به نام خدایی که در این نزدیکی است

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق- کنترل

کنترل تطبیقی ربات‌های با بازوهای صلب تحریک شده الکتریکی همراه با عدم قطعیت در سینماتیک

به کوشش

محبوبه احمدی‌پور

اساتید راهنما

دکتر علیرضا خیاطیان

دکتر مریم دهقانی

اسفند ماه ۱۳۹۰

به‌نام‌خدا

اظهارنامه

اینجانب محبوبه احمدی‌پور (۸۸۰۶۸۱) دانشجوی رشته برق گرایش کنترل دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر اظهار می‌کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی: محبوبه احمدی‌پور

تاریخ و امضا: ۱۳۹۱/۰۲/۰۹

به‌نام‌خدا

کنترل تطبیقی ربات‌های با بازوهای صلب تحریک شده الکتریکی همراه با عدم قطعیت در سینماتیک

به‌کوشش:

محبوبه احمدی‌پور

پایان‌نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

برق-کنترل

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته‌ی پایان‌نامه با درجه‌ی: عالی

دکتر علیرضا خیاطیان دانشیار بخش مهندسی برق-قدرت و کنترل(رئیس کمیته).....

دکتر مریم دهقانی استادیار بخش مهندسی برق-قدرت و کنترل(رئیس کمیته).....

دکتر سید علی‌اکبر صفوی استاد بخش مهندسی برق-قدرت و کنترل.....

دکتر محمد اقتصاد استاد بخش مهندسی مکانیک-جامدات.....

اسفند۱۳۹۰

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

آنانکه بی ادعا و منت می پرورند

می آموزند و دوست می دارند.

سپاسگزاری

در ابتدا لازم می‌دانم از اساتید راهنمای گرامی، جناب آقای دکتر علیرضا خیاطیان و سرکار خانم دکتر مریم دهقانی که با راهنمایی و حمایت‌های بی‌دریغشان مرا در انجام این پایان‌نامه مدد رساندند، تشکر و قدردانی نمایم. از ایشان سپاسگزارم به خاطر همه‌ی آنچه که در طول این مدت به من آموختند. همچنین سپاس و تشکر از اساتید محترم مشاور، جناب آقای دکتر علی‌اکبر صفوی و جناب آقای دکتر محمد اقتصاد که با راهنمایی‌های خود باعث بهبود این پایان‌نامه گردیده‌اند. در پایان، از حمایت‌های خانواده عزیزم تشکر می‌کنم که همواره پشتیبان و همراه من بوده‌اند.

چکیده

کنترل تطبیقی ربات‌های با بازوهای صلب تحریک شده الکتریکی همراه با عدم قطعیت در سینماتیک

به کوشش

محبوبه احمدی‌پور

امروزه ربات‌ها در زمینه‌های مختلفی مثل صنایع تولیدی، پزشکی، اکتشافات فضایی و دریایی کاربرد دارند. بنابراین، کنترل ربات از اهمیت زیادی برخوردار است. در بیشتر موارد، ربات وظیفه‌اش را توسط مجری نهایی انجام می‌دهد و بنابراین، مسیر مطلوب برای ربات در فضای دکارتی طراحی می‌شود.

در این پایان‌نامه، ابتدا یک روش کنترل تطبیقی برای ربات‌های با بازوهای صلب بدون درنظر گرفتن دینامیک الکتریکی محرک‌ها و در حضور عدم قطعیت در سینماتیک و دینامیک ربات پیشنهاد شده است. هدف کنترلی، تعقیب مسیر ربات در فضای دکارتی است. این کنترلر نیاز به اندازه‌گیری شتاب را حذف می‌کند. سپس یک کنترلر تعقیب مسیر تطبیقی برای ربات‌های با بازوهای صلب و محرک‌های الکتریکی و در حضور عدم قطعیت در سینماتیک، دینامیک ربات و دینامیک محرک‌ها و بدون نیاز به اندازه‌گیری شتاب پیشنهاد شده است. درنظر گرفتن دینامیک الکتریکی محرک‌ها طراحی کنترلر و تحلیل پایداری را پیچیده‌تر می‌کند، اما در عمل، نادیده گرفتن آن ممکن است باعث کاهش بازدهی کنترلر یا حتی ناپایداری شود. این کنترلر به کمک الگوریتم گام به عقب در دو مرحله طراحی شده است. ابتدا، یک بردار جریان مطلوب برای آرمیچرها به‌گونه‌ای طراحی شده است که خطای تعقیب مسیر به صفر میل کند. در مرحله دوم، ولتاژ موتورها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که جریان آرمیچرها، جریان مطلوب را تعقیب کنند. در پایان برای نشان دادن مؤثر بودن کنترلرهای پیشنهادی، نتایج شبیه سازی ارائه شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که بازدهی کنترلر پیشنهاد شده در سطح گشتاور با وجود جلوگیری از نیاز به شتاب، به خوبی کنترلرهای طراحی شده با اندازه‌گیری شتاب است. کنترلر پیشنهادی برای ربات با درنظرگرفتن دینامیک الکتریکی محرک‌ها در مدت زمان کوتاهی، منجر به همگرایی خطای تعقیب مسیر به صفر می‌شود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- پیشگفتار ۲

۱-۲- هدف پایان‌نامه..... ۴

۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم: دینامیک و سینماتیک ربات

۲-۱- مقدمه..... ۷

۲-۲- مدل ربات ۷

۲-۳- سینماتیک ربات ۱۱

۲-۴- جمع‌بندی فصل ۱۵

فصل سوم: ابزارهای اساسی و مقدمات ریاضی

۳-۱- مقدمه.....۱۷

۳-۲- مقدمات ریاضی ۱۷

۳-۳- کنترل گام به عقب.....۲۰

۳-۴- خطی‌سازی فیدبک.....۲۴

۳-۴-۱- خطی‌سازی فیدبک و فرم کانونی کنترل‌پذیر.....۲۵

۳-۴-۲- خطی‌سازی ورودی-خروجی.....۲۷

۳-۴-۳- سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی ۳۶

۳-۵- جمع‌بندی فصل ۳۷

فصل چهارم: کنترل ربات با بازوهای صلب در حضور عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک

۴-۱- مقدمه.....۴۰

۴-۲- مروری بر کارهای گذشته ۴۰

۴-۲-۱- کارهای انجام شده در دانشگاه شیراز.....۴۰

۴-۲-۲- کنترل ربات با بازوهای صلب در حضور عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک ۴۱

۴-۳- کنترل دینامیک معکوس تطبیقی تعقیب مسیر ربات در سطح گشتاور ۴۵

۴-۴- کنترل تطبیقی تعقیب مسیر ربات‌های RLED بر پایه اطلاعات فضای دکارتی.....۴۸

۴-۵- جمع‌بندی فصل ۵۱

فصل پنجم: کنترل تطبیقی در سطح گشتاور ربات با بازوهای صلب در حضور عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک

۵-۱- مقدمه.....۵۴

۵-۲- کنترل دینامیک معکوس در سطح گشتاور ۵۵

۵-۳- کنترلر پیشنهادی تطبیقی در سطح گشتاور برای ربات با بازوهای صلب در حضور عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک ۵۸

۵-۴- شبیه سازی ۶۵

۵-۴-۱- مدل ربات شبیه سازی شده ۶۵

۵-۴-۲- نتایج شبیه سازی کنترلر پیشنهادی تطبیقی در سطح گشتاور برای ربات با بازوهای صلب در حضور عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک(کنترلر پیشنهادی در بخش ۵-۳) ۶۷

۵-۴-۳- نتایج شبیه سازی کنترلر دینامیک معکوس تطبیقی تعقیب مسیر ربات در سطح گشتاور(کنترلر توضیح داده شده در بخش ۴-۳) ۷۰

۵-۴-۴- مقایسه نتایج شبیه سازی کنترلر پیشنهادی در بخش ۵-۳ و کنترلر دینامیک معکوس تطبیقی تعقیب مسیر ربات در سطح گشتاور ۷۴

۵-۵- جمع‌بندی فصل ۷۵

فصل ششم: کنترل تطبیقی ربات‌های RLED در حضور عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک ربات و دینامیک محرک‌ها

۶-۱- مقدمه ۷۷

۶-۲- کنترلر پیشنهادی تطبیقی برای ربات‌های RLED در حضور عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک ربات و دینامیک محرک‌ها ۷۸

۶-۲-۱- طراحی جریان مطلوب ۷۸

۶-۲-۲- طراحی ولتاژ کنترلی ورودی ۸۸

۶-۳- شبیه سازی ۹۲

۶-۳-۱- نتایج شبیه سازی کنترلر پیشنهادی تطبیقی برای ربات‌های RLED در حضور عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک(کنترلر پیشنهادی در بخش ۶-۲) ۹۳

۶-۳-۲- نتایج شبیه سازی کنترل تطبیقی تعقیب مسیر ربات‌های RLED بر پایه اطلاعات فضای دکارتی(کنترلر توضیح داده شده در بخش ۴-۴) ۹۸

۶-۳-۳- نتایج شبیه سازی اعمال ولتاژ متناظر با کنترلر پیشنهادی در سطح گشتاور برای ربات ۱۰۱

۶-۳-۴- مقایسه کنترلرها و نتایج آنها ۱۰۴

۶-۴- جمع‌بندی فصل ۱۰۶

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۸

۷-۲- پیشنهادها ۱۱۰

فهرست منابع ۱۱۱

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۵-۱) ضرایب کنترلی کنترلر بخش ۵-۳ ..... ۶۸
جدول (۵- ۲) ضرایب کنترلی کنترلر بخش ۴-۳ ..... ۷۰
جدول (۶-۱) ضرایب کنترلی کنترلر بخش ۶-۲ ..... ۹۴
جدول (۶-۲) ضرایب کنترلی کنترلر بخش ۴-۴ ..... ۹۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱) مدار آرمیچر یک موتور جریان مستقیم ۸
شکل (۲-۲) محورهای مختصات و پارامترها در قرارداد دناویت- هارتنبرگ ۱۳
شکل (۳-۱) بلوک دیاگرام سیستم (۳-۱۴)-(۳-۱۵) ۲۲
شکل (۳-۲) بلوک دیاگرام سیستم (۳-۱۸)-(۳-۱۹)؛ (معرفی $\phi(x)$) ۲۳
شکل (۳-۳) بلوک دیاگرام سیستم (۳-۲۳)-(۳-۲۴)؛ (عقب رفتن $\phi(x)$ از انتگرالگیر).....۲۳
شکل (۳-۴) بلوک دیاگرام $H(p)$ ۳۱
شکل (۵-۱) شماتیک ربات دو بازویی.....۶۶
شکل (۵-۲) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور x با اعمال کنترلر بخش ۵-۳؛ منحنی خط‌چین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۶۸
شکل (۵-۳) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور y با اعمال کنترلر بخش ۵-۳؛ منحنی خط‌چین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۶۹
شکل (۵-۴) مسیر مطلوب و واقعی ربات در فضای دکارتی با اعمال کنترلر بخش ۵-۳؛ منحنی خط‌چین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۶۹
شکل (۵-۵) خطای تعقیب مسیر ربات با اعمال کنترلر بخش ۵-۳؛ منحنی توپر: خطا در راستای محور x و منحنی خط‌چین: خطا در راستای محور y ۷۰
شکل (۵-۶) گشتاورهای اعمالی به ربات با اعمال کنترلر بخش ۵-۳؛ منحنی توپر: گشتاور اعمالی به مفصل اول و منحنی خط‌چین: گشتاور اعمالی به مفصل دوم ۷۰

شکل (۵-۷) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور x با اعمال کنترلر بخش ۴-۳؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۷۱
شکل (۵-۸) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور y با اعمال کنترلر بخش ۴-۳؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۷۲
شکل (۵-۹) مسیر مطلوب و واقعی ربات در فضای دکارتی با اعمال کنترلر بخش ۴-۳؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۷۳
شکل (۵-۱۰) خطای تعقیب مسیر ربات با اعمال کنترلر بخش ۴-۳؛ منحنی توپر: خطا در راستای محور x و منحنی خطچین: خطا در راستای محور y ۷۳
شکل (۵-۱۱) گشتاورهای اعمالی به ربات با اعمال کنترلر بخش ۴-۳؛ منحنی توپر: گشتاور اعمالی به مفصل اول و منحنی خطچین: گشتاور اعمالی به مفصل دوم ۷۴
شکل (۶-۱) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور x با اعمال کنترلر بخش ۶-۲؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۹۴
شکل (۶-۲) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور y با اعمال کنترلر بخش ۶-۲؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۹۵
شکل (۶-۳) مسیر مطلوب و واقعی ربات در فضای دکارتی با اعمال کنترلر بخش ۶-۲؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۹۵
شکل (۶-۴) خطای تعقیب مسیر ربات با اعمال کنترلر بخش ۶-۲؛ منحنی توپر: خطا در راستای محور x و منحنی خطچین: خطا در راستای محور y ۹۶
شکل (۶-۵) ولتاژهای ورودی محرک‌ها با اعمال کنترلر بخش ۶-۲؛ منحنی توپر: ولتاژ ورودی موتور اول و منحنی خطچین: ولتاژ ورودی موتور دوم ۹۶
شکل (۶-۶) خطای تعقیب مسیر ربات درصورت جایگزینی $\mathrm{sgn}(\tilde{\dot{q}})$ توسط $\tanh(\varepsilon\tilde{\dot{q}})$ و $\varepsilon = 10$؛ منحنی توپر: خطا در راستای محور x و منحنی خطچین: خطا در راستای محور y ۹۷
شکل (۶-۷) ولتاژهای ورودی محرک‌ها درصورت جایگزینی $\mathrm{sgn}(\tilde{\dot{q}})$ توسط $\tanh(\varepsilon\tilde{\dot{q}})$ و $\varepsilon = 10$؛ منحنی توپر: ولتاژ ورودی موتور اول و منحنی خطچین: ولتاژ ورودی موتور دوم ... ۹۷
شکل (۶-۸) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور x با اعمال کنترلر بخش ۴-۴؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۹۹

شکل (۶-۹) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور y با اعمال کنترلر بخش ۴-۴؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۱۰۰
شکل (۶-۱۰) مسیر مطلوب و واقعی ربات در فضای دکارتی با اعمال کنترلر بخش ۴-۴؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ۱۰۰
شکل (۶-۱۱) خطای تعقیب مسیر ربات با اعمال کنترلر بخش ۴-۴؛ منحنی توپر: خطا در راستای محور x و منحنی خطچین: خطا در راستای محور y ۱۰۰
شکل (۶-۱۲) ولتاژهای ورودی محرک‌ها با اعمال کنترلر بخش ۴-۴؛ منحنی توپر: ولتاژ ورودی موتور اول و منحنی خطچین: ولتاژ ورودی موتور دوم ۱۰۰
شکل (۶-۱۳) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور x با اعمال ولتاژ متناظر با گشتاور طراحی شده در بخش ۵-۳؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ..۱۰۳
شکل (۶-۱۴) مسیر مطلوب و واقعی ربات در راستای محور y با اعمال ولتاژ متناظر با گشتاور طراحی شده در بخش ۵-۳؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ..۱۰۳
شکل (۶-۱۵) مسیر مطلوب و واقعی ربات در فضای دکارتی با اعمال ولتاژ متناظر با گشتاور طراحی شده در بخش ۵-۳؛ منحنی خطچین: مسیر واقعی و منحنی توپر: مسیر مطلوب ..۱۰۴
شکل (۶-۱۶) خطای تعقیب مسیر ربات با اعمال ولتاژ متناظر با گشتاور طراحی شده در بخش ۵-۳؛ منحنی توپر: خطا در راستای محور x و منحنی خطچین: خطا در راستای محور y ۱۰۴
شکل (۶-۱۷) ولتاژهای ورودی متناظر با گشتاور طراحی شده در بخش ۵-۳؛ منحنی توپر: ولتاژ ورودی موتور اول و منحنی خطچین: ولتاژ ورودی موتور دوم ۱۰۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

امروزه ربات‌ها در زمینه‌های مختلفی مثل صنایع تولیدی، پزشکی، اکتشافات فضایی، دریایی و ... کاربرد دارند. کاهش هزینه‌ها، افزایش تولید، بهبود استانداردهای کیفیت تولید و حذف انجام کارهای مضر برای انسان، ازجمله دلایل مهم توسعه استفاده از ربات در کاربردهای مختلف می‌باشند. موضوع کنترل ربات، با توجه به کاربرد زیاد ربات، در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به وظیفه‌ای که برای ربات درنظرگرفته می‌شود، هدف کنترلی ممکن است مسئله تنظیم[۱] یا مسئله تعقیب[۲] باشد. در مسئله تنظیم، فقط موقعیت نهایی بازوها یا مجری نهایی[۳] مشخص می‌شود. اما در مسئله تعقیب، هدف این است که بازوها یا مجری نهایی مسیری را که با درنظر گرفتن زمان طراحی شده است، طی کنند. با توجه به غیرخطی بودن مدل دینامیکی ربات، استفاده از کنترلرهای غیرخطی اجتناب ناپذیر است. تاکنون کنترلرهای زیادی برای ربات‌ها طراحی شده‌اند. گروهی از این کنترلرها، فرض می‌کنند مدل دقیق ربات و پارامترهای آن معلوم است[۱ و ۲]. از آنجایی‌که ربات برای انجام وظایفش باید ابزار متفاوتی را در جهات مختلف و نقاط گیره‌ای متفاوت بردارد و علاوه‌براین بسیاری از پارامترهای فیزیکی آن را به‌طور دقیق نمی‌دانیم، بنابراین، دینامیک و سینماتیک ربات دارای عدم قطعیت هستند. از طرفی، اغتشاش و نویز نیز در مدل ربات تأثیر می‌گذارند. برای حل مشکل عدم قطعیت در پارامترها،

[1] Regulation
[2] Tracking
[3] End-Effector

کنترلرهای تطبیقی[1] و مقاوم[2] پیشنهاد شده‌اند[۳-۱۵]. کنترلرهای تطبیقی از پارامترهای تخمینی که بروزرسانی می‌شوند، استفاده می‌کنند. کنترلرهای مقاوم از کراندار بودن پارامترها استفاده می‌کنند و معمولاً وجود اغتشاش را در مدل ربات درنظر می‌گیرند. گروهی از کنترلرهای طراحی شده، از ترکیب روش‌های تطبیقی و مقاوم برای کنترل ربات استفاده می‌کنند[۱۶-۱۸].

بیشتر کنترلرهای طراحی شده برای ربات فرض می‌کنند که مسیر مطلوب را برای ربات در فضای مفصلی[3] در اختیار دارند. اما در بیشتر کاربردهای ربات، مسیر مطلوب بر حسب ویژگی‌های حرکتی مجری نهایی، طراحی می‌شود. بنابراین، قبل از استفاده از کنترلرهای طراحی شده در فضای مفصلی، باید مسئله سینماتیک معکوس را حل کنیم تا مسیر مطلوب در فضای دکارتی را به مسیری در فضای مفصلی تبدیل کنیم. مشکل این روش علاوه‌بر بار محاسباتی زیاد این است که مسیر به‌دست‌آمده در فضای مفصلی به دلیل وجود عدم قطعیت در سینماتیک ربات، دقیق نیست. بنابراین، این کنترلرها بازدهی پایین دارند یا حتی ممکن است موجب ناپایداری شوند. برای حل این مشکل، گروهی از کنترلرها مستقیماً در فضای دکارتی با فرض اطلاع دقیق از ماتریس ژاکوبین طراحی شده‌اند[۲]. اما در صورت وجود عدم قطعیت در سینماتیک ربات، ماتریس ژاکوبین نیز دارای عدم قطعیت است و این گروه از کنترلرها نیز بازدهی پایین خواهند داشت.

اینکه انسان بازوهایش را به آسانی و با مهارت کنترل می‌کند، نشان می‌دهد که ما به اطلاع دقیق از طول و دینامیک بازوهایمان و زاویه مطلوب مفصل‌ها برای رسیدن به یک جسم و رابطه هندسی دقیق بین مختصات چشم و مختصات بازوهایمان احتیاج نداریم. ما می‌توانیم اجسامی که طول و جرم دقیق آنها را نمی‌دانیم، حمل کنیم و ابزار را در نقاط گیره‌ای و جهات مختلف برداریم. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با وجود تمام عدم قطعیت‌ها در سینماتیک و دینامیک بازوهایمان و جسم، یک کنترلر ساده وجود دارد[۱۹]. محققین با ایده گرفتن از این موضوع، سعی در یافتن کنترلری برای ربات نمودند که با وجود عدم قطعیت در سینماتیک بتواند مسیر مطلوب را تعقیب کند.

---

[1] Adaptive
[2] Robust
[3] Joint-Space

گروهی از کنترلرها برای ربات با درنظر گرفتن همزمان تمام عدم قطعیت ها پیشنهاد شدند، اما طراحی بیشتر این کنترلرها، در سطح گشتاور صورت گرفته است. به این معنی که فرض شده است گشتاور مستقیماً به بازوها اعمال می‌شود و از دینامیک الکتریکی محرک‌ها صرف‌نظر شده است[۱۹-۲۹]. اما در عمل از موتورهای الکتریکی برای تولید گشتاور استفاده می‌شود و دینامیک الکتریکی محرک‌ها به‌خصوص در مواردی که سرعت بالا یا تغییر بار زیاد داریم، نقش مهمی بازی می‌کند. بنابراین، نادیده گرفتن دینامیک الکتریکی محرک‌ها منجر به کاهش بازدهی یا حتی ناپایداری می‌شود[۳۰]. درنظرگرفتن دینامیک الکتریکی محرک‌ها درجه سیستم را افزایش می‌دهد و طراحی کنترلر و اثبات پایداری سیستم را پیچیده‌تر می‌کند.

۱-۲- هدف پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، ابتدا یک روش کنترلی برای ربات با بازوهای صلب بدون درنظرگرفتن دینامیک الکتریکی محرک‌ها در حضور عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک ربات پیشنهاد شده است. به‌عبارت دیگر این کنترلر در سطح گشتاور طراحی می‌شود. هدف کنترلی، تعقیب مسیر ربات در فضای دکارتی است. یک مسئله مهم در طراحی این کنترلر، جلوگیری از نیاز به اندازه‌گیری شتاب می‌باشد. نادیده گرفتن دینامیک الکتریکی محرک‌ها در عمل باعث کاهش بازدهی کنترلر یا حتی ناپایداری سیستم می‌شود. بنابراین، در ادامه سعی در توسعه این روش کنترلی به ربات با بازوهای صلب و محرک‌های الکتریکی در حضور عدم قطعیت در دینامیک ربات و محرک‌ها و سینماتیک ربات، شده است. مسئله مهم در طراحی این کنترلر نیز، جلوگیری از نیاز به اندازه‌گیری شتاب می‌باشد. البته رسیدن به این هدف، با توجه به درنظر گرفتن دینامیک الکتریکی محرک‌ها و طراحی کنترلر در سطح ولتاژ ، مشکل‌تر از کنترلر طراحی‌شده در سطح گشتاور است و نیاز به طراحی رؤیت‌گر خواهد بود.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

ساختار این پایان نامه به شرح زیر می‌باشد:

در فصل دوم، دینامیک و سینماتیک ربات بیان می‌شود. مدل ربات، ویژگی‌های معادلات دینامیکی ربات‌های با بازوهای صلب و محرک‌های الکتریکی، سینماتیک ربات، مفهوم فضای دکارتی و روش دناویت- هارتنبرگ برای به‌دست آوردن رابطه بین بردار موقعیت ربات در فضای مفصلی و بردار موقعیت ربات در فضای دکارتی، در این فصل بیان می‌شود.

در فصل سوم، مقدمات ریاضی از جمله مفهوم پایداری، قضیه لیاپانوف، قضیه لاسال، روش کنترلی گام به عقب[۱] و خطی‌سازی فیدبک[۲] توضیح داده شده‌اند.

فصل چهارم به مروری بر کارهای گذشته می‌پردازد. کنترلرهای طراحی شده برای ربات‌های با بازوهای صلب در حضور همزمان عدم قطعیت در دینامیک و سینماتیک به‌طورخلاصه معرفی شده‌اند و برای دو کنترلر مهمتر از این میان توضیح بیشتری ارائه داده شده است. یکی از این کنترلرها در سطح گشتاور و دیگری برای ربات‌ها با درنظر گرفتن دینامیک الکتریکی محرک‌ها می‌باشد.

در فصل پنجم، کنترلرهای پیشنهادی برای ربات‌های با بازوهای صلب و اثبات پایداری آنها آورده شده است.

در فصل ششم، نتایج شبیه سازی اعمال کنترلرهای پیشنهادی در فصل پنجم و دو کنترلر توضیح داده شده در فصل چهارم بر روی یک ربات دو بازویی با دو مفصل چرخشی[۳] ارائه شده است. مقایسه این کنترلرها و نتایج شبیه سازی نیز در این فصل صورت گرفته است.

در فصل هفتم، نتیجه گیری و پیشنهادها آورده شده است.

---

[1] Backstepping
[2] Feedback Linearization
[3] Revolute