها از قبیل شبکه عصبی چند لایه و شعاعی بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ در طراحی کنترل کننده ها استفاده خواهیم کرد. پایداری سیستم کنترل نیز بررسی و تضمین می گردد.

۲-۳- طراحی کنترل مقاوم

مطابق بخش ۲-۲ از فصل دوم، قانون کنترل را به صورت زیر پیشنهاد می دهیم:

$$v(t) = u \quad \text{for} \quad |u| \leq v_{\max} \quad (1-3)$$

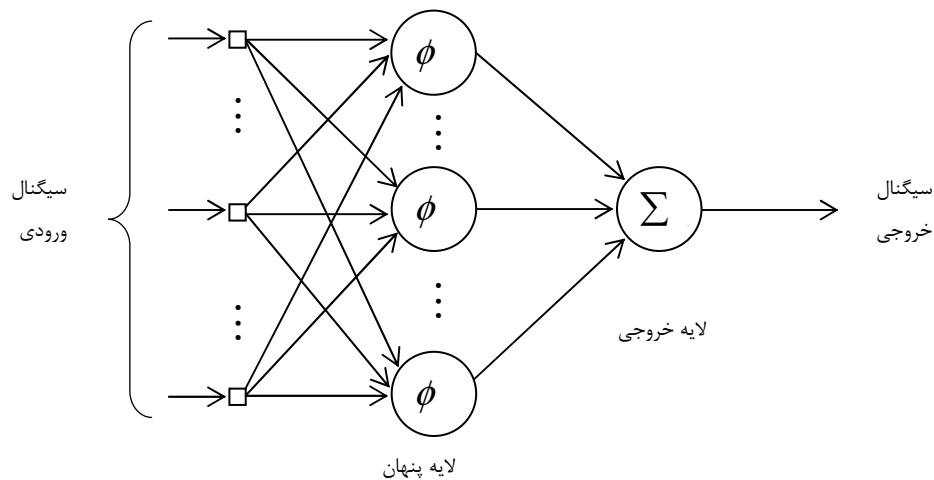
$$v(t) = v_{\max} \operatorname{sgn}(u) \quad \text{for} \quad v_{\max} < |u| \quad (2-3)$$

$$u = \hat{R}I_a + \hat{k}_r(\dot{q}_d + k_p(q_d - q)) + \hat{F} \quad (3-3)$$

که در آن $\hat{F}$ مقدار تخمینی F می باشد که در بخش بعدی معرفی می شود.

۱-۲-۳ تخمین گر تطبیقی عصبی چند لایه عدم قطعیت ها

شکل (۱-۳) قسمتی از یک پرسپترون چند لایه را توصیف می کند. دو نوع سیگنال در این شبکه تعریف می شود:



شکل (۲-۳) ساختار کلی یک شبکه عصبی پایه شعاعی

۱. سیگنال‌های عملگر. سیگنال عملگر همان سیگنال ورودی است که نرون به نرون بصورت مستقیم درون شبکه پخش می‌شود و در خروجی شبکه بصورت سیگنال خروجی ظاهر می‌شود.

۲. سیگنال‌های خطا. سیگنال خطا در نرون خروجی شبکه تولید می‌شود و بصورت برگشتی، لایه به لایه درون شبکه پخش می‌شود.

همانطور که قبلاً گفته شد برای حالتی که داشته باشیم $|u| \leq v_{\max}$ ، موتور برای کاهش خطا با ماکزیمم ولتاژ ممکن کار می‌کند، بنابراین، در این ناحیه تاثیر تخمین عدم قطعیت‌ها دیده نمی‌شود.

اما برای حالتی که $|u| \leq v_{\max}$ ، آن گاه طبق رابطه (۲-۱۱) خواهیم داشت:

$$F - \hat{F} = k_r^{-1}(\dot{e} + k_p e) \quad (۴-۳)$$

که در آن $F - \hat{F}$ خطای تخمین عدم قطعیت‌ها می‌باشد. نکته قابل توجه این است که سیگنال واقعی عدم قطعیت‌ها F ، در دسترس نمی‌باشد؛ با این وجود با توجه به رابطه (۳-۴)، خطای تخمین به عنوان سیگنال خطای خروجی تخمین‌گر عصبی با استفاده از خطای ردگیری و مشتق آن قابل محاسبه خواهد بود. در این پژوهش، از یک شبکه عصبی سه لایه برای تخمین عدم قطعیت‌ها استفاده

شده است. مطابق شکل (۳-۳)، یک نرون در لایه پنهان (نرون j ام) و یک نرون در لایه خروجی (نرون k ام) وجود دارد. معیار خطای شبکه برای نرون لایه خروجی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$J = \frac{1}{2}(F - \hat{F})^2 \quad (۵-۳)$$

برای تصحیح وزن‌های شبکه عصبی با روش گرادیان نزولی خواهیم داشت [۵۴]:

$$\Delta p_i = -\gamma_i \frac{\partial J}{\partial p_i} \quad i = 1, \dots, 5 \quad (۶-۳)$$

که در آن γ_i پارامترهای مثبت و p_i وزن‌های شبکه عصبی می‌باشد. با در نظر گرفتن روابط (۵-۳) و (۶-۳)، قوانین تطبیق بصورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{aligned} \hat{p}_4(t) &= \int_0^\tau \gamma_4 k_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) y_j d\tau + \hat{p}_4(0) \\ \hat{p}_5(t) &= \int_0^\tau \gamma_5 k_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) d\tau + \hat{p}_5(0) \end{aligned} \quad (۷-۳)$$

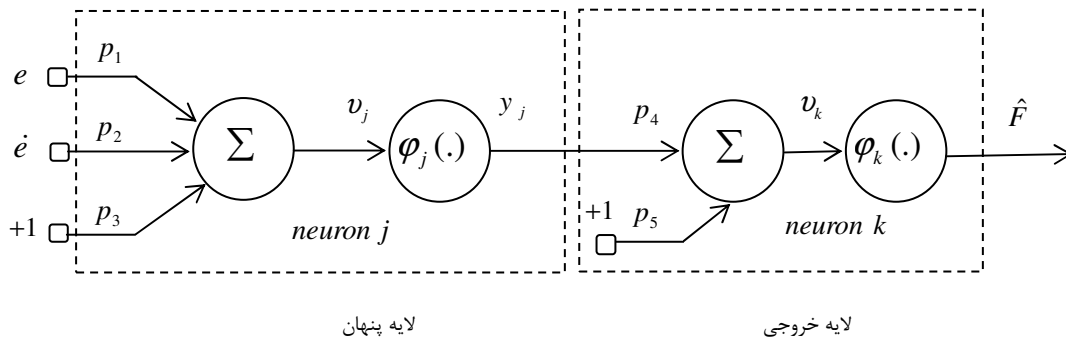
$$\begin{aligned} \hat{p}_1(t) &= \int_0^\tau \gamma_1 \varphi'_j \varphi'_k k_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) \hat{p}_4 d\tau + \hat{p}_1(0) \\ \hat{p}_2(t) &= \int_0^\tau \gamma_2 \varphi'_j \varphi'_k k_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) \hat{p}_4 \dot{e} d\tau + \hat{p}_2(0) \\ \hat{p}_3(t) &= \int_0^\tau \gamma_3 \varphi'_j \varphi'_k k_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) \hat{p}_4 d\tau + \hat{p}_3(0) \end{aligned}$$

که در آن که در آن $\hat{p}_1(0)$ ، $\hat{p}_2(0)$ و $\hat{p}_3(0)$ مقادیر اولیه وزن‌های نرون j ام و $\hat{p}_4(0)$ و $\hat{p}_5(0)$ مقادیر اولیه وزن‌های نرون k ام می‌باشند. در لایه پنهان شبکه عصبی، از تابع فعال سازی سیگموئید استفاده شده است. داریم:

$$\varphi_j(v_j) = \frac{1}{1 + \exp(-v_j)} \quad (۸-۳)$$

و در لایه خروجی از تابع فعال سازی خطی به صورت زیر استفاده شده است:

$$\varphi_k = v_k \quad (۹-۳)$$



شکل (۳-۳) طرح تخمین گر عصبی چند لایه عدم قطعیت ها

۳-۲-۲- تخمین گر تطبیقی عصبی شعاعی عدم قطعیت ها

در این بخش، بجای استفاده از شبکه عصبی چندلایه به عنوان تخمین گر عدم قطعیت ها، از یک شبکه عصبی شعاعی استفاده می شود. روند بدست آوردن قانون تطبیق مشابه بخش (۳-۲-۱) می باشد.

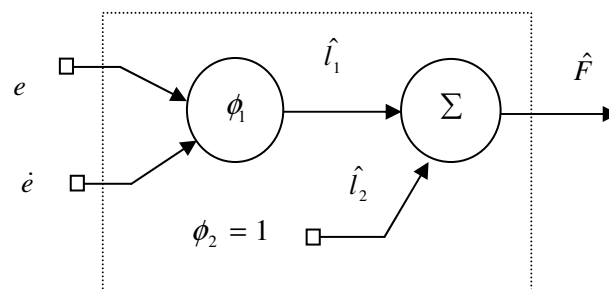
برای تخمین گر $\hat{F}$ ، یک شبکه عصبی شعاعی گوسی به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$\hat{F} = \hat{l}_1 \exp(-(e^2 + \dot{e}^2)) + \hat{l}_2 \quad (۳-۱۰)$$

که در آن $\hat{F}$ پاسخ خروجی شبکه عصبی، $\hat{l}_1$ و $\hat{l}_2$ نیز وزن های تطبیقی می باشند. ساختار تخمین گر پیشنهادی در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.

مطابق بخش (۳-۲-۱)، معیار خطای شبکه به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$J = \frac{1}{2} (F - \hat{F})^2 \quad (۳-۱۱)$$



شکل (۳-۴) طرح تخمین گر عصبی شعاعی پیشنهادی

برای تصحیح وزن های شبکه عصبی شعاعی، از الگوریتم پس انتشار استفاده می کنیم. برای وزن $\hat{l}_1$ ، داریم:

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{l}_1} = \frac{\partial J}{\partial (F - \hat{F})} \cdot \frac{\partial (F - \hat{F})}{\partial \hat{F}} \cdot \frac{\partial \hat{F}}{\partial \hat{l}_1} \quad (۱۲-۳)$$

با توجه به (۱۰-۳) و (۱۱-۳)، رابطه (۱۲-۳) بصورت زیر بیان می گردد:

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{l}_1} = -\exp(-(e^2 + \dot{e}^2))(F - \hat{F}) \quad (۱۳-۳)$$

تصحیح وزن $\Delta \hat{l}_1$ اعمالی به $\hat{l}_1$ را به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta \hat{l}_1 = -\gamma_6 \frac{\partial J}{\partial \hat{l}_1} \quad (۱۴-۳)$$

که در آن γ_6 یک پارامتر مثبت می باشد. با جایگذاری رابطه (۱۳-۳) در (۱۴-۳)، می توان نتیجه گرفت:

$$\Delta \hat{l}_1 = \gamma_6 (F - \hat{F}) \exp(-(e^2 + \dot{e}^2)) \quad (۱۵-۳)$$

با در نظر گرفتن روابط (۴-۳) و (۱۵-۳)، قانون تطبیق برای اصلاح وزن $\hat{l}_1$ بصورت زیر پیشنهاد می گردد:

$$\hat{l}_1(t) = \int_0^t \gamma_6 k_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) \exp(-(e^2 + \dot{e}^2)) d\tau + \hat{l}_1(0) \quad (۱۶-۳)$$

که در آن $\hat{l}_1(0)$ مقدار اولیه وزن $\hat{l}_1$ می باشند. مطابق روند طی شده، قانون تطبیق برای وزن $\hat{l}_2$ نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$\hat{l}_2(t) = \int_0^t \gamma_7 k_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) d\tau + \hat{l}_2(0) \quad (۱۷-۳)$$

که در آن γ_7 پارامتری مثبت و $\hat{l}_2(0)$ مقدار اولیه وزن $\hat{l}_2$ می باشد.

تخمین گر $\hat{F}$ در هر دو ساختار شبکه عصبی پیشنهاد داده شده، می تواند بر اساس خاصیت تقریب

گرعمومی بودن شبکه های عصبی چند لایه و شعاعی [۵۴ و ۵۵]، تابع عدم قطعیت F را تخمین

بزنند. بنابراین، داریم:

$$|F - \hat{F}| \leq \rho \quad (18-3)$$

که در آن ρ یک اسکالر مثبت است.

۳-۳- آنالیز پایداری

تابع مثبت معین V را بصورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$V = 0.5 e^2 \quad (19-3)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۹-۳) داریم:

$$\dot{V} = e \dot{e} \quad (20-3)$$

از رابطه (۴-۳)، به راحتی می‌توان نشان داد که:

$$\dot{e} = -k_p e + \hat{k}_r (F - \hat{F}) \quad (21-3)$$

حال با جایگذاری رابطه (۲۱-۳) در (۲۰-۳) نتیجه می‌شود که:

$$\dot{V} = -k_p e^2 + \hat{k}_r e (F - \hat{F}) \quad (22-3)$$

چنانچه $\dot{V} < 0$ باشد، خطای ردگیری کاهش می‌یابد. بنابراین، شرط همگرایی e زمانی تحقق می‌یابد که:

$$F - \hat{F} < k_p \hat{k}_r^{-1} e \quad (23-3)$$

بنابراین، به منظور برقراری رابطه (۲۳-۳)، با استفاده از نامساوی کوشی-شوارتز و رابطه (۱۸-۳)، داریم:

$$\rho \hat{k}_r / k_p \triangleq \delta_0 < |e| \quad (24-3)$$

که در آن δ_0 یک ثابت مثبت می‌باشد. بنابراین، تا زمانی که $|e| < \delta_0$ باشد، $\dot{V} < 0$ برقرار است. رابطه (۲۴-۳) به این معنی است که خطای ردگیری در خارج از دایره‌ای به شعاع δ_0 کاهش می‌یابد، تا زمانی که خطای ردگیری نهایتاً وارد دایره می‌شود. در نتیجه خطای ردگیری محدود خواهد ماند. در مقابل، زمانی که $|e| > \delta_0$ باشد، $\dot{V} > 0$ خواهد بود، به این معنی که خطای ردگیری محدود می‌ماند، هر چند به صفر میل نمی‌کند. بنابراین، می‌توان گفت:

خطای ردگیری e محدود می ماند و در نهایت وارد دایره ای به شعاع δ_0 می شود.

مطابق آنالیز پایداری بخش ۲-۳، محدودیت تمامی حالات سیستم q ، $\dot{q}$ و I_a اثبات و پایداری سیستم تضمین می شود.

۳-۴- نتایج شبیه سازی

سیستم کنترل را روی ربات اسکارا ۴ رابط شبیه سازی می نماییم. مسیر مطلوب ردگیری، شکل (۳-۵)، برای همه مفاصل با تابع زیر تعریف شده است:

$$q_d = 0.5(1 - \cos(\pi t / 2.5)) \quad \text{for} \quad 0 \leq t < 5 \quad (3-25)$$

۳-۴-۱- کنترل ردگیری کنترل کننده مجهز به تخمین گر عصبی چند لایه

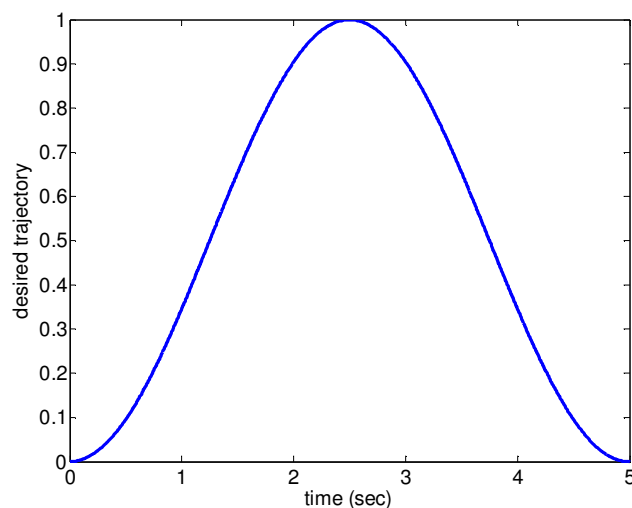
جهت اجرای شبیه سازی از قانون کنترل (۳-۱)، (۳-۲)، (۳-۳) و قوانین تطبیق (۳-۷) استفاده می کنیم. پارامترهای مورد نیاز در کنترل ردگیری ربات بصورت زیر انتخاب شده اند:

$$\begin{aligned} \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 20, \quad k_p = 70, \\ p_1(0) = p_2(0) = p_3(0) = p_4(0) = p_5(0) = 0 \end{aligned} \quad (3-26)$$

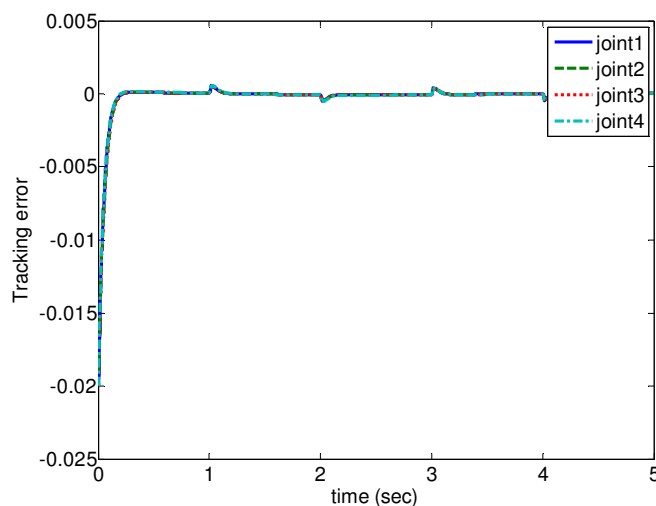
هر ۴ کنترل کننده بصورت یکسان انتخاب شده اند ولی در حالت کلی می توانند متفاوت باشند. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت های پارامتری، $\hat{R}$ و $\hat{k}_r$ ، ۹۰ درصد مقادیر واقعی شان در نظر گرفته شده اند. زمان اجرای شبیه سازی ۵ ثانیه انتخاب شده است. اغتشاش خارجی توسط یک تابع تولید پالس با پریود زمانی ۲ ثانیه، تاخیر ۱ ثانیه، دامنه ۱ و پهنای پالس ۱ ثانیه به سیستم کنترل اعمال می شود.

شکل (۳-۶) خطای ردگیری سیستم کنترل پس از انجام شبیه سازی با حضور اغتشاش خارجی را نمایش می دهد. خطای ردگیری تمامی مفاصل بدون فراجاهش در نهایت در انتهای ۵ ثانیه به کمتر از 5.7×10^{-5} می رسد. واحد خطای موقعیت برای مفاصل لولایی رادیان و برای مفصل کشویی، متر است. شکل (۳-۷) سیگنال کنترل ولتاژ موتورهای هر مفصل را نشان می دهد. ولتاژ موتورهای نرم و در محدوده مجاز است. افزایش ولتاژ موتورهای در لحظه ابتدایی به دلیل خطای اولیه مفاصل می باشد. ولتاژ موتور سوم به دلیل غلبه بر نیروی گرانشی در انتهای مسیر صفر نمی باشد. شکل (۳-۸) عملکرد

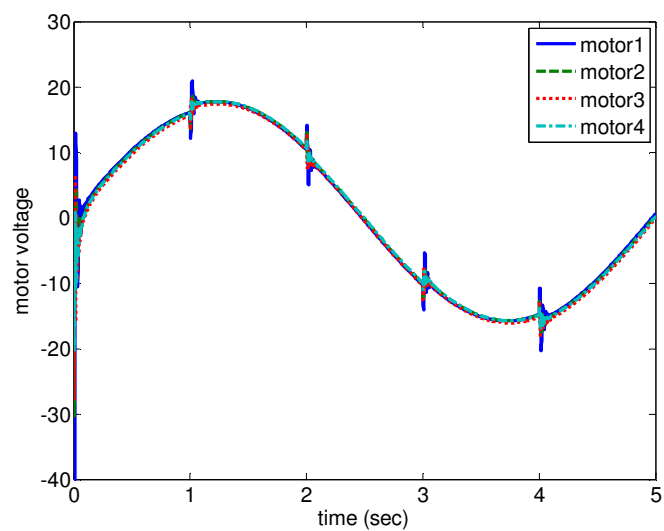
تخمین عدم قطعیت را برای همه مفاصل نشان می‌دهد. برای مفصل سوم، ماکزیمم فراجهبش خطای تخمین عدم قطعیت ها $-9.43V$ و در نهایت مقدار آن به کمتر از $0.042 V$ می‌رسد. شکل (۳-۹) تطبیق پارامترهای تخمین گر را برای تمامی مفاصل نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود قوانین سوم، چهارم و پنجم در فرایند تطبیق شرکت دارند در حالی که پارامترهای p_1 و p_2 به مقادیر ثابت همگرا شده‌اند.



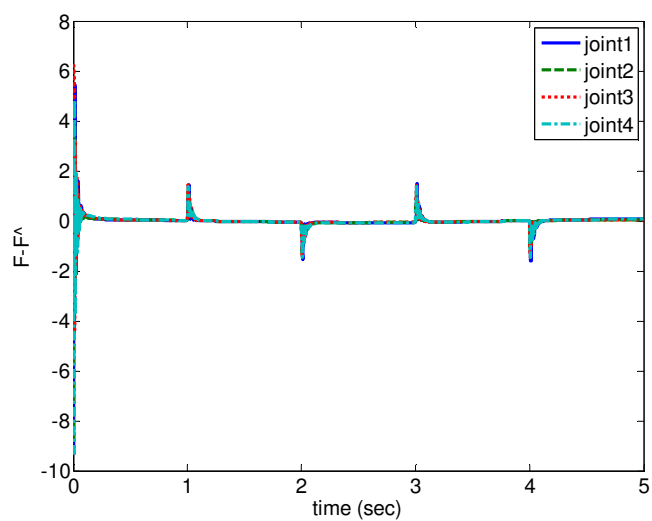
شکل (۳-۵) مسیر مطلوب ردگیری



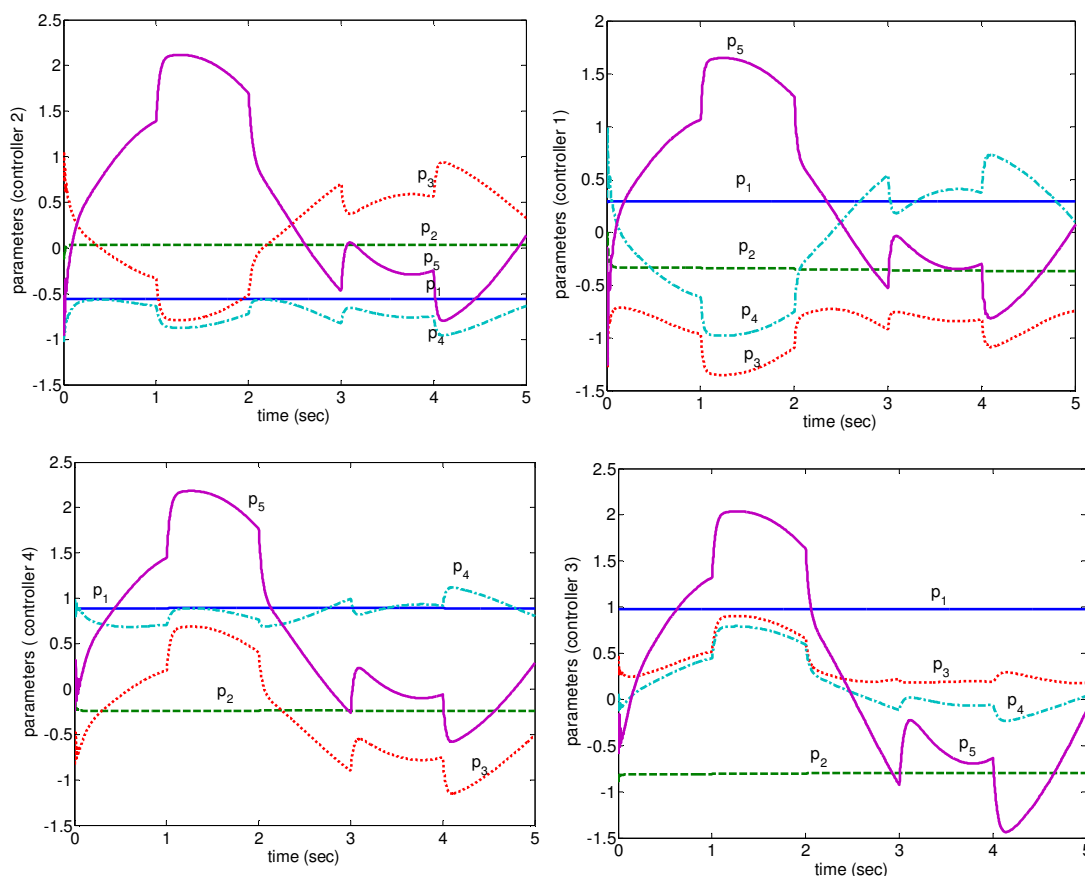
شکل (۳-۶) خطای ردگیری کنترل کننده مقاوم مجهز به تخمین گر عصبی چند لایه



شکل (۷-۳) ولتاژ موتورهای سیستم کنترل کننده مقاوم مجهز به تخمین گر عصبی چند لایه



شکل (۸-۳) عملکرد تخمین عدم قطعیت های سیستم توسط تخمین گر عصبی چند لایه



شکل (۳-۹) تطبیق پارامترهای تخمین گرهای عصبی چند لایه

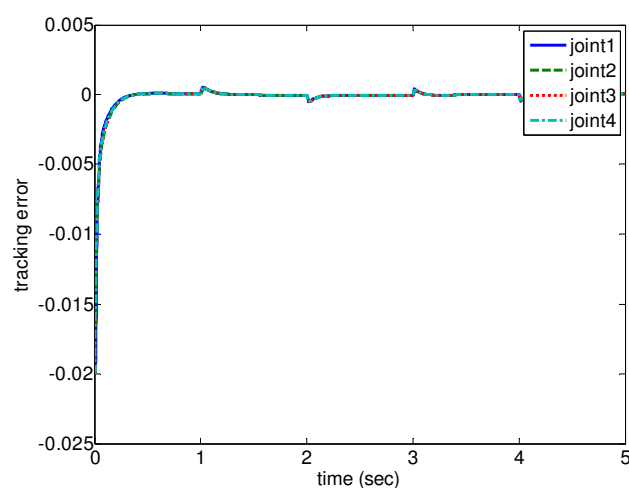
۳-۴-۲- کنترل ردگیری کنترلر مجهز به تخمین گر عصبی شعاعی

قانون کنترل (۳-۱)، (۳-۲)، (۳-۳) و قوانین تطبیق (۳-۱۶) و (۳-۱۷)، جهت انجام شبیه سازی سیستم کنترل به کار گرفته می شوند. پارامترهای مورد نیاز در کنترل کننده ها بصورت زیر انتخاب شده اند:

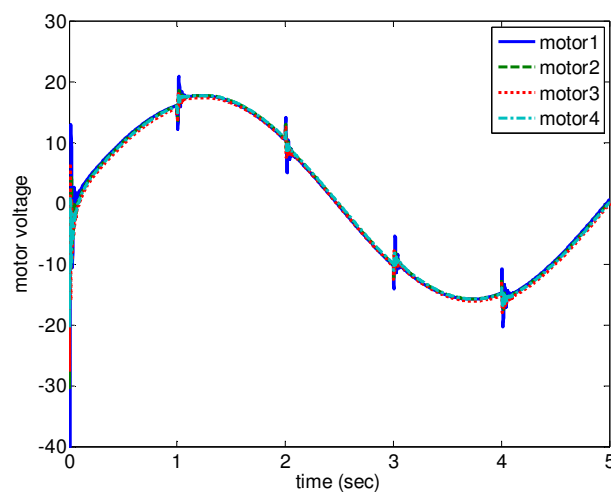
$$\gamma_6 = \gamma_7 = 20, \quad k_p = 70, \quad \hat{l}_1(0) = \hat{l}_2(0) = 0 \quad (۳-۲۷)$$

زمان اجرای شبیه سازی ۵ ثانیه می باشد. خطای ردگیری تمامی مفاصل در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. مقدار خطای مفاصل، بدون فراجهدش در انتهای شبیه سازی به کمتر از 1.88×10^{-5} می رسد. همانطور که مشاهده می شود، سیستم کنترل عملکرد بسیار مناسبی دارد. شکل (۳-۱۱) ولتاژ موتورهای هر مفصل را نشان می دهد. از آن جا که مفاصل دارای خطای اولیه می باشند، سیگنال های کنترل در آغاز بزرگ هستند. ولتاژ موتور مفصل ۳ برای غلبه بر نیروی گرانشی دارای مقدار است.

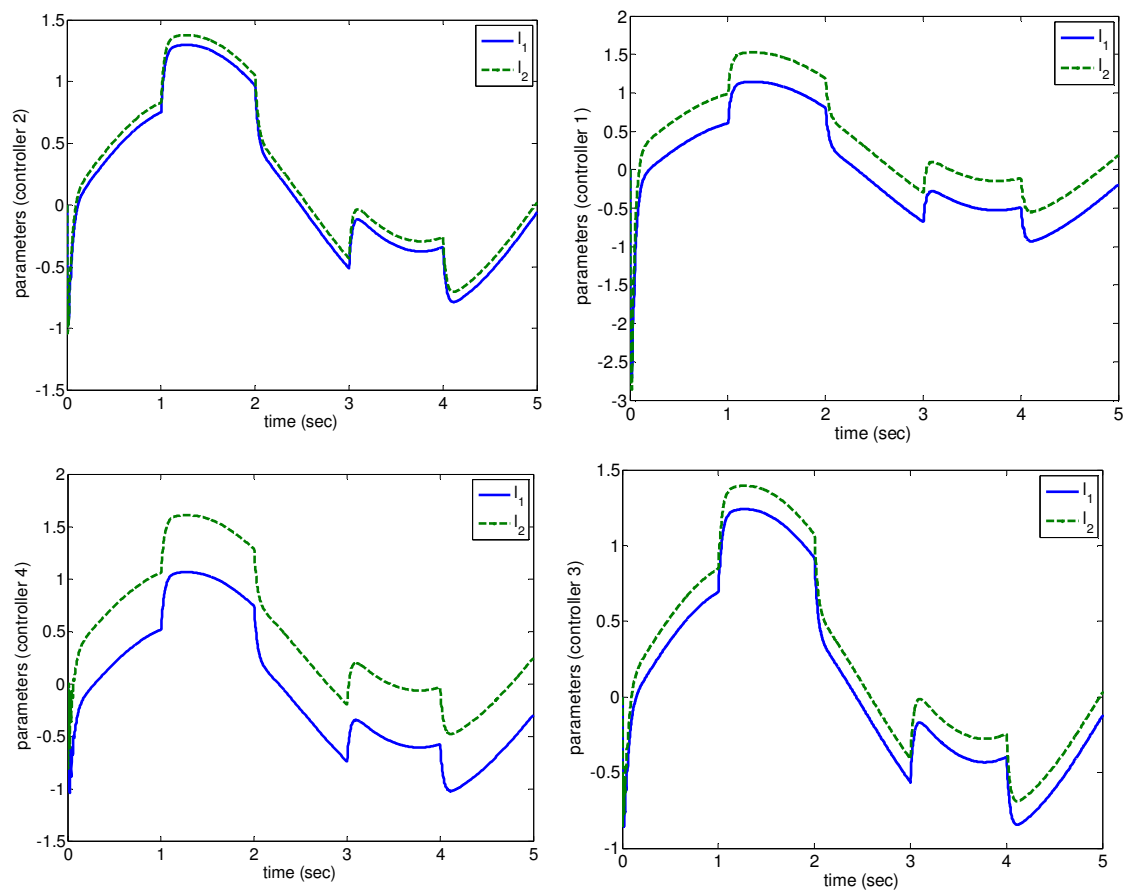
ولتاژ سایر موتورها در پایان تقریباً صفر است، زیرا باری روی آنها نیست. همگرایی پارامترهای تخمین گر شعاعی عصبی برای تمامی مفاصل نیز در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است. تمامی پارامترها در فرآیند تطبیق شرکت دارند. در شکل (۳-۱۳) عملکرد تخمین عدم قطعیت نشان داده شده است. خطای تخمین عدم قطعیت‌ها برای تمامی مفاصل در انتهای شبیه سازی به کمتر از $0.042 V$ می رسد. مقایسه نتایج هر دو روش کنترلی پیشنهادی، کارایی موثر آنها را اثبات می کند. اما روش کنترل مقاوم مجهز به تخمین گر عصبی شعاعی نسبت به روش دیگر ساده تر و محاسبات آن کمتر است. زیرا در تخمین گر عصبی آن دو پارامتر تنظیم می شوند، در حالی که در تخمین گر عصبی چند لایه، برای هر کنترل کننده، تنظیم ۵ پارامتر مورد نیاز می باشد.



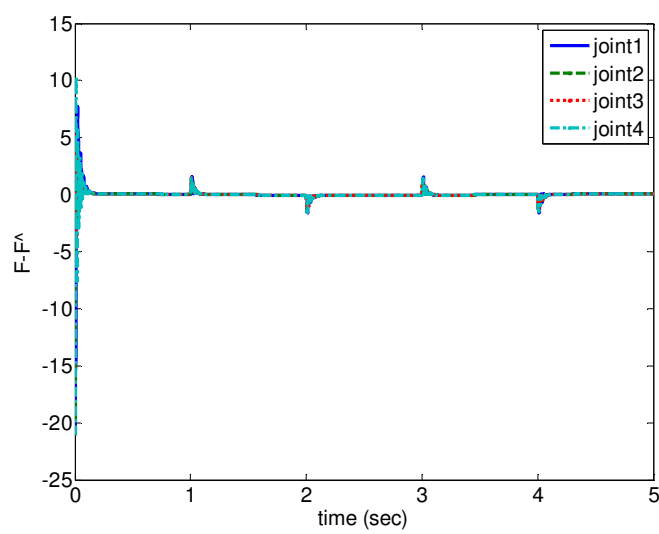
شکل (۳-۱۰) خطای ردگیری کنترل کننده مقاوم مجهز به تخمین گر عصبی شعاعی



شکل (۳-۱۱) ولتاژ موتورهای سیستم کنترل کننده مجهز به تخمین گر عصبی شعاعی



شکل (۳-۱۲) تطبیق پارامترهای تخمین گرهای عصبی شعاعی



شکل (۳-۱۳) عملکرد تخمین عدم قطعیت‌های سیستم توسط تخمین گر عصبی شعاعی

فصل ۴. کنترل مقاوم مستقل از مدل بازوی رباتیک با تخمین گر تطبیقی شعاعی

۴-۱- مقدمه

به طور کلی، تخمین و جبران عدم قطعیت‌ها یکی از ابزارهای مهم برای کنترل ردگیری مقاوم به حساب می‌آید. روش‌های تقریب توابع از قبیل منطق فازی، شبکه‌های عصبی، الگوریتم‌های بهینه سازی و توابع مثلثاتی نقش مهمی را در این زمینه ایفا می‌کنند. در دو دهه اخیر به طور فراوان از شبکه‌های عصبی [۵۶-۵۹] و منطق فازی [۶۰ و ۶۱] به دلیل توانایی قدرتمند آن‌ها در تقریب توابع [۵۵] در سیستم‌های کنترل استفاده شده است. یکی از مسایل مهم در طراحی تخمین‌گرها سادگی و بازده آن‌هاست. به طوری که تخمین‌گرهای پیچیده نیاز به فضای محاسباتی زیاد، سنگینی محاسبات و پارامترهای فراوان می‌باشند.

یک ابزار موثر برای تخمین توابع، شبکه‌های عصبی شعاعی می‌باشد. کنترل مقاوم سیستم‌های غیرخطی با استفاده از این شبکه‌های عصبی را می‌توان به دو دسته کنترل تطبیقی مستقیم و غیر مستقیم [۶۲-۶۴] تقسیم نمود. در کنترل تطبیقی مستقیم، از شبکه‌های عصبی شعاعی به عنوان کنترل کننده استفاده می‌شود. پارامترهای شبکه با استفاده از قوانین تطبیق به دست آمده از آنالیز پایداری به صورت لحظه ای تنظیم می‌شوند. در مقابل، کنترل تطبیقی غیر مستقیم شامل دو مرحله می‌باشد: اول این که دینامیک‌های سیستم با استفاده از شبکه‌های عصبی شعاعی تخمین زده شده و در مرحله دوم از توابع تخمین زده شده برای طراحی قوانین کنترل استفاده می‌شود.

در این فصل، روشی جدیدی برای کنترل مستقل از مدل مقاوم ولتاژ ربات با استفاده از شبکه‌عصبی شعاعی به عنوان تخمین‌گر عدم قطعیت‌ها معرفی می‌گردد. در مقایسه با دیگر روش‌های مرسوم کنترل مقاوم، روش کنترلی پیشنهادی به حدود عدم قطعیت‌ها و تشکیل توابع محدودیت بستگی ندارد. به علاوه، روش کنترلی پیشنهادی مستقل از مدل بوده و مشکل لرزش سیگنال نیز در آن وجود ندارد.

۴-۲- طراحی کنترل مقاوم

با جایگذاری روابط (الف-۲۹)، (الف-۳۰) و (الف-۳۲) در رابطه (الف-۳۱)، معادله اسکالر ولتاژ موتور i

ام به صورت زیر بیان می‌شود:

$$RK_m^{-1}Jr^{-1}\ddot{q} + (RK_m^{-1}Br^{-1} + K_br^{-1})\dot{q} + RK_m^{-1}r\tau_r + L\dot{I}_a + \varphi = v \quad (۱-۴)$$

که در آن $\ddot{q}$ ، $\dot{q}$ ، τ_r ، $\dot{I}_a$ و φ به ترتیب المان‌های i ام بردارهای $\ddot{q}$ ، $\dot{q}$ ، τ_r ، $\dot{I}_a$ و φ می‌باشد. معادله (۱-۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\ddot{q} + F = v \quad (۲-۴)$$

که در آن F ، مجموع تمامی عدم قطعیت‌ها می‌باشد و عبارت است از:

$$F = (RK_m^{-1}Jr^{-1} - 1)\ddot{q} + (RK_m^{-1}Br^{-1} + K_br^{-1})\dot{q} + RK_m^{-1}r\tau_r + L\dot{I}_a + \varphi \quad (۳-۴)$$

قانون کنترل را به صورت زیر پیشنهاد می‌کنیم:

$$u = \ddot{q}_d + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q) + \hat{F} \quad (۴-۴)$$

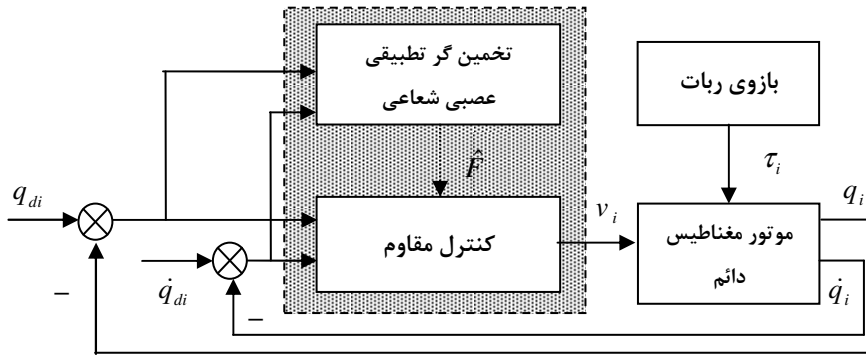
که در آن $\hat{F}$ ، تخمین F ، q_d موقعیت مفصلی مطلوب، ضرایب k_p و k_d پارامترهای طراحی کنترل می‌باشند. در این فصل، به منظور تخمین F ، از یک شبکه عصبی شعاعی گوسی به منظور تخمین‌گر عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شود. برای محافظت از موتور، ولتاژ اعمالی به آن باید کمتر از $v_{\max}$ باشد. بنابراین، از یک محدود کننده ولتاژ برای هر موتور استفاده می‌شود. بنابراین، قانون کنترل (۴-۴) را به صورت زیر اصلاح می‌کنیم:

$$v(t) = v_{\max} \text{sat}(u / v_{\max}) \quad (۵-۴)$$

که در آن

$$\text{sat}(u / v_{\max}) = \begin{cases} 1 & \text{if } u > v_{\max} \\ u / v_{\max} & \text{if } |u| \leq v_{\max} \\ -1 & \text{if } u < -v_{\max} \end{cases} \quad (۶-۴)$$

طرح کنترلی پیشنهادی در شکل (۱-۴) نشان داده شده است.



شکل (۱-۴) دیاگرام کنترل مقاوم مستقل از مدل ولتاژ موتور مفصل ربات

۱-۲-۴ طراحی تخمین گر عدم قطعیت‌ها

با اعمال قانون کنترل (۵-۴) به سیستم (۲-۴)، سیستم حلقه بسته به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\ddot{q} + F = v_{\max} \text{sat}(u / v_{\max}) \quad (۷-۴)$$

در حالتی که $u > v_{\max}$ ، با توجه به رابطه (۶-۴) داریم:

$$\ddot{q} + F = v_{\max} \quad (۸-۴)$$

و در حالتی که $u < -v_{\max}$ ، نیز با توجه به رابطه (۶-۴)، داریم:

$$\ddot{q} + F = -v_{\max} \quad (۹-۴)$$

در این وضعیت‌ها، موتور برای کاهش خطا با ماکزیمم ولتاژ ممکن کار می‌کند. بنابراین، در این ناحیه تاثیر تخمین عدم قطعیت‌ها دیده نمی‌شود.

در حالتی که $|u| \leq v_{\max}$ ، با توجه به روابط (۲-۴)، (۴-۴) و (۶-۴) داریم:

$$\ddot{q} + F = (\ddot{q}_d + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q)) + \hat{F} \quad (۱۰-۴)$$

بنابراین، سیستم حلقه بسته به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e = F - \hat{F} \quad (۱۱-۴)$$

که در آن e خطای ردگیری می‌باشد و عبارت است از:

$$e = q_d - q \quad (۱۲-۴)$$

در این فصل، یک تخمین گر ساده عصبی شعاعی گوسی برای تمام مفاصل پیشنهاد می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{F} = \hat{p} \exp(-(e^2 + \dot{e}^2)) \quad (13-4)$$

که در آن $\hat{p}$ ضریب تخمین گر تطبیقی می‌باشد. رابطه (13-4) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\hat{F} = \hat{p} \zeta \quad (14-4)$$

که در آن ζ برابرست با:

$$\zeta = \exp(-(e^2 + \dot{e}^2)) \quad (15-4)$$

تخمین گر $\hat{F}$ می‌تواند بر اساس خاصیت تقریب گر عمومی بودن شبکه های عصبی شعاعی [55]، تابع عدم قطعیت F را تخمین بزند. بنابراین، داریم:

$$|F - \hat{F}| \leq \rho \quad (16-4)$$

که در آن ρ یک اسکالر مثبت می‌باشد. فرض کنیم F به صورت زیر مدل سازی شود:

$$F = p\zeta + \varepsilon \quad (17-4)$$

که در آن ε خطای تقریب و بردار p ثابت می‌باشد. فرض شود:

$$|F - p\zeta| \leq \beta \quad (18-4)$$

با در نظر گرفتن روابط (17-4) و (18-4)، می‌توان نشان داد که $|\varepsilon| \leq \beta$ ، که در آن β حد بالای عدم قطعیت ها می‌باشد.

با جایگذاری روابط (17-4) و (14-4) در (11-4) دینامیک حلقه بسته خطا به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e = (p - \hat{p})\zeta + \varepsilon \quad (19-4)$$

معادله فضای حالت در فضای خطا برای رابطه (19-4) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\dot{E} = AE + B\omega \quad (20-4)$$

که در آن

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_p & -k_d \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, \quad \omega = (p - \hat{p})\zeta + \varepsilon \quad (21-4)$$

برای بدست آوردن قانون تطبیق، تابع مثبت معین V را پیشنهاد می‌کنیم:

$$V = 0.5\mathbf{E}^T \mathbf{S} \mathbf{E} + \frac{1}{2\gamma}(p - \hat{p})^2 \quad (22-4)$$

که γ یک اسکالر مثبت می‌باشد. از طرفی S و Q ماتریس‌های مثبت معین متقارن می‌باشند که در معادله لیاپانوف زیر صدق می‌کنند:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{A} = -\mathbf{Q} \quad (23-4)$$

با مشتق‌گیری نسبت به زمان از طرفین رابطه (22-4) داریم:

$$\dot{V} = 0.5\dot{\mathbf{E}}^T \mathbf{S} \mathbf{E} + 0.5\mathbf{E}^T \mathbf{S} \dot{\mathbf{E}} - \frac{1}{\gamma}(p - \hat{p})\dot{\hat{p}} \quad (24-4)$$

با جایگذاری روابط (20-4)، (21-4) و (23-4) در (24-4) داریم:

$$\dot{V} = -0.5\mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} + (p - \hat{p}) \left(\mathbf{E}^T \mathbf{S}_2 \zeta - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{p}} \right) + \mathbf{E}^T \mathbf{S}_2 \varepsilon \quad (25-4)$$

که در آن S_2 ستون دوم ماتریس S می‌باشد. برای $E \neq 0$ همواره $-0.5\mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} < 0$ خواهد بود. اگر قانون تطبیق بصورت زیر پیشنهاد گردد:

$$\dot{\hat{p}} = \gamma \mathbf{E}^T \mathbf{S}_2 \zeta \quad (26-4)$$

آنگاه

$$\dot{V} = -0.5\mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} + \mathbf{E}^T \mathbf{S}_2 \varepsilon \quad (27-4)$$

اگر $V < 0$ باشد، خطای ردگیری کاهش می‌یابد. بنابراین، همگرایی E تضمین گردد، اگر

$$\mathbf{E}^T \mathbf{S}_2 \varepsilon < 0.5\mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} \quad (28-4)$$

با استفاده از نامساوی کوشی-شوارتز و رابطه $|\varepsilon| \leq \beta$ ، داریم:

$$\mathbf{E}^T \mathbf{S}_2 \varepsilon \leq \|\mathbf{E}\| \cdot \|\mathbf{S}_2\| \cdot |\varepsilon| < \beta \|\mathbf{E}\| \cdot \|\mathbf{S}_2\| \quad (29-4)$$

از آن جایی که $\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{E}\|^2 \leq \mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} \leq \lambda_{\max}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{E}\|^2$ ، برای برقراری رابطه (28-4) کفایت:

$$2\beta \|S_2\| / \lambda_{\min}(Q) \triangleq \delta_0 < \|E\| \quad (۳۰-۴)$$

که در این رابطه، δ_0 یک اسکالر مثبت و $\lambda_{\min}(Q)$ و $\lambda_{\max}(Q)$ به ترتیب مینیمم و ماکزیمم مقادیر ویژه ماتریس Q می‌باشند. بنابراین، تا زمانی که $\delta_0 < \|E\|$ باشد، شرط $\dot{V} < 0$ برقرار است. به این معنی که در خارج از دایره ای با شعاع δ_0 ، خطای ردگیری کاهش می‌یابد. در نتیجه، نهایتاً خطای ردگیری به داخل دایره وارد می‌گردد. از سوی دیگر، اگر $\delta_0 > \|E\|$ باشد، $\dot{V} > 0$ خواهد بود. به این معنی که به صفر همگرا نخواهد شد.

طبق رابطه (۴-۲۶)، پارامتر تخمین گر عصبی شعاعی گوسی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\hat{p}(t) = \hat{p}(0) + \int_0^t \gamma E^T S_2 \zeta d\tau \quad (۳۱-۴)$$

که در آن $\hat{p}(0)$ مقدار اولیه می‌باشد.

نتیجه ۱: خطای ردگیری e و مشتق آن $\dot{e}$ محدود هستند و نهایتاً داخل دایره‌ای با شعاع δ_0 خواهند شد.

به منظور ارزیابی کردن مقدار نهایی خطا، باید خاطر نشان کرد که خطای ردگیری به حد بالای خطای تقریب β و پارامترهای طراحی کنترل k_p و k_d بستگی دارد. انتخاب k_p و k_d بزرگتر، خطای ردگیری کوچکتری را به همراه دارد.

۴-۳- آنالیز پایداری

اثبات محدودیت متغیرهای حالت θ ، $\dot{\theta}$ و I_a توسط آنالیز پایداری امکان پذیر می‌باشد. به منظور اثبات پایداری، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

فرضیه ۱: مسیر مطلوب حرکت بازوی ربات q_d باید هموار باشد، به این معنی که q_d و مشتقات آن تا مرتبه مورد نیاز در دسترس و همگی محدود باشند [۱۰].

فرضیه ۲: برای طراحی کنترل مقاوم، اغتشاش خارجی باید محدود باشد یعنی $|\varphi(t)| \leq \varphi_{\max}$.

فرضیه ۳: ولتاژ موتورها محدود باشند یعنی $|v| \leq v_{\max}$.

با توجه به نتیجه ۱، $E = [q_d - q \quad \dot{q}_d - \dot{q}]^T$ محدود می‌باشد. بنابراین، با در نظر گرفتن فرض ۱، که بیان گر محدودیت q_d و $\dot{q}_d$ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت:

نتیجه ۲: موقعیت مفصل q و سرعت مفصل $\dot{q}$ محدود هستند.

از رابطه (۴-۱)، برای هر موتور داریم:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} + \phi = v \quad (۴-۳۲)$$

با جایگذاری قانون کنترل (۴-۵) در رابطه (۴-۳۲) داریم:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} + \phi = v_{\max} \text{sat}(u / v_{\max}) \quad (۴-۳۳)$$

رابطه (۴-۳۳) را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$RI_a + L\dot{I}_a = w \quad (۴-۳۴)$$

که در آن

$$w = v_{\max} \text{sat}(u / v_{\max}) - k_b r^{-1} \dot{q} - \phi \quad (۴-۳۵)$$

متغیرهای $\dot{q}$ ، ϕ و v به ترتیب طبق نتیجه ۳، فرضیه ۲ و فرضیه ۳، محدود هستند. بنابراین، ورودی w در رابطه (۴-۳۳) محدود می‌باشد. معادله دیفرانسیل خطی (۴-۳۳) طبق معیار راث-هرویتز یک سیستم خطی پایدار است. با توجه به این که ورودی w محدود می‌باشد، بنابراین، خروجی I_a نیز محدود است.

نتیجه ۴: جریان I_a محدود است.

با توجه به نتایج گرفته شده، موقعیت مفصلی q ، سرعت مفصلی $\dot{q}$ و جریان موتور I_a محدود می‌باشند. بنابراین، حالات سیستم $\mathbf{q}$ ، $\dot{\mathbf{q}}$ و $\mathbf{I}_a$ همگی محدود هستند و پایداری سیستم تضمین می‌شود.

۴-۴- نتایج شبیه سازی

قانون کنترل (۴-۵) و قانون تطبیق (۴-۳۰) به ربات اسکارا جهت شبیه سازی سیستم کنترل اعمال شده است. بنابراین، برای کنترل موتورهای هر مفصل از یک کنترل کننده جداگانه استفاده می‌شود.

۴-۱-۴ کنترل ردگیری

مسیر مطلوب ردگیری برای همه مفاصل بصورت زیر تعریف شده است:

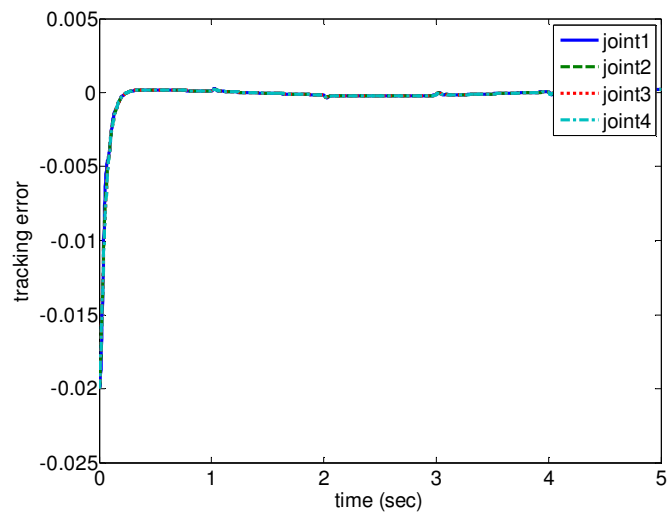
$$q_d = 0.5(1 - \cos(\pi t / 2.5)) \quad \text{for} \quad 0 \leq t < 5 \quad (۴-۳۶)$$

پارامترهای مورد نیاز در کنترل ردگیری ربات برای همه مفاصل بصورت یکسان و بصورت زیر انتخاب شده‌اند:

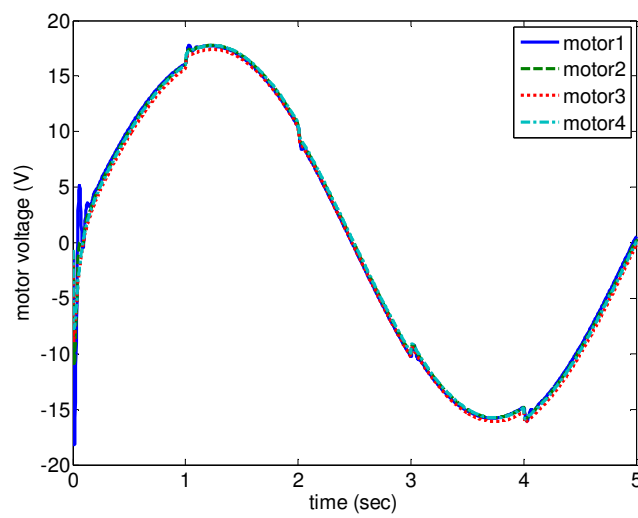
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -100 & -20 \end{bmatrix}, \quad S_2 = \begin{bmatrix} 100 \\ 6 \end{bmatrix}, \quad \gamma = 1000, \quad \hat{p}(0) = 0 \quad (۴-۳۷)$$

زمان اجرای شبیه سازی ۵ ثانیه انتخاب شده است. خطای اولیه برای مفاصل اول، دوم و چهارم، ۰.۰۲ رادیان و برای مفصل سوم ۰.۰۲ متر در نظر گرفته شده است. اغتشاش خارجی توسط یک تابع تولید پالس با پریود زمانی ۲ ثانیه، تاخیر ۱ ثانیه، دامنه ۱ و پهنای پالس ۱ ثانیه به سیستم کنترل اعمال می‌شود. بدین ترتیب، می‌توان تاثیر اغتشاش را بر روی سیستم کنترل بررسی نمود.

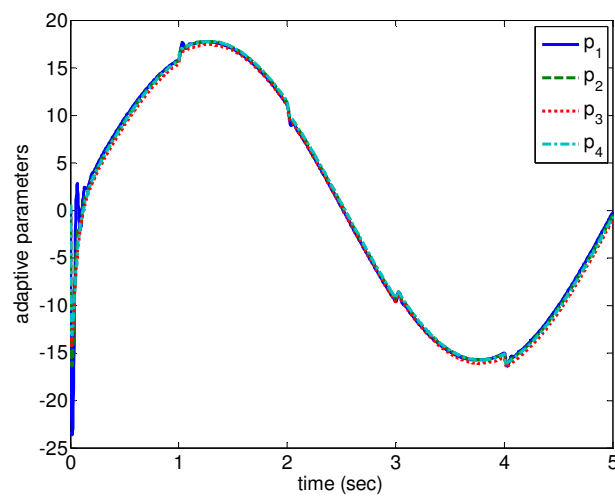
در شکل (۴-۲) خطای ردگیری سیستم کنترل در حضور اغتشاش خارجی نشان داده شده است. خطای ردگیری تمامی مفاصل بدون فراجش در نهایت در انتهای ۵ ثانیه به کمتر از 2.1×10^{-5} می‌رسد. واحد خطای موقعیت برای مفاصل لولایی رادیان و برای مفصل کشویی، متر است. شکل (۵-۳) سیگنال کنترل ولتاژ موتورهای هر مفصل را نشان می‌دهد. ولتاژ موتورها نرم و در محدوده مجاز است. ولتاژ موتور سوم به دلیل غلبه بر نیروی گرانشی در انتهای مسیر صفر نمی‌باشد. شکل (۴-۴) تطبیق پارامترها را برای تمامی مفاصل نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نمودار تطبیق پارامترها مشابه نمودار ولتاژ موتورها می‌باشد، به این معنی که تخمین گر نقش عمده ای در جبران عدم قطعیت ها ایفا می‌کند. شکل (۴-۵) عملکرد تخمین عدم قطعیت را برای همه مفاصل نشان می‌دهد. برای مفصل اول، ماکزیمم فراجش مقدار خطای تخمین عدم قطعیت 17.4 V و در نهایت به کمتر از 0.32 V می‌رسد.



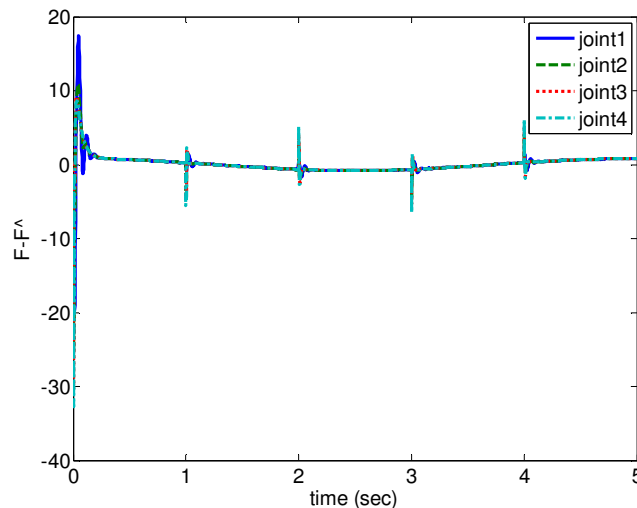
شکل (۲-۴) خطای ردگیری سیستم کنترل مقاوم مجهز به تخمین گر تطبیقی



شکل (۳-۴) سیگنال های کنترل ولتاژ سیستم کنترل مقاوم مجهز به تخمین گر تطبیقی



شکل (۴-۴) همگرایی پارامترهای ولتاژ سیستم کنترل مقاوم در حالت ردگیری



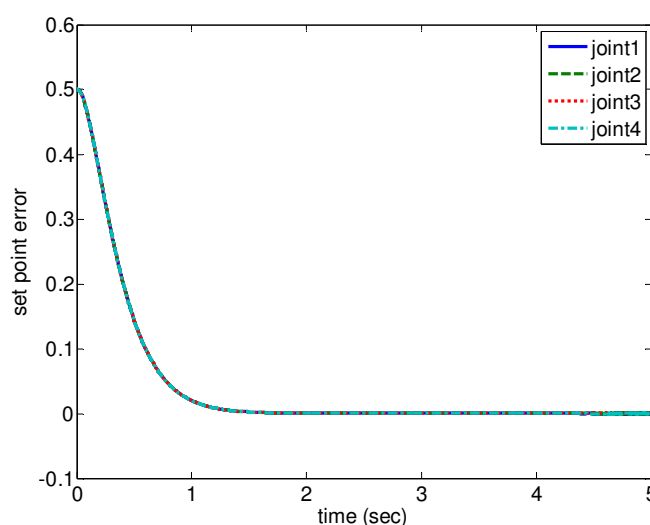
شکل (۴-۵) عملکرد تخمین تخمین گرهای عصبی تمامی مفاصل در حالت ردگیری

۴-۲-۴ کنترل تنظیم

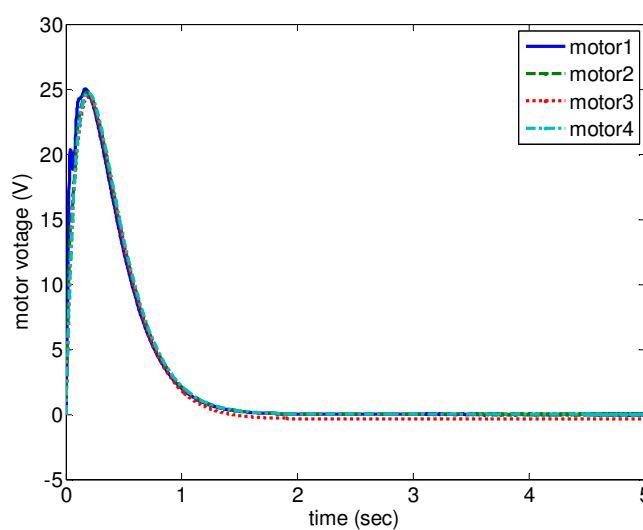
برای بررسی عملکرد تنظیم سیستم کنترل، موقعیت مفاصل روی ۰.۵ تنظیم شده است. پارامترهای مورد نیاز در کنترل تنظیم برای همه کنترل کننده‌ها مانند ردگیری (۴-۳۶) انتخاب شده است. زمان اجرای شبیه سازی در تنظیم ۵ ثانیه می‌باشد.

شکل (۴-۶) خطای تنظیم مفاصل را نشان می‌دهد. خطای ماندگار تمامی مفاصل، بدون فراجاهش در انتهای شبیه سازی تقریباً صفر است. مقدار خطای تمامی مفاصل در پایان ۵ ثانیه، به کمتر از 2.4×10^{-9} رسیده است، که این مقدار بسیار کوچک می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود، سیستم کنترل در حالت تنظیم عملکرد بسیار مناسبی دارد. همه کنترل کننده‌ها در تنظیم عملکرد یکسانی دارند و نمودار آن‌ها روی هم منطبق شده است. شکل (۴-۷)، ولتاژ موتورهای در حالت تنظیم را نشان می‌دهد. از آن جا که مفاصل دارای خطای اولیه می‌باشند، سیگنال‌های کنترل در آغاز بزرگ هستند. ولتاژ موتور مفصل ۳ برای غلبه بر نیروی گرانشی دارای مقدار است. ولتاژ سایر موتورهای در پایان تقریباً صفر است، زیرا باری روی آن‌ها نیست. همگرایی پارامترهای تخمین گرهای عصبی نیز در شکل (۵-۸) نشان داده شده است. در نهایت همه پارامترها به مقدار ثابتی همگرا شده‌اند.

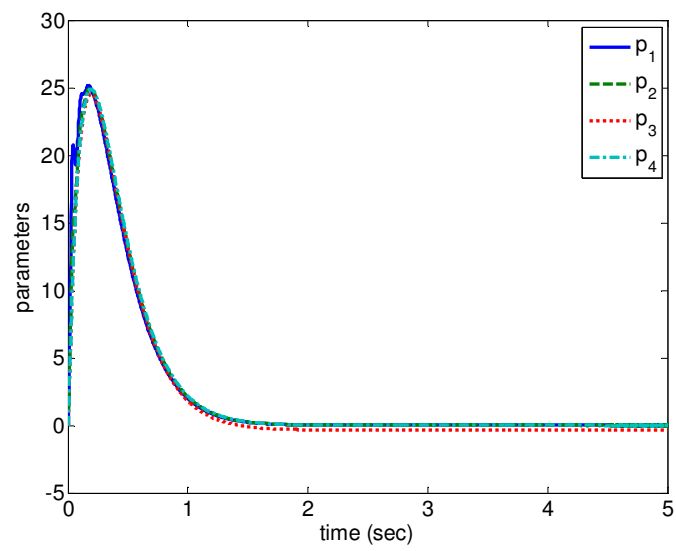
به طور کلی می توان گفت روش کنترل مقاوم پیشنهادی دارای عملکرد ردگیری و تنظیم بسیار مناسبی می باشد. همانطور که مشاهده گردید، دینامیک های پیچیده سیستم با به کارگیری شبکه عصبی شعاعی با عنوان تخمین گر عدم قطعیت ها، تخمین زده می شوند. این روش در مقابله با عدم قطعیت ها موفق بوده و مستقل از مدل می باشد. این روش بصورت مفصل مستقل به سیستم رباتیک اعمال شده و هر موتور بصورت جداگانه کنترل می شود. با توجه به نتایج شبیه سازی ها در هر دو حالت ردگیری و تنظیم، تخمین گر پیشنهادی در سیستم کنترل مقاوم دارای عملکرد مطلوبی می باشد.



شکل (۴-۶) خطای تنظیم سیستم کنترل مقاوم



شکل (۴-۷) ولتاژ موتورها در سیستم کنترل مقاوم پیشنهادی در حالت تنظیم (کنترل ولتاژ)



شکل (۸-۴) همگرایی پارامترهای تطبیقی تخمین گرهای عصبی در حالت تنظیم

فصل ۵. کنترل مقاوم عصبی بازوی ربات

۵-۱- مقدمه

همانطور که قبلاً گفته شد، اکثر روش‌های کنترل مقاوم ربات، بر اساس راهبرد کنترل گشتاور می باشد. یکی از ضعف‌های این استراتژی، نادیده گرفتن نقش محرکه‌های ربات در طراحی کنترل کننده می باشد. اخیراً تحقیقاتی برای در نظر گرفتن معادلات دینامیکی ربات و موتورها به عنوان یک سیستم واحد رباتیک انجام گرفته شده است [۵۷، ۶۵ و ۶۶]. در مرجع [۶۵] از تئوری خطی سازی فیدبکی برای حل این مشکل استفاده شده است. هر چند برای پیاده سازی این روش کنترلی، اندازه گیری متغیر شتاب مورد نیاز می باشد. در مرجع [۶۶]، از الگوریتم فازی تطبیقی برای کنترل ردگیری بازوی ربات مجهز به موتورهای الکتریکی های الکتریکی استفاده شده است. در مرجع [۵۷] از کنترل کننده مقاوم عصبی استفاده شده است. ساختار کنترل کننده دارای دو حلقه کنترلی است. حلقه داخلی، کنترل کننده ولتاژ موتورها با به کارگیری شبکه عصبی دو لایه می باشد، در حالی که حلقه خارجی کنترل، شامل یک کنترل کننده جریان با به کارگیری یک شبکه عصبی دو لایه برای تولید سیگنال جریان مطلوب می باشد.

در این فصل، از روش کنترلی مرجع [۵۷]، برای کنترل مقاوم ربات استفاده می شود. در نهایت با بررسی نتایج شبیه سازی، به مقایسه آن با روش‌های کنترلی پیشنهادی در این پایان نامه می پردازیم.

۵-۲- طراحی کنترل مقاوم عصبی

با استفاده از روابط (الف-۲۳)، (الف-۲۸) و (الف-۳۱)، معادله دینامیکی ربات مجهز به موتورهای مغناطیس دائم را بصورت زیر در نظر می گیریم:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_f(\dot{q}) = \tau \quad (۱-۵)$$

$$RI_a + LI_a + K_b r^{-1} \dot{q} + \phi = u_e \quad (۲-۵)$$

دینامیک خطای ردگیری بصورت زیر تعریف می شود:

$$r = \dot{e} + \Lambda e \quad (۳-۵)$$

که در آن Λ پارامتری مثبت می باشد. با استفاده از روابط (۱-۵) و (۲-۵)، معادله زیر بدست می آید:

$$D(q)\dot{r} = F_1 - C(q, \dot{q})r - k_m I \quad (۴-۵)$$

که در آن F_1 تابعی غیرخطی و پیچیده می‌باشد که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$F_1 = D(q)(\ddot{q}_d + \Lambda \dot{e}) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \Lambda e) + G(q) + \tau_f(\dot{q}) \quad (۵-۵)$$

اولین گام در طراحی کنترل‌کننده اول، فرض کردن I به عنوان یک سیگنال کنترلی مجازی برای معادله دینامیکی (۴-۵) می‌باشد. در این مرحله، این سیگنال مجازی I_d نامیده می‌شود. بنابراین، رابطه (۴-۵) بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$D(q)\dot{r} = F_1 - C(q, \dot{q})r - k_m I_d + k_m \eta \quad (۶-۵)$$

که در آن $\eta = I_d - I$ سیگنال خطا می‌باشد. هدف کنترلی گام اول، طراحی یک کنترل‌کننده عصبی برای سیگنال I_d می‌باشد تا حداکثر امکان r (و در نتیجه خطای ردگیری e) کوچکتر شود. به منظور طراحی کنترل‌کننده عصبی اول برای سیگنال مجازی I_d ، ساختار زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$I_d = \frac{1}{k_1} [\hat{F}_1 + k_\tau r + v_\tau] \quad (۷-۵)$$

که در آن $\hat{F}_1 = \hat{w}_1 \phi_1$ یک شبکه عصبی شعاعی دو لایه، k_1 و k_τ ضرایب اسکالر مثبت و v_τ یک رابطه مقاوم می‌باشد که بعداً تعریف می‌شود. هم‌چنین، وزن $\hat{w}_1$ توسط الگوریتم تطبیقی بروزرسانی می‌شود با جایگذاری رابطه (۷-۵) و (۱۴-۵) در (۶-۵) داریم:

$$D\dot{r} = -Cr + w_1^T \phi_1 - k_\tau \frac{k_m}{k_1} r + (1 - \frac{k_m}{k_1}) \hat{w}_1^T \phi_1 - \frac{k_m}{k_1} v_\tau + k_m \eta + \varepsilon_1 \quad (۸-۵)$$

رابطه مقاوم v_τ در رابطه (۷-۵) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_\tau = \rho_\tau \operatorname{sgn}(r) \quad (۹-۵)$$

که در آن

$$\rho_\tau = \|\hat{w}_1^T \phi_1\| b_k \quad (۱۰-۵)$$

در رابطه (۱۰-۵)، b_k حد بالای عبارت $\left\| 1 - \frac{k_m}{k_1} \right\|$ می‌باشد. در گام دوم، ساختار کنترل‌کننده دوم

برای سیگنال واقعی u_e ، بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$u_e = \hat{F}_2 + k_v \eta \quad (۱۱-۵)$$

که در آن:

$$\hat{F}_2 = \hat{w}_2^T \phi_2, \quad k_v > 0 \quad (۱۲-۵)$$

وزن $\hat{w}_2$ نیز توسط الگوریتم تطبیقی بروزرسانی می‌شود. هدف از طراحی کنترل کننده عصبی دوم برای سیگنال u_e ، کاهش سیگنال خطای η می‌باشد. با تفاضل η از طرفین رابطه (۲-۵) و حاصلضرب طرفین در L ، به معادله دینامیکی بصورت زیر می‌رسیم:

$$L\dot{\eta} = F_2 + \varphi - u_e \quad (۱۳-۵)$$

که در آن F_2 تابع غیر خطی بسیار پیچیده بر حسب q ، $\dot{q}$ ، r ، I_d و I می‌باشد. توابع غیرخطی F_1 و F_2 در روابط (۶-۵) و (۱۳-۵) را می‌توان توسط شبکه عصبی شعاعی دو لایه بصورت زیر بیان کرد:

$$F_1 = w_1^T \phi_1 + \varepsilon_1 \quad (۱۴-۵)$$

$$F_2 = w_2^T \phi_2 + \varepsilon_2 \quad (۱۵-۵)$$

که در آن w_1 و w_2 وزن‌های ایده‌آل و ϕ_1 و ϕ_2 توابع پایه‌ای مناسب و ε_1 و ε_2 خطاهای تقریب برای هر دو شبکه عصبی می‌باشند. با جایگذاری رابطه (۱۱-۵) و (۱۵-۵) در (۱۳-۵) داریم:

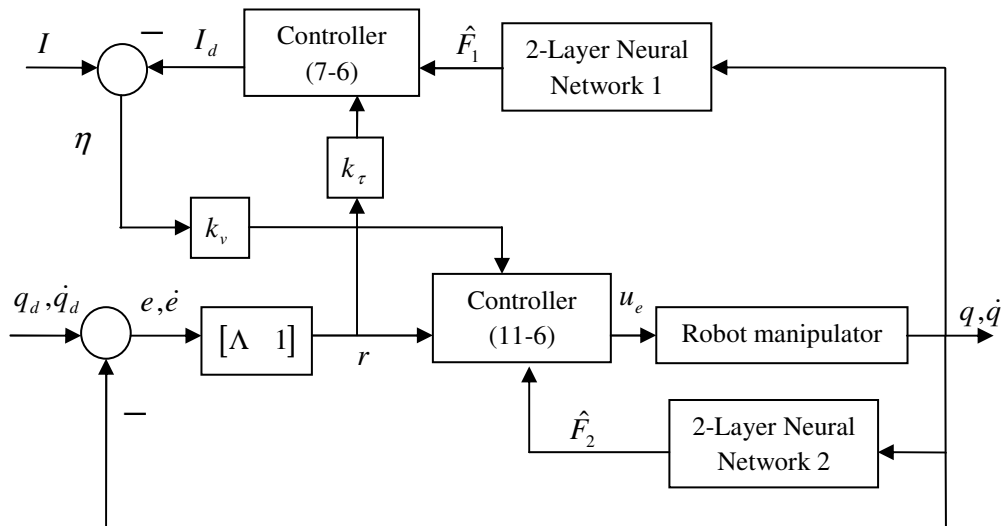
$$L\dot{\eta} = w_2^T \phi_2 + \varepsilon_2 + \varphi - k_v \eta \quad (۱۶-۵)$$

قوانین تطبیق وزن‌ها بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\dot{\hat{w}}_1 = \Gamma_1 \phi_1 r - k_\omega \Gamma_1 \|\zeta\| \hat{w}_1 \quad (۱۷-۵)$$

$$\dot{\hat{w}}_2 = \Gamma_2 \phi_2 r - k_\omega \Gamma_2 \|\zeta\| \hat{w}_2 \quad (۱۸-۵)$$

که در آن Γ_1, Γ_2 و k_ω ضرایب اسکالر مثبت و $\zeta = [r \quad \eta]$ می‌باشند. بلوک دیاگرام روش کنترلی در شکل (۱-۵) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱) بلوک دیاگرام روش کنترلی مرجع [۵۷]

۵-۳- نتایج شبیه سازی

قوانین کنترل (۵-۷) و (۵-۱۱) و قوانین بروزرسانی (۵-۱۷) و (۵-۱۸) را جهت بررسی عملکرد سیستم کنترل ربات، به ربات اسکارا ۴ رابط اعمال می‌کنیم. سیستم کنترل بصورت مفصل مستقل به ربات اعمال می‌گردد. بنابراین، برای هر مفصل از یک کنترل کننده مجزا استفاده می‌شود. مسیر مطلوب ردگیری مفصل، زمان شبیه سازی، خطای اولیه مفصل و اغتشاش خارجی اعمالی، مشابه فصل‌های قبل می‌باشد. پارامترهای مورد نیاز برای کنترل ردگیری همه مفصل بصورت یکسان و بصورت زیر انتخاب شده اند:

$$k_m = 0.26, k_v = k_\omega = 1, k_\tau = 20, k_1 = 0.1, \Lambda = 50, \quad (۵-۱۹)$$

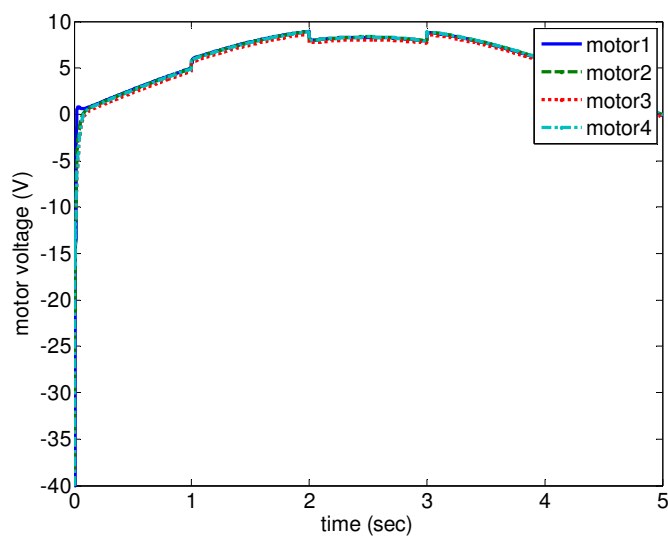
$$\Gamma_1 = \Gamma_2 = 1000, \hat{w}_1(0) = \hat{w}_2(0) = 0$$

ورودی شبکه عصبی برای کنترل کننده تمامی مفصل بصورت زیر انتخاب می‌شود:

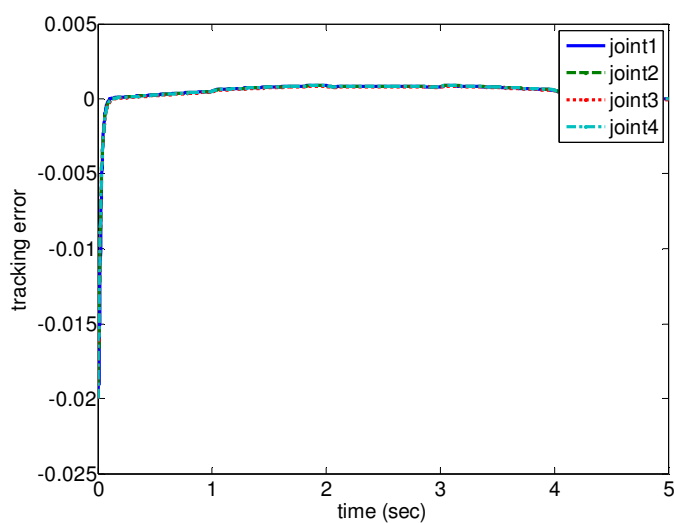
$$x = [\zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \cos(q) \quad \sin(q) \quad \dot{q} \quad 1]^T \quad (۵-۲۰)$$

که در آن $\zeta_1 = \dot{q}_d + \Lambda e$ و $\zeta_2 = \ddot{q}_d + \Lambda \dot{e}$ می‌باشند. شکل (۵-۲) سیگنال کنترل ولتاژ موتورهای هر مفصل را نشان می‌دهد. ولتاژ موتورها نرم و در محدوده مجاز است. شکل (۵-۳) خطای ردگیری سیستم کنترل پس از انجام شبیه سازی با حضور اغتشاش خارجی را نمایش می‌دهد. مقدار خطای ردگیری بدون فراجاهش در انتهای شبیه سازی برای همه مفصل به کمتر از 4.2×10^{-5} می‌رسد. واحد

خطای موقعیت برای مفاصل لولایی رادیان و برای مفصل کشویی، متر است. نتایج شبیه سازی عملکرد مناسب روش کنترلی را نشان می دهد.



شکل (۵-۲) سیگنال های کنترل ولتاژ سیستم کنترل مرجع [۵۷]



شکل (۵-۳) خطای ردگیری کنترل کننده مرجع [۵۷]

روش های کنترلی پیشنهادی در این پایان نامه، ساده تر و دارای محاسبات کمتری نسبت به روش کنترل مقاوم مرجع [۵۷] می باشد. زیرا روش های پیشنهادی دارای یک حلقه کنترلی می باشند، در

حالی که سیستم کنترل مرجع [۵۷] ، دارای دو حلقه کنترلی مجزا می‌باشد. بعلاوه در تمامی روش های کنترلی این پایان نامه ابعاد ورودی به کنترل کننده ها کمتر از روش فوق می باشد.

فصل ۶. نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه، روش‌هایی نوین برای کنترل مقاوم ردگیری موقعیت بازوی رباتیک در فضای مفصلی و با حضور عدم قطعیت‌ها پیشنهاد شده است.

در فصل دوم از این پایان نامه، با بهره‌گیری از راهبرد کنترل ولتاژ، تخمین و جبران عدم قطعیت‌های سیستم، توسط اولین مرتبه بسط سری تیلور و کنترل مقاوم پیشنهادی صورت گرفته است. با استفاده از روابط ریاضی، پایداری سیستم کنترل تضمین می‌گردد و قوانین تطبیق برای تنظیم پارامترهای تخمین‌گرها بدست می‌آیند. یکی از مزایای استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ، عدم وابستگی سیستم کنترل به مدل دینامیکی ربات می‌باشد. از نقطه نظر راهبرد کنترل ولتاژ، از آن جا که مفاصل ربات توسط موتورهای آن به حرکت در می‌آیند، مسئله کنترل ربات تبدیل به مسئله کنترل موتورهای آن می‌شود. در فصل سوم، برای کنترل مقاوم بازوی رباتیک با راهبرد کنترل ولتاژ، از تخمین‌گرهای تطبیقی عصبی عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. سیگنال خطای عدم قطعیت که تابعی از خطای ردگیری و مشتق آن بر حسب زمان می‌باشد با استفاده از الگوریتم پس انتشار برای تنظیم پارامترهای تخمین‌گر مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به تاثیر خطای مفصل و مشتق آن در ساختار قوانین تطبیقی، عملکرد کنترل‌کننده‌ها نسبت به روش قبل بهبود داشته است. در فصل چهارم، روشی جدید برای کنترل مستقل از مدل مقاوم ولتاژ ربات با استفاده از شبکه عصبی شعاعی معرفی گردید. همانطور که مشاهده شد، شبکه عصبی شعاعی به عنوان تخمین‌گر عدم قطعیت‌ها، توانایی تخمین دینامیک‌های پیچیده ربات را دارد. بر خلاف دو روش کنترلی قبل که به مدل دینامیکی موتور وابسته بود، روش کنترلی پیشنهادی در این فصل، مستقل از مدل دینامیکی ربات و موتور می‌باشد. نباید فراموش کرد که علاوه بر عدم وابستگی سیستم‌های کنترل پیشنهادی در این پایان‌نامه به حدود عدم قطعیت‌ها و تشکیل توابع محدودیت، مشکل لرزش سیگنال نیز در آن‌ها وجود ندارد. نهایتاً در فصل پنجم از این پایان نامه، مقایسه روش‌های کنترلی پیشنهادی با روش کنترل مقاوم مرجع [۵۷]، کارایی موثر روشهای پیشنهادی در این پایان نامه را نشان می‌دهد.

۶-۲- پیشنهادات

در این بخش برای بهتر شدن نتایج و به منظور ارائه راهکارهایی برای پژوهش‌های آینده، پیشنهادات زیر بیان می‌گردد:

- باتوجه به این که پارامترهای کنترل کننده با سعی و خطا انتخاب شده‌اند، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، برای بهبود عملکرد سیستم کنترل می‌تواند مفید باشد.
- تحقیق و بررسی انعطاف پذیری مفاصل در طراحی کنترل موقعیت بازوی رباتیک.
- به کارگیری سیستم‌های فازی یا فازی-عصبی برای تخمین و جبران عدم قطعیت‌ها

پیوست الف مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی بازوی رباتیک

الف-۱ سینماتیک ربات

در دیاگرام مفصلی ربات اسکارا مشاهده می شود که ربات شامل سه مفصل لولایی با پارامترهای متغیر θ_1 ، θ_2 و θ_4 و یک مفصل کشویی با پارامتر کشویی d_4 می باشد. برای بررسی و تحلیل نحوه حرکت بازوی ربات، برای هر رابط دستگاه مختصاتی تعریف می شود که هر کدام از این دستگاه های مختصات نسبت به دستگاه مختصات مرجع که روی رابط صفر نصب می گردد؛ سنجیده می شوند. در شکل (الف-۱) نحوه قرارگیری دستگاه های مختصات نشان داده شده است. یک دستورالعمل متداول برای تعیین دستگاه های مختصات و بدست آوردن پارامترها در کاربردهای رباتیک، دستورالعمل D-H است. دو نکته مهم در قراردادن دستگاه های مختصات در این روش، عمود بودن و متقاطع بودن محور x_i با محور z_{i-1} می باشد که باید مد نظر قرار بگیرد.

• x_i : محور x دستگاه i

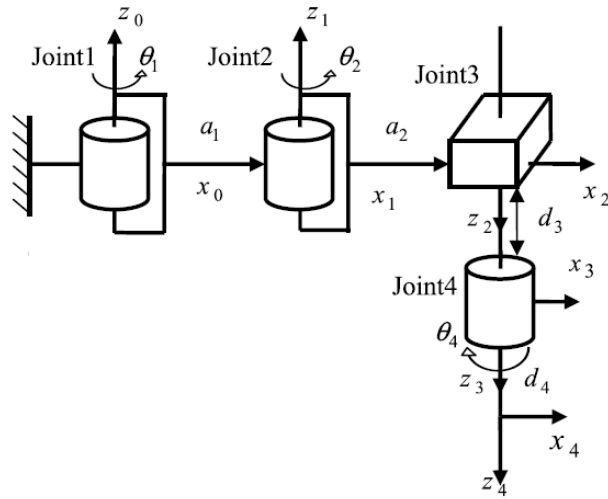
• z_{i-1} : محور z دستگاه $i-1$

در این دستورالعمل هر ماتریس تبدیل A_i بصورت ضرب چهار تبدیل اساسی داده می شود:

$$A_i = Rot_{z, \theta_i} Trans_{z, d_i} Tran_{x, a_i} Rot_{x, \alpha_i} \quad (\text{الف-۱})$$

$$= \begin{pmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} & 0 & 0 \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\alpha_i} & -S_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_i = \begin{pmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i S_{\theta_i} \\ 0 & 0 & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۲})$$



شکل (الف-۱) دیاگرام مفصلی ربات اسکارا ۴ رابط

نمادهای S و C نمایانگر توابع $\sin$ و $\cos$ هستند که به اختصار بیان شده اند. θ_i ، a_i و d_i و α_i

پارامترهای دستگاه i و مفصل i هستند که با نام های زیر معرفی می شوند:

• 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}

با قراردادن پارامترها در ماتریس تبدیل همگن می توان $\mathbf{A}_{i-1}^i$ ، $i = 1, 2, 3, 4$ را محاسبه کرد.

$$A_0^1 = \begin{pmatrix} C_{\theta_1} & -S_{\theta_1} & 0 & a_1 C_{\theta_1} \\ S_{\theta_1} & C_{\theta_1} & 0 & a_1 S_{\theta_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{(الف-۳)}$$

$$A_1^2 = \begin{pmatrix} C_{\theta_2} & S_{\theta_2} & 0 & a_2 C_{\theta_2} \\ S_{\theta_2} & -C_{\theta_2} & 0 & a_2 S_{\theta_2} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{(الف-۴)}$$

$$A_2^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۵})$$

$$A_3^4 = \begin{pmatrix} C_{\theta_4} & -S_{\theta_4} & 0 & a_4 C_{\theta_4} \\ S_{\theta_4} & C_{\theta_4} & 0 & a_4 S_{\theta_4} \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۶})$$

بنا به تئوری سینماتیک ربات [۱] می توان روابط زیر را برای ماتریس های تبدیل همگن نوشت:

$$\mathbf{A}_0^n = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \dots \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{A}_n = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_0^n & \mathbf{d}_0^n \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{الف-۷})$$

که بنا به رابطه بالا می توان $\mathbf{A}_0^2$ و $\mathbf{A}_0^3$ و سپس ماتریس دوران و ماتریس انتقال را بدست آورد. سینماتیک سرعت بازوی رباتیک، یعنی روابط سرعت، ارتباط سرعت های خطی و زاویه ای مجری نهایی (یا هر نقطه دیگر روی بازوی رباتیک) با سرعت های مفاصل می باشد. برای محاسبه سرعت مجری نهایی در اثر حرکت های خطی و زاویه ای رابط ها از مفهوم ژاکوبین استفاده می شود. ماتریس ژاکوبین ربات با به کارگیری ژاکوبین سرعت خطی و ژاکوبین سرعت زاویه ای به صورت زیر بیان می شود:

$$J_0^n = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \quad (\text{الف-۸})$$

که J_v ژاکوبین سرعت خطی و J_w ژاکوبین سرعت زاویه ای می باشد و بسته به نوع مفصل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$J_{v_i} = z_{i-1} \times (d_0^n - d_{c0}^{i-1}) \quad \text{برای مفصل لولایی} \quad (\text{الف-۹})$$

$$J_{v_i} = z_{i-1} \quad \text{برای مفصل کشویی}$$

$$J_{\omega_i} = z_{i-1} \quad \text{برای مفصل لولایی} \quad (\text{الف-۱۰})$$

$$J_{\omega_i} = 0 \quad \text{برای مفصل کشویی}$$

که بردار z و d_{c0} بصورت زیر تعریف می شوند:

$$z_0 = K = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (\text{الف-۱})$$

$$z_i = R_0^i K \quad (\text{الف-۱۲})$$

$$d_{c0}^i = d_0^i + R_0^i d_{ci} \quad (\text{الف-۱۳})$$

که d_{ci} فاصله مرکز مختصات i ام روی رابط i ام از مرکز جرم همان رابط می‌باشد.

الف-۲ دینامیک ربات

معادلات دینامیکی ربات با چند درجه آزادی، با محاسبه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی رابط‌ها و مفاصل به دست می‌آید. برای انجام این کار پس از محاسبه مقادیر انرژی‌ها، تابع لاگرانژین سیستم که عبارتست از اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل تشکیل می‌شود. سپس از تابع لاگرانژین نسبت به متغیرهای مفاصل مشتق می‌گیریم.

الف-۲-۱ انرژی پتانسیل برای ربات با n رابط

انرژی پتانسیل سیستم، مجموع انرژی پتانسیل رابط‌هاست که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V = \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{g}^T \mathbf{d}_0^{c_i} \quad (\text{الف-۱۴})$$

که در آن m_i جرم رابط i ام، $\mathbf{g}^T$ بردار شتاب جاذبه در دستگاه 0 و $\mathbf{d}_0^{c_i}$ نشان‌دهنده موقعیت مرکز جرم رابط i ام در دستگاه 0 است.

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

$$\mathbf{d}_0^{c_i} = \mathbf{d}_0^1 + \mathbf{R}_0^i \mathbf{d}_i^{c_i} \quad (\text{الف-۱۵})$$

الف-۲-۲ انرژی جنبشی برای ربات با n رابط

انرژی جنبشی یک ربات عبارت است از مجموع انرژی های جنبشی رابط های ربات یا به عبارت دیگر برای رابط i ام انرژی جنبشی بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_{ci}}^T J_{v_{ci}} + J_{w_{ci}}^T \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} J_{w_i}] \dot{\mathbf{q}} \quad (\text{الف-۱۶})$$

که m_i جرم رابط i ام، $\mathbf{R}_0^i$ ماتریس دورانی است که بردارها را از دستگاه مختصات جسم به دستگاه مختصات پایه تبدیل می‌کند و $\mathbf{I}_i$ ماتریس ممان اینرسی رابط i ام در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم ربات و موازی با دستگاه مختصات متصل به همان رابط می‌باشد که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & -I_{xy_i} & -I_{xz_i} \\ -I_{xy_i} & -I_{yy_i} & -I_{yz_i} \\ -I_{xz_i} & -I_{yz_i} & -I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (\text{الف-۱۷})$$

بنابراین، رابطه (الف-۱۶) را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (\text{الف-۱۸})$$

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

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_{ci}}^T J_{v_{ci}} + J_{w_{ci}}^T \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} J_{w_i}] \quad (\text{الف-۱۹})$$

انرژی پتانسیل ربات را به کمک رابطه (الف-۱۴) و انرژی جنبشی ربات را به کمک رابطه (الف-۱۸) محاسبه نمودیم. هم اکنون به تشکیل تابع لاگرانژین ربات می‌پردازیم.

$$L = K - V \quad (\text{الف-۲۰})$$

معادله کلی دینامیکی سیستم عبارتست از:

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \quad (\text{الف-۲۱})$$

که در این رابطه $\boldsymbol{\tau}$ بردار گشتاور برای مفاصل لولایی و نیرو برای مفاصل کشویی است. با استفاده از معادلات (الف-۱۸) و (الف-۲۰) در معادله (الف-۲۱) و ساده سازی روابط، به معادله نهایی زیر می‌رسیم:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{1}{2}\dot{q}^T \left(\frac{\partial D(q)}{\partial q} \right) \dot{q} + \frac{\partial V}{\partial q} \quad (\text{الف-۲۲})$$

در نهایت معادله دینامیکی ربات را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (\text{الف-۲۳})$$

که در آن $D(q)$ ماتریس $n \times n$ اینرسی ربات، $C(q, \dot{q})\dot{q} \in R^n$ بردار گشتاور کوریولیس و جانب مرکز و $G(q)$ بردار گشتاور گرانشی می باشد و

$$C(q, \dot{q})\dot{q} = \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{1}{2}\dot{q}^T \left(\frac{\partial D(q)}{\partial q} \right) \dot{q} \quad (\text{الف-۲۴})$$

و

$$G(q) = \frac{\partial V}{\partial q} \quad (\text{الف-۲۵})$$

معادلات ارائه شده در شبیه سازی حرکت ربات به ازای گشتاور ورودی معین بکار گرفته می‌شوند. این معادلات مدل ربات را می‌سازند و با توجه به آن‌ها می‌توان رفتار دینامیکی ربات را بررسی نمود. نباید فراموش کرد که معادلات دینامیکی بدست آمده، تنها شامل نیروهایی هستند که از مکانیک اجسام صلب حاصل می‌شوند. مهم‌ترین منبع نیروهایی که در نظر گرفته نشده‌اند، اصطکاک است. برای منطبق کردن معادلات دینامیکی بر واقعیت، باید مدلی از این نیروهای اصطکاکی را (دست کم به طور تقریبی) در نظر گرفت. مدلی ساده برای اصطکاک، اصطکاک ویسکوز است که در آن گشتاور حاصل از اصطکاک، با سرعت حرکت مفصل متناسب است. بدین ترتیب داریم:

$$\tau_f = \nu \dot{q} \quad (\text{الف-۲۶})$$

که در آن ν ثابت اصطکاک ویسکوز است. مدل ساده دیگر که گاهی به کار می‌رود، اصطکاک خشک است. مقدار اصطکاک خشک ثابت است، اما علامت آن به سرعت مفصل بستگی دارد

$$\tau_f = c \operatorname{sgn}(\dot{q}) \quad (\text{الف-۲۷})$$

که در آن c ثابت اصطکاک خشک است. ویسکوز یا خشک بودن اصطکاک در هر مفصل خاص از بازوی مکانیکی رباتیک، مسئله پیچیده‌ای است و به روغنکاری و دیگر اثرات بستگی دارد. مدل مناسبی که هر دو نوع اصطکاک را در برگیرد، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_f = \nu \dot{q} + c \operatorname{sgn}(\dot{q}) \quad (\text{الف} - ۲۸)$$

الف - ۳ دینامیک موتورهای

گشتاور لازم برای حرکت مفاصل ربات، توسط محرکه‌ها که در اغلب موارد موتورهای الکتریکی هستند، فراهم می‌شود. بنابراین، موتورهای یک بخش اصلی از دینامیک سیستم رباتیک را تشکیل می‌دهند. گشتاور مورد نیاز هر مفصل توسط موتورهای با رابطه زیر فراهم می‌شود [۱۰]:

$$\mathbf{J}\ddot{\theta}_m + \mathbf{B}\dot{\theta}_m + \mathbf{r}\tau_r = \tau_m \quad (\text{الف} - ۲۹)$$

که در این رابطه τ_m بردار گشتاور تولیدی موتورهای برای هر مفصل، τ_r بردار گشتاور بار موتورهای، $\mathbf{r}$ ماتریس ضریب کاهشی چرخ دنده‌ها، θ_m بردار زاویه موتورهای، $\mathbf{J}$ ماتریس جمع ممان اینرسی‌های روتورها و $\mathbf{B}$ ماتریس ضریب اصطکاک روتورها می‌باشد. $\mathbf{J}$ ، $\mathbf{B}$ و $\mathbf{r}$ ماتریس‌های قطری $n \times n$ هستند. از طرفی داریم:

$$\mathbf{q} = \mathbf{r}\theta_m \quad (\text{الف} - ۳۰)$$

برای بدست آوردن معادلات سیستم رباتیک بر اساس ولتاژ موتورهای به عنوان ورودی‌های کنترلی به معادله الکتریکی موتورهای مغناطیس دائم DC در فرم ماتریسی می‌پردازیم:

$$\mathbf{R}\mathbf{I}_a + \mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_a + \mathbf{K}_b \mathbf{r}^{-1} \dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\phi} = \mathbf{v} \quad (\text{الف} - ۳۱)$$

که $\mathbf{v} \in R^n$ بردار ولتاژ موتورهای، $\mathbf{I}_a \in R^n$ بردار جریان موتورهای، $\boldsymbol{\phi} \in R^n$ بردار اغتشاش خارجی، $\mathbf{R}$ ، $\mathbf{L}$ و $\mathbf{K}_b$ ماتریس‌های $n \times n$ به ترتیب معرف مقاومت سیم پیچ‌ها، اندوکتانس سیم پیچ‌ها و ضریب‌های ثابت القا می‌باشد. هم چنین داریم:

$$\mathbf{K}_m \mathbf{I}_a = \tau_m \quad (\text{الف} - ۳۲)$$

که رابطه گشتاور تولیدی موتورها را با جریان آرمیچر نشان می‌دهد. $\mathbf{K}_m$ ماتریس $n \times n$ ضریب‌های ثابت گشتاور می‌باشد. با استفاده از معادلات (الف-۲۳) و (الف-۲۸) تا (الف-۳۲) می‌توان مدل فضای حالت زیر را بدست آورد:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}\mathbf{v} - \mathbf{b}\phi \quad (\text{الف} - ۳۳)$$

که در آن $\mathbf{v}$ بردار ورودی سیستم و بردار $\mathbf{x}$ متغیرهای حالت سیستم و $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ عبارتست از:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ (\mathbf{J}\mathbf{r}^{-1} + \mathbf{rD}(\mathbf{x}_1))^{-1} (-\mathbf{B}\mathbf{r}^{-1} + \mathbf{rC}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2))\mathbf{x}_2 - \mathbf{rG}(\mathbf{x}_1) - \mathbf{r}\tau_f(\mathbf{x}_2) + \mathbf{K}_m\mathbf{x}_3 \\ \mathbf{L}^{-1}(\mathbf{K}_b\mathbf{r}^{-1}\mathbf{x}_2 + \mathbf{R}\mathbf{x}_3) \end{bmatrix} \quad (\text{الف} - ۳۴)$$

9

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{L}^{-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{I}_a \end{bmatrix} \quad (\text{الف} - ۳۵)$$

مدل فضای حالت (الف-۳۳) یک سیستم چند متغیره غیرخطی با تزویج سنگین در فرم غیرهمراه را نشان می‌دهد.

الف - ۴ مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا

در این پایان نامه از ربات اسکارا دارای ۳ مفصل لولایی و یک مفصل کشویی برای پیاده سازی قوانین کنترل استفاده شده است.

الف-۴-۱ استخراج پارامترهای دینامیکی و دناویت- هارتنبرگ بازوی ربات اسکارا

مطالعه موردی برروی ربات اسکارای ۴ محوره مدل TS60 ساخت شرکت STÄUBLI می‌باشد. ابتدا مدل سه بعدی تمامی قطعات ربات را از سایت شرکت دانلود کرده و سپس قطعات را در محیط Solidworks مونتاژ می‌کنیم. در مرحله بعد، دستگاه مختصات طبق قوانین دناویت- هارتنبرگ بر روی مفاصل ربات قرار داده می‌شوند. در شکل (الف-۲) بازوی رباتیک و دستگاه مختصات مفاصل نشان داده شده است. مقادیر جرم و ممان اینرسی برای هر رابط بازوی ربات پیوما در محیط Assembly، از قسمت Evaluate > Mass properties بدست می‌آید. نکته مهم در محاسبه

ممان اینرسی جرمی، در نظر گرفتن ممان اینرسی نسبت به دستگاه مختصات مرکز جرم رابط می باشد. در نتیجه، جدول پارامترهای ربات بدین صورت تشکیل می گردد:

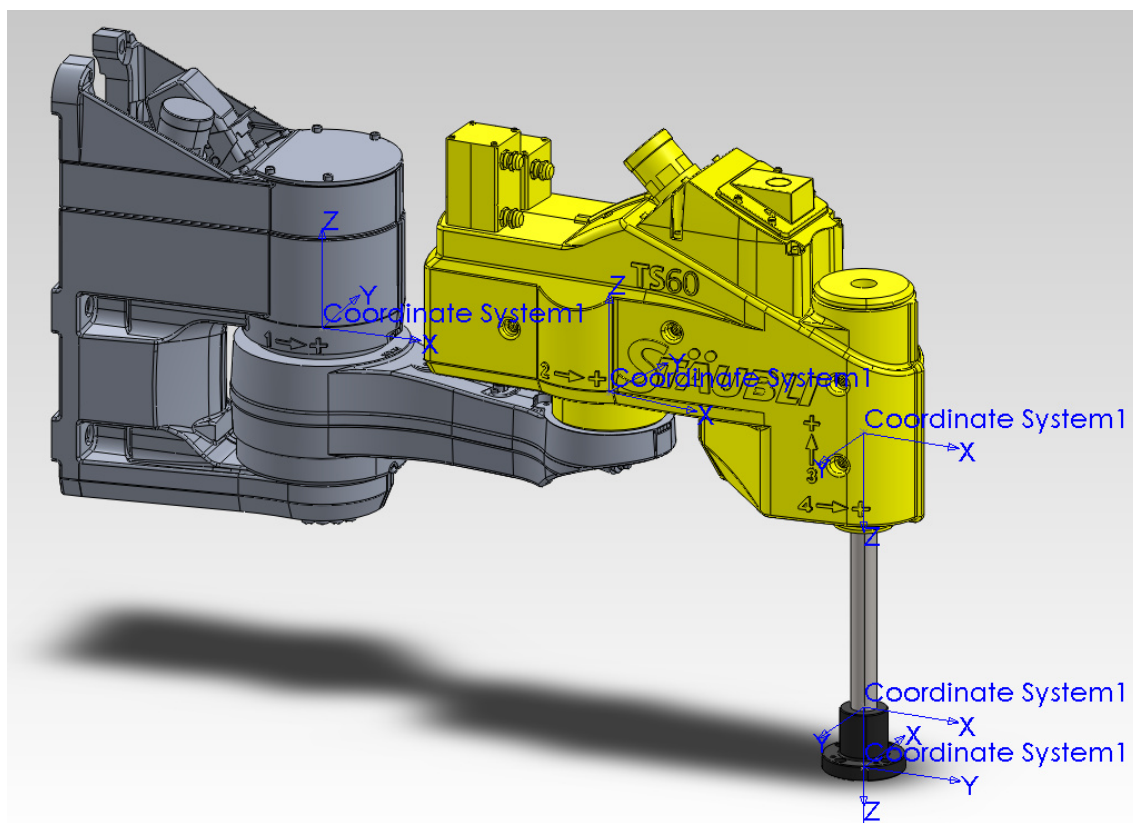
جدول (الف-۱) پارامترهای ربات

Link	$\theta(rad)$	$d(m)$	$a(m)$	$\alpha(rad)$
1	θ_1	0	$a_1 = 0.33$	0
2	θ_2	0	$a_2 = 0.27$	π
3	0	d_3	0	0
4	θ_4	$d_4 = 0.061$	0	0

هم چنین، پارامترهای ماتریس اینرسی و موقعیت مرکز جرم رابطها در جدول (الف-۲) آمده است. فرمول بندی سینماتیکی و دینامیکی مربوط به ربات اسکارا ۴ محوره که در نرم افزار MATLAB انجام شده، در پیوست ب پایان نامه آورده شده است.

جدول (الف-۲) پارامترهای ربات اسکارا

i	$x_i(m)$	$y_i(m)$	$z_i(m)$	$m_i(kg)$	$I_{xxi}(kgm^2)$	$I_{yyi}(kgm^2)$	$I_{zzl}(kgm^2)$	$I_{xyi}(kgm^2)$	$I_{xzi}(kgm^2)$	$I_{yzi}(kgm^2)$
1	-0.257	0	-0.0623	11.94	0.0297	0.1863	0.1899	0	0.001	0
2	-0.192	0	-0.0854	37.973	0.2564	0.8817	0.7373	-0.0017	0.1015	-0.0016
3	0	0	-0.205	0.263	0.0037	0.0037	3.1×10^{-5}	0	0	0
4	0	0	-0.0244	0.321	1.99×10^{-4}	1.97×10^{-4}	1.9×10^{-4}	0	0	0



شکل (الف-۲) نمایی از ربات اسکارا در محیط Solidworks

```

clc
clear all
close all
syms teta1 teta2 teta3 teta4 real
syms q1 q2 q3 q4 real
syms d1 d2 d3 d4 real
syms a1 a2 a3 a4 real
syms alfa1 alfa2 alfa3 alfa4 real
syms I1 I2 I3 I4 real
syms m1 m2 m3 m4 real
syms g
syms dq1 dq2 dq3 dq4
syms d2q1 d2q2 d2q3 d2q4

% D-H notations
%   | teta_i | d_i | a_i | alfa_i |
% 1 |  q1   |  0  | a1  |    0   |
% 2 |  q2   |  0  | a2  |  180   |
% 3 |   0   | d3  |  0  |    0   |
% 4 |  q4   | d4  |  0  |    0   |

%kinematic parameters
teta1=q1;    d1=0;      a1=0.330;   alfa1=0;
teta2=q2;    d2=0;      a2=0.270;   alfa2=180;
teta3=0;     d3=q3;     a3=0;       alfa3=0;
teta4=q4;    d4=0.061;  a4=0;       alfa4=0

T10=[cos(teta1) -sin(teta1)*cos(alfa1) sin(teta1)*sin(alfa1) a1*cos(teta1);
      sin(teta1) cos(teta1)*cos(alfa1) -cos(teta1)*sin(alfa1) a1*sin(teta1);
      0          sin(alfa1)          cos(alfa1)          d1          ;
      0          0                   0                   1          ];
T21=[cos(teta2) -sin(teta2)*cosd(alfa2) sin(teta2)*sind(alfa2) a2*cos(teta2);
      sin(teta2) cos(teta2)*cosd(alfa2) -cos(teta2)*sind(alfa2) a2*sin(teta2);
      0          sind(alfa2)          cosd(alfa2)          d2          ;
      0          0                   0                   1          ];
T32=[cos(teta3) -sin(teta3)*cos(alfa3) sin(teta3)*sin(alfa3) a3*cos(teta3);
      sin(teta3) cos(teta3)*cos(alfa3) -cos(teta3)*sin(alfa3) a3*sin(teta3);
      0          sin(alfa3)          cos(alfa3)          d3          ;
      0          0                   0                   1          ];
T43=[cos(teta4) -sin(teta4)*cos(alfa4) sin(teta4)*sin(alfa4) a4*cos(teta4);
      sin(teta4) cos(teta4)*cos(alfa4) -cos(teta4)*sin(alfa4) a4*sin(teta4);
      0          sin(alfa4)          cos(alfa4)          d4          ;
      0          0                   0                   1          ];

T20=T10*T21;
T20=simple(T20);
T30=T10*T21*T32;
T30=simple(T30);
T40=T10*T21*T32*T43;
T40=simple(T40);
R10=T10(1:3,1:3);
R20=T20(1:3,1:3);

```

```

R30=T30(1:3,1:3);
R40=T40(1:3,1:3);
d10=T10(1:3,4);
d20=T20(1:3,4);
d30=T30(1:3,4);
d40=T40(1:3,4);

z0=[0 0 1]';
z1=R10*z0; % z1=R10(1:3,3);
z2=R20*z0;
z3=R30*z0;
Jv=[cross(z0,d40-0) cross(z1,d40-d10) z2 cross(z3,d40-d30)];
Jw=[z0 z1 [0;0;0] z3];
J=[Jv;Jw];

% dci0=di0 + Ri0*dci1
dc10=d10+R10*dc11;
dc20=d20+R20*dc22;
dc30=d30+R30*dc33;
dc40=d40+R40*dc44;
Jvc1=[cross(z0,dc10-0), [0;0;0], [0;0;0], [0;0;0]];
Jvc2=[cross(z0,dc20-0), cross(z1,dc20-d10), [0;0;0], [0;0;0]];
Jvc3=[cross(z0,dc30-0), cross(z1,dc30-d10), z2, [0;0;0]];
Jvc4=[cross(z0,dc40-0), cross(z1,dc40-d10), z2, cross(z3,dc40-d30)];

Jvc1=simple(Jvc1);
Jvc2=simple(Jvc2);
Jvc3=simple(Jvc3);
Jvc4=simple(Jvc4);
Jw1=[z0, [0;0;0], [0;0;0], [0;0;0]];
Jw2=[z0,z1, [0;0;0], [0;0;0]];
Jw3=[z0,z1, [0;0;0], [0;0;0]];
Jw4=[z0,z1, [0;0;0], z3];

% Inertia Matrix
D=m1*Jvc1'*Jvc1+Jw1'*R10*I1*R10'*Jw1+...
m2*Jvc2'*Jvc2+Jw2'*R20*I2*R20'*Jw2+...
m3*Jvc3'*Jvc3+Jw3'*R30*I3*R30'*Jw3+...
m4*Jvc4'*Jvc4+Jw4'*R40*I4*R40'*Jw4;
D=simple(D);

% Potential energy
g=[0 0 g];
V=m1*g*dc10+m2*g*dc20+m3*g*dc30+m4*g*dc40;
V=simple(V);
V=vpa(V,4);

% kinetic energy
q=[q1;q2;q3;q4];
dq=[dq1;dq2;dq3;dq4];
trdq=[dq1 dq2 dq3 dq4];
d2q=[d2q1;d2q2;d2q3;d2q4];
K=0.5*trdq*D*dq;
K=simple(K);
K=vpa(K,4);
dD=(diff(D,q1)*dq1+diff(D,q2)*dq2+diff(D,q3)*dq3+diff(D,q4)*dq4);
dDdq=dD*dq;
dK=[diff(K,q1);diff(K,q2);diff(K,q3);diff(K,q4)];

```

```

Cdq=dDdq-dK;
Cdq=simple(Cdq);
Cdq=vpa(Cdq,4);
G=[diff(V,q1);diff(V,q2);diff(V,q3);diff(V,q4)];

```

- [1] Kelly R. Santibanez V. and Loria A. (2005) "Control of Robot Manipulators in Joint Space", Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer Press.
- [2] United Nations/Economic Commission for Europe and International Federation of Robotics. (2001) "World robotics 2001", United Nation Publication sales No. GV.E.01.0.16, ISBN 92-1-101043-8, ISSN 1020-1076, Printed at United Nations, Geneva, Switzerland.
- [3] Arimoto S. and Miyazaki F. (1984) "Stability and robustness of PID feedback control for robot manipulators of sensory capability", In Robotics Research. MIT Press, 783-799.
- [4] De Luca A. Siciliano B. and Zollo L. (2005) "PD control with online gravity compensation for robots with elastic joints: Theory and experiments", IEEE Transactions on Automatic Control, 41, 1809-1819.
- [5] Slotine E. and Li W. (1991) "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall.
- [6] Luh J.Y.S. (1983) "Conventional controller design for industrial robots – A tutorial", IEEE Trans.Systems Man Cybernet, 13, 298-316.
- [7] Freund E. (1982) "Fast nonlinear control with arbitrary pole-placement for industrial robots and manipulators, Internat. J. Robotics Res, 1, 65-78.
- [8] Kawamura S. Miyazaki F. and Arimoto S (1988) "Is a local linear PD feedback control law effective for trajectory tracking of robot motion?", in Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, 1335-1340.
- [9] Wang X. and Chen L.K. (1989) "Proving the uniform boundedness of some commonly used control schemes for robots", in Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, 1491-1496.
- [10] Spong M.W. Hutchinson S. Vidyasagar M. (2006) "Robot Modelling and Control", Wiley, New York.
- [11] Fateh M.M and Khorashadizadeh S (2011) "Optimal robust voltage control of electrically driven robot manipulators ", Nonlinear Dyn. DOI 10.1007/s11071-012-0546-4.
- [12] Craig J.J. Hsu P. and Sastry S.S. (1987) "Adaptive control of mechanical manipulators", Internat. J. Robotics Res, 6(2), 10-20.

- [13] Rohrs C.E. Valavani L.S. Athans M. and Stein G. (1985) "Robustness of continuous time adaptive control algorithms in the presence of unmodeled dynamics", IEEE Transactions, Automatic Control, 30(9), 881-889.
- [14] Abdallah C. Dawson D. Dorato P. and Jamshidi M. (1991) "Survey of robust control for rigid robots", IEEE Control Systems, 24-30.
- [15] Cai L. and Song G. (1994) "Joint stick-slip friction compensation of robot manipulators by using smooth robust controllers" Journal of Robotic Systems, 11(6), 451-470.
- [16] Slotine J.J.E. and Sastry S.S. (1983) "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulator" Internat. J. Control 38, 465-492.
- [17] Young K.D. (1978) "Controller design for a manipulator using theory of variable structure system" IEEE Trans. Systems Man Cybern. 8, 101-109.
- [18] Chang F.J. Twu S.H. and Chang S. (1990) "Adaptive chattering alleviation of variable structure systems control, Proc. IEE, Pt. D 137 (1990), 31-39.
- [19] Slotine J.J.E. and Li W. (1986) "On the adaptive control of robot manipulators ", Proceeding of winter annual meeting of the American society of mechanical engineers, Anaheim, CA, USA.
- [21] Dawson D.M. Qu Z. and Lewis F.L. (1992) "Hybrid adaptive-robust control for a robot manipulator", International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 6, 537-545.
- [22] Soltanpour M.R. and Fateh M.M. (2009) " Adaptive robust control of robot manipulator in the task space under uncertainties ", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3, 308-322.
- [23] Baicu C. Rahn C. and Dawson D. (1998) " Backstepping Boundary Control of Flexible Link Electrically Driven Gantry Robots" IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 3(1), 60-66.
- [24] Kuc T.Y. Nam K. and Lee J.S. (1991) "An iterative learning control of robot manipulator" IEEE Transaction on Robotic and Automation.
- [25] Wang D. (1995) "A simple iterative learning controller for manipulators with flexible joints" Automatica, 31(9), 1341-1344.
- [26] Wang L.X. (1996) "A Course in Fuzzy Systems and Control" Prentice Hall, New York.

- [27] Lim C.M. and Hiyama T. (1991) "Application of fuzzy logic control to a manipulator" *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 1(5), 688–691.
- [28] Hwang J.P. and Kim E. (2006) "Robust tracking control of an electrically driven robot: adaptive fuzzy logic approach", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 14(2), 232–247.
- [29] Narendra K.S and Parthasarathy K. (1990) "Identification and control of dynamical systems using neural networks", *IEEE Trans. Neural Networks*, 1, 4–27.
- [30] Wai R.J. and Chen P.C. (2006) "Robust Neural-Fuzzy-Network Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4).
- [31] Lee M.J. and Choi Y.K. (2004) "An adaptive neurocontroller using RBFN for robot manipulators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(3), 711–717.
- [32] Malis E. and Chaumette F. (2002) "Theoretical improvements in the stability analysis of a new class of model-free visual servoing methods", *IEEE Transactions on robotics and automation*, 18(2), 176–186.
- [33] Izadbakhsh A. and Fateh M.M. (2008) "A Model-Free Robust Control Approach for Robot Manipulator", *International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering*, 1(1).
- [34] Fateh M.M. (2009) "Robust Control of Electrical Manipulators by Reducing the Effects of Uncertainties", *World Applied Sciences Journal*, 7, 161–167.
- [35] Schiller Z. (1996) "Time-energy optimal control of articulated systems with geometric path constraints", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, *Trans. ASME*, 118, 139–143.
- [36] Liu C. Cheah C.C. and Slotine J.J.E (2006) "Adaptive Jacobian tracking control of rigid-link electrically driven robots based on visual taskspace information", *Automatica*, 42, 1491–1501.
- [37] Fateh M.M. (2008) " On the Voltage-Based Control of Robot Manipulators ", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 6(5), 702–712.
- [38] Leung T.P. Zhou Q.J. and Su C.Y (1991) "An adaptive variable structure model following control design for robot manipulators, *IEEE Trans. Automat. Control*, 36 (1991), 347–353.
- [39] Yoo D.S. and Chung M.J. (1992) "A variable structure control with simple adaptation laws for upper bounds on the norm of the uncertainties", *IEEE Trans. Automat. Control*, 37, 860–864.

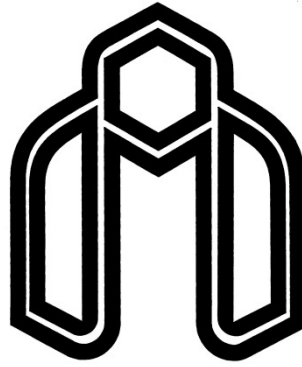
- [40] Ioannou P.A. and Datta A. (1991) "Robust adaptive control: A unified approach", Proc. IEEE, 79, 1736–1767.
- [41] Elmalı H. and Olgac N. (1992) "Theory and implementation of sliding mode control with perturbation estimation", in: Proc. of IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation, Nice, 2114–2119.
- [42] Lee J.J. Lee J.H. Ko J.S. and Youn M.J. (1992) "Design of efficient sliding mode controller for robot manipulator using disturbance observer", in: Proc. of IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation, Nice, 2120-2125.
- [43] Chan S.P. (1996) "An approach to perturbation compensation for variable structure systems", Automatica, 32(3), 469-473.
- [44] Chan S.P. (1999) "Variable structure control of Robot manipulators with perturbation estimator", J. Intell. Robot. Systems, 26, 29-46.
- [45] Shendge P.D. Patre B.M. Suryawanshi. P.V. (2010) " Robust Sliding Mode Control for Systems with Noise and Unmodeled Dynamics based on Uncertainty and Disturbance Estimation (UDE)", International Journal of Computer Applications.
- [46] Burkan R. (2006) "Upper Bounding Estimation for Robustness to the Parameter Uncertainty with Trigonometric Function in Trajectory Control of Robot Arms", J Intell Robot Syst. 46, 263-283.
- [47] Grip H.F. Johansen A.T. Imsland L. and Kaasa G.O. (2010) "Parameter estimation and compensation in systems with nonlinearly parameterized perturbations", Automatica, 46, 19-28.
- [48] Radpukdee T. Jirawattana P. (2009) "Uncertainty learning and compensation: An application to pressure tracking of an electro-hydraulic proportional relief valve", Control Engineering Practice. 17,
- [49] Youcef-Toumi K. (1990) "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics", Trans. of ASME, J. Dyn. Sys., Meas., Contr. 112(1), 133-142.
- [50] Lee S.U. and Chang P.H. (2001) "Control of Heavy-duty Robotic Excavator Using Time Delay Control with Integral Sliding Surface", Control Engineering Practice, 10(7), 697-711.
- [51] Fateh M.M. (2010) "Proper uncertainty bound parameter to robust control of electrical manipulators using nominal model", Nonlinear Dyn. 61, 655-666.
- [52] Fateh M.M. and Khorashadizadeh S. (2012) "Robust control of electrically driven robots by adaptive fuzzy estimation of uncertainty", Nonlinear Dyn. 69(3), 1465-1477.

- [53] Fateh M.M. (2007) " A novel formulation of inertia tensor using skew symmetric matrices", WSEAS Transactions on Systems, 1, 229-234.
- [54] Haykin S. (1994) "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", Macmillan, New York.
- [55] Park J. and Sandberg J.W. (1991) " universal approximation using radial-basis-function Network", Neural Computation, 3, 246-257.
- [56] Chen F.C. and Khalil H.K. "Adaptive control of nonlinear systems using neural networks" Int. J. Contr. 55(6), 129-1317.
- [57] Kwan C. Lewis F.L. Dawson D.M. (1998) "Robust neural-network control of rigid-link electrically driven robots", IEEE Transactions on Neural Networks, 9(4): 581-588.
- [58] Huang S.N. Tan K.K. Lee T.H (2002) "Adaptive motion control using neural network approximations", Automatica, 38 (2), 227-233.
- [59] Wai R.J. (2003) "Tracking control based on neural network strategy for robot manipulator", Neurocomputing, 51, 425-445.
- [60] Ham C. Qu Z. Johnson R. (2000) "Robust fuzzy control for robot manipulators", IEE Proc., Control Theory Appl. 147(2), 212–216.
- [61] Kim E. (2004) "Output feedback tracking control of robot manipulator with model uncertainty via adaptive fuzzy logic", IEEE Trans. Fuzzy Syst. 12(3), 368–376.
- [62] Sanner R.M. and Slotine J.E. (1992) "Gaussian networks for direct adaptive control", IEEE Trans. Neural Networks. (3), 837–863.
- [63] Ge S.S. and Wang C. (2002) "Direct Adaptive NN Control of a Class of Nonlinear Systems", IEEE Transactions on Neural Networks. 13(1).
- [64] Sridhar S. and Hassan K.K. (2002) "Output feedback control of nonlinear systems using RBF neural networks", IEEE Trans. Neural Netw. Learning Syst. 11(1), 69-79.
- [65] Taylor D. (1989) "Composite control of direct-drove robots", Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. 1670- 1675.
- [66] Chen B.S. Uang H.J. Tseng C.S. (1998) "Robust tracking enhancement of robot systems including motor dynamics: A fuzzy-based dynamic game approach", IEEE Trans. Fuzzy Syst. 6, 538–552.

Abstract

One of the difficulties of model-based control approaches is the uncertainty in system modeling. Therefore, estimation and compensation of uncertainty can improve the performance of control system. In this thesis, three novel adaptive approaches for estimation and compensation of uncertainty in the robust control of robot manipulator are proposed. In the first approach, Taylor series and in the second one Neural networks are used for uncertainty estimation and compensation using voltage control strategy instead of conventional torque control approaches. The third method is model-free and uncertainty is estimated by radial-basis-function networks. As advantages, the proposed control methods do not require proper selection of uncertainty bound parameters or bounding functions. As a result, one of the most important issues in designing the conventional robust control of robot manipulator which is the proper choice of uncertainty bounds and bounding functions are solved. In the conventional robust control, too low estimation of the uncertainty bounds may cause a higher tracking error while too high estimation of the bounds may cause saturation of input, higher frequency of chattering in the switching control laws and thus a bad behavior of the whole system. Scara robotic arm equipped with an electric permanent magnet motor is used for tracking control. In this research, kinematics and dynamics of robot and robust control methods equipped with the adaptive uncertainty estimators are introduced. In all of these proposed methods, closed-loop system stability is proved. To evaluate the performance of the proposed control system, controllers are simulated by MATLAB software. Simulation results show the efficiency of the control schemes.

Keywords: Uncertainty Estimation and Compensation, Robust Control, Taylor Series, Neural Networks, Robotic Arm, Voltage Control Strategy



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

**Robust position control of robot manipulator
driven by electric motors using uncertainty
estimation and compensation**

Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science (M.Sc)

Seyed Mohammad Ahmadi

Supervisor

Dr. M. M. Fateh

Date: September 2013