دانشکده مهندسی فناوری های نوین

گروه مهندسی مکاترونیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشانسی ارشد در رشته

مهندسی مکاترونیک

عنوان

طراحی و مدلسازی یک ربات پوشیدنی سختپوش پایین‌تنه

استاد راهنما

دکتر احمد قنبری

اساتید مشاور

دکتر علی رستمی

دکتر علیرضا اکبرزاده توتونچی

پژوهشگر

ابوذر غفاری

بهمن ۱۳۹۰

الهی...

دمی که بی تو برآید!

همان به که نیاید...

تقدیم

به

خانواده

مهربانم

سپاس گزاری...

سپاس خدای را عزَ وجلَ ..

در آغاز وظیفه خود می دانم از زحمات بی دریغ استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر احمد قنبری، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم که قطعاً بدون راهنمایی های ارزنده ایشان، این مجموعه به انجام نمی‌رسید.

از جناب آقای دکتر اکبرزاده توتونچی که زحمت مطالعه و مشاوره این رساله را تقبل فرمودند و در آماده سازی این رساله، به نحو احسن اینجانب را مورد راهنمایی قرار دادند، کمال امتنان را دارم.

همچنین لازم می دانم از خانواده مهربانم، که در طول این زندگی لحظه‌ای من را در سختی‌ها تنها نگذاشته‌اند بی‌نهایت سپاسگزاری کنم.

همچنین از دوستان، هم کلاسی ها و هم اتاقی های عزیزم در خوابگاه ولیعصر و خوابگاه فجر به خصوص آقایان عقیلی، سیدین، لعل دهقانی، قاسمی، نخجیرکان، احمدی، فروزان، صباغی فر، عقلی، هومنفرد، نظامی، مقیمی و دوستانم در خیابان شیخ هادی تهران که در طی این دوسال همیشه یار و یاور بنده بودند تشکر می‌نمایم...

نام خانوادگی: غفاری نام: ابوذر

عنوان پایان‌نامه: طراحی، مدل‌سازی و کنترل یک ربات سخت پوش برای پایین‌تنه

استاد راهنما: دکتر احمد قنبری
استاد مشاور اول: دکتر علی رستمی
استاد مشاور دوم: دکتر علیرضا اکبرزاده توتونچی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکاترونیک گرایش: مکاترونیک
دانشگاه: تبریز دانشکده: مهندسی فناوری های نوین
تاریخ فارغ التحصیلی: اسفند ۱۳۹۰ تعداد صفحه: ۱۰۲

کلیدواژه ها: اگزو اسکلتون- دینامیک-کنترل نیرو- عملگر نیرو

چکیده:

اگزواسکلتون رباتی است که به وسیله‌ی یک انسان پوشیده شده و ضمن ایجاد یک پوشش محافظ برای بدن فرد می‌تواند با افزایش قدرت و مقاومت عضلات، فرد را در حرکت‌ها، مانورها و همچنین حمل و جابجایی بارها کمک نماید. در این پایان‌نامه ابتدا با مفهوم اگزواسکلتون‌ها آشنا شده و سپس مبانی عملکردی آنها را مرور خواهیم کرد، در ادامه بررسی جامعی خواهیم داشت از بیومکانیک بدن انسان، دینامیک راه رفتن و مکانیک اندام و عضلاتی که نقش اصلی را در انجام حرکات و مانورهای بدن در هنگام راه رفتن به عهده دارند، طراحی و ساخت یک اگزواسکلتون بدون آشنایی با نحوه انجام حرکات توسط بدن امری بیهوده و مسلما" خطرناکی است، زیرا اگزواسکلتون در تماس با بدن انسان بوده و دائما" در حال تراکنش نیرو می‌باشد و هرگونه اشتباهی در تخمین میزان نیروی اعمالی می‌تواند باعث آسیب رساندن به بدن کاربر شود. در ادامه با استفاد از اطلاعات به دست آمده از بیومکانیک بدن انسان، اقدام به طراحی و مدل‌سازی یک اگزواسکلتون پایین‌تنه نموده ایم، نکته مهمی که در مدل‌سازی یک اگزواسکلتون باید در نظر داشت این است که اگزواسکلتون در فرایند راه رفتن در وضعیت‌های متفاوتی قرار می‌گیرد که هر وضعیت نیاز به مدلی جداگانه برای توصیف فیزیک مسئله دارد.

در یک ربات اگزواسکلتون الگوریتم کنترلی تضمین می‌کند که ربات در هماهنگی کامل با فرد پوشنده به گونه‌ای حرکت کند که کمترین تبادل نیرو بین آنها به وجود بیاید. در ادامه روشی برای کنترل یک اگزواسکلتون ارائه شده است، نتایج پیاده سازی این کنترلر بر روی یک اگزواسکلتون بسیار ساده نشان می‌دهد که می‌توان توان مصرفی کل برای انجام یک حرکت را بین عضلات بدن و موتور اگزواسکلتون به هر نسبتی تقسیم نمود. در ادامه یک عملگر نیرو به عنوان مهمترین و حساس ترین بخش یک اگزواسکلتون طراحی و مدل‌سازی شده و در نهایت این عملگر نیرو با امکانات موجود ساخته شده است. به طور کل می‌توان ادعا کرد که در این پایان‌نامه فناوری طراحی و ساخت اگزواسکلتون‌ها بومی‌سازی شده است.

فهرست مطالب

فهرست مطالب ..... و

فهرست شکل ها ..... ح

فهرست جدول ها ..... ک

فهرست اختصارات ..... ل

مقدمه ۱

۱ بررسی منابع ۴

۱-۱ مقدمه ۵

۱-۲ انگیزه‌ها ۷

۱-۳ کاربردها ۷

۱-۴ تاریخچه بحث ۹

۱-۵ معماری های مختلف طراحی ۱۱

۲ مواد و روش ها ۱۳

۲-۱ بیومکانیک بدن انسان ۱۴

۲-۱-۱ مقدمه ۱۴

۲-۱-۲ آناتومی و فیزیولوژی بدن انسان ۱۴

۲-۱-۳ حرکت مفاصل ۱۵

۲-۱-۴ چرخه‌ی گام زدن ۱۸

۲-۱-۵ تحلیل بالینی راه رفتن (CGA) به عنوان یک ابزار طراحی ۲۱

۲-۱-۶ مچ پا ۲۲

۲-۱-۷ زانو ۲۶

۲-۱-۸ مفصل ران ۲۸

۲-۱-۹ دور و نزدیک شدن خالص مفصل ران ۳۲

۲-۱-۱۰ چرخش خالص پا ۳۳

۲-۱-۱۱ تاثیر تغییرات سرعت ۳۵

۲-۱-۱۲ نتایج تحلیل بیومکانیکی برای اگزواسکلتون ۳۶
۲-۲ مدل‌سازی دینامیکی یک اگزواسکلتون پایین‌تنه ۳۷
۲-۲-۱ مقدمه ۳۷
۲-۲-۲ مدل دینامیکی ۳۷
۲-۲-۳ مدل پرش ۴۱
۲-۲-۴ مدل حالت ایستایش تک پا ۴۵
۲-۲-۵ مدل ایستایش دوپا ۴۹
۲-۲-۶ حالت ایستایش دو پا با یک تکیه گاه اضافی ۵۶
۲-۳ ایده کنترلی ۶۲
۲-۳-۱ مقدمه ۶۲
۲-۳-۲ ایده کنترلی ۶۳
۲-۳-۳ بررسی پایداری سیستم ۷۰
۲-۴ طراحی، مدل‌سازی و ساخت یک عملگر نیرو برای اگزواسکلتون‌ها ی پایین‌تنه ۷۱
۲-۴-۱ مقدمه ۷۱
۲-۴-۲ عملگرهای رفت و برگشتی ۷۲
۲-۴-۳ عملگرهای سری کشسان ۷۲
۲-۴-۴ عملگر سری کشسان الکترومغناطیسی ۷۵
۳ نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۵
۳-۱ نتیجه‌گیری ۸۵
۳-۲ پیشنهادات ۸۶
مراجع ۸۷

فهرست شکل ها

شکل ۱-۱ تصویر میکروسکپی از پوشش خارجی یک مورچه [۲]. ۵
شکل ۱-۲ ساختار کلی یک اگزواسکلتون پایین‌تنه [۲]. ۶
شکل ۱-۳: بارهای حمل شده توسط واحدهای مختلف پیاده نظام آمریکا در طول سال های مختلف [۴]. ۸
شکل ۱-۴ مثالی از معماری ساختار اندام انسانی(سمت چپ) و نامشابه با ساختار اندام انسانی (سمت راست) [۸]. .. ۱۲
شکل ۲-۱ صفحات توصیف آناتومیکی بدن در حالی که بدن در موقعیت آناتومیکی قرار گرفته است..... ۱۶
شکل ۲-۲ درجات آزادی مفاصل [۲۰]. ۱۶
شکل ۲-۳ در این شکل می‌توانید تفاوت بین بالاتنه و بخش محرک بدن را مشاهده کنید. همچنین مکان خط بار در حالت ایستاده نشان داده شده است. در صفحه‌ی میانی خط بار از بین گوش میانی و مرکز جرم بالاتنه عبور کرده و با گذشتن از پشت زانو وجلوی مچ به طرف پاشنه حرکت می‌کند. ابعاد و اندازه های داده شده برای مکان مرکز جرم بالاتنه (HAT CG) و جهت گیری پاها مبتنی بر اندازه گیری هایی است که در مورد ۵۰٪ مردان صادق است [۲۱].۱۷
شکل ۲-۴ چرخه‌ی گام زدن. توزیع زمانی (که بر حسب درصد از بازه ی کامل است) با تغییر سرعت گام زدن کمی تغییر می‌کند. درصدهای نشان داده شده برای سرعت راه رفتن با میانگین 1.3 m/s است. مسیر مرکز جرم بالاتنه در صفحه‌ی میانی نیز در این شکل نشان داده شده است [۲۳]. ۱۹
شکل ۲-۵ نحوه تعیین جهت برای زاویه‌ها..... ۲۲
شکل ۲-۶ زاویه‌ی مچ در طول چرخه‌ی گام زدن [۲۷]. ۲۳
شکل ۲-۷ ماکت سینماتیکی استفاده شده برای BLEEX [۲۷]. ۲۳
شکل ۲-۸ گشتاور مفصل مچ در چرخه‌ی گام زدن [۲۷]. ۲۴
شکل ۲-۹ توان لحظه‌ای مفصل مچ در چرخه گام زدن [۲۷]. ۲۵
شکل ۲-۱۰ تغییرات زاویه‌ی مفصل زانو در چرخه‌ی گام زدن [۲۷]. ۲۶
شکل ۲-۱۱ تغییرات گشتاور مفصل زانو در چرخه‌ی گام زدن [۲۷]. ۲۷
شکل ۲-۱۲ توان لحظه‌ای مفصل زانو در یک چرخه‌ی گام زدن [۲۷]. ۲۸
شکل ۲-۱۳ تغییرات زاویه‌ی مفصل ران در یک چرخه‌ی گام زدن [۲۷]. ۲۹
شکل ۲-۱۴ گشتاور مفصل ران در یک چرخه‌ی گام زدن [۲۷]. ۲۹
شکل ۲-۱۵ توان لحظه‌ای مفصل ران [۲۷]. ۳۰
شکل ۲-۱۶ کل توان لحظه‌ای برای یک فرد 75 kg که بر روی یک سطح صاف با سرعت 1.3 m/s در حال راه رفتن است [۲۷]. ۳۱
شکل ۲-۱۷ زوایای مفاصل در یک چرخه‌ی گام زدن، نسبت به درصد از یک چرخه‌ی کامل [۲۷]. ۳۱
شکل ۲-۱۸ گشتاور مفاصل در یک چرخه‌ی گام زدن ، نسبت به درصد از یک چرخه‌ی کامل(گشتاورها نسبت به جرم بدن به هنجار شده‌اند.) [۲۷]. ۳۲
شکل ۲-۱۹ زاویه دور و نزدیک شدگی خالص در سمت چپ و گشتاور مربوط به آن در سمت راست [۲۷]. ۳۲

شکل ۲-۲۰ اطلاعات CGA توان، مربوط به دورشدگی و نزدیک شدگی خالص پا [۲۷]. ۳۳
شکل ۲-۲۱ زاویه چرخش خالص در سمت چپ و گشتاور مربوط به آن در سمت راست [۲۷]. ۳۴
شکل ۲-۲۲ اطلاعات CGA توان مربوط به چرخش مفصل‌ها [۲۷]. ۳۴
شکل ۲-۲۳ چهارچوب‌های مختصات مرجع [۳۵]. ۳۹
شکل ۲-۲۴ ابعاد و اندازه های بخش های مختلف مدل اگزواسکلتون [۳۵]. ۴۰
شکل ۲-۲۵ وضعیت بدن در حالت پرش و معادل برای تحلیل دینامیک ۴۱
شکل ۲-۲۶ مدل سه درجه آزادی از یکی از پاها در حالت پرش [۳۵]. ۴۲
شکل ۲-۲۷ نیرو و گشتاور اعمالی از طرف بدن کاربر به اگزواسکلتون [۳۵]. ۴۴
شکل ۲-۲۸ وضعیت‌های مختلف بدن در حالت ایستایش تک پا و معادل دینامیکی آن. ۴۵
در حالت ایستایش تک پا بسته به وضعیت قرار گیری پای ایستایش که در شکل ۲-۲۸ نشان داده شد، منظور از قسمت گام هم متفاوت خواهد بود: ۴۶
دستگاه مختصات 0 : این دستگاه مختصات که دستگاه مختصات مرجع ما خواهد بود به زمین در محل تماس پا با زمین متصل شده و در آن محورe_{02} به طور عمودی به سمت بالا اشاره دارد(شکل ۲-۲۳). ۴۶
شکل ۲-۳۲ مدل اگزواسکلتون از نمای روبرو در حالی که مدل به دو بخش تقسیم شده است. ۵۰
شکل ۲-۳۳ مدل سه درجه آزادی از یک نیمه اگزواسکلتون [۳۵]. ۵۰
شکل ۲-۳۴ نیروی خارجی وارد بر یک لینک اگزواسکلتون. ۵۲
شکل ۲-۳۵ الف) گشتاور مفاصل ب) نیروی عملکردی معادل در مرکزجرم بالاتنه ۵۴
شکل ۲-۳۶ مدل اگزواسکلتون در حالت ایستایش دوپا و در وضعیتی که یکی از پاها به صورت یک تکیه گاه اضافی عمل می‌کند. ۵۷
شکل ۲-۳۷ تقسیم مدل اگزواسکلتون به دو مدل دیگر ۵۷
شکل ۲-۳۸ مدل ۴ درجه آزادی از یکی از بخش های اگزواسکلتون که در آن پای ایستایش به صورت یک تکیه گاه اضافی عمل می‌کند [۳۵]. ۵۸
شکل ۲-۳۹ الف) گشتاور مفاصل ب) معادل نیرو و گشتاور فضای عملکردی در مرکز جرم بالاتنه ۶۰
شکل ۲-۴۰ یک اگزواسکلتون یک درجه آزادی در اتصال با بدن فرد پوشنده. اگزواسکلتون اسکلتون گشتاور *T2* را حول محور دوران اعمال می‌کند. در حالی که مفصل پا نیز گشتاور *T1* را اعمال می نماید. گشتاور معادل با تمام نیروها و گشتاورهایی که از طرف بدن به اگزواسکلتون وارد می‌شوند با را با T نشان می‌دهیم. ۶۴
از شکل ۲-۴۱ و با استفاده از روابط دینامیکی می‌توانیم بنویسیم: ۶۴
شکل ۲-۴۲ تابع تبدیل سیستم حلقه باز موقعیت خروجی به مجموع گشتاورهای ورودی به سیستم. ۶۵
شکل ۲-۴۳ تابع تبدیل سیستم حلقه بسته با فیدبک مثبت برای افزایش حساسیت سیتم به ورودی. ۶۵
شکل ۲-۴۴ ساده‌ترین مدل ممکن برای اگزواسکلتون اسکلتون و پای فرد پوشند به صورت یک پاندول ساده ۶۷
شکل ۲-۴۵ کلیت ساختار مدل شده در نرم افزار MATLAB. ۶۸
شکل ۲-۴۶ نمودار بلوکی مدل‌سازی مکانیزم پا و اگزواسکلتون ۶۸
شکل ۲-۴۷ نحوه اعمال گشتاور در موتورهای پا و اگزواسکلتون اسکلتون به ازای $(1-\alpha^{-1}) = .75$ ۶۹
شکل ۲-۴۸ نحوه اعمال گشتاور در موتورهای پا و اگزواسکلتون اسکلتون به ازای $(1-\alpha^{-1}) = 0.9$ ۶۹

شکل ۲-۴۹ مدل حداقلی برای یک عملگر سری کشسان ۷۳
شکل ۲-۵۰ مدل حوزه توان یک عملگر سری. جرم متحرک عملگر تحت تاثیر نیروی موتور و نیز مقداری اصطکاک گران‌رو است ۷۶
شکل ۲-۵۱ مدل طراحی شده در محیط نرم افزار MATLAB ۷۷
شکل ۲-۵۲ نیروی وارد بر بار به ازای ورودی سینوسی با اندازه ۱۰ نیوتن با فرکانس های مختلف در حالی که ضریب فنر برابر K=286 KN/m است ۷۹
شکل ۲-۵۳ یروی وارد بر بار به ازای ورودی سینوسی با اندازه ۱۰ نیوتن با فرکانس های مختلف در حالی که ضریب فنر برابر K=2860 KN/m است ۷۹
شکل ۲-۵۴ پاسخ سیستم حلقه بسته به یک ورودی ۱۰ نیوتنی در حالتی که انتهای عملگر به یک نقطه ثابت شده است ۸۰
شکل ۲-۵۵ یک عملگر سری که به یک بار با جرم m_l متصل شده است ۸۱
شکل ۲-۵۶ یک عملگر سری که به یک بار با جرم m_l متصل شده است ۸۱
شکل ۲-۵۷ نمایی از عملگر ساخته شده مبتنی بر مباحث تئوری ارائه شده در این فصل ۸۲
شکل ۲-۵۸ نمایی از عملگر ساخته شده، در ساخت این عملگر از یک سروموتور ac صنعتی استفاده گردید ۸۳
شکل ۲-۵۹ نمایی از محل اتصال سنسور نیرو به انتهای عملگر. این سنسور نیرو یک لود سل صنعتی با توانایی اندازه گیری ۵۰۰ نیوتن بار است ۸۳
شکل ۲-۶۰ نمایی از سیستم محرک و انتقال نیروی عملگر، در ساخت این عملگر از یک بال اسکرو با گام 5mm استفاده گردید ۸۴

فهرست جدول ها

جدول ۲-۱ نگارش استفاده در تعیین جهت گشتاورها در هریک از حرکت‌ها..... ۲۲
جدول ۲-۲ پارامترهای مدل‌سازی..... ۷۸

فهرست اختصارات

BLEEX	Berkeley Lower Extremity Exoskeleton
CGA	Clinical Gate Analysis
HAL	Hybrid Assistive Leg

مقدمه

اگزواسکلتون رباتی است که به وسیله‌ی یک انسان پوشیده شده و ضمن ایجاد یک پوشش محافظ برای بدن فرد می‌تواند با افزایش قدرت و مقاومت عضلات، فرد را در حرکت‌ها، مانورها و همچنین حمل و جابجایی بارها کمک نماید. هدف از اگزواسکلتون‌ها ی پایین‌تنه فائق آمدن بر محدودیت های ربات‌های چندپا با افزودن یک اپراتور انسانی به سیستم است. این سیستم رباتیک از یک چارچوب شبیه کوله پشتی تشکیل یافته که بر روی دو پای رباتیک قرار گرفته است. اگر مکانیزم رباتیک در خدمت عامل انسانی آن قرار گیرد بسیاری از توانمندی های فوق العاده پیشرفته ی انسانی در درک محیط، مسیریابی و حفظ تعادل با بسیاری از توانمندی های مکانیکی ربات در هم می آمیزد و هم افزایی بسیار مناسبی را ایجاد می‌کند. بنابراین سیستم اگزواسکلتون پایین‌تنه تلاش می‌کند که قدرت و پایداری ربات‌های پیشرفته را با هوشمندی، مهارت و ظرافت عامل انسانی در هم بیامیزد.

فصل اول این پایان‌نامه مروری دارد بر انواع اگزواسکلتون‌ها ، تاریخچه این تکنولوژی و پروژه های مهم علمی که تا کنون در زمینه طراحی و ساخت این نوع جدید از ربات‌ها در دنیا صورت گرفته است.

اولین گام در ساخت یک ربات، طراحی مکانیزم کلی آن و بیان یک توصیف ریاضی مبتنی بر فیزیک مسئله با استفاده از روش های علم مکانیک است. اما نکته ای که باید در نظر داشت این است که این ربات بر خلاف سایر ربات‌ها باید در تماس مستقیم با بدن انسان بوده و به نحوی حرکات بدن انسان را در سریعترین زمان و کمترین خطا مثل سایه دنبال کند، بنابراین اولین قدم در طراحی چنین سیستمی، آشنایی کامل با بیومکانیک بدن انسان، آناتومی استخوان ها و عضلات، آناتومی سیستم حرکتی و مباحث علمی در مکانیک حرکتی بدن انسان است. در بخش دوم از فصل دوم به این موضوع پرداخته ایم و سعی کرده‌ایم مباحث بیومکانیکی پراهمیت در طراحی و ساخت یک اگزواسکلتون پایین‌تنه را به بهترین شکل و به صورت خلاصه و مفید برای پژوهشگرانی که قصد مطالعه در این زمینه خاص را دارند ارائه نماییم. در بخش سوم نیز یک اگزواسکلتون پایین‌تنه در کلی ترین حالت آن و با اجتناب از پرداختن به جزییات طراحی سخت افزاری و نرم افزاری آن و تنها با دید یک مکانیزم رباتیکی طراحی گردیده و با استفاده از روش های کلاسیک علم مکانیک و رباتیک از لحاظ دینامیکی مدل‌سازی شده است و روابط ریاضی لازم برای تحلیل چنین سیستمی استخراج گردیده اند.

در یک ربات اگزواسکلتون الگوریتم کنترلی تضمین می‌کند که ربات در هماهنگی کامل با فرد پوشنده به گونه‌ای حرکت کند که کمترین تبادل نیرو بین آنها به وجود بیاید. بخش چهارم این فصل از پایان‌نامه، روش "کنترل مبتنی بر افزایش حساسیت" برای کنترل یک اگزواسکلتون پایین‌تنه را ارائه می‌دهد. در این روش کنترلی، حساسیت سیستم حلقه بسته نسبت به ورودی های نیرو و گشتاوری که از طرف کاربر اگزواسکلتون به آن وارد می‌شود افزایش داده می‌شود. طرح کنترلی ارائه شده در اینجا نیاز به هیچ گونه اندازه گیری مستقیمی از بدن فرد پوشنده و بخش های اتصال دهنده ربات و بدن ندارد و به جای آن ، کنترلر مبتنی بر اندازه گیری هایی که بر روی اگزواسکلتون انجام می‌دهد و داده‌هایی که تنها از آن به دست می آورد، تعیین می‌کند که اگزواسکلتون چگونه حرکت کند تا کاربر نیروی بسیار کمی را احساس نماید. این روش بر روی یک مدل ساده از یک اگزواسکلتون پیاده شده است، در این مدل یک عملگر نقش موتور طبیعی پا را بازی کرده و عملگر دیگر نقش اگزواسکلتون را بازی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از این روش کنترلی میزان مصرف انرژی را با هر نسبت دلخواهی بین موتور طبیعی پا و اگزواسکلتون تقسیم نمود.

در بخش پنجم به طراحی و مدل‌سازی و ساخت بخشی از یک اگزواسکلتون که همانا مهمترین بخش یک اگزواسکلتون نیز می‌باشد پرداخته ایم. در تمام اگزواسکلتون‌ها ی موجود تا حد ممکن سعی شده است که از حجم و جرم عملگرها کاسته و به قدرت آنها افزوده گردد، به نحوی که در مورد ربات BLEEX عملگرهای هیدرولیک به طور

خاص برای این ربات طراحی و شاخته شده‌اند و دارای اندازه ای بسیار کوچک و توان بالایی می‌باشند. در مورد ربات HAL نیز از موتورهای با ضریب عملکرد بالا استفاده شده است که قیمت های بسیار زیادی دارند. با در نظر گرفتن این موضوع و همچنین با توجه به وضعیت کشور ما و عدم دسترسی به تکنولوژ های فوق در مقیاس های مینیاتوری، در این پایان‌نامه نحوه طراحی، مدل‌سازی و ساخت یک عملگر خطی ارائه گردیده است که در مقایسه با عملگرهای فوق نیاز به تکنولوژی پایینتری دارد و در عین حال می‌تواند نیازهای ما برای ساخت یک اگزواسکلتون در مقیاس های منطقی را برآورده سازد.

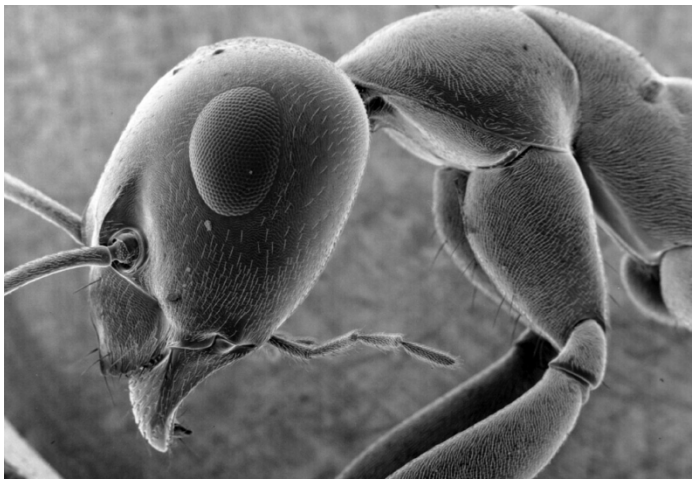
می‌توان ادعا کرد که در این پایان‌نامه فهم دقیق و تا حد امکان ساده ای از یک اگزواسکلتون ارائه گردیده است. به طور خلاصه می‌توان گفت در این پایان‌نامه:

- دینامیک یک اگزواسکلتون در حالت های مختلف بررسی شده است .
- یک روش کنترلی ساده برای کنترل آن پیاده سازی شده است.
- بخشی از یک اگزواسکلتون ساخته شده است.

۱ بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

از لحاظ علمی واژه‌ی لاتین Exoskeleton، به پوشش سخت بیرونی بدن حشرات و سختپوستان اشاره می‌کند (شکل ۱-۱)، این پوشش خارجی ، ضمن در برگرفتن ارگانیسم های داخلی بدن حشره یا سختپوست، موجود را در برابر آسیب‌ها، فشارها و به طور کل محیط اطراف آن حفاظت می‌کند [۱]. این لغت را از این مبحث علمی قرض می‌گیریم و رباتی را که به وسیله‌ی یک انسان پوشیده شده و ضمن ایجاد یک پوشش محافظ برای بدن فرد می‌تواند در حمل و جابجایی بارها به آن فرد کمک کند را در زبان فارسی سختپوش انسانی[۱] می نامیم.



شکل ۱-۱ تصویر میکروسکپی از پوشش خارجی یک مورچه [۲].

هدف از اگزواسکلتون‌ها ی پایین‌تنه فائق آمدن بر محدودیت های ربات‌های چندپا با افزودن یک اپراتور انسانی به سیستم است. این سیستم رباتیک از یک چارچوب شبیه کوله پشتی تشکیل یافته که بر روی دو پای رباتیک قرار گرفته اند، همانطور که شکل ۱-۲ نشان می‌دهد، این دو پای رباتیک به پاهای پوشنده‌ی ربات نیز متصل می‌شوند. اگر مکانیزم رباتیک در خدمت عامل انسانی آن قرار گیرد بسیاری از توانمندی های فوق‌العاده پیشرفته ی انسانی در درک محیط، مسیریابی و حفظ تعادل با بسیاری از توانمندی های مکانیکی ربات در هم می‌آمیزد و هم‌افزایی بسیار مناسبی را ایجاد می‌کند. بنابراین سیستم اگزواسکلتون‌ها ی پایین‌تنه تلاش می‌کند که قدرت و پایداری ربات‌های پیشرفته را با هوشمندی، مهارت و ظرافت عامل انسانی در هم بیامیزد [۲].

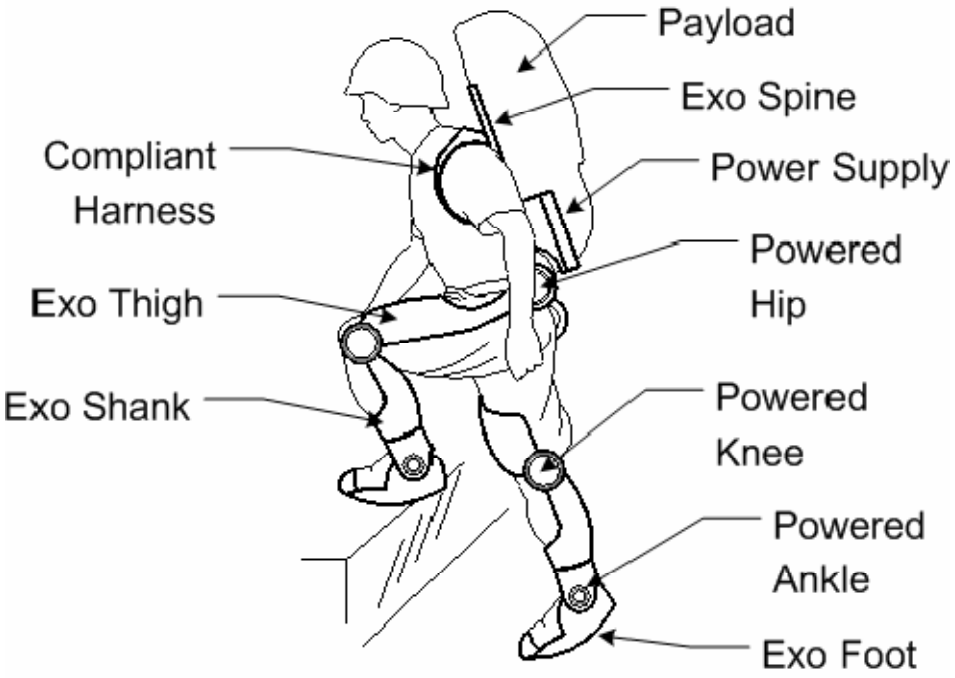
اگزواسکلتون‌ها ی انسانی سختی حمل بار را برای انسان کاهش داده و یا کلا" حذف می‌کنند. بدن انسان و حرکت آن با استفاده از دو پا، مکانیزم بی نظیری برای تحمل بارها و حرکت در اطراف با چالاکی بالا فراهم می‌کند. این سیستم طبیعی قابلیت سازگاری با محیط هایی را دارد که سیستم های مبتنی بر چرخ در آن کارایی ندارند و یا استفاده از آنها بسیار مشکل می‌باشد.

[۱] Human exoskeleton

حمل بارهای مختلف ، جزئی جدا ناپذیر از زندگی روزانـه ی هـر فـردی اسـت. بـرای سـربازان جنگـی و نیـز امدادرسانان حمل بارهای مختلف بسیار حیاتی و جزئی از وظایف آنها می‌باشد. متاسفانه، حمل بار نـه تنهـا خسـته کننده است بلکه می‌تواند به طور بلقوه باعث بروزخطرات و صدمات و صدمات جبران ناپذیر به بدن افراد شود.

یک اگزواسکلتون انسانی توسط فرد پوشیده شده و بارهایی مثل یک کوله پشتی سنگین، کـه پـیش از ایـن باید توسط سیستم اسکلتی عضلانی خود فرد تحمل می‌شد را تحمل می‌کند. در عین حال اگزواسکلتون نبایـد بـه گونه‌ای عمل کند که مانعی برای حرکات طبیعی فرد مانند ایسـتادن، نشسـتن، راه رفـتن و دویـدن ایجـاد نمایـد، همچنین باید تضمین کند که نیروهای مربوط به بار همیشه از طریق ساختار اگزواسکلتون منتقل شوند نه از طریق بدن انسان. اگزواسکلتون این مزیت‌ها را دارد که خستگی ناشی از حمل بار را برای فـرد کـاهش داده و مـی‌توانـد فاصله و زمان قابل تحمل برای حمل بار را افزایش دهد. همچنین فردی که اگزواسکلتون را مـی پوشـد از آسـیب های مربوط به تنش های اعمالی به سلسله اعصاب، عضلات، استخوان ها و مفاصل که ممکن بود به خـاطر حمـل بارهای سنگین پیش بیایند در امان نگه می دارد[۳].

هزینه ای که در قبال این مزایای برجسته باید پرداخت کنیم این است که یک وسیله‌ی فیزیکی داریم کـه در فاصله‌ی بسیار نزدیک با بدن انسان قرار گرفته و نیازمند منبع توانی است که دائما" نیاز به تعویض و یا شارژ شدن دارد و کلیت ساختار نیزمی‌تواند از لحاظ فیزیکی دچار عیب و اشکال شده و دیگر قادر به حمل بار نباشد و یا مـانع بعضی مانورها و حرکت‌ها توسط پوشنده‌ی آن گردد [۲].



شکل ۱-۲ ساختار کلی یک اگزواسکلتون پایین‌تنه [۲].

۱-۲ انگیزه‌ها

در بسیاری از کارها زمانی که استفاده از یک ابزار خارجی و یا یک وسیله‌ی چرخ دار مثل ارابه یا چرخ دستی امکان پذیر نیست و یا غیر ممکن است باید خومان بار را حمل کنیم. زمانی هم که باری را حمل می‌کنیم معمولا نیاز داریم که کارهای دیگر را نیز در عین حمل بار انجام دهیم برای مثال دری را باز کنیم و یا چیزی را جابجا کنیم. برای این منظور می‌توانیم از یک کوله پشتی که با یک کمربند به پشت ما بسته شده است و یا هر سیستم دیگری که بار را بر روی بدن ما حفظ کند استفاده کنیم.

طراحی سیستم رباتیکی که انعطاف‌پذیری یک باربند که به بدن انسان چسبیده باشد را داشته و در عین حال مزاحمتی برای انسان ایجاد نکند و همچنین بتواند نیاز به اعمال نیرو توسط اعضای بدن و صرف انرژی برای حمل آن را حذف نماید، هدف کلی تحقیقات در این زمینه است.

نسل های اول و دوم اگزواسکلتون‌هایی که در این آزمایشگاه های مختلف در سطح دنیا توسعه داده شده‌اند و در این پایان‌نامه به آنها اشاره خواهد شد برای حفاظت زرهی پوشنده‌ی آن طراحی نشده‌اند، اما نسل های بعدی آن که هم اکنون در حال طراحی و توسعه می‌باشند، قابلیت های مربوط به یک اگزواسکلتون طبیعی مثل یک حشره را نیز دارا می‌باشند. برخلاف انواع فانتزی و تخیلی این ربات‌ها که فیلم سازان و نویسندگان داستان های علمی تخیلی به آن می پردازند، ربات‌هایی که در این مرکز تحقیقاتی طراحی و ساخته می‌شوند، قرار نیست که نیروها و یا سرعت های مافوق بشری را برای پوشنده‌ی آن به همراه بیاورند بلکه این ربات‌ها جهت کاربردهای عملی در حمل بار طراحی شده‌اند[۲].

از علت های این هدف گذاری به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

۱) حذف سختی و مشقت حمل بار بسیاری از مشکلات واقعی و موجود مربوط به خستگی و آسیب های ناشی از آن را در بسیاری از کاربردها حذف می‌کند.

۲) استفاده از وسیله‌ای که بتواند قدرت فیزیکی انسان را به صورت فوق العاده ای افزایش دهد، مستلزم آن است که فرد پوشنده‌ی اگزواسکلتون در موقعیت هایی قرار گیرد که در صورت درست عمل نکردن اگزواسکلتون در معرض آسیب های جسمانی جدی قرار گیرد.

۳) اگزواسکلتونی که برای سرعت های بالا طراحی شده باشد قاعدتا" باید عضلات بدن پوشنده را مجبور نماید که با همان سرعت حرکت کنند که البته بدن انسان برای چنین حرکاتی ساخته نشده است.

۱-۳ کاربردها

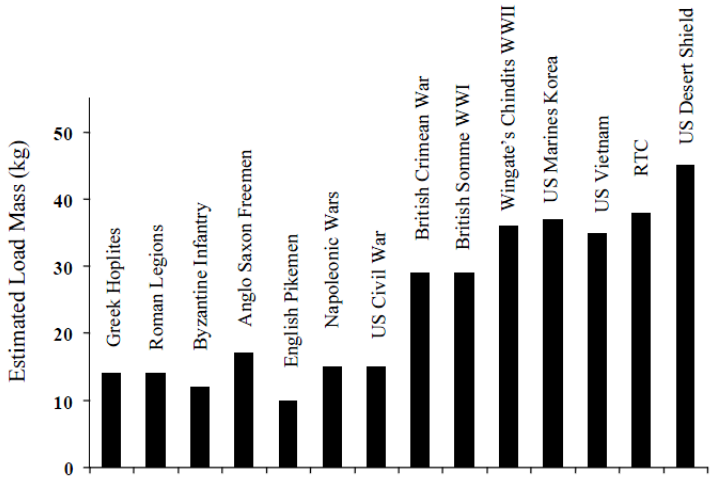
حمل بار برای سربازان:

پروژه ی ربات اگزواسکلتون پایین‌تنه در دانشگاه کالیفرنیا(برکلی) در ابتدا با سرمایه گذاری آژانس پروژه های تحقیقاتی پیشرفته ی نظامی[۱] که یک سازمان سرمایه گذاری زیر نظر وزارت دفاع آمریکا است شکل گرفت و نیروی

۱ DARPA

پیاده نظام ارتش آمریکا مشتری اصلی این ربات می‌باشد. سربازها به طور معمول بارهـای سـنگین را در مسـافت هـای طولانی حمل می‌کنند. در مقالات بسیاری ارتباط مستقیم بین حمل بارهای سنگین و تلفات و مشکلات ناشـی از آن و عملکردهای نامناسب و گاه مرگ های بی دلیل سربازان ناشی به خاطر آن، بررسی شده است [۴].

در اکثر دستورالعمل های نظامی، بیشینه‌ی باری که توصیه می‌شود توسط یک سرباز بـرای رژه در یـک مسـافت ۳۳ کیلومتری حمل شود، ۲۲ کیلوگرم است. اگر چه آمار نشان می‌دهد، بار واقعی که معمولا" توسط یـک سـرباز در میدان جنگ حمل می‌شود بین ۴۰ کیلوگرم تا ۷۳ کیلوگرم است. این آمار نشان می‌دهد که بارهای حمل شده توسط سربازان حدودا" ۵۵ تا ۱۰۰ ٪ وزن خودشان می‌باشد در حالی که استانداردها می گوینـد وزن بارحـداکثر بایـد ۳۰ تـا ۴۰٪ وزن بدن باشد. بارهایی که توسط سربازان حمل می‌شود نه تنها خسته کننده است بلکه در دراز مـدت تهدیـدی برای سلامتی آنها نیز می‌باشد. نیاز برای ابزارها یاروش هایی که این بارها را برای سربازان کاهش دهد بی نهایت واضح و آشکار است [۴].



شکل ۱-۳: بارهای حمل شده توسط واحدهای مختلف پیاده نظام آمریکا در طول سال های مختلف [۴].

شکل ۱-۳ تاریخچه ای از میزان بارهای حمل شده توسط سربازان واحد مختلف پیاده نظام آمریکا را نشان می‌دهد. برخلاف پیشرفت های زیادی که در طول این صده، در تکنولوژی ساخت مواد سبک وزن به دست آمده است، وزن کل بارهای حمل شده توسط سربازان افزایش یافته است. تا حدی که برای مثال در طول جنگ جهانی اول سربازان بارهایی در حد ۸۵٪ وزن خود را حمل می کرده اند. طبق آمارها تغییرات اخیر در نحوه‌ی جنگ ها از جنگ هایی با وسعت های بالا به جنگ های تن به تن و چریکی باعث خواهد شد که سربازان مجبور به حمل بارهای سنگین تری نسبت به قبل شوند.

کاربردهای غیرنظامی

اگزواسکلتون‌ها کاربردهای زیادی علاوه بر حمل بار برای سربازان دارند. این ربات‌ها می‌توانند در عملیات امداد و نجات و حمل وسایل، غذا، آب و نیازهای دارویی به مناطق آسیب دیده و صعب العبور به کمک امدادرسانان بیایند. ارتقاء در توانایی حمل بار این امکان را به امدادرسانان می‌دهد تا افراد آسیب دیده را از محل حادثه به پناهگاه ها انتقال دهند. به عبارتی هر امدادرسان خود به صورت یک آمبولانس تک نفره عمل می‌کند. به همین ترتیب یک اگزواسکلتون سربازان را قادر می‌سازد تا وسایل تنفسی و تجهیزات حیاتی که با حفظ جان سرباز در ارتباطند را بدون