

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
رشته مهندسی برق گرایش کنترل

رساله دکتری

کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در بازوهای رباتیک

نگارنده:

حامد چنارانی

استاد راهنما

جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح

بهمن ۱۴۰۰

شماره: ۲۸۶۵، ۱۳۹۴

تاریخ: ۱۴/۱۱/۹۴

ویرایش: —

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(تعیین درجه نمره رساله برای ورودی‌های ۹۴ و سال‌های قبل از آن)

بدینوسیله گواهی می‌شود آقای حامد چنارانی دانشجوی دکتری رشته مهندسی برق به شماره دانشجویی ۹۴۰۰۲۹۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۴ در تاریخ ۱۴۰۰/۱۱/۲۳ از رساله نظری ■ / عملی □ خود با عنوان: کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در بازوهای رباتیک دفاع و با اخذ نمره ۱۸.۲۷ به درجه: عالی نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒	ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ ☐	د) مردود: کمتر از ۱۵ ☐

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	استاد راهنمای اول	دکتر محمد مهدی نافع	استاد	
۲	استاد راهنمای دوم	دکتر —	—	—
۳	استاد مشاور اول	دکتر —	—	—
۴	استاد مشاور دوم	دکتر —	—	—
۵	استاد مدعو داخلی / خارجی	دکتر علیرضا خدوی	دانشیار	
۶	استاد مدعو داخلی / خارجی	دکتر علی‌البرزاه کلات	دانشیار	
۷	استاد مدعو داخلی / خارجی	دکتر علیرضا الفی	استاد	
۸	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محسن قلعه نوی	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای حامد چنارانی بعمل آید

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:
۱۴۰۲/۰۲/۰۱

تشکر و قدردانی

به نام آفریدگار پاک که انسان را از خاک آفرید و به واسطه عقل بر تمام موجودات رحمان داد و آنگاه دانش را وسیله تکامل عقل قرار داد. بزرگ پروردگار را سپاس که به ما استعداد آموختن عطا کردی. با تشکر از استاد محترم جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح که این جانب را در تهیه این رساله یاری نمودند از خداوند متعال پیروزی و موفقیت روز افزون ایشان را خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب حامد چنارانی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی برق دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در بازوهای رباتیک تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح متعهد می شوم.

- تحقیقات در این رساله 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 رساله 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 رساله 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.

۱۳۹۷/۱۲/۲۵
حامد چنارانی

تاریخ:

امضای دانشجو:

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های 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.

چکیده

در این رساله، روش کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ابداع می‌گردد. طراحی کنترل‌کننده در دو دسته‌ی راهبرد ولتاژ و روش وابسته به مدل ربات با خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی، ارائه می‌شود. همچنین، روش راهبرد ولتاژ، در دو حالت غیرفعال بودن عمومی و اکیداً غیرفعال خروجی نیز طراحی می‌گردد. در این طراحی از روش غیرفعال‌سازی پس‌خورد استفاده شده است که در آن، سیستم اولیه توسط یک قانون پس‌خورد به سیستم غیرفعال تبدیل و سپس طراحی کنترل‌کننده انجام می‌شود. در ادامه، به کمک نظریه غیرفعال بودن، روش مود لغزشی برای سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی ارائه می‌شود. به عبارت دیگر، از نظریه غیرفعال بودن در طراحی سطح لغزش استفاده می‌گردد. به کمک این روش پیشنهادی، ردگیری مسیر مطلوب مفاصل بازوهای رباتیک نیز تحقق می‌یابد. در تمامی مراحل طراحی، اثبات پایداری با استفاده از روش لیاپانوف انجام شده و کارایی روش‌های پیشنهادی، توسط شبیه‌سازی نمایش داده می‌شود.

کلمات کلیدی: کنترل ولتاژ، بازوهای رباتیک، نظریه غیرفعال بودن، روش مود لغزشی، عدم

قطعیت‌های ناسازگار با ورودی

لیست مقالات مستخرج از رساله

• مقالات ژورنالی

- ۱- Chenarani, H., Fateh, M. M. "Robust Passivity-based Sliding Mode Control of a Large Class of Nonlinear Systems Subject to Unmatched Uncertainties: A Robot Manipulator Case Study." *IETE Journal of Research*, 1-10, 2021.
- ۲- Chenarani, H., Fateh, M. M. "Robust Passivity-Based Voltage Control of Robot Manipulators", *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI)*, 7(2), 14۵-۱۵۴, ۲۰۱۹.

• مقالات کنفرانسی

- ۱- Chenarani, H., Fateh, M. M., and Keighobadi, J. "Robust Control Based on Backstepping Passivation Technique for Robotic Manipulators Including Actuator Dynamics." *2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. IEEE, 2019.
- ۲- Chenarani, H., Fateh, M. M. "Voltage-Based Control of the Industrial PUMA 560 Robot Using Passivity-Based Theorem", *The 2nd National Seminar on Control and Optimization*, Nov, 2018.

فصل اول: مقدمه و پیشینه تحقیق ۱

- ۱-۱ مقدمه و اهمیت موضوع ۲
- ۲-۱ پیشینه تحقیق ۴
- ۱-۲-۱ کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ۵
- ۲-۲-۱ کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ۱۰
- ۳-۲-۱ اصلاح کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی ۱۱
- ۳-۱ ضرورت تحقیق ۱۳
- ۴-۱ اهداف رساله ۱۴

فصل دوم: نظریه غیرفعال بودن ۱۷

- ۱-۲ مقدمه ۱۸
- ۲-۲ سیستم‌های غیرفعال ۱۸
- ۳-۲ کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ۲۲
- ۴-۲ غیرفعال سازی پسخورد ۲۳
- ۱-۴-۲ غیرفعال سازی پسخورد با استفاده از پسخورد حالت ۲۳
- ۲-۴-۲ غیرفعال سازی پسخورد با استفاده از پسخورد خروجی ۲۴
- ۵-۲ مزایا و کاربردهای نظریه غیرفعال بودن ۲۵

فصل سوم: کنترل مرسوم بازوهای رباتیک مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ...

۲۹

- ۱-۳ مقدمه ۳۰
- ۲-۳ کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن [۶۸] ۳۰

- ۳-۲-۱ ردگیری مسیر ثابت ۳۱
- ۳-۲-۲ ردگیری مسیر متغیر با زمان ۳۲
- ۳-۳ کنترل تطبیقی گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن [۶۸] ۳۴
- ۳-۴ جمع بندی ۳۵

فصل چهارم: کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک مبتنی بر غیرفعال بودن..... ۳۷

- ۴-۱ مقدمه ۳۸
- ۴-۲ تعریف مساله ۳۹
- ۴-۳ تنظیمات کلی شبیه سازی ۴۲
- ۴-۴ کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک با استفاده از خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی ۴۴
- ۴-۴-۱ نتایج شبیه سازی ۴۷
- ۴-۴-۲ بررسی اثر حذف ثابت زمانی الکتریکی موتور ۴۹
- ۴-۵ کنترل بازوهای رباتیک با استفاده از راهبرد ولتاژ مبتنی بر خاصیت غیرفعال بودن ۵۲
- ۴-۵-۱ نتایج شبیه سازی ۵۳
- ۴-۵-۲ کنترل تطبیقی بازوهای رباتیک با استفاده از راهبرد ولتاژ مبتنی بر خاصیت غیرفعال بودن در حضور عدم قطعیت ۵۵
- ۴-۵-۳ نتایج شبیه سازی ۵۸
- ۴-۶ کنترل بازوهای رباتیک با استفاده از راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیر فعال بودن ۶۱
- ۴-۷ طراحی کنترل کننده و تحلیل ردگیری ۶۲
- ۴-۷-۱ کنترل کننده مبتنی بر مدل ۶۲
- ۴-۷-۲ کنترل کننده تطبیقی مستقل از رگر سور ۶۴
- ۴-۸ نتایج شبیه سازی ۶۸
- ۴-۹ مقایسه عملکرد روش های کنترل ولتاژ ارائه شده در این رساله ۷۳
- ۴-۹-۱ مقایسه ی راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن با راهبرد مرسوم گشتاور [۲۴] ۷۵

فصل پنجم: اصلاح کنترل مود لغزشی برای سیستم‌های غیرخطی دارای عدم

قطعیت‌های ناسازگار با ورودی ۷۷

۱-۵ مقدمه ۷۸

۲-۵ معرفی ریاضیات مساله ۷۸

۳-۵ طراحی سطح لغزش مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ۸۰

۴-۵ قانون کنترل مود لغزشی ۸۲

۵-۵ کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک با استفاده از روش پیشنهادی ۸۷

۶-۵ نتایج شبیه سازی ۹۰

۷-۵ توسعه‌ی کنترل‌کننده‌ی مود لغزشی مرجع [۷۷] ۹۷

فصل ششم: جمع بندی و پیشنهادات ۱۰۳

۱-۶ جمع بندی ۱۰۴

۲-۶ پیشنهادات ۱۰۵

مراجع ۱۰۷

فهرست اشکال

شکل (۲-۱): مثال هایی از درجات آزادی موجود برای انتخاب تابع ϕ	۲۷
شکل (۴-۱): رویکردهای کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک ارائه شده در این فصل	۳۹
شکل (۴-۲): شماتیک یک بازوی ربات دو لینکی	۴۲
شکل (۴-۳): اغتشاش خارجی اعمال شده به گشتاور بازو	۴۳
شکل (۴-۴): مسیر مطلوب اول	۴۳
شکل (۴-۵): مسیر مطلوب دوم	۴۴
شکل (۴-۶): بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ مبتنی بر مدل ربات با خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی	۴۷
شکل (۴-۷): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۴-۲۰) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۴۷
شکل (۴-۸): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۲۰) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۴۸
شکل (۴-۹): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۴-۲۰) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۴۸
شکل (۴-۱۰): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۲۰) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۴۹
شکل (۴-۱۱): بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ مبتنی بر مدل ربات با خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی با حذف ثابت زمانی الکتریکی موتور	۴۹
شکل (۴-۱۲): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۳۴) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۵۰
شکل (۴-۱۳): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۳۴) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۵۰
شکل (۴-۱۴): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۳۴) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۵۱
شکل (۴-۱۵): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۳۴) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۵۱
شکل (۴-۱۶): بلوک دیاگرام راهبرد ولتاژ مبتنی بر خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی با فرض معلوم بودن پارامترهای موتور	۵۳
شکل (۴-۱۷): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۳۶) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۵۴
شکل (۴-۱۸): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۳۶) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۵۴
شکل (۴-۱۹): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۳۶) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۵۵
شکل (۴-۲۰): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۳۶) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۵۵
شکل (۴-۲۱): بلوک دیاگرام راهبرد ولتاژ تطبیقی مبتنی بر خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی	۵۸
شکل (۴-۲۲): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۴۱) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۵۸
شکل (۴-۲۳): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۴۱) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۵۹
شکل (۴-۲۴): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۴۱) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۵۹
شکل (۴-۲۵): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۴۱) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۵۹
شکل (۴-۲۶): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۴۱) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۶۰
شکل (۴-۲۷): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۴۱) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۶۰
شکل (۴-۲۸): بلوک دیاگرام راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای سیستم مرتبه اول (۴-۵۰)	۶۵
شکل (۴-۲۹): بلوک دیاگرام راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای سیستم مرتبه دوم (۴-۵۱)	۶۸
شکل (۴-۳۰): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۴-۶۶) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۶۹
شکل (۴-۳۱): ولتاژ محرکه های بازو به ازای کنترل کننده (۴-۶۶) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۶۹
شکل (۴-۳۲): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۴-۶۶) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۷۰
شکل (۴-۳۳): ولتاژ محرکه های بازو به ازای کنترل کننده (۴-۶۶) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)	۷۰
شکل (۴-۳۴): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۴-۷۴) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)	۷۱

- شکل (۳۵-۴): ولتاژ محرکه‌های بازو به ازای کنترل کننده‌ی (۷۴-۴) برای مسیر مطلوب اول (۱۷-۴)..... ۷۱
- شکل (۳۶-۴): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده‌ی (۷۴-۴) برای مسیر مطلوب دوم (۱۸-۴)..... ۷۲
- شکل (۳۷-۴): ولتاژ محرکه‌های بازو به ازای کنترل کننده‌ی (۷۴-۴) برای مسیر مطلوب دوم (۱۸-۴)..... ۷۲
- شکل (۳۸-۴): خطای ردگیری موقعیت مفاصل ناشی از اعمال قانون کنترل (۸۸-۴) به سیستم (۱-۴) برای هر دو مفصل بازو..... ۷۶
- شکل (۳۹-۴): دامنه ورودی گشتاور ناشی از اعمال قانون کنترل (۸۸-۴)..... ۷۶
- شکل (۱-۵): $\tanh\left(\frac{\eta}{\varepsilon_j}\right)$ به ازای مقادیر مختلف ε ۸۴
- شکل (۲-۵): بلوک دیاگرام روش مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن..... ۸۶
- شکل (۳-۵): مدل ربات اسکارا که در نرم افزار solidworks شبیه سازی شده است..... ۹۱
- شکل (۴-۵): مسیر مطلوب اول..... ۹۲
- شکل (۵-۵): مسیر مطلوب دوم..... ۹۲
- شکل (۶-۵): اغتشاش خارجی اعمال شده به گشتاور مفاصل بازو..... ۹۳
- شکل (۷-۵): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۴۳-۵) برای مسیر مطلوب اول (۵۲-۵)..... ۹۳
- شکل (۸-۵): تغییرات سطح لغزش در اجرای شبیه سازی به ازای مسیر مطلوب اول (۵۲-۵)..... ۹۴
- شکل (۹-۵): تلاش کنترلی محرکه‌ها با اعمال کنترل کننده (۴۳-۵) برای مسیر مطلوب اول (۵۲-۵)..... ۹۴
- شکل (۱۰-۵): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۴۳-۵) برای مسیر مطلوب دوم (۵۳-۵)..... ۹۵
- شکل (۱۱-۵): تغییرات سطح لغزش در اجرای شبیه سازی به ازای مسیر مطلوب دوم (۵۳-۵)..... ۹۵
- شکل (۱۲-۵): تلاش کنترلی محرکه‌های مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴۳-۵) برای مسیر مطلوب دوم (۵۳-۵)..... ۹۵
- شکل (۱۳-۵): خطای ردگیری موقعیت مفاصل ربات برای قانون کنترل توسعه یافته (۷۰-۵) به ازای مسیر مطلوب اول (۵۲-۵)..... ۱۰۰
- شکل (۱۴-۵): تغییرات سطح لغزش در اجرای شبیه سازی به ازای قانون کنترل توسعه یافته (۷۰-۵) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۵۲-۵)..... ۱۰۰
- شکل (۱۵-۵): تلاش کنترلی محرکه‌های مفاصل با اعمال قانون کنترل توسعه یافته (۷۰-۵) به ازای مسیر مطلوب اول (۵۲-۵)..... ۱۰۱
- شکل (۱۶-۵): خطای ردگیری موقعیت مفاصل ربات برای قانون کنترل توسعه یافته (۷۰-۵) به ازای مسیر مطلوب دوم (۵۳-۵)..... ۱۰۱
- شکل (۱۷-۵): تغییرات سطح لغزش در اجرای شبیه سازی به ازای قانون کنترل توسعه یافته (۷۰-۵) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۵۳-۵)..... ۱۰۱
- شکل (۱۸-۵): تلاش کنترلی محرکه‌های مفاصل با اعمال قانون کنترل توسعه یافته (۷۰-۵) به ازای مسیر مطلوب دوم (۵۳-۵)..... ۱۰۲

فهرست جداول

جدول (۱-۴): پارامترهای بازوی ربات	۴۲
جدول (۲-۴): پارامترهای موتورهای جریان مستقیم	۴۳
جدول (۳-۴): مقایسه عملکرد کنترل کننده های ولتاژ مبتنی بر غیرفعال بودن ارائه شده	۷۴
جدول (۴-۴): مقایسه عملکرد راهبرد ولتاژ و گشتاور در حضور عدم قطعیت	۷۶
جدول (۱-۵): پارامترهای DH ربات اسکارا	۹۱
جدول (۲-۵): پارامترهای موتور جریان مستقیم	۹۱
جدول (۳-۵): مقادیر بهره های کنترل کننده (۴۳-۵)	۹۳
جدول (۴-۵): ارزیابی عملکرد کنترل کننده ی (۴۳-۵) با استفاده از معیار RMS	۹۶

فهرست علائم و اختصارات

اینرسی موتور	J_m	موقعیت مفاصل	q
میرایی موتور	B_m	سرعت مفاصل	$\dot{q}$
ضریب چرخ‌دنده	r	شتاب مفاصل	$\ddot{q}$
نیروی ضد محرکه‌ی القایی موتور	K_b	گشتاور ورودی مفاصل	τ
مقاومت موتور	R	ماتریس اینرسی بازو	$M(q)$
اندوکتانس موتور	L	ماتریس کریولیس	$C(q, \dot{q})$
ولتاژ موتور	V_a	بردار گشتاورهای گرانشی	$g(q)$
جریان موتور	I_a	موقعیت روتور	θ_m
گشتاور موتور	τ_m	سرعت روتور	$\dot{\theta}_m$

فصل اول: مقدمه و پیشینه تحقیق

۱-۱ مقدمه و اهمیت موضوع

تضمین پایداری سیستم‌ها در حضور عدم قطعیت از اهمیت زیادی برخوردار است. این پایداری ارتباط مستقیمی با انرژی سیستم دارد. از دیدگاه انرژی، اگر انرژی ذخیره شده در یک سیستم کمتر از انرژی ورودی به آن باشد، آن سیستم غیرفعال^۱ است [۱]. در سال ۱۹۷۲ برای اولین بار آقای ویلمز^۲ مفهوم غیرفعال بودن را با استفاده از تعریف تابع ذخیره^۳ و نرخ تغذیه^۴ بیان نمود [۱]. به طور کلی منظور از تابع ذخیره، انرژی ذخیره شده در سیستم و همچنین منظور از نرخ تغذیه، حاصل ضرب داخلی بردار ورودی و بردار خروجی سیستم است. به عنوان مثال در سیستم‌های الکتریکی، نرخ تغذیه مفهوم توان سیستم را دارد. نظریه غیرفعال بودن ابزار مفیدی را برای تحلیل سیستم‌های غیرخطی در اختیار طراح قرار می‌دهد، که با پایداری لیاپانوف و پایداری L_2 که نوعی از پایداری ورودی-خروجی به شمار می‌رود، ارتباط مستقیمی دارد [۲]. لازم به ذکر است که کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن^۵ به عنوان یکی از روش‌های کنترل غیرخطی شناخته می‌شود. استفاده از این روش نیازمند وجود دو شرط اساسی است. سیستم‌هایی که دارای این دو شرط هستند را می‌توان با استفاده از یک قانون فیدبک خروجی استاتیکی به فرم $u = -\phi(y)$ کنترل کرد؛ که در این رابطه u ورودی و y خروجی سیستم می‌باشد. لازم به ذکر است که باید شرط‌های $y^T \phi(y) > 0$ (به ازای $y \neq 0$) و $\phi(0) = 0$ ، در مورد تابع $\phi(\cdot)$ برقرار باشد [۳]. نظریه غیرفعال بودن ویژگی‌های منحصر به فردی دارد. یکی از این ویژگی‌ها، امکان طراحی تابع $\phi(\cdot)$ به گونه‌ای است که قیود عملی موجود روی ورودی کنترلی سیستم را برآورده سازد. این موضوع خصوصاً در سیستم‌های عملی که دارای محرکه هستند، اهمیت زیادی دارد. به عنوان مثال، در مورد بازوهای رباتیک که حرکت مفاصل آن‌ها توسط موتورهای الکتریکی اتفاق می‌افتد، باقی ماندن سطح ولتاژ موتور در محدوده مجاز در مشخصات فنی شرکت سازنده آن اهمیت زیادی دارد [۴]. همچنین، بر اساس لم KYP^۶، این امکان وجود دارد که خروجی سیستم به نحوی تعیین شود که سیستم، بین ورودی و خروجی تعریف شده، غیرفعال باشد. در نتیجه به راحتی می‌توان با طراحی کنترل کننده بر

^۱Passive

^۲Willems

^۳Storage function

^۴Supply rate

^۵ در پایداری L_2 ، با تعریف فضای L_2 برای ورودی و نگاشت بین ورودی و خروجی سیستم، پایداری به این صورت تعریف می‌شود که ورودی محدود تحت یک نگاشت با بهره محدود، منجر به خروجی محدود خواهد شد و ارتباط مستقیم با خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی دارد.

^۶Passivity-Based Control (PBC)

^۷Kalman-Yakubovich-Popov (KYP)

اساس نظریه غیرفعال بودن، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته را تضمین نمود. یکی دیگر از راهکارهای استفاده از کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، تبدیل یک سیستم فعال به یک سیستم غیرفعال است. این روش که به غیرفعال سازی^۱ معروف است، با در نظر گرفتن یک ورودی جدید در قانون پیشنهادی اولیه که می‌تواند با استفاده از هر روش کنترلی مناسب صورت پذیرد، سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خروجی سیستم، غیرفعال شده و سپس ورودی جدید بر اساس نظریه غیرفعال بودن طراحی می‌گردد [۵]. از آنجایی که اکثر سیستم‌های دینامیکی در مدل خود دارای عدم قطعیت هستند، لذا توسعه‌ی طراحی کنترل کننده مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در حوزه سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت، ارزشمند می‌باشد.

امروزه به واسطه پیشرفت تکنولوژی و صنعت، بازوهای رباتیک نقش بسیار مهمی را در زندگی بشر ایفا می‌کنند [۶]. بر اساس مطالعات انجام شده، پژوهش‌های زیادی در حوزه کنترل گشتاور بازوهای رباتیکی انجام شده است [۸]، [۷]. از آنجایی که مدل مکانیکی بازوهای رباتیک با در نظر گرفتن گشتاور به عنوان ورودی سیستم و سرعت مفاصل به عنوان خروجی سیستم، از خاصیت غیرفعال بودن برخوردار هستند، در بسیاری از پژوهش‌ها از روش کنترل گشتاور مبتنی بر غیرفعال بودن استفاده شده که در بخش پیشینه تحقیق بیشتر به این موضوع پرداخته شده است. پس از ارائه راهبرد کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک که در آن ورودی کنترلی سیگنال ولتاژ موتورهای مغناطیس دائم جریان مستقیم هستند [۹]، روند طراحی و همچنین پیاده سازی کنترل کننده برای طراحان ساده‌تر شده است. در این راهبرد، مدل ریاضی موتور جریان مستقیم به عنوان سیستم اصلی در نظر گرفته می‌شود و مدل مکانیکی بازو به عنوان عدم قطعیت در سیستم اصلی ظاهر می‌شود. به کمک این راهبرد، قانون کنترل بدون پیچیدگی-های معمول حاصل می‌شود. بنابراین، در این رساله، طراحی قانون کنترل برای بازوهای رباتیک، بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای اولین بار ارائه شده است. در روش پیشنهادی، از روش غیرفعال سازی نیز استفاده شده، به گونه‌ای که با پیشنهاد یک قانون کنترل ساده و تعریف ورودی جدید، سیستم حلقه بسته غیرفعال بوده و سپس با استفاده از نظریه غیرفعال بودن قانون کنترل نهایی طراحی می‌شود.

از طرفی، مدل مکانیکی بازوهای رباتیک، با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌های آن، در قالب فرم رگولار قرار دارد. به طور کلی، در سیستم‌های غیرخطی که به فرم رگولار هستند، استفاده از

^۱Passivation Technique

کنترل‌کننده‌های ساختار متغیر بسیار مناسب است [۱۰]. چرا که در این فرم، ساختار سیستم به دو بلوک تقسیم شده، که در بلوک اول، تنها متغیرهای حالت سیستم ظاهر می‌شوند و ورودی‌های سیستم، تنها در بلوک دوم ظاهر خواهند شد. بنابراین، متغیرهای حالت بلوک دوم، نقش ورودی را برای متغیرهای حالت بلوک اول ایفا نموده و باید به گونه‌ای در نظر گرفته شوند که پایداری مجانبی دینامیک بلوک اول تضمین شود. سپس، ورودی کنترلی، بر اساس قانون پیشنهادی برای بلوک اول طراحی می‌شود تا اینکه پایداری مجانبی بلوک دوم نیز تضمین گردد. این روند، اساس کار کنترل‌کننده‌های ساختار متغیر است. روش مود لغزشی نیز یکی از روش‌های مرسوم کنترل ساختار متغیر می‌باشد. اولین و مهمترین قدم در روش مود لغزشی، طراحی سطح لغزش است. سطح لغزش، باید به گونه‌ای طراحی شود که دینامیک بلوک اول پایدار مجانبی باشد. سپس، قانون کنترل مود لغزشی بر اساس سطح لغزش پیشنهادی طراحی می‌شود [۱۱]. لازم به ذکر است که روش مود لغزشی، برای سیستم‌های دارای عدم قطعیت ناسازگار با ورودی^۱ یعنی عدم قطعیت‌هایی که در کانال ورودی ظاهر نمی‌شوند، قابل اجرا نیست [۳]. با توجه به توضیحات داده شده در خصوص فرم رگولار، عدم قطعیت‌هایی که در بلوک اول سیستم وجود دارند، از نوع ناسازگار با ورودی هستند. مدل دینامیکی بازوهای رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها نیز دارای عدم قطعیت ناسازگار با ورودی است. بنابراین، استفاده از روش مود لغزشی مرسوم برای این سیستم کارایی لازم را ندارد. در این رساله، ابتدا برای حالت کلی سیستم‌های غیرخطی که عدم قطعیت-های ناسازگار با ورودی دارند، روش مود لغزشی اصلاح شده مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ارائه می‌شود. سپس، این روش برای کنترل ردگیری موقعیت مفاصل بازوهای رباتیکی با در نظر گرفتن ولتاژ محرکه‌ها به عنوان ورودی کنترلی سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۱ پیشینه تحقیق

با توجه به گسترش استفاده از بازوهای رباتیک در صنعت و زندگی روزمره، مطالعه روش‌های مدل‌سازی و کنترل این دسته از سیستم‌ها، دارای اهمیت فراوانی است. برای مدل‌سازی اغلب سیستم‌های مکانیکی و به طور خاص، بازوهای رباتیک، از معادلات اوایلر لاگرانژ^۲ یا همیلتونین^۳ استفاده می‌شود [۲]. از آنجایی که معادلات لاگرانژ، مدل جامع‌تری نسبت به معادلات همیلتونین برای سیستم بازوهای رباتیک ارائه می‌دهد، طراحی کنترل‌کننده در این فضا از اهمیت بیشتری برخوردار است. راهبرد کنترل

^۱Unmatched Uncertainties

^۲Euler-Lagrange

^۳Hamiltonine

گشتاور، یک روش مرسوم در طراحی کنترل کننده برای این دسته از سیستم‌ها به شمار می‌رود [۲]. در این راهبرد، طراحی قانون کنترل بر اساس مدل مکانیکی ربات انجام شده و گشتاور مفاصل به عنوان ورودی کنترلی سیستم محسوب می‌شوند. از طرفی، با توجه به ویژگی‌های بازوهای رباتیک و مدل ریاضی حاصل از معادلات اویلر لاگرانژ یا همیلتونین، می‌توان ثابت کرد که سیستم بازوی ربات بین ورودی گشتاور و خروجی سرعت مفاصل، غیرفعال است [۴]. بنابراین، با توجه به خواص کنترل مبتنی بر نظریه غیر فعال بودن، مانند طراحی قانون کنترل مقاوم با ساختاری ساده، برآورده شدن قیود عملی سیگنال کنترل و تضمین پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته، راهبرد کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای بازوهای ربات مطرح شده است [۴]. لازم به ذکر است که قانون کنترل حاصل از راهبرد گشتاور، به دلیل استفاده از مدل دینامیکی ربات، دارای پیچیدگی زیادی است. با ارائه راهبرد کنترل ولتاژ برای بازوهای رباتیک که در آن، تنها معادلات الکتریکی موتور مفاصل در نظر گرفته می‌شود؛ قانون کنترل مستقل از دینامیک ربات بدست می‌آید که در مقایسه با راهبرد گشتاور، دارای ساختار ساده‌تری است [۹]. این بخش به مرور پژوهش‌های انجام شده در زمینه کنترل گشتاور و ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در سیستم‌های مکانیکی و بازوهای رباتیک اختصاص داده شده است.

۱-۲-۱ کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن

از آنجایی که مدل سیستم‌های مکانیکی بر اساس معادلات لاگرانژ و همیلتونین بیان می‌شود؛ در این قسمت، به طور جداگانه، پژوهش‌های انجام شده در زمینه کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن بر اساس این دو مدل، بررسی خواهند شد. لازم به ذکر است که مدل‌سازی سیستم‌های رباتیک، ابتدا بر اساس معادلات اویلر لاگرانژ صورت پذیرفته است [۱۴]–[۱۲]. هدف اصلی این مدل‌سازی، استفاده از ظرفیت معادلات لاگرانژ در بیان صورت مساله بر اساس انرژی سیستم‌ها است. بنابراین، می‌توان کنترل مبتنی بر انرژی سیستم را ارائه نمود. همچنین، مدل همیلتونین، شکل دیگری از مدل لاگرانژ است، که توسط تبدیل لژاندر حاصل می‌شود [۱۴].

• کنترل سیستم‌های همیلتونین

در زمینه کنترل سیستم‌های همیلتونین مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، پژوهش‌های مفیدی انجام شده است. به عنوان مثال، در مرجع [۱۵]، کنترل سیستم‌های همیلتونین مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن با در نظر گرفتن قیود غیرهولومونیک^۱ انجام شده است. از جمله مزایای نامبرده برای این روش، عدم نیاز به اندازه‌گیری متغیر سرعت می‌باشد. از آنجایی که در نظریه غیرفعال بودن از قانون پسخورد

^۱Nonholonomic constraints

خروجی استفاده می‌شود و متغیر سرعت در معادله خروجی سیستم ظاهر نشده، لذا نیازی به اندازه‌گیری متغیر سرعت نیست. مرجع [۱۶]، موضوع کنترل و ردگیری مسیر مطلوب در سیستم‌های مکانیکی با در نظر گرفتن متغیرهای حالت موقعیت و تکانه^۱ برای تشکیل سیستم همیلتونین را مورد بررسی قرار داده است. بر این اساس، در ساختار حلقه بسته جدید، ترم‌های کوپل شده‌ای بین متغیرهای موقعیت و تکانه وجود دارد که با استفاده از نظریه غیرفعال بودن بر این تزویج^۲ غلبه شده و تابع لیاپانوف مناسب ارائه شده است. نویسندگان [۱۷]، از روش مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای کنترل سیستم‌های مکانیکی مدل شده بر اساس معادلات همیلتونین استفاده نموده‌اند. ایده اصلی این مرجع، بدست آوردن تبدیل مناسب برای بیان مدل فضای حالت سیستم همیلتونین بر اساس معادلات خطای ردگیری، به گونه‌ای است که عدم قطعیت‌های سیستم، در کانال ورودی قرار داشته باشند. نویسندگان مرجع [۱۸]، قالب جدیدی از کنترل‌کننده مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن را برای کنترل سیستم‌های همیلتونین مکانیکی طراحی کرده‌اند. به منظور اثبات پایداری مجانبی دینامیک بلوک اول، از نظریه غیرفعال بودن استفاده شده است. به عبارت دیگر، سطح لغزش مناسب، به کمک نظریه غیرفعال بودن، طراحی شده است. لازم به ذکر است که عدم قطعیت‌های سیستم در نظر گرفته شده، از نوع سازگار با ورودی هستند. در مرجع [۱۹]، مطالعه گسترده‌ای در زمینه طراحی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای سیستم‌های غیرخطی همیلتونین انجام شده است. در این مرجع، به دو ایراد اساسی کنترل‌کننده‌های صنعتی تناسبی-انتگرالی-مشتقی، یعنی، دشوار بودن تنظیم بهره‌های کنترلی در سیستم‌هایی با تعداد متغیرهای زیاد و عدم دستیابی به هدف کنترلی مناسب در برخی از کاربردهای عملی به کمک سیگنال‌های خروجی، اشاره شده است. برای رفع این مشکلات، ترکیب کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی با نظریه غیرفعال بودن ارائه شده است. به خصوص اینکه قانون کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن به طور مستقیم بر اساس سیگنال خروجی سیستم طراحی می‌شود. همچنین، در کنترل‌کننده‌های مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، نیاز به استفاده از بهره‌های کنترلی زیاد نیست. به عبارت دیگر، همانطور که در بخش مقدمه نیز بیان گردید، قانون کنترل $u = -\phi(y)$ قادر است قیود عملی ورودی کنترلی سیستم را برآورده سازد. به عنوان مثال، اگر ولتاژ یک موتور جریان مستقیم به عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته شده باشد و این موتور قادر به تحمل ولتاژی در حدود a ولت باشد، به راحتی می‌توان این محدوده‌ی ولتاژ را در قانون کنترل $u = -\phi(y)$

^۱Momentum
^۲Coopling

لحاظ نمود. لازم به ذکر است که تابع $\phi(\cdot)$ یک تابع ربع اول و سومی است. مرجع [۲۰] نیز، موضوع طراحی قانون کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن را برای دسته خاصی از سیستم‌های همیلتونین مورد بررسی قرار داده است. در این مرجع، ابتدا تحلیلی ارائه شده که بر اساس آن، پایداری سیستم حلقه بسته از نوع L_2 است. سپس به دلیل ضعیف بودن این نوع پایداری، قانون کنترل به نحوی اصلاح شده است که پایداری سیستم حلقه بسته از نوع مجانبی باشد. در مرجع [۲۱] نیز، موضوع پایداری سازی سیستم‌های همیلتونین با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن بررسی شده است. در فرآیند طراحی قانون کنترل، یک معادله دیفرانسیل جزئی^۱ به وجود می‌آید، که برای حل آن، شرایط جبری جدیدی ارائه شده است. همچنین، در قانون پیشنهادی این مرجع، از روش غیرفعال سازی پسخورد استفاده شده است. نویسندگان [۲۲] نیز، از روش غیرفعال سازی پسخورد برای پایداری سازی سیستم‌های همیلتونین استفاده نموده‌اند. برای این منظور، ابتدا توسط یک قانون فیدبک حالت که از حل دسته‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی بدست می‌آید، سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خروجی تعریف شده غیرفعال است. سپس با استفاده از نظریه غیرفعال بودن، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته تضمین می‌شود. مرجع [۲۳]، کنترل‌کننده‌ی تطبیقی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن را برای سیستم‌های مکانیکی در حضور عدم قطعیت ارائه داده است. به کمک ساختار تطبیقی، اصطکاک ویسکوز که متغیری نامعلوم است، تخمین زده می‌شود. مقدار خطای تخمین به عنوان یک متغیر حالت به فضای حالت سیستم اصلی اضافه می‌گردد. در نهایت بر اساس نظریه غیرفعال بودن، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته تضمین می‌شود.

بیان این نکته ضروری است که در مراجع پیش گفته، سیستم‌های رباتیک به عنوان نمونه‌ی مورد مطالعه در نظر گرفته شده‌اند.

• کنترل سیستم‌های اویلر-لاگرانژ

برای کنترل سیستم‌های مکانیکی مدل شده بر اساس معادلات لاگرانژ نیز از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. اما در میان آن‌ها، نظریه غیرفعال بودن بخاطر داشتن مزایایی که تا کنون ذکر شد، جایگاه خاص خود را دارد. به عنوان مثال، مرجع [۲۴]، کنترل بازوهای رباتیک مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن را با درنظر گرفتن قیدهایی روی ورودی گشتاور بررسی نموده است. همانطور که بیان گردید، خاصیت غیرفعال بودن به راحتی می‌تواند قیدهای موجود بر روی ورودی گشتاور سیستم را برآورده سازد. بنابراین، مقدار ورودی گشتاور از حد مجاز تعیین شده تجاوز نمی‌کند. علاوه براین، به منظور

^۱Partial Differential Equation

اثبات پایداری سیستم حلقه بسته، از روش لیاپانوف و تعریف غیرفعال بودن استفاده شده است. لازم به ذکر است که در صورت افزایش بی‌رویه دامنه سیگنال کنترلی، کارایی سیستم حلقه بسته کاهش می‌یابد و حتی ممکن است منجر به ناپایداری سیستم شود. از این‌رو، نظریه غیرفعال بودن با در نظر گرفتن خواص فیزیکی سیستم و ساختار قانون کنترل آن، از بروز این اتفاق جلوگیری به عمل می‌آورد. نویسندگان [۲۵]، روش دینامیک معکوس^۱ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن را به منظور ردگیری موقعیت مطلوب در ربات‌های دارای مفاصل انعطاف پذیر^۲ ارائه نمودند. نظریه غیرفعال بودن به پایداری مجانبی حلقه بسته و همچنین مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت‌ها کمک کرده و بخش دینامیک معکوس، محاسبات عددی در زمینه کنترل ربات را ساده‌تر می‌نماید. نویسندگان [۲۶]، موضوع کنترل بازوهای رباتیک را از دو منظر پردازش سیگنال و کنترل مبتنی بر انرژی بررسی کرده‌اند. بر اساس مطالب ارائه شده در این مرجع، بررسی و حل مسایل سینماتیک با استفاده از رویکرد مبتنی بر انرژی، قابلیت فهم بیشتر و پیچیدگی کمتری دارد. چراکه انرژی دارای مفهوم وسیعی است که می‌تواند در ساده‌سازی توصیف سیستم‌های صنعتی بسیار پیچیده، نقش مهمی را ایفا نماید. در [۲۷]، مساله ردگیری نیرو در ربات‌های دارای مفاصل انعطاف پذیر، به کمک نظریه غیرفعال بودن مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور روش کنترل امپدانس مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن پیشنهاد شده است. نویسندگان [۲۸]، ریاضیات تطبیقی مرتبه کسری مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن را برای کنترل بازوهای رباتیک ارائه کرده‌اند. ساختار کنترلی پیشنهادی، از دو کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرالی و کنترل‌کننده مرتبه کسری مبتنی بر غیرفعال بودن تشکیل شده است. مرجع [۲۹]، با اشاره به مزایای روش کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، مانند، عدم نیاز به بهره کنترلی زیاد و همچنین مقاوم بودن آن در برابر عدم قطعیت‌های سیستم و اغتشاش‌های خارجی، یک قانون کنترل مقاوم برای ردگیری موقعیت مطلوب بازوهای رباتیک ارائه کرده است. از این‌رو، ابتدا به کمک یک رویکرد مبتنی بر تکانه، عدم قطعیت‌های سیستم تخمین زده می‌شود. سپس کنترل‌کننده مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن به سیستم اعمال می‌شود. نویسندگان [۳۰]، از روش تطبیقی مستقل از رگرسور^۳ برای تخمین پارامترهای نامعلوم سیستم استفاده نموده‌اند. در این روش که مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن می‌باشد، ورودی کنترلی سیستم، گشتاور مفاصل بوده و معادلات مربوط به دینامیک خطا، با استفاده از روش اصلاحی اسلوتین و لی (تعریف یک متغیر حالت

^۱Inverse Dynamic

^۲Elastic-joint Robot

^۳Regressor-free

جدید بر اساس متغیر سرعت و خطای موقعیت مفاصل [۶]) تشکیل شده است. در نهایت پایداری دینامیک خطای حلقه بسته به کمک نظریه غیرفعال بودن به اثبات رسیده است.

با بررسی کاربرد نظریه غیرفعال بودن در مدل‌های لاگرانژ و همیلتونین می‌توان دریافت که سیستم‌های همیلتونین سازگاری بیشتری با خاصیت غیرفعال بودن و در نتیجه نظریه غیرفعال بودن دارند. به عبارت دیگر، اثبات غیرفعال بودن در سیستم‌هایی که به وسیله معادلات همیلتونین بیان می‌شوند، نسبت به سیستم‌های لاگرانژ ساده‌تر است. از این رو در زمینه کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن سیستم‌های همیلتونین، پژوهش‌های زیادی انجام شده است. اما بیان این نکته ضروری است که در فرایند طراحی کنترل کننده برای سیستم‌های همیلتونین، لازم است معادلات دیفرانسل جزئی حل شود که حجم معادلات دیفرانسیل، به تعداد معادلات سیستم اصلی وابسته است. از طرفی مدل جامع‌تر اویلر لاگرانژ به ما این امکان را می‌دهد که بتوان با کمترین پیچیدگی، سیستم‌های غیرخطی که دارای هر دو مولفه الکتریکی و مکانیکی هستند را مدل‌سازی نمود. در اغلب اوقات، سیستم‌های پیچیده غیرخطی که با معادلات لاگرانژ مدل‌سازی می‌شوند را می‌توان به صورت اتصال چند زیر سیستم ساده نیز در نظر گرفت. به عبارت دیگر، اتصال فیدبکی دو سیستم لاگرانژ، در نهایت یک سیستم لاگرانژی خواهد بود. این مفهوم در مورد خاصیت غیرفعال بودن نیز برقرار است، یعنی اتصال فیدبکی دو سیستم غیرفعال، در نهایت، یک سیستم غیرفعال است. بنابراین، استفاده همزمان از مدل‌سازی مبتنی بر معادلات لاگرانژ و خاصیت غیرفعال بودن بسیار مفید است. با توجه به جامع بودن حوزه مدل‌سازی سیستم‌های فیزیکی بر اساس معادلات لاگرانژ، استفاده از این روش مدل‌سازی برای سیستم رباتیک نیز از اهمیت زیادی برخوردار است.

با توجه به مطالعات انجام شده در حوزه کنترل بازوهای رباتیک، عمده روش‌های کنترلی ارائه شده، بر اساس کنترل گشتاور می‌باشد. ساختار قانون کنترل مبتنی بر گشتاور مفاصل، به دلیل استفاده از مدل مکانیکی ربات، دارای پیچیدگی‌های زیادی است و لذا محاسبات سنگینی را برای کنترل سیستم تحمیل می‌نماید. از این رو، با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌های مفاصل در مدل مکانیکی ربات، مساله کنترل گشتاور به کنترل ولتاژ محرکه‌ها تبدیل شده و قانون کنترل حاصل، دارای ساختار ساده‌تری می‌باشد [۳۴]–[۳۱]. در حالت دیگری از مساله کنترل ولتاژ که راهبرد کنترل ولتاژ نام دارد، تنها معادله الکتریکی موتورهای مفاصل در نظر گرفته می‌شود [۹]. در این روش، اثر معادله مکانیکی بازوی رباتیکی در جریان موتور نمایان می‌شود [۹]. با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ می‌توان به مزایایی نظیر دقت بالا در ردگیری مسیرهای مطلوب، رفتار مقاوم، کاهش پیچیدگی در مدل سیستم و همچنین سادگی در

ساختار قانون کنترل دست یافت. از دیگر مزایای این راهبرد، می‌توان به کنترل مجزای مفصل، حجم کم محاسبات کنترلی و در نتیجه قابلیت پیاده سازی عملی اشاره کرد [۳۸]–[۳۵]. برای این منظور در بخش بعدی، موضوع کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در بازوهای رباتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲-۱ کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن

با توجه به مزیت‌های یاد شده برای روش کنترل ولتاژ و همچنین نظریه غیرفعال بودن، در این بخش به مهمترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در بازوهای رباتیک پرداخته می‌شود. به عنوان مثال، مرجع [۳۹] مساله ردگیری مسیر مطلوب موقعیت مفصل یک بازوی دو رابطی را با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌های آن، به کمک نظریه غیرفعال بودن، مورد بررسی قرار داده است. در این مرجع ابتدا، معادله فضای حالت بر اساس معادلات مکانیکی بازو و معادلات الکتریکی محرکه برای یک بازوی دو رابطی در قالب فرم همراه^۱ بیان شده است. سپس، برای دستیابی به هدف ردگیری، معادلات فضای حالت بر اساس متغیرهای خطای ردگیری اصلاح شده است. در این اصلاحیه از تغییر متغیر معروف اسلوتین و لی استفاده شده که منجر به غیرفعال بودن سیستم جدید می‌شود. در نهایت، قانون کنترل پیشنهادی بر اساس نظریه غیرفعال بودن طراحی گردیده است. همچنین، با فرض نامعلوم بودن پارامترهای مدل مکانیکی ربات، این پارامترها به کمک روش تطبیقی تخمین زده شده است. لازم به ذکر است که کنترل‌کننده پیشنهادی در این مرجع، قابلیت تعمیم به بازوهای با تعداد رابط‌های بیشتر را نداشته و تنها برای ربات‌های دو رابطی مناسب است. همچنین، قانون کنترل پیشنهادی، به مدل مکانیکی ربات وابسته است. در مرجع [۴۰]، از خاصیت سیستم‌های اکیداً غیرفعال خروجی (که به طور کامل در فصل دوم توضیح داده شده است) برای کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک استفاده شده است. بنابراین، اگر سیستم اکیداً غیرفعال خروجی بوده و همچنین رؤیت پذیر حالت صفر نیز باشد (تعریف رؤیت پذیری حالت صفر نیز در فصل دوم به بیان شده است)، سیستم به ازای ورودی صفر، پایدار مجانبی است. در این مرجع نیز، از تغییر متغیر اسلوتین و لی برای تشکیل سیستم جدید بر حسب متغیرهای خطا استفاده شده است. همچنین، در قانون کنترل پیشنهادی، ورودی جدیدی به منظور غیرفعال سازی سیستم اصلی در نظر گرفته شده است. به طوری که سیستم حلقه بسته با ورودی جدید و خروجی تعریف شده از جنس متغیر خطا، اکیداً غیرفعال خروجی باشد. بنابراین، کافی است مقدار ورودی جدید برابر صفر در نظر گرفته شود تا پایداری مجانبی سیستم حلقه

^۱Companion Form

بسته تضمین گردد. لازم به ذکر است که قانون کنترل پیشنهادی در این مرجع نیز به مدل مکانیکی ربات وابسته بوده و برای تخمین پارامترهای آن از روش حداقل مربعات وزن دار استفاده شده است. ایده مرجع [۴۰]، با تغییرات بسیار اندکی در خصوص مسیرهای مطلوب و شرط‌های در نظر گرفته شده برای موقعیت مفاصل، در مرجع [۴۱] تکمیل شده است. نکته بسیار مهمی که باید در خصوص طراحی‌های انجام شده در مراجع [۴۰] و [۴۱] به آن اشاره نمود، این است که، در فرآیند طراحی، معادله الکتریکی محرکه نادیده گرفته شده و ارتباط بین گشتاور مفاصل و ولتاژ محرکه‌ها به صورت کاملاً متناسب (با یک ضریب ثابت) در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که در زمینه کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، پژوهش‌های محدودی انجام شده است. همچنین، با توجه به مطالعات انجام شده، روش راهبرد کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای کنترل بازوهای رباتیک ارائه نشده است.

از طرفی، مدل مکانیکی بازوهای رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌های آن، در قالب فرم رگولار قرار دارد. همانطور که پیش‌تر نیز بیان گردید؛ روش مود لغزشی، بهترین گزینه برای کنترل سیستم‌هایی است که در قالب فرم رگولار قرار دارند [۱۰]. در ساختار فرم رگولار، سیستم اصلی از دو بلوک تشکیل می‌شود. بلوک اول، تنها به متغیرهای حالت سیستم وابسته است. اما در بلوک دوم، ورودی‌های کنترلی و عدم قطعیت‌ها نیز وجود دارند. به عبارت دیگر، اگر عدم قطعیت‌های سیستم، در کانال ورودی قرار داشته باشند، روش مود لغزشی برای این دسته از سیستم‌ها قابل اجراست. با توجه به ساختار مدل بازوهای رباتیک در فرم رگولار، می‌توان دریافت که این سیستم دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی است. لذا، نمی‌توان از روش مود لغزشی مرسوم در کنترل آن استفاده نمود و نیازمند اصلاح است. به طور کلی، روش مود لغزشی برای کنترل سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی، قابل اجرا نیست [۳]. اصلاح مود لغزشی برای استفاده در این دسته از سیستم‌ها، موضوع برخی از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است که در بخش بعدی به آن اشاره می‌شود.

۱-۲-۱۳ اصلاح کنترل‌کننده مود لغزشی برای سیستم‌های غیرخطی دارای عدم

قطعیت‌های ناسازگار با ورودی

روش مود لغزشی، یک روش مرسوم برای کنترل سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت سازگار با ورودی است [۴۴]–[۴۲]. در این روش با انتخاب مناسب سطح لغزش، می‌توان تضمین نمود که متغیرهای حالت سیستم، در زمان محدود به سطح لغزش رسیده و پس از لغزیدن روی آن، به مبدا مختصات می‌رسند. از آنجایی که در این روش، از توابع کلید زنی استفاده می‌شود، می‌توان با انتخاب

مناسب نوع این تابع نیز از بروز پدیده لرزش^۱ جلوگیری نمود. جزئیات مربوط به روش مود لغزشی را می‌توان در مرجع [۳] مطالعه نمود. لازم به ذکر است که، روش مود لغزشی برای کنترل سیستم‌های دارای عدم قطعیت ناسازگار با ورودی، قابل اجرا نیست. همچنین، معمولاً تغییرات عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی، با گذشت زمان بسیار آهسته بوده و مقدار حالت ماندگار آن‌ها ثابت است، به عبارت دیگر $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\Delta}(t) = 0$ است. $\Delta(t)$ بیانگر عدم قطعیت ناسازگار با ورودی است [۴۵]. ارائه راه حل برای کنترل مقاوم این دسته از سیستم‌ها با استفاده از روش مود لغزشی، موضوع برخی از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است. به عنوان مثال، در [۴۶]، برای مقابله با معضل اغتشاشات خارجی که در کانال ورودی قرار ندارند، رویکرد اغتشاش تطبیقی پیشنهاد شده است. اما طراحی در حضور عدم قطعیت برای این سیستم انجام نشده است. نویسندگان [۴۷]، از ترکیب کنترل کننده تناسبی-انتگرالی و مود لغزشی برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی استفاده کرده‌اند. البته در این مرجع، طراحی مختص سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی^۲ صورت گرفته است. مرجع [۴۸]، روش دیگری برای غلبه بر عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی در سیستم‌های غیرخطی مطرح نموده است. در این مرجع، از تبدیل سیستم غیرخطی معرفی شده به فرم بیرنز-ایزیدوری^۳ استفاده شده و اثر وجود انواع اغتشاش وابسته به متغیرهای سیستم و همچنین اغتشاشات متغیر با زمان مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۴۹]، روش مود لغزشی انتگرالی در حضور اغتشاشات خارجی ناسازگار با ورودی، ارائه شده است. در این روش، از یک ترم انتگرالی مبتنی بر مدل نامی سیستم، در طراحی سطح لغزش استفاده شده است. قانون کنترل مود لغزشی طراحی شده در این مرجع، در دو مرحله صورت پذیرفته است. ابتدا، قانون کنترل پیوسته برای سیستم نامی طراحی گردیده و سپس با اضافه کردن ترم مقاوم به قانون پیشنهادی، بر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم غلبه شده است. روش مود لغزشی انتگرالی معرفی شده در [۵۰] نیز مشابه [۴۹] می‌باشد که تنها در نوع ماتریس ژاکوبین استفاده شده در مشتق سطح لغزش با یکدیگر تفاوت دارند. در مرجع [۴۹]، ماتریس ژاکوبین به متغیرهای حالت سیستم وابسته است در صورتی که در [۵۰]، طراحی بر مبنای ماتریس ژاکوبین ثابت انجام شده است. مرجع [۵۱]، از ترکیب روش‌های مود لغزشی انتگرالی و H_∞ برای غلبه بر عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی در سیستم‌های غیرخطی استفاده شده است. در این روش، رفتار عدم قطعیت توسط یک ماتریس در نظر گرفته می‌شود؛ که نه تنها مانع تقویت آن شده، بلکه تاثیر آن را نیز به حداقل می‌رساند. نویسندگان مرجع [۵۲]، روش مود لغزشی

^۱ Chattering phenomenon

^۲ Micro-electro-mechanical systems

^۳ Byrnes-Isidori

انتگرالی مبتنی بر دینامیک خروجی برای جبران اغتشاشات محو شدنی^۱ ناسازگار با ورودی که به مرور زمان به صفر میل می‌کند را طراحی کرده‌اند. مود لغزشی انتگرالی به صورت مجانبی آفت را حذف می‌کند، اما ممکن است منجر به تولید بالازدگی یا از بین رفتن کارایی کنترل بخش نامی شود [۵۳]. مرجع [۵۴] نیز، روش مود لغزشی انتگرالی را برای غلبه بر عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی مورد بررسی قرار داده است. در این مرجع فرض‌های محدود کننده‌ای روی نُرم دوم عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی در نظر گرفته است. ایده اصلی این مرجع، طراحی سطح لغزش مبتنی بر تابع لیاپونوف است که از آن برای توسعه روش کنترل مود لغزشی انتگرالی استفاده شده است.

با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه اصلاح روش مود لغزشی، برای استفاده در کنترل سیستم‌های دارای عدم قطعیت ناسازگار با ورودی، می‌توان دریافت که روش‌های مختلفی برای این منظور استفاده شده است. اما تاکنون از نظریه غیرفعال بودن برای اصلاح آن استفاده نشده است.

۱-۳ ضرورت تحقیق

در بخش‌های قبل، روش‌های مختلف کنترل بازوهای رباتیک مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به توضیحات داده شده، کنترل ولتاژ نسبت به راهبرد گشتاور دارای مزایایی نظیر، عدم وابستگی به مدل مکانیکی ربات و در نتیجه سادگی ساختار قانون کنترل است. در روش کنترل ولتاژ، علاوه بر مدل مکانیکی ربات، دینامیک محرکه‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که راهبرد کنترل ولتاژ، حالت خاصی از روش کنترل ولتاژ است که در آن، تنها معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم مفاصل ربات در نظر گرفته می‌شود. در این روش، جریان موتور، حاوی اثرات بازوی ربات است. راهبرد کنترل ولتاژ، علاوه بر مزایای ذکر شده برای روش کنترل ولتاژ، از مزیت کنترل مجزای مفاصل بازو نیز بهره‌مند است. از طرفی، نظریه غیرفعال بودن در طراحی قانون کنترل، این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان به وسیله یک قانون کنترل ساده، قیدهای روی ورودی کنترلی را برآورده ساخت. همچنین، در قانون کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، نیاز به استفاده از بهره‌های کنترلی زیاد نیست. پایداری مجانبی سیستم‌های غیرفعالی که دارای خاصیت مشاهده پذیری حالت صفر هستند نیز تضمین شده است. وجود ویژگی‌های یاد شده برای راهبرد کنترل ولتاژ و نظریه غیرفعال بودن، این ضرورت را ایجاد نمود که برای اولین بار راهبرد کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای بازوهای رباتیک، در این رساله ارائه شود.

از سوی دیگر، با توجه به اینکه مدل مکانیکی بازوی رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها، در قالب فرم رگولار قرار دارد؛ روش مود لغزشی برای کنترل این سیستم بسیار مناسب است. اما از آنجایی که مدل مذکور فاقد دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی است، روش مود لغزشی مرسوم، قابلیت اجرا برای کنترل این سیستم را ندارد. با توجه به توضیحات داده شده در خصوص راهکارهای ارائه شده برای اصلاح روش مود لغزشی، نقایصی وجود دارد که می‌توان به آن‌ها اشاره نمود. به عنوان مثال، در برخی از روش‌ها تنها اغتشاشات خارجی در نظر گرفته شده و سهم عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی و نحوه‌ی مقابله با آن‌ها، بررسی نشده است. همچنین، بسیاری از طراحی‌ها محدود به سیستم‌های خاص بوده که قابل تعمیم به کلیه سیستم‌های غیرخطی را ندارد. در بسیاری از پژوهش‌ها نیز از روش مود لغزشی انتگرالی برای اصلاح مود لغزشی استفاده شده است که می‌تواند منجر به تولید بالازدگی و یا کاهش کارایی کنترل‌کننده‌ی بخش نامی سیستم شود. علاوه بر این، در فرایند طراحی روتگرهای اغتشاش برای اصلاح روش مود لغزشی و جبران اثر اغتشاشات خارجی ناسازگار با ورودی، لازم است شرط‌های محدود کننده‌ای در نظر گرفته شود. بنابراین، با توجه به ویژگی‌های ذکر شده برای سیستم‌های غیرفعال و روش غیرفعال‌سازی، در این رساله، ایده اصلاح روش مود لغزشی به کمک نظریه غیرفعال بودن برای دسته وسیعی از سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی، برای اولین بار ارائه شده است. پس از آن، از این ایده برای کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک، به منظور ردگیری موقعیت مطلوب مفاصل نیز استفاده شده است.

۱-۴ اهداف رساله

در این بخش اهداف اصلی این رساله به طور مختصر توضیح داده می‌شود. یکی از اهداف این رساله، طراحی کنترل‌کننده‌ی مقاوم بر اساس ولتاژ محرکه‌های مفاصل ربات مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن است. در این فرآیند، چند رویکرد مختلف مورد بررسی قرار گرفته و کنترل‌کننده‌های مناسب ارائه می‌شود.

• کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک با استفاده از خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی

در این رویکرد، طراحی، مبتنی بر مدل بازوهای رباتیک ارائه می‌شود. برای این منظور، با استفاده از روش غیرفعال‌سازی، قانون کنترل به نحوی طراحی می‌گردد که سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خروجی جریان موتور، اکیداً غیرفعال خروجی باشد. به این ترتیب، از آنجایی که سیستم مورد نظر مشاهده پذیر حالت صفر نیز هست، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته به ازای مساوی صفر قرار دادن ورودی جدید، تضمین می‌شود. قانون کنترل طراحی شده در این روش، حاوی جریان مطلوب موتور و

مشتق آن است. از آنجایی که جریان مطلوب موتور مبتنی بر مدل مکانیکی ربات بوده، بنابراین، محاسبه مشتق آن، نیازمند انجام محاسبات زیاد است. با توجه به اینکه ثابت زمانی الکتریکی موتور خیلی کوچکتر از ثابت زمانی مکانیکی بازوی ربات است، در عمل، می‌توان از ثابت زمانی موتور صرف نظر نمود. بنابراین، ترم $L\dot{I}_d$ در قانون کنترل ظاهر نخواهد شد و لذا محاسبات قانون کنترل ساده‌تر خواهد شد. لازم به ذکر است که نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، نشان می‌دهند که حذف ترم $L\dot{I}_d$ ، تاثیر چندانی در نتایج نداشته و خروجی‌های مربوط به ردگیری موقعیت مطلوب مفاصل به ازای هر دو قانون کنترل طراحی شده مناسب می‌باشد.

• کنترل بازوهای رباتیک با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ و خاصیت اکیداً غیرفعال

خروجی

در این رویکرد، تنها از مدل الکتریکی موتور برای دستیابی به هدف ردگیری موقعیت مطلوب مفاصل ربات، استفاده می‌شود و با توجه به نتایج رویکرد قبل، از ترم $L\dot{I}_d$ صرف نظر شده است. بنابراین، قانون کنترل با استفاده از روش غیرفعال‌سازی، به نحوی طراحی می‌گردد که سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خروجی خطای ردگیری موقعیت مفاصل، اکیداً غیرفعال خروجی باشد. لذا با توجه به اینکه سیستم مورد نظر، مشاهده پذیر حالت صفر نیز هست، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته به ازای مساوی صفر قرار دادن ورودی جدید، تضمین می‌شود. در این رویکرد، طراحی بر مبنای دو حالت مبتنی بر مدل الکتریکی موتور و تخمین پارامترهای موتور انجام می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این رویکرد نیز مناسب می‌باشد.

• کنترل بازوهای رباتیک با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال

بودن

در این رویکرد نیز تنها از مدل الکتریکی موتور برای دستیابی به هدف ردگیری موقعیت مفاصل بازو استفاده می‌شود. بر خلاف رویکرد قبل، در این قسمت، ترم‌های جریان موتور و مشتق آن به عنوان عدم قطعیت در نظر گرفته شده و به کمک روش تطبیقی مستقل از ماتریس رگرسیون تخمین زده می‌شود. بر خلاف طراحی‌های انجام شده در رویکردهای قبل، قانون کنترل طراحی شده، به نحوی است که سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خروجی خطای ردگیری موقعیت مفاصل، غیرفعال است. بنابراین، ورودی جدید بر اساس قضیه کنترل مبتنی بر غیرفعال بودن طراحی می‌شود. همچنین، از آنجایی که مدل اصلی ربات با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌های آن، در فضای q ، $\dot{q}$ و $\ddot{q}$ ، یک مدل

مرتبه سوم است؛ لذا مدل‌های تقریبی برای دینامیک الکتریکی موتور با مرتبه‌های یک و دو بررسی شده‌اند.

• اصلاح روش مود لغزشی به کمک نظریه غیرفعال بودن

یکی دیگر از هدف‌های این رساله، اصلاح روش مود لغزشی به کمک نظریه غیرفعال بودن، برای استفاده در سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت ناسازگار با ورودی است. مدل سیستم رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌های مفاصل، در قالب فرم رگولار قرار دارد که شامل عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی است. به عبارت دیگر، دارای عدم قطعیت‌هایی است که در کانال ورودی قرار ندارند. برای این منظور، ابتدا طراحی مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، برای حالت کلی از سیستم‌های غیرخطی در قالب فرم رگولار انجام می‌شود و سپس، از آن برای کنترل ردگیری موقعیت مفاصل بازوهای رباتیک استفاده می‌شود. فرم رگولار از دو بلوک تشکیل می‌شود. دینامیک متغیرهای حالت بلوک اول، تنها به متغیرهای حالت سیستم وابسته است و ورودی سیستم در این بلوک ظاهر نمی‌شود. در حالی که در بلوک دوم، علاوه بر متغیرهای حالت، ورودی سیستم نیز در دینامیک آن ظاهر می‌گردد. در روش پیشنهادی، سطح لغزش با استفاده از نظریه غیرفعال بودن به نحوی طراحی می‌شود که دینامیک بلوک اول در حضور عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی، پایدار مجانبی باشد. سپس با استفاده از دینامیک سطح لغزش، قانون کنترل گسسته به گونه‌ای پیشنهاد می‌شود که از بروز پدیده لرزش جلوگیری به عمل آید. همچنین، با استفاده از این قانون پیشنهادی، دینامیک سطح لغزش پایدار مجانبی خواهد بود، به این معنا که متغیرهای حالت سیستم، از هر شرط اولیه‌ای که شروع به حرکت نمایند، در زمان محدود، به روی سطح لغزش رسیده و تا رسیدن به مبدا مختصات، روی سطح باقی می‌مانند.

• سر فصل‌های این رساله به صورت زیر ارائه شده است:

در فصل دوم، مقدمات، تعاریف، لم‌ها و قضایای مربوط به سیستم‌های غیرفعال و همچنین، کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن به طور کامل بیان شده است. فصل سوم به مرور روش‌های مرسوم کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، اختصاص داده شده است. در فصل چهارم، ایده اصلی این رساله در خصوص کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای بازوهای رباتیک ارائه شده است. فصل پنجم، به ارائه روش مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن اختصاص داده شده است. فصل ششم نیز جمع بندی نهایی این رساله را بیان می‌کند.

فصل دوم: نظریه غیرفعال بودن

۱-۲ مقدمه

قبل از ورود به مباحث اصلی طراحی کنترل کننده مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای سیستم-های رباتیک، ابتدا لازم است در خصوص ویژگی‌های سیستم‌های غیرفعال و روابط ریاضی حاکم بر آن توضیحاتی ارائه شود. برای این منظور، در بخش اول این فصل، تعریف سیستم‌های غیرفعال بر اساس تابع ذخیره^۱ ارائه می‌شود. بعد از آن، لم‌های مربوط به پایداری حلقه باز سیستم‌های غیرفعال معرفی می‌شوند. یکی از کاربردی‌ترین لم‌های مرتبط با سیستم‌های غیرفعال، لم کالمن-یاکوبوویچ-پوپو^۲ است که در این فصل به آن اشاره می‌گردد. بر اساس این لم، شرایطی برای ورودی و خروجی سیستم معرفی می‌شود که اگر سیستم حلقه باز این شرایط را داشته باشد، غیرفعال است. همچنین، قضیه‌ای معرفی می‌شود که بر اساس آن، عکس لم کالمن-یاکوبوویچ-پوپو نیز برقرار است. به عبارت دیگر، اگر سیستمی غیرفعال باشد، آنگاه شرایط این لم برای آن سیستم صادق است. در ادامه، قضیه کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن بیان می‌گردد. این قضیه، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته را توسط یک قانون کنترل ساده تضمین می‌نماید. با توجه به مزایای طراحی کنترل کننده بر اساس نظریه غیرفعال بودن، موضوع تبدیل سیستم‌های فعال به غیرفعال، برای استفاده از این نظریه، نیز مطرح شده است. بنابراین، بخش دیگری از این فصل به بیان روش‌های غیرفعال‌سازی^۳ سیستم‌های غیرخطی فعال اختصاص داده شده است. در نهایت، مزایا و کاربردهای استفاده از نظریه غیرفعال بودن در انواع سیستم‌های فیزیکی به صورت موردی بیان می‌شود.

۲-۲ سیستم‌های غیرفعال

برای تعریف سیستم‌های غیرفعال، ابتدا فرم کلی سیستم غیرخطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x, u) \end{cases} \quad (1-2)$$

در این سیستم، $x \in R^n$ بردار حالت سیستم است. همچنین، تابع $f: R^n \times R^m \rightarrow R^n$ به صورت محلی لپ شیتز و تابع $h: R^n \times R^m \rightarrow R^m$ پیوسته است. تابع f زمانی به صورت محلی لپ شیتز است که ثابت مثبت γ وجود داشته باشد، به طوری که نامساوی $\|f(x_1) - f(x_2)\| \leq \gamma \|x_1 - x_2\|$ ، به ازای تمامی x_1 و x_2 در همسایگی شرط اولیه $x(0) = x_0$ برقرار باشد. بنابراین با استفاده از قضیه وجود و

^۱Storage function

^۲Kalman-Yaubovich-popov

^۳Passivation technique

یکتایی پاسخ، معادله دیفرانسیل $\dot{x} = f(x, u)$ دارای پاسخ یکتا است [۳]. $u \in R^m$ نشان دهنده‌ی بردار ورودی و $y \in R^m$ بیانگر بردار خروجی سیستم می‌باشند. در سیستم (۱-۲)، نقطه‌ی تعادل مبدا مختصات است. به عبارت دیگر، $f(0,0) = 0$ می‌باشد.

تعریف ۱-۲ [۳]: تابع اسکالر $b(x)$ و تابع برداری $a(x) \in R^n$ مفروض‌اند. تابع اسکالر جدید $L_{a(x)}b(x)$ ، که به آن مشتق لی نسبت به a گفته می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$L_{a(x)}b(x) = \frac{\partial b(x)}{\partial x} a(x) \quad (2-2)$$

تعریف ۲-۲ [۳]: اگر یک تابع اسکالر پیوسته، مشتق پذیر و نیمه معین مثبت $S(x): R^n \rightarrow R$ ، یعنی $S(0) = 0$ و $S(x) \geq 0$ وجود داشته باشد، بطوریکه رابطه‌ی زیر برآورده شود، آنگاه سیستم غیرخطی (۱-۲) غیرفعال است.

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S(x)}{\partial x} f(x, u) = L_{f(x, u)}S(x) \leq \langle y, u \rangle, \quad \forall (x, u) \in R^n \times R^m \quad (3-2)$$

در این رابطه $\langle y, u \rangle = y^T u = \sum_{i=1}^m y_i u_i$ نشان دهنده ضرب داخلی، بردارهای ورودی و خروجی است. لازم به ذکر است که در این رساله $\frac{\partial S(x)}{\partial x}$ ، نشان دهنده‌ی یک بردار سطری می‌باشد. تابع S به عنوان تابع ذخیره یاد می‌شود.

بر اساس تعریف ۲-۲، سیستم (۱-۲) [۳]:

- بی اتلاف^۱ است، اگر تساوی $\dot{S}(x) = y^T u$ برقرار باشد.
- غیرفعال پیشخور ورودی^۲ است، اگر به ازای برخی از توابع η رابطه‌ی $\dot{S}(x) \leq y^T u - u^T \eta(u)$ برقرار باشد.
- اکیدا غیرفعال ورودی^۳ است، اگر به ازای $u \neq 0$ و $u^T \eta(u) > 0$ ، رابطه‌ی $\dot{S}(x) \leq y^T u - u^T \eta(u)$ برقرار باشد.
- غیرفعال پسخور خروجی^۴ است، اگر به ازای برخی از توابع ρ رابطه‌ی $\dot{S}(x) \leq y^T u - y^T \rho(y)$ برقرار باشد.

^۱lossless

^۲Input-feedforward passive (IFP)

^۳Input strictly passive

^۴Output-feedback passive (OFP)

• اکیدا غیرفعال خروجی^۱ است، اگر به ازای $y \neq 0$ و $y^T \rho(y) > 0$ ، رابطه‌ی

$$\dot{S}(x) \leq y^T u - y^T \rho(y)$$

• اکیدا غیرفعال^۲ است، اگر به ازای برخی از توابع معین مثبت ψ ، رابطه‌ی

$$\dot{S}(x) \leq y^T u - \psi(x)$$

تعریف ۳-۲ [۳]: سیستم (۱-۲) را رؤیت پذیر حالت صفر^۳ گویند، اگر $x \equiv 0$ ، تنها پاسخ معادله

$$\dot{x} = f(x, 0)$$

باشد، به طوریکه در مجموعه زیر صدق کند.

$$D = \{x \in R^n \mid h(x, 0) = 0\}. \quad (۴-۲)$$

لم ۱-۲ [۳]: اگر سیستم (۱-۲)، با یک تابع ذخیره معین مثبت $S(x) : R^n \rightarrow R$ غیرفعال باشد،

در این صورت مبدا سیستم $\dot{x} = f(x, 0)$ پایدار لیاپانوفی است.

لم ۲-۲ [۳]: سیستم غیرخطی (۱-۲) را در نظر بگیرید. مبدا سیستم $\dot{x} = f(x, 0)$ پایدار

مجانبی است، اگر یکی از دو شرط زیر برقرار باشد:

- سیستم (۱-۲)، با یک تابع ذخیره معین مثبت، اکیدا غیرفعال باشد.
- سیستم (۱-۲)، با یک تابع ذخیره معین مثبت، اکیدا غیرفعال خروجی بوده و رؤیت پذیر حالت صفر نیز باشد.

لازم به ذکر است که اگر تابع ذخیره معرفی شده در لم ۲-۲، شعاعی نامحدود^۴ نیز باشد، آنگاه پایداری از نوع مجانبی کلی^۵ خواهد بود.

تعاریف مربوط به غیرفعال بودن سیستم‌های غیرخطی بیان شد. در ادامه خاصیت غیرفعال

بودن برای سیستم غیرخطی زیر که حالت خاصی از سیستم (۱-۲) است، معرفی می‌شود.

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (۵-۲)$$

در این سیستم تابع ماتریسی غیرخطی $g : R^n \rightarrow R^m$ ، تابعی پیوسته است. همچنین فرض می‌شود که

مبدا مختصات، نقطه‌ی تعادل این سیستم است؛ به عبارت دیگر، $f(0) = 0$ و $u = 0$.

^۱Output strictly passive

^۲Strictly passive

^۳Zero-State Observable

^۴Radially Unbounded

^۵Global Asymptotic Stability

لم ۳-۲ (لم KYP) [۳]: سیستم غیرخطی (۵-۲) با ورودی u و خروجی y غیرفعال است، اگر یک تابع اسکالر پیوسته، مشتق پذیر و نیمه معین مثبت $S(x) : R^n \rightarrow R$ ، $S(0) = 0$ وجود داشته باشد، بطوریکه روابط زیر برقرار باشد.

$$L_{f(x)} S(x) \leq 0 \quad (۶-۲)$$

$$h^T(x) = \frac{\partial S(x)}{\partial x} g(x) \quad (۷-۲)$$

اگر نامساوی (۶-۲)، به صورت $L_{f(x)} S(x) < 0$ ، و تابع ذخیره $S(x)$ معین مثبت باشد، آنگاه سیستم (۵-۲)، به ازای $x \neq 0$ ، اکیدا غیرفعال خواهد بود.

قضیه ۱-۲ [۳]: اگر سیستم غیرخطی (۵-۲)، شرایط لم ۳-۲ را برآورده سازد، آنگاه این سیستم با تابع ذخیره نیمه معین مثبت $S(x)$ غیرفعال است. بالعکس، اگر سیستم غیرخطی (۵-۲)، با یک تابع ذخیره پیوسته، مشتق پذیر و نیمه معین مثبت $S(x)$ غیرفعال باشد، آنگاه شرایط لم ۳-۲، برقرار خواهد شد.

ویژگی ۱-۲ [۳]: اگر شرایط (۶-۲) و (۷-۲) با وجود یک تابع معین مثبت $S(x)$ برقرار باشد، آنگاه با توجه به لم ۱-۲، مبدا سیستم (۵-۲)، به ازای ورودی صفر (یعنی $\dot{x} = f(x)$) پایدار لیاپانوفی است.

لم ۷-۲ [۳]: اگر شرایط قوی‌تری برای لم ۳-۲، به صورت زیر، در نظر گرفته شود، آنگاه، سیستم غیرخطی (۵-۲)، با تابع ذخیره نیمه معین مثبت $S(x)$ و تابع $\rho(y) = ky$ مطابق آنچه که قبلاً در خصوص تعریف اکیدا غیرفعال خروجی بیان شد، اکیدا غیرفعال خروجی خواهد بود.

$$L_{f(x)} S(x) \leq -k h^T(x) h(x), \quad k > 0 \quad (۸-۲)$$

$$h^T(x) = \frac{\partial S(x)}{\partial x} g(x) \quad (۹-۲)$$

ویژگی ۲-۲ [۳]: اگر روابط (۸-۲) و (۹-۲)، به ازای یک تابع معین مثبت $S(x)$ برقرار باشند و همچنین بنا به تعریف ۳-۲، سیستم (۵-۲)، دارای خاصیت رؤیت پذیری حالت صفر نیز باشد، آنگاه با توجه به شرایط بیان شده در لم ۲-۲، مبدا برای سیستم (۵-۲)؛ به ازای ورودی صفر یا $\dot{x} = f(x)$ پایدار مجانبی است. همچنین اگر تابع $S(x)$ ، شعاعی نامحدود باشد، آنگاه پایداری مبدا سیستم $\dot{x} = f(x)$ از نوع مجانبی کلی خواهد بود.

ویژگی ۳-۲ [۳]: فرض کنید که طراح در انتخاب خروجی سیستم (۵-۲)، آزاد است (یعنی فقط دینامیک $\dot{x} = f(x) + g(x)u$ وجود داشته باشد)، همچنین، تابع معین مثبت $S(x)$ یافت شود، به طوریکه، شرط (۶-۲) را برآورده سازد؛ آنگاه، با انتخاب خروجی مجازی $y_v = \left(\frac{\partial S(x)}{\partial x} g(x) \right)^T$ ، سیستم زیر، با ورودی u و خروجی y_v و تابع ذخیره‌ی $S(x)$ ، غیرفعال خواهد بود.

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y_v = \left(\frac{\partial S(x)}{\partial x} g(x) \right)^T \end{cases} \quad (۱۰-۲)$$

در واقع ویژگی فوق، نتیجه لم ۳-۲ است.

تعریف ۴-۲ [۳]: منظور از دینامیک صفر در سیستم‌های غیرخطی همان دینامیک داخلی سیستم است، اگر خروجی آن به ازای ورودی بخصوصی در صفر نگه داشته شود.

با توجه به این تعریف، می‌توان خاصیت مینیمم فاز بودن را برای سیستم‌های غیرخطی نیز معرفی کرد. سیستم غیرخطی که دینامیک صفر آن، پایدار مجانبی است را مینیمم فاز گویند [۳].

تعریف ۵-۲ [۳]: درجه نسبی سیستم غیرخطی (۵-۲)، z است، اگر روابط زیر برقرار باشد.

$$L_{g(x)} h(x) = \dots = L_{g(x)} L_{f(x)}^{j-2} h(x) = 0, \quad L_{g(x)} L_{f(x)}^{j-1} h(x) \neq 0 \quad (۱۱-۲)$$

به عبارت دیگر، ورودی سیستم، در z امین مشتق خروجی ظاهر می‌شود.

۳-۲ کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن

همانطور که در فصل گذشته نیز بیان گردید، کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در دسته‌ی روش‌های وابسته به انرژی قرار دارد. روش‌هایی که بر مبنای انرژی هستند، معمولاً عملکرد بهتری دارند؛ چرا که در این روش‌ها، طراحی کنترل‌کننده با استفاده از فیزیک مساله صورت می‌گیرد. لذا از حذف ترم‌های غیرخطی مفید، که معمولاً در روش‌های کنترلی مبتنی بر خطی سازی پس‌خورده رخ می‌دهد، جلوگیری می‌شود [۳]. به عنوان مثال، می‌توان به سیستم‌های مکانیکی که در قالب معادلات اوپلر-لاگرانژ یا همیلتونین بیان می‌شوند، اشاره نمود. در اینگونه از سیستم‌ها، ترم‌های غیرخطی وجود دارد که نباید توسط کنترل‌کننده حذف شوند [۵۵]، [۴].

در ادامه قضیه کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن بیان می‌شود. برای این منظور سیستم غیرخطی زیر را در نظر بگیرید.

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (12-2)$$

توجه شود که تفاوت این سیستم با سیستم غیرخطی (۱-۲)، در معادله خروجی آن‌ها است.

قضیه ۲-۲ [۳]: اگر سیستم غیرخطی (۱۲-۲)، رؤیت پذیر حالت صفر بوده و با یک تابع ذخیره معین مثبت $R^n \rightarrow R$: $S(x)$ غیرفعال باشد، آنگاه قانون کنترل زیر، پایداری مجانبی نقطه تعادل صفر سیستم حلقه بسته را تضمین می‌کند.

$$u = -\phi(y) \quad (13-2)$$

که در این رابطه $\phi(\cdot)$ تابعی لیپ شیتز می‌باشد که $\phi(0) = 0$ و به ازای $y \neq 0$ ، $y^T \phi(y) > 0$ است. (در ادامه این رساله، منظور از تابع $\phi(\cdot)$ ، تابعی با ویژگی‌های یاد شده است.)

لازم به ذکر است، اگر تابع ذخیره‌ی $S(x)$ شعاعی نامحدود نیز باشد، آنگاه پایداری از نوع مجانبی کلی خواهد بود.

۴-۲ غیرفعال سازی پس‌خورد^۱

در بخش‌های قبل ویژگی‌های سیستم‌های غیرفعال بیان شد. در این بخش به بیان شرایطی پرداخته می‌شود که بتوان یک سیستم فعال را، به یک سیستم غیرفعال تبدیل کرد و سپس با استفاده از قضیه ۲-۲ آن را کنترل نمود.

روش غیرفعال سازی پس‌خورد به وسیله‌ی یک قانون پس‌خورد حالت استاتیکی^۲ بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۱ مطرح شد و شرایط لازم برای تبدیل یک سیستم فعال به یک سیستم غیرفعال ارائه گردید [۵۶]، [۵]. بر این اساس، قانون کنترل $u = \Gamma(x) + B(x)w$ (که w بردار ورودی مجازی سیستم جدید است و توابع $\Gamma(\cdot)$ و $B(\cdot)$ هموار هستند، به عبارت دیگر، مشتق آن‌ها پیوسته و تا مرتبه مورد نیاز در دسترس می‌باشد)، قادر است سیستم‌های غیرخطی فعالی که دارای درجه نسبی یک و دینامیک صفر پایدار هستند را به یک سیستم غیرفعال تبدیل نماید.

۴-۲-۱ غیرفعال سازی پس‌خورد با استفاده از پس‌خورد حالت

لم ۲-۸ [۳]: سیستم غیرخطی (۵-۲) را در نظر بگیرید. فرض کنید که این سیستم غیرفعال نباشد. همچنین فرض کنید که درجه نسبی این سیستم یک بوده و دینامیک صفر آن پایدار است. آنگاه،

^۱Feedback passivation

^۲Static state feedback law

یک قانون پسخورد حالت استاتیکی به فرم زیر وجود دارد، بطوریکه، سیستم جدید با ورودی جدید ϖ و خروجی y خود، غیرفعال است.

$$u = \Gamma(x) + B(x)\varpi \quad (14-2)$$

لازم به ذکر است که در رابطه‌ی فوق، شرط هموار بودن توابع $\Gamma(\cdot)$ و $B(\cdot)$ رعایت شده است. با اعمال قانون پیشنهادی (۱۴-۲) به سیستم غیرخطی (۵-۲)، معادله دینامیکی سیستم حلقه بسته به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)\Gamma(x) + g(x)B(x)\varpi \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (15-2)$$

با در نظر گرفتن تابع معین مثبت $S: R^n \rightarrow R$ ، به عنوان تابع ذخیره، به طوری که نامساوی زیر (۱۶-۲) برآورده شود، سیستم جدید (۱۵-۲)، غیرفعال است.

$$\dot{S}(x) \leq \langle y, \varpi \rangle \quad (16-2)$$

همچنین در صورت رؤیت پذیر حالت صفر بودن این سیستم، ورودی کنترلی جدید $\varpi = -\phi(y)$ ، با استفاده از قضیه ۲-۲، طراحی می‌شود. در نهایت قانون کنترل $u = \Gamma(x) - B(x)\phi(y)$ ، پایداری مجانبی مبدا سیستم (۵-۲) را تضمین می‌کند.

۲-۴-۲ غیرفعال سازی پسخورد با استفاده از پسخورد خروجی

به منظور غیرفعال سازی پسخورد، می‌توان بجای قانون پسخورد حالت استاتیکی از یک قانون پسخورد خروجی استاتیکی^۱ نیز استفاده کرد. اما شرایط لازم برای اینکه بتوان یک سیستم فعال را، تحت یک پسخورد خروجی استاتیکی، به یک سیستم غیرفعال تبدیل کرد، با شرایط لازم برای تبدیل تحت پسخورد حالت استاتیکی متفاوت است که این شرایط، در لم زیر بیان می‌شوند.

لم ۲-۹ [۳]: سیستم غیرخطی (۵-۲) را در نظر بگیرید. فرض کنید که این سیستم غیرفعال نباشد. همچنین، درجه نسبی این سیستم یک و دینامیک صفر آن، پایدار در نظر گرفته شده است. اگر ژاکوبین سیستم خطی سازی شده حول نقطه تعادل، مینیمم فاز باشد؛ آنگاه، یک قانون پسخورد خروجی استاتیکی به فرم زیر وجود دارد، بطوریکه، سیستم جدید زیر با ورودی مجازی $\hat{v}$ و خروجی y ، غیرفعال پسخورد خروجی است.

$$u = -\rho(h(x)) + \hat{v} \quad (17-2)$$

^۱Static output feedback

در رابطه‌ی فوق، $\rho(\cdot) \in R^m$ یک تابع برداری با المان‌های معین مثبت است. با اعمال قانون (۲-۱۷)، سیستم حلقه بسته به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) - g(x)\rho(h(x)) + g(x)\hat{v} \\ y &= h(x)\end{aligned}\quad (2-18)$$

با در نظر گرفتن یک تابع نیمه معین مثبت $S: R^n \rightarrow R$ به عنوان تابع ذخیره، بطوریکه رابطه‌ی (۲-۱۹) برقرار شود، سیستم جدید (۲-۱۸)، غیرفعال پس‌خورد خروجی است و در صورت رؤیت پذیر حالت صفر بودن این سیستم، ورودی کنترلی جدید $\hat{v} = -\phi(h(x))$ با استفاده از قضیه ۲-۲، طراحی می‌شود. در نهایت قانون کنترل $u = -\rho(h(x)) + \phi(h(x))$ ، پایداری مجانبی مبدا سیستم (۲-۵) را تضمین می‌کند.

$$\dot{S}(x) \leq \langle y, \hat{v} \rangle - \langle y, \rho(y) \rangle \quad (2-19)$$

در زمینه غیرفعال سازی پس‌خورد کارهای بنیادین و ارزشمندی انجام شده است که برای مطالعه بیشتر می‌توان به [۵۹]–[۵۷] مراجعه نمود.

ویژگی ۲-۴: همانطور که در لم‌های ۲-۸ و ۲-۹ نیز بیان شد، برای استفاده از روش غیرفعال سازی پس‌خورد دو شرط درجه نسبی و پایداری دینامیک صفر سیستم لازم است. اما از آنجایی که ممکن است این شروط همیشه برقرار نبوده و شروطی محدود کننده باشند، لذا مرجع [۶۰] با استفاده از روش پس‌گام^۱ و رو به جلو^۲ الزام وجود این شروط را برطرف نموده است.

۲-۵ مزایا و کاربردهای نظریه غیرفعال بودن

به طور کلی کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در بسیاری از مسائل مهندسی کاربرد دارد. به عنوان مثال می‌توان به کاربردهایی نظیر، کنترل سیستم‌های الکترومغناطیسی (مانند موتورها، سیستم‌های تعلیق مغناطیسی و غیره)، سیستم‌های مکانیکی (مانند سیستم‌های پاندولی^۳، ربات‌های متحرک و غیره)، سیستم‌های حمل و نقل (مانند وسایل زیر آبی^۴، فضاپیماها و غیره)، سیستم‌های الکتریکی (مانند سیستم‌های قدرت، مبدل‌های توان و غیره) و موارد بسیار دیگر، اشاره کرد [۶۷]–[۶۱]. برخی مزایا و ویژگی‌های مهم طراحی کنترل کننده به کمک نظریه غیرفعال بودن [۳]:

^۱Back stepping

^۲Forwarding

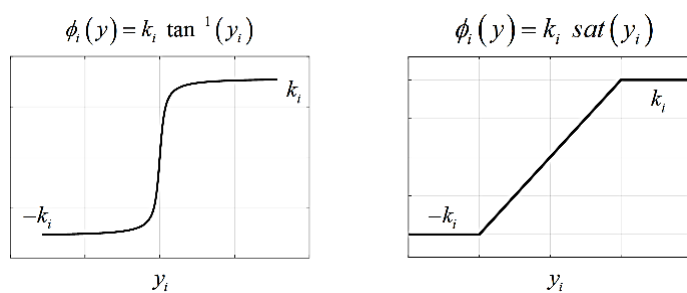
^۳Pendular systems

^۴Underwater vehicles

۱. با توجه به قانون کنترل معرفی شده در قضیه ۲-۲، از آنجایی که قانون کنترل (۲-۱۳) تابعی از خروجی سیستم است، نیازی به طراحی ریتگر حالت و تخمین متغیرهای حالت سیستم نیست.

۲. فرض کنید که برای دینامیک غیرخطی $\dot{x} = f(x) + g(x)u$ ، خروجی مشخصی تعریف نشده باشد. آنگاه اگر دینامیک حلقه باز آن پایدار لیپانوفی باشد، می‌توان با استفاده از شرایط تعریف شده در لم ۲-۳ (لم KYP)، خروجی سیستم را به صورت $y_v = H(x)$ (که $H(x) = \left(\frac{\partial S(x)}{\partial x} g(x) \right)^T$) تعریف کرد؛ بطوریکه سیستم جدید، با ورودی u و خروجی y_v ، غیرفعال باشد. سپس مطابق قضیه ۲-۲، قانون کنترل $u = -\phi(H(x))$ پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته تضمین می‌گردد.

۳. در انتخاب تابع $\phi(\cdot)$ ، در قانون کنترل (۲-۱۳)، تنوع زیادی وجود دارد. لذا در مسایل عملی، می‌توان این تابع را به گونه‌ای انتخاب کرد که بسیاری از قیود حاکم بر روی مولفه‌های ورودی سیستم برآورده شود. به عنوان مثال، اگر به ازای $1 \leq i \leq m$ تعداد ورودی‌های سیستم، قیود $|u_i| \leq k_i$ (که k_i یک عدد ثابت مثبت و بیانگر حد بالای ورودی i ام است) روی مولفه‌های ورودی وجود داشته باشد، آنگاه با انتخاب تابع $\phi(\cdot) = [\phi_i]_{m \times 1}$ به صورت $\phi_i(y) = k_i \text{sat}(y_i)$ یا $\phi_i(y) = \frac{2k_i}{\pi} \tan^{-1}(y_i)$ ، این قیود برآورده می‌شود. در شکل (۲-۱) دو نمونه تابع $\phi(\cdot)$ معرفی شده، نشان داده شده است. همانطور که می‌دانید، در عمل سیگنال ورودی محرکه‌ها باید دارای دامنه‌ی محدود و در یک باند مشخص باشد. این درحالی است که برآورده کردن ملاحظات عملی نظیر طراحی قانون کنترل با توجه به قیود دامنه‌ی سیگنال کنترلی، با استفاده از روش‌های دیگر مانند مد لغزشی، پسگام و سایر روش‌ها کار دشواری است و این روش‌ها در حالت عادی در روند طراحی کنترل‌کننده، چنین قیودی را مد نظر قرار نمی‌دهند و لذا در نظر گرفتن این قیده‌ها منجر به ایجاد پیچیدگی زیاد در طراحی کنترل‌کننده‌ی غیرخطی می‌شود. همچنین می‌توان تابع $\phi(\cdot)$ را به نحوی انتخاب کرد که ترم‌های غیرخطی مفید در سیستم‌های غیرخطی، حذف نشوند.



شکل (۲-۱): مثال‌هایی از درجات آزادی موجود برای انتخاب تابع ϕ

۴. در بسیاری از موارد خاصیت غیرفعال بودن این امکان را می‌دهد که با استفاده از یک قانون کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی ساده، بتوان پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته را تضمین نمود.

فصل سوم: کنترل مرسوم بازوهای رباتیک مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن

۳-۱ مقدمه

اکثر روش‌های کنترل بازوهای رباتیک مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، بر اساس کنترل گشتاور می‌باشد. بنابراین، ورودی کنترلی سیستم، گشتاور مفاصل بازوها است. در این فصل، روش‌های مرسوم طراحی قانون کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای بازوهای رباتیک معرفی می‌شود. برای این منظور، ابتدا مدل مکانیکی بازو تعریف شده و ویژگی‌های مهم آن بیان می‌گردد. سپس مساله طراحی کنترل‌کننده برای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای مسیرهای مطلوب ثابت و متغیر با زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا، در هر دوی این حالت‌ها فرض می‌شود که مدل سیستم معلوم است و طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر مدل ارائه می‌شود. سپس از روش تطبیقی برای تخمین بخش‌های نامعلوم سیستم استفاده می‌شود. قوانین کنترل گشتاور معرفی شده در این فصل، کاملاً به مدل مکانیکی ربات وابسته بوده و از این حیث، دارای ساختاری پیچیده هستند.

۳-۲ کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیر فعال بودن [۶۸]

مدل دینامیکی یک بازوی ربات دارای n -رابط به صورت زیر قابل بیان است:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (۱-۳)$$

که در این رابطه $q \in R^n$ ، $\dot{q} \in R^n$ و $\ddot{q} \in R^n$ به ترتیب موقعیت، سرعت و شتاب مفاصل هستند و $\tau \in R^n$ بردار گشتاور ورودی سیستم است. ماتریس $M(q) \in R^{n \times n}$ ماتریس اینرسی بازو، $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ ماتریس کریولیس^۱ و $G(q) \in R^n$ بردار گشتاورهای گرانشی است.

ویژگی ۳-۱: ماتریس $M(q) \in R^{n \times n}$ یک ماتریس معین مثبت و ماتریس $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ یک ماتریس شبه متقارن^۲ است.

هدف، طراحی ورودی گشتاور سیستم به نحوی است که موقعیت q ، مسیر مطلوب q_d را دنبال کند. بنابراین، بردار خطای موقعیت به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$e_q = q - q_d \quad (۲-۳)$$

^۱Coriolis matrix

^۲Skew-symmetric

۱-۲-۳ ردگیری مسیر ثابت

در این حالت موقعیت مطلوب، برداری از نقاط ثابت است، لذا $q_d = 0$ و $\dot{q}_d = 0$ خواهد بود. قانون کنترل زیر، یک کنترل کننده مرسوم گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن است، که در آن عناصر ماتریس قطری K_p ، بهره سیستم بوده و مثبت هستند.

$$\tau = G(q) - K_p e_q + u \quad (3-3)$$

در کنترل کننده ی (۳-۳)، u برای غیرفعال سازی سیستم حلقه بسته به کار گرفته شده است و نقش ورودی جدید سیستم را ایفا می کند. از جایگذاری قانون کنترل پیشنهادی فوق، در سیستم (۱-۳)، سیستم حلقه بسته به صورت زیر قابل بازنویسی است.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + K_p e_q = u \quad (4-3)$$

برای اثبات غیرفعال بودن سیستم حلقه بسته، باید یک تابع ذخیره مناسب تعریف شود. از اینرو، تابع ذخیره S زیر در نظر گرفته می شود.

$$S = \frac{1}{2}[\dot{q}^T M(q)\dot{q}] + \frac{1}{2}[e_q^T K_p e_q] \quad (5-3)$$

مشتق زمانی این تابع ذخیره عبارت است از:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \frac{1}{2}[\dot{q}^T \dot{M}(q)\dot{q}] + \dot{q}^T M(q)\ddot{q} + e_q^T K_p \dot{e}_q \\ &= \frac{1}{2}[\dot{q}^T \dot{M}(q)\dot{q}] + \dot{q}^T [-C(q, \dot{q})\dot{q} - K_p e_q + u] + e_q^T K_p \dot{q} \\ &= \frac{1}{2}\dot{q}^T [\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})]\dot{q} + \dot{q}^T u. \end{aligned} \quad (6-3)$$

با توجه به ویژگی ۱-۳، $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q}) = 0$ است. بنابراین، $\dot{S} = \dot{q}^T u = \langle \dot{q}, u \rangle$ می باشد. لذا، مطابق تعریف ۲-۲، سیستم (۴-۳)، بین ورودی u و خروجی $\dot{q}$ غیرفعال است. همچنین، با فرض صفر بودن خروجی سیستم (۴-۳)، یعنی $\dot{q} \equiv 0$ ، داریم $\ddot{q} \equiv 0$. بنابراین، مطابق تعریف ۳-۲، با صفر کردن ورودی و خروجی سیستم (۴-۳)، تنها پاسخ معادله حاصل، $e_q \equiv 0$ است. لذا با در نظر گرفتن e_q به عنوان متغیر حالت سیستم، سیستم (۴-۳) رؤیت پذیر حالت صفر می باشد. در نتیجه، بر اساس قضیه ۲-۲، قانون کنترل (۱۳-۲) به ازای $\phi(\dot{q}) = K_q \dot{q}$ ، پایداری مجانبی مبدا $e_q = 0$ و $\dot{e}_q = 0$ را تضمین می نماید. به عبارت دیگر، ورودی جدید u به صورت زیر خواهد بود.

$$u = -K_q \dot{q} \quad (7-3)$$

در رابطه فوق، عناصر ماتریس قطری K_q بهره سیستم هستند که مقدار آن‌ها مثبت است. برای توضیح بیشتر، لازم است به این نکته اشاره نمود که ابتدا به وسیله‌ی حلقه پسخورد (۳-۴)، فرایند غیرفعال سازی پسخورد اتفاق افتاده است. سپس، به کمک قانون (۳-۷)، فرایند تزریق میرایی^۱ رخ داده است. در واقع، به مجموعه این مراحل، کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن گویند. قانون کنترل با در نظر گرفتن روابط (۳-۳) و (۷-۳) به صورت زیر خواهد بود.

$$\tau = G(q) - K_p e_q - K_q \dot{q} \quad (۸-۳)$$

۳-۲-۲ ردگیری مسیر متغیر با زمان

در این بخش، حالت دیگری از مساله ردگیری مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن مسیر مطلوب متغیر با زمان است و به عبارت دیگر $\dot{q}_d \neq 0$. در این حالت دو روش برای تعریف قانون مناسب برای غیرفعال سازی پسخورد ارائه شده است.

■ روش اول: قانون غیرفعال سازی پسخورد به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + G(q) - K_p e_q + u \quad (۹-۳)$$

از جایگذاری قانون (۹-۳) در سیستم (۱-۳) داریم:

$$M(q)\ddot{e}_q + C(q, \dot{q})\dot{e}_q + K_p e_q = u \quad (۱۰-۳)$$

در ادامه تابع ذخیره به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$S = \frac{1}{2} \dot{e}_q^T M(q) \dot{e}_q + \frac{1}{2} e_q^T K_p e_q \quad (۱۱-۳)$$

مشابه حالت قبل، مشتق زمانی تابع ذخیره عبارت است از:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \frac{1}{2} \dot{e}_q^T \dot{M}(q) \dot{e}_q + \dot{e}_q^T M(q) \ddot{e}_q + e_q^T K_p \dot{e}_q \\ &= \frac{1}{2} \dot{e}_q^T \dot{M}(q) \dot{e}_q + \dot{e}_q^T [-C(q, \dot{q})\dot{e}_q - K_p e_q + u] + e_q^T K_p \dot{e}_q \\ &= \frac{1}{2} \dot{e}_q^T [\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})] \dot{e}_q + \dot{e}_q^T u = \langle \dot{e}_q^T, u \rangle. \end{aligned} \quad (۱۲-۳)$$

با توجه به ویژگی ۱-۳ و تعریف ۲-۲، سیستم حلقه بسته (۱۰-۳) بین ورودی u و خروجی $\dot{e}_q$ غیرفعال است. مشابه حالت قبل از مساوی صفر قرار دادن ورودی و خروجی تعریف شده، تنها پاسخ معادله (۱۰-۳)، $e_q \equiv 0$ خواهد بود که در نتیجه بر اساس تعریف ۲-۳، سیستم رؤیت پذیر حالت صفر

^۱Damping injection

می‌باشد. بنابراین با استفاده از قضیه ۲-۲، قانون کنترل (۱۳-۲) به ازای $\phi(\dot{e}_q) = K_q \dot{e}_q$ ، پایداری مجانبی مبدا سیستم را تضمین می‌کند. به عبارت دیگر، ورودی جدید u به صورت زیر خواهد بود.

$$u = -K_q \dot{e}_q \quad (۱۳-۳)$$

در نهایت، قانون کنترل با در نظر گرفتن (۹-۳) و (۱۳-۳) به صورت زیر خواهد بود.

$$\tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + G(q) - K_p e_q - K_q \dot{e}_q \quad (۱۴-۳)$$

■ **روش دوم:** در این روش، از تغییر متغیر استفاده شده و قانون غیرفعال سازی پس‌خورد به صورت زیر تعریف شده است.

$$\tau = M(q)\dot{v} + C(q, \dot{q})v + G(q) + u \quad (۱۵-۳)$$

که در این رابطه:

$$v = \dot{q}_d - \Lambda e_q \quad (۱۶-۳)$$

Λ ماتریس بهره با عناصر قطری و مثبت است. با معرفی متغیر جدیدی به نام r به صورت زیر، از جایگذاری قانون (۱۵-۳) در سیستم (۱-۳)، سیستم حلقه بسته بر حسب متغیر جدید r تشکیل خواهد شد.

$$r = \dot{q} - v = \dot{e}_q + \Lambda e_q \quad (۱۷-۳)$$

$$M(q)\dot{r} + C(q, \dot{q})r = u \quad (۱۸-۳)$$

با توجه به ساختار سیستم حلقه بسته، برای بررسی غیرفعال بودن آن، تابع ذخیره زیر پیشنهاد شده است.

$$S = \frac{1}{2} r^T M(q) r \quad (۱۹-۳)$$

مشق زمانی این تابع ذخیره عبارت است از:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q) r + r^T M(q) \dot{r} = \frac{1}{2} r^T [\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})] r + r^T u \\ &= \langle r, u \rangle. \end{aligned} \quad (۲۰-۳)$$

مشابه روش اول، اگر متغیر r به عنوان خروجی سیستم معرفی شود، سیستم حلقه بسته بین ورودی u و خروجی r غیرفعال است. همچنین مطابق تعریف ۳-۲، سیستم مشاهده پذیر حالت صفر نیز هست. لذا بر اساس قضیه ۲-۲، قانون کنترل (۱۳-۲) به ازای $\phi(r) = K_r r$ (که K_r ، ماتریس بهره مثبت با عناصر قطری است) پایداری مجانبی مبدا سیستم، یعنی $r = 0$ را تضمین می‌نماید.

$$u = -K_r r = -K_r (\dot{e}_q + \Lambda e_q) \quad (21-3)$$

لازم به ذکر است که هنوز ردیابی مطلوب اثبات نشده است. چراکه میل کردن متغیر r به سمت صفر، به معنای صفر شدن خطای ردیابی نیست. در واقع متغیر r مجموع خطای ردیابی و مشتق آن است. لذا برای اثبات صفر شدن خطای ردیابی، لازم است یک تابع لیاپانوف مناسب ارائه شود. برای این منظور، تابع لیاپانوف زیر مفروض است.

$$U = \frac{1}{2} r^T M(q) r + e_q^T \Lambda K_r e_q \quad (22-3)$$

مشتق زمانی این تابع لیاپانوف برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q) r + r^T M(q) \dot{r} + 2e_q^T \Lambda K_r \dot{e}_q \\ &= \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q) r + r^T [-C(q, \dot{q}) r + u] + 2e_q^T \Lambda K_r \dot{e}_q \\ &= \frac{1}{2} r^T [\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})] r - r^T K_r r + 2e_q^T \Lambda K_r \dot{e}_q \\ &= -[\dot{e}_q + \Lambda e_q]^T K_r [\dot{e}_q + \Lambda e_q] + 2e_q^T \Lambda K_r \dot{e}_q \\ &= -\dot{e}_q^T K_r \dot{e}_q - e_q^T \Lambda K_r \Lambda e_q. \end{aligned} \quad (23-3)$$

با توجه به معادله فوق، مشاهده می‌شود که $\dot{U} \leq 0$ ، نیمه معین منفی است. اما با توجه به اینکه تنها پاسخ صفر آن، زمانی اتفاق می‌افتد که $e_q \equiv \dot{e}_q \equiv 0$ باشد، بنابراین، مطابق قضیه لاسال [۳]، مبدا ($e_q \equiv \dot{e}_q \equiv 0$) پایدار مجانبی است. لذا خطای ردیابی به صفر میل کرده و ردیابی مطلوب حاصل می‌شود. در نهایت، قانون کنترل با در نظر گرفتن (۳-۱۵) و (۳-۲۱) به صورت زیر خواهد بود.

$$\tau = M(q) \dot{v} + C(q, \dot{q}) v + G(q) - K_r (\dot{e}_q + \Lambda e_q) \quad (24-3)$$

۳-۳ کنترل تطبیقی گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن [۶۸]

در این بخش، با فرض اینکه ماتریس‌های M ، C و بردار G دارای عدم قطعیت‌های نامتغیر با زمان هستند، تخمین آن‌ها به ترتیب $\hat{M}$ ، $\hat{C}$ و $\hat{G}$ در نظر گرفته می‌شود و در نهایت قانون کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن (۳-۱۵) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\tau = \hat{M}(q) \dot{v} + \hat{C}(q, \dot{q}) v + \hat{G}(q) - K_r r \quad (25-3)$$

با توجه به خواص دینامیکی بازوهای رباتیک، می‌توان سمت چپ معادله (۳-۱) را به صورت خطی در نظر گرفت [۶]. بنابراین داریم:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\psi. \quad (26-3)$$

در رابطه فوق، Y ماتریس رگر سور با مقدار معلوم و ψ بردار پارامترهای ثابت نامعلوم است. بنابراین، قانون کنترل (25-3) را می‌توان بر حسب Y ، $\hat{\psi}$ و r به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$\tau = Y\hat{\psi} - K_r r - \hat{M}(q)\dot{r} - \hat{C}(q, \dot{q})r \quad (27-3)$$

از جایگذاری دو رابطه آخر در سیستم (1-3)، خواهیم داشت:

$$M(q)\dot{r} + C(q, \dot{q})r + K_r r = Y\tilde{\psi} \quad (28-3)$$

در این رابطه $\tilde{\psi} = \hat{\psi} - \psi$ می‌باشد. پارامتر $\tilde{\psi}$ از رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$\dot{\tilde{\psi}} = -\Gamma^{-1}Y^T r \quad (29-3)$$

در ادامه برای اثبات پایداری مجانبی نقاط تعادل سیستم حلقه بسته، تابع لیاپانوف زیر در نظر گرفته شده است.

$$U = \frac{1}{2}r^T M(q)r + e_q^T \Lambda K_r e_q + \frac{1}{2}\tilde{\psi}^T \Gamma \tilde{\psi} \quad (30-3)$$

مشتق زمانی تابع لیاپانوف فوق با در نظر گرفتن قانون تطبیق (29-3) و با توجه به این نکته که ψ یک پارامتر ثابت است، برابر است با:

$$\dot{U} \leq -\dot{e}_q^T K_r \dot{e}_q - e_q^T \Lambda K_r \Lambda e_q \quad (31-3)$$

با توجه به (30-3) و (31-3)، متغیرهای r ، e_q و $\tilde{\psi}$ محدود هستند. از طرفی با توجه به تعریف $r = \dot{e}_q + \Lambda e_q$ و محدود بودن r و e_q می‌توان نتیجه گرفت که $\dot{e}_q$ نیز محدود است. همچنین، با توجه به محدود بودن متغیرهای r و $\tilde{\psi}$ در معادله (28-3)، می‌توان نتیجه گرفت که متغیر $\dot{r}$ نیز محدود است. بنابراین، با توجه به محدود بودن $\dot{e}_q$ و $\dot{r}$ در تعریف $\dot{r} = \ddot{e}_q + \Lambda \dot{e}_q$ ، می‌توان نتیجه گرفت که $\ddot{e}_q$ نیز محدود است. لذا بر اساس لم باربالات [3]، $e_q \rightarrow 0$ و $\dot{e}_q \rightarrow 0$ و ردگیری مجانبی برای مفاصل ربات حاصل می‌شود.

۳-۴ جمع بندی

در این فصل به معرفی برخی روش‌های مرسوم کنترل بازوهای رباتیک مبتنی بر راهبرد گشتاور و نظریه غیرفعال بودن، پرداخته شد. برای این منظور، ابتدا، کنترل کننده مبتنی بر مدل ارائه گردید که با استفاده از نظریه غیرفعال بودن، قانون کنترل مناسب برای ردیابی مجانبی موقعیت مفاصل بازوها

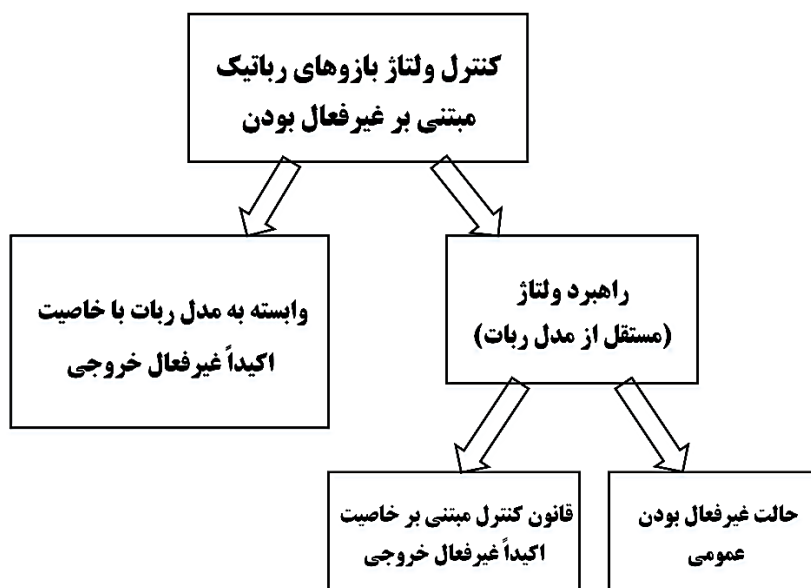
بدست آمد. پس از آن با استفاده از روش تطبیقی، ترم‌های نامعلوم مدل ربات تخمین زده شد. در روش کنترل گشتاور، قانون کنترل، کاملاً به مدل مکانیکی ربات وابسته است که این امر، پیچیدگی ساختار قانون کنترل را به دنبال دارد. از این‌رو، در فصل بعدی، روش کنترل ولتاژ مبتنی بر غیرفعال بودن با رویکردهای مختلف، برای بازوهای رباتیک بیان می‌شود. به کمک نظریه غیرفعال بودن، تنها با اثبات غیرفعال بودن سیستم بین ورودی و خروجی آن، اثبات ردگیری مجانبی سیستم حلقه بسته به راحتی امکان پذیر است. همچنین، قانون کنترل پیشنهادی، کاملاً از مدل ربات مستقل است و می‌تواند به طور مجزا به هر یک از مفاصل ربات اعمال شود.

فصل چهارم: کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک مبتنی بر غیرفعال بودن

۴-۱ مقدمه

در این فصل کنترل ولتاژ مبتنی بر غیرفعال بودن، با رویکردهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک با استفاده از خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی ارائه می‌شود. در این رویکرد، قانون کنترل، بر اساس جریان مطلوب روتور و معادله الکتریکی موتور طراحی می‌شود. با در نظر گرفتن یک ورودی جدید در قانون پیشنهادی، سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خروجی خطای جریان روتور، اکیداً غیرفعال خروجی است. با توجه به مشاهده پذیر حالت صفر بودن سیستم حلقه بسته، ردگیری مجانبی برای جریان روتور با صفر قرار دادن ورودی جدید تحقق می‌یابد. در نهایت، معادله جریان مطلوب، به گونه‌ای پیشنهاد می‌شود که خطای ردگیری موقعیت مفاصل نیز به صفر میل کند. اما از آنجایی که مشتق جریان مطلوب نیز در قانون کنترل ظاهر می‌شود، حجم محاسبات کنترلی افزایش می‌یابد. از طرفی، با توجه به اینکه ثابت زمانی الکتریکی موتور بسیار کوچکتر از ثابت زمانی مکانیکی ربات است، در عمل، می‌توان از ثابت زمانی موتور صرف نظر نمود. با این توضیح، در گام بعد، از ترم $L\dot{I}_a$ صرف نظر می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای هر دو حالت ارائه شده مناسب می‌باشد. اما به دلیل اینکه رابطه پیشنهادی برای جریان مطلوب روتور، به مدل مکانیکی ربات وابسته است، ساختار قانون کنترل از پیچیدگی زیادی رنج می‌برد. لذا در رویکرد بعدی، راهبرد ولتاژ مبتنی بر خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی پیشنهاد می‌شود. در این رویکرد، معادله الکتریکی موتور با حذف ترم $L\dot{I}_a$ در نظر گرفته شده و قانون کنترل پیشنهادی بر مبنای خطای ردگیری موقعیت مفاصل پیشنهاد می‌شود. لذا سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خطای موقعیت مفاصل، اکیداً غیرفعال خروجی بوده و با توجه به مشاهده پذیر حالت صفر بودن سیستم حلقه بسته، ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل از مساوی صفر قرار دادن ورودی جدید حاصل می‌شود. با توجه به قانون کنترل پیشنهادی، در این رویکرد، نیاز به استفاده از سنسور جریان روتور برای انجام محاسبات کنترلی است. این رویکرد، در دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا با فرض معلوم بودن پارامترهای موتور، طراحی انجام می‌شود و سپس به کمک روش تطبیقی، پارامترهای موتور نیز تخمین زده می‌شوند. لازم به ذکر است که قانون کنترل پیشنهادی در این رویکرد، دارای ساختاری بسیار ساده بوده و به مدل مکانیکی ربات وابسته نیست. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای هر دو حالت ارائه شده مناسب می‌باشد. در رویکردی دیگر، راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای بازوهای رباتیک ارائه می‌شود. در این رویکرد نیز، تنها معادله الکتریکی موتور در نظر گرفته می‌شود. با این تفاوت که جریان روتور و مشتق آن با استفاده از روش تطبیقی مستقل از رگرسور تخمین زده می‌شود. قانون کنترل پیشنهادی در این رویکرد، وابسته به

خطای ردگیری موقعیت مفاصل بوده و لذا سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خطای ردگیری موقعیت مفاصل غیرفعال می‌باشد. بنابراین، ورودی جدید با استفاده از نظریه غیرفعال بودن طراحی می‌شود و ردگیری مجانبی تحقق می‌یابد. از آنجایی که مدل سیستم ربات با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها در فضای حالت q ، $\dot{q}$ و $\ddot{q}$ ، یک مدل مرتبه سوم است. در این رویکرد، قانون کنترل برای مدل‌های تقریبی مرتبه اول و دوم بررسی می‌شوند. رویکردهای مطرح شده در این فصل در شکل زیر به اختصار بیان شده است.



شکل (۱-۴): رویکردهای کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک ارائه شده در این فصل

۲-۴ تعریف مساله

مدل بازوی ربات n -رابطی، با فرض عدم انعطاف مفاصل، مطابق رابطه (۱-۳)، در نظر گرفته شده است [۶].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (۱-۴)$$

ویژگی ۱-۴ [۶]: ماتریس اینرسی $M(q)$ به ازای تمامی مقادیر q متقارن و معین مثبت است. مقادیر ویژه ماتریس $M(q)$ به ازای یک مقدار ثابت از مختصات تعمیم یافته q ، به صورت $0 < \alpha_1(q) \leq \dots \leq \alpha_n(q)$ است. لازم به ذکر است که چون ماتریس $M(q)$ ، معین مثبت است، این مقادیر ویژه نیز مثبت هستند. لذا می‌توان نشان داد که ماتریس $M(q)$ از بالا و پایین کراندار است.

$$\alpha_1(q)I_{n \times n} \leq M(q) \leq \alpha_n(q)I_{n \times n} \quad (۲-۴)$$

ویژگی ۲-۴ [۶]: ماتریس کریولیس $C(q, \dot{q})$ به ازای تمامی مقادیر q و $\dot{q}$ و برخی مقادیر مثبت k_c در رابطه زیر صدق می‌کند.

$$\|C(q, \dot{q})\dot{q}\| \leq k_c \|\dot{q}\|^2 \quad (۳-۴)$$

ویژگی ۳-۴ [۶]: بردار گشتاورهای گرانشی $G(q)$ به ازای تمامی مقادیر q و برخی از مقادیر ثابت مثبت k_g ، رابطه زیر را برآورده می‌سازد.

$$\|G(q)\| \leq k_g \quad (۴-۴)$$

مدل مکانیکی موتور جریان مستقیم نیز به صورت زیر قابل بیان است.

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + r\tau = \tau_m \quad (۵-۴)$$

در این رابطه، ماتریس قطری $J_m \in R^{n \times n}$ معرف اینرسی موتور و ماتریس قطری $B_m \in R^{n \times n}$ معرف ضریب میرایی موتور می‌باشد. $\theta_m \in R^n$ بیانگر موقعیت روتور و $\tau_m \in R^n$ معرف گشتاور موتور است. همچنین مدل الکتریکی موتور جریان مستقیم عبارت است از:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b \dot{\theta}_m = V. \quad (۶-۴)$$

در معادله الکتریکی فوق، ماتریس $r \in R^{n \times n}$ ، بیانگر ضرایب چرخ دنده است. همچنین، ماتریس‌های $n \times n$ قطری K_b ، R و L ، به ترتیب مربوط به ثابت نیروی ضد محرکه القایی، مقاومت و اندوکتانس موتور هستند. بردارهای $V \in R^n$ و $I_a \in R^n$ نیز به ترتیب بیانگر ولتاژ و جریان موتور هستند. لازم به ذکر است که در موتورهای جریان مستقیم، گشتاور موتور با جریان روتور مطابق معادله ذیل متناسب است.

$$\tau_m = K_m I_a \quad (۷-۴)$$

همچنین، در این نوع موتور، ماتریس K_m با ماتریس K_b برابر می‌باشد. به علاوه، میان موقعیت روتور و موقعیت مفصل بازو نیز ارتباط مستقیمی به صورت زیر وجود دارد.

$$q = r\theta_m \quad (۸-۴)$$

مدل الکتریکی موتور (۶-۴)، با در نظر گرفتن رابطه (۸-۴) به صورت زیر خواهد بود.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} = V \quad (۹-۴)$$

فرض ۴-۱ [۶۹]: ولتاژ موتور هر یک از مفاصل، با توجه به مشخصات فنی آن، دارای حد بالایی مشخصی است که به صورت $\|V\| \leq V_{\max}$ در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر ولتاژ اعمالی به موتورها (V_a) به صورت زیر می‌باشد.

$$V_a = H(V), \quad H(V) = \begin{cases} V & \|V\| \leq V_{\max} \\ V_{\max} \operatorname{sgn}(V) & V_{\max} < \|V\| \end{cases} \quad (۴-۱۰)$$

با توجه به روابط (۴-۱) تا (۴-۹)، مدل فضای حالت سیستم ربات با حضور محرکه‌ها و با معرفی بردار متغیرهای حالت $X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [q \ \dot{q} \ I_a]^T$ ، به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{X} = f(X) + bV \quad (۴-۱۱)$$

تابع برداری غیرخطی $f(X)$ و بردار b نیز به صورت زیر می‌باشد.

$$f(X) = \begin{bmatrix} x_2 \\ (J_m r^{-1} + rM(x_1))^{-1} ((-B_m r^{-1} - rC(x_1, x_2))x_2 - rG(x_1) + K_m x_3) \\ L^{-1}(-R x_3 - K_b r^{-1} x_2) \end{bmatrix}, \quad (۴-۱۲)$$

$$b = [0 \ 0 \ L^{-1}]^T$$

مدل فضای حالت (۴-۱۱)، یک سیستم غیرخطی پیچیده را نشان می‌دهد. برای تبدیل فضای حالت معرفی شده به فرم همراه می‌توان از تبدیل حالت زیر استفاده نمود.

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ (J_m r^{-1} + rM(x_1))^{-1} ((-B_m r^{-1} - rC(x_1, x_2))x_2 - rG(x_1) + K_m x_3) \end{bmatrix} \quad (۴-۱۳)$$

بنابراین، مدل فضای حالت در فرم همراه به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 \\ h(z_1, z_2, z_3) + (J_m r^{-1} + rM(x_1))^{-1} K_m L^{-1} V \end{bmatrix} \quad (۴-۱۴)$$

که در این رابطه تابع غیرخطی $h(z_1, z_2, z_3)$ برابر است با:

$$\begin{aligned}
h(z_1, z_2, z_3) = & \left(\frac{d}{dt} (J_m r^{-1} + rM(z_1))^{-1} \right) \left(- (B_m r^{-1} + rC(z_1, z_2)) z_2 - rG(z_1) \right) \\
& + \left(\frac{d}{dt} (J_m r^{-1} + rM(z_1))^{-1} \right) \left[(B_m r^{-1} + rC(z_1, z_2)) z_2 \right. \\
& + (J_m r^{-1} + rM(z_1)) z_3 + rG(z_1) \left. \right] (J_m r^{-1} + rM(z_1))^{-1} \left[-rG(z_1) \right. \\
& \left. - rC(z_1, z_2) z_2 - (B_m r^{-1} + rC(z_1, z_2)) z_3 \right] - \\
& - (J_m r^{-1} + rM(z_1))^{-1} L^{-1} R \left[rG(z_1) + (J_m r^{-1} + rM(z_1)) z_3 \right. \\
& \left. + (B_m r^{-1} + rC(z_1, z_2)) z_2 \right] - (J_m r^{-1} + rM(z_1))^{-1} (K_m L^{-1} K_b r^{-1} z_2).
\end{aligned} \tag{۱۵-۴}$$

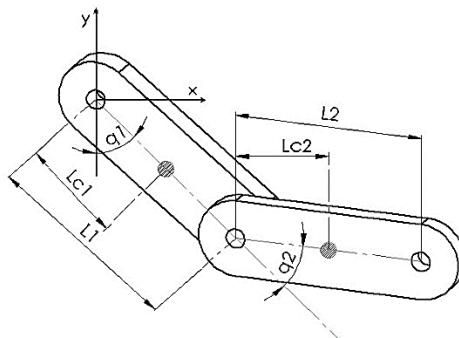
در نهایت دینامیک سیستم را می‌توان به صورت زیر معرفی نمود.

$$\ddot{q} = h(q, \dot{q}, \ddot{q}) + (J_m r^{-1} + rM(z_1))^{-1} (K_m L^{-1}) V \tag{۱۶-۴}$$

در فرم همراه (۱۶-۴)، ترم‌های غیرخطی بسیار زیادی مشاهده می‌شود که باعث افزایش پیچیدگی و حجم محاسبات در طراحی کنترل‌کننده خواهد شد. قبل از ورود به بحث‌های مربوط به طراحی کنترل‌کننده برای سیستم ربات، ابتدا تنظیمات کلی شبیه‌سازی، مقادیر پارامترهای ربات و موتور و همچنین، معادله مسیرهای مطلوب، معرفی می‌شود.

۳-۴ تنظیمات کلی شبیه سازی

به منظور بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌های پیشنهادی در هر بخش، از یک ربات دو رابطی که شماتیک آن در شکل زیر نمایش داده شده، استفاده می‌شود. همچنین پارامترهای ربات و موتورهای جریان مستقیم نیز در جداول (۱-۴) و (۲-۴) معرفی شده‌اند.



شکل (۲-۴): شماتیک یک بازوی ربات دو لینکی

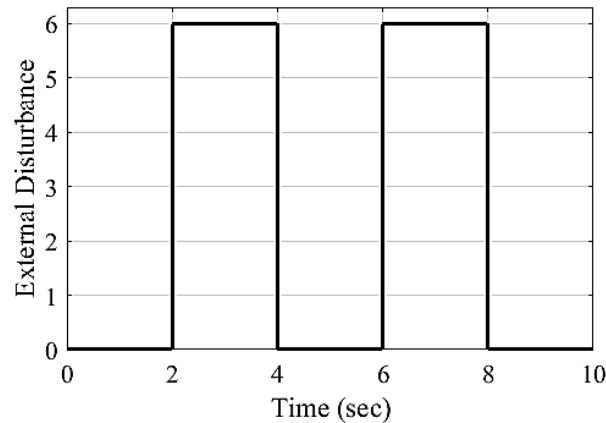
جدول (۱-۴): پارامترهای بازوی ربات

لینک	$l(m)$	$l_c(m)$	$m(kg)$	$I(kg.m^2)$
۱	۱	۰.۵	۱	۰.۱۲
۲	۱	۰.۵	۲	۰.۲۵

جدول (۴-۲): پارامترهای موتورهای جریانی مستقیم

$R(Ohm)$	$L(H)$	$J_m(Nm.s^2 / rad)$	$B_m(Nm.s / rad)$	$K_b(V.s / rad)$	r	$V_{max}(volt)$
۱,۶	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۱	۰,۲۶	۰,۰۱	۴۰

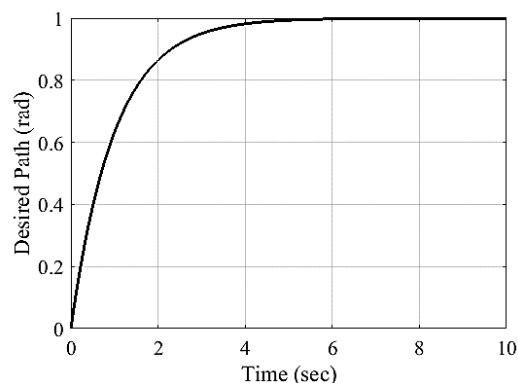
همچنین، اغتشاش خارجی به صورت یک سیگنال پالس در نظر گرفته شده است، که به گشتاور بازو اعمال می‌شود [۷۰].



شکل (۴-۳): اغتشاش خارجی اعمال شده به گشتاور بازو

شرایط اولیه موقعیت مفاصل بازو به صورت $q_1(0) = 0.6 rad$ و $q_2(0) = 0.4 rad$ در نظر گرفته می‌شود. در تمام شبیه سازی‌ها، از دو مسیر مطلوب برای ارزیابی عملکرد ردگیری موقعیت مفاصل بازوها در نظر گرفته شده است. معادله ریاضی مسیر مطلوب اول، به صورت زیر می‌باشد که می‌توان نمودار آن را در شکل (۴-۴) مشاهده نمود.

$$q_d(t) = 1 - e^{-t} \quad (۴-۱۷)$$

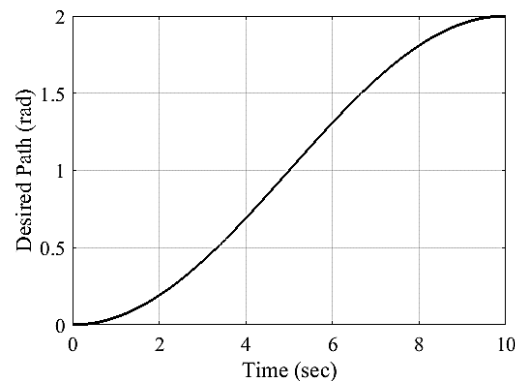


شکل (۴-۴): مسیر مطلوب اول

معادله ریاضی مسیر مطلوب دوم، به صورت زیر می‌باشد که می‌توان نمودار آن را در شکل (۴-۵) مشاهده نمود.

(۱۸-۴)

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



شکل (۵-۴): مسیر مطلوب دوم

در تمامی طراحی‌های انجام شده در این فصل، فرض زیر در مورد مسیر مطلوب در نظر گرفته شده است.

فرض ۴-۲ [۶۹]: سیگنال مسیر مطلوب (q_d) و مشتقات آن تا مرتبه سوم در دسترس هستند.

۴-۴ کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک با استفاده از خاصیت اکیداً غیرفعال

خروجی

در این روش، از مدل الکتریکی موتور که در معادله (۹-۴) توصیف شده است، برای طراحی کنترل‌کننده ولتاژ مبتنی بر خاصیت غیرفعال بودن استفاده می‌شود. مدل الکتریکی موتور به صورت زیر مفروض است.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} = V \quad (۱۹-۴)$$

هدف اصلی این بخش، ارائه روش مناسب برای تحقق ردگیری موقعیت مطلوب مفاصل است. برای این منظور، در نظریه‌ی زیر، قانون کنترل ولتاژ مناسب پیشنهاد می‌شود. این قانون کنترل، به جریان مطلوب روتور وابسته است. همچنین، یک ورودی جدید، در این قانون کنترل لحاظ شده است که بر اساس آن سیستم حلقه بسته بین این ورودی جدید و خروجی خطای ردگیری جریان روتور اکیداً غیرفعال خروجی باشد. توضیحات تکمیلی در اثبات نظریه زیر بیان شده است. در این بخش، فرض بر این است که تمامی پارامترهای مدل ربات و موتور معلوم هستند.

نظریه ۴-۱: سیستم (۱۹-۴) مفروض است. قانون کنترل ولتاژ پیشنهادی زیر، ردگیری مجانبی

موقعیت مفاصل بازوی ربات را تضمین می‌کند.

$$V = K_b r^{-1} \dot{q} + R I_d + L \dot{I}_d + u \quad (20-4)$$

در این رابطه، u ورودی جدید است که برای غیرفعال سازی سیستم حلقه بسته مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که سیستم حلقه بسته اکیداً غیرفعال خروجی است، لذا با انتخاب $u=0$ در قانون کنترل (20-4)، هدف ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل تحقق می‌یابد. در قانون کنترل (20-4)، منظور از I_d جریان مطلوب می‌باشد که به صورت زیر پیشنهاد می‌شود. لازم به ذکر است که فرض می‌شود که I_d در بازه‌ای قرار بگیرد که موتور توان تحمل آن را داشته باشد.

$$I_d = K_m^{-1} r [\bar{M}(q) \ddot{q}_d + \bar{C}(q, \dot{q}) \dot{q}_d + G(q) - K_d (\dot{q} - \dot{q}_d) - K_p (q - q_d)] \quad (21-4)$$

در رابطه فوق، K_p و K_d بهره‌های کنترلی هستند و $\bar{M}(q)$ و $\bar{C}(q, \dot{q})$ عبارت‌اند از:

$$\bar{M}(q) = M(q) + r^{-1} J_m r^{-1} \quad (22-4)$$

$$\bar{C}(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) + r^{-1} B_m r^{-1}.$$

اثبات: با جایگذاری قانون کنترل (20-4) در سیستم (19-4)، سیستم حلقه بسته به صورت

زیر می‌باشد.

$$L \dot{e}_I + R e_I = u \quad (23-4)$$

در این رابطه، $e_I = I_a - I_d$ می‌باشد. با معرفی تابع ذخیره زیر:

$$S = \frac{1}{2} e_I^T L e_I \quad (24-4)$$

و محاسبه مشتق زمانی آن، داریم:

$$\dot{S} = e_I^T L \dot{e}_I = e_I^T (u - R e_I) = e_I^T u - e_I^T R e_I. \quad (25-4)$$

بنابراین مطابق تعریف 2-2، سیستم (23-4)، بین ورودی u و خروجی $y_v = e_I$ اکیداً غیرفعال خروجی است. از آنجایی که سیستم (23-4) مشاهده پذیر حالت صفر نیز می‌باشد، لذا مطابق لم 2-2، به ازای $u=0$ ، $e_I \rightarrow 0$ و ردگیری مجانبی برای جریان موتور اتفاق می‌افتد. چون تابع ذخیره (24-4)، شعاعی نامحدود است، بنابراین، ردگیری از نوع مجانبی کلی می‌باشد. در قدم بعدی، باید از صحت ساختار پیشنهادی برای جریان مطلوب در رابطه (21-4)، اطمینان حاصل نمود. به عبارت دیگر، باید بررسی شود که آیا با صفر شدن خطای ردگیری جریان موتور، خطای ردگیری موقعیت مفاصل نیز صفر خواهد شد؟ برای این منظور فرض کنید که ردگیری مطلوب برای جریان موتور رخ داده است. در این صورت:

$$I_a = I_d. \quad (26-4)$$

از طرفی، با توجه به روابط (۱-۴) تا (۸-۴)، می‌توان جریان موتور را بر حسب مدل مکانیکی ربات به صورت زیر بیان نمود.

$$I_a = K_m^{-1} r [\bar{M}(q) \ddot{q} + \bar{C}(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q)] \quad (۲۷-۴)$$

دینامیک خطای ردگیری موقعیت مفاصل، از جایگذاری (۲۷-۴) و (۲۱-۴) در تساوی (۲۶-۴) به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\bar{M}(q) \ddot{e} + (\bar{C}(q, \dot{q}) + K_d) \dot{e} + K_p e = 0 \quad (۲۸-۴)$$

تابع لیاپانوف زیر را در نظر بگیرید.

$$V = \frac{1}{2} \dot{e}^T \bar{M}(q) \dot{e} + \frac{1}{2} e^T K_p e \quad (۲۹-۴)$$

مشتق تابع لیاپانوف برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{e}^T \bar{M}(q) \ddot{e} + \frac{1}{2} \dot{e}^T \dot{\bar{M}}(q) \dot{e} + e^T K_p \dot{e} = \dot{e}^T \left(-(\bar{C}(q, \dot{q}) + K_d) \dot{e} - K_p e \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \dot{e}^T \dot{\bar{M}}(q) \dot{e} + e^T K_p \dot{e} = \frac{1}{2} \dot{e}^T \left(\dot{\bar{M}}(q) - 2\bar{C}(q, \dot{q}) \right) \dot{e} - \dot{e}^T K_d \dot{e} \end{aligned} \quad (۳۰-۴)$$

با توجه به تعاریف $\bar{M}(q)$ و $\bar{C}(q, \dot{q})$ در (۲۲-۴) و ویژگی ۱-۳، ترم $\dot{\bar{M}}(q) - 2\bar{C}(q, \dot{q})$ برابر خواهد بود با:

$$\dot{\bar{M}}(q) - 2\bar{C}(q, \dot{q}) = [\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})] - 2r^{-1} B_m r^{-1} = -2r^{-1} B_m r^{-1}. \quad (۳۱-۴)$$

بنابراین، مشتق زمانی تابع لیاپانوف (۲۹-۴) برابر است با:

$$\dot{V} = -\dot{e}^T (r^{-1} B_m r^{-1}) \dot{e} - \dot{e}^T K_d \dot{e} = -\dot{e}^T (r^{-1} B_m r^{-1} + K_d) \dot{e} \quad (۳۲-۴)$$

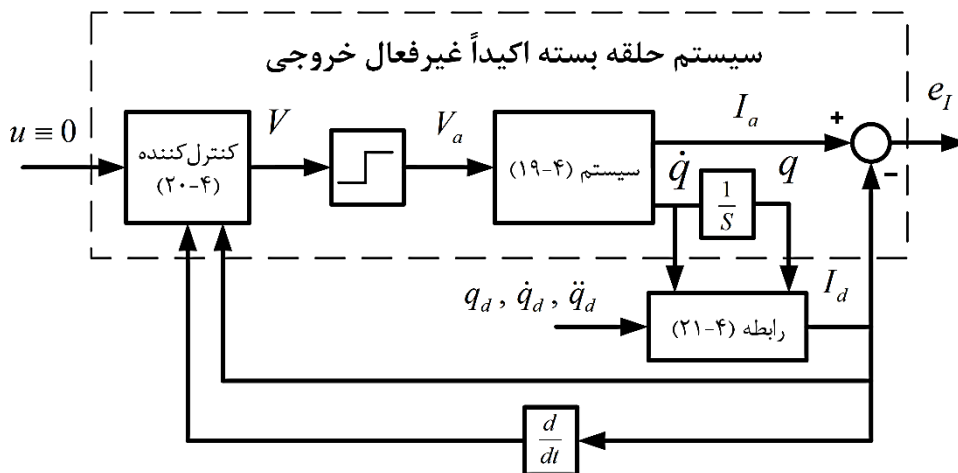
مشتق دوم تابع لیاپانوف به صورت زیر است.

$$\ddot{V} = -2\dot{e}^T (r^{-1} B_m r^{-1} + K_d) \ddot{e} \quad (۳۳-۴)$$

$\dot{V}$ منفی نیمه معین است پس پایداری مجانبی را نتیجه نمی‌دهد. با توجه به (۲۹-۴) و (۳۰-۴)، e و $\dot{e}$ محدود هستند. همچنین بر اساس ویژگی‌های ۱-۴ و ۲-۴، ماتریس‌های $M(q)$ و $C(q, \dot{q})$ محدود هستند. لذا با استفاده از رابطه (۲۲-۴) و با توجه به اینکه، ماتریس‌های r ، J_m و B_m ثابت هستند، می‌توان نتیجه گرفت که ماتریس‌های $\bar{M}(q)$ و $\bar{C}(q, \dot{q})$ نیز محدود هستند. در نهایت چون بهره‌های کنترلی K_p و K_d ثابت هستند، با استفاده از رابطه (۲۸-۴)، نتیجه می‌شود که $\ddot{e}$ نیز محدود است. حال چون $\dot{e}$ و $\ddot{e}$ محدود هستند، مطابق (۳۳-۴)، $\ddot{V}$ نیز محدود است. از آنجایی که V از پایین کراندار بوده و $\dot{V} \leq 0$ و $\ddot{V}$ محدود است، پس $\dot{V}$ پیوسته‌ی یکنواخت می‌باشد. بنابراین

بر اساس لم باربالات، با گذشت زمان، $\dot{e} \rightarrow 0$ برقرار است. همچنین، بر اساس رابطه (۴-۳۲) و با استفاده از قضیه لاسال، $\dot{V} = 0$ نتیجه می‌دهد که $\dot{e} = 0$ ، به عبارت دیگر، هر مقداری از e (در فضای دو بعدی، محور e) می‌تواند به عنوان بزرگترین مجموعه نامتغیر باشد. اما با توجه به رابطه (۴-۲۸)، خارج از مبدا مختصات، $\bar{M}(q)\ddot{e} + K_p e \neq 0$ صفر نبوده و مسیرهای حالت از محور e خارج می‌شوند. بنابراین، بزرگترین مجموعه نامتغیر $e=0$ است که در نتیجه پایداری جانبی سیستم (۴-۲۸) تضمین می‌شود. ■

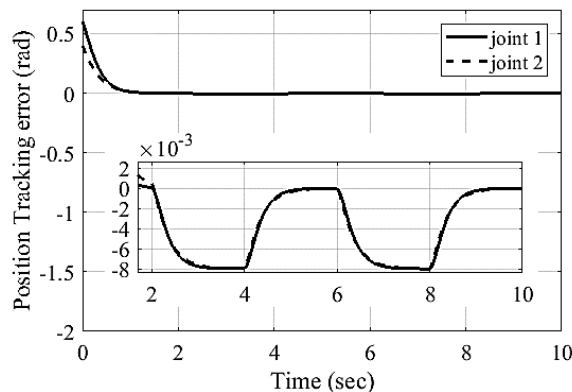
شکل زیر نمودار بلوکی الگوی معرفی شده در این بخش را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۶): بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ مبتنی بر مدل ربات با خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی

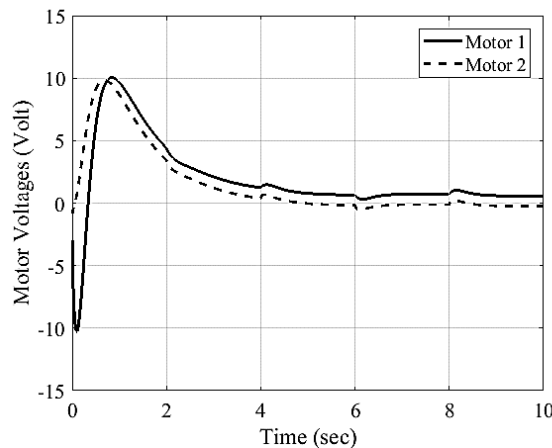
۴-۴-۱ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، برای بررسی عملکرد قانون کنترل ولتاژ (۴-۲۰)، از شبیه‌سازی در نرم افزار متلب کمک گرفته شده است. مقدار بهره‌های کنترلی به روش سعی و خطا به صورت $K_p = 250$ و $K_d = 80$ لحاظ شده‌اند. نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل بر اساس مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)، یعنی مسیر $q_d = 1 - e^{-t}$ به صورت زیر است.

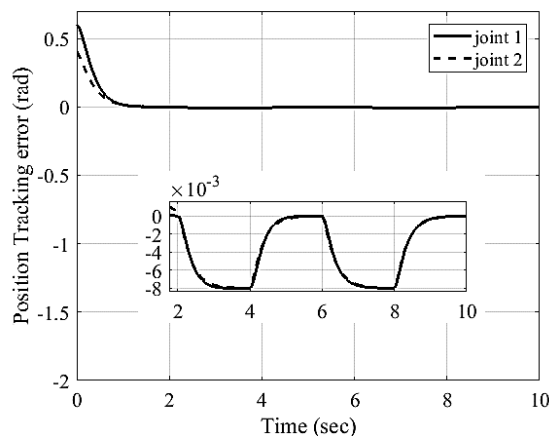


شکل (۴-۷): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۴-۲۰) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)

همانطور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، قانون کنترل پیشنهادی، خطای ردگیری موقعیت مفاصل را تا حد قابل قبولی کاهش داده است. دامنه خطای حالت ماندگار از مرتبه‌ی 10^{-3} می‌باشد. رفتار پالسی شکل خطای ردگیری موقعیت مفاصل، اثر اغتشاش خارجی که به گشتاور بازو اعمال شده است (مطابق شکل (۴-۳))، را نشان می‌دهد.

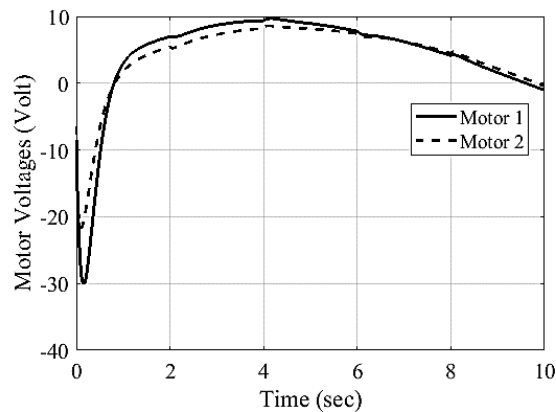


شکل (۴-۸): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۲۰) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷) بر اساس شکل (۴-۸)، مشاهده می‌شود که ولتاژ محرکه‌ها در محدوده مجاز قرار داشته و رفتار نرمی از خود نشان می‌دهد. در ابتدا، به دلیل وجود خطای اولیه موقعیت، مقدار دامنه ولتاژ بیشتر از زمان‌های دیگر است. در ادامه، نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل بر اساس مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)، یعنی مسیر $q_d = 1 - \cos(0.1\pi t)$ ، به صورت زیر است.



شکل (۴-۹): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۴-۲۰) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸) همانند حالت قبل، قانون کنترل پیشنهادی (۴-۲۰)، خطای ردگیری موقعیت مفاصل را تا حد قابل قبولی کاهش داده است. دامنه خطای حالت ماندگار در این حالت نیز از مرتبه‌ی 10^{-3} می‌باشد.

رفتار پالسی شکل خطای ردگیری موقعیت مفاصل، اثر اغتشاش خارجی که به گشتاور بازو اعمال شده است (مطابق شکل (۴-۳))، را نشان می‌دهد.

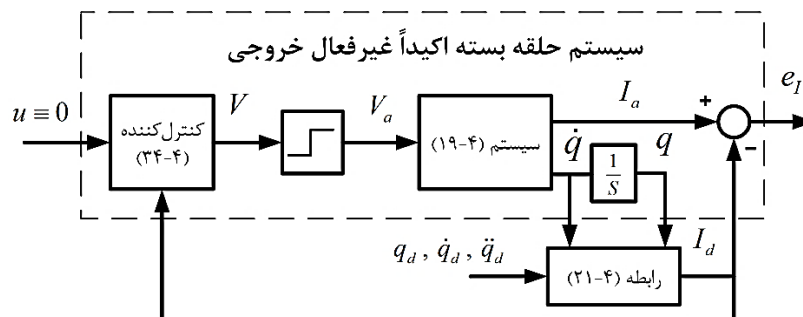


شکل (۴-۱۰): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۲۰) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸) بر اساس شکل فوق، مشاهده می‌شود که ولتاژ محرکه‌ها در محدوده مجاز قرار داشته و رفتار نرمی از خود نشان می‌دهد.

۴-۴-۲ بررسی اثر حذف ثابت زمانی الکتریکی موتور

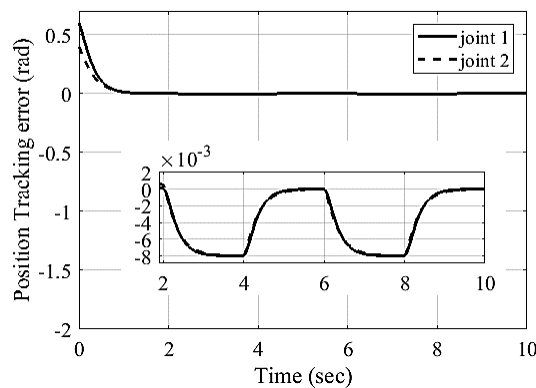
در ساختار قانون کنترل پیشنهادی (۴-۲۰)، از جریان مطلوب روتور و مشتق آن استفاده شده است. همچنین، با توجه به رابطه جریان مطلوب روتور (۴-۲۱)، محاسبه مشتق آن بر حجم محاسبات کنترلی می‌افزاید. بنابراین، از آنجایی که ثابت زمانی الکتریکی موتور خیلی کوچکتر از ثابت زمانی مکانیکی بازوی رباتیک است، می‌توان از ثابت زمانی موتور در عمل صرف نظر نمود. برای این منظور، در این بخش، از ترم $L\dot{I}_d$ در قانون کنترل (۴-۲۰) صرف نظر می‌شود. بنابراین، قانون کنترل (۴-۲۰) معرفی شده در نظریه ۴-۱، به شکل زیر خواهد بود. الگوی کنترلی در این حالت نیز نشان داده شده است.

$$V = K_b r^{-1} \dot{q} + R I_d + u \quad \forall (u \equiv 0) \quad (34-4)$$

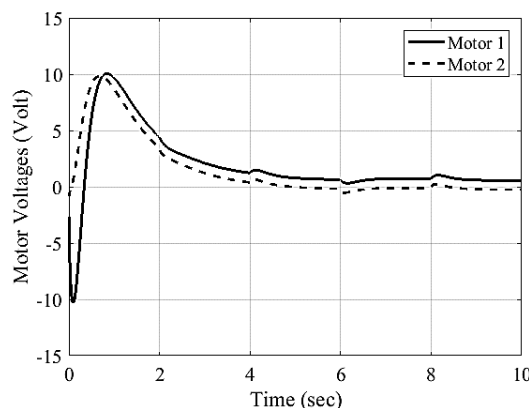


شکل (۴-۱۱): بلوک دیاگرام کنٹرول ولتاژ مثبتی پر مدل ربات با خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی با حذف ثابت زمانی الکترونیک، موتور

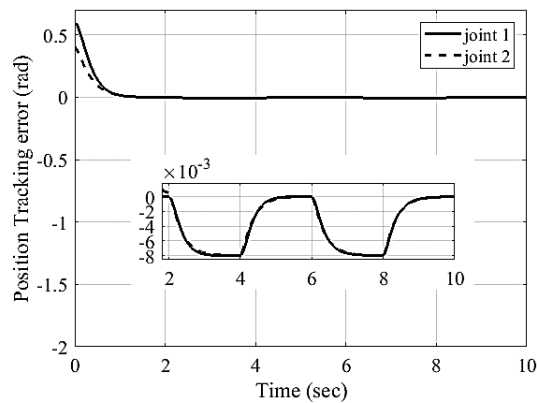
در این حالت نیز بهره‌های کنترلی به صورت $K_p = 250$ و $K_d = 80$ در نظر گرفته شده‌اند. نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل بر اساس مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)، یعنی مسیر $q_d = 1 - e^{-t}$ به صورت زیر است.



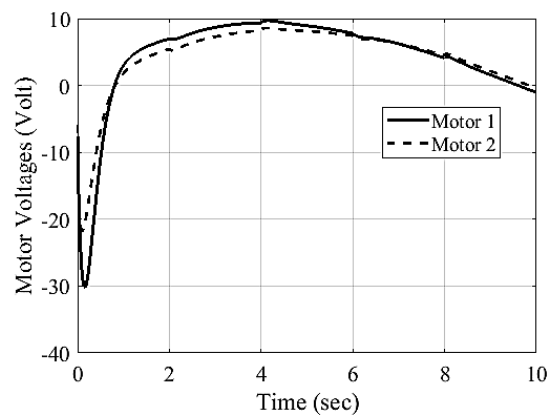
شکل (۴-۱۲): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۳۴) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷) همانطور که مشاهده می‌شود، با حذف ترم $L\dot{I}_d$ ، همچنان نتایج قابل قبول هستند و مرتبه خطای حالت ماندگار ردگیری موقعیت از مرتبه 10^{-3} است.



شکل (۴-۱۳): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۳۴) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷) همچنین بر اساس شکل (۴-۱۳)، مشاهده می‌شود که دامنه ولتاژ ورودی محرکه‌ها در بازه‌ی مجاز قرار داشته و رفتار سیگنال کنترلی بسیار نرم می‌باشد. در ادامه، نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل بر اساس مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)، یعنی مسیر $q_d = 1 - \cos(0.1\pi t)$ به صورت زیر است.



شکل (۴-۱۴): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۳۴) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)



شکل (۴-۱۵): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۳۴) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)

با توجه به شکل‌های فوق، مشاهده می‌شود که حذف ترم $L\dot{I}_d$ تاثیر چندانی در نتایج شبیه سازی ندارد و می‌توان این ترم را حذف نمود. در نتیجه نیازی به محاسبات $\dot{I}_d$ در قانون کنترل نیست. نکته‌ی قابل توجهی که در مورد کنترل کننده‌های (۴-۲۰) و (۴-۳۴) وجود دارد این است که، برای اجرای این قانون‌های کنترلی نیازمند محاسبه جریان مطلوب روتور هستیم. از آنجایی که جریان مطلوب (۴-۲۱) به مدل مکانیکی ربات وابسته است، لذا ساختار این کنترل کننده‌ها نیز دارای پیچیدگی هستند. بنابراین، در بخش بعد، رویکرد راهبرد کنترل ولتاژ مبتنی بر خاصیت غیرفعال بودن، برای بازوهای رباتیک معرفی می‌شود. در این رویکرد، از ثابت زمانی الکتریکی موتور در مقابل ثابت زمانی مکانیکی ربات صرف نظر می‌شود و قانون کنترل، بر اساس خطای ردگیری موقعیت مفاصل پیشنهاد می‌شود و از سنسور جریان برای اندازه‌گیری جریان روتور استفاده خواهد شد.

۴-۵ کنترل بازوهای رباتیک با استفاده از راهبرد ولتاژ مبتنی بر خاصیت

غیرفعال بودن

در این بخش، قانون کنترل مبتنی بر راهبرد ولتاژ با استفاده از خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی برای بازوهای رباتیک ارائه می‌شود. با توجه به اینکه ثابت زمانی الکتریکی موتور بسیار کوچکتر از ثابت زمانی مکانیکی بازو است، در عمل، می‌توان از آن صرف نظر نمود. نتایج ناشی از حذف ترم $L\dot{I}_d$ در بخش ۴-۴، نیز به صحت این ادعا کمک می‌نماید. بنابراین، مدل الکتریکی موتور (۴-۱۹) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$RI_a + K_b r^{-1} \dot{q} = V \quad (۴-۳۵)$$

در نظریه زیر، ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل بازوهای رباتیک به وسیله راهبرد ولتاژ مبتنی بر خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی بیان می‌شود. لازم به ذکر است که قانون کنترل پیشنهادی در این بخش، از مدل مکانیکی ربات مستقل می‌باشد.

نظریه ۴-۲: سیستم (۴-۳۵) را با فرض معلوم بودن ثابت‌های R ، K_b و r در نظر بگیرید.

قانون کنترل ولتاژ پیشنهادی زیر، ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل بازوی ربات را تضمین می‌نماید.

$$V = RI_a + K_b r^{-1} \dot{q}_d - K(q - q_d) + u \quad (۴-۳۶)$$

در این رابطه، u ورودی جدید می‌باشد که برای غیرفعال سازی سیستم حلقه بسته مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که سیستم حلقه بسته، اکیداً غیرفعال خروجی است، لذا با انتخاب $u=0$ در قانون کنترل (۴-۳۶)، هدف ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل تحقق می‌یابد. همچنین، ماتریس قطری و مثبت K در قانون کنترل (۴-۳۶)، بهره کنترلی می‌باشد.

اثبات: از جایگذاری قانون کنترل (۴-۳۶) در سیستم (۴-۳۵)، سیستم حلقه بسته به صورت

زیر خواهد بود.

$$K_b r^{-1} \dot{e} + Ke = u \quad (۴-۳۷)$$

در رابطه فوق، $e = q - q_d$ می‌باشد. با تعریف $\Lambda \triangleq K_b r^{-1}$ و همچنین معرفی تابع ذخیره زیر:

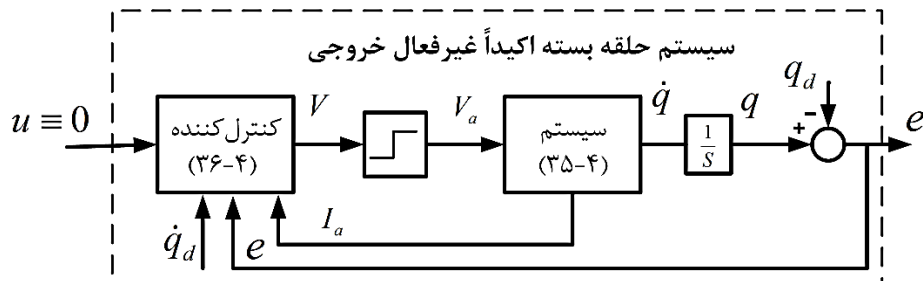
$$S = \frac{1}{2} e^T \Lambda e \quad (۴-۳۸)$$

مشتق تابع ذخیره به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{S} = e^T \Lambda \dot{e} = e^T (u - Ke) = e^T u - e^T Ke \quad (۴-۳۹)$$

بنابراین مطابق تعریف ۲-۲، سیستم (۳۷-۴)، بین ورودی u و خروجی $y_v = e$ اکیداً غیرفعال خروجی است. از آنجایی که سیستم (۳۷-۴) مشاهده پذیر حالت صفر نیز می‌باشد، لذا مطابق لم ۲-۲، به ازای $u = 0$ ، پایداری مجانبی است. به عبارت دیگر، $e \rightarrow 0$ و ردگیری مجانبی تحقق می‌یابد. چون تابع ذخیره (۳۸-۴)، شعاعی نامحدود است، بنابراین، ردگیری از نوع مجانبی کلی می‌باشد. با توجه به روابط (۳۸-۴) و (۳۹-۴)، e محدود است و چون q_d نیز محدود می‌باشد، نتیجه می‌شود که q نیز محدود است. از طرفی چون e و u محدود هستند، با استفاده از رابطه (۳۷-۴) می‌توان دریافت که $\dot{e}$ نیز محدود است. از محدود بودن $\dot{e}$ و $\dot{q}_d$ می‌توان نتیجه گرفت که $\dot{q}$ نیز محدود است. از طرفی، همانطور که در فرض ۱-۴ نیز بیان گردید، ولتاژ محرکه‌ها محدود است. لذا سمت چپ رابطه (۳۶-۴) محدود است و با توجه به محدود بودن q ، $\dot{q}$ و $\dot{q}_d$ نتیجه می‌شود که I_a نیز محدود است. همچنین با توجه به ویژگی‌های ۱-۴، ۲-۴ و ۳-۴، ماتریس‌های $M(q)$ ، $C(q, \dot{q})$ و $G(q)$ محدود هستند. با توجه به محدود بودن ماتریس‌های r ، J_m و B_m و رابطه‌ی (۲۲-۴)، می‌توان نتیجه گرفت که ماتریس‌های $\bar{M}(q)$ و $\bar{C}(q, \dot{q})$ محدود هستند. بنابراین، با استفاده از رابطه‌ی (۲۷-۴) می‌توان نتیجه گرفت که $\ddot{q}$ نیز محدود است.

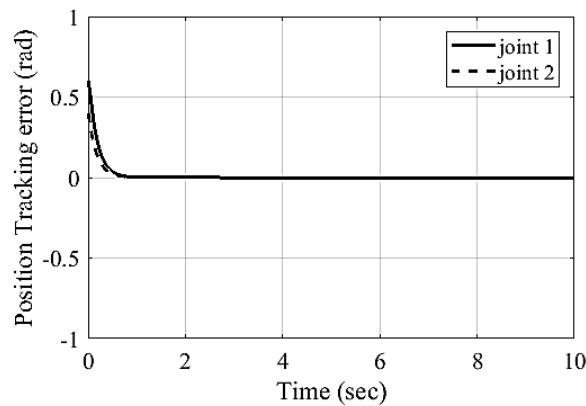
الگوی کنترلی معرفی شده در این بخش، در شکل زیر نمایش داده شده است.



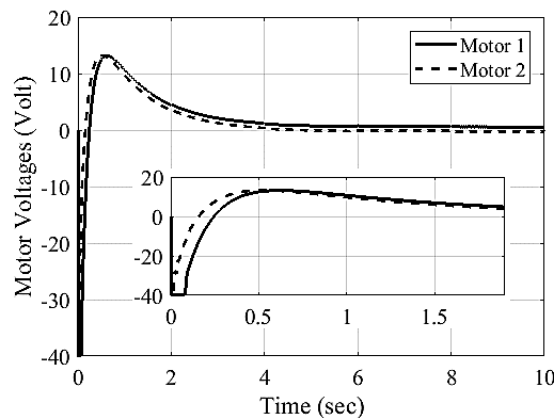
شکل (۱۶-۴): بلوک دیاگرام راهبرد ولتاژ مبتنی بر خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی با فرض معلوم بودن پارامترهای موتور

۱-۵-۴ نتایج شبیه سازی

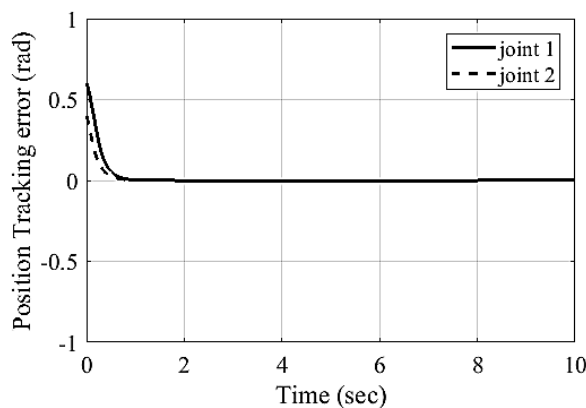
در این قسمت، برای ارزیابی کارایی قانون کنترل (۳۶-۴)، شبیه‌سازی مربوط به ربات دو رابطی معرفی شده در بخش ۳-۴ نشان داده می‌شود. ضریب بهره کنترلی به روش سعی و خطا به صورت $K = 150$ در نظر گرفته شده است. نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل برای مسیر مطلوب اول (۱۷-۴)، یعنی مسیر $q_d = 1 - e^{-t}$ به صورت زیر می‌باشد.



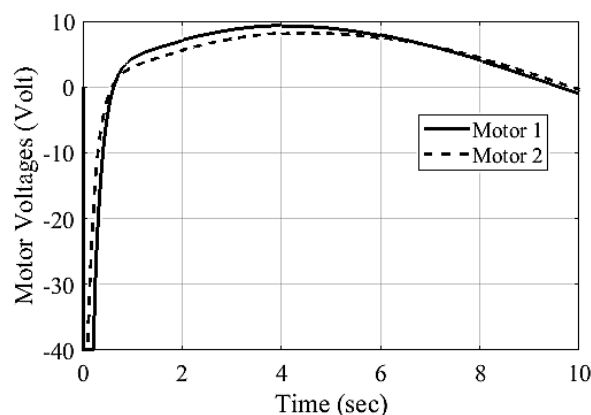
شکل (۴-۱۷): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۳۶) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷) همانطور که در شکل بالا نیز قابل مشاهده است، خطای ردگیری موقعیت مفاصل ربات به خوبی به صفر میل کرده که علت این امر، استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ و همچنین فرض معلوم بودن پارامترهای موتور می‌باشد. به عبارت دیگر، در مقایسه با رویکرد مطرح شده در بخش قبل، می‌توان دریافت که اغتشاش خارجی پالس اعمال شده به گشتاور بازو، تاثیری در نتیجه ردگیری با استفاده از قانون کنترل (۴-۳۶) نمی‌گذارد.



شکل (۴-۱۸): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۳۶) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷) همچنین، با توجه به شکل فوق، می‌توان به خوبی مشاهده نمود که دامنه ولتاژ ورودی محرکه‌ها در بازه مجاز قرار دارد. در ادامه نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)، یعنی $q_d = 1 - \cos(0.1 \times \pi t)$ ، به صورت زیر است.



شکل (۴-۱۹): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۳۶) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)



شکل (۴-۲۰): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۳۶) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸) در این حالت نیز، مشابه حالت قبل، خطای ردگیری به خوبی به صفر میل کرده و ولتاژ موتورها در بازه مجاز قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه، در این بخش، فرض معلوم بودن تمامی پارامترهای موتور در نظر گرفته شده است. در بخش بعدی، قانون کنترل به گونه‌ای اصلاح می‌شود که پارامترهای موتور به وسیله روش تطبیقی تخمین زده شوند. همچنین در معادله موتور، عدم قطعیت نیز لحاظ می‌شود.

۴-۵-۲ کنترل تطبیقی بازوهای رباتیک با استفاده از راهبرد ولتاژ مبتنی بر

خاصیت غیرفعال بودن در حضور عدم قطعیت

در رویکردهای قبل، این فرض در نظر گرفته شد که تمامی پارامترهای ربات و موتور معلوم هستند. در این بخش علاوه بر اینکه پارامترهای موتور تخمین زده می‌شوند، فرض می‌شود که به ولتاژ ورودی موتورها نیز عدم قطعیت وارد شود. بنابراین، در مدل الکتریکی موتور (۴-۳۵)، عدم قطعیت نیز لحاظ می‌شود. برای این منظور، قانون کنترل (۴-۳۶) به گونه‌ای اصلاح می‌شود که قادر به غلبه بر عدم قطعیت معرفی شده باشد و از روش تطبیقی برای تخمین این پارامترها استفاده می‌شود. بنابراین، مدل الکتریکی موتور به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$RI_a + K_b r^{-1} \dot{q} + d = V \quad (40-4)$$

در رابطه فوق، d بیانگر عدم قطعیت سیستم است. نظریه زیر، قانون کنترل پیشنهادی برای سیستم فوق را پیشنهاد می‌دهد.

نظریه ۳-۴: سیستم (۴۰-۴) را در نظر بگیرید. با تعریف $\Lambda \triangleq K_b r^{-1}$ ، قانون کنترل ولتاژ پیشنهادی زیر، ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل بازوی ربات را تضمین می‌کند.

$$V = \hat{R}I_a + \hat{\Lambda}\dot{q}_d - K(q - q_d) + \hat{d} + u \quad (41-4)$$

در این رابطه، u ورودی جدید می‌باشد که برای غیرفعال سازی سیستم حلقه بسته مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که سیستم حلقه بسته اکیداً غیرفعال خروجی است؛ لذا با انتخاب $u = 0$ در قانون کنترل (۴۱-۴)، هدف ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل تحقق می‌یابد. ماتریس قطری K ، ماتریس بهره کنترلی سیستم است. همچنین، $\hat{R}$ ، $\hat{\Lambda}$ و $\hat{d}$ به ترتیب، تخمین R ، Λ و d هستند که در قوانین تطبیق اسکالر زیر صدق می‌کنند.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{R}}_i &= -\gamma_{1i} I_{ai} e_i \\ \dot{\hat{\Lambda}}_i &= -\gamma_{2i} \dot{q}_i e_i \\ \dot{\hat{d}}_i &= -\gamma_{3i} e_i \end{aligned} \quad (42-4)$$

در قوانین تطبیق فوق، اندیس i ($i = 1, \dots, n$) به مفصل i ام اشاره دارد. ضرایب γ_{1i} ، γ_{2i} و γ_{3i} ، بهره‌های قوانین تطبیق برای مفصل i ام هستند. همچنین، خطای ردگیری به صورت $e_i = q_i - q_{di}$ تعریف شده است.

اثبات: با توجه به اینکه روش راهبرد ولتاژ به طور مجزا بر روی هر یک از موتورهای مفاصل قابل اعمال و پیاده سازی است. بدون از دست دادن کلیات مساله، اثبات پایداری و ردگیری مجانبی را برای یک مفصل انجام داده و می‌توان نتیجه مشابه را به سایر مفاصل نیز تعمیم داد. بنابراین، با جایگذاری قانون کنترل (۴۱-۴) در سیستم (۴۰-۴)، داریم:

$$\tilde{R}_i I_{ai} + \Lambda_i \dot{q}_i - \hat{\Lambda}_i \dot{q}_{di} + K_i e_i + \tilde{d}_i = u_i \quad (43-4)$$

که در این رابطه اندیس i به مفصل i ام اشاره دارد و در ماتریس‌های R و Λ بیانگر عنصر i ام روی قطر اصلی است. با تعریف $\tilde{R}_i \triangleq R_i - \hat{R}_i$ ، $\tilde{d}_i \triangleq d_i - \hat{d}_i$ و $\tilde{\Lambda}_i \triangleq \Lambda_i - \hat{\Lambda}_i$ و کم کردن ترم $\hat{\Lambda}_i \dot{q}_i$ به سمت چپ رابطه (۴۳-۴)، سیستم حلقه بسته برابر خواهد بود با:

$$\hat{\Lambda}_i \dot{e}_i + K_i e_i = u_i - \tilde{R}_i I_{ai} - \tilde{\Lambda}_i \dot{q}_i - \tilde{d}_i. \quad (44-4)$$

تابع زیر به عنوان تابع ذخیره معرفی می‌شود.

$$S = \frac{1}{2} \hat{\Lambda}_i e_i^2 + \frac{1}{2\gamma_{1i}} \tilde{R}_i^2 + \frac{1}{2\gamma_{2i}} \tilde{\Lambda}_i^2 + \frac{1}{2\gamma_{3i}} \tilde{d}_i^2 \quad (45-4)$$

مشتق زمانی تابع ذخیره برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{S} = e_i \hat{\Lambda}_i \dot{e}_i - \frac{1}{\gamma_{1i}} \tilde{R}_i \dot{\tilde{R}}_i - \frac{1}{\gamma_{2i}} \tilde{\Lambda}_i \dot{\tilde{\Lambda}}_i - \frac{1}{\gamma_{3i}} \tilde{d}_i \dot{\tilde{d}}_i = e_i u_i - K_i e_i^2 \\ - \tilde{R}_i \left(\frac{1}{\gamma_{1i}} \dot{\tilde{R}}_i + e_i I_{ai} \right) - \tilde{\Lambda}_i \left(\frac{1}{\gamma_{2i}} \dot{\tilde{\Lambda}}_i + e_i \dot{q}_i \right) - \tilde{d}_i \left(\frac{1}{\gamma_{3i}} \dot{\tilde{d}}_i + e_i \right) \end{aligned} \quad (46-4)$$

از صفر قرار دادن ترم‌های درون پرانتز در رابطه فوق، قوانین تطبیق معرفی شده در رابطه (42-4) بدست می‌آید. بنابراین:

$$\dot{S} = e_i u_i - K_i e_i^2. \quad (47-4)$$

رابطه فوق، اکیداً غیرفعال بودن خروجی سیستم (44-4) را بین ورودی u_i و خروجی e_i ثابت می‌کند. از آنجایی که سیستم (44-4) مشاهده پذیر حالت صفر نیز می‌باشد، لذا مطابق لم ۲-۲، به ازای $u_i = 0$ ، پایداری مجانبی سیستم (44-4) تضمین می‌شود. به عبارت دیگر، $e_i \rightarrow 0$ و ردگیری مجانبی تحقق می‌یابد. چون تابع ذخیره (45-4)، شعاعی نامحدود است، بنابراین، ردگیری از نوع مجانبی کلی می‌باشد. با توجه به (45-4) و (46-4)، e_i ، $\tilde{\Lambda}_i$ ، $\tilde{d}_i$ و $\tilde{R}_i$ محدود هستند. از طرفی، ثابت‌های Λ_i و R_i نیز محدود می‌باشند. همچنین فرض شده که عدم قطعیت d_i ثابت و محدود است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که $\hat{\Lambda}_i$ ، $\hat{R}_i$ و $\hat{d}_i$ محدود هستند. همچنین با محدود بودن e_i و q_{di} ، محدود بودن q_i نیز نتیجه می‌شود. رابطه‌ی (41-4) برای یک مفصل به صورت زیر است.

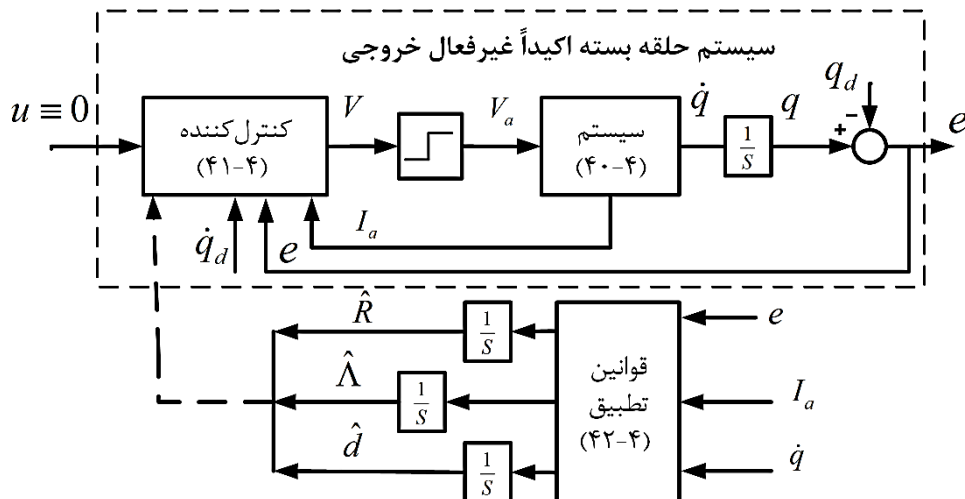
$$V_i = \hat{R}_i I_{ai} + \hat{\Lambda}_i \dot{q}_{di} - K_i (q_i - q_{di}) + \hat{d}_i + u_i \quad (48-4)$$

با توجه به فرض ۴-۱ و محدود بودن u_i و V_i ، با استفاده از رابطه فوق، نتیجه می‌شود که I_{ai} نیز محدود است. همچنین رابطه‌ی (40-4) برای یک مفصل به صورت زیر بیان می‌شود.

$$R_i I_{ai} + K_{bi} r_i^{-1} \dot{q}_i + d_i = V_i \quad (49-4)$$

بنا به رابطه‌ی فوق، می‌توان نتیجه گرفت که $\dot{q}_i$ نیز محدود است. از طرفی مطابق آنچه که در بخش‌های قبل بیان گردید، ماتریس‌های $\bar{M}(q)$ و $\bar{C}(q, \dot{q})$ محدود هستند، لذا بر اساس فرم اسکالر (27-4)، نتیجه می‌شود که $\ddot{q}_i$ نیز محدود است. ■

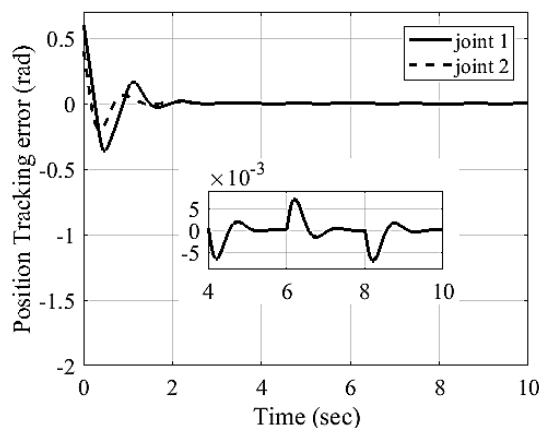
الگوی کنترلی پیشنهادی در این بخش، در شکل زیر نمایش داده شده است.



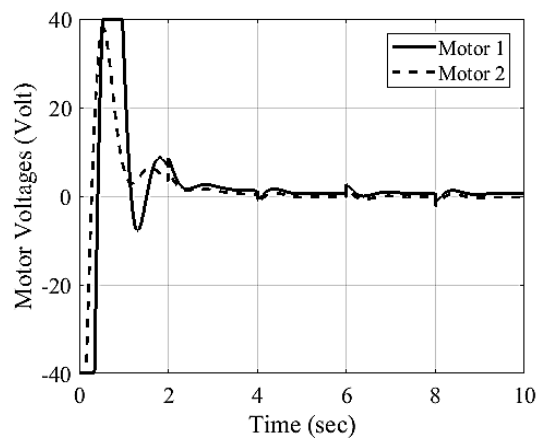
شکل (۴-۲۱): بلوک دیاگرام راهبرد ولتاژ تطبیقی مبتنی بر خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی

۴-۵-۳ نتایج شبیه‌سازی

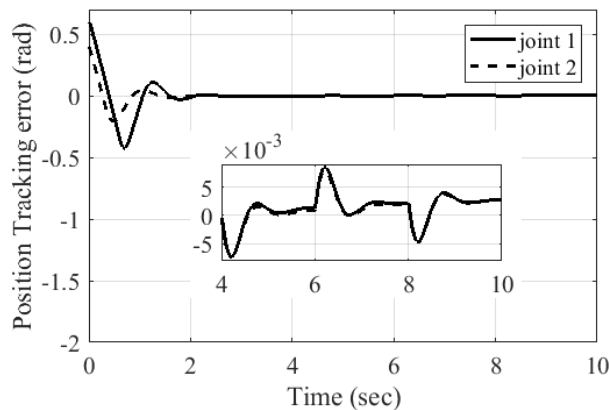
برای اعمال قانون کنترل (۴۱-۴) به ربات دو رابطی معرفی شده در بخش ۴-۳، بهره کنترل و ضرایب تطبیق به صورت $K=150$ ، $\gamma_1=\gamma_2=0.1$ و $\gamma_3=1000$ در نظر گرفته شده‌اند. نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)، یعنی $q_d=1-e^{-t}$ ، به صورت زیر است. با توجه به اینکه در این رویکرد، اغتشاش خارجی پالس شکل (۴-۳) هم به ورودی موتور و هم به گشتاور بازو اعمال شده است، اعوجاج نشان داده شده در حالت ماندگار خطای ردگیری موقعیت مفاصل و همچنین ولتاژ ورودی موتور ظاهر شده است.



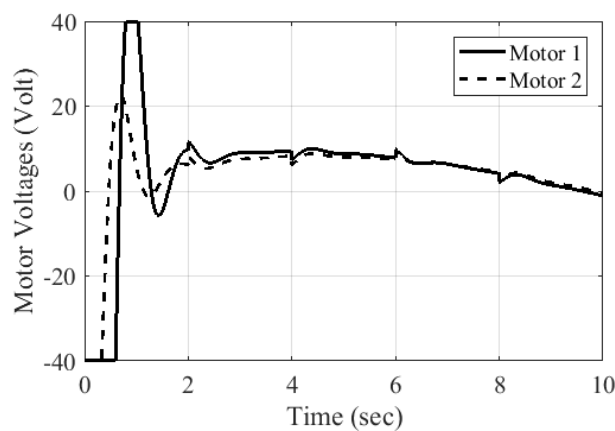
شکل (۴-۲۲): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴۱-۴) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)



شکل (۴-۲۳): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۴۱) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷) با توجه به شکل (۴-۲۲)، دامنه خطای ردگیری موقعیت مفاصل از مرتبه 10^{-3} است. همچنین، دامنه سیگنال کنترل مطابق شکل (۴-۲۳)، در محدوده مجاز قرار دارد. در ادامه، نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)، یعنی $q_d = 1 - \cos(0.1\pi t)$ ، به صورت زیر است.

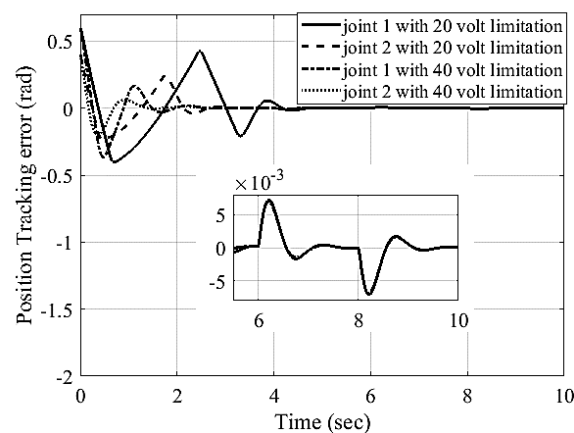


شکل (۴-۲۴): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۴۱) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)

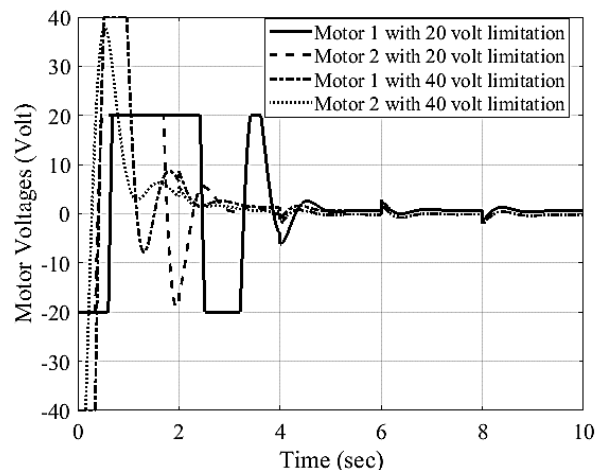


شکل (۴-۲۵): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۴۱) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)

در این حالت نیز، مطابق حالت قبل نتایج مربوط به خطای ردگیری موقعیت مفاصل و دامنه سیگنال کنترل قابل قبول است. نکته‌ای که در خصوص منحنی ولتاژ محرکه‌ها در این رویکرد وجود دارد، این است که محدودیت ۴۰ ولت اعمال شده به ورودی محرکه‌ها در هر دو حالت شبیه سازی شده به خوبی قابل مشاهده است. این مقدار بر اساس مشخصات فنی موتورهای مفاصل ربات تعیین می‌شود. اکنون فرض کنید که موتوری با حداکثر ولتاژ قابل تحمل ۲۰ ولت مورد آزمایش قرار گیرد. در ادامه، نتایج شبیه سازی به ازای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)، با در نظر گرفتن حداکثر ولتاژ ۲۰ ولت و ۴۰ ولت، به منظور مقایسه ارائه می‌شود.



شکل (۴-۲۶): خطای ردگیری موقعیت به ازای کنترل کننده (۴-۴۱) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)



شکل (۴-۲۷): ولتاژ موتورهای مفاصل با اعمال کنترل کننده (۴-۴۱) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)

با توجه به شکل (۴-۲۶) مشاهده می‌شود که مرتبه‌ی خطای ردگیری همچنان 10^{-3} است، اما زمان مورد نیاز برای رسیدن به این مقدار نسبت به حالت قبل که محدودیت ولتاژ ۴۰ ولت در نظر گرفته شده بود، افزایش یافته است.

برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های (۴-۳۶) و (۴-۴۱)، به سنسور جریان نیاز است. همچنین، از ترم $L\dot{I}_a$ صرف نظر شده است. در بخش بعد، رویکرد جدید راهبرد کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ارائه می‌شود. لذا در معادله الکتریکی موتور، جریان روتور و مشتق آن به عنوان عدم قطعیت در نظر گرفته شده که با استفاده از روش تطبیقی تخمین زده می‌شود.

۴-۶ کنترل بازوهای رباتیک با استفاده از راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه

غیر فعال بودن

در این بخش با در نظر گرفتن معادله الکتریکی محرکه‌ها و استفاده از نظریه غیرفعال بودن طراحی کنترل‌کننده‌ی مقاوم صورت می‌پذیرد. از آنجایی که مدل سیستم رباتیک با حضور محرکه‌ها در فضای حالت (۴-۱۴)، یک مدل مرتبه سوم است؛ بنابراین در این بخش، مدل‌های تقریبی با مرتبه‌های ۱ و ۲ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، با توجه به روابط (۴-۱) تا (۴-۷)، مشاهده می‌شود که جریان روتور حاوی اثرات مکانیکی بازو بر روی موتور بوده که می‌توان آن را به عنوان عدم قطعیت در نظر گرفت.

• مدل مرتبه اول:

$$V = \dot{q} + \delta_1, \quad \delta_1 = RI_a + L\dot{I}_a + (K_b r^{-1} - I)\dot{q} \quad (۴-۵۰)$$

در رابطه فوق، I ماتریس یکه است. همچنین، $\delta_1 \in R^n$ به عنوان عدم قطعیت مجتمع در نظر گرفته می‌شود.

• مدل مرتبه دوم:

$$V = \ddot{q} + \delta_2, \quad \delta_2 = RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} - \ddot{q} \quad (۴-۵۱)$$

در رابطه فوق، $\delta_2 \in R^n$ به عنوان عدم قطعیت مجتمع در نظر گرفته شده است.

فرض ۴-۳: تابع عدم قطعیت در نظر گرفته شده در مدل سیستم رباتیک با لحاظ دینامیک

محرکه‌های آن، محدود است. از طرفی، فضای تعریف مساله فرکانس پایین می‌باشد. بنابراین، اگر عدم قطعیت سیستم به تعداد بخش‌های زیاد با بازه‌های زمانی کوچک تقسیم شود، در بازه‌ی تطبیق، تغییرات هر کدام از این قطعات بسیار کوچک بوده به طوریکه می‌توان آن را ثابت فرض نمود. بنابراین، اگر پیروی نمونه برداری سیستم در عمل به اندازه‌ی کافی نسبت به تغییرات عدم قطعیت کوچک باشد، عدم قطعیت در بازه تخمین ثابت فرض می‌شود [۷۲]، [۷۱].

فرض ۴-۴: اغتشاش خارجی $d(t) \in R^n$ را نیز می‌توان در عدم قطعیت‌های δ_1 و δ_2 مربوط به سیستم‌های (۴-۵۰) و (۴-۵۱)، در نظر گرفت. همچنین، فرض می‌شود که حد بالای این اغتشاش خارجی $(\|d(t)\| \leq \varepsilon_{\max})$ ، مقداری محدود، ثابت و نامعلوم است.

۴-۷ طراحی کنترل‌کننده و تحلیل ردگیری

در این رویکرد، ابتدا طراحی مبتنی بر مدل برای سیستم‌های (۴-۵۰) و (۴-۵۱) ارائه می‌شود. به عبارت دیگر ابتدا عدم قطعیت‌های δ_1 و δ_2 ، به صورت ترم‌های ثابت و معلوم فرض می‌شوند و طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای ردگیری مسیر مطلوب توسط مفاصل بازو انجام می‌شود. سپس با استفاده از روش تطبیقی مستقل از رگرسور، مقدار این عدم قطعیت‌ها تخمین زده می‌شود.

۴-۷-۱ کنترل‌کننده مبتنی بر مدل

در این بخش، قانون کنترل مبتنی بر مدل و نظریه غیرفعال بودن، در قالب دو لم ارائه می‌شود. **لم ۴-۱:** سیستم (۴-۵۰) را در نظر بگیرید. قانون کنترل پیشنهادی زیر ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل بازوی ربات را تضمین می‌کند.

$$V = \dot{q}_d + \delta_1 + \varpi \quad (۴-۵۲)$$

که در آن:

$$\varpi = -Ke. \quad (۴-۵۳)$$

در رابطه فوق بردار e ، بردار خطای موقعیت مفاصل است و به صورت $e = q - q_d$ تعریف می‌شود. ماتریس قطری و مثبت K نیز، ماتریس بهره سیستم حلقه بسته است.

اثبات: پارامتر ϖ به عنوان یک ورودی جدید به منظور غیرفعال سازی سیستم حلقه بسته تعریف شده است. از جایگذاری قانون (۴-۵۲) در سیستم (۴-۵۰)، سیستم حلقه بسته زیر بدست می‌آید.

$$\dot{e} = \varpi \quad (۴-۵۴)$$

که در این رابطه $e = [e_1 \dots e_n]^T$ و $\varpi = [\varpi_1 \dots \varpi_n]^T$ است.

برای اثبات غیرفعال بودن سیستم حلقه بسته نیازمند تعریف یک تابع ذخیره هستیم. برای این منظور تابع ذخیره زیر پیشنهاد می‌شود.

$$S = \frac{1}{2} e^T e \quad (۴-۵۵)$$

مشتق زمانی این تابع ذخیره برابر است با:

$$\dot{S} = e^T \dot{e} = e^T \varpi = \langle e^T, \varpi \rangle. \quad (56-4)$$

لذا بر اساس تعریف ۲-۲، سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید ϖ و خروجی تعریف شده $y_v = e$ ، غیرفعال است. همچنین مطابق تعریف ۳-۲ و همچنین قضیه ۲-۲، از آنجایی که سیستم حلقه بسته رؤیت پذیر حالت صفر نیز هست، قانون (۵۲-۴) به ازای $\varpi = -\phi(y_v) = -Ke$ پایداری مجانبی نقطه تعادل سیستم حلقه بسته (۵۴-۴) را تضمین می‌کند. اثبات ردگیری مجانبی و محدود بودن تمامی متغیرهای سیستم رباتیک در اثبات نظریه ۴-۴ بیان خواهد شد. ■

لم ۲-۴: سیستم (۵۱-۴) را در نظر بگیرید. قانون کنترل پیشنهادی زیر ردگیری مجانبی مسیر مطلوب را تضمین می‌کند.

$$V = \ddot{q}_d - K_1 e - K_2 \dot{e} + \delta_2 + \varpi \quad (57-4)$$

که در آن:

$$\varpi = -K(B^T P X) \quad (58-4)$$

و K_i ($i=1,2$) و K ماتریس‌های قطری مثبت هستند. همچنین، ماتریس P از حل معادله لیاپانوف $A^T P + P A = -I$ بدست می‌آید و پارامترهای A ، X و B به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -(K_1)_{n \times n} & -(K_2)_{n \times n} \end{bmatrix}, B = [0_{n \times n} \quad I_{n \times n}]^T, X = [e \quad \dot{e}]^T, \quad (59-4)$$

لازم به ذکر است که I نشان دهنده ماتریس یک و 0 نشان دهنده ماتریس صفر است.

اثبات: مشابه لم قبل، ورودی جدید ϖ برای غیرفعال سازی مورد استفاده قرار گرفته است. با جایگذاری قانون (۵۷-۴) در سیستم (۵۱-۴)، معادله سیستم حلقه بسته به صورت زیر خواهد بود.

$$\ddot{e} + K_2 \dot{e} + K_1 e = \varpi \quad (60-4)$$

نمایش فضای حالت سیستم حلقه بسته (۶۰-۴) را می‌توان بر اساس پارامترهای معرفی شده در (۵۹-۴) به شکل زیر معرفی کرد.

$$\dot{X} = A X + B \varpi \quad (61-4)$$

بردار متغیرهای حالت X عبارت است از:

$$X = [e \quad \dot{e}]^T \quad (62-4)$$

به منظور بررسی غیرفعال بودن سیستم حلقه بسته، تابع ذخیره شعاعی نامحدود معین مثبت زیر مفروض است.

$$S = \frac{1}{2} X^T P X \quad (۴-۶۳)$$

در تابع فوق، P یک ماتریس متقارن معین مثبت است. مشتق زمانی این تابع ذخیره عبارت است از:

$$\dot{S} = \frac{1}{2} X^T (A^T P + P A) X + X^T P B \varpi. \quad (۴-۶۴)$$

بر اساس پارامترها و متغیرهای (۴-۵۹)، از آنجایی که ماتریس‌های K_i ($i=1,2$) ماتریس‌های قطری و مثبت هستند، لذا ماتریس A ، هرویتز^۱ است. بنابراین اگر ماتریس Q (معادله لیاپانوف و مثبت هستند)، یک ماتریس متقارن و معین مثبت باشد، آنگاه یک ماتریس متقارن معین مثبت P وجود دارد که در معادله لیاپانوف صدق کند [۷۱]. لذا، با تعریف بردار $y_v^T = (X^T P B)_{1 \times n}$ به عنوان خروجی سیستم، مشتق زمانی تابع ذخیره به صورت زیر قابل بازنویسی است.

$$\dot{S} = -\frac{1}{2} X^T Q X + y_v^T \varpi \leq \langle y_v, \varpi \rangle \quad (۴-۶۵)$$

لذا بر اساس تعریف ۲-۲، سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید ϖ و خروجی y_v ، غیرفعال است. همچنین مطابق تعریف ۲-۳ و قضیه ۲-۲، قانون (۴-۵۷) به ازای $\varpi = -\phi(y_v) = -(X^T P B)^T$ پایدار می‌گردد. اثبات ردگیری مجانبی و محدود بودن تمامی متغیرهای سیستم رباتیک در اثبات نظریه ۴-۵ بیان خواهد شد. ■

۴-۷-۲ کنترل کننده تطبیقی مستقل از رگرسور

در بخش قبل، کنترل کننده مبتنی بر مدل با استفاده از نظریه غیرفعال بودن برای سیستم‌های (۴-۵۰) و (۴-۵۱) ارائه شد. در این بخش از روش تطبیقی مستقل از رگرسور برای تخمین عدم قطعیت‌های δ_1 و δ_2 استفاده می‌شود.

نظریه ۴-۴: سیستم (۴-۵۰) را در نظر بگیرید. قانون کنترل مقاوم زیر، ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل بازوی رباتیک را برآورده می‌سازد.

$$V = \dot{q}_d + \hat{\delta}_1 - K e \quad (۴-۶۶)$$

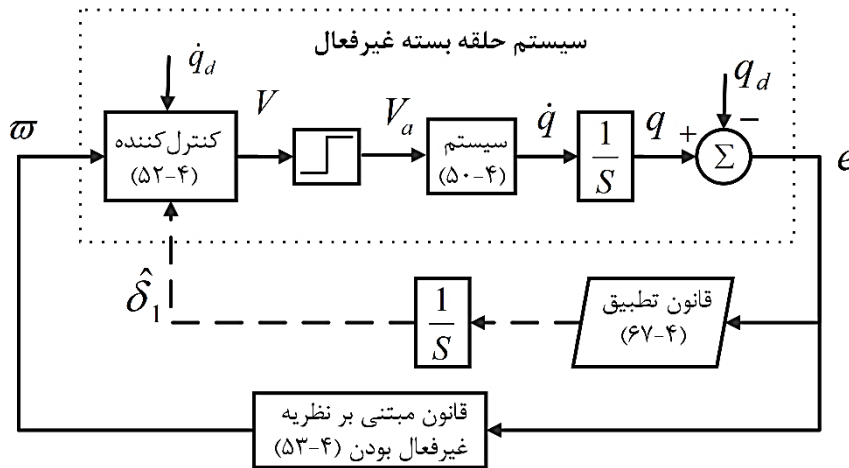
ماتریس K و بردار خطای موقعیت e در رابطه (۴-۵۳) معرفی شده‌اند. $\hat{\delta}_1$ تخمین عدم قطعیت δ_1 است که قانون تطبیق مناسب برای آن به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

^۱Hurwitz

$$\dot{\delta}_1 = -\Gamma^{-1}e \quad (۶۷-۴)$$

در این رابطه، ماتریس بهره Γ یک ماتریس قطری و مثبت است.

نمودار بلوکی این الگوی کنترلی در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل (۲۸-۴): بلوک دیاگرام راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای سیستم مرتبه اول (۵۰-۴)

اثبات: از جایگذاری قانون کنترل پیشنهادی (۶۶-۴) در سیستم (۵۰-۴)، سیستم حلقه بسته به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\dot{e} + Ke + \tilde{\delta}_1 = 0, \quad [\tilde{\delta}_1 \triangleq \delta_1 - \hat{\delta}_1] \quad (۶۸-۴)$$

برای اثبات پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته، تابع لیپانوف زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$W = \frac{1}{2}e^T e + \frac{1}{2}\tilde{\delta}_1^T \Gamma \tilde{\delta}_1 \quad (۶۹-۴)$$

بنابراین، مشتق زمانی این تابع برابر است با:

$$\dot{W} = e^T \dot{e} + \tilde{\delta}_1^T \Gamma \dot{\tilde{\delta}}_1 = e^T (-Ke - \tilde{\delta}_1) - \tilde{\delta}_1^T \Gamma \dot{\hat{\delta}}_1 = -e^T Ke - \tilde{\delta}_1^T (e + \Gamma \dot{\hat{\delta}}_1) \quad (۷۰-۴)$$

از مساوی صفر قرار دادن عبارت داخل پرانتز قانون تطبیق مناسب بدست می‌آید.

$$e + \Gamma \dot{\hat{\delta}}_1 = 0 \rightarrow \dot{\hat{\delta}}_1 = -\Gamma^{-1}e \quad (۷۱-۴)$$

بنابراین:

$$\dot{W} = -e^T Ke. \quad (۷۲-۴)$$

با توجه به نامساوی (۷۲-۴) می‌توان دریافت که مشتق تابع لیپانوف نیمه منفی است.

همچنین با توجه به (۶۹-۴) و (۷۲-۴)، $\tilde{\delta}_1$ و e محدود هستند. بنابراین بر اساس رابطه (۶۸-۴)، $\dot{e}$ محدود است. مشتق دوم تابع لیپانوف به صورت زیر خواهد بود:

$$\ddot{W} \leq -2\dot{e}^T K e. \quad (۷۳-۴)$$

با توجه به محدود بودن e و $\dot{e}$ ، مشتق دوم تابع لیاپانوف محدود است و بر اساس لم باربالات [۳]، چون W از پایین کراندار است و $\dot{W} < 0$ و $\ddot{W}$ نیز محدود می‌باشد، پس $\dot{W}$ پیوسته‌ی یکنواخت است، لذا به ازای $t \rightarrow \infty$ ، مشتق اول تابع لیاپانوف به صفر میل خواهد کرد ($\dot{W} \rightarrow 0$). بنابراین، $e \rightarrow 0$ و در نتیجه $q \rightarrow q_d$ خواهد بود. از محدود بودن e و $\dot{e}$ ، نتیجه می‌شود که q و $\dot{q}$ محدود هستند. از طرفی با توجه به محدود بودن ولتاژ محرکه‌ها مطابق فرض ۴-۱ و با استفاده از مدل الکتریکی موتور

$$RI_a + L\dot{I}_a = V - K_b r^{-1} \dot{q}$$

سمت راست این سیستم خطی که ورودی سیستم می‌باشد، محدود است. لذا خروجی سیستم محدود خواهد بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جریان موتور و مشتق آن محدود هستند. در نهایت با استفاده از رابطه (۴-۲۷)، می‌توان نتیجه گرفت که $\ddot{q}$ محدود است. ■

نظریه ۴-۵: سیستم (۴-۵۱) را در نظر بگیرید. قانون کنترل مقاوم زیر، ردگیری موقعیت مفصل بازوی رباتیک را برآورده می‌سازد.

$$V = \ddot{q}_d - K_1 e - K_2 \dot{e} + \hat{\delta}_2 - K(B^T P X) \quad (۷۴-۴)$$

ماتریس‌های K_i ($i=1,2$) و عبارت $K(B^T P X)$ قبلاً در لم ۴-۲ معرفی شده‌اند. همچنین قانون تطبیق مناسب برای تخمین عدم قطعیت δ_2 ، برابر است با:

$$\dot{\hat{\delta}}_2 = -\Psi^{-1} B^T P^* X. \quad (۷۵-۴)$$

در این رابطه ماتریس بهره Ψ ، یک ماتریس قطری و مثبت است. ماتریس P^* نیز پاسخ یکتای معادله لیاپانوف $\bar{A}^T P^* + P^* \bar{A} = -I$ می‌باشد (I ماتریس یکه است).

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ (-K'_1)_{n \times n} & (-K'_2)_{n \times n} \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} (P_1)_{n \times n} & (P_2)_{n \times n} \\ (P_2)_{n \times n} & (P_3)_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad (۷۶-۴)$$

$$\begin{cases} K'_1 \triangleq K_1 + K P_2 \\ K'_2 \triangleq K_2 + K P_3 \end{cases}$$

ویژگی ۴-۴: همانطور که قبلاً نیز بیان گردید، ماتریس‌های K و K_i ($i=1,2$)، ماتریس‌های مثبت و قطری هستند. مطابق اثبات لم ۴-۲، ماتریس P معرفی شده در (۴-۷۶)، پاسخ یکتای معادله لیاپانوف یک سیستم خطی در فرم همراه است. بنابراین، ماتریس‌های P_i ($i=1,2,3$) نیز قطری هستند. اما عناصر روی قطر اصلی در ماتریس‌های P_1 و P_3 مثبت و در ماتریس P_2 منفی است [۷۳]. بنابراین، حاصل ضرب ماتریس K در P_i ($i=1,2,3$) یک ماتریس قطری خواهد بود. پس ماتریس‌های تعریف

شده K'_i ($i=1,2$) در رابطه (۷۶-۴) قطری هستند. همچنین، عناصر K'_2 مثبت می‌باشند و عناصر ماتریس K'_1 تحت شرط زیر مثبت است.

$$K_1 > KP_2 \quad (۷۷-۴)$$

اثبات نظریه ۴-۵: از جایگذاری قانون کنترل پیشنهادی (۷۴-۴) در سیستم (۴-۵۱)، سیستم حلقه بسته به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\ddot{e} + K'_1 \dot{e} + K'_2 e + \tilde{\delta}_2 = 0, \quad \tilde{\delta}_2 \triangleq \delta_2 - \hat{\delta}_2 \quad (۷۸-۴)$$

نمایش فضای حالت سیستم حلقه بسته فوق عبارت است از:

$$\dot{X} = \bar{A}X + B\alpha \quad (۷۹-۴)$$

که در این رابطه، $\alpha = -\tilde{\delta}_2$ نقش ورودی سیستم را ایفا می‌کند. همانند حالت قبل، برای تحلیل پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته، تابع لیاپانوف زیر، پیشنهاد می‌شود.

$$W = \frac{1}{2} X^T P^* X + \frac{1}{2} \tilde{\delta}_2^T \Psi \tilde{\delta}_2 \quad (۸۰-۴)$$

مشتق زمانی این تابع عبارت است از:

$$\dot{W} = \frac{1}{2} X^T (\bar{A}^T P^* + P^* \bar{A}) X - \tilde{\delta}_2^T B^T P^* X - \tilde{\delta}_2^T \Psi \dot{\tilde{\delta}}_2. \quad (۸۱-۴)$$

مطابق توضیحات و شرایط مطرح شده در ویژگی ۴-۴ (شرایط (۷۷-۴))، ماتریس‌های K'_1 و K'_2 قطری و مثبت هستند. لذا ماتریس $\bar{A}$ هرویتز است. بنابراین، اگر ماتریس Q در معادله لیاپانوف $\bar{A}^T P^* + P^* \bar{A} = -Q$ یک ماتریس معین مثبت و متقارن باشد، آنگاه پاسخ یکتای معین مثبت و متقارن P^* وجود دارد که معادله لیاپانوف مذکور را برآورده می‌سازد. بنابراین، مشتق تابع لیاپانوف به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{W} = -\frac{1}{2} X^T Q X - \tilde{\delta}_2^T (B^T P^* X + \Psi \dot{\tilde{\delta}}_2) \quad (۸۲-۴)$$

از مساوی با صفر قرار دادن عبارت داخل پرانتز، قانون تطبیق مناسب بدست خواهد آمد.

$$\dot{\tilde{\delta}}_2 = -\Psi^{-1} B^T P^* X \quad (۸۳-۴)$$

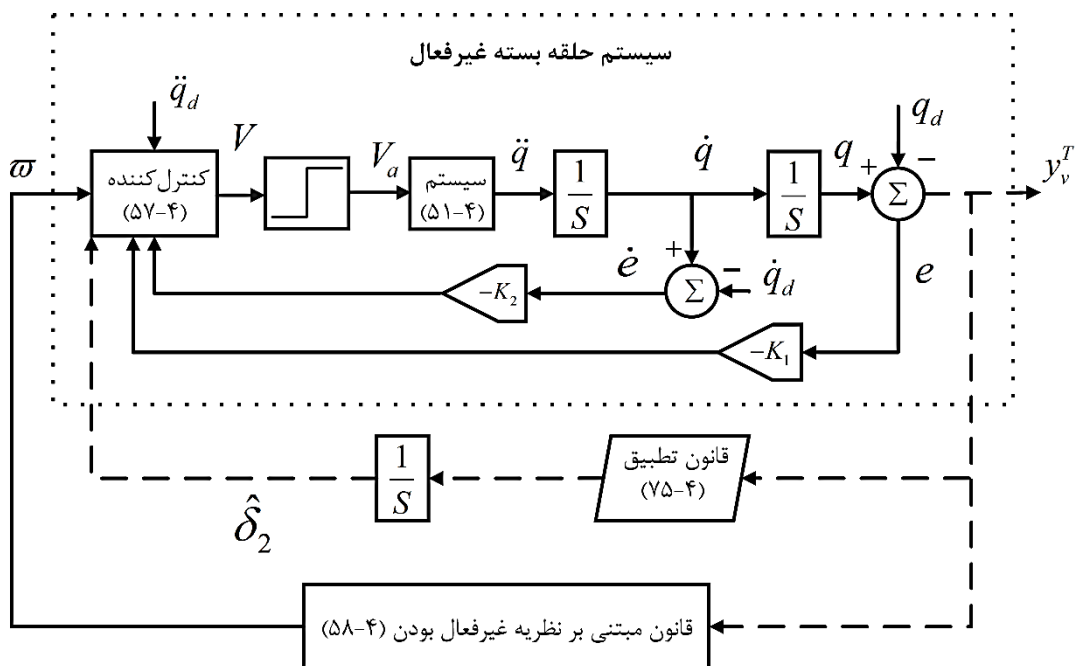
بنابراین:

$$\dot{W} = -\frac{1}{2} X^T Q X. \quad (۸۴-۴)$$

$$\ddot{W} = -\dot{X}^T Q X \quad (۸۵-۴)$$

با توجه به (۸۰-۴) و (۸۴-۴)، X و $\ddot{\delta}_2$ محدود هستند، بنابراین، بر اساس دینامیک حلقه بسته (۷۹-۴)، $\dot{X}$ نیز محدود است. در نتیجه $\dot{W}$ نیز محدود است و بر اساس لم باربالات، به ازای $t \rightarrow \infty$ ، W به صفر میل خواهد کرد. به عبارت دیگر، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته (۷۹-۴) تضمین می‌شود. بنابراین، $X \rightarrow 0$ و در نتیجه، $[e, \dot{e}] \rightarrow 0$. با توجه به محدود بودن، X و $\ddot{\delta}_2$ و با استفاده از رابطه (۷۸-۴)، $\ddot{e}$ نیز محدود است. پس می‌توان نتیجه گرفت که q ، $\dot{q}$ و $\ddot{q}$ محدود هستند. بنابراین، ردگیری مجانبی تحقق می‌یابد. ■

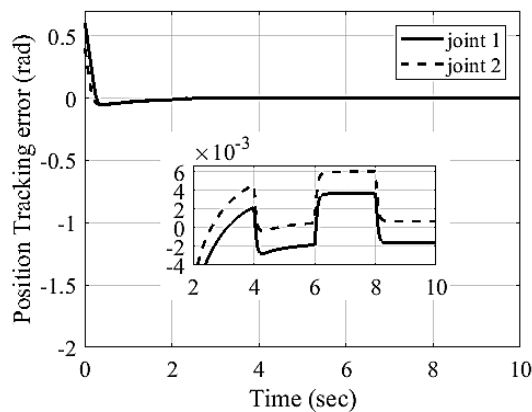
نمودار بلوکی این الگوی کنترلی در شکل ذیل نشان داده شده است.



شکل (۲۹-۴): بلوک دیاگرام راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای سیستم مرتبه دوم (۵۱-۴)

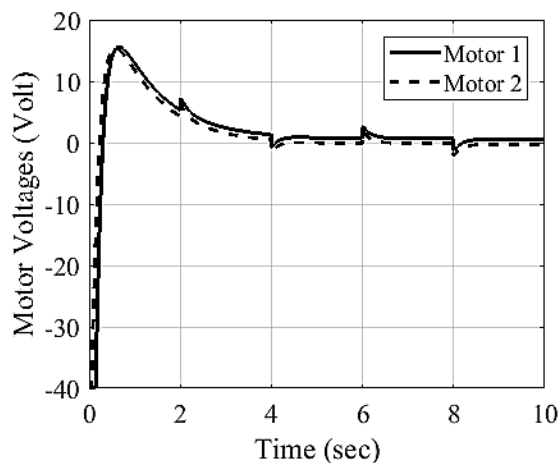
۸-۴ نتایج شبیه سازی

در این بخش برای ارزیابی کارایی کنترل کننده‌های (۶۶-۴) و (۷۴-۴)، از ربات دو رابطی معرفی شده در بخش ۳-۴، استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا نتایج ردگیری موقعیت مفاصل برای کنترل کننده (۶۶-۴) در ازای دو مسیر مطلوب (۱۷-۴) و (۱۸-۴) نمایش داده می‌شود. سپس نتایج مربوط به کنترل کننده (۷۴-۴) در ازای دو مسیر مطلوب یاد شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لذا، بهره‌ی کنترلی و ضریب تطبیق قانون کنترل (۶۶-۴) برای ردگیری موقعیت مطلوب (۱۷-۴)، یعنی $q_d = 1 - e^{-t}$ ، به صورت $K=150$ و $\gamma=500$ در نظر گرفته شده است. نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل، در شکل (۳۰-۴) نشان داده شده است.



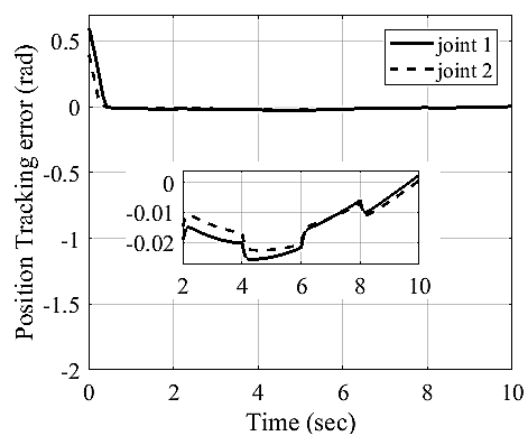
شکل (۴-۳۰): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده‌ی (۴-۶۶) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)

همانطور که در شکل فوق نیز قابل مشاهده است، مرتبه خطای ماندگار ردگیری موقعیت مفاصل ربات، 10^{-3} می‌باشد. همچنین با توجه به رفتار سیگنال کنترل که در شکل زیر قابل مشاهده است، می‌توان دریافت که دامنه ولتاژ محرکه‌ها در بازه مجاز قرار دارد.



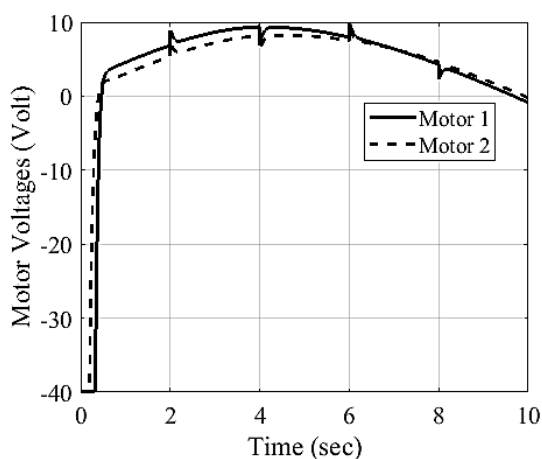
شکل (۴-۳۱): ولتاژ محرکه‌های بازو به ازای کنترل کننده‌ی (۴-۶۶) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)

بهره کنترل و ضریب تطبیق برای ردگیری مسیر مطلوب دوم به وسیله‌ی قانون کنترل (۴-۶۶)، برابر $K = 350$ و $\gamma = 500$ در نظر گرفته شده است. نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل برای مسیر مطلوب $q_d = 1 - \cos(0.1\pi t)$ ، در شکل زیر نشان داده شده است. خطای ماندگار ردگیری موقعیت مفاصل برای این حالت از مرتبه 10^{-2} است که نسبت به مسیر مطلوب اول، بیشتر شده است اما قابل قبول می‌باشد.



شکل (۴-۳۲): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده‌ی (۴-۶۶) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)

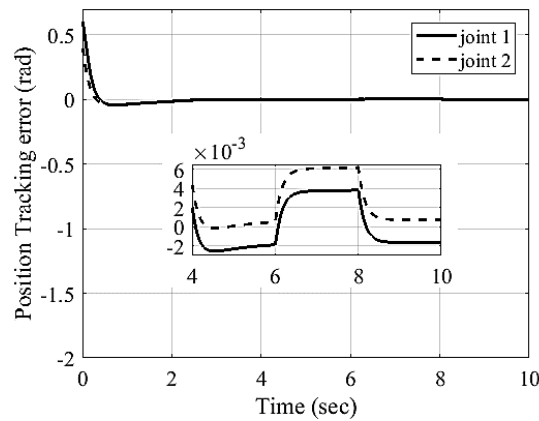
همچنین، دامنه ولتاژ محرکه‌ها به ازای این قانون کنترل همچنان در بازه مجاز قرار دارد.



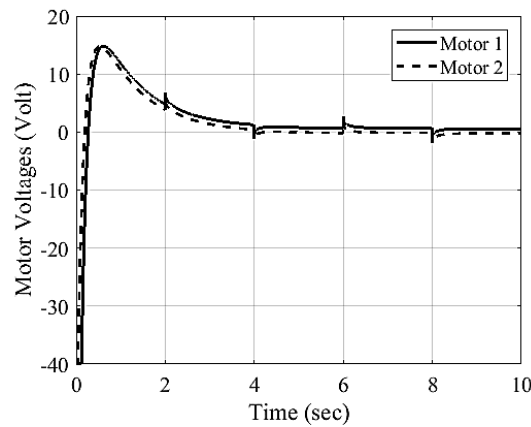
شکل (۴-۳۳): ولتاژ محرکه‌های بازو به ازای کنترل کننده‌ی (۴-۶۶) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)

در ادامه، نتایج مربوط به کنترل کننده (۴-۷۴) در ازای دو مسیر مطلوب یاد شده ارائه می‌شود.

در این حالت، بهره‌های کنترل برابر $K_1' = 100$ ، $K_2' = 25$ و $K = 10$ و ضریب تطبیق برابر $\Psi = 100$ در نظر گرفته شده است. بنابراین، نتیجه ردگیری موقعیت مفاصل و سیگنال کنترل محرکه‌ها در شکل-های زیر نمایش داده شده است.

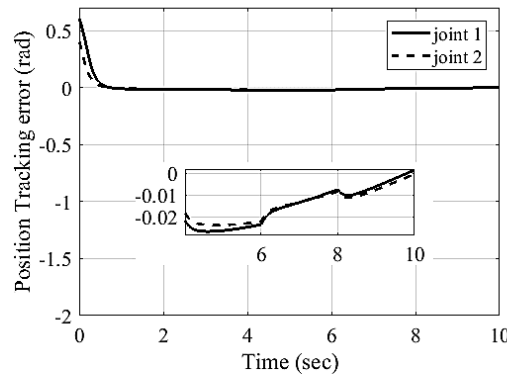


شکل (۴-۳۴): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده‌ی (۴-۷۴) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)

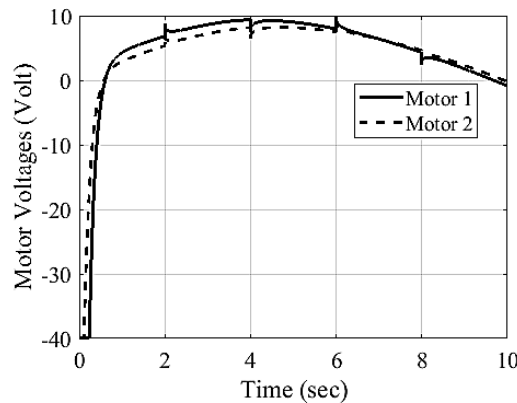


شکل (۴-۳۵): ولتاژ محرکه‌های بازو به ازای کنترل کننده‌ی (۴-۷۴) برای مسیر مطلوب اول (۴-۱۷)

همانطور که در شکل‌های فوق می‌توان دید، خطای ماندگار ردگیری موقعیت مفاصل ربات از مرتبه 10^{-3} است که مقدار قابل قبولی می‌باشد. همچنین دامنه سیگنال ولتاژ محرکه‌ها در بازه قابل قبول برای موتورهای جریان مستقیم قرار دارد. در ادامه، نتیجه ردگیری موقعیت مطلوب مسیر دوم $q_d = 1 - \cos(0.1\pi t)$ نشان داده شده است. با توجه به خروجی‌های شبیه‌سازی، دامنه سیگنال ولتاژ موتورها همچنان در بازه مجاز قرار دارد. اما خطای ردگیری موقعیت مفاصل نسبت به مسیر اول اندکی بیشتر شده است.



شکل (۴-۳۶): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده‌ی (۴-۷۴) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)



شکل (۴-۳۷): ولتاژ محرکه‌های بازو به ازای کنترل کننده‌ی (۴-۷۴) برای مسیر مطلوب دوم (۴-۱۸)

توضیح: در این بخش با توجه به فرض ۴-۳، مقدار مشتق عدم قطعیت معرفی شده در مدل سیستم‌های (۴-۵۰) و (۴-۵۱) صفر است. به عبارت دیگر $\dot{\delta}_{1,2} = 0$ ، اکنون مساله اثبات پایداری مجانبی در صورتی که این فرض برقرار نباشد مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور ادامه اثبات لم ۴-۱ را به این صورت بیان می‌شود.

فرض کنید که مشتق عدم قطعیت δ_1 قابل صرف نظر کردن نباشد یعنی، $\dot{\delta}_1 \neq 0$.

بنابراین، مشتق تابع لیاپانوف با در نظر گرفتن قانون تطبیق $\dot{\delta}_1 = -\Gamma^{-1}e$ به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{W} = -e^T K e + \tilde{\delta}_1^T \Gamma \dot{\delta}_1$$

با فرض اینکه مشتق عدم قطعیت مقداری محدود است ($\|\dot{\delta}_1\|_2 \leq \rho$)، می‌توان حد پایین نرم خطا را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\dot{W} \leq -\lambda_{\min}(K) \|e\|_2^2 + \lambda_{\min}(\Gamma) \cdot \rho \cdot \|\tilde{\delta}_1\|_2$$

بنابراین، اگر $\lambda_{\min}(K) \|e\|_2^2 > \lambda_{\min}(\Gamma) \cdot \rho \cdot \|\tilde{\delta}_1\|_2$ باشد، آنگاه $\dot{W} < 0$ خواهد شد.

$$\|e\|_2^2 > \frac{\lambda_{\min}(\Gamma) \cdot \rho \cdot \|\tilde{\delta}_1\|_2}{\lambda_{\min}(K)} \rightarrow \|e\|_2 > \sqrt{\frac{\lambda_{\min}(\Gamma) \cdot \rho \cdot \|\tilde{\delta}_1\|_2}{\lambda_{\min}(K)}} \triangleq \mu$$

به عبارت دیگر، دینامیک خطا بیرون از دایره‌ای به شعاع μ پایدار مجانبی است. مقدار خطا به ضرایب K نیز بستگی دارد. یعنی هرچه مقدار بهره کنترلی بیشتر شود، شعاع دایره کوچکتر خواهد شد. البته لازم به ذکر است که این نوع تنظیم ضرایب بهره‌های کنترلی همیشه باعث پایداری نخواهد شد، زیرا در عمل ممکن است ورودی کنترلی محدود بوده و به اشباع برود.

۹-۴ مقایسه عملکرد روش‌های کنترل ولتاژ ارائه شده در این رساله

در این بخش عملکرد تمامی کنترل‌کننده‌های ولتاژ مبتنی بر غیرفعال بودن ارائه شده در این رساله، با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای این منظور، مقدار RMS خطای ردگیری موقعیت مفاصل و همچنین ولتاژ موتورهای مطابق رابطه زیر نمایش داده می‌شود. به منظور جلوگیری از اثرگذاری بخش حالت گذرا، مقدار RMS برای خطای ردگیری موقعیت مفاصل در بازه $5 \leq t \leq 10$ محاسبه می‌شود.

$$RMS\{e\} = \sqrt{\frac{1}{5} \int_{t=5}^{t=10} \|e\|^2 dt} \quad , \quad RMS\{V_a\} = \sqrt{\frac{1}{10} \int_{t=0}^{t=10} \|V_a\|^2 dt} \quad (۸۶-۴)$$

جدول (۳-۴) مقدار RMS را برای تمامی کنترل‌کننده‌های ولتاژ ارائه شده به ازای مسیر مطلوب اول (۱۷-۴) در این فصل را نشان می‌دهد.

جدول (۳-۴): مقایسه عملکرد کنترل کننده های ولتاژ مبتنی بر غیرفعال بودن ارائه شده

		کنترل ولتاژ مبتنی بر		راهبرد ولتاژ مبتنی بر			
		خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی		خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی (با حذف ثابت زمانی الکتریکی موتور)		نظریه غیرفعال بودن (بدون حذف ثابت زمانی الکتریکی موتور و در حضور عدم قطعیت در مدل موتور)	
						مرتبه ۲، قانون کنترل (۷۴-۴)	مرتبه ۱، قانون کنترل (۶۶-۴)
		مدل ربات با حذف ثابت زمانی الکتریکی موتور، قانون کنترل (۳۴-۴)	مبتنی بر مدل ربات، قانون کنترل (۲۰-۴)	تطبیقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل الکتریکی موتور، قانون کنترل (۴۱-۴)	مبتنی بر مدل موتور، قانون کنترل (۳۶-۴)		
RMS e	مفصل ۱	۰,۰۰۴۷	۰,۰۰۴۷	$۱,۵ \times ۱۰^{-۶}$	۰,۰۰۲۳	۰,۰۰۲۶	۰,۰۰۲۶
	مفصل ۲	۰,۰۰۴۶	۰,۰۰۴۶	$۱,۵ \times ۱۰^{-۶}$	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۳۸	۰,۰۰۳۷
RMS V_a	موتور ۱	۳,۵۸	۳,۵۹	۵,۹	۱۲,۵۸	۸,۲۷	۷,۵۹
	موتور ۲	۳,۱۸	۳,۱۸	۴,۶۶	۹,۴۵	۷,۲۴	۶,۴

با توجه به مقادیر نشان داده شده در جدول فوق، مشاهده می شود که عملکرد تمامی کنترل کننده های پیشنهادی در این فصل، قابل قبول می باشد و مرتبه خطای ردگیری $۱۰^{-۳}$ است. همچنین ولتاژ موتورهای در بازه مجاز برای موتورهای جریان مستقیم قرار دارد. همانطور که در جدول بالا مشاهده می شود، رویکرد کنترل ولتاژ و راهبرد ولتاژ با یکدیگر مقایسه شده است. در رویکرد کنترل ولتاژ، قانون کنترل به مدل ربات وابسته است که منجر به ایجاد پیچیدگی در قانون کنترل می شود. از مقایسه ی نتایج شبیه سازی به ازای کنترل کننده های (۳۶-۴)، (۴۱-۴)، (۶۶-۴) و (۷۴-۴) که با استفاده از راهبرد ولتاژ طراحی شده اند با کنترل کننده های (۲۰-۴) و (۳۴-۴) که با استفاده از کنترل ولتاژ مبتنی بر مدل ربات هستند، می توان دریافت که تنها با در نظر گرفتن معادله الکتریکی موتور می توان به هدف ردگیری مطلوب برای ردگیری موقعیت مفاصل دست یافت. همچنین، می توان دریافت که حذف ثابت زمانی الکتریکی موتور در نتایج شبیه سازی خطایی ایجاد نمی کند و نتایج قابل قبول هستند.

۴-۹-۱ مقایسه‌ی راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن با راهبرد مرسوم

گشتاور [۲۴]

در مرجع [۲۴]، کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای بازوهای رباتیک ارائه شده است. مدل ربات همانند مدل (۴-۱)، به صورت زیر می‌باشد.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (۴-۸۷)$$

قانون کنترل پیشنهادی در مرجع [۲۴]، به صورت زیر است.

$$\tau = M(q) \underbrace{[\ddot{q}_d - k_d \dot{e} - k_p e]}_u + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \Pi \quad (۴-۸۸)$$

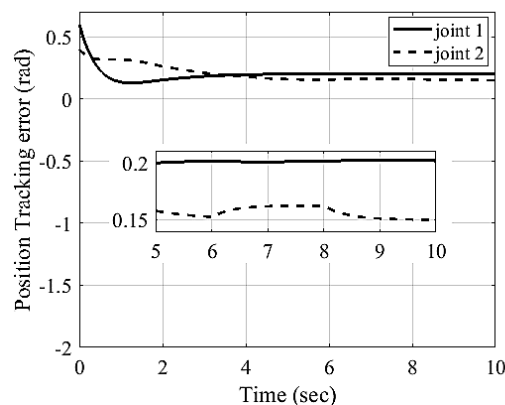
در این رابطه Π به عنوان یک تابع محدود کننده‌ی گشتاور معرفی شده است.

$$\Pi_i = (\bar{\tau}_i - |u_i|) f_i(u_i) \quad , \quad f_i(u_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } |u_i| \leq \bar{\tau}_i \\ 1 & \text{if } |u_i| > \bar{\tau}_i \\ -1 & \text{if } |u_i| < -\bar{\tau}_i \end{cases} \quad (۴-۸۹)$$

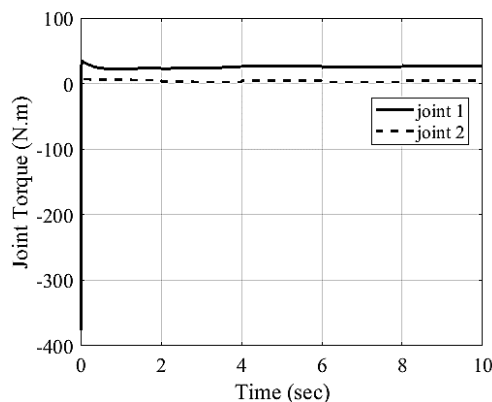
لازم به ذکر است که اندیس i به مفصل i ام اشاره دارد و $\bar{\tau} > 0$ حد بالای گشتاور مطلوب است. در متن مرجع [۲۴]، برای تکمیل فرآیند اثبات پایداری مجانبی دینامیک خطای سیستم حلقه بسته، محدودیت‌هایی روی ضرایب k_p و k_d لحاظ شده است که به شرح ذیل می‌باشد. با فرض اینکه $\theta_i > 1$ و $\varepsilon_i > 1$ پارامترهای ثابتی باشند، روابط زیر برقرار است.

$$(k_d)_i > \theta_i \varepsilon_i > \varepsilon_i \quad , \quad (k_p)_i + \varepsilon_i (k_d)_i - \varepsilon_i^2 > 0 \quad (۴-۹۰)$$

مطابق توضیحات گذشته در خصوص کنترل مبتنی بر گشتاور، قانون کنترل (۴-۸۸) نیز به مدل ربات وابسته است. همچنین فرض شده است که تمامی پارامترهای ربات معلوم هستند. با این حال، در این قسمت، کنترل کننده‌ی (۴-۸۸)، با کنترل کننده پیشنهادی (۴-۷۴) مقایسه می‌شود. برای این منظور، مسیر مطلوب (۴-۱۷) در نظر گرفته شده است. همچنین، سیگنال اغتشاش خارجی معرفی شده در شکل (۲-۱) نیز به ورودی گشتاور اعمال شده است. بهره‌های کنترلی برای قانون کنترل (۴-۸۸) به صورت $k_d = \text{diag}\{6, 10\}$ و $k_p = \text{diag}\{13, 20\}$ تنظیم شده و حد بالای گشتاور مفاصل به صورت $\bar{\tau} = [45 \quad 12]^T$ در نظر گرفته شده است [۲۴]. خطای ردگیری موقعیت مفاصل ناشی از اعمال قانون کنترل (۴-۸۸) به سیستم (۴-۱) در حضور اغتشاش خارجی، در شکل ذیل نشان داده شده است.



شکل (۴-۳۸): خطای ردگیری موقعیت مفاصل ناشی از اعمال قانون کنترل (۴-۸۸) به سیستم (۴-۱) برای هر دو مفصل بازو



شکل (۴-۳۹): دامنه ورودی گشتاور ناشی از اعمال قانون کنترل (۴-۸۸)

مقدار RMS خطای ردگیری موقعیت به ازای هر دو کنترل کننده در جدول زیر بیان شده است.

جدول (۴-۴): مقایسه عملکرد راهبرد ولتاژ و گشتاور در حضور عدم قطعیت

		کنترل کننده ولتاژ (۴-۷۴)	کنترل کننده گشتاور (۴-۸۸) [۲۴]
RMS e	مفصل ۱	۰,۰۰۲۶	۰,۲
	مفصل ۲	۰,۰۰۳۷	۰,۱۵

با توجه به مقدار خطای ردگیری موقعیت، می توان مشاهده نمود که کنترل ولتاژ نسبت به کنترل گشتاور مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، عملکرد بهتری دارد. همچنین، ساختار قانون کنترل ولتاژ بسیار ساده تر از کنترل کننده مبتنی بر گشتاور می باشد.

فصل پنجم: اصلاح کنترل مود لغزشی برای سیستم‌های
غیرخطی دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی

۵-۱ مقدمه

طراحی کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی، از اهمیت زیادی برخوردار است. از طرفی، به دلیل مقاوم بودن ذاتی نظریه غیرفعال بودن در برابر عدم قطعیت‌های سیستم و کارایی قابل ملاحظه آن در کنترل انواع سیستم‌ها با استفاده از انرژی سیستم، در این فصل روش کنترل مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی ارائه می‌شود. برای این منظور، با استفاده از نظریه غیرفعال بودن سطح لغزش مناسب برای غلبه بر عدم قطعیت‌هایی که در کانال ورودی سیستم قرار ندارند، طراحی می‌شود. با استفاده از این سطح لغزش، دینامیک بلوک اول سیستم در حضور عدم قطعیت از پایداری مجانبی برخوردار خواهد بود؛ به طوری که متغیرهای حالت در زمان محدود به سطح لغزش می‌رسند. به عبارت دیگر، متغیرهای حالت روی سطح لغزش حرکت کرده و به مبدا مختصات خواهند رسید. سپس با استفاده از قانون کنترل مود لغزشی، پایداری مجانبی کل سیستم تضمین خواهد شد. این روش برای دسته وسیعی از سیستم‌های غیرخطی ارائه می‌شود. برای نمایش کارایی آن، قانون کنترل پیشنهادی روی سیستم بازوی رباتیک اعمال شده و عملکرد آن در ردگیری موقعیت مفاصل بازو مسیره‌های مطلوب نمایش داده می‌شود.

۵-۲ معرفی ریاضیات مساله

طراحی کنترل کننده به روش مود لغزشی برای سیستم‌هایی که در قالب فرم رگولار قرار دارند، بسیار ساده‌تر است [۱۰]. مطابق رابطه زیر، فرم رگولار، برای سیستم‌های افاین از دو بلوک تشکیل می‌شود.

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, t) \quad (۵-۱)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, t) + B_2(x_1, x_2, t)u$$

در سیستم فوق، $x_1 \in R^{n-m}$ و $x_2 \in R^m$ و B_2 یک تابع ماتریسی غیرمنفرد با ابعاد $m \times m$ است. به عبارت دیگر درمینان B_2 مخالف صفر است. همانطور که مشاهده می‌شود، ورودی کنترلی تنها در بلوک دوم ظاهر شده است و بلوک اول مستقل از ورودی کنترلی می‌باشد. در واقع، ابعاد بلوک دوم بر اساس ابعاد بردار ورودی کنترلی سیستم در نظر گرفته می‌شود. برای استفاده از روش مود لغزشی در این ساختار، ابتدا متغیر حالت x_2 به عنوان ورودی بلوک اول در نظر گرفته شده و به گونه‌ای پیشنهاد می‌شود که پایداری مجانبی بلوک اول را تضمین نماید. به عبارت دیگر:

$$x_2 = -F_0(x_1). \quad (2-5)$$

بنابراین، قانون کنترل مود لغزشی مرسوم که در آن از یک تابع ناپیوسته مانند تابع علامت استفاده می‌شود، متغیرهای حالت را به سمت سطح لغزش η هدایت می‌نماید. بنابراین، متغیرهای حالت از هر شرط اولیه‌ای، در زمان محدود به روی سطح لغزش رسیده و تا رسیدن به مبدا مختصات روی آن باقی می‌مانند. سطح لغزش η مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۰].

$$\eta = x_2 + F_0(x_1) \quad (3-5)$$

به عبارت دیگری، زمانی که متغیرهای حالت روی سطح لغزش η قرار بگیرند، $\eta = 0$ شده و پایداری مجانبی دینامیک زیر، تضمین خواهد شد.

$$\dot{x}_1 + F_0(x_1) = 0 \quad (4-5)$$

لذا، فرآیند طراحی کنترل‌کننده‌ی مود لغزشی در قالب فرم رگولار، بسیار آسان است. لازم به ذکر است که مدل فضای حالت اکثر سیستم‌های عملی در این فرم قرار دارد، یا قابل تبدیل به این فرم است [۳].

با توجه به توضیحات فوق، معادلات فضای حالت سیستم رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌های آن در قالب فرم رگولار قرار دارد. در این فصل، ابتدا حالت کلی سیستم‌های غیرخطی که در فرم رگولار قرار دارند، در نظر گرفته می‌شود. سپس قانون کنترل مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای آن ارائه می‌شود.

سیستم غیرخطی زیر که حالت خاصی از سیستم (۵-۱) به شمار می‌رود، مفروض است.

$$\begin{aligned} \dot{\chi} &= T_a(\chi) + Y(\chi)\xi + \Delta(\chi, \xi) \\ \dot{\xi} &= T_b(\chi, \xi) + u + \delta(\chi, \xi, u) \end{aligned} \quad (5-5)$$

در این سیستم $\chi \in R^{n-m}$ و $\xi \in R^m$ متغیرهای حالت سیستم هستند. همچنین توابع T_a ، Y و T_b توابعی هموار، به صورت محلی لیپ‌شیتز^۱ و اکیداً صعودی می‌باشند به طوری که $T_a(0) = Y(0) = 0$ است. در سیستم (۵-۵)، عدم قطعیت Δ نسبت به ورودی $u \in R^m$ ناسازگار بوده و همچنین شرط $\Delta(0,0) = 0$ برای آن صادق است. متغیر δ نیز معرف مجموعه‌ای از عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات مجتمع است که با ورودی سیستم سازگار می‌باشد.

^۱Locally Lipchitz

مطابق توضیحاتی که در ارتباط با نحوه طراحی کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم (۵-۱) داده شد، در خصوص طراحی کنترل کننده برای سیستم (۵-۵) نیز ابتدا باید متغیر حالت ξ به گونه‌ای پیشنهاد شود که پایداری جانبی بلوک اول در حضور عدم قطعیت Δ تضمین شود. به عبارت دیگر، پایداری جانبی دینامیک زیر با طراحی مناسب ورودی ξ تضمین گردد.

$$\dot{\chi} = T_a(\chi) + Y(\chi)\xi + \Delta(\chi, \xi) \quad (۵-۶)$$

ویژگی ۵-۱: سیستم غیرخطی (۵-۵)، در قالب فرم رگولار می‌باشد. ساختار رگولار، یک قالب مرسوم برای توصیف مدل ریاضی سیستم‌های غیرخطی عملی به شمار می‌رود. به عنوان مثال، بازوهای رباتیک، سیستم فضاپیما، سیستم‌های ژيروسکوپی و غیره یا در قالب ساختار رگولار تعریف می‌شوند و یا قابلیت تبدیل به این قالب را دارند [۷۶]–[۷۴].

فرض ۵-۱: مشابه فرض ۴-۱، اگر پریود نمونه برداری سیستم در عمل به اندازه کافی نسبت به تغییرات عدم قطعیت‌های Δ و δ کوچک باشد، این دو عدم قطعیت در بازه تخمین، ثابت فرض می‌شوند. این فرض از منظر مسائل عملی کاملاً مرسوم و رایج است [۷۱].

در بخش بعد، نحوه طراحی سطح لغزش مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ارائه می‌شود.

۵-۳ طراحی سطح لغزش مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن

در سیستم (۵-۵)، سطح لغزش باید به گونه‌ای طراحی شود که پایداری جانبی بلوک اول تضمین شود. به عبارت دیگر، یک تابع پیوسته و مشتق پذیر $\mathcal{V}(\cdot)$ (که $\mathcal{V}(0) = 0$) باید معرفی باشد تا از جایگذاری $\xi = \mathcal{V}(\chi)$ در بلوک اول سیستم (۵-۵)، پایداری جانبی دینامیک $\dot{\chi} = T_a + Y\mathcal{V} + \Delta$ تضمین شود. سپس معادله سطح لغزش از رابطه $\eta = \chi - \mathcal{V}$ حاصل می‌شود [۳]. در نظریه زیر، سطح لغزش مناسب مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای غلبه بر عدم قطعیت Δ طراحی شده است.

نظریه ۵-۱: سیستم غیرخطی دارای عدم قطعیت (۵-۵) را در نظر بگیرید. فرض کنید که یک تابع معین مثبت $S(\chi)$ وجود دارد، به طوری که مشتق اول آن نسبت به χ اکیداً صعودی بوده و همچنین، $\left. \frac{\partial S}{\partial \chi} \right|_{\chi=0} = 0$ باشد. بنابراین، با انتخاب سطح لغزش η ، پایداری جانبی دینامیک (۵-۶) تضمین خواهد شد.

$$\eta = \xi - G_r^{-1} \left[-\frac{\partial S}{\partial \chi} (T_a + \hat{\Delta}) \right] + \phi(G^T) \quad (۵-۷)$$

در رابطه فوق،

$$G = \frac{\partial S}{\partial \chi} \Upsilon \quad (۸-۵)$$

و $G_r^\dagger \triangleq G^T (GG^T)^{-1}$ به عنوان معکوس مجازی بردار G تعریف می‌شود. بردار G به ازای تمامی مقادیر χ دارای رنک کامل می‌باشد. علاوه بر این، $\hat{\Delta}$ نشان دهنده‌ی تخمین عدم قطعیت Δ است که مقدار آن از قانون تطبیق زیر قابل محاسبه است.

$$\dot{\Delta} = \Gamma \left(\frac{\partial S}{\partial \chi} \right)^T \quad (۹-۵)$$

در رابطه فوق، Γ ماتریس قطری است که المان‌های آن را اعداد ثابت مثبت تشکیل می‌دهند.

اثبات: قانون زیر، بلوک χ در سیستم غیرخطی (۵-۵) را به یک بلوک غیرفعال مقاوم در برابر عدم قطعیت Δ تبدیل می‌کند.

$$\xi = G_r^\dagger \left[-\frac{\partial S}{\partial \chi} (T_a + \hat{\Delta}) \right] + u_p \quad (۱۰-۵)$$

به عبارت دیگر، ξ به عنوان ورودی مجازی برای بلوک χ در نظر گرفته می‌شود. متغیر u_p به عنوان ورودی کمکی برای غیرفعال‌سازی بلوک اول استفاده شده است. از جایگذاری قانون (۱۰-۵) در بلوک χ ، دینامیک حلقه بسته به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{\chi} = T_a + \Upsilon G_r^\dagger \left[-\frac{\partial S}{\partial \chi} (T_a + \hat{\Delta}) \right] + \Upsilon u_p + \Delta \quad (۱۱-۵)$$

تابع لیاپانوف زیر مفروض است.

$$V_1(\chi, \tilde{\Delta}) = S(\chi) + \frac{1}{2} \tilde{\Delta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\Delta} \quad (۱۲-۵)$$

در رابطه فوق $\tilde{\Delta}$ ، به صورت $\tilde{\Delta} \triangleq \Delta - \hat{\Delta}$ تعریف می‌شود. مشتق تابع لیاپانوف عبارت است از:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{\partial S}{\partial \chi} \dot{\chi} - \tilde{\Delta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Delta}} = \frac{\partial S}{\partial \chi} T_a + \frac{\partial S}{\partial \chi} \Upsilon G_r^\dagger \left[-\frac{\partial S}{\partial \chi} (T_a + \hat{\Delta}) \right] + \frac{\partial S}{\partial \chi} \Upsilon u_p \\ &\quad + \frac{\partial S}{\partial \chi} \Delta - \tilde{\Delta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Delta}}. \end{aligned} \quad (۱۳-۵)$$

با توجه به تعریف بردارهای G و $G_r^\dagger$ ، معادله فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{\partial S}{\partial \chi} \Upsilon u_p + \frac{\partial S}{\partial \chi} (\Delta - \hat{\Delta}) - \tilde{\Delta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Delta}} = \frac{\partial S}{\partial \chi} \Upsilon u_p + \frac{\partial S}{\partial \chi} \tilde{\Delta} - \tilde{\Delta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Delta}} \\ &= G u_p - \tilde{\Delta}^T \left(\Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Delta}} - \left(\frac{\partial S}{\partial \chi} \right)^T \right) \end{aligned} \quad (۱۴-۵)$$

برای غیرفعال‌سازی سیستم حلقه بسته بین خروجی G و ورودی u_p باید تساوی $\Gamma^{-1}\dot{\hat{\Delta}} - \left(\frac{\partial S}{\partial \chi}\right)^T = 0$ برآورده شود. بنابراین، قانون تطبیق $\dot{\hat{\Delta}} = \Gamma \left(\frac{\partial S}{\partial \chi}\right)^T$ مطابق رابطه (۵-۹) بدست می‌آید. در نتیجه، $\dot{V}_1 = Gu_p$ خواهد بود و با فرض $y_v = G^T$ به عنوان خروجی مجازی سیستم و در نظر گرفتن تابع V به عنوان تابع ذخیره سیستم، بلوک $\dot{\chi}$ بین ورودی u_p و خروجی y_v غیرفعال است. لذا، بر اساس تعریف ۲-۳ و قضیه ۲-۲، قانون کنترل زیر پایداری جانبی کلی متغیرهای حالت در سیستم (۵-۱۱) را تضمین می‌کنند.

$$u_p = -\phi(G^T) = -\phi(y_v) \quad (۵-۱۵)$$

بنابراین مطابق رابطه (۵-۳)، سطح لغزش مناسب، به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\eta = \xi - G_r^{-1} \left[-\frac{\partial S}{\partial \chi} (T_a + \hat{\Delta}) \right] + \phi(G^T) \quad (۵-۱۶)$$

لازم به ذکر است که استفاده از تابع $\phi(\cdot)$ ساختار انعطاف پذیری در طراحی سطح لغزش پیشنهادی فراهم می‌آورد که یکی از مزیت‌های نظریه غیرفعال بودن است. ■

۵-۴ قانون کنترل مود لغزشی

وظیفه اصلی روش مود لغزشی، پیشنهاد یک قانون کنترل مقاوم به گونه‌ای است که متغیرهای حالت سیستم در زمان محدود به سطح لغزش رسیده و تا زمان رسیدن به مبدا روی آن باقی می‌مانند. اما چنین تضمینی در مورد سیستم‌های دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی وجود ندارد [۳]. با توجه به سطح لغزش پیشنهادی (۵-۱۶)، اگر متغیر $\varpi(\chi)$ به صورت زیر تعریف شود:

$$\varpi(\chi) \triangleq -\frac{\partial S}{\partial \chi} [T_a + \hat{\Delta}] \quad (۵-۱۷)$$

آنگاه مشتق سطح لغزش (۵-۱۶)، به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= -\frac{\partial G_r^\dagger}{\partial \chi} \dot{\chi} \varpi - G_r^\dagger \frac{\partial \varpi}{\partial \chi} \dot{\chi} + \frac{\partial \phi(y_v)}{\partial y_v} \times \frac{\partial y_v}{\partial \chi} \dot{\chi} + \dot{\xi} \\ &= -\frac{\partial G_r^\dagger}{\partial \chi} [T_a + \Upsilon \xi + \Delta] \varpi + \left[\frac{\partial \phi(y_v)}{\partial y_v} \times \frac{\partial y_v}{\partial \chi} - G_r^\dagger \frac{\partial \varpi}{\partial \chi} \right] (T_a + \Upsilon \xi + \Delta) \\ &+ T_b + u + \delta = -\frac{\partial G_r^\dagger}{\partial \chi} [T_a + \Upsilon \xi] \varpi + \left[\frac{\partial \phi(y_v)}{\partial y_v} \times \frac{\partial y_v}{\partial \chi} - G_r^\dagger \frac{\partial \varpi}{\partial \chi} \right] (T_a + \Upsilon \xi) \\ &+ T_b + u + \Pi \end{aligned} \quad (۵-۱۸)$$

در رابطه فوق، Π بیانگر عدم قطعیت مجتمع می‌باشد که بر اساس فرض ۵-۱، مقداری ثابت

است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Pi = \delta - \frac{\partial G_r^\dagger}{\partial \chi} \Delta \varpi - G_r^\dagger \frac{\partial \varpi}{\partial \chi} \Delta + \frac{\partial \phi(y_v)}{\partial y_v} \times \frac{\partial y_v}{\partial \chi} \Delta \quad (۱۹-۵)$$

در روش مود لغزشی، به منظور محاسبه قانون کنترل، محاسبه مشتق سطح لغزش نیاز است. لذا با توجه به رابطه (۱۸-۵)، در نظریه ذیل، قانون کنترل مناسب مود لغزشی ارائه می‌شود.

نظریه ۵-۲: قانون کنترل زیر تضمین می‌کند که مسیرهای حالت سیستم (۵-۵) در زمان محدود به سطح لغزش (۷-۵) همگرا شده و با حرکت روی این سطح به مبدا مختصات برسند. به عبارت دیگر پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته تضمین می‌شود.

$$u = \frac{\partial G_r^\dagger}{\partial \chi} [T_a + \Upsilon \xi] \varpi + \left(G_r^\dagger \frac{\partial \varpi}{\partial \chi} - \frac{\partial \phi(y_v)}{\partial y_v} \times \frac{\partial y_v}{\partial \chi} \right) (T_a + \Upsilon \xi) - T_b + \bar{v} \quad (۲۰-۵)$$

که $\bar{v}$ بیانگر بخش مقاوم (ناپیوسته) قانون کنترل است که عبارت است از:

$$\bar{v} = -\gamma \tanh\left(\frac{\eta}{\varepsilon}\right) - \hat{\Pi}. \quad (۲۱-۵)$$

پارامترهای تنظیم γ و ε ثابت‌هایی مثبت هستند. پارامتر ε باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود تا تاثیر پدیده لرزش از بین برود. همچنین قانون تطبیق برای تخمین عدم قطعیت Π برابر است با:

$$\dot{\hat{\Pi}} = \Psi \eta \quad (۲۲-۵)$$

در رابطه فوق ماتریس ثابت مثبت و قطری Ψ ، ماتریس بهره است.

اثبات: از جایگذاری قانون (۲۰-۵) در دینامیک مشتق سطح لغزش (۱۸-۵)، دینامیک حلقه بسته به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\dot{\eta} = \bar{v} + \Pi \quad (۲۳-۵)$$

تابع زیر به عنوان تابع لیاپانوف در نظر گرفته می‌شود.

$$V_2(\eta, \tilde{\Pi}) = \frac{1}{2} \eta^T \eta + \frac{1}{2} \tilde{\Pi}^T \Psi^{-1} \tilde{\Pi} \quad (۲۴-۵)$$

در این رابطه $\tilde{\Pi} \triangleq \Pi - \hat{\Pi}$ می‌باشد. بنابراین، مشتق این تابع لیاپانوف برابر است با:

$$\dot{V}_2(\eta, \tilde{\Pi}) = \eta^T \dot{\eta} - \tilde{\Pi}^T \Psi^{-1} \dot{\hat{\Pi}} = \eta^T (\bar{v} + \Pi) - \tilde{\Pi}^T \Psi^{-1} \dot{\hat{\Pi}}. \quad (۲۵-۵)$$

با استفاده از قانون کنترل (۲۱-۵)، تساوی فوق به صورت زیر قابل بازنویسی است.

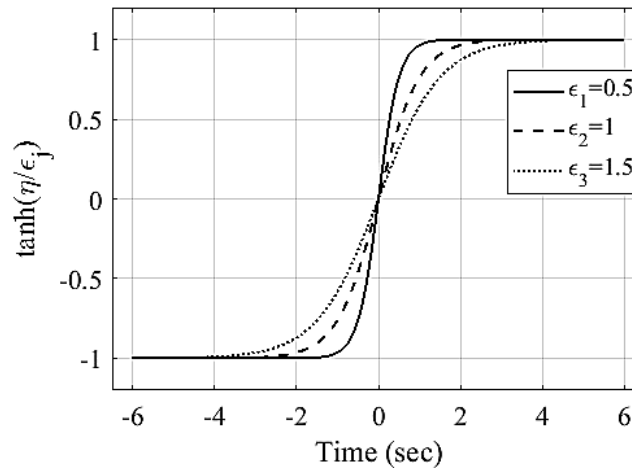
$$\begin{aligned} \dot{V}_2(\eta, \tilde{\Pi}) &= \eta^T (\bar{v} + \Pi) - \tilde{\Pi}^T \Psi^{-1} \dot{\hat{\Pi}} = \eta^T \left(-\gamma \tanh\left(\frac{\eta}{\varepsilon}\right) + \Pi - \hat{\Pi} \right) - \tilde{\Pi}^T \Psi^{-1} \dot{\hat{\Pi}} \\ &= -\eta^T \gamma \tanh\left(\frac{\eta}{\varepsilon}\right) - \tilde{\Pi}^T \left(\Psi^{-1} \dot{\hat{\Pi}} - \eta \right) \end{aligned} \quad (۲۶-۵)$$

از مساوی صفر قرار دادن عبارت داخل پرانتز $\Psi^{-1} \dot{\tilde{\Pi}} - \eta = 0$ ، قانون تطبیق $\dot{\tilde{\Pi}} = \Psi \eta$ مطابق رابطه (۲۲-۵)، بدست می‌آید. بنابراین:

$$\dot{V}_2(\eta, \tilde{\Pi}) = -\sum_{j=1}^m \gamma_j \eta_j \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) \quad (۲۷-۵)$$

علاوه بر این، با توجه به شکل تابع تانژانت هایپربولیک (شکل (۱-۵))، می‌توان تساوی زیر را نوشت:

$$\eta_j \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) = \left| \eta_j \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) \right| = |\eta_j| \times \left| \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) \right|. \quad (۲۸-۵)$$



شکل (۱-۵): شکل تابع $\tanh\left(\frac{\eta}{\varepsilon_j}\right)$ به ازای مقادیر مختلف ε

لذا با استفاده از تساوی (۲۸-۵) و توجه به اینکه حد بالای تابع $\tanh$ برابر ۱ است، داریم:

$$\dot{V}_2(\eta, \tilde{\Pi}) = -\sum_{j=1}^m \gamma_j \eta_j \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) = -\sum_{j=1}^m \gamma_j |\eta_j| \times \left| \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) \right| \leq -\sum_{j=1}^m \gamma_j |\eta_j|. \quad (۲۹-۵)$$

$$\dot{V}_2(\eta, \tilde{\Pi}) \leq -\lambda_{\min}(\gamma) \cdot \|\eta\|$$

با توجه به رابطه فوق، می‌توان دریافت که شرط دستیابی^۱ در زمان محدود برای روش مود لغزشی پیشنهادی حاصل شده است. به منظور بیان توضیح بیشتر، مشتق تابع لیپانوف $V_2(\eta, \tilde{\Pi})$ را با اعمال قانون تطبیق $\dot{\tilde{\Pi}} = \Psi \eta$ در نظر بگیرید.

$$\dot{V}_2(\eta, \tilde{\Pi}) = \eta^T \dot{\eta} - \tilde{\Pi}^T \Psi^{-1} \dot{\tilde{\Pi}} = \dot{\eta}^T \eta - \tilde{\Pi}^T \eta \leq \|\dot{\eta}^T\| \cdot \|\eta\| - \|\tilde{\Pi}^T\| \cdot \|\eta\| \quad (۳۰-۵)$$

^۱Reaching condition

همچنین با توجه به رابطه (۵-۲۹)، می‌توان نامساوی زیر را نوشت.

$$\|\dot{\eta}^T\| \cdot \|\eta\| - \|\tilde{\Pi}^T\| \cdot \|\eta\| \leq -\lambda_{\min}(\gamma) \cdot \|\eta\| \quad (۵-۳۱)$$

بنابراین:

$$\|\dot{\eta}^T\| \cdot \|\eta\| \leq -\lambda_{\min}(\gamma) \cdot \|\eta\| + \|\tilde{\Pi}^T\| \cdot \|\eta\| = \left(\|\tilde{\Pi}^T\| - \lambda_{\min}(\gamma) \right) \|\eta\|. \quad (۵-۳۲)$$

با فرض $\eta > 0$ ، نامساوی فوق، به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\|\dot{\eta}\| \leq \left(\|\tilde{\Pi}^T\| - \lambda_{\min}(\gamma) \right) \quad (۵-۳۳)$$

با در نظر گرفتن این نکته که $\lambda_{\min}(\gamma)$ مقداری ثابت است و با انتگرال گیری از طرفین رابطه فوق، نامساوی زیر حاصل می‌شود.

$$\int_0^t \|\dot{\eta}\| dt \leq \left(\int_0^t \|\tilde{\Pi}^T\| - \lambda_{\min}(\gamma) dt \right) \rightarrow \|\eta(t)\| - \|\eta(0)\| \leq \left(\int_0^t \|\tilde{\Pi}^T\| - \lambda_{\min}(\gamma) dt \right) \quad (۵-۳۴)$$

اکنون با فرض اینکه متغیرهای حالت در زمان t به سطح لغزش رسیده‌اند و روی سطح لغزش قرار دارند، (یعنی $\eta(t) = 0$) و با توجه به محدود بودن η و $\tilde{\Pi}$ ، مقدار زمان t از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$t \leq \frac{\int_0^t \|\tilde{\Pi}^T\| + \|\eta(0)\|}{\lambda_{\min}(\gamma)} \quad (۵-۳۵)$$

از آنجایی که مقدار سمت راست نامساوی بالا، مقداری محدود می‌باشد، بنابراین، متغیرهای حالت در زمان محدود به سطح لغزش رسیده‌اند.

اکنون با فرض $\eta < 0$ مراحل فوق مجدداً تکرار می‌شود.

$$\left(\lambda_{\min}(\gamma) - \|\tilde{\Pi}^T\| \right) \leq \|\dot{\eta}\| \quad (۵-۳۶)$$

با انتگرال گیری از طرفین نامساوی فوق داریم:

$$\left(\lambda_{\min}(\gamma) t - \int_0^t \|\tilde{\Pi}^T\| \right) \leq \int_0^t \|\dot{\eta}\| dt \rightarrow \left(\lambda_{\min}(\gamma) t - \int_0^t \|\tilde{\Pi}^T\| \right) \leq \|\eta(t)\| - \|\eta(0)\| \quad (۵-۳۷)$$

۵-۵ کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک با استفاده از روش پیشنهادی

در این بخش از روش مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای طراحی کنترل کننده ولتاژ بازوهای رباتیک استفاده می شود. مدل ریاضی بازوهای رباتیک و محرکه های آن ها مطابق آنچه که در فصل های گذشته معرفی شد، در نظر گرفته می شود.

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) &= \tau \\ J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + r\tau &= K_m I_a \\ V &= L\dot{I}_a + RI_a + K_b \dot{\theta}_m \end{aligned} \quad (۴۰-۵)$$

برای حل مساله ردگیری باید ترکیب روابط (۴۰-۵) بر حسب متغیرهای خطا بازنویسی شوند. برای این منظور خطای موقعیت و خطای سرعت، به ترتیب به صورت $e_1 = q - q_d$ و $e_2 = \dot{q} - \dot{q}_d$ تعریف می شود که q_d موقعیت مطلوب مفصل است به گونه ای که مشتقات آن تا مرتبه سوم هموار باشد. لذا، مدل فضای حالت بر حسب متغیرهای خطا به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= I_a - \ddot{q}_d + \Delta_1 \\ \dot{I}_a &= V + \Delta_2 \end{aligned} \quad (۴۱-۵)$$

که در رابطه فوق عدم قطعیت های Δ_1 و Δ_2 عدم قطعیت های مجتمع هستند که به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= K_m^{-1} \left[(I - J_m r^{-1}) \ddot{q} - B_m r^{-1} \dot{q} - r\tau \right] \\ \Delta_2 &= (I - L) \dot{I}_a - RI_a - K_b r^{-1} \dot{q} \end{aligned} \quad (۴۲-۵)$$

با مقایسه مدل فضای حالت (۴۱-۵) که برای بازوی رباتیک ارائه شده است و مدل فضای حالت ارائه شده برای فرم رگولار در رابطه (۵-۵)، می توان نتیجه گرفت که مدل فضای حالت (۴۱-۵)، در قالب فرم رگولار قرار دارد و تمامی مباحث مطرح شده در بخش قبل برای آن صادق است. از آنجایی که هدف اصلی، حل مساله ردگیری موقعیت بازوهای رباتیک است. مدل فضای حالت (۴۱-۵) نیز بر اساس متغیرهای حالت خطای موقعیت و خطای سرعت مفاصل نوشته شده است. لذا در مرحله اول، جریان روتور (I_a)، به عنوان ورودی برای بلوک اول، یعنی زیر سیستم متشکل از خطای موقعیت و سرعت مفاصل، در نظر گرفته می شود. بنابراین، جریان روتور به گونه ای طراحی می شود که پایداری مجانبی بلوک اول در حضور عدم قطعیت Δ_1 تضمین شود. قانون کنترلی که توسط جریان روتور

پیشنهاد می‌شود، در حقیقت همان جریان مطلوب است که باید توسط موتور تولید شود. در واقع باید ولتاژ موتور به گونه‌ای تغییر کند که جریان مطلوب روتور برای پایداری مجانبی دینامیک خطای موقعیت و سرعت مفاصل حاصل شود. لازم به ذکر است که در روش مود لغزشی پس از طراحی سطح لغزش، طراحی قانون کنترل برای ورودی اصلی سیستم انجام می‌شود. این قانون به گونه‌ای طراحی می‌شود که سطح لغزش پیشنهادی صفر گردد تا متغیرهای حالت روی سطح لغزش حرکت کرده و تا رسیدن به مبدا مختصات روی آن باقی بمانند. از طرفی با توجه به رابطه (۵-۳)، سطح لغزش برای سیستم (۵-۴۱)، به صورت $\eta = I_a - I_d$ خواهد بود که بخش I_d همان قانون کنترل پیشنهادی در مرحله اول می‌باشد. بنابراین، با طراحی مناسب ورودی ولتاژ، سطح لغزش η ، صفر می‌شود و به عبارت دیگر، $I_a \rightarrow I_d$. بار دیگر، به منظور طراحی کنترل کننده مقاوم مبتنی بر مود لغزشی و نظریه غیرفعال بودن، سیستم (۵-۴۱) با سیستم (۵-۵) مقایسه می‌شود. بنابراین، می‌توان دریافت که $\chi = [e_1^T \ e_2^T]^T$ ، $\xi = I_a$ ، $\Delta = \Delta_1$ و $\delta = \Delta_2$ است. همچنین، تابع ذخیره S معرفی شده در نظریه ۵-۱ به صورت زیر انتخاب شده است.

$$S(e_1, e_2) = \frac{1}{2}(e_1^T \lambda_1 e_1 + e_2^T e_2) \quad (۵-۴۳)$$

در تابع فوق، λ_1 ماتریس بهره ثابت مثبت است. بنابراین، تابع لیپانوف در این بخش برابر است با:

$$V_1(\chi, \tilde{\Delta}) = \frac{1}{2}(e_1^T \lambda_1 e_1 + e_2^T e_2) + \frac{1}{2} \tilde{\Delta}_1^T \Gamma^{-1} \tilde{\Delta}_1. \quad (۵-۴۴)$$

لذا قانون کنترل پیشنهادی زیر، پایداری مجانبی بلوک اول را تضمین می‌کند.

$$I_a = \underbrace{\ddot{q}_d - \lambda_1 e_1 - e_2 - \hat{\Delta}_1}_{I_d} \quad (۵-۴۵)$$

بنابراین، بلوک اول حلقه بسته‌ی (۵-۴۱)، برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= -\lambda_1 e_1 - e_2 + \tilde{\Delta}_1 \end{aligned} \quad (۵-۴۶)$$

مشتق تابع لیپانوف (۵-۴۴) به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1^T \lambda_1 \dot{e}_1 + e_2^T \dot{e}_2 - \tilde{\Delta}_1^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Delta}}_1 = e_1^T \lambda_1 e_2 + e_2^T (-\lambda_1 e_1 - e_2 + \tilde{\Delta}_1) - \tilde{\Delta}_1^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Delta}}_1 \\ &= -e_2^T e_2 + e_2^T \tilde{\Delta}_1 - \tilde{\Delta}_1^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Delta}}_1 = -e_2^T e_2 - \tilde{\Delta}_1^T (\Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Delta}}_1 - e_2) \end{aligned} \quad (۵-۴۷)$$

با مساوی صفر قرار دادن عبارت داخل پرانتز در رابطه فوق، قانون تطبیق برای تخمین عدم

قطعیت Δ_1 به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\dot{\hat{\Delta}}_1 = \Gamma e_2 \quad (48-5)$$

مشتق دوم تابع لیاپانوف برابر است با:

$$\ddot{V}_1 = -2e_2^T (I_a - \ddot{q}_d + \Delta_1) \quad (49-5)$$

بنابراین، با توجه به (44-5) و (47-5)، e_1 ، e_2 و Δ_1 محدود هستند. همچنین، $\hat{\Delta}_1$ و $\ddot{q}_d$ نیز محدود هستند. لذا، بر اساس رابطه (45-5)، متغیر I_a محدود بوده و در نتیجه، $\ddot{V}_1$ محدود می‌باشد. بنابراین، با استفاده از لم باربالات، به ازای $t \rightarrow \infty$ ، $\dot{V}_1 \rightarrow 0$ و بلوک اول (41-5) پایدار مجانبی است. همچنین، با توجه به توضیحات بخش 5-3 در خصوص نحوه طراحی سطح لغزش، سطح لغزش مناسب برای سیستم (41-5) عبارت است از:

$$\eta = I_a - I_d = I_a + \lambda_1 e_1 + e_2 - \ddot{q}_d + \hat{\Delta}_1. \quad (50-5)$$

ماتریس Γ بهره تطبیق ثابت مثبت است. مشتق سطح لغزش (50-5) برابر است با:

$$\dot{\eta} = V + (\lambda_1 + \Gamma)e_2 + I_a - \ddot{q}_d - \ddot{q}_d + \Pi. \quad (51-5)$$

متغیر $\Pi \triangleq \Delta_1 + \Delta_2$ ، بیانگر عدم قطعیت مجتمع است. لازم به ذکر است که مطابق آنچه که در فرض 5-1 نیز بیان گردید، این عدم قطعیت مجتمع، در بازه تخمین به صورت یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، بر اساس نظریه 5-2، قانون کنترل زیر، ردگیری موقعیت مطلوب را برای مفاصل بازو تضمین می‌نماید.

$$V = \ddot{q}_d + \dot{q}_d - (\lambda_1 + \Gamma)e_2 - I_a + \bar{v} \quad (52-5)$$

که در این رابطه، $\bar{v}$ برابر است با:

$$\bar{v} = -\gamma \tanh\left(\frac{\eta}{\varepsilon}\right) - \hat{\Pi}. \quad (53-5)$$

و قانون تطبیق عدم قطعیت مجتمع $\hat{\Pi}$ به صورت زیر می‌باشد.

$$\dot{\hat{\Pi}} = \Psi \eta \quad (54-5)$$

از جایگذاری قانون (52-5) در دینامیک سطح لغزش (51-5)، دینامیک حلقه بسته $\dot{\eta} = \bar{v} + \Pi$ حاصل می‌شود. لذا به منظور اثبات پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته، تابع لیاپانوف زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$V_2 = \frac{1}{2} \eta^T \eta + \frac{1}{2} \tilde{\Pi}^T \Psi^{-1} \tilde{\Pi} \quad (55-5)$$

مشتق تابع لیپانوف فوق برابر است با:

$$\dot{V}_2 = \eta^T (\bar{v} + \Pi) - \tilde{\Pi}^T \Psi^{-1} \dot{\tilde{\Pi}}. \quad (56-5)$$

بنابراین با اعمال قانون کنترل (53-5) و قانون تطبیق (54-5)، رابطه فوق به صورت زیر بازنویسی خواهد شد.

$$\dot{V}_2 = -\eta^T \gamma \tanh\left(\frac{\eta}{\varepsilon}\right) - \tilde{\Pi}^T \left(\Psi^{-1} \dot{\tilde{\Pi}} - \eta \right) = -\sum_{j=1}^m \gamma_j \eta_j \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) \quad (57-5)$$

با توجه به شکل و خاصیت تابع تانژانت هایپربولیک، مشتق تابع لیپانوف برابر خواهد بود با:

$$\dot{V}_2 = -\sum_{j=1}^m \gamma_j \eta_j \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) \leq -\sum_{j=1}^m \gamma_j |\eta_j| \quad (58-5)$$

نامساوی فوق پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته را نتیجه نمی‌دهد. لذا برای اثبات پایداری مجانبی، لازم است از لم باربالات استفاده شود. از اینرو، حد بالای مشتق دوم تابع لیپانوف V_2 عبارت است از:

$$\begin{aligned} \ddot{V}_2(\eta, \tilde{\Pi}) &\leq -\sum_{j=1}^m \gamma_j |\bar{v}_j + \Pi_j| \leq -\sum_{j=1}^m \left| -\gamma_j^2 \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) + \gamma_j (-\hat{\Pi}_j + \Pi_j) \right| \\ &\leq -\sum_{j=1}^m \left| -\gamma_j^2 \tanh\left(\frac{\eta_j}{\varepsilon_j}\right) + \gamma_j \tilde{\Pi}_j \right| \leq -\sum_{j=1}^m |-\gamma_j^2 + \gamma_j \tilde{\Pi}_j|. \end{aligned} \quad (59-5)$$

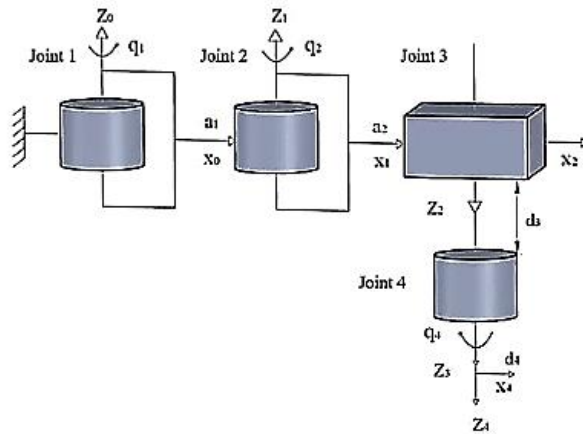
با توجه به (55-5) و (58-5)، $\tilde{\Pi}$ و η محدود هستند. همچنین، γ نیز بهره‌ی ثابت و محدود است، بنابراین، $\dot{V}_2$ محدود می‌باشد. لذا، با استفاده از لم باربالات، به ازای $t \rightarrow \infty$ ، $\dot{V}_2$ به صفر میل می‌کند. بنابراین، سطح لغزش به صفر میل می‌کند و به عبارت دیگر، جریان روتور به جریان مطلوب میل خواهد کرد ($I_a \rightarrow I_d$). با توجه به (44-5) و (47-5)، e_1 ، e_2 و Δ_1 محدود هستند. همچنین، $\hat{\Delta}_1$ و $\hat{q}_d$ نیز محدود هستند. لذا، بر اساس رابطه (45-5)، I_a محدود می‌باشد. از طرفی چون $\tilde{\Pi}$ و $\hat{\Pi}$ محدود هستند، لذا Π نیز محدود است. بنابراین، با توجه به تعریف $\Pi = \Delta_1 + \Delta_2$ ، Δ_2 نیز محدود است. ■

۵-۶ نتایج شبیه سازی

در این بخش، کنترل کننده (52-5) برای ردگیری موقعیت مفاصل یک ربات اسکارا مورد استفاده قرار گرفته است. مدل این بازو که در نرم افزار سالدورکس^۱ شبیه سازی شده، در شکل (5-3)

^۱Solidworks

نشان داده شده است. محرکه‌های مفاصل همگی موتورهای مغناطیس دائم جریان مستقیم هستند. پارامترهای DH این بازو یعنی q_i ، d_i ، a_i و α_i به ترتیب زاویه مفصل، آفست، طول و پیچش لینک هستند، که مقادیر آن‌ها در جدول (۵-۱) بیان شده است [۶۹].



شکل (۵-۳): مدل ربات اسکارا که در نرم افزار solidworks شبیه سازی شده است.

جدول (۵-۱): پارامترهای DH ربات اسکارا

لینک	$q \text{ (rad)}$	$d \text{ (m)}$	$a \text{ (m)}$	$\alpha \text{ (rad)}$
۱	q_1	.	$a_1 = 0.33$	.
۲	q_2	.	$a_2 = 0.27$	π
۳	.	d_3	.	.
۴	q_4	$d_4 = 0.061$	.	.

پارامترهای دینامیکی ربات نیز در جدول زیر معرفی شده‌اند. بر اساس آن، m_i جرم لینک i ام، $r_{ci} = [x_{ci} \ y_{ci} \ z_{ci}]$ مرکز جرم فریم i ام، I_i تانسور اینرسی مرکز جرم فریم i ام است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{xxi} & I_{xyi} & I_{xzi} \\ I_{xyi} & I_{yyi} & I_{yzi} \\ I_{xzi} & I_{yzi} & I_{zzi} \end{bmatrix} \quad (۵-۶۰)$$

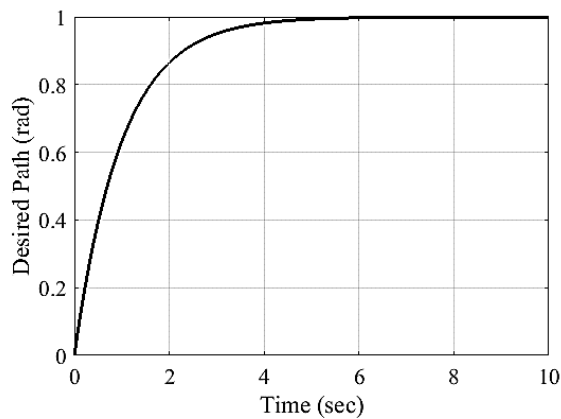
مقدار پارامترهای محرکه‌ها نیز در جدول (۵-۲) معرفی گردیده است.

جدول (۵-۲): پارامترهای موتور جریان مستقیم

موتور	$V_{\max} \text{ (Volt)}$	$R \text{ (}\Omega\text{)}$	$K_b \left(\frac{V \cdot s}{\text{rad}} \right)$	$L \text{ (H)}$	$J_m \left(\frac{\text{Nm} \cdot \text{s}^2}{\text{rad}} \right)$	$B_m \left(\frac{\text{Nm} \cdot \text{s}}{\text{rad}} \right)$	r
۱، ۲، ۳، ۴	۴۰	۱، ۲۶	۰، ۲۶	۰، ۰۰۱	۰، ۰۰۰۲	۰، ۰۰۱	۰، ۰۱

در این بخش، دو مسیر مطلوب برای بررسی کارایی قانون کنترل پیشنهادی (۵-۵۲)، در نظر گرفته شده است. مسیر مطلوب اول به صورت زیر است.

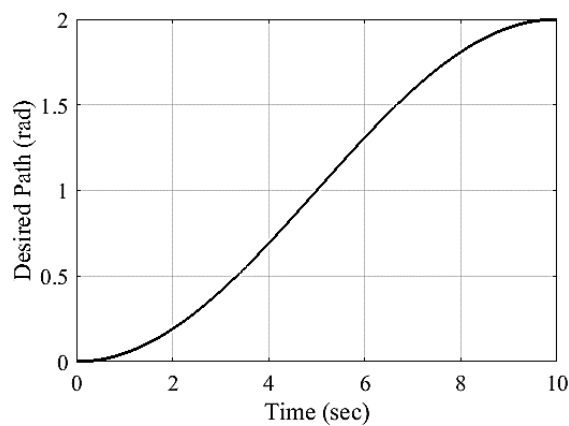
$$q_d = 1 - e^{-t} \quad (۵-۶۱)$$



شکل (۵-۴): مسیر مطلوب اول

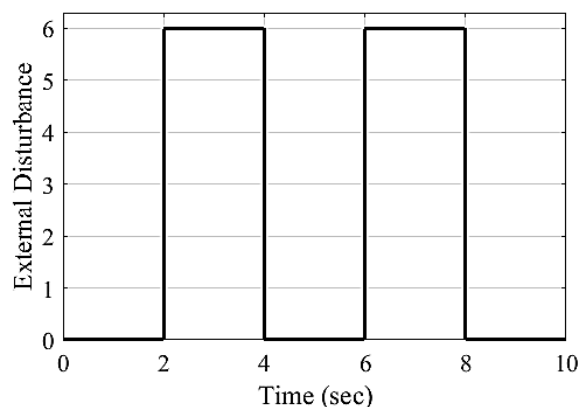
مسیر مطلوب دوم نیز به صورت زیر می‌باشد.

$$q_d(t) = 1 - \cos(0.1\pi t) \quad (۵-۶۲)$$



شکل (۵-۵): مسیر مطلوب دوم

در این بخش اغتشاش پالس که در شکل (۵-۶) نشان داده شده، به گشتاور مفاصل بازو اعمال شده است.



شکل (۵-۶): اغتشاش خارجی اعمال شده به گشتاور مفاصل بازو

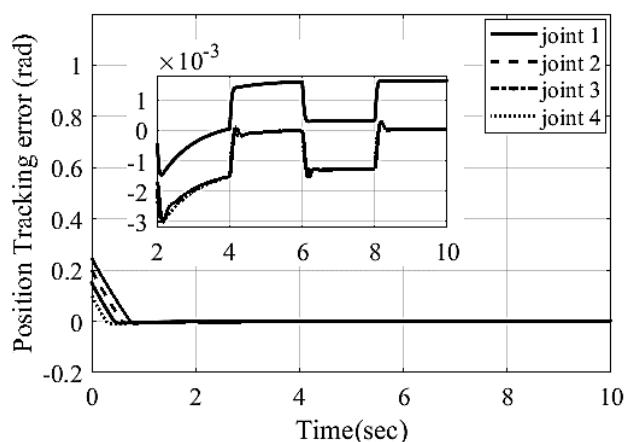
مقدار شرایط اولیه موقعیت مفاصل به صورت $q(0) = [0.25 \text{ rad} \quad 0.2 \text{ rad} \quad 0.15 \text{ m} \quad 0.1 \text{ rad}]$ در نظر گرفته شده است. در انجام این شبیه‌سازی‌ها تنظیم پارامترهای بهره‌های کنترل مطابق جدول زیر در نظر گرفته شده است.

جدول (۵-۳): مقادیر بهره‌های کنترل کننده (۵-۵۲)

λ_1	Γ	Ψ	γ	ε
$\text{diag}(150)$	$\text{diag}(10)$	$\text{diag}(20)$	$\text{diag}(40)$	۱.۳

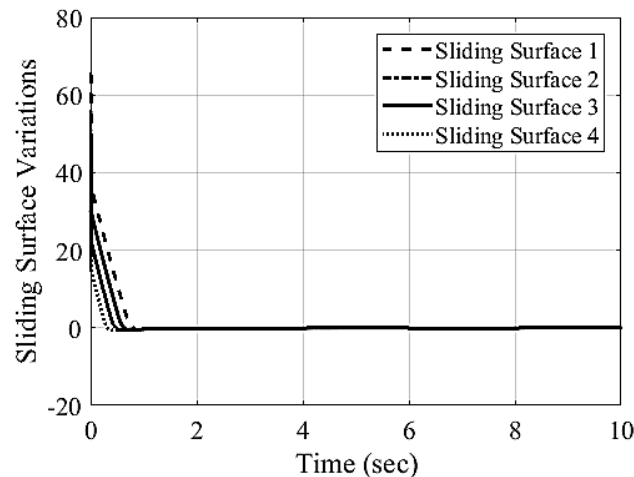
• ردگیری مسیر مطلوب اول (۵-۶۱)

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال قانون کنترل (۵-۵۲) به ربات اسکارا به ازای مسیر مطلوب اول (۵-۶۱)، نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۵-۷) نیز قابل مشاهده است، خطای ردگیری موقعیت مفاصل از مرتبه 10^{-3} می‌باشد. پالس‌های موجود در حالت ماندگار، اثر اغتشاش خارجی اعمال شده به گشتاور مفاصل را نشان می‌دهد.



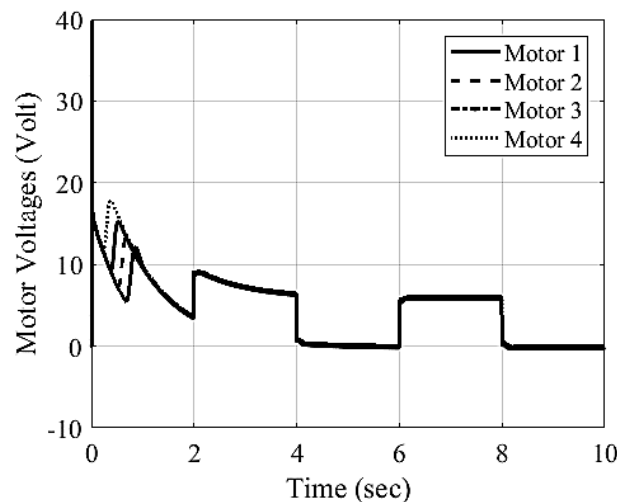
شکل (۵-۷): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۵-۵۲) برای مسیر مطلوب اول (۵-۶۱)

در شکل (۵-۸)، تغییرات سطح لغزش (۵-۷)، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان، مقدار η به صفر میل می‌کند. در نتیجه، بر اساس رابطه $\eta = I_a - I_d$ ، مقدار I_d به I_a میل می‌کند.



شکل (۵-۸): تغییرات سطح لغزش در اجرای شبیه سازی به ازای مسیر مطلوب اول (۵-۶۱)

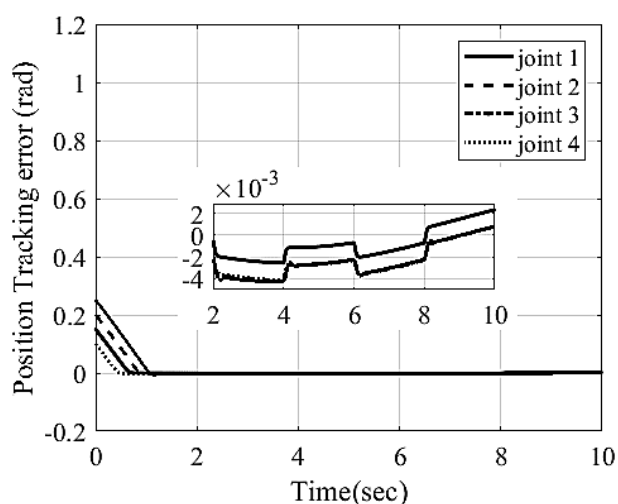
در ادامه نیز، نمودار تغییرات ولتاژ محرکه‌ها در شکل (۵-۹) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که دامنه ولتاژ در بازه مجاز قرار دارد.



شکل (۵-۹): تلاش کنترلی محرکه‌ها با اعمال کنترل کننده (۵-۵۲) برای مسیر مطلوب اول (۵-۶۱)

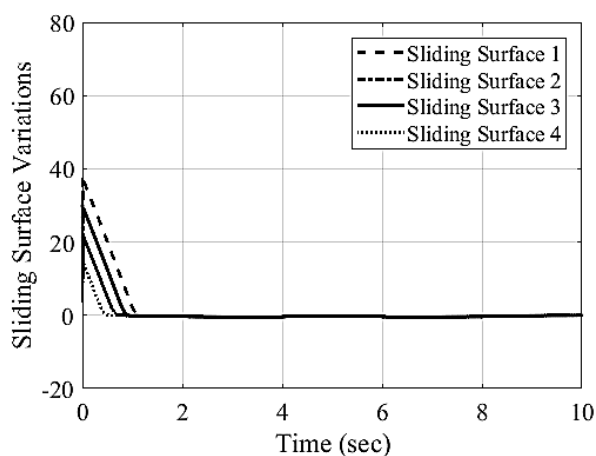
• ردگیری مسیر مطلوب دوم (۵-۶۲)

در این قسمت، نتایج ردگیری موقعیت مفاصل به ازای مسیر مطلوب دوم، نمایش داده شده است. در این حالت نیز خطای ردگیری موقعیت مفاصل از مرتبه 10^{-3} می‌باشد. همچنین مشابه حالت قبل، تغییرات سطح لغزش در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است که بر اساس آن می‌توان دریافت که $\eta \rightarrow 0$ میل می‌کند.

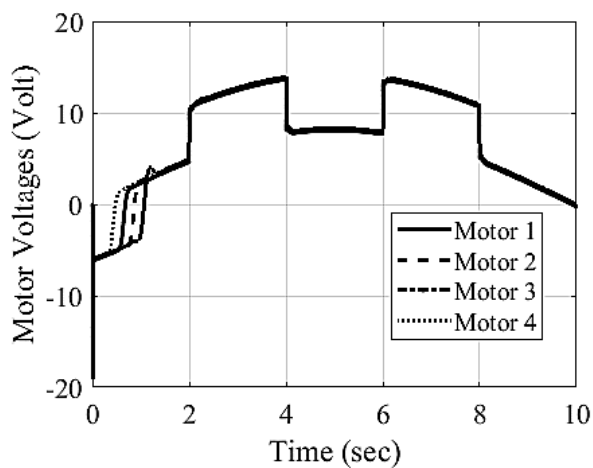


شکل (۵-۱۰): خطای ردگیری موقعیت مفاصل به ازای کنترل کننده (۵-۵۲) برای مسیر مطلوب دوم (۵-۶۲)

در ادامه تلاش کنترلی محرکه‌ها در شکل (۵-۱۲) قابل مشاهده است که بر اساس آن، ولتاژ محرکه‌ها دارای رفتاری نرم بوده و دامنه آن نیز در بازه مجاز قرار دارد.



شکل (۵-۱۱): تغییرات سطح لغزش در اجرای شبیه سازی به ازای مسیر مطلوب دوم (۵-۶۲)



شکل (۵-۱۲): تلاش کنترلی محرکه‌های مفاصل با اعمال کنترل کننده (۵-۵۲) برای مسیر مطلوب دوم (۵-۶۲)

• ارزیابی عملکرد کنترل کننده (۵-۵۲) با استفاده از معیار RMS

در این قسمت، برای مشاهده عددی عملکرد کنترل کننده (۵-۵۲)، از معیار RMS استفاده شده است. جدول (۵-۴)، مقدار RMS را برای خطای ردگیری موقعیت مطلوب مفاصل، تغییرات سطح لغزش و دامنه ولتاژ محرکه‌ها، نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر نشان داده شده در این جدول، مشاهده می‌شود که عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، قابل قبول می‌باشد و مرتبه خطای ردگیری در بدترین حالت 10^{-3} است. همچنین ولتاژ موتورها در بازه مجاز برای موتورهای جریان مستقیم قرار دارد. برای محاسبه مقدار RMS تابع نمونه‌ی F از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود.

$$RMS(F) = \sqrt{\frac{1}{t-t_0} \int_{t_0}^t \|F\|^2 dt} \quad (۵-۶۳)$$

در این بخش، برای محاسبه مقدار RMS، مقدار t برابر ۱۰ می‌باشد. همچنین، مقدار t_0 برای خطای ردگیری موقعیت مفاصل و تغییرات سطح لغزش برابر ۲ و برای دامنه ولتاژ برابر صفر در نظر گرفته شده است.

جدول (۵-۴): ارزیابی عملکرد کنترل کننده (۵-۵۲) با استفاده از معیار RMS

		$RMS e$	$RMS \eta$	$RMS V_a$
مسیر مطلوب اول $q_d = 1 - e^{-t}$	مفصل ۱	$8,2733 \times 10^{-4}$	۰,۰۰۱۴	۵,۴۲
	مفصل ۲	$8,۰۹۲۴ \times 10^{-4}$	۰,۰۰۱۳	۵,۶۳
	مفصل ۳	۰,۰۰۱۳	۰,۰۰۱۱	۵,۶۸
	مفصل ۴	$8,۰۴۱۲ \times 10^{-4}$	۰,۰۰۱۲	۶,۱۵
مسیر مطلوب دوم $q_d = 1 - \cos(0.1 \times \pi t)$	مفصل ۱	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۳۲	۹,۰۶
	مفصل ۲	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۳۱	۹,۰۵
	مفصل ۳	۰,۰۰۱۴	۰,۰۰۲۹	۸,۷۹
	مفصل ۴	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۰۳	۹

در بخش بعد، کنترل کننده مود لغزشی مبتنی بر غیرفعال بودن که در مرجع [۷۷] ارائه شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجایی که سیستم در نظر گرفته شده در مرجع [۷۷]، فاقد عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی است، در ادامه، ابتدا سطح لغزش پیشنهادی آن بر اساس روش ارائه شده در این فصل از رساله، به نحوی اصلاح می‌شود که برای سیستم‌های دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی نیز مناسب باشد. سپس، قانون کنترل مود لغزشی پیشنهادی نیز اصلاح می‌شود.

۵-۷ توسعه‌ی کنترل‌کننده‌ی مود لغزشی مرجع [۷۷]

در این بخش، هدف، استفاده از ساختار پیشنهادی سطح لغزش مرجع [۷۷] و توسعه آن برای سیستم‌های دارای عدم قطعیت‌ها و ناسازگار با ورودی است به نحوی که بتوان ردگیری مطلوب مفاصل ربات را در پی داشت. در مرجع [۷۷]، برای سیستم‌های غیرخطی مرتبه دوم که فضای حالت آن به صورت زیر می‌باشد، کنترل‌کننده‌ی مود لغزشی مبتنی بر خاصیت غیرفعال بودن ارائه شده است.

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \quad (۵-۶۴)$$

$$\dot{x}_2(t) = f(x_1, x_2, t) + u(t) + d(t)$$

در سیستم فوق، $x_1, x_2 \in R^n$ متغیرهای حالت سیستم هستند. همچنین، u ورودی کنترلی سیستم و d اغتشاش خارجی سیستم است. در این ساختار تابع هموار f ، یک تابع محدود بوده که شامل عدم قطعیت‌های نامعلوم است. اگر $\hat{f}$ تخمینی از آن باشد، داریم:

$$|\tilde{f} + d| \leq \gamma \quad (۵-۶۵)$$

که در این رابطه $\tilde{f} = f - \hat{f}$ و γ یک ثابت مثبت معلوم است. در مرجع [۷۷]، سطح لغزش پیشنهادی برای سیستم (۵-۶۴) به صورت زیر تعریف شده است:

$$\eta(x_1, x_2, t) = x_2(t) + c \tanh(\beta x_1(t)) \quad (۵-۶۶)$$

که در آن $c, \beta \in R$ پارامترهای طراحی هستند. همچنین تابع ذخیره معین مثبت به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$S = \frac{c}{\beta} \ln(\cosh(\beta x_1)) \quad (۵-۶۷)$$

مشتق این تابع ذخیره نسبت به متغیر حالت x_1 برابر است با:

$$s = \frac{\partial S}{\partial x_1} = c \tanh(\beta x_1) \quad (۵-۶۸)$$

لازم به ذکر است که در ساختار سطح لغزش (۵-۶۶)، از مشتق تابع ذخیره نسبت به متغیر حالت x_1 (رابطه (۵-۶۸)) استفاده شده است. به عبارت دیگر، متغیر حالت x_2 ، نقش ورودی را برای بلوک اول سیستم (۵-۶۴) ایفا نموده و زمانی که سطح لغزش صفر شود، پایداری مجانبی بلوک اول تضمین خواهد شد. در نهایت، قانون کنترل مود لغزشی مبتنی بر اکیداً غیرفعال بودن به صورت زیر قابل ارائه است.

$$u = -\hat{f} - (\alpha + \gamma) \frac{x_2}{|x_2|} - c \tanh(\beta x_1) \quad (۵-۶۹)$$

در این رابطه $\alpha > 0$ بهره کنترلی است. لازم به ذکر است که با توجه به توضیحات مقاله مذکور، محاسبه $\hat{f}$ می‌تواند به وسیله روش‌های تطبیقی یا روش‌های هوشمند نظیر فازی و شبکه عصبی صورت پذیرد.

اگر در سیستم غیرخطی (۶۴-۵)، عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی نیز وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، سیستم (۶۴-۵) به صورت زیر باشد؛

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + \Delta_1 \\ \dot{x}_2 &= f(x_1, x_2) + u + d\end{aligned}\quad (۷۰-۵)$$

در این صورت، قانون کنترل (۶۹-۵)، پایداری مجانبی سیستم (۷۰-۵) را تضمین نمی‌کند. از آنجایی که مدل فضای حالت بازوی رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها، دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی است، هدف اصلی این بخش، اصلاح سطح لغزش پیشنهادی (۶۶-۵) و همچنین قانون کنترل مود لغزشی (۶۹-۵) به منظور تحقق ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل ربات می‌باشد.

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= I_a - \ddot{q}_d + \Delta_1 \\ \dot{I}_a &= V + \Delta_2\end{aligned}\quad (۷۱-۵)$$

برای این منظور، تابع ذخیره مناسب برای سیستم فوق، بر اساس تابع (۶۷-۵)، به صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$S = \left\{ \lambda_1 \ln(\cosh(e_1^T)) \right\} + \frac{1}{2} e_2^T e_2 \quad (۷۲-۵)$$

در این رابطه λ_1 ماتریس قطری است که عناصر آن مثبت و ثابت هستند. از این‌رو تابع لیاپانوف (۴۴-۵) به صورت زیر خواهد بود.

$$V_1 = \left\{ \lambda_1 \ln(\cosh(e_1^T)) \right\} + \frac{1}{2} e_2^T e_2 + \frac{1}{2} \tilde{\Delta}_1 \Gamma^{-1} \tilde{\Delta}_1 \quad (۷۳-۵)$$

با توجه به نظریه ۱-۵، I_a ورودی بلوک اول سیستم (۷۱-۵) است که به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$I_a = -\lambda_1 \tanh(e_1) - \hat{\Delta}_1 - e_2 + \ddot{q}_d \quad (۷۴-۵)$$

مشتق تابع لیاپانوف (۷۳-۵) برابر است با:

$$\dot{V}_1 = \sum_{i=1}^n \left[\lambda_{1i} \tanh(e_{1i}) e_{2i} + e_{2i} (I_{ai} - \ddot{q}_{di} + \Delta_{1i}) - \tilde{\Delta}_{1i} \Gamma_i^{-1} \dot{\tilde{\Delta}}_{1i} \right]. \quad (۷۵-۵)$$

با جایگذاری I_a از رابطه (۷۴-۵) در تساوی فوق، داریم:

$$\dot{V}_1 = \sum_{i=1}^n \left[-e_{2i}^2 - \tilde{\Delta}_{1i} \left(\Gamma_i^{-1} \dot{\Delta}_{1i} - e_{2i} \right) \right]. \quad (۷۶-۵)$$

لازم به ذکر است که در روابط فوق، منظور از λ_{1i} و Γ_i ، عنصر i ام روی قطر اصلی است. اگر عبارت داخل پرانتز مساوی صفر قرار داده شود، قانون تطبیق $\dot{\Delta}_1 = \Gamma e_2$ بدست می‌آید و $\dot{V}_1 = -e_2^2$ می‌باشد. از طرفی، با توجه به (۷۳-۵) و (۷۴-۵)، e_1 ، e_2 و Δ_1 محدود هستند. بنابراین، با توجه به رابطه (۷۴-۵)، I_a نیز محدود است. لذا بر اساس لم باربالات به ازای $t \rightarrow \infty$ ، $\dot{V}_1 \rightarrow 0$ و پایداری مجانبی برای بلوک اول حلقه بسته (۷۱-۵) تضمین می‌شود. بنابراین، بر اساس نظریه ۵-۱، نسخه‌ی اصلاح شده سطح لغزش (۶۶-۵) به صورت زیر خواهد بود.

$$\eta = \{I_a + \lambda_1 \tanh(e_1)\} + (\hat{\Delta}_1 + e_2 - \ddot{q}_d). \quad (۷۷-۵)$$

مشتق سطح لغزش (۷۷-۵) برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{\eta} = \{ \dot{I}_a + \lambda_1 \operatorname{sech}^2(e_1) e_2 \} + (\dot{\hat{\Delta}}_1 + \dot{e}_2 - \ddot{q}_d) &= V_a + \Delta_2 + \lambda_1 \operatorname{sech}^2(e_1) e_2 + \Gamma e_2 \\ + I_a - \ddot{q}_d + \Delta_1 - \ddot{q}_d &= V_a + \lambda_1 [\operatorname{sech}^2(e_1) + \Gamma] e_2 + I_a - \ddot{q}_d - \ddot{q}_d + \Pi. \end{aligned} \quad (۷۸-۵)$$

در رابطه فوق $\Pi = \Delta_1 + \Delta_2$ است که مطابق توضیحاتی که قبلاً در رابطه (۵۱-۵) داده شده، مقداری ثابت و نامعلوم می‌باشد. بنابراین، مطابق نظریه ۵-۲، قانون کنترل توسعه یافته به صورت زیر می‌باشد.

$$V = \ddot{q}_d + \ddot{q}_d - [\lambda_1 \operatorname{sech}^2(e_1) + \Gamma] e_2 - I_a + \bar{v} \quad (۷۹-۵)$$

که $\bar{v}$ بیانگر بخش مقاوم (گسسته) قانون کنترل است که عبارت است از:

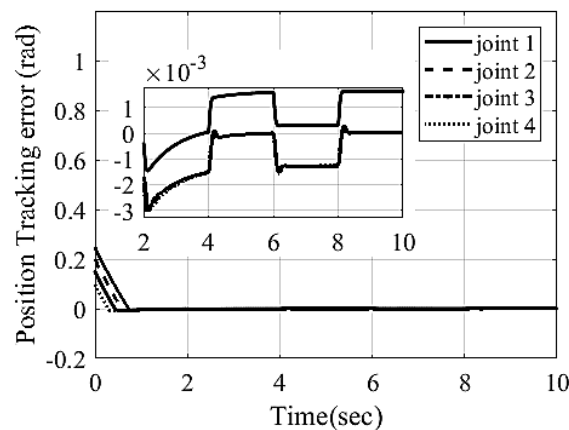
$$\bar{v} = -\gamma \tanh\left(\frac{\eta}{\varepsilon}\right) - \hat{\Pi}. \quad (۸۰-۵)$$

پارامترهای تنظیم γ و ε ثابت‌هایی مثبت هستند. پارامتر ε باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود تا تاثیر پدیده لرزش از بین برود. همچنین قانون تطبیق برای تخمین عدم قطعیت Π برابر است با:

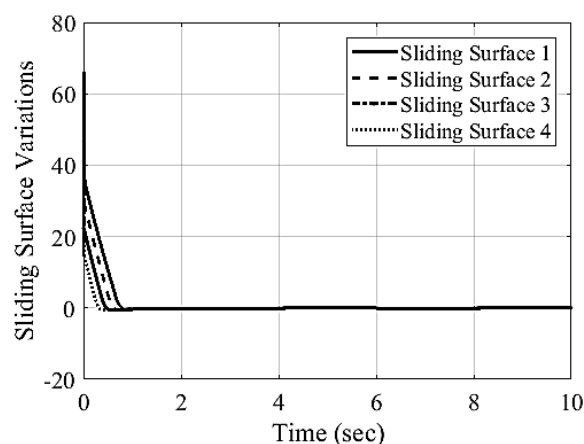
$$\dot{\hat{\Pi}} = \Psi \eta \quad (۸۱-۵)$$

در رابطه فوق ماتریس ثابت مثبت و قطری Ψ ، ماتریس بهره است. از اعمال قانون کنترل (۷۹-۵) به دینامیک مشتق سطح لغزش (۷۸-۵)، دینامیک حلقه بسته سطح لغزش به صورت $\dot{\eta} = \bar{v} + \Pi$ بدست می‌آید. اثبات پایداری این دینامیک دقیقاً مشابه توضیحات نظریه ۵-۲ می‌باشد. لذا برای مطالعه مجدد می‌توان به اثبات نظریه ۵-۲ مراجعه نمود.

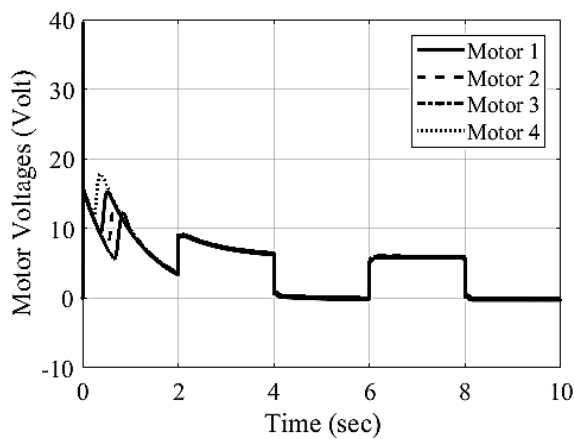
ضرایب کنترلی جدول (۳-۵) نیز برای قانون کنترل توسعه یافته (۷۹-۵) در نظر گرفته شده است. خطای ردگیری موقعیت مفاصل برای هر دو مسیر مطلوب معرفی شده در بخش قبل، در شکل‌های زیر نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۳-۵) مشاهده می‌شود که خطای ردگیری موقعیت مطلوب مفاصل به خوبی کوچک شده و به عبارت دیگر، ردگیری جانبی قابل قبول است. این موضوع با توجه به شکل (۱۴-۵) نیز قابل مشاهده است. در این شکل، تغییرات سطح لغزش نمایش داده شده است که با گذشت زمان به صفر میل کرده و ردگیری مطلوب برای جریان روتور اتفاق افتاده است. همچنین در شکل (۱۵-۵) تغییرات دامنه ولتاژ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، دامنه ولتاژ در بازه مجاز قرار دارد و رفتار آن نیز به صورت نرم می‌باشد.



شکل (۱۳-۵): خطای ردگیری موقعیت مفاصل ربات برای قانون کنترل توسعه یافته (۷۹-۵) به ازای مسیر مطلوب اول (۶۱-۵)

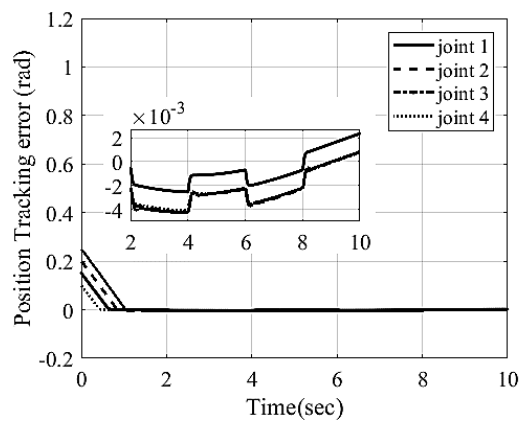


شکل (۱۴-۵): تغییرات سطح لغزش در اجرای شبیه سازی به ازای قانون کنترل توسعه یافته (۷۹-۵) در ردگیری مسیر مطلوب اول (۶۱-۵)

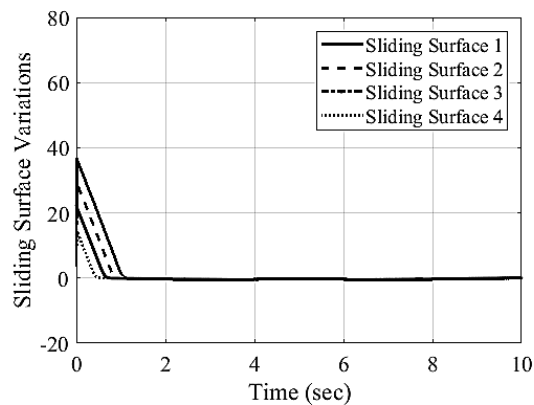


شکل (۵-۱۵): تلاش کنترلی محرکه‌های مفاصل با اعمال قانون کنترل توسعه یافته (۵-۷۹) به ازای مسیر مطلوب اول (۵-۶۱)

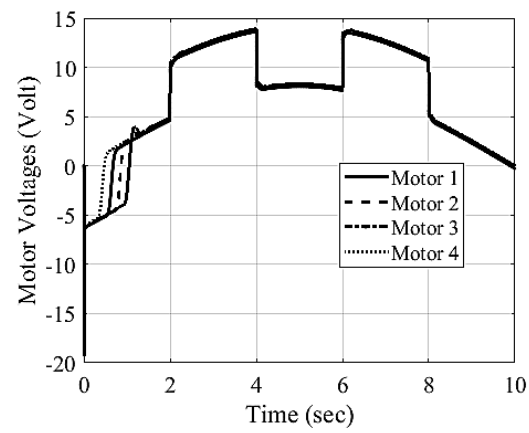
در ادامه نیز، نتایج شبیه‌سازی برای مسیر مطلوب دوم، نمایش داده شده است که مشابه حالت قبل، عملکرد قابل قبول کنترلی کننده‌ی (۵-۷۹) را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۶): خطای ردگیری موقعیت مفاصل ربات برای قانون کنترل توسعه یافته (۵-۷۹) به ازای مسیر مطلوب دوم (۵-۶۲)



شکل (۵-۱۷): تغییرات سطح لغزش در اجرای شبیه سازی به ازای قانون کنترل توسعه یافته (۵-۷۹) در ردگیری مسیر مطلوب دوم (۵-۶۲)



شکل (۵-۱۸): تلاش کنترلی محرکه‌های مفاصل با اعمال قانون کنترل توسعه یافته (۵-۷۹) به ازای مسیر مطلوب دوم (۵-۶۲)

فصل ششم: جمع بندی و پیشنهادات

۶-۱ جمع بندی

در این رساله دو موضوع اصلی و مهم کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن و همچنین اصلاح روش مود لغزشی برای سیستم‌های دارای عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی به کمک نظریه غیرفعال، برای بازوهای رباتیک مورد بررسی قرار گرفت. در هر دو روش کنترلی ارائه شده، ابتدا از روش غیرفعال‌سازی استفاده شده است. به این ترتیب که یک ورودی جدید در نظر گرفته می‌شود به نحوی که سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خروجی تعریف شده، غیرفعال یا اکیداً غیرفعال خروجی باشد. با این توضیح، در حوزه کنترل ولتاژ مبتنی بر غیرفعال بودن، چند رویکرد مختلف ارائه گردید. در ابتدا، کنترل ولتاژ مبتنی بر خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی طراحی شد. در این روش، سیستم حلقه بسته بین ورودی جدید و خروجی خطای ردگیری جریان مطلوب روتور اکیداً غیرفعال خروجی است. این رویکرد، نیازمند طراحی جریان مطلوب برای موتور می‌باشد. جریان مطلوب پیشنهادی در این رویکرد، وابسته به مدل ربات است. همچنین، در قانون کنترل نهایی، مشتق جریان مطلوب نیز حضور دارد، لذا این امر موجب افزایش محاسبات کنترلی می‌شود. از طرفی، با توجه به اینکه، در عمل، ثابت زمانی الکتریکی موتور خیلی از ثابت زمانی مکانیکی ربات کوچکتر است، می‌توان از ثابت زمانی الکتریکی موتور در برابر ثابت زمانی مکانیکی ربات، صرف نظر نمود. با توجه به این موضوع، برای رهایی از محاسبات مربوط به مشتق جریان مطلوب در قانون کنترل، در حالتی دیگر، از ترم $L\dot{I}_a$ در قانون کنترل نهایی صرف نظر شده است که نتایج شبیه‌سازی برای هر دو حالت مناسب بود. اما از آنجایی که جریان مطلوب پیشنهادی به مدل ربات وابسته است، لذا قانون کنترل نهایی نیز به مدل ربات وابسته می‌باشد. از این رو، ساختار کنترل‌کننده نهایی همانند روش‌های راهبرد گشتاور به مدل ربات وابسته بوده و دارای پیچیدگی زیادی است. بنابراین، در رویکردی دیگر، برای ساده‌سازی ساختار کنترل‌کننده ولتاژ، از راهبرد ولتاژ استفاده گردید که بر اساس آن، تنها مدل الکتریکی موتور برای تحقق هدف ردگیری مطلوب مفاصل ربات مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا راهبرد ولتاژ مبتنی بر خاصیت اکیداً غیرفعال خروجی با حذف ثابت زمانی الکتریکی موتور ارائه گردید. نتایج حاصل از این رویکرد نیز مناسب بود و همچنین دامنه ولتاژ محرکه‌ها در بازه مجاز قرار داشتند. اما به منظور بررسی راهبرد ولتاژ بدون حذف ثابت زمانی الکتریکی موتور و همچنین با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل الکتریکی موتور، رویکرد راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن ارائه گردید. از آنجایی که مدل ربات با در نظر گرفتن مدل الکتریکی موتور، در فضای حالت q ، $\dot{q}$ و $\ddot{q}$ یک مدل مرتبه سوم است، در رویکرد راهبرد ولتاژ مبتنی

بر نظریه غیرفعال بودن دو کنترل کننده با مرتبه‌های ۱ و ۲ ارائه گردید. نتایج حاصل از تمامی رویکرد-های ارائه شده، با استفاده از معیار RMS با یکدیگر مقایسه شد که عملکرد مناسب کنترل کننده ولتاژ مبتنی بر غیرفعال بودن در تمامی رویکردها را نشان داد. اما به لحاظ سادگی ساختار قانون کنترل، کنترل کننده راهبرد ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن در حضور عدم قطعیت‌های بازو و موتور دارای ساختاری بسیار ساده بوده که هدف ردگیری مجانبی موقعیت مطلوب مفاصل را نیز به همراه داشت.

در بخش دوم این رساله، با توجه به اینکه مدل فضای حالت بازوهای رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌های آن، در قالب فرم رگولار قرار دارد؛ بنابراین، اولین گزینه برای کنترل این سیستم، استفاده از روش مود لغزشی است. اما از آنجایی که در مدل فضای حالت ربات، عدم قطعیت‌هایی وجود دارند که در کانال ورودی ظاهر نشده و اصطلاحاً ناسازگار با ورودی هستند. بنابراین، روش مود لغزشی مرسوم کارایی لازم را در کنترل این دسته از سیستم‌ها ندارد. همچنین با توجه به مزایای کنترل مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، ایده اصلاح قانون کنترل مود لغزشی با استفاده از نظریه غیرفعال بودن مطرح شد. بر این اساس، سطح لغزش مناسب با استفاده از نظریه غیرفعال بودن به گونه‌ای طراحی گردید که پایداری مجانبی بلوک اول سیستم ربات در حضور عدم قطعیت‌های ناسازگار با ورودی تضمین شود. سپس قانون کنترل مود لغزشی بر اساس سطح لغزش پیشنهادی طراحی گردید. لازم به ذکر است که در این رساله، ابتدا این موضوع برای دسته وسیعی از سیستم‌های غیرخطی مطرح شد و سپس از آن برای تحقق هدف ردگیری مجانبی موقعیت مفاصل ربات اسکارا استفاده گردید. نتایج شبیه سازی در این حالت نیز مناسب بود و دامنه سیگنال کنترلی محرکه‌ها نیز در بازه مجاز قرار داشت.

۲-۶ پیشنهادات

در این رساله، به طور مفصل در مورد سیستم‌های غیرفعال، مزایای آن‌ها، نحوه‌ی غیرفعال سازی سیستم‌های غیرخطی و کنترل ولتاژ بازوهای رباتیک مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن بحث شد. ترکیب روش‌های کنترل غیرخطی با نظریه غیرفعال بودن، از جمله روش‌های پرکاربرد در کنترل سیستم‌های غیرخطی است. برخی از مهمترین پیشنهاداتی که می‌توان به منظور تعریف کارهای آینده مد نظر قرار داد به شرح زیر است:

- ترکیب کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن با سایر روش‌های غیرخطی:
- به عنوان مثال، یکی از چالش‌های موجود در طراحی کنترل کننده پسگام مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای مدل فضای حالت ربات با متغیرهای حالت $\dot{q}$ ، $\ddot{q}$ و $\dot{I}_a$ ، در غیرفعال سازی زیر سیستم سوم است. بنابراین، به طور خاص، حل مشکل طراحی کنترل کننده پسگام

مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای فضای حالت مذکور، یک پیشنهاد برای انجام کارهای آینده است.

- ارائه روش مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای سیستم‌های غیرافاین:
با توجه به ارائه روش مود لغزشی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای دسته وسیعی از سیستم‌های غیرخطی که در قالب فرم رگولار قرار دارند، می‌توان توسعه این طراحی را برای سیستم‌های غیرافاین (یعنی سیستم‌هایی که ورودی آن‌ها دارای ساختاری غیرخطی است) نیز بررسی نمود.
- ارائه روش کنترل ولتاژ مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن برای بازوهای رباتیک در حضور تاخیر ورودی و بررسی اثرات آن

مراجع

- [1] J. C. Willems, "Dissipative dynamical systems part I: General theory," *Arch. Ration. Mech. Anal.*, vol. 45, no. 2, pp. 321–351, Jan. 1972.
- [2] A. Van der Schaft, *L2-gain and passivity techniques in nonlinear control*, Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [3] H. Khalil, *Nonlinear Systems*. NJ, USA: Prentice Hall, 2002.
- [4] R. Ortega, J. Perez, P. Nicklasson, and H. Sira-Ramirez, *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications*, vol. 26, no. 3. Springer, 1999.
- [5] A. Isidori, "Passivity, Feedback Equivalence, and the Global Stabilization of Minimum Phase Nonlinear Systems," *Autom. Control IEEE Trans*, vol. 36, no. 11, pp. 1228–1240, 1991.
- [6] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*, vol. 26, no. 6. 2006.
- [7] T. Lima Costa, F. A. Lara-Molina, A. A. Cavalini Junior, and E. Taketa, "Robust H_∞ Computed torque Control for Manipulators," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 398–407, Feb. 2018.
- [8] Y. Chen, G. Ma, S. Lin, S. Ning, and J. Gao, "Computed-torque plus robust adaptive compensation control for robot manipulator with structured and unstructured uncertainties," *IMA J. Math. Control Inf.*, vol. 33, no. 1, pp. 37–52, Mar. 2016.
- [9] M. M. Fateh, "On the voltage-based control of robot manipulators," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 202–212, 2008.
- [10] V. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, "Sliding mode control in electro-mechanical systems, second edition," *Sliding Mode Control Electro-Mechanical Syst. Second Ed.*, pp. 1–485, Jan. 2017.
- [11] J. Mu, X. G. Yan, S. K. Spurgeon, and Z. Mao, "Generalized Regular Form Based SMC for Nonlinear Systems with Application to a WMR," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 8, pp. 6714–6723, Aug. 2017.
- [12] R. Abraham and J. Marsden, *Foundations of mechanics*, CRC Press, 2008.
- [13] C. Lanczos, *The Variational Principles of Mechanics*. Dover Publications, 1949.
- [14] P. Libermann and C.-M. Marle, *Symplectic Geometry and Analytical Mechanics*. Springer, 1987.
- [15] K. Fujimoto, S. Sakai, and T. Sugie, "Passivity based control of a class of Hamiltonian systems with nonholonomic constraints," *Automatica*, vol. 48, no. 12, pp. 3054–3063, Dec. 2012.
- [16] J. Ferguson, A. Donaire, and R. H. Middleton, "Kinetic-Potential Energy Shaping for Mechanical Systems With Applications to Tracking," *IEEE Control Syst. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 960–965, Oct. 2019.
- [17] N. Sakata, K. Fujimoto, and I. Maruta, "On trajectory tracking control of simple port-Hamiltonian systems based on passivity based sliding mode control," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 19, pp. 38–43, Jan. 2021.
- [18] K. Fujimoto, N. Sakata, I. Maruta, and J. Ferguson, "A Passivity Based Sliding Mode Controller for Simple Port-Hamiltonian Systems," *IEEE Control Syst. Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 839–844, 2021.
- [19] R. Ortega, J. G. Romero, P. Borja, and A. Donaire, *PID Passivity-Based Control of Nonlinear Systems with Applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2021.
- [20] M. Zhang, P. Borja, R. Ortega, Z. Liu, and H. Su, "PID Passivity-Based Control of Port-Hamiltonian Systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 63, no. 4, pp. 1032–1044, Apr. 2018.
- [21] P. Borja, R. Ortega, and J. M. A. Scherpen, "New Results on Stabilization of Port-Hamiltonian Systems via PID Passivity-Based Control," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 66, no. 2, pp. 625–636, 2021.
- [22] C. Wu, A. Van Der Schaft, and J. Chen, "Stabilization of Port-Hamiltonian Systems Based on Shifted Passivity via Feedback," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 66, no. 5, pp. 2219–2226, May 2021.
- [23] M. Ryalat, D. S. Laila, and H. ElMoaqet, "Adaptive Interconnection and Damping Assignment Passivity Based Control for Underactuated Mechanical Systems," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 864–877, Sep. 2021.

- [24] O. Penalzoza-Mejia, C. P. Ojeda-Perez, and H. J. Estrada-Garcia, "Passivity-based tracking control of robot manipulators with torque constraints," *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, vol. 2016-Septe, pp. 947–952, Sep. 2016.
- [25] A. Giusti, J. Malzahn, N. G. Tsagarakis, and M. Althoff, "On the Combined Inverse-Dynamics/Passivity-Based Control of Elastic-Joint Robots," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 34, no. 6, pp. 1461–1471, Dec. 2018.
- [26] Y. Zhang, S. Li, J. Zou, and A. H. Khan, "A Passivity-Based Approach for Kinematic Control of Manipulators with Constraints," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 16, no. 5, pp. 3029–3038, May 2020.
- [27] Y. Song, C. Li, C. Wang, and Z. Wu, "Passivity-Based Force Tracking Control for Flexible Joint Robots," *9th IEEE Int. Conf. Cyber Technol. Autom. Control Intell. Syst. CYBER 2019*, pp. 7–12, Jul. 2019.
- [28] J. E. Lavín-Delgado, S. Chávez-Vázquez, J. F. Gómez-Aguilar, G. Delgado-Reyes, and M. A. Ruíz-Jaimes, "Fractional-order passivity-based adaptive controller for a robot manipulator type scara," *Fractals*, vol. 5, no. 4, p. 2021, Jun. 2021.
- [29] J. Back and W. Ha, "Robust Tracking of Robot Manipulators via Momentum-based Disturbance Observer and Passivity-based Controller," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 976–985, Feb. 2019.
- [30] D. Ebeigbe and D. Simon, "A passivity-based regressor-free adaptive controller for robot manipulators with combined regressor/parameter estimation," *ASME 2018 Dyn. Syst. Control Conf. DSCC 2018*, vol. 2, 2018.
- [31] J. Li, K. Ma, and Z. Wu, "Prescribed Performance Control for Uncertain Flexible-joint Robotic Manipulators Driven by DC Motors," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 1640–1650, Jan. 2021.
- [32] M. F. Jalaeian, M. M. Fateh, and M. Rahimiyan, "Bi-Level Adaptive Computed-Current Impedance Controller for Electrically Driven Robots," *Robotica*, vol. 39, no. 2, pp. 200–216, Feb. 2021.
- [33] W. Si, L. Zhao, J. Wei, and Z. Guan, "Task-space regulation of rigid-link electrically-driven robots with uncertain kinematics using neural networks," *Meas. Control (United Kingdom)*, vol. 54, no. 1–2, pp. 102–115, Jan. 2021.
- [34] J. Peng, S. Ding, and R. Dubay, "Adaptive composite neural network disturbance observer-based dynamic surface control for electrically driven robotic manipulators," *Neural Comput. Appl.*, vol. 33, no. 11, pp. 6197–6211, Oct. 2021.
- [35] S. zaare, M. R. Soltanpour, and M. Moattari, "Voltage based sliding mode control of flexible joint robot manipulators in presence of uncertainties," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 118, pp. 204–219, 2019.
- [36] M. M. Fateh and M. Souzanchikashani, "Indirect adaptive fuzzy control for flexible-joint robot manipulators using voltage control strategy," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 1451–1459, 2015.
- [37] J. Orrante-Sakanassi, V. Santibañez, and J. Moreno-Valenzuela, "Stability analysis of a voltage-based controller for robot manipulators," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 10, Jan. 2013.
- [38] A. Izadbakhsh and S. Khorashadizadeh, "Robust adaptive control of robot manipulators using Bernstein polynomials as universal approximator," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 30, no. 7, pp. 2719–2735, May 2020.
- [39] N. Azoui and L. Saidi, "Passivity Based Adaptive Control of Robotic Manipulators Electrically Controlled," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 34, pp. 45–54, 2011.
- [40] J. Moreno-Valenzuela, R. Campa, and V. Santibañez, "On passivity-based control of a class of electrically driven robots," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 2756–2761, 2012.
- [41] J. Moreno-Valenzuela, R. Campa, and V. Santibañez, "Model-based control of a class of voltage-driven robot manipulators with non-passive dynamics," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 39, no. 7, pp. 2086–2099, 2013.
- [42] S. Islam and X. P. Liu, "Robust sliding mode control for robot manipulators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 6, pp. 3444–3453, Jun. 2014.
- [43] K. Rsetam, Z. Cao, and Z. Man, "Cascaded-Extended-State-Observer-Based Sliding-Mode Control for

- Underactuated Flexible Joint Robot,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 12, pp. 10822–10832, Dec. 2020.
- [44] Z. Zhang, M. Leibold, and D. Wollherr, “Integral Sliding-Mode Observer-Based Disturbance Estimation for Euler-Lagrangian Systems,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 28, no. 6, pp. 2377–2389, Nov. 2020.
 - [45] Y. Feng, M. Zhou, X. Zheng, F. Han, and X. Yu, “Full-order terminal sliding-mode control of MIMO systems with unmatched uncertainties,” *J. Franklin Inst.*, vol. 355, no. 2, pp. 653–674, 2018.
 - [46] Z. Guo, J. Guo, X. Wang, J. Chang, and H. Huang, “Sliding mode control for systems subjected to unmatched disturbances/unknown control direction and its application,” *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 31, no. 4, pp. 1303–1323, Mar. 2021.
 - [47] E. Ranjbar, M. Yaghoubi, and A. A. Suratgar, “An adaptive sliding mode controller design to cope with unmatched uncertainties and disturbance in a MEMS voltage reference source,” *Control Theory Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 211–226, Mar. 2021.
 - [48] K. Wulff, T. Posielek, and J. Reger, “Compensation of Unmatched Disturbances via Sliding-Mode Control: A Comparison of Classical Results and Recent Methods Using Integral and Higher-Order Sliding-Mode,” *Stud. Syst. Decis. Control*, vol. 271, pp. 237–272, 2020.
 - [49] M. Rubagotti, A. Estrada, F. Castaños, A. Ferrara, and L. Fridman, “Integral sliding mode control for nonlinear systems with matched and unmatched perturbations,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 56, no. 11, pp. 2699–2704, Nov. 2011.
 - [50] M. Rubagotti, A. Estrada, F. Castaños, A. Ferrara, and L. Fridman, “Optimal disturbance rejection via integral sliding mode control for uncertain systems in regular form,” *Proc. 2010 11th Int. Work. Var. Struct. Syst. VSS 2010*, pp. 78–82, 2010.
 - [51] F. Castaños and L. Fridman, “Analysis and design of integral sliding manifolds for systems with unmatched perturbations,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 51, no. 5, pp. 853–858, 2006.
 - [52] J. L. Chang, “Dynamic output integral sliding-mode control with disturbance attenuation,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 54, no. 11, pp. 2653–2658, Nov. 2009.
 - [53] J. Yang, S. Li, and X. Yu, “Sliding-mode control for systems with mismatched uncertainties via a disturbance observer,” *IECON Proc. Industrial Electron. Conf.*, pp. 3988–3993, 2011.
 - [54] X. Zhang, “SMC for nonlinear systems with mismatched uncertainty using Lyapunov-function integral sliding mode,” *Int. J. Control*, 2021.
 - [55] M. K. Camlibel, L. Iannelli, and F. Vasca, “Passivity and complementarity,” *Math. Program.*, vol. 145, no. 1–2, pp. 531–563, 2014.
 - [56] P. Kokotovic and HJ Sussmann, “A positive real condition for global stabilization of nonlinear systems,” *Syst. Control*, vol. 13, no. 2, pp. 125–133, 1989.
 - [57] A. L. Fradkov and D. J. Hill, “Exponential feedback passivity and stabilizability of nonlinear systems,” *Automatica*, vol. 34, no. 6, pp. 697–703, 1998.
 - [58] Y. W. Liang and D. C. Liaw, “Robust control of non-linear affine systems,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 137, no. 2–3, pp. 337–347, 2003.
 - [59] M. M. Seron, D. J. Hill, and A. L. Fradkov, “Nonlinear adaptive control of feedback passive systems,” *Automatica*, vol. 31, no. 7, pp. 1053–1060, 1995.
 - [60] P. Kokotović and M. Arcak, “Constructive nonlinear control: A historical perspective,” *Automatica*, vol. 37, no. 5, pp. 637–662, 2001.
 - [61] P. Sistla, S. Figarado, K. Chemmangat, N. S. Manjarekar, and G. Kallu Valappil, “Design and performance comparison of interconnection and damping assignment passivity-based control for vibration suppression in active suspension systems,” *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 27, no. 7–8, pp. 893–911, Apr. 2021.

- [62] A. Belherazem and M. Chenafa, "Passivity Based Adaptive Control of a Single-Link Flexible Manipulator," *Autom. Control Comput. Sci.*, vol. 55, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2021.
- [63] K. Zhang and G. Duan, "Passivity-based adaptive tracking control of spacecraft line-of-sight relative motion with thrust saturation," *J. Franklin Inst.*, vol. 358, no. 15, pp. 6408–6432, Jul. 2021.
- [64] O. D. Montoya, W. Gil-González, A. Garces, F. Serra, and J. C. Hernández, "Stabilization of MT-HVDC grids via passivity-based control and convex optimization," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 196, p. 107273, Jul. 2021.
- [65] M. A. Hassan, C.-L. Su, F.-Z. Chen, and K.-Y. Lo, "Adaptive Passivity-Based Control of DC-DC Boost Power Converter Supplying Constant Power and Constant Voltage Loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 6, pp. 6204–6214, Jun. 2022.
- [66] C. D. García-Beltrán, E. M. Miranda-Araujo, M. E. Guerrero-Sanchez, G. Valencia-Palomo, O. Hernández-González, and S. Gómez-Peñate, "Passivity-based control laws for an unmanned powered parachute aircraft," vol. 23, no. 5, pp. 2087–2096, 2021.
- [67] Y. Jeung, D. Lee, "Design of Passivity-Based Damping Controller for Suppressing Power Oscillations in DC Microgrids," vol. 36, no. 4, pp. 4016–4028, 2020.
- [68] T. Hatanaka, N. Chopra, M. Fujita, and M. W. Spong, *Passivity-based control and estimation in networked robotics*, Springer. 2015.
- [69] S. M. Ahmadi and M. M. Fateh, "Task-space asymptotic tracking control of robots using a direct adaptive Taylor series controller," *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 24, no. 23, pp. 5570–5584, Dec. 2018.
- [70] M. M. Fateh and S. Fateh, "Decentralized direct adaptive fuzzy control of robots using voltage control strategy," *Nonlinear Dyn. 2012 703*, vol. 70, no. 3, pp. 1919–1930, Sep. 2012.
- [71] F.-J. Lin, S.-G. Chen, and I.-F. Sun, "Intelligent Sliding-Mode Position Control Using Recurrent Wavelet Fuzzy Neural Network for Electrical Power Steering System," *Int. J. Fuzzy Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 1344–1361, Oct. 2017.
- [72] F. J. Lin, C. K. Chang, and P. K. Huang, "FPGA-based adaptive backstepping sliding-mode control for linear induction motor drive," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1222–1231, Jul. 2007.
- [73] V. Sreeram and P. Agathoklis, "Solution of Lyapunov equation with system matrix in companion form," *IEE Proc. D Control Theory Appl.*, vol. 138, no. 6, pp. 529–534, 1991.
- [74] B. Xu and F. Sun, "Composite Intelligent Learning Control of Strict-Feedback Systems with Disturbance," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 48, no. 2, pp. 730–741, 2018.
- [75] A. Tony Thomas, R. Parameshwaran, S. Sathiyavathi, and A. Vimala Starbino, "Improved Position Tracking Performance of Electro Hydraulic Actuator Using PID and Sliding Mode Controller," *IETE J. Res.*, 2019.
- [76] A. ur Rehman, N. Ali, O. Khan, and M. Pervaiz, "A Disturbance Observer Based Sliding Mode Control for Variable Speed Wind Turbine," *IETE J. Res.*, 2019.
- [77] J. L. Chang, "Passivity-based sliding mode controller/observer for second-order nonlinear systems," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 29, no. 6, pp. 1976–1989, Apr. 2019.

Abstract:

In this thesis, a new passivity-based voltage control of robotic manipulators is proposed. The controller design is presented in two categories of voltage control strategy and method depends on the robot model with output strictly passivity property. Also, the voltage control strategy method is designed in two cases of general passivity and output strictly passive case. In this design, the feedback passivation method is used in which the initial system is converted to a passive system by a feedback law and then the controller design is performed. Next, with the help of passivity-based control theory, the sliding mode method is proposed for nonlinear systems with unmatched uncertainties. In other words, the theory of passivity is used to design the sliding surface. With the help of the proposed method, desired path tracking of the robot joints is also achieved. In all stages of design, the proof of stability is done using Lyapunov method and the efficiency of the proposed methods is demonstrated by simulation.

Keywords: Voltage Control Strategy, Robot Manipulators, Passivity-based Control Theory, Sliding Mode Method, Unmatched Uncertainties.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering

PhD Dissertation in Electrical Engineering, Control Engineering

Passivity-based Voltage Control of Robot Manipulators

By: Hamed Chenarani

Supervisor:

Dr. Mohammad Mehdi Fateh

February 2022