



دانشکده برق و رباتیک
گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

کنترل فازی تطبیقی بازوهای ماهر رباتیک با مفاصل انعطاف پذیر

نگارش:

مهدی سوزنچی کاشانی

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی فاتح

شهریور ۹۲

چکیده

این پایان‌نامه روش نوینی از کنترل فازی تطبیقی برای بازوی رباتیک با مفاصل انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهد که بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ است. در مقایسه با روش‌های قبلی مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور، ساده‌تر با محاسبه کمتر و کارآمدتر است و پایداری را نیز تضمین می‌نماید. به جای دو حلقه کنترلی، یکی برای کنترل زاویه موتور و دیگری برای کنترل زاویه مفصل، فقط از یک حلقه کنترلی برای سیستم استفاده می‌شود. با توجه به استفاده از متغیرهای قابل اندازه‌گیری خروجی کنترل‌کننده به صورت مجزا به هر موتور وارد می‌شود.

در این پایان‌نامه، مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی بازوهای رباتیک با مفاصل انعطاف‌پذیر مطرح و سپس راهبرد کنترل ولتاژ معرفی می‌شود. روش‌های کنترلی قبلی مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ بررسی، مقایسه و شبیه‌سازی می‌گردند. در ادامه، روش‌های پیشنهادی کنترل فازی تطبیقی مستقیم برای ربات اسکارا و کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم بر روی بازوی رباتیک هنرمند بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی می‌شوند. از طرفی، کنترل‌کننده مود لغزشی توسط تخمین‌گر فازی تطبیقی بهبود داده می‌شود و بر روی بازوی رباتیک هنرمند بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ پیاده‌سازی می‌شود. با تحلیل ریاضی اثبات می‌شود که تمامی روش‌های پیشنهادی، پایداری را تضمین می‌نمایند و عملکرد آنها توسط شبیه‌سازی ارزیابی می‌گردد.

کلمات کلیدی: بازوی رباتیک، مفاصل انعطاف‌پذیر، راهبرد کنترل ولتاژ، کنترل فازی تطبیقی

Accepted paper:

[۱] M.M.Fateh, M.Souzanchi-k “Decentralized Direct Adaptive Fuzzy Control for Flexible-Joint Robots” Journal of Control Engineering and Applied Informatics

Revised papers:

[۲] M.M.Fateh, M.Souzanchi-k “Indirect Adaptive Fuzzy Control for Flexible-Joint Robot Manipulators Using Voltage Control Strategy” Journal of International Society of Automation (ISA) Transactions

[۳] M.M.Fateh, M.Souzanchi-k “Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Flexible-Joint Robots” Journal of Solid and Fluid Mechanics

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۴	۱-۱ مروری بر تحقیقات پیشین
۱۰	۲-۱ اهداف تحقیق
۱۲	۳-۱ مروری بر ساختار پایان نامه
۱۳	فصل دوم: مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات
۱۵	۱-۲ معادلات سینماتیکی ربات
۱۷	۲-۲ ژاکوبین بازوی ماهر ربات
۱۹	۱-۲-۲ سرعت زاویه‌ای
۲۰	۲-۲-۲ سرعت خطی
۲۳	۳-۲ معادلات دینامیکی ربات
۲۳	۱-۳-۲ انرژی پتانسیل
۲۴	۲-۳-۲ انرژی جنبشی
۲۷	۳-۳-۲ معادلات حالت ربات با حضور محرکه‌ها
۳۰	۴-۲ مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا
۳۰	۱-۴-۲ مدل سازی سینماتیکی
۳۱	۲-۴-۲ مدل سازی دینامیکی
۳۵	۵-۲ مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات هنرمند

۳۵	۱-۵-۲ مدل سازی سینماتیکی
۳۶	۲-۵-۲ مدل سازی دینامیکی
۴۱	فصل سوم: استراتژی کنترل ولتاژ و بازوهای ماهر رباتیک با مفاصل انعطاف پذیر
۴۵	۱-۳ ربات‌هایی با مفاصل انعطاف پذیر و کنترل آن‌ها
۴۷	۲-۳ روش‌های کنترلی
۴۸	۱-۲-۳ کنترل غیر خطی
۵۰	۲-۲-۳ کنترل مقاوم
۵۳	فصل چهارم: کنترل فازی تطبیقی مستقیم بر مبنای استراتژی کنترل ولتاژ
۵۴	۱-۴ طراحی کنترل کننده فازی تطبیقی مستقیم
۵۸	۲-۴ شبیه‌سازی روش کنترل فازی تطبیقی مستقیم
۵۹	۱-۲-۴ کنترل ردگیری
۶۳	۲-۲-۴ تنظیم
۶۶	فصل پنجم: کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم بر مبنای استراتژی کنترل ولتاژ
۶۷	۱-۵ طراحی کنترل کننده فازی تطبیقی غیرمستقیم
۷۱	۲-۵ شبیه‌سازی روش کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم
۷۲	۱-۲-۵ کنترل ردگیری
۷۴	۲-۲-۵ تنظیم
۷۶	فصل ششم: بهبود کنترل مود لغزشی ربات با مفاصل انعطاف پذیر توسط تخمین‌گر فازی تطبیقی
۷۷	۱-۶ طراحی کنترل کننده مود لغزشی- فازی
۸۳	۲-۶ شبیه‌سازی روش کنترل مود لغزشی- فازی
۸۴	۱-۲-۶ کنترل ردگیری

۸۶	۲-۲-۶ تنظیم
۸۹	فصل هفتم: کنترل فازی بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور
۹۰	۱-۷ طراحی کنترل کننده فازی
۹۰	۲-۷ شبیه سازی روش کنترلی
۹۲	۱-۲-۷ کنترل ردگیری
۹۳	۲-۲-۷ تنظیم
۹۵	فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۹۶	۱-۸ نتیجه گیری
۹۷	۲-۸ پیشنهادها
	منابع

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۱	شکل (۱-۱) تعداد مقالات چاپ شده در زمینه ربات‌هایی با مفاصل انعطاف پذیر
۱۱	شکل (۲-۱) درصد مقالات چاپ شده در مجلات معتبر در سال ۲۰۱۲
۳۰	شکل (۱-۲) دیاگرام مفصلی ربات اسکارا با ۴ درجه آزادی
۳۵	شکل (۲-۲) دیاگرام مفصلی ربات هنرمند با ۳ درجه آزادی
۴۳	شکل (۱-۳) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور ربات
۴۳	شکل (۲-۳) دیاگرام موتور مغناطیس دائم
۴۴	شکل (۳-۳) سیستم کنترل موتور
۴۴	شکل (۴-۳) سیستم کنترل ربات
۴۹	شکل (۵-۳) مسیر مطلوب برای ردگیری ربات
۴۹	شکل (۶-۳) خطای ردگیری رابط با مفصل انعطاف پذیر
۵۰	شکل (۷-۳) سیگنال کنترلی اعمالی به موتور
۵۱	شکل (۸-۳) خطای ردگیری رابط با مفصل انعطاف پذیر
۵۱	شکل (۹-۳) سیگنال کنترلی اعمالی به موتور
۵۵	شکل (۱-۴) توابع تعلق ورودی فازی
۵۹	شکل (۲-۴) بلوک دیاگرام سیستم کنترل
۶۱	شکل (۳-۴) خطای ردگیری در مفاصل بدون در نظر گرفتن اغتشاش
۶۱	شکل (۴-۴) خطای ردگیری در مفاصل با در نظر گرفتن اغتشاش

- ۶۱ شکل (۵-۴) سیگنال ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات
- ۶۲ شکل (۶-۴) جریان موتورهای ربات
- ۶۲ شکل (۷-۴) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق
- ۶۳ شکل (۸-۴) خطای تنظیم مفاصل
- ۶۴ شکل (۹-۴) ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات
- ۶۴ شکل (۱۰-۴) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق
- ۷۲ شکل (۱-۵) بلوک دیاگرام سیستم کنترل
- ۷۲ شکل (۲-۵) مسیر مطلوب برای ردگیری
- ۷۳ شکل (۳-۵) خطای ردگیری در مفاصل
- ۷۳ شکل (۴-۵) سیگنال ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات
- ۷۴ شکل (۵-۵) سیگنال جریان موتورهای ربات
- ۷۴ شکل (۶-۵) خطای تنظیم مفاصل
- ۷۵ شکل (۷-۵) ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات
- ۷۵ شکل (۸-۵) سیگنال جریان موتورهای ربات
- ۸۴ شکل (۱-۶) مسیر مطلوب برای ردگیری
- ۸۵ شکل (۲-۶) خطای ردگیری در مفاصل
- ۸۵ شکل (۳-۶) سیگنال ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات
- ۸۵ شکل (۴-۶) سیگنال جریان موتورهای ربات
- ۸۶ شکل (۵-۶) خطای تخمین تابع
- ۸۶ شکل (۶-۶) عملکرد تنظیم مفاصل
- ۸۷ شکل (۷-۶) ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات

۸۷	شکل (۶-۸) سیگنال جریان موتورهای ربات
۸۷	شکل (۶-۹) خطای تخمین تابع
۹۱	شکل (۷-۱) بلوک دیاگرام سیستم کنترلی
۹۲	شکل (۷-۲) خطای ردگیری در مفاصل
۹۲	شکل (۷-۳) گشتاور اعمالی به موتورها
۹۳	شکل (۷-۴) خطای تنظیم در مفاصل
۹۳	شکل (۷-۵) گشتاور اعمالی به موتورها

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۳۱	جدول (۱-۲) پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا
۳۴	جدول (۲-۲) پارامترهای دینامیکی ربات اسکارا
۳۶	جدول (۳-۲) پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات هنرمند
۴۰	جدول (۴-۲) پارامترهای دینامیکی ربات هنرمند
۴۷	جدول (۱-۳) پارامترهای ربات
۴۷	جدول (۲-۳) پارامترهای موتور الکتریکی
۵۵	جدول (۱-۴) قوانین فازی
۸۱	جدول (۱-۶) قوانین فازی
۹۱	جدول (۱-۷) مقادیر ضرایب کنترل کننده

فصل اول

مقدمه

در سال‌های اخیر با پیشرفت علم و تکنولوژی و صنعتی شدن جوامع بشری، ساخت ربات‌های جدید با کاربردهای متفاوت مورد توجه بسیاری از دانشمندان و صنعت‌گران قرار گرفته است. ربات‌های صنعتی با کاربردهایی مانند جابه‌جایی قطعات، جوشکاری، لحیم‌کاری، سوراخ‌کاری، بسته‌بندی و همچنین کار در محیط‌های خطرناک شیمیایی و هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت استفاده مناسب از ربات‌ها باید به درستی معادلات سینماتیک و دینامیک آن‌ها را به دست آورده و بتوان ربات‌ها را به خوبی کنترل کرد.

به طور کلی ربات‌ها به دو دسته انعطاف پذیر و صلب تقسیم می‌شوند. این انعطاف پذیری می‌تواند مربوط به مفاصل یا رابط‌ها باشد. طراحی کنترل کننده برای ربات‌ها، از اوایل دهه ۱۹۷۰ توجه مهندسان کنترل را به خود جلب نمود و کم‌کم ربات‌ها در کاربردهای متنوعی مورد استفاده قرار گرفتند. تاکنون دانشمندان، روش‌های کنترلی و کارهای تحقیقاتی زیادی را در کتاب‌ها و مقالات ارائه کرده‌اند. تعدادی از این روش‌ها به صورت عملی در صنعت پیاده‌سازی شده است. کنترل ربات‌های انعطاف پذیر به دلیل حجم محاسبات بالا و پیچیدگی مدل ربات بسیار پیچیده و دشوار است. اغلب روش‌های کنترل ربات بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور مفاصل ربات می‌باشند [۱]. در نتیجه این روش‌های کنترلی دارای پیچیدگی زیادی هستند زیرا از مدل ربات در قانون کنترل استفاده می‌شود. برای برطرف کردن این مشکل، اخیراً روشی مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ موتورهای ربات ارائه شده است [۲]. 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.

می‌توان ادعا کرد که مسئله کنترل موقعیت برای ربات‌های صلب امروزه به طور مناسبی حل شده است [۳]. اما رفته رفته در اثر جایگزینی ربات‌های متداول با ربات‌های جدید که کوچک‌تر، سبک‌تر و سریع‌تر هستند دیگر کنترل کننده‌های متداول پاسخگوی نیازهای کنترلی ربات‌ها نبوده و چالشی در

مهندسی کنترل ایجاد می‌شود. می‌توان نشان داد که در اغلب کاربردهای جدید همانند ربات‌های مورد استفاده در فضا، سیستم‌های پس‌خوراننده نیرو^۱، دست‌ها و بازوهای ماهر رباتیکی [۴] و ریز ربات‌ها^۲، مسئله اصلی مشترک برای کنترل، وجود انعطاف در مفاصل است که نادیده گرفتن آن در طراحی قانون کنترل موجب بروز ناپایداری، عدم ردیابی و یا افت عملکرد در سیستم کنترل می‌گردد.

انعطاف در مفاصل، اغلب از عوامل تأثیر گذار در پیچیدگی سیستم‌های رباتیک است. همان‌طور که در طی نتایج عملی نشان داده شده است برای دستیابی به عملکرد ردیابی بهتر، انعطاف مفاصل باید هم در مدل‌سازی و هم در طراحی کنترل‌کننده در نظر گرفته شود. مهم‌ترین عامل در انعطاف مفاصل، انعطاف در سیستم انتقال قدرت می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم بازوهای رباتیکی نیاز به محرکه‌هایی با قابلیت تولید گشتاور بالا در سرعت‌های پایین دارند، همچنین موتورهای الکتریکی گشتاور مورد نیاز ربات را در سرعت‌های بالا تأمین می‌کنند. بنابراین در ربات‌ها یک سیستم انتقال قدرت مانند هارمونیک درایو، تسمه [۵] و یا محورهای بلند [۶] برای افزایش گشتاور و کاهش سرعت به کار گرفته می‌شود. از بین سیستم‌های انتقال قدرت هارمونیک درایوها بیشتر مورد توجه طراحان قرار می‌گیرند. هارمونیک درایو، جعبه دنده مخصوصی است که مکانیزم انتقال قدرت در آن توسط یک المان انعطاف پذیر صورت می‌گیرد.

از نقطه نظر عملی، این انعطاف یا عمداً به ربات اضافه می‌گردد و یا از طرف ساختار ربات و سیستم انتقال توان می‌باشد. علاوه بر این، حسگرهای گشتاور و یا برخی عملگرها [۷،۸] نیز می‌توانند منشأ ایجاد انعطاف پذیری در مفاصل باشند. منشأ ایجاد انعطاف در اغلب ربات‌هایی با مفاصل انعطاف پذیر وجود سیستم انتقال حرکت هارمونیک درایو است و دیگر موارد ذکر شده به صورت محدود نمایان می‌شوند. اگر چه وجود انعطاف پذیری در ربات‌ها مفید و گریزناپذیر است؛ لیکن به منظور جلوگیری از

^۱ Force feedback
^۲ Micro robots

ایجاد انعطاف، لقی، اصطکاک غیر خطی و دیگر موارد ناشی از به‌کارگیری جعبه دنده، می‌توان ربات‌ها را بدون جعبه دنده با رانش مستقیم ساخت که خود مستلزم استفاده از موتورهای سنگین بوده و مشکلات خاص خود را به همراه دارد [۹،۱۰]. تا چندی پیش رویکرد اصلی در طراحی و ساخت ربات‌ها، صلبیت بالای آن‌ها بود و این رویکرد نه به علت نارسایی ربات‌های انعطاف پذیر، بلکه به منظور سادگی کنترل در ربات‌های صلب اتخاذ می‌گردید [۱۱-۱۳]. با وجود این، امروزه پذیرفته شده است که روش‌های صلب جوابگوی تمامی نیازهای کنترلی در رباتیک نبوده و در نظر گرفتن انعطاف پذیری از اهمیت بالایی برخوردار است.

۱-۱- مروری بر تحقیقات پیشین.

امروزه رباتیک و کاربردهای آن موضوعات تحقیقاتی جذابی در زمینه کنترل و اتوماسیون صنعتی هستند. در این بخش به بررسی تحقیقات انجام شده در طراحی کنترل کننده برای ربات‌های صلب و انعطاف پذیر پرداخته می‌شود. با توجه به کاربردی که ربات دارد روش کنترل آن مشخص می‌شود. به عنوان مثال در جابه‌جایی اجسام در انبار یک کارخانه ابتدا گیره ربات باز شده و قطعه را گرفته و سپس بعد از جابه‌جایی مورد نظر قطعه را به محل نهایی برده و سپس گیره مجدد باز می‌شود و برای گرفتن قطعه بعدی به محل اولیه باز می‌گردد. بنابراین، در این کاربرد ربات با کنترل موقعیت و کنترل نیروی تماسی مواجه می‌شود [۱].

سیستم رباتیک یک سیستم پیچیده، چند متغیره، غیرخطی همراه با تزویج‌های سنگین و نامعینی است. بنابراین، کنترل آن دارای اهمیت بسیار زیادی است. جهت کنترل این سیستم پیچیده روش‌های کنترلی مجزاسازی^۳ ارائه شده است [۱۴]. این روش کنترلی یک سیستم چند ورودی-چند خروجی را به چند سیستم یک ورودی- یک خروجی تبدیل می‌نماید. گاهی مواقع فرایند مجزاسازی، ساختارهای

^۳Decoupling control

پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که در عمل قابلیت اجرا ندارد. برای حل این مسأله روش‌های کنترل جداگانه^۴ ارائه می‌شود. این روش برای کنترل سیستم‌های چند متغیره سودمند است. زیرا کنترل سیستم‌های چند متغیره را از طریق کنترل جداگانه سیستم یک ورودی-یک خروجی انجام می‌دهد و همچنین اجرای عملی آن را ممکن می‌سازد [۱۵]. این نوع کنترل در بسیاری از ربات‌های مدرن به خاطر ساده شدن محاسبات و پایین آمدن هزینه سخت افزار بکار گرفته می‌شود [۱۶، ۱۷].

یکی از روش‌های مجزا سازی کنترل ربات، روش خطی سازی پس‌خورده^۵ است. قانون کنترل خطی سازی پس‌خورده می‌تواند سیستم غیر خطی و همراه با تزویج ربات را به سیستم خطی و بدون تزویج تبدیل کند. در سیستم به دست آمده اثری از ترم‌های غیرخطی وجود ندارد. در نتیجه، کنترل سیستم بسیار راحت‌تر می‌شود. با وجود این، برای اجرای این روش باید مدل دقیق سیستم در دست باشد. در صورت نداشتن مدل دقیق 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 به طور جداگانه کنترل می‌شود. در این روش سیستم ربات که چند ورودی-چند خروجی است به صورت چند سیستم یک ورودی-یک خروجی دیده می‌شود. پس‌خوردها از همان مفصلی گرفته می‌شود که کنترل می‌شود [۱۸]. به منظور کنترل ربات باید تمام مفاصل به طور جداگانه کنترل شود. در این روش تمامی اثرات تزویج‌ها به عنوان عدم قطعیت شناخته می‌شود [۱] سپس توسط کنترل کننده‌ها جبران می‌شود. این روش برای ردگیری مسیرهای با تغییرات شدید مناسب نیست. به دلیل وجود ترم‌های دینامیکی مثل شتاب کوریولس و شتاب جانب مرکز و تأثیرات تزویج که به سرعت مفاصل مربوط است سیستم نمی‌تواند عملکرد مناسبی در کاربردهای سریع ارائه دهد. ولی اگر ترم‌های دینامیکی و عدم قطعیت‌ها توسط قانون کنترل جبران شود این روش دارای عملکرد

^۴Decentralized control
^۵Feedback linearization

مناسبی می‌شود. عملکرد کنترلی سیستم با روش‌هایی مثل کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی بهبود می‌یابد. همچنین روش کنترل فازی به دلیل غلبه بر عدم قطعیت‌ها به طور موثری در روش کنترل جداگانه مفاصل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تا کنون کارهای بسیاری در زمینه کنترل مقاوم در فضای مفصلی [۱۹،۲۰] و فضای کار ربات [۲۱،۲۲] ارائه شده است. همچنین روشی مبتنی بر کنترل مود لغزشی برای کنترل غیر خطی مقاوم در برابر خطای مدل و اغتشاش خارجی در [۲۳] ارائه شده است. در مرجع [۲۴] کنترل مقاوم ربات با استفاده از مدل نامی، برای ساده‌سازی طرح و بهبود عملکرد کنترلی سیستم راهکاری بر مبنای حد بالای عدم قطعیت ارائه می‌کند. همچنین کنترل مقاوم ربات‌های انعطاف پذیر نیز بر مبنای کنترل ولتاژ ارائه شده است که عملکرد قابل قبولی داشته است [۲۵].

کنترل تطبیقی نیز در کنترل ربات کارایی بسیار زیادی دارد. بسیاری از ربات‌ها دارای عدم قطعیت پارامتری هستند. اگر این پارامترها بر اساس یک مکانیزم تطبیق تنظیم نشوند، ممکن است باعث کاهش دقت و تنزل عملکرد و یا حتی در بعضی موارد موجب ناپایداری سیستم نیز بشود [۲۶]. همچنین روش دیگری از کنترل تطبیقی ربات با جبران کننده فازی برای غلبه بر عدم قطعیت پارامتری مطرح شده است [۲۷].

کنترل فازی به دلیل سادگی در طراحی و غلبه بر عدم قطعیت‌ها توجه دانشمندان زیادی 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 روش‌های کنترل کلاسیک برتری دارد [۲۸]. این روش آسان با قابلیت‌های انکار ناپذیر به مدل سیستم وابسته نبوده و به همین جهت در بسیاری از کارهای تحقیقاتی برای کنترل ربات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹،۳۰].

روش کنترل مقاوم فازی ربات به کمک روش مستقیم لیاپانوف ارائه شده است [۳۱]. همچنین از کنترل

فازی برای کنترل ربات جوشکار در فضای کار استفاده شده است [۳۲]. یک ویژگی مهم و اساسی 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 [۳۳]. همچنین این توانایی سیستم فازی به صورت موثری در کنترل کننده‌های فازی تطبیقی بکار گرفته می‌شود.

کنترل ردگیری ربات‌ها با سرعت و دقت بالا یکی از موضوعات مهم در علم کنترل ربات است. کنترل کننده‌های فازی تطبیقی با بهره‌گیری از ویژگی‌های سیستم‌های فازی و کنترل کننده‌های تطبیقی به خوبی می‌توانند این هدف را محقق سازند. از آنجایی 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 [۳۴] استفاده شده است. در این خصوص می‌توان به روش آزاد از مدل، فازی تطبیقی مدل مرجع با روش مود لغزشی [۲۷] و کنترل ردگیری ربات با عدم قطعیت مدل با روش فازی تطبیقی [۳۵] اشاره نمود.

سیستم‌های فازی چند متغیره برای تولید قوانین کنترل گشتاور ربات در کنترل کننده‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که ربات دارای تزویج سنگین می‌باشد. این روش‌ها برای تضمین پایداری و همگرایی خطای ردگیری به همه متغیرهای حالت سیستم نیاز دارد در نتیجه، کنترل کننده دارای محاسبات سنگین از جهت تعداد زیاد قوانین برای پوشش متغیرهای ورودی در کنترل چند متغیره می‌باشد.

کنترل کننده‌های فازی تطبیقی به دو دسته فازی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. روش تطبیقی مستقیم مبتنی بر دانش کنترلی است ولی روش تطبیقی غیرمستقیم مبتنی بر دانش سیستمی است.

هر دو کنترل کننده برای کنترل ربات استفاده می‌شوند. کنترل کننده فازی تطبیقی مستقیم برای کنترل سیستم‌های نامعین غیر خطی استفاده شده است [۳۶].

کنترل کننده فازی تطبیقی غیر مستقیم برای کنترل ربات‌ها با بار ثابت پیشنهاد می‌شود [۳۷]. همچنین از ترکیب هر دو روش نیز برای کنترل ربات استفاده شده است [۳۸]. از کنترل عصبی فازی تطبیقی نیز در هر دو چهارچوب نیز استفاده می‌شود [۳۹]. در نهایت به طور کلی می‌توان گفت کنترل کننده‌های فازی تطبیقی دارای مزایای بسیاری می‌باشند ولی در طراحی آن‌ها باید در نظر داشت که عملکرد آن‌ها به طرح کنترل کننده، خطای تقریب و شرایط اولیه بسیار وابسته است. همچنین اثبات پایداری و همگرایی آن‌ها به دلیل ساختار پیچیده فازی با مسائل دشواری روبه‌رو است.

در مرجع [۴۰] نشان داده شده است که یک ربات سه محوره با مفاصل انعطاف پذیر قابل خطی سازی پس‌خوردی نبوده و کنترل آن نیازمند به‌کارگیری روش‌های جدیدی می‌باشد. در [۴۱،۴۲] به بررسی کنترل پذیری ربات‌ها با مفاصل انعطاف پذیر پرداخته‌اند. مرجع [۴۲] روش کنترل تطبیقی را با به‌کارگیری مدل خطی تقریبی از ربات ارائه نموده است. همچنین [۴۳] و [۴۴] با در نظر گرفتن مدلی دقیق از انعطاف پذیری در مفاصل، به بررسی اثرات آن بر روی کنترل موقعیت مجری نهایی ربات پرداخته و یک طرح جبران‌ساز پیش‌خور مستقل برای هر مفصل پیشنهاد داده‌اند. همین ایده برای کنترل ربات صنعتی با انعطاف پذیری توأم در رابط‌ها و مفاصل بکار گرفته شده است [۴۵]. روش گشتاور محاسباتی برای بازوی استوانه‌ای صفحه‌ای با مفاصل انعطاف پذیر به کار گرفته شده است و نشان داده می‌شود که روش کنترل گشتاور محاسباتی به تنهایی چندان مقاوم نمی‌باشد [۴۶]. بدون استفاده از فرض‌های ساده کننده به منظور حذف اثرات مربوط به پارامترهای بازو، عملگر و مفاصل بر دینامیک ربات، به مدل‌سازی دقیق ربات با مفاصل انعطاف پذیر پرداخته شده است [۴۷].

کنترل ساختار متغیر را به منظور کنترل ربات دو محوره با مفاصل انعطاف پذیر اتخاذ شده است [۴۸]. همچنین مراجع [۴۹-۵۲] از شبکه عصبی در طراحی کنترل کننده استفاده نموده‌اند.

تا کنون بیشتر مسائل کنترل ربات بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور صورت گرفته است ولی عیب‌های اساسی در این روش وجود دارد. هنگام استفاده از این راهبرد اغلب از دینامیک محرکه‌ها برای کنترل ربات صرف نظر می‌شود [۵۳-۵۵]. دینامیک محرکه‌ها نقش مهمی در حرکت‌های سریع، بارهای متغیر، اصطکاک و اشباع محرکه‌ها ایفا می‌کند [۵۶]. همچنین به دلیل وجود چرخ‌دنده‌ها در سیستم‌های انتقال قدرت محرکه‌ها پدیده انعطاف نیز ظاهر می‌شود که از آن نیز صرف نظر می‌کنند. این راهبرد شدیداً غیرخطی، با تزویج سنگین و بسیار محاسباتی است. برخی از تحقیقات اخیر نظیر فازی تطبیقی و پسگام [۵۷]، کنترل عصبی فازی تاکاگی سوگنو [۵۸]، کنترل فازی تطبیقی مستقیم مدل مرجع [۵۹]، کنترل عصبی فازی تطبیقی [۳۹] به کل سیستم رباتیک، شامل دینامیک موتورها توجه می‌کند. کنترل کننده‌های مذکور پایداری سیستم کنترل را تضمین و همگرایی خطای ردگیری را فراهم می‌کنند.

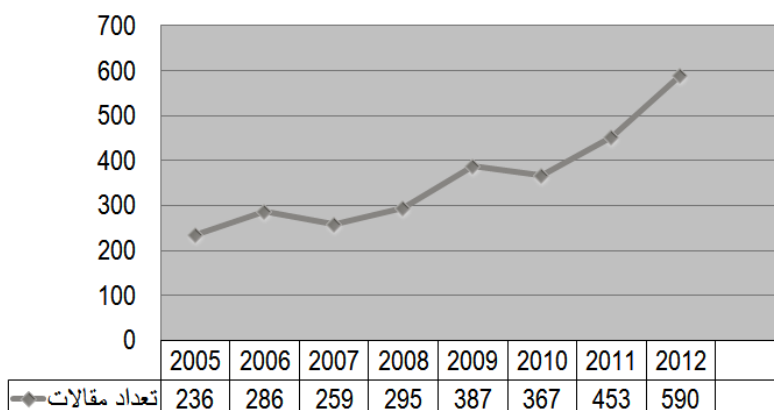
اخیراً راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل مجزا و آزاد از مدل ربات معرفی شده است [۲]. از آنجا که مدل موتور بسیار ساده‌تر از مدل ربات است طراحی کنترل کننده بر مبنای آن بسیار ساده‌تر است. در این طراحی ربات به عنوان بار موتور در نظر گرفته می‌شود. برای کنترل هر مفصل در واقع موتور آن کنترل می‌شود بدین ترتیب کنترل سیستم چند متغیره ربات به کنترل موتورهای آن تبدیل می‌شود و با کنترل جداگانه هر مفصل به راحتی می‌توان ربات را کنترل کرد. تا کنون کنترل ولتاژ به صورت کنترل مقاوم [۶۰]، کنترل فازی [۳۱]، کنترل با تأخیر زمانی [۲۵] و کنترل تطبیقی [۶۱] ارائه شده است.

۲-۱ اهداف و اهمیت تحقیق.

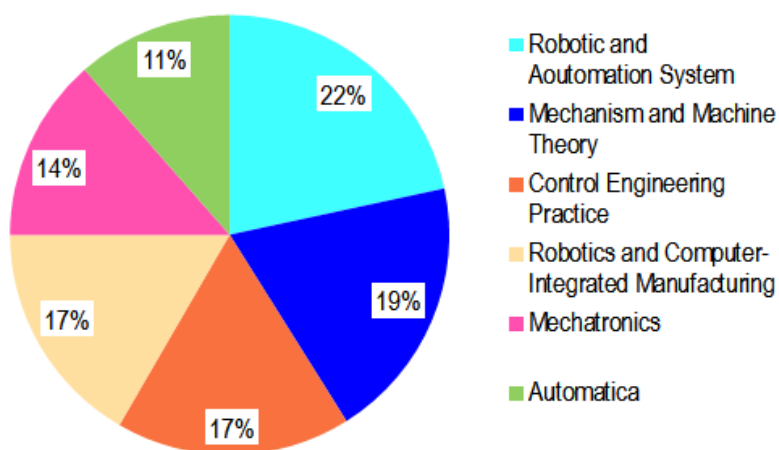
روش‌های کنترلی پیشین کمتر به اثر انعطاف پذیری مفاصل پرداخته که در عمل باعث کاهش کارایی و حتی در بعضی موارد موجب ناپایداری سیستم نیز می‌شود [۶۲]. با توجه به اهمیت کاربرد ربات‌های صنعتی با مفاصل انعطاف پذیر و پیچیدگی معادلات آن‌ها، در این پایان نامه به دنبال آن هستیم تا با رویکرد کنترل ولتاژ، روش جدیدی برای طراحی کنترل کننده فازی تطبیقی ارائه دهیم که به مدل ربات وابسته نباشد و همچنین در برابر عدم قطعیت‌ها نیز مقاوم باشد. در این خصوص، مدل سازی سیستم کنترل، طراحی کنترل کننده فازی، تحلیل پایداری و بررسی عملکرد سیستم کنترل انجام می‌شود. با توجه به پیچیده بودن سیستم رباتیک، غلبه بر عدم قطعیت‌ها شامل عدم قطعیت پارامتری، دینامیک مدل نشده و اغتشاش خارجی، از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین دلیل از کنترل فازی برای مقابله با عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شود. در اجرای کنترل نیز از راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل موتورهای ربات استفاده می‌شود. این روش نسبت به راهبرد مرسوم کنترل گشتاور ساده تر و کاربردی تر می‌باشد و از دقت و سرعت و سهولت اجرای بیشتری برخوردار است. با این روش هر مفصل به طور جداگانه کنترل می‌شود. در حل این مسأله هر دو روش کنترل فازی تطبیقی مستقیم و غیرمستقیم، طراحی و شبیه سازی شده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین از ویژگی تخمین گری فازی در قانون کنترل مود لغزشی استفاده می‌شود در انتها پایداری سیستم کنترل بررسی و تضمین می‌شود.

بحث کنترل ربات‌ها با مفاصل انعطاف پذیر در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است به طوری که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود در سال ۲۰۱۲ نزدیک به ۶۰۰ مقاله در مجلات بین‌المللی در این زمینه نوشته شده است. و شکل ۲-۱ توزیع چاپ مقالات مذکور در مجلات علمی پژوهشی را نشان می‌دهد.

تعداد مقالات



شکل (۱-۱) تعداد مقالات چاپ شده در زمینه ربات‌هایی با مفاصل انعطاف پذیر.



شکل (۲-۱) درصد مقالات چاپ شده در مجلات معتبر در سال ۲۰۱۲

۳-۱ مروری بر ساختار پایان نامه

فصل‌های دیگر این پایان نامه به صورت زیر تنظیم شده‌اند:

فصل دوم به مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات و به دست آوردن معادلات آن اختصاص داده شده است. در این فصل ربات اسکارا با ۴ درجه آزادی و ربات هنرمند با ۳ درجه آزادی با در نظر گرفتن اثر انعطاف در مفاصل، مدل سازی می‌شوند. در فصل سوم به معرفی مختصری از راهبرد کنترل ولتاژ پرداخته می‌شود و دو روش کنترلی برای ربات با اثر انعطاف در مفاصل با استفاده از این راهبرد بررسی می‌شود.

در فصل چهارم روش کنترل فازی تطبیقی مستقیم بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ تحلیل، طراحی و شبیه سازی می‌شود و در انتها پایداری سیستم کنترل بررسی و تضمین می‌شود. در فصل پنجم روش کنترل فازی تطبیقی غیر مستقیم بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ بررسی شده و پایداری سیستم کنترل بررسی و تضمین می‌شود و در فصل ششم روش کنترل مود لغزشی با استفاده از تخمین گر فازی تطبیقی ارائه می‌شود و پایداری سیستم بررسی و تضمین می‌گردد. در فصل هفتم به بررسی یک روش فازی بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور می‌پردازیم تا با نواقص این روش بهتر آشنا شویم و در انتها در فصل هشتم نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات ارائه می‌شود.

فصل دوم

مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات با مفاصل

انعطاف پذیر

سینماتیک علم حرکت است که حرکت را بدون در نظر گرفتن نیروهای ایجاد کننده آن مطالعه می‌کند. هر بازوی مکانیکی را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از اجسام صلب در نظر گرفت که به وسیله مفاصل به یکدیگر اتصال یافته‌اند. بنا بر ملاحظات طراحی، بازوهای مکانیکی ماهر در حالت کلی از مفصل‌هایی با یک درجه آزادی تشکیل می‌شوند. سینماتیک بازوهای ماهر همه ویژگی‌های هندسی ربات را در بر می‌گیرد.

سینماتیک مستقیم ربات، در واقع توصیف کننده موقعیت مجری نهایی ربات بر اساس زوایای رابطها و متغیرهای مفاصل می‌باشد. بنابراین، لازم است پارامترهای مورد نیاز برای توصیف مکان نسبی مفاصل انتخاب شود. 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 مکان مفاصل در این بخش در نظر گرفته نمی‌شود.

بعد از به دست آوردن معادلات سینماتیکی، معادلات دینامیکی ربات محاسبه می‌شود و در نهایت تأثیر دینامیک موتورها را در مدل‌سازی ربات بررسی کرده و ربات صنعتی اسکارا با مفاصل انعطاف‌پذیر به همراه ۴ درجه آزادی و همچنین ربات صنعتی هنرمند با مفاصل انعطاف‌پذیر به همراه ۳ درجه آزادی مدل‌سازی می‌شوند.

۱-۲ معادلات سینماتیکی ربات

برای بدست آوردن معادلات سینماتیکی ربات از [۶۵] استفاده می‌شود. ابتدا طبق قوانین دناویت هارتنبرگ دستگاه‌های مختصات ربات انتخاب و رسم می‌شوند، در ادامه نحوه انتخاب محورهای مختصات توضیح داده خواهد شد. سپس طبق قوانین دناویت هارتنبرگ جهت بدست آوردن معادلات سینماتیکی ربات عمل می‌گردد.

نحوه اعمال قوانین به صورت زیر است:

ابتدا رابطها را نام‌گذاری کرده. رابط پایه را رابط صفر و سپس رابط بعدی را رابط یک و به همین ترتیب همه رابطها نام‌گذاری می‌شوند. بر روی هر مفصل یک دستگاه مختصات قرار می‌گیرد. برای تعیین محورهای آن طبق روش دناویت هارتنبرگ به صورت زیر عمل می‌شود:

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

۲. محور x_0 به صورت اختیاری انتخاب می‌شود.

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

۴. محور y_i به گونه‌ای انتخاب می‌شود که همه دستگاهها به صورت راست گرد باشند.

۵. یک جدول از پارامترهای رابطها (طول، انحراف، پیچش، زاویه) تشکیل می‌گردد که تعریف هر

پارامتر عبارت است از:

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

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

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

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

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

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

۷. ماتریس همگنی که مختصات نقطه را از دستگاه j به دستگاه i تبدیل می‌کند به دست آورده می‌شود. این ماتریس، ماتریس تبدیل نامیده می‌شود و عبارت است از:

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

و در نهایت از آنجا که هر نقطه روی مجری نهایی که در دستگاه n بیان می‌شود مقداری ثابت دارد و مستقل از شکل ربات است و موقعیت مجری نهایی نسبت به دستگاه آغازین یا پایه به وسیله یک بردار سه عضوی d و یک ماتریس 3×3 دوران R قابل نمایش است خواهیم داشت:

$$T_0^n = A_1 A_2 \dots A_{n-1} A_n = \begin{bmatrix} R_0^n & d_0^n \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

ماتریس R_0^n جهت مجری نهایی در دستگاه آغازین را نمایش می‌دهد. در معادله (۳-۲) A_i به صورت زیر به دست می‌آید:

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

$a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$ پارامترهای رابط و مفصل i هستند و ماتریس Rot ماتریس دوران و ماتریس $Trans$

ماتریس انتقال می‌باشد. در نتیجه داریم:

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

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

۲-۲ ژاکوبین بازوی ماهر ربات

در بخش قبل معادلات سینماتیک مستقیم برای موقعیت‌های مفاصل و موقعیت و جهت مجری نهایی بدست آورده شد. در این بخش به سینماتیک سرعت بازوی ماهر، یعنی روابط سرعت، ارتباط سرعت-های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی با سرعت مفاصل پرداخته می‌شود. برای محاسبه سرعت مجری نهایی در اثر حرکت‌های خطی و زاویه‌ای رابطه‌ها، از مفهوم ژاکوبین استفاده می‌شود. ژاکوبین در واقع صورتی چند بعدی از مشتق است که برای تابع دلخواه Y که تابعی از متغیر X است به صورت زیر تعریف می‌گردد.

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

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

که در آن $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_1 \dots f_n]^T$ با مشتق گیری از معادله (۷-۲):

$$\dot{\mathbf{Y}} = J(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}} \quad (۹-۲)$$

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

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

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

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

$$\mathbf{W}_0^n = J_w \dot{\mathbf{q}} \quad (۱۱-۲)$$

$$\mathbf{V}_0^n = J_v \dot{\mathbf{q}} \quad (۱۲-۲)$$

که J_w و J_v ماتریس های $3 \times n$ هستند طبق معادله (۱۰-۲):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0^n \\ \mathbf{W}_0^n \end{bmatrix} = J_0^n \dot{\mathbf{q}} \quad (۱۳-۲)$$

که ماتریس ژاکوبین J_0^n عبارت است از:

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

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

۱-۲-۲ سرعت زاویه‌ای

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

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

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

$$W_{i-1}^i = 0 \quad (16-2)$$

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

$$W_0^n = W_0^1 + R_0^1 W_1^2 + R_0^2 W_2^3 + \dots + R_0^{n-1} W_{n-1}^n \quad (17-2)$$

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

$$\mathbf{W}_0^n = \rho_1 \dot{q}_1 \mathbf{k} + \rho_2 \dot{q}_2 \mathbf{R}_0^1 \mathbf{k} + \dots + \rho_n \dot{q}_n \mathbf{R}_0^{n-1} \mathbf{k} = \sum_{i=1}^n \rho_i \dot{q}_i \mathbf{z}_{i-1} \quad (18-2)$$

که

$$\mathbf{z}_{i-1} = \mathbf{R}_0^{i-1} \mathbf{k} \quad (19-2)$$

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

بنا بر این، با توجه به معادله (۱۱-۲) :

$$J_w = [\rho_1 \mathbf{z}_0 \quad \rho_2 \mathbf{z}_1 \quad \dots \quad \rho_n \mathbf{z}_{n-1}] \quad (20-2)$$

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

۲-۲-۲ سرعت خطی

سرعت خطی مجری نهایی عبارت است از:

$$\mathbf{V}_0^n = \dot{\mathbf{d}}_0^n \quad (21-2)$$

$$\dot{\mathbf{d}}_0^n = \frac{\partial \mathbf{d}_0^n}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial \mathbf{d}_0^n}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial \mathbf{d}_0^n}{\partial q_n} \dot{q}_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{d}_0^n}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (22-2)$$

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

داشته شده‌اند و مفصل i ام با سرعت واحد رانده می‌شود. این فرض در روابط بعدی نیز صدق می‌کند.

چنانچه مفصل i ام لولایی باشد داریم:

$$\mathbf{d}_0^n = \mathbf{d}_0^1 + \mathbf{R}_0^1 \mathbf{d}_1^2 + \mathbf{R}_0^2 \mathbf{d}_2^3 + \dots + \mathbf{R}_0^{i-1} \mathbf{d}_{i-1}^i + \dots + \mathbf{R}_0^{n-1} \mathbf{d}_{n-1}^n \quad (23-2)$$

بنابراین:

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

با مشتق گیری از رابطه (۲۴-۲) :

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

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

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

با جایگذاری معادله (۱۹-۲) و با استفاده از معادله (۲۴-۲) می‌توان نوشت:

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

بنابراین اگر مفصل i ام لولایی باشد با توجه به معادلات (۱۲-۲) و (۲۱-۲) خواهیم داشت:

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

اگر مفصل i ام کشویی باشد :

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

$$\mathbf{d}_0^n = \mathbf{d}_0^{i-1} + R_0^{i-1} \mathbf{d}_{i-1}^i + R_0^i \mathbf{d}_i^n \quad (30-2)$$

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

با مشتق گیری از رابطه فوق خواهیم داشت:

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

به کمک معادلات (۲۹-۲) و (۳۱-۲) می‌توان نوشت:

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

با توجه به معادله (۲-۱۹):

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

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

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

در نهایت ماتریس J_v به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که J_{v_i} اگر مفصل i ام لولایی باشد با رابطه (۲-۲۷) و اگر کشویی باشد با رابطه (۲-۳۴) محاسبه می‌گردد.

بنابراین ماتریس ژاکوبین ربات به صورت زیر حاصل می‌شود:

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

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

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

و برای مفصل کشویی به صورت زیر است:

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

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

۳-۲ معادلات دینامیکی ربات

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

۱-۳-۲ انرژی پتانسیل

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

$$V = \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{g}^T \mathbf{d}_0^{C_i} \quad (۳۹-۲)$$

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 $\mathbf{d}_0^{C_i}$ را محاسبه کرده و سپس به کمک رابطه زیر مقدار $\mathbf{d}_0^{C_i}$ محاسبه می‌گردد:

$$\mathbf{d}_0^{C_i} = \mathbf{d}_0^i + R_0^i \mathbf{d}_i^{C_i} \quad (۴۰-۲)$$

۲-۳-۲ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی یک ربات عبارت است از مجموع انرژی جنبشی رابط‌های ربات یا به عبارت دیگر برای ربات i ام انرژی جنبشی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i \mathbf{V}_{c_i}^T \mathbf{V}_{c_i} + \frac{1}{2} \mathbf{w}_0^{iT} \mathbf{I}_0^i \mathbf{w}_0^i \quad (۴۱-۲)$$

که m_i جرم ربات i ام و \mathbf{V}_{c_i} بردار سرعت خطی مرکز جرم ربات i ام و \mathbf{w}_0^i بردار سرعت زاویه‌ای ربات i ام ربات نسبت به دستگاه مختصات پایه و \mathbf{I}_0^i ماتریس ممان اینرسی ربات 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 رباط محاسبه شود که در این صورت دستگاه متصل به مرکز جرم ربات انتخاب شده است [۶۳].

$$\mathbf{I}_0^i = \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \quad (۴۲-۲)$$

بنابراین رابطه (۴۱-۲) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i \mathbf{V}_{c_i}^T \mathbf{V}_{c_i} + \frac{1}{2} \mathbf{w}_0^{iT} \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \mathbf{w}_0^i \quad (۴۳-۲)$$

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

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

$$\mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & -\int xy dm & -\int xz dm \\ -\int xy & \int (x^2 + z^2) dm & -\int yz dm \\ -\int xz & -\int yz dm & \int (y^2 + x^2) dm \end{bmatrix} \quad (44-2)$$

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:

$$\mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & -I_{xy_i} & -I_{xz_i} \\ -I_{xy_i} & I_{yy_i} & -I_{yz_i} \\ -I_{xz_i} & -I_{yz_i} & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (45-2)$$

با توجه به معادله (۴۳-۲) رابطه انرژی جنبشی ربات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{V}_{c_i}^T \mathbf{V}_{c_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_0^{iT} \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} \mathbf{w}_0^i \quad (46-2)$$

طبق روابط (۱۱-۲) و (۱۲-۲) می‌توان نوشت:

$$V_{c_i} = J_{v_{c_i}} \dot{\mathbf{q}} \quad (47-2)$$

$$W_0^i = J_{w_i} \dot{\mathbf{q}} \quad (48-2)$$

برای محاسبه $J_{v_{c_i}}$ باید از $\mathbf{d}_0^{c_i}$ بجای \mathbf{d}_0^n در معادله (۲۸-۲) استفاده نمود. بنابراین طبق توضیحات

قبلی مجدد به رابطه (۴۰-۲) برای محاسبه $\mathbf{d}_0^{c_i}$ نیاز است.

با جایگذاری روابط (۴۷-۲) و (۴۸-۲) در رابطه اصلی (۴۶-۲):

$$k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_{c_i}}^T J_{v_{c_i}} + J_{w_i}^T \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} J_{w_i}] \dot{\mathbf{q}} \quad (49-2)$$

بنا بر این رابطه (۴۹-۲) را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (50-2)$$

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

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_{ci}}^T J_{v_{ci}} + J_{w_i}^T \mathbf{R}_0^i \mathbf{I}_i \mathbf{R}_0^{iT} J_{w_i}] \quad (51-2)$$

انرژی پتانسیل ربات به کمک رابطه (2-39) و انرژی جنبشی ربات به کمک رابطه (2-50) محاسبه می‌شود. اکنون به تشکیل تابع لاگرانژین ربات پرداخته می‌شود.

$$L = K - V \quad (52-2)$$

معادله کلی دینامیکی سیستم عبارت است از:

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

که در این رابطه $\boldsymbol{\tau}$ بردار گشتاور برای مفاصل لولایی و نیرو برای مفاصل کشویی است. با استفاده از معادلات (2-50) تا (2-52) در معادله (2-53) و ساده سازی روابط، معادله نهایی زیر به دست می‌آید:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{D}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right) + \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \quad (54-2)$$

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

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (55-2)$$

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

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{D}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right) \quad (56-2)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \quad (57-2)$$

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 آن ها می توان رفتار دینامیکی ربات را بررسی کرد.

۲-۳-۳ معادلات حالت ربات با حضور محرکه ها

گشتاور لازم برای حرکت مفاصل ربات، توسط محرکه ها که در اغلب موارد موتورهای الکتریکی هستند، فراهم می شود. در سیستم انتقال قدرت موتورها به دلیل وجود المان هایی نظیر چرخ دنده انعطاف پذیری به وجود می آید. که این انعطاف را با فنر مدل می کنند. این پدیده باعث پیچیده شدن معادلات موتور شده و برای همین در بسیاری از تحلیل ها از آن صرف نظر می شود. این صرف نظر کردن در بعضی از موارد حتی باعث ناپایداری سیستم شده و باعث می شود که به درستی نتوان سیستم را کنترل کرد. در این پایان نامه برای موتورهای الکتریکی اثر انعطاف در نظر گرفته شده است. با توجه به مطالب بیان شده موتورها یک بخش اصلی از دینامیک سیستم رباتیک را تشکیل می دهند. گشتاور مورد نیاز هر مفصل توسط موتورها با رابطه زیر فراهم می شود [۶۴]

$$\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{r}\boldsymbol{\tau}_r = \boldsymbol{\tau}_m \quad (58-2)$$

که در این رابطه $\boldsymbol{\tau}_m$ بردار گشتاور تولیدی موتورها برای هر مفصل، $\boldsymbol{\tau}_r$ بردار گشتاور بار موتورها، \mathbf{r} ماتریس ضریب کاهشی چرخ دنده ها، $\boldsymbol{\theta}_m$ بردار زاویه موتورها، \mathbf{q} بردار زاویه مفصل ها، \mathbf{J} ماتریس جمع ممان اینرسی های روتورها و \mathbf{B} ماتریس ضریب اصطکاک روتورها می باشد. از طرفی:

$$\tau_r = k(r\theta_m - q) \quad (59-2)$$

$$\tau_r = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (60-2)$$

با برابر قرار دادن دو معادله بالا:

$$k^{-1}r^{-1}(D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) + r^{-1}q = \theta_m \quad (61-2)$$

$$k^{-1}r^{-1}(D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) = \theta_f \quad (62-2)$$

$$q = r(\theta_m - \theta_f) \quad (63-2)$$

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:

$$RI_a + LI_a + K_b\theta_m + \phi = u \quad (64-2)$$

که u بردار ولتاژ موتورها، I_a بردار جریان موتورها، ϕ بردار اغتشاش‌های خارجی، R ، L ، K_b

ماتریس‌های $n \times n$ به ترتیب معرف مقاومت سیم‌پیچ‌ها، اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها و ضریب‌های ثابت القا

می‌باشند. همچنین:

$$K_m I_a = \tau_m \quad (65-2)$$

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

ثابت گشتاور می‌باشند.

با استفاده از معادلات (2-55) و (2-58) تا (2-65) می‌توان مدل فضای حالت زیر را به دست آورد:

$$\dot{x} = f(x) + bu - b\phi \quad (66-2)$$

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

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{x}_1)(-\mathbf{g}(\mathbf{x}_1) - \mathbf{K}\mathbf{x}_1 - \mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 + \mathbf{K}\mathbf{r}\mathbf{x}_3) \\ \mathbf{x}_4 \\ \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{r}\mathbf{K}\mathbf{x}_1 - \mathbf{r}^2\mathbf{K}\mathbf{x}_3 - \mathbf{B}\mathbf{x}_4 + \mathbf{K}_m\mathbf{x}_5) \\ -\mathbf{L}^{-1}(\mathbf{K}_b\mathbf{x}_4 + \mathbf{R}\mathbf{x}_5) \end{bmatrix} \quad (۶۷-۲)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{L}^{-1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\theta}_m \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \\ \mathbf{I}_a \end{bmatrix} \quad (۶۸-۲)$$

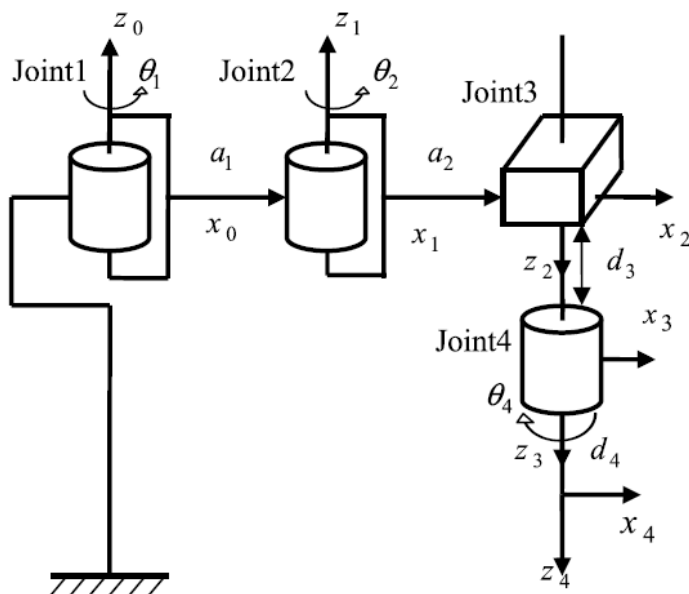
مدل فضای حالت (۶۶-۲) یک سیستم چند متغیره غیر خطی با تزویج سنگین در فرم غیر همراه را نشان می‌دهد. سیستم رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک موتورها بسیار پیچیده است. کنترل آن با مسائل چالش برانگیزی مواجه است. در بسیاری از کارهای تحقیقاتی از دینامیک موتورها صرف نظر می‌شود ولی دینامیک موتورها نقش مهمی در کنترل ربات در حرکتهای سریع و دقیق ایفا می‌کند.

۴-۲ مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا

در این بخش به مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات صنعتی اسکارا با ۴ درجه آزادی و مفاصل انعطاف پذیر پرداخته می شود [۱۷].

۱-۴-۲ مدل سازی سینماتیکی

ربات اسکارا دارای سه مفصل لولایی و یک مفصل کشویی است. شکل (۱-۲) دیاگرام مفصلی ربات اسکارا ۴ رابط را نشان می دهد.



شکل (۱-۲) دیاگرام مفصلی ربات اسکارا با ۴ درجه آزادی

دستگاه های مختصات طبق قوانین دناویت هارتنبرگ بر روی مفاصل ربات مطابق شکل قرار داده شده- اند. پارامترهای متغیر و ثابت ربات در شکل مشخص می باشند. با توجه به دستگاه های مختصات در شکل، جدول پارامترهای ربات به صورت زیر تشکیل می گردد. این مقادیر پس از طراحی ربات در نرم افزار بدست می آید.

جدول (۱-۲) پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا

i	$\theta(rad)$	$d(m)$	$a(m)$	$\alpha(rad)$
۱	θ_1	.	$a_1 = 0.6$.
۲	θ_2	.	$a_2 = 0.4$.
۳	.	d_3	.	π
۴	θ_4	$d_4 = 0.08$.	.

۲-۴-۲ مدل سازی دینامیکی

در این بخش ابتدا ماتریس‌های تبدیل ربات به دست می‌آید. سپس به کمک آن‌ها ماتریس‌های دوران، \mathbf{d} ، J_w ، J_v و ماتریس \mathbf{D} را محاسبه می‌شوند. در مرحله بعد انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی را محاسبه

نموده و مدل دینامیکی ربات به دست می‌آید. مدل دینامیکی ربات اسکارا مورد نظر طبق معادله (۲-۵۵) به صورت زیر قابل بیان است:

$$\tau_r = \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (۲-۷۴)$$

که در آن:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} & \mathbf{D}_{13} & \mathbf{D}_{14} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} & \mathbf{D}_{23} & \mathbf{D}_{24} \\ \mathbf{D}_{31} & \mathbf{D}_{32} & \mathbf{D}_{33} & \mathbf{D}_{34} \\ \mathbf{D}_{41} & \mathbf{D}_{42} & \mathbf{D}_{43} & \mathbf{D}_{44} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{C}_{13} & \mathbf{C}_{14} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} & \mathbf{C}_{23} & \mathbf{C}_{24} \\ \mathbf{C}_{31} & \mathbf{C}_{32} & \mathbf{C}_{33} & \mathbf{C}_{34} \\ \mathbf{C}_{41} & \mathbf{C}_{42} & \mathbf{C}_{43} & \mathbf{C}_{44} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \\ \mathbf{G}_3 \\ \mathbf{G}_4 \end{bmatrix}, \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{d}_3 \\ \mathbf{q}_4 \end{bmatrix} \quad (۲-۷۵)$$

و $[x_i \ y_i \ z_i]$ مختصات مرکز جرم رابط i ام در دستگاه i ام باشد، آنگاه:

$$\begin{aligned}
D_{11} = & 2m_1a_1x_1 + 2m_3a_2x_3 + 2m_2a_2x_2 + m_1y_1^2 + m_3x_3^2 + m_3a_2^2 + m_2a_2^2 + m_3y_3^2 + m_4a_2^2 + m_3a_1^2 + m_4x_4^2 + m_1a_1^2 \\
& + m_4a_1^2 + m_1x_1^2 + m_2a_1^2 + m_2x_2^2 + m_4y_4^2 + m_2y_2^2 + 2m_2a_1x_2 \cos(q_2) + 2m_3a_2a_1 \cos(q_2) + 2m_3a_1y_3 \sin(q_2) \\
& + 2m_2a_2a_1 \cos(q_2) - 2m_4a_2y_4 \sin(q_4) + 2m_4a_2x_4 \cos(q_4) + 2m_2a_1y_2 \sin(q_2) + 2m_3a_1x_3 \cos(q_2) \\
& + 2m_4a_2a_1 \cos(q_2) + I_{zz_3} + 2m_4a_1x_4 \cos(q_2 - q_4) + I_{zz_1} + 2m_4a_1y_4 \sin(q_2 - q_4) + I_{zz_2} + I_{zz_4}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{12} = & 2m_3a_2x_3 + 2m_2a_2x_2 + m_3x_3^2 + m_3a_2^2 + m_2a_2^2 + m_3y_3^2 + m_4a_2^2 + m_4x_4^2 + m_2x_2^2 + m_4y_4^2 + m_2y_2^2 \\
& m_2a_1x_2 \cos(q_2) + m_3a_2a_1 \cos(q_2) + m_3a_1y_3 \sin(q_2) + m_2a_2a_1 \cos(q_2) - 2m_4a_2y_4 \sin(q_4) \\
& + 2m_4a_2x_4 \cos(q_4) + m_2a_1y_2 \sin(q_2) + m_3a_1x_3 \cos(q_2) + m_4a_2a_1 \cos(q_2) + I_{zz_3} \\
& + m_4a_1x_4 \cos(q_2 - q_4) + m_4a_1y_4 \sin(q_2 - q_4) + I_{zz_2} + I_{zz_4}
\end{aligned}$$

$$D_{13} = 0$$

$$D_{14} = -m_4a_2x_4 \cos(q_4) - m_4y_4^2 - m_4a_1x_4 \cos(q_2 - q_4) - m_4a_1y_4 \sin(q_2 - q_4) + m_4a_2y_4 \sin(q_4) - m_4x_4^2 - I_{zz_4}$$

$$\begin{aligned}
D_{22} = & m_2y_2^2 + 2m_3a_2x_3 + m_2x_2^2 + 2m_4a_2x_4 \cos(q_4) + m_4y_4^2 + m_4x_4^2 + 2m_2a_2x_2 + I_{zz_3} - 2m_4a_2y_4 \sin(q_4) \\
& + m_3y_3^2 + m_3a_3^2 + m_4a_2^2 + I_{zz_2} + I_{zz_4} + m_3x_3^2 + m_2a_2^2
\end{aligned}$$

$$D_{23} = 0$$

$$D_{24} = -m_4a_2x_4 \cos(q_4) + m_4y_4^2 - m_4x_4^2 + m_4a_2y_4 \sin(q_4) - I_{zz_4}$$

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

$$D_{34} = 0$$

$$D_{44} = m_4 y_4^2 + m_4 x_4^2 + I_{z_4}$$

$$\begin{aligned} C_{11} = & -\dot{q}_2 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) + \dot{q}_2 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) + \dot{q}_2 m_2 a_1 y_2 \cos(q_2) - \dot{q}_2 m_2 a_1 x_2 \sin(q_2) \\ & - \dot{q}_2 m_2 a_2 a_1 \sin(q_2) - \dot{q}_2 m_4 a_2 a_1 \sin(q_2) - \dot{q}_2 m_3 a_2 a_1 \sin(q_2) + \dot{q}_2 m_3 a_1 y_3 \cos(q_2) - \dot{q}_2 m_3 a_1 x_3 \sin(q_2) \\ & + \dot{q}_4 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{12} = & \dot{q}_1 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) + \dot{q}_1 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) + \dot{q}_1 m_2 a_1 y_2 \cos(q_2) - \dot{q}_1 m_2 a_1 x_2 \sin(q_2) \\ & - \dot{q}_1 m_2 a_2 a_1 \sin(q_2) - \dot{q}_1 m_4 a_2 a_1 \sin(q_2) - \dot{q}_1 m_3 a_2 a_1 \sin(q_2) + \dot{q}_1 m_3 a_1 y_3 \cos(q_2) - \dot{q}_1 m_3 a_1 x_3 \sin(q_2) \\ & - \dot{q}_2 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) + \dot{q}_2 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) + \dot{q}_2 m_2 a_1 y_2 \cos(q_2) - \dot{q}_2 m_2 a_1 x_2 \sin(q_2) \\ & - \dot{q}_2 m_2 a_2 \sin(q_2) a_1 - \dot{q}_2 m_4 a_2 \sin(q_2) a_1 - \dot{q}_2 m_3 a_2 \sin(q_2) a_1 + \dot{q}_2 m_3 a_1 y_4 \cos(q_2) \\ & - \dot{q}_2 m_3 a_1 x_3 \sin(q_2) + \dot{q}_4 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) \end{aligned}$$

$$C_{13} = 0$$

$$C_{14} = m_4 \begin{pmatrix} \dot{q}_1 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_1 a_2 y_4 \cos(q_4) + \dot{q}_2 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) \\ - \dot{q}_2 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_2 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_2 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) + \dot{q}_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) \\ + \dot{q}_4 a_2 x_4 \sin(q_4) + \dot{q}_4 a_2 y_4 \cos(q_4) \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} C_{21} = & \dot{q}_1 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) + \dot{q}_1 m_2 a_1 x_2 \sin(q_2) \\ & + \dot{q}_1 m_2 a_1 a_2 \sin(q_2) + \dot{q}_1 m_4 a_1 a_2 \sin(q_2) - \dot{q}_1 m_3 a_1 y_3 \cos(q_2) + \dot{q}_1 m_3 a_1 x_3 \sin(q_2) \\ & - \dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) \end{aligned}$$

$$C_{22} = -\dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4)$$

$$C_{23} = 0$$

$$\begin{aligned} C_{24} = & -\dot{q}_1 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_1 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_2 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_2 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) \\ & + \dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) + \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) \end{aligned}$$

$$C_{31} = C_{32} = C_{33} = C_{34} = 0$$

$$C_{41} = -m_4 \begin{pmatrix} \dot{q}_1 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_1 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_2 a_2 x_4 \sin(q_4) \\ -\dot{q}_2 a_2 y_4 \cos(q_4) \end{pmatrix}$$

$$C_{42} = m_4 a_2 (\dot{q}_1 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_1 y_4 \cos(q_4) + \dot{q}_2 x_4 \sin(q_4) + \dot{q}_2 y_4 \cos(q_4))$$

$$C_{43} = C_{44} = 0$$

$$G_1 = G_2 = 0$$

$$G_3 = 9.81m_3 - 9.81m_4$$

$$G_4 = 0$$

پارامترهای ماتریس اینرسی و موقعیت مرکز جرم رابطها که پس از طراحی در نرم افزار سالیدورک

بدست آمده را در جدول (۲-۲) مشاهده می کنید. معادلات دینامیکی نشان می دهد که مدل دینامیکی

ربات پیچیده، چند متغیره و با توزیع سنگین می باشد.

جدول (۲-۲) پارامترهای دینامیکی ربات اسکارا

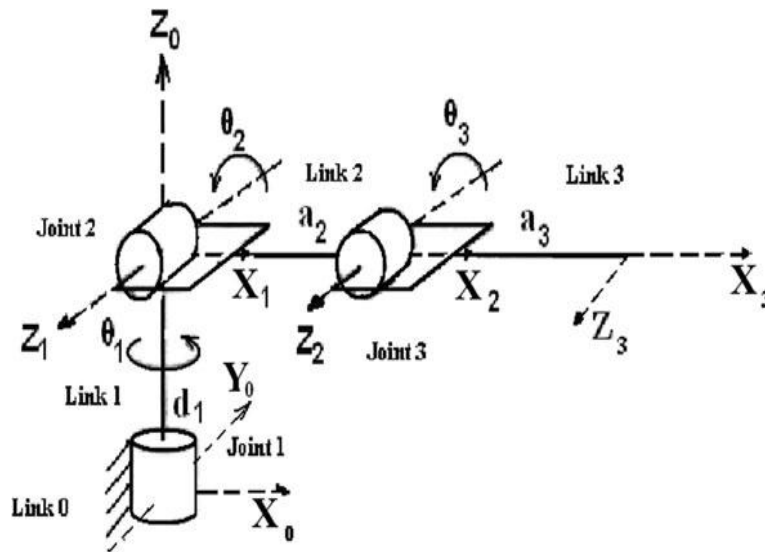
i	x_i (m)	y_i (m)	z_i (m)	m_i (kg)	I_{xxi} (kgm ²)	I_{yyi} (kgm ²)	I_{zzi} (kgm ²)	I_{xyi} (kgm ²)	I_{xzi} (kgm ²)	I_{yzi} (kgm ²)
۱	-۰.۳۱۸	۰	۰	۲۶.۱۴	۰.۰۹۳۹	۱.۳۴۴۱	۱.۳۹۹۶	۰	۰.۰۰۵۱	۰
۲	-۰.۲۷۴	۰	۰	۱۹.۱	۰.۱۹۴۷	۰.۶۱۵۶	۰.۵۱۴۴	۰.۰۰۰۱	-۰.۰۱۸۷	۰.۰۰۰۱
۳	۰	۰	-۰.۲۹۸	۲.۳۵	۰.۰۶۹۵	۰.۰۶۹۵	۰.۰۰۰۲	۰	۰	۰
۴	۰	۰	-۰.۰۳۹	۰.۳۸	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۲	۴.۳e-۵	۰	۰	۰

۵-۲ مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات هنرمند

در این بخش به مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات صنعتی هنرمند با ۳ درجه آزادی و مفاصل انعطاف پذیر پرداخته می شود.

۱-۵-۲ مدل سازی سینماتیکی

ربات هنرمند دارای سه مفصل لولایی است. شکل (۲-۲) دیاگرام مفصلی ربات هنرمند با ۳ رابط را نشان می دهد.



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

دستگاه های مختصات طبق قوانین دناویت هارتنبرگ بر روی مفاصل ربات مطابق شکل قرار داده شده اند. پارامترهای متغیر و ثابت ربات در شکل مشخص می باشند. با توجه به دستگاه های مختصات در شکل، جدول پارامترهای ربات به صورت زیر تشکیل می گردد. این مقادیر پس از طراحی ربات در نرم افزار بدست می آید.

جدول (۲-۳) پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات هنرمند

i	θ (rad)	d (m)	a (m)	α (rad)
۱	θ_1	$d_1 = 0.280$	۰	$\pi/2$
۲	θ_2	۰	$a_2 = 0.760$	۰
۳	θ_3	۰	$a_3 = 0.930$	۰

۲-۵-۲ مدل سازی دینامیکی

در این بخش ابتدا ماتریس‌های تبدیل ربات به دست می‌آیند. سپس به کمک آن‌ها ماتریس‌های دوران، \mathbf{d} ، J_w ، J_v و ماتریس \mathbf{D} را محاسبه می‌شود. در مرحله بعد انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی را محاسبه نموده و مدل دینامیکی ربات به دست می‌آید. مدل دینامیکی ربات هنرمند مورد نظر طبق معادله (۲-۵۵) به صورت زیر قابل بیان است:

$$\boldsymbol{\tau}_r = \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (۲-۷۶)$$

که در آن:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} & \mathbf{D}_{13} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} & \mathbf{D}_{23} \\ \mathbf{D}_{31} & \mathbf{D}_{32} & \mathbf{D}_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{C}_{13} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} & \mathbf{C}_{23} \\ \mathbf{C}_{31} & \mathbf{C}_{32} & \mathbf{C}_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \\ \mathbf{G}_3 \end{bmatrix}, \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_3 \end{bmatrix} \quad (۲-۷۷)$$

و $[x_i \ y_i \ z_i]$ مختصات مرکز جرم رابط i ام در دستگاه i ام باشد، آنگاه:

$$\begin{aligned}
D_{11} = & m_3 a_3 x_3 - \frac{1}{2} I_{xx_2} \cos(2q_2) + I_{yy_2} \sin(2q_2) + \frac{1}{2} m_3 a_2^2 \cos(2q_2) + \frac{1}{2} m_3 x_3^2 \cos(2q_3 + 2q_2) + I_{yy_1} \\
& + \frac{1}{2} I_{yy_2} \cos(2q_2) - m_3 a_3 y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + m_3 a_3 x_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} I_{xx_3} + \frac{1}{2} m_3 a_3^2 \cos(2q_3 + 2q_2) \\
& + m_3 a_3 a_2 \cos(2q_2 + q_3) - m_3 a_2 y_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3 x_3 y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) - m_2 a_2 y_3 \sin(q_3) + m_3 \cos(q_3) a_3 a_2 \\
& + m_3 a_2 x_3 \cos(q_3) + \frac{1}{2} m_2 x_2^2 + m_3 a_2 x_3 \cos(2q_2 + q_3) + \frac{1}{2} I_{yy_3} \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} m_2 y_2^2 + \frac{1}{2} m_3 y_3^2 + \frac{1}{2} I_{yy_2} \\
& - \frac{1}{2} m_3 y_3^2 \cos(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} I_{xx_3} \cos(2q_3 + 2q_2) + I_{yy_3} \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} I_{xx_2} + m_2 z_2^2 + m_1 z_1^2 + m_1 x_1^2 \\
& + m_2 a_2 x_2 + \frac{1}{2} m_3 a_3^2 + m_3 z_3^2 + \frac{1}{2} I_{yy_3} + \frac{1}{2} m_3 x_3^2 + \frac{1}{2} m_2 a_2^2 + \frac{1}{2} m_3 a_2^2 + \frac{1}{2} m_2 x_2^2 \cos(2q_2) - \frac{1}{2} m_2 y_2^2 \cos(2q_2) \\
& + \frac{1}{2} m_2 a_2^2 \cos(2q_2) + m_2 a_2 x_2 \cos(2q_2) - m_2 a_2 y_2 \sin(2q_2) - m_2 x_2 y_2 \sin(2q_2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{12} = & I_{yz_3} \cos(q_3 + q_2) + I_{xz_3} \sin(q_3 + q_2) + \sin(q_2) I_{xz_2} + \cos(q_2) I_{yz_2} \\
& - m_3 z_3 a_3 \sin(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) x_3 - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) y_3 \\
& - m_2 z_2 \cos(q_2) y_2 - m_2 z_2 \sin(q_2) x_2 - m_2 z_2 \sin(q_2) a_2 - m_3 z_3 \sin(q_2) a_2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{13} = & I_{yz_3} \cos(q_3 + q_2) + I_{xz_3} \sin(q_3 + q_2) - m_3 z_3 a_3 \sin(q_3 + q_2) \\
& - m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) x_3 - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) y_3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{22} = & I_{zz_2} + 2m_3 a_3 x_3 + m_2 x_2^2 + m_2 y_2^2 + m_3 y_3^2 + I_{zz_3} - 2m_3 a_2 y_3 \sin(q_3) \\
& + 2m_3 \cos(q_3) a_3 a_2 + 2m_2 a_2 x_2 + m_3 a_3^2 + m_3 x_3^2 + 2m_3 a_2 x_3 \cos(q_3) + m_2 a_2^2 + m_3 a_2^2
\end{aligned}$$

$$D_{23} = 2m_3 a_3 x_3 + m_3 y_3^2 + I_{zz_3} - m_3 a_2 y_3 \sin(q_3) + m_3 \cos(q_3) a_3 a_2 + m_3 a_3^2 + m_3 x_3^2 + m_3 a_2 x_3 \cos(q_3)$$

$$D_{33} = 2m_3 a_3 x_3 + m_3 y_3^2 + I_{zz_3} + m_3 a_3^2 + m_3 x_3^2$$

$$\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_{xx_3} \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} I_{yy_2} \sin(2q_2) + I_{xy_2} \cos(2q_2) + I_{xy_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_{yy_3} \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} I_{xx_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_{xx_3} \sin(2q_3 + 2q_2) \\ & + I_{xy_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_{yy_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_{xx_3} \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2} I_{yy_2} \sin(2q_2) + I_{xy_2} \cos(2q_2) + I_{xy_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_{yy_3} \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} I_{xx_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_{yz_3} \sin(q_3 + q_2) \\ & + I_{xz_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_{xz_2} - \sin(q_2) I_{yz_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_{yz_3} \sin(q_3 + q_2) + I_{xz_3} \cos(q_3 + q_2) \right) \dot{q}_3
\end{aligned}$$

$$C_{13} = \left(\begin{array}{l} -\frac{1}{2}m_3a_2y_3 \cos(q_3) - \frac{1}{2}m_3a_2x_3 \sin(q_3) - m_3a_3y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) \\ -\frac{1}{2}m_3a_2x_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3x_3y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - m_3a_3x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) \\ -\frac{1}{2}m_3a_2y_3 \cos(2q_2 + q_3) - \frac{1}{2}m_3a_3a_2 \sin(2q_2 + q_3) - \frac{1}{2}m_3 \sin(q_3)a_3a_2 \\ + \frac{1}{2}I_{xx_3} \sin(2q_3 + 2q_2) + I_{xy_3} \cos(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}m_3a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) \\ - \frac{1}{2}m_3x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}I_{yy_3} \sin(2q_3 + 2q_2) \end{array} \right) \dot{q}_1$$

$$+ \left(-m_3z_3a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3z_3 \cos(q_3 + q_2)x_3 + m_3z_3 \sin(q_3 + q_2)y_3 - I_{yz_3} \sin(q_3 + q_2) + I_{xz_3} \cos(q_3 + q_2) \right) \dot{q}_2$$

$$+ \left(-m_3z_3a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3z_3 \cos(q_3 + q_2)x_3 + m_3z_3 \sin(q_3 + q_2)y_3 - I_{yz_3} \sin(q_3 + q_2) + I_{xz_3} \cos(q_3 + q_2) \right) \dot{q}_3$$

$$C_{21} = \left(\begin{array}{l} m_2a_2x_2 \sin(2q_2) + m_2a_2y_2 \cos(2q_2) + m_2y_2x_2 \cos(2q_2) + m_3a_3y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + m_3a_2x_3 \sin(2q_2 + q_3) \\ + m_3y_3x_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + m_3a_3x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + m_3a_2y_3 \cos(2q_2 + q_3) + m_3a_3a_2 \sin(2q_2 + q_3) \\ - \frac{1}{2}I_{xx_3} \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}I_{yy_2} \sin(2q_2) - I_{yy_2} \cos(2q_2) - I_{yy_3} \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_2^2 \sin(2q_2) \\ - \frac{1}{2}m_2y_2^2 \sin(2q_2) + \frac{1}{2}m_2a_2^2 \sin(2q_2) + \frac{1}{2}m_2x_2^2 \sin(2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}m_3y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) \\ + \frac{1}{2}m_3x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}I_{yy_3} \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}I_{xx_2} \sin(2q_2) \end{array} \right) \dot{q}_1$$

$$C_{22} = \left(-m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) \right) \dot{q}_3$$

$$C_{23} = \left(-m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) \right) \dot{q}_2$$

$$+ \left(-m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) \right) \dot{q}_3$$

$$C_{31} = \left(\begin{array}{l} \frac{1}{2}m_3a_2y_3 \cos(q_3) + \frac{1}{2}m_3a_2x_3 \sin(q_3) + m_3a_3y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_2x_3 \sin(2q_2 + q_3) \\ + m_3y_3x_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + m_3a_3x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_2y_3 \cos(2q_2 + q_3) + \frac{1}{2}m_3a_2a_3 \sin(2q_2 + q_3) \\ + \frac{1}{2}m_3 \sin(q_3)a_2a_3 - \frac{1}{2}I_{xx_3} \sin(2q_3 + 2q_2) - I_{yy_3} \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}m_3a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \frac{1}{2}m_3y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) \\ + \frac{1}{2}m_3x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2}I_{yy_3} \sin(2q_3 + 2q_2) \end{array} \right) \dot{q}_1$$

$$C_{32} = (m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 + m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) + m_3 a_2 x_3 \sin(q_3)) \dot{q}_2$$

$$C_{33} = 0$$

$$G_1 = 0$$

$$G_2 = 9.81 \left(m_2 \cos(q_2) a_2 + m_2 \cos(q_2) x_2 - m_2 \sin(q_2) y_2 + m_3 a_3 \cos(q_3 + q_2) + m_3 \cos(q_2) a_2 \right. \\ \left. + m_3 \cos(q_3 + q_2) x_3 - m_3 \sin(q_3 + q_2) y_3 \right)$$

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

پارامترهای ماتریس اینرسی و موقعیت مرکز جرم رابدها که پس از طراحی در نرم افزار سالیدورک بدست آمده را در جدول (۲-۲) مشاهده می‌کنید. معادلات دینامیکی نشان می‌دهد که مدل دینامیکی ربات پیچیده، چند متغیره و با توزیع سنگین می‌باشد.

جدول (۲-۴) 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	I_{yzi} (kgm ²)
۱	۰	-۰.۲۲	۰	۱۹	۰.۳۴	۰.۳۶	۰.۳۱	۰	۰	۰
۲	-۰.۵۱	۰	۰	۱۸.۱۸	۰.۱۸	۱.۳۲	۱.۳۱	۰	۰	۰
۳	-۰.۶۷	۰	۰	۱۰.۹۹	۰.۰۷	۰.۹۲	۰.۹۳	۰	۰	۰

فصل سوم

راهبرد کنترل ولتاژ و بازوهای ماهر رباتیک با مفاصل

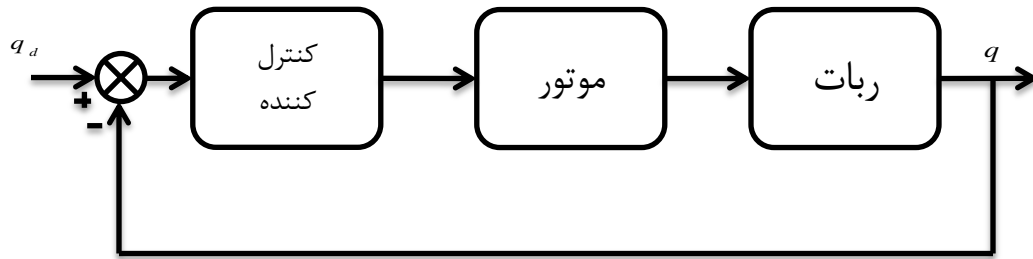
انعطاف پذیر

از آنجا که ربات‌ها به وسیله موتورهای کنترل می‌شوند راهبرد کنترل ولتاژ به وجود آمد. در صورت استفاده از این روش کنترل ربات به کنترل موتورهای مفاصل آن تبدیل می‌شود. به جای کنترل گشتاور مفاصل به کنترل ولتاژ موتورهای مفاصل پرداخته می‌شود. در این صورت سیگنال ورودی به سیستم ولتاژ موتورها است.

از آنجا که موتورهای الکتریکی با منبع ولتاژ تغذیه می‌شوند حتی برای کنترل جریان آن‌ها نیز باید ولتاژ آن را کنترل کرد. اگر در ربات‌ها از موتورهای مغناطیس دائم استفاده شود به دلیل داشتن دینامیک خطی، به آسانی قابل کنترل هستند. دینامیک موتور بسیار ساده‌تر از دینامیک ربات است در نتیجه به راحتی می‌توان یک کنترل کننده بر مبنای 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. البته در ربات‌هایی با مفاصل انعطاف‌پذیر این طراحی پیچیده‌تر از ربات‌هایی با مفاصل صلب است.

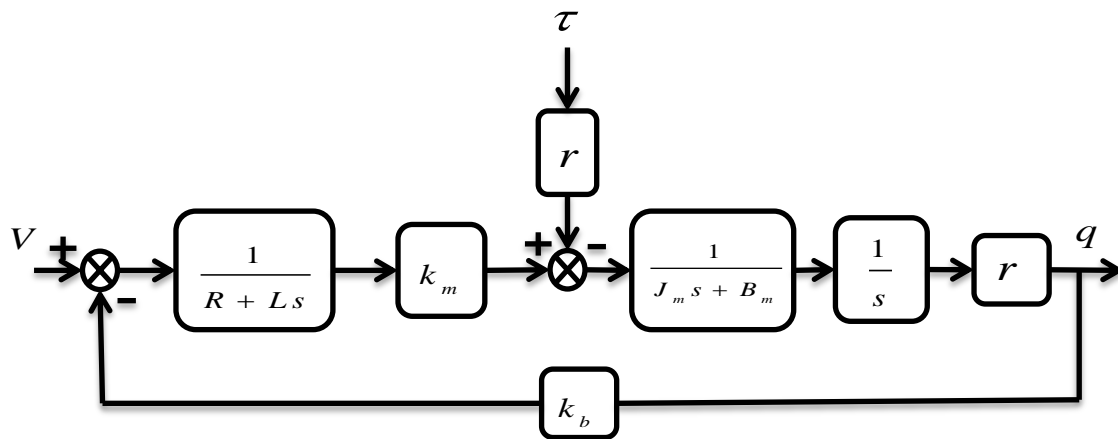
به وسیله این راهبرد کنترلی، سیستم چند متغیره ربات را می‌توان به صورت کاملاً مجزا کنترل کرد. راهبرد کنترل ولتاژ ربات بر مبنای مدل موتور و مستقل از مدل ربات برای نخستین بار در [۲] معرفی شده است.

این راهبرد به دلیل صرف نظر نکردن از دینامیک محرکه‌ها عملکرد کنترلی بهتری خواهد داشت و برای ردگیری با سرعت بالا نیز کاربرد دارد. شکل (۳-۱) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور مفصل ربات را نشان می‌دهد.

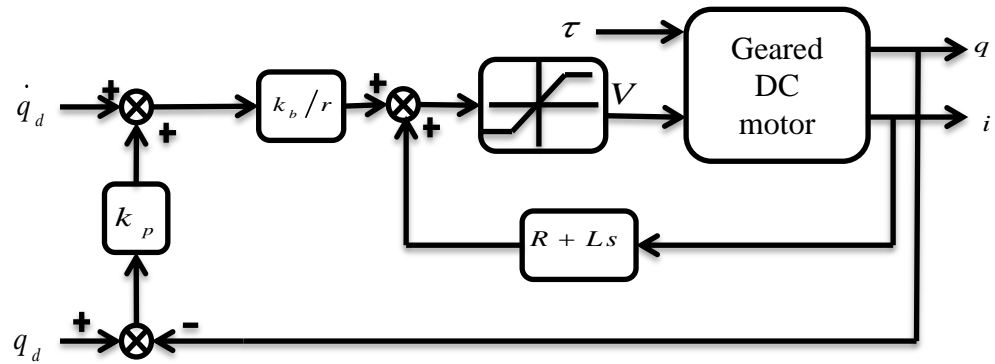


شکل (۳-۱) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور ربات

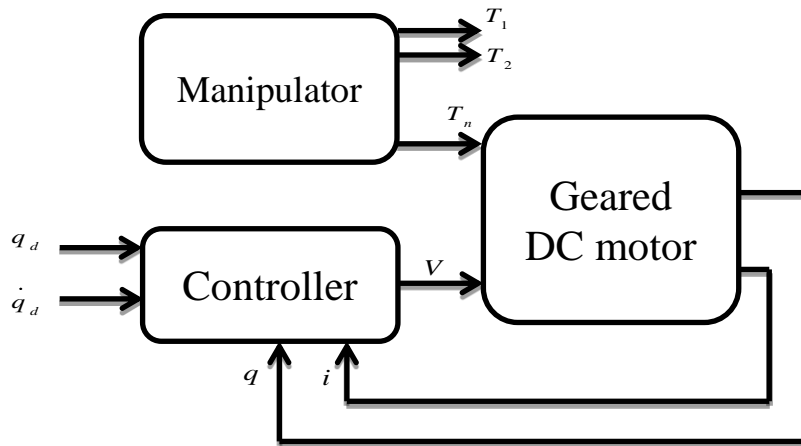
دیاگرام موتور مغناطیس دائم در شکل (۳-۲) رسم شده است. شکل (۳-۳) سیستم کنترل موتور و شکل (۳-۴) سیستم کنترل ربات را نشان می‌دهد. به منظور محافظت موتور از محدود کننده ولتاژ استفاده می‌شود. در این صورت مقادیر حدی ولتاژ به محدود کننده اعمال می‌شود. در صورت به کارگیری از این محدود کننده باید توجه نمود که در وضعیت اشباع، قانون کنترل پیشنهادی دیگر عمل نمی‌کند و ولتاژ موتور روی مقادیر حدی باقی می‌ماند.



شکل (۳-۲) دیاگرام موتور مغناطیس دائم



شکل (۳-۳) سیستم کنترل موتور



شکل (۴-۳) سیستم کنترل ربات

در ادامه به طراحی و شبیه‌سازی دو کنترل‌کننده با استفاده از این راهبرد برای رباتی با مفصل انعطاف پذیر پرداخته شده است تا با اساس کار کنترل ولتاژ ربات آشنا شوید.

۱-۳ ربات‌هایی با مفاصل انعطاف پذیر و کنترل آن‌ها

در این بخش ابتدا به معرفی و مدل سازی سیستم انعطاف پذیر پرداخته شده است و در ادامه دو شیوه کنترلی پیشنهادی برای کنترل ربات با مفاصل انعطاف پذیر در حوزه کنترل ولتاژ نیز معرفی می‌شود. همان‌طور که در فصل اول بیان شد، اثر انعطاف به دلیل وجود المان‌هایی نظیر چرخ‌دنده در سیستم انتقال قدرت به وجود می‌آید. معمولاً انعطاف را در شبیه سازی با فنر مدل می‌کنند و این فنر باعث می‌شود که زاویه شفت موتور با زاویه مفصل متفاوت باشد. حتی در بعضی از سیستم‌های انتقال قدرت به صورت مستقیم از فنر استفاده می‌شود که این باعث ایجاد شدن انعطاف بسیار زیادی می‌شود. از این سیستم‌ها در تجهیزات توان‌بخشی استفاده می‌شود که بیمار احساس آرامش بیشتری در حین حرکت دادن دست یا پا داشته باشد.

اثر انعطاف باعث می‌شود به هر مفصل یک درجه آزادی اضافه شود در نتیجه طراحی کنترل‌کننده نسبت به حالت صلب پیچیده‌تر می‌شود. همچنین از لحاظ پیاده سازی نیز بسیار پیچیده‌تر و دشوارتر از سیستم‌های بدون اثر انعطاف است. برای سهولت در کنترل ربات‌هایی با مفاصل انعطاف پذیر، از شیوه کنترل ربات به صورت کنترل جداگانه مفاصل به جای کنترل به صورت مجزاسازی استفاده می‌شود. همچنین در راهبرد کنترل ولتاژ قانون کنترل به صورت جداگانه بر موتورهای مفاصل اعمال می‌شود. در ادامه نحوه به دست آوردن روابط زاویه موتورها با زاویه مجری نهایی با اثر انعطاف بیان می‌گردد.

معادله الکتریکی موتورهای مغناطیس دائم DC به صورت زیر به دست می‌آید:

$$RI_a + L\dot{I}_a + k_b\dot{\theta}_m = U \quad (1-3)$$

همان‌طور که بیان شد در راهبرد کنترل ولتاژ به دینامیک موتورها نیز توجه می‌شود.

معادله دینامیکی موتور مطلوب عبارت است از:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + r\tau_l = k_m I_a \quad (2-3)$$

از آنجایی که مفاصل دارای خاصیت انعطاف پذیری هستند تغییر زاویه در موتور با تغییر زاویه در مفصل برابر نمی‌باشد و برای هر موتور داریم:

$$\tau_l = k(r\theta_m - q) \quad (3-3)$$

θ_m زاویه موتور، k ضریب انعطاف‌پذیری و q زاویه مفصل هستند.

از طرفی معادلات دینامیکی ربات عبارت است از:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_l \quad (4-3)$$

حال با برابر قرار دادن معادله (4-3) با فرم کلی معادله (3-3) معادله بین θ_m و q به دست می‌آید:

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

با باز نویسی معادله بالا خواهیم داشت:

$$\mathbf{k}^{-1}\mathbf{r}^{-1}(\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q})) + \mathbf{r}^{-1}\mathbf{q} = \theta_m \quad (6-3)$$

و در نهایت

$$\boldsymbol{\theta}_f + \mathbf{r}^{-1}\mathbf{q} = \theta_m \quad (7-3)$$

$$\boldsymbol{\theta}_f = \mathbf{k}^{-1}\mathbf{r}^{-1}(\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q})) \quad (8-3)$$

$\boldsymbol{\theta}_f$ ترمی است که به دلیل وجود اثر انعطاف به دست می‌آید و در ربات‌های صلب معادله بین زاویه موتور با زاویه مفصل به صورت زیر است.

$$\mathbf{r}^{-1}\mathbf{q} = \theta_m \quad (9-3)$$

۲-۳ روش‌های کنترلی

در این بخش چند روش کنترلی بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ بر روی ربات تک مفصلی با مفصل انعطاف پذیر پیاده سازی می‌شود تا تأثیر انعطاف در ربات بیان گردد. معادله دینامیکی ربات تک مفصلی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$J_l \ddot{q} + B_l \dot{q} + C_l \sin(q) = \tau_l \quad (۱۰-۳)$$

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

جدول (۱-۳) پارامترهای ربات

J_l	B_l	C_l
۱	۰.۱	۱

جدول (۲-۳) پارامترهای موتور الکتریکی

u_{max} (V)	R (Ω)	K_b ($\frac{V.s}{rad}$)	L (H)	J_m ($\frac{Nm.s^2}{rad}$)	B_m ($\frac{Nm.s}{rad}$)	r	k
۴۲	۱.۶	۰.۲۶	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۲	۵۰۰

۱-۲-۳ کنترل غیر خطی

در شبیه سازی اول از یک قانون کنترل غیر خطی استفاده شده است و به جای ترم غیر خطی و پیچیده بیان شده در معادله (۳-۶) از یک معادله ساده تر برای ایجاد ارتباط بین زاویه موتور و مفصل استفاده می شود [۶۱].

قانون کنترل به صورت زیر است:

$$u = \hat{R}I_a + \hat{k}_b (\dot{\theta}_{md} + \rho_2 \text{sign}(\theta_{md} - \theta_m)) \quad (۱۱-۳)$$

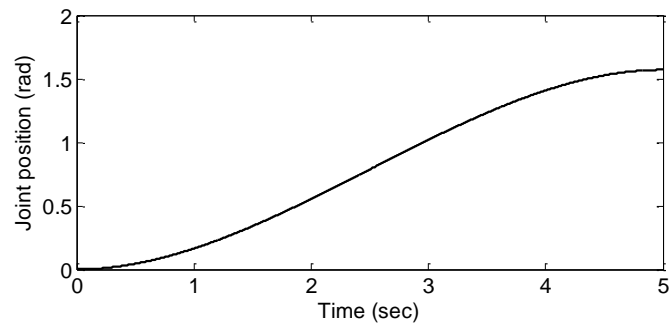
\hat{R} مقدار تقریبی مقاومت سیم پیچ، I_a جریان موتور، \hat{k}_b مقدار تقریبی ضریب ثابت القا، $\dot{\theta}_{md}$ سرعت مطلوب موتور، ρ_2 گین ثابت مثبت، θ_{md} زاویه مطلوب موتور، θ_m زاویه موتور و معادله بین زاویه موتور و زاویه مفصل عبارت است از:

$$\theta_{md} = k_d \dot{e} + k_p e + k_i \int e dt \quad (۱۲-۳)$$

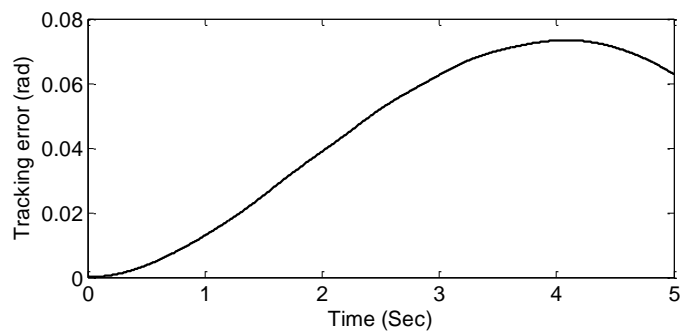
$$e = q_d - q \quad (۱۳-۳)$$

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 محاسبات می شود. نکته مهم این است که برای ردگیری، مسیر مطلوب باید نرم باشد تا ربات به راحتی بتواند مسیر را ردگیری کند. مسیر مطلوب در شکل (۳-۵) آورده شده است. در شکل (۳-۶) خطای ردگیری مشاهده می شود که تأثیر اثر انعطاف را از بین برده ولی خطا وجود دارد و مانند ربات صلب خطا کاهش پیدا نکرده است و در انتها نیز تلاش کنترلی در شکل (۳-۷) مشاهده می شود.

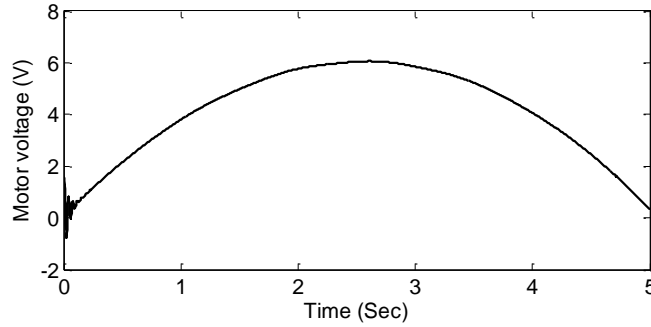
مزیتی که این روش دارد این است که دارای سیگنال کنترلی نرم و بدون چترینگ و محدود است و از لحاظ پیاده سازی عملی نیز با مشکل روبه‌رو نمی‌شود. و ایرادی که دارد این است که از دو حلقه کنترلی استفاده شده که حجم محاسبات را بالا برده است.



شکل (۳-۵) مسیر مطلوب برای ردگیری ربات



شکل (۳-۶) خطای ردگیری مفصل با مفصل انعطاف پذیر



شکل (۷-۳) سیگنال کنترلی اعمالی به موتور

۲-۲-۳ کنترل مقاوم

در شبیه سازی دوم نیز از یک قانون کنترل مقاوم استفاده شده است در قانون کنترل به صورت مداوم از قانون کنترل چند ثانیه قبل استفاده می شود و مانند شبیه سازی اول از یک معادله ساده برای ایجاد ارتباط بین زاویه موتور و مفصل استفاده شده است [۲۵].
قانون کنترل به صورت زیر است.

$$u = u(t - \varepsilon) + \hat{k}_b (\dot{\theta}_{md} - \dot{\theta}_m + \beta(\theta_{md} - \theta_m)) \quad (۱۴-۳)$$

\hat{k}_b مقدار تقریبی ضریب ثابت القا، $\dot{\theta}_{md}$ سرعت مطلوب موتور، $\dot{\theta}_m$ سرعت موتور، β گین ثابت مثبت،

θ_{md} زاویه مطلوب موتور، θ_m زاویه موتور هستند

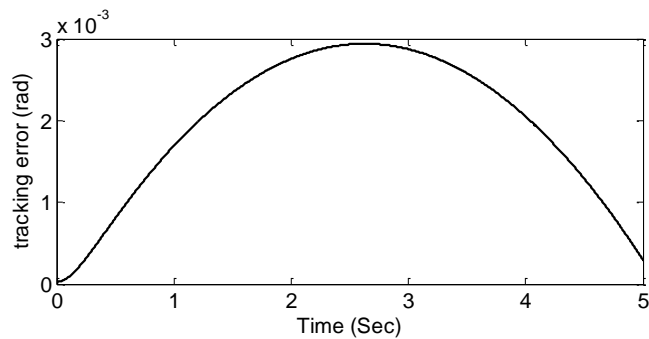
ورابطه بین زاویه موتور و زاویه مفصل عبارت است از:

$$\theta_{md} = k_d \dot{e} + k_p e + k_i \int e dt \quad (۱۵-۳)$$

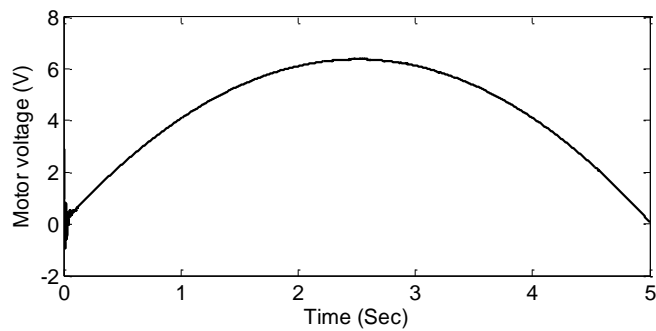
$$e = q_d - q \quad (۱۶-۳)$$

q زاویه مفصل، q_d زاویه مطلوب مفصل هستند. در این روش هم مانند روش قبلی از دو حلقه کنترلی

استفاده می‌گردد. مسیر مطلوب مانند حالت قبل در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۸-۳) خطای ردگیری مشاهده می‌شود که بسیار کمتر از حالت قبلی است و این به دلیل قانون مناسب در کنترل کننده است. و در شکل (۹-۳) ولتاژ تولید شده به وسیله کنترل کننده که به موتور اعمال می‌شود مشاهده می‌گردد که سیگنال نرمی است و از نظر عملی نیز قابل پیاده سازی است.



شکل (۸-۳) خطای ردگیری مفصل با مفصل انعطاف پذیر



شکل (۹-۳) سیگنال کنترلی اعمالی به موتور

نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده شد هر دو روش دارای حجم محاسبات نسبتاً سنگینی هستند. در هر دو روش از دو حلقه کنترلی برای کنترل زاویه مفصل استفاده شده است که این باعث پیچیده‌تر شدن کنترل‌کننده می‌شود و همچنین سرعت سیستم را کاهش می‌دهد. هر دو روش به مدل دینامیکی موتور نیازمند هستند و این نیز باعث افزایش حجم محاسبات می‌شود در ادامه کار به دنبال آن هستیم تا با روش فازی تطبیقی یک کنترل‌کننده بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ به صورتی که زاویه مفصل به صورت مستقیم کنترل شود را برای ربات صنعتی اسکارا با ۴ درجه آزادی و مفاصل انعطاف‌پذیر و بازوی رباتیک هنرمند با ۳ درجه آزادی و مفاصل انعطاف‌پذیر طراحی کنیم.

فصل چهارم

کنترل فازی تطبیقی مستقیم بر مبنای راهبرد

کنترل ولتاژ

در این فصل روش کنترل فازی تطبیقی مستقیم بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ معرفی، طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی می‌شود و عملکرد این کنترل‌کننده و مزایای استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ به جای کنترل گشتاور نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها نیز پایداری سیستم کنترلی مورد بررسی قرار داده می‌شود.

۱-۴ طراحی کنترل‌کننده فازی تطبیقی مستقیم

در طراحی کنترل‌کننده فازی تطبیقی مستقیم یک تزویج شدید در $D(q)$ و $C(q, \dot{q})$ وجود دارد زیرا این ماتریس‌ها قطری نیستند و همچنین مساله کنترل با اغتشاش خارجی روبرو می‌شود. بنابراین به منظور سادگی طراحی و پیاده‌سازی از روش مفصل مستقل استفاده گردد. جهت طراحی سیستم کنترل فازی تطبیقی ابتدا یک کنترل‌کننده فازی با ورودی‌های $e + k_1 \int e$ و $\dot{e} + k_1 e$ طراحی می‌شود که خروجی آن ولتاژ موتور است. اگر برای هر ورودی فازی سه تابع تعلق در نظر گرفته شود فضای کنترل با ۹ قانون فازی پوشش داده می‌شود. این کنترل‌کننده با اینکه ۹ قانون دارد ولی از نظر ورودی‌ها مانند کنترل‌کننده PID فازی است یعنی ورودی‌های e ، $\int e$ را دارد. در صورتی که ساختار کلی کنترل‌کننده PD فازی را دارد و از نظر حجم محاسبات بسیار کمتر از روش PID فازی است.

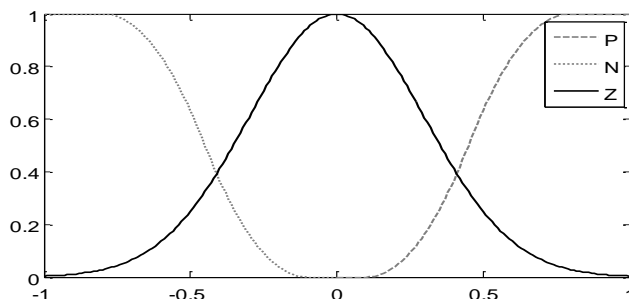
قوانین فازی به فرم ممدانی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(۱-۴) \quad \text{قانون } l: \text{ اگر } x_1 \text{ برابر با } A_l \text{ و } x_2 \text{ برابر با } B_l \text{ باشد، آنگاه } v \text{ برابر } C_l \text{ است}$$

l قانون l ام را برای $l=1, \dots, 9$ تعیین می‌نماید. A_l ، B_l ، C_l توابع تعلق فازی مربوط به $e + k_1 \int e$ و $\dot{e} + k_1 e$ و V هستند. سه تابع تعلق P ، Z و N برای ورودی‌ها مطابق شکل (۱-۴) در نظر گرفته می‌شود. و توابع تعلق به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\mu_N(x_1) = \begin{cases} 1 & x_1 \leq -1 \\ 1 - 2(x_1 + 1)^2 & -1 \leq x_1 \leq -0.5 \\ 2x_1^2 & -0.5 \leq x_1 \leq 0 \\ 0 & x_1 \geq 0 \end{cases} \quad \mu_P(x_1) = \begin{cases} 0 & x_1 \leq 0 \\ 2x_1^2 & 0 \leq x_1 \leq 0.5 \\ 1 - 2(x_1 - 1)^2 & 0.5 \leq x_1 \leq 1 \\ 1 & x_1 \geq 1 \end{cases} \quad (2-4)$$

$$\mu_Z(x_1) = \exp(-x_1^2 / (2\sigma^2)), \quad \sigma = 0.5$$



شکل (۴-۱) توابع تعلق ورودی فازی

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

$$\mu_{C_i}(v) = \exp\left(-\left((v - \hat{y}_i)^2 / (2\sigma^2)\right)\right) \quad (3-4)$$

و قوانین به صورت زیر نوشته می‌شود:

جدول (۴-۱) قوانین فازی

$X_2 \backslash X_1$	P	Z	N
P	PH	PM	Z
Z	PM	Z	NM
N	Z	NM	NH

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

توان قانون فازی تطبیقی زیر را ارائه داد [۶۶]:

$$u = \sum_{l=1}^9 \hat{y}_l \psi_l(x_1, x_2) = \hat{\mathbf{y}}^T \boldsymbol{\psi}(x_1, x_2) \quad (4-4)$$

که در معادله فوق $\Psi = [\psi_1 \dots \psi_9]^T$ و پارامترهای \hat{y} پارامترهای تطبیق هستند که در ادامه محاسبه می‌شوند.

با اضافه کردن کنترل کننده فازی به سیستم خواهیم داشت:

$$RI_a + LI_a + k_b \dot{\theta}_m = \hat{y}^T \Psi(x_1, x_2) \quad (5-4)$$

با توجه به ویژگی تقریب‌گر عمومی بودن سیستم‌های فازی می‌توان برای هر مفصل نوشت:

$$\ddot{e} + k_1 \dot{e} + \alpha(\dot{e} + k_1 e) + \beta(e + k_1 \int e) + RI_a + LI_a + k_b \dot{\theta}_m = \mathbf{y}^T \Psi(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (6-4)$$

که ε خطای تقریب و پارامترهای α ، β و k_1 مقادیر مثبتی هستند. جهت به دست آوردن مکانیزم تطبیق با توجه به دو معادله (5-4) و (6-4) خواهیم داشت:

$$\ddot{e} + k_1 \dot{e} + \alpha(\dot{e} + k_1 e) + \beta(e + k_1 \int e) = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T \Psi(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (7-4)$$

یا به عبارت ساده‌تر:

$$\dot{x}_2 + \alpha x_2 + \beta x_1 = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T \Psi(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (8-4)$$

معادله بالا به فرم فضای حالت زیر تبدیل می‌شود:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}w \quad (9-4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\alpha & -\beta \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad w = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T \Psi + \varepsilon \quad (10-4)$$

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

$$F = \frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} + \frac{1}{2\lambda} (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \quad (11-4)$$

در رابطه فوق ضریب ثابت λ و P و Q ماتریس‌های مثبت معین متقارن منحصر به فردی هستند که در معادله ماتریسی لیاپانوف زیر صدق می‌کنند:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q} \quad (12-4)$$

حال مشتق رابطه (11-4) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{F} = -0.5 \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \left((\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\varepsilon} \right) - \frac{1}{\lambda} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \dot{\hat{\mathbf{y}}} \quad (13-4)$$

در این رابطه $P_2 = \mathbf{P} \mathbf{B}$ ستون دوم ماتریس P است با توجه به معادله بالا خواهیم داشت:

$$\dot{F} = -0.5 \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \left(\mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\psi} - \frac{1}{\lambda} \dot{\hat{\mathbf{y}}} \right) + \mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\varepsilon} \quad (14-4)$$

پس قانون تطبیق به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\hat{\mathbf{y}}} = \lambda \mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\psi} \quad (15-4)$$

داریم:

$$\dot{F} = -0.5 \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\varepsilon} \quad (16-4)$$

در نتیجه پارامترهای تطبیق به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{\mathbf{y}} = \int_0^t \lambda \mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\psi} dt + \hat{\mathbf{y}}(0) \quad (17-4)$$

برای پایداری و همچنین کاهش خطای ردگیری باید $\dot{F} < 0$ باشد در نتیجه خواهیم داشت:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\varepsilon} < 0.5 \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} \quad (18-4)$$

برای تضمین معادله بالا کافی است که:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\varepsilon} < 0.5 \lambda_{\min} \mathbf{Q} \|\mathbf{X}\|^2 \quad (19-4)$$

از معادله کوشی داریم

$$\mathbf{X}^T \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\varepsilon} \leq \|\mathbf{X}\| \cdot \|\mathbf{P}_2\| \cdot |\boldsymbol{\varepsilon}| \quad (۲۰-۴)$$

در نتیجه:

$$\|\mathbf{X}\| \cdot \|\mathbf{P}_2\| \cdot |\boldsymbol{\varepsilon}| < 0.5 \lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{X}\|^2 \quad (۲۱-۴)$$

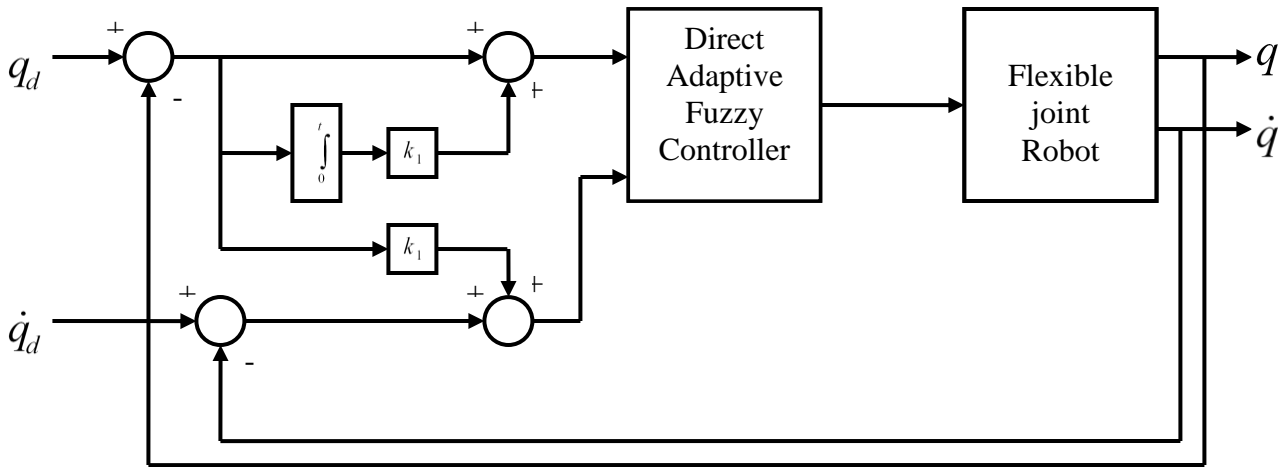
یا به عبارت ساده‌تر:

$$2 \|\mathbf{P}_2\| \cdot |\boldsymbol{\varepsilon}| / \lambda_{\min}(\mathbf{Q}) < \|\mathbf{X}\| \quad (۲۲-۴)$$

تا زمانی که رابطه فوق برقرار باشد خطای ردگیری کاهش می‌یابد یا به عبارت دیگر خطا محدود است.

۲-۴ شبیه‌سازی روش کنترل فازی تطبیقی مستقیم

قانون کنترل بر روی ربات اسکارا با مفاصل انعطاف پذیر پیاده سازی می‌شود. سیستم کنترل به صورت مفصل مستقل به ربات اعمال می‌شود. بنابراین برای کنترل موتورهای هر مفصل از یک کنترل کننده جداگانه استفاده می‌شود. سپس عملکرد سیستم کنترل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دیگرام سیستم کنترل فازی تطبیقی مستقیم بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۲-۴) بلوک دیاگرام سیستم کنترل

۱-۲-۴ کنترل ردگیری

مسیر مطلوب برای ردگیری مفاصل اول و دوم و چهارم به صورت زیر طراحی می‌شود:

$$q_d = (\pi/150)t^2 - (\pi/3375)t^3 \quad (۲۳-۴)$$

و برای مفصل سوم که به صورت کشویی است مسیر مطلوب به صورت زیر طراحی می‌شود:

$$q_d = (\pi/750)t^2 - (\pi/16875)t^3 \quad (۲۴-۴)$$

جهت اجرای شبیه سازی از قانون کنترل (۴-۴) و قانون تطبیق (۴-۱۷) استفاده می‌شود.

پارامترهای مورد نیاز در کنترل کننده به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -20 & -0.5 \end{bmatrix} \quad p_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \alpha = 200 \quad k_1 = 0.4 \quad \hat{y}(0) = 0 \quad \text{کنترل کننده اول:}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad p_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \alpha = 600 \quad k_1 = 0.4 \quad \hat{y}(0) = 0 \quad \text{کنترل کننده دوم:}$$

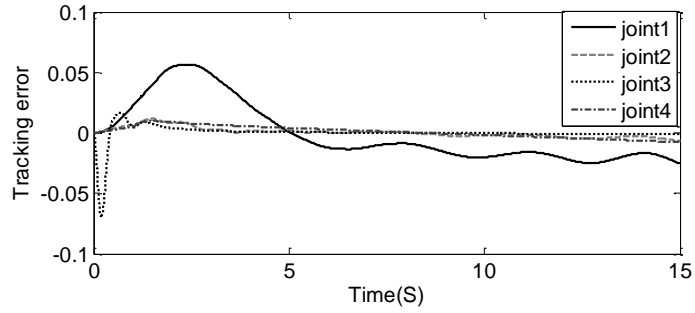
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad p_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \alpha = 500 \quad k_1 = 0.4 \quad \hat{y}(0) = 0 \quad \text{کنترل کننده سوم:}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad p_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \alpha = 400 \quad k_1 = 0.4 \quad \hat{y}(0) = 0 \quad \text{کنترل کننده چهارم:}$$

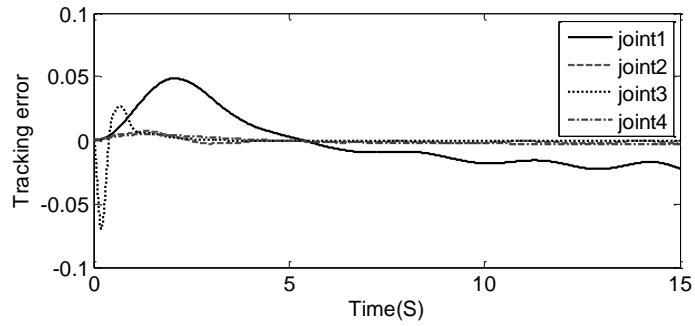
زمان اجرای شبیه‌سازی ۱۵ ثانیه بوده است. در این فصل نیز برای نشان دادن مقاوم بودن کنترل‌کننده در برابر اغتشاش، از یک تابع پله با تأخیر ۱ ثانیه و دامنه یک ولت به عنوان اغتشاش خارجی استفاده می‌شود و عملکرد سیستم در برابر آن بررسی می‌گردد.

شکل (۳-۴) خطای ردگیری مفاصل بدون اثر اغتشاش را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که خطا بسیار ناچیز بوده و حتی در بعضی از مفاصل به صفر همگرا می‌شود. شکل (۴-۴) خطای ردگیری با حضور اغتشاش است. مشاهده می‌شود که اثر اغتشاش به خوبی برطرف شده است و نشان می‌دهد که کنترل‌کننده مقاوم است.

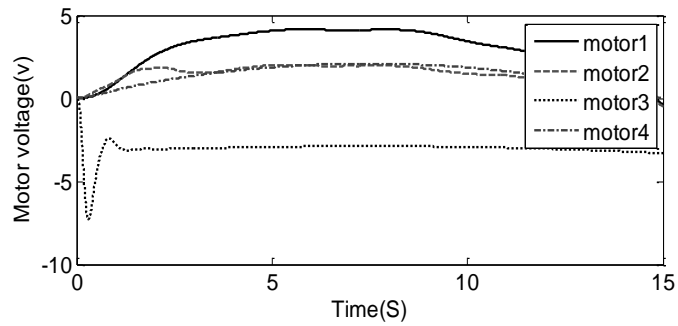
شکل (۵-۴) ولتاژ موتورها را برای کنترل ۴ مفصل ربات در ردگیری نشان می‌دهد. تلاش کنترلی به خوبی پاسخ می‌دهد و منحنی ولتاژ موتورها نرم بوده است و دارای لرزش نیست. در نتیجه قابلیت پیاده‌سازی در عمل را نیز دارد. در شکل (۶-۴) نیز جریان موتورها مشاهده می‌شود. فرآیند تطبیق نیز در شکل (۷-۴) نشان داده شده است. فرآیند تطبیق نشان می‌دهد که تمام قوانین به صورت فعال در تطبیق حضور داشته‌اند. و به دلیل اینکه مقدار اولیه و خطای اولیه برای تمام پارامترهای هر کنترل‌کننده یکسان بوده است تمامی پارامترها بر هم منطبق هستند و به دلیل PE نبودن سیگنال کنترلی و تحریک کامل نشدن آن پارامترها به مقدار ثابتی همگرا نمی‌شوند.



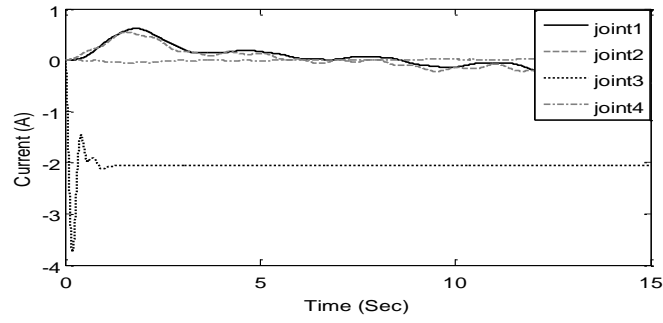
شکل (۳-۴) خطای ردگیری در مفاصل بدون در نظر گرفتن اغتشاش



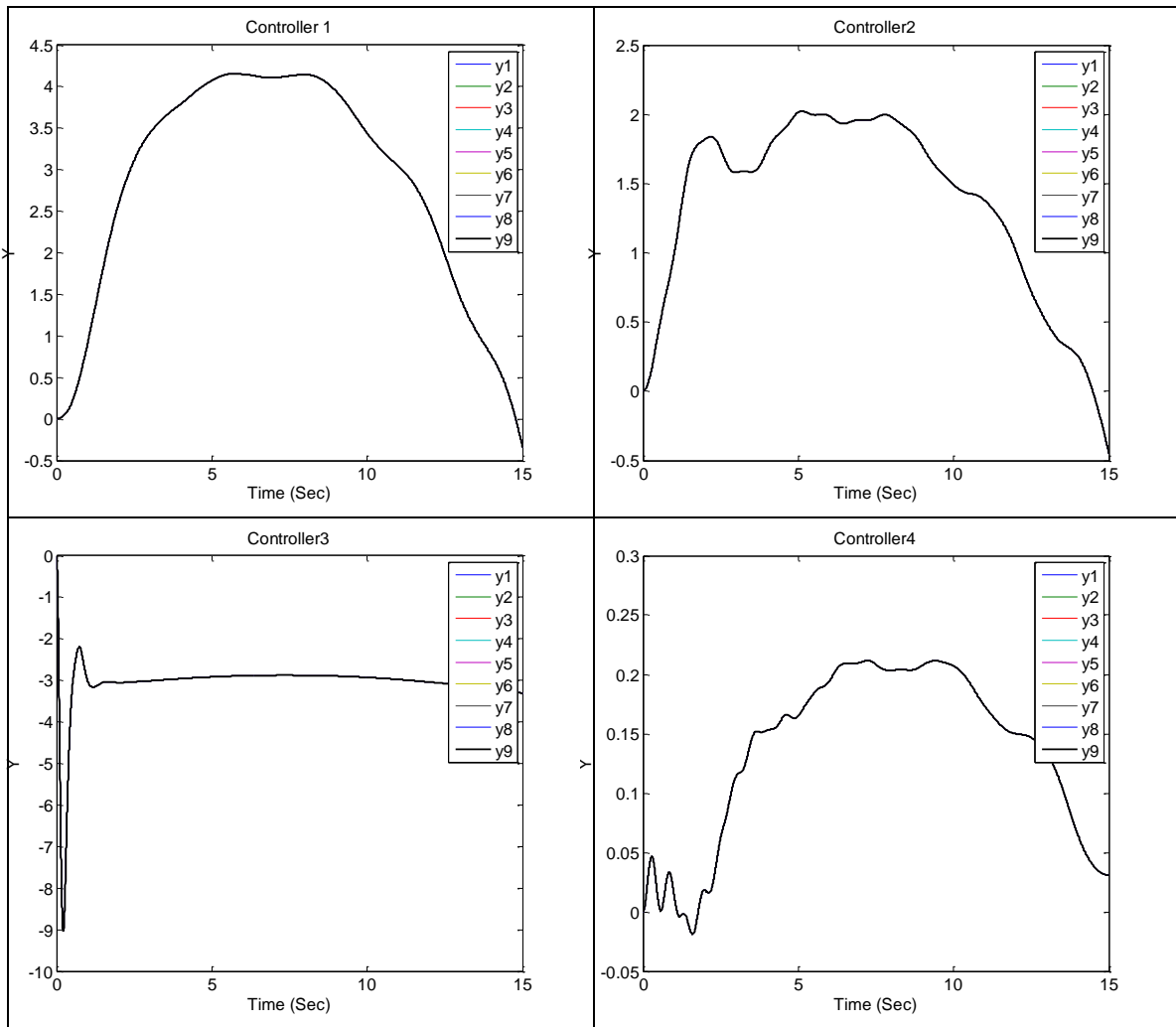
شکل (۴-۴) خطای ردگیری در مفاصل با در نظر گرفتن اغتشاش



شکل (۵-۴) سیگنال ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات



شکل (۴-۶) جریان موتورهای ربات

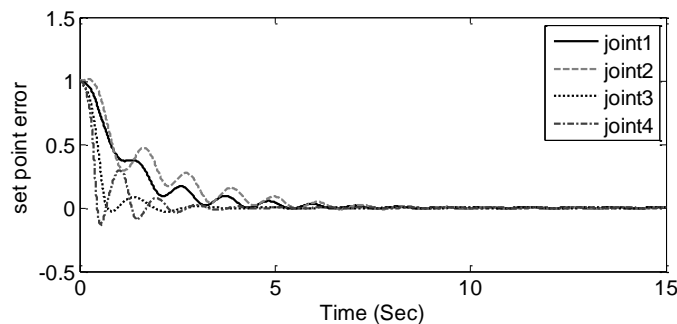


شکل (۴-۷) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق

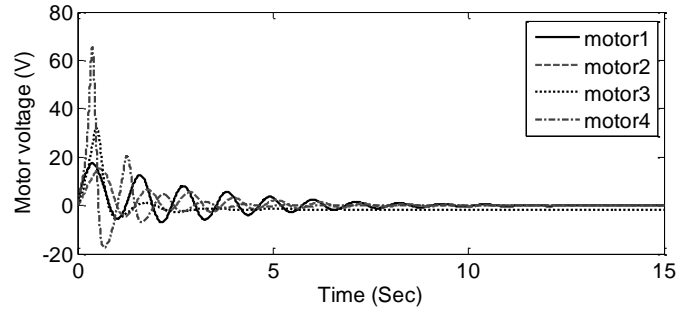
۲-۲-۴ تنظیم

برای بررسی عملکرد تنظیم سیستم کنترل، موقعیت مطلوب مفاصل بر روی 1 rad تنظیم شده است. پارامترهای مورد نیاز برای کنترل کننده ها مانند حالت قبل انتخاب شده است و زمان اجرای شبیه سازی نیز ۱۵ ثانیه است. شکل (۸-۴) خطای تنظیم مفاصل را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود خطای حالت ماندگار تقریباً برابر صفر است و در ابتدا هر ۴ مفصل دارای نوسانات زیادی هستند که ناشی

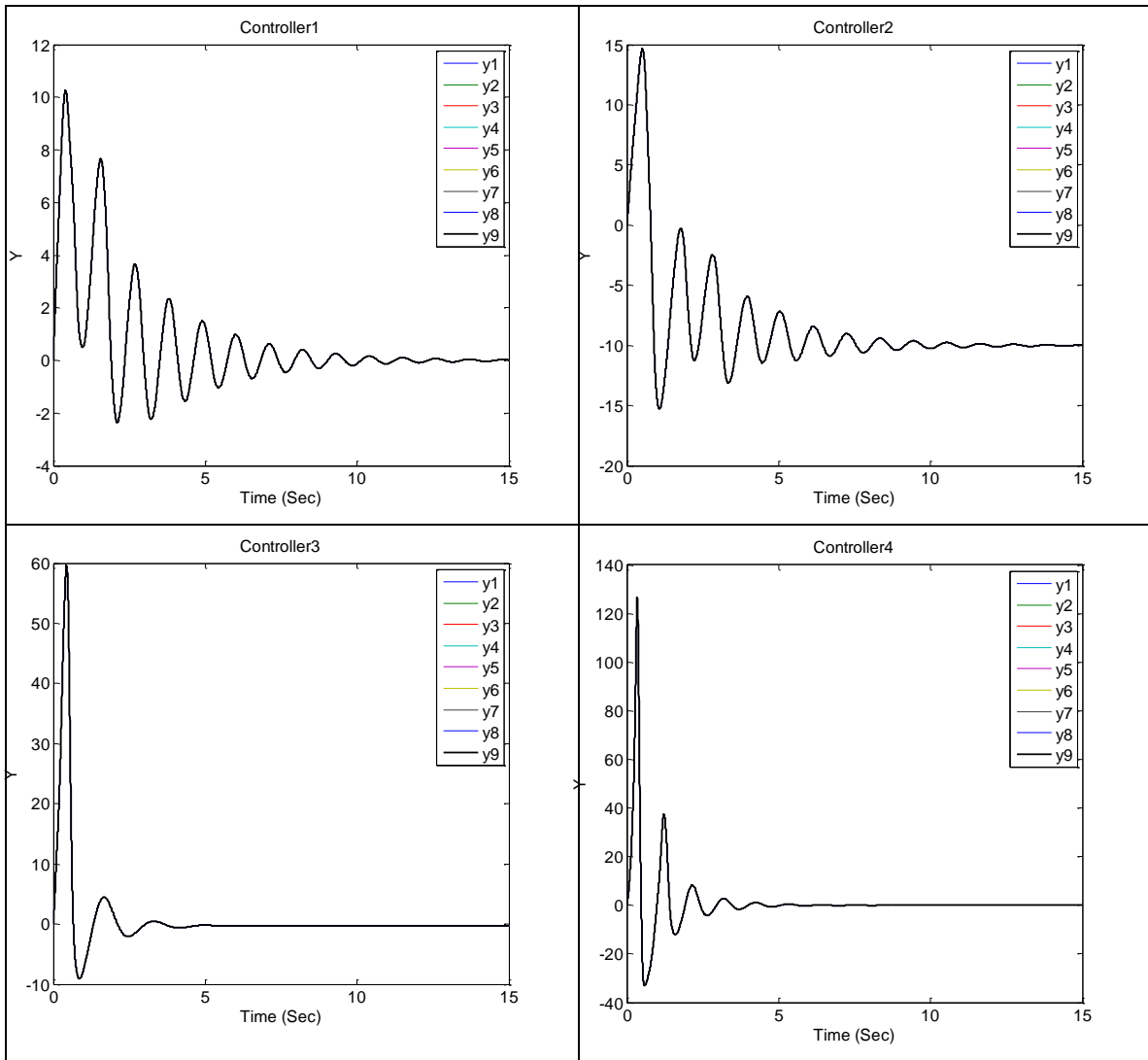
از انعطاف مفاصل است. ولتاژ موتورها در این حالت در شکل (۹-۴) نمایش داده شده است. از آنجایی که خطای اولیه بزرگ است سیگنال کنترلی در ابتدا نیز بزرگ است. ولتاژ موتور مفصل سوم برای غلبه بر گرانش نیز مقدار بزرگتری نسبت به بقیه دارد و در انتها تمامی ولتاژها به صفر همگرا می شود. همچنین همگرایی پارامترهای تطبیق در شکل (۱۰-۴) قابل مشاهده که دارای نوسان زیادی نیستند و بر روی هم منطبق می شوند. بعد از مدتی به مقدار ثابتی همگرا می شوند یعنی همگرایی پارامتری و همگرایی خطا داریم.



شکل (۸-۴) خطای تنظیم مفاصل



شکل (۴-۹) ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات



شکل (۴-۱۰) تغییرات در پارامترهای قانون تطبیق

نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان گفت روش کنترل فازی تطبیقی با راهبرد کنترل ولتاژ بر روی ربات اسکارا با مفاصل انعطاف پذیر دارای عملکرد ردگیری خوب و همچنین تنظیم مناسب بوده است و همچنین در برابر عدم قطعیت‌ها نیز مقاوم است و به مدل سیستم رباتیک وابسته نیست و نیازی به دو حلقه کنترلی ندارد و به طور مستقیم موقعیت رابط را کنترل می‌کند. مزیت این روش نسبت به روش های دیگر کنترل بر مبنای ولتاژ این است که از دینامیک موتورها نیز بی نیاز است.

فصل پنجم

کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم بر مبنای راهبرد کنترل

ولتاژ

در این فصل روش کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ معرفی، طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی می‌شود و عملکرد این کنترل‌کننده و مزایای استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ به جای کنترل گشتاور را نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در انتها نیز پایداری سیستم کنترلی ارائه خواهد شد.

۵-۱ طراحی کنترل‌کننده فازی تطبیقی غیرمستقیم

در طراحی کنترل‌کننده فازی تطبیقی غیرمستقیم بر خلاف طراحی کنترل‌کننده فازی تطبیقی مستقیم نیاز به دانش کنترلی نیست بلکه بر مبنای اطلاعات سیستمی کنترل‌کننده طراحی می‌شود. در طراحی کنترل‌کننده مرسوم معادلات باید به فرم همراه زیر نوشته شود.

$$\dot{q}^{(n)} = f(s) + g(s)u \quad (۱-۵)$$

که در آن $s = [q, \dots, q^{(n-1)}]^T$ بردار حالت، $f(s)$ و $g(s)$ توابع اسکالر و $q^{(n)}$ مشتق n ام مفصل q است و u ولتاژ موتورها است. ولی دستیابی به معادله مذکور برای ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر با حضور محرکه‌ها میسر نیست. برای طراحی کنترل‌کننده مفصل مستقل نیز باید سیستم رباتیک به صورت مجزا تبدیل شود. با توجه به اثر انعطاف موجود در مفاصل بین زاویه موتور و رابط رابطه زیر برقرار می‌شود

$$\theta_m = k^{-1}r^{-1}(D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) + r^{-1}q \quad (۲-۵)$$

معادله بالا نشان‌دهنده این است که به شیوه‌های مرسوم نمی‌شود معادلات سیستم را به فرم (۱-۵) تبدیل کرد. پس به دنبال ارائه روش جدیدی در طراحی سیستم کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم برای ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر باید باشیم که حجم معادلات را نیز کاهش دهد و سرعت سیستم را نیز افزایش دهد.

از آنجا که راهبرد کنترل به صورت کنترل ولتاژ است معادله الکتریکی موتور به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$RI_a + L\dot{I}_a + k_b\dot{\theta}_m = v \quad (3-5)$$

برای ظاهر شدن سرعت مفصل در معادلات، می‌توان به صورت زیر عمل کرد

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

معادله بالا را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد

$$\dot{q} + F = v \quad (5-5)$$

که تابع F عبارت است از

$$F = RI_a + L\dot{I}_a + K_b\dot{\theta}_m - \dot{q} \quad (6-5)$$

قانون کنترل را به صورت زیر در نظر می‌گیریم

$$\dot{q}_d + k_p(q - q_d) + \hat{F}(I_a, \dot{\theta}_m, \dot{q}) = v \quad (7-5)$$

که \hat{F} تخمینی از تابع F است با این تفاوت که F تابعی از I_a ، $\dot{\theta}_m$ و \dot{q} است و \hat{F} تابعی از I_a ، \dot{q} و $\dot{\theta}_m$ است. قابل توجه آنکه معادله (5-5) به فرم همراه نمی‌باشد. به دلیل اینکه ثابت زمانی الکتریکی موتور بسیار کمتر از ثابت زمانی مکانیکی موتور است و همچنین به دلیل اینکه اندازه‌گیری \dot{I}_a با نویز همراه است از ترم $L\dot{I}_a$ در \hat{F} صرف نظر شده است. از آنجا که سیستم‌های فازی به عنوان شناساگرهای خوبی شناخته شده هستند برای محاسبه \hat{F} از یک سیستم فازی تطبیقی استفاده می‌شود.

این سیستم دارای سه ورودی است که همگی از متغیرهای حالت سیستم هستند. و خروجی سیستم نیز تخمین تابع F است. اگر برای هر ورودی فازی سه تابع تعلق در نظر گرفته شود فضای کنترل با ۲۷ قانون فازی پوشش داده می‌شود.

قوانین به فرم ممدانی به صورت زیر بیان می‌شود

قانون l : اگر x_1 برابر با A_l و x_2 برابر با B_l و x_3 برابر با C_l باشد آنگاه \hat{F} برابر است با D_l

که در آن $l=1, \dots, 27$ است و برای هر ورودی ۳ تابع تعلق Z, P, N مانند زیر در نظر می‌گیریم

$$\mu_N(x_1) = \begin{cases} 1 & x_1 \leq -1 \\ 1-2(x_1+1)^2 & -1 \leq x_1 \leq -0.5 \\ 2x_1^2 & -0.5 \leq x_1 \leq 0 \\ 0 & x_1 \geq 0 \end{cases} \quad \mu_P(x_1) = \begin{cases} 0 & x_1 \leq 0 \\ 2x_1^2 & 0 \leq x_1 \leq 0.5 \\ 1-2(x_1-1)^2 & 0.5 \leq x_1 \leq 1 \\ 1 & x_1 \geq 1 \end{cases} \quad (8-5)$$

$$\mu_Z(x_1) = \exp(-x_1^2 / (2\sigma^2)), \quad \sigma = 0.5$$

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

$$\mu_{C_l}(\hat{F}) = \exp\left(-\left(\frac{\hat{F} - \hat{y}_l}{2\sigma^2}\right)^2\right) \quad (9-5)$$

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

توان قانون فازی تطبیقی زیر را ارائه داد [۶۶]:

$$\hat{F} = \sum_{l=1}^{27} \hat{y}_l \psi_l(x_1, x_2, x_3) = \hat{\mathbf{y}}^T \boldsymbol{\Psi}(x_1, x_2, x_3) \quad (10-5)$$

که در معادله فوق $\boldsymbol{\Psi} = [\psi_1 \dots \psi_9]^T$ و پارامترهای $\hat{\mathbf{y}}$ پارامترهای تطبیق هستند که در ادامه محاسبه می‌شوند.

$$\psi_l(x_1, x_2, x_3) = \frac{\mu_{A_l}(x_1) \mu_{B_l}(x_2) \mu_{C_l}(x_3)}{\sum_{l=1}^{27} \mu_{A_l}(x_1) \mu_{B_l}(x_2) \mu_{C_l}(x_3)} \quad (11-5)$$

با توجه به خاصیت تقریب‌گر عمومی بودن سیستم‌های فازی خواهیم داشت

$$F = \mathbf{y}^T \boldsymbol{\Psi}(x_1, x_2, x_3) + \varepsilon \quad (12-5)$$

که ε خطای تقریب است.

با توجه به معادلات (۵-۵) و (۷-۵) سیستم حلقه بسته به صورت زیر تشکیل می‌شود

$$\dot{e} + k_p e = F - \hat{F} \quad (۱۳-۵)$$

با قرار دادن (۱۰-۵) و (۱۲-۵) در معادله بالا:

$$\dot{e} = -k_p e + (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \boldsymbol{\psi}(x_1, x_2, x_3) + \varepsilon \quad (۱۴-۵)$$

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

نظر گرفته می‌شود

$$V = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2\alpha} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \quad (۱۵-۵)$$

که در آن α مقداری مثبت است. با مشتق گرفتن از رابطه بالا:

$$\dot{V} = e \dot{e} - \frac{1}{\alpha} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \dot{\hat{\mathbf{y}}} \quad (۱۶-۵)$$

با قرار دادن (۱۴-۵) در معادله بالا :

$$\dot{V} = -k_p e^2 + e \left((\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \boldsymbol{\psi} + \varepsilon \right) - \frac{1}{\alpha} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \dot{\hat{\mathbf{y}}} \quad (۱۷-۵)$$

برای محاسبه قانون تطبیق، معادله بالا را به صورت زیر می‌توان نوشت

$$\dot{V} = -k_p e^2 + (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \left(e \boldsymbol{\psi} - \frac{1}{\alpha} \dot{\hat{\mathbf{y}}} \right) + e \varepsilon \quad (۱۸-۵)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\dot{\hat{\mathbf{y}}} = \alpha e \boldsymbol{\psi} \quad (۱۹-۵)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = \alpha \int_0^t e \boldsymbol{\psi} dt + \hat{\mathbf{y}}(0) \quad (۲۰-۵)$$

که در آن $\hat{\mathbf{y}}(0)$ مقدار اولیه پارامترها است.

آنگاه:

$$\dot{V} = -K_p e^2 + e\varepsilon \quad (21-5)$$

اگر $\dot{V} < 0$ خطای ردگیری کاهش پیدا می کند

$$e\varepsilon < K_p e^2 \quad (22-5)$$

می دانیم که $e\varepsilon \leq |e| \cdot |\varepsilon|$ در نتیجه

$$|e| \cdot |\varepsilon| \leq K_p e^2 \quad (23-5)$$

به عبارتی

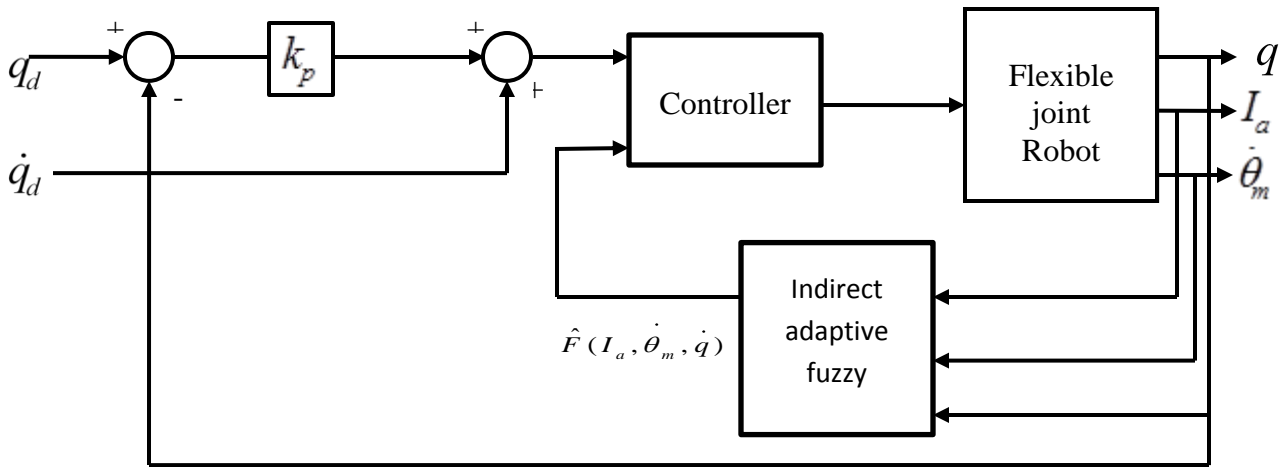
$$\frac{|\varepsilon|}{K_p} \leq |e| \quad (24-5)$$

بدین معنا که اگر $|\varepsilon|/K_p \leq |e|$ باشد آنگاه $\dot{V} < 0$ برقرار می شود. اندازه خطای ردگیری با کاهش

$|\varepsilon|/K_p$ کاهش پیدا می کند. به عبارتی از (24-5) می توان نتیجه گرفت که e محدود است.

۲-۵ شبیه سازی روش کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم

قانون کنترل بر روی ربات هنرمند با مفاصل انعطاف پذیر با ۳ درجه آزادی پیاده سازی می شود. سیستم کنترل به صورت مفصل مستقل به ربات اعمال می شود. بنابراین، برای کنترل موتورهای هر مفصل از یک کنترل کننده جداگانه استفاده می شود. سپس عملکرد سیستم کنترل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دیاگرام سیستم کنترل فازی تطبیقی مستقیم بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ در شکل زیر نشان داده شده است.



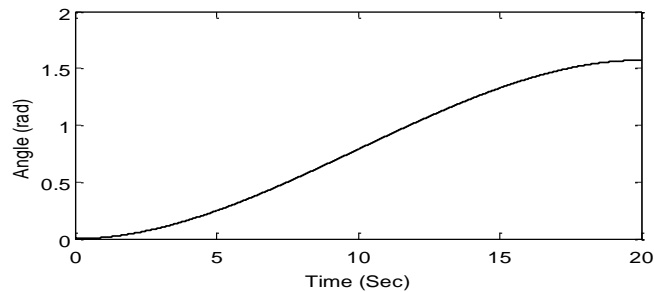
شکل (۵-۱) بلوک دیاگرام سیستم کنترل فازی تطبیقی غیر مستقیم

۵-۲-۱ کنترل ردگیری

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

$$q_d = (3\pi/800)t^2 - (\pi/8000)t^3 \quad (۵-۲۵)$$

که در زیر مشاهده می کنید



شکل (۵-۲) مسیر مطلوب برای ردگیری

جهت اجرای شبیه سازی از قانون کنترل (۵-۷) استفاده می کنیم. پارامترهای مورد نیاز در کنترل-

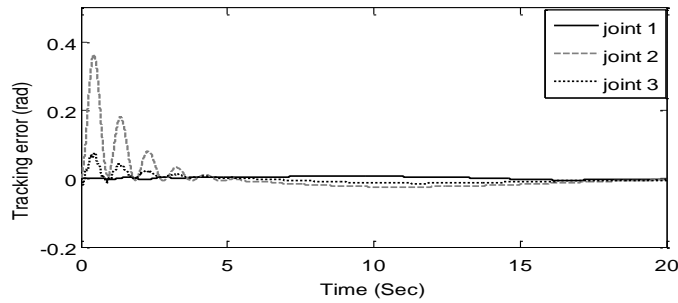
کننده به صورت زیر انتخاب می شوند:

$$\alpha = 10000 \quad k_p = 50 \quad \hat{y}(0) = 0 \quad \text{کنترل کننده اول:}$$

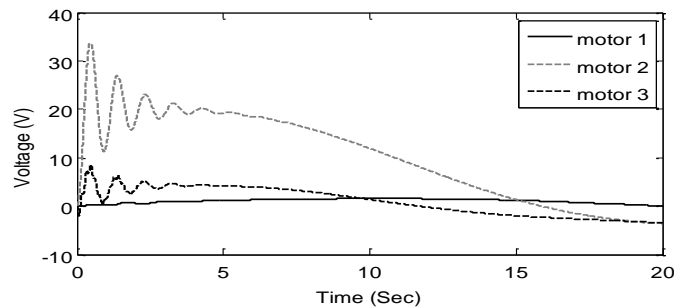
کنترل کننده دوم: $\alpha = 2000 \quad k_1 = 70 \quad \hat{y}(0) = 0$

کنترل کننده سوم: $\alpha = 1000 \quad k_1 = 100 \quad \hat{y}(0) = 0$

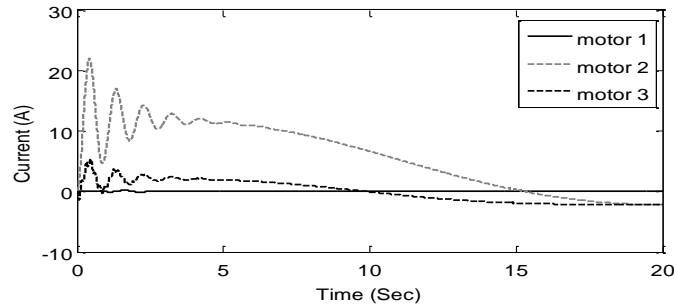
شکل (۳-۵) خطای ردگیری مفاصل بدون اثر اغتشاش را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که خطا بسیار ناچیز است. شکل (۴-۵) ولتاژ موتورها را برای کنترل ۳ مفصل ربات در ردگیری نشان می‌دهد. تلاش کنترلی به خوبی پاسخ می‌دهد و منحنی ولتاژ موتورها نرم بوده است و دارای نوسان اندکی در لحظه اول است که آن هم به خاطر گشتاور مورد نیاز در لحظه راه‌اندازی است. ولی قابلیت پیاده سازی در عمل را نیز دارد. در شکل (۵-۵) جریان موتورها نیز مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۵) خطای ردگیری در مفاصل



شکل (۴-۵) سیگنال ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات

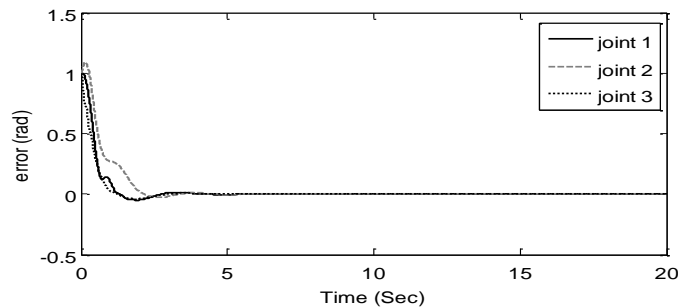


شکل (۵-۵) سیگنال جریان موتورهای ربات

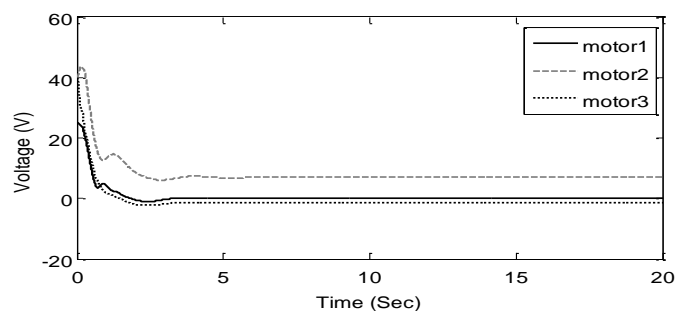
۲-۲-۵ تنظیم

برای بررسی عملکرد تنظیم سیستم کنترل، موقعیت مطلوب مفاصل بر روی ۱ تنظیم شده است. پارامترهای مورد نیاز برای کنترل کننده ها مانند حالت قبل انتخاب شده است و زمان اجرای شبیه سازی

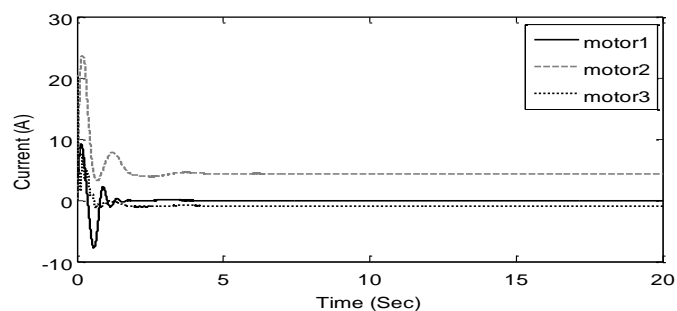
نیز ۲۰ ثانیه است. شکل (۶-۵) خطای تنظیم مفاصل را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود خطای حالت ماندگار تقریباً برابر صفر است و در ابتدا هر ۳ مفصل دارای پایین زدگی اندکی هستند قابل چشم پوشی است. ولتاژ موتورها در شکل (۷-۵) نمایش داده شده است. از آنجایی که خطای اولیه بزرگ است سیگنال کنترلی در ابتدا نیز بزرگ است. در شکل (۸-۵) نیز جریان هر موتور نشان داده شده است که در ابتدا دارای مقدار زیادی هستند که به این جریان اولیه، جریان راه اندازی می گوئیم.



شکل (۶-۵) خطای تنظیم مفاصل



شکل (۷-۵) ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات



شکل (۸-۵) سیگنال جریان موتورهای ربات

نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان بیان کرد که روش کنترل فازی تطبیقی غیر مستقیم با راهبرد کنترل ولتاژ بر روی ربات هنرمند با مفاصل انعطاف پذیر دارای عملکرد ردگیری خوب و همچنین تنظیم مناسب بوده است و نیازی به دو حلقه کنترلی ندارد و به طور مستقیم موقعیت رابط را کنترل می‌کند. مزیت این روش نسبت به روش های دیگر کنترل بر مبنای ولتاژ این است که از دینامیک موتورها نیز بی نیاز است.

فصل ششم

بهبود کنترل مود لغزشی ربات با مفاصل انعطاف پذیر توسط

تخمین گر فازی تطبیقی

در این فصل روش کنترل مود لغزشی بر روی ربات با مفاصل انعطاف پذیر پیاده سازی می شود با این تفاوت که برای بهبود عملکرد این روش از تخمین گر فازی تطبیقی استفاده شده است. راهبرد مورد استفاده مانند فصل های قبل راهبرد کنترل ولتاژ است. در انتها نیز پایداری سیستم کنترلی مورد بررسی قرار می گیرد

۱-۶ طراحی کنترل کننده مود لغزشی - فازی

معادله (۶۶-۲) بیان می کند که معادلات سیستم به فرم همراه نمی باشد. بنابراین، کنترل مود لغزشی مرسوم قابل ارائه نیست. البته بدون در نظر گرفتن دینامیک موتورها، معادلات به فرم همراه بوده و کنترل مود لغزشی مرسوم قابل ارائه است.

در طراحی مود لغزشی معادلات سیستم باید به حالت کلی زیر نوشته شود.

$$q^{(n)} = f(s) + g(s)u \quad (۱-۶)$$

که در آن $s = [q, \dots, q^{(n-1)}]^T$ بردار حالت، $f(s)$ و $g(s)$ توابع اسکالر و $q^{(n)}$ مشتق n ام مفصل q است و u ولتاژ موتورها است.

بنابراین برای طراحی یک کنترل کننده مفصل مستقل باید سیستم رباتیک به صورت مجزا دربیاید ولی با توجه به اثر انعطاف موجود در مفاصل این کار به راحتی صورت نمی گیرد.

طرح جدید کنترل مود لغزشی به صورت زیر ارائه می شود:

با توجه به (۶۴-۲) برای هر موتور، معادله الکتریکی زیر را داریم

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b\dot{\theta}_m = v \quad (۲-۶)$$

که در آن R ، L و K_b پارامترهای موتور و $\dot{\theta}_m$ سرعت موتور و v ولتاژ اعمالی به موتور است. برای ظاهر شدن سرعت مفصل در معادلات، می توان نوشت،

$$\dot{q} - \dot{q} + RI_a + L\dot{I}_a + K_b\dot{\theta}_m = v \quad (۳-۶)$$

معادله (۳-۶) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\dot{q} + F = v \quad (۴-۶)$$

که تابع F در آن عبارت است از

$$F = RI_a + LI_a + K_b \dot{\theta}_m - \dot{q} \quad (۵-۶)$$

حال برای طراحی کنترل مود لغزشی، سطح لغزش را به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$S = e + \lambda \int e dt \quad (۶-۶)$$

که در آن $e = q_d - q$ خطای ردگیری و q_d مسیر مطلوب مفصل است. تابع مثبت معین y را به صورت زیر فرض نمایید:

$$y = \frac{1}{2} S^2 \quad (۷-۶)$$

و با مشتق گرفتن از این تابع، داریم

$$\dot{y} = S\dot{S} \quad (۸-۶)$$

برای آنکه $S \rightarrow 0$ کافی است $\dot{y} < 0$. پس، در نظر می‌گیریم که

$$S\dot{S} = -\alpha |S| \quad (۹-۶)$$

$$\dot{S} \operatorname{sgn}(S) = -\alpha \quad (۱۰-۶)$$

که α مقداری مثبت و $\operatorname{sgn}(S) = S/|S|$ است. با محاسبه \dot{S} از (۶-۶) و جایگذاری آن در (۱۰-۶)

داریم

$$(\dot{e} + \lambda e) \operatorname{sgn}(S) = -\alpha \quad (۱۱-۶)$$

جایگذاری (۴-۶) در (۱۱-۶) می‌دهد

$$(\dot{q}_d + F - v + \lambda e) \operatorname{sgn}(S) = -\alpha \quad (12-6)$$

که در آن F از دو بخش زیر تشکیل شده است

$$F = \bar{F} + \Delta F \quad (13-6)$$

که در آن \bar{F} بخش معلوم سیستم است و ΔF بخش نامعلوم سیستم است که با تخمین‌گر فازی تطبیقی محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن توصیف F در (6-5) می‌توان \bar{F} و ΔF را به صورت زیر بیان کرد:

$$\bar{F} = -\dot{q} \quad (14-6)$$

$$\Delta F = RI_a + LI_a + K_b \dot{\theta}_m \quad (15-6)$$

از (6-15) می‌توان دریافت که ΔF تابعی از جریان موتور I_a ، مشتق آن \dot{I}_a و سرعت موتور $\dot{\theta}_m$ است. به دلیل اینکه ثابت زمانی الکتریکی موتور بسیار کمتر از ثابت زمانی مکانیکی موتور است می‌توان از اثر LI_a صرف نظر نمود. بنابراین با تقریب می‌توان نوشت:

$$\Delta F \approx RI_a + K_b \dot{\theta}_m \quad (16-6)$$

از آنجا که اندازه‌گیری \dot{I}_a با نویز همراه است صرف نظر نمودن از LI_a ، عملکرد سیستم کنترل را نیز بهبود می‌دهد. حال $\bar{\Delta F}$ را که تخمین ΔF است به صورت یک سیستم فازی پیشنهاد می‌شود که

$$\Delta F \approx \bar{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m) \quad (17-6)$$

با جایگذاری (6-17) و (6-14) در (6-13)، و سپس (6-13) در (6-12) بدست می‌آید

$$(\dot{q}_d - \dot{q} + \bar{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m) - v + \lambda e) \operatorname{sgn}(S) = -\alpha \quad (18-6)$$

با ضرب طرفین (6-12) در $\operatorname{sgn}(S)$ و اینکه $\operatorname{sgn}(S) \operatorname{sgn}(S) = 1$ ،

قانون کنترل v به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$v = \dot{e} + \lambda e + \overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m) + \alpha \operatorname{sgn}(S) \quad (19-6)$$

قانون کنترل v ، قانون کنترل مود لغزشی- فازی نامیده می‌شود که کاملاً متفاوت با قانون کنترل مود لغزشی مرسوم است. برای اجرای کنترل مود لغزشی مرسوم باید حدود عدم قطعیت‌ها معلوم باشند ولی قانون کنترل مود لغزشی جدید با کمک تخمین‌گر فازی $\overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m)$ ، نیازی به حدود عدم قطعیت ندارد.

برای طراحی تخمین‌گر فازی، ورودی‌های سیستم فازی $\overline{\Delta F}$ به صورت زیر نام‌گذاری می‌شوند:

$$x_1 = I_a \quad x_2 = \dot{\theta}_m \quad (20-6)$$

با در نظر گرفتن سه تابع عضویت برای هر ورودی، کل فضا را می‌توان با ۹ قانون فازی پوشش داد. قوانین به فرم ممدانی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\text{قانون } l: \text{ اگر } x_1 \text{ برابر با } A_l \text{ و } x_2 \text{ برابر با } B_l \text{ باشد، آنگاه } \overline{\Delta F} \text{ برابر } C_l \text{ است} \quad (21-6)$$

که در آن $l = 1, \dots, 9$ است و برای هر ورودی سه تابع تعلق مثبت P ، صفر Z و منفی N مانند زیر در نظر می‌گیریم

$$\mu_P(x_1) = \begin{cases} 0 & x_1 \leq 0 \\ 2x_1^2 & 0 \leq x_1 \leq 0.5 \\ 1 - 2(x_1 - 1)^2 & 0.5 \leq x_1 \leq 1 \\ 1 & x_1 \geq 1 \end{cases} \quad \mu_N(x_1) = \begin{cases} 1 & x_1 \leq -1 \\ 1 - 2(x_1 + 1)^2 & -1 \leq x_1 \leq -0.5 \\ 2x_1^2 & -0.5 \leq x_1 \leq 0 \\ 0 & x_1 \geq 0 \end{cases} \quad (22-6)$$

$$\mu_Z(x_1) = \exp(-x_1^2 / (2\sigma^2)), \quad \sigma = 0.5$$

برای ورودی x_2 نیز توابع به همین صورت در نظر گرفته می‌شود. توابع تعلق خروجی به صورت گوسین در نظر گرفته می‌شود که به صورت زیر است.

$$\mu_{C_l}(\overline{\Delta F}) = \exp\left(-\left(\overline{\Delta F} - \hat{y}_l\right)^2 / (2\sigma^2)\right) \quad (23-6)$$

که در آن \hat{y}_l مرکز C_l است.

جدول قوانین نیز به صورت زیر است:

جدول (۱-۶) قوانین فازی

X ₂ X ₁	P	Z	N
P	PH	PM	Z
Z	PM	Z	NM
N	Z	NM	NH

با استفاده از (۲۱-۶) تا (۲۳-۶) و در نظر گرفتن موتور استنتاج ممدانی، فازی ساز منفرد و غیرفازی- ساز میانگین مراکز $\overline{\Delta F}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\overline{\Delta F} = \sum_{l=1}^9 \hat{y}_l \psi_l(x_1, x_2) = \hat{\mathbf{y}}^T \boldsymbol{\psi}(x_1, x_2) \quad (24-6)$$

که در آن $\hat{\mathbf{y}} = [\hat{y}_1 \dots \hat{y}_9]^T$ و $\boldsymbol{\psi} = [\psi_1 \dots \psi_9]^T$ است. مقدار مثبتی دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\psi_l(x_1, x_2) = \frac{\mu_{A_l}(x_1) \mu_{B_l}(x_2)}{\sum_{l=1}^9 \mu_{A_l}(x_1) \mu_{B_l}(x_2)} \quad (25-6)$$

که در آن $\mu_{A_l}, \mu_{B_l} \in [0, 1]$ است. پس، $|\psi_l(x_1, x_2)| \leq 1$ است. بنابراین، نتیجه ۱. تابع فازی $\boldsymbol{\psi}$ محدود است.

با توجه به این که سیستم‌های فازی را می‌توان به عنوان تخمین‌گر عمومی در نظر گرفت ΔF را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\Delta F = \mathbf{y}^T \boldsymbol{\psi}(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (26-6)$$

که در آن $\mathbf{y} = [y_1 \dots y_9]^T$ است. همچنین ε به عنوان خطای تقریب در نظر گرفته می‌شود که طبق

قضیه تقریب عمومی مقدار محدودی دارد. یعنی

نتیجه ۲. خطای تقریب ε محدود است.

برای بدست آوردن قانون تطبیق ابتدا با جایگذاری قانون کنترل (۶-۱۹) در (۶-۴) سیستم حلقه بسته را تشکیل می‌دهیم

$$\dot{q} + F = \dot{e} + \lambda e + \overline{\Delta F}(I_a, \dot{\theta}_m) + \alpha \operatorname{sgn}(S) \quad (۶-۲۷)$$

سپس با جایگذاری (۶-۱۳)، (۶-۱۴)، (۶-۲۴) و (۶-۲۶) در (۶-۲۷) بدست می‌آید.

$$\dot{e} = -\lambda e - \alpha \operatorname{sgn}(S) + (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \boldsymbol{\psi}(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (۶-۲۸)$$

حال برای به دست آوردن قانون تطبیق به منظور محاسبه $\hat{\mathbf{y}}$ تابع مثبت معین V را به صورت زیر پیشنهاد می‌دهیم.

$$V = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2\gamma} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \quad (۶-۲۹)$$

که در آن γ مقداری مثبت است. \dot{V} به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{V} = e \dot{e} - \frac{1}{\gamma} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \dot{\hat{\mathbf{y}}} \quad (۶-۳۰)$$

با جایگذاری (۶-۳۰) در (۶-۲۸) به دست می‌آید:

$$\dot{V} = -\lambda e^2 + e \left((\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \boldsymbol{\psi} + \varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S) \right) - \frac{1}{\gamma} (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \dot{\hat{\mathbf{y}}} \quad (۶-۳۱)$$

برای محاسبه قانون تطبیق، (۶-۳۱) را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم.

$$\dot{V} = -k_p e^2 + (\mathbf{y}^T - \hat{\mathbf{y}}^T) \left(e \boldsymbol{\psi} - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\mathbf{y}}} \right) + e (\varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S)) \quad (۶-۳۲)$$

با پیشنهاد قانون تطبیق،

$$\dot{\hat{y}} = \gamma e \psi \quad (33-6)$$

پارامترهای سیستم فازی چنین محاسبه می‌شوند.

$$\hat{y} = \gamma \int_0^t e \psi dt + \hat{y}(0) \quad (34-6)$$

که در آن $\hat{y}(0)$ مقدار اولیه پارامترها است. در این صورت،

$$\dot{V} = -K_p e^2 + e(\varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S)) \quad (35-6)$$

اگر $\dot{V} < 0$ باشد خطای ردگیری کاهش پیدا می‌کند. برای آنکه $\dot{V} < 0$ باشد کافی است

$$e(\varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S)) \leq K_p e^2 \quad (36-6)$$

با توجه به آنکه $e(\varepsilon - \alpha \operatorname{sgn}(S)) \leq |e|(|\varepsilon| + \alpha)$ نامعادله (36-6) برقرار خواهد بود اگر

$$|e|(|\varepsilon| + \alpha) \leq K_p e^2 \quad (37-6)$$

که می‌شود

$$\frac{|\varepsilon| + \alpha}{K_p} \leq |e| \quad (38-6)$$

بدین معنا که اگر $\frac{|\varepsilon| + \alpha}{K_p} \leq |e|$ باشد آنگاه $\dot{V} < 0$ برقرار می‌شود. پس مقدار نهایی اندازه خطای

ردگیری با کاهش $(|\varepsilon| + \alpha) / K_p$ کاهش پیدا می‌کند.

۲-۶ شبیه‌سازی روش کنترل مود لغزشی فازی

قانون کنترل بر روی ربات هنرمند با مفاصل انعطاف پذیر با ۳ درجه آزادی پیاده سازی می‌شود. سیستم

کنترل به صورت مفصل مستقل به ربات اعمال می‌شود. بنابراین برای کنترل موتورهای هر مفصل از

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

گرفت.

۱-۲-۶ کنترل ردگیری

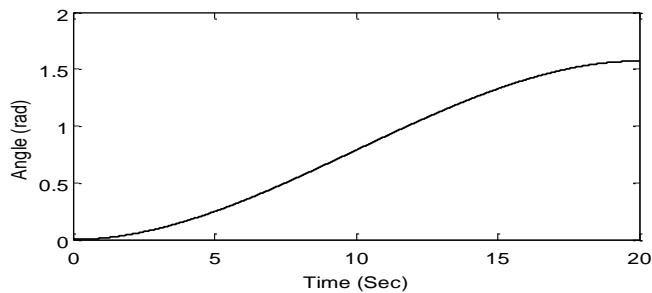
قانون کنترل (۱۹-۶) برای ردیابی مسیر شکل (۱-۶) بر روی ربات شبیه سازی می شود. پارامترهای قانون کنترل، با روش سعی و خطا برای دستیابی به عملکرد بهتر به صورت $\alpha = 0.05$ و $\lambda = 140$ داده شده اند. در شکل (۲-۶) عملکرد کنترل کننده مشاهده می شود که به خوبی اثر انعطاف در مفاصل خنثی شده است.

ولتاژ اعمالی به موتورها نیز در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. به خاطر اینکه ربات زیر بار قرار دارد در لحظه شروع موتورها به ولتاژ زیادی احتیاج دارند که به مرور زمان این ولتاژ کاهش پیدا می کند. مقدار اولیه ولتاژ به مقدار اولیه گشتاور وابسته است به صورتی که اگر گشتاور کم باشد ولتاژ نیز کم است. شکل (۴-۶) جریان موتورها را نشان می دهد. تخمین عدم قطعیت در شکل (۵-۶) برای هر مفصل نشان داده شده است.

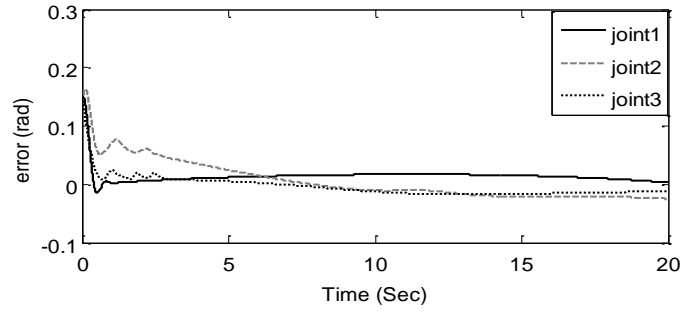
مسیر مطلوب برای ردگیری مفاصل به صورت زیر طراحی می شود:

$$q_d = (3\pi/800)t^2 - (\pi/8000)t^3 \quad (۲۵-۵)$$

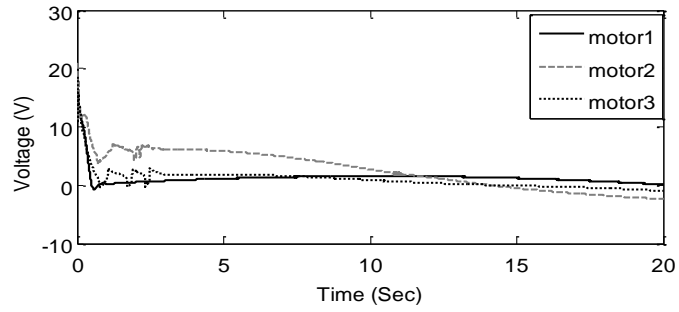
که در زیر مشاهده می کنید



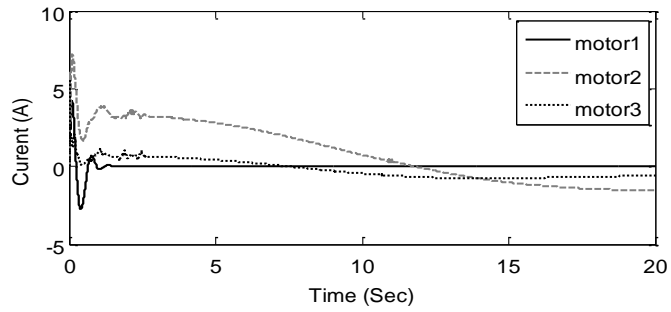
شکل (۱-۶) مسیر مطلوب برای ردگیری



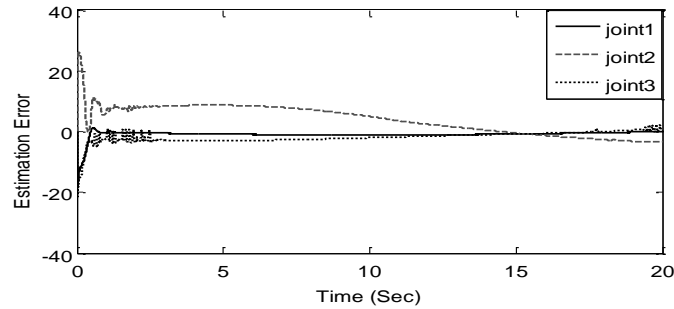
شکل (۲-۶) خطای ردگیری در مفاصل



شکل (۳-۶) سیگنال ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات



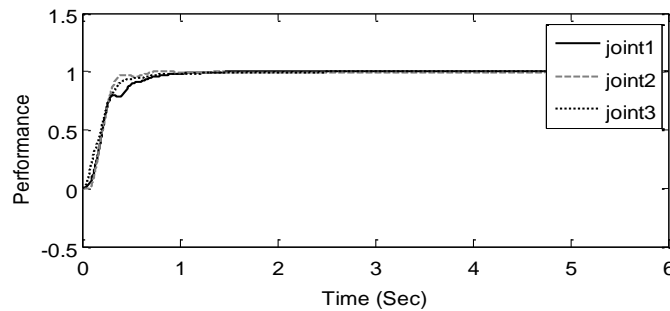
شکل (۴-۶) سیگنال جریان موتورهای ربات



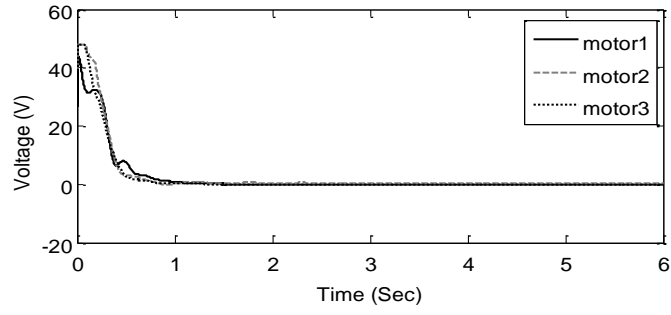
شکل (۵-۶) خطای تخمین تابع

۲-۲-۵ تنظیم

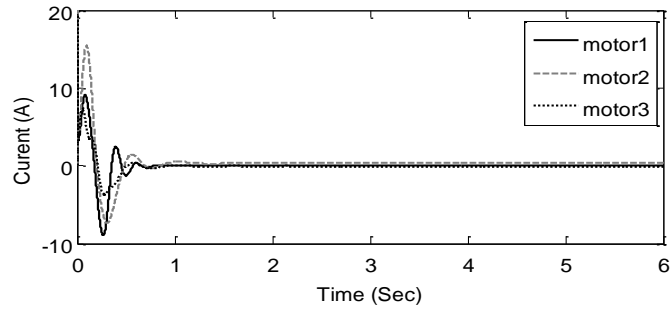
این شبیه‌سازی به بررسی عملکرد قانون کنترل (۶-۱۹) برای حالت تنظیم می‌پردازد. پارامترهای قانون کنترل، با روش سعی و خطا برای دستیابی به عملکرد بهتر به صورت $\alpha = 0.05$ و $\lambda = 70$ داده شده‌اند. مقدار مطلوب موقعیت مفصل 1rad است. در شکل (۶-۶) عملکرد کنترل کننده مشاهده می‌شود که در مدت زمان ناچیزی موقعیت مفاصل به مقدار مطلوب رسیده‌اند. همچنین در شکل (۶-۷) ولتاژ اعمالی به موتورها را برای حالت تنظیم مشاهده می‌شود. جریان موتورها در شکل (۶-۸) نمایش داده شده است. شکل (۶-۹) نیز مقدار تخمین عدم قطعیت را برای هر مفصل نشان می‌دهد.



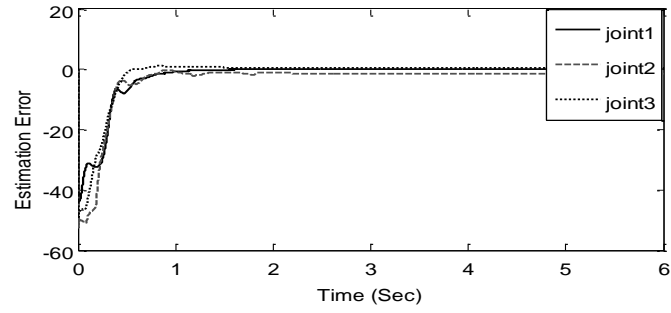
شکل (۶-۶) عملکرد تنظیم مفاصل



شکل (۶-۷) ولتاژ اعمالی به موتورهای ربات



شکل (۶-۸) سیگنال جریان موتورهای ربات



شکل (۶-۹) خطای تخمین تابع

نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان بیان کرد که روش کنترل مود لغزشی فازی با راهبرد کنترل ولتاژ بر روی ربات هنرمند با مفاصل انعطاف پذیر دارای عملکرد ردگیری خوب و همچنین تنظیم مناسب بوده است و شناساگر فازی به خوبی سیستم را شناسایی کرده و نیازی به دو حلقه کنترلی ندارد و به طور مستقیم موقعیت رابط را کنترل می‌کند. مزیت این روش نسبت به کنترل بر مبنای گشتاور این است که دینامیک موتورها نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

فصل هفتم

کنترل فازی بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور

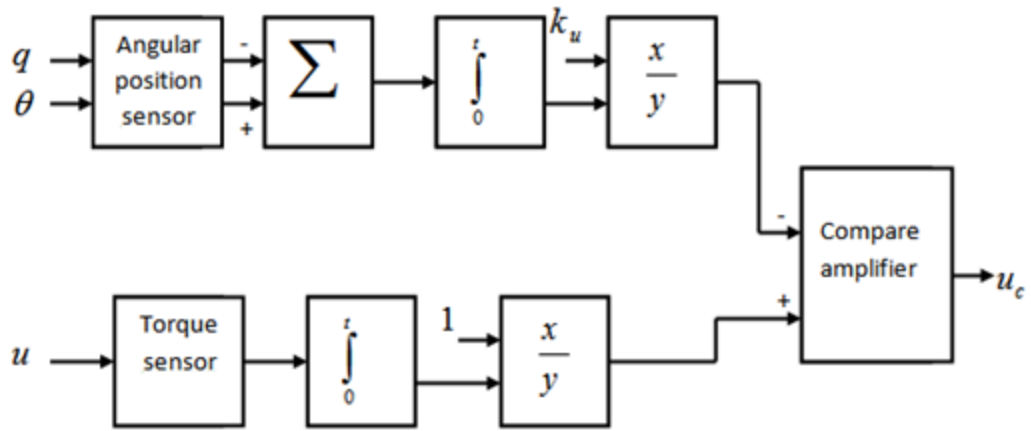
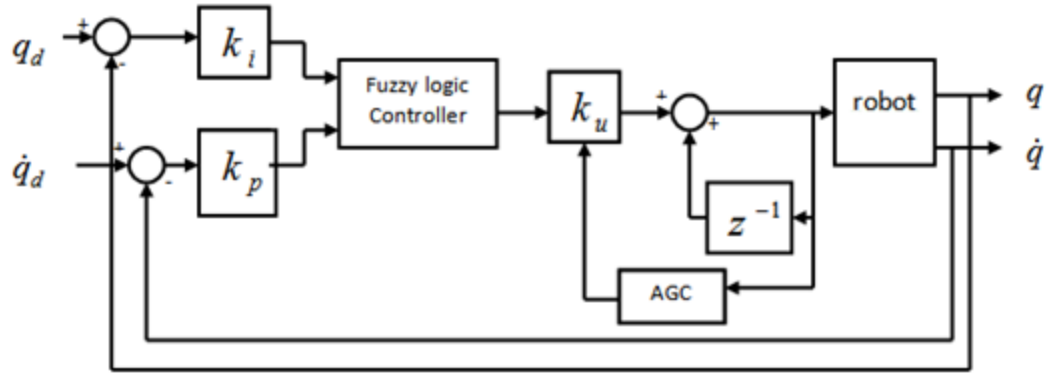
در این فصل روش کنترل فازی بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور استفاده شده در [۶۸]، معرفی و شبیه-سازی می‌شود و عملکرد این کنترل‌کننده نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها نیز مزایای راهبرد کنترل گشتاور را نسبت به راهبرد کنترل ولتاژ بیان می‌شود.

۷-۱ طراحی کنترل‌کننده فازی

کنترل‌کننده استفاده شده در [۶۸] از نوع کنترل‌کننده‌های فازی، تناسبی، انتگرالی است که اصلاح یافته است. در خروجی کنترل‌کننده فازی ضریبی قرار داده شده است که با توجه به تغییرات سیستم این ضریب تغییر می‌کند یا به عبارتی خود را با سیستم تطبیق می‌دهد. جزئیات طراحی کنترل‌کننده در [۶۸] ذکر شده است.

۷-۲ شبیه‌سازی روش کنترلی

قانون کنترل بر روی ربات اسکارا با مفاصل انعطاف پذیر پیاده سازی می‌شود. سیستم کنترل به صورت مفصل مستقل به ربات اعمال می‌شود. بنابراین برای کنترل موتورهای هر مفصل از یک کنترل‌کننده جداگانه استفاده می‌شود. سپس عملکرد سیستم کنترل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دیاگرام سیستم کنترل فازی بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور در شکل زیر نشان داده شده است. همچنین جدول ضرایب k_p و k_i برای هر کنترل‌کننده را در زیر مشاهده می‌کنید.



شکل (۱-۷) بلوک دیاگرام سیستم کنترلی

جدول (۱-۷) مقادیر ضرایب کنترل کننده

کنترل کننده	۱	۲	۳	۴
k_i	۰.۰۴	۰.۰۲	۱.۵	۱.۵
k_p	۰.۰۵	۰.۴	۰.۲۵	۰.۵

۱-۲-۷ کنترل ردگیری

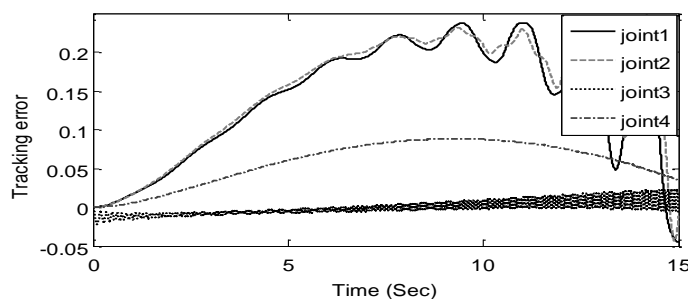
مسیر مطلوب برای ردگیری مفاصل اول و دوم و چهارم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$q_d = (\pi/150)t^2 - (\pi/3375)t^3 \quad (۱-۷)$$

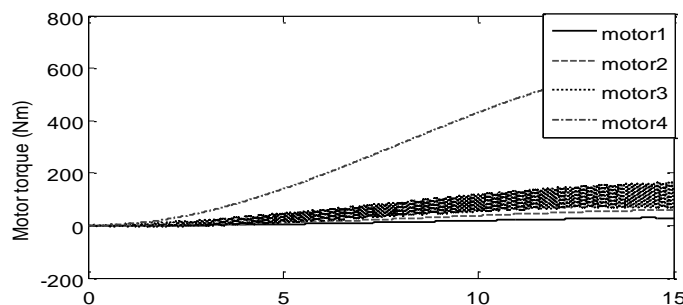
و برای مفصل سوم که به صورت کشویی است مسیر مطلوب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$q_d = (\pi/750)t^2 - (\pi/16875)t^3 \quad (۲-۷)$$

در شکل (۲-۷) عملکرد سیستم مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود در مفصل اول و دوم با گذشت زمان خطا بیشتر شده و حالت نوسانی پیدا می‌کند که این نیز به دلیل خاصیت انعطاف در مفاصل است. مفصل سوم نیز دارای نوسانات بسیاری است که نیروی جاذبه نیز بر روی آن تاثیر دارد. در شکل (۳-۷) نیز گشتاور اعمالی به موتورها نشان داده شده است. در این شکل نیز مفصل سوم دارای نوسانات بسیاری است و همچنین مفصل چهارم دارای مقدار گشتاور بسیار زیادی است.



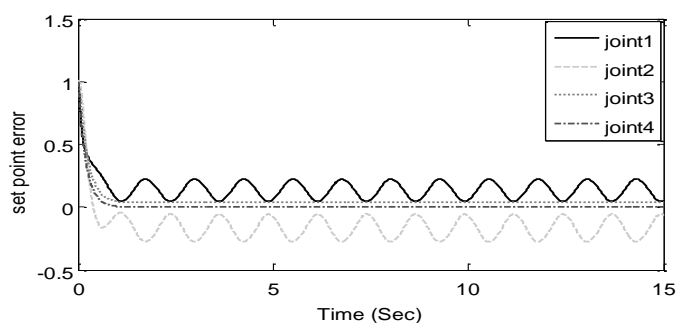
شکل (۲-۷) خطای ردگیری در مفاصل



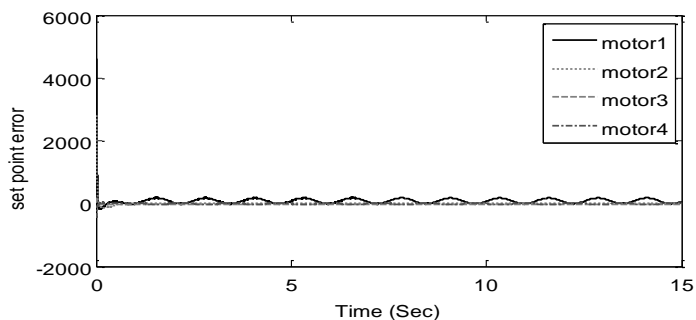
شکل (۳-۷) گشتاور اعمالی به موتورها

۲-۲-۷ تنظیم

برای بررسی عملکرد تنظیم سیستم کنترل، موقعیت مطلوب مفاصل بر روی 1 rad تنظیم شده است. پارامترهای مورد نیاز برای کنترل کننده ها مانند حالت قبل انتخاب شده است و زمان اجرای شبیه سازی نیز ۱۵ ثانیه است. شکل (۴-۷) خطای تنظیم مفاصل را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود مفصل اول و دوم دارای نوسان هستند که به دلیل وجود اثر انعطاف و همچنین باری که بر این مفاصل است به وجود می آید. شکل (۵-۷) گشتاور اعمالی به موتورها را نشان می دهد که در لحظه شروع دارای مقدار بسیار زیادی است که در عمل با مشکل مواجه می شویم.



شکل (۴-۷) خطای تنظیم در مفاصل



شکل (۵-۷) گشتاور اعمالی به موتورها

نتیجه‌گیری

در این فصل به بررسی کنترل ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور پرداختیم. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی معلوم است، این روش دارای عملکرد مناسبی نبوده زیرا خطای موجود قابل چشم‌پوشی نبوده و همچنین دارای نوسانات بسیاری نیز است و همچنین برای شروع حرکت موتورها گشتاور بسیار بالایی احتیاج است ولی در راهبرد کنترل ولتاژ خطای موجود قابل چشم‌پوشی بوده و همچنین برای حرکت موتورها ولتاژ نرم با مقدار کمی لازم است که از نظر عملی مناسب‌تر است

فصل هشتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۸-۱ نتیجه‌گیری‌ها

در این پایان‌نامه، مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا و ربات هنرمند با مفاصل انعطاف‌پذیر، استراتژی کنترل ولتاژ، کنترل فازی تطبیقی مستقیم و غیر مستقیم و همچنین کنترل مود لغزشی اصلاح شده به کمک تخمین‌گر فازی تطبیقی مورد توجه و بررسی قرار گرفته‌اند، تا به هدف اصلی پایان‌نامه یعنی کنترل فازی تطبیقی بازوهای ماهر رباتیک با مفاصل انعطاف‌پذیر به خوبی توجه گردد. هر یک از روش‌های کنترلی مذکور طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی شده است و به ارزیابی عملکرد سیستم کنترل در موارد ردگیری و تنظیم پرداخته شده است. روش‌های کنترل ولتاژ، آزاد از مدل ربات بوده و به صورت مفصل مستقل به سیستم اعمال گردیده است در نتیجه کنترل چند متغیره ربات به کنترل جداگانه هر مفصل تبدیل شده است که علاوه بر سادگی، سهم بسزایی در کاهش حجم محاسبات دارد. ضعف روش‌های مبتنی بر کنترل گشتاور این است که دینامیک محرکه‌ها را در نظر نمی‌گیرند ولی در مقابل روش‌های مبتنی بر استراتژی کنترل ولتاژ به نقش موتورها توجه اساسی دارند. روش‌های مبتنی بر کنترل ولتاژ دارای عملکرد مناسب‌تری در ردگیری و تنظیم هستند. از آنجا که در استراتژی کنترل ولتاژ نیازی به مدل پیچیده ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر نیست می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کنترل کننده فازی تطبیقی بر مبنای استراتژی کنترل ولتاژ نسبت به کنترل کننده فازی تطبیقی بر مبنای استراتژی کنترل گشتاور ترجیح داده می‌شود. با توجه به اطلاعات در دسترس برای طراح و اهداف طراحی که ممکن است دقت بیشتر در عملکرد ردگیری یا ساده بودن ساختار کنترل کننده مورد توجه باشد هر یک از کنترل کننده‌های فازی تطبیقی مستقیم یا فازی تطبیقی مستقیم می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرند.

اگرچه کنترل مود لغزشی یکی از روش‌های مقاوم کنترلی سیستم‌های غیر خطی نامعین است اما برای طراحی باید حدود عدم قطعیت‌ها معلوم باشد. همچنین سیگنال کنترل دارای لرزش است که در عمل مطلوب نیست. برای غلبه بر این ایرادها، طرح جدید کنترل مود لغزشی ارائه گردید. در این طرح از تخمین‌گر فازی تطبیقی استفاده کرده و نیازمند محاسبه توابع محدودیت نمی‌باشد و پدیده لرزش کنترل حذف می‌شود. هم‌چنین، از استراتژی کنترل ولتاژ استفاده می‌نماید که ساده‌تر و عملکرد بهتری دارد.

۲-۸ پیشنهادها

پیشنهادهای زیر برای ادامه تحقیق ارائه می‌گردد:

- ❖ می‌توان با بررسی عملکرد سیستم فازی تطبیقی به جای تطبیق همه پارامترها تنها پارامترهای مورد نیاز را تطبیق نمود و سایر پارامترها را به صورت ثابت در نظر گرفت.
- ❖ می‌توان برای انتخاب پارامترهای طراحی از روش‌های هوشمند استفاده کرد.
- ❖ از آنجایی که کنترل ربات در فضای کار مورد توجه قرار گرفته است می‌توان تمامی روش‌های مذکور را در فضای کار نیز پیاده‌سازی کرد.
- ❖ با توجه به گسترش علم رباتیک در بخش ربات‌های سیار می‌توان بازوهای ماهر رباتیک با مفاصل انعطاف پذیر را بر روی بستر سیار قرار داده و متدهای کنترلی را بر روی آن پیاده‌سازی نمود.
- ❖ می‌توان به کاربردهای ربات‌های انعطاف‌پذیر در علم توان‌بخشی توجه کرده و کنترل پیشنهادی فازی را بر روی این ربات‌ها نیز پیاده کرد.

- [1] Spong M. W and Vidyasager M (1989) "Robot Dynamics and Control" John Wiley and Sons, Inc.
- [2] Fateh M. M (2008) "On the voltage-based control of robot manipulators" International Journal of Control, Automation, and Systems, 6, 702-712.
- [3] Siciliano B (1998) "Control in robotics: Open problems and future directions" IEEE Int. Conf. on Control Applications, vol. 1, pp. 81-81, Naples Univ.
- [4] Liu H, Meusel P, Butterfass J and Hirzinger G (1998) "DLR's multisensory articulated hand. Part II: The parallel torque/position control system" IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 2087-2093, Wessling.
- [5] Wilson G. A and Irwin G. W (1993) "Tracking control of manipulators with elastic joints" IEEE Int. Conf. on Control Applications, pp. 160-170, Belfast.
- [6] 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, pp. 281-286.
- [7] Williamson M. M (1990) "Series elastic actuators", A. I. Technical Report.
- [8] Bar-Cohen Y, Xue T, Shahinpoor M, Simpson J and Smith J (1998) "Flexible low mass robotic arm actuated by electro active polymers and operated equivalently to human arm and hand" The 3rd Conf. and Exposition/Demonstration on Robotic for Challenging Environments, New Mexico.
- [9] Carroll J and Dawson D. M (1991) "Composite control of direct-drive manipulators under motion constraints" SSST, Southeastern Symposium on System Theory, pp. 182-186.
- [10] Asada H and Youcef-Tomei K (1987) "Direct drive robots: Theory and practice" MIT Press.
- [11] Spong M. W, Khorasani K and Kokotovic P. V (1987) "An integral manifold approach to the feedback control of flexible joint robots" IEEE Trans. on Robotics and Automation, 3, 291-299.
- [12] Lin L. C and Yuan K (1990) "Control of flexible joint robots via external linearization Approach" Journal of Robotic Systems, 7, 1-22.

- [13] Khorasani K (1992) "Adaptive control of flexible joint robot" IEEE Trans. on Robotics and Automation, 8, 200-267.
- [14] Isidori A (1989) "Nonlinear control system" Springer-Verlag, Heidelberg
- [15] Shen Y, Cai W.J and Li S (2010) "Multivariable process control: decentralized, decoupling or sparse" Ind. Eng. Chem. Res. 49, 771-771
- [16] Hsua S.H and Fua L.C (2006) "A fully adaptive decentralized control of robot manipulator" Automatica 42, 1771-1777
- [17] Fateh M. M and Fateh S. (2012) "Decentralized direct adaptive fuzzy control of robots using voltage control strategy" Nonlinear Dynamics, 70, 1919-1930.
- [18] seraji H (1989) "decentralized adaptive control of manipulators: theory simulation and experimentation" IEEE Trans. Robot. Autom. 5, 183-200.
- [19] Qu Z and Dawson D.M (1996) "Robust tracking control of robot manipulator" IEEE, New York
- [20] Abdallah C, Dawson D.M, Dorato P and Jamshidi M (1991) "Survey of robust control for rigid roots" Control syst. Mag. 11, 24-30.
- [21] Cheah C.C, Hirano M, Kawamura S and Arimoto S (2003) "Approximate Jacobian control for robots with uncertain kinematics and dynamics" IEEE Trans. Robot. Autom. 19, 692-702
- [22] Fateh M.M and Soltanpur M.R (2009) "Robust Task-space control of robot manipulator under imperfect transformation of control space" Int. J. Innov. Compute. Info. Control. 5(11A), 3949-3960.
- [23] James T.I and Huang T (1994) "Robust nonlinear control of robot manipulator" Robotics and Automation, IEEE international conference, 3, 2083-2088
- [24] Fateh M.M (2010) "Proper uncertainty bound parameter to robust control of electrical manipulators using nominal model" Nonlinear Dynamics, 61, 600-666
- [25] Fateh M.M (2011) "Robust control of flexible joint robots using voltage control strategy" Nonlinear Dynamics, 67, 1020-1037
- [26] Soltine J and Li W (1991) "Applied nonlinear control", Prentice Hall.
- [27] Yoo B.K and Ham W.C (2000) "adaptive control of robot manipulator using fuzzy Compensator" IEEE Trans. On fuzzy system, 8, 186-199

- [୪୪] Wang L.X (୧୯୯୬) “A course in fuzzy system and control” Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- [୪୫] Lim C.M and Hiyama T (୧୯୯୧) “Application of fuzzy logic control for robot manipulators” IEEE Trans, Robot. Autom. ୧, ୬୪୪-୬୫୧
- [୪୬] Ham C, Qu Z and Johnson R (୨୦୦୦) “Robust fuzzy control for robot manipulators” IEEE Proc., Control theory Appl. ୧୪୮, ୨୧୨-୨୧୬
- [୪୭] Fateh M.M (୨୦୧୦) “Robust fuzzy control of electrical manipulators” J. Intell. Robot. System, ୬୦, ୪୧୦-୪୩୪.
- [୪୮] Fateh M.M (୨୦୧୦) “Fuzzy Task-space control of welding robot” International Journal of Robotics and Automation, ୨୦, ୩୮୨-୩୮୪
- [୪୯] Wang L.X and Mendel J.M (୧୯୯୨) “Fuzzy basis function, universal approximation and orthogonal least squares learning” IEEE Trans. Neural Net Work, ୩, ୪୦୮-୪୧୪
- [୫୦] Hwang J.P and Kim E (୨୦୦୬) “Robust tracking control of an electrically driven robot: adaptive fuzzy logic approach” IEEE Trans. Fuzzy Syst, ୧୪, ୨୩୨-୨୪୮
- [୫୧] Kim E (୨୦୦୪) “Output feedback tracking control of robot manipulator with model uncertainty via adaptive fuzzy logic” IEEE Trans. Fuzzy Syst, ୧୨, ୩୬୪-୩୮୬
- [୫୨] Wang L.X (୧୯୯୪) “Adaptive fuzzy system and control: design and stability analysis” Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- [୫୩] Hyun C, Park C and Kim S (୨୦୧୦) “TS Fuzzy model based indirect adaptive fuzzy observer and controller design” Information sciences, ୧୪୦, ୨୩୧୪-୨୩୨୮.
- [୫୪] Yu H and Lloyd S (୧୯୯୮) “Combined direct and indirect adaptive control of constrained robots” Int. J. Control., ୬୪, ୯୦୦-୯୧୦.
- [୫୫] Wai R and Yang Z (୨୦୦୪) “Adaptive fuzzy neural network control design via a T-S fuzzy model for robot manipulator including actuator dynamics” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern,B, ୩୪, ୧୩୨୬-୧୩୪୬
- [୫୬] Cesareo G and Marino R (୧୯୮୪) “On the controllability properties of elastic robots” Int. Conf. on Analysis and Optimization of Systems.
- [୫୭] Cesareo G and Marino R (୧୯୮୪) “On the controllability of elastic robots” INRIA Int. Conf., Lecture Notes in Control and Inf. Sci., Springer-Verlag.

- [٤٢] Tomei P, Nicosia S and Ficola A (١٩٨٦) “An approach to the adaptive control of elastic at joints robots” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. ٥٥٢-٥٥٨.
- [٤٣] Widmann G. R and Ahmad S (١٩٨٦) “Control system design of robots with flexible joints” Recent Trends in Robotics: Modeling, Control and Education.
- [٤٤] Widmann G and Ahmad S (١٩٨٧) “Control of industrial robots with flexible joints” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. ١٥٦١-١٥٦٦.
- [٤٥] Gebler B (١٩٨٧) “Feed-Forward control strategy for an industrial robot with elastic links and joints” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. ٩٢٣-٩٢٨.
- [٤٦] Forrest-Barlach M. G and Babcock M (١٩٨٧) “Inverse dynamics position control of a compliant manipulator” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. ١٩٦-٢٠٥.
- [٤٧] Readman M. C and Belanger P. R (١٩٩٠) “Analysis and control of a flexible joint robot” IEEE Int. Conf. on Decision and Control, pp. ٢٥٥١-٢٥٥٩.
- [٤٨] Oh J. H and Lee J. S (١٩٩٧) “Control of flexible joint robot system by backstepping design Approach” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. ٣٤٣٥-٣٤٤٠.
- [٤٩] Kim H and Parker J. K (١٩٩٣) “Artificial neural network for identification and tracking control of a flexible joint single link robot” IEEE SSST, Southeastern Symposium on System Theory, pp. ٢٣٣-٢٣٧.
- [٥٠] Ge S. S and Postlethwaite I (١٩٩٥) “Adaptive neural network controller design for flexible joint robots using singular perturbation technique” IEEE Trans. on Inst. Measurement and Control, ١٧, ١٢٠-١٣١
- [٥١] Kwan C. M, Lewis F. L and Kim Y. H (١٩٩٥) “Robust neural network control of flexible joint robot” IEEE Int. Conf. on Decision and Control, pp. ١٢٩٦-١٣٠١.
- [٥٢] Zeman V, Patel R. V and Khorasani K (١٩٩٧) “Control of a flexible-joint robot using neural networks” IEEE Trans. on Control Systems Technology, ٥, ٤٥٣-٤٦٢

- [٥٣] Santibanez V, Kelly R and Llama M.A (٢٠٠٥) "A novel global asymptotic stable set point fuzzy controller with bounded torques for robot manipulator" IEEE Trans. Fuzzy Syst, ١٣, ٣٦٢-٣٧٢
- [٥٤] Kim E (٢٠٠٤) "output feedback tracking control of robot manipulator with model uncertainty via adaptive fuzzy logic" IEEE Trans. Fuzzy Syst., ١٢, ٣٦٨-٣٧٨
- [٥٥] Jafarov E.M and Parlakcy M.N.A (٢٠٠٥) "A new variable structure PID controller design for robot manipulators" IEEE Trans. Control Syst. Technol., ١٣, ١٢٢-١٣٠
- [٥٦] Chen B.S, Uang H and Tseng C.S (١٩٩٨) "Robust tracking enhancement of robot system including motor dynamics: A fuzzy based dynamic game approach" IEEE Trans. Fuzzy Syst., ٦, ٥٣٨-٥٥٢
- [٥٧] Hwang J.P and Kim E (٢٠٠٦) "Robust tracking control of an electrically driven robot: adaptive fuzzy logic approach" IEEE Trans. Fuzzy Syst., ١٤, ٢٣٢-٢٤٧
- [٥٨] Wai R.J (٢٠٠٤) "Intelligent tracking control for robot manipulator including actuator dynamic via TSK- type fuzzy neural network" IEEE Trans. Fuzzy Syst., ١٢, ٥٥٢-٥٦٠
- [٥٩] Cho Y.W, Seo K.S and Lee H.J (٢٠٠٧) "A direct adaptive fuzzy control of nonlinear systems with application to robot manipulator tracking control" Int. J. Control. Autom. Syst. ٥, ٦٣٠-٦٤٢
- [٦٠] Fateh M.M (٢٠١٠) "Robust voltage control of electrical manipulator in task space" International Journal of Innovative Computing, information and control, ٦, ٢٦٩١-٢٧٠٠
- [٦١] Fateh M.M (٢٠١١) "Nonlinear control of flexible joint robot" Nonlinear Dynamics, ٦٧, ٢٥٤٩-٢٥٥٩
- [٦٢] Kordasz M, nski R, Przybyła M and Sauer P (٢٠١١) "Active Disturbance Rejection Control for a Flexible-Joint Manipulator" chapter ٢١ of Robot Motion and Control, LNCIS ٤٢٢, ٢٤٧-٢٥٦
- [٦٣] Fateh M.M (٢٠٠٧) "A novel formulation of inertia tensor using skew symmetric matrices" WSEAS Transaction on systems, ١, ٢٢٩-٢٣٤
- [٦٤] Spong M.W, Hutchinson S and Vidyasagar M (٢٠٠٦) "Robot modeling and control" John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

[٦٥] مارک اسپانگ، " دینامیک و کنترل ربات"، ترجمه دکتر محمد مهدی فاتح، انتشارات دانشگاه صنعتی

[۶۶] لي وانگ، "سيستمهاي فزي و كنترل فزي"، ترجمه دكتور محمد تشنه لب، نيما صفاريور و داريوش افروي، انتشارات دانشگاه صنعتي خواجه نصير الدين طوسي، ۱۳۷۸