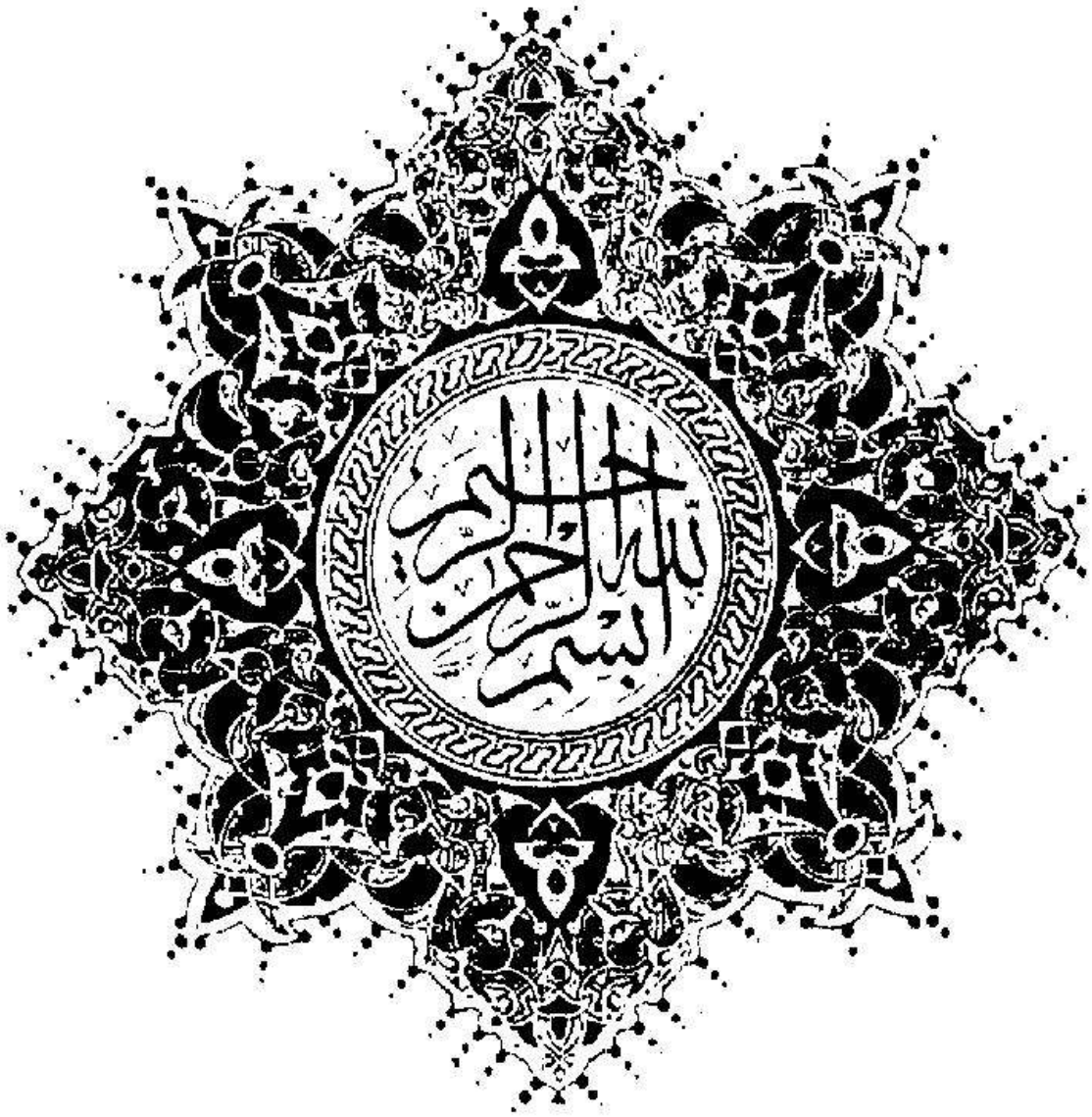
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک

طراحی کنترلر و رویتگر برای منیپولاتور ربات با لینک انعطاف پذیر

محقق: جواد عیسی وند

اساتید راهنما:

دکتر امین نیکوبین

بهمن ۱۳۸۹

فهرست

صفحه حقوقی

دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی مکانیک

طراحی کنترلر و رویتگر برای منیپولاتور ربات با لینک انعطاف پذیر

محقق: جواد عیسی وند

تأییدیه دفاعیه:

استاد راهنمای اول: **دکتر امین نیکوبین**

استاد داور داخلی:

استاد داور خارجی:

تقدیر و تشکر

در پایان این پروژه ساخت و تحقیقاتی که به نوبه خود اولین نمونه آزمایشگاهی کشور محسوب می شود وظیفه خود می دانم، تشکر و قدردانی رسمی خود را، از زحمات بی دریق و همه جانبه استاد عزیزم **جناب آقای دکتر امین نیکوبین** بابت تمامی راهنمایی ها، کمک ها و دلسوزی هایشان اعلام دارم.

در ادامه وظیفه خود می دانم تا از همکاری و زحمات دوستان عزیزم آقایان: **پیام ناظم زاده، امیر ذاکری، احسان پراورفکر، مصطفی عزیزی، محمد مهدی ذوالفقاریان، مجتبی اسداللهی،حسام الدین یعقوبی، صالح دمرچیلو، محمد مهدی خطیبی، سعیدسرخیل، پرهام عزیزی** و خانم ها: **سمانه عیسی وند، عاطفه حبیب اللهی،** کمال تشکر و قدر دانی را داشته باشم و نیز از همکاری مسئولین و پرسنل محترم **کارگاه های ماشین ابزار، اتومکانیک و جوشکاری** قدر دانی می نمایم. ضمن این که نقش جناب آقای **دکتر بیگلری** ریاست محترم دانشکده مهندسی مکانیک، در به نتیجه رسیدن این پروژه نباید فراموش شود. با آرزوی سلامتی و بهروزی برای تمامی عزیزان و در نهایت احترام به زحمات آنها، پایان نامه حاضر را به دلیل نقش انکار ناپذیر و تاثیر گذار، تقدیم می کنم به:

جناب آقای مهندس پیام ناظم زاده

خلاصه تحقیق

کاربرد روزافزون ربات ها در صنعت دنیا و نفوذ آنها در زندگی بشر، همگان را متقاعد ساخته که آینده بشر و پیشرفت علم و رسیدن به تولید انبوه و ارزان در صنایع مختلف در گرو پیشرفت علم رباتیک می باشد. از اینرو محققان زیادی در زمینه های مختلف این علم وارد شده اند. شاید واضح ترین و پر کاربرد ترین نوع ربات موجود در صنعت دنیا ربات های بازویی می باشند. این پایان نامه با هدف ساخت و کنترل دقیق نمونه آزمایشگاهی این دسته از ربات ها، هدف گذاری شد. این تیم تحقیقاتی با استخراج معادلات انواع ربات بازویی کار خود را شروع نمود و در ادامه با شناخت ربات های تحقیقاتی موجود در دنیا، ساخت یک ربات بازویی با لینک انعطاف پذیر را در دستور کار خود قرار داد. دلیل اصلی انتخاب این ربات را می توان این دانست که اولا این ربات به یک صورت مساله جهانی تبدیل شده است، که محققان توانایی روش های ارائه شده را روی این ربات آزمایش می کنند. ضمن اینکه تجربه ساخت این ربات در کشور وجود نداشت و تیم تحقیقاتی حاضر اولین نمونه ربات بازویی در کشور را ساختند.

در ادامه انواع کنترل های خطی، مدرن و پیشرفته (غیر خطی) مورد مطالعه قرار گرفت و در این بین روش کنترل غیر خطی گشتاور محاسباتی به دلیل توانایی فراوان و سهولت کاربرد انتخاب شد. به منظور اعمال این روش کنترلی به ربات ساخته شده، نیاز به استفاده از رویتگر حالت بود. در این میان رویتگر حالت مود لغزان به دلیل توانایی بسیار بالا مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه این پروژه به منظور افزایش دقت در کنترل پنجه ربات اثر انعطاف پذیری لینک توسط کرنش سنج به قانون کنترلی اضافه شد. در گام بعدی، به منظور حذف اثر اغتشاشات موجود در سیستم، رویتگر اغتشاش بر پایه معیار پایداری لیاپانوف طراحی شده و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی توانایی کنترلر و رویتگر حالت و رویتگر اغتشاش را در کنترل سیستم و تخمین حالت و نیز تخمین اغتشاش وارد شده بر سیستم را نمایش می دهد. در ادامه روش های کنترلی دیگری نیز برای این سیستم تست می شود که البته خارج از دامنه پیش فرض های این پایان نامه می باشد.

۱ فهرست

۱ فهرست ج

فهرست اشکال و جداول ط

۱ مقدّمه و تاریخچه تحقیق ۱

۱-۱شرح موضوع ۱
۱-۲مدلسازی ربات با لینک الاستیک ۱
۱-۳طراحی کنترلر برای ربات با لینک الاستیک ۲
۱-۴طراحی رویتگر حالت برای ربات با لینک الاستیک ۴
۱-۵طراحی رویتگر اغتشاش برای ربات با لینک الاستیک ۶
۱-۶معرفی پایان نامه ۷

۲ استخراج معادلات دینامیکی ربات بازویی ۸

۲-۱مقدمه ۸
۲-۲استخراج معادلات ربات با استفاده از معادله لاگرانژ ۹
۲-۲-۱ معادلات ربات با تک لینک صلب ۹
۲-۲-۲معادلات ربات با لینک انعطاف پذیر ۱۲
۲-۳ارائه معادلات استخراج شده و شبیه سازی ۱۵

۳ مباحث منتخب تئوری ۲۰

۳-۲رویتگر حالت ۲۱
۳-۲-۱ مقدمه ۲۱
۳-۲-۲سابقه رویتگر حالت و کاربردها ۲۱
۳-۲-۳رویت پذیری ۲۲
۳-۲-۴طراحی رویتگر غیر خطی حالت ۲۳
۳-۲-۵رویتگر حالت مود لغزان ۲۴
۳-۲-۶معادله رویتگر حالت مود لغزان ۲۴
۳-۲-۷ نتایج حاصل از شبیه سازی ۲۵

۳-۳ کنترلر ۲۵
۳-۳-۱ مقدمه ۲۵
۳-۴ رویتگر اغتشاش ۲۷
۳-۴-۱ سابقه رویتگر اغتشاش وکاربردها ۲۷
۳-۵ طراحی رویتگر غیر خطی اغتشاش برای منیپولاتور ها ۲۹
۳-۵-۱ استخراج معادلات ۲۹
۳-۵-۲ طراحی رویتگر ۳۰
۳-۵-۳ طراحی کنترلر ۳۳
۳-۵-۴ شبیه سازی و نتایج ۳۴
۳-۶ نتایج و جمع بندی نهایی حاصل از شبیه سازی ۳۹

۴ ساخت ربات با لینک انعطاف پذیر ۴۱

۴-۱ تاریخچه و معرفی ساخت ربات های مشابه ۴۱
۴-۲ ربات ساخته شده در این پروژه ۴۹
۴-۲-۱ درایور ۵۰
۴-۲-۲ کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال ۵۲
۴-۲-۳ انکودر ۵۳
۴-۳ سیستم ثبت اطلاعات خروجی کرنش سنج ۵۵
۴-۳-۱ مقدمه ۵۵
۴-۳-۲ شرح طرح ۵۶
۴-۳-۳ نحوه کار ۵۷
۴-۳-۴ رفع اشکالات پل وتستون و کالیبراسیون سیستم ۶۰
۴-۳-۵ نصب سنسور ۶۱
۴-۴ ربات نهایی ۶۲

۵ نتایج حاصل از تست و آزمایش ۶۷

۵-۱ مقدمه ۶۷
۵-۲ بدست آوردن مشخصات سیستم ۶۸
۵-۲-۱ مقدمه ۶۸
۵-۲-۲ ربات تک لینکی ۶۸

۵-۲-۳ اصطکاک ۷۰
۵-۲-۴ لقی ۷۴
۵-۲-۵ ثبت خروجی کرنش سنج ۷۸
۵-۲-۶ طراحی فیلتر پایین گذر ۷۹
۵-۳ رویتگر حالت مود لغزان ۸۳
۵-۳-۱ طراحی رویتگر حالت به منظور تخمین سرعت زاویه ای ۸۳
۵-۳-۲ تحلیل نتایج ۸۶
۵-۴ کنترلر ۸۶
۵-۴-۱ کنترلر گشتاور محاسباتی با معادلات صلب ۸۷
۵-۴-۲ کنترلر گشتاور محاسباتی با معادلات انعطاف پذیر ۸۹
۵-۴-۳ تحلیل نتایج ۹۴
۵-۵ رویتگر اغتشاش ۹۴
۵-۵-۱ رویتگر اغتشاش با معادلات لینک صلب ۹۴
۵-۵-۲ رویتگر اغتشاش با معادلات انعطاف پذیر ۱۰۰
۵-۵-۳ تحلیل نتایج ۱۰۴

۶ بحث و نتیجه گیری ۱۰۵

۶-۱ تحلیل نتایج ۱۰۵
۶-۲ نتیجه گیری نهایی ۱۰۶
۶-۳دستاورد های پروژه ۱۰۷
۶-۴ پیشنهادات ۱۰۸

۷ پیوست الف: درایور ۱۰۹

۸ پیوست ب: کارت مبدل ۱۱۹

۹ پیوست پ: کد نویسی استخراج معادلات ۱۳۱

۱۰ پیوست ت: کد نویسی در محیط درایور ۱۳۳

۱۱ مراجع ۱۳۷

فهرست اشکال

اشکال فصل دوم

شکل ۲-۱ مدل ساده از ربات صلب ۱۰
شکل ۲-۲ نمایش شماتیک از لینک انعطاف پذیر ۱۲
شکل ۲-۳ موقعیت زاویه ای لینک انعطاف پذیر با ضرایب انعطاف پذیری مختلف ۱۶
شکل ۲-۴ سرعت زاویه ای لینک انعطاف پذیر با ضرایب انعطاف پذیری مختلف ۱۶
شکل ۲-۵ نمایش مود اول ارتعاشاتی ۱۷
شکل ۲-۶ نمایش مود دوم ارتعاشاتی ۱۷
شکل ۲-۷ نمایش سرعت مود اول ارتعاشاتی ۱۸
شکل ۲-۸ نمایش سرعت مود اول ارتعاشاتی ۱۸
شکل ۲-۹ نمودار موقعیت زاویه ای لینک صلب ۱۹
شکل ۲-۱۰ نمودار سرعت زاویه ای لینک صلب ۱۹

اشکال فصل سوم

شکل ۳-۱ بلوک دیاگرام مدار کنترلی سیستم ۳۴
شکل ۳-۲ موقعیت لینک اول با رویتگر و بدون رویتگر (حالت اول) ۳۵
شکل ۳-۳ موقعیت لینک دوم با رویتگر و بدون رویتگر (حالت اول) ۳۶
شکل ۳-۴ مقایسه خطای ماندگار سیستم با رویتگر و بدون رویتگر لینک اول ۳۶
شکل ۳-۵ مقایسه خطای ماندگار سیستم با رویتگر و بدون رویتگر لینک دوم ۳۶
شکل ۳-۶ موقعیت لینک اول با رویتگر و بدون رویتگر (حالت دوم) ۳۷
شکل ۳-۷ موقعیت لینک دوم با رویتگر و بدون رویتگر (حالت دوم) ۳۷
شکل ۳-۸ اغتشاش واقعی و اغتشاش تخمین زده شده برای لینک اول ۳۸
شکل ۳-۹ اغتشاش واقعی و اغتشاش تخمین زده شده برای لینک دوم ۳۸
شکل ۳-۱۰ اعمال اغتشاش نویز سفید به مجموعه ۳۹
شکل ۳-۱۱ بلوک دیاگرام کنترلی مورد استفاده در شبیه سازی ۴۰

اشکال فصل چهارم

شکل ۴-۱ ربات دانشگاه هنگ کنگ سال ۲۰۰۰ ۴۲
شکل ۴-۲ ربات مربوط به دانشگاه میشیگان و مرکز تحقیقات ملی ساندیا ۴۳
شکل ۴-۳ ربات دانشگاه اینها کره جنوبی سال۲۰۰۳ ۴۴
شکل ۴-۴ ربات ساخته شده در دانشگاه کلمسون امریکا سال۲۰۰۳ ۴۴
شکل ۴-۵ ربات تک لینکی انعطاف پذیر ساخته شده در دانشگاه شهر هنگ کنگ سال۲۰۰۴ ۴۵
شکل ۴-۶ ربات تک لینکی انعطاف پذیر ساخته شده در دانشگاه نیوبرانسکو کانادا ۴۶
شکل ۴-۷ ربات تک لینکی انعطاف پدیر ساخته شده در دانشگاه دل پایس واسکو شهر بیلبلئو اسپانیا ۴۶
شکل ۴-۸ مدار بندی ربات دانشگاه ویکتوریا کانادا ساخته شده در سال ۲۰۰۸میلادی ۴۷
شکل ۴-۹ درایور سری ۹۴۰ لنز ۵۰
شکل ۴-۱۰ مدار کنترلی درایور ۹۴۰ لنز ۵۱
شکل ۴-۱۱ تجهیزات کارت مبدل ۵۳
شکل ۴-۱۲ الگوریتم نصب و راه اندازی کارت مبدل سیگنال ۵۳
شکل ۴-۱۳ نمایش سنسور دور سنج ۵۴

شکل ۴-۱۴ نحوه عملکرد و نوع خروجی سنسور دور سنج ۵۵
شکل ۴-۱۵ بلوک دیاگرام ثبت اطلاعات خروجی سنسور دور سنج ۵۸
شکل ۴-۱۶ ساختار حسگرهای کرنش سنج ۵۸
شکل ۴-۱۷ مدار پل وتستون جهت محاسبه مقاومت حسگر کرنش ۵۸
شکل ۴-۱۸ پل وتستون ۵۹
شکل ۴-۱۹ تقویت کننده ابزار دقیق ۶۰
شکل ۴-۲۰ استفاده از یک پتانسیومتر بزرگ جهت کالیبراسیون مدار ۶۱
شکل ۴-۲۱ شماتیکی از نحوه قرارگیری قطعات ۶۴
شکل ۴-۲۲ نمایش قطعات ۶۵
شکل ۴-۲۳ تمایش ربات ساخته شده ۶۵
شکل ۴-۲۴ نمایش ربات بر روی میز کار ۶۶

اشکال فصل پنجم

شکل۵-۱ نمودار گشتاور اعمالی ۶۹
شکل۵-۲ نمودار موقعیت زاویه ای حاصل از شبیه سازی ۶۹
شکل۵-۳ نمودار گشتاور اعمالی ورودی و زاویه خروجی شفت انکودر ساعتگرد ۷۰
شکل۵-۴ نمودار گشتاور اعمالی ورودی و زاویه خروجی شفت انکودر پادساعتگرد ۷۱
شکل۵-۵ بلوک دیاگرام بهینه سازی به منظور استخراج مقادیر نهایی سیستم ۷۲
شکل۵-۶ نمودار گشتاور اعمالی ۷۳
شکل۵-۷ نمودار موقعیت زاویه ای با پارامترهای اصلاح شده ۷۳
شکل۵-۸ نمودار نمایش اثر لقی و اصطکاک در موقعیت زاویه ای سیستم با گشتاور ورودی هارمونیک ۷۴
شکل۵-۹ نمودار گشتاور اعمالی ۷۵
شکل۵-۱۰ نمودار موقعیت زاویه ای مقادیر نهایی مشخصات سیستم ۷۵
شکل۵-۱۱ نمودار سرعت زاویه ای مقادیر نهایی مشخصات سیستم ۷۶
شکل۵-۱۲ نمودار گشتاور ورودی هارمونیک ۷۷
شکل۵-۱۳ نمودار موقعیت زاویه ای ربات ۷۷
شکل۵-۱۴ نمودار سرعت زاویه ای ربات ۷۸
شکل۵-۱۵ نمودار خروجی سنسور کرنش سنج ۷۹
شکل۵-۱۶ فیلتر مورد استفاده و نحوه فراخوانی آن از کتابخانه سیمولینک ۸۰
شکل۵-۱۷ نمایش اساس کار فیلتر پایین گذر ۸۰
شکل۵-۱۸ اعمال گشتاور به سیستم و ثبت ارتعاشات لینک تست سیستم ثبت کرنش سنج ۸۱
شکل ۵-۱۹ نمودار مود اول ارتعاشاتی بدست آمده از شبیه سازی برای اعمال گشتاور مشابه ۸۱
شکل ۵-۲۰ نمودار مود اول ارتعاشاتی بدست آمده از شبیه سازی برای اعمال گشتاور مشابه ۸۲
شکل ۵-۲۱بلوک دیاگرام شبیه سازی در محیط نرم افزار برای رویتگر حالت ۸۳
شکل ۵-۲۲ مقایسه نمودار سرعت زاویه ای شبیه سازی و رویتگر حالت (تئوری) ۸۴
شکل۵-۲۳ مقایسه نمودار موقعیت زاویه ای تخمین زده شده و شبیه سازی(آزمایشگاهی) ۸۵
شکل۵-۲۴ مقایسه نمودار سرعت زاویه ای تخمین زده شده و شبیه سازی عددی(آزمایشگاهی) ۸۵
شکل ۵-۲۵ بلوک دیاگرام کنترلی در محیط نرم افزار متلب مورد استفاده در تست آزمایشگاهی ۸۶
شکل ۵-۲۶ نمودار موقعیت زاویه ای اعمال کنترلر گشتاور محاسباتی(تئوری) ۸۷
شکل۵-۲۷ نمودار موقعیت زاویه ای اعمال کنترلر گشتاور محاسباتی (آزمایشگاهی) ۸۷

شکل ۵-۲۸ نمودار سرعت زاویه ای اعمال کنترلر گشتاور محاسباتی(تئوری) ۸۸
شکل۵-۲۹ نمودار سرعت زاویه ای اعمال کنترلر گشتاور محاسباتی(آزمایشگاهی) ۸۸
شکل ۵-۳۰ نمودار موقعیت زاویه لینک برای کنترلر گشتاور محاسباتی با اثر انعطاف پذیری(تئوری) ۸۹
شکل۵-۳۱ نمودار موقعیت زاویه لینک برای کنترلر گشتاور محاسباتی با فیدبک کرنش سنج (آزمایشگاهی) ۹۰
شکل ۵-۳۲ نمودار سرعت زاویه لینک برای کنترلر گشتاور محاسباتی با فیدبک اثر انعطاف پذیری(تئوری) ۹۱
شکل۵-۳۳ نمودار سرعت زاویه لینک برای کنترلر گشتاور محاسباتی با فیدبک کرنش سنج (آزمایشگاهی) ۹۱
شکل ۵-۳۴ نمودار خروجی کرنش سنج برای کنترلر گشتاور محاسباتی با فیدبک اثر انعطاف پذیری(تئوری) ۹۲
شکل۵-۳۵ نمودار خروجی کرنش سنج برای کنترلر گشتاور محاسباتی با فیدبک کرنش سنج (آزمایشگاهی) ۹۲
شکل ۵-۳۶ نمودار گشتاور اعمالی به سیستم برای کنترلر گشتاور محاسباتی با فیدبک اثر انعطاف پذیری ۹۳
شکل۵-۳۷ نمودار گشتاور اعمالی به سیستم برای کنترلر گشتاور محاسباتی با فیدبک کرنش سنج ۹۳
شکل۵-۳۸ اغتشاش تخمین زده شدهتوسط رویتگر برای کنترلر گشتاور محاسباتی با فیدبک کرنش سنج ۹۴
شکل۵-۳۹ نمودار موقعیت زاویه ای لینک (آزمایشگاهی) ۹۵
شکل۵-۴۰ نمودار سرعت زاویه ای لینک (آزمایشگاهی) ۹۵
شکل۵-۴۱ نمودار اغتشاش تخمین زده شده توسط رویتگر (آزمایشگاهی) ۹۶
شکل ۵-۴۳ نمودار موقعیت زاویه ای لینک(تئوری) ۹۶
شکل۵-۴۳ نمودار موقعیت زاویه ای لینک (آزمایشگاهی) ۹۶
شکل ۵-۴۴ نمودار سرعت زاویه ای لینک(تئوری) ۹۸
شکل۵-۴۵ نمودار سرعت زاویه ای لینک (آزمایشگاهی) ۹۸
شکل ۵-۴۶ نمودار اغتشاش تخمین زده شده توسط رویتگر(تئوری) ۹۹
شکل۵-۴۷ نمودار اغتشاش تخمین زده شده توسط رویتگر (آزمایشگاهی) ۹۹
شکل ۵-۴۸ نمودار موقعیت زاویه ای لینک (تئوری) ۱۰۰
شکل۵-۴۹ نمودار موقعیت زاویه ای لینک (آزمایشگاهی) ۱۰۱
شکل ۵-۵۰ نمودار سرعت زاویه ای لینک(تئوری) ۱۰۱
شکل۵-۵۱ نمودار سرعت زاویه ای لینک (آزمایشگاهی) ۱۰۲
شکل۵-۵۲ نمودار خروجی کرنش سنج (آزمایشگاهی) ۱۰۲
شکل۵-۵۳ نمودار اغتشاش تخمین زده شده توسط رویتگر (آزمایشگاهی) ۱۰۳
شکل۵-۵۴ نمودار گشتاور اعمالی به سیستم (آزمایشگاهی) ۱۰۳

فهرست جداول

جدول۳-۱ مشخصات فیزیکی سیستم ۳۶
جدول۳-۲ضرایب مربوط به کنترلر ۴۰
جدول۴-۱مشخصات ربات دانشگاه گلاسکو ۴۳
جدول۴-۲مشخصات موتورهای استفاده شده در ربات دانشگاه واشنگتون امریکا ۵۰
جدول۴-۳مشخصات کامل تقویت کننده های ربات دانشگاه واشنگتون امریکا ۵۱
جدول۴-۴لیست قطعات مورد استفاده در ربات ساخته شده ۵۱
جدول۵-۱ مشخصات سیستم برای لینک مورد آزمایش ۷۳
جدول۵-۲ معرفی میزان پارامتر لقی و اصطکاک ۷۵

فصل اول

مقدمه و تاریخچه تحقیق

۱ مقدّمه و تاریخچه تحقیق

۱-۱ شرح موضوع

ویژگی هایی همچون عمل در سرعت های بالا، داشتن نسبت بالای بار قابل حمل به وزن ربات و مصرف انرژی کمتر، سبب شده که استفاده از ربات های الاستیک به خصوص در زمینه های فضایی نسبت به ربات های صلب بیشتر شود. هر چند دو مشکل اساسی در ارتباط با ربات های الاستیک وجود دارد: اولا آنالیز سینماتیک و دینامیک ربات الاستیک بسیار مشکل بوده و این به خاطر این می باشد که مدلسازی دقیق مودهای ارتعاشی تقریبا غیرممکن است، بنابراین بخش سینماتیکی و دینامیکی غیردقیق خواهد بود. ثانیا کوپلینگ میان حرکت غیرخطی بخش صلب و جا به جایی خطی بخش الاستیک، دینامیک منیپولاتور الاستیک را به صورت یک سیستم غیرخطی چند ورودی ـ چند خروجی تبدیل کرده است، که این باعث ارتعاش ذاتی سیستم می شود. به این ترتیب ویژگی هایی همچون غیرمینیمم فاز بودن تابع تبدیل سیستم که شامل صفر ناپایدار و قطب مختلط می شود و عدم قطعیت های غیرساختاری به خاطر حذف مودهای فرکانس بالا و ترم های غیرخطی سبب می شود، که موقعیت دهی دقیق پنجه به راحتی امکان پذیر نبوده و طراحی کنترلر، برای این نوع ربات ها به یکی از کارهای چالش بر انگیز تبدیل شود. در این میان علاوه بر کنترلر، مساله اندازه گیری متغیرهای مورد نیاز کنترلر نیز مشکلات خاص خود را دارد. در واقع اطلاعات دقیق از

متغیرهای حالت برای الگوریتم های کنترلی پیشرفته برای ربات با لینک های الاستیک مورد نیاز است. اگرچه اندازه گیری محل و سرعت مفاصل و مودهای الاستیک ربات ها با استفاده از شفت انکودرها، تاکومترها و استرین گیج ها امکان پذیر می باشد، لیکن اندازه گیری نرخ تغییر مودهای الاستیک براحتی و دقت امکان پذیر نمی باشد. در ضمن ثبت خروجی استرین گیج یا همان کرنش سنج ها نیاز به سیستم های پیشرفته دارد. یک روش، انتگرال گیری از خروجی شتاب سنج که در طول تیر نصب می شود، بوده یا استفاده از مشتق گیری آنالوگ از متغیرهای خیز می باشد. اولین روش به خاطر توجیهات اقتصادی و روش دوم به خاطر مساله نویز قابل استفاده نمی باشند. بنابراین نیاز به طراحی رویتگر حالت می باشد.

به منظور مشخص تر شدن بحث، سابقه موضوع را در چهار بخش بررسی می شود. در بخش اول روش های به کار گرفته برای مدلسازی ربات های الاستیک را مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم کنترلرهای به کار گرفته بر روی ربات های الاستیک بررسی شده است. در بخش سوم و چهارم کارهایی که در زمینه طراحی رویتگرهای حالت و اغتشاش برای ربات های الاستیک انجام شده است مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۲ مدلسازی ربات با لینک الاستیک

برای سیستم های الاستیک، سه روش معمول برای حل دینامیک سیستم وجود دارد. اولین روش حل معادله دیفرانسیل پاره ای برای حل ریاضی مساله می باشد (۱). اگرچه این روش می تواند یک بیان دقیق از سیستم را نشان بدهد، اما فهم فیزیکی این روش مشکل و پیچیده می باشد. دومین روش استفاده از مدل جرم و فنر می باشد. در این روش کل سیستم به قسمت های مجزا تقسیم شده که مدل جرم و فنر، یک مدل ساده برای هر قسمت بیانگر اینرسی و سختی موضعی می باشد (۲) (۳). به این منظور مدلی که نه تنها این که ساده بوده بلکه بتواند با دقت خوبی سیستم فیزیکی را نمایش دهد، مورد نیاز می باشد. سومین روش از مدل بسط مودال، که مدل بسط تابع مشخصه نامیده می شود، استفاده می کند. این روش توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. حل این مدل براساس مجموع حاصل ضرب تابع حالت و تابع زمان می باشد. تابع حالت می تواند به عنوان مود حالت یا تابع مشخصه نیز نام برده شود.

روش مودهای فرضی و روش المان محدود هر دو برای بدست آوردن مدل بسط مودال به کار گرفته می شوند. در روش مودهای فرضی، شکل مودها برای تمام سیستم براساس شرایط مرزی به کار گرفته می شوند (۴) . در روش المان محدود، در ابتدا سیستم به المان های کوچکی که دارای تابع مشخصه و مشخصات گره ای مربوط به خود هستند، مجزا می شود (۵). از این جهت این روش برای

سیستم هایی که دارای ویژگی های سطح مقطع و موادی ناهموار هستند، مناسب می باشد. به طور کلی روش های مودهای فرضی و المان محدود با روش لاگرانژ و اصل همیلتون که هر دو از اصل انرژی برای استخراج معادلات حرکت سیستم استفاده می کنند، آمیخته می شوند. در ادامه به بررسی کارهای انجام شده در مدلسازی ربات الاستیک پرداخته می شود.

براساس روش نیوتن_اویلر، بویر و کویفت معادلات دینامیک ربات با چند لینک الاستیک را استخراج کردند (۶). توخی و همکارانش براساس روش المان محدود معادلات دینامیکی ربات با یک لینک الاستیک را استخراج کرده و به منظور تایید مدل دینامیکی، فرکانس های بدست آمده را با مقدارتجربی مقایسه کردند (۷). در زمینه مدلسازی ربات الاستیک با استفاده از روش مودهای فرضی کارهای زیادی انجام شده که در این روش حالات مختلفی برای انتخاب شرایط مرزی و تابع مشخصه وجود دارد. وانگ و ویدیاساگار و همچنین مارتین و همکارانش با استفاده از روش لاگرانژ و مودهای فرضی (۸)، بوک با استفاده از ماتریس معادله های دینامیکی ربات با یک لینک الاستیک را بدست آوردند (۹). روش بازگشتی برای استخراج معادلات ربات با چند لینک الاستیک ارائه کرد (۱۰). چن با استفاده از روش مودهای فرضی و در نظر گرفتن تیر اویلر _ برنولی، مدل دینامیکی خطی شده را برای ربات الاستیک با حرکت صفحه ای که می تواند تعداد لینک های اختیاری داشته باشد، را استخراج کرد (۱۱).

۱-۳ طراحی کنترلر برای ربات با لینک الاستیک

یکی از مشکلات در کنترل ربات های الاستیک، کم بودن تعداد ورودی های کنترلی نسبت به تعداد متغیرهای خروجی است. در سال های اخیر روش های مختلف به منظور طراحی کنترلر برای ربات الاستیک ارائه شده که شامل کنترل خطی، تکنیک های حوزه فرکانسی، کنترل تطبیقی، روش اختلالات منفرد، کنترل مقاوم و غیره می شود.

تعداد اندکی از محققین عملکرد کنترل مفاصل ربات الاستیک را بدون در نظر گرفتن اثر الاستیک بررسی کرده اند (۱۲). حرکت کنترلرهای پیشخور نیز توسط افراد زیادی به کار برده شده است (۱۳). از آن جا که ایده اصلی کنترلر حذف همه یا بخشی از دینامیک ربات می باشد، عملکرد کنترلر کاملا به دقت مدل دینامیکی بستگی دارد. فایفر و همکارانش روش کنترل گشتاور محاسباتی را که شامل ترم پیشخور با ترم تصحیح خیز استاتیکی می شد، برای کنترل حرکت مفاصل و کنترل پسخور را برای حرکت الاستیک باقیمانده به کار بردند (۱۴). برای کنترل ربات الاستیک استفاده LQG و LQR بعضی از محققین از روش های کنترل بهینه کرده اند. هرچند این کنترلرها عملکرد مطلوبی را برای ربات با چند لینک لاستیک که دینامیک و اشمیتز روش LQR غیرخطی قابل

توجهی دارند را تضمین نمی کنند (۱۵). هستینگ روش LQG را برای کنترل پنجه ربات تک لینک الاستیک به کار گرفتند (۱۶). هرچند تمایل برای کنترل پنجه موجب جستجوی بیشتری در این زمینه شده است ولی سه مشکل اساسی برای رسیدن به عملکرد خوب وجود دارد. این مشکل به علت ویژگی غیرمینیمم فاز بودن تابع تبدیل سیستم هنگامی که خروجی سیستم پنجه می باشد، بوده که تابع تبدیل دارای صفر ناپایدار می باشد. دومین مشکل وجود قطب های مختلف در این تابع تبدیل بوده که باعث ارتعاشات لینک می شود. سومین مشکل وجود عدم قطعیت ساختار نیافته به علت در نظر نگرفتن مودهای الاستیک فرکانس بالا می باشد. به علت وجود این مشکلات کارهای انجام شده در کنترل ربات الاستیک، مساله کنترل را به دو قسمت تقسیم کرده اند: ابتدا ردیابی زوایای مفاصل که تابع تبدیل آن مینیمم فاز می باشد و سپس کاهش ارتعاشات لینک الاستیک. به طور آشکار یک مساله سبک سنگینی میان این دو قسمت وجود دارد. اتگزبریا و همکارانش روش اختلالات منفرد را برای کنترل ربات های الاستیک به کار گرفتند (۱۷). در این روش، دینامیک سیستم به دو بخش تقسیم شده است. زیرسیستم کند که بر پایه حرکت مفاصل بوده و زیرسیستم تند که در رابطه با ارتعاشات الاستیکی می باشد. آن ها دو کنترلر برای کنترل این دو زیرسیستم طراحی کردند.

به عنوان یکی از روش های قوی در ردیابی سیستم های غیرخطی نادقیق، کنترل مود لغزان به طور وسیع در کنترل ربات ها به کار گرفته شده است (۱۸). در حقیقت کنترل مود لغزان به خاطر سادگی و مقاوم بودنش برای سیستم های پیچیده مانند ربات های الاستیک مناسب است.

ربات الاستیک n لینکی ویلسون و همکارانش، که به دو بخش مفصل و لینک تقسیم شده است، روش کنترلی مود لغزان افزوده را برای کنترل مقاوم به صورت زمان واقعی ارائه کرد (۱۹). برای طراحی کنترلر ربات، به سطح لغزش برای هر زیرسیستم به طوری مشخص شده است که پایداری جانبی و کلی را تضمین کند. هر سطح لغزش شامل جابه جایی زاویه ای، سرعت زاویه ای و مودهای الاستیک می شود. شتاب بخش الاستیک در طراحی کنترلر به عنوان اغتشاش در نظر گرفته شده است و این مزیت این کنترلر بوده که نیازی به معادلات دقیق بخش الاستیک نمی باشد .مزیت دیگر کنترلر ارائه شده این می باشد که هر مفصل به طور مجزا کنترل می شود. ویلسون و همکارانش کنترلر مود باشد، از ماتریس های که OFSMC لغزان فیدبک خروجی را برای ربات تک لینک الاستیک به کار گرفتند. آن ها کنترلر شامل دو کانال مجزا بوده و علاوه بر کنترل زاویه، ارتعاشات الاستیک را نیز میرا می کند، با کنترلر مقایسه کرده و از طریق تجربی برتری کنترلر ارائه شده را نشان دادند (۲۰). PID طراحی مود لغزان به شیوه متداول در حوزه زمان به علت مودهای

رزونانسی بی نهایت بازوی الاستیک که در اثر سویچینگ ورودی کنترلی تحریک می شوند، به سختی قابل پیاده سازی می باشد. بنابراین به منظور غلبه بر مساله ارتعاشات لینک، یانگ و ازنوگر روش مود لغزان بهینه بر پایه در سطح (cut off) قالب فرکانسی را به کار گرفتند (۲۱). با قرار دادن یک فیلتر با فرکانس قطع به طور مؤثری می توان ارتعاشات الاستیک غالب را میرا کرد. تنها FSOSM سویچینگ کنترلر محدودیت این روش پاسخ حالت گذرا می باشد که ممکن است به علت شیب سویچینگ کم کاهش یابد و خطای حالت ماندگار ممکن است نسبتا بزرگ شود.

کنترلر مود لغزان پایانه ای که از جاذب های پایانه ای استفاده می کند، توسط یو توسعه یافت (۲۲). این روش شیب سویچینگ معادل را با کاهش خطای ردیابی افزایش می دهد. خطای حالت TSM شیب زیاد سویچینگ معادل سرعت همگرایی را تسریع می کند و همچنین خطای حالت ماندگار را کاهش می دهد (۲۳). جیان و جونکاو دو روش TSM و FSOSM به صورت دو روش مکمل و بصورت، FSOSM کار بردند (۲۴). هنگامی که خطای ردیابی زیاد باشد، کنترلر که TSM بنابراین از تزریق انرژی خیلی زیاد در ربات الاستیک جلوگیری می کند. به علاوه کنترلر دارای شیب سویچینگ زیاد می باشد و همگرایی را هنگامی که خطای ردیابی نزدیک صفر می باشد، بهبود می بخشد. بدین ترتیب با ترکیب این دو کنترلر علاوه بر کاهش ارتعاشات مودهای الاستیک می توان به همگرایی سریعتر و خطای حالت ماندگار کمتر دست یافت.

۱-۴ طراحی رویتگر حالت برای ربات با لینک الاستیک

بعضی از کنترلرهای طراحی شده برای ربات های الاستیک نیاز به مکان پنجه دارند. برای ربات صلب به کمک شفت اینکودر می توان محل انتهای ربات را تعیین کرد ولی برای ربات الاستیک مساله مشکل تر می باشد. سیستم های اندازه گیری نوری که شامل لیزرهای نیمه هادی می باشد، برای موقعیت یابی پنجه به کار رفته است. (PSD) آشکارسازهای حساس به موقعیت سیستم های بینایی نیز برای محاسبه خیز بازو اگر چه به کار رفته است ولی به علت حجم محاسبات بالا دارای مشکلاتی در کاربردهای زمان واقعی می باشند. بعضی دیگر از کنترلرهای طراحی شده نیاز به سرعت و شتاب پنجه دارند که شتاب پنجه با شتاب سنج بدست می آید. محاسبه سرعت پنجه به راحتی امکان پذیر نبوده و به علت افزایش وزن پنجه بازوی الاستیک که منجر به ارتعاشات بازو می شود. نمی توان از سخت افزار برای محاسبه سرعت پنجه استفاده کرد. استفاده از تفاضل محدود از سیگنال مکان خروجی از انکودر و سنسور خیز نیز باعث افزایش نویز می شود. با توجه به دلایل بالا باید از یک رویتگر استفاده شود. لی و چن با استفاده از فیلتر کالمن، رویتگر خطی برای اندازه گیری خیز در انتهای بازوی ربات الاستیک ارائه کرده اند. مدل دینامیکی بازوی الاستیک براساس اصل همیلتون

بدست آمده است (۲۵). وانگ و ویدیاساگار برای تک لینک الاستیک که به انتهای ربات صلب با سه درجه آزادی متصل شده، کنترلر و رویتگر غیرخطی طراحی کرده اند و نشان دادند که ترکیب رویتگر با کنترلر روی سیستم، سیستم را پایدار ورودی_خروجی می کند (۲۶). نیلسون و پانزیئِری روشی متفاوت برای ردیابی مسیر پنجه برای را برای (LQG) یک بازوی الاستیک ارائه کرده اند. آن ها در ابتدا رفتار کنترلر فیدبک حالت بهینه پایدارسازی و تعدیل دینامیک داخلی ربات و دکوپله کردن لینک ها از هم نشان دادند (۲۷). برای ربات با دو درجه آزادی که لینک آخر الاستیک است، استفاده کرده اند آزمایش از ربات خیزهای الاستیک لینک توسط سنسورهای نوری از چند محل مختلف با نرخ نمونه برداری حدودی قابل اندازه گیری است. اگر چه این سنسور دارای دقت کافی در سرعت های پایین است ولی در حرکت های سریع نویز تولید می کند. به این منظور پانزیری و اولیوی برای ربات با دو لینک الاستیک فیلتر کالمن طراحی کرده اند (۲۸). جیانجیل و چانگ کوگ یک روش کنترلی برای ربات با بازوی الاستیک طراحی کرده اند که از تخمین پارامترها استفاده می کند. در تخمین پارامترها، سیستم تخمین مقادیر خروجی توسط الگوریتم کمترین مربع بازگشتی بدست می آید (۲۹). اِرلیک و لو، یک رویتگر سرعت مفصل برای منیپولاتور با پارامترهای دینامیکی مجهول ارائه کرده اند. رویتگر پیشنهادی یک تخمین سرعت که توسط کنترلر تطبیقی برای ردیابی مسیرحرکت استفاده می شود، ارائه می کند. رویتگر تطبیقی ارائه شده از دو راه رویتگرهای تطبیقی دیگر را بهبود بخشیده است؛ اولا رویتگر پیشنهادی از ساختار متغیر استفاده نمی کند، در نتیجه چترینگ تا حد بالایی حذف می شود. ثانیا رویتگر پیشنهادی دارای مرتبه کاهش یافته می باشد که این باعث می شود که معادله دیفرانسیل با دینامیک مرتبه اول داشته باشیم. رویتگرهای سرعت بازو طراحی شده در کارهای قبلی، رویتگر مرتبه کامل بوده و برای محاسبه تاخیر بیشتری را دارا می باشد (۳۰). معلم و همکارانش رویتگری که براساس تکنیک کنترل دینامیک معکوس می باشد ارائه کرده اند. رویتگر ارئه شده توسط آن ها نیازمند زاویه و سرعت مفصل و مودهای الاستیک بوده و نرخ تغییر مودهای الاستیک را تخمین می زند. این کار با استفاده از مفهوم رویتگر لیونبرگر که روی دینامیک مودهای الاستیک به کار گرفته شده، نائل شده است. همچنین نشان داده شده است که تکنیک رویتگرهای لغزنده می تواند در این طراحی ترکیب شود (۳۱). وانگ در فصل اول کتابش با عنوان مروری بر طراحی، مدلسازی، کنترل و کاربرد ربات های الاستیک اشاره ای به طراحی رویتگر برای لینک های الاستیک کرده است. مدلسازی لینک الاستیک در قسمت سینماتیک براساس کار بوک و در قسمت دینامیک براساس کار سیسیلیانو و روش مودهای فرضی انجام شده است. طراحی کنترلر و رویتگر براساس کار آرتگا انجام شده است (۳۲). نیوین و اِجلَند رویتگری را برای ربات با یک لینک الاستیک طراحی کردند. آن ها فرض کردند که زاویه و سرعت زاویه ای مفصل و سرعت

پنجه قابل اندازه گیری می باشد. همچنین بر اساس تئوری انقباض و تئوری نیم گروه نشان دادند که خطای رویتگر به صورت نمایی به سمت صفر متمایل است (۳۳) (۳۴).

۱-۵ طراحی رویتگر اغتشاش برای ربات با لینک الاستیک

ایده اصلی رویتگرهای اغتشاش براساس تخمین اغتشاش از مقایسه گشتاور ورودی سیستم واقعی با گشتاور مجازی که از معکوس مدل اسمی بدست می آید، گرفته شده است. این تخمین به عنوان سیگنال حذف کننده اغتشاش از گشتاور ورودی سیستم کم می شود. رویتگرهای اغتشاش براساس روش های خطی و غیرخطی آنالیز و طراحی می شوند. رویتگرهای خطی به گونه ای طراحی می شوند تا اغتشاش را در یک محدوده فرکانسی حذف کنند. این الگوریتم شامل معکوس مدل نامی و فیلتر پایین گذر می شود. این روش توسط چیانگ و همکارانش برای ربات با دو لینک الاستیک به کار گرفته شد (۳۵). آن ها از مدل ساده شده ربات الاستیک استفاده کرده به طوری که هر لینک به عنوان یک جرم در نظر گرفته شده که با یک فنر به هم متصل شده اند. این مدل سیستم دو جرمی تشدید شده نامیده می شود و دینامیک های باقی مانده به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می شوند. در کار بعدی که توسط آن ها ارائه شد ابتدا روش اختلالات منفرد را برای دینامیک ربات به کار گرفتند تا سیستم را به دو زیر سیستم تند و کند تقسیم کنند. آنگاه برای سیستم کند رویتگر اغتشاش را طوری طراحی کردند که فرکانس قطع فیلتر پایین گذر برپایه فرکانس اصلی سیستم انتخاب شود. آن ها نشان دادند به منظور عملکرد بهتر باید فرکانس قطع فیلتر پایین گذربه اندازه کافی نسبت به فرکانس اصلی سیستم کوچک انتخاب شود (۳۶). هوساکا و موراکامی با درنظر گرفتن ربات الاستیک به صورت جرم سه نقطه ای رویتگری را که از شتاب بازو به عنوان ورودی استفاده می کرد، ارائه کردند. رویتگر اغتشاش ارائه شده شامل سه رویتگر خطی می شد (۳۷). نکته قابل توجه در مورد رویتگرهای خطی این می باشد که این رویتگرها نیازمند طراحی فیلتر پایین گذر بوده و انتخاب فرکانس قطع این فیلتر و نوع این فیلتر از کارهای چالش انگیز می باشد. علاوه بر آن این رویتگرها برای سیستم های مینیمم فاز مناسب می باشند.

کارهای دیگری که در زمینه طراحی رویتگر اغتشاش شده است، بر پایه طراحی رویتگر حالت برای سیستم افزوده شده می باشد. ساساکی و همکارانش فیلتر کالمن را برای سیستم افزوده شده که در آن اغتشاشات به عنوان حالت در نظر گرفته شده، طراحی کردند (۳۸).