



دانشگاه سمنان

دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد مکترونیک

طراحی مسیر بهینه، کنترلر و رویتگر برای

منیپولاتور با مفصل انعطاف پذیر

دانشجو:

عاطفه حبیب‌اللهی

اساتید راهنما:

دکتر امین نیکوپین

دکتر عباس دیدبان

مهر ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

صفحه حقوقی

طراحی مسیر بهینه، کنترلر و رویتگر برای  
منیپولاتور با مفصل انعطاف پذیر

## تقدیم به مادر مهربانم

فرشته‌ای که از خواسته‌هایش گذشت، سختی‌ها را به جان خرید و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کرد تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم.

پروردگارا، نه می‌توانم موهایش را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست‌های پینه بسته‌اش که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکرگزارش باشم و ثنیه‌های عمرم را در عصای دست بودنش بگذرانم.

## تشکر و قدردانی

سپاس بیکران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. در اینجا بر خود می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های ارزشمند اساتید گرامی جناب آقایان دکتر امین نیکوبین و دکتر عباس دیدبان در راستای انجام این پروژه، تشکر و قدردانی نمایم.

در ادامه از زحمات کلیه کسانیکه مرا در به ثمر رسیدن این تحقیق یاری کردند و در طول این مدت همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند نیز کمال تشکر و سپاس را دارم و برای تمامی‌شان آرزوی سلامتی و موفقیت را از خداوند منان مسئلت دارم.

## چکیده

ربات‌ها به خاطر قابلیت بالایشان در سرعت و دقت، و همچنین به خاطر به صرفه بودن آنها در کارهای تکراری، به طور گسترده‌ای در یک دهه اخیر به جای کارگران انسانی و یا به عنوان ابزاری در خدمت متخصصین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما این منیپولاتورهای توانمند، به سختی قادر به انجام کار به خودی خود می‌باشند و برای انجام یک وظیفه مشخص نیازمند اقدامات اولیه‌ای مثل کالیبراسیون و طراحی مسیر می‌باشند. از طرف دیگر به منظور افزایش عملکرد و کارایی ربات، قیودی که از ساختار خود ربات ناشی می‌شود و همچنین قیودی که از طرف وظیفه تعیین شده تحمیل می‌گردد، باید در کنترل ربات در نظر گرفته شود. اغلب، راه‌های ممکن بیشماری برای انجام یک وظیفه مشخص وجود دارد که این آزادی انتخاب می‌تواند برای بهینه کردن یک تابع معیار داده شده به خدمت گرفته شود. از آنجایی که منیپولاتورها عمدتاً برای تکرار یک عمل از پیش تعیین شده به تعداد بسیار زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند، بنابراین کوچکترین بهبود در عملکردشان می‌تواند به صرفه‌جویی اقتصادی قابل ملاحظه‌ای منجر گردد. در این پایان‌نامه مساله کنترل ردگیری مسیر برای یک ربات منیپولاتور، مطرح شده است. به همین منظور پس از استخراج معادلات دینامیکی حاکم بر مدل منیپولاتور با مفاصل الاستیک که با در نظر گرفتن مدل موتور و گیربکس تکمیل شده است، به طراحی مسیر بهینه با کمترین گشتاور و ارتعاش برای مدل پرداخته شده است. سپس انواع کنترل‌های خطی، مدرن و پیشرفته (غیرخطی) مورد مطالعه قرار گرفت و در این بین روش کنترل غیرخطی بازخورد خطی‌سازی شده به دلیل توانایی فراوان و سهولت کاربرد انتخاب شد. در ادامه به منظور حذف اثر اغتشاشات موجود در سیستم، رویتگر اغتشاش بر پایه معیار پایداری لیاپانوف طراحی شد و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، توانایی کنترلر و رویتگر اغتشاش، در کنترل سیستم و تخمین اغتشاش وارد شده بر سیستم را نمایش می‌دهد.

**کلید واژه:** منیپولاتور، مفصل انعطاف‌پذیر، کنترلر بازخورد خطی‌سازی، رویتگر اغتشاش غیرخطی.

## فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- مساله کنترل و طراحی مسیر.....	۳
۱-۲-۱- رابطه بین طراحی و کنترل مسیر.....	۳
۲-۲-۱- تقسیم‌بندی مساله طراحی مسیر.....	۴
۳-۱- بیان مساله و اهداف.....	۷
۴-۱- مدل‌سازی ربات با مفصل انعطاف‌پذیر.....	۹
۵-۱- طراحی کنترلر برای ربات با مفصل انعطاف‌پذیر.....	۱۱
۶-۱- طراحی رویگر اغتشاش برای ربات با مفصل انعطاف‌پذیر.....	۱۲
۷-۱- مروری بر پایان‌نامه.....	۱۴
۸-۱- خلاصه‌ای از نوآوری‌های این پایان‌نامه.....	۱۵
<b>۲- فصل دوم: فرمولاسیون و استخراج شرایط بهینگی مسیر.....</b>	<b>۱۶</b>
۱-۲- مقدمه.....	۱۷
۲-۲- بیان ریاضی مساله.....	۱۸
۳-۲- استخراج شرایط بهینگی برای مسیر.....	۱۹
۱-۳-۲- قضیه اساسی حساب تغییرات.....	۱۹
۲-۳-۲- استخراج شرایط بهینگی بدون اعمال محدودیت کنترل.....	۲۰
۳-۳-۲- اعمال محدودیت کنترل.....	۲۲
۴-۲- اصلاح قانون کنترل بهینه.....	۲۴
۵-۲- الگوریتم یافتن مسیر بهینه.....	۲۷
۶-۲- همگرایی، وجود و یکتایی جواب.....	۲۸



## ۳- فصل سوم: استخراج معادلات ربات منیپولاتور..... ۲۹

۳۰-۱-۱-۳-۲ مقدمه..... ۳۰

۳۳-۲-۳-۲ استخراج معادلات..... ۳۳

۳۳-۱-۲-۳-۱ معادلات ربات منیپولاتور با مفصل انعطاف‌پذیر..... ۳۳

۳۳-۲-۲-۲ معادلات ربات دو لینکی با مفصل انعطاف‌پذیر و مدل موتور و گیربکس..... ۳۳

۳۴-۳-۲-۳ معادلات برای مسیر بهینه با کمترین گشتاور..... ۳۴

۳۸-۴-۲-۳ معادلات برای مسیر بهینه با کمترین ارتعاش..... ۳۸

۳۹-۳-۳ شبیه‌سازی برای منیپولاتور دو لینکی..... ۳۹

۴۰-۱-۳-۳ طراحی مسیر بهینه با کمترین گشتاور..... ۴۰

۴۱-۲-۳-۳ طراحی مسیر بهینه با کمترین ارتعاش..... ۴۱

۴۱-۴-۳ نتایج شبیه‌سازی طراحی مسیر..... ۴۱

## ۴- فصل چهارم: طراحی کنترلر..... ۴۵

۴۶-۱-۴-۱ مقدمه..... ۴۶

۴۹-۲-۴-۲ روش بازخورد کامل حالات..... ۴۹

۵۳-۳-۴-۳ روش بازخورد خطی‌سازی شده..... ۵۳

۵۹-۴-۴ شبیه‌سازی..... ۵۹

۵۹-۱-۴-۴ کنترلر بازخورد کامل حالات..... ۵۹

۶۱-۱-۱-۴-۴ ربات منیپولاتور..... ۶۱

۶۱-۲-۱-۴-۴ اغتشاش وارد بر سیستم..... ۶۱

۶۲-۲-۴-۴ شبیه‌سازی کنترلر بازخورد خطی‌سازی شده..... ۶۲

۶۳-۱-۲-۴-۴ کنترلر بازخورد خطی‌سازی شده..... ۶۳

۶۴-۲-۲-۴-۴ ربات منیپولاتور..... ۶۴

۶۴-۳-۲-۴-۴ مسیر مرجع..... ۶۴

۶۹-۵-۴ نتایج شبیه‌سازی..... ۶۹

- ۴-۵-۱- شبیه‌سازی با کنترلر بازخورد کامل حالات..... ۶۹
- ۴-۵-۱-۱- نتایج شبیه‌سازی برای مینیپولاتور دو لینکی با مفصل انعطاف‌پذیر..... ۶۹
- ۴-۵-۲- شبیه‌سازی با کنترلر بازخورد خطی‌سازی شده..... ۷۰
- ۴-۵-۲-۱- نتایج شبیه‌سازی برای مینیپولاتور تک لینکی با مفصل انعطاف‌پذیر..... ۷۰
- ۴-۵-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی برای مینیپولاتور دو لینکی با مفصل انعطاف‌پذیر..... ۷۲

## ۵- فصل پنجم: طراحی رویتگر اغتشاش..... ۷۷

- ۵-۱- مقدمه..... ۷۸
- ۵-۲- رویتگر اغتشاش غیرخطی..... ۸۰
- ۵-۳- طراحی رویتگر برای ربات صلب..... ۸۱
- ۵-۴- بررسی پایداری رویتگر برای ربات صلب..... ۸۳
- ۵-۵- طراحی رویتگر برای مینیپولاتور با مفصل انعطاف‌پذیر..... ۸۴
- ۵-۶- بررسی پایداری رویتگر برای مینیپولاتور با مفصل انعطاف‌پذیر..... ۸۵
- ۵-۷- مدل اصطکاک..... ۸۷
- ۵-۸- شبیه‌سازی رویتگر..... ۸۸
- ۵-۸-۱- رویتگر اغتشاش..... ۹۰
- ۵-۸-۲- مسیر مرجع..... ۹۱
- ۵-۸-۳- اغتشاش وارد بر سیستم..... ۹۵
- ۵-۹- نتایج شبیه‌سازی با رویتگر..... ۹۹
- ۵-۹-۱- نتایج شبیه‌سازی با کنترلر بازخورد کامل حالات..... ۹۹
- ۵-۹-۱-۱- نتایج شبیه‌سازی با اعمال اغتشاشات خارجی و داخلی..... ۹۹
- ۵-۹-۱-۲- نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اصطکاک برای مفاصل..... ۱۰۱
- ۵-۹-۲- نتایج شبیه‌سازی با کنترلر بازخورد خطی‌سازی شده..... ۱۰۴
- ۵-۹-۲-۱- نتایج شبیه‌سازی با اعمال اغتشاشات خارجی و داخلی روی مسیر بهینه..... ۱۰۴
- ۵-۹-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی با اعمال اغتشاشات خارجی و داخلی روی مسیریله‌ای..... ۱۰۷

۳-۲-۹-۵- نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اصطکاک برای مفاصل روی مسیرپله‌ای..... ۱۱۰

۱۰-۵- تحلیل نتایج..... ۱۱۳

۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری..... ۱۱۵

۱-۶- نتایج و کارهای جدید انجام گرفته..... ۱۱۶

۲-۶- پیشنهاداتی برای کارهای آینده..... ۱۱۶

مراجع..... ۱۱۸

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- طرح کنترل دو درجه آزادی ..... ۴
- شکل ۲-۱- تقسیم‌بندی مساله طراحی مسیر ..... ۵
- شکل ۳-۱- کنترل حلقه باز و قیود موجود روی ورودی و خروجی ..... ۸
- شکل ۴-۱- بلوک دیاگرام مدار کنترلی سیستم به همراه اغتشاشات ..... ۱۳
- شکل ۱-۳- مدلی از یک منیپولاتور تک لینکی و موتور ..... ۳۲
- شکل ۲-۳- شکل شماتیک یک منیپولاتور دو لینکی با مفصل انعطاف‌پذیر ..... ۳۲
- شکل ۳-۳- نمودار موقعیت زاویه‌ای موتور اول بر حسب زمان ..... ۴۲
- شکل ۴-۳- نمودار سرعت زاویه‌ای موتور اول بر حسب زمان ..... ۴۲
- شکل ۵-۳- نمودار اختلاف موقعیت زاویه‌ای لینک و موتور اول بر حسب زمان ..... ۴۳
- شکل ۶-۳- نمودار اختلاف سرعت زاویه‌ای لینک و موتور اول بر حسب زمان ..... ۴۳
- شکل ۷-۳- نمودار جریان موتور اول بر حسب زمان ..... ۴۴
- شکل ۸-۳- نمودار ولتاژ موتور اول بر حسب زمان ..... ۴۴
- شکل ۱-۴- بلوک دیاگرام طرح کنترلی بازخورد خطی‌سازی شده ..... ۴۸
- شکل ۲-۴- طرحی شماتیک از مدار کنترلی بازخورد کامل حالات در فضای حالت ..... ۵۰
- شکل ۳-۴- بلوک دیاگرام سیستم با کنترل کننده بازخورد کامل حالات ..... ۶۰
- شکل ۴-۴- بلوک دیاگرام سیستم با کنترل کننده بازخورد خطی‌ساز شده ..... ۶۲
- شکل ۵-۴- بلوک دیاگرام شبیه‌سازی با کنترلر بازخورد کامل حالات ..... ۶۶
- شکل ۶-۴- بلوک دیاگرام شبیه‌سازی با کنترلر ..... ۶۷
- شکل ۷-۴- بلوک شبیه‌سازی منیپولاتور با مفصل انعطاف‌پذیر ..... ۶۸
- شکل ۸-۴- بلوک شبیه‌سازی اغتشاشات خارجی ..... ۶۸
- شکل ۹-۴- موقعیت لینک‌ها در حضور کنترلر ..... ۶۹
- شکل ۱۰-۴- گشتاور مفاصل در حضور کنترلر ..... ۶۹
- شکل ۱۱-۴- اغتشاش وارد بر لینک‌ها ..... ۷۰
- شکل ۱۲-۴- اغتشاش وارد بر مفاصل ..... ۷۰

- شکل ۴-۱۳- موقعیت لینک در حضور کنترلر..... ۷۱
- شکل ۴-۱۴- خطای حالت ماندگار لینک در حضور کنترلر..... ۷۱
- شکل ۴-۱۵- گشتاور مفصل در حضور کنترلر..... ۷۲
- شکل ۴-۱۶- موقعیت لینک‌ها در حضور کنترلر و بدون اعمال اغتشاش خارجی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۷- موقعیت لینک‌ها در حضور کنترلر و با اعمال اغتشاش خارجی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۸- خطای حالت ماندگار لینک‌ها در حضور کنترلر و بدون اعمال اغتشاش خارجی..... ۷۴
- شکل ۴-۱۹- خطای حالت ماندگار لینک‌ها در حضور کنترلر و با اعمال اغتشاش خارجی..... ۷۴
- شکل ۴-۲۰- گشتاور مفاصل در حضور کنترلر و بدون اعمال اغتشاش خارجی..... ۷۵
- شکل ۴-۲۱- گشتاور مفاصل در حضور کنترلر و با اعمال اغتشاش خارجی..... ۷۵
- شکل ۴-۲۲- اغتشاشات وارد بر لینک‌ها در حضور کنترلر..... ۷۶
- شکل ۴-۲۳- اغتشاشات وارد بر مفاصل در حضور کنترلر..... ۷۶
- شکل ۵-۱- ساختار مدل اصطکاک ارتقا یافته..... ۸۸
- شکل ۵-۳- طرحی شماتیک از بلوک ..... ۹۰
- شکل ۵-۵- بلوک دیاگرام شبیه‌سازی با کنترلر بازخورد خطی‌سازی شده و رویتنگر..... ۹۴
- شکل ۵-۶- بلوک شبیه‌سازی رویتنگر..... ۹۳
- شکل ۵-۷- بلوک شبیه‌سازی اغتشاشات خارجی لینک‌ها و اصطکاک مفاصل..... ۹۷
- شکل ۵-۸- بلوک شبیه‌سازی مدل اصطکاک ارتقا یافته مفصل اول..... ۹۸
- شکل ۵-۹- بلوک شبیه‌سازی مدل اصطکاک مفصل اول..... ۹۸
- شکل ۵-۲۰- موقعیت لینک‌ها در حضور و عدم حضور رویتنگر..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲۱- سرعت لینک‌ها در حضور و عدم حضور رویتنگر..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲۲- خطای حالت ماندگار لینک‌ها در حضور و عدم حضور رویتنگر..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲۳- گشتاور مفاصل در حضور و عدم حضور رویتنگر..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲۴- اغتشاشات وارد بر لینک‌ها در حضور رویتنگر..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۵- اغتشاشات وارد بر مفاصل در حضور رویتنگر..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۶- موقعیت لینک‌ها در حضور و عدم حضور رویتنگر..... ۱۰۸

- شکل ۵-۲۷- سرعت لینک‌ها در حضور و عدم حضور روی‌تگر ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۲۸- خطای حالت ماندگار لینک‌ها در حضور و عدم حضور روی‌تگر ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۲۹- اغتشاشات وارد بر لینک‌ها در حضور روی‌تگر ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳۰- اغتشاشات وارد بر مفاصل در حضور روی‌تگر ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳۱- موقعیت لینک‌ها در حضور و عدم حضور روی‌تگر ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۲- خطای حالت ماندگار لینک‌ها در حضور و عدم حضور روی‌تگر ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۳- سرعت لینک‌ها در حضور و عدم حضور روی‌تگر ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳۴- گشتاور مفاصل در حضور و عدم حضور روی‌تگر ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳۵- اغتشاش وارد بر لینک‌ها در حضور و عدم حضور روی‌تگر ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۳۶- اصطکاک مفاصل در حضور و عدم حضور روی‌تگر ..... ۱۱۳

## فهرست جداول

- جدول ۳-۱- پارامترهای شبیه‌سازی مدل ربات ..... ۴۰
- جدول ۴-۱- ضرایب مربوط به کنترلر ..... ۶۳
- جدول ۵-۱- پارامترهای شبیه‌سازی برای اعمال اغتشاشات داخلی ..... ۹۶
- جدول ۵-۲- ضرایب مربوط به مدل اصطکاک ..... ۹۷

# ۱- فصل اول: مقدمه



## ۱-۱- مقدمه

امروزه با بکارگیری ربات‌ها در صنعت، نقطه عطفی در پیشرفت تکنولوژی به وجود آمده است. قابلیت برنامه‌ریزی، کار در محیط‌های خطرناک، داشتن قابلیت حرکت و مهارت بیشتر نسبت به ماشین‌های ابزار، کنترل از راه دور و هوشمندی، مزیت‌های بسیار مهمی است که باعث افزایش کاربرد ربات‌ها در صنایع مختلف گردیده است. از سوی دیگر ساخت تولیدات با کیفیت و ظرافت بالاتر و تلورانس‌های پایین و هم‌چنین کاهش زمان تولید، موجب می‌گردد تا ربات‌ها با دقت و سرعت بیشتری حرکت کنند. بدین دلیل می‌بایست ربات‌ها کامل‌تر شده و نقایص آنها برطرف گردد. یکی از فاکتورهای مهم در دقت حرکت ربات با سرعت بالا و یا حمل بار بیشتر، وجود عامل انعطاف در اعضای ربات مانند لینک‌ها، مفاصل و اجزای محرک می‌باشد [1]. الاستیک بودن لینک‌ها و مفاصل دو عامل اصلی انعطاف بازوهای مکانیکی هستند. در این پایان‌نامه فرض می‌کنیم که لینک‌ها صلب بوده و فقط مفاصل الاستیک را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

انعطاف مفاصل ناشی از عواملی از قبیل انعطاف در چرخ‌دنده‌ها، سیستم انتقال نیرو، تسمه‌ها، چرخ‌دنده‌ها و شفت‌ها می‌باشد [2]. اولین راه برای کاهش انعطاف مفاصل، تغییر در طراحی مکانیکی آنها است. به عنوان مثال چرخ‌دنده‌ها را می‌توان از مواد با سختی بالاتر مانند سرامیک ساخت، اما استفاده از این روش محدود است و از طرف دیگر بازوهای مکانیکی ساخته شده را پوشش نمی‌دهد. راه دیگر در نظر گرفتن انعطاف در مدل‌سازی و فرمولاسیون مجدد معادلات دینامیکی حاکم است که می‌توان با شبیه‌سازی معادلات و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل، به اصلاح پارامترها و مشخصات بازوی مکانیکی مانند متغیرهای کنترلی پرداخت. آنچه که مسلم است، در نظر گرفتن انعطاف مفاصل باعث پیچیدگی معادلات دینامیکی و مشکل‌تر شدن حل آنها می‌گردد.

ربات‌هایی که از چرخ‌دنده‌های دایروی، تسمه‌ها و یا شفت‌های بلند برای انتقال حرکت از موتورها به لینک‌های صلب متحرک استفاده می‌کنند، پدیده ویسکو-الاستیک را از خود نشان می‌دهند که این پدیده را می‌توان به صورت متمرکز در مفاصل فرض نمود. انعطاف‌پذیری در انتقال حرکت و کاهش اجزاء

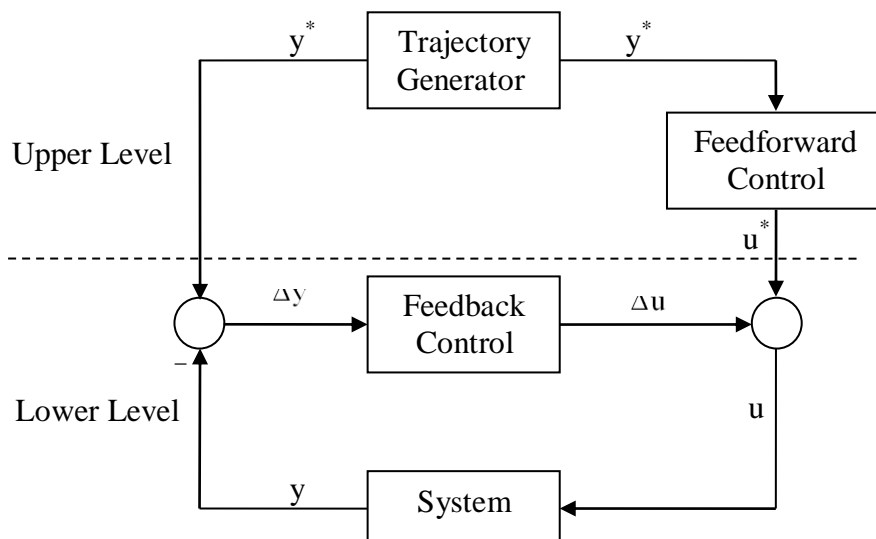
در ربات منیپولاتور، یک رفتار ارتعاشی را فراهم می‌کند که دقت دینامیکی آن را تنزل می‌دهد. برای ربات‌های صنعتی، این رفتار در زمان استفاده از تسمه‌ها، شفت‌های بلند و یا محرک‌های معلوم از راه دور برای به حرکت درآوردن لینک‌ها و نیز در زمان استفاده از هارمونیک درایوها و چرخ‌دنده‌های دایروی جهت بدست آوردن نسبت (دنده) کوچکتر به همراه توان موثرتر بروز می‌کند. جابجایی‌های دینامیکی متغیر با زمان، روی محورهای ربات و بین موقعیت موتورها و لینک‌های متحرک ارائه می‌شوند. این موقعیت بطور نمونه با معرفی الاستیسیته و یا ویسکو-الاستیسیته در مفاصل مدل می‌شوند. با تحمیل ترم‌های غیرخطی، برای طراحی پیشرفته‌تر، قوانین کنترلی ردگیری مسیر که قادر به خنثی نمودن کامل ارتعاشات ناشی از الاستیسیته مفاصل می‌باشند، نیازمند بازخورد تمام حالات می‌باشند. با وجود این هیچ رباتی با مفصل الاستیک، برای اندازه‌گیری تمام حالات (به عنوان مثال موقعیت و سرعت موتورها و لینک‌ها) سنسورهای قابل دسترسی ندارد. در گذشته چندین رویکرد غیرخطی با فرض مجموعه کاهش یافته اندازه‌گیری‌ها ارائه شده است [3].

## ۲-۱- مساله کنترل و طراحی مسیر

### ۱-۲-۱- رابطه بین طراحی و کنترل مسیر

مساله طراحی مسیر و کنترل در طی دهه‌های گذشته بسیار مورد توجه بوده است. پیچیدگی مساله، محققین را بر آن داشته که ساختار کنترل ربات را همانطور که در شکل ۱-۱ [4] نشان داده شده است، در دو سطح تقسیم کنند [5][6]. سطح بالا طراحی مسیر نامیده می‌شود و سطح پایین ردگیری یا کنترل مسیر می‌باشد. در سطح کنترل مسیر موقعیت و سرعت واقعی ربات 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 گونه‌ای طراحی می‌شود که سیستم به طور مناسبی پایدار گردد و نسبت به اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها مقاوم باشد. کنترل پیشخورد به عنوان درجه آزادی دوم برای رسیدن به

عملکرد ردگیری مطلوب از خروجی  $y$  اعمال می‌گردد. تولید کننده مسیر نیز مسیر مرجع  $y^*$  را برای هر دو کنترل پیش‌خورد و بازخورد تولید می‌کند. کنترل پیش‌خورد باید یک فرمان ورودی  $u^*$  به گونه‌ای تولید کند که سیستم مسیر خروجی مطلوب  $y^*$  را دنبال نماید. بنابراین در سطح طراحی مسیر، باید یک مسیر خروجی قابل قبول و تحقق پذیر  $y^*$  تولید گردد. در بسیاری از مقالات مربوط به طراحی مسیر ربات‌ها، مولفین مسائل مختلفی را بیان کرده‌اند و روشهای حل مختلفی را ارائه نموده‌اند. کارهای قبلی را می‌توان بر اساس سبک اجرا، مدلی که برای ربات در نظر گرفته می‌شود و روش عددی بکار گرفته شده، تقسیم‌بندی نمود. این تقسیم‌بندی در شکل ۱-۲ ([4]) آورده شده است.

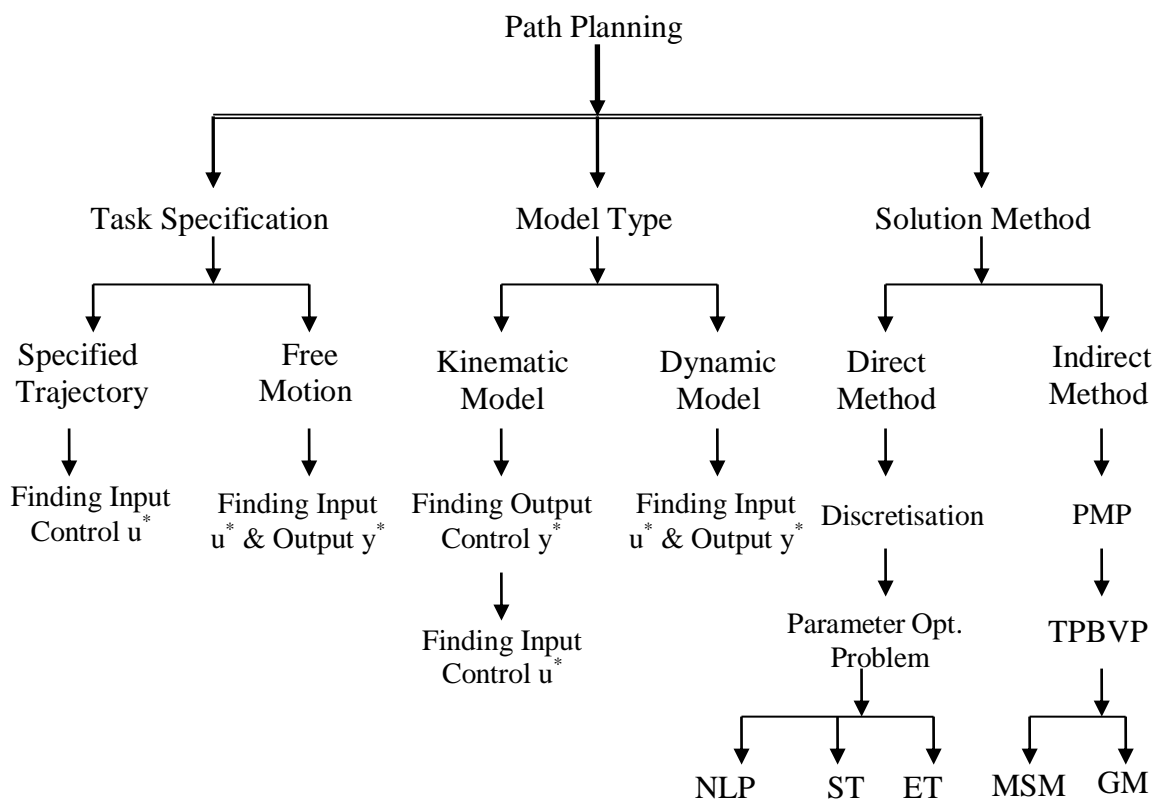


شکل ۱-۱- طرح کنترل دو درجه آزادی

### ۱-۲-۲- تقسیم‌بندی مساله طراحی مسیر

ربات‌های منیپولاتور هم اکنون بطور گسترده‌ای در صنعت، مراقبت‌های پزشکی و منازل مورد استفاده قرار می‌گیرند. دقت ردگیری مسیر در بسیاری از این کاربردها مورد نیاز است، از اینرو همواره یکی از مسائل مورد توجه محققین بوده است. این مسئله از جنبه‌های مختلفی قابل بررسی می‌باشد. طراحی مسیر برای ربات‌ها می‌تواند متناسب با وظایفی که برای آنها تعریف می‌گردد، صورت پذیرد. در بین

وظایفی که منیپولاتور انجام می‌دهد، اولین تقسیم‌بندی مربوط به نوع حرکت مورد نظر می‌باشد. بسته به وظیفه ربات، ممکن است مسیر پنجه در فضای کاری مشخص باشد. به عنوان 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 شده تعیین می‌نماید [6][7]. در این حالت مسیر خروجی  $y^*$  مشخص است و کنترل پیش‌خور  $u^*$  باید به گونه‌ای محاسبه گردد که سیستم مسیر  $y^*$  را دنبال نماید. از طرف دیگر، در حرکت نقطه به نقطه (جوش نقطه‌ای، عمل برداشتن و قرار دادن و غیره) حرکت پنجه بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی آزاد می‌باشد. در این حالت طراح، مسیر بهینه  $y^*$  و کنترل پیش‌خور متناظر  $u^*$  را تعیین می‌نماید [8][9].



شکل ۱-۲- تقسیم‌بندی مساله طراحی مسیر