

التحكم بكرسي طبي مدولب عن طريق الأوامر الصوتية و تحسين استجابته باستخدام متحكم تناسبي-تكاملي-تفاضلي ضبابي

د. أحمد محمود أحمد*

(تاريخ الإيداع 17 / 2 / 2021. قُبِلَ للنشر في 29 / 4 / 2021)

□ ملخص □

تشكل تقنيات المعلوماتية و الحاسبات باختلاف اختصاصاتها مكوناً أساسياً في أنظمة الهندسة الطبية الخاصة بإعادة التأهيل وخاصة تلك المتعلقة بحالات الشلل وبتز الأطراف السفلية. أحد تطبيقات تقنيات المعلوماتية هو تحسين أنظمة التفاعل بين الانسان و الآلة بحيث تؤمن امكانية تحكم لاسلكية مع أي منظومة الكترونية تهدف الى مساعدة ذوي الحالات الخاصة مثل مصابي التصلب الجانبي الضموري، و ذلك لتجنب الحاجة الى تدخل بشري. يهدف هذا البحث الى تسخير تقنيات المعلوماتية في التحكم بكرسي كهربائي مدولب قمنا بتصميمه ، من خلال امكانية التحكم به عن طريق الأوامر الصوتية المستقبلية من خلال تطبيق أندرويد، و المرسله لاسلكياً الى شريحة NodeMCU. أظهر التطبيق درجة رضى عالية لدى المرضى. كما تم تنفيذ خوارزمية متحكم تناسبي-تكاملي-تفاضلي ضبابي Fuzzy-PID تؤمن سرعة استجابة عالية ودقة كبيرة بحيث لا تشكل حركة الكرسي خطر على حياة المريض من حيث تجاوز الحركة المطلوبة بالإضافة لتأمينها سلاسة في الاقلاع. بينت النتائج أيضاً بأن مبدأ التحكم Fuzzy-PID قد أظهر استجابة زمنية جيدة جداً مقارنة بمتحكم PID التقليدي بالإضافة الى تغلبه على مشكلة تجاوز القيمة المرغوبة .Overshoot.

الكلمات المفتاحية: التفاعل بين الإنسان والحاسوب، الأوامر الصوتية، متحكم تناسبي-تكاملي-تفاضلي ضبابي، أندرويد، أندوينو.

* مدرس - قسم النظم الشبكات الحاسوبية - كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Email: ahmad.m.ahmad@tishreen.edu.sy; dr.eng.ahmad.ahmad@gmail.com

Controlling a Medical Wheelchair by Voice Commands and Improving its Response Using a Fuzzy Proportional-Integral-Derivative Controller

Dr. Ahmad Mahmoud Ahmad*

(Received 17 / 2 / 2021. Accepted 29 / 4 / 2021)

□ ABSTRACT □

Informatics and computer technologies, with different specializations, constitute an essential component of medical engineering systems for rehabilitation, especially those related to paralysis and lower limb amputations. One of the applications of informatics technology is to improve human-machine interaction systems so that it provides wireless control with any electronic system aimed at helping people with special conditions such as those with amyotrophic lateral sclerosis, in order to avoid the need for human intervention. This research aims to harness informatics techniques in controlling a designed electric wheelchair, by the possibility of controlling it through voice commands received by an Android application, and then sent wirelessly to the NodeMCU chip. The application showed a high degree of patient satisfaction. The Fuzzy-PID controller algorithm has also been implemented in order to ensure a high response speed and great accuracy, so that the chair movement does not pose a threat to the patient's life, in terms of exceeding the required movement, in addition to ensuring smooth take-off. The results also illustrated that the Fuzzy-PID control principle showed a very good time response compared to the conventional PID controller, in addition to eliminating the overshooting case.

Keywords: Human-Computer Interaction (HCI), Voice commands, Fuzzy-PID controller, Android, Arduino.

*Assistant Professor – Department of Computer Systems and Networks – Faculty of Informatics Engineering – Tishreen University – Lattakia- Syria. Email: ahmad.m.ahmad@tishreen.edu.sy; dr.eng.ahmad.ahmad@gmail.com

مقدمة:

ساهمت الأزمة التي تعصف ببلدنا الحبيب سوريا في ارتفاع حصيلة المعاقين بشكل ملحوظ، ناهيك عن حوادث السير المتزايدة و الناجمة عن انعدام الثقافة و عدم التقيد بقواعد السلامة المرورية. على الرغم من عدم وجود إحصائيات حول العدد الحقيقي للمصابين بيبتر أو بشلل في أحد الأطراف أو جميعها (الشلل رباعي) ، إلا أنه من المؤكد أن العدد يتزايد بشكل ملحوظ. وهذا يلزم الباحثين بزيادة الاهتمام بهذا النوع من الاعاقات لمساعدة المصابين على ممارسة حياتهم اليومية [1].

لعل أهم التحديات التي تواجه الكادر التقني و البحثي و الذي يعمل كتنفأ لكتف بشكل مباشر أو غير مباشر مع الكادر الطبي، هو تدارك تداعيات الأزمة من خلال سد حاجات المصابين، المدنيين منهم و العسكريين، نتيجة الحرب التي تعصف ببلدنا الحبيب. يهدف الباحثون في هذا المجال إلى استخدام الوسائل والتقنيات من أجل تلبية احتياجات المرضى. و أحد الاتجاهات الأساسية لتحقيق هذا الهدف هو الحصول على الإشارات الحيوية العضلية وتحويلها إلى حركات، حيث أن أكثر الأمثلة المعروفة عالمياً هي حالة العالم ستيفن هاوكينغ و الذي تم تشخيص حالته المرضية على أنها مرض التصلب الجانبي الضموري (Amyotrophic Lateral Sclerosis). إن هذا المرض هو نوع من أنواع أمراض العصبية الحركية التي تؤدي إلى موت الأعصاب التي تتحكم بالعضلات حيث أن أغلب المرضى تنتهي بهم الحالة إلى الموت بعد خمس سنوات. دفعت حالة السيد هاوكينغ باحثي شركة أنتل الى تطوير بعض التطبيقات و خوارزميات معالجة الصور التي مكنت السيد هاوكينغ من نقل ما يريد فعله عن طريق جهاز حاسب لوحي موجود على كرسيه المتحرك [2] حيث أنه كان لايزال بإمكانه التحكم ببعض عضلات وجهه. بينما يتمثل اتجاه بحثي آخر في التعبير عن مشاعر وأفكار المريض، الإشارات العصبية الدماغية، كإشارات كهربائية، ولكن هذا المجال من معالجة الإشارات لا يزال قيد الدراسة والتطوير بسبب صعوبة التفسير الدقيق لتلك الإشارات.

على الرغم من تعدد الاتجاهات البحثية إلا أنها تعتمد بالموثق على استخدام تقانات التحكم و المعلوماتية. على سبيل المثال، فقد أتاحت الخوارزميات الحديثة في معالجة الصورة، نوع جديد من تفسير المشاعر الظاهرية من خلال ترجمة إيماءات الرأس أو اليدين إلى إشارات كهربائية تمثل رغبات المريض، و بعدها ترجمة تلك الإشارات الكهربائية الى أوامر حركية، و ذلك باستخدام أجهزة الكمبيوتر أو النظم المدمجة المخصصة لهذه الأنواع من التطبيقات، بالإضافة إلى بعض البرامج المتخصصة، والتي تشكل جميعها ما يعرف بالتفاعل بين الإنسان والحاسوب (HCI: Human-Computer Interaction)، حيث يعد التفاعل بين الإنسان والكمبيوتر مجالاً واعداً للبحث في الوقت الحاضر [3].

ليست معالجة الصور و تحويلها الى إيماءات هي الجانب الوحيد، و إنما أيضاً معالجة الصوت و التي تمثل منحاً مهماً في التفاعل بين الإنسان والحاسوب. يهدف هذا البحث، الى تحويل الأوامر الصوتية الى إشارات كهربائية ترسل لاسلكياً الى كرسي طبي كهربائي مدولب، ليتم تحويلها الى أوامر حركية تتحكم في حركة الكرسي، كما يهدف الى تحسين استجابة الكرسي للأوامر مهما كان نوعها، إيماءات وجه أو أوامر صوتية، و ذلك باستخدام متحكم تناسبي-تكاملي-تفاضلي ضبابي Fuzzy-PID. تم تنظيم بقية الورقة البحثية كما يلي: عرض الدراسات المرجعية ليتم بعدها تحديد مشكلة البحث و أهميته، ليتم الانتقال الى تصميم الكرسي المدولب ونموذج التحكم العام. و من بعدها تم عرض نظام التحكم المقترح باستخدام الأوامر الصوتية ومن ثم تحسين الاستجابة الحركية للكرسي باستخدام متحكم Fuzzy-PID. يأتي بعد ذلك الاختبار و المناقشة و النتائج ليتم أخيراً استخلاص النتائج و تحديد التطلعات المستقبلية.

الدراسات المرجعية:

قدمت الورقتين البحثيتين [4-5] دراسة استقصائية توضح العديد من خوارزميات وطرق التحكم باستخدام الحاسب، من هذه الطرق المستخدمة هي أنظمة HCI، حيث هناك العديد من الطرق المقترحة من قبل العديد من الباحثين والتي تشمل الكشف عن حركة العيون باستخدام كاشف فيولا-جونز Viola-Jones detector [6] ومن ثم تتبع الحركة باستخدام التدفق البصري، عن طريق التتبع المتناثر sparse tracking [7-8] ، أو عن طريق اختلاف الكثافة بين الإطارات. تم اقتراح فكرة التصنيف المعتمد LSTM (Long short-term memory) بواسطة [9]. عيب هذه الطرق هو أنها تتطلب عموماً قوة حسابية عالية، وقد لا تكون مناسبة للمعالجة في الزمن الحقيقي. اقترح M. Chau و M. Betke [10] مطابقة القالب (الأنماط) مع قوالب العين المغلقة/المفتوحة. تكمن المشكلة في أن مطابقة القالب لا تعمل بشكل جيد في تدوير الكائن وقياسه. كما أن استخدام قالب عام واحد لكل عين قد لا يعطي نتائج دقيقة. قام Nguyen [11] بكشف طرفة العين عن طريق تحليل منطقة دلثا في الدماغ البشري باستخدام تقنية ElectroEncephaloGraphy (EEG)، و لكن ذلك يتطلب أجهزة إضافية وتركيب أقطاب كهربائية حول الدماغ البشري للحصول على البيانات مما يجعل النظام بأكمله مرهقاً ومكلفاً.

قدمت الورقة البحثية [12] حلاً يتم من خلاله استخلاص إيماءات الوجه و تحويلها الى اوامر حركية لتحريك نموذج صغير (Prototype) يحاكي كرسي طبي. تم استخدام تقنية البلوتوث للتواصل بين جهاز لابتوب من جهة و ذلك النموذج المبني على استخدام متحكم ميكروي من النوع Arduino Uno من جهة أخرى. استخدمت في ذلك البحث المكتبة المعروفة OpenCV [13] المكتوبة باللغة ++C و هي مكتبة للرؤية الحاسوبية في الزمن الحقيقي. كما صممت واجهات Interfaces سهلة توفر للمستخدم تفاعل مريح User friendly. تم اختبار التفاعل بين الانسان و الحاسوب عن طريق الاعتماد على مستخدمين من أعمار مختلفة حيث تم تقسيمهم الى فئات و تم تقسيم كل فئة عمرية الى قسمين، مستخدمين مدربين و مستخدمين غير مدربين. أخذت عملية التقييم ثلاث أطوار، في الطور الأول تم تقييم التفاعل اللحظي بين المستخدم و النظام، بينما تم في الطور الثاني تقييم الجانب النفسي للمستخدمين من خلال تسجيل فيديو للمستخدم دون علمه. بينما تم في الطور الأخير ملء استمارة تعبر عن مقدار الرضى عن التصميم. بينت النتائج أن التصميم جيد و لكن تبقى تلك النتائج ناقصة و ذلك لسببين: الاول عدم الاختبار على كرسي طبي كهربائي حقيقي، و كون الاختبار تم على نموذج لكرسي لا يتجاوز أكبر ابعاده ٢٠ سم. أما السبب الثاني فهو استخدام اللابتوب و الذي يعتبر مقيداً في هكذا أنظمة. حيث يفضل استخدام تطبيق اندرويد على جهاز موبايل او جهاز لوحي بأبعاد مقبولة.

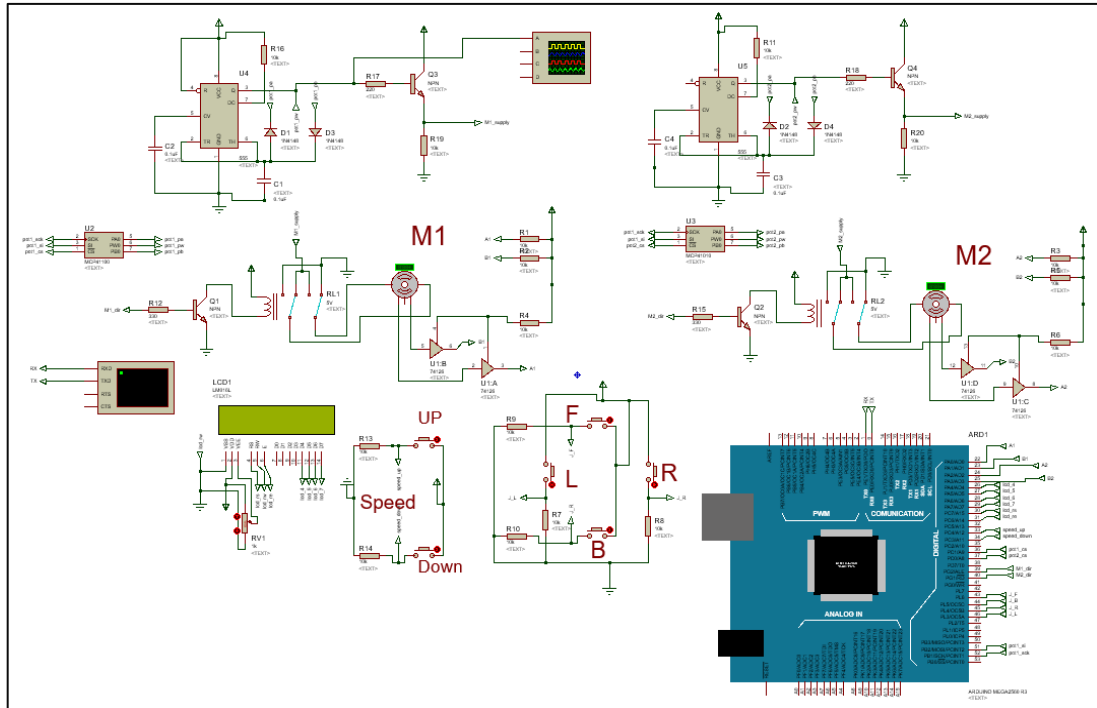
تم في الأبحاث [14-19] تقديم تصاميم لاستخدام الاوامر الصوتية باستخدام متحكمات مختلفة كأرديينو و راسبيري باي و بيك و انظمة تعرف على الصوت مثل HM2007، بعض تلك الانظمة مترافق مع استخدام حركات اليد عن طريق استخدام مستشعرات MemS. يستخدم بعض الأنظمة مستشعرات لاكتشاف الحواجز كمستشعرات ثانوية من أجل حماية المستخدم من الاصطدامات، بينما نجد تصاميم أخرى معتمدة على خريطة محددة و مسارات معرّفة مسبقاً. كما تناولت بعض تلك الأبحاث استخدام تقنيات الذكاء الصناعي بما يخص تمييز الأصوات بشكله الأمثل أو تحسين كفاءة استخدام الأوامر الصوتية مع المستشعرات الأخرى.

نلاحظ من الدراسات المرجعية المتعلقة بالوامر الصوتية بأنها موجهة لحالات معينة كالحالات التي يكون فيها المريض قادر على النطق السليم، و بأنها لم تأت لتتدرج ضمن نظام متكامل يأخذ الحالات المرضية كاملة و جميع احتمالاتها،

كمثال على تلك الحالات هو حالة لمريض مصاب بشلل اطرافه السفلى فقط، الذي يستدعي استخدام عصا التحكم Joystick، أو في حالة شلل الاطراف الاربعة و عدم امكانية الكلام و هنا تأتي ايماءات الوجه لتكون العنصر الاساسي في توليد الاوامر الحركية، او في حالة الشلل الرباعي و عدم المقدرة على الكلام و على استخلاص ايماءات الوجه بدقة، عندها سيتم اللجوء لطرق أخرى في تحريك الكرسي، كحركة الرأس مثلا. هذا من جهة، و من جهة أخرى، لم تأخذ الأبحاث المذكورة حتى هذه اللحظة جانب الدقة في تنفيذ تلك الأوامر سواء كانت إيماءات أو صوتية بما يخص التصميم الميكانيكي و الكهربائي و كيفية تحريك المحركات المستخدمة بالطريقة المثلى، على الرغم من وجود أبحاث تفرد في تطبيق تقنيات التحكم الآلي في قيادة الكراسي الطبية. على سبيل المثال، قدم Teferi [20] نظام ضبابي من أجل تحسين ضبط بارامترات متحكم PID لتحقيق استجابة زمنية ذات زمن استقرار steady-state error صغير وعدم وجود حالات تجاوز الهدف المرغوب overshooting. بينما اقترح Tsai وآخرون في [21] طريقة تحكم PID تكيفية جديدة باستخدام التحكم التنبئي و الشبكة العصبونية الضبابية ذات الإخراج المنكسر predictive control and output recurrent fuzzy wavelet neural network لمجموعة من الأنظمة الديناميكية الرقمية غير الخطية ذو التأخير الزمني. قام الباحثون في [22] بتصميم وحدة تحكم تفاضلية تكيفية ضبابية جديدة للتحكم بمسار الأقمار الاصطناعية ضمن مدارها المرغوب من خلال الاستجابة الزمنية عالية السرعة.

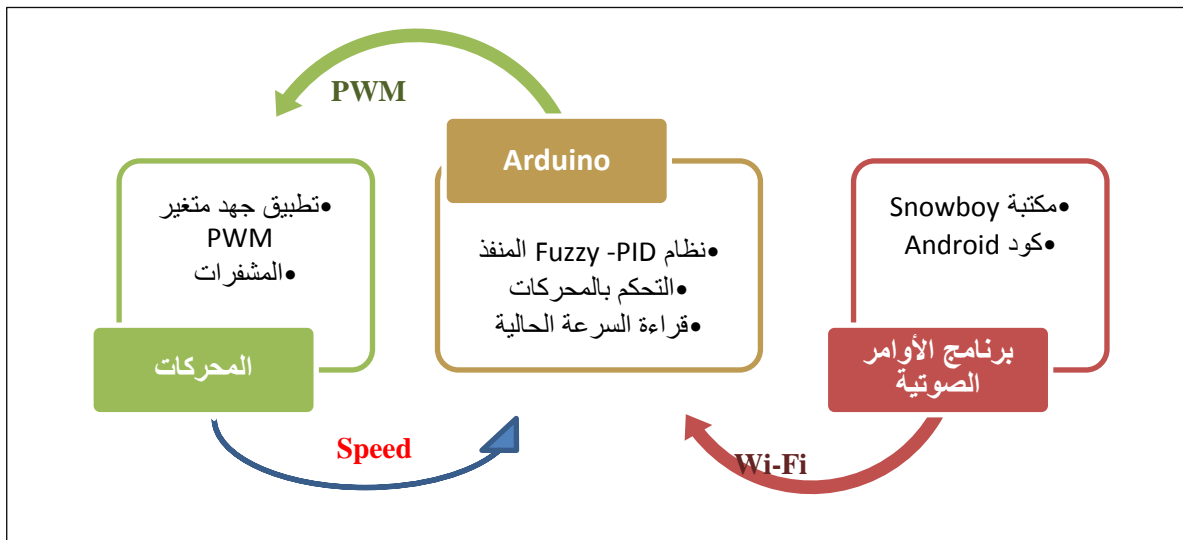
بناء على ما تم ذكره من دراسات سابقة، و على الحاجة لتصميم نظام حقيقي متكامل، تم الاعتماد على البحث [12]، الذي قدم تصميم كرسي حقيقي كهربائي مدولب مع نموذج عام للتحكم، حيث تم في بحثنا إضافة امكانية تحريك الكرسي عن طريق عصا تحكم Joystick، ثم إضافة خدمة الأوامر الصوتية، ومن ثم تحسين حركة الكرسي عن طريق تطبيق تقنيات التحكم الآلي حيث تم إدخال طريقة التحكم باستخدام Fuzzy-PID ضمن متحكم صغيري من النوع Arduino Mega المبني على استخدام متحكم من النوع AtMega.

على الرغم من أهمية انجاز التصميم المحوسب و الفيزيائي للكرسي الذي قمنا به، إلا أن أهميته الأكبر تكمن في توظيف هذه الكرسي لتساعد المرضى حسب درجة الإعاقة و الذي يمثل التحدي. الجدير بالذكر أن التصميم بحد ذاته هو خارج نطاق بحثنا هذا. يوضح الشكل (1)، بغرض الإيضاح، التصميم المحوسب لدارة التحكم البشري و التحكم بالمحركات والتي تعطي فكرة عامة عن مكونات التصميم الفيزيائي، من محركات تيار مستمر متصلة مع علب تروس، شريحة متحكم اردوينو ميغا Arduino Mega، وحدة تحكم متكاملة تحتوي على شاشة LCD، مشفر rotary encoder، مقاومة ضوئية وعصا تحكم joystick. بالإضافة لمشفرين rotary encoder موصولين الى المحركين. شريحة ESP8266MOD او كما تسمى NodeMCU، قطعتي PWM، و دارة تغذية مستقلة إضافة لريليايات مختلفة.



الشكل (1): التصميم المحوسب لدارة التحكم البشري والتحكم بالمحركات.

بناء على ما سبق ذكره، سيقصر بحثنا على تنفيذ نظام يستخدم الأوامر الصوتية في قيادة الكرسي من جهة وادخال طريقة متحكم Fuzzy-PID ضمن المتحكم الصغري Arduino من جهة أخرى. يوضح الشكل (2) المخطط التدفقي لعمل نظام التحكم بالكرسي الكهربائي.



الشكل (2): المخطط التدفقي لعمل نظام التحكم بالكرسي الكهربائي.

طرائق البحث ومواده:

تتلخص مشكلة البحث في جانبين أساسيين:

1. ضرورة تصميم نظام تحكم يعتمد على الأوامر الصوتية وذلك بناء على نتيجة الاختبار الذي تم القيام به في البحث [12] و تطلعاته المستقبلية.
 2. إن استخدام الاشارات الرقمية الصادرة عن مخرجات معالجة الاشارات بأنواعها، كاشارات تفيد في التحكم التقليدي بالكروسي المدولب، تؤدي بالمحركات الى الاستجابة بسلاسة لتغيير الاوامر، والتي قد تكون ببعض الحالات اشارات عشوائية. ناهيك عن حركة لا خطية أو اختلاف محتمل في أداء محركي الكروسي نتيجة التقادم أو بسبب مشاكل التغذية.
- لذلك ومن هذه النقطة تم العمل على تحقيق استخدام الأوامر الصوتية و تحسينها باستخدام Fuzzy-PID. يلبي هذا البحث حاجات مبتوري الأطراف كافة.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من خلال أمثلة التحكم بكرسي كهربائي مدولب من خلال إضافة خدمة الأوامر الصوتية و تحسين استجابة الكروسي للأوامر بشتى أنواعها مما يفضي الى التوجه نحو تصميم وتصنيع التجهيزات الطبية بخبرات وطنية واعدة يلغي احتكار الشركات الأجنبية لتلك المنتجات، فضلاً عن تلبية الحاجات الانسانية المتنوعة للمرضى و التوفير في تكاليف شراء نفس المنتج من الشركات الأجنبية.

أولاً: نظام التحكم باستخدام الأوامر الصوتية:

قمنا باستخدام شريحة Arduino Mega ذات الامكانيات الأكبر من Arduino Uno، بالإضافة لاستخدام شريحة Node MCU و تسمى أيضاً ESP8266mod. إن الشريحة الثانية تعمل كصلة الوصل بين الحاسب أو الموبايل من جهة و الجزء الإلكتروني، الكهربائي و الميكانيكي للكروسي من جهة أخرى عن طريق استخدام وصلة لاسلكية، حيث أن الشريحة Node MCU يمكنها العمل كنقطة نفاذ Access Point و بإمكانها بث شبكة لاسلكية تمكن الطرفيات الأخرى من الحصول على الخدمة، بالإضافة لتقديمها الخدمة DHCP. كما يمكنها أن تعمل كطرفية مستقلة متصلة بشبكة لاسلكية مقترنة مع موجه. تم استخدام تلك الشريحة في هذا البحث كطرفية مستقلة مقترنة بموجه بيت لاسلكياً.

يقسم الجزء البرمجي المستخدم المتعلق بتحقيق نظام التحكم بالكروسي باستخدام الأوامر الصوتية الى قسمين، الأول هو الرمز البرمجي المتعلق بتطوير تطبيق أندرويد، بينما الثاني هو الرمز البرمجي المحمل على الشريحة ESP8266mod.

(a) الرمز البرمجي المستخدم في التطبيق أندرويد:

تم استخدام بيئة التطوير Android Studio لتطوير تطبيق له عدة صفحات، يتم التنقل فيما بينها عن طريق السحب، حيث أن الصف المسؤول عن عرض المكونات المرئية التي يتفاعل معها المستخدم له نوع فعالية Activity، تم اختيار فعالية واحدة بصفحات جزئية Fragments. الجدير بالذكر أن الصفحة الأولى متعلقة بإجراء الوصول الى Node MCU المقترنة أساساً مع شبكة لاسلكية موجودة عن طريق التقنية WIFI، حيث تعرض الصفحة مكونين، أحدهما نصي لإدخال IP Address الخاص بال Node MCU، و المكون الثاني هو زر لحفظ هذا العنوان. تتعلق الصفحة

الثانية بعضا تحكم رقمي يحاكي عصا التحكم الفيزيائي الموجود أساساً في التصميم. أما الصفحة الثالثة فهي متعلقة بالتفاعل البصري مع الانسان عن طريق التقاط إيماءات الوجه و تحويلها الى أوامر حركية. أما الصفحة الأخيرة، وهي المحور الأساسي الأول في بحثنا فهي تتعلق بالأوامر الصوتية، حيث تم استخدام أوامر صوتية مدربة مسبقاً من أجل الكرسي. تم استخدام المكتبة Snowboy [23] المجانية مفتوحة المصدر في تمييز الأوامر الصوتية، تم في البداية تهيئة المكتبة واستخدامها في تمييز كلمة واحدة، ثم تم تعديل الرماز و استخدامه في تمييز عشر أوامر صوتية تقريباً، تمثل أوامر التحرك الخمسة "يسار، يمين، أمام، خلف، قف" بالإضافة إلى خمس أوامر صوتية على شكل أرقام "واحد...حتى... خمسة" تستخدم لتحديد مدى الفترة الزمنية التي نريد فيها التحرك، بعد هذه الفترة الزمنية يتم إيقاف المحركات تلقائياً. يتم تنفيذ الأوامر على سبيل المثال كالتالي: أربعة أمام : يعني أن يتقدم الكرسي إلى الامام لفترة أربع وحدات زمنية (حاليا نستخدم الثانية كوحدة زمنية). إثنان يسار: التحرك إلى اليسار بمقدار زاوية يكافئ الفترة الزمنية بمقدار وحدتين زمنيتين. الجدير بالذكر أنه من أجل كل صفحة من صفحات التطبيق أندرويد، هنالك ملف xml يوصف المكونات بداخلها و هنالك ملف كود لبرمجة الوظائف المطلوبة من الصفحة. من جهة أخرى فإن الملفات التي تمثل بارامترات الأوامر الصوتية التي تم تدريب المكتبة Snowboy على تمييزها تمتلك اللاحقة pmdl حيث سيتم تضمينها في الكود وفق مسار محدد.

(b) الرماز البرمجي المحقون على الشريحة ESP8266mod:

تم كتابة البرنامج باللغة C. يحتوي هذا الرماز على إجراءات لتحريك المحركات التي تقود الكرسي، حيث عند استقبال نص عبر الشبكة اللاسلكية من التطبيق أندرويد، فسيتم البحث فيما اذا كان الأمر المستقبل يمثل أمر من الأوامر المخزنة و المرتبطة بإجراءات المحرك، حيث يتم استدعاء الاجرائية الموافقة لذلك الأمر. تتلخص خوارزمية الرماز البرمجي المحقون على الشريحة ESP8266mod في استدعاء المكتبات الخاصة بالاتصال بالشبكة اللاسلكية و من ثم تعريف متغيرين لوضع اسم الشبكة اللاسلكية و كلمة المرور. يتم تشغيل الشريحة كمخدم HTTP قابل لاستقبال الطلبات عبر البوابة 80. نحتاج بعد ذلك لتعريف متغيرات تشير إلى أرقام المخارج الرقمية المستخدمة في الشريحة. تم استخدام عدة توابع، أحدها لتهيئة الشريحة و تابع آخر لتهيئة المخارج الرقمية بالإضافة لتوابع أخرى كالتابع الذي يضبط نمط الشريحة كجهاز متصل الى شبكة لاسلكية و التابع الذي يتم استدعاؤه و الذي يحدد اسم الشبكة و كلمة المرور الصحيحين. عند الاتصال بالشبكة اللاسلكية، سيتم اعطاء عنوان IP address الى الشريحة من خلال المخدم DHCP الموجود في الموجه. عند ورود أمر متطابق ما الأوامر التي تم تدريب الكرسي عليها، سيتم استدعاء إجراءات تحريك المحرك حسب الأمر الوارد.

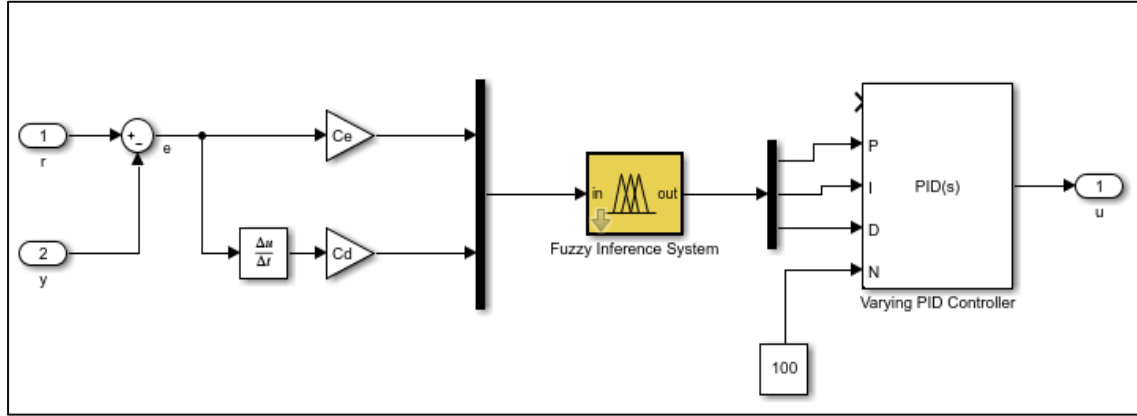
ثانياً: تحسين الاستجابة الزمنية للمحركات باستخدام متحكم Fuzzy-PID

يستخدم مبدأ المتحكم التناسبي - التكامل - التفاضلي (PID) على نطاق واسع في العديد من التطبيقات الصناعية نظراً لبساطتها رياضياً وسهولة استخدامها في التصميم. ومع ذلك، من الصعب تحقيق أداء التحكم المطلوب في ظل وجود دخل غير خطي، وتأخيرات زمنية، وتشويشات وكذلك عدم ثبات بارامترات النظام مع تغير الزمن. يتيح لنا ضبط الأمثل لبارامترات متحكم PID الحصول على أفضل شكل للاستجابة الزمنية من حيث سرعة الاستقرار وعدم وجود تجاوز للهدف المرغوب وتقليل الخطأ النهائي للاستقرار. يمكن ضبط بارامترات متحكم PID بعدة طرق بما في ذلك الضبط اليدوي، وضبط Ziegler-Nichols، وضبط Cohen-Coons، ومشاركة الحلقة loop sharing، وتموضع

الأقطاب pole placement. لكن هذه لها حدودها الخاصة. لذلك من أجل تحقيق الأداء المطلوب، يعد التحكم المنطقي الضبابي مناسباً للتغلب على ما تم ذكره [24].

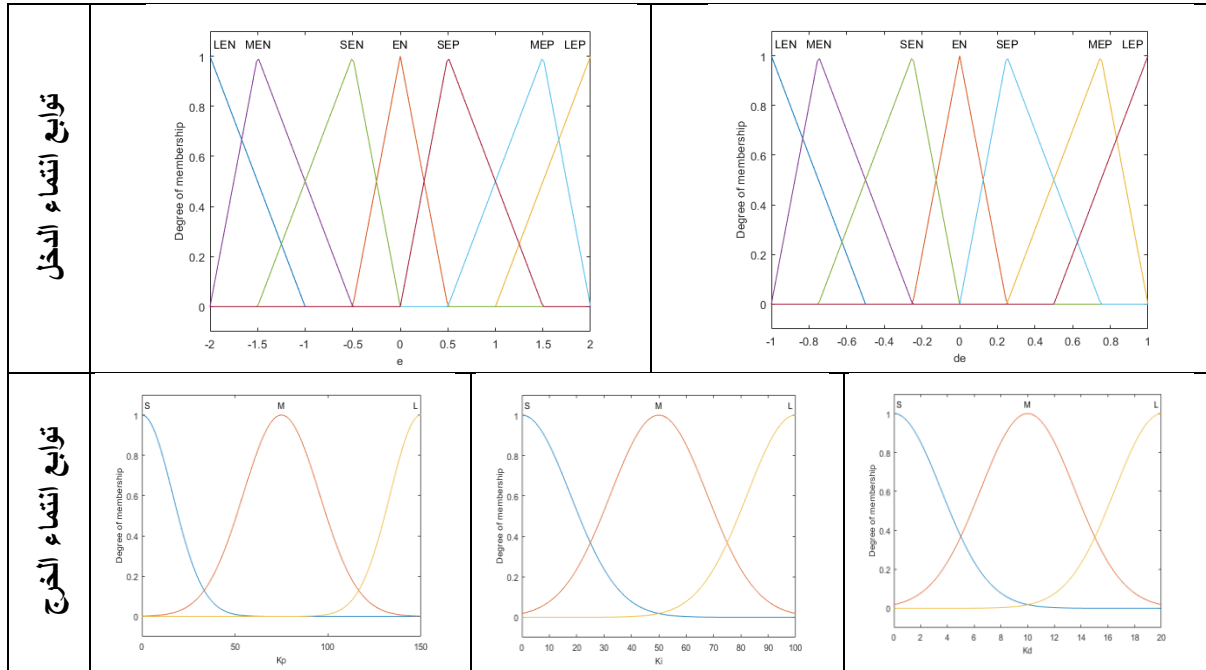
يعتمد متحكم Fuzzy-PID على توليف ومعايرة بارامترات المتحكم (K_P, K_I, K_D) في الزمن الحقيقي من خلال توابع انتماء محددة مسبقاً بالاعتماد على خبرة مصمم النظام وقواعد ضبابية يمكن أن تغطي جميع الحالات الممكنة للخطأ والقيم المناسبة للبارامترات [25]. وفي الخطوات التالية سنوضح خطوات محاكاة بناء المتحكم باستخدام مكتبة Simulink ضمن بيئة Matlab:

1. بناء متحكم PID ذو بارامترات خارجية واستخدام نموذج fuzzy logic كما يوضحه الشكل (3)، مع دخل يعبر عن الدخل المرغوب (u) والخرج الحالي (y) ليتم من خلاله حساب الخطأ (e) وليصبح دخل النظام الضبابي عبارة عن الخطأ ومشتق الخطأ ويتم استخدام قيمة ربح C_e و C_d لكل من الدخلين لاعتبارات تصميمية. يأتي الهدف من استخدام C_e و C_d من أنه تم بناء توابع الانتماء ضمن مجالات محددة، لذلك كان الهدف من استخدام الـ gain للخطأ ومشتقه هو تنسيب القيم scaling الى المجال المستخدم في النظام الضبابي في حال تجاوز القيم المسموحة، في أغلب الأحيان لا يتم استخدامها ضمن شروط العمل المفترضة وتكون قيمتها مساوية للواحد ولكن تم اخذها بعين الاعتبار من الناحية التصميمية المثالية.



الشكل (3): نموذج النظام الضبابي واتصال خرجه مع بارامترات متحكم PID.

2. تم ترميز توابع الانتماء المستخدمة في النظام الضبابي وفقاً لدرجة الخطأ وإشارته، حيث تعبر الرموز المستخدمة عن P (موجب)، N (سالب)، E (الخطأ)، L (كبير)، M (متوسط)، S (صغير). اعتماداً على تجربة سابقة في توليف متحكم PID بما يخص النموذج الميكانيكي الحالي، فقد تم اختيار مجال وعدد توابع الانتماء للدخل (الخطأ ومشتق الخطأ) والخرج (بارامترات المتحكم) بما يضمن تغطية جميع الحالات الممكنة للخطأ ودقة تغيير بارامترات تكفي للحصول على استجابة ممتازة الشكل (4). عدد القواعد المستخدمة تعتمد على حالة النظام المراد التحكم به وعدد الحالات الممكنة للدخل والخرج، تجريبياً وعملياً تم الاكتفاء بعدد 100 من القواعد الضبابية، تم توضيح عدد منها في الشكل (5).

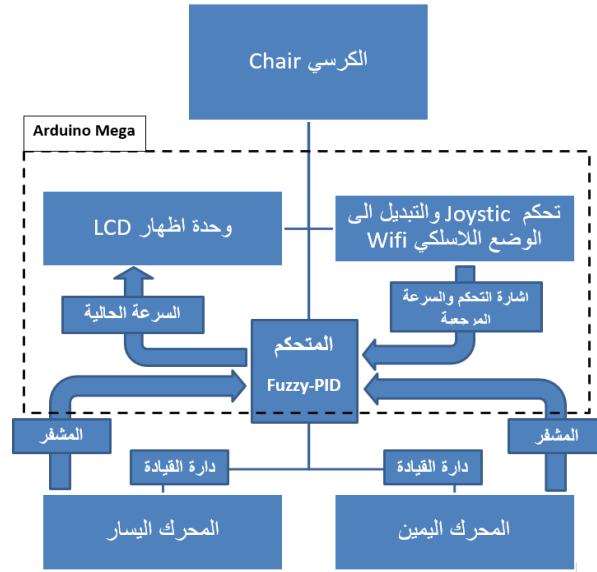


الشكل (4): توابع الانتماء للدخل والخرج ضمن النظام الضبابي.

1. If (e is LEN)	and	(de is LEN)	then	(Kp is B)	(Ki is S)	(Kdis S)
2. If (e is LEN)	and	(de is MEN)	then	(Kp is B)	(Ki is S)	(Kdis S)
3. If (e is LEN)	and	(de is SEN)	then	(Kp is B)	(Ki is S)	(Kdis S)
4. If (e is LEN)	and	(de is EN)	then	(Kp is B)	(Ki is S)	(Kdis S)
5. If (e is LEN)	and	(de is SEP)	then	(Kp is B)	(Ki is S)	(Kdis S)
6. If (e is LEN)	and	(de is MEP)	then	(Kp is B)	(Ki is S)	(Kdis S)
7. If (e is EN)	and	(de is SEP)	then	(Kp is S)	(Ki is M)	(Kdis B)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
95. If (e is EN)	and	(de is SEN)	then	(Kp is S)	(Ki is B)	(Kdis S)
96. If (e is EN)	and	(de is SEP)	then	(Kp is S)	(Ki is B)	(Kdis S)
97. If (e is EN)	and	(de is MEN)	then	(Kp is S)	(Ki is B)	(Kdis M)
98. If (e is EN)	and	(de is MEP)	then	(Kp is S)	(Ki is B)	(Kdis M)
99. If (e is EN)	and	(de is LEP)	then	(Kp is S)	(Ki is B)	(Kdis B)
100. If (e is EN)	and	(de is LEN)	then	(Kp is S)	(Ki is B)	(Kdis B)

الشكل (5): القواعد الضبابية المستخدمة ضمن Fuzzy-PID.

3. بعد تنفيذ النظام الضبابي ومحاكاة عمله ضمن بيئة Simulink، قمنا باستخدام موقع http://www.makeproto.com/projects/fuzzy/matlab_arduino_FIST الذي يعمل على تحويل النظام الضبابي المنفذ في بيئة Matlab الى كود بلغة C خاص بمنصة الأريدينو. وبالتالي أصبح لدينا النظام الضبابي جاهز للاستخدام ضمن بيئة الأريدينو، وتم تنفيذ باقي الكود البرمجي الخاص بعمل المتحكم وفق المخطط الصندوقي الموضح في الشكل (6).



الشكل (6): المكونات الأساسية للنظام وآلية العمل ودور منصة Arduino.

ومن أجل سلامة المريض تم دعم نظام التوجيه بالإضافة الى التحكم اللاسلكي (التحكم عن طريق الأوامر الصوتية) بمقبض تحكم joystick يوفر أداة بديلة في حال التحكم الحرج بالكرسي.

النتائج والمناقشة:

بعد تنفيذ طرق التحكم واختبار الكرسي الكهربائي المدولب على عدد من المرضى، و لأن اسهامنا في هذا البحث يتعلق بتحسين نوعية الحياة للمرضى من جهة، و بضمان تحرك الكرسي بالشكل الأمثل من خلال التحكم الصوتي وتحسين استجابة المحركات باستخدام Fuzzy-PID من جهة أخرى، كان لا بد من مناقشة النتائج من حيث (a) كيفية تنفيذ طريقة الأوامر الصوتية ومدى رضا المرضى عن استخدام الأوامر الصوتية ضمن الكرسي المدولب من خلال استبيانات وزعت على 30 شخص من فئات عمرية محددة. (a) و بمدى كفاءة استخدام المتحكم Fuzzy-PID مقارنة مع المتحكم PID التقليدية.

(a) اختبار استخدام الأوامر الصوتية:

احدى الطرق المستخدمة في اختبار التطبيقات هي تحديد درجة السهولة في التعامل معها أي بمعنى آخر، الى أي حد يمكن تصنيف الواجهات المصممة على أنها واجهات صديقة للمستخدم (User friendly)، مع الأخذ بعين الاعتبار اختلاف الجنس و العمر. لتحديد ذلك، يأتي مفهوم الاستخدامية (Usability) [12] [26] و التي تشير: إلى فعالية وكفاءة المنتج من ناحية، ورضا المستخدم في سياق محدد من ناحية أخرى.

تم استخدام نفس المنهجية المستخدمة في [12] و [27] من أجل التقييم، حيث تفيد التوصية المهنية بأن 5-12 مستخدم كاف لمثل هذه الأنواع من الاختبارات [27]. لكن قبل البدء بالاختبار يتوجب علينا استخدام المكتبة Snowboy من أجل عملية التدريب، أي تدريب المكتبة على أصواتنا من أجل الحصول على أصوات أكثر دقة. حيث نطلق من فرضية أنه يتم تدريب الكرسي على الأوامر الصوتية للمريض الذي يريد اقتناء الكرسي، تتبع عملية التدريب الخطوات التالية:

1. الولوج الى موقع المكتبة [23] و التسجيل فيها، حيث يمكن التسجيل عن طريق Gmail او عن طريق حساب Github [28]، Github هو منصة عمل تشاركية للمبرمجين معروفة عالمياً.
 2. اختيار الأيقونة Dashboard ومن ثم اختيار Create Hotword. هنا تظهر لنا نافذة جديدة بثلاثة حقول، الحقل الأول مخصص لاسم الأمر Hotword name، نختار مثلاً اسم الأمر الذي سيعطى لشريحة الأردوينو وليكن Forward. الحقل الثاني مخصص للغة و هنا نختار اللغة العربية. الحقل الثالث مخصص لاسم الشخص، نضع هنا مثلاً عبارة (بصوت فلان). نضغط عندئذ على الأيقونة الخضراء (Record my voice)
 3. عند الضغط على (Record my voice) ستظهر نافذة جديدة تتضمن ثلاثة أشكال لميكروفونات. أي سيتم تسجيل الأمر (أمام) ثلاث مرات. ولكن ستظهر نافذة فرعية صغيرة تطلب من المستخدم السماح للمكتبة باستخدام الميكروفون الخاص بالحاسب، يتوجب الموافقة و بعدها يتم تسجيل الصوت ثلاث مرات. بعد تسجيل الأمر لثلاث مرات يقوم المتصفح بتسجيل الصوت باسم موديل، أي مثلاً موديل الأمر (أمام).
 4. نضغط على الأيقونة (Test the model) لتأكد من وضوح الصوت. ستظهر هنا لنا نافذة جديدة بأيقونة جديدة باسم (Run the test). الجدير بالذكر أنه قبل التجريب يجب ملء الحقول المتعلقة بجنس المستخدم وعمره. الاختبار هنا يقتضي بأن يعطي المستخدم صوتياً الأمر لتتم مقارنته بالأمر المسجل لدى المتصفح.
 5. عند نجاح الاختبار، يتوجب الضغط على (Save and download)، ليتم تخزين الأمر على الحاسب الشخصي بالاسم (forward.pmdl).
 6. تكرر العملية من أجل الاوامر الأخرى.
- تم تقسيم المستخدمين في الاختبار إلى ثلاث فئات عمرية: 7-15، 16-35 و 36-60 سنة، مع 10 مستخدمين في كل فئة، 5 ذكور و 5 إناث. تم تدريب المكتبة Snowboy على اصواتهم جميعاً باستخدام الأوامر التالية: الأمام، والخلف، اليمين، اليسار والتوقف و من ثم تم تضمين ملفات الخرج ضمن الرماز البرمجي. تم بعد عملية تدريب المكتبة على الأصوات و تضمين ملفات الخرج ضمن الكود، الانتقال الى عملية تقييم المنتج. حيث قمنا باختبار التصميم من قبل المستخدمين من دون تدريبهم على المنتج ، أي الكرسي مع التطبيق أندرويد، ومن ثم أعدنا الاختبار بعد تدريبهم لمدة 10 دقائق. يوضح الجدول -1-، النتائج التي حصلنا عليها والتي تمثل متوسط نسبة النجاح في استجابة المنتج للأمر الصوتي مع العلم أن كل أمر صوتي تم تكراره 5 مرات من قبل كل مستخدم و في كلتا الحالتين، مع و بدون تدريب.

الجدول (1): نتائج الاختبار لكل من المستخدمين المدربين و غير المدربين:

(أ) للفئة العمرية (7-15) سنة، (ب) للفئة العمرية (16-35) سنة، (ج) للفئة العمرية (36-60) سنة.

- أ -

الفئة العمرية (7-15) سنة	الأمر الصوتي	المستخدمون غير مدربين	المستخدمون مدربين
	الأمام	98 %	100 %
	الخلف	97 %	100 %
	اليسار	98 %	99 %
	اليمين	99 %	100 %
	التوقف	98 %	100 %

- ب -

المستخدمون مدربون	المستخدمون غير مدربين	الأمر الصوتي	الفئة العمرية (16-35) سنة
100 %	97 %	الأمام	
99 %	96 %	الخلف	
98 %	96 %	اليسار	
99 %	97 %	اليمين	
99 %	97 %	التوقف	

- ج -

المستخدمون مدربون	المستخدمون غير مدربين	الأمر الصوتي	الفئة العمرية (36-60) سنة
98 %	98 %	الأمام	
97 %	95 %	الخلف	
96 %	94 %	اليسار	
97 %	95 %	اليمين	
98 %	94 %	التوقف	

يمكن الملاحظة من الجدول -1- أن الفئة العمرية الأولى تحقق النتائج الأفضل بين الفئات العمرية الأخرى و ذلك كونها الفئة العمرية الأصغر في المجتمع و الأكثر تواصلًا مع التكنولوجيا. و يبين الجدول أيضا، كما هو متوقع، أن الفئة العمرية الثالثة حققت النتائج الأسوأ لنفس السبب، ولكن النتائج بمجملها تعتبر أكثر من جيدة مع ملاحظة الفارق الصغير جدا بين القيم للمستخدمين قبل و بعد تدريبهم على المنتج لمدة 10 دقائق. وفيما يتعلق بالمرحلة الثانية من الاختبار، كشف فحص تسجيلات الفيديو للمستخدمين أن الارتياح كانت الصفة الغالبة المرافقة و يعزى ذلك الى حدوث نوع من التعود لدى المستخدمين والذي حققه الوقت المنقضي أثناء تدريب المكتبة. وأخيرا، أعطيت استبيانات لمستخدمي المنتج من أجل تحديد درجة الرضى لديهم، و ذلك على مقياس من 0 إلى 10، حيث تم تحديد أربعة تصنيفات بشأن الاختبار: مخيفة، مملة، سهلة، و ممتعة. تم حساب المتوسط والانحراف المعياري لكل تصنيف من أجل الحصول على فكرة إحصائية عن النتائج. ويوضح الجدول -2- نتائج الاستبيان.

الجدول (2): نتائج الاستبيان الموزع على المستخدمين

الفئة العمرية						
36-60 (10 أشخاص)		16-35 (10 أشخاص)		7-15 (10 أشخاص)		
الانحراف المعياري	المتوسط	الانحراف المعياري	المتوسط	الانحراف المعياري	المتوسط	
0.6708	0.5	0	0	0.3	0.1	مخيفة (10-0)
0.9165	0.6	0.6403	0.3	0.4	0.2	مملة (10-0)
0.8306	8.9	0.4899	9.4	0.4898	9.6	سهلة (10-0)
1.1874	8.7	1.005	9.3	0.4582	9.7	ممتعة (10-0)

الجدير بالذكر أن الانحراف المعياري يعطي فكرة عن انتشار النتائج التي تم الحصول عليها حول المتوسط. انخفاض قيم الانحراف المعياري، تشير إلى اختلاف بسيط في ردود المستخدم وتقاربها من بعضها. بينما تشير القيم العالية إلى مزيد من التباين.

(b) الاختبار عند استخدام المتحكم Fuzzy-PID:

بعد تنفيذ الكود الخاص بالمتحكم Fuzzy-PID و تحميل الكود النهائي على شريحة Arduino Mega، تم تجريب الكرسي الكهربائي على عدة اوامر منها التقدم الى الأمام وعدة اتجاهات، ولكن كون أنه لا نستطيع اظهار الأداء على مستوى الكرسي هنا، قمنا فقط باظهار الفرق بين استخدام متحكمي PID و Fuzzy-PID على المحركين ضمن الكرسي المنفذ كما هو موضح في الجدول (3). يظهر جدول النتائج مدى كفاءة استخدام Fuzzy-PID حيث تم حل مشكلة تجاوز القيم المرغوبة overshoot والتي تشير الى تجاوز الهدف وأيضاً حصلنا على سرعة استجابة أعلى بكثير ومعدل خطأ شبه صفري. حيث تم استحصال نتائج الاستجابة للمحركين من خلال الاتصال التسلسلي مع منصة الأردوينو وتم تقييم الاستجابات الزمنية من خلال تعليمة stepinfo التي توفر امكانية تحليل استجابة النظام عن طريق تمرير شعاعين من القيم يعبران عن خرج النظام وتابعيته مع الزمن.

الجدول (3): الاستجابة الزمنية للمحركين باستخدام نوعين من المتحكمات.

	المحرك اليسار		المحرك اليمين	
	Left Motor Speed - PID vs Fuzzy-PID		Right Motor Speed - PID vs Fuzzy-PID	
	PID	Fuzzy-PID	PID	Fuzzy-PID
RiseTime (sec)	1.395	1.002	1.39	1.001
Settling Time (sec)	4.45	1.61	4.4	1.6
SettlingMin (m/sec)	0.968	0.99	0.97	0.99
SettlingMax (m/sec)	1.65	1	1.6	1
Overshoot (m/sec)	1.65	1.0005	1.6	1.0001
Undershoot (m/sec)	0.98	1	0.98	1
Peak (m/sec)	1.65	1.0005	1.6	1.0001
PeakTime (sec)	1.925	1.461	1.92	1.46
SS Error (m/sec)	0.02	0	0.01	0

الجدير بالذكر أن الاستجابة الزمنية تعتبر جيدة عند الاقلاع و كذلك عند التوقف.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث تقديم حل للمرضى المصابين بشلل أو ببتز عن طريق إمكانية قيادة الكرسي الطبي الكهربائي المدولب من خلال تطبيق أندرويد يستقبل الأوامر الصوتية و يحولها الى أوامر حركية على شكل اشارات رقمية، ترسل عن طريق التقنية WIFI الى شريحة NodeMCU ، تقوم تلك الشريحة بمعالجة تلك الإشارات و من ثم تسليم الأوامر الحركية الى الشريحة Arduino MEGA و التي تتولى مهمة التنفيذ. أظهرت النتائج درجة عالية من الاستخدامية و الرضى لدى المستخدمين من فئات عمرية مختلفة و من الجنسين. كما تم في هذا البحث تحسين الاستجابة الحركية للكرسي باستخدام متحكم Fuzzy-PID عن طريق حقن كود ضمن الشريحة Arduino MEGA. أظهر النظام استجابة زمنية جيدة جداً عند استخدام ال متحكم Fuzzy-PID مقارنة بمتحكم PID التقليدي، كما و تمكن المستخدمين للكرسي المدولب من تنفيذ جميع الحركات المطلوبة وبسرعة استجابة مرضية بالرغم من اختلاف أوزانهم. من ناحية أخرى، تغلب متحكم Fuzzy-PID على تجاوز الهدف Overshoot قد أظهر سلاسة في اقلاع الكرسي ودقة في الوصول و بالتالي عدم وجود خطر على المريض أو المستخدم في حال العمل في مناطق تتطلب دقة في الحركة. وكتوصيات مستقبلية، فإن استخدام منصات بقدرات حسابية أكبر، مثل Raspberry Pi (حاسوب مصغّر)، في مهمة التدريب بشكل موضعي (ضمن الكرسي)، ومهمة معالجة الصور، وتخفيف الحمل قدر الامكان عن تطبيق أندرويد سيكون خياراً جيداً. أما فيما يتعلق باستخدام التحكم Fuzzy-PID، فإن اضافة حساسات وزن سيوفر امكانية تحكم أفضل بجهد المحركات مع تغير وزن المستخدم وبالتالي استجابة أعلى كفاءة. كما أن أمثلة اختيار القواعد وتوابع الانتماء من خلال محاكاة سيناريوهات مختلفة لمتحكم PID مع تغير بارامتراته سيعطي نتائج أفضل.

References:

1. Mazwi, N. L., Adeletti, K., & Hirschberg, R. E. *Traumatic spinal cord injury: recovery, rehabilitation, and prognosis. Current Trauma Reports*, 1(3), 182-192, 2015.
2. Kuo, C. L. *How Stephen Hawking Defied Amyotrophic Lateral Sclerosis for Five Decades. Clinical Medicine and Therapeutics (CMT)*, 2019.
3. Kosmyna, N., & Lécuyer, A. *Designing guiding systems for brain-computer interfaces. Frontiers in human neuroscience*, 11, 396, 2017.
4. R. Azad, B. Azad, N. Khalifa, and S. Jamali, *Real-time humancomputer interaction based on face and hand gesture recognition*, International Journal in Foundations of Computer Science Technology, vol. 4, pp. 37–48, 07 2014.
5. Y.-J. Tu, C.-C. Kao, H.-Y. Lin, and C.-C. Chang, *Face and gesture based human computer interaction*, International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, vol. 8, pp. 219– 228, 09 2015.
6. P. Viola, M. Jones et al. *Rapid object detection using a boosted cascade of simple features*, CVPR (1), vol. 1, pp. 511–518, 2001.
7. M. Divjak and H. Bischof. *Eye blink based fatigue detection for prevention of computer vision syndrome*. in MVA, 2009, pp. 350–353.
8. T. Drutarovsky and A. Fogelton. *Eye blink detection using variance of motion vectors*, in European Conference on Computer Vision. Springer, 2014, pp. 436–448.
9. G. Hu, Y. Xiao, Z. Cao, L. Meng, Z. Fang, and J. T. Zhou, *Towards real-time eyeblink detection in the wild: Dataset, theory and practices*, arXiv preprint arXiv:1902.07891, 2019.

10. M. Chau and M. Betke, *Real time eye tracking and blink detection with usb cameras*, Boston University Computer Science Department, Tech. Rep., 2005.
11. T. Nguyen, T. Nguyen, K. Truong, and T. Van Vo, *A mean threshold algorithm for human eye blinking detection using eeg*, in 4th International Conference on Biomedical Engineering in Vietnam. Springer, 2013, pp. 275–279.
12. Ahmad Mahmoud, Mohammad Hamoud, Ahmad M. Ahmad, Ahmad S. Ahmad . *Controlling a Wheelchair Using Human-Computer Interaction*. International Journal of Science and Research (IJSR), ISSN (Online): 2319-7064, 2016.
13. A. Kaehler, G. Bradski. *Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library*, O'Reilly, 2016.
14. Anoop.K.J, Inbaezhilan, Sathish raj, Ramaseenivasan, CholaPandian. *Designing and Modeling of Voice Controlled Wheel Chair Incorporated with Home Automation*, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 3, Special Issue 2, April, 2014.
15. K. Sudheer, T.V.Janardhana Rao, Ch. Sridevi, M.S.Madhan Mohan. *Voice and Gesture Based Electric-Powered Wheelchair Using ARM*, International Journal of Research in Computer and Communication technology, IJRCCT, ISSN 2278-5841, Vol 1, Issue 6, November 2012.
16. Ali A. Abed. *Design of Voice Controlled Smart Wheelchair*, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 131 – No.1, December 2015.
17. Romil Chauhan, Yash Jain, Harsh Agarwal, Abhijit Patil, *Study of Implementation of Voice Controlled Wheelchair*, 2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS -2016), Jan. 22 – 23, 2016, Coimbatore, INDIA.
18. Sateesh Reddy Avutu, Dinesh, Bhatia, B. Venkateswara Reddy, *Voice control module for Low cost Local-Map navigation based Intillegent wheelchair*, IEEE 7th International Advance Computing Conference, 2017.
19. G Azam and M T Islam. *Design and Fabrication of a Voice Controlled Wheelchair for Physically Disabled People*, International Conference on Physics Sustainable Development & Technology (ICPSDT-2015) (August 19-20, 2015).
20. Getachew, T. *Fuzzy-Pid Speed Control Of Pmsm Drive For Ev (Qute Bajaj) Application* (Doctoral dissertation, ASTU), 2020.
21. 13. Tsai, C., Yu, C., Tsai, C. *Adaptive ORFWNN-based predictive PID control*. Int. J. Fuzzy. Syst. 21, 1544–1559, 2019.
22. 11. Sari, N.N., Jahanshahi, H., Fakoor, M. *Adaptive fuzzy PID control strategy for spacecraft attitude control*. Int. J. Fuzzy. Syst. 21, 769–781, 2019.
23. <https://snowboy.kitt.ai/>
24. Rao, P. G. K., Subramanyam, M. V., & Satyaprasad, K. *Study on PID controller design and performance based on tuning techniques*. In 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT) (pp. 1411-1417). IEEE, 2014.
25. Camboim, M. M., Villanueva, J. M. M., & de Souza, C. P. *Fuzzy Controller Applied to a Remote Energy Harvesting Emulation Platform*. Sensors, 2020, 5874.
26. J. Preece, H. Sharp, Y. Rogers. *Interaction Design: beyond human-computer interaction*, 4th Edition, Wiley, 2015.

27. M. F. Ruzaij, S. Neubert, N. Stoll, K. Thurow, *Design and Implementation of Low-Cost Intelligent Wheelchair Controller for Quadriplegias and Paralysis Patient*, IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, January 26-28, 2017.
28. <https://github.com/>