



## دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی‌تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی

گرایش کنترل

کنترل تاب آور موقعیت عملگر خمی نرم در حضور عیب

نگارش

سینا ربیعی

اساتید راهنما

دکتر ایمان شریفی

پروفسور حیدرعلی طالبی

داور

دکتر محمداعظم خسروی

تابستان ۱۴۰۲



## صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه- فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

- در این صفحه فرم دفاع یا تایید و تصویب پایان نامه موسوم به فرم کمیته دفاع - موجود در پرونده آموزشی را قرار دهید.

## تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب سینا ربیعی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی استادی دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلًا برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مأخذ بلامنع است.

سینا ربیعی  
امضا

تّعديم به مهربانی همان زنگیم، پدر، مادر و خواهر عزیزم که حضور شان همیشه تسلی بخش خاطر من بوده است.

# پاس‌گزاری

در انتهای مراحل پژوهش، تدوین و نگارش پایان‌نامه، لازم است از خدمات تمامی اساتید و عزیزانی که در این مسیر بندۀ را یاری کردند، تقدیر و تشکر به عمل آورم:

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر ایمان شریفی که مسبب قرار گرفتن اینجانب در مسیر انتخاب و تدوین این پژوهه می‌باشد، کمال تشکر را دارم. از استاد گرانقدر جناب آقای پروفسور طالبی که در تمامی مراحل این مقطع تحصیلی از دانش و بیانش ایشان بهره بردم، بسیار سپاس‌گزارم.

همچنین لازم است از جناب آقای مهندس صادقی بابت همراهی و کمک‌های فراوان ایشان در طول تأليف این پایان‌نامه، تقدیر و تشکر به عمل آورم.

سیناربیعی  
شهریور ۱۴۰۲

## چکیده

ربات‌های نرم، ربات‌های پیوسته‌ای<sup>۱</sup> هستند که می‌توانند تحت تاثیر تغییر شکل کشسانی قرار بگیرند و از طریق تغییر شکل‌های یکنواخت و نرم به آرایش دلخواه برسند. در مقایسه با ربات‌های صلب که محدودیت‌هایی نظیر اشغال فضای زیاد، سخت بودن و بازه‌ی حرکتی محدود از ویژگی‌های عمومی آن‌ها است، ربات‌های نرم از وزن کم و عملکرد ایمن‌تری برخوردارند. با توجه به این مزایا، این دسته از ربات‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای ربات‌های صلب در بسیاری از زمینه‌ها مانند مسائل توانبخشی و تعامل انسان با ربات باشند.

اگرچه این ربات‌ها فواید و رفتارهای مطلوب بسیاری دارند اما داشتن بی‌شمار درجه آزادی و دشوار بودن مدل‌سازی دینامیکی، کنترل آن‌ها را به مسئله‌ای پیچیده و چالش‌برانگیز تبدیل کرده است.

در این پژوهه به ارائه راهکاری موثر برای کنترل موقعیت مجری نهایی<sup>۲</sup> ربات‌های نرم از طریق کنترل انحنای ایجاد شده توسط عملگرهای آن‌ها در صورت عدم وجود مدل دقیق پرداخته می‌شود. برای این منظور از یک ربات نرم دو درجه آزادی با عملگرهای خمی نیوماتیکی مورد بررسی قرار داده می‌شود. مدل‌سازی این ربات از طریق معادل‌سازی آن با یک ربات صلب چهار درجه آزادی با رفتار دینامیکی و سینماتیکی مشابه انجام می‌شود؛ همچنین فرض انحنای ثابت در فرایند مدل‌سازی و محاسبه معادلات دینامیکی لحاظ می‌گردد. پس از بدست آوردن دینامیک ربات صلب، به کمک یک نگاشت مناسب بین متغیرهای مفصلی این دو ربات، دینامیک ربات نرم دو درجه آزادی محاسبه می‌شود.

با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های فراوان در مدل و پارامترهای دینامیکی شناسایی شده و همچنین امکان بروز عیب‌های متعدد اعم از سوراخ شدن عملگرهای خمی و نشتی هوا از عملگرهای ربات نرم می‌پردازیم. در انتها، عملکرد ربات لغزشی به همراه رویتگر عیب برای کنترل زاویای خمی عملگرهای ربات نرم می‌پردازیم. در انتها، عملکرد ربات نرم مورد نظر کنترل شده با کنترل کننده طراحی شده را در مسئله تعقیب ورودی دلخواه و بروز عیب بررسی و با کنترل کننده‌های دیگر از جمله کنترل کننده PID مقایسه می‌کنیم.

## کلمات کلیدی:

ربات نرم، عملگر خمی نیوماتیکی، کنترل موقعیت، انحنای ثابت، کنترل کننده‌ی تطبیقی لغزشی، عیب

<sup>1</sup>Continuum robots

<sup>2</sup>End-Effector

# فهرست مطالب

۱	۱	مقدمه
۳	۱-۱	ربات‌های نرم
۳	۲-۱	کاربرد ربات‌های نرم
۴	۳-۱	چالش‌های مدل‌سازی و کنترل ربات‌های نرم
۵	۴-۱	عملگرها نرم نیوماتیکی
۶	۵-۱	قید ورودی مثبت
۶	۶-۱	قید انحنای ثابت
۷	۷-۱	پژوهش‌های پیشین
۱۰	۸-۱	طرح مسئله
۱۱	۹-۱	ساختار پایان‌نامه
۱۳	۲	مدل‌سازی ربات نرم
۱۴	۱-۲	مقدمه
۱۴	۲-۲	مدل‌سازی سینماتیکی
۱۶	۱-۲-۲	فضای کاری
۱۷	۳-۲	مدل‌سازی دینامیکی
۲۱	۴-۲	نتیجه‌گیری
۲۲	۳	طراحی رویتگر عیب
۲۳	۱-۳	مقدمه

۲۳	.....	۲-۳	مدل سازی عیب و فرضیات . . . . .
۲۴	.....	۳-۳	رویتگر عیب . . . . .
۲۵	.....	۴-۳	اثبات پایداری . . . . .
۲۸	.....	۵-۳	نتیجه‌گیری . . . . .
۴ طراحی کنترل کننده زاویه خم ش عملگر نرم			
۲۹	.....	۱-۴	مقدمه . . . . .
۳۰	.....	۲-۴	کنترل کننده تطبیقی لغزشی با در نظر گرفتن عیب . . . . .
۳۲	.....	۱-۲-۴	اثبات پایداری کنترل کننده تطبیقی لغزشی با در نظر گرفتن عیب . . . . .
۳۵	.....	۳-۴	کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون استفاده از تخمین عیب . . . . .
۳۶	.....	۱-۳-۴	اثبات پایداری کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون استفاده از تخمین عیب . . . . .
۵ شبیه‌سازی			
۳۸	.....	۱-۵	مقدمه . . . . .
۳۹	.....	۲-۵	کنترل کننده تطبیقی لغزشی با در نظر گرفتن عیب . . . . .
۴۳	.....	۳-۵	کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب . . . . .
۴۶	.....	۴-۵	کنترل کننده PID . . . . .
۴۹	.....	۵-۵	مقایسه عملکرد کنترل کننده‌ها . . . . .
۶ نتیجه‌گیری			
منابع و مراجع			
۵۱	.....	۵۴	

## فهرست تصاویر

۱-۱	ربات شبیه‌ساز اندام دست انسان با استفاده از عملگر خمی نرم [۲]. . . . .	۶
۲-۱	گریپر نرم برای برداشت اجسام حساس [۱]. . . . .	۷
۳-۱	ربات نرم نرم با ۴ عملگر خمی تحت احناک ثابت (هر عملگر قطاعی از یک دایره را تشکیل می‌دهد که شعاع آن با خطچین مشخص شده است) [۹]. . . . .	۸
۴-۱	ربات نرم مورد بررسی با دو عملگر خمی نیوماتیکی . . . . .	۱۲
۱-۲	ربات نرم حاصل از اتصال سری چند عملگر خمی نرم [۹] . . . . .	۱۵
۲-۲	به دست آوردن ماتریس تبدیل عملگر خمی نرم . . . . .	۱۶
۳-۲	فضای کاری ربات (الف) دو عملگر خمی متصل شده به صورت سری (ب) یک عملگر خمی - (خطچین‌های عمودی نشان‌دهنده مسیر مطلوب جهت حرکت جسم در راستای محور عمودی) . . . . .	۱۷
۴-۲	ربات صلب معادل با (الف) یک عملگر خمی (ب) ربات نرم تشکیل شده از دو عملگر خمی . . . . .	۱۸
۱-۵	تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب در عملگر خمی اول ۴۰	
۲-۵	تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب در عملگر خمی دوم ۴۱	
۳-۵	خطای تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب برای هر دو عملگر خمی . . . . .	۴۲
۴-۵	ورودی کنترلی اعمال شده توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب به هر دو عملگر خمی . . . . .	۴۲

۵-۵	تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب در عملگر خمثی	
۴۴	اول . . . . .	
۶-۵	تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب در عملگر خمثی	
۴۴	دوم . . . . .	
۷-۵	خطای تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب برای هر دو عملگر خمثی . . .	
۸-۵	ورودی کنترلی اعمال شده توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب به هر دو عملگر خمثی . . .	
۹-۵	تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده PID در عملگر خمثی اول . . .	
۱۰-۵	تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده PID در عملگر خمثی دوم . . .	
۱۱-۵	خطای تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده PID برای هر دو عملگر خمثی . . .	
۱۲-۵	ورودی کنترلی اعمال شده توسط کنترل کننده PID به هر دو عملگر خمثی . . .	
۱۳-۵	مقایسه عملکرد تعقیب ورودی مرجع توسط هر سه کنترل کننده در عملگر خمثی اول . . .	
۱۴-۵	مقایسه عملکرد تعقیب ورودی مرجع توسط هر سه کنترل کننده در عملگر خمثی دوم . . .	

## فهرست جداول

۱۹	۱-۲	پارامترهای دناویت هارتبرگ ربات صلب ۴ درجه آزادی معادل با یک عملگر خمش نرم . . .
۳۹	۱-۵	پارامترهای دینامیکی ربات نرم در نظر گرفته شده . . . . .
۴۰	۲-۵	پارامترهای تنظیمی ورودی کنترلی طراحی شده . . . . .
۴۶	۳-۵	پارامترهای کنترل کننده PID . . . . .
۵۰	۴-۵	ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطای کنترل کننده‌های معرفی شده . . . . .
۵۳	۱-۶	ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطای کنترل کننده‌های معرفی شده . . . . .

# فصل اول

مقدمه

مهندسان همواره از علم زیست‌شناسی و جانداران برای طراحی و خلق ماشین‌هایی توانمند الهام گرفته‌اند [۱۶]. نرمی و انطباق‌پذیری<sup>۱</sup> از مشخصه‌های مخصوص بسیاری از مکانیزم‌های زیستی موجود است و باعث تعامل<sup>۲</sup> بهتر این موجودات با محیط اطرافشان می‌شود. دانشمندان با توجه به این سیستم‌ها کلاس جدیدی از ربات‌ها به نام ربات‌های نرم<sup>۳</sup> را معرفی و بررسی کرده‌اند. از ربات‌های صلب<sup>۴</sup> به طور گسترده در زمینه ساخت، تولید و مونتاژ استفاده می‌شود و می‌توان آن‌ها را برای انجام بهینه یک وظیفه مشخص برنامه‌ریزی و کنترل کرد. اما این ربات‌ها با محدودیت‌های فراوانی از جمله نقاط فضای قابل دسترسی<sup>۵</sup> و جهت‌گیری‌های<sup>۶</sup> محدود، مواجه هستند. همچنین به دلیل وجود بازوها و مفاصل صلب در این ربات‌ها، در کابرد‌هایی که تعامل با انسان لازم است، سطح مناسبی از ایمنی و عملکرد را برآورده نمی‌کنند. اما با ساخته شدن ربات‌های نرم فاصله موجود بین انسان‌ها و ماشین‌ها کمتر شده است. برخلاف ربات‌های صلب، بدنه ربات‌های نرم از مواد ذاتاً نرم و انعطاف‌پذیر ساخته می‌شود و در نتیجه می‌توانند در اثر نیرو خارجی تغییر شکل دهند. به علاوه، این ربات‌ها در جات آزادی بسیاری دارند که باعث شباهت هرچه بیشتر آن‌ها به ماهیچه‌های موجود در ساختارهای زیستی می‌شوند. این دسته از ربات‌ها توانایی ارائه تطبیق‌پذیری، حساسیت و سرعت بی‌نظیری دارند. همچنین قابلیت پیچش و خمش تحت انحنای‌های زیاد، این ربات‌ها را به گزینه‌های مناسبی برای استفاده در محیط‌های کاری محدود تبدیل کرده. ویژگی‌هایی از این دسته باعث شده تا این ربات‌ها به شکل عملگرهای نرم به حوزه‌های پزشکی و توانبخشی نیز راه پیدا کنند. عملگرهای نرم نیوماتیکی<sup>۷</sup>، همان‌طور که از نامشان پیدا است، با استفاده از فشار هوای دمیده شده در آن‌ها کنترل می‌شوند. این مساله باعث می‌شود که تنها سیگنال‌های ورودی مثبت قابل قبول باشند [۱۹]. واضح است که ربات‌هایی با خصوصیات مذکور، در مدل‌سازی و کنترل چالش‌های جدیدی به وجود خواهند آورد. به این ترتیب نیاز است از راهکارهایی نوآورانه برای رسیدن به نتایج مطلوب در کنترل این دسته از ربات‌ها استفاده شود.

در این فصل سعی بر این است تا ویژگی‌های ربات‌های نرم به صورت اجمالی بررسی شود. هم چنین به طور مختصر به معرفی برخی کاربردهای این گونه ربات‌ها پرداخته می‌شود. سپس مروری کوتاه بر پیشینه تحقیقات آورده شده و در آخر بخش‌بندی پایان نامه حاضر شرح داده خواهد شد.

<sup>1</sup>Compliance

<sup>2</sup>Interaction

<sup>3</sup>Soft robots

<sup>4</sup>Rigid robots

<sup>5</sup>Reachable space

<sup>6</sup>Orientation

<sup>7</sup>Pneumatic

## ۱-۱ ربات‌های نرم

ربات‌های نرم به دسته‌ای از ربات‌ها گفته می‌شود که از مواد با انعطاف‌پذیری بالا همچون سیال‌ها، ژل‌ها و الاستومرها<sup>۸</sup> تشکیل می‌شوند [۱۰]. نرمی می‌تواند نشان‌دهنده جنس نرم یا ماده نرم و انعطاف‌پذیر، حرکت نرم، عملگرهای متغیر تطبیق‌پذیر و همچنین نرمی در تعامل با انسان باشد [۱۵]. به طور کلی می‌توان گفت ساخت ربات‌های نرم بدون وجود مواد نرم و انعطاف‌پذیر امکان‌پذیر نیست.

خواص کشسانی این دسته از ربات‌ها با خواص بافت‌ها و اندام موجودات زنده مشابه‌تر زیادی دارد. انعطاف‌پذیری و قابلیت تطبیق‌پذیری ربات‌های نرم بدین سبب از اهمیت ویژه برخوردار است که نیروهای ایجاد شده در تعامل با محیط، بر روی سطح تماس وسیع‌تری توزیع می‌شوند و از تمرکز تنش بین سطوح جلوگیری می‌کند. این امر در مواردی که ربات با اندام انسان در تعامل است، مانند استفاده‌های پزشکی از جمله توان‌بخشی، از آسیب به بافت زنده و حساس جلوگیری می‌نماید.

## ۲-۱ کاربرد ربات‌های نرم

با توجه به موارد مطرح شده، ربات‌های نرم، که از مواد نرم ساخته شده‌اند، قابلیت انعطاف و انطباق زیادی دارند. از این رو در تعامل با محیط و اجسام حساس بهتر از ربات‌های صلب عمل می‌کنند. همچنین این ربات‌ها برهم کنشی بسیار امن‌تر با بدن انسان دارند و آسیب‌های احتمالی ناشی از برخورد بدن با ربات کاهش می‌یابد. این خصوصیات باعث شده ربات‌های نرم در زمینه توان‌بخشی، مانند دستکش‌های طراحی شده برای کمک در انجام فعالیت‌های روزمره، و همچنین در حوزه‌های پزشکی، مانند ربات‌های جراح و سامانه‌های شبیه‌ساز بدن انسان، به طور وسیعی به کار گرفته شوند [۸، ۱۴]. کاربرد دیگر ربات‌های نرم را می‌توان در طراحی بازویی گیرنده یا چنگک‌ها یافت. در واقع ساختار نرم این عملگرهای بسیار مهم است. به علاوه، چنین بازویی امکان جابه‌جایی اجسام را در محیط‌هایی که نیاز است ربات شکل خود را با محیط تطبیق دهد و از حرکاتی سازگار با محیط استفاده کند، فراهم می‌کند [۱۲]. این ربات‌ها در فضاهای کوچک و محدود [۱۱] و یا برای حرکت در فضاهای نامهوار [۲۰] نیز می‌توانند گزینه‌های بهتری نسبت به ربات‌های صلب باشند.

<sup>8</sup>Elastomers

## ۱-۳ چالش‌های مدل‌سازی و کنترل ربات‌های نرم

نرم بودن، انعطاف زیاد و فراوان بودن بعدهای عملکردی ربات‌های نرم تصور راحت بودن کنترل آن‌ها را به همراه دارد، اما در واقعیت کنترل این دسته از ربات‌ها با چالش‌های فراوانی روپرتو است که در ادامه بخشی از آن‌ها بیان می‌شود.

### ۱. مدل کردن

مدل‌های عددی علاوه بر این که در طراحی ساختار اکثر کنترل‌کننده‌ها ضروری هستند، شهودی فیزیکی از سامانه در اختیار طراح قرار می‌دهند. در رباتیک کلاسیک از مدل‌های ساده شده‌ای استفاده می‌شود که می‌توانند دینامیک ربات را با دقت و صحت زیاد تخمین بزنند. طراحی ربات‌های صلب معمولاً با در نظر داشتن روند مدل‌سازی انجام می‌شود. در حالی که خواص غیرخطی و متغیر با زمان در ربات‌های نرم چالش‌هایی در روند مدل‌سازی سنتی ایجاد می‌کند.

### ۲. زیرفعال بودن<sup>۹</sup>

برخلاف سامانه‌های بیولوژیکی، ربات‌های نرم تنها با چند ورودی کنترلی فعال می‌شوند. این مساله باعث می‌شود تا این ربات‌ها در مقایسه با همتایان بیولوژیکی خود زیرفعال‌تر باشند. از این رو در این ربات‌ها حالت‌هایی وجود خواهند داشت که غیرقابل کنترل هستند و یا تنها در صورتی قابل کنترل می‌شوند که از کوپلینگ بین حالت‌ها استفاده شود. به علاوه، در صورتی که ربات با محیط خارجی تعامل داشته باشد، بعضی حالت‌ها ممکن است غیرقابل کنترل و یا غیرقابل مشاهده شوند.

### ۳. تصادفی بودن

یکی از مشکلات شایع سامانه‌های نرم این است که ویژگی‌های مواد سازنده آن‌ها متغیر با زمان هستند. هیسترزیس، خزش و اصطکاک برخی از عوامل متداولی هستند که دینامیک سامانه‌های نرم را تصادفی می‌کنند. در نتیجه استراتژی‌های کنترل تطبیقی یا مقاوم برای جبران این موارد ضروری می‌شوند.

### ۴. حسگری

با توجه به این که ربات‌های نرم بعدهای زیادی دارند، مشاهده تمام حالت‌های ربات کاری تقریباً غیرممکن

<sup>9</sup>Sub active

خواهد بود. بهتر است برای سامانه‌هایی که به طور جزئی قابل مشاهده هستند، کنترل‌کننده‌های فیدبک‌دار طراحی شود.

با در نظر گرفتن مواردی که به آن‌ها اشاره شد، استفاده از سامانه‌های نرم در کاربردهای عملی تنها در صورتی موفق خواهد بود که کنترل‌کننده‌های بلاذرنگی توسعه یابند که کنترل سریع، قابل اطمینان، دقیق و با انرژی بهینه را برای این ربات‌ها فراهم می‌کنند.

## ۴-۱ عملگرهای نرم نیوماتیکی

ربات‌های نرم به طور عمدۀ از سه نوع عملگر استفاده می‌کنند:

• عملگرهای کابلی<sup>۱۰</sup>

• عملگرهای حرارتی<sup>۱۱</sup>

• عملگرهای هیدرولیکی یا نیوماتیکی<sup>۱۲</sup>

در واقع این طبقه‌بندی بر اساس نوع تحریک این عملگرها صورت گرفته است. در دسته اول کشش ایجاد شده در نخ‌ها و در دسته دوم حرارت عامل حرکت است. آلیاژ‌های حافظه‌دار یا پلیمرهای حافظه‌دار در این دسته قرار می‌گیرند. در دسته آخر نیز فشار هوا عملگرهای نیوماتیکی را به حرکت در می‌آورد. عملگرهای نرم نیوماتیکی را به صورت‌های مختلف و با درجات آزادی متفاوت می‌توان طراحی کرد. یکی از انواع این عملگرها، عملگر نرم خمشی نیوماتیکی است که در ربات‌های متنوعی قابل استفاده است. در حرکاتی مانند برداشتن اجسام، حرکت انگشتان دست و در حرکت بازوهای برخی ربات‌ها می‌توان از این عملگرها بهره برد. نمونه‌هایی از این عملگر در شکل ۱-۱ برای استفاده‌های توانبخشی و شکل ۲-۱ برای تعامل با اجسام حساس نشان داده شده است. ربات نرم مورد بررسی در این پروژه نیز از عملگرهای خمشی نرم نیوماتیکی استفاده می‌کند.

<sup>10</sup>Cable-driven actuators

<sup>11</sup>Thermal actuators

<sup>12</sup>Hydraulic and Pneumatic actuators



شکل ۱-۱: ربات شبیه‌ساز اندام دست انسان با استفاده از عملگر خمشی نرم [۲].

## ۱-۵ قید ورودی مثبت

در دنیای واقعی سامانه‌های بسیاری وجود دارد که ورودی کنترلی آن‌ها غیرمنفی است و درواقع یک‌طرفه<sup>۱۳</sup> هستند. عملگرهای نیوماتیکی که در این پروژه مورد بررسی قرار گرفته‌اند نیز تنها با دمیده شدن هوا در آن‌ها کنترل می‌شوند و قابلیت مکش وجود ندارد. از این رو نیاز است تا قید مثبت بودن سیگنال کنترلی مورد توجه قرار گیرد؛ به این معنا که ورودی کنترل می‌تواند تنها مقادیر صفر و مثبت داشته باشد. درواقع ماهیچه‌های نیوماتیکی زیرمجموعه‌ای از سیستم‌هایی هستند که به سیگنال کنترل آن‌ها فقط می‌توان انرژی اضافه نمود. در واقع کاهش ورودی فقط تا حد بالای صفر امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین توجه به حد بالای ورودی قابل تحمل توسط عملگرها بدون آسیب رسیدن به آن‌ها حائز اهمیت می‌باشد. این نکته را می‌توان به ماهیچه‌ها و عضلات انسان نیز ارتباط داد، به این ترتیب که این سامانه‌های طبیعی نیز دارای محدودیت‌هایی در ایجاد سیگنال ورودی می‌باشند. این موضوعات در قسمت طراحی کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۱-۶ قید انحنای ثابت

در بسیاری از پژوهش‌ها و مراجع مربوط به مدل‌سازی معادلات دینامیکی و سینماتیکی ربات‌های نرم، فرض انحنای ثابت<sup>۱۴</sup> (خمش با انحنای ثابت) برای عملگرهای خمشی در نظر گرفته شده است. این فرض به این صورت بیان

<sup>13</sup>One-sided

<sup>14</sup>Constant Curvature



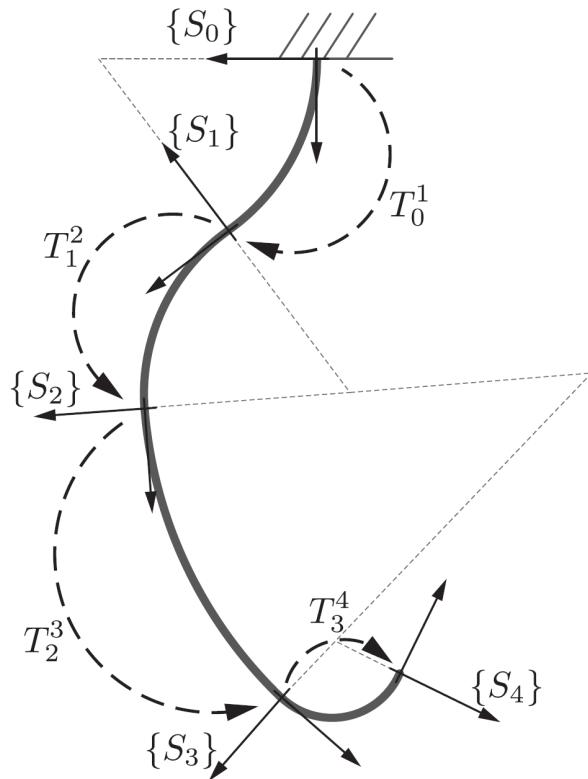
شکل ۲-۱: گریپر نرم برای برداشتن اجسام حساس [۱].

می‌شود که خمش عملگرهای نرم خمشی به گونه‌ای است که انحنای تشکیل شده در اثر خمش هر کدام از این عملگرهای را می‌توان به کمانی از دایره با شعاع ثابت تشبیه نمود. در شکل ۲-۱ یک ربات نرم با ۴ عملگر خمشی تحت انحنای ثابت نمایش داده شده است.

با استفاده از این فرض ربات نرم و عملگرهای خمشی آن را با ربات سری و صلب متناظر معادل‌سازی می‌کنیم و به کمک مدل‌های به دست آمده از ربات صلب، مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات نرم انجام می‌شود.

## ۷-۱ پژوهش‌های پیشین

ربات‌های نرم به عنوان موضوعی نوظهور در حوزه‌ی رباتیک عنوان می‌شوند و اغلب مطالعاتی که در این بخش صورت گرفته است، منحصر به پدید آمدن روش‌های جدید ساخت گریپرها است. در پاره‌ای از موارد نیز به مدل‌سازی این دسته از ربات‌ها پرداخته شده است. در ادامه برخی از تحقیقات صورت گرفته بر روی این دسته از ربات‌ها ارائه



شکل ۱-۳: ربات نرم با ۴ عملگر خمی تحت انحنای ثابت (هر عملگر قطاعی از یک دایره را تشکیل می‌دهد که شعاع آن با خطچین مشخص شده است) [۹].

می‌شود.

ژو و همکاران [۲۳] عملگر نرم خمی سه درجه آزادی را به مرحله‌ی ساخت رسانده‌اند و از آن در ساخت دست رباتیکی شبه انسان با سیزده درجه آزادی که به صورت مستقل تحریک می‌شوند، استفاده کرده‌اند. این عملگر که از سیلیکون ساخته شده است و با نیوماتیک تحریک می‌گردد، دارای فضای کاری شبیه به فضای کاری انگشتان دست انسان است. هدف از ساخت این دست رباتیک، برآورده ساختن موقعیت‌دهی اجسام مختلف در داخل دست رباتیک است که با افزایش فضای کاری مشترک بین انگشتان توسط عملگرهای پیشنهادی، میسر می‌گردد. این امر از سه جهت متفاوت جایه‌جایی جسم، چرخش جسم و بازآرایی آن توسط آزمایش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این پژوهش، کنترل عملگرهای تنها توسط کنترل فشار هوای ورودی و به صورت حلقه باز صورت گرفته است. بدین ترتیب مدل دینامیکی و الگوریتم کنترلی مشخصی برای این عملگرهای سه درجه آزادی در نظر گرفته نشده است.

در یکی از جدیدترین مطالعات بر روی دینامیک عملگرهای خمی، ونگ و همکاران [۲۲] با استفاده از رویکرد لاگرانژین و برقراری فرض انحنای ثابت در رفتار عملگر، به استخراج مدل دینامیکی عملگرهای الاستومری

نیوماتیکی تقویت شده پرداخته اند. در این مدل که اثر توزیع پیوسته جرم در نظر گرفته شده است، علاوه بر احتساب انرژی گرانشی، جنبشی، کرنشی و نیروهای تعیین یافته، تاثیر تغییر حجم عملگر نیز اعمال گردیده است. برای کاهش پیچیدگی مدل و امکان استفاده از آن در کاربردهای بلادرنگ، از بسط تیلور جهت حذف عبارت های مرتبه بالا استفاده شده است. در نهایت نیز آزمایشات تجربی برای بررسی صحت مدل ارائه شده به ازای ورودی های دینامیکی و شبه استاتیکی انجام گردیده است [۲۱]. در ادامه پژوهش پیشین، به جهت دستیابی به کنترل دقیق مدل محور، دینامیک سیستم به دو زیر سیستم دینامیک حرکتی و دینامیک هوای ورودی تقسیم بندی می شود و هر کدام به صورت جداگانه مدل می گردد. برای مدل سازی دینامیک حرکتی از یک تابع تبدیل مرتبه دو استفاده می شود که معرف تأثیر فشار هوای ورودی بر رفتار عملگر خمی است. پارامترهای این مدل در فرکانس های کاری متفاوت توسط نرم افزار متلب شناسایی می شوند. نکته ای قابل توجه، تفاوت پارامترهای شناسایی شده در فرکانس های مختلف با یکدیگر است به گونه ای که بیشترین اختلاف به ۳۶ درصد نیز می رسد اما با مقایسه مدل پیشنهادی و رفتار سیستم مشاهده می شود که مدل مذکور، رفتار قابل قبولی از سیستم را پیش بینی می کند. دینامیک هوای ورودی که رابطه ای بین فشار ورودی و سیگنال کنترلی است به صورت غیرخطی مدل می گردد و پارامترهای آن با استفاده از روش حداقل مربعات شناسایی می شوند. برای مدل نهایی به دست آمده از تلفیق دینامیک حرکتی و دینامیک هوای الگوریتم کنترلی غیرخطی مقاوم با استفاده از روش پسگام<sup>۱۵</sup> طراحی می گردد که علاوه بر تضمین پایداری سیستم، به خروجی مطلوب همگرا می شود.

یکی دیگر از مطالعاتی که بر روی دینامیک ربات های نرم با رویکرد شناسایی سیستم انجام شده است، توسط ساداتی و همکاران صورت گرفته است [۱۷]. در این پژوهش با فرض تعدادی تابع شکلی<sup>۱۶</sup> مطابق شرایط مرزی ربات و استفاده از روش های ریتز و ریتز-گالکین جهت تعیین ضرایب این توابع شکلی، مدل سینماتیکی و دینامیکی را استخراج نموده اند. پس از به دست آمدن ضرایب توابع شکل و جایگذاری در روابط پایه بر مبنای معادلات تیر کاسرات و روش کار مجازی، مدل سازی سینماتیکی و مدل سازی دینامیکی به ترتیب صورت می گیرد. با توجه به نتایج حاصل شده تجربی، مدل سازی ارائه شده در صفحه دارای شش درصد خطأ در حالت استاتیکی و بیست درصد خطأ در حالت دینامیکی است. همچنین میزان خطأ در فضای سه بعدی و در حالت استاتیکی برابر با هشت درصد و در حالت دینامیکی برابر با شانزده درصد است.

در [۴] برودر، مدل دینامیکی ربات های نرم را با استفاده از عملگر کوپمن<sup>۱۷</sup> به صورت خطی تخمین زده و با

<sup>15</sup>Back stepping method

<sup>16</sup>Shape mode function

<sup>17</sup>Koopman operator

استفاده از روش‌های مبتنی بر مدل<sup>۱۸</sup> کنترل می‌کند. روش‌های معرفی شده در این مقاله به صورت کاملاً داده محور هستند، ولی بر خلاف دیگر روش‌های داده محور، مانند شبکه عصبی که فقط به ورودی و خروجی دسترسی داریم، یک مدل کنترلی صریح ارائه می‌شود. روش اصلی بررسی شده در این مقاله کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل<sup>۱۹</sup> می‌باشد. یکی از عیوب این دسته از کنترل‌کننده‌ها بار محاسباتی بسیار بالای آن‌ها در صورت بزرگ بودن افق‌های کنترل و پیش‌بینی و نیاز به یک مدل دقیق از سیستم می‌باشد. همانطور که پیش‌تر بیان شد، به دلیل خواص فیزیکی سیستم و بسیار خطی بودن آن‌ها به دست آورند یک مدل دقیق و ثابت برای ربات‌های نرم کاری مشکل می‌باشد.

در [۳] یک عملگر خمشی نرم با ۲ لینک سری و کنترل‌کننده تطبیقی لغزشی برای دنبال کردن یک مسیر سینوسی انحنای مطلوب توسط هر عملگر طراحی شده است. در شبیه‌سازی صورت گرفته، این کنترل‌کننده عملکرد بهتری در مقایسه با کنترل‌کننده‌های رایج و به طور خاص کنترل‌کننده PID ارائه می‌دهد. کارهای انجام شده در راستای طراحی این کنترل‌کننده تا حد مطلوبی نیاز به مدل دقیق سیستم را از بین برده و با استفاده از تخمین‌های به دست آمده از الگوریتم تطبیقی، پایداری و صفر شدن خط اثبات می‌شود. اشکال اصلی این کار در نظر نگرفتن مشکلات احتمالی در سیستم مانند عیب می‌باشد. کنترل‌کننده تطبیقی توانایی بهبود عملکرد به حالت اولیه پس از گذشت مدتی از بروز عیب را دارا می‌باشد ولی در بسیاری از موارد توانایی بازیابی رفتار گذرا قبل از بروز عیب را ندارد.

## ۱-۸ طرح مسئله

پیش‌تر اشاره شد که مدل‌سازی ربات‌های نرم به دلیل خواص غیرخطی آن‌ها امری چالش برانگیز است. همین مساله کنترل این سیستم‌ها را با روش‌های مبتنی بر مدل‌های دقیق را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد و آن را تبدیل به کاری دشوار می‌کند و دقت نتایج به دست آمده از این روش‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین روش‌های کنترلی مبتنی بر مدل دقیق، حجم محاسباتی زیادی دارند. از این رو باید به سراغ کنترل‌کننده‌هایی رفت که بتوان به راحتی از آن‌ها به صورت بلادرنگ<sup>۲۰</sup> استفاده کرد و در صورت بروز نایقینی در مدل تقریبی و پارامترهای سیستم، عملکرد کنترل‌کننده تضعیف نشود. یکی از راهکارهای قابل استفاده برای حل موارد بالا، استفاده از کنترل‌کننده‌های

<sup>18</sup>Model based

<sup>19</sup>Model Predictive Control method

<sup>20</sup>Realtime

تطبیقی<sup>۲۱</sup> است. کنترل کننده تطبیقی این امکان را فراهم می‌کند تا وابستگی به مدل در کنترل کننده‌ها تا حد بسیاری از بین برود و طراحی بدون نیاز به اطلاعات زیادی از مدل انجام شود. در این پایان‌نامه نیز هدف طراحی کنترل کننده‌ای تاب آور<sup>۲۲</sup> برای کاربرد تعقیب مسیر مطلوب در حضور عیوب‌های احتمالی در سیستم، با در نظر داشتن قید ورودی مثبت و انحنای ثابت برای ربات‌های نرم است. لازم به ذکر است در این پایان‌نامه به دلیل استفاده از شیرهای کنترل فشار سریع، از دینامیک گاز صرف نظر شده و تنها سیگنال مطلوب به شیر ارسال می‌شود. تمامی موارد بیان شده از جمله مدل‌سازی و طراحی کنترل کننده مورد نظر برای ربات موجود در شکل ۱-۴ انجام می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این ربات دارای دو عملگر خمی با دو ورودی هوا پرفشار در ابتدای آن‌ها (یکی از بالا و دیگری از سمت چپ) می‌باشد. همچنین برای جلوگیری از پاره شدن سیلیکون استفاده شده در عملگرها، سمت راست ربات به کمک پارچه (فیبر) تقویت شده است. پارامترهای فیزیکی این ربات در فصل ۵ شرح داده شده است.

## ۹-۱ ساختار پایان‌نامه

روندهای پایان‌نامه را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

در فصل دوم به مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی عملگرهای خمی پرداخته می‌شود. در این قسمت فرض انحنای ثابت برای عملگرها در نظر گرفته می‌شود که همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، در محاسبه تمامی مدل‌های ذکر شده بسیار حائز اهمیت می‌باشد و در بسیاری از پژوهش‌های موجود در این زمینه، فرض انحنای ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین با استفاده از این فرض و معادل‌سازی ربات نرم با ربات سری و صلب متناظر، مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات انجام می‌شود.

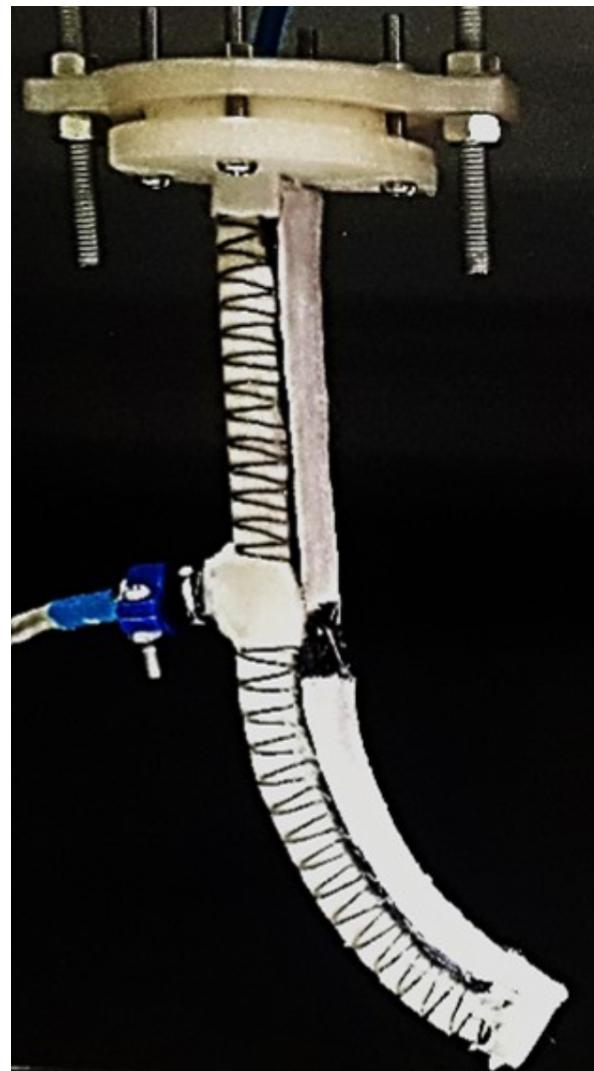
در فصل سوم عیب<sup>۲۳</sup>، تعریف و نحوه اثر آن بر سیستم توضیح داده می‌شود. علاوه بر آن، یک رویتگر برای تخمین مقدار عیب موجود در سیستم طراحی و پایداری و همگرایی خطای تخمین آن به صفر بررسی می‌شود. در فصل چهارم، روند طراحی کنترل کننده مورد نظر شرح داده می‌شود. در ادامه این فصل اثبات پایداری روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل پنجم، در شبیه‌سازی‌های انجام شده در حضور عیب، کنترل کننده پیشنهادی با دو کنترل کننده از

<sup>21</sup>Adaptive controllers

<sup>22</sup>Resilient

<sup>23</sup>Fault



شکل ۱-۴: ربات نرم مورد بررسی با دو عملگر خمشی نیوماتیکی

جهت عملکرد، خطای تعقیب و ورودی کنترلی مقایسه و برتری آن نشان داده می شود.  
در نهایت، این پژوهه در فصل ششم با ارائه نتیجه گیری و پیشنهادات به پایان می رسد.

فصل دوم

مدل‌سازی ربات نرم

## ۱-۲ مقدمه

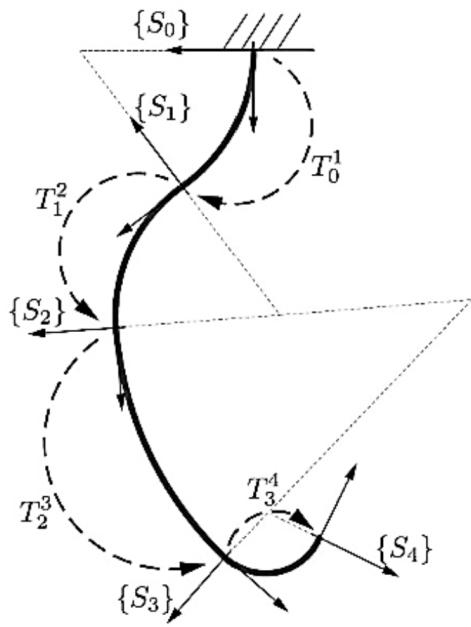
در قدم نخست شناخت نحوه رفتار عملگرهای رباتیکی نرم الزامی است. بدین ترتیب با فرض رفتار یکسان برای هر دو عملگر، رفتار یکی از آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از این فصل تعریف چهارچوبی استاندارد برای تبیین رفتار دینامیکی ربات نرم دو درجه آزادی با عملگرهای خمی است و لازم به ذکر است که این امر با فرض خمی عملگرها به صورت انحنای ثابت در صفحه‌ی عمودی انجام می‌پذیرد. بدین منظور ابتدا روابط سینماتیکی و فضای کاری ربات مورد نظر بررسی می‌شود. در بخش دوم با استفاده از معادل‌سازی عملگر خمی با ربات صلب مشابه از لحاظ رفتار دینامیکی، معادلات دینامیکی استخراج می‌شوند. در نهایت با تعریف یک نگاشت مناسب، معادلات محاسبه شده برای ربات صلب را به ربات نرم تعمیم می‌دهیم.

## ۲-۲ مدل‌سازی سینماتیکی

ربات فرض شده در این پژوهه، از اتصال سری و یکپارچه‌ی دو عملگر خمی سیلیکونی، تقویت‌شده با فیبر، ساخته شده است. از آن جایی که در این عملگرهای خمی تغییر حجم بر اثر فشار در راستای شعاعی و طولی محدود شده است، خمی این عملگرها را می‌توان با استفاده از فرض انحنای ثابت تقریب زد. موقعیت انتهای عملگر خمی در محورهای افقی و عمودی، تنها با استفاده از میزان خمی عملگر قابل محاسبه است. لازم به ذکر است در صورتی که نیروی خارجی بیش از اندازه‌ای به این عملگرها اعمال شود، آن هم در حالتی که نسبت طول عملگر به عرض سطح مقطع آن بسیار بزرگ‌تر باشد، فرض انحنای ثابت ممکن است برقرار نباشد.

اکنون ربات نرمی که از اتصال چندین عملگر خمی به صورت سری ایجاد شده است، که در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است، را در نظر می‌گیریم [۹]. این در حالی است که ربات مورد بحث در این پژوهه از اتصال دو عملگر تشکیل شده است. هر کدام از این عملگرهای خمی می‌توانند علاوه بر خواص فیزیکی متفاوت، طول متفاوتی داشته باشند که منجر به تفاوت در شعاع خمی آن‌ها می‌گردد.

همان‌گونه که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، در انتهای هر کدام از عملگرها یک دستگاه مختصات در نظر گرفته می‌شود که با  $S_i$  نشان داده می‌شود. با در نظر گرفتن فرض انحنای ثابت، می‌توان با استفاده از دستگاه مختصات  $S_i$  و  $S_{i-1}$  وضعیت عملگر خمی  $T_{i-1}^i$  را با استفاده از ماتریس تبدیل  $T_{i-1}^i$  در صفحه مشخص نمود و در نهایت با به دست آمدن ماتریس تبدیل هر عملگر، با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲ موقعیت انتهای عملگر خمی



شکل ۲-۱: ربات نرم حاصل از اتصال سری چند عملگر خمی نرم [۹]

آخر یا انتهای موثر<sup>۱</sup> ربات را نسبت به مختصات پایه‌ی ربات بیان نمود.

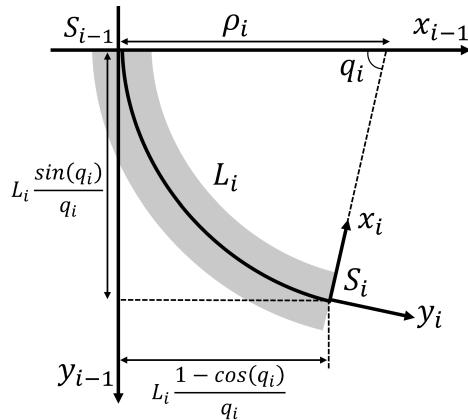
$$T_0^i = T_0^1 T_1^2 \cdots T_{i-1}^i \quad (1-2)$$

ماتریس تبدیل را برای یکی از عملگرها را محاسبه می‌کنیم و به دیگر عملگرها نیز تعمیم می‌دهیم. همانطور که در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود، تنها یک متغیر برای توصیف وضعیت عملگر کافی است. بدین ترتیب در این پژوهه چرخش نسبی بین دو دستگاه مختصات در دو انتهای عملگر به عنوان متغیر حرکتی سیستم تعریف می‌شوند. اندازه‌ی این زاویه‌ی خمی نسبی برای عملگر  $i$  ام با  $q_i$  نشان داده شود و  $q$  برداری است که زاویه‌ی خمی کلیه‌ی عملگرها را در خود جای داده است. به علاوه می‌توان با استفاده از روابط هندسی نشان داد که زاویه‌ی خمی هر عملگر طبق رابطه‌ی ۲-۲ به شعاع خمش  $\rho_i$  و طول عملگر  $L_i$  مرتبط می‌شود.

$$\rho_i q_i = L_i \quad (2-2)$$

اکنون می‌توان ماتریس تبدیل را برای عملگر  $i$  در فضای دو بعدی به صورت ماتریس بیان شده در رابطه ۳-۲ به دست آورد. با به دست آمدن ماتریس تبدیل برای هر عملگر و بهره بردن از رابطه‌ی ۱-۲ در نهایت می‌توان

<sup>1</sup>End Effector



شکل ۲-۲: به دست آوردن ماتریس تبدیل عملگر خمی نرم

ماتریس تبدیل بین انتهای موثر و مختصات پایه را به دست آورد.

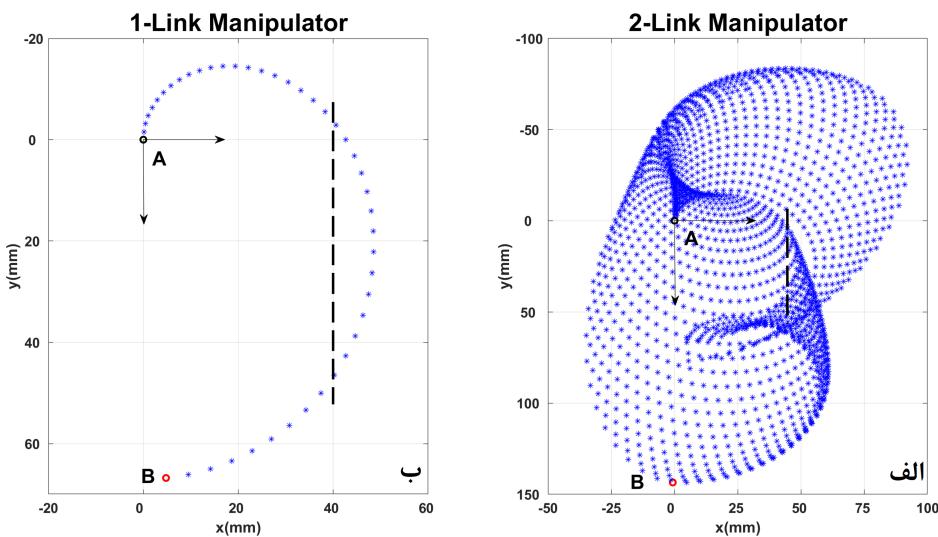
$$T_{i-1}^i(q_i) = \begin{bmatrix} \cos(q_i) & -\sin(q_i) & L_i \frac{\sin(q_i)}{q_i} \\ \sin(q_i) & \cos(q_i) & L_i \frac{1-\cos(q_i)}{q_i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

## ۱-۲-۲ فضای کاری

به کمک ماتریس تبدیل انتهای ربات نسبت به مختصات پایه در قسمت قبل، می‌توان فضای کاری ربات را بررسی نمود. با توجه به این‌که طول عملگر خمی اول برابر با ۶۷ میلی‌متر و طول عملگر خمی دوم برابر با ۷۷ میلی‌متر است، شکل ۳-۲ فضای کاری ربات رسم شده در نرم‌افزار MATLAB را در صفحه دو بعدی نشان می‌دهد. در قسمت ب از شکل ۳-۲ فضای کاری یک عملگر خمی با طول ۶۷ میلی‌متر و در قسمت الف، فضای کاری ربات متتشکل از دو عملگر خمی توصیف شده که به صورت به یکدیگر متصل هستند را نشان می‌دهد.

در شکل ۳-۲ فرض شده است که میزان خمش عملگرهای خمی به صورت کامل یعنی  $360^\circ$  درجه امکان‌پذیر است. همان‌گونه که در شکل مشخص شده است، محل قرارگیری پایه ربات<sup>۲</sup> که ثابت فرض می‌شود با دستگاه مختصات A نشان داده می‌شود و نقطه‌ی B همان انتهای عملگر خمی در حالتی است که هیچ‌گونه خمی صورت نگرفته است. سایر نقاط مشخص شده، موقعیت انتهای عملگر خمی در صفحه است. همان‌گونه که در قسمت الف مشاهده می‌گردد، فضای کاری ربات تشکیل شده از دو عملگر خمی، سطحی از صفحه را در بر می‌گیرد، در حالی است که فضای کاری یک عملگر خمی به صورت یک منحنی می‌شود. در حالتی که فضای

<sup>2</sup>Robot base



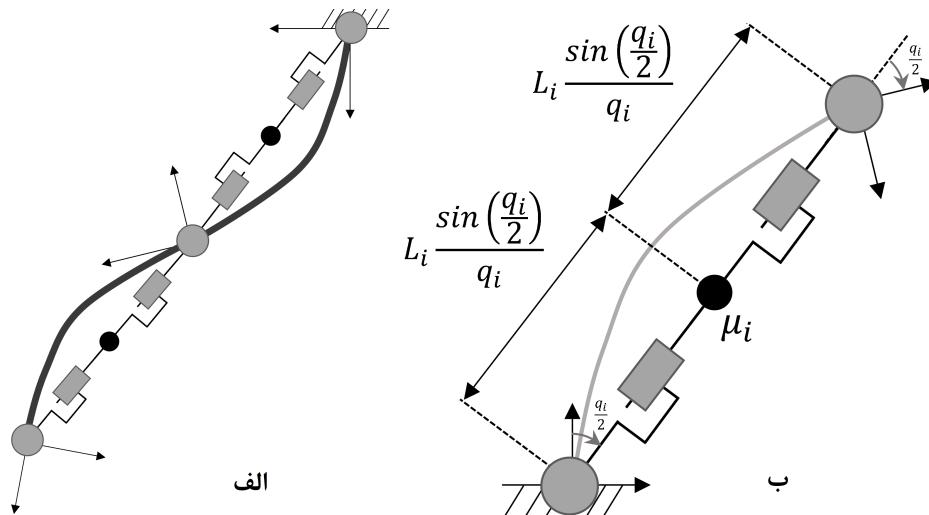
شکل ۲-۳: فضای کاری ربات (الف) دو عملگر خمی متصل شده به صورت سری (ب) یک عملگر خمی - (خط چین‌های عمودی نشان‌دهنده مسیر مطلوب جهت حرکت جسم در راستای محور عمودی)

کاری به صورت خط باشد، امکان کنترل موقعیت و جهت‌گیری جسم به صورت مستقل امکان ندارد. برای درک این مسئله می‌توان فرض کرد که هدف جابه‌جایی جسم در راستای عمودی  $z$  است بدون آن که تغییری در موقعیت افقی جسم و یا زاویه آن به وجود آید. در این صورت اگر فرض شود که حرکت بین جسم و انتهای ربات نرم از نوع غلتش خالص باشد، مسیر حرکت انتهای عملگر خمی باید تا حدودی شبیه به خط‌چین مشخص شده در شکل ۲-۳ باشد. مشاهده می‌شود که در خوش‌بینانه‌ترین شرایط، مسیر انتهای ربات نرم با یک عملگر خمی تنها در دو نقطه با مسیر خط چین مشخص شده اشتراک دارد. این موضوع بدان معنی است که کنترل موقعیت جسم در راستای عمود به صورت پیوسته امکان‌پذیر نخواهد بود. مسیر انتهای ربات نرم با دو عملگر خمی در تمام نقاط با خط‌چین مشخص شده اشتراک داد که این امر امکان جایی جسم در راستای عمودی به صورت مستقل را نشان می‌دهد.

### ۳-۲ مدل‌سازی دینامیکی

برای آن که بتوان دینامیک سیستم را به صورت تحلیلی استخراج نمود، از روش معادل‌سازی پارامترهای ربات نرم با ربات صلب معادل آن استفاده می‌شود [۶]. در این روش هر عملگر خمی ربات نرم باید معادل با ربات صلبی انتخاب شود که از لحاظ سینماتیکی و دینامیکی رفتار مشابهی را بروز دهد. از دیدگاه سینماتیک، برای آن که هر دو ربات رفتار مشابهی داشته باشند باید انتهای موثر هر دو بر یکدیگر

منطبق شوند. برای تشابه رفتار دینامیکی دو ربات باید مشخصه‌ی اینرسی آن‌ها یکسان باشد. بدین منظور یک راه حل ممکن، انتخاب جرم لینک‌های ربات صلب به گونه‌ای است که همتا شدن موقعیت مرکز جرم عملگر خمی و موقعیت مرکز جرم ربات صلب معادل آن را در پی داشته باشد. با توجه به مطالب ذکر شده، یک انتخاب مناسب برای ربات صلب مورد نظر که شرایط ذکر شده را داشته باشد، ربات شکل ۴-۲ ب است که دارای دو مفصل چرخشی<sup>۳</sup> و دو مفصل منشوری<sup>۴</sup> بین دو عملگر خمی است.



شکل ۴-۲: ربات صلب معادل با (الف) یک عملگر خمی ب) ربات نرم تشکیل شده از دو عملگر خمی

همان‌گونه که در شکل ۴-۲ مشاهده می‌گردد انتهای این ربات منطبق بر انتهای‌ی عملگر خمی است بنابراین شرط تشابه سینماتیکی برقرار است. برای تشابه رفتار دینامیکی نیز فرض می‌شود تنها لینک دوم از ربات دارای جرم است و این جرم به صورت نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود و توسط مفصل مفصل منشوری به گونه‌ای جابه‌جا می‌شود تا بر مرکز جرم عملگر خمی منطبق باشد. محل قرارگیری جرم لینک دوم با استفاده از روابط سینماتیک مستقیم<sup>۵</sup>، در نقطه‌ای که در شکل نشان داده شده است انتخاب می‌گردد. حالت دیگری که می‌توان برای انتخاب محل قرارگیری جرم لینک‌های ربات صلب در نظر گرفت، افزودن جرم‌های نقطه‌ای در دو مفصل چرخشی ربات است که محل مرکز جرم کل ربات صلب را تغییر نمی‌دهد اما ممکن است سبب تشابه رفتاری دقیق‌تری بین ربات صلب و عملگر خمی متناظر آن شود. جرم ربات صلب معادل برای عملگر خمی  $\mu_i$  با  $\mu$  نشان داده می‌شود. اکنون به محاسبه معادلات دینامیکی ربات صلب معادل می‌پردازیم و پس از استخراج معادلات دینامیکی،

<sup>3</sup>Revolute joint

<sup>4</sup>Prismatic joint

<sup>5</sup>Forward kinematics

دینامیک ربات نرم با استفاده از نگاشتی مناسب، به دینامیک ربات صلب معادل آن ارتباط می‌دهیم. اگر متغیرهای مفصلی در ربات صلب معادل در نظر گرفته شده با  $\mathbb{R}^{nh} \in \mathbb{R}^n$  نشان داده شوند به گونه‌ای که  $h$  تعداد مفاصل صلب هر ربات معادل و  $n$  تعداد عملگرهای خمی باشد، می‌توان با استفاده از نگاشت  $m(q)$  متغیرهای ربات صلب معادل را به متغیرهای خمی مرتبط نمود. به طوری که  $m : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{nh}$  است. این نگاشت با استفاده از قید  $m(q) = m$ <sup>6</sup> تطابق انتهای ربات نرم و مرکز جرم آن بر نقاط متناظر از ربات صلب معادل را تضمین می‌کند. همچنین جهت‌گیری انتهای ربات صلب معادل با استفاده از این نگاشت، مشابه با جهت‌گیری ربات نرم خواهد بود. برای به دست آوردن نگاشت  $(q)$  باید ابتدا پارامترهای دناویت-هارتبرگ<sup>6</sup> برای ربات صلب معادل استخراج شوند سپس با استفاده از تطابق بین زوایای ربات صلب معادل و زوایای خمی، نگاشت نهایی محاسبه شود. با در نظر گرفتن شکل ۴-۲ ب می‌توان به روش کلاسیک پارامترهای دناویت-هارتبرگ ربات صلب را استخراج نمود (جدول ۲-۱). سپس نگاشت مورد نظر را با توجه به ماتریس تبدیل محاسبه شده برای سینماتیک ربات نرم به صورت رابطه‌ی ۴-۲ محاسبه می‌کنیم.

$$m_i(q_i) = \begin{bmatrix} q_i & L_i \frac{\sin(\frac{q_i}{2})}{q_i} & L_i \frac{\sin(\frac{q_i}{2})}{q_i} & -\frac{q_i}{2} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

جدول ۲-۱: پارامترهای دناویت هارتبرگ ربات صلب ۴ درجه آزادی معادل با یک عملگر خمش نرم

$\alpha$	$a$	$d$	$\theta$	شماره لینک
$-\pi$	0	0	$\frac{q_i}{2}$	۱
$\frac{\pi}{2}$	0	$L_i \frac{\sin(\frac{q_i}{2})}{q_i}$	0	۲
0	0	$L_i \frac{\sin(\frac{q_i}{2})}{q_i}$	0	۳
$\frac{\pi}{2}$	0	0	$-\frac{q_i}{2}$	۴

نگاشت کلی بین ربات نرم با عملگرهای خمی و معادل آن را در رابطه‌ی ۵-۲ آورده شده است.

$$m(q) = [m_1^T(q_1) \quad m_2^T(q_2) \quad \cdots \quad m_n^T(q_n)] \quad (5-2)$$

<sup>6</sup>Denavit–Hartenberg parameters

حال با داشتن نگاشت بین ربات نرم و معادل آن، با به کارگیری یکی از روش‌های لاغرانژ یا نیوتون اویلر، دینامیک ربات صلب معادل مطابق با رابطه‌ی ۶-۲ به دست می‌آید. در این معادله  $\ddot{\xi}$ ،  $\dot{\xi}$  و  $\ddot{q}$  متغیرهای مفصلی ربات صلب و مشتقات آن‌ها هستند، ماتریس اینرسی ربات با  $M_\xi(\xi) \in \mathbb{R}^{nh \times nh}$ ، عبارت‌های شتاب کریولیس با  $C_\xi(\xi) \in \mathbb{R}^{nh}$  تاثیرات نیروی گرانش با بردار  $G_\xi(\xi) \in \mathbb{R}^{nh}$  و در نهایت اثرات نیروهای خارجی وارد شده بر انتهای ربات صلب با  $f_{ext}$  نشان داده شده است. اثر نیروهای خارجی به کمک ژاکوبین ربات  $J_\xi^T(\xi)$  به گشتاور عمل‌کننده بر ربات تبدیل می‌شوند.

$$M_\xi(\xi)\ddot{\xi} + C_\xi(\xi, \dot{\xi})\dot{\xi} + G_\xi(\xi) = J_\xi^T(\xi)f_{ext} \quad (6-2)$$

اکنون برای استخراج دینامیک ربات نرم در فضای متغیرهای خمی، کافی است از نگاشت به دست آمده استفاده کنیم. بدین منظور با استفاده از روابط ۷-۲ می‌توان متغیرهای مفصلی تعریف شده برای ربات صلب را با متغیرهای  $q$ ،  $\dot{q}$  و  $\ddot{q}$  مربوط به ربات نرم جایگزین نمود.

$$\begin{cases} \xi = m(q) \\ \dot{\xi} = J_m(q)\dot{q} \\ \ddot{\xi} = \dot{J}_m(q, \dot{q})\dot{q} + J_m(q)\ddot{q} \end{cases} \quad (7-2)$$

در معادلات ۷-۲  $J_m(q)$  ژاکوبین نگاشت به دست آمده است و با مشتق‌گیری از آن نسبت به متغیرهای خمی به دست می‌آید. هر ستون از ژاکوبین تعریف شده به کمک رابطه ۸-۲ به دست می‌آید. با کنار هم قرار دادن این بردارها در یک ماتریس، ماتریس ژاکوبین کلی به دست می‌آید.

$$J_{m,i} = \left[ \frac{1}{2} \quad L_i \frac{q_i \cos(\frac{q_i}{2}) - 2 \sin(\frac{q_i}{2})}{2q_i^2} \quad L_i \frac{q_i \cos(\frac{q_i}{2}) - 2 \sin(\frac{q_i}{2})}{2q_i^2} \quad - \frac{1}{2} \right] \quad (8-2)$$

روابط بیان شده را در معادله دینامیکی ربات صلب معادل قرار می‌دهیم و به رابطه ۹-۲ می‌رسیم که دینامیک ربات نرم مورد نظر است.

$$\begin{aligned} M_\xi(m(q)) \left[ \dot{J}_m(q, \dot{q})\dot{q} + J_m(q)\ddot{q} \right] + C_\xi(m(q), J_m(q)\dot{q}) [J_m(q)\dot{q}] + G_\xi(m(q)) \\ = J_\xi^T(m(q))f_{ext} \end{aligned} \quad (9-2)$$

با ضرب معکوس ترانهاده ماتریس ژاکوبین از سمت چپ و تغییر متغیرهای بیان شده در ۱۰-۲ به معادله دینامیک

کلی ربات نرم در رابطه ۱۱-۲ می‌رسیم.

$$\left\{ \begin{array}{l} M(q) = J_m^T(q)M_\xi(m(q))J_m(q) \\ C(q, \dot{q}) = J_m^T(q)M_\xi(m(q))\dot{J}_m(q, \dot{q})\dot{q} + J_m^T(q)C_\xi(m(q), J_m(q)\dot{q})J_m(q) \\ G(q) = J_m^T(q)G_\xi(m(q)) \\ J^T(q) = J_m^T(q)J_\xi^T \end{array} \right. \quad (10-2)$$

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = J^T(q)f_{ext} \quad (11-2)$$

برای تکمیل معادلات دینامیک ربات نرم، لازم است عبارت‌هایی که میزان سفتی و استهلاک ربات را تعیین می‌کنند نیز در نظر گرفته شوند. بدین منظور ضرایب مربوط به استهلاک و سفتی عملگرهای خمشی به صورت خطی در نظر گرفته می‌شوند و ماتریس سفتی و استهلاک کل ربات به صورت ماتریس‌های مربعی، مثبت معین و قطری در نظر گرفته می‌شوند. بدین ترتیب خاصیت الاستیک و استهلاک در ربات نرم مورد بررسی، از طریق عبارت‌های  $Kq$  و  $D\dot{q}$  بر دینامیک سیستم اثر می‌گذارند. از سوی دیگر، هر یک از عملگرهای خمشی استفاده شده در ربات نرم، توسط گشتاور  $\tau_i$  تحریک می‌شوند و به وضوح این گشتاور بر روی رفتار دینامیکی کل سیستم اثر گذار است. در این پژوهش، فشار نیوماتیک ایجاد شده به کمک شیرهای هوا این گشتاور را تولید می‌کنند. سرانجام با توجه به مباحث ارائه شده، می‌توان معادلات دینامیکی نهایی ربات نرم را به صورت رابطه ۱۲-۲ نوشت.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D\dot{q} + Kq + G(q) = \tau + J^T(q)f_{ext} \quad (12-2)$$

## ۴-۲ نتیجه‌گیری

در این فصل به بیان مدل سینماتیکی و دینامیکی ربات نرم با دو درجه آزادی پرداختیم. در روش معرفی شده ابتدا هر عملگرم خمشی نرم را با یک ربات صلب دارای ۴ مفصل مدل می‌کنیم. سپس با محاسبه معادلات دینامیکی حاکم بر ربات صلب، به کمک یک تبدیل ۴ به ۱، معادلات دینامیکی مربوط به ربات نرم را محاسبه می‌کنیم. لازم به ذکر است که این مدل‌سازی با در نظر گرفتن فرض خمش عملگرهای با انحنای ثابت قابل اجرا می‌باشد و در نهایت مدل دینامیکی به دست آمده دارای دو متغیر خمش عملگرهای و دو ورودی فشار هوا برای هر لینک می‌باشد.

فصل سوم

طراحى رویتگر عیب

### ۱-۳ مقدمه

عیب<sup>۱</sup>، شناسایی و در نظر گرفتن آن در کنترل کننده یکی از مباحث مهم و کاربردی در مهندسی کنترل می‌باشد. عیب بر خلاف اختشاش از اجزای درونی سیستم و به دلیل عدم عملکرد درست آن‌ها اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال در موتورهای AC امکان سوختن یک سیم پیچ در حین کار موتور وجود دارد که آن را می‌توان به عنوان عیب در نظر گرفت.

### ۲-۳ مدل‌سازی عیب و فرضیات

عیب حالت‌های مختلفی از جمله چرخش آزاد<sup>۲</sup> ( $\tau_i = \tau_{sat,i}$ )، شیب ثابت<sup>۳</sup> ( $\tau_i = \gamma_0 i t$ ) و اشباع<sup>۴</sup> ( $\tau_i = \gamma_0 i$ ) دارد که مطابق با رابطه ۱-۳ می‌توان آن‌ها را مدل کرد. در این روابط  $\zeta_i(t)$  گشتاور اعمال شده به عملگر  $i$  و زمان بروز عیب  $T_f$  می‌باشد.

$$\zeta_i(t) = \begin{cases} \tau_i(t) & \\ \tau_i(t) - \gamma_0 i t & \forall t \geq T_f \\ \tau_i(t) - \tau_{sat,i} & \end{cases} \quad (1-3)$$

برای عیبهایی که در ربات نرم با عملگرهای خمسی نرم امکان بروز دارند می‌توان به سوراخ شدن عملگرها اشاره نمود. با توجه به این عیب توصیف شده، برای تمامی عیبهای سیستم فرض‌های موجود در رابطه ۲-۳ را در نظر می‌گیریم که با کمی توجه، منطقی بودن آن‌ها در واقعیت واضح می‌باشد. حدود مشخص شده با  $\gamma_1$ ،  $\gamma_2$  و  $\gamma_3$  اعدادی مثبت و ثابت هستند.

$$\|\bar{\zeta}(t)\| \leq \gamma_1, \quad \|\dot{\bar{\zeta}}(t)\| \leq \gamma_2, \quad \|\ddot{\bar{\zeta}}(t)\| \leq \gamma_3 \quad (2-3)$$

توجه داریم که با در نظر گرفتن این فرضیات، برخی از عیبهای مانند شیب ثابت به دلیل محدود نبودن مقدار آن برای همه‌ی زمان‌ها، مورد بررسی قرار نمی‌گیرند.

<sup>1</sup>Fault

<sup>2</sup>Free-Swinging

<sup>3</sup>Ramp

<sup>4</sup>Saturation

### ۳-۳ رویتگر عیب

در [۷] روش‌های متعددی برای شناسایی عیب و زمان بروز آن معرفی و بررسی شده است، همچنین در [۱۳] رویتگر غیرخطی بیان شده در رابطه ۳-۳ برای تخمین مقدار عیب شناسایی شده با در اختیار داشتن دینامیک سیستم طراحی و بررسی شده است. این رویتگر به خطای تخمین سرعت  $e$  نیاز دارد که در ادامه نحوه محاسبه آن توضیح داده می‌شود.

$$\hat{\zeta}(t) = \int_{T_f}^t (K_0 + I_n)e(\sigma)d\sigma + \int_{T_f}^t K_1 \operatorname{sgn}(e(\sigma))d\sigma + (K_0 + I_n)e(t) - (K_0 + I_n)e(T_f) \quad (3-3)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، این رویتگر شیاهت زیادی به رویتگر لیونبرگ<sup>۵</sup> دارد. برای ادامه، به دینامیک ربات که در رابطه ۱۲-۲ بیان شده عبارت مربوط به عیب را اضافه می‌کنیم و آن را به شکل رابطه ۴-۳ می‌نوسیم. در این رابطه  $\bar{N}(q, \dot{q}) = M^{-1}[C(q, \dot{q})\dot{q} + D\dot{q} + Kq + G(q)]$  و  $u_{T_f}\bar{\zeta}(t) = M^{-1}\tau(t)$  بر گشتاور به وجود آمده از فشار هوا عمل در نظر گرفته شده است.

$$\ddot{q}(t) + \bar{N}(q, \dot{q}) = \bar{\tau}(t) - u_{T_f}\bar{\zeta}(t) \quad (4-3)$$

به کمک رویتگر عیب بیان شده در رابطه ۳-۳، یک رویتگر برای سرعت به فرم رابطه ۵-۳ تعریف می‌کنیم.

$$\dot{\hat{q}}(t) = - \int_{T_f}^t \bar{N}(q(\sigma), \dot{q}(\sigma))d\sigma - \int_{T_f}^t \hat{\zeta}(\sigma)d\sigma + \int_{T_f}^t \bar{\tau}(\sigma)d\sigma + \dot{q}(T_f) \quad \forall t \geq T_f \quad (5-3)$$

خطای تخمین سرعت مورد نیاز در رویتگر عیب را به کمک سرعت تخمین زده شده، به فرم رابطه ۶-۳ تعریف می‌کنیم.

$$e(t) = \dot{\hat{q}}(t) - \dot{q}(t) \quad (6-3)$$

در ادامه به اثبات پایداری و محدود بودن خطای تخمین این رویتگر می‌پردازیم.

---

<sup>5</sup>Luenberger

### ۴-۳ اثبات پایداری

برای استفاده از رویتگر معرفی شده، لازم است خطای تخمین آن پایدار باشد و به سمت صفر برود. با گرفتن مشتق از رابطه ۶-۳ به رابطه ۷-۳ می‌رسیم.

$$\dot{e}(t) = \ddot{\hat{q}}(t) - \ddot{q}(t) \quad (7-3)$$

که می‌توان عبارت  $\ddot{\hat{q}}(t)$  را به کمک رابطه ۸-۳ بدست آورد.

$$\ddot{\hat{q}}(t) = -\bar{N}(q, \dot{q}) + \bar{\tau}(t) - \hat{\zeta}(t) \quad \forall t \geq T_f \quad (8-3)$$

با قرار دادن دو رابطه ۸-۳ و ۹-۳ در رابطه ۷-۳ به رابطه ۹-۳ می‌رسیم.

$$\dot{e}(t) = \bar{\zeta}(t) - \hat{\zeta}(t) = \tilde{\zeta}(t) \quad \forall t \geq T_f \quad (9-3)$$

یک متغیر خطای کمکی با فرمت خطای مود لغزشی<sup>۶</sup> به فرم رابطه ۱۰-۳ تعریف می‌کنیم.

$$s(t) = \dot{e}(t) + e(t) \quad (10-3)$$

با مشتق گرفتن از رابطه ۹-۳ به رابطه ۱۱-۳ می‌رسیم.

$$\ddot{e}(t) = \dot{\bar{\zeta}}(t) - \dot{\hat{\zeta}}(t) \quad (11-3)$$

از خطای کمکی تعریف شده مشتق می‌گیریم و رابطه ۱۱-۳ را در آن جاگذاری می‌کنیم و به رابطه ۱۲-۳ می‌رسیم.

$$\dot{s}(t) = \dot{\bar{\zeta}}(t) - \dot{\hat{\zeta}}(t) + \dot{e}(t) \quad (12-3)$$

اگر مشتق رویتگر عیب طراحی شده در رابطه ۳-۳ را به کمک قضیه لايبنیتز<sup>۷</sup> محاسبه کنیم، به رابطه ۱۳-۳ می‌رسیم.

$$\dot{s}(t) = \dot{\bar{\zeta}}(t) - [(K_0 + I_n)e(t) + K_1 \operatorname{sgn}(e(t)) + (K_0 + I_n)\dot{e}(t)] + \dot{e}(t) \quad (13-3)$$

با استفاده از تعریف متغیر خطای کمکی تعریف شده، می‌توان رابطه ۱۳-۳ را به فرم رابطه ۱۴-۳ ساده نمود.

$$\dot{s}(t) = \dot{\bar{\zeta}}(t) - [(K_0 + I_n)s(t) + K_1 \operatorname{sgn}(e(t))] + \dot{e}(t) \quad (14-3)$$

<sup>6</sup>Sliding mode error

<sup>7</sup>Leibniz

برای اثبات پایداری این رویتگر از تابع لیاپانوف بیان شده در رابطه ۱۵-۳ بهره می‌بریم [۱۳].

$$V = \frac{1}{2}e^T e + \frac{1}{2}s^T s \quad (15-3)$$

مشتق این تابع در رابطه ۱۶-۳ بیان شده است.

$$\dot{V} = \dot{e}^T e + s^T \dot{s} \quad (16-3)$$

مشتق خطای مود لغزشی در رابطه ۱۴-۳ را در مشتق تابع لیاپانوف قرار می‌دهیم و به رابطه ۱۷-۳ می‌رسیم.

$$\dot{V} = \dot{e}^T e + s^T \left[ \dot{\zeta} - (K_0 + I_n)s + K_1 \operatorname{sgn}(e) + \dot{e} \right] \quad (17-3)$$

با در نظر داشتن تعریف متغیر کمکی خطا می‌توان مشتق به دست آمده را به شکل رابطه ۱۸-۳ ساده نمود.

$$\dot{V} = (s - e)^T e + s^T \dot{\zeta} - s^T K_0 s - s^T s - s^T K_1 \operatorname{sgn}(e) + s^T \dot{e} \quad (18-3)$$

در رابطه ۱۸-۳ با توجه به رابطه ۱۰-۳ می‌دانیم که  $e^T e + s^T \dot{e} - s^T s = 0$  و  $s^T K_0 s - s^T s$  منفی معین<sup>۸</sup> می‌باشند. در نتیجه می‌توان به نامساوی ۱۹-۳ رسید.

$$\dot{V} \leq s^T \dot{\zeta} - s^T K_1 \operatorname{sgn}(e) \quad (19-3)$$

از طرفین نامساوی انتگرال می‌گیریم و رابطه ۱۰-۳ را جاگذاری می‌کنیم. حدود انتگرال با توجه به بازه تعریف مشتق خطا از  $T_f$  تا  $t$  می‌باشد.

$$\begin{aligned} V(t) - V(T_f) &\leq \int_{T_f}^t \dot{e}^T(\sigma) \dot{\zeta}(\sigma) d\sigma + \int_{T_f}^t e^T(\sigma) \dot{\zeta}(\sigma) d\sigma \\ &\quad - \int_{T_f}^t \dot{e}^T(\sigma) K_1 \operatorname{sgn}(e(\sigma)) d\sigma - \int_{T_f}^t e^T(\sigma) K_1 \operatorname{sgn}(e(\sigma)) d\sigma \end{aligned} \quad (20-3)$$

در  $\dot{e}$  ها عبارت‌های مبتنی بر شتاب وجود دارد که توانایی اندازه‌گیری آن‌ها وجود ندارد. به همین دلیل به کمک انتگرال‌گیری جزء جز روابط ۲۱-۳ را محاسبه می‌کنیم. توجه داریم که  $\int_{T_f}^t e^T(\sigma) K_1 \operatorname{sgn}(e(\sigma)) d\sigma = 0$  زیرا

---

<sup>۸</sup>Negative definite

در نقاطی که تابع علامت<sup>۹</sup> ثابت است، مشتق آن و زمان تغییر علامت آن، مقدار  $e(\sigma)$  برابر صفر می‌باشد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{T_f}^t \dot{e}^T(\sigma) \dot{\zeta}(\sigma) d\sigma = e^T(\sigma) \dot{\zeta}(\sigma)|_{T_f}^t - \int_{T_f}^t e^T(\sigma) \ddot{\zeta}(\sigma) d\sigma = \\ e^T(t) \dot{\zeta}(t) - e^T(T_f) \dot{\zeta}(T_f) - \int_{T_f}^t e^T(\sigma) \ddot{\zeta}(\sigma) d\sigma \\ \int_{T_f}^t \dot{e}^T(\sigma) K_1 \operatorname{sgn}(e(\sigma)) d\sigma = e^T(\sigma) K_1 \operatorname{sgn}(e(\sigma))|_{T_f}^t - \int_{T_f}^t e^T(\sigma) K_1 \operatorname{sgn}(\dot{e}(\sigma)) d\sigma = \\ e^T(t) K_1 \operatorname{sgn}(e(t)) - e^T(T_f) K_1 \operatorname{sgn}(e(T_f)) \end{array} \right. \quad (۲۱-۳)$$

با قرار دادن انتگرال‌های محاسبه شده در نامساوی ۲۰-۳ به رابطه ۲۲-۳ می‌رسیم.

$$\begin{aligned} V(t) &\leq V(T_f) + e^T(t) \dot{\zeta}(t) - e^T(T_f) \dot{\zeta}(T_f) + \int_{T_f}^t e^T(\sigma) \dot{\zeta}(\sigma) d\sigma \\ &\quad - \int_{T_f}^t e^T(\sigma) \ddot{\zeta}(\sigma) d\sigma - e^T(t) K_1 \operatorname{sgn}(e(t)) + e^T(T_f) K_1 \operatorname{sgn}(e(T_f)) \\ &\quad - \int_{T_f}^t e^T(\sigma) K_1 \operatorname{sgn}(e(\sigma)) d\sigma \end{aligned} \quad (۲۲-۳)$$

از طرفین نامساوی ۲۲-۳ نرم می‌گیریم و با توجه به نامساوی‌های بیان شده در رابطه ۲۳-۳ به رابطه ۲۴-۳

می‌رسیم.

$$\begin{aligned} \int_{T_f}^t e^T(\sigma) K_1 \operatorname{sgn}(e(\sigma)) d\sigma &\leq \int_{T_f}^t \|e(\sigma)\| \|K_1\| d\sigma \\ e^T(t) K_1 \operatorname{sgn}(e(t)) &\leq \|e(t)\| \|K_1\| \end{aligned} \quad (۲۳-۳)$$

$$\begin{aligned} V(t) &\leq V(T_f) - e^T(T_f) \dot{\zeta}(T_f) + e^T(t) \dot{\zeta}(t) - \|e(t)\| \|K_1\| + \int_{T_f}^t e^T(\sigma) \left( \dot{\zeta}(\sigma) - \ddot{\zeta}(\sigma) \right) d\sigma \\ &\quad - \int_{T_f}^t \|e(\sigma)\| \|K_1\| d\sigma + e^T(T_f) K_1 \operatorname{sgn}(e(T_f)) \end{aligned} \quad (۲۴-۳)$$

اگر فرضیات مطرح شده در ۲-۳ برقرار باشند می‌توان عبارت‌های بیان شده در رابطه ۲۵-۳ را منفی معین در نظر گرفت.

$$\left\{ \begin{array}{l} \|K_1\| \geq \gamma_2 \rightarrow e^T(t) \dot{\zeta}(t) - \|e(t)\| \|K_1\| < 0 \\ \|\dot{\zeta}(t)\| \leq \gamma_2 \\ \|K_1\| \geq \gamma_2 - \gamma_3 \rightarrow \int_{T_f}^t e^T(\sigma) \left( \dot{\zeta}(\sigma) - \ddot{\zeta}(\sigma) \right) d\sigma - \int_{T_f}^t \|e(\sigma)\| \|K_1\| d\sigma < 0 \\ \|\dot{\zeta}(t)\| \leq \gamma_2, \|\ddot{\zeta}(t)\| \leq \gamma_3 \end{array} \right. \quad (۲۵-۳)$$

<sup>۹</sup>Sign function

نامساوی ساده شده با توجه به عبارت‌های تعیین علامت شده به شکل رابطه ۲۶-۳ می‌باشد.

$$V(t) \leq V(T_f) - e^T(T_f) \dot{\zeta}(T_f) + e^T(T_f) K_1 \operatorname{sgn}(e(T_f)) \quad (26-3)$$

با توجه به محدود بودن تمامی عبارات موجود در سمت راست این نامساوی می‌توان گفت  $V(t) \in L_\infty$  در نتیجه به کمک تعریفتابع لیاپانوف به رابطه ۲۷-۳ می‌رسیم.

$$\frac{1}{2}e^T e + \frac{1}{2}s^T s \in L_\infty \rightarrow \begin{cases} e(t), s(t) \in L_2 \\ e(t), s(t) \in L_\infty \end{cases} \quad (27-3)$$

با توجه به محدود بودن خطای مود لغزشی و تعریف آن می‌توان گفت  $\dot{e}(t) \in L_\infty$ . با در نظر گرفتن رابطه . $\ddot{e}(t) \in L_\infty$  می‌توان محدود بودن  $\dot{s}(t)$  را نتیجه گرفت و در نهایت با توجه به رابطه ۲۸-۳ می‌توان گفت  $\dot{s}(t) \in L_\infty$ .

$$\dot{s}(t) = \ddot{e}(t) + \dot{e}(t) \quad (28-3)$$

به کمک لم باربالت<sup>۱۰</sup> می‌توان به رابطه ۲۹-۳ رسید.

$$\begin{cases} e(t) \in L_\infty \\ \dot{e}(t) \in L_\infty \rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}(t) = \tilde{\zeta}(t) = 0 \\ \ddot{e}(t) \in L_\infty \end{cases} \quad (29-3)$$

### ۵-۳ نتیجه‌گیری

با توجه به روابط بیان شده در قسمت پیش و استفاده از لم باربالت به رابطه ۲۹-۳ رسیدیم و پایداری رویتگر پیشنهاد شده اثبات شد. به این ترتیب با مشخص شدن پایداری رویتگر و همگرا شدن خطای تخمین عیب به صفر، در قسمت بعدی به طراحی قانون کنترلی و قانون تطبیق برای ربات نرم با دو عملگر خمی در حضور عیب‌های احتمالی می‌پردازیم. لازم به ذکر است در این رویتگر تخمینی از عیب رخ داده شده در سیستم به دست می‌آید و نیازی به تخمین  $q$  یا  $\dot{q}$  به طور مستقیم نمی‌باشد.

<sup>10</sup>Barbalats' lemma

## فصل چهارم

طراحی کنترل کننده زاویه خمش عملگر نرم

## ۱-۴ مقدمه

با در دست داشتن تخمینی از عیب موجود در سیستم و لحاظ کردن آن در معادلات دینامیکی ربات نرم با دو عملگر خمی، می‌توان برای کنترل زاویه خمش عملگرها از کنترل کننده‌های بر پایه‌ی مدل دینامیکی ربات استفاده نمود. در این فصل الگوریتم کنترلی تطبیقی لغزشی<sup>۱</sup> مبتنی بر مدل<sup>۲</sup> برای کنترل زاویه خمش عملگرها ارائه می‌شود، نتایج آن در شبیه‌سازی بررسی می‌شود و سپس برای مقایسه عملکرد این کنترل کننده، نتایج حاصل از آن با PID طراحی شده برای این عملگر مقایسه می‌شوند.

در سرتاسر این بخش به فیدبک از سرعت تغییرات خمش عملگرها و زاویه خمش مطلق آن‌ها داریم. با توجه وجود سنسورهای متعدد پیزوالکترونیکی و مقاومتی برای اندازه‌گیری میزان خمش لینک‌ها و امکان محاسبه میزان تغییرات نسبت به زمان از طریق روابط ریاضی و تقریب مشتق، فرض در نظر گرفته شده منطقی و قابل اجرا می‌باشد.

## ۲-۴ کنترل کننده تطبیقی لغزشی با در نظر گرفتن عیب

با توجه به فصل قبل و موارد بیان شده در ارتباط با پیچیدگی مدل دینامیکی ربات، می‌توان گفت که خطا در شناسایی پارامترهای دینامیکی، یکی از دلایل خطای بین مدل پیش‌بینی شده و مدل واقعی سیستم است که باعث کاهش دقیقت کنترل پارامترهای مطلوب می‌گردد. به همین دلیل استفاده از کنترل کننده‌ای که بتواند با توجه به خروجی سیستم، پارامترهای دینامیکی را به مقدار مناسب تطبیق دهد، می‌تواند بسیار موثر واقع شود. کنترل کننده‌ی تطبیقی لغزشی [۱۸، ۵] از این دسته کنترل کننده‌ها می‌باشد و برای کنترل ربات نرم یاد شده از آن استفاده می‌شود. این کنترل کننده با جبران خطای ناشی از شناسایی پارامترهای دینامیکی، عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد.

متغیر خطای مود لغزشی را به صورت رابطه ۱-۴ تعریف می‌کیم.

$$r = \dot{q} - v \quad (1-4)$$

که در آن  $v$  متغیر کمکی است و به صورت رابطه ۲-۴ تعریف می‌شود.

$$v = \dot{q}_d - \lambda(q - q_d) \quad (2-4)$$

<sup>۱</sup>Adaptive Sliding Mode Controller (ASMC)

<sup>۲</sup>Model-based control

با ترکیب این دو رابطه، خطای مود لغزشی به فرم موجود در رابطه ۳-۴ خلاصه می‌شود.

$$r = \dot{\tilde{q}} + \lambda \tilde{q} \quad (3-4)$$

همچنین مشتق خطای مود لغزشی به شکل رابطه ۴-۴ می‌باشد.

$$\dot{r} = \ddot{q} - \dot{v} \quad (4-4)$$

ورودی کنترلی را با توجه به عدم قطعیت در مقادیر در دسترس از خواص فیزیکی ربات به صورت رابطه ۵-۴ تعریف می‌کنیم.

$$\tau = \hat{M}\dot{v} + \hat{C}v + \hat{G} + \hat{\zeta} - Lr \quad (5-4)$$

در این رابطه  $\hat{G} = \hat{K}q + \hat{G}(q)$  و  $\hat{C} = \hat{C}(q, \dot{q}) + \hat{D}$  هستند. ماتریس  $L$  یک ماتریس قطری و مثبت معین است. توجه داریم که در قانون کنترلی تعریف شده، اثربار از عبارات مبتنی بر مشتق دوم متغیرهای خمش وجود ندارد. این نکته از آن جهت حائز اهمیت است که اندازه‌گیری شتاب پرهزینه و با خطاهای فراوان همراه است. به این نوع کنترل، کنترل مبتنی بر انفعال<sup>۳</sup> گفته می‌شود.

فرم‌های رگرسوری<sup>۴</sup> رابطه ۶-۴ را در نظر بگیرید. در این رابطه‌ها، ماتریس‌های  $C$  و  $\hat{C}$  دربرگیرنده ماتریس نیروهای کورلیوس و اثر استهلاک و ماتریس‌های  $G$  و  $\hat{G}$  دربرگیرنده بردار اثر جاذبه و اثر الاستیک می‌باشند.

$$\begin{aligned} M\dot{v} + Cv + G &= Y(q, \dot{q}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)\theta \\ \hat{M}\dot{v} + \hat{C}v + \hat{G} &= Y(q, \dot{q}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)\hat{\theta} \end{aligned} \quad (6-4)$$

در این روابط ماتریس  $Y(q, \dot{q}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)$  ماتریس مقادیر شناخته شده<sup>۵</sup> و تشکیل شده از زاویه خمش عملگرها، مشتق آنها و مقادیر مطلوب می‌باشد. همچنین  $\theta$  بردار مقادیر ناشناخته<sup>۶</sup> و متغیر، مانند جرم لینک‌ها، و  $\hat{\theta}$  تخمین این بردار می‌باشد. با توجه به رابطه ۶-۴، قانون تطبیق در نظر گرفته شده برای بردار مقادیر ناشناخته در فرم رگرسوری به صورت رابطه ۷-۴ می‌باشد.

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma^{-T}Y^Tr \quad (7-4)$$

<sup>3</sup>Passivity based control

<sup>4</sup>Regressor

<sup>5</sup>Known values

<sup>6</sup>Unknown values

که در آن ماتریس مثبت معین و معکوس پذیر  $\Gamma$  نرخ تطبیق<sup>۷</sup> نامیده می‌شود.  
از این پس برای سادگی، عیب موجود در سیستم را با  $\zeta$  و عیب تخمین زده شده توسط رویتگر را با  $\hat{\zeta}$  نشان می‌دهیم. اگر معادله دینامیکی حلقه بسته را با استفاده فرم‌های رگرسوری به دست آمده بازنویسی کنیم به رابطه ۸-۴ می‌رسیم.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + G = Y(q, \dot{q}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)\hat{\theta} + \hat{\zeta} - Lr \quad (8-4)$$

برای بدست آوردن معادله بالا بر حسب متغیر خطای لغزشی از دو طرف معادله  $\theta$  را کم می‌کنیم. با ساده‌سازی سمت چپ معادله به رابطه ۹-۴ می‌رسیم.

$$M\dot{r} + Cr + Lr - \tilde{\zeta} - Y(q, \dot{q}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)\tilde{\theta} = 0 \quad (9-4)$$

در این رابطه  $\hat{\theta} - \theta = \tilde{\zeta} - \hat{\zeta}$  می‌باشد.

در قسمت بعد به اثبات پایداری و همگرایی خطای زاویه خمش به سمت صفر به وسیله ورودی کنترلی و قانون تطبیق پیشنهاد شده می‌پردازیم.

#### ۱-۲-۴ اثبات پایداری کنترل کننده تطبیقی لغزشی با در نظر گرفتن عیب

برای بررسی پایداری و همگرا شدن خطای خمش به صفر به کمک ورودی کنترلی ۵-۴ و قانون تطبیق ۷-۴، تابع لیاپانوف رابطه ۱۰-۴ را تعریف می‌کنیم.

$$V = \frac{1}{2}r^T Mr + \tilde{q}^T \lambda L \tilde{q} + \frac{1}{2}\tilde{\theta}^T \Gamma \tilde{\theta} \quad (10-4)$$

مشتق تابع پیشنهاد شده در رابطه ۱۰-۴ نسبت به زمان در رابطه ۱۱-۴ بیان شده است. توجه داریم در این مشتق به دلیل مثبت معین بودن ماتریس  $M$  مقادیر  $r^T Mr$  و  $\dot{r}^T Mr$  با هم برابر می‌شوند. این نکته برای عبارت  $\tilde{\theta}^T \Gamma \tilde{\theta}$  نیز برقرار است.

$$\dot{V} = r^T M \dot{r} + \frac{1}{2} \dot{r}^T M \dot{r} + \dot{\tilde{q}}^T \lambda L \tilde{q} + \tilde{q}^T \lambda L \dot{\tilde{q}} + \dot{\tilde{\theta}}^T \Gamma \tilde{\theta} \quad (11-4)$$

عبارت  $\dot{r}^T Mr$  را از دینامیک حلقه بسته در رابطه ۹-۴ جاگذاری می‌کنیم و به رابطه ۱۲-۴ می‌رسیم.

$$\dot{V} = r^T \left[ -Cr - Lr + Y\tilde{\theta} + \tilde{\zeta} + \frac{1}{2} \dot{M}r \right] + \dot{\tilde{q}}^T \lambda L \tilde{q} + \tilde{q}^T \lambda L \dot{\tilde{q}} + \dot{\tilde{\theta}}^T \Gamma \tilde{\theta} \quad (12-4)$$

<sup>7</sup>Adaptation rate

با توجه به پادمتقارن بودن ماتریس  $\dot{M} - 2C$  می‌توان مشتق محاسبه شده را به فرم رابطه ۱۳-۴ ساده نمود.

$$\dot{V} = -r^T L r + r^T Y \tilde{\theta} + r^T \tilde{\zeta} + \dot{\tilde{q}}^T \lambda L \tilde{q} + \tilde{q}^T \lambda L \dot{\tilde{q}} + \dot{\tilde{\theta}}^T \Gamma \tilde{\theta} \quad (13-4)$$

با جاگذاری خطای مود لغزشی از رابطه ۴-۳ در عبارت اول رابطه ۴-۴ به رابطه ۴-۱۴ می‌رسیم.

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{q}}^T L \dot{\tilde{q}} - \tilde{q}^T \lambda^2 L \tilde{q} - \dot{\tilde{q}}^T \lambda L \tilde{q} - \tilde{q}^T \lambda L \dot{\tilde{q}} + r^T Y \tilde{\theta} + r^T \tilde{\zeta} + \dot{\tilde{q}}^T \lambda L \tilde{q} + \tilde{q}^T \lambda L \dot{\tilde{q}} + \dot{\tilde{\theta}}^T \Gamma \tilde{\theta} \quad (14-4)$$

پس از حذف عبارات مساوی به رابطه ساده شده ۴-۱۵ می‌رسیم.

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{q}}^T L \dot{\tilde{q}} - \tilde{q}^T \lambda^2 L \tilde{q} + r^T Y \tilde{\theta} + r^T \tilde{\zeta} + \dot{\tilde{\theta}}^T \Gamma \tilde{\theta} \quad (15-4)$$

با توجه به رابطه ۴-۱۶، قانون تطبیق رابطه ۴-۷ را جاگذاری می‌کنیم.

$$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\tilde{\theta}} - \dot{\theta} = \dot{\tilde{\theta}} \quad (16-4)$$

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{q}}^T L \dot{\tilde{q}} - \tilde{q}^T \lambda^2 L \tilde{q} + r^T \tilde{\zeta} \quad (17-4)$$

با استفاده از تعریف خطای مود لغزشی، عبارت آخر در رابطه ۴-۱۷ را بازنویسی کرده و به رابطه ۴-۱۸ می‌رسیم.

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{q}}^T L \dot{\tilde{q}} - \tilde{q}^T \lambda^2 L \tilde{q} + \dot{\tilde{q}}^T \tilde{\zeta} + \tilde{q}^T \lambda \tilde{\zeta} \quad (18-4)$$

بردار حالت‌های خطای موجود  $e$  را به شکل رابطه ۴-۱۹ تعریف می‌کنیم.

$$e = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (19-4)$$

به کمک رابطه ۴-۱۹ رابطه ۴-۱۸ را به فرم ماتریسی موجود در رابطه ۴-۲۰ می‌نویسیم.

$$\dot{V} = -e^T \underbrace{\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & \lambda^2 L \end{bmatrix}}_Q e + e^T \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{\zeta} \\ \lambda \tilde{\zeta} \end{bmatrix}}_z \quad (20-4)$$

برای منفی معین بودن مشتق لیپانوف به دو شرط زیر نیاز است:

۱. ماتریس  $Q$  مثبت معین باشد.

۲. نرم ماتریس  $Q$  در رابطه ۲۱-۴ صدق کند.

$$\|Q\| > \frac{\|z\|}{\|e\|} \quad (21-4)$$

با توجه به تعریف ورودی کنترلی، ماتریس  $L$  مثبت معین است و ضریب  $\lambda$  در خطای مود لغزشی مثبت است. به این ترتیب ماتریس  $Q$  مثبت معین است. ساده‌سازی رابطه ۲۱-۴ به رابطه ۲۲-۴ می‌انجامد.

$$\begin{cases} \|Q\| = \max\{\lambda^2\|L\|, \|L\|\} \\ \|z\| = \sqrt{\tilde{\zeta}^2(1 + \lambda^2)} \\ \|e\| = \sqrt{\tilde{q}^2 + \dot{\tilde{q}}^2} \end{cases} \rightarrow \max\{\lambda^2\|L\|, \|L\|\} > \sqrt{\frac{\tilde{\zeta}^2(1 + \lambda^2)}{\tilde{q}^2 + \dot{\tilde{q}}^2}} \quad (22-4)$$

اگر ماتریس  $L$  و ضریب  $\lambda$  در رابطه ۲۲-۴ صدق کنند، مشتق تابع لیاپانوف ۴-۱۰ منفی معین است. در ادامه به اثبات محدود بودن خطای زاویه خمش و همگرایی آن به صفر می‌پردازیم.

در رابطه ۲۳-۴ محدود بودن تابع لیاپانوف پیشنهاد شده و در نتیجه عبارات تشکیل‌دهنده آن ثابت شده است.

$$\begin{cases} V \geq 0 \\ \dot{V} < 0 \end{cases} \rightarrow V \in L_\infty \rightarrow \begin{cases} r \in L_\infty \\ x \in L_\infty \\ \tilde{q} \in L_\infty \\ \tilde{\theta} \in L_\infty \end{cases} \quad (23-4)$$

با توجه به رابطه ۴-۳ و محدود بودن  $\tilde{q}$  و  $r$  به رابطه ۴-۲۴ می‌رسیم.

$$\begin{cases} r \in L_\infty \\ \tilde{q} \in L_\infty \end{cases} \rightarrow \dot{\tilde{q}} \in L_\infty \quad (24-4)$$

به کمک محدود بودن  $\tilde{q}$  در رابطه ۲۳-۴ و  $\dot{\tilde{q}}$  در رابطه ۴-۲۴ نتیجه می‌شود تمامی درایه‌ها بردار  $e$  و در نهایت کل بردار محدود می‌باشد. با توجه به نکات بیان شده در فصل ۳ و رابطه ۳-۲۹، عبارت  $\tilde{\theta}$  محدود است. از آن جایی

که ماتریس  $Q$  نیز محدود می‌باشد، به رابطه ۴-۲۵ می‌رسیم.

$$\begin{cases} e \in L_\infty \\ Q \in L_\infty \end{cases} \rightarrow \dot{V} \in L_\infty \quad (25-4)$$

مشتق دوم تابع لیاپانوف برحسب زمان با استفاده از رابطه ۴-۲۰ به فرم رابطه ۴-۲۶ می‌باشد.

$$\ddot{V} = -2e^T Q \dot{e} + \dot{e}^T z + e^T \dot{z} \quad (26-4)$$

برای محدود بودن این رابطه، بردارهای  $\dot{e}$  و  $\dot{\theta}$  باید محدود باشند. در دینامیک حلقه بسته سیستم به دست آمده در رابطه ۴-۹ ماتریس‌های  $C$ ،  $M$  و  $L$  محدود هستند. بردارهای  $\dot{\zeta}$  و  $\dot{\theta}$  با توجه به محدود بودن عیب‌های رخ داده در سیستم (فصل ۳) و پارامترهای فیزیکی ریاضی محدود می‌باشند. با استفاده از رابطه ۴-۲۳ نتیجه می‌شود که عبارت  $\dot{r}$  نیز محدود می‌باشد. با استفاده از این موضوع و رابطه ۴-۲۴ به رابطه ۴-۲۷ می‌رسیم.

$$\begin{cases} \dot{r} \in L_\infty \\ \dot{q} \in L_\infty \end{cases} \rightarrow \ddot{q} \in L_\infty \quad (4-27)$$

در نتیجه بردار  $\dot{e}$  محدود است. همچنین محدود بودن مشتق خطای تخمین عیب در رابطه ۳-۲۹ اثبات شده است. در نتیجه مشتق دومتابع لیاپانوف محدود می‌باشد. با توجه به این موضوع و استفاده از روابط ۴-۲۳ و ۴-۲۵ و استفاده از لم باربالت به رابطه ۴-۲۸ می‌رسیم.

$$\begin{cases} V \in L_\infty \\ \dot{V} \in L_\infty \\ \ddot{V} \in L_\infty \end{cases} \rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} \rightarrow 0 \quad (4-28)$$

با توجه به منفی معین بودن  $\dot{V}$  و رابطه ۴-۲۸ می‌توان نتیجه گرفت بردار  $e$  به صفر می‌رود و در نهایت به رابطه ۴-۲۹ می‌رسیم.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e \rightarrow 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}, \ddot{q} \rightarrow 0 \quad (4-29)$$

بنابراین خطای زاویه خمش و تغییرات آن با استفاده از قانون کنترلی و قانون تطبیق ارائه شده به صفر میل خواهد کرد.

### ۴-۳ کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون استفاده از تخمین عیب

در این بخش کنترل کننده تطبیقی لغزشی طراحی شده در قسمت ۴-۲ را به گونه‌ای تغییر می‌دهیم که اثری از تخمین عیب در ورودی کنترلی مشاهده نشود.

با استفاده از تعریف‌های خطای مود لغزشی و متغیر خطای کمکی تعریف شده در روابط ۴-۱ و ۴-۲ ورودی کنترلی جدید را به فرم رابطه ۴-۳۰ تعریف می‌کنیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت این قانون کنترلی با رابطه ۴-۵ در نبود تخمین عیب به دست آمده از رویتگر عیب می‌باشد.

$$\tau = \hat{M}\dot{v} + \hat{C}v + \hat{G} - Lr \quad (4-30)$$

برای قانون تطبیق نیز از رابطه ۷-۴ استفاده می‌کنیم. با استفاده از فرم‌های رگرسوری موجود در رابطه ۶-۴ و به روش مشابه دینامیک حلقه بسته سیستم را به شکل رابطه ۳۱-۴ محاسبه می‌کنیم.

$$M\dot{r} + Cr + Lr + \zeta - Y(q, \dot{q}, q_d, \dot{q}_d)\tilde{\theta} = 0 \quad (31-4)$$

در بخش بعدی به اثبات پایداری سیستم معرفی شده در رابطه ۳۱-۴ می‌پردازیم.

### ۱-۳-۴ اثبات پایداری کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون استفاده از تخمین عیب

برای بررسی پایداری و همگرا شدن خطای خمش به صفر به کمک ورودی کنترلی ۵-۴ و قانون تطبیق ۷-۴، تابع لیاپانوف رابطه ۳۲-۴ را تعریف می‌کنیم.

$$V = \frac{1}{2}r^T Mr + \tilde{q}^T \lambda L \tilde{q} + \frac{1}{2}\tilde{\theta}^T \Gamma \tilde{\theta} \quad (32-4)$$

مشتق تابع لیاپانوف نسبت به زمان با جاگذاری دینامیک حلقه بسته ۳۱-۴ و در نظر داشتن پادمتقارن بودن ماتریس  $\dot{M} - 2C$  در رابطه ۳۳-۴ محاسبه شده است.

$$\dot{V} = -r^T L r + r^T Y \tilde{\theta} - r^T \zeta + \dot{\tilde{q}}^T \lambda L \tilde{q} + \tilde{q}^T \lambda L \dot{\tilde{q}} + \dot{\tilde{\theta}}^T \Gamma \tilde{\theta} \quad (33-4)$$

خطای مود لغزشی از رابطه ۳-۴ و قانون تطبیق از رابطه ۷-۴ را جاگذاری می‌کنیم. پس از ساده‌سازی به رابطه ۳۴-۴ می‌رسیم.

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{q}}^T L \dot{\tilde{q}} - \tilde{q}^T \lambda^2 L \tilde{q} - r^T \zeta \quad (34-4)$$

همانند قسمت ۱-۳-۴ به کمک تعریف خطای مود لغزشی و بردار  $e$  تعریف شده در رابطه ۱۹-۴، مشتق به دست آمده را به فرم ماتریسی در رابطه ۳۵-۴ می‌نویسیم.

$$\dot{V} = -e^T \underbrace{\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & \lambda^2 L \end{bmatrix}}_Q e - e^T \underbrace{\begin{bmatrix} \zeta \\ \lambda \zeta \end{bmatrix}}_z \quad (35-4)$$

در صورت برقراری شروط زیر تابع ۳۲-۴ منفی معین خواهد بود.

۱. ماتریس  $Q$  مثبت معین باشد.

۲. نرم ماتریس  $Q$  در رابطه ۳۶-۴ صدق کند.

$$\|Q\| > -\frac{\|z\|}{\|e\|} \quad (36-4)$$

ماتریس  $Q$  با توجه به تعریف پارامترهای تنظیمی، مثبت معین است. پس رابطه ۳۶-۴ همیشه برقرار است و در نتیجه مشتق تابع پیشنهادی منفی معین است. ادامه اثبات همانند قسمت قبل می‌باشد و در نهایت با استفاده از لم باربالت به رابطه ۳۷-۴ می‌رسیم که پایداری و در نهایت صفر شدن خطای زاویه خمش و تغییرات آن را نشان می‌دهد.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e \rightarrow 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}, \dot{\tilde{q}} \rightarrow 0 \quad (37-4)$$

در فصل بعد به بررسی عملکرد هر یک از این کنترل کننده‌ها و مقایسه آن‌ها به کنترل کننده PID در حالت‌های مختلف می‌پردازیم.

فصل پنجم

شبیه‌سازی

## ۱-۵ مقدمه

برای بررسی عملکرد کنترل کننده طراحی شده و مقایسه آن با کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون در نظر گرفتن عیب و کنترل کننده PID، شبیه‌سازی‌هایی در حالت حرکت آزاد ربات ذکر شده و عدم حضور نیروی خارجی انجام می‌شود.

پارامترهای ربات با دو عملگر خمی نیوماتیکی نرم، از جمله جرم، طول و ضرایب اصطکاک و الاستیسیته لینک‌ها در جدول ۱-۵ آورده شده است [۳].

جدول ۱-۵: پارامترهای دینامیکی ربات نرم در نظر گرفته شده

پارامتر	واحد	لینک ۱	لینک ۲
جرم	$g$	20	25.1
طول	$mm$	67	77
ضریب الاستیک	$N.m/rad$	0.068	0.07
ضریب اصطکاک	$N.m.s/rad$	0.0029	0.0029

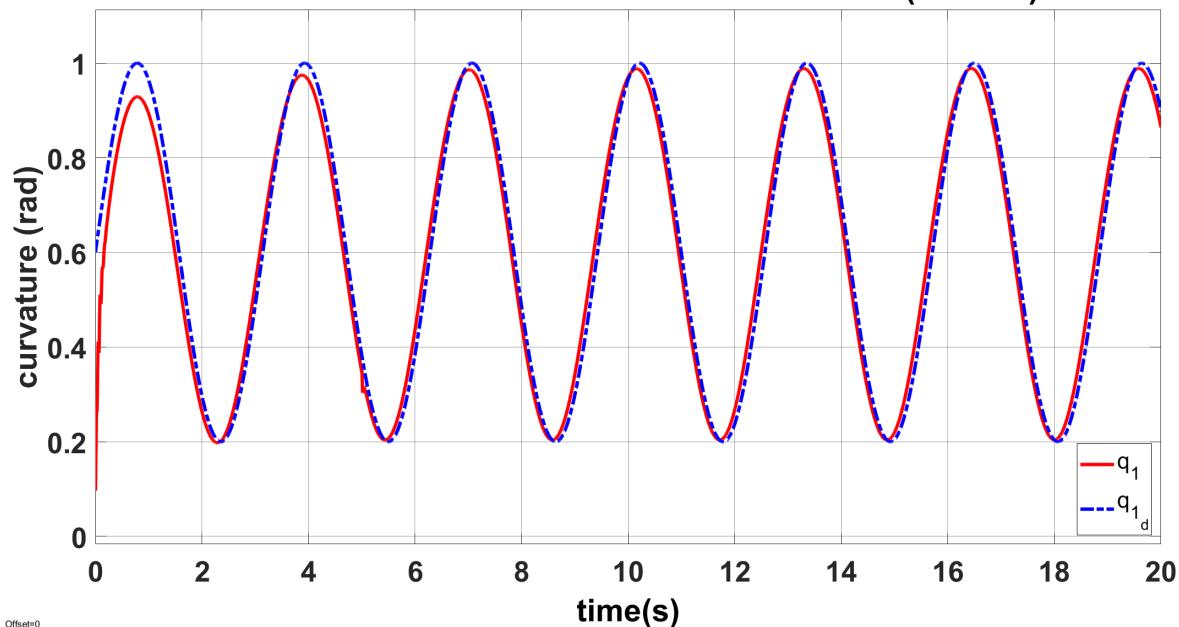
## ۲-۵ کنترل کننده تطبیقی لغزشی با در نظر گرفتن عیب

هدف از شبیه‌سازی‌های انجام شده، تعییب خمی مرجع و مطلوب  $q_d = 0.6 \sin(t) + 0.4$  توسط هر دو عملگر می‌باشد. گینهای تنظیمی کنترل کننده، قانون تطبیق و خطای مود لغزشی برای دو کنترل کننده تطبیقی لغزشی، با توجه به حدود محاسبه شده برای پایداری، بر اساس جدول ۲-۵ انتخاب می‌شوند.

جدول ۵-۲: پارامترهای تنظیمی ورودی کنترلی طراحی شده

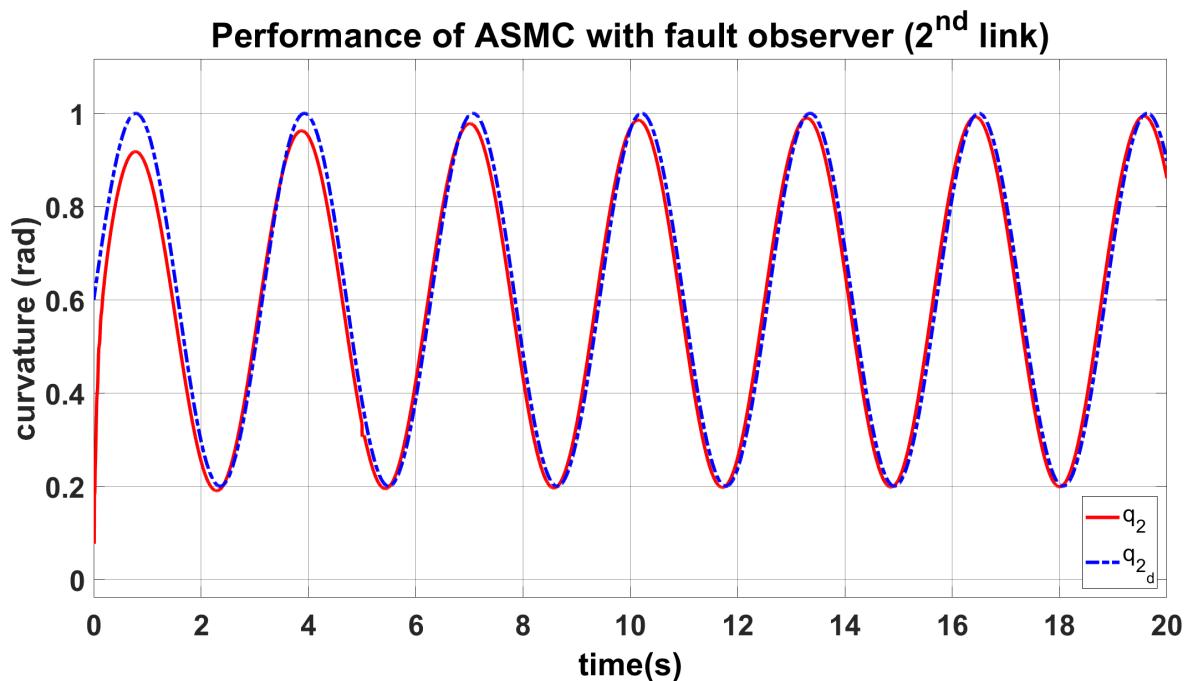
اندازه	پارامتر
$0.002I_2$	$L$
15	$\lambda$
$0.017I_{11}$	$\Gamma$

شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵ به ترتیب عملکرد کنترل کننده تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب را در تعقیب<sup>۱</sup> ورودی مرجع ذکر شده برای عملگرهای اول و دوم نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که عیب نشته هوا (سوراخ شدن عملگرها) به اندازه  $60\%$  در لحظه  $t = 5s$  به هر دو عملگر اعمال شده است.

Performance of ASMC with fault observer (1<sup>st</sup> link)

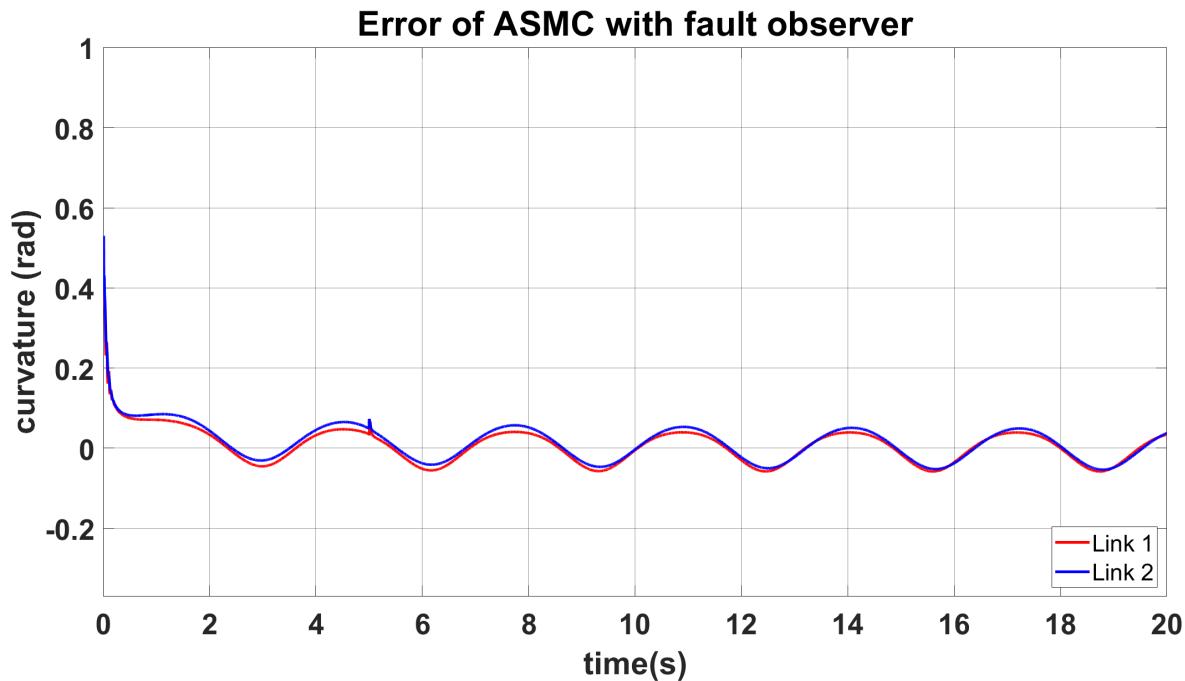
شکل ۵-۱: تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب در عملگر خمسی اول

<sup>1</sup>Tracking

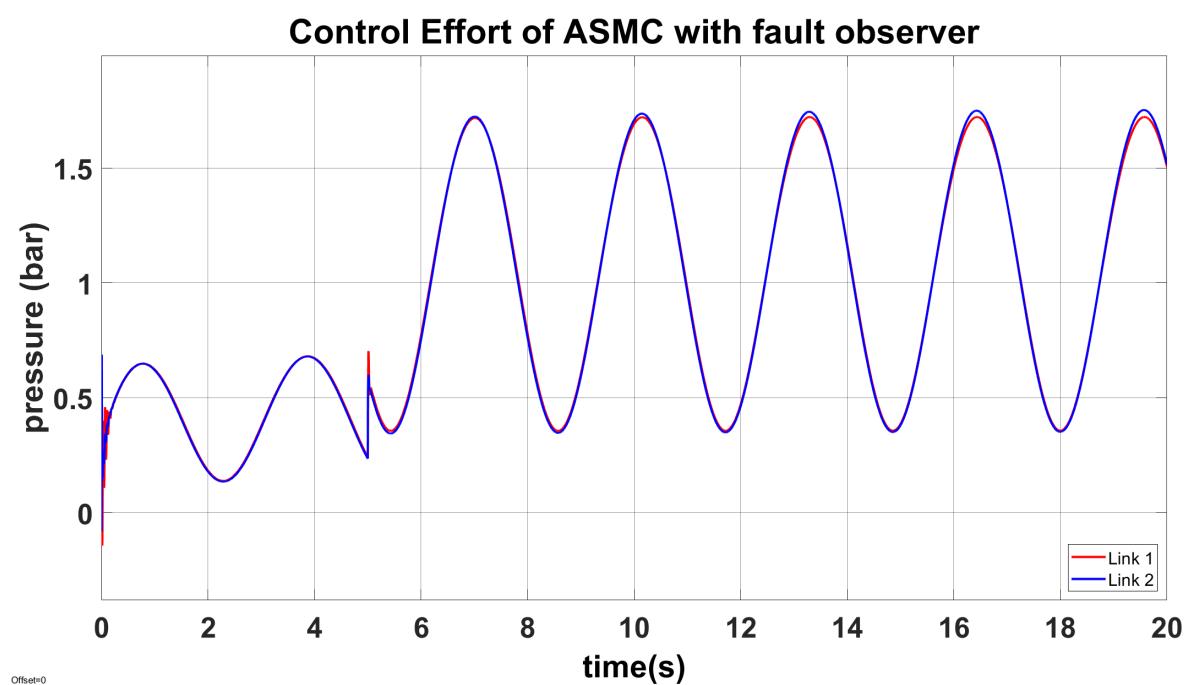


شکل ۵-۲: تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب در عملگر خمثی دوم

خطای تعقیب خمث مطلوب توسط این کنترل کننده و همچنین ورودی تولید شده توسط کنترل کننده برای رسیدن به خروجی شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵ به ترتیب در شکل‌های ۳-۵ و ۴-۵ برای هر دو عملگر نمایش داده شده‌اند.



شکل ۵-۳: خطای تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل‌کننده تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب برای هر دو عملگر خمثی



شکل ۵-۴: ورودی کنترلی اعمال شده توسط کنترل‌کننده تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب به هر دو عملگر خمثی

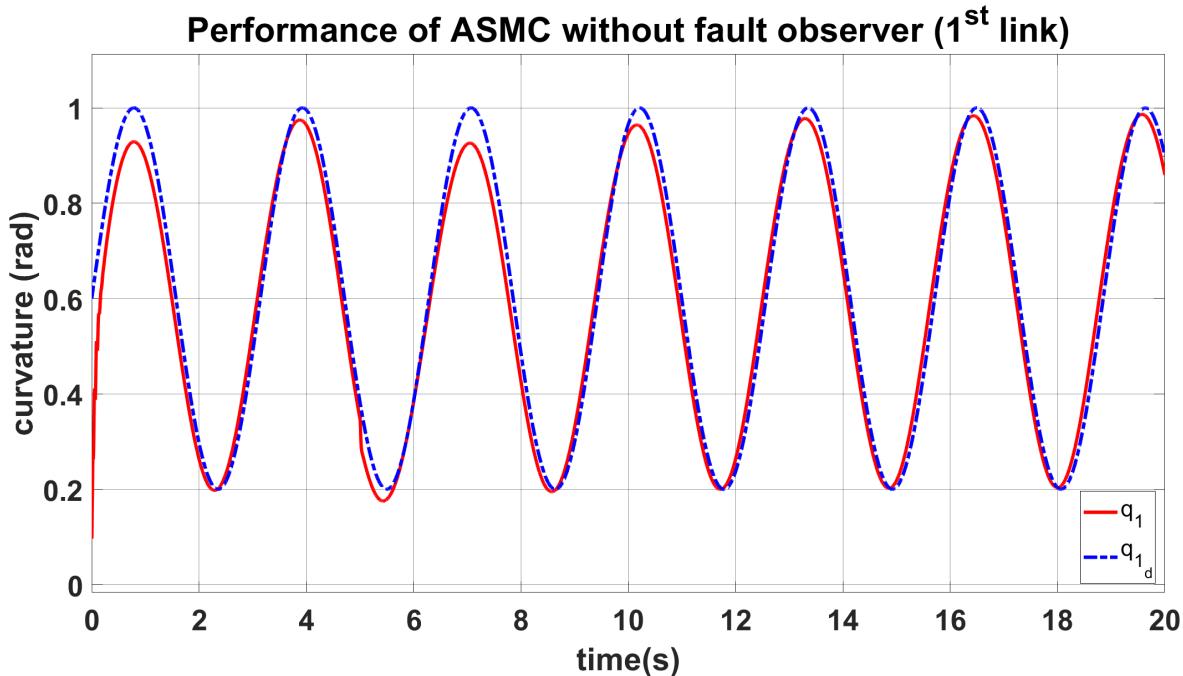
همان‌طور که در شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵ مشاهده می‌شود، عملکرد نسبتاً مطلوبی از کنترل‌کننده طراحی شده به دست آمده است. اگرچه کارکرد کنترل‌کننده ظرفیت بهبود زیادی دارد ولی به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی ربات نرم مورد بررسی، تغییر ضرایب کنترل‌کننده اثرگذاری زیادی بر روی پاسخ سیستم دارند. همچنین تنظیم پارامترهای باید به نحوی صورت گیرد که حدود پایداری بیان شده در قسمت‌های قبل، در شروع و کل زمان تعقیب برقرار باشد.

نکته‌ی قابل ذکر دیگر وقوع فراجهش زیاد در ابتدای کنترل عملگر اول است که نسبت به عملگر دوم، به اندازه قابل ملاحظه‌ای بیشتر می‌باشد. علت این امر آن است که جرم عملگر دوم بر پاسخ عملگر خمشی اول تاثیر زیادی دارد. این فراجهش به دلیل نبود تخمین اولیه از مقادیر واقعی سیستم در پارامترهای تطبیقی می‌باشد. در صورتی که مقادیر اولیه بردار  $\hat{\theta}$  نزدیک به مقادیر واقعی ربات انتخاب شوند، این نوسانات کاهش می‌یابند.

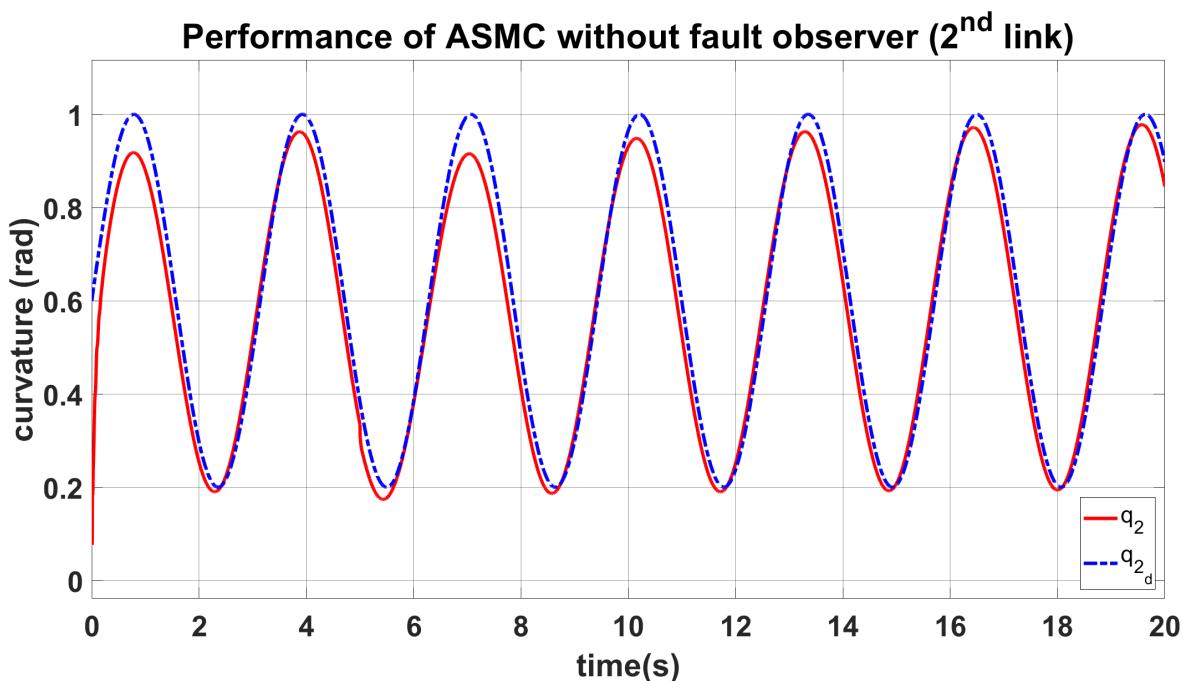
همان‌طور که پیش‌تر بیان شد و در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود، ورودی کنترلی همیشه مثبت و کمتر از ۲ بار می‌باشد. محدود بودن ورودی کنترلی به این حد بالا باعث جلوگیری از آسیب رسیدن به عملگرها می‌شود. در قسمت بعدی به بررسی نتایج به دست آمده از کنترل‌کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب می‌پردازیم.

### ۳-۵ کنترل‌کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب

شکل‌های ۵-۵ و ۶-۵ به ترتیب عملکرد کنترل‌کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب را در تعقیب ورودی مرجع ذکر شده و عیب مشابه حالت قبل برای عملگرهای اول و دوم نشان می‌دهند.

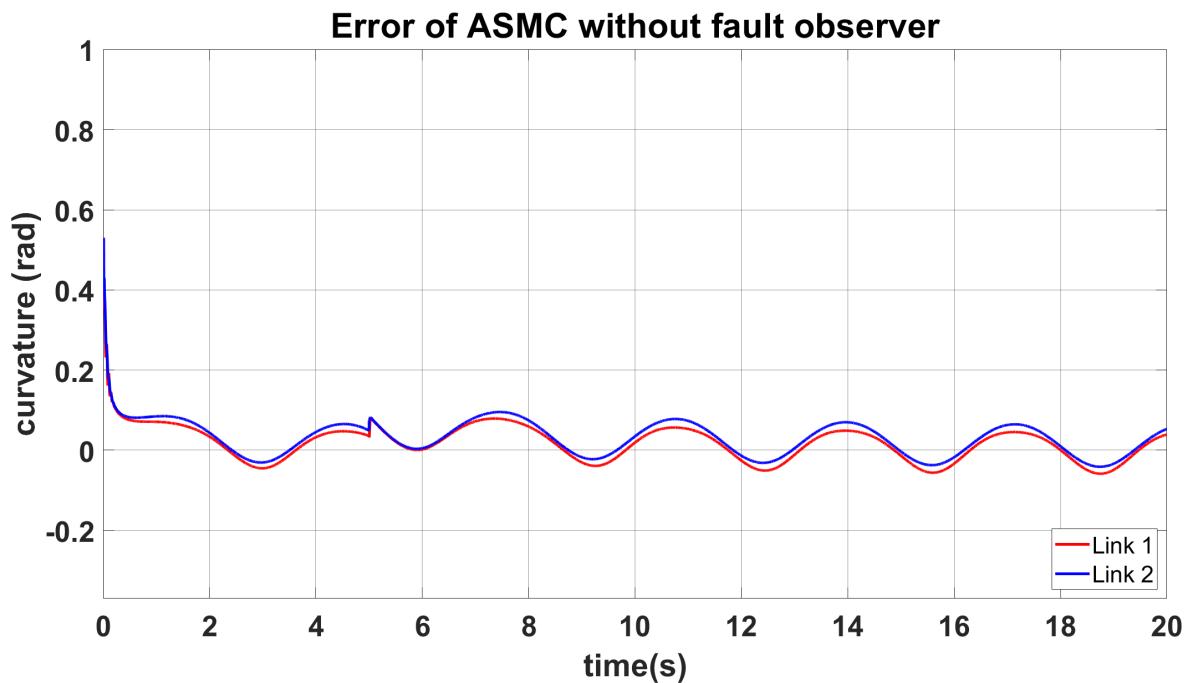


شکل ۵: تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب در عملگر خمشی اول

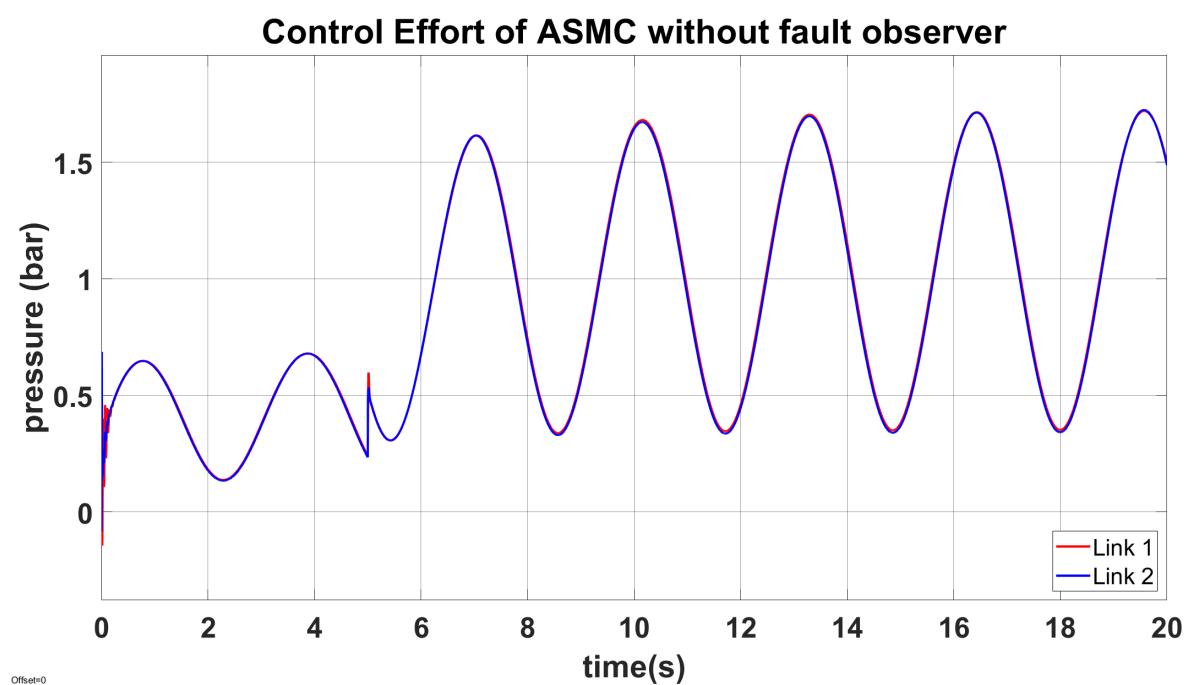


شکل ۶: تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب در عملگر خمشی دوم

خطای تعقیب خمش مطلوب توسط این کنترل کننده و همچنین ورودی تولید شده برای رسیدن به خروجی شکل های ۵-۵ و ۶-۶ به ترتیب در شکل های ۷-۵ و ۸-۵ برای هر دو عملگر نمایش داده شده اند.



شکل ۵-۷: خطای تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب برای هر دو عملگر خمی



شکل ۵-۸: ورودی کنترلی اعمال شده توسط کنترل کننده تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب به هر دو عملگر خمی

این کنترل کننده همانند قسمت قبل از عملکرد مناسبی برخوردار است و توانایی تطبیق با تغییرات رخ داده در سیستم را دارد. تفاوت عمدہ‌ای که به دلیل نبود رویتگر عیب رخ داده، کندر شدن بازگشت عملکرد کنترل کننده در کاهش خطأ و کمتر بودن مقدار ورودی کنترلی در لحظات پس از بروز عیب نسبت به کنترل کننده قبلی می‌باشد. این موضوع در بخش ۵-۵ با وضوح بیشتری بررسی می‌شود.

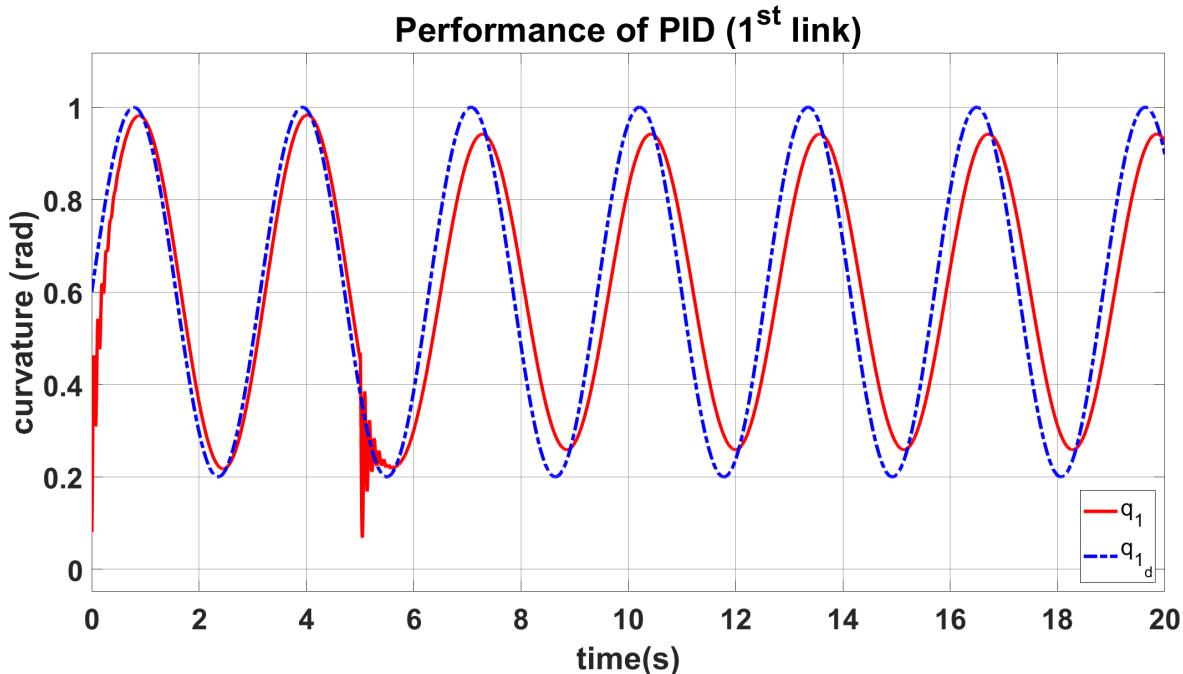
## ۴-۵ کنترل کننده PID

در نهایت نتایج به دست آمده از کنترل کننده PID را بررسی می‌کنیم. گین‌های این کنترل کننده بر اساس جدول ۳-۵ تنظیم شده‌اند. برای هر دو عملگر از مشخصات یکسان برای کنترل کننده‌ها استفاده می‌کنیم.

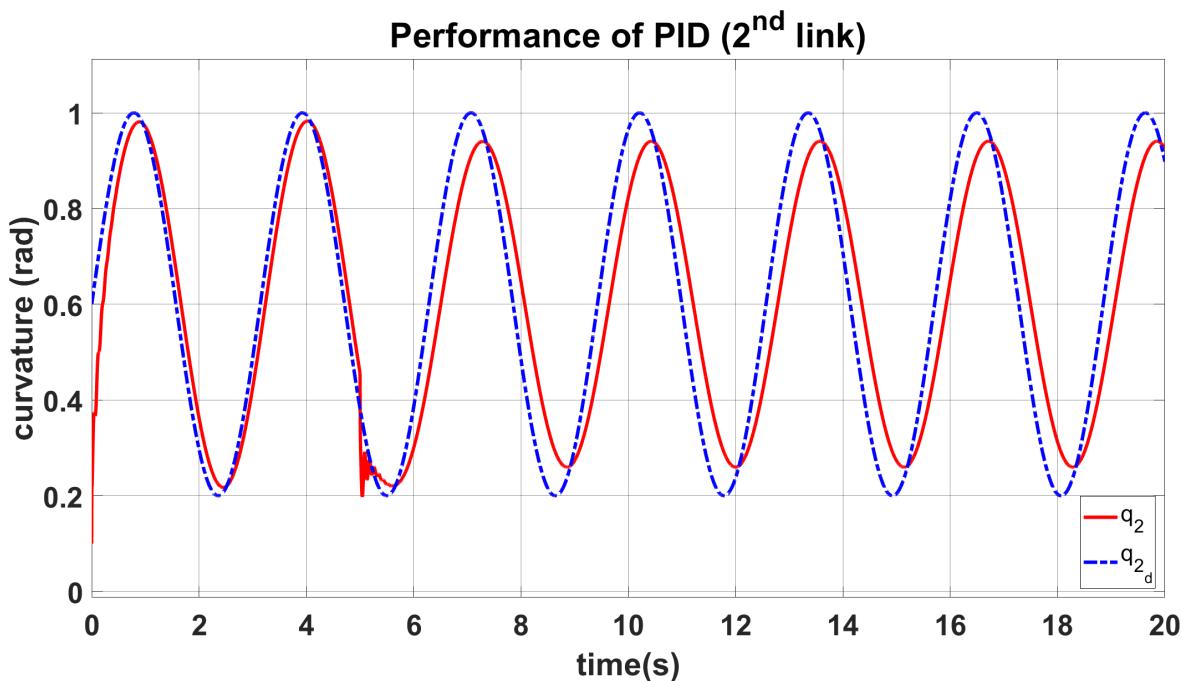
جدول ۳-۵: پارامترهای کنترل کننده PID

اندازه	پارامتر
0.5	$K_p$
7	$K_i$
0.001	$K_d$

شکل‌های ۹-۵ و ۱۰-۵ به ترتیب عملکرد کنترل کننده PID را در شرایط مطابق حالت‌های قبلی برای عملگرهای اول و دوم نشان می‌دهند.

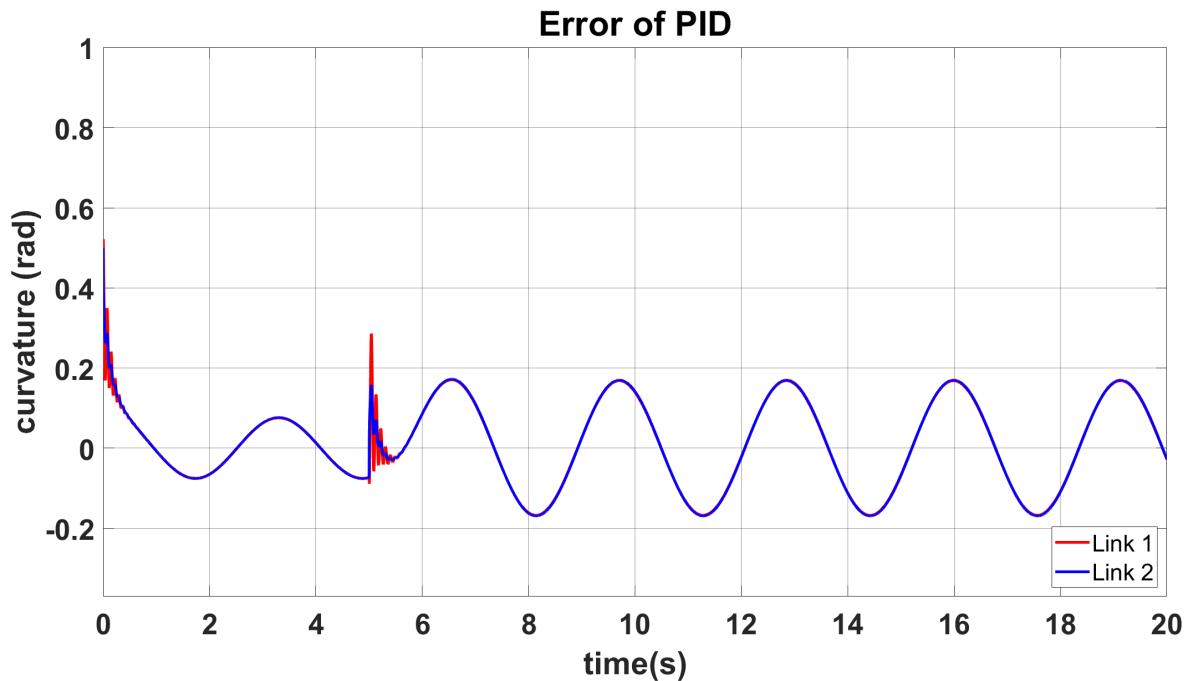


شکل ۹-۵: تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده PID در عملگر خمی اول

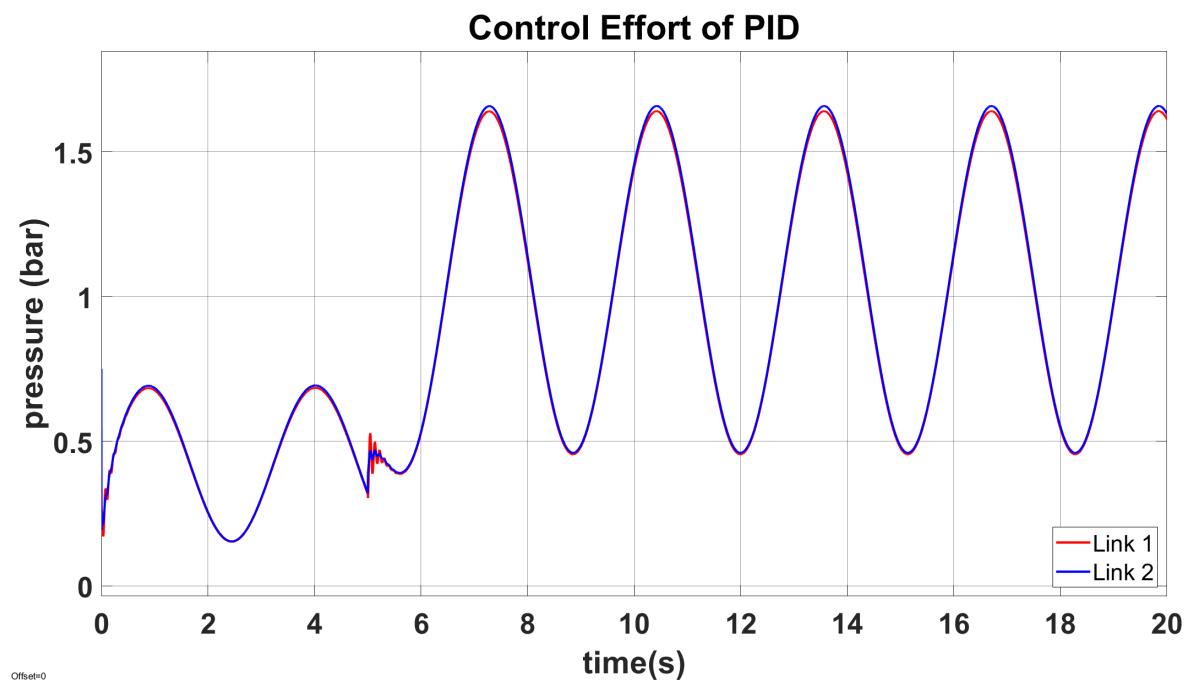


شکل ۱۰-۵: تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده PID در عملگر خمی دوم

خطای تعقیب خمی و ورودی تولید شده به ترتیب در شکل‌های ۱۱-۵ و ۱۲-۵ برای هر دو عملگر نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۱-۵: خطای تعقیب ورودی مرجع توسط کنترل کننده PID برای هر دو عملگر خمی



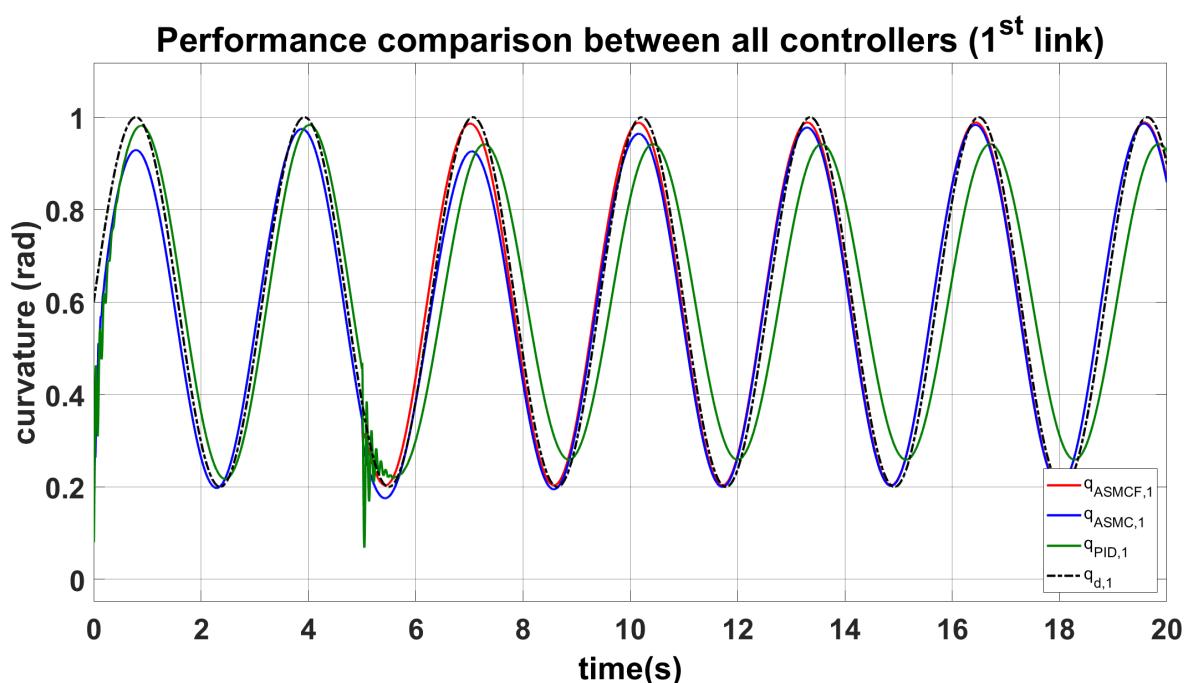
شکل ۱۲-۵: ورودی کنترلی اعمال شده توسط کنترل کننده PID به هر دو عملگر خمی

عملکرد کلی سیستم با توجه به این که سیگنال کنترلی تنها بر اساس خطای سیستم تعیین می‌شود، قابل قبول می‌باشد. از نواقصی که به این کنترل کننده نسبت داده می‌شود، عدم توانایی در تعقیب ورودی مرجع پس از

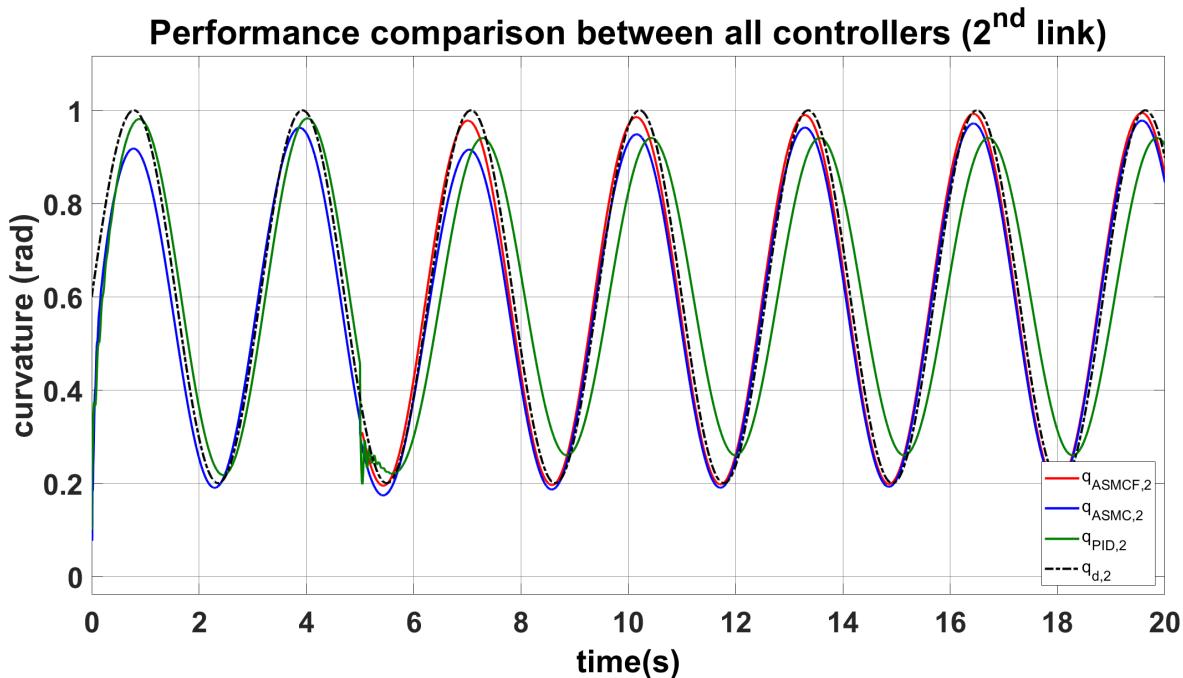
بروز عیب و در کل عدم تطبیق با تغییرات بروز داده در سیستم می‌باشد. همچنین ورودی کنترلی در لحظه بروز عیب نوسانات زیادی دارد که برای برخی از عملگرها مناسب و قابل ایجاد نیست.

## ۵-۵ مقایسه عملکرد کننده‌ها

برای بررسی بهتر کنترل کننده‌ها و نشان دادن برتری کنترل کننده طراحی شده، در شکل‌های ۱۳-۵ و ۱۴-۵ نحوه تعقیب ورودی مرجع توسط هر سه کنترل کننده در مقایسه با یکدیگر به ترتیب برای عملگرهای اول و دوم آورده شده است.



شکل ۱۳-۵: مقایسه عملکرد تعقیب ورودی مرجع توسط هر سه کنترل کننده در عملگر خمثی اول



شکل ۵-۱۴: مقایسه عملکرد تعقیب ورودی مرجع توسط هر سه کنترل کننده در عملگر خمی دوم

برای شفافسازی مقدار خطای بهبود یافته توسط کنترل کننده پیشنهادی، جدول ۴-۵ جذر میانگین مربعات خطای این کنترل کننده‌ها را نمایش می‌دهد.

جدول ۴-۵: ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطای کنترل کننده‌های معرفی شده

Controller	RMSE Link2	RMSE Link1
تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب	0.002413	0.002059
تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب	0.003062	0.002403
تناسبی-انتگرال گیر-مشتق گیر	0.01178	0.01166

فصل ششم

نتیجه‌گیری

در این فصل به جمع‌بندی مطالبی که در طول این پایان نامه مورد بررسی قرار گرفت، پرداخته می‌شود تا دید کلی نسبت به مواردی که بررسی شد، به دست آید. در ادامه نیز به ارائه‌ی پیشنهاداتی پرداخته می‌شود که می‌تواند روش پیش‌گرفته شده را در زمینه‌ی مدل‌سازی، برخورد با عیوبها و کنترل بهبود بخشد.

هدف از انجام این پژوهه، مدل‌سازی و کنترل ربات نرم در حضور نایقینی‌های مدل، تغییرات دینامیک جسم و بروز عیوب‌های احتمالی بود. هدف پژوهش‌هایی که پیش‌تر بر روی ربات‌ها و گریپرهای نرم انجام شده بود، ارائه‌ی روش‌های نوین ساخت، مدل‌سازی و در بهترین حالت بررسی گیرش استاتیک توسط آن‌ها بوده است. از آن جایی که ربات‌های نرم با الهام گرفتن از دست انسان و ماهیچه‌ها و عضلات طبیعی ساخته شده‌اند، لازم است برای بهبود عملکرد آن‌ها، بررسی دقیق‌تری نسبت به همتایی طبیعی آن داشته باشیم. نکته‌ای که در دست انسان توجه را بر می‌انگیرد، قابلیت موقعیت‌دهی اجسام توسط انگشتان است که می‌تواند بدون حرکت بازو و مج انجام پذیرد. به عبارت دیگر عملکرد دست صرفاً به گیرش استاتیک محدود نمی‌گردد و امکان تغییر موقعیت و جهت‌گیری جسم مورد نظر را نیز دارد. مطالعاتی که این موضوع را بررسی نموده‌اند، امکان بروز عیوب و برخی نایقینی‌ها را در نظر نگرفته‌اند که با توجه به نرم بودن ربات‌های مطرح شده و خواص فیزیکی آن‌ها بسیار شایع می‌باشد.

با توجه به موارد بیان شده، هدف پژوهه ارائه‌ی الگوریتم و طراحی کننده‌ای برای ربات نرم دو درجه آزادی به منظور موقعیت‌دهی جسم از طریق تنظیم موقعیت مجری‌نهایی و زاویه خمس عملگرها، در حضور عیوب معطوف گردید. در ابتدا برای به‌دست آوردن معادلات دینامیکی ربات نرم موجود، از معادل‌سازی هر عملگر خمی نرم با ربات صلب چهار درجه آزادی با فرض انحنای ثابت برای هر عملگر خمی استفاده کردیم. پس از به‌دست آمدن مدل دینامیکی، رویتگر عیوب برای تخمین میزان عیوب موجود در سیستم و استفاده از آن در ورودی کنترلی مطرح و پایداری آن بررسی شد. پس از آن کنترل‌کننده تطبیقی لغزشی با در نظر گرفتن تخمین عیوب برای سیستم طراحی شد. در آخر نتایج حاصل از تعقیب خمی مطلوب ورودی توسط سه کنترل‌کننده تطبیقی لغزشی با تخمین عیوب، تطبیقی لغزشی بدون تخمین عیوب و PID در شبیه‌سازی مقایسه شد. جدول ۱-۶ مجدوّر میانگین مربعات خطای هر کنترل‌کننده برای هر لینک آورده شده است.

جدول ۶-۱: ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطای کنترل کننده‌های معرفی شده

Controller	RMSE Link2	RMSE Link1
تطبیقی لغزشی با رویتگر عیب	0.002413	0.002059
تطبیقی لغزشی بدون رویتگر عیب	0.003062	0.002403
تناسبی-انتگرال گیر-مشتق گیر	0.01178	0.01166

با توجه به چالش‌ها و مشکلاتی که در طول تحقیقات به آن‌ها برخورد کردیم، به نکات زیر اشاره می‌شود:

- مقدار پایین ضرایب استهلاک سیستم سبب ناپایداری سیستم به ازای کوچک‌ترین اختشاش‌ها و تغییرات خواهد شد. از این رو استفاده از ماده‌ای که بتواند خاصیت استهلاک ربات را افزایش دهد، می‌تواند به عملکرد بهتر و افزایش مرز پایداری ربات کمک بسیاری کند.
- استفاده از فرض خمس با انحنای ثابت منجر به ساده‌سازی معادلات دینامیکی انگشت خمی می‌گردد از این رو خطای مدل پیش‌بینی شده افزایش می‌یابد. بدین ترتیب استفاده از سایر روش‌های مدل‌سازی که از این فرض استفاده نمی‌کنند و تخمین دقیق‌تری از دینامیک ربات را در اختیار قرار می‌دهند، می‌تواند سبب بهبود عملکرد سیستم شود.

برای کارهای آینده می‌توان عملگرها و ربات‌های نرمی را در نظر گرفت حرکت آن‌ها در یک صفحه محدود نمی‌شود و قابلیت حرکت در هر سه بعد را دارند. همچنین می‌توان با معرفی رویتگرهای عیب متفاوت، نیاز به محدود بودن عیب و مشتقات آن در اثبات پایداری رویتگر را از بین برد. از دیگر نقاط قابل بررسی در این پژوهش می‌توان به روش‌های موثرتر برای تشخیص زمان وقوع عیب به کمک فیلترهای متنوع و روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی اشاره نمود.

## مراجع و مراجع

- [1] Rad, C., Hancu, O. & Lapusan, C. Data-driven kinematic model of pneunets bending actuators for soft grasping tasks. *Actuators*. **11**, 58 (2022)
- [2] Rob Scharff soft robotics 3d printed hand: <https://www.dezeen.com/2015/10/26/rob-scharff-soft-robotics-3d-printed-hand-responds-to-human-grip/>. Accessed: 2024-2-16.
- [3] Amirhosein Alian, Mohammad Zareinejad, and H.A. Talebi. Curvature tracking of a two-segmented soft finger using an adaptive sliding-mode controller. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 28(1):50–59, 2022.
- [4] Daniel Bruder, Brent Gillespie, C David Remy, and Ram Vasudevan. Modeling and control of soft robots using the koopman operator and model predictive control. *arXiv preprint arXiv:1902.02827*, 2019.
- [5] Chien-Chern Cheah, Chao Liu, and Jean-Jacques E Slotine. Adaptive jacobian tracking control of robots with uncertainties in kinematic, dynamic and actuator models. *IEEE transactions on automatic control*, 51(6):1024–1029, 2006.
- [6] Cosimo Della Santina, Robert K Katzschmann, Antonio Biechi, and Daniela Rus. Dynamic control of soft robots interacting with the environment. In *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pages 46–53. IEEE, 2018.

- [7] Warren E Dixon, Ian D Walker, Darren M Dawson, and John P Hartranft. Fault detection for robot manipulators with parametric uncertainty: A prediction-error-based approach. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6):689–699, 2000.
- [8] Kelvin HL Heung, Raymond KY Tong, Alan TH Lau, and Zheng Li. Robotic glove with soft-elastic composite actuators for assisting activities of daily living. *Soft robotics*, 6(2):289–304, 2019.
- [9] Robert Katzschmann. *Building and controlling fluidically actuated soft robots : from open loop to model-based control*. PhD thesis, 01 2018.
- [10] Carmel Majidi. Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future. *Soft robotics*, 1(1):5–11, 2014.
- [11] Andrew D Marchese, Russ Tedrake, and Daniela Rus. Dynamics and trajectory optimization for a soft spatial fluidic elastomer manipulator. *The International Journal of Robotics Research*, 35(8):1000–1019, 2016.
- [12] Barbara Mazzolai, Laura Margheri, Matteo Cianchetti, Paolo Dario, and Cecilia Laschi. Soft-robotic arm inspired by the octopus: Ii. from artificial requirements to innovative technological solutions. *Bioinspiration & biomimetics*, 7(2):025005, 2012.
- [13] Michael L McIntyre, Warren E Dixon, Darren M Dawson, and Ian D Walker. Fault identification for robot manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(5):1028–1034, 2005.
- [14] Cagdas D Onal and Daniela Rus. Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot. *Bioinspiration & biomimetics*, 8(2):026003, 2013.

- 
- [15] Rolf Pfeifer, Max Lungarella, and Fumiya Iida. The challenges ahead for bio-inspired ‘soft’ robotics. *Communications of the ACM*, 55(11):76–87, 2012.
  - [16] Daniela Rus and Michael T Tolley. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553):467–475, 2015.
  - [17] SM Hadi Sadati, S Elnaz Naghibi, Ian D Walker, Kaspar Althoefer, and Thris hantha Nanayakkara. Control space reduction and real-time accurate modeling of continuum manipulators using ritz and ritz–galerkin methods. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(1):328–335, 2017.
  - [18] Jean-Jacques E Slotine and Weiping Li. On the adaptive control of robot manipulators. *The international journal of robotics research*, 6(3):49–59, 1987.
  - [19] Ning Sun, Dingkun Liang, Yiming Wu, Yiheng Chen, Yanding Qin, and Yongchun Fang. Adaptive control for pneumatic artificial muscle systems with parametric uncertainties and unidirectional input constraints. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(2):969–979, 2019.
  - [20] T TolleyMichael, F ShepherdRobert, C GallowayKevin, J WoodRobert, M WhitesidesGeorge, et al. A resilient, untethered soft robot. *Soft robotics*, 2014.
  - [21] Tao Wang, Yunce Zhang, Zheng Chen, and Shiqiang Zhu. Parameter identification and model-based nonlinear robust control of fluidic soft bending actuators. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 24(3):1346–1355, 2019.
  - [22] Tao Wang, Yunce Zhang, Yipeng Zhu, and Shiqiang Zhu. A computationally efficient dynamical model of fluidic soft actuators and its experimental verification. *Mechatronics*, 58:1–8, 2019.

- [23] Jianshu Zhou, Juan Yi, Xiaojiao Chen, Zixie Liu, and Zheng Wang. Bcl-13: A 13-dof soft robotic hand for dexterous grasping and in-hand manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4):3379–3386, 2018.

## Abstract

Soft robots are continuum robots that can be elastically deformed and reach their desired arrangement through uniform and soft deformations. In comparison with rigid robots, which occupying a lot of space, being hard, and limited range of motion are their general characteristic and limitations, Soft robots have lower weights and safer performance. Due to these advantages, this class of robots can be a suitable alternative to rigid robots in many fields, For example, in rehabilitation applications and human-robot interactions.

Although these robots have many benefits and desirable behaviors, having countless degrees of freedom and the difficulty of dynamic modeling has turned their control into a complex and challenging problem.

This project provides an effective solution to control the End-Effector positioning of soft robots by controlling the curvature of their actuators in the absence of a precise model. For this purpose, a two-degree-of-freedom soft robot with pneumatic bending actuators is considered. The modeling of this robot is done by paring it with a rigid four-degree-of-freedom robot with similar dynamic and kinematic behavior; Also, the assumption of constant curvature is considered in the modeling process. After obtaining the dynamics of the rigid robot, with the help of a suitable mapping between the joint variables of these two robots, the dynamics of the soft robot with two degrees of freedom is obtained.

Taking into account many uncertainties and the possibility of many faults, including the piercing and air leakage of bending actuators, the adaptive sliding mode controller along with the fault observer is used to control the bending angles of the soft robot actuators. Finally, we examine the performance of the soft robot in question controlled by the proposed controller in the application of input tracking with fault occurrence and compare it with other controllers, including the PID controller.

## **Abstract**

---

### **Keywords:**

Soft robot, Pneumatic bending actuator, Positioning control, Constant curvature, Adaptive sliding mode controller, Fault



# Amirkabir University of Technology

(Tehran Polytechnic)

Department of Electrical Engineering

BSc Thesis  
Control Engineering

Resilient position control of soft bending actuator in the  
presence of fault

By  
Sina Rabiee

Supervisor  
Dr. Iman Sharifi  
Prof. Heidar Ali Talebi

Jury  
Dr. MohammadAzam Khosravi  
September 2023