

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی کنترل کننده ی تطبیقی مقاوم بازوی رباتیک با روش گرادیان نزولی

مجید مقتدایی

استاد راهنما:

پروفسور محمد مهدی فاتح

شهریور ۹۴

ماحصل آموخته ایم را تقدیم می کنیم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است
به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم
به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم
که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شتم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را پاس نتوانم بگویم
امروز، هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما
ره آوردی کران سنگ ترا از این ارزان نداشتم تا به خاک پائین نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم کوزه غبار محنتیتان را بزدايد
بوسه بردستان پر مهرتان

باتقدیر و تشکر شایسته از استاد فریخته و فرزانه جناب آقای دکتر محمد مهدی فتح که بابت نامه های دلاویز و گفته های بلند، صحیفه های سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راه گشای محاربه در انجام و اتمام کارهای پایان نامه بوده است.

تعهد نامه

اینجانب مجید مقتدایی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق دانشکده برق و رباتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی کنترل کننده ی تطبیقی مقاوم بازوی رباتیک با روش گرادیان نزولی تحت راهنمایی پروفسور محمدمهدی فاتح متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در این پایان نامه، طرح کنترل تطبیقی مقاوم جدید با استفاده از روش گرادیان نزولی برای بازوی ماهر رباتیک ارائه شده است. روش پیشنهادی با دو روش کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی مقایسه گردیده است. کنترل کننده های مقاوم نسبت به عدم قطعیت غیرساختاری مقاوم هستند ولی باید حدود عدم قطعیت از قبل معلوم باشد. در مقابل کنترل کننده تطبیقی در حضور عدم قطعیت های غیر ساختاری عملکرد مطلوبی ندارد ولی نسبت به عدم قطعیت ساختاری مقاوم است. در طرح کنترل تطبیقی نیازمند تشکیل ماتریس رگرسیون هستیم و با توجه به معادلات دینامیکی غیرخطی ربات، تشکیل این ماتریس برای ربات های با بیش از دو رابط کار دشواری است. روش پیشنهادی در این پایان نامه قادر است تا به عدم قطعیت ساختاری و غیر ساختاری مانند اغتشاش خارجی و دینامیک مدل نشده غلبه کند. این طرح نیازی به معکوس ماتریس اینرسی، اندازه گیری بردار شتاب و محاسبه ماتریس رگرسیون ندارد. علاوه بر این، روند طراحی کنترل کننده ساده بوده و نیازی به محاسبات پیچیده ندارد. پایداری سیستم کنترل اثبات شده و نشان داده شده است که تمام سیگنال ها در سیستم حلقه بسته ی ربات محدود هستند. عملکرد طرح کنترل پیشنهادی با دو طرح کنترل تطبیقی و کنترل مقاوم توسط شبیه سازی کامپیوتری بر روی ربات اسکارا مقایسه شده اند. نتایج برتری روش پیشنهادی را نشان می دهد.

کلید واژه ها: کنترل کننده تطبیقی مقاوم، گرادیان نزولی، عدم قطعیت، رگرسیون، ربات اسکارا

فهرست مطالب

۱	۱ مقدمه
۱	۱-۱ مقدمه..... ۱
۲	۲-۱ مروری بر کارهای گذشته..... ۲
۷	۱-۲-۱ کنترل تطبیقی بر اساس روش مدل مرجع..... ۷
۸	۲-۲-۱ کنترل تطبیقی با استفاده از مدل‌های خود بازگشتی..... ۸
۹	۳-۲-۱ کنترل انحراف تطبیقی..... ۹
۱۰	۴-۲-۱ کنترل تطبیقی بر مبنای مدل..... ۱۰
۱۴	۳-۱ اهداف تحقیق..... ۱۴
۱۴	۴-۱ مروری بر پایان نامه..... ۱۴
۱۷	۲ مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی بازوی ربات
۱۷	۱-۲ مقدمه..... ۱۷
۱۸	۲-۲ اجزا و ساختار ربات..... ۱۸
۱۸	۳-۲ نمایش دناویت- هارتنبرگ..... ۱۸
۲۲	۱-۳-۲ مدل سازی سینماتیکی ربات‌های اسکارا و دو رابط لولایی..... ۲۲
۲۶	۴-۲ سینماتیک سرعت..... ۲۶
۲۶	۱-۴-۲ ژاکوبین بازوی ماهر ربات..... ۲۶
۲۸	۲-۴-۲ سرعت زاویه ای..... ۲۸
۲۹	۳-۴-۲ سرعت خطی..... ۲۹
۳۱	۵-۲ معادلات دینامیکی ربات..... ۳۱
۳۱	۱-۵-۲ انرژی پتانسیل..... ۳۱

۳۲..... ۲-۵-۲ انرژی جنبشی.....

۳۵..... ۲-۵-۳ مدل سازی دینامیکی ربات دو رابط لولایی.....

۳۵..... ۲-۵-۴ مدل سازی دینامیکی ربات اسکارا.....

۳ کنترل تطبیقی بازوی ربات

۳۷

۳۷..... ۱-۳ مقدمه.....

۳۸..... ۲-۳ مدل دینامیکی بازوی ماهر ربات.....

۳۹..... ۳-۳ طراحی کنترل کننده تطبیقی.....

۴۲..... ۴-۳ اثبات پایداری.....

۴۳..... ۵-۳ شبیه سازی.....

۴۵..... ۳-۵-۱ عملکرد ردیابی مسیر ربات دو رابط لولایی.....

۴۸..... ۳-۵-۲ عملکرد تنظیم نقطه ربات دو رابط لولایی.....

۵۰..... ۳-۶ نتیجه گیری.....

۴ کنترل مقاوم بازوی ربات

۵۱

۵۱..... ۱-۴ مقدمه.....

۵۲..... ۲-۴ معادله دینامیکی ربات.....

۵۲..... ۳-۴ کنترل کننده تناسبی مشتقی.....

۵۴..... ۴-۳-۱ تحلیل پایداری.....

۵۶..... ۴-۴ کنترل کننده مقاوم.....

۵۷..... ۴-۴-۱ تحلیل پایداری.....

۵۸..... ۴-۵-۱ شبیه سازی.....

۶۱..... ۴-۵-۱ عملکرد ردیابی مسیر ربات.....

۶۴..... ۴-۵-۲ عملکرد تنظیم نقطه ربات.....

۶-۴ نتیجه گیری..... ۶۶

۵ کنترل تطبیقی مقاوم بازوی ربات با روش گرادیان نزولی ۶۹

۱-۵ مقدمه..... ۶۹

۲-۵ معادله دینامیکی ربات..... ۷۱

۳-۵ طراحی کنترل کننده تطبیقی مقاوم با روش گرادیان نزولی..... ۷۱

۴-۵ تحلیل پایداری..... ۷۵

۵-۵ شبیه سازی..... ۷۷

۵-۵-۱ عملکرد ردیابی مسیر ربات..... ۷۹

۵-۵-۲ عملکرد تنظیم نقطه ربات..... ۸۴

۶-۵ نتیجه گیری..... ۸۸

۶ نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۱

۱-۶ نتیجه گیری..... ۹۱

۲-۶ پیشنهادات..... ۹۲

مراجع:..... ۹۳

فهرست شکل ها

- شکل (۱-۲) تعیین دستگاه‌ها مطابق دناویت هارتنبرگ [۸] ۲۱
- شکل (۲-۲) دیاگرام مفصلی ربات اسکارا با چهار درجه آزادی ۲۳
- شکل (۳-۲) دیاگرام مفصلی ربات دو رابط لولایی ۲۵
- شکل (۱-۳). دیاگرام بلوکی کنترل کننده تطبیقی ۴۵
- شکل (۲-۳) مسیر مطلوب ردگیری در فضای مفصلی ۴۶
- شکل (۳-۳) خطای ردیابی با اعمال کنترل کننده تطبیقی ۴۶
- شکل (۴-۳) خطای سرعت با اعمال کنترل کننده ی تطبیقی ۴۷
- شکل (۵-۳) گشتاور ورودی با اعمال کنترل کننده ی تطبیقی ۴۷
- شکل (۶-۳) پارامترهای کنترل کننده تطبیقی در فرآیند ردگیری ۴۸
- شکل (۷-۳) عملکرد تنظیم نقطه با اعمال کنترل کننده ی تطبیقی ۴۹
- شکل (۸-۳) گشتاور ورودی با اعمال کنترل کننده ی تطبیقی ۴۹
- شکل (۹-۳) پارامترهای کنترل کننده تطبیقی در فرآیند تنظیم ۵۰
- شکل (۱-۴) اغتشاش اعمال شده به ربات دو رابط ۶۰
- شکل (۲-۴) اغتشاش اعمال شده به ربات اسکارا ۶۰
- شکل (۳-۴) خطای ردیابی موقعیت ربات دو رابط با اعمال کنترل کننده ی مقاوم ۶۱
- شکل (۴-۴) گشتاور ورودی ربات دو رابط با اعمال کنترل کننده ی مقاوم ۶۲
- شکل (۵-۴) خطای ردیابی موقعیت ربات اسکارا با اعمال کنترل کننده ی مقاوم ۶۳
- شکل (۶-۴) گشتاور ورودی ربات اسکارا با اعمال کنترل کننده ی مقاوم ۶۳
- شکل (۷-۴) عملکرد تنظیم نقطه ربات دو رابط با اعمال کنترل کننده ی مقاوم ۶۴
- شکل (۸-۴) گشتاور ورودی ربات دو رابط با اعمال کنترل کننده ی مقاوم ۶۵
- شکل (۹-۴) عملکرد تنظیم نقطه ربات اسکارا با اعمال کنترل کننده ی مقاوم ۶۵
- شکل (۱۰-۴) گشتاور ورودی ربات اسکارا با اعمال کنترل کننده ی مقاوم ۶۶

- شکل (۵-۱) خطای ردیابی موقعیت ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۰
- شکل (۵-۲) خطای سرعت ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۰
- شکل (۵-۳) گشتاور ورودی ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۱
- شکل (۵-۴) پارامترهای کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ربات دو رابط در فرآیند ردگیری ۸۱
- شکل (۵-۵) خطای ردیابی موقعیت ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۲
- شکل (۵-۶) خطای سرعت ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۳
- شکل (۵-۷) گشتاور ورودی ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۳
- شکل (۵-۸) پارامترهای کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ربات اسکارا در فرآیند ردگیری ۸۴
- شکل (۵-۹) عملکرد تنظیم نقطه ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۵
- شکل (۵-۱۰) گشتاور ورودی ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۵
- شکل (۵-۱۱) پارامترهای کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ربات دو رابط در فرآیند تنظیم ۸۶
- شکل (۵-۱۲) عملکرد تنظیم نقطه ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۷
- شکل (۵-۱۳) گشتاور ورودی ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ۸۷
- شکل (۵-۱۴) پارامترهای کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ربات اسکارا در فرآیند تنظیم ۸۸

فهرست جداول

جدول (۱-۲) پارامترهای دناویت هارتنبِرج ربات اسکارا.....	۲۳
جدول (۲-۲) پارامترهای دناویت هارتنبِرج ربات دو رابط لولایی.....	۲۵
جدول (۱-۳) پارامترهای ربات دو-رابط لولایی.....	۴۴
جدول (۲-۳) پارامترهای کنترل کننده.....	۴۴
جدول (۳-۳) ماتریس رگرسیون.....	۴۴
جدول (۱-۴) پارامترهای ربات دو-رابط لولایی.....	۵۸
جدول (۲-۴) پارامترهای دینامیکی ربات اسکارا.....	۵۹
جدول (۳-۴) پارامترهای کنترل کننده.....	۵۹
جدول (۱-۵) پارامترهای ربات دو-رابط لولایی.....	۷۸
جدول (۲-۵) پارامترهای دینامیکی ربات اسکارا.....	۷۸
جدول (۳-۵) پارامترهای کنترل کننده.....	۷۸

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ مقدمه

بازوهای رباتیک در صنایع به منظور افزایش سرعت تولید یا کاهش هزینه محصولات استفاده می‌شوند. سیستم‌های رباتیکی کارهای تکراری را در یک محیط متعارف انجام می‌دهند. با پیشرفت سریع فناوری در حسگرها و محاسبات کامپیوتری، ربات‌های جدید را با حجم محاسباتی بالا و حسگرهای قدرتمند طراحی می‌نمایند. امروزه سیستم‌های رباتیکی در محیط‌های حساس و خطرناک نیز به کار می‌روند. برای مثال، فضا، اکتشاف در اعماق دریا، تمیز کردن محیط‌های خطرناک و شیمیایی را می‌توان نام برد. اخیراً، یک بازار رو به رشد برای استفاده از ربات‌ها در کاربردهای سرگرمی و خدماتی نیز به وجود آمده است. بعنوان مثال می‌توان به ربات‌های شبه انسان و اسباب بازی با توانمندی‌هایی همچون بالا رفتن، راه رفتن و یا برداشتن اجسام اشاره کرد.

کاربردهای جدید ربات‌ها، چالش بزرگی را در برابر روش‌های کنترلی سابق ایجاد می‌کنند و انتظار می‌رود که قوانین کنترل انعطاف پذیرتر و پیچیده تر به منظور عملکرد مناسب ربات ارائه شوند.

۱-۲ مروری بر کارهای گذشته

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، صاحبان صنایع در جست و جوی 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 کننده‌های کلاسیک در فضای مفصلی ربات، کنترل تناسبی-مشتقی-انتگرالی می‌باشد. این کنترل کننده نه تنها ساده و قابل پیاده سازی است، بلکه در برابر عدم قطعیت‌های بازوی رباتیک در حالت تنظیم، پایدار و مقاوم نیز می‌باشد [۱]. پس از آن، با استفاده از استراتژی مفصل مستقل، روش کنترل تناسبی-مشتقی با جبران گشتاور گرانشی به عنوان روش‌های مرسوم در کنترل تنظیم نقطه موقعیت بازوی رباتیک، مورد استفاده قرار گرفت [۲]. بر همین اساس بعضی از کارهای صنعتی نظیر جوشکاری نقطه ای، جا به جایی اجسام، مونتاژ کاری و رنگ کاری را می‌توان به کمک این کنترل کننده‌ها انجام داد. ماهیت غیرخطی و تزویج شدید دینامیک‌های یک بازوی رباتیک، شرایط را برای کنترل ردگیری دقیق به خصوص برای سرعت‌های بالا، با مشکل مواجه می‌سازد. بنابراین، برای اینکه کنترل کننده عملکرد مطلوبی داشته باشد، باید تاثیر این عوامل لحاظ گردد. روش‌های کنترل خطی بر پایه‌ی فرض اصلی عملکرد در محدوده‌ی کوچک برای مدل خطی بنا نهاده شده است. هنگامی که محدوده‌ی عملکرد مورد نیاز وسیع باشد، کنترل کننده‌ی خطی عملکرد ضعیف و یا ناپایدار دارد، زیرا اثرات غیرخطی در سیستم را نمی‌توان به طور مناسب جبران کرد. بنابراین، کنترل غیرخطی قادر است اثرات غیرخطی در دامنه‌ی وسیع را پاسخگو باشد [۳]. برای حل این مشکل طرح‌های کنترلی فراوانی پیشنهاد شده است. برای جبران دینامیک‌های غیرخطی، روش‌های کلاسیک اولیه مانند روش گشتاور محاسباتی [۴] یا کنترل پس‌خورد غیرخطی [۵]، به عنوان جبران گرهای غیرخطی پیشنهاد گردید. این روش‌های کنترلی بر اساس شناخت کامل از مدل دینامیکی ربات طرح شده‌اند، که نیازمند محاسبات سنگین می‌باشند. این روش‌ها را مبتنی بر مدل

می‌نامند. 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، اصطکاک مفاصل و دیگر دینامیک‌های مدل نشده می‌باشد. کارهای صنعتی مختلفی وجود دارد که بر اساس ردگیری انجام می‌شود. در این حالت مساله‌ی کنترل، غلبه بر عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری است که در وضعیت ردگیری مطرح می‌شوند. درحالی که در وضعیت تنظیم نقطه تاثیرگذار نیستند، در چنین شرایطی، روش‌های کنترل کلاسیک و روش‌های مبتنی بر مدل برای انجام ردگیری کارآمد نمی‌باشند [۶] و [۷].

خطی سازی فیدبکی^۱ یکی از روش‌های رایج کنترل غیرخطی می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان سیستم چند ورودی-چند خروجی را به سیستم‌های تک ورودی-تک خروجی بدون تزویج خطی تبدیل کرد. هرچند استفاده از این روش به خاطر عواملی مانند عدم قطعیت‌های سیستم و محاسبات اضافی در روند کنترلی با مشکل روبروست. به علاوه عملکرد طرح‌های کنترل که از خطی سازی فیدبکی استفاده می‌کنند به مدل دینامیکی سیستم بستگی دارد [۸] و [۹].

یکی دیگر از روش‌های کنترل غیرخطی، روش کنترل مقاوم پسگام می‌باشد. در واقع این روش کنترلی، یک روش بازگشتی است که با پس‌خورد حالت‌های سیستم و اعمال آن به ورودی‌های کنترل، سیستم ناپایدار را پایدار نموده و تابع لیاپانوف سیستم نیز بدست می‌آید. برای کنترل ردگیری موقعیت بازوی رباتیک، روش کنترل مقاوم پسگام با دیگر روش‌ها 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 می‌باشد. هرچند در این روش کنترلی نیز مثل سایر روش‌های کنترل مقاوم، باید کران عدم قطعیت معلوم باشد [۱۰].

یکی دیگر از روش‌های کنترلی، کنترل یادگیری تکرار شونده می‌باشد. کنترل یادگیری تکرار شونده، روش کنترل پیش‌خوردی می‌باشد برای بهبود عملکرد سیستم‌هایی که وظایف تکراری انجام

¹ · feedback linearization

می دهند کاهش خطای ردگیری به صورت مرحله به مرحله صورت می گیرد. عملکرد گذرای مطلوب از 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 حداقل 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 تکرار شونده عملکرد سیستم را بهبود می بخشد [۱۱] و [۱۲].

در کنار کنترل کننده های پیشرفته، 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، 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، مستقل از مدل می گویند. در این روش کنترلی از قوانین زبانی فازی که از دانش افراد خبره بدست آمده است، برای غلبه بر عدم قطعیت ها، غیرخطی ها و تزویج^۱ استفاده می شود. تحلیل 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 [۱۳]، [۱۴] و [۱۵].

تحقیقات فراوانی بر روی شبکه های عصبی به عنوان کنترل کننده های مستقل از مدل برای سیستم های غیرخطی انجام گرفت. الگوریتم پس انتشار دینامیکی با بکارگیری پرسپترون چندلایه برای شناسایی سیستم و کنترل آن مورد استفاده قرار گرفت [۱۶]. همچنین روش کنترلی عصبی-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 [۱۷]. از طرفی چون ساختار یک پرسپترون چند لایه پیچیده و سرعت یادگیری آن عمدتاً پایین است، از روش شبکه های شعاعی استفاده شد [۱۸]. ساختار پیوندگرایانه یک شبکه عصبی توانایی های منحصر به فردی از قبیل یادگیری تطبیقی، تحمل خطا و

^۱ Coupling

قابلیت تعمیم به کنترل فازی را داراست. هرچند، 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 رو به رو است [۱۹]. برای رفع این مشکل، کنترل مقاوم مستقل از مدل با پس‌خورد حالت خطی، برای بازوی رباتیک شش محوره پیشنهاد شد [۲۰].

یکی از مزایای اکثر روش‌های کنترلی، اعمال روش لیپانوف برای رسیدن به اهداف پایداری قوانین کنترلی پیشنهادی، در حضور عدم قطعیت‌ها می‌باشد [۳]. برخلاف اینکه روش‌های کنترل پیشنهادی از لحاظ تئوری بسیار قدرتمند می‌باشند، ولی از لحاظ پیاده سازی عملی با مشکل مواجه هستند. این قوانین کنترلی، با معایبی از قبیل محدودیت‌های سیستم، تجهیزات سنسوری، اشباع محرکه‌ها، لرزش سیگنال کنترل و زمان طولانی پردازش رو به رو هستند [۲۱]. 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 [۲۲]. اجرای راهبرد کنترل گشتاور به علت پیچیدگی معادلات دینامیکی بازوی رباتیک، با مشکل مواجه است. در کاربردهای عملی پیاده سازی فرمان کنترل گشتاور، یک مشکل اساسی تلقی می‌شود و نمی‌توان آن را مستقیماً برای حرکت دادن بازوی رباتیک به ورودی محرکه 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 وسیله‌ی ولتاژهای 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 و سرعت محاسبات بالاتر اشاره نمود. در واقع معادلات دینامیکی موتور الکتریکی بسیار ساده تر از معادلات دینامیکی بازوی رباتیک می‌باشد [۲۳] و [۲۴].

با طرح مسئله‌ی کنترل موقعیت بازوی رباتیک با وجود عدم قطعیت، کنترل کننده‌های پیشرفته‌ای برای ردگیری موقعیت در فضای مفصلی ارائه شد. از میان کنترل کننده‌های پیشنهادی، کنترل تطبیقی و کنترل مقاوم بیشتر مورد توجه قرار گرفتند. هرچند این کنترل کننده‌ها نیز دارای مزایا و معایبی می‌باشند. امروزه در کارهای صنعتی، از بازوهای رباتیک استفاده‌های زیادی می‌شود. از آن جا که ابزار و وسایل مورد استفاده توسط ربات دارای ابعاد و اشکال مختلفی هستند، در کنترل بازوی رباتیک برای غلبه بر این عدم قطعیت‌ها، باید از روش‌های پیشرفته کنترلی استفاده نمود. در بازوهایی که وظیفه انتقال و جا به جایی بارهای مختلفی را برعهده 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 نظریه‌ای پرترفدار است که برای کنترل سیستم‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که دارای دینامیک‌های معلوم، اما با پارامترهای نامعلوم باشند. هدف اصلی کنترل تطبیقی، پیدا کردن یک الگوریتم تخمین زن است که به این الگوریتم، قانون تطبیقی می‌گویند به عبارتی می‌توان گفت که کنترل تطبیقی با این قانون تطبیقی، توانایی یادگیری از تجربیات کنترل سیستم را بدست می‌آورد.

با بررسی الگوریتم‌های تطبیقی پیشنهاد شده، روش‌های گوناگون را مورد بررسی قرار دادیم، بعضی از این روش‌ها تنها در قدم‌های اولیه و برای مدل‌های خطی شده و تقریبی به کار گرفته می‌شدند و قابل تعمیم به حالت کلی دینامیک غیرخطی و کامل ربات نبودند و در بخش آخر حالت‌هایی که قابل عمومیت دادن به وضعیت کلی می‌باشند، در نظر خواهیم گرفت.

۱-۲-۱ کنترل تطبیقی بر اساس روش مدل مرجع

از میان روش‌های رایج کنترل تطبیقی، روش مدل مرجع نخستین روشی بود که بر روی یک سیستم رباتیک اعمال گردید [۲۵]، [۲۶] و [۲۷]. در این سیستم‌ها یک مدل مرجع درجه دوم برای توصیف عملکرد سیستم انتخاب شده و قانون تطبیق، بهره‌های فیدبک را در جهت تعقیب رفتار این مدل تنظیم می‌کرد.

در این روش اثر بار با ترکیب کردن آن با رابط نهایی مورد توجه قرار گرفته و از ابعاد پنجه در مقایسه با سایر رابط‌ها صرف نظر شده است. یک سیستم درجه دوم فوق میرا به عنوان مدل خروجی برای هر رابط ربات در نظر گرفته شده و مدل سیستم با حذف درجات بالاتر خطی گردیده است. یک چنین مدل مرجع انتخاب شده ای نمایش موثر و انعطاف پذیر از عملکرد حلقه بسته دلخواه سیستم تحت کنترل می‌باشد. ربات به وسیله‌ی تنظیم ضرایب بهره‌ی فیدبک موقعیت و سرعت به گونه ای کنترل می‌شد تا خروجی آن خروجی مدل را دنبال کند. بدین ترتیب مشخصات دینامیکی حلقه بسته سیستم منطبق بر عملکرد دینامیکی دلخواه مدل مرجع خواهد شد.

به عنوان یک نتیجه، پیاده کردن این الگوریتم کنترل تطبیقی تنها نیاز به محاسبات ساده دارد که می‌توان آن‌ها را با پردازنده‌های نه چندان سریع انجام داد. بعلاوه این روش نه نیاز به یک مدل ریاضی پیچیده از دینامیک داشته و نه اینکه به اطلاعات اولیه ای از محیط و بار وابسته است. سیستم تطبیقی مدل مرجع قابلیت نگهداری یک عملکرد خوب و مناسب را برای محدوده گسترده ای از حرکات و بارها دارد. علیرغم مزایای ذکر شده معایب چندی نیز به این روش وارد می‌باشد [۲۵].

در بدست آوردن الگوریتم‌های کنترلی فرض‌های زیر به کار گرفته شده است:

۱- مدل غیرخطی ربات با حذف درجات بالاتر خطی در نظر گرفته شده است.

۲- از تزویج میان رابط‌ها صرف نظر شده است.

۳- الگوریتم با فرض کندی تغییر پارامترهای کنترل کننده بدست آمده بود.

همانطور که از سوی افراد بسیاری در [۲۸] مورد توجه قرار گرفته است، الگوریتم‌های پیشنهادی از دید عملی غیرقابل اجرا می‌باشد، چون علاوه بر فرض‌های محدود کننده بالا، قانون تطبیق با توجه به خطای شتاب محاسبه می‌گردد که نیازمند اندازه گیری شتاب در هر رابط می‌باشد که به سادگی امکان پذیر نیست.

۱-۲-۲ کنترل تطبیقی با استفاده از مدل‌های خود بازگشتی

تنظیم کننده‌های خود تنظیم، کنترل کننده‌های دیگری بودند که کاربرد آن‌ها در مسئله ربات بلافاصله پس از کنترل تطبیقی مدل مرجع ظاهر گردید [۲۹]. این کنترل کننده‌ها که ماهیت گسسته داشتند، برپایه منطبق کردن یک مدل خود بازگشتی بر اطلاعات ورودی-خروجی عمل کرده و سپس این مدل را جهت بدست آوردن قانون کنترل بهینه به منظور حداقل کردن خطا مورد استفاده قرار می‌دادند.

از آنجا که در این روش پارامترهای مدل خودبازگشتی هر رابط تنها با استفاده از اطلاعات ورودی خروجی همان رابط تخمین زده می‌شوند، در الگوریتم کنترل فرض می‌شود که تزویج میان رابط‌ها قابل صرف نظر باشد.

به طور خلاصه، مدل خود بازگشتی و پارامترهای آن به گونه ای تخمین زده می‌شوند تا مدل بر اطلاعات منطبق گردد. این پارامترها در قدم بعدی برای بدست آوردن کنترل بهینه به کار خواهند رفت.

ایراد اساسی این روش که پیاده سازی عملی آن را در زمان مطرح شدن الگوریتم غیر ممکن می‌ساخت، بدین ترتیب خلاصه می‌شود:

از آنجا که دینامیک ربات فوق العاده غیرخطی است، منطبق کردن یک مدل خطی لحظه ای بر آن نیازمند فرکانس‌های نمونه برداری بزرگ می‌باشد. ولی از طرف دیگر حجم محاسبات اجازه کوچک کردن دوره‌ی نمونه برداری از حد مشخص را نمی‌دهد. بدین ترتیب پیاده سازی عملی این روش با

پردازشگرهای موجود ممکن نمی‌باشد. استفاده از روش‌های طراحی سریع تر [۳۰]، [۳۱] و [۳۲] و بهبود نسبی سرعت پردازش سیستم‌ها امید به اجرای این روش در آینده را افزایش داده است.

۱-۲-۳ کنترل انحراف تطبیقی^۱

در این روش بر خلاف سایر روش‌هایی که تا کنون بحث شد، تداخل میان رابط‌های گوناگون در نظر گرفته شده و قانون کنترل بر پایه‌ی معادلات انحراف در همسایگی یک منحنی نامی بدست آورده می‌شد.

منحنی‌های نامی با درون یابی از منحنی‌های مطلوب بدست آمده و شامل موقعیت‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌های زاویه ای در هر لحظه‌ی نمونه برداری می‌باشند. در قدم بعدی معادلات دینامیکی غیر خطی ربات در امتداد منحنی نامی خطی شده و یک مدل انحرافی خطی بدست می‌آید [۳۳] و [۳۴]. سیستم کنترل برای این مدل با دو مولفه‌ی پسخورد و پیشخور مشخص می‌شد که به طور جداگانه و همزمان قابل محاسبه بودند. برای بدست آوردن این روش کنترلی به مفروضات زیر نیازمندیم:

۱- پارامترهای سیستم آهسته تغییر کنند، بطوریکه سرعت تغییرات آن‌ها کندتر از سرعت تطابق باشد.

۲- متغیرهای حالت سیستم خطی شده قابل اندازه گیری باشند.

۳- نویز اندازه گیری قابل صرف نظر باشد.

از آنجا که روش پیشنهادی برپایه‌ی مدل خطی شده ای از ربات عمل می‌کنند شکل خاصی از معادلات دینامیکی برای این منظور توصیه می‌شود.

محدودیت‌های عمده‌ی این روش با مفروضات در نظر گرفته شده برای همگرایی الگوریتم شناسایی ارتباط تنگاتنگ دارد. این روش در محیط‌های با نویز خوب کار نکرده و به محض گذشتن سرعت حرکت ربات از حد مشخصی، کنترل مختل خواهد شد. به علاوه، تغییرات ناگهانی بار (مانند افتادن

^۱Adaptive perturbation control

بار) سیستم را ناپایدار خواهد کرد. علیرغم این نقاط ضعف، تحقیقات در جهت بهبود عملکرد روش و کاهش محدودیت‌های آن ادامه دارد [۳۵] و [۳۶].

۱-۲-۴ کنترل تطبیقی بر مبنای مدل

این روش که در نخستین سالهای دهه‌ی ۱۹۸۰ بیان شد [۳۷] و [۳۸] ترکیب روش بر مبنای مدل مرسوم و یک الگوریتم تطبیقی به گونه‌ای می‌باشد که اثرات تغییر دینامیک غیرخطی و عدم قطعیت‌های مدل نیز در سیستم کنترل مخلوط گردد. هدف سیستم کنترل در این روش محاسبه جملات غیرخطی و تداخل‌ها و سپس جبران اثرات آن‌ها می‌باشد. پس از جبران این آثار، سیستم خطی و مجزا شده بوسیله کنترل کننده‌های با بهره ثابت کنترل خواهد شد.

در ابتدا عمل جبران سازی برپایه‌ی یک مدل مرجع انجام می‌گرفت و بعداً تخمین زننده‌های پارامتر، جایگزین مدل مرجع شدند. به همین دلیل نیز این دسته از روش‌ها جزء خانواده روش‌های تطبیقی با مدل مرجع منظور نشده است.

سیستم‌های کنترل پیشنهاد شده در این طرح‌ها دارای یک حلقه درونی با کنترل کننده مدل مرجع می‌باشند در حالیکه حلقه بیرونی آن‌ها شامل یک کنترل کننده‌ی تناسبی-مشتقی-انتگرالی با ضرایب ثابت می‌باشند. این الگوریتم‌ها نیز تداخل میان رابط‌ها را در نظر گرفته و صریحاً در مدل مرجع منظور می‌کنند. برای سادگی کار ممان اینرسی بار و رابط اول کوچک در نظر گرفته شده و اثر گشتاورهای گرانشی صرف نظر می‌شود.

الگوریتم پیشنهادی ساده بوده و نیازی به اندازه گیری شتاب رابط‌ها نداشته و معکوس ماتریس اینرسی سیستم را نیز در قانون تطابق وارد نمی‌کند.

کارهای اساسی که نتایج آن‌ها را در بالا بررسی کردیم، تئوری کنترل تطبیقی را که برای سیستم‌های خطی توسعه داده شده بود، با در نظر گرفتن فرض‌ها و تقریب‌هایی به ربات غیرخطی اعمال کردند. خواص غیرخطی تزویج میان رابط‌ها با فرض کوچک بودن نادیده گرفته شده و یا با تقریب‌های درجه

اول خطی می‌شد و یا حتی آن را ثابت در نظر می‌گرفتند. بعضی از این بحث‌ها بلافاصله پس از اینکه ربات کمی سریع‌تر حرکت کرده و یا در اعمال محرک از نسبت چرخ دنده کوچک‌تری استفاده می‌شد شکست می‌خوردند.

برای نسبت چرخ دنده‌های بزرگ، مانند اکثر ربات‌های امروزی، دینامیک محرک بر دینامیک غیرخطی ربات غالب شده و در نتیجه سیستم برای کنترل کننده در نقش یک سیستم خطی ثابت با زمان مجزا شده خواهد بود، که منجر به قوانین کنترل ساده می‌گردد. اما تمایل در جهت بکارگیری محرک‌های رانش مستقیم و در نتیجه نبودن نسبت‌های بزرگ چرخ دنده در کنار افزایش تقاضا برای سرعت عملکرد بالا موجب گردید، تا سیستم‌های کنترلی مورد توجه قرار گیرند که دینامیک غیرخطی غالب ربات را در بررسی‌های خود منظور می‌کنند.

در واقع با پیشرفت تحقیقات، الگوریتم‌های کنترل تطبیقی توسعه داده شدند که مدل کامل غیرخطی ربات را برای تحلیل خود در نظر گرفته و علیرغم ماهیت غیرخطی پارامترهای معادله‌ی دینامیکی ربات، پایداری سیستم را تضمین می‌کردند. این نتایج عمدتاً متعلق به دو طبقه می‌باشند. نخستین طبقه از این روش‌ها با بکارگیری دانش اولیه‌ای از باندهای بالایی پارامترهای دینامیک ربات، قوانین تطابق پارامتر با سوئیچینگ غیرخطی را پیشنهاد می‌کردند [۳۹-۴۳]. کلیدی این طرح‌های تطبیقی از آن نظر مشترک می‌باشند که همگی خطای تعقیب یک منحنی نامی و مشتق آنرا جهت تعیین بهره‌ی تطبیقی حلقه فیدبک مورد استفاده قرار می‌دهند. این بهره تطبیقی تا زمانی که به اندازه کافی بزرگ شده و خواص غیر خطی را حذف کند، رشد خواهد کرد.

یک سوال پاسخ داده نشده در کلیدی این طرح‌ها اینست که، پارامترهای طراحی و بهره‌های حلقه تطبیقی را که بستگی به خواص حلقه بسته سیستم دارند، چگونه انتخاب می‌شوند. این سیستم‌ها عملاً کنترل کننده‌هایی با بهره بالا می‌باشند که ورودی کنترل آن‌ها با ناپیوستگی‌های بسیار به سیستم اعمال خواهد شد. این دو عامل از عوامل اصلی تحریک دینامیک‌های مدل نشده و ناپایداری سیستم می‌باشند. اثر ناپیوستگی قانون کنترل را می‌توان با استفاده از ناحیه مرده در قانون تطابق

کاهش داد. به طور کلی در هیچ یک از روش‌های این دسته به بررسی پایداری مقاوم نسبت به خطای ساختاری پرداخته نشده است.

در دسته‌ی دوم از طرح‌های تطبیقی که مدل کامل و غیرخطی ربات را در نظر می‌گیرند، قانون کنترل مدل پایه در کنار بعضی جملات اضافی برای تضمین پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در الگوریتم‌های این طبقه با به کارگیری خاصیت خطی بودن دینامیک ربات نسبت به یک مجموعه از پارامترهای مجهول، دینامیک غیرخطی ربات در هر مرحله تخمین زده شده و جهت جبران آثار نامطلوب به ورودی سیستم اضافه می‌شود. به عبارت دیگر قانون تطابق پارامترها تنها برای تخمین مجموعه مقادیر ناشناخته بکارگرفته می‌شود. کلیه روش‌های این خانواده همگرایی مطلق می‌باشند بدین معنی که خطای میان وضعیت واقعی و مطلوب برای هر وضعیت و تخمین اولیه‌ای با طی زمان به صفر همگرا می‌شود. این روش‌ها ادامه‌ی الگوریتم‌های تطبیق مدل پایه می‌باشد که در قسمت قبل توضیح داده شد و همگرایی خطا با فرض آهستگی تغییر پارامترها ثابت گردید.

کنترل تطبیقی را تنها برای سیستم‌های غیرخطی می‌توان به کار گرفت که دینامیک‌های آن نسبت به پارامترهای سیستم، خطی است [۴۴]. استفاده از این روش برای کنترل موقعیت بازوهای صنعتی کارآمد، اما پرهزینه است. زیرا در ساختار این گونه بازوها، از رابط‌های بسیار محکمی استفاده می‌شود و تا جایی که مقدور است، لقی‌های موجود در بازو را کاهش می‌دهند. در صورت مهیا نشدن شرایط فوق، عدم قطعیت‌های غیر ساختاری نظیر اغتشاش خارجی و دینامیک مدل نشده، در دینامیک‌های بازوی رباتیک ظاهر می‌گردد. حساس بودن کنترل تطبیقی به عدم قطعیت‌های غیر ساختاری، محدودیت دیگری است که باعث می‌شود روش تطبیقی در کنترل این گونه سیستم‌ها دارای نمایشی ضعیف باشد [۴۵].

وجود عدم قطعیت‌های غیرساختاری در دینامیک‌های بازوی رباتیک موجب شد تا کنترل مقاوم مورد توجه قرار گیرد. کنترل مقاوم در دفع اغتشاش خارجی و دینامیک‌های مدل نشده عملکرد درخشانی دارد و پایداری سیستم حلقه بسته را با وجود همه‌ی این عوامل تضمین می‌کند. برای

طراحی کنترل کننده‌های مقاوم باید کران عدم قطعیت‌ها معلوم باشد. بنابراین در این روش، طراحان باید احتیاط‌های لازم را به عمل آورند تا پایداری سیستم حلقه بسته تضمین شود [۴۶] و [۴۷].

در سال‌های اخیر، توجه فراوانی بر روی تئوری کنترل ساختار متغیر به عنوان کنترل کننده‌ی مقاوم برای بازوهای رباتیک گردیده است. این روش کنترلی مزایای فراوانی از قبیل سادگی و مقاوم بودن نسبت عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری اما با کرانه‌های معلوم را داراست. در طراحی کنترل ساختار متغیر، قانون کنترل شامل تابع کلید زنی می‌باشد که باعث ایجاد لرزش سیگنال کنترل در طی اجرای آن می‌باشد. در واقع لرزش سیگنال کنترل مرتبط با ماهیت ناپیوسته روش کنترلی می‌باشد و تحریک دینامیک‌های مدل نشده از آثار نامطلوب این پدیده می‌باشد [۴۸] و [۴۹]. بنابراین، روش‌های هموارسازی از قبیل روش لایه مرزی [۴۸] و الگوریتم‌های تطبیقی کاهش لرزش سیگنال کنترل [۴۹] پیشنهاد شد. هرچند سیستم حلقه بسته با اعمال این راهکارها، دارای پایداری محدود یکنواخت می‌شود [۵۰].

ترکیب کنترل تطبیقی و مقاوم از مزایای هر دو نوع کنترل کننده برخوردار بوده و احتیاط‌های لازم در زمینه‌ی طراحی کنترلر مقاوم را کاهش داده و عملکرد گذرای پاسخ سیستم را نیز بهبود داده است. در شرایطی که اطلاعات لازم از دینامیک‌های غیرساختاری در دسترس نیستند، کنترل تطبیقی مقاوم راهکار مناسبی برای کنترل ردگیری بازوی ربات محسوب می‌شود. در صورتی که دینامیک‌های عدم قطعیت غیرساختاری در دسترس باشند، استفاده از کنترل تطبیقی مقاوم توصیه شده است [۵۱] و [۵۲].

همانطور که گفته شد، برای طراحی اکثر کنترل کننده‌های مقاوم، باید کران عدم قطعیت‌ها معلوم باشد. از آنجایی که تخمین دقیق این کران‌ها آسان نیست، یکسری قوانین بروز رسانی [۵۳] و [۵۴] برای عدم نیاز به حدود عدم قطعیت‌ها پیشنهاد شد، هرچند در این گونه روش‌ها مشکلات مرتبط با انحراف پارامتر وجود دارد [۵۵]. 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 [۵۶] و [۵۷]. یک ایده‌ی جدید برای تخمین سیگنال اختلال سیستم (عدم قطعیت ساختاری و اغتشاش خارجی) استفاده از دینامیک‌های مد لغزشی معرفی گردید [۵۸]. در ادامه‌ی این پژوهش از جبران کننده برای کاهش تاثیر عدم قطعیت‌ها استفاده شد.

۱-۳ اهداف تحقیق

موضوع این پایان نامه کنترل تطبیقی مقاوم بازوی رباتیک با استفاده از روش گرادیان نزولی است. در این خصوص، مدل سازی سیستم، طراحی کنترل کننده تطبیقی مقاوم و تحلیل پایداری سیستم کنترل انجام می‌شود. باتوجه به پیچیده بودن سیستم رباتیک، غلبه بر عدم قطعیت‌ها شامل عدم قطعیت پارامتری، دینامیک مدل نشده و اغتشاش خارجی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کنترل تطبیقی به عنوان روشی مناسب برای کنترل سیستم‌هایی که دارای عدم قطعیت پارامتری هستند استفاده می‌شود، اما ضعف آن در مقابله با دینامیک مدل نشده و اغتشاش خارجی است. در این پایان نامه طرح نوین کنترل تطبیقی مقاوم با استفاده از روش گرادیان نزولی برای بازوی ربات ماهر ارائه می‌گردد. روش تطبیقی پیشنهادی می‌تواند به دینامیک مدل نشده و اغتشاش خارجی غلبه نماید.

۱-۴ مروری بر پایان نامه

در فصل دوم این پایان نامه مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی بازوی ربات ارائه خواهد شد. در فصل سوم کنترل کننده تطبیقی مرسوم بر روی بازوی ربات بررسی می‌شود. از آنجایی که کنترل کننده تطبیقی در مقابل نامعینی‌های ساختار نیافته^۱ ناتوان است، در فصل چهار با در نظر گرفتن این نامعینی‌ها کنترل کننده مقاوم طراحی می‌شود. در فصل پنجم با در نظر گرفتن هر دو نوع نامعینی ساختار یافته و نیافته طرح نوین کنترل کننده تطبیقی مقاوم با روش گرادیان نزولی ارائه خواهد شد.

^۱ Unstructured uncertainty

کارایی طرح پیشنهادی با اثبات پایداری و شبیه سازی کامپیوتری بررسی خواهد شد. در فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادهایی برای ادامه کار در آینده ارائه خواهد شد.

فصل ۲

مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی بازوی ربات

۲-۱ مقدمه

در این فصل چگونگی بدست آوردن مدل ریاضی ربات اسکارا تشریح می شود [۸]. مدل سازی ربات ها شامل دو بخش مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی است. در مدل سازی سینماتیکی روابط مربوط به حرکت ربات را بدست می آوریم. در این مدل سازی تشکیل جدول هارتنبرگ مهم ترین گام است. این الگوریتم روشی منظم برای انجام سینماتیک مستقیم ارائه می کند. در رباتیک اولین مسئله که لازم است روشن شود، تعیین موقعیت ابزار و مجری نهایی در دستگاه مبنا می باشد. سینماتیک مستقیم بیانگر موقعیت و جهت مجری نهایی در دستگاه مبنا به ازای متغیرهای مفاصل ربات می باشد. متغیرهای مفصلی در مفصل لولایی، زاویه بین رابط ها و در مفصل کشویی طول رابط می باشد. در مدل سازی دینامیکی روابط انرژی جنبشی و پتانسیل ربات بدست می آید. سپس با استفاده از روش های تحلیلی مدل دینامیکی ربات حاصل می شود.

۲-۲ اجزا و ساختار ربات

بازوی مکانیکی ماهر از اتصال رابطها و مفاصل در یک زنجیر باز سینماتیک تشکیل می‌شوند. مفاصل به طور مشخص لولایی (دوار) یا کشویی (خطی) می‌باشند. یک مفصل لولایی شبیه یک لولا است که اجازه چرخش نسبی بین دو رابط را می‌دهد. یک مفصل کشویی اجازه حرکت نسبی طولی بین دو رابط را می‌دهد. از حرف اختصاری R برای نشان دادن مفاصل لولایی و حرف اختصاری P برای مفاصل کشویی استفاده می‌کنیم.

تعداد مفاصل، درجه آزادی بازوی مکانیکی ماهر را تعیین می‌کند. یک بازوی مکانیکی ماهر معمولاً شش درجه آزادی مستقل دارد. سه درجه آزادی برای موقعیت یابی و سه درجه آزادی برای جهت یابی می‌باشد. ربات با کمتر از شش درجه آزادی بازو به هر نقطه در محیط کار با زاویه دلخواه نخواهد رسید. برای کاربردهایی نظیر دسترسی به اطراف یا پشت موانع نیاز به تعداد درجات حرکت بیشتر از شش می‌باشد. مشکل کنترل بازوی ماهر با افزایش درجه حرکت، افزایش می‌یابد. بازوی ماهر با داشتن بیش از شش رابط بعنوان بازوی ماهر با حرکت اضافی^۱ معرفی می‌گردد.

۲-۳ نمایش دناویت - هارتنبرگ

برای انجام تحلیل سینماتیک مستقیم در یک روش متقارن باید برخی دستورات عملها معرفی شود. البته بدون این روش خاص هم می‌توان آنالیز سینماتیک را انجام داد، اما برای ربات‌هایی با n رابط، فوق العاده پیچیده است. دستوراتی که در ادامه معرفی می‌شود معادلات را بطور قابل توجهی ساده می‌سازد، بعلاوه آن‌ها به یک زبان عمومی ارتقا می‌یابند که با آن، مهندسين ربات می‌توانند ارتباط برقرار کنند.

در ربات‌هایی با $n+1$ رابط، رابطها را از شماره ۰ تا n شماره گذاری می‌کنیم. از پایه ربات به عنوان رابط صفر شروع می‌کنیم و مفاصل را از شماره ۱ تا n نام گذاری می‌کنیم. حال فرض کنید که

¹ Redundant Manipulator

A_i ماتریسی همگن است که دستگاه مختصات i را به دستگاه $i-1$ ، تبدیل می‌کند. ماتریس A_i ثابت نیست اما مطابق با تغییر ترکیب ربات تغییر می‌کند. بنابراین A_i تابعی از متغیر مفاصل q_i می‌باشد :

$$A_i = A_i(q_i) \quad (۱-۲)$$

این ماتریس همگن، ماتریس تبدیل نامیده می‌شود و با T_i^j نشان داده می‌شود

$$\begin{cases} T_i^j = A_{i+1}A_{i+2} \cdots A_{j-1}A_j & i < j \\ T_i^j = I & i = j \end{cases} \quad (۲-۲)$$

$$T_i^j = (T_i^j)^{-1}$$

با توجه به روشی که ما دستگاه‌های مختصات مختلف را به صورت صلب به رابط‌های مربوط متصل نموده‌ایم. در نتیجه موقعیت هر نقطه روی مجری نهایی که در دستگاه n بیان می‌شود مقداری ثابت و مستقل از شکل ربات است. موقعیت و جهت مجری نهایی نسبت به دستگاه مبنا بوسیله یک بردار سه عضوی d_0^n و یک ماتریس 3×3 دوران R_0^n نشان داده می‌شوند در این صورت ماتریس همگن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H = \begin{bmatrix} R_0^n & d_0^n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۳-۲)$$

در نتیجه موقعیت هر نقطه روی مجری نهایی در دستگاه مبنا با رابطه‌ی زیر تعیین می‌گردد:

$$H = T_0^n = A_1(q_1) \cdots A_n(q_n) \quad (۴-۲)$$

هر تبدیل همگن A_i بصورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$A_i = \begin{bmatrix} R_{i-1}^i & d_{i-1}^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۵-۲)$$

بنابراین داریم:

$$T_i^j = A_{i+1}A_{i+2} \cdots A_{j-1}A_j = \begin{bmatrix} R_i^j & d_i^j \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۶-۲)$$

ماتریس R_i^j جهت دستگاه j را نسبت به دستگاه i بیان می‌کند. بخش‌های دوران ماتریس T_i^j به صورت زیر می‌باشد:

$$R_i^j = R_i^{i+1} \cdots R_{j-1}^j \quad (۷-۲)$$

بردار d_i^j بوسیله رابطه زیر بصورت تکراری بدست می‌آید:

$$d_i^j = d_i^{j-1} + R_i^{j-1} d_{j-1}^i \quad (۸-۲)$$

برای انجام آنالیز می‌توانیم هر دستگاه دلخواهی را به رابطه‌ها متصل نماییم، ولی رعایت نظم در انتخاب دستگاه مفید خواهد بود. یک دستورالعمل متداول برای تعیین دستگاه‌های مختصات در کاربردهای رباتیک، دناویت-هاتنبرگ یا دستورالعمل $D-H$ است در این دستورالعمل هر ماتریس تبدیل A_i به صورت ضرب چهار تبدیل اساسی نشان داده می‌شود:

$$A_i = \text{Rot}(z, \theta_i) . \text{Trans}(z, d_i) . \text{Trans}(x, a_i) . \text{Rot}(x, \alpha_i) \quad (۹-۲)$$

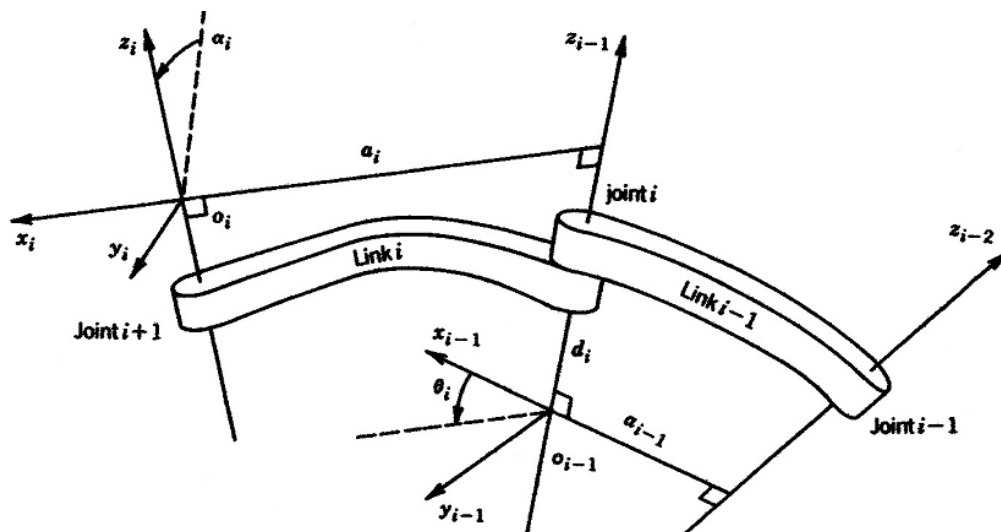
با جایگذاری ماتریس‌های تبدیل اساسی و انجام ضرب ماتریس A_i به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} & 0 & 0 \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\alpha_i} & -S_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۰-۲)$$

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

در ماتریس تبدیل A_i چهار کمیت $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$ پارامترهای رابط می‌باشند. a_i طول رابط، α_i پیچش رابط، d_i انحراف رابط و θ_i زاویه مفصل نامیده می‌شود. در مفاصل لولایی θ_i متغیر مفصلی و در مفاصل کشویی d_i متغیر مفصلی می‌باشد.

الگوریتم زیر به طور خلاصه، دستورالعمل دناویت-هاتنبرگ را نشان می‌دهد، شکل (۱-۲) برای درک بهتر این مراحل مفید خواهد بود.



شکل (۱-۲) تعیین دستگاه‌ها مطابق دناویت هارتنبرگ [۸]

- گام ۱. محور مفاصل را $z_0, \dots, z_{n-1}$ قرار داده و نامگذاری می‌نماییم.
- گام ۲. دستگاه پایه را نصب می‌نماییم و مبدا آن را در محلی دلخواه روی محور z_0 قرار می‌دهیم. محورهای x_0 و y_0 را با در نظر گرفتن دستگاه راستگرد بطور مناسب انتخاب می‌نماییم. (برای $i = 0, \dots, n-1$ گام‌های ۳ تا ۵ را اجرا می‌نماییم)
- گام ۳. مبدا O_i را در جایی که عمود مشترک z_i و z_{i-1} را قطع می‌کند قرار می‌دهیم. اگر z_i و z_{i-1} متقاطع هستند نقطه O_i را در نقطه تقاطع قرار می‌دهیم. اگر z_i و z_{i-1} موازی هستند O_i را در محل مفصل i قرار می‌دهیم.
- گام ۴. x_i را در امتداد عمود مشترک بین z_i و z_{i-1} و در عبور از O_i قرار می‌دهیم. یا هنگامی که z_i و z_{i-1} متقاطع هستند در جهت عمود به صفحه‌ی z_i و z_{i-1} قرار می‌دهیم.
- گام ۵. y_i را با تکمیل دستگاه راستگرد مشخص می‌کنیم.

- گام ۶. دستگاه مختصات قسمت پایانی $O_n x_n y_n z_n$ را تعیین می‌نماییم.
- گام ۷. یک جدول از پارامترهای رابط $a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i$ تشکیل می‌دهیم، که در آن:

- ❖ a_i طول در امتداد x_i از O_i تا محل تقاطع محورهای x_i و z_{i-1} .
- ❖ d_i طول در امتداد z_{i-1} از O_{i-1} تا محل تقاطع محورهای x_i و z_{i-1} .

❖ α_i زاویه بین z_i و z_{i-1} که حول x_i اندازه گیری می شود.

❖ θ_i زاویه بین x_i و x_{i-1} که حول z_{i-1} اندازه گیری می شود.

گام ۸. ماتریس های تبدیل های همگن A_i را تشکیل می دهیم.

گام ۹. $T_0^n = A_1, \dots, A_n$ را تشکیل می دهیم. این ماتریس موقعیت و جهت دستگاه مختصات ابزار در

دستگاه مختصات پایه تعیین می کند.

۲-۳-۱ مدل سازی سینماتیکی ربات های اسکارا و دو رابط لولایی

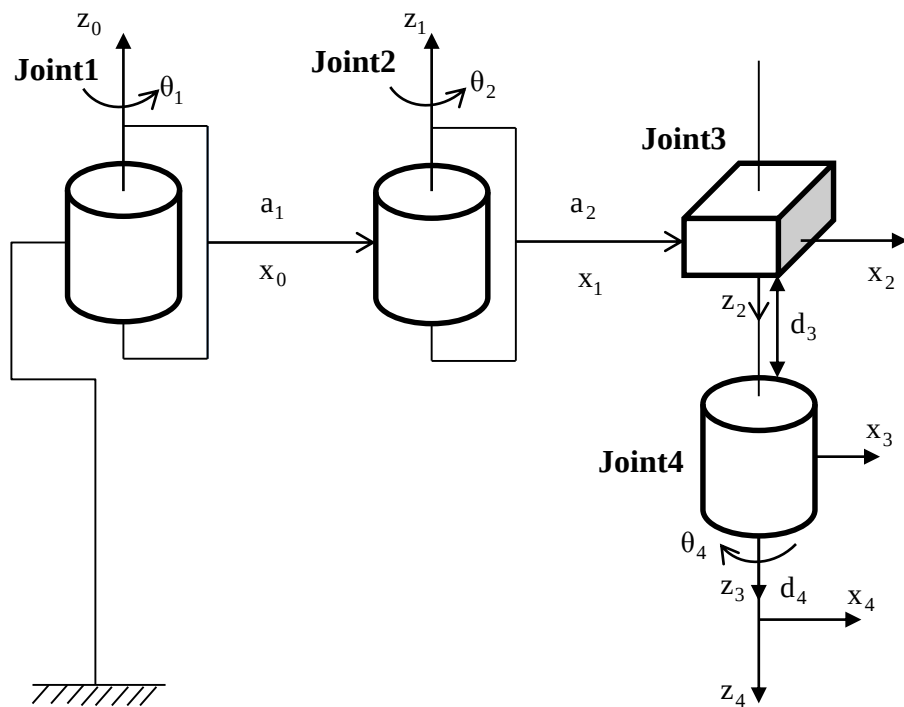
از آنجایی که در این پایان نامه دو نوع ربات، اسکارا و دو رابط لولایی، را مورد بررسی قرار خواهیم داد

لذا در ادامه به مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی این ربات ها می پردازیم. شکل (۲-۲) اختصاص

دستگاه مختصات به دیاگرام مفصلی ربات اسکارا و نام گذاری مفاصل را نشان می دهد. پس از ترسیم

دیاگرام مفصلی، طبق گام ۷، جدول پارامترهای رابط را به صورت نشان داده شده در جدول (۲-۱)

تشکیل می دهیم.



شکل (۲-۲) دیاگرام مفصلی ربات اسکارا با چهار درجه آزادی

جدول (۱-۲) پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا.

شماره رابط‌ها	$\theta(\text{rad})$	$d(\text{m})$	$a(\text{m})$	$\alpha(\text{rad})$
رابط شماره ۱	θ_1	0	$a_1 = 0.6$	0
رابط شماره ۲	θ_2	0	$a_2 = 0.4$	π
رابط شماره ۳	0	d_3	0	0
رابط شماره ۴	θ_4	$d_4 = 0.08$	0	0

ماتریس‌های تبدیل همگن به صورت زیر می‌باشد:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} & -S_{\theta_1} & 0 & a_1 C_{\theta_1} \\ S_{\theta_1} & C_{\theta_1} & 0 & a_1 S_{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۱-۲)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C_{\theta_2} & S_{\theta_2} & 0 & a_2 C_{\theta_2} \\ S_{\theta_2} & -C_{\theta_2} & 0 & a_2 S_{\theta_2} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۲-۲)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۳-۲)$$

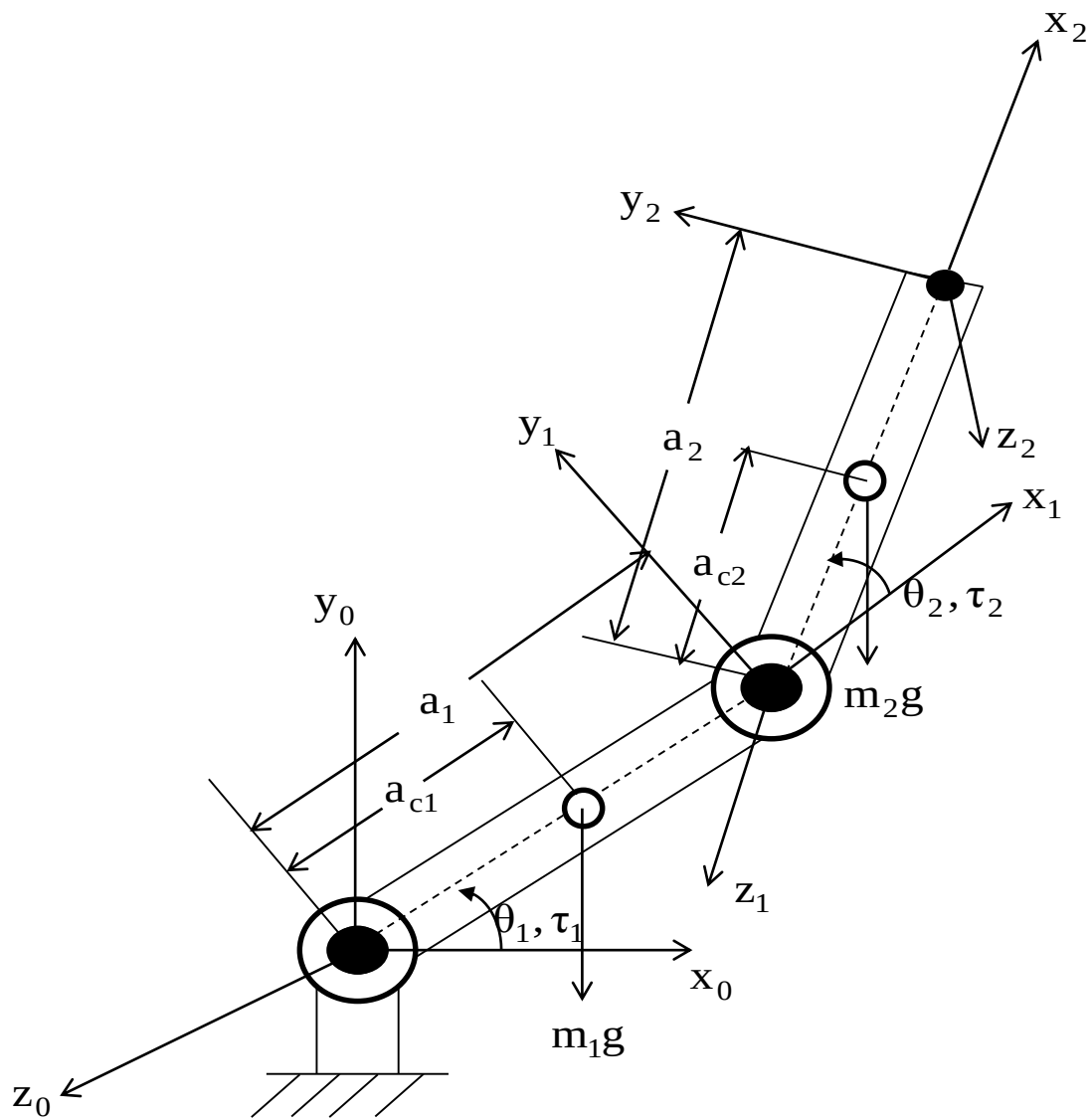
$$A_4 = \begin{bmatrix} C_{\theta_4} & -S_{\theta_4} & 0 & 0 \\ S_{\theta_4} & C_{\theta_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۴-۲)$$

موقعیت هر نقطه روی مجری نهایی در دستگاه مبنا با رابطه‌ی زیر تعیین می‌گردد:

$$T_0^4 = A_1 \cdots A_4 = \begin{bmatrix} C_{\theta_{12}} C_{\theta_4} + S_{\theta_{12}} S_{\theta_4} & -C_{\theta_{12}} S_{\theta_4} + S_{\theta_{12}} C_{\theta_4} & 0 & a_1 C_{\theta_1} + a_2 C_{\theta_{12}} \\ S_{\theta_{12}} C_{\theta_4} - C_{\theta_{12}} S_{\theta_4} & -S_{\theta_{12}} S_{\theta_4} - C_{\theta_{12}} C_{\theta_4} & 0 & a_1 S_{\theta_1} + a_2 S_{\theta_{12}} \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۵-۲)$$

همین روند را برای ربات دو رابط لولایی که در شکل (۳-۲) آمده نیز پیاده سازی می‌کنیم. جدول (۲-۲)

(۲) پارامترهای دناویت هارتنبرگ این ربات را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲) دیاگرام مفصلی ربات دو رابط لولایی

جدول (۲-۲) پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات دو رابط لولایی

شماره رابط‌ها	$\theta(\text{rad})$	$d(\text{m})$	$a(\text{m})$	$\alpha(\text{rad})$
رابط شماره ۱	θ_1	0	$a_1 = 1$	0
رابط شماره ۲	θ_2	0	$a_2 = 1$	0

ماتریس‌های تبدیل همگن ربات دو رابط نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & a_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۶-۲)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۷-۲)$$

بنابراین ماتریس انتقال به صورت زیر بدست می‌آید.

$$T = A_1 A_2 = \begin{bmatrix} C_{\theta_{12}} & -S_{\theta_{12}} & 0 & a_1 C_{\theta_1} + a_2 C_{\theta_{12}} \\ S_{\theta_{12}} & C_{\theta_{12}} & 0 & a_1 S_{\theta_1} + a_2 S_{\theta_{12}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۸-۲)$$

۲-۴ سینماتیک سرعت

از دیدگاه ریاضی، معادلات سینماتیک مستقیم یک تابع بین فضای جهت‌ها و موقعیت‌های دکارتی و فضای موقعیت‌های مفاصل تعریف می‌کند. روابط سرعت بوسیله ژاکوبین این تابع تعیین می‌شوند. ماتریس ژاکوبین یکی از مهم‌ترین کمیت‌های آنالیز و کنترل حرکت ربات محسوب می‌شود. ماتریس ژاکوبین در طراحی و اجرای مسیرهای هموار، تعیین ترکیب‌های تکین، تعیین معادلات دینامیکی حرکت، تبدیل نیروها و گشتاورها از مجری نهایی به مفاصل بازوی ماهر بکار می‌رود.

۲-۴-۱ ژاکوبین بازوی ماهر ربات

در بخش قبل معادلات سینماتیک مستقیم برای موقعیت‌های مفاصل و موقعیت و جهت مجری نهایی بدست آورده شد. در این بخش به سینماتیک سرعت بازوی ماهر، یعنی روابط سرعت، ارتباط سرعت‌های خطی و زاویه ای مجری نهایی با سرعت مفاصل پرداخته می‌شود. برای محاسبه سرعت

مجری نهایی در اثر حرکت‌های خطی و زاویه ای رابط‌ها، از مفهوم ژاکوبین استفاده می‌شود. ژاکوبین در واقع صورتی چند بعدی از مشتق است که برای تابع دلخواه Y که تابعی از متغیر x است به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Y = F(x) \quad (19-2)$$

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (20-2)$$

که در آن $F(x) = [f_1 \cdots f_n]$ ، با مشتق گیری از معادله (۱۹-۲)

$$\dot{Y} = J(x)\dot{x} \quad (21-2)$$

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

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (22-2)$$

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

فرض کنید ω_0^n بیانگر سرعت زاویه ای مجری نهایی باشد و همچنین V_0^n بیانگر بردار سرعت خطی مجری نهایی باشد، آنگاه:

$$\omega_0^n = J_\omega \dot{q} \quad (23-2)$$

$$V_0^n = J_v \dot{q} \quad (24-2)$$

که J_ω و J_v ماتریس‌های $3 \times n$ هستند طبق معادله (۲۲-۲):

$$\begin{bmatrix} V_0^n \\ \omega_0^n \end{bmatrix} = J_0^n \dot{q} \quad (25-2)$$

که ماتریس ژاکوبین J_0^n عبارت است از:

$$J_0^n = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \quad (26-2)$$

ماتریس J_0^n یک ماتریس $6 \times n$ است که در آن n تعداد رابط‌هاست.

۲-۴-۲ سرعت زاویه ای

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

$$\omega_{i-1}^i = \dot{q}_i k \quad (27-2)$$

که k بردار یکه در راستای محور z_{i-1} است. چنانچه مفصل i ام کشویی باشد در این صورت حرکت دستگاه مختصات i نسبت به دستگاه مختصات $i-1$ تنها یک انتقال است و در این صورت:

$$\omega_{i-1}^i = 0 \quad (28-2)$$

بنابراین مفصل i ام کشویی باشد، سرعت زاویه ای مجری نهایی به q_i که حالا d_i است بستگی ندارد. جهت جمع نمودن سرعت‌های زاویه ای باید همه آن‌ها در یک دستگاه مختصات بیان شود. بنابراین، سرعت زاویه ای در دستگاه پایه به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\omega_0^n = \omega_0^1 + R_0^1 \omega_1^2 + R_0^2 \omega_2^3 + \dots + R_0^{n-1} \omega_{n-1}^n \quad (29-2)$$

معادله بالا با توجه به معادلات (۲۷-۲) و (۲۸-۲) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\omega_0^n = \rho_1 \dot{q}_1 k + \rho_2 \dot{q}_2 R_0^1 k + \dots + \rho_n \dot{q}_n R_0^{n-1} k = \sum_{i=1}^n \rho_i \dot{q}_i z_{i-1} \quad (30-2)$$

که

$$z_{i-1} = R_0^{i-1} k \quad (31-2)$$

اگر مفصل $\dot{a}_m$ لولایی باشد $\rho_i = 1$ و اگر کشویی باشد برابر $\rho_i = 0$ است.

بنابراین، با توجه به معادله (23-2):

$$J_\omega = [\rho_1 z_0 \quad \rho_2 z_1 \quad \dots \quad \rho_n z_{n-1}] \quad (32-2)$$

$$z_0 = k = [0 \quad 0 \quad 1]^T \quad \text{که البته}$$

۲-۴-۳ سرعت خطی

سرعت خطی مجری نهایی عبارت است از :

$$V_0^n = \dot{d}_0^n \quad (33-2)$$

$$\dot{d}_0^n = \frac{\partial d_0^n}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_n} \dot{q}_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial d_0^n}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (34-2)$$

این رابطه همان سرعت خطی مجری نهایی است که در آن همه مفاصل به جز مفصل $\dot{a}_m$ ثابت نگه

داشته شده‌اند و مفصل $\dot{a}_m$ با سرعت واحد رانده می‌شود. این فرض در روابط بعدی نیز صدق می‌کند.

چنانچه مفصل $\dot{a}_m$ لولایی باشد داریم:

$$d_0^n = d_0^1 + R_0^1 d_1^2 + R_0^2 d_2^3 + \dots + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + \dots + R_0^{n-1} d_{n-1}^n \quad (35-2)$$

بنابراین:

$$\dot{d}_0^n = \dot{d}_0^{i-1} + R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^n \quad (36-2)$$

با مشتق گیری از رابطه (36-2) :

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^n \quad (37-2)$$

با توجه به رابطه سرعت زاویه ای، رابطه فوق به صورت رابطه ضرب خارجی زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1}(\dot{q}_i k \times d_{i-1}^n) \quad (38-2)$$

با جایگذاری معادله (۳۱-۲) و با استفاده از معادله (۳۶-۲) می توان نوشت:

$$\dot{d}_0^n = \dot{q}_i z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \quad (39-2)$$

بنابراین اگر مفصل اِام لولایی باشد با توجه به معادلات (۲۴-۲) و (۳۳-۲) خواهیم داشت:

$$J_{v_i} = z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \quad (40-2)$$

اگر مفصل اِام کشویی باشد:

$$d_{i-1}^i = d_i k + R_{i-1}^i a_i i \quad (41-2)$$

$$d_0^n = d_0^{i-1} + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + R_0^i d_i^n \quad (42-2)$$

با توجه به فرض ثابت نگه داشته شدن همه مفاصل به جز مفصل اِام و رانده شدن آن با سرعت واحد،

با مشتق گیری از رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^i \quad (43-2)$$

به کمک معادلات (۴۱-۲) و (۴۳-۲) می توان نوشت:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_i k \quad (44-2)$$

با توجه به معادله (۳۱-۲) :

$$\dot{d}_0^n = z_{i-1} \dot{d}_i \quad (45-2)$$

در مفاصل کشویی $q_i = d_i$ بنابراین، اگر مفصل اِام کشویی باشد با در نظر گرفتن معادله (۲۴-۲)

ستون اِام ماتریس J_v عبارت است از:

$$J_{v_i} = z_{i-1} \quad (46-2)$$

در نهایت ماتریس J_v به صورت زیر تعریف می شود:

$$J_v = [J_{v_1} \quad J_{v_2} \quad \cdots \quad J_{v_n}] \quad (47-2)$$

که J_{v_i} اگر مفصل i ام لولایی باشد با رابطه (۳۹-۲) و اگر کشویی باشد با رابطه (۴۶-۲) محاسبه می‌گردد.

بنابراین ماتریس ژاکوبین ربات به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$J = [J_1 \quad J_2 \quad \cdots \quad J_n] \quad (۴۸-۲)$$

که ستون i ام ماتریس ژاکوبین برای مفصل لولایی به صورت :

$$J = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (۴۹-۲)$$

و برای مفصل کشویی به صورت زیر است:

$$J = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۵۰-۲)$$

با استفاده از دو رابطه آخر به سادگی می‌توان ژاکوبین بازوی ماهر را بدست آورد.

۲-۵ معادلات دینامیکی ربات

معادلات دینامیکی ربات با چند درجه آزادی، با محاسبه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی رابطها و مفاصل بدست می‌آید. برای انجام این کار پس از محاسبه مقادیر انرژی‌ها، تابع لاگرانژین سیستم که عبارت است از اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل، تشکیل می‌شود. سپس از آن تابع، نسبت به متغیرهای مفاصل مشتق گرفته می‌شود. در اینجا برای توضیح دقیق روند کار ابتدا به روابط مربوط به محاسبه انرژی‌ها پرداخته و سپس روابط نهایی استخراج می‌گردد.

۲-۵-۱ انرژی پتانسیل

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

$$V = \sum_{i=1}^n m_i g^T d_0^{c_i} \quad (۵۱-۲)$$

که در آن m_i جرم رابط $\dot{\mathbf{a}}_i$ ، $\mathbf{g}^T$ بردار شتاب جاذبه در دستگاه صفر و $d_0^{c_i}$ نشان دهنده‌ی موقعیت مرکز جرم رابط $\dot{\mathbf{a}}_i$ در دستگاه صفر است.

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

$$d_0^{c_i} = d_0^i + R_0^i d_i^{c_i} \quad (52-2)$$

۲-۵-۲ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی یک ربات عبارت است از مجموع انرژی جنبشی رابط‌های ربات یا به عبارت دیگر برای رابط $\dot{\mathbf{a}}_i$ انرژی جنبشی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i \mathbf{V}_{c_i}^T \mathbf{V}_{c_i} + \frac{1}{2} \omega_0^{iT} \mathbf{I}_0^i \omega_0^i \quad (53-2)$$

که m_i جرم رابط $\dot{\mathbf{a}}_i$ و $\mathbf{V}_{c_i}$ بردار سرعت خطی مرکز جرم رابط $\dot{\mathbf{a}}_i$ و ω_0^i بردار سرعت زاویه‌ای رابط $\dot{\mathbf{a}}_i$ نسبت به دستگاه مختصات پایه و $\mathbf{I}_0^i$ ماتریس ممان اینرسی رابط $\dot{\mathbf{a}}_i$ نسبت به دستگاه مختصات پایه می‌باشد.

برای آنکه بتوان ماتریس ممان اینرسی را مستقل از حرکت جسم محاسبه کرد لازم است ماتریس ممان اینرسی در دستگاه متصل به همان رابط محاسبه شود که در این صورت دستگاه متصل به مرکز جرم ربات انتخاب شده است.

$$\mathbf{I}_0^i = \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \quad (54-2)$$

بنابراین رابطه (۵۳-۲) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i \mathbf{V}_{c_i}^T \mathbf{V}_{c_i} + \frac{1}{2} \omega_0^{iT} \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \omega_0^i \quad (55-2)$$

که $\mathbf{R}_0^i$ ماتریس دورانی است که بردارها را از دستگاه مختصات جسم به دستگاه مختصات پایه تبدیل می‌کند.

I_i ماتریس ممان اینرسی رابط $\dot{a}_m$ در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم ربات و موازی با دستگاه مختصات متصل به همان رابط می‌باشد. که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_i = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & - \int xy dm & - \int xz dm \\ - \int xy dm & \int (x^2 + z^2) dm & - \int yz dm \\ - \int xz dm & - \int yz dm & \int (x^2 + y^2) dm \end{bmatrix} \quad (56-2)$$

که x, y, z مختصات نقطه ای در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم رابط $\dot{a}_m$ می‌باشد. معادله بالا را می‌توان به فرم کلی زیر نیز نوشت:

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & -I_{xy_i} & -I_{xz_i} \\ -I_{xy_i} & I_{yy_i} & -I_{yz_i} \\ -I_{xz_i} & -I_{yz_i} & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (57-2)$$

با توجه به معادله (55-2) رابطه انرژی جنبشی ربات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \omega_0^{iT} R_0^i I_i R_0^{iT} \omega_0^i \quad (58-2)$$

طبق روابط (23-2) و (24-2) می‌توان نوشت:

$$V_{c_i} = J_{v_{ci}} \dot{q} \quad (59-2)$$

$$\omega_0^i = J_{\omega_i} \dot{q} \quad (60-2)$$

برای محاسبه $J_{v_{ci}}$ باید از $d_0^{c_i}$ بجای d_0^n در معادله (40-2) استفاده نمود. بنابراین طبق توضیحات

قبلی مجدد به رابطه (52-2) برای محاسبه $d_0^{c_i}$ نیاز است.

با جایگذاری روابط (59-2) و (60-2) در روابط اصلی (58-2):

$$k = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_{ci}}^T J_{v_{ci}} + J_{\omega_i}^T R_0^i I_i R_0^{iT} J_{\omega_i}] \dot{q} \quad (61-2)$$

بنابراین رابطه (61-2) را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$k = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (62-2)$$

که در آن ماتریس $D(q)$ عبارت است از:

$$D(q) = \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_{ci}}^T J_{v_{ci}} + J_{\omega_i}^T R_0^i I_i R_0^{iT} J_{\omega_i}] \quad (۶۳-۲)$$

انرژی پتانسیل ربات به کمک رابطه (۵۱-۲) و انرژی جنبشی ربات به کمک رابطه (۶۲-۲) محاسبه می‌شود. اکنون به تشکیل تابع لاگرانژین ربات پرداخته می‌شود.

$$L = K - V \quad (۶۴-۲)$$

معادله کلی دینامیکی سیستم عبارت است از:

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial V}{\partial \dot{q}} \quad (۶۵-۲)$$

که در این رابطه τ بردار گشتاور برای مفاصل لولایی و نیرو برای مفاصل کشویی است. با استفاده از معادلات (۶۲-۲) تا (۶۴-۲) در معادله (۶۵-۲) و ساده سازی روابط، معادله نهایی زیر به دست می‌آید:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} (\dot{q}^T D(q) \dot{q}) + \frac{\partial V}{\partial q} \quad (۶۶-۲)$$

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

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (۶۷-۲)$$

که در آن $D(q)$ ماتریس $n \times n$ اینرسی ربات، $C(q, \dot{q})\dot{q}$ بردار گشتاور کریولیس و مرکزگرا و $G(q)$ بردار گشتاور گرانشی است.

$$C(q, \dot{q})\dot{q} = \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} (\dot{q}^T D(q) \dot{q}) \quad (۶۸-۲)$$

$$G(q) = \frac{\partial V}{\partial q} \quad (۶۹-۲)$$

معادلات ارائه شده در شبیه سازی حرکت ربات به ازای گشتاور ورودی معین بکار گرفته می‌شود. این معادلات مدل ربات را می‌سازند و با توجه به آن‌ها می‌توان رفتار دینامیکی ربات را بررسی کرد.

۳-۵-۲ مدل سازی دینامیکی ربات دو رابط لولایی

شکل (۳-۲) مدل فیزیکی ربات دو بازویی را نشان می‌دهد، هر بازو مجهز به یک موتور برای تولید گشتاور ورودی، یک کدگذار^۱ برای اندازه گیری موقعیت مفصل و یک تاکومتر برای اندازه گیری سرعت مفصل است. معادلات دینامیکی ربات عبارت‌اند از [۶۲]:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -h\dot{q}_2 & -h\dot{q}_1 - h\dot{q}_2 \\ h\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (۷۰-۲)$$

در این رابطه $q = [\theta_1 \ \theta_2]^T = [q_1 \ q_2]^T$ زوایای دو مفصل، $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ ورودی‌های مفصل است و

$$D_{11} = m_1 a_{c_1}^2 + I_1 + m_2 [a_1^2 + a_{c_2}^2 + 2a_1 a_{c_2} \cos q_2] + I_2$$

$$D_{22} = m_2 a_{c_2}^2 + I_2$$

$$D_{12} = D_{21} = m_2 a_1 a_{c_2} \cos q_2 + m_2 a_{c_2}^2 + I_2$$

$$h = m_2 a_1 a_{c_2} \sin q_2 \quad (۷۱-۲)$$

$$g_1 = m_1 a_{c_1} g \cos q_1 + m_2 g [a_{c_2} \cos(q_1 + q_2) + a_1 \cos q_1]$$

$$g_2 = m_2 a_{c_2} g \cos(q_1 + q_2)$$

در رابطه بالا m_1 و m_2 ، a_{c1} و a_{c2} ، I_1 و I_2 به ترتیب جرم، مرکز جرم و ممان لختی رابط اول و دوم است.

۴-۵-۲ مدل سازی دینامیکی ربات اسکارا

در این بخش به مدل سازی دینامیکی ربات صنعتی اسکارا سه رابط می‌پردازیم. ربات اسکارا به صورت متداول دارای چهار رابط می‌باشد اما به منظور سهولت کار، رابط چهار را به رابط سه قفل می‌کنیم. باتوجه به روابطی که در بخش قبل توضیح داده شد، ماتریس‌های D ، C و G محاسبه می‌شوند و مدل دینامیکی ربات اسکارا مورد نظر، به صورت زیر خواهد بود [۷۶]:

^۱ Encoder

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (۷۲-۲)$$

که در آن:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (۷۳-۲)$$

آنگاه:

$$D_{11} = I_{zz1} + I_{zz2} + I_{zz3} + I_{zz4} + m_1(a_1 + x_{c1})^2 + m_2[(a_1 + x_{c1})^2 + a_1^2] + (m_3 + m_4)(a_1^2 + a_2^2)$$

$$+ \cos(\theta_2)[2a_1m_2(a_2 + x_{c2}) + 2a_1a_2(m_3 + m_4)]$$

$$D_{22} = I_{zz2} + I_{zz3} + I_{zz4} + m_2(a_2 + x_{c2})^2 + a_2^2(m_3 + m_4)$$

$$D_{33} = (m_3 + m_4)$$

$$D_{12} = D_{21} = I_{zz2} + I_{zz3} + I_{zz4} + m_2(a_2 + x_{c2})^2 + a_2^2(m_3 + m_4) + \cos(\theta_2)[a_1m_2(a_2 + x_{c2})]$$

$$+ a_1a_2(m_3 + m_4)$$

$$D_{13} = D_{31} = D_{32} = D_{23} = 0$$

$$C_{11} = -[a_1m_2(a_2 + x_{c2}) + a_1a_2(m_3 + m_4)]\sin(\theta_2)\dot{\theta}_2$$

$$C_{12} = -[a_1m_2(a_2 + x_{c2}) + a_1a_2(m_3 + m_4)]\sin(\theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$C_{21} = [a_1m_2(a_2 + x_{c2}) + a_1a_2(m_3 + m_4)]\sin(\theta_2)\dot{\theta}_1$$

$$C_{13} = C_{22} = C_{23} = C_{31} = C_{32} = C_{33} = 0$$

$$G_1 = G_2 = 0, G_3 = -9.81(m_3 + m_4)$$

فصل ۳

کنترل تطبیقی بازوی ربات

۳-۱ مقدمه

بسیاری از سیستم‌های دینامیکی پارامترهای نامعلوم دارند که یا ثابت‌اند و یا به آهستگی تغییر می‌کنند. برای مثال، جابه‌جاکننده‌های ربات ممکن است اجسام بزرگی را با پارامترهای اینرسی نامعلوم حمل کنند. اگر میزان نامعلومی این پارامترها با یک مکانیسم تطبیق و یا تخمین به صورت بهنگام تقلیل داده نشوند، ممکن است باعث عدم دقت و یا ناپایداری در سیستم کنترل شوند [۵۹]. روش پیشنهاد شده در این فصل از مرجع [۵۱] برداشت شده است. کنترل تطبیقی پیشنهادی از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول یک پس‌خوراند^۱ مشتقی تناسبی^۲ است و قسمت دوم جبران‌کننده پیش‌خوراند^۳ با دینامیک کاملی است که پارامترهای مجهول در آن بصورت برخلاف تخمین زده می‌شوند. در این طراحی نیازی به پس‌خوراند شتاب یا معکوس ماتریس اینرسی تخمین زده شده نیست [۵۱].

^۱. Feedback

^۲. PD

^۳. Feedforward

۳-۲ مدل دینامیکی بازوی ماهر ربات

با نادیده گرفتن اصطکاک و دیگر اغتشاش‌ها، مدل دینامیکی یک ربات n رابط به صورت زیر قابل بیان است.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (۱-۳)$$

در رابطه‌ی بالا $q \in \mathbb{R}^n$ بردار موقعیت مفاصل، $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس اینرسی ربات، $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای مرکزگرا و کوریولیس، $G(q) \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای گرانشی و $\tau \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاور ورودی است.

در اینجا به دو ویژگی ساده کننده‌ی این ساختار دینامیکی اشاره می‌شود. اولی، همانطور که توسط چندین محقق مورد توجه قرار گرفته [۶۰] و [۶۱]، بیان می‌کند که ماتریس $[D - 2C]$ پادمتقارن است [۵۱] بنابراین رابطه زیر را داریم:

$$\dot{q}^T (\dot{D} - 2C)\dot{q} = 0 \quad (۲-۳)$$

دیگر مشخصه‌ی مهم، خاصیت خطی شدن ساختار دینامیکی ربات نسبت به پارامترهای آن است. برای روشن شدن این مطلب معادلات (۷۰-۲) و (۷۱-۲) را در نظر بگیرید. مشخص است که بردار گشتاور، بر حسب موقعیت و سرعت مفاصل غیر خطی است. همچنین این گشتاور بر حسب پارامترهای فیزیکی $m_1, m_2, a_{c1}, a_{c2}, I_1, I_2$ نیز غیر خطی است. اما با پارامتری کردن مناسب می‌توان بردار گشتاور را بر حسب پارامترهای معادل به صورت خطی نوشت. در ابتدا پارامترهای معادل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} p_1 &= m_1 a_{c1}^2 + I_1 + m_2 a_1^2 + m_2 a_{c2}^2 + I_2 \\ p_2 &= m_2 a_{c2}^2 + I_2 \\ p_3 &= m_2 a_1 a_{c2} \\ p_4 &= m_2 a_{c2} \end{aligned} \quad (۳-۳)$$

$$p_5 = m_1 a_{c1} + m_2 a_1$$

بنابراین رابطه (۳-۱) را به صورت خطی بر اساس پارامترها به صورت زیر می توان نوشت:

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})p \quad (۳-۴)$$

که در آن p بردار پارامترهای فیزیکی با بعد 5×1 به صورت

$$p = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4 \quad p_5]^T \quad (۳-۵)$$

می باشد و Y ماتریس رگرسور با بعد 2×5 ، تابعی غیر خطی بر حسب $q, \dot{q}$ و $\ddot{q}$ می باشد. عضوهای ماتریس رگرسور به صورت زیر می باشد:

$$Y_{11} = \ddot{q}_1 \quad Y_{21} = 0$$

$$Y_{12} = \ddot{q}_2 \quad Y_{22} = \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2$$

$$Y_{13} = \cos q_2 (2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) - \sin q_2 (\dot{q}_2 \dot{q}_1 + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \dot{q}_2) \quad Y_{23} = \cos q_2 \ddot{q}_1 + \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_1 \quad (۳-۶)$$

$$Y_{14} = g \cos(q_1 + q_2) \quad Y_{24} = g \cos(q_1 + q_2)$$

$$Y_{15} = g \cos q_1 \quad Y_{25} = 0$$

۳-۳ طراحی کنترل کننده تطبیقی

مسئله طراحی کنترل کننده به این صورت بیان می شود که، با داشتن مسیر مطلوب $q_d(t)$ (فرض می کنیم که موقعیت، سرعت و شتاب مطلوب همگی کراندارند)، و با فرض اینکه بعضی یا همه پارامترهای ربات نامعلوم اند، مسئله طراحی کنترل تطبیقی، بدست آوردن قانون کنترل برای گشتاورهای محرک، و قانون تخمین در پارامترهای نامعلوم است، طوری که خروجی ربات $q(t)$ با دقت زیاد مسیر مطلوب را دنبال کند. برای استخراج قانون کنترل و قانون تطبیق، تابع لیاپانوف پیشنهادی زیر را در نظر می گیریم:

$$V(t) = \frac{1}{2}(\tilde{\mathbf{q}}^T D(q) \tilde{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{p}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\mathbf{p}} + \tilde{\mathbf{q}}^T K_p \tilde{\mathbf{q}}) \quad (۷-۳)$$

که در آن p یک بردار ثابت از پارامترهای نامعلوم که خواص جرم بازوی ربات را توصیف می‌کند و $\hat{p}$ تخمین آن است؛ Γ و K_p ماتریس‌های مثبت معین متقارن هستند و معمولاً به صورت قطری انتخاب می‌شوند؛ $\tilde{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{q}(t) - \mathbf{q}_d(t)$ خطای ردیابی است؛ و $\tilde{\mathbf{p}} = \hat{\mathbf{p}}(t) - \mathbf{p}$ را به عنوان خطای ردیابی پارامتر تعریف می‌کنیم. با مشتق‌گیری از $V(t)$ نسبت به زمان خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \tilde{\mathbf{q}}^T D \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}^T \dot{D} \tilde{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{p}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{p}}} + \tilde{\mathbf{q}}^T K_p \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \\ &= \tilde{\mathbf{q}}^T (\tau - C(q, \dot{q}) \dot{q} - G(q) - D \ddot{q}_d) + \tilde{\mathbf{q}}^T \left[\frac{1}{2} (\dot{D} - 2C) + C \right] \tilde{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{p}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{p}}} + \tilde{\mathbf{q}}^T K_p \tilde{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (۸-۳)$$

$$\begin{aligned} &= \tilde{\mathbf{q}}^T [\tau - D(q) \ddot{q}_d - C(q, \dot{q}) \dot{q}_d - G(q) + K_p \tilde{\mathbf{q}}] + \tilde{\mathbf{p}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{p}}} \\ &\quad \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}^T (\dot{D} - 2C) \tilde{\mathbf{q}} \end{aligned}$$

که در آن از خاصیت پاد متقارن بودن ماتریس $[\dot{D} - 2C]$ برای حذف جمله‌ی

استفاده شده است. با انتخاب قانون کنترل به صورت زیر

$$\tau = \hat{D}(q) \ddot{q}_d + \hat{C}(q, \dot{q}) \dot{q}_d + \hat{G}(q) - K_p \tilde{\mathbf{q}} - K_D \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (۹-۳)$$

و جایگذاری آن در رابطه (۸-۳)، خواهیم داشت:

$$\dot{V}(t) = \tilde{\mathbf{q}}^T [\tilde{D}(q) \ddot{q}_d + \tilde{C}(q, \dot{q}) \dot{q}_d + \tilde{G}(q) - K_D \dot{\tilde{\mathbf{q}}}] + \tilde{\mathbf{p}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{p}}} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن $\tilde{D}(q)$ ، $\tilde{C}(q, \dot{q})$ و $\tilde{G}(q)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$\tilde{D}(q) = \hat{D}(q) - D(q) \quad \tilde{C}(q, \dot{q}) = \hat{C}(q, \dot{q}) - C(q, \dot{q}) \quad \tilde{G}(q) = \hat{G}(q) - G(q) \quad (۱۱-۳)$$

و چون معادله دینامیکی ربات بر حسب پارامترها خطی است می‌توان رابطه زیر را نوشت

$$\tilde{D}(q) \ddot{q}_d + \tilde{C}(q, \dot{q}) \dot{q}_d + \tilde{G}(q) = Y \tilde{\mathbf{p}} \quad (۱۲-۳)$$

در رابطه بالا $Y = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)$ یک ماتریس $n \times m$ است، بنابراین خواهیم داشت

$$\dot{V}(t) = -\tilde{\mathbf{q}}^T K_D \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \tilde{\mathbf{p}}^T [\Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{p}}} + Y^T \tilde{\mathbf{q}}] \quad (۱۳-۳)$$

این رابطه ما را به انتخاب قانون تطبیق زیر هدایت می‌کند:

$$\dot{\hat{p}} = -\Gamma Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \tilde{q} \quad (14-3)$$

توجه شود که به علت ثابت در نظر گرفتن پارامترهای p رابطه‌ی $\dot{\hat{p}} = \tilde{\dot{p}}$ برقرار است.

در نتیجه $\dot{V}(t)$ به صورت زیر در می‌آید.

$$\dot{V}(t) = -\tilde{q}^T K_D \tilde{q} \leq 0 \quad (15-3)$$

پس قانون کنترل (۹-۳) و قانون تطبیق (۱۴-۳) کنترل کننده تطبیقی پایدار عمومی را نتیجه می‌دهد. عبارت (۱۵-۳) صفر بودن خطای سرعت در حالت ماندگار را نتیجه می‌دهد ولی لزوماً صفر بودن خطای موقعیت در حالت ماندگار را تضمین نمی‌کند. برای صفر شدن خطای موقعیت در حالت ماندگار، روش تطبیقی معرفی شده باید اصلاح شود. اگر خطای ماندگار موقعیت را مقید کنیم که در سطح لغزش زیر باقی بماند آنگاه این خطا صفر خواهد شد [۵۱].

$$\tilde{q} + \Lambda \tilde{q} = 0 \quad (16-3)$$

در این رابطه Λ ماتریس مثبت معین متقارن است. برای این منظور $q_r(t)$ را به صورت زیر تعریف کرده و به جای $q_d(t)$ در روابط بالا قرار می‌دهیم.

$$q_r = q_d - \Lambda \int_0^t \tilde{q} dt \quad (17-3)$$

به همین ترتیب $\dot{q}_d(t)$ و $\ddot{q}_d(t)$ نیز با روابط زیر جایگذاری می‌شود

$$\begin{aligned} \dot{q}_r &= \dot{q}_d - \Lambda \tilde{q} \\ \ddot{q}_r &= \ddot{q}_d - \Lambda \dot{\tilde{q}} \end{aligned} \quad (18-3)$$

با تعریف s به صورت

$$s = \dot{q} - \dot{q}_r = \tilde{q} + \Lambda \tilde{q} \quad (19-3)$$

قانون کنترل و قانون تطبیق به صورت زیر در می‌آید [۵۱].

$$\tau = \hat{D}(q)\ddot{q}_r + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q}_r + \hat{G}(q) - K_D s \quad (20-3)$$

$$\dot{\hat{p}} = -\Gamma^{-1} Y^T(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) s \quad (21-3)$$

توجه شود که ماتریس رگرسیون Y اکنون تابعی از $\dot{q}_r$ و $\ddot{q}_r$ می باشد نه $\dot{q}_d$ و $\ddot{q}_d$. با جایگذاری قانون کنترل (۳-۲۰) در معادله دینامیکی ربات (۳-۱)، دینامیک حلقه بسته به صورت زیر در می آید.

$$D\dot{s} + (K_D + C)s = Y\tilde{p} \quad (۳-۲۲)$$

۳-۴ اثبات پایداری

برای اثبات همگرایی سراسری ردیابی مسیر از تابع لیاپانوف زیر استفاده می شود.

$$V(t) = \frac{1}{2} (s^T D(q)s + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \tilde{p}) \quad (۳-۲۳)$$

با مشتق گیری نسبت به زمان و با استفاده از (۳-۲۰) و (۳-۲۱) رابطه زیر حاصل می شود.

$$\dot{V}(t) = -s^T K_D s \leq 0 \quad (۳-۲۴)$$

رابطه ی فوق ایجاب می کند که خطای خروجی به سطح $s = 0$ همگرا شود، در نتیجه تا زمانی که t به بی نهایت میل می کند، $\tilde{q}$ و $\dot{\tilde{q}}$ به 0 میل می کنند. بنابراین، پایداری کلی سیستم (یعنی کرانداری بردارهای q ، $\dot{q}$ و $\tilde{p}$) و همگرایی خطای ردیابی، هردو به وسیله ی کنترل کننده ی تطبیقی فوق تضمین می شوند.

اثبات:

برای نشان دادن $s \rightarrow 0$ وقتی $t \rightarrow \infty$ ، با توجه به رابطه (۳-۲۴) برای $\dot{V}$ ، کافی است نشان دهیم که $\dot{V} \rightarrow 0$ چنانچه $t \rightarrow \infty$ ، چون

$$\dot{V} \rightarrow 0 \Rightarrow s \rightarrow 0 \quad (۳-۲۵)$$

به علاوه، چونکه V مثبت است، لم باربالات نشان می دهد اگر $\dot{V}$ پیوسته یکنواخت باشد به سمت صفر میل خواهد کرد، و به طور خاص اگر $\ddot{V}$ کراندار باشد، آنگاه

$$\ddot{V} \text{ کراندار} \Rightarrow \dot{V} \rightarrow 0 \Rightarrow s \rightarrow 0 \quad (۳-۲۶)$$

با توجه به (۳-۲۴) داریم $\ddot{V} = -2s^T K_D \dot{s}$ ، بنابراین

$$(s \text{ کراندار } \dot{s}) \Rightarrow \ddot{V} \text{ کراندار} \Rightarrow \dot{V} \rightarrow 0 \Rightarrow s \rightarrow 0 \quad (27-3)$$

پس تنها نیاز است نشان دهیم که $\dot{s}$ و s کراندار باقی می‌مانند.

حال چونکه $V \geq 0$ و $\dot{V} \leq 0$ ، V کراندار باقی می‌ماند. با توجه به رابطه (23-3) برای V ، $\tilde{p}$ و s کراندارند. به علاوه، این خود ایجاب می‌کند که $\tilde{q}$ و $\tilde{p}$ همگی کراندار باشند. همچنین با توجه به دینامیک‌های حلقه بسته (22-3) در می‌یابیم که $\dot{s}$ نیز کراندار است.

بنابراین $s \rightarrow 0$ وقتی $t \rightarrow \infty$ ، و این ایجاب می‌کند تا زمانیکه t به بی‌نهایت میل می‌کند، $\tilde{q}$ و $\tilde{q}$ به 0 میل می‌کنند. $\square$

۳-۵ شبیه سازی

طرح پیشنهادی توسط قانون کنترل (20-3) و قانون تطبیق (21-3) توصیف شده است و روی ربات دو رابط (70-2) شبیه سازی می‌گردد. مقادیر واقعی پارامترهای ربات که در این شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است در جدول (1-3) و پارامترهای کنترل کننده در جدول (2-3) آمده است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری، پارامترهای فیزیکی ربات 90٪ مقادیر واقعی انتخاب می‌شود، بردار پارامترهای فیزیکی با توجه به رابطه‌های (3-3) و (5-3) تعیین می‌شوند. ماتریس رگرسیون که در رابطه (6-3) آمده با توجه به (18-3)، در جدول (3-3) بازنویسی شده است.

جدول (۱-۳). پارامترهای ربات دو-رابط لولایی

$m_1 = 1 \text{ kg}$	$m_2 = 2 \text{ kg}$
$a_1 = 1 \text{ m}$	$a_2 = 1 \text{ m}$
$a_{c1} = 0.5 \text{ m}$	$a_{c2} = 0.5 \text{ m}$
$I_1 = 0.12 \text{ kg.m}^2$	$I_2 = 0.25 \text{ kg.m}^2$

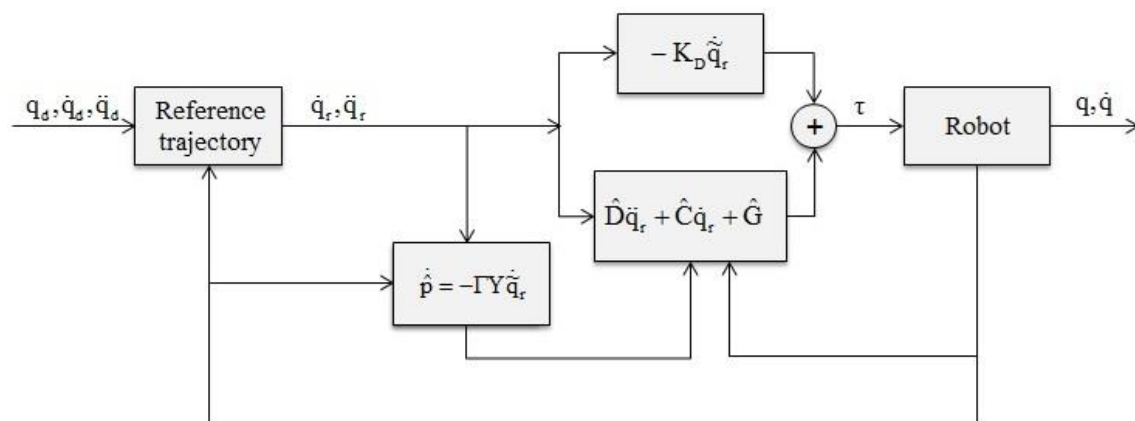
جدول (۲-۳). پارامترهای کنترل کننده

$\Lambda = 2.5I_2$	$K_D = 90I_2$
$\Gamma = 5I_5$	$\hat{p}(0) = [2.67 \quad 0.58 \quad 0.81 \quad 0.81 \quad 2.2]$

جدول (۳-۳). ماتریس رگرسیون

$Y_{11} = \ddot{q}_{r1}$	$Y_{21} = 0$
$Y_{12} = \ddot{q}_{r2}$	$Y_{22} = \ddot{q}_{r1} + \ddot{q}_{r2}$
$Y_{13} = \cos q_2 (2\ddot{q}_{r1} + \ddot{q}_{r2}) - \sin q_2 (\dot{q}_2 \dot{q}_{r1} + (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \dot{q}_{r2})$	$Y_{23} = \cos q_2 \ddot{q}_{r1} + \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_{r1}$
$Y_{14} = g \cos(q_1 + q_2)$	$Y_{24} = g \cos(q_1 + q_2)$
$Y_{15} = g \cos q_1$	$Y_{25} = 0$

دیگرام بلوکی کنترل کننده تطبیقی مورد نظر در شکل (۱-۳) آمده است.



شکل (۳-۱). دیاگرام بلوکی کنترل کننده تطبیقی

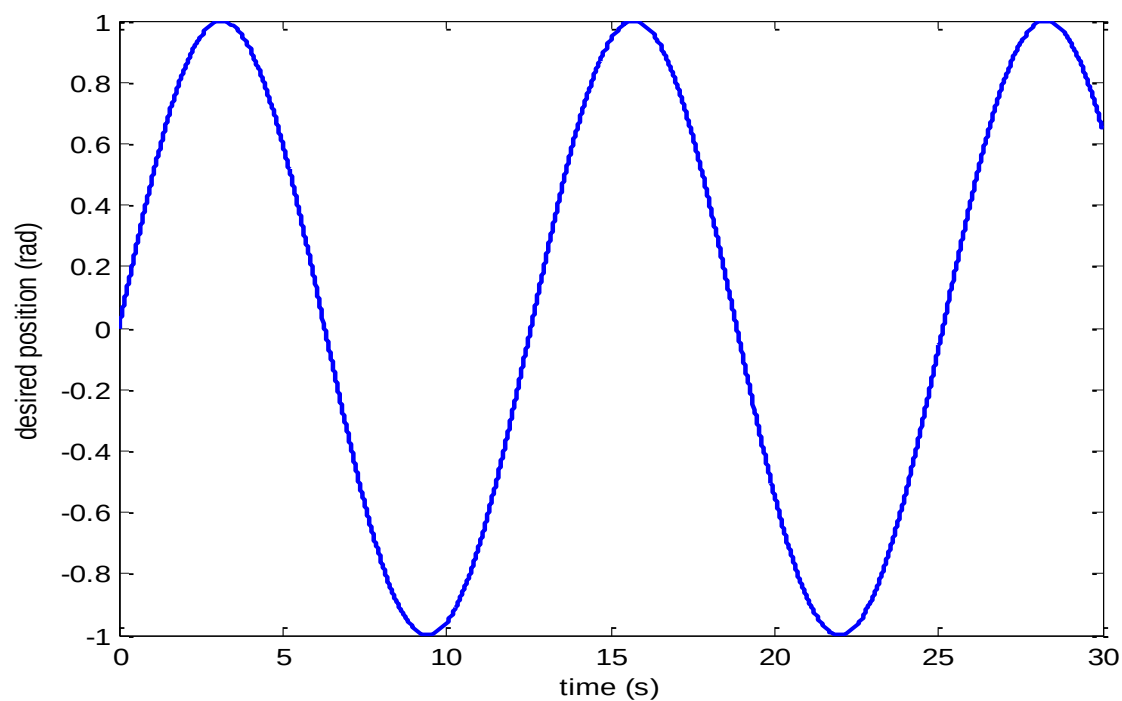
۳-۵-۱ عملکرد ردیابی مسیر ربات دو رابط لولایی

مسیر مطلوب رد گیری برای هر دو مفصل با تابع زیر تعریف شده و در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

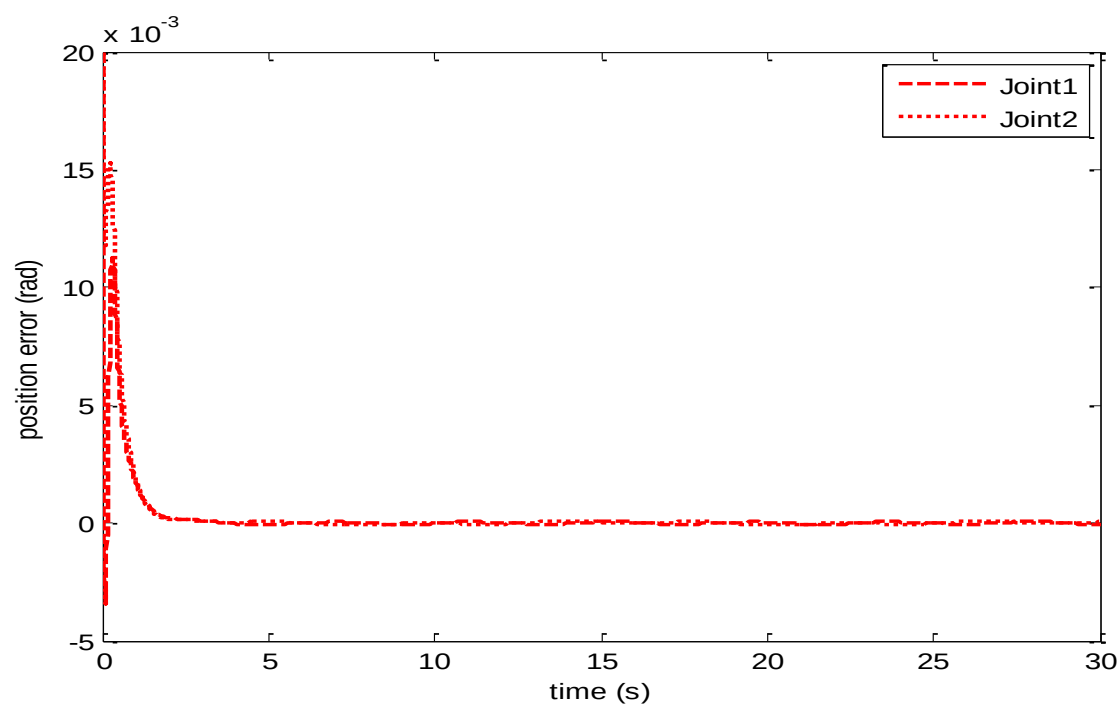
$$q_d = \sin(0.5t) \text{ for } 0 \leq t < 30 \quad (۳-۲۸)$$

خطای اولیه برای هر دو مفصل ۰/۰۲ رادیان در نظر گرفته شده است.

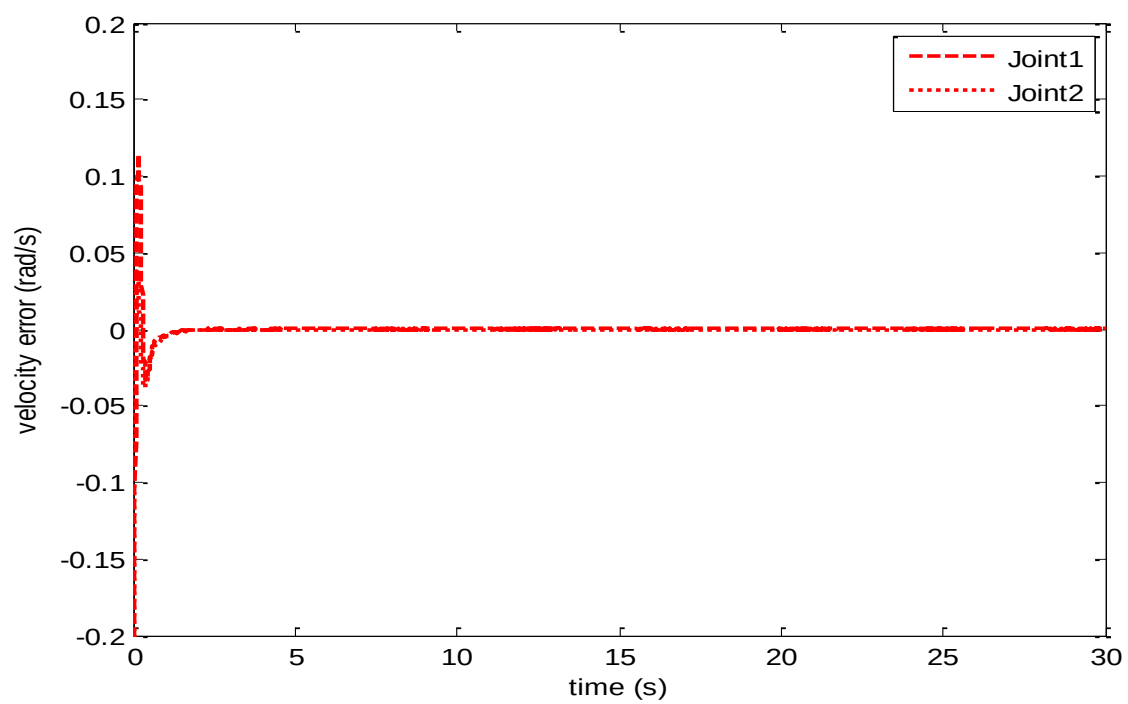
پس از اعمال کنترل کننده پیشنهادی، با توجه به شکل (۳-۳) می بینیم که با وجود عدم قطعیت پارامتری سیستم کنترل به خوبی عمل می کند و خطای ردگیری موقعیت q_{d1} و q_{d2} در کمتر از ۳ ثانیه به 10^{-4} رادیان می رسد. همچنین با مشاهده شکل (۳-۴) می توان دریافت که در این سیستم همگرایی خطای ردیابی سرعت مناسبی نیز داشته و در کمتر از ۳ ثانیه به کمتر از 10^{-4} می رسد. مطابق شکل (۳-۵) ورودی های کنترل مفاصل ۱ و ۲ پیوسته هستند و حداکثر گشتاور ورودی مفاصل برابر با ۸۵ نیوتون متر است. با توجه به مقادیر پارامترهای بازوی ربات این ورودی های کنترل در محدوده مجازی قرار دارند. همگرایی پارامترهای کنترل کننده نیز در شکل (۳-۶) آمده است، این پارامترها نیز تقریباً به مقادیر ثابت همگرا می شوند.



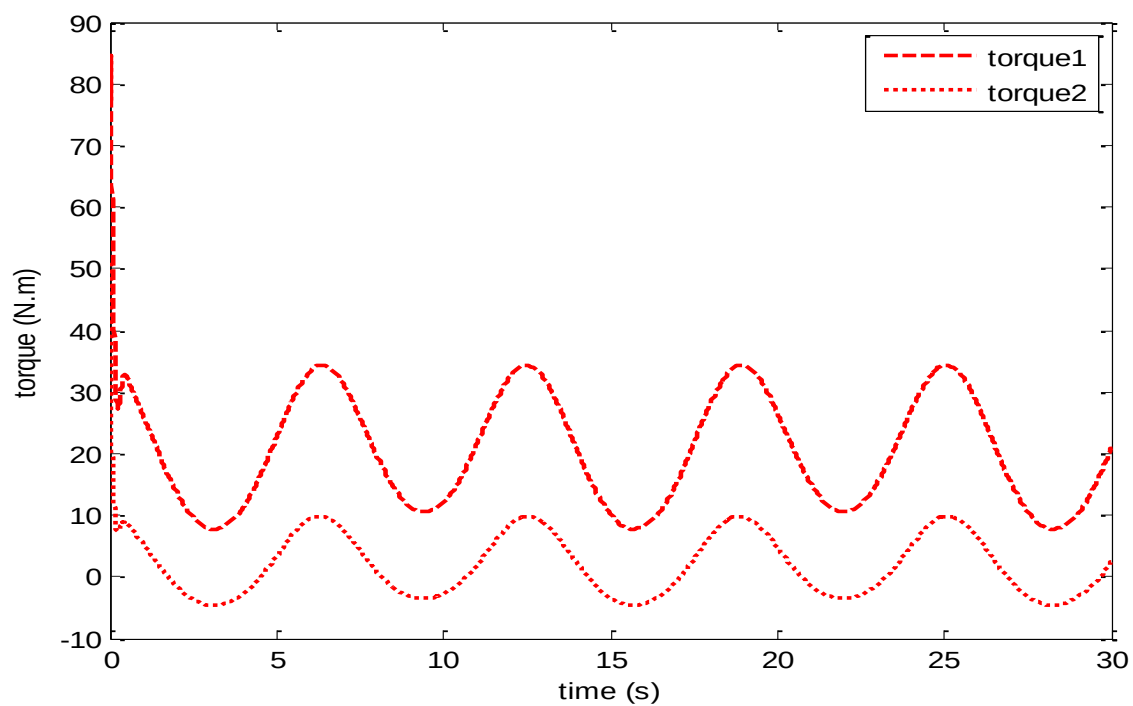
شکل (۲-۳) مسیر مطلوب ردگیری در فضای مفصلی



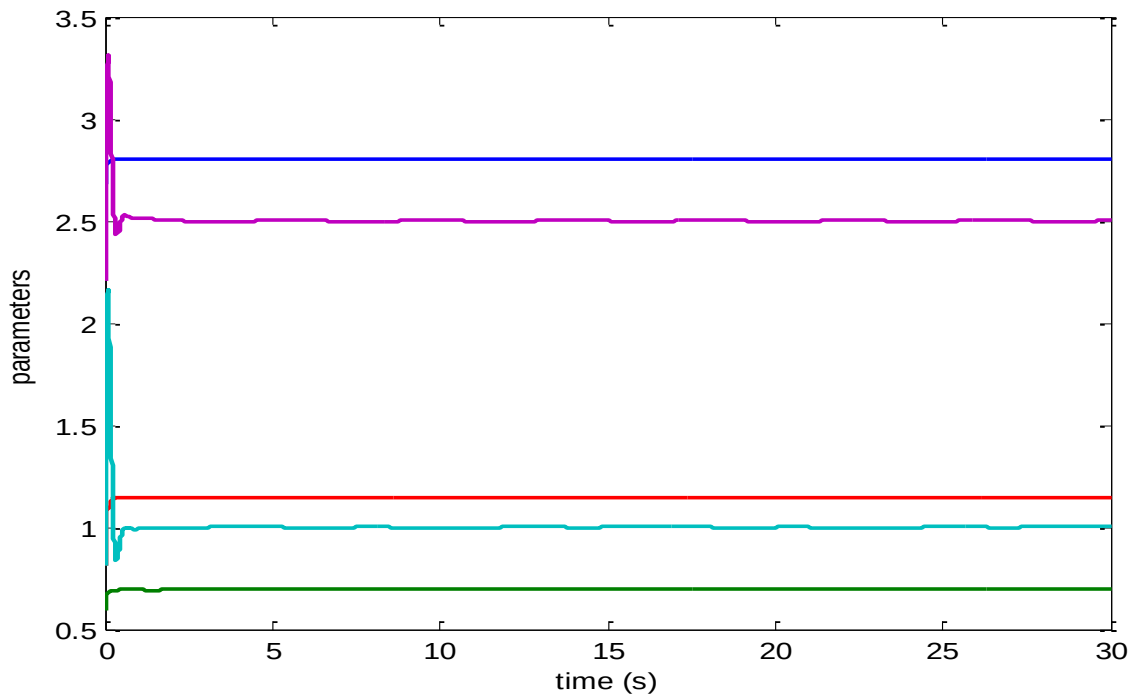
شکل (۳-۳) خطای ردیابی با اعمال کنترل کننده تطبیقی



شکل (۳-۴) خطای سرعت با اعمال کنترل کننده ی تطبیقی



شکل (۳-۵) گشتاور ورودی با اعمال کنترل کننده ی تطبیقی

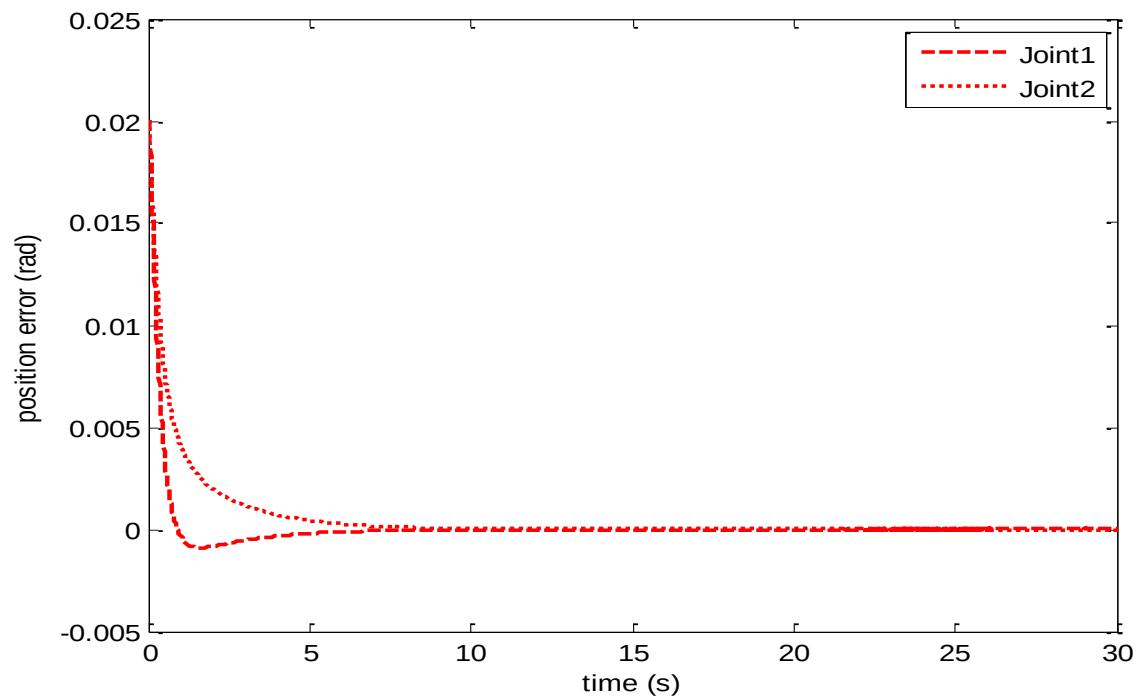


شکل (۳-۶) پارامترهای کنترل کننده تطبیقی در فرآیند ردگیری

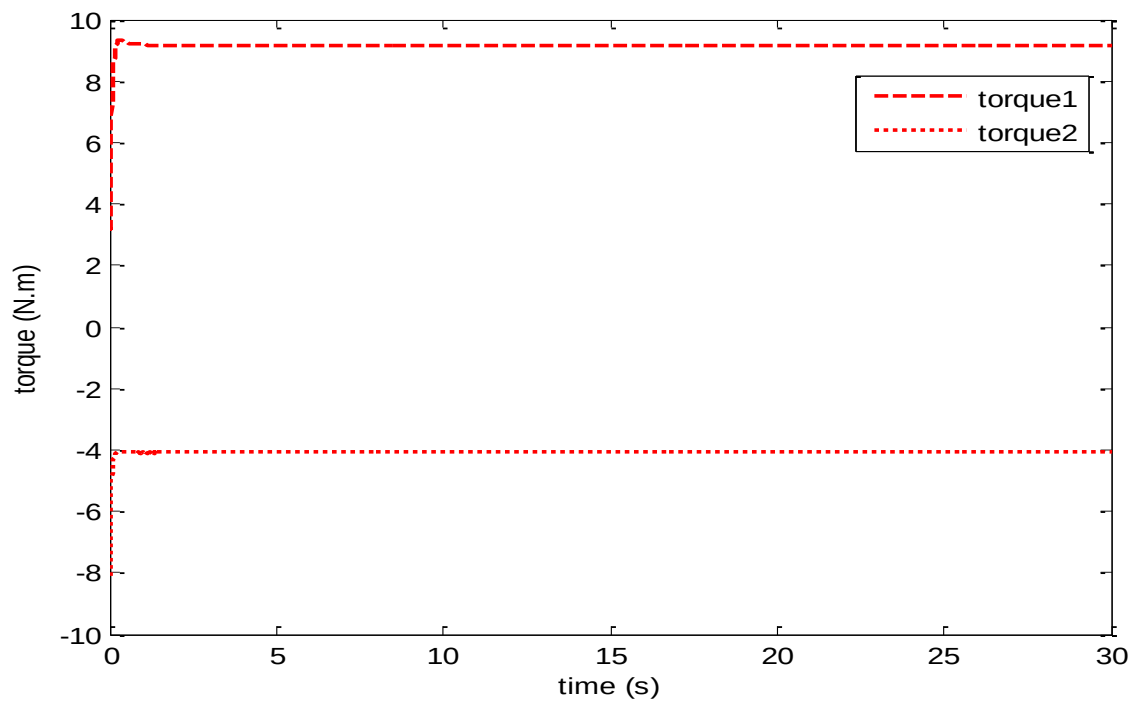
۳-۵-۲ عملکرد تنظیم نقطه ربات دو رابط لولایی

مسیر مطلوب جهت بررسی عملکرد تنظیم نقطه، $q_d = [1 \ 1]^T$ در نظر گرفته شده است. خطای اولیه برای هر دو مفصل 0.2 رادیان می باشد

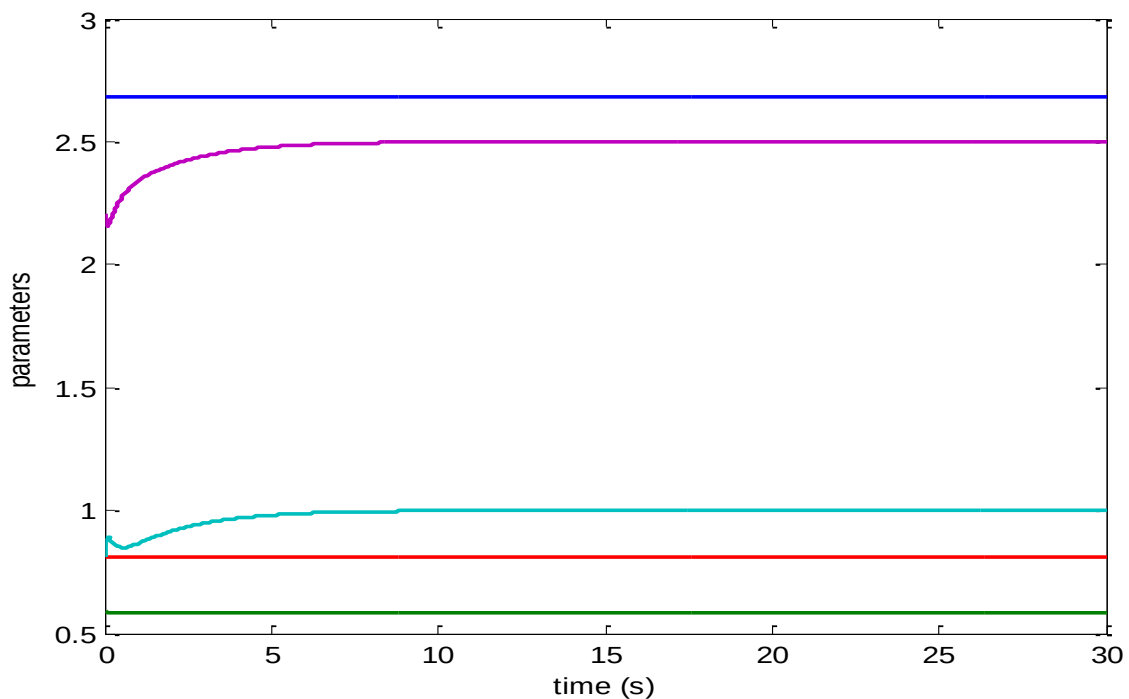
با توجه به شکل های (۳-۷) واضح است که کنترل کننده در مسئله تنظیم موقعیت دارای عملکرد مناسبی می باشد. همچنین در شکل (۳-۸) مشاهده می شود که گشتاور ورودی نیز در حد مجاز بوده و پیوسته است و در شکل (۳-۹) پارامترهای کنترل نیز به سرعت به مقادیر ثابت همگرا می شوند.



شکل (۷-۳) عملکرد تنظیم نقطه با اعمال کنترل کننده ی تطبیقی



شکل (۸-۳) گشتاور ورودی با اعمال کنترل کننده ی تطبیقی



شکل (۳-۹) پارامترهای کنترل کننده تطبیقی در فرآیند تنظیم

۳-۶ نتیجه گیری

در این فصل یک کنترل کننده تطبیقی بازوی ربات طراحی گردید. پایداری سیستم کنترل اثبات و بر روی یک ربات دو رابط لولایی شبیه سازی شد. نتایج شبیه سازی عملکرد مناسب این کنترل کننده در مقابل عدم قطعیت‌های پارامتری را نشان داده است. اما همانطور که گفته شد برای استفاده از این الگوریتم باید از خاصیت خطی شدن ساختار دینامیکی ربات نسبت به پارامترهای آن، به منظور تشکیل ماتریس رگرسیون استفاده کرد. چون معادلات دینامیکی ربات بسیار پیچیده است تشکیل این ماتریس برای ربات‌هایی با بیش از دو رابط کار بسیار دشواری است. از طرف دیگر کنترل کننده تطبیقی در مقابل عدم قطعیت‌های ساختار نیافته مانند اغتشاش خارجی و دینامیک مدل نشده عملکرد مناسبی را نخواهد داشت از این رو غلبه بر این مشکل کنترل مقاوم در فصل ۴ پیشنهاد می‌شود.

فصل ۴

کنترل مقاوم بازوی ربات

۴-۱ مقدمه

در بازوهای ربات از کنترل کننده‌های رایجی نظیر کنترل گشتاور محاسباتی، کنترل تناسبی مشتقی و کنترل تناسبی مشتقی انتگرالی برای غلبه بر دینامیک‌های غیرخطی استفاده شده است و نشان داده می‌شود این کنترل کننده‌ها در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم هستند [۶۳] و [۶۴]. اما این مقاوم بودن در صورتی است که ضرایب این کنترل کننده‌های خطی بسیار بزرگ انتخاب شوند، در این صورت ورودی کنترل بزرگ می‌شود و از لحاظ فیزیکی این امر باعث اشباع محرکه‌ها و ایجاد بالازدگی در حالات سیستم می‌شود. از طرف دیگر در صورتی که در سیستم نویز وجود داشته باشد بهره‌ی فیدبکی بزرگ ممکن است مشکل ساز شود. برای حل این مسائل کنترل کننده مقاوم غیرخطی ارائه می‌شود. در این فصل یک کنترل کننده‌ی مقاوم بازوی ربات با توجه به مرجع [۶۵] طراحی خواهد شد. سیستم کنترل بر روی ربات‌های دو رابط لولایی و اسکارا شبیه سازی می‌گردد.

۴-۲ معادله دینامیکی ربات

مدل دینامیکی یک ربات n رابط را به صورت زیر می‌توان نوشت.

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

که در آن $q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t) \in \mathbb{R}^n$ به ترتیب بردارهای موقعیت، سرعت و شتاب مفاصل می‌باشند. $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس اینرسی ربات، $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای مرکزگرا و کوریولیس، $G(q) \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای گرانشی، $\tau \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاور ورودی است. $\tau_d \in \mathbb{R}^n$ عدم قطعیت مجتمع، شامل اغتشاش خارجی و بخش نامعلوم مدل است. در ادامه به دو ویژگی معادله دینامیکی (۱-۴) اشاره می‌شود که در توسعه الگوریتم کنترلی و تحلیل پایداری آن مورد استفاده قرار خواهد گرفت. اولین ویژگی اینکه، $D(q)$ یک ماتریس مثبت معین متقارن می‌باشد که نامعادله زیر در رابطه با آن صادق است.

$$p_1 \|\xi\|^2 \leq \xi^T D(q) \xi \leq p_2 \|\xi\|^2 \quad \forall \xi \in \mathbb{R}^n \quad (۲-۴)$$

که در این نامعادله p_2 و p_1 ثابت‌های مثبت و معلوم هستند، همچنین عدم قطعیت مجتمع نیز به یک عدد ثابت مثبت و معلوم مثل ξ_{td} محدود است

$$\|\tau_d\| \leq \xi_{td} \quad (۳-۴)$$

ویژگی دومی که به آن نیاز داریم این است که ماتریس $\dot{D} - 2C$ پادمتقارن است. که در فصل قبل اثبات آن آورده شده است.

$$\xi^T \left(\frac{1}{2} \dot{D} - 2C \right) \xi = 0 \quad \forall \xi \in \mathbb{R}^n \quad (۴-۴)$$

۴-۳ کنترل کننده تناسبی مشتقی

در این فصل هدف این است که کنترل ردیابی موقعیت رابط‌ها برای بازوی رباتیک که با معادله (۱-۴) مشخص شده را انجام دهیم. خطای ردیابی موقعیت به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$e = q_d - q \quad (5-4)$$

که در رابطه بالا $q_d(t)$ مسیر مطلوب رابط را نشان می‌دهد. به منظور سهولت در انجام کار، $r(t)$ را به صورت زیر تعریف می‌کنیم که در ادامه برای طراحی کنترل کننده و تحلیل پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$r = \dot{e} + \alpha e \quad (6-4)$$

در رابطه بالا α یک بهره‌ی ثابت می‌باشد. با دوبار مشتق گرفتن از رابطه‌ی (5-4)، با در نظر گرفتن رابطه (1-4) و با انجام کار ریاضی به رابطه زیر می‌رسیم [65].

$$D\ddot{e} = D\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_d - \tau \quad (7-4)$$

با مشتق زمانی از $r(t)$ و در نظر گرفتن رابطه (7-4) به رابطه‌ی زیر می‌رسیم.

$$D\dot{r} = D\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_d - \tau + \alpha D\dot{e} \quad (8-4)$$

حال رابطه‌ی بالا را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم

$$D\dot{r} = -C(q, \dot{q})r + \tau_d - \tau + N \quad (9-4)$$

که در آن $N(q, \dot{q}, t) \in R^n$ به صورت زیر تعریف می‌شود

$$N = D\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \alpha e) + G(q) + \alpha D\dot{e} \quad (10-4)$$

اکنون کنترل کننده‌ی تناسبی مشتقی زیر را که بر اساس روش گشتاور محاسباتی¹ است پیشنهاد می‌دهیم.

$$\tau = (k_1 + k_2)r + N \quad (11-4)$$

حال با در نظر گرفتن $k \triangleq k_1 + k_2$ که در آن $k_1, k_2 \in R$ رابطه بالا را به صورت زیر می‌نویسیم

$$\tau = k\dot{e} + \alpha k e + N \quad (12-4)$$

که در رابطه بالا k بهره‌ی مشتقی و αk بهره تناسبی است. با جایگذاری (11-4) در (9-4) به سیستم خطای حلقه بسته‌ی زیر می‌رسیم

¹ · computed torque method

$$D\dot{r} = -C(q, \dot{q})r + \tau_d - kr \quad (۱۳-۴)$$

۴-۳-۱ تحلیل پایداری

سیستم خطای حلقه باز (۹-۴) و کنترل کننده‌ی (۱۲-۴) تضمین می‌کند که خطای ردیابی به صورت سراسری کراندار نهایی یکنواخت^۱ است. یعنی

$$\|e(t)\| \leq \sqrt{\xi_0 \exp(-\xi_1 t) + \xi_2} \quad (۱۴-۴)$$

ξ_0, ξ_1 و ξ_2 ثابت‌های مثبت هستند [۶۵].

۱.۶۶ [۶۶]

$V(t)$ یک تابع اسکالر غیر منفی برحسب زمان بر روی $[0, \infty)$ می‌باشد که نامعادله دیفرانسیل زیر را برقرار می‌کند.

$$\dot{V} \leq -\gamma V + \varepsilon \quad (۱۵-۴)$$

ε و γ ثابت‌های مثبت هستند. با توجه به رابطه‌ی (۱۵-۴) می‌توان نتیجه گرفت

$$V(t) \leq V(0)\exp(-\gamma t) + \frac{\varepsilon}{\gamma}(1 - \exp(-\gamma t)) \quad \forall t \in [0, \infty) \quad (۱۶-۴)$$

۲.۶۶ [۶۶]

اگر معادله دیفرانسیل (۶-۴) به صورت زیر محدود باشد

$$|r(t)| \leq \sqrt{A + B\exp(-kt)} \quad (۱۷-۴)$$

که k, A و B اعدادی حقیقی و $A + B \geq 0$ ، آنگاه $e(t)$ در (۶-۴) به صورت زیر می‌تواند محدود باشد

$$|e(t)| \leq |e(0)|\exp(-\alpha t) + \frac{a}{\alpha}(1 - \exp(-\alpha t)) + \frac{2b}{2\alpha - k} \left(\exp(-\frac{1}{2}kt) - \exp(-\alpha t) \right) \quad (۱۸-۴)$$

که

^۱. uniform ultimate boundedness

$$a = \sqrt{A} \quad \text{و} \quad b = \sqrt{B} \quad (۱۹-۴)$$

اثبات

تابع غیر منفی $V(t) \in R$ زیر را در نظر بگیرید

$$V(t) = \frac{1}{2} r^T D r \quad (۲۰-۴)$$

با استفاده از روابط (۱۳-۴)، (۲-۴) و (۴-۴) و مشتق زمانی از رابطه (۲۰-۴) می توان نوشت

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} r^T \dot{D} r + r^T (-C r + \tau_d - k r) \\ &= r^T (\tau_d - k r) \leq -k \|r\|^2 + \xi_{td} \|r\| \end{aligned} \quad (۲۱-۴)$$

با باز کردن رابطه بالا داریم

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -k_1 \|r\|^2 - k_2 \left[\|r\|^2 - \frac{\xi_{td}}{k_2} \|r\| + \left(\frac{\xi_{td}}{2k_2} \right)^2 \right] + \frac{\xi_{td}^2}{4k_2} \\ &\leq -\frac{2k_1}{p_2} V + \frac{\xi_{td}^2}{4k_2} \end{aligned} \quad (۲۲-۴)$$

که p_1 در (۲-۴) تعریف شده است. این نامعادله را می توان با استفاده از لم ۱ حل کرد بطوریکه

$$V(t) \leq V(0) \exp\left(-\frac{2k_1}{p_2} t\right) + \frac{p_2 \xi_{td}^2}{8k_1 k_2} (1 - \exp\left(-\frac{2k_1}{p_2} t\right)) \quad (۲۳-۴)$$

با توجه به (۲۰-۴) و نامعادله (۲۳-۴) می توان نوشت

$$\begin{aligned} \|r(t)\|^2 &\leq \frac{p_2}{p_1} \|r(0)\|^2 \exp\left(-\frac{2k_1}{p_2} t\right) + \frac{p_2 \xi_{td}^2}{4p_1 k_1 k_2} (1 - \exp\left(-\frac{2k_1}{p_2} t\right)) \\ &\leq \left(\frac{p_2}{p_1} \|r(0)\|^2 - \frac{p_2 \xi_{td}^2}{4p_1 k_1 k_2} \right) \exp\left(-\frac{2k_1}{p_2} t\right) + \frac{p_2 \xi_{td}^2}{4p_1 k_1 k_2} \end{aligned} \quad (۲۴-۴)$$

بنابراین نامعادله‌ی (۴-۱۴) با استناد به لم ۲ از (۴-۲۴) می‌تواند بدست آید. ■

۴-۴ کنترل کننده مقاوم

در قسمت قبل نشان داده شد که چگونه می‌توان با یک کنترل کننده‌ی تناسبی مشتقی در حضور عدم قطعیت به پایداری کراندار نهایی یکنواخت رسید. با توجه به رابطه (۴-۲۴) واضح است با افزایش بهره‌های تناسبی و مشتقی به اندازه دلخواه (یعنی، بهره فیدبکی بزرگ)، می‌توان خطای باقی مانده‌ی حالت ماندگار ξ_2 را به اندازه دلخواه کوچک کرد. اما اگر نویز در سیستم وجود داشته باشد بهره‌ی فیدبکی بزرگ مشکل ساز خواهد شد [۶۵]. به منظور کاهش خطای حالت ماندگار به اندازه‌ی دلخواه، بدون افزایش بهره‌های فیدبکی، روش کنترل مقاوم جایگزینی پیشنهاد می‌شود که در این فصل از آن استفاده خواهد شد.

قانون کنترل زیر را در نظر بگیرید

$$\tau = kr + u_R + N \quad (۴-۲۵)$$

این رابطه شبیه قانون کنترل تناسبی مشتقی (۴-۱۱) است با این تفاوت که به آن یک جزء مقاوم کننده $u_R \in R^n$ را اضافه کرده‌ایم. این جزء مقاوم کننده‌ی فرکانس بالا در زیر تعریف شده است.

$$u_R = \frac{r \xi_{td}^2}{\xi_{td} \|r\| + \varepsilon} \quad (۴-۲۶)$$

که در این رابطه $\varepsilon \in R$ یک عدد ثابت مثبت و به اندازه‌ی دلخواه کوچک است که طراح آن را تعیین می‌کند. واضح است که اگر $\varepsilon = 0$ قرار داده شود یک کنترل کننده مود لغزشی خواهیم داشت که در آن خطای ردیابی به صورت نمایی پایدار خواهد بود. اما به دلیل لرزش بسیار زیاد سیگنال کنترل، ε را یک عدد ثابت مثبت و به اندازه‌ی دلخواه کوچک در نظر می‌گیریم در نتیجه خطای ردیابی به صورت کراندار نهایی یکنواخت خواهد بود.

با جایگذاری (۲-۲۵) و (۲-۲۶) در (۲-۹) سیستم خطای حلقه بسته به صورت زیر بدست می‌آید.

$$D\dot{r} = -C(q, \dot{q})r + \tau_d - \frac{r\xi_{td}^2}{\xi_{td}\|r\| + \varepsilon} - kr \quad (27-4)$$

۴-۴-۱ تحلیل پایداری

سیستم خطای حلقه باز (۹-۴)، کنترل کننده‌ی مقاوم ارائه شده در (۲۵-۴) و (۲۶-۴) تضمین می‌کند که خطای ردیابی به صورت کراندار نهایی یکنواخت خواهد بود،

$$\|e(t)\| = \sqrt{\xi_0 \exp(-\xi_1 t) + \xi_2} \quad (28-4)$$

که در آن ξ_0, ξ_1, ξ_2 ثابت‌های مثبت هستند.

اثبات

با استفاده از (۲۷-۴)، (۲-۴) و (۴-۴)، مشتق زمانی از رابطه (۲۰-۴) به صورت زیر قابل بیان است.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} r^T \dot{D}r + r^T \left(-C(q, \dot{q})r + \tau_d - \frac{r\xi_{td}^2}{\xi_{td}\|r\| + \varepsilon} - kr \right) \\ &= r^T \left(\tau_d - \frac{r\xi_{td}^2}{\xi_{td}\|r\| + \varepsilon} - kr \right) \\ &\leq -k\|r\|^2 + \varepsilon \left(\frac{\|r\|\xi_{td}}{\xi_{td}\|r\| + \varepsilon} \right) \\ &\leq -k\|r\|^2 + \varepsilon \\ &\leq -\frac{2k}{p_2} V + \varepsilon \end{aligned} \quad (29-4)$$

حال با استفاده از لم ۱ داریم:

$$V(t) \leq V(0) \exp\left(-\frac{2k}{p_2} t\right) + \frac{p_2 \varepsilon}{2k} (1 - \exp\left(-\frac{2k}{p_2} t\right)) \quad (30-4)$$

با توجه به (۲-۴)، (۲۰-۴) و نامعادله (۳۰-۴) می‌توان نوشت

$$\begin{aligned} \|r(t)\|^2 &\leq \frac{p_2}{p_1} \|r(0)\|^2 \exp\left(-\frac{2k}{p_2} t\right) + \frac{p_2 \varepsilon}{p_1 k} (1 - \exp\left(-\frac{2k}{p_2} t\right)) \\ &\leq \left(\frac{p_2}{p_1} \|r(0)\|^2 - \frac{p_2 \varepsilon}{p_1 k} \right) \exp\left(-\frac{2k}{p_2} t\right) + \frac{p_2 \varepsilon}{p_1 k} \end{aligned} \quad (31-4)$$

اکنون با استفاده از لم ۲ می‌توان نامعادله (۲۸-۴) را از (۳۱-۴) نتیجه گرفت. مقایسه‌ی نتایج (۳۱-۴) و (۲۴-۴) مزیت طرح کنترل مقاوم را مشخص خواهد کرد. خطای حالت ماندگار ξ_2 به کران بالای عدم قطعیت ξ_{td} وابسته نیست و می‌توان آن را، هم با افزایش بهره کنترلی و هم با کوچک انتخاب کردن پارامتر طراحی ε ، کاهش داد. کوچک انتخاب کردن ε از دیدگاه عملی موجب خواهد شد تا پهنای باند مورد نیاز برای عملگر افزایش یابد.

۴-۵ شبیه سازی

کنترل کننده‌ی مقاوم پیشنهادی توسط قانون کنترل (۲۵-۴) توصیف شده است و روی ربات دو رابط (۷۰-۲) و همچنین ربات اسکارا سه رابط با معادلات (۷۲-۲) و (۷۳-۲) شبیه سازی می‌گردد. مقادیر واقعی پارامترهای ربات که در این شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته در جداول (۱-۴) و (۲-۴) آمده است. پارامترهای کنترل کننده در جدول (۳-۴) آورده شده است.

جدول (۱-۴). پارامترهای ربات دو-رابط لولایی

$m_1 = 1 \text{ kg}$	$m_2 = 2 \text{ kg}$
$a_1 = 1 \text{ m}$	$a_2 = 1 \text{ m}$
$a_{c1} = 0.5 \text{ m}$	$a_{c2} = 0.5 \text{ m}$
$I_1 = 0.12 \text{ kg.m}^2$	$I_2 = 0.25 \text{ kg.m}^2$

جدول (۲-۴) پارامترهای دینامیکی ربات اسکارا

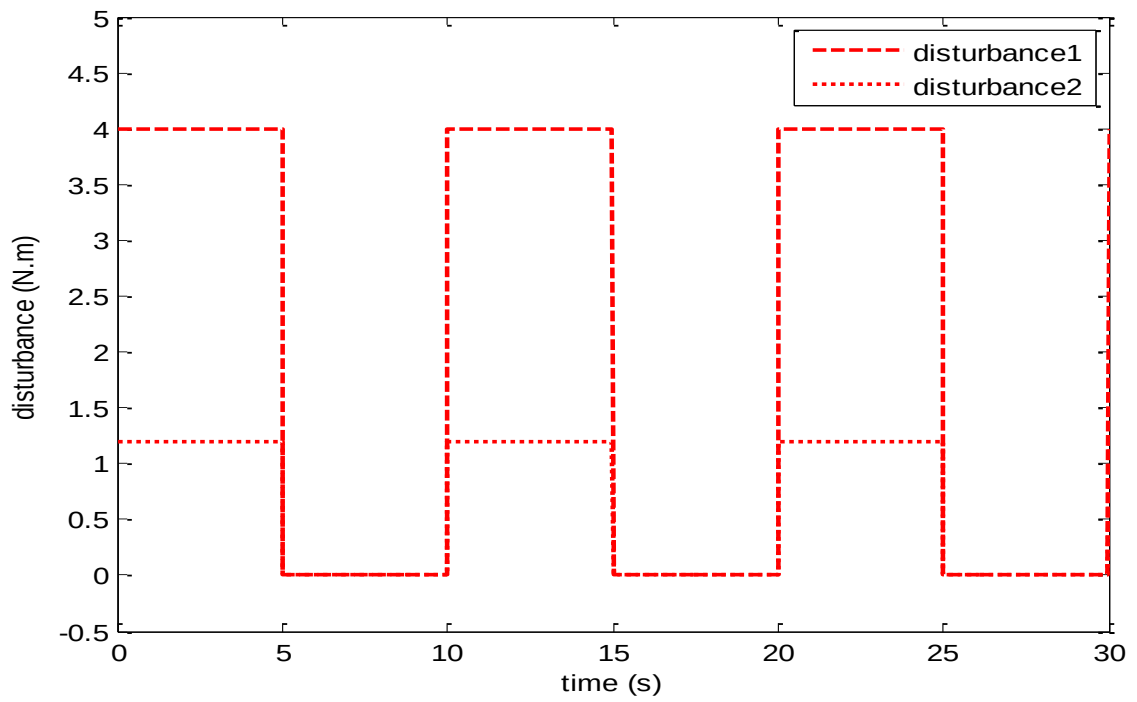
i	x_i (m)	y_i (m)	z_i (m)	m_i (kg)	I_{xxi} (kg.m ²)	I_{yyi} (kg.m ²)	I_{zzi} (kg.m ²)	I_{xyi} (kg.m ²)	I_{xzi} (kg.m ²)	I_{yzi} (kg.m ²)
۱	-۰/۳۱۸	.	.	۲۶/۱۴	۰/۰۹۳۹	۱/۳۴۴۱	۱/۳۹۹۶	.	۰/۰۰۵۱	.
۲	-۰/۲۷۴	.	.	۱۹/۱	۰/۱۹۴۷	۰/۶۱۵۶	۰/۵۱۴۴	۰/۰۰۰۱	-۰/۰۱۸۷	۰/۰۰۰۱
۳	.	.	-۰/۲۹۸	۲/۳۵	۰/۰۶۹۵	۰/۰۶۹۵	۰/۰۰۰۲	.	.	.
۴	.	.	-۰/۰۳۹	۰/۳۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۴/۳×۱۰ ^{-۵}	.	.	.

جدول (۳-۴) پارامترهای کنترل کننده

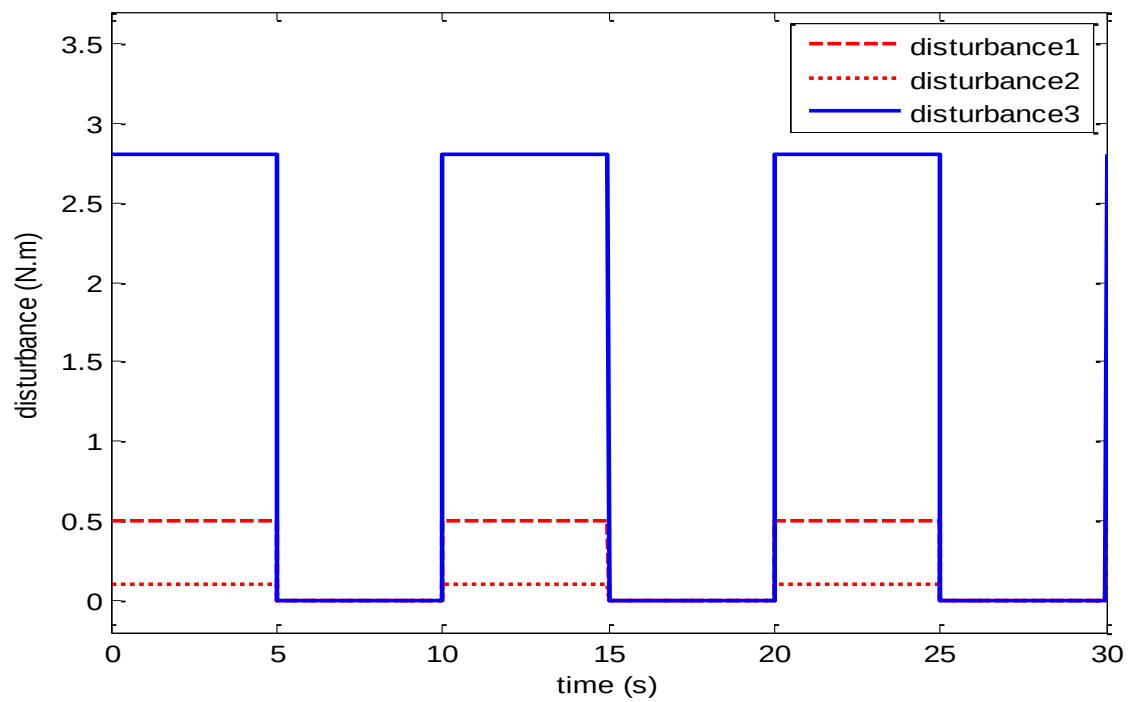
$k = 90$	$\alpha = 2.5I$
$\xi_{td} = 2$	$\varepsilon = 0.007$

عدم قطعیت مجتمع برای ردیابی ربات دورابط و ربات اسکارا توسط یک تابع تولید پالس به ترتیب در

شکل های (۱-۴) و (۲-۴) نشان داده شده است.



شکل (۱-۴) اغتشاش اعمال شده به ربات دو رابط



شکل (۲-۴) اغتشاش اعمال شده به ربات اسکارا

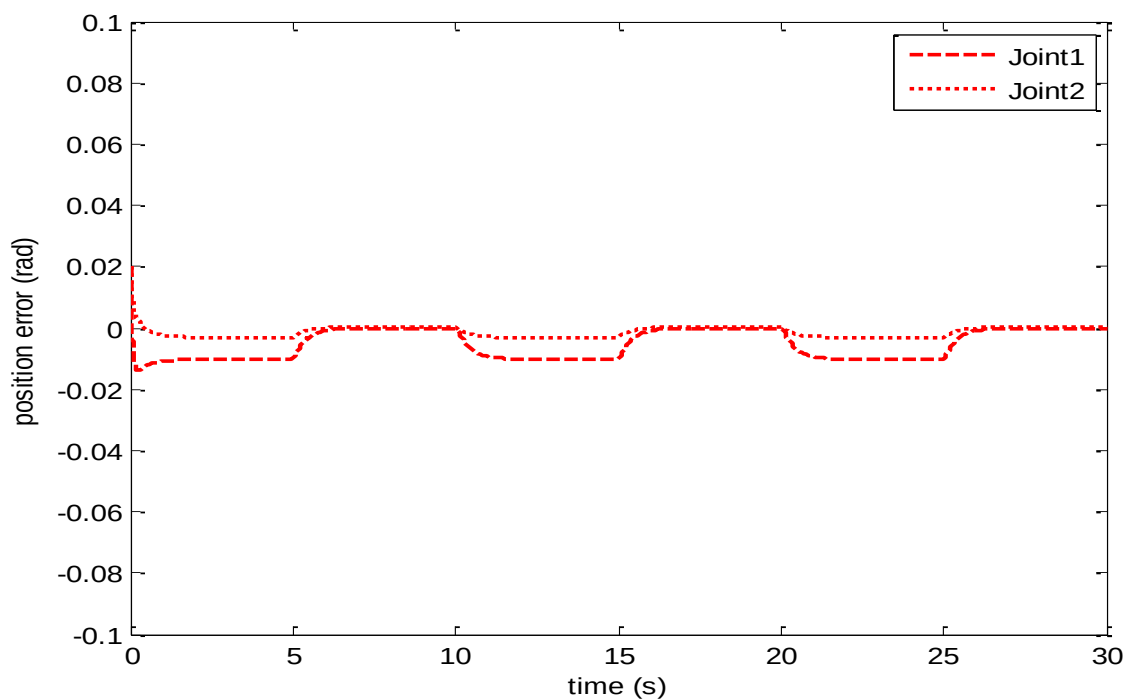
مسیر مطلوب رد گیری برای تمام مفاصل با رابطه زیر تعریف شده است.

$$q_d = \sin(0.5t) \text{ for } 0 \leq t < 30 \quad (۳۲-۴)$$

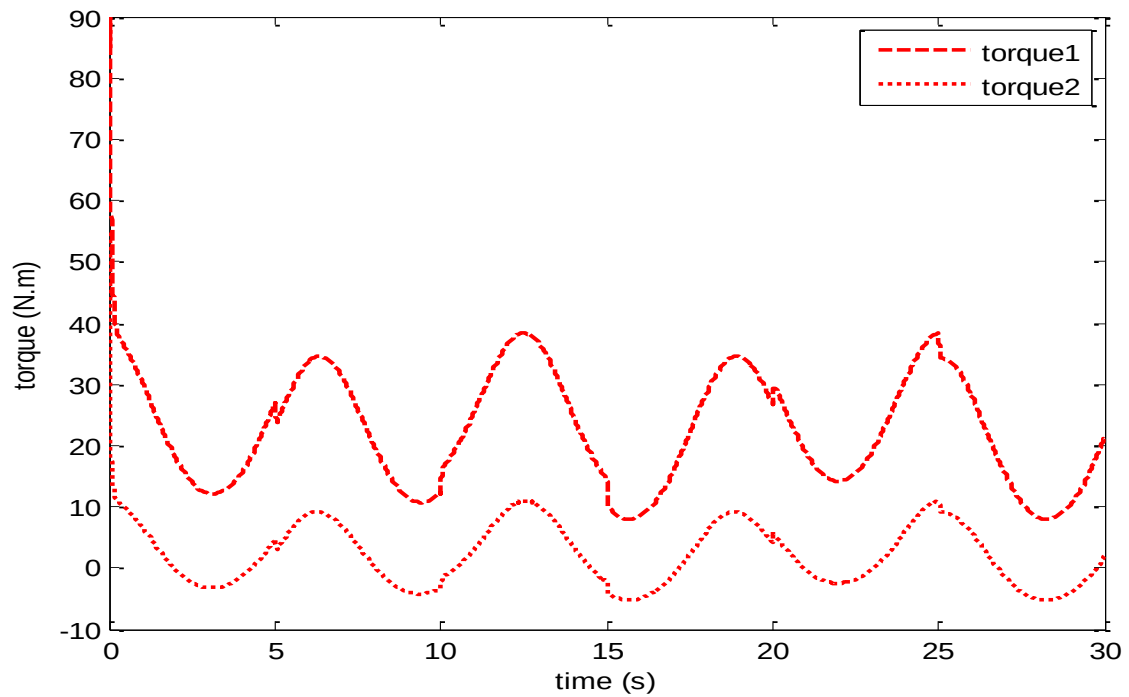
خطای اولیه برای همه‌ی مفاصل 0.02 رادیان در نظر گرفته شده است.

۴-۵-۱ عملکرد ردیابی مسیر ربات

پس از اعمال کنترل کننده‌ی مقاوم (۴-۲۵) روی ربات دو رابط خطای ردگیری در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. خطای ردگیری هر دو مفصل در انتهای 30 ثانیه به کمتر از 0.01 رادیان می‌رسد. در شکل (۴-۴) گشتاور ورودی هر دو رابط نیز پیوسته بوده، هیچ گونه لرزشی در آن مشاهده نمی‌شود و در محدوده مجاز قرار دارند. در صورتی که اگر ε را کوچک‌تر انتخاب می‌کردیم موجب می‌شد تا سیگنال کنترل دارای لرزش شود ولی در عوض خطای ردیابی کوچک‌تر گردد.

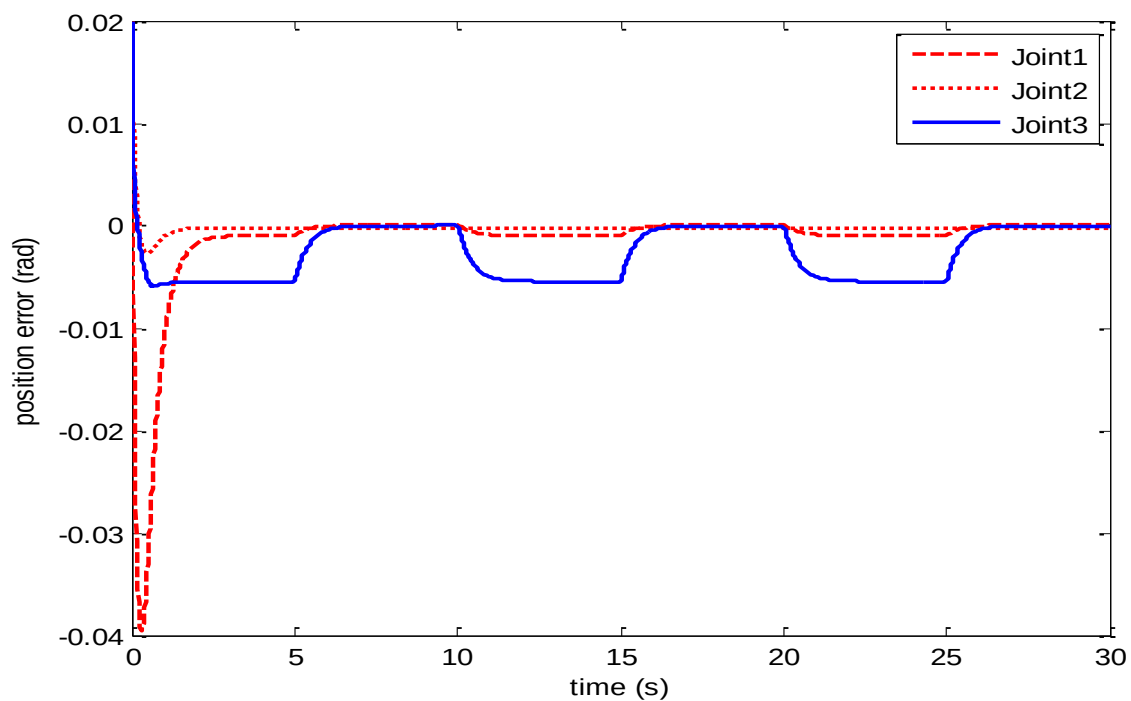


شکل (۴-۳) خطای ردیابی موقعیت ربات دو رابط با اعمال کنترل کننده‌ی مقاوم

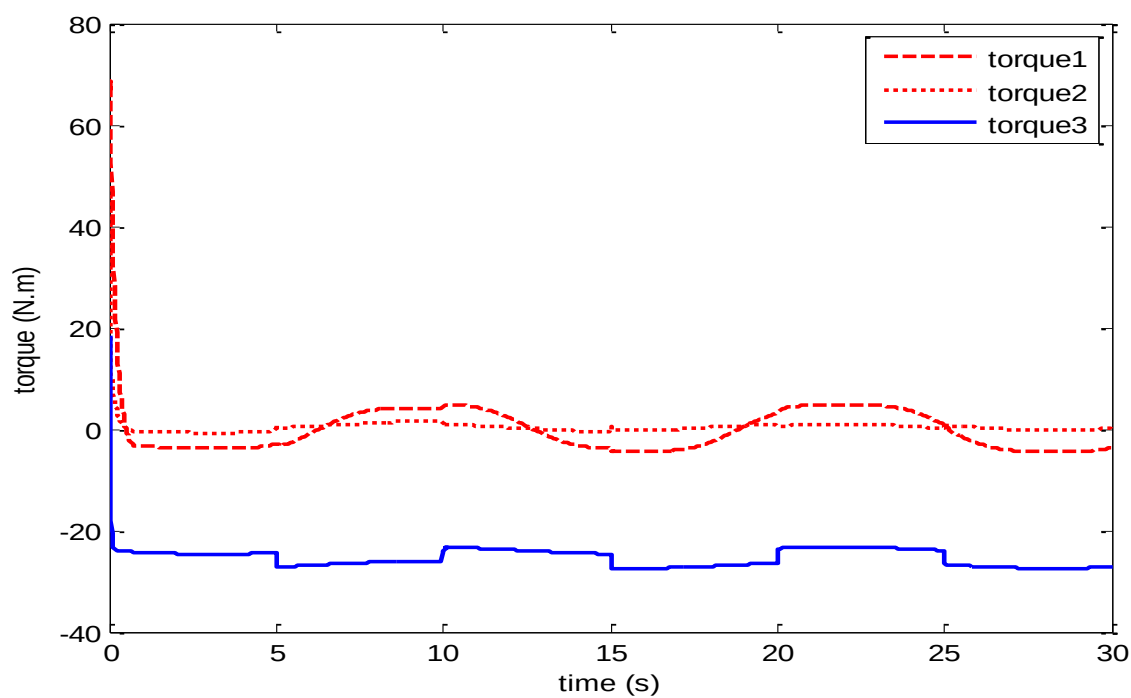


شکل (۴-۴) گشتاور ورودی ربات دو رابط با اعمال کنترل کننده ی مقاوم

اکنون همین بررسی را برای ردیابی مسیر ربات اسکارا انجام خواهیم داد. شکل (۴-۵) خطای ردیابی را نشان می دهد که بعد از ۲ ثانیه به کمتر از 5×10^{-3} رادیان می رسد. در شکل (۴-۶) هم گشتاور ورودی مفاصل مشاهده می شود که در محدوده مجاز قرار داشته و لرزشی ندارد. گشتاور ورودی رابط سوم که نسبت به دو رابط دیگر در ادامه ی مسیر مقدار بیشتری دارد به دلیل وجود نیروی گرانش می باشد.



شکل (۴-۵) خطای ردیابی موقعیت ربات اسکارا با اعمال کنترل کننده ی مقاوم

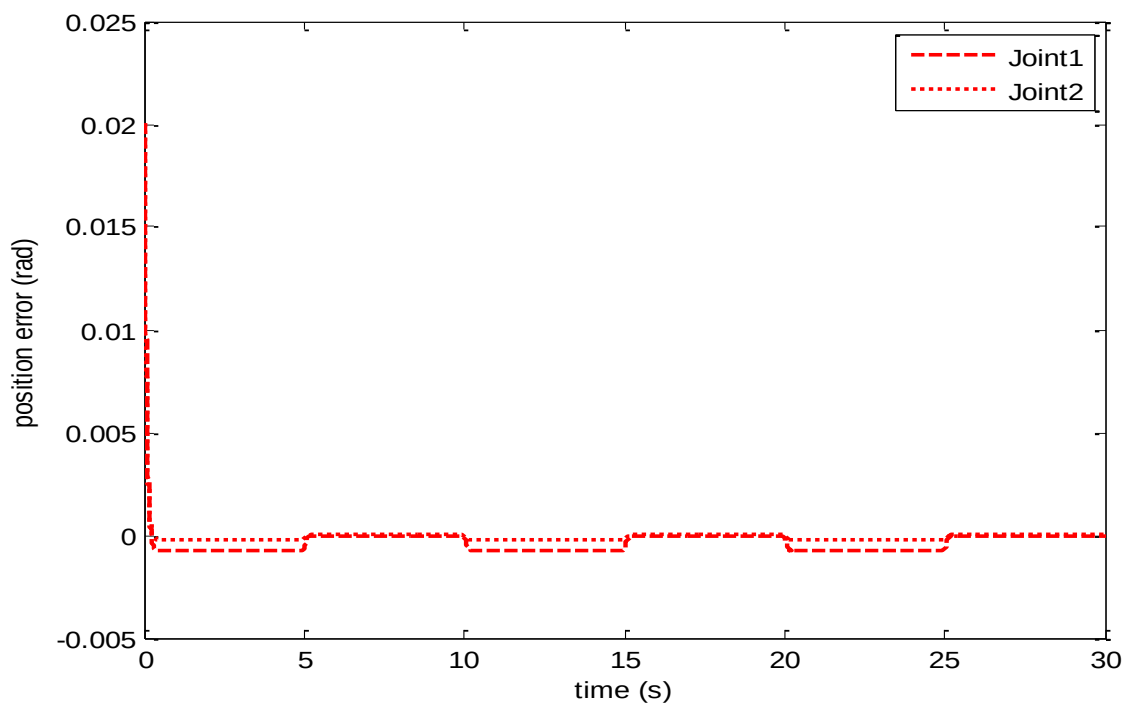


شکل (۴-۶) گشتاور ورودی ربات اسکارا با اعمال کنترل کننده ی مقاوم

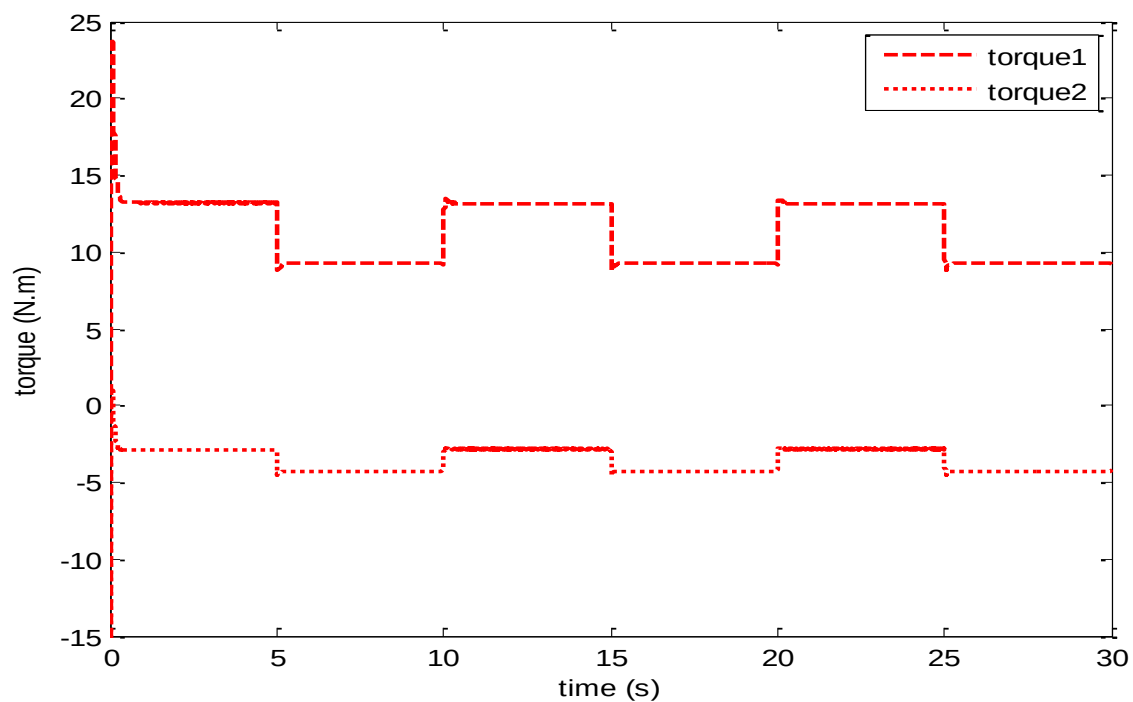
۴-۵-۲ عملکرد تنظیم نقطه ربات

مسیر مطلوب جهت بررسی عملکرد تنظیم نقطه، برای تمام مفاصل بردار واحد تعریف شده و خطای اولیه مفاصل 0.02 رادیان در نظر گرفته شده است.

شکل (۴-۷) و (۴-۸) به ترتیب عملکرد تنظیم نقطه و گشتاور ورودی مفاصل ربات دو رابط را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود خطای موقعیت کمتر از 0.001 رادیان بوده و گشتاور ورودی نیز در محدوده مجاز قرار دارد. در لحظه ابتدایی به دلیل وجود خطای اولیه گشتاور ورودی اندکی بیشتر بوده و سپس با جبران خطا کمتر می‌شود.

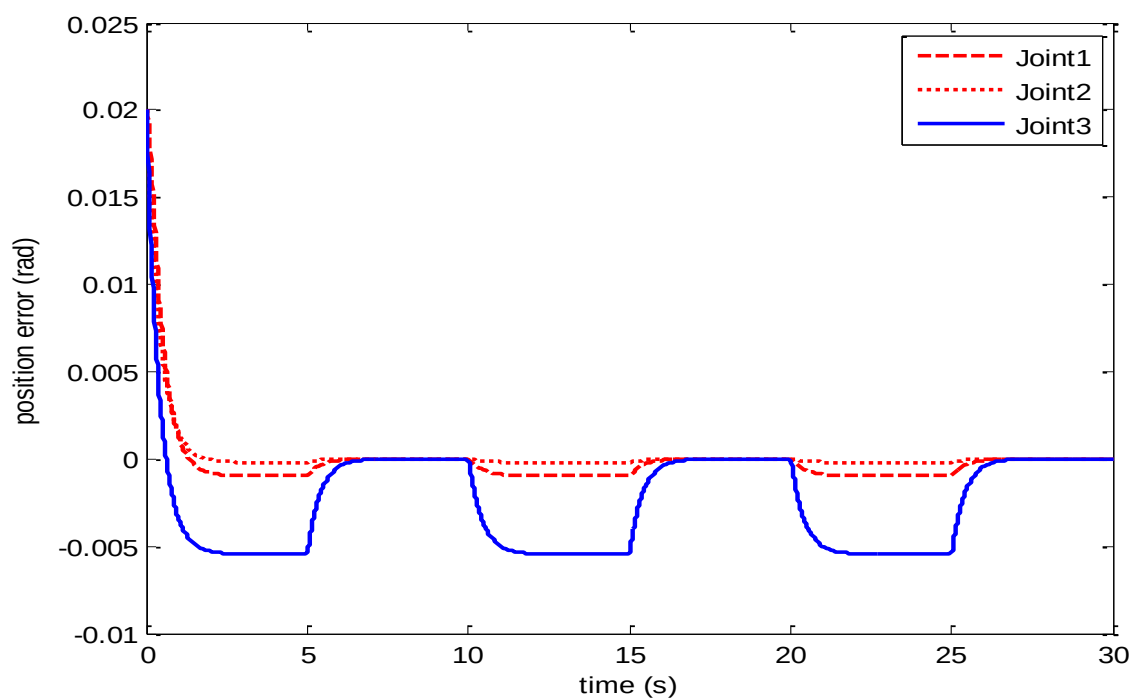


شکل (۴-۷) عملکرد تنظیم نقطه ربات دو رابط با اعمال کنترل کننده ی مقاوم

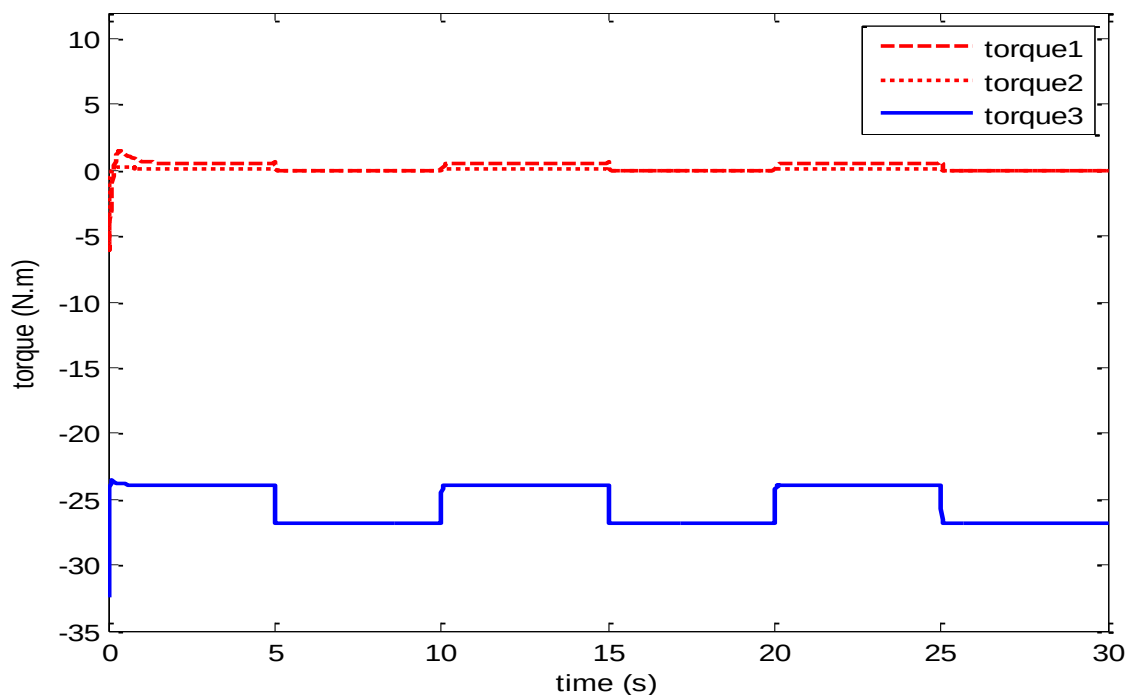


شکل (۴-۸) گشتاور ورودی ربات دو رابط با اعمال کنترل کننده ی مقاوم

نتایج مربوط به ربات اسکارا نیز در شکل‌های زیر آمده است، که کارایی روش مذکور را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۹) عملکرد تنظیم نقطه ربات اسکارا با اعمال کنترل کننده ی مقاوم



شکل (۴-۱۰) گشتاور ورودی ربات اسکارا با اعمال کنترل کننده ی مقاوم

۴-۶ نتیجه گیری

در این فصل کنترل کننده ی مقاوم به منظور غلبه بر عدم قطعیت های موجود در سیستم طراحی شد. پایداری سیستم کنترل با استفاده از روش لیاپانوف اثبات و به منظور بررسی عملکرد آن، روی ربات های دو رابط لولایی و سه رابط اسکارا شبیه سازی گردید. نتایج شبیه سازی کارایی روش مذکور را تایید می کند. در این روش مقاوم، خطای حالت ماندگار به کران بالای عدم قطعیت وابسته نبوده و با تنظیم پارامترهای کنترل کننده می توان آن را کوچک کرد. ولی برای طراحی کنترل کننده باید حدود عدم قطعیت از قبل معلوم باشد. پایداری از نوع کراندار نهایی یکنواخت است.

کنترل تطبیقی از نظر مقابله با عدم قطعیت پارامتری نسبت به کنترل مقاوم ارجحیت دارد، بر عکس کنترل مقاوم ویژگی هایی دارد که کنترل تطبیقی فاقد آن هاست، مثل قابلیت مقابله با اغتشاش ها و دینامیک های مدل نشده که یک مزیت محسوب می شود. بنابراین ترکیب این دو کنترل کننده منجر به کنترل کننده تطبیقی مقاومی می شود که می تواند بر تمام عدم قطعیت های پارامتری

و غیر پارامتری غلبه کند. در نتیجه طرح نوین کنترل کننده‌ی تطبیقی مقاوم را در فصل ۵ اجرا خواهیم کرد که معایب روش‌های پیشین را نداشته و تکمیل کننده آن‌هاست.

فصل ۵

کنترل تطبیقی مقاوم بازوی ربات با روش گرادیان نزولی

۵-۱ مقدمه

دینامیک‌های یک ربات صلب با مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل بسیار غیر خطی مدل شده که موجب می‌شود طراحی کنترل کننده آن سخت باشد. در کاربردهای عملی یک ربات صنعتی، از آنجا که مدل ریاضی ناچارا دارای نامعینی‌ها و اغتشاشات گوناگونی می‌باشد، استفاده‌ی گسترده از کنترل کننده‌ها با روش گشتاور محاسباتی^۱ ممکن است دقت بالایی را نداشته باشد. با توجه به این توضیحات، چندین طرح کنترل مقاوم [۴۶]، [۶۷]، [۶۸] و کنترل تطبیقی [۷۲-۶۹] پیشنهاد شده‌اند. روش‌های تطبیقی اگرچه کارایی مناسبی را برای ردیابی مسیر در حضور نامعینی‌ها ارائه می‌دهند، اما اکثر آن‌ها به محاسبه‌ی ماتریس رگرسیون نیاز دارند. علت آن هم این است که، با استفاده از ماتریس رگرسیون دینامیک‌های ربات قادر خواهد بود تا به فرم ترکیب خطی از پارامترها بیان شود. با استفاده از

^۱ Computed torque method

این ویژگی یک تابع لیاپانوف مناسب می‌توان پیدا کرد تا قانون به روز رسانی پایدار را برای پارامترهای نا معین ارائه داد. با توجه به پژوهش‌هایی که در این رابطه صورت گرفته است [۲۸]، به این نکته باید اشاره کرد که روش‌های براساس رگرسور ممکن است مشکلاتی را در اجرای عملی به دلیل پیچیدگی این ماتریس ایجاد کند. علاوه بر این، چون ماتریس رگرسور به صورت تحلیلی از مدل ربات بدست می‌آید، عملاً تشکیل آن برای ربات‌هایی با بیش از دو رابط کار بسیار دشواری است. با توجه به این واقعیت که ماتریس رگرسور به موقعیت و سرعت مفاصل وابسته است و باید در هر سیکل کنترلی محاسبه شود مشکل را دو چندان خواهد کرد. بنابراین، روش‌های بر اساس رگرسور به ربات‌های ساده محدود می‌شوند.

به منظور کاهش پیچیدگی محاسبات که ناشی از رگرسور است، صادق و هرویتز [۷۱] روشی را پیشنهاد دادند که رگرسور با استفاده از مسیرهای مطلوب محاسبه می‌شد. در این روش ماتریس رگرسور به صورت خارج خط قابل محاسبه بوده و نتایج آن در حافظه به صورت یک جدول جست و جو ذخیره می‌شود. در این روش حافظه بزرگی را باید به جدول جست و جویی که شامل رگرسور است اختصاص داد. همچنین هر موقع که مسیرهای مطلوب عوض شود باید دوباره جدول جست و جو را تغییر داد. کاوازاکی [۷۳] یک کنترل کننده تطبیقی بر مبنای مدل برای بازوی ماهر ربات پیشنهاد داد که ماتریس رگرسور به صورت صریح با استفاده از یک الگوریتم بازگشتی براساس روابط نیوتون-اولر محاسبه می‌شود. یانگ [۷۴] یک کنترل کننده تطبیقی مقاوم ردیابی بازو ربات پیشنهاد داد که ماتریس رگرسورش به مسیرهای مطلوب وابسته بوده و به صورت خارج خط محاسبه می‌شود. به هر حال یک رگرسور در این روش‌ها نیاز بوده و به دلایلی که گفته شد آزار دهنده است.

در این فصل، طرح نوینی از کنترل تطبیقی مقاوم با استفاده از روش گرادیان نزولی برای بازوی ماهر ربات ارائه می‌گردد که به محاسبه ی این ماتریس نیاز ندارد.

۵-۲ معادله دینامیکی ربات

مدل دینامیکی یک ربات n رابط را به صورت زیر می‌توان نوشت.

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

که در آن $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ به ترتیب بردارهای موقعیت، سرعت و شتاب مفاصل می‌باشند. $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس اینرسی ربات، $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای مرکزگرا و کوریولیس، $G(q) \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای گرانشی، $\tau \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاور ورودی و $\tau_d \in \mathbb{R}^n$ یک بردار اغتشاش کراندار است.

۵-۳ طراحی کنترل کننده تطبیقی مقاوم با روش گرادیان نزولی

با داشتن مسیر مطلوب q_d (فرض می‌کنیم که موقعیت، سرعت و شتاب مطلوب همگی کراندارند)، مسئله طراحی کنترل تطبیقی، بدست آوردن قانون کنترل برای گشتاورهای محرک، و قانون تخمین پارامترهای نامعلوم است، طوری که خروجی ربات q با دقت زیاد مسیر مطلوب را دنبال کند. خطای ردیابی موقعیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e = q_d - q \quad (۲-۵)$$

قانون کنترل زیر پیشنهاد می‌شود

$$\tau = D(q)(\ddot{q}_d + \Lambda \dot{e}) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \Lambda e) + G(q) + k_d(\dot{e} + \Lambda e) + \tau_d \quad (۳-۵)$$

که در آن Λ و k_d ماتریس‌های مثبت معین متقارن هستند. معادله (۱-۵) مدل سیستم واقعی را نشان می‌دهد. بنابراین، قانون کنترل (۳-۵) صرفاً با در دست داشتن مدل واقعی سیستم قابل اجرا خواهد بود. ضمن آنکه اغتشاش خارجی نیز نامعلوم می‌باشد و وجود آن در قانون کنترل غیر قابل قبول می‌باشد. زیرا قانون کنترل باید معلوم باشد. بنابراین، قانون کنترل (۳-۵) به دلیل نداشتن مدل واقعی عملکرد مناسبی نخواهد داشت.

از آنجا که هر مدل پیشنهادی برای ربات با مدل واقعی تفاوت دارد، حضور عدم قطعیت‌ها مشتمل بر عدم قطعیت پارامتری و غیرساختاری در مدل ربات اجتناب ناپذیر است. برای این منظور می‌توان هر مدل واقعی را به دو بخش معلوم و بخش عدم قطعیت تجزیه کرد. بنابراین، مدل واقعی (۵-۱) را به صورت زیر باز نویسی می‌کنیم.

$$\tau = \hat{D}(q)\ddot{q} + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \eta_m \quad (۴-۵)$$

که در آن $\hat{D}(q)$ ، $\hat{C}(q, \dot{q})$ و $\hat{G}(q)$ مقادیر معلوم بوده و تخمینی از مقادیر واقعی $D(q)$ ، $C(q, \dot{q})$ و $G(q)$ هستند. η_m عدم قطعیت نام دارد و با برابر قرار دادن معادلات (۴-۵) و (۵-۱) به صورت زیر توصیف می‌شود.

$$\eta_m = (D - \hat{D})\ddot{q} + (C - \hat{C})\dot{q} + (G - \hat{G}) + \tau_d \quad (۵-۵)$$

حال با استفاده از روش کنترل مقاوم، یک عبارت مقاوم کننده به منظور جبران عدم قطعیت‌ها به سیستم کنترل اضافه می‌شود و قانون کنترل (۵-۳) به صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$\tau = \hat{D}(q)(\ddot{q}_d + \Lambda \dot{e}) + \hat{C}(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \Lambda e) + \hat{G}(q) + k_d(\dot{e} + \Lambda e) + u_c \quad (۶-۵)$$

که در آن کنترل مقاوم u_c برای جبران عدم قطعیت‌ها اضافه شده است. معادله سیستم حلقه بسته با جایگذاری قانون کنترل (۶-۵) در سیستم (۵-۱) به صورت

$$\begin{aligned} D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_d &= \hat{D}(q)(\ddot{q}_d + \Lambda \dot{e}) + \\ \hat{C}(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \Lambda e) + \hat{G}(q) + k_d(\dot{e} + \Lambda e) + u_c \end{aligned} \quad (۷-۵)$$

خواهد بود. که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت

$$D\ddot{q} - \hat{D}\ddot{q}_d + (\hat{D}\Lambda + C)\dot{q} - (\hat{D}\Lambda + \hat{C})\dot{q}_d - \hat{C}\Lambda e + (G - \hat{G}) + \tau_d - u_c = k_d(\dot{e} + \Lambda e) \quad (۸-۵)$$

و با بازنویسی رابطه بالا داریم

$$\eta - u_c = k_d(\dot{e} + \Lambda e) \quad (۹-۵)$$

که در این رابطه η عدم قطعیت مجتمع است و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\eta = D\ddot{q} - \hat{D}\ddot{q}_d + (\hat{D}\Lambda + C)\dot{q} - (\hat{D}\Lambda + \hat{C})\dot{q}_d - \hat{C}\Lambda e + (G - \hat{G}) + \tau_d - u_c \quad (10-5)$$

فرض می‌کنیم که η محدود است یعنی

$$\|\eta\| \leq \rho \quad (11-5)$$

حد بالای عدم قطعیت ρ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = \beta_u \|\dot{q}\| + \alpha_u \|\ddot{q}\| + \gamma_u \quad (12-5)$$

که در آن $\alpha_u, \beta_u, \gamma_u$ حد بالایی عبارت‌های زیر هستند.

$$\|\hat{D}\Lambda + C\| \leq \beta_u \quad (13-5)$$

$$\|-\hat{D}\ddot{q}_d - (\hat{D}\Lambda + \hat{C})\dot{q}_d - \hat{C}\Lambda e + (G - \hat{G}) + \tau_d\| \leq \gamma_u \quad (14-5)$$

$$\|D\| \leq \alpha_u \quad (15-5)$$

شرط (11-5) برقرار است زیرا $D, \hat{D}, C, \hat{C}, G, \hat{G}$ و τ_d همگی محدود هستند. با توجه به معادلات

(9-5) و (10-5) کنترل مقاوم به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$u_c = \beta(t)\dot{q} + \gamma(t)d \quad (16-5)$$

که در آن $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ پارامترهای طراحی کنترل کننده مقاوم و $d \in \mathbb{R}^n$ بردار با اعضای واحد است.

به منظور ردیابی مناسب مسیر، کنترلر u_c باید به نحوی طراحی شود که $u_c \rightarrow \eta$. برای این منظور

یک تابع مثبت معین به صورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$V(t) = \frac{1}{2} E^T E \quad (17-5)$$

که در آن E برابر است با

$$E = \eta - u_c \quad (18-5)$$

برای برقرار شدن $E \rightarrow 0$ یا $u_c \rightarrow \eta$ ، پارامترهای طراحی کنترل کننده مقاوم u_c در (۱۶-۵) یعنی $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ باید به نحوی به روز شوند که $V(t) \rightarrow 0$. برای این منظور با استفاده از روش گرادیان نزولی داریم

$$\dot{\beta} = -\lambda_{\beta} \frac{\partial V}{\partial \beta} \quad (۱۹-۵)$$

$$\dot{\gamma} = -\lambda_{\gamma} \frac{\partial V}{\partial \gamma} \quad (۲۰-۵)$$

که در آن $\lambda_{\beta} > 0$ و $\lambda_{\gamma} > 0$ توسط طراح تعیین می‌شود. با استفاده از (۱۶-۵)، (۱۷-۵) و (۱۸-۵) می‌توان نوشت

$$\frac{\partial V}{\partial \beta} = -E^T \dot{q} \quad (۲۱-۵)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \gamma} = -E^T d \quad (۲۲-۵)$$

برای محاسبه‌ی E ، معادله‌ی (۱۸-۵) را در (۹-۵) جایگذاری می‌کنیم

$$E = k_d(\dot{e} + \Lambda e) \quad (۲۳-۵)$$

بنابراین E معلوم است و برای محاسبه‌ی آن نیاز به اندازه‌گیری $q(t)$ و $\dot{q}(t)$ داریم. جایگذاری معادلات (۲۱-۵) در (۱۹-۵) و (۲۲-۵) در (۲۰-۵) منجر به قوانین به روز رسانی برای پارامترهای کنترل مقاوم به صورت زیر خواهد شد.

$$\beta(t) = \int_0^t \lambda_{\beta} E^T \dot{q} dt + \beta(0) \quad (۲۴-۵)$$

$$\gamma(t) = \int_0^t \lambda_{\gamma} E^T d dt + \gamma(0) \quad (۲۵-۵)$$

با فرض $\beta(0) = \gamma(0) = 0$ کنترل مقاوم (۱۵-۵) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$u_c = \lambda_{\beta} \dot{q} \int_0^t E^T \dot{q} dt + \lambda_{\gamma} d \int_0^t E^T dt \quad (۲۶-۵)$$

در یک مسئله بهینه سازی ممکن است روش گرادیان نزولی در کمینه محلی گیر کند. ولی توجه شود که بهینه سازی محلی یا سراسری با وجود عدم قطعیت در مسئله کنترل ربات میسر نمی شود. ضمناً بکارگیری بسیاری از روش های بهینه سازی که در حالت خارج خط برای سیستم های استاتیکی به کار رفته است به دلیل محدودیت زمانی و تغییر داده ها در حالت زمان واقعی برای کنترل سیستم های دینامیکی قابل استفاده نمی باشد. در این پایان نامه هر دو مسئله ی کنترل سیستم دینامیکی و وجود عدم قطعیت مطرح هستند. بنابراین، بهینه سازی محقق نمی گردد ولی هدف سیستم کنترل یعنی کاهش خطای ردگیری با بکارگیری روش گرادیان نزولی در حالت روی خط برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده محقق خواهد شد.

۵-۴ تحلیل پایداری

برای اثبات پایداری باید نشان دهیم که متغیرهای حالت سیستم محدود هستند. برای این منظور فرض های زیر را در نظر می گیریم

فرض ۱: مسیر مطلوب حرکت بازوی ربات q_d هموار است، به این معنی که q_d و مشتقات آن تا مرتبه مورد نیاز در دسترس و همگی محدود باشند.

فرض ۲: اغتشاش خارجی محدود است، یعنی $\|\tau_d\| \leq \xi_{td}$

فرض ۳: تمامی پارامترهای ربات یعنی D, C, G و تخمین آن ها $\hat{D}, \hat{C}, \hat{G}$ محدود می باشند.

در فرآیند تنظیم پارامترها توسط روش گرادیان نزولی فرض براین است که فقط پارامترها در فرآیند تنظیم متغیر بوده و سایر عوامل ثابت هستند. به عبارتی سرعت تنظیم پارامترها خیلی بیشتر از نرخ تغییر سایر عوامل است. در نتیجه، فرض شده است که V در فرآیند تنظیم فقط تابعی از پارامترهای $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ است. بنابراین با مشتق از $V(\beta, \gamma)$ نسبت به زمان بدست می آید:

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial \beta} \dot{\beta} + \frac{\partial V}{\partial \gamma} \dot{\gamma} \quad (27-5)$$

با جایگذاری $\dot{\beta}$ و $\dot{\gamma}$ از معادلات (19-5) و (20-5) در معادله (27-5) داریم:

$$\dot{V} = -\lambda_{\beta} \left(\frac{\partial V}{\partial \beta} \right)^2 - \lambda_{\gamma} \left(\frac{\partial V}{\partial \gamma} \right)^2 \quad (28-5)$$

با توجه به اینکه $\lambda_{\beta} > 0$ و $\lambda_{\gamma} > 0$ بنابراین نتیجه می‌گیریم که $\dot{V} < 0$. چونکه V تابع مثبت معین است و $\dot{V} < 0$ ، پس V کاهش می‌یابد و $V \rightarrow 0$. با توجه به $V = \frac{1}{2} \|E\|^2$ در (17-5) و چون $V \rightarrow 0$ پس می‌توان نتیجه گرفت که $\|E\| \rightarrow 0$ ، بنابراین همگرایی خطا به سمت صفر محقق می‌شود.

از آنجایی که V تابعی محدب از E است و E تابعی افاین نسبت به پارامترهای $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ است آنگاه V تابعی محدب نسبت به پارامترهای $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ است [75]. هرگاه $\frac{\partial V}{\partial \beta} = 0$ و $\frac{\partial V}{\partial \gamma} = 0$ با هم برقرار باشند گرادیان V برابر صفر و در نتیجه $\dot{V} = 0$ است. از آنجایی که گرادیان V برابر با صفر است و V تابعی محدب نسبت به پارامترها است، شرط لازم و کافی برای قرارگرفتن تابع V در کمینه‌ی سراسری محقق شده است [75]. یعنی $V = 0$ که $E = 0$ نتیجه می‌شود. پس همگرایی خطا به صفر محقق شده است.

با توجه به بکارگیری روش گرادیان نزولی و اثبات همگرایی که در گفته‌های بالا صورت پذیرفت در هر

صورت $\dot{V} < 0$ است پس $V(t) \leq V(0)$ که از $V = \frac{1}{2} \|E\|^2$ می‌توان نتیجه گرفت که $\|E\| \leq \|E(0)\|$

نتیجه ۱: یعنی E محدود است.

حال با مشاهده رابطه‌ی حلقه بسته‌ی (23-5) و توجه به این موضوع که Λ و k_d ماتریس‌های ثابت و مثبت معین هستند و همچنین در نظر گرفتن نتیجه ۱، بر اساس معیار راث هرویتز در سیستم‌های

خطی، معادله (23-5) پایدار است. پس،

نتیجه ۲: $e = q_d - q$ و $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$ محدودند.

بر اساس فرض ۱ متغیرهای q_d و $\dot{q}_d$ محدودند. بنابراین با استفاده از فرض ۱ و نتیجه ۲ خواهیم داشت،

نتیجه ۳: متغیرهای حالت q و $\dot{q}$ محدودند.

اکنون با مشاهده‌ی رابطه (۷-۵) و به کارگیری فرض‌های ۱، ۲، ۳ و نتیجه‌ی ۳ داریم،

نتیجه ۴: متغیر حالت $\ddot{q}$ محدود است.

با توجه به نتایج، موقعیت مفصلی q ، سرعت مفصلی $\dot{q}$ و شتاب مفصلی $\ddot{q}$ محدود می‌باشند. بنابراین

حالات سیستم q ، $\dot{q}$ و $\ddot{q}$ همگی محدودند و پایداری سیستم تضمین می‌شود.

از آنجا که قانون کنترل مقاوم پیشنهادی (۵-۱۶) پیوسته است، در صورتی که عدم قطعیت بطور

کامل جبران نشود، همگرایی خطا به صفر محقق نمی‌شود. در نتیجه، پاسخ از نوع کراندار نهایی

یکنواخت خواهد بود [۶۳].

۵-۵ شبیه سازی

طرح پیشنهادی توسط قانون کنترل (۵-۶) و قوانین تطبیق (۵-۲۴) و (۵-۲۵) توصیف شده است که

روی ربات اسکارا با معادلات (۲-۷۲)، (۲-۷۳) و ربات دو رابط لولایی (۲-۷۰) شبیه سازی می‌گردد.

مقادیر واقعی پارامترهای ربات که در این شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است در جداول (۵-۱)

و (۵-۲) آمده است. پارامترهای مورد نیاز در کنترل ربات برای همه مفاصل به صورت یکسان و مطابق

جدول (۵-۳) انتخاب می‌شود.

جدول (۵-۱). پارامترهای ربات دو-رابط لولایی

$m_1 = 1 \text{ kg}$	$m_2 = 2 \text{ kg}$
$a_1 = 1 \text{ m}$	$a_2 = 1 \text{ m}$
$a_{c1} = 0.5 \text{ m}$	$a_{c2} = 0.5 \text{ m}$
$I_1 = 0.12 \text{ kg.m}^2$	$I_2 = 0.25 \text{ kg.m}^2$

جدول (۵-۲) پارامترهای دینامیکی ربات اسکارا

i	x_i (m)	y_i (m)	z_i (m)	m_i (kg)	I_{xxi} (kg.m ²)	I_{yyi} (kg.m ²)	I_{zzi} (kg.m ²)	I_{xyi} (kg.m ²)	I_{xzi} (kg.m ²)	I_{yzi} (kg.m ²)
۱	-۰/۳۱۸	۰	۰	۲۶/۱۴	۰/۰۹۳۹	۱/۳۴۴۱	۱/۳۹۹۶	۰	۰/۰۰۵۱	۰
۲	-۰/۲۷۴	۰	۰	۱۹/۱	۰/۱۹۴۷	۰/۶۱۵۶	۰/۵۱۴۴	۰/۰۰۰۱	-۰/۰۱۸۷	۰/۰۰۰۱
۳	۰	۰	-۰/۲۹۸	۲/۳۵	۰/۰۶۹۵	۰/۰۶۹۵	۰/۰۰۰۲	۰	۰	۰
۴	۰	۰	-۰/۰۳۹	۰/۳۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۴/۳×۱۰ ^{-۵}	۰	۰	۰

جدول (۵-۳) پارامترهای کنترل کننده

$k_d = 200$	$\Lambda = 25$
$\lambda_\beta = 100$	$\lambda_\gamma = 100$

برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پارامتری، $\hat{D}$ ، $\hat{C}$ و $\hat{G}$ ۹۰ درصد مقادیر واقعی‌شان در نظر گرفته شده‌اند. زمان اجرای شبیه سازی ۳۰ ثانیه انتخاب شده است. خطای اولیه برای تمامی مفاصل ۰/۰۲ در نظر گرفته شده است. اغتشاش خارجی برای بررسی عملکرد ردیابی و تنظیم نقطه ربات‌های دورابط و اسکارا، توسط یک تابع تولید پالس با دوره زمانی ۱۰ ثانیه، پهنای پالس ۵ ثانیه و دامنه‌های متفاوت برای هر مفصل به سیستم کنترل اعمال می‌شود. شکل‌های (۴-۱) و (۴-۲) به ترتیب اغتشاش وارد شده به ربات دو رابط لولایی و ربات سه رابط اسکارا را نشان می‌دهد.

۵-۵-۱ عملکرد ردیابی مسیر ربات

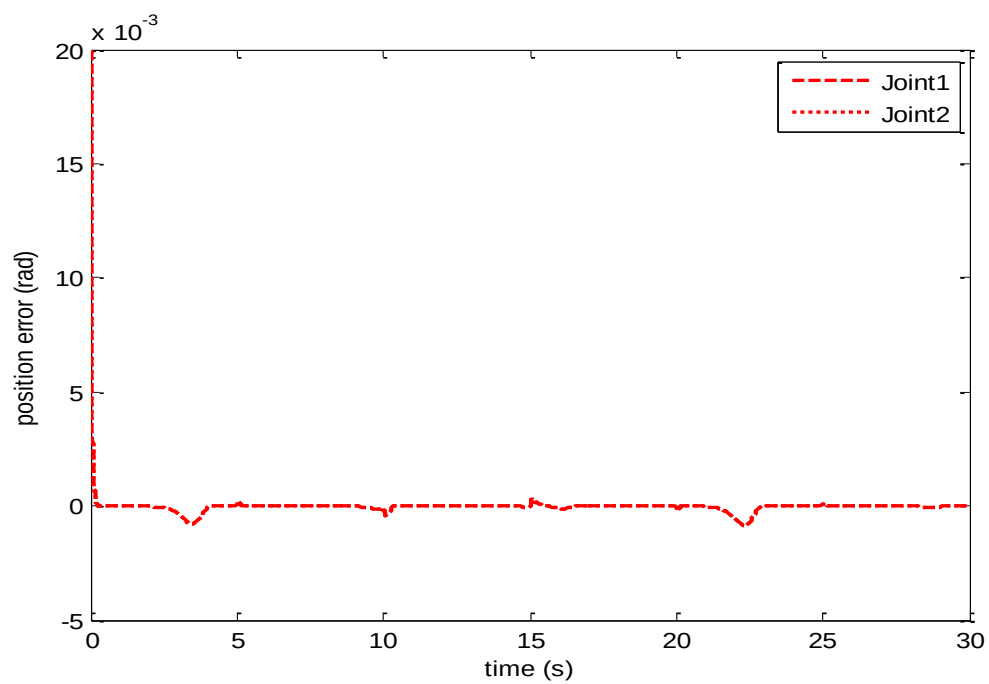
مسیر مطلوب جهت ردیابی بازوی رباتیک توسط رابطه زیر ارائه شده است و در شکل (۲-۳) نشان داده شده است

$$q_d = \sin(0.5t) \quad \text{for} \quad 0 \leq t < 30 \quad (۲۹-۵)$$

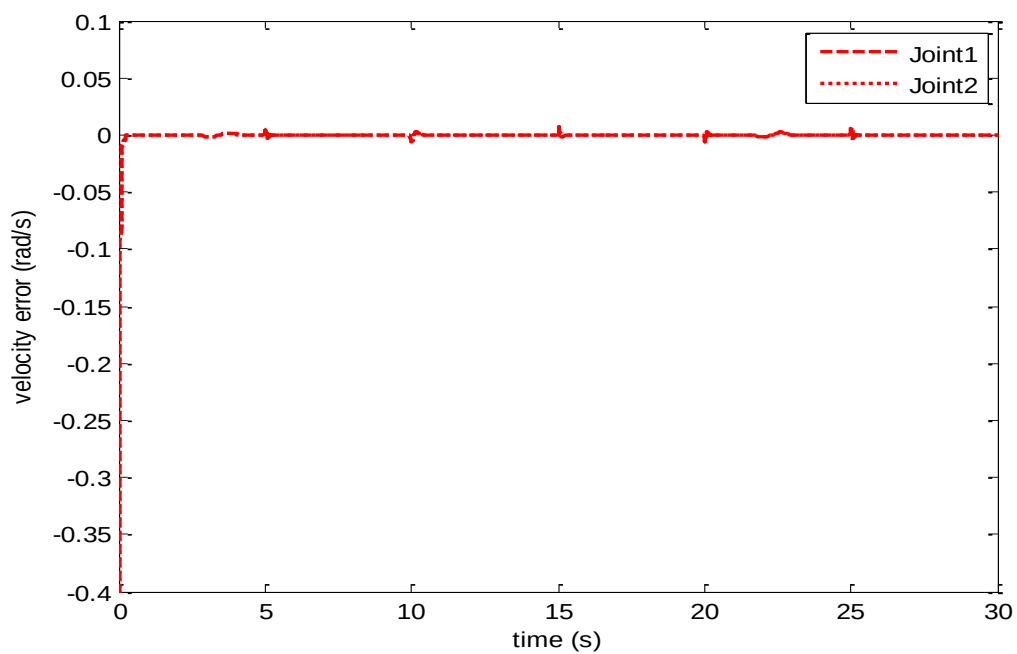
شکل (۵-۱) خطای ردیابی مسیر برای ربات دو رابط را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با وجود عدم قطعیت‌های ساختار یافته^۱ و ساختار نیافته^۲ ربات عملکرد مناسبی داشته و به سرعت به خطای کمتر از 8×10^{-4} رادیان می‌رسد. حداکثر خطای سرعت رابط‌ها نیز ۰/۰۰۵ رادیان بر ثانیه می‌باشد که در شکل (۵-۲) مشخص شده است. شکل (۵-۳) نشان دهنده گشتاور ورودی همین ربات می‌باشد که پیوسته بوده و در محدوده مجاز قرار دارد. شکل (۵-۴) فرآیند تطبیق پارامترها را نشان می‌دهد. به دلیل وجود اغتشاش خارجی همگرایی پارامترها به یک مقدار خاص را نخواهیم داشت.

^۱ · structured uncertainty

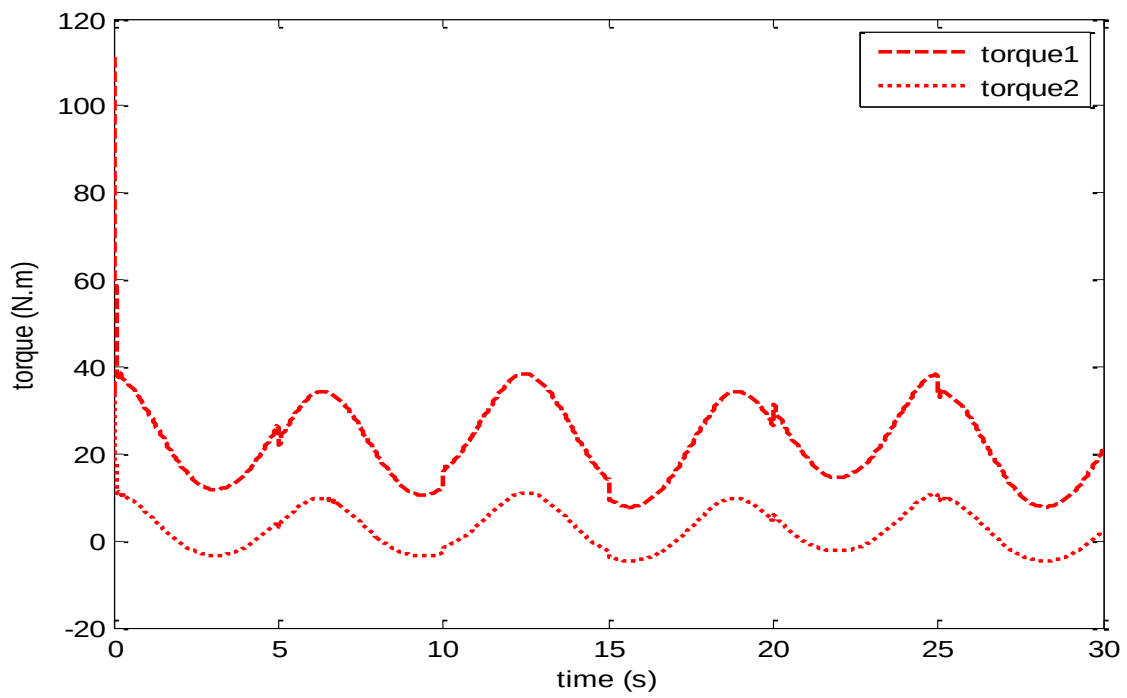
^۲ · unstructured uncertainty



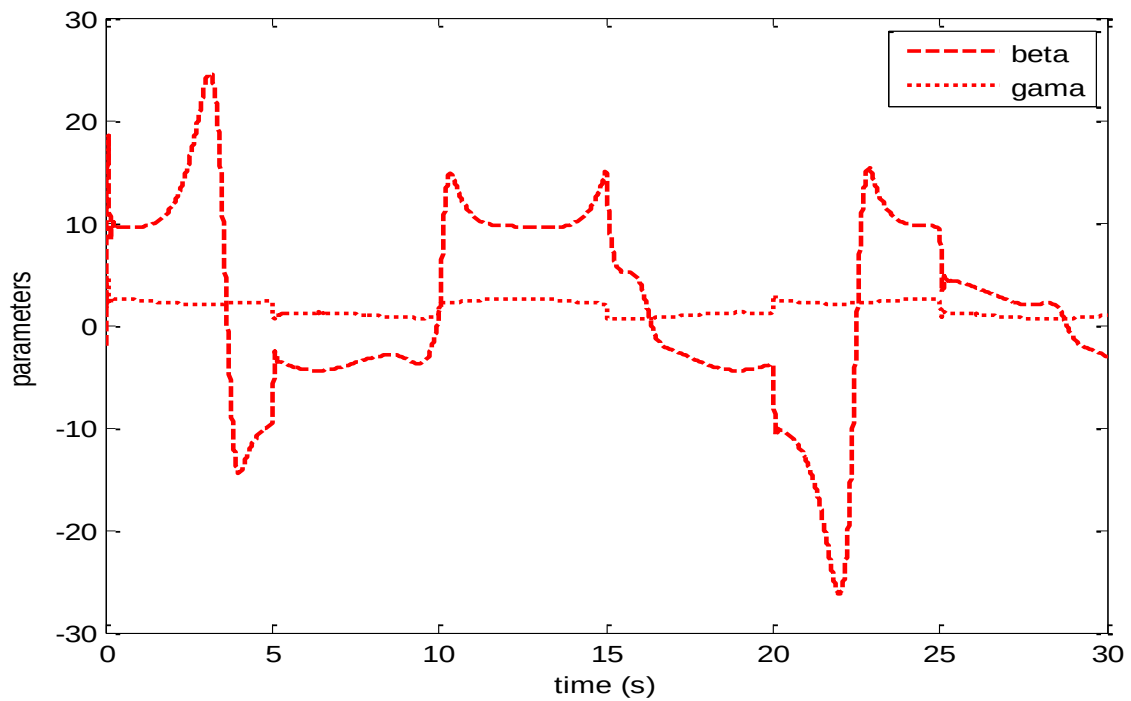
شکل (۵-۱) خطای ردیابی موقعیت ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی



شکل (۵-۲) خطای سرعت ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی

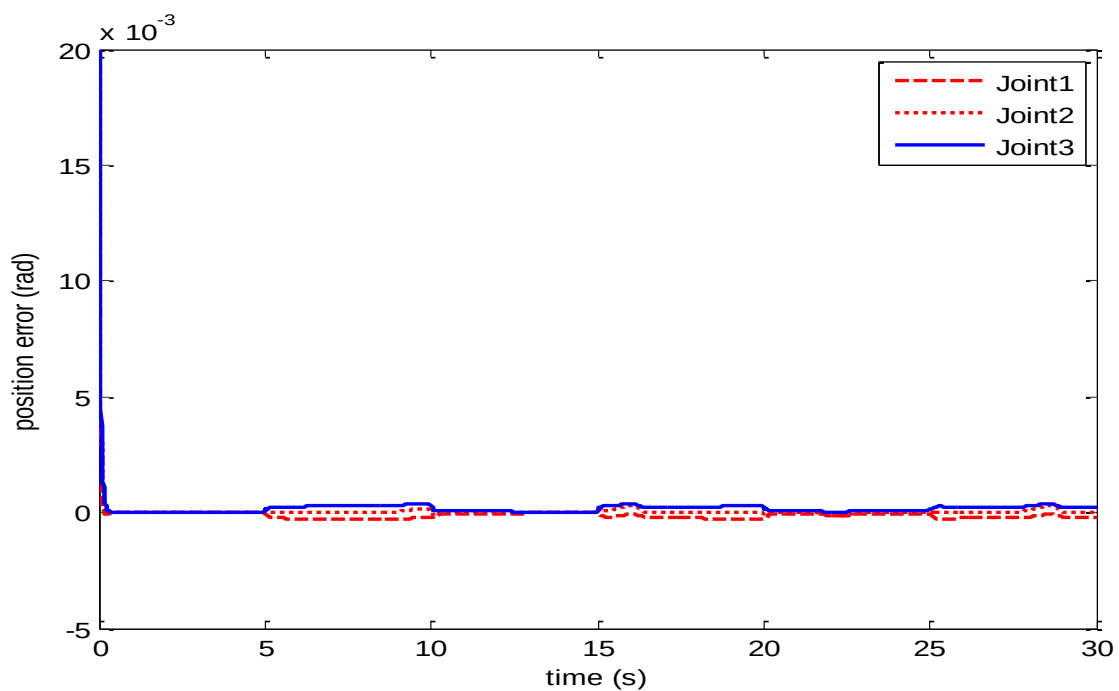


شکل (۳-۵) گشتاور ورودی ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی

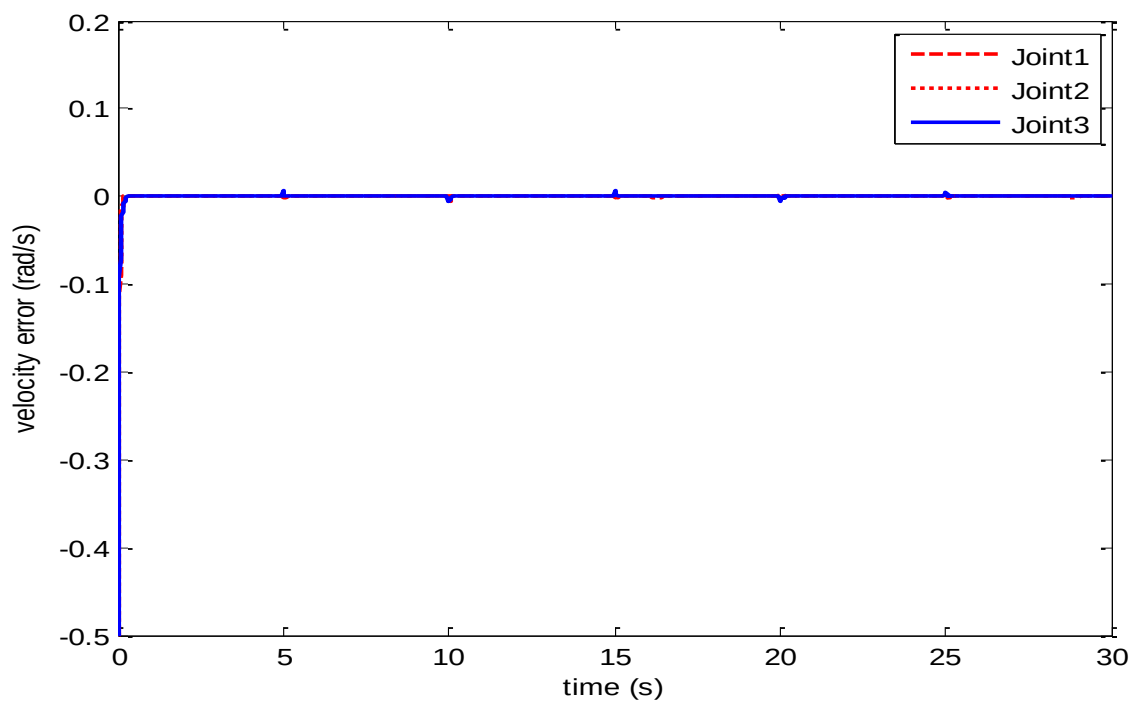


شکل (۴-۵) پارامترهای کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی ربات دو رابط در فرآیند ردگیری

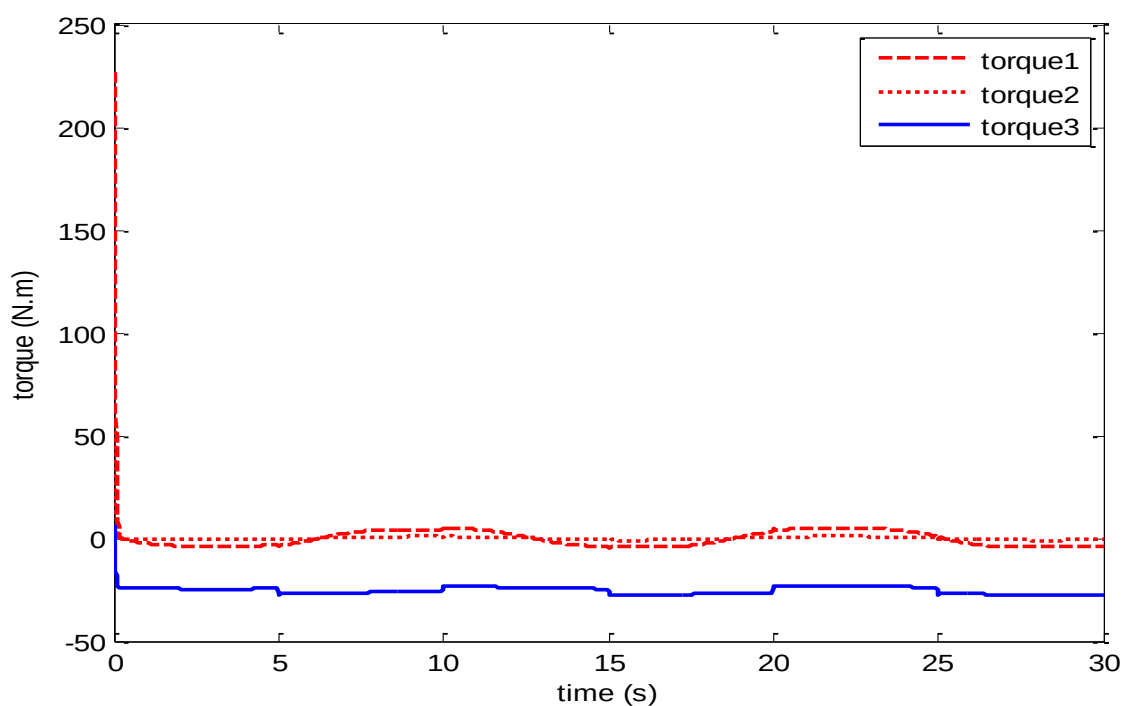
اکنون همین بررسی را برای ردیابی مسیر ربات اسکارا سه رابط انجام خواهیم داد. شکل (۵-۵) خطای ردیابی را نشان می‌دهد که حداکثر 4×10^{-4} رادیان می‌باشد. شکل (۶-۵) خطای سرعت رابط‌ها را نشان می‌دهد که به دلیل خطای اولیه‌ی رابط‌ها در ابتدا کمی بزرگ است سپس به خطای کمتر از 10^{-5} رادیان می‌رسد. در شکل (۷-۵) هم گشتاور ورودی مفاصل مشاهده می‌شود که در محدوده مجاز قرار داشته و لرزشی ندارد. گشتاور ورودی رابط سوم که نسبت به دو رابط دیگر در ادامه‌ی مسیر مقدار بیشتری دارد به دلیل وجود نیروی گرانش می‌باشد.



شکل (۵-۵) خطای ردیابی موقعیت ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی

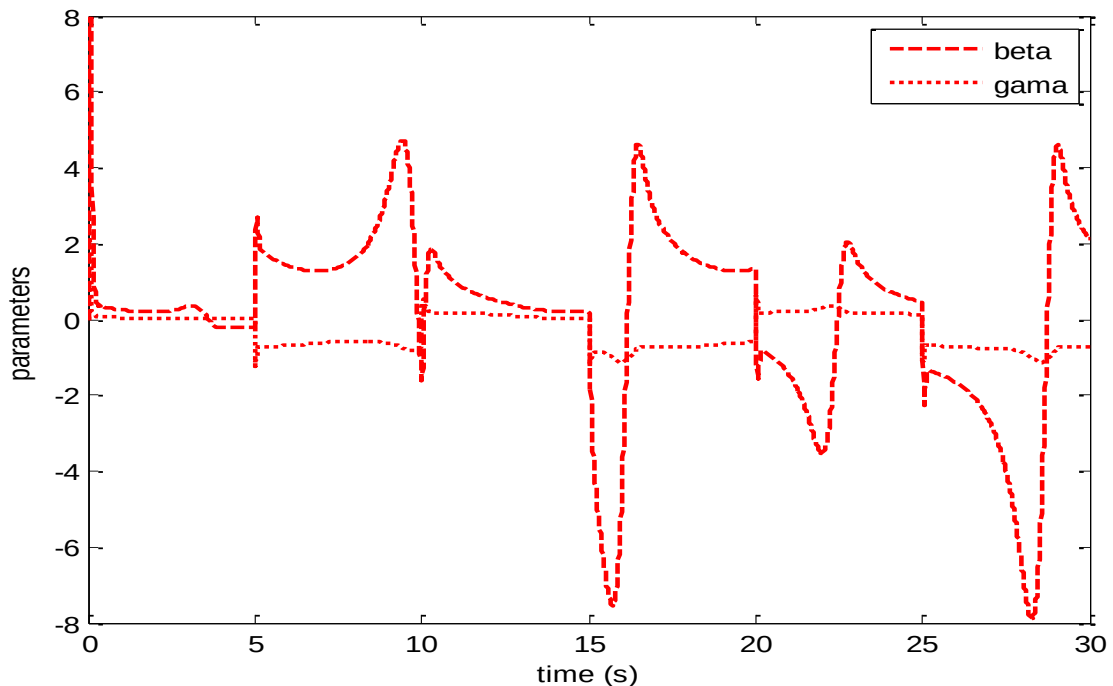


شکل (۵-۶) خطای سرعت ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی



شکل (۵-۷) گشتاور ورودی ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی

پارامترهای کنترل نیز در شکل (۸-۵) آورده شده است. همانطور که گفته شد به دلیل وجود اغتشاش خارجی همگرایی پارامترها به مقدار مشخص را نخواهیم داشت. اما به هدف سیستم کنترل که کاهش خطای ردگیری است رسیده ایم.

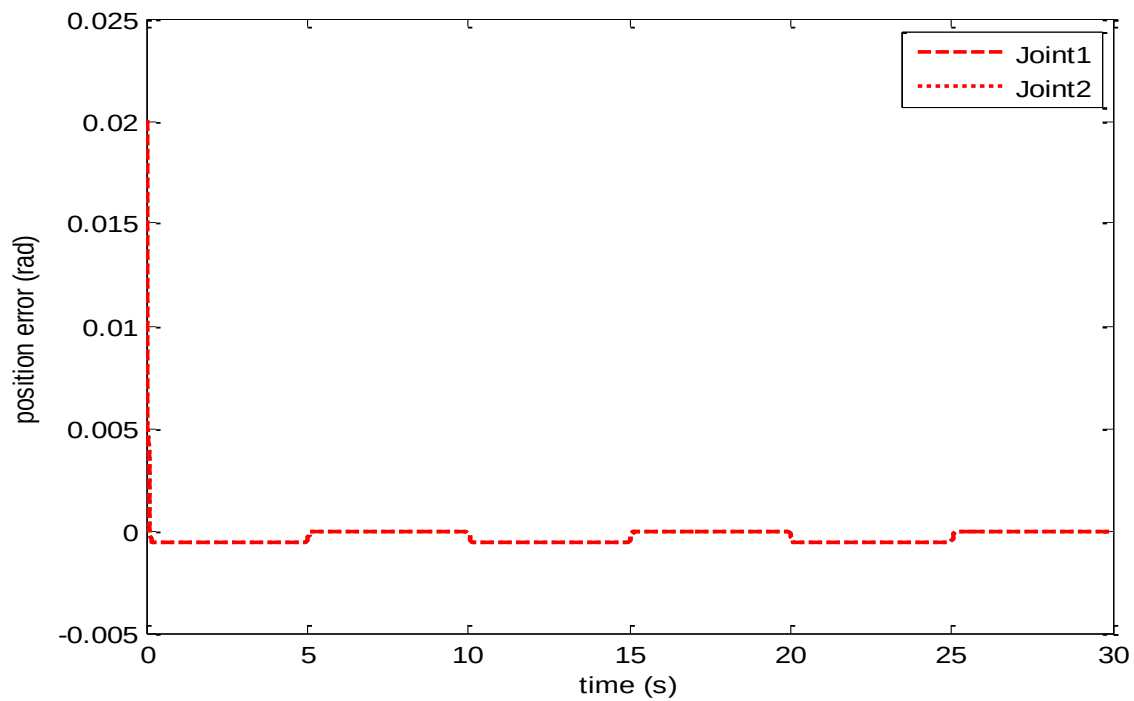


شکل (۸-۵) پارامترهای کنترل تطبیقی مقاوم با روش گرادیان نزولی ربات اسکارا در فرآیند ردگیری

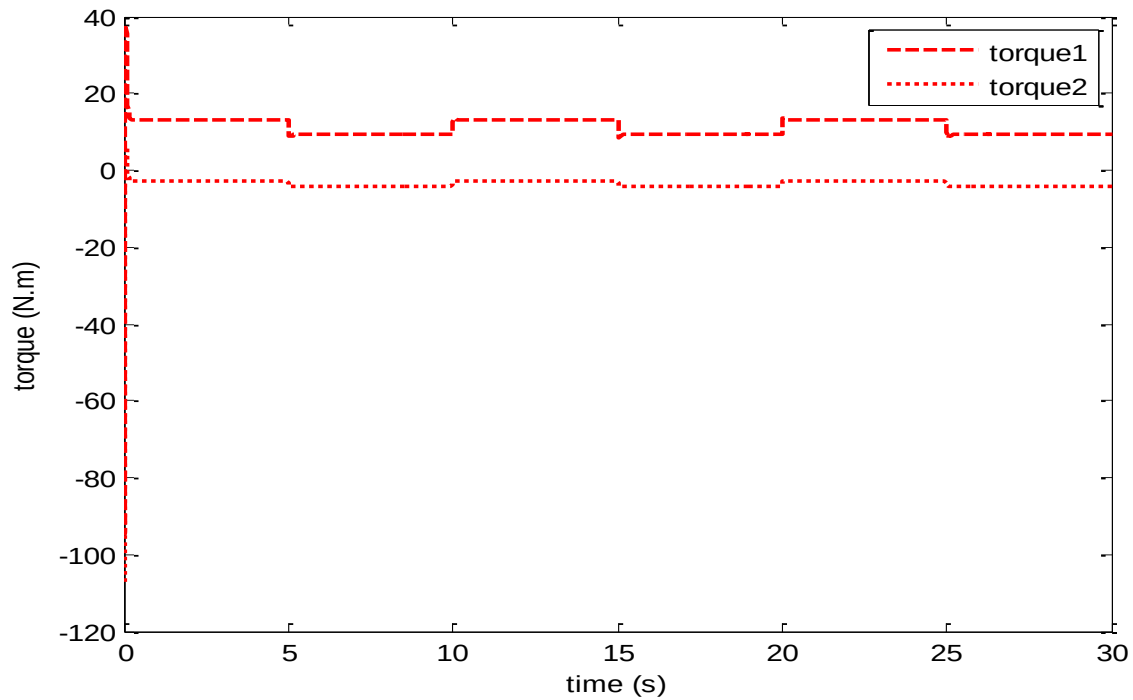
۵-۵-۲ عملکرد تنظیم نقطه ربات

مسیر مطلوب جهت بررسی عملکرد تنظیم نقطه، برای تمام مفاصل بردار واحد تعریف شده و خطای اولیه مفاصل 0.2 رادیان در نظر گرفته شده است.

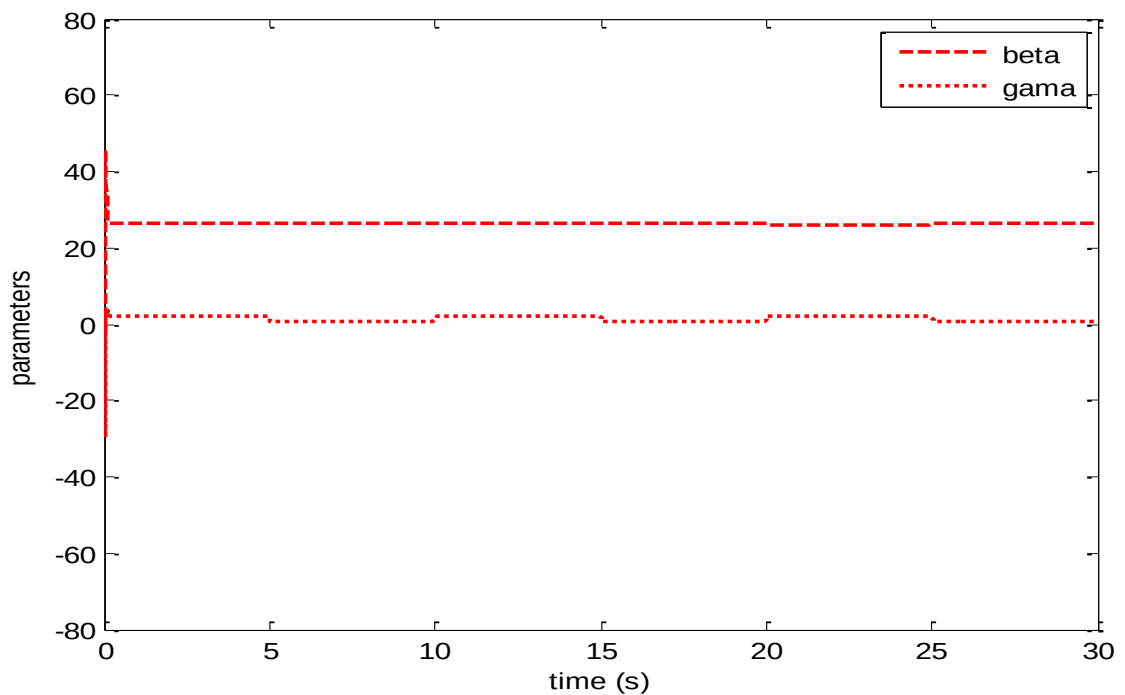
شکل (۹-۵) و (۱۰-۵) به ترتیب عملکرد تنظیم نقطه و گشتاور ورودی مفاصل ربات دو رابط را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود خطای موقعیت کمتر از $5/7 \times 10^{-4}$ رادیان بوده و گشتاور ورودی نیز در محدوده مجاز قرار دارد. شکل (۱۱-۵) نیز فرآیند تطبیق پارامترها را نشان می دهد.



شکل (۵-۹) عملکرد تنظیم نقطه ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی

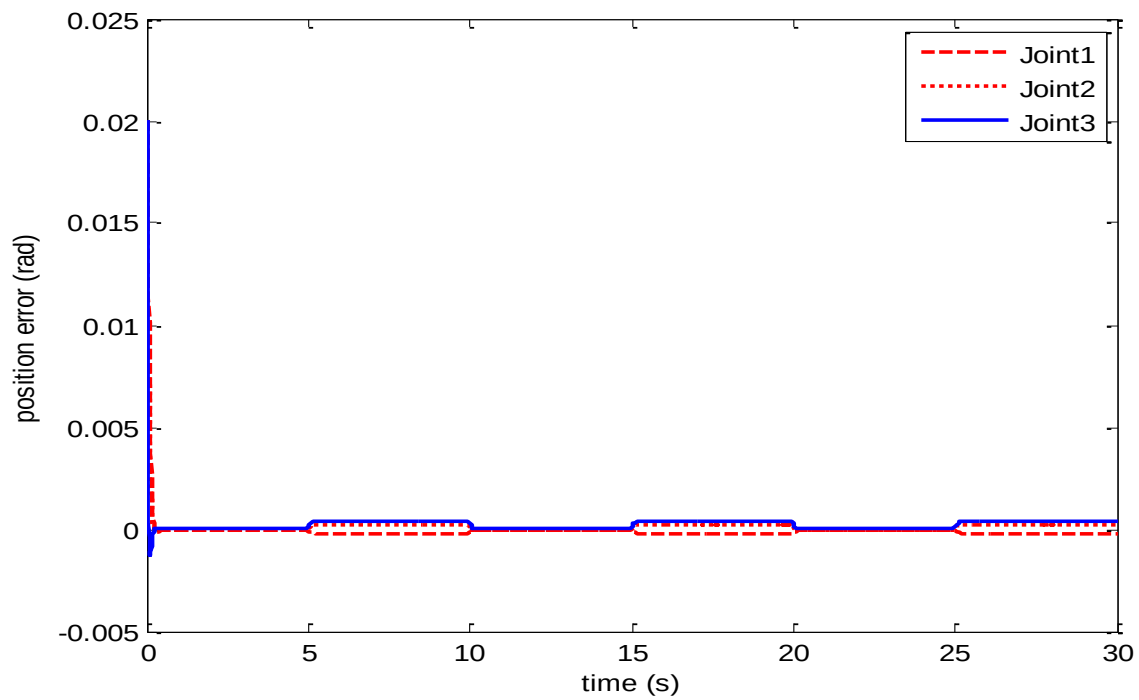


شکل (۵-۱۰) گشتاور ورودی ربات دو رابط با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی

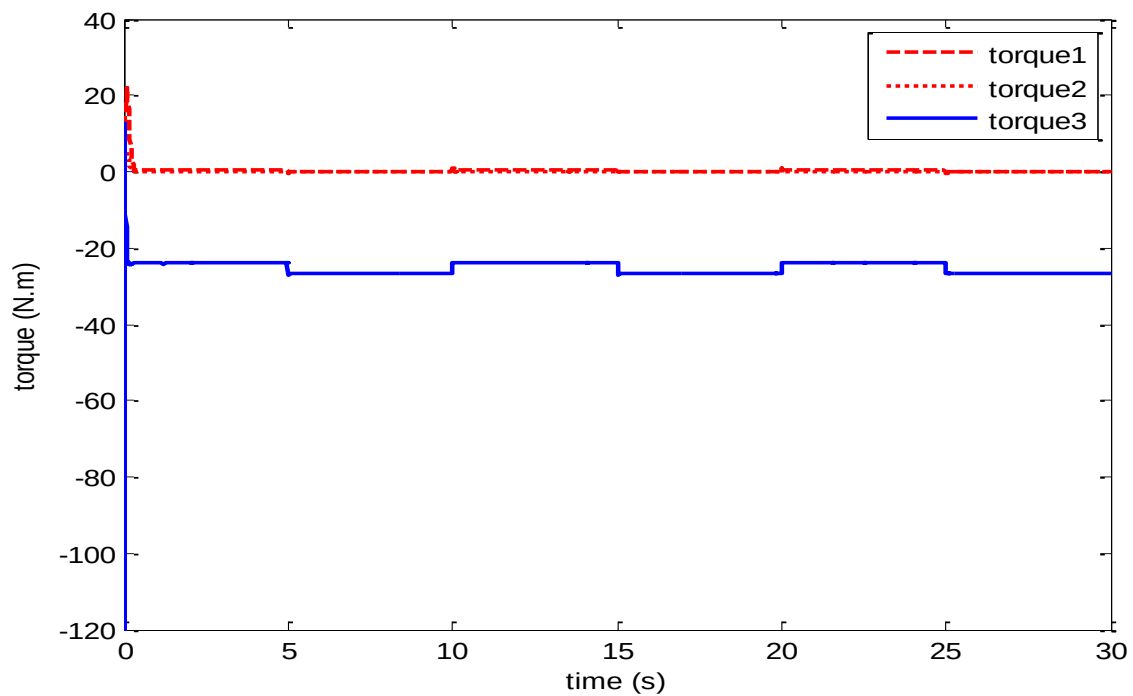


شکل (۵-۱۱) پارامترهای کنترل تطبیقی مقاوم با روش گرادیان نزولی ربات دو رابط در فرآیند تنظیم

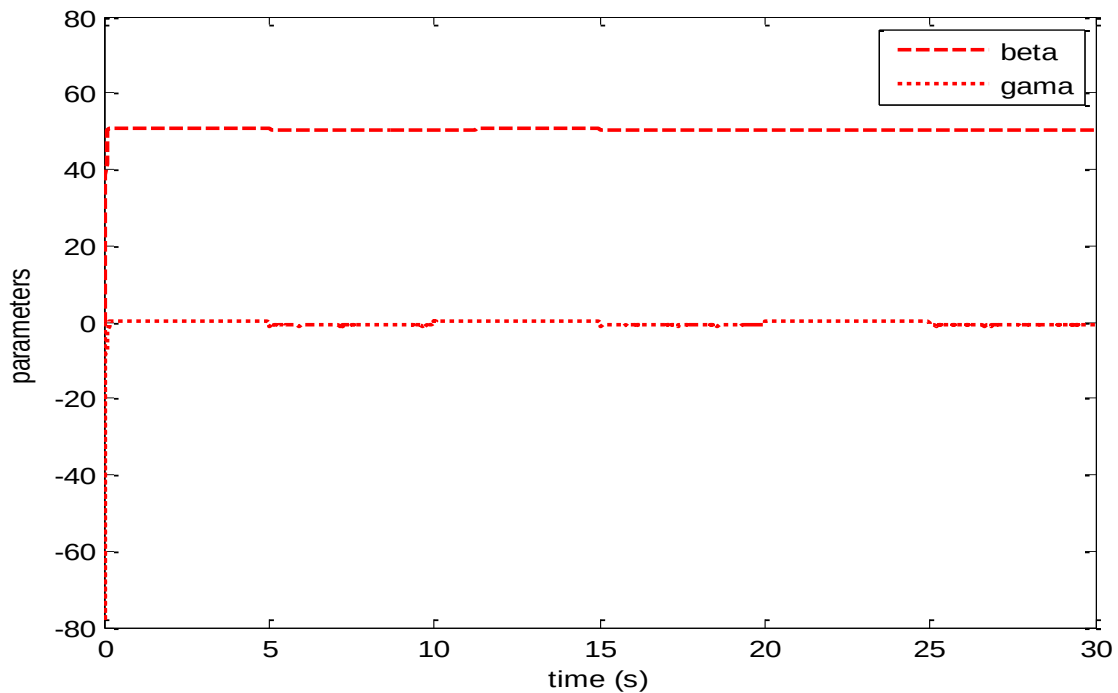
به منظور کامل کردن بحث و نشان دادن صحت کار، عملکرد تنظیم نقطه ربات اسکارا را نیز مورد بررسی قرار خواهیم داد. شکل (۵-۱۲) عملکرد تنظیم نقطه ربات اسکارا را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، حداکثر خطای موقعیت 4×10^{-4} می‌باشد. ورودی کنترل مفاصل نیز در شکل (۵-۱۳) و پارامترهای کنترل نیز در (۵-۱۴) آمده است.



شکل (۵-۱۲) عملکرد تنظیم نقطه ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی



شکل (۵-۱۳) گشتاور ورودی ربات اسکارا با کنترل تطبیقی مقاوم به روش گرادیان نزولی



شکل (۵-۱۴) پارامترهای کنترل تطبیقی مقاوم با روش گرادیان نزولی ربات اسکارا در فرآیند تنظیم

۵-۶ نتیجه گیری

در این پایان نامه یک کنترل کننده تطبیقی مقاوم با استفاده از روش گرادیان نزولی برای بازوی ماهر ربات ارائه گردید. روش پیشنهادی با دو روش کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی مقایسه شد. در فصل سوم یک کنترل کننده تطبیقی مرسوم مورد بررسی قرار گرفت. این کنترل کننده به محاسبه ی معکوس ماتریس اینرسی تخمین زده شده و پسخورد بردار شتاب نیاز ندارد اما برای استفاده از این الگوریتم تطبیقی باید از خاصیت خطی شدن ساختار دینامیکی ربات نسبت به پارامترهای آن استفاده کرد. بنابراین نیازمند تشکیل ماتریس رگرسیون هستیم و چون معادلات دینامیکی ربات پیچیده است تشکیل این ماتریس برای ربات‌هایی با بیش از دو رابط کار دشواری است. از طرف دیگر کنترل کننده تطبیقی در مقابل عدم قطعیت‌های ساختار نیافته مانند اغتشاش خارجی و دینامیک مدل نشده عملکرد مناسبی ندارد. در فصل چهارم یک کنترل کننده ی مقاوم به منظور غلبه بر عدم قطعیت های ساختاری و غیر ساختاری ارائه گردید. کنترل کننده های مقاوم نسبت به عدم قطعیت غیر ساختاری مقاوم هستند ولی باید حدود عدم قطعیت از قبل معلوم باشد. از این رو برای رفع

نواقص طرح های قبل، کنترل تطبیقی مقاوم با روش گرادیان نزولی در فصل پنجم ارائه شد. همگرایی مجانبی طرح پیشنهادی اثبات و کارایی کنترل کننده مذکور با استفاده از شبیه سازی در نرم افزار متلب نشان داده شد. شکل (۵-۵) خطای ردیابی موقعیت روش پیشنهادی برای ربات اسکارا را نشان می دهد که در مقایسه با خطای ردیابی کنترل کننده مقاوم یعنی شکل (۵-۴) عملکرد بهتری دارد. شکل (۵-۱۲) عملکرد تنظیم نقطه روش پیشنهادی را نشان می دهد که در مقایسه با کنترل مقاوم در شکل (۴-۹) خطای کمتری دارد. شکل (۵-۱) خطای ردیابی موقعیت روش پیشنهادی برای ربات دو رابط در حضور اغتشاش خارجی را نشان می دهد که در مقایسه با کنترل کننده ی تطبیقی فصل سوم که اغتشاش خارجی در سیستم اعمال نشده است، شکل (۳-۳)، عملکرد بهتری دارد بعلاوه به دلیل پیچیده بودن ماتریس رگرسیون برای ربات های با بیش از دو رابط، کنترل کننده تطبیقی فصل سه روی ربات اسکارا اعمال نگردید. با توجه به مطالب این فصل، روش تطبیقی پیشنهادی می تواند به هرگونه نامعینی ساختار یافته و ساختار نیافته مانند اغتشاش خارجی و دینامیک مدل نشده غلبه نماید. ویژگی های این طرح عبارتند از:

- عدم نیاز به محاسبه ی ماتریس رگرسیون
- عدم نیاز به محاسبه ی معکوس ماتریس اینرسی تخمین زده شده
- عدم نیاز به اندازه گیری بردار شتاب
- بر خط بودن روش پیشنهادی
- ساده بودن سیستم کنترلی و عاری بودن از هر نوع پیچیدگی

فصل ۶

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری

در این پایان نامه یک کنترل کننده ی تطبیقی مقاوم با روش گرادیان نزولی روی بازوی رباتیک پیاده شده است. در طرح پیشنهادی از روش گرادیان نزولی برای به روز رسانی پارامترهای تطبیق استفاده شده است. کنترل تطبیقی به عنوان روشی مناسب برای کنترل سیستم هایی که دارای عدم قطعیت پارامتری هستند استفاده می شود، اما ضعف آن در مقابله با دینامیک مدل نشده و اغتشاش خارجی است. در این پایان نامه طرح نوینی از کنترل تطبیقی مقاوم با روش گرادیان نزولی برای بازوی ربات ماهر ارائه گردید که توانست در حضور هر دو نوع نامعینی ساختار یافته و ساختار نیافته عملکرد مناسبی داشته باشد. روش های تطبیقی مرسوم که در گذشته برای کنترل ربات بکار گرفته می شدند، اغلب از خاصیت خطی شدن ربات نسبت به پارامتر بهره می گرفتند و در نتیجه نیازمند وجود ماتریس رگرسیون بودند. به دلایلی که در فصل آخر به آن اشاره شد روش های تطبیقی بر اساس رگرسیون به ربات های ساده محدود می شدند. اما در طرح تطبیقی پیشنهادی در این پایان نامه نیازی به محاسبه این ماتریس نیست در نتیجه برای ربات های پیچیده نیز، به راحتی قابل استفاده است. علاوه

بر این روند طراحی کنترل کننده ساده بوده و به دلیل بر خط بودن، اجرای روش پیشنهادی در عمل آسان تر است. نتایج شبیه سازی کارایی کنترل کننده را تایید می کند.

۶-۲ پیشنهادات

در این پایان نامه از راهبرد کنترل بر مبنای گشتاور استفاده شده است در ادامه ی این تحقیق پیشنهاد می شود از روش کنترل ولتاژ که باعث سادگی، دقت و سرعت در محاسبات می شود استفاده گردد. در این تحقیق فرض شده که ربات صلب بوده و از اثر انعطاف در مفاصل صرف نظر کردیم در ادامه می توان طرح پیشنهادی را برای ربات های انعطاف پذیر نیز استفاده کرد. با توجه به اینکه طرح پیشنهادی بسیار کاربردی و جامع است حتی می توان آن را برای سیستم هایی که خاصیت خطی شدن نسبت به پارامتر را ندارند نیز به کار برد.

- [1] A. Chaillet, A. Loria, R. Kelly, "Robustness of PID-controlled manipulators with respect to external disturbances," in Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, 2006, pp. 2949–2954.
- [2] A. De Luca, B. Siciliano, L. Zollo, "PD control with on-line gravity compensation for robots with elastic joints: Theory and experiments," *Automatica*, vol. 41, no. 10, pp. 1809–1819, Oct. 2005.
- [3] Z. Li, P. Ring, K. Macrae, A. Hinsch, Applied nonlinear control, in Proceedings of the 36th CDC, 1991.
- [4] J. Y. S. Luh, "Conventional controller design for industrial robots — A tutorial," *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. SMC-13, no. 3, pp. 298–316, May 1983.
- [5] E. Freund, "Fast nonlinear control with arbitrary pole-placement for industrial robots and manipulators," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 65–78, Mar. 1982.
- [6] S. Kawamura, F. Miyazaki, S. Arimoto, "Is a local linear PD feedback control law effective for trajectory tracking of robot motion," in Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1335–1340.
- [7] X. Wang, L. K. Chen, "Proving the uniform boundedness of some commonly used control schemes for robots," in Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation, pp. 1491–1496.
- [8] M. W. Spong, M. Vidyasagar, Robot dynamics and control, John Wiley and Sons, Inc, New York, U.S.A, 1989.
- [9] M. M. Fateh, S. Khorashadizadeh, "Optimal robust voltage control of electrically driven robot manipulators," *Nonlinear Dyn.*, vol. 70, pp. 1445–1458, 2012.
- [10] M. Soltanpour, M. M. Fateh, "Adaptive robust tracking control of robot manipulators in the task-space under uncertainties," *Aust. J. Basic Appl*, vol. 3, no. 1, pp. 308–322, 2009
- [11] C. F. Baicu, C. D. Rahn, D. M. Dawson, "Backstepping boundary control of flexible-link electrically driven gantry robots," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 3, no. 1, pp. 60–66, Mar. 1998.
- [12] J. S. Lee, "An iterative learning control of robot manipulators," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 7, no. 6, pp. 835–842, 1991.

- [13] D. Wang, "A simple iterative learning controller for manipulators with flexible joints," *Automatica*, vol. 31, no. 9, pp. 1341–1344, Sep. 1995.
- [14] L. X. Wang, "A course in fuzzy systems and control," p. 424, 1997.
- [15] C. M. Lim, T. Hiyama, "Application of fuzzy logic control to a manipulator," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 7, no. 5, pp. 688–691, 1991.
- [16] J. P. Hwang, E. Kim, "Robust tracking control of an electrically driven robot: adaptive fuzzy logic approach," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 232–247, Apr. 2006.
- [17] K. S. Narendra, K. Parthasarathy, "Identification and control of dynamical systems using neural networks," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 1, no. 1, pp. 4–27, Jan. 1990.
- [18] R. J. Wai, P. C. Chen, "Robust neural-fuzzy-network control for robot manipulator including actuator dynamics," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1328–1349, Jun. 2006.
- [19] M. J. Lee, Y. K. Choi, "An adaptive neurocontroller using RBFN for robot manipulators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 3, pp. 711–717, Jun. 2004.
- [20] E. Malis, F. Chaumette, "Theoretical improvements in the stability analysis of a new class of model-free visual servoing methods," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 18, no. 2, pp. 176–186, 2002.
- [21] A. Izadbakhsh, M. M. Fateh, "A model-free robust control approach for robot manipulator," *Int. J. Mech. Syst. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 1, 2008.
- [22] M. M. Fateh, "Robust control of electrical manipulators by reducing the effects of uncertainties," vol. 7, pp. 161–167, 2009.
- [23] Z. Shiller, "Time-energy optimal control of articulated systems with geometric path constraints," in *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2680–2685.
- [24] C. Liu, C. C. Cheah, J. J. E. Slotine, "Adaptive jacobian tracking control of rigid-link electrically driven robots based on visual task-space information," *Automatica*, vol. 42, no. 9, pp. 1491–1501, Sep. 2006.
- [25] S. Dubowsky, D. T. Desforges, "The application of model-referenced adaptive control to robotic manipulators," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 101, no. 3, pp. 193–200, 1979.

- [26] B. K. Kim, K. G. Shin, "An adaptive model following control of industrial manipulators, " IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-19, no. 6, pp. 805-814, 1983.
- [27] M. Takegaki, S. Arimoto, "An adaptive trajectory control of manipulators," International Journal of Control, vol. 34, no. 2, pp. 219-230, 1981.
- [28] J. Craig, P. Hsu, S. S. Sastry, "Adaptive control of mechanical manipulators," International journal of robotics research, vol. 6, no. 2, pp. 16-28, 1987.
- [29] J. A. Koivo, T. H. Guo, " Adaptive linear controller for robotic manipulators," IEEE Trans on Automatic control, Vol. 28, no. 2, pp. 162-171, 1983.
- [30] M. H. Liu, W. Lin, " Pole assignment self-tuning controller for robotic manipulators," International Journal of Control, vol. 46, no. 4, pp. 1307-1317, 1987.
- [31] M. H. Liu, W. Lin, "Multivariable self-tuning control with decoupling for robot manipulators," IEE proceedings D control theory and applications, vol. 135, no. 1, pp. 43-48, 1988.
- [32] L. Guo, J. Angeles, " Controller estimation for the adaptive controller of robotic manipulators," IEEE Trans on Automatic control, vol. 5, no. 3, pp. 315-323, 1989.
- [33] C. S. G. Lee, M. Chung, " An adaptive control strategy for mechanical manipulators," IEEE Trans on Automatic control, vol. 29, no. 9, pp. 837-840, 1984.
- [34] C. S. G. Lee, M. Chung, B. H. Lee, " Adaptive control for robot manipulators in joint and cartesian coordinates," 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings, vol. 1, pp. 530-539, 1984.
- [35] Y. K. Choi, M. J. Chung, Z. Bien, " An adaptive control scheme for robot manipulators," International Journal of Control, vol. 44, no. 4, pp. 1185-1191, 1986.
- [36] A. A. Goldenberg, J. A. Apkarian, H. W. Smith, " An approach to adaptive control of robot manipulators using the computed torque technique," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 111, no. 1, pp. 1-8, 1989.
- [37] R. Horowitz, M. Tomizuka, " An adaptive controller scheme for mechanical manipulators-compensation nonlinearity and decoupling control," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 108, no. 2, pp. 127-135, 1986.
- [38] M. Tomizuka, R. Horowitz, G. Anwar, Y. L. Jia, " Implementation of adaptive technique for motion control of robotic manipulators," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 110, no. 1, pp. 62-69, 1988.

- [39] P. J. Tewari, K. A. Kapoor, " An adaptive model following control for robotic manipulators," Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology 2000, vol. 2, pp. 55-57, 2000.
- [40] N. S. Singh, "Adaptive model following control of nonlinear robotic systems," IEEE Trans on Automatic control, vol. 30, no. 11, pp. 1099-1100, 1985.
- [41] S. Nicosia, P. Tomei, " Model reference adaptive control algorithm for industrial robot," Automatica, vol. 20, no. 5, pp. 635-644, 1984.
- [42] Y. K. Lim, M. Eslami, " Robust adaptive controller designs for robot manipulator systems," IEEE Trans on Automatic control, Vol. 3, no. 1, pp. 54-66, 1987.
- [43] H. Seraji, " A new approach to adaptive control of manipulators," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 109, no. 3, pp. 193-202, 1987.
- [44] J. Craig, S. Sastry, "adaptive control of mechanical manipulators," in Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1986, vol. 3, pp. 190–195.
- [45] C. Rohrs, L. Valavani, M. Athans, G. Stein, "Robustness of continuous-time adaptive control algorithms in the presence of unmodeled dynamics," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 30, no. 9, pp. 881–889, Sep. 1985.
- [46] C. Abdallah, D. M. Dawson, P. Dorato, M. Jamshidi, "Survey of robust control for rigid robots," IEEE Control Syst., vol. 11, no. 2, pp. 24–30, Feb. 1991.
- [47] L. Cai, G. Songag, "Joint stick-slip friction compensation of robot manipulators by using smooth robust controllers," J. Robot. Syst., vol. 11, no. 6, pp. 451–470, 1994.
- [48] J. J. Slotine, S. S. Sastry, "Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators," Int. J. Control, vol. 38, no. 2, pp. 465-492, Mar. 1983.
- [49] K. K. D. Young, "Controller design for a manipulator using theory of variable structure systems," IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., vol. 8, no. 2, pp. 101–109, Feb. 1978.
- [50] F. J. Chang, S. H. Twu, S. Chang, "Adaptive chattering alleviation of variable structure systems control," Control Theory Appl. IEE Proc. D, vol. 137, no. 1, pp. 31–39, Jan. 1990.
- [51] J. J. E. Slotine, W. Li, "On the adaptive control of robot manipulators," Int. J. Rob. Res., vol. 6, no. 3, pp. 49–59, Sep. 1987.

- [52] D. M. Dawson, Z. Qu, F. L. Lewis, "hybrid adaptive-robust control for a robot manipulator," *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, vol. 6, no. 6, pp. 537–545, Nov. 1992.
- [53] C. Liu, C. C. Cheah, J. J. E. Slotine, "Adaptive jacobian tracking control of rigid-link electrically driven robots based on visual task-space information," *Automatica*, vol. 42, no. 9, pp. 1491–1501, Sep. 2006.
- [53] M. M. Fateh, "On the voltage-based control of robot manipulators," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 6, no. 5, pp. 702–712, 2008.
- [54] T. P. Leung, Q. J. Zhou, C. Y. Su, "An adaptive variable structure model following control design for robot manipulators," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 36, no. 3, pp. 347–353, Mar. 1991.
- [55] D. S. Yoo, M. J. Chung, "A variable structure control with simple adaptation laws for upper bounds on the norm of the uncertainties," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 37, no. 6, pp. 860–865, Jun. 1992.
- [56] P. A. Ioannou, A. Datta, "Robust adaptive control: a unified approach," *Proc. IEEE*, vol. 79, no. 12, pp. 1736–1768, 1991.
- [57] H. Elmali, N. Olgac, "Theory and implementation of sliding mode control with perturbation estimation (SMCPE)," in *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1992, pp. 2114–2119.
- [58] J. J. Lee, J. H. Lee, J. S. Ko, M. J. Youn, "Design of efficient sliding mode controller for robot manipulator using disturbance observer," in *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2120–2125.
- [59] J. J. E. Slotine, W. Li, *Applied nonlinear control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A, 1991.
- [60] S. Arimoto, S. Kawamura, F. Miyazaki, S. Tamaki, "Learning control theory for dynamical systems," 1985 24th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1375–1380, 1985.
- [61] D. Koditschek, "Natural motion for robot arms," 1984 23th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 733–735, 1984.
- [62] H. Asada, J. J. E. Slotine, *Robot analysis and control*, John Wiley and Sons, Inc, New York, U.S.A, 1986.
- [63] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*, John Wiley and Sons, Inc, New York, U.S.A, 2006.

- [64] P. Tomei, "A simple PD controller for robot with elastic joints," IEEE Trans. on Automatic control, vol. 36, no. 10, pp. 1208-1213, 1991.
- [65] W. Dixon, A. Behal, B. Xian, D. M. Dawson, Lyapunov-based control of robotic systems, CRC Press, Inc, Boca Raton, FL, U.S.A, 2007.
- [66] D. M. Dawson, J. Hu, T. C. Burg, Nonlinear control of electric machinery, Marcel Dekker, Inc, New York, U.S.A, 1998.
- [67] D. Cai, Y. Dai, "A globally convergent robust controller for robot manipulator," Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on control applications, pp. 328–332.
- [68] E. S. Shin, K. W. Lee, "Robust output feedback control of robot manipulators using high-gain observer," Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on control applications, pp. 881–886.
- [69] R. Ortega, M. W. Spong, "Adaptive motion control of rigid robots," Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control, vol. 2, pp. 1575-1584, 1988.
- [70] D. Sun, J. K. Mills, "Performance improvement of industrial robot trajectory tracking using adaptive-learning scheme," ASME journal of dynamic measurement and control, vol. 121, no. 2, pp. 285–292, 1999.
- [71] N. Sadegh, R. Horowitz, "Stability and robustness analysis of a class of adaptive controller for robotic manipulator," International journal of robotics research, vol. 9, no. 3, pp. 74–92, 1990.
- [72] P. R. Pagilla, M. Tomizuka, "An adaptive output feedback controller for robot arms: stability and experiments," Automatica, vol. 37, no. 7, pp. 983–995, 2001.
- [73] H. Kawasaki, T. Bito, K. Kanzaki, "An efficient algorithm for the model based adaptive control of robotic manipulators," IEEE Trans. on Robotics and Automation., vol. 12, no. 3, pp. 496–501, 1996.
- [74] J. H. Yang, "Adaptive tracking control for manipulators with only position feedback," 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 3, pp. 1740-1745.
- [75] S. Boyd, L. Vandenberghe, Convex optimization, Cambridge University Press, New York, U.S.A, 2004.
- [76] M. M. Fateh, R. Babaghasabha, "Impedance control of robot using voltage control strategy," Nonlinear Dynamics, vol. 74, no. 1-2, pp. 277–286, 2013.

Abstract:

In this thesis, a novel robust adaptive controller using gradient descent method for robotic manipulators is presented. The proposed method has been compared with an adaptive and robust controller. Robust controllers have a good performance against unstructured uncertainty but some bounds of uncertainty must be specified previously. On the other side, adaptive controller doesn't have a good performance in presence of unstructured uncertainties but it is robust to structured uncertainty. In adaptive control scheme we need to calculate regressor matrix. According to nonlinear dynamical equation of the robot, calculation of this matrix is difficult for a robot with more than two links. The proposed controller is able to overcome the structured and unstructured uncertainties like external disturbances and unmodeled dynamics. The proposed design does not need to inversion of the inertia matrix, the measurement of joint acceleration, and calculation of a regressor matrix. In addition, the controller design process is simple and does not need complex computation. The stability of control system is proven and demonstrated that all signals in the closed-loop robot system are bounded. Performance of proposed control scheme has been compared with an adaptive and robust controller by computer simulations of a scara robot manipulator. Results show advantage of proposed method.

keywords: robust adaptive controller, gradient descent, uncertainty, regressor, scara robot



University of Shahrood

Department of Electrical and Robotic Engineering

**Designing a robust adaptive controller of robotic
manipulators using gradient descent method**

Majid Moghtadaei

Supervisor:

Prof. Mohammad Mehdi Fateh

September 2015