بسم الله الرحمن الرحيم

١١٥٩١٦

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک

طراحی، ساخت و کنترل Model Based
یک روبات موازی هگزا

بوسیله‌ی
مهدی احمدی

اساتید راهنما
دکتر محمد اقتصاد
دکتر علیرضا خیاطیان

۱۳۸۸/۶/۱۱
تهیه مدارک

اسفند ۱۳۸۷

۱۱۵۹۸۶

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب: مهدی احمدی دانشجوی رشته‌ی: مهندسی مکانیک

گرایش: طراحی کاربردی دانشکده: مهندسی

اظهار می‌کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته ام. همچنین اظهار می‌کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه ام تکراری نیست و تعهد می نمایم 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: مهدی احمدی

تاریخ و امضا: ۱۳۸۸/۵/۵

به نام خدا

طراحی، ساخت و کنترل یک روبات موازی هگزا

به وسیله‌ی

مهدی احمدی

پایان‌نامه

ارائه شده به معاونت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی

از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی

مهندسی مکانیک

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان‌نامه با درجه: عالی

دکتر محمد اقتصاد، دانشیار مهندسی مکانیک (رئیس کمیته) ----------

دکتر علیرضا خیاطیان، دانشیار مهندسی برق (رئیس کمیته) ----------

دکتر مجتبی محزون، استادیار مهندسی مکانیک ----------

دکتر مهرداد فرید، دانشیار مهندسی مکانیک ----------

۱۳۸۷

تقدیم به پدر، مادر و خواهر مهربانم
که خورشید زندگی‌ام هستند

و

تقدیم به همه شهدای دانشجوی کشور

سپاسگزاری

پیش از هر سخن از همه کسانی که مرا در به پایان رساندن این پایان‌نامه یاری رساندند کمال سپاسگزاری را دارم.و؛یژه از اساتید عزیز جناب آقای دکتر محمد اقتصاد که در طول سالهای تحصیل آموزگار دانش و زندگی من بودند و جناب آقای دکتر علیرضا خیاطیان که با راهنمایی‌ها و حمایتهای بی‌دریغشان مرا در به سرانجام رساندن این پایان‌نامه یاری نمودند. همچنین از اساتید گرامی جناب آقای دکتر مجتبی محزون و جناب آقای دکتر مهرداد فرید که با راهنمایی‌هایشان موجبات بهبود این پایان‌نامه را فراهم آوردند و در دوران تحصیل از آموزشهای گرانبهایشان آموختم نیز تشکر می‌نمایم. از جناب آقای مهندس محسن مرزبان که سخاوتمندانه پشتیبان فکری و مالی ساخت روبات هگزا بودند و جناب آقای مهندس بیژن مرزبان که در همه مراحل یاریمان کردند و مهندس علی مرزبان، مهندس مصطفی مقدم، مهندس علی پرتوی، مهندس محمد دقت و مهندس مهدی دهقانی و کلیه دوستانی که بی-وجودشان این پایان‌نامه به سرانجام نمی‌رسید کمال قدردانی و سپاسگزاری را دارم.

چکیده

طراحی، ساخت و کنترل یک روبات موازی هگزا

بوسیله

مهدی احمدی

توسعه و افزایش تولید صنایع و در پی آن رشد اقتصادی و اجتماعی یک جامعه در قرن جدید، با خودکار کردن روندهای تولید گره خورده است. یکی از اجزای خودکار ساختن صنایع، استفاده از روباتها در چرخه تولید به منظورهای مختلف می‌شاپ گ‌نر ؛دشاب ی، جابجایی، نصب قطعات و جوشکاری بخش کوچکی از فضایی است که به روباتهای کارا نیازمند است. پس از استفاده فراوان از روباتهای سریال در صنایع و انجام پژوهشهای پایه‌ای بر روی طراحی و کنترل آنها، در دو دهه اخیر توجه پژوهشگران به ساختارهای روباتیک موازی جلب شده است. یکی از آخرین طراحی های مورد توجه در بین روباتهای موازی، روبات موازی هگزا است که موضوع مورد بررسی در این پایان‌نامه نیز بوده است. در این پایان‌نامه با طراحی و ساخت یک نمونه روبات هگزا به تحقیق و تحلیل مسایل سینماتیک مستقیم با استفاده از شبکه عصبی با هسته ویولت و حل تحلیلی سینماتیک معکوس، تنظیم پارامترهای سینماتیکی با روش پردازش تصاویر و بهینه سازی پارامترهای سینماتیکی به روش حداقل مربعات، دینامیک لاگرانژی و کنترل آن پرداخته می‌شود. در نهایت نتایج آزمایشهای عملی بر روی روبات و مقایسه کنترل باز و بسته اعمالی بر روبات هگزا ارائه می‌گردد.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

۱-۱- تاریخچه تکامل روباتها ۲
۱-۲- دسته بندی روباتها ۶
۱-۲-۱- دسته بندی از نظر درجه آزادی ۶
۱-۲-۲- دسته بندی روباتها از نظر نیروی محرکه ۶
۱-۲-۳- دسته بندی از نظر فضای کاری ۷
۱-۲-۴- دسته بندی از نظر هندسی ۷
۱-۲-۵- روباتهای سریال و موازی ۸
۱-۲-۵-۱- نگاهی بر تاریخچه روباتهای موازی ۱۱
۱-۲-۵-۲- روبات موازی هگزا ۱۷
۱-۲-۵-۳ پیشینه تحقیقات انجام شده بر روی روبات موازی هگزا ۱۸
۱-۳- تحقیقات صورت پذیرفته در زمینه روباتیک در دانشگاه شیراز ۲۱
۱-۴- هدف پایان نامه ۲۲
۱-۵- فصلهای پایان نامه ۲۳
۲- مدلسازی و سینماتیک روبات هگزا ۲۵
۲-۱- مقدمه ۲۵
۲-۲- وضعیت دو دستگاه مختصات نسبت به یکدیگر ۲۵
۲-۲-۱- مکان ۲۵
۲-۲-۲ جهتگیری ۲۶
۲-۲-۳- چارچوب (دستگاه مختصات) ۲۸
۲-۲-۴- نگاشت از یک چارچوب به چارچوب دیگر ۲۹
۲-۲-۳- تبدیلهای همگن مرکب ۳۰
۲-۲-۴- وارون تبدیل همگن T ۳۱
۲-۳- تبدیلهای دوران ۳۲
۲-۳-۱- زوایای RPY ۳۲
۲-۳-۲- زوایای اویلر ۳۴

۲-۴- سینماتیک روباتها ۳۵
۲-۴-۲- حل مساله سینماتیک مستقیم ۳۷
۲-۴-۳- مساله سینماتیک معکوس ۳۷
۲-۵- سرعت انتقالی و دورانی جسم ۳۷
۲-۵-۱- ماتریس ژاکوبین ۳۸
۲-۵-۲- تکینگی ۴۰
۲-۶- بررسی و حل مساله سینماتیک در روبات هگزا ۴۰
۲-۶-۱- ساختار روبات موازی هگزا ۴۱
۲-۶-۲- دستگاههای مختصات روبات هگزا ۴۳
۲-۶-۳- حل مساله سینماتیک معکوس در روبات موازی هگزا ۴۴
۲-۶-۴- شبکه های عصبی مصنوعی ۴۸
۲-۶-۴-۱ شبکه عصبی مصنوعی *MLP* ۴۹
۲-۶-۴-۲- شبکه عصبی مصنوعی ویونت ۵۰
۲-۶-۴-۲-۱- ویولت ها و خاصیت عملکرد چند مقیاسی ۵۰
۲-۶-۴-۲-۲- الگوریتم آموزش شبکه ویونت ۵۲
۲-۶-۴-۳- حل مساله مستقیم به کمک شبکه های عصبی مصنوعی ۵۳
۲-۶-۴-۳-۱- فضای کاری مورد نظر روبات ۵۳
۲-۶-۴-۳-۲- حل مساله مستقیم به وسیله شبکه عصبی مصنوعی *MLP* ۵۴
۲-۶-۴-۳-۳- حل مساله مستقیم به وسیله شبکه عصبی مصنوعی ویونت ۵۴
۲-۶-۵- نتایج مدلسازی ۵۴
۲-۶-۵-۱- بررسی نتایج مدلسازی با شبکه *MLP* ۵۵
نتایج مدلسازی توسط شبکه عصبی *MLP* ۵۵
بررسی خطای مدلسازی توسط شبکه عصبی *MLP* در ۱۰۰۰ داده نمونه ۵۷
۲-۶-۵-۲- بررسی نتایج مدلسازی با شبکه ویونت ۵۸
مدلسازی در رزولوشن صفر ۵۹
مدلسازی در رزولوشن ۱- ۶۰
مدلسازی در رزولوشن ۲- ۶۱
نمودار رگرسیون خطی دو متغیر *X* و *Y* ۶۲
۲-۶-۵-۳- مقایسه نتایج مدلسازی با شبکه های عصبی *MLP* و ویونت ۶۳
۳- تنظیم پارامترهای سینماتیکی روبات هگزا ۶۵
۳-۱- مساله تنظیم در روباتها ۶۵
۳-۲- روشهای مختلف تنظیم در روباتهای موازی ۶۶
۳-۳- روشهای تنظیم ۶۷
۳-۳-۱- تنظیم با استفاده از وسایل اندازه گیری خارجی ۶۷
۳-۳-۲- تنظیم داخلی ۶۸
۳-۳-۳- تنظیم با اعمال محدودیت های مکانیکی ۶۹

۳-۴- کارهای پیشین انجام شده در تنظیم روبات موازی هگزا ۶۹
۳-۴-۱- تنظیم روبات موازی هگزا با اعمال محدودیت های مکانیکی ۶۹
۳-۴-۲- تنظیم روبات موازی هگزا با استفاده از نصب حسگر بر روی مفاصل غیر فعال ۷۱
۳-۵- تنظیم سینماتیکی روبات موازی هگزا با استفاده از دوربین ۷۲
۳-۵-۱- مقدماتی در مورد پردازش تصویر ۷۲
۳-۵-۲- تنظیم پارامترهای دوربین ۷۳
۳-۵-۲-۱- مدل سر سوزن ۷۴
۳-۵-۲-۲- پارامترهای دوربین ۷۵
۳-۵-۲-۳- تنظیم دوربین ۷۶
۳-۵-۲-۴- استفاده از صفحه شطرنجی جهت تنظیم پارامترهای دوربین ۷۷
۳-۵-۲-۵- بررسی چگونگی محاسبه زاویه و پارامترهای دوربین در یک مثال عملی ۷۹
۳-۵-۲-۶- تنظیم پارامترهای سینماتیکی روبات هگزا با استفاده از دوربین ۸۳
۳-۵-۳- پارامترهای مورد استفاده در تنظیم روبات موازی هگزا ۸۸
۳-۵-۴- بهینه سازی با روش حداقل مربعات ۹۱
۴- مدلسازی دینامیکی روبات هگزا ۱۰۰
۴-۱- روش لاگرانژ ۱۰۰
۴-۱-۱- آشنایی با لاگرانژین یک سیستم دینامیکی ۱۰۰
۴-۲- دینامیک روبات هگزا ۱۰۲
۴-۲-۱- انرژی جنبشی صفحه متحرک ۱۰۲
۴-۲-۱-۱- انرژی جنبشی صفحه متحرک روبات هگزا ناشی از جابجایی خطی ۱۰۲
۴-۲-۱-۲- انرژی جنبشی صفحه متحرک روبات هگزا ناشی از دوران ۱۰۳
۴-۲-۱-۳- انرژی جنبشی کل صفحه متحرک روبات هگزا ۱۰۴
۴-۲-۲- انرژی پتانسیل صفحه متحرک روبات هگزا ۱۰۴
۴-۲-۳- لاگرانژین صفحه متحرک روبات هگزا ۱۰۵
۴-۲-۴- انرژی جنبشی بازوی *i* ام روبات هگزا ۱۰۵
۴-۲-۵- انرژی پتانسیل بازوی *i* ام روبات هگزا ۱۰۵
۴-۲-۶- لاگرانژین بازوهای روبات هگزا ۱۰۶
۴-۲-۷- انرژی جنبشی بازوی *i* ام میلهی روبات هگزا ۱۰۶
۴-۲-۷-۱- تحلیل سرعت میله *i* ام روبات هگزا ۱۰۶
۴-۲-۸- انرژی جنبشی میله *i* ام روبات هگزا ۱۰۸
۴-۲-۹- انرژی پتانسیل میله های روبات هگزا ۱۰۸
۴-۲-۱۰- لاگرانژین میله های روبات هگزا ۱۰۹
۴-۲-۱۱- دینامیک روبات هگزا ۱۰۹
۴-۳- خواص معادلهٔ دینامیک حاکم بر روبات ۱۱۰
۴-۳-۱- ماتریس جرم ۱۱۰

۴-۳-۲- ماتریس نیروی کوریولیس و جانب به مرکز ۱۱۰
۴-۴-۳- بردار گرانش ۱۱۱
۴-۴-۴- پادمتقارن بودن ماتریس $\dot{M}-2C$ ۱۱۱
۴-۴-۵- خطی بودن برحسب پارامترها ۱۱۱
۵- تئوری پایداری لیاپانوف و روشهای کنترل روباتهای صلب ۱۱۳
۵-۱- تئوری پایداری لیاپانوف ۱۱۳
۵-۱-۱ روش مستقیم لیاپانوف ۱۱۵
۵-۲- قضایای معکوس لیاپانوف ۱۱۶
۵-۳- روشهای کنترل روبات ۱۱۷
۵-۳-۱- تنظیم نقطه به نقطه ۱۱۸
۵-۳-۲- کنترل روی مسیر ۱۱۸
۵-۳-۲-۱- کنترل دینامیک معکوس ۱۱۸
۵-۳-۲-۲- کنترل بر اساس لیاپانوف ۱۲۰
۵-۳-۲-۳- کنترل بر اساس تلفات ۱۲۰
۵-۳-۲-۴- کنترل مقاوم ۱۲۱
۵-۳-۲-۴-۱- کنترل مقاوم دینامیک معکوس ۱۲۱
۵-۳-۲-۵- کنترل تطبیقی ۱۲۲
۵-۳-۲-۵-۱- کنترل تطبیقی دینامیک معکوس ۱۲۳
۵-۳-۲-۶- کنترل تطبیقی- مقاوم ۱۲۴
۵-۳-۲-۶-۱- پایداری سیستم با کنترلر تطبیقی-مقاوم ۱۲۷
۵-۴- نتایج عملی کنترل مدار بسته مقاوم-تطبیقی روبات هگزا ۱۲۸
۵-۴-۱- حرکت روی مسیر دایره‌ای در صفحه xy در ارتفاع $35cm$- ۱۲۸
۵-۴-۲- حرکت روی مسیر دایرهای در ارتفاع $z=-40\ (cm)$ ۱۳۵
۵-۴-۳- مسیر دایره ای در فضا ۱۴۱
۵-۴-۴- جابجایی توام با تغییر زاویه صفحه متحرک ۱۴۷
۵-۴-۵- مسیر حرکت نوسانی در صفحه (شبیه به حرکت رنگپاشی) ۱۵۳
۵-۴-۶- نوسان در راستای محور z ۱۵۹
۶- مروری بر روند طراحی و ساخت روبات هگزا ۱۶۶
۶-۱- محیط طراحی روبات شش ۱۶۷
۶-۱-۱- طراحی مسیر حرکت صفحه متحرک ۱۶۹
۶-۱-۲- طراحی روبات هگزا ۱۷۰
۶-۲- روش ساخت اجزای روبات هگزا ۱۷۱
۶-۲-۱- پایه روبات ۱۷۱
۶-۲-۲- بازو ۱۷۳
۶-۲-۳- میله ۱۷۳

۶-۲-۴- صفحه متحرک ۱۷۴
۶-۲-۵- فلنج ۱۷۵
۶-۲-۶- مفصل کروی ۱۷۶
۶-۲-۷- گیربکس ۱۷۶
۶-۲-۸- رابط گیربکس و موتور ۱۷۷
۶-۲-۹- پیچ میله ۱۷۷
۶-۲-۱۰- پیچ صفحه متحرک ۱۷۸
۶-۲-۱۱- موتور ۱۷۹
۶-۲-۱۲- جعبه کنترل ۱۷۹
۶-۲-۱۳- مدار الکترونیکی ۱۸۰
۶-۲-۱۴- چارچوب روبات ۱۸۰
۶-۲-۱۵- روبات سر هم شده ۱۸۱
۷-۱- نتیجه گیری ۱۸۵
۷-۲- پیشنهادها ۱۸۵

فهرست جدولها

عنوان صفحه

جدول ۱-۱ - مشخصات عملکرد برخی از روباتهای سریال ۱۰
جدول ۱-۲- مروری بر خواص روباتهای سری و موازی ۱۱
جدول ۱-۳ – مقایسه سه نوع روبات موازی مختلف ۱۸
جدول ۱-۲- برخی تحقیقات مهم انجام شده بر روی روبات موازی هگزا ۲۰
جدول ۲-۲- پارامترهای هندسی روبات موازی هگزا ۵۴
جدول ۲-۳- بررسی خطاهای مدلسازی در حل مساله مستقیم به کمک شبکه عصبی MLP ۵۸
جدول ۲-۴- بررسی خطاهای مدلسازی در حل مساله مستقیم به کمک شبکه عصبی ویونت ۵۸
جدول ۲-۵- مقایسه نتایج مدلسازی با MLP و ویونت در حل مساله مستقیم ۶۳
جدول ۳-۱- به دست آوردن موقعیت (مکان و جهت) صفحه شطرنجی در تصاویر ۱۰ گانه ۸۱
جدول ۳-۲- پارامترهای داخلی دوربین ۸۱
جدول ۳-۳ مقایسه زاویه دوران حول محور افقی، محاسبه شده توسط نقاله و دوربین ۸۲
جدول ۳-۴ – تعداد پارامترهای به دست آمده از رابطه ۳-۳ ..... ۸۸
جدول ۳-۵- پارامترهای سینماتیکی تنظیم شده در این پایان‌نامه ۸۹
جدول ۳-۶ پارامترهای اولیه و کرانهای بالا و پایین آنها در روبات موازی هگزا بر حسب متر ۹۲
جدول ۳-۷- مقادیر مورد نظر برای صفحه متحرک روبات هگزا ۹۵
جدول ۳-۸- مقادیر واقعی طی شده توسط صفحه متحرک روبات هگزا ۹۵
جدول ۳-۹- فضای طی شده پس از انجام عمل تنظیم ۹۶
جدول ۳-۱۰- خطای حرکت صفحه متحرک پیش از تنظیم سینماتیکی ۹۶
جدول ۳-۱۱- پارامترهای روبات موازی هگزا پس از انجام بهینه سازی ۹۷
جدول ۳-۱۲- شاخص های خطای نقاط روی مسیر های دوگانه ۹۷
جدول ۳-۱۳- خطای حرکت صفحه متحرک پس از تنظیم سینماتیکی ۹۸

فهرست شکلها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱- نمونه طراحی‌های الجزری، سال ۱۲۰۰ میلادی ۳
شکل ۱-۲- موتور بخار جیمز وات، قرن ۱۸ میلادی ۳
شکل ۱-۳- صحنه‌ای از فیلم کارل کاپک، سال ۱۹۲۱ ..... ۴
شکل ۱-۴ روبات *Unimate* کارخانه فورد، سال ۱۹۶۱ ..... ۵
شکل ۱-۵- روبات سریال کوکا-۱۶۰ ..... ۸
شکل ۱-۶- روبات موازی استوارت-گاف ۸
شکل ۱-۷- دستگاه تنفس مصنوعی، دانشگاه ماکئو چین، سال ۲۰۰۷ ..... ۹
شکل ۱-۸- روبات موازی درل برای سوراخ کردن جمجمه، دانشگاه کاسینو ایتالیا، سال ۲۰۰۵ ..... ۱۱
شکل ۱-۹- نخستین طرح ثبت شده از روباتهای موازی، سال ۱۹۳۰ ..... ۱۲
شکل ۱-۱۰- طرح سینمای متحرک، احتمالا نخستین طرح از یک مکانیزم موازی، سال ۱۹۳۱ ..... ۱۲
شکل ۱-۱۱- نمونه یک سیستم *MAST*، دانشگاه کاسل ۱۳
شکل ۱-۱۲- چپ روبات گاف ۱۹۵۴، راست نمونه جدید روبات گاف، ۲۰۰۰ کارخانجات چرخ دانلوپ ۱۳
شکل ۱-۱۳- طرح استوارت برای شبیه ساز پرواز، سال ۱۹۶۵ ..... ۱۴
شکل ۱-۱۴- اولین شبیه ساز پرواز بر پایه یک روبات شش پای موازی، دهه ۱۹۶۰ ..... ۱۴
شکل ۱-۱۵- طرح روبات دلتا ۱۵
شکل ۱-۱۶- روبات دلتا جهت برداشت و گذاشت سریع، محصول کارخانجات *ABB* ۱۶
شکل ۱-۱۷- راست روبات فرزکار دلتا، چپ روبات برداشت و نصب سریع، محصول کارخانجات هیتاچی ۱۷
شکل ۱-۱۸- طرح روبات هگزا، دانشگاه شیراز، سال ۲۰۰۸ ..... ۱۸
شکل ۱-۱۹- سمت راست روبات موازی هگزا-۶۷ ، سمت چپ روبات هگزا، ساخت گروه‌ژاپنی ۱۹
شکل ۱-۲۰- روبات هگزا ساخته شده توسط آی.دبلیو.اف.، ساخت گروه آلمانی، سال ۲۰۰۵ ..... ۲۰
شکل ۲-۱- نمایش یک بردار نسبت به یک دستگاه ۲۶
شکل ۲-۲- مکان و جهتگیری یک گیره روبات نسبت به پایه ۲۷
شکل ۲-۳- بیان یک بردار در دو دستگاه ۲۹
شکل ۲-۴- نگاشت بین چارچوبهای متوالی ۳۱
شکل ۲-۵- زوایای X-Y-Z ثابت ۳۳
شکل ۲-۸- وضعیت گیره روبات نسبت به چارچوب مرجع ۳۷
شکل ۲-۹- بردار سرعت زاویه‌ای ${}^{A}\omega_{B}$ ۳۸

شکل ۲-۱۰- مولفه‌های بردار سرعت زاویه‌ای ${}^{A}\omega_{B}$ در چارچوب $\{A\}$ ۳۸
شکل ۲-۱۱- معرفی اجزای روبات هگزای دانشگاه شیراز ۴۱
شکل ۲-۱۲- یک زنجیر نمونه در روبات هگزا ۴۱
شکل ۲-۱۳- نمای بالای صفحه متحرک و پایه روبات ۴۳
شکل ۲-۱۴- چارچوبهای نصب شده بر روی یک حلقه سینماتیکی روبات هگزا ۴۴
شکل ۲-۱۵- کلیه چارچوبهای نصب شده بر روی روبات هگزا ۴۸
شکل ۲-۱۶ – ساختار شبکه عصبی مصنوعی MLP ۵۱
شکل ۲-۱۷– ساختار چند دقتی در فضای $L^2(R)$ ۵۲
شکل ۲-۱۸– ویولت $Haar$ و تابع مقیاس مربوط به آن ۵۲
شکل ۲-۱۹– ساختار شبکه ویونت ۵۲
شکل ۲-۲۰- محدوده کاری مورد نظر روبات موازی هگزا ۵۳
شکل ۲-۲۱ تا ۲-۲۶ - نتایج مدلسازی توسط شبکه عصبی MLP ۵۶
شکل ۲-۲۷ تا ۲-۳۲ - بررسی خطای مدلسازی توسط شبکه عصبی MLP در ۱۰۰۰ داده نمون ۵۷
شکل ۲-۳۳ تا ۲-۳۵ - مدلسازی در رزولوشن صفر ۵۹
شکل ۲-۳۶ تا ۲-۳۸ - مدلسازی در رزولوشن ۱- ۶۰
شکل ۲-۳۹ تا ۲-۴۱ - مدلسازی در رزولوشن ۲- ۶۱
شکل ۲-۴۲ تا ۲-۴۳ - نمودار رگرسیون خطی دو متغیر X و ۶۲
شکل ۳-۱- قفل کردن مفاصل غیر فعال و نصب آن بر روی روبات هگزا ۷۰
شکل۳-۲- یک مفصل غیر فعال روبات و حسگر آن ۷۱
شکل ۳-۳- چگونگی تشکیل‌تصویر و نحوه شکل گیری پیکسلهای آن ۷۲
شکل ۳-۴- مثالی از جداسازی خطوط و گوشه ها در تصاویر ۷۳
شکل ۳-۵- مدلهای مختلف دوربین در دریافت پرتوهای نور ۷۴
شکل ۳-۶- پارامترهای مدل $pinhole$ ۷۴
شکل ۳-۷- دستگاه مختصات جسم و دوربین ۷۵
شکل ۳-۸- برخی از پارامترهای داخلی دوربین ۷۵
شکل ۳-۹- دو تصویر از یک جسم، راست تصویر با لنز مناسب، چپ با لنز نامناسب ۷۶
شکل ۳-۱۰- تخته تنظیم سه بعدی ۷۷
شکل ۳-۱۱- صفحه شطرنجی جهت تنظیم پارامترهای دوربین ۷۸
شکل ۳-۱۲- جداسازی مرز های بین خانه های تیره و روشن صفحه شطرنجی ۷۸
شکل ۳-۱۳- تغییر فاصله نقاط گوشه خانه‌های صفحه شطرنجی در موقعیت های مختلف ۷۸
شکل ۳-۱۴- تصاویر گرفته شده از برد شطرنجی در موقعیت های مختلف ۸۰
شکل ۳-۱۵- چگونگی مشخص کردن لبه ها و تعیین مبدا مکان تصویر ۸۰
شکل ۳-۱۶- تصاویر گرافیکی موقعیتهای مختلف صفحه شطرنجی پس از پردازش تصاویر ۸۱
شکل ۳-۱۷- تغییرات مبدا مکان مورد نظر در تصاویر ۱۰ گانه گرفته شده از صفحه شطرنجی ۸۲
شکل ۳-۱۸- نحوه قرارگیری روبات هگزا و دوربین نسبت بهم پیش از انجام آزمایش ۸۳
شکل ۳-۱۹- دوربین نصب شده جهت عکسبرداری از صفحه شطرنجی نصب شده بر روی روبات هگزا ۸۴

شکل ۳-۲۰- "." مقادیر زاویه‌سنج، "+" مقادیر حاصل از داده‌های دوربین برای بازوی شماره ۱ ..... ۸۵
شکل ۳-۲۱- "." مقادیر زاویه‌سنج، "+" مقادیر حاصل از داده‌های دوربین برای بازوی شماره ۲ ..... ۸۵
شکل ۳-۲۲- "." مقادیر زاویه‌سنج، "+" مقادیر حاصل از داده‌های دوربین برای بازوی شماره ۳ ..... ۸۶
شکل ۳-۲۳- "." مقادیر زاویه‌سنج، "+" مقادیر حاصل از داده‌های دوربین برای بازوی شماره ۴ ..... ۸۶
شکل ۳-۲۴- "." مقادیر زاویه‌سنج، "+" مقادیر حاصل از داده‌های دوربین برای بازوی شماره ۵ ..... ۸۷
شکل ۳-۲۵- "." مقادیر زاویه‌سنج، "+" مقادیر حاصل از داده‌های دوربین برای بازوی شماره ۶ ..... ۸۷
شکل ۳-۲۶ پارامترهای مربوط به مکان نقاط رئوس شش ضلعی های پایه و صفحه متحرک روبات ۸۹
شکل ۳-۲۷- صفحه شطرنجی نصب شده بر روی بخش متحرک روبات ۸۹
شکل ۳-۲۸- بیست تصویر از صفحه متحرک روبات در مکان-جهتگیری‌های مختلف در فضای کاری ۹۰
شکل ۳-۲۹- تصاویر شبیه سازی شده از مکان و زاویه صفحه شطرنجی در فضای کاری روبات ۹۰
شکل ۳-۳۰ - تصاویر شبیه سازی شده مربوط به مکان مرکز هندسی روبات ۹۱
شکل ۳-۳۱- تصاویر گرفته شده پس از تنظیم در نقاط نشان داده شده در شکل ۳-۳۰ ..... ۹۴
شکل ۴-۱- زنجیر سینماتیکی i و بردار مکان r چارچوب t ۱۰۳
شکل ۴-۲- دستگاهها و نقاط واقع بر صفحه متحرک ۱۰۷
شکل ۵-۱ تا ۵-۶- "ـــ" مسیر واقعی و "ـــ." مسیر مطلوب بازوی شماره ۱ روبات هگزا ..... ۱۲۹ تا ۱۳۱
شکل ۵-۷ تا ۵-۱۲- "ـــ" خطا و "ـــ." مشتق خطا بازوی شماره ۶ روبات هگزا ..... ۱۳۲ تا ۱۳۴
شکل ۵-۱۳ تا ۵-۱۸- "ـــ" مسیر واقعی و "ـــ." مسیر مطلوب بازوی شماره ۱ روبات هگزا ..... ۱۳۵ تا ۱۳۷
شکل ۵-۱۹ تا ۵-۲۴- "ـــ" خطا و "ـــ." مشتق خطا بازوی شماره ۶ روبات هگزا ..... ۱۳۸ تا ۱۴۰
شکل ۵-۲۵ تا ۵-۳۰- "ـــ" مسیر واقعی و "ـــ." مسیر مطلوب بازوی شماره ۱ روبات هگزا ..... ۱۴۱ تا ۱۴۳
شکل ۵-۳۱ تا ۵-۳۶- "ـــ" خطا و "ـــ." مشتق خطا بازوی شماره ۶ روبات هگزا ..... ۱۴۴ تا ۱۴۶
شکل ۵-۳۷ تا ۵-۴۲- "ـــ" مسیر واقعی و "ـــ." مسیر مطلوب بازوی شماره ۱ روبات هگزا ..... ۱۴۷ تا ۱۴۹
شکل ۵-۴۳ تا ۵-۴۸- "ـــ" خطا و "ـــ." مشتق خطا بازوی شماره ۶ روبات هگزا ..... ۱۵۰ تا ۱۵۲
شکل ۵-۴۹ تا ۵-۵۴- "ـــ" مسیر واقعی و "ـــ." مسیر مطلوب بازوی شماره ۱ روبات هگزا ..... ۱۵۳ تا ۱۵۵
شکل ۵-۵۵ تا ۵-۶۰- "ـــ" خطا و "ـــ." مشتق خطا بازوی شماره ۶ روبات هگزا ..... ۱۵۶ تا ۱۵۸
شکل ۵-۶۱ تا ۵-۶۶- "ـــ" مسیر واقعی و "ـــ." مسیر مطلوب بازوی شماره ۱ روبات هگزا ..... ۱۵۹ تا ۱۶۱
شکل ۵-۶۷ تا ۵-۷۲- "ـــ" خطا و "ـــ." مشتق خطا بازوی شماره ۶ روبات هگزا ..... ۱۶۲ تا ۱۶۴
شکل ۶-۱- محیط نرم‌افزار طراحی روبات هگزا، محیط شش ۱۶۷
شکل ۶-۲- راست، حالت پایین و چپ، حالت بالای رسیدن به نقطه هدف ۱۶۸
شکل ۶-۳- نحوه رسیدن یک دو بازویی به نقطه هدف در فضا ۱۶۸
شکل ۶-۴- تعریف مسیر حرکت صفحه متحرک روبات هگزا ۱۶۹
شکل ۶-۵- طراحی ابعاد اجزای مکانیکی روبات هگزا ۱۷۰
شکل ۶-۶- پایه روبات هگزا طراحی شده در اتوکد ۱۷۱
شکل ۶-۷- نقشه کارگاهی پایه روبات هگزا ۱۷۲
شکل ۶-۸- پایه روبات هگزا، طراحی سه بعدی در محیط طراحی اینونتور ۹ ..... ۱۷۲
شکل ۶-۹- نقشه کارگاهی بازوی روبات هگزا، شش عدد ۱۷۳
شکل ۶-۱۰- طراحی سه بعدی بازوی روبات هگزا، محیط اینونتور ۹ ..... ۱۷۳

شکل ۶-۱۱- نقشه کارگاهی میله روبات، شش عدد ۱۷۳
شکل ۶-۱۲- طراحی سه بعدی میله روبات هگزا، محیط اینونتور ۹ ..... ۱۷۳
شکل ۶-۱۳- نقشه کارگاهی صفحه متحرک روبات ۱۷۴
شکل ۶-۱۴- طراحی سه بعدی صفحه متحرک روبات هگزا ۱۷۴
شکل ۶-۱۵- صفحه متحرک ساخته شده از آلومینیوم ۱۷۴
شکل ۶-۱۶- نقشه کارگاهی فلنج، تعداد شش ۱۷۵
شکل ۶-۱۷- طراحی سه بعدی فلنج، محیط اینونتور ۹ ..... ۱۷۵
شکل ۶-۱۸- نقشه مدل شده از یک مفصل کروی ۱۷۶
شکل ۶-۱۹- یک مفصل کروی واقعی مورد استفاده در پروژه ۱۷۶
شکل ۶-۲۰- مدل سه بعدی یک گیربکس مورد استفاده در پروژه ۱۷۶
شکل ۶-۲۱- یک گیربکس و موتور مورد استفاده در پروژه ۱۷۶
شکل ۶-۲۲- نقشه کارگاهی رابط گیربکس و موتور ۱۷۷
شکل ۶-۲۳- نقشه کارگاهی پیچ میله، شش عدد ۱۷۷
شکل ۶-۲۴- طرح سه بعدی پیچ میله، محیط اینونتور ۹ ..... ۱۷۸
شکل ۶-۲۵- نقشه کارگاهی پیچ صفحه متحرک، شش عدد ۱۷۸
شکل ۶-۲۶- طرح سه بعدی پیچ صفحه متحرک ، محیط اینونتور ۹ ..... ۱۷۸
شکل ۶-۲۷- مدل سه بعدی موتور روبات هگزا، محیط اینونتور ۹ ..... ۱۷۹
شکل ۶-۲۸- نقشه کارگاهی ساخت جعبه کنترل روبات هگزا ۱۷۹
شکل ۶-۲۹- جعبه کنترل ساخته شده روبات هگزا ۱۷۹
شکل ۶-۳۰- جعبه کنترل ساخته شده روبات هگزا ۱۸۰
شکل ۶-۳۱- نقشه کارگاهی چارچوب روبات هگزا ۱۸۰
شکل ۶-۳۲- روبات هگزای سر هم شده در محیط اینونتور ۹ ..... ۱۸۱
شکل ۶-۳۳- روبات هگزای سر هم شده با بدنه، محیط اینونتور ۹ ..... ۱۸۱
شکل ۶-۳۴- اولین روبات هگزای ساخته شده در ایران، دانشگاه شیراز، ۲۰۰۹ میلادی ۱۸۲
شکل ۶-۳۵- نقشه سه بعدی سر هم بندی شده روبات هگزا ۱۸۳

فصل ۱

تاریخچه پژوهشهای پیشین و مقدمه‌ای بر روباتهای موازی

مقدمه

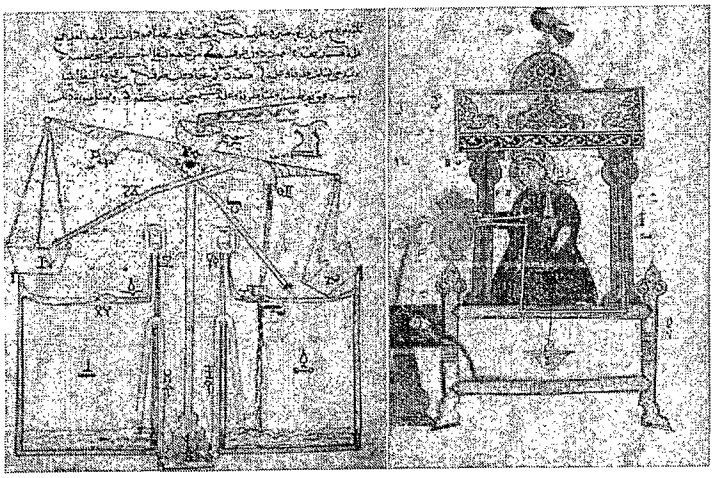
۱-۱- تاریخچه تکامل روباتها

بشر در طول تاریخ کوشیده است که از نیروی طبیعت در راستای نیازهای خود استفاده کند. نقاشی های غار متعلق به ۱۵۰۰۰ سال پیش نشان از رام شدن اسب و گاو و نخستین بهره برداری مکانیکی بشر از طبیعت دارد. انسان توانست با سوار شدن بر اسب به سرعت جابجایی بسیار بیشتری که ضرورت حیاتی زندگی عصر یخبندان در کوچهای مکرر بود دست یابد. همچنین او پس از یکجانشینی و کشف کشاورزی یوغ خیش کشاورزی را بر گردن گاو، حیوان مقدس جهان باستان نهاد که بدون او زمینی آماده کشت نمی‌شد و حیات انسان در معرض نابودی قرار می‌گرفت.

گرچه این همه کشفهای بزرگی در تاریخ حضور انسان بر زمین بودند اما بجز اختراع چرخ که جابجایی را سهلتر و اقتصادی‌تر می‌کرد تا دو سه سده اخیر هزاره دوم پس از میلاد مسیح زمین، عرصه تلاطم شکل گیری خرد نو و جنگ بقای بقایای تمدنهای باستانی بود. در این فضا چندان مجالی برای اختراع و اکتشاف بزرگی وجود نداشت و چنانچه چیزی هم صورت می-پذیرفت یا به آتش دادگاههای تفتیش عقاید غرب می‌سوخت و یا در فراموشخانه مردم خسته شرق مدفون می‌گردید.

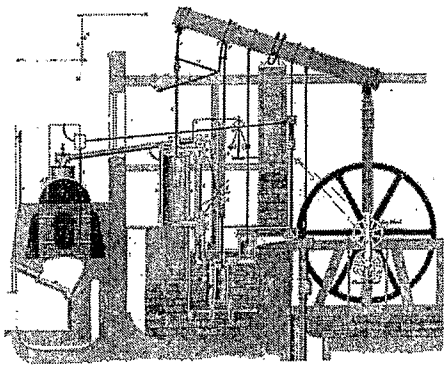
در گرد و غبار این همه هیاهو جابر ابن حیان به واسطه کتاب اسرار آمیز کتاب الاشجار بعنوان یکی از پیشگامان علم روباتیک شناخته می‌شود. او ۱۲۰۰ سال پیش در این کتاب مکانیزمهایی را برای تقلید حرکت عنکبوت و مار طراحی کرد. جالب است که جابر روشهای نمادگذاری خاصی برای توضیحات نقشه‌هایش ابداع نمود که آن را تنها برای شاگردانش مفهوم می‌ساخت. ۴۰۰ سال پس از جابر دانشمند دیگر مسلمان الجزری مکانیزمهای بسیاری را که با آب کنترل می‌شدند طراحی و ارائه و یا تکمیل کرد. شاید اگر بجای مکانیزمهایی که در آن موتورها با نیروی محرکه آب به حرکت درمی‌آمدند، مکانیزمی که به آن بسیار علاقه مند بود، به نیروی بخار آب توجه کرده بود انقلاب صنعتی ۵۰۰ سال پیش از اروپا در مشرق زمین، با اختراع موتور بخار رخ داده بود. به گفته امروزین الجزری یک مهندس مکانیک علاقه مند به

طراحی مکانیزمها بود. الجزری نخستین کسی است که یک روبات آدم نما با کنترل حرکات بر اساس جریان آب را طراحی کرد (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱- نمونه طراحی‌های الجزری، سال ۱۲۰۰ میلادی

پس از انقلاب صنعتی و توجه به علوم تجربی تلاش بسیاری در طراحی و ساخت دستگاههای خودکار و یا خودتنظیم صورت پذیرفت. منشا این تحرکات اختراع ماشین بخار توسط جیمز وات انگلیسی بود (شکل ۱-۲). این رویداد شاه کلید استفاده کنترل شده بشر از سیستمهای حرکتی و جایگزینی نیروی بازوی انسان و اسب و گاو با دیگهای جوشان بخار بود.



شکل ۱-۲- موتور بخار جیمز وات، قرن ۱۸ میلادی

پس از آن موتورهای بخار مختلف سود سرشاری را روانه جیب طراحان و سرمایه‌داران حامی آنها نمود و موجب رشد فزاینده تولید و کاهش زمان ساخت گردید و بر خلاف تصور عمومی، اتوماسیون به دلیل افزایش حجم تولید فرصتهای شغلی بیشتری برای کارگران و واسطه‌ها فراهم نمود.

در ابتدای قرن هجدهم میلادی ژاکار یک دستگاه بافندگی قابل برنامه‌ریزی را اختراع کرد. در آن زمان کسی نمی‌اندشید این ابتکار وی بعدها به یکی از مهمترین اجزای صنعتی تبدیل شده و حتی به شکل یک رقیب برای انسان ظاهر شود. پس از ژاکار، میلادرت عروسکی