

طراحی سیستم کاهش لرزش دست در بیماران مبتلا به پارکینسون با استفاده از کنترل پیش بین

رویا آراسته^۱، جواد صفائی^{۲*}، مهدی عباسی^۳، عارف افشارفرد^۴

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استادیار بیوالکترونیک، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، safaie@um.ac.ir

^۳ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۴ دانشیار مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۰

ویرایش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۱

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۴

چکیده: بیماری پارکینسون بعد از آلزایمر شایع‌ترین بیماری اعصاب محسوب می‌شود که با کاهش توانایی مغز در تولید ماده‌ای به نام دوپامین ایجاد می‌گردد. روش‌های مختلفی برای کاهش اثرات ناشی از این بیماری تاکنون ارائه شده است، اما متأسفانه این روش‌ها دارای عوارض جانبی فراوانی می‌باشند. به همین علت تلاش‌های فراوانی برای یافتن روش‌های جایگزین و غیرتهاجمی صورت پذیرفته است که عموماً به دلیل هزینه بالا، وزن زیاد سیستم و ... کارآمد نبودند.

در این مقاله از روش فعال جهت کاهش لرزش منتقل شده به دستگاه استفاده می‌گردد. در طرح پیشنهادی، ابتدا لرزش دست با استفاده از فیلتر ANFIS شناسایی شده و سپس با استفاده از دو موتور الکتریکی و مکانیزم طرح شده، حرکتی در خلاف جهت لرزش دست با استفاده از کنترلر پیش بین اعمال می‌گردد. نتایج شبیه سازی حاکی از عملکرد بسیار خوب سیستم در پیروی از حرکات ارادی و حذف لرزش غیر ارادی حاصل از بیماری پارکینسون می‌باشد.

کلمات کلیدی: پارکینسون، ربات کاهش لرزش دست، کنترل پیش بین، شبکه عصبی فازی.

Design of Hand Tremor Reduction System Based on Predictive Control in Patients with Parkinson Disease

Roya Arasteh, Javad Safaie*, Mahdi Abbasi, Aref Afsharfard

Abstract: Parkinson's disease is the most common neurological disorder after Alzheimer's, which is caused by a decrease in the brain's ability to produce dopamine. There are several ways to reduce the effects of this disease so far, but unfortunately these have many side effects. For this reason, many attempts have been made to find non-invasive alternative methods, which are generally ineffective due to the cost, system weight, and so on.

In this paper, the active method was used to reduce the transmitted vibration to the device. In the proposed scheme, the hand vibration was first identified using an ANFIS filter and then a reverse motion was applied by two electric motors and the designed mechanism, using a predictive controller. The simulation results showed the system performance in following voluntary movements and eliminating spontaneous vibration, which stems from Parkinson's disease.

Keywords: Parkinson, Hand tremor reduction robot, Predictive control, Fuzzy neural network.

۱- مقدمه

لرزش، حرکتی نوسانی، شبه سینوسی و غیر ارادی عضوی از بدن است که می‌تواند منشأ عصبی یا فیزیکی داشته باشد. لرزش در قسمتهای مختلف بدن بیماران مشاهده می‌شود، پارکینسون (PD) و ایسنشیل ترمور (ET) از جمله رایجترین بیماری‌هایی هستند که باعث لرزش عضوی از بدن به خصوص دست‌ها با فرکانس ۳ تا ۶ هرتز می‌شوند. اگر چه لرزش عضوی از بدن مانند دستها، بیماری خطرناک و کشنده‌ای به شمار نمی‌آید ولی اغلب بر روی فعالیت‌های روزانه بیماران نظیر خوردن، نوشیدن، تایپ کردن، نوشتن و موارد بسیاری از این قبیل تأثیر منفی فراوانی دارد و در نتیجه باعث افت شدید سطح کیفی زندگی شخصی و کاری بیماران می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهد که حدود ۷ میلیون نفر درجهان به بیماری پارکینسون مبتلا هستند [۱]. متأسفانه علت اصلی ابتلا به این دسته از بیماری‌ها تاکنون کشف نشده و درمان قطعی نیز برای آنها ارائه نگردیده است.

روش دارویی رایج‌ترین راه‌حلی است که در حال حاضر برای کنترل و کاهش شدت بیماری وجود دارد. البته در موارد پیشرفته، جراحی نیز پیشنهاد می‌گردد. بر اساس مطالعات انجام شده، استفاده از درمان دارویی سبب ایجاد عوارض جانبی گوناگونی از جمله تاری دید، خستگی، توم، عدم تعادل، تهوع و خواب‌آلودگی می‌شود [۲]. با توجه به این مشکلات، یافتن روش درمان یا بهبود موثر و غیر تهاجمی برای بیماران پارکینسون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد و تحقیقات زیادی را تا کنون به خود اختصاص داده است که متأسفانه اکثر آنها نیاز به تجهیزات بزرگ و گران‌قیمتی دارند که باعث ایجاد محدودیت در استفاده از آنها می‌گردد از قبیل: مسیریابی با استفاده از دوربین Creative Senz2D camera [۳]، توسعه دستکش دارای تکنولوژی پیزومقاومتی و استفاده از ژيروسکوپ قابل نصب بر روی مچ دست [۴]، به حداقل رساندن اثرات لرزش دست در نوشتن [۵]، جذب منفعل لرزش برای کنترل لرزش استراحت در دست بیمار مبتلا به پارکینسون [۶]، تخمین فرکانس لرزش دست بیماران به صورت آنلاین [۷]، ارزیابی حرکت دست بیماران مبتلا به پارکینسون [۸]، استفاده از روش کنترل فعال برای کاهش لرزش دست بیماران مبتلا به پارکینسون (با استفاده از الگوریتم ژنتیک و فیدبک از حرکت دست) [۹]، کاهش لرزش دست بیماران از طریق ترکیب کنترل کننده PID و منطق فازی (روی مدل بایودینامیکی با ۴ درجه آزادی) [۱۰].

با توجه به اینکه هدف سیستم ارائه شده در این پژوهش، حذف حرکات غیرارادی دست بیماران مبتلا به پارکینسون است، سیستم بایستی توانایی تفکیک بین دو حرکت ارادی و غیرارادی دست این بیماران را داشته باشد. فیلترهای مختلفی تاکنون به کاربرده شده است. ناوت تلاش کرد تا لرزش دست را در استفاده از موس توسط فیلتر از بین ببرد [۱۱]. گانزالز از طریق ردیابی مسیر الگوریتم، فیلتر دیجیتال را گسترش داد [۱۲]. رویور از یک الگوریتم فیلتر ویژه برای کاهش لرزش فیزیولوژیکی دست بیماران مبتلا

به پارکینسون استفاده کرد [۶]. البته شایان ذکر است که این الگوریتم فیلترینگ عملکرد مطلوب را به دست نمی‌دهد.

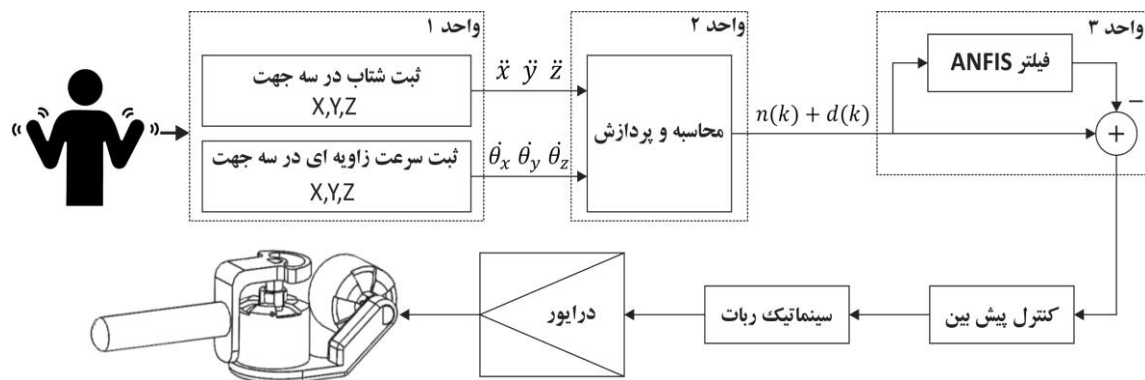
هدف اصلی پژوهش حاضر، ارائه طرحی غیرتهاجمی، قابل حمل جهت کاهش مؤثر لرزش دست، به منظور ارتقا سطح کیفی زندگی روزمره بیماران مبتلا به بیماری پارکینسون می‌باشد. در این طرح ابتدا لرزش دست توسط الگوریتم Recurrent Self-Evolving Fuzzy Neural Network (RSEFNN) شناسایی می‌شود. ایده اصلی این است که نویز وارد شده (لرزش دست بیمار) بر حسب یک مسیر پیش بینی شده برطرف گردد و سپس با استفاده از دو موتور الکتریکی و مکانیزم مطرح شده، حرکتی در خلاف جهت لرزش دست با استفاده از کنترلر اعمال گردد، همچنین از جاذب‌های دینامیکی ارتعاشات به منظور کاهش غیرفعال ارتعاشات منتقل شده به پایه دستگاه استفاده شده‌است که مشخصه جاذب‌ها براساس فرکانس غالب لرزش دست بیماران پارکینسونی تعیین می‌شود [۱۳]. ایده کنترل پیش بین براساس شبکه عصبی توسط بسیاری از محققین در موارد گوناگون مورد بهره‌برداری قرار گرفته است [۱۴]، [۱۵].

۲- مواد و روش‌ها

شکل ۱ طرح کلی سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد. به منظور ثبت لرزش دست از شتاب‌سنج و ژيروسکوپ سه محوره استفاده گردید (واحد ۱). پس از تفکیک اطلاعات مربوط به هر کانال (در سه راستای X , Y , Z) و تنظیم مقیاس این مقادیر (واحد ۲)، سیگنال حاصله $n(k)$ نمایش دهنده نویز یا لرزش غیر ارادی حاصل از بیماری و $d(k)$ نمود سیگنال حرکت ارادی (فرد) وارد بخش فیلتر (واحد ۳) می‌گردد. در این بخش خروجی فیلتر سیگنال حرکت ارادی (فرکانس‌های کمتر از ۳ هرتز [۱۰]، [۱۳]، [۱۴]) می‌باشد که با کسر آن از سیگنال اصلی، سیگنال نویز (لرزش) تولید می‌گردد. این سیگنال در بخش بعدی به کنترل کننده و محرک‌ها برای اعمال نهایی به مفاصل متحرک وارد می‌شود.

ثبت حرکت

در این پژوهش برای ثبت حرکت دست بیماران، از سیستم قابل حملی استفاده شد که شامل سنسور MPU6050 (InvenSense Inc, acceleration range: $\pm 16g$, resolution: 0.5mili g) برای اندازه‌گیری شتاب و سرعت زاویه‌ای و یک برد کنترلر بر پایه آردوینو می‌باشد. برد سنسور در ابعاد بسیار کوچک و وزن کم (size: $21 \times 16 \times 2.5mm$, weight: 2gr) طراحی شده است به صورتی که هیچ‌گونه مزاحمتی برای بیمار ایجاد نکرده و تأثیری در دامنه و فرکانس حرکت دست بیمار نخواهد داشت.



شکل ۲: طرح کلی سیستم پیشنهادی

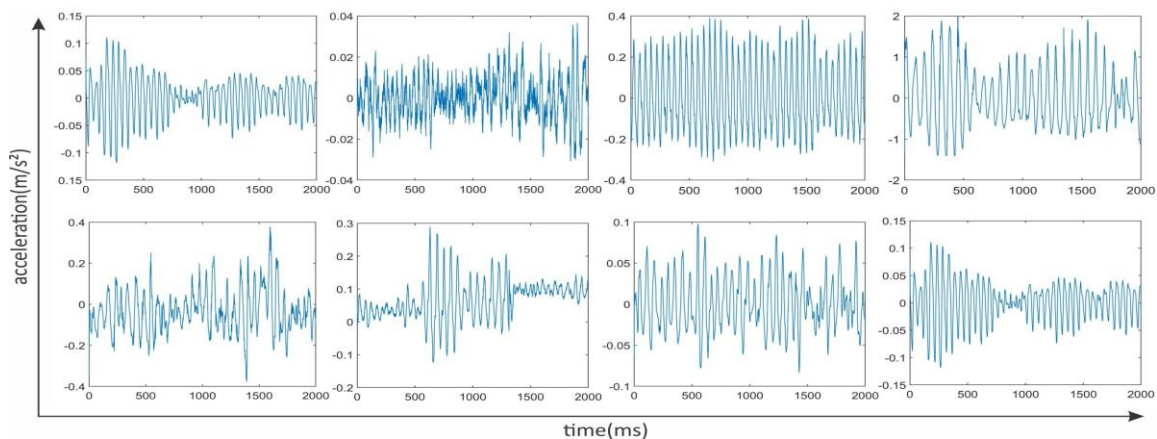


شکل ۳: اندازه گیری و ثبت حرکت دست بیمار

برای ثبت، مطابق شکل ۲، سنسور مورد نظر روی دست بیمار نصب می شود و اطلاعات خروجی از طریق کابل انعطاف پذیر سیلیکونی به واحد میکروکنترلر منتقل می گردد. این سیستم قادر است مشخصات شتاب و سرعت زاویه ای دست بیمار در ۳ جهت را با سرعت دوهزار نمونه بر ثانیه ثبت نماید. در این آزمایش با توجه به بیشینه فرکانس و دامنه حرکت دست بیمار سرعت نمونه برداری ۲۰۰ نمونه بر ثانیه برای ثبت اطلاعات در نظر گرفته شد. هشت بیمار مبتلا به پارکینسون با اخذ رضایت نامه کتبی در این تحقیق شرکت نمودند.

جدول ۱: اطلاعات ثبت داده از بیماران

بیمار	نوع بیماری	سن	جنسیت	مدت بیماری (سال)	سابقه بیماری	فرکانس لرزش (Hz)
۱	PD	۵۵	زن	۱۰	لرزش	۴/۵
۲	PD	۶۲	مرد	۳	لرزش، کندی در حرکت	۵
۳	PD	۸۴	زن	۱۵	لرزش، کندی در حرکت	۴/۲۵
۴	PD	۷۲	مرد	۱۰	لرزش، کندی در حرکت	۵/۳۰
۵	PD	۸۱	مرد	۸	لرزش، کندی در حرکت، عدم تعادل	۳/۲۵
۶	PD	۷۰	زن	۱۱	عدم تعادل، کندی در حرکت	۴
۷	PD	۵۰	زن	۱	لرزش	۳/۳۵
۸	PD	۸۰	مرد	۸	لرزش، کندی در حرکت	۳/۵



سینماتیک و دینامیک سیستم

سیستم مورد نظر دارای دو درجه آزادی است، بنابراین برای تعیین مکانیزم این سیستم، چهار دستگاه مختصات استفاده شده است. برای ارزیابی سینماتیک سیستم، جدول دنوت هارتبرگ استفاده شده است که ماتریس تبدیل 0_3T به صورت زیر (جدول ۲) می باشد. θ_i زاویه بین X_{i-1} و X_i حول محور Z و L_1 و L_2 طول لینک ها می باشد. در این جدول a_i فاصله Z_i تا Z_{i+1} که در راستای X اندازه گیری شده، α_i زاویه بین Z_i و Z_{i+1} حول محور X و d_i فاصله X_{i-1} تا X_i حول محور Z می باشد [۱۳].

جدول ۲: ماتریس دنوت هارتبرگ

I	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	-90	L_1	0	θ_2
3	0	L_2	0	0

فیلتر

با توجه به تفاوت طیف فرکانسی حرکات ارادی و غیرارادی، استفاده از فیلترهای فرکانسی در توسعه این سیستم اجتناب ناپذیر می باشد. فیلتر مورد استفاده در تحقیق حاضر از ساختار Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) بهره میبرد (مطابق شکل ۵). این فیلتر در مقایسه با سایر روشها عملکرد بهتری را از نظر مقدار تاخیر، Total Harmonic Distortion (THD)، دقت و قابلیت اطمینان ارائه می دهد [۱۶]. در این پژوهش، سیگنال ورودی $d(k) + n(k)$ می باشد. در این مرحله سعی شده است که سیگنال اصلی از نویز تمیز داده شود. سیگنال های منبع نویز از یک تابع دینامیک غیرخطی $f()$ به صورت زیر عبور می کنند که تغییر شکل و تاخیر به آن اعمال می شود.

$$F(k) = f(n(k), n(k-1), n(k-2), \dots) \quad (۱)$$

با شناسایی تابع $f(n(k))$ می توان سیگنال $F(k)$ را از سیگنال اطلاعات کم کرده و به سیگنال اصلی دست یافت. خروجی مدل ANFIS، $d(k)$ خواهد بود. که ANFIS با توجه به خطای بین $d(k)$ و سیگنال اصلی ورودی و روش حداقل مربعات پارامترهای خود را در هر مرحله تنظیم می کند.

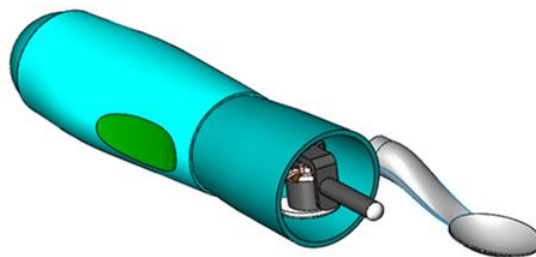
کنترلر سیستم توانبخشی بر پایه کنترل پیش بین

لرزش دست که به قلم (یا قاشق) دستگاه منتقل می گردد باید توسط مکانیزم طراحی شده حذف شود درحالی که حرکت ارادی نایستی تحت تاثیر مکانیزم قرار گیرد. در طرح پیشنهادی از کنترل پیش بین برای تنظیم حرکت نوک قلم (یا قاشق) استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی شکل ۷ شبکه ای عصبی با سه ویژگی Self-Evolving, Recurrent و Fuzzy می باشد. این شبکه برای شناسایی سیستم های دینامیکی و بازگشتی مناسب

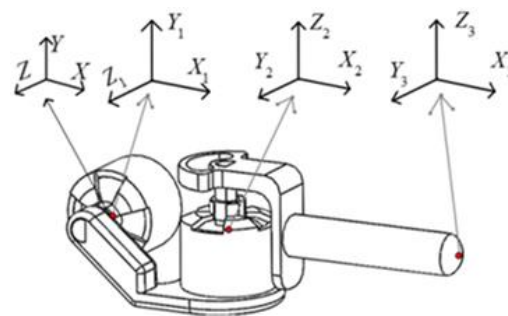
به دلیل کھولت سن بعضی بیماران و همچنین محدودیت آن ها برای حرکت، ثبت لرزش دست در حال استراحت (task-free) مد نظر قرار گرفت. اهم ویژگی های بیماران در جدول ۱ قابل ملاحظه است. در این جدول، ستون فرکانس لرزش با استفاده از تحلیل فرکانسی اطلاعات ثبت شده از سنسور به دست آمده است و همانطور که ملاحظه می گردد در تمام موارد بالاتر از ۳ هرتز است که این در هماهنگی کامل با مراجع [۱۰]، [۱۳]، [۱۴] می باشد.

طراحی مکانیک سیستم

مکانیزم طراحی شده، یک مداد یا قاشق است که حرکت ارادی از غیرارادی دست را تشخیص و لرزش را کاهش می دهد. بدین صورت که در حالت ایده آل، لرزش دست بر روی نوک وسیله (مداد یا قاشق) تاثیری نخواهد داشت. مدل Computer Aided Design (CAD) طراحی شده توسط نرم افزار SolidWorks در شکل ۴ الف نمایش داده شده است [۱۳]. قاشق یا قلم دارای دسته سبک و دو موتور پله ای است که به پایه و لینک اول سیستم متصل می باشد. لینک آخر نیز به موتور دوم متصل است (شکل ۴ ب). هریک از موتورهای پله ای قادر به حرکت در یک راستا می باشند، بنابراین سیستم ربات نهایی دارای دو درجه آزادی است و این قابلیت را خواهد داشت که لرزش را در دو جهت مختصات کاهش دهد. دامنه حرکت لرزشی دست بیماران در حدود یک تا چهار سانتیمتر می باشد و مکانیزم طراحی شده می تواند این رنج حرکتی را تامین نماید [۱۳].

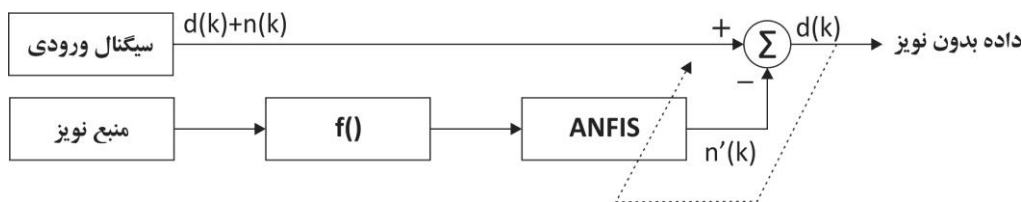


(الف)

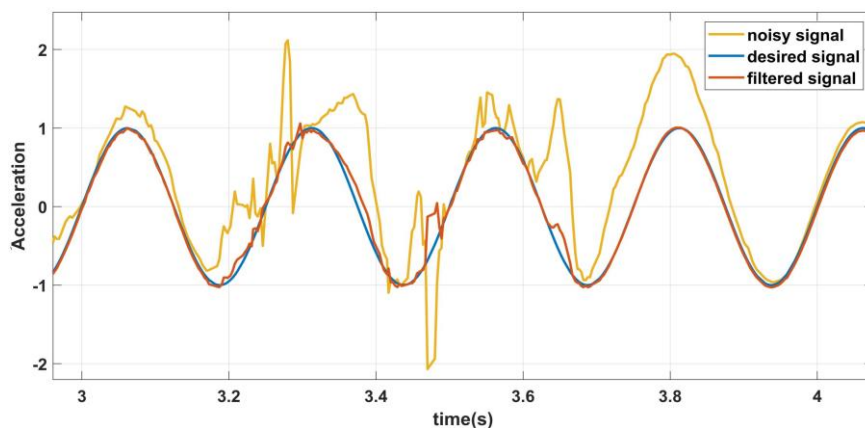


(ب)

شکل ۴: الف) مدل طراحی شده برای شکل نهایی سیستم پیشنهادی ب) ساختار اتصالات مکانیکی موتور بازوها



شکل ۵: فیلتر ANFIS مورد استفاده در طرح حاضر



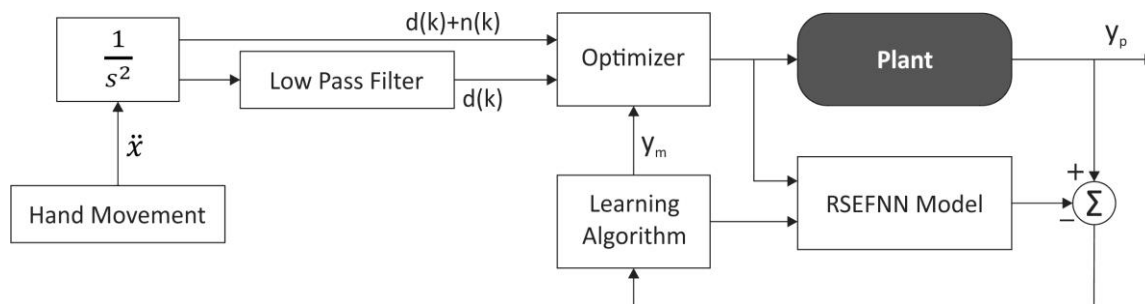
شکل ۶: مقایسه سیگنال حاصل از فیلتر ANFIS و سیگنال دارای نویز

RSEFNN در مقایسه با RNN به دلیل داشتن ساختار recurrent از پیچیدگی کمتر محاسبات بهره می برد. RSEFNN از دو فاز یادگیری structure learning phase (SLP) و parameter learning phase (PLP) به صورت همزمان استفاده می کند. در اینجا منظور از یادگیری یا آموزش همزمان به این معنی می باشد که با ورود هر بخش داده، دو فاز SLP و PLP به صورت همزمان و آنلاین فعالیت خود را انجام می دهند. در ابتدا هیچ قانونی در این فرآیند وجود ندارد و قوانین پس از دریافت هر بخش داده به صورت همزمان در دو بخش یادگیری ساختاری و یادگیری پارامتری تکامل می یابند. هدف از یادگیری ساختاری، تخمین زمان ایجاد قانون فازی جدید می باشد. برای اطمینان از اینکه حداقل یک قانون برای هر ورودی فعال باشد، قوانین فازی توسط داده های آموزشی تولید می گردد.

است. در مقاله [۱۷] از این شبکه برای شناسایی دینامیک مغز حین رانندگی، استفاده شده است. کنترل پیش بین RSEFNN در این مقاله به منظور تخمین حرکت دست در بیماران مبتلا به پارکینسون استفاده شده است.

ساختار شبکه عصبی RSEFNN پیشنهادی

در این پژوهش از ترکیب (recurrent neural network) RNN و FNN (fuzzy neural network) استفاده شده است. با این ترکیب ضمن استفاده از اطلاعات حرکات گذشته دست بیمار و مشاهده وضعیت فعلی، پیش بینی حرکات غیر ارادی دست بیمار و در نتیجه خنثی سازی آنها در زمان مناسب امکان پذیر خواهد بود. با ترکیب خروجی مرحله قبل و ورودی مرحله جدید می توان تاخیر زمانی مجموعه را بسیار کاهش داد. به عبارت دیگر حلقه های درونی شبکه اطلاعات را در حین خواندن ورودی از نوروها عبور می دهند.



شکل ۷: کنترل کننده پیش بین، برای رسیدن به مسیر هدف که همان حرکت ارادی دست بیمار می باشد و کنترل ابزار (قاشق یا مداد) لازم است مراحل زیر طی گردند: مسیر مرجع که شامل خروجی فیلتر و همچنین انتگرال داده های خروجی از سیستم ثبت حرکت می باشد برای انجام محاسبات اولیه وارد بخش optimizer شده و در هر دوره نمونه برداری به روز می گردند. خروجی حاصل از این بخش برای به روز رسانی توابع و قوانین لایه های شبکه، وارد بخش RSEFNN Model می شود. که در این بخش داده ها برای ورود به بخش آموزش آماده می شوند.

$$u_{ij}^2 = \exp\left(-\frac{[u_i^1 - m_{ij}]^2}{\sigma_{ij}^2}\right) \quad (3)$$

که در آن m_{ij} و σ_{ij}^2 به ترتیب میانگین و واریانس تابع گوسی می باشند.

لایه سوم: لایه فعالساز است که به صورت زیر بیان می شود.

$$u_j^3 = F^j = \Pi_j(u_{ij}^{(2)}) \quad (4)$$

هرگره در لایه سوم به یک قانون فازی مرتبط می شود. گرچه براساس قانون های مرتبط در لایه سوم، درجه عضویت دریافت می کنند.

لایه چهارم: هرگره در لایه چهارم یک قانون بازگشتی فازی می باشد، که یک حلقه بازگشتی را ایجاد می کند.

$$u_j^3 = \phi_q^j(t) = \lambda_q^j F^j(t) + (1 - \lambda_q^j) \phi_q^j(t - 1) \quad (5)$$

t زمان و $0 < \lambda_q^j < 1$ پارامتر بازگشتی (تخمین زننده سهم حالت حال و گذشته) را نشان می دهند. پارامترهای بازگشتی با مقادیر اتفاقی مقداردهی اولیه شده و سپس با استفاده از الگوریتم آموزشی بروزرسانی می شوند.

لایه پنجم: گرچه لایه پنجم گرچه های نتیجه هستند a_{iq}^j بیان کننده وزن لینک های ارتباطی بین گرچه های ۴ و ۵ است. خروجی لایه پنجم به صورت زیر می باشد:

$$u_j^{(5)} = f_q^j(t) = \sum_{i=1}^n a_{iq}^j x_i(t) \quad (6)$$

لایه ششم: خروجی گرچه در لایه ششم defuzzification می باشد.

$$y = \frac{\sum_{j=1}^R \phi_q^j(t) (f_q^j(t) + a_q^j)}{\sum_{j=1}^R \phi_q^j(t)} \quad (7)$$

که در آن R تعداد کل قوانین فازی و y خروجی مدل می باشد.

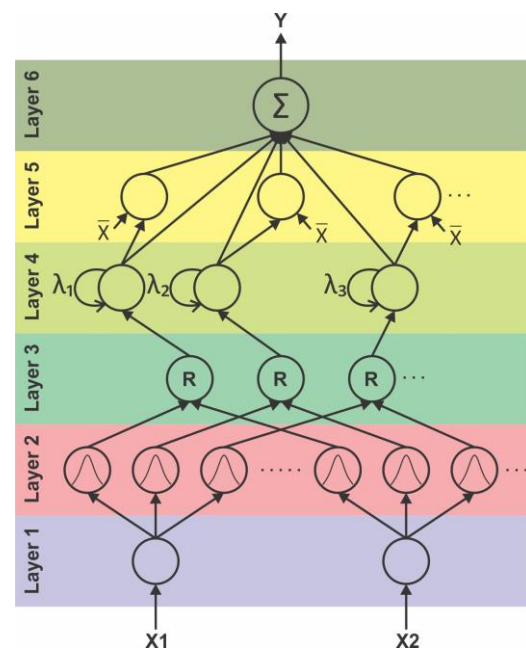
یادگیری ساختاری

هدف از این یادگیری، تخمین زمان ایجاد قانون فازی جدید می باشد. برای اطمینان از اینکه حداقل یک قانون برای هر ورودی x فعال می شود، قوانین فازی توسط داده های آموزشی تولید می گردند. در این پژوهش ورودی x سیگنال حاصل از فیلتر است که به عنوان سیگنال مطلوب در نظر گرفته می شود. برای هر ورودی x ، $f^j(t)$ به عنوان معیاری برای ایجاد قانون جدید می باشد. در ابتدا هیچ قانونی وجود ندارد. با ورود اولین داده، قانون جدیدی با مرکز اولیه $\bar{X}(0)$ و مقدار اولیه تابع گوسی به صورت زیر ایجاد می گردد:

$$m_i^1 = x_i(0), \sigma_i^1 = \sigma_{\text{initial}} \quad (8)$$

مرحله یادگیری پارامتری پس از یادگیری ساختاری ادامه می یابد. تمام پارامترهای آزاد RSEFNN به صورت آنلاین بدون در نظر گرفتن این موضوع که آیا قوانین فازی به تازگی ایجاد شده اند و یا از قبل وجود داشتند، تطبیق داده می شود. در یادگیری پارامتری، تمام پارامترهای حاصل از قوانین فازی پیشین و قوانین جدید توسط الگوریتم Gradient Descent آموزش داده می شوند. در مجموعه داده ها، خروجی فیلتر، سیگنال نویز (لرزش غیر ارادی دست) است که در داخل کنترلر به دو بخش train و test تقسیم می شود. سیگنال train به منظور اعتبار سنجی داده ها استفاده می شود که این اعتبار سنجی برای تخمین حرکت مفید خواهد بود و سیگنال آزمون به منظور ارزیابی خطای انتخاب نهایی استفاده می گردد [۱۸].

الگوریتم RSEFNN پیشنهادی مطابق شکل ۸ از شش لایه تشکیل به شرح ذیل تشکیل شده است:



شکل ۸: ساختار RSEFNN

لایه اول: ورودیها با بردار $\vec{x}$ نمایش داده می شوند. $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots)$ بدون تغییرات و به صورت مستقیم به لایه بعدی تحت عنوان $u_i^{(1)}$ منتقل می شود. هرگره برابر با یک ورودی می باشد.

$$u_i = x_i \quad (9)$$

لایه دوم: به لایه دوم تابع عضویت (Membership function) گفته می شود، در اینجا از تابع گوسی استفاده شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial m_q^i} &= \frac{\partial E}{\partial y_q} \cdot \frac{\partial y_q}{\partial \phi_q^i} \cdot \frac{\partial \phi_q^i}{\partial F^i} \cdot \frac{\partial F^i}{\partial m_q^i} \\ &= (y - y^d) \cdot \frac{w^i - y}{\sum_{i=1}^r \phi_q^i} \cdot F^i \cdot \lambda_q^i \cdot \frac{2(x_j - m_j^i)}{(\sigma_j^i)^2} \end{aligned}$$

واریانس تابع عضویت گوسی به صورت زیر به روز می شود:

$$\sigma_j^i(t+1) = \sigma_j^i(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial \sigma_j^i} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \sigma_j^i} &= \frac{\partial E}{\partial y_q} \cdot \frac{\partial y_q}{\partial \phi_q^i} \cdot \frac{\partial \phi_q^i}{\partial F^i} \cdot \frac{\partial F^i}{\partial \sigma_j^i} \\ &= (y - y^d) \cdot \frac{w^i - y}{\sum_{i=1}^r \phi_q^i} \cdot F^i \cdot \lambda_q^i \cdot \frac{2(x_j - m_j^i)^2}{(\sigma_j^i)^3} \end{aligned}$$

۳- نتایج شبیه سازی

برای مقایسه عملکرد کنترل کننده، میزان THD و Mean Square Error (MSE) در سه حالت مختلف مطلوب، نویزدار و کنترل شده محاسبه شده است (جدول ۳). طبق نتایج به دست آمده، مشاهده می شود که RSEFNN قابلیت دقت و اطمینان بالایی دارد و برای سیستم های real time و متغیر با زمان قابل استفاده می باشد.

از مزایای استفاده از حالت بازگشتی که در این کنترلر استفاده شده است، میتوان به این موضوع اشاره کرد که در مدل های غیر بازگشتی، ساختار فقط از حالاتی استفاده می کند که در همان لحظه وارد میشود و امکان بهره گیری از اطلاعات ورودی های گذشته را ندارد. به منظور ارزیابی عملکرد این کنترلر با قابلیت پیش بینی، شبیه سازی در محیط سیمولینک انجام شده است که خروجی شتاب یک جهت برای سه گونه حرکت دلخواه دندان اره ای، سینوسی و اسپیرال در شکل ۸ نشان داده شده است.

جدول ۳: مقایسه میزان THD و MSE خروجی در سه حالت مطلوب، نویزدار و کنترل شده

MSE	THD%	سیگنال
۰	۱.۲۸۲۹	مطلوب
۰.۳۱۲۲	۲۳.۰۹۶۶	نویزدار
۰.۰۰۵۷	۴.۴۸	سیگنال خروجی از کنترل کننده پیش بین

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش طراحی بخش کنترل ربات جدیدی برای بیماران مبتلا به لرزش دست ارائه شد. این وسیله که می تواند به عنوان قلم و یا قاشق مورد استفاده قرار گیرد، با حرکت لینک ها در جهت مخالف لرزش دست کنترل

که در آن $\sigma_{initial}$ یک مقدار از پیش تعیین شده است. برای یک ورودی $x(t)$ حداکثر مقدار تابع فعال ساز برای بررسی اینکه آیا قانون جدیدی ایجاد گردد یا خیر محاسبه می شود.

$$I = \arg \max_{1 \leq j \leq R(t)} F^j(t) \quad (9)$$

که در آن $R(t)$ تعداد قوانین در شبکه در زمان t می باشد. اگر $F^j(t) < F_{thresh}$ باشد، که F_{thresh} مقداری بین صفر و یک است، (در این پژوهش مقدار اولیه F_{thresh} برابر ۰.۷ در نظر گرفته شده است) در آن صورت قانون جدید ایجاد می گردد. با ایجاد قانون جدید مرکز و عرض قانون جدید به صورت زیر ایجاد می شود:

$$m_i^{R(t+1)} = x_i(t), \sigma_i^{R(t+1)} = \beta \cdot |x_i(t) - m_i^I| \quad (10)$$

که در آن β ضریب overlap می باشد، در اینجا ۰.۶ در نظر گرفته شده است.

یادگیری پارامتری

مرحله یادگیری پارامتری پس از یادگیری ساختاری ادامه می یابد. تمام پارامترهای آزاد RSEFNN به صورت آنلاین و بدون در نظر گرفتن این موضوع که آیا قوانین فازی به تازگی ایجاد شده اند یا از قبل وجود داشتند، تطبیق داده می شود. در یادگیری پارامتری تمام پارامترهای حاصل از قوانین فازی پیشین و جدید توسط الگوریتم Gradient decent (GD) آموزش داده می شوند. برای مثال یک نمونه از خروجی در نظر گرفته می شود، هدف به حداقل رساندن تابع هزینه است.

$$E(t+1) = \frac{1}{2} (y(t+1) - y^d(t+1))^2 \quad (11)$$

بردار پارامترها به صورت زیر به روز می شود.

$$a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) - \eta \frac{\partial E(t+1)}{\partial a_{ij}(t)} \quad (12)$$

$$\frac{\partial E(t+1)}{\partial a_{ij}(t)} = (y(t+1) - y^d(t+1)) \cdot \frac{\phi_j^{(3)} u_j^{(4)}}{\sum_{k=1}^r \phi_k^{(3)}}$$

که در آن $\varepsilon(0,1)$ ثابت آموزش می باشد. هر پارامتر بازگشتی λ_q^i به صورت زیر به روز می شود:

$$\lambda_q^i(t+1) = \lambda_q^i(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial \lambda_q^i} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \lambda_q^i} &= \frac{\partial E}{\partial y_q} \cdot \frac{\partial y_q}{\partial \phi_q^i} \cdot \frac{\partial \phi_q^i}{\partial \lambda_q^i} = \\ &= (y - y^d) \cdot (F^i(t) - \phi_q^i(t-1)) \cdot \frac{w^i - y}{\sum_{i=1}^r \phi_q^i} \end{aligned}$$

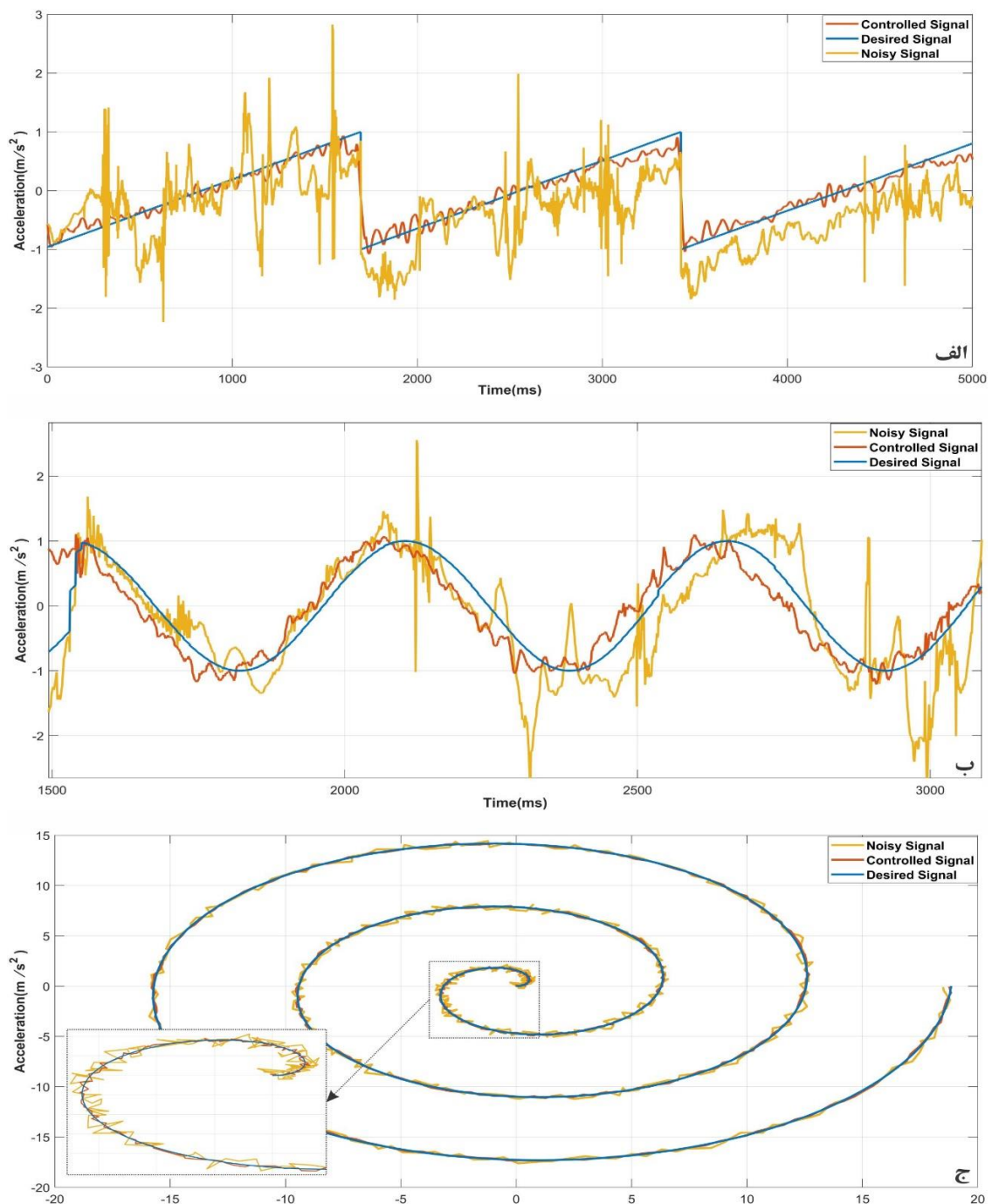
تابع عضویت گوسی به صورت زیر به روز می شود:

$$m_j^i(t+1) = m_j^i(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial m_j^i} \quad (14)$$

شبکه عصبی با سه ویژگی Fuzzy, Self-Evolving, Recurrent به سیستم اعمال شد تا با استفاده از آن بتوان حرکت لرزش دست بیماران مبتلا به پارکینسون را تخمین زد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که این تخمین دارای مقدار خطای کم ($MSE=0.0174$) می‌باشد.

می‌گردد. به منظور فراهم آوردن اطلاعات لرزش دست در این گروه از بیماران، هشت بیمار با سوابق و لرزش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. فیلترهای مختلفی در این پروژه به کار گرفته شد که عمدتاً مشکل تاخیر فیلتر و وجود اعوجاج و هارمونیک‌های غیر مطلوب در خروجی مشاهده گردید. در نهایت از فیلتر ANFIS به دلیل خروجی مطلوب آن نسبت به سایر فیلترها استفاده شد.

شکل ۹: مقایسه خروجی برای سه گونه حرکت دلخواه (الف) دندان اره‌ای، (ب) سینوسی و (ج) اسپیرال



مراجع

- [12] J. G. Gonzalez, E. A. Heredia, T. Rahman, K. E. Barner, and G. R. Arce, "Optimal digital filtering for tremor suppression," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 47, no. 5, pp. 664–673, 2000, doi: 10.1109/10.841338.
- [13] M. Abbasi, A. Afsharfard, R. Arasteh, and J. Safaie, "Design of a noninvasive and smart hand tremor attenuation system with active control: a simulation study," *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 56, no. 7, pp. 1315–1324, Jul. 2018, doi: 10.1007/s11517-017-1769-9.
- [14] H. G. Han, H. H. Qian, and J. F. Qiao, "Nonlinear multiobjective model-predictive control scheme for wastewater treatment process," *J. Process Control*, vol. 24, no. 3, pp. 47–59, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.jprocont.2013.12.010.
- [15] R. K. Al Seyab and Y. Cao, "Nonlinear system identification for predictive control using continuous time recurrent neural networks and automatic differentiation," *J. Process Control*, vol. 18, no. 6, pp. 568–581, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.jprocont.2007.10.012.
- [16] Z. Liu, Q. Wu, Y. Zhang, and C. L. P. Chen, "Adaptive least squares support vector machines filter for hand tremor canceling in microsurgery," *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 2, no. 1, pp. 37–47, Feb. 2011, doi: 10.1007/s13042-011-0012-5.
- [17] Y. T. Liu, Y. Y. Lin, S. L. Wu, C. H. Chuang, and C. T. Lin, "Brain Dynamics in Predicting Driving Fatigue Using a Recurrent Self-Evolving Fuzzy Neural Network," *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 347–360, Feb. 2016, doi: 10.1109/TNNLS.2015.2496330.
- [18] G. Grimaldi, P. Lammertse, N. Van Den Braber, J. Meuleman, and M. Manto, "Effects of inertia and wrist oscillations on contralateral neurological postural tremor using the wristalyzer, a new myohaptic device," in *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2008, vol. 2, no. 4, pp. 269–279, doi: 10.1109/TBCAS.2008.926726.
- [1] M. G. Baker and L. Graham, "The journey: Parkinson's disease," *BMJ*, vol. 329, no. 7466, pp. 611–614, Sep. 2004, doi: 10.1136/bmj.329.7466.611.
- [2] D. Case, B. Taheri, and E. Richer, "Design and Characterization of a Small-Scale Magnetorheological Damper for Tremor Suppression," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no. 1, pp. 96–103, 2013, doi: 10.1109/TMECH.2011.2151204.
- [3] H. M. Zhu and C. M. Pun, "An adaptive superpixel based hand gesture tracking and recognition system," *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/849069.
- [4] N. Carbonaro, G. D. Mura, F. Lorussi, R. Paradiso, D. De Rossi, and A. Tognetti, "Exploiting wearable goniometer technology for motion sensing gloves," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 18, no. 6, pp. 1788–1795, Nov. 2014, doi: 10.1109/JBHI.2014.2324293.
- [5] C. Ou, A. Gouldstone, B. K. Jaeger, and R. Sipahi, "Control design for a hand tremor suppression pen," in *ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference, DSCC 2015*, Jan. 2015, vol. 2, doi: 10.1115/DSCC2015-9962.
- [6] C. N. Riviere, R. Scott Rader, and N. V. Thakor, "Adaptive canceling of physiological tremor for improved precision in microsurgery," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 45, no. 7, pp. 839–845, 1998, doi: 10.1109/10.686791.
- [7] E. Ohara, K. Yano, S. Horiata, T. Aoki, and Y. Nishimoto, "Development of Tremor-Suppression filter for Meal-Assist robot," in *Proceedings - 3rd Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2009*, 2009, pp. 238–243, doi: 10.1109/WHC.2009.4810802.
- [8] H. Dai, H. Lin, and T. C. Lueth, "Quantitative assessment of parkinsonian bradykinesia based on an inertial measurement unit," *Biomed. Eng. Online*, vol. 14, no. 1, p. 68, Jul. 2015, doi: 10.1186/s12938-015-0067-8.
- [9] A. Lekshmi and K. I. Ramachandran, "Parkinson's Tremor Suppression Using Active Vibration Control Method," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 577, p. 012056, Dec. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/577/1/012056.
- [10] A. As'array, H. Jamaluddin, T. A. Z. Rahman, K. A. Md Rezali, and M. Z. Md Zain, "Suppression of Parkinson's hand-like tremor using fuzzy-PID controller," in *Proceedings - 2016 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, I2CACIS 2016*, Mar. 2017, vol. 2017-March, pp. 1–5, doi: 10.1109/I2CACIS.2016.7921041.
- [11] M. Nawate, D. Morimoto, S. Fukuma, and S. Honda, "A Painting Tool with Blurring Compensation for People Having Involuntary Hand Motion," *researchgate.net*, vol. 3, pp. 6–9, 2004, Accessed: Jul. 10, 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228953097>.