

طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی انگشت ربات با قابلیت حس لامسه

چکیده: با پیشرفت صنعت رباتیک در دهه های اخیر، یکی از این توانایی ها که تا کنون کمتر به آن توجه شده ولی از ضروری ترین توانایی های بشری است، حس لامسه است. توانایی ای که به هیچ وجه با دیگر قابلیت ها از جمله پردازش تصویر، جبران نمی شود. در این مقاله به طراحی و ساخت یک نمونه حسگر لامسه با ظاهری شبیه به بند انگشت انسان ارائه شده است. این انگشت از یک بدنه صلب داخلی (استخوان) و یک پوشش منعطف کشسان (پوست) ساخته شده است. فضای مابین بدنه و پوشش با یک سیال پر شده و با یک مجرا به یک فشارسنج راه می یابد. زمانی که پوست به جسم خارجی تماس پیدا کند، متناسب با شدت تماس، تغییر شکل داده و سیال محبوس تحت فشار قرار می گیرد. افزایش فشار، با بالا رفتن ولتاژ خروجی فشارسنج قرائت می شود. سطح خارجی پوست دارای طرح های برجسته است که به هنگام لغزش پوست بر روی جسم خارجی تولید امواج ارتعاشی در سیال می کند. حسگر ساخته شده توانست تست های تکرار پذیری و حساسیت را به خوبی بگذراند.

واژه های راهنما: حسگر لامسه، فشار سیال، ربات، انگشت ربات، لغزش.

میثم فرج الهی*

استادیار،
دانشکده فناوری های نوین،
گروه سیستم های انرژی،
دانشگاه علم و صنعت ایران

حامد پوریای ولی

دانشجوی کارشناسی،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تهران

عقیل یوسفی کما

استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تهران

مقاله علمی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰

Meisam Farajollahi*
Assistant Professor,
School of Advanced
Technologies,
Department of Energy
Systems, Iran
University of Science
and Technology, Tehran

Hamed Pouriayevali
BSc Student, School of
Mechanical
Engineering, University
of Tehran

Aghil Yousefikoma
Professor, School of
Mechanical
Engineering, University
of Tehran

Robot fingertip with tactile sensation: design, fabrication and testing

Abstract: Recent progress in robotic industry has increased efforts on robot ability enhancement to use them in factories and services instead of labors and human workers. One of the important ability which plays an important role to reach this aim, is tactile sensation which is not compensated by other ability including image processing. In this paper, a robot fingertip with tactile sensation is designed and fabricated which has a configuration very close to human fingertip for gripping or other robotic applications. This fingertip consists of rigid body and elastic flexible cover which the area between these two parts is filled with a fluid which is connected to the pressure sensor. When the elastic cover which plays a skin role, touch the external body, regarding to the speed and amplitude of touch, the reaction of the cover is transferred to the fluid and also pressure sensor. Pressure sensor sense the pressure change and convert this to the output voltage which is detectable by designed electrical circuit. Outer layer of the elastic cover is corrugated to increase sensitivity of the sensor. The fabricated tactile sensor was tested to verify its performance in different experiments which was in good agreement with our expectation.

Keywords: Tactile sensor, Fluid pressure, Robot, Robot fingertip, sliding.

۱- مقدمه

به فرد است که امکان کار با ابزار را برای وی فراهم میکند. بر اساس آزمایش های انجام شده، حیوانات از این لحاظ ضعیف تر هستند و از طرفی مطالعه و بررسی رفتار حیوانات بسیار دشوار است. امروزه رباتها با توانایی ادراک و چابکی الهام یافته از طبیعت ساخته میشوند و لذا می توان با فراهم کردن بستر آزمایشگاهی مناسب رفتار لامسه را شبیه سازی و مطالعه کرد. رویای دیرینه بشر برای ایجاد توانایی ربات ها در استفاده از ابزار دوشادوش انسانها تنها با پیاده سازی چنین تئوری هایی امکان پذیر است [۵].

تاکنون تعداد معدودی حسگر لمسی برای گیره ها و انگشت های رباتیکی تجاری سازی شده است. تجهیزات صنعتی به گونه ای تکامل یافته اند که بدون حس لامسه و تنها با تکیه بر پردازش تصویری به عنوان داده ی ورودی قادر به انجام وظیفه خود هستند. این محدودیت ربات ها زمانی که با اجسامی با ماهیت، ابعاد و جهت گیری نامشخص سروکار دارند به خوبی قابل تشخیص است.

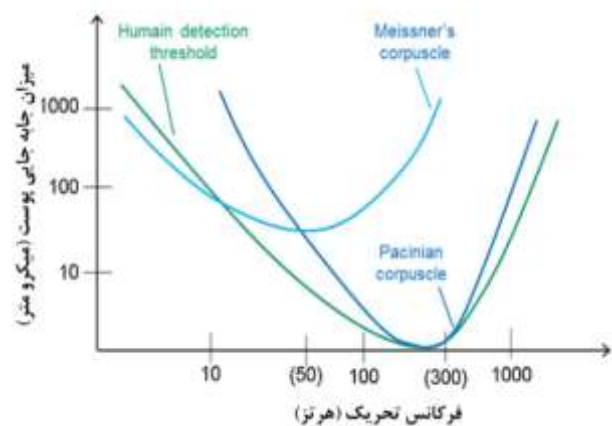
اکثر سیستم های رباتیکی تنها میتوانند با اجسام صلب با موقعیت معین کار کنند در حالی که از انجام کوچکترین کارهای روزمره مانند بستن دکمه پیراهن، نگه داشتن یک فنجان قهوه و یا نوشتن با قلم عاجزند. مشابه چنین ناتوانی در افرادی که پوست سرانگشتان آنها بر اثر سرما دچار بیحسی شده است نیز مشهود است. با معرفی حسگرهای لامسه پیشرفته و الگوریتم های استفاده از داده های آن، انتظار می رود رباتها نیز به سطح چابکی و مهارت انسان برسند؛ مهارتی که انسان به پاس حساسیت لامسه ای که گیرنده های موجود در پوست صاف کف دست ایجاد میکنند از آن بهره می برد.

لامسه بر خلاف بینایی و شنوایی یک حس تعاملی است. ما میتوانیم بدون تعامل فیزیکی مناظر و صداها محیط اطراف خود را مشاهده کنیم و بشنویم، در حالی که مشخصات وابسته به حس لامسه یک جسم تنها با تماس فیزیکی قابل شناسایی است. روان شناسان تجربی موفق شده اند شش نوع اصلی از حرکات کاوش گرانه را که انسان برای شناسایی اجسام از راه لمس استفاده میکند معرفی کنند [۶].

همانطور که در بالا اشاره شد تا کنون چندین نوع حسگر برای تشخیص تماس و لمس ساخته شده است که به ربات توانایی لمس بشری دهد. در ادامه به توضیح برخی پرداخته میشود.

حس لامسه شامل حواسی چون درد، فشار، ارتعاش و دماست. این حواس به وسیله دو نوع گیرنده واقع در زیر سطح پوست، تشخیص داده میشوند: انتهاهای عصبی آزاد (بدون پوشش) و انتهاهای عصبی پوشیده به صورت اجسام حسی. تعداد گیرنده ها در بدن فرق میکند: برای مثال، نوک انگشتان دست به شدت حساس هستند و گیرنده های زیادی دارند در حالی که ناحیه میانی پشت گیرنده های کمتری دارد. گیرنده های عصبی آزاد در نزدیک سطح پوست، به لمس، درد، فشار و دما پاسخ میدهند. ارتعاشات نقش کلیدی در حس لامسه انسان برای تشخیص لغزش اجسام، اطلاعات لازم برای استفاده از ابزار، کنترل گرفتن اجسام و درک جنس و بافت سطوح ایفا میکند. این قابلیت به کمک غده پایچینی^۱ که یک گیرنده بسیار کوچک در بافت زیرپوستی است ممکن شده است [۱] که توانایی شناسایی ارتعاشات تا فرکانس ۱۰۰۰ هرتز را دارد [۲]. این گیرنده ها در ناحیه بیشینه حساسیت خود (حدود ۲۵۰ هرتز) به ارتعاشات با دامنه کمتر از یک میکرومتر نیز حساسند [۳]. سیستم های الهام یافته از طبیعت که به دنبال توانایی ادراک و تشخیص انسانی هستند از چنین قابلیت هایی بهره میبرند.

در شکل (۱) نمودار میزان جابه جایی پوست انسان نسبت به فرکانس تحریک برای آستانه حساسیت انسان و دو حسگر بیولوژیکی پوست نشان داده شده است.



شکل ۱ میزان جابه جایی پوست انسان نسبت به فرکانس تحریک برای آستانه حساسیت انسان (خط سبز) و دو حسگر بیولوژیکی پوست (خطوط آبی) [۴]

لامسه را میتوان توصیف و تشخیص اجسام به کمک جستجو ارادی و بازخورد حسی دانست. انسان دارای توان لامسه منحصر

¹ Pacinian corpuscle

جدول ۱ کنترل حرکات کاوشگرانه و تخمین مشخصات [۷]

اطلاعات حسی	منعبر کنترل	حرکت کاوشگرانه
گرمايي	موقعیت سرانگشت	تماس ایستا
تغییر شکل محلی، نیرو	موقعیت و نیروی سرانگشت	فشار
ارتعاشات	سرعت و نیروی سرانگشت	حرکت جانبی
تماس	موقعیت سرانگشت	دنبال کردن خطوط برجسته
موقعیت مفصل دست	گشتاور مفصل دست	دربز گرفتن
گشتاور مفصل بازو	موقعیت مفصل بازو	نگه داشتن بدون تکیه گاه

محبوس بالا می‌رود. این افزایش فشار توسط فشارسنج به صورت سیگنال ولتاژ قرائت می‌شود. موقعیت پوسته با یک ناخن پلاستیکی صلب تثبیت می‌شود.

این حسگر در ظاهر شبیه دو بند انتهایی انگشت است، به گونه ای که بند انتهایی با یک پوسته منعطف پوشیده شده است. بدنه صلب داخلی آن کوچکتر بوده و فضای مابین بدنه و پوسته با مایعی رسانا با گرانش کم پر شده است. در صورتی که گرانش مایع بیش از اندازه باشد، امواج حاصل از ارتعاش پوسته قبل از رسیدن به فشارسنج از بین می‌روند. بند دوم انگشت در بردارنده قطعات حسگر از جمله فشارسنج است.

برای کاهش هزینه تولید از روش تراشکاری به جای قالب‌ریزی برای ساخت بدنه انگشت استفاده شد. یک قطعه استوانه ای شکل از جنس تفلون با دستگاه تراش به شکل یک انگشت به قطر ۳ سانتیمتر در آمد. سپس با فرز دستی، حوضچه ای برای سیال در بخش زیرین انگشت تعبیه شد. از یک دستکش لاتکس برای پوسته منعطف انگشت استفاده شد. در انتهای بدنه دو سوراخ تعبیه شده است؛ یکی برای لوله حسگر فشار و دیگری برای پر و خالی کردن سیال. انتهای سوراخ پر و خالی کردن به صورت مخروطی درآمده است و سمت دیگر آن با گام M8 رزوه شده است. از جنس تفلون یک پیچ مغزی M8 تراشیده و رزوه شده است که در محور آن سوراخی سرتاسری به قطر یک میلی‌متر وجود دارد. مابین این مغزی و انتهای سوراخ تخلیه یک قطعه با هندسه مخروط ناقص از جنس سیلیکون گذاشته می‌شود که به هنگام بستن پیچ مغزی از سمت دیواره های مخروطی تحت فشار قرار می‌گیرد. زمانی که پیچ مغزی بسته شده، حوضچه به کمک یک سرنگ از سوراخ مرکزی پیچ مغزی پر از آب می‌شود تا به فشار لازم برسد. پس از خارج کردن سوزن سرنگ، سوراخ ایجاد شده در قطعه سیلیکونی بر اثر فشار جانبی دیواره مخروطی بسته شده و آب خارج نمی‌شود.

برای اندازه گیری فشار سیال محبوس از فشارسنج MPX5050DP استفاده شد. این فشارسنج از نوع دیافراگمی بوده و در آن از تکنولوژی پیزومقاومتی و پل وتستون استفاده شده است. بازه اندازه گیری فشار تا ۵۰ کیلوپاسکال نسبت به فشار محیط است و خروجی آن ۵ ولت می‌باشد که تفکیک پذیری خوبی را ایجاد می‌کند. برای آبیندی بهتر اتصال حسگر و بدنه، دور لوله حسگر چندین دور نوار تفلون پیچیده می‌شود تا با کمی فشار در سوراخ موجود در انتهای بدنه جای گیرد. مهمترین بخش آبیندی مربوط به اتصال پوسته و بدنه است. پوسته که همان

الف) استفاده از حسگر نیرو-گشتاور در بدنه انگشت. در این روش از یک لودسل^۱ چندمحوره قبل از بند نهایی انگشت قرار می‌گیرد. این حسگر جزئیات توزیع فشار تماسی را تشخیص نداده و فقط قادر به اندازه گیری بردار نیرو و گشتاور خالص به هنگام تماس نوک انگشت با جسم خارجی می‌باشد.

ب) استفاده از سطوح آرایه لمسی^۲. این روش مرسوم ترین روش دریافت داده های لمسی است و به طور گسترده در زندگی روزمره استفاده می‌شود مانند صفحه لمسی تلفن های همراه. در این روش مجموعه ای از حسگرهای کوچک با چیدمان خاصی در کنار هم، تشکیل یک سطح با قابلیت تشخیص لمس را می‌دهند. با توجه به نوع المان های حسگر، سطح قادر به اندازه گیری فشار و یا جابه جایی حاصل در سطح انگشت بر اثر تماس با جسم خارجی خواهد بود.

ج) - استفاده از حسگر لامسه دینامیکی. این نوع حسگرها به تغییر در شرایط تماس حساس بوده و معمولاً ارتعاشات و یا تغییرات تنش در پوسته منعطف سطح انگشت را اندازه گیری میکنند [۸].

در این مقاله برای طراحی و ساخت سنسور مورد نظر، از روش اندازه گیری فشار توسط یک فشار سنج گیبج استفاده شده است.

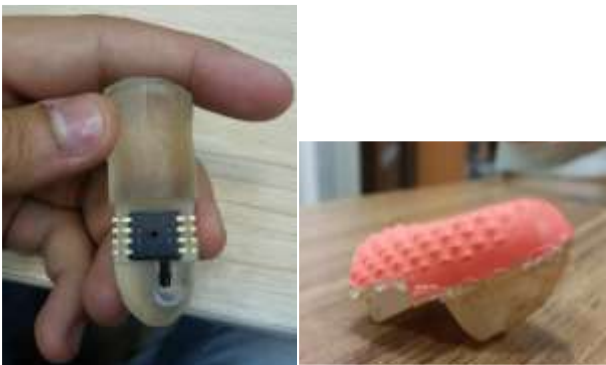
۲- طراحی و ساخت انگشت لمس کننده ربات

طرح پیشنهادی حسگر شامل یک بدنه صلب از جنس پلاستیک و یک پوسته لاستیکی انعطاف پذیر است. فضای بین بدنه و پوسته توسط مایعی پر شده است و این فضا با لوله ای به یک حسگر فشار متصل شده است. زمانی که انگشت به سطحی تماس پیدا کند، پوسته انعطاف پذیر تغییر شکل داده و فشار سیال

² Tactile array

¹ Load cell

لوله حسگر به حوضچه است. مکانیزم پر و خالی کردن حوضچه نیز تغییرات بنیادی داشت و سیستم پیچ و مخروط با سیستمی جایگزین شد که فضای بسیار کمتری اشغال کرده و پیاده سازی آن بسیار ساده تر است. در روش جدید یک لوله منعطف (لوله سرم) با چسب در سوراخ منتهی به حوضچه تثبیت شده و سر دیگر آن به سرنگ متصل میشود. پس از تنظیم مقدار سیال لوله از نزدیکی انگشت بر روی خودش خم شده و به کمک یک گیره بسته میشود. این روش آبنندی موقت است و برای نمونه نهایی انگشت، لوله به کمک یک روش دائمی مانند پرس حرارتی مسدود میشود. در طراحی جدید، بدنه انگشت پیچیده تر شده و در نتیجه باید روش ساخت دقیقتری استفاده شود. برای سهولت استفاده انگشت، محلی برای اتصال دسته در بدنه تعبیه شده است.



شکل ۴ نمونه سوم ساخته شده انگشت

برای ساخت بدنه انگشت این بار از قالب ریزی استفاده شده است. رزین اپوکسی و سخت کننده با نسبت یک به یک مخلوط شده و داخل انگشت دستکش جراحی (لاتکس) ریخته میشود. برای جلوگیری از ایجاد چروک در دستکش، فشار فضای اطراف انگشت را کاهش داده تا دستکش تا حدی منبسط شود. برای ایجاد این فشار منفی، انگشت و محتویات بر درب یک بطری که مقداری فشرده شده کشیده شده و سپس بطری رها میشود. بدین ترتیب فشار داخل بطری از محیط بیرون کمتر شده و دستکش را باز میکند. رزین پس از خشک شدن به سادگی از دستکش خارج میشود. حفره های هوای بسیار ریز در قطعه وجود دارند که مشکلی در روند ساخت ایجاد نمیکند. مزیت روش قالب ریزی یک اندازه بودن تمام انگشتهای ساخته شده است که امکان استفاده از مدل کامپیوتری برای ساخت به کمک دستگاه فرز CNC را فراهم می کند.

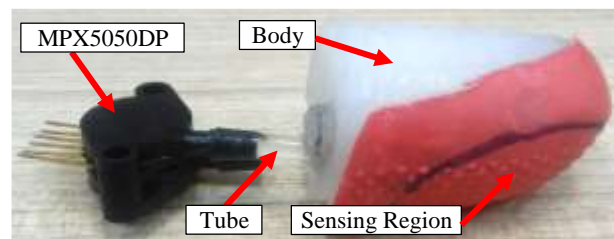
نمونه نهایی انگشت بر روی فیکسچر نصب شد تا بتوان تست های لازم عملکردی را انجام داد. شکل نهایی انگشت ربات ساخته شده و متصل شده به فیکسچر در زیر آمده است.

انگشت دستکش لاتکس است بر روی بدنه کشیده شده و با یک رشته مفتول یا چندین کش لاستیکی به دور بدنه محکم میشود.



شکل ۲ اولین نمونه ساخته شده انگشت با پوشش کامل

بزرگترین مشکل این طرح ناکارآمدی سیستم آبنندی بین بدنه و پوسته آن بود که با یک شیار روی بدنه و یک کش یا مفتول منعطف صورت میگرفت. ضعف این طراحی به هنگام استفاده از روغن به عنوان سیال کاری به خوبی به چشم می آمد. برای رفع مشکل آبنندی، در طرح بعدی، تنها بخشی از سطح زیرین انگشت توانایی لمس را داشت. این بار فقط ناحیه حوضچه با پوسته پوشیده شده و لبه های آن با چسب قطره های ثابت میشود. در این طرح همچنان از حسگر MPX5050DP استفاده شده و برای پر کردن حوضچه از سرنگ و سیستم آب بندی مخروطی استفاده شده است. با این شیوه مشکل نشتی سیال درون انگشت ربات حل شد.

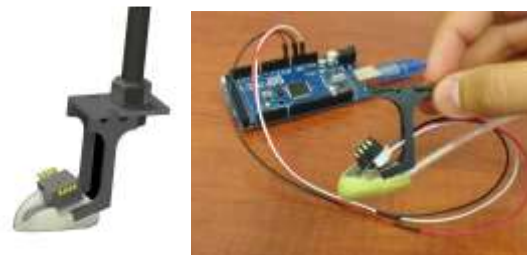


شکل ۳ نمونه دوم ساخته شده انگشت با پوشش جزئی

در گام بعد تصمیم گرفته شد ابعاد انگشت تا جای ممکن کوچک شده و در حدود ابعاد انگشت انسان قرار گیرد. برای این منظور همه اجزای سیستم باید از لحاظ ابعاد و چیدمان تغییر کند. حسگر مورد استفاده از MPX5050DP به MPXV5050GP تغییر پیدا کرد. حسگر جدید از لحاظ عملکردی کاملاً مشابه حسگر پیشین بوده و ابعاد آن بسیار کوچکتر است.

در این طراحی محل قرارگیری حسگر از پشت انگشت به روی آن منتقل شد. نتیجه این انتقال، عوض شدن محل اتصال

انگشت به اندازه کافی منبسط نشده و بر اثر اندکی فشردگی پوسته به بدنه میرسد. در صورت زیاد بودن فشار، پوسته بیش از اندازه منبسط شده و توانایی کشسانی خود را پس از مدتی از دست میدهد و سیگنال (فشار) افت میکند. از طرفی هر چه فشار اولیه بیشتر باشد، حسگر زودتر اشباع میشود و به حداکثر خود (۵ ولت) میرسد. لذا تنظیم فشار اولیه بسیار مهم است و باید با دقت صورت گیرد. در آزمایش اول حسگر با هوا پر شده و در سه فشار مختلف بررسی میشود. در این آزمایش حسگر با فیکسچر طراحی شده به سر دستگاه CNC متصل شده و محکم میشود. حسگر به سرنگ متصل است و فشار از طریق صفحه رایانه قابل رویت است. فشار را در مقدار معین تنظیم کرده و راه آن به طریق توضیح داده شده مسدود میشود. سپس فک CNC تا جایی پایین میآید که به صفحه ترازو دیجیتالی تماس پیدا کند. با استفاده از ترازوی دیجیتالی نیروی تماس با واحد گرم نیرو اندازه گیری میشود. در لحظه تماس، سیگنال فشار و مقدار نیرو اندکی افزایش می یابد. موقعیت عمودی (Z) دستگاه درست قبل از تماس با ترازو صفر شده و با گام ثابت، حسگر به وسط صفحه ترازو فشرده میشود. نتایج این آزمایش در سه فشار مختلف در ادامه قابل مشاهده است. یکی از پارامترهای مهم در صحنه گذاری عملکرد حسگر، موضوع تکرار پذیری است. در ادامه به بررسی تکرارپذیری عملکرد حسگر پرداخته شده است. در این آزمایش حسگر از حالت مماس با سطح ترازو به اندازه یک گام با طول مشخص در راستای عمودی به آن فشرده می شود و و سپس مجدداً به حالت بدون بار مماس، باز میگردد. این عمل چندین بار تکرار شده و تکرارپذیری نتایج بررسی شده است. همچنین این تکرار پذیری برای گام ها مختلف جابه جایی عمودی که می تواند فاشر بیشتری بر روی انگشت ربات ایجاد نماید تست شده است و در همه آزمایشات تکرار پذیری بسیار خوبی توسط حسگر نشان داده شده است. برای نمونه نتایج یکی از این آزمایشات در زیر آورده شده است. هر کدام از آزمایش ها چندین مرتبه (حداقل ۳ مرتبه) تکرار شده است و نتایج نشان داده شده، میانگین تکرار آزمایش ها است. خطای نشان داده شده در نمودارهای زیر، حاصل نتایج به دست آمده از تکرار آزمایش ها است که حداکثر ۷ درصد خطا داشته است. همانطور که در نمودارهای زیر نیز مشخص است، با افزایش مقدار نیرو، مقدار خطای تکرار آزمایش ها نیز بیشتر شده است. یعنی نیروهای مختلف وارده شده در محدوده حدود ۷ درصدی، مقدار ولتاژ خروجی مشابهی داشته اند.



شکل ۵ نمونه نهایی انگشت متصل به فیکسچر



شکل ۶ نمونه نهایی انگشت در تست سفتی

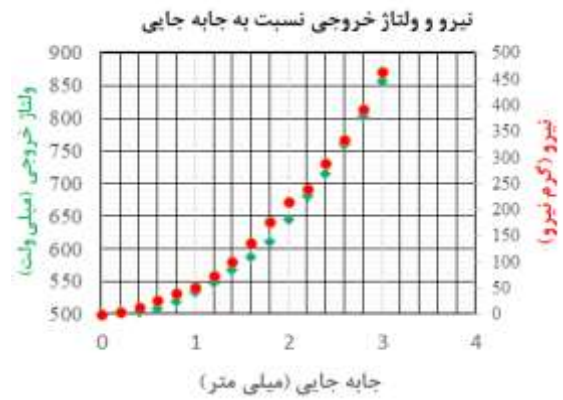
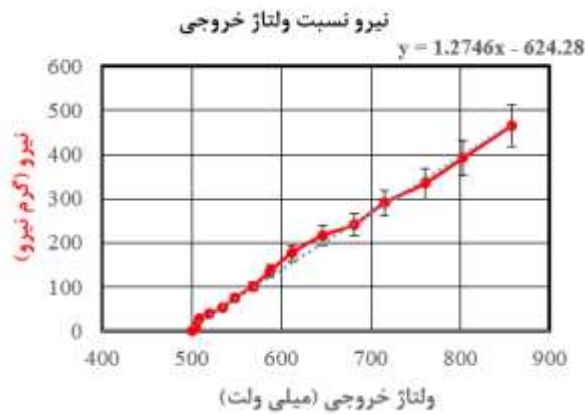
۳- تست و تحلیل نتایج

اولین مراحل داده برداری از حسگر فشار MPX5050DP با آردوینو Mega 2560 انجام شد. پین های حسگر به پین های مرتبط آردوینو متصل شده و از کد آماده قرائت پین آنالوگ در Arduino IDE استفاده شد. به دلیل استفاده از اتصالات نامناسب، نویزهای زیادی در داده ها مشاهده شد. برای تقویت مشخصات فرکانس بالای سیگنال از یک فیلتر بالاگذر مرتبه اول آنالوگ (مقاومت ۱۰۰ کیلو اهمی و خازن ۱۰۰ نانوفاراد) با فرکانس قطع ۱۰ هرتز استفاده شد. این سیگنال فیلتر شده پس از تقویت شدن (به صورت دیجیتالی) با سیگنال خام جمع میشود. در ادامه به منظور کاهش حجم سیستم از فیلتر آنالوگ خودداری شد. برای ایجاد محیط کاربری بهتر از نرم افزار LabVIEW برای ادامه کار استفاده شد. با نصب افزونه Arduino interface بلوک های ارتباط با آردوینو به سادگی در دسترس قرار گرفت. برای اجرای دستورات برد آردوینو میبایست ابتدا کد LIFA توسط Arduino IDE بر روی آردوینو بارگذاری شود. مراحل بعدی در محیط LabVIEW برنامه ریزی شد.

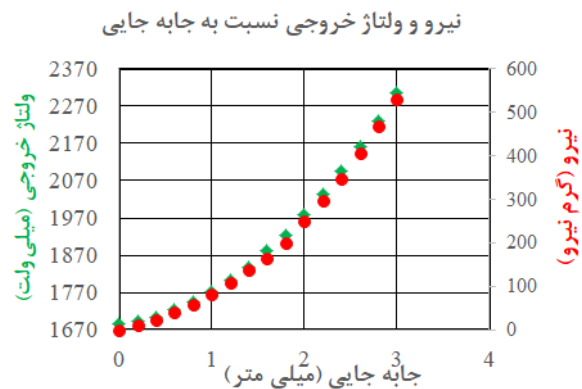
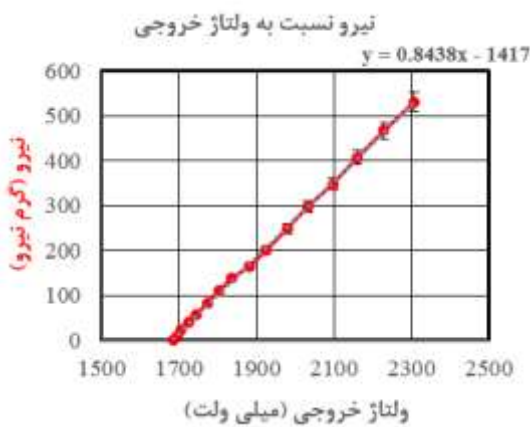
۳-۱- تست فشار اولیه

در این آزمایش به بررسی تاثیر فشار اولیه بر عملکرد سیستم و خطی بودن آن پرداخته میشود. در ابتدا به کمک سرنگ، فشار اولیه تنظیم میشود. پیش بینی می شود اگر این فشار کم باشد

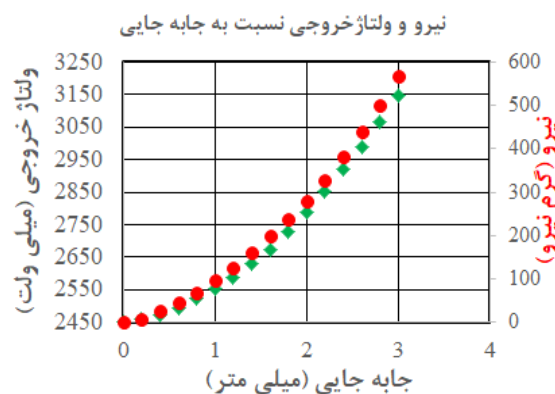
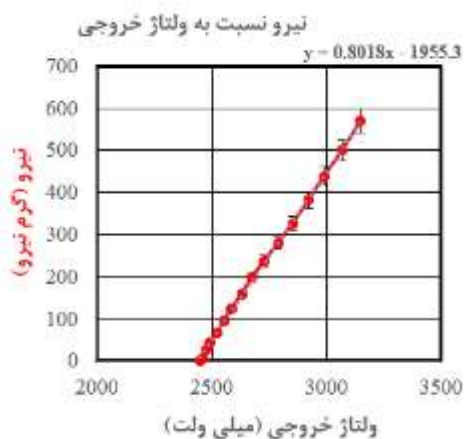
¹ Gram Force



شکل ۷ روابط حسگر انگشت نسبت به تغییرات جابجایی در فشار اولیه گیج ۵۵ / ۵ کیلوپاسکال (در نمودار رفتار فشار و نیرو با جابه جایی، لوزی سبز نماد سیگنال خروجی ولتاژ و دایره قرمز نماد نیرو است)



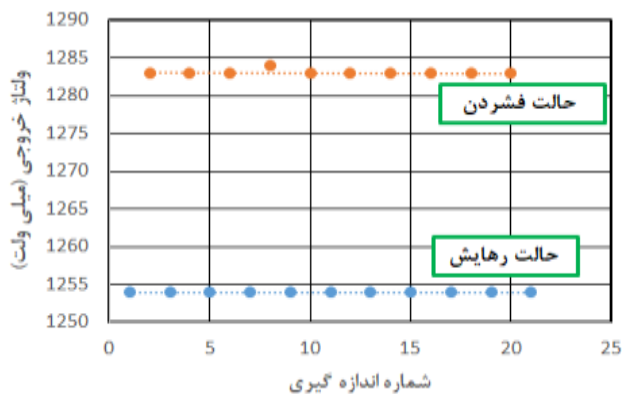
شکل ۸ روابط حسگر انگشت نسبت به تغییرات جابجایی در فشار اولیه گیج ۷۲ / ۱۸ کیلوپاسکال (در نمودار رفتار فشار و نیرو با جابه جایی، لوزی سبز نماد سیگنال خروجی ولتاژ و دایره قرمز نماد نیرو است)



شکل ۹ روابط حسگر انگشت نسبت به تغییرات جابجایی در فشار اولیه گیج ۲۲ / ۲۷ کیلوپاسکال (در نمودار رفتار فشار و نیرو با جابه جایی، لوزی سبز نماد سیگنال خروجی ولتاژ و دایره قرمز نماد نیرو است)

در این مقاله رخ نداده و با تقریب خوبی، رفتار حسگر در هر دو حالت یکسان بوده است. در نتایج به دست آمده از سنسور ساخته شده در این مقاله، همانطور که در شکل های ۷ تا ۹ آمده است، یک رابطه خطی با معادلات مشخص به دست آمده که هنگامی که فشار اولیه بالا بوده است، شیب این خط نیز تغییر نکرده است.

رفتار خطی بین ولتاژ و نیروی اعمالی در کار انجام شده در مرجع [۹] نیز تایید شده است. این رفتار در شکل ۱۰ نشان داده شده است. البته در مرجع مربوطه، رفتار در حالت اعمال نیرو و برداشتن نیرو از روی حسگر، کمی با هم تفاوت داشته و اصطلاحاً حسگر دارای هیستریزیس است. این رفتار در حسگر پیشنهادی

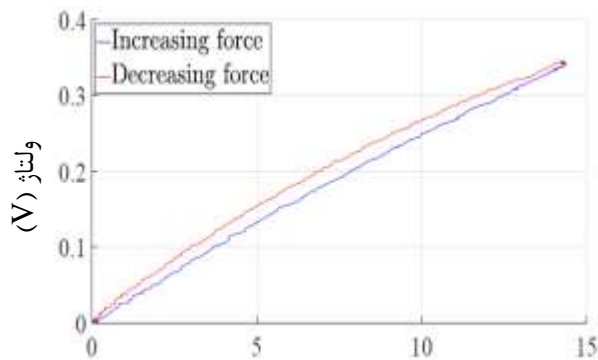


شکل ۱۱ تکرارپذیری عملکرد حسگر در فشار اولیه گیج ۹۳ / ۱۳ کیلوپاسکال و گام نیم میلیمتر

۳-۳ تست تشخیصی حرکت جانبی

در آخرین آزمایش، به بررسی توانایی تشخیصی حرکت جانبی انگشت پرداخته شده است. از اصلی ترین اهداف ساخت این انگشت، تشخیص سُر خوردن اجسام از دست ربات است. پس باید داده های خروجی انگشت بتواند زمان دقیق شروع سُر خوردن را به طور مشخص نشان دهد. برای بررسی این عملکرد، بستر آزمایشی متفاوتی تعبیه شد. این بار از یک سوهان فلز به عنوان سطح تماس استفاده شد و انگشت به کمک میز CNC ابتدا اندکی به سطح سوهان فشرده شده و در ادامه با سرعت یکنواخت بر روی سطح آن کشیده میشود.

در لحظه شروع حرکت جانبی، مشاهده میشود که سیگنال فشار اندکی افت داشته و مولفه های فرکانس بالا ظاهر میشود. بنابراین تصمیم بر این شد که با تشخیص لحظه ظهور امواج فرکانس بالا در منحنی FFT سیگنال، لحظه شروع حرکت شناسایی شود. در نرم افزار LabVIEW برنامه ای نوشته شد که به طور همزمان از سیگنال دریافتی FFT بگیرد. داده های ورودی از آردوینو به صورت تکی و جداگانه است لذا ابتدا یک آرایه ۱۰۰۰ تایی از داده های ولتاژ ورودی ایجاد کرده و از آن FFT گرفته میشود. با توجه به این که بخش ثابت سیگنال اهمیتی در تشخیص لحظه شروع لغزش ندارد، از یک فیلتر بالاگذر نیز استفاده شد. فیلتر از نوع Butterworth مرتبه ۳ با فرکانس برش یک هزارم هرتز است. البته مقیاس فرکانس در این برنامه واقعی نیست چون داده های ورودی بدون مولفه زمان هستند و نرم افزار به طور پیش فرض با فرکانس ۱ هرتز داده ها را ثبت میکند. هدف اصلی مشاهده یک یا چند قله در نمودار FFT است. ارتعاشات ایجاد شده در انگشت ربات در شکل ۱۲ آمده است.



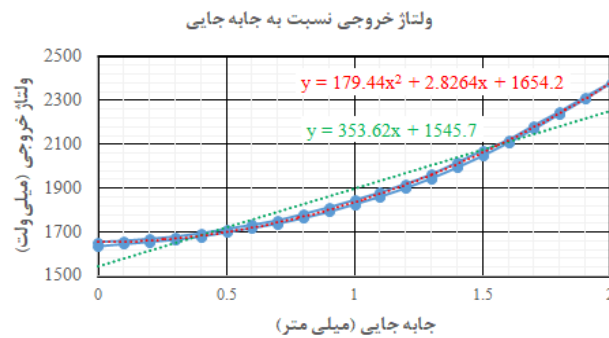
نیروی اعمال شده به حسگر (N)

شکل ۱۰ رابطه بین نیروی اعمال شده و ولتاژ تولید شده در حسگر ارایه شده در مرجع [۹].

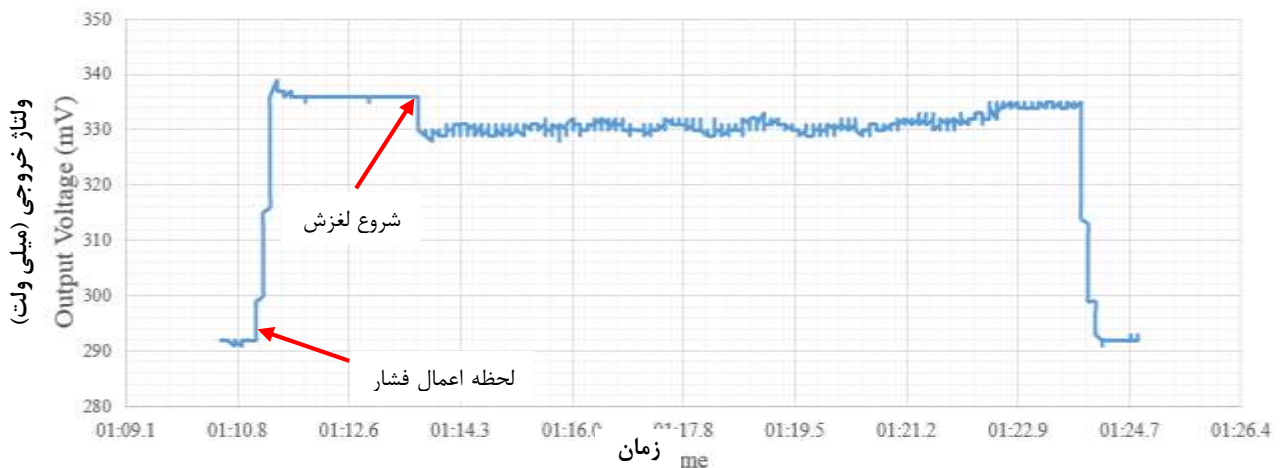
۳-۲ تست اثر نوع سیال محبوس بر ولتاژ خروجی

در این آزمایش به بررسی تاثیر سیال محبوس در حوضچه انگشت پرداخته میشود. برای این منظور، از آب استفاده داخل انگشت از آب پر شده باشد و حباب هوا در مسیر نباشد، مخصوصاً در لوله واصل حوضچه به حسگر فشار چون نوسانات فشار تا حد زیادی به واسطه این تغییر فاز محیط از بین میرود. پس از آماده سازی انگشت، آزمایشی مشابه آزمایش فشار اولیه انجام میشود. فشار اولیه گیج بنابر نتیجه آزمایش فشار، برابر با ۱۸/۷ کیلوپاسکال قرار داده شد و انگشت به کمک میز CNC بر روی صفحه ترازو یک حرکت رفت و برگشتی قائم به طول ۲ میلیمتر طی میکنند.

همانطور که از شکل ۱۲ قابل مشاهده است، در مقایسه با شکل ۸، حساسیت سیگنال فشار به جابه جایی بیشتر شده و رفتار تغییر فشار به جابه جایی بنا بر دلیل مشابه توضیح داده شده در بخش فشار اولیه، غیر خطی است. بنا براین با در نظر گرفتن محدودیت فیزیکی اعمال جابه جایی به پوسته انگشت، جهت افزایش ناحیه فشار قابل دسترس و یا بالا بردن تفکیک پذیری حسگر انگشت برای مصارف با دقت بالاتر بهتر است از آب و یا مایع مشابه استفاده کرد. همانطور که ملاحظه می شود برای نمونه، وقتی که حسگر با هوا پر شده است، بر اعمال جابه جای ۱ میلی متری ولتاژ خروجی حدود ۱۰۰ میلی ولت تغییر می کند در صورتیکه این عدد برای حسگر پر شده به وسیله آب نزدیک به ۳۵۰ میلی ولت است یعنی حساسیت یا نسبت ولتاژ خروجی به جابه جایی ورودی در حسگر پر شده با آب چند برابر بالاتر است. این برای حسگر یک مزیت به حساب می آید هر چند که رفتار غیر خطی بیشتری از خود نشان می دهد.



شکل ۱۲ تغییرات سیگنال فشار نسبت به جابه جایی با آب به عنوان سیال



شکل ۱۳ ارتعاشات ایجاد شده در انگشت بر اثر جابه جایی جانبی روی سطح

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک بند نهایی انگشت ربات مطابق با ابعاد انگشت انسان طراحی و ساخته شد. بدنه صلب با رزین اپوکسی قالب ریزی شده و سپس با استفاده از برنامه نویسی کامپیوتری CAM مدلی برای تراش آن ساخته شد که با فرز CNC در سه مرحله و زمان حدودی ۲۰ دقیقه تکمیل میشود. برای روکش منعطف سطح زیرین انگشت از دستکش های آماده لاتکس استفاده شد. از لحاظ آب بندی عملکرد قابل قبولی داشته و در مدت ۴۸ ساعت تنها ۵ درصد افت سیگنال پایا را شاهد بود. این انگشت قابلیت تشخیص لمس و با تقریب خیلی خوبی تشخیص لغزش را دارد. عملکرد آن نسبت به نیروی تماسی کاملاً خطی است. با بسیاری از سیالات از جمله هوا، آب و روغن کار میکند و حساسیت و تفکیک پذیری آن با تعویض سیال کاری قابل تنظیم است. تکرارپذیری عملکرد انگشت بررسی و تایید شد.

۵- مراجع

- mammalian way: An artificial Pacinian corpuscle", *Bioinspiration Biomimetics*, Vol. 15, pp. 4-11, (2020).
- [2] Barrett-Snyder, K., Lane, S., Lazarus, N., Albert, W. C. K., Hanrahan, B., "Printing a pacinian corpuscle: Modeling and performance", *Micromachines*, Vol. 12, No, 5, pp. 574-579, (2021).
- [3] Quindlen, J. C., Bloom, E. T., Ortega, L. E., Moeller, A. T., Barocas, V. H., "Micropipette aspiration of the Pacinian corpuscle", *Journal of Biomechanics*, Vol 63, pp. 104-109, (2017).
- [4] Ganet, F., Le, M. Q., Capsal, J. F., Gérard, J. F., Pruvost, S., Duchet, J., Livi, S., Lermusiaux, P., Millon, A., Cottinet, P., J., "Haptic feedback using an all-organic electroactive polymer composite", *Sensors Actuators, B: Chemical*, Vol. 220 pp. 1120-30, (2015).
- [5] Abiri, A., Pensa, J., Tao, A., Ma, J., Juo, Y. Y., Askari, S. J., Bisley, J., Rosen, J., Dutson, E. P., Grundfest, W. S., "Multi-Modal Haptic Feedback for Grip Force Reduction in Robotic Surgery", *Scientific Reports*, Vol. 9, pp. 19-21, (2019).

- [1] Lane, S., Barrett-Snyder, K., Lazarus, N., Albert, W. C. K., Hanrahan, B., "Vibration sensing the

- [8] Yang, T., Xie, D., Li, Z., Zhu, H., "Recent advances in wearable tactile sensors : Materials , sensing mechanisms , and device performance", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 115, pp. 1-37, (2017).
- [9] Costanzo, M., De Maria, G., Natale, C., Pirrozi, C., "Design and Calibration of a Force/Tactile sensor for Dexterous Manipulation", *Sensors*, Vol, 19, pp. 1-23, (2019).
- [6] Rahim, M. A., Shin, J., "Hand movement activity-based character input system on a virtual keyboard", *Electronics*, Vol. 9, No. 5, pp. 1-15, (2020).
- [7] Lederman, S. J., Klatzky, R. L., "Hand Movements: A Window into Haptic Object Recognition", *Cognitive Psychology*, Vol. 19, No. 3, pp. 342-368, (1987).