

اقتراح نظام هجين لتحسين أداء ذراع روبوتية مرنة من خلال دمج متحكم LQR والمنطق الضبابي

* اسم الدكتور المشرف: د. نبيل دحدوح المشرف المشارك : د. ميشيل سمعان

** اسم الباحثة: هلا محسن معروف

□ الملخص □

تزداد الحاجة الصناعية لاستخدام الأذرع الروبوتية في المجالات الصناعية خاصة في المجالات التي تتطلب مهام تكرارية كعمليات اللحام والتجميع في مصانع السيارات والعمل في الأماكن التي يصعب التواجد فيها كالفضاء وأعماق البحار وجوف الأرض، والأماكن الحاوية على مواد خطرة مثل المفاعلات النووية والمواد الكيماوية، كما لعبت دوراً مهماً في التطبيقات الطبية مثل القيام بعمليات جراحية والكثير من التطبيقات في مختلف مجالات الحياة، ويجب على الروبوت تحقيق استجابة سريعة للمهمة المطلوبة منه وبشكل خاص في تطبيقات الزمن الحقيقي كالمجال الطبي والعمليات الجراحية، تم في هذا البحث تحسين التحكم لذراع روبوتية مرنة بالاعتماد على متحكم LQR (المتحكم التريبي الخطي) ونظام تحكم هجين من خلال دمج تقنية المنطق الضبابي مع متحكم LQR والمقارنة بينهما من ناحية سرعة الاستجابة، وتم إثبات فعالية النظام المقترح في تحقيق استجابة سريعة و تحقيق انخفاضاً سريعاً في قيمة التسارع وبالتالي تقليل مستوى التذبذب بسرعة إلى الصفر وبالنتيجة تثبيت الذراع المرنة وتحسين الأداء بشكل واضح. جميع إجراءات المحاكاة تمت باستخدام برنامج الماتلاب.

الكلمات المفتاحية: LQR (المتحكم التريبي الخطي)، المنطق الضبابي، ذراع روبوتية مرنة،

سرعة الاستجابة.

Proposing a hybrid system to improve the performance of a flexible robotic arm by integrating an LQR controller and fuzzy logic

□ ABSTRACT □

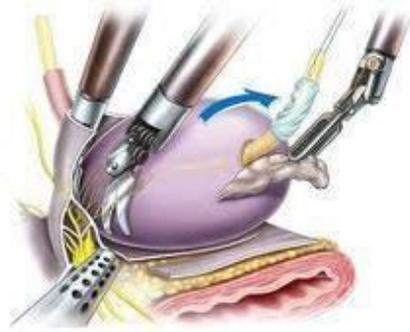
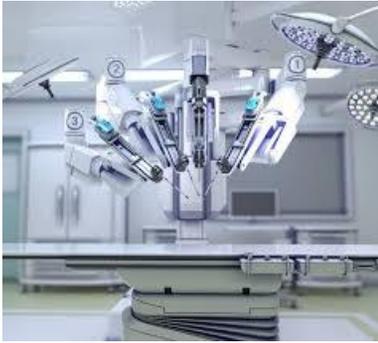
There is an increasing industrial need for using robot arms, especially in fields that require repetitive tasks such as welding and assembly in car factories, working in difficult-to-reach places such as space, deep sea, and underground, and in places containing hazardous materials such as nuclear reactors and chemicals. They also play a crucial role in medical applications such as performing surgeries and many other applications in various fields of life. The robot must achieve a quick response to the required task, especially in real-time applications such as the medical field and surgical operations. In this research, the control of a flexible robot arm has been improved by using LQR (Linear Quadratic Regulator) controllers and a hybrid control system through integrating fuzzy logic technique with LQR controller. A comparison between them is made in terms of response speed, and the effectiveness of the proposed system in achieving a quick response and rapid reduction in acceleration values, thus quickly reducing oscillation levels to zero and consequently stabilizing the flexible arm and improving performance significantly has been demonstrated. All simulation procedures have been performed using Matlab software.

Key Words: LQR (Linear Quadratic Regulator), Fuzzy logic, flexible robotic arm, response speed.

1- المقدمة

تعتمد الصناعات الحديثة في هذه الأيام على الأذرع الروبوتية الثابتة والروبوتات المتحركة، ويمكن تعريف الروبوتات على أنها منظومات الكتروميكانيكية معقدة يتطلب تصميمها الربط بين مزيج من التخصصات الهندسية (الميكانيكية، الكهربائية والإلكترونية بالإضافة لعلوم الكمبيوتر كالبرمجة) وهذا ما يتطلب وجود بيئة نمذجة متعددة المجالات تُتيح للمصممين تجسيد فكرتهم في نموذج أولي متكامل [1].

تستخدم الأذرع المرنة في الكثير من التطبيقات نظراً لتوفير الطاقة وزمن الاستجابة السريع، وتعتبر التطبيقات الطبية من مجالات العمل الأساسية لهذه الأذرع حيث تتطلب أوزان خفيفة وسهولة تركيب بالإضافة إلى جودة في أداء الذراع المقادة عن بعد كما في الشكل (1) حيث تكون الاستجابة والدقة من أولويات هذه الأذرع [2].



الشكل (1) ذراع مقادة للأغراض الطبية

2- الدراسات المرجعية:

باعتبار أن الأذرع الروبوتية المرنة من أهم التجهيزات في العصر الحديث ولها العديد من التطبيقات، لذلك لاقى اهتماماً ملحوظاً من قبل الباحثين نظراً للتسهيلات التي تقدمها في إنجاز العديد من الأعمال، وتم التطرق فيما يلي إلى بعض تلك الدراسات :

Composite control of flexible manipulators based on SMC-DO and LQR

قام الباحثون في هذه الدراسة بتقديم نهج تحكم مركب جديد يهدف إلى تحقيق تتبع المسار وتخفيف الاهتزاز للأذرع المرنة. تعتمد طريقة التحكم هذه على التحكم بوضع الانزلاق مع مراقبة الاضطراب (SMC-DO) بالمنظم الخطي التربيعي (LQR). تم تقسيم ديناميكيات النظام إلى نظامين فرعيين في فترات زمنية مختلفة باستخدام نظرية الاضطراب المفرد (SP). ففي فترة الزمن البطيء، يتم بناء مراقب اضطراب تراجعي للتعامل مع الاضطرابات البطيئة المتغيرة مع الزمن، ويتم تصميم تحكم بطيء يستند إلى SMC-DO. وفي فترة الزمن السريع، يتم تصميم تحكم سريع باستخدام LQR. تم بعد ذلك تشكيل التحكم المركب عن طريق دمج التحكم البطيء والتحكم السريع، وتم إثبات استقرار المحركات المرنة باستخدام نظرية SP [3].

Learning Control for Flexible Manipulators with Varying Loads: A Composite Method with Robust Adaptive Dynamic Programming and Robust Sliding Mode Control

❖ اعتمد الباحثون في هذه الدراسة على دراسة التحكم على أنظمة الأذرع المرنة ذات الأحمال المتغيرة حيث تم تحليل ديناميكيات النظام إلى نظامين فرعيين سريع وبطيء باستخدام تقنية الاضطراب المفرد. تم تصميم متحكمين فرعيين وهما متحكم تكيفي قوي للبرمجة الديناميكية (RADP) ومتحكم انزلاقي قوي للوضع (RSMC) للنظامين الفرعيين البطيء والسريع على التوالي، ففي الفترة البطيئة، تم استخدام المتحكم الفرعي القائم على RADP لتحقيق تتبع المسار من خلال استخدام زوايا الدوران. يستطيع هذا المتحكم الفرعي التكيف مع تغيرات الأحمال والاضطرابات مع مرور الوقت، أما في الفترة السريعة، تم تقديم

المتحكم الفرعي RSMC لتحسين منع الاهتزاز. تم تصميم هذا المتحكم الفرعي للتكيف على الديناميكيات السريعة وتقليل التذبذبات في النظام، يؤكد الباحثون فعالية الطريقة المقترحة وتم تسليط الضوء على إمكانياتها في التطبيقات العملية في مختلف الصناعات [4].

Vibrations and intelligent tracking control of single link flexible manipulator.

❖ قام الباحثون في هذه الدراسة باقتراح تحكم ذكي هجين للأذرع المرنة ذات الوصلة الواحدة حيث تم تصميم مرشح (OBF) باستخدام إشارة الخرج للنظام لتخفيف انحرافات الطرف وتم دمجها مع متحكم المنطق الضبابي (fuzzy logic controller) للتحكم في تتبع نقطة الضبط للنظام وتم تحقيق تتبع جيد وتقليل كبير في الانحراف. تم قياس ذلك باستخدام تحليل الاستجابة الزمنية وتم الاستنتاج أن أداء OBF-LQR كان أفضل وأكثر توافقاً من OBF-fuzzy [5].

Vision based tip position tracking control of two link flexible manipulator.

❖ اعتمد الباحثون في هذه الدراسة على التحكم بالرؤية القائمة على الصورة (IBVS) من خلال التتبع الدقيق لموضع الطرف، حيث تم استخدام مستشعر رؤية لقياس مباشر لموضع الطرف بدلاً من استخدام المستشعرات الميكانيكية التقليدية بين أنظمة التحكم المختلفة للتحكم بالرؤية، حيث تم اختيار الميزة البصرية الجديدة المستندة إلى الزمن، وقام الباحثون بتطوير متحكم جديد بنظام زمني مزدوج للتحكم بتتبع الطرف للأذرع المرنة ذات الوصلة الواحدة، حيث تم تجزئة ديناميكا الأذرع المرنة إلى نماذج زمنية مزدوجة، وهي نظام فرعي بطيء ونظام فرعي سريع وتم التحقق من أداء وقوة التحمل لمتحكم IBVS ذو النظام

الزمني المزدوج الجديد المقترح للأذرع المرنة ذات الوصلة الواحدة، وبين الباحثون من خلال النتائج المستخلصة أن المتحكم المقترح يستقر بشكل فعال لديناميكيات الاهتزاز ويتتبع مسار الإشارة المرجعية بدقة [6].

Hybrid Vibration Control Algorithm of a Flexible Manipulator System Robotics.

❖ قام الباحثون في هذه الدراسة بدراسة مشكلة صعوبات التحكم في الأذرع المرنة، حيث تم اقتراح نموذجي تحكم للأذرع المرنة يستخدم النموذج الأول متحكمين نسبيين - تكاملين - تفاضليين (PID)، حيث يُستخدم الأول للتحكم في الموضوع، ويُستخدم الآخر للحد من الاهتزاز، أما النموذج الثاني هو تطوير مُحسن للنموذج الأول بإضافة متحكم منطق ضبابي لتحسين تخفيف الاهتزاز. تم الاستنتاج أن الطريقة المقترحة قادرة على تقليل الاهتزازات بشكل فعال مع اختصار كبير في وقت الاهتزاز بفضل إدخال طاقة التحكم وفقًا لخصائص الاهتزاز [7].

Active vibration control of composite laminates with MFC based on PID-LQR hybrid controller

❖ قام الباحثون في هذه الدراسة باقتراح وحدة تحكم مشتركة PID-LQR، حيث تم إثبات أن وحدة التحكم المشتركة لديها أداء تحكم أفضل من خلال محاكاة استجابة الاهتزاز الهيكلي تحت ظروف تحفيز مختلفة. وتم التحقق من فعالية وحدة التحكم المشتركة من خلال تجربة التحكم النشط، وبينت النتائج أنه تم تقليل استجابة الاهتزاز بنسبة حوالي 31.55% بعد استخدام النموذج المقترح للتحكم [8].

MODELLING AND CONTROL OF A TWO-LINK RIGID-FLEXIBLE MANIPULATOR.

❖ قام الباحثون في هذه الدراسة بعرض نموذج لروبوت ذو مفصلين صلب-مرن تم تصميمه بطريقتين مختلفتين، الأولى باستخدام معادلات لاجرانج وطريقة العنصر المحدود لإنشاء نموذج رياضي للروبوت، والثانية باستخدام برنامج Autodesk Inventor لإنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد واستيراده إلى MATLAB Simulink، وتم التحكم في كلا النموذجين بواسطة ثلاثة أنواع من المتحكمات: متحكم PID التقليدي ومتحكم LQR ومتحكم LQG. أظهرت الدراسة أداء النموذجين بالنسبة للمتحكمات الثلاثة، وأثبتت النتائج أن Autodesk Inventor يعد أداة موثوقة لنمذجة الأنظمة الميكانيكية. كما أكدت النتائج أن المتحكمات الحديثة، مثل LQR و LQG، تعمل بشكل أفضل بكثير من المتحكمات التقليدية بالنسبة لحركة الروبوت [9].

3. أهمية البحث وأهدافه

تكمن أهمية الأذرع الروبوتية المرنة في أنها تشكل النواة الأساسية لمختلف الصناعات والتطبيقات والأماكن التي يصعب التواجد فيها مثل الفضاء وأعماق الأرض والأماكن الخطرة مثل المفاعلات النووية وغرف العمليات. إن هدف البحث هو تحسين التحكم في الأذرع المرنة من أجل الحصول على سرعة استجابة أكبر ومتوسط خطأ صغير من خلال تطبيق دمج بين نظام متحكم LQR وتقنية Fuzzy logic وإثبات فعالية النظام المقترح في تحقيق سرعة عالية في الاستجابة.

4. طرائق البحث ومواده

4-1- متحكم LQR:

يعتبر المتحكم LQR إحدى أنواع التحكم الأمثلي الذي يعتمد على التحكم برجوع الحالة (إعادة تموضع الأقطاب) بحيث نحصل على الأداء المطلوب للذراع الروبوتية المرنة، ويهدف هذا المتحكم إلى إيجاد دخل مناسب u بحيث نجعل المعيار التربيعي J أصغر مايمكن بحيث نعرف هذا المعيار كما يلي:

$$\text{Find } u \text{ to minimize } J = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \dots \dots \dots (1)$$

وبالتالي يصبح الهدف من المتحكم هو اختيار أفضل قيمة مثالية لشعاع التحكم بحيث نحصل على قيمة أصغرية لمعامل الأداء J وبالتالي يصبح هذا المعيار محدوداً، وعندها يسعى شعاع الحالة نحو الصفر وهذا يضمن استقرار النظام.

تعرف Q على أنها مصفوفة أوزان الحالة و R عبارة عن مصفوفة أوزان الدخل، تعبر المعادلة (2) عن ربح التغذية الراجعة (K) feedback [11]:

$$K = T^{-1}(T^T)^{-1}B^T P = R^{-1}B^T P \quad (2)$$

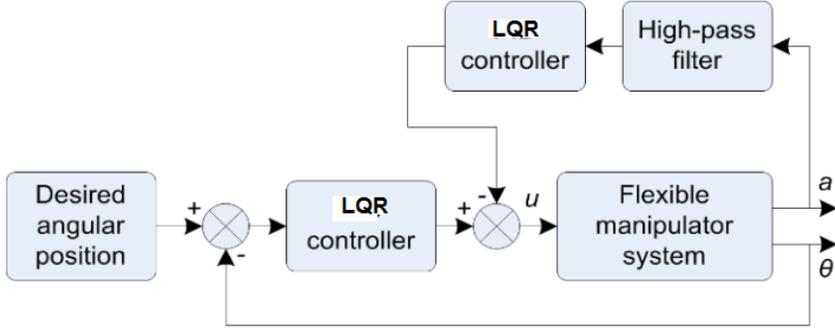
حيث P هي مصفوفة موجبة محددة تسمى مصفوفة ريكاتي، والتي يتم الحصول عليها عن طريق حل معادلة ريكاتي وممثلة في المعادلة (3) ويمكن أن يكتب في حالة ثابتة كما المعادلة (4):

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = -P \quad (3)$$

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (4)$$

بما أن لدينا مدخل واحد $R = 1$ ، ستستمر المصفوفة Q في التغير من أجل الحصول على مصفوفة مكاسب التغذية الراجعة المثلى لأفضل أداء مطلوب.

يبين الشكل (2) مخطط LQR المستخدم في المحاكاة



الشكل (2) المخطط الصندوقي لنظام متحكم LQR

4-2- المنطق الضبابي Fuzzy Logic:

تتألف تقنية المنطق الضبابي من ثلاثة أقسام رئيسية هي [12]:

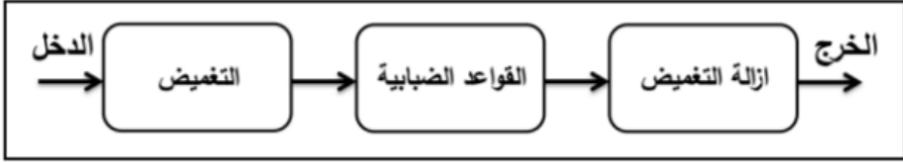
1- التغميض Fuzzification: في مرحلة التغميض يتم تحويل متغير التحكم العددي الكمي الى قيمة كيفية ككلمة صغير أو متوسط أو كبير، والتي تُعرف بالمتغيرات اللغوية، توصف هذه المتغيرات من خلال دوال تدعى بدوال انتماء Membership Function تأخذ قيمةً بين الصفر والواحد، دوال الانتماء الأكثر شهرة هي الدوال المثلثية Triangular والدوال الشبه منحرفة Trapezoidal والدوال الغاوصية Gaussian.

2- القواعد Rules: عبارة عن مجموعة من حالات If-Then المعروفة بالقواعد اللغوية التي تصف بدقة تصرف النظام وفقاً لمجموعة معينة من المدخلات، بمعنى أن هذه القواعد تقوم بتوصيف للعلاقة بين قيم المخارج والأوامر المسندة إلى تلك القيم.

اقتراح نظام هجين لتحسين أداء ذراع روبوتية مرنة من خلال دمج متحكم LQR والمنطق الضبابي

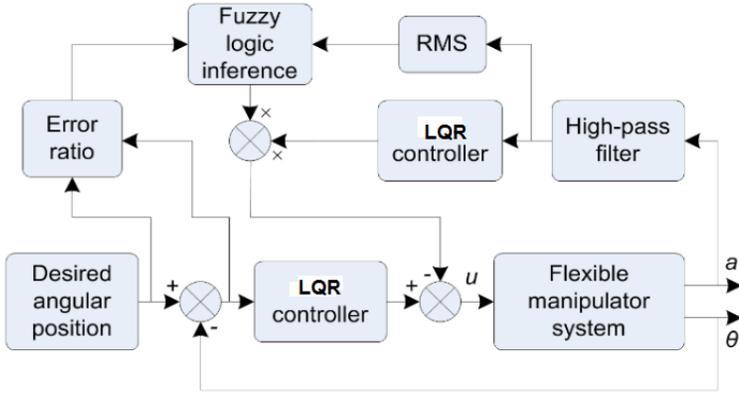
3- إزالة التغميض **Defuzzification**: إزالة التغميض هي عملية تحويل القيم الكيفية (اللغوية) إلى قيم عددية يسهل على الحاسب التعامل معها.

يبين الشكل (3) المخطط الصندوقي للمنطق الضبابي.



الشكل (3) المخطط الصندوقي للمنطق الضبابي

تم في هذا البحث اقتراح نظام تحكم هجين من خلال دمج متحكم LQR مع تقنية Fuzzy Logic كما هو موضح في الشكل (4).



الشكل (4) المخطط الصندوقي للنظام الهجين المقترح المستخدم في المحاكاة

يتم الحصول على إشارة الإدخال إلى وحدة التحكم الضبابية من مستوى التذبذب وانحراف زاوية التحكم عن القيمة المحددة. كل إشارة إدخال لديها خمس دوال انتماء بنطاق من القيم المقيسة بين [0، 1]. تتضمن الإشارة الناتجة أيضاً خمس دوال انتماء بنطاق من القيم المقيسة بين [0، 1]. تم وصف قاعدة الشرط- النتيجة (if-then) كما في

الجدول 1، وتكون الاختصارات هي أسماء الدوال الانتماء مع التقديرات التالية: VS - صغير جداً، RS - صغير نسبياً، SS - صغير، RB - كبير نسبياً، و BB - كبير.

الجدول (1) القواعد if-then الخاصة بنظام المنطق الضبابي

Error	Oscillation					
	VS	RS	SS	RB	BB	
VS	VS	VS	VS	VS	VS	
RS	VS	VS	VS	RS	SS	
SS	VS	VS	SS	BB	BB	
RB	RB	RB	BB	BB	BB	
BB	RB	RB	BB	BB	BB	

5. النتائج والمناقشة:

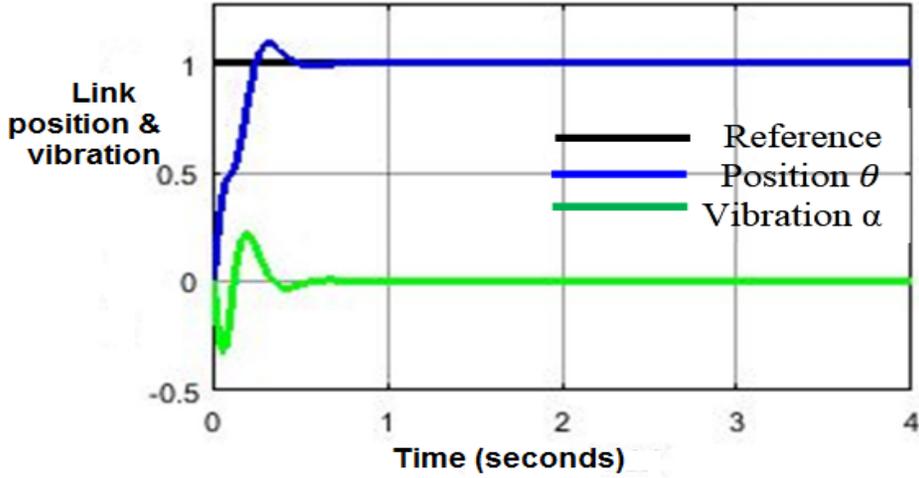
تم تطبيق متحكم LQR والنظام المقترح الهجين والمقارنة بينهما من ناحية سرعة الاستجابة، يوضح الجدول (2) بارامترات المحاكاة المطبقة على النظام.

الجدول (2) بارامترات المحاكاة

الرمز	الوصف	القيمة
B_{eq}	معامل الامتصاص	0.004 N.ml(rad/s)
J_{eq}	عزم الارتفاع المكافئ بدون حمل خارجي	0.00208 kg.m ²
η_{lm}	كفاءة المحرك	0.69
K_m	ثابت الجهد العكسي	0.00768 V/(rad/s)
R_m	مقاومة الدائرة الكهربائية للمحرك	2.6 Ω
K_s	ثابت الصلابة	1.4

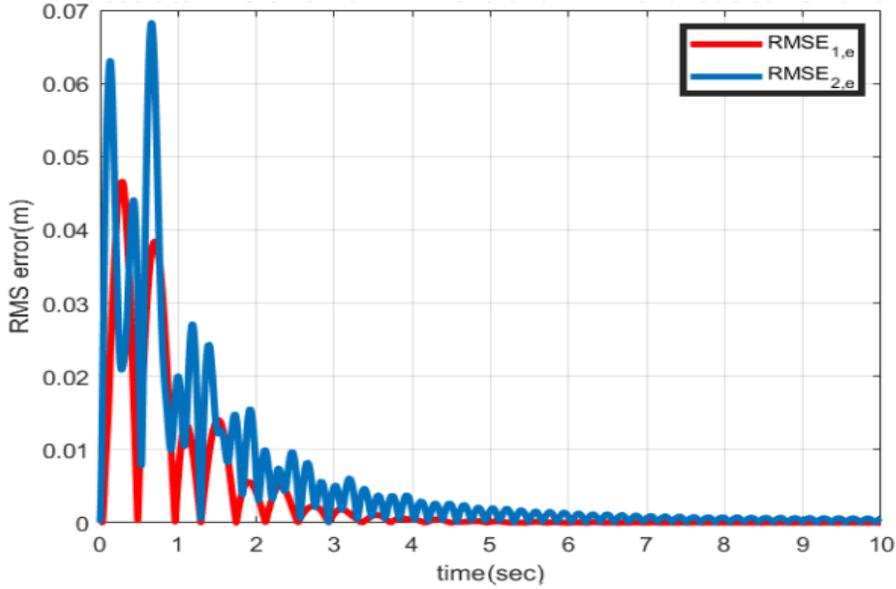
5-1- متحكم LQR:

تم تطبيق متحكم LQR من خلال المخطط الموضح في الشكل (2) وبعد تطبيق بارامترات المحاكاة الموضحة في الجدول (2) نستنتج الشكل (5) والشكل (6).



الشكل (5) أداء متحكم LQR

يظهر الشكل (5) الإخراج الموضعي واهتزازات الرباط المرن لمتحكم LQR المصمم. بناءً على نتيجة المحاكاة للتصميم القياسي، فإن النظام مستقر ويصل الإخراج الموضعي إلى صفر الخطأ الثابت في أقل من نصف ثانية واحدة، ويحقق أداء جيد.

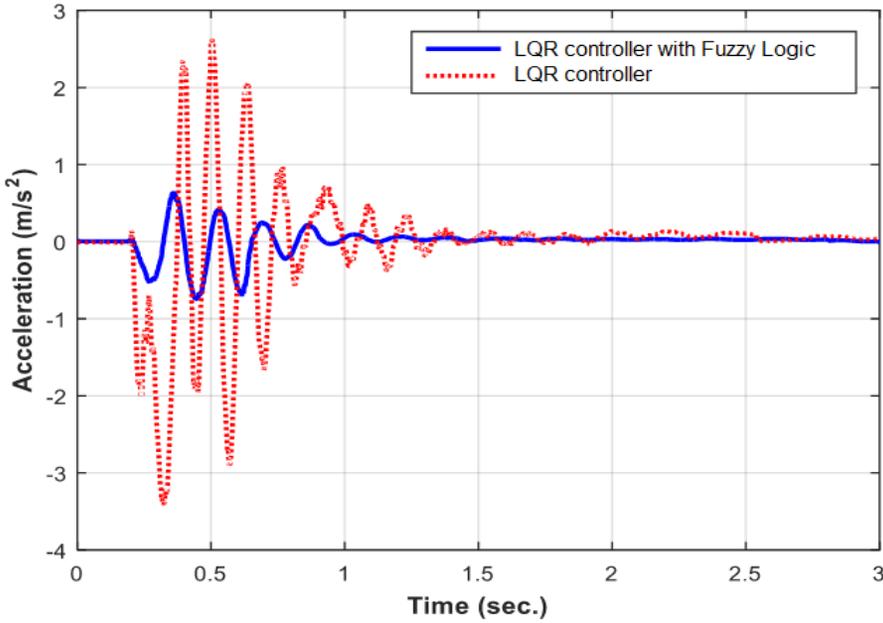


الشكل (6) خطأ RMS الناتج عن السلوك المرن على نهائي الوصلتين عند تطبيق متحكم LQR

يعبر الشكل (6) عن متوسط الخطأ التربيعي RMS الناتج عن السلوك المرن على نهائي الوصلتين عند تطبيق متحكم LQR، ونلاحظ أن الخطأ يتناقص مع مرور الزمن حتى ينعدم وبالتالي متحكم LQR يحقق أداء جيد .

5-2 تقنية Fuzzy logic:

تم تطبيق نظام هجين من خلال دمج متحكم LQR مع تقنية Fuzzy logic كما هو موضح في الشكل (4) وبعد تطبيق بارامترات المحاكاة الموضحة في الجدول (2) نستنتج الشكل (7).



الشكل (7) مقارنة التخميد في حالة متحكم LQR و حالة استخدام Fuzzy Logic مع LQR

يوضح الشكل (7) أداء نموذج النظام الهجين المقترح مقارنة بالحالة التي يتم فيها تطبيق خوارزمية التحكم في التذبذب بواسطة متحكم LQR فقط، نلاحظ أن النظام المقترح حقق انخفاضاً سريعاً في قيمة التسارع، وأدى استخدام خوارزمية المنطق الضبابي إلى تقليل وقت التذبذب سريعاً، ويتم قمع التذبذب في وقت أقل، حيث تم تخفيض قيمة التسارع بشكل كبير (أكثر من 80%) مقارنة بحالة عدم استخدام المنطق الضبابي، وبالتالي تم تقليل مستوى التذبذب بسرعة إلى الصفر، وهذا يؤدي إلى تثبيت الذراع المرنة وتحسين الأداء بشكل كبير.

6. الاستنتاجات والتوصيات

تم في هذا البحث دراسة تحليلية لأنظمة ذراع روبوتية مرنة وتم مناقشة تطبيق متحكمين وهما متحكم LQR ومتحكم هجين من خلال دمج LQR مع تقنية Fuzzy logic والمقارنة بينهما من ناحية سرعة الاستجابة والقدرة على تثبيت الذراع المرن وتحسين الأداء. تم في البداية تطبيق متحكم LQR وتبين أن النظام مستقر ويصل الإخراج الموضوعي إلى صفر الخطأ الثابت في أقل من نصف ثانية واحدة، كما أن متوسط الخطأ التربيعي RMS يصل إلى الصفر خلال فترة زمنية قصيرة وبالتالي متحكم LQR حقق أداء جيد، وتم بعد ذلك اقتراح نظام تحكم هجين من خلال دمج LQR مع تقنية Fuzzy logic وبينت النتائج أنه النظام المقترح حقق انخفاضاً سريعاً في قيمة التسارع، وأدى استخدام خوارزمية المنطق الضبابي إلى تقليل وقت التذبذب سريعاً، وتم قمع التذبذب في وقت أقل، وبالتالي تم تثبيت الذراع المرن وتحسين الأداء بشكل كبير.

يمكن في الأبحاث القادمة تطبيق متحكمات أخرى مثل متحكم SMC ومقارنتها مع متحكمات LQR وPID، كما يمكن تطبيق خوارزمية سرب الطيور PSO لإيجاد قيم بارمترات التصميم لمتحكمات أنظمة التحكم.

المراجع العلمية:

- [1] T. Solatges, "Modélisation, conception et commande de robots manipulateurs flexibles," Master dissertation in Toulouse university ,2018.
- [2] Mohammad.Tokhi, Flexible Robot Manipulators 2nd edition book in The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, pages(80–88,115–141), (2017)..
- [3] Xu, Y., Dou, K., Wang, L., Yang, C., & Wang, K. (2020, August). Composite control of flexible manipulators based on SMC–DO and LQR. In 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC) (pp. 261–266). IEEE.
- [4] Xu, Y., Wang, X., Wang, L., Wang, K., & Ma, L. (2022). Learning Control for Flexible Manipulators with Varying Loads: A Composite Method with Robust Adaptive Dynamic Programming and Robust Sliding Mode Control. Electronics, 11(6), 956.
- [5] Tahir, N. M., Abubakar, K. A., Sambo, A. U., Kunya, A. B., & Gambo, I. (2019). Vibrations and intelligent tracking control of single link flexible manipulator. Sensors & Transducers, 232(4), 8–14.

- [6] Sahu, U. K., Patra, D., & Subudhi, B. (2020). Visionbased tip position tracking control of twolink flexible manipulator. IET Cyber Systems and Robotics, 2(2), 53–66.
- [7] Nguyen, V. B., & Bui, X. C. (2023). Hybrid Vibration Control Algorithm of a Flexible Manipulator System. Robotics, 12(3), 73.
- [8] Zhang, H., Sun, W., Luo, H., & Zhang, R. (2023). Active vibration control of composite laminates with MFC based on PID–LQR hybrid controller. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 1–18.
- [9] AlNajjar, R. S. R. (2021). MODELLING AND CONTROL OF A TWO–LINK RIGID–FLEXIBLE MANIPULATOR.
- [10] C.C. Fang, K.J. Astrom, W.K. Ho, “Refinements of the Ziegler–Nichols tuning formula,” IEEE proceedings–d, vol. 138, no. 2, March 1991..
- [11] Kiam Heong Ang, Gregory Chong, Student Member, IEEE, and Yun Li, Member, IEEE, “PID Control System Analysis, Design, and Technology,” IEEE transactions on control systems technology, vol. 13, no. 4, July 2005.

[12] Farooq,U; Hasan,K.M; Raza,A; Amar,M; Khan,S. and Javaid,S. 2010, A Low Cost Microcontroller Implementation of Fuzzy Logic Based Hurdle Avoidance Controller for a Mobile Robot. 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, China. Vol.9, Pages: 480 – 485.