بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی

طراحی مسیر بهینه برای منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر

محقق: امین خسروجردی

اساتید راهنما:

دکتر امین نیکوبین

مهر ۱۳۹۰

فهرست

صفحه حقوقی

دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی

طراحی مسیر بهینه برای منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر

محقق: امین خسروجردی

تأییدیه دفاعیه:

استاد راهنمای اول: **دکتر امین نیکوبین**

استادان داور داخلی: **دکتر آشوری**

دکتر قدوسیان

استاد داور خارجی:

تقدیر و تشکر

با سپاس فراوان از همه اساتید محترم و دوستان عزیز به ویژه جناب آقای دکتر نیکوبین و مهندس ابراهیم شهاب که مرا در انجام این پایان نامه یاری فرمودند.

خلاصه تحقیق

در این پروژه، طراحی مسیر بهینه برای منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر انجام می گیرد. استخراج معادلات دینامیکی بوسیله روش جمع زنی مودهای فرضی با در نظر گرفتن دو مود شیپ صورت می گیرد. جهت بهینه سازی از روش غیر مستقیم که بر مبنای حساب تغییرات و یک روش تحلیلی است استفاده می شود. مسیر بهینه باید به گونه ای بدست آید که ارتعاشات لینک و گشتاور اعمالی به منیپولاتور مینیمم گردد. معادلات برای منیپولاتورهای صلب و منیپولاتورهای با لینک انعطاف پذیر با سختیهای متفاوت استخراج می گردد و گشتاور و ارتعاش مینیمم برای این منیپولاتورها محاسبه می شود. به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده، شبیه سازی به جهت مقایسه ی منیپولاتورهای انعطاف پذیر با لینکها با سختیهای مختلف و منیپولاتورهای صلب معادل، توسط نرم افزار Matlab انجام می شود. یک منیپولاتور تک لینکی انعطاف پذیر توسط دانشجویان قبلی ساخته شده و یک سری آزمایشات بر روی آن انجام شده‌است. هدف اصلی در این پروژه این است که صحت نتایج تحلیلی بدست آمده از طریق آزمایش مورد بررسی قرار گیرد.

فهرست

فهرست ز

فهرست اشکال و جداول ه

۱ مقدّمه و تاریخچه تحقیق ۱

۱-۱ شرح موضوع ۱
۱-۲ مدلسازی منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر ۲
۱-۳ طراحی مسیر بهینه برای منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر ۵
۱-۴ معرفی پایان نامه ۸

۲ استخراج معادلات دینامیکی منیپولاتور بازویی (منیپولاتور) ۱۰

۲-۱ مقدمه ۱۰
۲-۲ معادله‌ی لاگرانژ و روش مود فرضی ۱۱
۲-۲-۱ معادلات منیپولاتور با تک لینک صلب ۱۲
۲-۲-۲ معادلات منیپولاتور با تک لینک انعطاف پذیر ۱۳
۲-۲-۳ شبیه سازی ۱۶
۲-۳ روش المان محدود ۲۱
۲-۳-۱ معادلات منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر ۲۱
۲-۳-۲ شبیه سازی ۲۶
۲-۴ روش المان محدود با در نظر گرفتن ترم‌های غیر خطی ۳۰
۲-۴-۱ معادلات منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر ۳۰
۲-۵ مقایسه سه روش مدلسازی ارائه شده ۳۳

۳ طراحی مسیر بهینه منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر ۳۷

۳-۱ مقدمه ۳۷
۳-۲ فرمولاسیون مسیر بهینه ۳۸
۳-۲-۱ بیان ریاضی مساله ۳۹
۳-۲-۲ استخراج شرایط بهینگی ۴۰

۳-۲-۲-۱ قضیه‌ی اساسی حساب تغییرات ۴۰
۳-۲-۲-۲ استخراج شرایط بهینگی بدون اعمال محدودیت کنترل ۴۱
۳-۲-۲-۳ اعمال محدودیت کنترل ۴۳
۳-۲-۳ اصلاح قانون کنترل بهینه ۴۴
۳-۲-۴ همگرایی و وجود جواب ۴۵
۳-۲-۵ فرمولاسیون مساله کنترل بهینه ۴۵
۳-۳ شبیه سازی برای منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر ۴۷
۳-۳-۱ استخراج معادلات ۴۷
۳-۳-۲ مسیر بهینه با کمترین گشتاور ۴۸
۳-۳-۲-۱ شبیه سازی ۴۹
۳-۳-۳ مسیر بهینه با کمترین ارتعاش ۵۱
۳-۳-۳-۱ شبیه سازی ۵۲
۳-۳-۴ مسیر بهینه‌ی با کمترین ولتاژ ۵۴
۳-۳-۴-۱ شبیه سازی ۵۷

۴ نتایج حاصل از تست و آزمایش ۶۱

۴-۱ مقدمه ۶۱
۴-۲ آشنایی با قطعات سیستم ۶۲
۴-۲ پردازش تصویر ۶۶
۴-۳ نحوه‌ی تست ۶۸
۴-۴ تخمین پارامترهای سیستم ۷۱
۴-۵ نتایج ۷۲

۵ بحث و نتیجه گیری ۶۶

۵-۱ تحلیل نتایج ۷۶
۵-۳ دستاورد های پروژه ۷۷
۵-۴ پیشنهادات ۷۸

۶ پیوست الف: کد نویسی استخراج معادلات ۷۹

۷ مراجع ۸۰

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ طرح کنترل دو درجه آزادی ۶
شکل ۲-۱ مدلی ساده از منیپولاتور صلب ۱۲
شکل ۲-۲ نمایش شماتیک از لینک انعطاف پذیر ۱۴
شکل ۲-۳ موقعیت زاویه ای لینک انعطاف پذیر با ضرایب انعطاف پذیری مختلف ۱۷
شکل ۲-۴ سرعت زاویه ای لینک انعطاف پذیر با ضرایب انعطاف پذیری مختلف ۱۷
شکل ۲-۵ سرعت زاویه ای لینک انعطاف پذیر در حالت بزرگنمایی ۱۸
شکل ۲-۶ نمایش مود اول ارتعاشاتی ۱۸
شکل ۲-۷ نمایش مود دوم ارتعاشاتی ۱۹
شکل ۲-۸ نمایش سرعت مود اول ارتعاشاتی ۱۹
شکل ۲-۹ نمایش سرعت مود دوم ارتعاشاتی ۲۰
شکل ۲-۱۰ مقایسه موقعیت زاویه‌ای لینک صلب و الاستیک ۲۰
شکل ۲-۱۱ مقایسه سرعت زاویه‌ای لینک صلب و الاستیک ۲۱
شکل ۲-۱۲ نمایش شماتیک از لینک انعطاف پذیر ۲۲
شکل ۲-۱۳ نمایش گشتاور ورودی ۲۶
شکل ۲-۱۴ نمودار موقعیت زاویه‌ای با در نظر گرفتن یک المان ۲۷
شکل ۲-۱۵ نمودار سرعت زاویه‌ای با در نظر گرفتن یک المان ۲۷
شکل ۲-۱۶ نمودار موقعیت زاویه‌ای با در نظر گرفتن ۴ المان ۲۸
شکل ۲-۱۷ نمودار سرعت زاویه‌ای با در نظر گرفتن ۴ المان ۲۸
شکل ۲-۱۸ نمودار موقعیت زاویه‌ای با در نظر گرفتن میرایی و ۴ المان ۲۹
شکل ۲-۱۹ نمودار سرعت زاویه‌ای با در نظر گرفتن میرایی و ۴ المان ۲۹
شکل ۲-۲۰ نمایی از لینک انعطاف پذیر در حالت سه درجه آزادی ۳۱
شکل ۲-۲۱ نمودار موقعیت زاویه‌ای بدست آمده از ۳ روش ۳۴
شکل ۲-۲۲ نمودار سرعت زاویه‌ای بدست آمده از ۳ روش ۳۴
شکل ۲-۲۳ نمودار انحراف نوک لینک بدست آمده از ۳ روش ۳۵
شکل ۲-۲۴ نمودار سرعت انحراف نوک لینک بدست آمده از ۳ روش ۳۵
شکل ۲-۲۵ نمودار سرعت انحراف نوک لینک در حالت بزرگنمایی ۳۶
شکل ۳-۱ نمودار موقعیت زاویه‌ای برای مسیر با کمترین گشتاور ۴۹
شکل ۳-۲ نمودار سرعت زاویه‌ای برای مسیر با کمترین گشتاور ۵۰
شکل ۳-۳ نمودار انحراف نوک لینک برای مسیر با کمترین گشتاور ۵۰
شکل ۳-۴ نمودار سرعت انحراف نوک لینک برای مسیر با کمترین گشتاور ۵۱
شکل ۳-۵ نمودار گشتاور ورودی مینیمم ۵۱
شکل ۳-۶ نمودار موقعیت زاویه‌ای به ازای ضرایب وزنی مختلف ۵۲
شکل ۳-۷ نمودار سرعت زاویه‌ای به ازای ضرایب وزنی مختلف ۵۳
شکل ۳-۸ نمودار انحراف نوک لینک به ازای ضرایب وزنی مختلف ۵۳
شکل ۳-۹ نمودار سرعت انحراف نوک لینک به ازای ضرایب وزنی مختلف ۵۴
شکل ۳-۱۰ نمودار گشتاور ورودی به ازای ضرایب وزنی مختلف ۵۴

شکل ۳-۱۱ مدلی ساده از موتور DC ۵۵
شکل ۳-۱۲ نمودار موقعیت زاویه‌ای برای مسیر با کمترین ولتاژ ۵۷
شکل ۳-۱۳ نمودار سرعت زاویه‌ای برای مسیر با کمترین ولتاژ ۵۸
شکل ۳-۱۴ نمودار انحراف نوک لینک برای مسیر با کمترین ولتاژ ۵۸
شکل ۳-۱۵ نمودار سرعت انحراف نوک لینک برای مسیر با کمترین ولتاژ ۵۹
شکل ۳-۱۶ نمودار جریان الکتریکی برای مسیر با کمترین ولتاژ ۵۹
شکل ۳-۱۷ نمودار ولتاژ ورودی مینیمم ۶۰
شکل ۴-۱ درایور سری ۹۴۰ لنز ۶۳
شکل ۴-۲ مدار کنترلی درایور ۹۴۰ لنز ۶۴
شکل ۴-۳ تجهیزات کارت مبدل سیگنال، Advantech 1710 HG ۶۴
شکل ۴-۴ الگوریتم نصب و راه‌اندازی کارت مبدل سیگنال ۶۵
شکل ۴-۵ سنسور دورسنج ۶۶
شکل ۴-۶ نحوه‌ی نمایش تصویر در متلب ۶۸
شکل ۴-۷ نمایی از سیستم و نحوه‌ی فیلمبرداری ۶۹
شکل ۴-۸ نمایی از لینک و لامپهای LED در اتاق تاریک ۷۰
شکل ۴-۹ نمایی از حالت صلب و الاستیک لینک ۷۰
شکل ۴-۱۰ نمودار سرعت ورودی به شکل بنگ-بنگ ۷۲
شکل ۴-۱۱ موقعیت مکانی نوک لینک در حالت صلب و الاستیک به ازای ورودی بنگ-بنگ ۷۲
شکل ۴-۱۲ نمودار انحراف نوک منیپولاتور به ازای ورودی بنگ-بنگ در حالت تئوری و تجربی ۷۳
شکل ۴-۱۳ نمودار سرعت ورودی به شکل سینوسی ۷۳
شکل ۴-۱۴ موقعیت مکانی نوک لینک در حالت صلب و الاستیک به ازای ورودی سینوسی ۷۴
شکل ۴-۱۵ نمودار انحراف نوک منیپولاتور به ازای ورودی سینوسی ۷۴

فهرست جداول

جدول ۳-۱ پارامترهای شبیه سازی ۳۶
جدول ۳-۲ پارامترهای شبیه سازی ۴۰
جدول ۴-۱ لیست قطعات و تجهیزات مورد استفاده در ساخت ربات ۶۲

فصل اول

مقدمه و تاریخچه تحقیق

۱ مقدمه و تاریخچه تحقیق

۱.۱ شرح موضوع

امروزه منیپولاتورها به طور گسترده در کارهای پرخطر و کارهای خسته کننده، تکراری و غیره به کار گرفته می‌شوند. بیشتر منیپولاتورهای موجود با هدف افزایش سختی لینکها به منظور دستیابی به موقعیت یابی با دقت بالا طراحی و ساخته می‌شوند و این سختی بالا با استفاده از مواد سنگین حاصل می‌شود.

اما از معایب منیپولاتورهای ساخته شده از مواد سنگین، نسبت انرژی مصرفی زیاد و سرعت کم در برابر کار انجام گرفته است. همچنین نیروهای اینرسی بزرگ ناشی از جرم زیاد لینکهای صلب، باعث بوجود آمودن مشکلات کنترلی شدیدی در این نوع منیپولاتورها می‌شود. بنابراین عملکرد دقیق منیپولاتورها به شدت به خاطر وجود تغییر شکل دینامیکی آنها محدود شده است. زمان نشست مورد نیاز برای ارتعاشات باقی مانده پنجه یا نوک منیپولاتور، در اجرای آن وقفه ایجاد می‌کند، از این رو بهره‌وری سیستم را کاهش می‌دهد. این ناسازگاری بین سرعت بالا و دقت بالا به عنوان یک مسئله چالش برانگیز، مورد بحث بسیاری از محققین قرار گرفته است. همچنین، تعداد زیادی از منیپولاتورهای صنعتی با مشکل ارتعاش بازو در حین حرکت با سرعت بالا، مواجه هستند.

به منظور بهره‌وری اقتصادی بیشتر لازم است وزن بازوها کاهش یابد یا اینکه سرعت عمل آنها را افزایش یابد. به همین دلیل امروزه برای افزایش سرعت عمل و کاهش انرژی مصرفی از لینکهای انعطاف پذیر در منیپولاتورها استفاده می‌شود. در مقایسه با منیپولاتورهای بزرگ و سنگین موجود، منیپولاتورها با لینک انعطاف پذیر دارای مزیتهای بیشماری از جمله هزینه ساخت و انرژی مصرفی

کمتر، حجم کار، سرعت عمل و نسبت ظرفیت حمل بار به وزن بیشتر، موتورهای محرک کوچکتر، قابلیت مانور و انتقال بهتر و عملکرد مطمئنتر می‌باشند. اما بزرگترین مشکل این منیپولاتورها، مسئله ارتعاش ناشی از سختی کم لینکها می‌باشد. در بعضی موارد، ساعتهای زیادی باید بگذرد تا ارتعاش به اندازه یک اینچ کاهش یابد. امروزه به دلیل مهم و مفید بودن موضوع، محققین سرتاسر دنیا نسبت به این نوع منیپولاتورها توجه بیشتری دارند.

پژوهشهای بسیاری در زمینه‌ی توسعه‌ی مدلهای دینامیکی منیپولاتورهای انعطاف پذیر انجام شده است. که این باعث تشریح و توصیف بیشتر معادلات دیفرانسیل پاره‌ای و معادلات دیفرانسیل معمولی متناهی در این زمینه شده است. ماهیت دینامیکی منیپولاتورهای انعطاف پذیر، باعث ایجاد فهم روشنتر و کاربردیتر روش های موجود خواهد شد.

استفاده از روشهای دیفرانسیل محدود و اختلاف محدود به صورت عددی، برای توصیف مشخصات دینامیکی منیپولاتورهای انعطاف پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. که این باعث بوجود آمودن الگوریتم های شبیه سازی دینامیکی منیپولاتورهای انعطاف پذیر شده که خود روند آنالیز، تست و تائید روشهای کنترلی و بهینه سازی را می‌طلبد.

منیپولاتورها اصولاً به سختی قادر به انجام کار می‌باشند و برای انجام یک عملیات مشخص نیازمند اقدامات اولیه‌ای چون کالیبراسیون و طراحی مسیر می‌باشند. از طرف دیگر به منظور افزایش عملکرد و دقت آنها، قیودی که از ساختار خود منیپولاتور و قیودی که از طرف وظیفه خواسته شده بوجود می‌آیند، باید در کنترل آنها در نظر گرفته شود. اغلب مسیرهای زیادی برای انجام یک وظیفه‌ی مشخص وجود دارد. که این آزادی در انتخاب مسیر می‌تواند گزینه‌ای برای بهینه‌کردن عملیات منیپولاتور در جهت اهداف مختلف به خدمت گرفته شود.

۱.۲ مدلسازی منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر

در این بخش روشهای مختلف مدل سازی استفاده شده در آنالیز منیپولاتورهای انعطاف پذیر به صورت مختصر همراه با ذکر کارهای انجام شده در رابطه با روشها توضیح داده شده‌اند.

در صورت صرف نظر کردن از ماهیت انعطاف پذیری لینکها در مدلهای دینامیکی دو مورد خطا بوجود خواهد آمد. که یک مورد در رابطه با خطای گشتاور مورد نیاز ورودی از موتور و مورد دیگر از بین رفتن دقت در موقعیت‌یابی پنجه منیپولاتور می‌باشد. برای موقعیت‌یابی پنجه منیپولاتور در کارهای دقیق، دامنه ارتعاش باید خیلی کم شود و در حالت ایده‌آل به طور کامل صفر باشد. از این رو برای دستیابی به دقت بیشتر باید برای مدل‌کردن سیستمها از مدلهای دینامیکی خیلی دقیق استفاده شود.

طرحهای متنوع زیادی برای مدلسازی منیپولاتورها توسط محققین مورد بررسی قرارگرفته است. در حالت کلی مدل‌های ریاضی منیپولاتورها از اصول انرژی استخراج می‌شوند. در یک منیپولاتور صلب معمولی، انرژی جنبشی را بواسطه‌ی اینرسی حرکتی لینکها و مفاصل و انرژی پتانسیل هم بواسطه‌ی موقعیت لینکها و مفاصل در میدان گرانشی در سیستم ایجاد می‌شوند، اما بازوهای انعطاف پذیر علاوه بر انرژی پتانسیل گرانشی، انرژی پتانسیل خمشی هم بواسطه‌ی خمش و انعطاف لینکها و مفاصل در خود ذخیره می‌کنند. مفاصل اغلب به عنوان یک فنر پیچشی محض که فقط انژی پتانسیل را ذخیره می‌کند مدل می‌شوند. قطعات درایوها از قبیل محورها و تسمه‌ها به علت اینرسی کم انرژی جنبشی خیلی کمی، در خود ذخیره می‌کنند، و یک مدل پارامتر توده‌ای برای مدل سازی آنها نتیجه خوبی خواهد داشت. لینکها در معرض پیچش، خمش و فشار قرار می‌گیرند. پیچش یک لینک بیشتر انرژی پتانسیل را ذخیره می‌کند و به دلیل ممان اینرسی جرمی کم حول محور طولی لینک، انرژی جنبشی کمتری را در خود ذخیره می‌کند به همین دلیل بیشتر به عنوان یک فنر بدون جرم در نظر گرفته می‌شوند. به علت سختی فشاری کم روی لینکها انرژی پتانسیل کمی در آن ذخیره می‌شود و اغلب در راستای محور طولی به عنوان یک جرم صلب در نظر گرفته می‌شوند. لینکهای در معرض خمش به خاطر تغییر شکل خمشی انرژی پتانسیل را به خوبی انرژی جنبشی در خود ذخیره می‌کنند و یک مدل خوب باید حتما دربردارنده‌ی این ماهیت لینک باشد. برای در نظر گرفتن خمش لینک اغلب از معادله اویلر-برنولی استفاده می‌شود که در آن از اثرات برشی و اینرسی دورانی صرف نظر شده‌است. این دو اثر اکثراً زمانی که لینک با یک تیر تیموشنکو (نسبت اندازه طول به قطر لینک کم باشد) مدل شود در مدلسازی سیستم لحاظ می‌شوند. اما، بوک [1] و سایر محققین در بیشتر مدلهای منیپولاتورهای انعطاف پذیر از تیر اویلر-برنولی استفاده کرده‌اند. دینامیک مشخص و معینی که با معادلات دیفرانسیل پاره ای و دارای یک ابعاد متناهی برای منیپولاتورها با لینک انعطاف پذیر توصیف شود به آسانی برای آنالیز هر سیستم و طراحی هر کنترلری در دسترس نمی‌باشد. بیشتر معادلات دینامیکی موجود به چند مدل دیفرانسیل محدود با هر دو روش جمع زنی مودهای فرضی (AMM) یا روش المان محدود (FEM) تقسیم می‌شوند.

منیپولاتورهای با لینک انعطاف پذیر سیستمهای دینامیکی پیوسته‌ای هستند که بوسیله‌ی تعداد نامحدود درجات آزادی مشخص می‌شوند و معادلات حاکم بر آنها معادلات دیفرانسیل پاره‌ای، معمولی و جفت شده است. حل دقیق چنین سیستمهایی عملا امکان پذیر نیست و نیز همچنین مدلی با ابعاد نامحدود، قیدهای زیادی را در طراحی مسیر ایجاد می‌کند. از این رو این معادلات را بوسیله روشهای جمع زنی مود فرضی، المان محدود یا پارامترهای توده‌ای به یک سیستم گسسته تبدیل می‌کنند.

برای حل دینامیکی سیستم های انعطاف پذیر، سه روش رایج وجود دارد. اولین روش حل معادله دیفرانسیل پاره‌ای برای بیان ریاضی مساله می‌باشد [1] . اگرچه این روش می تواند یک بیان دقیق از سیستم ارائه دهد، اما فهم فیزیکی این روش مشکل و پیچیده است. دومین روش استفاده از مدل جرم و فنر می‌باشد. در این روش کل سیستم به قسمت های مجزا تقسیم شده که مدل جرم و فنر، یک مدل ساده برای بیان اینرسی و سختی هر قسمت می‌باشد [3][2] . به این منظور مدلی که در عین سادگی بتواند با دقت خوبی سیستم فیزیکی را نمایش دهد، مورد نیاز است. 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 حاصلضرب تابع حالت و تابع زمان می‌باشد. تابع حالت می‌تواند به عنوان مد 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 [4] . در روش المان محدود، در ابتدا سیستم به المان های کوچکتر که دارای تابع مشخصه و مشخصات گره ای مشابه سیستم می‌باشند، تقسیم می‌شود [5] . از این رو روش برای سیستمهایی که دارای سطح مقطع نامعین و مواد ناهمگن هستند، مناسب می‌باشد. به طور کلی روش مودهای فرضی و المان محدود با روش لاگرانژ و اصل همیلتون که هر دو از اصل انرژی برای استخراج معادلات حرکت سیستم استفاده می‌کنند، آمیخته می‌شوند. اما در روش مدل پارامترهای توده‌ای، که ساده ترین روش تحلیل دینامیکی می‌باشد، منیپولاتور به صورت یک سیستم جرم وفنر مدل می شود که البته این روش معمولا نتایج کاملا دقیقی ارائه نمی دهد. در ادامه به بررسی کارهای انجام شده در زمینه‌ی مدلسازی منیپولاتورهای انعطاف پذیر می‌پردازیم.

براساس روش نیوتن- اویلر، بویر و کویفت معادلات دینامیک منیپولاتور با چند لینک انعطاف پذیر را استخراج کردند [6] . توخی و همکارانش با روش المان محدود معادلات دینامیکی منیپولاتور با یک لینک انعطاف پذیر را استخراج کرده و به منظور تایید مدل دینامیکی، فرکانس های بدست آمده را با مقدار تجربی مقایسه کردند [7] . مدلسازی منیپولاتور انعطاف پذیر با 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 به استخراج معادلات پرداختند [8] ، بوک با استفاده از این روش معادله‌های دینامیکی منیپولاتور با یک لینک انعطاف پذیر را بدست آورد [9] . تسو و یانگ روش بازگشتی برای استخراج معادلات منیپولاتور با چند لینک انعطاف پذیر ارائه کردند [10] . چن با استفاده از روش مودهای فرضی و در نظر گرفتن

تیر اویلر - برنولی، مدل دینامیکی خطی شده را برای منیپولاتور انعطاف پذیر با حرکت صفحه ای که می‌تواند تعداد لینک های اختیاری داشته باشد، را استخراج کرد [11].

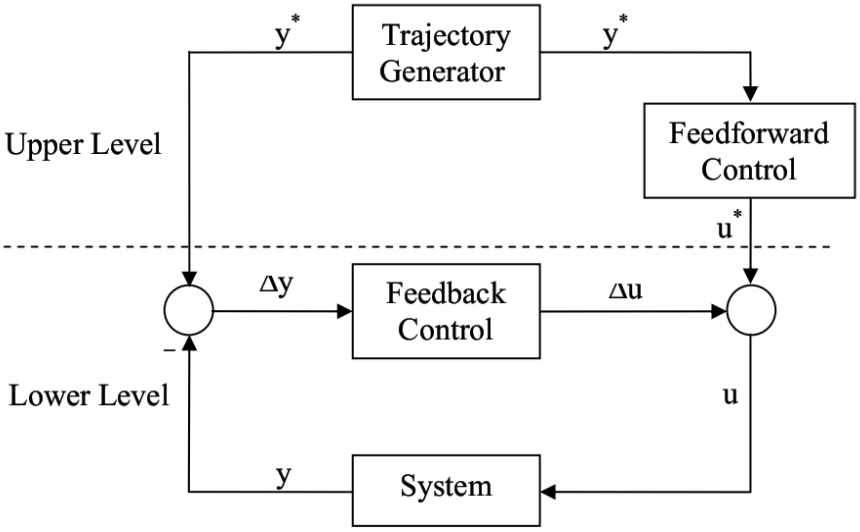
با استفاده از روش المان محدود، ناگراژان و همکارش معادلات سیستم و المانی را برای یک منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر و صلب استخراج کردند [12] . چانگ و گانون با استفاده از فرمولاسیون لاگرانژ معادلات دینامیکی یک منیپولاتور تک لینکی را بدست آوردند [13] . جانکر نیز، بوسیله‌ی فرمولاسیون غیر خطی المان محدود، منیپولاتور انعطاف پذیر با سه درجه آزادی را تحلیل کرد [14].

به دلیل دقت کم روش پارامترهای توده ای، مدل سازی به این روش کمتر انجام می‌شود. با این حال ژو و همکارانش در سال ۱۹۹۹ با استفاده از این روش به شبیه سازی ردیابی موقعیت نوک یک منیپولاتور انعطاف پذیر پرداختند [16] . خلیل و گاتیر یک سیستم مکانیکی انعطاف پذیر را با مدل الاستیک توده ای مدلسازی کردند [17] . پاشکویچ و همکارانش یک منیپولاتور موازی مقید را یا فنرهای ۶ درجه آزادی با قابلیت دوران و چرخش مدل کردند [18].

۱.۳ طراحی مسیر بهینه برای منیپولاتور با لینک انعطاف پذیر [40]

امروزه با افزایش رقابت در زمینه‌های مختلف تولیدی، صنعتی و نظامی، مساله طراحی مسیر بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته است. به منظور دستیابی به اهدافی همچون بالا بردن سرعت اجرا، افزایش دقت سیستم، مینیمم کردن توان مصرفی و ... که همگی به هدف طراح وابسته است مساله طراحی مسیر بوجود آمده‌است. پیچیدگی مساله محققین را بر آن داشته که ساختار کنترل منیپولاتور را همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، در دو سطح تقسیم کنند. سطح بالا که طراحی مسیر نامیده می شود و سطح پایین که ردگیری یا کنترل مسیر می‌باشد. در سطح کنترل مسیر موقعیت و سرعت واقعی منیپولاتور به مقادیری که توسط طراح مسیر تعیین می‌گردد رسانده می‌شود و طراح مسیر نیز با توجه به خواسته‌های مورد نظر و قیود موجود، موقعیت و سرعت مطلوب را محاسبه می‌نماید. این طرح کنترل دو درجه آزادی، بسط کنترل بازخورد می‌باشد. کنترل بازخورد به گونه ای طراحی می‌شود که سیستم به طور مناسب پایدار گردد و نسبت به اغتشاشات و عدم قطعیتها مقاوم باشد. کنترل پیش خورد به عنوان درجه آزادی دوم برای رسیدن به عملکرد ردگیری مطلوب از خروجی اعمال می‌گردد. تولید کننده مسیر نیز مسیر مرجع را برای هر دو کنترل پیش خورد و بازخورد تولید می‌کند. کنترل پیش خورد باید یک فرمان ورودی به گونه ای تولید کند که سیستم مسیر خروجی مطلوب را دنبال نماید. بنابراین در سطح طراحی مسیر، باید یک مسیر خروجی قابل قبول و تحقق پذیر تولید گردد. در بسیاری از مقالات مربوط به طراحی مسیر منیپولاتورها، مولفین مسائل مختلفی را بیان

کرده‌اند و روشهای حل مختلفی را ارائه نموده‌اند. کارهای قبلی را می‌توان بر اساس سبک اجـرا، مـدلی که برای منیپولاتور در نظر گرفته می‌شود و روش عددی به کار گرفته شده تقسـیم بنـدی نمـود. ایـن تقسیم بندی در شکل آورده شده است.



شکل ۱-۱ طرح کنترل دو درجه آزادی

در بین وظایفی که منیپولاتور انجام می‌دهد، اولین تقسیم بندی مربوط به نوع حرکت مورد نظر مـی-باشد. بسته به وظیفه منیپولاتور، ممکن است مسیر پنجه در فضای کاری مشخصی باشـد. بـه عنـوان مثال اگر ابزار قرار گرفته در پنجه طبق یک مسیر از پیش تعیین شده عمل نماید (چسب زنی، جوش قوسی، برش لیزری و غیره)، طراح مسیر شرایط ردگیری بهینه را برای مسیر داده شـده تعیـین مـی-نماید. در این حالت مسیر خروجی مشخص است و کنترل پیش خورد باید به گونه ای محاسبه گـردد که سیستم مسیر را دنبال نماید. از طرف دیگر، در حرکت نقطـه بـه نقطـه (جـوش نقطـه ای، عمـل برداشتن و قرار دادن و غیره) حرکت پنجه بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی آزاد می‌باشد. در این حالت طراح، مسیر بهینه کنترل پیش خورد متناظر را تعیین می‌نماید.

بعضی محققین از مدل سینماتیکی منیپولاتور برای طراحی مسیر استفاده نموده‌اند. این نوع مدل اغلب برای طراحی مسیر منیپولاتورهای با درجات آزاد اضافی [19] ، طراحی مسیر جهـت اجتنـاب از موانـع [20]و یا طراحی مسیرهای بلادرنگ [21] مورداستفاده قرار گرفته است. طراحی مسیر به ایـن روش در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول مسیر بهینه طراحی مـی‌گـردد و در مرحلـه دوم کنتـرل پـیش خورد محاسبه می‌گردد. در این نوع طراحی مسیر از آنجایی که مسیر خروجی و کنترل ورودی مستقل از هم محاسبه می‌گردند، اغلب برای تحقق مسیر بدست آمده نیاز به گشتاوری بیش از گشتاور موتورها

می‌باشد، که این برای سیستم زیان آور است. بنابراین به منظور یک کنترل واقع بینانه تر باید از مدل دینامیکی استفاده نمود. به طوری که ورودی پیش خورد و مسیر بهینه به طور همزمان طراحی گردند.

تقسیم بندی دیگر بر اساس روش حل می‌باشد. به خاطر پیچیدگی‌هایی که در حل مساله طراحی مسیر وجود دارد، روشهای مختلفی برای حل آن ارائه شده است. کلیه روشهای به کار گرفته شده را در دو خانواده اصلی، می‌توان تقسیم بندی نمود: روش مستقیم و روش غیر مستقیم

روشهای مستقیم بر اساس گسسته کردن متغیرهای دینامیکی سیستم (حالتها و کنترلها) می‌باشند که به یک مساله بهینه سازی پارامتری منجر می‌شوند. سپس روش‌های بهینه سازی خطی (LP)، بهینه سازی غیر خطی (NLP)، روشهای تکاملی (ET)، یا تکنیکهای آماری (ST)، برای بدست آوردن مقادیر بهینه پارامترها به کار گرفته می‌شوند. گسسته‌کردن متغیرها به روشهای مختلفی انجام می‌گیرد و ممکن است متغیرهای کنترل، متغیرهای حالت و یا هر دو را شامل گردد. روش مستقیم برای مسائل با ابعاد کم به خوبی جواب می‌دهد اما مشکل اساسی این روش در برخورد با مسائل با ابعاد بالا می‌باشد، به طوری که بسیار زمان بر هستند و اغلب دچار انفجار عددی می‌شوند. یک روش متداول برای پارامتری کردن متغیرها استفاده از توابع چند جمله ای و Spline می‌باشد. در این حالت جواب بدست آمده یک حل تقریبی می‌باشد و مستقیما به مرتبه تابع در نظر گرفته شده بستگی دارد.

در سال ۲۰۰۰، شوگن و میتسورو مسیر یک منیپولاتور با درجات آزادی زائد را در جهت کم کردن زمان حرکت پنجه به کمک روش بهینه سازی خطی طراحی کردند [22] . کرایم و قریبلو به منظور ماکزیمم کردن ظرفیت حمل بار یک منیپولاتور متحرک از روش بهینه سازی غیرخطی استفاده کرده‌اند [23] . فاریس و همکارانش به کمک این روش مسیر حرکت یک منیپولاتور دو لینکی انعطاف پذیر را به منظور کاهش انرژی مصرفی بهینه کردند [24] . منیپولاتوری دو لینکی با یک لینک الاستیک توسط آکیرا در جهت کاهش ارتعاشات باقی مانده بهینه سازی شد [25] .

و اما روشهای غیرمستقیم بر اساس اصل مینیمم پونتریاگن (PMP) می‌باشند که اولین بار برای تعریف کنترل بهینه استفاده گردید. این روش برای حل مسائل کمترین زمان در امتداد مسیرهای مشخص به کار گرفته شد، که سپس برای حرکتهای آزاد نیز بسط داده شد. اصل مینیمم پونتریاگن به طور مستقیم برای طراحی مسیر بهینه نیز به کار گرفته شده‌است. در این روش شرایط بهینگی به صورت یک دستگاه معادلات دیفرانسل استخراج می‌شوند که به همراه شرایط مرزی داده شده، یک مساله مقدار مرزی دو نقطه ای (TPBVP) ایجاد می‌کنند. این مساله بدست آمده با تکنیکهای عددی مثل روش پرتابی چند تایی (MSM) و یا روش شیب (GM) قابل حل می‌باشد.

یک مشکل اساسی در نتایج گزارش شده در کارهای قبلی که بر اساس روش‌های مستقیم می‌باشند، وجود خطای نسبتا زیاد در شرایط مرزی انتهایی می‌باشد. این مشکل در نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی ما روش غیر مستقیم است، وجود ندارد و شرایط مرزی در ابتدا و انتها دقیقا بر آورده می‌شوند. همچنین در بعضی روش‌های ILP، برای همگرایی مساله به جواب نهایی، مسیر اولیه انتخاب شده باید به جواب نهایی بسیار نزدیک باشد. در حالی که در روش پیشنهادی نیاز به حدس اولیه از مسیر نیست و در صورت جواب داشتن مساله حتما به جواب نهایی خواهیم رسید.

روشی بر مبنای اصل مینیمم پونتریاگن برای یک سیستم مفصل دار مثل منیپولاتور دولینکی به منظور کاهش زمان و انرژی مصرفی توسط شیلز پیشنهاد شده‌است [26] . ساکاموتو و کاوامورا به کمک روش حساب تغییرات مسیر بهینه ای برای منیپولاتور در جهت کاهش ارتعاشات طراحی کردند [27]. کاهش ارتعاشات باقی مانده در یک منیپولاتور چند لینکی الاستیک توسط بنوسمان و همکارانش به کمک اصل مینیمم پونتریاگین حاصل شده‌است [28] . کرایم و همکارانش به منظور ماکزیمم کردن ظرفیت حمل بار یک منیپولاتور با لینکهای انعطاف پذیر از اصل مینیمم پونتریاگن استفاده کرده‌اند [29] .

۱.۴ معرفی پایان نامه

در فصل اول، ابتدا به بررسی کارهای انجام شده در زمینه‌ی استخراج معادلات در منیپولاتورهای انعطاف پذیر پرداخته شده‌است و روش‌های مناسب و متداول مشخص می‌شوند. سپس ساختار کنترل دو درجه آزادی ارائه می‌گردد و رابطه‌ی بین مساله کنترل مسیر و طراحی مسیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس مساله طراحی مسیر از جنبه‌های مختلف توضیح داده‌می‌شود. نهایتا کارهای انجام شده در زمینه‌ی استخراج معادلات و طراحی مسیر به طور خلاصه بررسی می‌شوند و روش مناسب برای حل آن انتخاب می‌گردد.

در این مرحله بعد از ارائه تاریخچه ای از تحقیقات گذشته، در فصل دوم معادلات مربوط به منیپولاتور تک لینکی با لینک صلب و انعطاف پذیر به روش لاگرانژ و استفاده از روش مودهای فرضی و المان محدود به منظور مدل نمودن ماهیت انعطاف پذیری، ارائه می‌شود. بعد از آن ورود قسمت‌های غیر خطی رابطه‌ی تغییر مکان – کرنش به رابطه‌ی المان محدود بررسی می‌شود. نهایتا سه روش استخراج معادلات در یک شبیه‌سازی یکسان با هم مقایسه می‌شوند.

در فصل سوم، بیان ریاضی یافتن مسیر بهینه ارائه می‌گردد و با استفاده از روش حساب تغییرات و اصل مینیمم پونتریاگن شرایط لازم بهینگی برای مسیر بهینه بین دو نقطه داده شده در فضای گاری

استخراج می‌گردد. این شرایط بهینگی شامل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل و یک سری شرایط مرزی می‌باشد که با حل آنها مسیر بهینه و کنترل ورودی متناظر مستقیما بدست می‌آید. در این فصل شبیه‌سازی برای یک منیپولاتور تک لینکی انعطاف پذیر انجام می‌گیرد و چگونگی اعمال روش برای محاسبه مسیر بهینه نشان داده می‌شود.

فصل چهارم، با معرفی قطعات منیپولاتور ساخته شده، شروع شده و در ادامه، در مورد بدست آوردن مشخصات سیستم بحث می‌شود. سپس روش استفاده شده در انجام آزمایشات توضیح داده می‌شود. و نتایج شبیه‌سازی و تست با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

در فصل پنجم، نتایج بدست آمده در این رساله جمع بندی می‌شوند . پیشنهاداتی برای کارهای آینده ارائه می‌شود.

فصل دوم

استخراج معادلات دینامیکی منیپولاتور

مباحث فصل دوم:

۱.۲ مقدمه

۲.۲ روش مودهای فرضی

۳.۲ روش المان محدود

۴.۲ روش المان محدود با در نظر گرفتن ترمهای غیر خطی

۵.۲ مقایسه سه روش ارائه شده

۲ استخراج معادلات دینامیکی منیپولاتور

۲.۱ مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی در امر استفاده از منیپولاتور و همچنین نیاز انسانها به منیپولاتورهایی با سرعت بالا و کیفیت عالی، ایده استفاده از منیپولاتورهای سبک مطرح شده است. از آنجائیکه در منیپولاتورهای سبک با سرعت‌های بالا و بارهای سنگین، تغییر فرم نسبی در بازوهای منیپولاتور رخ می‌دهد، بدین سبب مسئله منیپولاتور با بازوهای انعطاف پذیر[1] مطرح می‌گردد.

1- Flexible