

## بهبود کنترل دست رباتیک به کمک کنترل کننده تطبیقی فازی-PID با استفاده از طبقه بندی سیگنالهای EMG

ندا مهدوی  
کارشناسی ارشد  
Nmahdavi78@gmail.com

نادر جوادی فر  
دکتری  
javadifar@aliabadiau.ac.ir

چکیده - این پژوهش حاضر با هدف شبیه سازی بهبود کنترل دست رباتیک به کمک کنترل کننده تطبیقی فازی-PID با استفاده از طبقه بندی سیگنالهای EMG انجام شد. استفاده از طبقه بندی سیگنال EMG برای ورودی کنترل به طور قابل توجهی دقت و پاسخگویی دست رباتیک را بهبود می بخشد. این سیستم قادر به طبقه بندی دقیق الگوهای مختلف حرکت دست بود که به کاربر این امکان را می داد تا دست رباتیک را با دقت و مهارت بالا کنترل کند. کاربردهای بالقوه این پژوهش بسیار گسترده است. کنترل دست رباتیک بهبود یافته می تواند برای افراد دارای ناتوانی اندام فوقانی مفید باشد و آنها را قادر می سازد مهارت و استقلال را در انجام کارهای روزانه به دست آورند. علاوه بر این، این فناوری را می توان در زمینه های مختلفی مانند رباتیک توانبخشی پروتز و اتوماسیون صنعتی که کنترل دقیق و طبیعی دست های رباتیک بسیار مهم است، به کار برد. نتایج نشان داد که کنترل کننده تطبیقی فازی-PID با استفاده از طبقه بندی سیگنال EMG یک راه حل امیدوارکننده برای بهبود کنترل دست رباتیک ارائه می دهد. با ترکیب نقاط قوت کنترل PID منطق فازی و تجزیه و تحلیل سیگنال EMG، این رویکرد به افزایش سازگاری عملکرد و دقت در کنترل دست های رباتیک دست می یابد. نتایج تجربی اثربخشی رویکرد پیشنهادی را تأیید می کند که راه را برای کاربرد آن در حوزه های مختلف هموار می کند. پژوهش های آینده می تواند تکنیک های بهینه سازی را بیشتر بررسی کند و دامنه کاربردهای این استراتژی کنترل نوآورانه را گسترش دهد.

کلید واژه- شبیه سازی، بهبود کنترل دست، رباتیک، فازی، PID، سیگنالهای EMG.

### ۱- مقدمه

نما سنتی باشند[2]. رباتیک یک رشته بین رشته ای است که شامل طراحی، ساخت، بهره برداری و استفاده از ربات ها می شود. رباتیک زمینه های بسیاری را که با جنبه های خاصی از رباتیک سروکار دارند، ادغام می کند. به عنوان مثال، در مهندسی مکانیک، اصطلاح رباتیک به ساخت ساختارهای فیزیکی یک ربات اشاره دارد، در حالی که در علوم کامپیوتر، رباتیک بر مطالعه نرم افزارهای رباتیک تمرکز دارد. همچنین بسیاری از جنبه های دیگر توسعه رباتیک و زمینه های بازگردانده شده از جمله مهندسی برق، کنترل، نرم افزار، اطلاعات، الکترونیک، مخابرات، کامپیوتر، میکاترونیک، مواد و مهندسی زیست پزشکی وجود دارد که در آن همپوشانی دارند[3].

هدف رباتیک طراحی ماشین هایی است که می توانند به انسان کمک کنند. حوزه رباتیک ماشین هایی را توسعه می دهد که می توانند وظایف را به طور خودکار انجام دهند و کارهای مختلفی را انجام دهند که ممکن است انسان قادر به انجام آنها نباشد[4]. ربات ها را می توان در موقعیت های زیادی برای اهداف مختلف استفاده کرد، اما امروزه بسیاری

رباتیک شاخه ای از مهندسی و علوم کامپیوتر است که شامل ایده، طراحی، ساخت و بهره برداری از ربات ها می شود. هدف از رشته رباتیک ایجاد ماشین های هوشمندی است که می توانند به روش های مختلف به انسان کمک کنند. رباتیک می تواند اشکال مختلفی داشته باشد. رباتیک می تواند اشکال مختلفی داشته باشد. یک ربات ممکن است شبیه یک انسان باشد یا به شکل یک برنامه کاربردی رباتیک باشد، مانند اتوماسیون فرآیند رباتیک، که شبیه سازی نحوه تعامل انسان با نرم افزار برای انجام وظایف تکراری و مبتنی بر قوانین است[1]. در حالی که زمینه رباتیک و اکتشاف کاربردهای بالقوه و عملکرد ربات ها در قرن بیست و یکم رشد قابل توجهی داشته است، این ایده مطمئناً جدید نیست. امروزه از ربات های صنعتی و همچنین بسیاری از انواع دیگر ربات ها برای انجام کارهای تکراری استفاده می شود. آنها می توانند به شکل یک بازوی رباتیک، یک ربات مشارکتی، یک اسکلت بیرونی رباتیک یا ربات های انسان

نمایان کرده و در مدل سازی و کنترل اندامهای پروتزی به کار گرفته شوند[7].

## ۲- مبانی نظری

### ۱-۲- رباتیک

رباتیک فناوری برای جایگزینی ماشین‌ها با انسان استفاده می‌باشد. ربات‌ها می‌توانند در هر موقعیت و برای هر منظوری به کار بروند ولی امروزه بسیاری از آن‌ها در محیط‌های خطرناک، فرایندهای تولید یا مکانهایی که انسان قادر به حیات نیست، استفاده می‌شوند. ربات‌ها می‌توانند به هر شکل و قیافه‌ای باشند ولی بعضی از آن‌ها طراحی می‌شوند تا شبیه انسان به نظر برسند. تلاش می‌شود که رباتهای انسان نما بتوانند راه رفتن، حرف زدن، شناختن و مخصوصاً هر چیزی را که انسان می‌تواند انجام دهد، تقلید کنند. با وجود اینکه دنیای رباتیک روز به روز در حال گسترده‌تر شدن است، در هر حال ربات‌ها برخی خصوصیت‌ها و ویژگی‌های مشترک دارند[5]:

ربات‌ها از نوعی ساختار مکانیکی تشکیل شده‌اند. جنبه مکانیکی ربات به آن کمک می‌کند تا وظایف را در محیطی انجام دهد که برای آن طراحی شده است. برای مثال، چرخ‌های ربات مریخ‌نورد ناسا نسخه ۲۰۲۰ به صورت مجزا دارای موتور هستند و از لوله تیتانیومی ساخته شده‌اند که کمک می‌کند به زمین سخت و خشن سیاره سرخ، محکم چفت شود.

ربات‌ها به اجزای الکتریکی نیاز دارند که این اجزا به منظور کنترل و تامین نیروی لازم برای کارکرد تجهیزات ربات به کار گرفته می‌شوند. اساساً برای تامین نیروی بسیاری از ربات‌ها، جریان برق الکتریکی مثل باتری مورد نیاز است.

### ۲-۲- الکترومایوگرافی (EMG)

نوار عصب و عضله، یک روش تشخیص بیماری است که وضعیت سلامتی ماهیچه‌ها و سلول‌های عصبی کنترل کننده آنها را ارزیابی می‌کند. این سلولهای عصبی به عنوان نورون حرکتی شناخته می‌شوند. آنها سیگنالهای برقی را منتقل می‌کنند که باعث انقباض و شل شدن عضلات می‌شوند. یک EMG این سیگنال‌ها را به نمودار یا اعداد ترجمه می‌کند و به پزشکان در تشخیص بیماری کمک می‌کند. پزشک معمولاً هنگامی که شخصی علائم یک اختلال عضله یا عصب را تجربه می‌کند، EMG را تجویز می‌کند. این علائم ممکن است شامل گزگز کردن، بی حسی

از آنها در محیط‌های خطرناک (از جمله بازرسی مواد رادیواکتیو، شناسایی و غیرفعال‌سازی بمب)، فرایندهای ساخت یا جاهایی که انسان‌ها نمی‌توانند زنده بمانند (مثلاً در فضا، زیر آب، در ارتفاعات، گرما، پاکسازی و مهار مواد و تشعشعات خطرناک). ربات‌ها می‌توانند هر شکلی داشته باشند، اما برخی از آنها به گونه‌ای ساخته شده‌اند که از نظر ظاهری شبیه انسان هستند. ادعا می‌شود که این به پذیرش ربات‌ها در رفتارهای تکراری خاصی که معمولاً توسط افراد انجام می‌شود کمک می‌کند. چنین ربات‌هایی تلاش می‌کنند راه رفتن، بلند کردن، گفتار، شناخت یا هر کار دیگری را که عمدتاً توسط انسان انجام می‌شود، تکرار کنند. بسیاری از ربات‌های امروزی از طبیعت الهام گرفته شده‌اند و در زمینه رباتیک الهام گرفته شده از زیست کمک می‌کنند[5]. برخی از ربات‌ها برای کار کردن به ورودی کاربر نیاز دارند، در حالی که ربات‌های دیگر به طور مستقل عمل می‌کنند. مفهوم ایجاد ربات‌هایی که می‌توانند به طور مستقل کار کنند به دوران کلاسیک بازمی‌گردد، اما پژوهشات در مورد عملکرد و کاربردهای بالقوه ربات‌ها تا قرن بیستم رشد قابل توجهی نداشت. در طول تاریخ، اغلب محققان، مخترعان، مهندسان و تکنسین‌های مختلف تصور می‌کردند که ربات‌ها روزی قادر خواهند بود رفتار انسان را تقلید کنند و وظایف را به شکلی شبیه انسان مدیریت کنند. امروزه، رباتیک یک رشته به سرعت در حال رشد است، زیرا پیشرفت‌های فن آوری ادامه دارد. پژوهش، طراحی و ساخت ربات‌های جدید اهداف عملی مختلفی را انجام می‌دهد، چه داخلی، چه تجاری و چه نظامی. بسیاری از ربات‌ها برای انجام کارهای خطرناک برای مردم ساخته شده‌اند[6].

دست انسان یکی از مهمترین اعضای بدن بوده که نقش اساسی در تعامل با محیط دارد زیرا بازخورد حسی و لمسی و همچنین امکان گیرش اشیاء را فراهم می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد که به طور میانگین هر فرد روزانه ۱۵۰۰ گیرش را با دست انجام می‌دهد. با این حال میلیون‌ها نفر در سراسر جهان از اختلال در عملکرد دست رنج می‌برند و این تعداد همواره در حال افزایش است. اندام‌های رباتیک طوری طراحی شده‌اند که حداکثر شباهت را به اندامهای انسان داشته باشند. در صورتی که سیگنال‌های حاصل از عملکرد عضلات بدن، ثبت شوند، می‌توانند فعالیت عضلات را

فروتن و همکاران [13] یک کنترل کننده مدلغزشی مبتنی بر شبکه عصبی چبیشف برای بازوی رباتیک ماهر طراحی کردند. الگوریتم آموزش شبکه عصبی چبیشف به صورت آنلین خواهد بود و قادر به سازگاری سریع با تغییرات غیرخطی سیستم می باشد. از دیگر مزیت های طرح کنترلی پیشنهادی میتوان به استحکام در برابر تغییرات پارامترها، نویز و اغتشاش های وارد بر سیستم اشاره نمود. با استفاده از تئوری لیاپانوف، پایداری سیستم حلقه بسته بازوی رباتیک ماهر تضمین می گردد و برای بررسی رفتار کنترل کننده پیشنهادی و مقایسه آن با سایر کنترل کننده ها، مدل دینامیکی بازویرباتیک ماهر در نرم افزار متلب شبیه سازی می شود و کارآمدی سیستم کنترل کننده پیشنهادی در کنترل بهینه سیستم بازوی رباتیک ماهر مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

قین و همکاران [14] آموزش تقلید برای دستکاری ماهرانه از راه دور با یک دوربین را ارائه کردند. پیشنهاد می کنند، که یادگیری تقلید را برای دستکاری ماهرانه با دست ربات چند انگشتی از تظاهرات انسان انجام دهند و سیاست را به دست ربات واقعی منتقل کنند. با یادگیری تقلیدی با استفاده از داده های مان، پیشرفت زیادی نسبت به خطوط پایه با چندین کار دستکاری پیچیده نشان می دهند. مهمتر از همه، نشان می دهند که خط مشی آموخته شده هنگام انتقال به ربات واقعی به طور قابل توجهی قوی تر است.

آنتونلی و همکاران [15] یک روش طبقه بندی کننده سیگنال EMG مبتنی بر مدل سازی (MBES) برای اهداف کنترل از راه دور رباتیک طراحی کردند. نتایج دلگرم کننده نشان می دهد که طبقه بندی کننده توسعه یافته می تواند یک رابط فرمان معتبر برای اهداف رباتیک باشد.

چا و همکاران [16] یک مطالعه بر روی تشخیص قصد و بازخورد حسی: کنترل دست مصنوعی رباتیک از طریق طبقه بندی EMG و بازخورد حس عمقی با استفاده از دستگاه هیپتیک مبتنی بر قانون انجام دادند. سیستم یکپارچه که شامل تشخیص قصد با استفاده از مدل طبقه بندی EMG مبتنی بر CNN و بازخورد حسی با استفاده از دستگاه لمسی پیشنهادی است، انتظار می رود برای کنترل پروتز دست مصنوعی رباتیک شرکت کنندگان از دست دادن اندام مورد استفاده قرار گیرد.

یا ضعف ناشناخته در اندام باشد. نتایج EMG می تواند به پزشک در تشخیص اختلالات عضلانی، اختلالات عصبی و اختلالات مؤثر در ارتباط اعصاب و ماهیچه ها کمک کند. ممکن است برخی از پزشکان از الکترومیوگرافی به عنوان الکترودیگنوزیس استفاده کنند [8]. الکترومیوگرافی این سیگنال ها را به صورت نمودار یا اعداد نمایش می دهد و در تشخیص انواع اختلالات عملکرد عصبی، اختلالات عملکرد عضلانی یا مشکلات انتقال سیگنال عصب به عضله، کمک زیادی به پزشکان می کند. [9].

الکترومیوگرافی یک تکنیک و روش تشخیصی برای ارزیابی سلامت عضلات و سلول های عصبی است. در واقع پاسخ ماهیچه یا فعالیت الکتریکی را در پاسخ به تحریک عصب عضله اندازه گیری می کند. نتایج EMG می تواند اختلال عملکرد عصبی، اختلال عملکرد عضلانی یا مشکلات انتقال سیگنال عصب به عضله را نشان دهد. در طول EMG سوزنی، یک یا چند سوزن کوچک که الکتروود نامیده می شود، مستقیماً در عضله قرار می گیرد، سپس فعالیت الکتریکی گرفته شده توسط الکتروودها بر روی یک اسیلوسکوپ (مانیتوری که فعالیت الکتریکی را به شکل امواج نشان می دهد) نمایش داده می شود [10].

### ۳- پیشنهاد پژوهش

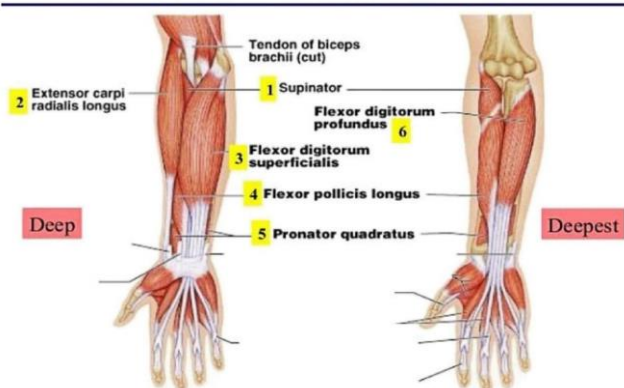
جوان و همکاران [11]، بازوی رباتیک با چهار درجه آزادی و دو مجری نهایی متفاوت طراحی کردند. این بازو شامل سه مفصل لولایی-کشویی-کشویی بوده و مجری نهایی نیز به دو صورت متفاوت گیره و صفحه آهنربایی با قابلیت تعویض ساخته شده است. سینماتیک مستقیم و معکوس بازوی رباتیک با توجه به پارامترهای دینامیت هارتنبرگ محاسبه شده است. علاوه بر این جهت مشخص شدن کامل بازو، فضای کاری نیز ترسیم شده است.

هادی پور و همکاران [12] یک روش کنترل مقاوم مد لغزشی بازوی ماهر رباتیک با استفاده از بسط سری فوریه در حضور عدم قطعیت طراحی کردند. مطالعه موردی یک ربات اسکارا است که توسط موتورهای الکتریکی DC آهنربا دائمی فعال می شود. تاثیر تخمین عدم قطعیت بر اساس بسط سری فوریه به جای استفاده از تابع علامت مورد مطالعه قرار می گیرد. همچنین روش پیشنهادی با چند جمله ای لژاندر نیز مقایسه می شود. نتایج شبیه سازی عملکرد مقاوم و رضایت بخش کنترل کننده پیشنهادی را تایید می کند.

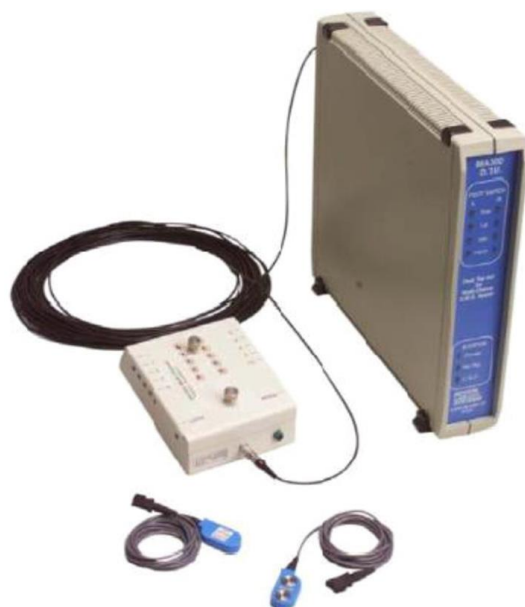
که بیشتر کارهای دست را در فعالیت های روزمره زندگی شامل می شوند.

#### ۴- مواد و روش ها

##### ۴-۱- داده های EMG



شکل ۱. عضلات خم کننده سطحی انگشتان و دراز خم کننده شست دست انسان



شکل ۲. دستگاه الکترومیوگرافی ۱۶ کانالی MA-300 و الکترودهای سطحی



شکل ۳. موقعیت الکترودها روی ساعد

حرکات به شرح زیر است:

- استوانه ای: برای گرفتن اجسام استوانه ای مانند یک بطری یا یک لیوان
- قلاب: برای حمل یا کشیدن اشیاء با استفاده از چهار انگشت مانند یک کیف

سیگنال های EMG از دست ۵ دختر ۲۰ تا ۲۳ ساله که در آزمایشگاه بیومکانیک گروه ورزشی دانشگاه بوعلی سینا همدان پذیرش می شوند [17]، جمع آوری می شود. این مطالعه مورد تایید کمیته اخلاق پژوهش دانشگاه بوعلی سینا قرار گرفت. آزمودنی ها رضایت آگاهانه ای داده اند که اجازه ثبت و استفاده از داده های EMG آنها را برای اهداف علمی می دهد. پژوهش با تمام مقررات مطابقت دارد. سیگنال ها با استفاده از دو الکتروود دستگاه الکترومیوگرافی تعبیه شده بر روی عضلات FDS<sup>۱</sup> و FPL<sup>۲</sup> و نرم افزار ضبط و پخش WinDaq در فرمت WDQ ثبت می شوند. ماهیچه ها به انگشتان دست انسان ختم می شوند و نقش اساسی در حرکت انگشتان دارند. دستگاه الکترومیوگرافی ۱۶ کانالی MA-300 و الکترودهای سطحی آن در شکل ۲، نشان داده شده است. الکتروود اول روی عضله FDS و الکتروود دوم روی عضله FPL قرار دارد. موقعیت الکترودها روی ساعد در شکل ۳، نشان داده شده است. افراد باید هر یک از هشت حرکت دست زیر را ده بار و هر کدام به مدت هفت ثانیه انجام دهند. یک فاصله پنج دقیقه ای برای آرامش بین حرکات وجود دارد. پیکربندی پیش فرض MA-300 در جدول ۱، فهرست شده است. در این جستجوی مجدد، فرکانس نمونه برداری سیگنال EMG روی ۲۰۰۰ هرتز تنظیم شد. هشت حرکت دست شامل استوانه، قلاب، جانبی، نقطه ای، استراحت، کروی، سه پایه و نوک است که در شکل ۴، نشان داده شده است. برای آزمایش سیستم کنترل میوالکتریک و طراحی دست طراحی شده اند. آنها حرکات اصلی هستند

<sup>۱</sup> Flexor digitorum superficialis muscle

<sup>۲</sup> Flexor pollicis longus muscle

خاموش شد تا میزان کم را ثبت کند. سیگنال نویز در این مطالعه علاوه بر این، از برخی فیلترها برای کاهش تاثیر نویز استفاده می شود. هدف این بخش اعمال فیلترهای مناسب برای حذف نویز اطلاعات است. برای حذف نویز از نرم افزار EMG Analysis Automation Section استفاده شده است. در این پژوهش از گزینه های Time Shift Data، Auto High Pass Filter، Low Pass Filter، Notch Filter، Zero Noise Suppression قسمت Automation استفاده شده است. در نتیجه سیگنال هایی با نویز کمتر در قالب C3D به دست می آیند و ذخیره می شوند. گزینه های زیر در زیر توضیح داده شده است:

#### • Time Shift Data

این گزینه به کاربر اجازه می دهد تا تاخیر در دریافت داده های EMG یا تاخیرهای ناشی از اعمال فیلترهای مختلف را حذف کند. برای مثال، اگر ۱۵ میلی ثانیه تأخیر در داده های اصلی یا فیلتر شده وجود داشته باشد، به صفر تبدیل می شود.

#### • صفر خودکار:

با فعال کردن این گزینه، یک افست صفر، تولید شده توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال، از سیگنال EMG حذف می شود.

#### • فیلتر شکاف:

بسیاری از عوامل می توانند نویز را با فرکانس خاصی به سیگنال EMG اضافه کنند، مانند نویز از خطوط AC (فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز). فیلتر ناچ در این مطالعه برای حذف نویز ۵۰ هرتز و هارمونیک های آن استفاده شد.

#### • فیلتر Low Pass:

این گزینه بخشی از سیگنال را که دارای فرکانس بالاتر از یک مقدار خاص است حذف می کند. در این مطالعه از فیلتر پایین گذر با درجه ۲۰ و فرکانس قطع ۵۰۰ هرتز استفاده شد.

#### • فیلتر High Pass:

این گزینه بخشی از سیگنال را که دارای فرکانس کمتر از یک مقدار خاص است حذف می کند. در این مطالعه از یک فیلتر بالاگذر با درجه ۲۰ و فرکانس قطع ۱۰ هرتز استفاده شد.

- جانبی: برای نگه داشتن اشیاء بین انگشت شست و قسمت جانبی انگشت چهارم. مانند یک کلید
- نقطه: برای نشان دادن جهت یا فشار دادن دکمه ها
- استراحت: مانند یک نیمکت برای نگهداری یک بشقاب یا کتاب
- کروی: برای گرفتن اشیاء با تمام دست، مانند توپ تنیس
- سه پایه: برای حس کردن اجسام کوچک بین انگشت شست، سبابه و انگشت میانی، مانند درب بطری
- نکته: برای فشار دادن اجسام کوچکتر مانند سنجاق

جدول ۱. پیکربندی پیش فرض MA-300

| پارامتر               | مقدار                              |
|-----------------------|------------------------------------|
| پهنای باند سیگنال EMG | ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز (-3 db)            |
| سطح ورودی EMG         | ۲،۵ میلی ولت در ورودی های پیش آمپر |
| سطح سیگنال EMG        | ۵ ± ولت (حداکثر)                   |
| کلیدهای پای آنالوگ    | ۰ تا ۴،۶۸۸ ولت در ۱۶ مرحله مجزا    |



شکل ۴. هشت حرکت دست

#### ۴-۲-پیش پردازش سیگنال EMG

سیگنال EMG ثبت شده به دلایل مختلفی از جمله ویژگی های بافت، تداخل امواج فیزیولوژیکی عضلات مجاور، تغییر در مکان های الکترود، تعریق و چربی پوست و نویز خارجی، نویزدار است. قبل از ضبط سیگنال EMG، سطح پوست با الکل کاملاً تمیز شد، الکترودها به پوست فرد چسبانده شدند تا از جابجایی الکترودها جلوگیری شود، و تلفن همراه آنها برای حذف نویز خارجی در آزمایشگاه

## • Noise Suppression

این گزینه دامنه و الگوریتم حذف نویز پس زمینه دستگاه را فعال می کند.

### ۴-۳- ویژگی های استخراج EMG

سیگنال EMG خام به دلیل اندازه بزرگ برای طبقه بندی مناسب نیست، که منجر به بار محاسباتی سنگین و کاهش نرخ تشخیص می شود. بنابراین، ویژگی های مختلف باید از داده های EMG استخراج شود. ویژگی های مختلفی از جمله دامنه زمان، دامنه فرکانس و دامنه فرکانس زمانی از سیگنال های EMG استخراج می شوند. بر اساس پژوهش های قبلی، ویژگی های بهینه برای سیستم های تشخیص حرکت دست شامل MAV<sup>۲</sup>، VAR<sup>۴</sup> و SE<sup>۵</sup> می شود. همچنین، SE اضافه شده به ویژگی های MAV، VAR و سری های زمانی اتورگرسیو (AR) دقت طبقه بندی را برای برنامه های کاربردی دست مجازی و آفلاین بهبود بخشید. بنابراین، ویژگی های دامنه زمانی MAV، VAR و SE محاسبه می شوند. ویژگی های این مطالعه برای اهداف زیر استفاده می شود: طبقه بندی داده های EMG برای تشخیص حرکت و مقایسه سیگنال های حرکت دست انسان (EMG) و سیگنال های حرکت دست رباتیک. ابتدا باید پنجره های مناسب برای تجزیه و تحلیل داده های EMG در نظر گرفته شود، به دلیل غیر ثابت بودن این سیگنال ها. بنابراین، داده های EMG در یک پنجره زمانی ۲۵۰ میلی ثانیه تحلیل می شوند. معادله (۱) تعداد پنجره ها را محاسبه می کند.

(معادله ۱)

$$No. of windows = \frac{data\ length - window\ size}{window\ increment} + 1$$

<sup>۲</sup> Motion Amplitude Vector

<sup>۴</sup> Variance

<sup>۵</sup> Structuring Element

که در آن طول داده طول برداری است که داده های ثبت شده در آن قرار دارند، اندازه پنجره اندازه پنجره ای است که برای محاسبه ویژگی های ریاضی استفاده می شود، و افزایش پنجره اندازه افزایش مجاز پنجره است. در این مطالعه، افزایش پنجره ۷۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. اگر سیگنال EMG ثبت شده در نقطه  $i$  پنجره با  $s(i)$  نمایش داده شود، MAV آن با استفاده از معادله ۲، محاسبه می شود.  $N$  اندازه پنجره (۲۵۰ میلی ثانیه) است.

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |s(i)| \quad (معادله ۲)$$

VAR با استفاده از معادله (۳) محاسبه می شود:

$$VAR = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N s(i)^2 \quad (معادله ۳)$$

SE مطابق معادله (۴) محاسبه می شود:

$$SE(n, r, N) = -1n \frac{B^{n+1}(r)}{B^n(r)} \quad (معادله ۴)$$

$N$  طول پنجره است،  $n$  بعد بردار داده است که در روش ما مقدار آن عدد ۲ است و  $\sigma = 0.25\sigma$  جایی که  $\sigma$  انحراف استاندارد سیگنال EMG است.

### ۵- یافته های پژوهش

قبل از پرداختن به کاربردها، درک چگونگی دریافت سیگنال های EMG ضروری است. سیگنال های EMG معمولاً با استفاده از الکترودهای سطحی که روی پوست بالای ماهیچه های مورد نظر قرار می گیرند، به دست می آیند. این الکترودها فعالیت الکتریکی تولید شده توسط ماهیچه ها را در حین انقباض تشخیص می دهند. سیگنال های به دست آمده سپس فیلتر شده و برای استخراج اطلاعات مفید پردازش می شوند.

### ۵-۱- بهبود کنترل دست رباتیک به کمک کنترل

#### کننده تطبیقی فازی PID

کنترل دست رباتیک نقش مهمی در زمینه رباتیک ایفا می کند و ربات ها را قادر می سازد تا وظایف مختلف ماهرانه را با دقت و دقت انجام دهند. با افزایش تقاضا برای کاربردهای رباتیک، نیاز به افزایش مکانیسم های کنترلی برای بهبود کارایی و سازگاری دست های رباتیک وجود دارد.

بهبود کنترل دست رباتیک با استفاده از یک کنترل کننده تطبیقی فازی PID یک رویکرد امیدوارکننده برای افزایش کارایی و سازگاری سیستم های کنترل دست رباتیک ارائه می دهد. با ترکیب مزایای کنترل PID و منطق فازی، کنترل کننده می تواند عدم قطعیت ها و غیرخطی ها را با

مجموعه های K-1 برای آموزش داده ها استفاده می شود و هر بار یک زیر مجموعه برای آزمایش داده ها استفاده می شود. روش K-fold CV کل فرآیند را k بار با تغییر نمونه های داده های آزمون و آموزش تکرار می کند. علاوه بر این، بهترین مدل با یافتن حداقل خطا بر اساس آمارهای تقریب خطای مختلف تعیین می شود. نتایج طبقه بندی از نظر دقت، حساسیت و ویژگی برای هر موضوع مورد ارزیابی قرار می گیرد. این معیارها به طور گسترده برای تشخیص و طبقه بندی استفاده می شود. آنها با استفاده از معادله های ۵، ۶، ۷ تعریف شده اند. تعداد مثبت های درست (TP)، مثبت های کاذب (FP)، منفی های درست (TN) و منفی های کاذب (FN) برای محاسبه استفاده می شود.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (5 \text{ معادله})$$

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} \times 100 \quad (6 \text{ معادله})$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN+FP} \times 100 \quad (7 \text{ معادله})$$

### ۵-۳- تجزیه و تحلیل تشخیصی (DA)

DA<sup>۱۰</sup> یک روش طبقه بندی محبوب برای تخمین پارامترهای توابع متمایز متغیرهای پیش بینی است. روش طبقه بندی DA دارای دو زیر مجموعه است که به نام های LDA و QDA شناخته می شوند. تابع تفکیک خطی با چگالی چند متغیره برای هر کلاس متناسب است. در روش LDA که به طبقه بندی کور معروف است، مرز بین طبقات با استفاده از معادله خط مرتبه اول مشخص می شود. مزیت طبقه بندی کننده LDA این است که نیازی به آموزش تکراری نیست و از کم آموزشی یا تمرین بیش از حد اجتناب می کند. در روش QDA، مرز بین کلاس ها با منحنی ها تعریف می شود. QDA احتمال هر کلاس را به عنوان یک توزیع گاوسی مدل می کند و سپس از توزیع های زیر برای

محیط های متغیر سازگار کند و به عملکرد کنترل برتر دست یابد. ادغام دانش تخصصی و یادگیری تطبیقی کنترل کننده را قادر می سازد تا پارامترهای کنترلی خود را بهینه کند و به دستکاری دقیق اشیاء دست یابد.

### ۵-۲- تجزیه و تحلیل ویژگی ها و طبقه بندی

هدف از طبقه بندی جداسازی هشت حرکت دست بر اساس ویژگی های استخراج شده از داده ها و تشخیص نوع حرکت توسط طبقه بندی کننده است. وقتی طبقه بندی کننده حرکتی را شناسایی می کند، سیگنال های زاویه مناسب برای حرکت انگشتان رباتیک تعیین می شوند و به عنوان سیگنال مرجع به کنترل کننده فازی-PID ارسال می شوند.

در شکل ۵، ویژگی SE در طول زمان به صفر گرایش دارد، مگر در لحظات اولیه. بنابراین بهتر است از ویژگی SE برای طبقه بندی داده ها استفاده نکنید. بنابراین، طبقه بندی داده ها بر اساس ویژگی های MAV و VAR با روش های LDA، QDA، KNN و SVM<sup>۹</sup> خواهد بود. اینها چهار روش یادگیری ماشینی هستند که به خوبی شناخته شده و به طور گسترده در طبقه بندی سیگنال EMG استفاده می شوند. طبقه بندی حرکات برای هر موضوع انجام می شود. این یک موضوع خاص است زیرا سیگنال EMG در چندین نفر، حتی در یک نفر، در تکرار یک حرکت متفاوت است.

در این پژوهش، از اعتبارسنجی متقاطع K-fold (CV) با k = 5 برای ارزیابی عملکرد هر طبقه بندی استفاده شد. ابتدا داده ها به طور تصادفی به زیر مجموعه های K تقسیم می شوند که هر کدام تعداد نمونه یکسانی دارند. سپس، از زیر

<sup>۶</sup> Linear Discriminant Analysis.

<sup>۷</sup> Quadratic Discriminant Analysis

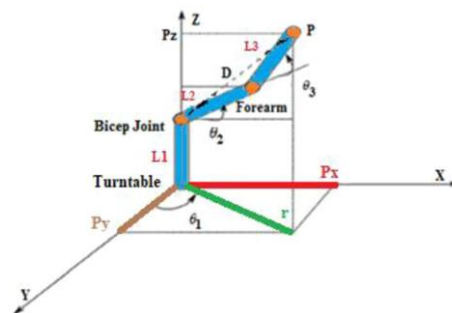
<sup>۸</sup> K-Nearest Neighbors

<sup>۹</sup> Support Vector Machine

<sup>۱۰</sup> Discriminant Analysis

موقعیت های نقطه پایانی ربات در مختصات فضایی هستند. فاصله مستقیم از نقطه صفر سیستم مختصات تا تصویر نقطه P در صفحه XY و D فاصله مفصل دوسر بازو تا نقطه P است. در نهایت دست انسان با پنج ربات با سه عدد مدل سازی می شود. درجه آزادی، و هشت حرکت توسط یک دست رباتیک انجام می شود. بلوک دیاگرام سیمولینک ربات سه درجه آزادی در شکل ۴، نشان داده شده است. مفصل دوسر بازو، ساعد و صفحه گردان ربات با سه بلوک چرخشی Revolute1، Revolute2 و Revolute3 مدل سازی شده اند. یک بلوک چرخشی یک درجه چرخشی از آزادی را تعریف می کند. بدن پیرو (F) نسبت به بدنه پایه (B) حول یک محور چرخشی می چرخد. هر کدام از این بلوک ها دو خروجی دارند. یکی از خروجی ها به سنسور مفصلی (حسگر مفصل ۱، حسگر مفصل ۲، حسگر مفصل ۳) متصل است که زاویه چرخش مفصل را اندازه گیری می کند. زوایای اندازه گیری شده با تتا ۰، تتا ۱ و تتا ۲ نشان داده می شوند. خروجی دیگر به بدنه سفت و سختی متصل است که نقش بازوی ربات را بازی می کند. بلوک خاکستری Env محیط شبیه سازی مکانیکی را مانند گرانش و ابعاد تعریف می کند. بلوک RootGround یک طرف اتصال را به یک مکان ثابت متصل می کند، بلوک Weld نشان دهنده مکانیسم صفر درجه آزادی برای انجام چرخش مفصل نسبت به آن است و RigidBody1 یک زیر سیستم صلب است. پارامترهای مدل در جدول ۲، فهرست شده است.

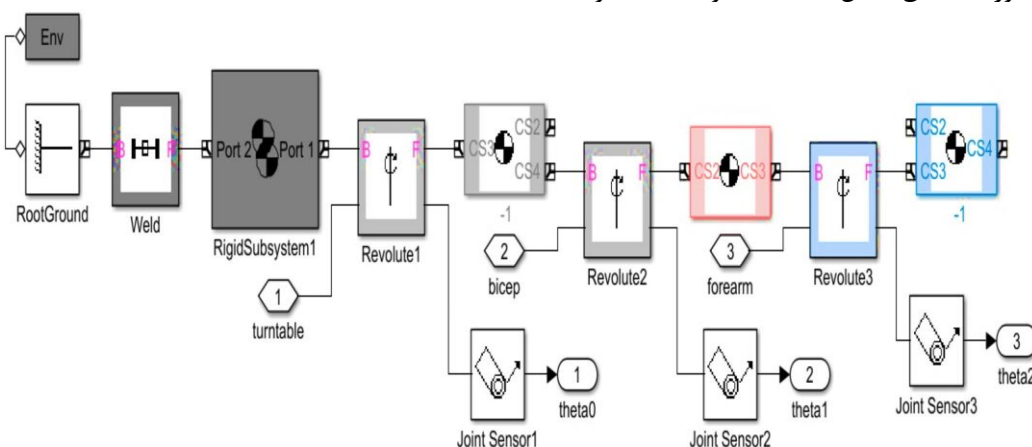
پیش بینی کلاس برای یک نقطه آزمایشی معین استفاده می کند. پارامترهای گاوسی برای هر کلاس را می توان از نقاط آموزشی با استفاده از تخمین حداکثر درستنمایی تخمین زد. برای طبقه بندی LDA و QDA در متلب، از معیارهای تشخیص خطی و درجه دوم استفاده می شود.



شکل ۵. یک ربات با سه درجه آزادی در مختصات فضایی

#### ۱- ۴،۵ مدل سازی و شبیه سازی ربات با سه درجه آزادی

اولین قدم در طراحی یک کنترل کننده برای هر سیستم، مدل سازی آن است. شکل ۵، رباتی را با سه درجه آزادی در مختصات فضایی نشان می دهد. هر انگشت انسان دارای سه بند انگشت و سه مفصل است. این ربات دارای سه بازو با طول های  $l_1$ ،  $l_2$  و  $l_3$  است که به رنگ آبی در شکل نشان داده شده است و مانند سه بند انگشت انسان عمل می کند. همچنین این ربات دارای سه مفصل دوسر بازو، ساعد و صفحه گردان است که در شکل با رنگ های نارنجی نشان داده شده است. این سه مفصل نقش سه مفصل انگشت انسان را نیز بازی می کنند.  $\theta_1$ ،  $\theta_2$  و  $\theta_3$  زوایای بازوهای ربات با محورهای مطابق شکل ۵ هستند و  $Px$ ،  $Py$  و  $Pz$



شکل ۶. بلوک دیاگرام سیمولینک یک ربات با سه درجه آزادی

جدول ۲. پارامترهای مدل مورد استفاده در شبیه سازی

| عنوان پارامتر |             |           |            |            | انگشت                                                        |
|---------------|-------------|-----------|------------|------------|--------------------------------------------------------------|
| شست           | انگشت اشاره | انگشت وسط | انگشت حلقه | انگشت کوچک |                                                              |
| ۱۶,۳          | ۱۲,۳        | ۱۴,۳      | ۱۲,۳       | ۸,۳        | جرم هر مفصل و بازوی رباتیک مرتبط (گرم)                       |
| ۱۵            | ۱۷          | ۱۸        | ۱۷         | ۱۱         | طول هر بازوی رباتیک (میلی متر)                               |
| ۰,۰۴۵         | ۰,۰۳۹       | ۰,۰۴۲     | ۰,۰۳۹      | ۰,۰۳۴      | ممان اینرسی هر مفصل و بازوی رباتیک مربوطه (کیلوگرم متر مربع) |
| ۲۵۰           | ۲۵۰         | ۲۵۰       | ۲۵۰        | ۲۵۰        | محدوده چرخش مفصل دوسر بازو و ساعد (DG)                       |
| ۳۶۰           | ۳۶۰         | ۳۶۰       | ۳۶۰        | ۳۶۰        | محدوده چرخش مفصل گردان (DG)                                  |

فازی وجود خواهد داشت. این سیستم های فازی از نوع TakagiSugeno هستند و دارای دو ورودی شامل سیگنال مرجع و بازخورد و یک خروجی می باشند. هر چه توابع و قوانین عضویت در سیستم های فازی دقیق تر تنظیم شوند، عملکرد سیستم مطلوب تر است. یک خطای جزئی پس از آزمایش توابع مختلف عضویت در این پژوهش با استفاده از توابع زنگی شکل به دست می آید.

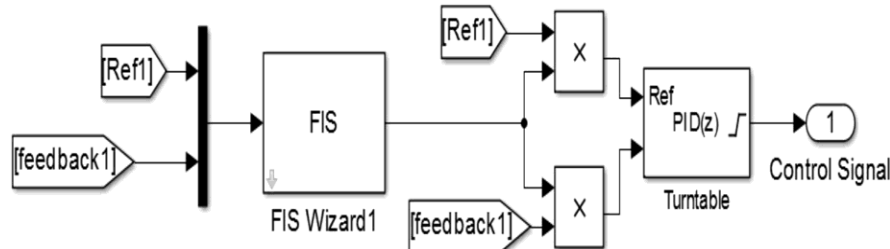
خروجی این برنامه یک کنترل کننده منطق فازی است که می تواند به طور کاملاً هوشمندانه علایق کنترل کننده PID را انتخاب کند. در نتیجه، سه سیستم فازی برای انتخاب و تنظیم تطبیقی علایق کنترل کننده PID برای مفاصل میز گردان، دوسر بازو و ساعد در نظر گرفته شده است. خروجی علایق کنترل کننده PID را تنظیم می کند (کاهش یا افزایش می دهد). پنج تابع عضویت فازی برای هر ورودی تعریف شده است، بنابراین در هر سیستم فازی ۲۵ قانون

جدول ۳. پارامترهای کنترل کننده PID نهایی برای سه مفصل انگشت رباتیک

| مشترک      | متناسب (P) | انتگرال (I) | مشتق (D) | ضریب فیلتر (N) | وزن تعیین شده (B) | وزن تعیین شده (C) |
|------------|------------|-------------|----------|----------------|-------------------|-------------------|
| صفحه گردان | ۴,۵        | ۱۲          | ۱,۱۷۳    | ۲۵             | ۱                 | ۱                 |
| عضله دو سر | ۴,۵        | ۱۴          | ۰,۸۹     | ۱۰             | ۱                 | ۱                 |
| ساعد       | ۸          | ۶۰          | ۱,۲۱۲    | ۱۵             | ۱                 | ۱                 |

این بهره تنظیم کننده در هر دو مقدار مرجع (Ref1) و بازخورد (feedback1) و به عبارت دیگر سیگنال خطا ضرب می شود و وارد کنترل کننده PID می شود. اگر بهره تنظیم کننده در هر بهره PID یا سیگنال خطای ورودی به بلوک PID ضرب شود، به دلیل قانون جابجایی ضرب تفاوتی حاصل نخواهد شد. در نهایت، سیگنال خروجی PID که در شکل به عنوان سیگنال کنترل نشان داده شده است، به موتورهای DC ارسال می شود.

نمونه ای از اجرای یک کنترل کننده فازی - PID تطبیقی در شکل ۷ نشان داده شده است. ورودی های بلوک Ref1، FIS و Feedback1، وارد بلوک FIS می شوند. Ref1 (سیگنال مرجع) در زیر توضیح داده شده است، و فیدبک ۱ (سیگنال بازخورد) سیگنالی است که از حرکت یک دست رباتیک که توسط یک کنترل کننده فازی - PID کنترل می شود، حاصل می شود. خروجی بلوک FIS بهره PID را تنظیم می کند.



شکل ۷. اجرای یک کنترل کننده فازی - PID تطبیقی

|       |       |       |         |
|-------|-------|-------|---------|
| ۳۵,۲۶ | ۹۰,۶۹ | ۸۳,۸۱ | ۴       |
| ۳۱,۱۷ | ۹۰,۰۹ | ۸۲,۶۹ | ۵       |
| ۳۲,۷۹ | ۹۰,۴۱ | ۸۳,۲۵ | میانگین |

جداول ۴ تا ۷ دقت، ویژگی و حساسیت طبقه‌بندی‌کننده‌ها را برای هر فرد نشان می‌دهد که با میانگین هشت مقدار محاسبه شده است. شکل ۷ (قسمت a تا d) نمونه ای از ماتریس های سردرگمی برای طبقه بندی کننده های LDA، QDA، KNN و SVM را نشان می دهد که در این مطالعه به ترتیب برای یک فرد استفاده شده است.

جدول ۶. نتایج طبقه بندی توسط KNN

| زیرشناسه | دقت (درصد) | ویژگی (درصد) | حساسیت (درصد) |
|----------|------------|--------------|---------------|
| ۱        | ۸۶,۱۱      | ۹۲,۰۳        | ۴۶,۷۷         |
| ۲        | ۸۶,۸۴      | ۹۲,۴۷        | ۴۶,۹۴         |
| ۳        | ۸۸,۲۱      | ۹۳,۲۶        | ۵۰,۲۳         |
| ۴        | ۹۰,۶۱      | ۹۴,۶۰        | ۶۳,۷۸         |
| ۵        | ۸۶,۲۵      | ۹۲,۰۸        | ۴۵,۱۸         |
| میانگین  | ۸۷,۶۰      | ۹۲,۸۸        | ۵۰,۵۸         |

جدول ۷. نتایج طبقه بندی توسط SVM

| زیرشناسه | دقت (درصد) | ویژگی (درصد) | حساسیت (درصد) |
|----------|------------|--------------|---------------|
| ۱        | ۸۷,۸۳      | ۹۲,۹۹        | ۵۱,۳۲         |
| ۲        | ۹۱,۳۷      | ۹۵,۰۷        | ۶۴,۵۳         |
| ۳        | ۹۰,۲۴      | ۹۴,۳۱        | ۵۹,۵۸         |
| ۴        | ۹۱,۹۹      | ۹۵,۳۹        | ۶۷,۷۴         |
| ۵        | ۹۲,۰۴      | ۹۵,۴۴        | ۶۷,۳۵         |
| میانگین  | ۹۰,۶۹      | ۹۴,۶۴        | ۶۲,۱۰         |

## ۵-۵- نتایج طبقه بندی

این بخش نتایج طبقه بندی به دست آمده با روش های یادگیری ماشینی را گزارش می کند. جداول ۴، ۵، ۶ و ۷ نتایج طبقه بندی را بر اساس الگوریتم های LDA، QDA، KNN و SVM نشان می دهد.

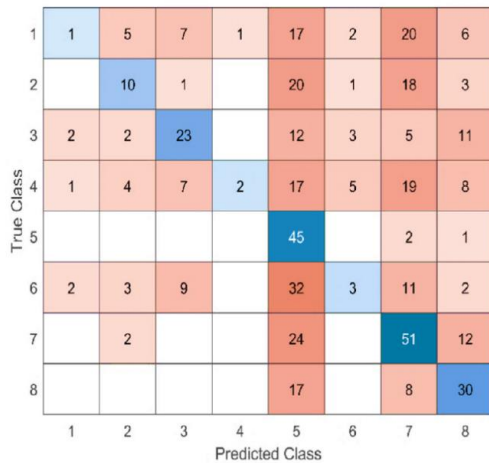
جدول ۴. نتایج طبقه بندی بر اساس LDA

| زیرشناسه | دقت (درصد) | ویژگی (درصد) | حساسیت (درصد) |
|----------|------------|--------------|---------------|
| ۱        | ۸۳,۴۷      | ۹۰,۵۳        | ۳۴,۲۳         |
| ۲        | ۸۱,۰۹      | ۸۸,۸۹        | ۲۲,۵۳         |
| ۳        | ۸۲,۵۱      | ۸۹,۹۸        | ۲۹,۸۳         |
| ۴        | ۸۱,۴۳      | ۸۹,۲۵        | ۲۴,۳۱         |
| ۵        | ۸۲,۱۳      | ۸۹,۷۱        | ۲۷,۶۳         |
| میانگین  | ۸۲,۱۲      | ۸۹,۶۷        | ۲۷,۷۰         |

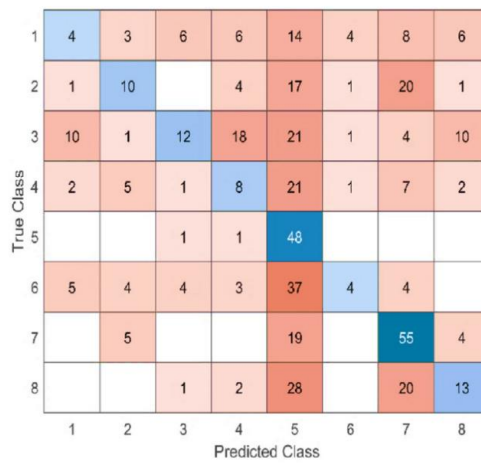
در این مطالعه تعداد کلاس ها برابر با تعداد حرکات هشت کلاس است. برای محاسبه سه معیار دقت، حساسیت و ویژگی برای ارزیابی عملکرد طبقه‌بندی‌کننده‌ها، یک ماتریس سردرگمی برای هر فرد در هر یک از روش‌های طبقه‌بندی محاسبه می‌شود. هشت مقدار برای هر فرد از ماتریس سردرگمی هشت مقدار برای دقت، هشت مقدار برای ویژگی و هشت مقدار برای حساسیت محاسبه می شود.

جدول ۵. نتایج طبقه بندی توسط QDA

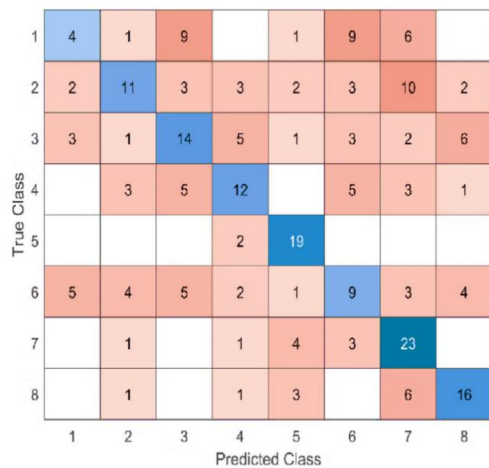
| زیرشناسه | دقت (درصد) | ویژگی (درصد) | حساسیت (درصد) |
|----------|------------|--------------|---------------|
| ۱        | ۸۲,۹۱      | ۹۰,۲۸        | ۳۱,۰۱         |
| ۲        | ۸۳,۴۶      | ۹۰,۴۹        | ۳۳,۲۲         |
| ۳        | ۸۳,۳۹      | ۹۰,۵۲        | ۳۳,۳۰         |



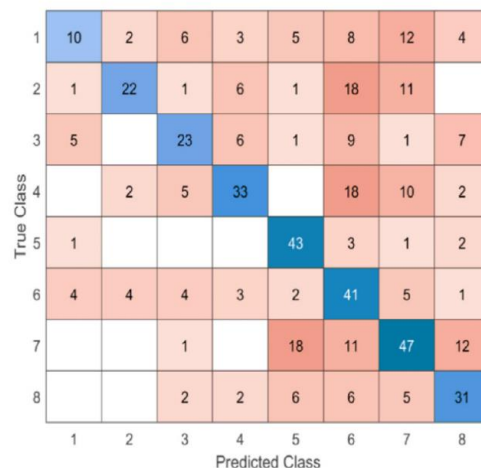
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۸. نمونه ای از ماتریس های سردرگمی برای طبقه بندی کننده ها برای یک فرد. (قسمت a) LDA. (قسمت b) LDA. (قسمت c) KNN. (قسمت d) SVM

## ۶- نتیجه گیری

در نتیجه، کنترل کننده تطبیقی PID فازی با استفاده از طبقه بندی سیگنال EMG یک راه حل امیدوارکننده برای بهبود کنترل دست رباتیک ارائه می دهد. با ترکیب نقاط قوت کنترل PID منطق فازی و تجزیه و تحلیل سیگنال EMG، این رویکرد به افزایش سازگاری عملکرد و دقت در کنترل دست های رباتیک دست می یابد. نتایج تجربی اثربخشی رویکرد پیشنهادی را تأیید می کند که راه را برای کاربرد آن در حوزه های مختلف هموار می کند. پژوهشات آینده می تواند تکنیک های بهینه سازی را بیشتر بررسی کند و دامنه کاربردهای این استراتژی کنترل نوآورانه را گسترش دهد.

استفاده از یک کنترل کننده تطبیقی PID فازی بر اساس طبقه بندی سیگنال EMG نوید بزرگی برای بهبود کنترل دست رباتیک دارد. این تکنیک کنترل پیشرفته مزایای کنترل PID منطق فازی و تجزیه و تحلیل سیگنال EMG را ترکیب می کند که منجر به افزایش عملکرد و دقت در حرکات دست رباتیک می شود. پژوهش ارائه شده در این مقاله اثربخشی رویکرد پیشنهادی را در دستیابی به کنترل دقیق و طبیعی دست های رباتیک نشان داده است. با استفاده از سیگنال های EMG که توسط ماهیچه ها در حین حرکات دست تولید می شوند، کنترلر قادر است مقاصد کاربر را با دقت بیشتری تفسیر کند. این یک تعامل شهودی و بدون درز بین کاربر و دست رباتیک را امکان پذیر می کند.

## ۷- منابع

استفاده از بسط سری فوریه در حضور عدم قطعیت، "۱۴۰۱.

- [13] ع. فروتن and ع. صفا، "کنترل کننده مدل‌گزشی مبتنی بر شبکه عصبی چبیشف برای بازوی رباتیک ماهر،" *سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق، کامپیوتر، مکانیک و هوش مصنوعی*. مشهد، ۱۴۰۲. Available: <https://civilica.com/doc/1707765>
- [14] Y. Qin, H. Su, and X. Wang, "From one hand to multiple hands: Imitation learning for dexterous manipulation from single-camera teleoperation," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 10873–10881, 2022.
- [15] M. G. Antonelli, P. Beomonte Zobel, F. Durante, and M. Zeer, "Modeling-based EMG signal (MBES) classifier for robotic remote-control purposes," in *Actuators*, MDPI, 2022, p. 65.
- [16] H. Cha, S. An, S. Choi, S. Yang, S. Park, and S. Park, "Study on Intention Recognition and Sensory Feedback: Control of Robotic Prosthetic Hand Through EMG Classification and Proprioceptive Feedback Using Rule-based Haptic Device," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 15, no. 3, pp. 560–571, 2022.
- [17] H. Karami, "Dataset EMG." [Online]. Available: <https://github.com/Hamidreza-Karami/Improving-Robotic-Hand-Control-via-Adaptive-Fuzzy-PI-Controller-using-Classification-of-EMG-Signals>

- [1] S. Zhang *et al.*, "Piezo robotic hand for motion manipulation from micro to macro," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, p. 500, 2023.
- [2] W. Zhang, Z. Miao, N. Li, C. He, and T. Sun, "Review of current robotic approaches for precision weed management," *Curr. Robot. reports*, vol. 3, no. 3, pp. 139–151, 2022.
- [3] Z. Wang, S. Hirai, and S. Kawamura, "Challenges and opportunities in robotic food handling: A review," *Front. Robot. AI*, vol. 8, p. 789107, 2022.
- [4] H. Saeidi *et al.*, "Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis," *Sci. Robot.*, vol. 7, no. 62, p. eabj2908, 2022.
- [5] Z. Liu, Q. Liu, W. Xu, L. Wang, and Z. Zhou, "Robot learning towards smart robotic manufacturing: A review," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 77, p. 102360, 2022.
- [6] W. Wang, Q. Guo, Z. Yang, Y. Jiang, and J. Xu, "A state-of-the-art review on robotic milling of complex parts with high efficiency and precision," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 79, p. 102436, 2023.
- [7] Y. Yu *et al.*, "All-printed soft human-machine interface for robotic physicochemical sensing," *Sci. Robot.*, vol. 7, no. 67, p. eabn0495, 2022.
- [8] A. Cimolato, J. J. M. Driessen, L. S. Mattos, E. De Momi, M. Laffranchi, and L. De Micheli, "EMG-driven control in lower limb prostheses: A topic-based systematic review," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–26, 2022.
- [9] R. M. Maura, S. Rueda Parra, R. E. Stevens, D. L. Weeks, E. T. Wolbrecht, and J. C. Perry, "Literature review of stroke assessment for upper-extremity physical function via EEG, EMG, kinematic, and kinetic measurements and their reliability," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–32, 2023.
- [10] G. Li *et al.*, "Continuous dynamic gesture recognition using surface EMG signals based on blockchain-enabled internet of medical things," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 646, p. 119409, 2023.

- [11] س. جوان and ح. بابازاده، "بازوی رباتیک با چهار درجه آزادی و دو مجری نهایی متفاوت،" *پنجمین همایش ملی فناوریهای نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک/ایران*. تهران، ۱۴۰۱. Available: <https://civilica.com/doc/1538184>
- [12] ع. هادی پور، س. آذرگشسب and ع. قاسمی، "کنترل مقاوم مدل‌گزشی بازوی ماهر رباتیک با