

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وزارت علوم تحقیقات و فناوری



دانشگاه صنعتی شاهرود

گزارش پایانی

طرح پژوهشی

عنوان طرح

طراحی و شبیه سازی کنترل فازی – خطی نیروی ربات

کد طرح ۱۳۰۷

شهریور ماه ۱۳۸۳

مجری طرح : دکتر محمد مهدی فاتح

این گزارش نتیجه طرح پژوهشی با عنوان

طراحی و شبیه سازی کنترل فازی - خطی نیروی ربات

است که در تاریخ ۸۳/۷/۲۶ به تصویب شورای پژوهشی دانشگاه رسیده است.

چکیده

در این طرح تحقیقاتی، سیستم کنترل نیروی ربات با یک روش جدید ساختار متغیر فازی - خطی طراحی و شبیه سازی می‌گردد. هدف سیستم کنترل تنظیم نیروی ثابت مجری نهایی در انجام کارهایی است که ربات با محیط تماس دارد. به منظور کاهش خطای حالت ماندگار چنانچه اندازه خطا از مقدار معینی کمتر شود ساختار سیستم کنترل بطور اتوماتیک از فازی به فضای حالت خطی تغییر می‌کند. عملکرد سیستم نشان می‌دهد که خطای حالت ماندگار بطور رضایت بخشی کاهش می‌یابد. این نتیجه با انجام آنالیز ریاضی و شبیه سازی تایید می‌گردد. کارایی سیستم کنترل با بکارگیری کنترل فازی در مهار اغتشاشات و غلبه بر غیرخطی بودن مدل، بهبود می‌یابد. طراحی سیستم کنترل در فضای مفصلی و پیاده سازی استراتژی مفصل مستقل، منجر به دکوپله سازی سیستم شده و کنترل نیرو را ساده نموده است. بکارگیری کنترل کننده های فازی به صورت جداگانه برای مفاصل موجب شده است که تعداد قوانین فازی کمتر شوند و در نتیجه زمان محاسبات کاهش یابد.

فهرست

۱	فصل اول: مقدمه.....
۲	۱-۱ کنترل ترکیبی نیرو - موقعیت.....
۳	۲-۱ کنترل امیدانس.....
۴	۳-۱ کنترل کننده فازی.....
۴	۴-۱ گزارش در یک نگاه.....
۵	فصل دوم: استراتژی کنترل.....
۵	۱-۲ سیستم با ساختار متغیر.....
۶	۲-۲ تنظیم نیروی مجری نهایی.....
۷	۳-۲ کنترل کننده های جداگانه.....
۸	۴-۲ استراتژی مفصل مستقل.....
۹	فصل سوم: طراحی کنترل کننده فازی.....
۹	۱-۳ تعیین ورودی ها و خروجی ها.....
۹	۲-۳ گروه های فازی.....
۱۰	۳-۳ قوانین فازی.....
۱۳	فصل چهارم: کاهش خطا با پسخوری حالت خطی.....
۱۳	۱-۴ دینامیک موتور.....
۱۵	۲-۴ فرموله کردن خطا.....
۱۶	۳-۴ پیاده سازی پسخوری حالت خطی.....
۱۸	۴-۴ دفع اغتشاش.....
۲۰	فصل پنجم: شبیه سازی سیستم کنترل.....
۲۱	۱-۵ بدون حضور اغتشاش.....
۲۲	۲-۵ با حضور اغتشاش.....
۲۴	۳-۵ تغییر پسخوری حالت خطی.....
۲۶	۴-۵ گشتاورهای مختلف.....
۲۷	۵-۵ ضرایب مختلف سفتی محیط.....
۲۹	۶-۵ سفتی غیر خطی.....
۳۰	فصل ششم: نتایج.....
۳۱	مراجع.....

فهرست علائم

ماتریس حالت	A
ماتریس ضرایب بردار ورودی	b
ضریب میرایی معادل روی محور رتور	B_{mj}
موتور با جریان مستقیم	DC
بردار خطا	e
بردار نیروی مجری نهایی وارد بر سطح تماس	f_e
تابع غیر خطی معرفی کننده معادلات حالت	f_j
ماتریس ژاکوبین بازوی ماهر	J
ترانزاده ماتریس ژاکوبین بازوی ماهر	J^T
اینرسی معادل روی محور رتور	J_{mj}
بردار ضرایب پسخوری حالت خطی	k^T
ثابت القا،	k_{bj}
ثابت گشتاور	k_{mj}
ماتریس سفتی محیط	k_x
ماتریس سفتی مفصلی	k_θ
تابع عضویت	MF
تعداد متغیر ورودی	N_i
تعداد قوانین فازی	N_r
منفی	n
زیاد منفی	nh
متوسط منفی	nm
خیلی زیاد منفی	nvh
مثبت	p
زیاد مثبت	ph
متوسط مثبت	pm
خیلی زیاد مثبت	pvh
ماتریس ضرایب تبدیل چرخ دنده های مفاصل	r
فرکانس مختلط	s
تعداد توابع عضویت	N_m
بردار موقعیت نقطه انتهایی	p_e
بردار موقعیت نقطه تماس	p
نسبت تبدیل کاهنده چرخ دنده	r_j
مقاومت	R_j
تنظیم کننده مرکز انعطاف	RCC
کنترل کننده تناسبی، انتگرالی و مشتقی	PID

ولتاژ به عنوان خروجی	v_j
بردار حالت	x_j
بردار ورودی در معادلات حالت	u_j
بردار ورودی جدید در معادلات حالت	\tilde{u}
صفر	Z
بردار گشتاور ورودی	τ
بردار گشتاور مطلوب مفاصل	τ_d
بردار گشتاور بار موتور ها	τ_l
بردار زاویه مطلوب موتور ها	θ_{md}
بردار تغییر مکان مجری نهایی	Δp
بردار تغییر زاویه مفصل	$\Delta \theta$
گشتاور بار مرجع	τ_{lj_d}
گشتاور بار موتور	τ_{lj}
اغتشاش	$\tau_{Dj}(t)$
خطای گشتاور	$\Delta \tau_j$
مشتق گشتاور	$\dot{\tau}_{lj}$
زاویه مطلوب رتور	θ_{mj_d}
زاویه رتور	θ_{mj}

فصل اول

مقدمه

هم اکنون فناوری ربات در زمینه های مختلفی نظیر بینایی ماشین، هوش مصنوعی، حس لامسه، کنترل اتوماتیک، کامپیوتر و غیره به سطح بالایی رسیده است و کاربردهای ربات، پیشرفت قابل ملاحظه ای نموده است. با توجه به مزیت های بکارگیری سیستم های رباتیک و اتوماسیون، استفاده چشمگیری از رباتها در صنایع مختلف می شود. استفاده موثر از رباتها در کارخانه های خودرو سازی برای فلز کاری، سنباده کاری، مونتاژ کاری، جوشکاری، رنگ آمیزی و جابجایی از جمله موارد بارز حضور کارآمد رباتها در صنایع است. ربات بخوبی به جای کارگر کار می کند و حتی کارهایی را انجام می دهد که از دست انسان بر نمی آید. او در محیط کار از محدودیت های فیزیکی انسان عبور کرده است. انجام کارهای با دقت زیاد و سرعت قابل توجه، انجام کارهای تکراری و پشت سر هم ولی بدون خستگی، تولید انبوه و کار در محیط خطرناک از جمله مزیت های استفاده از رباتها است که می توان به آن اشاره نمود.

هم اکنون عرصه های جدید تحقیقاتی برای اجرای عملیات توسط رباتها در محیط های خطرناک گسترده شده است. تکنولوژی هسته ای و بهره مندی صلح آمیز از انرژی هسته ای پیشرفت قابل ملاحظه ای داشته است جایی که رباتها به جای کارگر برای انجام کار در نیروگاه هسته ای برای انجام اموری نظیر جابجایی زباله های هسته ای کار می کنند. با بکارگیری رباتها در تحقیقات فضایی با اعزام رباتهای فضاورد و در کاوش در اعماق اقیانوسها و حفاری در اعماق زمین نشان داده شده است که مشکل انجام پژوهش در شرایط کاری خارج از تحمل انسان، حل شده است. در امور دفاعی برای انجام عملیات در محیط های شیمیایی، رادیو اکتیو و محیط های منفجره به استفاده از رباتها توجه ویژه شده است. از رباتها می توان برای خنثی کردن میدانهای مین و سایر ادوات منفجره، در پدافند شیمیایی با خنثی کردن اثرات کشنده بمباران شیمیایی و حضور در محیط رادیو اکتیو استفاده نمود.

انجام امور رباتیکی به ویژگی های ساختاری ربات، محیط کار و نوع کار بستگی دارد. ربات در ساختمان سازه ای خود شامل بازوی مکانیکی و مجری نهایی می شود که از رابط ها و مفاصل تشکیل می شوند. تعداد درجات آزادی و تعداد درجات اضافی حرکت که از مهمترین مشخصه های اصلی ربات می باشند با توجه به ساختار سینماتیکی بازوی مکانیکی ماهر تعیین می شوند. تعداد درجات آزادی نقطه انتهایی بازوی مکانیکی ماهر حداکثر به شش محدود می گردد که سه درجه آزادی آن برای حرکت در جهت محورهای X ، Y و Z بوجود می آید و سه درجه دیگر برای دوران حول محورها ایجاد می شود. چنانچه متغیرهای مستقل از تعداد معادله های مستقل سینماتیکی بازوی مکانیکی ماهر بیشتر باشد در این صورت درجه های اضافی حرکت فراهم می گردد. متغیرهای مستقل در معادله های سینماتیکی از متغیرهای مفصلی بوجود می آیند. این اطلاعات در ماتریس ژاکوبین بازوی مکانیکی ماهر به خوبی گرد آمده است به طوری که تعداد درجات آزادی از تعداد ردیف های آن به دست می آید و تعداد ستونهای آن، تعداد متغیرهای مستقل را نشان می دهد. تعداد درجات اضافی حرکت از تفاضل تعداد ستونها و تعداد ردیفها به دست می آید. تعداد درجات آزادی، قابلیت ربات در انجام کار را نشان می دهد در حالیکه درجات اضافی حرکت، مهارت ربات را مشخص می سازد.

کارهای رباتیکی در دو میدان اصلی کنترل موقعیت و کنترل نیرو انجام می‌شود. حرکت ربات در کنترل موقعیت به صورت آزاد می‌باشد اما در کنترل نیرو اغلب به صورت درگیر با محیط می‌باشد. در طراحی سینماتیکی ربات، به گونه ای عمل می‌شود که تعیین مکان مجری نهایی توسط سه مفصل اول ربات انجام می‌شود و سه مفصل بعدی در تعیین جهت یابی مجری نهایی شرکت می‌کنند. اما در انجام کنترل نیرو بر حسب نوع کار ممکن است تمام مفاصل ربات درگیر باشند و یا آنکه فقط مجری نهایی دست اندر کار باشد. در انجام بسیاری از کارها ابتدا کنترل موقعیت و سپس کنترل نیرو انجام می‌شود اما کارهایی نیز وجود دارند که لازم است ربات، کنترل نیرو و موقعیت را به صورت هم زمان انجام دهد. کنترل ربات به صورت حلقه بسته انجام می‌شود و با روش پسخوری خطا جبران می‌گردد. در رباتهای صنعتی که دارای صلبیت و دقت بالایی در انجام کار می‌باشند از کنترل کننده های تناسبی، انتگرالی و مشتقی (PID) استفاده می‌شود اما با توجه به کاربرد اخیر رباتها در محیط‌های غیر ساختاری با حضور عدم قطعیت، کنترل کننده های هوشمند به طور چشمگیری مورد توجه هستند.

در سیستم کنترل، فرمان‌های کنترلی توسط کنترل کننده ها برای سیستم های محرکه صادر می‌شوند تا ربات به سوی هدف حرکت نماید. هم اکنون بکارگیری محرکه های الکتریکی در سیستمهای رباتیک رو به افزایش است زیرا آنها دارای قابلیت کنترل پذیری در سطح عالی هستند و امکان استفاده صنعتی از آنها در سرعت‌ها و گشتاورهای مختلف محقق شده‌است. محرکه های هیدرولیکی دارای مزیت کاربری در گشتاورهای بسیار بالا هستند اما در مقایسه با محرکه های الکتریکی، دارای محدودیتهای کنترلی، بسیار گران، سنگین، پر سر و صدا، روغن آلود و نیازمند به تجهیزات بیشتر به همراه تعمیر و نگهداری سنگینتری هستند. محرکه های بادی نوع دیگری از سیستمهای محرکه هستند که در صنعت رباتیک در بارهای سبک استفاده می‌شوند. کنترل این گونه از سیستم های محرکه با دشواری مسئله فشرده شدن هوا و بروز عوامل غیرخطی ناشی از آن مواجه است. سیستم‌های محرکه بادی در مقایسه با محرکه های الکتریکی دارای مشکل کنترل پذیری، تجهیزات بیشتر و گرانتر و محدودیت گشتاور می‌باشند.

علاوه بر کنترل کننده ها و سیستمهای محرکه می‌توان به نقش موثر سنسورها در سیستم های کنترل ربات اشاره نمود. تشخیص فاصله و سرعت، که نقش مهمی در سیستمهای کنترل موقعیت ربات دارند با رشد صنعتی بینایی ماشین و فناوری نوری به درجه مطلوبی رسیده اند. اندازه گیری نیرو نیز در کیفیت بالایی انجام می‌شود و این موفقیت در توسعه سنسورهای لمسی در رباتیک به همراه سنسورهای نیرو با بهره گیری از فناوری نوری، پیزو الکتریک، مغناطیسی، خازنی و مقاومتی به دست آمده است.

۱-۱ کنترل ترکیبی نیرو - موقعیت

کنترل نیروی ربات در انجام بسیاری از کارهای مختلف رباتیکی به کار می‌رود و یکی از میدانهای جدید و فعال تحقیقاتی محسوب می‌شود. برای انجام کارهایی نظیر دستکاری روی اجسام، گرفتن اشیاء، تراشکاری، آسیاب کاری، سنباده کاری و مونتاژ کاری لازم است که نیروی تماس ربات با محیط کنترل شود. برای بیان اهمیت کنترل نیرو، کافی است به گرفتن یک جسم سفت، توجه شود. فرض کنید که مجری نهایی ربات نتواند بطور دقیق در موقعیت مورد نظر قرار گیرد. در این صورت، اندکی اختلاف در محل قرار گرفتن مجری نهایی نسبت به جسم، موجب بر خورد می‌گردد که به جسم یا ربات آسیب می‌زند و یا اینکه ممکن است مجری نهایی ربات نتواند با جسم تماس بر قرار نماید. برای جلوگیری از ضربه در هنگام برخورد میتوان از یک وسیله مکانیکی بنام تنظیم کننده مرکز انعطاف (RCC) استفاده نمود که سفتی نقطه نهایی را کاهش میدهد [۱۶]. این وسیله از اجزایی نظیر فنر و میرا کننده تشکیل می‌شود و در مجری نهایی ربات نصب می‌گردد. این استراتژی را کنترل نیرو به صورت غیر فعال می‌نامند و برای تنظیم انعطاف لازم جهت انجام کارهایی مثل مونتاژ کاری، مفید واقع می‌شود. در بسیاری از کارهای صنعتی

از این وسیله استفاده می‌گردد زیرا آن ساختار ساده ای دارد. یک گزارش تحقیقاتی نشان می‌دهد که برای تنظیم موقعیت ربات از یک مچ با کنترل نیرو به صورت غیر فعال استفاده شده‌است که بر اساس تنظیم انعطاف و بکارگیری قیود کار میکند [۲۱]. کارهایی وجود دارند که دقت بسیار بالایی در انجام آنها لازم است از آن جمله میتوان گرفتن اجسام شکننده را نام برد. در این صورت با توجه به وجود برخی محدودیتها، کنترل نیرو به صورت غیر فعال جوابگو نمی‌باشد و لازم است که کنترل نیرو و موقعیت با هم انجام شود. برای انجام این قبیل کارها از روش کنترل نیرو به صورت فعال استفاده می‌گردد [۲۳]، [۲۵].

روش کنترل نیروی فعال به دو گروه کنترل امیدانس و کنترل ترکیبی نیرو / موقعیت تقسیم بندی می‌گردد. برای تعقیب مسیر دلخواه نیرو، از کنترل ترکیبی نیرو / موقعیت استفاده می‌شود. در این روش، نیرو و موقعیت ربات اندازه گیری می‌شوند و با مقادیر مطلوب مقایسه می‌گردند سپس با توجه به مقادیر خطا، فرمانهای کنترلی توسط کنترل کننده ها صادر می‌شوند که در نتیجه با روش پسخوری در دو حلقه مجزای کنترل نیرو و کنترل موقعیت، اختلافات را جبران می‌نمایند. برای پیاده سازی این سیستم کنترلی، ابتدا جهات مورد نظر برای کنترل نیرو یا کنترل موقعیت نقطه انتهایی در فضای کاری مشخص می‌گردند [۱۸]. جهاتی که موقعیت در آنها کنترل می‌شوند عمود بر جهاتی هستند که نیرو در آنها کنترل می‌شوند. وقتی ربات در حالت حرکت آزاد قرار دارد در این صورت قیود طبیعی مکان وجود ندارند و می‌تواند از درجات آزادی خود برای مکان بهره مند باشد و کنترل مکان در درجات آزادی مکان قابل اجرا است. چنانچه ربات در مسیر خود به مانع برخورد نماید در این صورت یک قید طبیعی مکان در جهت حرکت ربات ایجاد می‌شود و یک درجه آزادی مکان از دست می‌رود ولی در عوض یک درجه آزادی نیرو ایجاد می‌شود و کنترل نیرو در درجه آزادی نیرو میسر می‌گردد. با این بحث می‌توان نتیجه گرفت که هر درجه آزادی ربات فقط به یکی از دو متغیر موقعیت یا نیرو اختصاص می‌یابد. برای کنترل در جهت مورد نظر، سیستم کنترل بطور خودکار به حلقه کنترل نیرو یا کنترل موقعیت مرتبط می‌گردد. کنترل ترکیبی نیرو / موقعیت برای گرفتن اشیاء با بکارگیری کنترل کننده فازی تطبیقی پیاده شده‌است [۱۰]. همچنین طرح همکاری بین بازوهای مکانیکی برای پیاده سازی کنترل ترکیبی نیرو / موقعیت با استفاده از کنترل کننده فازی تطبیقی انجام شده‌است [۷].

۲-۱ کنترل امیدانس

در کنترل امیدانس که یکی دیگر از میدانهای اصلی کنترل نیرو است به کنترل دینامیکی نیروی مجری نهایی ربات در تماس با محیط پرداخته می‌شود. در این روش کنترلی، ربات در تماس با محیط، به گونه ای عمل می‌کند که از یک وسیله مکانیکی متشکل از اجزاء جرم، فنر و میرا کننده انتظار می‌رود [۱۴]. امیدانس مکانیکی توسط نسبت تبدیل لاپلاس نیرو به تبدیل لاپلاس سرعت تعریف می‌شود [۱۹]. کنترل امیدانس به تنظیم رابطه دینامیکی بین نیروهای عکس العمل و تغییر مکان نقطه انتهایی، در تماس مجری نهایی با محیط می‌پردازد. بنابراین هدف در این روش، تنظیم معادله دینامیکی نیرو/تغییر مکان است و کاملاً متفاوت با روش کنترل ترکیبی نیرو / موقعیت است که هدف آن تنظیم نیرو یا دنبال کردن یک مسیر نیروی مرجع است. یک مزیت کنترل امیدانس آن است که با یک روش واحد به انجام همه جنبه های دستکاری اجسام توسط ربات پرداخته میشود و با یک الگوریتم هر دو کار حرکت آزاد و حرکت درگیر با محیط انجام می‌شود [۸].

یک روش دیگر کنترل نیروی ربات، کنترل سفتی ربات نام دارد که زیر مجموعه کنترل امیدانس محسوب می‌شود. در این روش کنترلی می‌توان سفتی ربات را به صورت فعال تنظیم نمود. اگر چه ربات دارای ضریب سفتی بالایی است اما با بکارگیری این روش، می‌توان آن را به یک دستگاه انعطاف پذیر تبدیل نمود و ضریب سفتی آن را متناسب با نیازمندیهای محیط کار تنظیم نمود. در این حالت ربات مانند یک فنر با تعداد درجات آزادی مورد نیاز

در فضای کاری تعریف می‌شود [۲۲]. برای انجام کارهای رباتیکی، یک دست ربات ساخته شده‌است و کنترل امیدانس روی آن پیاده شده‌است [۲]. از جمله طرح های دیگری که در آن از الگوریتم کنترل امیدانس استفاده شده‌است بازوهای مکانیکی ماهر با ماتریس ضریب سفتی غیر قطری بوده است [۳]. طرحهای کنترل امیدانس برای انجام کارهای رباتیکی در گیر با محیط پیشنهاد شده‌است. از آن جمله انجام مونتاژ در سلول کار [۹]، دستکاری اجسام [۸] و سوراخکاری و تراشکاری [۱۳] را می‌توان نام برد.

۱-۳ کنترل کننده فازی

نکته قابل توجه در مورد طراحی و پیاده سازی طرحهای سنتی آن است که داشتن مدلی دقیق از دستگاه ضروری است. در این حالت مشکل اصلی آن است که ممکن است مدل دقیقی از دستگاه در اختیار نباشد. عواملی نظیر تغییر پارامترهای سیستم، تغییر بار، اصطکاک در مفاصل، انعطاف در اجزا، اغتشاشات خارجی و دینامیک مدل نشده موجبات عدم قطعیت در سیستم را فراهم می‌سازند. تحقیقات نشان می‌دهند که اصطکاک، یک تابع غیر خطی از سرعت مفصل می‌باشد و از بخشهای خشک، چسبندگی، لغزندگی و منفی تشکیل می‌گردد [۱]، [۶]. الگوریتمهای کنترل تطبیقی نیرو برای غلبه بر عدم قطعیت پیشنهاد شده‌اند [۱۲]، [۱۷]. علاوه بر آن، تعداد چشمگیری از طرحهای تحقیقاتی گزارش داده‌اند که کنترل کننده های هوشمند که بر مبنای استفاده از فازی لاجیک، شبکه های عصبی و متدهای ترکیبی طراحی شده‌اند و در انجام کنترل نیرو توسط بازوهای ماهر مکانیکی در محیط های غیر ساختاری با حضور عدم قطعیت موفق بوده‌اند [۴]، [۹]، [۱۱]، [۱۳]، [۲۴].

دلیل موفقیت کنترل کننده های فازی آن است که آنها وابسته به مدل نمی‌باشند. این کنترل کننده ها برای کنترل بسیاری از فرآیندهای صنعتی جدید نظیر سیستمها و دستگاههایی که به صورت منطقی و هوشمند کنترل می‌شوند مفید هستند. آنها همچنین برای سیستمهایی موثر هستند که به صورت دقیق توسط روابط ریاضی بیان نشده‌اند و یا سیستمهایی که بطور جدی در معرض اثرات مدل نشده و عدم قطعیت هستند و یا حتی سیستمهایی که در وضعیتها و شرایط متناقض قرار دارند [۵]. این کنترل کننده برای کنترل خروجی های سیستم، از قوانین فازی استفاده می‌کند و فرمانهای کنترلی مناسب را برای ورودیهای سیستم فراهم می‌سازد. برای طراحی یک کنترل کننده فازی لازم است که قوانین فازی به طور مناسب تعریف شوند و تعداد قوانین، تعداد گروه های فازی و تعیین کران های آنها شرایط لازم را فراهم سازند و توابع عضویت به صورت مناسب تعریف شوند. به هر اندازه تعداد قوانین و تعداد گروه های فازی بیشتر شود زمان محاسبات بیشتر می‌شود ولی ممکن است نتایج مناسب تری را ارائه دهد. در طراحی کنترل کننده فازی سعی بر آن است که بتوان با حداقل تعداد قوانین و گروههای فازی به جواب قابل قبول رسید تا کنترل کننده بتواند علاوه بر سریع شدن عملیات محاسباتی از مزیت سادگی نیز برخوردار گردد. ممکن است که کاهش تعداد قوانین و گروههای فازی منجر به افزایش خطا گردد اما همیشه تضمینی وجود ندارد که با افزودن تعداد قوانین و گروههای فازی بتوان خطا را کاهش داد.

۱-۴ گزارش در یک نگاه

در این طرح تحقیقاتی، سیستم کنترل نیروی ربات برای انجام کارهایی که نیاز به تماس با محیط دارند با یک روش جدید ساختار متغیر فازی- خطی طراحی و شبیه سازی می‌گردد. دو نوع کنترل کننده در سیستم کنترل وجود دارند که یکی فازی و دیگری کنترل کننده حالت خطی است. مادامی که خطای تنظیم از مقدار مورد نظر بیشتر باشد سیستم کنترل توسط کنترل کننده فازی هدایت می‌شود تا با توانمندیهای کنترل فازی به دفع اغتشاش بپردازد و خروجی را به هدف نزدیک نماید. چنانچه خطای تنظیم کمتر از مقدار مورد نظر گردد در این

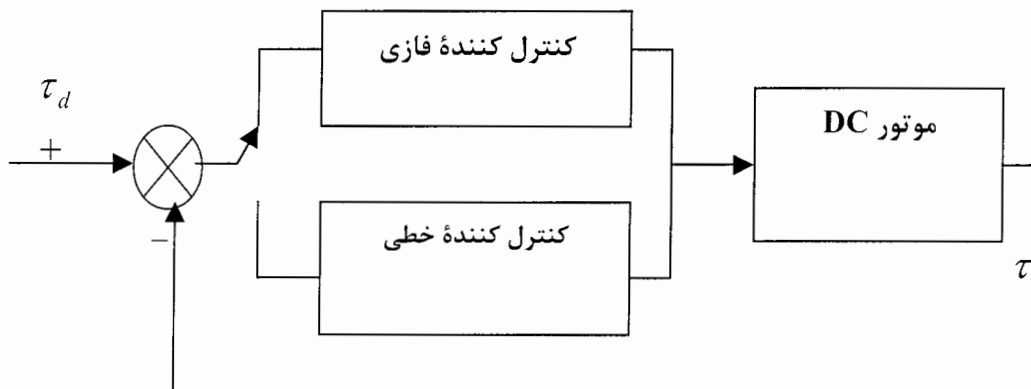
صورت برای دستیابی به خطای کمتر در تنظیم نیروی مرجع، سیستم کنترل بطور اتوماتیک از فازی به فضای حالت خطی منتقل می‌شود و از توانمندی این کنترل کننده در کاهش خطای حالت ماندگار برخوردار می‌گردد. روش کنترلی ارائه شده میتواند به تعقیب نیروی مرجع بپردازد و حلقه کنترل نیرو را در سیستم ترکیبی موقعیت - نیرو برقرار سازد. در قسمتهای بعدی این گزارش در فصل دوم، استراتژی کنترل تشریح می‌گردد. طراحی کنترل کننده فازی مشتمل بر تعیین گروههای فازی، تعریف قوانین فازی و توابع عضویت در فصل سوم انجام می‌شود. سپس در فصل چهارم به بررسی کاهش خطای حالت ماندگار پرداخته می‌شود. در این فصل، دینامیک ربات در وضعیت در گیر با محیط تحلیل و بررسی می‌گردد و مدل خطی ربات با تقریب معادلات در پیرامون نقطه کار بدست می‌آید و با استفاده از آنالیز ریاضی ثابت می‌گردد که بکار گیری کنترل کننده حالت خطی موجب کاهش خطای حالت ماندگار می‌شود. سپس موضوع دفع اغتشاش بررسی و تحلیل می‌گردد. در ادامه گزارش در فصل پنجم شبیه سازی سیستم کنترل انجام می‌شود و توانمندی سیستم ساختارمتغیر فازی- حالت خطی در تنظیم نیروی مجری نهایی به همراه نتایج نشان داده می‌شوند. در پایان نتایج ارائه می‌گردند.

فصل دوم

استراتژی کنترل

۱-۲ سیستم با ساختار متغیر

دو نوع کنترل کننده در سیستم کنترل وجود دارند که یکی فازي و دیگری کنترل کننده حالت خطی است. مادامی که دامنه خطای نیرو از مقدار مورد نظر بیشتر باشد سیستم کنترل توسط کنترل کننده فازي هدایت می شود تا با توانمندیهای کنترل فازي به دفع اغتشاش به پردازد و خروجی را به هدف نزدیک نماید. چنانچه دامنه خطای نیرو کمتر از مقدار مورد نظر گردد در این صورت برای دستیابی به دامنه خطای کمتر در تنظیم نیروی مرجع، سیستم کنترل بطور اتوماتیک از فازي به فضای حالت خطی منتقل می شود و از توانمندی این کنترل کننده در کاهش دامنه خطای حالت ماندگار برخوردار می گردد. هرگاه به هر دلیلی، از جمله اغتشاش خارجی، دامنه خطای نیرو بیشتر از مقدار مورد نظر گردد کنترل کننده خطی بطور اتوماتیک از مدار خارج می شود و کنترل کننده فازي کنترل سیستم را بعهد می گیرد و همان روند قبلی تکرار می گردد تا دامنه خطای نیرو از مقدار مورد نظر کمتر گردد. به این ترتیب، در این الگوریتم کنترلی، ساختار سیستم کنترل با معیار خطای نیرو بطور خودکار تغییر می کند تا هدف سیستم که کاهش خطای حالت ماندگار است تامین گردد. شکل ۱-۲ دیاگرام سیستم کنترل نیروی فازي - خطی ربات را نشان می دهد.



شکل ۱-۲ دیاگرام سیستم ساختار متغیر کنترل نیروی فازي - خطی ربات

۲-۲ تنظیم نیروی مجری نهایی

هدف از کنترل نیروی ربات آن است که بردار نیروی مجری نهایی مطابق با مقدار دلخواه تنظیم گردد. معمولاً بردار نیروی مجری نهایی در همان دستگاه مختصات مجری نهایی داده می شود و فضای کاری نیز در همین دستگاه مختصات تعریف می گردد. بردار نیروی مجری نهایی دارای سه مولفه نیرو در راستای محورها و سه مولفه گشتاور در حول محورهای مختصات می باشد. نیروی مجری نهایی هنگامی پدید می آید که ربات درگیر با محیط است در غیر این صورت این نیرو صفر است. سیستمهای محرکه ربات که مفاصل را به حرکت در می آورند این نیرو را تامین می کنند. در این طرح تحقیقاتی، از یک موتور DC مغناطیس دائم مجهز به چرخ دنده، برای به حرکت در آوردن هر مفصل استفاده می شود. در عمل، سیستم کنترل ربات با کنترل ولتاژ موتورهای الکتریکی، به اجرای کنترل نیروی ربات می پردازد. نیروی مجری نهایی در فضای کاری تعریف می شود اما گشتاور مفاصل ربات در فضای مفصلی قرار دارد. با استفاده از تبدیل پایین می توان گشتاور مفاصل را برحسب بردار نیروی مجری نهایی تعیین نمود [۲۰].

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_e \quad (1-2)$$

که در آن \mathbf{f}_e بردار نیروی مجری نهایی در فضای کاری است، $\boldsymbol{\tau}$ بردار گشتاور مفاصل در فضای مفصلی است و \mathbf{J}^T ترانزپوز ماتریس ژاکوبین ربات می باشد.

وقتی که مجری نهایی درگیر با محیط است در حالت استاتیکی گشتاور موتورهای الکتریکی با گشتاور بار آنها برابر است. در سیستم کنترل میتوان با اندازه گیری نیروی مجری نهایی و سپس با استفاده از معادله (۱) گشتاور موتورها را تعیین نمود و یا اینکه بطور مستقیم می توان آن را توسط سنسور گشتاور که در محور موتور نصب میگردد اندازه گیری نمود. ولتاژ موتورها نیز در فضای مفصلی بدست می آید زیرا ولتاژ موتور تابعی از جریان و جریان متناسب با گشتاور است. با اندازه گیری جریان موتور می توان گشتاور آن را نیز تعیین نمود. در طراحی سیستم کنترل ممکن است که قوانین کنترل نیرو در فضای کاری تعریف شوند تا کنترل نیروی ربات با هدف تنظیم نیروی مجری نهایی انجام شود اما پیاده سازی این متد با مشکلاتی مواجه است. قابل توجه آنکه، سیستم های محرکه در فضای مفصلی عمل می کنند بنابراین لازم است که ورودی های کنترلی موتورها که همان خروجی های کنترل کننده می باشند به فضای مفصلی منتقل شوند که این انتقال با استفاده از ترانزپوز ماتریس ژاکوبین ربات انجام می شود.

۳-۲ کنترل کننده های جداگانه

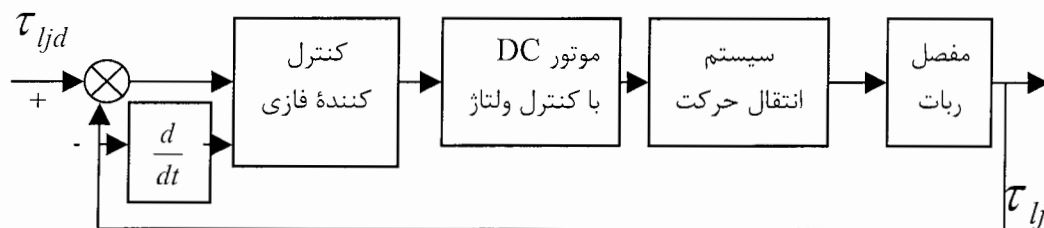
مشکل دوم آن است که تعداد زیاد ورودی و خروجی در طراحی کنترل کننده فازی باعث زیاد بودن قوانین فازی می گردد و در نتیجه پیچیدگی قوانین فازی، افزایش تعداد قوانین و افزایش زمان محاسبات را در پی دارد. یک راه حل آن است که برای هر موتور الکتریکی یک کنترل کننده فازی در نظر بگیریم. در این صورت برابر با تعداد مفاصل، کنترل کننده فازی خواهیم داشت. با توجه به شرحی که در فصل بعد خواهد آمد هر کنترل کننده فقط یک خروجی و دو ورودی خواهد داشت. با در نظر گرفتن پنج گروه فازی برای ورودی اول و سه گروه فازی برای ورودی دوم، تعداد پانزده قانون فازی برای کنترل کننده تعریف شده است. در حالیکه اگر فقط یک کنترل کننده فازی برای ربات طراحی می شد تعداد قوانین فازی بطور چشمگیری افزایش می یافت. بطور کلی تعداد قوانین فازی برای کنترل کننده فازی با تعداد یکسان تابع عضویت در متغیرهای ورودی، از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$N_r = N_m^{N_i} \quad (2-2)$$

که در آن N_r تعداد قوانین فازی، N_f تعداد متغیر ورودی و N_m تعداد توابع عضویت برای هر متغیر ورودی است. در این صورت برای یک ربات با شش مفصل با ۱۲ ورودی و برای هر کدام فقط سه تابع عضویت، تعداد قوانین فازی برابر با $3^{12} = 531441$ میگردید. بنابراین به جای یک کنترل کننده فازی برای کل سیستم، برای هر مفصل یک کنترل کننده فازی جداگانه در نظر گرفته میشود که تعداد آنها مجموعاً شش کنترل کننده برای یک ربات با شش مفصل می شود.

۲-۴ استراتژی مفصل مستقل

با در نظر گرفتن کنترل کننده های جداگانه برای مفاصل می توان استراتژی مفصل مستقل را نیز پیاده نمود. در این استراتژی در مدلسازی مفصل مورد نظر، کلیه اثرات دینامیکی ناشی از ارتباط سایر مفاصل با مفصل مورد نظر به صورت اغتشاش منظور میگردد. این اثرات دینامیکی می تواند عواملی نظیر تغییرات بار، تغییرات لختی، انعطاف در مفاصل، تغییر در پارامترهای سیستم و اصطکاک را شامل گردد. با اجرای این استراتژی، تحلیل و بررسی دینامیکی ربات به بررسی دینامیکی موتور DC مغناطیس دائم مجهز به چرخ دنده تقلیل می یابد. چنانچه قانون کنترل نیز در فضای مفصلی تعریف گردد در اینصورت سیستم کنترل نیروی ربات بر اساس سیستم کنترل گشتاور یک موتور DC مغناطیس دائم طراحی می گردد. در نتیجه برای آنکه نیروی مجری نهایی روی مقدار مشخصی تنظیم گردد ابتدا کافی است مشخص شود که گشتاور مطلوب هر کدام از مفاصل چقدر است و سپس با سیستم های کنترل جداگانه، گشتاور کلیه مفاصل برای رسیدن به مقادیر مطلوب هدایت می شوند. شکل ۲-۲ دیاگرام کنترل گشتاور ربات را نشان می دهد.



شکل ۲-۲ دیاگرام کنترل گشتاور ربات

فصل سوم

طراحی کنترل کننده فازی

۱-۳ تعیین ورودی‌ها و خروجی‌ها

هدف از بکارگیری کنترل کننده فازی آن است که گشتاور مفصل موتور الکتریکی کنترل گردد تا از این طریق نیروی مجری نهایی تنظیم گردد. همانگونه که قبل از این بیان گردید هر مفصل توسط یک موتور DC مغناطیس دائم مجهز به چرخ دنده به حرکت در می‌آید. به منظور کنترل گشتاور موتور لازم است ولتاژ موتور که تنها ورودی آن است کنترل گردد و قانون کنترل برای آن تعریف گردد. بنابراین خروجی کنترل کننده فازی به صورت ولتاژ به موتور اعمال می‌گردد. خطای گشتاور و مشتق گشتاور موتور به عنوان دو ورودی کنترل کننده فازی نیز تعریف می‌گردند. خطای گشتاور که تفاضل گشتاور مرجع با گشتاور موتور است با بهره گیری از پسخوری گشتاور در یک حلقه کنترلی و مقایسه گشتاور موتور با مقدار مرجع بدست می‌آید.

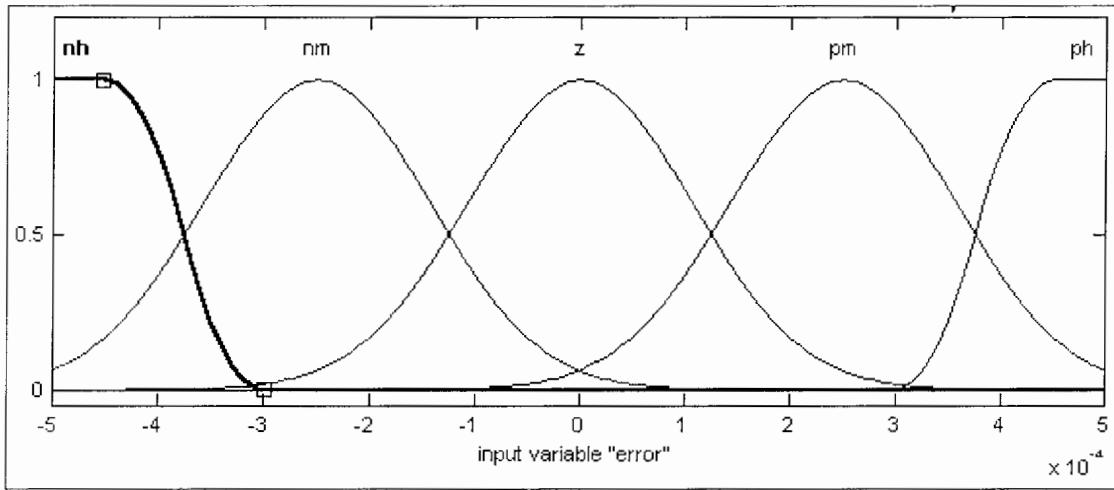
ورودیها و خروجی کنترل کننده، با اسامی زیر نامگذاری می‌گردند.

$$\begin{aligned} \text{input1: } \Delta \tau_j &= \tau_{ljd} - \tau_{lj} \\ \text{input2: } \dot{\tau}_{lj} & \\ \text{output: } v_j & \end{aligned} \quad (1-3)$$

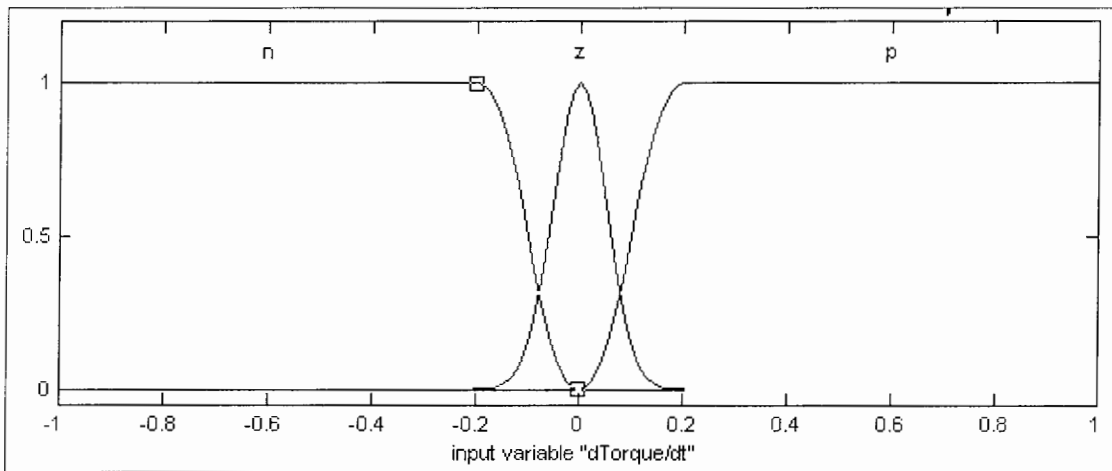
که در آن برای مفصل j ، گشتاور بار مرجع، τ_{ljd} ، گشتاور بار موتور، τ_{lj} ، خطای گشتاور به عنوان ورودی ۱، $\dot{\tau}_{lj}$ مشتق گشتاور به عنوان ورودی ۲، v_j ولتاژ به عنوان خروجی معرفی می‌گردند.

۲-۳ گروه‌های فازی

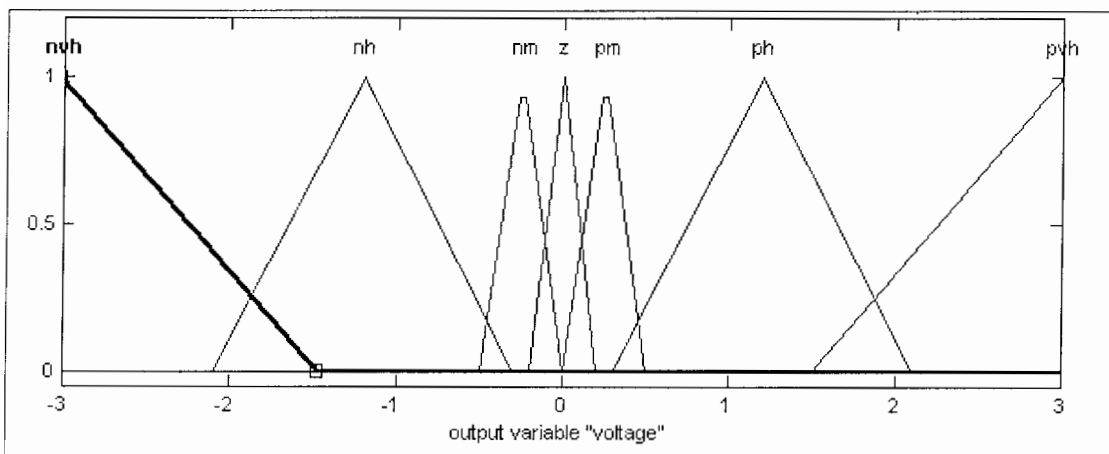
قدم بعدی در طراحی کنترل کننده فازی آن است که گروه‌های فازی و توابع عضویت برای ورودیها و خروجی کنترل کننده، مشخص گردند. خطای گشتاور شامل پنج گروه فازی به اسامی زیاد مثبت (ph)، متوسط مثبت (pm)، صفر (z)، متوسط منفی (n) و زیاد منفی (nh) می‌گردد که در شکل ۱-۳ نشان داده شده‌اند. برای مشتق گشتاور، سه گروه فازی مثبت (p)، صفر (z) و منفی (n) مطابق شکل ۲-۳ تعیین می‌شوند. در پایان هفت گروه فازی با اسامی خیلی زیاد مثبت (pvh)، زیاد مثبت (ph)، متوسط مثبت (pm)، صفر (z)، متوسط منفی (n)، زیاد منفی (nh) و خیلی زیاد منفی (nvh) برای ولتاژ در شکل ۳-۳ معرفی میشوند. در تعیین کران‌های گروه‌های فازی به محدوده‌های فیزیکی متغیرهای ورودی و خروجی توجه شده‌است و با روش سعی و خطا برای نیل به نتیجه مطلوب اصلاحات لازم انجام می‌شود.



شکل ۱-۳ توابع عضویت خطای گشتاور



شکل ۲-۳ توابع عضویت مشتق گشتاور



شکل ۳-۳ توابع عضویت ولتاژ

۳-۳ قوانین فازی

گام بعدی تعریف قوانین فازی است. قانون فازی یک جمله شرطی است که رابطه بین خروجی و ورودیها را بیان می کند. هدف آن است که با تعریف کمترین تعداد ممکن از قوانین فازی پاسخ مناسب فراهم گردد. با در نظر گرفتن پنج گروه فازی برای ورودی اول و سه گروه فازی برای ورودی دوم، تعداد پانزده قانون فازی برای کنترل کننده تعریف می شود. این قوانین به صورت زیر داده می شود:

$$\text{If input1 is } MF_m \text{ and input2 is } MF_n \text{ then output is } MF_{m,n} \quad (2-3)$$

با این توصیف که اگر ورودی اول دارای تابع عضویت MF_m است و ورودی دوم دارای تابع عضویت MF_n است آنگاه خروجی دارای تابع عضویت $MF_{m,n}$ باشد. که در آن $m=1, \dots, 5$ و $n=1, \dots, 3$. قوانین فازی در جدول ۳-۱ ارائه شده اند. تعریف قوانین فازی، مهمترین مرحله در طراحی کنترل کننده فازی محسوب می گردد. در کنترل گشتاور موتور، وضعیت خروجی موتور توسط ورودیهای کنترل کننده فازی بیان می شود و ورودی موتور همان خروجی کنترل کننده فازی است. بنابراین کنترل کننده فازی به ورودی و خروجی موتور نگاه می کند و در پی آن است که خروجی موتور به هدف نزدیک شود. برای تعریف قوانین فازی لازم نیست که اطلاعات دقیقی از سیستم در اختیار باشد اما منطق قوانین فازی بر رفتار عمومی دستگاه و اصل حرکت به سوی هدف استوار می گردد. در رفتار عمومی موتور مشاهده می شود که:

۱- افزایش ولتاژ با پلاریته مثبت موجب افزایش گشتاور می گردد.

۲- موتور دارای محدودیت ولتاژ، جریان و گشتاور است.

هدف آن است که گشتاور موتور به گشتاور مرجع برسد. به بیان دیگر آن که خطای گشتاور به سوی صفر حرکت کند. با این هدف، قوانین فازی برای موتور تعریف شده اند. با توجه به آنکه مسیرهای متعددی به سوی هدف وجود دارد الگوریتم واحدی در تعریف قوانین فازی وجود ندارد و ممکن است قوانین فازی به صورتهای متنوعی تعریف شوند. شکل ۳-۴ نمای سه بعدی از قوانین فازی را نشان می دهد. گام نهایی انتخاب روش محاسباتی کنترل کننده فازی و روش دی فازی کردن خروجی است که به ترتیب از روش ممدانی و روش دی فازی کردن مرکز ثقل استفاده شده اند.

رفتار خروجی سیستم بستگی به طرح کنترل فازی دارد و طراحی کنترل کننده مبتنی بر قوانین فازی، گروههای فازی و توابع عضویت، روش فازی کردن و دی فازی کردن است. با توجه به تنوع زیاد در روش طراحی و ماهیت منطق فازی، تضمینی برای رسیدن به خطای حالت ماندگار صفر وجود ندارد. در حالت تعادل ممکن است خروجی در محدوده مقدار نهایی نوسان نماید و یا اینکه در نزدیکی نقطه نهایی مستقر گردد که در این صورت خطای حالت ماندگار اجتناب ناپذیر است. برای توصیف بیشتر در مورد این پدیده، توجه شود که برای آنکه گشتاور مورد نظر توسط موتور تامین گردد لازم است که موتور در ولتاژ غیر صفر قرار گیرد. بنابراین انتظار می رود که خروجی کنترل کننده فازی بطور متناوب تغییر نماید تا ولتاژ مناسب فراهم گردد که در این صورت گشتاور موتور نوسانی می شود. البته رفتار گشتاور به پاسخ فرکانسی موتور بستگی دارد و وجود تاخیر در سیستم نقش تعیین کننده ای را دارد.

بعنوان یک نتیجه از این بحث می توان گفت که تضمینی برای حصول به خطای حالت ماندگار صفر وجود ندارد. بر این اساس برای کاهش یا حذف خطای حالت ماندگار یک سیستم ساختار متغیر پیشنهاد می شود بطوریکه برای تحقق این هدف، ساختار سیستم از فازی به خطی تغییر نماید. فصل بعدی به بررسی این موضوع می پردازد.

فصل چهارم

کاهش خطا با پسخوری حالت خطی

۱-۴ دینامیک موتور

معادله دینامیکی موتور DC مغناطیس دائم مجهز به چرخ دنده توسط رابطه زیر داده می شود [۱۹].

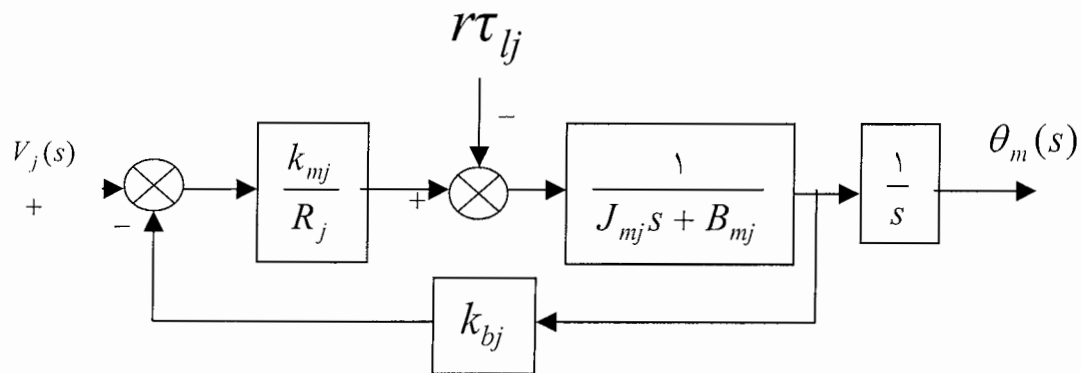
$$J_{mj} \ddot{\theta}_{mj}(t) + (B_{mj} + k_{bj} k_{mj} / R_j) \dot{\theta}_{mj}(t) = (k_{mj} / R_j) v_j(t) - r_j \tau_{lj}(t) \quad (1-4)$$

که در آن برای موتور متصل به مفصل J ، علائم عبارتند از: J_{mj} اینرسی معادل روی محور رتور، B_{mj} ضریب میرایی معادل روی محور رتور، k_{bj} ثابت القا، k_{mj} ثابت گشتاور، R_j مقاومت آرمیچر، r_j نسبت تبدیل کاهنده چرخ دنده، θ_{mj} زاویه رتور، v_j ولتاژ آرمیچر و τ_{lj} گشتاور بار. این معادله دینامیکی، وضعیت زاویه رتور θ_{mj} به عنوان خروجی موتور را بر حسب دو ورودی موتور یعنی ولتاژ آرمیچر v_j و گشتاور بار τ_{lj} بیان می کند.

توجه شود که این معادله با تقریب به دست آمده است. در آن فرض شده است که ثابت زمانی الکتریکی $\frac{L_j}{R_j}$

بسیار کوچکتر از ثابت زمانی مکانیکی $\frac{J_{mj}}{B_{mj}}$ است. این تقریب در مورد اغلب موتورهای الکتریکی، قابل قبول است و

مرتبه سیستم با بکار بستن آن کاهش می یابد. شکل ۱-۴ بلوک دیاگرام سیستم موتور DC مغناطیس دائم مجهز به چرخ دنده که توسط معادله (۱-۴) بیان شده است را نشان می دهد.



شکل ۱-۴ بلوک دیاگرام سیستم موتور DC مغناطیس دائم مجهز به چرخ دنده

برای آگاهی از وضعیت گشتاور بار τ_{ij} لازم است که دینامیک تماس بررسی شود. هنگامی که ربات با محیط درگیر می‌شود نیروی مجری نهایی تابعی از تغییر مکان سطح تماس خواهد بود. در حالت کلی توزیع نیرو در سطح تماس بستگی به هندسه تماس و ضریب سختی محیط دارد. یک مدل خطی از نیروی تماس به صورت زیر داده می‌شود [۱۹]:

$$\mathbf{f}_e = k_x(\mathbf{p} - \mathbf{p}_e) \quad (2-4)$$

که در آن \mathbf{p} بردار موقعیت نقطه انتهایی است، \mathbf{p}_e بردار موقعیت نقطه تماس قبل از اینکه نیرو به آن وارد شود، \mathbf{f}_e بردار نیروی مجری نهایی وارد بر سطح تماس است و k_x ماتریس سفتی محیط است. $\mathbf{p} - \mathbf{p}_e$ شامل تغییر شکل یا فشردگی اجزاء بازوی ماهر مکانیکی و ساختمان پایه آن، فشردگی مجری نهایی یا ابزار و همچنین تغییر شکل سطح تماس می‌گردد.

$$\boldsymbol{\tau}_l = J^T \mathbf{f}_e = J^T k_x (\mathbf{p} - \mathbf{p}_e) \quad (3-4)$$

که در آن $\boldsymbol{\tau}_l$ بردار گشتاور بار موتور ها است بطوری که برای یک ربات با شش مفصل داریم:

$$\boldsymbol{\tau}_l = [\tau_{l1} \ \tau_{l2} \ \tau_{l3} \ \tau_{l4} \ \tau_{l5} \ \tau_{l6}]^T \quad (4-4)$$

با توجه به رابطه بین تغییرات مکان مجری نهایی و تغییرات زوایای مفصلی که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta \mathbf{p} = J \Delta \boldsymbol{\theta} \quad (5-4)$$

که در آن $\Delta \mathbf{p}$ تغییر بردار مکان مجری نهایی و $\Delta \boldsymbol{\theta}$ تغییر بردار زاویه مفصل می‌باشد با جایگزینی پارامترهای زیر در معادله (۳-۴):

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p} - \mathbf{p}_e \quad (6-4)$$

به دست می‌آوریم که:

$$\boldsymbol{\tau}_l = J^T k_x J \Delta \boldsymbol{\theta} \quad (7-4)$$

با در نظر گرفتن

$$k_\theta = J^T k_x J \quad (8-4)$$

رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\boldsymbol{\tau}_l = k_\theta \Delta \boldsymbol{\theta} \quad (9-4)$$

k_θ را ماتریس سفتی مفصلی می‌نامند. اگرچه k_x یک ماتریس قطری است ولی k_θ قطری نمی‌باشد. اگر ماتریس های ژاکوبین J و ضریب سفتی معلوم باشند می‌توان ماتریس سفتی مفصلی k_θ را از رابطه (۸-۴) تعیین نمود. وقتی ربات درگیر با محیط است این ماتریس تقریباً ثابت است زیرا آن تابعی از زوایای مفصلی است که در

شرایط درگیر با محیط تغییرات آنها ناچیز است. اگر چنانچه ماتریس های مذکور در اختیار نباشد در هنگام اجرای کار تماسی توسط ربات، با استفاده از سنسورها می توان مقادیر $\Delta\theta$ و τ_l را اندازه گیری نمود و از رابطه (۴-۹) ماتریس سفتی مفصلی k_θ را تعیین نمود. با انتخاب متغیرهای حالت به صورت زیر:

$$\begin{aligned} x_{1j}(t) &= \theta_{mj}(t) \\ x_{2j}(t) &= \dot{\theta}_{mj}(t) \end{aligned} \quad (10-4)$$

معادلات حالت موتور از معادله (۴-۱) به صورت زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1j}(t) &= x_{2j}(t) \\ \dot{x}_{2j}(t) &= -\frac{B_{mj}R_j + k_{bj}k_{mj}}{R_jJ_{mj}}x_{2j}(t) + \frac{k_{mj}}{R_jJ_{mj}}v_j(t) - \frac{r_j}{J_{mj}}\tau_{lj}(t) \end{aligned} \quad (11-4)$$

با توجه به بررسی قبلی، وقتی ربات با محیط درگیر است گشتاور بار مفصل $\tau_{lj}(t)$ تابعی از زوایای مفاصل است. مشکل این است که گشتاور مفصل نه تنها به زاویه مفصل J بستگی دارد بلکه به زوایای مفاصل دیگر نیز بستگی دارد زیرا ماتریس سفتی مفصلی k_θ قطری نمی باشد. این باعث می شود که کلیه اثرات دینامیکی از مفاصل دیگر به همراه ناهنجاری های ناشی از اصطکاک که تابعی غیر خطی است توسط گشتاور بار مفصل $\tau_{lj}(t)$ به معادلات حالت فوق منتقل شود. علاوه بر آن، اثرات ناشی از تقریب هایی که قبل از این در حصول به معادلات فوق انجام شده است نیز باعث خطا می شود. اگر چنانچه کلیه این اثرات بعلاوه سایر موارد نامعین را مجموعاً به عنوان اغتشاش در نظر بگیریم و با $\tau_{Dj}(t)$ نشان دهیم آنگاه معادلات (۴-۱۱) به شکل زیر در می آید.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1j}(t) &= x_{2j}(t) \\ \dot{x}_{2j}(t) &= -\frac{B_{mj}R_j + k_{bj}k_{mj}}{R_jJ_{mj}}x_{2j}(t) + \frac{k_{mj}}{R_jJ_{mj}}v_j(t) - \frac{r_j}{J_{mj}}\tau_{lj}(t) - \frac{r_j}{J_{mj}}\tau_{Dj}(t) \end{aligned} \quad (12-4)$$

با توجه به آن که گشتاور بار تابعی غیر خطی از متغیرهای حالت است معادلات حالت موتور را به صورت زیر می توان نوشت.

$$\dot{x}_j = f_j(x_j, u_j) \quad (13-4)$$

که در آن $x_j = [x_{1j} \ x_{2j}]^T$ بردار حالت، $u_j = [v_j]$ بردار ورودی و f_j یک تابع غیر خطی است.

۲-۴ فرموله کردن خطا

تابع f_j در رابطه (۴-۱۳) یک تابع کاملاً غیر خطی است. از بسط سری تیلور در پیرامون نقطه کار می توان به یک تقریب خطی از تابع f_j رسید. در نزدیکی نقطه کار از جملات با مرتبه بالای سری تیلور می توان چشم پوشی نمود زیرا تغییرات متغیرهای تابع f_j بسیار کوچک است. پس تقریب خطی تابع f_j به صورت زیر در می آید.

$$\mathbf{f}_j(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{dj}, \mathbf{u}_{dj}) + \left. \frac{\partial f_j}{\partial \mathbf{x}_j} \right|_Q (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_{dj}) + \left. \frac{\partial f_j}{\partial \mathbf{u}_j} \right|_Q (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_{dj}) \quad (14-4)$$

که در آن $\mathbf{x}_{dj}, \mathbf{u}_{dj}$ مختصات نقطه کار را نشان می‌دهند. در نقطه کار میتوان نوشت:

$$\dot{\mathbf{x}}_{dj} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{dj}, \mathbf{u}_{dj}) \quad (15-4)$$

جایگذاری رابطه (15-4) در معادله (14-4) نتیجه میدهد که:

$$\dot{\mathbf{x}}_j = \dot{\mathbf{x}}_{dj} - \mathbf{A}\mathbf{e} - b\tilde{\mathbf{u}} \quad (16-4)$$

که در آن $\mathbf{e} = \mathbf{x}_{dj} - \mathbf{x}_j$ و $\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{u}_{dj} - \mathbf{u}_j$ ، $A = \left. \frac{\partial f_j}{\partial \mathbf{x}_j} \right|_Q$ ، $b = \left. \frac{\partial f_j}{\partial \mathbf{u}_j} \right|_Q$ است. با استفاده از رابطه زیر

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{x}}_{dj} - \dot{\mathbf{x}}_j \quad (17-4)$$

و جایگذاری آن در معادله (16-4)، معادلات حالت خطی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + b\tilde{\mathbf{u}} \quad (18-4)$$

۳-۴ پیاده سازی پسخوری حالت خطی

قانون پسخوری حالت خطی به صورت زیر نوشته می‌شود

$$\mathbf{u} = -k^T \mathbf{e} \quad (19-4)$$

که در آن $k^T = [k_1, k_2]$ جایگذاری $\tilde{\mathbf{u}}$ در معادله (18-4) نتیجه می‌دهد که:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} - bk^T \mathbf{e} \quad (20-4)$$

و از آن می‌توان بدست آورد که:

$$\dot{\mathbf{e}} - (\mathbf{A} - bk^T)\mathbf{e} = 0 \quad (21-4)$$

تبدیل لاپلاس معادله (21-4) نتیجه می‌دهد که:

$$[sI - \mathbf{A} + bk^T]E(s) = 0 \quad (22-4)$$

که با استفاده از آن می‌توان قطب‌های سیستم را از رابطه زیر تعیین نمود:

$$\det[sI - \mathbf{A} + bk^T] = 0 \quad (23-4)$$

با استفاده از روش تعیین مکان قطب‌ها میتوان k^T را به گونه ای تعیین نمود که قطب‌ها در سمت چپ صفحه S قرار گیرند. در این صورت اگر زمان به سوی بی‌نهایت میل کند آنگاه خطا به سوی صفر می‌رود.

بنابراین هرگاه خروجی سیستم در نزدیکی نقطه کار (نقطه مرجع) قرار گیرد با بکارگیری پسخوری حالت خطی می توان خطای حالت ماندگار را حذف نمود. معادله (۴-۱۹) رابطه زیر را برقرار می کند.

$$\ddot{\mathbf{u}} = -k_v(\theta_{mjd} - \theta_{mj}) - k_p(\dot{\theta}_{mjd} - \dot{\theta}_{mj}) \quad (۲۴-۴)$$

که در آن زاویه مطلوب رتور مفصل زاست. شکل ۴-۳ پیاده سازی پسخوری حالت خطی را برای کنترل گشتاور نشان می دهد. برای حالتی که زاویه مطلوب رتور ثابت است معادله (۴-۲۴) به صورت زیر نوشته می شود:

$$\ddot{\mathbf{u}} = -k_v(\theta_{mjd} - \theta_{mj}) + k_p\dot{\theta}_{mj} \quad (۲۵-۴)$$

زاویه مطلوب رتور مفصل به روش زیر تعیین می گردد. رابطه زاویه رتور θ_{mj} با زاویه مفصل θ_{lj} به صورت زیر است:

$$\theta_{lj} = r_j \theta_{mj} \quad (۲۶-۴)$$

و به صورت ماتریسی داریم

$$\boldsymbol{\theta}_l = r \boldsymbol{\theta}_m \quad (۲۷-۴)$$

که در آن r ماتریس ضرایب تبدیل چرخ دنده های مفاصل است و برای ربات با شش مفصل به صورت زیر معرفی می گردد:

$$r = \begin{bmatrix} r_1 & . & 0 \\ . & . & . \\ 0 & . & r_6 \end{bmatrix} \quad (۲۸-۴)$$

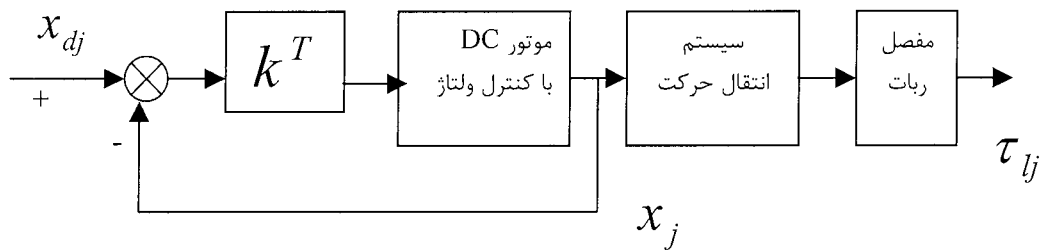
چنانچه در معادله (۴-۱) زاویه اولیه صفر در نظر گرفته شود در اینصورت تغییرات زاویه رتور برابر $\boldsymbol{\theta}_m$ و تغییرات زاویه مفصل برابر $\boldsymbol{\theta}_l$ میشود. در نتیجه از معادله (۴-۹) بدست می آید که:

$$\boldsymbol{\tau}_d = k_\theta r \boldsymbol{\theta}_{md} \quad (۲۹-۴)$$

که در آن $\boldsymbol{\tau}_d$ بردار گشتاور مطلوب مفاصل است و $\boldsymbol{\theta}_{md}$ بردار زاویه مطلوب رتور ها است. بنابراین داریم

$$\boldsymbol{\theta}_{md} = r^{-1} k_\theta^{-1} \boldsymbol{\tau}_d \quad (۳۰-۴)$$

به این ترتیب با مشخص کردن بردار گشتاور مطلوب مفاصل، بردار زوایای مطلوب رتورها تعیین می گردد.



شکل ۴-۳ پیاده سازی پسخوری حالت خطی برای کنترل گشتاور موتور.

۴-۴ دفع اغتشاش

عوامل مختلفی در ایجاد اغتشاش دخالت دارند. از آن جمله می توان اصطکاک، انعطاف در مفاصل و چرخ دنده ها، تغییرات بار، تغییرات اینرسی، تغییر پارامترهای سیستم، خطای محاسباتی و اثرات ناشی از کوپلینگ ها و بهم پیوستگی های اجزاء و دینامیک مدل نشده را می توان برشمرد. از آنجا که اغتشاش موجب خطا می گردد باید نسبت به دفع آن اقدام نمود. سهم اصلی در دفع اغتشاش توسط کنترل فازی به انجام میرسد. زیرا کنترل فازی وابسته به مدل دستگاه نمی باشد و چنانچه خطا در خروجی ظاهر شود با قوانین فازی مواجه می گردد. در تعریف قوانین فازی این هدف دنبال می شود که خطای خروجی کاهش یابد و به این ترتیب اغتشاش دفع می گردد. این موضوع تا زمانی برقرار است که سیستم توسط کنترل فازی هدایت می گردد. اما در کنترل ساختار متغیر پیشنهادی، وقتی دامنه خطا کوچک است سیستم توسط کنترل خطی اداره میشود. در این صورت سیستم با اغتشاشاتی که موجب خطا با دامنه کوچک می شوند چه برخوردی می نماید. با تحلیل ریاضی وضعیت خطا بررسی می گردد. در سری تیلور معرفی شده در معادله (۴-۱۴) جملات با مرتبه بالا حذف شده است. جملات حذف شده میتوانند به عنوان آن بخش از اغتشاش در نظر گرفته شوند که تا کنون به حساب نیامده اند. بنابراین بسط سری تیلور تابع $f_j(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j)$ در نقطه کار به صورت زیر تکمیل می گردد.

$$\mathbf{f}_j(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{dj}, \mathbf{u}_{dj}) + \left. \frac{\partial f_j}{\partial \mathbf{x}_j} \right|_Q (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_{dj}) + \left. \frac{\partial f_j}{\partial \mathbf{u}_j} \right|_Q (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_{dj}) + \mathbf{v}_D \quad (۳۱-۴)$$

که در آن \mathbf{v}_D مجموع جملات حذف شده است که به عنوان اغتشاش منظور می گردد. سپس معادله (۳۱-۴) به صورت زیر کامل می شود.

$$\dot{\mathbf{x}}_j = \dot{\mathbf{x}}_{dj} - \mathbf{A}e - \mathbf{b}\tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{v}_D \quad (۳۲-۴)$$

و نتیجه می دهد که:

$$\dot{e} = \mathbf{A}e + \mathbf{b}\tilde{\mathbf{u}} - \mathbf{v}_D \quad (۳۳-۴)$$

و سپس با بکارگیری پسخوری حالت خطی رابطه زیر به دست می آید.

$$\dot{e} - (A - bk^T)e = -v_D \quad (34-4)$$

با تبدیل لاپلاس از طرفین معادله (37) می توان نتیجه گرفت که:

$$E(s) = -[sI - (A - bk^T)]^{-1} V_D(s) \quad (35-4)$$

که در آن $V_D(s)$ تبدیل لاپلاس اغتشاش v_D است. خطای حالت ماندگار به اغتشاش ثابت D برابر است با:

$$\lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = (A - bk^T)^{-1} D \quad (36-4)$$

می توان نتیجه گرفت که سیستم کنترل خطی خطای حالت ماندگار را با عامل $(A - bk^T)^{-1}$ تغییر می دهد. با انتخاب مناسب پسخوری حالت خطی k^T میتوان قطبهای سیستم حلقه بسته را در محلی قرار داد که اندازه خطای حالت ماندگار کاهش یابد.

فصل پنجم

شبیه سازی سیستم کنترل

سیستم کنترل به منظور تنظیم نیروی مجری نهایی روی مقدار معین طراحی و شبیه سازی می‌شود. در طراحی سیستم کنترل از استراتژی مفصل مستقل استفاده میشود و کنترل کننده ها به صورت جداگانه در فضای مفصلی سیستم های محرکه مفاصل را هدایت می نمایند. با توجه به طراحی انجام شده، سیستم کنترل نیروی ربات توسط کنترل گشتاور محرکه های الکتریکی به اجرا در می آید. در سیستم کنترل ساختار متغیر پیشنهادی، با در نظر گرفتن معیار خطا، ساختار سیستم کنترل تغییر می کند. چنانچه اندازه خطای گشتاور موتور کمتر از مقدار معینی شود کنترل سیستم بطور خودکار از فازی به فضای حالت خطی منتقل میشود. و بر عکس، چنانچه اندازه خطای گشتاور از مقدار معینی بیشتر شود کنترل سیستم بطور خودکار از فضای حالت خطی به فازی منتقل میشود. برای تغییر ساختار سیستم کنترل، معیار دامنه خطای گشتاور بار موتور $10^{-2} Nm$ تعیین شده است. طراحی کنترل کننده فازی در فصل سوم و طراحی کنترل خطی با استفاده از پسخوری حالت خطی در فصل چهارم انجام شد. از موتور DC مغناطیس دائم مجهز به چرخ دنده برای سیستم محرکه مفصل استفاده می‌شود. مشخصات فنی موتور J به شرح زیر می‌باشد:

$$J_{mj} = 10^{-5} kg.m^2/s^2$$

$$B_{mj} = 10^{-2} N.m.s$$

$$k_{bj} = 0.04 V.s/rad$$

$$k_{mj} = 0.04 N.m/A$$

$$R_j = 10 \Omega$$

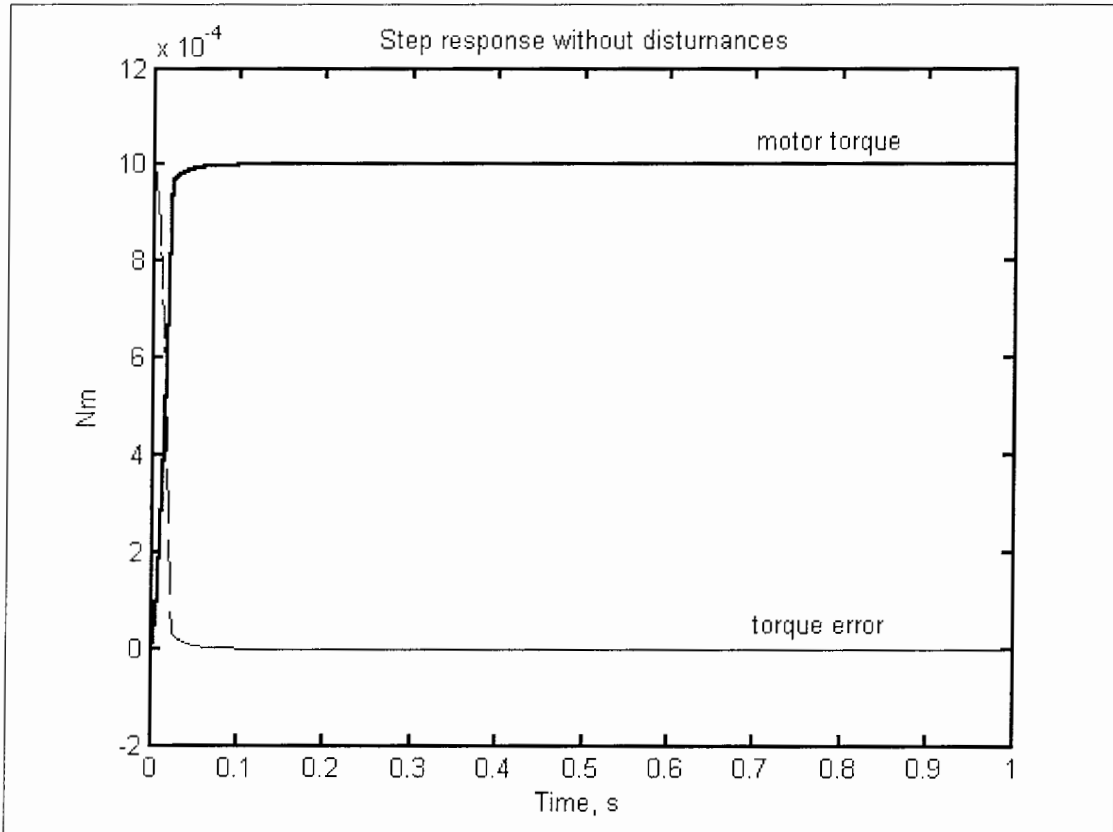
$$L_j = 0.001 H$$

$$r_j = 0.05$$

به منظور نشان دادن کارایی سیستم کنترل ساختار متغیر در کاهش خطا، نتایج شبیه سازی سیستم کنترل ساختار متغیر با نتایج شبیه سازی سیستم کنترل فازی مقایسه شده است. همچنین توسط شبیه سازی، توانمندی سیستم در دفع اغتشاش و کاهش خطای ماندگار بررسی میگردد. به کمک شبیه سازی، وضعیت سیستم به ازای گشتاورهای مختلف در محدوده کاری موتور DC بین $5 \times 10^{-2} Nm$ و $5 \times 10^{-3} Nm$ ارزیابی می‌گردد. این شبیه سازی روی یک مفصل ربات به عنوان نمونه انجام شده است و قابل تعمیم به کلیه مفاصل است. همچنین روش ارائه شده مستقل از ترکیب سینماتیکی ربات است. شبیه سازی در نرم افزار MATLAB SIMULINK انجام شده است و نتایج به صورت گرافیکی نمایش داده شده اند. در مواردی که از سفتی محیط صحبت نشده است مدل خطی منظور شده است و در مورد سفتی غیر خطی محیط شبیه سازی جداگانه ای انجام شده است.

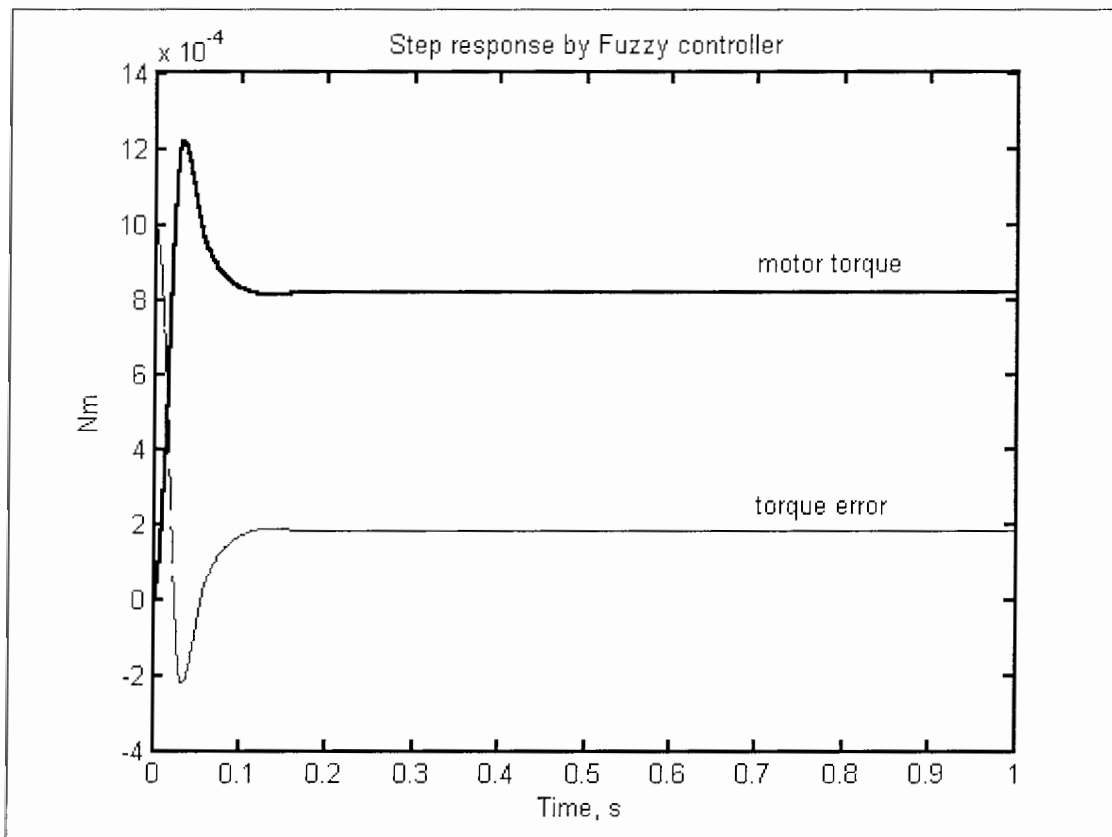
۱-۵ بدون حضور اغتشاش

سیستم کنترل ساختار متغیر بدون حضور اغتشاش در گشتاور مرجع برابر $10^{-2} Nm$ و پسخوری حالت خطی برابر $k^T = [200 \quad 10000]$ شبیه سازی میگردد. پاسخ پله و خطای تعقیب در شکل ۱-۵ نشان داده شده‌اند. همان گونه که شکل ۶ تایید می‌کند گشتاور خروجی در مقدار مرجع قرار گرفته است بدون آنکه در مسیر خود به سوی هدف، نوسان و بالا زدگی نشان دهد و خطای تعقیب به سرعت به صفر میل کرده است و خطای ماندگار حدود صفر است.



شکل ۱-۵ پاسخ پله و خطای تعقیب سیستم ساختار متغیر

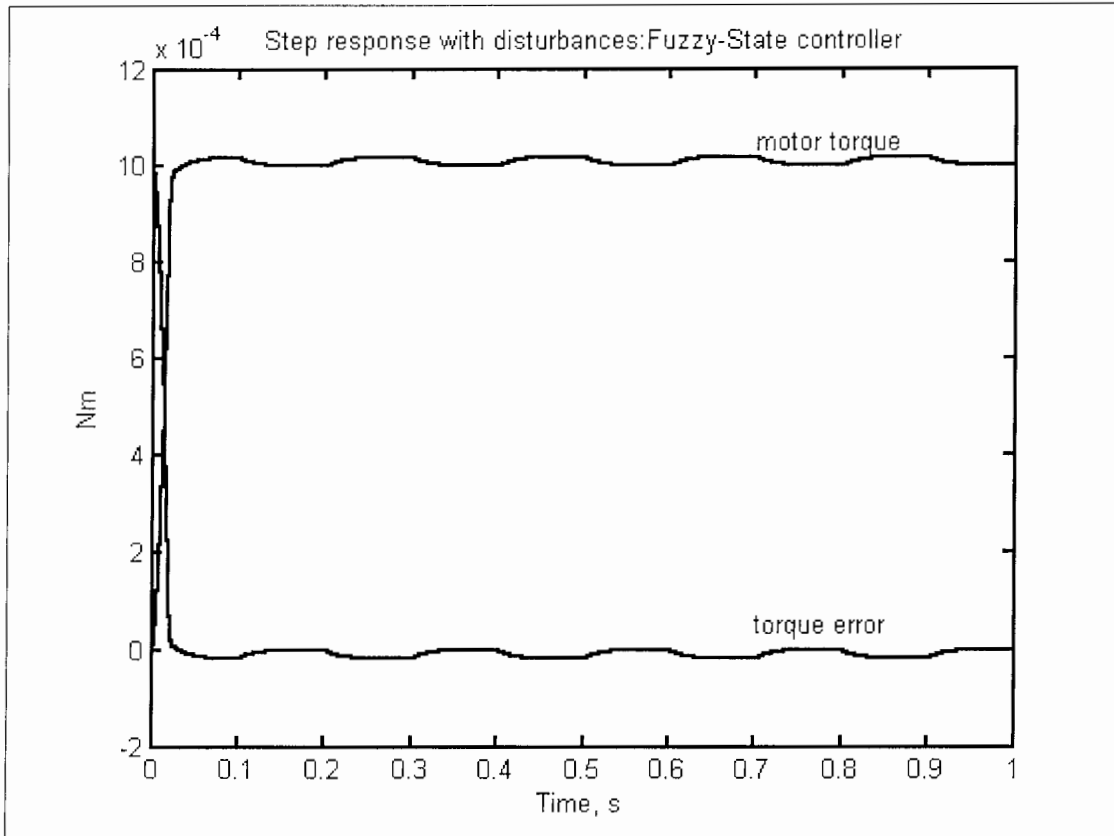
برای مقایسه عملکرد سیستم ساختار متغیر با عملکرد سیستم کنترل فازی، نتایج سیستم کنترل فازی نیز در تعقیب گشتاور مرجع مذکور نیز مشاهده می‌گردد. به این منظور، پسخوری حالت خطی، از سیستم خارج می‌گردد و شبیه سازی انجام می‌شود. پاسخ پله و خطای تعقیب در شکل ۲-۵ نشان داده شده‌اند. همانگونه که شکل ۲-۵ نشان می‌دهد گشتاور خروجی به سرعت به سوی هدف میل کرده است و خطای حالت ماندگار $2 \times 10^{-2} Nm$ را نشان می‌دهد که برابر ۲۰٪ مقدار مرجع می‌باشد و قابل ملاحظه است. در این مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که سیستم ساختار متغیر کنترل فازی- خطی دارای خطای حالت ماندگار کمتری نسبت سیستم کنترل فازی است.



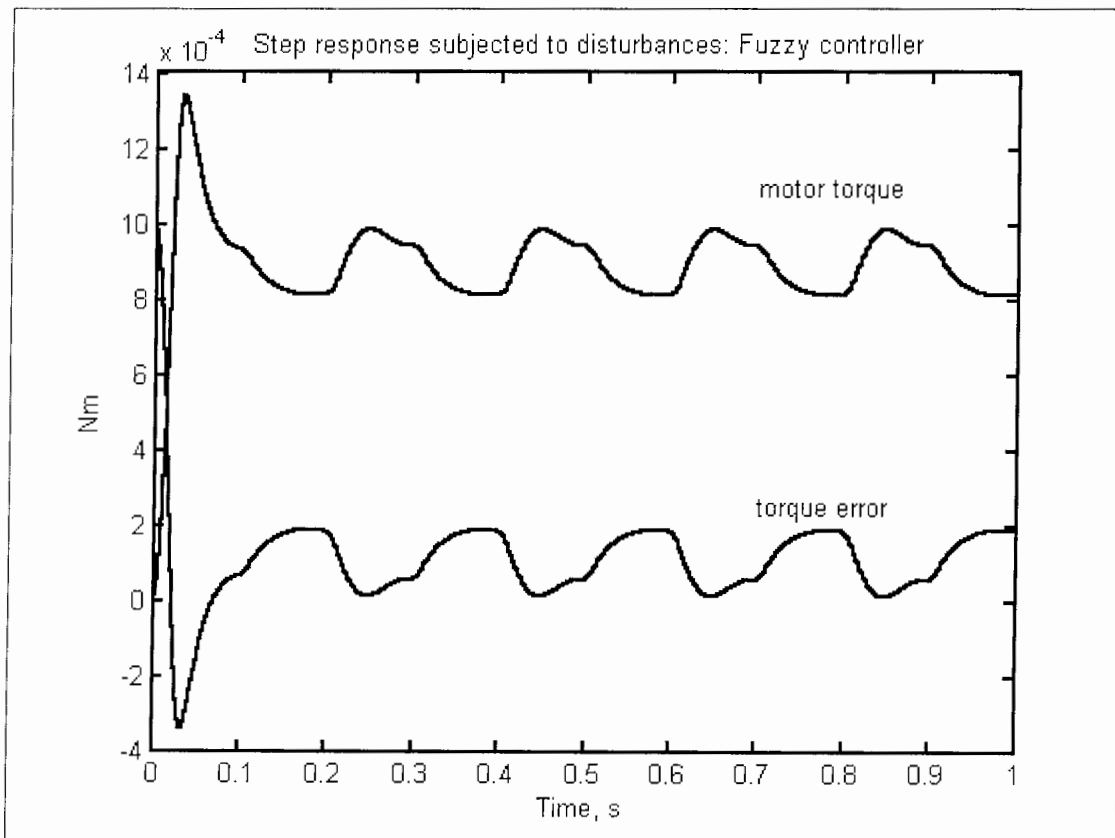
شکل ۲-۵ پاسخ پله و خطای تعقیب سیستم کنترل فازی

۲-۵ با حضور اغتشاش

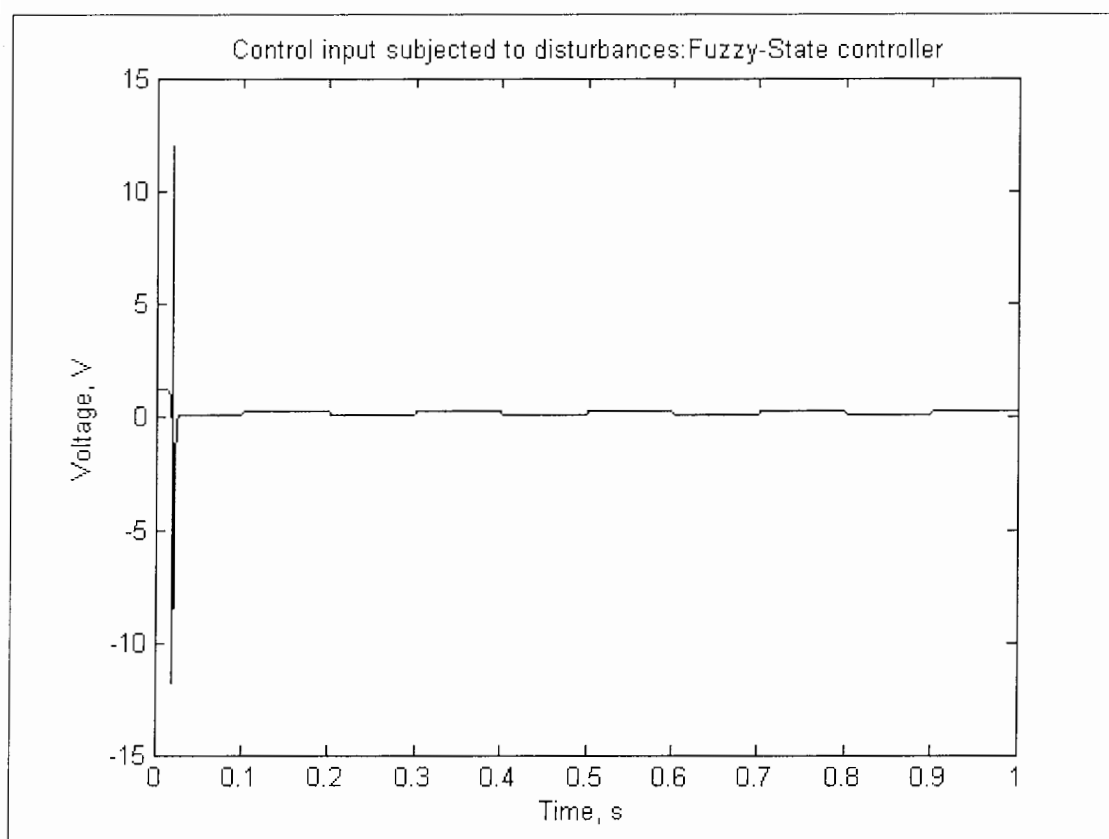
سیستم کنترل ساختار متغیر با حضور اغتشاش در گشتاور مرجع برابر $10^{-3} Nm$ و پسخوری حالت خطی برابر $[200 \quad 10000] k^T =$ میگردد. یک موج مربعی با زمان تناوب 0.2 ثانیه و دامنه 0.2 ولت به عنوان اغتشاش به ولتاژ ورودی اضافه می‌شود. پاسخ پله و خطای تعقیب سیستم ساختار متغیر و سیستم فازی به ترتیب در شکل‌های ۳-۵ و ۴-۵ نشان داده شده‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد که سیستم ساختار متغیر بهتر از سیستم کنترل فازی در دفع اغتشاش عمل می‌کند. همانگونه که شکل ۳-۵ تایید میکند گشتاور خروجی به تعقیب گشتاور مرجع می‌پردازد و اغتشاش نتوانسته است مانع حرکت به سوی هدف گردد ولی نوسانات ضعیفی با دامنه حدود $2 \times 10^{-3} Nm$ را در نقطه کار نشان می‌دهد. سیستم بخوبی توانسته است که اغتشاشات را دفع نماید زیرا در حالی که دامنه اغتشاشات حدود 2.5% ولتاژ ورودی موتور است اما اثر آن نسبت به مقدار نهایی خروجی برابر 0.2% است. عملکرد سیستم ساختار متغیر در دفع اغتشاش توسط ورودی کنترلی در شکل ۵-۵ نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۵ پاسخ پله و خطای تعقیب سیستم ساختار متغیر با حضور اغتشاش.



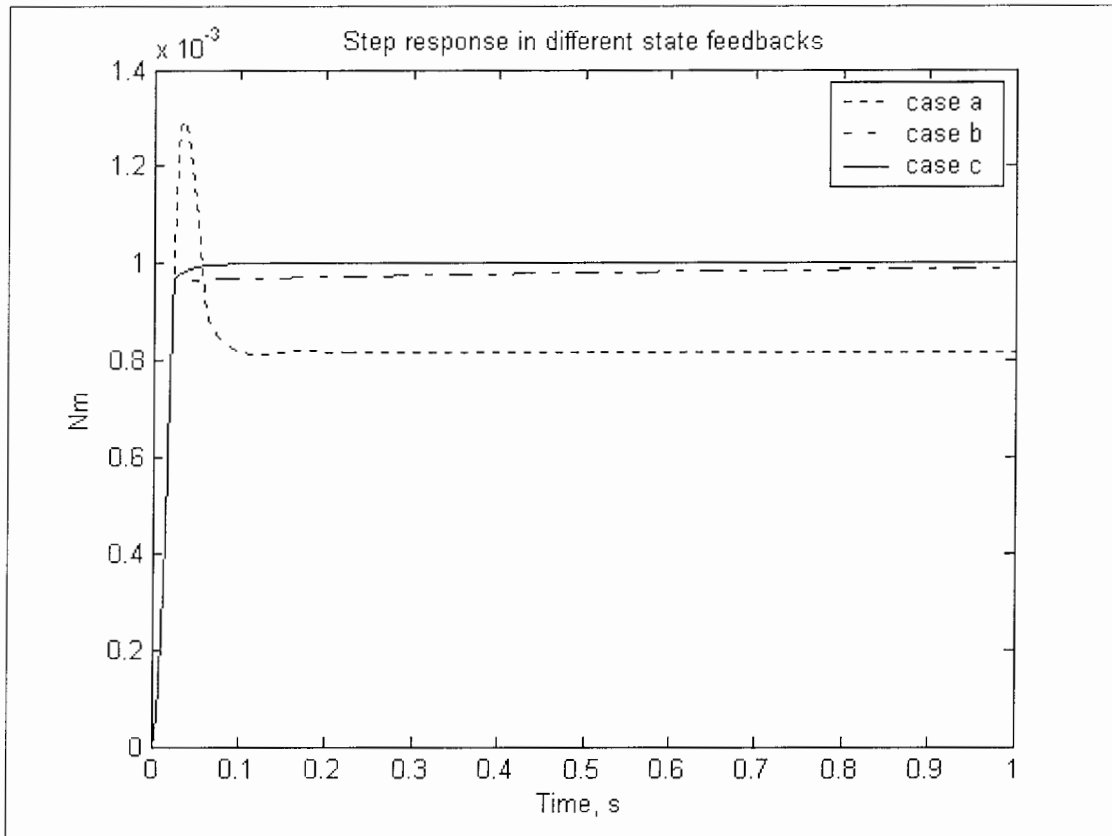
شکل ۴-۵ پاسخ پله و خطای تعقیب سیستم کنترل فازی با حضور اغتشاش.



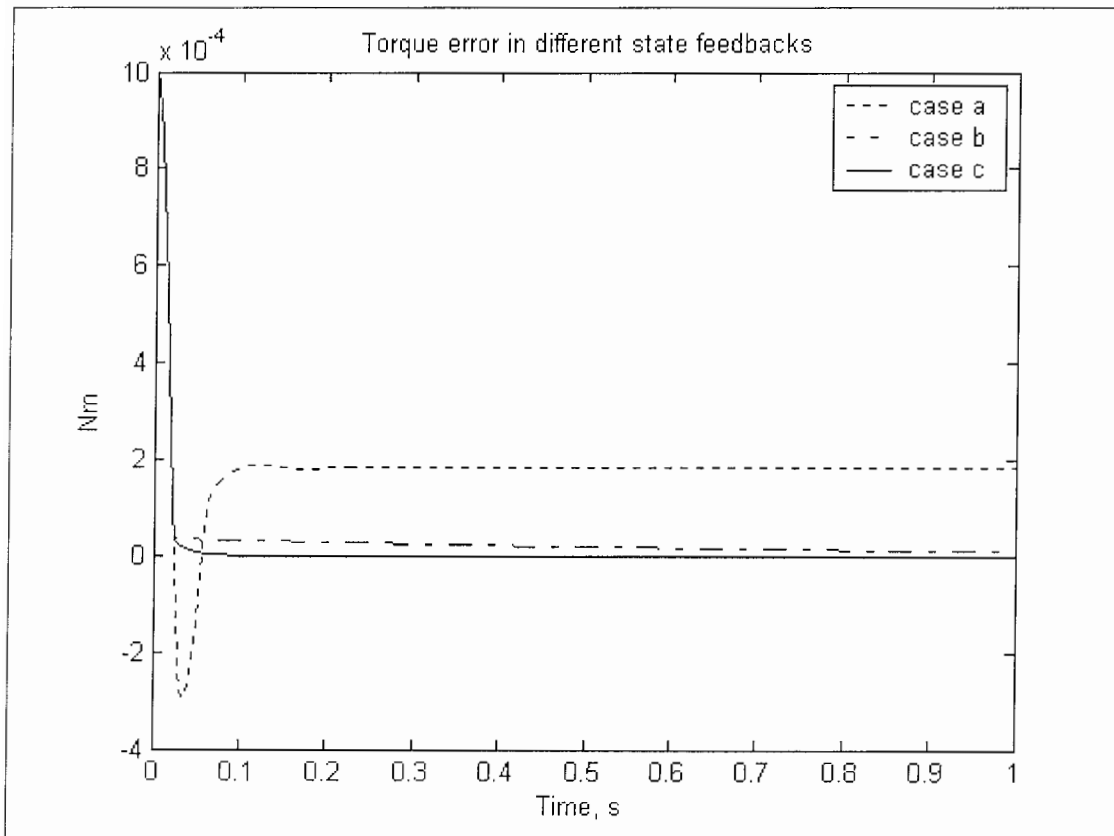
شکل ۵-۵ ورودی کنترلی سیستم ساختار متغیر در دفع اغتشاش .

۳-۵ تغییر پسخوری حالت خطی

در این شبیه سازی نقش مولفه های بردار پسخوری حالت خطی $k^T = [k_1 \ k_2]$ در کاهش خطای حالت ماندگار بررسی می شود. در بردار پسخوری حالت خطی، k_1 وزن خطای زاویه رتور و k_2 وزن مشتق خطای زاویه رتور است. پاسخ پله سیستم ساختار متغیر فازی - خطی به ورودی مرجع $10^{-2} Nm$ برای سه حالت تعقیب در شکل ۷-۵ ترسیم شده اند. از نتایج بدست آمده از این شبیه سازی در مورد مقادیر خطای حالت ماندگار در زمان 1 s برای حالت **a** برابر $1/82 \times 10^{-2} Nm$ ، برای حالت **b** برابر $1/036 \times 10^{-2} Nm$ و برای حالت **c** برابر $1.45 \times 10^{-8} Nm$ نشان می دهند.



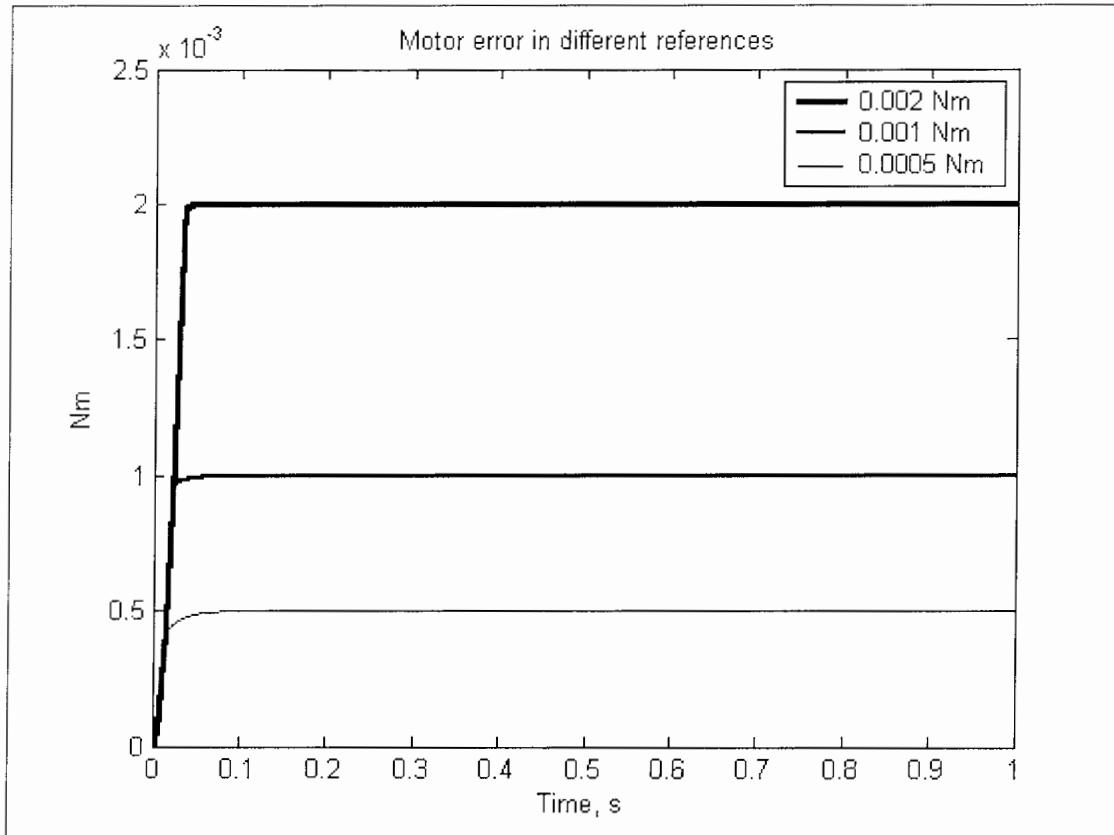
شکل ۶-۵ پاسخ پله در پاسخوری های مختلف.



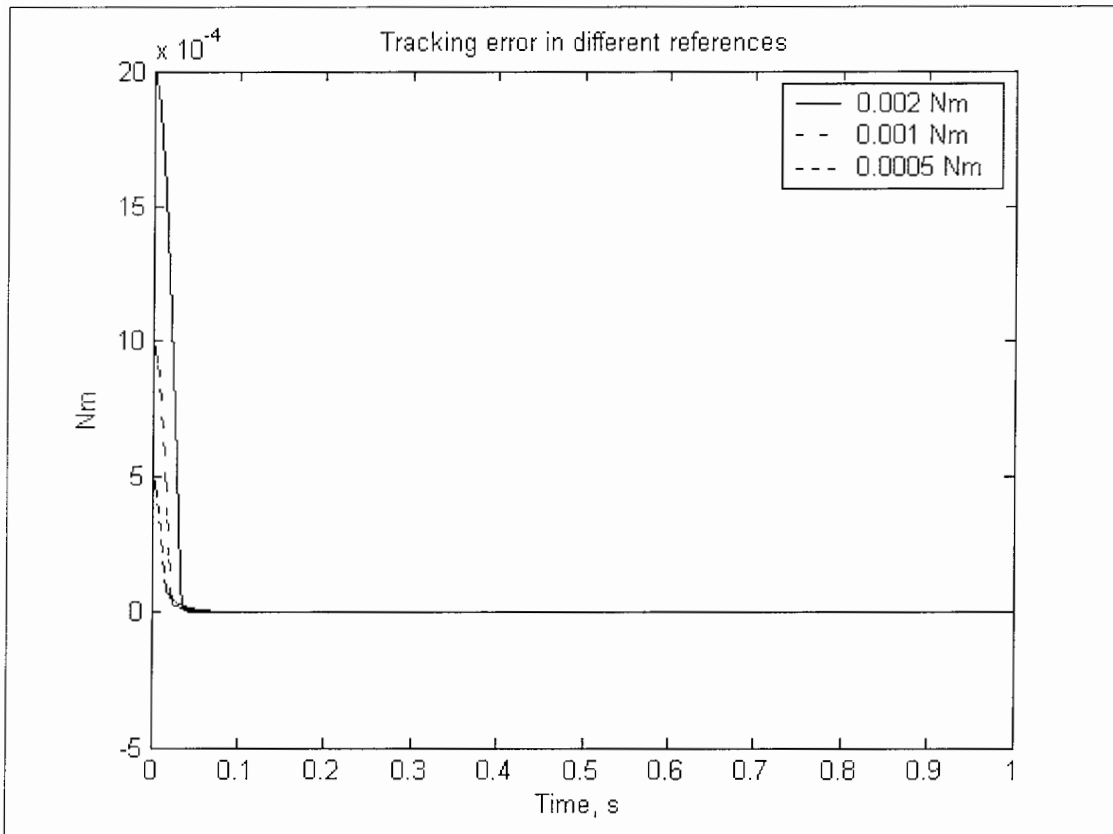
شکل ۷-۵ خطای گشتاور در پاسخوری های مختلف.

۴-۵ گشتاورهای مختلف

به منظور بررسی عملکرد سیستم ساختار متغیر در نقطه کارهای مختلف در محدوده کاری موتور، پاسخ پله سیستم به ازای گشتاور مرجع در مقادیر 0.002 Nm ، 0.001 Nm و 0.0005 Nm در شکل ۵-۸ و خطای تعقیب در شکل ۹-۵ ارائه می گردد. همانطور که ملاحظه می گردد رفتار سیستم در کلیه مقادیر ورودی مرجع مناسب است.



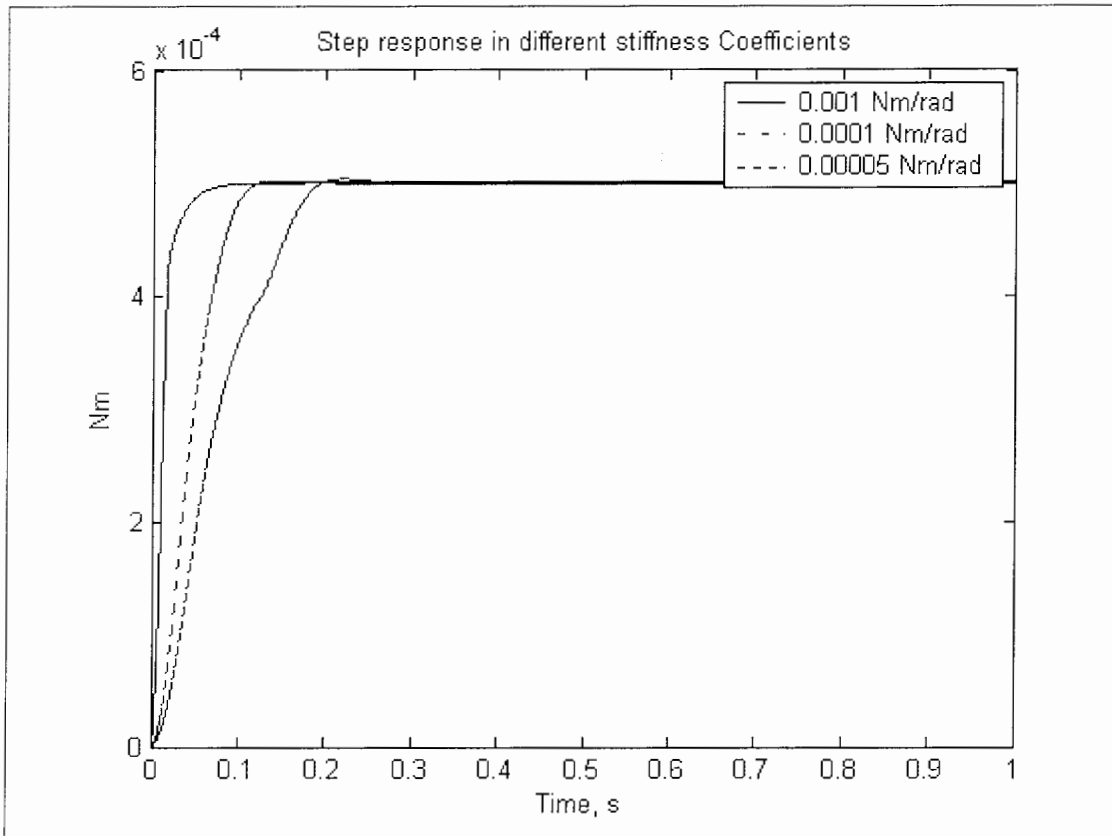
شکل ۵-۸ پاسخ پله در گشتاورهای مختلف مرجع



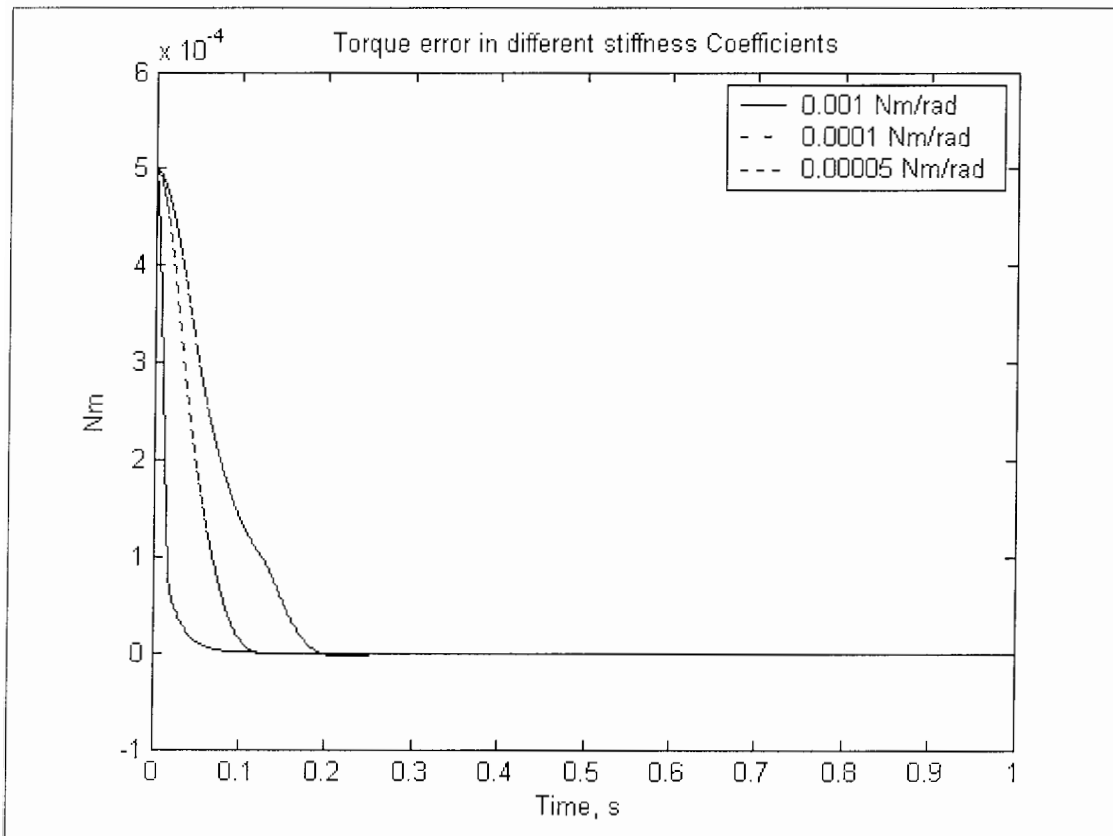
شکل ۹-۵ خطای تعقیب در گشتاورهای مختلف مرجع

۵-۵ ضرایب مختلف سفتی محیط

با هدف بررسی عملکرد سیستم ساختار متغیر در شرایط سفتی های مختلف محیط، پاسخ پله سیستم در گشتاور مرجع $10^{-3} Nm$ به ازای ضریب سفتی منتقل شده به محور رتور در مقادیر $10^{-2} Nm/rad$ ، $10^{-4} Nm/rad$ و $5 \times 10^{-5} Nm/rad$ به ترتیب از چپ به راست در شکل ۵-۱۰ و خطای تعقیب در شکل ۵-۱۱ ارائه می گردد. همانطور که ملاحظه می گردد گشتاور موتور بدون نوسان به سوی مقدار مرجع میل میکند و با خطای حالت ماندگار ناچیز در آن مستقر می شود. به عنوان یک نتیجه از این شبیه سازی می توان مطرح نمود که سیستم کنترل ساختار متغیر در ضرایب مختلف سفتی محیط در محدوده مذکور به خوبی کار می کند.



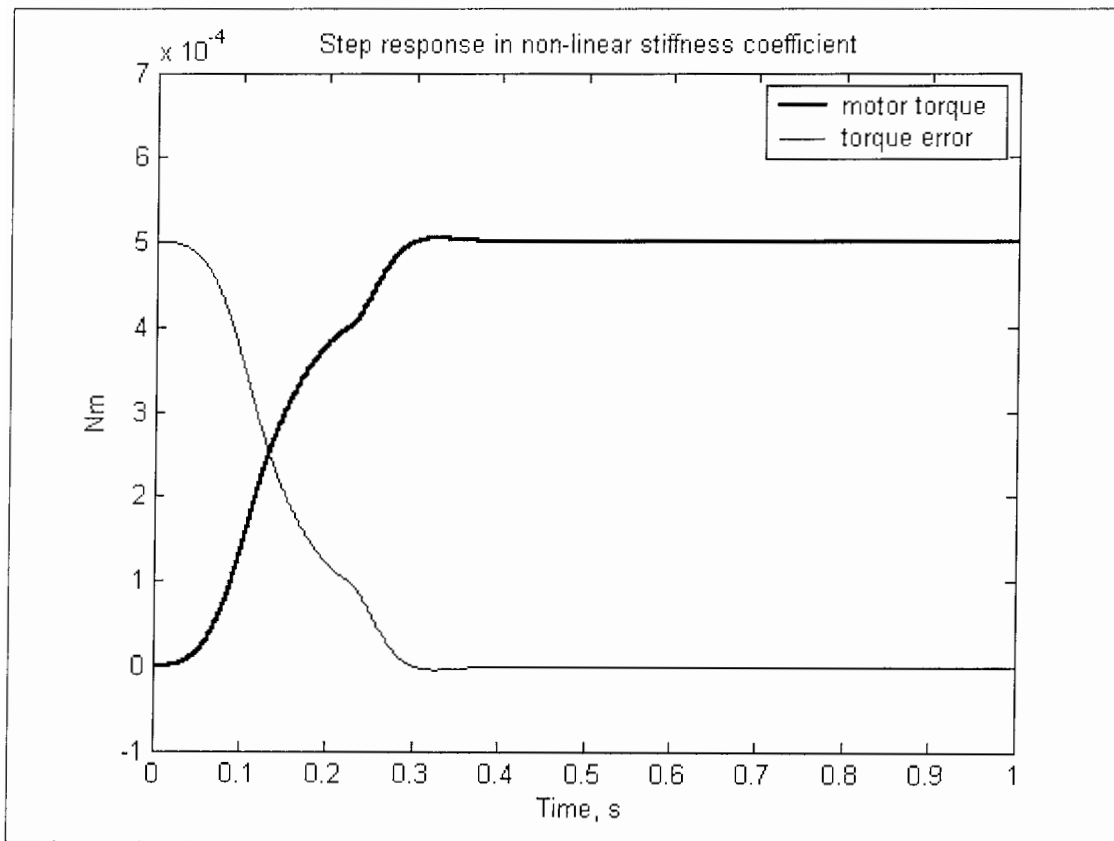
شکل ۵-۱۰ پاسخ پله در ضرایب مختلف سفتی محیط.



شکل ۵-۱۱ خطای تعقیب در ضرایب مختلف سفتی محیط.

۵-۶ سفتی غیر خطی

در این شبیه سازی، عملکرد سیستم ساختار متغیر در شرایط سفتی غیر خطی محیط بررسی می گردد. پاسخ پله سیستم در گشتاور مرجع $10^{-2} Nm$ به ازای سفتی غیر خطی منتقل شده به محور رتور به صورت $\tau_{mj} = (0/001 \theta_{mj})^2 Nm$ و خطای تعقیب در شکل ۵-۱۲ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد گشتاور موتور بدون نوسان و بالازدگی به سوی مقدار مرجع میل میکند و با خطای حالت ماندگار ناچیز در آن مستقر می شود.



شکل ۵-۱۲ پاسخ پله و خطای تعقیب در سفتی غیر خطی محیط $\tau_{mj} = (0/001 \theta_{mj})^2 Nm$.

فصل ششم

نتایج

در این طرح تحقیقاتی، سیستم کنترل نیروی ربات با یک روش جدید ساختار متغیر فازی - خطی طراحی و شبیه سازی شده است. هدف سیستم کنترل، تنظیم نیروی ثابت مجری نهایی در انجام کارهایی است که نیاز به تماس با محیط دارند. با توجه به تحقیق انجام شده می توان نتایج زیر را بر شمرد:

- تغییر ساختار سیستم کنترل از فازی به فضای حالت خطی، خطای حالت ماندگار را بطور رضایت بخشی کاهش داده است. آنالیز ریاضی و شبیه سازی نشان داده اند که وقتی سیستم در نزدیکی نقطه کار قرار دارد کنترل خطی موجب کاهش خطا می گردد و در دفع اغتشاش نیز موفق است. مقایسه نتایج سیستم ساختار متغیر با سیستم فازی نشان داده است که سیستم ساختار متغیر از خطای حالت ماندگار کوچکتری برخوردار است.
- بکارگیری کنترل فازی در سیستم ساختار متغیر، باعث شده است که سیستم در مهار اغتشاشات بخوبی عمل نماید. اغتشاشات می توانند از عواملی نظیر اصطکاک، انعطاف در مفاصل و چرخ دنده ها، تغییرات بار، تغییرات اینرسی، تغییر پارامترهای سیستم، خطای محاسباتی و اثرات ناشی از کولپینگ ها و بهم پیوستگی های اجزاء و سایر موارد دینامیک مدل نشده در سیستم بوجود آیند. ویژگی کنترل فازی در کنترل سیستم غیرخطی نیز قابل توجه بوده است.
- طراحی سیستم کنترل در فضای مفصلی و پیاده سازی استراتژی مفصل مستقل، منجر به دکوپله سازی سیستم شده است و کنترل نیرو را ساده نموده است. سیستم کنترل نیروی ربات از حالت چند ورودی - چند خروجی به شکل ساده یک ورودی - یک خروجی با هدف کنترل گشتاور مفصل تبدیل شده است. همچنین، بکارگیری کنترل کننده های فازی به صورت جداگانه برای مفاصل موجب شده است که تعداد قوانین فازی کمتر شوند و در نتیجه زمان محاسبات کاهش یابد.
- با استفاده از اندازه گیری اطلاعات گشتاور مفاصل و موقعیت زوایای مفاصل، ماتریس سفتی مفصلی تعیین شده است بویژه آنکه ماتریس ژاکوبین ربات و ماتریس سفتی محیط مواجه با عدم قطعیت باشد.
- شبیه سازی در فضای SIMULINK MATLAB انجام شده است و نتایج به صورت گرافیکی نمایش داده شده اند. عملکرد سیستم در هر دو حالت با حضور و بدون حضور اغتشاش، تغییر پسخوری حالت خطی، در گشتاور های مختلف، در ضرایب مختلف سفتی و در سفتی غیر خطی بررسی و ارزیابی شده است.

مراجع

- [1] B. Armstrong, "Friction: experimental determination, modeling and compensation", *Proc. IEEE Intl. Conf. On Robotics and Automation*, April 1988, pp. 1422-1427.
- [2] M. K. Brown, "A controlled impedance robot gripper", *AT&T Technical Journal*, vol. 64, no. 4, 1985, pp. 937-969.
- [3] F. Caccval, B. Siciliano and L. Villani, "Robot impedance control with nondiagonal stiffness", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, no. 10, Oct 1999, pp.1943-1946.
- [4] C. C. Cheah and D. Wang, "Learning impedance control", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 3, June 1998, pp. 452-465.
- [5] W. Chen, J. K. Mills, J. Chu and D. Sun, "A Fuzzy Compensator for Uncertainty of Industrial Robots", *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, May 2001, pp. 2968-2973.
- [6] P. Dupont, V. Hayward, B. Armstrong, and F. Altpeter, "Single state elastoplastic friction models", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 5, May 2002, pp. 787-792.
- [7] W. Gueaieb, F. Karray and S. Al-Sharhan, "A robust adaptive fuzzy position/force control scheme for cooperative manipulators", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 4, July 2003, pp. 516 – 528.
- [8] N. Hogan, "Impedance control: an approach to manipulation", Parts I,II,III, *ASME Journal of Dynamic systems, Measurement and Control*, vol. 107, no. 1, 1985, pp. 1-24.
- [9] L. Huang, S.S. Ge and T. H. Lee, "Fuzzy unidirectional force control of constrained robotic manipulators", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 134, no. 1, February 2003, pp. 135-146.
- [10] S. Jagannathan and G. Galan, "gripper", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 15, no. 2, March 2004, pp. 395 – 407.
- [11] D. Jossi and M. Donath, "Using six degree of freedom impedance control robots to perform contact tasks in a workcell", *Proceedings of the ASME Systems and Control Division*, ASME 1995, pp. 207-216.
- [12] S. Jung, T. C. Hsia, and R.G. Bonitz, "Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 3, May 2004, pp. 474-483.

- [13] S. Jung, and T. C. Hsia, "Neural network impedance force control of robot manipulator", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 3, 1998, pp. 451-461.
- [14] W. Khalil and E. Dombre, "Modeling, identification and control of robots", 2002, *Hermes Penton Ltd.*
- [15] K. Kiguchi, and T. Fukuda, "Intelligent position/force controller for industrial robot manipulators-Application of fuzzy neural networks" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 6, 1997, pp. 753-761.
- [16] J. L. Nevins and D. E. Whitney, "Computer controlled assembly", *Scientific American Magazine*, February 1978, pp. 67.
- [17] H. Park and J.M. Lee, "Adaptive impedance control of a haptic interface", *Mechatronics*, vol. 14, no. 3, April 2004, pp. 237-253.
- [18] M. H. Raibert and Craig J. J., "Hybrid position / force control of manipulator", *Trans. ASME, J. DSMC*, 103(2), 1981, pp.128-133.
- [19] M. W. Spong, and M. Vidyasagar, "Robot dynamics and control", 1989, *John Wiley & Sons, Inc.*
- [20] R. J. Schilling, *Fundamentals of robotics: analysis & control*, 1990, *Prentice-Hall Inc*, New Jersey.
- [21] J. M. Schimmels and S. Hunge, "A passive mechanism that improves robotic positioning through compliance and constraint", *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, ASME 1995, pp. 217-223.
- [22] K. J. Salisbury, "Active stiffness control of a manipulator in Cartesian coordinator", *The 19th IEEE Conference on Decision and Control*, Albuquerque, 1980, pp. 95-100.
- [23] D. E. Whitney, "Force feedback control of manipulator fine motions", *ASME Journal of Dynamic Systems and Measurement, and Control*, vol. 98, 1997, pp. 91-97.
- [24] Z. L. Xu, and G. Fang, "Fuzzy impedance control for robot in complex spatial edge following", *Seventh International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Dec 2002, Singapore, pp. 845-850.
- [25] T. Yoshikawa, "Force control of robot manipulator", *Proceedings of the 2000 IEEE International conference on Robotics & Automation*, CA, USA, 2000, pp. 220-226.
- [26] G. Zeng and A. Hemami, "An overview of robot force control", *Robotica*, vol. 15, 1997, pp. 473-482.