

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

کنترل فازی-تطبیقی بهینه دستگاه CNC

ابراهیم عباس زاده

استاد راهنما:

دکتر محمد حدادظریف

شهریور ۹۲



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۸۰۸۷/آ.ت.ب
تاریخ: ۹۲/۰۶/۲۶
ویرایش: -----

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای:

ابراهیم عباس زاده رشته: برق گرایش: کنترل

تحت عنوان: کنترل فازی تطبیقی بهینه دستگاه CNC

که در تاریخ ۹۲/۰۶/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: عالی) (امتیاز: ۱۹۲۰) دفاع مجدد مردود

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

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

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر محمد رضا ذری	استاد	
۲- استاد مشاور	---	---	---
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	محمد علی مهرزاد	استاد	
۴- استاد ممتحن	مرتضی زاهد	استاد	
۵- استاد ممتحن	محمد علی ذری	استاد	

رئیس دانشکده:

تعهد نامه

اینجانب **ابراهیم عبدین زاده موزی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **فیزیکی برق کنترل** دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

کنترل فیزیکی تطبیق همبند با سن CNC

تحت راهنمایی آقای دکتر **محمد علی زین** متعهد می شوم :

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

تاریخ: ۹۲، ۴، ۲۲
امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

بمنظور بهره‌مندی از مزایای کنترل خطی‌سازی پسخوردی و کنترل فازی و همچنین اجتناب از محدودیتهای این روشها، این پایان‌نامه یک طرح کنترلی فازی-تطبیقی بهینه و مقاوم مرکب از یک بخش کنترل خطی‌سازی پسخوردی و یک سیستم جبرانساز فازی به جهت دستیابی به بهترین کنترل مقاوم برای عملگرهای رباتیک CNC که شامل عدم قطعیت‌های ساختاری و غیرساختاری هستند ارائه می‌نماید. جبرانساز پیشنهاد شده بر اساس تخمین و جبران عدم قطعیتها بکمک سیستم فازی تطبیقی طراحی گردیده است. این سیستم کنترل فازی تطبیقی پیشنهاد شده بکمک الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهینه شده است و می‌تواند عدم قطعیتها را از طریق مدل کردن آنها بشکل یک تابع غیرخطی از متغیرهای مفاصل سیستم رباتیک جبران نماید. علاوه بر آن سیستم کنترلی طوری تنظیم می‌شود که سیگنال کنترلی محدود می‌ماند. مزیت سیستم فازی-تطبیقی پیشنهادی آن است که پارامترهای سیستم فازی تطبیقی پیشنهادی در بهترین شکل تنظیم شده است، از همه حالت‌های سیستم استفاده نمی‌کند و همچنین سیگنال گشتاور کنترلی از محدوده اشباع تجاوز نخواهند کرد. برطبق نظریه پایداری لیپانوف خطای ردگیری سیستم حلقه بسته محدود می‌شود و همگرایی و پایداری طرح کنترلی اثبات شده است.

در این پایان‌نامه پس از بیان مقدمات آشنایی با ماشین‌های CNC ابتدا مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات‌های صنعتی مطرح می‌گردد. سپس روش کنترل خطی‌سازی پسخوردی و پس از آن به جهت مقابله با عدم قطعیت‌های پارامتری کنترل تطبیقی و در ادامه کار کنترل فازی-تطبیقی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها با کمک الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، پارامترهای کنترل کننده فازی تطبیقی مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرند و با انتخاب تابع هدف مناسب، با وجود دسترسی به خطای کمینه، از عبور سیگنال گشتاور کنترلی از حدود اشباع عملگرها ممانعت بعمل می‌آید.

کلمات کلیدی

ماشین CNC، بازوی رباتیک، خطی سازی پسخوردی، کنترل فازی-تطبیقی، الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات

مقالات مستخرج از پایان نامه

- [1] Abbaszadeh E., Haddad-Zarif M., " Optimized Adaptive Fuzzy Controller for a Machining Tool with Uncertain Dynamics", International Review of Automatic Control, 2013, Italy, In press.
- [2] Abbaszadeh E., Haddad-Zarif M., " Applying Fuzzy-Adaptive Controller in Control of Machining Tool in Operation Field", 13th Iranian Conference on Fuzzy Systems, Iran, 2013.

فهرست مطالب

۱	فصل اول - مقدمه
۲	۱-۱ ماشین CNC
۲	۱-۱-۱ سیستم کنترل محرکه
۵	۲-۱-۱ طرح کنترلی
۶	۳-۱-۱ رباتهای صنعتی
۷	۲-۱ مرور کارهای انجام شده
۱۳	۳-۱ اهداف تحقیق
۱۴	۴-۱ مروری بر ساختار پایان نامه
۱۵	فصل دوم - مدلسازی سینماتیکی و دینامیکی
۱۶	۱-۲ مدلسازی سینماتیکی
۱۸	۲-۲ مدلسازی دینامیکی
۲۲	فصل سوم - خطی سازی پسخوردی
۲۳	۱-۳ مقدمه
۲۳	۲-۳ کنترل کننده
۲۴	۳-۳ شبیه سازی
۲۹	۴-۳ نتیجه گیری
۳۰	فصل چهارم - کنترل تطبیقی

۳۱	۱-۴ مقدمه
۳۱	۲-۴ کنترل کننده
۳۴	۳-۴ شبیه سازی
۳۸	۴-۴ نتیجه گیری
۳۹	فصل پنجم - کنترل فازی تطبیقی
۴۰	۱-۵ مقدمه
۴۲	۲-۵ کنترل کننده
۴۲	۱-۲-۵ طرح کنترلی
۴۴	۲-۲-۵ ساختار سیستم فازی
۴۷	۳-۲-۵ قانون تطبیق
۴۸	۳-۵ تحلیل پایداری
۴۹	۴-۵ شبیه سازی
۵۲	۵-۵ نتیجه گیری
۵۴	فصل ششم - کنترل فازی تطبیقی بهینه
۵۵	۱-۶ مقدمه
۵۷	۲-۶ کنترل کننده
۵۷	۱-۲-۶ طرح کنترلی
۵۷	۲-۲-۶ هدف بهینه سازی
۵۸	۳-۲-۶ الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات
۶۰	۳-۶ شبیه سازی
۶۶	۴-۶ نتیجه گیری

۶۷

فصل هفتم - نتیجه گیری و پیشنهادات

۶۸

۱-۷ نتیجه گیری

۶۹

۲-۷ پیشنهادات

۷۰

مراجع

فهرست شکل‌ها

- ۵ (۱-۱) حلقه کنترلی ماشین CNC
- ۱۷ (۱-۲) ساختار و دستگاه‌های مختصات متصل شده به ربات اسکارا سه لینکی
- ۲۴ (۱-۳) نمودار سیستم کنترل رابطه (۱-۳)
- ۲۶ (۲-۳) روند ردگیری مسیر برای سه مفصل سیستم رباتیک با فرض اطلاع دقیق از مدل دینامیکی سیستم
- ۲۷ (۳-۳) خطای ردگیری با فرض اطلاع دقیق از مدل دینامیکی سیستم
- ۲۷ (۴-۳) سیگنال کنترلی با فرض اطلاع دقیق از مدل دینامیکی سیستم
- ۲۸ (۵-۳) خطای ردگیری با فرض وجود عدم قطعیت در مدل دینامیکی سیستم
- ۳۵ (۱-۴) روند ردگیری مسیر برای سه مفصل سیستم رباتیک
- ۳۶ (۲-۴) خطای ردگیری کنترل کننده تطبیقی (بدون حضور اغتشاش خارجی)
- ۳۶ (۳-۴) سیگنال خروجی کنترل کننده تطبیقی (بدون حضور اغتشاش خارجی)
- ۳۷ (۴-۴) روند همگرایی پارامترها
- ۳۸ (۵-۴) سیگنال خطای کنترل کننده تطبیقی در حضور اغتشاش خارجی
- ۴۳ (۱-۵) نمودار پیکربندی طرح کنترلی فازی تطبیقی رابطه (۱-۵)
- ۴۷ (۲-۵) توابع تعلق هر ورودی
- ۵۰ (۲-۵) روند ردگیری مسیر برای سه مفصل سیستم رباتیک
- ۵۱ (۳-۵) خطای ردگیری کنترل کننده فازی تطبیقی
- ۵۱ (۴-۵) سیگنال خروجی کنترل کننده تطبیقی
- ۵۲ (۵-۵) روند همگرایی پارامترها
- ۶۱ (۱-۶) روند همگرایی تابع هدف رابطه (۳-۶)
- ۶۲ (۲-۶) روند ردگیری مسیر برای سه مفصل سیستم رباتیک
- ۶۲ (۳-۶) خطای ردگیری کنترل کننده فازی تطبیقی
- ۶۳ (۴-۶) سیگنال خروجی کنترل کننده
- ۶۴ (۵-۶) روند همگرایی تابع هدف رابطه (۸-۶)
- ۶۵ (۶-۶) خطای ردگیری کنترل کننده فازی تطبیقی با ضرایب بهینه (۹-۶)
- ۶۵ (۷-۶) سیگنال خروجی کنترل کننده با ضرایب بهینه (۹-۶)

فهرست جدول‌ها

- ۳ (۱-۱) مقایسه کاربرد سروموتورها در ماشینهای CNC
- ۱۷ (۱-۲) جدول پارامترهای دناویت-هارتنبرگ
- ۲۱ (۲-۳) اندازه پارامترهای مدل

فصل اول - مقدمه

۱-۱ ماشین CNC

جهان صنعتی در چند دهه اخیر بخش بزرگی از توجه خود را به بکارگیری رباتها در صنایع معطوف داشته است و تحقیقات گسترده در زمینه های مختلف کاربردهای ربات، دستاوردهای ارزنده ای را بدنبال داشته است. از یک سو نقش مؤثر رباتها در صنایع پیشرفته و از سوی دیگر نقش ویژه آن در محیطهای خطرناک و همچنین کاهش هزینه های تولید، افزایش و بهبود کیفیت محصولات، از دلایل سرمایه گذاری روزافزون در این زمینه محسوب می شود.

"کنترل عددی کامپیوتری"^۱ (CNC) بدلیل دقت بسیار بالای مورد نیاز در فرایند ماشینکاری اقلامی نظیر قطعات هواپیماهای مدرن بوجود آمد. اولین رباتها بصورت ترکیبی از اتصالات مکانیکی با قابلیت برنامه ریزی، ماشینهای CNC و اتوماسیون بودند.[۱] ماشین های CNC براده بردار دارای ساختاری رباتیکی هستند که از طریق حرکت دادن مته گردان مخصوص براده برداری بر روی قطعه کار به خلق اشکال سه بعدی مطابق طرح سه بعدی رایانه ای موجود در حافظه دستگاه می پردازد. به کمک دستگاههای CNC می توان به سرعت قطعاتی با شکل و اندازه های دقیق از فلز یا چوب یا... ساخت. کنترل عددی در ابتدا برای ماشینهای تراش و فرز بکار گرفته شدند، اما با توجه به مزیت های بسیار کنترل عددی کامپیوتری، امروزه CNC در اکثر فرآیند های براده برداری مثل مته کاری، تراشکاری، برشکاری و بسیاری روش های دیگر تولید که مستلزم برش یا براده برداری نیستند همچون لوله خم کنی، اندازه گیری و پانچ به کار رفته است.

۱-۱-۱ سیستم کنترل محرکه

۱-۱-۱-۱ موتور

موتورهای مورد استفاده در این ماشینها از نوع سروموتورهای AC القایی، سنکرون AC و DC می باشد.[۲]
موتورهای مورد استفاده در ماشینهای CNC باید دارای مشخصات بنیادی زیر باشند:

¹ computer numerical control

۱- قادر به تأمین قدرت کافی مطابق بار اعمال شده

۲- توانایی پاسخدهی سریع به فرمان های کنترلی

۳- توانایی شتاب گیری و ترمز مناسب

۴- محدوده سرعت گسترده

۵- توانایی کنترل سرعت خوب در تمام محدوده سرعت

۶- توانایی تأمین شتاب و ترمز مکرر

۷- رزولوشن بالا در گشتاور کافی

۸- دقت بالای چرخش

جدول ۱-۱ مزایا و معایب موتورهای مطرح شده را مقایسه می نماید [۲]:

جدول (۱-۱) مقایسه کاربرد سروموتورها در ماشینهای CNC

سروموتور DC	سروموتور AC سنکرون	سروموتور AC القایی	
قیمت پایین محدوده سرعت گسترده کنترل آسان	بدون جاروبک ترمز آسان	ساختار ساده	مزایا
گرما فرسوده شدن جاروبک نویز	ساختار پیچیده ریپل گشتاور لرزش	ترمز دینامیک غیرممکن از دست دادن حرارت	معایب
کوچک	کوچک و متوسط	متوسط و بزرگ	ظرفیت
لازم نیست	انکدر ^۱ ریسولور ^۲	لازم نیست	سنسور
بستگی به عمر جاروبک دارد	بستگی به عمر بلبرینگ دارد	بستگی به عمر بلبرینگ دارد	طول عمر
نامناسب	قابل استفاده	بهترین حالت	سرعت بالا
موجود	موجود	موجود نیست	مغناطیس دائم

¹ encoder

² resolver

۱-۱-۱-۲ حسگرهای موقعیت و سرعت

وسیله‌ای که برای تشخیص موقعیت محور موتور بکار می‌رود، انکدر نام دارد. بمنظور کنترل سرعت بازوهای رباتیک، سرعت توسط سنسور سرعت اندازه‌گیری یا از روی موقعیت بدست آمده از انکدر محاسبه می‌گردد.

ریسولور نیز وسیله‌ای است که برای تشخیص موقعیت محور موتورهای ماشین CNC بکار می‌رود. برخلاف انکدر که سیگنال خروجی دیجیتال تولید می‌کند، ریسولور توانایی تولید سیگنالهای آنالوگ را دارد.

همانطور که اشاره شد، سرعت می‌تواند از اطلاعات موقعیت تولید شده توسط انکدر یا ریسولور محاسبه گردد. اما سنسورهایی برای بدست آوردن مستقیم اطلاعات سرعت وجود دارند. تاکومتر^۱ یکی از انواع رایج سرعت‌سنج‌های صنعتی می‌باشد.

حسگرها برای اندازه‌گیری موقعیت و سرعت، یا روی مفصل رباتیک و یا روی محور موتور محرکه نصب می‌گردند. لازم به ذکر است که هیچ روش مستقیم اندازه‌گیری برای تعیین موقعیت و جهت مجری نهایی وجود ندارد و باید به هندسه صلب فرض شده برای سیستم رباتیک اعتماد کرد؛ در غیراینصورت می‌توان به کمک روشهای بینایی ماشین، دقت را افزایش داد. [۱]

¹ tachometer

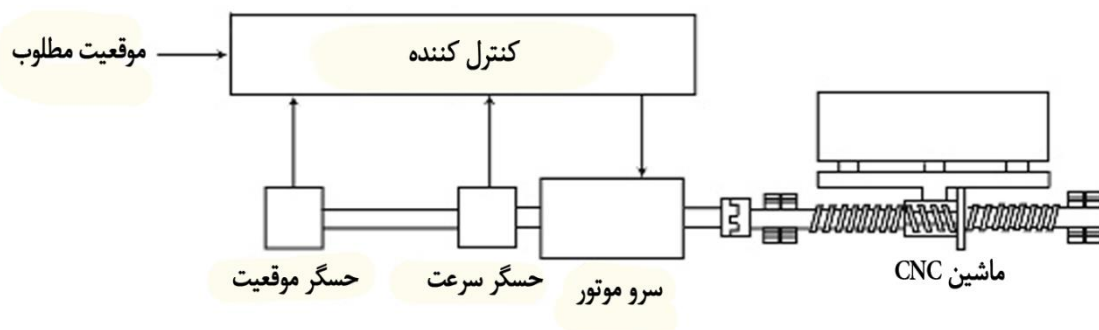
۲-۱-۱ طرح کنترلی

سیستم کنترل یک CNC از سه واحد کنترل عددی، موتور و راه‌انداز موتور تشکیل شده است و اغلب فقط به بخش کنترل عددی، CNC اطلاق می‌شود. شایان ذکر است که محتوای این پایان‌نامه به بخش کنترل عددی تمرکز دارد و شامل بخشهای موتور و راه‌انداز موتور نمی‌شود.

سیستم کنترل CNC معمولاً به دو نوع حلقه بسته و حلقه باز تقسیم می‌گردد. [۲] طراح بسته به انتخاب نوع کنترل نقطه_به_نقطه یا کنترل مسیر یکی از انواع حلقه بسته و باز را انتخاب می‌کند. نشان داده شده است که سیستم حلقه باز در کنترل نقطه_به_نقطه مناسب است و با توجه به نیاز به افزایش دقت و کیفیت کار، استفاده از پسخورد و سیستم حلقه بسته در کنترل مسیر ضروری می‌شود.

۱-۲-۱-۱ حلقه بسته

به محض اینکه موقعیت و سرعت از سنسورها حس بشود، این اطلاعات به مدار کنترلی پسخورد داده می‌شود و سروموتورها بمنظور کمینه کردن مقدار خطای ردگیری بکار گرفته می‌شوند. شکل (۱-۱) حلقه کنترلی یک ماشین CNC را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱) حلقه کنترلی ماشین CNC

سیستم کنترل حلقه باز سیستم پسخورد ندارد. اینگونه سیستمها در جاهایی که دقت کنترل بالا نیست کاربرد دارند. در سیستم حلقه باز از موتور پله‌ای استفاده می‌گردد. این سیستم نیازی به حسگر و مدار پسخورد ندارد و ساختار آن بسیار ساده می‌باشد. دقت سیستم کنترل در این روش، مستقیماً تحت تأثیر میزان دقت موتور پله‌ای و سیستم انتقال نیرو مکانیکی قرار دارد.

۱-۱-۳ رباتهای صنعتی

ماشینهای CNC از نوع رباتهای صنعتی محسوب می‌شوند که فقط برای مقاصد خاص مثلاً فرز قطعات فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تفاوت ماشینهای CNC و رباتهای صنعتی در میزان دقت و سرعت مورد نیاز در انجام امور مربوطه می‌باشد. اصولاً ماشینهای CNC نیازمند به دقت بسیار بالا در ردگیری مسیر هستند که این امر علاوه بر محدودیت سرعت در عمل ماشینکاری مواد، باعث محدود شدن سرعت کاری آنها خواهد شد. این درحالیست که در کنترل رباتهای صنعتی سرعت عملگر نهایی از اهمیت بیشتری برخوردار است. با این وجود امروزه با پیشرفت روزافزون رباتهای صنعتی، بعنوان یک جایگزین به صرفه و انعطاف‌پذیر برای ابزارهای ماشینکاری مطرح هستند. حتی بکارگیری رباتهای صنعتی استاندارد برای کاربردهای ماشینکاری و نمونه‌سازی^۱ نیز مورد توجه قرار گرفته است. [۳] شایان ذکر است که توجه این پایان‌نامه بر روی ماشین CNC متمرکز است، اما روشهای ارائه شده در انواع کاربردهای مطرح شده برای رباتهای صنعتی نیز قابل کاربرد می‌باشد.

¹ prototyping

۱-۲ مرور کارهای انجام شده

ارتقای رباتهای صنعتی هنوز به حد نهایی خود نرسیده است و همچنان محافل علمی و صنعتی بدنبال راهکای جدید در رسیدن به کنترل‌های با کارایی بهتر می‌باشند. [۴] همچنین با توجه به زمینه های کاربردی جدید که بر دقت مورد توقع از کنترل کننده ها تأثیرگذار شده است، تحقیقات زیادی بر روی ارتقای ساختار رباتیک و کارایی کنترل کننده ها متمرکز شده است. فناوری CNC نمی‌تواند تنها بوسیله یک فناوری ارتقاء یابد، این فناوری نیازمند مجموعه‌ای از فناوری‌های مهندسی کنترل، برق، رایانه، سخت‌افزار، فن ماشینکاری، و... می‌باشد. از اینروست که از آن بعنوان "گل فناوری‌های صنعتی" نام برده می‌شود. [۲]

باتوجه به نیاز روزافزون صنایع مختلف به سطوح بالای اتوماسیون و سرعت بیشتر در عملیات صنعتی، طی دهه گذشته روشهای مختلف کنترل عملگرهای رباتیک توسط انواع کنترل کننده ها در مقالات مختلف بررسی شده است، نظیر کنترل کننده تناسبی-مشتقی-انتگرالی، کنترل کننده پیشخوردی، کنترل کننده تطبیقی، کنترل ساختار متغیر، شبکه های عصبی و کنترل فازی.

بعنوان یک روش رایج در صنعت کنترل عملگرهای رباتیک، کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی دارای یک ساختار ساده و روش پیاده سازی مرسوم می‌باشد. اما کارایی این کنترل کننده با افزایش سرعت به نسبت کاهش می‌یابد. بنابراین مجموعه رباتیکی که با این روش کنترل می‌شود فقط مناسب حرکات آهسته می‌باشد. برای غلبه بر این مشکل در روشهای کنترلی مبتنی بر مدل، معمولاً سعی بر آن است که مدل ریاضی دقیقتری از سیستم تهیه نمایند. اما با اینهمه بدلیل حضور عدم قطعیت‌هایی نظیر بارهای نامعلوم، اصطکاک و اغتشاش خارجی در اینگونه روشها باز هم با افزایش سرعت، عملکرد سیستم می‌تواند تحت تاثیر این عوامل قرار بگیرد [5]

بدلیل اسفاده عملگرهای رباتیک در محیطهای صنعتی، این عملگرها بطور اجتناب ناپذیری تحت تأثیر عدم قطعیت‌های ساختاری و غیرساختاری قرار دارند. عدم قطعیت‌های ساختاری در مدل دینامیکی صحیح اما با تفاوت در پارامترها ظاهر می‌شود. این تفاوتها نتیجه اختلاف در وزن، ابعاد، بارهای اعمالی متفاوت، تفاوت در ویژگیهای رابطهای عملگرهای رباتیک و تفاوت در ثابتهای گشتاور محرکه ها می‌باشد. عدم قطعیت‌های غیرساختاری نیز توسط دینامیکهای مدل نشده که ناشی از اغتشاشات خارجی، مدهای فرکانس بالای عملگرهای رباتیک، تأخیر زمانی صرفنظر شده و اصطحکاک غیرخطی هستند، مشخص می‌گردند.

همانگونه که اشاره شد یک مجموعه رباتیک یک سیستم دینامیکی چندمتغیره غیرخطی با تزویج و همراه با عدم قطعیت‌های مختلف می‌باشد و در نتیجه طراحی یک روش کنترلی مبتنی بر مدل ریاضی دقیق برای آن بسیار مشکل می‌باشد. عدم قطعیت‌های ساختاری می‌توانند موجب عدم دقت در مدل دینامیکی عملگر رباتیک شود و کنترل کننده‌ای که براساس مدل نامی طراحی شده است نمی‌تواند برای همه تغییرات در پارامترها به درستی عمل نماید. روش کنترل تطبیقی [۶] روش مناسبی برای این موارد باشد. عموماً روشهای کنترل تطبیقی برای کنترل سیستمهای با مدل مشخص اما پارامترهای ناشناخته بکارگرفته می‌شود. کنترل کننده‌های تطبیقی می‌توانند برپایه پارامترهای قابل تنظیم توسط مکانیزمی خاص، تنظیم شده و رفتار خود را در پاسخ به تغییر دینامیک فرایند تغییر دهند. با این وجود قانون کنترل تطبیقی قادر به برطرف کردن عدم قطعیت‌های غیرساختاری نیست.

روشهای ساختار متغیر [۷, ۸] می‌توانند بطور همزمان بر هر دو نوع عدم قطعیت ساختاری و غیرساختاری غلبه نمایند. اما لرزش^۱ ناخواسته در سطح لغزش که ناشی از کلیدزنی فرکانس بالا که از خصوصیات غیرقابل اجتناب این روش است، می‌تواند کارایی سیستم را تحت تأثیر قرار دهد.

¹ chattering

روش کنترل خطی سازی پسخوردی [۹] روشی است که برای مسائل کنترلی عملی و پیچیده در کنترل عملگرهای رباتیک کاربرد زیادی دارد. این روش کنترل روشی است برای خطی سازی و دیکوپله کردن مدل دینامیک ربات، بکمک مدل دقیق دینامیکی ربات، تا هر مفصل بتواند بصورت فردی کنترل گردد. اما این روش برای کنترل عملگرهای رباتیک با دو مشکل روبروست؛ اول اینکه، این روش به دانش دقیق از سیستم نیاز دارد، و می توان گفت این امر برای مسائل عملی غیرممکن است. و مشکل دوم این روش مقاوم نبودن در برابر عدم قطعیتهاست. این مشکلات می توانند ارزش کارایی این روش را تنزل بخشند.

از سوی دیگر کنترل شبکه های عصبی نیز بدلیل مزیتهایی نظیر ساختار موازی، قابلیت یادگیری، تقریبگری سیستمهای غیرخطی و نیز قابلیت پیاده سازی مناسب خود را بعنوان یکی از روشهای سودمند کنترل عملگرهای رباتیک خود را اثبات نموده است. اما درمورد این کنترل کننده ها باید گفت که در آن تفسیر روابط بین مقدار یک وزن تنها و خروجی کلی شبکه و به تبع آن انتخاب ساختار مناسب شبکه با وزنه های مناسب کاری دشوار به شمار می آید. [10]

یکی از کاربردهای سیستمهای فازی مدل کردن سیستمهای پیچیده غیرخطی بوسیله مجموعه ای از قوانین فازی می باشد. یک خاصیت مهم سیستمهای فازی، قابلیت شکل یابی بصورتی است که قابلیت تقریبگری عمومی داشته باشند. [۱۱] بعبارت دیگر یک سیستم فازی می تواند برای هر تابع غیرخطی بوسیله تدوین قوانین مناسب و کافی، تقریبی با دقتی دلخواه بدست بدهند. استفاده از سیستمهای فازی برای کنترل، یا کنترل فازی می تواند از دانش و تجربه افراد خبره برای کنترل سیستمها استفاده نماید و نیازی به مدل ریاضی سیستم وجود ندارد. طی چندسال گذشته از کنترل فازی بطور گسترده ای برای کنترل سیستمهای غیرخطی و پیچیده استفاده شده است. استفاده از سیستمهای فازی در کنترل عملگرهای رباتیک نیز شامل این محدوده می شوند. [۱۲] ترکیب سیستم فازی با سایر انواع کنترل کننده ها یکی از روشهای مرسوم در کنترل سیستمهای مختلف می باشد، بعنوان مثال مقاله [۱۳] کنترل کننده ای با یک

سیستم فازی و یک بخش کنترل کننده نظارتی طراحی نموده است که پایداری سیستم حلقه بسته را نیز تأمین نموده است. در [۱۴] دو طرح کنترل فازی برای یک دسته از سیستمهای با دینامیک غیرخطی چندورودی_چندخروجی زمان پیوسته طراحی نموده است. عملکرد موردنظر این کنترلکنندهها بر روی عملگرهای رباتیک بررسی شده است. در [۱۴] فرض شده است که عملگر رباتیک به همراه عدم قطعیت‌های ساختاری و غیرساختاری می تواند به دو زیر سیستم جدا شود: سیستم نامی با دانش سیستمی دقیق و بخش سیستم غیرقطعی که نامعلوم است. در این مقاله یک راهکار استفاده از خطی سازی فیدبکی به همراه جبران‌ساز فازی ارائه گردیده است. بخش نامی بوسیله کنترل کننده خطی سازی فیدبکی کنترل می‌شود و برای بخش نامعلوم سیستم کنترل کننده فازی بکار گرفته شده است. در این طرح کنترلی، کنترل کننده فازی بعنوان یک جبران‌ساز برای بخش خطی سازی فیدبکی عمل می‌کند.

همچنین سیستم فازی بطور گسترده ای همراه با کنترل تطبیقی برای کنترل عملگرهای رباتیک بکار رفته است. در [۱۵] طراح الگوریتم تطبیق را برای یک کنترل کننده فازی_لغزشی بکار گرفته است. این روش بر مبنای دانش زبانی به شکل قوانین اگر_آنگاه فازی طرح شده است. در [۱۶] یک کنترل کننده فازی چندلایه مقاوم برای کنترل عملگرهای رباتیک به روش کنترل مدل مرجع به همراه اغتشاشات گشتاور و نویز اندازه گیری طراحی گردیده است. مقاله [۱۷] یک مجموعه از قوانین فازی مبتنی بر سیگنال خطا و مشتق خطا را برای طراحی کنترل کننده تعریف نموده است. مقاله [۱۸] قابلیت تقریب‌گیری سیستمهای فازی را برای غلبه بر عدم قطعیت‌های پارامتری در عملگرهای رباتیک به خدمت گرفته است. در [۱۹] طراح روش یادگیری تقویتی را که با کنترل فازی ترکیب شده است را برای کنترل عملگرهای رباتیک پیشنهاد داده است. در این طرح کنترلی سیگنال یادگیری تقویتی برای به روز رسانی وزنه‌های سیستم فازی که بمنظور تقریب یک سیستم غیرخطی بکار رفته است، مورد استفاده قرار گرفته است. سپس این تابع تقریب زده شده برای محاسبه قانون کنترل بکار گرفته شده است. در [۲۰] طراح یک طرح کنترلی ترکیبی برای کنترل ردگیری

عملگر رباتیک ارائه گردیده است. این طرح کنترلی شامل یک کنترل کننده تناسبی فازی و یک کنترل کننده مشتقی و انتگرالی معمولی می‌باشد. و این کنترل کننده با یک کنترل کننده تناسبی_مشتقی_انتگرالی مرسوم مقایسه گردیده و کارایی این طرح کنترلی بهتر ارزیابی شده است. در [۲۱] طرح کنترلی شامل دو بخش کنترل کننده تناسبی_مشتقی رایج و یک بخش کنترل مقاوم فازی می‌باشد. مقاله [۲۲] یک کنترل کننده فازی تطبیقی مقاوم برای یک دسته از سیستم‌های غیرخطی نامعلوم ارائه کرده است. در این روش سیستم فازی بمنظور تخمین یک تابع ناشناخته بکار گرفته شده است و یک جبران‌ساز مقاوم به روش H_{inf} برای از بین بردن عدم قطعیتها طراحی شده است. در [۲۳] یک کنترل کننده فازی ممدانی مطابق الگوی کنترل زیربهبینه ارائه گردیده است. کنترل کننده پیشنهادشده در مقایسه با کنترل کننده تناسبی-مشتقی مرسوم عملکرد بهتری را نشان داده است. در [۲۴] یک کنترل کننده فازی_عصبی تطبیقی بمنظور ردگیری مسیر برای عملگرهای رباتیک ارائه گردیده است. در این طرح کنترلی مدل دینامیکی فازی با ساختار تاکاگی_سوگنو پیشنهاد شده است و کنترل کننده فازی_عصبی تطبیقی براساس دینامیک فازی عملگر، ارائه گردیده و کارایی سیستم با تطبیق پارامترهای مدل فازی با عملگر رباتیک بهبود بخشیده شده است. همه ی این روشهای معرفی شده به اندازه گیری هردو متغیر موقیت و سرعت بازو نیاز دارند که این امر در عمل می‌تواند مشکل آفرین باشد.

در [۲۵] نیز یک کنترل کننده فازی تطبیقی پیشنهاد شده است. ساختار این کنترل کننده برپایه روشی بنام کنترل کننده اسلوتین_لی شکل گرفته است. این کنترل کننده دارای یک بخش کنترل کننده تناسبی_مشتقی بهمراه یک بخش جبران‌ساز غیرخطی مبتنی بر مدل می‌باشد. با این روش یک تخمین از بخش غیرخطی قانون کنترل بدست خواهد آمد. در این روش یک الگوریتم یادگیری برای تطبیق توابع تعلق بکار گرفته شده است و در ضمن پایداری سیستم حلقه بسته نیز اثبات شده است.

در [۱۲] یک کنترل کننده فازی تطبیقی پایدار برای کنترل ردگیری مسیر در عملگرهای رباتیک، بدون نیاز به اندازه گیری سرعت و با در نظر گرفتن محدودیتهای محرکه ها ارائه گردیده است. این کنترل کننده براساس تخمینی که توسط سیستم فازی از ساختار دینامیکی ربات بدست آمده است طراحی شده است. پایداری مجانبی و همگرایی خطای موقعیت به سمت صفر برای کنترل کننده نیز اثبات شده است. کنترل کننده پیشنهادی نه تنها در مقابل عدم قطعیت‌های ساختاری مقاوم است، بلکه در برابر عدم قطعیت‌های غیرساختاری نیز مقاومت لازم را از خود نشان می دهد.

همانطور که تاکنون بررسی گردید برای غلبه بر آثار غیرخطی، عدم قطعیتها و سایر مشکلاتی که در کنترل سیستمهای غیرخطی وجود دارد، روشهای مختلفی پیشنهاد شده است. از این میان کنترل کنندههای فازی که کاربرد زیادی نیز در سیستمهای با خواص غیرخطی دارد، و در سالهای اخیر در بسیاری از کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار گرفته اند. کنترل کننده فازی یک سیستم مبتنی بر استنتاج تقریبی است و مدل تحلیلی دقیقی برای ارزیابی پایداری و مقاوم بودن^۱ آن وجود ندارد و این مورد باعث می شود بکارگیری سیستمهای فازی در کاربردهای صنعتی و تجاری با تأمل روبرو باشد. [۲۶] کنترل فازی_تطبیقی و کنترل تطبیقی متعارف هر دو دارای ساختار پایه و اصول کم و بیش یکسان می باشند. همچنین ابزارهای ریاضی مورد استفاده در تحلیلها و طراحی مشابه است. از سوی دیگر کنترل کننده های فازی دارای یک ساختار غیرخطی خاص می باشند که برای سیستمهای متفاوت یکسان است. درحالیکه ساختار یک کنترل کننده تطبیقی کلاسیک از سیستمی به سیستم دیگر متفاوت است. همچنین در کنترل کننده های فازی_تطبیقی دانش کارشناسی درباره دینامیکهای سیستم و استراتژیهای کنترل می تواند با هم ترکیب شود، ولی چنین دانشی در سیستمهای کنترل تطبیقی کلاسیک در نظر گرفته نمی شود. [۲۷] و همین تفاوت، مزیت اصلی کنترل فازی تطبیقی نسبت به کنترل تطبیقی کلاسیک را مشخص می نماید. کنترل کننده های فازی_تطبیقی علاوه بر اینکه بر مبنای تضمین پایداری طراحی می شوند، می توانند روشی برای تحصیل

¹ robustness

پارامترهای کنترل کننده فازی توسط یک الگوریتم تطبیق ارائه نمایند. البته این نوع کنترل بر مبنای این فرض بنا شده است که سیستم فازی بصورت یک سیستم غیرخطی با قابلیت خطی نسبت به پارامترها شکل داده شده باشد. [۲۷] و بر همین اساس یک مکانیزم تطبیقی می تواند پارامترهای کنترل کننده فازی را بدست بدهد.

۳-۱ اهداف تحقیق

در این پژوهش قصد بر آن است که با تکیه بر خواص کاربردی کنترل کننده های فازی_ تطبیقی به طراحی مکانیزمی برای تنظیم خودکار پارامترهای کنترل کننده با توجه به عدم قطعیت های موجود در فرایند ساخت و محیط بکارگیری ماشینهای CNC و نیز لزوم تعویض ابزار ماشینکاری در اینگونه ماشینها، پرداخته و با استفاده از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات^۱ به بهینه سازی عوامل موثر در کنترل کننده طراحی شده پرداخته شود و ضمن رسیدن به خطای کمینه در موقعیت عملگر نهایی، با انتخاب مناسب تابع هدف، مانع عبور مقدار سیگنال کنترلی از حدود اشباع تعریف شده برای محرکه ها شد. در این خصوص تحلیل پایداری و ارزیابی سیستم کنترل نیز انجام خواهد شد. در حل مسئله روندی برای غلبه بر عدم قطعیت های ساختاری و غیرساختاری کنترل کننده بهینه شده پیشنهادی با کنترل کننده های خطی سازی پسخوردی مرسوم، کنترل تطبیقی و کنترل فازی تطبیقی مقایسه شده است.

¹ particle swarm optimization (PSO)

۴-۱ مروری بر ساختار پایان نامه

این پایان نامه در ادامه با بخشهای زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم به نحوه مدلسازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اشاره شده و مدل دینامیکی ماشین CNC با ساختار رباتیک اسکرای سه لینکی ارائه گردیده است. در فصل سوم کنترل کننده طراحی شده به روش خطی سازی پسخوردی ارائه گردیده و عملکرد آن در مقابل عدم قطعیت‌های ساختاری مورد بررسی قرار گرفته است. بخش چهارم به طراحی و ارزیابی عملکرد کنترل کننده به روش کنترل تطبیقی اختصاص دارد. این کنترل کننده در مقابل عدم قطعیت‌های ساختاری و نیز اغتشاش خارجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش پنجم کنترل کننده فازی تطبیقی که از یک بخش کنترل کننده خطی سازی پسخوردی مرسوم و یک بخش جبرانساز فازی تطبیقی تشکیل شده است، پیشنهاد و کارایی آن به نمایش گذاشته شده است. در فصل ششم عوامل موثر در کنترل کننده طراحی شده فصل پیش با استفاده از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات بهینه سازی می‌شود و ضمن رسیدن به خطای کمینه در موقعیت عملگر نهایی، با انتخاب مناسب تابع هدف، مانع عبور مقدار سیگنال کنترلی از حدود اشباع تعریف شده برای محرکه‌ها خواهیم شد.

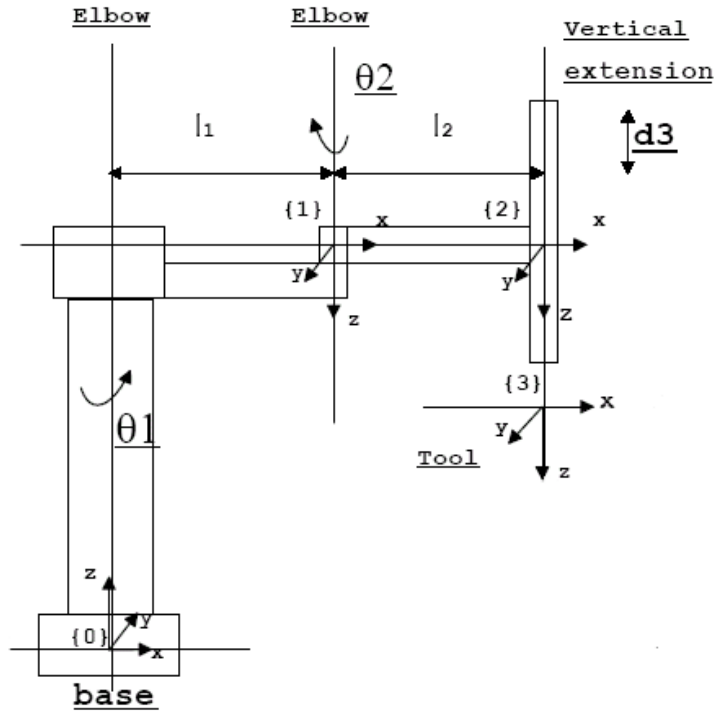
فصل دوم – مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی

۱-۲ مدل‌سازی سینماتیکی

سینماتیک علم حرکت است که حرکت را بدون در نظر گرفتن نیروهای ایجاد کننده آن مطالعه می‌کند. هر بازوی رباتیک را می‌توان بصورت مجموعه‌ای از اجسام صلب در نظر گرفت که بوسیله مفصل به یکدیگر اتصال یافته‌اند. بنا بر ملاحظات طراحی، بازوی مکانیکی ماهر در حالت کلی از مفصل‌های با یک درجه آزادی تشکیل می‌شوند. (مفاصل مرکب n درجه آزادی با n مفصل جداگانه یک درجه آزادی لولایی یا کشویی پشت سرهم و با طول صفر می‌توانند مدل شوند). تحلیل سینماتیک بازوهای مکانیکی ویژگیهای هندسی ربات را در بر می‌گیرد. سینماتیک مستقیم یک ربات، در واقع توصیف کننده موقعیت و جهت مجری نهایی ربات بر اساس زوایا و متغیرهای مفاصل و رابطها می‌باشد. هنگام بدست آوردن معادلات سینماتیکی یک ربات، هر رابط تنها بصورت جسمی صلب، رابطه بین دو محور مفصلی را در بازوی مکانیکی ماهر توصیف می‌کند و عواملی مانند استحکام رابطها، جنس رابطها، مکان مفاصل در این تحلیل در نظر گرفته نمی‌شود.

در این پایان نامه ماشین CNC با ساختار اسکارا¹ و دارای سه مفصل لولایی، لولایی و خطی برای آزمایش طرح‌های کنترلی مورد نظر قرار دارد. چنین ابزار ماشینکاری، قابلیت براده برداری تا سه درجه آزادی را خواهد داشت. در این فصل برای بدست آوردن معادلات سینماتیکی ربات اسکارای سه‌لینکی شکل (۱-۲) مطابق دستورالعمل مرسوم دناویت-هارتنبرگ عمل نموده و ابتدا دستگاه‌های مختصات هر مفصل را مطابق شکل قرار می‌دهیم.

¹ SCARA(selective compliant articulated robot for assembly)



شکل (۱-۲) ساختار و دستگاه‌های مختصات متصل شده به ربات اسکارسه لینکی

با توجه به شکل (۱-۲) می‌توان جدول پارامترهای دناویت-هارتنبیگ ربات که از چهار کمیت α_i ، a_i ، d_i ، θ_i مربوط به رابط i و مفصل i تشکیل شده است را به شرح زیر تشکیل داد:

جدول (۱-۲) جدول پارامترهای دناویت-هارتنبیگ

مفصل	l	a	d	θ
۱	l_1	0	0	θ_1
۲	l_2	2π	0	θ_2
۳	0	0	d_3	0

در این جدول پارامترهای d_i, l_i, θ_i و α_i به ترتیب طول رابط، انحراف رابط^۱، زاویه مفصل و پیچش رابط^۲ نام دارند.

در ادامه با استفاده از جدول بالا و پیروی از دستورالعمل دناویت-هارتنبِرج می‌توان به ماتریس تبدیل همگن A که بیانگر موقعیت و جهت مجری نهایی نسبت به دستگاه پایه است دست یافت.

$$A = \begin{bmatrix} C_{12} & S_{12} & 0 & a_1 C_1 + a_2 C_{12} \\ S_{12} & -C_{12} & 0 & a_1 S_1 + a_2 S_{12} \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

نمادهای S_i و C_i در معادلات فوق عملگرهای $\sin\theta_i$ و $\cos\theta_i$ هستند که به اختصار بیان شده‌اند. همچنین $\sin(\theta_1 + \theta_2)$ با S_{12} و $\cos(\theta_1 + \theta_2)$ با C_{12} نشان داده شده‌اند.

۲-۲ مدل‌سازی دینامیکی

معادلات دینامیکی ربات‌های صنعتی با محاسبه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی رابط‌ها و مفاصل بدست می‌آید. برای بدست آوردن این معادلات مطابق دستورالعمل اوپلر-لاگرانژ مطرح شده در [۱، ۲۸] پس از محاسبه انرژی‌ها، تابع لاگرانژین سیستم که از طریق محاسبه اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل تشکیل می‌شود را بدست آورده و از آن نسبت به متغیرهای مفاصل مشتق گرفته تا در نهایت به روابط زیر برای یک ربات اسکارای سه‌لینکی دست می‌یابیم [۲۸]:

برای مفصل ۱ :

¹ link offset

² link twist

$$\tau_1 = \left[\left(\frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right) l_1^2 + (m_2 + 2m_3) l_1 l_2 C_2 + \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) l_2^2 \right] \ddot{q}_1 - \left[\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_1 l_2 C_2 + \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) l_2^2 \right] \ddot{q}_2 - l_1 l_2 S_2 [(m_2 + 2m_3) \dot{q}_1 \dot{q}_2 - \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \dot{q}_2^2] \quad (۳-۲) \text{ الف}$$

برای مفصل ۲ :

$$\tau_2 = - \left[\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_1 l_2 C_2 + \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) l_2^2 \right] \ddot{q}_1 + \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) l_2^2 \ddot{q}_2 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_1 l_2 S_2 \dot{q}_1^2 \quad (۳-۲) \text{ ب}$$

و برای مفصل ۳ :

$$\tau_3 = m_3 \ddot{q}_3 - 9.81 m_3 \quad (۳-۲) \text{ ج}$$

معادلات ارائه شده در تحلیل حرکات ربات به ازای گشتاور ورودی معین بکار گرفته می‌شوند. در واقع پیش از محاسبه و اعمال گشتاور ورودی به سیستم نیازمند است از متغیرهای حالت سیستم \ddot{q} ، \dot{q} و q اطلاع داشته باشیم. همانطور که مشهود است این معادلات، معادلات دیفرانسیل پیچیده، غیرخطی و دارای تزویج^۱ می‌باشد. این معادلات مدل ربات را می‌سازند و به کمک آنها می‌توان رفتار دینامیکی ربات را بررسی نمود. مسئله ردگیری در این معادلات شامل محاسبه گشتاور لازم $\tau_i(t)$ بطوریکه زوایای مفاصل $q(t)$ از مسیر مطلوب $q_d(t)$ پیروی نماید.

معادلات (۳-۲) را می‌توان به شکل ماتریسی رایج زیر نیز نمایش داد:

$$D(q)_{3 \times 3} \ddot{q} + C(q, \dot{q})_{3 \times 3} \dot{q} + G(q)_{3 \times 1} = \tau \quad (۴-۲)$$

¹ coupling

که در آن

$$D_{11} = \left(\frac{m_1}{3} + m_2 + m_3\right) l_1^2 + \left(\frac{m_2}{3} + m_3\right) l_2^2 + (m_2 + 2m_3) l_1 l_2 \cos q_2 + I_1 + I_2 + I_3$$

$$D_{12} = -\left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) l_2^2 - \left(\frac{m_2}{3} + m_3\right) l_1 l_2 \cos q_2 + I_2 + I_3$$

$$D_{22} = -\left(\frac{m_2}{3} + m_3\right) l_2^2 + I_2 + I_3$$

$$D_{33} = m_3$$

$$D_{21} = D_{12}$$

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

$$C_{11} = -l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) \dot{q}_2 \sin q_2$$

$$C_{12} = -l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) \dot{q}_2 \sin q_2 - l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) \dot{q}_1 \sin q_2$$

$$C_{21} = l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) \dot{q}_1 \sin q_2$$

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

$$G_1 = G_2 = 0$$

$$G_3 = -9.81 m_3$$

گفتنی است در معادلات بالا از نیروی اصطحکاک صرفنظر شده است. همچنین فرض شده است مرکز جرم رابطةا دقیقاً در مرکز هندسی رابطةا منطبق شده است. این فرضیات متداول و علاوه بر آنها خطاهای اندازه گیری و سایر صرفنظرهای مهندسی در فرایندهای مدلسازی می‌تواند از منابع مهم ایجاد عدم قطعیت و دینامیک‌های مدل نشده باشد.

مقادیر زیر برای ابعاد، جرم و اینرسی سیستم رباتیک مورد مطالعه این پایان نامه در نظر گرفته شده است:

جدول (۳-۲) اندازه پارامترهای مدل

رابط			
1	$l_1 = 0.4 \text{ m}$	$m_1 = 10 \text{ kg}$	$I_1 = 0.88 \text{ kgm}^2$
2	$l_2 = 0.4 \text{ m}$	$m_2 = 10 \text{ kg}$	$I_2 = 0.58 \text{ kgm}^2$
3	$l_3 = 0.3 \text{ m}$	$m_3 = 3.9 \text{ kg}$	$I_3 = 0.15 \text{ kgm}^2$

فصل سوم – خطی سازی پسخوردی

۳-۱ مقدمه

یک ماشین CNC بعنوان یک سیستم رباتیک، یک مجموعه مکانیکی بشمار می‌آید. نیرو و گشتاور وارد به مفاصل بعنوان ورودی سیستم رباتیک و نیز خروجی کنترل کننده تلقی می‌شود و اشاره به روش کنترل گشتاور^۱ دارد. در این روش قانون کنترل بر مبنای گشتاور یا نیروی اعمالی به مفاصل طراحی می‌شود. روش کنترل گشتاور یکی از روشهای رایج و موثر در طراحی کنترل کننده برای ردگیری مسیر می باشد. [۲۹] در این روش دینامیک‌های غیرخطی سیستم رباتیک از طریق خطی سازی پس‌خوردی جبران می‌شوند و پایداری سیستم نیز به روش پس‌خورد خطی تأمین می‌شود.

در این بخش یک کنترل کننده برای سیستم رباتیک با استفاده از خطی سازی پس‌خوردی و بر مبنای کنترل گشتاور طراحی می‌شود. این کنترل کننده بر مبنای مدل دقیق سیستم طراحی خواهد شد. به کمک شبیه سازی رایانه ای نشان داده خواهد شد که این روشهای مبتنی بر مدل در مقابل قطعیت‌های حاضر در مدل سیستم کارایی لازم را نخواهند داشت.

۳-۲ کنترل کننده

با توجه به معادله مدل دینامیکی ربات مطرح شده در فصل پیش (۲-۴)، قانون کنترل پس‌خوردی سیستم‌های غیرخطی را می‌توان بصورت زیر پیشنهاد داد [۳۰].

$$\tau = D \left(\ddot{q}_d + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q) \right) + C \cdot \dot{q} + G \quad (۱-۳)$$

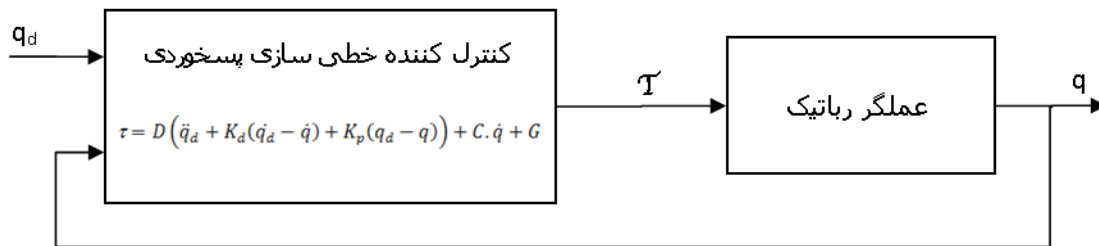
¹ computed torque control

با اعمال قانون کنترل رابطه (۱-۳) به سیستم مورد کنترل و نیز با در نظر گرفتن $q_d - q = e$ به رابطه (۳-۳) خواهیم رسید.

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = 0 \quad (۲-۳)$$

در معادله دیفرانسیل خطی بدست آمده برای دینامیک خطا در رابطه (۲-۳)، اگر ضرایب ماتریسهای K_p و K_d مقادیری مثبت انتخاب شوند، خطای ردگیری بصورت نمایی بسمت صفر میل کرده و پایداری سیستم تضمین خواهد شد.

نمودار اجرایی این سیستم کنترل چندمتغیره در شکل (۱-۳) به نمایش درآمده است:



شکل (۱-۳) نمودار سیستم کنترل رابطه (۱-۳)

۳-۳ شبیه سازی

کنترل کننده طراحی شده بکمک شبیه سازی رایانه ای بر روی ماشین CNC سه محوره با ساختار رباتیک اسکارا که با رابطه (۴-۲) مشخص شده است اجرا گردید.

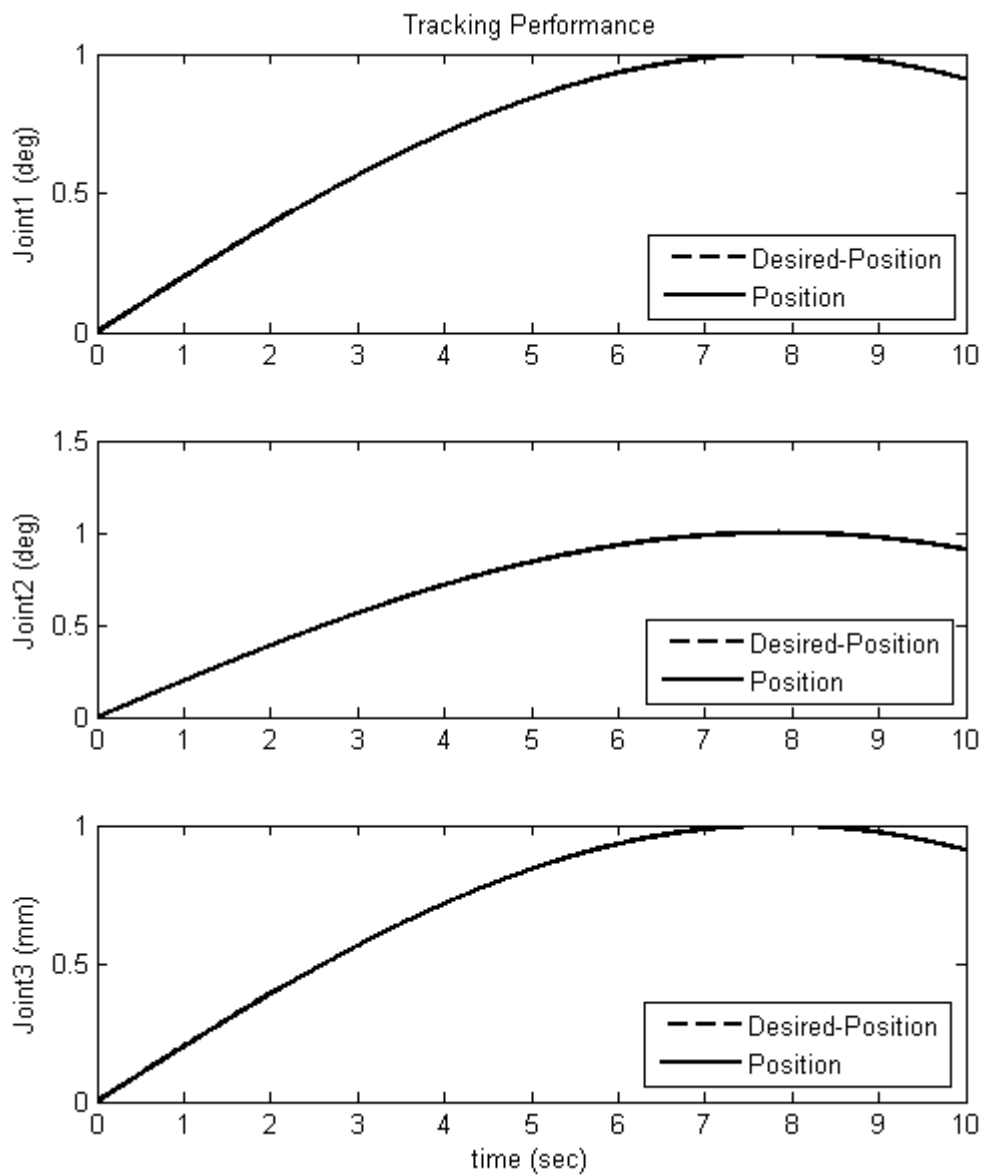
ماتریسهای K_p و K_d بصورت زیر انتخاب شده اند:

$$K_p = k_p \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad K_d = k_d \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

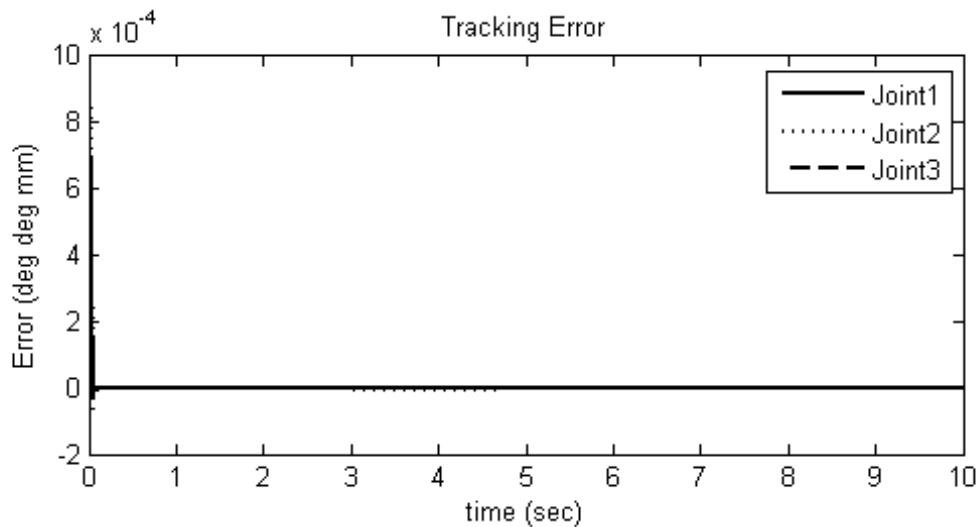
و مقادیر ۲۰ و ۲۰۰ به ترتیب برای k_p و k_d در نظر گرفته شده است.

با اعمال کنترل کننده به سیستم، و با فرض دقیق بودن اطلاعات ما از سیستم، میتوانیم به نتایج زیر دست

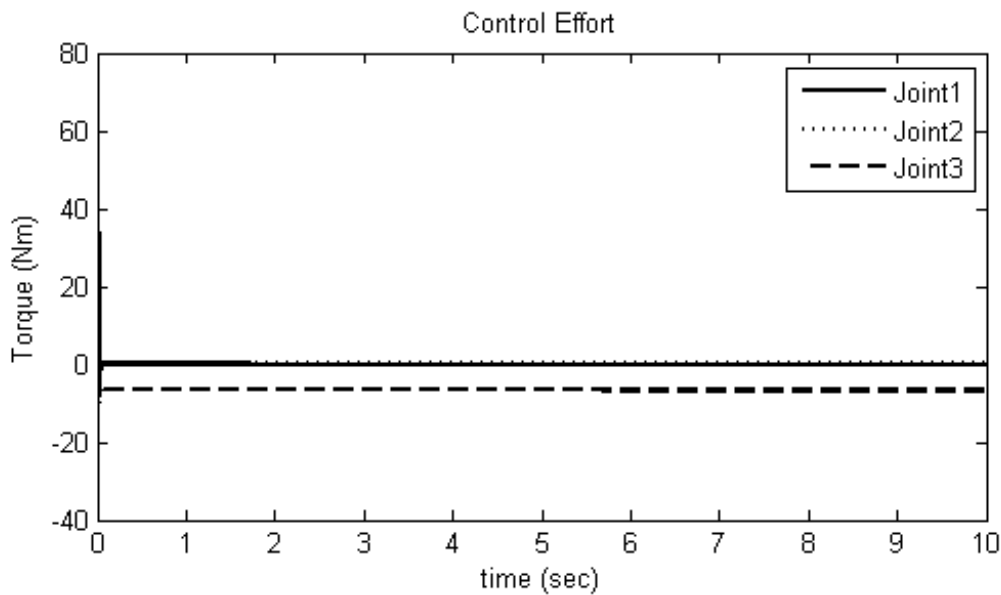
بیابیم:



شکل (۲-۳) روند ردگیری مسیر برای سه مفصل سیستم رباتیک با فرض اطلاع دقیق از مدل دینامیکی سیستم



شکل (۳-۳) خطای ردگیری با فرض اطلاع دقیق از مدل دینامیکی سیستم

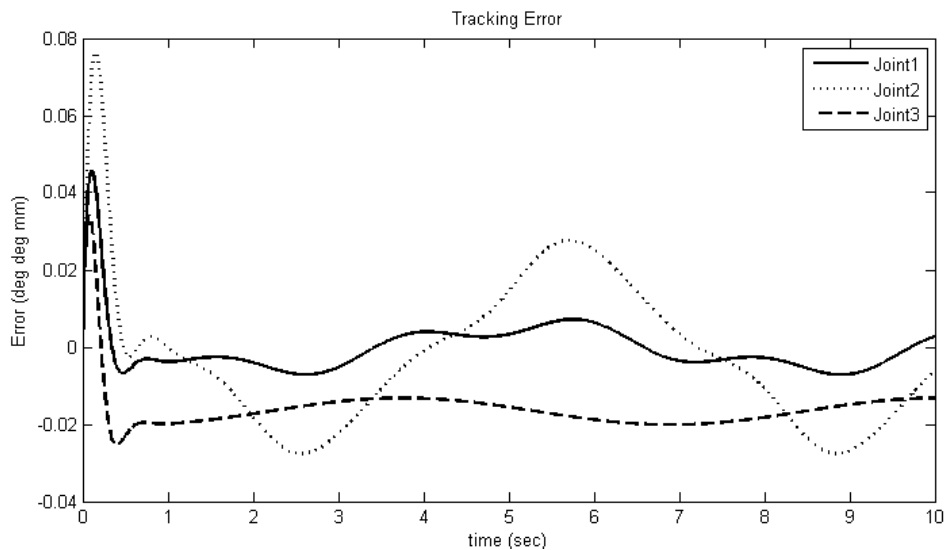


شکل (۴-۳) سیگنال کنترلی با فرض اطلاع دقیق از مدل دینامیکی سیستم

در شکل (۳-۳) مشاهده میکنیم سیگنال خطا برای هر سه مفصل به مقداری کمتر از 10^{-5} رسیده است. با توجه به اینکه کنترل کننده بر مبنای دانش دقیق از سیستم طراحی شده است، خطای ردگیری برای همه مفصل به مقدار ناچیزی رسیده است. سیگنال خروجی کنترل کننده هم در شکل (۴-۳) به نمایش درآمده

است. از آنجاکه مفصل سوم نیروی گرانش را تحمل می‌کند، سیگنال کنترلی مفصل رفتار متفاوتی را نسبت به دو مفصل دیگر از خود نشان می‌دهد. گفتنی است واحد سیگنال کنترلی برای مفاصل ۱ و ۲ که از انواع مفاصل لولایی هستند از جنس گشتاور و با واحد نیوتن‌متر (Nm) و برای مفصل سوم از جنس نیرو و با واحد نیوتن (N) می‌باشد؛ همچنین به دلیل مشابه، و با توجه به ورودی اعمالی، واحد سیگنال خطا برای دو مفصل اول درجه (deg) و برای مفصل سوم میلی‌متر (mm) می‌باشد.

همانطور که اشاره شد، نتایج بالا با فرض دقیق بودن اطلاعات ما از سیستم بدست آمده است؛ اما در عمل بدلیل وجود عدم قطعیت‌هایی در مدل دینامیکی سیستم، این روش کنترل برای کاربردهای صنعتی نمی‌تواند جذاب باشد. عملکرد ردگیری این سیستم کنترل در حضور عدم قطعیتها در شکل (۵-۳) قابل مشاهده می‌باشد. در این حالت کنترل کننده براساس پارامترهای نامی در دسترس طراحی شده است، و این درحالیست که پارامترهای واقعی سیستم متفاوت هستند. همانگونه که در شکل (۵-۳) پیداست مقدارخطا در این حالت بسیار زیاد شده و این اصلا مطلوب نیست.



شکل (۵-۳) خطای ردگیری با فرض وجود عدم قطعیت در مدل دینامیکی سیستم

۳-۴ نتیجه گیری

در این فصل کنترل کننده پسخوردی برای سیستم رباتیک طراحی شد. با کمک شبیه سازی رایانه ای نشان داده شد که روش خطی سازی پسخوردی که نیازمند دانش دقیق سیستم است، در مقابل عدم قطعیت پارامتری قادر به ارائه پاسخ مطلوب و قابل دفاع در محیط عملیاتی نمی باشد. راه غلبه بر این مشکل رفتن به سمت روشهای کنترل مقاوم نظیر کنترل تطبیقی می باشد که در فصل آینده بحث خواهد شد.

فصل چہارم – کنترول تطبیقی

۴-۱ مقدمه

یک مجموعه رباتیک یک سیستم دینامیکی چندمتغیره غیرخطی با تزویج و همراه با عدم قطعیت‌های مختلف می‌باشد و در نتیجه طراحی یک روش کنترلی مبتنی بر مدل ریاضی دقیق برای آن بسیار مشکل می‌باشد. [۵] اینجاست که روش کنترل تطبیقی پیشنهاد می‌شود. عموماً روش‌های کنترل تطبیقی برای کنترل سیستم‌های با مدل مشخص اما پارامترهای ناشناخته بکارگرفته می‌شود. کنترل کننده های تطبیقی می‌توانند بر پایه پارامترهای قابل تنظیم توسط مکانیزمی خاص، تنظیم شده و رفتار خود را در پاسخ به تغییر دینامیک فرایند تغییر دهند. [۳۱]

بسیاری از سیستم‌های دینامیکی که بایستی کنترل شوند، پارامترهای نامعلوم دارند که یا ثابت‌اند یا بطور بسیار آهسته تغییر می‌کنند. برای مثال در دستگاه‌های CNC در شرایطی مجبوریم از متدهای مختلف برای براده برداری استفاده کنیم، که می‌تواند در جرم و طول رابط نهایی تأثیر بگذارد و مدل دینامیکی موجود سیستم را تغییر دهد. ایده اصلی این فصل این است که پارامترهای نامعلوم سیستم و کنترل کننده، براساس سیگنال‌های اندازه‌گیری شده بصورت بهنگام تخمین زده شوند و کنترل کننده بتواند رفتار خود را برای پاسخ دادن به تغییرات ایجادشده در دینامیک سیستم اصلاح نماید.

۴-۲ کنترل کننده

با توجه به معادله مدل دینامیکی ربات مطرح شده در فصل پیش (۲-۴)، می‌توان قانون کنترل پسخوردی را با استفاده از پارامترهای نامی موجود، بصورت رابطه زیر پیشنهاد داد [۳۱].

$$\tau = \tilde{D} \left(\ddot{q}_d + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q) \right) + \tilde{C} \cdot \dot{q} + \tilde{G} \quad (۱-۴)$$

در رابطه (۱-۴) ماتریسهای \tilde{D} ، \tilde{C} و \tilde{G} ماتریسهای مدل نامی در دسترس از سیستم می باشد که در پارامترهای آنها با عدم قطعیت‌های پارامتری مواجه هستیم.

پس از اعمال قانون کنترل به سیستم و با در نظر گرفتن $q_d - q = e$ به رابطه (۲-۴) خواهیم رسید.

$$\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e = \tilde{D}^{-1}((D - \tilde{D})\ddot{q} + (C - \tilde{C})\dot{q} + (G - \tilde{G})) \quad (۲-۴)$$

با توجه به این قابلیت دینامیکهای غیرخطی ربات که می‌توان آن را بصورت خطی پارامتری کرد، رابطه (۴-۴) را خواهیم داشت.

$$\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e = \tilde{D}^{-1}Y(P - \tilde{P}) \quad (۳-۴)$$

در این صورت ماتریس تابع Y و بردار پارامترها P برای ساختار رباتیک مورد مطالعه به دو بخش ثابت و متغیر که قابلیت پیاده‌سازی کنترل تطبیقی را داشته باشد، برای مدل رباتیک مورد مطالعه بصورت رابطه (۴-۴) بدست خواهد آمد.

$$Y = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & \cos q_2 \cdot \dot{q}_1 & \ddot{q}_2 & \cos q_2 \cdot \dot{q}_2 & (2q_1 + \dot{q}_2) \cdot \sin q_2 \cdot \dot{q}_2 & \dot{q}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 & \cos q_2 \cdot \dot{q}_1 & -\dot{q}_1 \cdot \sin q_2 \cdot \dot{q}_1 & \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{q}_3 & \dot{q}_3 - 9.81 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} \left(\frac{m_1}{3} + m_2 + m_3\right) l_1^2 + \left(\frac{m_2}{3} + m_3\right) l_2^2 + I_1 + I_2 + I_3 \\ (m_2 + 2m_3) l_1 l_2 \\ -\left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) l_2^2 + I_2 + I_3 \\ -\left(\frac{m_2}{3} + m_3\right) l_2^2 \\ -l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) \\ f \\ m_3 \end{bmatrix} \quad (۴-۴)$$

اگر معادله رابطه (۲-۴) را به فرم فضای حالت بنویسیم، به رابطه زیر خواهیم رسید.

$$\dot{X} = AX + Bw \quad (۵-۴)$$

که در آن

$$x_1 = e \quad x_2 = \dot{e} \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ -k_p_{3 \times 3} & -k_d_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad w = \tilde{D}^{-1}Y(P - \tilde{P})$$

اگر تابع $V(x)$ را با خصوصیات تابع کاندید لیاپانوف به شکل رابطه (۶-۴) معرفی نماییم:

$$V(x) = X^T S X + \frac{1}{2} (P - P^*)^T (P - \tilde{P}) \quad (۶-۴)$$

بطوریکه $V(0) = 0$ و $V(x \neq 0) > 0$ ؛ با گرفتن مشتق $V(x)$ نسبت به زمان، رابطه (۷-۴) را خواهیم داشت.

$$\dot{V} = X^T (A^T S + SA) X + 2X^T S B w - \dot{\tilde{P}} (P - \tilde{P}) \quad (۷-۴)$$

با جایگذاری w و انتخاب ماتریس $S_{6 \times 6}$ مثبت معین طبق نظریه پایداری مستقیم لیاپانوف (رابطه (۸-۴)) میتوان به قانون تطبیق رابطه (۹-۴) رسید.

$$A^T S + SA = -Q_{(PD)} \quad (۸-۴)$$

$$\tilde{P} = \int_0^t (X^T S B \tilde{D}^{-1} Y) dt + \tilde{P}_0 \quad (۹-۴)$$

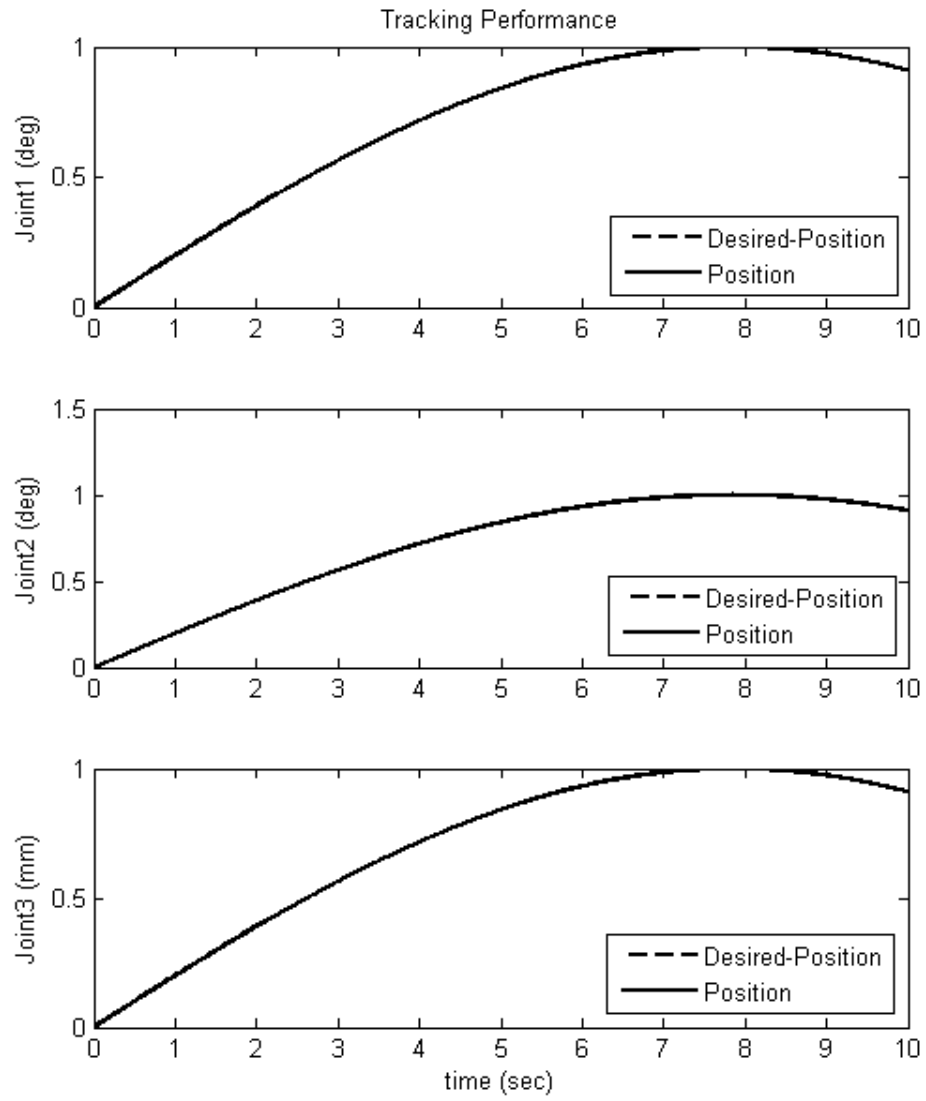
در رابطه (۴-۹)، \bar{P}_0 بردار مقدار اولیه پارامترها می باشد.

در این روش همزمان با اینکه به یک کنترل کننده دست می یابیم که خود را بسته به شرایط سیستم برای دسترسی به کمترین خطا تطبیق می دهد، با انتخاب مناسب k_p و k_d (مثبت) پایداری لیاپانوفی نیز تضمین شده است.

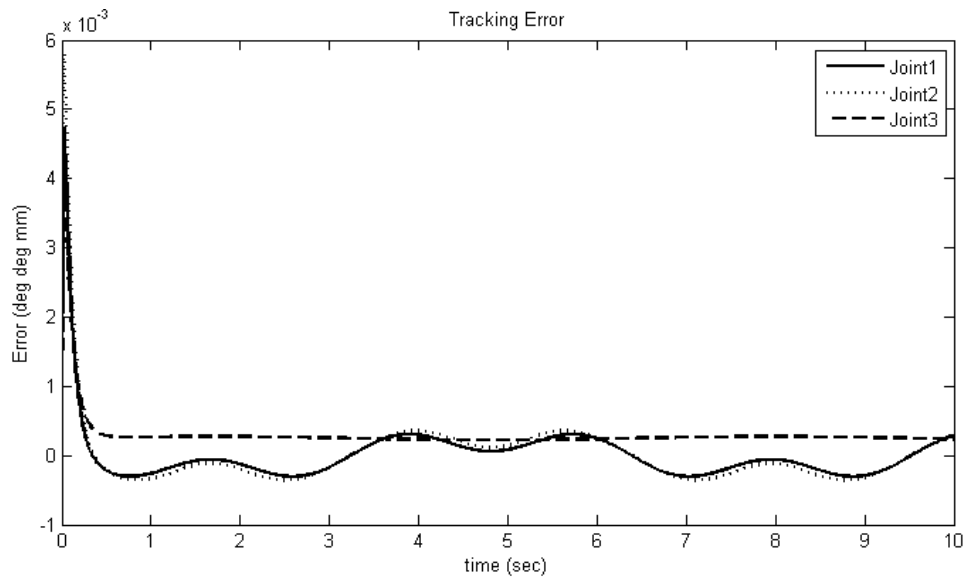
۴-۳ شبیه سازی

کنترل کننده طراحی شده بکمک شبیه سازی رایانه ای بر روی ماشین با ساختار رباتیک اسکارا سه لینیکی اجرا گردید. در شبیه سازی برای مدل کردن عدم قطعیت پارامتری، فرض شده است مقادیر نامی پارامترها ۹۰٪ مقادیر واقعی باشند. ماتریسهای K_p و K_d بصورت رابطه (۳-۳) انتخاب شده اند و به ترتیب مقادیر ۲۰ و ۲۰۰ برای آنها انتخاب شده است. همچنین Q در معادله لیاپانوف رابطه (۴-۸) بصورت $Q = I$ در نظر گرفته شده است.

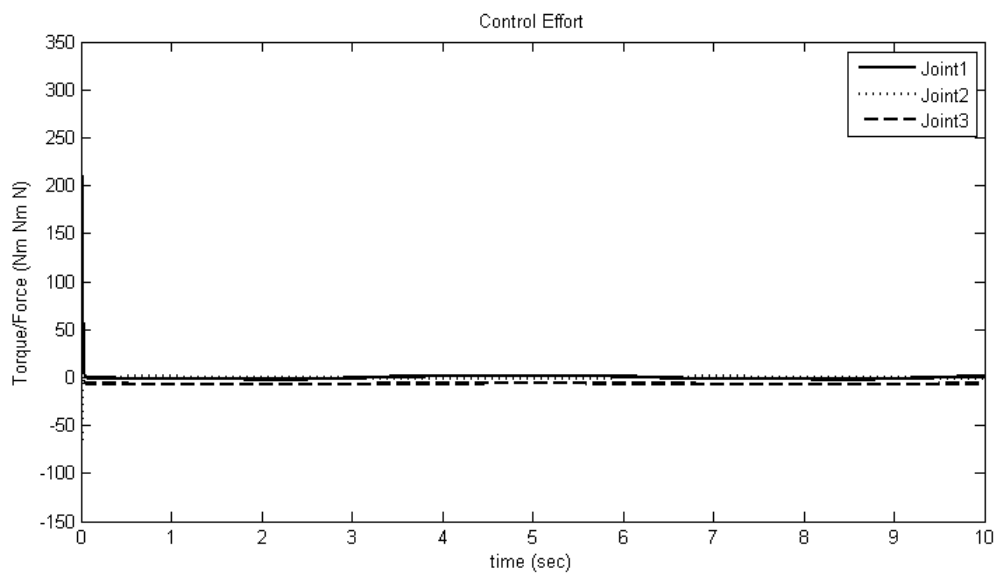
با اعمال کنترل کننده به سیستم، و با فرض اینکه اغتشاش خارجی از محیط بر کنترل کننده تأثیری ندارد، به نتایج زیر دست می یابیم:



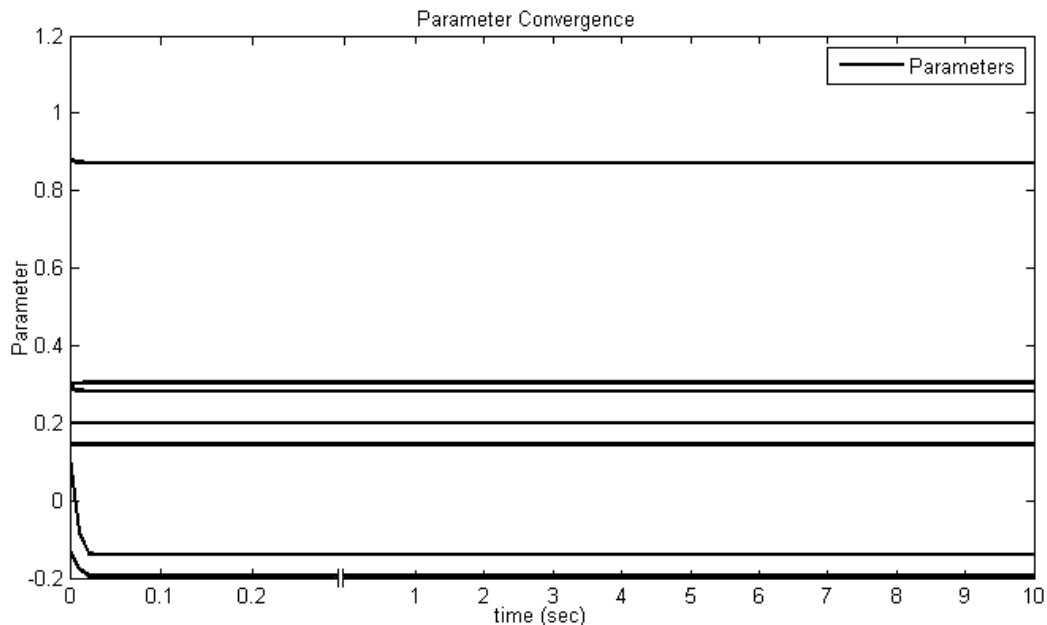
شکل (۴-۱) روند ردگیری مسیر برای سه مفصل سیستم رباتیک



شکل (۲-۴) خطای ردگیری کنترل کننده تطبیقی (بدون حضور اغتشاش خارجی)



شکل (۳-۴) سیگنال خروجی کنترل کننده تطبیقی (بدون حضور اغتشاش خارجی)



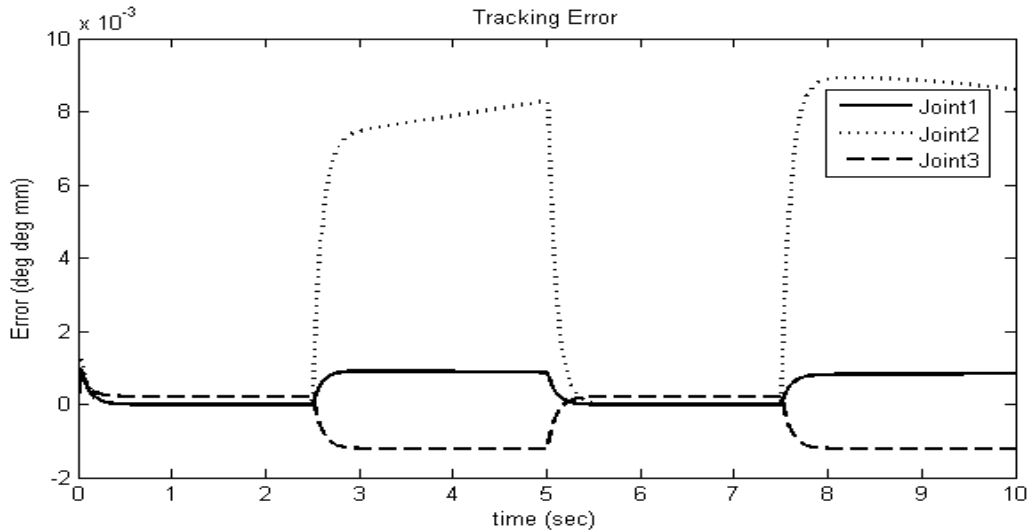
شکل (۴-۴) روند همگرایی پارامترها

همانطور که در شکل (۴-۱) پیداست، کنترل کننده تطبیقی توانسته است درمقابل عدم قطعیت های پارامتری عملکرد خوبی از خود نشان داده و خطا را در مقایسه با کنترل کننده خطی سازی پسخوردی (شکل (۳-۵)) به شدت کاهش داده است.

اگر در سیستم تحت مطالعه اغتشاشات را بصورت τ_d در مدل دینامیکی ربات مطابق رابطه (۴-۱۰) نشان دهیم،

$$D(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + B(\dot{q}) + \tau_d = \tau \quad (۴-۱۰)$$

و اغتشاش خارجی را با سیگنال پالس مربعی با دامنه (Nm, Nm, N) 1 و دوره تناوب 5s مدل نماییم، در اینحالت خطای ردگیری شکل (۴-۴) بدست خواهد آمد.



شکل (۴-۵) سیگنال خطای کنترل کننده تطبیقی در حضور اغتشاش خارجی

مشاهده می‌شود سیگنال خطا در مفصل دوم بطرز محسوسی بزرگ شده است. لذا می‌توانیم نتیجه بگیریم کنترل کننده تطبیقی درمقابل اغتشاش خارجی بعنوان یکی از انواع عدم قطعیت‌های غیرساختاری مقاوم نیست و در محیط‌های عملیاتی که اغتشاشات خارجی حضور پررنگی دارند قابلیت کاربردی ندارد.

۴-۴ نتیجه گیری

در این فصل کنترل کننده تطبیقی برای سیستم رباتیک طراحی شد. با کمک شبیه سازی رایانه ای نشان داده شد که این روش کنترلی فقط در مقابل عدم قطعیت پارامتری قادر به ارائه پاسخ مطلوب است اما درمقابل اغتشاش خارجی عملکرد مناسبی را ارائه نمی‌کند لذا این طرح کنترلی نیز قابل دفاع در محیط عملیاتی نمی‌باشد. راه غلبه بر این مشکل استفاده از روشهای کنترل مقاوم دیگر نظیر کنترل فازی تطبیقی می‌باشد که در فصل آینده بحث خواهد شد.

فصل پنجم – کنترل فازی تطبیقی

۵-۱ مقدمه

بمنظور بکارگیری رباتهای صنعتی در محیط صنعتی، بخش عظیمی از توجهات در مقالات مختلف، به کنترل مقاوم عملگرهای رباتیک که بتواند آثار عدم قطعیت‌های موجود را تخفیف دهد، اختصاص پیدا کرده است. [۳۲-۳۵] عدم قطعیتها شامل دینامیکهای مدل نشده، عدم قطعیت‌های پارامتری و اغتشاشات خارجی می‌شود. از اینرو در نظر گرفتن منابع مختلف عدم قطعیتها نظیر خطاهای مدلسازی، بارهای نامعلوم و خطاهای محاسباتی در بکارگیری روشهای کنترلی برای کنترل عملگرهای رباتیک در محیطهای عملیاتی ضروریست. این عدم قطعیتها بعنوان یک چالش در مسیر استفاده از خطی سازی پسخوردی بعنوان یک روش رایج در کنترل عملگرهای رباتیک مطرح هستند. [۳۶] برای بکارگیری روش خطی سازی پسخوردی به مدل دقیق سیستم نیازمندیم، و این درحالیست که غالباً مدل کامل سیستم در دسترس نیست. عدم دقت در مدل سیستم می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم کنترل را کاهش دهد. بنابراین عدم قطعیت باید بوسیله قانون کنترل جبران شود تا کارایی سیستم کنترل افزایش یابد.

همانگونه که اشاره شده است، عدم قطعیتها تأثیرات نامطلوبی بر کارایی کنترل کننده‌ها دارند و حتی می‌توانند موجب ناپایداری سیستم بشوند. کنترل تطبیقی یکی از راههای مقابله با عدم قطعیتهاست. بمنظور رفع مشکلاتی که در شیوه کنترل تطبیقی وجود دارد و در فصل پیش نیز بررسی شد، محققان در مقالات متعدد روشهای کنترل مختلفی پیشنهاد داده‌اند. کنترل مد لغزشی تطبیقی یک روش موثر و رایج در حل مشکل تفاوت در پارامترها و عدم قطعیتهاست. [۳۷، ۳۸] مقاله دیگری [۳۹] یک طرح کنترلی تطبیقی مد لغزشی فازی پیشنهاد می‌دهد که در آن، محقق بوسیله قوانین فازی، بطور موثری لرزش سیگنال کنترلی را کاهش داده است. بمنظور جبران اصطکاک، مقاله [۴۰] یک طرح کنترلی فازی تطبیقی براساس جبران‌ساز کنترل مد لغزشی پیشنهاد کرده است. در مقاله [۴۱] هدف رسیدن به کنترل کننده ای مقاوم در حضور اغتشاش خارجی، دینامیک های مدل نشده و عدم قطعیت‌های مدل می باشد. ساختار کنترل مقاوم پیشنهاد

شده در این مقاله، مبتنی بر ترکیب کنترل مد لغزشی با یک جبرانساز تطبیقی غیرخطی می باشد. همانقدر که کنترل مد لغزشی در ایجاد مقاوم بودن بالا در سیستمها مفید است، اما لرزش ناخواسته بر سطح لغزش می تواند کارایی سیستم کنترل را تحت الشعاع قرار دهد. نکته دیگری که در کنترل کننده های مد لغزشی می تواند مورد توجه قرار بگیرد، نیاز به اطلاع از حد بالا و پایین عدم قطعیتهاست که برای طراحی کنترل کننده حتما باید این حدود محاسبه بشوند.

کنترل فازی یک روش کنترل مقاوم مستقل از مدل است که به سادگی طراحی می شود و می تواند بعنوان یک جانشین روشهای کنترل مقاوم رایج مطرح باشد [۲۷] برای ساختن یک کنترل کننده فازی به اطلاع دقیق از مدل سیستم نیاز نداریم. کنترل کننده فازی که از قوانین زبانی مبتنی بر دانش افراد خبره سود می برد، یکی از روشهای کنترل هوشمند محسوب می گردد. در نتیجه کنترل فازی برای سیستمهای رباتیک در مقالات مختلف مورد توجه قرار گرفته است تا بر عدم قطعیت، خواص غیرخطی و تزویج این سیستمها غلبه کنند. [۴۵-۴۲] سیستمهای فازی همچنین بطور گسترده بعنوان یک کنترل کننده تکمیلی برای جبران عدم قطعیتها مورد استفاده قرار گرفته است. [۴۶] مقاله [۴۷] یک راهکار برای بهبود ردگیری مسیر در عملگرهای رباتیک با ترکیب کنترل خطی سازی پسخوردی و سیستم فازی ارائه کرده است. بخش فازی کنترل کننده در این مقاله برای تقریب زدن عدم قطعیتها در سیستم رباتیک استفاده شده است. اما تنظیم پارامترهای بخش فازی کنترل کننده نیازمند یک معادله لیاپانوف پیچیده است که منجر به طراحی یک کنترل کننده پیچیده شده است. مقاله دیگر [۴۸] خطی سازی پسخوردی معمولی را با سیستم فازی برای حل مشکلات ردگیری مسیر در یک ربات صنعتی ترکیب کرده است. اما بدلیل تعیین قوانین فازی در سیستم کنترل فازی بوسیله چند آزمایش و تجربه طراحان، بجای استفاده از یک قانون تطبیق، اطمینان از پایداری سیستم کنترل فازی را در حالت کلی مشکل می نماید. در مقاله [۳۴] نیز نویسنده کنترل کننده خطی سازی را به همراه سیستم فازی بکارگیری کرده است. در این مقاله سیستم فازی برای تخمین و جبران

عدم قطعیتها بکار رفته است، اما تعداد قوانین فازی بسیار زیاد است که قابلیت عملیاتی شدن کنترل کننده را تحت الشعاع قرار داده است.

بمنظور اجتناب از این معایب و نیز استفاده از مزیت‌های کنترل خطی سازی پسخوردی و سیستم‌های فازی، در ادامه طرح کنترلی فازی تطبیقی مقاوم از ترکیب کنترل کننده خطی سازی پسخوردی و یک جبرانساز فازی تطبیقی ارائه خواهد شد.

۵-۲ کنترل کننده

۵-۲-۱ طرح کنترلی

با توجه به معادله مدل دینامیکی ابزار ماشینکاری با ساختار رباتیک اسکارا (۲-۴)، در این فصل قانون کنترل رابطه (۵-۱) را پیشنهاد می‌دهیم.

$$\tau = \hat{D}_{(q)}(\ddot{q}_d + k_d \dot{e} + k_p e + f) + \hat{H}_{(q, \dot{q})} \quad (۵-۱)$$

در رابطه (۵-۱) ماتریسهای \hat{D} ، \hat{C} و \hat{G} ماتریسهای مدل نامی در دسترس از سیستم می باشد که در آنها با عدم قطعیت‌های مواجه هستیم. همچنین f در این رابطه سیستم فازی مورد استفاده در کنترل کننده می باشد.

قانون کنترل ارائه شده در رابطه (۵-۱) یک طرح کنترلی تطبیقی است که از ترکیب دو بخش کنترل خطی سازی پسخوردی و یک جبرانساز فازی تشکیل شده است.

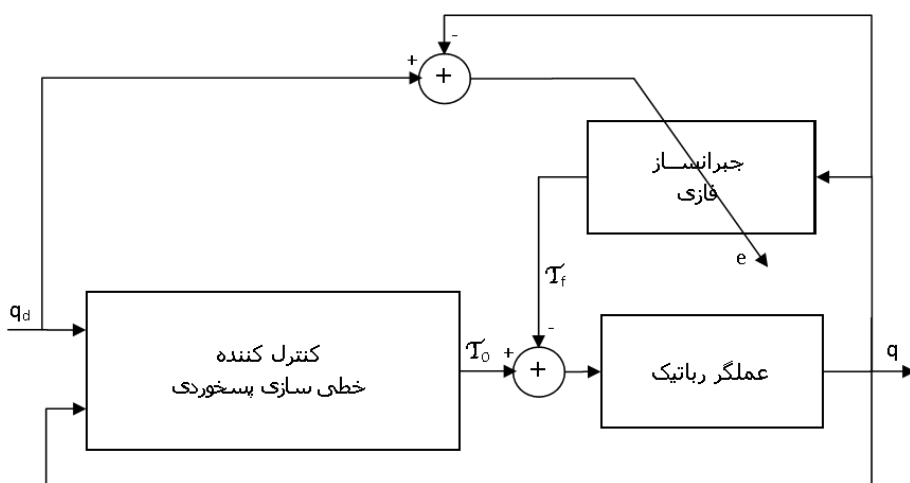
$$\tau = \tau_0 + \tau_f \quad (۵-۲)$$

در این رابطه داریم:

$$\tau_0 = \widehat{D}_{(q)}(\ddot{q}_d + k_d \dot{e} + k_p e) + \widehat{H}_{(q, \dot{q})} \quad (3-5)$$

$$\tau_f = \widehat{D}_{(q)} f \quad (4-5)$$

مطابق پیکربندی نشان داده شده در شکل (۱-۵) برای کنترل کننده پیشنهادی، سیگنال کنترلی τ_0 که خروجی بخش خطی سازی پسخوردی کنترل کننده است، با سیگنال کنترلی بخش فازی تطبیقی τ_f جمع می‌شود تا سیگنال کنترلی τ را برای عملگر رباتیک تولید نمایند.



شکل (۱-۵) نمودار پیکربندی طرح کنترلی فازی تطبیقی رابطه (۱-۵)

بخش خطی سازی پسخوردی دستورات اعمالی و مقادیر اندازه گیری شده متغیرهای مفاصل رباتیک را بعنوان ورودی دریافت می‌نماید. بخش فازی کنترل کننده نیز از متغیرهای مفاصل بعنوان ورودی و از سیگنالهای خطا بمنظور تنظیم پارامترهای جبران‌ساز فازی استفاده می‌کند. سیگنال کنترلی خروجی از سیستم فازی τ_f ، وظیفه محو کردن آثار عدم قطعیتها را که ناشی از عدم دقت در پارامترهای مدل و اغتشاشات خارجی است، دارد.

با اعمال کنترل کننده رابطه (۵-۱) به سیستم رباتیک، و با در نظر گرفتن $q_d - q = e$ ، به سیستم حلقه بسته رابطه (۵-۵) خواهیم رسید.

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = \hat{D}^{-1} \left((D - \hat{D}) \ddot{q} + (H - \hat{H}) + F \right) - f = \omega \quad (5-5)$$

در این سیستم، جبرانساز فازی f نقش کاهش سیگنال خطای ω را برعهده خواهد داشت و از این طریق به رسیدن به کنترل مطلوب کمک می‌نماید.

۵-۲-۲ ساختار سیستم فازی

طبق تعریف یک سیستم فازی چندورودی-چندخروجی، یک نگاشت از مجموعه های فازی $U \in R^l$ به مجموعه های فازی $V \in R^n$ بر مبنای قوانین اگر-آنگاه فازی می‌باشد. خروجی یک سیستم فازی چندورودی-چندخروجی با فازی ساز منفرد، موتور استنتاج ضرب و غیرفازی ساز میانگین مراکز بصورت رابطه (۵-۶) می‌باشد. [۲۷]

$$f_j = \frac{\sum_{i=1}^L \bar{y}_j^l (\prod_{i=1}^l \mu_{A_i^l}(x_i))}{\sum_{i=1}^L \prod_{i=1}^l \mu_{A_i^l}(x_i)}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6-5)$$

در رابطه (۵-۶) A_i^l و B_j^l متغیرهای زبانی در زیرفضاهای فازی U_i و V_j هستند که با توابع تعلق $\mu_{A_i^l}(x_i)$ و $\mu_{B_j^l}(y_j)$ تعریف شده اند و \bar{y}_j^l مراکز توابع تعلق خروجی B_j^l می‌باشد. L تعداد قوانین فازی است و I تعداد ورودی های تابع فازی و n تعداد خروجی.

بمنظور آماده سازی سیستم فازی رابطه (۵-۶) بصورت قابل نمایش در قالب خطی سازی پارامتری، تابع پایه فازی می‌تواند بصورت زیر تعریف گردد:

$$\zeta(x)^l = \frac{\prod_{i=1}^l \mu_{A_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^L \prod_{i=1}^l \mu_{A_i^l}(x_i)}, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (7-5)$$

بدین ترتیب رابطه (۶-۵) می‌تواند بصورت زیر بازنویسی گردد:

$$f_j = \sum_{l=1}^L \bar{y}_j^l \zeta(x) = \zeta_{j(x)} \theta_j^T, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8-5)$$

که در آن \bar{y}_j^l مرکز توابع تعلق خروجی، $\zeta_{j(x)} = (\zeta(x)^1, \dots, \zeta(x)^L)$ بردار پایه فازی، و $\theta_j = (\bar{y}_j^1, \dots, \bar{y}_j^L)^T$ بردار پارامترها نام دارد.

بنابراین خروجی کلی تابع فازی چندورودی-چندخروجی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$f = \zeta(x) \theta^T \quad (9-5)$$

در این رابطه، θ بردار پارامترها، یک بردار مرکب $(n \times 1)$ است که θ_j ، j مین سطر بردار θ می‌باشد..

سیستم فازی با ساختار ارائه شده در رابطه (۶-۵) دارای خاصیت تقریبگیری عمومی است و می‌تواند هر تابع غیرخطی ناشناخته را تقریب بزند. [۲۷] لذا f در رابطه (۱-۵) برای جبران سیگنال خطای w در رابطه (۵-۵) می‌تواند بوسیله یک تابع فازی ایده آل تخمین زده شود.

$$f = \zeta(x) \theta^{*T} + \varepsilon \quad (10-5)$$

که در آن ε خطای تقریب فازی نام دارد و $x = q$ متغیرهای مفاصل مجموعه رباتیک، بردار ورودی سیستم فازی است. θ^* بردار تخمین بهینه عدم قطعیتها می‌باشد. $\hat{f}(x|\hat{\theta})$ یک تقریب از $f(x|\theta)$ است و بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\hat{f}(x|\hat{\theta}) = \zeta_{(x)} \hat{\theta}^T \quad (11-5)$$

لذا جبرانساز فازی τ_f می تواند بصورت زیر تعریف گردد:

$$\tau_f = \widehat{D}_{(q)} \hat{f}(x|\hat{\theta}) \quad (12-5)$$

با جایگذاری رابطه (11-5) در (5-5)، و نوشتن رابطه سیستم حلقه بسته بصورت فضای حالت داریم:

$$\dot{X} = AX + B\widehat{\omega} \quad (13-5)$$

که در آن $X = (e, \dot{e})^T$ ، $A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix}$ ، $B = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix}$ و

$$\widehat{\omega} = \zeta_{(x)} (\theta^{*T} - \hat{\theta}^T) + \varepsilon$$

بردار ورودی کنترل کننده فازی بصورت $x = \{q_1, q_2, q_3\}$ در نظر گرفته شده است. قوانین زبانی فازی به شکل زیر مورد استفاده قرار گرفته اند:

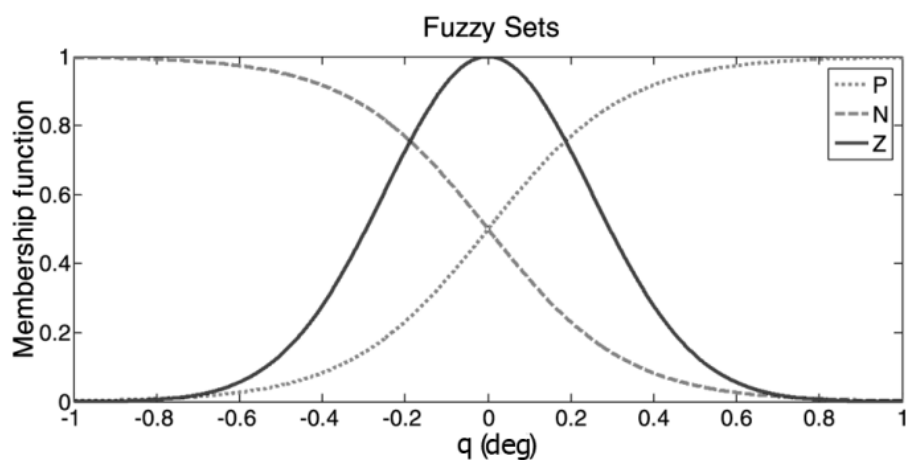
Rule^l : If x_1 is A_1^l and x_2 is A_2^l and x_3 is A_3^l , Then f is B^l

که در آن l شماره قانون فازی است که برای سه ورودی و سه تابع تعلق اختصاصی $1, \dots, 27$ خواهد بود. در قانون l A_i^l ($i = 1, 2, 3$) و B^l توابع تعلق متغیرهای فازی می باشند. سه تابع تعلق گوسین $\mu_{A^l}(x_i)$ با نامهای مثبت (P)، صفر (Z) و منفی (N) نامگذاری شده اند و در روابط (5-14) تا (5-16) تعریف شده اند و همچنین در شکل (5-2) به نمایش در آمده اند.

$$(N) \quad \mu_{A^l}(x_i) = 1/1 + \exp(-(x_i + x_c)/\sigma) \quad (14-5)$$

$$(Z) \quad \mu_{A^l}(x_i) = \exp(-(x_i/\sigma)^2) \quad (15-5)$$

$$(P) \quad \mu_{A^l}(x_i) = 1/1 + \exp((x_i + x_c)/\sigma) \quad (16-5)$$



شکل (۲-۵) توابع تعلق هر ورودی

۳-۲-۵ قانون تطبیق

براساس تئوری پایداری لیاپانوف، تابع کاندید لیاپانوف زیر را پیشنهاد می‌دهیم:

$$V = \frac{1}{2}X^T P X + \frac{1}{2\gamma} \text{tr}((\theta^* - \hat{\theta})^T (\theta^* - \hat{\theta})) \quad (17-5)$$

که در آن tr طبق تعریف، بیانگر عملگر حاصلجمع عناصر قطری ماتریس مربعی می باشد. P یک ماتریس

مثبت معین متقارن است که طبق رابطه لیاپانوف تولید می‌گردد [۳۰]:

$$A^T P + PA = -Q \quad (18-5)$$

با مشتق گرفتن از V نسبت به زمان خواهیم داشت:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2}X^T QX + X^T PB(\zeta_{(x)}(\theta^{*T} - \hat{\theta}^T) + \varepsilon) - \frac{1}{\gamma} \text{tr}(\hat{\theta}^T(\theta^* - \hat{\theta})^T) \quad (19-5)$$

و سرانجام می‌توانیم قانون تطبیق زیر را برای تنظیم جبران‌ساز فازی تطبیقی استخراج بنمائیم.

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma X^T PB \zeta_{(x)} \quad (20-5)$$

۳-۵ تحلیل پایداری

قضیه ۱-۵ - قضیه ریلی-ریتز^۱ [۴۹]: اگر A یک ماتریس مثبت معین متقارن $n \times n$ باشد، و λ_{min} و

λ_{max} به ترتیب کمترین و بیشترین اندازه مقدار ویژه ماتریس باشند، آنگاه برای $X \in R^n$ خواهیم داشت:

$$\lambda_{\min(A)} \|X\|^2 \leq X^T A X \leq \lambda_{\max(A)} \|X\|^2$$

با انتخاب $k_p, k_d > 0$ در رابطه قانون تطبیق (۱-۵)، و با توجه به تابع کاندید لیاپانوف پیشنهادی رابطه

(۱۷-۵) و لحاظ کردن رابطه لیاپانوف (۱۸-۵) در آن، و سپس گرفتن مشتق از این تابع لیاپانوف (رابطه (۵-۱۹)) و لحاظ کردن قانون تطبیق (۲۰-۵) در آن خواهیم داشت:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2}X^T QX + X^T PB\varepsilon \quad (21-5)$$

حال بر طبق قضیه ۱-۵ می‌توان به نامساوی زیر رسید:

¹ Rayleigh-Ritz theorem

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2}\lambda_{\min(Q)}\|X\|^2 + \|\varepsilon\|\lambda_{\max(P)}\|X\| = \quad (22-5)$$

$$-\frac{1}{2}\|X\|[\lambda_{\min(Q)}\|X\| - 2\|\varepsilon_0\|\lambda_{\max(P)}]$$

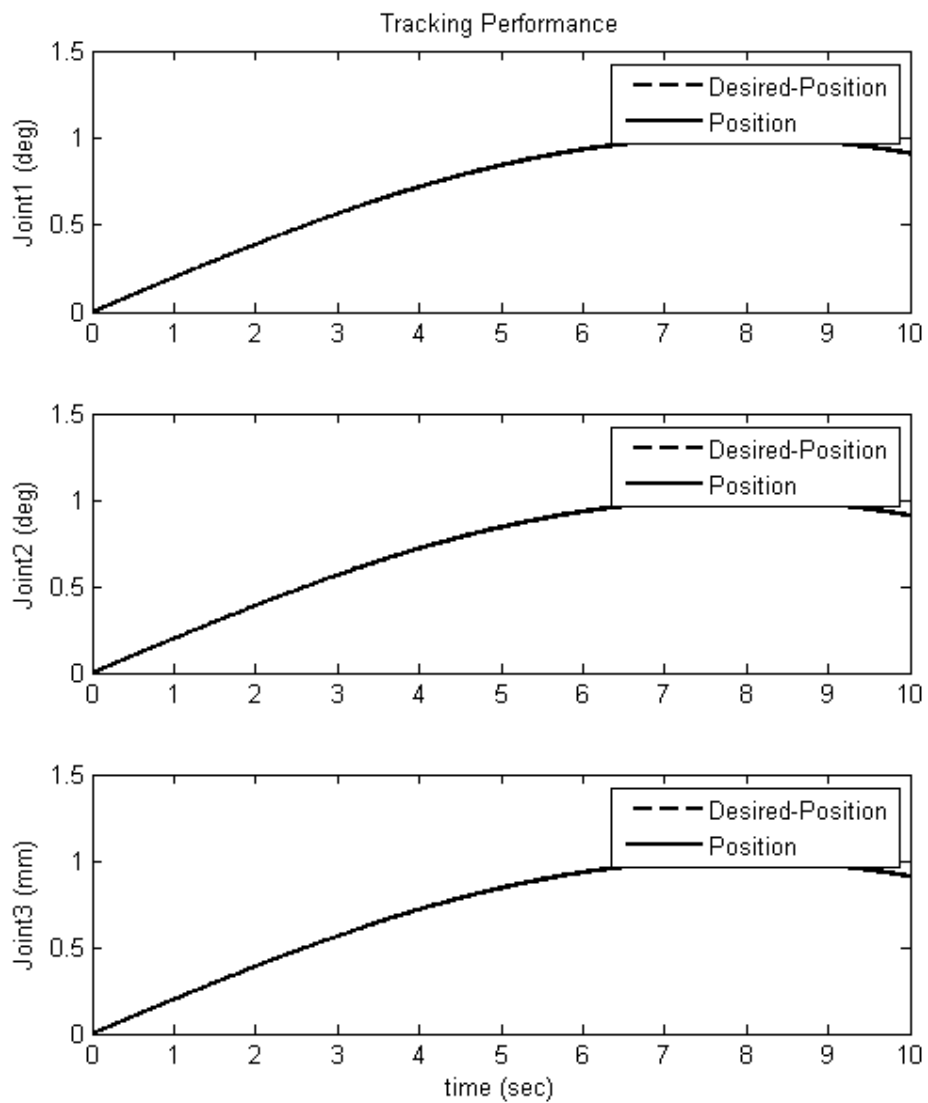
بنابراین مادامی که عبارت داخل کروشه در رابطه (22-5) مثبت باشد، \dot{V} منفی خواهد بود.

$$\|X\| > \frac{2\|\varepsilon\|\lambda_{\max(P)}}{\lambda_{\min(Q)}} \quad (23-5)$$

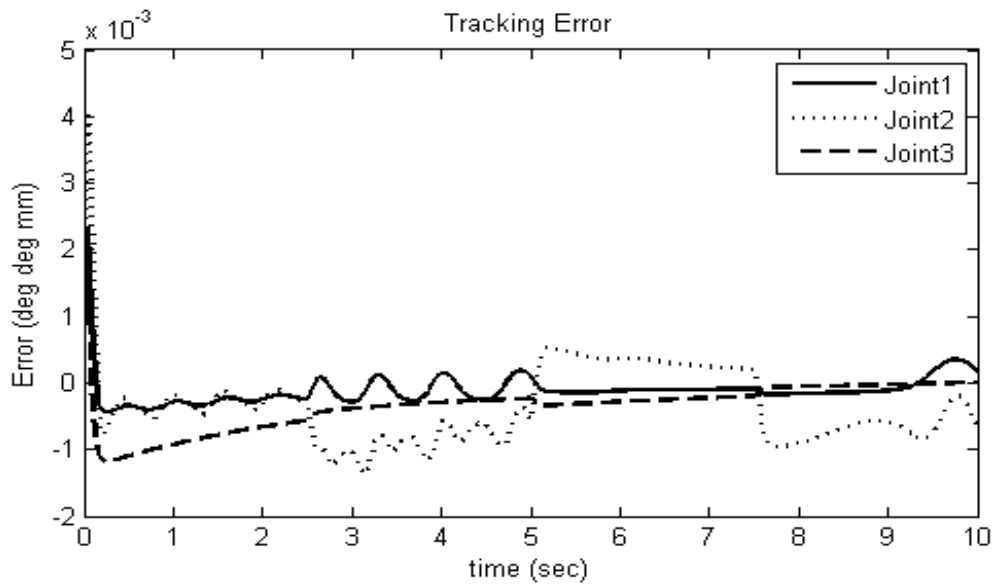
تا زمانی که رابطه فوق برقرار باشد، نامساوی (22-5) تضمین می‌شود و خطای ردگیری کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر می‌توان گفت خطا وارد یک فضای کروی محدود به شعاع $2\|\varepsilon\|\lambda_{\max(P)}/\lambda_{\min(Q)}$ شده و با فرض طراحی یک سیستم فازی با خطای تقریب به اندازه کافی کوچک، برطبق نظریه لیاپانوف سیستم پایدار و خطا محدود می‌ماند.

۴-۵ شبیه سازی

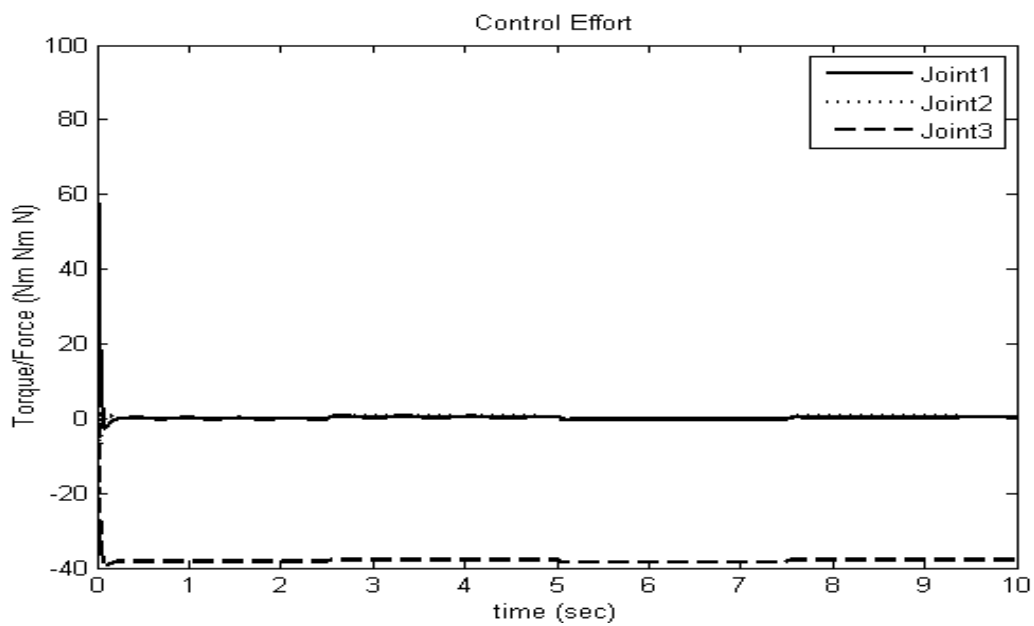
کنترل کننده طراحی شده در این فصل بکمک شبیه سازی رایانه‌ای بر روی سیستم مورد مطالعه در این پایان نامه متشکل از یک ماشین CNC با ساختار رباتیک اسکارا سه‌لینکی اجرا گردید. در شبیه‌سازی برای مدل کردن عدم قطعیت پارامتری، فرض شده است مقادیر نامی پارامترها ۹۰٪ مقادیر واقعی باشند. و اغتشاش خارجی نیز با سیگنال پالس مربعی با دامنه (Nm, Nm, N) 1 و دوره تناوب 5s به سیستم کنترل وارد شده است. ماتریسهای K_p و K_d بصورت رابطه (3-3) انتخاب شده اند و به ترتیب مقادیر ۲۰ و ۲۰۰ برای آنها انتخاب شده است. همچنین Q در معادله لیاپانوف رابطه (5-15) بصورت $Q = I$ در نظر گرفته شده است. پارامترهای کنترل کننده فازی تطبیقی نیز بصورت $\sigma = 1, x_c = 5, \gamma = 8000$ انتخاب شده اند. با اعمال کنترل کننده به سیستم به نتایج زیر دست می‌یابیم:



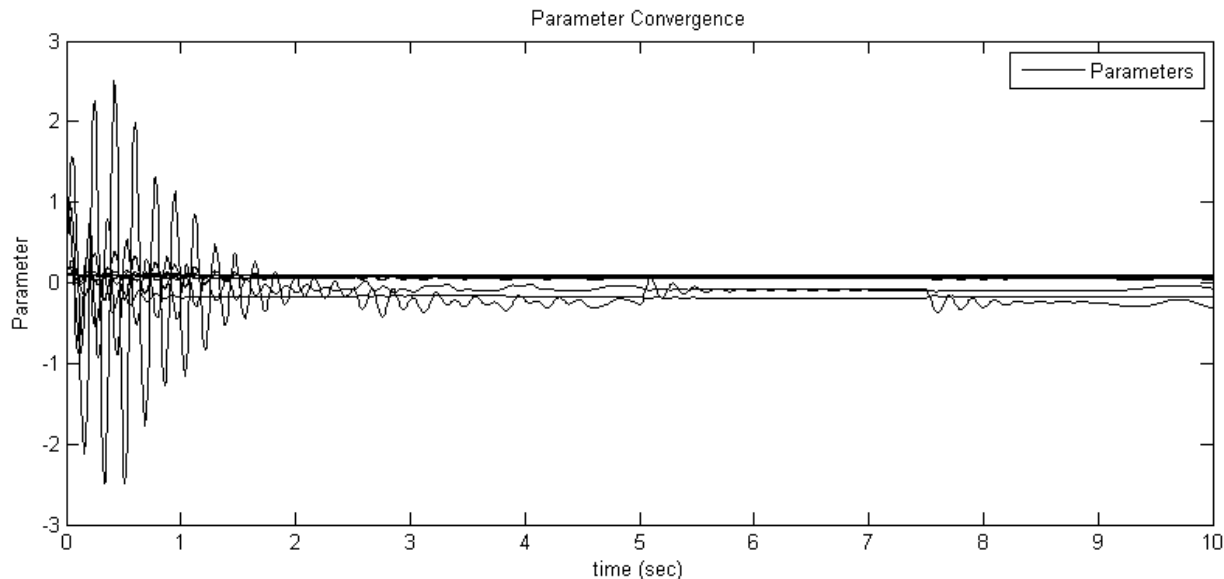
شکل (۲-۵) روند ردگیری مسیر برای سه مفصل سیستم رباتیک



شکل (۳-۵) خطای ردگیری کنترل کننده فازی تطبیقی



شکل (۴-۵) سیگنال خروجی کنترل کننده تطبیقی



شکل (۵-۵) روند همگرایی پارامترها

همانگونه که در شکل (۳-۵) قابل مشاهده است مقدار خطای ردگیری با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی رابطه (۱-۵)، در مقایسه با حالت مشابه در فصل پیش، شکل (۲-۴) بطور چشمگیری کاهش داشته است و این امر نشان از کارایی مناسب کنترل کننده خطی سازی پسخوردی ترکیب شده با جبران‌ساز فازی تطبیقی می‌باشد.

۵-۵ نتیجه گیری

در این فصل جبران‌ساز فازی تطبیقی برای کنترل کننده خطی سازی پسخوردی بمنظور کاربرد در کنترل سیستم رباتیک طراحی شد. با کمک شبیه سازی رایانه ای نشان داده شد که این روش کنترلی هم در مقابل عدم قطعیت پارامتری و هم در برابر اغتشاش خارجی از خود مقاومت نشان می‌دهد. اگرچه مقدار خطا در مقایسه با شرایط مشابه در فصلهای پیش بطور ملموس کاهش یافته است، اما همچنان با مقدار خطا در مقایسه با حالت فرض دانش دقیق از سیستم، فاصله دارد؛ استفاده از الگوریتمهای بهینه سازی در بهینه

کردن کنترل کننده فازی تطبیقی طراحی شده می‌تواند بعنوان یکی از راهکارها برای کاهش مقدار خطای ردگیری مطرح باشد که در فصل بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل ششم – کنترل فازی تطبیقی بهینه

۶-۱ مقدمه

کنترل کننده ماشینهای صنعتی بمنظور بکارگیری در محیطهای عملیاتی، باید قابلیت‌های لازم در مقابله با عدم قطعیتها و اغتشاشات خارجی را داشته باشد؛ در فصل پیش کنترل کننده ای متشکل از جبرانساز فازی تطبیقی برای کنترل کننده خطی سازی پسخوردی طراحی گردید. و بکمک شبیه سازی نشان داده شد، کنترل کننده خطی سازی پسخوردی ترکیب شده با جبرانساز فازی تطبیقی از کارایی مناسب برخوردار می باشد. اما در مقوله طراحی کنترل کننده اغلب توجه ها معطوف به بدست آوردن بهترین شکل برای کنترل کننده در قالب معیارهای تعریف شده، محدودیت های موجود و علاوه بر آنها پایدار بودن سیستم می باشد. این خواسته ها طراح را به طرف موضوع کنترل بهینه سوق می دهد.

در کنار استفاده از سیستم کنترل فازی_تطبیقی، به ناچار با خطای تقریب فازی نیز مواجه خواهیم بود. این یک مسئله مهم در ارزیابی عملکرد سیستمهای کنترل به شمار می رود که می تواند در پایداری و همگرایی خطای ردگیری سیستمهای کنترل تأثیرگذار باشد. خطای تقریب در اغلب مقالات به اندازه کافی کوچک فرض می شود. برخی از مقالات بمنظور اطمینان از پایداری سیستم حلقه بسته از یک کنترل کننده نظارتی در سیستم کنترل فازی تطبیقی استفاده نموده اند. [۵۰-۵۲] اما این روشها با لرزش در سیگنال کنترل و نیز گین کنترل بالا روبرو هستند. [۱۰] در مجموع می توان گفت همه این روشهای حل خطای تقریب را با قیود پیچیده و سختی همراه کرده اند.

در این فصل یک کنترل کننده فازی تطبیقی مقاوم و بهینه شده ارائه خواهد شد. این کنترل کننده بمنظور کاهش خطای تخمین فازی تطبیقی و به تبع آن دستیابی به جبران بهتر عدم قطعیتها، به کمک الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات^۱ (PSO) از بهینه کردن پارامترهای موثر در کنترل کننده ارائه شده در فصل پیش، حاصل شده است. با استفاده از روش پیشنهادی دیگر از سعی و خطا برای تعیین پارامترهای کنترل کننده

¹ particle swarm optimization

استفاده نخواهد شد. در خلال اجرای الگوریتم بهینه سازی، پارامترهایی که مورد بهینه شدن قرار می گیرند، با شرایطی که در فصل پیش برای پایداری الزامی در نظر گرفته شده اند، مقید شده اند تا سیستم از محدوده پایداری خارج نگردد. روش ارائه شده در این فصل بخصوص برای کارهای ماشینکاری در تعداد زیاد می تواند مفید باشد. در این روش ابتدا کنترل کننده به بهترین شکل برای مسیر ماشینکاری مشخص تنظیم شده و پس از آن می تواند تعداد زیادی از قطعات را به شکل بهینه تولید نماید.

از سوی دیگر در عمل برای ورودی عملگرها با محدودیت اشباع مواجه هستیم. یک فرض رایج در مقالات مختلف و کنترل کننده های طراحی شده برای سیستمهای رباتیک این است که فرض می شود عملگرهای سیستم رباتیک قادر به تولید هر اندازه گشتاور دلخواهی هستند. اما در عرصه عملیاتی عملگرها با محدودیتهای فیزیکی روبرو هستند که اندازه گشتاور ورودی را محدود میکند. مشکلاتی که بر اثر بکارگیری کنترل کننده های طراحی شده براساس فرض گشتاور در دسترس نامحدود می تواند بصورتیهای کاهش دقت ردگیری موقعیت بازوها و فروشکست حرارتی و مکانیکی بروز نماید. بر این اساس محققان بسیاری اقدام به طراحی کنترل کننده های با سیگنال کنترل محدود کرده اند. [۵۳، ۵۴] در این پایان نامه با انتخاب یک تابع هدف مناسب و حل یک مسئله بهینه سازی چندهدفه^۱ پارامترهای کنترل کننده را طوری تنظیم می نمائیم که امکان دسترسی به خطای کمینه را توأم با محدود در نظر گرفتن سیگنال کنترلی، عملی نماید.

¹ multi_objective optimization

۶-۲ کنترل کننده

۶-۲-۱ طرح کنترلی

در فصل پیش رو نیز سیستم تحت کنترل با رابطه (۲-۴) مشخص می شود. در این فصل قانون کنترل مطابق فصل پیش بصورت رابطه (۵-۱)، ساختار سیستم فازی بشکل رابطه (۵-۸) و قانون تطبیق بصورت رابطه (۵-۲۰) بکار گرفته خواهد شد. ایده اصلی این فصل بهینه سازی پارامترهای این کنترل کننده بنحوی که به کمترین خطای ردگیری ممکن برسیم می باشد.

در تحلیل پایداری این روش شایان ذکر است که مادامیکه پارامترهای مورد بهینه سازی در چارچوب مطالب ارائه شده در بخش (۵-۳) محدود گردند و با اعمال قیود لازم در الگوریتم بهینه سازی مانع خروج پارامترها از محدوده های تعریف شده گردد، پایداری تضمین شده خواهد ماند.

۶-۲-۲ هدف بهینه سازی

هدف ارائه راهکاری ترکیبی برای آموزش سیستم کنترل فازی تطبیقی بمنظور رسیدن به دقت بیشتر در عملیات ماشینکاری می باشد. روش ارائه شده ترکیبی از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات و سنتز لیاپانوف برای به روز کردن پارامترهای کنترل کننده که شامل دو بخش خطی سازی پسخوردی و جبران ساز فازی است، می باشد. همانطور که می دانیم در بکارگیری سیستم فازی بعنوان کنترل کننده، دانش بشری درباره یک سیستم کنترل می تواند به دو دسته دانش سیستمی و دانش کنترلی تقسیم گردد. دانش سیستمی به معنای تعریف قوانین اگر-آنگاه فازی برای توصیف رفتار سیستم است و دانش کنترلی، قوانین فازی را که مشخص می کند در هر وضعیتی چه عمل کنترلی باید اتخاذ گردد، تعریف می نماید. در بخش فازی کنترل کننده پیشنهادی، الگوریتم PSO بمنظور بهبود بخش اولیه سیستم فازی بکار گرفته شده است و بخش ثانویه نیز بوسیله قانون تطبیق به مقادیر بهینه خود می رسند. علاوه بر آن برخی از پارامترهای کنترل کننده خطی

سازی پس‌خوردی و برخی پارامترها که در آموزش کنترل کننده نقش دارند، نیز در خلال امر بهینه سازی، توسط الگوریتم PSO بهینه خواهند شد تا دیگر مجبور به استفاده از روش سعی و خطا در تنظیم پارامترهای کنترل کننده ها نباشیم و همچنین علاوه بر آن بتوانیم به خطای کمتری دست یابیم.

۶-۲-۳ الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات

الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات یا PSO اولین بار در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. در تدوین این روش از پرواز گروهی پرندگان و شنای گروهی ماهی‌ها و زندگی اجتماعی آنان الهام گرفته شده که با استفاده از یک سری روابط ساده فرمول‌بندی شده است. همانند همه الگوریتم‌های تکاملی دیگر، الگوریتم دسته ذرات نیز با ایجاد یک جمعیت تصادفی از افراد شروع می‌شود که در اینجا به عنوان یک گروه از ذره ها خوانده می‌شوند. مشخصات هر ذره در گروه، براساس مجموعه ای از پارامترها تعیین می‌شود که باید مقادیر بهینه آنها تعیین شود. در این روش، هر ذره یک نقطه از فضای جواب مسئله را نشان می‌دهد. هر کدام از ذرات دارای حافظه هستند، یعنی بهترین موقعیتی که در فضای جستجو به آن می‌رسند را به خاطر می‌سپارند. بنابراین حرکت هر ذره در دو جهت صورت می‌گیرد: ۱- به سوی بهترین موقعیتی که تاکنون اختیار کرده اند و ۲- به سوی بهترین موقعیتی که همه ذرات تا به حال اختیار کرده اند. در این روش، تغییر موقعیت هر ذره در فضای جستجو تحت تاثیر تجربه و دانش خود و همسایگانش است.

فرض کنید در یک مسئله خاص، فضایی D بعدی داریم و n ذره از گروه می‌تواند با یک بردار سرعت و یک بردار موقعیت نمایش داده شود. تغییر موقعیت هر ذره با تغییر در ساختار موقعیت و سرعت قبلی امکان‌پذیر است. هر ذره، اطلاعاتی شامل بهترین مقداری که تاکنون به آن رسیده (بهینه شخصی^۱) و موقعیت $W(t)$ را داراست. این اطلاعات، حاصل مقایسه تلاش‌هایی است که هر ذره برای یافتن بهترین جواب انجام می‌دهد. همچنین هر ذره بهترین جوابی را که تا کنون در کل گروه بدست آمده است، از مقایسه

¹ personal best

مقادیر بهینه ذرات مختلف می شناسد (بهینه فراگیر)^۱. هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب سعی می کند موقعیت خود را با استفاده از اطلاعات زیر تغییر دهد:

- موقعیت کنونی ($w(t)$)
- سرعت کنونی ($v(t)$)
- فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه شخصی
- فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه فراگیر

بدین ترتیب سرعت هر ذره و به تبع آن موقعیت جدید آن به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$v_{i(t+1)} = wv_{i(t)} + c_1r_{1(t)}(pbest_i - w_{i(t)}) + c_2r_{2(t)}(gbest - w_{i(t)}) \quad (5-6)$$

که در آن $v_{i(t+1)}$ سرعت ذره در تکرار جدید و $v_{i(t)}$ سرعت ذره در تکرار فعلی می باشند. پارامترهای c_1 و c_2 ضرایب شناختی و اجتماعی نامیده می شوند، r_1 و r_2 مقادیر تصادفی بین ۰ و ۱ هستند که برای حفظ تنوع و گوناگونی گروه به کار می روند و در هر تکرار نیز یکسان نیستند. w اینرسی وزنی نام دارد که برای کنترل تأثیر سوابق سرعت‌های پیشین بر سرعت‌های جاری مورد استفاده قرار می گیرد. $pbest$ بهترین موقعیتی که ذره i تا کنون اختیار کرده است و $gbest$ بهترین موقعیتی که تمام ذرات تا کنون اختیار کرده اند است.

سرانجام موقعیت هر ذره در هر تکرار با جمع کردن بردار سرعت با بردار موقعیت فعلی به روز خواهد شد:

$$w_{i(t+1)} = w_{i(t)} + v_{i(t+1)} \quad (6-6)$$

خروجی این الگوریتم ذره $gbest$ خواهد بود که شامل مقادیر نهایی بهینه شده می باشد.

¹ global best

۳-۶ شبیه سازی

در این فصل کنترل کننده طراحی شده رابطه (۵-۱) بکمک شبیه سازی رایانه ای بر روی سیستم CNC مورد مطالعه در این پایان نامه که از ساختار رباتیک اسکارا بهره می برد اجرا گردید. در فرایند شبیه سازی برای مدل کردن عدم قطعیت پارامتری، مطابق روال فصل پیش، فرض شده است مقادیر نامی پارامترها ۹۰٪ مقادیر واقعی باشند. و اغتشاش خارجی نیز با سیگنال پالس مربعی با دامنه (Nm, Nm, N) 1 و دوره تناوب 5s به سیستم کنترل وارد شده است. در این فصل ماتریسهای K_p و K_d بصورت رابطه (۳-۳) انتخاب شده اند و به همراه Q در معادله لیاپانوف رابطه (۵-۱۵) که برای آن نیز به منظور سهولت در برنامه نویسی ها ساختاری قطری مشابه رابطه (۳-۳) مدنظر قرار گرفته است و همچنین پارامترهای کنترل کننده فازی رابطه (۵-۹) اعم از σ, χ_c پارامترهای مرکز و مقیاس توابع تعلق فازی و ضریب یادگیری تطبیقی γ در رابطه (۵-۲۰) به الگوریتم بهینه سازی سپرده شده اند.

تابع هدف بصورت زیر انتخاب شده است:

$$J = \int_0^{\infty} |e| dt \quad (۳-۶)$$

و قیدهای زیر نیز بمنظور رعایت تضمین شرایط پایداری کنترل کننده در بهینه سازی لحاظ گردیده است:

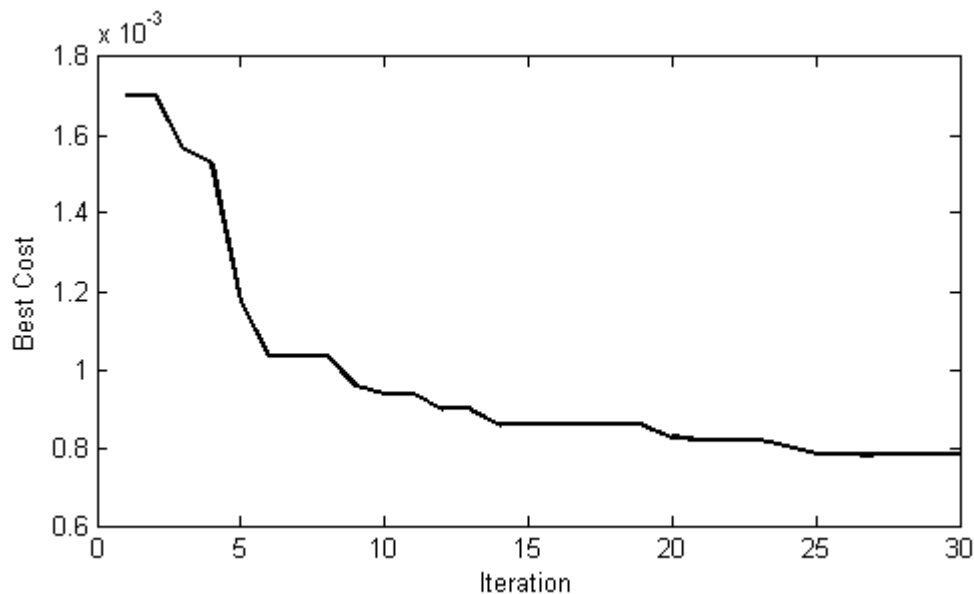
$$0 < k_p, k_d, \chi_c, \sigma, \gamma, Q < \infty \quad (۴-۶)$$

تعداد جمعیت ذرات برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است و پارامترهای C_1 و C_2 ضرایب شناختی و اجتماعی هر دو برابر ۱.۴۹۶۲ (بر مبنای روش ضرایب انقباضی^۱ [۵۵]) انتخاب شده اند.

با اجرای عملیات بهینه سازی، نتایج زیر برای پارامترهای مورد نظر برای بهینه سازی حاصل گردید:

$$k_p = 638.8478, \quad k_d = 58.23978, \quad x_c = 17.89555, \quad \sigma = 1.724817, \\ \gamma = 3298.758465, \quad Q = 33.69447 \quad (5-6)$$

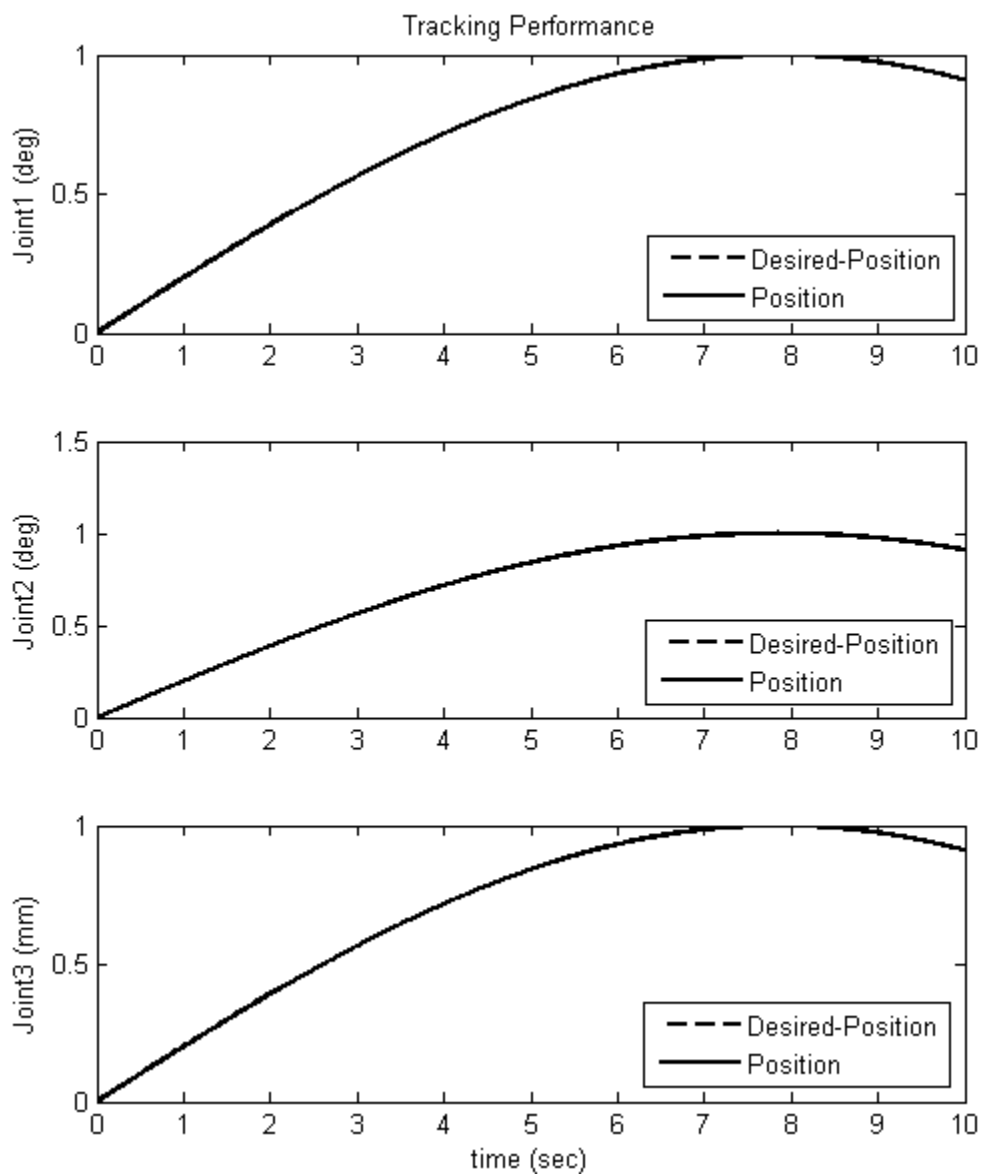
روند همگرایی تابع هدف در شکل (۱-۶) به نمایش در آمده است:



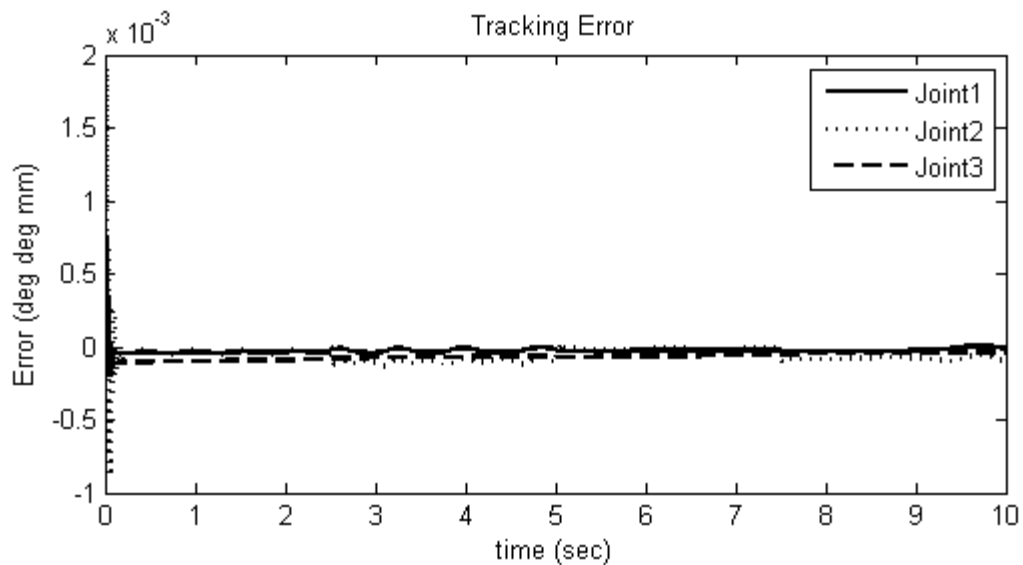
شکل (۱-۶) روند همگرایی تابع هدف رابطه (۳-۶)

با تنظیم شدن کنترل کننده (۱-۵) با ضرایبی که از الگوریتم بهینه سازی استخراج شده اند، به نتایج زیر برای دست خواهیم یافت:

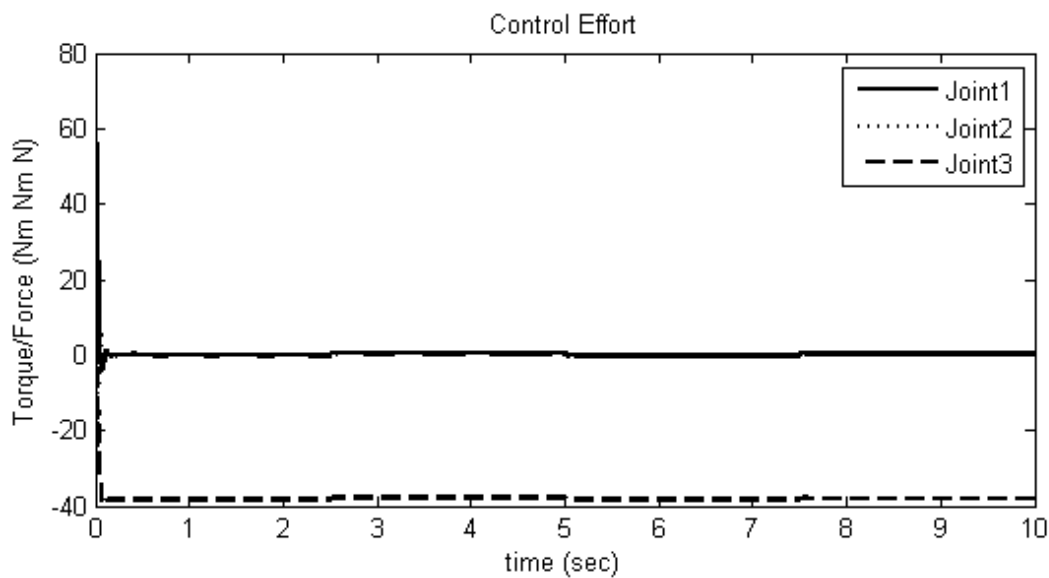
¹ constriction coefficient approach



شکل (۶-۲) روند ردگیری مسیر برای سه مفصل سیستم رباتیک



شکل (۳-۶) خطای ردگیری کنترل کننده فازی تطبیقی



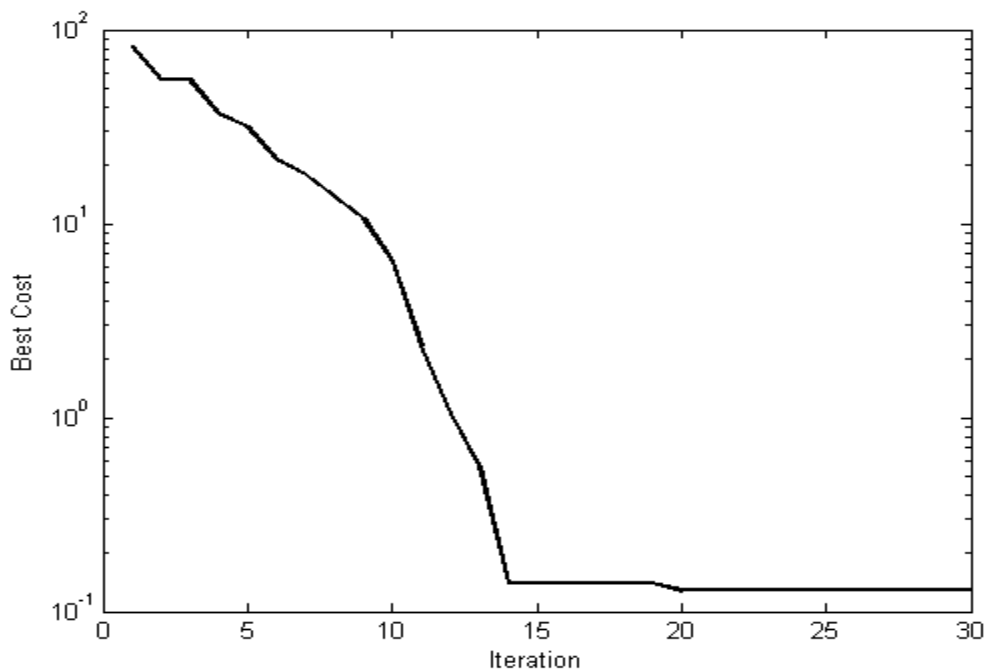
شکل (۴-۶) سیگنال خروجی کنترل کننده

همانگونه که در شکل (۳-۶) قابل مشاهده است مقدار خطای ردگیری با استفاده از ضرایب بهینه شده در کنترل کننده، در مقایسه با حالت سعی و خطا در فصل پیش، شکل (۳-۵)، بطور چشمگیری کاهش داشته است. شکل (۴-۶) سیگنال خروجی کنترل کننده را در حالتی که این سیگنال کنترلی بکمک ضرایب بهینه شده، سیستم را به حد خطای قابل قبولی رسانده است نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشهود

است بیشینه گشتاور به حد $Nm 80$ نزدیک شده است و این مقدار از گشتاور برای سیستم رباتیکی با این ابعاد (۲-۱۰) با توجه به وزن موتورهای الکتریکی مخصوص این دستگاهها غیرقابل دستیابی است. [۵۶, ۵۷] چنانچه تابع هدف را مطابق رابطه (۶-۸) بصورت یک تابع هدف چندهدفه طوری اصلاح نمائیم که در صورت امکان دسترسی به خطای کمینه را توأم با محدود در نظر گرفتن سیگنال کنترلی، تأمین نماید، خواهیم داشت:

$$J = \int_0^{\infty} (|e| + |u_{max} - u_{sat}|) dt \quad (۶-۸)$$

در این رابطه u_{max} مقدار بیشینه سیگنال کنترل می‌باشد. با در نظر گرفتن حد اشباع $u_{sat} = 40$ (Nm, Nm, N) و بدون تغییر در قیدها و ضرایب الگوریتم بهینه سازی، تابع هدف با روند نشان داده شده در شکل (۶-۵) به مقداری بهینه همگرا شد و پارامترهای بهینه شده بصورت (۶-۹) بدست آمدند.

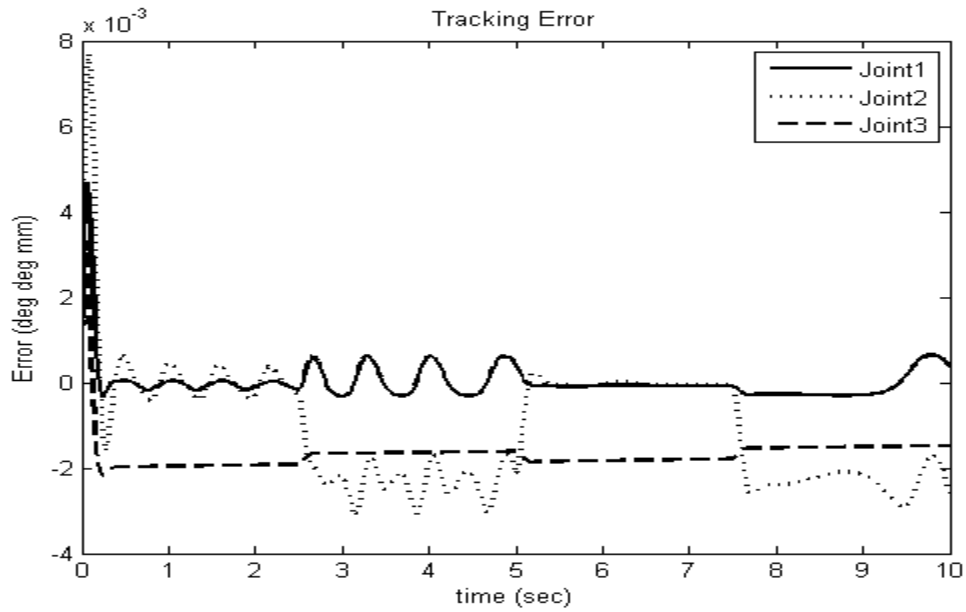


شکل (۶-۵) روند همگرایی تابع هدف رابطه (۶-۸)

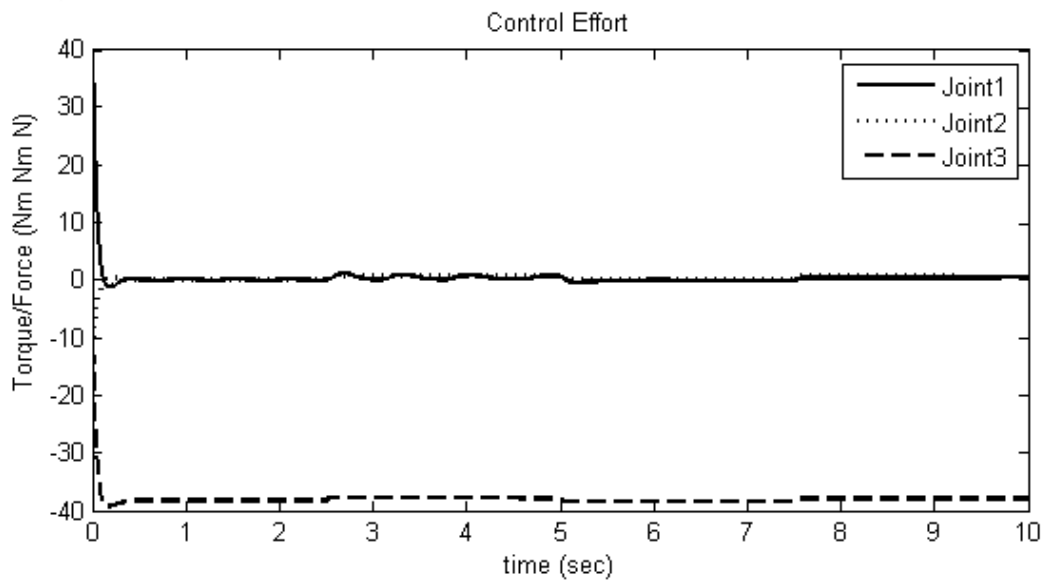
$$k_p = 368.6929, \quad k_d = 34.099158, \quad x_c = 5.0421228, \quad \sigma = 6.2400344,$$

$$\gamma = 2271.9959, \quad Q = 4.8201259 \quad (9-6)$$

با اعمال کنترل کننده با ضرایب بهینه شده جدید (۹-۶) نتایج زیر برای مقدار خطای ردگیری و حدود سیگنال کنترلی حاصل آمد:



شکل (۶-۶) خطای ردگیری کنترل کننده فازی تطبیقی با ضرایب بهینه (۹-۶)



شکل (۷-۶) سیگنال خروجی کنترل کننده با ضرایب بهینه (۹-۶)

در شکل‌های (۶-۶) و (۷-۶) بطور واضح مشخص است که خطای ردگیری باوجود افزایش نسبت به حالت قبل (شکل (۶-۳)) اما همچنان با درنظر گرفتن نکته مثبت عدم تجاوز سیگنال کنترلی از محدوده اشباع، چنانکه در شکل (۷-۶) مشهود است، عملکرد الگوریتم بهینه سازی و کنترل کننده طراحی شده بصورت ترکیبی قابل قبول است.

۴-۶ نتیجه گیری

در این فصل کنترل کننده متشکل از جبرانساز فازی تطبیقی و کنترل کننده خطی سازی پسخوردی طراحی شده در فصل پیش بمنظور کاهش خطای تخمین فازی تطبیقی و به تبع آن دستیابی به جبران بهتر عدم قطعیتها، به کمک الگوریتم بهینه سازی PSO مورد بهینه سازی پارامترها قرار گرفت. کنترل کننده بهینه شده عملکرد بسیار خوب و نزدیک به کنترل کننده با ضرایب دقیق از خود نشان داد، اما اندازه سیگنال کنترلی مطلوب نبود و از حدود اشباع عملگرها عبور کرده بود. بمنظور دستیابی به خطای کمینه با سیگنالهای کنترلی کمتر از حد اشباع، تابع هدف الگوریتم بهینه سازی تغییر پیدا کرد و پارامترهای کنترل کننده با شرایط جدید مورد بهینه سازی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی کارایی مطلوب این کنترل کننده بهینه شده را مورد تأیید قرار دادند.

فصل هفتم – نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱ نتیجه گیری

در این پایان نامه پس از بیان مقدمات آشنایی با ماشین‌های CNC ابتدا مدلسازی سینماتیکی و دینامیکی ربات‌های صنعتی مطرح گردید. در فصل سوم روش کنترل خطی‌سازی پسخوردی که یکی از روش‌های رایج کنترل سیستم‌های غیرخطی است مورد مطالعه قرار گرفت و مزیت این روش در رسیدن به دقت بسیار بالا در صورت اطلاع دقیق از مدل سیستم تحت کنترل و همچنین ضعف این روش در صورت وجود عدم‌دقت در پارامترهای مدل سیستم به نمایش درآمد. در فصل چهارم به جهت مقابله با عدم قطعیت‌های پارامتری کنترل تطبیقی برای کنترل سیستم ماشینکاری رباتیک تحت کنترل به کار گرفته شد. در ادامه این فصل به ارزیابی کنترل‌کننده در صورت وجود عدم قطعیت غیرساختاری پرداخته شد و نشان داده شد که کنترل تطبیقی در مقابل اغتشاش خارجی نمی‌تواند عملکرد مطلوب مورد نظر طراح را ارائه دهد. در ادامه کار کنترل فازی-تطبیقی مورد بررسی قرار گرفت. کنترل‌کننده فازی-تطبیقی طراحی شده از یک کنترل‌کننده خطی‌سازی پسخوردی که براساس پارامترهای نامی در دسترس و یک کنترل‌کننده فازی که براساس شرایط کنترلی طبق قانون تطبیق مخصوص بصورت خودکار تنظیم می‌شود، تشکیل شده است. در فصل ششم برای رسیدن به خطای ردگیری کمتر بسوی الگوریتم‌های بهینه سازی گرایش پیدا شد. با کمک الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات، بخشی از پارامترهای کنترل‌کننده فازی تطبیقی که خارج از محدوده بهینه سازی توسط قانون تطبیق بودند، مورد بهینه‌سازی قرار گرفتند. سپس با انتخاب تابع هدف مناسب، ملاحظات عملیاتی برای بکارگیری کنترل‌کننده مدنظر قرار گرفت و با وجود دسترسی به کمترین خطای ممکن، از عبور سیگنال گشتاور کنترلی از حدود اشباع عملگرها ممانعت شد. در روش ارائه شده که بخصوص برای کارهای ماشینکاری با تعداد زیاد می‌تواند بسیار مفید باشد، ابتدا کنترل‌کننده به بهترین شکل تنظیم شده و پس از آن می‌تواند تعداد زیادی از قطعات را به شکل بهینه تولید نماید. در روش ارائه شده در این پایان نامه در تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده از سعی و خطا اجتناب شده است و بکمک الگوریتم بهینه سازی در قالب

ترکیب یک عملیات پیش آموزش و یک عملیات برخط به بهترین ترکیب برای پارامترهای کنترل کننده دست یافته شده است. از آنجاکه روش ارائه شده در این پایان نامه بر مبنای روش سنتز لیاپانوف طراحی شده است سیستم حلقه بسته پایدار خواهد بود. علاوه بر آن این سیستم کنترلی در برابر عدم قطعیت‌های ساختاری و غیرساختاری مقاوم است و براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده عملکرد مناسبی از خود نشان داده است.

بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت با کمک کنترل کننده فازی-تطبیقی بهینه شده پیشنهادی، می‌توان علاوه بر جبران عدم قطعیت‌های سیستم کنترل در حد قابل قبول، از حدود اشباع عملگرها برای سیگنال کنترلی هم تجاوز نکرد.

۲-۷ پیشنهادات

پیشنهادات زیر می‌تواند برای کارهای تحقیقاتی آینده مطرح باشد:

- مطالب مطرح شده در این پایان نامه براساس مبانی نظری بیان شده است، و در استفاده عملیاتی از سیستم کنترل پیشنهادی ممکن است ملاحظات بیشتری مورد نیاز باشد لذا پیاده‌سازی سیستم کنترل بصورت عملیاتی در صورت در دسترس بودن سیستم رباتیک می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر کارایی کنترل کننده کمک شایان توجهی بنماید.
- بررسی عملکرد سیستم کنترل در سیستم‌های رباتیک با در نظر گرفتن انعطاف موجود در مفاصل و بازوها از دیگر پیشنهاداتی است که در کارهای تحقیقاتی آینده می‌تواند مطرح باشد

مراجع

- [1] M. W. Spong and M. Vidyasagar, (1989), "*Robot Dynamics and Control: John Wiley and sons*", Inc..
- [2] S. H. Suh, S. K. Kang, D. H. Chung, and I. Stroud, (2008), "*Theory and Design of CNC Systems*". London: Springer series in advanced manufacturing.
- [3] E. Abele ,M. Weigold, and S. Rothenbücher, (2007), "Modeling and Identification of an Industrial Robot for Machining Applications," *Annals of the CIRP*, vol. 56, pp. 387-391.
- [4] T. Brogardh, (2007), "Present and future robot control development—An industrial perspective," *Annual Reviews in Control*, pp. 69-79.
- [5] A. Izadbakhsh and M. M. Fateh, (2008), "A Model-Free Robust Control Approach for Robot Manipulator," *INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SYSTEMS SCIENCE AND ENGINEERING*, vol. 1, pp. 32-38,.
- [6] J. J. E. Slotine and W. Li, (1988), "Adaptive manipulator control: a case study," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 33, pp. 995-1003,.
- [7] J. J. E. Slotine and S. S. Sastry, (1983), "Tracking control of nonlinear systems using sliding surface with application to robot manipulator ", *Int. J. Control*, vol. 38, pp. 465-492,.
- [8] M. F. Mendes, W. JrKarus, and d. E.R., (2002), "Variable Structure position control of an industrial Robotic Manipulator," *Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, pp. 69-77,.
- [9] R. H. Middleton and G .C. Goodwin, (1988), "Adaptive computed torque control for rigid link manipulators," in *System Control Lett.*, pp. 9-17.
- [10] P. A. Phan and T. Gale, (2007), "Two-mode adaptive fuzzy control with approximation error estimator," *IEEE Transaction Fuzzy Systems*, vol. 5 ,pp. 943-956.
- [11] L. X. Wang and J. M. Mendel, (1992), "Fuzzy basis function universal approximation, and orthogonal least square learning," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 3, pp. 807-814,.
- [12] S. Purwar, I. N. Kar, and A. N. Jha, (2005), "Adaptive control of robot manipulators using fuzzy logic systems under actuator constraints," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 152, pp. 651-664.
- [13] F. Sun, Z. Sun, and G. Feng, (2011), "An adaptive fuzzy controller based on sliding mode for robot manipulator," *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.*, vol. 29, pp. 661-670,.
- [14] Z. Song, J. Yi, D. Zhao, and X. A. Li, (2006), "a computed torque controller for uncertain robotic manipulator systems: Fuzzy approach.," *Fuzzy Sets ans Systems*, vol. 154, pp. 208-226.
- [15] M. K. Chang, (2010), "An adaptive self-organizing fuzzy sliding mode controller for a 2-DOF rehabilitation robot actuated by pneumatic muscle actuators," *Control Engineering Practice*, vol. 18, pp. 13-22.

- [16] C. H. Tsai, C. H. Wang, and W. S. Lin, (2000), "Robust fuzzy model following control of robot manipulators," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 8, pp. 462-469.
- [17] S. Y. Yi and M. J. Chung, (1997), "A robust fuzzy logic controller for robot manipulators with uncertainties," *IEEE Trans. Systems Man Cybernet. Part B*, vol. 27, pp.713-706 .
- [18] B. K. Yoo and W. C. Ham, (2000), "Adaptive control of robot manipulators using fuzzy compensator," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 8, pp. 186-199.
- [19] C. K. Lin, (2002), "A reinforcement learning adaptive fuzzy controller for robots," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 137, pp. 339-351.
- [20] W. Li, X. G. Chang, F. M. Wahl, and J. Farrell, (2001), "Tracking control of a manipulator under uncertainty by FUZZY P+ID controller," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 122, pp. 125-137.
- [21] S. Kohn-Rich and H .Flashner, (2003), "Robust fuzzy logic control of mechanical systems," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 133, pp. 77-108,.
- [22] N. GolBa and A. GolBa, (2002), "Fuzzy adaptive control of multivariable nonlinear systems," in *IEEE International Conference on Fuzzy Systems* , pp. 330-335.
- [23] F. Zhang, D. M. Dawson, M. S. deQueiroz, and W. E. Dixon, (2000), "Global adaptive output feedback tracking control of robot manipulators," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 45, pp. 1203-1209.
- [24] F. Sun, Z. Sun, L. Li, and H. X .Li, (2003), "Neuro-fuzzy adaptive control based on dynamic inversion for robotic manipulators," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 134, pp. 117-133.
- [25] S. Commuri and F. L. Lewis, (1996), "Adaptive-fuzzy logic control of robots manipulators," in *Proc. IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation*, Mineapolis, pp. 2604-2610.
- [26] K. C. Chiou and S. J. Huang, (2004), "An adaptive fuzzy controller for robot manipulators," *Mechatronics*, vol. 2, pp. 24-35.
- [27] L. X. Wang, (1996), *A Course in Fuzzy Systems and Control*: Prentice-Hall International, Inc.,
- [28] R. J. Schilling, (2004), *Fundamentals of Robotics Analysis and Control*. New Delhi: Prentice-Hall of India.
- [29] L. SCIavicco and B. Siciliano, (2000), *Modelling and control of robot manipulators*. London: Springer-Verlag.
- [30] J. J. E. Slotine and W. Li, (1991), *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice-Hall.
- [31] Wittenmark, K. J. Astrom, and Bjorn, (1998), *Adaptive Control*, 2 ed.: Addison-Wesley.
- [32] C. Abdallah, D. Dawson, P. Dorato, and M. Jamshidi, (1991), "Survey of robust control for rigid robots," *IEEE Control System Magazine* vol. 11, pp. 24-30,.
- [33] M. M. Fateh and M. R. Soltanpour, (2009), "Robust task-space control of robot manipulators under imperfect transformation of control space," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 5, pp. 3949-3960.
- [34] Y. Chen, G. Ma, S. Lin, and J. Gao, (2012), "Adaptive Fuzzy Computed-Torque Control for Robot Manipulator with Uncertain Dynamics," *Int. J. Advanced Robotic Systems*, vol. 9, pp. 237-246.

- [35] H. G. Sage, M. F. De-Mathelin, and E. Ostertag, (1999), "Robust control of robot manipulators: a survey," *Int. J. Control* vol. 72, pp. 1498-1522.
- [36] m. m. Fateh, (2010), "Robust control of electrical manipulators by joint acceleration," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 6, pp. 5501-5511.
- [37] Q. Zheng and F. Wu, (2011), "Adaptive control design for uncertain polynomial nonlinear systems with parametric uncertainties," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 25, pp. 502-519.
- [38] R. Yan, K. Tee, and H. Z. Li, (2010), "Adaptive learning tracking control of robotic manipulators with uncertainties," *Journal of Control Theory and Applications*, vol. 8, pp. 160-166.
- [39] X. Lu and H. M. Schwartz, (2008), "A revised adaptive fuzzy sliding mode controller for robotic manipulators," *Int. J. Modelling, Identification and Control*, vol. 4, pp. 127-133.
- [40] J. Ohri, L. Dewan, and M. K. Soni, (2008), "Fuzzy adaptive dynamic friction compensator for robot," *Int. Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, vol. 2, pp. 157-163.
- [41] H. R. Kobravi and A. Erfanian, (2009), "Decentralized adaptive robust control based on sliding mode and nonlinear compensator for the control of ankle movement using functional electrical stimulation of agonist–antagonist muscles," *Journal of Neural Engineering*, vol. 6, pp. 1-10.
- [42] M. M. Fateh, S. Shahrabi-Frahani, and A. Khatamianfar, (2010), "Task space control of a welding robot using a fuzzy coordinator," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 8, pp. 574-583.
- [43] J. P. Hwang and E. Kim, (2006), "Robust tracking control of an electrically driven robot, adaptive fuzzy logic approach," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 14, pp. 232-248.
- [44] M. M. Fateh, (2010), "Robust fuzzy control of electrical manipulators," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 6, pp. 415-435.
- [45] M. M. Fateh, (2010), "Fuzzy task-space control of a welding robot," *Int. J. Robot. Autom.*, vol. 25, pp. 372-379.
- [46] M. M. Fateh and S. Khorashadizadeh, (2012), "Robust control of electrically driven robots by adaptive fuzzy estimation of uncertainty," *Nonlinear Dyn*, pp. 1-13.
- [47] Z. S. Song, J. Q. Yi, D. B. Zhao, and X. C. Li, (2005), "A computed torque controller for uncertain robotic manipulator systems, Fuzzy approach," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 154, pp. 208-217.
- [48] W. W. Chen, J. K. Mills, J. X. Chu, and D. Sun, (2001), "A Fuzzy Compensator for Uncertainty of Industrial Robots," in *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, pp. 2968-2974.
- [49] L. L. Frank, M. D. Darren, and T. A. Chaouki, (2006), *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. New York: Marcel Dekker.
- [50] L. X. Wang, (1994), "A supervisory controller for fuzzy control systems that guarantees stability," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 39, pp. 1845-1858.

- [51] M. J. Er and S. H. Chin, (2000), "Hybrid adaptive fuzzy controllers of robot manipulators with bounds estimation," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 47, pp. 1151-1161.
- [52] Y. C. Hsu, G. R. Chen, and H. X. Li, (2001), "A fuzzy adaptive variable structure controller with applications to robot manipulators," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B*, vol. 31, pp. 331-341.
- [53] W. E. Dixon, M. S. deQueiroz, F. Zhang, and D. M. Dawson, (1999), "Tracking Control of Robot Manipulators with Bounded Torque Inputs," *Robotica*, vol. 17, pp. 121-130.
- [54] W .Peng, Z. Lin, and J. Su, (2009), "Computed torque control-based composite nonlinear feedback controller for robot manipulators with bounded torques," *Control Theory & Applications, IET*, vol. 3, pp. 701-711.
- [55] M. CLERC and J. KENNEDY, (2002), "The Particle Swarm—Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, pp. 58-73.
- [56] (2013) <http://www.magnetic.it/products/htq-series-torque-motors~1.html> .
- [57] (2013) <http://www.automation.siemens.com/mcms/mc/en/motors/motion-control-motors/simotics-t-torque-motor/Pages/torque-motor.aspx> .

Abstract

To exploit the beneficial features of feedback linearization control and fuzzy control, and also to defeat their disadvantages, this paper presents an optimal robust adaptive fuzzy control scheme combining conventional feedback linearization control and an optimized compensator for the best robust tracking control of robotic manipulators with uncertainties in forms of structured and unstructured. The proposed compensator is based on adaptive fuzzy estimation and compensation of uncertainty. This proposed adaptive fuzzy system is optimized aided particle swarm optimization algorithm and it can compensate the uncertainties by modeling of the uncertainties as a nonlinear function of the joint position variables. In addition the control system is adjusted such that the control signals are bounded. The advantage of the proposed adaptive fuzzy system is that tuned in best set of parameters, does not use all system states for estimating the uncertainty and the torque control signal will not exceed the saturation range. According to Lyapunov stability theory, a tracking error limit is derived for the closed-loop control system and based on it the convergence and stability of the control scheme is proved.

In this thesis, after expression for the introduction of CNC machines, robot kinematic and dynamic modeling are presented. And then, feedback linearization control approach and after that, to deal with the parametric uncertainties adaptive control, and continue to work fuzzy-adaptive control are examined. In the end, the parameters of adaptive fuzzy controller optimized by particle swarm optimization. And through selecting the appropriate objective function, even with access to the minimum error, is prevented the torque signal controls to go beyond saturation range.

Keywords

CNC Machine, Robot Manipulator, Feedback linearization control, Adaptive-Fuzzy Control, Particle Swarms Optimization



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical & Robotic Engineering

Optimal Adaptive-Fuzzy Control of CNC Machine

Ebrahim Abbaszadeh

Supervisor:
Dr. Mohammad Haddad-Zarif

September 2013