

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

کنترل ربات با مفصل انعطاف پذیر از طریق جبران سازی اثر انعطاف

سیده ساره احمدی

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی فاتح

بهمن ۱۳۹۴

تقدیریم به به یاد مهربانم، آن فرشته ای که از خواسته هایم گذشت، سختی ها را به جهان
خرید و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کرد تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام
برسم.

مشکر و قدردانی

پاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی ما را بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به هم نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزمان ساخت.

از استاد گرامی، جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح کمال مشکر و قدردانی را دارم که زحمت مشاوره این رساله را بر عهده داشتند و از تمام اساتیدی که در دوران تحصیلم به نحوی افتخار شاگردی در محضرشان را دارم کمال مشکر را دارم، باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را پاس گوید.

تعهد نامه

- اینجانب سیده ساره احمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق-کنترل دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل ربات با مفصل انعطاف پذیر از طریق جبران سازی اثر انعطاف تحت راهنمایی دکتر محمد مهدی 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
 - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
 - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .
- تاریخ:
- امضای دانشجو:

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در این پایانامه روش نوینی برای کنترل بازوی ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر ارائه می‌گردد. در این روش با جبران اثر انعطاف، ربات مانند ربات صلب شده و روش‌های کنترل ربات صلب بر روی ربات انعطاف‌پذیر اعمال می‌شود. از سیستم فازی تطبیقی برای جبران سازی اثر انعطاف استفاده می‌شود. روش خطی سازی فیدبکی برای ربات صلب و همچنین فازی تطبیقی مستقیم بر مبنای مدل صلب با راهبرد گشتاور بر روی ربات انعطاف‌پذیر طراحی و شبیه سازی می‌شود. در ادامه راهبرد کنترل ولتاژ معرفی می‌گردد و خطی‌سازی فیدبکی بر مبنای این راهبرد شرح داده می‌شود. سپس به طراحی سیستم فازی تطبیقی برای جبران اثر انعطاف می‌پردازیم و قانون کنترل خطی سازی فیدبکی بر مبنای مدل صلب به ربات انعطاف‌پذیر اعمال می‌شود و عملکرد آنها توسط شبیه سازی ارزیابی می‌گردد. در انتها به طراحی تقریب‌گر فازی تطبیقی برای بهبود عملکرد آن در برابر عدم قطعیت‌ها در راهبرد ولتاژ می‌پردازیم. در همه این روش‌ها با تحلیل ریاضی اثبات می‌شود که روش‌های پیشنهادی پایداری را تضمین می‌نماید. روش کنترل بر مبنای راهبرد ولتاژ نسبت به روش گشتاور دارای ساختار ساده‌تر و در نتیجه اجرای آن آسانتر است.

کلمات کلیدی: ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر، سیستم فازی تطبیقی، راهبرد گشتاور، راهبرد کنترل ولتاژ

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ مروری بر تحقیقات پیشین.....	۳
۳-۱ اهداف و اهمیت تحقیق.....	۸
۴-۱ مروری بر ساختار پایان نامه.....	۹
فصل دوم: مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات با مفاصل انعطاف پذیر.....	۱۱
۱-۲ مقدمه.....	۱۲
۲-۲ معادلات سینماتیکی ربات.....	۱۳
۳-۲ ژاکوبین بازوی ماهر ربات.....	۱۴
۱-۳-۲ سرعت زاویه‌ای.....	۱۵
۲-۳-۲ سرعت خطی.....	۱۶
۴-۲ معادلات دینامیکی ربات.....	۱۹
۱-۴-۲ انرژی پتانسیل.....	۱۹
۲-۴-۲ انرژی جنبشی.....	۱۹
۵-۲ مدل سازی دینامیکی.....	۲۲
۱-۵-۲ مدل سازی دینامیکی ربات هنرمند.....	۲۲
۶-۲ معادلات ربات با حضور محرکه ها.....	۲۷
۱-۶-۲ معادلات حالت ربات در حضور محرکه ها.....	۲۹
فصل سوم: کنترل ربات با مفاصل انعطاف پذیر با راهبرد کنترل گشتاور.....	۳۱
۱-۳ ربات هایی با مفاصل انعطاف پذیر و کنترل آنها.....	۳۲
۲-۳ طراحی کنترل کننده.....	۳۴
۳-۳ آنالیز پایداری.....	۴۱
۴-۳ شبیه سازی روش کنترل.....	۴۲
۱-۴-۳ کنترل ردگیری.....	۴۲
۲-۴-۳ تنظیم.....	۴۵

فصل چهارم: کنترل فازی تطبیقی مستقیم ربات با مفاصل انعطاف پذیر با راهبرد کنترل گشتاور.....	۴۷
۱-۴ مقدمه.....	۴۸
۲-۴ طراحی کنترل کننده.....	۴۸
۳-۴ شبیه سازی.....	۵۲
۱-۳-۴ کنترل ردگیری.....	۵۳
۲-۳-۴ تنظیم.....	۵۵
فصل پنجم: کنترل ربات با مفاصل انعطاف پذیر با راهبرد کنترل ولتاژ.....	۵۷
۱-۵ راهبرد ولتاژ.....	۵۸
۲-۵ طراحی کنترل کننده.....	۶۰
۳-۵ آنالیز پایداری.....	۶۶
۴-۵ شبیه سازی روش کنترل فازی تطبیقی.....	۶۹
۱-۴-۵ کنترل ردگیری.....	۷۰
۲-۴-۵ تنظیم.....	۷۲
فصل ششم: طراحی کنترل کننده با در نظر گرفتن عدم قطعیت با راهبرد کنترل ولتاژ.....	۷۵
۱-۶ مقدمه.....	۷۶
۲-۶ طراحی کنترل کننده.....	۷۶
۳-۶ آنالیز پایداری.....	۸۳
۴-۶ شبیه سازی.....	۸۳
۱-۴-۶ کنترل ردگیری.....	۸۴
۲-۴-۶ تنظیم.....	۸۷
فصل هفتم: کنترل غیر خطی ربات با مفاصل انعطاف پذیر.....	۸۹
۱-۷ کنترل غیرخطی.....	۹۰
۲-۷ شبیه سازی سیستم کنترل.....	۹۱
۱-۲-۷ کنترل ردگیری.....	۹۱
۲-۲-۷ تنظیم.....	۹۲
۳-۷ ارزیابی عملکرد روش ها.....	۹۳
فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۹۵

۹۶.....	۱-۸ نتیجه گیری ها.....
۹۶.....	۲-۸ پیشنهادات.....
۹۷.....	مراجع.....

فهرست تصاویر

۲۳.....	شکل (۱-۲) دیاگرام مفصلی ربات هنرمند با ۳ درجه آزادی.....
۲۸.....	شکل (۲-۲) مکانیزم مفصل انعطاف پذیر.....
۳۴.....	شکل (۱-۳) سیستم کنترل ربات انعطاف پذیر.....
۳۸.....	شکل (۲-۳) توابع تعلق ورودی فازی.....
۴۲.....	شکل (۳-۳) بلوک دیاگرام سیستم کنترل.....
۴۳.....	شکل (۴-۳) مسیر مطلوب برای ردگیری ربات.....
۴۴.....	شکل (۵-۳) خطای ردگیری مفاصل انعطاف پذیر.....
۴۴.....	شکل (۶-۳) سیگنال های کنترل.....
۴۵.....	شکل (۷-۳) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق.....
۴۶.....	شکل (۸-۳) خطای تنظیم مفاصل.....
۴۶.....	شکل (۹-۳) سیگنال های کنترل.....
۴۶.....	شکل (۱۰-۳) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق.....
۵۳.....	شکل (۱-۴) خطای ردگیری مفاصل.....
۵۴.....	شکل (۲-۴) سیگنال های کنترل.....
۵۴.....	شکل (۳-۴) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق.....
۵۴.....	شکل (۵-۴) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق جبران ساز اثر انعطاف.....
۵۵.....	شکل (۶-۴) خطای تنظیم مفاصل.....
۵۵.....	شکل (۷-۴) سیگنال های کنترل.....
۵۶.....	شکل (۸-۴) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق.....
۵۶.....	شکل (۹-۴) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق جبران ساز اثر انعطاف.....
۵۸.....	شکل (۱-۵) دیاگرام کنترل ولتاژ ربات.....
۵۹.....	شکل (۲-۵) دیاگرام موتور مغناطیسی دائم.....
۵۹.....	شکل (۳-۵) سیستم کنترل موتور.....

۵۹	شکل (۴-۵) سیستم کنترل ربات.....
۷۰	شکل (۵-۵) بلوک دیاگرام سیستم کنترل.....
۷۱	شکل (۶-۵) خطای ردگیری در مفاصل.....
۷۱	شکل (۷-۵) ولتاژ اعمالی به موتورها.....
۷۱	شکل (۸-۵) سیگنال جریان موتورها.....
۷۲	شکل (۹-۵) پارامترهای قانون تطبیق.....
۷۳	شکل (۱۰-۵) خطای تنظیم مفاصل.....
۷۳	شکل (۱۱-۵) ولتاژ اعمالی به موتورها.....
۷۳	شکل (۱۲-۵) سیگنال جریان موتورهای ربات.....
۷۴	شکل (۱۳-۵) پارامترهای قانون تطبیق.....
۸۳	شکل (۱-۶) بلوک دیاگرام سیستم کنترل.....
۸۵	شکل (۲-۶) خطای ردگیری در مفاصل.....
۸۵	شکل (۳-۶) ولتاژ اعمالی به موتورها.....
۸۵	شکل (۴-۶) سیگنال جریان موتورها.....
۸۶	شکل (۵-۶) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق.....
۸۶	شکل (۶-۶) نامعینی در مفاصل.....
۸۶	شکل (۷-۶) خطای تخمین عدم قطعیت ها در مفاصل.....
۸۷	شکل (۸-۶) خطای تنظیم مفاصل.....
۸۸	شکل (۹-۶) ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات.....
۸۸	شکل (۱۰-۶) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق.....
۹۱	شکل (۱-۷) خطای ردگیری در مفاصل.....
۹۲	شکل (۲-۷) ولتاژ اعمالی به موتورها.....
۹۲	شکل (۳-۷) خطای تنظیم در مفاصل.....
۹۳	شکل (۴-۷) ولتاژ اعمالی به موتورها.....

فهرست جداول

۲۲	جدول (۱-۲) پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات هنرمند.....
۲۴	جدول (۲-۲) پارامترهای دینامیکی ربات هنرمند.....
۳۸	جدول (۱-۳) قوانین فازی.....
۴۳	جدول (۲-۳) پارامترهای موتور.....
۹۴	جدول (۱-۷) مقایسه عملکرد روش ها.....

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

امروزه رباتیک و کاربردهای آن موضوع تحقیقات جذابی در زمینه کنترل و اتوماسیون صنعتی است. تا چندی پیش رویکرد اصلی در طراحی و ساخت ربات ها، صلبیت بالای آنها بود و این رویکرد نه به علت ضعف ربات های انعطاف پذیر، بلکه به منظور سادگی کنترل در ربات های صلب اتخاذ می-گردید [۱]. ربات های صلب برای حصول به سختی بالا، اغلب سنگین و حجیم ساخته می شوند و دارای نسبت وزن به تحمل بار بالا و مصرف انرژی زیادی هستند. انعطاف پذیری در مفاصل به دلیل خاصیت الاستیک در سیستم انتقال قدرت است بنابراین می توان گفت هر بازویی دارای مفاصل انعطاف پذیر است و فرض صلب بودن مفاصل یک فرض ساده شونده است. بنابراین امروزه پذیرفته شده که روش های صلب جوابگوی تمامی نیازهای کنترل در رباتیک نبوده و در نظر گرفتن انعطاف-پذیری از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو مطالعه کنترل ربات های انعطاف پذیر سرعت رو به رشدی داشته و روش های کنترلی و کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده است.

در یک تقسیم کلی، ربات ها را به دو دسته انعطاف پذیر و صلب تقسیم می شوند. در سال های اخیر کنترل ربات های صلب به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته و اکثر کنترل کننده های صنعتی بر این مبنا طراحی شدند. انعطاف پذیری مفاصل و رابط ها دو عامل اصلی انعطاف در بازوهای مکانیکی هستند. در این پایان نامه فرض می کنیم که رابط ها صلب بوده و فقط مفاصل انعطاف پذیر را مورد بررسی قرار می دهیم.

نیروی محرکه بسیاری از ربات ها توسط موتورهای الکتریکی تامین می شود. هر چند موتورهای DC با سرعت بالا می چرخند اما بیشتر آنها قدرتمند نیستند (گشتاور آنها کم است). به منظور افزایش گشتاور و کاهش سرعت، موتورهای الکتریکی مجهز به سیستم انتقال قدرت مانند هارمونیک درایو، تسمه [۲] و یا محورهای بلند [۳] می شوند. یک محرکه هارمونیک نوع خاصی از مکانیزم چرخ دنده است. به دلیل وجود چرخ دنده ها، پدیده انعطاف به وجود می آید. در نتیجه انعطاف پذیری در اثر عدم

صلبیت دستگاه انتقال قدرت (چرخ دنده) به وجود می‌آید. همه مواد سختی محدود دارند و با اعمال گشتاور و نیرو تغییر شکل کشسان (انعطاف‌پذیر) می‌دهند. حتی در ربات‌هایی که صلب فرض می‌شوند وقتی در سرعت‌های بالا استفاده شوند نوسان ظاهر می‌شود و اثر انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه است. انعطاف‌پذیری، منبع اصلی نوسانات در ربات‌های صنعتی است [۴]. اولین راه برای کاهش انعطاف مفاصل، تغییر در طراحی مکانیکی آنهاست. به عنوان مثال چرخ دنده‌ها را می‌توان با سختی بالاتر مواد مانند سرامیک ساخت. اما استفاده از این روش محدود است و از طرف دیگر بازوهای مکانیکی ساخته شده را پوشش نمی‌دهد. راه دیگر در نظر گرفتن انعطاف در مدل سازی معادلات دینامیکی حاکم است که این خود از عوامل تاثیرگذار در پیچیدگی معادلات دینامیکی سیستم ربات محسوب می‌شود. منشا ایجاد انعطاف در اغلب ربات‌هایی با مفاصل انعطاف‌پذیر وجود سیستم انتقال حرکت هارمونیک درایو است و دیگر موارد ذکر شده به صورت محدود نمایان می‌شوند. استفاده از روش‌های کنترل ربات صلب برای ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر، می‌تواند باعث ناپایداری، عدم ردیابی و افت عملکرد در سیستم کنترل گردد. پس باید اثر انعطاف را برای بهبود کارایی کنترل کننده در نظر گرفت.

۱-۲ مروری بر تحقیقات پیشین

امروزه با توجه به کاربرد وسیعی که ربات‌هایی با مفاصل انعطاف‌پذیر دارند، همانند ربات‌های مورد استفاده در سیستم‌های فضایی، دست‌ها و بازوهای ماهر رباتیکی و ریز ربات‌ها^۱، روش کنترل آنها اهمیت زیادی پیدا کرده است. در این بخش به بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی کنترل کننده برای ربات‌های صلب و سپس انعطاف‌پذیر می‌پردازیم.

کنترل بازوهای رباتیک، تعیین ورودی‌های مفاصل بر حسب زمان است که وجود آنها برای اجرای دستور یک حرکت توسط بازوی ماهر ضروری است [۵]. ورودی‌های مفاصل ممکن است نیروها و گشتاورهای مفاصل باشند یا ممکن است ورودی‌های محرکه‌ها باشند. اغلب روش‌های کنترل ربات بر

¹ micro robots

مبنای راهبرد کنترل گشتاور مفاصل ربات می‌باشند. در نتیجه این روش‌های کنترلی دارای پیچیدگی - های زیادی هستند. زیرا از مدل ربات در قانون کنترل استفاده می‌شود. برای برطرف کردن این مشکل روش مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ موتورهای ربات ارائه شده است [۶]. در این روش به نقش محرکه ها در سیستم کنترل ربات توجه شده و از مدل محرکه ها به جای مدل ربات در قانون کنترل استفاده می‌شود.

سیستم ربات یک سیستم پیچیده، چندمتغیره، غیر خطی همراه با تزویج‌های سنگین و نامعینی است. جهت کنترل این سیستم روش‌های کنترلی مجزا سازی^۱ ارائه شده است [۴]. این روش یک سیستم چند ورودی - چند خروجی را به چند سیستم یک ورودی - یک خروجی تبدیل می‌نماید. گاهی مواقع فرآیند مجزا سازی ساختارهای پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که در عمل قابلیت اجرا ندارند. برای حل این مساله روش‌های کنترل جداگانه^۲ ارائه می‌شود. این روش کنترل سیستم‌های چند متغیره را از طریق کنترل جداگانه یک سیستم یک ورودی - یک خروجی انجام می‌دهد [۷].

یکی از روش‌های مجزا سازی روش خطی سازی پس‌خورد^۳ است [۸]. به طور کلی ایده اصلی خطی‌سازی پس‌خورد عبارت است از ساختن یک قانون کنترل که بخش‌های غیر خطی را حذف کند. در این روش سیستم باید قابلیت خطی سازی پس‌خورد را داشته باشد. هر سیستم که به فرم همراه در بیاید قابلیت خطی سازی پس‌خورد را دارد [۸]. مدل بازوی ربات هم می‌تواند به فرم همراه در بیاید. این روش یکی از روش‌های بر مبنای مدل است. بنابراین اگر مدل دقیق سیستم در دسترس نباشد باید بتوان بر عدم قطعیت‌ها غلبه کرد.

روش کنترلی دیگر به نام مفصل مستقل یا کنترل جداگانه است که در آن هر مفصل یا به عبارتی محرکه‌های هر مفصل را به صورت جداگانه کنترل می‌کند. پس‌خورد ها از همان مفصل گرفته می‌شود که کنترل می‌شود [۹]. به منظور کنترل ربات باید تمام مفاصل به طور جداگانه کنترل شود. از این

¹ Decoupling

² Decentralized control

³ Feedback linearization

کنترل در بسیاری از ربات‌ها به خاطر ساده شدن کنترل ربات و پایین آمدن هزینه سخت افزار به کار گرفته می‌شود [۱۰]. در این روش تمامی اثرات تزویج به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود و توسط کنترل کننده‌ها جبران می‌شود [۵]. عملکرد این سیستم‌ها با روش‌های مقاوم و تطبیقی بهبود می‌یابد.

در زمینه کنترل مقاوم کارهای بسیاری در فضای مفصلی [۱۱-۱۲] انجام شده است. در مرجع [۱۳] کنترل مقاوم ربات با استفاده از مدل نامی برای ساده سازی طرح و بهبود عملکرد کنترلی سیستم راهکاری بر مبنای حد بالای عدم قطعیت ارائه می‌شود.

کنترل تطبیقی در کنترل ربات کارایی بسیار دارد. بسیاری از ربات‌ها دارای عدم قطعیت پارامتری دارند. اگر این پارامترها با یک مکانیزم تطبیق تنظیم نشوند ممکن است باعث کاهش دقت، افت عملکرد و ناپایداری شوند [۱۴]. در مرجع [۱۵] از کنترل تطبیقی ربات با جبران کننده فازی برای غلبه بر عدم قطعیت استفاده شده است. در برخی مقالات با به کارگیری هر دو روش کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی به طراحی کنترل کننده برای بازوی روبات پرداخته اند [۱۶]. شبکه عصبی هم به دلیل قدرت شناسایی و تخمین بالا [۱۷]، توجه دانشمندان را به خود جلب کرده است. به عنوان مثال در [۱۸] از شبکه عصبی تطبیقی برای تقریب نامعینی در سیستم ربات استفاده شده است.

کنترل فازی به دلیل غلبه بر عدم قطعیت به طور گسترده‌ای در کنترل جداگانه مفصل مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۱۹-۲۰]. قوانین فازی قادر به پیاده سازی تصمیم‌گیری‌های اگر آنگاه و استفاده از دانش و تجربه افراد خبره می‌باشند [۲۱]. اما تحلیل پایداری کنترل فازی بازوهای ربات یک مشکل جدی و چالش برانگیز در تئوری است. این چالش‌ها با پیچیدگی دینامیک ربات‌ها و ساختار کنترل کننده فازی افزایش می‌یابد [۲۲]. برای رفع این مشکلات در [۲۳] کنترل کننده فازی مقاوم بر مبنای روش مستقیم لیپانوف با استفاده طراحی می‌شود. این کنترل کننده از نوع تاکاگی- سوگنو با یک ساختار ساده است. از طرفی کنترل فازی بازوهای ربات با ساختار مفصل مستقل یک مشکل جدی دارد و آن این است که مدل فضای حالت سیستم ربات، شامل دینامیک بازوها و موتورها به فرم غیر

همراه، چند متغیره، به شدت غیر خطی و دارای تزویج سنگین است. با توجه به این مشکل در [۲۴] از راهبرد کنترل ولتاژ و تحلیل همگرایی برای طراحی کنترل کننده فازی مقاوم دقیق استفاده شد.

یک ویژگی مهم سیستم‌های فازی آن است که از این سیستم‌ها به عنوان تقریب‌گر عمومی برای تقریب هر سیستم غیر خطی همراه با عدم قطعیت می‌توان استفاده کرد [۲۵]. از این توانایی سیستم فازی در طراحی کنترل کننده‌های فازی تطبیقی به طور موثری استفاده شده است. کنترل کننده‌های فازی تطبیقی به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم به کار می‌روند. روش تطبیقی مستقیم مبتنی بر دانش کنترلی است ولی روش تطبیقی غیرمستقیم مبتنی بر دانش سیستمی است [۲۱]. از آنجا که تضمین پایداری دارای اولویت است روش مستقیم لیاپانوف در طراحی کنترل کننده فازی تطبیقی به صورت موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است. از این روش کنترلی در بسیاری از موارد از جمله، کنترل تطبیقی چند ورودی - چند خروجی بر اساس روش لیاپانوف برای جبران عدم قطعیت‌ها [۲۶] استفاده شده است. همچنین برای کنترل ردگیری ربات با عدم قطعیت مدل با روش فازی تطبیقی [۲۷] اشاره نمود. از همین روش با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ نیز برای طراحی کنترل کننده استفاده شد. به عنوان مثال در [۲۸] از یک سیستم فازی تطبیقی برای تقریب و جبران نامعینی استفاده می‌شود. در [۲۹] از روش فازی تطبیقی مستقیم با ساختار مفصل مستقل با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل ربات استفاده می‌شود. کنترل کننده‌های فازی تطبیقی غیر مستقیم برای کنترل ربات با بار ثابت پیشنهاد شده است [۳۰]. همچنین از ترکیب هر دو روش نیز برای کنترل ربات استفاده شده است [۳۱]. از کنترل عصبی فازی تطبیقی نیز بر مبنای هر دو روش استفاده شده است [۳۲]. الگوریتم‌های بهینه سازی هوشمند نظیر الگوریتم گروهی ذرات [۳۳] و تکثیر باکتری [۳۴] به منظور طراحی کنترل کننده‌هایی با پارامترهای بهینه در کنترل بازوهای ربات دیده می‌شود.

مدل ربات‌هایی با مفصل انعطاف‌پذیر بسیار پیچیده تر از رباتهای صلب است و تعداد درجات آزادی آنها دو برابر تعداد عملگرهای کنترلی است [۳۵]. به دلیل اینکه موقعیت رابط بطور مستقیم با موقعیت

موتور در ارتباط نیست، کنترل آن بسیار مشکل و پیچیده است. بنابراین، روش‌های پیشرفته‌ای برای کنترل ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر ارائه شده است. به طور مثال از روش‌هایی نظیر کنترل تطبیقی [۳۶]، کنترل فازی [۳۷]، شبکه عصبی [۳۸]، کنترل مقاوم [۳۹]، کنترل مود لغزشی [۴۰]، کنترل تناسبی-مشتقی-انتگرالی [۴۱] و کنترل گام به عقب [۴۲] برای کنترل ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر استفاده شده است. تمامی روش‌های مذکور بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور هستند. یکی از ایرادهای آن این است که در قانون کنترل از دینامیک ربات استفاده شده است. در نتیجه محاسبه قانون کنترل پیچیده و طولانی است. برای برطرف کردن این مشکل از روش مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ موتورهای ربات استفاده می‌شود [۶]. در این روش به نقش محرکه‌ها در سیستم کنترل ربات توجه شده و از مدل محرکه‌ها به جای مدل ربات در قانون کنترل استفاده می‌شود و ربات به عنوان بار خارجی در نظر گرفته می‌شود. این راهبرد در کنترل غیرخطی ربات با مفصل انعطاف‌پذیر [۴۳] و کنترل مقاوم مفصل انعطاف‌پذیر به منظور غلبه بر نامعینی [۴۴] پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی کنترل مقاوم شامل دو حلقه است. حلقه داخلی که موقعیت روتور را کنترل می‌کند و حلقه خارجی موقعیت مطلوب روتور برای کنترل زاویه مفصل را فراهم می‌کند. به منظور غلبه بر نامعینی هم در محرکه‌ها و هم در دینامیک ربات روش کنترل مقام بر مبنای لیپانوف [۴۵] نیز پیشنهاد شده است.

توصیف دقیق دینامیک ربات با مفصل انعطاف‌پذیر به دلیل ویژگی‌های خاص از جمله دینامیک غیرخطی با تزویج و مرتبه بالا بسیار پیچیده است. بنابراین روش‌هایی که طراحی آنها آزاد از مدل است می‌تواند جایگزین مناسبی برای کنترل ربات با مفصل انعطاف‌پذیر باشد. از جمله این روش‌ها، روش‌های کنترل فازی است. کنترل کننده‌های فازی یکی از کنترل کننده‌های قدرتمند در کنترل سیستم‌هایی با مدل دینامیکی نامعین هستند. در مرجع [۴۶] از سیستم فازی همراه با روش پس‌گام بهره بردند. در این مقاله دینامیک محرکه در نظر گرفته شده و از سیستم فازی برای تخمین حالات غیر قابل اندازه‌گیری استفاده شده است. در [۴۷] از کنترل کننده فازی تناسبی-مشتقی-انتگرالی برای کنترل ربات یک محوره استفاده شده است. در این مقاله به طور عملی نشان داده شده است که

کنترل کننده فازی تناسبی - مشتقی - انتگرالی در مقایسه با کنترل کننده تناسبی - مشتقی - انتگرالی متداول به نتایج بهتری منجر می‌شود.

روش‌های فازی تطبیقی توجه محققان را در کنترل ربات‌های انعطاف پذیر به خود جلب کرده است. روش غیرمستقیم [۴۸] با راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل ربات با مفصل انعطاف پذیر پیشنهاد شد. این روش‌ها دارای عملکرد ردگیری خوب و همچنین تنظیم مناسب بوده است و در برابر عدم قطعیت نیز مقاوم است.

در بسیاری از روش‌ها که دینامیک عملگرها در قانون کنترل دیده نمی‌شود عملکرد کنترل کننده-ها در سرعت‌های بالا تضعیف می‌نماید و پدیده لرزش سیگنال کنترل نیز رخ می‌دهد و دینامیک‌های مدل نشده را تحریک می‌نماید. برای غلبه بر این ایرادها طرح جدید کنترل مود لغزشی فازی ربات از نوع کنترل جداگانه هر مفصل در [۴۹] ارائه شد. این طرح از تقریب‌گر فازی تطبیقی برای تقریب تابع استفاده شد همچنین از راهبرد کنترل ولتاژ استفاده می‌نماید و به جای روش مرسوم دو حلقه‌ای از کنترل یک حلقه‌ای استفاده شده است.

۱-۳ اهداف و اهمیت تحقیق

می‌توان ادعا کرد که مسئله کنترل موقعیت برای ربات‌های صلب امروزه به طور مناسبی حل شده است [۵۰]. با توجه به اهمیت کاربرد ربات‌های صنعتی با مفاصل انعطاف‌پذیر و پیچیدگی معادلات آنها، در این پایان‌نامه به دنبال آن هستیم تا با ارائه طرح کنترل فازی به دنبال جبران اثر انعطاف در مفاصل باشیم به گونه‌ای که ربات انعطاف‌پذیر به ربات صلب تبدیل شده و سپس روش کنترل برای ربات صلب استفاده خواهد شد.

کنترل فازی به دلیل سادگی در طراحی و غلبه بر عدم قطعیت‌ها توجه دانشمندان را به خود جلب کرده است. قوانین فازی دانش و تجربه افراد خبره را به صورت زبانی بیان می‌کند. به همین دلیل روش فازی نسبت به روش کنترل کلاسیک برتری دارد [۲۲]. این روش با قابلیت‌های انکارناپذیر به

مدل سیستم وابسته نبوده و به همین جهت در بسیاری از کارهای تحقیقاتی برای کنترل ربات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این پایان نامه، روش کنترل فازی تطبیقی برای جبران انعطاف طراحی و روش‌های کنترل ربات صلب شبیه سازی شده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین از ویژگی تخمین‌گری فازی در قانون کنترل خطی سازی فیدبکی با راهبرد ولتاژ استفاده می‌شود. در انتها پایداری سیستم کنترل بررسی و تضمین می‌شود.

۴-۱ مروری بر ساختار پایان نامه

فصل‌های دیگر این پایان نامه به صورت زیر تنظیم شده است.

فصل دوم به مدل‌سازی دینامیکی و سینماتیکی ربات و به دست آوردن معادلات آن اختصاص داده شده است. در این فصل ربات سه رابط هنرمند با در نظر گرفتن اثر انعطاف در مفاصل مدل سازی می‌شود. در فصل سوم به معرفی یک روش کنترل بر مبنای راهبرد گشتاور پرداخته می‌شود. در فصل چهارم روش کنترل فازی تطبیقی مستقیم بر مبنای گشتاور طراحی و شبیه سازی می‌شود و در انتها پایداری سیستم کنترل بررسی و تنظیم می‌شود. در فصل پنجم به معرفی مختصری از راهبرد کنترل ولتاژ پرداخته می‌شود و یک روش برای جبران انعطاف و کنترل ربات ارائه، و پایداری سیستم بررسی و تضمین می‌شود. در فصل ششم یک سیستم فازی برای بهبود عملکرد کنترل در مقابل نامعینی‌ها طراحی و شبیه سازی می‌شود. در فصل هفتم به بررسی یک روش غیر خطی بر مبنای ولتاژ می‌پردازیم تا با نواقص آن آشنا شویم و در فصل هشتم نتیجه گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

فصل دوم

مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات با مفاصل

انعطاف پذیر

سینماتیک مستقیم ربات، در واقع توصیف‌کننده موقعیت مجری نهایی ربات بر اساس متغیرهای مفاصل می‌باشد. بنابراین، لازم است پارامترهای موردنیاز برای توصیف کامل متغیرهای مفاصل انتخاب شود. زمانی که مقادیر و زاویه‌های متناظر مفصل‌های ربات شناخته‌شده باشد، برای محاسبه موقعیت، جهت، سرعت و شتاب مجری نهایی از سینماتیک مستقیم استفاده می‌شود. درحالی‌که در نقطه مقابل آن و برای محاسبه مقادیر موردنیاز متغیرهای مفاصل با توجه به مقادیر معلوم مجری نهایی، از سینماتیک معکوس ربات استفاده می‌شود [۵]. هنگام به دست آوردن معادلات سینماتیکی ربات، هر رابط تنها به صورت جسمی صلب، رابطه بین دو محور مفصلی را در بازوی مکانیکی ماهر توصیف می‌کند. عواملی چون استحکام رابط‌ها، جنس رابط‌ها و در این بخش در نظر گرفته نمی‌شود.

در این فصل بعد از به دست آوردن معادلات سینماتیکی، معادلات دینامیکی ربات محاسبه می‌شود. دینامیک شاخه‌ای از مکانیک است که به بررسی نیروهای پدید آورنده حرکت می‌پردازد. دینامیک نقش مهمی در کنترل ربات دارد. یکی از روش‌های کنترل ربات، برای حرکت در مسیر مورد نظر استفاده از معادله دینامیکی حرکت ربات برای محاسبه گشتاور محرک است. از کاربردهای معادله دینامیکی می‌توان به شبیه‌سازی حرکت ربات نیز اشاره کرد.

در نهایت در این فصل تأثیر دینامیک موتورها را در مدل‌سازی ربات بررسی کرده و ربات صنعتی هنرمند با مفاصل انعطاف‌پذیر به همراه ۳ درجه آزادی مدل‌سازی می‌شوند.

۲-۲ معادلات سینماتیکی ربات

برای به دست آوردن معادلات سینماتیکی ربات از [۵] استفاده شده است. پس از نامگذاری رابط ها، محورهای آن طبق روش دناویت هارتنبرگ تخصیص داده می شود. این محورهای برای هر مفصل i ام، دارای سه جهت x, y, z می باشد. محور z را در راستای محور مفصل قرار می دهیم. محور x_i به گونه ای انتخاب می کنیم که عمود و متقاطع با z_{i-1} باشد و y_i به گونه ای انتخاب می شود که همه دستگاه ها راست گرد باشند. با توجه به این محورها پارامترهای رابطها (طول، انحراف، پیچش، زاویه) به صورت زیر به دست می آید.

$$a_i = \text{فاصله از } z_{i-1} \text{ تا } z_i \text{ در جهت } x_i$$

$$d_i = \text{فاصله از } x_{i-1} \text{ تا } x_i \text{ در جهت } z_{i-1}$$

$$\alpha_i = \text{زاویه از } z_{i-1} \text{ تا } z_i \text{ حول } x_i$$

$$\theta_i = \text{زاویه از } x_{i-1} \text{ تا } x_i \text{ حول } z_{i-1}$$

از آنجا که هر نقطه روی مجری نهایی که در دستگاه n بیان می شود مقداری ثابت دارد و مستقل از شکل ربات است، ماتریس تبدیل ربات محاسبه شده و موقعیت مجری نهایی نسبت به دستگاه پایه به وسیله یک بردار سه عضوی d و یک ماتریس 3×3 دوران R قابل نمایش است:

$$\mathbf{T}_0^n = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \dots \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0^n & \mathbf{d}_0^n \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (۳-۲)$$

ماتریس \mathbf{R}_0^n جهت مجری نهایی در دستگاه پایه نشان می دهد. در معادله (۳-۲) \mathbf{A}_i به صورت زیر به دست می آید:

$$\mathbf{A}_i = \text{Rot}_{z, \theta_i} \text{Trans}_{z, d_i} \text{Trans}_{x, a_i} \text{Rot}_{z, \alpha_i} \quad (۴-۲)$$

ماتریس انتقال می‌باشد. در نتیجه داریم:

ماتریس **Rot** ماتریس دوران و ماتریس **Trans** پارامترهای رابط و مفصل i هستند و θ_i ، α_i ، d_i ، a_i

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

نمادهای S و C نمایانگر توابع \sin و \cos هستند که به اختصار بیان شده‌اند.

۲-۳ ژاکوبین بازوی ماهر ربات

در قسمت 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 زاویه‌ای مجری نهایی با سرعت مفاصل پرداخته می‌شود. برای محاسبه سرعت مجری نهایی در اثر حرکت‌های خطی و زاویه‌ای 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 (Y و X بردار هستند) به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$Y = F(x) \quad (6-2)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (7-2)$$

که در آن $F(x) = [f_1 \ \dots \ f_n]^T$ با مشتق‌گیری از معادله (۶-۲):

$$\dot{Y} = J(X)\dot{X} \quad (8-2)$$

برای مرتبط ساختن سرعت مفاصل به سرعت‌های دکارتی مجری نهایی از ژاکوبین استفاده می‌شود. به صورت کلی:

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

که $\dot{\mathbf{x}}$ بردار سرعت خطی و زاویه‌ای مجری نهایی است و \mathbf{q} همان بردار متغیرهای مفصلی است. فرض کنید بیانگر سرعت زاویه‌ای مجری نهایی باشد و همچنین \mathbf{V}_0^n بیانگر بردار سرعت خطی مجری نهایی باشد، آنگاه:

$$\mathbf{W}_0^n = \mathbf{J}_w \dot{\mathbf{q}} \quad (10-2)$$

$$\mathbf{V}_0^n = \mathbf{J}_v \dot{\mathbf{q}} \quad (11-2)$$

که \mathbf{J}_v و \mathbf{J}_w ماتریس‌های $3 \times n$ هستند. ماتریس ژاکوبین \mathbf{J}_0^n عبارت است از:

$$\mathbf{J}_0^n = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_v \\ \mathbf{J}_w \end{bmatrix} \quad (12-2)$$

ماتریس \mathbf{J}_0^n یک ماتریس $3 \times n$ است که در آن n تعداد رابط‌هاست.

۲-۳-۱ سرعت زاویه‌ای

سرعت زاویه‌ای مجری نهایی نسبت به دستگاه پایه را می‌توان با بیان سرعت زاویه‌ای رابط‌ها در دستگاه پایه و جمع نمودن آنها تعیین کرد. چنانچه مفصل i ام لولایی باشند آنگاه q_i متغیر مفصل i ام برابر θ_i و محور دوران است بنابراین سرعت زاویه‌ای رابط i در دستگاه $i-1$ به صورت زیر است:

$$\mathbf{w}_{i-1}^i = \dot{q}_i \mathbf{k} \quad (13-2)$$

که k بردار یکه در راستای محور z_{i-1} است. بنا براین، با توجه به معادله (۲-۱۰) داریم:

$$\mathbf{J}_w = [\rho_1 \mathbf{z}_0 \quad \rho_2 \mathbf{z}_1 \quad \dots \quad \rho_n \mathbf{z}_{n-1}] \quad (۲-۱۴)$$

$$\mathbf{z}_0 = \mathbf{k} = [0 \quad 0 \quad 1]^T \text{ که البته}$$

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

$$\mathbf{z}_{i-1} = \mathbf{R}_0^{i-1} \mathbf{k} \quad (۲-۱۵)$$

۲-۳-۲ سرعت خطی

سرعت خطی مجری نهایی به صورت زیر است:

$$V_0^n = \dot{d}_0^n \quad (۲-۱۶)$$

با استفاده از قانون زنجیره ای مشتق داریم:

$$\dot{d}_0^n = \frac{\partial d_0^n}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_n} \dot{q}_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial d_0^n}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (۲-۱۷)$$

این همان رابطه سرعت خطی مجری نهایی است. چنانچه مفصل i ام لولایی باشد داریم:

$$d_0^n = d_0^1 + R_0^1 d_1^2 + \dots + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + \dots + R_0^{n-1} d_{n-1}^n \quad (۲-۱۸)$$

بنابراین

$$\dot{d}_0^n = \dot{d}_0^{i-1} + R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^n \quad (۲-۱۹)$$

با مشتق گیری از رابطه (۲-۱۹) داریم:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^n \quad (۲-۲۰)$$

با توجه با رابطه سرعت زاویه‌ای می توان نوشت:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1}(\dot{q}_i k \times \mathbf{d}_{i-1}^n) \quad (21-2)$$

با جایگذاری (۱۵-۲) و با استفاده از معادله (۱۹-۲) داریم:

$$\dot{d}_0^n = \dot{q}_i \mathbf{z}_{i-1} \times (\mathbf{d}_0^n - \mathbf{d}_0^{i-1}) \quad (22-2)$$

بنابراین اگر مفصل i ام لولایی باشد ستون i ام ماتریس J_v برابر است با

$$J_{v_i} = \mathbf{z}_{i-1} \times (\mathbf{d}_0^n - \mathbf{d}_0^{i-1}) \quad (23-2)$$

اگر مفصل i ام کشویی باشد:

$$d_{i-1}^i = d_i k + a_i i \quad (24-2)$$

که در رابطه فوق d_i و a_i پارامترهای رابط i ام هستند. از طرفی طبق معادله (۱۸-۲) می‌توان نوشت:

$$d_0^n = d_0^{i-1} + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + \dots + R_0^i d_i^n \quad (25-2)$$

با فرض ثابت نگه داشتن همه مفاصل به جز مفصل i ام با سرعت واحد با مشتق‌گیری از رابطه فوق داریم:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^i \quad (26-2)$$

با کمک معادلات (۲۴-۲) و (۲۶-۲) می‌توان نوشت:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}^i k \quad (27-2)$$

با توجه به معادله (۱۵-۲) داریم:

$$\dot{d}_0^n = z_{i-1} \dot{d}_i \quad (28-2)$$

در مفاصل کشویی $q_i = d_i$ بنابراین اگر مفصل i ام کشویی باشد ستون i ام ماتریس \mathbf{J}_v عبارتست از:

$$J_{v_i} = z_{i-1} \quad (29-2)$$

در نهایت ماتریس \mathbf{J}_v به صورت زیر است:

$$J_v = [J_{v_1} \ J_{v_2} \ \dots \ J_{v_n}] \quad (30-2)$$

با توجه به ارتباط سرعت خطی با ژاکوبین سرعت، ماتریس ژاکوبین ربات به صورت زیر حاصل می-شود:

$$\mathbf{J} = [J_1 \ J_2 \ \dots \ J_n] \quad (31-2)$$

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

$$J = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i-1} \times (\mathbf{d}_0^n - \mathbf{d}_0^{i-1}) \\ \mathbf{z}_{i-1} \end{bmatrix} \quad (32-2)$$

و برای مفصل کشویی به صورت زیر است:

$$J = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (33-2)$$

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

۴-۲ معادلات دینامیکی ربات

معادلات دینامیکی ربات با چند درجه آزادی، با محاسبه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی رابطها و مفاصل به دست می آید.

۱-۴-۲ انرژی پتانسیل

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

$$V = \sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i \mathbf{g}^T \mathbf{d}_0^{c_i} \quad (۳۴-۲)$$

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

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

$$\mathbf{d}_0^{c_i} = \mathbf{d}_0^i + R_0^i \mathbf{d}_i^{c_i} \quad (۳۵-۲)$$

۲-۴-۲ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی یک ربات عبارت است از مجموع انرژی جنبشی رابطهای ربات یا به عبارت دیگر

برای رابط i ام انرژی جنبشی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$k_i = \frac{1}{2} \mathbf{m}_i \mathbf{V}_{c_i}^T \mathbf{V}_{c_i} + \frac{1}{2} \mathbf{w}_0^{iT} \mathbf{I}_0^i \mathbf{w}_0^i \quad (۳۶-۲)$$

که m_i جرم رابط i ام و \mathbf{V}_{c_i} بردار سرعت خطی مرکز جرم رابط i ام و \mathbf{w}_0^i بردار سرعت زاویه‌ای رابط i ام ربات نسبت به دستگاه مختصات پایه و \mathbf{I}_0^i ماتریس ممان اینرسی رابط i ام ربات نسبت به دستگاه مختصات پایه می‌باشد.

برای آنکه بتوان ماتریس ممان اینرسی را مستقل از حرکت جسم محاسبه کرد لازم است ماتریس ممان اینرسی در دستگاه متصل به همان رابط محاسبه شود که در این صورت دستگاه متصل به مرکز جرم ربات انتخاب شده است [۵۱] داریم:

$$\mathbf{I}_0^i = \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \quad (۳۷-۲)$$

\mathbf{I}_i ماتریس ممان اینرسی رابط i ام در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم ربات و موازی با دستگاه مختصات متصل به همان رابط می‌باشد. که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & -\int xy dm & -\int xz dm \\ -\int xy dm & \int (x^2 + z^2) dm & -\int yz dm \\ -\int xz dm & -\int yz dm & \int (y^2 + x^2) dm \end{bmatrix} \quad (۳۸-۲)$$

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

$$\mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & -I_{xy_i} & -I_{xz_i} \\ -I_{xy_i} & I_{yy_i} & -I_{yz_i} \\ -I_{xz_i} & -I_{yz_i} & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (۳۹-۲)$$

طبق روابط (۲-۱۰) و (۲-۱۱) می‌توان نوشت:

$$\mathbf{V}_{c_i} = \mathbf{J}_{v_i} \dot{\mathbf{q}} \quad (۴۰-۲)$$

$$\mathbf{W}_0^i = \mathbf{J}_{w_i} \dot{\mathbf{q}} \quad (۴۱-۲)$$

با توجه به معادلات (۲-۳۶)، (۲-۴۰) و (۲-۴۱) رابطه انرژی جنبشی ربات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (42-2)$$

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

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n [\mathbf{m}_i \mathbf{J}_{v_{ci}}^T \mathbf{J}_{v_{ci}} + \mathbf{J}_{w_i}^T \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \mathbf{J}_{w_i}] \quad (43-2)$$

انرژی پتانسیل ربات به کمک رابطه (۳۴-۲) و انرژی جنبشی ربات به کمک رابطه (۴۲-۲) محاسبه می‌شود. اکنون به تشکیل تابع لاگرانژین ربات پرداخته می‌شود.

$$L = K - V \quad (44-2)$$

معادله کلی دینامیکی سیستم عبارت است از:

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} \quad (45-2)$$

که در این رابطه $\boldsymbol{\tau}$ بردار گشتاور برای مفاصل لولایی و نیرو برای مفاصل کشویی است. با استفاده از معادلات (۴۲-۲) تا (۴۴-۲) در معادله (۴۵-۲) و ساده سازی روابط، معادله نهایی زیر به دست می‌آید:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (46-2)$$

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

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{D}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right) \quad (47-2)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \quad (48-2)$$

معادلات ارائه شده در شبیه سازی حرکت ربات به ازای گشتاور ورودی معین بکار گرفته می شود.

این معادلات مدل ربات را می سازند و با توجه به آنها می توان رفتار دینامیکی ربات را بررسی کرد.

۲-۵ مدل سازی دینامیکی

در این بخش به مدل سازی دینامیکی ربات سه رابط هنرمند می پردازیم.

۲-۵-۱ مدل سازی دینامیکی ربات هنرمند

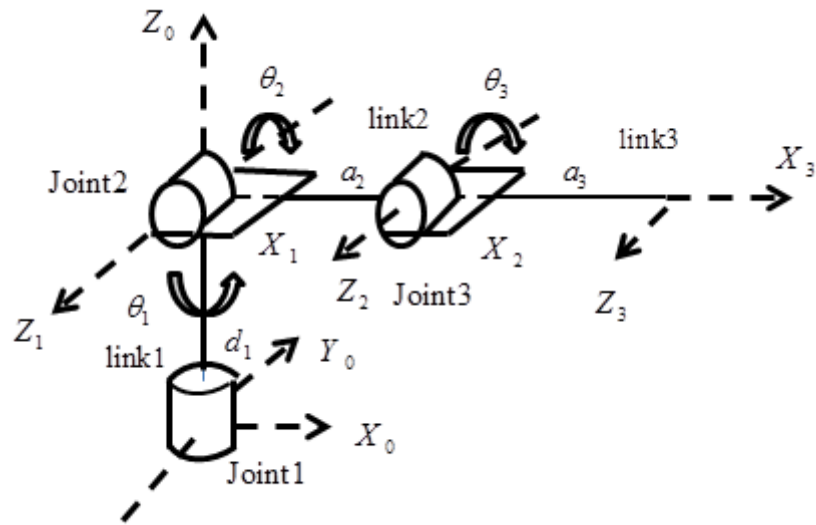
ربات هنرمند دارای سه مفصل لولایی است. شکل (۱-۲) دیاگرام مفصلی ربات هنرمند ۳ رابط را

نشان می دهد. با توجه به دستگاه های مختصات در شکل، جدول پارامترهای ربات به صورت زیر

تشکیل می گردد.

جدول (۱-۲) پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات هنرمند

i	θ (rad)	d (m)	a (m)	α (rad)
1	θ_1	$d_1 = 0.280$	0	$\pi/2$
2	θ_2	0	$a_2 = 0.760$	0
3	θ_3	0	$a_3 = 0.930$	0



شکل (۱-۲) دیاگرام مفصلی ربات هنرمند با ۳ درجه آزادی

مدل دینامیکی ربات هنرمند مورد نظر طبق معادله (۲-۴۵) به صورت زیر قابل بیان است:

$$\tau_r = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (۲-۴۹)$$

که در آن:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (۲-۵۰)$$

پارامترهای ماتریس اینرسی و موقعیت مرکز جرم رابطها را در جدول (۲-۲) مشاهده می‌کنید. معادلات دینامیکی نشان می‌دهد که مدل دینامیکی ربات پیچیده، چند متغیره و با تزویج سنگین می‌باشد.

جدول (۲-۲) پارامترهای دینامیکی ربات هنرمند

i	x_i (m)	y_i (m)	z_i (m)	m_i (kg)	I_{xxi} (kgm ²)	I_{yyi} (kgm ²)	I_{zzi} (kgm ²)	I_{xyi} (kgm ²)	I_{xzi} (kgm ²)	I_{yzi} (kgm ²)
1	0	-0.22	0	19	0.34	0.36	0.31	0	0	0
2	-0.51	0	0	18.18	0.18	1.32	1.31	0	0	0
3	-0.67	0	0	10.99	0.07	0.92	0.93	0	0	0

$$\begin{aligned}
 D_{11} = & m_3 a_3 x_3 - \frac{1}{2} I_{xx2} \cos(2q_2) + I_{xy2} \sin(2q_2) + \frac{1}{2} m_3 a_2^2 \cos(2q_2) + \frac{1}{2} m_3 x_3^2 \cos(2q_3 + 2q_2) + I_{yy1} \\
 & + \frac{1}{2} I_{yy2} \cos(2q_2) - m_3 a_3 y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + m_3 a_3 x_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} I_{xx3} + \frac{1}{2} m_3 a_3^2 \cos(2q_3 + 2q_2) \\
 & + m_3 a_3 a_2 \cos(2q_2 + q_3) - m_3 a_2 y_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3 x_3 y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) - m_2 a_2 y_3 \sin(q_3) + m_3 \cos(q_3) a_3 a_2 \\
 & + m_3 a_2 x_3 \cos(q_3) + \frac{1}{2} m_2 x_2^2 + m_3 a_2 x_3 \cos(2q_2 + q_3) + \frac{1}{2} I_{yy3} \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} m_2 y_2^2 + \frac{1}{2} m_3 y_3^2 + \frac{1}{2} I_{yy2} \\
 & - \frac{1}{2} m_3 y_3^2 \cos(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} I_{xx3} \cos(2q_3 + 2q_2) + I_{xy3} \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} I_{xx2} + m_2 z_2^2 + m_1 z_1^2 + m_1 x_1^2 \\
 & + m_2 a_2 x_2 + \frac{1}{2} m_3 a_3^2 + m_3 z_3^2 + \frac{1}{2} I_{yy3} + \frac{1}{2} m_3 x_3^2 + \frac{1}{2} m_2 a_2^2 + \frac{1}{2} m_3 a_2^2 + \frac{1}{2} m_2 x_2^2 \cos(2q_2) - \frac{1}{2} m_2 y_2^2 \cos(2q_2) \\
 & + \frac{1}{2} m_2 a_2^2 \cos(2q_2) + m_2 a_2 x_2 \cos(2q_2) - m_2 a_2 y_2 \sin(2q_2) - m_2 x_2 y_2 \sin(2q_2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{12} = & I_{yz3} \cos(q_3 + q_2) + I_{xz3} \sin(q_3 + q_2) + \sin(q_2) I_{xz2} + \cos(q_2) I_{yz2} \\
 & - m_3 z_3 a_3 \sin(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) x_3 - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) y_3 \\
 & - m_2 z_2 \cos(q_2) y_2 - m_2 z_2 \sin(q_2) x_2 - m_2 z_2 \sin(q_2) a_2 - m_3 z_3 \sin(q_2) a_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{13} = & I_{yz3} \cos(q_3 + q_2) + I_{xz3} \sin(q_3 + q_2) - m_3 z_3 a_3 \sin(q_3 + q_2) \\
 & - m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) x_3 - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) y_3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{22} = & I_{zz2} + 2m_3 a_3 x_3 + m_2 x_2^2 + m_2 y_2^2 + m_3 y_3^2 + I_{zz3} - 2m_3 a_2 y_3 \sin(q_3) \\
 & + 2m_3 \cos(q_3) a_3 a_2 + 2m_2 a_2 x_2 + m_3 a_3^2 + m_3 x_3^2 + 2m_3 a_2 x_3 \cos(q_3) + m_2 a_2^2 + m_3 a_2^2
 \end{aligned}$$

$$D_{23} = 2m_3 a_3 x_3 + m_3 y_3^2 + I_{zz3} - m_3 a_2 y_3 \sin(q_3) + m_3 \cos(q_3) a_3 a_2 + m_3 a_3^2 + m_3 x_3^2 + m_3 a_2 x_3 \cos(q_3)$$

$$D_{33} = 2m_3 a_3 x_3 + m_3 y_3^2 + I_{zz3} + m_3 a_3^2 + m_3 x_3^2$$

$$\begin{aligned}
C_{11} = & \left(\begin{aligned}
& -m_2 a_2 x_2 \sin(2q_2) - m_2 a_2 y_2 \cos(2q_2) - m_2 x_2 y_2 \cos(2q_2) - m_3 a_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) \\
& - m_3 a_2 x_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3 x_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - m_3 a_3 x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) - m_3 a_2 y_3 \cos(2q_2 + q_3) \\
& - m_3 a_3 a_2 \sin(2q_2 + q_3) + \frac{1}{2} I_{x x_3} \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} I_{y y_3} \sin(2q_2) + I_{x y_2} \cos(2q_2) + I_{x y_3} \cos(2q_3 + 2q_2) \\
& - \frac{1}{2} m_3 a_2^2 \sin(2q_2) + \frac{1}{2} m_2 y_2^2 \sin(2q_2) - \frac{1}{2} m_2 a_2^2 \sin(2q_2) - \frac{1}{2} m_2 x_2^2 \sin(2q_2) - \frac{1}{2} m_3 a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) \\
& + \frac{1}{2} m_3 y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} m_3 x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} I_{y y_3} \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} I_{x x_2} \sin(2q_2)
\end{aligned} \right) \dot{q}_2 \\
+ & \left(\begin{aligned}
& -\frac{1}{2} m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - \frac{1}{2} m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) - m_3 a_2 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} m_3 a_2 x_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3 x_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) \\
& - m_3 a_3 x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} m_3 a_2 y_3 \cos(2q_2 + q_3) - \frac{1}{2} m_3 a_3 a_2 \sin(2q_2 + q_3) - \frac{1}{2} m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 + \frac{1}{2} I_{x x_3} \sin(2q_3 + 2q_2) \\
& + I_{x y_3} \cos(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} m_3 a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} m_3 y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} m_3 x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} I_{y y_3} \sin(2q_3 + 2q_2)
\end{aligned} \right) \dot{q}_3 \\
C_{12} = & \left(\begin{aligned}
& -m_2 a_2 x_2 \sin(2q_2) - m_2 a_2 y_2 \cos(2q_2) - m_2 x_2 y_2 \cos(2q_2) - m_3 a_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) \\
& - m_3 a_2 x_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3 x_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - m_3 a_3 x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) - m_3 a_2 y_3 \cos(2q_2 + q_3) \\
& - m_3 a_3 a_2 \sin(2q_2 + q_3) + \frac{1}{2} I_{x x_3} \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} I_{y y_2} \sin(2q_2) + I_{x y_2} \cos(2q_2) + I_{x y_3} \cos(2q_3 + 2q_2) \\
& - \frac{1}{2} m_3 a_2^2 \sin(2q_2) + \frac{1}{2} m_2 y_2^2 \sin(2q_2) - \frac{1}{2} m_2 a_2^2 \sin(2q_2) - \frac{1}{2} m_2 x_2^2 \sin(2q_2) - \frac{1}{2} m_3 a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) \\
& + \frac{1}{2} m_3 y_2^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} m_3 x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} I_{y y_3} \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} I_{x x_3} \sin(2q_2)
\end{aligned} \right) \dot{q}_1 \\
+ & \left(\begin{aligned}
& -m_2 z_2 \cos(q_2) x_2 - m_3 z_3 a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) x_3 + m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) y_3 - I_{y z_3} \sin(q_3 + q_2) \\
& + I_{x z_3} \cos(q_3 + q_2) + m_2 z_2 \sin(q_2) y_2 - m_3 z_3 \cos(q_2) a_2 + \cos(q_2) I_{x z_2} - \sin(q_2) I_{y z_2} - m_2 z_2 \cos(q_2) a_2
\end{aligned} \right) \dot{q}_2 \\
+ & \left(-m_3 z_3 a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) x_3 + m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) y_3 - I_{y z_3} \sin(q_3 + q_2) + I_{x z_3} \cos(q_3 + q_2) \right) \dot{q}_3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{13} &= \left(\begin{array}{l} -\frac{1}{2}m_3a_2y_3 \cos(q_3) - \frac{1}{2}m_3a_2x_3 \sin(q_3) - m_3a_3y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) \\ -\frac{1}{2}m_3a_2x_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3x_3y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - m_3a_3x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) \\ -\frac{1}{2}m_3a_2y_3 \cos(2q_2 + q_3) - \frac{1}{2}m_3a_3a_2 \sin(2q_2 + q_3) - \frac{1}{2}m_3 \sin(q_3)a_3a_2 \\ +\frac{1}{2}I_{xx_3} \sin(2q_3 + 2q_2) + I_{yy_3} \cos(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}m_3a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) \\ -\frac{1}{2}m_3x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}I_{yy_3} \sin(2q_3 + 2q_2) \end{array} \right) \dot{q}_1 \\
&+ \left(-m_3z_3a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3z_3 \cos(q_3 + q_2)x_3 + m_3z_3 \sin(q_3 + q_2)y_3 - I_{yz_3} \sin(q_3 + q_2) + I_{xz_3} \cos(q_3 + q_2) \right) \dot{q}_2 \\
&+ \left(-m_3z_3a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3z_3 \cos(q_3 + q_2)x_3 + m_3z_3 \sin(q_3 + q_2)y_3 - I_{yz_3} \sin(q_3 + q_2) + I_{xz_3} \cos(q_3 + q_2) \right) \dot{q}_3 \\
C_{21} &= \left(\begin{array}{l} m_2a_2x_2 \sin(2q_2) + m_2a_2y_2 \cos(2q_2) + m_2y_2x_2 \cos(2q_2) + m_3a_3y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + m_3a_2x_3 \sin(2q_2 + q_3) \\ +m_3y_3x_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + m_3a_3x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + m_3a_2y_3 \cos(2q_2 + q_3) + m_3a_3a_2 \sin(2q_2 + q_3) \\ -\frac{1}{2}I_{xx_3} \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}I_{yy_2} \sin(2q_2) - I_{yy_2} \cos(2q_2) - I_{yy_3} \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_2^2 \sin(2q_2) \\ -\frac{1}{2}m_2y_2^2 \sin(2q_2) + \frac{1}{2}m_2a_2^2 \sin(2q_2) + \frac{1}{2}m_2x_2^2 \sin(2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}m_3y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) \\ +\frac{1}{2}m_3x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}I_{yy_3} \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}I_{xx_2} \sin(2q_2) \end{array} \right) \dot{q}_1 \\
C_{22} &= \left(-m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) \right) \dot{q}_3 \\
C_{23} &= \left(-m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) \right) \dot{q}_2 \\
&+ \left(-m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) \right) \dot{q}_3 \\
C_{31} &= \left(\begin{array}{l} \frac{1}{2}m_3a_2y_3 \cos(q_3) + \frac{1}{2}m_3a_2x_3 \sin(q_3) + m_3a_3y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_2x_3 \sin(2q_2 + q_3) \\ +m_3y_3x_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + m_3a_3x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_2y_3 \cos(2q_2 + q_3) + \frac{1}{2}m_3a_2a_3 \sin(2q_2 + q_3) \\ +\frac{1}{2}m_3 \sin(q_3) a_2 a_3 - \frac{1}{2}I_{xx_3} \sin(2q_3 + 2q_2) - I_{yy_3} \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}m_3y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) \\ +\frac{1}{2}m_3x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}I_{yy_3} \sin(2q_3 + 2q_2) \end{array} \right) \dot{q}_1 \\
C_{32} &= \left(m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 + m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) + m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) \right) \dot{q}_2 \\
C_{33} &= 0 \\
G_1 &= 0
\end{aligned}$$

$$G_2 = 9.81 \left(\begin{aligned} & m_2 \cos(q_2) a_2 + m_2 \cos(q_2) x_2 - m_2 \sin(q_2) y_2 + m_3 a_3 \cos(q_3 + q_2) + m_3 \cos(q_2) a_2 \\ & + m_3 \cos(q_3 + q_2) x_3 - m_3 \sin(q_3 + q_2) y_3 \end{aligned} \right)$$

$$G_3 = 9.81 m_3 (a_3 \cos(q_3 + q_2) + \cos(q_3 + q_2) x_3 - \sin(q_3 + q_2) y_3)$$

۲-۶ معادلات ربات با حضور محرکه ها

گشتاور لازم برای حرکت مفاصل ربات، توسط محرکه ها که در اغلب موارد موتورهای الکتریکی هستند فراهم می‌شود. در سیستم انتقال قدرت به دلیل وجود المان‌هایی نظیر چرخ دنده انعطاف-پذیری به وجود می‌آید که این انعطاف را با فنر مدل می‌کنند. این پدیده باعث پیچیده شدن معادلات موتور شده و برای همین در بسیاری از تحلیل‌ها از آن صرف نظر شده است. این صرف نظر کردن باعث می‌شود که به درستی نتوان سیستم را کنترل کرد. در این پایان نامه برای موتورهای الکتریکی اثر انعطاف در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر به وسیله موتورهای مغناطیس دائم چرخ دنده دار حرکت می‌کند.

با توجه به مطالب بیان شده موتورها یک بخش اصلی از دینامیک سیستم رباتیک را تشکیل می‌دهند. گشتاور مورد نیاز هر مفصل توسط موتورها با رابطه زیر فراهم می‌شود [۵۲].

$$\mathbf{J}\ddot{\theta}_m + \mathbf{B}\dot{\theta}_m + \mathbf{r}\tau_1 = \tau_m \quad (2-51)$$

که در این رابطه τ_m بردار گشتاور تولیدی موتورها برای هر مفصل، τ_1 بردار گشتاور بار موتورها، \mathbf{r} ماتریس ضریب کاهشی چرخ دنده‌ها، θ_m بردار زاویه موتورها، \mathbf{q} بردار زاویه مفصل‌ها، \mathbf{J} ماتریس ممان اینرسی‌های روتورها و \mathbf{B} ماتریس ضریب اصطکاک روتورها می‌باشد.

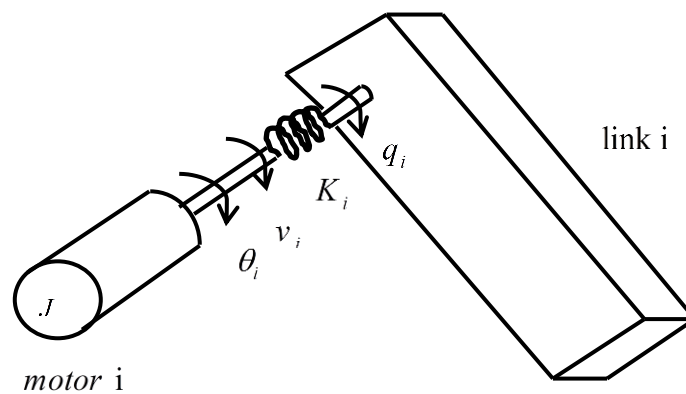
در مدل ساده شده ربات با مفصل انعطاف‌پذیر [۵۳] رابط‌های بازو صلب در نظر گرفته می‌شوند و موتورها به صورت الاستیک به رابط‌ها کوپل شده‌اند. گشتاور ربات‌ها به عنوان ورودی سیستم رباتیک

در نظر گرفته می‌شود و انعطاف مفصل با یک فنر خطی مدل می‌شود در نتیجه معادلات دینامیکی به صورت زیر است:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{K}(\mathbf{r}\boldsymbol{\theta}_m - \mathbf{q}) \quad (52-2)$$

$$\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{rK}(\mathbf{r}\boldsymbol{\theta}_m - \mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_m \quad (53-2)$$

به عنوان مثال شکل (۲-۲) نمایشگر یک بازو با مفصل انعطاف‌پذیر به حرکت درآمده توسط یک موتور از طریق یک فنر پیچشی است که در آن $q_i, i=1, \dots, n$ زاویه مفصل i و $\theta_i, i=1, \dots, n$ زاویه موتور می‌باشد. در این صورت $q_i - \theta_i$ جابه‌جایی الاستیک مفصل i است.



شکل (۲-۲) مکانیزم مفصل انعطاف‌پذیر

۲-۶-۱ معادلات حالت ربات در حضور محرکه ها

برای به دست آوردن معادلات سیستم رباتیک بر اساس ولتاژ موتورها به عنوان ورودی‌های کنترلی معادله الکتریکی موتورهای مغناطیس دائم DC در فرم ماتریسی نوشته می‌شود:

$$\mathbf{R}\mathbf{I}_a + \mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_a + \mathbf{K}_b\boldsymbol{\theta}_m + \mathbf{f} = \mathbf{v} \quad (۵۴-۲)$$

که \mathbf{v} بردار ولتاژ موتورها، \mathbf{I}_a بردار جریان موتورها، $\boldsymbol{\phi}$ بردار اغتشاش‌های خارجی، \mathbf{R} ، \mathbf{L} ، \mathbf{K}_b ماتریس‌های $n \times n$ به ترتیب معرف مقاومت سیم پیچ‌ها، اندوکتانس سیم پیچ‌ها و ضریب‌های ثابت القا می‌باشند.

همچنین:

$$\mathbf{K}_m\mathbf{I}_a = \boldsymbol{\tau}_m \quad (۵۵-۲)$$

که رابطه گشتاور تولیدی موتورها را با جریان آرمیچر نشان می‌دهد. ماتریس $n \times n$ ضریب‌های ثابت گشتاور می‌باشند.

با استفاده از معادلات (۵۲-۲) تا (۵۵-۲) می‌توان مدل فضای حالت زیر را به دست آورد:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{b}\mathbf{v} - \mathbf{b}\boldsymbol{\phi} \quad (۵۶-۲)$$

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

$$f(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} x_2 \\ D^{-1}(x_1)(-g(x_1) - Kx_1 - C(x_1, x_2)x_2 + Krx_3) \\ x_4 \\ J^{-1}(rKx_1 - r^2Kx_3 - Bx_4 + K_mx_5) \\ -L^{-1}(K_b x_4 + Rx_5) \end{bmatrix} \quad (۵۷-۲)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{L}^{-1} \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\theta}_m \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \\ \mathbf{I}_a \end{bmatrix} \quad (58-2)$$

مدل فضای حالت (۵۶-۲) یک سیستم چند متغیره با توزیج سنگین در فرم غیر همراه را نشان می‌دهد. سیستم رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک موتورها بسیار پیچیده است. در بسیاری از کارهای تحقیقاتی از دینامیک موتورها صرف نظر می‌شود ولی دینامیک موتورها نقش مهمی در کنترل در حرکت‌های سریع و دقیق ایفا می‌کند.

فصل سوم

کنترل ربات با مفاصل انعطاف پذیر

با راهبرد کنترل گشتاور

۳-۱ ربات هایی با مفاصل انعطاف پذیر و کنترل آنها

همان طور که در فصل اول بیان شد، اثر انعطاف به دلیل وجود المان‌هایی نظیر چرخ دنده در سیستم انتقال قدرت به وجود می‌آید. معمولاً انعطاف را در شبیه سازی با فنر مدل می‌کنند و این فنر باعث می‌شود زاویه شفت موتور با زاویه مفصل متفاوت باشد و در نتیجه طراحی کنترل نسبت به حالت صلب پیچیده تر است. برای سهولت در کنترل ربات‌هایی با مفصل انعطاف‌پذیر از شیوه کنترل ربات به صورت کنترل جداگانه مفاصل استفاده می‌شود. همچنین در راهبرد کنترل ولتاژ قانون کنترل به صورت جداگانه بر موتورهای مفاصل اعمال می‌شود. در ادامه نحوه به دست آوردن زاویه موتورها با زاویه مجری نهایی با اثر انعطاف بیان می‌گردد و طراحی کنترل کننده بر مبنای مدل برای ربات انعطاف‌پذیر شرح داده می‌شود.

معادله دینامیکی ربات های صلب عبارت است از:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau_1 \quad (1-3)$$

در ربات‌های صلب رابطه بین زاویه موتور با زاویه مفصل به صورت زیر است:

$$q = r\theta_m \quad (2-3)$$

که q بردار زاویه مفصلی، θ_m بردار زوایای موتور و r ماتریس ضرایب چرخ دنده می‌باشد.

از طرفی معادله دینامیکی موتور عبارت است از:

$$J\ddot{\theta}_m + B\dot{\theta}_m + r\tau_1 = \tau_m \quad (3-3)$$

از آنجایی که در ربات‌های انعطاف‌پذیر مفاصل دارای خاصیت انعطاف‌پذیری هستند، تغییر زاویه در موتور با تغییر زاویه در مفصل برابر نمی‌باشد و برای هر موتور داریم:

$$\tau_1 = \mathbf{K}(\mathbf{r}\theta_m - \mathbf{q}) \quad (4-3)$$

که \mathbf{K} ضریب انعطاف‌پذیری می‌باشد. بنابراین معادله دینامیکی ربات و موتور به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{K}(\mathbf{r}\theta_m - \mathbf{q}) \quad (5-3)$$

$$\mathbf{J}\ddot{\theta}_m + \mathbf{B}\dot{\theta}_m + \mathbf{r}\mathbf{K}(\mathbf{r}\theta_m - \mathbf{q}) = \tau_m \quad (6-3)$$

از معادله (4-3) داریم:

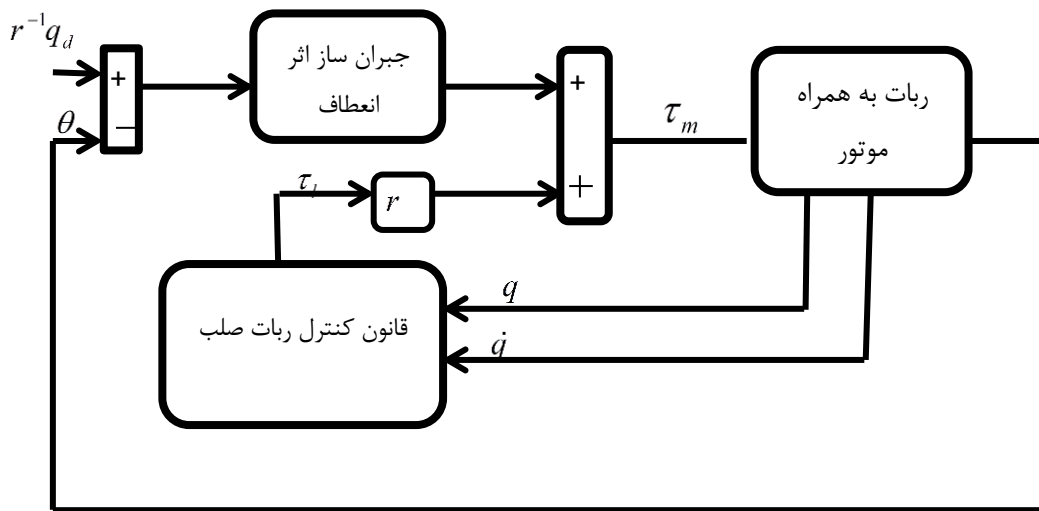
$$\mathbf{K}^{-1}\tau_1 = \mathbf{r}\theta_m - \mathbf{q} \quad (7-3)$$

که نتیجه می‌دهد:

$$\mathbf{q} = \mathbf{r}\theta_m - \mathbf{K}^{-1}\tau_1 \quad (8-3)$$

مقایسه رابطه (8-3) و (2-3) تفاوت ربات صلب با ربات انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد.

مساله‌ای که در اینجا مطرح است این است که چه هنگام یک ربات انعطاف‌پذیر تبدیل به ربات صلب می‌شود. از مقایسه دو رابطه (8-3) و (2-3) متوجه می‌شویم که در صورت برقراری رابطه $\mathbf{q} = \mathbf{r}\theta_m$ ربات همانند ربات صلب شده است. به عبارت دیگر $\theta_m \rightarrow \mathbf{r}^{-1}\mathbf{q}$ یک هدف کنترلی ما می‌شود تا ربات، مانند ربات صلب عمل کند. از طرفی هدف اصلی ما در سیستم ربات این است که $q \rightarrow q_d$ بنابراین با یک قانون کنترل ربات صلب می‌توانیم به این هدف کنترلی نیز برسیم. طرح کلی سیستم پیشنهادی به صورت زیر قابل نمایش است:



شکل (۱-۳) سیستم کنترل ربات انعطاف پذیر

۲-۳ طراحی کنترل کننده

در این قسمت به طراحی کنترل کننده با راهبرد گشتاور برای ربات با مفاصل انعطاف پذیر بر مبنای دیاگرام شکل (۱-۳) می پردازیم. از یک سیستم فازی تطبیقی برای جبران اثر انعطاف استفاده خواهیم کرد و یک روش کنترل ربات صلب با استفاده از خطی سازی فیدبکی استفاده می شود.

با توجه به معادله دینامیکی ربات صلب (۱-۳) قانون خطی سازی پس خورد به صورت زیر پیشنهاد می شود.

$$\tau = \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{u} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (۹-۳)$$

که در آن $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^n$ به صورت یک ورودی جدید تعریف می شود. با اعمال (۹-۳) به معادله دینامیکی (۱-۳) داریم:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{u} \quad (۱۰-۳)$$

سیستم حاصل خطی و بدون تزویج است. قانون کنترل خطی زیر برای کنترل ردگیری مسیر مطلوب q_d پیشنهاد می‌شود.

$$\mathbf{u} = \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) \quad (11-3)$$

که در آن \mathbf{K}_d و \mathbf{K}_p ماتریس‌های قطری مثبت $n \times n$ هستند که پارامترهای کنترل می‌باشند. با جایگذاری (11-3) در (9-3) قانون کنترل نهایی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_d - \mathbf{q})) + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (12-3)$$

مدل ربات با مفصل انعطاف‌پذیر به صورت زیر است:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{K}(\mathbf{r}\boldsymbol{\theta}_m - \mathbf{q}) \quad (13-3)$$

$$\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{r}\mathbf{K}(\mathbf{r}\boldsymbol{\theta}_m - \mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_m \quad (14-3)$$

جایگذاری (13-3) در (14-3) می‌دهد:

$$\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{r}\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{r}\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{r}\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_m \quad (15-3)$$

اگر اثر انعطاف در رابطه (15-3) را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$\boldsymbol{\theta}_m = \mathbf{r}^{-1}\mathbf{q} + \boldsymbol{\delta} \quad (16-3)$$

جایگذاری (16-3) در (15-3) می‌دهد:

$$\mathbf{J}\mathbf{r}^{-1}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{B}\mathbf{r}^{-1}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{r}\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{r}\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{r}\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_m \quad (17-3)$$

با مرتب کردن (17-3) به دست می‌آید:

$$(\mathbf{r}\mathbf{D}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}\mathbf{r}^{-1})\ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{r}\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{B}\mathbf{r}^{-1})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{r}\mathbf{G}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\tau}_m \quad (18-3)$$

که در آن η اثر انعطاف با توصیف زیر است:

$$\eta = J\ddot{\delta} + B\dot{\delta} \quad (۱۹-۳)$$

τ_m قانون کنترل به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\tau_m = \tau_{m_1} + \tau_{m_2} \quad (۲۰-۳)$$

τ_{m_1} برای ربات صلب، τ_{m_2} برای جبران اثر انعطاف که با هدف $q = r\theta_m$ انجام می‌شود:

قانون کنترل برای ربات صلب همانند رابطه (۱۲-۳) به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\tau_{m_1} = (rD + Jr^{-1})[\ddot{q}_d + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q)] + (rC + Br^{-1})\dot{q} + rG \quad (۲۱-۳)$$

قانون کنترل برای جبران اثر انعطاف با یک کنترل کننده فازی تطبیقی چنین پیشنهاد می‌شود:

$$\tau_{m_2} = \hat{f}^T \psi(\delta, \dot{\delta}) \quad (۲۲-۳)$$

و هدف آن است که $r^{-1}q \rightarrow \theta_m$

با جایگذاری (۲۱-۳) و (۲۲-۳) در (۱۸-۳) به دست می‌آید:

$$(rD + Jr^{-1})[\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e] = \hat{f}^T \psi(\delta, \dot{\delta}) - \eta \quad (۲۳-۳)$$

که $e = q_d - q$ خطای ردگیری است.

اگر اثر انعطاف جبران شود یعنی $\delta \rightarrow 0$ آنگاه $\hat{f} \rightarrow \eta$ بنابراین سمت راست معادله (۲۳-۳) صفر می

شود و در نتیجه $q \rightarrow q_d$.

رابطه (۱۹-۳) در ساختار مجزا شده عبارتست از:

$$\eta = J\ddot{\delta} + B\dot{\delta} \quad (۲۴-۳)$$

که در آن $J\delta$ و $B\delta$ ، i امین المان از بردارهای $\mathbf{J}\delta$ و $\mathbf{J}\dot{\delta}$ هستند. اگر از موتور استنتاج فازی ممدانی، فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز استفاده شود می توان سیستم فازی تطبیقی را به صورت زیر ارائه داد [۲۱]:

$$\tau_{m_2} = \sum_{l=1}^9 \hat{f}_l \psi_l(\delta, \dot{\delta}) = \hat{\mathbf{f}}^T \boldsymbol{\Psi}(\delta, \dot{\delta}) \quad (25-3)$$

که در رابطه بالا داریم $\boldsymbol{\Psi} = [\psi_1 \dots \psi_9]^T$ و ψ_l عبارتست از:

$$\psi_l(\delta, \dot{\delta}) = \frac{\mu_{A_l}(\delta) \mu_{B_l}(\dot{\delta})}{\sum_{l=1}^9 \mu_{A_l}(\delta) \mu_{B_l}(\dot{\delta})} \quad (26-3)$$

$\mu_l \in [0,1]$ توابع تعلق و \hat{f} پارامترهای تطبیق هستند که در ادامه محاسبه می شوند.

τ_{m_2} خروجی سیستم فازی با دو ورودی δ و $\dot{\delta}$ می باشد. اگر برای هر ورودی فازی سه تابع تعلق در نظر گرفته شود فضای کنترل با ۹ قانون فازی پوشش داده می شود. قوانین فازی به فرم ممدانی به صورت زیر نوشته می شوند:

(۲۷-۳) قانون l : اگر δ برابر با A_l و $\dot{\delta}$ برابر با B_l باشد آنگاه τ_{m_2} برابر با C_l می شود.

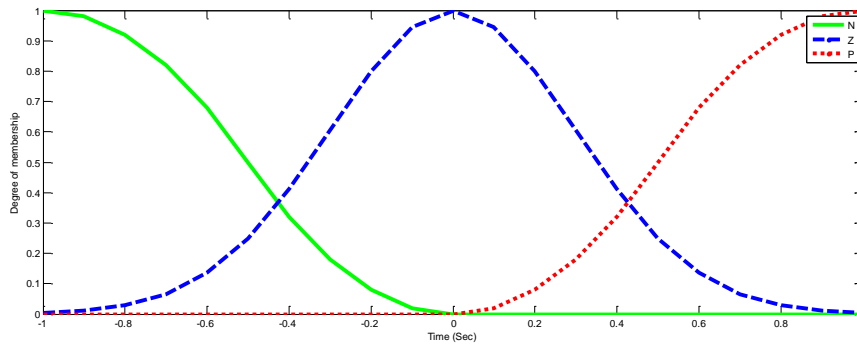
l قانون l Rule قانون l ام را برای $l = 1, \dots, 9$ تعیین می نماید. A_l ، B_l ، C_l توابع تعلق فازی مربوط به

δ ، $\dot{\delta}$ ، τ_{m_2} می باشد. سه تابع تعلق P ، Z و N به صورت زیر برای هر ورودی در نظر می گیریم.

$$\mu_N(x) = \begin{cases} 1 & x \leq -1 \\ 1 - 2(x+1)^2 & -1 \leq x \leq -0.5 \\ 2x^2 & -0.5 \leq x \leq 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases} \quad \mu_P(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 2x^2 & 0 \leq x \leq 0.5 \\ 1 - 2(x+1)^2 & 0.5 \leq x \leq 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases} \quad (28-3)$$

$$\mu_Z(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \sigma = 0.3$$

توابع تعلق متغیر خروجی با تابع گوسین زیر بیان شده است:



شکل (۲-۳) توابع تعلق ورودی فازی

$$\mu_{c_l} = \exp(-(\tau_{m_2} - \hat{f}_l)^2 / (2\sigma^2)) \quad (۲۹-۳)$$

که در آن \hat{f}_l مرکز C_l است و $\sigma = 0.3$.

قوانین فازی مطابق با جدول زیر می باشد:

جدول (۱-۳) قوانین فازی

<i>Rule 1</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A_l	P	P	P	Z	Z	Z	N	N	N
B_l	P	Z	N	P	Z	N	P	Z	N
C_l	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9

با افزودن کنترل کننده فازی (۲۵-۳) به (۲۴-۳) خواهیم داشت:

$$J(\ddot{\delta} + \frac{B}{J} \dot{\delta}) = \hat{\mathbf{f}}^T \boldsymbol{\psi}(\delta, \dot{\delta}) \quad (۳۰-۳)$$

با توجه به تئوری تقریب زنی سیستم های فازی [۲۵] می توان نوشت:

$$J(\frac{B}{J} \dot{\delta} - k_1 \dot{\delta} - k_2 \delta) = \hat{\mathbf{f}}^T \boldsymbol{\psi}(\delta, \dot{\delta}) + \varepsilon \quad (۳۱-۳)$$

که ε خطای تقریب و k_1 و k_2 مثبت هستند. با اعمال (۳۱-۳) به (۳۰-۳) داریم:

$$(\ddot{\delta} + k_1 \dot{\delta} + k_2 \delta) = J^{-1}(\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f})^T \boldsymbol{\psi}(\delta, \dot{\delta}) - J^{-1} \varepsilon \quad (۳۲-۳)$$

سیستم (۳۲-۳) را می توان به فرم فضای حالت زیر نوشت:

$$\ddot{\delta} = -k_1 \dot{\delta} - k_2 \delta + J^{-1}(\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f})^T \boldsymbol{\psi}(\delta, \dot{\delta}) - J^{-1} \varepsilon \quad (۳۳-۳)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}w, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ -\mathbf{k}_2 & -\mathbf{k}_1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix}, w = J^{-1}(\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f})^T \boldsymbol{\psi}(\delta, \dot{\delta}) - J^{-1} \varepsilon$$

جهت به دست آوردن قانون تطبیق برای همگرایی \mathbf{X} ، تابع لیاپانوف به صورت زیر پیشنهاد می شود:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} + \frac{J^{-1}}{2\gamma} (\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f})^T (\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f}) \quad (۳۴-۳)$$

که ضریب ثابت γ مثبت و ماتریس های \mathbf{P} و \mathbf{Q} ماتریس های مثبت معین هستند که در معادله ماتریسی لیاپانوف زیر صدق میکنند:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q} \quad (۳۵-۳)$$

با استفاده از روابط (۳۳-۳) تا (۳۵-۳) $\dot{\mathbf{F}}$ به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{\mathbf{F}} = -\frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 J^{-1} ((\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f})^T \boldsymbol{\psi}(\delta, \dot{\delta}) - \varepsilon) + \frac{J^{-1}}{\gamma} \dot{\hat{\mathbf{f}}}^T (\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f}) \quad (۳۶-۳)$$

که $\mathbf{P}_2 = \mathbf{P} \mathbf{B}$ ستون دوم ماتریس \mathbf{P} است. از (۳۶-۳) می توان به دست آورد:

$$\dot{\mathbf{F}} = -\frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + J^{-1} (\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{f})^T (\mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\psi}(\delta, \dot{\delta}) + \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\mathbf{f}}}) - \mathbf{X}^T J^{-1} \mathbf{P}_2 \varepsilon \quad (۳۷-۳)$$

بنابراین قانون تطبیق به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{\hat{\mathbf{f}}} = -\gamma \mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\psi}(\delta, \dot{\delta}) \rightarrow \hat{\mathbf{f}} = -\int_0^t \gamma \mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\psi}(\delta, \dot{\delta}) dt + \hat{\mathbf{f}}(0) \quad (38-3)$$

داریم:

$$\dot{\mathbf{F}} = -\frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} - \mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 J^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (39-3)$$

باید $\dot{\mathbf{F}} < 0$ در نتیجه خواهیم داشت:

$$-\mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 J^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} \leq 0.5 \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} \quad (40-3)$$

از روابط ریاضی [۱۴] داریم:

$$\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{X}\|^2 \leq \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} \leq \lambda_{\max}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{X}\|^2 \quad (41-3)$$

$\lambda_{\min}(\mathbf{Q})$ و $\lambda_{\max}(\mathbf{Q})$ مقادیر ویژه حداقل و حداکثر ماتریس \mathbf{Q} هستند برای تضمین (۴۰-۳)

کافیست:

$$-\mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 J^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} \leq 0.5 \lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{X}\|^2 \quad (42-3)$$

با توجه به نامساوی شوارتز داریم:

$$-\mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 J^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} \leq \left\| -\mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 J^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} \right\| \leq \|\mathbf{X}\| \cdot \|\mathbf{P}_2\| \cdot |J^{-1}| \cdot |\boldsymbol{\varepsilon}| \quad (43-3)$$

اگر

$$\|\mathbf{X}\| \cdot \|\mathbf{P}_2\| \cdot |J^{-1}| \cdot |\boldsymbol{\varepsilon}| \leq 0.5 \lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{X}\|^2 \quad (44-3)$$

یا

$$\frac{2|J^{-1}| \|\mathbf{P}_2\| |\boldsymbol{\varepsilon}|}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q})} \leq \|\mathbf{X}\| \quad (45-3)$$

در نتیجه تا زمانی که رابطه (۳-۴۵) برقرار باشد، \mathbf{X} کاهش می‌یابد. یا به عبارت دیگر می‌توان

گفت \mathbf{X} وارد یک فضای کروی محدود به شعاع $\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) / \varepsilon \| \mathbf{P}_2 \| \| J^{-1} \|$ می‌گردد.

۳-۳ آنالیز پایداری

اثبات محدودیت متغیرهای حالت سیستم توسط آنالیز پایداری صورت می‌گیرد. به منظور اثبات

پایداری فرض زیر در نظر گرفته می‌شود.

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

مرتبه مورد نیاز در دسترس و همگی محدود باشد.

با توجه به بخش قبل $\dot{\mathbf{F}} < 0$ نتیجه می‌دهد $\| \mathbf{X} \| \leq 2 \| J^{-1} \| \| \mathbf{P}_2 \| \varepsilon / \lambda_{\min}(\mathbf{Q})$ و $\| \mathbf{X} \| \leq \| 0 \|$ که

$\mathbf{X}(0)$ مقدار اولیه بردار \mathbf{X} است. بنابراین $\| \mathbf{X} \| \leq \| 0 \|$ و $\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) / \varepsilon \| \mathbf{P}_2 \| \| J^{-1} \|$ محدود است.

که $\mathbf{X}^T = [x_1 \ x_2]$ ، $x_1 = \delta = r\theta - q$ و $x_2 = r\dot{\theta} - \dot{q}$ بنابراین سمت راست معادله (۳-۲۴) محدود

است. این سیستم یک معادله دیفرانسیل مرتبه دو با ورودی محدود است و ضرایب K_p و K_d مثبت

هستند بنابراین طبق معیار راث هرویتز پایدار است و e, \dot{e}, \ddot{e} محدود هستند. با توجه به اینکه

$$q = q_d - e \quad \text{و} \quad \dot{q} = \dot{q}_d - \dot{e} \quad \text{و} \quad \ddot{q} = \ddot{q}_d - \ddot{e}$$

از طرفی با توجه به اینکه بردار \mathbf{X} محدود است و به سمت صفر میل می‌کند بنابراین

$$\delta \rightarrow 0 \Rightarrow \theta \rightarrow r^{-1}q \quad \text{و} \quad \dot{\delta} \rightarrow 0 \Rightarrow \dot{\theta} \rightarrow r^{-1}\dot{q} \quad \text{و} \quad q \rightarrow 0 \Rightarrow \dot{q} \rightarrow 0$$

محدود هستند در نتیجه تمام متغیرهای حالت سیستم محدود می‌باشند.

۴-۳ شبیه سازی روش کنترل

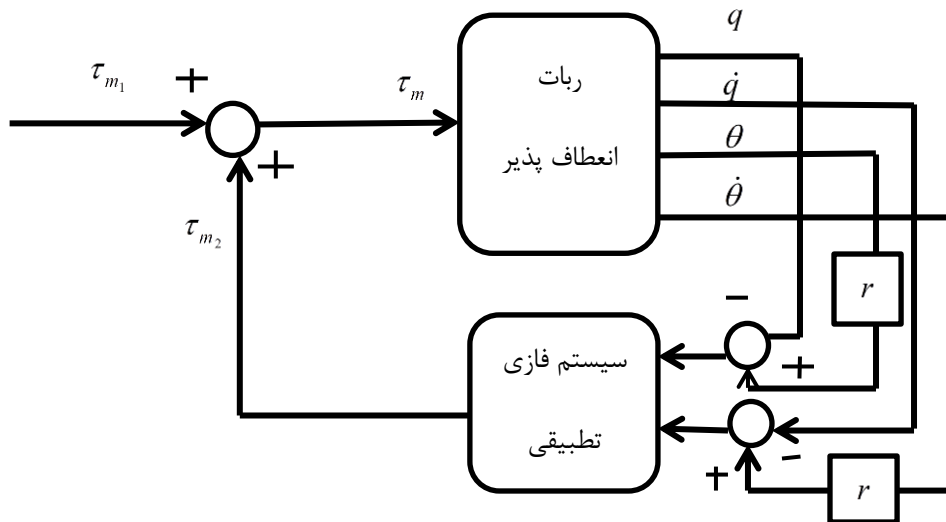
قانون کنترل (۳-۲۲) و (۳-۲۱) بر روی ربات سه رابط هنرمند با مفاصل انعطاف پذیر پیاده سازی می شود. و سپس عملکرد سیستم کنترل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دیاگرام سیستم کنترل به در شکل (۳-۳) نمایش داده شده است:

۳-۴-۱ کنترل ردگیری

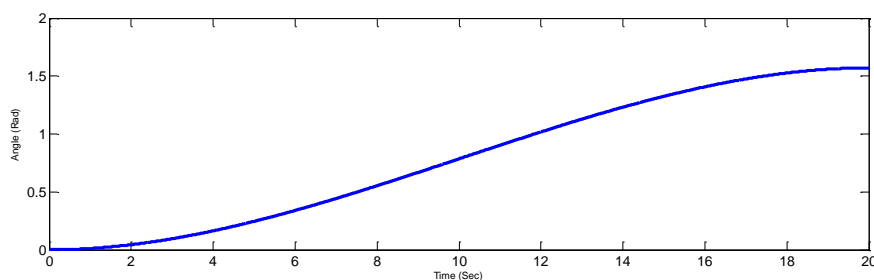
مسیر مطلوب برای ردگیری مفاصل به صورت زیر تعریف می شود:

$$q_d = \frac{3\pi}{800}t^2 - \frac{\pi}{8000}t^3 \quad (۳-۴۵)$$

که در شکل (۳-۴) مشاهده می کنید



شکل (۳-۳) بلوک دیاگرام سیستم کنترل



شکل (۳-۴) مسیر مطلوب برای ردگیری ربات

جدول پارامترهای موتور ها به صورت زیر است:

جدول (۳-۲) پارامترهای موتور

U_{\max} (V)	R (Ω)	K_b ($\frac{V \cdot s}{rad}$)	L (H)	J_m ($\frac{Nm \cdot s^2}{rad}$)	B_m ($\frac{Nm \cdot s}{rad}$)	r	k
۵۰	۱.۶	۰.۲۶	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۱	۱۰۰۰

پارامترهای مورد نیاز در کنترل کننده به صورت زیر انتخاب می شود:

$$K_p = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 200 \end{bmatrix}, K_d = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}, \gamma = \begin{bmatrix} 100 \\ 10 \\ 10 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

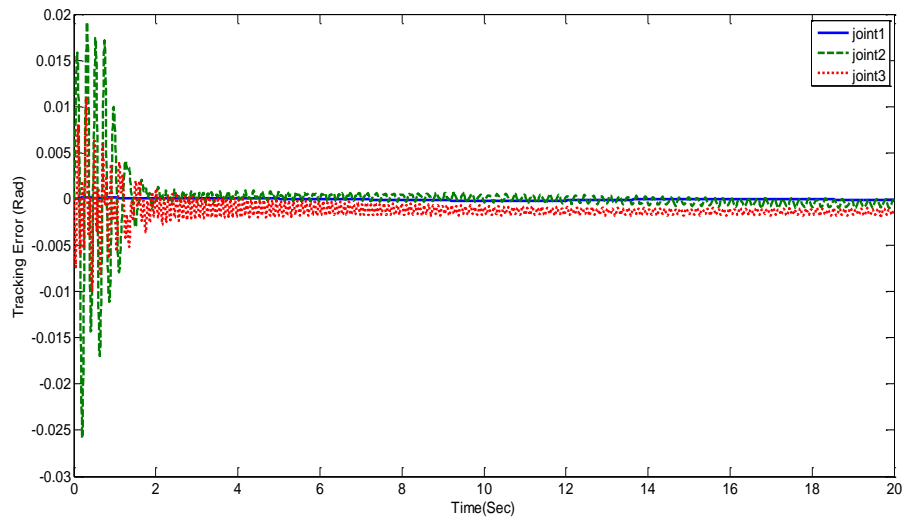
شکل (۳-۵) عملکرد سیستم کنترل را نشان می دهد همانطور که مشاهده می کنید خطا کوچک

است و عمل ردگیری به خوبی انجام شده است. در شکل (۳-۶) گشتاور اعمالی به موتور ربات قابل

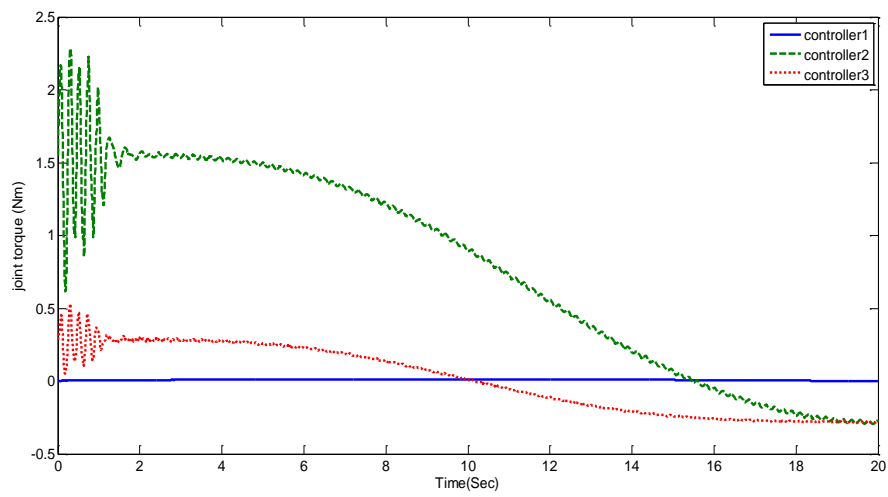
مشاهده است که به دلیل گشتاور راه اندازی و جبران انعطاف در ابتدا دارای نوسان است. در شکل (۳-۷)

پارامترهای تطبیق سیستم فازی تطبیقی نشان داده شده است که تقریباً همگی به یک مقدار

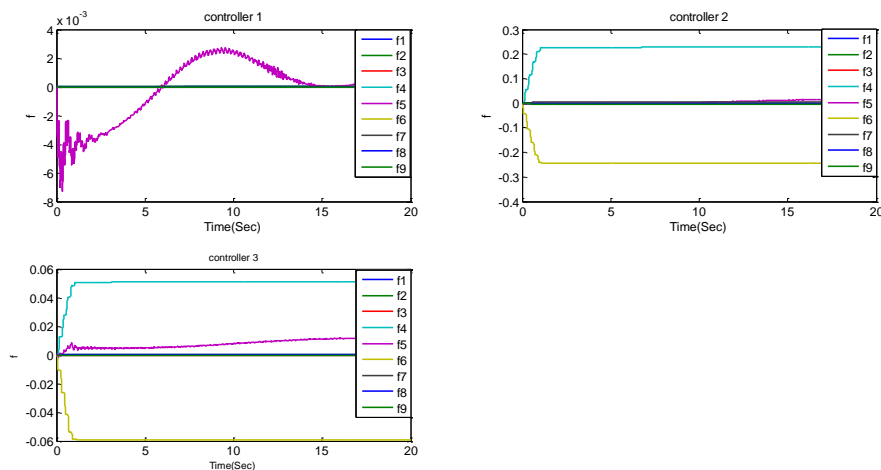
ثابتی همگرا شده اند.



شکل (۵-۳) خطای ردگیری مفاصل انعطاف پذیر



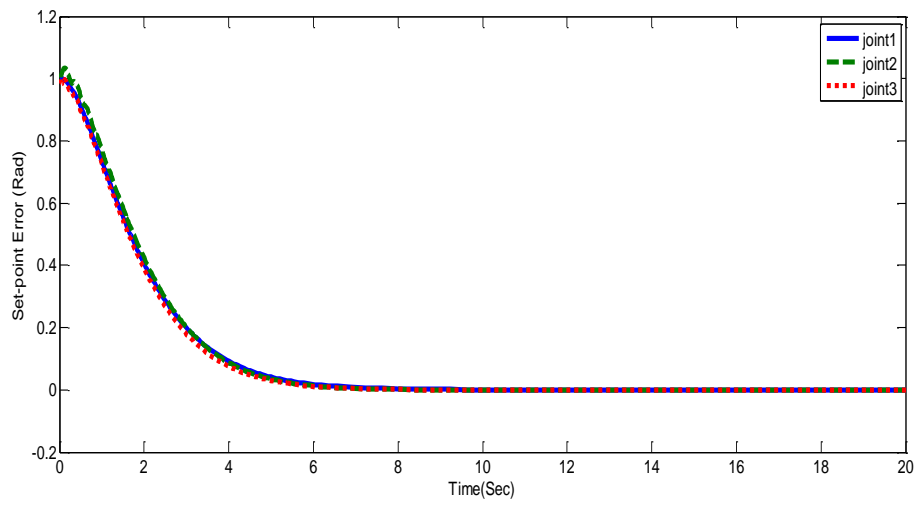
شکل (۶-۳) سیگنال های کنترل



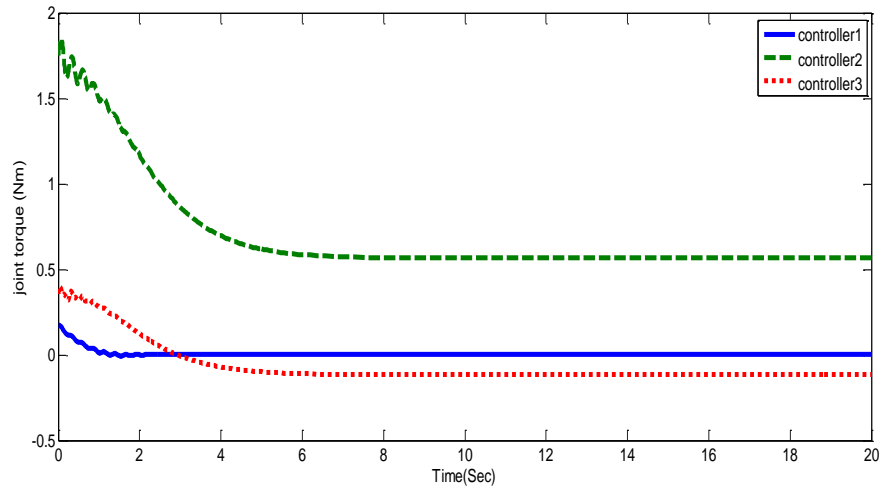
شکل (۷-۳) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق

۲-۴-۳ تنظیم

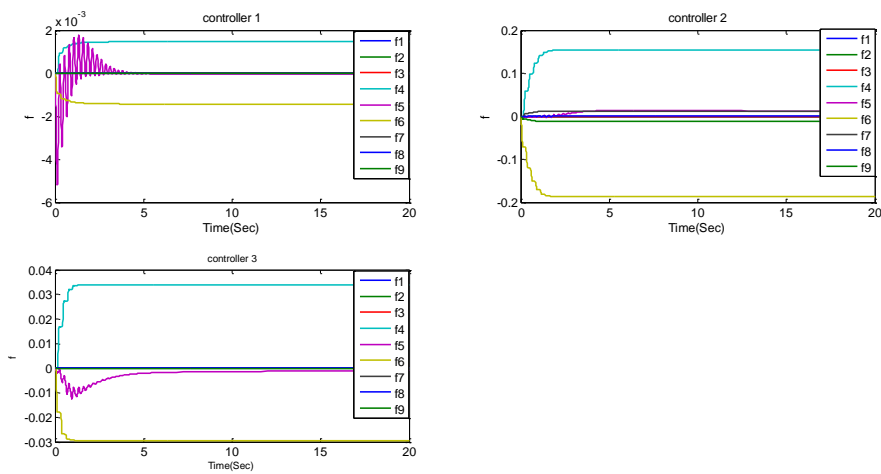
برای بررسی عملکرد تنظیم سیستم کنترل، موقعیت مطلوب مفاصل بر روی 1 rad تنظیم شده است. پارامترهای مورد نیاز مانند حالت قبل انتخاب شده است. شکل (۸-۳) خطای تنظیم مفاصل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سیستم کنترل در تنظیم به خوبی عمل می‌کند و نمودار خطای مفاصل پس از مدت کوتاهی به صفر میل می‌کند. سیگنال‌های کنترل در تنظیم در شکل (۳-۹) نمایش داده شده‌اند. به دلیل وجود خطای اولیه سیگنال‌های کنترل در آغاز زیاد ولی تلاش کنترلی با کاهش خطا کاهش می‌یابد. همگرایی پارامترها در تنظیم در شکل (۱۰-۳) قابل مشاهده است. همانگونه که در شکل مشخص است پارامترها پس از مدت کوتاهی به خوبی به مقدار ثابتی همگرا می‌شوند.



شکل (۸-۳) خطای تنظیم مفاصل



شکل (۹-۳) سیگنال های کنترل



شکل (۱۰-۳) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق

فصل چهارم

کنترل فازی تطبیقی مستقیم ربات با مفاصل انعطاف-

پذیر با راهبرد کنترل گشتاور

۴-۱ مقدمه

قانون کنترل (۳-۲۱) برای ربات صلب یک قانون مبتنی بر مدل است. در بسیاری از موارد در دینامیک ربات نامعینی وجود دارد و مدل دقیق ربات در دسترس نیست. روش فازی تطبیقی مستقیم می‌تواند سیستم‌های غیر خطی همراه با عدم قطعیت را کنترل نماید. بنابراین در این فصل روش طراحی کنترل‌کننده فازی تطبیقی مستقیم برای ربات صلب ارائه می‌شود و به عنوان یک قانون کنترل ربات صلب بر مبنای بلوک دیاگرام (۳-۱) و با استفاده از کنترل‌کننده فازی تطبیقی (۳-۲۲) برای جبران اثر انعطاف، این قانون بر روی ربات انعطاف‌پذیر پیاده‌سازی می‌شود.

۴-۲ طراحی کنترل‌کننده

از رابطه (۳-۱۸) داشتیم:

$$(\mathbf{rD} + \mathbf{Jr}^{-1})\ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{rC} + \mathbf{Br}^{-1})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{rG} + \boldsymbol{\varphi} + \boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\tau}_m \quad (۱-۴)$$

که در آن $\boldsymbol{\varphi}$ بردار اغتشاشات خارجی و $\boldsymbol{\eta}$ اثر انعطاف با توصیف زیر است:

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\delta}} \quad (۲-۴)$$

$\boldsymbol{\tau}_m$ قانون کنترل به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\boldsymbol{\tau}_m = \boldsymbol{\tau}_{m_1} + \boldsymbol{\tau}_{m_2} \quad (۳-۴)$$

$\boldsymbol{\tau}_{m_1}$ برای ربات صلب، $\boldsymbol{\tau}_{m_2}$ برای جبران اثر انعطاف که با کنترل‌کننده (۳-۲۲) جبران می‌شود.

جهت طراحی بر اساس مدل ربات صلب سیستم (۴-۱) را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$(\mathbf{rD} + \mathbf{Jr}^{-1})\ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{rC} + \mathbf{Br}^{-1})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{rG} + \boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\tau}_{m_1} + \boldsymbol{\tau}_{m_2} - \boldsymbol{\eta} \quad (۴-۴)$$

τ_{m_2} کنترل کننده (۳-۲۲) می باشد. برای طراحی τ_{m_1} ابتدا تلاش می کنیم اثر ضریب ورودی را حذف نماییم زیرا کنترل کننده فازی تطبیقی مستقیم برای سیستم‌هایی پیاده‌سازی می شود که ضریب ورودی ثابت باشد ولی در مدل گشتاور ضریب ورودی متغیر است. بر مبنای مدل ربات می توان نوشت:

$$\ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{rD} + \mathbf{Jr}^{-1})\ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{rC} + \mathbf{Br}^{-1})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{rG} + \boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\tau}_{m_1} \quad (۵-۴)$$

که تنها $\ddot{\mathbf{q}}$ به مدل اضافه و کم شده است. بنابراین

$$\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{a}\dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\tau}_{m_1} \quad (۶-۴)$$

$$\mathbf{a} = (\mathbf{rC} + \mathbf{Br}^{-1}), \boldsymbol{\mu} = (\mathbf{rG} + ((\mathbf{rD} + \mathbf{Jr}^{-1}) - \mathbf{I})\ddot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\varphi}) \quad (۷-۴)$$

برای طراحی سیستم کنترل فازی تطبیقی مستقیم، مشابه سیستم فازی قبل عمل می کنیم. خطای ردگیری و مشتق خطای ردگیری به عنوان ورودی سیستم فازی در نظر می گیریم. گشتاور- نیرو هر مفصل به عنوان خروجی آن در نظر می گیریم. اگر برای هر ورودی سه تابع تعلق در نظر گرفته شود فضای کنترل با ۹ قانون پوشش داده می شود. اگر در سیستم (۶-۴) τ_{m_1} ، i امین مولفه از بردار $\boldsymbol{\tau}_{m_1}$ باشد، قوانین فازی به فرم ممدانی بدین صورت نوشته شده اند:

$$\text{قانون } l: \text{ اگر } e \text{ برابر با } A_l \text{ و } \dot{e} \text{ برابر با } B_l \text{ باشد آنگاه } \tau_{m_1} \text{ برابر با } C_l \text{ می شود} \quad (۸-۴)$$

Rule l قانون l ام را برای $l = 1, \dots, 9$ تعیین می نماید. A_l ، B_l ، C_l توابع تعلق فازی مربوط به e ، \dot{e} ، τ_{m_1} می باشد. سه تابع تعلق P ، Z و N به صورت زیر برای هر ورودی مطابق شکل (۳-۲) در نظر گرفته شده است. توابع تعلق با توابع ریاضی مطابق با (۳-۲۷) تعریف شده اند. توابع تعلق متغیر خروجی با تابع گوسین زیر بیان شده است:

$$\mu_{c_l} = \exp(-(\tau_{m_2} - \hat{y}_l)^2 / (2\sigma^2)) \quad (۹-۴)$$

که در آن \hat{y}_l مرکز C_l است و $\sigma = 0.3$. قوانین فازی مشابه قبل در جدول (۳-۱) نوشته شده اند. اگر از موتور استنتاج فازی ممدانی، فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز استفاده شود می-توان قانون کنترل فازی تطبیقی مستقیم را برای ربات صلب به صورت زیر پیشنهاد نمود:

$$\tau_{m_1} = \hat{\mathbf{y}}^T \boldsymbol{\psi}(e, \dot{e}) \quad (10-4)$$

که در رابطه بالا داریم $\boldsymbol{\psi} = [\psi_1 \dots \psi_9]^T$ و ψ_l عبارتست از معادله (۳-۲۵) و $e = q_d - q$ خطای ردگیری تعریف می‌شود. $\hat{\mathbf{y}}$ پارامترهای تطبیق هستند که در ادامه محاسبه می‌شوند. با اعمال τ_{m_1} داریم:

$$\ddot{q} + a\dot{q} + \mu = \hat{\mathbf{y}}^T \boldsymbol{\psi}(e, \dot{e}) \quad (11-4)$$

که در آن $a\dot{q}$ ، \ddot{q} و μ ، i امین مولفه از بردارهای $\ddot{\mathbf{q}}$ ، $a\dot{\mathbf{q}}$ و $\boldsymbol{\mu}$ هستند و $\hat{\mathbf{y}}$ تخمین \mathbf{y} است که در ادامه تعریف خواهد شد. بنابر بر تقریب‌گر عمومی بودن سیستم‌های فازی می‌توان برای هر مفصل نوشت:

$$(\ddot{q}_d + k_1(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_2(q_d - q) + a\dot{q} + \mu) = \mathbf{y}^T \boldsymbol{\psi}(e, \dot{e}) + \varepsilon \quad (12-4)$$

که ε خطای تقریب و پارامترهای k_1 و k_2 مثبت هستند. با استفاده از رابطه (۴-۱۱) و (۴-۱۲) داریم:

$$\ddot{q}_d - \ddot{q} + k_1(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_2(q_d - q) = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T \boldsymbol{\psi}(e, \dot{e}) + \varepsilon \quad (13-4)$$

سیستم (۴-۱۳) را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{A}\mathbf{E} + \mathbf{B}w, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ -\mathbf{k}_2 & -\mathbf{k}_1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix}, w = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T \boldsymbol{\psi}(e, \dot{e}) + \varepsilon \quad (14-4)$$

برای به دست آوردن قانون تطبیق به گونه‌ای که خطا همگرا شود تابع مثبت معین زیر را پیشنهاد

می‌کنیم:

$$F = \frac{1}{2} \mathbf{E}^T \mathbf{P} \mathbf{E} + \frac{1}{2\gamma} (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \quad (15-4)$$

که γ مثبت و ماتریس‌های \mathbf{P} و \mathbf{Q} ماتریس‌های مثبت معین هستند که در معادله ماتریسی لیاپانوفی زیر صدق می‌کند.

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q} \quad (16-4)$$

با مشتق گرفتن از رابطه (15-4) داریم:

$$\dot{F} = -\frac{1}{2} \mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} + (\mathbf{E}^T \mathbf{P}_2 (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \psi(e, \dot{e}) - \frac{1}{\gamma} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \dot{\hat{\mathbf{y}}}) \quad (17-4)$$

که $\mathbf{P}_2 = \mathbf{P} \mathbf{B}$ ستون دوم ماتریس \mathbf{P} است از (17-4) می‌توان به دست آورد:

$$\dot{F} = -\frac{1}{2} \mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} + (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) (\mathbf{E}^T \mathbf{P}_2 \psi(e, \dot{e}) - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\mathbf{y}}}) + \mathbf{E}^T \mathbf{P}_2 \varepsilon \quad (18-4)$$

بنابراین با انتخاب قانون تطبیق به صورت زیر

$$\dot{\hat{\mathbf{y}}} = \gamma \mathbf{E}^T \mathbf{P}_2 \psi(e, \dot{e}) \rightarrow \hat{\mathbf{y}} = \int_0^t \gamma \mathbf{E}^T \mathbf{P}_2 \psi(e, \dot{e}) dt + \hat{\mathbf{y}}(0) \quad (19-4)$$

داریم:

$$\dot{F} = -\frac{1}{2} \mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} + \mathbf{E}^T \mathbf{P}_2 \varepsilon \quad (20-4)$$

برای کاهش خطای ردگیری باید $\dot{F} < 0$ باشد بنابراین:

$$\mathbf{E}^T \mathbf{P}_2 \varepsilon \leq 0.5 \mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} \quad (21-4)$$

همانطور که در فصل قبل نیز اشاره شد با در نظر گرفتن:

$$\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|\mathbf{E}\|^2 \leq \mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} \leq \lambda_{\max}(\mathbf{Q})\|\mathbf{E}\|^2 \quad (22-4)$$

برای تضمین (21-4) کفایت:

$$\mathbf{E}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{E} \leq 0.5 \lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|\mathbf{E}\|^2 \quad (23-4)$$

از آنجا که

$$\mathbf{E}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{E} \leq \|\mathbf{E}\| \cdot \|\mathbf{P}_2\| \cdot |\varepsilon| \quad (24-4)$$

اگر

$$\|\mathbf{E}\| \cdot \|\mathbf{P}_2\| \cdot |\varepsilon| \leq 0.5 \lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|\mathbf{E}\|^2 \quad (25-4)$$

یا

$$\frac{2\|\mathbf{P}_2\||\varepsilon|}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q})} \leq \|\mathbf{E}\| \quad (26-4)$$

نا مساوی $\dot{\mathbf{F}} < 0$ برقرار می‌شود. پس تا زمانی که رابطه فوق برقرار باشد خطای ردگیری کاهش

می‌یابد یا به عبارت دیگر می‌توان گفت خطا محدود می‌گردد.

۳-۴ شبیه سازی

قانون کنترل (22-3) و (10-4) بر روی ربات سه رابط هنرمند با مفاصل انعطاف‌پذیر پیاده سازی

می‌شود. و سپس عملکرد سیستم کنترل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دیاگرام سیستم کنترل

همانند شکل (3-3) می‌باشد.

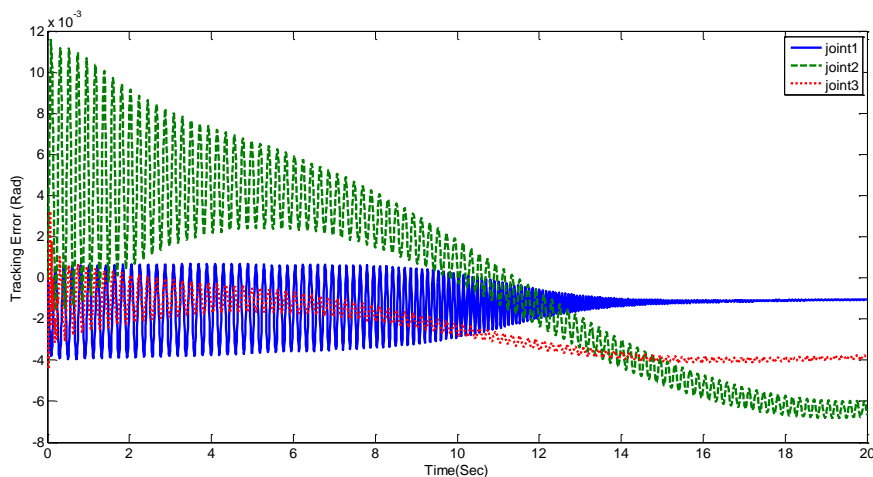
۴-۳-۱ کنترل ردگیری

مسیر مطلوب برای ردگیری مفاصل همانند رابطه (۳-۴۰) در نظر گرفته شده است. اغتشاش خارجی به سیله یک تابع پله به سیستم کنترل اعمال می شود.

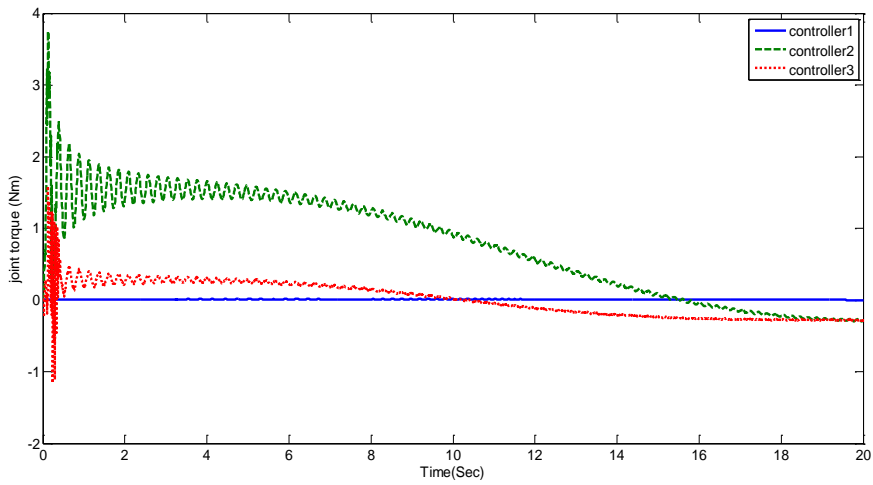
پارامترهای مورد نیاز در کنترل کننده به صورت زیر انتخاب می شود:

$$\gamma = \begin{bmatrix} 1000 \\ 2500 \\ 3000 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

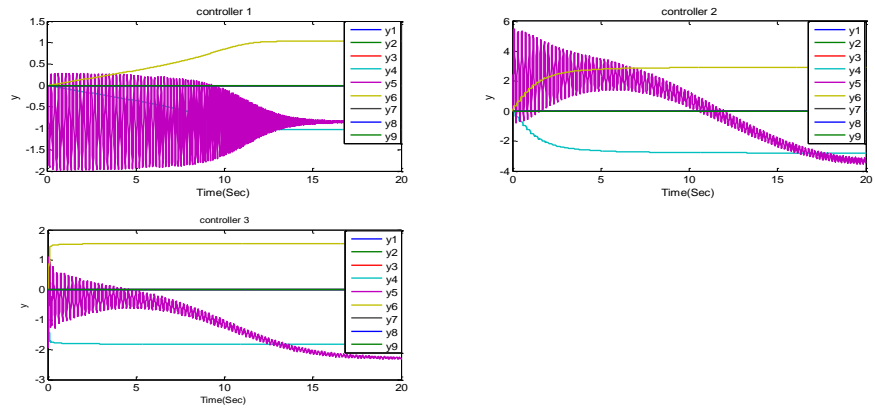
شکل (۴-۱) عملکرد سیستم کنترل را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می کنید خطا کوچک است و عمل ردگیری به خوبی انجام شده است. در شکل (۴-۲) گشتاور اعمالی به موتور ربات قابل مشاهده است که در ابتدا دارای نوسان است که به دلیل گشتاور راه اندازی و جبران اثر انعطاف به وجود می آید. در شکل (۴-۳) پارامترهای تطبیق سیستم فازی تطبیقی نشان داده شده است که تقریباً همگی به یک مقدار ثابتی همگرا شده اند.



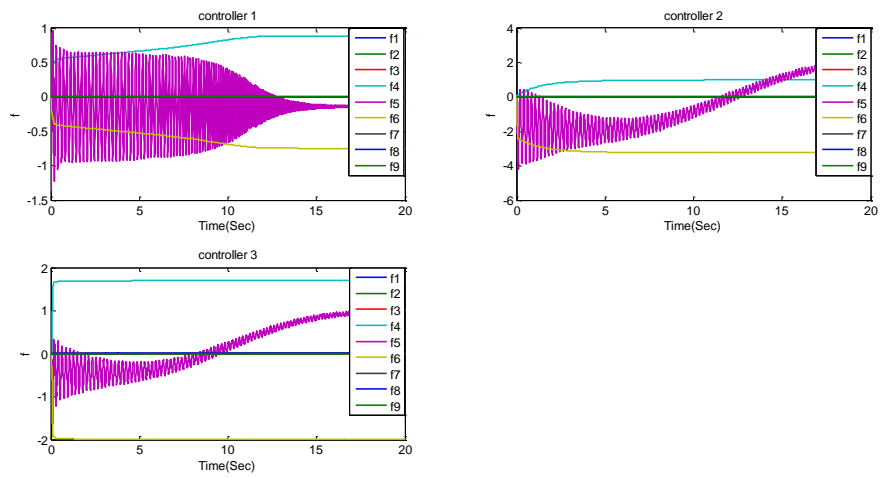
شکل (۴-۱) خطای ردگیری مفاصل



شکل (۲-۴) سیگنال های کنترل



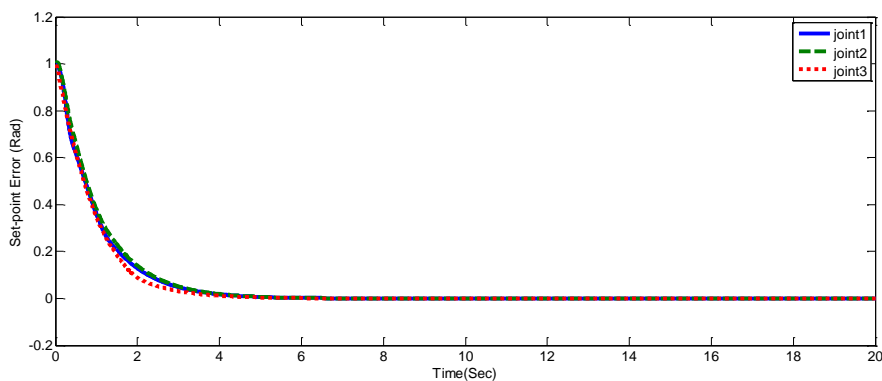
شکل (۳-۴) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق



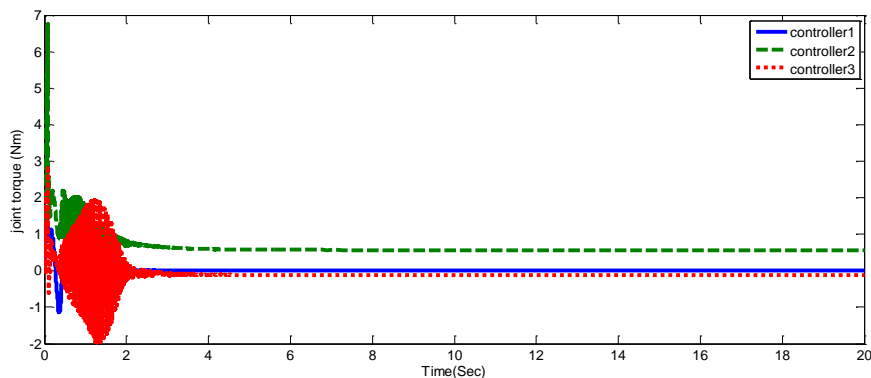
شکل (۵-۴) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق جبران ساز اثر انعطاف

۴-۳-۲ تنظیم

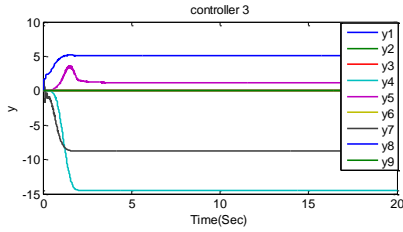
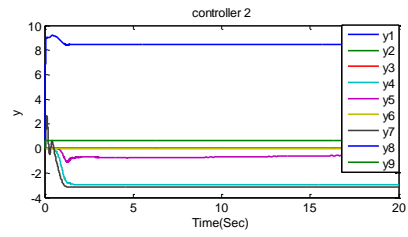
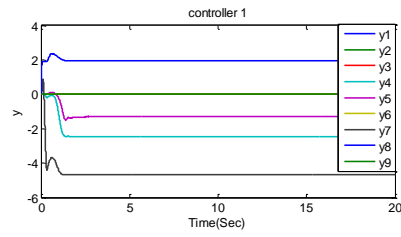
برای بررسی عملکرد تنظیم سیستم کنترل، موقعیت مطلوب مفاصل بر روی 1 rad تنظیم شده است. پارامترهای مورد نیاز مانند حالت قبل انتخاب شده است. شکل (۴-۴) خطای تنظیم مفاصل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سیستم کنترل در تنظیم به خوبی عمل می‌کند و نمودار خطای مفاصل پس از مدت کوتاهی به صفر میل می‌کند. سیگنال‌های کنترل در تنظیم در شکل (۴-۵) نمایش داده شده‌اند. به دلیل وجود خطای اولیه سیگنال‌های کنترل در آغاز زیاد ولی تلاش کنترلی با کاهش خطا کاهش می‌یابد. همگرایی پارامترها در تنظیم در شکل (۴-۶) قابل مشاهده است. همانگونه که در شکل مشخص است پارامترها پس از مدت کوتاهی به خوبی به مقدار ثابتی همگرا می‌شوند.



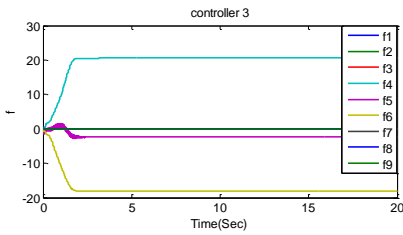
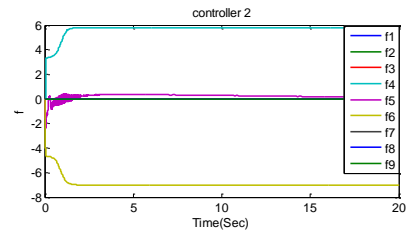
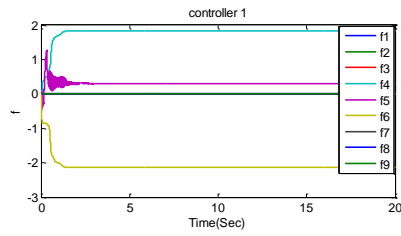
شکل (۴-۶) خطای تنظیم مفاصل



شکل (۴-۷) سیگنال‌های کنترل



شکل (۴-۸) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق



شکل (۴-۹) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق جبران ساز اثر انعطاف

فصل پنجم

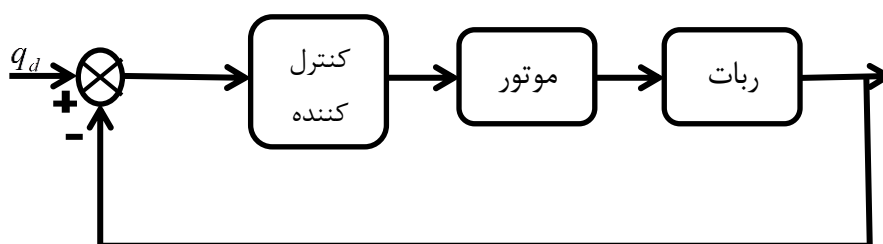
کنترل ربات با مفاصل انعطاف پذیر با راهبرد کنترل

ولتاژ

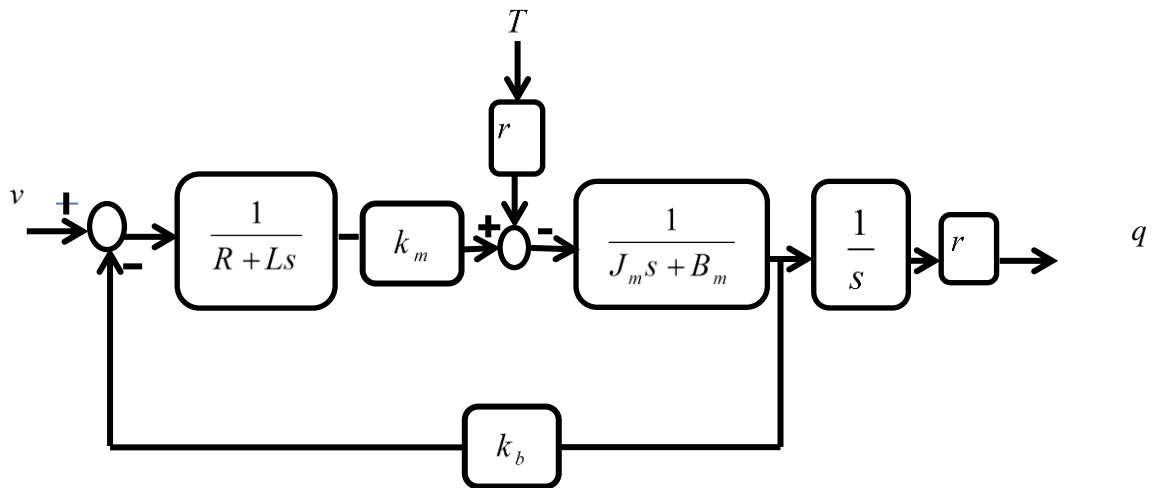
۵-۱ راهبرد ولتاژ

بسیاری از روش‌های کنترل پیشرفته بر مبنای کنترل گشتاور مفاصل ارائه شده است. در کنترل بر مبنای گشتاور با معادلات پیچیده ای روبرو خواهیم بود. از آنجا که ربات‌ها به وسیله موتورهای کنترل می‌شوند راهبرد کنترل ولتاژ به وجود آمد [۶]. در صورت استفاده از این روش کنترل، به جای کنترل گشتاور مفاصل ربات به کنترل ولتاژ موتورهای مفاصل پرداخته می‌شود. در این صورت سیگنال ورودی به سیستم ولتاژ موتورهاست.

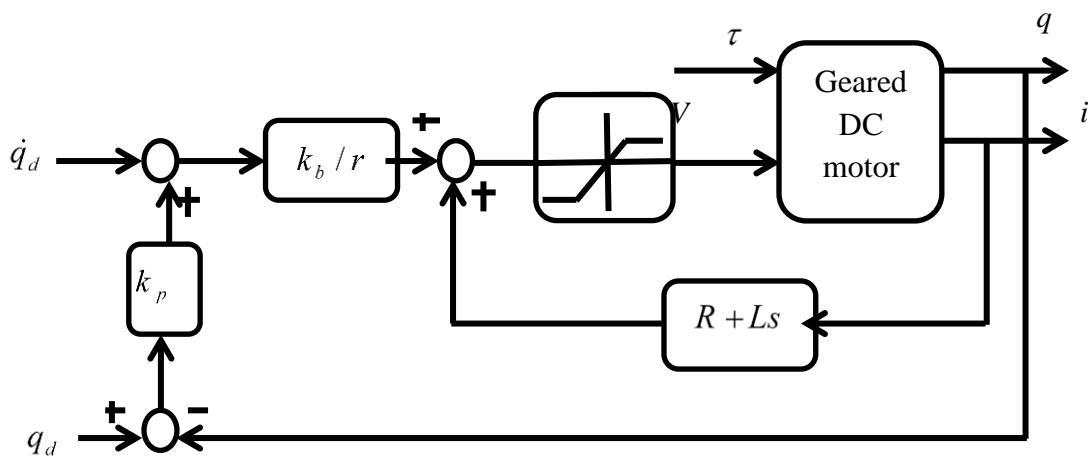
اگر در ربات‌ها از موتورهای مغناطیس دائم استفاده شود به دلیل داشتن دینامیک خطی، به آسانی قابل کنترل هستند. دینامیک موتور بسیار ساده تر از دینامیک ربات است در نتیجه به راحتی می‌توان یک کنترل کننده بر مبنای مدل مدل موتور طراحی کرد. در این نوع طراحی، ربات به عنوان بار موتور در نظر گرفته می‌شود و برای کنترل موقعیت مفصل ربات موقعیت موتور کنترل می‌شود. به وسیله این راهبرد کنترلی سیستم چند متغیره را می‌توان به صورت کاملاً مجزا کنترل کرد. شکل (۵-۱) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور مفصل ربات را نشان خواهد داد. دیاگرام موتور مغناطیس دائم در شکل (۵-۲) رسم شده است. شکل (۵-۳) سیستم کنترل موتور و شکل (۵-۴) سیستم کنترل ربات را نشان می‌دهد. به منظور محافظت موتور از محدود کننده ولتاژ استفاده می‌شود. در این صورت مقادیر حدی ولتاژ به محدود کننده اعمال می‌شود. در صورت به کارگیری از این محدود کننده باید توجه نمود که در وضعیت اشباع، قانون کنترل پیشنهادی دیگر عمل نمی‌کند و ولتاژ موتور روی مقادیر حدی باقی می‌ماند.



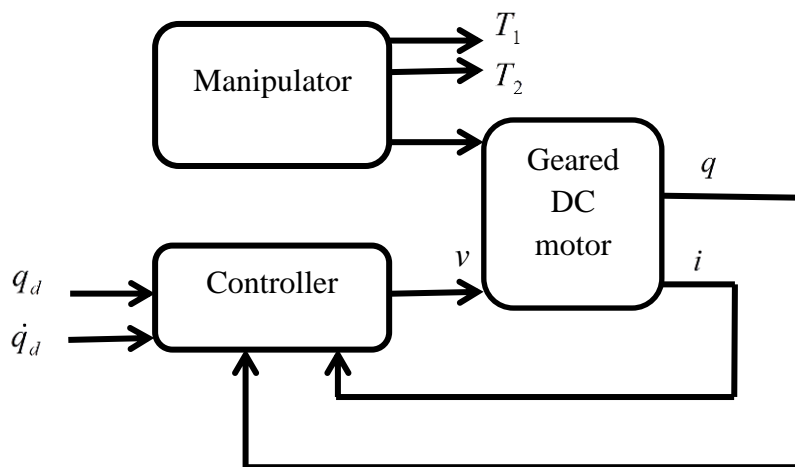
شکل (۵-۱) دیاگرام کنترل ولتاژ ربات



شکل (۲-۵) دیاگرام موتور مغناطیسی دائم



شکل (۳-۵) سیستم کنترل موتور



شکل (۴-۵) سیستم کنترل ربات

۲-۵ طراحی کنترل کننده

در این بخش به طراحی کنترل کننده بر مبنای مدل ولتاژ می پردازیم. ابتدا روش طراحی یک کنترل کننده مفصل مستقل بر مبنای مدل موتور و خطی سازی فیدبکی شرح داده می شود و سپس به طراحی سیستم فازی تطبیقی برای جبران انعطاف می پردازیم. سپس عملکرد سیستم و مزایای استفاده از راهبرد ولتاژ نسبت به گشتاور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

با توجه به مدل موتور (۲-۲۳) که در فصل دو به آن پرداخته شد داریم:

$$\mathbf{J}\ddot{\theta}_m + \mathbf{B}\dot{\theta}_m + r\tau_1 = \tau_m \quad (1-5)$$

همان گونه که در این رابطه مشخص است ربات به عنوان بار موتور τ_1 در نظر گرفته شده است.

رابطه گشتاور موتور با جریان آرمیچر عبارتست از:

$$\mathbf{K}_m \mathbf{I}_a = \tau_m \quad (2-5)$$

که K_m ضریب ثابت گشتاور و I_a جریان آرمیچر و τ_m گشتاور موتور می باشد.

با جایگذاری معادله (۲-۵) در (۱-۵) داریم:

$$\mathbf{J}\ddot{\theta}_m + \mathbf{B}\dot{\theta}_m + r\tau_1 = \mathbf{K}_m \mathbf{I}_a \quad (3-5)$$

همان طور که از رابطه (۳-۵) مشخص است تمام ترم های غیر خطی ربات τ_1 ، در جریان موتور I_a موجود می باشد، بنابراین برای مقابله با ترم های غیر خطی ربات باید با ترم های جریان موتور مقابله شود. در موتورهای DC مغناطیس دائم داریم:

$$RI_a + L\dot{I}_a + k_b \dot{\theta}_m = v \quad (4-5)$$

که v ولتاژ موتور، I_a جریان موتور، θ_m زاویه موتور، R ، L و K_b به ترتیب معرف مقاومت سیم پیچ، اندوکتانس سیم پیچ و ضریب ثابت القا می باشد.

با استفاده از خطی سازی پسخورد برای مقابله با ترم های جریان قانون کنترل زیر پیشنهاد می شود:

$$RI_a + LI_a + k_b f = v \quad (5-5)$$

که f یک ورودی جدید کنترلی است. با استفاده از دو رابطه (4-5) و (5-5) سیستم خطی زیر حاصل می شود:

$$f = \dot{\theta}_m \quad (6-5)$$

بنابراین برای ردگیری قانون کنترل زیر پیشنهاد می شود:

$$f = \dot{\theta}_{md} + k_p (\theta_{md} - \theta_m) \quad (7-5)$$

با θ_{md} موقعیت مطلوب موتور است. از دو رابطه (6-5) و (7-5) نتیجه می شود:

$$\dot{\theta}_{md} - \dot{\theta} + k_p (\theta_{md} - \theta) = 0 \quad (8-5)$$

اگر تعریف کنیم:

$$e = \theta_{md} - \theta \quad (9-5)$$

که e خطای ردگیری است. با جایگذاری (9-5) در (8-5) داریم:

$$\dot{e} + k_p e = 0 \quad (10-5)$$

بنابراین با انتخاب $k_p > 0$ خطا به سمت صفر میل می کند.

با توجه به معادلات (3-5) و (4-5) و رابطه زیر

$$q = r\theta_m \quad (11-5)$$

و با توجه به معادلات (۴-۵)، (۷-۴)، (۱۱-۴) قانون کنترل نهایی به صورت زیر است:

$$RI_a + LI_a + k_b r^{-1}(\dot{q}_d + k_p(q_d - q)) = v \quad (12-5)$$

در قانون کنترل فوق می توان از ترم LI_a به دلیل کوچک بودن اندوکتانس صرف نظر کرد.

همانطور که در فصل سه اشاره شد اثر انعطاف به صورت زیر است:

$$\theta_m = r^{-1}q + \delta \quad (13-5)$$

و با قرار دادن رابطه (۱۳-۵) در (۴-۵) می دهد:

$$v = RI_a + LI_a + k_b r^{-1}\dot{q} + k_b \dot{\delta} \quad (14-5)$$

رابطه (۱۴-۵) معادله ولتاژ با در نظر گرفتن اثر انعطاف می باشد. قانون کنترل بر مبنای این مدل به

صورت زیر پیشنهاد می شود:

$$v = RI_a + k_b r^{-1}(\dot{q}_d + k_p(q_d - q)) + \hat{F}(\dot{\delta}) \quad (15-5)$$

قانون کنترل (۱۵-۵) از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول قانون ربات صلب و قسمت دوم

یک سیستم فازی برای جبران اثر انعطاف. در رابطه (۱۵-۵) به دلیل اینکه اندازه گیری \dot{I} با نویز

همراه است و همچنین L مقدار کوچکی است، از عبارت LI صرف نظر می کنیم.

با اعمال قانون کنترل (۱۵-۵) به سیستم (۱۴-۵) معادله حلقه بسته به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{e} + K_p e = k_b^{-1}r(F - \hat{F}) \quad (16-5)$$

که در تعریف بالا $e = q_d - q$ است.

با توجه به دو رابطه (۱۴-۵) و (۱۵-۵) داریم:

$$F = k_b \dot{\delta} \quad (17-5)$$

\hat{F} تقریب تابع F است. از آنجا که سیستم‌های فازی به عنوان شناساگرهای خوبی شناخته می‌شوند از یک سیستم فازی تطبیقی برای محاسبه \hat{F} استفاده می‌کنیم. این سیستم دارای ورودی به صورت $\dot{\delta} = \dot{\theta} - r^{-1}\dot{q}$ است که از متغیرهای حالت سیستم هستند. اگر برای این ورودی سه تابع تعلق در نظر گرفته شود فضای کنترل با سه قانون پوشش داده می‌شود.

برای این ورودی سه تابع تعلق به صورت N, Z, P همانند رابطه (۳-۲۸) در نظر می‌گیریم.

توابع تعلق خروجی با تابع گوسین به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_{cl}(\hat{F}) = \exp\left(-\frac{(\hat{F} - \hat{p})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (18-5)$$

که در آن \hat{p} مرکز C_l است.

اگر از موتور استنتاج فازی ممدانی، فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز استفاده شود می-

توان سیستم فازی تطبیقی را به صورت زیر ارائه داد [۲۱]:

$$\hat{F}(\dot{\delta}) = \frac{\sum_{l=1}^{l=3} \mu_{A_l}(\dot{\delta}) \hat{p}_l}{\sum_{l=1}^{l=3} \mu_{A_l}(\dot{\delta})} \quad (19-5)$$

رابطه (۱۹-۵) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\hat{F} = \hat{\mathbf{p}}^T \boldsymbol{\psi}(\dot{\delta}) \quad (20-5)$$

که در رابطه (۲۰-۵) $\boldsymbol{\psi} = [\psi_1 \dots \psi_3]$ عبارتست از:

$$\psi(\dot{\delta}) = \frac{\mu_{A_l}(\dot{\delta})}{\sum_{l=1}^3 \mu_{A_l}(\dot{\delta})} \quad (21-5)$$

و $\mu_l \in [0,1]$ توابع تعلق و \hat{p} پارامترهای تطبیق هستند که در ادامه محاسبه می‌شوند.

با توجه به تئوری تقریب‌گر عمومی بودن سیستم‌های فازی [25] خواهیم داشت:

$$F = \mathbf{P}^T \psi(\dot{\delta}) + \varepsilon \quad (22-5)$$

که ε خطای تقریب است.

با اعمال (22-5) و (20-5) به سیستم حلقه بسته (16-5) داریم:

$$\dot{e} + k_p e = k_b^{-1} r ((\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) \psi + \varepsilon) \quad (23-5)$$

حال برای محاسبه قانون تطبیق مورد نیاز برای شناساگر فازی، تابع مثبت معین V به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$V = 0.5(e)^2 + \frac{k_b^{-1} r}{2\gamma} (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) (\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}) \quad (24-5)$$

که در آن γ مقداری مثبت است. با مشتق گرفتن از V داریم:

$$\dot{V} = e\dot{e} - \frac{k_b^{-1} r}{\gamma} (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) \dot{\hat{\mathbf{p}}} \quad (25-5)$$

از رابطه (23-5) داریم:

$$\dot{e} = k_b^{-1} r (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) \psi + k_b^{-1} r \varepsilon - k_p e \quad (26-5)$$

قرار دادن (26-5) در (25-5) می‌دهد:

$$\dot{V} = k_b^{-1}r(\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T)(e\psi - \frac{1}{\gamma}\dot{\mathbf{p}}) + (k_b^{-1}re\varepsilon - k_p^2e) \quad (27-5)$$

بنابراین قانون تطبیق به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{\mathbf{p}} = \gamma e \psi \quad (28-5)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = \int_0^t \gamma e \psi dt + \hat{\mathbf{p}}(0) \quad (29-5)$$

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

آنگاه

$$\dot{V} = k_b^{-1}re\varepsilon - k_p^2e \quad (30-5)$$

خطای ردیابی کاهش می‌یابد اگر $\dot{V} < 0$ و برای برقراری این شرط لازم است:

$$k_b^{-1}re\varepsilon < k_p^2e^2 \quad (31-5)$$

با توجه به نا مساوی کوشی شوارتز داریم:

$$k_b^{-1}re\varepsilon < |e| |k_b^{-1}r\varepsilon| \quad (32-5)$$

در نتیجه

$$|e| |k_b^{-1}r\varepsilon| < k_p^2e^2 \quad (33-5)$$

به عبارتی

$$\frac{|k_b^{-1}r\varepsilon|}{k_p} < |e| \quad (34-5)$$

بدین معنا که اگر $|e| < \frac{|k_b^{-1}r\varepsilon|}{k_p}$ برقرار باشد آنگاه $\dot{V} < 0$ برقرار می‌شود. اندازه خطای ردگیری

کاهش می‌یابد تا زمانی که وارد یک گوی به شعاع $\frac{|k_b^{-1}r\varepsilon|}{k_p}$ می‌شود. به عبارتی از (۳۴-۵) می‌توان

نتیجه گرفت که خطا محدود است.

۳-۵ آنالیز پایداری

اثبات محدودیت متغیرهای حالت سیستم توسط آنالیز پایداری صورت می‌گیرد. به منظور اثبات

پایداری فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود.

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

مرتبه مورد نیاز در دسترس و همگی محدود باشد.

فرض ۲: ولتاژ موتورها محدود باشد یعنی $|v| \leq v_{\max}$

از آنجا که $q = q_d - e$ با استفاده از فرض ۱ و همچنین محدود بودن e که در قسمت قبل نشان

داده شد مشاهده می‌شود سمت راست معادله $q = q_d - e$ محدود است بنابراین

نتیجه ۱: q موقعیت مفصل محدود است.

محدود بودن \dot{e} با استفاده از رابطه (۲۶-۵) اثبات می‌شود. ε بر طبق تئوری تقریب‌گر عمومی

محدود است. ψ که طبق رابطه (۲۱-۵) تعریف می‌شود توابع تعلق در بازه $[0, 1]$ دارد بنابراین

$|\psi| \leq 1$ و محدود است. از آنجا که V در رابطه (۲۴-۴) تابع مثبت معین از e و بردار پارامترهای

$p - \hat{p}$ است بنابراین $\dot{V} < 0$ نشان می‌دهد که $|V| \leq V(0)$ و در نتیجه $p - \hat{p}$ محدود است. طبق

رابطه $\dot{q} = \dot{q}_d - \dot{e}$ و با استفاده از فرض ۱

نتیجه ۲: محدود بودن \dot{q} اثبات می‌شود.

با توجه به اثباتی که در مرجع [۴۴] انجام شده اثبات محدود بودن I_a و $\dot{\theta}_m$ به صورت زیر است.

اگر دو طرف رابطه (۴-۵) را در I_a ضرب کنیم معادله انرژی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$vI_a = RI_a^2 + LI_a\dot{I}_a + k_b\dot{\theta}_m I_a \quad (۳۵-۵)$$

در واقع موتور با دریافت انرژی الکتریکی vI_a انرژی مکانیکی $k_b\dot{\theta}_m I_a$ را تولید می‌کند. توان RI_a^2 بیانگر اتلاف سیم پیچ‌ها و توان $LI_a\dot{I}_a$ تغییرات زمانی انرژی مغناطیسی می‌باشد با انتگرال گیری از دو طرف معادله (۳۵-۵) برای $t \geq 0$ داریم:

$$\int_0^t vI_a dt = \int_0^t RI_a^2 dt + \int_0^t LI_a\dot{I}_a dt + \int_0^t k_b\dot{\theta}_m I_a dt \quad (۳۶-۵)$$

با $I_a(0) = 0$ داریم:

$$\int_0^t vI_a dt = RI_a^2 t + 0.5LI_a^2 + \int_0^t k_b\dot{\theta}_m I_a dt \quad (۳۷-۵)$$

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

$$\int_0^t k_b\dot{\theta}_m I_a dt \leq \int_0^t vI_a dt \quad (۳۸-۵)$$

ترم $\int_0^t vI_a dt$ حد بالای انرژی مکانیکی $\int_0^t k_b\dot{\theta}_m I_a dt$ می‌باشد. بنابراین حد بالای انرژی مکانیکی برابر

است:

$$\int_0^t k_b\dot{\theta}_m I_a dt = \int_0^t vI_a dt \quad (۳۹-۵)$$

در حد بالای انرژی مکانیکی داریم:

$$k_b \dot{\theta}_m = v \quad (40-5)$$

نتیجه ۳: سرعت موتور به صورت زیر محدود است:

$$|\dot{\theta}_m| \leq \frac{|v|}{k_b} \quad (41-5)$$

با استفاده از فرض ۱ می‌توان گفت:

$$|\dot{\theta}_m| \leq \frac{|v_{\max}|}{k_b} \triangleq \dot{\theta}_{m,\max} \quad (42-5)$$

که در آن $\dot{\theta}_{m,\max}$ ماکزیمم سرعت موتور است.

با استفاده از رابطه (۴-۵) داریم:

$$RI_a + LI_a \dot{=} w \quad (43-5)$$

که در آن

$$w = v - K_b \dot{\theta}_m \quad (44-5)$$

متغیرهای $\dot{\theta}_m$ و v طبق نتیجه ۳ و فرض ۲ محدود هستند. بنابراین ورودی w در رابطه (۴۳-۵) محدود می‌باشد. معادله دیفرانسیل خطی (۴۳-۵) طبق معیار راث هورویتز یک سیستم خطی پایدار است. با توجه به اینکه ورودی w محدود می‌باشد، بنابراین خروجی I_a نیز محدود است.

نتیجه ۴: جریان I_a محدود است.

از رابطه (۱۵-۵) داریم:

$$\hat{F}(\dot{\delta}) = v - (RI_a + k_b r^{-1}(\dot{q}_d + k_p(q_d - q))) \quad (45-5)$$

که با توجه به فرض ۱ و فرض ۲ و نتیجه ۱ و ۴ محدود بودن \hat{F} اثبات می‌شود.

با استفاده از معادلات (۲-۵۵) و (۲-۵۳) داریم:

$$\mathbf{J}\ddot{\theta}_m + \mathbf{B}\dot{\theta}_m + \mathbf{rKr}\theta_m = \mathbf{K}_m \mathbf{I}_a + \mathbf{rKq} \quad (46-5)$$

رابطه (۴۶-۵) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\mathbf{J}\ddot{\theta}_m + \mathbf{B}\dot{\theta}_m + \mathbf{rKr}\theta_m = \mathbf{z} \quad (47-5)$$

که \mathbf{z} برابر است با:

$$\mathbf{z} = \mathbf{K}_m \mathbf{I}_a + \mathbf{rKq} \quad (48-5)$$

متغیر \mathbf{z} محدود است زیرا q و I_a محدود است. ماتریس‌های \mathbf{J} , \mathbf{B} و \mathbf{rKq} مثبت و ثابت هستند.

بنابراین معادله دیفرانسیل مرتبه ۲ (۴۷-۵) پایدار است. از آنجا که \mathbf{z} ورودی محدود است

نتیجه ۵: خروجی θ_m محدود است.

در نهایت تمام متغیرهای حالت $I_a, \dot{\theta}_m, \theta_m, \dot{q}, q$ محدود است.

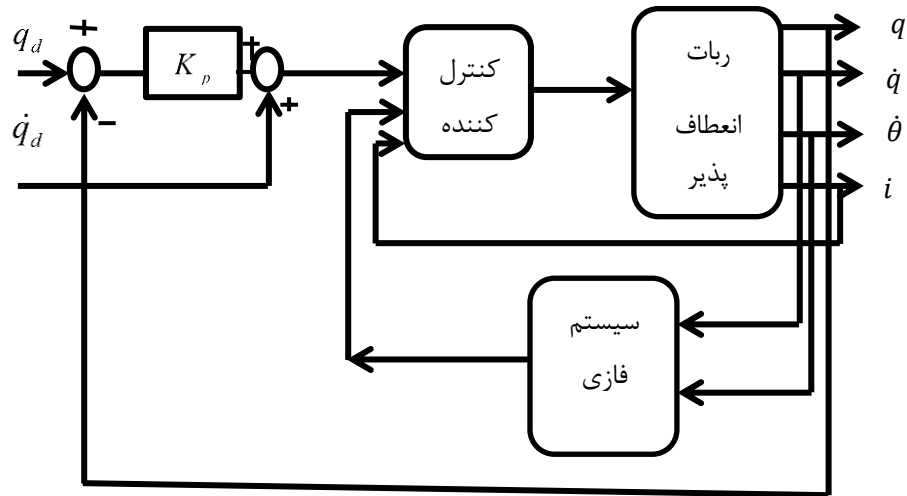
۴-۵ شبیه سازی روش کنترل فازی تطبیقی

قانون کنترل (۱۵-۵) بر روی ربات با مفاصل انعطاف پذیر پیاده سازی می‌شود. سیستم کنترل به

صورت مفصل مستقل به ربات اعمال می‌شود. بنابراین برای کنترل ربات‌های هر مفصل از یک کنترل-

کننده جداگانه استفاده می‌شود. سپس عملکرد سیستم کنترل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دیاگرام

سیستم کنترل بر مبنای کنترل ولتاژ به صورت زیر است:



شکل (۵-۵) بلوک دیاگرام سیستم کنترل

۵-۴-۱ کنترل ردگیری

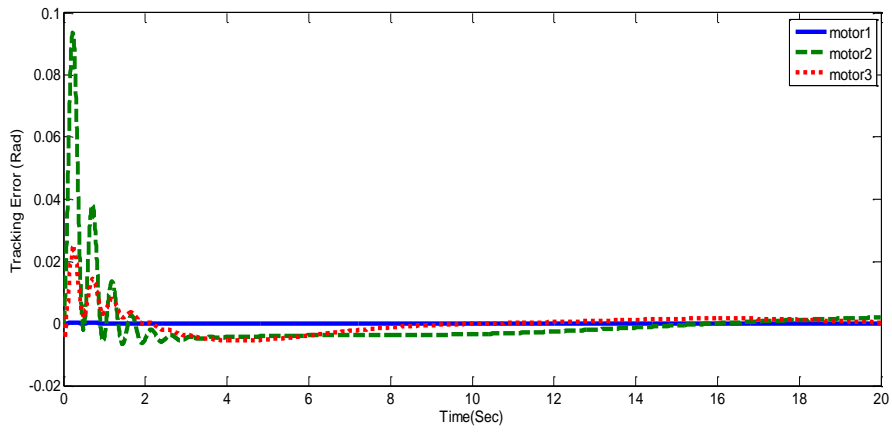
مسیر مطلوب برای ردگیری مفاصل همانند رابطه (۳-۴۰) تعریف می شود. جهت اجرای شبیه سازی از قانون کنترل (۵-۱۵) استفاده می شود. پارامترهای مورد نیاز در کنترل کننده به صورت زیر انتخاب می شود. از فیلتر پایین گذر به دلیل وجود نویز در اندازه گیری جریان می توان استفاده کرد.

کنترل کننده اول: $K_p = 0.5, \gamma = 1, \hat{P}(0) = 0$

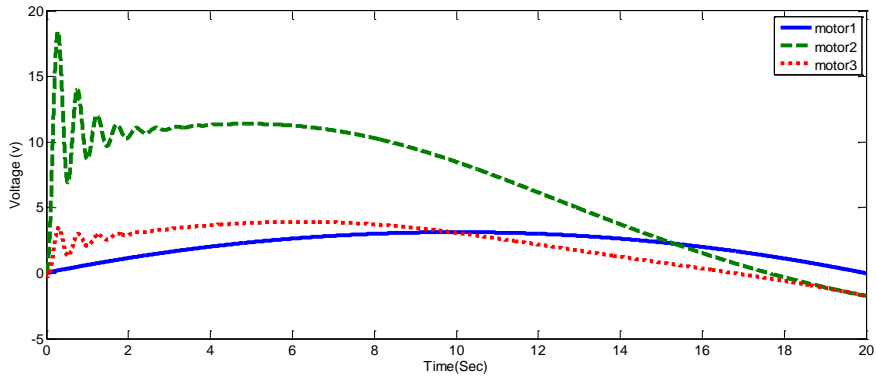
کنترل کننده دوم: $K_p = 0.5, \gamma = 50, \hat{P}(0) = 0$

کنترل کننده سوم: $K_p = 0.5, \gamma = 10, \hat{P}(0) = 0$

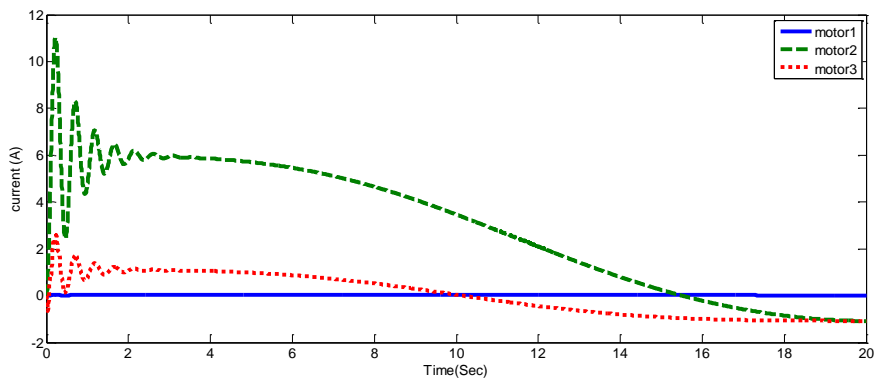
شکل (۵-۶) خطای ردگیری مفاصل را نشان می دهد. شکل (۵-۷) ولتاژ موتورها برای کنترل سه مفصل را نشان می دهد. تلاش کنترلی به خوبی پاسخ می دهد و منحنی ولتاژها دارای نوسانات در لحظه اول است که برای جبران اثر انعطاف و هم به خاطر گشتاور مورد نیاز در راه اندازی می باشد. شکل (۵-۸) جریان موتورها را نشان می دهد.



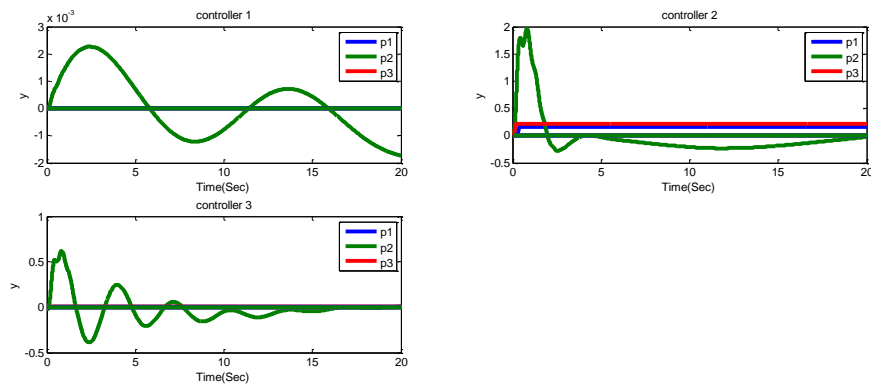
شکل (۵-۶) خطای ردگیری در مفاصل



شکل (۵-۷) ولتاژ اعمالی به موتورها



شکل (۵-۸) سیگنال جریان موتورها



شکل (۹-۵) پارامترهای قانون تطبیق

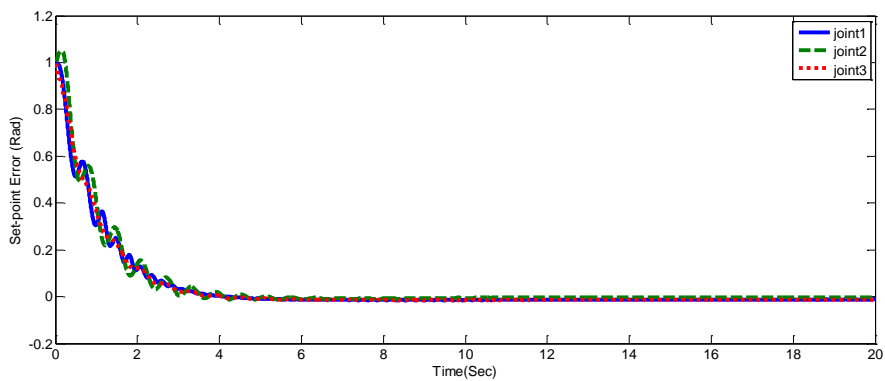
۵-۴-۲ تنظیم

برای بررسی عملکرد تنظیم سیستم کنترل، موقعیت مطلوب مفاصل بر روی 1 rad تنظیم شده است. پارامترهای مورد نیاز کنترل کننده‌ها در زیر بیان شده است. زمان اجرای شبیه سازی ۲۰ ثانیه می‌باشد. شکل (۹-۵) خطای تنظیم مفاصل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مفاصل در لحظه شروع دارای نوسان هستند که به دلیل وجود اثر انعطاف بر این مفاصل به وجود می‌آید. شکل (۱۰-۵) ولتاژ اعمالی به موتورها را نشان می‌دهد که در آغاز برای جبران انعطاف دارای مقدار بزرگی است. ولتاژ مفصل ۲ برای غلبه بر نیروی گرانشی دارای مقدار است و ولتاژ سایر موتورها دارای مقدار تقریباً صفر است. شکل (۱۱-۵) هم جریان موتورها را نشان می‌دهد.

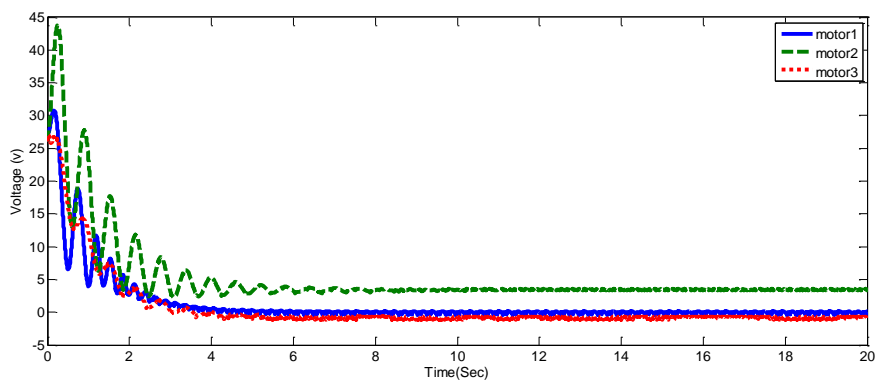
کنترل کننده اول: $k_p = 1, \gamma = 1, \hat{P}(0) = 0$

کنترل کننده دوم: $k_p = 1, \gamma = 10, \hat{P}(0) = 0$

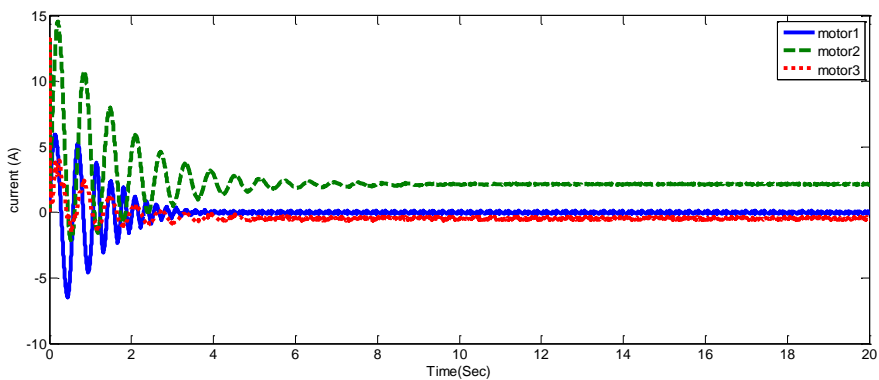
کنترل کننده سوم: $k_p = 1, \gamma = 5, \hat{P}(0) = 0$



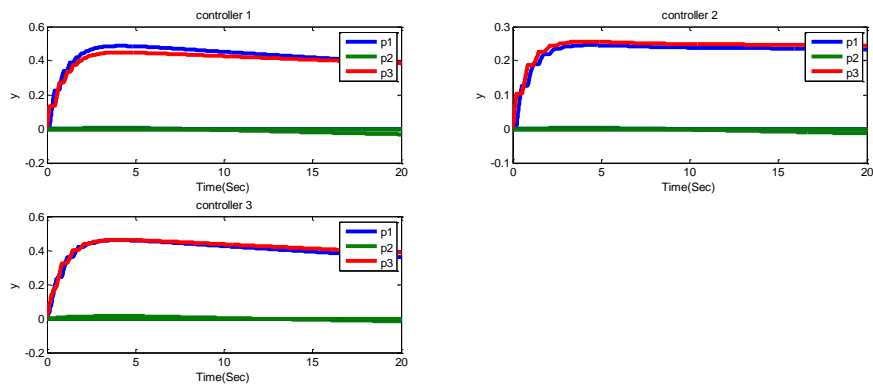
شکل (۵-۱۰) خطای تنظیم مفاصل



شکل (۵-۱۱) ولتاژ اعمالی به موتورها



شکل (۵-۱۲) سیگنال جریان موتورهای ربات



شکل (۵-۱۳) پارامترهای قانون تطبیق

به طور کلی می توان نتیجه گرفت که روش کنترل بر مبنای کنترل ولتاژ دارای عملکرد ردگیری و تنظیم خوبی می باشد. این روش به صورت مفصل مستقل اعمال شده و هر موتور به صورت جداگانه کنترل می شود. این روش نسبت به روش گشتاور دارای ساختار ساده تر و در نتیجه اجرای آن آسانتر است.

فصل ششم

طراحی کنترل کننده با در نظر گرفتن عدم قطعیت با

راهبرد کنترل ولتاژ

۶-۱ مقدمه

در بسیاری از موارد مدل سیستم‌ها دارای عدم قطعیت هستند و کنترل کننده طراحی شده باید به قدری قدرتمند باشد که بر این عدم قطعیت‌ها غلبه کند و هدف کنترلی را محقق سازد. طراحی یک کنترل کننده فازی غیر تطبیقی به منظور غلبه بر عدم قطعیت‌ها کار آسانی نیست و دانش دقیق نسبت به رفتار سیستم می‌طلبد، لذا توجه طراحان به سمت کنترل کننده‌های فازی تطبیقی معطوف می‌شود. یک کنترل کننده فازی تطبیقی می‌تواند به انواع عدم قطعیت‌ها غلبه کند. در این بخش با طراحی سیستم فازی تطبیقی سعی در غلبه بر نامعینی‌ها را داریم.

۶-۲ طراحی کنترل کننده

همان‌طور که در فصل قبل نشان داده شد معادله دینامیک موتور با در نظر گرفتن اثر انعطاف به صورت زیر است:

$$v = RI + L\dot{I} + k_b r^{-1} \dot{q} + k_b \dot{\delta} + \varphi \quad (1-6)$$

که φ اغتشاش خارجی می‌باشد. برای پیشنهاد قانون کنترل، مدل نامی سیستم را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$v = \hat{R}I + \hat{k}_b \hat{r}^{-1} \dot{q} \quad (2-6)$$

که در رابطه بالا \hat{R} ، \hat{k}_b ، \hat{r} مقادیر نامی R ، k_b ، r می‌باشند.

با استفاده از رابطه (۱-۶)، رابطه (۲-۶) به صورت زیر قابل باز نویسی است:

$$v = \hat{R}I + \hat{k}_b \hat{r}^{-1} \dot{q} + F \quad (3-6)$$

با توجه به دو رابطه (۳-۶) و (۱-۶) داریم:

$$F = (R - \hat{R})I + (k_b r^{-1} - \hat{k}_b \hat{r}^{-1})\dot{q} + LI + k_b \dot{\delta} + \varphi \quad (4-6)$$

تابع F در واقع عدم قطعیت است که شامل φ اغتشاش خارجی، $K_b \dot{\delta}$ اثر انعطاف و LI به

عنوان عنوان دینامیک‌های مدل نشده، و عدم قطعیت‌های پارامتری $(R - \hat{R})I + (k_b r^{-1} - \hat{k}_b \hat{r}^{-1})\dot{q}$ می-باشد.

با استفاده از (3-6) قانون کنترل به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$v = \text{sat}(u) \quad (5-6)$$

که تابع $\text{sat}(\cdot)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{sat}(u) = \begin{cases} u_{\max} & u \geq u_{\max} \\ u & |u| < u_{\max} \\ -u_{\max} & u \leq -u_{\max} \end{cases} \quad (6-6)$$

که u_{\max} ماکزیمم ولتاژ موتور است و u به صورت زیر است:

$$u = \hat{R}I + \hat{k}_b \hat{r}^{-1}(\dot{q}_d + k_p(q_d - q)) + \hat{F} \quad (7-6)$$

\hat{F} تخمین تابع F است که با استفاده از سیستم فازی تطبیقی محاسبه می‌شود. q_d مسیر مطلوب

برای ردگیری مفصل و K_p پارامتر کنترل می‌باشد. بنابراین برای $|u| > u_{\max}$ داریم $v = u_{\max} \text{sgn}(u)$

و برای $|u| < u_{\max}$ با اعمال قانون کنترل (7-6) به سیستم (3-6) معادله حلقه بسته به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{e} + k_p e = \hat{k}_b^{-1} \hat{r} (F - \hat{F}) \quad (8-6)$$

که در تعریف بالا $e = q_d - q$ است.

\hat{F} خروجی سیستم فازی با دو ورودی x_1 و x_2 می باشد. اگر برای هر ورودی فازی سه تابع تعلق در نظر گرفته شود فضای کنترل با ۹ قانون فازی پوشش داده می شود. قوانین فازی به فرم ممدانی به صورت زیر نوشته می شوند:

$$(۹-۶) \quad \text{قانون } l: \text{ اگر } x_1 \text{ برابر با } A_l \text{ و } x_2 \text{ برابر با } B_l \text{ باشد آنگاه } \hat{F} \text{ برابر با } C_l \text{ می شود.}$$

$l = 1, \dots, 9$ قانون l ام را برای تعیین می نماید. A_l, B_l, C_l توابع تعلق فازی مربوط به x_1, x_2, \hat{F} می باشد. سه تابع تعلق P, Z و N همانند فصل قبل برای متغیر ورودی x_1 مطابق شکل (۳-۲) در نظر گرفته شده است. توابع تعلق با توابع ریاضی مطابق با (۳-۲۷) تعریف شده است. توابع تعلق x_2 را همانند توابع تعلق x_1 انتخاب می نماییم. توابع تعلق خروجی \hat{F} با تابع گوسین به صورت زیر تعریف می شود:

$$(۱۰-۶) \quad \mu_{cl}(\hat{F}) = \exp\left(-\frac{(\hat{F} - \hat{p})^2}{2\sigma^2}\right)$$

که در آن \hat{p} مرکز C_l است و $\sigma = 0.3$

قوانین فازی مطابق با جدول (۳-۱) می باشد.

اگر از موتور استنتاج فازی ممدانی، فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز استفاده شود می توان سیستم فازی تطبیقی را به صورت زیر ارائه داد:

$$(۱۱-۶) \quad \hat{F}(x_1, x_2) = \frac{\sum_{l=1}^{l=9} \mu_{A_l}(x_1) \mu_{B_l}(x_2) \hat{p}_l}{\sum_{l=1}^{l=9} \mu_{A_l}(x_1) \mu_{B_l}(x_2)}$$

که در آن $\mu_{A_l}(x_1) \in [0,1]$ و $\mu_{B_l}(x_2) \in [0,1]$ توابع تعلق برای مجموعه های فازی A_l و B_l است.

را بطنه (۱۱-۶) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\hat{F}(x_1, x_2) = \sum_{l=1}^9 \hat{p}_l^T \zeta_l = \hat{\mathbf{p}}^T \boldsymbol{\zeta} \quad (12-6)$$

که $\boldsymbol{\zeta} = [\zeta_1, \dots, \zeta_9]^T$ و ζ_l مقداری مثبت به صورت زیر است:

$$\zeta_l = \frac{\mu_{A_l}(x_1) \mu_{B_l}(x_2)}{\sum_{l=1}^9 \mu_{A_l}(x_1) \mu_{B_l}(x_2)} \quad (13-6)$$

و

$$\hat{\mathbf{p}}^T = [\hat{p}_1 \dots \hat{p}_9] \quad (14-6)$$

$$x_1 = e, x_2 = \dot{e} \quad (15-6)$$

با قرار دادن (15-6) در (11-6)، \hat{F} را به صورت تابعی از e و \dot{e} می نویسیم:

$$\hat{F}(e, \dot{e}) = \frac{\sum_{l=1}^9 \mu_{A_l}(e) \mu_{B_l}(\dot{e}) \hat{p}_l}{\sum_{l=1}^9 \mu_{A_l}(k_1 e) \mu_{B_l}(k_2 \dot{e})} \quad (16-6)$$

با قرار دادن \hat{F} در معادله حلقه بسته (8-6) نتیجه می شود:

$$F = \hat{r}^{-1} \hat{k}_b (\dot{e} + k_p e) + \hat{F}(e, \dot{e}) \quad (17-6)$$

با توجه به تئوری تقریب زنی سیستم های فازی می توان نوشت:

$$F(e, \dot{e}) = \mathbf{P}^T \boldsymbol{\zeta} + \varepsilon \quad (18-6)$$

که ε خطای تقریب است.

با اعمال (18-6) و (12-6) به سیستم حلقه بسته (8-6) داریم:

$$\dot{e} + k_p e = \hat{k}_b^{-1} \hat{r} (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) \zeta + \hat{k}_b \hat{r}^{-1} \varepsilon \quad (19-6)$$

با توجه به معادله سیستم حلقه بسته (۸-۵) خطای تقریب $F - \hat{F}$ متناسب است با $\dot{e} + k_p e$. همچنین خطای تقریب وابسته است به اختلاف پارامترهای $p^T - \hat{p}^T$ در معادله حلقه بسته (۱۹-۶). بنابراین با استفاده از (۱۹-۶) تابع لیاپانوف به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$V = 0.5(\dot{e} + k_p e)^2 + \frac{1}{2\gamma} (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T)(\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}) \quad (20-6)$$

با مشتق گرفتن از رابطه (۲۰-۶) داریم:

$$\dot{V} = (\dot{e} + k_p e)(\ddot{e} + k_p \dot{e}) - \frac{1}{\gamma} (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) \dot{\hat{\mathbf{p}}} \quad (21-6)$$

از رابطه (۱۹-۶) داریم:

$$\dot{e} = \hat{k}_b^{-1} \hat{r} (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) \zeta + \hat{k}_b \hat{r}^{-1} \varepsilon - k_p e \quad (22-6)$$

قرار دادن (۲۲-۶) در (۲۱-۶) می‌دهد:

$$\dot{V} = ((\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) k_p \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \zeta) (\dot{e} + k_p e) + (\dot{e} + k_p e) (\ddot{e} + k_p \dot{e} - k_p^2 e) - \frac{1}{\gamma} (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) \dot{\hat{\mathbf{p}}} \quad (23-6)$$

با مرتب کردن (۲۳-۶) داریم:

$$\dot{V} = (\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) ((\dot{e} + k_p e) k_p \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \zeta - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\mathbf{p}}}) + (\dot{e} + k_p e) (\ddot{e} + k_p \dot{e} - k_p^2 e) \quad (24-6)$$

\dot{V} در (۲۴-۶) شامل دو عبارت است. می‌توانیم \dot{V} را از طریق تنظیم \hat{p} که در عبارت اول است کنترل کنیم. که این موجب به پیشنهاد قانون کنترل به صورت زیر می‌شود:

$$(\mathbf{p}^T - \hat{\mathbf{p}}^T) ((\dot{e} + k_p e) k_p \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \zeta - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\mathbf{p}}}) = 0 \quad (25-6)$$

بنابراین قانون تطبیق به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{\hat{\mathbf{p}}} = \alpha \zeta (\dot{e} + k_p e) \quad (26-6)$$

که در آن α به صورت زیر است:

$$\alpha = k_p \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \gamma \quad (27-6)$$

در نتیجه پارامترهای سیستم فازی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\hat{\mathbf{p}} = \int_0^t \alpha \zeta (\dot{e} + k_p e) + \mathbf{p}(0) \quad (28-6)$$

با قراردادن (25-6) در (24-6) داریم:

$$\dot{V} = (\dot{e} + k_p e)(\ddot{e} + k_p \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \varepsilon - k_p^2 e) \quad (29-6)$$

با مشتق گرفتن از (22-6) داریم:

$$\ddot{e} = \hat{k}_b^{-1} \hat{r} v - k_p \dot{e} \quad (30-6)$$

که v برابر است با:

$$v = \frac{d((p^T - \hat{p}^T)\zeta + \varepsilon)}{dt} \quad (31-6)$$

با قرار دادن (30-6) در (29-6) و به منظور برقراری $\dot{V} < 0$ لازم است که:

$$(\dot{e} + k_p e) \hat{k}_b^{-1} \hat{r} (v + k_p \varepsilon) < k_p (\dot{e} + k_p e)^2 \quad (32-6)$$

با توجه به نامساوی کوشی شوارتز داریم:

$$(\dot{e} + k_p e) \hat{k}_b^{-1} \hat{r} (v + k_p \varepsilon) < |\dot{e} + k_p e| |v + k_p \varepsilon| \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \quad (33-6)$$

فرض کنیم :

$$|v + k_p e| < \Psi \quad (34-6)$$

که Ψ عددی مثبت است. بنابراین برای برقراری نا مساوی (32-6) کافیست:

$$|(\dot{e} + k_p e)| \hat{k}_b^{-1} \hat{r} \Psi < k_p (\dot{e} + k_p e)^2 \quad (35-6)$$

از (35-6) نتیجه می شود:

$$\frac{\hat{k}_b^{-1} \hat{r} \Psi}{k_p} < |(\dot{e} + k_p e)| \quad (36-6)$$

در نتیجه تا زمانی که $|(\dot{e} + k_p e)| < \frac{\hat{k}_b^{-1} \hat{r} \Psi}{k_p}$ رابطه $\dot{V} < 0$ برقرار است. بنابراین $|(\dot{e} + k_p e)|$ کاهش

می یابد تا

$$\frac{\hat{k}_b^{-1} \hat{r} \Psi}{k_p} = |(\dot{e} + k_p e)| \quad (37-6)$$

با استفاده از رابطه حلقه بسته (6-8) و رابطه (37-6) می توان نوشت:

$$F - \hat{F} \leq \hat{r}^{-1} \hat{k}_b |(\dot{e} + k_p e)| \triangleq \frac{\Psi}{k_p} \quad (38-6)$$

بنابراین اندازه خطای تخمین برابر است با :

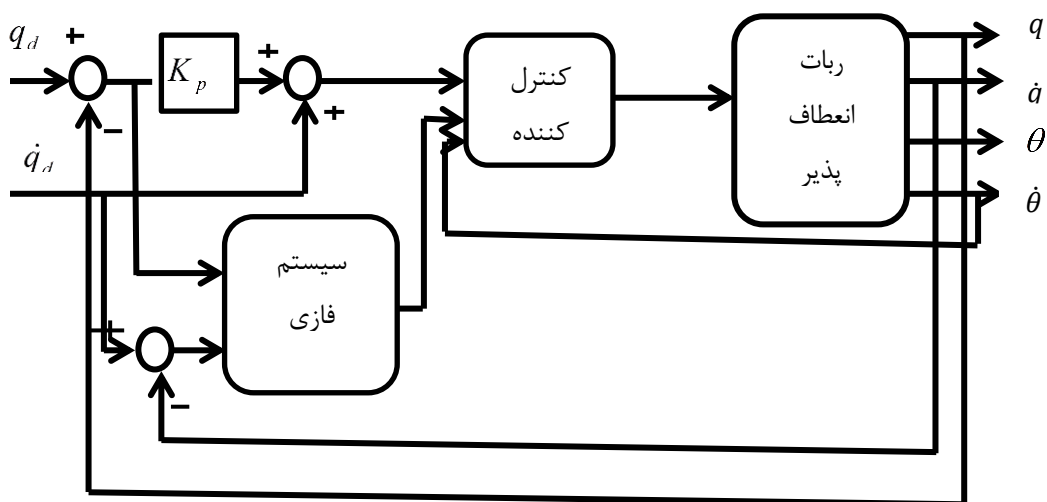
$$\rho = \frac{\Psi}{k_p} \quad (39-6)$$

۳-۶ آنالیز پایداری

با توجه به معادله سیستم حلقه بسته (۶-۸) عبارت $\hat{k}_b^{-1}\hat{r}(F-\hat{F})$ به عنوان ورودی سیستم است. در قسمت قبل ثابت کردیم $F-\hat{F} \leq \rho$ بنابراین ورودی سیستم محدود می‌باشد در نتیجه $e = q_d - q$ و $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$ محدود بنابراین q و \dot{q} محدود است. با توجه به فصل قبل که ثابت شد با فرض محدود بودن ولتاژ و با فرض محدود گرفتن اغتشاش خارجی I_a و $\dot{\theta}$ و همچنین θ محدود می‌باشد. بنابراین کل حالت های سیستم محدود می‌ماند.

۴-۶ شبیه سازی

قانون کنترل بر روی ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر سه رابط هنرمند پیاده‌سازی می‌شود. سیستم کنترل به صورت مفصل مستقل به ربات اعمال می‌شود. بنابراین برای کنترل ربات‌های هر مفصل از یک کنترل‌کننده جداگانه استفاده می‌شود. سپس عملکرد سیستم کنترل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دیاگرام سیستم کنترل بر مبنای کنترل ولتاژ به صورت زیر است:



شکل (۶-۱) بلوک دیاگرام سیستم کنترل

۶-۴-۱ کنترل ردگیری

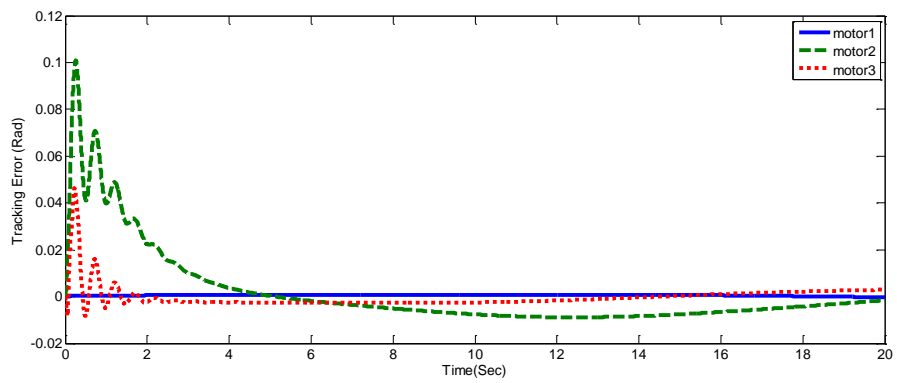
جهت اجرای شبیه‌سازی از قانون کنترل (۶-۷) استفاده می‌شود. مسیر مطلوب برای ردگیری همانند رابطه (۳-۴۰) در نظر گرفته شده است. برای در نظر گرفتن نا معینی پارامتری مقادیر \hat{R} , \hat{r} , \hat{K}_b 80% مقدار واقعی در نظر گرفته شد. برای نشان دادن مقاوم بودن کنترل‌کننده از یک تابع پله با دامنه یک ولت به عنوان اغتشاش خارجی در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد نیاز در کنترل‌کننده به صورت زیر انتخاب می‌شود.

کنترل‌کننده اول: $k_p = 0.5, \gamma = 100, \hat{p}(0) = 0$

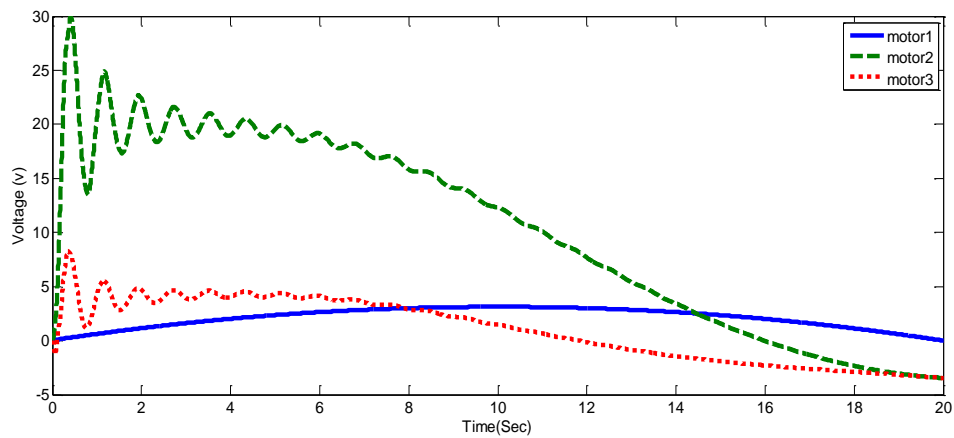
کنترل‌کننده دوم: $k_p = 1, \gamma = 800, \hat{p}(0) = 0$

کنترل‌کننده سوم: $k_p = 2, \gamma = 600, \hat{p}(0) = 0$

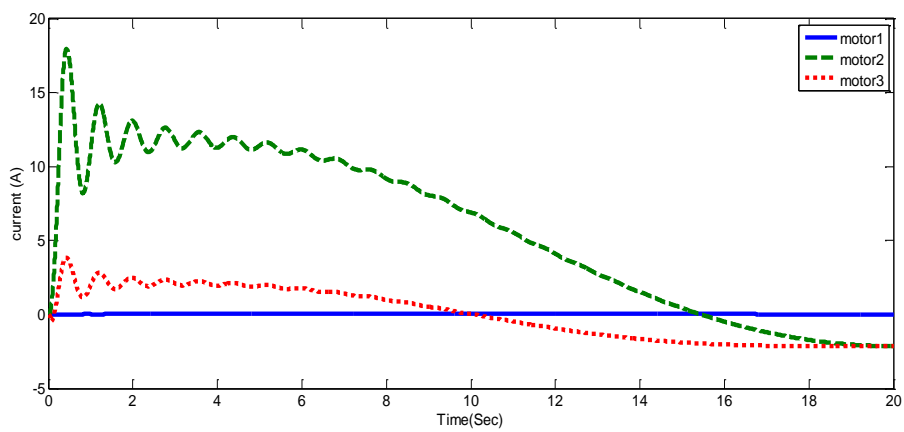
شکل (۶-۲) خطای ردگیری مفاصل را نشان می‌دهد. شکل (۶-۳) ولتاژ موتورها برای کنترل سه مفصل را نشان می‌دهد. تلاش کنترلی به خوبی پاسخ می‌دهد و منحنی ولتاژها دارای نوسانات در لحظه اول است که برای جبران اثر انعطاف و نامعینی و هم به خاطر گشتاور مورد نیاز در راه‌اندازی می‌باشد. شکل (۶-۴) جریان موتورها را نشان می‌دهد. تطبیق پارامترهای \hat{P} کنترل‌کننده‌ها در شکل (۶-۵) نشان داده شده است. شکل (۶-۶) نامعینی در مفاصل را نشان می‌دهد. شکل (۶-۷) عملکرد تخمین عدم قطعیت‌ها برای همه مفاصل نشان می‌دهد. در تمام مفاصل مقدار خطای تخمین عدم قطعیت در نهایت کمتر از ۰.۰۵ می‌رسد.



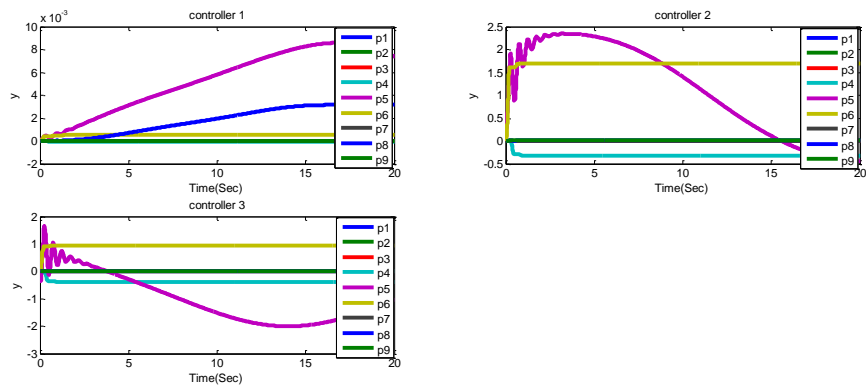
شکل (۲-۶) خطای ردگیری در مفاصل



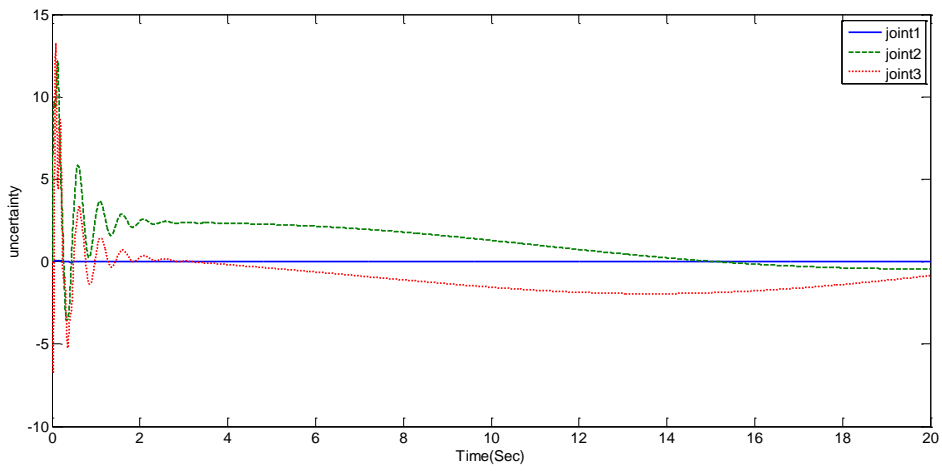
شکل (۳-۶) ولتاژ اعمالی به موتورها



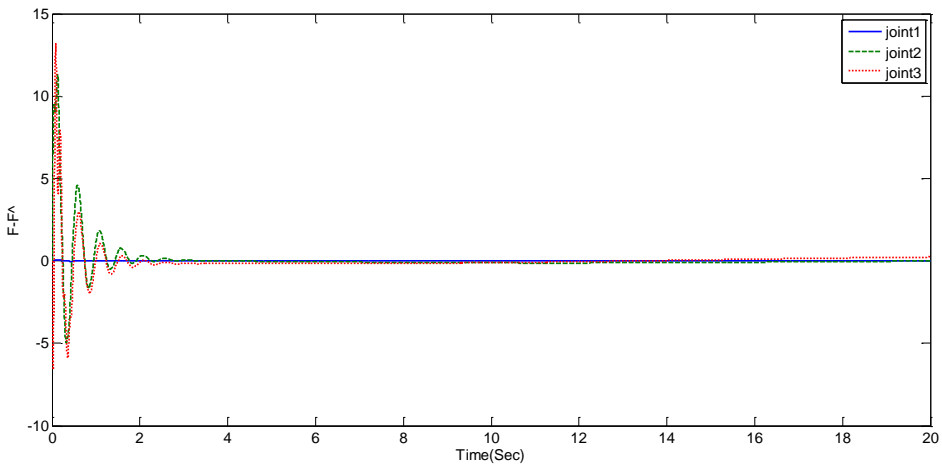
شکل (۴-۶) سیگنال جریان موتورها



شکل (۵-۶) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق



شکل (۶-۶) نامعینی در مفاصل



شکل (۷-۶) خطای تخمین عدم قطعیت ها در مفاصل

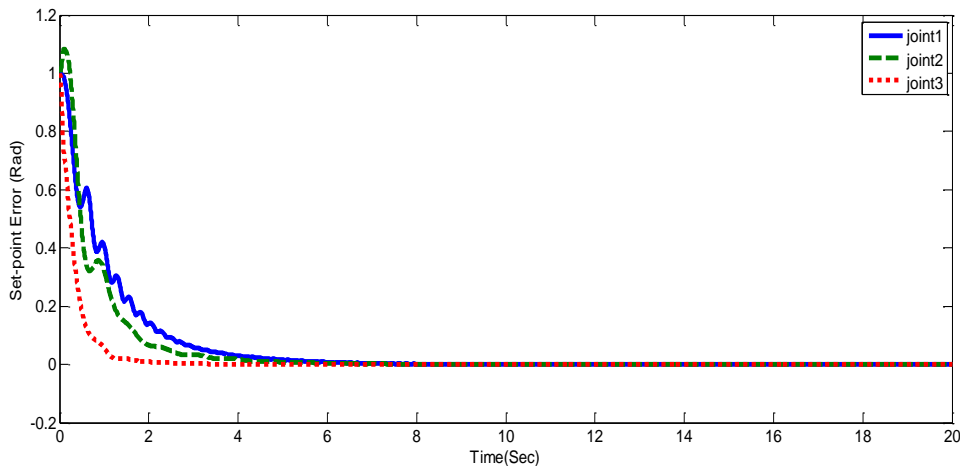
۲-۴-۶ تنظیم

برای بررسی عملکرد تنظیم سیستم کنترل، موقعیت مطلوب مفاصل بر روی 1 rad تنظیم شده است. پارامترهای مورد نیاز کنترل‌کننده‌ها در زیر بیان شده است. زمان اجرای شبیه سازی ۲۰ ثانیه می‌باشد. شکل (۶-۶) خطای تنظیم مفاصل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود خطای حالت ماندگار تقریباً برابر با صفر است و مفاصل در لحظه شروع دارای نوسان هستند که به دلیل وجود اثر انعطاف به وجود می‌آید. شکل (۶-۷) ولتاژ اعمالی به موتورها را نشان می‌دهد. از آنجا که خطای اولیه بزرگ است سیگنال کنترلی در ابتدا نیز بزرگ است. ولتاژ مفصل یک برای غلبه بر نیروی گرانشی دارای مقدار است و ولتاژ سایر موتورها دارای مقدار تقریباً صفر است. همچنین همگرایی پارامترهای تطبیق در شکل (۶-۸) قابل مشاهده است که بعد از مدتی به مقدار ثابتی همگرا می‌شود یعنی همگرایی پارامتری و همگرایی خطا داریم.

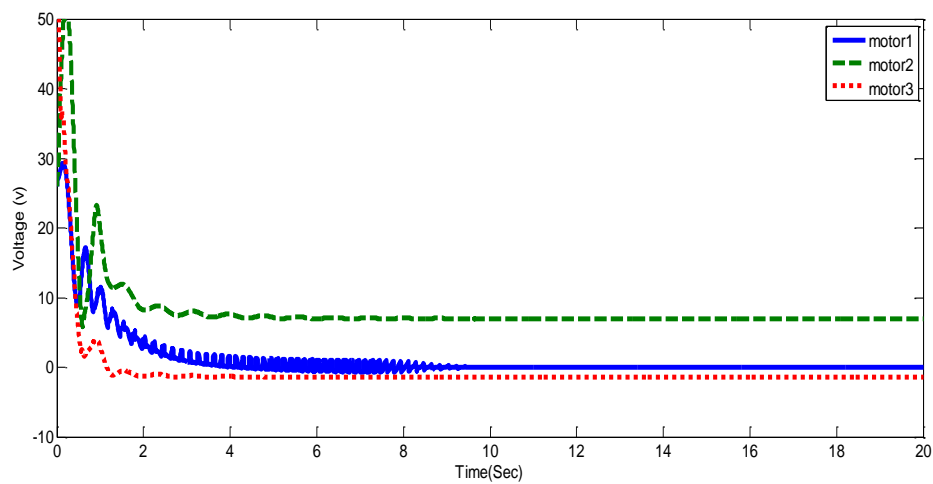
کنترل کننده اول: $k_p = 0.5, \gamma = 500, \hat{P}(0) = 0$

کنترل کننده دوم: $k_p = 1, \gamma = 800, \hat{P}(0) = 0$

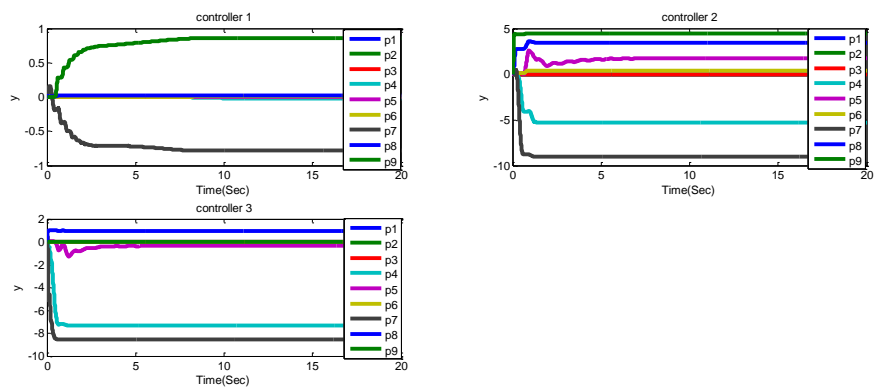
کنترل کننده سوم: $k_p = 1, \gamma = 600, \hat{P}(0) = 0$



شکل (۶-۸) خطای تنظیم مفاصل



شکل (۶-۹) ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات



شکل (۶-۱۰) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق

فصل هفتم

کنترل غیر خطی ربات با مفاصل انعطاف پذیر

در این فصل یک روش کنترل بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ استفاده شده در مرجع [۴۳] معرفی و شبیه سازی می شود و عملکرد این کنترل کننده مورد بررسی و مقایسه با روش پیشنهادی در این پایان نامه قرار می گیرد.

۷-۱ کنترل غیرخطی

در این شبیه سازی از یک قانون کنترل غیرخطی استفاده شده است [۴۳]. در این مقاله برای ایجاد ارتباط بین زاویه موتور و مفصل از یک رابطه جداگانه استفاده شده است.

قانون کنترل به صورت زیر است:

$$u = \hat{R}I + \hat{k}_b (K_d \ddot{E} + K_p \dot{E} + K_i E + \rho_2 \text{sign}(e)) \quad (1-7)$$

با $E = \theta_{md} - \theta_m$ زاویه مطلوب موتور و θ_m زاویه موتور و \hat{k}_b و \hat{R} مقدار تقریبی k_b و R می باشد که از طریق رابطه غیر خطی زیر محاسبه می شوند.

$$\begin{aligned} \hat{R} &= \gamma \int_0^t \left(\frac{I_d e}{\hat{k}_b} \right) dt + \hat{R}(0) \\ \hat{k}_b &= \sqrt{2\gamma \int_0^t (\dot{\theta}_m e) dt + \hat{k}_b(0)^2} \end{aligned} \quad (2-7)$$

رابطه بین زاویه موتور و زاویه مفصل به صورت زیر است:

$$\theta_{md} = k_d \dot{e} + k_p e + k_i \int e dt \quad (3-7)$$

$$e = q_d - q \quad (4-7)$$

q زاویه مفصل، q_d زاویه مطلوب مفصل هستند. در این شبیه سازی به جای کنترل مستقیم زاویه مفصل از دو حلقه کنترلی استفاده می شود. یکی برای کنترل زاویه موتور و دیگری برای کنترل زاویه

مفصل از طریق زاویه موتور و این باعث پیچیده تر شدن سیستم کنترل و تخمین پارامترها دارای حجم محاسبات زیاد می‌باشد.

۲-۷ شبیه سازی سیستم کنترل

قانون کنترل بر روی ربات سه رباط هنرمند پیاده سازی می‌شود. سیستم کنترل به صورت مفصل مستقل به ربات اعمال می‌شود. بنابراین برای کنترل ربات‌های هر مفصل از یک کنترل کننده جداگانه استفاده می‌شود.

۱-۲-۷ کنترل ردگیری

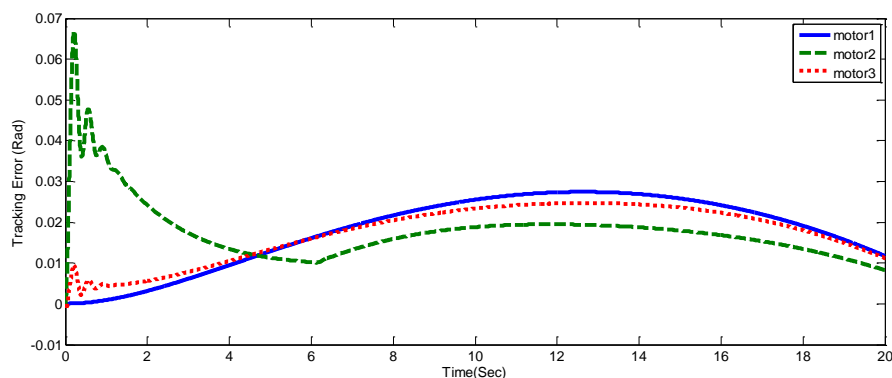
مسیر مطلوب برای ردگیری همانند رابطه (۳-۴۰) در نظر گرفته شده است. پارامترهای کنترل کننده به صورت زیر انتخاب شده‌اند.

$$K_p = 100, K_d = 12, K_i = 400$$

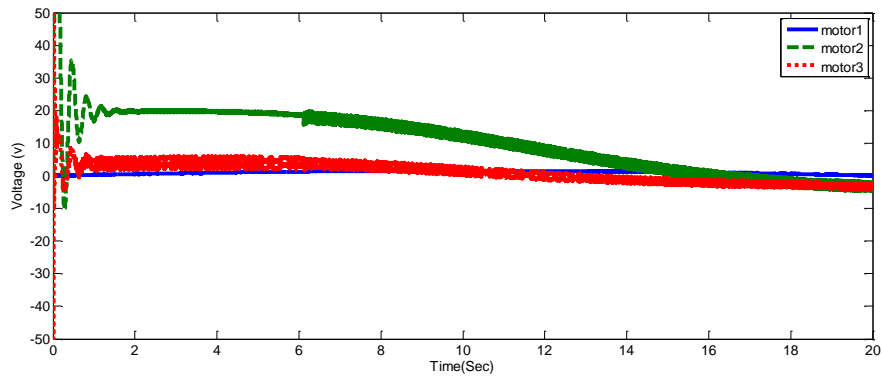
$$\rho_1 = 0.2, \rho_2 = 4, \rho_3 = 2$$

$$\gamma = 0.001, \gamma = 0.00001, \gamma = 0.00001$$

شکل (۱-۷) خطای ردگیری را نشان می‌دهد که تاثیر انعطاف را از بین برده است ولی خطا به اندازه ربات صلب کاهش نیافته است. در شکل (۲-۷) هم تلاش کنترلی مشاهده می‌شود.



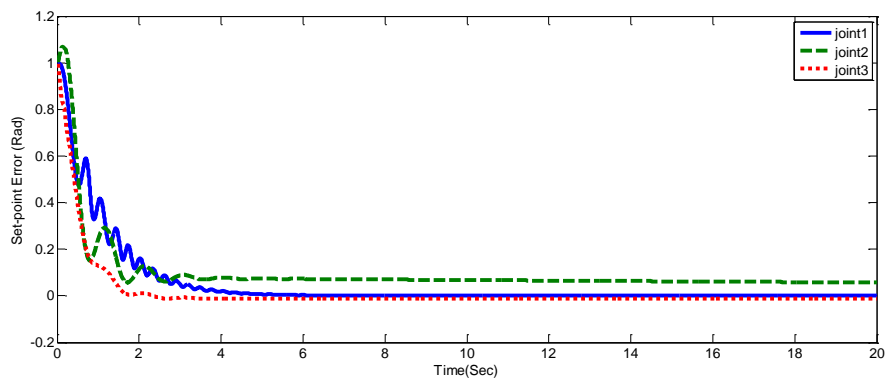
شکل (۱-۷) خطای ردگیری در مفاصل



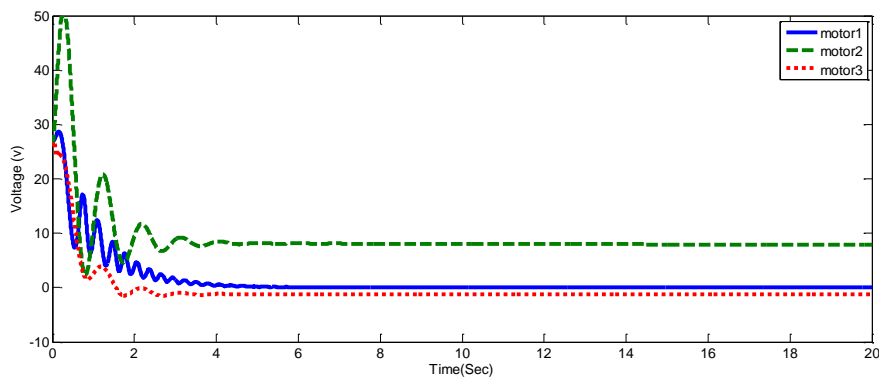
شکل (۲-۷) ولتاژ اعمالی به موتورها

۲-۲-۷ تنظیم

برای بررسی عملکرد تنظیم سیستم کنترل، موقعیت مطلوب مفاصل بر روی 1 rad تنظیم شده است. پارامترهای مورد نیاز کنترل کننده‌ها در زیر بیان شده است. زمان اجرای شبیه سازی ۲۰ ثانیه می‌باشد. شکل (۳-۷) خطای تنظیم مفاصل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مفاصل در لحظه شروع دارای نوسان هستند که به دلیل وجود اثر انعطاف بر این مفاصل به وجود می‌آید. شکل (۴-۷) ولتاژ اعمالی به موتورها را نشان می‌دهد که در آغاز به دلیل بزرگ بودن خطا دارای مقدار بزرگی است.



شکل (۳-۷) خطای تنظیم در مفاصل



شکل (۷-۴) ولتاژ اعمالی به موتورهای

۳-۷ ارزیابی عملکرد روش‌ها

به منظور ارزیابی و مقایسه روش‌ها از معیار عملکرد انتگرال مربع خطا^۱ (MISE) استفاده شده

است. MISE به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MISE = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2) dt} \quad (۷-۵)$$

که T زمان عملکرد (شبه سازی) و e_1 ، e_2 ، e_3 خطا برای مفصل ۱، ۲ و ۳ می‌باشد.

با توجه به جدول (۷-۱) در کنترل ردگیری و تنظیم روش فازی تطبیقی مستقیم در راهبرد

گشتاور عملکرد بهتری نسبت به خطی سازی فیدبکی دارد و در راهبرد ولتاژ روش پیشنهادی در این

پایان نامه نسبت به روش کنترل غیرخطی پیشنهاد شده در مرجع [۴۴] هم دارای معیار MISE

کمتر و در نتیجه عملکرد بهتری است.

^۱ Mean of the Integral of Squared Error

جدول (۷-۱) مقایسه عملکرد روش ها

روش	ردگیری / MISE	MISE/ تنظیم
خطی سازی فیدبکی - گشتاور	0.000012960	0.7166
فازی تطبیقی مستقیم - گشتاور	0.00001089	0.4589
خطی سازی فیدبکی - ولتاژ	0.00003844	0.1715
خطی سازی فیدبکی با تخمینگر فازی تطبیقی مقاوم	0.000081	0.1489
کنترل غیر خطی	0.000445	0.1597

فصل هشتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۸-۱ نتیجه گیری ها

در این پایان نامه مدل سازی دینامیکی و سینماتیکی ربات، راهبردهای کنترل گشتاور و کنترل ولتاژ و سیستم فازی تطبیقی مورد توجه و بررسی قرار گرفت تا بتوان به هدف اصلی پایان نامه یعنی کنترل فازی ربات از طریق جبران سازی اثر انعطاف رسید. هر یک از روش های مذکور طراحی تحلیل و شبیه سازی شده اند و به ارزیابی عملکرد کنترل در موارد ردگیری و تنظیم پرداخته شده است. روش های کنترل ولتاژ آزاد از مدل ربات بوده و به صورت مفصل مستقل به سیستم اعمال می شوند. در نتیجه کنترل چند متغیره ربات به کنترل جداگانه هر مفصل تبدیل شده است که علاوه بر سادگی حجم بسزایی در کاهش حجم محاسبات دارد. ضعف روش های مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور آن است که دینامیک محرکه ها را در نظر نمی گیرند ولی در مقابل روش مبتنی بر راهبرد ولتاژ به نقش موتورها توجه اساسی دارد. از آنجا که در راهبرد کنترل ولتاژ نیاز به مدل پیچیده ربات نیست ساختار سیستم فازی تطبیقی ساده تر است.

۸-۲ پیشنهادات

پیشنهادات زیر برای ادامه تحقیق ارائه می گردد:

- می توان از روش های دیگری که برای ربات صلب پیشنهاد شده است در هر دو راهبرد ولتاژ و گشتاور استفاده کرد.
- می توان از روش های هوشمند برای انتخاب پارامترهای طراحی استفاده کرد.
- از آنجایی که کنترل ربات در فضای کار مورد توجه قرار گرفته است می توان روش مذکور را در فضای کار پیاده سازی کرد.
- می توان به کاربردهای ربات انعطاف پذیر در علم توان بخشی توجه کرده و کنترل پیشنهادی را بر روی این ربات ها پیاده سازی کرد.

- [1] Lin L.C and Yuan K (1990) "Control of flexible joint robots via external linearization Approach" Journal of Robotic System, 7, 1-22.
- [2] Wilson G. A and Irwin G. W (1993) "Tracking Control of manipulators with elastic joints" IEEE Int. Conf. on Control Applications, 1, 165-170.
- [3] Dixon W. E, Zergroglu E, Dawson D. M and Hannan M. W (1999) "Global adaptive partial state feedback tracking control of rigid-link flexible-joint robot" IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, 49, 281-286.
- [4] Sweet LM, Good MC (1985) "Redefinition of the robot motion control problem". IEEE Control Syst Mag, 5, 18–24.
- [5] Spong M. W and Vidyasager M (1989) "Robot Dynamics and Control" John Wiley and Sons, Inc.
- [6] Fateh M.M (2008) "On the voltage-based control of robot manipulators" International journal of control, Automation, and Systems, 6, 702-712.
- [7] Shen Y, Cai W,J, L (2010) "Multivariable process control:decentralized, decoupling or sparse", Ind, Eng, Chem. Res, 49, 761-771.
- [8] Isidori A (1989) "Nonlinear control system" Springer-Verlage, Heidelberg.
- [9] Seraji H (1989) "Decentralized adaptive control of manipulators: theory simulation and experimentation" IEEE Trans. Robot. Autom, 5, 183-200.
- [10] Hsua S.H, Fua L.C (2006) "A fully adaptive decentralized control of robot manipulators" Automatica, 42, 1761-1767.
- [11] Qu Z and Dawson D.M (1996) "Robus tracking control of robot manipulator" , New York.
- [12] Abdallah C, Dawson D.M, Dorato P and Jamshidi M (1991) "Survey of robust control for rigid robots" Control syst. Mag.11, 24-30.
- [13] Fateh M.M (2010) "Proper uncertainty bound parameter to robust control of electrical manipulators using nominal model" Nonlinear Dynamics, 61, 655-666.
- [14] Soltine J and Li W (1991) "Applied nonlinear control", Prentice Hall.
- [15] Yoo B. K ,Ham W.C (2000) "Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator" IEEE Trans on fuzzy systems, 8, 186-199.
- [16] Soltanpour M.R, Fateh M.M (2009) "Adaptive robust tracking control of manipulators in the task-space under uncertainties" International journal of basic and applied science, 3, 308-322.
- [17] Park J, Sandberg J.W (1991) "Universal approximation using radial-basise-function Network" Neural Computation, 3, 246-257.

- [18] Fateh M.M, Ahmadi S.M, Khorashadizadeh S (2014) "Adaptive RBF network control for robot manipulators" *Journal of AI and data mining*, 2, 159-166.
- [19] Lim C.M and Hiyama T (1991) "Application of fuzzy logic control for robot manipulators" *IEEE Trans, Robot. Autom. L*, 7, 688-691.
- [20] Kumbla K, Jamshidi M (1994) "Control of robotic manipulator using fuzzy logic" *IEEE international conference*, 1, 518-523.
- [21] Wang L.X (1996) "A course in fuzzy systems and control" Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- [22] Tsai C.H,Wang C.H, Lin W.S, (2000) "Robust fuzzy model-following control of robot manipulators, *IEEE Trans, Fuzzy Syst*, 8, 462-469.
- [23] Fateh M.M (2010) "Robust fuzzy control of electrical manipulators" *J Int Robot Syst*, 60, 415-434.
- [24] Fateh M.M, Fateh S (2013) "A precise robust fuzzy control of robots using voltage control strategy" *International journal of automation and computing*, 10, 64-72.
- [25] Wang L.X and Mendel J.M (1992) "Fuzzy basic function, universal approximation and orthogonal least squares learning" *IEE Trans. Neural Net Work*, 3, 807-814.
- [26] Hwang J.P and Kim E (2006) "Robust tracking control of an electrically driven: adaptive fuzzy logic approach" *IEEE Trans. Fuzzy Syst*, 14, 232-247.
- [27] Kim E (2004) "Output feedback tracking control of robot manipulator with model uncertainty via adaptive fuzzy logic" *IEEE Trans. Fuzzy Syst*, 12, 368-376.
- [28] Fateh M.M, Khorashadizadeh S (2012) "Robust control of electrically driven robots by adaptive fuzzy estimation of uncertainty" *Nonlinear Dynamics*, 69, 1465-1477.
- [29] Fateh M.M, Fateh S (2012) "Decentralized direct adaptive fuzzy control of robots using voltage control strategy" *Nonlinear Dynamics*, 70,1919-1930.
- [30] HyunC, Park C and Kim (2010) "TS fuzzy model based indirect adaptive fuzzy observer and controller design" *Information science*, 180, 2314-2327.
- [31] Yu H and Liyod S (1997) "Combined direct and indirect adaptive control constrained robots" *Int. J.Control*, 68, 955-970.
- [32] Wai R and Yang Z (2008) "Adaptive fuzzy neural network control design via T-S fuzzy model for robot manipulator including actuator dynamics" *IEEE Trans. Syst, Man, Cybern, B*, 8, 1326-1346.
- [33] Fateh M.M, Khorashadizadeh S (2012) "Optimal robust voltage control of electrically driven manipulators" *Nonlinear Dynamics*, 70, 1445-1458.
- [34] Ashjarian M, Kiyani K, Fateh M.M (2012) "Design of fuzzy controller for robot manipulators using bacterial foraging optimization algorithm" *Journal of intelligent learning systems and applications*, 4, 53-58.

- [35] Brogliato B, Lozano R Ortega R (1995) "Global tracking controllers for flexible-joint manipulators: a comparative study", *Automatica*, 31, 41–956.
- [36] Chien MC, Huang AC (2007) "Adaptive control for flexible-joint electrically driven robot with timevarying uncertainties", *IEEE Trans Ind Electron*, 54, 1032–1038.
- [37] Li Y, Tong S, Li T (2012) "Fuzzy adaptive dynamic surface control for a single-link flexible-joint robot", *Nonlinear Dynamics*, 70, 2035–2048.
- [38] Yoo S.J, Park JB, Choi YH (2008) "Adaptive Output Feedback Control of Flexible-Joint Robots Using Neural Networks, Dynamic Surface Design Approach", *IEEE Trans Neural Networks*, 19, 712–1726.
- [39] Chang Y.C, Yen H.M (2012) "Robust tracking control for a class of electrically driven flexible-joint robots without velocity measurements", *Int. J.Control*, 85, 194–212.
- [40] Talole SE, Phadke SB (2008) "Model following sliding mode control based on uncertainty and disturbance estimator", *ASME J Dyn Syst Meas Control*, 130, 1–5.
- [41] Carvajal, Chen G, Ogmen H (2000) "Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis", *Inform Sci*, 123, 249–270.
- [42] Bang JS, Shim H, Park SK, Seo JH (2010) "Robust tracking and vibration suppression for a two inertia system by combining backstepping approach with disturbance observer", *IEEE Trans Ind Electron*, 57, 3197–3206.
- [43] Fateh M.M (2012) "Nonlinear control of flexible joint robot" *Nonlinear dynamics*, 67, 2549-2559.
- [44] Fateh M.M (2012) "Robust control of flexible joint robots using voltage control strategy" *Nonlinear dynamics*, 67, 1525-1537.
- [45] Izadbakhsh A, Fateh M.M (2012) "Robust lyapunov-base control of flexible-joint robots using voltage control strategy" *Arab J Sci Eng*, 39, 3111-3121.
- [46] Yongmin L, Shaochen T, Tieshan L (2013) "Adaptive fuzzy output feedback control for a single-link flexible robot driven driven DC motor via backstepping" *Nonlinear analysis, Real world application*, 14, 483-494.
- [47] Heidar A, Malki, Dave M, Denny F, Guanrong C (1997) "Fuzzy PID control of a flexible-joint robot arm with uncertainties from time-varying loads" *IEEE Transaction on control systems technology*, 5, 371-378.
- [48] Fateh M.M, Souzanchi-k M (2015) "Indirect adaptive fuzzy control for flexible-joint robot manipulators using voltage control strategy" *Journal of information society of automation Transaction*, 28, 1451-1459.

- [49] Fateh M.M, Souzanchi-k M, Arab A.A (2013) "Fuzzy sliding mode control for flexible-joint robots" *Journal of Solid and Fluid, Mechanics*, 2, 31-43.
- [50] Siciliano B (1998) "Control in robotic: Open problems and future directions", *IEEE Int.Conf.on Control Applications*, 1, 81-84.
- [51] Fateh M.M (2007) "A novel formulation of inertia tensor using skew symmetric matrices" *WSEAS Transaction on systems*, 1, 229-234.
- [52] Spong M.W, Hutchinson S and Vidyasagar M (2006) "Robot modeling and control" John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- [53] Spong M.W (1987) "Modeling and control of elastic joint robots" *J.Dyn.Syst.Meas.Control*, 109, 310-319.

Abstract

This thesis presents a novel method for controlling flexible-joint robot manipulators. In this approach, by compensating flexibility effect the robot turns to rigid robot and then control methods for rigid robots are applied. Feedback linearization and direct adaptive fuzzy control, based on rigid model are designed with torque control strategy and simulated on three-link articulated flexible-joint robot. In the following, voltage control strategy is introduced and feedback linearization based on this strategy is explained. Then an adaptive fuzzy system is designed for compensating flexibility effect and feedback linearization based on rigid model is implemented on flexible-joint robot. In addition, performance of controller is evaluated by simulation. At the end, an adaptive fuzzy system is designed for improving performance of system against uncertainties. In all of these methods, by mathematical analysis, it is proved that the proposed control laws guaranty stability. Voltage control strategy, in comparison with torque control strategy has simpler structure therefore, implementation is easier.

Key words: Flexible-joint robots, Adaptive fuzzy system, Torque strategy, Voltage control strategy.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical&Robotic Engineering

**control of flexible-joint robot manipulator
by compensating flexibility effect**

S. Sareh Ahmadi

Supervisor:

Professor Mohammad Mehdi Fateh

February 2016