



دانشگاه تهران

پردیس البرز

دانشکده مهندسی مکانیک

طراحی و ساخت کمر نرم برای ربات کرم ابریشم

پایان نامه یا رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکاترونیک

نام دانشجو

فرزام معصومی

استاد راهنما اول:

دکتر هادی مرادی

شهریور ۱۴۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تهران

پردیس دانشکده‌های فنی

دانشکده مهندسی

گواهی دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

هیأت داوران پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم به شماره
دانشجویی در رشته گرایش را در تاریخ
با عنوان

به حروف

به عدد

--	--

با نمره نهایی

ارزیابی کرد

--

و درجه

ردیف	مشخصات هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه ه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضاء
۱	استاد راهنما استاد راهنمای دوم (حسب مورد)				
۲	استاد مشاور				
۳	استاد داور داخلی				
۴	استاد مدعو				
۵	نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده / گروه				

نام و نام خانوادگی معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی

پردیس دانشکده‌های فنی:

تاریخ و امضاء:

نام و نام خانوادگی معاون تحصیلات تکمیلی و

پژوهشی دانشکده / گروه:

تاریخ و امضاء:

تعهدنامه اصالت اثر

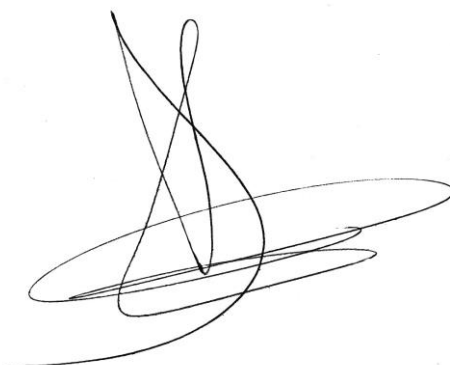
باسمه تعالی

اینجانب فرزام معصومی تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو : فرزام معصومی

امضای دانشجو :



تقدیم به

دو شمع فروزان حیاتم

مادر و پدرم

که همه امیدشان تعالی

فرزندانشان است

و با سپاس فراوان

از استاد دانشمند و پر مایه‌ام جناب آقای دکتر منوچهر مرادی که از محضر پر فیض تدریس شان، بهره‌ها برده‌ام، با امتنان بیکران از مساعدت‌های بی شائبه جناب آقای دکتر کارن ابری نیا ریاست محترم دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران و جناب آقای دکتر یونس نوربخش ریاست محترم پردیس البرز دانشگاه تهران، و با سپاس بی دریغ خدمت دوستان گرانمایه‌ام خانم پریسا پرهامی و آقایان پیمان شرفیان، بیژن مهرعلیزاده و شهاب نیکخو که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داده‌اند.

چکیده

یکی از مهم ترین دلایل استفاده از ربات‌ها، بکارگیری آن‌ها در محل‌هایی است که انسان توانایی ورود به آن‌ها را ندارد یا حضور انسان در آن محیط‌ها پر خطر است به طور مثال بازرسی لوله‌های پالایشگاه‌ها و یا بویلرها. به همین منظور امروزه ربات‌های نرم به دلیل درجات آزادی و دامنه‌ی حرکتی بالا اهمیت خاصی پیدا کرده‌اند. ربات کرم ابریشم یکی از ربات‌های ساخته شده در این زمینه است.

در این پروژه با الهام از طبیعت اقدام به طراحی و ساخت کمرنرمی فعال برای ربات کرم ابریشم به منظور بالابردن توانایی‌های حرکتی (درجات آزاد) ربات با استفاده از دو فنر هلیکال در مرکز مازول و چهار نخ در اطراف و به موازات فنر کرده‌ایم. با ساخت این کمرنرم فعال، ربات کرم ابریشم امکان حرکت در بازه مثبت ۹۰ درجه تا منفی ۹۰ درجه در راستای محور X و Y را دارد و همچنین توانایی حرکت در راستای محور Z به اندازه طول کمر را دارد که این ویژگی حرکت در راستای محور Z در مقایسه با مازول‌های دیگر منحصر به فرد است.

ما پس از طراحی و ساخت این مازول برای کنترل آن از کنترلر PID استفاده کردیم و در نهایت با انجام تست‌هایی به کمک روش‌های شناسایی سیستم و پردازش تصویر موفق به نشان دادن کنترل پذیری سیستم و به دست آوردن ضرایب معادله سهمی درجه سوم سیستم و اثر بخشی آن شدیم و این سیستم می‌تواند به عنوان ساختاری جهت توسعه کارهای آینده به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: ربات کرم ابریشم، مازول کمر نرم فعال، درجه آزادی، مجموع فنرونخ

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- تعریف مسئله	۲
۳-۱- ربات های الهام گرفته از طبیعت	۲
۴-۱- رباتهای کمرنرم	۳
۵-۱- رباتهای ماری	۶
۶-۱- لزوم انجام پژوهش	۷
۷-۱- خلاصهی فصلها	۸
فصل ۲: مرور ادبیات.....	۹
۱-۲- مقدمه	۹
۲-۲- تاریخچه	۱۰
۳-۲- ربات الاستیک شرکت فستو معروف به خرطوم فیل	۱۲
۴-۲- کنترل موقعیتیابی	۱۳
۵-۲- رباتهای الاستیک دانشگاه EPFL	۱۴
۱-۵-۲- ربات (SRS)	۱۴
۲-۵-۲- رباتنرم با قدرت خلاء	۱۸
۳-۵-۲- کمرندهای محرکرم برای تقویت انسان	۲۱

۲۳	۲-۶- مازولهای نرم با فناوری فلز پیزوالکتریک
۲۴	۲-۶-۱- روش کار
۲۶	۲-۷- رباتهای ماری
۳۰	۲-۸- معرفی کوتاهی بر ربات کرم ابریشم با کمر غیرفعال
۳۱	۲-۹- تحلیل رفتاری فنر
۳۲	۲-۱۰- سیستم عامل ROS
۳۲	۲-۱۱- چرا ROS
۳۳	۲-۱۲- نتیجه گیری
۳۴	فصل ۳: طراحی، ساخت و طراحی کنترلر
۳۴	۳-۱- مقدمه
۳۵	۳-۲- معرفی مازول کمر نرم فعال
۳۶	۳-۳- تحلیل اولیه ساختار مازول کمر نرم فعال
۴۳	۳-۴- محاسبه مقدار k فنر
۴۴	۳-۵- تشریح کامل روش تحقیق
۴۴	۳-۵-۱- نسل اول مازول کمر نرم
۴۵	۳-۵-۲- نسل دوم مازول کمر نرم
۵۰	۳-۵-۳- نسل سوم مازول کمر نرم
۵۳	۳-۵-۴- نسل چهارم مازول کمر نرم
۵۴	۳-۶- ساخت پلتفرم کنترلی مازول

۳-۷- طراحی کنترل PID ۵۵

۳-۸- کنترل زاویه ۵۵

۳-۹- طراحی کنترل کننده ۵۸

فصل ۴: نتایج ۵۹

۴-۱- مقدمه ۵۹

۴-۲- نتایج کنترل زاویه ماژول ۶۰

۴-۳- کنترل حلقه باز ۶۰

۴-۴- کنترل حلقه بسته ۶۵

۴-۵- تعداد درجات آزادی ۷۰

۴-۶- هولونومیک و غیرهولونومیک ۷۰

۴-۷- فضای کاری کمر نرم ربات کرم ابریشم: ۷۰

۴-۸- نتیجه گیری ۷۳

فصل ۵: بحث و نتیجه‌گیری ۷۴

۵-۱- جمع بندی ۷۴

۵-۲- نتیجه‌گیری ۷۵

۵-۳- کارهای آینده ۷۶

فصل ۶: مراجع ۱

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) تشبه رباتهای الاستیک به بدن یک هشت پا [۱] ۳
- شکل (۲-۱) ربات الاستیک ساخته شده در دانشگاه EPFL [۲] ۵
- شکل (۳-۱) شباهت دو ربات ماری به یک مار واقعی [۳] ۶
- شکل (۴-۱) استفاده از رباتهای ماری در جستجو و نجاتهای شهری [۴] ۷
- شکل (۱-۲) مازل سیلیکونی ساخته شده توسط Suzumori و همکارانش [۶] ۱۱
- شکل (۲-۲) اولین مازول ربات خرطوم فیل [۷] ۱۱
- شکل (۳-۲) ربات خرطوم فیل شرکت فستو [۹] ۱۴
- شکل (۴-۲) مازول الاستیک دانشگاه EPFL [۱۱] ۱۵
- شکل (۵-۲) نمایش یک مازول تک واحدی SRS دانشگاه EPFL [۱۱] ۱۶
- شکل (۶-۲) در شکل بالا سه شیء با ساختارهای متفاوت و همچنین مدل حرکتی متفاوت [۱۲] ۱۷
- شکل (۷-۲) ربات V-SPA محیطهای عملیاتی مختلفی را برای کاربردهای متنوع با یکدیگر مخلوط می کند [۱۳] ۱۸
- شکل (۸-۲) لایههای تشکیل دهنده ربات نرم با محرک خلاء [۱۳] ۱۹
- شکل (۹-۲) مجموعه ای از حالت های حرکتی گرفته شده از ربات که به ترتیب: (A) حرکت موجی با پنج مازول (B) حرکت موجی شکل با سه مازول (C) انجام حرکت چرخشی با وجود پنج مازول (D) بالا رفتن به صورت عمودی با استفاده از مازول های ساکشن [۱۴] ۲۰
- شکل (۱۰-۲) نمایی دیگر از ربات در حال بالا رفتن از شیشه به کمک مازول ساکشن [۱۴] ۲۰
- شکل (۱۱-۲) کمر بند های محرک نرم برای تقویت انسان در انجام حرکات [۱۵] ۲۱

- شکل (۲-۱۲) روش طراحی به کار رفته در کمربند توانبخشی برای رفع چالش کمبود نیرو در
- محرکهای نرم [۱۵]..... ۲۲
- شکل (۲-۱۳) ماژول نرم ساخته شده با پیزوالکتریک [۱۷]..... ۲۳
- شکل (۲-۱۴) تصویربرداشتن ، یک تخم مرغ خام ، یک قطعه کاغذ صاف و یک بالون آب ۷۳ گرم با
- گیرنده های نرم و سازگار مبتنی بر ترکیب تحریک الکترواستاتیک . [۱۸]..... ۲۴
- شکل (۲-۱۵) ساختار DEA [۱۸]..... ۲۵
- شکل (۲-۱۶) تصویری از مکانیزم گرفتن اشیاء: گیرنده هم چسبندگی الکتریکی و هم نیروی محکم
- گرفتن را تولید می کند. [۲۰]..... ۲۵
- شکل (۲-۱۷) اولین ربات آبپاش آتش نشان ماری ملقب به آناکوندا [۲۲]..... ۲۷
- شکل (۲-۱۸) اولین ربات ماری که توسط پروفسور شیگئو در سال ۱۹۷۲ ساخته شده است. [۲۴]..... ۲۸
- شکل (۲-۱۹) ربات یامادا ساخته شده در موسسه فناوری توکیو. این ربات توانایی حرکت در زیر آب
- را دارد [۲۶]..... ۲۹
- شکل (۲-۲۰) ربات ماری معروف به عموسام این ربات در دانشگاه کارنگی ملون ساخته شده است.
- این ربات مکانیزم مفصلی قوی و فشردهای دارد و میتواند از تیرها بالا رود. [۲۷]..... ۳۰
- شکل (۲-۲۱) نمایی از ربات کرم ابریشم..... ۳۱
- شکل (۲-۲۲) دو نمونه از مفصل رباتهای ماری [۲۷]..... ۳۳
- شکل (۳-۱) تصویری از اولین طراحی ماژول کمر نرم فعال..... ۳۶
- شکل (۳-۲) تصویری از لحظه برخورد نخ به فنر..... ۳۷
- شکل (۳-۳) تصویر فنر قبل در لحظه برخورد نخ و ایجاد دایره‌ی فرضی بر حسب کمان فنر ۳۸

- شکل (۳-۴) تصویری از فنر در دو حالت خم شدن متفاوت و ایجاد دایره‌های فرضی به شعاع h1
- و h2 ۳۹
- شکل (۳-۵) حالت حدی از فنر که نخ با فنر برخورد کرده است ۴۰
- شکل (۳-۶) نمونه اولیه ساخته شده مازول کمر نرم ۴۵
- شکل (۳-۷) تصویری از موتور A312 قبل از ایجاد تغییرات در آن ۴۶
- شکل (۳-۸) در تصویر سمت راست مراحل ساخت جرخ دنده نشان داده شده است و در شکل سمت چپ مدل قرار گیری آن در گیربکس موتور است ۴۶
- شکل (۳-۹) موتور تکمیل شده برای استفاده در نسل سوم مازول کمر نرم فعال ۴۷
- شکل (۳-۱۰) مدل جایگذاری موتورها در داخل مازول کمر نرم فعال ۴۸
- شکل (۳-۱۱) تصویر سمت راست محلی شکستگی پوسته گیربکس در اثر نیروی خمشی ایجاد شده در شفت ها را نشان می‌دهد و تصویر سمت چپ استفاده از ورق استیل برای مهار این نیرو در گیربکس است ۴۸
- شکل (۳-۱۲) ابعاد و اندازه انکدر موس استفاده شده در طراحی ۴۹
- شکل (۳-۱۳) در تصویر بالا حالت خم شدن مازول را می‌بینید که با زاویه‌ی بیش از ۹۰ درجه نخها به فنر برخورد نکرده اند ۵۰
- شکل (۳-۱۴) تصویری از مازول نسل سوم ۵۱
- شکل (۳-۱۵) تصویری از برد بکار برده شده در مازول از شرکت آردوینو ۵۲
- شکل (۳-۱۶) نسل چهارم مازول کمر نرم فعال ۵۳
- شکل (۳-۱۷) طراحی پلتفرم کنترلی ربات ۵۴

- شکل (۳-۱۸) تصویری از یک تگ واقعیت افزوده..... ۵۶
- شکل (۳-۱۹) نمایی از تگاروکوکد در دوربین..... ۵۷
- شکل (۳-۲۰) نمایی از گراف ROS..... ۵۸
- شکل (۴-۱) تصویری از زاویه دید انکودر موتور داینامیکسل..... ۶۱
- شکل (۴-۲) نمایش موتورهای و مجری نهایی در یک صفحه و نمای کلی آن ها از بالا..... ۶۱
- شکل (۴-۳) اندازه پولی طراحی شده برای موتورهای..... ۶۳
- شکل (۴-۴) دیتاهای جمعآوری شده و مطابقت سهمی درجه سوم با آن..... ۶۴
- شکل (۴-۵) در تصویر بالا نمودار نارنجی رنگ ورودی پله زاویه ۲۰ درجه است و نمودار آبی رنگ خروجی مازول در زاویه ۲۰ درجه است..... ۶۴
- شکل (۴-۶) در تصویر بالا نمودار نارنجی رنگ ورودی پله زاویه ۲۰ درجه است و نمودار آبی رنگ خروجی مازول در زاویه ۲۰ درجه است..... ۶۶
- شکل (۴-۷) نمودار بدست آمده از کنترل PID در حضور اغتشاش در زاویه ۲۰ درجه..... ۶۷
- شکل (۴-۸) نمودار بدست آمده از کنترل PID در حضور چندین اغتشاش در زاویه ۲۰ درجه..... ۶۸
- شکل (۴-۹) نمودار بدست آمده از کنترل PID در حضور چندین اغتشاش در زاویه ۴۵ درجه..... ۶۸
- شکل (۴-۱۰) نمایش حرکت کامل ربات..... ۶۹
- شکل (۴-۱۱) تصویر سه بعدی از حرکت مازول کمر نرم..... ۶۹
- شکل (۴-۱۲) جابهجایی مازول کمر نرم در راستای محور Z..... ۷۱
- شکل (۴-۱۳) جابهجایی مازول کمر نرم در راستای محور X..... ۷۱
- شکل (۴-۱۴) فضای کاری مازول کمر نرم از زاویه دید بالا نسبت به مازول..... ۷۲

شکل (۴-۱۵) فضای کاری ماژول کمر نرم در چند تصویر در راستاهای محور x ۷۲

فهرست جداول

(جدول ۱-۳) جدول مشخصات مینی موتور گیربکس دار..... ۵۰

(جدول ۲-۳) جدول مشخصات برد لیلی پد شرکت آردوینو..... ۵۲

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروزه به دلیل تغییرات و پیشرفت‌های روزافزون علم و فناوری، ربات‌ها^۱ در بسیاری از کارها به جای انسان فعالیت می‌کنند. در دنیای امروز نیز ربات‌های مختلفی با وظایف و ساختارهای متفاوتی را مشاهده می‌کنیم. می‌توان ربات‌ها را به دسته‌های مختلف دسته‌بندی کرد که یکی از این دسته‌ها ربات‌های نرم^۲ (الاستیک)، معرفی جدیدی از رباتیک هستند. این روبات‌ها عموماً از محیط زیست الهام گرفته‌اند. اکثر برنامه‌های کاربردی از ساختارهای بیولوژیکی الهام گرفته شده از مارها و کرم‌ها هستند.

^۱ Robot

^۲ Soft robots

۱-۲- تعریف مسئله

در این پروژه به طراحی و ساخت کمر نرم فعال برای ربات کرم ابریشم به منظور بالا بردن توانایی‌های حرکتی (درجات آزاد) ربات پرداخته شده است. با توجه به نیاز و کاربرد اصلی این ماژول بر روی ربات کرم ابریشم این ماژول^۱ در سائز کوچک طراحی و ساخته شده است از دیگر اهداف اصلی انجام این پروژه عبارت است از :

- تحقیق درباره‌ی ربات‌های کمر نرم
- طراحی اولیه و ساخت نمونه‌های اولیه ماژول کمر نرم برای ربات کرم ابریشم
- طراحی و ساخت نمونه‌ی نهایی ماژول کمر نرم
- همچنین رسیدن به ماژولی است که توانایی اتصال به ربات‌های مختلف جهت بالا بردن درجات آزادی^۲ آن‌ها را داشته باشد.

۱-۳- ربات‌های الهام گرفته از طبیعت

یکی از دسته بندی‌های ربات‌ها، ربات‌های الهام گرفته از طبیعت هستند. همان طور که از اسم این ربات‌ها پیداست در ساخت آن‌ها از موجوداتی که در طبیعت وجود دارند از جمله حیوانات الهام گرفته شده است و در ساخت این ربات‌ها تلاش بر این بوده تا حرکت و چگونگی جابه‌جایی آن‌ها

¹ module

² Degrees of freedom

مشابه با حرکت و جابه‌جایی حیوانات باشد [۱]. از جمله ربات‌های الهام گرفته شده از طبیعت^۱ عبارت اند از:

ربات‌های شناگر^۲

ربات‌های پرنده^۳

ربات‌های الاستیک یا کمرنرم^۴

۴-۱- ربات‌های کمرنرم



شکل (۱-۱) تشبه ربات‌های الاستیک به بدن یک هشت پا [۱]

¹ Bio-inspired robotics

² Swimming robots

³ Flying robots

⁴ Elastic robots (soft robots)

ربات‌های نرم (الاستیک) دسته بندی‌های جدیدی برای ربات‌ها هستند. ربات‌های نرم، زیرمجموعه خاصی از رباتیک است که زمینه‌ی کاری آن‌ها ساخت ربات‌هایی با الهام‌گیری از طبیعت و موجودات زنده می‌باشد [۱]. طبیعت غالباً منبع الهام برای طراحی ربات‌های نرم است زیرا با توجه به این‌که حیوانات خودشان بیشتر از اجزای نرم تشکیل شده‌اند، به نظر می‌رسد که آن‌ها از نرمی خود برای حرکت موثر در محیط‌های پیچیده تقریباً در هر جای زمین بهره می‌گیرند. همان‌طور که بیشتر گفته شد برخلاف روبات‌های ساخته شده از مواد سخت، ربات‌های نرم امکان انعطاف پذیری بیشتر برای انجام کارها و همچنین ایمنی بیشتر هنگام کار در اطراف انسان را فراهم می‌کنند. ربات‌های نرم اغلب از سیستم‌های بیولوژیکی^۱ متشکل از مواد نرم الهام گرفته می‌شوند. چندین مزیت روبات نرم در مقایسه با روبات معمولی وجود دارد، از جمله حفظ ایمنی انسان و ماشین به دلیل داشتن ساختار نرم، سازگاری آن‌ها با دستگاه و ربات‌های پوشیدنی^۲، استفاده از آن‌ها در سیستم‌ها و مکانیزم‌هایی که نیاز به گرفتن ساده یک قطعه دارد و غیره [۲].

با توجه به ویژگی‌ها و مزایای منحصر به فرد، ربات‌های نرم دارای طیف قابل توجهی از برنامه‌ها هستند. سیستم‌های تحریک و حرکتی برای ربات‌های نرم را می‌توان به سه دسته تقسیم بندی کرد: سیستم مکانیکی با طول متغیر، عملگرهای سیالاتی^۳ و پلیمر الکتریک فعال (EAP)^۴.

خاصیت تغییر شکل ربات‌های نرم، استفاده از سنسورهای رایج را محدود می‌کند از جمله رمزگذارها^۵، فشار سنج‌ها^۶ و یا واحدهای اندازه گیری اینرسی. بنابراین، سنسورهایی با مدول پایین

¹ Biological systems

² Wearable robots

³ Fluid operators

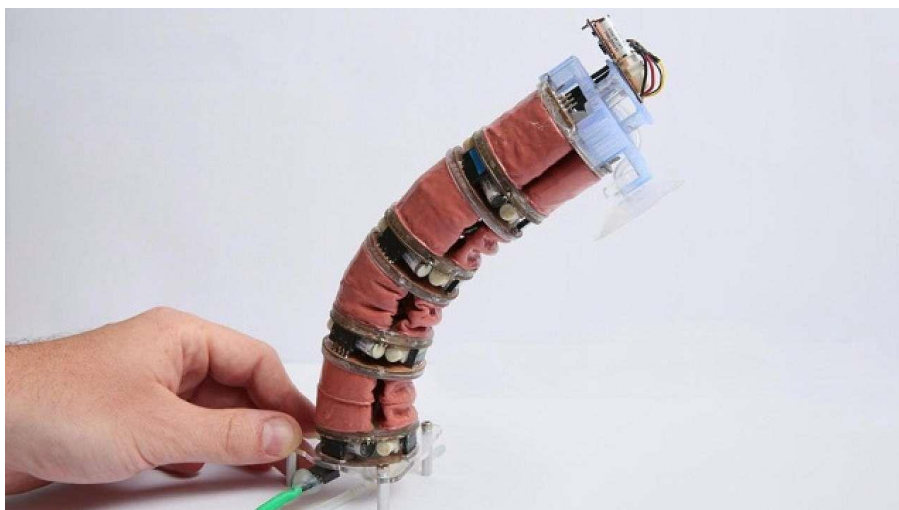
⁴ Electro Active polymers

⁵ encoder

⁶ Barometer

برای ربات‌های نرم ترجیح داده می‌شوند. به‌طور مثال سنسورهای شامل الاستومرهای کم‌توان (۱) < مگاپاسکال) برای استفاده در این ربات‌ها مناسب است. از نظر کنترلی، ایده کنترل ربات‌ها باید کمی متفاوت باشد، زیرا ممکن است تکنیک‌های کنترلی معمولی برای کنترل ربات‌های نرم کافی نباشند. در فصل بعد به تحلیل و بررسی چند نمونه از ربات‌های الاستیک پرداخته شده است تا دید بهتری با این ربات‌ها بدست آوریم [۲].

شکل (۱-۲) یکی از نمونه‌های ربات‌های الاستیک ساخته شده در دانشگاه epfl است.



شکل (۱-۲) ربات‌های الاستیک ساخته شده در دانشگاه EPFL [۲]

۱-۵- ربات‌های ماری



شکل (۱-۳) شباهت دو ربات ماری به یک مار واقعی [۳]

ربات‌های مار^۱ نوع جدیدی از ربات‌ها هستند. همان‌طور که از نام‌شان پیداست، این ربات‌ها دارای اتصالات با چندین محرک هستند که باعث می‌شود تا این نوع ربات‌ها از چندین درجه آزادی^۲ برخوردار باشند. این ویژگی به آن‌ها توانایی برتری در انعطاف‌پذیری و دستیابی به حرکت‌های پیچیده‌تر در فضای کار خود، نسبت به ربات‌های دیگر را می‌دهد [۳].

عوامل زیادی مانند اندازه، قدرت و وزن، طراحی ربات‌های مار مدولار را محدود می‌کنند. برآورده ساختن این محدودیت‌ها نیاز به اجرای معماری پیچیده‌ی مکانیکی و الکتریکی دارد. ربات‌های ماری، شکل و توانایی منحصر به فرد در جهت‌یابی در محیط‌های بسیار کم و پر پیچ‌وخم مانند لوله‌ها دارند که این توانایی‌ها آن‌ها را برای مأموریت‌های جستجو و نجات شهری و همچنین مصارف نظامی مناسب می‌کند [۴].

¹ Snake robots

² Degrees of freedom

شکل (۴-۱) یک ربات ماری اکتشافگر است که در زمان زلزله برای جست و جو در زیر آوار استفاده می شود.



شکل (۴-۱) استفاده از ربات های ماری در جستجو و نجات های شهری [۴]

۶-۱- لزوم انجام پژوهش

با توجه به عدم توانایی انسان در انجام بعضی از کارها بویژه برای انجام کارهای تکراری و پرخطر استفاده از ربات مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. بخصوص امروزه در محیط های صنعتی به خوبی می بینیم که حضورشان موجب کاهش صدمات جانی، کاستن از میزان حوادث و مشکلات و کاهش هزینه ها شده است. از دیگر موارد استفاده از ربات در محل هایی است که انسان توانایی ورود به آنها را ندارد مانند بازرسی دیگ بخار^۱، بازرسی اتافک آسانسورها و کانال ها و همچنین بازرسی دکل های برق فشارقوی . به منظور انجام این کارها بهتر است از رباتی استفاده کرد که دارای ساختار انعطاف پذیر باشند، ربات هایی با این ساختار به دلیل داشتن درجات آزادی زیاد، قابلیت حرکت به

¹ Boilers

تمامی جهات را دارا هستند، ربات‌های ماری و ربات کرم از جمله ربات‌هایی هستند که این ویژگی را دارا می‌باشند. به همین منظور ما در صدد طراحی و ساخت یک ماژول فعال برآمدیم تا با بهره‌گیری از آن بتوان درجات آزادی ربات‌ها را بالا برد

۷-۱- خلاصه‌ی فصل‌ها

در فصل ۲ مروری خواهیم داشت بر مطالعات انجام شده در گذشته و چارچوب مورد نظرمان را جهت طراحی و ساخت ماژول الاستیک یا همان کمر نرم بر مبنای نتایج بدست آمده از دیگر محققان ارائه می‌کنیم. ابتدا مروری کرده ایم بر مطالعات و کارهای انجام شده جهت بررسی انواع ساختار و مدل‌های ماژول‌های نرم و چگونگی حرکت آن‌ها و بررسی معایب و مزایای ماژول‌های ساخته شده نسبت به یک‌دیگر و در انتها به بررسی کاربرد آن‌ها و روش‌های کنترلی آن‌ها می‌پردازیم.

در فصل ۳ به روند طراحی و ساخت ماژول کمر نرم فعال می‌پردازیم و سلسله‌ی تغییرات صورت گرفته را در چهار نسل بیان خواهیم کرد؛ و همچنین در آخر مزایای ماژول طراحی شده را نسبت به ماژول‌های دیگر که در فصل ۲ آن‌ها را بررسی کرده بودیم می‌پردازیم و در آخر ساختار و مدل کنترلی انجام شده در این پروژه را معرفی خواهیم کرد.

فصل ۴ به توضیح درباره‌ی چگونگی روند جمع‌آوری داده‌ها خواهیم پرداخت و همچنین داده‌های بدست آمده را تحلیل و بررسی خواهیم کرد.

در فصل ۵ به نتیجه‌گیری و بحث در باره‌ی بهبود عملکرد ماژول خواهیم پرداخت.

فصل ۲: مرور ادبیات

۲-۱- مقدمه

در این فصل مروری اجمالی بر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی مدل سازی و ساخت و روش-های کنترلی ربات‌های الاستیک و مار مانند میپردازیم. لیکن ابتدا به تاریخچه‌ی کلی این نوع ربات‌ها نگاهی کوتاه خواهیم داشت و سپس به مدل‌ها و ایده‌های جدید و بروز ساخت این نوع از ماژول‌ها می‌رسیم. این مطالعات به سبب اهمیت تحلیل مزایا و معایب مدل حرکتی هر یک از ماژول‌ها نسبت به هم، نقش تاثیرگذاری در مدل حرکتی ماژول پیشنهادی ما دارد. و در آخر روش‌های کنترلی برای این ماژول‌ها را معرفی و بررسی خواهیم کرد. این روش‌ها، شالوده‌ی اصلی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهند. در فصل قبل ما به معرفی انواع ربات‌های نرم به صورت کلی پرداختیم. در ادامه ما اولین ربات‌های الاستیک و مار مانند را معرفی می‌کنیم و سپس بررسی تعدادی چند از ربات‌های تجاری سازی شده می‌پردازیم و روش‌های مورد استفاده‌ی آن‌ها را مقایسه می‌کنیم.

۲-۲- تاریخچه

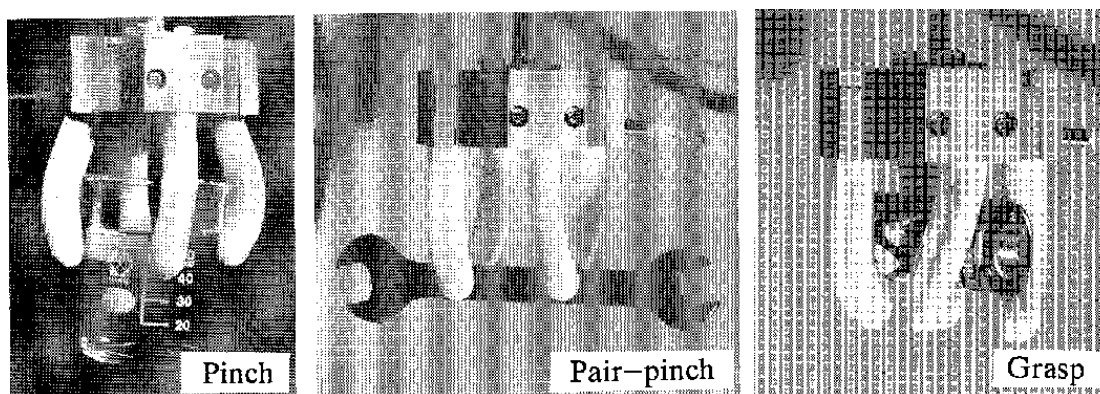
ربات‌های نرم، مورد توجه روزافزون علم‌رباتیک و همچنین رسانه‌های عمومی است و روز به روز اطلاعات و فناوری‌های جدید در این زمینه از ربات‌ها افزایش می‌یابد. برای درک بهتر در مورد روند تکامل این ربات‌ها، آن‌ها را از سال ۱۹۹۰ تا به حال مورد بررسی قرار می‌دهیم. در سال‌های اخیر، ربات‌های نرم به یکی از موضوعات مهم و به سرعت در حال رشد، در جامعه رباتیک تبدیل شده است و ظهور آن در دانشگاه، احتمال ایجاد انقلابی در صنعت رباتیک را نشان می‌دهد [۵]. بر اساس بررسی ادبیات، اصطلاح "ربات نرم"^۱ برای اولین بار برای یک دست پنوماتیک^۲ با اتصالات مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است. پس از آن، به تدریج از ربات نرم در مقالات، اختراعات و سایر اسناد علمی استفاده شد، اما با توجه به طیف وسیعی از این دسته ربات‌ها، هنوز هم نمایانگر یک ربات یا ماشینی از مواد تشکیل شده صلب است. در سال ۲۰۰۸، اصطلاح "رباتیک نرم" برای توصیف تحقیقات در مورد ربات‌هایی با مفاصل صلب، و همچنین ربات‌های مبتنی بر مواد نرم با خاصیت انعطاف‌پذیری و تغییر شکل‌پذیری بسیار بالا به کار رفته است. در سال ۱۹۹۰، Shimachi و Matumoto^۸ کار خود را روی انگشتان نرم^۳ آغاز کردند. یک سال بعد، Suzumori و همکارانش ریز محرک انعطاف‌پذیر خود را که از لاستیک سیلیکونی^۴ ساخته شده بود را منتشر کردند [۶].

¹ soft robots

² Pneumatic

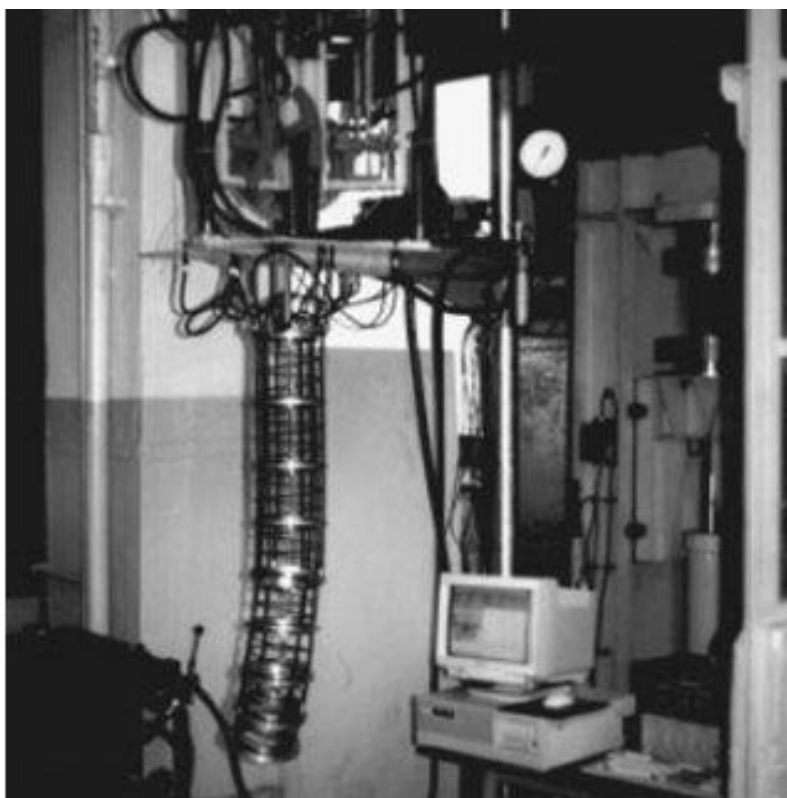
³ Soft fingers

⁴ Silicone rubber



شکل (۱-۲) ماژل سیلیکونی ساخته شده توسط Suzumori و همکارانش [۶]

پس از آن در طی ده سال بعد ساختارهای مشابهی با مکانیزم‌های دیگر ایجاد شدند به طور مثال: ماژول‌های پنوماتیکی، ماژول‌های پلیمر الکتریکی، ماژول‌های سیالاتی و همچنین ساخت اولین ماژول خرطوم فیل.



شکل (۲-۲) اولین ماژول ربات خرطوم فیل [۷]

علیرغم سازوکارها، ساختارها و عملکرد حرکتی متفاوت، این محرک‌ها باعث پیشرفت‌های کلیدی در زمینه‌ی علم رباتیک شدند.[۷]

گرچه رباتیک نرم تقریباً نیم قرن سابقه دارند، اما در دهه اخیر فقط به یک موضوع داغ در جامعه علمی و عموم مردم تبدیل شده است. از آنجا که این فناوری‌ها به تدریج توسط جامعه رباتیک شناخته می‌شوند، دانشمندان و مهندسان بیشتری به دنبال گسترش و پیشرفت این زمینه هستند. این امر با افزایش روزافزون آزمایشگاه‌ها، همکاری‌های بین المللی، نشریات در حال ظهور، جوامع و سازمان‌های مرتبط با ربات‌های نرم، جلسات ویژه در انواع کنفرانس‌های بین المللی، رویدادهای حرفه‌ای و فعالیت‌ها منعکس می‌شود. اگرچه حوزه‌ی رباتیک نرم هنوز در مراحل ابتدایی است، اما دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی زیادی در دنیا در این زمینه فعالیت می‌کنند. یکی از این دانشگاه‌ها، دانشگاه EPFL^۱ در سوئیس است که در ادامه به بررسی آن می‌پردازیم.[۸]

۲-۳- ربات الاستیک شرکت فستو معروف به خرطوم فیل

دانشمندان شرکت گسترش اتوماسیون فستو^۲ بازوی روباتی به انعطاف و زیبایی خرطوم فیل طراحی کرده‌اند که می‌تواند دستیار بسیار مناسب و پر قدرتی برای حمل و نقل و جابه‌جایی تجهیزات مختلف باشد. مرکز تحقیقات بیونیک^۳ این شرکت از طبیعت برای ساخت مدل‌های تازه و گسترش سیستم‌های اتوماسیون صنعتی^۴ الهام می‌گیرد. طرح جدید که دستیار^۵ حمل و نقل کمکی با الهام از

^۱ École Polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)

^۲ Pneumatic & electric automation technology | Festo USA

^۳ Bionic

^۴ Industrial automation systems

^۵ manipulator

خرطوم فیل نام گرفته، از یک محور دستی و اتصال‌های متعدد توبی تشکیل شده است. به کمک گیره چنگکی^۱ تعبیه شده در سر این خرطوم، ربات قادر به برداشتن اشیاء و حرکت در جهات گوناگون خواهند بود و در نتیجه، این ربات می‌تواند در کشاورزی و صنعت، خصوصاً خطوط تولید دستیار بسیار خوبی برای کارگران باشد. در عین حال کاملاً سازگار است و حتی در صورت برخورد نیز خطری برای کاربر ایجاد نمی‌کند. بنابراین، این ربات دو الزام اساسی فضای کار مشترک فردا را برآورده می‌کند: جدایی دقیق بین کار دستی کارگر کارخانه و اقدامات خودکار ربات به طور فزاینده-ای کنار گذاشته می‌شود. به این ترتیب، انسان و ماشین در آینده می‌توانند همزمان روی یک قطعه کار یا یک جزء با هم کار کنند. از یک طرف، این پیش فرض است که راه حل‌های ربات خودکار می‌توانند به طور مستقیم و ایمن با انسان‌ها ارتباط برقرار کنند، بدون اینکه به دلایل ایمنی از آن‌ها محافظت شود. از طرف دیگر، این فضاهای کاری باز در درجه اول به روبات‌هایی نیاز دارند که بتوانند انعطاف‌پذیر باشند و به طور مستقل با محصولات و سناریوهای مختلف سازگار شوند.[۹]

۲-۴- کنترل موقعیت‌یابی

دستورات کنترلی توسط FMTV^۲ اجرا می‌شوند، که در وهله‌ی اول کنترل و تنظیم حرکت پیچیده را امکان‌پذیر می‌کند [۱۰]. از طریق الگوریتم‌های کنترل داخلی برنامه‌های حرکتی آن و شیرهای پیزو^۳ نصب شده، می‌توان دبی و فشار^۴ را دقیقاً اندازه‌گیری کرد و همچنین هر یک از تنظیمات در چندین کانال به‌طور هم‌زمان و کاملاً متفاوت از هم است. که توالی‌های حرکتی قدرتمند

^۱ Fin Gripper

^۲ Festo Motion Terminal VTEM

^۳ Piezo Valves

^۴ Flow and pressure

و سریع و همچنین نرم و حساس را امکان‌پذیر می‌کند. رابط بین رایانه و FMT^۱ پلت فرم منبع باز ROS^۲ است که بر روی آن برنامه‌ریزی مسیر حرکتی محاسبه می‌شود. علاوه بر این، ROS کد ورودی را از رایانه تفسیر کرده و مختصات محور را به ترمینال حرکت منتقل می‌کند.



شکل (۳-۲) ربات خرطوم فیل شرکت فستو [۹]

۵-۲- ربات‌های الاستیک دانشگاه EPFL

دانشگاه EPFL مطالعات و تحقیقات بسیار زیادی در زمینه‌ی ربات‌های نرم انجام داده است که در اینجا به معرفی چند نمونه از آن‌ها می‌پردازیم:

۵-۲-۱- ربات (SRS)^۳

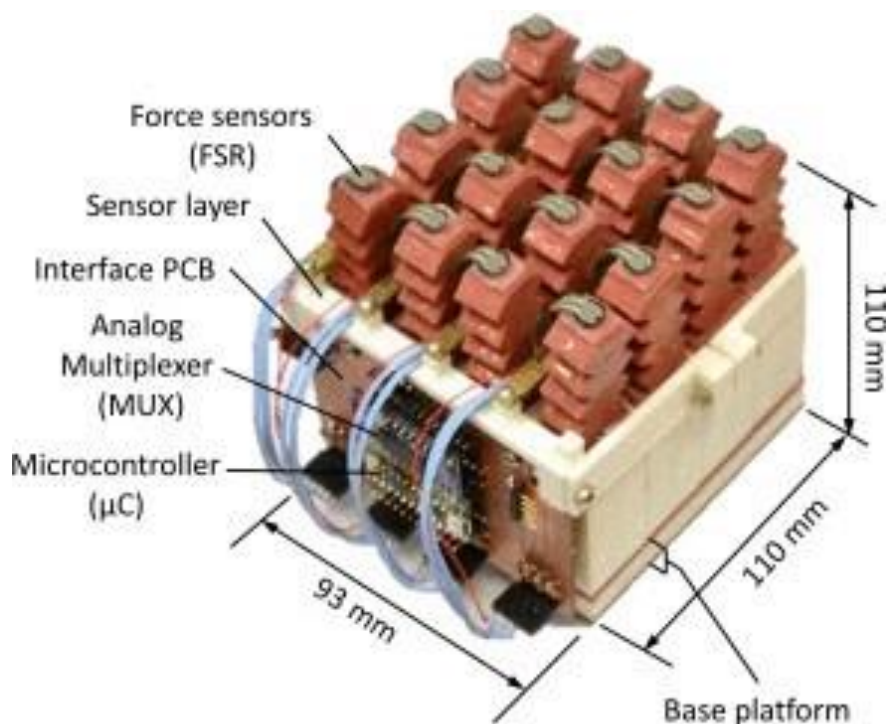
محققین این دانشگاه با استفاده از قدرت خلاء و محرک‌های مواد نرم، یک سطح نرم قابل تنظیم (SRS) با قابلیت کنترل و عملکرد چند حالتی را طراحی و ساخته‌اند. SRS شامل یک آرایه شبکه‌ای

^۱ Festo Motion Terminal

^۲ Robotic Operating System

^۳ Soft Reconfigurable Surface

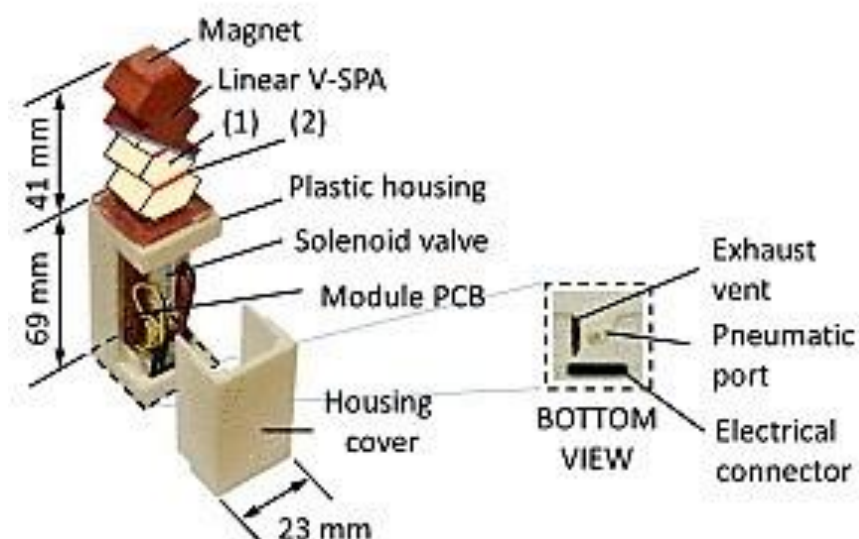
مربعی شکل از محرک‌های نرم پنوماتیک با بهره‌گیری از فشار خلاء است که در آن ماژول‌هایی تعبیه شده است که امکان تنظیم، تلفیق و کنترل بسیاری از درجات آزادی را فراهم می‌کند. مفهوم SRS مقیاس‌پذیر، فضا کارآمد و دارای پتانسیل عملکرد متنوعی است. [۱۱]



شکل (۴-۲) ماژول الاستیک دانشگاه EPFL [۱۱]

نمونه‌ی اولیه SRS نشان داده شده در شکل (۴-۲) شامل ۱۶ واحد محرک مدولار است که در یک طرح شبکه 4×4 مرتب شده‌اند. این چیدمان و پیکربندی برای فعال کردن انواع متنوعی از قابلیت‌ها و رفتارهای سیستم طراحی شده است و به دلیل مدولار (تک واحدی) بودن، هر نوع ترتیب محرک امکان‌پذیر است و ممکن است به راحتی بتواند سفارشی‌سازی شود.

این پلتفرم رابط مکانیکی را نیز فراهم می‌کند، که به ماژول‌های محرک اجازه می‌دهد تا به‌طور فیزیکی به آن متصل شوند و یک سیستم واحد را تشکیل دهند.



شکل (۵-۲) نمایش یک ماژول تک واحدی SRS دانشگاه EPFL [۱۱]

بدنه‌ی واحدهای سازنده شامل سخت‌افزار و وسایل الکترونیکی است که محرک‌های متصل را قادر می‌سازد تا تغذیه و کنترل شوند. اجزای تشکیل دهنده شامل یک شیر برقی^۱ (Lee, LHDA0531115H) و یک مدار مجتمع یا آی سی^۲ (WS2811) است که به صورت داخلی بر روی یک صفحه مدار چاپی^۳ نصب شده است که اجازه می‌دهد دستورات به طور مستقل به هر ماژول از طریق یک خط سیگنال ارسال شوند. [۱۱]

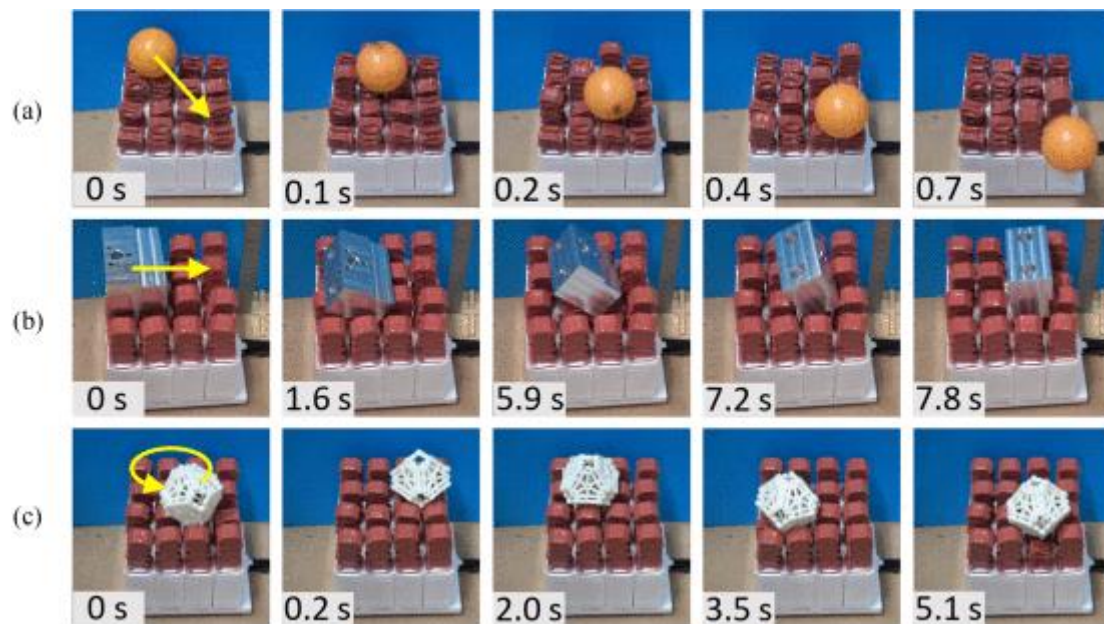
برای فعال کردن کنترل بازخورد اختیاری SRS، می‌توان لایه سنجش نیرو را به شبکه مونتاژ شده ماژول‌های محرک متصل کرد. لایه سنسور شامل یک ساختار 3D است که به ماژول متصل می‌شود و صفحه‌های مدار چاپی نازکی را در خود جای داده است که بین ردیف‌های V-SPA، در

¹ Solenoid valve

² Integrated circuit

³ PCB

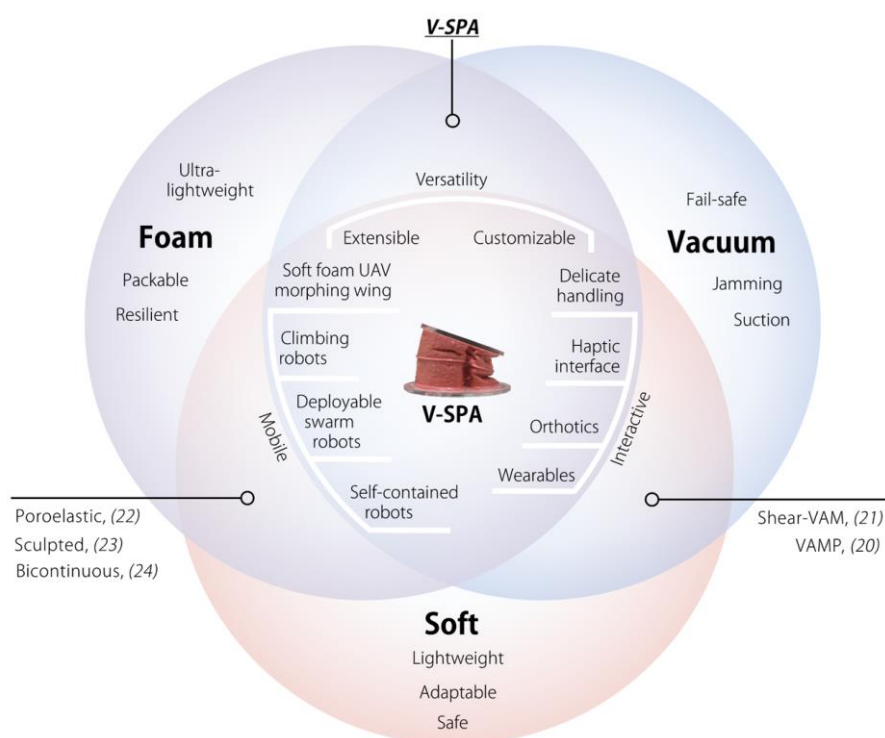
قسمت بالایی SRS قرار می گیرند. برای اتصال سنسورها به پلتفرم حرکتی یک آهنربای نئودیومی^۱ کوچک با قدرت بالا به قسمت پشتی پلتفرم حرکتی چسبانده می شود. [۱۲]



شکل (۲-۶) در شکل بالا سه شیء با ساختارهای متفاوت و همچنین مدل حرکتی متفاوت [۱۲]

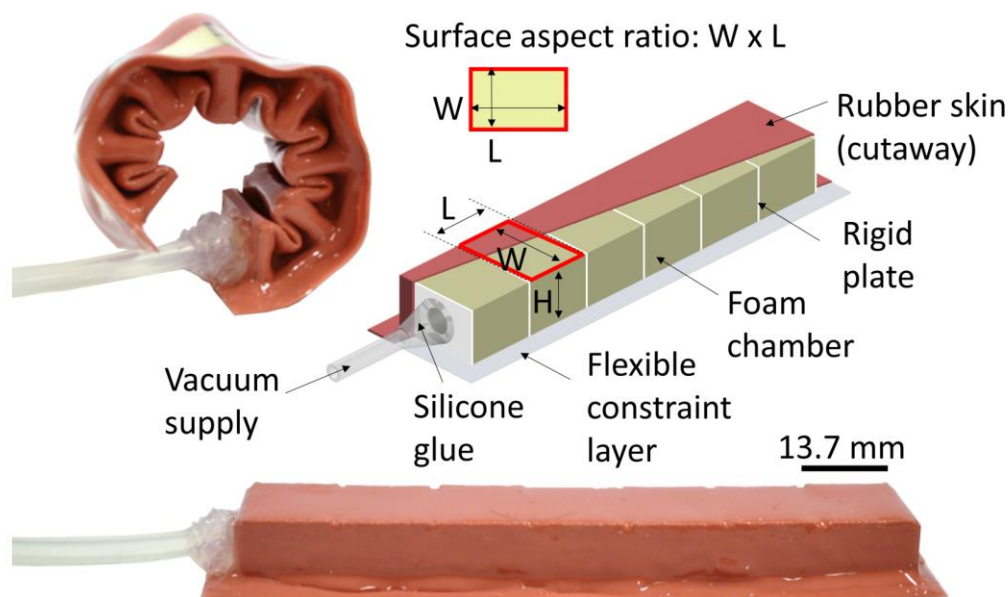
¹ neodymium magnet (NdFeB)

۲-۵-۲- ربات نرم با قدرت خلاء



شکل (۷-۲) ربات V-SPA محیط‌های عملیاتی مختلفی را برای کاربردهای متنوع با یکدیگر مخلوط می‌کند [۱۳]

ما در اینجا یک محرک نرم پنوماتیکی با قدرت خلاء (V-SPA) را معرفی می‌کنیم که از یک منبع تغذیه خلاء مشترک استفاده می‌کند و یک سیستم رباتیکی نرم پیچیده را با درجه‌های آزادی زیاد و عملکردهای متنوع امکان‌پذیر می‌کند. این محرک جدید با طراحی ساده و بدون نیاز به بدنه داخلی و خارجی ساخته می‌شود. این ماژول از یک لایه داخلی فوم مانند با برش‌های لیزری و لایه خارجی تشکیل شده از لایه‌های نازک لاستیک سیلیکون است و می‌تواند بازتولید شود و در کمتر از ۲ ساعت آماده‌ی استفاده است. هسته فوم مانند به عنوان یک داربست داخلی عمل می‌کند همان‌طور که در شکل زیر پیدا است، این یک ساختار محصور و خالی از هوای ایجاد می‌کند که فقط با مواد نرم و متخلخل پر می‌شود [۱۳].

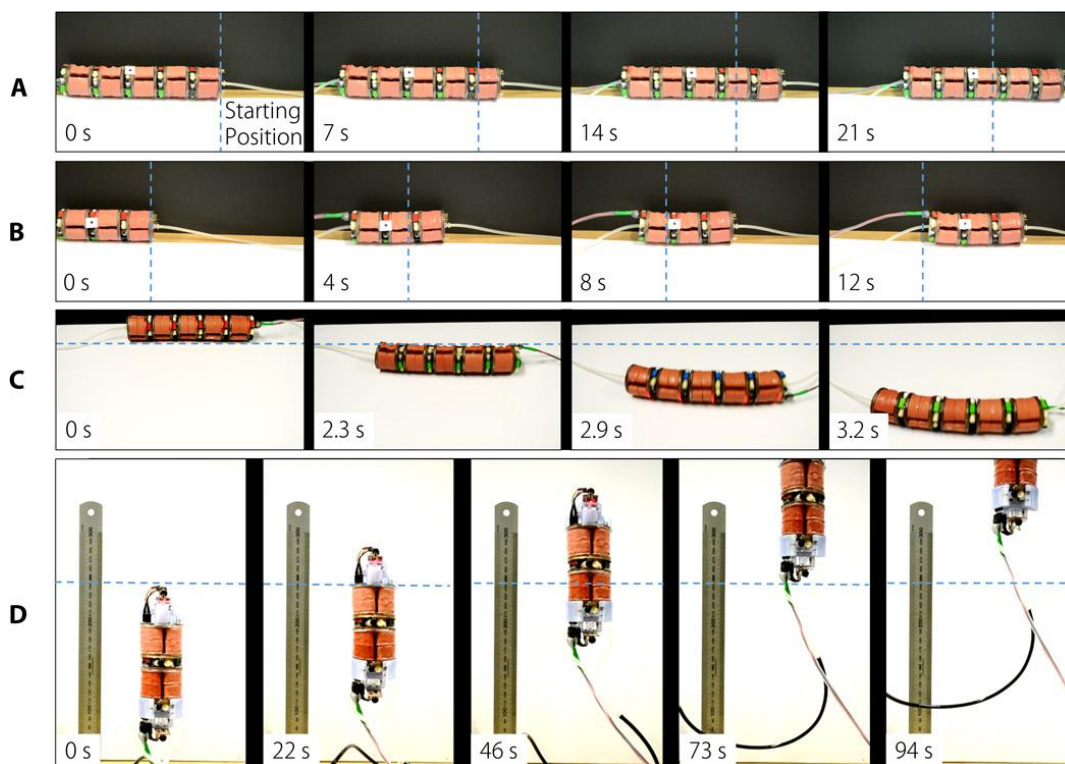


شکل (۲-۸) لایه‌های تشکیل دهنده‌ی ربات نرم با محرک خلاء [۱۳]

از آنجایی که SPA های معمولی یا سایر طرح‌های محرک خلا دارای حفره‌های داخلی کاملاً توخالی هستند، باعث شده تا ضخامت دیواره این نوع SPA ها بسیار زیاد باشد اما به لطف وجود هسته فوم مانند ضخامت دیواره‌های V-SPA بسیار نازک تر است، زیرا در اینجا هسته‌ی مرکزی پشتیبانی ساختاری که معمولاً توسط ضخامت دیواره‌ها تضمین می‌شود را فراهم می‌کند. این تفاوت در ضخامت دیواره کمک می‌کند تا جرم V-SPA بسیار کمتر باشد، و در مجموع یک محرک سبک‌تر حاصل می‌شود. همان طور که در شکل (۲-۸) نشان داده شده است هنگام خارج کردن هوای داخل مازول^۱ تمام ساختار محرک جمع می‌شود و نیروی کششی تولید می‌کند که می‌تواند برای حرکت استفاده شود و بلافاصله پس از از بین رفتن حالت خلا، به دلیل خاصیت ارتجاعی غشای سیلیکونی خارجی سبب می‌شود تا

¹ air Vacuum

محرک به شکل اولیه خود برگردد. این خاصیت به این ربات اجازه‌ی حرکت و جابه‌جایی بعضی اشیاء را می‌دهند [۱۴].



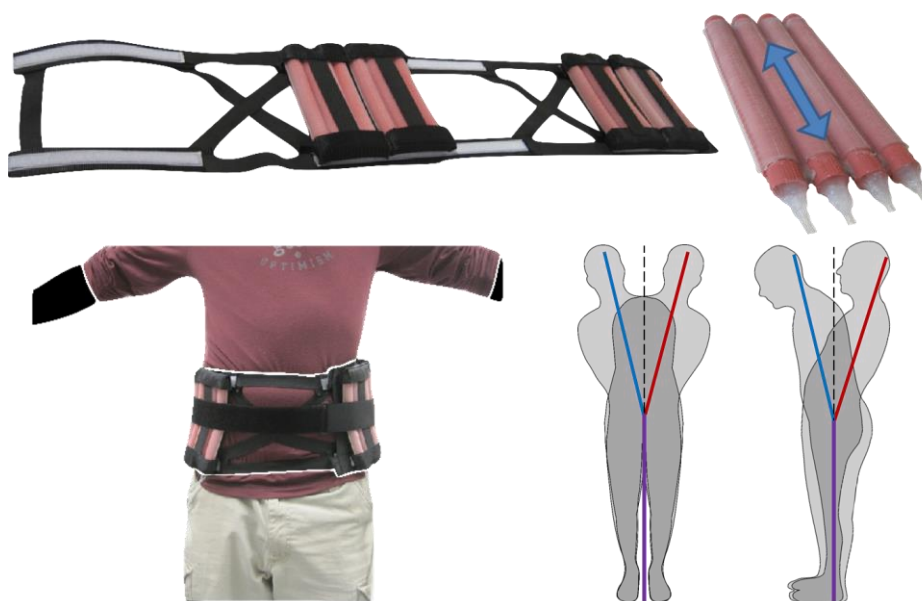
شکل (۲-۹) مجموعه‌ای از حالت‌های حرکتی گرفته شده از ربات که به ترتیب: (A) حرکت موجی با پنج ماژول (B) حرکت موجی شکل با سه ماژول (C) انجام حرکت چرخشی با وجود پنج ماژول (D) بالا رفتن به صورت عمودی با استفاده از ماژول‌های ساکشن [۱۴]



شکل (۲-۱۰) نمایی دیگر از ربات در حال بالا رفتن از شیشه به کمک ماژول ساکشن [۱۴]

۲-۵-۳- کمربندهای محرک نرم برای تقویت انسان

محرک‌های پنوماتیک نرم (SPA) در دستگاه‌های پوشیدنی و فناوری‌های توانبخشی نیز به کار رفته است. در حالی که محرک‌های نرم یکی از مهمترین عناصر فناوری برای پیشرفت در زمینه‌ی رباتیک نرم بوده است اما مشکلات کلی از جمله استحکام، کنترل‌پذیری^۱ و تکرارپذیری^۲ همچنان وجود دارد. ساختار SPA-pack ارائه شده در اینجا با هدف دستیابی به این استانداردها برای حوزه‌ی رباتیک نرم، و بهبود عملکرد اساسی SPA با بهره‌گیری از مزایای علم زیست‌شناسی و همچنین استفاده از محرک‌ها توان پایین در چیدمانی موازی هم برای ایجاد یک مازول محرک بزرگتر و قدرتمندتر است. [۱۵]

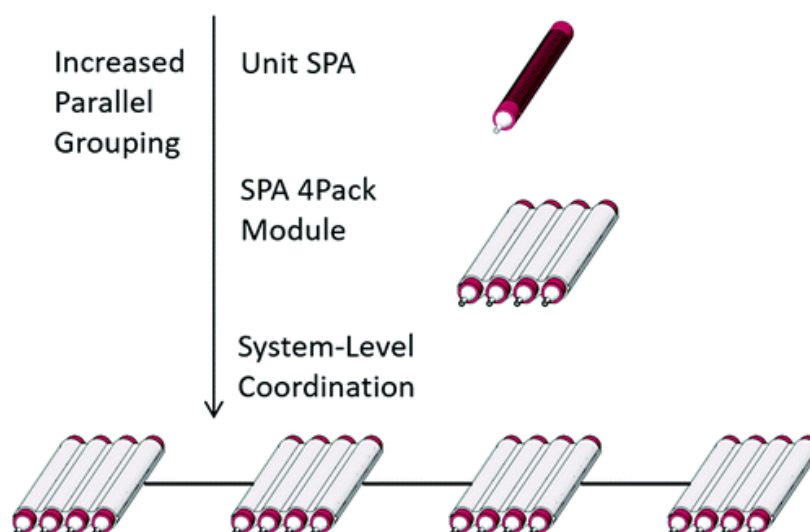


شکل (۲-۱۱) کمربندهای محرک نرم برای تقویت انسان در انجام حرکات [۱۵]

¹ control-ability

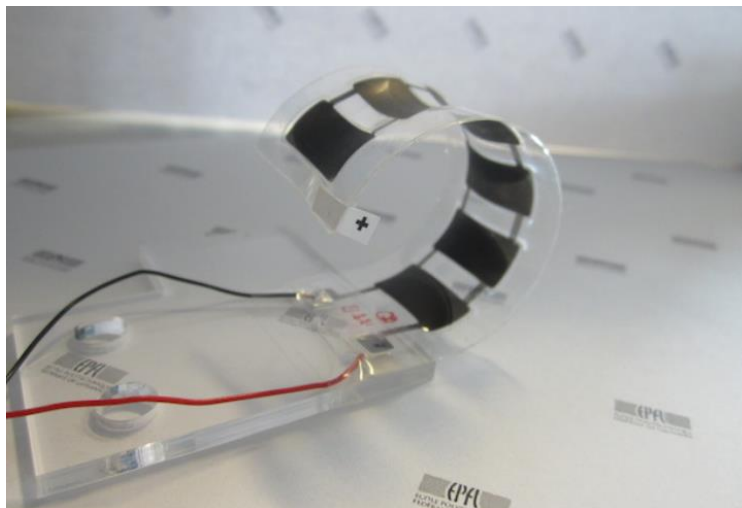
² Reproducibility

با به کارگیری چندین SPA به طور موازی، می‌توان بسته‌های محرک را تشکیل داد که در مقایسه با تک ماژول بسیار بهتر است. با این پیکربندی نه تنها می‌توان خروجی نیروی بیشتری به دست آورد بلکه عملکرد واحدهای سازنده نیز افزایش می‌یابد. این بدان معناست که هرچه تعداد بیشتری از این بسته‌های محرک به طور موازی با یکدیگر ترکیب شوند، می‌توان به افزایش نیرو در خروجی نیز دست یافت. این ویژگی‌ها ارزش قابل توجهی دارند زیرا فضای طراحی را در حوزه رباتیک نرم گسترش می‌دهند. از این ساختار در بحث توانبخشی برای افراد دارای مشکلات حرکتی در ناحیه‌ی کمر استفاده می‌شود و به بیمار در انجام حرکات روزمره کمک می‌کند. علاوه بر این روش، طراحی به کار رفته در این کمر بند راه حلی برای یکی از چالش‌های اصلی رباتیک نرم یعنی کمبود نیرو و قدرت بوده است [۱۶].



شکل (۲-۱۲) روش طراحی به کار رفته در کمر بند توانبخشی برای رفع چالش کمبود نیرو در محرک‌های نرم [۱۵]

۲-۶- مازول‌های نرم با فناوری فلز پیزوالکتریک



شکل (۲-۱۳) مازول نرم ساخته شده با پیزوالکتریک [۱۷]

یک روش جدید برای ایجاد گیرنده‌های نرم و سازگار مبتنی بر ترکیب تحریک الکترواستاتیک^۱ با یک نیروی بهینه‌سازی برقی است، که به ما امکان می‌دهد اشیاء تغییر شکل‌پذیر و یا شکننده را کنترل کنیم.

چسبندگی الکتریکی^۲ به معنی اثر الکترواستاتیک اختلال بین دو سطح تحت یک میدان الکتریکی است. چسبندگی الکتریکی یک مکانیسم نوین و نویدبخش برای کاربردهای رباتیک و حمل مواد^۳ با مزایایی بیشتری نسبت به فن‌آوری‌های موجود از جمله سازگاری بیشتر، جابه‌جایی ملایم، انعطاف‌پذیر، کاهش پیچیدگی و مصرف بسیار کم انرژی است. [۱۷]

¹ Electrostatic stimulation

² Electro adhesion

³ material handling

گیرنده‌های برقی EA، به اجزای اضافی و لوازم الکترونیکی مرتبط با آنها برای ایجاد توانایی حسی نیاز دارند. علاوه بر این، گیرنده‌های مسطح فعلی EA در چسبیدن به سطوح غیرمسطح و برداشتن اجسام غیرمسطح مشکل دارند. از روش‌های حل این مشکل ترکیب یک کامپوزیت EA یکپارچه با عملکرد الاستومر دی الکتریک^۱ است. این گیرنده کامپوزیت جدید EA-DEA نه تنها از نظر ادراکی می‌تواند تغییر شکل‌های داخلی را حس کند بلکه می‌تواند به طور فعال شکل گرفته و با سطوح منحنی سازگار شود. با ادغام یک واحد خود سنجش "self-sensing" ولتاژ بالا با کامپوزیت EA-DEA می‌توان به قابلیت‌های گرفتن و سنجش هم‌زمان دست‌یافت [۱۸].



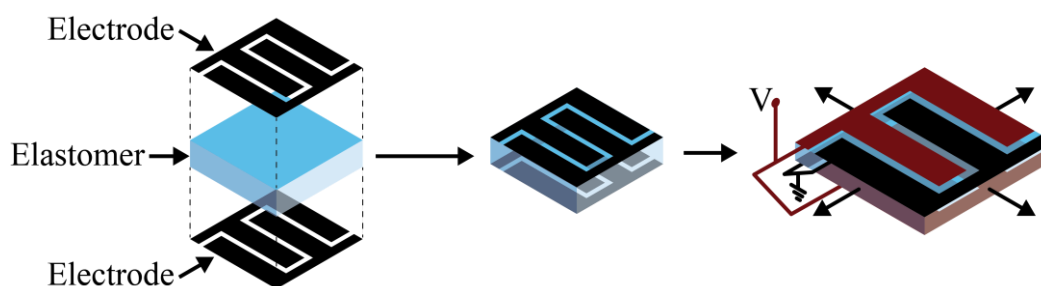
شکل (۲-۱۴) تصویربرداری از یک تخم مرغ خام، یک قطعه کاغذ صاف و یک بالون آب ۷۳ گرم با گیرنده‌های نرم و سازگار مبتنی بر ترکیب تحریک الکترواستاتیک. [۱۸]

۲-۶-۱- روش کار

محرک شامل دو قطب مغناطیسی^۲ است که یک غشا الاستومری در بین آن قرار گرفته است. اعمال ولتاژ باعث ایجاد میدان‌های الکتریکی در داخل و خارج سازه می‌شود [۱۹].

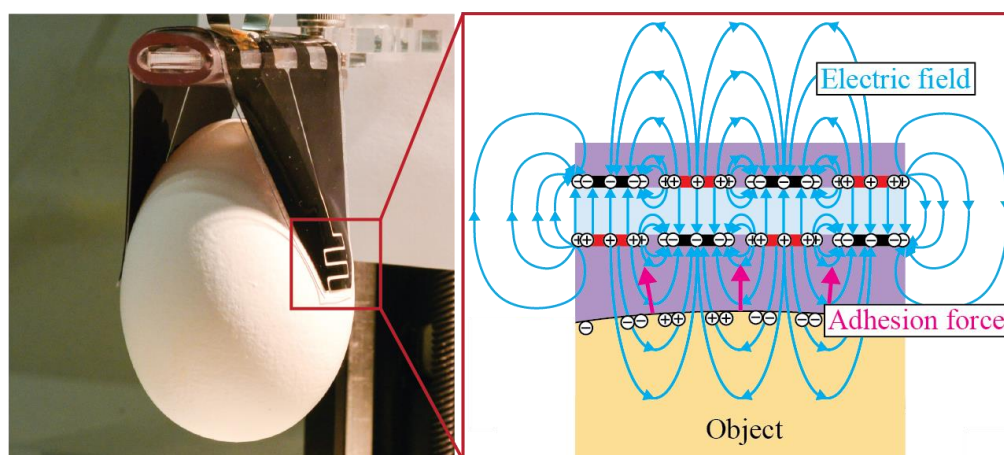
^۱ Dielectric elastomer

^۲ Electrode



شکل (۲-۱۵) ساختار DEA [۱۸]

میدان الکتریکی^۱ در داخل الاستومر نیروی جمع کننده‌ی غشای ماکسول^۲ را ایجاد می‌کند و منجر به تحریک (خم شدن چنگال) می‌شود. میدان الکتریکی خارج از الاستومر منجر به ایجاد نیروی چسبندگی الکتریکی "electro-adhesion force" بر روی اشیایی می‌شود که این میدان به آنها نفوذ می‌کند [۲۰].



شکل (۲-۱۶) تصویری از مکانیزم گرفتن اشیاء: گیرنده هم چسبندگی الکتریکی و هم نیروی محکم گرفتن را تولید می‌کند. [۲۰]

^۱ Electrical Field

^۲ Maxwell-stress

۷-۲- ربات‌های ماری

ربات‌های ماری نمونه‌ای از ربات‌های الاستیک هستند. ربات مار مکانیزم رباتیک است که برای حرکت مانند یک مار بیولوژیکی طراحی شده است. این مکانیزم‌ها معمولاً از ماژول‌های متصل به یکدیگر تشکیل می‌شوند که قابلیت خم شدن در یک یا چند صفحه را دارند. آزادی‌های بسیار زیاد ربات‌های ماری کنترل آنها را دشوار می‌کند اما مهارت‌های بالقوه حرکتی را در محیط‌های نامرتب و نامنظم فراهم می‌کند [۲۱].

قبل از ایجاد انگیزه برای تحقیق در مورد ربات‌های مار، بیایید با شرح چگونگی درگیر شدن و هیجان نویسندگان در این فعالیت تحقیقاتی شروع کنیم. تحقیقات در مورد ربات‌های مار در دانشگاه علم و صنعت نروژ^۱ از یک پروژه تحقیقاتی ایجاد شده است. این پروژه در سال ۲۰۰۳ و پس از چندین مورد آتش‌سوزی در شهرهای بزرگ در تروندهایم^۲ آغاز شد، که ابتکاری را برای نزدیک کردن سازمان آتش‌نشانی با جامعه تحقیقاتی در تروندهایم برای تحریک تلاشهایی که باعث بهبود ایمنی در برابر آتش‌سوزی می‌شود، آغاز کرد. ایده‌ای که از این ابتکار عمل متولد شد چشم انداز یک شلنگ آتش‌نشانی خودران به عنوان ابزاری رباتیک برای کمک به آتش‌نشانان بود. این ایده از این جهت هوشمندانه است که می‌توان از فشار آب داخل شلنگ به عنوان یک محرک هیدرولیکی در مکانیزم پیش‌ران استفاده کرد و همچنین یک مکانیزم اطفاء حریق و یک مکانیزم خنک کننده برای خنک‌سازی ربات در محیط‌هایی با دمای شدید [۲۲].

¹NTNU

²Trondheim



شکل (۲-۱۷) اولین ربات آب پاش آتش نشان ماری ملقب به آناکوندا [۲۲]

اگرچه آتش سوزی انگیزه اولیه‌ی این تحقیق بود اما دامنه‌ی فعالیت‌های این نوع ربات‌ها فراتر از انجام وظایف در آتش است زیرا ربات‌های مار می‌توانند به‌طور بالقوه در بسیاری از برنامه‌های دیگر که به حرکت‌های پیچیده نیاز است استفاده شوند. یک کاربرد بسیار مرتبط و مهم ربات‌های مار در آینده شامل ماموریت‌های جستجو و نجات در مناطق زلزله زده است. به‌طور مثال، زلزله در هائیتی^۱ در ژانویه ۲۰۱۰ و سونامی^۲ که در مارس ۲۰۱۱ ژاپن را لرزاند، بلایای طبیعی در مدت اخیر است که نیاز به فناوری را نشان می‌دهد که می‌توان برای یافتن بازماندگان در زیر آوار ساختمان‌های فرو ریخته استفاده کرد. از دیگر استفاده‌های این نوع ربات‌ها می‌توان در عملیات مداخله در محیط‌های خطرناک کارخانه‌های صنعتی، عملیات جست و جو در فضاها، تنگ و عملیات زیر دریا اشاره کرد [۲۳].

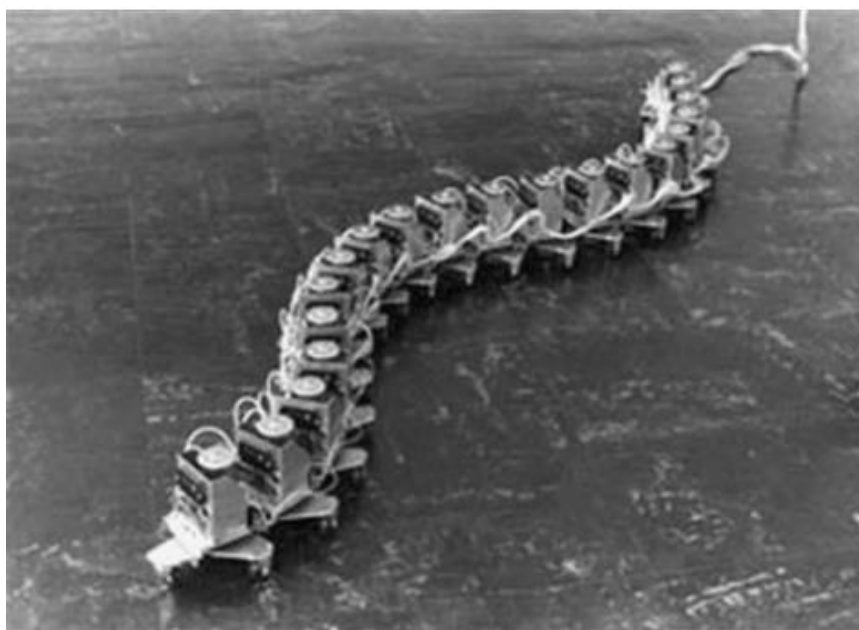
از منظر جهانی، تحقیقات در مورد ربات‌های ماری چندین دهه است که آغاز شده. زمینه تحقیق حدود ۴۰ سال پیش توسط پروفیسور شیگئو هیروز در انستیتوی فناوری توکیو^۳ آغاز شد که اولین

¹ Haiti

² Tsunami

³ Tōkyō Kōgyō Daigaku

ربات ماری جهان را از اوایل سال ۱۹۷۲ تولید کرد. این ربات مجهز به چرخ‌هایی بود که به کمک آن‌ها حرکت می‌کرد. چرخ‌ها ربات را قادر می‌ساخت تا با کنترل اتصالات، حرکتی موجی شکل ایجاد کند و مانند مارهای بیولوژیکی، روی سطح صاف به جلو حرکت کند [۲۴].



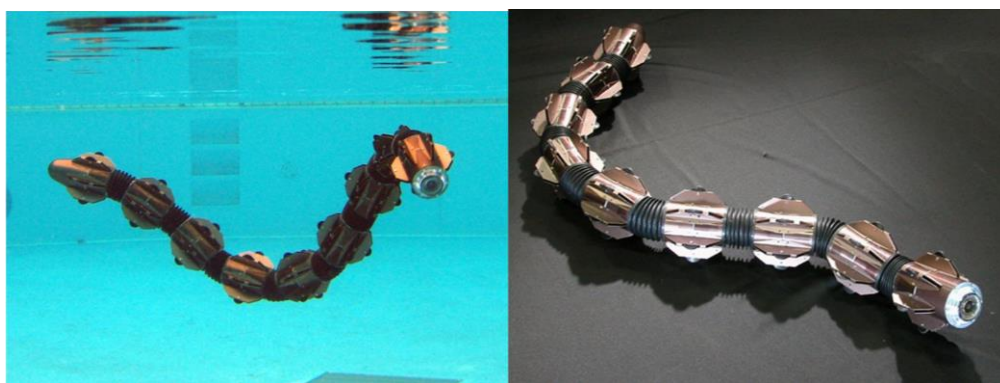
شکل (۱۸-۲) اولین ربات ماری که توسط پروفیسور شیگئو در سال ۱۹۷۲ ساخته شده است. [۲۴]

ساخت و کنترل ربات‌های مار به دو دلیل اساسی بسیار چالش برانگیز است. اول از همه این‌که، یک ربات مار دارای درجه آزادی زیادی است، به این معنی که مکانیسم فیزیکی شامل یک اتصال پیچیده از سنسورها^۱، محرک‌ها^۲ و منطق کنترل خواهد بود. علاوه بر این، درجه‌ی آزادی‌های مختلف بیانگر حالت‌های غیرخطی پیچیده‌ای است که تجزیه و تحلیل آن از منظر کنترلی بسیار چالش برانگیز است. دوم، وابستگی به تعامل محیطی برای یک ربات مار پیچیده‌تر از روبات‌های متحرک معمولی است. حرکت مبتنی بر چنین تعامل محیطی هم از نظر طراحی کنترلر و هم از نظر مکانیکی چالش برانگیز است. در طی این سال‌ها ربات‌های ماری بسیار زیادی ساخته شده‌اند برخی از ربات‌ها فقط

¹ sensors

² joint

می‌توانند حرکت مسطح داشته باشند، در حالی که ربات‌های دیگر می‌توانند پیوندهای خود را به صورت افقی و عمودی حرکت دهند [۲۵]. در این میان برخی از ربات‌های ماری مانند ربات یامادا^۱ به گونه‌ای طراحی شده‌اند که توانایی حرکت در زیر آب و یا محیط‌های دارای گردوغبار را به آنها می‌دهد در حالی که اکثر ربات‌های ماری طراحی شده بدلیل نوع ساختار آنها فقط توانایی حرکت در محیط‌های آزمایشگاهی را دارند. با این حال، یک ویژگی مشترک این مکانیسم‌ها این است که آنها به‌طور کلی فقط قادر به حرکت در سطوح نسبتاً مسطح هستند زیرا چرخ‌های غیرفعال به کاررفته در آنها در محیط‌های غیرمسطح خیلی خوب حرکت نمی‌کنند [۲۶].



شکل (۲-۱۹) ربات یامادا ساخته شده در موسسه فناوری توکیو. این ربات توانایی حرکت در زیر آب را دارد [۲۶]

یکی دیگر از ربات‌های ساخته شده ربات مارگونه دانشگاه کارنیگی ملون آمریکا^۲ است در این پژوهش با الهام از ساختار بدنی مار روشی برای پیمایش سطوح استوانه‌های ارائه شده است. عمده مسئله و چالش پیشروی این پژوهش، دشواری استفاده از این مکانیزم و پیچیدگی‌های کنترلی و محاسباتی این روش است [۲۷]. دلیل این امر تعداد زیاد عملگرها^۳ و جهت‌های متفاوتی است که ربات در ساختار درونی به خود می‌گیرد و با در نظر گرفتن یک نقطه مرجع ثابت با مشکلات و

¹ yamada

² Carnegie Mellon University

³ operator

پیچیدگی‌های فراوان مواجه می‌شود. پژوهشگران برای فایق آمدن بر این پیچیدگی از مراجعی استفاده کردند که با بخش‌های مختلف بدن مار هم‌راستا شده و محاسبات را ساده‌سازی می‌کنند [۲۸].



شکل (۲-۲۰) ربات ماری معروف به عموسام این ربات در دانشگاه کارنگی ملون^۱ ساخته شده است. این ربات مکانیزم مفصلی قوی و فشرده‌ای دارد و می‌تواند از تیرها بالا رود. [۲۷]

۸-۲- معرفی کوتاهی بر ربات کرم ابریشم با کمر غیرفعال

با توجه به کاربرد فراوان سازه‌های فلزی و اهمیت قابل توجه بررسی‌های دوره‌ای این سازه‌ها، ربات کرم ابریشم طراحی و پیاده‌سازی شد. این ربات که با الهام از توانایی بی‌نظیر کرم پروانه‌ها، در حرکت و بقا در محیط‌های پر از مانع (بریدگی‌ها و زوایای باز و بسته)، طراحی شده‌است قادر خواهد بود که بر پیچیدگی‌های موجود در مسیر ربات فائق آید و مسیرهای غیرقابل گذر برای نمونه‌های مشابه را پشت سر گذارد. هر بخش از ربات، توانایی تطبیق با محیط بستر خود را دارا بوده، و از سوی دیگر حضور بندواره‌های نرم کنترل‌پذیر امکان دسترسی به بعدهای دیگر فضا را

¹ Uncle Sam developed at Carnegie Mellon University

فراهم می‌آورد. ربات موجود شامل سه بخش و دو بندواره است. در آزمایشات صورت گرفته ربات توانایی انتقال در زوایای منفرجه و حاده تا زاویه‌ی ۴۵ درجه را داراست.



شکل (۲-۲۱) نمایی از ربات کرم ابریشم

۹-۲- تحلیل رفتاری فنر

بر اساس مطالعات صورت گرفته در مقاله‌ی آقای جانگو ژاو^۱ می‌توان منحنی خمش فنر در زوایای محدود و کوچک را به کره‌ای با شعاع مشخص تخمین زد. در مقاله‌ی مذکور نشان داده شده‌است که فرض دایره بودن منحنی مذکور با محدودیت ذکر شده معتبر بوده و نتایج کنترلی مطلوبی خواهد داشت.

¹ Jianguo Zhao

۲-۱۰- سیستم عامل ROS

سیستم عامل ROS در سال ۲۰۰۷ در آزمایشگاه هوش مصنوعی دانشگاه استنفورد متولد شد، از سال ۲۰۱۳ توسط OSRF مدیریت می شود ROS. سیستم عاملی open source برای ربات هاست که بیشتر یک میان افزار تلقی می شود ولی کارکردهای معمول یک سیستم عامل همچون سخت افزار، کنترل سطح پایین ابزارها، انتقال پیام بین فرایندها و مدیریت بسته را فراهم می کند، همچنین ROS با فراهم کردن ابزارها و کتابخانه هایی امکان ایجاد، نوشتن و اجرای کدهایی برای سیستم های چند رایانه ای را به ما می دهد [۲۹] و شاید بتوان از این جهت آن را با چارچوب های نرم افزاری همچون YARP مقایسه کرد [۳۰]. ROS یک سیستم عامل real-time نیست، گرچه امکان ادغام کدهای time-real با آن وجود دارد البته مشکل عدم پشتیبانی سیستم عامل real-time در نسخه ROS2 حل شده است [۳۱].

ویژگی کلیدی ROS فراهم کردن چارچوب ها و ابزارهایی با بیشترین قابلیت ها نیست، ROS به منظور حداکثر کردن امکان دوباره ای استفاده از کدهای غالباً نوشته شده، ساخته شده است. همچنین این سیستم چارچوب پردازشی غیر متمرکزی به اسم node است، که امکان اجرای انفرادی یا تعدادی از آنها با یکدیگر وجود دارد، امکان جمع کردن چندین node در یک package وجود دارد که امکان اشتراک و پخش کردن ساده ای آن را ایجاد می کند. ROS به صورت میان افزاری سبک و ماژوالر ساخته شده است تا امکان استفاده برای تمامی کارکردها فراهم شود، ROS مستقل از زبان برنامه نویسی است و طیف گسترده ای از زبان ها هم چون python و ++C را پشتیبانی می کند [۳۲].

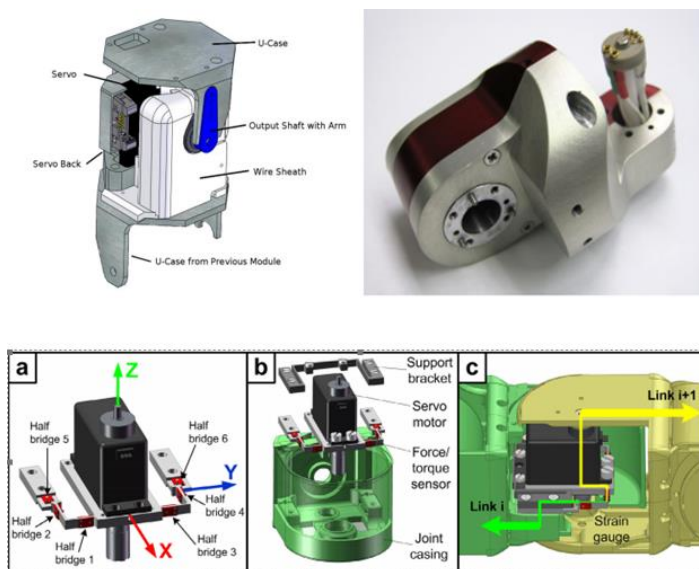
۲-۱۱- چرا ROS

ROS با داشتن معماری open source، غیرمتمرکز، چند زبانه و سبک، عملاً تبدیل به استاندارد-ی برای تولید نرم افزارهای حوزه ی رباتیک شده است. ROS با امکان مدیریت پردازش ها، ارتباط

میان پردازشی و درایور_هایی برای وسایل گوناگون در کنار ابزارهایی برای شبیه‌سازی، تصویرسازی، جمع‌آوری داده و امکانات گسترده‌ای برای مسائل مرسوم دنیای رباتیک همچون کنترل و نقشه-برداری، وجود راهنماها و آموزش‌های بسیار فعال تبدیل به بهترین چارچوب برنامه‌نویسی برای سیستم‌های رباتیکی و مکاترونیکی شده است. ROS در ۱۴ سال گذشته با عرضه‌ی نسخه‌های متعدد پیوسته خود را با نیازهای بازار تطبیق داده و بر روی ربات‌ها و دستگاه‌های صنعتی بسیاری در حال کار است [۳۳].

۱۲-۲- نتیجه گیری

همان‌طور که در این فصل نشان داده شده است اکثر ربات‌های ماری دارای ساختاری صلب و اتصالات فیکس و غیرقابل تغییر هستند. این نوع اتصالات ربات‌های ماری درجات آزادی آن‌ها را محدود می‌کند و عموماً هیچ‌یک از آن‌ها نمی‌توانند در راستای محور Z جابه‌جا شوند. در فصل بعد ما به معرفی کمر انعطاف‌پذیری که طراحی کرده‌ایم می‌پردازیم و تفاوت‌های آن را با ساختارهای دیگر مورد تحلیل قرار می‌دهیم.



شکل (۲-۲۲) دو نمونه از مفصل ربات‌های ماری [۲۷]

فصل ۳: طراحی، ساخت و طراحی کنترلر

۳-۱- مقدمه

در دو فصل گذشته، به طور کامل در مورد ربات‌ها و ماژول کمر نرم مار مانند، تنوع فناوری در ساخت، انواع ساختار حرکتی و پیشینه‌ی آن‌ها پرداخته شد. در این فصل به بیان کامل جزئیات در پروژه‌ی انجام شده پرداخته می‌شود.

همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد در تمامی کارهایی که تا به امروز بر روی ماژول‌های کمر نرم انجام شده از ساختارهای مکانیکی و پنوماتیکی در طراحی مفاصل و بندهای^۱ آن‌ها استفاده شده است. در ساختار مکانیکی به دلیل این‌که از مکانیزم‌های حرکتی مکانیکی برای ایجاد دوران استفاده می‌کنند، درجات آزادی را محدود کرده و حرکت ربات به تمامی جهات به صورت آنی امکان‌پذیر نمی‌باشد همچنین در ساختارهای پنوماتیکی ربات‌ها استقامت کافی را برای حمل و جابه‌جایی قطعات ندارند. همان‌طور که گفته شد در سال‌های اخیر به دلیل محدودیت‌های محرک‌های صلب^۲ و

¹ Joints

² Rigid joints

همچنین ایمنی بیشتر محرک‌های نرم در کنار اپراتورها^۱ در محیط‌های صنعتی استفاده از محرک‌های نرم رایج‌تر شده است. هدف ما طراحی و ساخت کمر نرم^۲ است که بتواند انعطاف‌پذیری بیشتری در مقایسه با ساختارهای کنونی داشته باشد و همچنین بتواند در راستای محور Z نیز جابه‌جا شود. در فصل پیش رو ما به معرفی کامل ماژول کمر نرم فعال ربات کرم ابریشم^۳ و همچنین معایب و مزایای آن خواهیم پرداخت. قابل به ذکر است که این ماژول با توجه به نیازها و محدودیت‌های ربات کرم ابریشم که در آزمایشگاه هوش ماشین و رباتیک دانشکده ی برق ساخته شده است طراحی و توسعه یافته است.

۲-۳- معرفی ماژول کمر نرم فعال

به دلیل اهمیت بالایی که امروزه ربات‌ها به خصوص ربات‌های نرم پیدا کرده‌اند ماژولی بر مبنای همین ویژگی‌ها ساخته‌ایم. به دلیل مشکلاتی که به آن‌ها اشاره شد در ساخت این ماژول از ترکیب کابل و فنر استفاده شده است. در طراحی این ماژول هدف بالابردن توانایی حرکتی ربات‌ها و افزایش درجات آزادی آن‌ها است که این یکی از کاربردهای این ماژول است. سیستم ساخته شده یک سیستم خودکار رباتیکی برای تغییر جهت در زوایای گوناگون است روش کلی کار این سیستم با الگوبرداری از کمر موجودات زنده مانند مار، کرم و انسان صورت گرفته است. ساختار کمر موجودات زنده متشکل از استخوانها، ماهیچه‌ها و زردپی‌ها^۴ است که در اینجا برای شبیه سازی آن‌ها از فنر و کابل استفاده شده است که فنر^۵ به عنوان مفصل و کابل به عنوان تاندون جایگزین شده‌اند به این صورت

¹ Operators

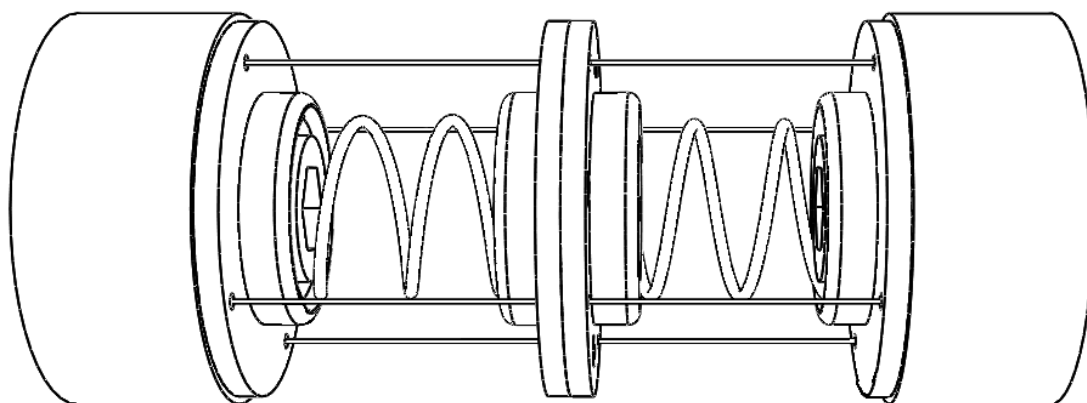
² Soft waist

³ Silkworm

⁴ Tendons

⁵ Spring

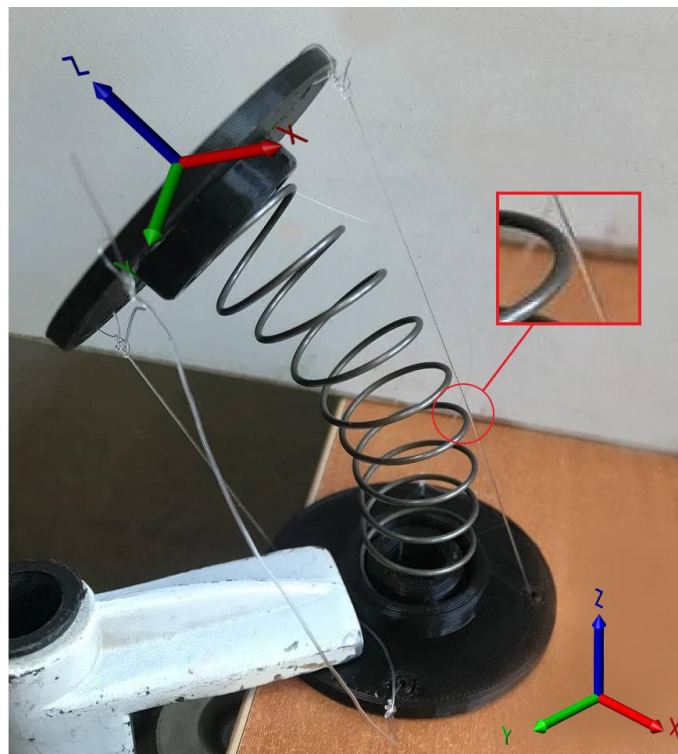
که یک فنر در مرکز و چهار کابل در مجاورت آن به صورت موازی و متقارن قرار دارند. این ماژول دارای انعطاف پذیری بالا با زاویه خمشی بیش از ۹۰ درجه است و همچنین توانایی فشرده و کشیده شدن را دارد. این ماژول می تواند وزنی در حدود ۸۰۰ گرم را تحمل کند. همان طور که مشاهده کردید تفاوت بارز بین این ماژول با ماژول هایی که تا به حال ساخته شده در این است که هیچ کدام از آن ها توانایی جابه جایی در صفحه ی Z را ندارند و جابه جایی آن ها به صفحه های X و Y محدود می شود. نمایی از ماژول ساخته شده در شکل (۳-۱) آمده است.



شکل (۳-۱) تصویری از اولین طراحی ماژول کمر نرم فعال

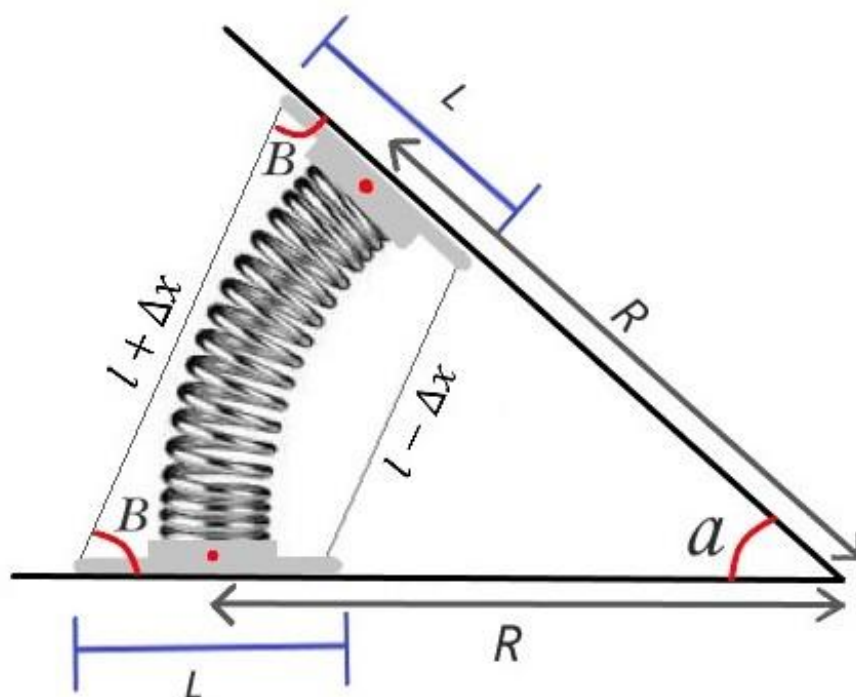
۳-۳- تحلیل اولیه ساختار ماژول کمر نرم فعال

همان طور که در بالا گفته شد در ساخت این ماژول از ترکیب نخ و فنر استفاده شده است در اولین نمونه ی ساخته شده این ماژول از یک فنر ۱۰ سانتی متری استفاده شده بود که ۴ نخ به موازات آن در اطراف فنر قرار داده شد که در ساخت آن از نخ ماهیگیری استفاده کرده بودیم چرا که نخ ماهیگیری با وجود داشتن ضخامت کم، مقاومت بسیار بالایی دارد. استفاده از فنر بلند دارای یک نقص بزرگ در طراحی و موجب ایجاد اختلال در حرکت بود، چرا که در حرکت ماژول از زاویه ۴۰ درجه به بالا، نخ به دیواره ی فنر برخورد کرده و از خم شدن بیشتر فنر جلوگیری می کرد و با افزایش زاویه موجب ایجاد پیچش در فنر می شد.



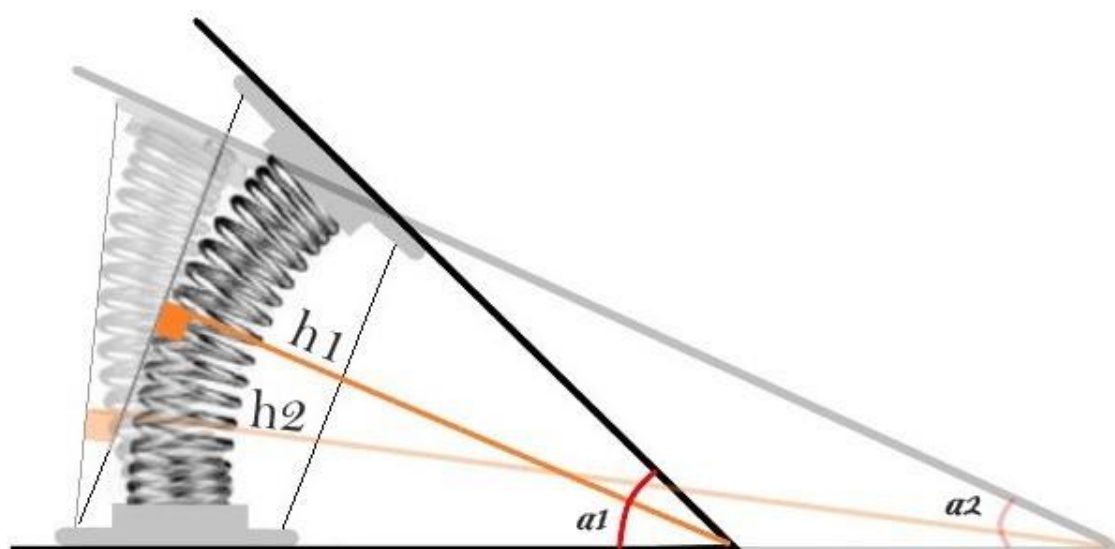
شکل (۳-۲) تصویری از لحظه برخورد نخ به فنر

برای رفع این مشکل فنر را دو قسمت کردیم و به جای یک فنر بلند از دو فنر کوتاه در ساخت ماژول استفاده شد و همچنین در میان دو فنر یک صفحه قرار داده شده تا در زمان خم شدن فنرها از برخورد نخ به فنر جلوگیری کند. با انجام این کار میزان حرکت ماژول از ۴۰ درجه به چیزی حدود ۹۰ درجه افزایش خواهد یافت. یکی دیگر از پارامترهایی که در حرکت و میزان انحراف ماژول موثر است محاسبه‌ی فاصله نخ قرار گرفته در اطراف فنر با مرکز فنر است. در ادامه رابطه‌ای برحسب میزان طول فنر و فاصله‌ی مرکز آن تا نخ‌های اطراف بدست آمده است.



شکل (۳-۳) تصویر فنر قبل در لحظه‌ی برخورد نخ و ایجاد دایره‌ی فرضی بر حسب کمان فنر

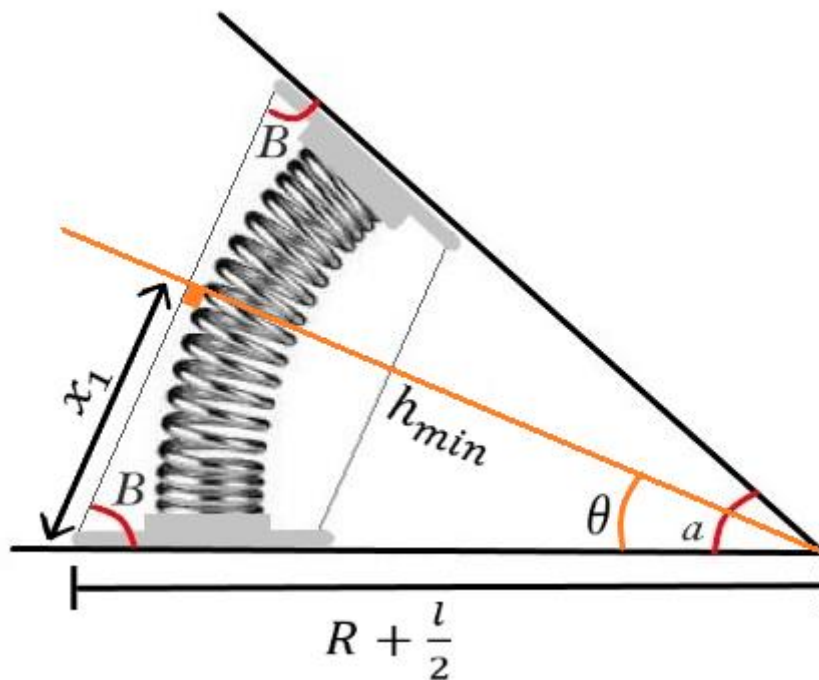
در شکل بالا β مقدار زاویه‌ای است که ما به سیستم می‌دهیم و توسط دوربین که فیدبک سیستم کنترلی ما هست خوانده می‌شود (در فصل ۴ بیشتر به آن می‌پردازیم)، α زاویه نخ‌ها تا دایره‌ای است که فنر در حالت خم شدن، آن را می‌سازد و بر روی آن قرار می‌گیرد، R فاصله‌ی مرکز دایره‌ی ایجاد شده تا وسط فنر است که با نقطه‌ی قرمز نشان داده شده است، L طول صفحه نگهدارنده‌ی فنر است، $l - \Delta x$ مقدار جمع شدن نخ توسط موتورها است، $l + \Delta x$ مقدار باز شدن نخ توسط موتورها است (در هنگام حرکت ماژول موتورها مقابل هم به یک میزان، ولی برعکس هم حرکت می‌کنند).



شکل (۴-۳) تصویری از فنر در دو حالت خم شدن متفاوت و ایجاد دایره‌های فرضی به شعاع h_1 و h_2

با توجه به شکل (۴-۳) می‌خواهیم کمی دقیق‌تر به بررسی حالت‌های فنر بپردازیم. همان‌طور که در شکل مشخص است در حالت دوم نخ $l-\Delta x$ مقدار بیشتری نسبت به حالت اول جمع شده است و باعث خم شدن بیشتر فنر شده، حال در این حالت دایره‌ی تشکیل شده از کمان فنر کوچک‌تر از حالت اول می‌شود، h_1 و h_2 عمودهای مختلفی است که با زاویه‌های مختلف فنر می‌توانند شکل بگیرند. با توجه به شکل (۵-۳) طبق قضایای هندسی می‌دانیم که هر خطی که به دایره مماس شود به شعاع دایره عمود است پس خط h_1 و h_2 به شعاع دایره‌هایی که کمان فنرها می‌سازند عمود هستند و طول آن‌ها به اندازه R یا همان شعاع دایره^۱ است.

¹ Radius



شکل (۵-۳) حالت حدی از فنر که نخ با فنر برخورد کرده است

با توجه به قضیه اثبات شده هنگام برخورد نخ به فنر، فاصله محل برخورد نخ تا مرکز دایره‌ی ساخته شده توسط کمان فنر برابر شعاع دایره است که آن را h_{min} نام گذاری می‌کنیم، $x1$ فاصله خط h_{min} تا صفحه نگه‌دارنده فنر است، θ هم زاویه شعاع دایره فرضی یا همان h_{min} تا خط افق است و همچنین فاصله سر نخ تا مرکز دایره فرضی برابر $R + L/2$ است.

پس داریم:

$$h_{min} = R \quad 1-3$$

و در حالت‌های دیگر که هنوز نخ به فنر برخورد نکرده است به صورت کلی داریم:

$$h_n > R \quad 2-3$$

از آنجایی مثلث تشکیل شده با زوایای α و β یک مثلث متساوی الساقین است و مقدار زاویه β با توجه به فیدبک کنترلی که همان دوربین است را داریم میتوانیم مقدار α را بدست آوریم که برابر است با $\pi-2\beta$.

حال می‌خواهیم طول x_1 که در شکل (۷-۳) به آن اشاره کردیم را بدست آوریم. در ابتدا باید زاویه θ که در واقع زاویه مثلث $R+L/2, x_1$ و h_{min} است را بدست آوریم که زاویه‌ی بین x_1 و h_{min} با توجه به قضیه خط مماس با دایره، 90° درجه است. بنابر این مقدار θ برابر است با:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \beta \quad 3-3$$

حال زاویه θ را داریم و می‌توان مقدار x_1 را از روابط سینوسی و کسینوسی بدست آورد:

$$x_1 = \left(R + \frac{l}{2}\right) \sin \theta \quad 4-3$$

$$x_1 = \left(R + \frac{l}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \quad 5-3$$

$$x_1 = \left(R + \frac{l}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos(\beta) - \sin(\beta) \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad 6-3$$

$$x_1 = \left(R + \frac{l}{2}\right) (\cos(\beta)) \quad * \quad 7-3$$

حال می‌خواهیم مقدار X_1 را از رابطه فیثاغورس^۱ هم بدست آوریم باتوجه به شکل (۷-۳) مثلث x_1 ، $h_{\min}, R+L/2$ یک مثلث قائم الزاویه^۲ است که اگر از رابطه فیثاغورس استفاده کنیم $R+L/2$ به توان دو باید برابر باشد با x به توان دو بعلاوه h یا همان R به توان دو پس:

$$x_1 = \sqrt{\left(R + \frac{l}{2}\right)^2 - R^2} = \sqrt{\frac{l^2}{4} + Rl} \quad * \quad ۸-۳$$

حال با توجه به روابط* مقدار x_1 را از دو راه مختلف بدست آوردیم آن‌ها را مساوی هم قرار می‌دهیم تا ببینیم مقدار β به چه صورت در می‌آید.

$$\left(R + \frac{l}{2}\right)^2 \cos^2 \beta = \left(R + \frac{l}{2}\right)^2 - R^2 \quad ۹-۳$$

$$\cos \beta = \frac{\sqrt{\frac{l^2}{4} + Rl}}{\left(R + \frac{l}{2}\right)} \rightarrow \beta = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{\frac{l^2}{4} + Rl}}{\left(R + \frac{l}{2}\right)} \right) \quad ۱۰-۳$$

حالتی که در اینجا در نظر می‌گیریم حالت نهایی ما است که در این طول فنر در مینیمم حالت خود است که اگر این طول را داشته باشد نخ به فنر برخورد می‌کند پس باید حالت‌های ما بزرگ‌تر مساوی آن باشد در واقع داریم:

$$\text{spring length} \geq Ra \quad ۱۱-۳$$

¹ Pythagorean theorem

² Right triangle

در رابطه‌ی بالا α با توجه به شکل ۱ و از آنجایی که مقدار زاویه β را می‌دانیم برابر $\pi - 2\beta$ است پس در آخر اندازه‌ی طول کمان (l_1) باید برابر باشد با :

$$l_1 < R \underbrace{(\pi - 2\beta)}_{\alpha} < R \left(\pi - 2 \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{\frac{l^2}{4} + Rl}}{\left(R + \frac{l}{2}\right)} \right) \right) \quad ۱۲-۳$$

۳-۴- محاسبه‌ی مقدار k فنر

نکته‌ی دیگری که باید به آن اشاره شود این است که محاسبات انجام شده برای فنری با k ثابت 112 N/m است که مقدار k از روش زیر قابل محاسبه است:

$$k = \frac{d^4 G}{8nD^3} \quad ۱۳-۳$$

در فرمول بالا n برابر تعداد حلقه موثر، G مادول سختی، D قطر فنر و d قطر مفتول است.

۳-۵- تشریح کامل روش تحقیق

ماژول کمر نرم فعال در چهار نسل ساخته شده است.

نسل اول : مدل آزمایشگاهی و ساده ترین نسل ساخته شده است.

نسل دوم : یک مدل کامل تر با مکانیزم حرکتی متفاوت تر نسبت به نسل اول.

نسل سوم : دارای مکانیزم حرکتی مشابه نسل دوم ولی با موتورهای قوی تر و اضافه شدن سنسورها.

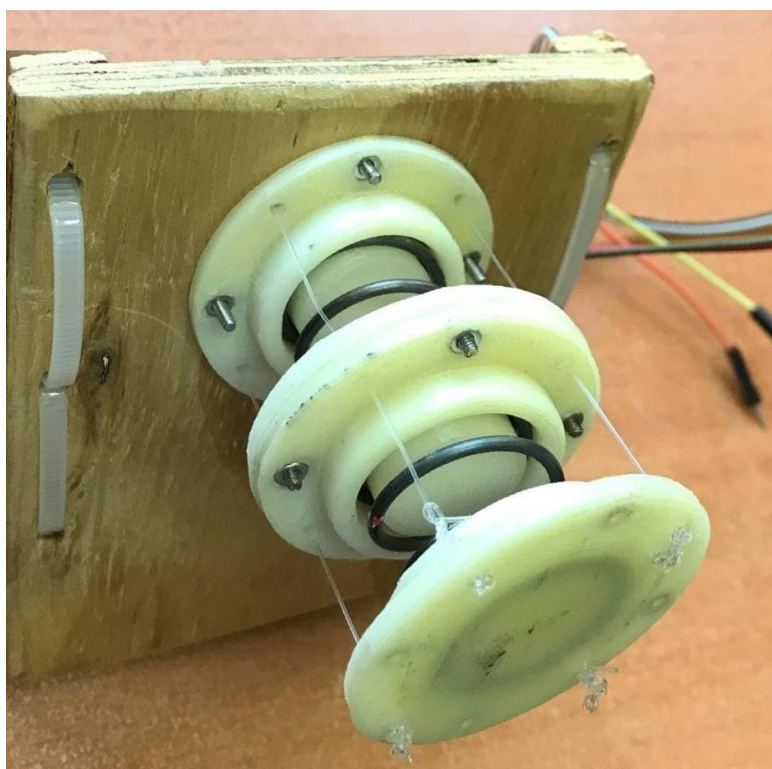
نسل چهارم : ساخت ماژول با ابعاد بسیار بزرگ تر نسبت به نسل های قبل.

۳-۵-۱- نسل اول ماژول کمر نرم

پس از محاسبات فاصله نخها تا فنر نمونه اولیه بر مبنای محاسبات صورت گرفته و همچنین برآورد مقدار k فنر ساخته شد. این نمونه در واقع تنها یک نمونه‌ی آزمایشی از این تحقیق بود تا بتوانیم یک دید کلی از پروژه بدست آوریم.

در ساخت این ماژول از وسایل بسیار ساده و اولیه استفاده شده است. در ابتدا برای ثابت نگه داشتن فنرها و ایجاد ساختار اولیه چهار قطعه‌ی استوانه‌ای با دستگاه پرینتر سه بعدی، ساخته شد تا فنرها در شیارهایی با توجه به k محاسبه شده در آن تعبیه شد تا فنر در آن‌ها قرار بگیرد و ثابت بماند و نخها به موازات فنر در سوراخهایی که تعبیه شده قرار می‌گیرد. در این نمونه از موتورهای سروو^۱ استفاده شده است که توانایی تحمل ۹۰۰ گرم وزن را داشتند.

¹ Servomotor



شکل (۳-۶) نمونه اولیه ساخته شده ماژول کمر نرم

۳-۵-۲- نسل دوم ماژول کمر نرم

در نمونه‌ای که برای نسل اول ساخته شد نتیجه حرکتی ماژول طبق انتظاراتی که داشتیم، بود. بنابراین در این نسل هدف اصلی کوچک کردن اندازه ماژول و نزدیک شدن به نمونه‌ی اصلی است. برای کوچک کردن سایز ماژول ابتدا باید موتورهای ماژول کوچک می‌شدند و در عین کوچک شدن باید قدرت کافی را برای تحمل وزن ربات می‌داشتند. برای این منظور از موتور گیربکس‌دار باید استفاده می‌کردیم، برای این کار از موتور A312 استفاده کردیم. بزرگ‌ترین عیب این موتور این بود که گیربکس آن شفتی برای اتصال پولی به آن نداشت. برای رفع این مشکل آخرین چرخ دنده‌ی داخل گیربکس موتور را با چرخ دنده‌ی دارای شفت تعویض شد و روی بدنه گیربکس سوراخی برای قرارگیری شفت ایجاد کردیم.



شکل (۷-۳) تصویری از موتور A312 قبل از ایجاد تغییرات در آن

برای چرخ دنده‌ی جایگزین از چرخ دنده‌ی برنجی استفاده شد که تعداد گام‌های آن با چرخ دنده‌ی قبلی یکی باشد اما باید در داخل آن یک شفت برای اتصال پولی به آن قرار می‌دادیم برای این کار چرخ دنده‌ی برنجی پس از کوچک شدن اندازه‌ی آن، حرارت داده می‌شد تا بتوان شفت استیل را در داخل آن قرار داد.



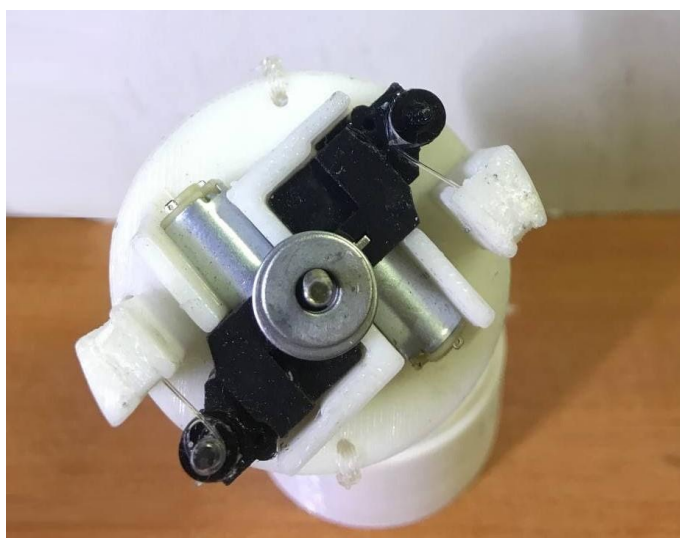
شکل (۸-۳) در تصویر سمت راست مراحل ساخت جرخ دنده نشان داده شده است و در شکل سمت چپ مدل قرار گیری آن در گیربکس موتور است

پس از درست شدن شفت چرخ دنده‌ی جدید باید برای قرارگیری آن در داخل موتور سوراخی برای خروج شفت ایجاد می‌شد، به دلیل کوچک بودن سائز موتور تمام کارهای سوراخ کاری بر روی گیربکس باید دستی انجام می‌گرفت که این موضوع سختی کار را چند برابر می‌کرد و در نهایت بعد از جایگذاری چرخ دندی جدید موتور آماده نصب بر روی ماژول بود.



شکل (۳-۹) موتور تکمیل شده برای استفاده در نسل سوم ماژول کمر نرم فعال

همان طور که قبلاً اشاره شد این ماژول برای استفاده در ربات کرم ابریشم باید طراحی می‌شد بنابراین باید سائز آن بسیار کوچک‌تر از نمونه‌ی نسل اول می‌شد برای همین نمی‌توانستیم تمام چهار موتور را در یک سمت مانند مدل قبل قرار دهیم برای همین دو موتور در قسمت پایین ماژول و دو موتور دیگر در قسمت بالای آن قرار داده شد. با انجام این کار قطر دایره ای که ماژول ما را تشکیل می‌داد شش سانتی متر شد که این مقدار برای بکارگیری در ربات بسیار مناسب بود.



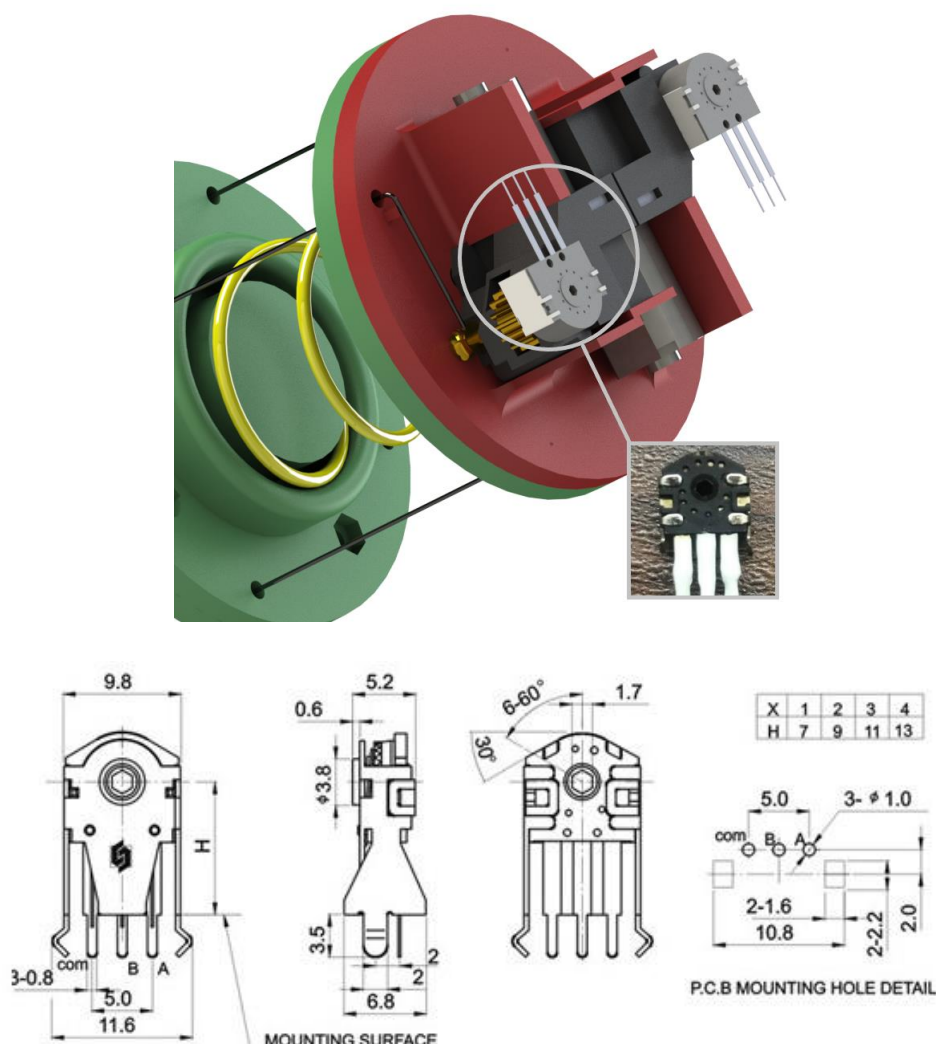
شکل (۳-۱۰) مدل جایگذاری موتورها در داخل ماژول کمر نرم فعال

پس از انجام تست ماژول به دلیل این که بدنه‌ی گیربکس موتورها از جنس پلاستیک بود در حین حرکت کششی که در نخ‌ها به دلیل نیروی جمع شدن فنر ها ایجاد می‌شد سر شفت‌هایی که پولی روی آن قرار داده شده بود ایجاد نیروی خمشی می‌کرد و این نیروی خمشی سبب ترک خوردن و در نهایت شکستن بدنه گیربکس موتور می‌شد. برای رفع این مشکل یک ورق استیل بر روی موتورها قرار گرفت به این صورت که سوراخ‌هایی بر روی ورق استیل ایجاد شد تا شفت‌های موتور از داخل آن‌ها رد شود با این کار نیروی خمشی ایجاد شده در شفت مهار می‌شد.



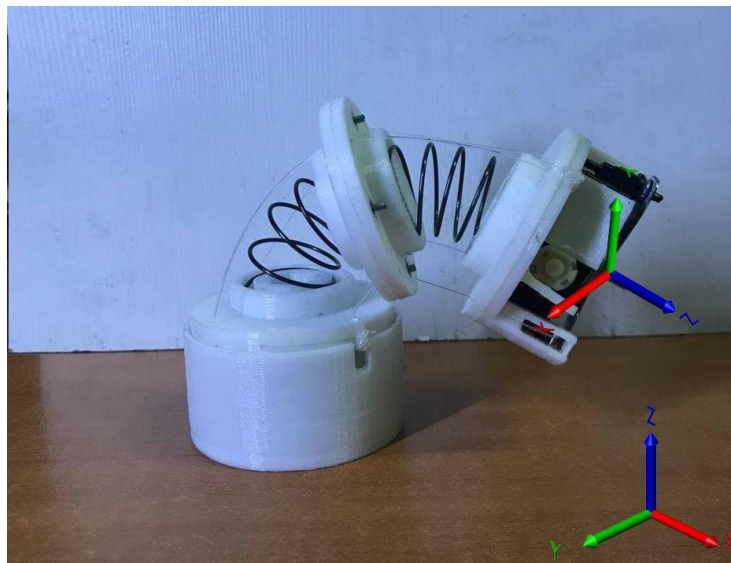
شکل (۳-۱۱) تصویر سمت راست محلی شکستگی پوسته گیربکس در اثر نیروی خمشی ایجاد شده در شفت ها را نشان می‌دهد و تصویر سمت چپ استفاده از ورق استیل برای مهار این نیرو در گیربکس است.

برای کنترل ربات که در فصل بعد به آن پرداخته شده است ما نیاز به انکودر^۱ داشتیم برای این منظور قرار بود از انکودرهای داخل موس کامپیوترها استفاده شود به این صورت که انکودر بر روی شفت بیرون زده از ورقه استیل متصل می شد ولی به دلیل خطاهایی که انکودرها داشتند اندازه‌ی دقیقی از چرخش موتورها به ما نمی‌دادند و همچنین وزنی که می‌توانستیم با این موتورها تحمل کنیم کمتر از هشتصد گرم بود برای همین مجبور به تغییر موتورها در نسل سوم این ماژول شدیم.



شکل (۳-۱۲) ابعاد و اندازه انکودر موس استفاده شده در طراحی

^۱ Priority encoder



شکل (۳-۱۳) در تصویر بالا حالت خم شدن ماژول را می‌بینید که با زاویه‌ی بیش از ۹۰ درجه نخ‌ها به فنر برخورد نکرده‌اند

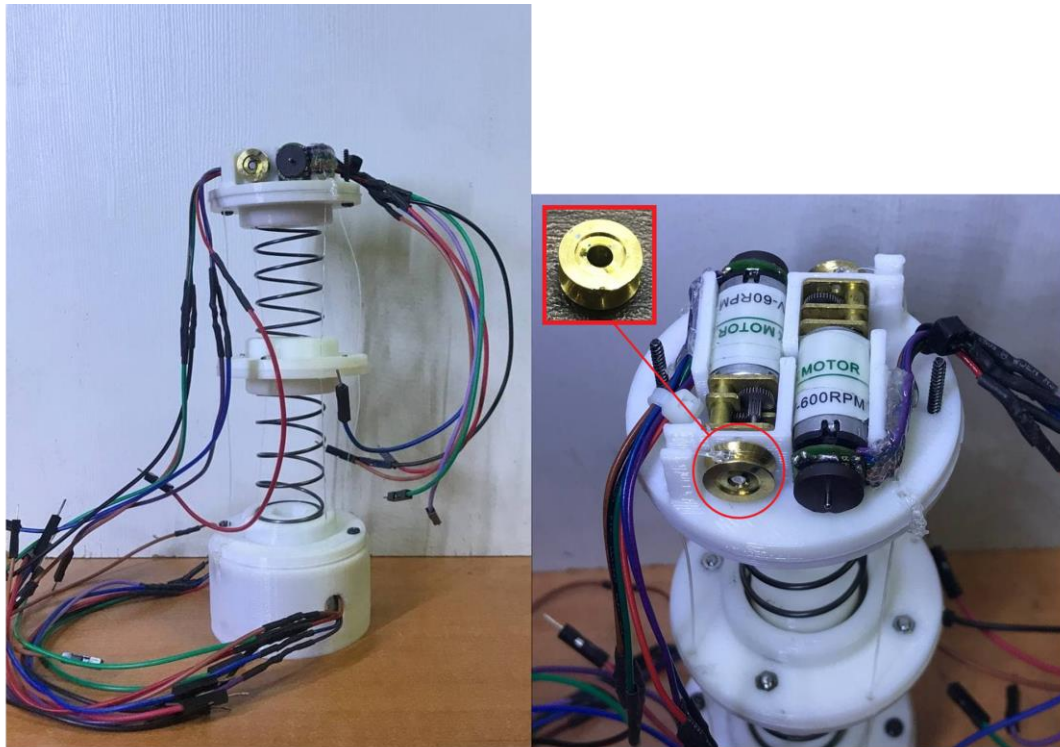
۳-۵-۳- نسل سوم ماژول کمر نرم

به دلایل و مشکلاتی که موتورهای نسل قبل داشتند و مجبور به ایجاد تغییراتی در ماژول شدیم. در این نمونه ما از مینی موتور گیربکس انکودر دار استفاده کردیم این موتورها نسبت به موتور-های نسل قبل قوی‌تر هستند و همچنین دارای تاکومتر هستند که می‌تواند تعداد دور موتور را از آن بدست آورد و همچنین مشخصات فنی موتور ها ۱۲ ولت ۶۰۰ دور است.

جدول (۳-۱) مشخصات مینی موتور گیربکس دار

تعداد دور	ولتاژ کاری	طول شفت	طول موتور	قطر شفت	وزن
600 دور	6-12 ولت	1 سانتی متر	2.8 سانتی متر	3 میلیمتر	30 گرم

برای جمع کردن نخ‌ها در این موتور از یک پولی برنجی به قطر ۱۰ میلی متر استفاده شده است. در تست‌های گرفته شده با این ماژول عملکرد آن بسیار قابل قبول بود و ماژول می‌توانست وزنی تا ۹۰۰ گرم را حرکت دهد. در ادامه تصویری از این ماژول نشان داده شده است.



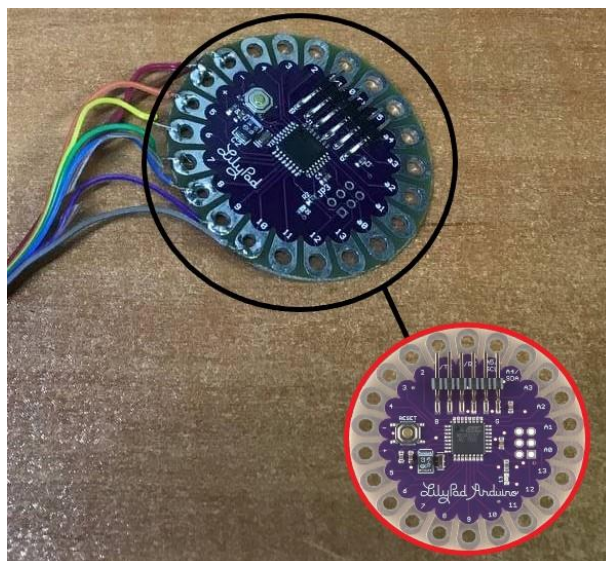
شکل (۳-۱۴) تصویری از ماژول نسل سوم

برای درایو کردن و کنترل این ماژول از برد لیلی‌پد شرکت آردوینو^۱ استفاده شد که این سری از بردها به دلیل دایره شکل بودن به راحتی در درپوشی که برای ماژول طراحی شده بود قرار می‌گرفت. مشخصات این برد به صورت کامل در ادامه آمده است.

^۱ Arduino

جدول (۲-۳) مشخصات برد لیلی پد شرکت آردوینو

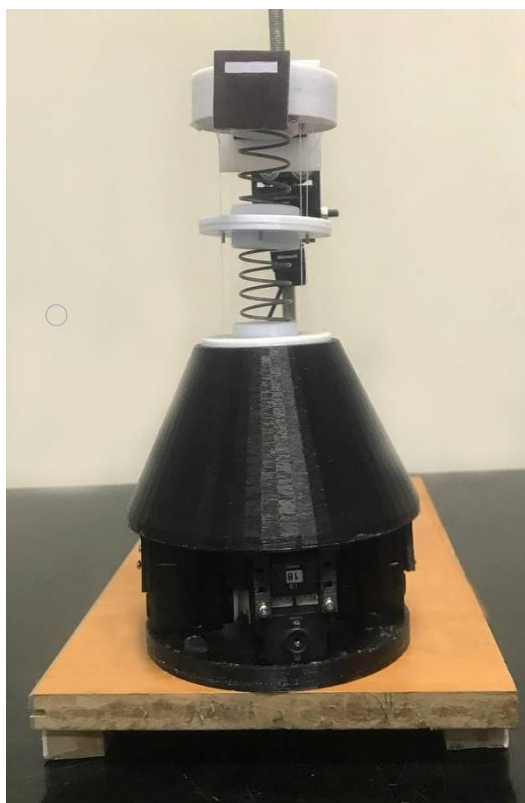
Microcontroller	ATmega168 or ATmega328V
Operating Voltage	2.7-5.5 V
Input Voltage	2.7-5.5 V
Digital I/O Pins	14
PWM Channels	6
Analog Input Channels	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
Flash Memory	16 KB (of which 2 KB used by bootloader)
SRAM	1 KB
EEPROM	512 bytes
Clock Speed	8 MHz



شکل (۳-۱۵) تصویری از برد بکار برده شده در ماژول از شرکت آردوینو

۳-۵-۴- نسل چهارم ماژول کمر نرم

در اینجا تنها تفاوت این ماژول با ماژول‌های قبل در سائز آن است سائز ماژول ساخته شده در نسل چهارم بسیار بزرگ‌تر از نمونه‌های قبلی است زیرا در اینجا برای گرفتن تست‌های بیشتر از موتور داینامیکسل^۱ AX12 استفاده کرده ایم. از آنجایی که برای کنترل این ربات می‌خواستیم از دوربین برای تشخیص موقعیت ماژول استفاده کنیم برای راحتی کار در گرفتن، داده‌ها یک نمونه‌ی بزرگ برای تست دیتاها ساخته شد تنها تفاوت آن نیز فقط در قسمت موتورها است. توضیحات کامل درباره‌ی روش کنترلی و همچنین دیتاهای بدست آمده تماماً در فصل چهارم به آن‌ها پرداخته شده است.

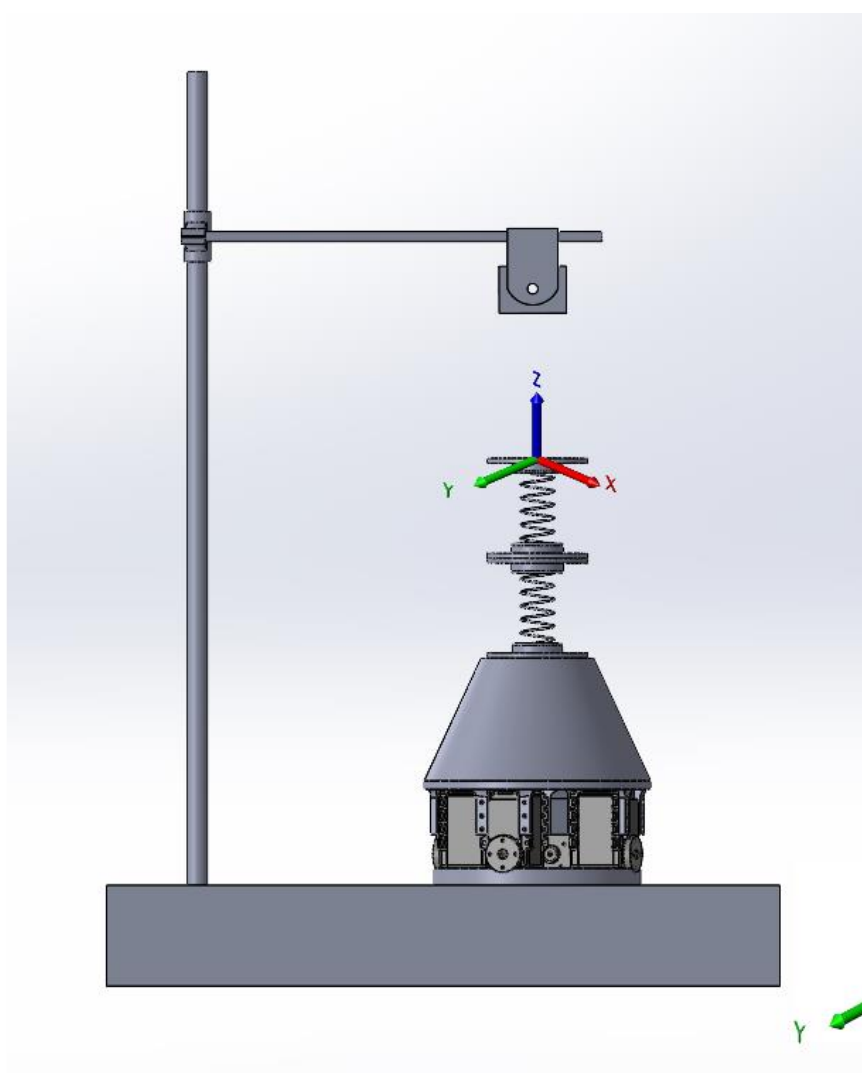


شکل (۳-۱۶) نسل چهارم ماژول کمر نرم فعال

¹ Dynamixel

۳-۶- ساخت پلتفرم کنترلی ماژول

پس از کالیبره کردن دوربین برای کنترل ماژول نیاز بود تا پلتفرم طراحی و ساخته شود تا ماژول و دوربین در طول فرآیند کنترل ثابت بمانند. برای این منظور در ابتدا یک قاب برای نگهداری دوربین طراحی و با پرینتر سه بعدی ساخته شد و ویژگی اصلی این طراحی قابلیت قرارگیری دوربین در زوایا و فواصل مختلف نسبت به ماژول بود تا بتوانیم با تنظیم آن بهترین دید دوربین را نسبت به تگ آروکو داشته باشیم.



شکل (۳-۱۷) طراحی پلتفرم کنترلی ربات.

۷-۳- طراحی کنترل PID

برای بدست آوردن ضرایب PID از قاعده زیگلر نیکولز استفاده کردیم به این صورت که در ابتدا K_i و K_d را صفر قرار می‌دهیم و K_p را افزایش می‌دهد تا سیستم حول نقطه تعیین شده به نوسان بیفتد، وقتی سیستم به نوسان افتاد به آرامی K_p را به مقدار ثابتی کاهش می‌دهیم و مقدار K_d را آنقدر افزایش می‌دهیم تا سیستم با سرعت مناسبی نزدیک نقطه تعیین شده برسد و همچنین نوسان کمی حول آن نقطه داشته باشد. [۳۶][۳۷] پس از آن که محل نوسان فاصله کمی تا نقطه تعیین شده‌ی ما داشت به آرامی مقدار K_i را زیاد می‌کنیم تا جایی که خطای حالت ماندگار گرفته شود. ضرایب PID بدست آمده به صورت زیر است:

$$K_p = 86.05$$

$$K_d = 28$$

۱۴-۳

$$K_i = 0.15$$

۸-۳- کنترل زاویه

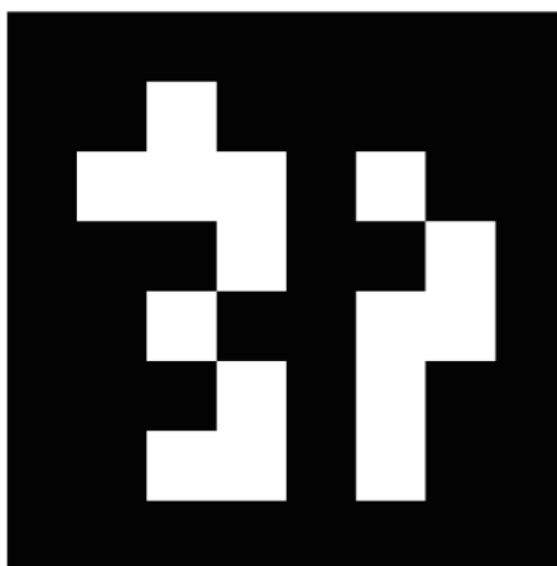
برای محاسبه زاویه مازول کمر نرم روش‌های مختلفی وجود داشت که دو نمونه از اصلی‌ترین آن‌ها عبارتند از:

۱. استفاده از انکودر موتور و محاسبه‌ی سینماتیک مستقیم و معکوس مازول برای بدست آوردن موقعیت مازول و استفاده از IMU برای گرفتن فیدبک موقعیت

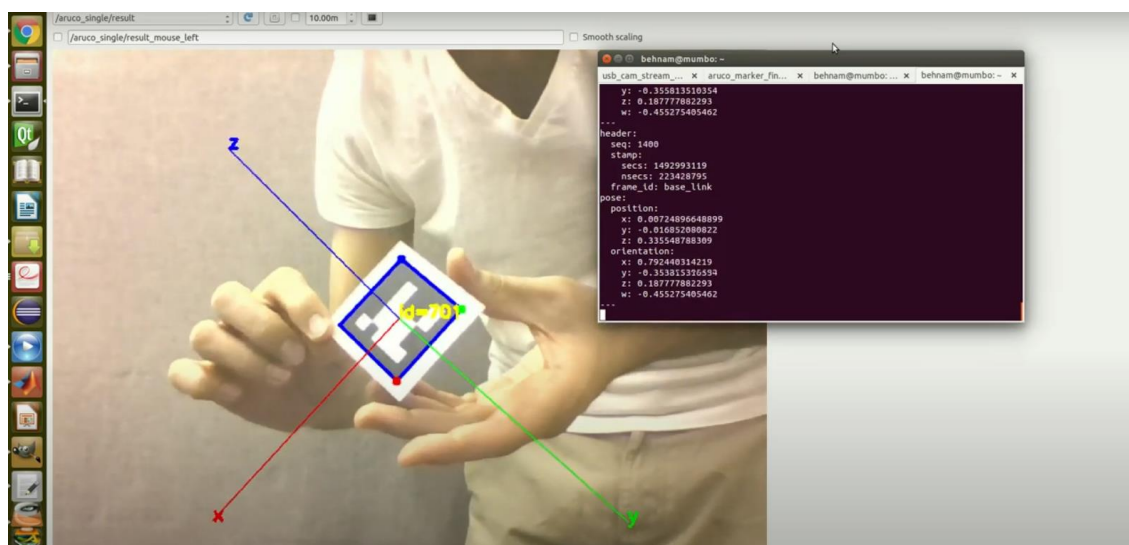
۲. استفاده از دوربین و تگ‌واقعیت افزوده و همچنین پکیج‌های آماده سیستم عامل ROS

به دلیل بالا بودن هزینه‌ی مازول IMU و همچنین به دلیل این‌که استفاده از محاسبات سینماتیکی ربات بخشی از تز پایانی یکی از دانشجویان دکتری بر روی این مازول است از این روش به دلیل استفاده از فرمول‌های فنر در انجام محاسبات، قادر به کنترل ربات از این روش نبودیم برای همین از روش دوم که هزینه‌ی چندانی نیز نداشت استفاده شد.

در این روش از یک دوربین وبکم شرکت ماکروسافت برای کنترل و بدست آوردن زاویه قرارگیری مازول پس از حرکت آن استفاده شده است. به این صورت که یک تگ واقعیت افزوده در قسمت بالایی مازول وصل می‌شود و دوربین درست در روبروی آن قرار می‌گیرد و از طریق پکیج-های آماده پلتفرم ROS برای تشخیص تگ واقعیت مجازی توسط دوربین استفاده می‌کنیم. در این روش سه جهت $(x-y-z)$ و همچنین زوایای اولیه‌ی حول $(x-y-z)$ توسط دوربین از روی تگ آروکو خوانده می‌شوند. فقط باید توجه داشت که مقدار محور z ، فاصله تگ آروکو تا دوربین است.



شکل (۳-۱۸) تصویری از یک تگ واقعیت افزوده

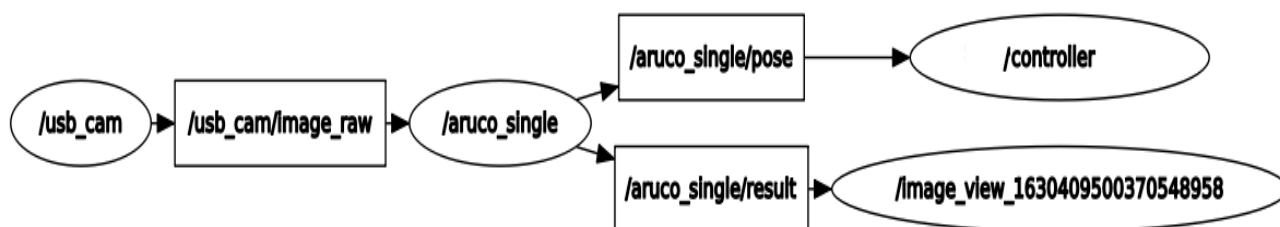


شکل (۳-۱۹) نمایش از تگ‌اروکوکد در دوربین

برای آن که مقادیر و محاسبات فاصله و زاویه بدست آمده از دوربین دقت بالایی داشته باشند در ابتدای کار باید یکبار دوربین را کالیبره کنیم قابل ذکر است که کالیبره کردن دوربین از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که در صورت انجام ندادن آن داده‌های بدست آمده خطاهای بسیار زیادی دارند و قابل استفاده نیستند. برای کالیبره کردن دوربین، پکیج‌های آماده بسیاری وجود دارد ولی به طور کلی منظور از کالیبره کردن در واقع از بین بردن حالت اعوجاج لنز دوربین است که برای این کار پس از اجرای پکیج کالیبراسیون دوربین راس، یک شکل هندسی مشخص را که در اینجا ما از یک صفحه شطرنجی 30×40 استفاده کردیم را باید در مقابل دوربین قرار داده و باید آن را در جهات و فاصله‌های مختلف حرکت دهیم.

بعد از این کار و پس از این که تصویربرداری از مراحل مختلف کالیبراسیون توسط دوربین انجام شد به ماتریس خروجی کالیبراسیون می‌رسیم که آن را باید جایگزین ماتریس فعلی دوربین‌مان کنیم.

۳-۹- طراحی کنترل کننده



شکل (۳-۲۰) نمایی از گراف ROS

در شکل بالا ما از نود `usb_cam` روی تاپیک `usb-cam/image_row` تصویر را می‌خوانیم و می‌دهیم به `aruco_single` و این نود روی تصویر الگوریتم مورد نظر را اجرا می‌کند. از این نود، دو خروجی به ما می‌دهد که یکی تاپیک `aruco_single/pose` هست که موقعیت آن تگ استفاده شده که در اینجا تگ شماره صفر است که آن را به نود `controller` می‌دهیم که کنترل طریق پروت سریال به ربات وصل است و آن را کنترل می‌کند.

حال برای نمایش تصویر از تاپیک `aruco_single/result` که در آن آروکو را تشخیص می‌دهد را با نود `image_view` می‌خوانیم و نمایش می‌دهیم.

فصل ۴: نتایج

۴-۱- مقدمه

در فصل های گذشته به توضیح و چگونگی طراحی و ساخته کمر نرم فعال پرداختیم حال در این فصل می خواهیم به تحلیل و بررسی نتایج بدست آمده پردازیم و در آخر نمایش خروجی داده ها از جمله مهم ترین مسائلی است که باید مورد بررسی قرار گیرد و در این فصل به طور کامل به این مسائل پرداخته می شود.

همان طور که در فصل دوم گفته شد در این پروژه از سیستم عامل ROS استفاده کرده ایم برای همین منظور ابتدا توضیح کوتاهی درباره ی کارهای انجام شده با این سیستم عامل را بیان می کنیم و بعد به روش و مدل کنترلی انجام شده برای تعیین موقعیت می پردازیم و در آخر به بررسی و تحلیل داده های بدست آمده می پردازیم.

۴-۲- نتایج کنترل زاویه ماژول

در این پروژه برای کنترل زاویه ماژول از دو کنترلر حلقه باز^۱ و حلقه بسته^۲ استفاده کرده ایم که در ادامه ابتدا به توضیح درباره‌ی کنترل حلقه باز و پس از آن به کنترل حلقه بسته خواهیم پرداخت و نمودارهای خروجی آن‌ها را در آخر بررسی خواهیم کرد.

۴-۳- کنترل حلقه باز

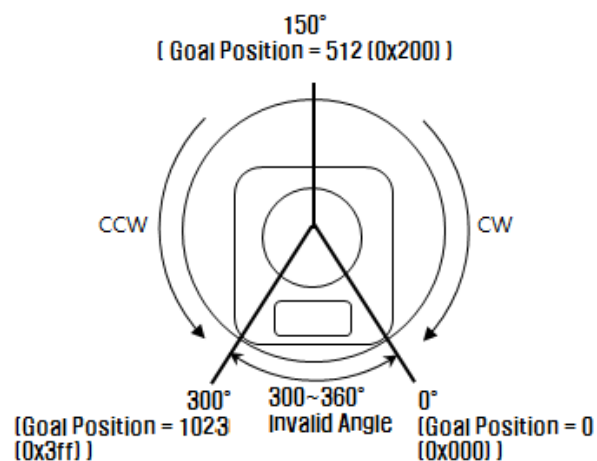
به دلایلی که در ابتدای فصل به آن‌ها اشاره شد نمی‌توانستیم معادلات سینماتیکی ماژول را محاسبه کنیم و همچنین به دلیل این که موتور داینامیکسل AX12 در حالت کنترل زاویه، ۶۰ درجه از زاویه انکودر را نمی‌تواند بخواند دیتاهای گرفته شده از دوربین بسیار غیرخطی بودند، پس برای آن که بتوانیم یک کنترلر حلقه باز طراحی کنیم ابتدا نیاز بود از طریق روش شناسایی سیستم^۳ یک سری داده^۴ جمع‌آوری کنیم تا بتوانیم یک تابع تبدیل برای سیستم بدست آوریم.

¹ Open Loop

² Close loop

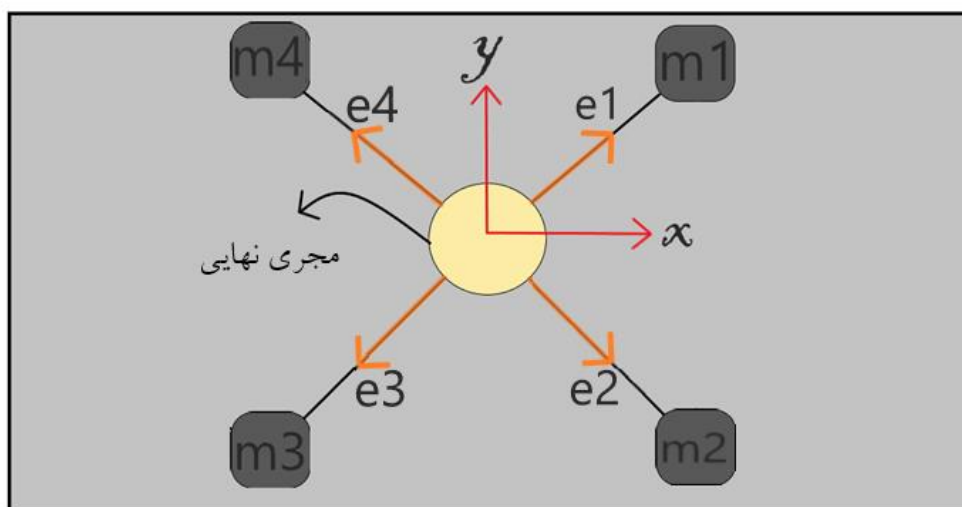
³ System identification

⁴ Data



شکل (۴-۱) تصویری از زاویه دید انکودر موتور داینامیکسل

در ابتدا برای ساده سازی مسئله فرض کردیم که موتورها و مجری نهایی^۱ ماژول همگی در یک صفحه قرار دارند و بر طبق این ساده سازی فرمول حرکت موتورها را نسبت به هم محاسبه کرده ایم.



شکل (۴-۲) نمایش موتورها و مجری نهایی در یک صفحه و نمای کلی آن ها از بالا.

¹ end effector

در تصویر بالا m موتورهای هستند که در مازول استفاده شده است، e_1 ، e_2 ، e_3 ، e_4 برآیند نیرویی بردار x و y است. بر اساس اینها فرمول حرکت موتورها نسبت به یکدیگر عبارت است از:

$$X = \frac{\sqrt{2}}{2}(e_1 + e_2 - e_3 - e_4) \quad 1-4$$

$$Y = \frac{\sqrt{2}}{2}(e_1 + e_4 - e_2 - e_3) \quad 2-4$$

در نتیجه خواهیم داشت:

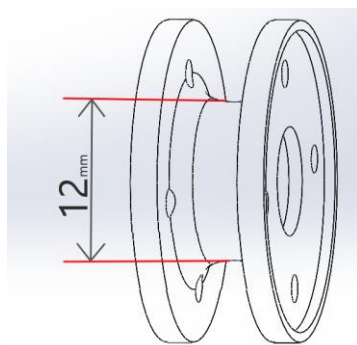
$$x = 0.7071(e_1 + e_2) - 0.7071(e_3 + e_4) \quad 3-4$$

$$y = 0.7071(e_1 + e_4) - 0.7071(e_2 + e_3) \quad 4-4$$

پس از محاسبه معادلات حرکتی رباتها مقدار جمع شدن نخ به دور پولی موتورها را در هر ثانیه محاسبه کنیم. با توجه به این که سرعت موتورهای دینامیکسل 27.75 [rev/min] است و همچنین قطر پولی طراحی شده برای موتورها 12 mm است خواهیم داشت:

$$27.75 \text{ rev/min} \times \frac{1}{60} \text{ min/s} = 0.4625 \text{ rev/s} \quad 5-4$$

$$0.4625 \text{ rev/s} \times \frac{12}{1} \text{ mm/rev} = 5.55 \text{ mm/s} \quad 6-4$$



شکل (۴-۳) اندازه پولی طراحی شده برای موتورها

پس از محاسبه فرمول حرکت موتور ها و میزان جمع شدن نخ در هر ثانیه نیاز بود تا میزان حرکت ماژول را در بازه ۰.۱ ثانیه تا ۱.۵ ثانیه در هر لحظه بدست آوریم. پس از جمع‌آوری داده‌ها آن‌ها را در نرم افزار متلب^۱ نمایش دادیم و بعد با دستور ابزار برازش منحنی^۲ یک منحنی بر آن سوار کردیم و یک تابع تبدیل برای آن بدست آوردیم. از آنجایی که دوربین در جلوی ماژول قرار دارد می‌دانیم منحنی بدست آمده باید نصف یک بخش از یک سهمی باشد. بر اساس داده های جمع آوری شده یک سهمی درجه سوم به خوبی به داده‌ها مطابقت داشت و توانستیم به راحتی ضرایب (P_1, P_2, P_3, P_4) معادله درجه سه را بدست آوریم. ضرایب بدست آمده عبارت اند از:

$$P_1 = -2.823_e - 06 \quad ۷-۴$$

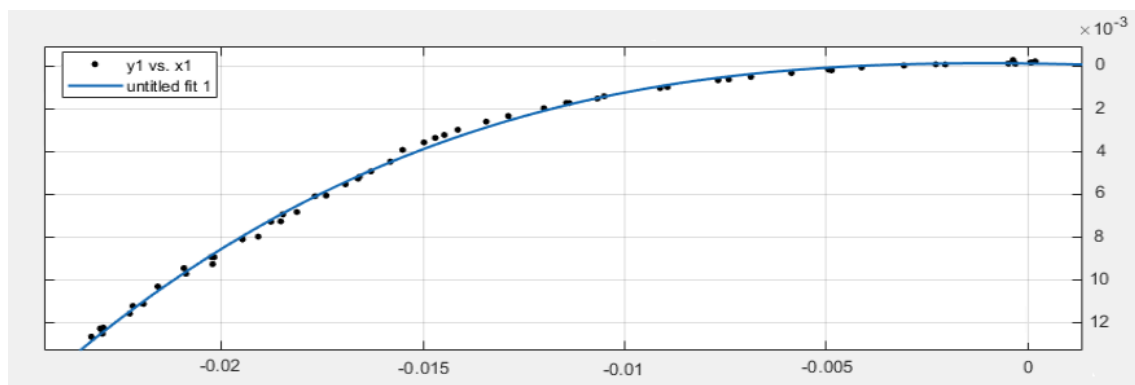
$$P_2 = 5.529_e - 06 \quad ۸-۴$$

$$P_3 = -0.03632 \quad ۹-۴$$

$$P_4 = 0.1556 \quad ۱۰-۴$$

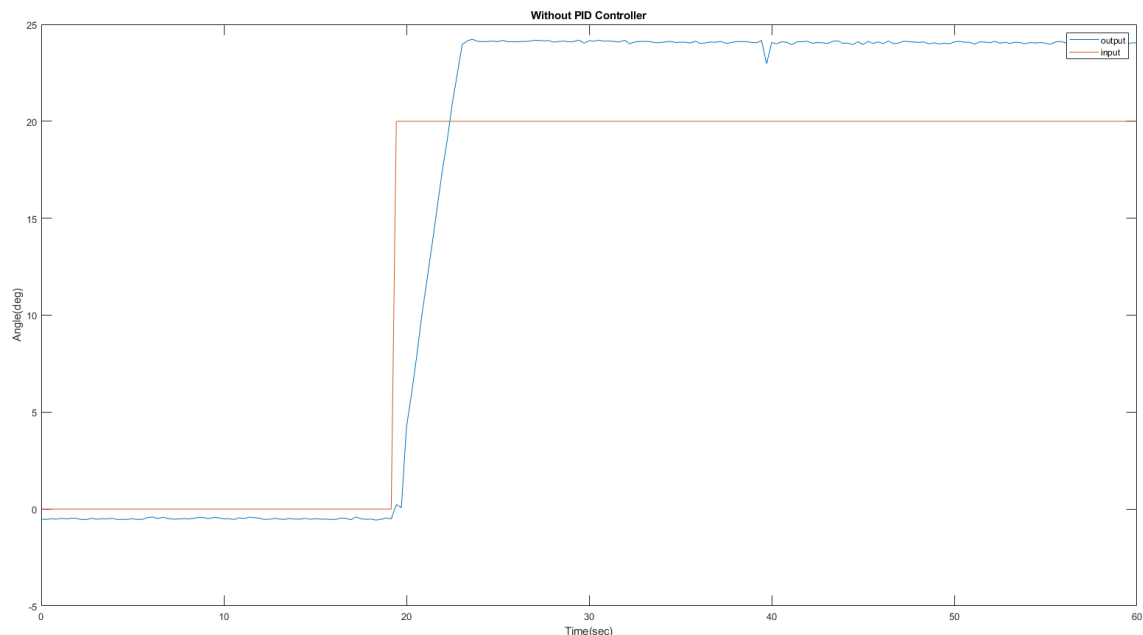
^۱ MATLAB

^۲ curve fitting tool



شکل (۴-۴) دیتاهای جمع‌آوری شده و مطابقت سه‌می درجه سوم با آن

پس از بدست آوردن ضرایب یک تابع تبدیل با توجه به ضرایب بدست آوردیم که بتوانیم در ورودی میزان زاویه مورد نظرم را بدهیم و در خروجی، تابع تبدیل مقدار زمان مورد نیاز برای رسیدن به آن زاویه را بر حسب ثانیه به ما بدهد. نتایج بدست آمده از تابع تبدیل در زاویه ۲۰ درجه به صورت زیر است:



شکل (۴-۵) در تصویر بالا نمودار نارنجی رنگ ورودی پله زاویه ۲۰ درجه است و نمودار آبی رنگ خروجی ماژول در زاویه ۲۰ درجه است.

همان‌طور که مشخص است در کنترل حلقه باز بین مقدار ورودی داده شده به سیستم و خروجی گرفته شده از مازول حدود پنج درجه اختلاف وجود دارد. برای از بین بردن این اختلاف ما باید از کنترل حلقه بسته استفاده می‌کردیم و در کنترلر از کنترل PID استفاده کردیم که در بخش بعد به توضیح در باره‌ی آن و نتایج بدست آمده خواهیم پرداخت.

۴-۴- کنترل حلقه بسته

سیستم کنترل حلقه بسته که با نام سیستم کنترل فیدبک نیز شناخته می‌شود، از مفهوم سیستم حلقه باز برای مسیر روبه جلو بهره می‌گیرد، البته یک یا چند حلقه یا مسیر فیدبک بین خروجی و ورودی آن نیز وجود دارد. هدف سیستم‌های حلقه بسته، رسیدن به خروجی مطلوب، آن هم به صورت خودکار و ماندن در آن شرایط از طریق مقایسه با خروجی واقعی است.

مهم‌ترین ویژگی‌های کنترل حلقه بسته به شرح زیر است:

۱. کاهش خطا با تنظیم خودکار ورودی سیستم تحت کنترل

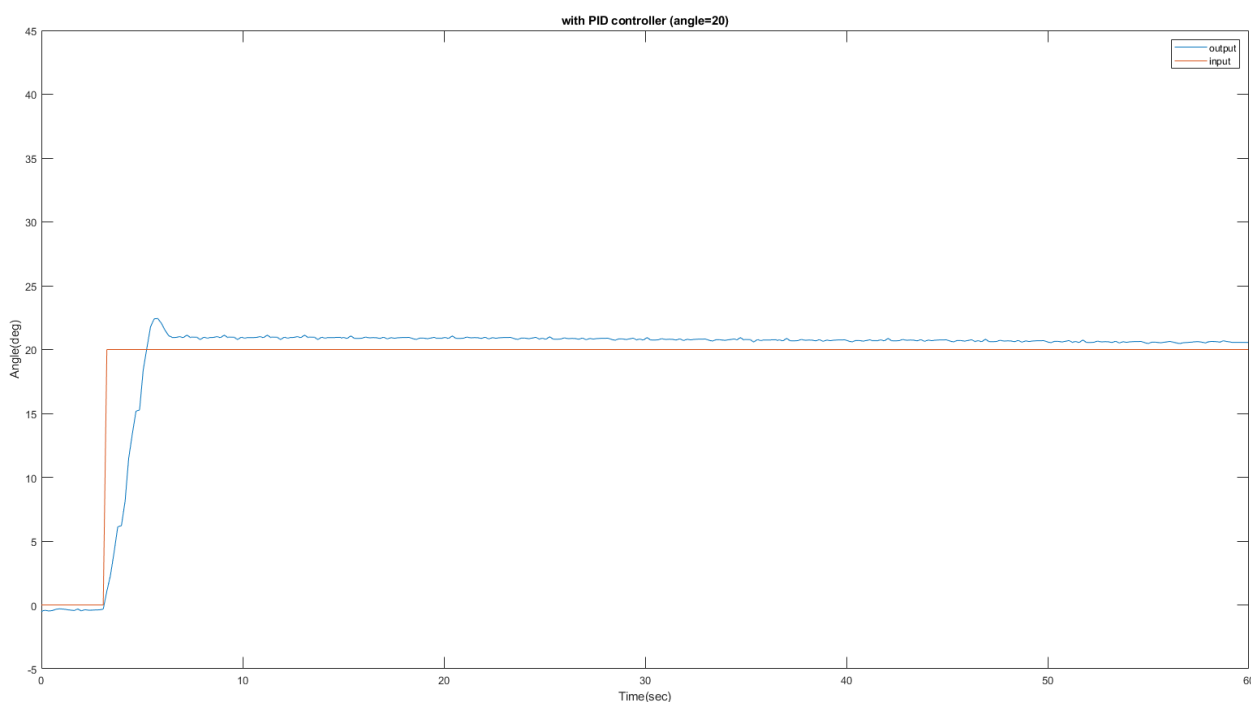
۲. بهبود پایداری سیستم ناپایدار

۳. افزایش یا کاهش حساسیت سیستم

۴. افزایش مقاومت در برابر اغتشاش‌های خارجی

۵. عملکرد قابل اطمینان و قابل تکرار

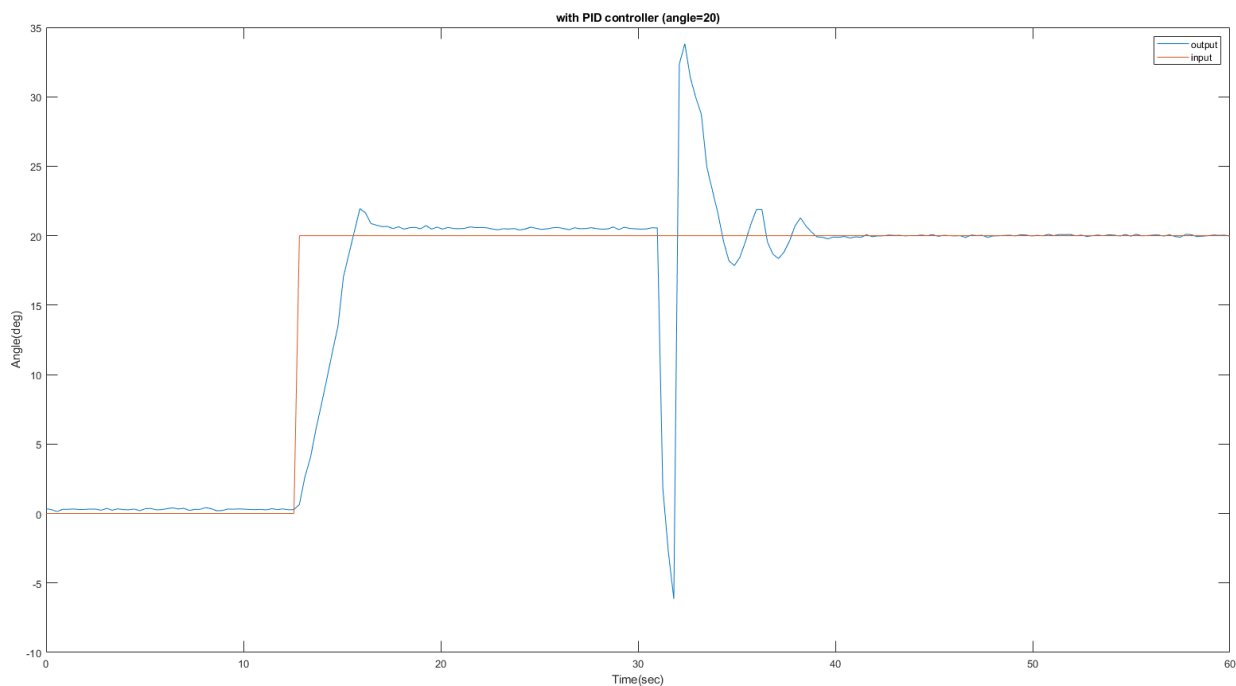
نتایج بدست آمده از تابع تبدیل در زاویه ۲۰ درجه به همراه کنترلر PID به صورت زیر است:



شکل (۴-۶) در تصویر بالا نمودار نارنجی رنگ ورودی پله زاویه ۲۰ درجه است و نمودار آبی رنگ خروجی مازول در زاویه ۲۰ درجه است

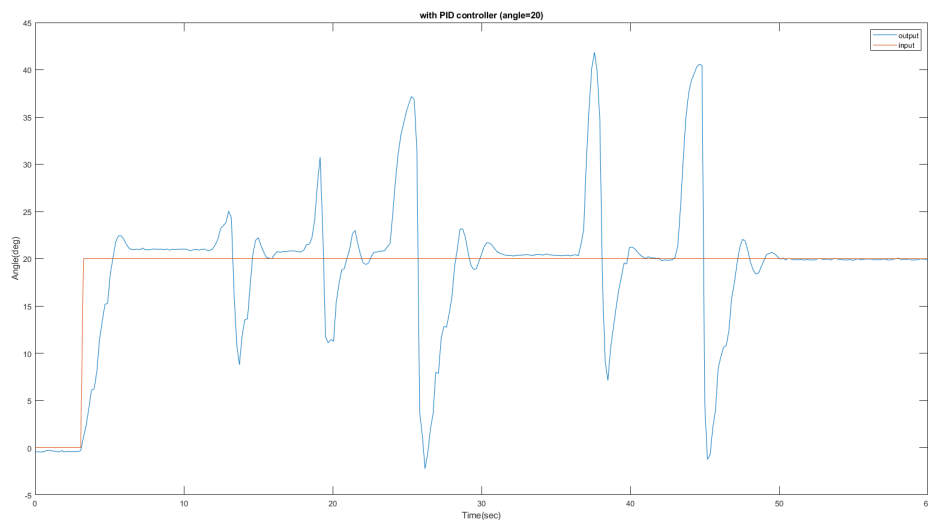
برای تست کنترل هنگامی که مازول به نقطه تعیین شده رسید به سر مازول نیرو وارد می‌کنیم تا کنترل را در حضور اغتشاش^۱ آزمایش کنیم این کار یک بار در زاویه ۲۰ درجه و بار دیگر در زاویه ۴۵ درجه انجام داده شد و نتایج بدست آمده به صورت زیر است.

¹ disturbances



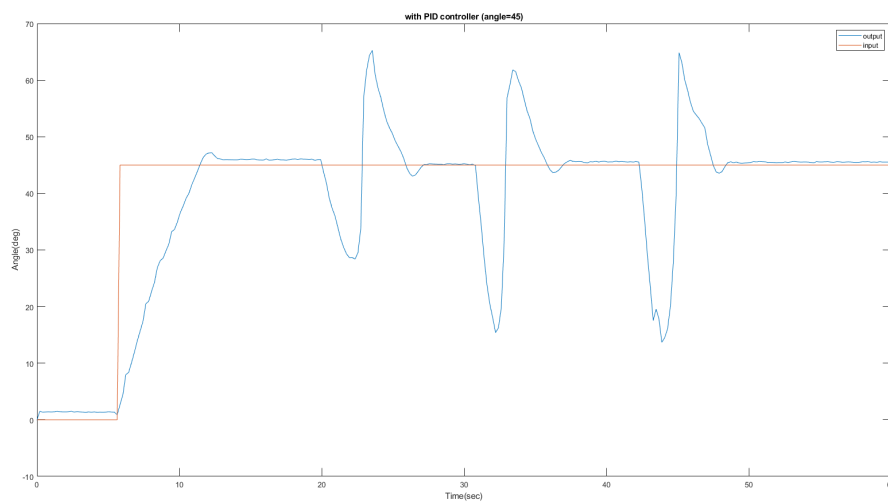
شکل (۷-۴) نمودار بدست آمده از کنترل PID در حضور اغتشاش در زاویه ۲۰ درجه

همانطور که در تصویر بالا می بینید با وجود اغتشاش زیادی که به سیستم وارد کرده ایم اما کنترلر PID اجرا شده برای سیستم توانسته است به سرعت سیستم را به حالت اولیه خود باز گرداند. در ادامه همین تست را برای زاویه ۲۰ درجه انجام داده ایم با این تفاوت که به جای یک بار چندین بار به سیستم اغتشاش وارد کرده ایم



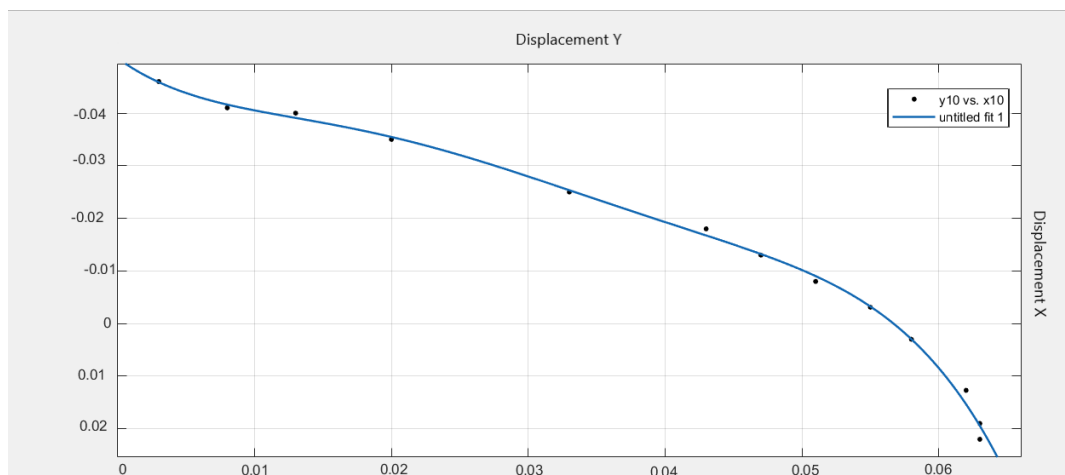
شکل (۴-۸) نمودار بدست آمده از کنترل PID در حضور چندین اغتشاش در زاویه ۲۰ درجه

در ادامه تست بالا را برای زاویه ۴۵ درجه انجام داده و به جای یک بار چندین بار به سیستم اغتشاش وارد کرده ایم.

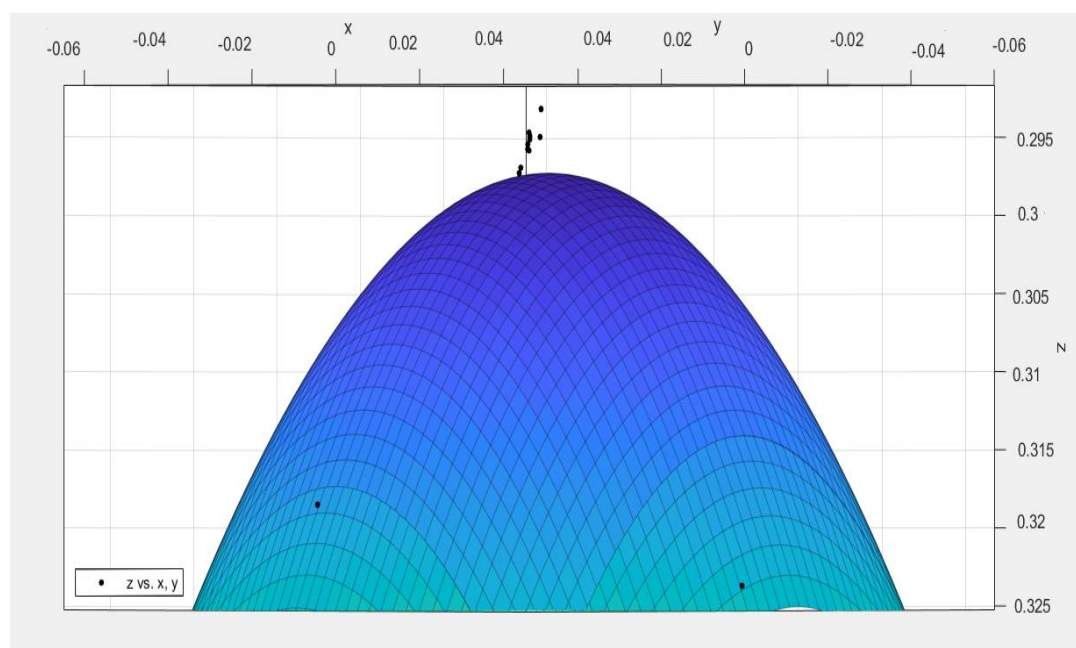


شکل (۴-۹) نمودار بدست آمده از کنترل PID در حضور چندین اغتشاش در زاویه ۴۵ درجه

سیستم ساخته شده یک سیستم غیر خطی درجه سوم است که نمودار حرکت کلی سیستم در شکل (۴-۱۰) نمایش داده شده است. و همچنین در شکل (۴-۱۱) تصویر سه بعدی حرکت سیستم شبیه سازی شده است.



شکل (۴-۱۰) نمایش حرکت کامل ربات



شکل (۴-۱۱) تصویر سه بعدی از حرکت ماژول کمر نرم

۴-۵- تعداد درجات آزادی

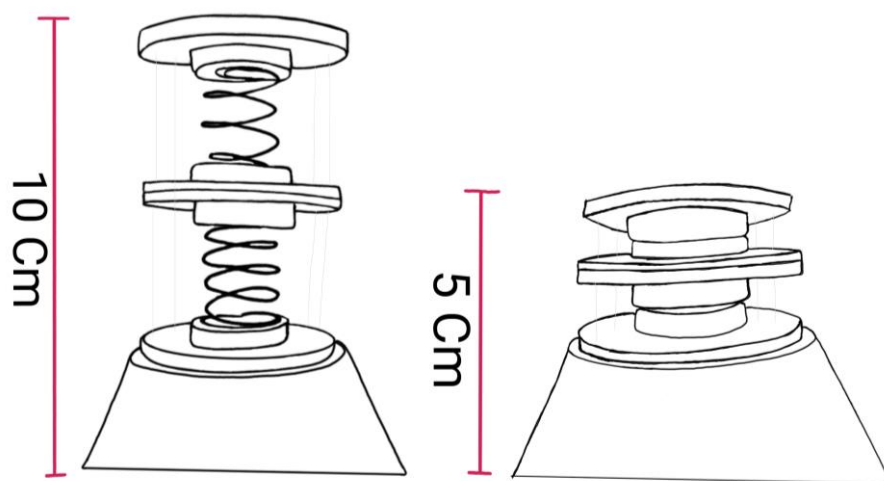
ربات کمر نرم از نظر درجات آزادی امکان حرکت در ۶ درجه آزادی را دارد، اما از آنجا که ربات های نرم دارای بینهایت درجات آزادی هستند با توجه به طراحی انجام شده، ما توانایی کنترل ۵ درجه آن را داریم در واقع همانطور که قبلا گفته شد ماژول ساخته شده توانایی جابجایی در هر سه محور x, y, z و همچنین توانایی چرخش در راستای محور x, y را دارد. همچنین از نظر دیدگاه کنترل صنعتی چون درجات آزادی یک ربات را با تعداد موتورهای ربات محاسبه می کنند از نظر صنعتی ماژول ساخته شده دارای ۴ درجه آزادی است.

۴-۶- هولونومیک و غیرهولونومیک

هولونومیک بودن به زبان ساده در ربات به معنای این است که توانایی کنترل تمامی درجات آزادی ربات را داشته باشیم و از آنجایی که به دلیل مدل طراحی شده ما توانایی کنترل ۵ درجه از ۶ درجه آزادی ربات را داریم سیستم ساخته شده غیرهولونومیک است.

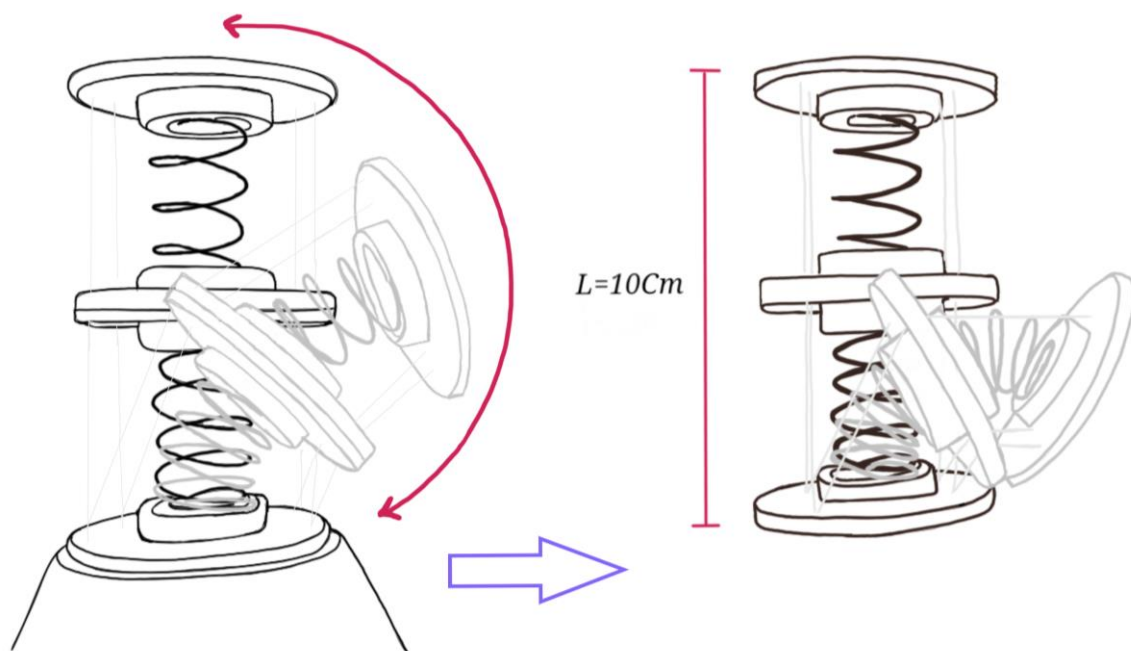
۴-۷- فضای کاری کمر نرم ربات کرم ابریشم:

ماژول کمر نرم در راستای محور z توانایی جابه جایی به مقدار ۵ سانتی متر را دارد به این گونه که در حالت آزاد اندازه ماژول ۱۰ سانتی متر است و پس از جمع شدن کامل اندازه آن به ۵ سانتی متر میرسد. در شکل (۴-۱۲) نمایی از جابجایی این ماژول در راستای محور z نمایش داده شده است.

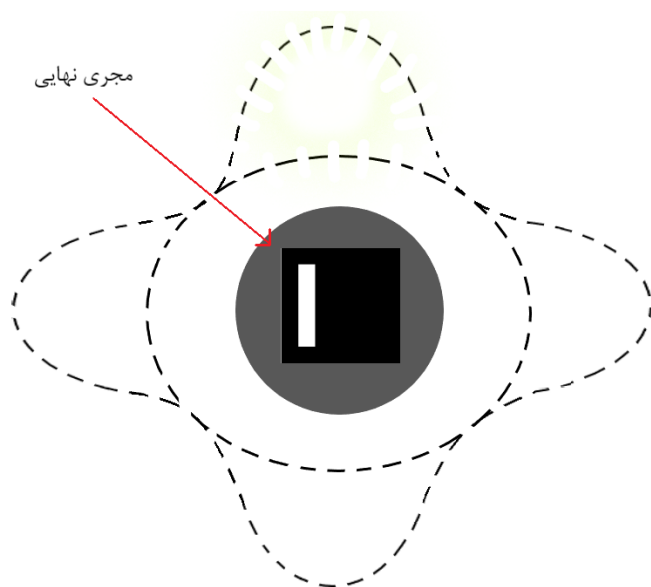


شکل (۴-۱۲) جابه‌جایی ماژول کمر نرم در راستای محور Z

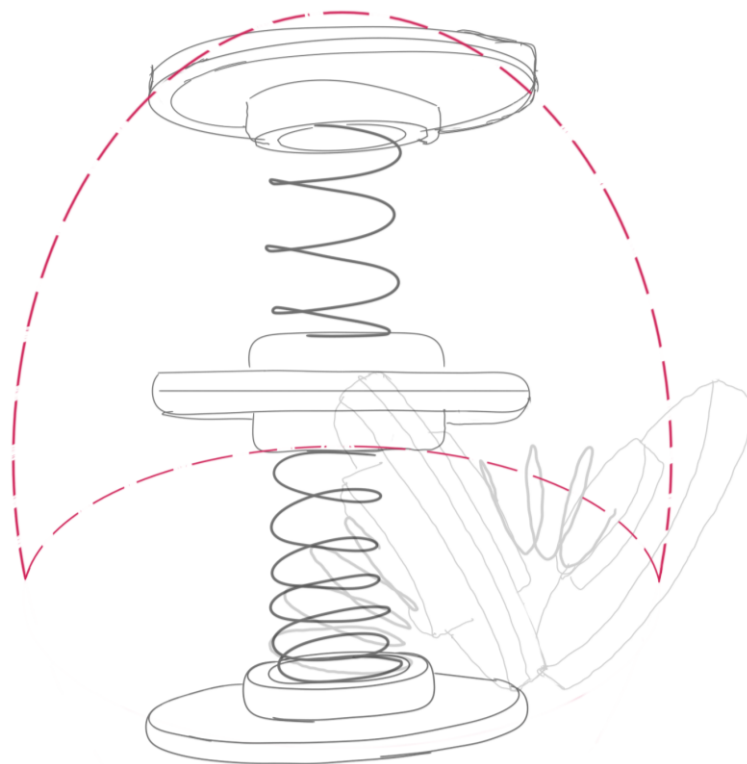
در ادامه فضای کاری ماژول کمر نرم در چند تصویر در راستای محاور X نمایش داده شده است و از آنجایی که حرکت ماژول کمر نرم در راستای محاور X و Y به صورت متقارن است پس حرکت ماژول در راستای محور Y نیز همانند حرکت ماژول در راستای محور X نمایش داده شده است.



شکل (۴-۱۳) جابه‌جایی ماژول کمر نرم در راستای محور X



شکل (۴-۱۴) فضای کاری ماژول کمر نرم از زاویه دید بالا نسبت به ماژول



شکل (۴-۱۵) فضای کاری ماژول کمر نرم در راستای محور X

۴-۸- نتیجه گیری

در این فصل نتایج حاصل از هر بخش بررسی و دسته بندی شد و در نهایت تمام سیستم در حضور اغتشاشات تست و تحلیل شد و با توجه به نتایج بدست آمده می توان گفت سیستم با کمک کنترلر به حالت پایدار درآمده است.

فصل ۵: بحث و نتیجه گیری

۵-۱- جمع بندی

در این پایان نامه، سعی بر طراحی و ساخت کمر نرم فعال برای ربات کرم ابریشم به منظور بالا بردن توانایی های حرکتی (درجات آزاد) ربات است و هدف اصلی این مهم رسیدن ماژولی است که توانایی اتصال به ربات های مختلف جهت بالا بردن درجات آزادی آن ها است. به همین منظور با توجه به نیاز و کاربرد آن بر روی ربات کرم ابریشم ابتدا این ماژول در سازه کوچک طراحی و ساخته شده است. در این ماژول از ترکیب کابل و فنر استفاده کردیم. از جمله مزایای استفاده از این ترکیب کابل و فنر قابلیت فشرده و کشیده شدن، توانایی گردش به جهات مختلف تا زاویه 90° درجه را برای ربات امکان پذیر می سازد. مهم تر از همه استفاده از ترکیب کابل و فنر توانایی حرکت این ماژول را در راستای محور Z امکان پذیر ساخته است که این ویژگی در ربات های دیگر که دارای اجزاء صلب هستند امکان پذیر نیست.

دیگر ویژگی این ماژول عبارت است از:

استفاده آسان

هزینه بسیار پایین

ماژولی بودن

الهام گیری آن از طبیعت است

۵-۲- نتیجه‌گیری

همانطور که گفته شد یکی از اهداف این پایان نامه مقایسه ماژول ارائه شده با ماژول های دیگر می باشد در این پایان نامه هدف، بالا بردن توانایی حرکتی ربات ها و افزایش درجات آزادی آنها است که این یکی از کاربردهای این ماژول است. سیستم ساخته شده یک سیستم خودکار رباتیکی برای تغییر جهت به زوایای گوناگون است روش کلی کار این سیستم با الگوبرداری از کمر موجودات زنده مانند مار، کرم و انسان صورت گرفته است. ساختار کمر موجودات زنده متشکل از استخوان ها، ماهیچه ها و تاندون ها است که در اینجا از المان های مکانیکی به جای آنها استفاده شده است. در این روش از فنر و کابل استفاده شد که فنر به عنوان مفصل و کابل به عنوان تاندون جایگزین شده اند. برای ساخت کمر نرم در این ماژول از ترکیبی از کابل و فنرها استفاده می کنیم که در آن یک فنر در مرکز و چهار کابل در مجاورت آن به صورت موازی و متقارن قرار دارند. این ماژول دارای انعطاف پذیری بالا با حداکثر زاویه خمشی ۹۰ درجه است و همچنین توانایی فشردگی و کشیده شدن را دارد. این ماژول می تواند حداکثر وزن ۸۰۰ گرم را تحمل کند. همان طور که مشاهده کردید تفاوت بارز بین این ماژول با ماژول هایی که تا به حال ساخته شده است در این است که هیچ کدام از آنها توانایی جابه جایی در صفحه ی Z را ندارند و جابجایی آنها در صفحه های X و Y است.

۵-۳- کارهای آینده

مثل هر پژوهش دیگری این کار نیز در راستا و در ادامه سایر پروژه‌ها قرار گرفته و از نتایج آن‌ها بهره برده است. در علم رباتیک، ربات‌های نرم دسته‌بندی جدید و نوینی در این صنعت به شمار می‌آیند و ربات‌های نرم روز به روز تغییرات زیادی می‌کنند. در ادامه به صورت خلاصه به چندین مورد از کارهایی که می‌توان در آینده برای بهبود این سیستم انجام داد اشاره می‌کنیم.

استفاده از سنسور IMU : به جای استفاده از دوربین و سیستم عامل ROS می‌توان از سنسور IMU برای کنترل موقعیت و زاویه مازول استفاده کرد.

استفاده از موتورهایی با قدرت بیشتر: می‌توان در پروژه‌های دیگر که در اجرای آن‌ها محدودیت اندازه مطرح نیست از موتور هایی با توان بالاتر استفاده کرد به این کار هم می‌توان وزن‌های بیشتری را کنترل کرد و هم از فنرهایی با ضخامت بیشتر در ساخت مازول استفاده کرد.

استفاده از کابل فولادی: در صورت استفاده از موتورها و فنرهای قوی‌تر برای جلوگیری از پاره شدن و یا تغییر شکل کابل‌ها می‌توان از کابل‌های فولادی نازک به جای نخ‌های ماهیگیری استفاده شود.

فصل ٦ : مراجع

-
- [0] (N.d.-b). Retrieved August 23, 2021, from Conres.com website: <https://www.conres.com/it-products-solutions/news-events/top-10-tech-trends-autonomous-agents-things/>
- [1] Robotpark.com. Available: <http://www.robotpark.com/All-Types-Of-Robots>. (accessed 17, Aug, 2021)
- [2] C. Lee et al., “Soft robot review,” Int. J. Control Autom. Syst., vol. 15, no. 1, pp. 3–15, 2017.
- “Snake robot design - the robotics institute Carnegie Mellon university. Available: <https://www.ri.cmu.edu/project/snake-robot-design/>. (accessed 18, Aug, 2021)
- [3] C. Wright et al., “Design and architecture of the unified modular snake robot,” in 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012.
- [4] Katifori, E., Alben, S., Cerda, E., Nelson, D. R., & Dumais, J. (2010). Foldable structures and the natural design of pollen grains. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107(17), 7635–7639.
- [5] Trivedi, D., Rahn, C. D., Kier, W. M., & Walker, I. D. (2008). Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research. Applied Bionics and Biomechanics, 5(3), 99–117.
- [6] G. Bao et al., “Soft Robotics: Academic insights and perspectives through bibliometric analysis,” Soft Robot., vol. 5, no. 3, pp. 229–241, 2018.
- [7] Home. (n.d.). Retrieved August 23, 2021, from Epfl.ch website: <https://www.epfl.ch/en/>
- “BionicSoftArm,” BionicSoftArm | Festo Corporate. [Online]. Available: <https://www.festo.com/group/en/cms/13527.htm>. (accessed 13, Aug, 2021)
- Ackerman, E. (2018, March 28). Festo’s new bionic robots include rolling spider, flying fox. Retrieved August 23, 2021, from IEEE Spectrum website: <https://spectrum.ieee.org/festo-bionic-learning-network-rolling-spider-flying-fox> (accessed 20, Aug, 2021)

- [8] Soft Reconfigurable Surface (SRS)*****: M. A. Robertson, M. Murakami, W. Felt, and J. Paik, “A compact modular soft surface with reconfigurable shape and stiffness,” IEEE ASME Trans. Mechatron., vol. 24, no. 1, pp. 16–24, 2019.
- [9] “Soft Reconfigurable Surface (SRS),” Epfl.ch. [Online]. Available: <https://www.epfl.ch/labs/rrl/soft-reconfigurable-surface-srs/>. (accessed 17, Aug, 2021)
- [10] M. A. Robertson and J. Paik, “New soft robots really suck: Vacuum-powered systems empower diverse capabilities,” Sci. Robot., vol. 2, no. 9, p. ean6357, 2017.
- [11] “Vacuum-Powered Soft Robots,” Epfl.ch. [Online]. Available: <https://www.epfl.ch/labs/rrl/research-2/research-soft/page-148999-en-html/>.
- [12] (accessed 19, Aug, 2021)
- [13] M. A. Robertson, H. Sadeghi, J. M. Florez, and J. Paik, “Soft pneumatic actuator fascicles for high force and reliability,” Soft Robot., vol. 4, no. 1, pp. 23–32, 2017.
- [14] “Soft actuator packs for human augmentation,” Epfl.ch. [Online]. Available: <https://www.epfl.ch/labs/rrl/research-2/research-soft/page-148992-en-html/>.
- [15] (accessed 14, Aug, 2021)
- [16] J. Germann, B. Schubert, and D. Floreano, “Stretchable electroadhesion for soft robots,” in 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014.
- [17] J. Guo, C. Xiang, and J. Rossiter, “A soft and shape-adaptive electroadhesive composite gripper with proprioceptive and exteroceptive capabilities,” Mater. Des., vol. 156, pp. 586–587, 2018.
- [18] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, and H. Shea, “Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators,” Adv. Mater., vol. 28, no. 2, pp. 231–238, 2016.
- [19] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, and H. Shea, “Soft robotic grippers,” Adv. Mater., p. e1707035, 2018
- [20] P. Liljebäck, K. Y. Pettersen, Ø. Stavdahl, and J. T. Gravdahl, Snake Robots. London: Springer London, 2013.
- [21] P. Liljebäck, K. Y. Pettersen, Ø. Stavdahl, and J. T. Gravdahl, Snake robots: Modelling, mechatronics, and control, 2013th ed. Guildford, England: Springer, 2012.
 “Anna Konda - The fire fighting snake robot - ROBOTNOR,” Robotnor.no, 25-Nov-2012. [Online]. Available: <https://robotnor.no/research/anna-konda-the-fire-fighting-snake-robot/>.(accessed 15, Aug, 2021)
- [22] S. Hirose, Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators. Oxford: Oxford University Press, 1993
- [23] S. Ma, “Analysis of snake movement forms for realization of snake-like robots,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, vol. 4, Detroit, MI USA, May 1999, pp. 3007–3013.

- [24] S. Ma, "Analysis of snake movement forms for realization of snake-like robots," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, vol. 4, Detroit, MI USA, May 1999, pp. 3007–3013. –
- [25] Quigley, Morgan, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, and Andrew Y. Ng. "ROS: an open-source Robot Operating System." In ICRA workshop on open-source software, vol. 3, no. 3.2, p. 5. 2009
- [26] Metta, Giorgio, Paul Fitzpatrick, and Lorenzo Natale. "YARP: yet another robot platform." International Journal of Advanced Robotic Systems 3, no. 1 (2006): 8.
 Kay, Jackie. "Introduction to Real-Time Systems." Introduction to real-time systems. https://design.ros2.org/articles/realtime_background.html. (accessed 13, Aug, 2021)
- [27] "Wiki." ros.org. Accessed August 18, 2021. <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>.
 (accessed 22, Aug, 2021)
- [28] Wyrobek, Keenan. "The Origin Story of Ros, the Linux of Robotics." IEEE Spectrum. IEEE Spectrum, July 8, 2021. https://spectrum.ieee.org/the_origin-story-of-ros-the-linux-of-robotics
- [29] A brief history of automatic control. (1996). IEEE Control Systems, 16(3), 17–25.
- [30] Liptak, B. G. (Ed.). (2005). Instrument engineers' handbook, volume two: Process control and optimization (4th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [31] J. G. Ziegler and N. B. Nichols: Optimum Settings for Automatic Controllers, Trans. ASME, Vol. 64, 1942, s. 759-768
 (N.d.). Retrieved August 23, 2021, from Controleng.com website: <https://www.controleng.com/articles/ziegler-nichols-methods-facilitate-loop-tuning-3/> (accessed 23, Aug, 2021)
- [32] Gao, B., Zhao, J., Xi, N., & Xu, J. (2011). Combined kinematic and static analysis of a cable-driven manipulator with a spring spine. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE.

Abstract:

One of the significant advantages of using robots is situations that could be hazardous and dangerous for humans. Pipelines, boilers, and industrial plants are a few of them. Soft robots with more degree of freedom and range of movements by design are suitable candidates for these types of inspections. Silkworm robot is a soft modular robot that was developed for these applications.

In this research, we design and prototype a nature-inspired active soft wrist to improve the movement ability of the silkworm robot. We develop a platform that has two helical springs in the middle and four strings surrounded it. The silkworm robot could have 180 degrees of freedom along each X and Y axis with this platform. Also, it could compress and extend along Z-axis.

We also develop a PID controller and a testbed for validation of the soft wrist. We use system identification and image processing methods to verify the control ability of the wrist. This system could be used for future developments.



University of Tehran



College of
Engineering
Faculty of Industrial
and Systems Engineering

Soft waist in a silkworm robot

A thesis submitted to the Graduate Studies Office

In partial fulfillment of the requirements for

The degree of Master of Science in

Mechatronics Engineering

By:

Farzam Masoumi

Supervisor:

Dr. Manouchehr Moradi sabsevar

September 2022