مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد42 العدد (3) – 2026: 371- 390

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 42 number (3) -2026: 371-390

تصميم ومحاكاة منهجيات تحكم بروبوت كروي لتتبع مسار مرغوب

بكري عمر أشرم[1*] عماد عدنان الروح [2] مروان جبرا لباد[3]

[1*] طالب دراسات عليا (ماجستير) كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب.
Bakri.asharam@alepuniv.edu.sy

[2]. أستاذ مساعد في قسم هندسة الميكاترونيكس، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب.
imadalrouh@alepuniv.edu.sy

[3]. استاذ في قسم هندسة التحكم والأتمتة، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب.
marwanlabbad@alepunv.edu.sy

الملخص:

لقد تطورت الروبوتات بشكل كبير بفضل الأبحاث التي اهتمت بها، ومن هذه الروبوتات هو الروبوت الكروي الذي جذب اهتمام الباحثين وذلك لما له أهمية كبيرة في الحياة العملية، وفي هذا البحث تم إيجاد النموذج الرياضي الذي يمثل ديناميك الروبوت الكروي، ومن ثم تمثيل المعادلات الديناميكية له بمعادلات الحالة، ومحاكاتها باستخدام الـ Simulink في برنامج الـ Matlab، وكذلك تم في هذا البحث استخدام منهجيات تحكم متقدمة لتحقيق استقرار الروبوت الكروي وتحقيق الملاحقة للمواضع المرجعية وللمسارات المنحنية وللمسارات الدائرية والمسارات لشكل حرف (∞)، والمنهجيات المستخدمة هي:

المتحكم الأمثلي التربيعي الخطي PI_LQR، والمتحكم الأمثلي التكاملي LQI، والمتحكم الأمثلي مع المتحكم الضبابي Fuzzy Control، وتم اختبار أداء هذه المتحكمات من أجل الحالة المثالية وهي عدم وجود قوى احتكاك بين الروبوت الكروي ومستوي التماس معه، ومن أجل وجود قوى احتكاك والتي تتناسب قيمتها مع السرعة تم تصميم متحكم تكيفي ذو النموذج المرجعي MARC حيث تمت مقارنة الاستجابات من أجل سرعات خطية مختلفة وقوى احتكاك متناسبة معها وذلك حسب خشونة سطوح التلامس مع الروبوت الكروي.

أوضحت نتائج المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB أهمية متحكم التغذية العكسية LQR في تحقيق استقرار النظام. كما اوضحت كذلك تفوق نظام التحكم FUZZY with LQR مقارنة مع نظام التحكم PI with LQR و Integral-LQR في سرعة الاستجابة وانخفاض قيمة الخطأ الستاتيكي خلال ملاحقة مسار مرغوب بعدم وجود قوى احتكاك بينما أثبت المتحكم التكيفي ذو النموذج المرجعي MARC قوته للاستجابة للاضطرابات وهي قوى الاحتكاك.

الكلمات المفتاحية: روبوت كروي، التحكم التربيعي الأمثلي الخطي، المتحكم الأمثلي التكاملي، التحكم الضبابي الهجين، التحكم التكيفي ذو النموذج المرجعي.

تاريخ الإيداع: 2023/10/2
تاريخ القبول: 2024/10/2

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب CC **BY-NC-SA**

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

Design and simulation of trajectory tracking control approaches for spherical robot

Bakri Omar Ashram[*1] Emad Adnan Al-Rouh[2] Marwan Jabra Labbad[3]

*[1]. Master studeng, Department of Control and Automation Engineering, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Aleppo University
Bakri.asharam@alepuniv.edu.sy

2. Associate Professor, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Aleppo University
imadalrouh@alepuniv.edu.sy

3. Professor, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Aleppo University
marwanlabbad@alepunv.edu.sy

Accepted: 2/10/2023
Published: 21/10/2024

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA

ABSTRACT:

Robots have developed greatly due to the research that focused on them, and one of these robots is the spherical robot that attracted the attention of researchers because of its great importance in practical life. In this research, a mathematical model was found that represents the dynamics of the spherical robot, and then its dynamic equations were represented with state equations and simulate them using MATLAB Simulink.

Advanced control methodologies were also used in this research to achieve stability of the spherical robot and achieve tracking of reference positions, curved paths, circular paths, and paths in the shape of the letter (∞). The methodologies used are:

The linear quadratic optimization controller PI_LQR, the integral optimization controller LQI, and the optimization controller with the Fuzzy Controller and Model reference adaptive control MARC. The performance of these controllers was tested for the ideal and real case, which is the absence of frictional forces between the spherical robot and the contact plane with it, and for the presence of frictional forces whose value is proportional to the speed. , where the responses were compared for different linear speeds and frictional forces proportional to them, according to the roughness of the contact surfaces with the spherical robot.

Simulation results using MATLAB demonstrated the importance of the LQR feedback controller in achieving system stability. It also showed the superiority of the FUZZY with LQR control system compared to the PI with LQR and Integral-LQR control systems in response speed and low static error value while following a desired path without friction forces. At the same time, MARC demonstrated high performance toward frictions.

Keywords: spherical robot, linear quadratic optimal control, fuzzy controller, and adaptive controller with reference model.

المقدمة:

إن الروبوتات الكروية (Sphere Robots) هي صنف من الروبوتات المتنقلة التي تعتمد على الدحرجة على غلافها الخارجي بمساعدة مكونات القيادة الداخلية والتي تؤمن العزم المطلوب للتحري، يختلف الروبوت الكروي عن الروبوتات الأخرى ذات العجلات بالنقاط التالية [Aminata ,2023 ,P1] [Pokhrel,2013,1] [Shi et all,2019,1]:

1. قدرته على المناورة والتنقل حول اي جسم بسهولة.
2. يسمح الشكل الكروي للروبوت بتجاوز أنواع مختلفة من العوائق.
3. انخفاض احتمالية أن يعلق في الزوايا.
4. امكانية رميه او اسقاطه في اي مكان.
5. نقطة تماس وحيدة مع الأرض مما يؤدي الى تقليل الاحتكاك وبالتالي الطاقة اللازمة للحركة.
6. مثالي للبيئات الخطيرة او غير التقليدية كالسائلة حيث يؤمن الشكل الكروي الحماية للأجزاء الداخلية للروبوت.

تجعل مزايا الروبوت الكروي استخدامه مناسبًا للعديد من تطبيقات الروبوتات المتنقلة المختلفة مثل المراقبة والاستطلاع وتقييم البيئة الخطرة والبحث والإنقاذ، واستكشاف الكواكب. [Aminata ,2023 ,2]

بالمقارنة مع الأنواع الأخرى من الروبوتات المتنقلة، على سبيل المثال، الروبوتات ذات العجلات والأرجل، فإن الباحثين في مجال الروبوتات المتنقلة يقللون من أهمية الروبوتات الكروية. يمكن أن يكون أحد الأسباب هو الديناميكيات المعقدة لـ SRs التي ظلت تشكل عقبة أمام فهم سلوكها وقدرتها على المناورة بالإضافة الى صعوبة التحكم بها.[Pokhrel,2013,1]

تم اقتراح العديد من نماذج للروبوتات الكروية في العقود الماضية، ولكن لا تزال هناك العديد من المشاكل التي تحد من استخدامه. أحد الأسباب الرئيسية هو صعوبة التحكم في الحركة. ونظرًا لتعقيد مشاكل التحكم الخاصة وبالتالي صعوبة تحديد منهجية تحكم فعالة إلى الآن. من الأسباب أيضا التي حالت دون انتشاره الواسع تعقيد مكونات الروبوت؛ كالعناصر الهيكلية غير القياسية لتلائم هيكل خارجي كروي ومعادلات ديناميكية غير خطية متقاربة مع قيود غير هندسية. كما انه في السنوات الأخيرة، انجذب العديد من الباحثين لدراسة وتطوير أنواع مختلفة من الروبوتات الكروية. [Pokhrel et all,2013,1]، ولذلك كانت فكرة هذا البحث هو محاولة اقتراح منهجيات تحكم متقدمة وتقييم أدائها من خلال المحاكاة باستخدام برنامج الماتلاب.

الهدف:

يتناول هذا البحث التحكم بروبوت كروي (SpheRobot) يعتمد مبدأ النواس، والذي يتميز بكونه ذو نموذج Multi-Inputs Multi-Outputs، فهو يتضمن خمس إشارات خرج، واشارتي دخل.

يهدف البحث إلى تصميم نظام تحكم يؤمن استقرار النظام ويحقق ملاحقة المسار المطلوب ضمن مستوى الإحداثيات (X,Y)، حيث يتم إجراء دراسة مقارنة بين عدة طرق لتحقيق ذلك، وكذلك تم في البحث دراسة أثر عامل الاحتكاك بين الروبوت الكروي والسطح الذي يتحرك عليه على الاستقرار والملاحقة وذلك من أجل عوامل احتكاك مختلفة والتي تتناسب مع السرع الخطية وفق الاتجاهين (X,Y)

حيث تضمن البحث الخطوات التالية:

- نمذجة للنظام الفيزيائي للروبوت الكروي
- محاكاة في المستوي المرتفع.
- تطبيق أربع منهجيات تحكم والمقارنة بينها.
- دراسة أثر الاحتكاك من أجل سرعات مختلفة.

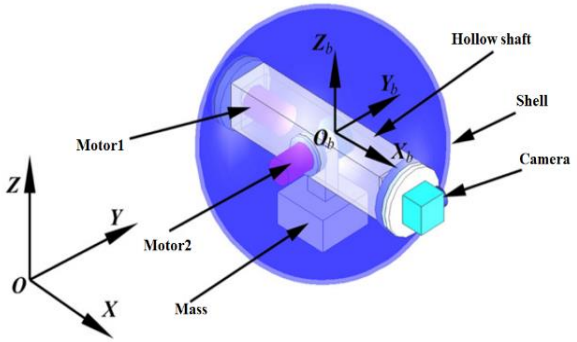
البنية الفيزيائية للروبوت الكروي

يظهر الشكل (1) البنية الميكانيكية للروبوت الكروي (SpheRobot)، حيث يتكون من محركين MOTOR 1, MOTOR 2، وحدة تحريك داخلية (هي عبارة عن نواس

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

تصميم ومحاكاة منهجيات تحكم بروبوت كروي لتتبع مسار مرغوب

درجة حرية واحدة مع كتلة) Mass، هيكل خارجيShell عمود متصل بالهيكل من الطرفين الداخليات يعمل لتثبيت باقي العناصر Hollow shaft كما هو موضح بالشكل أدناه [Yao et all,2012,3]



الشكل (1) بنية روبوت كروي

مبدأ تشغيل SpheRobot:

يحتوي الروبوت الكروي كما ذكرنا سابقاً على محركين مسؤولين عن تحريكه وفق المسار المطلوب ولدينا نوعين من

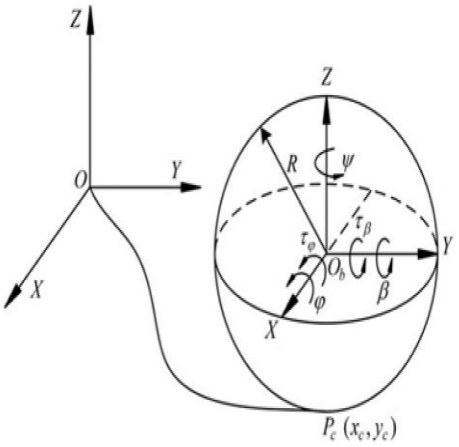
أنواع الحركة:

الحركة في مسار مستقيم للروبوت الكروي:

عندما يدور المحرك Motor 1 حول المحور (X) ويكون المحرك Motor 2 ثابتًا، فإن دوران النواس والعمود حول المحور (X) يغير مركز ثقل الروبوت وينتج عزم دوران يجعل الروبوت يتحرك للأمام أو للخلف على طول المحور (Y)، بينما يولد المحرك MOTOR 2 عزم الدوران حول المحور (Y) لجعل الروبوت يتحرك نحو اليمين أو اليسار أي على طول المحور (X).

الحركة على مسار منحني للروبوت الكروي:

عندما يدور كل من المحركين Motor 1 , Motor 2 ، يتمكن الروبوت الكروي، مدفوعًا بمحركين، أن يدور ويتحرك خلال مستوى X,Y ويمكن التحكم في حركة الروبوت عن طريق التحكم في هذين المحركين. حيث يبين الشكل مخطط توضيح لعزوم وزوايا الدوران المتولدة نتيجة حركة المحركين Motor 1, Motor 2. [Yao et all,2012,3]



الشكل (2) المخطط التمثيلي لجملة الروبوت المدروس

حيث أن:

x_c , y_c : موضع الروبوت على المحور X ،Y على الترتيب.

P_c: نقطة تلامس الروبوت مع الأرض.

ψ , β , φ : زاوية الدوران مقدرة بالراديان حول المحور Z، X،Y على الترتيب.

$\tau_\varphi , \tau_\beta$: عزوم الدوران مقدرة بالنيوتن متر حول المحور X,Y على الترتيب.

I_s عزم العطالة للمحركات

$$I_s = \frac{2}{3}.m.r^2 = \frac{2}{3} * 1.9 * (0.2)^2 = 0.05\ Kg.m^2$$

R: نصف قطر الروبوت ،واخترنا في هذا البحث R=20cm.

M: كتلة الروبوت وهي 1.9 Kg

النموذج الديناميكي عالي المستوى لـ SpheRobot:

يعطى النموذج الرياضي للروبوت المدروس دون الأخذ بعين الاعتبار المستوى المنخفض (المشغلات) وفق الصيغة الرياضية التالية: [Yao et all,2012,3] [Cai et all,2012,3]

$$\dot{x}_c = \dot{\beta}R\cos\psi + \dot{\varphi}R\sin\psi\cos\beta \quad (1)$$

$$\dot{Y}_c = \dot{\beta}R\sin\psi + \dot{\varphi}R\cos\psi\cos\beta \quad (2)$$

$$\ddot{\beta} = \frac{\tau_\beta}{I_s} - \dot{\varphi}\dot{\psi}\cos\beta \quad (3)$$

$$\ddot{\psi} = \sin\beta\ddot{\varphi} + \dot{\beta}\dot{\varphi}\cos\beta \quad (4)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{(I_s\dot{\beta}\dot{\psi}\cos\beta - I_s\dot{\beta}\dot{\phi}\cos\beta\sin\beta)+\tau_\varphi}{I_s((\sin\beta)^2+1)} \quad (5)$$

تمثيل الروبوت الكروي بمعادلات الحالة:

نفرض متحولات الحالة الإشارات الممثلة بالمعادلات (6)

$$x_1(t) = x_c\,, x_2(t) = y_c\,, x_3(t) = \beta\,, x_4(t) = \dot{\beta}\,:$$

$$x_5(t) = \psi\,, x_6(t) = \dot{\psi}\,,\ \ x_7(t) = \phi\,, x_8(t) = \dot{\phi} \quad (6)$$

ومنه معادلات الحالة الجديدة بعد تعويض (6) في المعادلات من (1) الى (5) واجراء العمليات الحسابية اللازمة نجد أن:

$$\dot{x}_1(t) = x_4 R\cos x_5 + x_8 R\sin x_5 \cos x_3 \quad (7)$$

$$\dot{x}_2(t) = x_4 R\sin x_5 + x_8 R\cos x_5 \cos x_3 \quad (8)$$

$$\dot{x}_3(t) = x_4 \quad (9)$$

$$\dot{x}_4(t) = \frac{\tau_\beta}{I_s} - x_8 x_6 \cos x_3 \quad (10)$$

$$\dot{x}_5(t) = x_6 \quad (11)$$

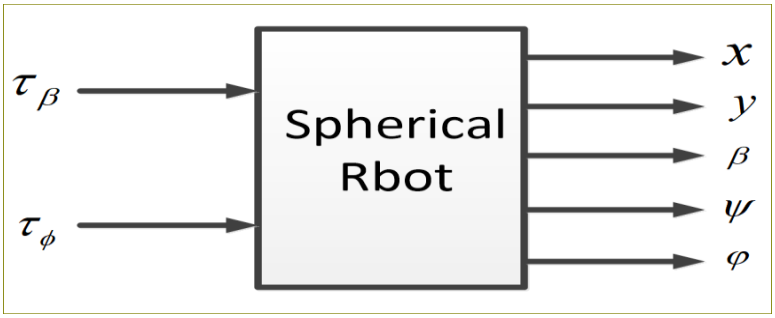
$$\dot{x}_6(t) = \sin x_3 \frac{(I_s x_4 x_6 \cos x_3 - I_s x_4 x_8 \cos x_3 \sin x_3)+\tau_\varphi}{I_s((\sin x_3)^2+1)} + x_4 x_8 \cos x_3 \quad (12)$$

$$\dot{x}_7(t) = x_8 \quad (13)$$

$$\dot{x}_8(t) = \frac{(I_s x_4 x_6 \cos x_3 - I_s x_4 x_8 \cos x_3 \sin x_3)+\tau_\varphi}{I_s((\sin x_3)^2+1)} \quad (14)$$

المخطط الصندوقي لتمثيل جملة الروبوت الكروي في الحلقة المفتوحة:

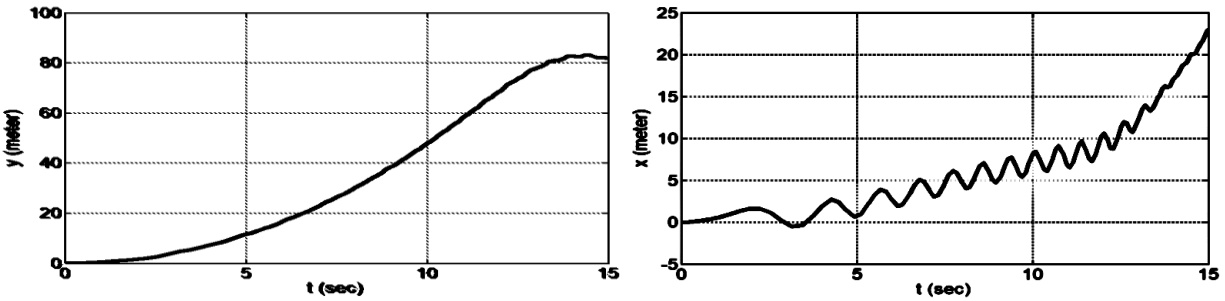
يبين الشكل (3) جملة الروبوت الكروي في الحلقة المفتوحة، حيث نلاحظ ان عزوم المشغلات تشكل إشاراتي الدخل، والموضع مع زوايا الميلان تشكل إشارات الخرج.



الشكل (3) جملة الروبوت الكروي في الحلقة المفتوحة

استجابات الروبوت الكروي في الحلقة المفتوحة:

تمت محاكاة النموذج الرياضي للروبوت في الحلقة المفتوحة اعتمادا على معادلات الحالة الممثلة بالصيغة من المعادلات (7) وحتى (14) ويبين الشكل (4) الاستجابات بالنسبة للموضع (X,Y) حيث نلاحظ أن جملة الحلقة المفتوحة للروبوت الكروي غير مستقرة.



الشكل (4) استجابة جملة الروبوت الكروي في الحلقة المفتوحة

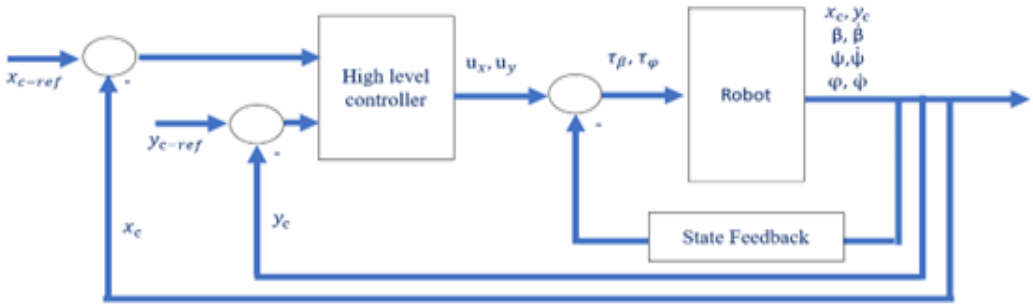
تصميم نظام التحكم بالروبوت لملاحقة مسار مرغوب:

يوضح الشكل (5) المخطط الصندوقي لنظام التحكم في الحلقة المغلقة، حيث يتم استخدام ثوابت تغذية عكسية للحالة لتحقيق استقرار النظام، مع إضافة متحكم ملاحقة المسار في حلقة التغذية الأمامية، حيث أن قانون التحكم النهائي للحصول على العزم المطبق على كل من مشغل من مشغلات الروبوت المدروس يشتمل على إشارتين، العزم القادم من حاصل جداء متحولات الحالة بثوابت التغذية العكسية، وهو ضروري لجعل الروبوت في حالة توزان واستقرار، والعزم القادم من حلقة التغذية الأمامية، وهو ضروري لجعل الروبوت يلاحق المسار المرغوب.

يمكن كتابة العزم على المطبق على كل مشغل على النحو الآتي:

$$\tau_i = \tau_{LQR} + u_j \qquad (15)$$

حيث أن: $i=\beta,\varphi$, $j=x,y$



الشكل (5) المخطط الصندوقي لنظام التحكم في الحلقة المغلقة

سنقوم في هذا البحث بأجراء مقارنة بين ثلاث منهجيات تحكم لملاحقة المسار واخترنا لتقييم الأداء مسار دائري ومسار على شكل علامة لانهاية وقمنا بالمقارنة بينهم، هذه المنهجيات هي:

االمنظمات التناسبية–التكاملية.

التحكم التربيعي الخطي التكاملي.

متحكم المنطق الضبابي.

منهجية التحكم التكيفي ذات النموذج المرجع

ومعادلات المسارات المرجعية المختبرة تعطى بالشكل التالي:

معادلة الدائرة المرجعية:

$$\tau_{\beta ref} = 4.\sin(t + \frac{\pi}{2})$$

$$\tau_{\emptyset ref} = 4.\sin(t)$$

معادلة إشارة اللانهاية المرجعية:

$$\tau_{\beta ref} = 4.\sin(t + \frac{\pi}{2})$$

تصميم ومحاكاة منهجيات تحكم بروبوت كروي لتتبع مسار مرغوب

$$\tau_{\emptyset ref} = 4.\sin(t).\sin\left(t+\frac{\pi}{2}\right)$$

المنظمات التناسبية التكاملية التفاضلية:

من مزايا المنظمات التناسبية التكاملية أنها بسيطة، تساهم بتقليل الخطأ الستاتيكي وسهلة التصميم والتنفيذ، اما مساوئه فتكمن في كونها حساسة للاضطرابات الخارجية وتغير بارامترات النظام، استجابة غير ملائمة للحالة المستقرة اثناء حالات العبور، وارتفاع في خطأ الحالة المستقرة للأنظمة الارتيابية [Mahmud et all,2020,1] , [Anantachaisilp et all,2017,1]

سيتم حساب ثوابت التغذية العكسية للحالة بالاعتماد على تقنية المنظم التربيعي الخطي للروبوت والذي يهدف الى تقليل تابع الكلفة المعطى وفق العلاقة التالية:

$$J = ||x||_Q^2 + ||u||_R^2 \qquad \textbf{(16)}$$

حيث Q,R مصفوفات تثقيل قطرية موجبة.

من أجل صياغة النموذج الديناميكي للنظام وفق العلاقة:

$$\dot{x} = Ax + Bu \qquad \textbf{(17)}$$

من أجل زوايا صغيرة، يمكن اعتبار:

$$\cos\psi = \cos\beta = 1\,,\ \sin\psi = \sin\beta = 0 \qquad \textbf{(18)}$$

وبالتالي، يعطى النموذج الرياضي الخطي وفق العلاقات (19):

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= Rx_4 \\
\dot{x}_2 &= Rx_8 \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
\dot{x}_4 &= \frac{\tau_\beta}{I_s} \\
\dot{x}_5 &= x_6 \\
\dot{x}_6 &= 0 \\
\dot{x}_7 &= x_8 \\
\dot{x}_8 &= \frac{\tau_\varphi}{I_s}
\end{aligned} \qquad \textbf{(19)}$$

حيث إن متحولات الحالة هي الموصوفة في الفرضيات (6).

بعد ذلك، تم اختيار عدة قيم لمصفوفات التثقيل Q,R وبناء على النتائج تم اختيار القيم التالية كما يلي:

$$R1 = \begin{bmatrix} 3.9 & 0 \\ 0 & 3.9 \end{bmatrix}$$

أشرم، الروح ولباد

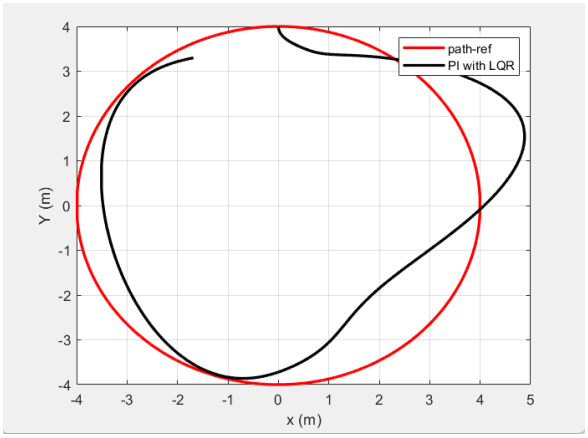
$$Q1 = \begin{bmatrix} 30 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 22 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 \end{bmatrix} * 10^4$$

وبالتالي فإن ثوابت ربح التغذية العكسية للحالة ستكون كما يلي:

$$k1 = \begin{bmatrix} 1604 & 0 & 249 & 412 & 633 & 1901 & 0 & 0 \\ 0 & 342 & 0 & 0 & 0 & 0 & 471 & 412 \end{bmatrix}$$

لإكمال نظام التحكم تم إضافة متحكمي PI- controller في حلقة التغذية الأمامية لتنظيم الموضع ضمن جملة المحاور الإحداثية X,Y، حيث تم ضبط ثوابت هذه المتحكمات بشكل تجريبي ، وحصلنا على القيم الآتية , Px=5000 , Ix=15000 Py=900 , Iy=2200

وباستخدام تعليمات الماتلاب مع توليف مصفوفات الوزن (Q,R) بالشكل المناسب، وبإضافة المنظم (PI) وضبط البارامترات بشكل تجريبي نحصل على نتائج الاستجابات الموضحة في الشكل (6) وذلك من أجل ملاحقة مسار دائري.



الشكل (6) استجابة جملة الروبوت الكروي لملاحقة المسار الدائري عند استخدام منهجية PI with LQR

وحسب الشكل (6) نلاحظ أن الملاحقة للمسار الدائري سيئة، وبالتالي فإن المتحكم (LQR-PI) لا يحقق المتطلبات اللازمة للروبوت الكروي، ولا بد من تصميم متحكم آخر.

تصميم ومحاكاة منهجيات تحكم بروبوت كروي لتتبع مسار مرغوب

المـــتحكم الأمثلـــي التربيعـــي الخطـــي التكـــاملي (LQI): [Amirhossein et all,2020,7]يتميـز المـتحكم الأمثلـي التربيعي الخطي (LQI) أنه يمكنه التعامل مع الأنظمة متعددة المداخل متعددة المخارج MIMO، كما يمكنه التعامل مع التغيرات والارتيابية بشرط أن تكون الارتيابات صغيرة ومحدودة، كما يمكنه تحقيق الأداء الأمثلي من حيث تقليل تابع الكلفة، أما مساوئ هذه المنهجية فتكمن في كونها تحتاج لأن تكون جميع متحولات الحالة مقاسة أو مقدرة [Akyazı et all,2012,1].

لتطبيق المتحكم (LQI) فإنه يتم توسيع قانون التحكم للمنظم التربيعي من خلال إضافة حدود تكاملية بعد توسعة فضاء الحالة للنظام، حيث يتم ذلك بإضافة متحولي حالة جديدين هما: [Amirhossein et all,2020,7]

$$z_x = \int (x_{1-ref} - x_1)dt \qquad \textbf{(20)}$$

$$z_y = \int (x_{2-ref} - x_2)dt \qquad \textbf{(21)}$$

بعد ذلك، تم اختبار عدة قيم لمصفوفات التثقيل Q,R وبناء على النتائج تم اختيار القيم التالية كما يلي:

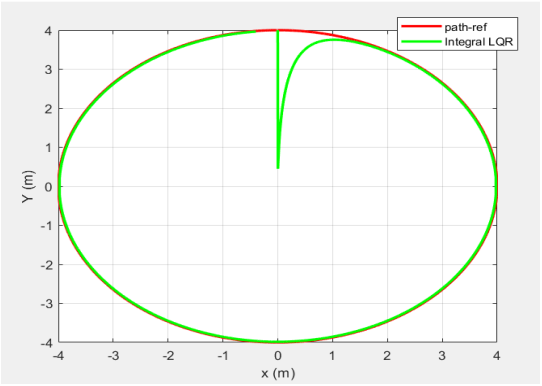
$$R2 = \begin{bmatrix} 3.9 & 0 \\ 0 & 3.9 \end{bmatrix}$$

$$Q2 = \begin{bmatrix} 30 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10^8 \end{bmatrix} * 10^4$$

وبالتالي فإن ثوابت ربح المتحكم ستكون كما يلي:

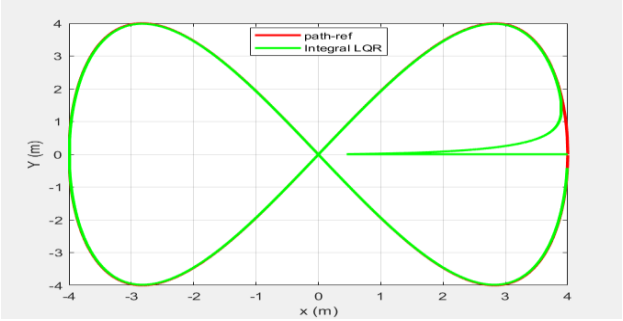
$$k2 = \begin{bmatrix} 10 & 410 & 0 & 30 & 0 & 0 & 309360 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 410 & 0 & 309540 \end{bmatrix}$$

وبالتالي نحصل على الاستجابة المبينة في الشكل (7) لملاحقة المسار الدائري.



الشكل (7) استجابة جملة الروبوت الكروي لملاحقة المسار الدائري باستخدام منهجية Integral LQR

كما يبين الشكل (8) ملاحقة جملة الروبوت الكروي للمسار بشكل حرف (∞).



الشكل (8) استجابة جملة الروبوت الكروي للمسار بشكل حرف (∞) باستخدام منهجية Integral LQR

من خلال الإشارتين الموضحتين على الشكلين (7) و (8) نلاحظ أن المتحكم الأمثلي التكاملي (LQI) قد نجح بشكل جيد في تحقيق الملاحقة التامة.

المتحكم الضبابي:

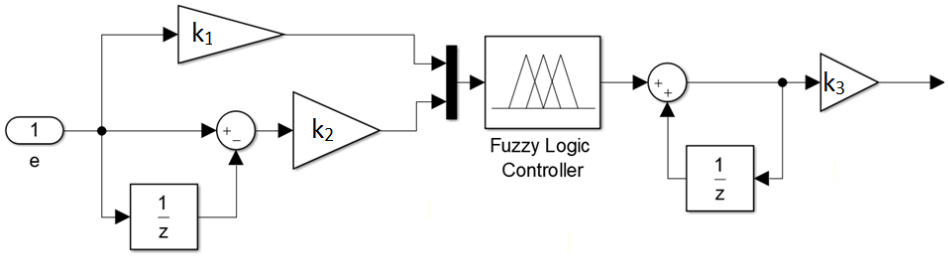
في المرحلة الأخيرة، تم استخدام متحكم المنطق الضبابي والذي يتميز بقدرته على التعامل مع الأنظمة اللاخطية، ويمتاز بقوة الأداء اتجاه الاضطرابات والبارامترات المرتابة، وأما مساوئه فهي أنه بطيء ومعقد التصميم والتنفيذ وذلك بسبب الحاجة لتوليد توابع انتماء هندسية، كما أن المتحكم الضبابي يحتاج لوجود عدد كبير من المتغيرات لمعايرتها. [Erkan et all, 2012, 7]

وبشكل عام يستخدم المتحكم الضبابي في حالتين هما:

1 – عدم وجود النموذج الرياضي الذي يصف جملة التحكم.

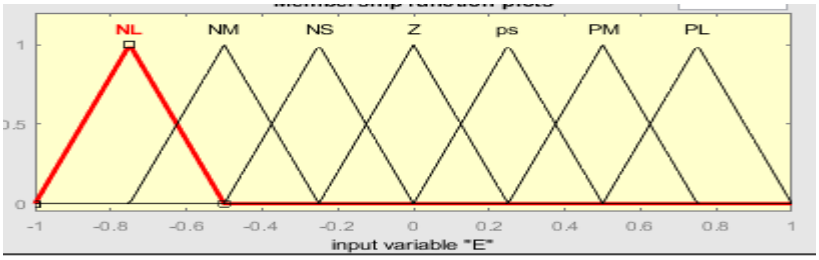
2 – إذا كـان النمـوذج الرياضـي الـذي يصـف جملـة الـتحكم معقداً.

إن استخدام المتحكم الضبابي بسيط ولا يحتاج إلا إلى معرفة القواعد البسيطة التي تربط دخل النظام بخرجه، كما أن وصف جملة التحكم بقواعد غامضة بسيطة بيسط من تصميم المتحكم. ومن أجل تنفيذ متحكم المنطق الضبابي Fuzzy logic (FL) controller لتنظـيم الموضـع علـى المحـور X سـيتم اعتبـار مداخل المتحكم هي خطأ الموضع وتغير خطأ الموضع على المحور X أما خرج المتحكم فهو Δu_x وبإجراء بمكاملة خرج المتحكم يتم الحصول على u_x كما هو موضح في الشكل (9)، وكذلك لتنظيم الموضع على المحور Y سيتم اعتبار مداخل المتحكم هي خطأ الموقع وتغير خطأ الموضع على المحور Y أما خرج المتحكم فهو Δu_y وبإجراء بمكاملة خرج المتحكم يتم الحصول على u_y.

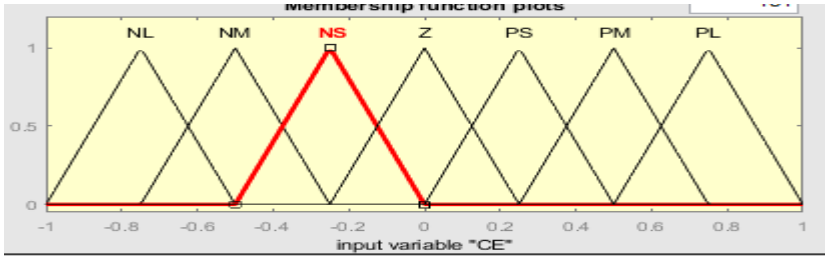


الشكل (9) بنية متحكم المنطق الضبابيFuzzy controller

سيتم تصميم متحكم المنطق الضبابي بالاعتماد على منهجية sugeno، حيث توضح الأشكال (10) و (11) و (12) توابع الانتماء لإشارات الدخل والخرج، كما يوضح الشكل (13): المخطط الصندوقي لجملة التحكم باستخدام Fuzzy with LQR. [Mehdi, 2016, 4]

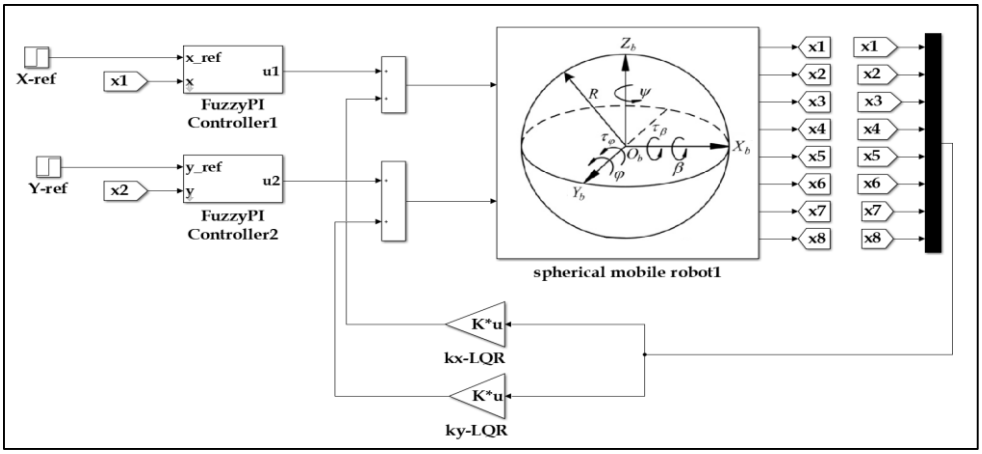


الشكل (10) توابع الانتماء لإشارة خطأ الموضع *e*



الشكل (11) توابع الانتماء لإشارة تغيّر خطأ الموضع Δe

الشكل (12) توابع الانتماء لإشارة الخرج



الشكل (13) المخطط الصندوقي لجملة التحكم باستخدام Fuzzy with LQR

بالعودة إلى توابع انتماء المداخل، نلاحظ أنه يوجد دخلين هما (e,Δe) ولكل دخل سبعة توابع انتماء، وهذا يعني أنه يمكن كتابة تسع وأربعين قاعدة كما هو موضح في الجدول (1) وإن التقليل من عدد توابع الانتماء يؤدي الى استجابة غير دقيقة للنظام.

يعطى قانون التحكم النهائي في حالة استخدام المتحكم الضبابي (FLC) بالصيغة التالية:

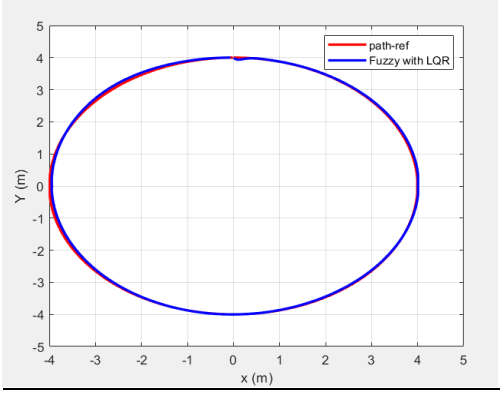
$$\tau_\beta = k_1(1,1)x_1+k_1(1,2)x_2+k_1(1,3)x_3+k_1(1,4)x_4+k_1(1,5)x_5+k_1(1,6)x_6 + k_1(1,7)x_7+k_1(1,8)x_8 + FL_{x\text{-controller}} \quad \textbf{(26)}$$

$$\tau_\varphi = k_1(2,1)x_1+k_1(2,2)x_2+k_1(2,3)x_3+k_1(2,4)x_4+k_1(2,5)x_5+k_1(2,6)x_6 + k_1(1,7)x_7+k_1(1,8)x_8 + FL_{y\text{-controller}} \quad \textbf{(27)}$$

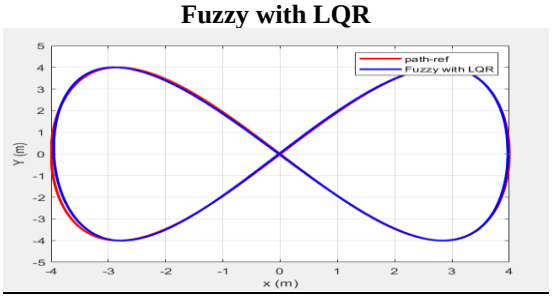
الجدول (1) جدول الخبرة لحالات الخرج تبعاً لتغيرات الدخل من أجل 49 قاعدة

Δe / e	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z
NM	NL	NL	NL	NM	NS	Z	PS
NS	NL	NL	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PS	NM	NS	Z	Z	PM	PL	PL
PM	NS	Z	PS	PM	PL	PL	PL
PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL

وبإجراء محاكاة للنظام باستخدام المتحكم الضبابي، يبين الشكل (14) الاستجابة لجملة الروبوت الكروي عند استخدام المتحكم الضبابي وملاحقة المسار الدائري، كما يبين الشكل (15) الاستجابة لملاحقة المسار بشكل حرف (∞).



الشكل (14) استجابة النظام لإشارة مرجعية دائرية باستخدام منهجية Fuzzy with LQR



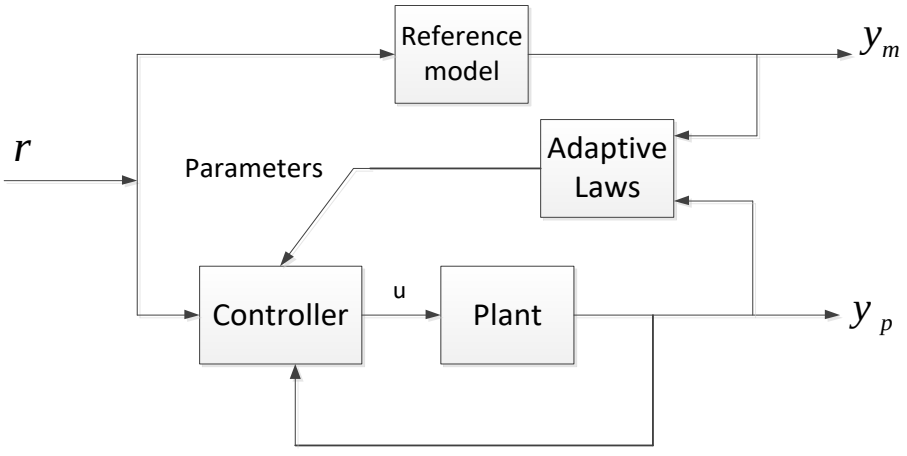
الشكل (15) استجابة النظام لإشارة مرجعية مسار لانهاية باستخدام منهجية Fuzzy with LQR

من خلال الإشارتين الموضحتين على الشكلين (14) و (15) نلاحظ أن المتحكم الضبابي (FLC) قد نجح بشكل جيد في تحقيق الملاحقة التامة.

دراسة تأثير قوى الاحتكاك على الاستجابات عند استخدام المتحكمات المصممة:

عند إضافة قوى الاحتكاك إلى النموذج الرياضي فقد فشلت منهجيات التحكم السابقة في ملاحقة المسار المرغوب، وهذا يدل على مدى تأثر المنهجيات السابق بالاضطرابات الخارجية، لذلك تم تطبيق منهجية التحكم التكيفي ذات النموذج المرجعي والتي تعتمد بشكل أساسي على ملاحقة الروبوت الكروي لنموذج رياضي ذو استجابة جيدة، وبالتالي عند حدوث أي اضطرابات خارجية فإن الروبوت يبقى ملاحقا للاستجابة المثالية، مما يقلل من تأثير قوى الاحتكاك الناتجة عن السطوح، وقد تم تصميم منهجية التحكم التكيفي وفق الخطوات التالية:

يبين الشكل (16) المخطط الصندوقي لتقنية الـ MRAC [Olabi , 2015 , 90]



الشكل (16) البنية الأساسية لنظام التحكّم MRAC

* يتم تصميم المتحكم التكيفي بأن نفرض شعاع التحكم التكيفي بالصيغة التالية:

$$u = k_b x_p + k_0 r \quad (22)$$

ثم يتم اختيار تابع ليابونوف المعرف إيجابيا الذي يتضمن خطأ الإشارة وخطأ البارامتر، ثم يتم اشتقاق تابع ليابونوف، و وضع الجزء غير المعرف مساويا للصفر فنستنتج آلية التكيف: [Olabi , 2015 , 121]:

$$\dot{\phi} = -\Gamma e^T . P . b_I . w(t) \quad (23)$$

حيث أن:

$\phi^T = [K_0 \quad K_1 \quad K_2]$ شعاع ربح المتحكم التكيفي.

$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_2 \end{bmatrix}$ مصفوفة ربح التكيف ويتم معايرة قيمها عشوائيا.

$e^T = [e_1 \quad e_2]$ الأخطاء بين متحولات الحالة لجملة التحكم ومتحولات الحالة للنموذج المرجعي:

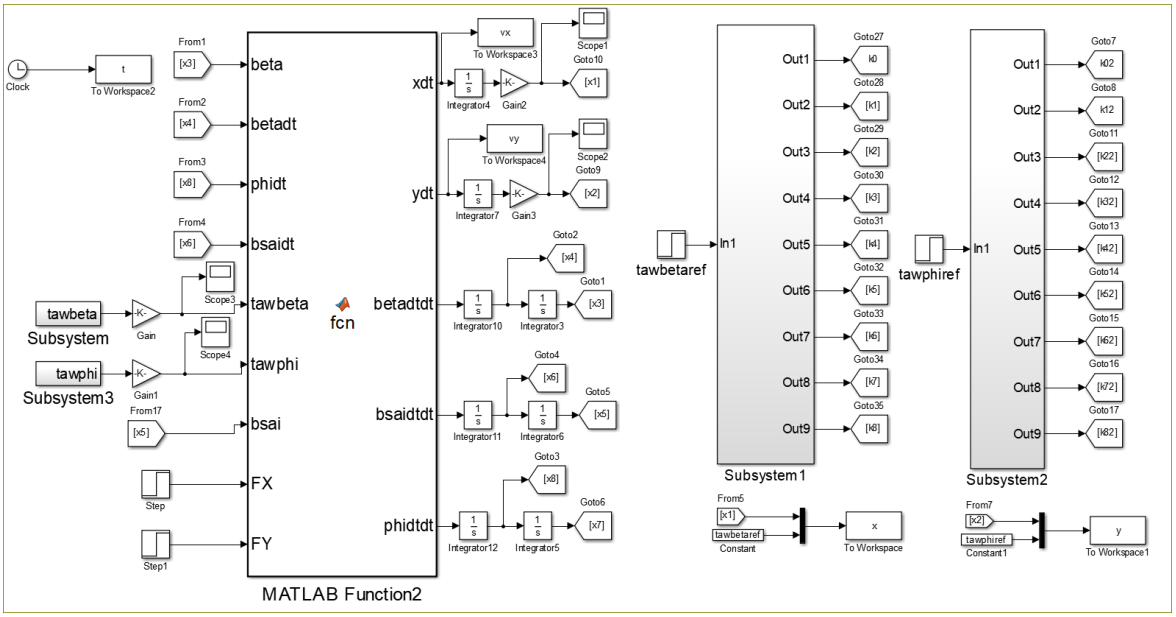
$$[e_1 \quad e_2] = [x_{p1} - x_{m1} \quad x_{p2} - x_{m2}]$$

(P) حل معادلة ليابونوف التالية: $A_m^T . P + P . A_m = -Q$

$b_I = [0 \quad 1]^T$

$w(t) = [r(t) \quad x_{p1}(t) \quad x_{p2}(t)]^T$ شعاع الإشارة.

يبين الشكل (17) مخطط الـ Simulink للمتحكم التكيفي ذو النموذج المرجعي:



الشكل (17) مخطط الـ Simulink للمتحكم الأمثلي التكيفي ذو النموذج المرجعي

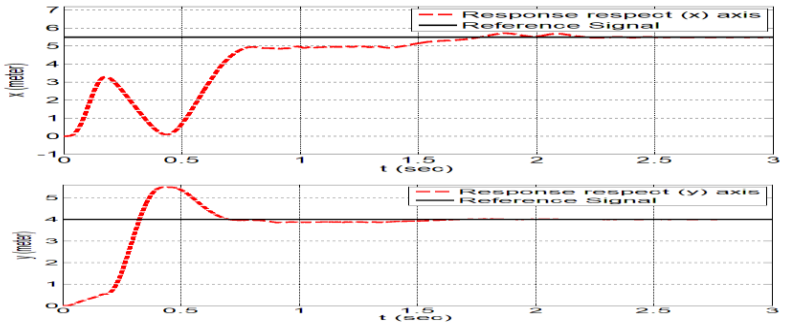
المحاكاة والنتائج:

تمـــت محاكـــاة النظـــام المقتـــرح باســـتخدام بيئـــة MATLAB/Simulink واختبـار أداء كـلا مـن المتحكمـين البارامتري الأمثلي والمتحكم التكيفي ذو النموذج المرجعي من أجل ملاحقة نقطة محددة ومن أجل ملاحقة مسارات منحنية ومسارات مغلقة دائرية وبشكل حرف (∞)، فتم الحصول على النتائج التالية:

1- الاستجابات من أجل قوى احتكاك صفرية:

يبين الشكل (18) استجابات الروبوت الكروي بالنسبة للموضع (x,y)، مـن أجـل قـوى احتكـاك صـفرية، أي أن: $F_x = F_y = 0\ N$

ومـــن أجـــل القـــيم التاليـــة للإشـــارات المرجعيـــة: $\tau_\beta = 5.5\ N.m$ ، $\tau_\phi = 4\ N.m$



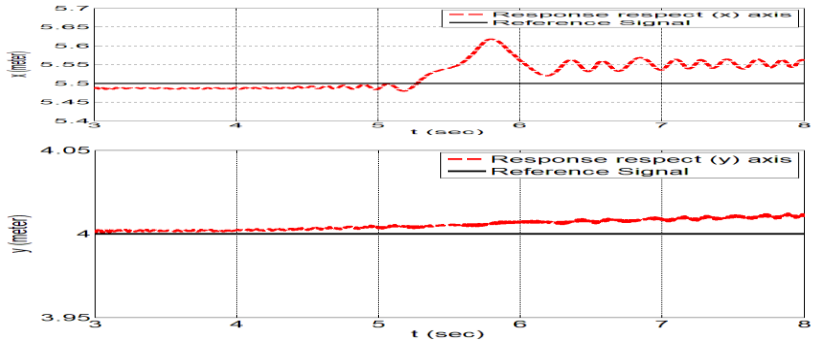
الشكل (18) استجابات الروبوت الكروي بالنسبة للموضع (x,y) عند استخدام المتحكم التكيفي

2-الاستجابات بوجود قوى احتكاك:

يبـين الشـكل (19) الاسـتجابات بوجـود قـوى الاحتكـاك عنـد سرعات خطية صغيرة:

ومـــن أجـــل $F_x = f_x.V_x = 0.6\ N\ , F_y = f_y.V_y = 0.5\ N$ المقارنة سنفرض أن قوى الاحتكاك تم تطبيقها في اللحظة (4 sec)، ومن أجل القيم التالية للإشارات المرجعية:

$\tau_\beta = 5.5\ N.m$ ، $\tau_\phi = 4\ N$



الشكل (19) استجابات الروبوت الكروي من أجل $F_x = f_x.V_x = 0.6\ N\ , F_y = f_y.V_y = 0.5\ N$

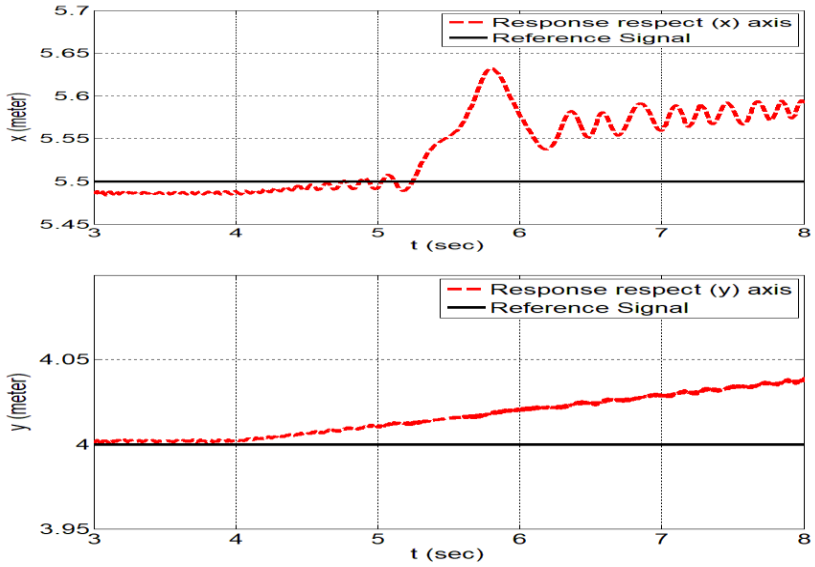
3 –الاستجابات بوجود قوى احتكاك:

يبين الشكل (20) الاستجابات بوجود قوى احتكاك عند سرعات متوسطة:

$$F_x = 2\ N\ , F_y = 2\ N$$

ومن أجل المقارنة سنفرض أن قوى الاحتكاك تم تطبيقها في اللحظة (4 sec) ومن أجل القيم التالية للإشارات المرجعية:

$$\tau_\beta = 5.5\ N.m,\ \tau_\phi = 4\ N$$



الشكل (20) استجابات الروبوت الكروي من أجل $F_x = 2\ N\ , F_y = 2\ N$

4–الاستجابات بوجود قوى احتكاك:

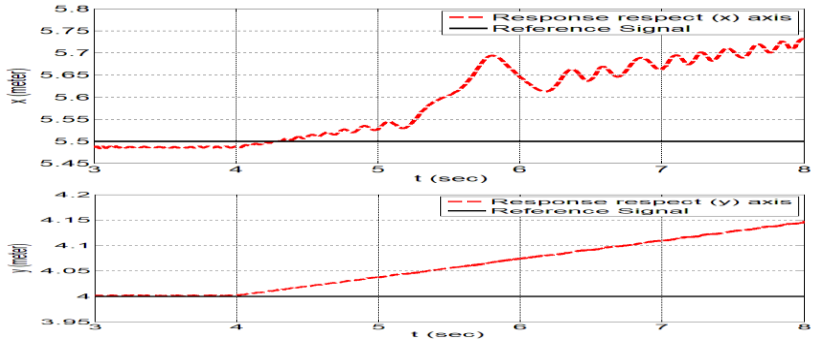
يبين الشكل (21) الاستجابات من أجل سرعات مرتفعة:

$$F_x = 8\ N \quad , \quad F_y = 8\ N$$

ومن أجل المقارنة سنفرض أن قوى الاحتكاك تم تطبيقها في اللحظة (4 sec).

ومن أجل القيم التالية للإشارات المرجعية:

$$\tau_\beta = 5.5\ N.m \quad , \quad \tau_\phi = 4$$



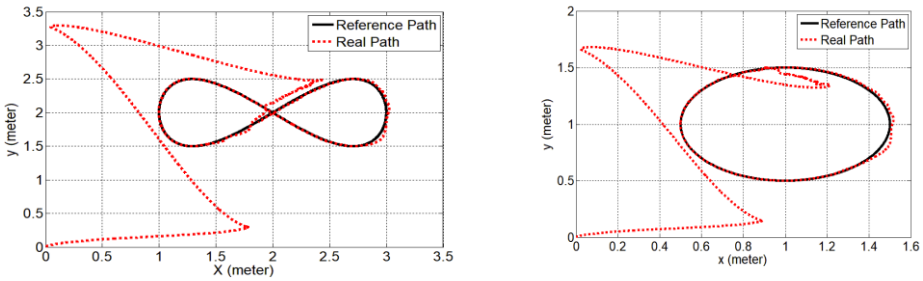
الشكل (21) استجابات الروبوت الكروي من أجل $F_x = 8\ N\ , F_y = 8\ N$

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

5-ملاحقة مسارات مرجعية من أجل قوى احتكاك مختلفة:

يبين الشكل (22) ملاحقة مسارات مرجعية دائرية ومسار بشكل (∞) من أجل قوى احتكاك صفرية:

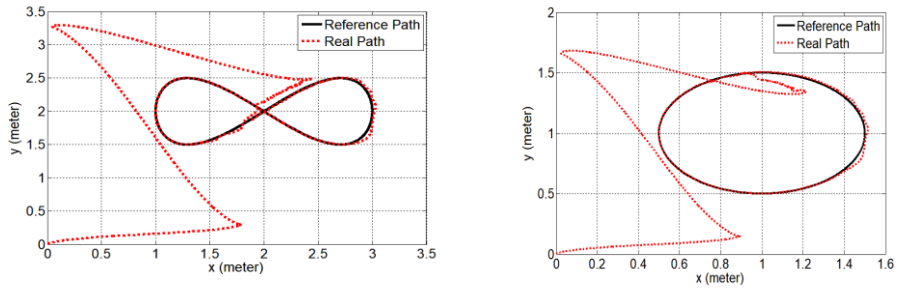
$$F_x = F_y = 0\ N$$



الشكل (22) ملاحقة مسارات دائرية وبشكل (∞) من أجل قوى احتكاك صفرية: $F_x = F_y = 0\ N$

كما يبين الشكل (23) ملاحقة مسار دائري مرجعي ومسار بشكل (∞) من أجل قوى احتكاك تنشأ عن سرعات خطية صغيرة:

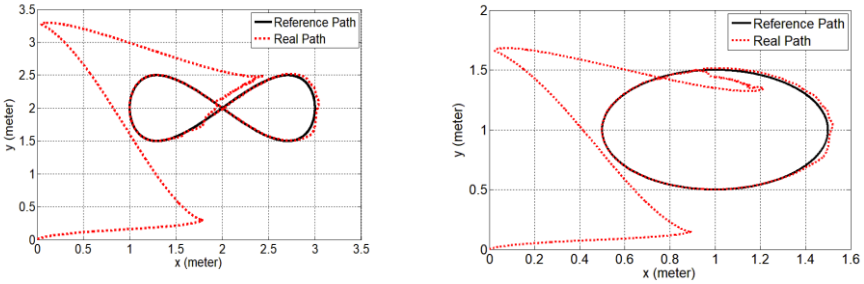
$$F_x = F_y = 0.5\ N$$



الشكل (23) ملاحقة مسارات دائرية وبشكل (∞) من أجل قوى احتكاك: $F_x = F_y = 0.5\ N$

كما يبين الشكل (24) ملاحقة مسارات مرجعية دائرية ومسار بشكل (∞) من أجل قوى احتكاك تنشأ عن سرعات خطية صغيرة:

$$F_x = F_y = 2\ N$$

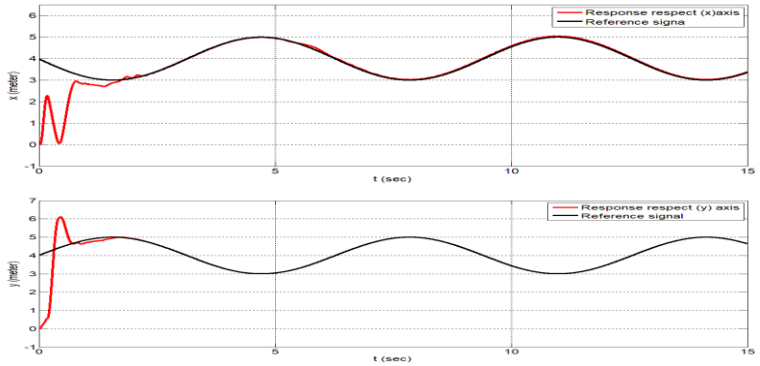


الشكل (24) ملاحقة مسارات دائرية وبشكل (∞) من أجل قوى احتكاك: $F_x = F_y = 2\ N$

6- ملاحقة مسارات مرجعية منحنية من أجل قوى احتكاك صفرية:

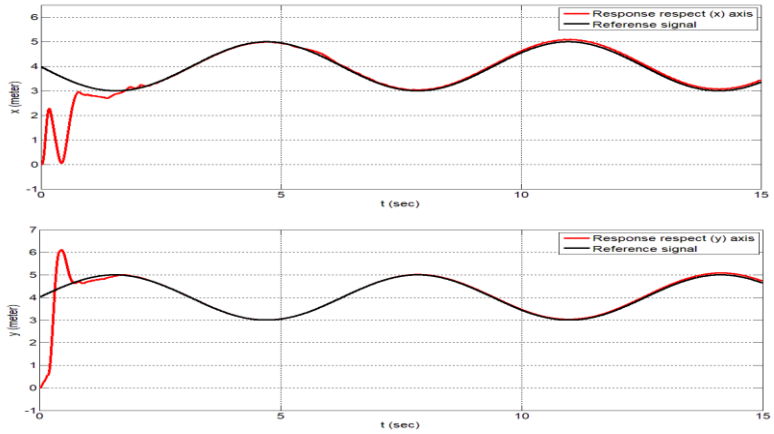
يبين الشكل (25) الاستجابات لملاحقة مسارات منحنية وفق التجاهين (x) و (y) من أجل قوى احتكاك صفرية، أي أن :

$$F_x = F_y = 0\ N$$



الشكل (25) ملاحقة مسارات مرجعية منحنية من أجل قوى احتكاك صفرية: $F_x = F_y = 0\ N$

كما يبين الشكل (26) الاستجابات لملاحقة مسارات منحنية وفق التجاهين (x) و (y) من أجل قوى احتكاك: $F_x = F_y = 2\ N$



الشكل (26) ملاحقة مسارات مرجعية منحنية من أجل قوى احتكاك: $F_x = F_y = 2\ N$

تحليل نتائج استجابات استخدام المتحكم التكيفي ذو النموذج المرجعي:

الجدول (2) يوضح تحليل رقمي للاستجابات

نوع الاستجابة Response model	التجاوز الاعظمي overshoot	زمن الاستقرار stable time	زمن الصعود Raise time	نوع المتحكم Controller type
عطالية	N/Aلايوجد	0.4S	0.02S	PI with LQR
عطالية	N/Aلايوجد	0.6S	0.17S	LQI
عطالية	N/Aلايوجد	3S	0.7S	Fuzzy
اهتزازية بشكل بسيط	4.50%	2S	1S	MARC

من خلال النتائج السابقة نلاحظ وبمراجعة الجدول (2) تفوق المتحكم التكيفي في تحقيق الملاحقة والاستقرار، وخاصة عند وجود قوى الاحتكاك المختلفة الناشئة عن سرعات مختلفة على الرغم من زمن الصعود وزمن الاستقرار البطيئين نوعاً ما مقارنة بمنهجيات تحكم أخرى، وسبب بقاء المتحكم التكيفي محافظاً على أدائه الجيد هو استخدام النموذج المرجعي ذو الاستجابة الممتازة والتي يجب على جملة التحكم أن تلاحقها.

من خلال المناقشة السابقة فإنه يمكن تلخيص نقاط القوة والضعف كما يلي:

1- المتحكم التكيفي يحتوي على حالات العابرة الاهتزازية.

2- يستخدم المتحكم التكيفي عند حركة الروبوت على السطوح الملساء وغيرها والتي تولد قوى احتكاك، حيث يبقى هذا المتحكم قادرا على مجابهة قوى الاحتكاك والتغلب عليها.

3- إن سبب قوة المتحكم التكيفي وتفوقه هو استخدام النموذج المرجعي وبالتالي ملاحقة استجابة جملة التحكم لهذه الاستجابة المثالية الناتجة عن النموذج المرجعي، وعند وجود أي خطأ فإن المتحكم يعالج هذا الخطأ وتحقيق الملاحقة.

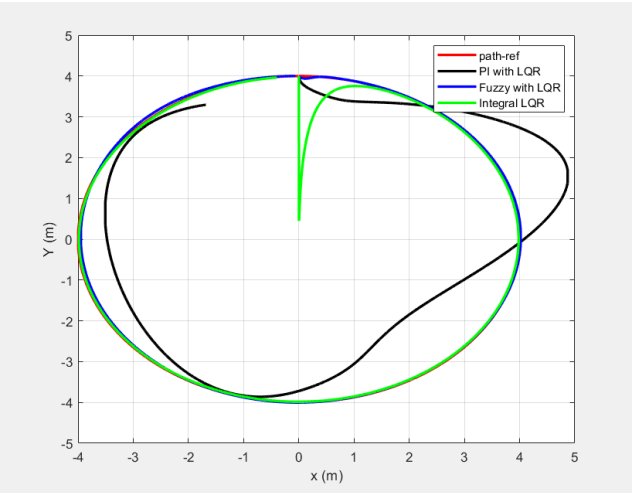
الخلاصة:

تم تنفيذ المحاكاة في بيئة الماتلاب لأربع خوارزميات تحكم كما وردت في المقالة مسبقاً، حيث تم تطبيق ذات الإشارة المرجعية على جميع أنظمة التحكم المقترحة، (PI with LQR, , Integral-LQR, Fuzzy with LQR , MARC) من أجل إجراء المقارنة بين أداء كل منها، يوضح الشكل (27) الإشارة المرجعية الدائرية ومقارنتها مع استجابات المنهجيات المختلفة بدون MARC.

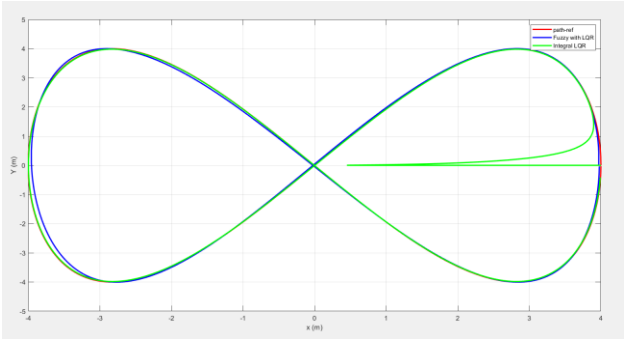
كما تم أيضا رسم مسار اللانهاية كإشارة مرجعية ومقارنتها مع استجابات المنهجيات المختلفة كما في الشكل (28) بدون MARC. كما تم رسم إشارات الخطأ على المحاور X,Y بالنسبة للإشارة المرجعية الدائرية كما تظهر في الاشكال (29) و (30) على التوالي.

نلاحظ اختلاف في مطالات إشارات الخطأ على المحورين X ,Y، حيث يكون اعلا مطال لإشارة خطأ منهجية PI with LQR بينما تأتي منهجية التحكم Fuzzy with LQR بأقل مطال لإشارة الخطأ على المحورين مما يثبت فعالية هذه المنهجية مقارنة مع بقية المنهجيات المذكورة في هذه المقالة.

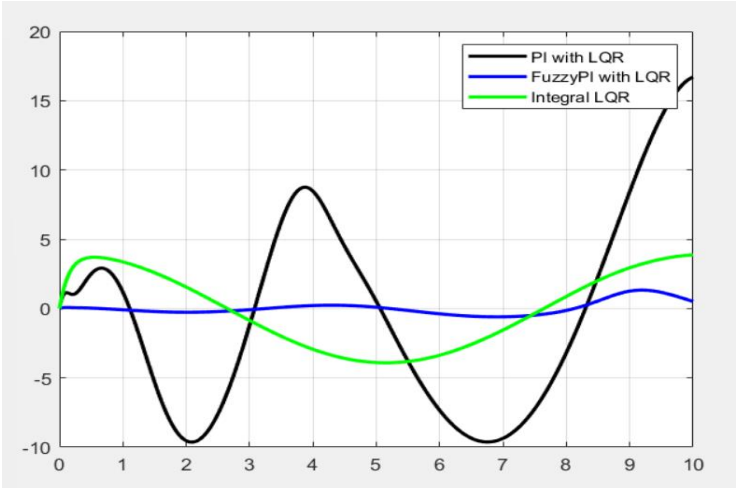
وبالتالي نلاحظ تفوق منهجية Fuzzy with LQR عند حركة الروبوت على السطوح الملساء، بينما يتفوق المتحكم التكيفي بشكل واضح عند حركة الروبوت على السطوح التي تولد قوى احتكاك متنايبة مع السرع الخطية.



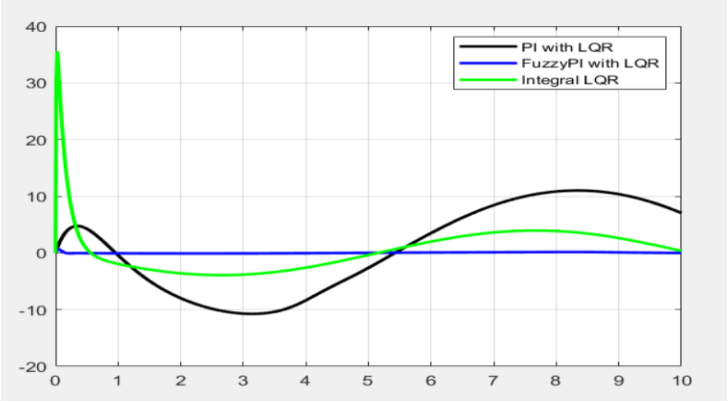
الشكل (27) استجابة النظام لإشارة مرجعية دائرية باستخدام جميع المنهجيات المذكورة



الشكل (28) استجابة النظام لإشارة مرجعية مسار لانهاية باستخدام جميع المنهجيات المذكورة



الشكل (29) إشارة الخطأ على المحور X لإشارة مرجعية دائرية باستخدام منهجية جميع المنهجيات المذكور بدون MARC.



الشكل (30) إشارة الخطأ على المحور Y لإشارة مرجعية دائرية باستخدام منهجية جميع المنهجيات المذكورة بدون MARC.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

References:

1. Aminata Diouf, Bruno Belzile, Maarouf Saad, David St-Onge, (2023), "Spherical Rolling Robots Design, Modeling, and Control: A Systematic Literature Review", arXiv:2310.02240v1.

2. Pokhrel, D., Luitel, N.R., Das, S. and Ray, D.N., 2013, December. Design and development of a spherical robot (spherobot). In Proceedings of the 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013), IIT Roorkee, India (pp. 735-741).

3. Shi, C., Sun, H., Jia, Q. and Zhao, K., 2009, May. Research on modeling and motion simulation of a spherical space robot with telescopic manipulator based on virtual prototype technology. In Space Exploration Technologies II (Vol. 7331, pp. 55-62). SPIE.

4. Yao Cai ∗, Qiang Zhan, Xi Xi, (2012), " Path tracking control of a spherical mobile robot ", Mechanism and machine ataheory.

5. Anantachaisilp, P. and Lin, Z., 2017, January. Fractional order PID control of rotor suspension by active magnetic bearings. In Actuators (Vol. 6, No. 1, p. 4). MDPI.

6. Mahmud, M., Motakabber, S.M.A., Alam, A.Z. and Nordin, A.N., 2020. Control BLDC motor speed using PID controller. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 11(3).

7. Amirhossein Ahmadi, Behnam Mohammadi-Ivatloo, Amjad Anvari-Moghaddam, and Mousa Marzband , (2020), " Optimal Robust LQI Controller Design for Z-Source Inverters", APPLIED SCIENCES.François

8. Akyazı, Ö.M.Ü.R., Usta, M.E.H.M.E.T. and Akpınar, A., 2012. A self-tuning fuzzy logic controller for aircraft roll control system. International Journal of Control Science and Engineering, (2).

9. Erkan Kayacan, Zeki Y. Bayraktaroglu and Wouter Saeys, (2012), " Modeling and control of a spherical rolling robot: a decoupled dynamics approach", © Cambridge University Press 2011 doi:10.1017/S0263574711000956.

10. Mehdi Roozegar, Mohammad J. Mahjoob, (2016), "Modelling and control of a non-holonomic pendulum-driven spherical robot moving on an inclined plane: simulation and experimental results", IET Control Theory & Applications.

11. د.علبي أسامة، "التحكم التكيفي"، منشورات جامعة حلب، 2015.