

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

مهندسی برق - گرایش کنترل

رساله دکتری

کنترل مستقل از مدل بازوی رباتیک با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ

نگارنده: امیر سالکی

استاد راهنما

دکتر محمد مهدی فاتح

مهر ۱۳۹۹



فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم امیر سالکی دانشجوی دکتری رشته برق - کنترل به شماره دانشجویی ۹۲۱۶۰۴۵

ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۱۳۹۹/۰۷/۰۱ از رساله نظری ■ / عملی □ خود با عنوان:

کنترل مستقل از مدل بازوی رباتیک با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ

دفاع و با اخذ نمره ۱۸،۴۹۳... به درجه: بسیار خوب.. نائل گردید.

ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷ ✓

د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد □

الف) درجه عالی: نمره ۲۰ - ۱۹ □

ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ □

ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد □

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
	دکتر محمد مهری نافع	استاد/اساتید راهنما	استاد	
	دکتر —	مشاور / مشاورین	—	
	دکتر علیرضا خسروی	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
	دکتر حسن قلی زاده نرم	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
	دکتر محمد حواد ظریف	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
	دکتر محسن قلعه نوی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/ خانم

امیر سالکی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: عرصه امیر سالکی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم بہ

درد فداکار
♦

مادر دلسوز

و

ہمسفر مہربانم

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم قبل از هر چیز از زحمات و صبوری‌های استاد ارجمندم جناب آقای پروفسور فاتح سپاسگزاری کنم. اکنون نزدیک به دو دهه است که افتخار آشنایی با ایشان و سعادت علم‌اندوزی در محضرشان را دارم. شروع دوران تحصیلات دانشگاهی‌ام در محضر ایشان بود و اکنون در مهمترین مقطع زندگی تحصیلی‌ام نیز از راهنمایی‌های ارزنده‌ی ایشان بهره گرفته‌ام. تا همیشه مدیون ارشادشان خواهم بود.

پدر و مادر عزیزم همراهان همیشگی‌ام بوده‌اند در مسیر بی‌نظیر زندگی. پیمودن این مسیر را بدون حضورشان نمیتوانم تصور کنم. هیچ کلامی بیانگر حجم فداکاری آنها و عمق ارادتم به ایشان نیست. قدردانشان هستم.

بسیاری از اتفاقات خوب و آرزوهایم با ورود همسر مهربانم رخ دادند. امیدوارم تا ابد در کنارش بهترین‌ها را تجربه کنم و سعی می‌کنم برایش بهترین باشم.

از اساتید محترم گروه کنترل دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود و همه بزرگوارانی که در دوران تحصیلم در محضرشان کسب علم کرده‌ام، سپاسگزارم.

از دوستان عزیزم آقایان منصور بسطامی، منصور رضایی و امیر یونسیان که در این مدت به من لطف فراوان داشته‌اند تشکر می‌کنم.

و در نهایت ...

خداوند بزرگ را شاکرم

به خاطر تمام داشته‌هایم،

که داده‌ی اوست.

تعمدنامه

اینجانب امیر سالکی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی برق گرایش کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل مستقل از مدل بازوی رباتیک با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم 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.

چکیده

در این رساله از چند روش کنترل مستقل از مدل برای کنترل بازوهای ماهر صنعتی استفاده شده است. ساختار کلی که در این رساله برای بازوهای ماهر صنعتی در نظر گرفته شده، بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ بدست آمده است. در این ساختار کلی تمامی عوامل ناشناخته‌ی داخلی سیستم به همراه اغتشاشات و عوامل محیطی، به شکل یک متغیر واحد در نظر گرفته شده و تخمین زده می‌شوند. در روش‌های ارائه شده در این رساله برای کنترل مفاصل نیازی به در اختیار داشتن مدل پیچیده ربات نیست. هر کدام از مفاصل به صورت مستقل کنترل می‌شوند و سیگنال کنترل تولید شده توسط مکانیزم کنترل، ولتاژ موتورهایست، که به راحتی و به صورت مستقیم قابل اعمال به آن‌هاست. پیاده‌سازی این روش‌ها آسان است و پیچیدگی روش‌های مبتنی بر مدل را ندارد. روش‌های ارائه شده در این رساله عبارتند از کنترل مستقل از مدل با استفاده از رویکرد حالت توسعه یافته، کنترل مستقل از مدل تطبیقی و کنترل مستقل از مدل با استفاده از شبکه عصبی. نتایج حاصل از تحلیل ریاضی و شبیه‌سازی‌ها و مقایسه نشان می‌دهد که این روش‌ها موثر و مناسب هستند.

کلمات کلیدی: کنترل مستقل از مدل، بازوی ماهر رباتیک، راهبرد کنترل ولتاژ، رویکرد حالت توسعه یافته، کنترل تطبیقی، تخمین اغتشاش.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

❖ مقالات ژورنالی

- 1- Amir Saleki, & Mohammad Mehdi Fateh, (2020), "Model-free control of electrically driven robot manipulators using an extended state observer". *Computers & Electrical Engineering*, 87, p.106768.
- 2- Amir Saleki, & Mohammad Mehdi Fateh, (2020), "Adaptive Model-Free Voltage Control of Robot Manipulators". *International Journal of Robotics and Automation*, vol 35(3).

❖ مقالات کنفرانسی

- 1- Saleki, A., & Fateh, M. M. (2019, April). Adaptive Model-Free Control of Electrically Driven Robot Manipulators. In 2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 1086-1091). IEEE.
- 2- Saleki, A., & Fateh, M. M. (2018, October). Model free control of electrically driven manipulator by optimized linear extended state observer, based on voltage control strategy. In 2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM) (pp. 548-553). IEEE.

۳- امیر سالکی، محمد مهدی فاتح. " کنترل مستقل از مدل بازوی ماهر الکتریکی با استفاده از LESO. بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ"، پنجمین کنفرانس بین المللی کنترل و ابزار دقیق ایران - آبان ماه ۹۶ - دانشگاه شیراز.

فهرست مطالب

ل	فهرست اشکال
س	فهرست جداول
۱	فصل اول: مقدمه ای بر کنترل مستقل از مدل
۲	۱-۱ مقدمه..... ۲
۴	۲-۱ روش های طراحی کنترل کننده ی کلاسیک..... ۴
۴	۱-۲-۱ روش کنترل مدرن ۴
۶	۲-۲-۱ روش طراحی تجربی مبتنی بر خطا ۶
۸	۳-۱ محدودیت های روش های طراحی کنترل کلاسیک..... ۸
۸	۱-۳-۱ محدودیت های کنترل مدرن..... ۸
۱۰	۲-۳-۱ محدودیت های روش طراحی مبتنی بر خطا..... ۱۰
۱۲	۴-۱ کنترل مستقل از مدل..... ۱۲
۱۳	۱-۴-۱ کنترل کننده های فازی..... ۱۳
۱۴	۲-۴-۱ کنترل کننده های مبتنی بر شبکه عصبی..... ۱۴
۱۵	۳-۴-۱ روش کنترل آزاد از مدل ۱۵
۱۷	۴-۴-۱ کنترل حذف اغتشاش فعال ۱۷
۱۸	۵-۴-۱ کنترل کننده ی تناسبی - انتگرالی - مشتقی ۱۸
۱۸	۵-۱ کنترل مستقل از مدل بازوهای ماهر ۱۸
۱۸	۱-۵-۱ کنترل هوشمند ۱۸
۲۰	۲-۵-۱ روش های کنترل مستقل از رگرسور..... ۲۰
۲۱	۳-۵-۱ روش های کنترل مبتنی بر رویتگر..... ۲۱
۲۲	۴-۵-۱ روش تخمین تاخیر زمانی..... ۲۲
۲۳	۶-۱ درباره رساله..... ۲۳
۲۵	فصل دوم: کنترل بازوی ماهر رباتیک
۲۶	۱-۲ مقدمه..... ۲۶
۲۷	۲-۲ راهبرد کنترل مبتنی بر گشتاور..... ۲۷
۲۹	۱-۲-۲ کنترل تطبیقی بازوی ماهر..... ۲۹

۲۹	 کنترل مقاوم بازوی ماهر..... ۲-۲-۲
۳۲	 راهبرد کنترل مبتنی بر ولتاژ..... ۳-۲
۳۳	 مدل سازی راهبرد کنترل ولتاژ..... ۴-۲
۳۸	 نتیجه گیری..... ۵-۲

فصل سوم: کنترل مستقل از مدل بازوی ماهر صنعتی با استفاده از رویتگر

۳۹	حالت توسعه یافته ی خطی
۴۰	 مقدمه..... ۱-۳
۴۰	 ساختار کلی رویتگر حالت توسعه یافته ی خطی..... ۲-۳
۴۴	 کنترل موقعیت بازوی ماهر بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ با استفاده از رویتگر حالت توسعه یافته ی خطی..... ۳-۳
۴۵	 تحلیل همگرایی..... ۴-۳
۴۶	 گام اول تحلیل..... ۱-۴-۳
۴۷	 گام دوم تحلیل..... ۲-۴-۳
۴۸	 شبیه سازی روش کنترل پیشنهادی..... ۵-۳
۵۹	 تعیین پارامترهای رویتگر و کنترل کننده با استفاده از PSO..... ۶-۳
۶۱	 شبیه سازی..... ۱-۶-۳
۶۷	 نتیجه گیری..... ۷-۳

فصل چهارم: کنترل مستقل از مدل بازوی ماهر صنعتی با استفاده از رویتگر حالت

۶۹	توسعه یافته غیر خطی
۷۰	 مقدمه..... ۱-۴
۷۰	 ساختار کلی رویتگر حالت توسعه یافته غیر خطی..... ۲-۴
۷۲	 کنترل موقعیت بازوی ماهر بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ با استفاده از رویتگر حالت توسعه یافته غیر خطی..... ۳-۴
۷۴	 تحلیل همگرایی رویتگر حالت توسعه یافته غیر خطی..... ۴-۴
۷۵	 گام اول: همگرایی متغیرهای رویتگر..... ۱-۴-۴
۷۷	 گام دوم: ردیابی مسیر مرجع..... ۲-۴-۴
۷۸	 نتایج شبیه سازی..... ۵-۴
۷۹	 شبیه سازی ۱..... ۱-۵-۴

۸۳	 شبیه سازی ۲	۴-۵-۲
۸۶	 شبیه سازی ۳ و مقایسه	۴-۵-۳
۸۹	 نتایج تجربی	۴-۶
۹۱	 اعمال روش کنترل پیشنهادی بر روی راهبرد کنترل گشتاور	۴-۷
۹۳	 شبیه سازی روش کنترل مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور	۴-۷-۱
۹۶	 نتیجه گیری	۴-۸
۹۹	فصل پنجم: کنترل مستقل از مدل تطبیقی	
۱۰۰	 مقدمه	۵-۱
۱۰۰	 کنترل کننده ی مستقل از مدل تطبیقی	۵-۲
۱۰۳	 شبیه سازی	۵-۳
۱۰۶	 نتیجه گیری	۵-۴
۱۰۷	فصل ششم: کنترل مستقل از مدل بازوی ماهر با استفاده از شبکه ی عصبی	
۱۰۸	 مقدمه	۶-۱
۱۰۸	 مدل اغتشاش برای مفصل بازوی ماهر	۶-۲
۱۰۹	 تخمین عبارت F با استفاده از شبکه ی عصبی	۶-۳
۱۱۲	 طراحی کنترل کننده برای مفصل بازوی ماهر	۶-۴
۱۱۴	 شبیه سازی	۶-۵
۱۱۶	 نتیجه گیری	۶-۶
۱۱۹	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات	
۱۲۰	 مقدمه	۷-۱
۱۲۲	 کنترل مستقل از مدل بازوی ماهر - مطالب ارائه شده در این رساله	۷-۲
۱۲۴	 پیشنهادات	۷-۳
۱۲۵	فهرست منابع	

فهرست اشکال

شکل ۱-۱	یک سیستم کنترل فیدبک.....	۲
شکل ۲-۱	ساختار کنترل آزاد از مدل.....	۱۷
شکل ۱-۳	نمایش نمادین بازوی ماهر هنرمند.....	۵۰
شکل ۲-۳	خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - z_{i1})$ در حالت بدون اغتشاش.....	۵۱
شکل ۳-۳	خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در حالت بدون اغتشاش.....	۵۲
شکل ۴-۳	متغیر مفصلی سوم در حالت بدون اغتشاش.....	۵۲
شکل ۵-۳	ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال های کنترل) در حالت بدون اغتشاش.....	۵۳
شکل ۶-۳	گشتاور اغتشاشی وارد بر مفصل سوم بازوی ماهر هنرمند.....	۵۳
شکل ۷-۳	خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - z_{i1})$ در حضور اغتشاش.....	۵۴
شکل ۸-۳	خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در حضور اغتشاش.....	۵۵
شکل ۹-۳	متغیر مفصلی سوم در حضور اغتشاش.....	۵۵
شکل ۱۰-۳	ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال های کنترل) در حضور اغتشاش.....	۵۶
شکل ۱۱-۳	خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - z_{i1})$ در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر.....	۵۷
شکل ۱۲-۳	خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر.....	۵۷
شکل ۱۳-۳	متغیر مفصلی سوم در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر.....	۵۸
شکل ۱۴-۳	ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال های کنترل) در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر.....	۵۸
شکل ۱۵-۳	گشتاور اغتشاشی وارد بر مفصل دوم ربات دورابطی.....	۶۴
شکل ۱۶-۳	خطای ردیابی متغیرهای مفصلی ربات دورابطی.....	۶۵
شکل ۱۷-۳	ولتاژ اعمالی به موتورهای مفاصل ربات دورابطی.....	۶۵
شکل ۱۸-۳	گشتاور اعمالی به مفاصل ربات دورابطی.....	۶۶
شکل ۱۹-۳	متغیر مفصلی دوم ربات دورابطی.....	۶۶

۷۱	.....	شکل ۱-۴ تابع $fal(.)$ به ازای مقادیر $\alpha = 0.1, \delta = 0.1$
۷۴	.....	شکل ۲-۴ بلوک دیاگرام سیستم کنترل
۷۹	.....	شکل ۳-۴ نمایش نمادین بازوی ماهر هنرمند
۷۹	.....	شکل ۴-۴ گشتاور اغتشاشی وارد بر مجری نهایی
۸۰	.....	شکل ۵-۴ خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - z_{i1})$
۸۱	.....	شکل ۶-۴ خطای ردیابی متغیرهای مفصلی $(q_{di} - q_i)$
۸۲	.....	شکل ۷-۴ متغیر مفصلی سوم ربات
۸۲	.....	شکل ۸-۴ ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال‌های کنترل)
۸۳	.....	شکل ۹-۴ گشتاورهای اعمالی به مفاصل ربات
		شکل ۱۰-۴ خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - z_{i1})$ در
۸۴	.....	حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر
		شکل ۱۱-۴ خطای ردیابی متغیرهای مفصلی $(q_{di} - q_i)$ در حضور اغتشاش و فرکانس
۸۴	.....	دو برابر
۸۵	.....	شکل ۱۲-۴ متغیر مفصلی سوم ربات در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر
		شکل ۱۳-۴ ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال کنترل) در حضور اغتشاش و
۸۵	.....	فرکانس دو برابر
۸۷	.....	شکل ۱۴-۴ خطای ردیابی متغیرهای مفصلی $(q_{di} - q_i)$ (روش AUE)
۸۸	.....	شکل ۱۵-۴ سیگنال‌های کنترل (روش AUE)
۹۰	.....	شکل ۱۶-۴ بازوی ماهر اسکارا
۹۰	.....	شکل ۱۷-۴ ردیابی مسیرهای مرجع در پیاده سازی عملی روش کنترل پیشنهادی
۹۱	.....	شکل ۱۸-۴ سیگنال‌های کنترل در پیاده سازی عملی (ولتاژ موتورها)
۹۳	.....	شکل ۱۹-۴ خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در کنترل مبتنی بر گشتاور (بدون اغتشاش)
۹۴	.....	شکل ۲۰-۴ گشتاورهای اعمالی به مفاصل در روش کنترل مبتنی بر گشتاور (بدون اغتشاش)
		شکل ۲۱-۴ خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در کنترل مبتنی بر گشتاور (در حضور
۹۵	.....	اغتشاش)
		شکل ۲۲-۴ گشتاورهای اعمالی به مفاصل در روش کنترل مبتنی بر گشتاور (در حضور
۹۵	.....	اغتشاش)
۱۰۳	.....	شکل ۱-۵ بلوک دیاگرام سیستم کنترل تطبیقی مستقل از مدل

شکل ۵-۲	گشتاور اغتشاشی وارد بر مجری نهایی.....	۱۰۴
شکل ۵-۳	خطای ردیابی متغیرهای مفصلی $(q_{di} - q_i)$	۱۰۵
شکل ۵-۴	ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال‌های کنترل).....	۱۰۵
شکل ۵-۵	متغیرهای تخمینی $\hat{F}$ برای هرکدام از مفاصل ربات.....	۱۰۶
شکل ۶-۱	دیاگرام کلی شبکه عصبی مورد استفاده برای تخمین F	۱۱۰
شکل ۶-۲	گشتاور اغتشاشی وارد بر مجری نهایی.....	۱۱۴
شکل ۶-۳	خطای ردیابی متغیرهای مفاصل $(q_{di} - q_i)$	۱۱۵
شکل ۶-۴	سیگنال‌های کنترل (ولتاژ موتورها).....	۱۱۶
شکل ۶-۵	جریان موتورها.....	۱۱۷
شکل ۶-۶	متغیر مفصلی سوم بازوی ماهر.....	۱۱۷

فهرست جداول

جدول ۱-۳	پارامترهای دناویت - هارتنبرگ (DH) بازوی ماهر هنرمند.....	۴۹
جدول ۲-۳	پارامترهای دینامیکی بازوی ماهر هنرمند.....	۴۹
جدول ۳-۳	پارامترهای موتور الکتریکی DC بازوی ماهر هنرمند.....	۴۹
جدول ۴-۳	پارامترهای ربات دورابطی.....	۶۳
جدول ۵-۳	پارامترهای موتور الکتریکی DC ربات دورابطی.....	۶۳
جدول ۶-۳	پارامترهای بدست آمده توسط روش PSO.....	۶۳
جدول ۱-۴	مقایسه شاخص‌های عملکردی روش پیشنهادی با روش AUE.....	۸۸

فصل اول

مقدمه ای بر کنترل مستقل از مدل

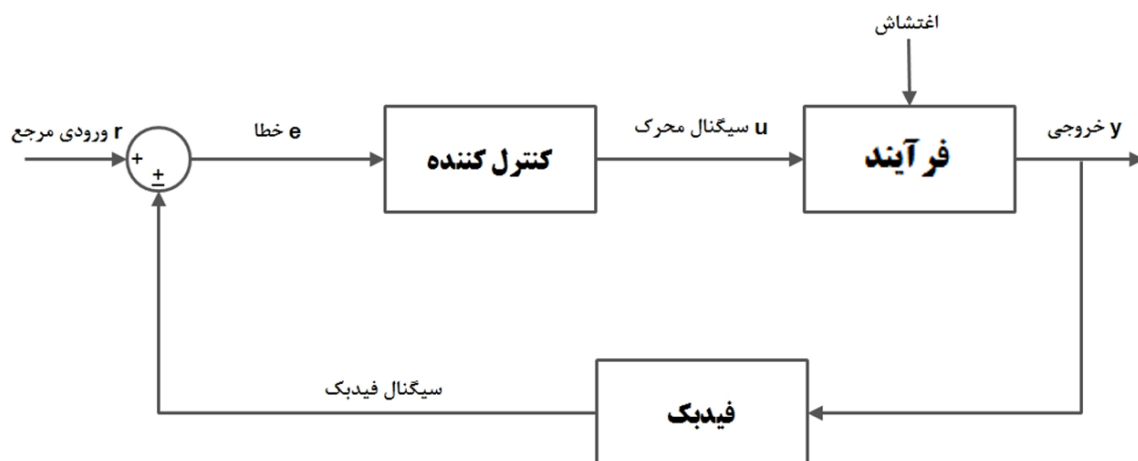
۱-۱ مقدمه

تئوری کنترل یک عرصه تحقیقاتی بسیار گسترده است که در تمامی زمینه‌های مهندسی ورود پیدا کرده و می‌توان آن را به عنوان اولین دست آورد تکنیکی انقلاب صنعتی در نظر گرفت. مهمترین اصل کنترل اصلاح رفتار سیستم برای رسیدن به عملکرد مطلوب است. هدف کنترل‌کننده حداقل کردن اختلاف بین خروجی واقعی سیستم y و ورودی مرجع r است. شکل ۱-۱ بیان‌کننده ساختار کلی کنترل فیدبک است.

علم کنترل و به ویژه کنترل فیدبک نقش عمده‌ای در پیشبرد انقلاب صنعتی داشته است. امروزه، از کارخانجات گرفته تا اکتشافات فضایی، تصور یک سیستم مهندسی که مکانیزم کنترل فیدبک این چنینی نداشته باشد، بسیار مشکل است.

مفهوم، تئوری و کاربردهای کنترل فیدبک موضوع بسیار جذابی هم برای تئوریسین‌ها و هم برای تکنسین‌ها و مهندسان عملی کنترل بوده است. مقالات و مستندات علمی کنونی در زمینه کنترل فیدبک، حاصل تحقیقات بیش از ۷ دهه است. در سیستم کنترل فیدبک، متغیر ورودی به گونه‌ای توسط کنترل‌کننده تنظیم می‌شود که خروجی به شکل مطلوب تغییر کند.

توجه به این نکته لازم است که در عمل، قانون کنترل، معمولاً به صورت تجربی تعیین می‌شود. اما تئوری کنترل مدرن برای استفاده و بکارگیری شیوه‌های مختلف خود به مدل ریاضی از سیستم فیزیکی



شکل ۱-۱: یک سیستم کنترل فیدبک

نیاز دارد و این آغاز مشکلات و پیچیدگی‌ها در این حوزه است. روش‌های تحلیل و طراحی کنترل مدرن، همگی وابستگی شدیدی به مدل ریاضی دقیق سیستم تحت کنترل دارند. در صورت در اختیار داشتن مدل ریاضی سیستم، کنترل مدرن روش‌های بسیار قدرتمند و جذابی برای هدایت سیستم در مسیر مطلوب و دلخواه دارد.

اما تصور داشتن یک مدل ریاضی دقیق از یک سیستم فیزیکی، بسیار خوشبینانه و غیر واقعی است. جدا از پیچیدگی‌های فراوان و عدم دقت روش‌های شناسایی سیستم‌ها، استهلاک سیستم‌ها و عدم قطعیت در دینامیک آنها باعث می‌شود که هیچگاه مدل بدست آمده برای سیستم، برای مدت زمان زیادی اعتبار نداشته باشد. علاوه بر آن اغتشاشات و نویز موجود در محیط همیشه عواملی هستند که فرآیند کنترل را به شدت با مشکل مواجه می‌کنند. برای مقابله با اغتشاشات و نویزهای محیطی روش‌هایی چون کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی ارائه شده است، اما وابستگی به مدل سیستم همچنان در این زمینه‌ها نیز بر نتیجه نهایی کار سایه می‌افکند. با این اوصاف اگر بتوان روش کنترلی یافت، که به واسطه‌ی آن بتوان بدون نیاز به مدل ریاضی سیستم و تنها از طریق اطلاعات ورودی و خروجی آن که در هر زمانی به راحتی قابل اندازه‌گیری باشند، فرآیند کنترل را انجام داد، گام مهمی در ساده‌سازی روش‌های کنترل برداشته شده است.

عدم وابستگی کنترل‌کننده به مدل سیستم تحت کنترل موجب می‌شود که تغییراتی که به مرور زمان در دینامیک‌های داخلی سیستم اتفاق می‌افتد، در فرآیند کنترل بی‌تاثیر بوده و کنترل‌کننده نیاز به تنظیم مجدد به واسطه تغییر مدل سیستم نداشته باشد.

جذابیت این ایده باعث شده تا تلاش‌های فراوانی در این زمینه صورت گیرد و نتایج مفید و متفاوتی نیز حاصل شود. کنترل فازی، کنترل عصبی، کنترل مستقل از مدل، کنترل مستقل از مدل تطبیقی و کنترل حذف اغتشاش فعال از جمله نتایجی است که در اثر این تلاش‌ها توسط محققین علم کنترل

بدست آمده است. اما قبل از همه این روش‌ها، کنترل‌کننده‌های معروف تناسبی – انتگرالی – مشتقی^۱، خود شروعی بر مایع‌های کنترل مستقل از مدل سیستم‌ها بوده‌اند.

در ادامه‌ی این فصل ابتدا روش‌های طراحی متداول کنترل‌کننده‌ها، با یک دسته بندی کلی ساده معرفی می‌شوند. پس از بررسی نحوه کار و مشکلات موجود برای تحقق و استفاده از آنها، نیاز به تغییر نگرش درباره روش‌های کنترل برای سیستم‌های واقعی مورد بحث قرار می‌گیرد. در انتهای فصل نیز تعدادی از روش‌های کنترل مستقل از مدل به صورت اجمالی معرفی می‌شوند.

۲-۱ روش‌های طراحی کنترل‌کننده‌ی کلاسیک

با توجه به آنچه در منابع مختلف به آن اشاره شده است، از یک منظر روش‌های اصلی طراحی کنترل-کننده را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم نمود:

۱- روش کنترل مدرن

۲- روش کنترل مبتنی بر خطا

۱-۲-۱ روش کنترل مدرن

به سیستم زیر توجه کنید:

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + bu \quad (1-1)$$

که در آن y موقعیت خروجی، b یک ثابت، u ورودی و w اغتشاش خارجی است.

در طراحی مبتنی بر مدل فرض می‌شود که دینامیک‌های مطلوب حلقه بسته به صورت زیر است:

$$\ddot{y} = g(y, \dot{y}) \quad (2-1)$$

در این صورت مراحل طراحی کنترل فیدبک به این صورت است که ابتدا باید یک تقریب ریاضی معادل معمولاً خطی و تغییرناپذیر با زمان و بدون اغتشاش از $f(y, \dot{y}, w, t)$ یافت. برای این منظور از روش‌های مختلف خطی سازی و فرضیات مربوط به حذف اغتشاش استفاده می‌شود:

^۱ Proportional - Integral – Derivative (PID)

$$\bar{f}(y, \dot{y}) \approx f(y, \dot{y}, w, t) \quad (3-1)$$

این مراحل در طی فرآیند «مدل سازی» انجام می پذیرد.

در گام بعد با توجه به روابط (2-1) و (3-1) و ترکیب آنها با رابطه‌ی (1-1) قانون کنترل به صورت زیر بدست می آید:

$$u = \frac{-\bar{f}(y, \dot{y}) + g(y, \dot{y})}{b} \quad (4-1)$$

این رابطه باید هدف مطلوب را محقق سازد، که البته به دلیل فرض‌ها و تقریب‌های انجام گرفته ممکن است زیاد دقیق نباشد.

پس مراحل کنترل مدرن را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ۱) ابتدا سیستم فیزیکی دقیقاً در یک مدل ریاضی تشریح می شود.
 - ۲) اهداف طراحی با یک مدل ریاضی دیگر بیان می شود. یعنی یا به فرمت معادلات دیفرانسیلی مشابه (2-1) و یا بعنوان یک تابع هزینه که قرار است مینیمم گردد طراحی می شود.
 - ۳) یک قانون کنترل به گونه ای که اهداف را محقق سازد ساخته می شود.
 - ۴) در نهایت پایداری سیستم کنترل اثبات می شود.
- در این روش فرض کلیدی آن است که تابع تحلیلی $\bar{f}(y, \dot{y})$ ، در تحقق فیزیکی به میزان کافی به $f(y, \dot{y}, w, t)$ نزدیک باشد. اما در سیستم‌های صنعتی دنیای واقعی، بویژه سیستم‌های کنترل حرکت صنعتی مانند آنچه که در رابطه‌ی (1-1) تشریح شده است، $f(y, \dot{y}, w, t)$ که بیان کننده‌ی دینامیک کلی سیستم است عموماً غیرخطی و متغیر با زمان است. در حقیقت هنگامی که رهیافت‌های مبتنی بر مدل در عمل مورد استفاده قرار می گیرند، اغلب مشاهده می شود که مهندسين بیشتر زمان خود را در بخش «مدل سازی» صرف می کنند نه در بخش طراحی کنترل. این امر شاید اصلی ترین دلیلی است که منجر به مطرح شدن این پرسش شده است که تئوری کنترل مدرن بیشتر در مورد مدل سازی است و کمتر وارد مقوله‌ی کنترل می شود. وابستگی روش کنترل مدرن به مدل ریاضی فرآیند، منجر به پیشرفت

تحقیقات در زمینه‌هایی چون روش‌های کنترل تطبیقی، روش‌های مقاوم و تخمین‌گر/رویتگر اغتشاش شد.

۲-۲-۱ روش کنترل مبتنی بر خطا

این مفهوم توسط مهندسان تجربی در کنترل صنعتی پایه‌ریزی شد. اساس این روش رسیدن به قانون کنترلی است که خطای بین متغیر واقعی فرآیند و سیگنال مرجع را حداقل نماید. بعبارت دیگر مهندسان در این روش طراحی، مبنا را بر ردیابی خطا و اصلاح آن قرار دادند. فرض کنید r مسیر مطلوب برای خروجی است. مسئله‌ی طراحی کنترل به این صورت است که قانون کنترل به گونه‌ای ساخته شود که خطای ردیابی $e = r - y$ تا حد امکان کوچک گردد. در نتیجه از آنجا که هدف کنترل از بین بردن خطا و یا دست‌کم، حداقل کردن خطا به میزان ممکن است، عملکرد کنترل باید بر اساس رفتار آن باشد. لذا قانون کنترل با بررسی خطای فعلی، مجموع مقادیر گذشته‌ی خطا و پیش‌بینی روند تغییرات خطا در آینده‌ی نزدیک البته با ضرایب وزنی خاص برای هر ترم، بدست می‌آید. یعنی قانون کنترل به صورت زیر است:

$$u = k_p e + k_I \int e dt + k_D \dot{e} \quad (۵-۱)$$

و عملکرد مطلوب با تنظیمات دستی پارامترهای k_I, k_p و k_D بدست می‌آید. رابطه‌ی فوق معرف کنترل‌کننده‌ی مشهور تناسبی - انتگرالی - مشتقی است.

پیدایش و پیشرفت گسترده‌ی این قانون کنترل، به بازه زمانی ۱۹۴۰-۱۹۲۰، در پاسخ به تقاضای صنایع اتوماتیک بویژه پس از جنگ جهانی دوم باز می‌گردد و نقش آن در رشد انفجاری و سریع صنایع پس از جنگ غیر قابل انکار است. ماینورسکی، کنترل‌کننده‌ی مذکور را در سال ۱۹۲۲ ارائه کرد [۱]. در سال ۱۹۴۲ زیگلر و نیکولز مجموعه‌ای از روش‌های تنظیم آن را ارائه کردند که تاکنون نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. امروزه نیز هنوز تقاضا برای استفاده از آن در بخش‌های مختلف همه صنایع بالاست. به نظر می‌رسد که این کنترل‌کننده بیشتر از هر تکنولوژی دیگری بواسطه‌ی مزیت‌هایش در عرصه

صنعت دوام آورده است و هنوز هم انتخاب اول در بیش از ۹۰٪ کاربردهای کنترل صنعتی کنونی است. حتی زمانی که اطلاعات کمی در مورد دینامیک‌های فرآیند در دسترس باشد، می‌توان آن را بکار گرفت. برای از دست ندادن سادگی از معادله‌ی سیستم مرتبه دوم نمونه‌ی زیر به منظور تشریح روند طراحی کنترل مذکور استفاده خواهد شد [۳]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (۶-۱)$$

با تعریف:

$$e = r - y = r - x_1 = e_1, \quad \dot{e}_1 = -\dot{x}_1 = e_2, \quad \ddot{e} = -\ddot{x}_1 \quad (۷-۱)$$

دینامیک‌های خطا به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = a_1 e_1 + a_2 e_2 - a_1 r - bu \end{cases} \quad (۸-۱)$$

با تعریف:

$$e_0 = \int_0^t e \, dt \quad (۹-۱)$$

خواهیم داشت:

$$\dot{e}_0 = e = e_1 \quad (۱۰-۱)$$

و رابطه‌ی (۵-۱) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$u = k_0 e_0 + k_1 e_1 + k_2 e_2 \quad (۱۱-۱)$$

با توجه به رابطه‌ی (۸-۱) می‌توان معادلات دینامیک خطا را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = e_1 \\ \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -bk_0 \left(e_0 + \frac{a_1}{bk_0} r \right) + (a_1 - bk_1) e_1 + (a_2 - bk_2) e_2 \end{cases} \quad (۱۲-۱)$$

که با توجه به شرایط پایداری روث-هرویتز، پایدار مجانبی است اگر:

$$\begin{cases} bk_0 > 0, (bk_1 - a_1) > 0, (bk_2 - a_2) > 0 \\ (bk_1 - a_1)(bk_2 - a_2) > bk_0 \end{cases} \quad (13-1)$$

با انتخاب مناسب ضرایب k_1, k_2, k_3 هدف مطلوب طراحی که همان $e_1 = e = r - x_1 \rightarrow 0$ یا $x_1 \rightarrow r$ است، حاصل می‌شود. اگر مدل ریاضی سیستم در دسترس باشد، ضرایب کنترل را می‌توان به صورت تحلیلی بدست آورد و اگر مدل نباشد، برای داشتن ویژگی‌های مطلوب، ضرایب به روش سعی و خطا محاسبه می‌شوند.

اگر چه این راحتی و سادگی تنظیمات یکی از دلایل اصلی محبوبیت این کنترل‌کننده است، اما همین موارد از جمله محدودیت‌های اساسی آن نیز هست، که این موضوع در ضعف عملکرد این سیستم کنترل در برآورده کردن خواسته‌های متنوعی که دنیای صنعتی امروز از آن انتظار دارد، کاملاً مشهود است. حال سوال این است که چه چیزی را می‌توان جایگزین این مکانیزم کنترل بسیار موفق نمود که در عین نگه داشتن تمامی مزایا، محدودیت‌های آن را نداشته باشد؟ پاسخ این سوال در درک ما از ویژگی‌های کنترل‌کننده‌ی مذکور و همچنین چالش‌های پیش رو، نهفته است. چنین درکی است که ما را به سمت پیشنهاداتی برای بهبود آن و شاید یک نوآوری جدید در جهت یافتن نسل جدیدی از راه حل‌های کنترلی هدایت می‌کند.

۳-۱ محدودیت‌های روش‌های طراحی کنترل کلاسیک

فاصله‌ی بین تئوری و عمل در علم کنترل، یک بحث سابقه دار میان دو طیف مهندسين آکادمیک و مهندسين تجربی و عملی بوده است. اما دلیل این فاصله چیست؟

به منظور رسیدن به یک پاسخ مناسب، در این بخش به بررسی محدودیت‌ها و چالش‌هایی می‌پردازیم که روش‌های طراحی ارائه شده در بخش قبل با آنها مواجه است.

۱-۳-۱ محدودیت‌های کنترل مدرن

تئوری کنترل کلاسیک، بویژه روش پاسخ فرکانسی دید بسیار مفیدی از چگونگی و چرایی عملکرد سیستم کنترل فیدبک و چگونگی بهبود و ارتقای آن به مهندسان کنترل می‌دهد. تئوری کنترل مدرن

از فیلتر کالمن تا کنترل H_∞ ، در ۵ دهه اخیر پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در زمینه ریاضیات تئوری کنترل نشان داده است. اما سطح ریاضیاتی که برای درک آن مورد نیاز است، فرض‌های خطی بودن و تغییرناپذیری با زمان و وابستگی به مدل ریاضی سیستم‌های فیزیکی، برخی از فاکتورهایی است که استفاده از آن توسط متخصصین و تکنیسین‌های کنترل را محدود ساخته است.

در طی پیشرفت تئوری کنترل مدرن این مسئله مورد توجه قرار گرفت که دنیای واقعی بسیار پیچیده است و مدل‌های ریاضی که برای تشریح دینامیک کامل سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، غیر دقیق هستند. این ناشی از این حقیقت است که سیستم‌های دنیای واقعی غیرخطی هستند و تحت تاثیر محیط قرار دارند. این زمینه ساز بروز عرصه‌ی «مدل‌سازی و شناسایی سیستم‌ها» شد. محققان تمرکز خود را بیش از پیش بر مدل‌سازی قرار داده و راه‌حل‌ها و پاسخ‌های متنوعی را برای این مسئله ارائه کردند که می‌توان آنها را در مستندات مختلف مشاهده کرد. اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها مانعی بزرگ در استفاده از روش‌های ریاضی کلاسیک کنترل مدرن است، روش‌هایی که نیاز به دقت قابل قبولی برای مدل دارند. کنترل مدرن برای مقابله با این ناشناخته‌ها از ابزار زیر کمک گرفت [۴]:

(۱) کنترل مقاوم: یک روش کنترل که نیاز به یک سری اطلاعات اولیه در مورد دینامیک‌های سیستم و حدود عدم قطعیت‌ها دارد. در کنترل مقاوم خطی سیستم بصورت خطی تغییرناپذیر با زمان با دینامیک‌های شناخته شده فرض می‌شود و محدوده‌ی روی نامعینی‌ها را درحوزه فرکانس، معلوم در نظر می‌گیرد. در این روش قانون کنترل تغییر نمی‌کند.

(۲) کنترل تطبیقی: یک روش کنترل که به اطلاعات اولیه در مورد دینامیک‌های سیستم و حدود عدم قطعیت‌های پارامتری نیاز ندارد. در این روش برای مقابله با ناشناخته‌ها و تغییرات در دینامیک‌های سیستم، بهره‌های کنترل‌کننده با استفاده از یک قانون تطبیق خاص تنظیم می‌شود و این قانون در طی فرآیند کنترل خود را بروز رسانی می‌کند.

برای رسیدن به نتیجه مطلوب‌تر از کنترل مقاوم تطبیقی نیز استفاده شده است.

در این میان پیشرفت‌های قابل توجهی نیز در زمینه برنامه نویسی پویا توسط بلمن ، اصل پونتر یاگین توسط پونتریاگین و تئوری سیستم خطی توسط کالمن انجام شد. در نتیجه تئوری کنترل که با نام «کنترل اتوماتیک» آغاز شده بود، به تدریج شروع به حرکت به سمت فاز جدیدی تحت نام «تئوری سیستم‌ها» نمود.

اما مشکل همچنان پا برجا بود. در کنترل مدرن فرض بر این است که می‌توان از مدل ریاضی سیستم برای تشریح موثر دینامیک‌های سیستم استفاده کرد. لذا قوانین کنترل از این زیربنای ریاضی قابل استنتاج است. عملکرد و دقت کنترل‌کننده، به مدل ریاضی که سیستم را تشریح می‌کند بستگی دارد. لذا با وجود پیشرفت‌هایی که بواسطه این روش‌ها حاصل شد، کنترل مقاوم و تطبیقی به عنوان راه حل‌هایی برای مسئله‌ی حذف اغتشاشات و مقابله با نامعینی‌ها، هنوز هم زیاد از منبع اصلیشان که همان تئوری کنترل کلاسیک مبتنی بر مدل است فاصله نگرفته‌اند. این رهیافت‌ها را به عنوان روش‌های «غیرفعال» می‌شناسند.

درمقابل، در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی صورت گرفت که روش‌های گوناگونی را برای حذف اغتشاش پیشنهاد می‌دادند، که در قیاس با شیوه‌های قبلی کنترل مدرن، می‌توان آنها را «فعال» نامید. این روش‌ها که تفاوت زیادی با روش‌های استاندارد داشت، ابتدا میزان اغتشاش خارجی را با استفاده از یک رویکرد تخمین زده و اثر آن را حذف می‌کرد و به طراح کنترل اجازه می‌داد تا سیستم را به یک سیستم بدون اغتشاش کاهش داده و کنترل نماید. لذا مسئله حذف اغتشاش به مسئله طراحی رویکرد اغتشاش تبدیل شد. این سرآغازی بر حرکت به سوی رهیافتی جدید در علم کنترل بود.

۲-۳-۱ محدودیت‌های روش کنترل مبتنی بر خطا

همان‌گونه که بیان شد، کنترل‌کننده‌های تناسبی - انتگرالی - مشتقی، کنترل‌کننده‌هایی مبتنی بر خطا هستند که معمولاً به مدل ریاضی سیستم برای کنترل احتیاج ندارند. مهندسين تجربی این کنترل-کننده‌ها را با استفاده از جداول جستجو و روش‌های سعی و خطایی که ناشی از تجربه‌ی بالایشان است

تنظیم می‌کنند. هر چند که در اختیار داشتن اطلاعاتی در مورد دینامیک سیستم، می‌تواند در طراحی کنترل‌کننده به طراح کمک کند.

کنترل‌کننده‌های تناسبی - انتگرالی - مشتقی متداول تقریباً از ابتدای پیدایش تاکنون، نزدیک به ۹۰ سال است که به صورت گسترده‌ای در فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با وجود سادگی، رهیافت‌های عملی استفاده از آن محدودیت‌هایی در تنظیمات برای مهندسين ایجاد می‌کنند. پروفیسور هان چهار نقطه ضعف آن را، جدا از تقاضای زیادی که برای استفاده از آن در فرآیندهای صنعتی وجود دارد، به صورت زیر برمی‌شمارد [۳]:

(۱) خطای محاسباتی: ورودی مرجع^۲ که برای تنظیم کنترل‌کننده، اغلب تابع پله در نظر گرفته می‌شود، برای اکثر سیستم‌های دینامیک مناسب نیست. چرا که نیازمند ایجاد یک تغییر اندازه‌ی بزرگ در خروجی خواهد بود و بنابراین، سیگنال کنترل باید یک پرش ناگهانی داشته باشد.

(۲) تاثیر شدید نویز در کنترل مشتقی: معمولاً به خاطر حساسیت بخش مشتقی به نویز، از آن استفاده نمی‌شود.

(۳) ساده سازی بیش از حد و در نتیجه ضعف عملکرد در قانون کنترلی که به صورت جمع وزن دار خطی در نظر گرفته می‌شود. حاصل جمع سه قسمت رابطه‌ی (۱-۵)، با وجود سادگی ممکن است بهترین قانون کنترل بر اساس خطای فعلی، خطای گذشته و نرخ تغییرات آن نباشد.

(۴) پیچیدگی و عواقب ناشی از کنترل انتگرالی: بخش انتگرالی، در عین اینکه برای حذف خطای حالت ماندگار حیاتی است، باعث بروز مشکلات دیگری نظیر اشباع و کاهش بهره‌ی پایداری در نتیجه‌ی تاخیر فاز می‌شود.

مشکل دیگر کنترل‌کننده‌های مذکور این است که طراحی آنها به سیستم وابسته است، لذا فرآیند تنظیم باید برای هر کاربرد تکرار شود. همچنین از دیگر موارد ضعف آنها، می‌توان به مقاومت بسیار کم آنها در برابر اغتشاشات خارجی اشاره نمود.

^۲ Set Point

با توجه به موارد مطرح شده در مورد کنترل مدرن و کنترل مبتنی بر خطا، به نظر می‌رسد که هر دوی این روش‌ها برای بهره بردن از ویژگی‌های مطلوب کنترل فیدبک ناکافی می‌باشند. اولی وابستگی زیادی به مدل معلوم سیستم دارد و دومی به دور از نظم سیستماتیک و بهره‌وری لازم است. در نتیجه نیاز به روشی دیگر احساس می‌شود.

۴-۱ کنترل مستقل از مدل

همانگونه که بیان شد، شاید اصلی‌ترین اشکال در تئوری کنترل مدرن، نیاز به یک مدل ریاضی دقیق از سیستم است، چیزی که شاید برای اکثر قریب به اتفاق سیستم‌ها و فرآیندهای واقعی بدست آوردن آن ممکن نباشد. به همین دلیل مهندسان و محققان حوزه‌ی کنترل همیشه در پی یافتن روش‌هایی بودند که این وابستگی به مدل را کاهش دهد.

عملکرد عمومی کنترل‌کننده‌های مستقل از مدل به این صورت است که، یک ساختار عمومی برای دینامیک‌های ناشناخته سیستم در نظر می‌گیرند و سپس با استفاده از اطلاعات ورودی و خروجی سیستم، که به صورت آنالین از طریق سنسورها در اختیار آن‌ها قرار می‌گیرد، یک مکانیزم کنترلی را پیاده سازی می‌کنند [۵]. رهیافت‌های کنترلی مستقل از مدل امروزه نقش مهمی در علم کنترل ایفا می‌کنند و تا کنون الگوریتم‌های مستقل از مدل متعددی طراحی و پیاده سازی شده‌اند.

برخی منابع، روش‌های کنترل مستقل از مدل را با توجه به ساختار کنترل‌کننده به دو گروه مختلف تقسیم کرده‌اند. در گروه اول ساختار کنترل‌کننده مشخص و ثابت است و پارامترهای مختلف کنترل‌کننده با توجه به اطلاعات ورودی و خروجی سیستم فقط برای یک بار توسط طراح تعیین می‌شوند و پس از آن ثابت می‌مانند. کنترل‌کننده‌ی مشهور تناسبی - انتگرالی - مشتقی و چندین روش دیگر از جمله تنظیم فیدبک تکراری^۳ [۶ و ۷] و کنترل ابطال‌ناپذیر^۴ [۸] در این گروه قرار داده شده‌اند. در گروه دوم هم کنترل‌کننده‌هایی قرار دارند که ساختار آن‌ها ثابت نیست و پارامترهای آن‌ها با توجه به مقادیر

^۳ Iterative Feedback Tuning

^۴ Unfalsified Control

اندازه‌گیری شده‌ی ورودی و خروجی سیستم در هر لحظه تغییر می‌کند و برورسانی می‌شود. از این مدل کنترل‌کننده‌ها می‌توان به کنترل مستقل از مدل تطبیقی [۹ و ۱۰] اشاره کرد.

با این حال با توجه به کنترل‌کننده‌های مستقل از مدلی که در ساختار آن‌ها از ترکیب دو روش فوق استفاده شده است، این گروه‌بندی چندان دقیق و قابل اتکا نیست. برای مثال ساختارهای کنترلی وجود دارند که در آن‌ها پارامترهای کنترل‌کننده‌ی تناسبی - انتگرالی - مشتقی، به صورت برخط و با استفاده از روش‌هایی چون ساختارهای فازی یا تطبیقی، به صورت مداوم برورسانی می‌شوند [۱۱].

با توجه به مزایای روش‌های کنترل مستقل از مدل، تحقیقات در این حوزه به سرعت در حال پیشرفت است و کاربردهای عملی این روش‌ها گزارش شده است. با این حال تنها مشکل کنترل مستقل از مدل اثبات پایداری است و تحقیقات در این زمینه ادامه دارد.

۱-۴-۱ کنترل‌کننده‌های فازی

کنترل فازی به شکل گسترده‌ای در صنایع بکار گرفته می‌شود و نتایج موفقیت‌آمیز عملی زیادی نیز داشته است. اگر چه از این روش بیشتر به عنوان یک رهیافت مستقل از مدل یاد می‌شود، اما کنترل فازی مبتنی بر مدل هم در ۲۰ سال اخیر کاربرد گسترده و قابل توجهی داشته است [۱۲].

کاربردهای صنعتی از کنترل فازی بر دو جنبه مهم از این راهبرد کنترلی تاکید دارند:

- برای فرآیندهایی با توابع غیرخطی زیاد که منجر به مدل‌های ریاضی سخت و روابط کنترلی نامناسب می‌شود، کنترل فازی می‌تواند به عنوان یک جانشین ارزشمند برای روش‌های کنترل کلاسیک، مورد استفاده قرار گیرد.
- در مقایسه با روش‌های مرسوم و متداول کنترل، کنترل فازی می‌تواند به شکل جدی بر تجربه افراد متخصص و خبره تمرکز نماید. یک کنترل‌کننده‌ی فازی می‌تواند این تجربیات را به وسیله شیوه‌های زبانی، خیلی دقیق‌تر از کنترل‌کننده‌های کلاسیک مدل‌سازی نماید.

۱-۴-۲ کنترل‌کننده‌های مبتنی بر شبکه عصبی

امروزه این موضوع پذیرفته شده است که در حوزه‌ی سیستم‌های غیرخطی و پیچیده‌ای که یا به طور کلی و یا به شکل جزئی ناشناخته هستند، شبکه‌های عصبی روش‌های کنترلی موثری را ارائه می‌دهد. شبکه‌های عصبی، با توانایی قابل توجه‌شان در زمینه استخراج مفاهیم از اطلاعات مبهم و پیچیده، می‌توانند برای استخراج الگوها و شناسایی رفتارهایی که برای انسان و یا سایر روش‌های محاسباتی مشکل است، مورد استفاده قرار گیرند.

شبکه‌های عصبی را می‌توان به شکل موثری برای مدل‌سازی بکار گرفت. در نتیجه می‌توان از آنها برای طراحی کنترل‌کننده‌ها برای سیستم‌های غیرخطی پیچیده استفاده کرد. شبکه‌های عصبی هوشمند روش‌های موثری را برای ساخت کنترل‌کننده‌های غیرخطی، فیلترها، رویترهای حالت و شناسایی سیستم‌ها ارائه می‌دهند.

یک شبکه‌ی عصبی آموزش داده شده مزیت‌های زیر را نسبت به روش‌های کلاسیک دارد [۱۳]:

(۱) یادگیری تطبیقی: یک شبکه‌ی عصبی بر اساس اطلاعات استفاده شده برای آموزش، قابلیت یادگیری اینکه در شرایط خاص و جدید چگونه عمل کند، را دارد.

(۲) خودسازماندهی: شبکه عصبی می‌تواند با توجه به اطلاعاتی که در زمان آموزش دریافت می‌کند خود را سازماندهی نماید.

(۳) قدرت تحمل عیب: خرابی بخشی از شبکه قاعداً منجر به نقص در عملکرد سیستم خواهد شد. با این وجود برخی از شبکه‌های عصبی این قابلیت را دارند که حتی در شرایط آسیب دیدگی جدی هم، همچنان عملکرد قابل قبول خود را حفظ نمایند.

یکی از اهداف مهندسی کنترل نوین این است که سریع‌ترین و ساده‌ترین راه‌حل را برای مسائل کنترل غیرخطی، در محیط‌های مقید و نامعلوم، بیابد. این تقاضا از احتیاج به طراحی کنترل‌کننده‌هایی برای فرآیندهای صنعتی، که با غیرخطی‌های شدید توصیف می‌شوند و دائماً در معرض تغییر شرایط هستند، سرچشمه می‌گیرد. بسیاری از این مسائل کنترل پیچیده را نمی‌توان با روش‌های کنترل مرسوم

حل کرد. امروزه این نتیجه حاصل شده است که شبکه‌های عصبی هوشمند، می‌توانند برای تقریب زدن هر تابع غیرخطی پیوسته با دقت نسبتاً دلخواه، مورد استفاده قرار گیرند. به علاوه شبکه‌های عصبی، حتی در حین انجام عملیات هم، قابلیت یادگیری دارند.

در مواردی که روش‌های مدل‌سازی معمول در ایجاد یک مدل به اندازه‌ی کافی خوب ناتوان هستند، شبکه‌های عصبی معمولاً مدل‌های مناسب‌تری تولید می‌کنند. همچنین شبکه‌های عصبی را می‌توان برای تشخیص و شناسایی خطاهای سیستم و نیز برای کمک به ذخیره‌سازی اطلاعات به منظور تصمیم‌گیری بکار برد. برای مثال، شبکه‌ی عصبی می‌تواند تعیین کند که چه زمانی یک کنترل‌کننده‌ی خاص، از بین چند کنترل‌کننده بکار گرفته شود.

پس از ارائه تئوری شبکه‌های عصبی، کاربردهای فراوانی از آنها در حوزه‌های تخمین، مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های دینامیک گزارش شده است. برای مثال برخی از کاربردهای شبکه‌های عصبی در حوزه‌ی کنترل عبارتند از: شناسایی سیستم‌های دینامیکی غیرخطی، تقریب کنترل زمان - بهینه برای فرآیندهای صنعتی، طراحی سیستم‌های کنترل بهینه و

۳-۴-۱ روش کنترل آزاد از مدل^۵

این روش در سال ۲۰۰۶ توسط فلیس و همکارانش ارائه شد و جزئیات آن به صورت مدون در سال ۲۰۱۳ معرفی گردید [۵]. اولین کاربرد صنعتی این روش نیز توسط جوین و همکارانش در سال ۲۰۰۸ گزارش شد [۱۴].

فلیس مفهوم کنترل آزاد از مدل را در کنار کنترل‌کننده‌های تناسبی - انتگرالی - مشتقی هوشمند معرفی کرد. به طور کلی کنترل آزاد از مدل عبارت است از تلاش برای تخمین یک سیگنال کنترل مناسب به منظور دستیابی به یک ردیابی خروجی خوب، از طریق اندازه‌گیری ورودی و خروجی‌ها. این امر مستلزم ساختن یک «مدل محلی» از سیستم است که به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$y^{(n)} = F + \alpha u \quad (14-1)$$

⁵ Model Free Control (MFC)

که در آن $\alpha \in R$ یک پارامتر طراحی ثابت غیر فیزیکی است و $F \in R$ معرف تمامی ناشناخته‌های سیستم است و از طریق اطلاعات موجود در رفتار ورودی و خروجی سیستم قابل جبران است. مجدداً ذکر این نکته ضروری است که در این روش فرض می‌کنیم که هیچ مدلی از سیستم در اختیار نداریم. مرتبه‌ی $n \in N$ در رابطه (۱۴-۱) یک پارامتر طراحی است که می‌تواند به دلخواه انتخاب شود. اما اگر فرض کنیم که درجه‌ی غالبِ نسبیِ سیستم معلوم است، آنگاه n می‌تواند برابر با این درجه باشد. توجه شود که مدل ارائه شده در رابطه (۱۴-۱) را نباید مشابه یک جعبه‌ی سیاه به منظور شناسایی سیستم در نظر گرفت.

کمیت F در هر دوره‌ی نمونه‌برداری با استفاده از اطلاعات ورودی و اندازه‌گیری خروجی، تخمین زده شده و بروزرسانی می‌شود. در زمان نمونه برداری k ام $t = kT_s$ ، که T_s دوره‌ی نمونه‌برداری است)، تخمین F به صورت زیر است:

$$[F(k)]_e = [y^{(n)}(k)]_e - \alpha u(k-1) \quad (۱۵-۱)$$

که در آن $[y^{(n)}(k)]_e$ تخمین n امین مشتقِ خروجی است که در زمان نمونه برداری k می‌توان بدست آورد و $u(k-1)$ ورودیِ کنترلی است که در دوره‌ی نمونه‌برداری قبل به سیستم اعمال شده است. بر اساس اطلاعات بدست آمده از تخمین F ، سیگنال کنترلی برای دوره نمونه‌برداری k ام، با استفاده از رابطه‌ی (۱۴-۱)، از طریق حذف ترم غیر خطی F به اضافه‌ی یک ردیابی حلقه بسته از مسیر مرجع $y^*(t)$ ، به صورت زیر بدست می‌آید:

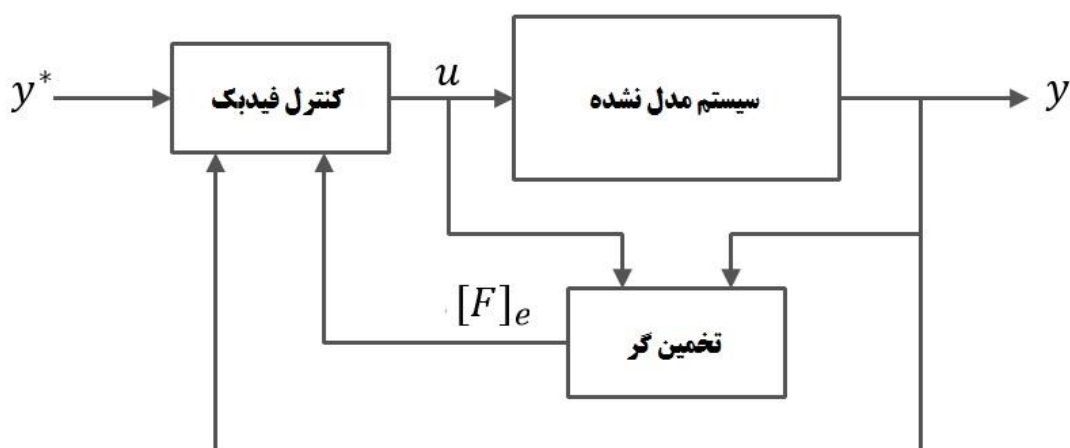
$$u(k) = \underbrace{-\frac{[F(k)]_e}{\alpha}}_{\text{ردیابی حلقه بسته}} + \underbrace{\frac{y^{*(n)} + \Delta(e(k))}{\alpha}}_{\text{حذف بخش غیر خطی}} \quad (۱۶-۱)$$

که در آن $e(k) = y(k) - y^*(k)$ خطای ردیابی است و $\Delta(e(k))$ کنترل‌کننده‌ی فیدبک حلقه بسته بر اساس خطای ردیابی است. هنگامی که کنترل‌کننده‌ی حلقه بسته از نوع تناسبی - انتگرالی -

مشتقی باشد، کنترل آزاد از مدل را می‌توان «تناسبی - انتگرالی - مشتقی هوشمند»^۶ نامید. دیاگرام کلی این روش کنترلی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

۴-۴-۱ کنترل حذف اغتشاش فعال^۷

کنترل حذف اغتشاش فعال یک راهبرد کنترل است، که در آن مدل سیستم با یک متغیر حالت جدید توسعه می‌یابد. این متغیر حالت جدید تمامی دینامیک‌های ناشناخته و اغتشاشات را دربر دارد. تخمین آنلاین این متغیر جدید توسط یک رویتر حالت که «رویتر حالت توسعه یافته»^۸ نامیده می‌شود انجام می‌گیرد. لذا سیستم و اغتشاشات از هم جدا می‌شوند و سیستم به یک مدل ساده کاهش می‌یابد. جبران زمان واقعی^۹ عدم قطعیت‌ها، مشکلات مدل‌سازی را حذف می‌کند. یعنی تفاوت مدل‌سازی (تفاوت مدل نامی و واقعی) در این روش هیچ تاثیری بر مکانیزم کنترل نخواهد داشت. مقاومت و توانایی حذف عدم قطعیت‌ها در این روش، آن را به یک راه حل جذاب در مواقعی که اطلاعات کاملی در مورد سیستم در دست نیست تبدیل کرده است. مفهوم کنترل حذف اغتشاش فعال در ابتدا توسط هان [۳] مطرح شد. هر چند که اصطلاح کنترل حذف اغتشاش فعال به صورت سیستماتیک در مستندات انگلیسی برای اولین بار توسط ژائو [۱۵] مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱-۲: ساختار کنترل آزاد از مدل

^۶ i - PID

^۷ Active Disturbance Rejection Control (ADRC)

^۸ Extended State Observer (ESO)

^۹ Real Time

۵-۴-۱ کنترل‌کننده‌ی تناسبی - انتگرالی - مشتقی

این کنترل‌کننده، که ساختار آن در ابتدای فصل معرفی شد را می‌توان نوعی کنترل‌کننده‌ی مستقل از مدل در نظر گرفت. نوع اولیه و کلاسیک این کنترل‌کننده، برای تولید سیگنال کنترل فقط به خطای بین خروجی واقعی سیستم و خروجی مطلوب آن نیاز دارد. مزایا و نقایص آن در ابتدای فصل به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۱ کنترل مستقل از مدل بازوهای ماهر

همگام با پیشرفت علم کنترل در حوزه‌ی روش‌های کنترل مستقل از مدل، استفاده از این روش‌ها در کنترل بازوهای ماهر نیز رو به افزایش نهاد. روش‌ها و مکانیزم‌های مستقل از مدلی که برای کنترل بازوهای ماهر بکار گرفته شده‌اند بسیار متنوع و متفاوت هستند. در ادامه این بخش به معرفی تعدادی از این روش‌ها خواهیم پرداخت.

۱-۵-۱ کنترل هوشمند

استفاده از روش‌های هوشمند به دلیل عملکرد مناسب آنها در برخورد با سیستم‌های غیرخطی، در حوزه‌ی کنترل بازوهای ماهر با استقبال مواجه شده است. در این میان شبکه‌های عصبی و همچنین سیستم‌های فازی بیشترین نقش را ایفا کرده‌اند.

روش‌های کنترل متفاوتی مثل کنترل شبکه عصبی [۱۶، ۱۷] و کنترل منطق فازی [۱۸] برای کنترل ردیابی مسیر بازوهای ماهر ارائه شده‌اند.

همچنین سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی به واسطه‌ی خاصیت «تقریب زنی عمومی» شان [۱۹] به صورت گسترده‌ای در کنترل مقاوم و تطبیقی بازوهای ماهر، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰-۲۲].

کنترل فازی بازوی ماهر برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها و غیرخطی‌ها و کوپل‌شدگی‌ها، موضوع تحقیقات زیادی بوده است [۲۳-۲۵]. در بعضی کاربردها کنترل‌کننده‌های فازی بکار گرفته شده، به عنوان یک کنترل‌کننده‌ی جعبه سیاه که به روش سعی و خطا ساخته می‌شود، عمل می‌کند و توانسته نتایج کنترلی

مناسبی نیز داشته باشد [۲۶]. با این وجود، برای تضمین پایداری و داشتن عملکرد مطلوب یک اثبات تحلیلی لازم است. تحلیل پایداری کنترل فازی بازوی ماهر، یک چالش جدی در تحقیقات مختلف بوده است. مشکلات تئوریک در نتیجه پیچیدگی دینامیک بازوهای ماهر و کنترل‌کننده‌های فازی با یکدیگر، به شدت افزایش می‌یابد [۲۷].

یک روش کنترل گشتاور ترکیبی با کنترل فازی برای بازوهای ماهر قابل انعطاف در [۲۸] ارائه شده است. یک کنترل مستقل از مدل با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی و کنترل فازی برای بازوهای ماهر در [۲۹] پیشنهاد شده است.

کنترل موقعیت مجری نهایی یک ربات با رابط منعطف، با استفاده از کنترل‌کننده فازی و کنترل‌کننده عصبی نیز در [۳۰-۳۲] شرح داده شده است. در [۳۱] یک روش کنترل بهینه‌ی هوشمند برای یک بازوی رباتیک منعطف غیرخطی که توسط سرووموتورهای سنکرون مغناطیس دائم راه‌اندازی می‌شوند، با استفاده از یک رهیافت کنترل شبکه عصبی - فازی تشریح شده است. این رهیافت شامل یک کنترل - کننده بهینه که یک شاخص عملکردی را مینیمم می‌کند و یک کنترل‌کننده‌ی شبکه عصبی - فازی که دینامیک‌های نامعین بازوی ماهر منعطف را می‌آموزد، تشکیل شده است.

در [۳۰] یک کنترل‌کننده‌ی فازی برای یک ربات سه رابطی با دو رابط صلب و یک بازوی منعطف ارائه شد است. در [۳۲] یک ترکیب فازی عصبی برای کنترل موقعیت مجری نهایی یک بازوی ماهر تک رابطی ارائه شده است. فاکتورها و ضرایب مقیاس‌بندی کنترل‌کننده‌ی فازی-عصبی، به صورت آنلاین با استفاده از یک شبکه‌ی عصبی که با یک الگوریتم پس انتشار تعمیم یافته آموزش داده شده است، بروز رسانی می‌شود. در [۳۳] دو کنترل‌کننده‌ی پیش‌خور فازی عصبی مختلف برای جبران سازی غیرخطی - های بازوی ماهر منعطف ارائه شده‌اند. در [۳۴] کنترل تطبیقی برای یک بازوی ماهر با رابط منعطف با استفاده از یک کنترل‌کننده‌ی تاخیر زمانی فازی عصبی ارائه شده است. در [۳۵] از الگوریتم ژنتیک برای بهبود عملکرد یک کنترل‌کننده‌ی فازی که به منظور جبران سازی انعطاف رابط‌ها و مفاصل یک بازوی ماهر طراحی شده، استفاده شده است. از سایر روش‌های کنترل هوشمند ترکیبی می‌توان به کنترل

شبکه عصبی - فازی با مود لغزشی [۳۶]، کنترل مقاوم با مود لغزشی و شبکه عصبی [۳۷] و کنترل عصبی تطبیقی [۲۲ و ۳۸] اشاره کرد.

سیستم تاکاگی سوگنو (TS) نیز در یک رهیافت تطبیقی برای مقابله با سیستم‌های غیرخطی عملکرد خوبی داشته است [۳۹]. یک کنترل فازی مقاوم که پایداری را تضمین کرده و عملکرد ردیابی مناسبی نیز دارد در [۴۰] طراحی شده است. همچنین یک تخمین فازی - تطبیقی و جبران عدم قطعیت نیز برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها و داشتن یک ردیابی مناسب و خوب در [۴۱] معرفی شده است. روش‌های هوشمند هرکدام مزایا و نقایص خود را دارند. مثلاً کنترل‌کننده‌ی مبتنی بر شبکه‌ی عصبی ممکن است به محاسبات آنلاین پیچیده و زمان آموزش نسبتاً طولانی نیاز داشته باشد. روش‌های هوشمند عموماً پیچیدگی محاسباتی دارند و برای استفاده نیاز به اندازه‌گیری سرعت و شتاب دارند.

۱-۵-۲ روش‌های کنترل مستقل از رگرسور

در روش‌های مستقل از رگرسور ماتریس اینرسی، ماتریس کوریولیس و نیروهای گریز از مرکز و بردار نیروهای گرانشی با استفاده از سری فوریه یا چندجمله‌ای‌های لژاندر [۴۲، ۴۳]، یا سیستم‌های فازی [۴۴] و .. تخمین زده می‌شوند. در حقیقت این روش‌ها به نوعی مانند روش‌های شناسایی سیستم عمل می‌کنند و پارامترهای دینامیکی بازوی ماهر را تخمین می‌زنند. پیاده‌سازی این روش نسبت به شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی ساده‌تر است. با این حال این روش‌ها عمدتاً به فیدبک‌های متعددی از متغیرهای حالت سیستم نیاز دارند. این در حالی است که در اکثر سیستم‌های رباتیک تمامی متغیرهای سیستم در دسترس نیستند و فقط موقعیت مفاصل قابل دسترسی است. همچنین این روش‌ها معمولاً پیچیدگی محاسباتی دارند.

۳-۵-۱ روش‌های کنترل مبتنی بر رویتگر

همانطور که بیان شد، در اکثر روش‌های مبتنی بر مدل و همچنین قسمت قابل توجهی از روش‌های مستقل از مدل، برای پیاده‌سازی مکانیزم کنترل نیاز به محاسبه و در اختیار داشتن متغیرهای متعدد حالت سیستم و یا اندازه‌گیری متغیرهای مختلفی چون سرعت، شتاب و حتی مشتق شتاب وجود دارد. برای غلبه بر این مسئله کنترل‌کننده‌های مبتنی بر رویتگر پیشنهاد شده‌اند. در این روش تمام دینامیک‌های ناشناخته، نامعینی‌ها و اغتشاشات توسط یک رویتگر تخمین زده می‌شوند و در نهایت سیستم واقعی به یک سیستم ساده‌ی ایده‌آل مرتبه اول یا دوم کاهش می‌یابد [۵]. مزیت اصلی استفاده از این روش‌ها برای کنترل بازوهای ماهر این است که، آن‌ها به هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد دینامیک ربات و موتورهای آن احتیاج ندارند. تنها مواردی که این روش‌ها برای پیاده‌سازی در دنیای واقعی به آن احتیاج دارند، ورودی و خروجی سیستم است.

روش‌های کنترل مبتنی بر رویتگر اغتشاش در حوزه رباتیک به شکل گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در [۴۵] یک روش کنترلی فازی تطبیقی مبتنی بر رویتگر ارائه شده است که در آن یک رویتگر خطی برای تخمین سیگنال‌های سرعت به عنوان ورودی‌های یک سیستم فازی مورد استفاده قرار گرفته است.

رویتگر حالت توسعه یافته، یک رویتگر ساده و جذاب است، که در آن عدم قطعیت‌های تجمعی به عنوان یک متغیر حالت اضافه در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه با همان الگوریتمی که برای تخمین حالت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، تخمین زده می‌شوند [۴۶]. در [۴۷] و [۴۸] به منظور کنترل ردیابی مسیر مرجع یک سیستم رباتیک با مفصل منعطف، یک مکانیزم کنترلی مبتنی بر خطی‌سازی فیدبک، با استفاده از یک رویتگر حالت توسعه یافته و یک رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی ارائه شده است. با این حال، این دو تحقیق که بر اساس راهبرد کنترل گشتاور انجام شده‌اند، به صورت کامل مستقل از مدل نیستند و برای پیاده‌سازی آنها باید بخش قابل توجهی از دینامیک‌های سیستم معلوم باشد. در شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این کارها، عدم قطعیتی که برای سیستم نامی در نظر گرفته شده است

تنها ۲۰٪ است. علاوه بر آن، هیچ گشتاور اغتشاشی خارجی در طول شبیه‌سازی به سیستم اعمال نشده است. همچنین اثباتی برای پایداری و همگرایی متغیرهای ناحیه‌ی غیرخطی ارائه نشده است. علاوه بر موارد بیان شده، به منظور پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ی پیشنهاد شده در این منابع متغیرهای سرعت، شتاب و حرکت مسیر مرجع مورد نیاز است، که این موارد پیاده‌سازی مکانیزم کنترلی را مشکل‌تر می‌سازد.

در [۴۹] یک رویکرد مستقل از مدل تطبیقی به منظور کنترل یک بازوی ماهر در فضای مفصلی، بدون استفاده از اندازه‌گیری سرعت طراحی شده است. در این روش برای تخمین عوامل غیرخطی و عدم قطعیت‌های بازوی ماهر، از سری فوری در رویکرد و کنترل‌کننده استفاده شده است.

در [۵۰] نیز یک رهیافت مستقل از مدل بر اساس سری تیلور مرتبه‌ی اول ارائه شده است. در [۵۱] یک سیاست کنترلی مستقل از مدل برای مسئله‌ی ردیابی در بازوهای ماهر رباتیک ارائه شده است، که در آن فرض شده است که دینامیک‌های بازوی ماهر دارای غیرخطی‌های ناشناخته اما محدود و اغتشاشات خارجی هستند. در این تحقیق ماتریس‌های نامعلوم سیستم توسط قوانین تطبیق مقاوم و بر اساس راهبرد کنترل گشتاور تخمین زده می‌شوند.

۴-۵-۱ روش تخمین تاخیر زمانی^{۱۰}

رهیافت دیگری که برای کنترل مستقل از مدل بازوهای ماهر مورد استفاده قرار می‌گیرد، رهیافت تخمین تاخیر زمانی است [۵۲]. در [۵۳] از تخمین تاخیر زمانی برای کنترل بازوی ماهر بدون در اختیار داشتن مدل دینامیکی ربات و پارمترهایش استفاده شده است، اما در آن باید شتاب مفاصل در هر لحظه اندازه‌گیری شوند. در [۵۴] از یک کنترل‌کننده‌ی مستقل از مدل شبکه عصبی با تخمین تاخیر زمانی، برای کنترل یک ربات پوشیدنی پایین تنه استفاده شده است. در [۵۵] و [۵۶] نیز به منظور کنترل بازوهای ماهر رباتیک، به ترتیب یک کنترل‌کننده‌ی مقاوم تطبیقی و یک کنترل‌کننده‌ی فازی با روش تخمین تاخیر زمانی ترکیب شده‌اند.

¹⁰ Time Delay Estimation (TDE)

دسته بندی فوق فقط نمونه‌ای از روش‌های کنترل مستقل از مدلی است که به منظور کنترل سیستم‌های رباتیک و بازوهای ماهر ارائه شده است. در این حوزه موارد و روش‌های متعددی می‌توان یافت [۵۷، ۵۸] که پرداختن به تمامی آن‌ها خود می‌تواند موضوع یک تحقیق گسترده و جامع باشد. مشکلات قوانین کنترل مبتنی بر گشتاور از قبیل نیاز به در اختیار داشتن اطلاعات کامل درباره‌ی اجزا مختلف ربات (که در بسیاری از موارد امکان پذیر نیست)، محاسبات فراوان، نیاز به وسایل و حسگرهای اندازه گیری دقیق و پرهزینه، اشباع محرک‌ها، چترینگ و زمان پردازش طولانی، لزوم بررسی روش‌های دیگر و یا بهبود روش‌ها برای کنترل ربات‌ها را آشکار می‌سازد.

۶-۱ درباره‌ی رساله

در ادامه، در فصل دوم کنترل بازوهای ماهر مطرح شده، روش‌های معمول و مرسوم کنترل این سیستم‌ها ارائه خواهد شد و راهبرد کنترل ولتاژ معرفی می‌شود. در فصل سوم روش کنترل بازوی ماهر با استفاده از رویکرد توسعه یافته خطی بیان می‌شود. کنترل بازوی ماهر با استفاده از رویکرد توسعه یافته غیرخطی نیز در فصل چهارم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل پنجم یک رویکرد تطبیقی برای تخمین اغتشاشات کلی وارد بر بازوی ماهر معرفی خواهد شد و فرآیند کنترل مفاصل بازوی ماهر با استفاده از آن انجام می‌شود. در فصل ششم رویکرد عصبی برای کنترل بازوی ماهر طراحی می‌شود. در نهایت در فصل هفتم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

فصل دوم

کنترل بازوی ماهرباتیکی

۲-۱ مقدمه

بازوی ماهر از سیستم‌های رباتیکی مرسوم است که در صنایع گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد. پاشش رنگ، جوشکاری، مونتاژ قطعات، سوراخکاری، پالت‌گذاری، بسته‌بندی و ...، از جمله اموری است که مدتهاست توسط بازوهای ماهر صنعتی انجام می‌شود. بازوهای ماهر از نظر تعداد رابط و نوع مفاصل انواع گوناگونی دارند. مجری‌های نهایی نیز متناسب با وظیفه‌ای که باید انجام دهند انواع متفاوتی دارند و ممکن است مفاصل گوناگونی در ساختمان آنها به کار رفته باشد. اما منظور ما از مفصل، در اینجا مفاصلی است که رابط‌های اصلی بازوی ماهر را به یکدیگر متصل می‌کنند.

بازوهای ماهر سیستم‌هایی به شدت غیرخطی، چند متغیره با کوپل‌شدگی بالا و همراه با عدم قطعیت هستند. عدم قطعیت‌هایی که از عوامل مختلفی چون خطاهای پارامتری، دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاشات خارجی ناشی می‌شوند. به دلیل همین ویژگی‌ها کنترل بازوهای ماهر مورد توجه مهندسين و محققين حوزه‌ی کنترل بوده است.

در زمینه بازوهای ماهر، هدف‌های کنترلی مختلفی مطرح است، از جمله کنترل ردیابی مسیر مرجع^{۱۱}، کنترل تنظیم چند نقطه‌ای^{۱۲}، کنترل نیرو^{۱۳}، کنترل ترکیبی موقعیت/نیرو^{۱۴} و کنترل امپدانس^{۱۵}. با این حال کنترل ردیابی کامل، هدف مطلوب بسیاری از کاربردهای رباتیک است.

برای داشتن یک کنترل مناسب روی بازوی ماهر و در نتیجه داشتن یک عملکرد خوب، دو راهکار وجود دارد. اول اینکه یک بازوی ماهر با بالاترین کیفیت ممکن از نظر سخت‌افزار، تجهیزات اندازه‌گیری ابزار دقیق و شبکه و ارتباطات نرم‌افزاری ساخته شود. اما ساختن یک ربات صنعتی با داشتن ویژگی‌های مکانیکی و الکتریکی مطلوب مستلزم هزینه‌ی گزافی است، که شاید تقبل آن برای مصرف‌کننده مقرون به صرفه نباشد. از طرفی با در اختیار داشتن یک بازوی ماهر با کیفیت بالا هم، نمی‌توان با درصد بالایی

¹¹ Tracking Control

¹² Multi Point Regulating Control

¹³ Force Control

¹⁴ Hybrid Position/Force Control

¹⁵ Impedance Control

تضمین کرد که یک سیستم کنترل ساده می‌تواند آن را تحت هر شرایطی کنترل کند. لذا برای کاهش هزینه و همچنین اطمینان از عملکرد مناسب بازوی ماهر در هر شرایطی، باید توجه خود را بر روی روش‌های کنترل آن معطوف کنیم و این راهکار دوم است [۴۰].

اساساً در روش کلاسیک برای کنترل بازوهای ماهر که غیرخطی بوده و نامعینی دارند دو فلسفه وجود دارد. اولی کنترل تطبیقی و دومی کنترل مقاوم. در یک کنترل تطبیقی مناسب، کنترل‌کننده سعی می‌کند پارامترهای نامعین سیستم را «یاد بگیرد» و بهترین عملکرد را ارائه بدهد. از طرف دیگر، کنترل‌کننده‌های مقاوم ساختار ثابتی دارند که پایداری و عملکرد را برای نامعینی‌های محدود تضمین می‌کند. البته علاوه بر موارد فوق روش‌های کنترل هوشمند را نیز می‌توانیم به عنوان یک گروه مجزا در زمینه کنترل بازوهای ماهر در نظر بگیریم [۵۹].

در ادامه‌ی این فصل ابتدا شیوه‌ی معمول و مرسوم کنترل بازوهای ماهر صنعتی، که همان روش کنترل مبتنی بر گشتاور^{۱۶} است، را مورد بررسی قرار خواهیم داد. سپس روش کنترل ولتاژ^{۱۷} معرفی شده و مدل‌سازی بازوی ماهر بر اساس این راهبرد انجام خواهد شد. مزایای این روش نسبت به روش‌های قبلی بیان شده و بعضی از کاربردها و تحقیقات مرتبط با آن نیز معرفی می‌شود.

۲-۲ راهبرد کنترل مبتنی بر گشتاور

بسیاری از راهبرد‌های کنترل پیشرفته‌ای که برای کنترل بازوهای ماهر رباتیک ارائه شده‌اند بر اساس رهیافت کنترل گشتاور اعمالی به مفاصل کار می‌کنند. این روش کنترلی به واسطه‌ی پیچیدگی معادلات دینامیکی بازوی ماهر، مشکل است.

معادله‌ی دینامیکی یک بازوی ماهر با n رابط و به تبع آن n مفصل مختلف که مبنای بسیاری از روش‌های کنترلی این گونه ربات‌هاست، به صورت زیر است [۶۰]:

$$D(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_d \quad (1-2)$$

¹⁶ Torque Control Strategy (TCS)

¹⁷ Voltage Control Strategy (VCS)

که در آن $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ بردار زاویه‌ی مفاصل، $\mathbf{D}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس اینرسی، $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^n$ ماتریس نیروهای گریز از مرکز و کوریولیس، $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ بردار نیروهای گرانشی، $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای وارد بر مفاصل ربات و $\boldsymbol{\tau}_d \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای اغتشاشی است. بردارهای $\dot{\mathbf{q}}$ و $\ddot{\mathbf{q}}$ نیز به ترتیب معرف سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای مفاصل می‌باشند. تمامی روش‌های کنترل مبتنی بر مدل معمولاً بر پایه‌ی رابطه‌ی (۲-۱) بنا نهاده شده‌اند.

هدف کلی در کنترل ردیابی، این است که گشتاورها به گونه‌ای به مفاصل وارد شوند که در نهایت مجری نهایی یک مسیر مشخص شده‌ی مرجع را دنبال نماید. روال معمول تعیین بردار گشتاورها، استفاده از قانون کنترل زیر است (با صرف نظر کردن از اغتشاش):

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{U} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (2-2)$$

که در آن $\mathbf{U}$ سیگنال خروجی کنترل‌کننده است و برای کنترل‌کننده پیشنهادی متفاوتی ارائه شده است. برای مثال قانون کنترل زیر بر مبنای خطی سازی پس‌خورد پیشنهادی است که منابع زیادی تحقیقات خود را بر اساس آن انجام داده‌اند [۶۱]:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q})[\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{K}_v\Delta\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{K}_p\Delta\mathbf{q} - \mathbf{j}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}})] + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (2-3)$$

که در آن $\Delta\mathbf{q} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d$ بیانگر خطای ردیابی موقعیت و $\Delta\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d$ معرف خطای ردیابی سرعت است. $\mathbf{K}_p$ و $\mathbf{K}_v$ نیز ماتریس‌های مثبت معین قطری و ضرایب کنترل‌کننده‌اند. $\mathbf{j}$ نیز معرف ژاکوبین سیستم است.

رابطه‌ی (۲-۳) معادله‌ی پایه در اکثر روش‌های کنترل گشتاور است و با توجه به میزان معلوم بودن پارامترها و جزئیات ریاضی مدل ربات، راهبردهای کنترلی مختلف، برای تعیین گشتاور اعمالی به ربات از آن استفاده می‌کنند.

۲-۲-۱ کنترل تطبیقی بازوی ماهر

کنترل کننده‌های تطبیقی گوناگونی برای مقابله با عدم قطعیت‌های دینامیکی بازوهای ماهر پیشنهاد شده‌اند [۶۱، ۶۲]. عموماً این کنترل کننده‌ها را می‌توان براساس تفاوت آنها در اهداف کنترلی‌شان و سیگنال‌های راه‌اندازشان در تطبیق پارامترها، به ۳ گروه تقسیم نمود.

در گروه اول سیگنال‌های راه‌انداز تطبیق، خطاهای ردیابی هستند [۶۳-۶۶] و هدف آن‌ها کاهش خطای ردیابی است. در گروه دوم قوانین تطبیق پارامترها از خطاهای پیش‌بین تاثیر می‌پذیرد [۶۷، ۶۸]. گروه سوم کنترل تطبیقی ترکیبی نام دارد [۶۹]، که در آن تطبیق پارامتر هم با استفاده از خطای ردیابی و هم با استفاده از خطای پیش‌بین انجام می‌گیرد. در کنترل کننده‌ی تطبیقی ترکیبی همگرایی پارامترها سریعتر و دقت ردیابی بهتر است و لذا برای دینامیک‌های مدل نشده مقاومت بهتری دارد. علاوه بر مسئله ردیابی، از کنترل تطبیقی برای سایر اهداف کنترلی بازوهای ماهر نظیر کنترل امپدانس نیز استفاده شده است [۷۰]. با وجود این در همه‌ی طرح‌های کنترل تطبیقی فوق سینماتیک ربات دقیقاً معلوم در نظر گرفته شده است. از طرفی پارامترهایی که برای آنها قوانین تطبیق را بدست می‌آوریم، باید شرایطی از جمله خطی بودن و یا سرعت بسیار پایین تغییرات را برآورده سازند.

۲-۲-۲ کنترل مقاوم بازوی ماهر

در دهه‌های اخیر، کنترل مقاوم به همراه کنترل تطبیقی بازوهای ماهر موضوع طیف وسیعی از تحقیقات بوده است [۷۱-۷۴]. بسیاری از رهیافت‌های ارزشمند کنترل مقاوم برای کنترل بازوهای ماهر رباتیک در فضای مفصلی [۷۵، ۷۶] و فضای کاری [۷۷، ۷۸] ارائه شده‌اند. دلیل اهمیت کنترل تطبیقی و مقاوم اثر آنها در غلبه بر عدم قطعیت‌های ناشی از عدم تطابق مدل‌های نامی و واقعی است.

اغتشاشات خارجی، عدم قطعیت‌های پارامتری و دینامیک‌های مدل نشده اصلی‌ترین منابع عدم قطعیت در مهندسی کنترل هستند که می‌توانند عملکرد کنترل کننده را به صورت جدی تحت تاثیر قرار دهند.

روش‌های کنترل مقاوم زیادی بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور ارائه شده‌اند. مهم‌ترین نتایج کنترل مقاوم و البته تطبیقی تضمین پایداری و فائق آمدن بر عدم قطعیت‌ها، عوامل غیرخطی و کوپل‌شدگی‌ها در دینامیک بازوهای ماهر است [۷۹، ۸۰]. همانگونه که بیان شد کنترل مقاوم یکی از موثرترین روش‌ها در حضور طیف وسیعی از عدم قطعیت‌هاست. در ادامه چند نمونه از روش‌های معروف کنترل مقاوم معرفی می‌شود.

۲-۲-۱ خطی‌سازی فیدبک و کنترل گشتاور محاسبه شده^{۱۸}

یکی از معمول‌ترین روش‌های استفاده شده در کنترل مقاوم بازوهای ماهر است. این روش بر اساس خطی‌سازی دینامیک‌های غیرخطی بازوی ماهر، زمانی که مقادیر پارامترها با اندازه‌گیری آنلاین حالت‌ها در اختیار باشد، عمل می‌کند. همچنین خطی‌سازی فیدبک قادر است یک سیستم چندورودی/چندخروجی غیرخطی را به سیستم‌های تک ورودی/تک خروجی خطی تبدیل نماید. این روش از آن جهت که رهیافت‌های زیادی برای کنترل سیستم‌های خطی وجود دارند، مفید است. خطی‌سازی فیدبک و کنترل گشتاور محاسبه شده یک روش خطی‌سازی فیدبک ویژه است، که اگر بهره‌های کنترل‌کننده ثابت، متقارن و معین مثبت باشند، منجر به یک سیستم حلقه بسته‌ی خطی تغییرناپذیر با زمان^{۱۹} با پایداری مجانبی کلی می‌شود.

خطی‌سازی فیدبک، از فیدبک غیرخطی برای از بین بردن دینامیک‌های غیرخطی ربات استفاده می‌کند و منجر به ایجاد سیستم حلقه بسته‌ای می‌شود که شبیه یک سیستم خطی عمل می‌کند. برای این منظور و برای دکوپله کردن معادلات ربات، دینامیک‌های معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرند. پایداری سیستم حلقه بسته در این روش تضمین شده است.

پس از خطی‌سازی فیدبک، گشتاور مورد نیاز برای کنترل ربات توسط این روش محاسبه می‌شود. روش فوق نیاز به در اختیار داشتن پارامترهای دقیق مدل دارد. برخی از منابعی که از روش خطی‌سازی

¹⁸ Feedback Linearization/Computed Torque Control

¹⁹ Linear Time Invariant (LTI)

فیدبک و کنترل گشتاور محاسبه شده برای کنترل بازوی ماهر استفاده کرده‌اند عبارتند از [۸۱-۸۳]. لذا این روش از آنجایی که نیاز به مدل دقیقی از سیستم و همچنین فیدبک‌های موقعیت و سرعت دارد، از نظر پیاده‌سازی مشکل دارد و عملکرد آن به میزان دقت مدل استفاده شده برای خطی‌سازی فیدبک وابسته است. روال مرسوم این است که معمولاً یک کنترل‌کننده‌ی هوشمند نظیر فازی یا شبکه‌ی عصبی به منظور مقابله با نیروهای اصطکاکی و دینامیک‌های مدل نشده، همراه با این روش استفاده شود.

۲-۲-۲ جبران‌ساز ساختار متغیر^{۲۰}

این روش که زیر مجموعه‌ی *کنترل مد لغزشی* است، از دیگر روش‌های استفاده شده برای کنترل مقاوم ربات است. می‌توان از آن برای فرآیندهای غیرخطی زیادی استفاده کرد. از معایب آن نیز می‌توان به داشتن لرزش^{۲۱} اشاره کرد. در مقالات مختلف برای فائق آمدن بر این مشکلات از شبکه‌های عصبی و همچنین منطق فازی استفاده کرده‌اند [۸۴-۸۶].

۲-۲-۳ کنترل مبتنی بر غیرفعالی^{۲۲}

یک رهیافت دیگر در کنترل مقاوم است که بر اساس ساختار غیرفعال فیزیکی سیستم ربات کار می‌کند. این روش، غیرفعالی سیستم فیدبک را حفظ می‌کند که تضمین‌کننده‌ی پایداری حتی در حضور عدم قطعیت پارامترها و غیرخطی‌هاست. مزیت این روش نسبت به روش خطی‌سازی آن است که در اینجا نیازی به در اختیار داشتن معکوس ماتریس اینرسی نیست، و همچنین نیازی به اندازه‌گیری شتاب مفاصل نمی‌باشد. کنترل‌کننده‌های مبتنی بر عدم فعالیت خصوصیات قوام بهتری دارند و در برابر تغییرات متغیرها پایداری مقاوم دارند. این روش نیز نیاز به فیدبک موقعیت و سرعت دارد [۸۷، ۸۸]. از معایب این روش این است که روش معلوم و مشخصی برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده وجود ندارد. کنترل مقاوم می‌تواند پایداری را تضمین کند و عملکرد خوب و مناسبی از خود نشان می‌دهد. با این وجود پیاده‌سازی کنترل مقاوم با توجه به پیچیدگی دینامیک‌های بازوی ماهر، معمولاً پیچیده است.

²⁰ Variable Structure Compensator

²¹ Chattering

²² Passivity Based Control (PBC)

۳-۲ راهبرد کنترل مبتنی بر ولتاژ

در بخش قبل عنوان شد که اغلب تحقیقات در حوزه کنترل ربات بر اساس راهبرد کنترل گشتاور انجام شده‌اند. در این راهبرد، قانون کنترل گشتاورهایی را که باید به مفاصل اعمال شوند محاسبه می‌کند. محرک‌های سیستم باید تحریک شوند و گشتاورهای مطلوب را تولید نمایند.

اما در عمل، بکارگیری دستورات و فرامین کنترل گشتاور یک مشکل اساسی است، چرا که نمی‌توان آنها را مستقیماً به عنوان ورودی به بازوهای ماهر الکتریکی که توسط موتورهای الکتریکی رانده می‌شوند اعمال نمود. لذا استفاده از قوانین جدید کنترلی برای اعمال این گشتاور به محرک‌ها لازم است.

برای بهبود روش کنترل گشتاور، محدودیت‌ها و دینامیک محرک‌ها هم باید مورد توجه قرار گیرد. در نتیجه از نقایص راهبرد کنترل بر مبنای گشتاور می‌توان به استفاده از دینامیک پیچیده‌ی بازوهای ماهر، مشکلات پیاده سازی عملی و نادیده گرفتن نقش محرک‌ها در بکارگیری این روش اشاره کرد. حقیقت این است که بازوهای ماهر با محرک‌ها راهاندازی می‌شوند. بنابراین به منظور کنترل بازوی ماهر، محرک آن باید کنترل شود.

بازوهای ماهری که توسط موتورهای الکتریکی رانده می‌شوند، به دلیل اینکه موتورهای الکتریکی در مقایسه با سایر محرک‌ها قابلیت کنترل پذیری بالایی دارند، شرایط کنترلی مناسب‌تری دارند.

موتورهای الکتریکی بوسیله‌ی ولتاژهای اعمالی به ورودی‌های موتور، کنترل می‌شوند. پس در یک جمع‌بندی کلی باید گفت که کنترل‌کننده‌ها باید فرامین کنترلی را به صورت ولتاژ اعمالی به موتورها، تولید نمایند. همین امر خود مستلزم در نظر گرفتن دینامیک محرک‌ها در قانون کنترل است. همین موارد دلیل ارائه‌ی روش کنترل ولتاژ [۸۹] برای بازوهای ماهر است. این دیدگاه از آنجا که در روند پیاده سازی خود نیازی به استفاده از دینامیک پیچیده‌ی بازوی ماهر ندارد باعث بالا رفتن سادگی، دقت و سرعت محاسبات و قوام در سیستم کنترل بازوی ماهر می‌شود.

البته قبل از ارائه‌ی راهبرد کنترل ولتاژ، بعضی از تحقیقات اثر دینامیک محرک‌های بازوی ماهر را نیز در قوانین کنترل خود در نظر گرفتند. برای مثال یک روش هوشمند کنترل ردیابی مقاوم برای غلبه

بر عدم قطعیت‌ها در [۹۰] ارائه شده، که دینامیک محرک‌ها را در نظر گرفته است. با این وجود به دلیل در نظر گرفتن دینامیک محرک‌ها، مسئله‌ی کنترل بسیار مشکل و پیچیده شده و برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها داشتن یک ردیابی خوب در کنترل گشتاور، حالت‌های زیادی یا باید اندازه‌گیری شده و یا تخمین زده شوند.

با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ، راهبرد مفصل مستقل به صورت کامل و بدون دخالت ترم‌های دینامیکی بازوهای ماهر قابل اعمال است. راحتی راهبرد مفصل مستقل در آن است که هر مفصل بازوی ماهر به صورت جداگانه کنترل می‌شود.

از دیگر مزایای روش کنترل ولتاژ این است که در آن خطی‌سازی فیدبک به مدل موتور اعمال می‌شود، در حالیکه در کنترل گشتاور به مدل بازوی ماهر اعمال می‌شود. این امر عملکرد خطی‌سازی فیدبک را در کنترل ولتاژ بهبود می‌بخشد، چرا که مدل موتور نسبت به مدل بازوی ماهر بسیار ساده‌تر است و عدم قطعیت کمتری هم دارد.

علاوه بر مسئله‌ی نادیده گرفتن دینامیک محرک‌ها در روش کنترل گشتاور، در این روش با مسائلی نظیر محدودیت‌های اندازه‌گیری (سنسورها)، اشباع محرک‌ها و زمان زیاد پردازش نیز روبرو هستیم. راهبرد کنترل ولتاژ یک روش سریع و از لحاظ محاسباتی سبک است که می‌تواند مسئله‌ی کنترل ربات را به مسئله‌ی کنترل موتور تبدیل نماید.

۲-۴ مدل‌سازی راهبرد کنترل ولتاژ

یک بازوی ماهر مکانیکی، زنجیره‌ای از رابط‌های صلب است که به واسطه‌ی مفاصل چرخشی یا کشویی به یکدیگر متصل شده‌اند. هدف از کنترل یک بازوی ماهر، مدیریت نوع و اندازه‌ی حرکت مفاصل آن است به گونه‌ای که مجری نهایی، که در انتهای رابط آخر قرار دارد، در یک نقطه‌ی مطلوب قرار گرفته و یا مسیر مطلوبی را دنبال نماید.

معادله‌ی دینامیکی بیان شده توسط رابطه‌ی (۲-۱) را در نظر بگیرید. در روش‌های متداول کنترل بازوهای ماهر، هدف یافتن بردار گشتاوری است که موقعیت مفاصل ربات را در لحظات مختلف در

موقعیت‌های مطلوب و دلخواه قرار دهد. در این بین شاید بتوان گفت اصلی‌ترین نکته به فراموشی سپرده شده است و آن اینکه ابزاری که ما برای کنترل و مدیریت ربات در دنیای واقعی و به صورت فیزیکی در اختیار داریم، متناسب با نوع موتور محرکه‌ای که برای ربات استفاده شده است، ولتاژ، جریان و یا فرکانس است.

به منظور داشتن قابلیت کنترل‌پذیری بالا برای یک ردیابی مناسب، می‌توان بازوی ماهر را با موتورهای DC راه اندازی نمود. بر اساس معادلات حرکت یک موتور DC مغناطیس دائم، گشتاور وارد شده بر مفاصل ربات از طریق موتورهای الکتریکی به صورت زیر است :

$$\mathbf{J}_m \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{B}_m \dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{r} \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_m \quad (4-2)$$

که در آن $\boldsymbol{\tau}_m \in \mathbf{R}^n$ بردار گشتاور موتورها، $\boldsymbol{\theta}_m \in \mathbf{R}^n$ بردار زاویه‌ی موتورها و $\mathbf{J}_m, \mathbf{B}_m, \mathbf{r} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ به ترتیب ماتریس‌های قطری اینرسی، میرایی و ضریب کاهش چرخ‌دنده‌ی موتورها می‌باشند. همچنین بردار سرعت مفاصل $\dot{\mathbf{q}}$ ، از طریق رابطه زیر با سرعت موتورها رابطه دارد:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{r} \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \quad (5-2)$$

مبنای راهبرد کنترل ولتاژ این است که از ولتاژ موتورهای بازوی ماهر به عنوان ورودی کنترلی استفاده کنیم. معادله الکتریکی حاکم بر موتورهای بازوی ماهر به صورت زیر است:

$$\mathbf{R} \mathbf{I}_a + \mathbf{L} \dot{\mathbf{I}}_a + \mathbf{K}_b \mathbf{r}^{-1} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{V} \quad (6-2)$$

که در آن $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^n$ بردار ولتاژ موتورها، $\mathbf{I}_a \in \mathbf{R}^n$ بردار جریان موتورها و $\mathbf{R}, \mathbf{L}, \mathbf{K}_b \in \mathbf{R}^{n \times n}$ به ترتیب ماتریس‌های قطری مقاومت، اندوکتانس و ضریب بازگشتی emf موتورها هستند. بردار گشتاور موتورها $\boldsymbol{\tau}_m$ به عنوان ورودی رابطه (۴-۲)، از طریق رابطه زیر با جریان موتورها در ارتباط است:

$$\mathbf{K}_m \mathbf{I}_a = \boldsymbol{\tau}_m \quad (7-2)$$

که در آن $\mathbf{K}_m$ ماتریس قطری ضرایب گشتاورهاست. بنابراین با استفاده از روابط (۱-۲) و (۴-۲) تا (۷-۲) می‌توانیم نمایش فضای حالت بازوی ماهر کنترل شده با موتورهای الکتریکی را به صورت زیر بنویسیم:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{N}\mathbf{V} \quad (۸-۲)$$

که در آن:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ (\mathbf{J}\mathbf{r}^{-1} + \mathbf{r}\mathbf{D}(\mathbf{x}_1))^{-1}(-(\mathbf{B}\mathbf{r}^{-1} + \mathbf{r}\mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2))\mathbf{x}_2 - \mathbf{r}\mathbf{g}(\mathbf{x}_1) + \mathbf{K}_m\mathbf{x}_3) \\ -\mathbf{L}^{-1}(\mathbf{K}_b\mathbf{r}^{-1}\mathbf{x}_2 + \mathbf{R}\mathbf{x}_3) \end{bmatrix} \quad (۹-۲)$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{L}^{-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{I}_a \end{bmatrix} \quad (۱۰-۲)$$

معادله‌ی حالت بیان شده در رابطه‌ی (۸-۲)، نشان دهنده‌ی یک سیستم بسیار پیچیده‌ی چند متغیره، با پارامترهای غیرخطی است. این پیچیدگی یک معضل بسیار اساسی در مبحث کنترل بازوهای ماهر است.

در این رساله قصد داریم برای کنترل بازوی ماهر از روش‌هایی استفاده کنیم که نیاز به در اختیار داشتن مشخصات دینامیکی کامل ربات و معادلات پیچیده‌ی آن را مرتفع کند. در این روش‌ها که بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ طراحی شده اند، هر کدام از مفاصل به صورت مستقل کنترل می‌شوند. هدف این است که با استفاده از این روش‌های کنترلی، ردیابی مسیر مرجع برای هر کدام از مفاصل ربات در حضور اغتشاشات و نامعینی‌های سیستم به خوبی انجام شود.

با توجه به رابطه (۶-۲)، می‌توان معادله‌ی الکتریکی هر کدام از موتورهای بازوی ماهر را به صورت زیر نوشت:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \varphi = v \quad (۱۱-۲)$$

که در آن φ بیانگر اغتشاشات خارجی وارد بر موتور است. رابطه‌ی (۱۱-۲) اساس روش کنترل ولتاژ بازوهای ماهر است. همان‌گونه که در [۸۹] بیان شده است، می‌توانیم موقعیت مفصل بازوی ماهر را با توجه به رابطه‌ی (۱۱-۲) از طریق ولتاژ موتور کنترل کنیم. به این ترتیب دیگر نیازی به مدل پیچیده ربات نیست و تمام مشخصات دینامیکی آن در جریان موتور وجود دارد.

اجازه دهید رابطه (۱۱-۲) را به صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$\dot{q} = \frac{r}{K_b} v - \frac{r}{K_b} (RI_a + LI_a + \varphi) \quad (۱۲-۲)$$

یا

$$\dot{q} = Mv + W \quad (۱۳-۲)$$

که در آن:

$$M = \frac{r}{K_b}, \quad W = -\frac{r}{K_b} (RI_a + LI_a + \varphi) \quad (۱۴-۲)$$

بعبارت دیگر، W بیانگر کلیه خصوصیات دینامیکی و پارامترهای موتور و بازوی ماهر، بعلاوه اغتشاشات خارجی وارد بر آن خواهد بود. رابطه‌ی (۱۳-۲) رابطه اصلی برای روش‌های کنترل ارائه شده در این رساله است.

اگر قانون کنترل مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ به صورت زیر ارائه شود:

$$v = \frac{\dot{q}_d + K_p(q_d - q) - W}{M} \quad (۱۵-۲)$$

که در آن q_d متغیر مسیر مرجع و K_p ضریب کنترل‌کننده است، با قرار دادن رابطه‌ی (۱۵-۲) در رابطه‌ی (۱۳-۲) خواهیم داشت:

$$\dot{q} = \dot{q}_d + K_p(q_d - q) \quad (۱۶-۲)$$

اگر خطای ردیابی را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$e = (q_d - q) \quad (۱۷-۲)$$

آنگاه با توجه به رابطه‌ی (۱۶-۲) داریم:

$$\dot{e} + K_p e = 0 \quad (۱۸-۲)$$

بنابراین اگر K_p مثبت معین باشد، با گذشت زمان خطای ردیابی به سمت صفر میل خواهد کرد.

پس از ارائه‌ی روش کنترل مبتنی بر ولتاژ، کاربردها و روش‌های کنترلی مختلفی بر اساس آن برای بازوهای ماهر ارائه شد. در [۹۱] پارامترهای باند عدم قطعیت برای کنترل مقاوم بازوهای ماهر الکتریکی با استفاده از روش کنترل ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در [۹۲] یک روش کنترل ولتاژ بهینه‌ی مقاوم برای بازوهای ماهر رباتیک راه‌اندازی شده با موتورهای الکتریکی ارائه شده است. همه اجزاء سیستم رباتیک شامل بازوهای ماهر و موتورها در مسئله کنترل مد نظر قرار گرفته شده‌اند. برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی کنترل از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده، بنابراین عملکرد سیستم کنترل بهبود یافته است. مرجع [۴۲] درباره کنترل فضای کاری مقاوم بازوهای ماهر دارای محرک‌های الکتریکی با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ است. در این مقاله محدوده‌ی نامعینی با استفاده از چند جمله‌ای لژاندار محاسبه شده است.

تحلیل پایداری برای کنترل فازی بازوهای ماهر رباتیک، یک مسئله‌ی اساسی در تحقیقات مختلف است. در [۴۰] یک رهیافت کنترل فازی مقاوم جدید برای بازوهای ماهر الکتریکی با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف ارائه شده است. در این مقاله مشکلات محاسبات تحلیلی، با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ به جای راهبرد کنترل گشتاور پشت سر گذاشته شده و یک کاندید لیاپانوف ساده برای بررسی و بکارگیری تحلیل پایداری، بدون دراختیار داشتن دینامیک‌های کاملاً معلوم از سیستم پیشنهاد شده است.

علاوه بر بازوهای ماهر صلب، روش کنترل ولتاژ توانسته به صورت موفقیت آمیزی برای کنترل مقاوم سیستم‌هایی نظیر بازوهای ماهر دارای راه‌انداز الکتریکی و مفصل انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار گیرد [۹۳، ۹۴]. در مقابل کنترل مقاوم ربات‌های با مفصل انعطاف‌پذیر به روش کنترل گشتاور بسیار پیچیده و مشکل است [۹۵].

در [۹۶] مبحث کنترل امپدانس، به عنوان یک راه‌حل مناسب و یکنواخت جدید برای کنترل نیرو و موقعیت بازوهای ماهر، بر اساس روش کنترل ولتاژ ارائه شده است. روش ارائه شده در مقابل روش کنترل امپدانس مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور، ساده‌تر، موثرتر و مقاوم‌تر است.

در [۹۷] از یک کنترل کننده فازی تطبیقی که بر مبنای روش کنترل ولتاژ طراحی شده است، برای کنترل بازوی ماهر استفاده شده است. در این پژوهش به منظور غلبه بر اثرات عدم قطعیت‌ها و همچنین به منظور کاهش اثر چترینگ در سیگنال کنترل، از ترکیب یک کنترل کننده اثر لغزشی با یک تقریبگر فازی استفاده شده است. در [۹۸] نیز یک روش تطبیقی مقاوم به منظور کنترل امپدانس یک بازوی ماهر اسکارا ارائه شده است. علاوه بر این، مراجع مختلف دیگری از جمله [۱۸، ۹۹-۱۰۲] نیز از این راهبرد برای مقاصد مختلف بهره برده‌اند.

۵-۲ نتیجه گیری

بازوهای ماهر رباتیک، سیستم‌های پیچیده‌ای هستند که کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارند. شیوه معمول کنترل این ربات‌ها، راهبرد کنترل گشتاور است. در این راهبرد سیگنال کنترل تولید شده توسط کنترل کننده، «گشتاور» است که باید به رابط‌های ربات اعمال شود. اما از آنجا که مفاصل ربات توسط موتورهای الکتریکی کنترل می‌شوند، گشتاور تولیدی در کنترل کننده باید به ولتاژ تبدیل شود. راهبرد کنترل ولتاژ با در نظر گرفتن دینامیک موتورهای ربات، علاوه بر اینکه امکان کنترل مفاصل ربات را به صورت مستقل فراهم می‌آورد، سیگنال کنترل را نیز به صورت ولتاژ تولید می‌کند که به آسانی و به صورت مستقیم به موتورهای ربات اعمال می‌شود. راهبرد کنترل ولتاژ مبنای روش‌های کنترل مستقل از مدلی است که در فصول آینده ارائه خواهند شد.

فصل سوم

کنترل مستقل از مدل بازوی ماهر صنعتی

با استفاده از رویکردهای حالت توسعه یافته‌ی خطی

۱-۳ مقدمه

اغتشاشات به صورت گسترده‌ای در سیستم‌های کنترل صنعتی مدرن وجود دارد و بر عملکرد این سیستم‌ها تاثیر منفی دارد. بنابراین حذف اثر اغتشاش یکی از اهداف کلیدی در طراحی کنترل‌کننده-هاست. همانگونه که در بسیاری از منابع تحقیقاتی به آن اشاره شده است، منظور از «اغتشاشات» فقط اغتشاشات ناشی از محیط خارجی یک سیستم کنترل نیست. بلکه عدم قطعیت‌های سیستم تحت کنترل از جمله دینامیک‌های مدل نشده، آشفتگی‌های پارامتری و کوپل شدگی‌های غیرخطی در سیستم‌های چند متغیره نیز به منزله‌ی اغتشاش برای سیستم کنترل در نظر گرفته می‌شوند [۱۰۳]. در بازوهای ماهر صنعتی نیز، دقت کنترل عموماً تحت تاثیر اغتشاشات مختلفی چون گشتاورهای اغتشاشی نامعین، بارهای متغیر و عدم قطعیت‌های پارامتری قرار دارد.

وجود این عوامل نامعین تاثیرات جانبی زیادی روی سیستم‌های مهندسی واقعی دارد. بنابراین بهبود الگوریتم‌های کنترلی با ویژگی حذف اغتشاش، به منظور ارتقاء دقت کنترل ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های مشهوری چون کنترل تطبیقی، کنترل مقاوم و کنترل حالت لغزشی این ویژگی را دارا هستند. استفاده از «رویتگر اغتشاش» یکی از موثرترین روش‌های تخمین و حذف اثر اغتشاش است [۱۰۴]. یکی از رویتگرهای اغتشاش، «رویتگر حالت توسعه یافته» است. در این فصل ساختار «رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی» و در فصل بعد حالت عمومی و کلی «رویتگر حالت توسعه یافته» و چگونگی بکارگیری آنها در روش کنترل پیشنهادی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲-۳ ساختار کلی رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی^{۲۳}

معادلات دینامیکی حاکم بر کلاسی از سیستم‌ها را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت [۴]:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)}(t) = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t) + w(t) + bu(t) \\ y(t) = x(t) \end{cases} \quad (۱-۳)$$

²³ Linear Extended State Observer (LESO)

در رابطه‌ی فوق $f(\cdot)$ یک تابع اختیاری از متغیرهای حالت است که با توجه به معادلات دینامیکی سیستم تعیین می‌شود، $w(t)$ اغتشاش خارجی، $u(t)$ قانون کنترل، b بهره کنترل و $x(t)$ نیز حالت اندازه‌گیری شده هستند. اگر اغتشاش کلی وارد بر سیستم را به صورت زیر در یک متغیر واحد تعریف کنیم:

$$a(t) = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t) + w(t) \quad (2-3)$$

آنگاه طبق یک روال معمول معادلات حالت را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) = x_n(t) \\ \dot{x}_n(t) = a(t) + bu(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (3-3)$$

که در آن، $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, \dots, x_n = x^{(n-1)}$ متغیرهای حالت هستند و b ضریب سیگنال کنترل است. اگر عبارت $a(t)$ را به عنوان یک متغیر حالت اضافه در نظر بگیریم، رابطه‌ی (۳-۳) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) = x_n(t) \\ \dot{x}_n(t) = x_{n+1}(t) + bu(t) \\ \dot{x}_{n+1}(t) = h(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (4-3)$$

که در آن $x_{n+1}(t) = a(t)$ و $h(t) = \dot{a}(t)$ است. در نتیجه مدل فضای حالت سیستم فوق به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u + \mathbf{T}h \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{X} \end{aligned} \quad (5-3)$$

که در آن:

$$\mathbf{X}_{(n+1) \times 1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ x_{n+1} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

$$\mathbf{B}_{(n+1) \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{(n+1) \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{1 \times (n+1)} = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]$$

برای سیستمی مانند آنچه که در رابطه (۴-۳) تعریف شده و دارای $n + 1$ متغیر حالت است، رویتگر

حالت توسعه یافته خطی از مرتبه $n + 1$ خواهد بود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = z_2 - \beta_1(z_1 - x_1) \\ \vdots \\ \dot{z}_{n-1}(t) = z_n - \beta_{n-1}(z_1 - x_1) \\ \dot{z}_n(t) = z_{n+1} - \beta_n(z_1 - x_1) + bu(t) \\ \dot{z}_{n+1}(t) = -\beta_{n+1}(z_1 - x_1) \\ \hat{y}(t) = z_1 \end{cases} \quad (7-3)$$

متغیرهای حالت رویتگر یعنی $z_1, \dots, z_n$ ، تخمین متغیرهای حالت سیستم یعنی $x_1, \dots, x_n$

هستند. z_{n+1} متغیر حالت اضافی است که برای تخمین اغتشاش وارد بر سیستم تعریف شده است.

β_i ($i = 1, 2, \dots, n + 1$) ها نیز بهره‌های رویتگر هستند. رویتگر مورد اشاره حالت خاصی از رویتگر

حالت توسعه یافته است که در فصل بعد به تشریح آن خواهیم پرداخت. مدل فضای حالت رویتگر حالت

توسعه یافته‌ی خطی به صورت زیر است:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{AZ} + \mathbf{Bu} + \mathbf{L}(z_1 - x_1) \quad (8-3)$$

$$\hat{y} = \mathbf{CZ}$$

که در آن مقادیر $\mathbf{A}$ ، $\mathbf{B}$ و $\mathbf{C}$ مشابه با مقادیر ارائه شده در رابطه‌ی (۶-۳) است و مقدار $\mathbf{L}$ که بردار

بهره‌های رویتگر است به صورت زیر خواهد بود:

$$\mathbf{L}_{(n+1) \times 1} = \begin{bmatrix} -\beta_1 \\ -\beta_2 \\ \vdots \\ -\beta_n \\ -\beta_{n+1} \end{bmatrix} \quad (9-3)$$

حال اگر بردار خطای تخمین را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z} - \mathbf{X} \quad (10-3)$$

آنگاه با توجه به روابط (5-3)، (8-3) و (9-3) خواهیم داشت:

$$\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{A}_e \mathbf{E} + \mathbf{T}_1 h \quad (11-3)$$

که در آن:

$$\mathbf{A}_{e(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ -\beta_n & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ -\beta_{n+1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_1 = -\mathbf{T} \quad (12-3)$$

در نتیجه رویترگر حالت توسعه یافته‌ی خطی معرفی شده در رابطه‌ی (3-3) پایدار ورودی محدود-خروجی محدود^{۲۴} خواهد بود اگر ریشه‌های معادله مشخصه‌ی ماتریس $\mathbf{A}_e$ همگی در نیم صفحه‌ی چپ باشند و h نیز محدود باشد. بهره‌های رویترگر را می‌توان با استفاده از هر کدام از روش‌های شناخته شده، مانند تکنیک جایابی قطب تعیین نمود.

در [۱۰۴] به منظور کاهش پارامترهایی که نیاز به تنظیم دارند، پیشنهاد شده که همه‌ی قطب‌های رویترگر در یک نقطه قرار داده شده و بهره‌های رویترگر برحسب تابعی از فقط یک پارامتر بیان شود. این پارامتر، پهنای باند رویترگر ω_o است. برای این منظور، برای یک رویترگر توسعه یافته‌ی خطی از مرتبه‌ی $(n+1)$ و ماتریس $\mathbf{A}_e$ معادله مشخصه‌ای به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود که تمامی ریشه‌های آن در ω_o قرار دارند:

$$\lambda(s) = (s + \omega_o)^{n+1} \quad (13-3)$$

²⁴ Bounded-input bounded-output (BIBO)

و با توجه به رابطه‌ی فوق، هر کدام از ضرایب روی‌تگر به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\beta_i = a_i \quad i = 1, \dots, n+1 \quad (۱۴-۳)$$

که در آن a_i ضریب جمله‌ی s^{n+1-i} در رابطه‌ی (۱۳-۳) است. به عنوان مثال، برای $n = 1$ داریم:

$$(s + \omega_o)^2 = s^2 + a_1 s + a_2 = s^2 + 2\omega_o s + \omega_o^2 \quad (۱۵-۳)$$

لذا:

$$\beta_1 = a_1 = 2\omega_o, \quad \beta_2 = a_2 = \omega_o^2 \quad (۱۶-۳)$$

و تنها پارامتری که تنظیم می‌شود، پهنای باند روی‌تگر ω_o است.

۳-۳ کنترل موقعیت بازوی ماهر بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ با استفاده

از روی‌تگر حالت توسعه یافته‌ی خطی

اگر در رابطه (۱۳-۲) تعریف کنیم:

$$M = M_0 + \Delta M \quad (۱۷-۳)$$

که در آن M_0 یک مقدار ثابت ناشناخته است. بدون از دست دادن کلیت مسئله می‌توانیم فرض کنیم

که $M_0 = 1$. آنگاه خواهیم داشت:

$$\dot{q} = v + F \quad (۱۸-۳)$$

که در آن:

$$F = \Delta M v + W \quad (۱۹-۳)$$

یعنی F بیانگر هر آن چیزی است که درباره‌ی سیستم نمی‌دانیم (تقریباً همه چیز).

با توجه به رابطه‌ی (۱۸-۳)، به منظور کنترل موقعیت مفصل q و تخمین اغتشاشات کلی F ، یک

روی‌تگر حالت توسعه یافته‌ی خطی از مرتبه‌ی ۲ تعریف می‌کنیم. فرمت کلی روی‌تگر تعریف شده برای

هر مفصل بازوی ماهر به صورت زیر است:

$$\dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - q) + v \quad (۲۰-۳)$$

$$\dot{z}_2 = -\beta_2(z_1 - q)$$

در روابط فوق q اندازه واقعی متغیر مفصلی، z_1 تخمین متغیر مفصلی، z_2 تخمین اغتشاشات وارد بر مفصل، و v ولتاژ وارد بر موتور مفصل است.

تعریف می‌کنیم:

$$e_q = z_1 - q, e_F = z_2 - F, e_{tr} = q_d - q \quad (21-3)$$

که در آن q_d ورودی مرجع متغیر مفصلی و F اغتشاشات کلی وارد بر مفصل است. همچنین e_q خطای تخمین متغیر مفصلی، e_F خطای تخمین اغتشاشات کلی وارد بر مفصل و e_{tr} خطای ردیابی متغیر مفصلی است.

حال با استفاده از روابط (20-3) و (21-3)، قانون کنترل را به صورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$v = \dot{q}_d + K_p(e_{tr} - e_q) + \beta_1 e_q - z_2 \quad (22-3)$$

در بخش بعد در دو گام نشان داده خواهد شد که خطای تخمین متغیرها یعنی e_q و e_F و همچنین خطای تخمین در رهگیری ورودی مرجع محدود است و در نتیجه خطای ردیابی محدود خواهد بود. علاوه بر این همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، تنها کافی است در هر لحظه فقط از موقعیت متغیرهای مفصلی فیدبک گرفته شده و در اختیار رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی قرارگیرد. با توجه به مقاوم بودن این رویتگر در مقابل خطاهای اندازه‌گیری، نیاز به سنسورهای گران قیمت با دقت بالا نیز نخواهد بود. در نتیجه با توجه به اینکه در سایر روش‌های کنترل بازوهای ماهر معمولاً علاوه بر فیدبک گرفتن از موقعیت مفاصل نیاز به فیدبک گرفتن از سرعت و یا شتاب مفاصل نیز هست، لذا این مورد یکی از مهمترین مزایای این روش کنترلی به شمار می‌آید.

۳-۴ تحلیل همگرایی

برای بررسی روند همگرایی متغیرهای تخمینی توسط رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی و همچنین بررسی خطای تخمین در رهگیری ورودی مرجع، فرض‌های زیر را در نظر خواهیم گرفت:

فرض (۱): مسیر مرجع q_d باید هموار و نرم باشد و مشتقات آن تا هر درجه دلخواه وجود داشته و کراندار یکنواخت باشند [۹۴].

فرض (۲): φ اغتشاش خارجی بیان شده در رابطه‌ی (۲-۱۱) و همچنین گشتاور اغتشاشی τ_d باید کراندار باشند [۹۴]، یعنی :

$$|\varphi| \leq \varphi_{max} , \quad |\tau_d| \leq \tau_{d_max} \quad (۲۳-۳)$$

که در آن φ_{max} و τ_{d_max} اعداد صحیح مثبت هستند.

فرض (۳): ولتاژ موتورهای ربات برای محافظت در برابر آسیب دیدگی، در مقدار معینی محدود شده است [۹۴]:

$$|v| \leq v_{max} \quad (۲۴-۳)$$

فرض (۴): سیستم در لحظه‌ی $t = 0$ در حالت سکون قرار دارد و کلیه‌ی شرایط اولیه صفر هستند.

۱-۴-۳ گام اول

قضیه ۱-۳ - خطای همگرایی متغیرهای تخمینی توسط روینگر تعریف شده توسط رابطه‌ی (۳-۲۰) محدود است، یعنی:

$$|e_q = z_1 - q| \leq \sigma_1 , \quad |e_F = z_2 - F| \leq \sigma_2 \quad (۲۵-۳)$$

- اثبات :

از ترکیب روابط (۳-۱۸)، (۳-۲۰) و (۳-۲۱) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \dot{e}_q = -\beta_1 e_q + e_F \\ \dot{e}_F = -\beta_2 e_q - \dot{F} \end{cases} \quad (۲۶-۳)$$

با تعریف $\dot{F} = h$ داریم:

$$\dot{\mathbf{E}}_0 = \mathbf{A}\mathbf{E}_0 + \mathbf{B}h \quad (۲۷-۳)$$

که در آن:

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} e_q \\ e_F \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 \\ -\beta_2 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (28-3)$$

با توجه به اینکه ولتاژ موتورها برای حفاظت در برابر اضافه ولتاژ محدود شده‌اند، مطابق با فرض‌های ۱ و ۲ مقادیر φ و $\dot{q}$ کراندارند و همچنین با توجه به اینکه مطابق با [۹۴] مقادیر $I_a, \dot{I}_a$ نیز کراندار هستند، در نتیجه F و h نیز کراندار خواهند بود:

$$|h| \leq \delta \quad (29-3)$$

از طرفی می‌دانیم که اگر β_1 و β_2 مثبت باشند، ماتریس $\mathbf{A}$ هرویتز بوده و همچنین رابطه‌ی (۳-۲۷) نیز پایدار هرویتز است. حال با توجه به اینکه رابطه‌ی (۳-۲۷) بیانگر یک سیستم خطی با ورودی h است، با توجه به محدود بودن h و هرویتز بودن $\mathbf{A}$ می‌توان نتیجه گرفت که $\mathbf{E}_0$ محدود است. در نتیجه با توجه به (۳-۲۸)، e_q و e_F نیز محدود هستند. لذا برای هر مفصل ربات، متغیرهای تخمینی تعریف شده در رویتگر در همسایگی متغیرهای واقعی قرار می‌گیرند.

۲-۴-۳ گام دوم

قضیه ۳-۲ - برای سیستم بیان شده توسط رابطه‌ی (۳-۱۸) تحت قانون کنترل پیشنهاد شده در رابطه‌ی (۳-۲۲)، خطای رهگیری مسیر مرجع توسط متغیر تخمینی رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی معرفی شده با رابطه‌ی (۳-۲۰) محدود است، یعنی:

$$|q_d - z_1| < \sigma_3 \quad (30-3)$$

- اثبات:

با قرار دادن (۳-۲۲) در (۳-۱۸) داریم:

$$\dot{q} = \dot{q}_d + K_p(e_{tr} - e_q) + \beta_1 e_q - z_2 + F \quad (31-3)$$

با ساده سازی رابطه (۳-۳۱) در نهایت دینامیک خطای سیستم حلقه بسته به صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$\dot{e}_{tr} = -K_p(e_{tr} - e_q) - \beta_1 e_q + e_F \quad (32-3)$$

تابع معین مثبت را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$V = \frac{1}{2}(e_{tr} - e_q)^2 \quad (33-3)$$

لذا داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (e_{tr} - e_q)(\dot{e}_{tr} - \dot{e}_q) \\ &= (e_{tr} - e_q)(-K_p(e_{tr} - e_q) - \beta_1 e_q + e_F - e_F + \beta_1 e_q) \quad (34-3) \\ &= -K_p(e_{tr} - e_q)^2 \end{aligned}$$

و با شرط $K_p > 0$ و $e_{tr} \neq e_q$ خواهیم داشت:

$$\dot{V} < 0 \quad (35-3)$$

و از آنجا که متغیر تابع معین مثبت به صورت زیر است:

$$e_{tr} - e_q = q_d - z_1 \quad (36-3)$$

لذا در سیستم حلقه بسته (۳۱-۳)، رابطه‌ی (۳۰-۳) برقرار خواهد بود و متغیر تخمینی z_1 قادر است در همسایگی مسیر مرجع q_d قرار گیرد.

نکته - در صورتی که ولتاژ بدست آمده توسط رابطه‌ی (۲۲-۳) بزرگتر از مقدار v_{max} باشد، آنگاه خروجی کنترل کننده همان مقدار v_{max} خواهد بود. بعبارت دیگر ولتاژ تحت هر شرایطی محدود خواهد بود، لذا با توجه به [۹۴] سیستم حلقه بسته پایدار ورودی محدود - خروجی محدود خواهد بود. با توجه به مطالب بیان شده، می‌توانیم قانون کنترل را به صورت زیر بازنویسی نماییم:

$$v = \begin{cases} \dot{q}_d + K_p(e_{tr} - e_q) + \beta_1 e_q - z_2 & |v| < v_{max} \\ v_{max} & v > v_{max} \\ -v_{max} & v < -v_{max} \end{cases} \quad (37-3)$$

۳-۵ شبیه سازی روش کنترل پیشنهادی

در این قسمت، روش کنترل پیشنهادی بر روی یک ربات هنرمند اعمال می‌شود. پارامترهای دناویت - هارتنبرگ (DH) این ربات در جدول ۳-۱ آورده شده‌اند. در این جدول q_i معرف متغیر مفصل (یا

همان زاویه مفصل)، d_i بیانگر انحراف رابط، a_i بیان‌کننده‌ی طول رابط و α_i معرف پیچش رابط برای رابط i ام ربات است. پارامترهای دینامیکی ربات نیز در جدول ۳-۲ ارائه شده است، که در آن m_i معرف جرم رابط i ام و $r_{ci} = [x_{ci} \ y_{ci} \ z_{ci}]^T$ بیانگر مرکز جرم چارچوب i ام است. تانسور اینرسی در مرکز چارچوب جرم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{xxi} & I_{xyi} & I_{xzi} \\ I_{xyi} & I_{yyi} & I_{yzi} \\ I_{xzi} & I_{yzi} & I_{zzi} \end{bmatrix} \quad (3-38)$$

پارامترهای موتورهای جریان مستقیم بازوی ماهر نیز در جدول ۳-۳ آمده است [۴۱]. لازم به ذکر است که برای هر سه مفصل از یک نوع موتور استفاده شده است. همانطور که در جدول ۳-۳ نیز نشان داده شده، ولتاژ موتورها در مقدار $|v_{\max}| = 40 \text{ V}$ محدود شده است.

جدول ۳-۱ - پارامترهای دناویت - هارتنبرگ بازوی ماهر هنرمند [۴۱]

شماره رابط	q	d	a	α
۱	q_1	d_1	0	$\pi/2$
۲	q_2	0	a_2	0
۳	q_3	0	a_3	0

جدول ۳-۲ - پارامترهای دینامیکی بازوی ماهر هنرمند [۴۱]

رابط	DH	x_i	y_i	z_i	m_i	I_{xxi}	I_{yyi}	I_{zzi}	I_{yzi}	I_{xzi}	I_{yzi}
۱	$d_1 = 0.280$	0	-0.22	0	19	0.34	0.36	0.31	0	0	0
۲	$a_2 = 0.760$	-0.51	0	0	18.18	0.18	1.32	1.31	0	0	0
۳	$a_3 = 0.930$	-0.67	0	0	10.99	0.07	0.92	0.93	0	0	0

جدول ۳-۳ - پارامترهای موتور الکتریکی DC بازوی ماهر هنرمند [۴۱]

شماره موتور	$v_{\max}$	R	K_b	L	J	B	r	k
۳، ۲، ۱	40	1.6	0.26	0.001	0.0002	0.001	0.02	500

این بازوی ماهر در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. مسیر مرجع برای زوایای مفاصل را به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۴]:

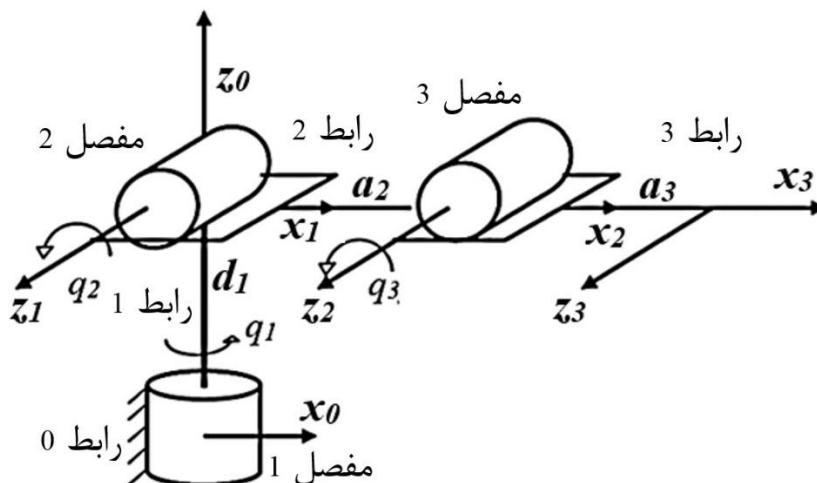
$$q_d = 1 - \cos(0.1\pi t) \quad (3-39)$$

برای هر کدام از مفاصل ربات یک رویکرد حالت توسعه یافته‌ی خطی از مرتبه‌ی ۲ به صورت رابطه‌ی (۳-۲۰) و یک قانون کنترل به صورت (۳-۲۲) در نظر می‌گیریم. برای مفصل i ام، متغیرهای تخمینی به ترتیب به صورت Z_{i1} و Z_{i2} تعریف می‌شوند. مقادیر پارامترهای رویکرد حالت توسعه یافته‌ی خطی و کنترل‌کننده به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\omega_{o1} = 20, \omega_{o2} = 21, \omega_{o3} = 30, K_{1p} = 20, K_{2p} = 30, K_{3p} = 30 \quad (3-40)$$

در این بخش ردیابی سیستم کنترل حلقه بسته را در سه حالت بدون اغتشاش، در حضور اغتشاش و با در نظر گرفتن یک مسیر مرجع با سرعت بالاتر مورد بررسی قرار می‌دهیم.

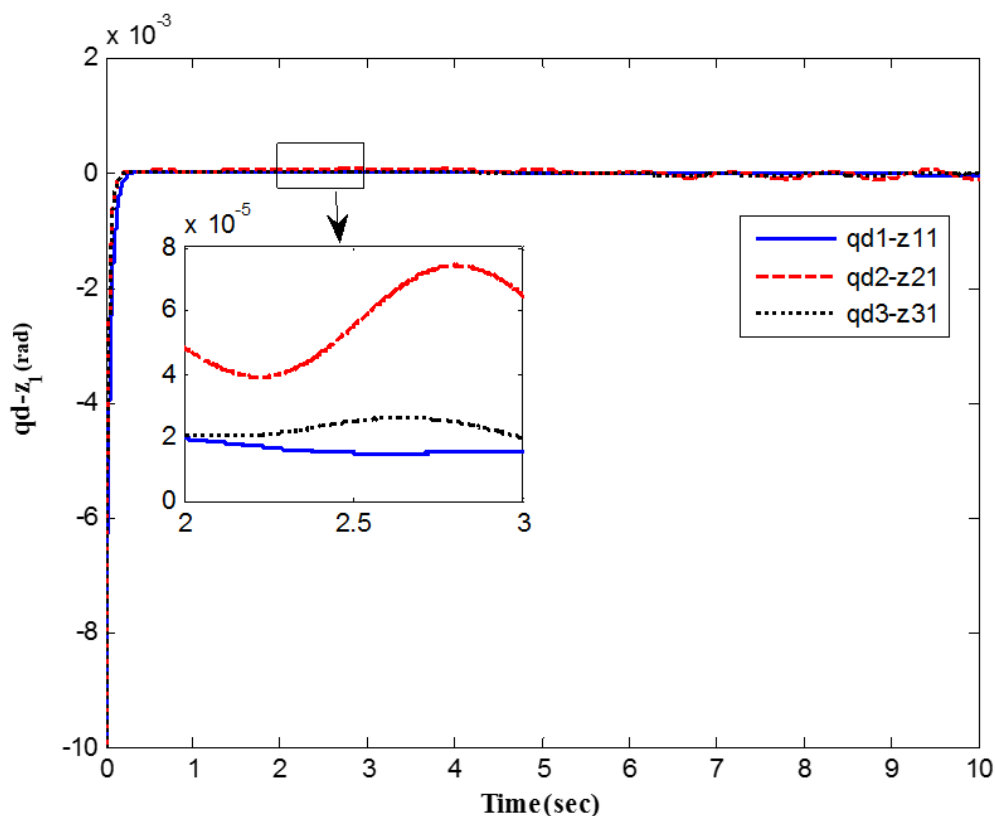
حالت اول - در این حالت وضعیت کاری سیستم را بدون حضور اغتشاش بررسی می‌کنیم. در شکل ۲-۳ خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیر تخمین برای هر کدام از مفاصل نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که این خطا مطابق انتظار محدود است و مفهوم آن این است که متغیرهای تخمینی توسط رویکرد حالت توسعه یافته‌ی خطی قادرند مسیرهای مرجع را دنبال کنند. در شکل ۳-۳ خطای ردیابی متغیرهای مفصلی ربات نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر خطا برای مفاصل



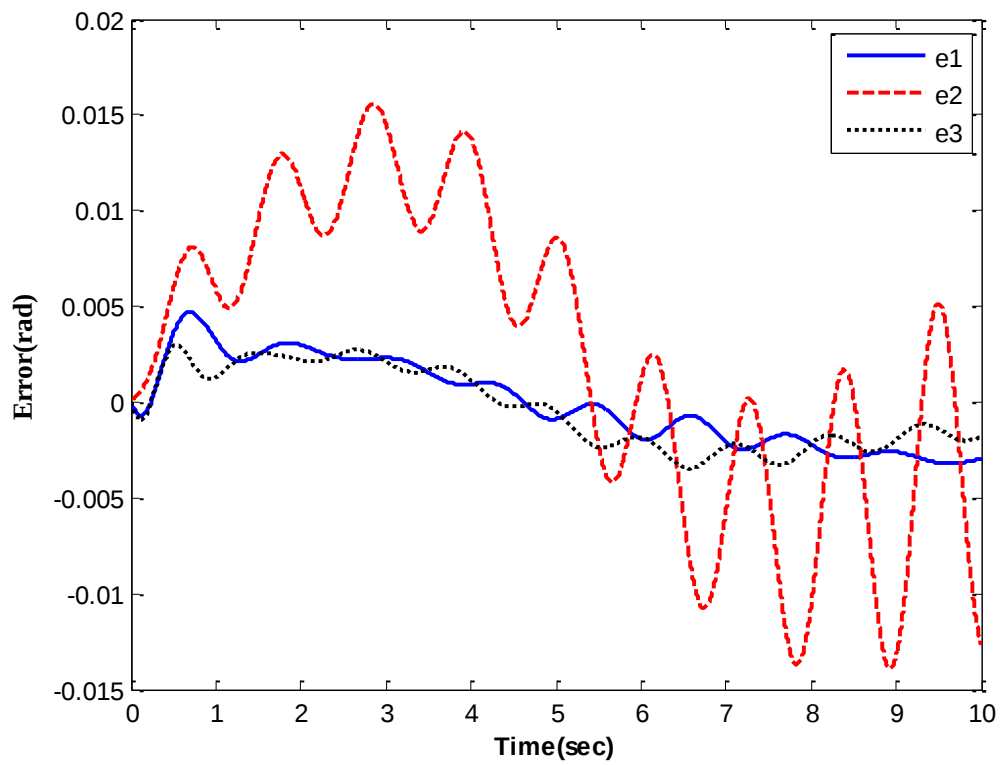
شکل ۱-۳: نمایش نمادین بازوی ماهر هنرمند

مختلف بازوی ماهر محدود است. با توجه به اینکه از مقادیر ثابت به عنوان بهره‌های روی‌تگر استفاده شده است، خطای ردیابی به صورت نوسانی است. با این وجود مقدار خطا برای مفاصل ۱ و ۳ در محدوده‌ی قابل قبولی قرار دارد. اگر چه خطای ردیابی مفصل ۲ بیشتر از دو مفصل دیگر است، اما این مقدار در بدترین حالت خود کمتر از ۱ درجه (۰٫۸۶ درجه) است. در شکل ۳-۴ متغیر مفصلی سوم به عنوان نمونه نشان داده شده است. در شکل ۳-۵ سیگنال کنترل، که ولتاژ اعمالی به موتورها است نشان داده شده است. ولتاژ اعمال شده به موتورها پایین تر از مقدار اشباع بوده و هموار است.

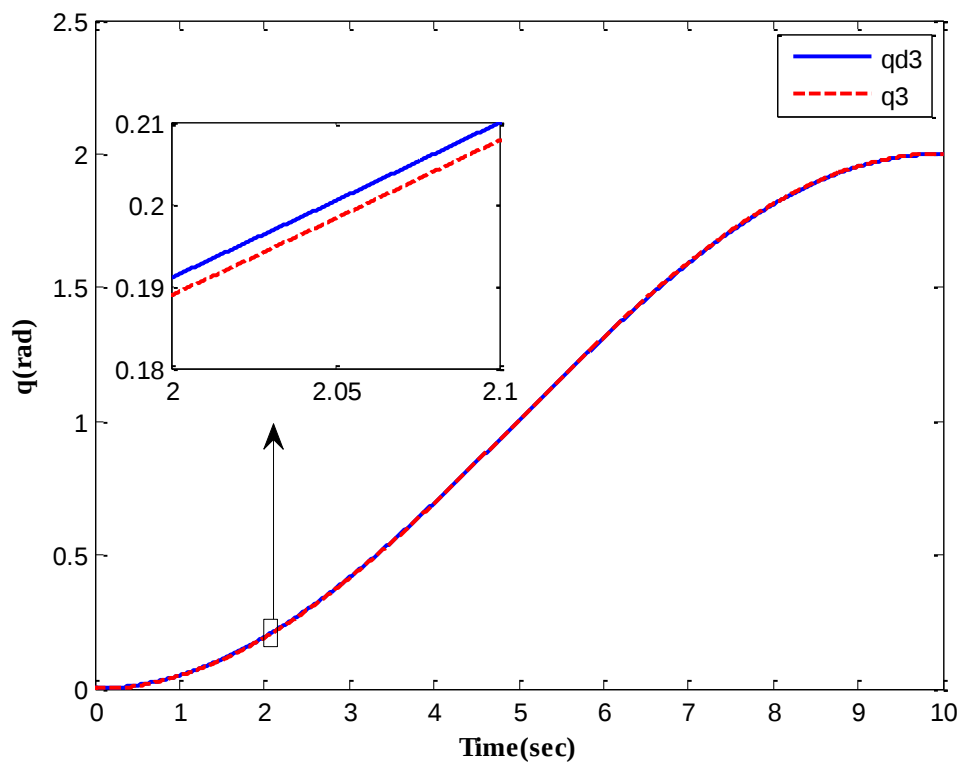
حالت دوم - در این حالت یک گشتاور اغتشاشی پالسی به مفصل سوم ربات اعمال می‌شود. در واقع مشابه با اتفاقاتی که در محیط کار واقعی بازوی ماهر ممکن است بیافتد، گشتاور اغتشاشی به مجری نهایی ربات اعمال شده است. گشتاور اغتشاشی اعمال شده در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این حالت هیچ کدام از پارامترهای روی‌تگر و کنترل‌کننده نسبت به شبیه‌سازی اول تغییر نمی‌کنند.



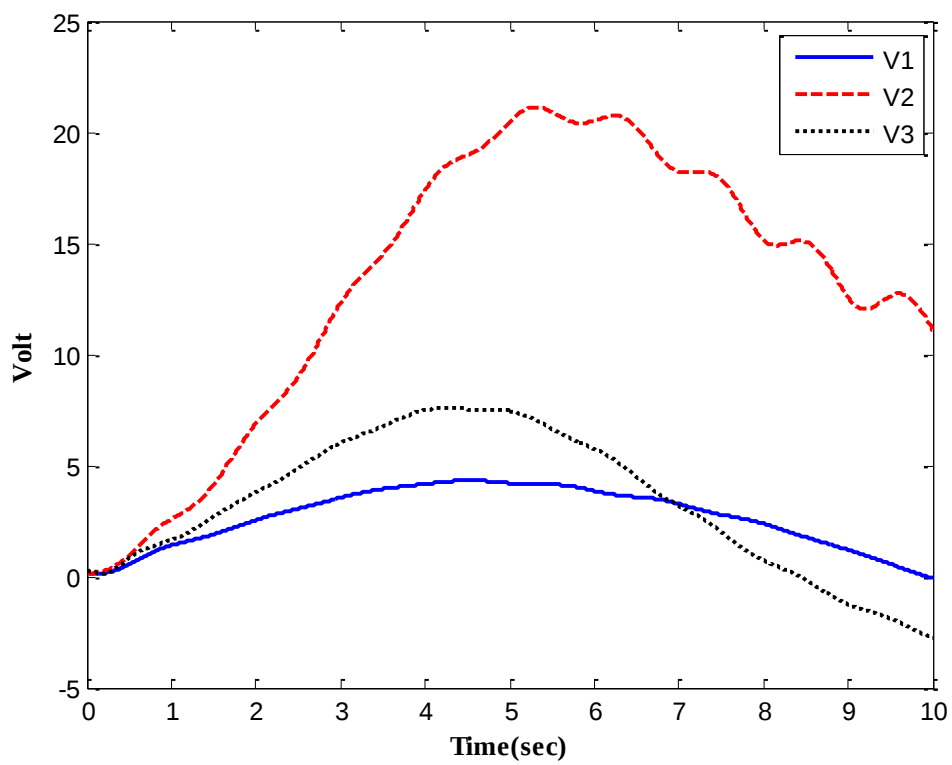
شکل ۳-۲: خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - z_{i1})$ در حالت بدون اغتشاش



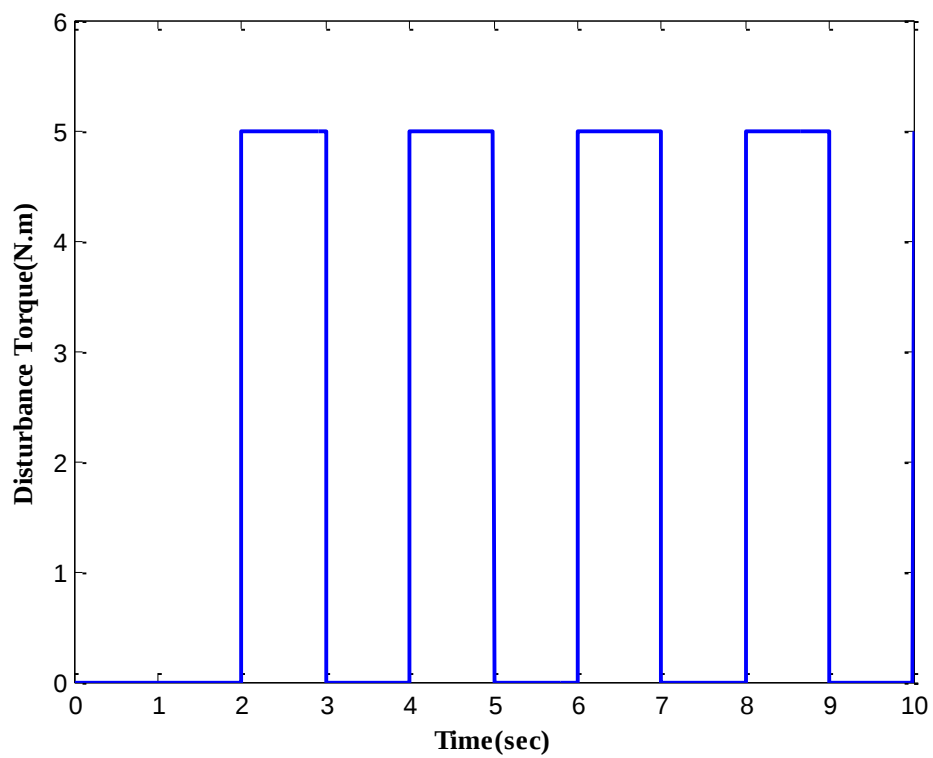
شکل ۳-۳: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در حالت بدون اغتشاش



شکل ۳-۴: متغیر مفصلی سوم در حالت بدون اغتشاش



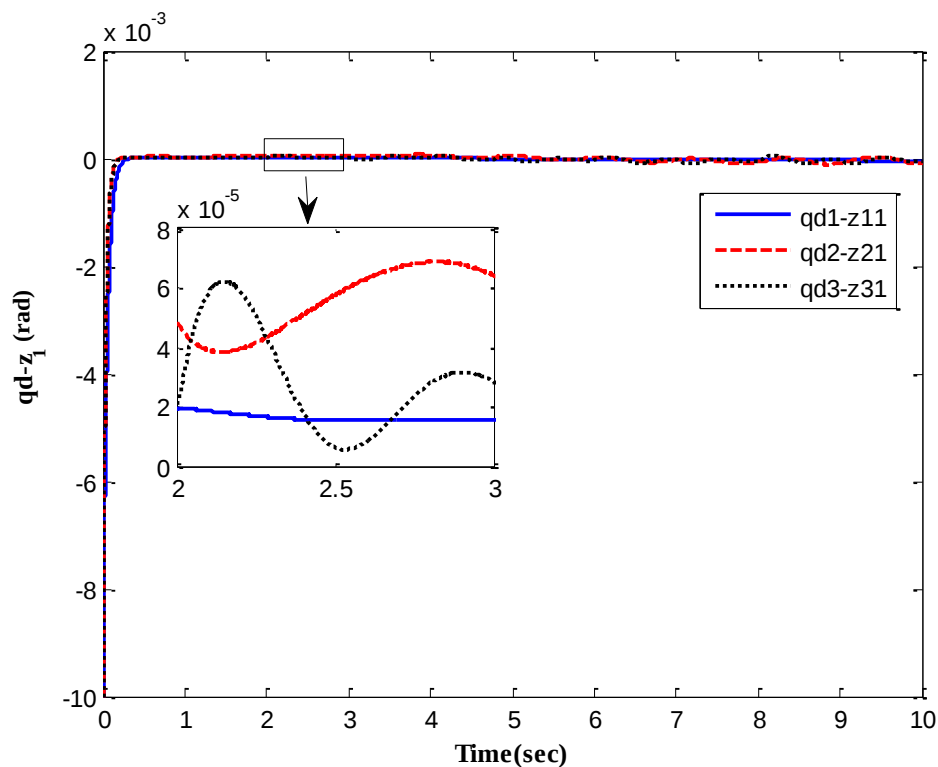
شکل ۳-۵: ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال های کنترل) در حالت بدون اغتشاش



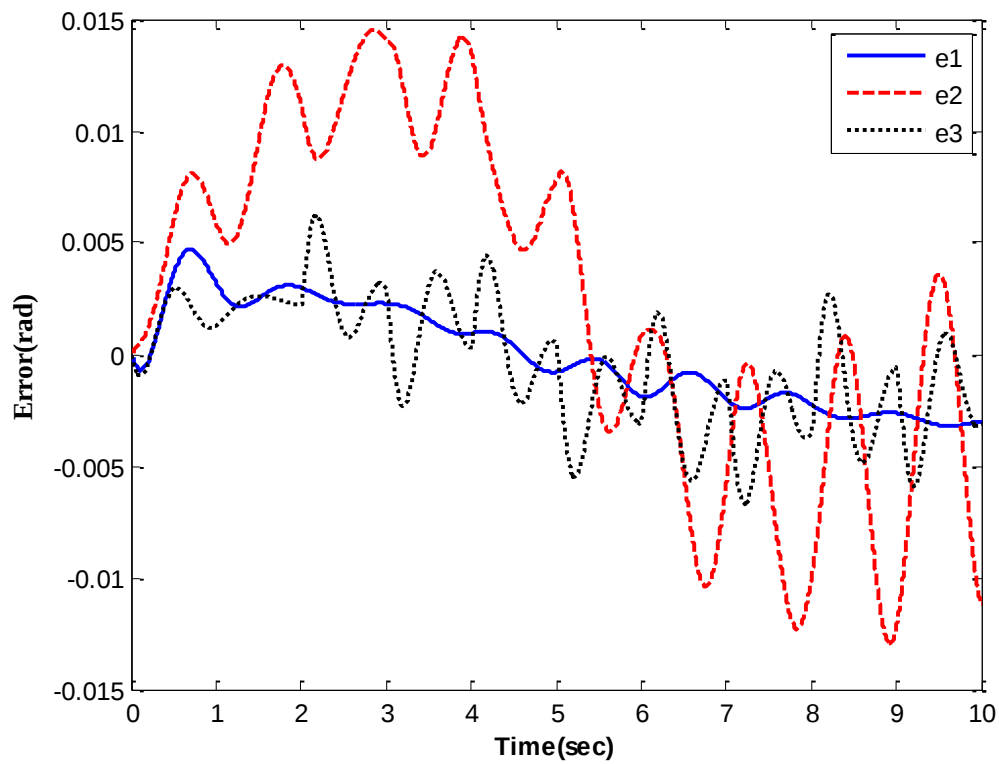
شکل ۳-۶: گشتاور اغتشاشی وارد بر مفصل سوم بازوی ماهر هنرمند

در شکل ۳-۷ خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیر تخمین برای هر کدام از مفاصل در این حالت نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که این خطا برای مفصل سوم تغییر ملموس‌تری دارد. با این حال خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیر تخمین محدود است.

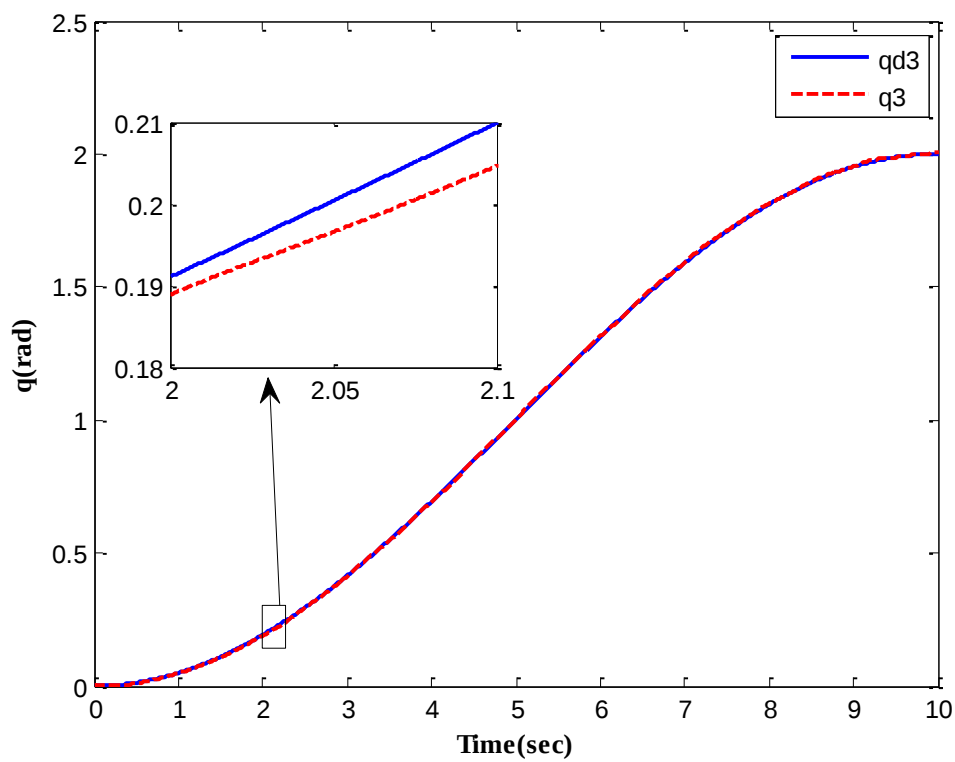
در شکل ۳-۸ خطای ردیابی متغیرهای مفصلی نشان داده شده است. با وجود یه مقدار اغتشاشی بزرگ، باز هم مقادیر خطا محدود و در بازه‌ی قابل قبول هستند و بازوی ماهر می‌تواند در حضور این اغتشاش عملکرد ردیابی مناسبی داشته باشد. ملاحظه می‌شود با توجه به اینکه کنترل هر کدام از مفاصل به صورت مستقل انجام می‌شود، اغتشاش اعمال شده بر مفصل سوم تاثیر مشهودی بر ردیابی مفاصل اول و دوم ندارد. کنترل‌کننده با کمک رویکرد سعی در برطرف کردن اثر اغتشاش اعمال شده دارد. اما به هر حال به دلیل ضعف ناشی از ساختار خطی رویکرد، خطا همچنان نوسانی است. متغیر مفصلی سوم بازوی ماهر در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. در شکل ۳-۱۰ سیگنال کنترل اعمالی به موتورهای نشان داده شده است. ولتاژها همگی زیر مقدار اشباع و هموار هستند. ملاحظه می‌شود که پس از اعمال اغتشاش، سیگنال کنترل خود را به خوبی برای دفع آن هماهنگ می‌کند.



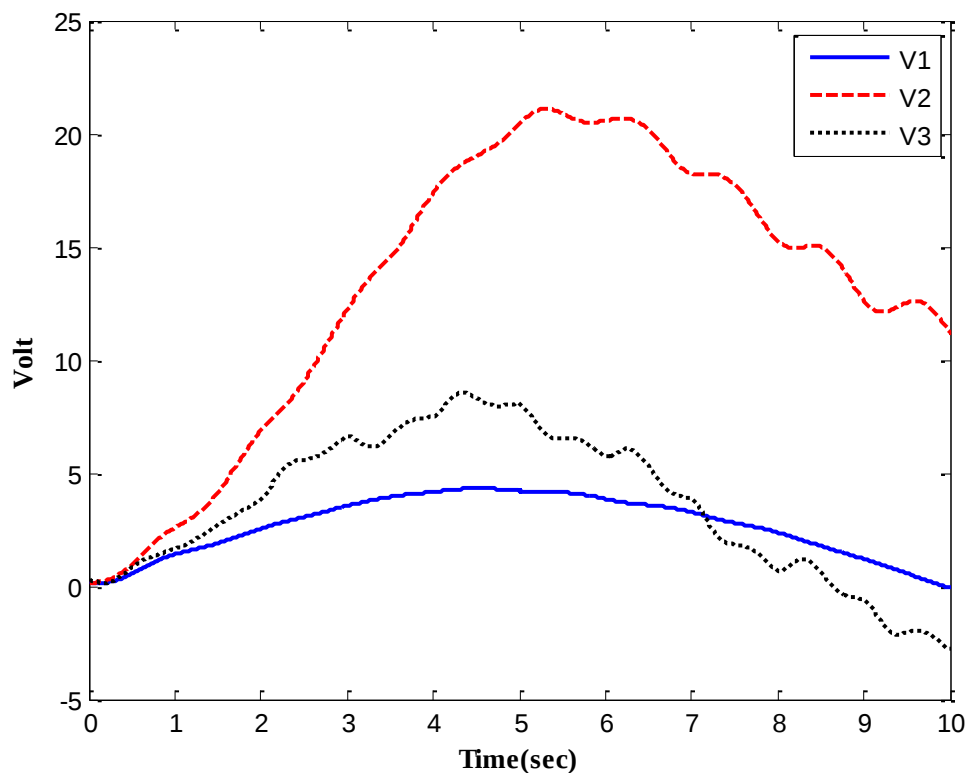
شکل ۳-۷: خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - z_{i1})$ در حضور اغتشاش



شکل ۳-۸: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در حضور اغتشاش



شکل ۳-۹: متغیر مفصلی سوم در حضور اغتشاش

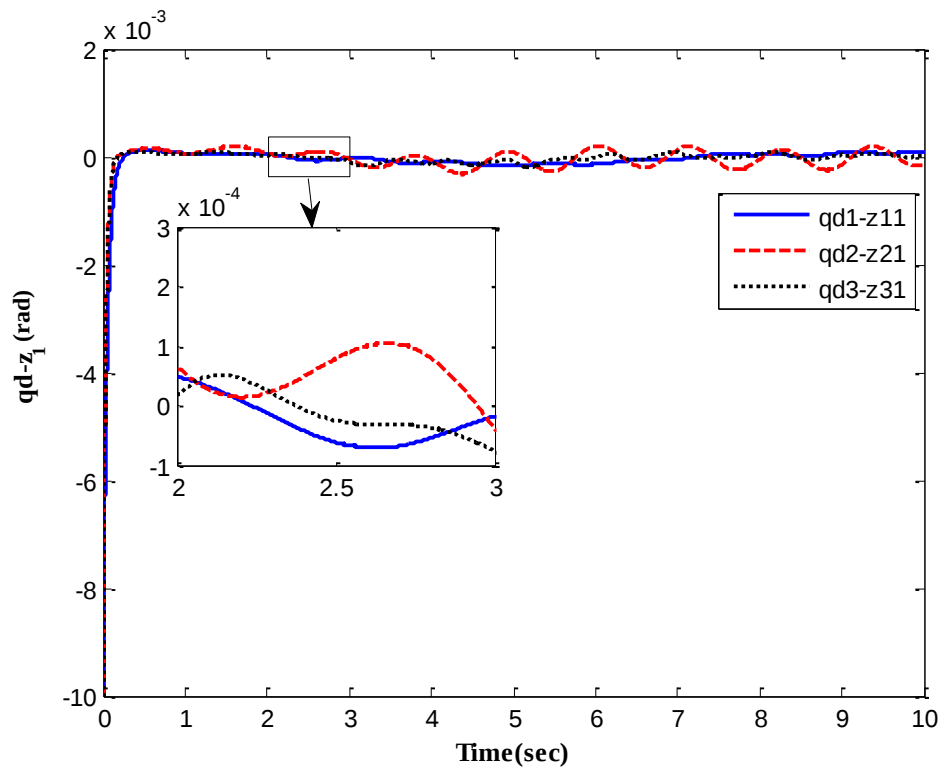


شکل ۳-۱۰: ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال های کنترل) در حضور اغتشاش

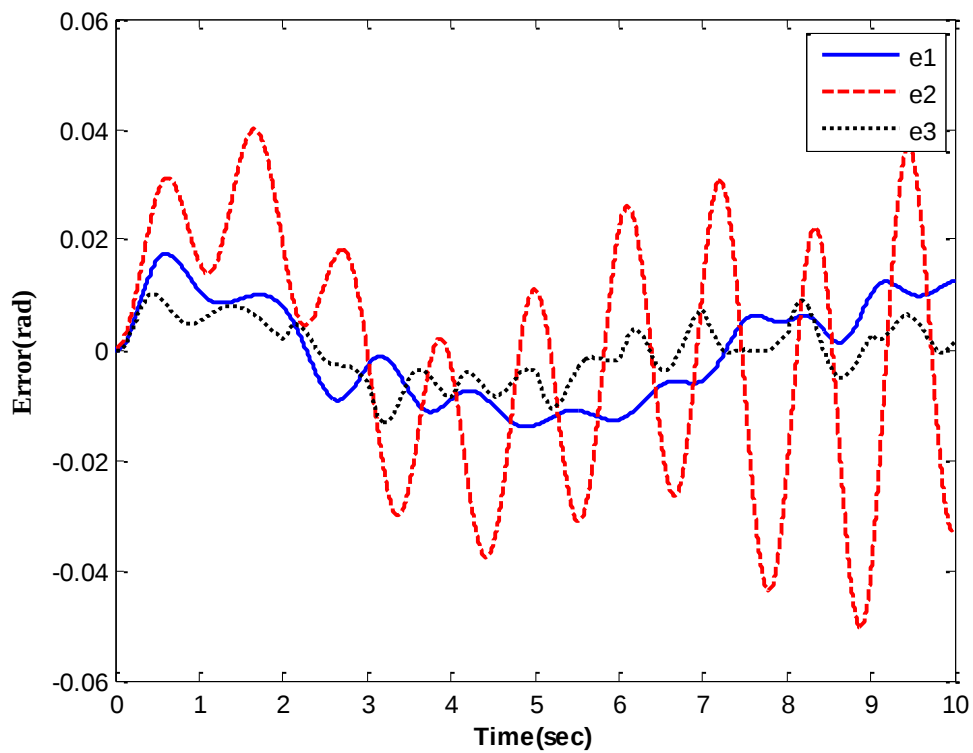
حالت سوم - در این حالت قصد داریم تاثیر افزایش سرعت حرکت ربات بر عملکرد سیستم کنترل طراحی شده را بررسی کنیم. برای این منظور فرکانس مسیر مرجع را دو برابر می کنیم. یعنی مسیر مرجع را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$q_d = 1 - \cos(0.2\pi t) \quad (3-41)$$

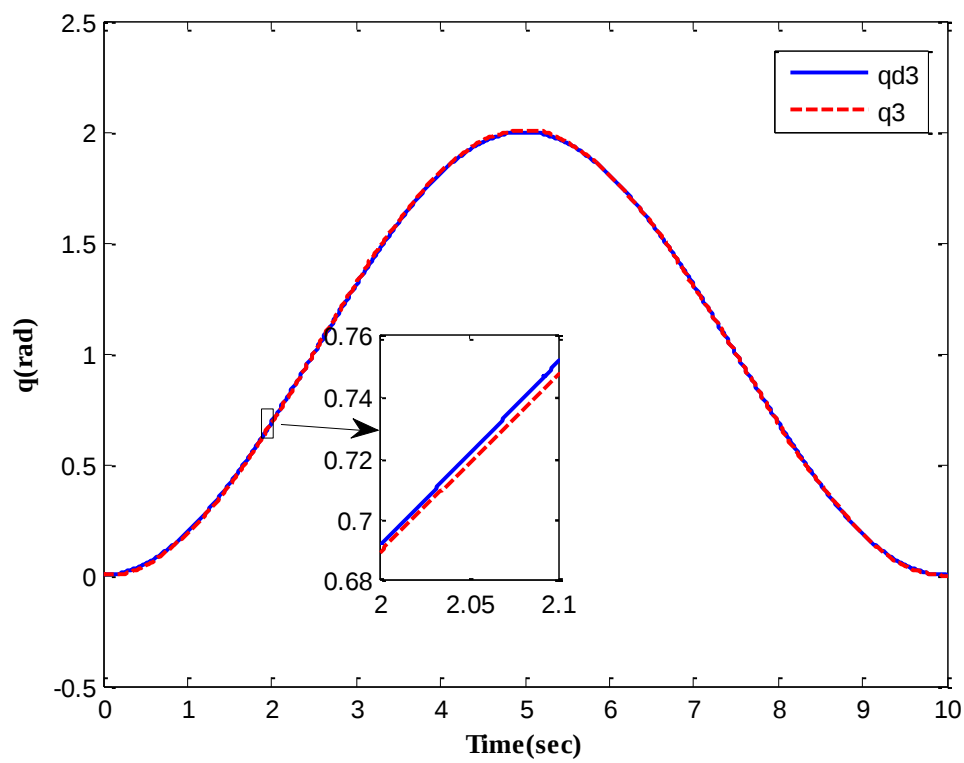
لازم به ذکر است که در این حالت سیگنال اغتشاش نیز به بازوی سیستم اعمال می شود. شکل ۳-۱۱ خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیر تخمین را در این حالت نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود، افزایش سرعت تاثیر منفی بر عملکرد سیستم کنترل دارد. شکل های ۳-۱۲، ۳-۱۳ و ۳-۱۴ به ترتیب خطای ردیابی متغیرهای مفصلی، متغیر مفصلی سوم و سیگنال های کنترل هر کدام از مفاصل را در این حالت نشان می دهد. ملاحظه می شود که خطای تخمین و خطای ردیابی در اثر افزایش سرعت، افزایش می یابند. همچنین دامنه نوسانات سیگنال کنترل به منظور کنترل سیستم افزایش یافته است.



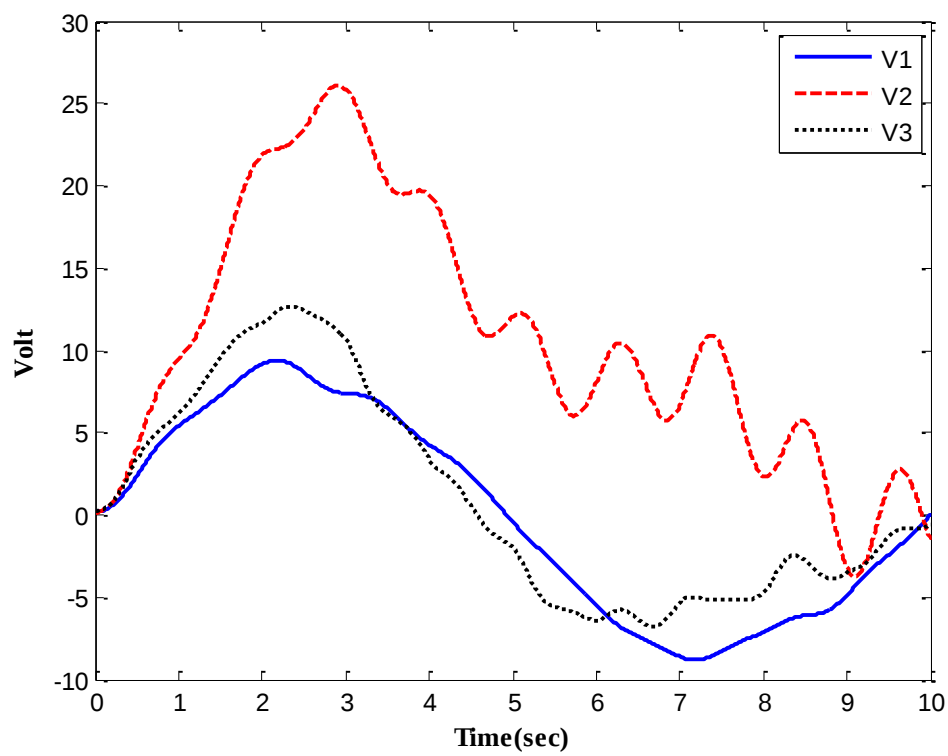
شکل ۳-۱۱: خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - z_{i1})$ در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر



شکل ۳-۱۲: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر



شکل ۳-۱۳: متغیر مفصلی سوم در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر



شکل ۳-۱۴: ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال های کنترل) در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر

۳-۶ تعیین پارامترهای رویتر حالت توسعه یافته‌ی خطی و کنترل

کننده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۲۵}

یکی از مهمترین چالش‌ها در استفاده از رویتر توسعه یافته‌ی خطی، تعیین پهنای باند رویتر ω_0 برای هر مفصل و همچنین تعیین بهترین ضریب K_p برای کنترل‌کننده است که به صورت تجربی و با سعی و خطا انجام می‌شود. در این بخش به منظور تعیین یک رویه‌ی مشخص به منظور انتخاب بهترین مقادیر برای این پارامترها، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده می‌شود.

یکی از الگوریتم‌های موثر بهینه‌سازی، الگوریتم ازدحام ذرات است. از ویژگی‌های مهم این الگوریتم، قابلیت بهینه‌سازی چند بعدی است. روند کار در این الگوریتم به این صورت است که ابتدا یک نسل اولیه از ذره‌ها به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. هر ذره یک مجموعه از پارامترهایی است که باید بهینه شوند. در ادامه، الگوریتم برای رسیدن به بهترین پاسخ نسل را بروزرسانی می‌کند. در این الگوریتم هر کدام از ذره‌ها با توجه به بهترین تجربه شخصی خود و بهترین تجربه‌ی همه‌ی نسل، بروزرسانی می‌شوند. بنابراین ذره‌ها به سمت رسیدن به بهترین پاسخ حرکت می‌کنند. ملاک بررسی عملکرد هر کدام از ذرات، تابع هزینه‌ای است که خواسته‌های مسئله‌ی بهینه‌سازی را در خود جای داده است.

در یک فضای جستجوی n بعدی، موقعیت و سرعت i امین ذره در هر نسل، به ترتیب به صورت $S^i = (s_1^i, s_2^i, \dots, s_n^i)$ و $H^i = (h_1^i, h_2^i, \dots, h_n^i)$ نشان داده می‌شوند. اگر برای ذره‌ی i ام، بهترین موقعیت شخصی‌اش از نظر هزینه را با P^i نمایش داده و موقعیت بهترین ذره در میان نسل نیز با P^g مشخص شود، آنگاه سرعت هر ذره به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{t+1}^i = \omega_t S_t^i + c_1 r_1 (P_t^i - H_t^i) + c_2 r_2 (P_t^g - H_t^i) + c_3 r_3 (R_t^i - H_t^i) \quad (۴۲-۳)$$

که در آن t شمارنده‌ی نسل، ω بیانگر وزن اینرسی، c_1 و c_2 ضرایب یادگیری، c_3 ضریب جمعیتی، R_t^i یک ذره که به صورت تصادفی از میان نسل انتخاب شده است و r_1, r_2 و r_3 نیز اعداد تصادفی

²⁵ Particle Swarm Optimization (PSO)

هستند که از بازه $[0, 1]$ انتخاب می‌شوند. موقعیت فعلی ذره با H_t^i نشان داده شده و S_{t+1}^i سرعت جدید ذره در جمعیت $t + 1$ ام است.

موقعیت جدید ذره با افزودن سرعت S_{t+1}^i به موقعیت فعلی ذره بدست می‌آید. یعنی:

$$H_{t+1}^i = H_t^i + S_{t+1}^i \quad (43-3)$$

البته مقدار موقعیت جدید ذره در صورتی قابل قبول است که در فضای جستجوی قابل قبول قرار داشته باشد.

با بدست آمدن موقعیت جدید ذره t ام، هزینه آن با استفاده از تابع هزینه برآورد می‌شود و در صورتی که این مقدار بهتر از مقدار هزینه P^i باشد، موقعیت جدید جایگزین P^i خواهد شد. یعنی:

$$P_{t+1}^i = \begin{cases} P_t^i & \text{if } f(H_{t+1}^i) \geq f(H_t^i) \\ H_{t+1}^i & \text{if } f(H_{t+1}^i) < f(H_t^i) \end{cases} \quad (44-3)$$

که در آن، $f(.)$ تابع هزینه است. مقدار P^g نیز با یافتن بهترین ذره نسل جدید از نظر هزینه و مقایسه آن با مقدار فعلی P^g بروزرسانی می‌شود.

توجه شود که هر چه مقدار ω بزرگتر باشد، محدوده جستجو بزرگتر و هر چه کوچکتر باشد ناحیه جستجو نیز کوچکتر خواهد بود. برای این منظور در شروع به کار الگوریتم، به منظور داشتن یک جستجوی کلی تر مقدار ω بزرگ در نظر گرفته می‌شود، در حالیکه رفته رفته و با رسیدن به انتهای الگوریتم و نزدیک شدن به محدوده پاسخ بهینه، این مقدار کوچکتر می‌شود. اگر بزرگترین مقدار انتخابی برای ضریب اینرسی را ω_{max} و کوچکترین مقدار آن را ω_{min} بنامیم، خواهیم داشت:

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{t_{max}} t \quad (45-3)$$

که در آن t_{max} بیانگر بیشترین مقدار تکرار الگوریتم است.

به عنوان معیار توقف الگوریتم می‌توان از بیشترین مقدار تکرار یعنی t_{max} و یا معیاری دیگر مثل حداقل هزینه مطلوب استفاده کرد.

در این بخش برای بدست آوردن پارامترهای رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، پارامترها را به عنوان ویژگی‌های هر ذره در نظر می‌گیریم. به عبارت دیگر برای یک بازوی ماهر با n رابط، هر ذره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H = (\omega_{o1}, \omega_{o2}, \dots, \omega_{on}, K_{1p}, \dots, K_{np}) \quad (46-3)$$

تابع هزینه نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \sum_{k=1}^n \|E_k\| \quad (47-3)$$

که در آن، E_k بردار خطای ردیابی هر کدام از مفاصل بازوی ماهر است. نکته‌ای که در اینجا لازم است به آن توجه شود این است که به منظور پیاده سازی الگوریتم بهینه‌سازی سیستم باید تکرارپذیر باشد. در نتیجه فرآیند یافتن پارامترها بوسیله الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر روی مدل نامی بازوی ماهر و در شرایطی که هیچ اغتشاشی بر آن وارد نمی‌شود، پیاده‌سازی می‌شود. در نتیجه شرط تکرارپذیر بودن سیستم برقرار است. بدیهی است با توجه به ویژگی‌هایی که برای مکانیزم کنترلی پیشنهاد شده در این فصل ارائه شد، سیستم کنترلی که با استفاده از این پارامترها پیاده سازی می‌شود قادر خواهد بود بازوی ماهر را در حضور اغتشاشات نیز کنترل نماید.

۱-۶-۳ شبیه سازی

در این قسمت، از روش کنترل پیشنهادی در ابتدای فصل برای کنترل یک بازوی ماهر دورابطی استفاده می‌کنیم. پارامترهای رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی از طریق بهینه سازی به روش الگوریتم ازدحام ذرات تعیین می‌شوند. جزئیات دینامیکی ربات دورابطی مورد نظر به صورت زیر است [۶۰]:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (48-3)$$

$$D(q) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}, \quad C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}, \quad G(q) = \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \end{bmatrix} \quad (49-3)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}
D_{11} &= m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_1 + I_2 \\
D_{12} &= D_{21} = m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_2 \\
D_{22} &= m_2 l_{c2}^2 + I_2 \\
C_{11} &= -m_2 l_1 l_{c2} \dot{q}_2 \sin(q_2) \\
C_{12} &= -m_2 l_1 l_{c2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_2) \\
C_{21} &= m_2 l_1 l_{c2} \dot{q}_1 \sin(q_2) \\
C_{22} &= m_2 l_1 l_{c2} \dot{q}_1 \sin(q_2) \\
G_{11} &= (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos(q_1) + m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2) \\
G_{21} &= m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2)
\end{aligned} \tag{۵۰-۳}$$

در روابط فوق $i = 1, 2$ q_i معرف زاویه مفصلی، l_i طول رابط، m_i جرم رابط، I_i ممان اینرسی رابط داده شده در مرکز جرم و l_{ci} فاصله بین مرکز جرم رابط و مفصل i ام است. مقادیر پارامترهای ربات در جدول ۳-۴ آمده است. همچنین مقادیر پارامترهای هر کدام از موتورهای جریان مستقیم متصل به مفاصل در جدول ۳-۵ آمده است. لازم به ذکر است که حداکثر ولتاژ قابل اعمال به این موتورها نیز $|v_{\max}| = 40 \text{ V}$ است.

مسیر مرجع برای زوایای مفاصل به شکل رابطه (۳-۳۸) در نظر گرفته می شود. برای هر کدام از مفاصل ربات یک رویکرد حالت توسعه یافته خطی مرتبه ۲ به شکل رابطه (۳-۲۰) و یک قانون کنترل به صورت (۳-۲۲) در نظر می گیریم.

بنابراین هر ذره در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات به صورت زیر خواهد بود:

$$H = (\omega_{o1}, \omega_{o2}, K_{1p}, K_{2p}) \tag{۵۱-۳}$$

در شبیه سازی انجام شده، تعداد ذرات هر نسل برابر با ۲۵ ذره در نظر گرفته شده و سایر پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات نیز به صورت زیر هستند:

$$c_1 = c_2 = 1.49, c_3 = 0.6, \omega_{\max} = 0.7, \omega_{\min} = 0.4 \tag{۵۲-۳}$$

جدول ۳-۴ - پارامترهای ربات دورابطی [۶۰]

شماره رابط	l (m)	l_c (m)	m (kg)	I kg.m ²
۱	1	0.5	15	5
۲	1	0.5	6	2

جدول ۳-۵ - پارامترهای موتور الکتریکی DC ربات دو رابطی [۶۰]

شماره موتور	v_{max}	R	K	J	B	$1/r$
۱	40	1.6	0.26	0.0002	0.000817	107.8200
۲	40	1.6	0.26	0.0002	0.00138	53.7063

هرچند محدودیت خاصی برای مقادیر ω_o و K_p وجود ندارد، اما در اینجا برای جلوگیری از بزرگ شدن این بهره‌ها و تاثیر مقادیر بزرگ آنها بر نتیجه نهایی، این دو مقدار به صورت زیر محدود شده‌اند:

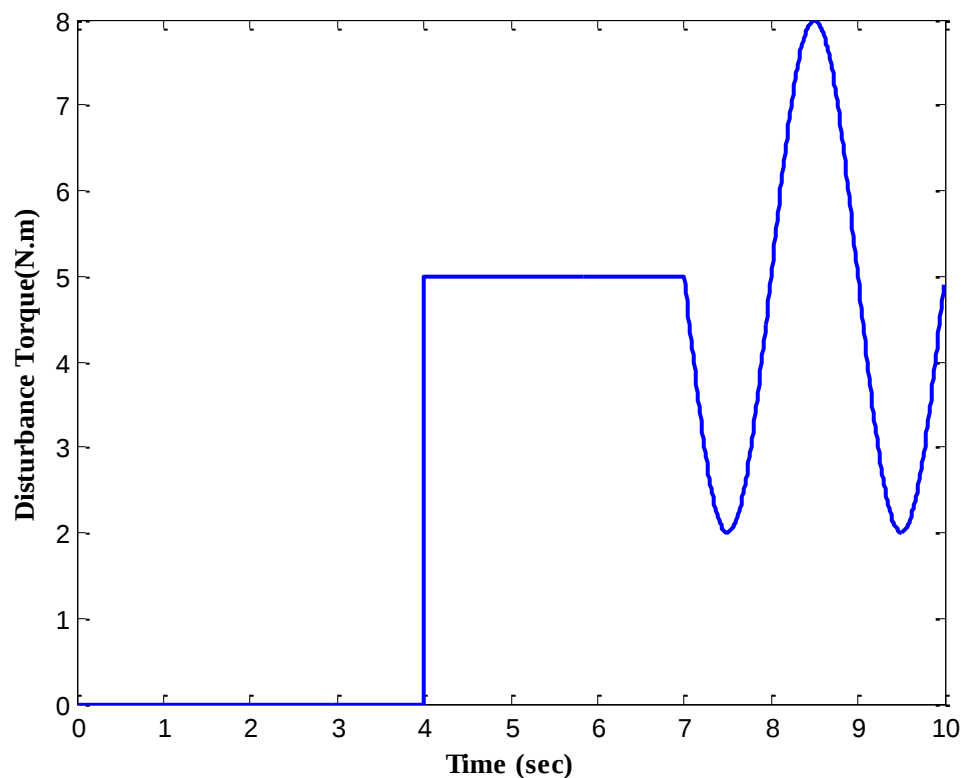
$$c_1 = c_2 = 1.49, c_3 = 0.6, \omega_{max} = 0.7, \omega_{min} = 0.4 \quad (۳-۵۳)$$

مقادیر بدست آمده برای پارامترهای رویتر حالت توسعه یافته‌ی خطی و کنترل کننده پس از ۱۰۰۰ بار تکرار الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در جدول ۳-۶ نشان داده شده‌اند.

در بخش اول شبیه سازی که تا ثانیه چهارم ادامه دارد، هیچ گونه اغتشاشی به ربات اعمال نمی شود. از ثانیه چهارم تا ثانیه هفتم، یک اغتشاش ثابت به اندازه ۵ نیوتن - متر به مفصل دوم وارد می‌شود. در نهایت از ثانیه هفتم تا انتهای شبیه سازی یک اغتشاش متناوب به اندازه $5 + 3 \sin(\pi t)$ نیوتن-متر به مفصل دوم اعمال می‌شود. گشتاور اغتشاشی اعمال شده در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۳-۶ - پارامترهای بدست آمده توسط روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات

پارامترها	ω_{o1}	ω_{o2}	K_{p1}	K_{p2}
نتیجه PSO	27.5184	36.4880	33.9300	42.2614

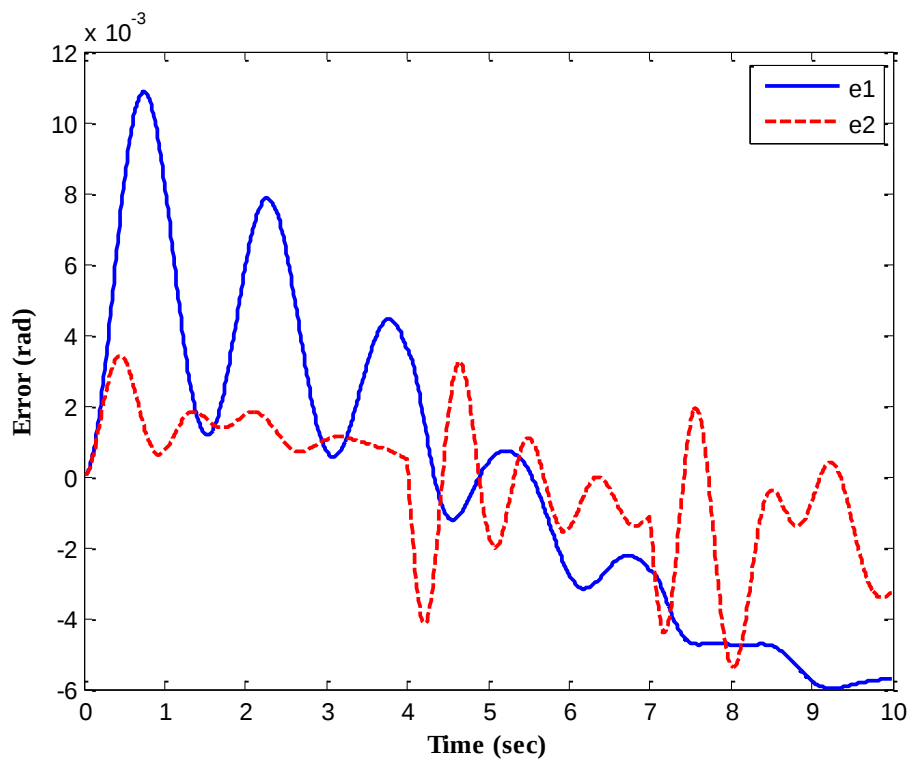


شکل ۳-۱۵: گشتاور اغتشاشی وارد بر مفصل دوم ربات دورابطی

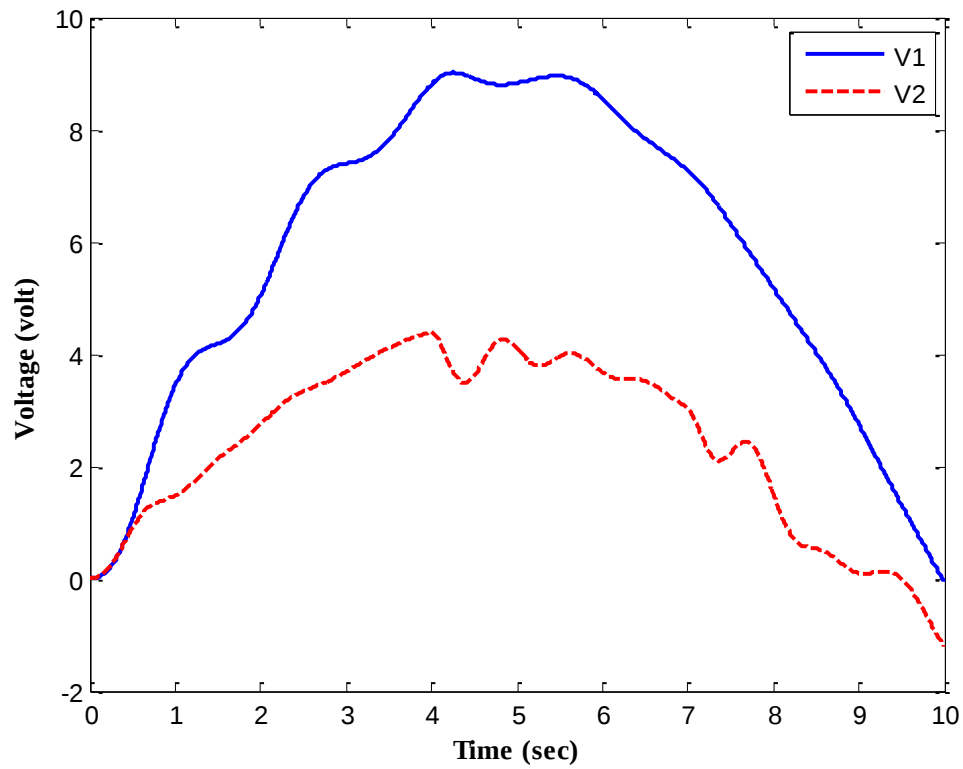
خطای ردیابی متغیرهای مفصلی ربات در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر خطا در بازه قابل قبول قرار دارند و اثرات گشتاور اغتشاشی نیز توسط سیستم کنترل دفع شده است.

در شکل ۳-۱۷ سیگنال‌های کنترل تولید شده توسط کنترل‌کننده، که در واقع همان ولتاژ اعمالی به مفاصل است نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، ولتاژ موتورهای هموار و بدون نوسان-های شدید و ناگهانی است. همچنین با توجه به ولتاژ موتور دوم ملاحظه می‌شود که سیستم کنترل برای دفع اثر اغتشاشات به خوبی سیگنال کنترل مناسب را تولید کرده است.

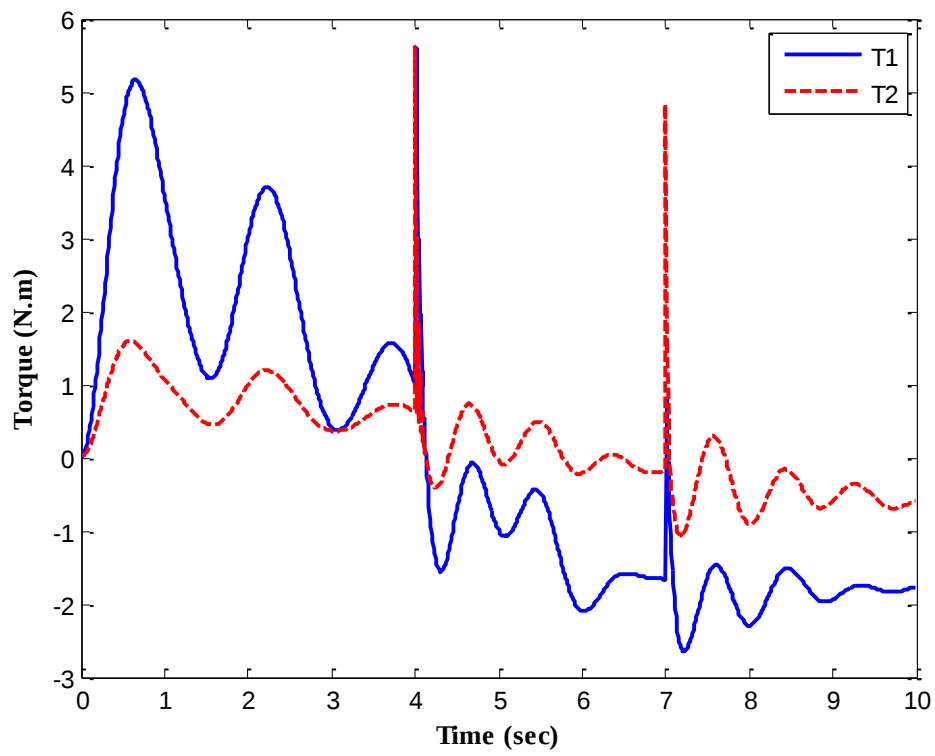
شکل ۳-۱۸ گشتاورهای اعمالی به مفاصل ربات را نشان می‌دهد. اثر گشتاور اغتشاشی در ثانیه های ۴ ام و ۷ ام شبیه سازی بر روی هر دو مفصل به خوبی مشهود است. اما همانطور که ملاحظه می‌شود، این اثرات نامطلوب به سرعت توسط سیستم کنترل دفع شده است. شکل ۳-۱۹ عملکرد متغیر مفصلی دوم را نشان می‌دهد.



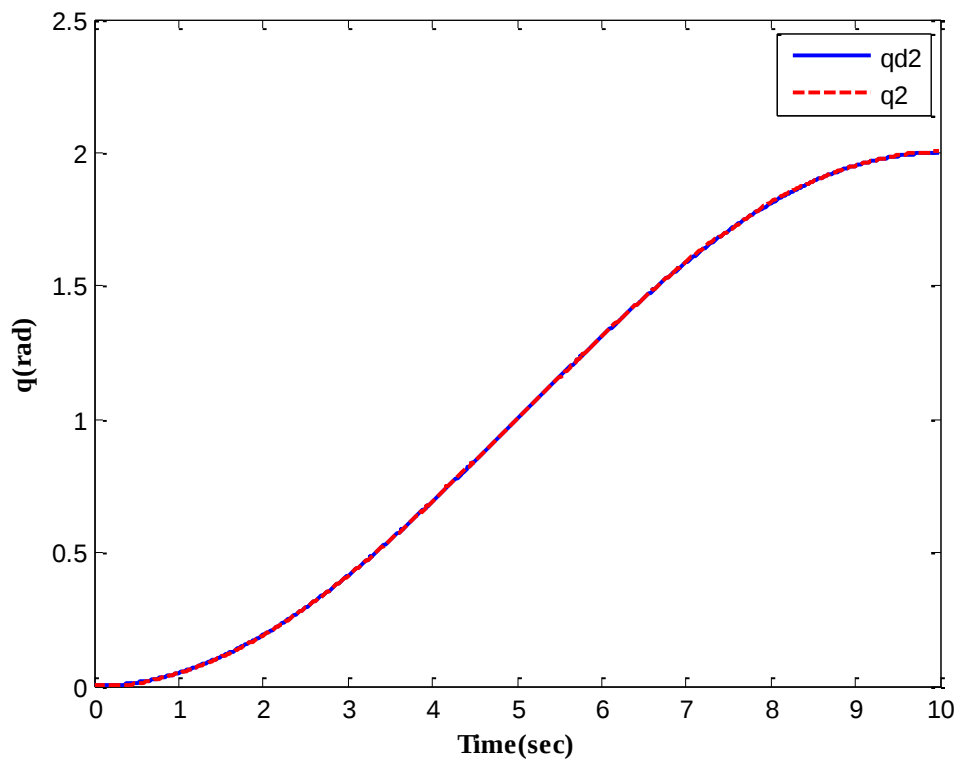
شکل ۳-۱۶: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی ربات دورابطی



شکل ۳-۱۷: ولتاژ اعمالی به موتورهای مفاصل ربات دورابطی



شکل ۳-۱۸: گشتاور اعمالی به مفاصل ربات دو رابطی



شکل ۳-۱۹: متغیر مفصلی دوم ربات دو رابطی

۷-۳ نتیجه گیری

در این فصل برای کنترل بازوی ماهر رباتیک از یک روش کنترل مستقل از مدل استفاده شده است. اساس این روش استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ و تخمین اغتشاشات وارد بر موتورهای مفاصل با استفاده از رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی است. پس از تخمین اغتشاشات، فرآیند ردیابی مسیر مرجع، با استفاده از کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی انجام می‌شود. در این فصل در دو گام اثبات شده است که خطای ردیابی متغیرهای مفصلی محدود است. در گام اول اثبات شده است که خطای همگرایی متغیرهای رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی به متغیرهای واقعی هر کدام از مفاصل ربات محدود است و رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی می‌تواند مقدار نامعینی‌های دینامیکی و پارامتری و همچنین اغتشاشات کلی وارد بر سیستم را تخمین بزند. در گام بعد با استفاده از یک تابع معین مثبت نشان داده شده است که متغیرهای تخمینی توسط رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی در همسایگی ورودی مرجع قرار می‌گیرند و در نتیجه خطای ردیابی محدود است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی بازوی ماهر هنرمند نشان می‌دهد که فرآیند ردیابی، هم بدون حضور اغتشاش و هم در حضور اغتشاشات به خوبی انجام می‌شود. این در حالی است که در هیچ کدام از مراحل طراحی رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی از اطلاعات پیچیده و غیرخطی دینامیک سیستم و پارامترهای موتور استفاده نشده و تنها اطلاعات مورد نیاز برای انجام فرآیند کنترل، ولتاژ اعمالی به موتورها و اندازه متغیر مفصلی در هر لحظه است، که هر دو پارامتر به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند. با این حال به دلیل ساختار خطی رویتگر خطای ردیابی نوسانی است. همچنین افزایش فرکانس مسیر مرجع ربات، تاثیر منفی بر عملکرد سیستم کنترل دارد. در فصل بعد نشان داده خواهد شد که استفاده از رویتگر توسعه یافته غیرخطی عملکرد سیستم کنترل را به میزان قابل توجهی بهبود می‌دهد.

بعلاوه در این فصل به منظور دستیابی به بهترین پارامترهای طراحی برای رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی، این پارامترها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تعیین شده‌اند. اگرچه در

فرآیند یافتن پارامترها از مدل نامی ربات استفاده می‌شود، اما از آنها برای پیاده سازی سیستم کنترل در شرایط واقعی و مقابله با اغتشاشات وارد بر سیستم استفاده می‌شود.

فصل چهارم

کنترل مستقل از مدل بازوی ماهر صنعتی

با استفاده از رویکردهای حالت توسعه یافته غیرخطی

۱-۴ مقدمه

در فصل پیش به منظور تخمین اغتشاشات کلی وارد بر بازوی ماهر از یک رویتر حالت توسعه یافته خطی استفاده شد. این رویتر حالت خاصی از رویتر حالت توسعه یافته غیرخطی است که در آن به منظور تخمین حالت‌های سیستم، به جای استفاده از مقادیر بهره‌های ثابت از توابع منتخب غیرخطی استفاده می‌شود. در این شرایط میزان اثربخشی رویتر بیشتر است و متغیرهای تخمینی دقیق‌تر خواهند بود. نتایج شبیه سازی‌های انجام شده نیز این نظر را تایید می‌کند.

در ادامه این فصل ابتدا ساختار کلی رویتر حالت توسعه یافته غیرخطی معرفی خواهد شد. پس از آن سیستم کنترل پیشنهادی به منظور کنترل موقعیت بازوی ماهر بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ با استفاده از این رویتر ارائه شده و همگرایی متغیرهای تخمین تحلیل خواهد شد. در نهایت با انجام شبیه سازی سیستم کنترل پیشنهادی بر روی بازوی ماهر هنرمند پیاده سازی شده و نتایج بررسی و با یک روش کنترل مستقل از مدل دیگر مقایسه خواهد شد.

۲-۴ ساختار کلی رویتر حالت توسعه یافته غیرخطی

همانطور که در فصل قبل عنوان شد، معادلات دینامیکی حاکم بر گروهی از سیستم‌ها را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۱-۳) در نظر گرفت و معادلات حالت را نیز به فرم (۴-۳) بازنویسی نمود.

برای سیستمی به فرم رابطه‌ی (۴-۳) رویتر حالت توسعه یافته غیرخطی از مرتبه $(n + 1)$ است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = z_2 - g_1(z_1 - x_1) \\ \vdots \\ \dot{z}_{n-1}(t) = z_n - g_{n-1}(z_1 - x_1) \\ \dot{z}_n(t) = z_{n+1} - g_n(z_1 - x_1) + bu(t) \\ \dot{z}_{n+1}(t) = -g_{n+1}(z_1 - x_1) \\ \hat{y}(t) = z_1 \end{cases} \quad (۱-۴)$$

متغیرهای حالت رویتر یعنی $z_1, \dots, z_n$ ، تخمین متغیرهای حالت سیستم یعنی $x_1, \dots, x_n$ هستند.

z_{n+1} متغیر حالت اضافی است که برای تخمین اغتشاشات کلی وارد بر سیستم تعریف شده است.

$g_i(.) (i = 1, 2, \dots, n + 1)$ ها توابع غیر خطی مناسب هستند. هان در [۱۰۵] این توابع را به صورت

زیر پیشنهاد داده است:

$$g_i(e) = \beta_i fal(e, \alpha_i, \delta_i) \quad i = 1, 2, \dots, n + 1 \quad (۲-۴)$$

که در آن $\beta_i (i = 1, 2, \dots, n + 1)$ ها بهره های رویترگر هستند و تابع $fal(.)$ به صورت زیر

تعریف می شود:

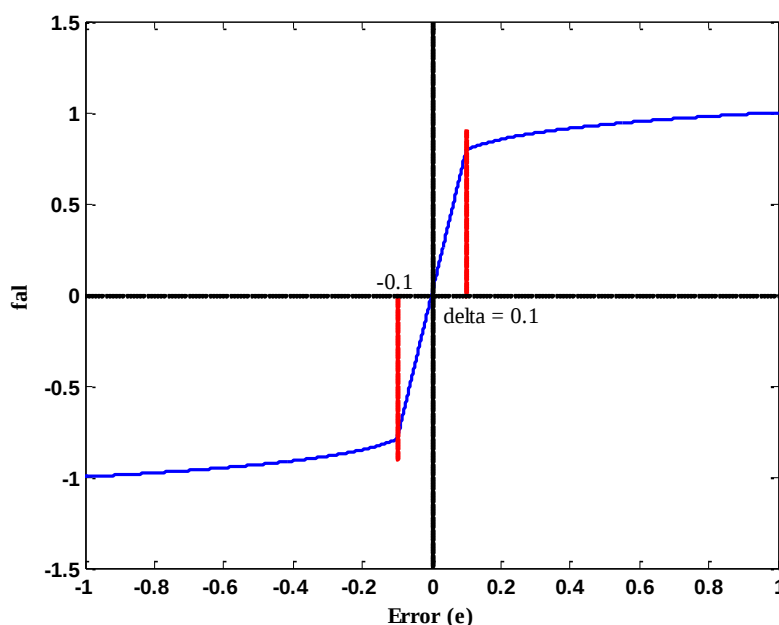
$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha sign(e) & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (۳-۴)$$

در رابطه (۳-۴) متغیر $e = z_1 - x_1$ بیانگر خطای تخمین متغیر واقعی سیستم توسط متغیر حالت

رویترگر است، α مقدار ثابتی است که نرخ همگرایی رویترگر را تعیین می کند و δ مقدار ثابتی است که

عرض ناحیه خطی تابع $fal(.)$ را تعیین می کند. این پارامترها به صورت تجربی توسط طراح تعیین

می شوند. در شکل ۱-۴ نمودار تابع $fal(.)$ به ازاء $\alpha = 0.1$ و $\delta = 0.1$ رسم شده است.



شکل ۱-۴: تابع $fal(.)$ به ازای مقادیر $\alpha = 0.1, \delta = 0.1$

۳-۴ کنترل موقعیت بازوی ماهر بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ با استفاده

از رویتگر حالت توسعه یافته غیر خطی

در این بخش به منظور طراحی یک کنترل کننده مستقل از مدل برای بازوی ماهر مجدداً از رابطه‌ی (۱۸-۳) استفاده می‌کنیم. این رابطه که بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ بدست آمده به صورت زیر است:

$$\dot{q} = v + F \quad (۴-۴)$$

همانطور که در فصل قبل نیز بیان شد، F بیانگر کل عوامل ناشناخته‌ی وارد بر سیستم شامل دینامیک-های ناشناخته بازوی ماهر و موتورها، عدم قطعیت های ولتاژ و اغتشاشات است.

با توجه به رابطه‌ی (۴-۴)، به منظور کنترل موقعیت مفصل q و تخمین اغتشاشات کلی F ، یک رویتگر حالت توسعه یافته غیر خطی از مرتبه‌ی ۲ تعریف می‌کنیم. فرمت کلی رویتگر تعریف شده برای هر مفصل بازوی ماهر به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 fal_1(z_1 - q, \alpha, \delta) + v \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 fal_2(z_1 - q, \alpha, \delta) \end{cases} \quad (۵-۴)$$

که در آن q اندازه واقعی متغیر مفصلی، z_1 تخمین متغیر مفصلی، z_2 تخمین اغتشاشات وارد بر مفصل، و v ولتاژ هر کدام از موتورها است.

توابع $fal_1(.)$ و $fal_2(.)$ نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$fal_1(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha sign(e) & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (۶-۴)$$

$$fal_2(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^{2\alpha-1} sign(e) & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| \leq \delta \end{cases}$$

تعریف می‌کنیم:

$$e_q = z_1 - q, e_F = z_2 - F, e_{tr} = q_d - q \quad (۷-۴)$$

که در آن q_d مسیر مرجع متغیر مفصلی و F اغتشاشات کلی وارد بر مفصل است. همچنین e_q خطای تخمین متغیر مفصلی، e_F خطای تخمین اغتشاشات کلی وارد بر مفصل و e_{tr} خطای ردیابی متغیر مفصلی است. حال با استفاده از رابطه‌ی (۷-۴)، قانون کنترل را به صورت زیر پیشنهاد می‌هیم:

$$v = \dot{q}_d + K_p(e_{tr} - e_q) + \beta_1 \text{fal}(z_1 - q, \alpha_1, \delta_1) - z_2 \quad (۸-۴)$$

در بخش بعد در دو گام، ابتدا نشان خواهیم داد که خطای تخمین متغیرها یعنی e_q و e_F محدود خواهد بود و بعد از آن نشان می‌دهیم که خطای تخمین در رهگیری ورودی مرجع به سمت صفر همگرا می‌شود، در نتیجه می‌توان گفت که خطای ردیابی محدود باقی خواهد ماند. علاوه بر این، تنها کافی است در هر لحظه فقط از موقعیت متغیرهای مفصلی فیدبک گرفته شده و در اختیار رویتر قرار گیرد. با توجه به مقاوم بودن این رویتر در مقابل خطاهای اندازه‌گیری، نیاز به سنسورهای گران قیمت با دقت بالا نیز نخواهد بود. در نتیجه با توجه به اینکه در سایر روش‌های کنترل بازوهای ماهر معمولاً علاوه بر فیدبک گرفتن از موقعیت مفاصل نیاز به فیدبک گرفتن از سرعت و یا شتاب مفاصل نیز هست، لذا این مورد یکی از مهمترین مزایای این روش کنترلی به شمار می‌آید.

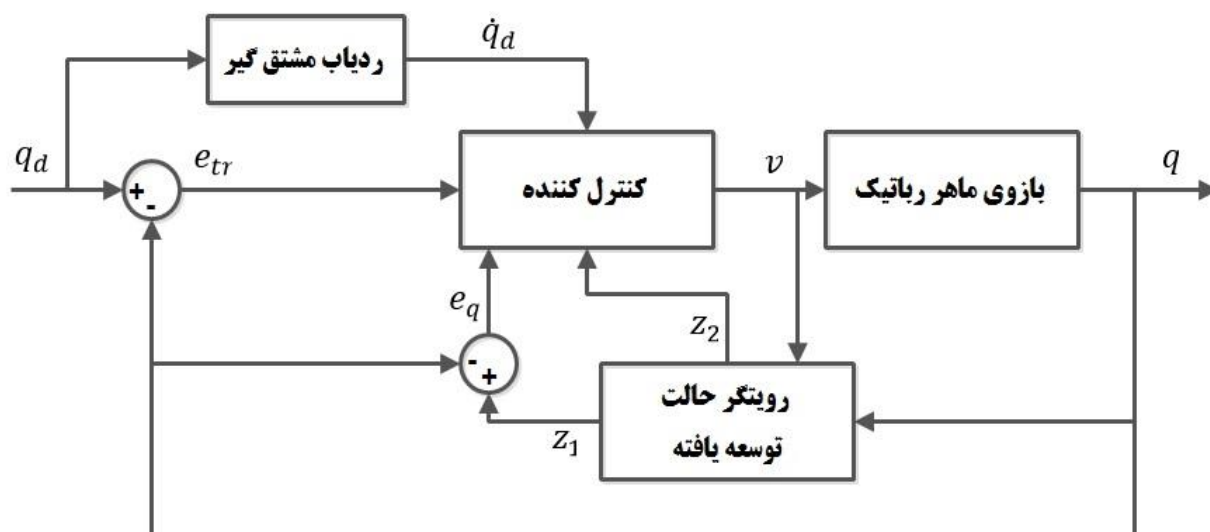
از طرفی باید توجه داشته باشیم که این رویتر به واسطه‌ی استفاده از توابع غیر خطی برای تخمین اغتشاشات، قابلیت بالاتری نسبت به رویتر حالت توسعه یافته خطی دارد [۱۰۴].

نکته - در رابطه (۸-۴) برای محاسبه ولتاژ v ، به $\dot{q}_d$ نیاز داریم. برای محاسبه $\dot{q}_d$ می‌توان از ردیاب مشتق‌گیر^{۲۶} زیر که توسط هان [۱۰۶] پیشنهاد شده است استفاده کرد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{L_1 L_2}(x_1 - u) - \frac{L_2 + L_1}{L_1 L_2} x_2 \\ y = x_2 \end{cases} \quad (۹-۴)$$

که u سیگنال ورودی ردیاب مشتق‌گیر است و x_2 بیانگر مشتق آن است. ضرایب $L_1 < L_2$ مقادیر ثابت و ضرایب ردیابی هستند. دیاگرام سیستم کنترل پیشنهادی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.

²⁶ Tracking Differentiator (TD)



شکل ۴-۲: بلوک دیاگرام سیستم کنترل

۴-۴ تحلیل همگرایی رویتگر حالت توسعه یافته غیر خطی

در این بخش همگرایی متغیرهای تخمین زده شده توسط رویتگر حالت توسعه یافته غیر خطی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین خطای تخمین در رهگیری ورودی مرجع تحلیل خواهد شد. در این بخش فرض‌های زیر را در نظر خواهیم گرفت:

فرض (۱): مسیر مرجع q_d باید هموار و نرم باشد و مشتقات آن تا هر درجه دلخواه وجود داشته و کراندار یکنواخت باشند [۹۴].

فرض (۲): φ اغتشاش خارجی بیان شده در رابطه‌ی (۲-۱۱) و همچنین گشتاور اغتشاشی τ_d باید کراندار باشد [۹۴]، یعنی :

$$|\varphi| \leq \varphi_{max} , \quad |\tau_d| \leq \tau_{d_max} \quad (۱۰-۴)$$

که در آن φ_{max} و τ_{d_max} اعداد صحیح مثبت هستند.

فرض (۳): ثابت‌های مثبت $T, \chi > 0$ و توابع مثبت معین و مشتق پذیر پیوسته‌ی

$$V(\cdot), W(\cdot): \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \text{ وجود دارند به طوری که [۱۰۸]:}$$

$$\bullet \quad \{y | V(y) \leq d\} \text{ برای هر } d > 0 \text{ محدود است.}$$

$$\bullet \quad \frac{\partial V}{\partial y_1}(y_2 - g_1(y_1)) - \frac{\partial V}{\partial y_2} g_2(y_1) \leq -W(y) \quad (11-4)$$

$$\bullet \quad \left| \frac{\partial V}{\partial y_2} \right| \leq \chi W(y) \quad \text{for } \|y\| > T \quad (12-4)$$

که در آن $y = [y_1 \ y_2]^T$.

فرض (۴): ولتاژ موتورهای ربات به منظور محافظت، در مقدار معینی محدود شده است:

$$|v| \leq v_{max} \quad (13-4)$$

۱-۴-۴ گام اول: همگرایی متغیرهای ریتگر حالت توسعه یافته غیرخطی

قضیه ۱-۴ - اگر فرض ۱ و فرض ۲ برقرار باشند، خطای همگرایی متغیرهای تخمینی توسط ریتگر حالت

توسعه یافته غیرخطی که توسط رابطه (۵-۴) تعریف شده محدود است، یعنی:

$$|e_q = z_1 - q| \leq \sigma_1, |e_F = z_2 - F| \leq \sigma_2 \quad (14-4)$$

- اثبات :

با توجه به توابع $fal_1(.)$ و $fal_2(.)$ در رابطه (۶-۴)، قضیه ۱ را در دو بخش اثبات می کنیم.

$$\checkmark \text{ بخش ۱ - } |e_q| \leq \delta$$

با توجه به رابطه (۶-۴) می توانیم رابطه (۵-۴) را به صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - c_1 e_q + v \\ \dot{z}_2 = -c_2 e_q \end{cases} \quad (15-4)$$

که در آن c_1 و c_2 ضرایب ثابتی هستند که به صورت زیر تعریف می شوند:

$$c_1 = \frac{\beta_1}{\delta^{1-\alpha}}, c_2 = \frac{\beta_2}{\delta^{1-\alpha}} \quad (16-4)$$

با توجه به روابط (۱۵-۴) و (۷-۴) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \dot{e}_q = -c_1 e_q + e_F \\ \dot{e}_F = -c_2 e_q - \dot{F} \end{cases} \quad (17-4)$$

با تعریف $\dot{F} = h$ داریم:

$$\dot{E}_o = AE_o + Bh \quad (۱۸-۴)$$

که در آن:

$$E_o = \begin{bmatrix} e_q \\ e_F \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} -c_1 & 1 \\ -c_2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (۱۹-۴)$$

طبق فرض (۴) ولتاژ موتورهای برای حفاظت در برابر اضافه ولتاژ محدود شده‌اند. علاوه بر آن با توجه به فرض (۲) مقدار φ کراندار است. همچنین با توجه به اینکه مطابق با [۹۴] مقادیر $I_a, \dot{I}_a$ نیز کراندار هستند، در نتیجه F و h نیز کراندار خواهند بود:

$$|h| \leq \kappa \quad (۲۰-۴)$$

اگر c_1 و c_2 مثبت انتخاب شوند، ماتریس A هرویتز بوده و رابطه‌ی (۱۸-۴) نیز پایدار هرویتز است. حال با توجه به اینکه رابطه‌ی (۱۸-۴) بیانگر یک سیستم خطی با ورودی h است، با توجه به محدود بودن h و هرویتز بودن A می‌توان نتیجه گرفت که E_o محدود است. در نتیجه با توجه به (۱۹-۴)، e_F و e_q نیز محدود هستند.

$$\checkmark \text{ بخش ۲-} |e_q| > \delta$$

اگر δ به گونه‌ای در نظر گرفته شود که $\delta < \sigma$ ، آنگاه ممکن است حالت $|e_q| > \delta$ اتفاق بیفتد. در این حالت رابطه (۵-۴) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 |e_q|^\alpha \text{sign}(e_q) + v \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 |e_q|^{2\alpha-1} \text{sign}(e_q) \end{cases} \quad (۲۱-۴)$$

در [۱۲۸] اثبات شده است که برای رویکرد بیان شده توسط رابطه (۲۱-۴)، فرض (۳) برآورده شده و متغیرهای رویکرد به متغیرهای واقعی سیستم همگرا خواهند شد. در نتیجه رابطه (۱۴-۴) برقرار است و برای هر مفصل ربات، متغیرهای تخمینی تعریف شده در رویکرد در همسایگی متغیرهای واقعی قرار می‌گیرند.

۲-۴-۴ گام دوم: ردیابی مسیر مرجع

قضیه ۲-۴ - برای سیستم بیان شده توسط رابطه (۴-۴) تحت قانون کنترل پیشنهاد شده در رابطه (۴-۸)، خطای رهگیری مسیر مرجع توسط متغیر تخمینی رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی معرفی شده با رابطه (۴-۵) محدود است، یعنی:

$$|q_d - z_1| < \sigma_3 \quad (۲۲-۴)$$

- اثبات:

برای ساده نویسی می توانیم تعریف زیر را انجام دهیم:

$$f_1 = fal(z_1 - q, \alpha_1, \delta_1) \quad (۲۳-۴)$$

با قرار دادن (۴-۸) در (۴-۴) داریم:

$$\dot{q} = \dot{q}_d + K_p(e_{tr} - e_q) + \beta_1 f_1 - z_2 + F \quad (۲۴-۴)$$

بنابراین دینامیک خطای سیستم حلقه بسته به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{e}_{tr} = -K_p(e_{tr} - e_q) - \beta_1 f_1 + e_F \quad (۲۵-۴)$$

یک تابع مثبت معین را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$V = \frac{1}{2}(e_{tr} - e_q)^2 \quad (۲۶-۴)$$

لذا داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (e_{tr} - e_q)(\dot{e}_{tr} - \dot{e}_q) \\ &= (e_{tr} - e_q)(-K_p(e_{tr} - e_q) - \beta_1 f_1 + e_F - e_F + \beta_1 f_1) \\ &= -K_p(e_{tr} - e_q)^2 \end{aligned} \quad (۲۷-۴)$$

و با شرط $K_p > 0$ برای $e_{tr} \neq e_q$ خواهیم داشت:

$$\dot{V} < 0 \quad (۲۸-۴)$$

و از آنجا که متغیر تابع معین مثبت به صورت زیر است:

$$e_{tr} - e_q = q_d - z_1 \quad (29-4)$$

لذا در سیستم حلقه بسته (۲۴-۴)، رابطه‌ی (۲۲-۴) برقرار خواهد بود و متغیر تخمینی z_1 قادر است در همسایگی مسیر مرجع q_d قرار گیرد.

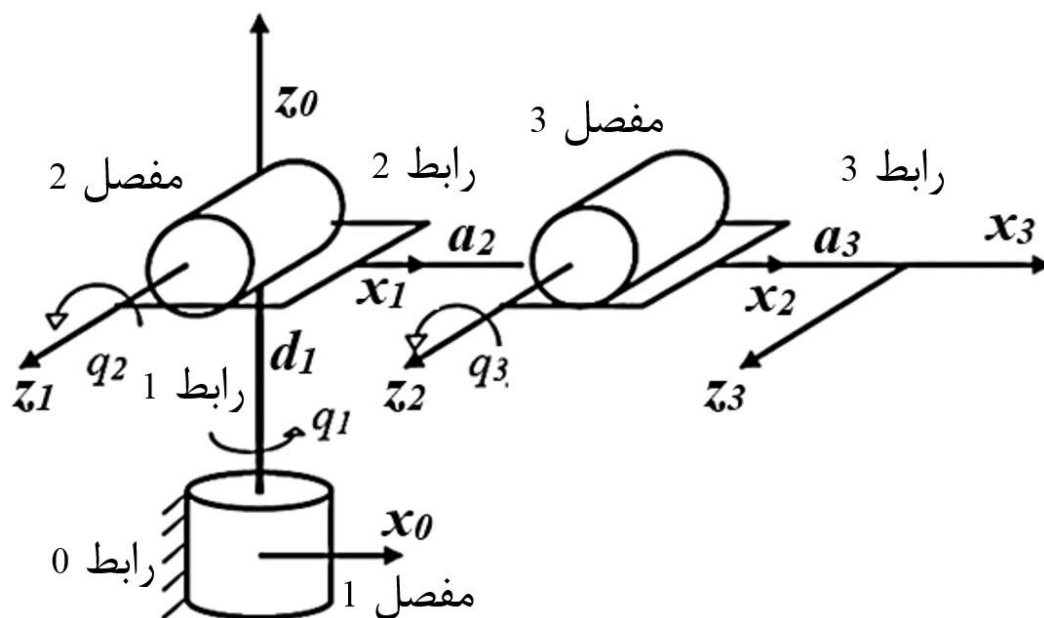
نکته - در صورتی که ولتاژ بدست آمده توسط رابطه‌ی (۸-۴) بزرگتر از مقدار v_{max} باشد، آنگاه خروجی کنترل‌کننده همان مقدار v_{max} خواهد بود. عبارت دیگر ولتاژ تحت هر شرایطی محدود خواهد بود، لذا با توجه [۹۴] به سیستم حلقه بسته پایدار ورودی محدود - خروجی محدود خواهد بود. با توجه به مطالب بیان شده، می‌توانیم قانون کنترل را به صورت زیر بازنویسی نماییم:

$$v = \begin{cases} \dot{q}_d + K_p(e_{tr} - e_q) + \beta_1 fal(z_1 - q, \alpha_1, \delta_1) - z_2 & |v| < v_{max} \\ v_{max} & v > v_{max} \\ -v_{max} & v < -v_{max} \end{cases} \quad (30-4)$$

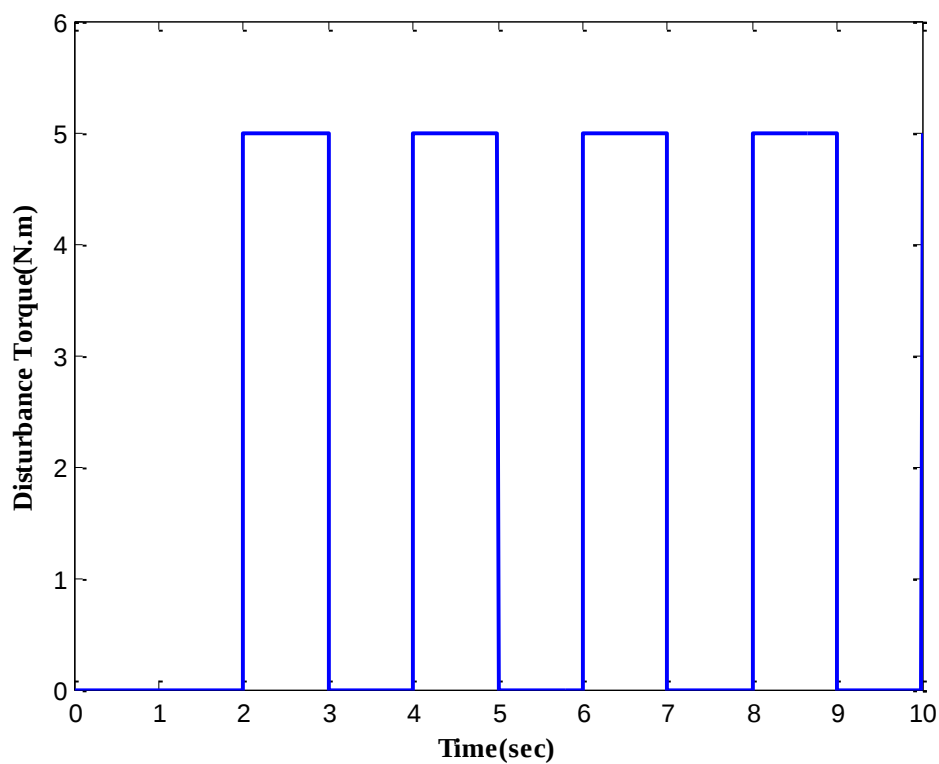
۵-۴ نتایج شبیه سازی

در این قسمت، روش کنترل پیشنهادی در این فصل بر روی ربات هنرمند اعمال می‌شود. جزئیات دینامیکی این ربات و مقادیر پارامترهای هر کدام از موتورهای جریانی مستقیم متصل به مفاصل آن در فصل سوم به صورت کامل شرح داده شده است. دیاگرام بازوی ماهر در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. در این بخش شبیه سازی را در سه حالت انجام خواهیم داد. در حالت اول عملکرد مکانیزم کنترل پیشنهادی را در دفع اغتشاشات وارد بر سیستم بررسی خواهیم کرد. در حالت دوم تاثیر افزایش فرکانس مسیر مرجع را مورد بررسی قرار خواهیم داد. و در نهایت در حالت سوم مقایسه‌ای بین روش ارائه شده در این فصل و یک روش کنترل مستقل از مدل دیگر ارائه خواهیم کرد.

به منظور شبیه سازی محافظت موتورها در برابر اضافه ولتاژ، ولتاژ موتورها در مقدار $|v_{max}| = 40 \text{ V}$ محدود شده است. گشتاور اغتشاشی وارد بر مجری نهایی بازوی ماهر، در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳: نمایش نمادین بازوی ماهر هنرمند



شکل ۴-۴: گشتاور اغتشاشی وارد بر مجری نهایی

۴-۵-۱ شبیه سازی ۱

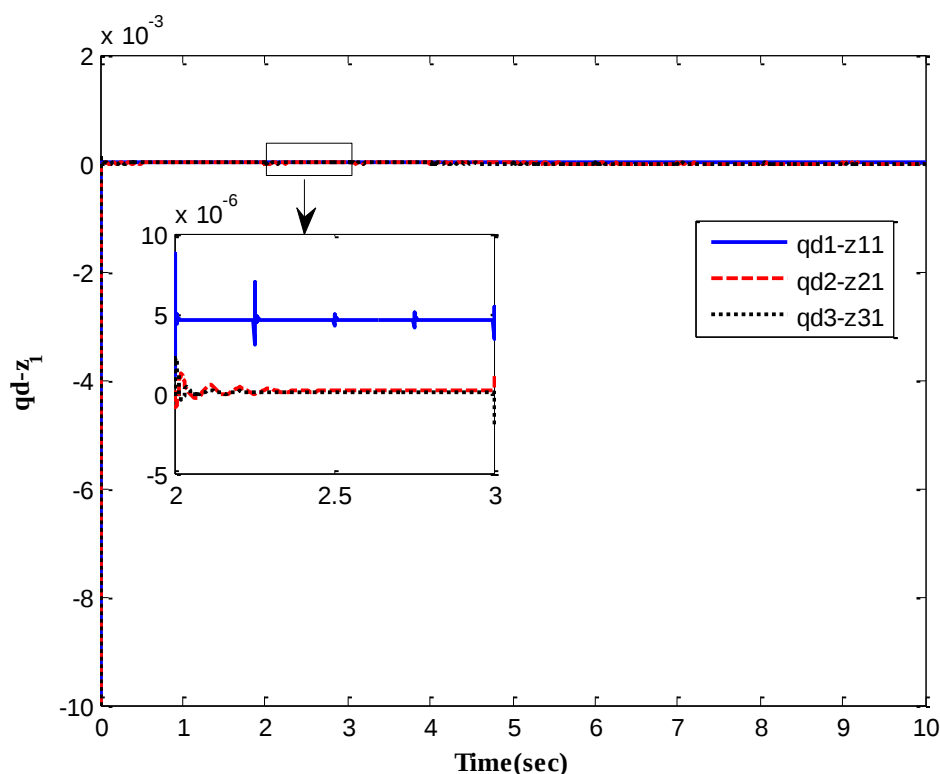
در این حالت مسیر مرجع برای همه مفاصل به صورت زیر تعریف می شود:

$$q_d = 1 - \cos(0.1\pi t) \quad (31-4)$$

به منظور استفاده از قانون کنترل پیشنهادی در رابطه‌ی (۴-۸)، برای هر کدام از مفاصل ربات یک رویتگر حالت توسعه یافته غیرخطی از مرتبه‌ی ۲ به صورت رابطه‌ی (۴-۵) تعریف می‌کنیم. برای مفصل i ام، متغیرهای تخمینی به ترتیب به صورت Z_{i1} و Z_{i2} تعریف می‌شوند. مقادیر پارامترهای رویتگر و کنترل‌کننده به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} = 0.01, \alpha_{12} = 0.01, \alpha_{21} = 0.1, \alpha_{22} = 0.1, \alpha_{31} = 0.05 \\ \alpha_{32} = 0.05, \delta_{11} = 0.001, \delta_{12} = 0.001, \delta_{21} = 0.001, \delta_{22} = 0.001 \\ \delta_{31} = 0.005, \delta_{32} = 0.005, \beta_{11} = 20, \beta_{12} = 50, \beta_{21} = 20 \\ \beta_{22} = 50, \beta_{31} = 30, \beta_{32} = 40, k_{p1} = 50, k_{p2} = 200, k_{p3} = 100 \end{aligned} \quad (32-4)$$

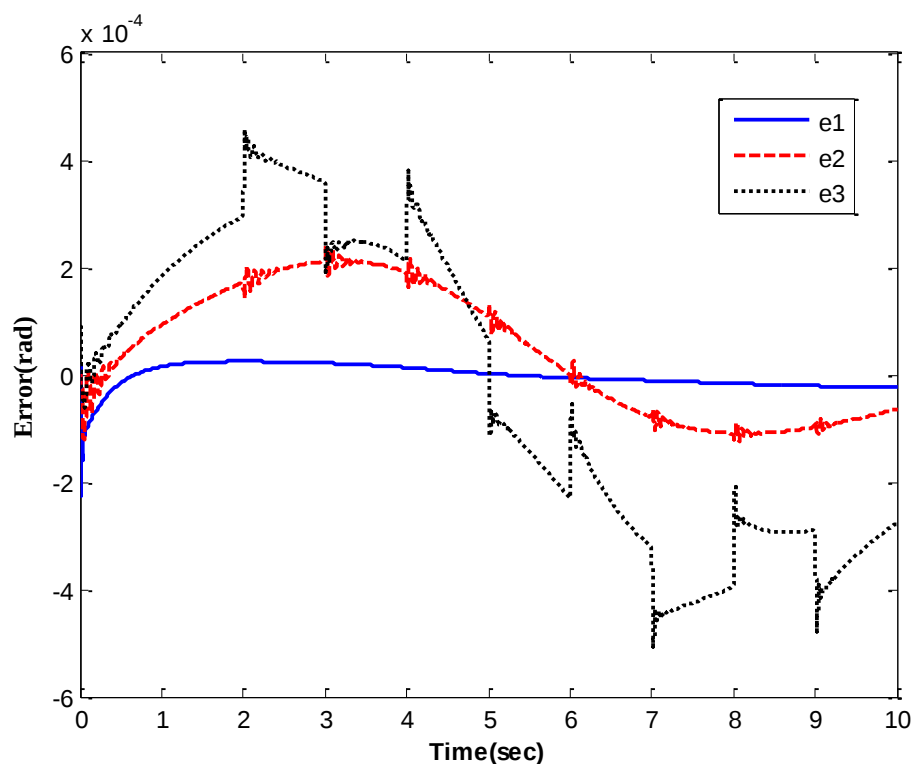
خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیر تخمین برای هر کدام از مفاصل در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که این خطا در محدوده بسیار مناسبی قرار دارد و این رویتگر در مقایسه با رویتگر حالت توسعه یافته خطی قابلیت ردیابی بهتری دارد.



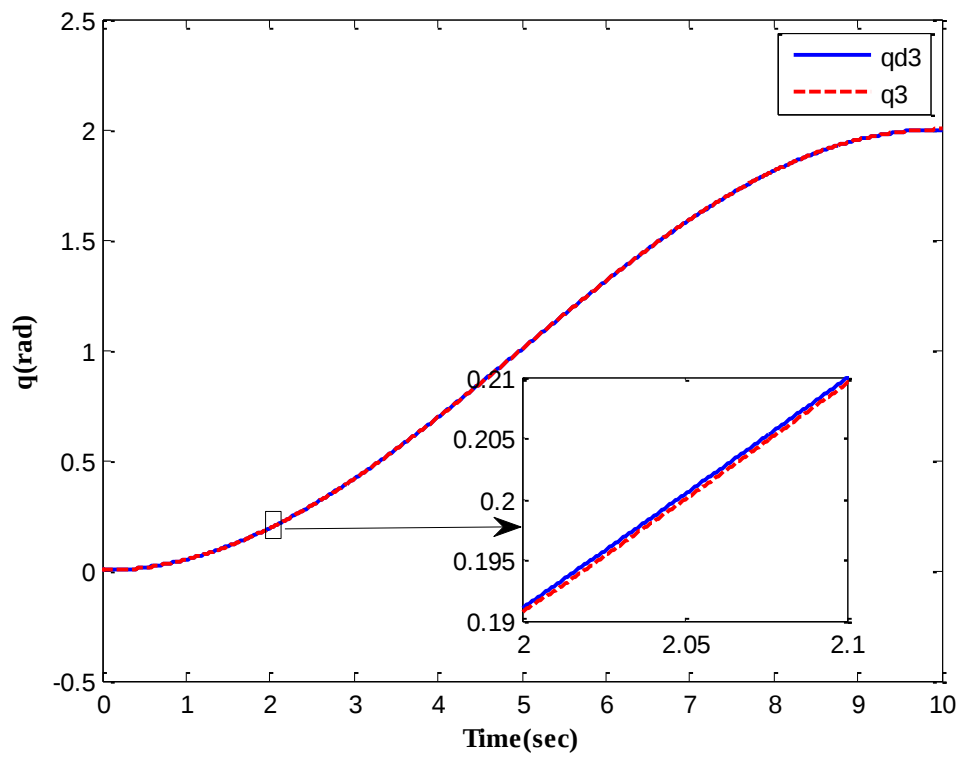
شکل ۴-۵: خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - Z_{i1})$

شکل ۴-۶ خطای ردیابی متغیرهای مفصلی بازوی ماهر را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود خروجی ها مسیر مرجع را به خوبی دنبال می کنند و اثر گشتاورهای اغتشاشی وارد بر ربات به خوبی توسط سیستم کنترل دفع می شود. خطای ردیابی در این روش در مقایسه با روش رویتگر حالت توسعه یافته خطی پایین تر است. این ویژگی ناشی از قابلیت بالای توابع غیرخطی انتخابی در تخمین متغیرهای سیستم و همچنین اغتشاشات وارد بر آن است. در شکل ۴-۷ متغیر مفصلی سوم ربات نشان داده شده است.

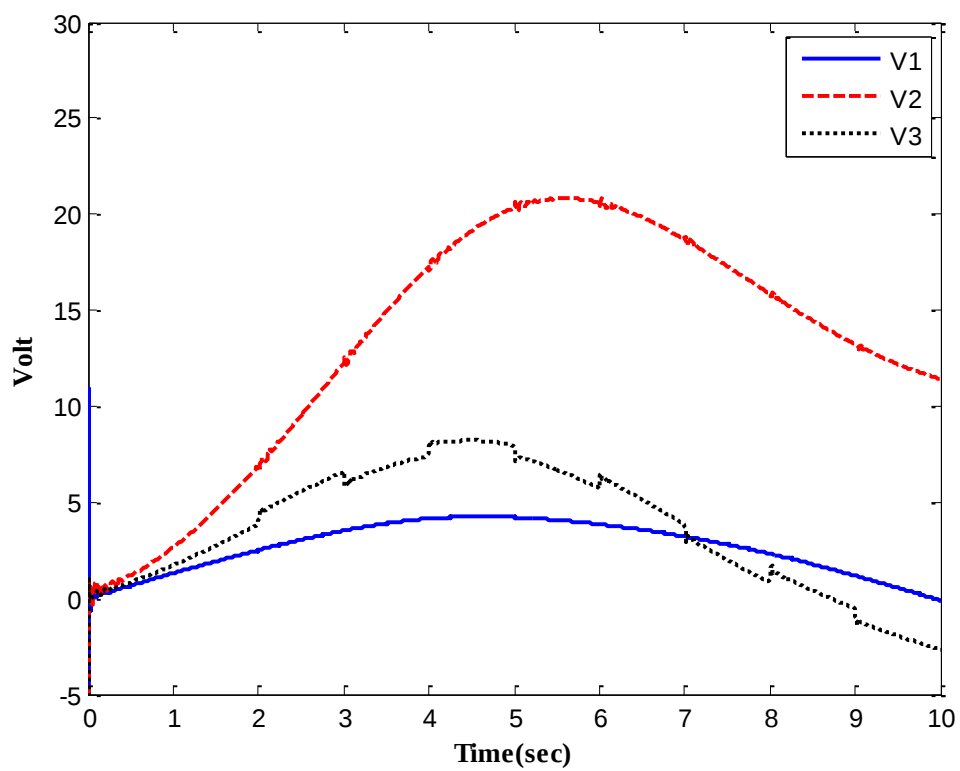
در شکل ۴-۸ سیگنال کنترل، که ولتاژ اعمالی به موتورها است نشان داده شده است. ولتاژ اعمال شده به موتورها پایین تر از مقدار اشباع بوده و هموار است. با توجه به این شکل می توان دید که سیستم کنترل به منظور مقابله با اثرات ناشی از اغتشاش، سیگنال های کنترل را به شکل مناسب تولید می نماید. نتایج شبیه سازی موثر بودن کنترل کننده پیشنهادی را نشان می دهد. شکل ۴-۹ نشان دهنده ی گشتاور اعمالی به ربات است. تاثیر گشتاورهای اغتشاشی به خوبی واضح است.



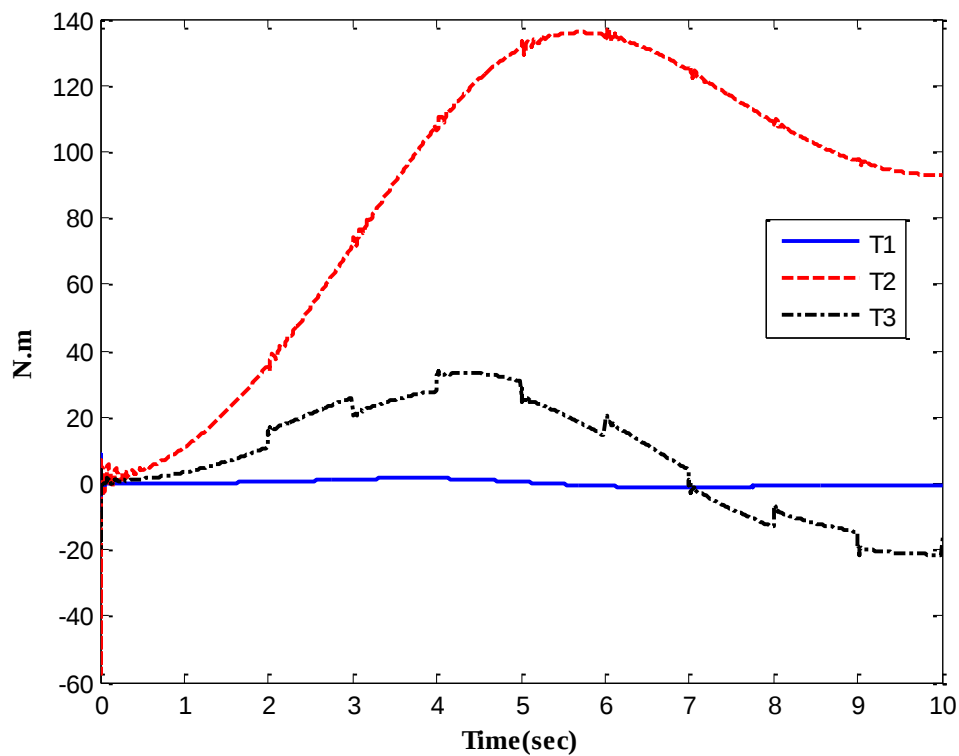
شکل ۴-۶: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی $(q_{di} - q_i)$



شکل ۴-۷: متغیر مفصلی سوم ربات



شکل ۴-۸: ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال‌های کنترل)



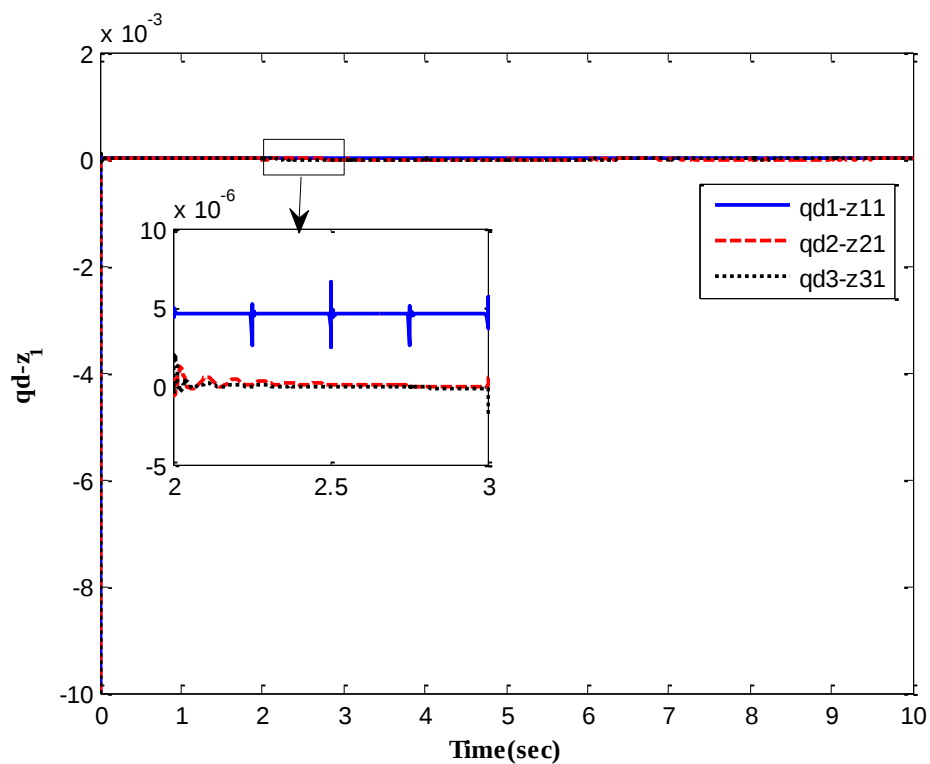
شکل ۴-۹: گشتاورهای اعمالی به مفاصل ربات

۲-۵-۴ شبیه سازی ۲

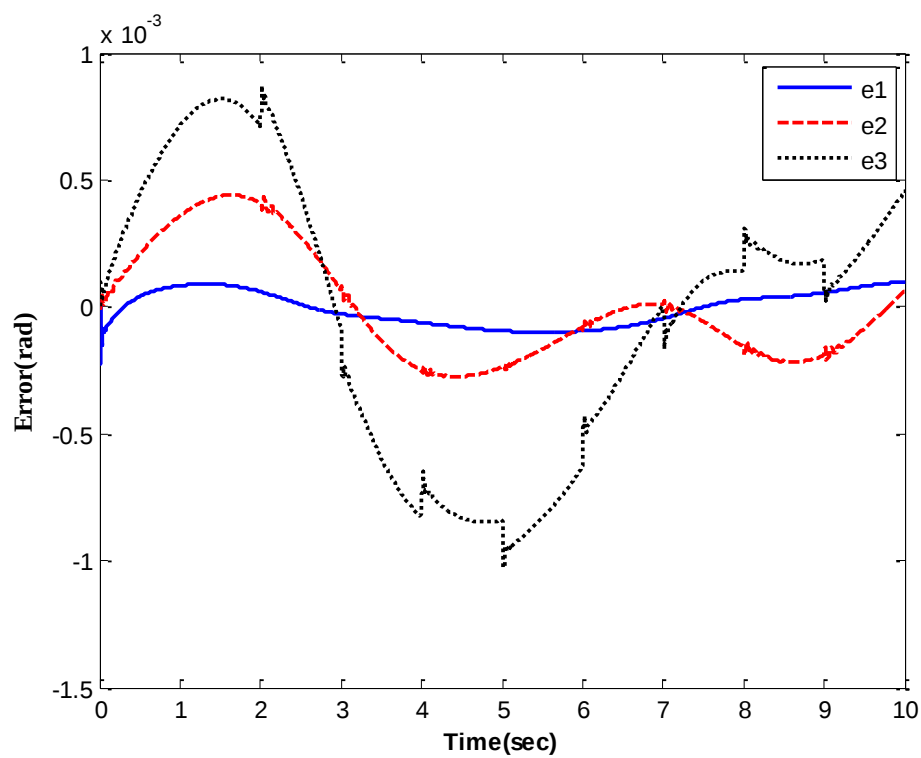
در این حالت تاثیر افزایش سرعت حرکت ربات بر عملکرد سیستم کنترل طراحی شده را بررسی کنیم. برای این منظور فرکانس مسیر مرجع را دو برابر می‌کنیم. یعنی مسیر مرجع را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$q_d = 1 - \cos(0.2\pi t) \quad (۴-۳۳)$$

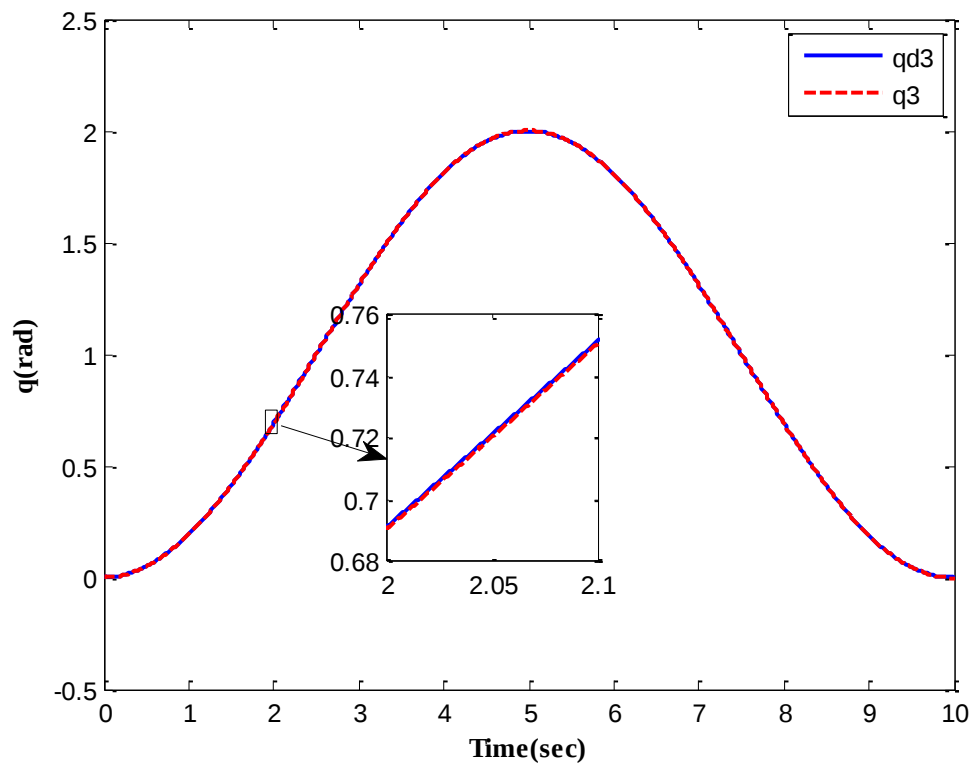
هیچکدام از پارامترهای رویتگر و کنترل‌کننده در این حالت تغییر نمی‌کنند و توسط رابطه‌ی (۴-۳۲) تعریف می‌شوند. سیگنال اغتشاش شکل ۴-۴ نیز به بازوی ماهر وارد می‌شود. با توجه به شکل‌های ۴-۱۰ تا ۴-۱۳ ملاحظه می‌شود که کنترل‌کننده‌ی ارائه شده در مقابل افزایش فرکانس مسیر مرجع عملکرد بسیار مناسب تری در مقایسه با کنترل‌کننده مبتنی بر رویتگر حالت توسعه یافته‌ی خطی دارد.



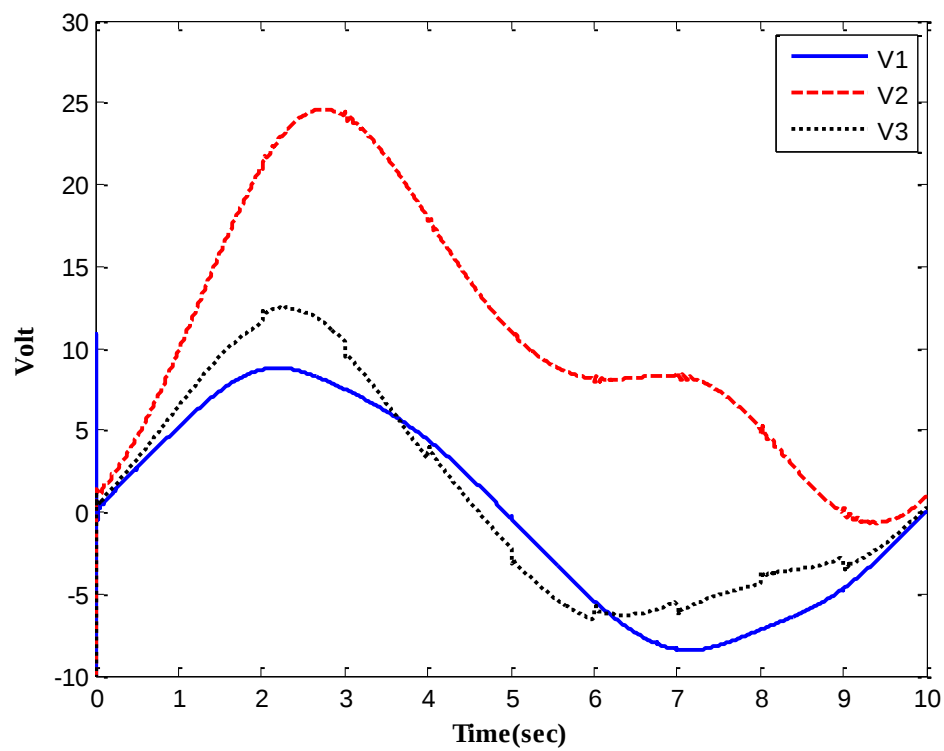
شکل ۴-۱۰: خطای ردیابی مسیر مرجع توسط متغیرهای تخمین $(q_{di} - z_{i1})$ در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر



شکل ۴-۱۱: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی $(q_{di} - q_i)$ در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر



شکل ۴-۱۲: متغیر مفصلی سوم در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر



شکل ۴-۱۳: ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال های کنترل) در حضور اغتشاش و فرکانس دو برابر

۳-۵-۴ شبیه سازی ۳ و مقایسه

در این قسمت به منظور بررسی مزایای روش کنترل پیشنهادی، مقایسه‌ای بین این روش و روش تخمین عدم قطعیت تطبیقی^{۲۷} صورت گرفته است. در [۵۰] عدم قطعیت‌ها با استفاده از یک تخمینگر عدم قطعیت تطبیقی که از سری تیلور مرتبه‌ی اول بهره می‌گیرد، تخمین زده شده‌اند. این روش نیز یک روش مستقل از مدل است. این روش مزایایی چون عملکرد ردیابی مناسب، حذف اغتشاش سریع و مصرف انرژی پایین دارد. در این روش معادله ولتاژ موتور $\dot{I}$ ام بازوی ماهر رباتیک به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ddot{q} + F_A = u \quad (۳۴-۴)$$

که در آن F_A عدم قطعیت تجمعی و u ولتاژ موتور است. در این روش F_A با استفاده از بسط سری تیلور مرتبه‌ی اول، به شکل زیر تخمین زده می‌شود:

$$\hat{F}_A = \hat{F}_{A0} + \frac{\partial \hat{F}_A}{\partial e} \big|_{(0,0)} e + \frac{\partial \hat{F}_A}{\partial \dot{e}} \big|_{(0,0)} \dot{e} = \hat{p}_1 + \hat{p}_2 e + \hat{p}_3 \dot{e} \quad (۳۵-۴)$$

در رابطه‌ی (۳۵-۴)، $\hat{F}_A$ تخمین F_A است و ضرایب $\hat{p}_1, \hat{p}_2$ و $\hat{p}_3$ بوسیله یک قانون بروزرسانی تعیین می‌شوند. کنترل‌کننده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u = \ddot{q}_d + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q) + \hat{F}_A \quad (۳۶-۴)$$

که در آن q_d موقعیت مطلوب مفصل، k_p و k_d پارامترهای طراحی کنترل هستند. همانگونه که ملاحظه می‌شود، در این روش به اندازه گیری $\dot{q}$ نیاز داریم. علاوه بر آن، محاسبات این روش پیچیده تر از روش پیشنهادی در این فصل است. عملکرد ردیابی و سیگنال‌های کنترل به ترتیب در شکل‌های ۱۴-۴ و ۱۵-۴ نشان داده شده‌اند. همانگونه که در [۵۰] بیان شده است، «معیارهای عملکردی» که برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

²⁷ Adaptive Uncertainty Estimation (AUE)

الف - انتگرال مربعات خطا^{۲۸}:

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (۳۷-۴)$$

ب - انتگرال قدر مطلق خطا^{۲۹}:

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (۳۸-۴)$$

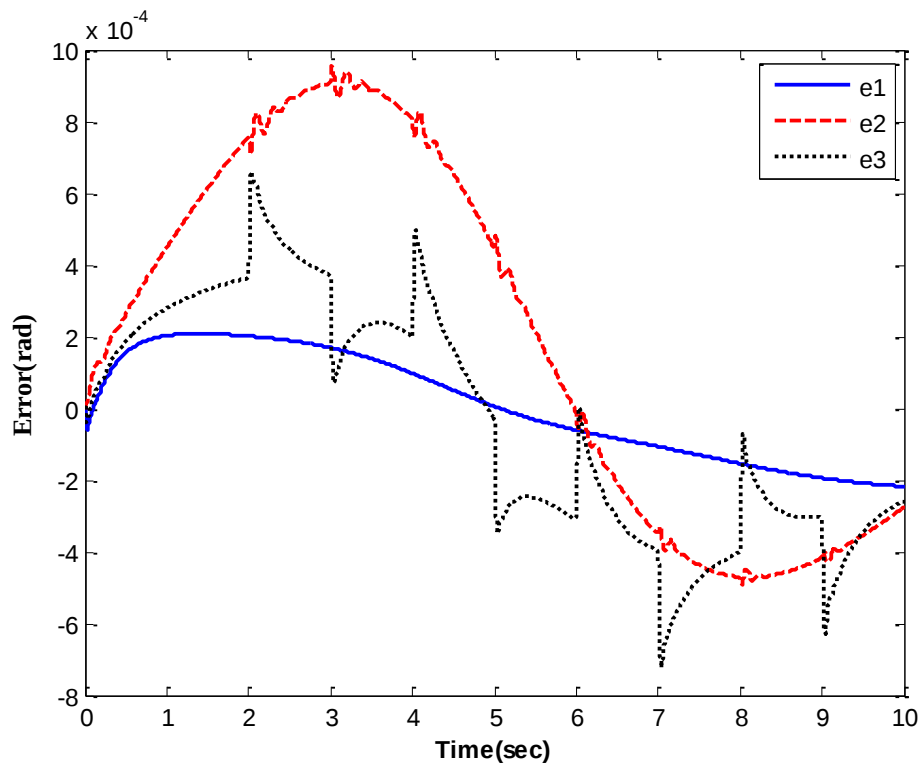
ج - انتگرال حاصلضرب زمان در قدر مطلق خطا^{۳۰}:

$$ITAE = \int_0^t t|e(t)| dt \quad (۳۹-۴)$$

د - انتگرال مربع سیگنال کنترل ورودی^{۳۱}:

$$ISV = \int_0^t u^2(t) dt \quad (۴۰-۴)$$

در روابط فوق، t بیانگر کل زمان شبیه سازی است.



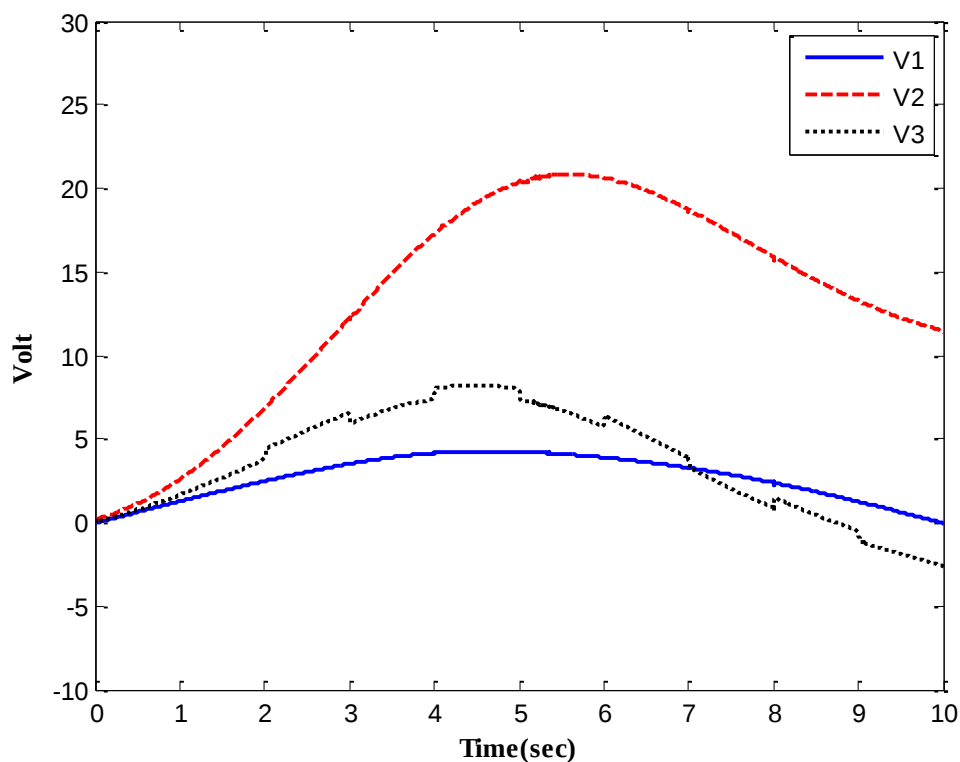
شکل ۴-۱۴: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی ($q_{di} - q_i$) (روش AUE)

²⁸ Integral of Square Error (ISE)

²⁹ Integral of the Absolute value of the Error (IAE)

³⁰ Integral of Time multiplied by the Absolute value of the Error (ITAE)

³¹ Integral of the Square Value (ISV)



شکل ۴-۱۵: سیگنال‌های کنترل (روش AUE)

با توجه به جدول ۴-۱، می‌توان ملاحظه کرد که روش کنترلی ارائه شده در این بخش، از لحاظ معیارهای عملکردی، نسبت به روش تخمین عدم قطعیت تطبیقی بهتر است. شایان ذکر است، همانگونه که قبلاً بیان شد، در روش تخمین عدم قطعیت تطبیقی با استفاده بسط سری تیلور نیاز به اندازه‌گیری مقدار $\dot{q}$ داریم، در صورتیکه در روش پیشنهادی در این بخش فقط لازم است مقدار q اندازه‌گیری شود.

جدول ۴-۱ - مقایسه شاخص‌های عملکردی روش پیشنهادی با روش AUE

روش کنترلی	مفصل	معیار عملکرد ^{۳۲}			
		$ISE(rad) \times 10^{-6}$	$IAE(rad) \times 10^{-3}$	$ITAE(rad.s) \times 10^{-3}$	$ISV(v^2)$
روش پیشنهاد شده در این رساله	مفصل ۱	0.0051	0.2	0.7	87.4
	مفصل ۲	0.1202	1.1	5.1	2184.1
	مفصل ۳	0.0852	2.7	15	298.0
روش AUE	مفصل ۴	0.0221	1.3	6.7	88.3
	مفصل ۵	0.3017	4.9	22.1	2186.4
	مفصل ۶	0.1292	3	16.7	266.9

³² Performance Criterion

۴-۶ نتایج تجربی

به منظور بررسی عملکرد روش کنترل پیشنهادی، این روش در این بخش به صورت عملی به یک بازوی ماهر رباتیک اعمال می‌شود. بازوی ماهر مورد استفاده یک ربات اسکارا^{۳۳} است که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. موتورهای مورد استفاده در این بازوی ماهر سه عدد سروو موتور DC هستند. حداکثر ولتاژ مجاز برای موتورهای مربوط به مفاصل لولایی ۵ ولت و برای مفصل کشویی ۱۲ ولت است. مسیرهای مرجع در نظر گرفته شده برای مفاصل به صورت زیر هستند:

$$q_d = \begin{bmatrix} \left(\frac{\pi}{2}\right) - \left(\frac{\pi}{5}\right) \cos\left(\frac{4\pi t}{20}\right) \text{ rad} \\ \left(\frac{\pi}{2}\right) - \left(\frac{\pi}{5}\right) \cos\left(\frac{9\pi t}{20}\right) \text{ rad} \\ 45 + 2.5 \sin\left(\frac{\pi t}{30}\right) \text{ mm} \end{bmatrix} \quad (4-41)$$

حداکثر جابجایی زاویه‌ای مفاصل ۱ و ۲ برابر با ۲۰۰ درجه است. حداکثر جابجایی خطی مفصل سوم نیز برابر با ۸ سانتی‌متر است. مسیرهای مرجع با در نظر گرفتن موارد فوق انتخاب شده‌اند. پارامترهای کنترل‌کننده به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

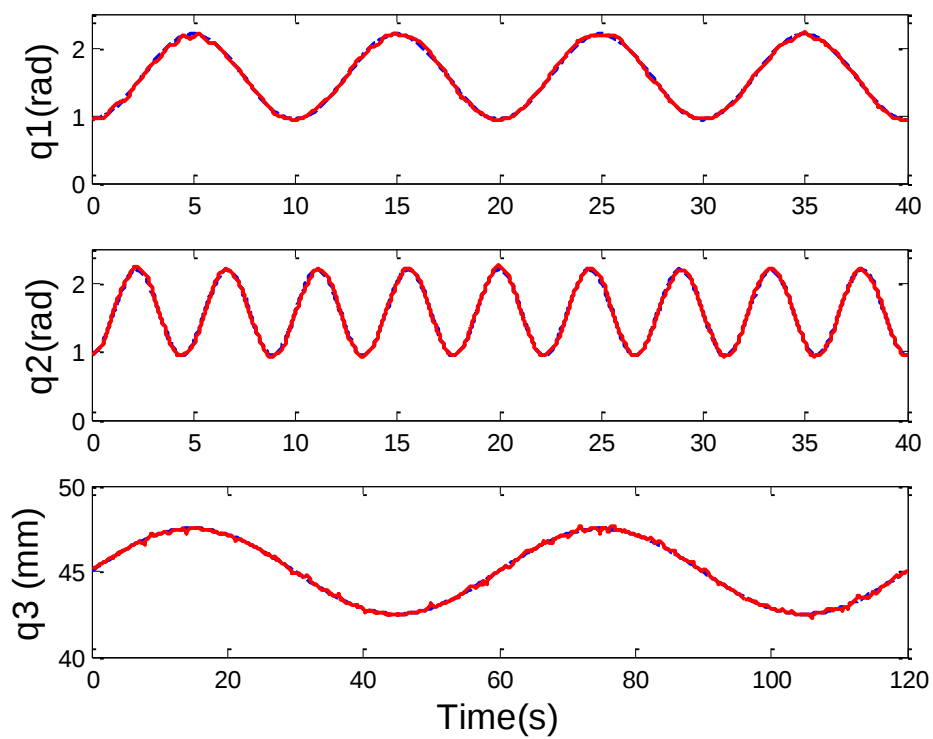
$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= \alpha_{12} = \alpha_{21} = \alpha_{22} = \alpha_{31} = \alpha_{32} = 0.1 \\ \delta_{11} &= \delta_{12} = \delta_{21} = \delta_{22} = \delta_{31} = \delta_{32} = 0.01 \\ \beta_{11} &= \beta_{21} = \beta_{31} = 30, \beta_{12} = \beta_{22} = \beta_{32} = 20 \\ k_{p1} &= k_{p2} = 200, k_{p3} = 50 \end{aligned} \quad (4-42)$$

عملکرد ردیابی سیستم کنترل در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، اگر چه اطلاعات پارامترهای مدل بازوی ماهر نامعلوم است، اما فرآیند ردیابی مسیر مرجع به خوبی انجام می‌شود. ولتاژ موتورهای نیز در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. این مقادیر در محدوده‌ی مجاز ولتاژ موتورهای قرار دارند.

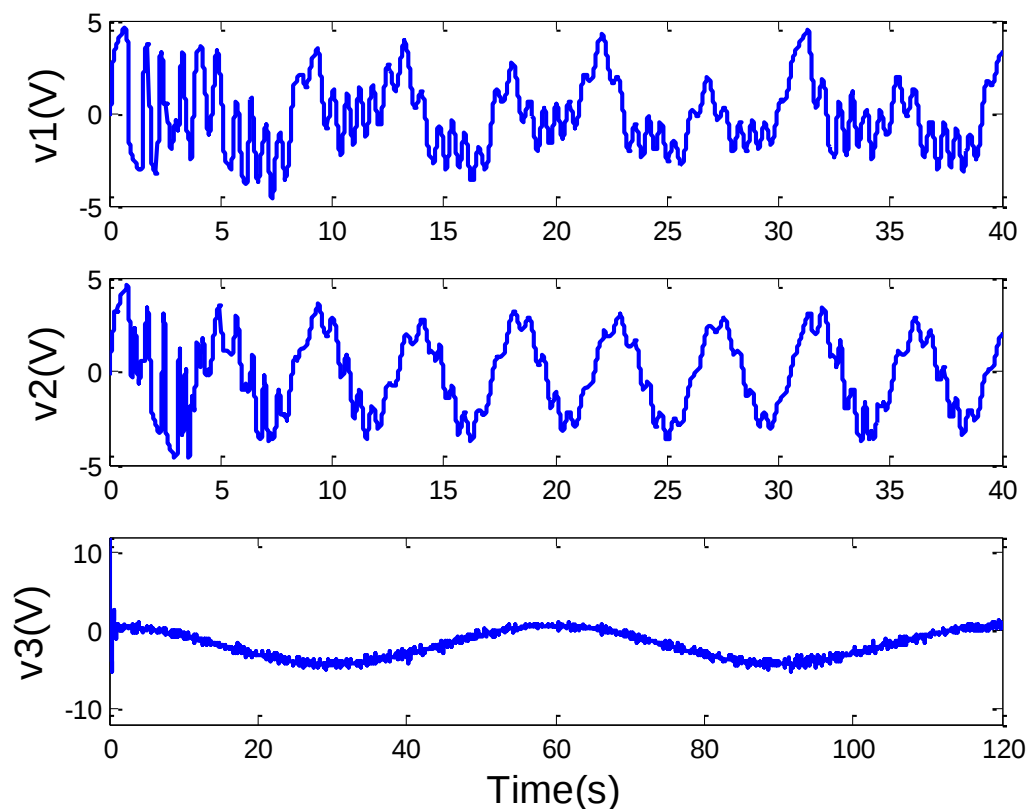
³³ SCARA



شکل ۴-۱۶: بازوی ماهر اسکارا



شکل ۴-۱۷: ردیابی مسیرهای مرجع در پیاده‌سازی عملی روش کنترل پیشنهادی
(— مسیر مرجع ، - - - متغیر مفصلی بازوی ماهر)



شکل ۴-۱۸: سیگنال‌های کنترل در پیاده‌سازی عملی (ولتاژ موتورها)

۴-۷ اعمال روش کنترل پیشنهادی بر روی راهبرد کنترل گشتاور

در این بخش روش کنترل ارائه شده در این فصل با استفاده از راهبرد کنترل گشتاور پیاده‌سازی می‌شود.

معادله دینامیکی بازوی ماهر به صورت زیر است:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (4-43)$$

این رابطه را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\ddot{q} = D^{-1}(q)\tau - D^{-1}(q)(C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)) \quad (4-44)$$

رابطه‌ی فوق را با فرض نامعلوم بودن پارامترهای دینامیکی ربات به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\ddot{q} = A\tau + F \quad (4-45)$$

با توجه به رابطه‌ی (۴-۴۵) برای هر کدام از مفاصل بازوی ماهر یک رویتگر حالت توسعه یافته از مرتبه‌ی

۳ به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 fal_1(z_1 - q, \alpha, \delta) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 fal_1(z_1 - q, \alpha, \delta) + \tau \\ \dot{z}_3(t) = -\beta_3 fal_1(z_1 - x_1) \end{cases} \quad (46-4)$$

که در آن q اندازه واقعی متغیر مفصلی، z_1 تخمین متغیر مفصلی، z_2 تخمین $\dot{q}$ و z_3 تخمین اغتشاشات وارد بر مفصل است. τ نیز گشتاور اعمال شده به مفصل است و تابع $fal_1(.)$ مشابه با آنچه در رابطه‌ی (۴-۶) آمده تعریف می‌شود. با توجه به تعاریف ارائه شده در رابطه‌ی (۴-۷) قانون کنترل به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\tau = \ddot{q}_d + K_d(\dot{e}_{tr} - \dot{e}_q) + K_p(e_{tr} - e_q) + \beta_2 fal_1(.) - z_3 \quad (47-4)$$

اگر رابطه‌ی (۴-۴۵) را برای هر مفصل به صورت مستقل بازنویسی کنیم و رابطه‌ی (۴-۴۷) را در آن قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\ddot{q} = \ddot{q}_d + K_d(\dot{e}_{tr} - \dot{e}_q) + K_p(e_{tr} - e_q) + \beta_2 fal_1(.) - z_3 + F \quad (48-4)$$

بنابراین دینامیک خطای سیستم حلقه بسته به صورت زیر خواهد بود:

$$\ddot{e}_{tr} = -K_d(\dot{e}_{tr} - \dot{e}_q) - K_p(e_{tr} - e_q) - \beta_2 fal_1(.) + e_F \quad (49-4)$$

اگر یک تابع مثبت معین به صورت زیر تعریف کنیم:

$$V = \frac{1}{2}(\dot{e}_{tr} - \dot{e}_q)^2 + \frac{K_p}{2}(e_{tr} - e_q)^2 \quad (50-4)$$

انگاه داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (\ddot{e}_{tr} - \ddot{e}_q)(\dot{e}_{tr} - \dot{e}_q) + K_p(e_{tr} - e_q)(\dot{e}_{tr} - \dot{e}_q) = \\ &= -K_d(\dot{e}_{tr} - \dot{e}_q)^2 \end{aligned} \quad (51-4)$$

و با شرط $K_d > 0$ برای $\dot{e}_{tr} \neq \dot{e}_q$ خواهیم داشت:

$$\dot{V} < 0 \quad (52-4)$$

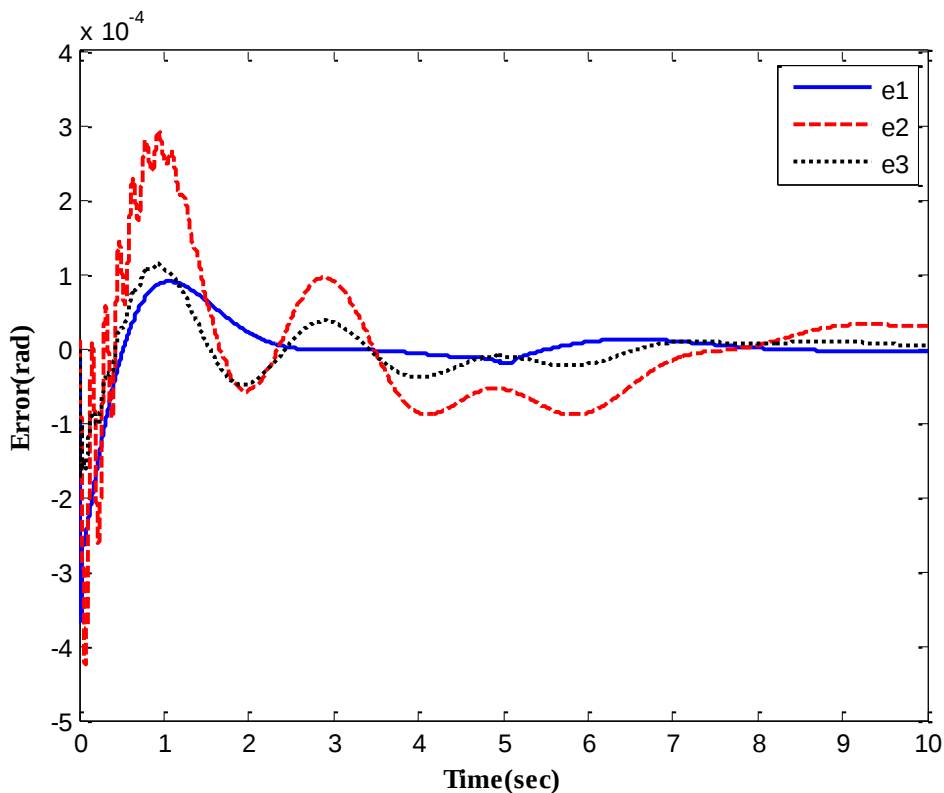
لذا متغیر تخمینی z_1 قادر است در همسایگی مسیر مرجع q_d قرار گیرد.

۴-۷-۱ شبیه سازی روش کنترل مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور

روش کنترل پیشنهاد شده در روابط (۴-۴۶) و (۴-۴۷) را بر روی بازوی ماهر معرفی شده در بخش ۴-۵ اعمال می‌کنیم. مسیر مرجع را نیز به صورت رابطه‌ی (۴-۳۱) در نظر می‌گیریم. مقادیر پارامترهای رویتنگر و کنترل‌کننده به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= 0.01, \alpha_{12} = 0.01, \alpha_{13} = 0.01, \alpha_{21} = 0.01, \alpha_{22} = 0.01, \\ \alpha_{23} &= 0.01, \alpha_{31} = 0.01, \alpha_{32} = 0.01, \alpha_{33} = 0.01, \delta_{11} = 0.001 \\ \delta_{12} &= 0.001, \delta_{13} = 0.001, \delta_{21} = 0.001, \delta_{22} = 0.001 \\ \delta_{23} &= 0.001, \delta_{31} = 0.001, \delta_{32} = 0.001, \delta_{33} = 0.001, \\ \beta_{11} &= 20, \beta_{12} = 50, \beta_{13} = 100, \beta_{21} = 10, \beta_{22} = 10, \beta_{23} = 100 \\ \beta_{31} &= 10, \beta_{32} = 10, \beta_{33} = 100, k_{p1} = 50, k_{d1} = 1, k_{p2} = 200 \\ k_{d2} &= 2, k_{p3} = 100, k_{d3} = 1 \end{aligned} \quad (۴-۵۳)$$

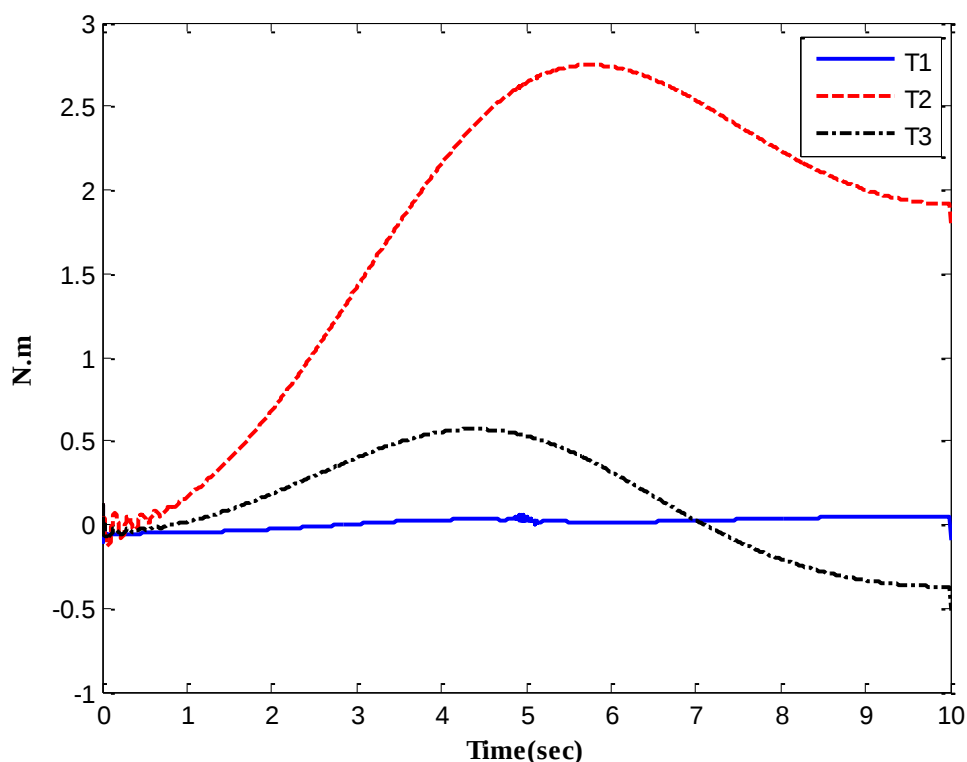
ابتدا شبیه سازی را بدون اعمال اغتشاش به بازوی ماهر انجام می‌دهیم. خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در این حالت در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود خطای ردیابی برای هر سه مفصل محدود است و در بازه‌ی قابل قبولی قرار دارد. شکل ۴-۲۰ سیگنال‌های کنترل که همان



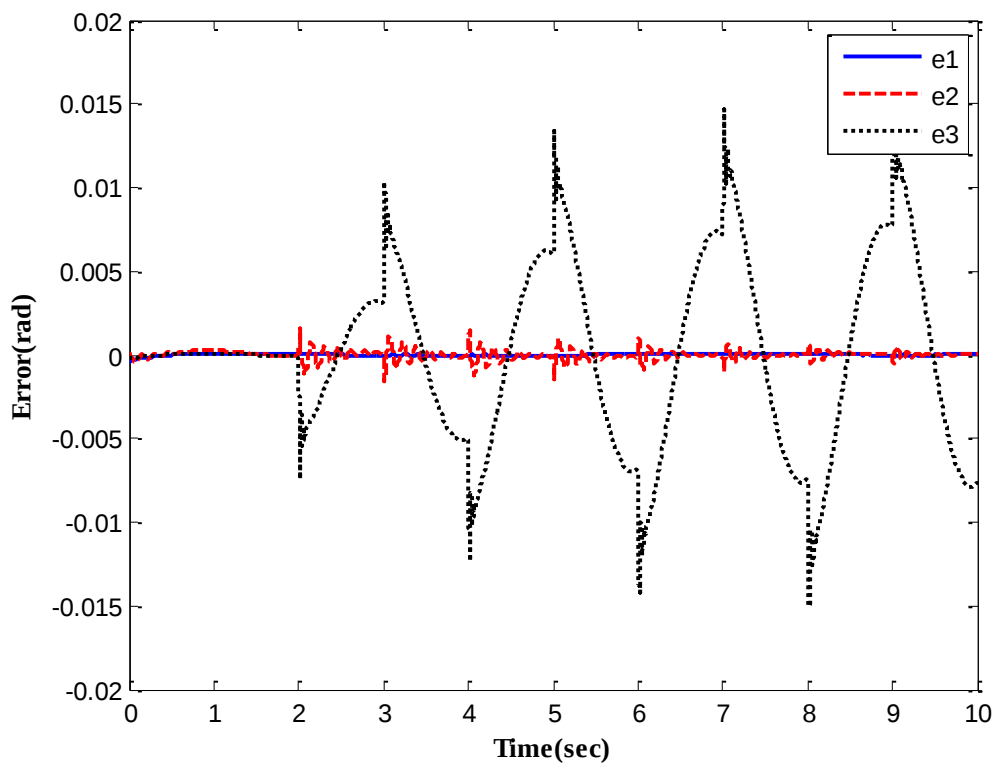
شکل ۴-۱۹: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در کنترل مبتنی بر گشتاور (بدون حضور اغتشاش)

گشتاورهای اعمالی به مفاصل بازوی ماهر است را نشان می‌دهد. در ادامه گشتاور اغتشاشی نشان داده شده در شکل ۴-۴ را به مجری نهایی بازوی ماهر اعمال کرده و مجدداً شبیه سازی را بدون تغییر پارامترها انجام می‌دهیم. خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در این حالت در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با این که خطای ردیابی محدود است اما این اغتشاش تاثیر مشهودی بر متغیر مفصلی سوم دارد. شکل ۴-۲۲ گشتاورهای تولید شده توسط سیستم کنترل را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که سیستم کنترل با تولید سیگنال مناسب سعی در دفع اثر اغتشاش اعمال شده به سیستم دارد. تاثیر اغتشاش بر گشتاور اعمالی به مفاصل دوم و سوم کاملاً مشهود است. در ارتباط با روش کنترل ارائه شده بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور و در مقایسه با روش کنترل مبتنی بر ولتاژ نکات زیر قابل توجه است:

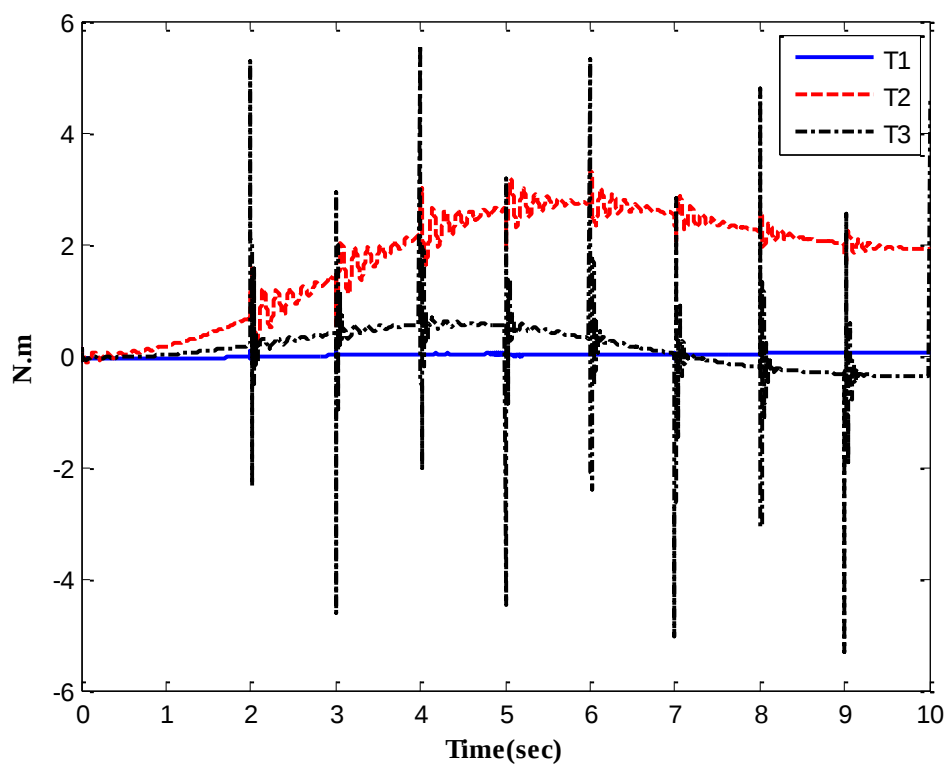
- اندازه‌ی گشتاورهای تولیدی در کنترل مبتنی بر گشتاور کمتر از گشتاور تولید شده در کنترل مبتنی بر ولتاژ است.



شکل ۴-۲۰: گشتاورهای اعمالی به مفاصل در روش کنترل مبتنی بر گشتاور (بدون حضور اغتشاش)



شکل ۴-۲۱: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی در کنترل مبتنی بر گشتاور (در حضور اغتشاش)



شکل ۴-۲۲: گشتاورهای اعمالی به مفاصل در روش کنترل مبتنی بر گشتاور (در حضور اغتشاش)

- روش کنترل مستقل از مدل پیشنهادی، در راهبرد کنترل گشتاور نیز نتایج مطلوب و مناسبی دارد و با وجود بهره نگرستن از معادلات دینامیکی بازوی ماهر، هر کدام از مفاصل قادرند به خوبی مسیر مرجع را ردیابی نمایند.
- گشتاورهای تولید شده به عنوان سیگنال کنترل در این بخش، به صورت مستقیم قابل اعمال به موتورهای بازوی ماهر نیستند و در عمل باید به ولتاژ تبدیل شوند. این در صورتی است که سیگنال کنترل تولید شده در روش کنترل مبتنی بر ولتاژ به صورت مستقیم به موتورهای بازوی ماهر قابل اعمال است.
- در روش کنترل مبتنی بر گشتاور علاوه بر نیاز به اندازه‌گیری متغیر مفصلی بازوی ماهر، به محاسبه‌ی مشتقات اول و دوم مسیر مرجع و همچنین به اندازه‌گیری سرعت هر کدام از مفاصل نیازمندیم. اما در روش کنترل مبتنی بر ولتاژ تنها به اندازه‌گیری متغیر مفصلی و محاسبه‌ی مشتق اول مسیر مرجع نیازمندیم. این ویژگی به دلیل برطرف کردن نیاز مکانیزم کنترل به استفاده از سنسورهای اندازه‌گیری سرعت و در نتیجه عدم وارد شدن نویز مربوطه در محاسبات از مهمترین مزایای روش کنترل مبتنی بر ولتاژ است.
- در روش کنترل مبتنی بر گشتاور دینامیک ها و ویژگی‌های موتورها در نظر گرفته نمی‌شود.
- در روش کنترل مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور، اثر گشتاور اغتشاشی بر سیگنال‌های کنترل و مسیر مفاصل بیشتر از تاثیری است که در روش کنترل مبتنی بر ولتاژ بر روی آنها گذاشته می‌شود.

۸-۴ نتیجه گیری

در این فصل یک روش مستقل از مدل برای کنترل بازوهای ماهر ارائه شده است. اساس این روش استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ است و سیگنال کنترل تولیدی به صورت مستقیم به موتورها اعمال می‌شود. یک رویکرد حالت توسعه یافته غیرخطی اغتشاشات و نامعینی های وارد بر مفاصل بازوی ماهر

را تخمین می‌زند. پس از تخمین این اغتشاشات، ردیابی مسیر مرجع توسط یک کنترل کننده غیر خطی انجام می‌شود.

در این فصل اثبات شده است که خطای ردیابی تمامی متغیرهای مفصلی کراندار باقی می‌ماند. برای این منظور ابتدا نشان داده شده است که خطای همگرایی متغیرهای تخمینی رویتر حالت توسعه یافته غیرخطی کراندار است و رویتر می‌تواند اغتشاشات کلی و عدم قطعیت های تجمعی وارد بر سیستم را به خوبی تخمین بزند. پس از آن، نشان داده شده است که متغیرهای تخمینی رویتر در همسایگی مسیر مرجع قرار می‌گیرند. بنابراین خطای ردیابی محدود خواهد بود.

نتایج بدست آمده از شبیه سازی بر روی بازوی ماهر هنرمند نشان می‌دهد که فرآیند ردیابی در حضور اغتشاشات به خوبی انجام می‌شود. علاوه بر آن نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده‌ی پیشنهادی در این فصل، که در فرآیند تخمین متغیرهای سیستم و اغتشاشات از رویتر حالت توسعه یافته غیرخطی استفاده می‌کند، از کنترل کننده‌ی پیشنهادی در فصل قبل که در آن از رویتر حالت توسعه یافته خطی استفاده شده بود، هم در عملکرد ردیابی خطا و هم در مقابله با اغتشاشات و فرکانس‌های بالاتر ورودی مرجع مناسب‌تر است. علت این امر آن است که توابع غیرخطی بکار رفته در رویتر حالت توسعه یافته غیرخطی به منظور تخمین متغیرهای سیستم و اغتشاشات، از ضرایب ثابت مورد استفاده در رویتر حالت توسعه یافته خطی موثرتر هستند.

همچنین به منظور بررسی عملکرد روش کنترل ارائه شده، این روش بر روی یک بازوی ماهر اسکارا به صورت عملی پیاده‌سازی شد. با وجود معلوم نبودن پارامترهای مدل بازوی ماهر، نتایج بدست آمده عملکرد مناسب سیستم کنترل را در محیط واقعی نیز تایید می‌کند.

فصل پنجم

کنترل مستقل از مدل تطبیقی

۵-۱ مقدمه

روش تطبیقی از معروف‌ترین رهیافت‌هایی است که در علم کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از کنترل تطبیقی مقابله با اثرات نامطلوب ناشی از عدم قطعیت‌های پارامتری است. ایده کنترل تطبیقی این است که ابتدا پارامترهای مدل سیستم‌های تحت کنترل به صورت برخط شناسایی شوند. سپس به منظور دستیابی به بهترین عملکرد، پارامترهای کنترل بر اساس پارامترهای مدل شناسایی شده تنظیم شوند. کنترل تطبیقی در مقابله با عدم قطعیت‌های پارامتری مدل اثربخشی بالایی دارد و به همین دلیل کاربردهای وسیعی در مهندسی دارد. موفقیت روش‌های کنترل تطبیقی عموماً وابستگی زیادی به طراحی قوانین تخمین یا شناسایی متغیر با زمان پارامترهای مدل دارد [۱۰۳].

در این فصل از رهیافت تطبیقی برای تخمین اغتشاشات و ناشناخته‌های بازوی ماهر استفاده شده است، به این صورت که تمامی دینامیک‌های ناشناخته و همچنین اغتشاشات وارد بر بازوی ماهر به صورت مجتمع توسط یک قانون تطبیق تخمین زده می‌شود.

۵-۲ کنترل کننده مستقل از مدل تطبیقی

همانطور که در فصل دوم بیان شد، می‌توانیم رابطه بین متغیر مفصلی و ولتاژ موتور را برای هر کدام از مفاصل بازوی ماهر به صورت زیر بنویسیم:

$$\dot{q} = v + F \quad (۱-۵)$$

که در آن ترم F بیانگر دینامیک‌های ربات، موتور و اغتشاشات خارجی است.

برای ادامه کار تعریف می‌کنیم:

$$e_{tr} = q_d - q \quad (۲-۵)$$

$$\tilde{F} = F - \hat{F} \quad (۳-۵)$$

که در آن $\tilde{F}$ بیانگر خطای تخمین F ، ترم e_{tr} خطای تخمین متغیر مفصلی و q_d مسیر مرجع متغیر مفصلی است. علاوه بر آن تعریف می‌کنیم :

$$\lambda = e_{tr} + \int e_{tr} dt \quad (4-5)$$

همانگونه که در [۱۲۹] بیان شده است، تجمیع خطای ردیابی با انتگرال زمانی اش می تواند تاثیر خطای حالت ماندگار را کاهش دهد.

قضیه ۱-۵ - اگر برای رابطه (۱-۵) قانون کنترلی به صورت زیر تعریف کنیم:

$$v = \dot{q}_d + K\lambda + e_{tr} - \hat{F} \quad (5-5)$$

خطای ردیابی مسیر مرجع به طور یکنواخت نهایتاً کران دار^{۳۴} خواهد بود. در رابطه (۵-۵) K یک ثابت مثبت است و $\hat{F}$ از طریق قانون تطبیق زیر تخمین زده می شود:

$$\dot{\hat{F}} = -\delta\gamma\hat{F} - \gamma\lambda \quad (6-5)$$

که در آن δ و γ بهره های ثابت و مثبت هستند.

- اثبات :

با توجه به روابط (۲-۵) و (۳-۵) تابع معین مثبت زیر را تعریف می کنیم:

$$U = \frac{1}{2}\lambda^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{F}^2 \quad (7-5)$$

مشتق زمانی U به صورت زیر است :

$$\dot{U} = \dot{\lambda}\lambda + \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{F}}\tilde{F} = \lambda(\dot{q}_d - v - F + e_{tr}) + \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{F}}\tilde{F} \quad (8-5)$$

اگر عبارت $\lambda\hat{F}$ را به قسمت راست رابطه ی (۸-۵) اضافه کرده و از آن کم کنیم خواهیم داشت:

$$\dot{U} = \lambda(\dot{q}_d - v - (F - \hat{F}) + e_{tr} - \hat{F}) + \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{F}}\tilde{F} \quad (9-5)$$

و آنگاه:

$$\dot{U} = \lambda(\dot{q}_d - v + e_{tr} - \hat{F}) + \tilde{F}(-\lambda + \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{F}}) \quad (10-5)$$

اجازه بدهید تعریف کنیم:

³⁴ Uniformly Ultimately Bounded (UUB)

$$B = \frac{1}{4\delta} \left(\frac{1}{\gamma} \dot{F} + \delta F \right)^2 + \delta \tilde{F}^2 + \delta \tilde{F} \hat{F} \quad (۱۱-۵)$$

با کم کردن و اضافه کردن ترم B به رابطه (۱۰-۵) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{U} = & \lambda(\dot{q}_d - v + e_{tr} - \hat{F}) + \tilde{F} \left(-\lambda - \delta \hat{F} - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{F}} \right) + \left[-\frac{1}{4\delta} \left(\frac{1}{\gamma} \dot{F} \right. \right. \\ & \left. \left. + \delta F \right)^2 - (\sqrt{\delta} \tilde{F})^2 + \left(2 \times \frac{1}{2\sqrt{\delta}} \left(\frac{1}{\gamma} \dot{F} + \delta F \right) \times (\sqrt{\delta} \tilde{F}) \right) \right] \quad (۱۲-۵) \\ & + \frac{1}{4\delta} \left(\frac{1}{\gamma} \dot{F} + \delta F \right)^2 \end{aligned}$$

لذا :

$$\begin{aligned} \dot{U} = & \lambda(\dot{q}_d - v + e_{tr} - \hat{F}) + \tilde{F} \left(-\lambda - \delta \hat{F} - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{F}} \right) \\ & - \left[\frac{1}{2\sqrt{\delta}} \left(\frac{1}{\gamma} \dot{F} + \delta F \right) - (\sqrt{\delta} \tilde{F}) \right]^2 + \frac{1}{4\delta} \left(\frac{1}{\gamma} \dot{F} + \delta F \right)^2 \quad (۱۳-۵) \\ = & T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \end{aligned}$$

با استفاده از رابطه (۵-۵) برای عبارت T_1 خواهیم داشت:

$$T_1 = \lambda(\dot{q}_d - \dot{q}_d - K\lambda - e_{tr} + \hat{F} + e_{tr} - \hat{F}) = -K\lambda^2 \quad (۱۴-۵)$$

بنابراین:

$$if \quad K > 0 \quad \Rightarrow \quad T_1 < 0 \quad (۱۵-۵)$$

با برابر صفر قرار دادن عبارت T_2 ، قانون تطبیق (۵-۶) بدست خواهد آمد:

$$T_2 = 0 \Rightarrow \dot{\hat{F}} = -\delta\gamma\hat{F} - \gamma\lambda \quad (۱۶-۵)$$

برای عبارت T_3 داریم:

$$T_3 = -\left[\frac{1}{2\sqrt{\delta}} \left(\frac{1}{\gamma} \dot{F} + \delta F \right) - (\sqrt{\delta} \tilde{F}) \right]^2 \leq 0 \quad (۱۷-۵)$$

عبارت T_4 ، یک عبارت مثبت است.، با انتخاب یک مقدار به اندازه کافی بزرگ برای γ و انتخاب یک

مقدار به اندازه کافی کوچک برای δ ، می‌توانیم عبارت T_4 را به اندازه‌ی کافی کوچک کنیم.

$$if \quad \gamma \gg 0 \quad and \quad 0 < \delta \ll 1 \Rightarrow 0 < T_4 < \varepsilon \quad (۱۸-۵)$$

که ε بیانگر یک مقدار مثبت بسیار کوچک است. بنابراین با توجه به روابط (۱۵-۵)، (۱۶-۵)، (۱۷-۵) و در صورت برقراری شرط (۱۸-۵)، خطای ردیابی مسیر مرجع یکنواخت نهایتاً کراندار (UUB) خواهد بود.

نکته - با توجه به رابطه (۵-۵)، برای محاسبه $\hat{F}$ به محاسبه $\dot{q}_d$ نیاز داریم. برای بدست آوردن $\dot{q}_d$ می‌توانیم از ردیاب مشتق‌گیر معرفی شده در رابطه‌ی (۴-۹) استفاده کنیم. شکل ۱-۵ دیاگرام مکانیزم کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

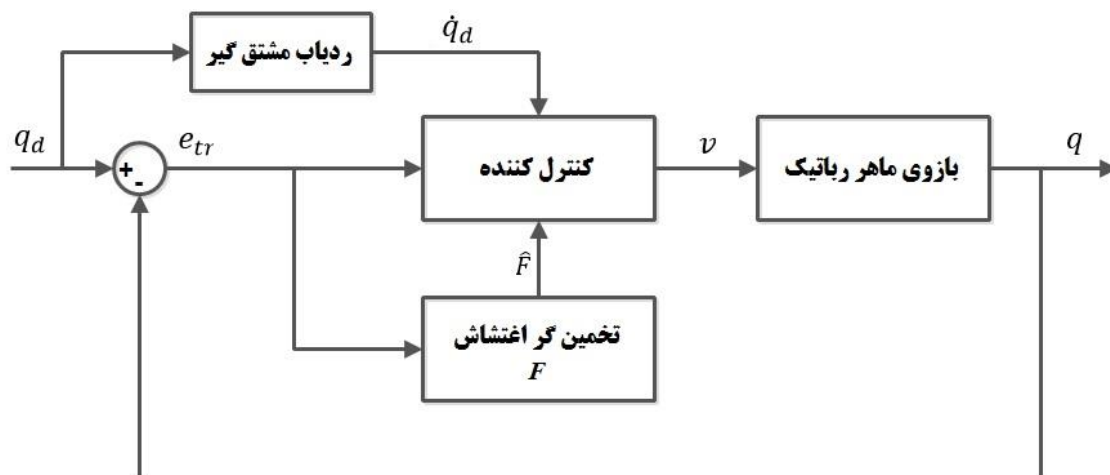
۳-۵ شبیه سازی

در این بخش برای بررسی مکانیزم کنترل پیشنهادی، آن را روی بازوی ماهر هنرمند پیاده سازی می‌کنیم. مشخصات دینامیکی این ربات در فصول قبل تشریح شده است. میزان حداکثر ولتاژ موتورهای روی مقدار $|v_{max}| = 40V$ تنظیم شده است.

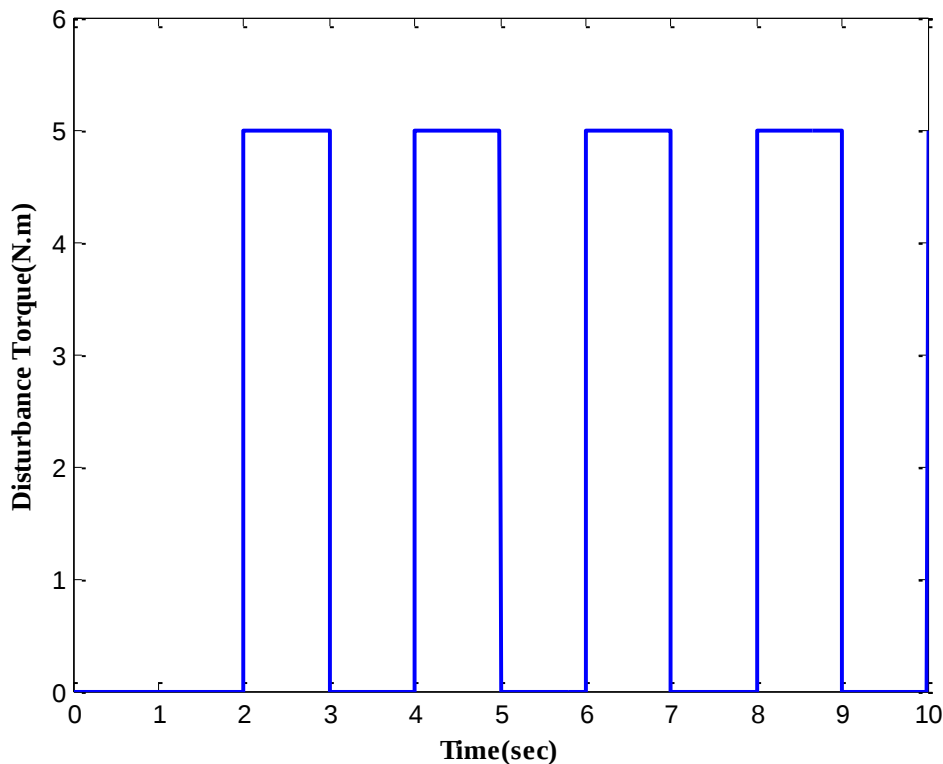
مسیر مرجع برای همه مفاصل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_d = 1 - \cos(0.1\pi t) \quad (۱۹-۵)$$

گشتاور اغتشاشی وارد بر مجری نهایی بازوی ماهر، در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۵: بلوک دیاگرام سیستم کنترل تطبیقی مستقل از مدل



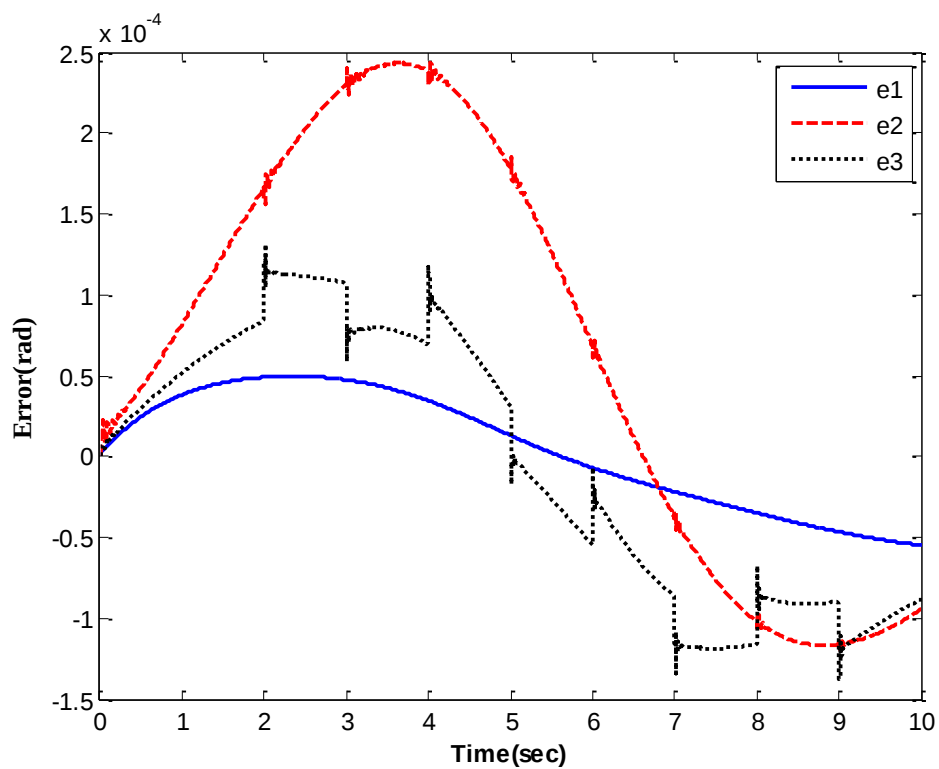
شکل ۵-۲: گشتاور اغتشاشی وارد بر مجری نهایی

برای هر کدام از مفاصل ربات یک کنترل کننده به شکل رابطه‌ی (۵-۵) تعریف می‌کنیم. پارامترها و ضرایب کنترل کننده، قانون تطبیق و ردیاب مشتق‌گیر به صورت زیر تنظیم شده‌اند:

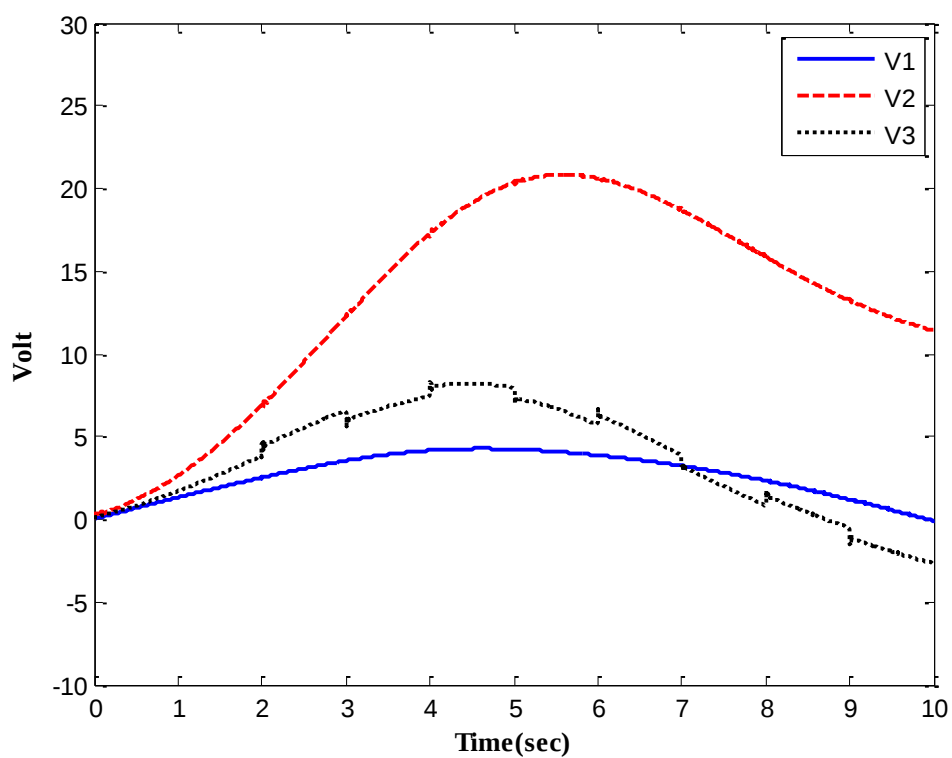
$$\begin{aligned} K_1 = 20, K_2 = 20, K_3 = 20, \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 10^8 \\ \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 10^{-4}, L_1 = 0.0005, L_2 = 0.001 \end{aligned} \quad (۵-۲۰)$$

که در آن K_i ، γ_i و δ_i پارامترهای مفصل i ام هستند.

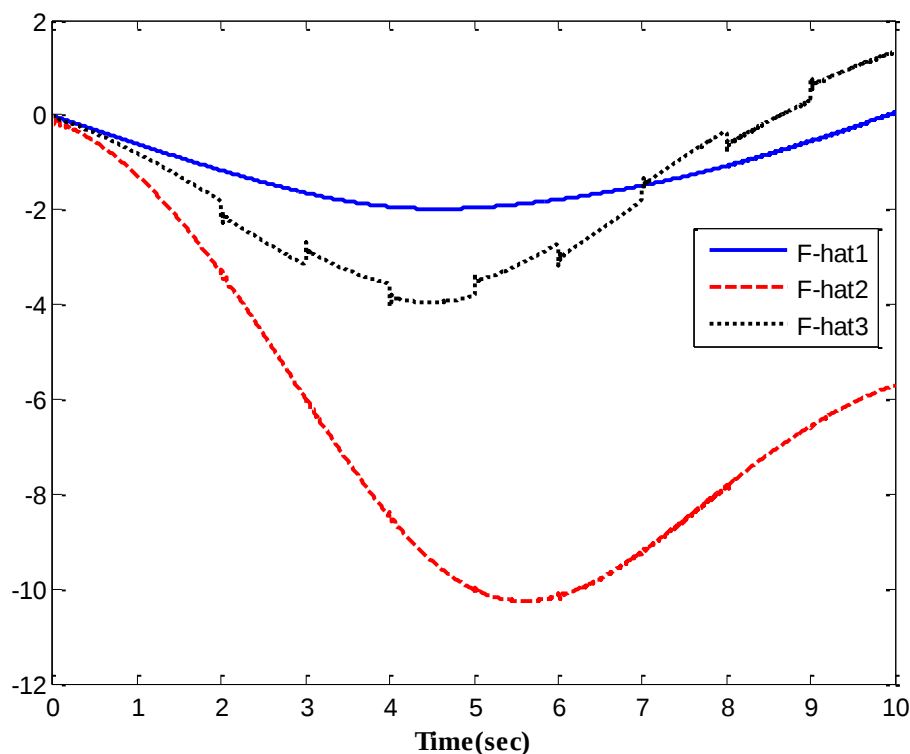
خطای ردیابی مفاصل بازوی ماهر در شکل ۵-۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، مسیر مرجع در نهایت توسط خروجی به شکل مناسبی ردیابی می‌شود و مقدار تمامی خطاها پایین تر از $2.5 \times 10^{-4} \text{ (rad)}$ است که مقدار بسیار قابل قبولی است. سیگنال‌های کنترل که همان ولتاژ موتورها هستند در شکل ۵-۴ نشان داده شده است. این ولتاژها هموار بوده و زیر مقدار اشباع تعریف شده برای ولتاژ موتورها هستند. در شکل ۵-۵ متغیر تخمینی $\hat{F}$ برای هر کدام از مفاصل نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی ها ملاحظه می‌شود که عملکرد کنترل کننده پیشنهادی مطلوب و موثر است.



شکل ۵-۳: خطای ردیابی متغیرهای مفصلی $(q_{di} - q_i)$



شکل ۵-۴: ولتاژهای اعمالی به مفاصل ربات (سیگنال‌های کنترل)



شکل ۵-۵: متغیرهای تخمینی $\hat{F}$ برای هر کدام از مفاصل ربات

۴-۵ نتیجه‌گیری

در این فصل یک روش کنترل مستقل از مدل برای بازوهای ماهر رباتیک ارائه شده است. در این روش که بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ ارائه شده است، مفاصل به صورت مستقل کنترل می‌شوند و تمامی اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها و نامعینی‌های دینامیکی به صورت یک ترم ناشناخته در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این اثرات مربوط به معادلات دینامیکی ربات نیز در همین ترم ناشناخته قرار می‌گیرد. لذا برای پیاده‌سازی این روش نیازی به معادلات پیچیده دینامیکی ربات و موتورهای آن نداریم. این ترم ناشناخته توسط یک قانون تطبیق تخمین زده می‌شود و در نهایت فرآیند ردیابی مسیر مرجع توسط کنترل‌کننده پیشنهادی به خوبی صورت می‌گیرد. همچنین از آنجاییکه سیگنال‌های کنترل همان ولتاژ موتورها هستند، می‌توان آنها را به آسانی و به صورت مستقیم به موتورها اعمال نمود. نتایج شبیه‌سازی انجام شده بر روی ربات هنرمند نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در حضور اغتشاشات مختلف ثابت و متناوب نیز عملکرد مناسبی دارد. لازم به ذکر است که تنها اطلاعاتی که برای پیاده‌سازی این مکانیزم کنترلی نیاز داریم، ولتاژ موتورها و متغیر مفصلی هستند، که هر دو به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشند.

فصل ششم

کنترل مستقل از مدل بازوی ماهر با استفاده از شبکه عصبی

۱-۶ مقدمه

شاید مهمترین ویژگی که می‌توان برای شبکه‌های عصبی برشمرد این است که قادرند داده‌های عظیم چند متغیره را تفسیر کنند سیستم تولید کننده‌ی آن‌ها را تخمین بزنند. امروزه از مدل‌های مختلف شبکه‌های عصبی به منظور تخمین، برازش و پیش بینی استفاده می‌شود. اما یکی از مهمترین کاربردهای شبکه‌های عصبی، بکارگیری آن‌ها در علم کنترل است.

به طور کلی کاربرد شبکه‌های عصبی در علم کنترل در دو گروه دسته بندی می‌شود: شناسایی و کنترل. به کارگیری شبکه‌های عصبی در فاز شناسایی سیستم‌ها و مدل‌ها، به واسطه‌ی خاصیت معروف شبکه‌های عصبی یعنی همان «تقریب زنی عمومی» آسان‌تر است. چرا که در این حالت شبکه‌ی عصبی در مباحث مربوط به بررسی پایداری مکانیزم کنترلی وارد نمی‌شود و اگر بروزرسانی وزن‌های شبکه بر اساس روش‌های استاندارد چون پس انتشار خطا انجام شود، محدود ماندن وزن‌ها تضمین شده است. اما استفاده از شبکه‌ی عصبی در طراحی کنترل کننده پیچیده‌تر است، چرا که در بررسی پایداری سیستم حلقه بسته لازم است که شبکه‌ی عصبی و روند تغییر و بروزرسانی وزن‌هایش نیز مدنظر قرار گیرد [۱۰۸]. در این فصل برای تخمین اغتشاشات مجتمع وارد بر بازوی ماهر از یک شبکه عصبی استفاده شده است. نوآوری این فصل علاوه بر استفاده از شبکه‌ی عصبی برای این منظور، این است که از جریان موتورهای بازوی ماهر به عنوان یکی از ورودی‌های شبکه عصبی استفاده شده است. نکته‌ای که با وجود اهمیتش در راهبرد کنترل ولتاژ تا کنون به آن پرداخته نشده است.

۲-۶ مدل اغتشاش برای مفصل بازوی ماهر

همانطور که در فصول گذشته مشاهده شد، اساس کار راهبرد کنترل ولتاژ این است که ولتاژ هر کدام از موتورها به عنوان سیگنال کنترل و متغیر مفصلی نیز به عنوان خروجی کنترل شده در نظر گرفته می‌شود. از طرفی، همانطور که در فصول گذشته نیز بیان شد، با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ می‌توانیم هر کدام از مفاصل را به صورت یک سیستم مستقل در نظر گرفته و کنترل کنیم. در فصل دوم بیان شد

که در راهبرد کنترل ولتاژ معادله‌ی الکتریکی هر کدام از موتورهای بازوی ماهر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} + \varphi = v \quad (۱-۶)$$

با اضافه و کم کردن $\dot{q}$ به این رابطه خواهیم داشت:

$$RI_a + L\dot{I}_a + (K_b r^{-1} - 1)\dot{q} + \dot{q} + \varphi = v \quad (۲-۶)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\dot{q} = v + F \quad (۳-۶)$$

که در آن:

$$F = -(RI_a + L\dot{I}_a + (K_b r^{-1} - 1)\dot{q} + \varphi) \quad (۴-۶)$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود پارامتر F که بیانگر اغتشاشات کلی و ناشناخته‌های سیستم است، به متغیرهای I_a و $\dot{q}$ وابسته است. از مهمترین نکاتی که در مبحث راهبرد کنترل ولتاژ مطرح شده، این است که جریان موتور کلیه اثرات دینامیکی بازوی ماهر و موتور و همچنین اغتشاشات وارد بر آن را در خود دارد [۹۲]. اما با این حال تاکنون در هیچ کدام از روش‌های ارائه شده بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ، از جریان موتورها بهره گرفته نشده است. ما در این فصل و با توجه به رابطه (۴-۶) از جریان موتورها برای یافتن اغتشاشات کلی وارد بر هر مفصل، که شامل دینامیک‌های بازوی ماهر و موتورها و همچنین اغتشاشات خارجی وارد بر آنهاست، استفاده خواهیم کرد.

۳-۶ تخمین عبارت F با استفاده از شبکه‌ی عصبی

شبکه‌های عصبی چند لایه پرسپترون (MLP) از معروفترین و در عین حال کاملترین شبکه‌های عصبی هستند. این شبکه‌ها به دلیل خاصیت تقریب زندگی عمومی که دارند در بحث تقریب زدن توابع غیرخطی کاربرد فراوان دارند [۱۳]. به همین دلیل ما در این فصل برای تخمین مقدار F از یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده می‌کنیم.

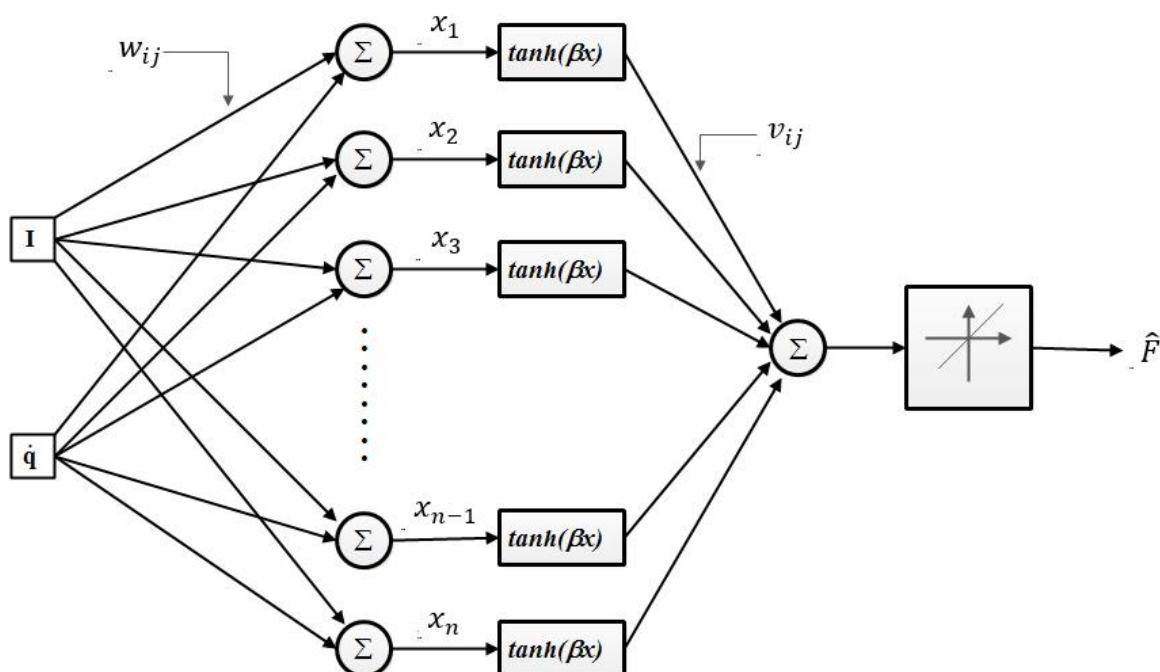
ورودی های این شبکه مقادیر $\dot{q}$ و جریان موتور هر مفصل I خواهند بود. شبکه عصبی مورد استفاده یک شبکه دو لایه است. تعداد نرون ها در لایه مخفی n عدد در نظر گرفته شده است. توابع تحریک نرون ها در لایه میانی تابع $\tanh(\beta x)$ و در لایه خروجی تابع خطی در نظر گرفته شده است. همچنین از الگوریتم پس انتشار خطا^{۳۵} برای بروز رسانی وزن های شبکه استفاده شده است. دیاگرام کلی شبکه عصبی مورد استفاده در شکل ۶-۱ نشان داده شده است.

اگر خروجی شبکه عصبی را با $\hat{F}$ نمایش دهیم، آنگاه خطای تخمین اغتشاش F به صورت زیر خواهد بود:

$$e_F = F - \hat{F} \quad (۵-۶)$$

که مقدار F در هر لحظه، با توجه به رابطه ی (۶-۳) با اندازه گیری مقادیر v و $\dot{q}$ قابل محاسبه است. عبارت دیگر داریم:

$$F = \dot{q} - v \quad (۶-۴)$$



شکل ۶-۱: دیاگرام کلی شبکه عصبی مورد استفاده برای تخمین F
(به منظور جلوگیری از پیچیده شدن شکل بایاس نرون ها نشان داده نشده اند)

³⁵ Back Propagation Error (BPE)

بردار ورودی شبکه را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\mathbf{X}^{3 \times 1} = [I \ \dot{q} \ 1]^T \quad (7-6)$$

درایه‌ی آخر بردار به منظور در نظر گرفتن مقدار بایاس هر نرون، ۱ در نظر گرفته شده است. ماتریس وزن‌های لایه مخفی، با در نظر گرفتن مقادیر بایاس هر نرون در ستون آخر، به صورت $\mathbf{W}^{n \times 3}$ تعریف می‌شود. همچنین بردار وزن‌های لایه خروجی، با در نظر گرفتن درایه‌ی آخر آن به عنوان مقدار بایاس نرون، به صورت $\mathbf{V}^{1 \times (n+1)}$ تعریف می‌شود.

با توجه به اینکه تابع $\tanh(\beta x)$ به عنوان تابع تحریک برای نرون‌های لایه‌ی میانی در نظر گرفته شده است، لذا خروجی لایه‌ی میانی به صورت زیر خواهد بود:

$$\mathbf{Z}^{n \times 1} = \tanh(\beta(\mathbf{W}^{n \times 3} \times \mathbf{X}^{3 \times 1})) \quad (8-6)$$

و در نهایت خروجی شبکه به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\hat{F} = \mathbf{V}^{1 \times (n+1)} \times [\mathbf{Z}^{n \times 1}; 1] \quad (9-6)$$

همانگونه که عنوان شد برای بروز رسانی وزن‌های شبکه از الگوریتم پس انتشار خطا استفاده شده است.

اگر تابع هدف مورد نظر به منظور کمینه سازی را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$J = \frac{1}{2} e_F^2 = \frac{1}{2} (F - \hat{F})^2 \quad (10-6)$$

آنگاه ماتریس وزن‌های لایه‌ی میانی و لایه‌ی خروجی به صورت زیر بروز رسانی می‌شوند:

$$\mathbf{W}_{New}^{n \times 3} = \mathbf{W}^{n \times 3} + \Delta \mathbf{W}^{n \times 3} \quad (11-6)$$

$$\mathbf{V}_{New}^{1 \times (n+1)} = \mathbf{V}^{1 \times (n+1)} + \Delta \mathbf{V}^{1 \times (n+1)} \quad (12-6)$$

که در آن ماتریس‌های $\Delta \mathbf{W}^{n \times 3}$ و $\Delta \mathbf{V}^{1 \times (n+1)}$ با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\Delta \mathbf{W}^{n \times 3} = -\eta \times \delta_2^{n \times 3} \times [\mathbf{X}^{3 \times 1}]^T \quad (13-6)$$

$$\Delta \mathbf{V}^{1 \times (n+1)} = -\eta \times \delta_1^{1 \times 1} \times [\mathbf{Z}^{n \times 1}; 1]^T \quad (14-6)$$

در روابط فوق، η معرف نرخ یادگیری است و مقادیر $\delta_1^{1 \times 1}$ و $\delta_2^{n \times 1}$ که بیانگر حساسیت رفتار شبکه در لایه های خروجی و میانی هستند، با توجه به فرآیندهای مربوط به روش پس انتشار خطا و با توجه به توابع تحریک انتخاب شده، به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\delta_1^{1 \times 1} = -\beta \times e_F \quad (15-6)$$

$$\delta_2^{n \times 1} = \beta \times \text{sign}(\mathbf{1}^{n \times 1} - (\mathbf{Z}^{n \times 1})^2) \cdot ([\mathbf{V}^{1 \times n}]^T \times \delta_1^{1 \times 1}) \quad (16-6)$$

در روابط فوق e_F معرف خطای تخمین F است که در رابطه (5-6) بیان شده است، تابع $\text{sign}(\cdot)$ معرف تابع علامت است، $\mathbf{1}^{n \times 1}$ معرف برداری ستونی است که تمام درایه های آن ۱ هستند و عملگرهای $\cdot^2$ و $*$ به ترتیب معرف توان دوم درایه به درایه و ضرب درایه به درایه ماتریسی هستند.

روابط (11-6) تا (16-6) تضمین می کنند که وزن های شبکه عصبی محدود باقی می ماند.

۴-۶ طراحی کنترل کننده برای مفصل بازوی ماهر

پس از تخمین اغتشاشات کلی وارد بر هر کدام از مفاصل با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه، در این بخش قانون کنترل مربوط به مفاصل را مطرح می کنیم. برای ادامه کار تعریف می کنیم:

$$e_{tr} = q_d - q \quad (17-6)$$

که در آن e_{tr} خطای تخمین متغیر مفصلی و q_d مسیر مرجع متغیر مفصلی است. علاوه بر آن مشابه با فصل قبل به منظور کاهش تاثیر خطای حالت ماندگار [107] تعریف می کنیم:

$$\lambda = e_{tr} + \int e_{tr} dt \quad (18-6)$$

حال می توانیم برای سیستم معرفی شده با رابطه (3-6) قضیه زیر را بیان کنیم:

قضیه ۱-۶- اگر برای رابطه (3-6) قانون کنترلی به صورت زیر تعریف کنیم:

$$v = \dot{q}_d + K\lambda + e_{tr} - \hat{F} \quad (19-6)$$

خطای ردیابی مسیر مرجع محدود خواهد بود:

$$e_{tr}(t) < \sigma \quad (20-6)$$

در رابطه (۶-۱۹) K یک ثابت مثبت است و $\hat{F}$ از طریق شبکه عصبی معرفی شده توسط روابط (۶-۷) تا (۶-۱۶) تخمین زده می‌شود.

- اثبات:

با قرار دادن رابطه (۶-۱۹) در رابطه (۶-۳) خواهیم داشت:

$$\dot{q} = F + \dot{q}_d + K\lambda + e_{tr} - \hat{F} \quad (۶-۲۱)$$

لذا دینامیک خطای حلقه بسته به شکل زیر خواهد بود:

$$\dot{e}_{tr} = -e_{tr} - K\lambda - e_F \quad (۶-۲۲)$$

تابع مثبت معین زیر را تعریف می‌کنیم:

$$U = \frac{1}{2}\lambda^2 \quad (۶-۲۳)$$

مشتق زمانی U به صورت زیر است :

$$\dot{U} = \dot{\lambda}\lambda = \lambda(\dot{e}_{tr} + e_{tr}) \quad (۶-۲۴)$$

با توجه به رابطه‌ی (۶-۲۲) می‌توان نوشت:

$$\dot{U} = \lambda(-e_{tr} - K\lambda - e_F + e_{tr}) = -K\lambda^2 - \lambda e_F \quad (۶-۲۵)$$

با توجه به اینکه اگر $K > 0$ آنگاه خواهیم داشت:

$$-K\lambda^2 < 0 \quad (۶-۲۶)$$

لذا برای اینکه داشته باشیم $\dot{U} < 0$ رابطه زیر باید برقرار باشد:

$$|\lambda e_F| < |K\lambda^2| \quad (۶-۲۷)$$

با توجه به محدود بودن F که در فصول قبل به آن اشاره شد، طبق قضیه تقریب عمومی با انتخاب

مناسب پارامترهای طراحی شبکه‌ی عصبی می‌توانیم خروجی شبکه یعنی $\hat{F}$ را به هر میزان دلخواه به

مقدار حقیقی F نزدیک کنیم. [13]. در نتیجه قادر خواهیم بود شرط (۶-۲۷) را با انتخاب مناسب

تعداد نرون‌های لایه میانی و همچنین انتخاب مناسب توابع تحریک برقرار کنیم. با برقراری شرط (۶-۲۷)

(۶) خواهیم داشت:

$$\dot{U} < 0 \quad (۶-۲۸)$$

و در نتیجه خطای ردیابی مسیر مرجع محدود خواهد بود و رابطه (۶-۲۰) برقرار است.

۵-۶ شبیه سازی

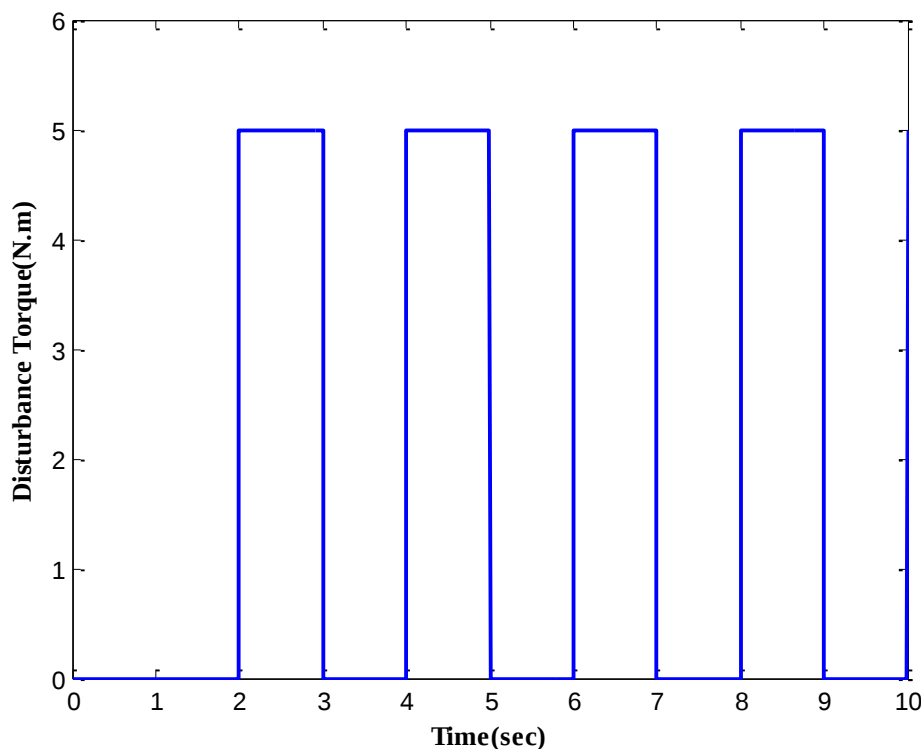
در این بخش برای بررسی مکانیزم کنترل پیشنهادی، آن را روی بازوی ماهر هنرمند پیاده سازی می-کنیم. مشخصات دینامیکی این ربات در فصول قبل تشریح شده است. حداکثر ولتاژ موتورهای روی مقدار $|v_{max}| = 40V$ تنظیم شده است. مسیر مرجع برای همه مفاصل مانند فصول قبل به صورت زیر تعریف می-شود:

$$q_d = 1 - \cos(0.1\pi t) \quad (۶-۲۹)$$

گشتاور اغتشاشی وارد بر مجری نهایی بازوی ماهر، در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.

تعداد نرون‌های لایه میانی تخمینگر عصبی را ۲۰ عدد در نظر می‌گیریم. مقادیر سایر پارامترهای شبکه عصبی را به صورت زیر انتخاب می‌کنیم:

$$\eta_1 = 1.5, \beta_1 = 0.15, \eta_2 = 0.001, \beta_2 = 20, \eta_3 = 1, \beta_3 = 0.1 \quad (۶-۳۰)$$



شکل ۶-۲: گشتاور اغتشاشی وارد بر مجری نهایی

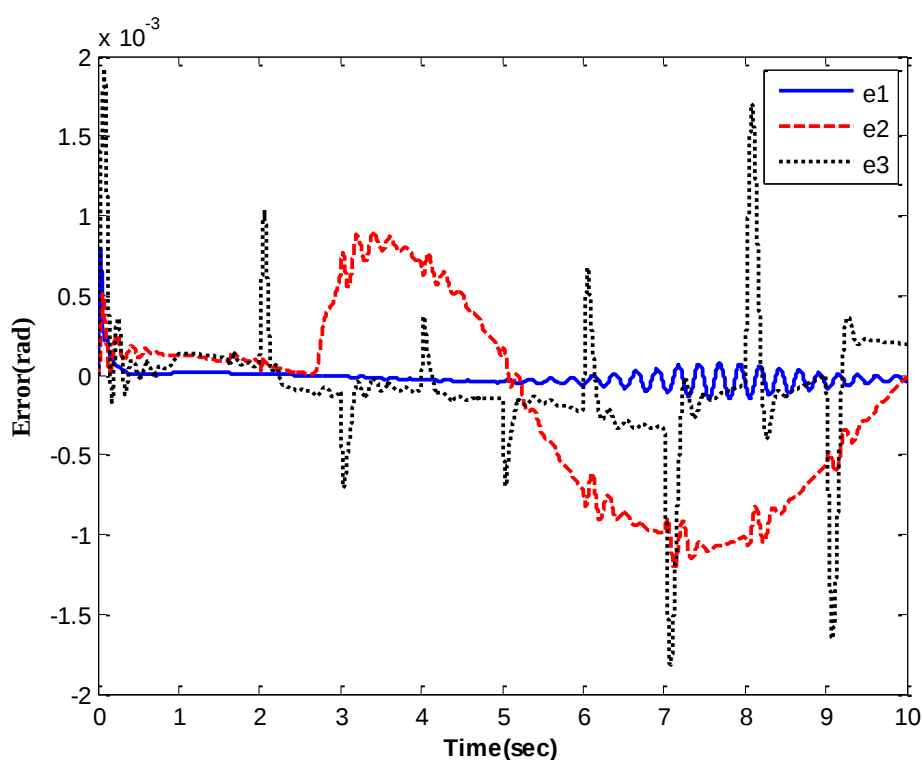
که در آن η_i و β_i پارامترهای شبکه عصبی مربوط به مفصل i ام هستند. نکته قابل توجه این است که وزن‌ها و بایاس‌های اولیه شبکه عصبی به صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌شوند. همچنین برای هر کدام از مفاصل یک قانون کنترل به صورت رابطه (۶-۱۹) تعریف شده است. پارامترهای مربوط به کنترل‌کننده برای هر یک از مفاصل به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$K_1 = 5, \quad K_2 = 0.5, \quad K_3 = 10 \quad (۶-۳۱)$$

خطای ردیابی مفاصل بازوی ماهر در شکل ۶-۳ نشان داده شده است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود، خطای ردیابی محدود است. سیستم کنترل به خوبی اثرات اغتشاشات وارد بر سیستم در زمان‌های مختلف را دفع می‌کند. این مکانیزم دفع اغتشاشات به خوبی در نمودار خطای ردیابی متغیر مفصلی سوم مشهود است.

سیگنال‌های کنترل که همان ولتاژ موتورها هستند در شکل ۶-۴ نشان داده شده است. مقدار این ولتاژها زیر مقدار اشباع تعریف شده برای ولتاژ موتورها هستند. همانگونه که ملاحظه می‌شود، ولتاژهای اعمالی به موتورها، به منظور کاهش اثر اغتشاش وارد شده بر ربات به خوبی تغییر می‌کنند.



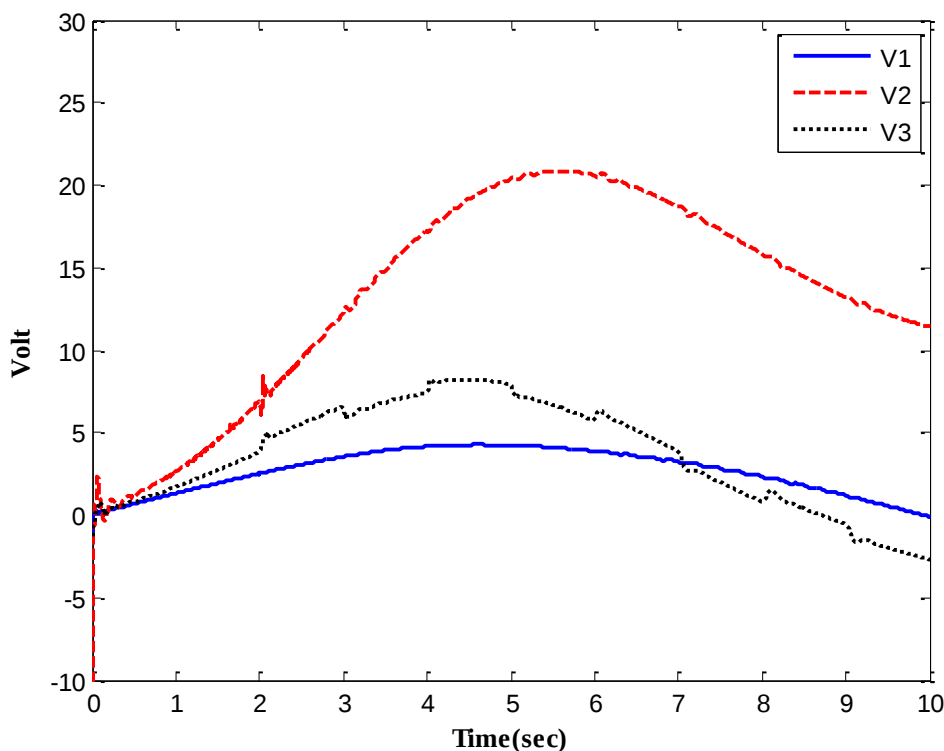
شکل ۶-۳: خطای ردیابی متغیرهای مفاصل $(q_{di} - q_i)$

در شکل ۵-۶ جریان هر کدام از موتورها نشان داده شده است. مطابق انتظار با وارد شدن اغتشاش به بازوی ماهر، جریان موتورها نیز تغییر می‌کند. همانطور که در ابتدای فصل بیان شد، راهبرد کنترل ولتاژ عنوان می‌کند که جریان موتورها بیانگر دینامیک‌های ناشناخته و تاثیر اغتشاشات وارد بر بازوی ماهر است و این موضوع با توجه به نحوه تغییرات جریان در شکل ۵-۶ تایید می‌شود.

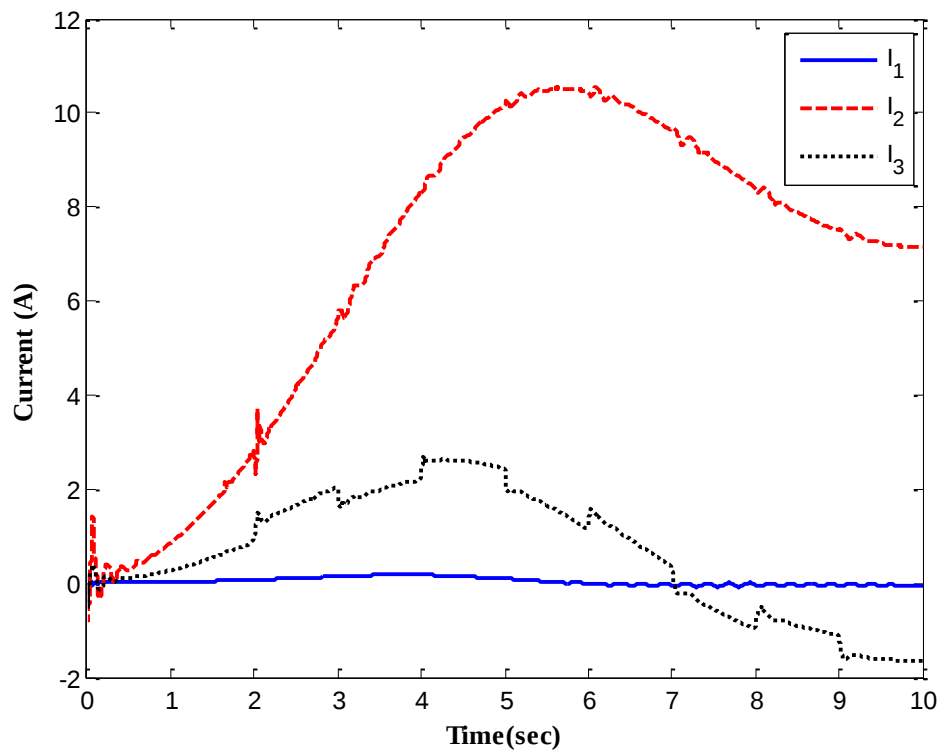
شکل ۶-۶ خروجی مفصلی سوم بازوی ماهر را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ردیابی متغیر مفصلی با استفاده از سیستم کنترل پیشنهادی در این فصل به خوبی انجام می‌شود.

۶-۶ نتیجه‌گیری

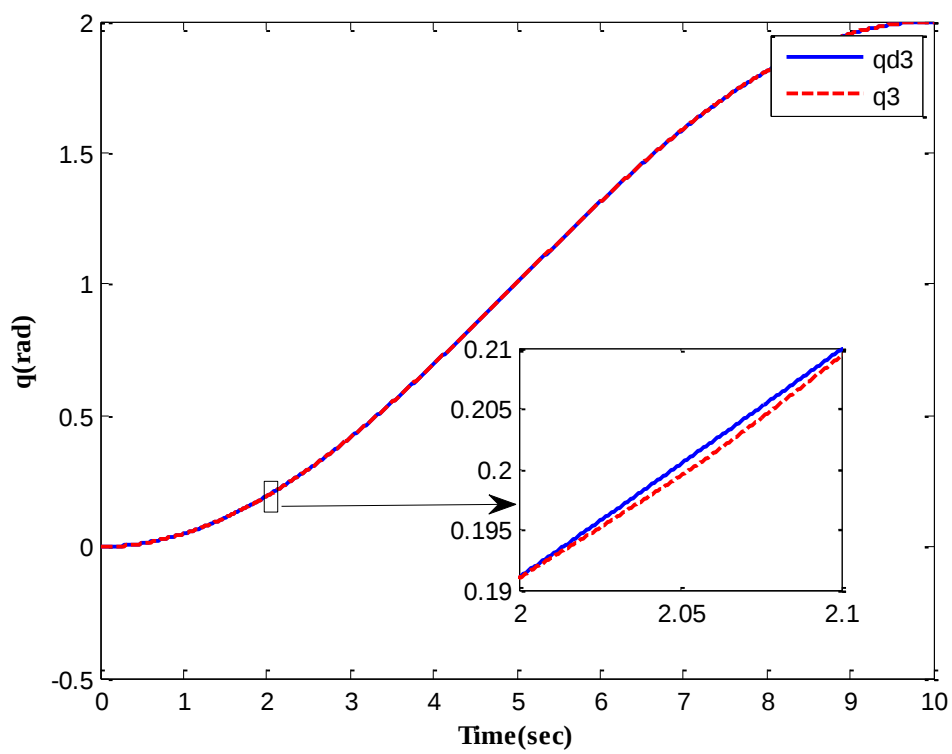
در این فصل برای هر کدام از مفاصل ربات یک مدل محلی تعریف شده است. در این مدل تمامی اطلاعات مربوط به دینامیک‌های ربات و موتورها و همچنین اطلاعات مربوط به نامعینی‌های سیستم و اغتشاشات مختلف به صورت تجمعی در نظر گرفته شده است.



شکل ۶-۴: سیگنال‌های کنترل (ولتاژ موتورها)



شکل ۶-۵: جریان موتورهای



شکل ۶-۶: متغیر مفصلی سوم بازوی ماهر

در راهبرد کنترل ولتاژ بیان می‌شود که جریان موتورهای تمامی اطلاعات مربوط به اثرات دینامیکی و همچنین اثرات مربوط به اغتشاشات و نامعینی‌ها را در خود دارد. با این وجود تاکنون در هیچ کدام از روش‌های ارائه شده بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ، از جریان موتورهای بهره گرفته نشده است. در این رساله برای اولین بار اغتشاشات تجمعی سیستم به صورت تابعی از جریان موتور ربات و متغیر سرعت مفصلی ربات در نظر گرفته شده است.

در ادامه برای تخمین اغتشاشات تجمعی از یک شبکه عصبی استفاده شده است. شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه با توجه به ویژگی تخمین زندگی عمومی‌شان برای این منظور در نظر گرفته شده‌اند. برای برورسانی وزن‌های شبکه عصبی از الگوریتم پس انتشار خطا استفاده شده است. پس از تخمین این اغتشاشات، از یک کنترل‌کننده برای ردیابی مسیر مرجع استفاده شده است و پایداری سیستم کنترل نیز نشان داده شده است.

با توجه به موارد مطرح شده، مزایای روش ارائه شده را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- در طراحی این روش نیاز به هیچ کدام از معادلات دینامیکی پیچیده بازوی ماهر و موتورهای آن نداریم.
- در این روش هر کدام از مفاصل به صورت کاملاً مستقل کنترل می‌شوند.
- در این روش از جریان موتورهای، که عامل اصلی نشان دهنده‌ی اثرات عوامل دینامیکی شناخته شده و ناشناخته بر روی ربات هستند، استفاده شده است.
- سیگنال‌های کنترل همان ولتاژ موتورهای هستند و پس از محاسبه توسط کنترل‌کننده به راحتی و به صورت مستقیم به سیستم اعمال می‌شوند.
- استفاده از شبکه عصبی مناسب، همگرایی تخمین اغتشاشات تجمعی به مقادیر واقعی را تضمین می‌کند.

در نهایت، نتایج شبیه‌سازی انجام شده بر روی یک ربات هنرمند نشان می‌دهد که روش پیشنهادی موثر بوده و قادر است اثرات نامطلوب اغتشاشات مختلف ثابت و متناوب را به خوبی از بین ببرد.

فصل، ہفتم

نتیجہ گیری و پیشہادات

۷-۱ مقدمه

انسان برای انجام امور و وظایف روزمره‌ی خود نیاز به داشتن اطلاعات و جزئیات ریاضی دقیق محیط پیرامونی خود ندارد. در این بین چشمان انسان نقش مهمی در انجام این امور ایفا می‌کنند. ما موقعیت هدف را در هر دو دستگاه مختصات چشم‌ها و دست‌ها بدست می‌آوریم. لذا به کمک اطلاعاتی که از چشمانمان دریافت می‌کنیم قادر خواهیم بود اشیاء مختلف را با ویژگی‌های دینامیکی و سینماتیکی ناشناخته، بوسیله‌ی دستانمان بلندکنیم و آنها را با مهارت و بدون کوچکترین مشکلی برای انجام امور پیچیده‌تر بکار گیریم. روش برخورد راحت انسان با اشیای ناشناخته نشان می‌دهد که ما به اطلاعات دقیق و کاملی در مورد دینامیک‌ها و سینماتیک‌های بازویمان و هدف نیاز نداریم. حال آیا نمی‌توان از روش برخورد انسان با اشیاء، برای کنترل بازوهای ماهر صنعتی ایده گرفت؟

دینامیک‌ها و سینماتیک بازوهای ماهر بسیار غیرخطی است. در مواردی که مدل ربات با جزئیات دقیق در اختیار باشد، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدل می‌تواند عملکرد خوبی داشته باشد. اما برای مثال وقتی ربات ابزاری با طول‌های متفاوت را بلند می‌کند، نقاط درگیری و جهات ناشناخته پدیدار می‌شود که دینامیک‌ها و سینماتیک ربات را تغییر داده و هدایت دقیق آن را مشکل می‌سازد. بنابراین فرض در اختیار داشتن اطلاعات دقیق و کامل درباره‌ی مدل بازوی ماهر، قابلیت تطبیق‌پذیری ربات با تغییرات و عدم قطعیت‌های ربات و محیط را، به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

اگرچه روش‌های مختلف کالیبره کردن و شناسایی می‌تواند در یافتن پارامترهای دینامیکی و سینماتیکی بازوی ماهر با دقت قابل قبول مفید باشد، اما این روش‌ها بعضاً بسیار وقت‌گیر، پیچیده و از لحاظ محاسباتی سنگین هستند و از طرفی معمولاً برای بکارگیری آنها باید شرایط و محدودیت‌های خاصی برقرار باشد.

بنابراین بهبود کنترل‌کننده‌های ربات به گونه‌ای که بتواند به صورت منعطف با نامعینی‌های دینامیکی و سینماتیکی مقابله نماید، گام مهمی در جهت رسیدن به بازوهای ماهر رباتیک خبره‌تر خواهد بود.

روند تحول تئوری کنترل به سمتی پیش می‌رود که در آن وابستگی کنترل‌کننده به مدل ریاضی سیستم تا حد امکان کاهش یابد. حال برای قطع این وابستگی چند راهکار وجود دارد.

اول اینکه یک مدل استاندارد و نامی برای سیستم واقعی تعریف کنیم و با توجه به شناختی که از خصوصیات و ویژگی‌های مدل واقعی داریم، برای مدل نامی یک محدوده‌ی تغییرات در نظر بگیریم. یک کنترل‌کننده برای این مدل نامی طراحی کنیم و با استفاده از روش‌های ریاضی پیشرفته قوانینی برای آن تعیین کنیم که بتواند در محدوده‌ی تغییرات تعیین شده برای مدل واقعی، خود را تنظیم کرده و عملکرد مناسبی داشته باشد. البته امیدوار باشیم مدل واقعی سیستم از محدوده‌ی تغییرات مورد نظر خارج نشود. برای اطمینان از اینکه کنترل‌کننده در این حالت به درستی کار می‌کند، می‌توانیم محدوده‌ی تغییرات را کوچک در نظر بگیریم. که در این صورت قطعاً عملیات محاسباتی برای طراحی کنترل‌کننده کمتر بوده و نتیجه نهایی نیز احتمالاً رابطه‌ی ساده‌ای خواهد بود. اما هزینه‌ای که برای این سادگی می‌پردازیم اعتبار محدود این کنترل‌کننده، برای سیستم واقعی است. اما اگر بخواهیم کنترل‌کننده‌ی طراحی شده در مقیاس بزرگتری اعتبار داشته باشد، ناچاریم محدوده‌ی تغییرات مدل نامی را بزرگتر در نظر بگیریم. این امر باعث پیچیده شدن طراحی کنترل‌کننده و بالارفتن حجم عملیات محاسباتی برای تعیین سیگنال کنترل خواهد شد، که قاعدتاً مشکلات بعدی را چه از نظر نرم‌افزاری و چه از نظر سخت‌افزاری ایجاد خواهد کرد.

راهکار دوم تلاش برای بهبود مدل ریاضی سیستم تحت کنترل و رسیدن به رابطه‌ای است که بتواند خصوصیات سیستم اصلی و واقعی را تا حد امکان در برگیرد. برای این منظور نیاز به پیشرفت و بهبود در حوزه‌های مدل‌سازی و شناسایی خواهیم داشت. این یعنی نیاز به محاسبات سنگین و پیشرفته، هم در مرحله‌ی مدل‌سازی و هم در مرحله طراحی کنترل‌کننده. به علاوه پس از طی این مراحل، باز هم تضمین قطعی برای اینکه مدل بدست آمده دقیقاً با مدل واقعی در همه شرایط هم‌خوانی داشته باشد وجود نخواهد داشت.

راهکار بعدی پیش‌بینی و در نظر گرفتن همه حالت‌هایی است که ممکن است برای سیستم بوجود آید. برای هر کدام از آن حالت‌ها کنترل‌کننده‌ی مطلوب طراحی شود و یک مکانیزم انتخاب در هر مرحله حالت سیستم را تشخیص داده و کنترل‌کننده‌ی مربوط به آن حالت را بکار گیرد. بر روی هر کدام از راهکارهای ارائه شده فوق، تاکنون تحقیقات گسترده و زیادی انجام شده است و نتایج مختلفی نیز بدست آمده است. مطمئناً نمی‌توان با قاطعیت گفت که کدام راهکار مناسب‌ترین راه حل است. اما می‌توان به جرأت گفت که روش‌های فوق تنها راه حل‌ها نیستند.

۲-۷ کنترل مستقل از مدل بازوهای ماهر - خلاصه‌ای از مطالب ارائه

شده در این رساله

ایده‌ی «کنترل مستقل از مدل»، سیستم تحت کنترل به همراه همه موارد خواسته یا ناخواسته‌ای که روی آن تاثیر می‌گذارند را، در «هر لحظه»، به عنوان سیستمی که باید کنترل شود، در نظر می‌گیرد. منظورمان از «هر لحظه»، هر دوره نمونه برداری و یا هر مرحله خواندن اطلاعات و ایجاد سیگنال کنترل است. به عبارت دیگر، سیستم واقعی به همراه تمامی اغتشاشات وارد بر آن، در هر لحظه به عنوان سیستمی که باید کنترل شود در نظر گرفته می‌شود. هر چند این نظریه، بسیار ایده‌آل و مناسب به نظر می‌آید، اما مطمئناً پیاده‌سازی آن، به راحتی بیان کردنش نخواهد بود !!

در فصل اول با چندین روش که تاکنون ارائه شده و می‌توانند به تحقق کنترل مستقل از مدل کمک کنند، آشنا شدیم. با توجه به مطالبی که در مقدمه‌ی این فصل بیان شد، در این رساله به بررسی این مسئله پرداختیم که با توجه به پیچیدگی فراوان بازوهای ماهر، آیا امکان استفاده از روش‌های مستقل از مدل برای کنترل آنها وجود دارد یا خیر؟

شایان ذکر است که، با توجه به مزایای گسترده‌ی روش کنترل مبتنی بر ولتاژ برای بازوهای ماهر، که در فصل دوم به آن اشاره شد، اساس کار این پژوهش بر پایه‌ی این روش بوده است.

در فصل‌های سوم و چهارم این رساله از روی‌نگر حالت توسعه یافته به منظور پیاده‌سازی سیستم کنترل مستقل از مدل بازوی ماهر رباتیک استفاده شد. در این سیستم کنترلی، تمامی ناشناخته‌های دینامیکی بازوی ماهر و موتورهای محرک آن، به همراه اغتشاشات خارجی وارد بر بازو، به عنوان یک متغیر حالت مستقل در نظر گرفته شده و توسط روی‌نگر حالت تخمین زده می‌شود. علاوه بر پیاده‌سازی آسان، مزیت عمده‌ی دیگر این روش امکان کنترل هر کدام از مفاصل بازوی ماهر به صورت مستقل است. در فصل سوم روی‌نگر حالت خطی مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه بکارگیری و پیاده‌سازی این روی‌نگر ساده است، اما مشکلاتی از جمله کاهش عملکرد مطلوب در هنگام افزایش فرکانس مسیر مرجع دارد. بعلاوه یکی دیگر از مشکلات این روش تعیین پارامترهای روی‌نگر و کنترل‌کننده است، در فصل سوم از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تعیین بهترین مقادیر برای این پارامترها استفاده شده است. در فصل چهارم نیز روی‌نگر حالت توسعه یافته‌ی غیرخطی، که کلی‌ترین حالت استفاده از این روی‌نگر است، مورد بررسی قرار گرفته است. این روی‌نگر در مقایسه با روی‌نگر حالت توسعه یافته‌ی خطی عملکرد مناسب تری دارد و عکس العمل مناسبی در مقابل افزایش فرکانس مسیر مرجع دارد. از مشکلات این روش می‌توان به بحث تعیین پارامترهای آن اشاره کرد که معمولاً به صورت تجربی توسط طراح انجام می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش‌های پیشنهادی در این فصول، عملکرد مناسب این روش‌ها را به خوبی نشان می‌دهد.

در فصل پنجم از یک روش تطبیقی برای تخمین نامعینی‌ها و اغتشاشات وارد بر بازوی ماهر استفاده شده است. در این روش نامعینی‌های کلی وارد بر هر کدام از مفاصل بازوی ماهر، در هر لحظه با استفاده از یک قانون تطبیق تخمین زده شده و بروزرسانی می‌شود. کاربرد موثر و مناسب این روش در کنترل مستقل از مدل مفاصل بازوی ماهر در نتایج بخش شبیه‌سازی این فصل به خوبی مشهود است.

در فصل ششم نیز برای تخمین اغتشاشات کلی وارد بر مفاصل، از یک شبکه عصبی استفاده شده است. نکته بسیار مهم در این فصل استفاده از جریان موتور هر کدام از مفاصل بازوی ماهر برای تخمین نامعینی‌ها است. با اینکه در معرفی تئوری کنترل مبتنی بر ولتاژ بیان شده است که اثر تمامی عوامل

ناشناخته‌ی وارد بر بازوی ماهر در جریان موتورهای قابل مشاهده است، اما تاکنون در هیچ پژوهشی به صورت جدی از جریان موتورهای در مکانیزم کنترل بازوی ماهر استفاده نشده است. روش‌های ارائه شده در این رساله، هر چند کوچک و اندک، اما می‌تواند بیانگر توانایی روش‌های مستقل از مدل در کنترل سیستم‌های پیچیده‌ای چون بازوهای ماهر صنعتی باشد.

۳-۷ پیشنهادات

- در ادامه مطالعات صورت گرفته در این پژوهش، موارد زیر پیشنهاد می‌شود:
- پیاده‌سازی روش‌های کنترل مستقل از مدل بر روی ربات‌های توانبخشی.
 - پیاده‌سازی روش‌های کنترل مستقل از مدل بر روی ربات‌های منعطف.
 - پیاده‌سازی روش‌های کنترل مستقل از مدل بر روی مکانیزم‌های کم عملگر.
 - تعمیم نتایج حاصل از این رساله برای کنترل امپدانس بازوی ماهر.
 - بکارگیری روش‌های کنترل مستقل از مدل برای کنترل بازوی ماهر در فضای کاری.

فہرست منابع

- [^١] N. Minorsky, "Directional stability of automatically steered bodies," *Journal of ASNE*, vol. 42, no. 2, pp. 280-309, 1922.
- [^٢] J. Ziegler and N. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *trans. ASME*, vol. 64, no. 11, 1942.
- [^٣] J. Han, "From PID to active disturbance rejection control," *Industrial Electronics, IEEE transactions on*, vol. 56, no. 3, pp. 900-906, 2009.
- [^٤] W. Zhou, S. Shao, and Z. Gao, "A stability study of the active disturbance rejection control problem by a singular perturbation approach," *Applied Mathematical Sciences*, vol. 3, no. 10, pp. 491-508, 2009.
- [^٥] M. Fliess and C. Join, "Model-free control," *International Journal of Control*, vol. 86, no. 12, pp. 2228-2252, 2013.
- [^٦] H. Hjalmarsson, M. Gevers, S. Gunnarsson, and O. Lequin, "Iterative feedback tuning: theory and applications," *IEEE control systems magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 26-41, 1998.
- [^٧] S. Satoh and K. Fujimoto, "Iterative feedback tuning for Hamiltonian systems based on variational symmetry," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 29, no. 16, pp. 5845-5865, 2019.
- [^٨] M. G. Safonov and T.-C. Tsao, "The unfalsified control concept and learning," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 6, pp. 843-847, 1997.
- [^٩] Z. Hou and S. Xiong, "On model-free adaptive control and its stability analysis," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 64, no. 11, pp. 4555-4569, 2019.
- [^{١٠}] S. Liu, Z. Hou, X. Zhang, and H. Ji, "Model-free adaptive control method for a class of unknown MIMO systems with measurement noise and application to quadrotor aircraft," *IET Control Theory & Applications*, vol. 14, no. 15, pp. 2084-2096, 2020.
- [^{١١}] K. Lu, W. Zhou, G. Zeng, and W. Du, "Design of PID controller based on a self-adaptive state-space predictive functional control using extremal optimization method," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 355, no. 5, pp. 2197-2220, 2018.
- [^{١٢}] A.-T. Nguyen, T. Taniguchi, L. Eciolaza, V. Campos, R. Palhares, and M. Sugeno, "Fuzzy control systems: Past, present and future," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 56-68, 2019.
- [^{١٣}] S. Haykin and N. Network, "A comprehensive foundation," *Neural networks*, vol. 2, no. 2004, p. 41, 2004.
- [^{١٤}] P.-A. Gédouin, C. Join, E. Delaleau, J.-M. Bourgeot, S. Arbab-Chirani, and S. Calloch, "Model-free control of shape memory alloys antagonistic actuators," in *17th IFAC World Congress*, 2008, p. CDROM .
- [^{١٥}] Z. H. Gao, Y. Han, J., Y. Huang, and J. Han, "An alternative paradigm for control system design," in *Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on*, 2001, vol. 5: IEEE, pp. 4578-4585 .
- [^{١٦}] F. Wang, Z.-q. Chao, L.-b. Huang, H.-y. Li, and C.-q. Zhang, "Trajectory tracking control of robot manipulator based on RBF neural network and fuzzy sliding mode," *Cluster Computing*, vol. 22, no. 3, pp. 5799-5809, 2019.
- [^{١٧}] J. Nubert, J. Köhler, V. Berenz, F. Allgöwer, and S. Trimpe, "Safe and fast tracking on a robot manipulator: Robust mpc and neural network control," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 3050-3057, 2020.
- [^{١٨}] S. Fateh and M. M. Fateh, "Adaptive Fuzzy Control of Robot Manipulators with Asymptotic Tracking Performance," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 52-61, 2020.
- [^{١٩}] L.-X. Wang, *A course in fuzzy systems*. Prentice-Hall press, USA, 1999.

- [۲۰] A. Naderolasli and A. Chatraei, "One DOF robot manipulator control through type-2 fuzzy robust adaptive controller," *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, vol. 13, 2019.
- [۲۱] V. T. Yen, W. Y. Nan, and P. Van Cuong, "Robust adaptive sliding mode neural networks control for industrial robot manipulators," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 783-792, 2019.
- [۲۲] Q. Zhou, S. Zhao, H. Li, R. Lu, and C. Wu, "Adaptive neural network tracking control for robotic manipulators with dead zone," *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2018.
- [۲۳] C. Ham, Z. Qu, and R. Johnson, "Robust fuzzy control for robot manipulators," *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, vol. 147, no. 2, pp. 212-216, 2000.
- [۲۴] E. Kim, "Output feedback tracking control of robot manipulators with model uncertainty via adaptive fuzzy logic," *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 3, pp. 368-378, 2004.
- [۲۵] J. P. Hwang and E. Kim, "Robust tracking control of an electrically driven robot: adaptive fuzzy logic approach," *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 2, pp. 232-247, 2006.
- [۲۶] H. Ying, "The Takagi-Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rules are nonlinear variable gain controllers," *Automatica*, vol. 34, no. 2, pp. 157-167, 1998.
- [۲۷] C.-H. Tsai, C.-H. Wang, and W.-S. Lin, "Robust fuzzy model-following control of robot manipulators," *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 4, pp. 462-469, 2000.
- [۲۸] L. Lih-Chang and C. Chiang-Chuan, "Rigid model-based fuzzy control of flexible-joint manipulators," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 107-126, ۱۹۹۵ ,
- [۲۹] L.-C. Lin and T.-E. Lee, "Integrated PID-type learning and fuzzy control for flexible-joint manipulators," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 47-66, 1997.
- [۳۰] H. A. Talebi, K. Khorasani, and R. V. Patel, "Neural network based control schemes for flexible-link manipulators: simulations and experiments," *Neural Networks*, vol. 11, no. 7, pp. 1357-1377, 1998.
- [۳۱] R.-J. Wai and M.-C. Lee, "Intelligent optimal control of single-link flexible robot arm," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 1, pp. 201-220, 2004.
- [۳۲] B. Subudhi and A. S. Morris, "Soft computing methods applied to the control of a flexible robot manipulator," *Applied Soft Computing*, vol. 9, no. 1, pp. 149-158, 2009.
- [۳۳] F. M. Caswara and H. Unbehauen, "A neurofuzzy approach to the control of a flexible-link manipulator," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 6, pp. 932-944, 2002.
- [۳۴] D. Hui, S. Fuchun, and S. Zengqi, "Observer-based adaptive controller design of flexible manipulators using time-delay neuro-fuzzy networks," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 453-466, 2002.
- [۳۵] V. Nguyen and A. S. Morris, "Genetic algorithm tuned fuzzy logic controller for a robot arm with two-link flexibility and two-joint elasticity," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 49, no. 1, pp. 3-18, 2007.

- [۳۶] N. X. Quynh, W. Y. Nan, and V. T. Yen, "Design of a robust adaptive sliding mode control using recurrent fuzzy wavelet functional link neural networks for industrial robot manipulator with dead zone," *Intelligent Service Robotics*, vol. 13, no. 2, pp. 219-233, 2020.
- [۳۷] B. Ren, Y. Wang, and J. Chen, "Trajectory-Tracking-Based Adaptive Neural Network Sliding Mode Controller for Robot Manipulators," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 20, no. 3, 2020.
- [۳۸] R. Mei and C. Yu, "Adaptive Neural Output Feedback Control for Uncertain Robot Manipulators with Input Saturation," *Complexity*, vol. 2017, 2017.
- [۳۹] O. Shaheen, A. M. El-Nagar, M. El-Bardini, and N. M. El-Rabaie, "Stable adaptive probabilistic Takagi–Sugeno–Kang fuzzy controller for dynamic systems with uncertainties," *ISA transactions*, vol. 98, pp. 271-283, 2020.
- [۴۰] M. M. Fateh, "Robust fuzzy control of electrical manipulators," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 60, no. 3-4, pp. 415-434, 2010.
- [۴۱] M. M. Fateh and S. Khorashadizadeh, "Robust control of electrically driven robots by adaptive fuzzy estimation of uncertainty," *Nonlinear Dynamics*, vol. 69, no. 3, pp. 1465-1477, 2012.
- [۴۲] S. Khorashadizadeh and M. M. Fateh, "Robust task-space control of robot manipulators using Legendre polynomials for uncertainty estimation," *Nonlinear Dynamics*, vol. 79, no. 2, pp. 1151-1161, 2015.
- [۴۳] S. Khorashadizadeh and M. M. Fateh, "Uncertainty estimation in robust tracking control of robot manipulators using the Fourier series expansion," *Robotica*, vol. 35, no. 2, pp. 310-336, 2017.
- [۴۴] C.-H. Chu and C.-H. Lee, "Regressor-free adaptive fuzzy force tracking control of redundant robot manipulator for task space," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 9, p. 1687814019878899, 2019.
- [۴۵] N. Goléa, A. Goléa, K. Barra, and T. Bouktir, "Observer-based adaptive control of robot manipulators: Fuzzy systems approach," *Applied Soft Computing*, vol. 8, no. 1, pp. 778-787, 2008.
- [۴۶] A. Castillo, P. García, R. Sanz, and P. Albertos, "Enhanced extended state observer-based control for systems with mismatched uncertainties and disturbances," *ISA transactions*, vol. 73, pp. 1-10, 2018.
- [۴۷] S. Talole and S. Phadke, "Extended state observer based control of flexible joint system," in *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, 2008: IEEE, pp. 2514-2519.
- [۴۸] S. E. Talole, J. P. Kolhe, and S. B. Phadke, "Extended-state-observer-based control of flexible-joint system with experimental validation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1411-1419, 2010.
- [۴۹] R. Gholipour and M. M. Fateh, "Adaptive task-space control of robot manipulators using the Fourier series expansion without task-space velocity measurements," *Measurement*, vol. 123, pp. 285-292, 2018.
- [۵۰] S. M. Ahmadi and M. M. Fateh, "Robust control of electrically driven robots using adaptive uncertainty estimation," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 56, pp. 674-687, 2016.
- [۵۱] A. Safaei, Y. C. Koo, and M. N. Mahyuddin, "Adaptive model-free control for robotic manipulators," in *Robotics and Intelligent Sensors (IRIS), 2017 IEEE International Symposium on*, 2017: IEEE, pp. 7-12.

- [52] J. Baek, W. Kwon, B. Kim, and S. Han, "A widely adaptive time-delayed control and its application to robot manipulators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 7, pp. 5332-5342, 2018.
- [53] M. Jin, S. H. Kang, P. H. Chang, and J. Lee, "Robust Control of Robot Manipulators Using Inclusive and Enhanced Time Delay Control," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2141-2152, 2017.
- [54] X. Zhang, H. Wang, Y. Tian, L. Peyrodie, and X. Wang, "Model-free based neural network control with time-delay estimation for lower extremity exoskeleton," *Neurocomputing*, vol. 272, pp. 178-188, 2018.
- [55] J. Lee, P. H. Chang, and M. Jin, "Adaptive integral sliding mode control with time-delay estimation for robot manipulators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6796-6804, 2017.
- [56] H.-J. Bae, M. Jin, J. Suh, J. Y. Lee, P.-H. Chang, and D.-s. Ahn, "Control of robot manipulators using time-delay estimation and fuzzy logic systems," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 1271-1279, 2017.
- [57] H. Abouaïssa and S. Chouraqui, "On the control of robot manipulator: A model-free approach," *Journal of Computational Science*, vol. 31, pp. 6-16, 2019.
- [58] D. Chen, Y. Zhang, and S. Li, "Tracking Control of Robot Manipulators with Unknown Models: A Jacobian-Matrix-Adaption Method," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017.
- [59] P. Gupta and N. K. Sinha, "Intelligent control of robotic manipulators: experimental study using neural networks," *Mechatronics*, vol. 10, no. 1, pp. 289-305, 2000.
- [60] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*. Wiley New York, 2006.
- [61] H. Wang and Y. Xie, "Adaptive inverse dynamics control of robots with uncertain kinematics and dynamics," *Automatica*, vol. 45, no. 9, pp. 2114-2119, 2009.
- [62] M. A. Arteaga-Pérez, A. Ortiz-Espinoza, J. G. Romero, and G. Espinosa-Pérez, "On the adaptive control of robot manipulators with velocity observers," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2020.
- [63] M. W. Spong and R. Ortega, "On adaptive inverse dynamics control of rigid robots," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 35, no. 1, pp. 92-95, 1990.
- [64] J.-J. Slotine and L. Weiping, "Adaptive manipulator control: A case study," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 11, pp. 995-1003, 1988.
- [65] J.-J. E. Slotine and W. Li, "On the adaptive control of robot manipulators," *The international journal of robotics research*, vol. 6, no. 3, pp. 49-59, 1987.
- [66] J. J. Craig, P. Hsu, and S. S. Sastry, "Adaptive control of mechanical manipulators," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 6, no. 2, pp. 16-28, 1987.
- [67] F. Lin, Y. Chen, Y. Zhao, and S. Wang, "Path tracking of autonomous vehicle based on adaptive model predictive control," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 16, no. 5, p. 1729881419880089, 2019.
- [68] F. Schnelle and P. Eberhard, "Adaptive nonlinear model predictive control design of a flexible-link manipulator with uncertain parameters," *Acta Mechanica Sinica*, vol. 33, no. 3, pp. 529-542, 2017.
- [69] J.-J. E. Slotine and W. Li, "Composite adaptive control of robot manipulators," *Automatica*, vol. 25, no. 4, pp. 509-519, 1989.
- [70] I. Bonilla, M. Mendoza, D. U. Campos-Delgado, and D. E. Hernández-Alfaro, "Adaptive Impedance Control of Robot Manipulators with Parametric Uncertainty

- for Constrained Path-Tracking," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 28, no. 2, pp. 363-374, 2018.
- [^{٧١}] J. J.-B. M. Ahanda, J. B. Mbede, A. Melingui, and B. Essimbi, "Robust adaptive control for robot manipulators: Support vector regression-based command filtered adaptive backstepping approach," *Robotica*, vol. 36, no. 4, pp. 516-534, 2018.
- [^{٧٢}] M. A. Arteaga-Pérez, J. Pliego-Jiménez, and J. G. Romero, "Experimental results on the robust and adaptive control of robot manipulators without velocity measurements," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019.
- [^{٧٣}] Y. Wang, F. Yan, K. Zhu, B. Chen, and H. Wu, "A new practical robust control of cable-driven manipulators using time-delay estimation," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 29, no. 11, pp. 3405-3425, 2019.
- [^{٧٤}] Y. Jiang, K. Lu, C. Gong, and H. Liang, "Robust composite nonlinear feedback control for uncertain robot manipulators," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 2, p. 1729881420914805, 2020.
- [^{٧٥}] Z. Qu and D. M. Dawson, *Robust tracking control of robot manipulators*. IEEE press, 1995.
- [^{٧٦}] H. G. Sage, M. De Mathelin, and E. Ostertag, "Robust control of robot manipulators: a survey," *International Journal of Control*, vol. 72, no. 16, pp. 1498-1522, 1999.
- [^{٧٧}] C. C. Cheah, M. Hirano, S. Kawamura, and S. Arimoto, "Approximate Jacobian control for robots with uncertain kinematics and dynamics," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4, pp. 692-702, 2003.
- [^{٧٨}] M. M. Fateh and M. R. Soltanpour, "Robust task-space control of robot manipulators under imperfect transformation of control space," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 5, no. 11, pp. 3949-3960, 2009.
- [^{٧٩}] J. Fernandez, L. Penalver, V. Hernandez, and J. Tornero, "High performance algorithm to obtain Johansson adaptive control in robot manipulators," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 9, no. 2, pp. 167-176, 2004.
- [^{٨٠}] J. Peng, J. Wang, and Y. Wang, "Neural network based robust hybrid control for robotic system: an H_∞ approach," *Nonlinear Dynamics*, vol. 65, no. 4, pp. 421-431, 2011.
- [^{٨١}] M. Kumar, A. Gupta, and N. Nagpal, "Tracking control of robot using intelligent-computed torque control," in *Applications of artificial intelligence techniques in engineering*: Springer, 2019, pp. 619-628.
- [^{٨٢}] D. Nguyen-Tuong and J. Peters, "Learning robot dynamics for computed torque control using local gaussian processes regression," in *Learning and Adaptive Behaviors for Robotic Systems, 2008. LAB-RS'08. ECSIS Symposium on, 2008*: IEEE, pp. 59-64.
- [^{٨٣}] F. Paccot, P. Lemoine, N. Andreff, D. Chablat, and P. Martinet, "A vision-based computed torque control for parallel kinematic machines," in *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, 2008*: IEEE, pp. 1556-1561.
- [^{٨٤}] H.-S. Choi, "Robust control of robot manipulators with torque saturation using fuzzy logic," *Robotica*, vol. 19, no. 06, pp. 631-639, 2001.
- [^{٨٥}] Y. Guo and P.-Y. Woo, "An adaptive fuzzy sliding mode controller for robotic manipulators," *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 2, pp. 149-159, 2003.

- [^{٨٦}] T. Kuo and Y. Huang, "Global Stabilization of Robot Control with Neural Network and Sliding Mode," *Engineering Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 56-60, 2008.
- [^{٨٧}] M. Ali and C. Alexander, "Robust tracking control of a robot manipulator using a passivity-based extended-state observer approach," *IET Cyber-systems and Robotics*, vol. 1, no. 2, pp. 63-71, 2019.
- [^{٨٨}] Y. Zhang, S. Li, J. Zou, and A. H. Khan, "A passivity-based approach for kinematic control of manipulators with constraints," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 5, pp. 3029-3038, 2019.
- [^{٨٩}] M. M. Fateh, "On the voltage-based control of robot manipulators ", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 5, pp. 702-712, 2008.
- [^{٩٠}] Y.-C. Chang, H.-M. Yen, and M.-F. Wu, "An intelligent robust tracking control for electrically-driven robot systems," *International Journal of Systems Science*, vol. 39, no. 5, pp. 497-511, 2008.
- [^{٩١}] M. M. Fateh, "Proper uncertainty bound parameter to robust control of electrical manipulators using nominal model," *Nonlinear Dynamics*, vol. 61, no. 4, pp. 655-666, 2010.
- [^{٩٢}] M. M. Fateh and S. Khorashadizadeh, "Optimal robust voltage control of electrically driven robot manipulators," *Nonlinear Dynamics*, vol. 70, no. 2, pp. 1445-1458, 2012.
- [^{٩٣}] M. M. Fateh, "Nonlinear control of electrical flexible-joint robots," *Nonlinear Dynamics*, vol. 67, no. 4, pp. 2549-2559, 2012.
- [^{٩٤}] M. M. Fateh, "Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy," *Nonlinear Dynamics*, vol. 67, no. 2, pp. 1525-1537, 2012.
- [^{٩٥}] M. W. Spong, "Modeling and control of elastic joint robots," *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 109, no. 4, pp. 310-318, 1987.
- [^{٩٦}] M. M. Fateh and R. Babaghasabha, "Impedance control of robots using voltage control strategy," *Nonlinear Dynamics*, vol. 74, no. 1-2, pp. 277-286, 2013.
- [^{٩٧}] M. Veysi and M. R. Soltanpour, "Voltage-base control of robot manipulator using adaptive fuzzy sliding mode control," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 19, no. 5, pp. 1430-1443, 2017.
- [^{٩٨}] Z. Ghassemi, A. Akbarzadeh Kalat, and M. M. Fateh, "Robust adaptive impedance control in scara robot manipulator for robotic cell injection," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 12, pp. 637-647, 2017.
- [^{٩٩}] A. Haqshenas M, M. M. Fateh, and S. M. Ahmadi, "Adaptive control of electrically-driven nonholonomic wheeled mobile robots: Taylor series-based approach with guaranteed asymptotic stability," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2020.
- [^{١٠٠}] M. Souzanchi-K, A. Arab, M.-R. Akbarzadeh-T, and M. M. Fateh, "Robust impedance control of uncertain mobile manipulators using time-delay compensation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 6, pp. 1942-1953, 2017.
- [^{١٠١}] M. M. Fateh and S. Fateh, "Decentralized direct adaptive fuzzy control of robots using voltage control strategy," *Nonlinear Dynamics*, vol. 70, no. 3, pp. 1919-1930, 2012.
- [^{١٠٢}] M. M. Fateh, H. A. Tehrani, and S. M. Karbassi, "Repetitive control of electrically driven robot manipulators," *International Journal of Systems Science*, vol. 44, no. 4, pp. 775-785, 2013.
- [^{١٠٣}] S. Li, J. Yang, W.-H. Chen, and X. Chen, *Disturbance observer-based control: methods and applications*. CRC press, 2014.

- [١٠٤] B.-Z. Guo and Z.-l. Zhao, "On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty," *Systems & Control Letters*, vol. 60, no. 6, pp. 420-430, 2011.
- [١٠٥] J. Han, "Robustness of Control System and the {G\} o\}'s incomplete theorem," *Control Theory and Applications: Institute of Systems Science, Chinese Academy of Sciences*, vol. 16, no. 1, pp. 149-155.١٩٩٩ ,
- [١٠٦] J.-Q. Han, "Nonlinear design methods for control systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 32, no. 2, pp. 1531-1536, 1999.
- [١٠٧] Y. Tan, J. Chang, H. Tan, and J. Hu, "Integral backstepping control and experimental implementation for motion system," in *Control Applications, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on*, 2000: IEEE, pp. 367-372 .
- [١٠٨] O. Omidvar and D. L. Elliott, *Neural systems for control*. Elsevier, 1997.

Abstract

In this thesis, several model-Free control methods have been used for robot manipulators control. The general structure of manipulator in this thesis is based on Voltage Control Strategy. In this structure, the unknown parameters of the system, such as disturbances and uncertainties, are considered and as a single variable. In the proposed methods, it is not necessary to complex robot model for control. Each joint is controlled independently and the control signal generated by the control mechanism is the voltage of the motors, which can be applied to them directly. The implementation of these methods are easy. The presented methods in this thesis are Model-Free Control using an extended state observer, Adaptive Model_Free Control and Model_Free Control using Neural Network. The results of mathematical analysis and simulations and comparisons show that these methods are effective.

Keywords: Model-Free Control, Robot Manipulator, Voltage Control Strategy, Extended State Observer, Adaptive Control, and Disturbance Estimation.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotic

Ph.D. Dissertation in Control Engineering

**Model-Free Control of Manipulators Using
Voltage Control Strategy**

By: Amir Saleki

Supervisor:

Dr. Mohammad Mehdi Fateh

Jun - 2020