بسم الله

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی مکانیک

کنترل بهینه ربات با افزونگی درجه آزادی در حرکت نقطه به نقطه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

استاد راهنما : دکتر محمد حسن‌قاسمی

استاد مشاور : دکتر مرتضی دردل

استاد مشاور دوم : دکتر عطاالله ابراهیم‌زاده

نگارش : نواب کشیری

فروردین ۱۳۹۰

با تشکر و سپاس از

لطف و حمایت پدر و مادر عزیزم،

زحمات اساتید گرامیم به ویژه دکتر حسن قاسمی و دکتر دردل،

و کلیه دوستانی که به اینجانب یاری رساندند.

چکیده

در این تحقیق، کنترل حداقل زمان ربات‌های چند لینکی سری با افزونگی درجات آزادی در دو حالت حرکت نقطه به نقطه و حرکت مسیر مشخص پنجه با درنظر گرفتن قید گشتاور عملگر و تکانه عملگر بررسی می‌شود. برای بررسی کنترل حداقل زمان در حرکت نقطه به نقطه از اصل حداقل‌سازی پنتریاگین استفاده می‌شود. باتوجه به پیچیدگی مساله مقدار مرزی منتجه از مساله حداقل زمان، روشی تکراری برای حل حداقل زمان سیستم با استفاده از حل حداقل انرژی ارایه می‌گردد تا حل حداقل زمان از کاهش زمان درنظر گرفته شده برای حل حداقل انرژی محاسبه شود. همچنین، راهکاری برای محدود کردن تکانه عملگرها نیز ذکر می‌شود. در ادامه، باتوجه به این‌که مساله سینماتیک معکوس ربات‌های افزونه حالت-ناقص می‌باشد، حالت عمومی شرط مرزی درنظر گرفته می‌شود. همچنین به‌منظور اجتناب از برخورد ربات با مانع، ربات و مانع بصورت دایروی مدل شدند و جمله‌ای به تابع هزینه اضافه شد تا فاصله حداقلی بین ربات و مانع حفظ شود.

برای بررسی کنترل حداقل زمان در حرکت مسیر مشخص، آنالیز صفحه فاز و بهینه‌سازی خطی استفاده می‌شود، و نیز روشی برای درنظر گرفتن قید تکانه عملگرها ارایه می‌گردد. در ادامه، بااستفاده از مفهوم ناحیه تله و مسدود، روشی برای تعیین نقاط سوییچ و تولید خط‌سیر حداقل زمان پیشنهاد شد. چند شبیه‌سازی عددی نیز انجام می‌گیرد تا علاوه بر تایید قابلیت، صحت و دقت روش‌های مذکور، تاثیر اعمال قید تکانه عملگر نیز بررسی شود.

فهرست مطالب

چکیده **۱**

فهرست مطالب **۲**

۱. فصل اول- مقدمه **۴**

۱-۱. پیشگفتار ۴

۱-۲. کنترل ربات‌ها ۱۰

۱-۳. مروری بر تحقیقات انجام شده و تعریف مساله ۱۲

۱-۴. روند بحث ۱۵

۲. فصل دوم- مقدمات تحلیلی **۱۷**

۲-۱. کنترل بهینه ۱۷

۲-۱-۱. مقدمه ۱۷

۲-۱-۲. تابع هزینه ۱۸

۲-۱-۳. نظریه کنترل بهینه ۲۰

۲-۲. مکانیک ربات ۳۱

۲-۲-۱. درجه آزادی و افزونگی درجه آزادی ۳۱

۲-۲-۲. سینماتیک ربات ۳۲

۲-۲-۲-۱. روابط سینماتیک ربات دو درجه آزادی صفحه‌ای ۳۵

۲-۲-۲-۲. روابط سینماتیک ربات سه درجه آزادی صفحه‌ای ۳۵

۲-۲-۲-۳. روابط سینماتیک ربات فضایی اسکربت ۳۶

۲-۲-۳. دینامیک ربات ۳۸

۲-۲-۳-۱. معادلات حرکت ربات دو درجه آزادی صفحه‌ای ۴۱

۲-۲-۳-۲. معادلات حرکت ربات سه درجه آزادی صفحه‌ای ۴۲

۲-۲-۳-۳. معادلات حرکت ربات فضایی اسکربت ۴۲

۳. فصل سوم- کنترل حداقل زمان نقطه به نقطه **۴۴**

۳-۱. مقدمه ۴۴

۳-۲. تعریف مساله کنترل بهینه ۴۶

۳-۳. استخراج شرایط بهینگی ۴۷

۳-۴. ایجاد حدس اولیه ۴۹
۳-۵. حل مساله حداقل زمان ۵۱
۳-۶. اعمال قید تکانه ۵۳
۳-۷. حالت عمومی شرط مرزی در زمان نهایی (اعمال افزونگی سینماتیکی ربات) ۵۵
۳-۸. اجتناب از برخورد با مانع ۵۶
۳-۹. شبیه‌سازی عددی ۵۹
۳-۹-۱. حل حداقل زمان ربات دولینکی صفحه‌ای ۵۹
۳-۹-۲. حل حداقل زمان ربات سه‌لینکی صفحه‌ای ۶۲
۳-۹-۳. حل حداقل زمان ربات پوما ۵۶۰ ۶۶
۴. فصل چهارم- کنترل حداقل زمان مسیر مشخص ۷۰
۴-۱. مقدمه ۷۰
۴-۲. معادلات سینماتیک حرکت مسیر ۷۲
۴-۳. معادلات دینامیک حرکت مسیر ۷۴
۴-۴. قیود حرکت ۷۴
۴-۵. مساله حداقل زمان حرکت مسیر مقید ۷۵
۴-۶. الگوریتم تولید خط‌سیر ۷۷
۴-۷. شبیه‌سازی‌های عددی ۸۳
۴-۷-۱. حل حداقل زمان ربات اسکربت ۸۳
۴-۷-۲. حل حداقل زمان ربات سه‌درجه آزادی صفحه‌ای ۸۷
۵. فصل پنجم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۳
دستاوردهای پژوهشی ۹۷
مراجع ۹۸

۱. فصل اول- مقدمه

۱-۱. پیشگفتار[۱]

مردم همواره به دنبال خودکار نمودن امور بوده‌اند تا زندگی را به سمت آسایش و رفاه سوق دهند. به عنوان مثال هِرون[۲] ریاضی دان و مهندس یونانی (۱۰-۷۰ پس از میلاد مسیح) چندین سیستم اتوماتیک را برای اولین بار ابداع کرد که از جمله آن‌ها می‌توان درب اتوماتیک صومعه را نام برد که با روشن شدن مشعلی در محراب صومعه، درب اصلی صومعه باز می‌شود. اما موج حقیقی تغییرات در زمان انقلاب صنعتی در اوایل قرن هجدهم رخ داد و این جرقه‌ای برای سیستم هوشمند صنعتی بود.

باتوجه به تحولات شگرفی که برای بکارگیری ماشین‌های خودکار در قرن بیستم رخ داد، بسیاری از صاحب نظران را بر آن داشت که این قرن را عصر اتوماسیون بنامند. هر ماشین الکترومکانیکی، هوشمند، خودکار، چندمنظوره، دارای حسگر و قابل برنامه نویسی را ربات گویند و علم طراحی، ساخت و کاربرد ربات را رباتیک می نامند. از آنجایی‌که ربات‌ها دقت و سرعت مناسبی در انجام امور

[۱] اطلاعات این بخش برگرفته از مرجع [۱] می‌باشد

[۲] Heron

مختلف دارند در این عصر مورد توجه زیادی قرار گرفتند تا به عنوان جایگزین انسان در انجام بسیاری از امور، به ویژه کارهای تکراری، ایفای نقش کنند.

ریشه اصلی لغت *ربات* کلمه "Robota" می‌باشد که کلمه‌ای به معنی «کارگر» در زبان اسلواکی می‌باشد. این لغت نخستین بار در بین سال‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ توسط کارل کاپک[۱] نویسنده اهل چک در نمایشنامه‌ای به نام "Rossum's Universal Robots" مطرح شد که در آن موجودات کوچک انسان نما ربات نامیده شدند. کلمه رباتیک که در شاخه علمی مورد نظر به‌کار می‌رود توسط ایزاک آزیموف[۲]، نویسنده داستان‌های علمی-تخیلی، ابداع شد. وی کتاب «سه قانون رباتیک» را خلق کرد که این قوانین به دفعات توسط دیگران در قوانین واقعی و تخیلی استفاده شد. این قوانین در سال ۱۹۴۲ در کتاب "Runaround" به شرح زیر بیان شد :

- یک ربات نباید به انسان آزار برساند و اجازه ندهد ضرر به چیزی برسد.
- یک ربات باید از انسان اطاعت کند مگر آنکه خلاف قانون قبل باشد.
- یک ربات باید خودش را در برابر خطر حفظ کند مگر آنکه خلاف قوانین قبل باشد.

اگرچه تعریف دقیقی برای ربات وجود ندارد، دو تعریف معروف برای ربات وجود دارد که به شرح زیر است :

- فرهنگ لغت مختصر آکسفورد[۳] : ماشینی مکانیکی با ظاهر یک انسان که گرچه فاقد شخصیت است اما باهوش و مطیع است. این تعریف زیاد صحیح نمی‌باشد چراکه الزاما ربات‌ها انسان‌نما و کاملا هوشمند نمی‌باشند.
- انجمن رباتیک آمریکا[۴] : وسیله‌ای با دقت عمل زیاد که قابل برنامه‌ریزی مجدد بوده و توانایی انجام چند کار را دارد و برای حمل اشیا و یا سایر حرکات مورد نظر برنامه ریزی می‌شوند و هدف

---

[۱] Karl capek

[۲] Isaac Asimov

[۳] Concise Oxford Dictionary

[۴] Robotics Society of America

از ساخت آن انجام وظایف مختلف می‌باشد. گرچه این تعریف از تعریف قبل مناسب‌تر است اما نمی تواند مبین یک تعریف قطعی و دقیق از ربات باشد.

تاریخچه برخی از تحولات مهم در حوزه رباتیک در زیر ذکر شده است:

۱۹۴۲ : اولین کنترلر ترتیبی خودکار[۱] در دانشگاه هاروارد طراحی شد.

۱۹۴۶ : جرج دیول[۲] یک ربات بازنواخت[۳] همه منظوره را با استفاده از ضبط مغناطیسی برای کنترل ماشین به ثبت رساند.

۱۹۴۷ : جان ماوچلی[۴] و جان اکرت[۵] اولین کامپیوتر الکترونیکی را در دانشگاه پنسیلوانیا ساختند.

۱۹۵۱ : رِیموند گویرتز[۶] در فرانسه اولین بازوی مفصلی کنترل از راه دور را برای انجام مأموریت هسته‌ای طراحی کرد. طراحی آن مبتنی بر کلیه روابط متقابل مکانیکی بین بازوی اصلی و فرعی با استفاده از روش متداول تسمه و قرقره بود که نمونه‌هایی برگرفته از این طرح هنوز هم در مواردی که نیاز به لمس نمونه‌های کوچک هسته‌ای است دیده می‌شود.

۱۹۵۴ : جرج دیول اولین ربات قابل برنامه‌ریزی به نام "Unimate" را طراحی کرد. این امر زمینه‌ای برای نام‌گذاری شرکت "Unimation" در آینده شد.

۱۹۵۵ : جیکس دناویت[۷] و ریچارد هارتنبرگ[۸] روش خود برای انتخاب دستگاه مختصات مرجع بازوهای مکانیکی را معرفی کردند.

۱۹۵۶ : جوزف انگلبرگر[۱] امتیاز ربات "Unimate" را خرید و شرکت "Unimation" را تاسیس کرد.

---

[۱] Automatic sequence controller

[۲] George Devol

[۳] Playback Robot

[۴] John Mauchly

[۵] John Presper Eckert

[۶] Reymond Goertz

[۷] Jaques Denavit

[۸] Richard S. Hartenberg

۱۹۵۹ : ماروین مینسکی[۲] و جان مک‌کارتی[۳] آزمایشگاه هوش مصنوعی را در دانشگاه MIT بنا نهادند. همچنین مک‌کارتی زبان برنامه نویسی LISP را بوجود آورد که همچنان در تحقیقات هوش مصنوعی مهم بشمار می‌آید.

۱۹۶۰ : شرکت "Unimation" توسط شرکت "Coudoc" خریداری شد و توسعه سیستم ربات‌های آن آغاز گردید. همچنین، اولین ربات استوانه ای شکل به نام "Versatran" که توسط جانسون[۴] و کِویک[۵] طراحی شده بود فروش رفت.

۱۹۶۱ : شرکت "General Motors" اولین ربات صنعتی "Unimate" را خریداری کرد و آن را در خط تولید خود، برای یک ماشین ریخته‌گری تحت فشار، قرار داد.

۱۹۶۳ : مک‌کارتی آزمایشگاه هوش مصنوعی دیگری را در دانشگاه استنفورد بنا کرد. همچنین، اولین سیستم بینایی ربات در این سال طراحی شد.

۱۹۶۵ : دانشگاه کارنگی ملون[۶] موسسه رباتیک خود را تأسیس کرد. در این سال، تبدیل دستگاه مختصات همگن[۷] که امروزه نیز در مبانی رباتیک بکار می‌رود معرفی شد. همچنین ربات "Verstran" در ژاپن خریداری شد و به‌عنوان نخستین ربات به ژاپن وارد شد.

۱۹۶۸: کاوازاکی مجوز طراحی ربات‌های هیدرولیک را از "Unimation" گرفت و تولید آن را در ژاپن آغاز کرد.

۱۹۶۸ : شیکی[۸] یک ربات سیار با قابلیت بینایی و کنترل با یک کامپیوتر به اندازه یک اتاق ساخت.

---

[۱] Joseph Engelberger
[۲] Marvin Minsky
[۳] John McCarthy
[۴] Harry Johnson
[۵] Veljkomilen kovic
[۶] Carnegie Mellon
[۷] Homogeneous Transformation
[۸] Shakey

۱۹۷۰: ویکتور شینمن[۱] از دانشگاه استنفورد بازویی استاندارد طراحی کرد که به ربات استنفورد معروف است.

۱۹۷۳ : سینسیناتی میلاکرون[۲] اولین ربات صنعتی خود را با نام T3 که توسط یک مینی کامپیوتر کنترل می شد را عرضه کرد.

۱۹۷۴ : پروفسور شینمن، سازنده ربات استنفورد، ربات "Vicarm Inc" را به عنوان رباتی جهت مصارف صنعتی روانه بازار کرد. بازوی جدید با یک مینی کامپیوتر کنترل می‌شد.

۱۹۷۶ : "Vicarm Inc" در کاوشگر فضایی وایکینگ ۱و۲ استفاده شد.

۱۹۷۷ : شرکت اروپایی ASEA ، دو مدل ربات با موتور الکتریکی ارایه کرد که هر دو ربات از یک کنترلر میکرو کامپیوتر برای برنامه ریزی عملکرد خود استفاده می‌کردند.

۱۹۷۸ : شرکت "unimation" با استفاده از تکنولوژی ربات "Vicarm Inc"، ربات "PUMA" به معنی «ماشین قابل برنامه‌ریزی برای مونتاژ»[۳] را ارایه داد. امروزه همچنان می‌توان این ربات را در بسیاری از آزمایشگاه‌های تحقیقاتی یافت. همچنین، در این سال ماشین خودکار "Brooks" تولید شد.

۱۹۷۹ : شرکت "IBM" و "SANKYO" ربات "SCARA" به معنی «ربات با بازوی انتخاب کننده، جمع کننده و مفصلی»[۴] که در دانشگاه یاماناشی[۵] ژاپن برنامه‌ریزی و تولید شده بود، را فروختند.

۱۹۸۰ : شرکت فانوک فوجیتسو[۶] در ژاپن اولین کارخانه کاملا خودکار را ساخت.

۱۹۸۱ : گروه ربات‌های "CRS" عرضه شد. همچنین، اولین ربات با عملگر مستقیم (بدون جعبه دنده) در دانشگاه کارنگی ملون ساخته شد.

---

[۱] Victor Scheinman

[۲] Cincinnate Milacron

[۳] Programmable Universal Machine for Assembly

[۴] selective compliant articulated robot arm

[۵] Yamanashi

[۶] Fujitsu Fanuc

۱۹۸۲ : شرکت "Fanuc" و "General Motors" ربات "GM Fanuc" را برای ارایه در شمال آمریکا روانه بازار کردند.

۱۹۸۴ : جوزف انگلبرگر ایجاد تغییرات در رباتیک را آغاز کرد و پس از آن نام ربات‌های کمکی[۱] به ربات‌های خدماتی توسعه یافته[۲] تغییر یافت.

۱۹۸۶: با خاتمه یافتن مجوز ساخت شرکت "Unimation"، کاوازاکی خط تولید ربات‌های الکتریکی خود را توسعه داد.

۱۹۸۸: گروه "Staubli"، شرکت "Unimation" را از شرکت "Westing house" خرید.

۱۹۹۴: یک ربات متحرک شش پا از مؤسسه رباتیک "CMU" یک آتشفشان در آلاسکا را برای نمونه‌برداری از گازهای آتشفشانی کاوش کرد.

۱۹۹۷ : ربات مسیریاب مریخ ناسا وارد مریخ شد.

۱۹۹۸ : شرکت "Honda" ربات "p3" را، به عنوان هشتمین نمونه در پروژه طراحی ربات‌های شبه انسان که در ۱۹۸۶ آغاز شده بود، عرضه کرد.

۲۰۰۰ : شرکت "Honda" ربات "Asimo" را، به عنوان نسل بعدی از سری ربات‌های شبه انسان، عرضه کرد. همچنین، در این سال شرکت "Sony" از ربات شبه انسان خود به نام "SDR" به معنی«ربات رویایی Sony»[۳] پرده برداری کرد.

۲۰۰۱ : شرکت "Sony" دومین نسل از ربات‌های شبه سگ به نام "Aibo" را عرضه کرد.

۲۰۰۲ : شرکت "iRobot" برای اولین بار ربات نظافتچی "Roomba" را ارایه کرد.

۲۰۰۳ : شرکت "Epson" ربات "Monsieur II-P" را ارایه کرد که قادر به پرواز است.

۲۰۰۴ : شرکت "Epson" کوچکترین ربات را ارایه کرد که تنها ۱۰ گرم وزن دارد و پرواز می‌کند.

---

[۱] Helpmate

[۲] Developed service Robots

[۳] Sony Dreamy Robot

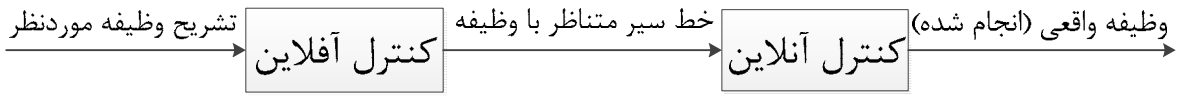
۲۰۰۵ : تحقیقات در دانشگاه کرنل[۱] منجر به ساخت اولین ربات خودتکرار[۲] شد.

...

۱-۲.کنترل ربات‌ها

اگرچه قابلیت‌های بالای ربات‌ها منجر به استفاده روزافزون آن‌ها به عنوان ابزاری توانمند و یا جایگزینی آن‌ها با انسان‌ها می‌شود، اما ربات‌ها نیز مانند تمام ماشین‌ها به اقداماتی مهمی از جمله کنترل ربات‌ها نیازمند است.

بررسی کنترل ربات‌ها در دهه‌های اخیر همواره مورد توجه بوده است. محققانی که به بررسی این موضوع پرداخته‌اند مساله کنترل ربات‌ها را، همانطور که در شکل ۱- ۱ نشان داده شده است، به دو بخش اساسی تقسیم می‌کنند [۲]-[۳]. بخش اول که کنترل آفلاین[۳] نیز نامیده می‌شود یک سیستم کنترلی حلقه باز می‌باشد. هدف این بخش تعیین کنترل‌ها و خط سیر[۴] حرکت ربات براساس وظیفه موردنظر[۵] ربات است که باتوجه به مدل دینامیکی و سینماتیکی ربات و نیز درنظر گرفتن محدودیت‌های مدل واقعی محاسبه می‌شود. بخش دوم که کنترل آنلاین می‌باشد یک سیستم کنترلی حلقه بسته است. در این بخش خط سیر محاسبه شده در بخش اول روی ربات واقعی اعمال می‌شود که باتوجه به حلقه بسته بودن این بخش تاثیر اغتشاشات و سایر عوامل احتمالی، باتوجه به نوع این سیستم و طراحی آن، تاحدی برطرف می‌شود.



شکل ۱- ۱. طرح کلی دو بخش اساسی کنترل ربات‌ها

---

[۱] Cornell University

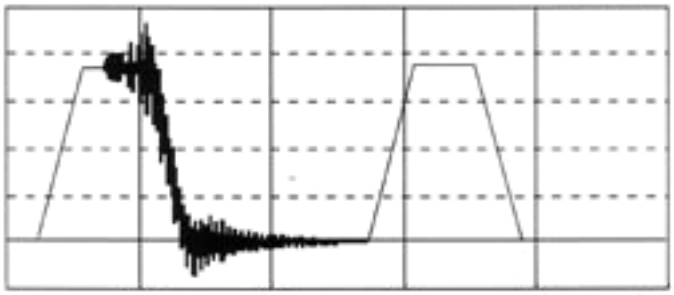
[۲] Self-replicating robot

[۳] Off-line

[۴] Trajectory

[۵] Desired task

باتوجه به اینکه حداکثر نزدیکی وظیفه مورد نظر و وظیفه واقعی مطلوب است، هر دو بخش کنترلی بسیار مهم است و باید کلیه پارامترها و محدودیت‌های سیستم در هر دو بخش درنظر گرفته شود. یکی از مهمترین محدودیت‌ها، محدودیت‌های عملگرها می‌باشند. که از جمله مهمترین آن‌ها محدود بودن گشتاور و میزان تغییرات گشتاور عملگرها می‌باشد. نتایج آزمایش یک عملگر صنعتی [۴] در شکل ۱- ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- ۲. نمودار گشتاور بر حسب زمان آزمایش یک عملگر صنعتی [۴].

الزام محدود بودن گشتاور و میزان تغییرات گشتاور براساس نتیجه این آزمایش، طبق گزارش تولید کننده آن، تایید می‌شود.

معمولا حرکت ربات‌ها، و به تبع آن مساله کنترلی، به دو دسته تقسیم می‌شوند :

۱- حرکت نقطه به نقطه که حرکت پنجه مقید به آغاز از یک نقطه مشخص و پایان به نقطه‌ای دیگر است و از جمله موارد کاربرد آن، برداشتن و گذاشتن[۱] می‌باشد.

۲- حرکت مسیر مشخص که پنجه مقید به حرکت بر روی مسیری مشخص است که از جمله موارد کاربرد این حرکت در برشکاری و جوشکاری می‌باشد.

تاکنون روش‌های زیادی برای بررسی مسایل کنترلی مذکور ارایه شده است. روش‌هایی که برای مساله کنترل آفلاین ارایه شده‌اند به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول روش‌هایی هستند که خط سیر را صرفا براساس مدل سینماتیکی محاسبه می‌کنند و سپس کنترل‌ها بر اساس مدل دینامیکی محاسبه می‌شوند. باتوجه به اینکه محدودیت‌های دینامیکی سیستم، بویژه محدودیت‌های

[۱] Pick and Palce Operation

عملگرها که پیش‌تر بدان اشاره شد، در طراحی خط سیر اعمال نمی‌شود؛ احتمال آنکه کنترل‌های مورد نیاز فراتر از توان سیستم باشد زیاد است که این مشکل مانع از عملکرد مطلوب سیستم می‌شود. دسته دوم روش‌هایی است که خط سیر را براساس مدل دینامیکی، و در صورت نیاز مدل سینماتیکی، محاسبه می‌شوند که امکان تاثیر کلیه قیدها، اعم از قیود دینامیکی و سینماتیکی، وجود دارد. از اینرو، این دسته از روش‌ها مناسب‌تر از روش‌های دسته اول به شمار می‌آیند اگرچه درنظر گرفتن قیود زیاد حل این مساله را تاحد زیادی پیچیده می‌کند و در مواردی غیرممکن می‌سازد.

از جمله روش‌های مهم کنترلی شامل کنترل آفلاین و آنلاین، روش کنترل بهینه می‌باشد. این روش که علاوه بر کنترل ربات‌ها، کاربرد وسیعی در سایر شاخه‌های علوم مهندسی نظیر برق و مکانیک و هوافضا و ... دارد از حدود سال ۱۹۵۰ بوجود آمد. در آن زمان به‌خاطر فعالیت‌های شوروی و آمریکا در رابطه با کشفیات در منظومه شمسی شاخه‌ی جدیدی آغاز شد که هدف آن ایجاد مسیرهایی است که یک فضاپیما که با یک موتور راکت کوچک کنترل و هدایت می‌شود، به هدف مورد نظرش در کمترین زمان ممکن و یا با کمترین سوخت مصرف شده برسد. این نوع مسایل جدید با روش‌هایی که تا آن زمان ابداع شده بودند قابل حل نبودند و نظریه جدیدی نیاز بود که توسط پنتریاگین مطرح شد [۵].

۱-۳. مروری بر تحقیقات انجام شده و تعریف مساله

در دهه‌های گذشته، حل مساله حداقل زمان ربات‌ها در تحقیقات زیادی بررسی شد. بررسی‌های انجام شده در این زمینه در دو زمینه اصلی انجام شد. زمینه اول حرکت بدون درنظر گرفتن مسیر حرکت ربات که حرکت نقطه به نقطه نامیده می‌شود و زمینه دوم حرکت با درنظر گرفتن مسیر حرکت پنجه ربات که حرکت مسیر مشخص نامیده می‌شود.

تحقیقاتی که در زمینه حل حداقل زمان حرکت نقطه به نقطه انجام شده است عموما براساس اصل حداقل‌سازی پنتریاگین می‌باشد که براساس آن مساله کنترل بهینه به یک مساله مقدار مرزی

دونقطه‌ای تبدیل می‌شود. گیرینگ و همکارانش [۶] حرکت حداقل زمان یک ربات دولینکی را در شرایط مرزی مختلف با استفاده از اصل پنتریاگین بررسی کردند. ویلیگنبروگ و لوپ [۷] نیز مساله حداقل زمان ربات با درنظر گرفتن میرایی کلمبی را مطالعه کردند و نتایج را با نتایج یک روش مستقیم تایید کردند. فتوحی و زایزوسکی [۸] با استفاده از ترکیب روش پرتابی و روش پیشرو-پسرو روشی برای ایجاد حدس اولیه مناسب و حل حداقل زمان ربات‌های دولینکی در مسیرهای غیرتکین ارایه دادند. در تحقیقات مذکور حالت‌های مختلف تغییر وضعیت (سوییچ) کنترل‌ها درنظر گرفته شده و کمترین زمان از بین آن‌ها انتخاب شده است که برای ربات‌هایی که درجه‌آزادی بیشتری دارند این روش‌ها عملی نمی‌باشند. چن و دسروچرز [۹] روشی برای کنترل حداقل زمان ربات مذکور بر مبنای حل حداقل زمان-انرژی ذکر کردند تا حل حداقل زمان به طور تکراری از حل حداقل زمان انرژی بدست آید. اگرچه حل مساله مقدار مرزی منتجه از این روش نسبت به مساله مقدار مرزی منتجه از مساله حداقل زمان به مراتب ساده‌تر می‌باشد، اما اعمال این روش برای سیستم‌های پیچیده همچنان بسیار مشکل می‌باشد.

کنترل بهینه در حرکت نقطه به نقطه با اجتناب از برخورد با موانع نیز در چندین تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. شیلر و دوبوسکی [۱۰] حل حداقل زمان در حضور موانع را با استفاده از یک روش جستجو بررسی کردند. آن‌ها برای این کار فضای کاری را محدود به فضایی کردند که امکان برخورد ربات با مانع وجود نداشته باشد و در فضای کاری باقیمانده مسیری که منجر به کمترین زمان پیمایش مسیر شود را جستجو کردند. گالیکی [۱۱] کنترل حداقل انرژی با اجتناب از برخورد با موانع را با استفاده از اصل حداقل‌سازی پنتریاگین بررسی کرد. چتیبی و همکارانش [۳] مساله کنترل بهینه با اجتناب از برخورد با موانع را با استفاده از تبدیل مساله کنترل بهینه به مساله بهینه سازی بررسی کردند.

تحقیقاتی که در زمینه حل حداقل زمان حرکت مسیر مشخص انجام شده است عموما براساس تحقیق انجام شده توسط باب‌رو و همکارانش [۱۲] و تحقیق صورت گرفته توسط شین و مک‌کی

[۱۳] می‌باشد. در تحقیقات مذکور نشان داده شده که برای آنکه یک ربات پنجه خود را بر روی مسیری در حداقل زمان جابجا کند، بایستی شتاب حرکت پنجه در هر لحظه اکسترمم باشد. در این مطالعات منحنی مرز ناحیه قابل دسترس معرفی شد و نشان داده شد که تا وقتی که خط سیر حرکت ربات درصفحه فاز حرکت در بخش قابل دسترس قرار داشته باشد امکان کنترل حرکت پنجه ربات بر روی مسیر موردنظر امکان‌پذیر است. بدین‌ترتیب خط سیر حرکت ربات بدین‌گونه است که بخش آغازین حرکت با شتاب مسیر حداکثر و بخش پایانی حرکت با شتاب مسیر حداقل می‌باشد و در بخش‌های میانی وضعیت شتاب به‌طور تناوبی تغییر می‌کند. از نتیجه تحقیقات مذکور به دفعات استفاده شده است که از جمله آن می‌توان به تحقیق ارایه شده توسط فایفر و جوآنی [۱۴] اشاره کرد که به بررسی روشی برای تعیین نقطه سوییچ روی مرز پرداختند. زلاجپا [۱۵] با معرفی ناحیه تله که خط سیر از آن ناحیه خارج نمی‌شود و ناحیه مسدود که خط سیر به آن وارد نمی‌شود، به بیان مباحث جدیدی در تعیین نقاط سوییچ پرداخت. همچنین با تبدیل قید سرعت برحسب مسیر و تعیین محدوده مقید در صفحه فاز، این قید را نیز در محاسبات وارد کرد. قاسمی و صدیق [۱۶] با معرفی نقاط بحرانی و استفاده از مشخصات منحنی مرز ناحیه قابل دسترس روشی تحلیلی برای تعیین نقاط سوییچ ارایه کردند. کنستان‌تینسکو و کرافت [۱۷] و [۱۸] قید تکانه عملگر را با استفاده از مشتق معادله حرکت به قید تکانه مسیر تبدیل کرده و با معرفی منحنی مرز ناحیه غیرقابل دسترس سه بعدی این قید را اثر دادند و بدین‌ترتیب روشی برای حل مساله حداقل زمان با درنظر گرفتن قید تکانه عملگر ارایه کردند. لازم به ذکر است، که تحقیقات مذکور براساس عدم افزونگی سینماتیکی ربات مورد نظر بوده است چراکه افزونگی سینماتیکی محدود بودن جواب مساله سینماتیک معکوس ربات را نفی کرده و استفاده از فرمولاسیون ارایه شده در مطالعات مذکور را غیرممکن می‌سازد. ما و واتانابه [۱۹] و [۲۰] با ارایه فرمولاسیون جدید روش ارایه شده توسط باب‌رو و همکارانش [۱۲] را برای ربات‌های با افزونگی سینماتیکی تعمیم دادند. همچنین، باتوجه به اینکه افزونگی ربات تشکیل منحنی مرز ناحیه قابل دسترس را امکان‌پذیر نمی‌سازد، روشی تقریبی برای تعیین نقاط سوییچ ارایه کردند.

در تحقیقات دیگری که در این زمینه انجام گرفت، مک‌کارتی و باب‌رو [۲۱] نشان دادند که چنانچه بنا باشد پنجه یک ربات بر روی یک مسیر مشخص حرکت داده شود، حداقل تعداد عملگرهای اشباع شده عدد ثابتی است. همچنین گالیکی [۲۲] با انجام تحقیقی مشابه و بررسی حل حداقل زمان کنترل ربات‌های افزونه نشان داد که حداکثر تعداد عملگرهای اشباع نیز عدد ثابتی است.

لازم به ذکر است، از آن‌جایی‌که معمولا بکارگیری اصل پنتریاگین برای حل حداقل زمان کنترل نقطه به نقطه ربات‌ها منجر به مساله معادلات دیفرانسیل مقدار مرزی نسبتا پیچیده می‌شود [۲۳] و حرکت مستقیم الخط حرکت بسیار مناسبی برای ربات‌های صنعتی به‌شمار می‌آید [۲۴]؛ در بسیاری از موارد برای بررسی حرکت نقطه به نقطه، حرکت مسیر مشخص با درنظر گرفتن مسیر مستقیم بین دو نقطه مذکور درنظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق مساله کنترل حداقل زمان به‌صورت مساله کنترل بهینه تعریف می‌شود. ربات مورد نظر یک ربات سری است و از انعطاف‌پذیری مفاصل و اعضا و نیز اثرات اصطکاک صرفنظر می‌شود. مساله حداقل زمان مذکور در دو نوع حرکت نقطه به نقطه و حرکت مسیر مشخص بررسی می‌شود. برای بررسی حرکت مسیرمشخص از اکسترمم‌سازی شتاب مسیر و برای بررسی حرکت نقطه به نقطه از اصل حداقل‌سازی پنتریاگین استفاده می‌شود و نیز اجتناب از برخورد با مانع نیز در این حرکت درنظر گرفته می‌شود. همچنین افزونگی ربات در دو حرکت مذکور و بویژه در حرکت مسیر مشخص درنظر گرفته می‌شود. همچنین برای ایجاد یک خط‌سیر هموار و درنظر گرفتن محدودیت عملگرهای صنعتی قید تکانه عملگر نیز در موارد مذکور اعمال می‌شود.

۱-۴. روند بحث

در این تحقیق به کنترل حداقل زمان ربات‌های با افزونگی سینماتیکی در حرکت نقطه به نقطه و مسیر مشخص پرداخته شده است. پس از بحث مختصری در مورد مقدمات موضوع و بررسی کارهای انجام شده در این زمینه که در فصل جاری ذکر شد، در فصل دوم به مباحث تحلیلی اولیه پرداخته شده است. ابتدا مباحث مقدماتی کنترل بهینه و اصل حداقل‌سازی پنتریاگین بیان شده است. در ادامه

خلاصه‌ای در مبحث درجه آزادی و افزونگی سینماتیکی ربات‌ها ذکر شده و در پایان سینماتیک و دینامیک ربات‌های مورد بررسی ذکر شده است.

در فصل سوم مساله کنترل بهینه ربات فرمول‌بندی شده و با ارایه روشی برای کنترل حداقل زمان، مساله حداقل زمان ربات سری در حرکت نقطه به نقطه بررسی شده است. همچنین با اصلاح الگوریتم ارایه شده، اجتناب از برخورد ربات با موانع و نیز اعمال قید تکانه عملگر درنظر گرفته شد. همچنین با درنظر گرفتن شرط مرزی به فرم عمومی افزونگی ربات نیز منظور گردید. در پایان نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده ارایه شده است.

در فصل چهارم مساله کنترل حداقل زمان ربات با افزونگی سینماتیکی با درنظر گرفتن مسیر حرکت پنجه فرمول‌بندی گردید. راهکاری برای اعمال قید تکانه عملگر معرفی شده و در ادامه الگوریتمی برای تولید خط‌سیر ارایه شده است. در پایان این فصل نیز نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده ذکر گردید.

و بالاخره در فصل پنجم نتایج بدست آمده در این تحقیق جمع‌بندی شده و پیشنهاداتی برای کارهای آینده ارایه شده است.

۲. فصل دوم- مقدمات تحلیلی

۲-۱. کنترل بهینه

۲-۱-۱. مقدمه

حل عمومی مسایل کنترل بهینه با استفاده از حساب تغییرات و اصل ماکزیمم سازی پنتریاگین [۵]، به‌منظور تعیین شرط لازم مرتبه اول برای حل، قابل محاسبه می باشد. بدین‌ترتیب، شرط لازم بهینگی به مساله مقدار مرزی دونقطه‌ای تبدیل می‌شود. حل تحلیلی مساله‌ی مقدار مرزیِ بدست آمده برای اکثر مسایل بسیار مشکل و یا غیرممکن می‌باشد؛ بنابراین از تکنیک‌های عددی برای تخمین حل پیوسته استفاده می‌شود. روش‌های عددی بسیاری برای حل این مسایل ارایه شده است که به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند.

- روش‌های غیرمستقیم براساس تخمین حل شرط لازم بهینگی است. مزیت اصلی روش‌های غیرمستقیم عبارتند از :
  - دقت بالا