

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل

طراحی کنترل کننده فازی تطبیقی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور با تاخیر زمانی

دانشجو: مریم مستقر

استاد راهنما

دکتر علیرضا الفی

دی ۱۴۰۰

تقدیم اثر

تقدیم به

پدر، مادر و برادر عزیز و مهربانم
که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یآوری دلسوز و خداکار
و پشتیبانی ماکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

و تقدیم به آنان که در راه کسب دانش، راهنمایم بودند.

شکر و قدردانی

به انجام رسیدن این پایان نامه مرهون راهنمایی و کمک بزرگوارانی است که در مراحل مختلف تحصیل از هیچ کوششی دریغ نورزیدند. از این رو بر خود لازم می‌دارم که از زحمات و تلاش آنان قدردانی نمایم.

در ابتدا، از پدر و مادرم تشکر می‌نمایم که در این مسیر طولانی همیشه یاورم بودند. از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر الفی، به خاطر راهنمایی‌های ایشان تقدیر می‌نمایم. و همراهی دوستانم که مایه دلگرمی بوده‌اند، را فراموش نفواهم کرد.

تعمیرنامه

اینجانب مریم مستقر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی کنترل کننده فازی تطبیقی برای سیستم های حرکتی از راه دور با تاخیر زمانی تحت راهنمایی دکتر علیرضا الفی متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در این پایان نامه به منظور تضمین همزمان پایداری و شفافیت در سیستم‌های حرکتی از راه دور دو طرفه در حضور تاخیر ثابت با زمان کانال ارتباطی، غیرخطی بودن‌ها و عدم قطعیت‌ها، کنترل‌کننده پسگام فازی تطبیقی برای ربات‌های فرمانده و فرمانبر به‌طور جداگانه طراحی می‌گردد. طرح کنترلی پیشنهادی عملکرد خوب سیستم از دیدگاه خطای همزمانی بین ربات‌های فرمانده و فرمانبر را نشان می‌دهد و پایداری سیستم حلقه بسته مبتنی بر نظریه لیاپانوف تضمین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب ساختار کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: سیستم‌های حرکتی از راه دور، کنترل پسگام فازی تطبیقی، تاخیر زمانی، پایداری،

همزمان‌سازی، شفافیت

فهرست مطالب

| | |
|----|--|
| ۵ | فهرست جداول |
| ۵ | فهرست اشکال |
| ۱ | فصل ۱: مقدمه |
| ۲ | ۱-۱ مقدمه |
| ۲ | ۲-۱ تاریخچه |
| ۳ | ۳-۱ معرفی سیستم‌های حرکتی از راه دور |
| ۵ | ۴-۱ تاخیر زمانی در سیستم‌های حرکتی از راه دور |
| ۶ | ۵-۱ اهداف مهم در سیستم‌های حرکتی از راه دور |
| ۷ | ۶-۱ کاربردهای سیستم حرکتی از راه دور |
| ۷ | ۱-۶-۱ جابجایی مواد خطرناک |
| ۸ | ۲-۶-۱ کاربردهای پزشکی |
| ۸ | ۳-۶-۱ کاربردهای فضایی |
| ۸ | ۴-۶-۱ محیط‌های زیر آب |
| ۹ | ۵-۶-۱ کاربردهای صنعتی |
| ۹ | ۷-۱ مروری بر ساختار پایان نامه |
| ۱۱ | فصل ۲: مبانی تحقیق |
| ۱۲ | ۱-۲ مقدمه |
| ۱۲ | ۲-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر تئوری پسیویته، پراکندگی و متغیرهای موج |

- ۳-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل تطبیقی..... ۱۷
- ۴-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل مقاوم..... ۲۰
- ۵-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل پیش بین ۲۲
- ۶-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل مد لغزشی..... ۲۴

فصل ۳: مدلسازی ۲۷

- ۱-۳ مقدمه ۲۸
- ۳-۲ مدل دینامیکی سیستم‌های حرکتی از راه دور ۲۸
- ۱-۲-۳ خواص مهم ۳۰
- ۳-۳ طراحی کنترل کننده پیشنهادی ۳۱
- ۱-۳-۳ سیستم منطق فازی ۳۱
- ۲-۳-۳ کنترل فازی تطبیقی ۳۳
- ۳-۳-۳ کنترل پسگام..... ۳۴
- ۴-۳-۳ تابع لیاپانوف محدودکننده ۳۵
- ۵-۳-۳ اثبات پایداری و طراحی کنترل کننده پیشنهادی ۳۶

فصل ۴: شبیه سازی و نتایج روش پیشنهادی ۴۳

- ۱-۴ مقدمه ۴۴
- ۲-۴ پیاده سازی کنترل کننده پیشنهادی ۴۴
- ۱-۲-۴ نتایج روش کنترلی پیشنهادی در حضور تأخیر ثابت نامتقارن ۴۶
- ۲-۲-۴ نتایج روش کنترلی پیشنهادی در حضور تأخیر ثابت متقارن ۵۶
- ۳-۴ نتیجه‌گیری ۷۲

فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادات ۷۵

- ۱-۵ جمع بندی ۷۶

۲-۵ پیشنهادات ۷۶

۷۸

مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۴ : پارامترهای سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه [۵۶] ۴۵
- جدول ۲-۴ : پارامترهای قانون کنترل ۴۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ : ساختار کلی سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه ۴
- شکل ۱-۳ : ساختار سیستم حرکت از راه دور دوطرفه با دو درجه آزادی ۲۸
- شکل ۱-۴ : ساختار کنترل پیشنهادی ۴۴
- شکل ۲-۴ : نیروی اعمال اپراتور انسانی ۴۶
- شکل ۳-۴ : ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر ۴۷
- شکل ۴-۴ : ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر ۴۷
- شکل ۵-۴ : خطای موقعیت ربات فرمانده ۴۸
- شکل ۶-۴ : خطای موقعیت ربات فرمانبر ۴۸
- شکل ۷-۴ : توابع عضویت سیستم منطق فازی ۴۹
- شکل ۸-۴ : سیگنال کنترلی ربات فرمانده ۴۹
- شکل ۹-۴ : سیگنال کنترلی ربات فرمانبر ۵۰
- شکل ۱۰-۴ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانده ۵۰
- شکل ۱۱-۴ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانده ۵۱
- شکل ۱۲-۴ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانبر ۵۱
- شکل ۱۳-۴ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانبر ۵۲
- شکل ۱۴-۴ : ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر در حالت دوم ۵۳
- شکل ۱۵-۴ : ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر در حالت دوم ۵۳
- شکل ۱۶-۴ : خطای موقعیت ربات فرمانده در حالت دوم ۵۴
- شکل ۱۷-۴ : خطای موقعیت ربات فرمانبر در حالت دوم ۵۴
- شکل ۱۸-۴ : سیگنال کنترلی ربات فرمانده در حالت دوم ۵۵
- شکل ۱۹-۴ : سیگنال کنترلی ربات فرمانبر در حالت دوم ۵۵
- شکل ۲۰-۴ : ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه ۵۶
- شکل ۲۱-۴ : ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه ۵۷
- شکل ۲۲-۴ : خطای موقعیت ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه ۵۷
- شکل ۲۳-۴ : خطای موقعیت ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه ۵۸
- شکل ۲۴-۴ : سیگنال کنترلی ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه ۵۸
- شکل ۲۵-۴ : سیگنال کنترلی ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه ۵۹
- شکل ۲۶-۴ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه ۵۹

- شکل ۴-۲۷ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه
 ۶۰.....
- شکل ۴-۲۸ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه
 شکل ۴-۲۹ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه
 ۶۱.....
- شکل ۴-۳۰ : ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت
 دوم.....
 شکل ۴-۳۱ : ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در
 حالت دوم.....
 شکل ۴-۳۲ : خطای موقعیت ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم.....
 شکل ۴-۳۳ : خطای موقعیت ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم.....
 شکل ۴-۳۴ : سیگنال کنترلی ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم.....
 شکل ۴-۳۵ : سیگنال کنترلی ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم.....
 شکل ۴-۳۶ : ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۳۷ : ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۳۸ : خطای موقعیت ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۳۹ : خطای موقعیت ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۴۰ : سیگنال کنترلی ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۴۱ : سیگنال کنترلی ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۴۲ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۴۳ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۴۴ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۴۵ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه.....
 شکل ۴-۴۶ : ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت
 دوم.....
 شکل ۴-۴۷ : ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت
 دوم.....
 شکل ۴-۴۸ : خطای موقعیت ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم.....
 شکل ۴-۴۹ : خطای موقعیت ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم.....
 شکل ۴-۵۰ : سیگنال کنترلی ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم.....
 شکل ۴-۵۱ : سیگنال کنترلی ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم.....
 شکل ۴-۵۲ : سیگنال کنترلی ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم.....

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه

با پیشرفت ربات‌ها در دنیای تکنولوژی بحث استفاده و کنترل آن‌ها در محیط‌های دور از دسترس و خطرناک توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است. فرآیند کنترل یک وسیله یا یک ماشین از فاصله دور و از طریق یک محیط واسط، سیستم حرکتی از راه دور^۱ نامیده می‌شود. سیستم حرکتی از راه دور تعمیمی از حواس انسان و توانایی انجام کارها با بازوی مکانیکی در یک موقعیت دور از دسترس می‌باشد. با رشد تجهیزات ارتباطی، کاربردهای سیستم حرکتی از راه دور در زمینه‌های مختلفی پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌است. از مهم‌ترین کاربردهای این سیستم‌ها می‌توان به اکتشافات فضایی، محیط‌های زیر آب، حمل مواد هسته‌ای، جابجایی مواد سمی در صنعت، کاربردهای پزشکی و... اشاره کرد.

۲-۱ تاریخچه

در طول چند دهه گذشته سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه، محققان را در هر دو نظریه کنترل و رباتیک به چالش کشیده‌اند. نقطه آغاز ایجاد سیستم‌های حرکتی از راه دور به اواسط دهه ۱۹۴۰ برمی‌گردد. گورتس^۲ ساخت اولین سیستم حرکتی از راه دور را با هدف جابجایی مواد رادیواکتیو و کنترل آن به صورت مکانیکی انجام داد [۱،۲]. نمونه بهبودیافته آن در سال ۱۹۵۴ توسط همین شخص طراحی شد که با افزودن مجموعه‌ای از کابل‌ها و قرقره‌ها یک سیستم الکترومکانیکی ارائه شد، به طوری که ربات‌های فرمانده^۳ و فرمانبر^۴ ارتباط مکانیکی با یکدیگر نداشتند و به وسیله دستگیره‌ی متصل به ربات فرمانده از فاصله‌ای دورتر و محیطی امن‌تر قابل کنترل بودند [۳،۴]. اوایل دهه ۱۹۶۰ تحقیقات روی اثر

^۱ Tele-operation System

^۲ Goertz

^۳ Master

^۴ Slave

تأخیر زمانی در این سیستم‌ها متمرکز و کنترل نظارتی برای حل این مشکل ارائه شد [۵]. در سال ۱۹۶۶، روش انعکاس نیرو در حضور تأخیر زمانی یک دهم ثانیه‌ای استفاده شد و ناپایداری سیستم به وجود آمد [۶]. در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ با هدف کاهش اثرات تأخیر زمانی در این سیستم‌ها روش‌های کنترل مبتنی بر غیرفعال بودن^۵، تئوری پراکندگی^۶ و متغیرهای موج^۷ مطرح شدند و از آن زمان به بعد، مسئله مدل‌سازی و کاهش اثرات تأخیر زمانی برای کنترل چنین سیستم‌هایی مورد توجه محققان قرار گرفت [۷، ۱]. امروزه سیستم‌های حرکتی از راه دور به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند. در دسته اول، ابزارهای مکانیکی قرار دارند که دستیابی انسان به محیط اطرافش را آسان می‌کنند و ویژگی دیگر آن‌ها فاصله کم بین محیط عملیاتی و کاربر انسانی است. در دسته دیگر، بین دو سیستم فرمانده و فرمانبر از سنسورهای نیرو و موقعیت با تزویج الکترومکانیکی استفاده شده است، و برخلاف دسته اول، فاصله بین محیط عملیاتی و کاربر انسانی می‌تواند تا چندین کیلومتر هم باشد. در دسته سوم، یکی از ربات‌ها با یک شبیه‌ساز کامپیوتری جایگزین شده است.

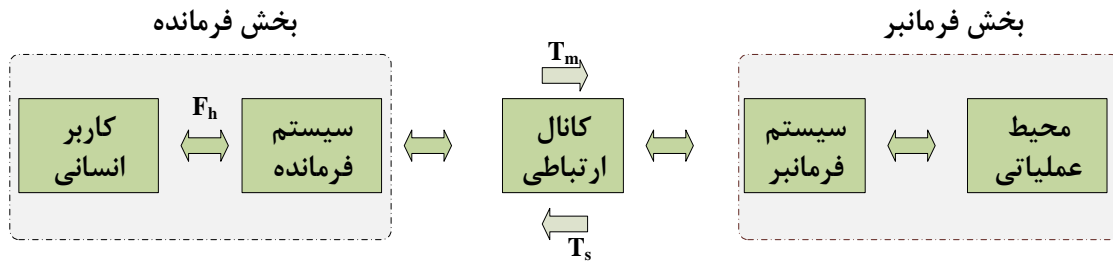
۳-۱ معرفی سیستم‌های حرکتی از راه دور

در این بخش، به معرفی سیستم‌های حرکتی از راه دور و کاربردهای آنها می‌پردازیم. شکل (۱-۱) بلوک‌دیگرام کلی یک سیستم کنترل از راه دور را نشان می‌دهد:

^۵Passivity

^۶Scattering

^۷Wave variable



شکل ۱-۱: ساختار کلی سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه

در سیستم حرکتی از راه دور، یک یا چند ربات به وسیله کاربر انسانی^۸ از فاصله دور و با به کارگیری محیط واسط به عنوان کانال ارتباطی^۹ کنترل می‌شوند. ربات فرمانده^{۱۰} با کاربر، و ربات فرمانبر^{۱۱} با محیط عملیاتی در ارتباط است و اطلاعات، بین محیط فرمانده و فرمانبر توسط کانال ارتباطی منتقل می‌شوند.

طبق تعریف سیستم‌های حرکتی از راه دور، فاصله میان بخش‌های فرمانده و فرمانبر می‌تواند از ده‌ها سانتی‌متر در عملیات ظریف مانند جراحی بر روی بدن انسان، تا ابعاد وسیع مانند کاربرد این سیستم‌ها در زیر دریا و حفاری معادن باشد؛ پس، کانال انتقال اطلاعات می‌تواند به صورت کابل، شبکه‌های بی سیم، ارتباط ماهواره‌ای یا اینترنت باشد. با توجه به گستردگی و هزینه کم اینترنت، سیستم‌های حرکتی از راه دور برمبنای اینترنت سهم قابل توجهی از تحقیقات را به خود اختصاص داده‌اند.

معمولاً چنین سیستم‌هایی شامل پیکربندی فرمانده- فرمانبر هستند؛ کاربر با حرکت دادن انتهای ربات فرمانده با استفاده از یک دستگیره^{۱۲}، که به لحاظ ساختاری مشابه ربات فرمانبر است، دستور انجام کار را به ربات فرمانبر ارسال می‌کند و ربات فرمانبر با دریافت اطلاعاتی نظیر موقعیت و نیروی دست کاربر و اعمال آن‌ها به نقطه مطلوب دریافتی، نیروی دریافتی از محیط عملیاتی و موقعیت خود را به

^۸ Human operator

^۹ Communication channel

^{۱۰} Master

^{۱۱} Slave

^{۱۲} Gripper

ربات فرمانده ارسال می‌کند. اطلاعاتی که از سمت فرمانبر به فرمانده ارسال می‌شود بستگی به هدف سیستم دارد و در بعضی موارد علاوه بر نیرو و موقعیت، تصویری از رویدادهای محیط عملیاتی و صدا نیز به کاربر ارسال می‌شود.

در سیستم‌های کنترل از راه دور، اگر سیگنال اطلاعات فقط در مسیر رفت (از سیستم فرمانده به فرمانبر) ارسال شود؛ به چنین سیستمی، سیستم حرکت از راه دور یک‌طرفه^{۱۳} گفته می‌شود. اگر این ارسال سیگنال علاوه بر مسیر رفت، در مسیر برگشت (از سیستم فرمانبر به فرمانده) نیز انجام شود، منجر به ایجاد سیستم حرکت از راه دور دوطرفه^{۱۴} می‌شود. به عبارت دیگر، سیگنال‌های اطلاعاتی در سیستم‌های دوطرفه از طریق یک حلقه پس‌خورد به سایت محلی ارسال می‌شوند.

۴-۱ تأخیر زمانی در سیستم‌های حرکتی از راه دور

یکی از مشکلات سیستم‌های حرکتی از راه دور، وجود تأخیر زمانی در کانال ارتباطی است که مهم‌ترین چالش در کنترل پایداری^{۱۵} و کارایی^{۱۶} چنین سیستم‌هایی است. در این سیستم‌ها هنگام انتقال اطلاعات از سیستم فرمانده به فرمانبر و بالعکس، همواره یک تأخیر زمانی وجود دارد که این تأخیر به خصوص زمانی که فاصله بین دو سایت محلی زیاد باشد، غیر قابل نظر کردن است و می‌تواند باعث ناپایداری سیستم شود. در بسیاری از کاربردها، حتی مقدار کمی تأخیر باعث کاهش عملکرد و ناپایداری می‌شود. تأخیر زمانی به سه نوع تأخیر ثابت با زمان^{۱۷}، تأخیر متغیر با زمان^{۱۸} و تأخیر تصادفی^{۱۹} تقسیم می‌شود.

^{۱۳} Unilateral

^{۱۴} Bilateral

^{۱۵} Stability

^{۱۶} Task Performance

^{۱۷} Constant delay

^{۱۸} Time Varying delay

^{۱۹} Random delay

۱-۵ اهداف مهم در سیستم‌های حرکتی از راه دور

در طراحی این سیستم‌ها باید سه هدف پایداری، شفافیت^{۲۰} و عملکرد کاری ارضا شوند.

پایداری: حفظ پایداری سیستم حلقه بسته بدون توجه به رفتار اپراتور یا محیط عملیاتی، نیاز اصلی سیستم‌های کنترل از راه دور است. اپراتور انسانی، محیط کنترل از راه دور، کانال ارتباطی و همچنین حسگرهای عدم قطعیت در سیستم به دلیل رفتار ساختار نیافته و متفاوت آن‌ها، کل سیستم را ناپایدار می‌کنند. در نتیجه، کنترل‌کننده طراحی شده باید قادر به حفظ پایداری با توجه به مجموعه‌ای از ابهامات معرفی شده توسط مولفه‌های مختلف باشد.

شفافیت: اگر نیروی عکس‌العمل محیط عملیاتی به‌درستی به سیستم فرمانده و کاربر انسانی منتقل شود، و یا در هر زمان که امیدانس ورودی (یا انتقالی) مشاهده شده توسط اپراتور انسانی، امیدانس محیط عملیاتی را پیروی کند، می‌توان خاصیت شفافیت را تعریف کرد. شفافیت یکی از شرایط بحرانی در سیستم‌ها است؛ چرا که یک احساس و تصویر واقعی از محیط عملیاتی راه دور را برای کاربر انسانی ایجاد و تضمین می‌کند.

عملکرد: هدف اولیه یک سیستم کنترل‌شده، با موفقیت انجام دادن کار موردنظر است. سیستم‌های کنترل از راه دور باید طوری طراحی شوند که عملکرد رضایت‌بخشی از سیستم به‌دست‌آید که این کار، با غلبه بر موانعی مانند فاصله، مدل سیستم، عدم قطعیت مدل سیستم و تأخیر زمانی تحقق می‌یابد. این سیستم‌ها زمانی عملکرد بهتری دارند که عدم قطعیت‌های مرتبط با مدل انسانی و محیط و همچنین اختلالات ناشناخته خارجی، تخمین زده و در نظر گرفته شوند. عملکرد کاری براساس پارامترهای فیزیکی قابل دسترس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

به‌طور کلی بهبود پایداری در این سیستم‌ها باعث کاهش شفافیت می‌شود. این دو هدف همزمان در

^{۲۰} Transparency

شرایط ایده‌آل به دست می‌آیند [۸،۹]. تأخیر زمانی یک مسئله رایج در سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه است. اگرچه بسیاری از تلاش‌ها برای بهینه‌سازی ساختارهای کنترل انجام شده‌است، اما آنچه که در بحث این نوع سیستم‌ها مهم است تضمین و موازنه میان پایداری و شفافیت است که جز نیازهای اساسی هستند تا اپراتورها بتوانند ایمن و دقیق وظایف خود را انجام دهند.

۱-۶ کاربردهای سیستم حرکتی از راه دور

وجود تأخیر، عامل بروز ناپایداری و عملکرد نامناسب در سیستم‌های فیزیکی می‌باشد. از طرفی با پیشرفت روزافزون علم و لزوم حضور و ورود انسان در محیط‌های دور از دسترس یا خطرناک و رشد سریع تجهیزات ارتباطی، استفاده از ربات‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. از این رو بحث کنترل ربات‌ها و استفاده مناسب از آنها در فواصل دور تحت عنوان سیستم‌های حرکتی از راه دور، به یکی از زمینه‌های مهم مطالعات محققین در چند دهه اخیر تبدیل شده‌است و کاربرد این سیستم‌ها در زمینه‌های مختلفی در حال گسترش است که از جمله آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱-۶-۱ جابجایی مواد خطرناک

همان‌طور که اشاره شد، اواسط دهه ۱۹۴۰ گورتس اولین سیستم حرکتی از راه دور را، با هدف جابجایی مواد رادیواکتیو و کنترل آن به صورت مکانیکی ارائه داد. امروزه کاربرد ربات‌ها در آزمایشگاه‌ها و راکتورهای هسته‌ای، حمل زباله‌های هسته‌ای، فلزات داغ یا مواد شیمیایی به دلیل دقت بالا و ایمنی و قابلیت اطمینان بیشتر، افزایش یافته‌است. نمونه اولیه یک ربات سیار چند منظوره^{۲۱}، به جهت انجام وظایف بالقوه خطرناک برای انسان‌ها، مانند کار در محیط‌های خطرناک یا دستکاری مواد سمی، که می‌توان آن را از راه دور کنترل کرد در [۱۰] ارائه شده‌است. در این پژوهش تعامل بین ربات سیار و

²¹ Prototyp Remote Controlled Multifunctional Mobile Robot (PROMM)

دستگاه کنترل از راه دور با تکنولوژی بلوتوث اجرا شده است. مزایای استفاده از این ربات‌ها علاوه بر سادگی آن‌ها، کاهش مصرف انرژی و ابعاد و عملکرد خوب آن‌ها می‌باشد.

۱-۶-۲ کاربردهای پزشکی

طراحی و گسترش ساخت پروتزهای جایگزین برای افراد معلول، کاربردهایی مانند جراحی اندوسکوپی^{۲۲}، آنژیوگرافی^{۲۳}، انواع عکس برداری از بافت‌های داخلی بدن بیمار، امکان جراحی از راه دور در محیط‌های دور از دسترس یا شرایطی که نیاز به نظر چندین پزشک و متخصص وجود دارد و عمل‌های جراحی با ریسک بسیار بالا از مهم‌ترین کاربردهای سیستم‌های حرکت از راه دور در علم پزشکی به شمار می‌آیند. استفاده از این سیستم‌ها در زمینه پزشکی باعث کاهش طول دوره درمان، کاهش هزینه‌ها، تشخیص و درمان بهتر می‌شود. مراجع [۱۱-۱۴] نمونه‌هایی از این کاربرد را بیان می‌کنند.

۱-۶-۳ کاربردهای فضایی

امروزه به دلیل کاهش هزینه‌های مالی، ایمنی کاربر انسانی و نبود شرایط حضور انسان در فضا برای تحقیقات فضایی، از ربات‌ها برای اکتشافات، انجام تحقیقات علمی و حتی تعمیرات در ایستگاه‌های فضایی استفاده می‌شود.

۱-۶-۴ محیط‌های زیر آب

برای انجام وظایفی مثل حفاری، تعمیرات مربوط به لوله‌ها و کابل‌های شرکت‌ها در دریا، عملیات نظامی، تحقیقات مربوط به شرکت‌ها و جستجوی علمی در زمینه زیست‌شناسی، محیط زیست، زندگی

^{۲۲} Endoscopy

^{۲۳} Angiography

جانداران زیر دریا، عکاسی از محیط زیرآب و... که در بسیاری از این موارد از عهده انسان خارج است، هزینه و زمان زیادی نیاز دارد، از ربات‌های زیردریایی استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین کاربردهای سیستم حرکتی از راه دور، در صنایع نظامی بود که نقطه آغاز آن به دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ برمی‌گردد که برای حل مشکل تأخیر زمانی مربوط به انتقال سیگنال ارسالی کنترل نظارتی پیشنهاد شده است [۱۵]. از ویژگی‌های این کاربرد می‌توان به دقت بالا، ایمنی بیشتر، کاهش خطرات جانی مربوط به کاربر انسانی، صرفه جویی در زمان و هزینه، آسیب کمتر به محیط زیر دریا و زیستگاه آبزیان و حذف اثرات مخرب تأخیر زمانی در انتقال اطلاعات اشاره کرد.

۱-۶-۵ کاربردهای صنعتی

امروزه استفاده از سیستم‌های حرکتی از راه دور در بسیاری از صنایع مانند تولید لوازم خانگی، خودروسازی، جوشکاری، فرزکاری و... به دلیل دقت و سرعت عمل بالا و عملکرد بسیار خوب و همچنین به منظور کاهش خطرات جانی برای کاربر انسانی و صرفه جویی در وقت و هزینه، گسترش پیدا کرده است.

۱-۷ مروری بر ساختار پایان نامه

در این پایان نامه پس از معرفی سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه در فصل اول و بیان اهداف و کاربردهای این سیستم‌ها، در فصل دوم به مرور تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. در فصل سوم، پس از معرفی مدل دینامیکی در نظر گرفته شده برای سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه، به طراحی کنترل کننده فازی تطبیقی پیشنهادی پرداخته می‌شود و پس از اثبات و تحلیل پایداری سیستم کنترل، در فصل چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش کنترلی پیشنهادی بیان می‌شود.

فصل ۲: مبانی تحقیق

۲-۱ مقدمه

امروزه ربات‌ها برای انجام کارهای دقیق و با تکرارپذیری بالا کاربرد زیادی پیدا کرده‌اند و همچنین افزایش هزینه‌ها و ریسک بالای حضور نیروی انسان در محیط‌های خطرناک و دور از دسترس باعث پیشرفت ربات‌ها شده و سهم قابل توجهی از تحقیقات را به خود اختصاص داده‌اند. پایداری، شفافیت و عملکرد کاری خوب، سه هدف سیستم‌های حرکتی از راه دور هستند. به طور ایده‌آل، شرط شفافیت کامل و عملکرد کاری باید به طور همزمان و بدون به خطر انداختن پایداری سیستم ارضا شوند. تأخیر زمانی، تغییر پارامتر، و عدم قطعیت در مدل دینامیک محیط و مدل ربات نیز مسائل چالش‌برانگیزی هستند که باید به منظور دستیابی به عملکرد کنترلی مناسب در نظر گرفته شوند.

مقایسه نقاط قوت، کاستی‌ها، مسیرهای احتمالی تحقیقات آینده را براساس شکاف شناسایی شده در تحقیقات قبل، مشخص می‌کنند. به منظور انتخاب کنترل‌کننده مناسب برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه، بررسی مزایا و معایب استراتژی‌های کنترلی موجود ضروری است. در این فصل، به تعدادی از این تحقیقات و ساختارهای پیشنهادشده که برای تحقق اهداف سیستم‌های حرکتی از راه دور ارائه شده‌اند می‌پردازیم.

۲-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر تئوری پسیویتی، پراکندگی و

متغیرهای موج

روش‌های کنترلی مبتنی بر تئوری پسیویتی یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه‌ی تحلیل سیستم‌های حرکتی از راه دور است که می‌تواند با مسئله تأخیر زمانی مقابله کند. روش‌های کنترلی مبتنی بر پسیویتی هم برای سیستم‌های خطی و هم غیرخطی بدون اطلاع کامل از مدل سیستم کاربرد دارند. در این روش دو متغیر توان از طرف فرمانده به سمت فرمانبر منتقل می‌شوند. متغیر موج یکی از

روش‌های کنترل تئوری پسیویتی است که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌جای فرستادن متغیرهای توان به طرف فرمانبر، تبدیل صورت می‌گیرد و متغیرهای جدیدی بر روی کانال ارتباطی ارسال می‌شوند. معمولاً یک جفت نیرو و سرعت به عنوان متغیرهای جدید انتخاب می‌شوند ولی متغیرهای دیگری هم می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. مفهوم کلی متغیر موج تحت پوشش تئوری پسیویتی است و تبدیل متغیر موج تضمین می‌کند که تحت این طرح، پسیوتی حفظ می‌شود. روش‌های مبتنی بر پسیویتی بیشتر بر تضمین پایداری مقاوم متمرکز هستند. با این حال، نمی‌توانند به‌طور همزمان عملکرد کنترل را تضمین کنند [۱۶].

رویکرد مبتنی بر پسیویتی بیان‌شده در [۱۶، ۱۷] سنگ بنای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه در دهه‌های گذشته هستند. در [۱۷] با استفاده از تئوری پسیویتی و پراکندگی، معیاری برای غلبه بر ناپایداری ناشی از تأخیر زمانی ارائه‌شده است. کنترل‌کننده ارائه‌شده تضمین می‌کند که کانال ارتباطی مستقل از تأخیر زمانی پسیو باقی می‌ماند. این معیار نشان می‌دهد که چرا سیستم‌های کنترل دوطرفه موجود برای محیط‌های خاص ناپایدار هستند و چرا قانون کنترل ارائه‌شده برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه، برای هر محیط و با هر تأخیر زمانی که می‌تواند نامعلوم و متغیر با زمان باشد، پایدار است. در نتیجه، این فقدان پسیویتی ناچیز است و سیستم را تنها در فرکانس‌های بالا تحت تأثیر قرار می‌دهد که در آن عملکرد سیستم به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، مشکل پهنای باند، همه سیستم‌های رباتیک را محدود می‌کند و منحصر به سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه نمی‌باشد.

در پی افزایش تأخیر زمانی در کانال ارتباطی که منجر به افزایش خطای ردیابی و زمان پاسخ سیستم و عدم تطابق بین امپدانس کانال ارتباطی و امپدانس سیستم می‌شود، در ادامه کار [۱۷] با هدف بررسی پایداری سیستم‌های حرکتی از راه دور در حضور تأخیر زمانی ثابت و نامشخص، روش متغیر موج در [۱۶] پیشنهاد شده است، که در این طرح پیشنهادی متغیرهای توان به متغیرهای موج تبدیل می‌شوند. مشکل عدم تطابق بین امپدانس کانال ارتباطی و امپدانس سیستم، باعث نوسان در پاسخ سیستم

می‌شود، این مسئله با تطبیق امپدانس موج و محیط عملیاتی که به روش تطبیق امپدانس^{۲۴} معروف است، برطرف می‌شود.

تأخیر زمانی موجود در کانال‌های ارتباطی منجر به ظهور برخی مشکلات چالش‌برانگیز مانند کاهش پایداری و ضعف در ردیابی عملکرد می‌شود. براساس معماری دوگانه فرمانده-فرمانبر^{۲۵}، روش مبتنی بر متغیر موج برای رسیدگی به این مشکلات با استفاده از تئوری پسیویتی در [۱۸] پیشنهاد شده‌است. برای تضمین پایداری سیستم و افزایش عملکرد ردیابی مسیر و نیرو، یک روش جبران متغیر موج نامتقارن^{۲۶} ارائه شده‌است که خطای ردیابی مسیر را در کانال ارتباطی رو به جلو و خطای ردیابی نیرو در کانال ارتباطی رو به عقب را کاهش می‌دهد. در نتیجه این روش پیشنهادی باعث کاهش خطای ردیابی و تضمین پایداری سیستم و عملکرد بهتر هردو بازو شده‌است.

در [۱۹]، کنترل سیستم حرکتی از راه دور چندطرفه^{۲۷} با n فرمانده، n فرمانبر در حضور تأخیر زمانی در کانال ارتباطی مورد بررسی قرار گرفته است. کنترل‌کننده مبتنی بر نظریه پسیویتی به منظور بازخورد مؤثر نیروی محیطی برای کاربر انسانی و بهبود ردیابی عملکرد پیشنهاد شده‌است. این ساختار ارتباطی جدید برای برآورده کردن نیازهای ارتباطی سیستم چندگانه فرمانده ارائه شده، که هر سیستم فرمانده یا فرمانبری می‌تواند با انتخاب ضرایب وزنی، اثر وزن‌دار از سمت هر سیستم فرمانده یا فرمانبر دیگری را دریافت کند.

علاوه بر پایداری، میزان بالای شفافیت نیز یک نیاز اساسی است تا اپراتورها بتوانند ایمن و دقیق وظایف سیستم را انجام دهند. در [۲۰] یک روش جدید برای ترکیب تکنیک تبدیل موج در یک معماری چهارکاناله پیشنهاد شده‌است که این ساختار پیچیدگی محاسبات کمتری دارد، قادر به دستیابی به شفافیت مطلوب در حضور تأخیر زمانی می‌باشد و شرایط پایداری مطلق متناظر را ایجاد و معیارهای عملکرد پایدار را فراهم می‌کند.

²⁴ Impedance Adaption

²⁵ Dual-master-dual-slave

²⁶ Asymmetric wave variable compensation

²⁷ Multilateral

علاوه بر تأخیر زمانی در کانال ارتباطی سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه، تلفات داده^{۲۸} دیگر مسئله مهمی است که عملکرد چنین سیستم‌هایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث ناپایداری سیستم می‌شود. در [۲۱] به فرض وجود عدم قطعیت در دینامیک مدل، تأخیر زمانی و تلفات داده، با هدف تضمین پایداری و بهبود ردیابی عملکرد، یک ساختار کنترلی برای سیستم پیشنهاد شده‌است. روش پیشنهادی یک تکنیک پسیویتی به نام مدولاسیون بسته مبتنی بر پسیویتی^{۲۹} است که با اتلاف داده در شبکه سروکار دارد و در واقع به منظور مقابله با اتلاف داده چنین روشی پیشنهاد شده‌است. در [۲۲] ساختار مبتنی بر تئوری پسیویتی به منظور افزایش شفافیت و حفظ پایداری سیستم به طور همزمان برای یک سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه چهارکانالی در حضور تأخیر ثابت با زمان، پیشنهاد شده است. روش کنترل پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های توسعه‌یافته در کارهای قبلی دارد.

در [۲۳] یک طرح کنترل دوطرفه جدید برای تضمین پایداری سیستم تحت طیف گسترده‌ای از شرایط عملیاتی پیشنهاد شده‌است. پایداری سیستم برحسب تعریف دامنه زمانی از تئوری پسیویتی تحلیل می‌شود. روش پیشنهادی، مسائل مربوط به پیاده‌سازی رؤیتگر پسیویتی^{۳۰} و کنترل‌کننده پسیویتی^{۳۱} برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه را مورد بررسی قرار می‌دهد. نکته مهم این کار این است که کنترل‌کننده پیشنهادی روشی برای افزایش شفافیت نیست، بلکه روشی برای حفظ عملکرد و تضمین پایداری سیستم با اضافه کردن دو جز رؤیتگر پسیویتی و کنترل‌کننده پسیویتی به ساختار کنترلی است. از آنجایی که به مدل دقیق و تخمین پارامتر نیازی نیست، انتظار می‌رود که این روش مفید باشد.

پسیویتی به سیستم‌هایی از درجه نسبی صفر یا یک محدود است در حالی که کمبود پسیویتی^{۳۲}

²⁸ Data Loss

²⁹ Passivity-Based Packet Modulation (PBPM)

³⁰ Passivity Observer

³¹ Passivity Controller

³² passivity - shortage

شامل سیستم‌هایی با درجات نسبی بالاتر و احتمالاً نامینیمم فاز می‌شود. کمبود پسیویتی به طور طبیعی زمانی ایجاد می‌شود که انتقال داده‌ها منوط به تأخیرات زمانی سیستم، چه ثابت و چه متغیر با زمان است. در [۲۴] یک پیکربندی کنترل پسخورد چند حلقه‌ای برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه در حضور تأخیر زمانی با استفاده از مفهوم کمبود پسیویتی با هدف پایداری و بهبود عملکرد شامل هم‌گرایی خطای حالت پایدار، و مقاومت در برابر آشفتگی‌های محیطی ارائه شده‌است. در این طرح پیشنهادی دو حلقه پسخورد منفی به ترتیب برای سیستم‌های فرمانده و فرمانبر و یک حلقه پسخورد بزرگ‌تر که شامل سیستم فرمانده، سیستم فرمانبر و کانال ارتباطی بین آن‌ها می‌باشد، وجود دارد که این چهارچوب کنترل می‌تواند یک کلاس بسیار گسترده از دینامیک این سیستم‌ها را فراهم کند.

در [۲۵] یک کنترل‌کننده موج تقویت‌شده مبتنی بر شتاب‌سنج که اجازه مقیاس‌دهی و شکل‌دهی مسیر پسخورد را فراهم می‌کند پیشنهاد شده‌است. در این روش نشان داده شده که کنترل‌کننده موج تقویت‌شده توانایی انتقال اطلاعات شتاب با فرکانس بالا از تعامل محیط با کاربر انسانی و تضمین پایداری سیستم در حضور تأخیر زمانی و بهبود متغیرهای موج را دارد.

یک کنترل‌کننده دوطرفه بر مبنای متغیر موج برای یک سیستم حرکتی از راه دور میکرو^{۳۳} در [۲۶] پیشنهاد شده‌است. شرایط پسیویتی پیشنهادی در این روش، عملکرد پایداری و شفافیت را در برابر تأخیر زمانی متغیر با زمان و عوامل مقیاس‌بندی تضمین می‌کند.

در [۹] یک ساختار جدید برای جبران شفافیت و حفظ پایداری سیستم حرکتی از راه دور تحت تأخیر زمانی کانال ارتباطی پیشنهاد شده‌است. رویکرد پیشنهادی براساس پسخورد بصری است و مطابق با نیروی تماسی که در طرف فرمانبر تشخیص داده می‌شود، شفافیت را افزایش می‌دهد.

^{۳۳} Micro-Teleoperation System

۳-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل تطبیقی

بسیاری از سیستم‌های دینامیکی که بایستی کنترل شوند پارامترهای نامعلوم دارند که یا ثابت اند و یا به آهستگی تغییر می‌کنند. کنترل تطبیقی به عنوان یک روش برای کنترل چنین سیستم‌هایی پیشنهاد می‌شود. ایده اصلی کنترل تطبیقی این است که پارامترهای نامعلوم را برای تطبیق با محیط اصلاح می‌کند. این روش می‌تواند عملکرد مشخصی را از طریق تطبیق پارامترها در کنترل‌کننده به دست آورد. یکی از کاربردهای مهم این روش، تطبیق عملکرد سمت فرمانبر با تطبیق عملکرد سمت فرمانده در سیستم‌های حرکتی از راه دور است. علاوه بر این، روش کنترل تطبیقی برای تغییر در پارامترها در سایر طرح‌های کنترلی اعمال می‌شود. تمام روش‌های تطبیقی نیازمند یک مدل برای تطبیق با آن هستند. کنترل‌کننده تطبیقی در سیستم‌های حرکتی از راه دور در حضور نامعینی‌های سیستم، با شناسایی دقیق پارامترها و با استفاده از سایر عوامل کنترلی موثر بر سیستم می‌تواند عملکرد چنین سیستم‌هایی را بهبود ببخشد.

یک طرح کنترل تطبیقی دوطرفه برای به دست آوردن پاسخ ایده‌آل سیستم‌های حرکتی از راه دور ناپایدار با در نظر گرفتن عدم قطعیت در [۲۷] پیشنهاد شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی از مشخصه‌های دینامیکی حلقه بسته استفاده می‌کند که جزء ویژگی‌های ساختاری است که کنترل‌کننده‌های دوطرفه به طور مشترک دارند. این کنترل‌کننده پارامترهای مربوط به محیط عملیاتی و کاربر انسانی را تخمین نمی‌زند، بلکه تنها پارامترهای دینامیک ربات‌های فرمانده و فرمانبر را تخمین می‌زند.

در [۲۸] دو نوع از استراتژی‌های کنترل جدید برای سیستم‌های حرکتی از راه دور با دو ربات فرمانده و یک ربات فرمانبر در حضور تأخیر متغیر با زمان در دو حالت متقارن و نامتقارن پیشنهاد می‌شوند. ویژگی‌های امپدانس نیروهای تعامل بین کاربر انسانی و دو ربات فرمانده و همچنین محیط عملیاتی و ربات فرمانبر توسط استراتژی‌های کنترل تطبیقی تخمین زده می‌شوند. علاوه بر این، از روش‌های تطبیقی برای مقابله با نیروهای جاذبه سه ربات استفاده شده است همچنین پایداری این سیستم با

پیشنهاد تابع منتخب لیاپانوف محقق می‌شود.

در [۲۹] یک کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور با تأخیر زمانی، که همزمانی موقعیت‌ها و سرعت ربات‌های فرمانده و فرمانبر را با استفاده از تبدیل پراکندگی تضمین می‌کند، پیشنهاد شده‌است. این طرح در حالت کلی برای سیستم‌های بدون جاذبه قابل اجرا است، اما در [۳۰] با ارائه یک بسط کلی غیرخطی نسبت به [۲۹] و برای غلبه بر این مانع که سیستم باید بدون جاذبه باشد، یک کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستم کنترل از راه دور پیشنهاد شده است. این کنترل‌کننده دو مسئله را برای چنین سیستم‌هایی تضمین می‌کند: (۱) مسئله همزمان‌سازی موقعیت‌ها و سرعت ربات‌های فرمانده و فرمانبر. (۲) محدود ماندن تمامی سیگنال‌ها و همگرا شدن خطاهای موقعیت و سرعت به صفر، در حرکت آزاد و برای هر تأخیر زمانی. تفاوت بین این دو کنترل‌کننده در استفاده از موقعیت و خطاهای شتاب در گشتاورهای هماهنگ‌کننده و در نتیجه، در قوانین تطبیق است.

برای کنترل سیستم‌ها در حضور تأخیر زمانی یک کنترل‌کننده تطبیقی جدید با در نظر گرفتن دامنه وسیعی از تأخیرات زمانی پیشنهاد شده‌است که برای این منظور، یک جبران‌کننده پیشخورد^{۳۴} برای اطمینان از پسیویتی سیستم طراحی شده و سپس یک کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع^{۳۵} برای ارائه عملکرد خوب توسعه داده شده‌است. به علاوه جبران‌کننده پیشخورد باعث می‌شود که سیستم با یک ردیاب ژنراتور فرمان^{۳۶} کنترل شده پایداری و قابلیت ردیابی نیرو را تضمین کند [۳۱].

در [۳۲] یک استراتژی کنترل تطبیقی برای یک کلاس از سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه غیرخطی در حضور تأخیر زمانی و عدم قطعیت دینامیکی پیشنهاد شده است. می‌دانیم که تأخیر تأثیر قابل توجهی بر پایداری چنین سیستم‌هایی دارد، پس طرح کنترل تطبیقی ارائه شده برای تخمین کران بالای تأخیر اعمال می‌شود که می‌تواند این مشکل را حل کند سپس، شبکه‌های عصبی تابع شعاعی برای تخمین عدم قطعیت‌ها در سیستم استفاده می‌شوند. در نتیجه استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی،

³⁴ Feedforward compensator (FFC)

³⁵ Model reference adaptive controller (MRAC)

³⁶ Command generator tracker (CGT)

خطاهای سیستم به یک همسایگی کوچک در اطراف صفر همگرا می‌شوند و ردیابی عملکرد مطلوب به دست می‌آید.

تداخل خطوط الکترومغناطیسی و آسیب آن باعث شکست لینک ارتباطی و در ادامه منجر به از دست رفتن حجمی از داده‌ها می‌شود. به منظور غلبه بر این مشکلات و ارسال پیوسته اطلاعات در [۳۳] با استفاده از تکنیک بهره کم، یک طرح کنترل تطبیقی پیشنهاد شده است که یک فرمانده و چند فرمانبر در شرایطی ارائه می‌شوند که در آن هر ربات مجاز است تنها با همسایه‌های خود در زمان گسسته و نامنظم ارتباط برقرار کند و نشان داده می‌شود که ربات فرمانبر با فاصله نسبی می‌تواند حرکت ربات فرمانده را دنبال کند و همچنین پایداری سیستم نیز تضمین می‌شود.

در سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه، عدم قطعیت پارامتری عملکرد سیستم را تضعیف می‌کند و همچنین سبب ناپایداری سیستم می‌شود. در [۳۴] یک کنترل‌کننده تطبیقی مرکب برای جبران این عدم قطعیت‌ها و همگرایی متغیرهای حالت سیستم پیشنهاد شده است، که در نتیجه این طرح کنترلی به تضمین همزمانی، شفافیت بین نیروی اعمال شده از سمت کاربر انسانی و انعکاس آن از محیط عملیاتی و تخمین پارامتر کمک می‌کند و این رویکرد به مدل‌های خاص نیز محدود نمی‌شود.

در [۳۵] یک چهارچوب کنترل تطبیقی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور غیرخطی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های دینامیکی و در حضور تأخیر متغیر با زمان پیشنهاد شده است. این روش توسعه یافته می‌تواند به طور همزمان دینامیک ناشناخته، و تأخیر نامتقارن و متغیر با زمان را در یک چهارچوب یکپارچه بررسی کند. برای اثبات پایداری از روش نامساوی ماتریس خطی^{۳۷} مبتنی بر معیار پایداری لیاپانوف استفاده شده است.

به منظور ردیابی موقعیت برای سیستم‌های حرکت از راه دور دوطرفه در حضور تأخیر زمانی ثابت، دو کنترل‌کننده تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی برای حالت حرکت آزاد در [۳۶] پیشنهاد شده است. اولین کنترل‌کننده، که به اطلاعات مربوط به شتاب ربات‌های فرمانده و فرمانبر نیاز دارد، می‌تواند خطای

³⁷ Linear Matrix Inequalities (LMI)

موقعیت و خطای سرعت را به طور مجانبی به صفر برساند. کنترل کننده دوم، نیز می‌تواند بدون اندازه‌گیری شتاب به عملکرد ردیابی خوبی دست یابد.

۲-۴ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل مقاوم

از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی کنترل کننده‌ها می‌توان به ردیابی مطلوب سیگنال مرجع در حضور عدم قطعیت‌ها، نویز و اغتشاشات وارد بر سیستم‌ها اشاره کرد. از جمله روش‌های کنترل مقاوم می‌توان H_∞ ، H_2 ، سنتز μ ، روش شکل‌دهی حلقه و ... را نام برد که اساس طراحی کنترل کننده‌های مقاوم، تئوری بهینه سازی H_∞ می‌باشد.

یک چهارچوب برای طراحی کنترل کننده مقاوم براساس تئوری H_∞ و بدون نیاز به ارسال اطلاعات مربوط به سیگنال موقعیت یا سرعت، در [۳۷] پیشنهاد شده‌است. این کنترل کننده به گونه‌ای طراحی شده‌است که رفتار دینامیکی ربات‌های فرمانده و فرمانبر به یکدیگر وابسته هستند. بازوی انسان با حرکات محدود در تماس مداوم با ربات فرمانده است، که مشخصه تعیین کننده بازوی انسان در این حرکات مرتبط با توانایی انسان برای اعمال نیروهای مورد نظر است. همان‌طور که گفتیم این روش منحصر به فرد به اطلاعات مربوط به سیگنال موقعیت یا سرعت نیازی ندارد، فقط اطلاعات مربوط به سیگنال نیرو منتقل می‌شود که همین موضوع منجر به انباشته شدن خطای موقعیت یا خطای سرعت می‌شود.

در [۳۸] به بررسی مسئله کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور با عدم قطعیت دینامیکی، تأخیر زمانی متغیر و بدون سرعت نسبی با استفاده از روش کنترل مقاوم پرداخته شده‌است. با طراحی کنترل مد لغزشی نشان داده می‌شود که روش کنترل مقاوم وقتی پایدار است و عملکرد مطلوبی را نشان می‌دهد که، بهره کنترلی مشروط به حدود تأخیر متغیر با زمان باشد و شرایط آن را ارضا کند. برای مقابله با نیاز به سرعت نسبی، یک روش کنترل مقاوم دیگر با در نظر گرفتن اغتشاش برای نشان دادن مقاومت سیستم ارائه شده‌است.

در [۳۹] یک رویکرد نامساوی ماتریس خطی برای طراحی کنترل کننده مقاوم با تئوری H_∞ و L_1 در حضور تأخیر زمانی نامشخص و تصادفی، برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه بیان شده است. در این روش، یک کنترل کننده امیدانس برای سمت فرمانده، و یک کنترل کننده حلقه باز با تکنیک عدم پذیرش اغتشاش با استفاده از مفهوم کنترل مدل داخلی برای سمت فرمانبر طراحی شده است. در سمت فرمانبر کنترل کننده فیدبک خروجی با رویکرد نامساوی ماتریس‌ها به منظور تضمین پایداری و عملکرد قوی با تئوری H_∞ ، و برای رسیدن به یک پاسخ گذرای خوب علاوه بر ردیابی، یک کنترل کننده L_1 ایجاد شده است.

مسئله همزمانی سیستم‌های حرکتی از راه دور در حضور تأخیر زمانی و با اغتشاش و عدم قطعیت با ورودی‌های پسیو از سمت اپراتور انسانی و محیط عملیاتی در [۴۰] بررسی شده است. یک روش مد لغزشی انتگرال‌پذیر با ترکیب تئوری H_∞ پیشنهاد شده است و سپس شرایط پایداری وابسته به تأخیر زمانی برای کنترل کننده‌ی طراحی شده، با استفاده از نامساوی ماتریس خطی و با ساخت یک تابع لیاپانوف ارائه شده است. این روش، پایداری سیستم را با کران بالایی از تأخیرات زمانی مشخص تضمین می‌کند.

یک کنترل هزینه تضمین شده^{۳۸} مبتنی بر نامساوی ماتریس خطی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه در حضور تأخیر متغیر با زمان برای تضمین مقاومت سیستم و شاخص شفافیت در [۴۱] پیشنهاد شده است.

در [۴۲] به منظور اثبات پایداری مقاوم و شفافیت عملکرد در حضور تأخیر زمانی و عدم قطعیت مدل، یک ساختار کنترل مقاوم برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه ارائه شده است. برای رسیدن به اهداف کنترلی سیستم، در ساختار پیشنهادی از کنترل کننده PID و برای از بین بردن اثر تأخیر زمانی در مخرج تابع انتقال سیستم حلقه بسته از پیش بین اسمیت استفاده شده است. ویژگی اصلی طرح پیشنهادی سادگی آن در پیاده‌سازی است.

³⁸ Guaranteed cost control

در [۴۳] یک ساختار کنترل کننده مقاوم برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه با استفاده از سنتز μ براساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۳۹} با ضرایب شتاب متغیر با زمان ارائه شده‌است. هدف از ساختار پیشنهادی دستیابی به شفافیت و اثبات پایداری در حضور عدم قطعیت و تأخیر زمانی است. در واقع، این تکنیک یک راه‌حل جایگزین برای حل مسئله سنتز μ طراحی می‌کند تا کنترل کننده جدید با ساختاری ساده‌تر اهداف کنترلی را ارضا کند.

۲-۵ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل پیش بین

کنترل پیش‌بین مدل^{۴۰} محدوده وسیعی از روش‌های کنترل است که به صورت صریح از مدل سیستم براساس بهینه‌سازی یک تابع هدف، برای به دست آوردن سیگنال کنترل استفاده می‌کند. این روش کنترلی از دهه ۱۹۸۰ در صنایع شیمیایی، پالایشگاه‌های نفت، تولید سیمان، برج‌های تقطیر، حوزه رباتیک و... به کار می‌رود. در سال‌های اخیر کنترل پیش بین در مدل‌های بالانس سیستم‌های قدرت و الکترونیک قدرت نیز به کار رفته‌است. کنترل کننده‌های پیش‌بین در، استفاده صریح از مدل سیستم برای پیش‌بینی خروجی سیستم، محاسبه سیگنال کنترل براساس مینیمم سازی تابع هدف و استراتژی برگشتی، مشترک هستند. اختلاف روش‌های مختلف کنترل پیش‌بین در مدل سیستم، لحاظ کردن نویز و تابع هزینه است.

یکی از مؤثرترین روش‌ها برای حل مشکل تأخیر در سیستم‌های پایدار استفاده از پیش‌بین اسمیت است که می‌تواند تأخیر زمانی را از مخرج تابع تبدیل سیستم حلقه بسته حذف کند. به عنوان اشکالات عمده آن می‌توان به، آگاهی از مدل دقیق سیستم و تأخیر زمانی ثابت و مشخص اشاره کرد. بنابراین کاربرد پیش‌بین اسمیت در سیستم‌های حرکتی از راه دور محدود است [۴۴].

اگر تأخیر غیرقابل اغماض به دلیل دریافت و پردازش تصویر در انجام عمل جراحی جبران نشود،

^{۳۹} particle swarm optimization

^{۴۰} Model Predictive Control

سیستم ممکن است ناپایدار شود یا خطای ردیابی غیرقابل قبولی را نشان دهد. سیستم کنترل پیش‌بین پیشنهادی در [۴۵] فاصله بین دیوار قلب و مجری نهایی ربات (یعنی ابزار جراحی) با موقعیت جراح را تضمین می‌دهد. از یک پیش‌بین اسمیت برای جبران این تأخیر زمانی استفاده شده است و نتایج نشان می‌دهند که ردیابی حرکت قلب به عنوان معرفی پیش‌بین اسمیت، به طرز قابل توجهی میانگین خطای مطلق را کاهش داده است.

روشی برای دستیابی به کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل برای سیستم‌های محدود خطی با عدم قطعیت در [۴۶] ارائه و تحلیل شده است. این روش بر معایب روش مرسوم کنترل پیش‌بین غلبه می‌کند اما محاسبات آن پیچیده است. طبق این روش پایداری مجانبی سیستم کنترل تضمین می‌شود.

یک رویکرد کنترل پیش‌بین برای کنترل امیدانس سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه با سیم اتصال در حضور تأخیر زمانی در [۴۷] ارائه شده است. ساختار کنترلی پیشنهادی به طور مشابه برای هر دو سمت فرمانده و فرمانبر به منظور تخمین همزمان دینامیک داخلی ربات‌ها و سیگنال‌های منتقل شده به کار می‌رود. در نتیجه استفاده از این روش، تأثیر تأخیر زمانی روی کل سیستم به حداقل می‌رسد، دقت پیش‌بینی و عملکرد سیستم بهبود می‌یابد و پایداری سیستم با وجود تأخیر تضمین می‌شود.

با تخمین غیرمستقیم از نیروی خارجی به جای استفاده مستقیم از سنسورهای نیرو-گشتاور، یک روش کنترل پیش‌بین در حضور دینامیک‌های نامشخص و تأخیر زمانی تصادفی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه در [۴۸] ارائه شده است. از پیش‌بین نیرو در سمت فرمانده و موقعیت برای سمت فرمانبر استفاده شده است و با استفاده از یک استراتژی کنترل فازی تطبیقی مبتنی بر نامساوی ماتریس خطی تضمین می‌شود که خطاهای همزمانی سیستم به صفر همگرا می‌شوند و نیروی تخمین زده شده به مقادیر حقیقی آن نزدیک است.

در [۴۹] یک رویکرد کنترل حرکت مبتنی بر کنترل پیش‌بین برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه تحت تأخیر زمانی ارائه شده است. این رویکرد مقاوم برای تخمین حالات زمان واقعی ربات‌ها در هر دو طرف است. با استفاده از تئوری لیپانوف، شرایط کافی تضمین کارایی پیش‌بین و ردیابی خطاها

به دست می‌آید و خطا به صورت نمایی به صفر همگرا می‌شود.

اثر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی بر کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور به‌طور گسترده توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در [۵۰] برای دستیابی به شفافیت و پایداری در برابر عدم تطابق مدل و تأخیر زمانی نامشخص، یک طرح کنترل برای سیستم‌های حرکتی از راه دور از طریق تکنیک انعکاس نیرو پیشنهاد شده‌است. در هسته ساختار کنترلی پیشنهادی، یک الگوریتم شناسایی توسعه یافته‌است که علاوه بر پیش‌بینی پارامتر تأخیر زمانی، سیستم حلقه بسته را عملاً مستقل از تأخیر زمانی می‌سازد.

۶-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل مد لغزشی^{۴۱}

کنترل مد لغزشی یک تکنیک کنترل غیرخطی است که از ویژگی‌های آن می‌توان به دقت، مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت‌ها و تأخیر زمانی، تنظیم و پیاده‌سازی آسان اشاره کرد. این روش مبتنی بر این نکته است که کنترل سیستم‌های مرتبه اول، چه غیرخطی باشند چه نامعین، نسبت به کنترل سیستم‌های مرتبه $n-1$ ام بسیار آسان‌تر است. طرح کنترل‌کننده مد لغزشی، روشی قانونمند برای حفظ پایداری و عملکرد یکنواخت با بی‌دقتی‌های مدل‌سازی است [۵۱]. طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی دارای دو بخش است:

(۱) طراحی سطح لغزش به‌طوری که حرکت سطح لغزش ویژگی‌های طراحی را ارضا کند.

(۲) انتخاب یک قانون کنترل درست.

برای کاهش مشکل پراکندگی ناشی از کنترل‌کننده مد لغزشی، بهبود عملکرد ردیابی و افزایش توان سیستم، یک کنترل‌کننده مد لغزشی همراه با جبران‌ساز مبتنی بر یک رویکرد اغتشاش^{۴۲} غیرخطی در [۵۲] پیشنهاد شده‌است. با استفاده از رویکرد اغتشاش غیرخطی، اغتشاشات ناشی از مدل دینامیکی

^{۴۱} Sliding Mode Controller (SMC)

^{۴۲} Disturbance observer (DOB)

نامشخص، نیروهای اصطکاک و نیروهای تعامل خارجی تخمین زده می‌شوند که در قانون کنترل جبران می‌شوند و خط سیر مطلوب را به درستی ردیابی می‌کنند.

در [۵۳] یک طرح کنترلی جدید با رویکرد مد لغزشی که طرح کنترلی سه حالت (موقعیت- موقعیت، نیرو- نیرو، نیرو- موقعیت) نامیده می‌شود برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه با ربات فرمانده و فرمانبر پنوماتیکی ارائه شده است.

یک کنترل‌کننده مد لغزشی مبتنی بر مدل آشفتگی منفرد^{۴۳} برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه از طریق اینترنت در حضور تأخیر متغیر با زمان در [۵۴] بیان شده است. این روش دینامیک سیستم را به دو حالت، فرمانبر و خطا (متفاوت از فرمانده و فرمانبر) تجزیه و یک کنترل‌کننده مد لغزشی برای هر حالت طراحی می‌کند. این کنترل‌کننده‌ها از پسیویتی، شفافیت و کارایی بالا سیستم با در نظر گرفتن تأخیر زمانی کانال ارتباطی و تعامل بین فرمانبر و محیط عملیاتی، اطمینان حاصل می‌کنند و یک گام جدید در جهت کاهش مرتبه مدل به حساب می‌آیند.

یک طرح کنترل مد لغزشی تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی تابع پایه شعاعی^{۴۴} برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه غیرخطی با تأخیر زمانی و عدم قطعیت در [۵۵] بررسی شده است. پایداری کلی و عملکرد مطلوب که شامل ردیابی موقعیت و بازخورد نیروها می‌شود را می‌توان به طور همزمان از این روش پیشنهادی نتیجه گرفت.

⁴³ Singular Perturbation

⁴⁴ Radial Basis Function Neural Network (RBFNN)

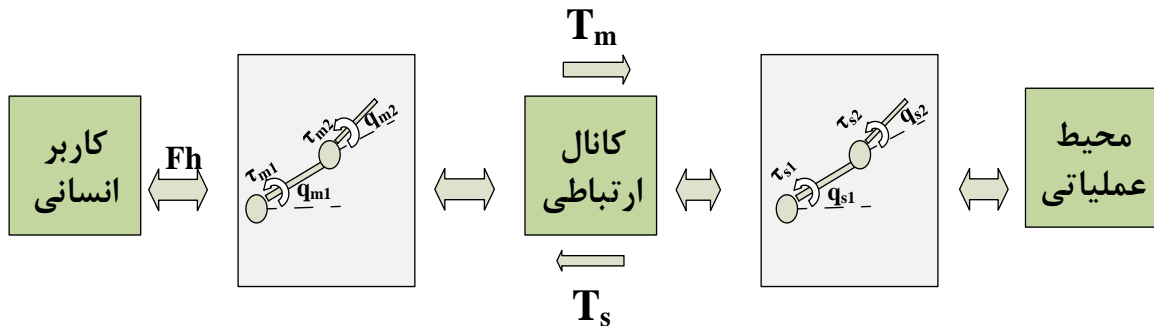
فصل ۳ : مدل سازی

۳-۱ مقدمه

همان طور که گفته شد یک سیستم حرکتی از راه دور متشکل از پنج عنصر، اپراتور انسانی، ربات‌های فرمانده و فرمانبر، کانال ارتباطی و محیط عملیاتی است، که موقعیت حاصل از ربات فرمانده توسط کانال ارتباطی به سمت ربات فرمانبر فرستاده می‌شود و اطلاعات نیرویی که توسط فرمانبر احساس می‌شود به اپراتور انسانی از طریق فرمانده منعکس می‌شود. همچنین در فصل قبل، کاربرد و روش‌های کنترلی متعددی برای چنین سیستم‌هایی بیان شد. در این فصل به منظور تضمین پایداری و شفافیت پس از ارائه یک مدل دینامیکی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه در حضور تأخیر ثابت زمانی، یک کنترل کننده فازی تطبیقی مبتنی بر مکانیزم پسگام با تابع لیاپانوف محدودکننده طراحی می‌گردد.

۳-۲ مدل دینامیکی سیستم‌های حرکتی از راه دور

شکل (۳-۱) مدل دینامیکی یک سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه با دو درجه آزادی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱: ساختار سیستم حرکت از راه دور دوطرفه با دو درجه آزادی

معادلات حرکت اوپلر- لاگرانژ^{۴۵} ربات‌های فرمانده و فرمانبر مربوط به چنین سیستمی به صورت زیر

بیان می‌شود [۵۶]:

^{۴۵} Euler-Lagrange

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + G_m(q_m) + F_m\dot{q}_m + f_{cm}(\dot{q}_m) + \tau_{dm} = \tau_m + F_h \quad (۱-۳)$$

$$M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + G_s(q_s) + F_s\dot{q}_s + f_{cs}(\dot{q}_s) + \tau_{ds} = \tau_s - F_e \quad (۲-۳)$$

که در این روابط، اندیس‌های $i = \{m, s\}$ به ترتیب نشان‌دهنده ربات‌های فرمانده و فرمانبر و $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i \in R^{n \times 1}$ به ترتیب بیانگر موقعیت، سرعت و شتاب بازوها هستند. $M_i(q_i) \in R^{n \times n}$ ماتریس اینرسی جرم، $C_i(q_i, \dot{q}_i) \in R^{n \times n}$ ماتریس نیروی کوریولیس و گریز از مرکز، $G_i(q_i) \in R^{n \times 1}$ بردار گشتاور گرانشی، F_i ضریب اصطکاک ویسکوز، $f_{ci}(\dot{q}_i) \in R^{n \times 1}$ اصطکاک کولمب، $\tau_{di} \in R^{n \times 1}$ اغتشاش خارجی محدود، $\tau_i \in R^{n \times 1}$ سیگنال کنترلی و در نهایت $F_h \in R^{n \times 1}$ نیروی اعمالی توسط کاربر انسانی به ربات فرمانده و $F_e \in R^{n \times 1}$ نیروی اعمالی توسط محیط عملیاتی به ربات فرمانبر هستند. و n نشان‌دهنده تعداد لینک یا درجه آزادی بازوی ربات‌ها است که مشابه [۵۶] سیستم را با دو درجه آزادی در نظر می‌گیریم.

روابط دینامیکی پارامترهای سیستم به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$M_i(q_i) = \begin{bmatrix} M_{i11} & M_{i12} \\ M_{i21} & M_{i22} \end{bmatrix} \quad (۳-۳)$$

$$= \begin{bmatrix} l_{i2}^2 m_{i2} + l_{i1}^2 (m_{i1} + m_{i2}) + 2l_{i1}l_{i2}m_{i2}\cos(q_{i2}) & l_{i2}^2 m_{i2} + l_{i1}l_{i2}m_{i2}\cos(q_{i2}) \\ l_{i2}^2 m_{i2} + l_{i1}l_{i2}m_{i2}\cos(q_{i2}) & l_{i2}^2 m_{i2} \end{bmatrix}$$

$$C_i(q_i, \dot{q}_i) = \begin{bmatrix} C_{i11} & C_{i12} \\ C_{i21} & C_{i22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{i1}l_{i2}m_{i2}\sin(q_{i2})\dot{q}_{i2} & -l_{i1}l_{i2}m_{i2}\sin(q_{i2})\dot{q}_{i2} \\ l_{i1}l_{i2}m_{i2}\sin(q_{i2})\dot{q}_{i1} & 0 \end{bmatrix} \quad (۴-۳)$$

$$G_i(q_i) = \begin{bmatrix} g l_{i2}m_{i2}\cos(q_{i1} + q_{i2}) + l_{i1}(m_{i1} + m_{i2})\cos(q_{i1}) \\ g l_{i2}m_{i2}\cos(q_{i1} + q_{i2}) \end{bmatrix} \quad (۵-۳)$$

در روابط بالا، l_{i1} و l_{i2} طول هر دو لینک و m_{i1} و m_{i2} جرم هر دو لینک، برای بازوی ربات‌های فرمانده و فرمانبر را نشان می‌دهند. در رابطه (۵-۳)، ضریب g بیانگر شتاب گرانش است.

ترم اصطکاک موجود در مدل سیستم به شکل زیر تعریف می شود:

$$F_i \dot{q}_i + f_{ci}(\dot{q}_i) = F \dot{q}_i + f_c(\dot{q}_i) \Rightarrow F \dot{q}_i + f_c(\dot{q}_i) = \begin{bmatrix} f_{d1} \dot{q}_{i1} + \kappa_1 \operatorname{sgn}(\dot{q}_{i1}) \\ f_{d2} \dot{q}_{i2} + \kappa_2 \operatorname{sgn}(\dot{q}_{i2}) \end{bmatrix} \quad (۶-۳)$$

$$\tau_{di} = \begin{bmatrix} 0.3 q_{i1} \dot{q}_{i1} \sin t \\ 0.3 q_{i2} \dot{q}_{i2} \sin t \end{bmatrix} \quad (۷-۳)$$

۱-۲-۳-۳ خواص مهم

برخی از خواص مهم معادلات سیستم غیرخطی که در طراحی کنترل کننده به آن ها رجوع می شود، به صورت زیر بیان می شوند [۵۶]:

۱. ماتریس اینرسی جرم ربات های فرمانده و فرمانبر، ماتریسی معین مثبت متقارن و دارای حد بالا و پایین مشخصی است. حدود آن به شکل زیر بیان می شود:

$$0 < \lambda_m(M_m(q_m)) I_{n \times n} \leq M_m(q_m) \leq \lambda_M(M_m(q_m)) I_{n \times n} \quad (۸-۳)$$

λ_m و λ_M به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر ویژه مربوط به ماتریس اینرسی جرم ربات فرمانده هستند.

$$0 < \lambda_s(M_s(q_s)) I_{n \times n} \leq M_m(q_m) \leq \lambda_S(M_s(q_s)) I_{n \times n} \quad (۹-۳)$$

λ_s و λ_S به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر ویژه مربوط به ماتریس اینرسی جرم فرمانبر هستند.

و I نشان دهنده ی ماتریس همانی با ابعاد مشابه ماتریس اینرسی برای هر دو بازوی ربات است.

۲. به ازای تمام مقادیر q_i, x, y و با در نظر گرفتن ثابت مثبت u_i داریم:

$$\| C_i(q_i, x)y \| \leq v_i \| x \| \| y \| \quad (۱۰-۳)$$

۳. یکی از ویژگی های مهم ربات ها، پاد متقارن^{۴۶} بودن ماتریس های $\dot{M}_i(q_i) - 2C_i(q_i, \dot{q}_i)$ مربوط

به ربات های فرمانده و فرمانبر است.

^{۴۶} Skew-symmetric

$$\eta^T (\dot{M}_i(q_i) - 2C_i(q_i, \dot{q}_i)) \eta = 0 \quad (۱۱-۳)$$

۳-۳ طراحی کنترل کننده پیشنهادی

۱-۳-۳ سیستم منطق فازی^{۴۷}

سیستم‌های فازی در سال‌های گذشته، به طور گسترده به عنوان تقریب‌گر عمومی برای طراحی کنترل کننده سیستم‌های دینامیکی با مدل دقیق ناشناخته استفاده شده‌اند. سیستم‌های فازی، سیستم‌هایی با تعریف دقیق هستند و کنترل فازی نیز نوع خاصی از کنترل غیرخطی است. اگرچه سیستم‌های فازی پدیده‌های غیرقطعی و نامشخص را توصیف می‌کنند، با این حال خود تئوری فازی یک تئوری دقیق می‌باشد.

سیستم‌های فازی، مبتنی بر دانش یا قواعد هستند که می‌توان گفت نقطه شروع ساخت یک سیستم فازی به دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه فازی است، که در مرحله بعد این قواعد در یک سیستم واحد با هم ترکیب می‌شوند.

سیستم‌های فازی را می‌توان به عنوان کنترل کننده حلقه باز و یا حلقه بسته استفاده کرد. سیستم‌های فازی به عنوان کنترل کننده حلقه باز، معمولاً بعضی پارامترهای کنترل را تعیین کرده و سیستم مطابق با این پارامترها کار می‌کند. زمانی که سیستم فازی به عنوان کنترل کننده حلقه بسته مورد استفاده قرار می‌گیرد، به طور همزمان خروجی‌های فرآیند را اندازه گرفته و عملیات کنترل را انجام می‌دهد.

یک سیستم فازی شامل چهار بخش است: پایگاه قواعد فازی، موتور استنتاج فازی، فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز. هر کدام از بخش‌های یک سیستم فازی دارای انواع مختلفی است اینکه از کدام نوع موتور استنتاج یا از کدام نوع فازی‌ساز و یا غیرفازی‌ساز استفاده کنیم، نتیجه را تغییر می‌دهد. استفاده از موتور استنتاج ضرب ممدانی، فازی‌ساز منفرد، غیرفازی‌ساز میانگین مراکز و توابع عضویت گوسین متداول

^{۴۷} Fuzzy Logic System

ترین شکل استفاده از یک سیستم فازی است [۵۷].

همان طور که گفتیم، یک سیستم فازی متشکل از مجموعه قواعد اگر- آنگاه فازی است که به شکل

زیر تعریف می شود:

$$IF \ x_1(t) \text{ is } A_1^j \text{ and } \dots \text{ and } x_n(t) \text{ is } A_n^j \text{ THEN } y(t) \text{ is } B^j \quad (۱۲-۳)$$

طبق رابطه بالا، A^j و B^j به ترتیب مجموعه های فازی، x و y به ترتیب متغیرهای ورودی و خروجی

سیستم فازی هستند. و j نیز بیانگر تعداد قواعد سیستم فازی است ($j=1,2,\dots,L$).

با استفاده از موتور استنتاج ضرب ممدانی، فازی ساز منفرد، غیرفازی ساز میانگین مراکز و توابع

عضویت گوسین، خروجی سیستم فازی مطابق رابطه زیر به دست می آید:

$$y(x(t)) = \frac{\sum_{j=1}^L \bar{y}^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i(t)) \right)}{\sum_{j=1}^L \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i(t))} \quad (۱۳-۳)$$

که $\mu_{A_i^j}(x_i(t))$ بیانگر تابع عضویت متغیر فازی $x_i(t)$ است.

فرم کلی توابع عضویت گوسین به صورت زیر است:

$$\mu_{A_i^j}(x_i(t)) = \exp \left(- \frac{(x_i - \bar{x}_i^l)^2}{\sigma_i^l} \right) \quad (۱۴-۳)$$

که \bar{x}_i^l و σ_i^l پارامترهای مثبت و ثابت و قابل تنظیم تابع عضویت گوسین هستند که در عملکرد سیستم

فازی تأثیر دارند. σ_i^l بیانگر واریانس است، در واقع میزان باز یا بسته شدن شکل توابع عضویت را نشان

می دهد.

همان طور که گفتیم سیستم فازی را می توان به عنوان تقریب گر عمومی در نظر گرفت، که این تقریب

را به شکل رابطه زیر بیان می کنیم:

(۱۵-۳)

$$y(x(t)) = \frac{\sum_{j=1}^l \bar{y}^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i(t)) \right)}{\sum_{j=1}^l \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i(t))} \rightarrow$$

$$y(x(t)) = \frac{\bar{y}^1 \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^1}(x_i(t)) \right)}{\sum_{j=1}^l \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i(t))} + \dots + \frac{\bar{y}^l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i(t)) \right)}{\sum_{j=1}^l \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i(t))}$$

$$\Rightarrow \left[\frac{\left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^1}(x_i(t)) \right)}{\sum_{j=1}^l \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i(t))} \dots \frac{\left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i(t)) \right)}{\sum_{j=1}^l \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i(t))} \right] * \begin{bmatrix} \bar{y}^1 \\ \vdots \\ \bar{y}^l \end{bmatrix} = \xi^T \bar{y}$$

در این رابطه ξ^T تابعی از متغیر ورودی و \bar{y} بردار ضرایب هستند پس می‌توان گفت سیستم فازی $\xi^T \bar{y}$

معادل تابع $y(x(t))$ است که در بهترین حالت همیشه یک خطای جزئی به نام ε ، مطابق رابطه زیر باقی

می‌ماند.

$$y(x(t)) = \xi^T \bar{y} + \varepsilon$$

(۱۶-۳)

۲-۳-۳ کنترل فازی تطبیقی

فرض می‌شود که کنترل‌کننده‌های فازی در شرایطی کار می‌کنند که یک عدم قطعیت بزرگ یا تغییرات نامعلوم در پارامترها و ساختارهای سیستم وجود دارد که ممکن است باعث عدم دقت و یا ناپایداری در سیستم تحت کنترل شود. در این صورت به منظور ثابت نگه داشتن عملکرد سیستم در برابر این عدم قطعیت‌ها و یا تغییرات نامشخص آن‌ها، کنترل تطبیقی پیشنهاد می‌شود. بنابراین می‌توان سیستم کنترل تطبیقی را یک سیستم کنترل با تخمین بهنگام پارامترها در نظر گرفت. پس می‌توان گفت که کنترل فازی پیشرفته برای رسیدن به عملکرد مطلوب باید تطبیقی باشد. در این صورت باید یک جز به نام قاعده تطبیق به ساختار کنترلی اضافه شود تا پارامترهای کنترل‌کننده فازی را به صورت آنلاین تنظیم سازد. عملکرد بهتر و دانش کمتر از سیستم تحت کنترل دو مزیت از سیستم‌های کنترل فازی تطبیقی نسبت به فازی غیرتطبیقی هستند. دانش سیستمی و استراتژی‌های کنترلی می‌توانند با

کنترل کننده‌های فازی تطبیقی ترکیب شوند، اما در سیستم‌های کنترل تطبیقی کلاسیک در نظر گرفته نمی‌شوند. این موضوع مهم‌ترین تفاوت و مزیت کنترل فازی تطبیقی نسبت به تطبیقی کلاسیک است. هر سیستم کنترل حداقل دارای یک سیستم تحت کنترل و یک کنترل کننده می‌باشد. پس بنابراین دانش بشری درباره یک سیستم کنترل به دو دسته، دانش سیستمی و دانش کنترل تقسیم می‌شود. حال با توجه به این موضوع، کنترل فازی تطبیقی به سه دسته تقسیم می‌شود:

(۱) کنترل فازی تطبیقی مستقیم: این روش مبتنی بر دانش کنترلی است که قواعد کنترل فازی مشخص می‌کنند در هر وضعیت، چه عمل کنترلی باید اتخاذ شود.

(۲) کنترل فازی تطبیقی غیر مستقیم: این روش مبتنی بر دانش سیستمی است که قواعد اگر-آنگاه فازی رفتار سیستم را شرح می‌دهند.

(۳) روش ترکیبی مستقیم- غیرمستقیم: این روش مبتنی بر هر دو دانش کنترلی و سیستمی است و کنترل کننده صورت یک متوسط وزن دار شده از دو روش مستقیم و غیرمستقیم را شامل می‌شود [۵۷].

۳-۳-۳ کنترل پسگام^{۴۸}

در چند دهه گذشته، چندین تکنیک کنترل برای تثبیت، تنظیم و کنترل سیستم‌های خطی و غیرخطی معرفی شده است. روش کنترل پسگام یک روش طراحی بازگشتی است که با انتخاب یک تابع لیاپانوف و ارتباط آن با کنترل کننده فیدبک، پایداری مجانبی سراسری سیستم‌های فیدبک را تضمین می‌کند. کنترل پسگام روشی عمومی است و به طور گسترده در حوزه‌هایی مانند مهندسی مکانیک، رباتیک، مهندسی برق، سیستم‌های قدرت، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های آشوب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

^{۴۸} Backstepping Control

۳-۳-۴ تابع لیاپانوف محدودکننده^{۴۹}

روش‌های طراحی کنترل بسیار مهمی وجود دارند که به منظور کنترل محدودیت‌های خروجی ارائه شده‌اند. از جمله طراحی مبتنی بر تابع لیاپانوف محدودکننده که یک روش بسیار مؤثر است، زیرا مقدار چنین تابعی هر زمان که آرگومان‌های آن به محدوده تعریف شده نزدیک شوند، به بی‌نهایت میل می‌کند. تخطی از محدودیت‌های موجود در حین عملیات ممکن است منجر به تضعیف عملکرد، خطرات یا خسارات به سیستم شود. تکنیک‌های کنترل مبتنی بر تابع لیاپانوف محدودکننده ثابت متقارن و نامتقارن متغیر با زمان برای تایید پایداری انواع مختلفی از سیستم‌ها با محدودیت‌های حالت یا خروجی پیشنهاد می‌شوند.

تابع لیاپانوف محدودکننده، یک تابع عددی $V(x)$ است که با توجه به سیستم $\dot{x} = f(x)$ در یک ناحیه باز D که شامل مبدأ می‌باشد، تعریف می‌شود، به طوری که پیوسته و مثبت معین بوده و مشتق مرتبه اول آن در تمام نقاط ناحیه D پیوسته می‌باشد، همچنین اگر $V(x) \rightarrow \infty$ آنگاه، x به سمت ناحیه D میل می‌کند، و در کنار راه‌حل‌های مربوط به معادله $\dot{x} = f(x)$ رابطه $V(x) \leq b$ ، $\forall t \geq 0$ تعریف می‌شود که b ثابت‌هایی مثبت می‌باشند [۵۸].

برای یک محدودیت ثابت متقارن، از تابع منتخب لیاپانوف به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$V = \frac{1}{2} \log \frac{a^T a}{a^T a - z^T z} \quad a > |z| \quad (۱۷-۳)$$

که در آن a یک ثابت مثبت و z خطای ردیابی می‌باشد. زمانی که $a = |z|$ باشد، مقدار تابع لگاریتم به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. بنابراین طبق این ویژگی تابع لیاپانوف محدودکننده مثبت خواهد بود.

اگر برای ثابت مثبت a یک z وجود داشته باشد که شرط $a > |z|$ را برآورده کند، آنگاه رابطه زیر برقرار می‌گردد:

^{۴۹} Barrier Lyapunov Function

$$V = \frac{1}{2} \log \frac{a^T a}{a^T a - z^T z} < \frac{a^T a}{a^T a - z^T z} \quad (18-3)$$

۵-۳-۳ اثبات پایداری و طراحی کنترل کننده پیشنهادی

در این بخش با هدف تضمین پایداری و شفافیت برای سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه در حضور تأخیر زمانی ثابت با مدل دینامیکی بیان شده در روابط (۱-۳) و (۲-۳)، یک کنترل کننده فازی تطبیقی مبتنی بر مکانیزم پسگام و تابع لیاپانوف محدودکننده مطابق زیر در نظر می گیریم:

$$\begin{cases} z_{m1} = q_m - q_s(t - T_s) \\ z_{m2} = \dot{q}_m - \alpha_{m1} \end{cases} \quad (19-3)$$

$$\begin{cases} z_{s1} = q_s - q_m(t - T_m) \\ z_{s2} = \dot{q}_s - \alpha_{s1} \end{cases} \quad (20-3)$$

متغیرهای z_{s1} و z_{m1} ، به ترتیب دینامیک خطای ردیابی مربوط به ربات‌های فرمانده و فرمانبر را بیان می کنند که برای محقق شدن هدف کنترلی یعنی مسئله همزمان سازی دو ربات فرمانده و فرمانبر، باید خطا به سمت صفر میل کند. که در نهایت می توان نتیجه گرفت سیستم پایدار است. در این روابط متغیر T_m ، بیانگر تأخیر زمانی کانال ارتباطی از سمت ربات فرمانده به ربات فرمانبر و T_s ، تأخیر زمانی کانال ارتباطی از سمت ربات فرمانبر به ربات فرمانده است. متغیرهای α_{m1} و α_{s1} ، به عنوان ورودی های مجازی مربوط به مکانیزم پسگام برای ربات های فرمانده و فرمانبر تعریف می شوند.

حال برای اثبات پایداری حلقه بسته، تابع منتخب لیاپانوف برای زیر سیستم اول را به صورت زیر

پیشنهاد می دهیم:

$$v_1 = \frac{1}{2} z_{m1}^T z_{m1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \log \frac{a_i^2}{a_i^2 - z_{s1i}^2} \quad a_i > |z_{s1i}| \quad (21-3)$$

با مشتق گیری از تابع لیاپانوف تعریف شده داریم:

$$\dot{v}_1 = z_{m1}^T \dot{z}_{m1} + \sum_{i=1}^n \frac{z_{s1i} \dot{z}_{s1i}}{a_i^2 - z_{s1i}^2} \quad (22-3)$$

با مشتق‌گیری از روابط خطای تعریف‌شده داریم:

$$\begin{cases} \dot{z}_{m1} = \dot{q}_m - \dot{q}_s(t - T_s) \\ \dot{z}_{s1} = \dot{q}_s - \dot{q}_m(t - T_m) \end{cases} \quad (23-3)$$

در نتیجه داریم:

$$\rightarrow \dot{v}_1 = z_{m1}^T (z_{m2} + \alpha_{m1} - \dot{q}_s(t - T_s)) + \sum_{i=1}^n \frac{z_{s1i} (z_{s2} + \alpha_{s1} - \dot{q}_m(t - T_m))}{a_i^2 - z_{s1i}^2} \quad (24-3)$$

برای نیم‌معین منفی شدن مشتق تابع لیاپانوف، متغیرهای α_{s1} و α_{m1} را به صورت زیر پیشنهاد می‌شوند:

$$\text{if } \begin{cases} \alpha_{m1} = -k_{m1} z_{m1} + \dot{q}_s(t - T_s) \\ \alpha_{s1} = -k_{s1} z_{s1} + \dot{q}_m(t - T_m) \end{cases} \quad (25-3)$$

ضرایب k_{s1} و k_{m1} هر دو باید مثبت باشند تا نیم‌معین منفی شدن مشتق تابع لیاپانوف محقق شود.

در نهایت رابطه (22-3) را به صورت زیر داریم:

$$\Rightarrow \dot{v}_1 - k_{m1} z_{m1}^T z_{m1} + z_{m1}^T z_{m2} + \sum_{i=1}^n \frac{-k_{s1} z_{s1i}^2}{a_i^2 - z_{s1i}^2} + \frac{z_{s1i} z_{s2}}{a_i^2 - z_{s1i}^2} \quad (26-3)$$

حال برای زیرسیستم دوم تابع منتخب لیاپانوف را پیشنهاد می‌دهیم:

$$v_2 = v_1 + \frac{1}{2} z_{m2}^T M_m z_{m2} + \frac{1}{2} z_{s2}^T M_s z_{s2} \quad (27-3)$$

با مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف تعریف شده داریم:

$$\begin{aligned} \dot{v}_2 = \dot{v}_1 + \frac{1}{2} \dot{z}_{m2}^T M_m z_{m2} + \frac{1}{2} z_{m2}^T \dot{M}_m z_{m2} + \frac{1}{2} z_{m2}^T M_m \dot{z}_{m2} + \frac{1}{2} \dot{z}_{s2}^T M_s z_{s2} \\ + \frac{1}{2} z_{s2}^T \dot{M}_s z_{s2} + \frac{1}{2} z_{s2}^T M_s \dot{z}_{s2} \end{aligned} \quad (28-3)$$

با جایگذاری رابطه (26-3) و طبق خاصیت شماره ۳ مربوط به ربات‌ها، رابطه بالا را می‌توان به شکل زیر

نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{v}_2 - k_{m1} z_{m1}^T z_{m1} + z_{m1}^T z_{m2} + \sum_{i=1}^n \frac{-k_{s1} z_{s1i}^2}{a_i^2 - z_{s1i}^2} + \frac{z_{s1i} z_{s2}}{a_i^2 - z_{s1i}^2} + z_{m2}^T C_m z_{m2} \\ + z_{s2}^T C_s z_{s2} + z_{m2}^T M_m \dot{z}_{m2} + z_{s2}^T M_s \dot{z}_{s2} \end{aligned} \quad (29-3)$$

با مشتق گیری از روابط مربوط به مکانیزم پسگام، دو رابطه زیر به دست می آیند:

$$\begin{cases} \dot{z}_{m_2} = \dot{q}_m - \dot{\alpha}_{m_1} \\ \dot{z}_{s_2} = \dot{q}_s - \dot{\alpha}_{s_1} \end{cases} \quad (30-3)$$

طبق معادلات دینامیکی بیان شده مربوط به سیستم در بخش ۳-۲، دو متغیر \dot{q}_m و \dot{q}_s را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\begin{cases} \ddot{q}_m = M_m^{-1}(q_m)(-C_m \dot{q}_m - G_m - F_m \dot{q}_m - f_{cm} - \tau_{dm} + \tau_m + F_h) \\ \ddot{q}_s = M_s^{-1}(q_s)(-C_s \dot{q}_s - G_s - F_s \dot{q}_s - f_{cs} - \tau_{ds} + \tau_s - F_e) \end{cases} \quad (31-3)$$

پس با جایگذاری روابط به دست آمده در مشتق تابع لیاپانوف، داریم:

$$\dot{v}_2 - k_{m_1} z_{m_1}^T z_{m_1} + z_{m_1}^T z_{m_2} + \sum_{i=1}^n \frac{-k_{s_1} z_{s_1 i}^2}{a_i^2 - z_{s_1 i}^2} + \frac{z_{s_1 i} z_{s_2}}{a_i^2 - z_{s_1 i}^2} + z_{m_2}^T C_m z_{m_2} \quad (32-3)$$

$$\begin{aligned} &+ z_{s_2}^T C_s z_{s_2} + z_{m_2}^T (-C_m \dot{q}_m - G_m - F_m \dot{q}_m - f_{cm} - \tau_{dm} + \tau_m \\ &+ F_h - M_m \dot{\alpha}_{m_1}) + z_{s_2}^T (-C_s \dot{q}_s - G_s - F_s \dot{q}_s - f_{cs} - \tau_{ds} + \tau_s - F_e \\ &- M_s \dot{\alpha}_{s_1}) \end{aligned}$$

$$\rightarrow \dot{v}_2 = -k_{m_1} z_{m_1}^T z_{m_1} + z_{m_1}^T z_{m_2} + \sum_{i=1}^n \frac{-k_{s_1} z_{s_1 i}^2}{a_i^2 - z_{s_1 i}^2} + \frac{z_{s_1 i} z_{s_2}}{a_i^2 - z_{s_1 i}^2} \quad (33-3)$$

$$\begin{aligned} &+ z_{m_2}^T (-C_m \dot{q}_m + C_m z_{m_2} - G_m - F_m \dot{q}_m - f_{cm} - \tau_{dm} + \tau_m + F_h \\ &- M_m \dot{\alpha}_{m_1}) + z_{s_2}^T (-C_s \dot{q}_s + C_s z_{s_2} - G_s - F_s \dot{q}_s - f_{cs} - \tau_{ds} + \tau_s - F_e - M_s \dot{\alpha}_{s_1}) \end{aligned}$$

با ساده سازی و استفاده از معادلات پسگام بیان شده رابطه بالا را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Rightarrow \dot{v}_2 = -k_{m_1} z_{m_1}^T z_{m_1} + z_{m_1}^T z_{m_2} + \sum_{i=1}^n \frac{-k_{s_1} z_{s_1 i}^2}{a_i^2 - z_{s_1 i}^2} + \frac{z_{s_1 i} z_{s_2}}{a_i^2 - z_{s_1 i}^2} \quad (34-3)$$

$$\begin{aligned} &+ z_{m_2}^T (-C_m \alpha_{m_1} - G_m - F_m \dot{q}_m - f_{cm} - \tau_{dm} + \tau_m + F_h - M_m \dot{\alpha}_{m_1}) \\ &+ z_{s_2}^T (-C_s \alpha_{s_1} - G_s - F_s \dot{q}_s - f_{cs} - \tau_{ds} + \tau_s - F_e - M_s \dot{\alpha}_{s_1}) \end{aligned}$$

طبق رابطه (۳-۱۵) که خاصیت تقریب گر عمومی بودن سیستم فازی را نشان می دهد و به منظور

طراحی یک کنترل کننده فازی تطبیقی غیرمستقیم که مبتنی بر دانش سیستمی است می توان ترم های

زیر را که براساس دانش مدل سازی و سیستم برای هر دو ربات فرمانده و فرمانبر است، نامعلوم در نظر

گرفت و با یک سیستم فازی آنها را تقریب زد:

$$\begin{cases} -M_m \dot{\alpha}_{m1} - C_m \alpha_{m1} - G_m - F_m \dot{q}_m - f_{cm} = Q_m(X_m) = \theta_m^T \varphi_m(X_m) \\ -M_s \dot{\alpha}_{s1} - C_s \alpha_{s1} - G_s - F_s \dot{q}_s - f_{cs} = Q_s(X_s) = \theta_s^T \varphi_s(X_s) \end{cases} \quad (35-3)$$

ورودی‌های سیستم فازی برای ربات‌های فرمانده و فرمانبر را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\begin{cases} X_m = [\dot{q}_s(t - T_s), \dot{q}_s(t - T_s), \dot{q}_m, q_m]^T \\ X_s = [\ddot{q}_m(t - T_m), \dot{q}_m(t - T_m), \dot{q}_s, q_s]^T \end{cases} \quad (36-3)$$

در نتیجه می‌توان قانون کنترل را برای بازوهای فرمانده و فرمانبر به شکل زیر پیشنهاد داد:

$$\begin{cases} \tau_m = -k_{m2} z_{m2} - z_{m1} - \hat{Q}_m(X_m) - u_{rm} - F_h \\ \tau_{si} = -k_{s2} z_{s2} - \sum_{i=1}^n \frac{z_{s1i}}{a_i^2 - z_{s1i}^2} - \hat{Q}_s(X_s) - u_{rs} + F_e \end{cases} \quad (37-3)$$

ضرایب k_{m2} و k_{s2} هر دو باید مثبت باشند.

ترم u_r اضافه شده در قانون کنترل یک ترم مقاوم‌ساز است و به منظور جبران خطای تقریب و نامعینی‌های دیگر در هر دو بازوی فرمانده و فرمانبر به کار می‌رود. طبق رابطه (3-15) و با علم به اینکه ترم‌های قانون کنترل باید معین و قابل پیاده‌سازی باشند پس تخمین سیستم فازی بیان شده در رابطه (35-3) را در قانون کنترل استفاده می‌کنیم.

حال برای دستیابی به عملکرد کنترلی مطلوب و پایداری کلی سیستم، تابع منتخب لیاپانوف کلی به

صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_m^T \Lambda_m^{-1} \tilde{\theta}_m + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_s^T \Lambda_s^{-1} \tilde{\theta}_s + \frac{1}{2} \tilde{\delta}_m^T Y_m^{-1} \tilde{\delta}_m + \frac{1}{2} \tilde{\delta}_s^T Y_s^{-1} \tilde{\delta}_s \quad (38-3)$$

که در رابطه بالا، دو ترم آخر مربوط به تخمین آنلاین کران نامعینی‌های دو بازوی فرمانده و فرمانبر هستند که به ساخت u_r منجر می‌شوند.

با مشتق‌گیری از تابع منتخب لیاپانوف کلی داریم:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + \tilde{\theta}_m^T \Lambda_m^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m + \tilde{\theta}_s^T \Lambda_s^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s + \tilde{\delta}_m^T Y_m^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_m + \tilde{\delta}_s^T Y_s^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_s \quad (39-3)$$

با جایگذاری رابطه (3-34) و تقریب فازی و قانون کنترل پیشنهادی رابطه بالا به صورت زیر بازنویسی

می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 - k_{m1}z_{m1}^T z_{m1} + z_{m1}^T z_{m2} + \sum_{i=1}^n \frac{-k_{s1}z_{s1i}^2}{a_i^2 - z_{s1i}^2} + \frac{z_{s1i}z_{s2}}{a_i^2 - z_{s1i}^2} & \quad (۴۰-۳) \\ + z_{m2}^T (Q_m(X_m) - \tau_{dm} - k_{m2}z_{m2} - z_{m1} - \widehat{Q}_m(X_m) - u_{rm}) & \\ + z_{s2}^T \left(Q_s(X_s) - \tau_{ds} - k_{s2}z_{s2} - \frac{z_{s1}}{a^T a - z_{s1}^T z_{s1}} - \widehat{Q}_s(X_s) - u_{rs} \right) & \\ + \tilde{\theta}_m^T \Lambda_m^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m + \tilde{\theta}_s^T \Lambda_s^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s + \tilde{\delta}_m^T Y_m^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_m + \tilde{\delta}_s^T Y_s^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_s & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{V}_3 = -k_{m1}z_{m1}^T z_{m1} - k_{m2}z_{m2}^T z_{m2} - \frac{k_{s1}z_{s1i}^2}{a_i^2 - z_{s1i}^2} - k_{s2}z_{s2}^T z_{s2} & \quad (۴۱-۳) \\ + z_{m2}^T (Q_m(X_m) - \widehat{Q}_m(X_m)) + z_{s2}^T (Q_s(X_s) - \widehat{Q}_s(X_s)) & \\ + z_{m2}^T (-\tau_{dm} - u_{rm}) + z_{s2}^T (-\tau_{ds} - u_{rs}) + \tilde{\theta}_m^T \Lambda_m^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m & \\ + \tilde{\theta}_s^T \Lambda_s^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s + \tilde{\delta}_m^T Y_m^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_m + \tilde{\delta}_s^T Y_s^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_s & \end{aligned}$$

از طرفی:

$$\begin{cases} \tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta} \rightarrow \theta^* = \tilde{\theta} + \hat{\theta} \\ \tilde{\delta} = \delta^* - \hat{\delta} \rightarrow \delta^* = \tilde{\delta} + \hat{\delta} \end{cases} \quad (۴۲-۳)$$

و با تعریف خطای تقریب به صورت زیر می‌توان به رابطه (۴۴-۳) رسید

$$\begin{cases} \omega_m = Q_m - \widehat{Q}_m(X_m | \theta_m^*) \\ \omega_s = Q_s - \widehat{Q}_s(X_s | \theta_s^*) \end{cases} \quad (۴۳-۳)$$

$$\begin{cases} Q_m - \widehat{Q}_m = \widehat{Q}_m(X_m | \theta_m^*) - \widehat{Q}_m + \omega_m = \tilde{\theta}_m^T(X_m)\varphi_m + \omega_m(X_m) \\ Q_s - \widehat{Q}_s = \widehat{Q}_s(X_s | \theta_s^*) - \widehat{Q}_s + \omega_s = \tilde{\theta}_s^T(X_s)\varphi_s + \omega_s(X_s) \end{cases} \quad (۴۴-۳)$$

پس داریم:

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{V}_3 = -k_{m1}z_{m1}^T z_{m1} - k_{m2}z_{m2}^T z_{m2} - \frac{k_{s1}z_{s1i}^2}{a_i^2 - z_{s1i}^2} - k_{s2}z_{s2}^T z_{s2} + z_{m2}^T \tilde{\theta}_m^T(X_m)\varphi_m & \quad (۴۵-۳) \\ + z_{s2}^T \tilde{\theta}_s^T(X_s)\varphi_s + z_{m2}^T (-\tau_{dm} - u_{rm} + \omega_m) & \\ + z_{s2}^T (-\tau_{ds} - u_{rs} + \omega_s) + \tilde{\theta}_m^T \Lambda_m^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m + \tilde{\theta}_s^T \Lambda_s^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s + \tilde{\delta}_m^T Y_m^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_m & \\ + \tilde{\delta}_s^T Y_s^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_s & \end{aligned}$$

حال اگر کران نامعینی به صورت زیر تعریف شود:

$$\begin{cases} \|\omega_m - \tau_{dm}\| = \delta_m^* \\ \|\omega_s - \tau_{ds}\| = \delta_s^* \end{cases} \quad (۴۶-۳)$$

می‌دانیم که θ پیشنهادی بهینه است و مشتق آن صفر می‌شود. بنابراین می‌توان گفت: $\dot{\hat{\theta}} = -\hat{\theta}$ در

نتیجه قوانین تطبیق به فرم زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{cases} z_{m2}^T \varphi_m - \Lambda_m^{-1} \hat{\theta}_m = 0 \Rightarrow \hat{\theta}_m = \Lambda_m z_{m2}^T \varphi_m \\ z_{s2}^T \varphi_s - \Lambda_s^{-1} \hat{\theta}_s = 0 \Rightarrow \hat{\theta}_s = \Lambda_s z_{s2}^T \varphi_s \end{cases} \quad (۴۷-۳)$$

ضرایب Λ_m و Λ_s به کار رفته در رابطه بالا همان ضرایب تطبیق هستند.

با استفاده از این روابط و جایگذاری در مشتق تابع لیاپانوف کلی داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -k_{m1} z_{m1}^T z_{m1} - k_{m2} z_{m2}^T z_{m2} - \frac{k_{s1} z_{s1i}^2}{a_i^2 - z_{s1i}^2} - k_{s2} z_{s2}^T z_{s2} + z_{m2}^T \tilde{\delta}_m + z_{m2}^T \hat{\delta}_m \\ & + z_{s2}^T \tilde{\delta}_s + z_{s2}^T \hat{\delta}_s - z_{m2}^T u_{rm} - z_{s2}^T u_{rs} + \tilde{\delta}_m^T Y_m^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_m + \tilde{\delta}_s^T Y_s^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_s \end{aligned} \quad (۴۸-۳)$$

اکنون طبق رابطه بالا اگر رابطه مربوط به ترم مقاوم‌ساز (u_r) را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$\begin{cases} \hat{\delta}_m = Y_m z_{m2} \Rightarrow u_{rm} = \hat{\delta}_m \|z_{m2}\| \\ \hat{\delta}_s = Y_s z_{s2} \Rightarrow u_{rs} = \hat{\delta}_s \|z_{s2}\| \end{cases} \quad (۴۹-۳)$$

در نهایت مشتق تابع منتخب لیاپانوف کلی به فرم زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{V}_3 \leq -k_{m1} z_{m1}^T z_{m1} - k_{m2} z_{m2}^T z_{m2} - \frac{k_{s1} z_{s1i}^2}{a_i^2 - z_{s1i}^2} - k_{s2} z_{s2}^T z_{s2} \leq 0 \quad (۵۰-۳)$$

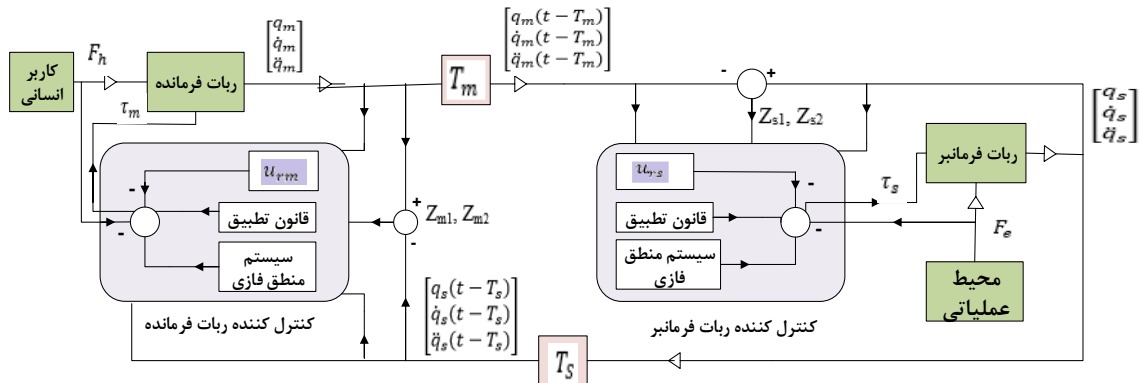
طبق نتیجه به دست آمده نیم معین منفی بودن تابع منتخب لیاپانوف کلی محقق و پایداری سیستم

مورد نظر اثبات می‌شود.

فصل ۴ : تهیه سازی و نتایج روش پیشنهادی

۱-۴ مقدمه

در فصل قبل به منظور تضمین پایداری و شفافیت عملکرد سیستم‌های حرکتی از راه دور دو طرفه در حضور تأخیر ثابت با زمان برای بازوی ربات‌های فرمانده و فرمانبر با دو درجه آزادی، یک کنترل کننده فازی تطبیقی مبتنی بر مکانیزم پسگام با تابع لیاپانوف محدودکننده طراحی شد. در این فصل، ابتدا ساختار کنترلی پیشنهادی مطابق شکل (۱-۴) و مقادیر پارامترهای مربوط به سیستم و کنترل کننده که روابط آن‌ها در فصل قبل بیان شده، ارائه می‌شود و سپس به منظور نشان دادن اثر روش کنترلی پیشنهادی نتایج حاصل از شبیه سازی، ارائه و بررسی می‌شوند.



شکل ۱-۴: ساختار کنترل پیشنهادی

۲-۴ پیاده سازی کنترل کننده پیشنهادی

در این بخش ابتدا، پارامترهای دینامیکی سیستم حرکتی از راه دور تعریف شده در روابط (۱-۳) و (۲-۳) به کار رفته در شبیه‌سازی براساس مقادیر جدول (۱-۴) و همچنین، پارامترهای قانون کنترل براساس مقادیر جدول (۲-۴) ارائه می‌شوند. و در ادامه با اعمال نیروی کاربر انسانی به ربات فرمانده مطابق شکل (۲-۴) و به فرض اینکه از سمت محیط عملیاتی نیرویی اعمال نشود، اثر روش کنترلی پیشنهادی در دو حالت تأخیر ثابت با زمان متقارن و نامتقارن بررسی می‌شود.

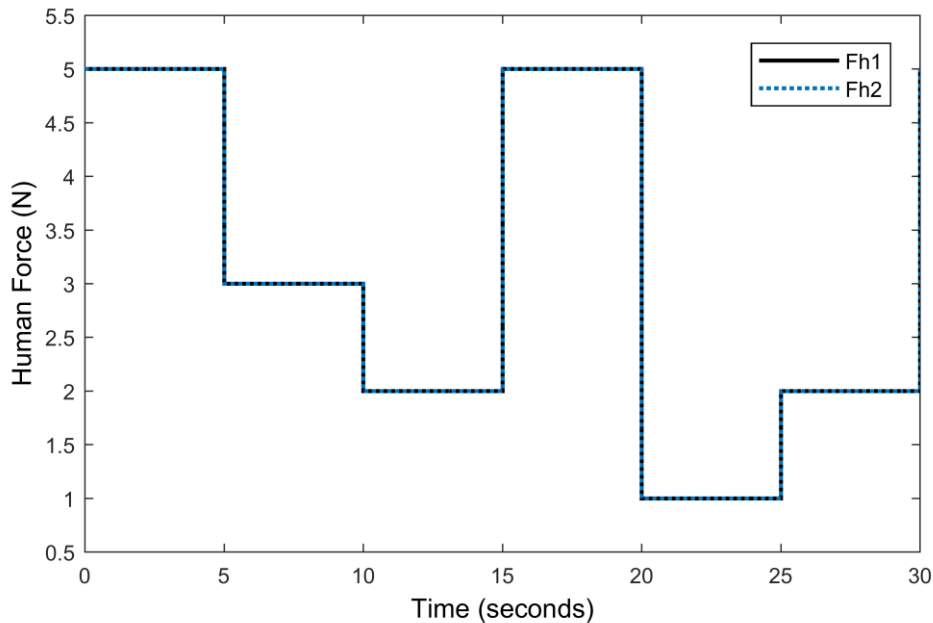
جدول ۱-۴: پارامترهای سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه [۵۶]

| Parameters | Value |
|-------------------|------------------------------|
| $m_{i1} = m_{i2}$ | 1 (kg) |
| $l_{i1} = l_{i2}$ | 0.5 (m) |
| g | 9.81 (m/s ²) |
| f_{d1} | 3 |
| f_{d2} | 4 |
| κ_1 | 5 |
| κ_2 | 4 |
| $q_m(0)$ | $[0.2\pi \ 0.1\pi]^T$ (rad) |
| $q_s(0)$ | $[0.1\pi \ 0.12\pi]^T$ (rad) |
| $\dot{q}_m(0)$ | $[0 \ 0]^T$ (rad/s) |
| $\dot{q}_s(0)$ | $[0 \ 0]^T$ (rad/s) |

جدول ۲-۴: پارامترهای قانون کنترل

| Parameters | Value |
|-------------|-------|
| k_{m1} | 10 |
| k_{m2} | 30 |
| k_{s1} | 11 |
| k_{s2} | 20 |
| Y_m | 7 |
| Y_s | 5 |
| Λ_m | 10 |
| Λ_s | 5 |
| a | 0.5 |

فرض می‌شود که نیرویی به شکل (۲-۴) از سمت کاربر انسانی به ربات فرمانده وارد می‌شود.



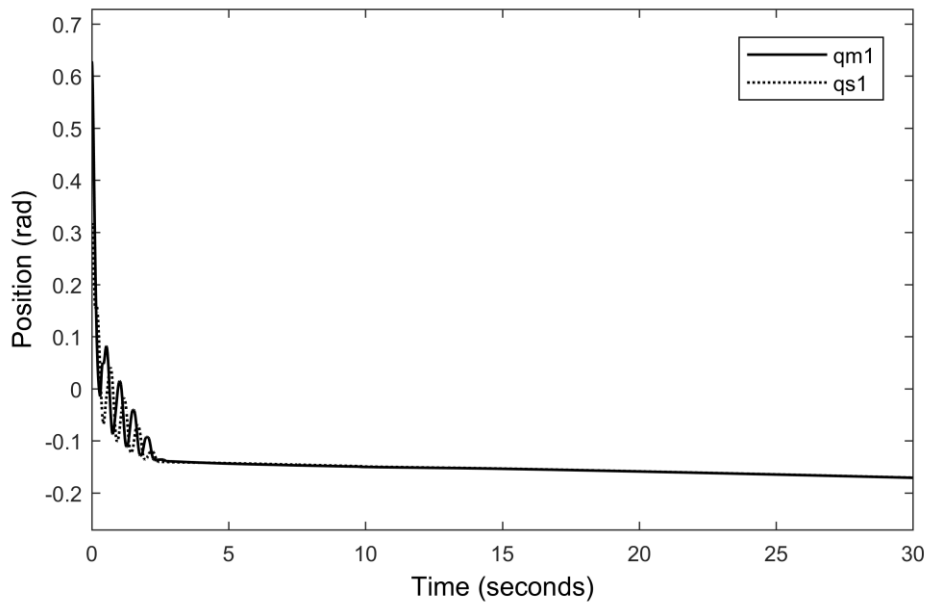
شکل ۲-۴: نیروی اعمال اپراتور انسانی

۱-۲-۴ نتایج روش کنترلی پیشنهادی در حضور تأخیر ثابت نامتقارن

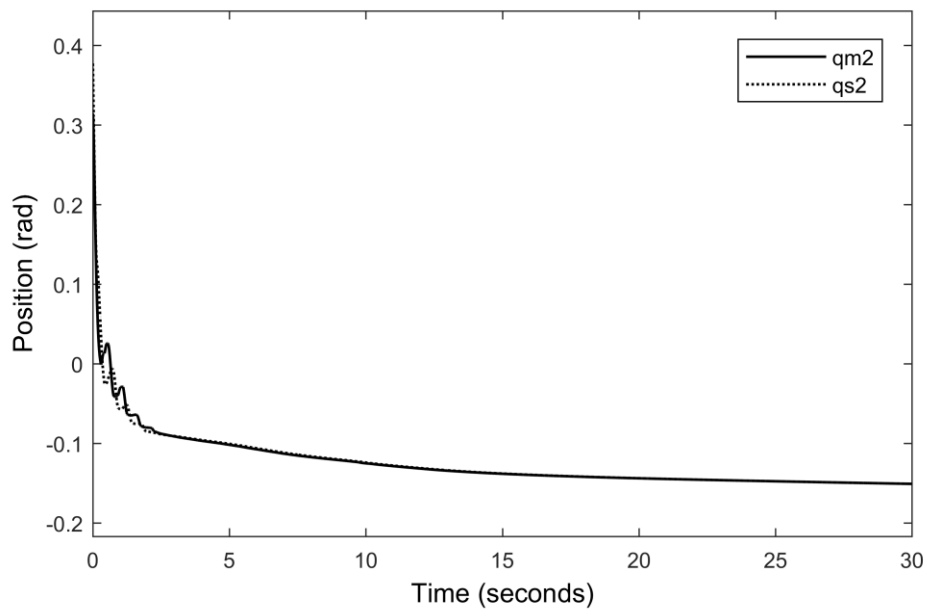
طبق معادلات سیستم و کنترل کننده به دست آمده در فصل قبل و جدول های (۱-۴) و (۲-۴) که بیانگر مقادیر پارامترهای سیستم و کنترل کننده هستند و با فرض تأخیر زمانی ثابت نامتقارن، اثر روش کنترلی به ترتیب در دو حالت رعایت شرط رابطه (۳-۲۱) و نقض شرط مطابق زیر گزارش می شود:

$$T_m = 0.1 \text{ s} , T_s = 0.3 \text{ s}$$

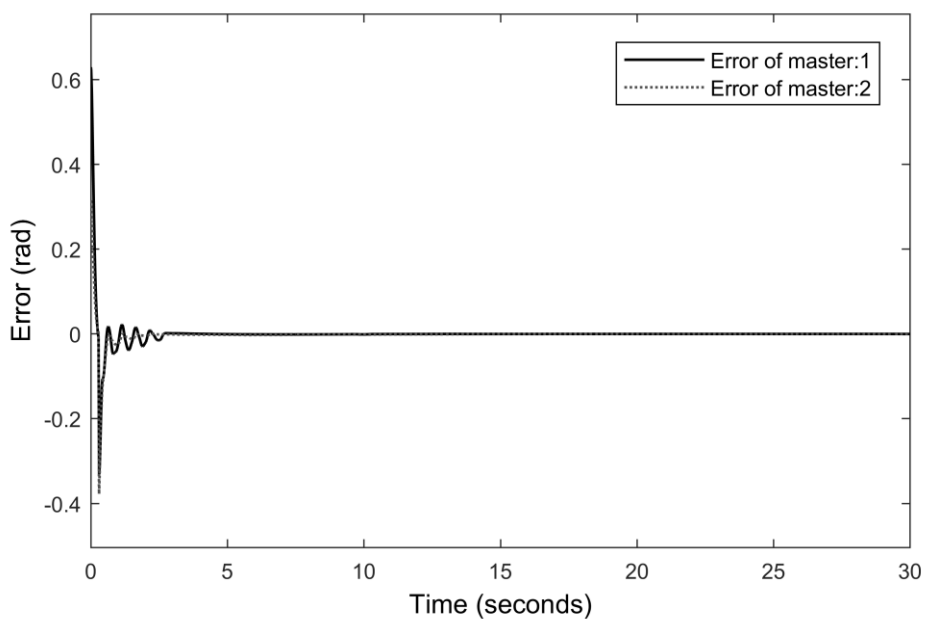
همان طور که قبلاً بیان شد، T_m بیانگر تأخیر زمانی کانال ارتباطی از سمت ربات فرمانده به ربات فرمانبر و T_s بیانگر تأخیر زمانی کانال ارتباطی از سمت ربات فرمانبر به ربات فرمانده است. با اعمال چنین زمان تأخیری به سیستم، موقعیت بازوی مفصلی ربات ها، خطای ردیابی موقعیت و سیگنال های کنترلی اعمالی به ربات های فرمانده و فرمانبر به ترتیب مطابق شکل های زیر خواهند بود.



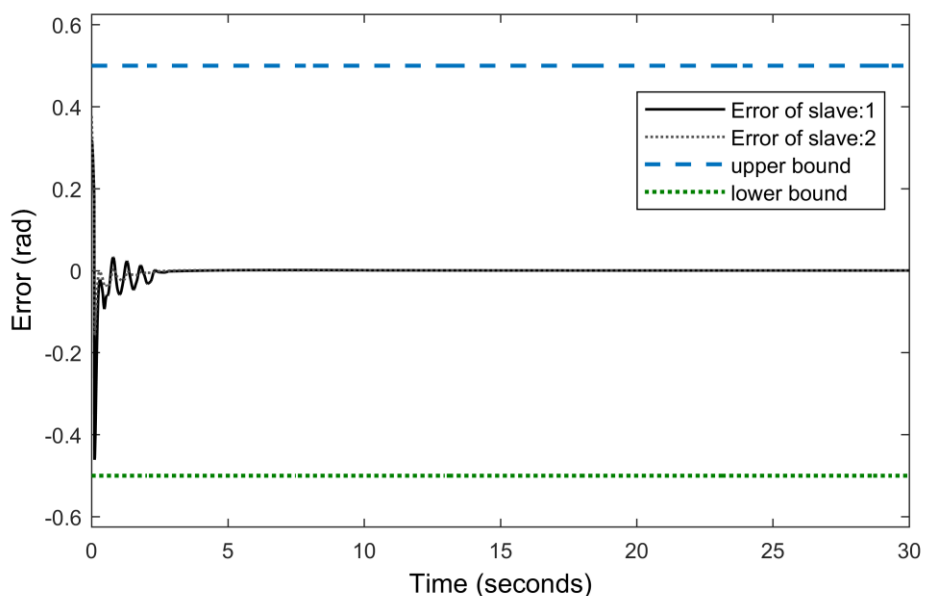
شکل ۳-۴: ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر



شکل ۴-۴: ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر



شکل ۴-۵: خطای موقعیت ربات فرمانده

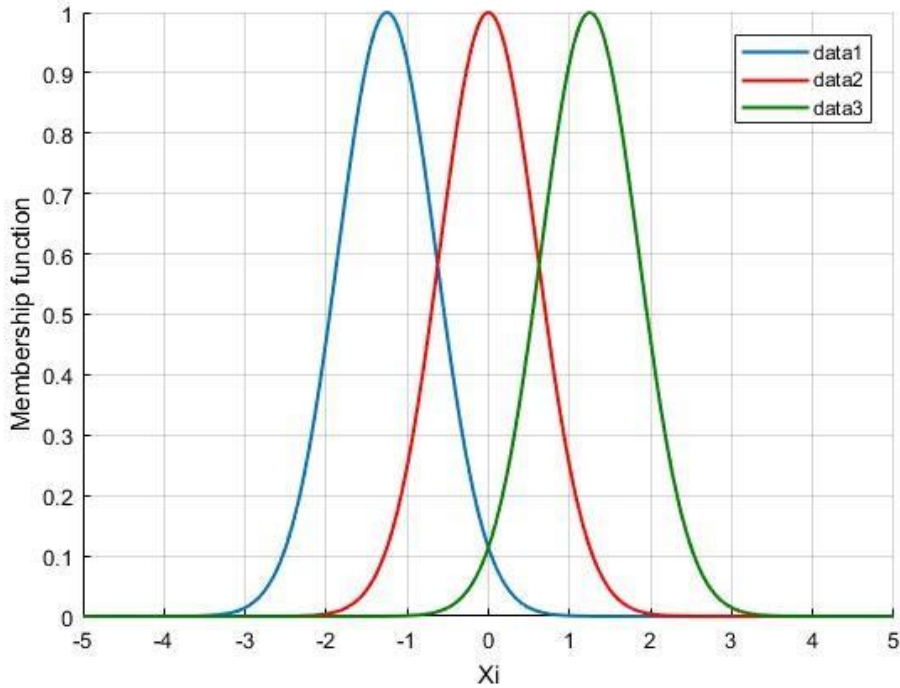


شکل ۴-۶: خطای موقعیت ربات فرمانبر

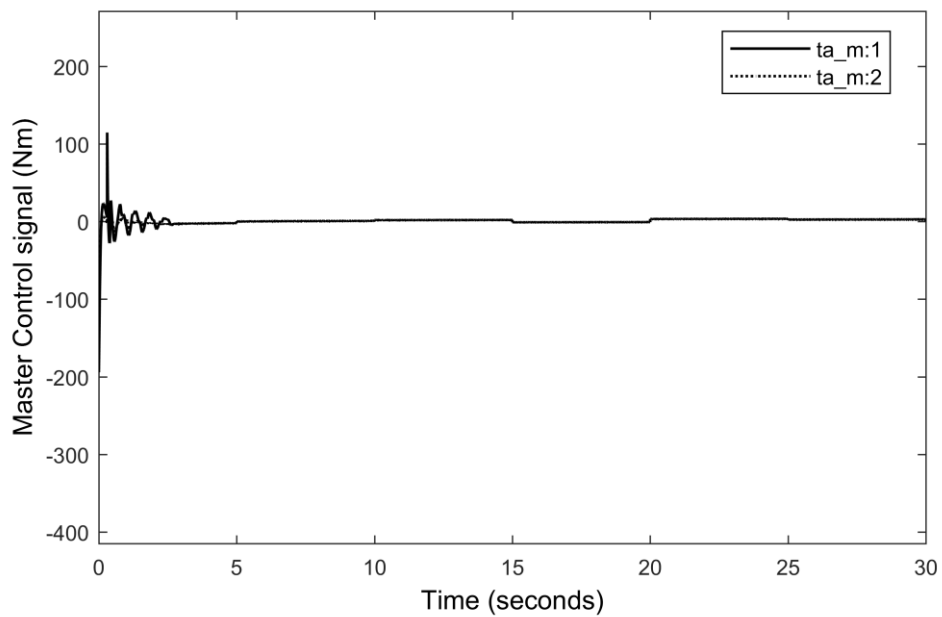
همان طور که از نتایج مشخص است با اعمال تأخیر به سیستم، پایداری سیستم محقق و خطای ردیابی موقعیت با گذشت زمان به سمت صفر همگرا شده است. به عبارتی دیگر، ردیابی موقعیت مفصلی بازوی ربات‌های فرمانده و فرمانبر محقق شده است و به خوبی برهم منطبق شده‌اند که شکل‌های (۴-۳) و (۴-۴) بیانگر این نتیجه هستند.

حال اگر برای هر ورودی سیستم منطق فازی سه گروه تابع عضویت گوسین مطابق رابطه (۳-۱۴) با

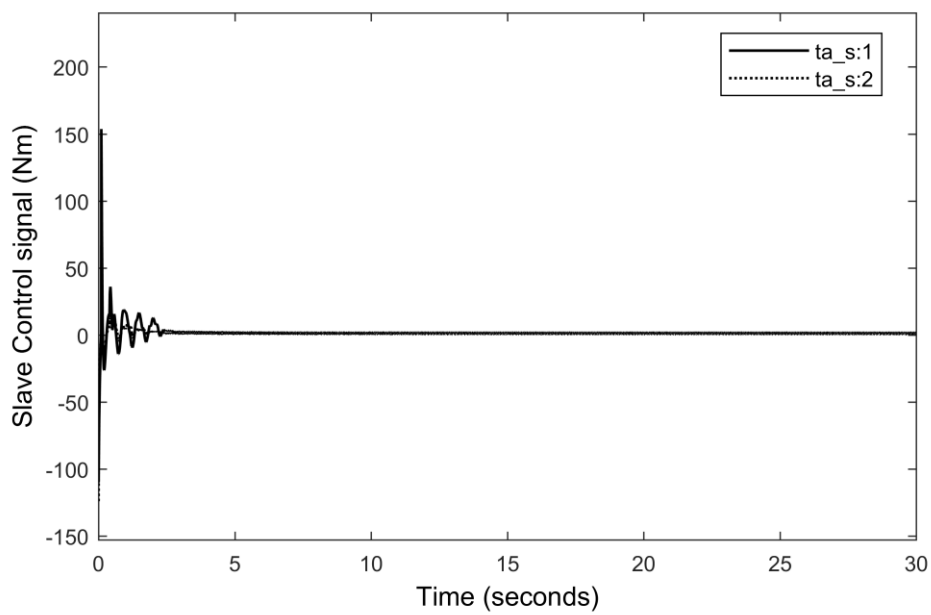
فرض $\sigma_i^l = 0.6$ و $\bar{x}_i^l = [-1.25, 0, 1.25]$ تعریف کنیم، داریم:



شکل ۴-۷: توابع عضویت سیستم منطق فازی

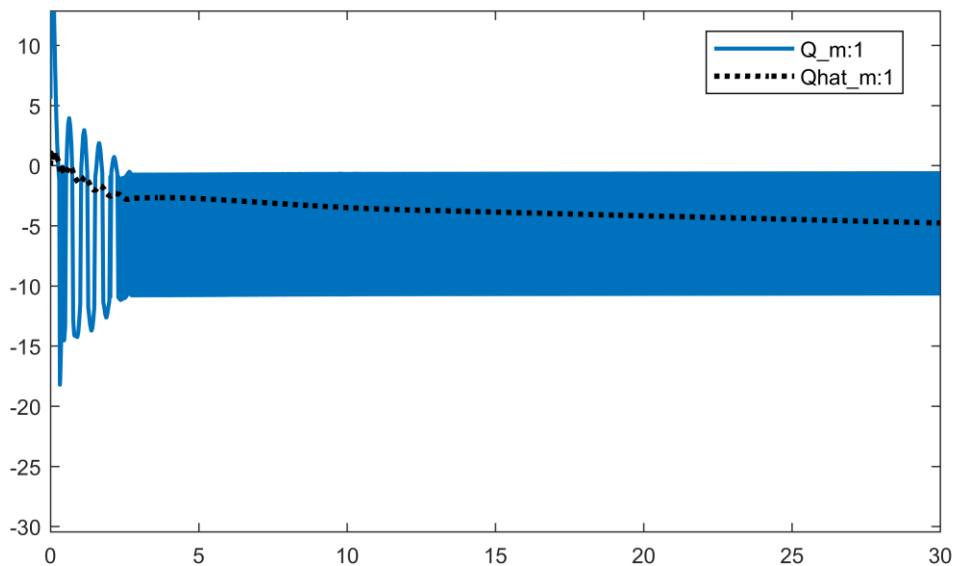


شکل ۴-۸: سیگنال کنترلی ربات فرمانده

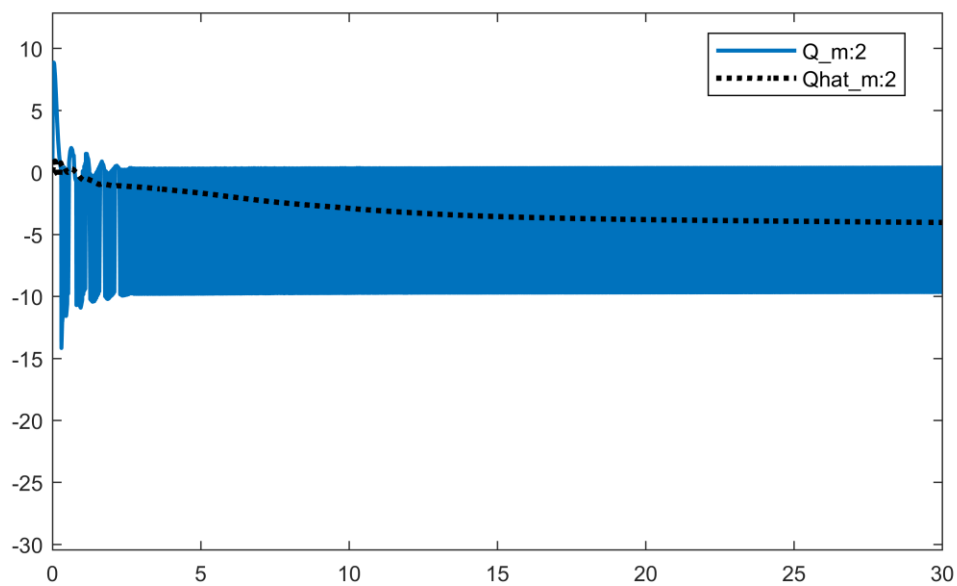


شکل ۹-۴: سیگنال کنترلی ربات فرمانبر

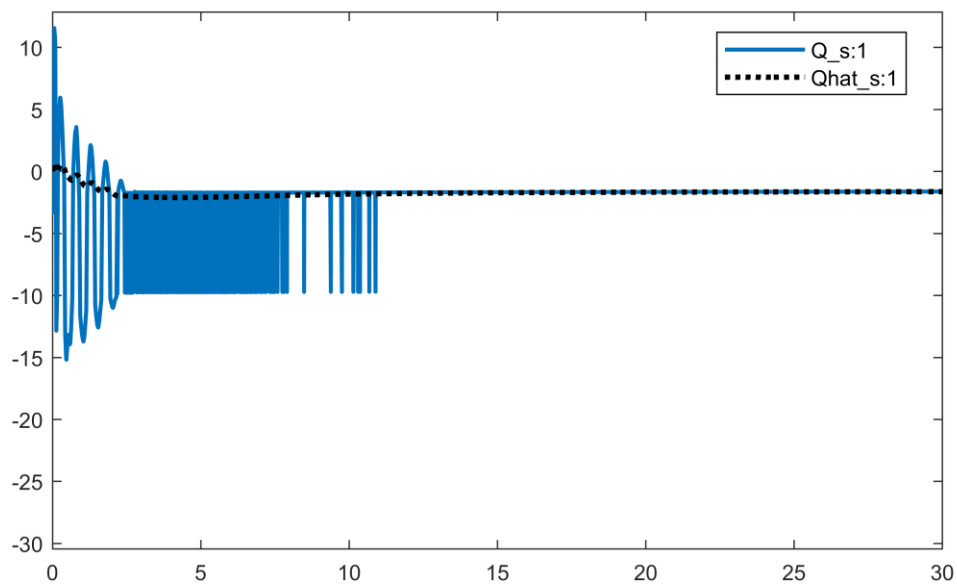
شکل‌های (۸-۴) و (۹-۴) سیگنال ورودی کنترلی ربات‌های فرمانده و فرمانبر را نشان می‌دهند. که بعد از گذشت زمان و چندین اعوجاج ثابت شده‌اند.



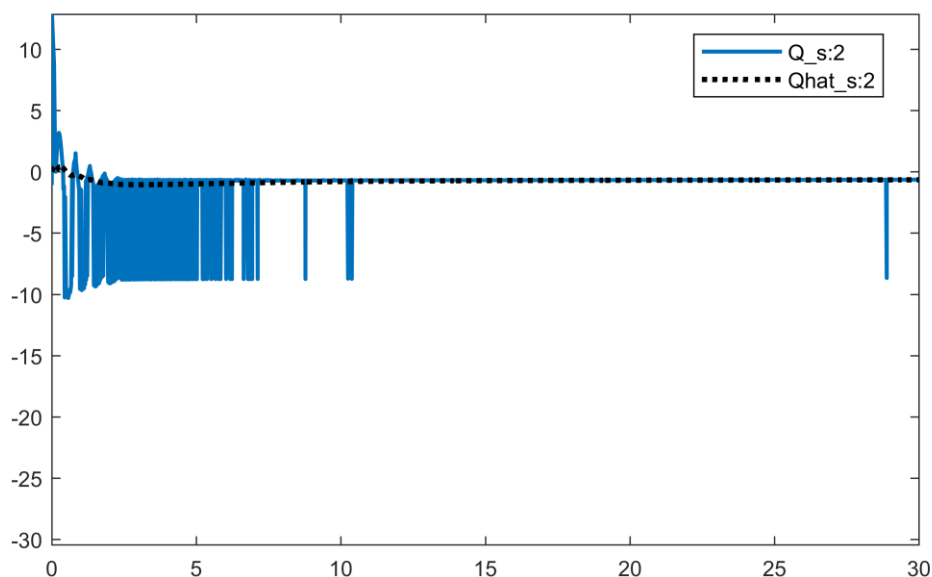
شکل ۱۰-۴: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانده



شکل ۴-۱۱: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانده



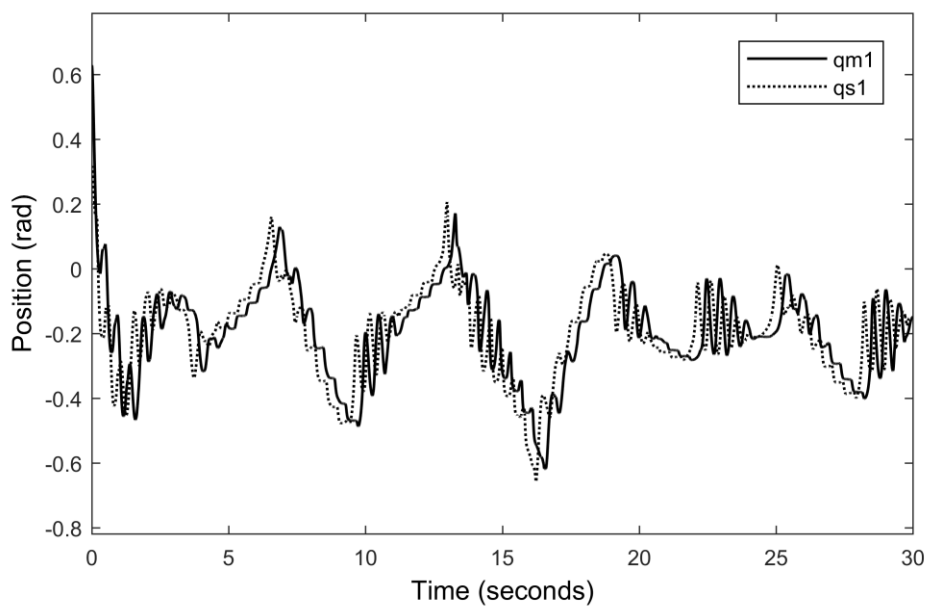
شکل ۴-۱۲: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانبر



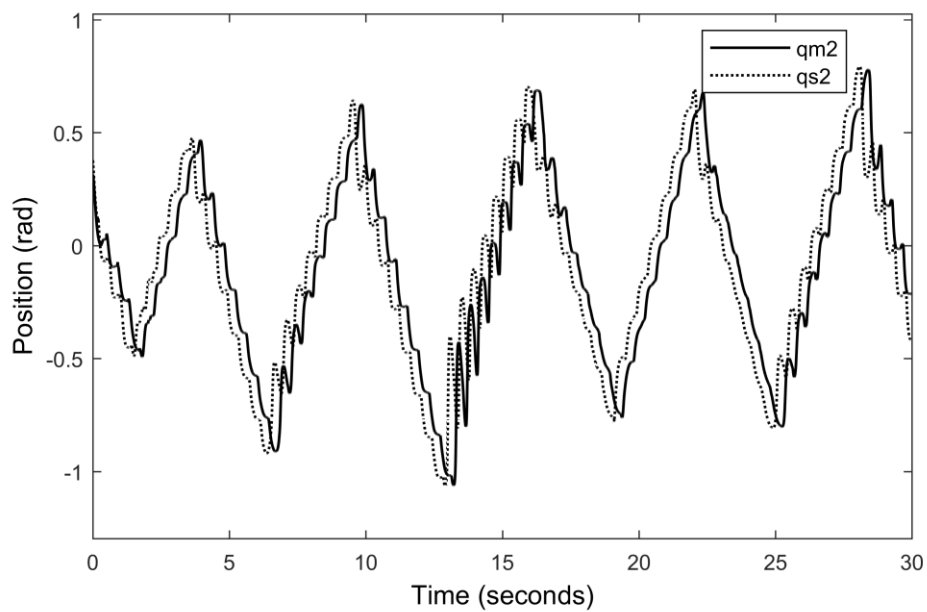
شکل ۴-۱۳: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانبر

همان طور که می‌دانیم سیستم منطق فازی را می‌توان به عنوان تقریب‌گر عمومی در نظر گرفت که در نهایت باید مقدار واقعی و مقدار تخمین یکسان باشند و رفتاری مشابه را نشان دهند. که از شکل‌های (۴-۱۰) - (۴-۱۳) می‌توان همین را نتیجه گرفت.

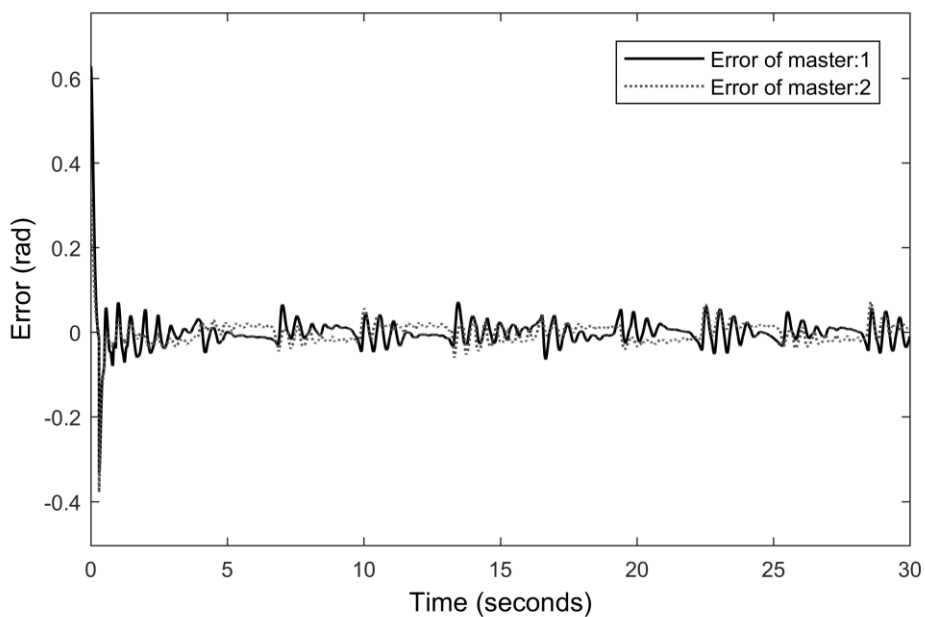
طبق نتایج به دست آمده در این بخش، با اعمال کنترل کننده طراحی شده به سیستم حرکت از راه دور دوطرفه در حضور تأخیر زمانی نامتقارن مد نظر، پایداری و شفافیت عملکرد که اهداف کنترلی مطلوب از سیستم بودند محقق شده‌اند و خطاهای ردیابی مربوط به هر دو بازوی ربات به صفر همگرا شده‌اند. نتایج بالا در حالتی که شرط رابطه (۳-۲۱) برقرار باشد به دست آمده است. حال اگر این شرط رعایت نشود و مقدار خطا از آستانه تعریف شده توسط پارامتر a بیشتر باشد، نتایج به فرض $a = 0.2$ به این صورت گزارش می‌شوند:



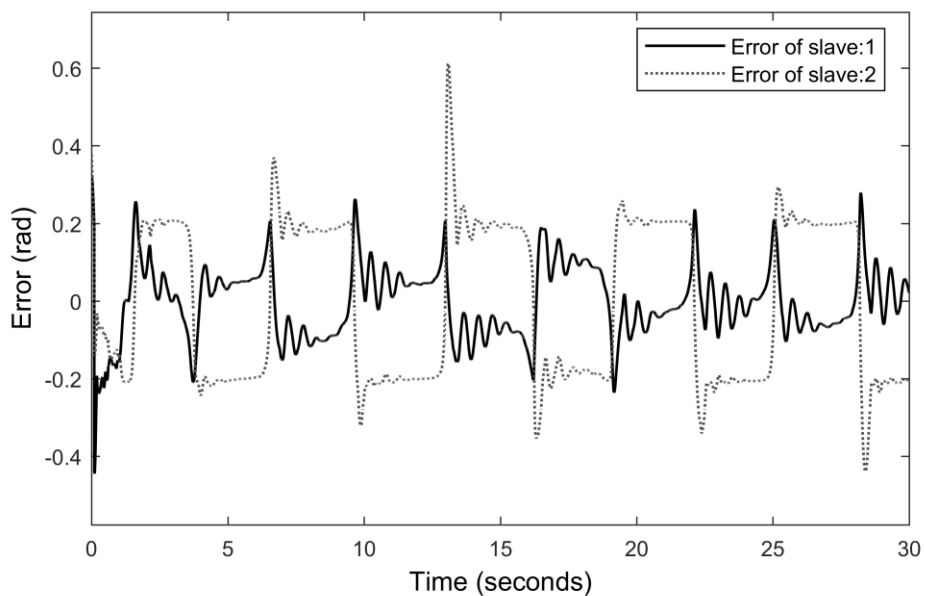
شکل ۴-۱۴: ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر در حالت دوم



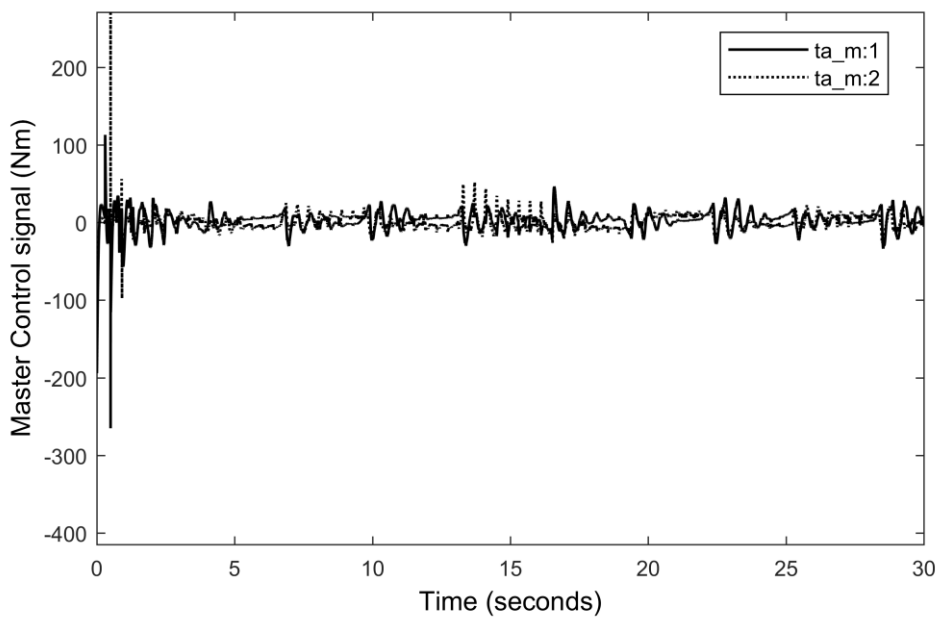
شکل ۴-۱۵: ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر در حالت دوم



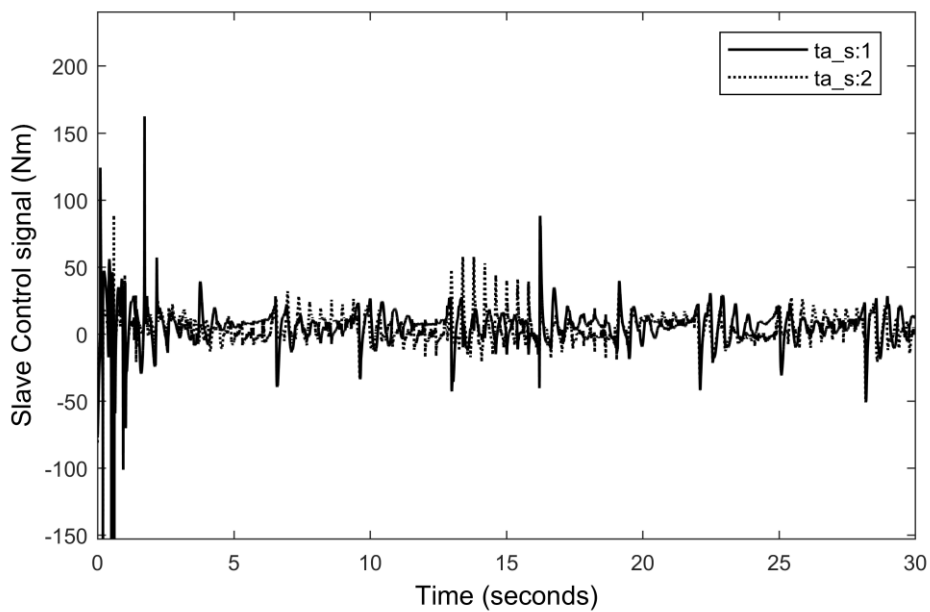
شکل ۴-۱۶: خطای موقعیت ربات فرمانده در حالت دوم



شکل ۴-۱۷: خطای موقعیت ربات فرمانبر در حالت دوم



شکل ۴-۱۸ : سیگنال کنترلی ربات فرمانده در حالت دوم

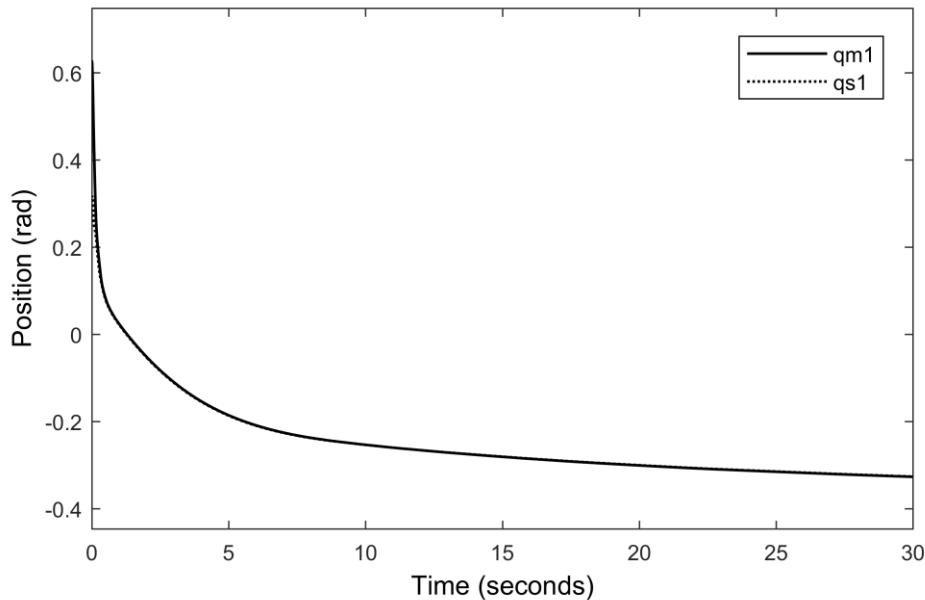


شکل ۴-۱۹ : سیگنال کنترلی ربات فرمانبر در حالت دوم

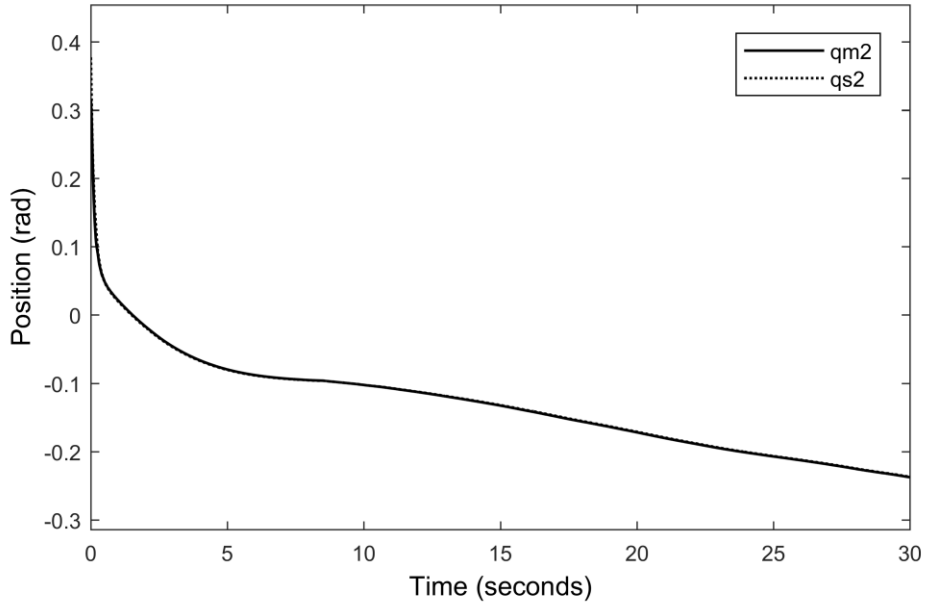
۲-۲-۴ نتایج روش کنترلی پیشنهادی در حضور تأخیر ثابت متقارن

طبق معادلات سیستم و کنترل کننده به دست آمده در فصل قبل و جدول‌های (۱-۴) و (۲-۴) که بیانگر مقادیر پارامترهای سیستم و کنترل کننده هستند و با فرض تأخیر زمانی ثابت متقارن و با اعمال نیروی کاربر انسانی مطابق شکل (۲-۴)، اثر روش کنترلی در چند حالت تأخیر زمانی مختلف در کانال ارتباطی رفت و برگشت بر روی سیستم و به ترتیب ابتدا در حالت رعایت شرط رابطه (۳-۲۱) و سپس در حالت نقض شرط بررسی می‌شود:

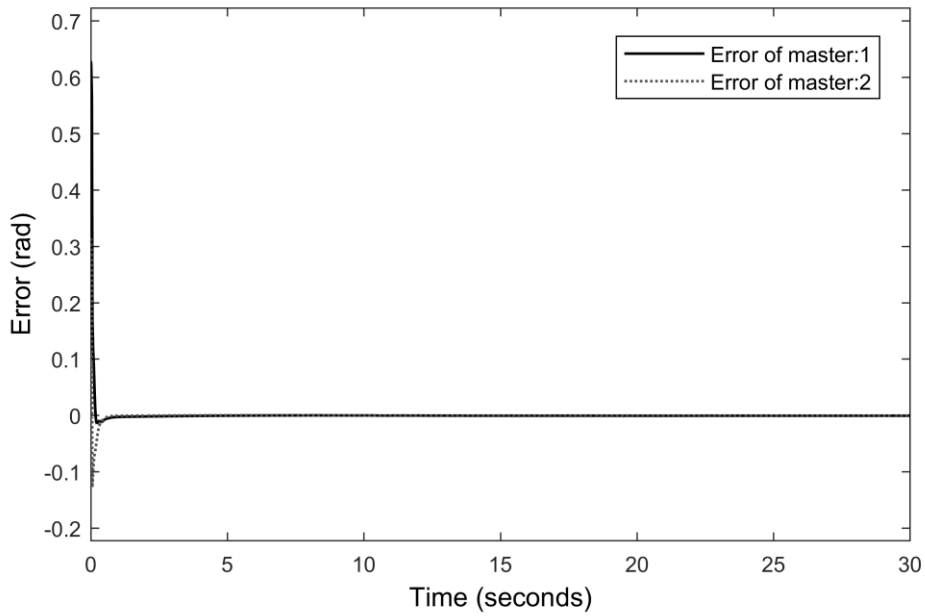
۲-۲-۴-۱ حالت (الف) تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه



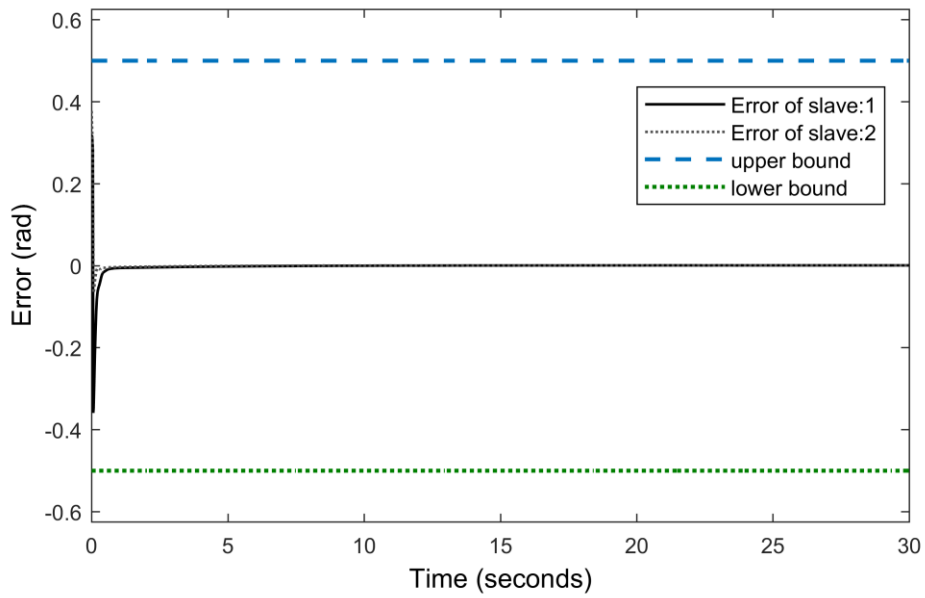
شکل ۲-۴: ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه



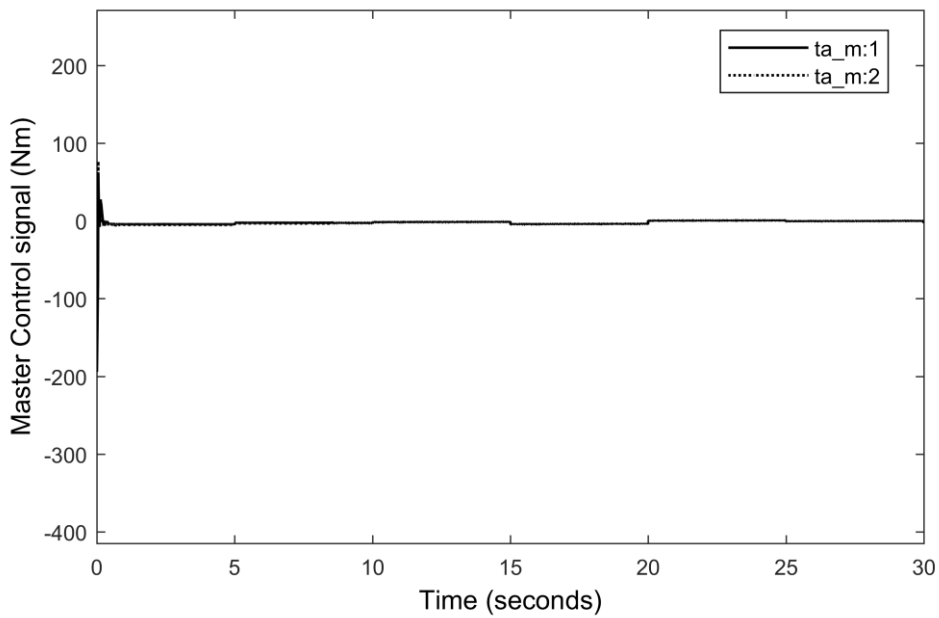
شکل ۴-۲۱: ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه



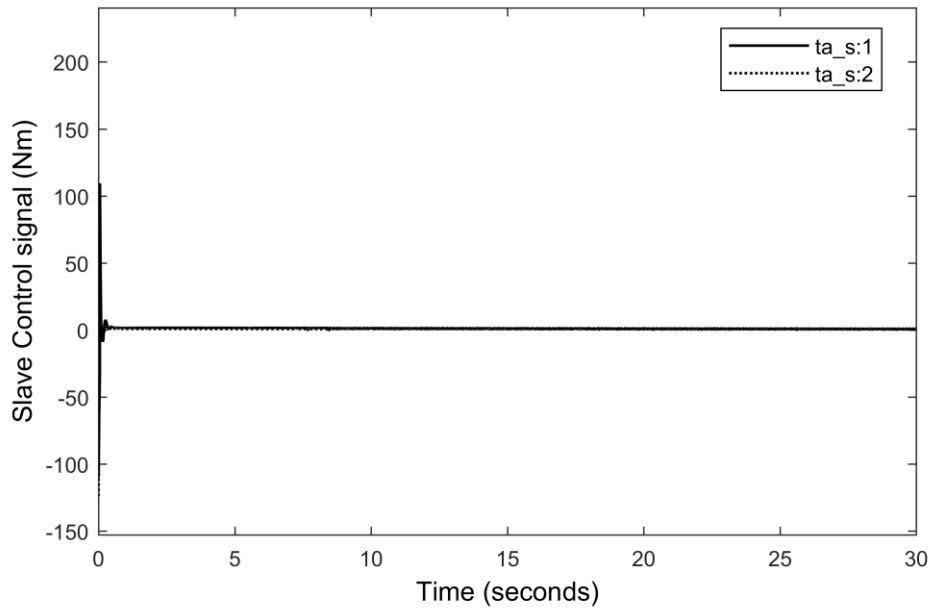
شکل ۴-۲۲: خطای موقعیت ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه



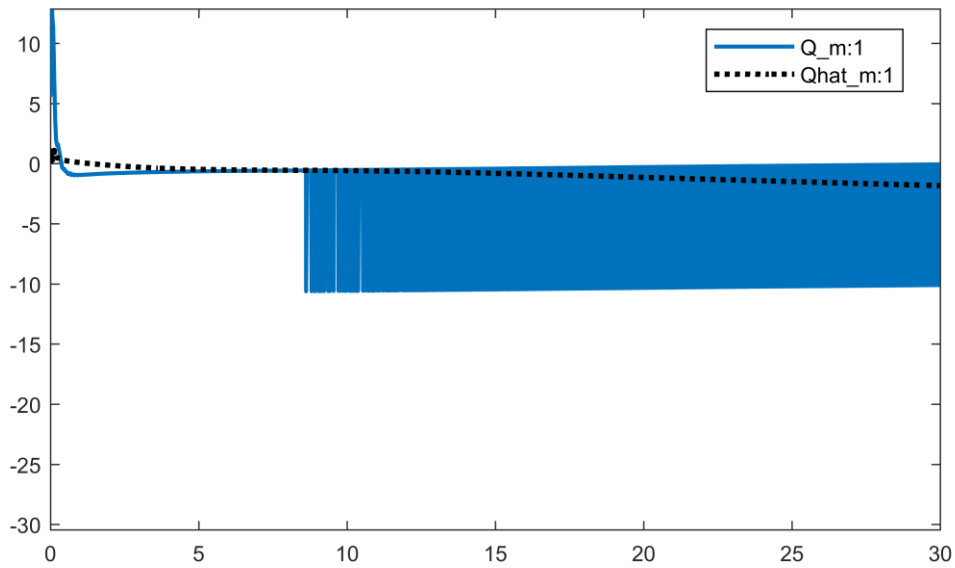
شکل ۴-۲۳: خطای موقعیت ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه



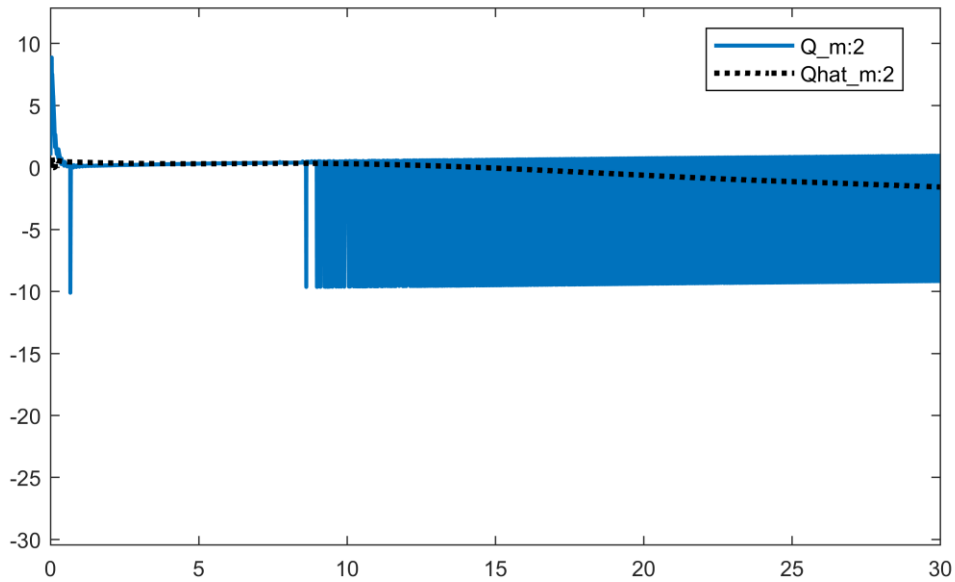
شکل ۴-۲۴: سیگنال کنترلی ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه



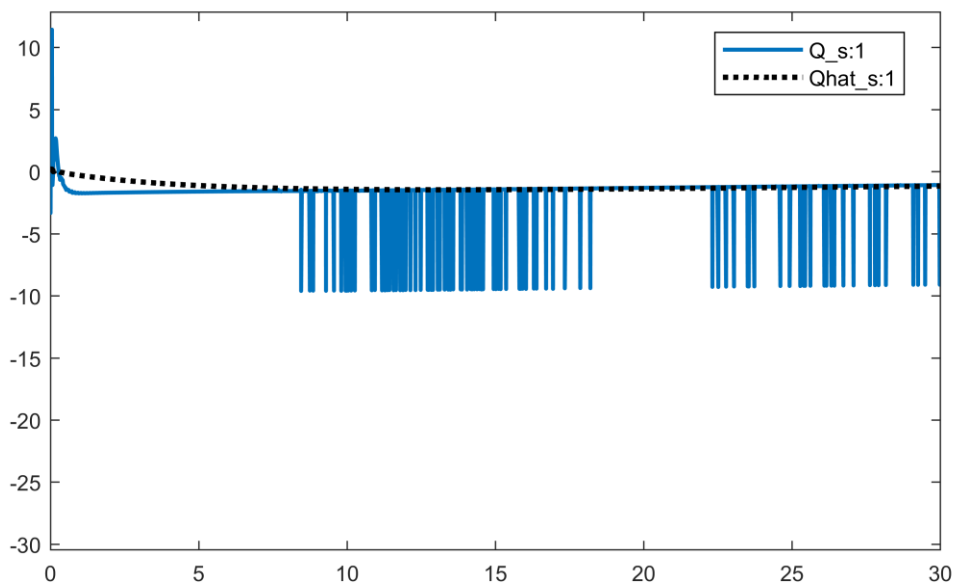
شکل ۴-۲۵: سیگنال کنترلی ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه



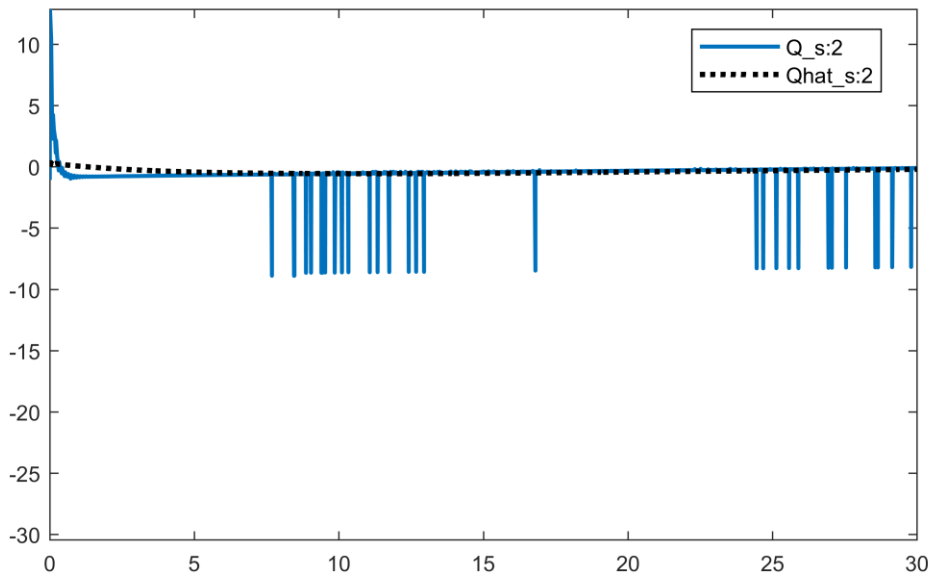
شکل ۴-۲۶: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه



شکل ۴-۲۷: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه

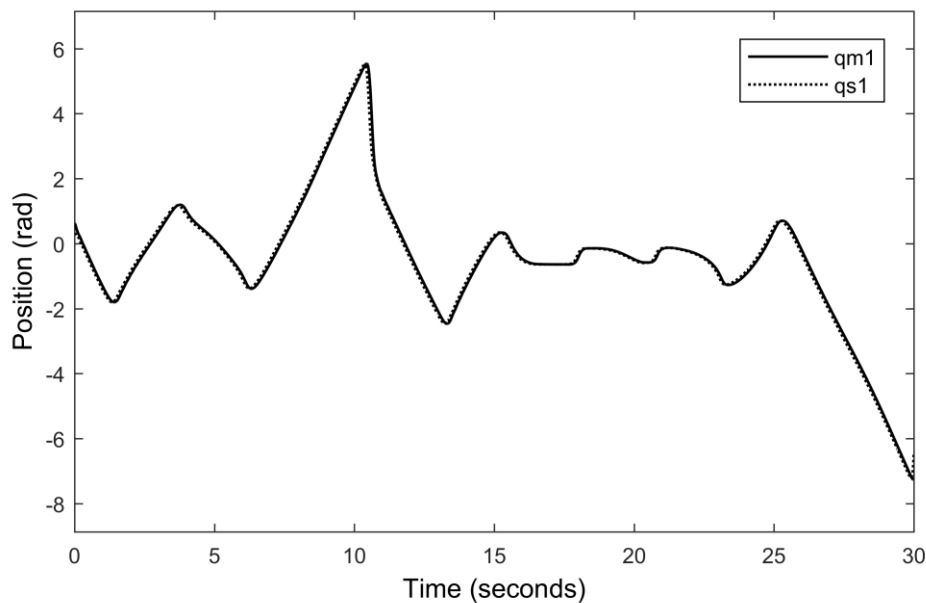


شکل ۴-۲۸: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه

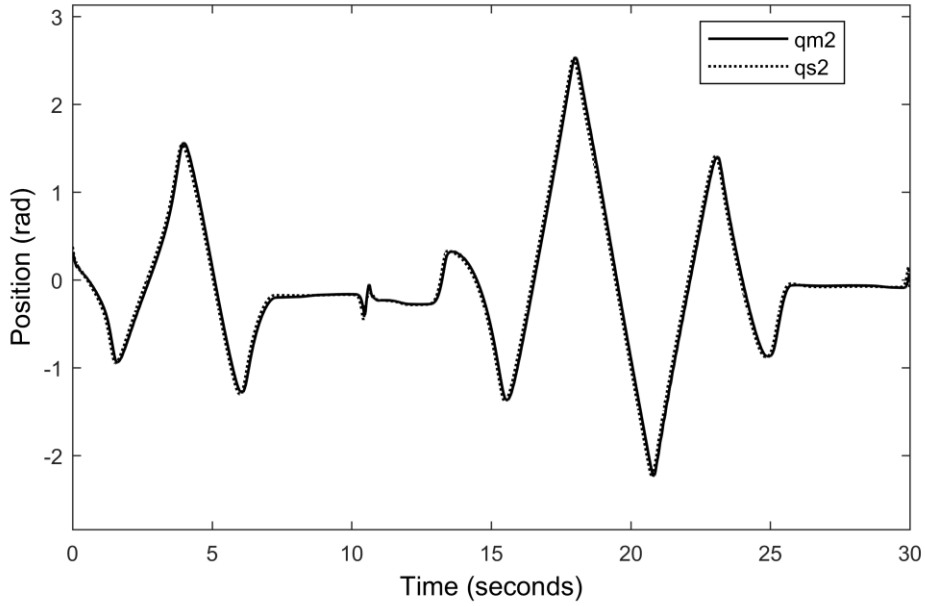


شکل ۴-۲۹: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه

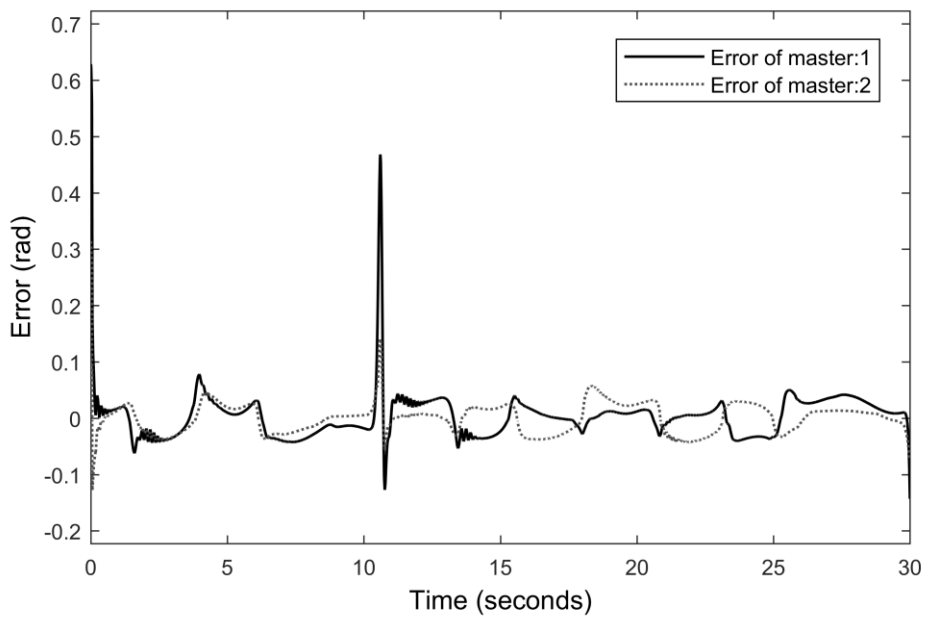
حال اگر مقدار خطا از آستانه تعریف شده توسط پارامتر a بیشتر باشد، نتایج به فرض $a = 0.2$ به این صورت گزارش می‌شوند:



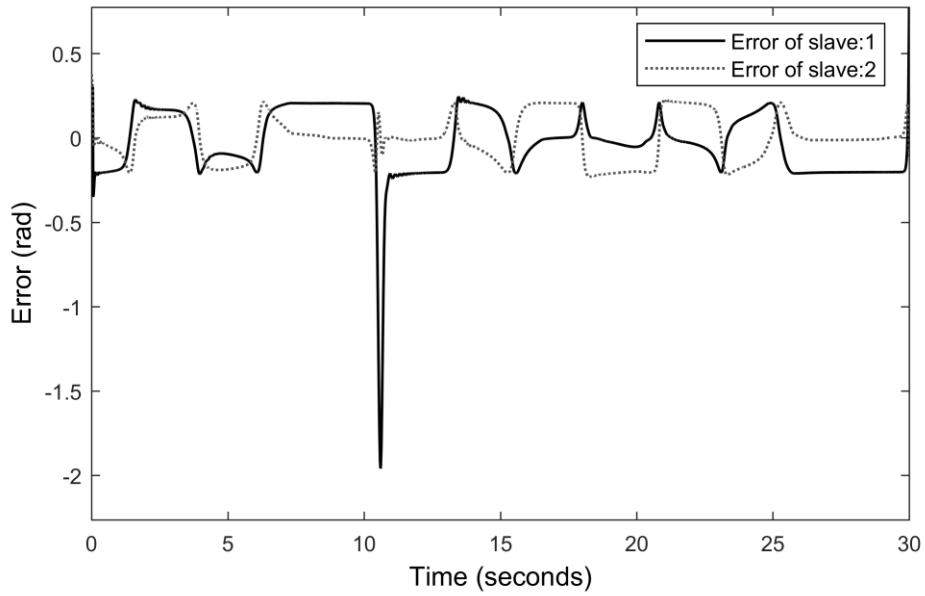
شکل ۴-۳۰: ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم



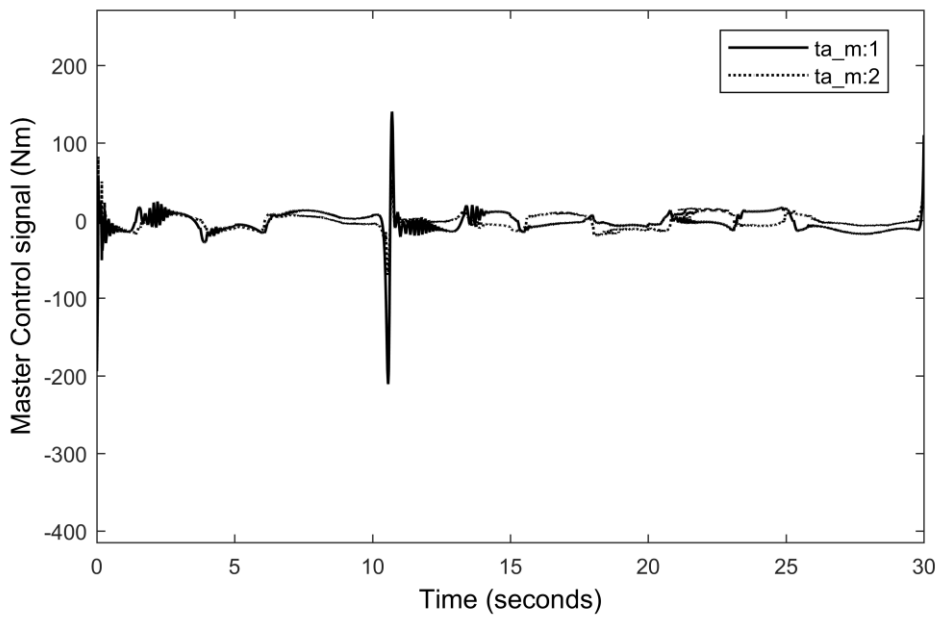
شکل ۴-۳۱: ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم



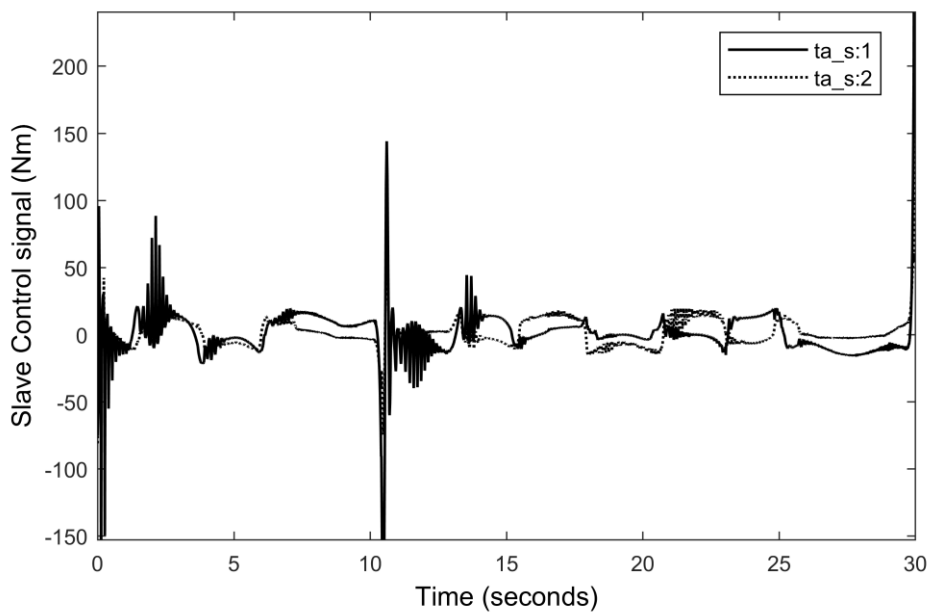
شکل ۴-۳۲: خطای موقعیت ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم



شکل ۴-۳۳: خطای موقعیت ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم

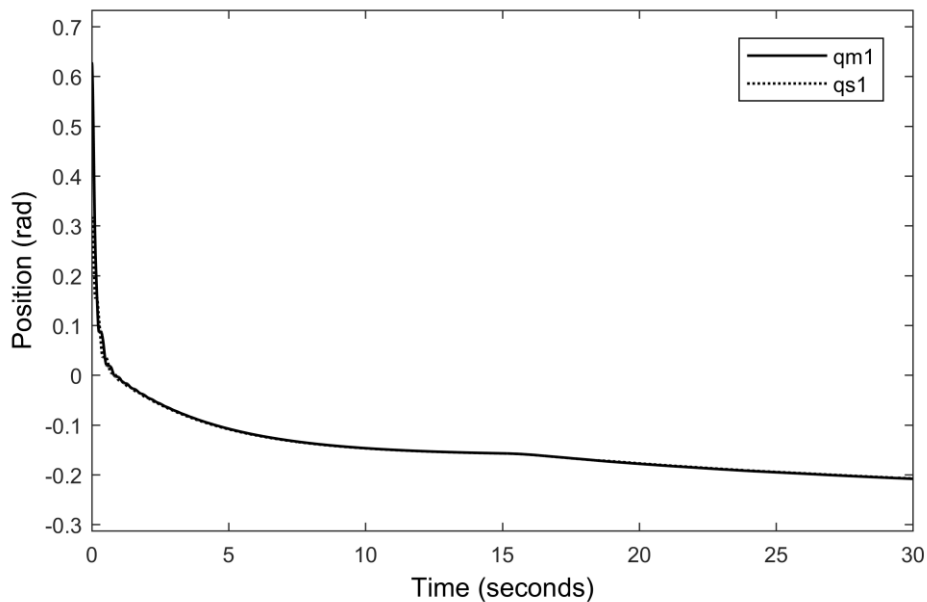


شکل ۴-۳۴: سیگنال کنترلی ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم

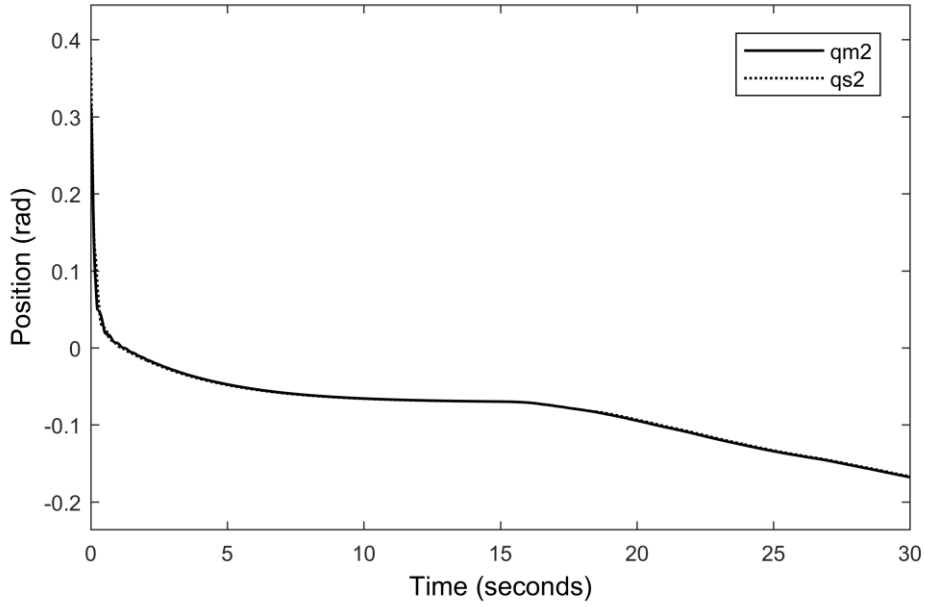


شکل ۴-۳۵: سیگنال کنترلی ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۰۵ ثانیه در حالت دوم

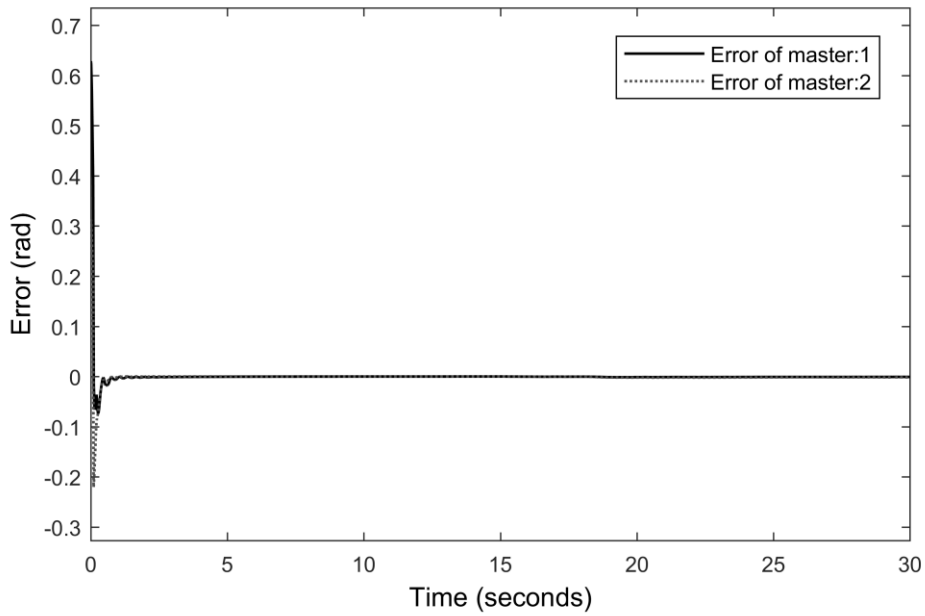
۴-۲-۲-۲-۲ حالت (ب) تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



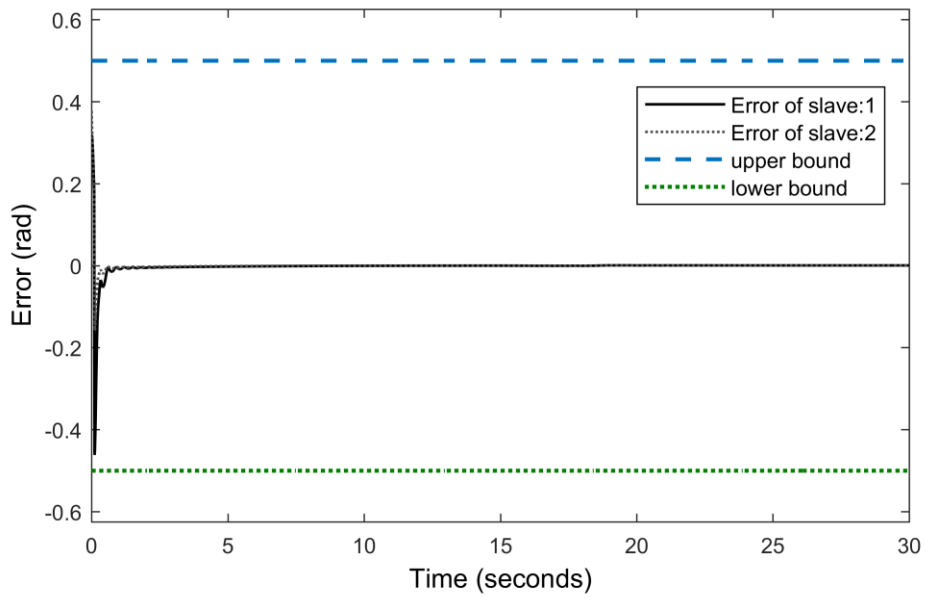
شکل ۴-۳۶: ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



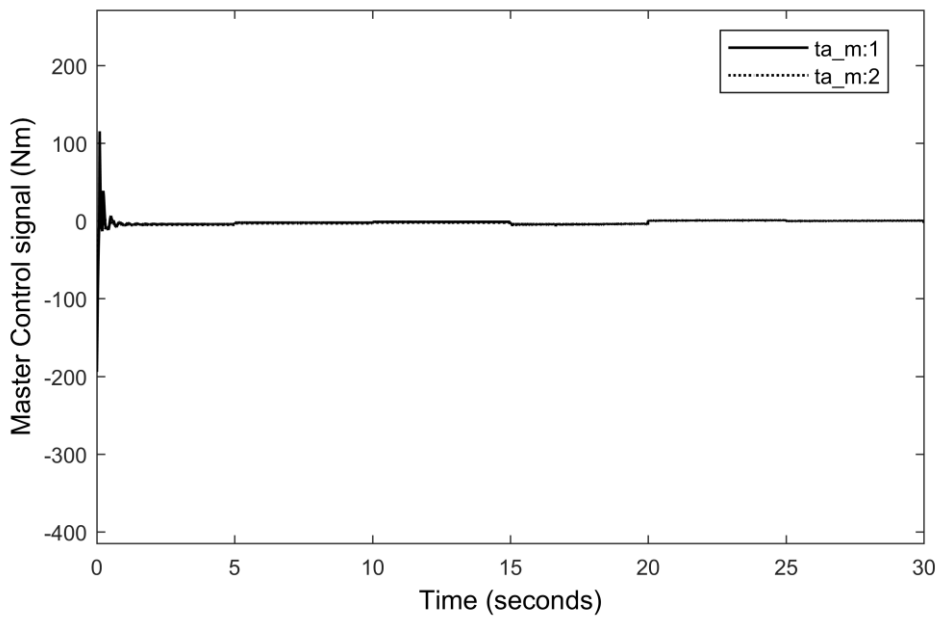
شکل ۴-۳۷: ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



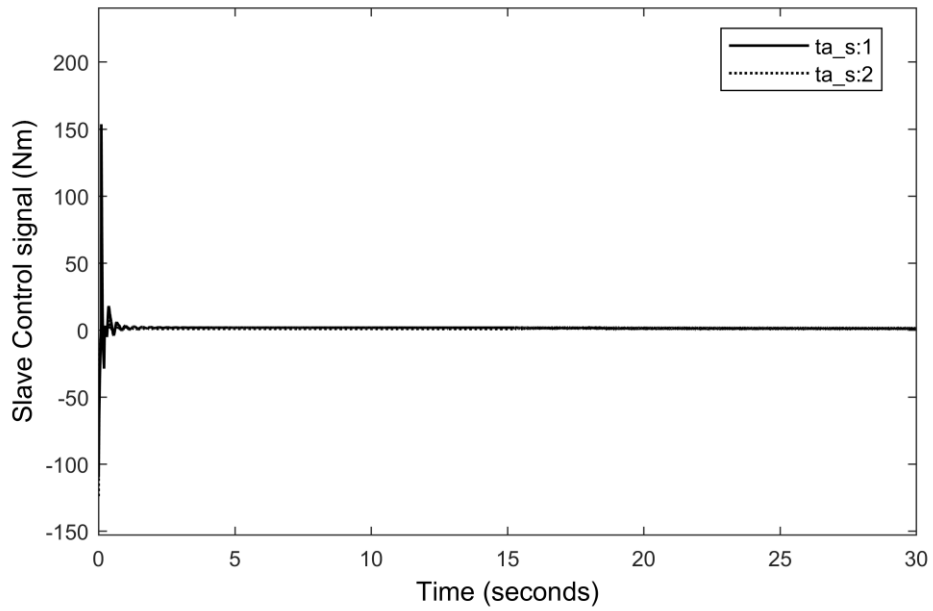
شکل ۴-۳۸: خطای موقعیت ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



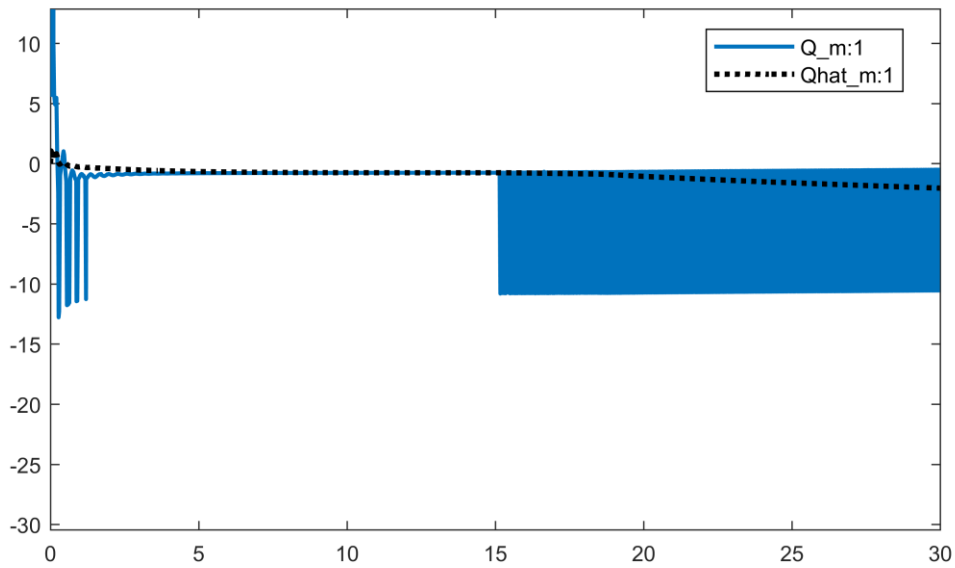
شکل ۴-۳۹: خطای موقعیت ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



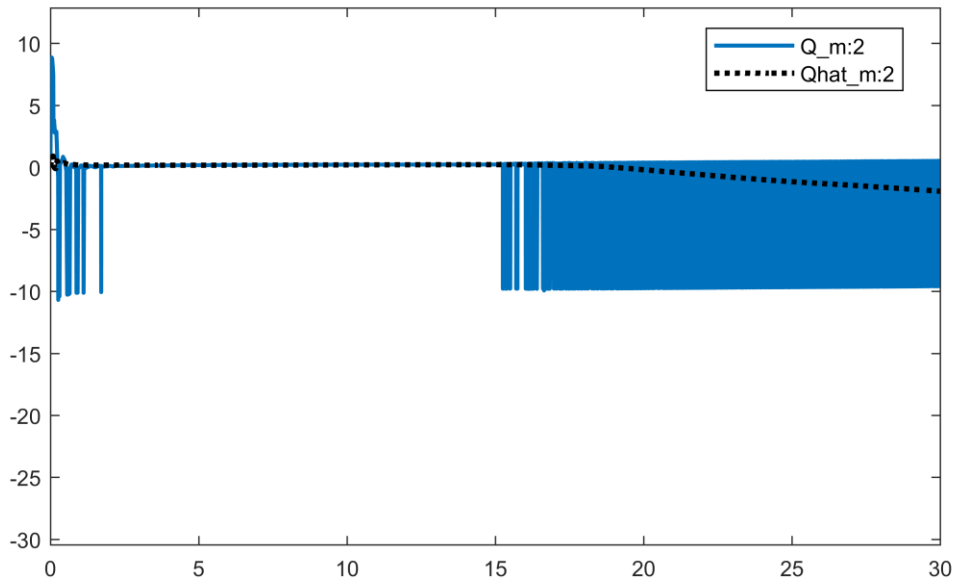
شکل ۴-۴۰: سیگنال کنترلی ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



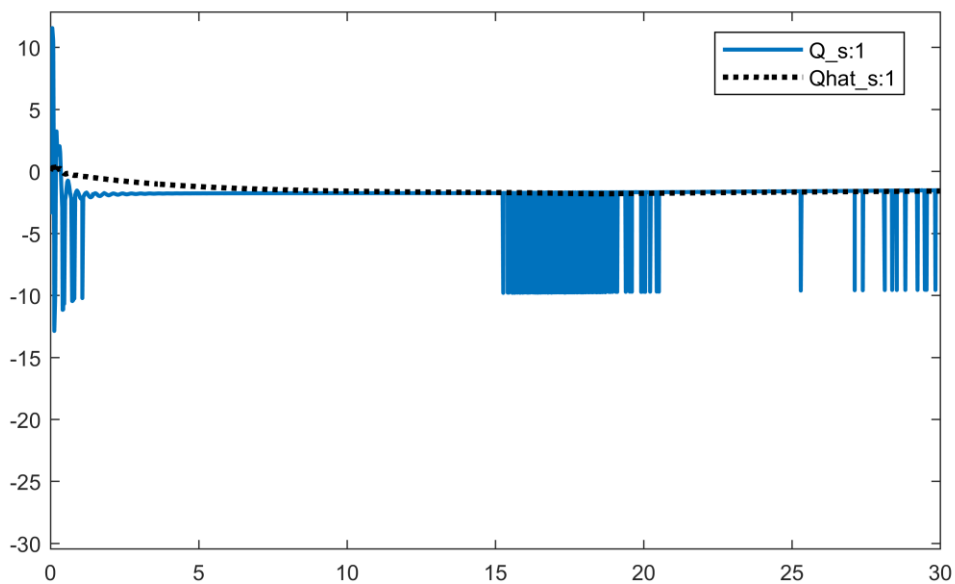
شکل ۴-۴۱: سیگنال کنترلی ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



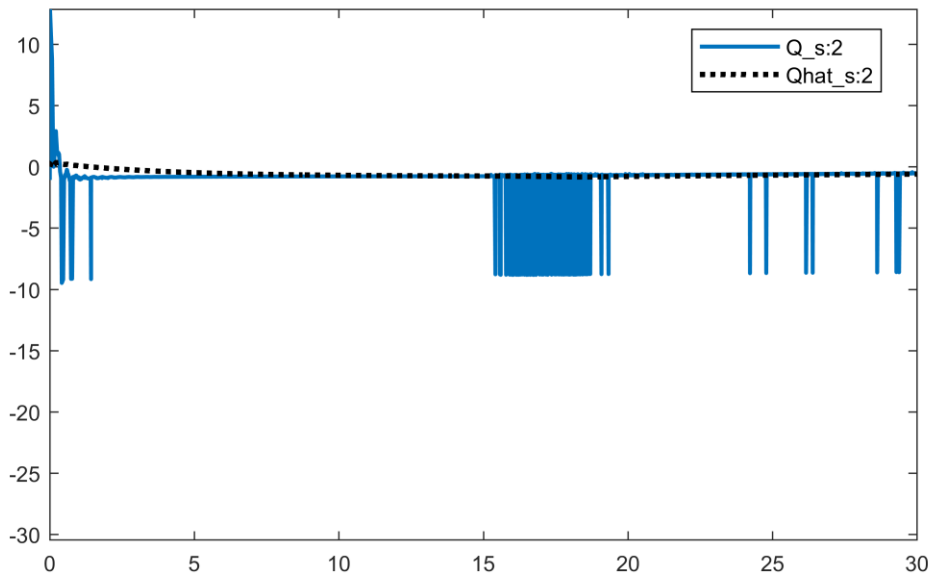
شکل ۴-۴۲: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه



شکل ۴۳-۴ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

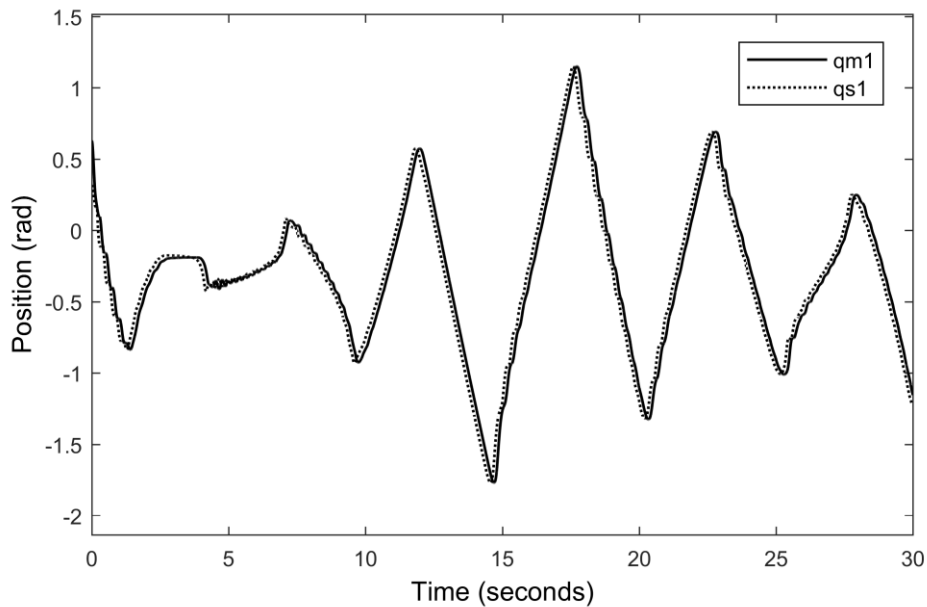


شکل ۴۴-۴ : مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک اول ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

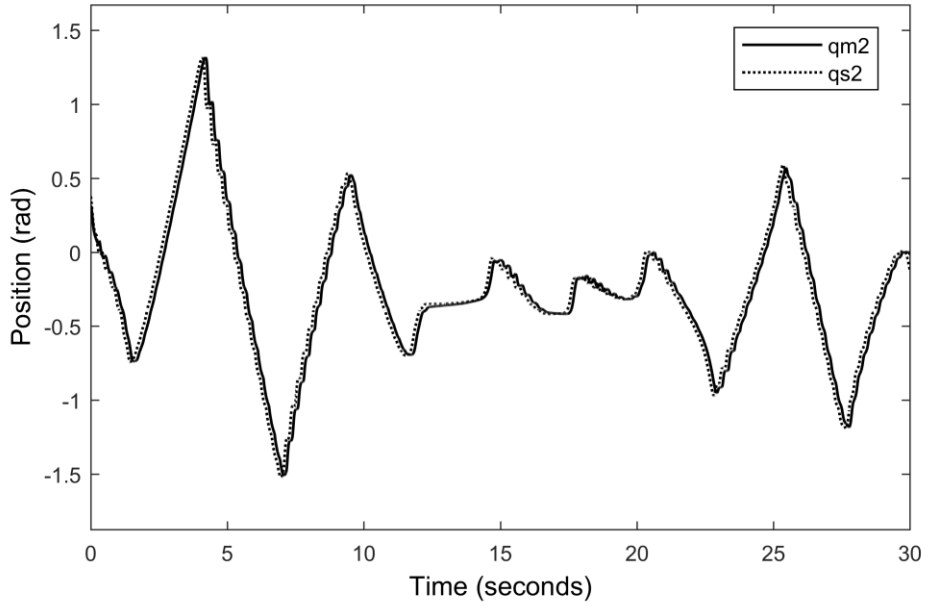


شکل ۴-۴۵: مقایسه تخمین فازی با مقدار واقعی لینک دوم ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه

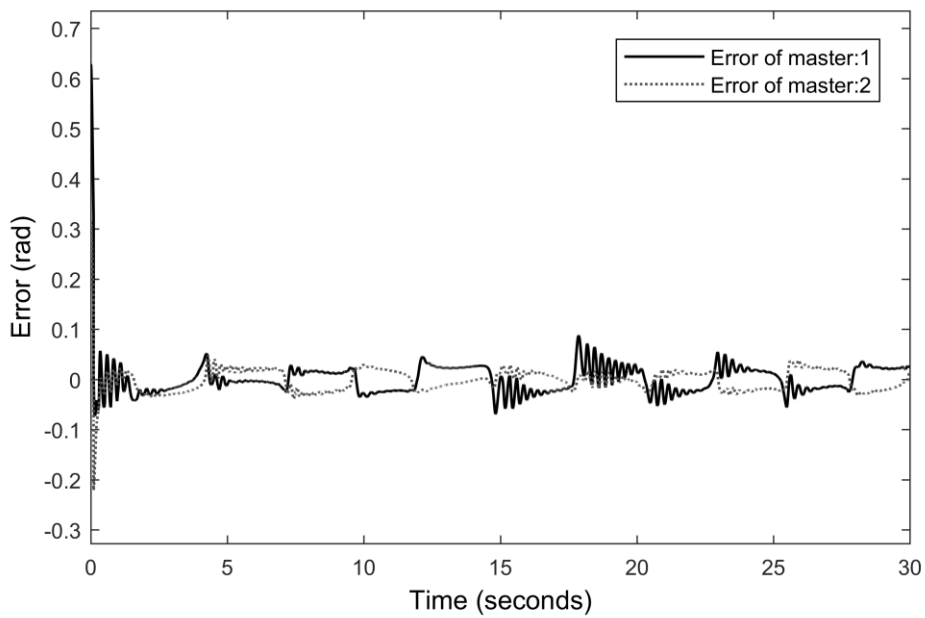
اگر مقدار خطا از آستانه تعریف شده توسط پارامتر a بیشتر باشد، نتایج به فرض $a = 0.2$ و تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه به این صورت گزارش می‌شوند:



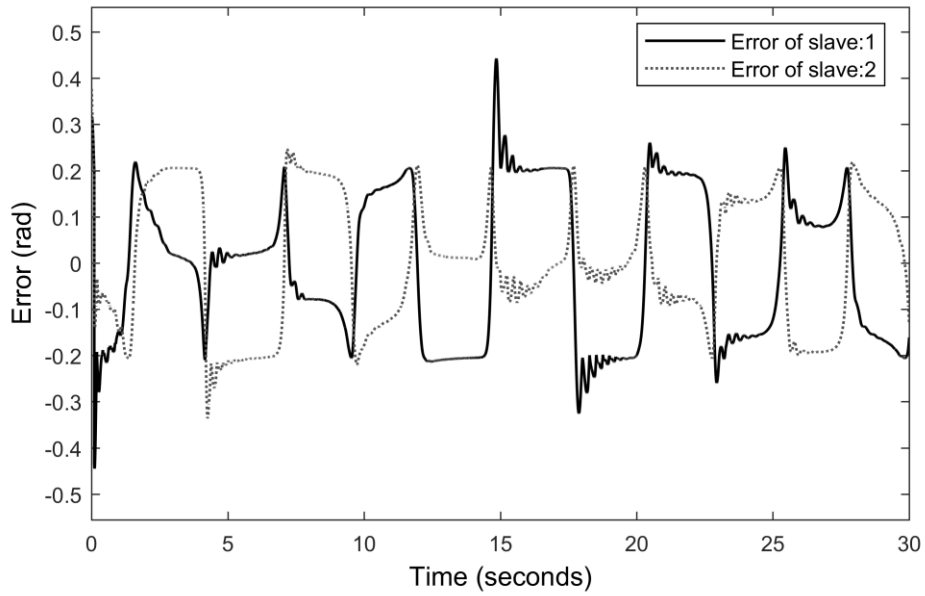
شکل ۴-۴۶: ردیابی موقعیت لینک اول ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم



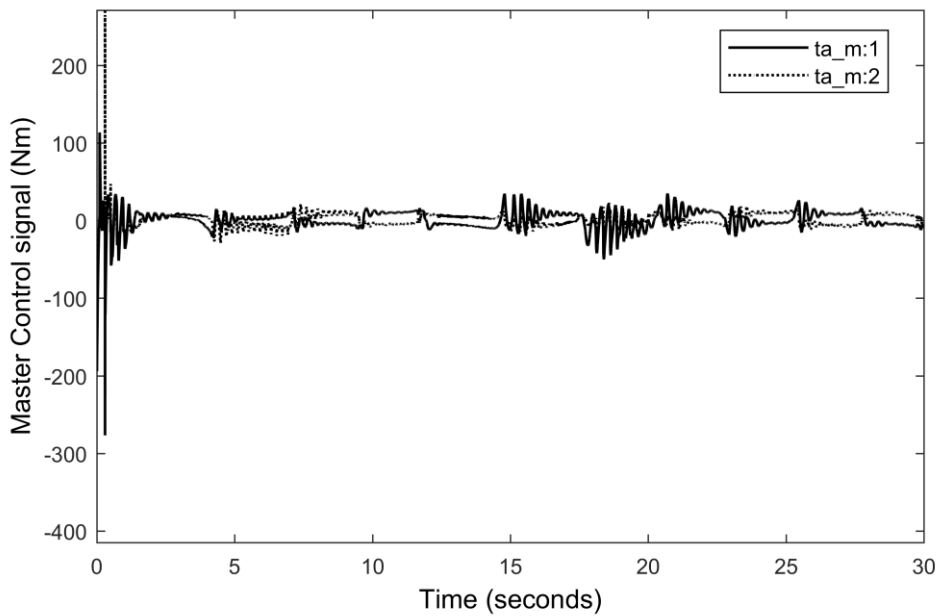
شکل ۴-۴۷: ردیابی موقعیت لینک دوم ربات‌های فرمانده و فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم



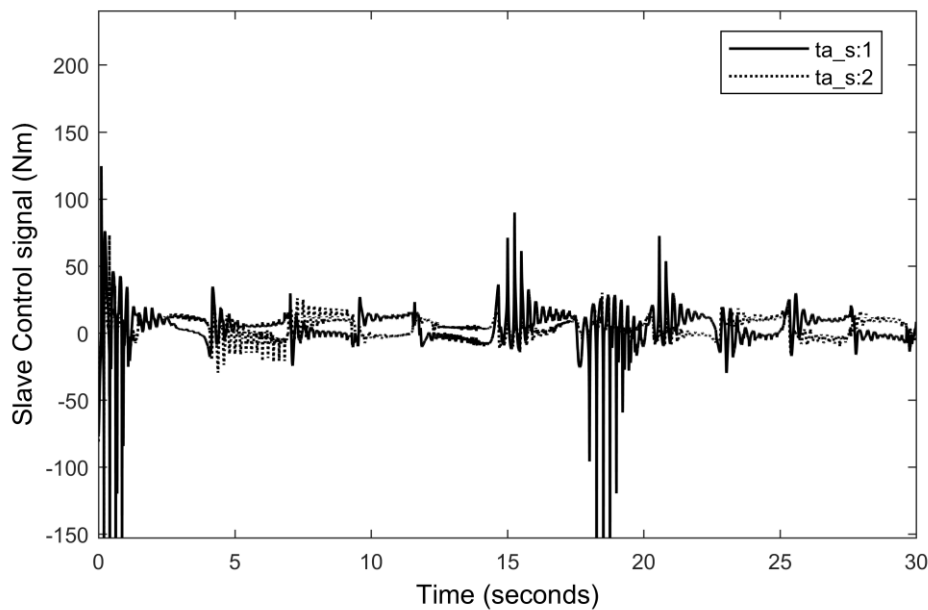
شکل ۴-۴۸: خطای موقعیت ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم



شکل ۴-۴۹: خطای موقعیت ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم



شکل ۴-۵۰: سیگنال کنترلی ربات فرمانده برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه در حالت دوم



شکل ۴-۵۱: سیگنال کنترلی ربات فرمانبر برای تأخیر زمانی ۰.۱ ثانیه ثانیه در حالت دوم

۳-۴ نتیجه گیری

پس از اعمال کنترل کننده پیشنهادی و در نظر گرفتن مهم‌ترین چالش سیستم‌های حرکتی از راه دور یعنی تأخیر زمانی مشاهده کردیم که، ردیابی موقعیت دو ربات فرمانده و فرمانبر و پایداری سیستم محقق می‌شود، خطاهای ردیابی موقعیت هر دو ربات به صفر همگرا می‌شوند و طبق انتظار ما از تابع لیاپانوف محدودکننده و رعایت شرط مربوط به آن، خروجی سیستم، خطای ردیابی و سیگنال کنترلی محدود و مقید باقی می‌مانند و نوسانات سیگنال کنترلی کمتر می‌شود.

همچنین مشاهده کردیم که در حالت نقض شرط تابع لیاپانوف محدودکننده یعنی هنگامی که خطا از آستانه تعریف شده توسط پارامتر a بیشتر شود، هیچ کدام از اهداف کنترلی مدنظر محقق نمی‌شوند، سیستم عملکرد مطلوب و دقت کافی را ندارد و طبق ویژگی لگاریتم سیگنال کنترلی به بی‌نهایت میل می‌کند.

همچنین از نتایج چند حالت بررسی شده برای تأخیر زمانی ثابت متقارن مشخص است که اهداف کنترلی و عملکرد مطلوب سیستم در برابر زمان‌های تأخیر متفاوت محقق می‌شوند، اما با افزایش زمان تأخیر کانال ارتباطی زمان پاسخ سیستم نیز افزایش می‌یابد.

فصل ۵ : جمع بندی و پیشنهادات

۵-۱ جمع بندی

در این پایان نامه سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه معرفی و مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که بیان شد، در سیستم‌های حرکتی از راه دور یک یا چند ربات به وسیله کاربر انسانی از فاصله دور و با به‌کارگیری محیط واسط تحت عنوان کانال ارتباطی با دو هدف مهم تضمین پایداری و شفافیت، کنترل می‌شوند. اطلاعات بین ربات‌های فرمانده و فرمانبر توسط کانال ارتباطی منتقل می‌شوند. یکی از مشکلات سیستم‌های حرکتی از راه دور وجود عامل تأخیر چه به صورت ثابت با زمان یا متغیر با زمان یا چه به صورت تصادفی، در کانال ارتباطی است که وجود همین عامل تأخیر به صورت مستقیم بر اهداف کنترلی سیستم مورد نظر تأثیر دارد و باعث بروز ناپایداری و عملکرد نامناسب در سیستم می‌شود. در این پایان نامه یک ساختار کنترل فازی تطبیقی مبتنی بر مکانیزم پسگام با استفاده از تابع لیاپانوف محدودکننده به منظور تضمین پایداری و شفافیت برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه با دو درجه آزادی ارائه شد. در این ساختار پیشنهادی، دو کنترل کننده برای سمت ربات فرمانده و ربات فرمانبر طراحی شد. شبیه‌سازی سیستم برای دو حالت تأخیر زمانی ثابت متقارن و نامتقارن انجام شد که نتایج آن، تحقق اهداف کنترلی پایداری و شفافیت عملکرد و همزمانی موقعیت را به خوبی نشان می‌دهد. در حالت تأخیر زمانی متقارن چندین حالت متفاوت اعمال می‌شود که از مقایسه نتایج می‌توان اثر منفی تأخیر زمانی بر اهداف کنترلی سیستم را نتیجه گرفت.

۵-۲ پیشنهادات

به منظور ادامه تحقیقات در زمینه سیستم‌های حرکتی از راه دور موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

(۱) می‌توان برای بهبود عملکرد ساختار کنترل پیشنهادی، مقادیر بهینه پارامترهای قانون کنترل

را با روش‌های مختلف بهینه‌سازی به دست آورد.

(۲) از رویتنگر اغتشاش، به منظور تخمین عدم قطعیت سیستم می‌توان استفاده کرد.

مرجع

- [1] Hokayem, P.F. and Spong, M.W., 2006. Bilateral teleoperation: An historical survey. *Automatica*, 42(12), pp.2035-2057.
- [2] Sheridan, T.B., 1995. Teleoperation, telerobotics and telepresence: A progress report. *Control Engineering Practice*, 3(2), pp.205-214.
- [3] Goertz, R.C. and Thompson, W.M., 1954. Electronically controlled manipulator. *Nucleonics (US) Ceased publication*, 12.
- [4] Sheridan, T.B., 1989. Telerobotics. *Automatica*, 25(4), pp.487-507.
- [5] Ferrell, W.R. and Sheridan, T.B., 1967. Supervisory control of remote manipulation. *IEEE spectrum*, 4(10), pp.81-88.
- [6] Ferrell, W.R., 1966. Delayed force feedback. *Human factors*, 8(5), pp.449-455.
- [7] Nuño, E., Basañez, L. and Ortega, R., 2011. Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial. *Automatica*, 47(3), pp.485-495.
- [8] Smith, A.C. and Hashtrudi-Zaad, K., 2006. Smith predictor type control architectures for time delayed teleoperation. *The International Journal of Robotics Research*, 25(8), pp.797-818.
- [9] Zhu, Y., Aoyama, T. and Hasegawa, Y., 2020. "Enhancing the Transparency by Onomatopoeia for Passivity-Based Time-Delayed Teleoperation". *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), pp.2981-2986.
- [10] Bucur, B.G. and Oprea, M., 2019. Development of a prototype remote controlled multifunctional mobile robot for applications in hazardous environments. *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science*, 5(2), pp.11-16.
- [11] Hung, A.J., Chen, J., Shah, A. and Gill, I.S., 2018. Telementoring and telesurgery for minimally invasive procedures. *The Journal of urology*, 199(2), pp.355-369.
- [12] Su, H., Shang, W., Li, G., Patel, N. and Fischer, G.S., 2017. An MRI-guided telesurgery system using a Fabry-Perot interferometry force sensor and a pneumatic haptic device. *Annals of biomedical engineering*, 45(8), pp.1917-1928.
- [13] Taylor, R.H., Funda, J., Eldridge, B., Gomory, S., Gruben, K., LaRose, D., Talamini, M., Kavoussi, L. and Anderson, J., 1995. A telerobotic assistant for laparoscopic surgery. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 14(3), pp.279-288.

- [14] Kim, K.Y., Song, H.S., Suh, J.W. and Lee, J.J., 2011. "A novel surgical manipulator with workspace-conversion ability for telesurgery". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(1), pp.200-211.
- [15] Funda, J. and Paul, R.P., 1991, October. "A symbolic teleoperator interface for time-delayed underwater robot manipulation". In *OCEANS 91 Proceedings* (pp. 1526-1533). IEEE.
- [16] Niemeyer, G. and Slotine, J.J., 1991. "Stable adaptive teleoperation". *IEEE Journal of oceanic engineering*, 16(1), pp.152-162.
- [17] R.J. Anderson and M. W. Spong, 1989. Bilateral control of teleoperators with time delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34(5), pp. 494–501.
- [18] Huang, P., Dai, P., Lu, Z. and Liu, Z., 2018. Asymmetric wave variable compensation method in dual-master-dual-slave multilateral teleoperation system. *Mechatronics*, 49, pp.1-10.
- [19] Chen, Z., Pan, Y.J., Gu, J. and Forbrigger, S., 2018. A novel multilateral teleoperation scheme with power-based time-domain passivity control. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(11), pp.3252-3262.
- [20] Aziminejad, A., Tavakoli, M., Patel, R.V. and Moallem, M., 2008. Transparent time-delayed bilateral teleoperation using wave variables. *IEEE Transactions on control systems technology*, 16(3), pp.548-555.
- [21] Hu, H.C. and Liu, Y.C., 2017. Passivity-based control framework for task-space bilateral teleoperation with parametric uncertainty over unreliable networks. *ISA transactions*, 70, pp.187-199.
- [22] Sun, D., Naghdy, F. and Du, H., 2015. Wave-variable-based passivity control of four-channel nonlinear bilateral teleoperation system under time delays. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 21(1), pp.238-253.
- [23] Ryu, J.H., Kwon, D.S. and Hannaford, B., 2004. Stable teleoperation with time-domain passivity control. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 20(2), pp.365-373.
- [24] Venkateswaran, D.B. and Qu, Z., 2020. A passivity-shortage based control design for teleoperation with time-varying delays. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), pp.4070-4077.
- [25] Tanner, N.A. and Niemeyer, G., 2006. High-frequency acceleration feedback in wave variable telerobotics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11(2), pp.119-127.
- [26] Boukhnifer, M. and Ferreira, A., 2006. Wave-based passive control for transparent micro-teleoperation system. *Robotics and Autonomous Systems*, 54(7), pp.601-615.

- [27] Ryu, J.H. and Kwon, D.S., 2001. A novel adaptive bilateral control scheme using similar closed-loop dynamic characteristics of master/slave manipulators. *Journal of Robotic Systems*, 18(9), pp.533-543.
- [28] Ji, Y. and Gong, Y., 2021. Adaptive control for Dual-master/Single-slave nonlinear teleoperation systems with time-varying communication delays. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- [29] Chopra, N., Spong, M.W. and Lozano, R., 2008. Synchronization of bilateral teleoperators with time delay. *Automatica*, 44(8), pp.2142-2148.
- [30] Nuño, E., Ortega, R. and Basañez, L., 2010. An adaptive controller for nonlinear teleoperators. *Automatica*, 46(1), pp.155-159.
- [31] Hosseini-Suny, K., Momeni, H. and Janabi-Sharifi, F., 2010. A modified adaptive controller design for teleoperation systems. *Robotics and autonomous systems*, 58(5), pp.676-683.
- [32] Zhang, S., Yuan, S., Yu, X., Kong, L., Li, Q. and Li, G., 2021. Adaptive Neural Network Fixed-Time Control Design for Bilateral Teleoperation With Time Delay. *IEEE Transactions on Cybernetics*.
- [33] Yang, X., Hua, C.C., Yan, J. and Guan, X.P., 2018. Adaptive formation control of cooperative teleoperators with intermittent communications. *IEEE transactions on cybernetics*, 49(7), pp.2514-2523.
- [34] Kim, B.Y. and Ahn, H.S., 2013. A design of bilateral teleoperation systems using composite adaptive controller. *Control Engineering Practice*, 21(12), pp.1641-1652.
- [35] Li, Y., Yin, Y. and Zhang, D., 2018. Adaptive task-space synchronization control of bilateral teleoperation systems with uncertain parameters and communication delays. *IEEE Access*, 6, pp.5740-5748.
- [36] Hua, C.C., Yang, Y. and Guan, X., 2013. Neural network-based adaptive position tracking control for bilateral teleoperation under constant time delay. *Neurocomputing*, 113, pp.204-212.
- [37] Kazerooni, H., Tsay, T.I. and Hollerbach, K., 1993. A controller design framework for telerobotic systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1(1), pp.50-62.
- [38] Liu, Y.C., Dao, P.N. and Zhao, K.Y., 2019. On robust control of nonlinear teleoperators under dynamic uncertainties with variable time delays and without relative velocity. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(2), pp.1272-1280.
- [39] Sadeghi, M.S., Momeni, H.R. and Amirifar, R., 2008. H_∞ and L_1 control of a teleoperation system via LMIs. *Applied Mathematics and Computation*, 206(2), pp.669-677.

- [40] Al-Wais, S., Khoo, S., Lee, T.H., Shanmugam, L. and Nahavandi, S., 2018. Robust H_∞ cost guaranteed integral sliding mode control for the synchronization problem of nonlinear tele-operation system with variable time-delay. *ISA transactions*, 72, pp.25-36.
- [41] Mohammadi, L., Alfi, A. and Xu, B., 2017. Robust bilateral control for state convergence in uncertain teleoperation systems with time-varying delay: a guaranteed cost control design. *Nonlinear Dynamics*, 88(2), pp.1413-1426.
- [42] Alfi, A., Bakhshi, A., Yousefi, M. and Talebi, H.A., 2016. Design and implementation of robust-fixed structure controller for telerobotic systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 83(2), pp.253-269.
- [43] Alfi, A., Khosravi, A. and Lari, A., 2014. Swarm-based structure-specified controller design for bilateral transparent teleoperation systems via μ synthesis. *IMA Journal of Mathematical control and Information*, 31(1), pp.111-136.
- [44] Alfi, A., & Farrokhi, M. (2008). A Simple Structure for Bilateral Transparent Teleoperation Systems With Time Delay. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 130(4), 044502.
- [45] Bowthorpe, M., Tavakoli, M., Becher, H. and Howe, R., 2013. Smith predictor-based robot control for ultrasound-guided teleoperated beating-heart surgery. *IEEE Journal of biomedical and Health Informatics*, 18(1), pp.157-166.
- [46] Langson, W., Chrysochoos, I., Raković, S.V. and Mayne, D.Q., 2004. Robust model predictive control using tubes. *Automatica*, 40(1), pp.125-133.
- [47] Pan, Y.J., Canudas-de-Wit, C. and Sename, O., 2006. A new predictive approach for bilateral teleoperation with applications to drive-by-wire systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(6), pp.1146-1162.
- [48] Lu, Z., Huang, P. and Liu, Z., 2017. Predictive approach for sensorless bimanual teleoperation under random time delays with adaptive fuzzy control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(3), pp.2439-2448.
- [49] Shen, S., Song, A. and Li, T., 2021. "Bilateral motion prediction and control for teleoperation under long time-varying delays". *ISA transactions*.
- [50] Alfi, A. and Farrokhi, M., 2008. Force reflecting bilateral control of master-slave systems in teleoperation. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 52(2), pp.209-232.
- [51] Slotine, J.J.E. and Li, W., 1991. *Applied nonlinear control* (Vol. 199, No. 1). Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall. pp.326.
- [52] Hao, S., Hu, L. and Liu, P.X., 2019. Sliding mode control for a surgical teleoperation system via a disturbance observer. *IEEE Access*, 7, pp.43383-43393.

- [53] Moreau, R., Pham, M.T., Tavakoli, M., Le, M.Q. and Redarce, T., 2012. Sliding-mode bilateral teleoperation control design for master–slave pneumatic servo systems. *Control Engineering Practice*, 20(6), pp.584-597.
- [54] Ganjefar, S., Sarajchi, M.H. and Mahmoud Hoseini, S., 2014. Teleoperation systems design using singular perturbation method and sliding mode controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 136(5), p.051005.
- [55] Huang, F., Zhang, W., Chen, Z., Tang, J., Song, W. and Zhu, S., 2019. RBFNN-based adaptive sliding mode control design for nonlinear bilateral teleoperation system under time-varying delays. *IEEE Access*, 7, pp.11905-11912.
- [56] Yang, Y., Hua, C. and Guan, X., 2015. Synchronization control for bilateral teleoperation system with prescribed performance under asymmetric time delay. *Nonlinear dynamics*, 81(1), pp.481-493.
- [57] Wang, L.X., 1996. *A course in fuzzy systems and control*. Prentice-Hall, Inc. pp.1.
- [58] Yang, Y., Hua, C. and Guan, X., 2016. Adaptive fuzzy synchronization control for networked teleoperation system with input and multi-state constraints. *Journal of the Franklin Institute*, 353(12), pp.2814-2834.

Abstract

In this thesis, in order to guarantee the stability and transparency of teleoperation systems in the presence of constant time delay in communication channel, nonlinearity and uncertainties, an adaptive fuzzy backstepping controller for the master and slave robots is separately designed . The proposed method has a good transparency in view point of synchronization error between the master and slave robots and guarantees the stability of the closed-loop system based on the Lyapunov theory. Simulation results show the proper performance of the proposed control structure.

Keywords: Teleoperation System, Adaptive fuzzy backstepping control, Time delay, Stability, Synchronization, Transparency



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

M.Sc. Thesis in Control Engineering

Adaptive Fuzzy Controller Design for Delayed Teleoperation Systems

By: Maryam Mostaghar

Supervisor:
Dr. Alireza Alfi

December.2021