

تصميم نظام تحكم لا خطي لتحسين الأداء الديناميكي لذراع روبوتية تسلسلية 4dof

* أ.د. نائر ابراهيم *

** د. محسن أحمد خطيب **

*** م. فاطمة علي حبه ***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٢/٢ . قبل للنشر في ٢٠٢٥/٥/٢٠)

□ ملخص □

تعتبر الأنظمة الروبوتية ذات خصائص لا خطية، وبالتالي طرق التحكم الخطية ليست قادرة على تقليل الاهتزازات والتعامل مع المعاملات اللاخطية التي لها تأثيرات غير متوقعة على استجابة هذه الأنظمة والتي تقلل من أدائها الجيد.

في هذا البحث تم تصميم وحدة تحكم ضبابي FLC-PID (Fuzzy PID) لنموذج مفتوح المصدر لذراع روبوتية تسلسلية (4dof) محركاتها servo motor ومقارنة الأداء مع المتحكم التتابعي التقليدي P-PI في بيئة MATLAB، من أجل تعزيز الأداء الديناميكي للتحكم بالموضع الزاوي للمفاصل وانحراف المؤثر النهائي عن المحاور الإحداثية x,y,z.

تم اختبار وحدة التحكم الضبابي المقترحة على مستوى المفصل، حيث تأخذ هذه الوحدة بعين الاعتبار القوى والعزوم المؤثرة على المفاصل والمسببة للحركة، إلى جانب المتغيرات variants المسببة للاضطرابات كتسارع الجاذبية الأرضية، والتي تؤثر بشكل مشترك على أداء الأنظمة الروبوتية.

حيث أظهرت نتائج المحاكاة والنمذجة أن وحدة التحكم الضبابي تتفوق على المتحكم التتابعي التقليدي (P-PI) كما امتازت بمقاومة عالية ضد التشويش والاضطرابات التي قد تؤثر على النظام الروبوتي المدروس، مما أدى إلى تقليل التجاوز الأعظمي والخطأ الستاتيكي في تحديد الموقع الزاوي للمفاصل أي تتبع قيم الموضع الزاوي بشكل أفضل وأكثر دقة، كما أثبتت قدرتها على تقليل انحراف موضع المؤثر النهائي عن محاور الإحداثيات (x, y, z) إلى نسبة 0% عند تطبيق دخل ثابت، بينما حافظت على نسبة خطأ قريبة من الصفر أثناء الاستجابة الزمنية للنظام عند تطبيق دخل متغير وقد حققت أيضاً زاوية دوران قريبه من القيم المرجعية للمسار المدخل خلال فترة زمنية قصيرة، مع تجاوز أعظمي صغير بنسبة 11%، وخطأ تموضع بلغ 0.04% و 0.02%، و 0.05% على محاور الإحداثيات.

الكلمات المفتاحية: ذراع روبوتية تسلسلية 4dof، المتحكم P-PI، المتحكم fuzzy PID، الأداء الديناميكي.

* أستاذ في هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سورية
** أستاذ مساعد في هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سورية.
*** طالبة دكتوراه في هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سورية.

Design of a Nonlinear Control System to Improve the Dynamic Performance of a 4DOF

Prof. Thaer Ibrahim*

Dr. Mohsen Ahmad Khateeb**

(Received 26/2/2025 . Accepted 15/5/2025)

□ ABSTRACT □

Robotic systems exhibit nonlinear characteristics, making linear control methods ineffective in mitigating vibrations and nonlinear parameters that unpredictably affect their responsiveness, ultimately reducing their overall performance.

In this study, we designed a Fuzzy PID (FLC-PID) controller for an open-source model of a serial robotic arm with four degrees of freedom (4-DOF) powered by servo motors. The performance of this controller was compared with the conventional P-PI controller in a MATLAB environment to enhance dynamic control over the angular position of joints and minimize end-effector deviation along the x, y, and z axes.

The proposed fuzzy control unit was tested at the joint level, considering the forces and torques affecting the joints and causing movement, as well as the variants that induce disturbances, such as gravitational acceleration, which jointly impact the performance of robotic systems.

Simulation and modeling results showed that the fuzzy control unit outperforms the conventional proportional-integral (P-PI) controller. It demonstrated high resistance to noise and disturbances that could affect the studied robotic system, leading to a reduction in maximum overshoot and static error in determining the angular position of the joints—ensuring better and more accurate tracking of angular position values. Additionally, it proved its ability to minimize the deviation of the end-effector position from the coordinate axes (x, y, z) to 0% when a constant input was applied while maintaining an error rate close to zero during the system's time response to variable input. It also achieved an angular rotation close to the reference values of the input trajectory within a short time, with a small maximum overshoot of 11% and positioning errors of 0.04%, 0.02%, and 0.05% on the coordinate axes.

Keywords: 4DOF serial robotic arm, P-PI controller, fuzzy PID controller, dynamic performance.

*Professor in the Department of Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tartous University - Tartous - Syria.

**Assistant Professor in the Department of Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tartous University - Tartous - Syria.

***PhD Student in Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tartous University - Tartous - Syria.

1. المقدمة introduction:

اهتم الجيل الصناعي الرابع (the era of industry 4.0) بالتطبيقات الروبوتية وخاصة المناولات الصناعية (الأذرع الروبوتية) والتي يُعد التحكم بها لتأدية مهمة معينة بشكل دقيق ونسبة خطأ قريبة من الصفر، من التحديات الصعبة وذلك مع مراعاة دلائل جودة النظام (تجاوز أعظمي δ_{max} وزمن استقرار t_s وزمن صعود t_r) إذ تعد المناولات الصناعية من الأنظمة اللاخطية التي تتمتع باستجابة اهتزازية في الحلقة المفتوحة، إضافة إلى وجود قوى الترابط بين المفاصل التي تسبب اضطرابات غير مرغوبة [1]، تنطلق دراسة أي منظومة روبوتية بخطوات مرتبة انطلاقاً من الدراسة الحركية Kinematics ثم إيجاد النموذج الديناميكي للذراع الروبوتية، وتحقيق الإشارات المرجعية للذراع الروبوتية (زاوية، سرعة زاوية، عزم) وتحسين الأداء من خلال اختيار خوارزمية التحكم الأنسب التي تتطلب معرفة وتحديد بارامترات الديناميك وإضافة الاضطرابات والتشويش لمراقبة وقياس قيم المتغيرات على خرج المنظومة الروبوتية المدروسة [2].

تؤكد الكثير من الدراسات المرجعية أهمية المتحكم الضبابي وموثوقيته في الأنظمة الغير خطية وفي الأنظمة التي تمتلك تشويش واضطرابات داخلية كانت أم خارجية

يبين بحث نُشر عام (2021) أهمية الاعتماد على المتحكم الضبابي في موالفة ثابت الـ PID وموثوقيته في الأنظمة اللاخطية ومناعته ضد الاضطرابات والتشويش، حيث تم تطبيق متحكم fuzzy-PID على ذراع روبوتية 2dof أظهرت نتائج المحاكاة أنه تم حل مشاكل تتبع المسار سعياً لتحسين الأداء والتغلب على مشكل الاضطراب والتشويش بالإضافة للدراسة الرياضية لإيجاد النموذج الديناميكي العام للذراع روبوت [3].

أوضح بحث نُشر عام (2017) تصميم متحكم ضبابي فقط fuzzy logic controller (FLC) لذراع روبوتية تسلسلية ثلاث درجات حرية ودرجة حرية للمؤثر النهائي الهدف منها استبدال العمالة البشرية لنقل البندورة إلى نظام التعبئة، أظهرت النتائج حركة دقيقة وسلسة للذراع، أظهرت النتائج التجريبية أخطاء موضع المؤثر النهائي للمحاور (x, y, z) هي 0.1% ، 0.1% ، 0.04% وأخطاء الموضع الزاوي لمفاصل الروبوت $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ هي 0.3%، 0.7%، 0% [4].

تم التطرق في بحث نُشر عام (2019) إلى دراسة المتحكم الضبابي لذراع روبوتية ست درجات حرية محركته من نوع dc motor دون التطرق إلى القوى المسببة للتشويش والاضطراب ودراستها، حيث كانت أخطاء موضع المؤثر النهائي للمحاور (x, y, z) هي 0.2% ، 0.62%، 0.24% والخطأ الستاتيكي 0.2 [5].

درس بحث نُشر عام (2023) المتحكم الضبابي fuzzy PID لضبط موضع ذراع روبوتية درجتين حرية لحل مشاكل الحركية المباشرة والعكسية وذلك بهدف تتبع مسار محدد مسبقاً في الفضاء ثلاثي الأبعاد حيث يتم ذلك بواسطة متحكم PID تم ضبط معاملات KP وKI وKD بواسطة المتحكم الضبابي في كل لحظة حقق هذا المتحكم أداء مرغوب وقوي في للتحكم بحركة الروبوت وتتبع المسار [6].

تستخدم الأذرع الروبوتية التسلسلية في الكثير من المجالات الصناعية التي تتطلب موثوقية عمل عالية، وبما أن طرق التحكم التقليدية المستخدمة لتحسين عمل هذه الأذرع تمتلك الكثير من العيوب ولا توفر الاستجابة الزمنية المرجوة وخصوصاً عند تواجد اضطرابات واستجابة اهتزازية غير منتظمة في الحلقة المفتوحة، والتي لن تكون قادرة على التعامل مع الاضطرابات وإزالتها بشكل كامل وتحميل النظام أعباء إضافية، كان لا بد من البحث عن طرق بديلة تعمل على ضمان استقرار هذه الأذرع وتحسين أداءها الديناميكي.

3. أهمية البحث وأهدافه:

انطلاقاً من أهمية الأذرع الروبوتية التسلسلية واستخدامها بكثرة في جميع مجالات العمل الصناعية والطبية وغيرها كان لا بد من العمل على تحسين أداءها وضمان استقرارها ورفع موثوقيتها، وذلك من خلال تصميم متحكم لا خطي ضبابي والذي يعتبر متحكم ذو مناعة عالية ضد التشويش وذو موثوقية عالية، للحفاظ على استقرار الأنظمة الروبوتية.

يتمثل الهدف الرئيس لهذا البحث بتصميم متحكم ضبابي يعمل على تحسين أداء الأذرع الروبوتية التسلسلية وينبثق عنه الأهداف الفرعية التالية:

- 1- تصميم المتحكم الضبابي في بيئة MATLAB واختباره على نموذج لذراع روبوتية أربع درجات حرية في بيئة MATLAB SIMULINK.
- 1- اختبار المتحكم الضبابي المدروس ومقارنته مع المتحكم التقليدي من حيث دراسة استقرار الذراع الروبوتية عن طريق التحكم بموضع مفاصل الذراع الروبوتية ووصول المؤثر النهائي (اللاقط) إلى الموضع المطلوب بأقل خطأ ممكن.
- 3- دراسة قدرة المتحكم الضبابي المدروس على التخلص من الاضطرابات والتشويش الناتج عن المعاملات الديناميكية للذراع الروبوتية المدروسة ومقارنته مع المتحكم التقليدي.

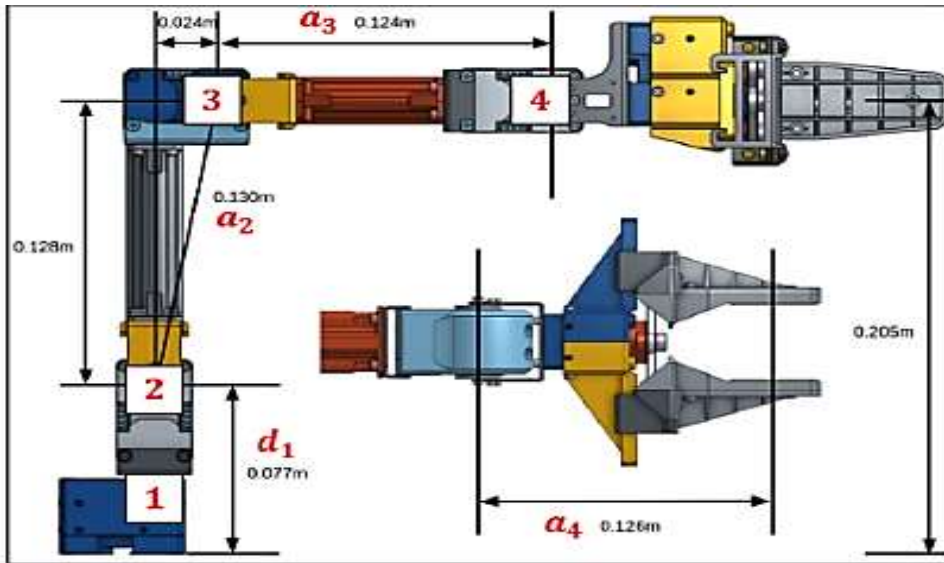
4. مواد البحث وطرائقه:

- 1- برنامج (MATLAB Simulink).
- 2- التصميم الميكانيكي للذراع الروبوتية التسلسلية المختارة مفتوحة المصدر أربع درجات حرية للمفاصل ودرجتين حرية للمؤثر النهائي (Open MANIPULATOR-X).
- 3- مجموعة المكتبات الخاصة بتصدير ومحاكاة الأذرع الروبوتية: Control toolbox / Robotics system toolbox/ sim mechanics/ sim scape/ Simulink control design
- 4- أداة fuzzy toolbox لتصميم واختبار تقنية التحكم الضبابي المقترحة.

5. النمذجة والمحاكاة في بيئة MATLAB:

1.5 دراسة وتوصيف الذراع الروبوتية:

قمنا في هذا المقال بالاعتماد على إحدى تصاميم الأذرع الروبوتية المفتوحة المصدر (Open Manipulator) (Robot Arm 4dof+2dof End Effect Gripper) /ذراع روبوتية أربع درجات حرية ودرجتين حرية للمؤثر النهائي (اللاقط) [12].
يوضح الشكل (1) الذراع الروبوتية المختارة وأبعادها الهندسية، حيث تشير الأرقام من 1,2,3,4 إلى مفاصل الذراع الروبوتية:



الشكل (1): الذراع الروبوتية المدروسة وأبعادها الهندسية [7].

تتم الدراسة الرياضية للذراع بالاعتماد على نموذج الدراسة الحركية (الحركة العكسية / الحركة الأمامية) (kinematics study) ونموذج الدراسة الديناميكية (dynamic model).

تُعبّر الدراسة الحركية عن الحركة الأمامية التي من خلالها يتم تحديد مواقع المفاصل وموقع المؤثر النهائي عند تطبيق الدخل، والحركة العكسية والتي من خلالها يتم تحديد القيم الواجب تطبيقها على المفاصل انطلاقاً من موقع محدد للمؤثر النهائي.

يمكن إجراء الدراسة الحركية باستخدام طريقة Denavit Hartenberg [7]، حيث يوضح الجدول (1) بارامترات D-H للذراع الروبوتية المدروسة.

الجدول (1): بارامترات D-H [7].

| joint | $\theta_i(^{\circ})$ | $a_i(^{\circ})$ | $a_i(m)$ | $d_i(m)$ |
|-------|-----------------------|-----------------|----------|----------|
| 1 | θ_1 | 90 | 0 | 0.077 |
| 2 | $\theta_1 - \theta_0$ | 0 | 0.130 | 0 |
| 3 | $\theta_3 + \theta_0$ | 0 | 0.135 | 0 |
| 4 | θ_4 | 0 | 0.126 | 0 |

حيث:

$a_i(^{\circ})$: انحراف الوصلة أي الزاوية بين \hat{Z}_{i-1} إلى \hat{Z}_i حول المحور \hat{x}_{i-1} . حيث i رقم المفصل.

$\theta_i(^{\circ})$: زاوية المفصل، الزاوية بين \hat{x}_{i-1} إلى \hat{x}_i حول المحور \hat{z}_i .

$a_i(m)$: طول الوصلة، المسافة من \hat{z}_i إلى \hat{z}_{i+1} وفق المحور \hat{x}_i .

$d_i(m)$: انزياح الوصلة، المسافة \hat{x}_{i-1} إلى \hat{x}_i وفق المحور \hat{z}_i .

من أجل بناء النموذج الديناميكي للذراع الروبوتية التسلسلية سنعتمد على طريقة (أولر - لاغرانج / Euler-Lagrange) [8]، حيث لدينا أربع مركبات أساسية هي العزم الناتج عن المركبة العطالية (inertial torque) / العزم الناتج عن الجاذبية الأرضية (gravity torque) / عزم الجذب المركزي (centripetal torque) / عزم كوريوليس (Coriolis Torque) تؤثر على الذراع الروبوتية والتي تسبب الاضطرابات والحركة الاهتزازية، بالاعتماد على النموذج الديناميكي سنقوم بتصميم وتحليل خوارزميات التحكم بالذراع الروبوتية.

انطلاقاً من تابع لاغرانج الموضح بالعلاقة (1) نجد العلاقات المعبرة عن الطاقة الحركية والطاقة الكامنة للذراع ونستنتج منها علاقة العزم الدوراني المبين بالعلاقة (2) [8],[13],[14]:

$$L = K - p \quad (1)$$

حيث K الطاقة الحركية، p الطاقة الكامنة.

$$\tau_i = D_{ij}\ddot{q}_j + D_{ijj}\dot{q}_j^2 + 2D_{ijk}\dot{q}_i\dot{q}_j + D_i \quad (2)$$

انطلاقاً من العلاقة (2) نجد التابع الرياضي المعبر عن النموذج الديناميكي العكسي، كما هو مبين بالعلاقة (3):

$$\ddot{q}_j = D_{ij}^{-1}[\tau_i - D_{ijj}\dot{q}_j^2 + 2D_{ijk}\dot{q}_i\dot{q}_j + D_i] \quad (3)$$

حيث: D_{ij} : مصفوفة العطالة، D_{ijk} : مصفوفة كوريوليس، D_{ijj} مصفوفة القوى المركزية، D_i : مصفوفة الجاذبية و τ_i العزم الدوراني للمفصل المتحرك i ، التسارع الزاوي للمفصل التالي، و \dot{q}_i ، \dot{q}_j السرعة الزاوية للمفاصل على التوالي.

يمكن إهمال العزم الناتج عن الجذب المركزي وتأثير كوريوليس وذلك عند السرعات المنخفضة، بسبب قيمها الصغيرة مقارنة مع قيم باقي العزوم المؤثر [8].

نموذج الذراع الروبوتية الديناميكي هو نموذج غير خطي ومتغير مع الزمن ويتألف من مداخل متعددة ومخارج متعددة، لا خطية النظام تأتي بشكل مباشر من معادلات الحركة الخاصة بالعزم الدوراني (المعادلة 2) وتبعية المصفوفات D_{ij} و D_{ijj} و D_{ijk} لـ q تعطي جداءات بين المشتقات المختلفة للتابع $q(t)$. يمكن التعبير عن المعادلة (2) بالمعادلة (4)، والتي توضح مصفوفة الاحتكاك والتشويش:

$$\tau_{n \times 1} = M(q)_{n \times n} \ddot{q}_{n \times 1} + B(q, \dot{q}) \quad (4)$$

حيث:

$\tau_{n \times 1}$ تمثل مصفوفة العزم الدوراني لـ n مفصل متحرك.

$M(q)$ مصفوفة العطالة.

$B(q, \dot{q})$ مصفوفة الاحتكاك والتشويش.

2.5 نمذجة الذراع الروبوتية:

نحتاج لمحاكاة الأذرع الروبوتية التسلسلية في بيئة MATLAB إلى الأبعاد الهندسية والمعلومات الميكانيكية الموجودة بالملفات ذات اللواحق (STL/STEP) والصادرة عن تصميم الذراع الروبوتية باستخدام بيئة تصميم ميكانيكية افتراضية، حيث قمنا بتصدير التصميم المختار للذراع الروبوتية المدروسة من بيئة التصميم الميكانيكي إلى بيئة (MATLAB-Simulink)، يوضح الشكل (2) المبدأ العام لتصدير نموذج الذراع الروبوتية الميكانيكي:



الشكل (2): المبدأ العام لتصدير نموذج الميكانيكي.

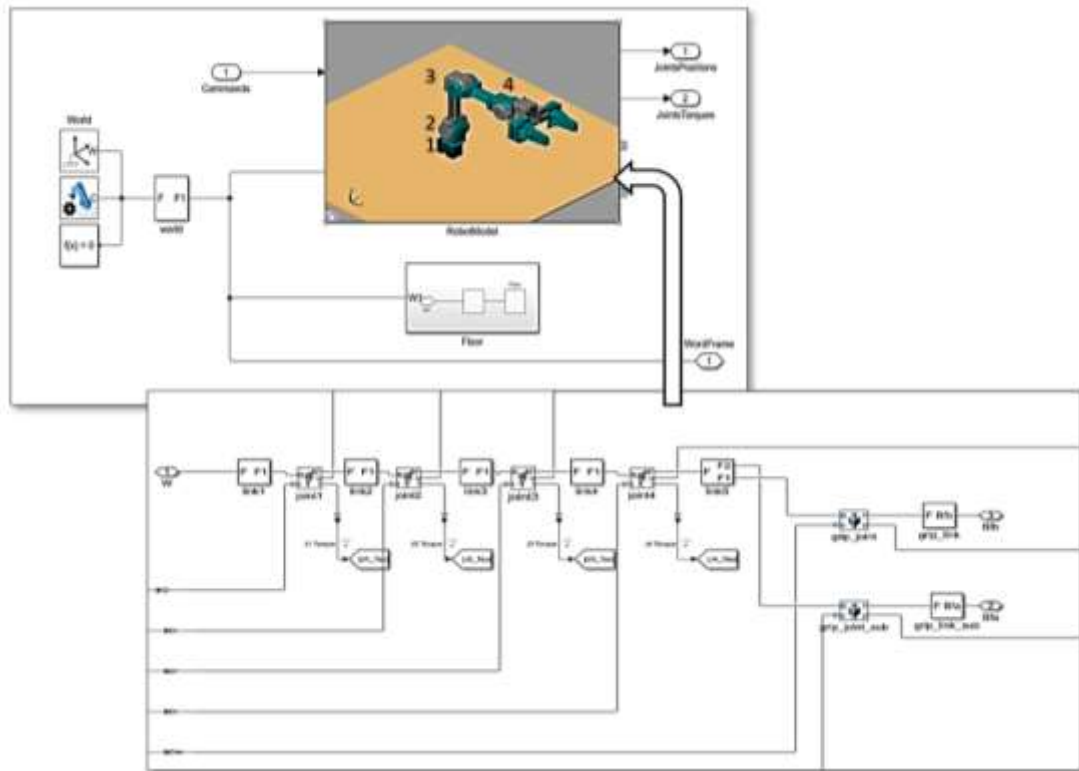
حيث تم في هذا المقال اعتماد نموذج ميكانيكي للذراع الروبوتية جاهز مفتوح المصدر (Open

MANIPULATOR) 4dof+2dof robot arm [12].

بالإضافة إلى مجموعة المكتبات الخاصة بتصدير ومحاكاة الأذرع الروبوتية:

Control toolbox / Robotics system toolbox/ sim mechanics/ sim
scape/ Simulink control design

وانطلاقاً من الدراسة الحركية والديناميكية للأذرع الروبوتية نقوم باستكمال بناء نموذج للأذرع الروبوتية المصدرة إلى بيئة MATLAB والمؤلفة من أربع مفاصل دورانية بين وصلاته (joint_{1,2,3,4}) revolute ومفصلين للمؤثر النهائي يتم تحديد دخل النظام الروبوتي بأنه العزم الدوراني لكل مفصل أو الموضع الزاوي للمفاصل والخرج هو الموضع الزاوي أو السرعة الزاوية، يوضح الشكل (3) النموذج الروبوتي في بيئة MATLAB بناءً على الخطوات الموضحة بالشكل (1):



الشكل (3): النموذج الروبوتي في بيئة MATLAB، مبيناً بالأرقام مواقع مفاصله.

6. تصميم المتحكم:

1.6 المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID:

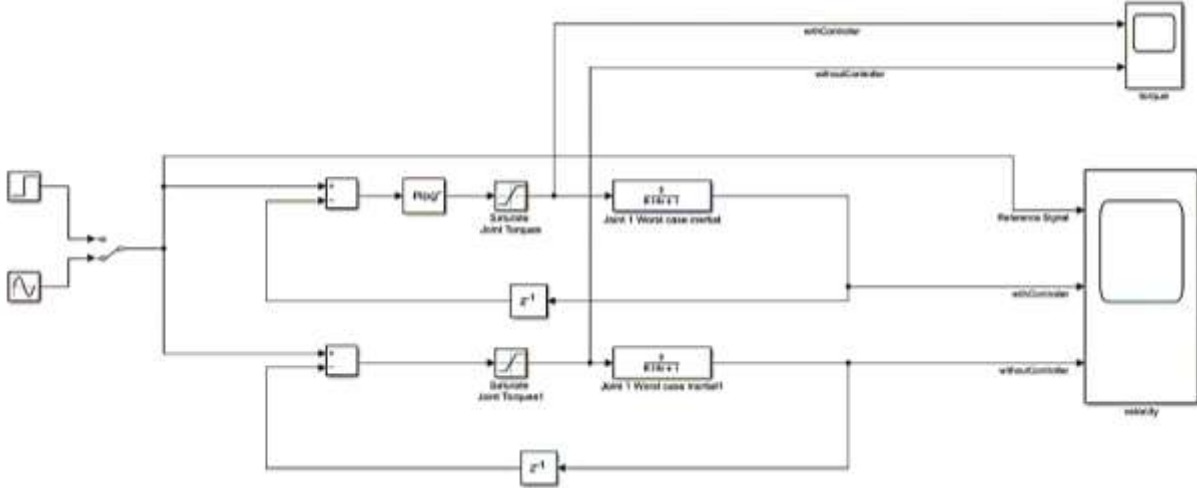
1. متحكمات الـ PID تفترض أن النظام خطي وغير متغير مع الزمن، ويدخل واحد وخرج واحد SISO ، قمنا بتحويل النموذج الديناميكي المستنتج إلى نموذج خطي غير متغير مع الزمن (LTI - linear time-invariant) وذلك عند نقطة عمل معينة، ينتج نموذج ديناميكي خطي غير متغير مع الزمن يشار إليه عنصر تباطؤ من الدرجة الأولى PT_1 ، وإيجاد توابع النقل الخاصة بالمفاصل [9].
يبين الجدول (2) تمثيل النظام المدروس بتابع نقل لكل مفصل والمبينة في الشكل (3)، عند تطبيق دخل واحد وذلك للاستفادة منها في ضبط ثوابت الـ PID .

الجدول (2) توابع النقل الخاصة بمفاصل الأذرع الروبوتية.

| رقم المفصل | تابع النقل |
|------------|------------|
|------------|------------|

| | |
|--------------------------|---|
| $\frac{5}{0.14s + 1}$ | 1 |
| $\frac{5.9}{0.18s + 1}$ | 2 |
| $\frac{5.5}{0.05s + 1}$ | 3 |
| $\frac{4.95}{0.01s + 1}$ | 4 |

يوضح الشكل (4) المخطط الصندوقي لتتابع النقل والـ PID في MATLAB:



الشكل (4): المخطط الصندوقي لتتابع النقل والـ PID في MATLAB.

انطلاقاً من متحكمات الـ PID يمكننا تصميم متحكم تعاقبي P-PI على مستوى المفصل، حيث يتم التحكم في المتغير الأسرع ديناميكياً بحلقة تحكم داخلية (حلقة للتحكم بالسرعة) والمتغير الأبطأ ديناميكياً بحلقة تحكم خارجية (حلقة التحكم بالموضع)، متحكم الحلقة الداخلية سيساهم بتعويض التشويش الخارجي بسبب سرعة الاستجابة مما يقلل الخطأ في حلقة التحكم الخارجية.

كما يمكننا تحسين عملية التحكم والملاحقة (ملاحقة المسار) باعتماد متحكم تغذية خلفية ومتحكم تغذية أمامية (بنية محسنة) [10]، حيث يعتمد متحكم التغذية الأمامية على عكس النموذج الديناميكي $G(s)$ ثم إضافة ذلك كدخل تحكمي للنظام وقياس التشويش $B(s)$ وعكس نمودجه وإضافته كدخل تحكمي انطلاقاً من التابع الرياضي المعبر عن النموذج الديناميكي العكسي المبين في المعادلة (3).

يبين الجدول (3) قيم ثوابت المتحكم التعاقبي P-PI الناتجة عن ضبط الثوابت تجريبياً، لتتابع النقل الموضحة بالجدول (2):

الجدول (3) قيم المتحكم P-PI على مستوى المفصل.

| رقم المفصل J | قيم ثوابت المتحكم P-PI على مستوى المفصل |
|--------------|--|
| 1 | Joint1_Cascade_ControllerPosition_Kp = 2.022 Joint1_Cascade_ControllerVelocity_Kp = 0.3193*10.88 Joint1_Cascade_ControllerVelocity_Ki = 0.3193 |
| 2 | Joint2_Cascade_ControllerVelocity_Kp = 1.97 Joint2_Cascade_ControllerVelocity_Kp = 0.2834*15.19 Joint2_Cascade_ControllerPosition_Ki = 0.2834 |
| 3 | Joint3_Cascade_ControllerVelocity_Kp = 1.93 |

| | |
|---|---|
| Joint3_Cascade_ControllerVelocity_Ki = 0.307*42.1 Joint3_Cascade_ControllerPosition_Kp = 0.307 | |
| Joint4_Cascade_ControllerVelocity_Kp = 2.94 Joint4_Cascade_ControllerVelocity_Kp = 0.2722*224.3 Joint4_Cascade_ControllerPosition_Ki = 0.2722 | 4 |

2.6 تصميم متحكمات الـ Fuzzy PID:

يعتبر المتحكم الضبابي من أهم طرق التحكم اللاخطية بسبب ما يتمتع به من مناعة عالية تجاه التشويش والاضطرابات التي تؤثر على النظام المدروس [11].

قمنا بتصميم المتحكم fuzzy-PID لمفاصل الذراع الروبوتية (تصميم حلقة تحكم بالموقع فقط لكل مفصل) وذلك باستخدام بيئة Simulink MATLAB وباستخدام الأداة fuzzy toolbox حيث احتجنا تجريبياً، لسبع توابع انتماء لكل من متغيرات الدخل والخرج.

أولاً: تم إضافة متغيرين لدخل المتحكم (الخطأ ومشتق الخطأ) وثلاث متغيرات على خرج المتحكم (ثوابت الـ PID) (K_i, K_p, K_d)، كما يظهر في الجدول (4):

الجدول (4) متغيرات الدخل لمتحكم الـ Fuzzy PID

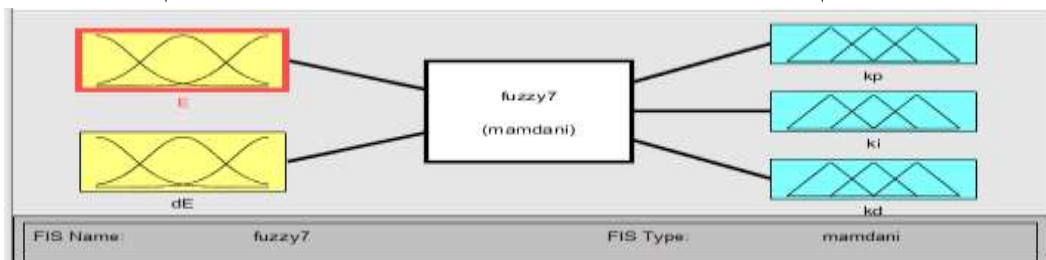
| | |
|---------------------------|--------|
| الخطأ (error E) | دخول 1 |
| مشتق الخطأ (ΔE) | دخول 2 |
| المعامل التناسبي K_p | خروج 1 |
| المعامل التكاملي K_i | خروج 2 |
| المعامل التفاضلي K_d | خروج 3 |

ثانياً: تم تمثيل متغيرات الدخل في وحدة التحكم المقترحة بسبع متغيرات لغوية لتوابع انتماء مثلثية وتمثيل متغيرات الخرج بسبع متغيرات لغوية لتوابع انتماء مثلثية وهي:

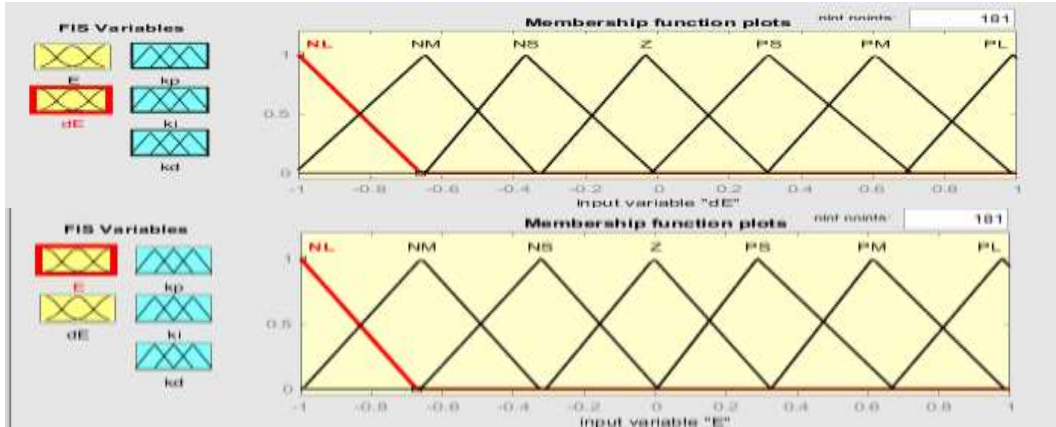
توابع انتماء الدخل: Negative Large (NL), Negative Medium (NM), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (NS), Positive Medium (PM), Positive Large (PL).

توابع انتماء الخرج: Zero (Z), Very Small (VS), Medium Small (MS), Medium (M), Medium Big (MB), Very Big (VB), Very Large (VL).

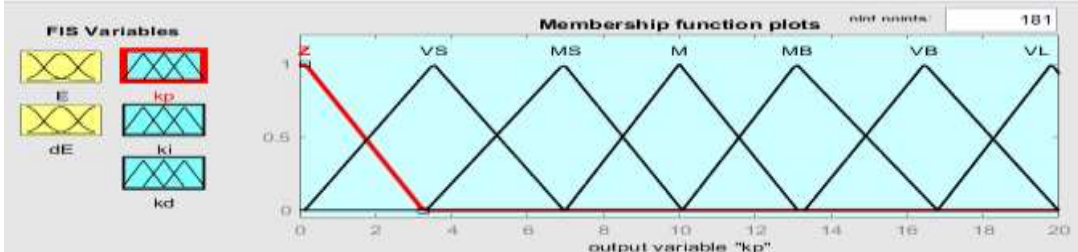
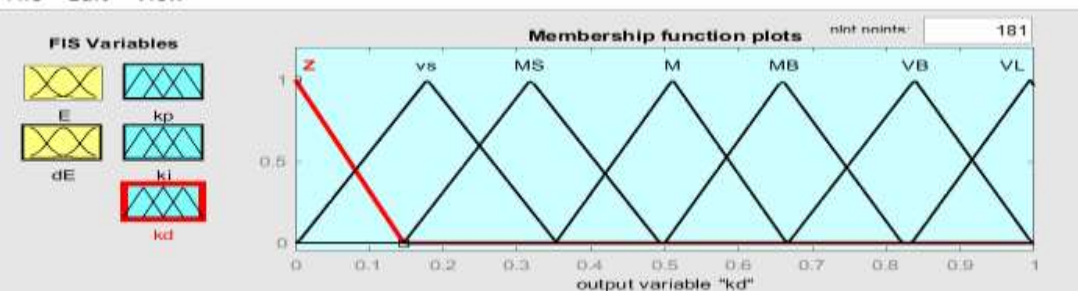
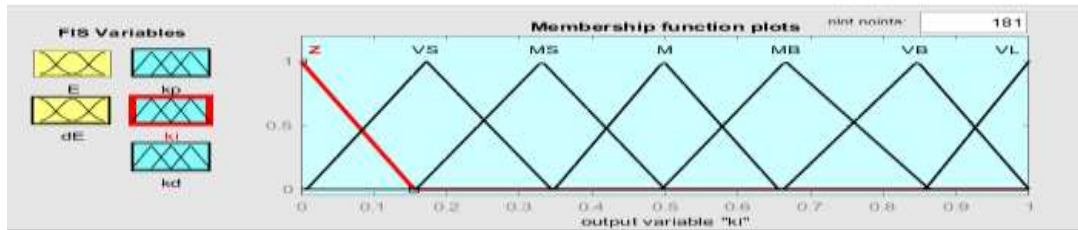
تبين الأشكال (5), (6), (7) بنية النظام الترجيحي وتوابع الانتماء الخاصة بالدخل وتوابع الانتماء الخاصة بالخرج على الترتيب، حيث يتم اختيار المجالات من إشارة الخطأ والموالمفة السابقة لثوابت المتحكم.



الشكل (5): بنية النظام الترجيحي.



الشكل (6): توابع الانتماء الخاصة بالدخل $E, \Delta E$.



الشكل (7): توابع الانتماء الخاصة بالخرج K_i, K_d, k_p .

قواعد الأوامر: IF input1 and input2 THEN output1 and output2 and output3. مبنية

كما هو مبين في الجداول (5)، (6)، (7):

جدول (5): قاعدة الأوامر للريج التناسبي K_p

| ΔE E | NL | NM | NS | Z | PS | PM | PL |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NL | VL | VL | VB | VB | MB | MB | M |
| NM | VL | VL | VB | MB | MB | M | MS |
| NS | VB | VB | MB | MB | M | MS | MS |
| Z | VB | VB | MB | M | MS | VS | VS |
| PS | MB | MB | M | MS | MS | VS | VS |
| PM | MB | M | MS | MS | VS | Z | Z |
| PL | M | MS | MS | VS | VS | Z | Z |

جدول (6): قاعدة الأوامر للربح التكاملي Ki

| $\frac{\Delta E}{E}$ | NL | NM | NS | Z | PS | PM | PL |
|----------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NL | Z | Z | VS | VS | MS | M | M |
| NM | Z | Z | VS | MS | MS | M | M |
| NS | Z | VS | MS | MS | M | MB | MB |
| Z | VS | VS | MS | M | MB | VB | VB |
| PS | MS | MS | M | MB | MB | VB | VL |
| PM | M | M | MB | MB | VB | VL | VL |
| PL | M | M | MB | VB | VB | VL | VL |

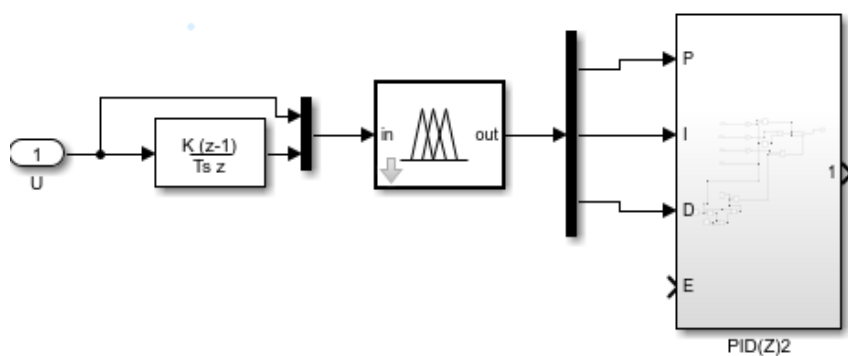
جدول (7): قاعدة الأوامر للربح التفاضلي Kd

| $\frac{\Delta E}{E}$ | NL | NM | NS | Z | PS | PM | PL |
|----------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NL | MB | MS | Z | Z | Z | VS | MB |
| NM | MB | MS | Z | Z | Z | VS | MB |
| NS | M | MS | VS | VS | MS | MS | M |
| Z | M | MS | MS | MS | MS | MS | M |
| PS | M | M | M | M | M | M | M |
| PM | VL | MS | MB | MB | MB | MB | VL |
| PL | VL | VB | VB | VB | MB | MB | VL |

انطلاقاً من المعادلة (5) المعبرة عن معادلة الـ PID، نصمم بنية المتحكم fuzzy PID الموضحة في

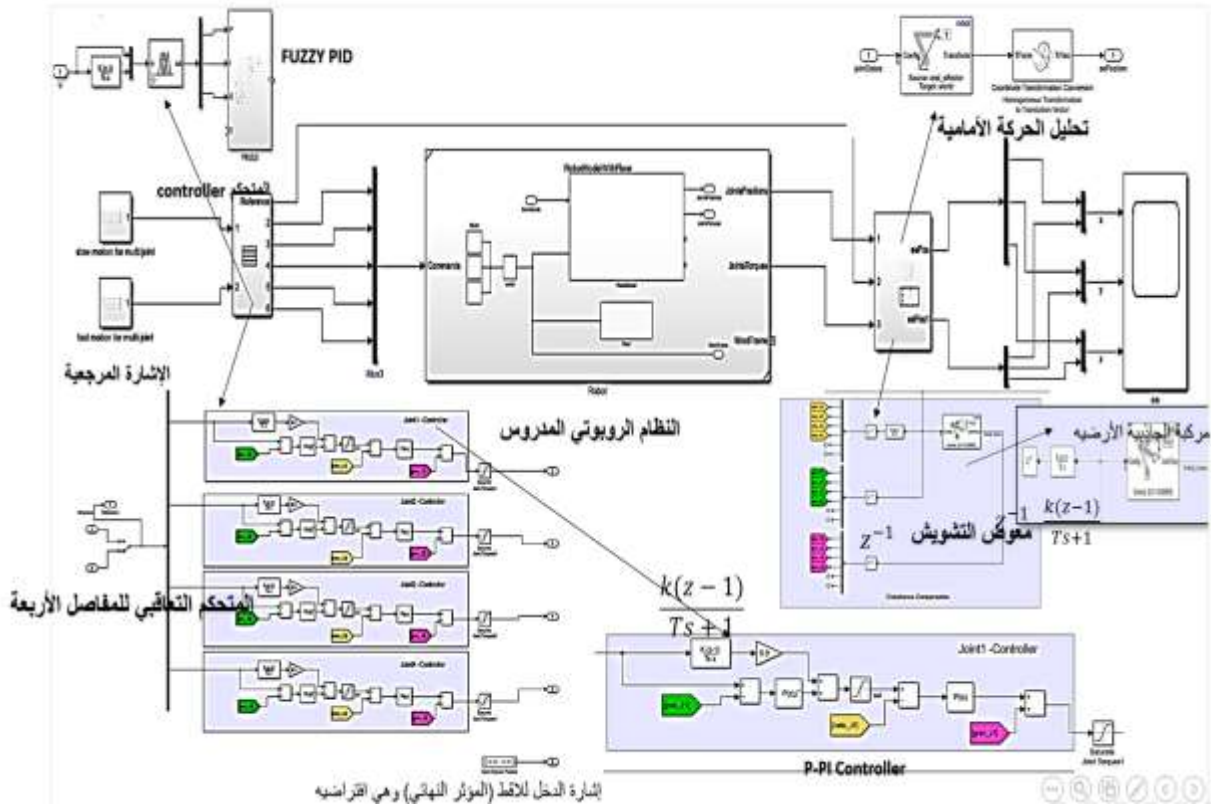
الشكل (8):

$$\left(P + I.T_s \cdot \frac{1}{z-1} + D \cdot \frac{N}{1+N.T_s \cdot \frac{1}{z-1}} \right) \cdot e(z) \quad (5)$$



الشكل (8): بنية متحكم الـ fuzzy PID.

يبين الشكل (9) النموذج الروبوتي والمتحكمات التي تم تصميمها ودراستها في بيئة MATLAB:



الشكل (9): النظام الروبوتي والمتحكمات التي تم تصميمها.

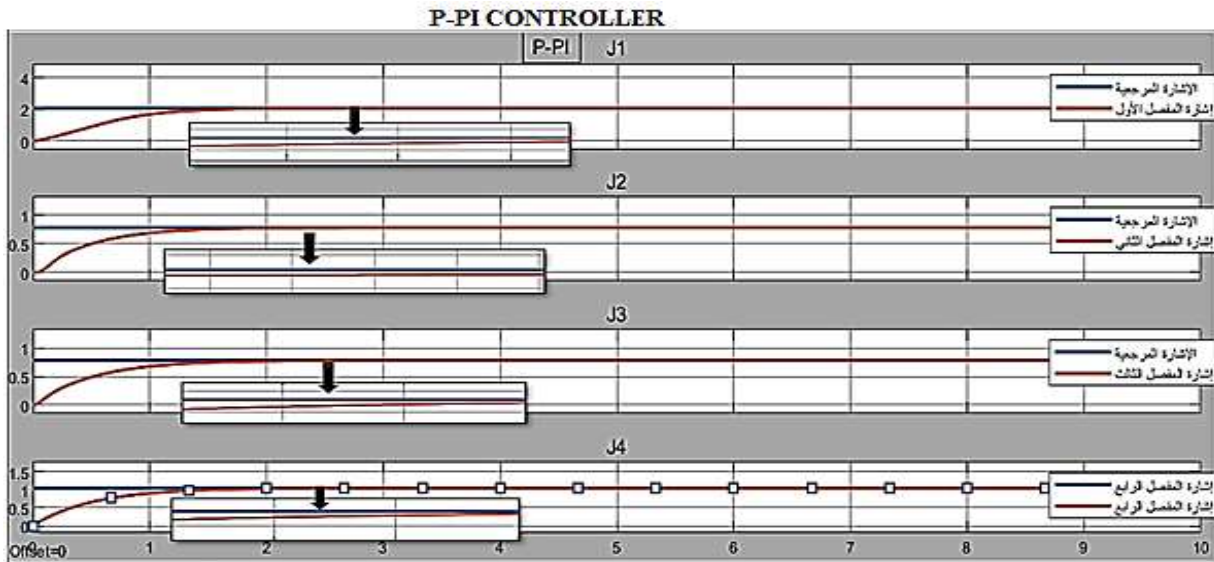
7. محاكاة النموذج الروبوتي المصمم:

1. المرحلة الأولى: اختبار متحكم الـ Fuzzy PID المصمم على النظام الروبوتي المدروس ومقارنته

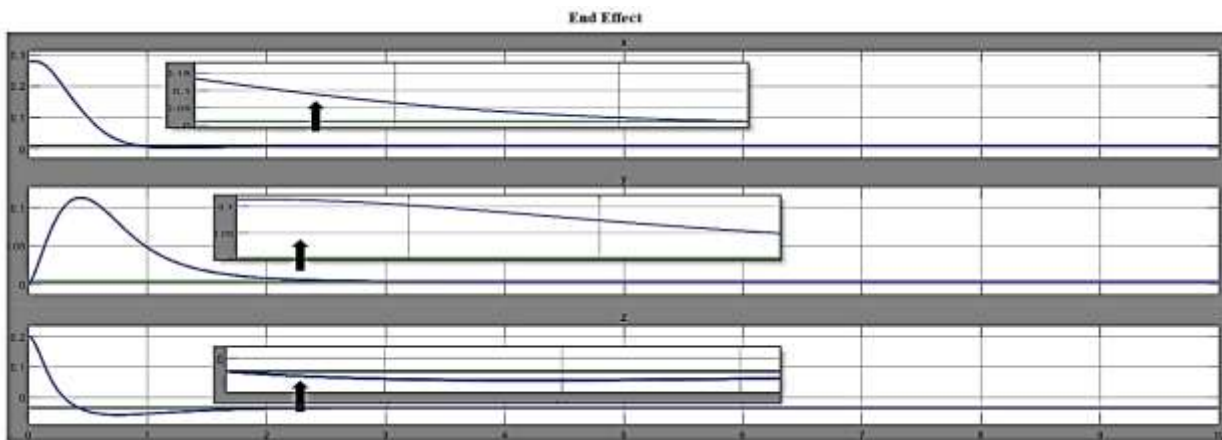
مع المتحكم التفاضلي P-PI التقليدي عند تطبيق دخل الخطوة الواحدة step ثابت:

البنية المحسنة للمتحكم التفاضلي التقليدي تبدي مناعة جيدة ضد التشويش والاضطرابات وتحقق أداء جيد و انحراف مقبول لتموضع المؤثر النهائي على المحاور x,y,z، كما هو واضح في الأشكال (10) ، (11) دون وجود تجاوز أعظمي في الإشارة، و خطأ استاتيكي 5% (كما هو موضح في الجدول(8)) وذلك عند دخل واحد حيث الدخل هو عبارة عن الموضع الزاوي (rad).

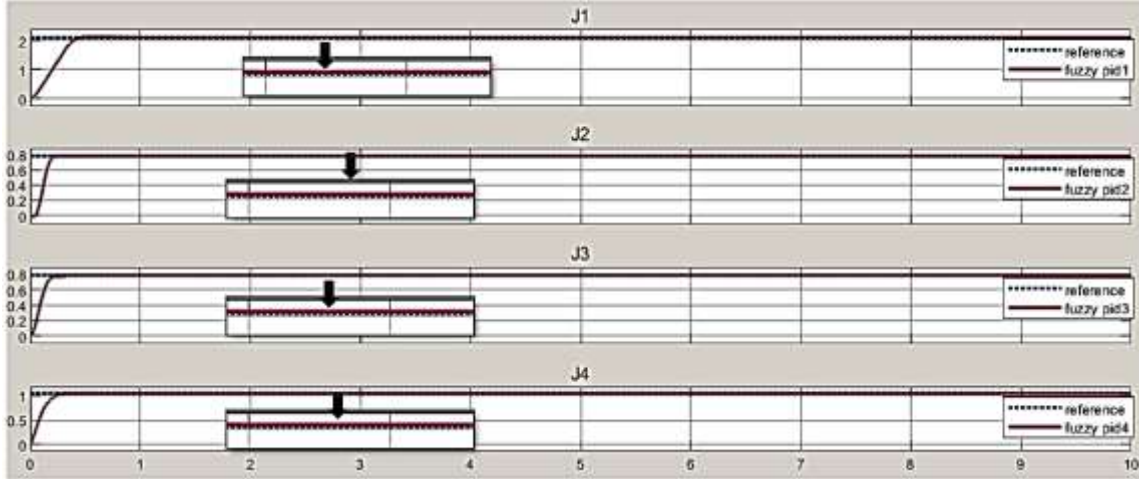
بينما حقق المتحكم اللاخطي المصمم Fuzzy PID مناعه عالية اتجاه التشويش و الاضطرابات، رغم أننا لم نعتد سوي على التحكم بحلقة الموضع و تظهر نتائجه كما هو مبين في الأشكال (12)،(13) دون وجود تجاوز أعظمي في الإشارة و خطأ استاتيكي 0% ومقدار انحراف 0% لتموضع المؤثر النهائي على المحاور x,y,z (كما هو موضح في الجدول(8)).



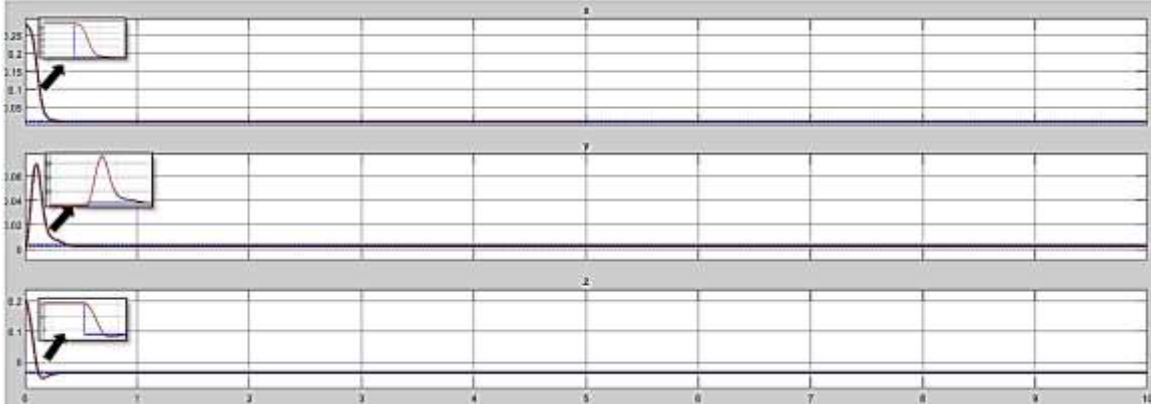
الشكل(10): استجابة النظام الروبوتي للمتحكم التقليدي عند تطبيق دخل ثابت.



الشكل(11): تموضع المؤثر النهائي عند تطبيق المتحكم التقليدي وفق المحاور الإحداثية x,y,z.



الشكل(12): استجابة النظام الروبوتي للمتحكم الإشرافي عند تطبيق دخل ثابت.



الشكل (13): تموضع المؤثر النهائي عند تطبيق المتحكم الإشرافي وفق المحاور الإحداثية x,y,z.

جدول (8): مقارنة بين قيم بارامترات الاستجابة الزمنية للمفاصل عند تطبيق المتحكمات fuzzy PID /P-PI.

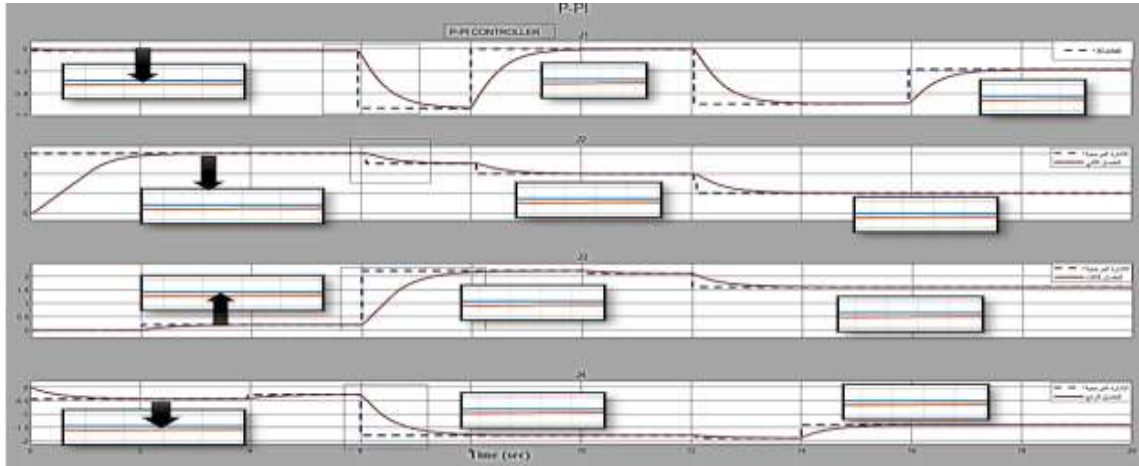
| البارامترات | قيم استجابة المتحكم fuzzy PID: | قيم استجابة المتحكم P-PI: |
|--|--------------------------------|---------------------------|
| زمن الصعود Rise Time | 0s | 0.15s |
| زمن الاستقرار Stability Time | 0.2s | 1s |
| التجاوز الأعظمي Overshoot | 0% | 0% |
| الخطأ الستاتيكي % ess | 0% | 3% |
| خطأ انحراف موضع المؤثر النهائي عن محاور الإحداثيات x,y,z (خطأ التموضع) | 0% | 5% |

2. المرحلة الثانية تطبيق دخل متغير: تمت الدراسة عند دخل متغير (عند نقاط لها تسارعات غير صفرية)

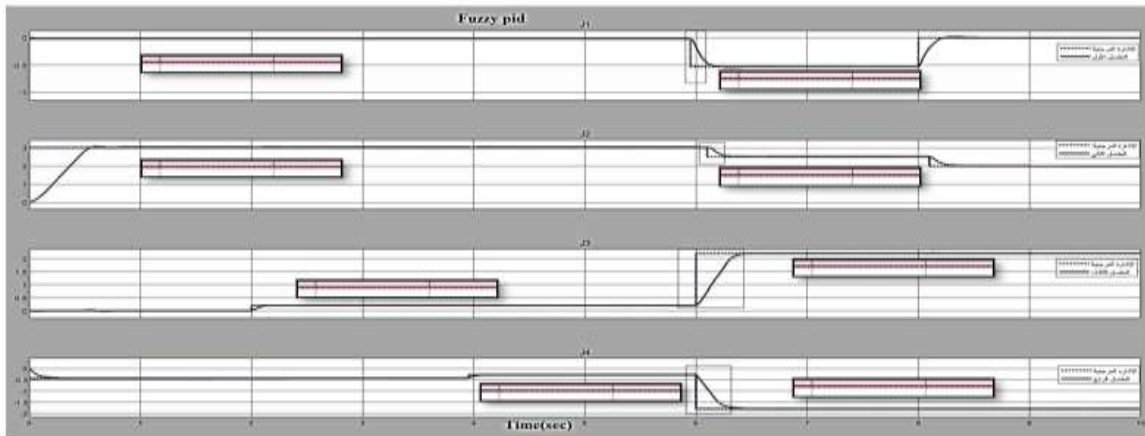
باستخدام صندوق signal builder ، ينتج لدينا أربع إشارات موزعه على أربع مفاصل:

نلاحظ عند تطبيق خرج المتحكم التقليدي على مفاصل الذراع الروبوتية وجود خطأ ثابت على طول الاستجابة ودوران المفصل بزوايا أكبر من المطلوبة لمدة معينة، كما هو موضح في الشكل(14) وتجاوز أعظمي 55% وخطأ انحراف موضع المؤثر النهائي عن محاور الإحداثيات x,y,z (خطأ التموضع) 0.41%,0.62% عند تطبيق دخل متغير كما هو موضح في الشكل (16-b).

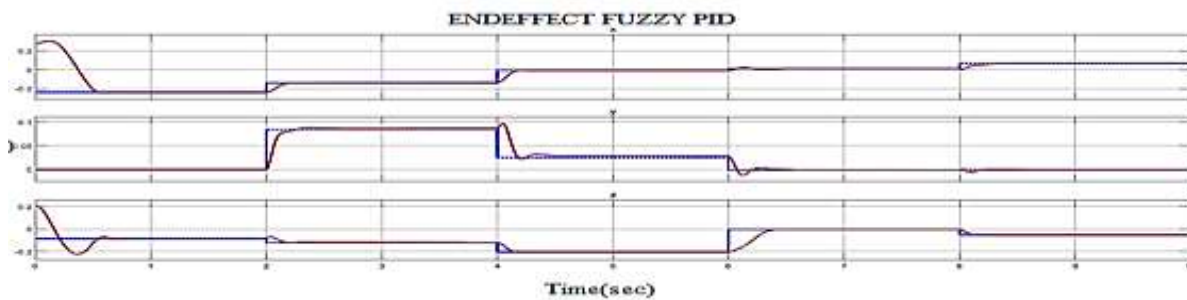
أما بالنسبة لتطبيق خرج المتحكم اللاخطي Fuzzy PID فقد حقق خطأ صفري على طول الإستجابة ودوران المفاصل بزاوية قريبة من المطلوبة ضمن حد مقبول ولمدة زمنية صغيرة، كما هو موضح في الشكل (15)، وتجاوز اعظمي صغير 11% وخطأ انحراف موضع المؤثر النهائي عن محاور الإحداثيات x,y,z (خطأ التموضع) 0.05%, 0.02%, 0.04% عند تطبيق دخل متغير كما هو موضح في الشكل (16-a).



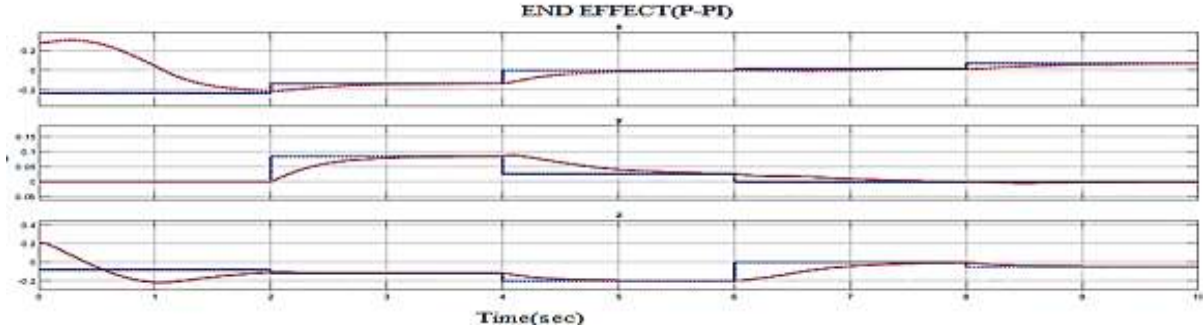
الشكل (14): استجابة النظام الروبوتي للدخل المتغير لكل مفصل عند إضافة المتحكم التقليدي.



الشكل (15): استجابة النظام الروبوتي للدخل المتغير لكل مفصل عند إضافة المتحكم اللاخطي الضبابي المصمم.



الشكل (16-a): تموضع المؤثر النهائي عند تطبيق المتحكم الضبابي وفق المحاور الإحداثية x,y,z .

الشكل (16-b): تموضع المؤثر النهائي عند تطبيق المتحكم التقليدي وفق المحاور الإحداثية x, y, z ..

جدول (9): بارامترات الاستجابة الزمنية للمفاصل عند تطبيق دخل متغير.

| البارامترات | قيم استجابة المتحكم fuzzy PID: | قيم استجابة المتحكم P-PI: |
|--|--------------------------------|---------------------------|
| زمن الصعود Rise Time | 0.1s | 0.9s |
| زمن الاستقرار Stability Time | 0.2s | 1.5s |
| التجاوز الأعظمي Overshoot | 11% | 55% |
| الخطأ الستاتيكي ess% | 0% | 5% |
| خطأ انحراف موضع المؤثر النهائي عن محاور الإحداثيات x, y, z (خطأ التموضع) | 0.04%, 0.02%, 0.05% | 0.41%, 0.62%, 0.85% |

1.7 النتائج:

انطلاقاً من نتائج المحاكاة للنموذج الروبوتي المصمم توصلنا إلى النتائج التالية:

1. يحتاج المتحكم P-PI حلقتي تحكم (الموقع، السرعة) ومعوّض تشويش للوصول إلى أداء جيد وهذا يعني كلف إضافية لتنفيذ حلقات التحكم بالإضافة للحساسات المطلوبة.
2. يتمتع المتحكم (Fuzzy PID) بمناعة عالية مقاومة للتشويش والاضطرابات التي تؤثر على الأذرع الروبوتية التسلسلية والناجمة عند حركة المفاصل دون الحاجة لمعوّض تشويش وبحلقة تحكم واحدة فقط خاصة بالموقع.
3. تم إلغاء التجاوز الأعظمي، الخطأ الستاتيكي وخطأ تموضع المؤثر النهائي باستخدام المتحكم (Fuzzy PID) عند دخل ثابت.
4. كما حقق المتحكم (Fuzzy PID) ملاحقة جيدة للمسار المطلوب، وتحسين الاستجابة الزمنية لمفاصل الذراع الروبوتية حيث قلل من قيمة التجاوز الأعظمي من 55% لـ 11% وإلغاء الخطأ الستاتيكي وتحقيق خطأ مقبول لتموضع المؤثر النهائي 0.05%, 0.02%, 0.04% وذلك عند تطبيق دخل متغير.

8. الخاتمة والتوصيات:

بينت نتائج البحث أن استخدام المتحكم Fuzzy PID يحسن استقرار الأنظمة الروبوتية (الأذرع الروبوتية التسلسلية) مقارنةً باستقرارها عند استخدام متحكم تقليدي، حيث حسّن المتحكم الضبابي المصمم الأداء الديناميكي حيث استطاع تقليل الاضطرابات overshoot الناتجة عن حركة المفاصل دون الحاجة لمعوّض تشويش وكذلك التقليل من الخطأ الستاتيكي وخطأ التموضع لحدود مقبولة قريبة من الصفر عند تطبيق دخل متغير وبالاعتماد على حلقة تحكم واحدة فقط خاصة بالموقع مقارنة بنظيره التقليدي (P-PI).

نقترح تصدير خوارزمية التحكم السابقة إلى الحواسيب المصغرة "raspberry pi" بهدف التنفيذ في الوقت الحقيقي بشكل مستقل بالاعتماد على تقنية (PIL) PROCESSOR IN LOOP وتطبيقها على نموذج روبوت حقيقي.

كما نقترح تطبيق المتحكم الضبابي مع الخوارزميات التزامنية عند العمل مع أكثر من ذراع روبوتية، كما نوصي باستخدام المتحكم الضبابي الصلب ك-fuzzy Back stepping لتقليل ظاهرة تجاوزات الحالة العابرة التي ترافق المتحكم (FSC).

8. المراجع:

[1] Sooria, Dastres, Arezoo, Jough. (2024). *Intelligent robotic systems in Industry 4.0*. Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, 4(3), p2-3.

[2] Fareh, Khadraoui, Abdallah, Baziyad, Bettayeb. (2021). *Active disturbance rejection control for robotic systems*.80(1), p102671.

[3] Zaiwu , Liping, Jianwan.(2021). *Feed-forward control of elastic-joint industrial robot based on hybrid inverse dynamic model*, Advances in Mechanical Engineering,13(9), p1-14.

[4] Issa, Jokhdar, Nawlo. (2017). *Finding a Compact Dynamic Mathematical Model Derivation for nDoFs Arm Robot: Electronic System Converters*. Aleppo University, Master.

[5] Omran, Abd Alrahman. (2019). *Improve control performance of 6-dof industrial robot arm using Fuzzy Supervisory Control (FSC)*, Tartous Journal, April 2019, p 1-18.

[6] Eslami, Chatraei, Ebrahimi. (2023). *Implementation of Fuzzy-PID Controller on Two-Link Robot*, Journal of Propulsion Technology, 44(6), p 893-907.

[7] Ting, Zaman, Ibrahim, Moubark. (2021). *Kinematic Analysis for Trajectory Planning of Open-Source 4-DoF Robot Arm*. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 12(6), p769-773.

[8] Giacaglia, Lamas. (2020). *Newton-Euler formulation of robotic manipulators. institution of Mechanical Engineering/ Tendencies in Mathematical Application and Computing* ,21(2), p 359-369.

[9] Spong, Hutchinson, Vidyasagar. (2024). *Robot Dynamics and Control*. springer, book 0-247.

[10] Borase, Maghade, Sondkar, Pawar. (2021). *A review of PID control, tuning methods and applications*. International Journal of Dynamics and Control, 9(1), p818-827.

[11] Eslami, Chitrali, Ebrahimi. (2023). *Implementation of Fuzzy-PID Controller on Two-Link Robot*. Journal of Propulsion Technology,44(6).p893-409.

[12] ROBTs, (2020). *(Open MANIPULATOR-X)*. (<https://emanual.robotis>). Access:12/1/2024.

[13] Laalou, Joukhdar, Alrouh. (2018). *Enhancement of Dynamic Performance of a Gripper Control System with an Arm Robot Incorporating Touch and Force Sensors*. Aleppo University, 44(6). p39-43.

[14] Al-Qahtani, Mohammed, Sunar. (2016). *Dynamics and Control of a Robotic Arm Having Four Links*, Arab J Sci Eng springer, 4(2). p1841-1852