

تحسين أداء التحكم في ذراع روبوت صناعي من ست درجات حرية باستخدام المتحكم الضبابي الإشرافي FSC

نزار عبد الرحمن*

حسين عمران**

(تاريخ الإيداع ٩ / ٧ / ٢٠١٩ . قبل للنشر ٢٤ / ١٠ / ٢٠١٩)

الملخص

تعد النمذجة والتحكم بالروبوتات الصناعية من المواضيع المهمة جداً في التطبيقات الصناعية، من أجل نقل النهاية المؤثرة للروبوت من موقع أولي إلى الموقع المطلوب بدقة وكفاءة، من حيث سرعة الاستجابة ودقة التنفيذ. جرى في هذا البحث تصميم ذراع روبوت صناعي مؤلف من ست درجات حرية باستخدام برنامج Solidwork، ثم تحويله إلى نموذج محاكاة Simulink ضمن بيئة MATLAB باستخدام الأداة البرمجية Simscape multibody. ثم التحكم به باستخدام نوعين من المتحكمات هما: المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID) ومتحكم الإشراف الضبابي (FSC). يقوم المتحكم بتوليد اشارات التحكم اللازمة لعمل المحركات الموصولة على مفاصل الروبوت حيث استخدمت محركات تيار مستمر (DC) في هذا البحث، يعتمد نظام التحكم على قياس قيمة الموقع الزاوي للمفاصل ويقوم بإلغاء الخطأ في حال وجوده. يناقش البحث في النهاية نتائج تطبيق كل من المتحكمين السابقين ومقارنة أداء التحكم من خلال مقياس الاستجابة الزمنية عند دخل ثابت ومتغير، حيث تبين النتائج أن استخدام متحكم FSC أفضل من المتحكم PID.

الكلمات المفتاحية: المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID) ، متحكم الإشراف الضبابي (FSC)، التصميم بمساعدة الحاسب (Computer-aided design).

* استاذ مساعد في قسم الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين.
** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين.

Improve control performance of 6-dof industrial robot arm using Fuzzy Supervisory Control (FSC)

Nizar Abd Alrahman*
Hussien Omran**

(Received 9 / 7 / 2019 . Accepted 24 / 10 / 2019)

ABSTRACT

Modeling and control of industrial robot are very important topics in industrial applications in order to transfer the end effector from the initial location to the desired location accurately and efficiently in terms of response speed and accuracy of implementation. In this research, an industrial robot arm of six-dof was designed using Solidwork software and then converted to simulink model within the MATLAB environment using Simscape multibody tool. After that, control it using two types of controllers: PID and FSC. The controller generates the necessary control signals for the operation of the DC motors that connected to joints. The control system in this research depends on the value of the angular location of the joints and eliminates the error if it exists. The research ultimately discusses the results of previous controller's implementation and compares the performance of the control through the time response scale at constant and variable input where the results show that the using of FSC controller is better than the PID controller.

Keywords: proportional–integral–derivative controller (PID), fuzzy supervisory controller (FSC), Computer Aided Design (CAD)

* Assistant professor – Department of mechatronics – Faculty of Mechanical and electrical engineering – Tishreen University

** M.Sc. student - Department of mechatronics – Faculty of Mechanical and electrical engineering – Tishreen University

مقدمة:

يعدّ التحكم في الحركة أمراً أساسياً للعديد من تطبيقات الروبوتات، حيث يتم نقل النهاية المؤثرة للروبوت من موقع أولي إلى الموقع المطلوب، يعتمد هذا التحكم اعتماداً أساسياً على وصف التحليل الحركي للروبوت، ويتم ذلك باستخدام طريقة شائعة وهي Denavit–Hartenberg [1].

اعتمدت أغلب الدراسات السابقة على المعادلات الديناميكية من أجل نمذجة الروبوت، واستخدم مفهوم المنطق الضبابي (FL) على مرحلتين في تحسين أداء ذراع الروبوت الصناعية. في المرحلة الأولى استخدم المتحكم الضبابي (FLC) كبديل عن PID. حيث أظهرت النتائج كفاءة (FLC) في الوصول الى الموقع المطلوب مع التخلص من تجاوز الهدف (overshoot) بالمقارنة مع متحكم PID [2]. في المرحلة الثانية تم الجمع بين ميزات (FLC) و PID باستخدام متحكم الإشراف الضبابي (FSC) من أجل توسيع قدرة المتحكمات الخطية على التعامل مع الأنظمة اللاخطية مثل أذرع الروبوتات [3]. وأخذ بعين الاعتبار أن تقنيات التحكم التي تعتمد على المنطق الضبابي تتأثر بعدد توابع الانتماء وشكلها في عملية التحكم [4][5].

يقدم البحث المقترح طريقة جديدة لنمذجة روبوت تسلسلي مؤلف من ست درجات حرية، من دون الاعتماد على المعادلات الديناميكية، حيث استُخدم (Simscape Multibody Link Toolbox) من أجل نقل التصميم الميكانيكي من Solidworks الى نموذج محاكاة ضمن Matlab [6]، وجرى التحكم به باستخدام المتحكم (FSC) الذي يعتمد على الخطأ ومشتق الخطأ من أجل ضبط بارمترات PID، ومن ثم مناقشة النتائج مع نتائج استخدام PID. ويمكن تلخيص مناحي البحث بالخطوات الآتية:

١- دراسة النموذج الحركي لروبوت. Kinematic model.

٢- تصميم الروبوت باستخدام SOLIDWORKS.

٣- نمذجة محرك DC motor model.

٤- تصميم خوارزميات التحكم باستخدام MATLAB.

٥- دراسة النتائج.

مشكلة البحث :

يعمل المتحكم (PID) في الأنظمة الخطية، وبالتالي هو غير مناسب للتحكم في الروبوت لكونه غير خطي، وبالتالي سنستخدم في هذا البحث متحكماً إشرافياً هو (FSC)، الذي يقوم بضبط بارمترات (K_p, K_I, K_D) لكي نحصل على متحكم لا خطي، وبالتالي تموضع أفضل وأدق للنهاية المؤثرة.

أهمية البحث:

تبرز أهمية البحث من الناحية الطبية في وصول النهاية المؤثرة للروبوت الى الموقع المطلوب بدقة، وهو أمر مهم ولاسيما في العمليات الجراحية؛ ومن الناحية الصناعية فإن بعض أنواع الروبوتات تستخدم للحام بالاحتكاك، فمن المهم وضع النهاية المؤثرة في الموقع المطلوب وتأمين استقرارها. كما أن نمذجة الروبوت قبل التنفيذ على الواقع يوفر الوقت والمال. ويمكن أيضاً أن تعمم هذه الدراسة على جميع أنواع الروبوتات التسلسلية.

أولاً: نموذج الروبوت :

جرى اعتماد تصميم الروبوت ABB IRB 140 ذي ست درجات حرية، من أجل نمذجته في هذا البحث، حيث يستخدم تحليل Denavit-Hartenberg (D-H) من أجل دراسة الروبوت كينماتيكياً [7]، وتقسم الدراسة الى:

- نموذج أمامي (Forward Kinematic): حيث تعطى قيم زوايا دوران المفاصل ويطلب حساب الموقع.

- نموذج عكسي (Inverse Kinematics): حيث تعطى إحداثيات الموقع ويطلب حساب زوايا الدوران للمفاصل.

يبين الجدول (1) بارمترات جدول (D-H) للروبوت ABB IRB 140 الذي تجري دراسته.

جدول (1) -جدول DH للروبوت ABB IRB 140

Axis (i)	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	$d_1 = 352$	θ_1
2	-90	$a_1 = 70$	0	$\theta_2 - 90$
3	0	$a_2 = 360$	0	θ_3
4	-90	0	$d_4 = 380$	θ_4
5	90	0	0	θ_5
6	-90	0	0	θ_6

من خلال الجدول يمكن أن نحصل على مصفوفة التحويل 0T_6 والتي تحوي على الدوران والموقع للنهاية

المؤثرة.

$${}^0T_6 = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_X \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_Y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

تعطى عناصر المصفوفة وفق المعادلات:

$$R_{11} = c_1 c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - c_1 s_{23} s_5 c_6 + s_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \quad (1)$$

$$R_{12} = c_1 c_{23} (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) + c_1 s_{23} s_5 s_6 - s_1 (s_4 c_5 s_6 - c_4 c_6) \quad (2)$$

$$R_{13} = -c_1 c_{23} c_4 s_5 - c_1 s_{23} c_5 - s_1 s_4 s_5$$

(3)

$$R_{21} = s_1 c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_1 s_{23} s_5 c_6 - c_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \quad (4)$$

$$R_{22} = s_1 c_{23} (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) + s_1 s_{23} s_5 s_6 + c_1 (s_4 c_5 s_6 - c_4 c_6) \quad (5)$$

$$R_{23} = -s_1 c_{23} c_4 s_5 - s_1 s_{23} c_5 + c_1 s_4 s_5 \quad (6)$$

$$R_{31} = -s_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - c_{23} s_5 c_6 \quad (7)$$

$$R_{32} = -s_{23} (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) + c_{23} s_5 s_6 \quad (8)$$

$$R_{33} = s_{23} c_4 s_5 - c_{23} c_5 \quad (9)$$

$$X = -d_4 c_1 s_{23} + c_1 (c_2 a_2 + a_1) \quad (10)$$

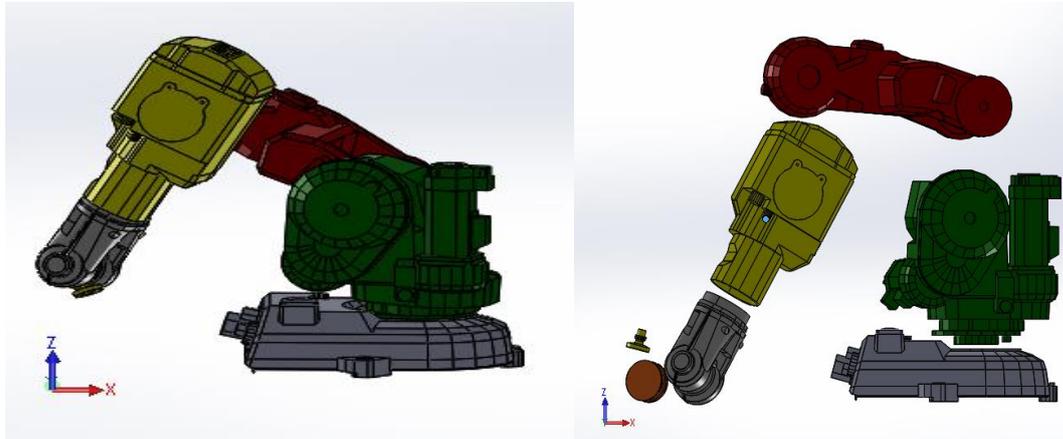
$$Y = -d_4 s_1 s_{23} + s_1 (c_2 a_2 + a_1) \quad (11)$$

$$Z = -s_2 a_2 + d_1 - d_4 c_{23} \quad (12)$$

كما ذكرنا سابقا في النموذج الأمامي، نعوض قيم الزوايا في (10) (11) (12) ونحصل على الموقع؛ أما بالنسبة إلى النموذج العكسي فيعطى الموقع والاتجاه للنهاية المؤثرة، وبالتالي فإن المصفوفة 0T_6 تصبح معلومة. تستخدم إحداثيات الموقع في حساب الزوايا (θ_1) (θ_2) (θ_3) من العلاقات (10) (11) (12). ونحصل على قيم الزوايا (θ_4) (θ_5) (θ_6) من خلال المقارنة بين المصفوفة 0T_6 المعطاة التي نحصل عليها بتعويض الموقع وزوايا الاتجاه في الشكل العام لمصفوفة التحويل ومصفوفة المجاهيل 0T_6 التي نحصل عليها من جداء مصفوفات التحويل للمفاصل (${}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6$) وذلك بعد تعويض قيم (θ_1) (θ_2) (θ_3).

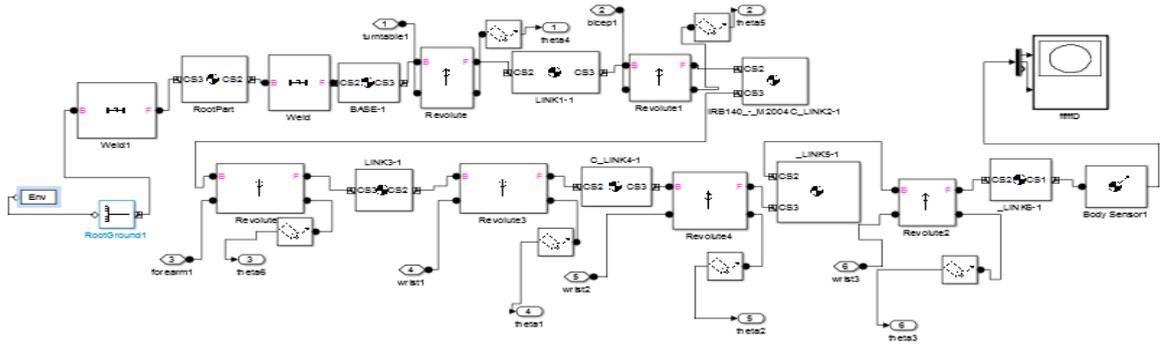
ثانياً: تصميم الروبوت ونمذجته :

تجري محاكاة الروبوت باستخدام برنامج Solidworks، ومنصة المحاكاة Simulink التي يوفرها برنامج Matlab؛ تصمم في البداية الأجزاء في Solidworks، ثم يجري تجميعها كما يوضح الشكل (1).



الشكل (1) - أجزاء الروبوت ABB IRB 140 وتجميعها ضمن Solidworks.

يتم نقل النموذج التصميمي الميكانيكي من Solidworks الى نموذج محاكاة برمجية ضمن MATLAB باستخدام أداة برمجية تكاملية هي Simscape Multibody، حيث تسمح لبرنامج Solidworks بتحليل الأجزاء التجميعية للروبوت وتحويلها الى ملفات (STL) ذات أبعاد حقيقية، ثم إدخالها الى Simulink على شكل بلوكات برمجية تعبر عن الوصلات (أبعاد وكتلة) والمفاصل (نوع الحركة وقيم الدخل). يوضح الشكل (2) نمذجة الروبوت باستخدام Simulink مع المداخل والمخارج.



الشكل (2) - نموذج Simulink الناتج تنفيذ Simscape Multibody للمناول ABB IRB 140.

ثالثاً: نمذجة محرك التيار المستمر:

محرك التيار المستمر DC Motor يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية باستخدام التيار المستمر. يتميز المحرك بحركة دورانية مباشرة، وعند دمجها مع الجزء الميكانيكي، يمكنه توفير الحركة للمفصل المطلوب.

اعتماداً على العلاقتين (13) (14) يمكن نمذجة محرك DC [8] [9]

$$L \frac{di}{dt} = V - K_e \frac{d\theta}{dt} - Ri \quad (13)$$

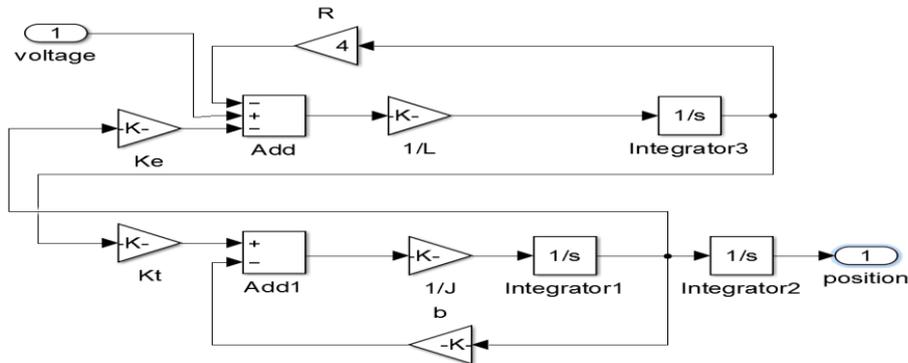
$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = k_t i - b \frac{d\theta}{dt} \quad (14)$$

يوضح الجدول (2) بارامترات المحرك dc وقيمها.

الجدول (2) - بارامترات محرك التيار المستمر.

Parameters	Symbol	Value	Unit
Moment of inertia	J	3.2284E-6	kg.m ²
Viscous friction constant	b	3.5077E-6	Nms
Electromotive force constant	Ke	0.0274	V/rad/sec
Motor torque constant	Kt	0.0274	Nm/Amp
Electric resistance	R	4	Ohm
Electric inductance	L	2.75E-6	H

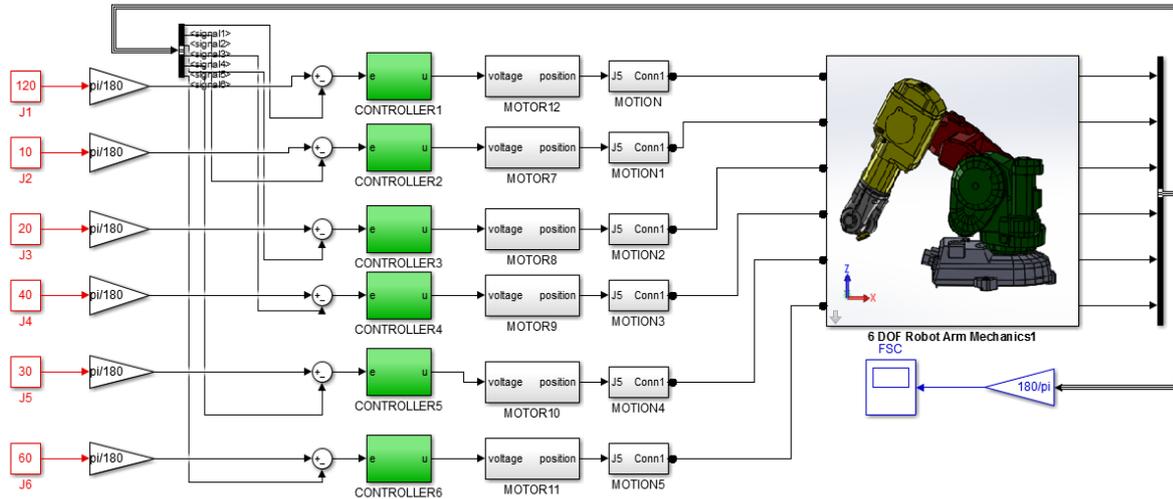
يوضح الشكل (3) نمذجة محرك DC باستخدام Simulink:



الشكل (3) - نموذج Simulink لدارة محرك DC.

رابعاً: خوارزمية التحكم :

يستخدم البحث حلقة تحكم مغلقة مؤلفة من الروبوت وستة متحكمات، لكل مفصل متحكم خاص به وستة مداخل مرجعية هي زوايا الدوران كما يوضح الشكل (4):



الشكل (4) - النموذج الكامل لدارة التحكم مع نموذج الروبوت.

1-4 متحكم PID:

يعتمد المتحكم PID على الخطأ (E) بين الدخل المرجعي والقيمة التي نحصل عليها من الحساسات ومن ثم يولد إشارة التحكم حيث تعطى علاقة المتحكم PID وفق:

$$G_{PID}(E) = K_P + \frac{K_I}{E} + K_D E \quad (15)$$

حيث: E - مقدار الخطأ، (K_P تناسبي K_I تكاملي K_D تفاضلي)

استناداً إلى ميزات المتحكم PID يجب اتباع القوانين الآتية [10] وهي:

1- إذا كان الخطأ (E) كبيراً: من أجل تسريع الاستجابة وتجنب قيمة عالية لتجاوز الهدف

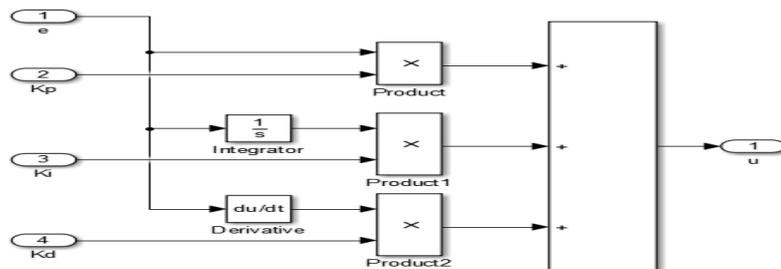
(Overshoot)، تعطى قيمة K_P كبيرة وقيمة كل من K_I و K_D صغيرة .

2- أما إذا كان الخطأ (E) صغيراً، من أجل الحفاظ على خطأ صغير ومنع التذبذبات الناتجة عن

قيمة كبيرة لتجاوز الهدف (Overshoot)، نقلل قيمة K_P ونجعل K_I صغيراً و K_D معتدلاً.

باستخدام العلاقة (15) يمكن نمذجة المتحكم PID في بيئة Simulink كما يوضح الشكل (5) حيث

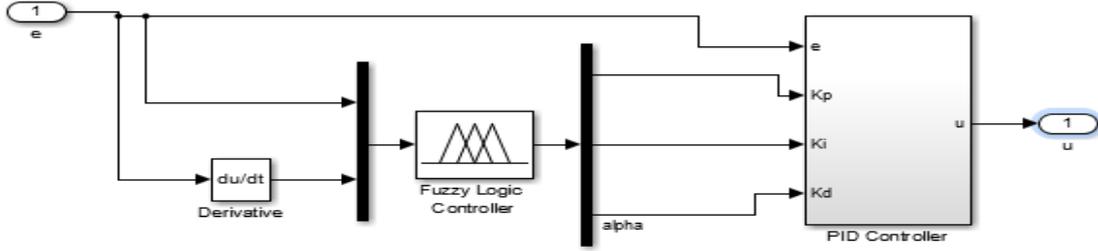
تعطى قيم البارامترات (K_P, K_I, K_D):



الشكل (5) - نموذج متحكم PID.

2-4 المتحكم الإشرافي FSC:

تعتمد القاعدة العامة المتبعة في المتحكم PID على التجريب وعلى متغير واحد (E) مما يجعلها معقدة وتقليدية. لكن يمكن استخدامها كأساس في تصميم متحكم ضبابي إشرافي (FSC). يعتمد المتحكم (FSC) في ضبط قيم البارامترات (K_p, K_I, K_D) على متغيرين هما الخطأ (E) ومشتق الخطأ (dE) وعلى مجموعة من القواعد الضبابية التي تربط الدخل مع الخرج. يوضح الشكل (6) المتحكم (FSC) في بيئة Simulink:



الشكل (6) - المتحكم (FSC) في بيئة Simulink.

- Derivative: نحصل في خرجه على مشتق الخطأ.
- Fuzzy Logic Controller: يحول قيم الدخل الواضحة الى قيم ضبابية وذلك عن طريق مجموعة من توابع الانتماء ، ويتم فيه تحديد القواعد التي تربط كل من الخرج والدخل الضبابيين .

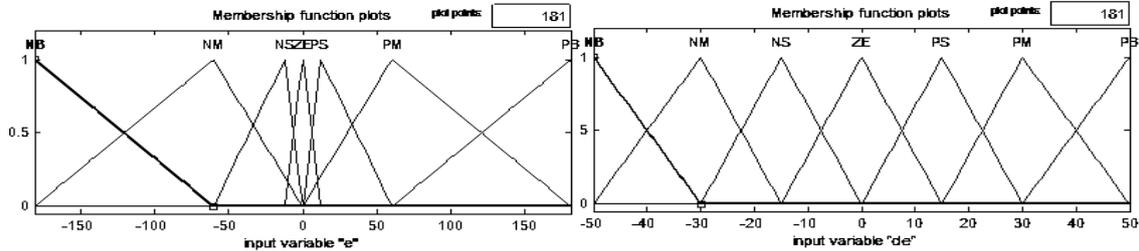
- تتم إزالة الضبابية للخرج (Defuzzification) باستخدام طريقة مركز الثقل center of gravity

(COG) [11]. تعطى إشارة التحكم بالعلاقة:

$$U = \frac{\sum_{i=m}^m \mu(x_i) \cdot x_i}{\sum_{j=m}^m \mu(x_i)} \quad (16)$$

تتراوح قيمة الدخل (e) بين قيمة كبيرة سالبة (-180) وقيمة كبيرة موجبة ($+180$) تكون توابع الانتماء على شكل مثلث ذات حساسية جيدة للدخل . كما يوضح الشكل (7-a). أما بالنسبة إلى الدخل الثاني (dE) تتراوح قيمته بين قيمة كبيرة سالبة (-50) وقيمة كبيرة موجبة ($+50$) وتكون توابع الانتماء أيضا" على شكل مثلث كما في الشكل (7-b)

(7)

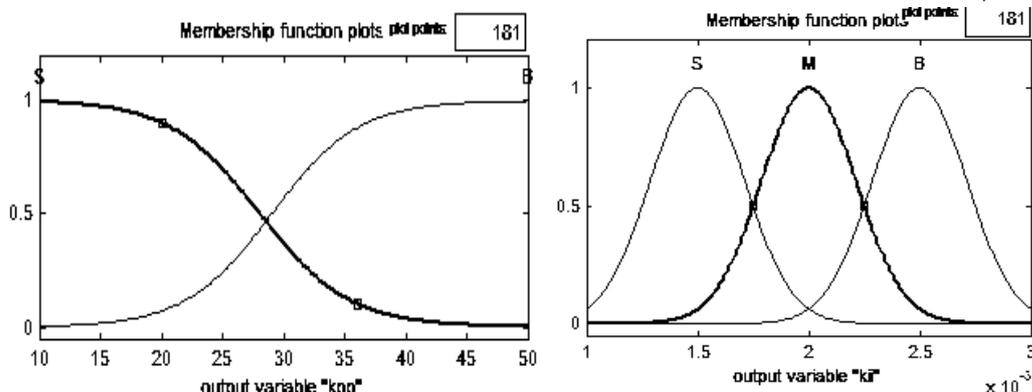


الشكل (7-a) : توابع الانتماء للخطأ (e)

الشكل (7-b): توابع الانتماء لمشتق الخطأ (dE)

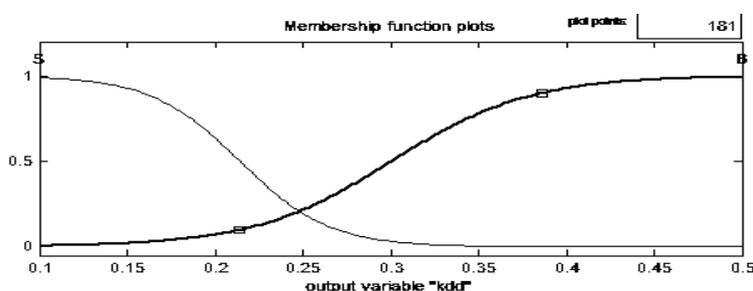
تتراوح قيمة الخرج (K_{pp}) بين قيمة صغرى (10) وقيمة كبيرة (50) لذلك تكون توابع الانتماء من الشكل (Sigmoid) كما يوضح الشكل (8-a). تتراوح قيمة الخرج (K_{II}) بين قيمة صغرى (1×10^{-3}) وقيمة كبيرة (3×10^{-3}) حيث تكون توابع الانتماء سلسة من الشكل (gauss) كما يوضح الشكل (8-b). تتراوح قيمة الخرج

بين قيمة صغرى (0.1) وقيمة كبيرة (0.5) حيث تكون توابع الانتماء من الشكل (Sigmoid) كما يوضح الشكل (8-c).



الشكل (8-a) : توابع الانتماء للخروج K_{PP}

الشكل (8-b): توابع الانتماء للخروج K_{II} .



الشكل (8-c) : توابع الانتماء للخروج K_{dd} .

- يتم ربط الدخل مع الخرج عن طريق آلية استدلال وهي في هذا البحث (Mamdani)
- بما أنه لدينا دخلان لكل منهما (7) توابع انتماء بالتالي لدينا (49) قاعدة تكتب وفق (Mamdani)

على الشكل الآتي [10]:

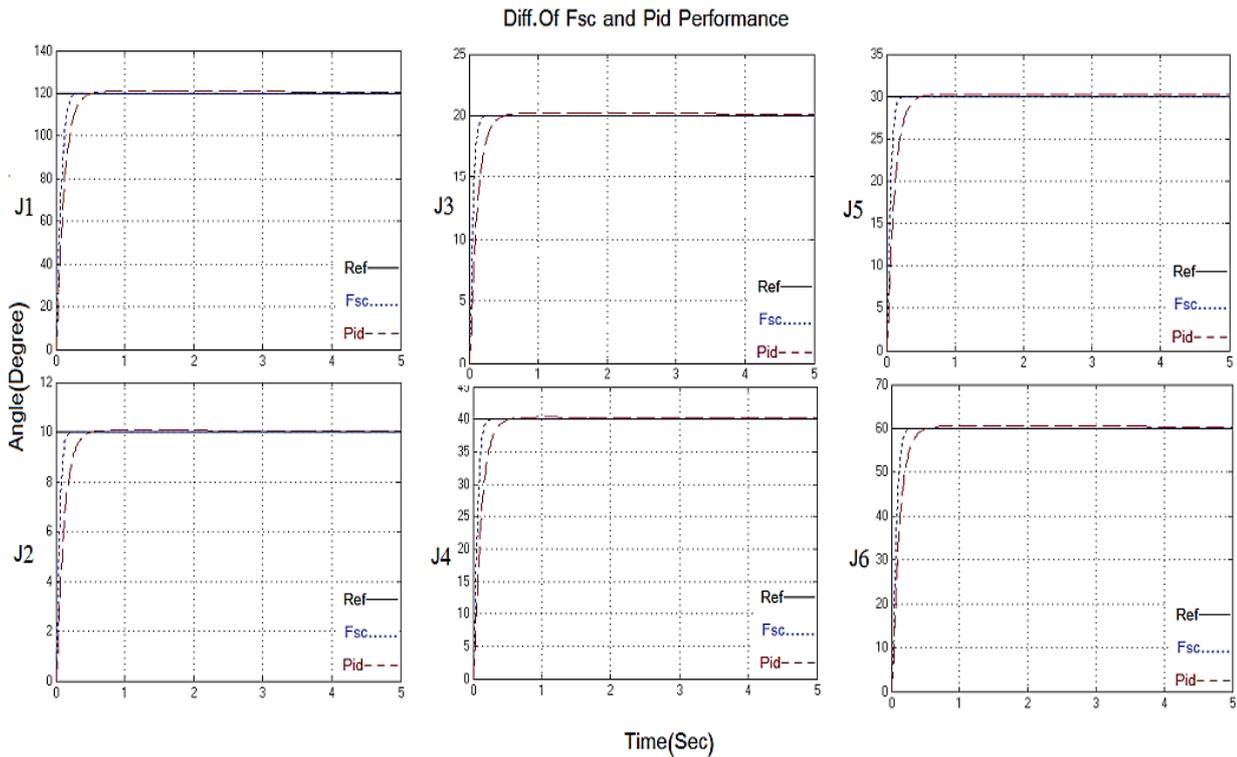
الجدول (3) - عدد من القواعد المستخدمة ضمن المنطق الضبابي

1. If (e is NB)	And	(edot is NB)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
2. If (e is NB)	And	(edot is NM)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
3. If (e is NB)	And	(edot is NS)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
4. If (e is NB)	And	(edot is ZE)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
5. If (e is NB)	And	(edot is PS)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
6. If (e is NB)	And	(edot is PM)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
7. If (e is NB)	And	(edot is PB)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
8. If (e is NM)	And	(edot is NB)	Then	(kpp is S)	(kii is M)	(kdd is B)
9. If (e is NM)	And	(edot is NM)	Then	(kpp is B)	(kii is M)	(kdd is B)
10. If (e is NM)	And	(edot is NS)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
11. If (e is NM)	And	(edot is ZE)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
12. If (e is NM)	And	(edot is PS)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)

13.	If (e is NM)	And	(edot is PM)	Then	(kpp is B)	(kii is M)	(kdd is B)
14.	If (e is NM)	And	(edot is PB)	Then	(kpp is S)	(kii is M)	(kdd is B)
15.	If (e is NS)	And	(edot is NB)	Then	(kpp is S)	(kii is B)	(kdd is B)
16.	If (e is NS)	And	(edot is NM)	Then	(kpp is S)	(kii is M)	(kdd is B)
17.	If (e is NS)	And	(edot is NS)	Then	(kpp is B)	(kii is M)	(kdd is B)
18.	If (e is NS)	And	(edot is ZE)	Then	(kpp is B)	(kii is S)	(kdd is S)
19.	If (e is NS)	And	(edot is PS)	Then	(kpp is B)	(kii is M)	(kdd is B)
20.	If (e is NS)	And	(edot is PM)	Then	(kpp is S)	(kii is M)	(kdd is B)
21.	If (e is NS)	And	(edot is PB)	Then	(kpp is S)	(kii is B)	(kdd is B)
22.	If (e is ZE)	And	(edot is NB)	Then	(kpp is S)	(kii is B)	(kdd is B)
23.	If (e is ZE)	And	(edot is NM)	Then	(kpp is S)	(kii is B)	(kdd is B)
24.	If (e is ZE)	And	(edot is NS)	Then	(kpp is S)	(kii is M)	(kdd is B)
25.	If (e is ZE)	And	(edot is ZE)	Then	(kpp is B)	(kii is M)	(kdd is B)
26.	If (e is ZE)	And	(edot is PS)	Then	(kpp is S)	(kii is M)	(kdd is B)
27.	If (e is ZE)	And	(edot is PM)	Then	(kpp is S)	(kii is B)	(kdd is B)
28.	If (e is ZE)	And	(edot is PB)	Then	(kpp is S)	(kii is B)	(kdd is B)
29.	If (e is PS)	And	(edot is NB)	Then	(kpp is S)	(kii is B)	(kdd is B)

خامساً: النتائج والمناقشة :

تمت دراسة النتائج عند دخل ($\theta_1=120^\circ, \theta_2=10^\circ, \theta_3=20^\circ, \theta_4=40^\circ, \theta_5=30^\circ, \theta_6=60^\circ$) على الروبوت باستخدام بيئة Simulink. جرى ضبط بارامترات المتحكم PID تجريبياً (بالتكرار) وفق: ($K_P = 30, K_I =$) لجميع المفاصل. يقوم المتحكم FSC بضبط بارامترات PID وفق ($K_P = 38.67, K_I =$) وذلك بحسب قيمة الخطأ ومشتق الخطأ. يوضح الشكل (9) الاستجابة الزمنية عند تطبيق متحكم FSC و PID على كل مفاصل مع مقارنتها بالدخل المرجعي.



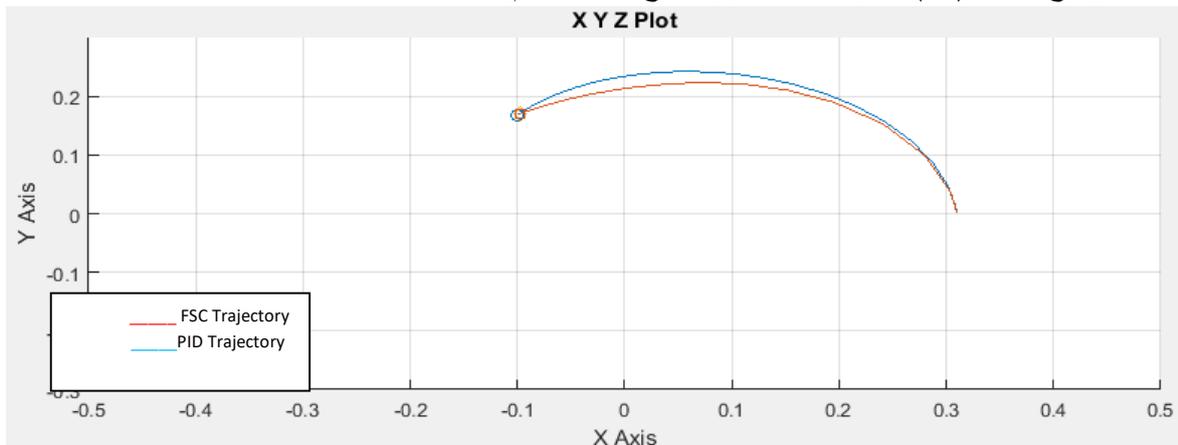
الشكل (9) -الدخل المرجعي Ref. والخرج باستخدام PID و FSC

يوضح الجدول (4) مقارنة بين قيم الاستجابة لكلا المتحكمين.

الجدول (4) - بارمترات الخرج للمتحكمين PID و FSC

	PID	FSC
Overshoot	0.013	0
Rising Time	0.23	0.11
Steady state error	0.05	0.0002

يوضح الشكل (10) مسار النهاية المؤثرة الناتج عن استخدام المتحكمين:



الشكل (10) - مسار النهاية المؤثرة عند استخدام كل من المتحكمين عند دخل ثابت.

يبين الجدول (5) إحداثيات الموقع المطلوب (Desired position (P)، والنهاية المؤثرة (آخر نقطة وصل إليها

المسار) عند استخدام كل من المتحكمين PID و FSC؛ كما يبين خطأ التموضع في كل متحكم بالقيمة المطلقة.

الجدول (5) - إحدائيات النهاية المؤثرة وخطأ التموضع في كلا المتحكمين.

	P	PID	FSC	Error(PID)	Error(FSC)
X-coordinate(mm)	-98.29	-100.3	-98.29	2.01	0
Y-coordinate(mm)	170.2	167.6	170.2	2.6	0
Z-coordinate(mm)	-896.5	-897.7	-896.5	1.2	0

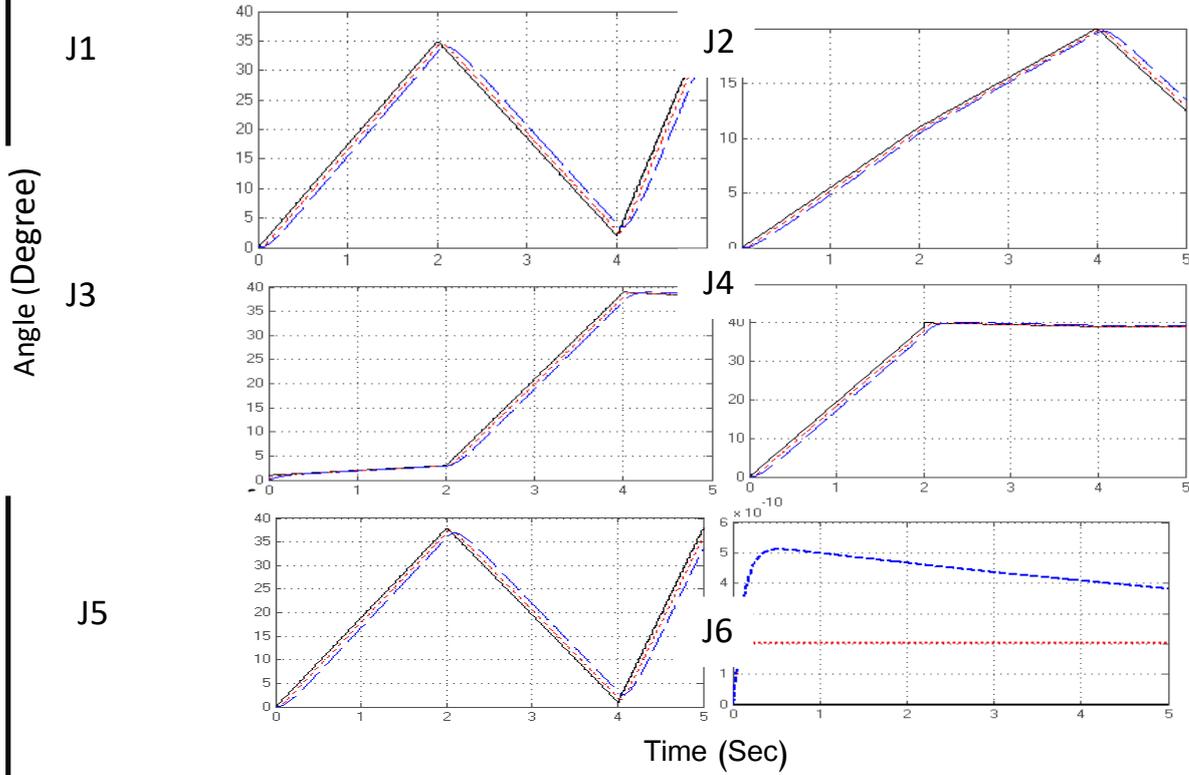
في المرحلة الثانية تُرست النتائج عند دخل متغير باستخدام بلوك (signal builder)، يحوي ست إشارات موزعة على ستة مفاصل، كما هو موضح بالشكل (11).



الشكل (11) - إشارة دخل متغيرة على المفاصل الستة.

عند تطبيق الخرج المتغير باستخدام المتحكمين السابقين نلاحظ وجود خطأ ثابت على طول الاستجابة، كما يوضح الشكل (12).

Ref ___ FSC..... PID---



الشكل (12) - الخطأ الثابت عند استخدام PID و FSC مع دخل متغير.

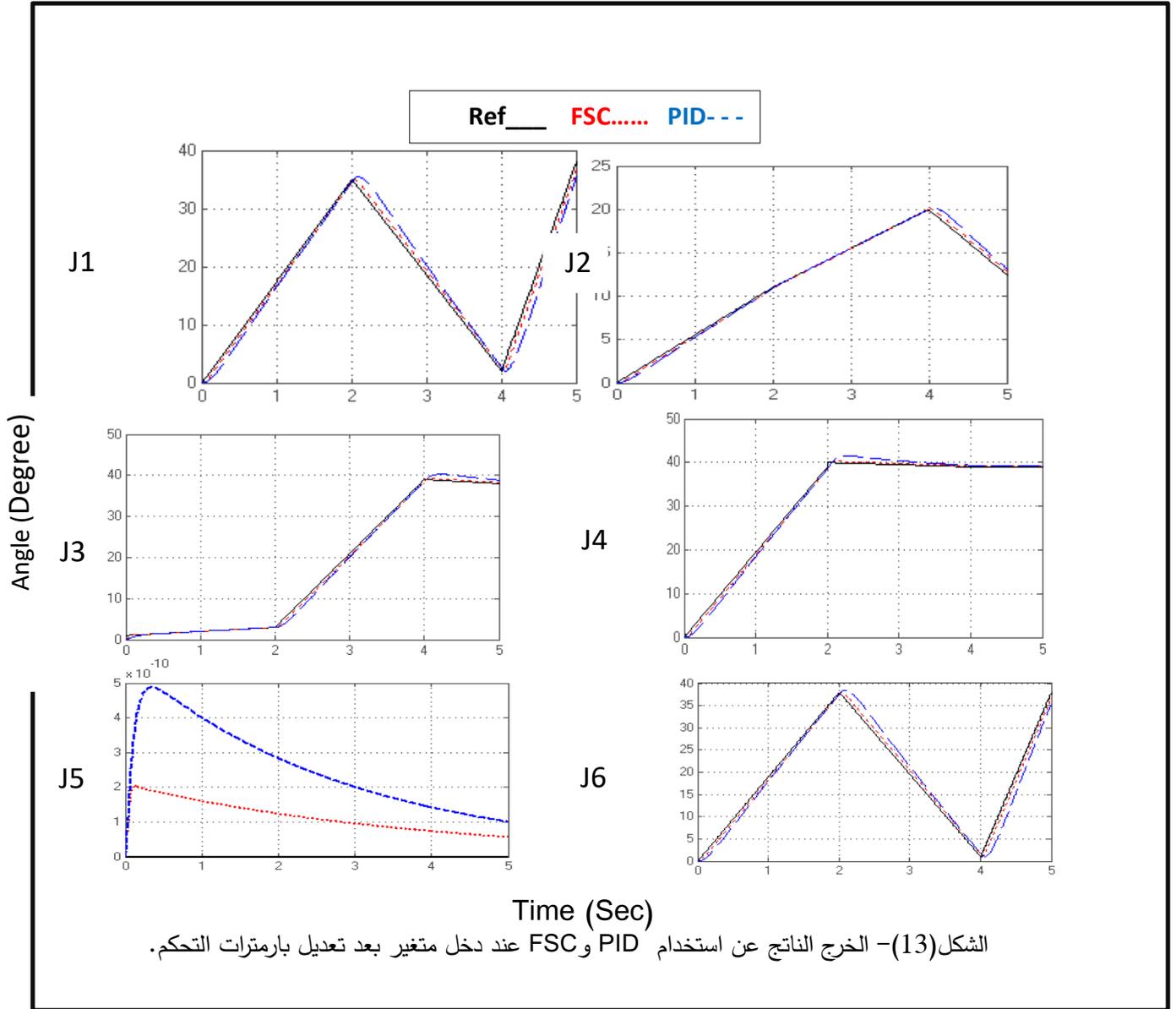
يجري التغلب على الخطأ الثابت عن طريق تعديل بارامترات التحكم وفق الآتي :

في متحكم PID : تصبح البارامترات على الشكل $K_p = 15, K_I = 13, K_D = 0.01$.

في متحكم FSC : تحافظ توابع انتماء الخرج على شكلها، ويتم تعديل المجالات وفق الآتي :

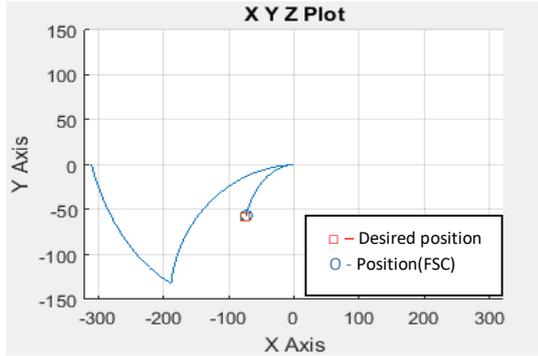
$K_{dd} = [0.1 \ 1], K_{pp} = [10 \ 50], K_{II} = [1 \ 20]$

يبين الشكل (13) الاستجابة عند استخدام كل من PID و FSC عند دخل متغير بعد تعديل بارامترات التحكم.

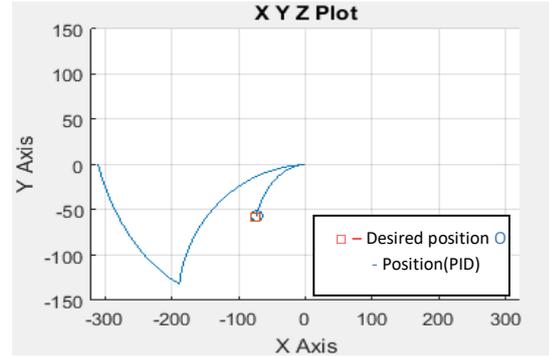


يوضح الشكل (14-a) المسار عند استخدام متحكم FSC والشكل (14-b) المسار عند استخدام متحكم PID

مع توضيح الموقع المطلوب ووموقع النهاية المؤثرة عند استخدام كل متحكم.



الشكل (14-أ) - المسار عند استخدام FSC.



الشكل (14-ب) - المسار عند استخدام PID.

يوضح الجدول (6) مقارنة بين إحدائيات النهاية المؤثرة عند استخدام كلا المتحكمين مع إحدائيات الموقع

المطلوب (P)، كما يوضح خطأ التموضع بالقيمة المطلقة في كلا المتحكمين:

الجدول (6) - إحدائيات النهاية المؤثرة وخطأ التموضع

	P	PID	FSC	Error(PID)	Error(FSC)
X-coordinate(mm)	-73.91	-73.6	-73.67	0.31	0.24
Y-coordinate(mm)	-57.74	-57.03	-57.12	0.71	0.62
Z-coordinate(mm)	996.7	996.9	996.9	0.2	0.2

يوضح الجدول (7) بارامترات الاستجابة الزمنية عند استخدام كل من المتحكمين:

الجدول (7) - بارامترات الاستجابة عند دخل متغير.

	PID	FSC
Overshoot	0.85	0.82
Rising Time	1.59	1.5
Steady state error	0.238	0.2

الاستنتاجات والتوصيات:

- ناقش البحث أداء متحكم PID وأداء المتحكم الإشراف الضبابي FSC من حيث الاستجابة الزمنية، عند العمل على دخلين (ثابت ، ومتغير)؛ حيث أظهرت النتائج في الجداول (4) (7) أن استخدام متحكم FSC أفضل.
- يبين الشكل (12) خطأً ثابتاً جرى التغلب عليه، عن طريق تعديل بارامترات التحكم لذلك كل دخل (مسار مرغوب) جديد يحتاج الى بارامترات تحكم جديدة تحسن الأداء .
- توضح النتائج في الجداول (5) (6) أن أداء المتحكم FSC فعال أكثر عند العمل على دخل ثابت منه على دخل متغير، من حيث الخطأ في قيمة التموضع .
- توضح الجداول (5)(6) أن خطأ التموضع أقل عند استخدام متحكم FSC منه عند استخدام المتحكم PID.

- عند دراسة التحكم في الروبوتات التسلسلية الصناعية يجب التركيز على نقطتين أساسيتين هما:-
1- تقليل Overshoot لأنه يؤدي الى دوران المفصل بزوايا أكبر من المطلوبة لمدة معينة.
2- تقليل Steady state error حتى تتوضع النهاية المؤثرة على الموقع المطلوب.
- يمكن توسيع مجال المنطق الضبابي في تحسين عمل الروبوت ليشمل أمثلة (المسار - الطاقة - الوقت).

المراجع :

- [1] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, M. Vidyasagar. *Robot Modeling and Control* 2006.
- [2] Ahmed Kharidege, Ding Jianbiao, Yajun Zhang. *Performance Study of PID and Fuzzy Controllers for Position Control of 6DOF arm Manipulator with Various Defuzzification Strategies*. MATEC Web of Conferences .77, 2016.
- [3] Reham H. Mohammed, Fahmy Bendary, Kamel Elserafi. *Trajectory Tracking Control for Robot Manipulator using Fractional Order-Fuzzy-PID Controller*. International Journal of Computer Applications .22-29, 2016.
- [4] Omar Adil M. Ali, Aous Y. Ali, Balasem Salem Sumait. *Comparison between the Effects of Different Types of Membership Functions on Fuzzy Logic Controller Performance*. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology. 76-83, 2015.
- [5] Reza Ezuan Samin, Mohd Syakirin Ramli and Mohd Ashraf Ahmad. *Performance Comparison of PD-type Fuzzy Logic Controller of USBM Simplified Model*. The 2nd International Power Engineering and Optimization Conference. 217-221, 2008.
- [6] Yingjie Tang, Xinwen Li, *Simulation Research of Manipulator Control System Based on Solidworks and Simmechanics*, Academic Journal of Computing & Information Science. 19-27, 2018.
- [7] Mohammed Almagd . *Forward and Inverse Kinematic Analysis and Validation of the ABB IRB 140 Industrial Robot*. INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS, MECHANICAL AND MECHATRONICS ENGINEERING. 1383-1401, 2017.
- [8] Wai Phyo Aung. *Analysis on Modeling and Simulink of DC Motor and its Driving System Used for Wheeled Mobile Robot*. World Academy of Science, and Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering. 299-306, 2007.
- [9] M.A. SEN, V.BAKIRCIOGLU, M. KALYONCU. *Modelling and PID Control of Scara Robot*. International Conference on Engineering Technologies. 07-09, 2017
- [10] Xiaodiao Huang, Liting Shi. *Simulation on a Fuzzy-PID Position Controller of the CNC Servo System*. IEEE Xplore . Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 305-309, 2006.

[11] Iancu, Ion. "A Mamdani type fuzzy logic controller." Fuzzy logic-controls, concepts, theories and applications. IntechOpen.2012.