

پیاده سازی سیستم کنترل موقعیت بر روی یک دست ربات ۵ انگشتی به منظور تقلید و گرفتن پایدار

حمیدرضا حیدری*
طیبه قهری صارمی
طاہره قهری صارمی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، hr.heidari@malayeru.ac.ir
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، sima.saremi2018@gmail.com
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، sahel.saremi2017@gmail.com

چکیده

دست انسان الهام بخش عملکردهای مختلفی مانند گرفتن در دست‌های رباتیک است. گرفتن ماهرانه اشیاء یک عملکرد اساسی برای ربات‌ها می‌باشد که نقش مهمی در کاربردهای مختلف ایفا می‌کند. این مقاله یک دست رباتیک ۵ درجه آزادی با مکانیزم میله‌ای به منظور گرفتن اشیاء را ارائه می‌دهد. دست رباتیک با استفاده از فناوری پربنتر سه بعدی ساخته می‌شود. هر انگشت توسط یک موتور DC گیربکس دار فعال می‌شود تا حرکات خمش/کشش را ایجاد کند. از یک دستکش مبتنی بر حسگر فلکس برای فرمان دست ربات استفاده می‌شود. هدف از این مقاله پیاده سازی یک سیستم کنترلی برای انجام عملکردهای گرفتن، بازتولید طبقه بندی گرفتن و تقلید حرکات دست ربات از حرکات دست کاربر می‌باشد. به منظور کنترل موقعیت انگشتان از روش کنترل PID استفاده می‌شود. سپس عملکرد دست رباتیک بر روی گرفتن اشیاء مختلف آزمایش می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که دست ربات قادر به بازتولید ۹ الگوی گرفتن از طبقه بندی کاتکاسکی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: گرفتن، دست ربات، کنترل PID، حسگر فلکس، تقلید، طبقه بندی کاتکاسکی.

Implementation of the Position Control System on a 5-finger Robot Hand in Order to imitation and Grasping Stably

H. R. Heidari

T. Ghahri Saremi

T. Ghahri Saremi

Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Abstract

The human hand inspires various functions such as grasping in robotic hands. Dexterous grasping objects is a basic function for robots that plays an important role in various applications. This paper presents a 5-degree-of-freedom robotic hand with a bar mechanism for grasping objects. The robotic hand is made using 3D printer technology. Each finger is actuated by a DC Motor Gearbox to generate flexion/extension movements. A flex sensor-based glove is used to operate the robot hand. The purpose of this article is to implement a control system to perform grasping functions, reproduce the grasping classification and imitating the robot's hand movements from the user's hand movements. In order to control the position of the fingers, the PID control method is used. Then the performance of the robotic hand is tested on grasping different objects. The results show that the robot hand is able to reproduce 9 grasping patterns from Cutkosky's classification.

Keywords: Grasping, robot hand, PID control, flex sensor, imitation, Cutkosky's classification.

حرکت و سیستم کنترل همگی برای گرفتن ضروری هستند. به همین منظور هر ۲ روش طراحی و کنترل باید به دقت انتخاب و مطالعه شوند. دست‌های ربات را می‌توان در بسیاری از کاربردها، مانند تولید، جراحی، فعالیت‌های خطرناک هسته‌ای و دست مصنوعی استفاده نمود. دست انسان در انتهای ساعد قرار دارد. آناتومی آن به دلیل ترکیبی از استخوان‌ها، ماهیچه‌ها و تاندون‌ها منحصر به فرد است. دست انسان دارای ۲۷ استخوان و ۲۷ درجه آزادی است. نمایش آناتومیک دست انسان در شکل ۱ نشان داده شده است. استخوان‌های دست به ۳ قسمت کارپها، متاکارپها و فالانکس‌ها تقسیم می‌شوند. متاکارپها استخوان‌هایی در کف دست هستند در حالی که فالانکس‌ها در انگشتان دست یافت می‌شوند. هر انگشت از ۳ قسمت فالانکس پروگزیمال، فالانکس میانی و فالانکس دیستال تشکیل شده است. مفاصل انگشتان عبارتند از: مفاصل متاکارپو فالانژیال، مفاصل اینترفالانژیال پروگزیمال و

۱- مقدمه

دست‌ها یکی از اعضای بدن هستند که بیشترین استفاده را در طول روز دارند. آن‌ها به دلیل داشتن ۲۷ درجه آزادی از مهارت بالایی برای انجام تعداد زیادی حرکت و گرفتن برخوردار هستند. در حال حاضر مطالعه دست انسان یکی از حوزه‌های مورد بررسی رباتیک است. دست ابزار کاملی است که حرکات متعددی را برای انسان ایجاد می‌کند. از آنجایی که گرفتن یکی از مهارت‌های انسانی است، محققان رباتیک بیشتر سعی در تقلید از آن دارند. قابلیت گرفتن ماهرانه در دست‌های رباتیک معمولاً از طریق مکانیزم‌های پیچیده و چند مفصلی محقق می‌شود. هندسه‌های متفاوتی برای دست‌های رباتیک پیشنهاد شده است تا قابلیت گرفتن را افزایش دهد. جنبه‌های اصلی از قبیل موادی که دست ربات با آن ساخته می‌شود، نوع محرک، حسگر برای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hr.heidari@malayeru.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۳۰/۰۲/۱۷

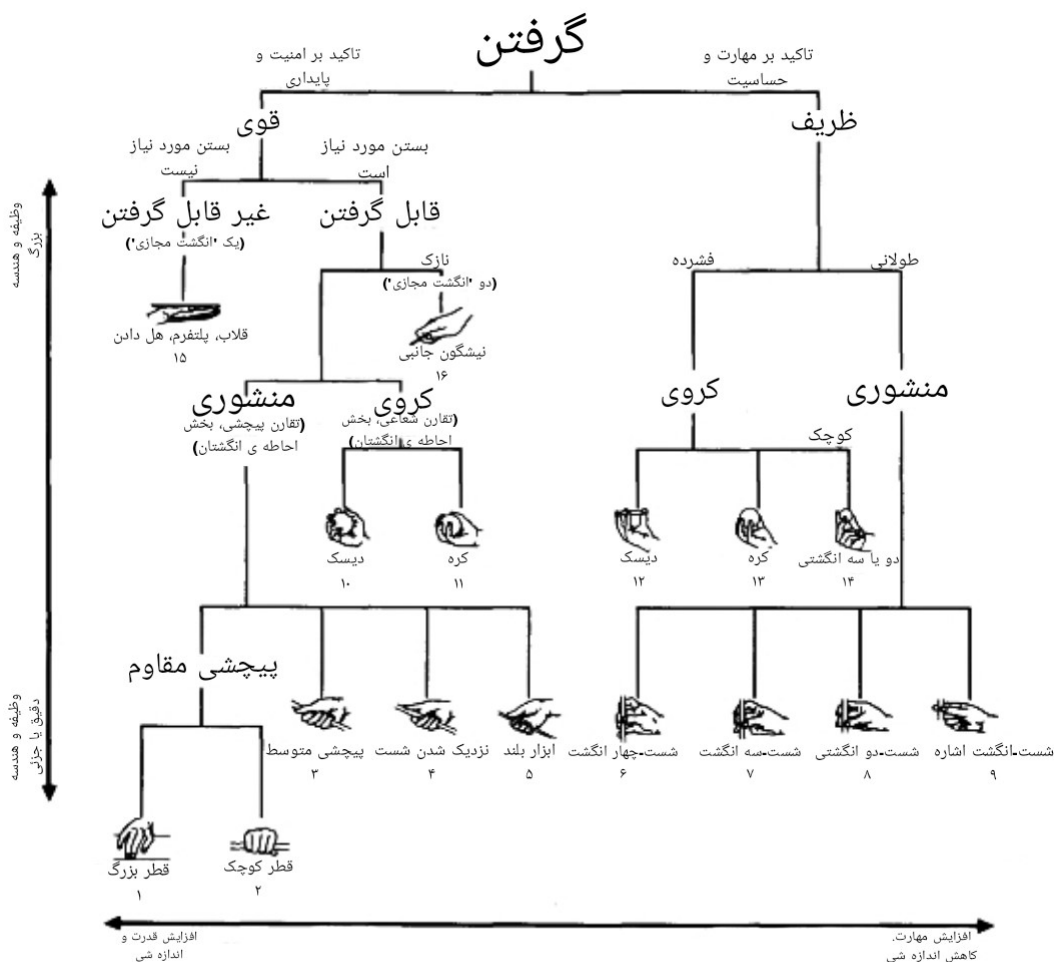
مفاصل اینترفالانژیال دیستانال.



شکل ۱- طرحواره مفاصل دست انسان [۱]

می‌باشد. حرکات خمشی، زاویه بین استخوان‌ها را کاهش می‌دهد و انگشت را خم می‌کند در حالی که حرکات کششی، زاویه را افزایش می‌دهد و انگشت را صاف می‌کند. دور شدن حرکتی است که یک اندام را از اندام دیگر دور می‌کند در حالی که نزدیک شدن حرکتی برای نزدیک کردن یک اندام به اندام دیگر است. دست انسان با توجه به خصوصیات آناتومیکی خود قادر به انجام انواع مختلفی از عمل گرفتن است [۱]. کاتاکاسکی [۲] طبقه‌بندی گرفتن که به طبقه‌بندی کاتاکاسکی معروف است را ارائه داد. او طبقه بندی را به ۲ دسته تقسیم بندی نمود. دسته اول را گرفتن‌های قوی و دسته دوم را گرفتن‌های ظریف نامید. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در گرفتن قوی، شیء با کف دست تماس پیدا می‌کند و بر ثبات تاکید دارد در حالی که در گرفتن ظریف، شیء با نوک انگشتان نگه داشته می‌شود و بر مهارت تاکید دارد. این طبقه بندی علاوه بر درجه آزادی، فاکتورهای مختلفی مانند محل قرارگیری انگشت، جهت گیری انگشت و نقاط تماس با شیء گرفته شده را در نظر می‌گیرد.

دست انسان می‌تواند انواع مختلفی از حرکات را انجام دهد که برای گرفتن و ماهرانه عمل کردن ضروری می‌باشد. چند مورد از حرکات مهم دست، حرکات خمشی/کشش و دور/ نزدیک شدن انگشتان



شکل ۲- طبقه بندی گرفتن کاتاکاسکی [۲]

مرتبط در سیستم کنترل، پارامترهای کنترلی مورد نظر مانند موقعیت زاویه مفاصل بر روی انگشتان، سرعت لینک‌ها و یا نیروی گرفتن می‌باشد. لوکاس و همکارانش [۱۲] از ورودی الکترومیوگرافی برای کمک به افراد آسیب نخاعی در انجام کارهای گرفتن اشیاء استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افراد قادر به گرفتن برخی از اشیاء مانند توپ یا یک رول نوار بودند. با این حال، آن‌ها قادر به گرفتن اشیاء با اندازه‌ها و ویژگی‌های متفاوت نبودند. صالح و همکارانش [۱۳] از کنترل موقعیت PID برای عمل گرفتن یک دست رباتیک ۳ انگشتی استفاده کردند و به منظور تنظیم پارامتر کنترل PID، روش دستی را به کار بردند. در نهایت دست ربات موفق به عمل گرفتن اشیای کروی و مستطیلی شد. پایداری گرفتن معیاری است که نشان می‌دهد شیء چقدر خوب محدود شده است و مستقیماً با تماس بین انگشتان و شیء مرتبط است. حمزه نژاد و همکارانش [۱۴] از یک روش کنترلی بر مبنای روش کنترل مواد لغزشی مرتبه کسری برای کنترل موقعیت یک بازوی ربات استفاده کردند. نتایج شبیه سازی نشان داد عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در ردیابی مسیر مطلوب، مناسب است. زکریا [۱۵] یک کنترل کننده موقعیت PID را بر روی یک بازوی ربات انسان نما پیاده سازی کرد. هر مفصل این بازو با استفاده از کنترل کننده موقعیت و تنظیم زوایای موتور حرکت می‌کند. مشاهده شد به دلیل پایداری سیستم، این بازوی ربات انسان نما می‌تواند فعالیت‌های مختلفی را به طور ایمن انجام دهد.

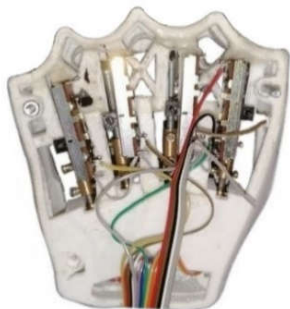
در این راستا برای گرفتن قوی و ظریف و هم چنین تقلید حرکات از یک دست رباتیک ۵ انگشتی استفاده می‌شود. کنترل کننده PID برای کنترل موقعیت انگشتان رباتیک به منظور قابلیت گرفتن انتخاب می‌شود. در نهایت مهارت دست رباتیک از طریق اثبات توانایی دست در دستیابی به طبقه‌بندی کاتکاسکی ارزیابی می‌شود. مکانیزم میله ای استفاده شده می‌تواند عملکرد انتقال حرکت دست ربات را بهبود بخشد. انگشت شست نیز به گونه ای طراحی شده که به عمل گرفتن ایمن کمک می‌کند و منجر به عملکرد مناسبی در گرفتن اشیاء با اندازه و اشکال مختلف خواهد شد. این مقاله چندین مزیت نسبت به روش‌های فعلی دارد. با پرداختن به محدودیت‌های روش‌های قبلی در زمینه مکانیکی و کنترلی، دست رباتیک پیشنهادی به طور بالقوه می‌تواند قابلیت‌های بهتری در بازتولید وظایف گرفتن کاتکاسکی ارائه دهد. استفاده از پتانسیومتر خطی برای اندازه گیری موقعیت انگشتان دست ربات، علاوه بر هزینه ی پایین از دقت مناسبی برخوردار است. این دست ربات می‌تواند به عنوان یک پلتفرم کم هزینه استفاده شود و برای طیف وسیعی از کاربردها در دسترس تر و مقرون به صرفه تر باشد. هم چنین عملکرد از راه دور با استفاده از دستکش کالیبره شده می‌تواند کنترل طبیعی و همه جانبه تری را امکان پذیر کند. این پیشرفت‌ها به توسعه‌ی یک دست رباتیک برای کاربردهای مختلف کمک می‌کند که نیاز به گرفتن قوی و ظریف، تقلید از حرکات و وظایف طبقه‌بندی کاتکاسکی دارد.

۲- ساختار دست

۲-۱- طراحی و ساخت دست ربات

طراحی مکانیکی دست رباتیک بر اساس دست منبع باز ۵ درجه

با حرکت از چپ به راست نمودار شکل ۲، گرفتن‌ها قدرت کمتری دارند و اشیای گرفته شده کوچکتر می‌شوند. بنابراین گرفتن‌های شماره ۱ و ۲، قوی‌ترین و کم‌مهارت ترین و گرفتن‌های شماره ۹ و ۱۴ دقیق ترین نوع گرفتن می‌باشند. در این راستا می‌توان از این طبقه‌بندی به عنوان مرجعی برای طراحی دست‌های رباتیک استفاده نمود. دست ربات Southampton-remedi [۳] یکی از اولین طراحی‌های دست رباتیک ۶ درجه آزادی برای گرفتن بود که بر اساس مکانیزم میله‌ای ساخته شد. حرکت انگشتان توسط یک محرک از نوع موتور DC ایجاد می‌شود که فقط قادر به انجام حرکات خمش و کشش در ۴ انگشت به علاوه چرخش و خمش در انگشت شست می‌باشد. Gifu III [۴] که برای استفاده در یک پلتفرم رباتیک طراحی شده است، از ۵ انگشت تشکیل شده است. انگشت شست دارای ۴ درجه آزادی و انگشتان دیگر دارای ۳ درجه آزادی هستند. در این طرح از یک مکانیزم ۴ میله ای استفاده می‌شود. انگشتان به صورت جداگانه دارای موتورهای DC هستند. این دست ربات می‌تواند گرفتن‌های استوانه ای و کروی را انجام دهد. دست Awiwi [۵] یک دست ربات ۵ انگشتی است که طراحی آن بر اساس تاندون محور است. این دست ربات در مجموع ۲۰ درجه آزادی دارد و محرک‌های آن بر روی ساعد قرار می‌گیرند. همه‌ی انگشتان به جز انگشتان میانی و اشاره دارای زاویه در مفاصل خود هستند که امکان چسبندگی بر روی اشیای کروی را بهبود می‌بخشد. دست ربات UOMPro [۶] بر اساس مکانیزم‌های ۴ میله‌ای ساخته شده است. محرک‌های استفاده شده از نوع موتورهای الکتریکی DC هستند. این دست در مجموع ۶ درجه آزادی دارد. سیستم کنترل حرکت آن از طریق یک رابط مایوالکترونیک انجام می‌شود. این دست ربات توانست گرفتن‌های ظریف و استوانه‌ای را انجام دهد. بزرگترین مسئله‌ی ایجاد شده برای دست‌های رباتیک، عامل اقتصادی است. دست‌های رباتیک موجود هنوز هم بسیار گران هستند و با بودجه بسیاری از افرادی که به آن‌ها نیاز دارند، تناسب ندارد. به همین دلیل، به لطف گسترش پیرینترهای سه بعدی، با قیمت‌های پایین‌تر و پیشرفت فناوری، ابتکارات متعددی برای ایجاد دست‌های رباتیک کم‌هزینه ایجاد کرده است. بنابراین طراحی و کنترل دست ربات بر اساس تجزیه و تحلیل ویژگی‌های گرفتن ضروری می‌باشد [۷]. معیارهای ارزیابی در مورد اجرای طراحی را می‌توان به بخش‌های مکانیزم، تعداد محرک و حسگرها طبقه بندی نمود [۸]. برای انتقال حرکات در مفاصل دست‌های رباتیک، معمولاً از مکانیزم‌هایی استفاده می‌شود که به انگشتان اجازه خم شدن می‌دهد. از جمله‌ی این مکانیزم‌ها می‌توان به انتقال توسط میله‌ها، موتورهای نصب شده در هر مفصل و انتقال توسط قرقره‌ها اشاره نمود [۹]. در یک سیستم رباتیک، محرک عنصری است که نوعی انرژی (الکتریکی، هیدرولیک، پنوماتیکی) را به حرکت خطی یا چرخشی تبدیل می‌کند. انواع مختلفی از محرک‌ها را می‌توان با توجه به عملکردشان در تولید حرکت به ۲ دسته معمولی و غیر معمولی طبقه‌بندی نمود [۱۰]. حسگرها نقش عمده‌ای در توسعه دست‌های رباتیک دارند و می‌توانند پارامترهایی مانند موقعیت و سرعت در مفاصل، دما، رطوبت و زبری سطح را اندازه‌گیری کنند. حسگرهایی که در یک دست ربات استفاده می‌شوند به کاربردهای خاص دست و شرایط محیطی بستگی دارند [۱۱]. علاوه بر این، کنترل دست رباتیک را می‌توان با کمک روش‌های مختلف انجام داد. یکی از موضوعات

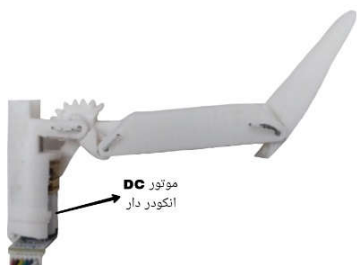


شکل ۴- نصب پتانسیومترها در دست ربات از نمای پشتی

انگشتان توسط موتورهای DC گیربکس دار هدایت می‌شوند که باعث خم شدن و باز شدن انگشتان می‌شود. موتورهای DC برای عملکرد حرکت مستقل ۴ انگشت در محفظه‌های پایینی و موتور DC انکودر دار در محفظه متصل به انگشت شست قرار می‌گیرند. محل قرار گیری موتورها در شکل ۵ و ۶ آورده شده است.



شکل ۵- اتصال موتورهای DC به دست ربات از نمای روبه رو



شکل ۶- محل قرار گیری موتور DC انکودر دار

سپس مطابق شکل ۷، به شفت موتورهای DC یک پیچ و یک مهره متصل می‌شود. این مهره که مهره اصلی می‌باشد به دو مهره فرعی و یک پین جوش داده می‌شود. مهره‌های فرعی به منظور اتصال موتور به لینک سوم استفاده می‌شوند. پین‌های استفاده شده نیز برای تعیین موقعیت انگشتان اشاره، میانی، حلقه و کوچک به پتانسیومتر خطی متصل می‌شوند. در نهایت با چرخیدن پیچ توسط موتور، لینک سوم حرکت می‌کند و انگشتان را باز و بسته می‌کند.

آزادی [۱۶] ارائه می‌شود. قطعات دست ربات با استفاده از پرینتر FDM چاپ می‌شوند و مواد مورد استفاده برای چاپ ماده پلی لاکتیک اسید می‌باشد. دست رباتیک پیشنهادی شامل ۵ انگشت، کف دست، قسمت حاوی محفظه، قاب جلویی و پایه نگهدارنده می‌باشد. قطعات هر انگشت از فالانکس و لینک تشکیل شده است. ۴ انگشت به استثنای انگشت شست از مفاصل متاکارپو فالانژیال، اینترفالانژیال پروگزیمال و اینترفالانژیال دیستال تشکیل شده است. شکل ۳ طرحواره ای از ساختار انگشتان دست ربات را نشان می‌دهد.



شکل ۳- طرحواره ای از مفاصل انگشتان دست ربات: (الف) انگشت اشاره و (ب) انگشت شست

کف دست قسمتی است که انگشتان را به قطعات الکترونیکی متصل می‌کند. قسمتی که روی کف دست قرار می‌گیرد، شامل محفظه‌هایی در ناحیه بالا و پایین می‌باشد. ناحیه بالایی به قرار گرفتن پتانسیومترها کمک می‌کند و ناحیه پایینی به منظور تعبیه موتورهای DC ایجاد شده است. قاب جلویی حاوی محفظه‌ی موتور DC انکودر دار می‌باشد. این قاب به منظور زیبایی و نیز کمک به عمل گرفتن ایجاد شده است. در مجموع دست از ۳۵ قسمت قابل چاپ تشکیل شده است. مشخصات دقیق دست ربات در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات دست ربات

ویژگی	شاخص
۱ درجه آزادی	درجه آزادی هر انگشت
۵ ولت	ولتاژ کاری
۹×۴×۲۲ سانتی متر	اندازه‌ی دست ربات (طول×عرض×ارتفاع)

مفاصل انگشتان از طریق مکانیزم میله ای فعال می‌شود. مکانیزم میله ای به حرکت فالانکس‌ها کمک می‌کند. عملکرد انتقال این مکانیزم به این صورت است که میله‌ها در امتداد صفحه موازی با سطح داخلی کف دست کشیده می‌شوند و خمش و کشش انجام می‌شود. اتصال مفاصل به لینک‌ها با استفاده از پیچ، مهره و پین صورت می‌گیرد. لینک سوم رابط انگشتان به کف دست، پتانسیومتر و موتورهای DC می‌باشد. در ماژول انگشت شست، مکانیزم چرخ دنده ای وجود دارد که باعث حرکت خمش و کشش انگشت شست می‌شود و چرخ دنده حلزونی، چرخ دنده ساده را می‌چرخاند. علاوه بر این، انگشت شست در عملیات گرفتن به نحوی ایمن عمل می‌کند و با پیچیدن به دور شیء کنترل را آسان تر می‌کند. ۴ پتانسیومتری که برای اندازه گیری موقعیت انگشتان دست ربات استفاده شده است، در پشت محفظه‌های بالایی ثابت می‌شوند. شکل ۴ محل قرار گیری حسگر موقعیت یا پتانسیومتر را نشان می‌دهد.



شکل ۹- دستکش مبتنی بر حسگر فلکس

۳-۲- سیستم الکترونیکی

سیستم الکترونیکی کلی شامل حسگر فلکس، میکروکنترلر، موتور DC، محرک و پتانسیومتر خطی خواهد بود. اجزای سیستم در جدول ۲ آورده شده است.

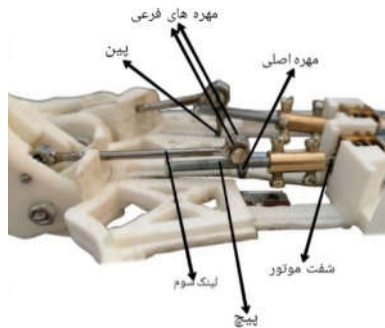
جدول ۲- اجزای سیستم

تعداد	تصویر قطعه	نام قطعه
۱		آردوینو مگا
۴		موتور DC
۱		موتور DC انکودر دار
۴		پتانسیومتر خطی
۳		محرک موتور
۵		حسگر فلکس

در این مقاله ۵ حسگر فلکس روی انگشتان دست کاربر وصل شده است. با اندازه گیری میزان خمیدگی هر انگشت توسط حسگر فلکس، می توان حرکت انگشتان دست کاربر را ثبت کرد. با این حال، میکروکنترلر نمی تواند مقاومت حسگرهای فلکس را مستقیماً بخواند. بنابراین، یک تقسیم کننده ولتاژ مورد نیاز است. با یک مدار تقسیم کننده ولتاژ، تغییر مقاومت به تغییر ولتاژ تبدیل می شود. سپس افت ولتاژ در حسگر فلکس با استفاده از مبدل آنالوگ به دیجیتال یا ADC آردوینو خوانده می شود. در این راستا حسگرهای فلکس به صورت سری با یک مقاومت اضافی سیم کشی می شوند تا یک تقسیم کننده ولتاژ را تشکیل دهند و یک ولتاژ در سراسر تقسیم کننده اعمال شود. معادله ی تقسیم ولتاژ با استفاده از معادله زیر اندازه گیری می شود:

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_E}{R_S + R_E} \quad (1)$$

V_{in} ولتاژ مرجع یا ولتاژ ورودی است، V_{out} ولتاژ خروجی اندازه گیری شده است. شکل ۱۰ مدار تقسیم کننده ولتاژ را نشان می دهد.



شکل ۷- نمونه ای از نحوه ی اتصال موتور DC به لینک سوم در مکانیزم میله ای

یک پوشش سیلیکونی نرم نیز به نوک انگشتان اضافه می شود تا چسبندگی بیشتری فراهم شود. در نهایت دست ربات پیشنهادی بر روی پایه نگهدارنده قرار می گیرد. شکل ۸ مدل سه بعدی دست ربات را نشان می دهد.



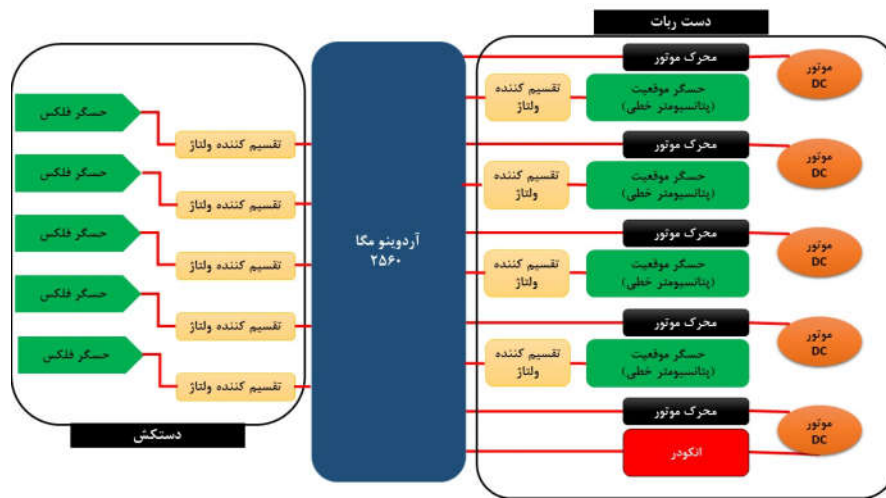
شکل ۸- مدل سه بعدی دست ربات

۲-۲- دستکش مبتنی بر حسگر فلکس

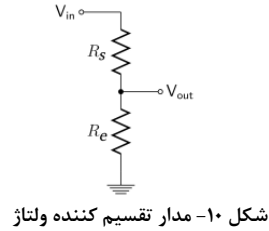
برای فرمان دادن به دست ربات، خمش انگشتان و عملیات از راه دور یک دستکش مبتنی بر حسگر فلکس پیشنهاد شده است. عملکرد از راه دور با استفاده از دستکش داده یک روش کارآمد برای کنترل دست ربات می باشد. حسگرهای فلکس همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است به دستکش متصل می شوند. حسگرهای فلکس مورد استفاده در این مقاله، حسگرهای فلکس ۲.۲ اینچی هستند. این حسگرها موقعیت انگشتان کاربر را تعیین می کنند. با خم شدن انگشتان کاربر، مقاومت حسگر تغییر می کند، در نتیجه افت ولتاژ حسگر نیز تغییر می کند. حسگر فلکس حرکت انگشتان را به سیگنال های مناسب برای کنترل تبدیل می کند که نشان دهنده سیگنال مرجع نیز می باشد.

فلکس، یک تقسیم کننده ولتاژ برای اتصال پتانسیومترها به میکروکنترلر استفاده می‌شود. مقاومت پتانسیومتر نیز با استفاده از معادله‌ی (۲) محاسبه می‌شود. میکروکنترلر نیز وظیفه‌ی اجرای حلقه-های کنترل موقعیت هر یک از انگشتان، خواندن انکودر موتور و دریافت دستورات موقعیت انگشتان را بر عهده دارد که از طریق کابل USB به کامپیوتر متصل می‌شود. بلوک دیاگرام سیستم در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

به طور کلی، سیستم با ورودی دستکش مبتنی بر حسگر فلکس کار می‌کند و مقادیر ورودی به برد میکروکنترلر آردوینو منتقل می‌شود. با خم شدن حسگر فلکس درخواست چرخش موتورها به محرک موتور ارسال می‌شود. هر محرک ۲ موتور را به طور همزمان کنترل می‌کند. در نهایت با چرخش موتورها، ماژول انگشت دست ربات باز یا بسته می‌شود.



شکل ۱۱- بلوک دیاگرام سیستم



شکل ۱۰- مدار تقسیم کننده ولتاژ

R_E مقاومت اضافی و R_S مقاومت حسگر است. مقاومت حسگر را می‌توان با استفاده از معادله‌ی (۲) محاسبه نمود:

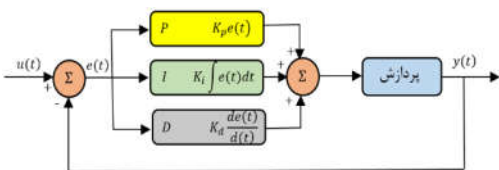
$$R_S = R_E \frac{V_{in} - V_{out}}{V_{out}} \quad (2)$$

هم چنین موقعیت ۴ انگشت اشاره، میانی، حلقه و کوچک دست ربات توسط پتانسیومترهای خطی و موقعیت انگشت شست توسط انکودر موتور اندازه گیری می‌شود. تغییر مقاومت پتانسیومتر نمی‌تواند مستقیماً توسط میکروکنترلر خوانده شود، بنابراین مشابه حسگر

عبارت است از:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$

جایی که t زمان، $U(t)$ متغیر کنترل کننده‌ی خروجی، $e(t)$ خطای سیستم، K_p ، K_i و K_d به ترتیب بهره ثابت تناسبی، انتگرالی و مشتق گیر هستند. کنترل کننده PID از یک بازخورد کنترل حلقه بسته برای حفظ خروجی واقعی سیستم که نزدیک به خروجی مورد نظر است استفاده می‌کند. شکل ۱۲ بلوک دیاگرام یک سیستم کنترل حلقه بسته را با استفاده از کنترل کننده PID نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- طرحواره سیستم کنترل کننده PID

۳- استراتژی کنترل دست ربات

در این بخش سیستم کنترل PID و تنظیم پارامترهای آن شرح داده می‌شود.

۳-۱- سیستم کنترل PID

کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی یا PID به عنوان پرکاربردترین تکنیک کنترل در برنامه‌های کنترلی در نظر گرفته می‌شود. کنترل کننده PID دارای دینامیک کنترل بهینه از جمله پاسخ سریع و پایداری بالاتری می‌باشد [۱۷]. کنترل کننده PID کمک می‌کند تا خروجی مورد نظر (سرعت، دما، موقعیت) را در زمان کوتاهی، با حداقل فراجهدش و کمترین خطا، به مقدار مورد نظر برساند [۱۸]. کنترل کننده PID با کم کردن نقطه تنظیم مورد نظر از متغیر فرآیند، مقدار خطا را تعیین می‌کند و تلاش می‌کند خطا را به حداقل برساند. الگوریتم PID از ۳ پارامتر تناسبی، انتگرالی و مشتق گیر تشکیل شده است. معادله‌ای که الگوریتم کنترل کننده PID را توصیف می‌کند [۱۹]

۲-۳- تنظیم پارامترهای کنترلی

اگر مقادیر نامناسبی از پارامترهای کنترلی استفاده قرار گیرند، سیستم کنترل ضعیف عمل می‌کند و ناپایدار می‌شود. بنابراین تنظیم پارامترهای کنترلی کننده برای دستیابی به عملکرد مناسب کنترل با انتخاب صحیح ثابت‌های تنظیم ضروری است. تنظیم کنترل کننده شامل انتخاب مقادیر K_p ، K_i و K_d است [۲۰]. روش‌هایی برای تنظیم یک کنترل کننده PID وجود دارد که برخی از این روش‌ها عبارتند از: روش دستی، زیگلر نیکولز، الگوریتم ژنتیک، نرم‌افزاری [۲۱] و کنترل منطق فازی [۲۲].

۴- پیاده سازی سیستم کنترل موقعیت بر روی

انگشتان دست ربات

۴-۱- تنظیم پارامترهای کنترل PID دست ربات

در این مقاله برای تنظیم پارامترهای کنترل PID موقعیت انگشتان دست ربات از روش دستی استفاده می‌شود. آنالیز این روش با مشاهده پاسخ سیستم انجام می‌شود. با توجه به پاسخ، مشخص می‌شود سیستم به کدام عمل برای بهبود رفتار نیاز دارد. پس از اعمال بهره کنترلی، تغییرات جدیدی در عمل کنترلی ارائه می‌شود تا پاسخ بهبود یابد. این فرآیند باید چندین بار تکرار شود تا سیستم به بهترین پاسخ ممکن برسد. ابتدا K_p ، K_i و K_d روی صفر تنظیم می‌شوند. سپس به آرامی K_p افزایش می‌یابد تا زمانی که مقداری نوسان در خروجی مشاهده شود. پس از به دست آوردن مقدار K_p بهینه، K_i افزایش می‌یابد تا زمانی که افسس اصلاح شود و خطای حالت پایدار حذف شود. باید در نظر گرفت که افزایش K_i می‌تواند باعث بی ثباتی شود. پس از تنظیم K_p و K_i ، بهره مشتق گیر افزایش می‌یابد. افزودن K_d باعث پایداری سیستم و کاهش فراجش می‌شود. از آنجایی که این روش یک روش "آزمون و خطا" است، بسیار مهم است که مشخص شود هر بهره چه تاثیری بر سیستم دارد. بنابراین، در جدول ۳ اثرات هر بهره بر رفتار سیستم شرح داده شده است.

جدول ۳- اثرات بهره‌های کنترلی بر رفتار سیستم

پارامتر	فراجش	زمان نشست	خطای حالت ماندگار
K_p	افزایش	تغییر کم	کاهش
K_i	افزایش	افزایش	حذف
K_d	کاهش	کاهش	بدون تاثیر

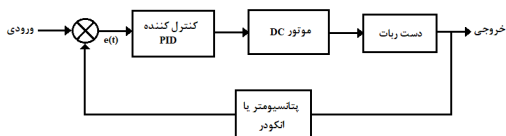
در جدول ۴ نتایج مقادیر مناسب پارامترها برای دست ربات آورده شده است.

جدول ۴- مقادیر تنظیم شده برای پارامترهای PID

مقدار	کنترل کننده
۱۰۰	K_p
۲۰۰	K_i
۱۰	K_d

۴-۲- اجرای کنترل موقعیت انگشتان دست ربات

به منظور پیاده‌سازی کنترل موقعیت بر روی هر یک از انگشتان دست ربات، از کتابخانه PID آردوینو استفاده می‌شود. کد کنترلی به زبان ++C نوشته شده است و با استفاده از پلتفرم IO فراخوانی می‌شود. این برنامه عمدتاً از ۳ ماژول دریافت داده‌ها، انتقال و ماژول کنترل تشکیل شده است. انتقال و دریافت داده‌ها به صورت موازی اجرا می‌شوند. ماژول دریافت داده، اطلاعات از حسگر را دریافت می‌کند. ماژول انتقال داده وظیفه‌ی ارسال اطلاعات به میکروکنترلر را دارد. ماژول کنترلی که ماژول اصلی برنامه کنترل می‌باشد، دارای بخش کنترل موقعیت است. در کنترل موقعیت هنگامی که کاربر انگشتان دست خود را خم می‌کند، این کنترل کننده فعال می‌شود و انگشتان دست ربات را به موقعیت مورد نظر می‌رساند. کنترل کننده PID برای کاهش یا به حداقل رساندن خطای بین ورودی واقعی و خروجی موقعیت مورد نظر استفاده می‌شود. شکل ۱۳ بلوک دیاگرام کنترل حلقه بسته دست ربات را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، موقعیت هر انگشت به وسیله پتانسیومتر و انکودر اندازه گیری می‌شود. موقعیت انگشتان دست ربات مطابق با موقعیت ارائه شده توسط انگشتان کاربر افزایش یا کاهش می‌یابد تا به موقعیت مورد نظر دست یابند. به عبارتی دیگر نقطه تنظیم با استفاده از حسگر فلکس، موقعیت دست کاربر را به عنوان ورودی می‌گیرد و از موقعیت بازخورد اندازه گیری شده توسط انکودر مربعی یا پتانسیومتر برای تنظیم موقعیت دست ربات استفاده می‌کند. در این حلقه، موقعیت انگشتان دست ربات با موقعیت انگشتان کاربر مقایسه می‌شود و بر روی جهت موتورهای DC اعمال می‌شود. اگر مقدار کنترل مثبت باشد، مقدار LOW تنظیم می‌شود و موتور در جهت عقربه‌های ساعت به حرکت در می‌آید. اگر منفی باشد، مقدار HIGH تنظیم می‌شود و موتور در خلاف جهت عقربه‌های ساعت به حرکت در می‌آید. خطای بین مقادیر موقعیت با کنترل کننده PID اصلاح می‌شود. با اجرای کنترل موقعیت PID، کنترل کننده، کنترل لازم را برای خمش و کشش دست ربات ارائه می‌کند.



شکل ۱۳- طرحواره کنترل موقعیت انگشتان دست ربات با استفاده از

کنترل کننده PID

۵- بحث و نتایج

پس از فرآیند ساخت، مونتاژ قطعات و پیاده سازی کنترل PID، دست رباتیک از نظر عملکرد تقلید و مهارت گرفتن پایدار اشیاء تست می‌شود.

۵-۱- کالیبراسیون حسگر فلکس

در ابتدا آزمایشی برای ارزیابی رفتار حسگر فلکس در هنگام ادغام آن با انگشت کاربر انجام شد. کالیبراسیون حسگر فلکس با خواندن

مقدار ADC تولید شده در زمانی که حسگر در حالت صاف و خمیده است انجام می‌شود. هدف از این کالیبراسیون تراز کردن حرکت حسگر فلکس با نتایج خروجی زاویه ای مناسب است. این آزمایش برای هر انگشت ۲۰ بار تکرار شد تا دقت و تکرارپذیری خوانش آن ارزیابی شود. سپس مقادیر بیشینه ADC در حالت خمش انگشتان و کمینه هر حسگر در حالت کشش انگشتان خوانده می‌شود. به ازای اعداد بین بازه (کمینه خمیدگی و بیشینه خمیدگی)، خمیدگی مورد نظر از حسگر فلکس به دست می‌آید. در جدول ۵ مقادیر بیشینه و کمینه حسگر فلکس برای هر انگشت آورده شده است. سپس بازه تغییرات مربوط به ADC خوانده شده از حسگر فلکس به ۱۰ قسمت تقسیم شد تا میزان خمیدگی حسگر فلکس (داده های خمشی) به این ۱۰ قسمت نسبت داده شود. در نتیجه PID در بازه مشخص شده متناظر در حسگر حول مقادیر تعریف شده در برنامه، کنترل را انجام می‌دهد.

جدول ۵- مقادیر کالیبره شده حسگر فلکس برای هر انگشت

انگشت شست	انگشت اشاره	انگشت میانی	انگشت حلقه	انگشت کوچک	مقادیر بیشینه
۸۹۰	۸۳۲	۷۰۰	۷۲۷	۷۶۰	مقادیر بیشینه
۷۱۰	۶۱۲	۵۵۰	۵۷۴	۵۷۵	مقادیر کمینه

اشیای مختلف مانند موارد دیسکی، استوانه‌ای، کروی و غیره با هندسه و شرایط سختی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. روش تمایز بین اشیای مختلف شامل آنالیز ویژگی‌های شیء و نوع گرفتن می‌باشد. ویژگی‌های اشیاء به عواملی مانند شکل هندسی، اندازه، وزن، شرایط سختی و غیره بستگی دارد. بر اساس آنالیز هندسی، پیکربندی گرفتن شیء تعیین می‌شود. طبقه‌بندی کاتکاسکی که مجموعه‌ای از انواع گرفتن‌ها مانند گرفتن استوانه ای، کروی و غیره را ارائه می‌دهد، می‌تواند فرآیند انتخاب شیء را هدایت کند. در این راستا از ۶ شیء شامل یک توپ با قطر بزرگ و کوچک، بطری، CD، ماژیک علامت گذار و قوطی پلاستیکی استفاده شد. مجموعه‌ای اشیاء در شکل ۱۵ آورده شده است.



شکل ۱۵- مجموعه اشیای استفاده شده در آزمایش گرفتن

سپس تلاش‌هایی برای گرفتن انجام شد و رفتار اشیاء مشاهده و ثبت شد. یک ارزیابی برای تعیین اینکه آیا دست ربات می‌تواند حالت‌های گرفتن پیشنهادی در طبقه‌بندی کاتکاسکی را انجام دهد یا خیر، انجام شد. طبق طبقه بندی کاتکاسکی، گرفتن‌های ظریف دست ربات شامل گرفتن اشیای منشوری، کروی و کوچک می‌شود البته تا زمانی که با نوک انگشت دست ربات گرفته شوند. گرفتن‌های قوی دست ربات شامل اشیای استوانه ای و کروی می‌باشد که با استفاده از کف دست و انگشتان دور شیء پیچیده می‌شوند. در این راستا شیء به گونه‌ای نگه داشته می‌شود که در فضای کاری شست و انگشتان باشد. هنگامی که شیء در فضای کاری دست رباتیک قرار گرفت، کاربر با دستکش حرکت گرفتن را انجام می‌دهد. علاوه بر این به منظور ارزیابی دقت گرفتن، اشیاء با جهت گیری‌های خاص در مقابل دست ربات قرار می‌گیرند. در صورتی که دست رباتیک شیء را به صورت پایدار گرفته باشد، گرفتن موفق خواهد بود. گرفتن پایدار، توانایی دست ربات را برای جلوگیری از لغزش اشیاء در حین گرفتن اشیاء نشان می‌دهد. برای نشان دادن نتایج به‌دست‌آمده با کمک طبقه‌بندی کاتکاسکی، گرفتن‌های ساخته شده توسط دست ربات باز تولید می‌شود. در ابتدا باید موقعیت انگشتان برای بازتولید دسته‌ها شناسایی شود. همانطور که گفته شد از دستکش مبتنی بر حسگر فلکس و کنترل کننده موقعیت برای رساندن موقعیت انگشتان دست ربات به موقعیت‌های لازم استفاده شده است. موقعیت‌های انگشتان دست ربات در جدول ۶ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که این موقعیت‌ها، موقعیت زاویه ای هر انگشت بر حسب درجه می‌باشند.

شکل ۱۶ گرفتن‌های مختلف اجرا شده توسط دست ربات را نشان می‌دهد. این گرفتن‌ها سعی در بازتولید مواردی دارند که در طبقه بندی کاتکاسکی آورده شده است.

۵-۲- تقلید دست ربات از کاربر

هدف از این بخش این است که آیا دست ربات می‌تواند به‌طور مؤثر حرکات دست انسان را در انگشتان خود تقلید کند یا خیر. در این راستا توانایی تقلید دست رباتیک با دستکش مبتنی بر حسگر فلکس مورد بررسی قرار گرفت. دست رباتیک باید بتواند علائم دستی که توسط کاربر با دستکش انجام می‌شود را تکرار کند. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۱۴، حرکات با موفقیت توسط دست رباتیک تقلید شد. لازم به ذکر است که باز و بسته شدن انگشتان دست ربات چند ثانیه طول می‌کشد تا به موقعیت مورد نظر دست یابد.



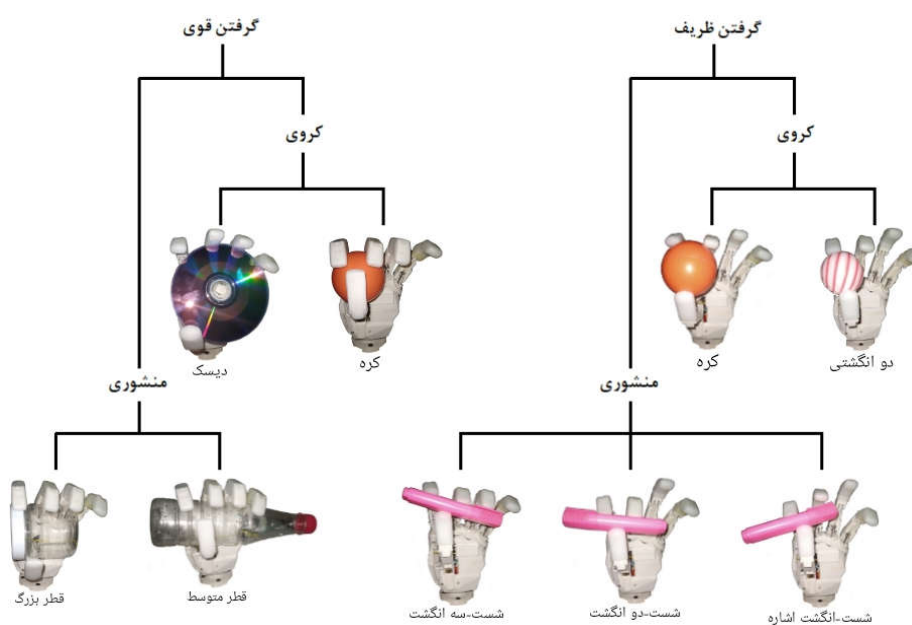
شکل ۱۴- نمونه‌هایی از تقلید دست ربات

۵-۳- مهارت گرفتن طبقه بندی کاتکاسکی

در این بخش توانایی گرفتن دست رباتیک به منظور گرفتن

جدول ۶- موقعیت انگشتان دست ربات برای باز تولید طبقه بندی گرفتن کاتکاسکی

نوع گرفتن	نام گرفتن	زاویه ی خمش انگشت شست (درجه)	زاویه ی خمش انگشت اشاره (درجه)	زاویه ی خمش انگشت میانی (درجه)	زاویه ی خمش انگشت حلقه (درجه)	زاویه ی خمش انگشت کوچک (درجه)
قوی	کروی (دیسک)	۲۵	۳۸	۳۲	۳۴	۳۶
قوی	کروی (کره)	۱۰۰	۱۱۳	۱۱۱	۰	۰
قوی	منشوری (قطر بزرگ)	۳۰	۹۸	۹۶	۹۵	۰
قوی	منشوری (قطر متوسط)	۷۰	۱۰۸	۱۰۶	۱۰۴	۱۰۶
ظریف	کروی (کره)	۴۰	۵۶	۵۸	۰	۰
ظریف	کروی (دو انگشتی)	۶۰	۷۸	۰	۰	۰
ظریف	منشوری (شست + انگشت اشاره)	۱۰۳	۸۹	۰	۰	۰
ظریف	منشوری (شست + ۲ انگشت)	۱۰۳	۸۹	۸۵	۰	۰
ظریف	منشوری (شست + ۳ انگشت)	۱۱۲	۸۰	۸۲	۸۳	۰



شکل ۱۶- تست گرفتن بر اساس طبقه بندی کاتکاسکی

جانبی برای دست ربات امکان پذیر نبود. اگرچه می توان در آینده تغییراتی در دست ربات ایجاد کرد تا بتوان تمام موارد طبقه بندی را انجام داد. در حالی که دست ربات ساخته شده ممکن است دامنه حرکتی محدودتری در مقایسه با دست انسان داشته باشد، اما همچنان می تواند ابزار مفیدی برای گرفتن و بازتولید طیف بالایی از طبقه بندی استراتژی های گرفتن باشد. میزان موفقیت گرفتن در بازتولید طبقه بندی کاتکاسکی به عنوان معیار کمی برای اثربخشی دست ربات تعریف می شود. این معیار توانایی دست ربات را در گرفتن اشیاء ارزیابی می کند.

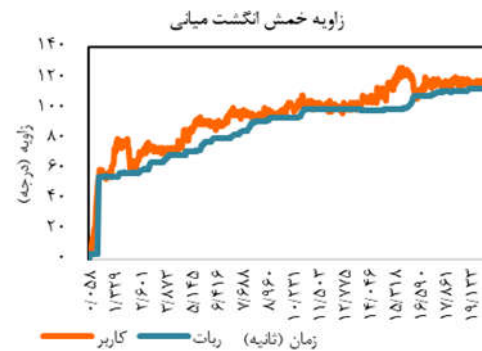
درصد موفقیت برابر است با نسبت تعداد گرفتن های باز تولید شده توسط دست ربات به تعداد کل گرفتن های طبقه بندی کاتکاسکی:

$$\frac{9}{16} * 100 = 56.25$$

میانگین درصد موفقیت گرفتن دست ربات در بازتولید طبقه بندی کاتکاسکی برابر ۵۶/۲۵٪ می باشد. نمودار شکل ۱۷ اطلاعات حرکت

همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، دست رباتیک می تواند اشیاء مختلفی مانند توپ، CD، بطری، ماژیک علامت گذار و قوطی پلاستیکی را به طور پایدار بگیرد. مطابق شکل ۱۶ هنگام گرفتن قوی برای اشیای کروی مانند توپ پلاستیکی نارنجی، فالانکس های انگشتان دست باید دور شیء پیچیده شوند. برای انجام این نوع گرفتن در دست رباتیک از ۳ درجه آزادی استفاده شده است. این نوع گرفتن در مقایسه با گرفتن ظریف، ثبات بیشتری را برای اشیای بزرگتر و گردتر فراهم می کند. در گرفتن ظریف اشیای کروی مانند توپ پلاستیکی ۲ رنگ، شیء فقط با نوک انگشت دست ربات گرفته می شود. این نوع گرفتن به خمش/کشش انگشت شست و اشاره با ۲ درجه آزادی نیاز دارد و فقط ۲ نقطه تماس درگیر هستند. نتایج نشان داد دست رباتیک می تواند ۴ حالت گرفتن قوی و ۵ گرفتن ظریف را با موفقیت انجام دهد و توانایی خود را در گرفتن برخی از اشیاء نشان دهد. اشیای استوانه ای شکل آسان ترین حالت در گرفتن بودند. به دلیل نداشتن حرکت دور/ نزدیک شدن انگشت شست، حرکت نیشگون

زاویه‌ای انگشت میانی کاربر و دست ربات را برای گرفتن قوی یک کره (توپ) در مدت زمان حدود ۲۰ ثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- زاویه خمشی انگشت میانی دست کاربر و دست ربات

همانطور که مشاهده می‌شود الگوی زاویه‌ای دست انسان و ربات مقایسه شده است. نتایج نشان داد ویژگی‌های مشابهی (زاویه) بین دست ربات و کاربر وجود دارد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک دست ربات کنترل شده مبتنی بر دستکش پیشنهاد و ساخته شد. طراحی دست ربات مبتنی بر مکانیزم میله‌ای است و ۵ درجه آزادی را ارائه می‌دهد. یک کنترل کننده PID برای کنترل موقعیت انگشتان دست رباتیک و بهبود عملکرد سیستم انتخاب شد. دست رباتیک حرکت دست انسان را از راه دور تقلید می‌کند. این دست ربات می‌تواند اشیای مختلفی با ویژگی‌های سطحی و شکل‌های مختلف را به صورت پایدار بگیرد. بازتولید طبقه بندی کاتکاسکی برای دست ربات، امکان گرفتن اشیاء مسطح، کروی و استوانه‌ای شکل را فراهم می‌کند. در آینده می‌توان کارهای بیشتری در این زمینه انجام داد و از اهداف آینده می‌توان به ترکیب کنترل موقعیت و نیرو اشاره نمود.

۷- مراجع

- [1] Maw J, Wong KY, Gillespie P. Hand anatomy. *British Journal of Hospital Medicine*. 2016; 77: 34-40.
- [2] Cutkosky MR. On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Transactions on robotics and automation*. 1989; 5: 269-279.
- [3] Light CM, Chappell PH. Development of a lightweight and adaptable multiple-axis hand prosthesis. *Medical engineering & physics*. 2000; 22: 679-684.
- [4] Mouri T, Kawasaki H, Yoshikawa K, Takai J, Ito S. Anthropomorphic robot hand: Gifu hand III. 2002; 1288-1293.
- [5] Grebenstein M, Grebenstein M. The awiwi hand: An artificial hand for the dlr hand arm system. *Approaching Human Performance: The Functionality-Driven Awiiwi Robot Hand*. 2014.

[6] Nisal K, Ruhunge I, Subodha J, Perera CJ, Lalitharatne TD. Design, implementation and performance validation of UOMPro artificial hand: Towards affordable hand prostheses. In 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). 2017; 909-912.

[7] Billard A, Kragic D. Trends and challenges in robot manipulat. *Science*. 2019; 364.

[8] Mahmoud R, Ueno A, Tatsumi S. Dexterous mechanism design for an anthropomorphic artificial hand: Osaka City University Hand I. In 2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. 2010; 180-185.

[9] Aviles OF, Simanca PL, Niño P. Diseño y construcción de un dedo para grippers robótico. *Revista Colombiana de Rehabilitación*. 2007; 6.

[10] Aviles OF, Simanca PL, Calle G. DEDOS PARA "GRIPPERS" ROBÓTICOS-REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA, *Scientia et technica*. 2005; 11: 97-102.

[11] Yong K, Ge Y, Cao H, He L. A multi-sensor system applied to control an intelligent robotic hand for underwater environment. In 2009 International Conference on Mechatronics and Automation. 2009; 513-518.

[12] Lucas L, DiCicco M, Matsuoka Y. An EMG-controlled hand exoskeleton for natural pinching. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2004; 16: 482-488.

[13] Shauri RLA, Salleh NM, Hadi AKA. PID position control of 7-DOF three-fingered robotic hand for grasping task. In 2014 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2014). 2014; 70-74.

[۱۴] حمزه نژاد ف، فیاضی ع، قیومی زاده ح، فاتحی مرج ح، حسین نیاج ح.

کنترل موقعیت دقیق نوک ربات تک رابط انعطاف پذیر با استفاده از کنترل کننده مود لغزشی مرتبه کسری. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۰،

د. ۵۱، ش. ۲، ص ۵۱-۵۹.

[15] Zakaria NM, Elnady AO. Implementation of Position Control Servo DC Motor with PID Controller to Humanoid Robot Arm. In 5 th IUGRC International Undergraduate Research Conference, Military Technical College, Cairo, Egypt. 2021.

[16] [Online]. https://github.com/alarisnu/alaris_hand.

[17] Rao VV. Performance analysis of speed control of DC motor Using P, PI, PD And PID Controllers. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013; 2: 60-66.

[18] Najib MS, Jadin MS, Ismail RMTR, Mohamed MR. Design and implementation of PID controller in programmable logic controller for DC motor position control of the conveyor system. In Proceedings of the 3rd WSEAS/IASME international conference on Dynamical systems and control. 2007; 266-270.

[19] Ogata K. *Modern control engineering*. Prentice hall Upper Saddle River, NJ. 2010; 5.

[20] Youns MD, Attya SM, Abdulla AI. Position Control Of Robot Arm Using Genetic Algorithm Based PID Controller. *AL Rafdain Engineering Journal*. 2013; 21: 19-30.

[21] Borase RP, Maghade DK, Sondkar SY, Pawar SN. A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*. 2021; 9: 818-827.

[۲۲] قنواتی ا، محمودآبادی م، بیگ زاده عباسی م. طراحی بهینه کنترل

کننده فازی تناسبی-انترگرالی - مشتقی برای یک ربات کابلی صفحه ای سه

درجه آزادی بر پایه بهینه سازی دسته میگو. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه*

تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۱، ص ۱۸۳-۱۹۲.