

تخطيط المسار الأمثل لروبوت التجميع الإنتقائي من أجل عمليات الالتقاط والوضع

د. عبد الرزاق دبور*

(تاريخ الإيداع 22 / 3 / 2021. قُبل للنشر في 9 / 6 / 2021)

□ ملخص □

تعتبر عمليات التقاط الأجسام وتحريرها من أكثر العمليات الصناعية انتشاراً وأكثرها تتطلباً لنقل الجسم بأقل وقت ممكن وبأقل قوى ديناميكية مؤثرة على الروبوت وعلى الجسم.

في هذا البحث تم اختبار عدة مسارات مختلفة لعملية التقاط جسم وتحريره باستخدام روبوت تجميع إنتقائي، حيث تم المقارنة بين هذه المسارات من حيث قيم التسارعات الخطية لأداة الروبوت وقيم السرعات والتسارعات الزاوية لمفاصل الروبوت والتي تؤثر على محركات الروبوت.

تم في هذا البحث المقارنة بين المسار التقليدي والمسار شبه المنحرف المعدل بأقطار مختلفة بالإضافة إلى مسار شبه منحرف معدل ذو نصف قطر مساوي لإرتفاع المسار من خلال استخدام برنامج Solidworks في مرحلة تصميم ونمذجة الروبوت وإيجاد التسارع الخطي لأداة الروبوت والسرعات والتسارعات الزاوية لمفاصل الروبوت.

أظهرت النتائج تفوق كبير للمسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع عن بقية المسارات المختبرة حيث أدى هذا المسار إلى تقليل قيم السرعات الزاوية بمقدار (28.7 %) بالنسبة للمفصل الأول بمقدار (49 %) بالنسبة للمفصل الثاني بالمقارنة مع المسار التقليدي، كما أدى إلى خفض أعلى قيمة للتسارع الزاوي بمقدار (94.9 %) بالنسبة للمفصل الأول وبمقدار (94.8 %) بالنسبة للمفصل الثاني بالمقارنة مع المسار التقليدي، بالإضافة إلى خفض أعلى قيمة تسارع خطي لأداة الروبوت بمقدار (96.5%) بالمقارنة مع المسار التقليدي.

كما أظهر المسار شبه المنحرف بنصف قطر مساوي للإرتفاع تفوقاً على المسارات شبه المنحرفة بأنصاف أقطار مختلفة حيث أدى إلى تخفيض قيم السرعات والتسارعات الزاوية لمفاصل الروبوت بالإضافة إلى خفض أعلى قيمة تسارع خطي لأداة الروبوت بالمقارنة مع المسارات شبه المنحرفة بأنصاف أقطار مختلفة.

الكلمات المفتاحية: تخطيط المسار ، روبوتات التجميع ، الالتقاط والوضع، قوى ديناميكية.

* قائم بالأعمال - كلية الهندسة - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

SCARA Robot Optimal Trajectory Planning for Pick and Place Tasks

Dr. Abd Alrazzak Dabbour*

(Received 22 / 3 / 2021. Accepted 9 / 6 / 2021)

□ ABSTRACT □

The processes of picking and placing objects are among the most widespread industrial operations and the most demanding to move the objects with the least possible time and the least dynamic forces affecting the robot and the body.

In this paper, multi trajectories were designed for pick and place task using SCARA robot, these trajectories were compared using linear acceleration values for robot's tool, robot joint's angular velocity and robot joint's angular acceleration.

In this paper, traditional trajectory, modified trapezoid curve and modified trapezoid curve with radius equal height were compared using solidworks software in robot designing and simulation and finding linear acceleration for robot's tool, robot joint's angular velocity and robot joint's angular acceleration.

The results showed a significant superiority of the modified trapezoid curve with radius equal height to the rest of tested trajectories, as this trajectory led to a decrease in angular velocities values by (28.7 %) for first joint and by (49 %) for second joint compared with traditional trajectory, It also reduced the highest value of angular acceleration by (94.9 %) for first joint and by (94.8 %) for second joint compared with traditional trajectory, in addition the linear acceleration value for robot's tool was reduced by (96.5 %) compared with traditional trajectory.

The modified trapezoid curve with radius equal height path shows significant superiority of modified trapezoid curve tested paths, as this trajectory led to a decrease in angular velocities and accelerations values for robot joints, in addition the linear acceleration value for robot's tool was reduced compared with modified trapezoid curve with various radius.

Keywords: Trajectory planning, SCARA Robot, Pick and Place, Dynamic Forces.

*Academic Assistant- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – Tishreen University- Lattakia- Syria.

مقدمة:

تشكل روبوتات التجميع الإنتقائية (SCARA Robot) عنصراً هاماً في العديد من العمليات الصناعية كفرز القطع غير مطابقة للمواصفات، مهام التقاط الأجسام ووضعها في أماكن محددة، عمليات الدهان، تجميع لوحات الدوائر الكهربائية وتجميع القطع الميكانيكية، حيث تتطلب هذه المهام متابعة دقيقة ومناورة عالية السرعة لأداة الروبوت المستخدم [1]. بالرغم من تعدد تركيبات هذه الروبوتات إلا أن روبوت التجميع المكون من مفصلين دورانيين ومفصل إنسحابي على المحور (Z) من أكثرها شيوعاً بسبب بساطة هيكلها، وزنها الخفيف وتمتعها بالاستجابة السريعة لتغيير اتجاه الحركة بسبب خفة وزنها مما يؤدي إلى تميزها بدقة الحركة بالمقارنة من أنواع الروبوتات الأخرى [2]. حيث تم استخدام النموذج السابق في العديد من التطبيقات الصناعية مثل تركيب عناصر كهربائية على الدارات الكهربائية المطبوعة [2] ، وتصنيف مجموعة من القطع ضمن نظام ترتيب صناعي [3]. كما أن العديد من الأبحاث التي اهتمت بدراسة هذا النوع من الروبوتات من أجل وضع نموذج دقيق له [4]، تصميم أنظمة التحكم المقادة بواسطة أنظمة الرؤية [5]، مجالات التعاون بين البشر والروبوتات [6] وتصميم المسار لأداة الروبوت [7]. كما اهتمت العديد من الأبحاث في إيجاد المسار الأمثل لعمليات التقاط الأجسام ووضعها في أماكن محددة، فمنها من اهتم من بدراسة المسار الأمثل لروبوت مثلثي (Delta Robot) من أجل عمليات التقاط أجسام متوضعة على سير ناقل ونقلها إلى مكان محدد [8]، ومنها من أهتم بإيجاد المسار لعملية التقاط جسم ووضعها في مكان محدد خلال أقل زمن ممكن [9]، ومنها من اهتم بتأثير عمليات التقاط الأجسام ووضعها بشكل متكرر بسرعات عالية وتأثير المسار على القوى الديناميكية الناتجة [10]، بينما أهتمت دراسات أخرى بتأثير المسار على الاهتزازات والقوى الديناميكية للروبوتات المثلثية (Delta Robots) أثناء عمليات التقاط الأجسام ووضعها في أماكن محددة ومعلومة مسبقاً [11].

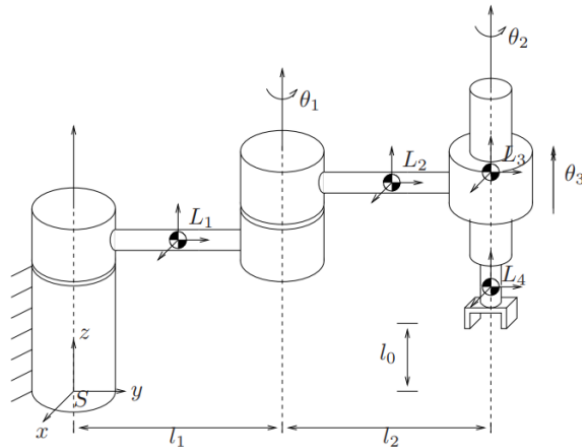
أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في إيجاد النموذج الرياضي لروبوت تجميع إنتقائي (SCARA ROBOT RRP) وتصميم المسار من أجل عمليات التقاط الأجسام ووضعها في أماكن محددة. حيث يهدف البحث إلى تحقيق النقاط التالية:

- ✓ إيجاد النموذج الرياضي لروبوت إنتقائي (SCARA ROBOT RRP).
- ✓ تصميم الروبوت باستخدام برنامج Solidworks.
- ✓ مقارنة عدة مسارات لأداة الروبوت أثناء عملية التقاط جسم من مكان محدد ونقله إلى مكان آخر.
- ✓ استخدام برنامج Solidworks من أجل المقارنة بين المسارات المختيرة لإيجاد المسار الأمثل.
- ✓ دراسة تأثير المسار المتبع على القوى الديناميكية التي تتعرض لها الحمولة وأداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار المحدد.

1. روبوت التجميع الإنتقائي من نوع RRP

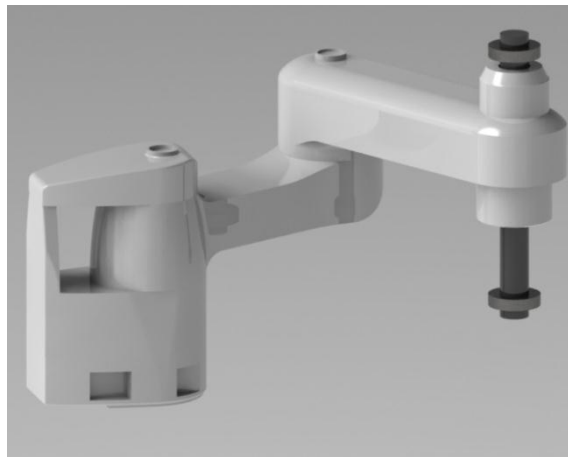
تم تصميم واستخدام روبوتات التجميع الإنتقائية عام 1981 حيث كانت تتكون من سلسلة مفتوحة مكونة من مفصلين دورانيين ومفصل إنسحابي متصل مباشرة بأداة الروبوت كما هو موضح بالشكل (1).



الشكل (1) بنية روبوت تجميع إنتقائي من نوع RRP.

2. الدراسة الهندسية للروبوت المستخدم

تم في هذا البحث دراسة وتحليل روبوت تجميع إنتقائي المستخدم في عمليات الإلتقاط والوضع والموضح بالشكل (2) والذي تم تصميمه بشكل مشابه لروبوت Epson t3 Scara Robot.



الشكل (2) الروبوت المصمم في هذا البحث.

تم استنتاج النموذج الرياضي للروبوت المستخدم لنمذجته وتصميم مسار حركة أدواته وفق المراحل الموضحة بالشكل (3).



الشكل (3) المراحل الأساسية لنمذجة الروبوت وتصميم المسار لحركة أدواته.

2.1. استنتاج تمثيل دينايفت-هارينترغ (Denavit-Harberterg)

يهدف إيجاد النموذج الرياضي للروبوت إلى تحديد موضع واتجاه أدواته (Robot Tool) نسبة لقاعدته من خلال تعيين الأطر الإحداثية (Coordinate Frames) للقاعدة والأداة مروراً بجميع مفاصل الروبوت. يمكن تمثيل انتقال ودوران الإطار ($i + 1$) بالنسبة للإطار (i) من خلال المعادلة الرياضية (1).

$${}_{i+1}^i T = \begin{bmatrix} {}_{i+1}^i R & {}_{i+1}^i P \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

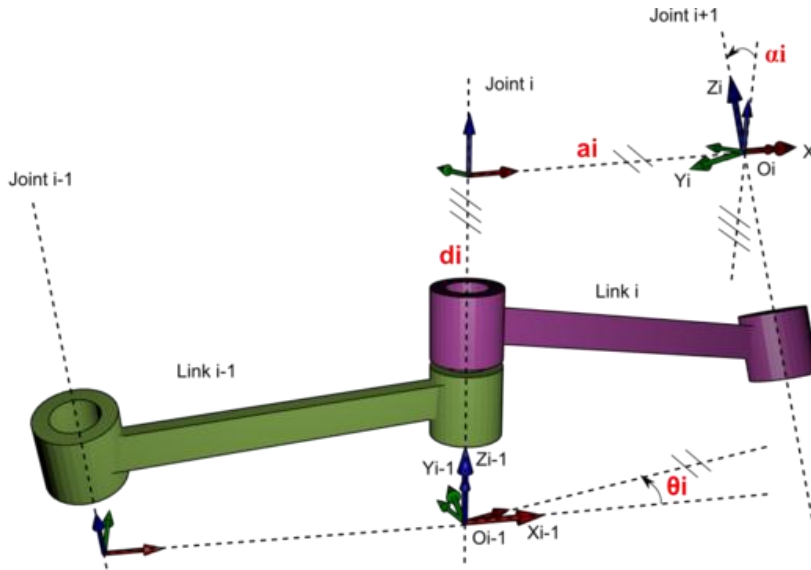
إذ:

${}_{i+1}^i P : 3 \times 1$: شعاع انتقال الإطار ($i + 1$) بالنسبة للإطار (i).

${}_{i+1}^i R : 3 \times 3$: مصفوفة دوران الإطار ($i + 1$) بالنسبة للإطار (i).

${}_{i+1}^i T : 4 \times 4$: مصفوفة انتقال ودوران الإطار ($i + 1$) بالنسبة للإطار (i).

يتم استنتاج تمثيل دينايفت-هارينترغ (D-H) Denavit-Harberterg للروبوت المستخدم من خلال إيجاد قيم البارامترات الخاصة به والموضحة بالشكل (4).



الشكل (4) بارامترات تمثيل دينايفت-هارينترغ.

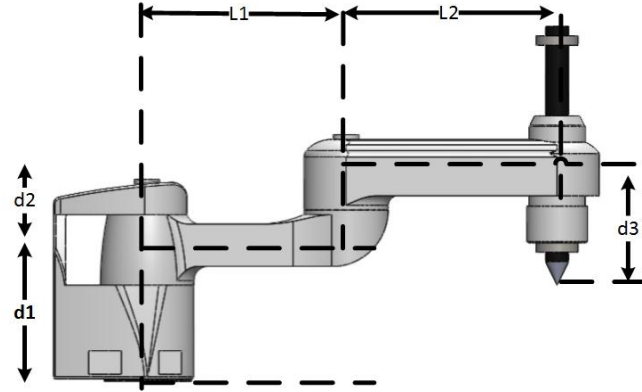
حيث:

a_i : طول الوصلة، المسافة من \hat{Z}_i إلى \hat{Z}_{i+1} وفق المحور \hat{X}_i .

α_i : انحراف الوصلة، الزاوية بين \hat{Z}_i و \hat{Z}_{i+1} حول المحور \hat{X}_i .

d_i : انزياح الوصلة، المسافة من \hat{X}_i إلى \hat{X}_{i+1} وفق المحور \hat{Z}_i .

θ_i : زاوية المفصل، الزاوية بين \hat{X}_{i+1} و \hat{X}_i حول المحور \hat{Z}_i .



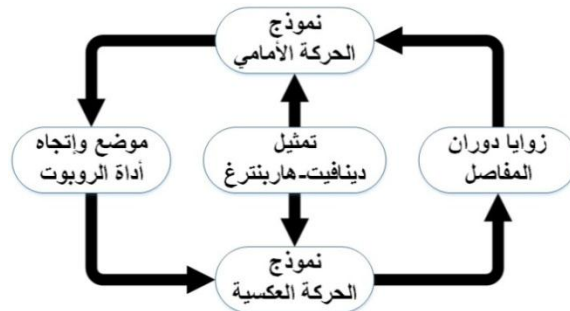
الشكل (5) مخطط الوصلات للروبوت المستخدم.

بالاعتماد على الشكل (5) وقواعد تمثيل دينافيت-هارينترغ يمكن استنتاج الجدول التالي الذي يوضح بارامترات التمثيل لكل مفصل من مفاصل الروبوت المستخدم.

الجدول (1) تمثيل دينافيت-هارينترغ (Denavit-Harbenterg) للروبوت المستخدم.

θ_i	d_i	a_i	α_i	رقم المفصل i
θ_1	d_1	l_1	0	1
θ_2	d_2	l_2	180	2
0	d_3	0	0	3
θ_4	0	0	0	4

حيث: $d_1 = 195 \text{ mm}$, $d_2 = 35 \text{ mm}$, $d_3 = 86 \text{ mm}$, $l_1 = 325 \text{ mm}$ و $l_2 = 275 \text{ mm}$ [12]. وانطلاقاً من تمثيل دينافيت-هارينترغ يمكن إيجاد موضع واتجاه أداة الروبوت انطلاقاً من معرفة زوايا دوران مفاصل الروبوت (نموذج الحركة الأمامية)، بالإضافة إلى إمكانية إيجاد قيم زوايا دوران المفاصل تبعاً لموضع واتجاه أداة الروبوت (نموذج الحركة العكسية) كما هو موضح بالشكل (6).



الشكل (6) المخطط العام للحركة الأمامية والحركة العكسية.

2.2. نموذج الحركة الأمامية

يهدف نموذج الحركة الأمامية للروبوت إلى إيجاد موضع واتجاه أداة الروبوت نسبة إلى قيم زوايا دوران كل مفصل من مفاصل الروبوت من خلال اتباع الخطوات الآتية:

(1) إيجاد مصفوفة تحويل لكل مفصل من مفاصل الروبوت المستخدم بالاعتماد على تمثيل ديناميت-هارينترغ للروبوت الموضح بالجدول (1).

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & a_1C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & a_1S_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & a_2C_2 \\ S_2 & -C_2 & 0 & a_2S_2 \\ 0 & 0 & -1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_4T = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) استنتاج مصفوفة التحويل النهائية بين أداة الروبوت وقاعدته من خلال جداء مصفوفات التحويل السابقة.

$${}^0_5T = {}^0_1T * {}^1_2T * {}^2_3T * {}^3_4T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

حيث:

$$\begin{aligned} n_x &= c_1c_2 - s_1s_2 \\ n_y &= s_1c_2 + c_1s_2 \\ n_z &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} o_x &= -c_1s_2 - s_1c_2 \\ o_y &= c_1c_2 - s_1s_2 \\ o_z &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} a_x &= 0 \\ a_y &= 0 \\ a_z &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} p_x &= a_2(c_1c_2 - s_1s_2) + a_1c_1 \\ p_y &= a_2(s_1c_2 + c_1s_2) + a_1s_1 \\ p_z &= d_1 + d_2 - d_3 \end{aligned} \quad (7)$$

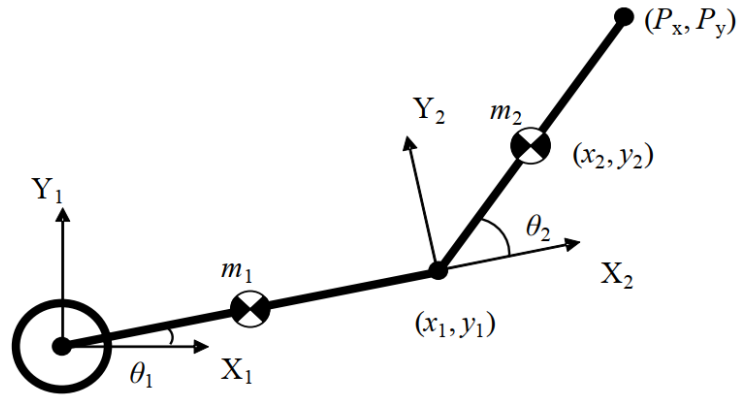
كما تم استخدام الاختصارات الآتية في كتابة المعادلات $c_i = \cos(\theta_i)$ و $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ ، كما أن P_x ، P_y و P_z تعبر عن إحداثيات مركز مقبض الروبوت.

بالتالي يمكن استنتاج إحداثيات موضع أداة الروبوت انطلاقاً من زوايا دوران مفاصل الروبوت وفق المعادلة الرياضية التالية:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2(c_1c_2 - s_1s_2) + a_1c_1 \\ a_2(s_1c_2 + c_1s_2) + a_1s_1 \\ d_1 + d_2 - d_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.3. نموذج الحركة العكسي

يهدف استنتاج نموذج الحركة العكسية إلى إيجاد النموذج الرياضي الذي يقوم بتحديد قيم زوايا دوران مفاصل الروبوت تبعاً لإحداثيات واتجاه أدواته. إذ يوضح الشكل التالي المسقط العلوي لمخطط مفاصل الروبوت من أجل تحديد زوايا دوران المفصل الأول والثاني.



الشكل (7) المسقط العلوي لمخطط الروبوت المستخدم.

من الشكل السابق يمكن استنتاج المعادلات الرياضية التالية:

$$p_x = a_1 c\theta_1 + a_2 c\theta_{12} \quad (9)$$

$$p_y = a_1 s\theta_1 + a_2 s\theta_{12} \quad (10)$$

$$p_z = -d_3 + d_1 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} p_x^2 + p_y^2 &= a_1^2 c^2\theta_1 + a_2^2 c^2\theta_{12} + 2a_1 a_2 c\theta_1 c\theta_{12} + a_1^2 s^2\theta_1 + a_2^2 s^2\theta_{12} + 2a_1 a_2 s\theta_1 s\theta_{12} \\ &= a_1^2 (c^2\theta_1 + s^2\theta_1) + a_2^2 (c^2\theta_{12} + s^2\theta_{12}) + 2a_1 a_2 (c\theta_1 c\theta_{12} + s\theta_1 s\theta_{12}) \\ &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 c\theta_2 \end{aligned} \quad (12)$$

وبإعادة ترتيب المعادلة (12) ينتج لدينا المعادلة التالية:

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1 a_2} \right) \quad (13)$$

بإعادة ترتيب المعادلتين (9) و (10) ينتج لدينا المعادلتين الرياضيتين التاليتين:

$$\begin{aligned} p_x &= a_1 c\theta_1 + a_2 (c\theta_1 c\theta_2 - s\theta_1 s\theta_2) = a_1 c\theta_1 + a_2 c\theta_1 c\theta_2 - a_2 s\theta_1 s\theta_2 \\ &= c\theta_1 (a_1 + a_2 c\theta_2) - s\theta_1 (a_2 s\theta_2) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} p_y &= a_1 s\theta_1 + a_2 (s\theta_1 c\theta_2 - c\theta_1 s\theta_2) = a_1 s\theta_1 + a_2 s\theta_1 c\theta_2 - a_2 c\theta_1 s\theta_2 \\ &= s\theta_1 (a_1 + a_2 c\theta_2) - c\theta_1 (a_2 s\theta_2) \end{aligned} \quad (15)$$

بإعادة ترتيب المعادلة (15) يمكن استنتاج المعادلة الرياضية التالية:

$$s\theta_1 = \frac{p_y - c\theta_1 (a_2 s\theta_2)}{(a_1 + a_2 c\theta_2)} \quad (16)$$

بتعويض المعادلة السابقة بالمعادلة (14) وإعادة ترتيبها ينتج لدينا المعادلة الرياضية التالية:

$$p_x = c\theta_1 (a_1 + a_2 c\theta_2) - \left(\frac{p_y - c\theta_1 (a_2 s\theta_2)}{(a_1 + a_2 c\theta_2)} \right) (a_2 s\theta_2) \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
c\theta_1(a_1 + a_2c\theta_2) &= p_x + \left(\frac{p_y - c\theta_1(a_2s\theta_2)}{a_1 + a_2c\theta_2} \right) (a_2s\theta_2) \\
c\theta_1(a_1 + a_2c\theta_2)^2 &= p_x(a_1 + a_2c\theta_2) + p_y(a_2s\theta_2) - c\theta_1(a_2s\theta_2)^2 \\
c\theta_1[(a_1 + a_2c\theta_2)^2 + (a_2s\theta_2)^2] &= p_x(a_1 + a_2c\theta_2) + p_y(a_2s\theta_2) \\
c\theta_1 &= \frac{p_x(a_1 + a_2c\theta_2) + p_y(a_2s\theta_2)}{(a_1 + a_2c\theta_2)^2 + (a_2s\theta_2)^2} \\
c\theta_1 &= \frac{p_x(a_1 + a_2c\theta_2) + p_y(a_2s\theta_2)}{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2c\theta_2}
\end{aligned}$$

بتعويض المعادلة السابقة بالمعادلة (16) وإعادة ترتيبها ينتج لدينا المعادلة الرياضية التالية:

$$s\theta_1(a_1 + a_2c\theta_2) = p_y - (a_2s\theta_2) \left(\frac{p_x(a_1 + a_2c\theta_2) + p_y(a_2s\theta_2)}{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2c\theta_2} \right) \quad (18)$$

وبفرض $\Delta = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2c\theta_2$ يمكن إعادة صياغة المعادلة الرياضية السابقة كما يلي:

$$\begin{aligned}
s\theta_1\Delta(a_1 + a_2c\theta_2) &= p_y\Delta - p_x(a_2s\theta_2)(a_1 + a_2c\theta_2) - p_y(a_2s\theta_2)^2 \\
&= p_y(\Delta - (a_2s\theta_2)^2) - p_x(a_2s\theta_2)(a_1 + a_2c\theta_2) \\
&= p_y(a_1 - a_2s\theta_2)^2 - p_x(a_2s\theta_2)(a_1 + a_2c\theta_2)
\end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
s\theta_1\Delta &= \frac{p_y(a_1 + a_2c\theta_2)^2 - p_x(a_2s\theta_2)(a_1 + a_2c\theta_2)}{(a_1 + a_2c\theta_2)} \\
&= p_y(a_1 + a_2c\theta_2) - p_x(a_2s\theta_2)
\end{aligned} \quad (20)$$

بالتالي يمكن كتابة المعادلة الرياضية التالية:

$$s\theta_1 = \frac{p_y(a_1 + a_2c\theta_2) - p_x(a_2s\theta_2)}{\Delta} \quad (21)$$

من المعادلات الرياضية السابقة يمكن إيجاد قيمة زاوية دوران المفصل الأول (θ_1) وفق المعادلة الرياضية التالية:

$$\begin{aligned}
\theta_1 &= ATAN2(s\theta_1, c\theta_1) \\
&= ATAN2\left(\frac{p_y(a_1 + a_2c\theta_2) - p_x(a_2s\theta_2)}{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2c\theta_2}, \frac{p_x(a_1 + a_2c\theta_2) + p_y(a_2s\theta_2)}{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2c\theta_2} \right)
\end{aligned} \quad (22)$$

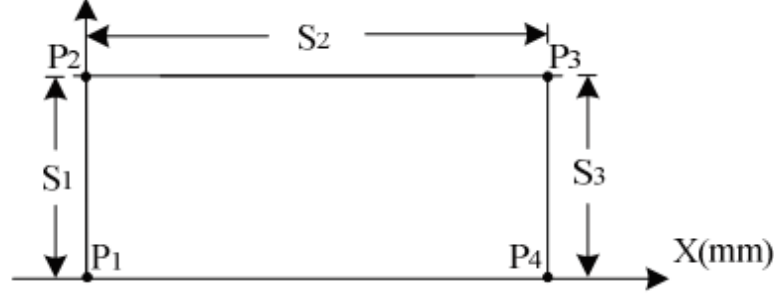
3. تصميم المسار

3.1 المسار التقليدي

غالباً ما تعتمد خوارزميات توليد المسار للروبوتات الصناعية على منحنيات الإزاحة دون الأخذ بعين الاعتبار منحنيات السرعة والتسارع. علاوة على ذلك يعتمد تخطيط المسار على طريقة الاستيفاء الخطي أو طريقة الاستيفاء الدائري، حيث يتم تقسيم منحنى الإزاحة لأداة الروبوت إلى n نقطة من ثم يتم إيجاد زوايا دوران مفاصل الروبوت عند كل نقطة بالاعتماد على نموذج الحركة العكسي لينتج منحنى زوايا دوران كل مفصل من مفاصل الروبوت تبعاً للزمن بالتالي يتم انتقال أداة الروبوت وفق المسار المحدد.

يوضح الشكل التالي المسار التقليدي لحركة أداة روبوت يتكون من ثلاث مراحل كل منها عبارة عن خط مستقيم كما يلي:

- مرحلة التقاط الجسم والارتفاع. $\overrightarrow{P_1P_2}(S_1)$
- مرحلة الانتقال إلى الموضع الهدف. $\overrightarrow{P_2P_3}(S_2)$
- مرحلة الهبوط وتحرير الجسم في الموقع الهدف. $\overrightarrow{P_3P_4}(S_3)$

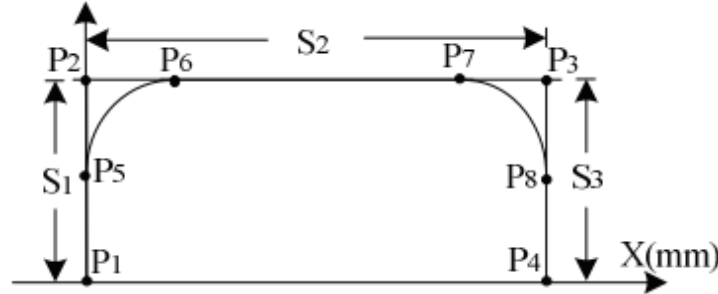


الشكل (8) الشكل العام للمسار التقليدي لعملية التقاط جسم ووضعه في مكان مختلف.

3.2. المسار شبه المنحرف المعدل

يمكن الهدف الرئيسي من تصميم المسار ضمان انتقال أداة الروبوت من نقطة البداية إلى النقطة الهدف بأقل زمن ممكن من خلال تطبيق أعلى قيم تسارع للأداة وأقل قوى ديناميكية مؤثرة على الحمولة مما يؤدي إلى خفض قيم اهتزازات الحمولة لأكبر قدر ممكن.

في حالة المسار التقليدي عند النقطة P_2 والنقطة P_3 تتعرض أداة الروبوت لقيم تسارعات مرتفعة مما يؤدي إلى تعرض الحمولة إلى قوى ديناميكية مرتفعة، للتخفيف من القوى الديناميكية واهتزازات الأداة لأكبر قدر ممكن يتم تعديل المسار في النقطتين P_2 و P_3 من زاوية حادة إلى قوس كما هو موضح بالشكل التالي.



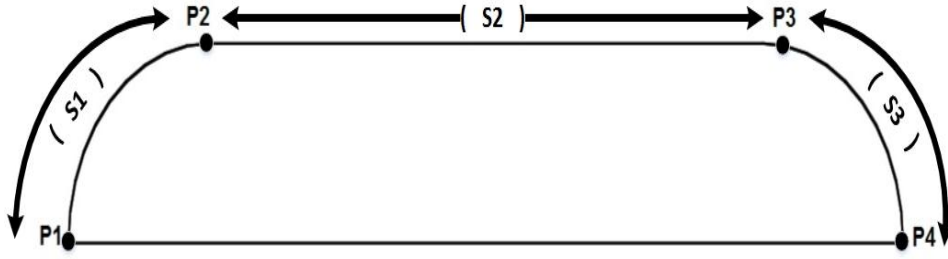
الشكل (9) الشكل العام للمسار شبه المنحرف المعدل لعملية التقاط جسم ووضعه في مكان مختلف.

بالتالي يتم استبدال النقطة P_2 بقوس بين نقطتين P_5 و P_6 وبشكل مشابه يتم استبدال النقطة P_3 بقوس بين نقطتين P_7 و P_8 .

3.3. المسار شبه منحرف بنصف قطر مساوي للإرتفاع

يتكون هذا المسار من ثلاثة مراحل:

- مرحلة الإرتفاع $\overrightarrow{P_1P_2}(S_1)$: في هذه المرحلة يتم رفع أداة الروبوت عن المستوى الصفري وتحريكها بنفس الوقت باتجاه النقطة الهدف.
- مرحلة الانتقال إلى النقطة الهدف $\overrightarrow{P_2P_3}(S_2)$: في هذه المرحلة يتم تحريك أداة الروبوت باتجاه النقطة الهدف.
- مرحلة الهبوط $\overrightarrow{P_3P_4}(S_3)$: تبدأ هذه المرحلة قبل وصول أداة الروبوت إلى الموضع المحدد حيث تبدأ بالإنخفاض بالإضافة إلى الاقتراب من الموضع الهدف.



الشكل (10) الشكل العام للمسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع.

النتائج والمناقشة:

1. النتائج

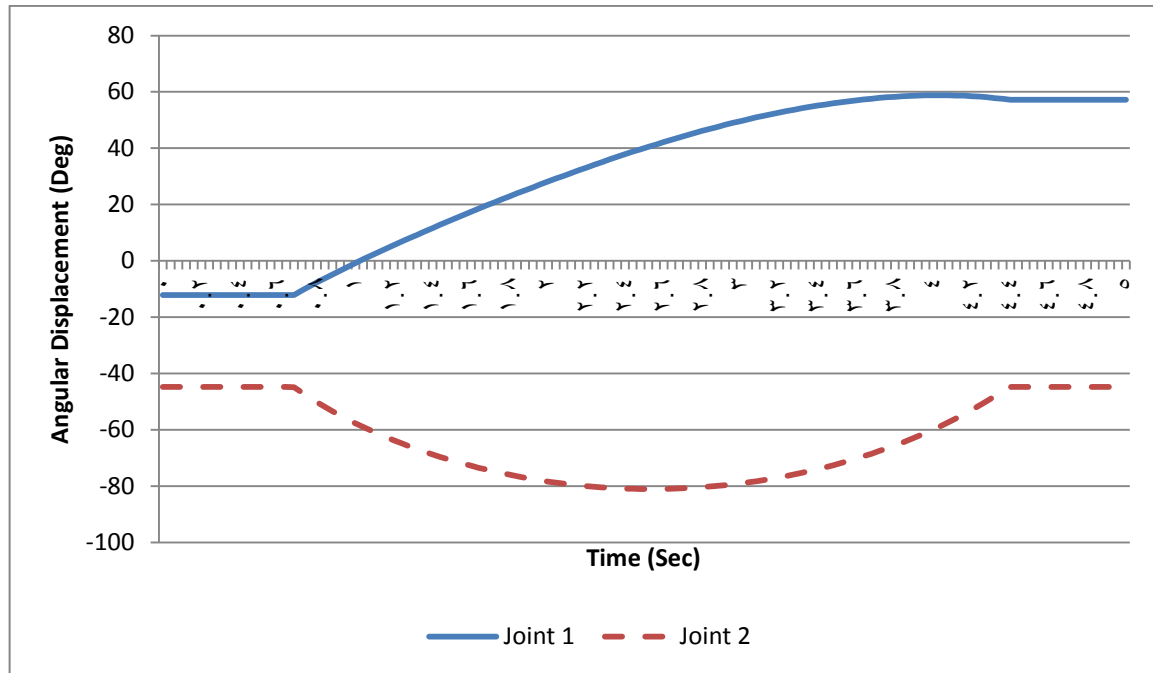
في هذا البحث تم استخدام برنامج Solidworks من أجل تصميم الروبوت المستخدم ونمذجة حركة أدواته والقوى التي تتعرض لها الحمولة أثناء التقاطها من موضع معين ونقلها إلى الموضع الهدف. بالرغم من دراسة المسار شبه المنحرف في دراسات سابقة إلى أنه لم يتم دراسة تأثير نصف القطر ولم يتم مقارنة هذا المسار مع المسارات التقليدية وهو ما اهتم هذا البحث بالمقارنة فيما بينهم حيث اختيار المواصفات التالية لكل مسار كما هو موضح بالجدول التالي:

الجدول (2) مواصفات المسارات المقترحة لأداة الروبوت.

رقم المسار	نوع المسار	مسافة الإرتفاع (S_1)	مسافة الإنتقال (S_2)	مسافة الإنخفاض (S_3)	نصف قطر القوس
1	تقليدي	165 mm	900 mm	165 mm	0 mm
2	شبه منحرف معدل بنصف قطر (20 mm)	165 mm	900 mm	165 mm	20 mm
3	شبه منحرف معدل بنصف قطر (60 mm)	165 mm	900 mm	165 mm	60 mm
4	شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع	165 mm	900 mm	165 mm	165 mm

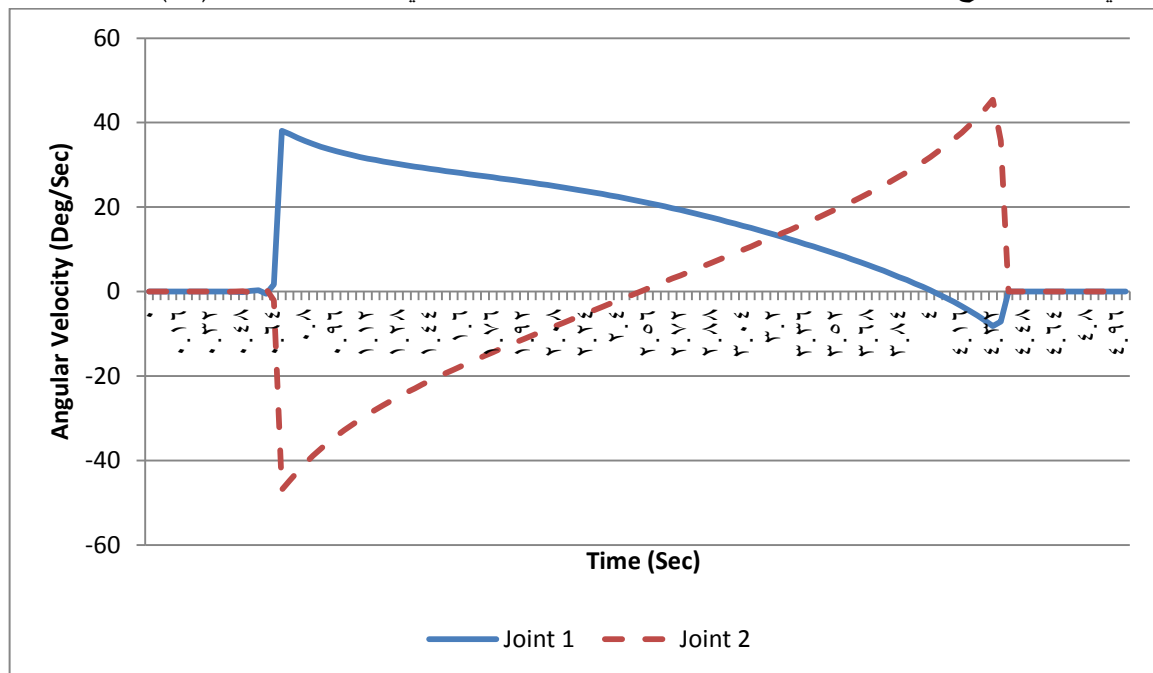
1.1. اختبار المسار التقليدي

بالاعتماد على نموذج الحركة العكسي للروبوت المستخدم يمكن استنتاج زوايا دوران المفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم من أجل تحريك أداة الروبوت وفق المسار المحدد كما هو موضح بالشكل (11).



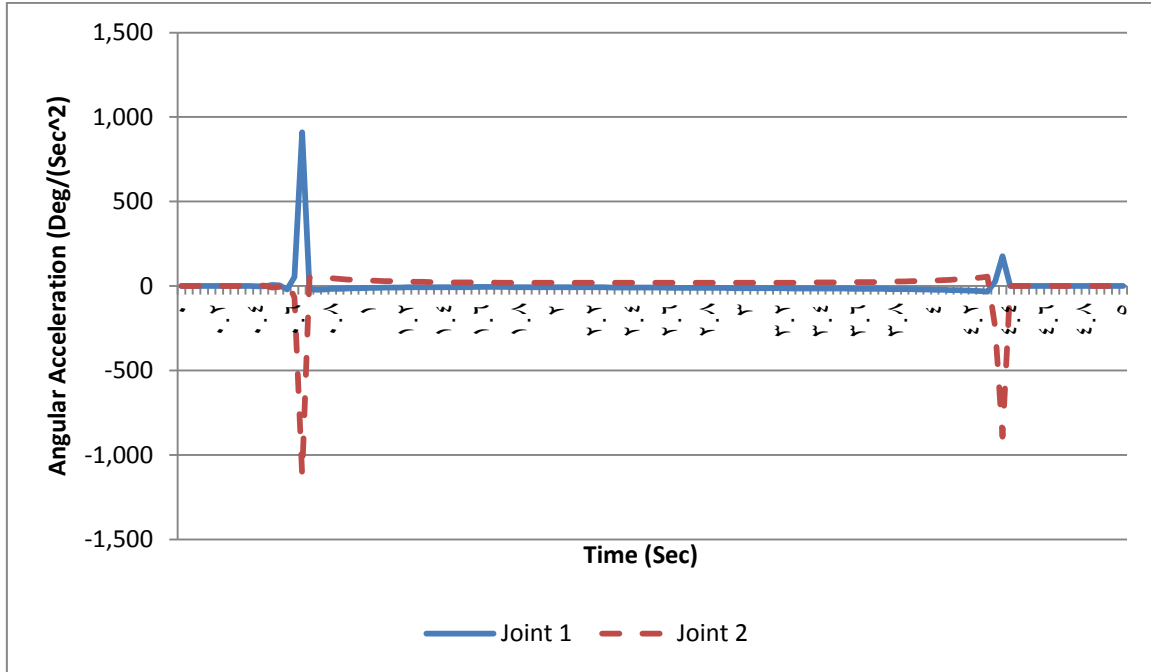
الشكل (11) زوايا دوران المفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال المسار التقليدي.

بالتالي يمكن استنتاج إشارات السرعات الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني والموضحة بالشكل(12).



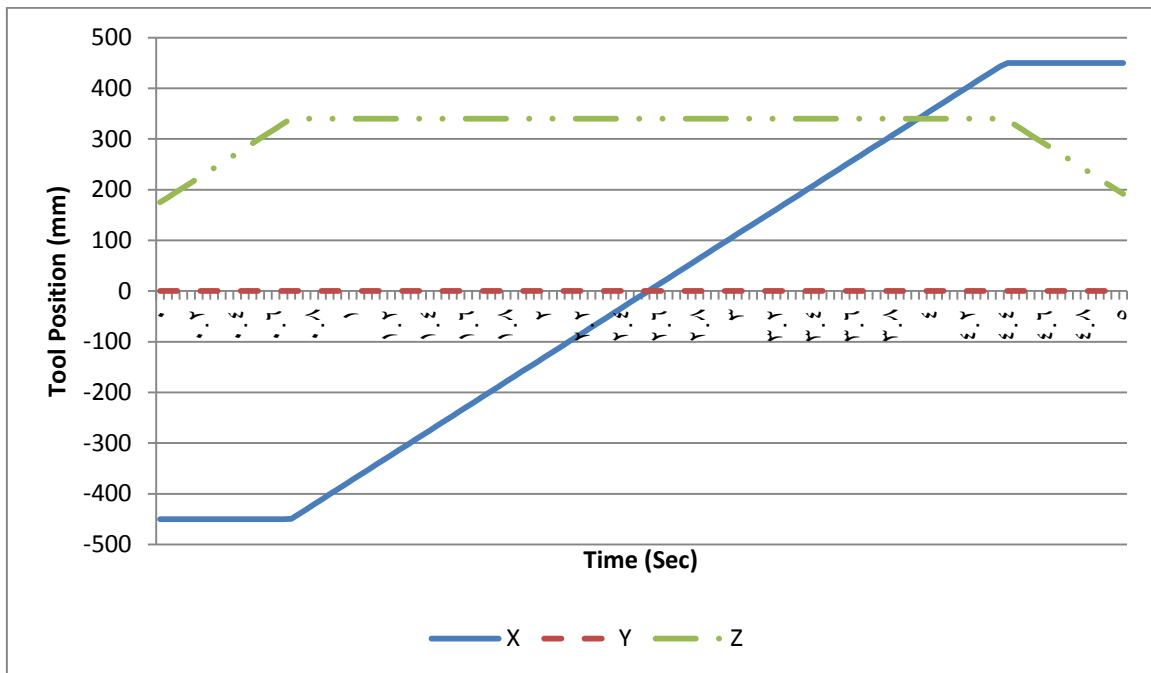
الشكل (12) السرعة الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال المسار التقليدي.

أما التسارع الزاوي للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت موضح بالشكل(13).

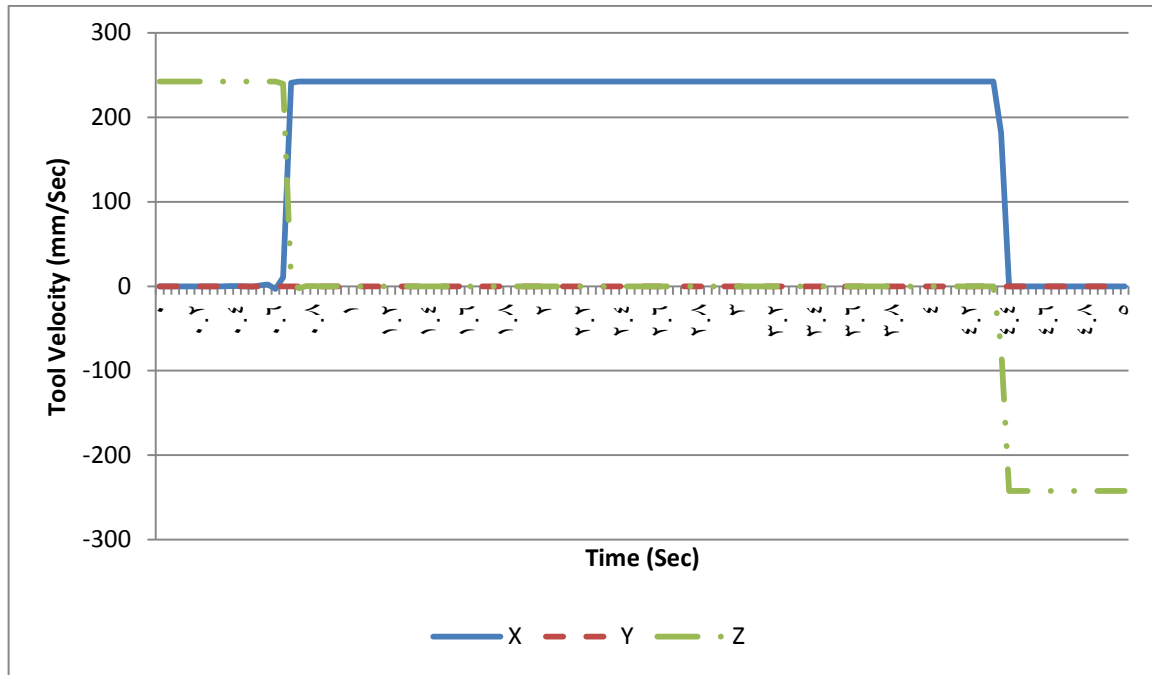


الشكل (13) التسارع الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال المسار التقليدي.

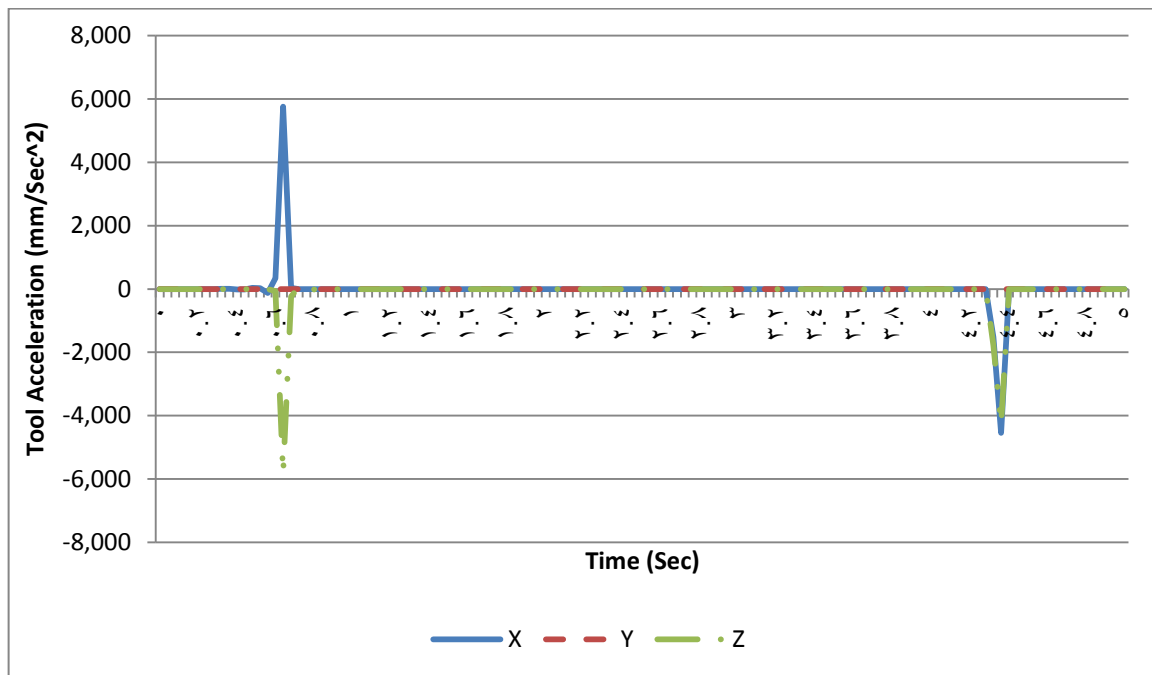
يوضح الشكل (14) إحدائيات أداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار التقليدي، أما الشكل (15) والشكل (16) فيوضحان قيم السرعة الخطية والتسارع الخطي لأداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار المحدد.



الشكل (14) إحدائيات أداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار التقليدي.

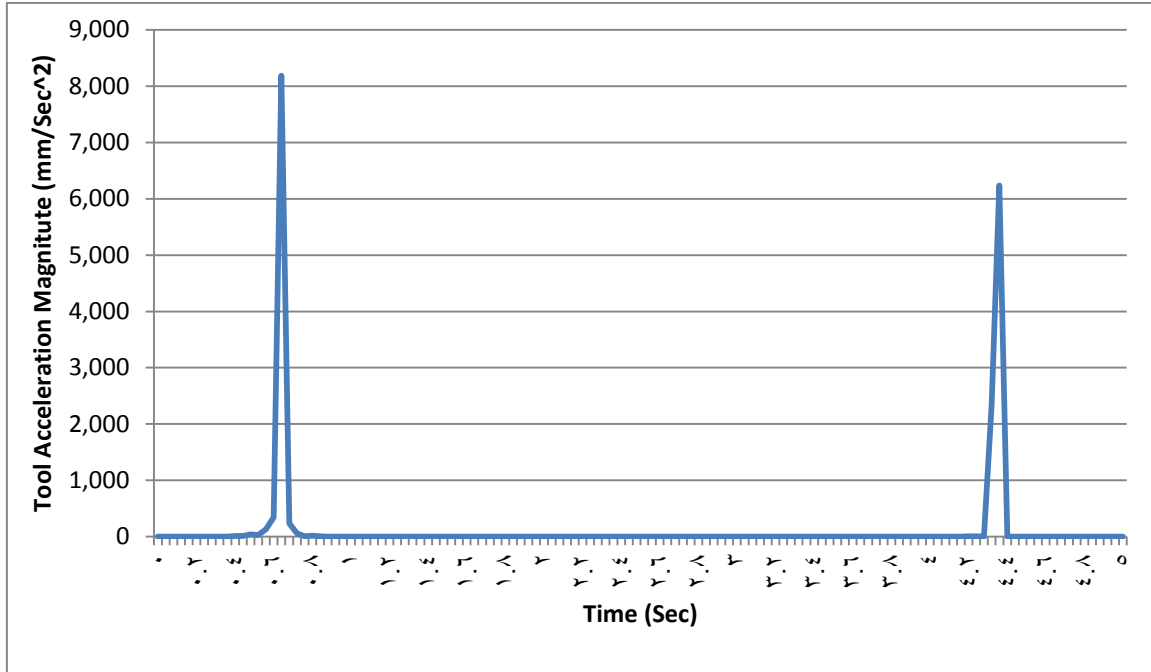


الشكل (15) السرعة الخطية لأداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار التقليدي.



الشكل (16) التسارع الخطي لأداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار التقليدي.

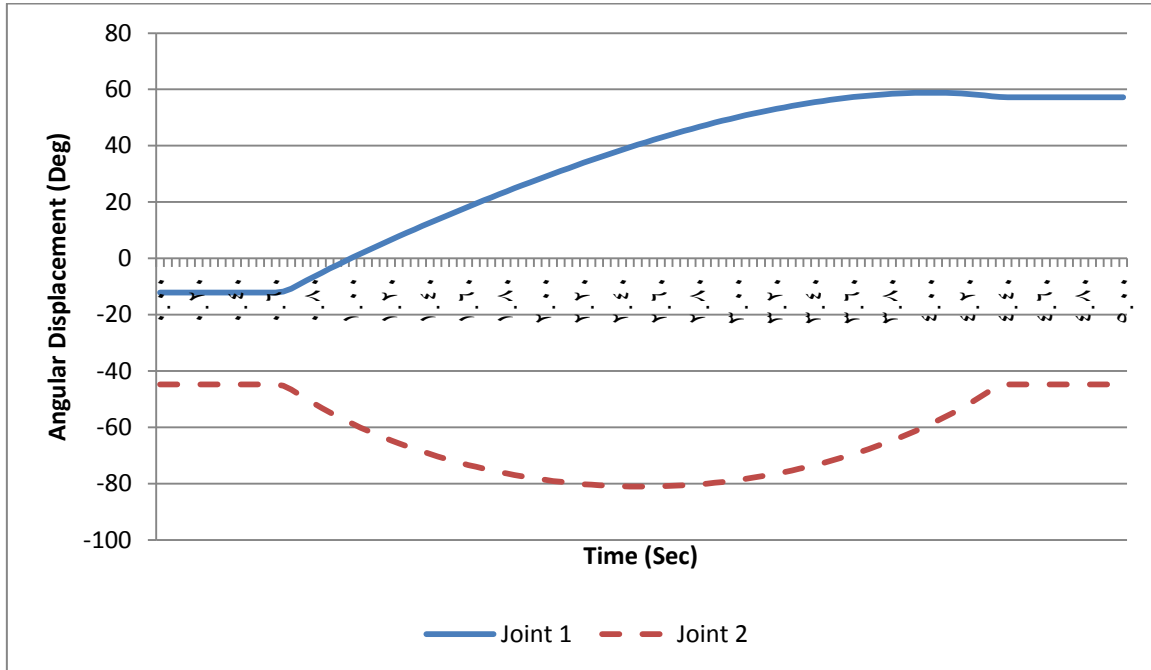
وبما أن قيم القوى الديناميكية التي تتعرض لها الحمولة وأداة الروبوت مرتبطة بقيمة التسارع الخطي، بالتالي يوضح الشكل (17) قيم التسارع الكلية التي تتعرض لها أداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار المحدد.



الشكل (17) قيمة التسارع الخطي الكلي التي تتعرض لها أداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار التقليدي.

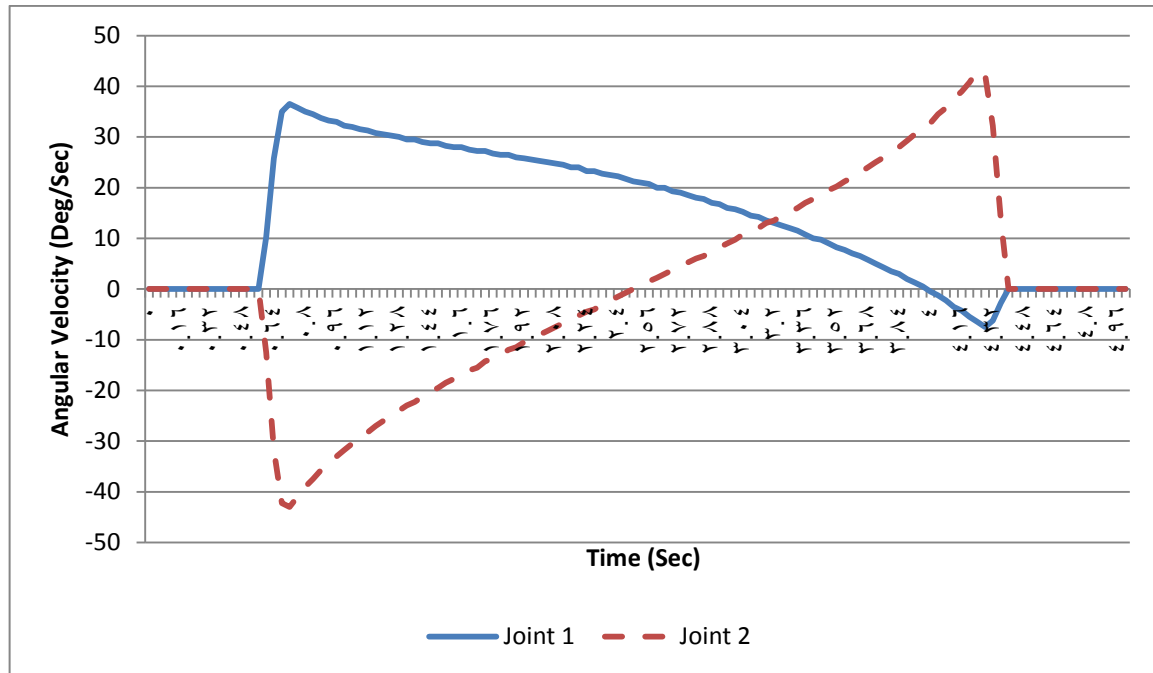
2.1. اختبار مسار شبه منحرف معدل بنصف قطر (20 mm)

بالاعتماد على نموذج الحركة العكس للروبوت المستخدم يمكن استنتاج زاويا دوران المفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم من أجل تحريك أداة الروبوت وفق المسار المحدد كما هو موضح بالشكل (18).



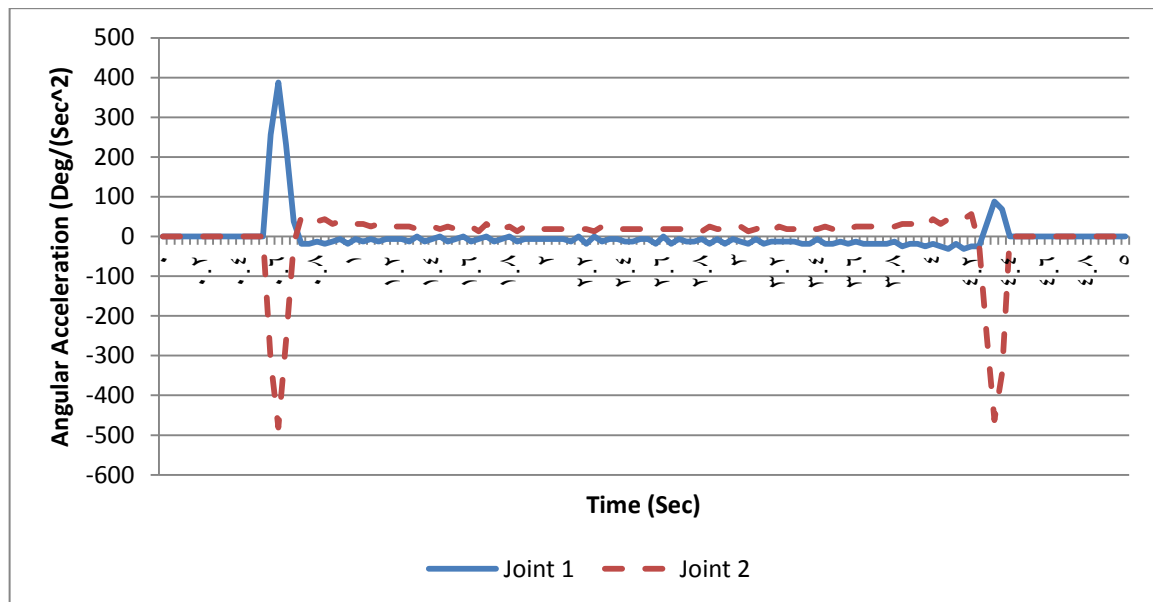
الشكل (18) زاويا دوران المفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال مسار شبه منحرف معدل بنصف قطر 20 mm.

بالتالي يمكن استنتاج إشارات السرعات الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني والموضحة بالشكل (19).



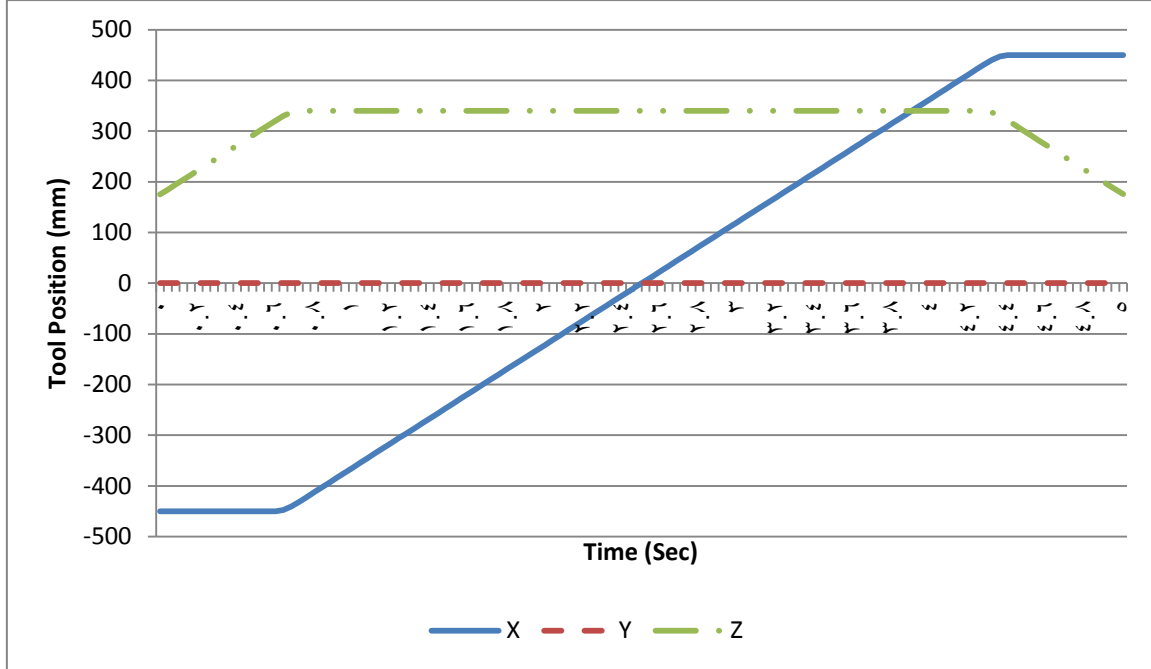
الشكل (19) السرعة الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 20 mm .

أما إشارات التسارع الزاوي للمفصل الأول والمفصل الثاني من مفاصل الروبوت فموضحة بالشكل (20).

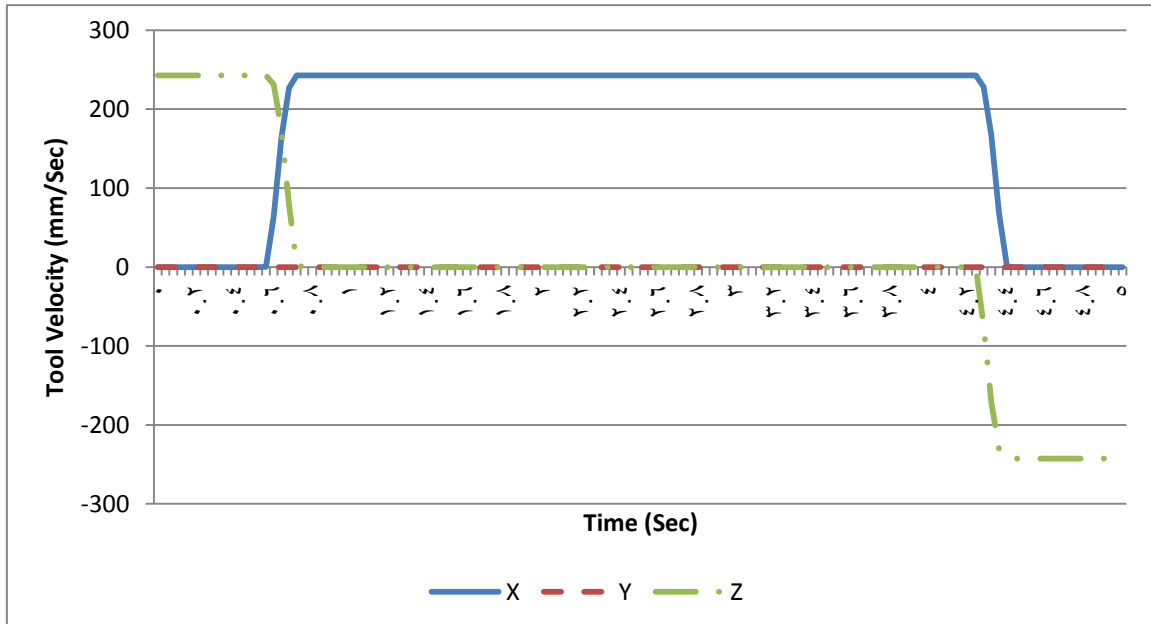


الشكل (20) التسارع الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 20 mm .

يوضح الشكل (21) إحداثيات أداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار التقليدي، أما الشكل (22) والشكل (23) فيوضحان قيم السرعة الخطية والتسارع الخطي لأداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار المحدد.

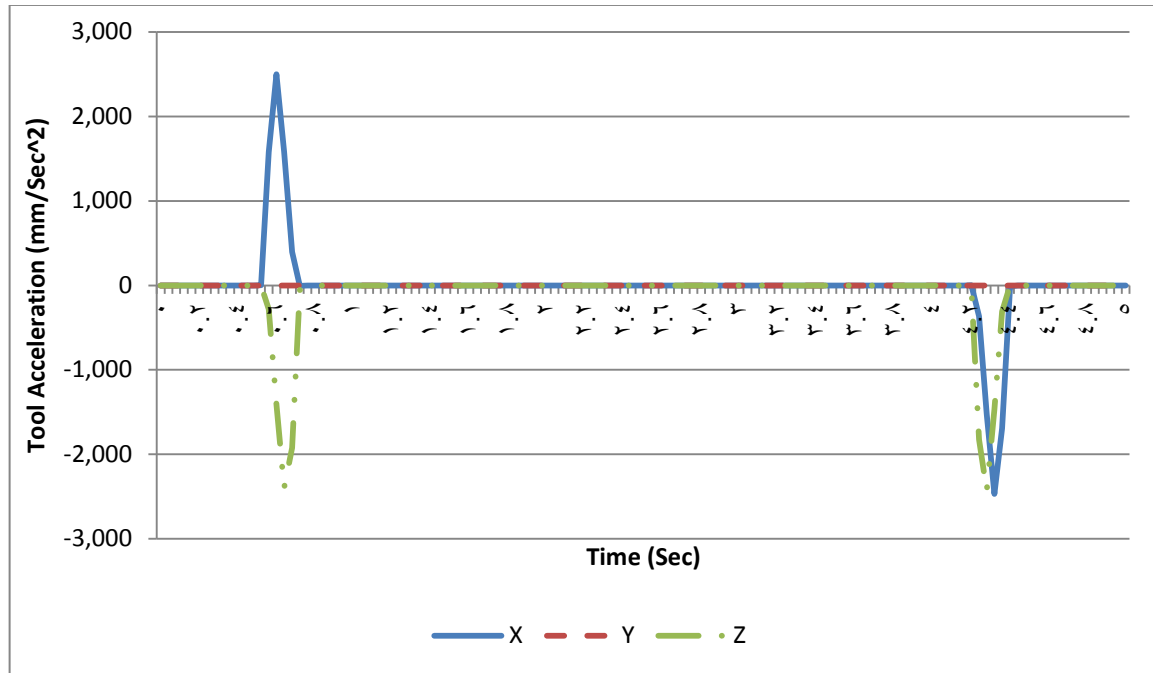


الشكل (21) إحداثيات أداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 20 mm .



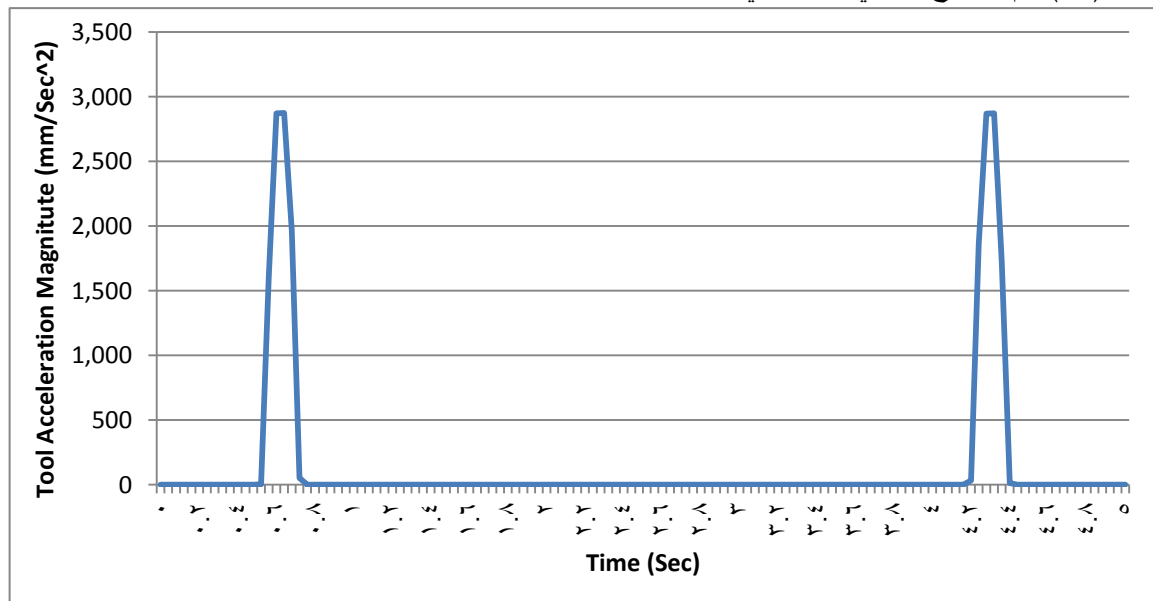
الشكل (22) السرعة الخطية لأداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 20 mm .

بينما يوضح الشكل (23) التسارع الخطي لأداة الروبوت أثناء حركتها وفق المسار المحدد.



الشكل (23) التسارع الخطي لأداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 20 mm .

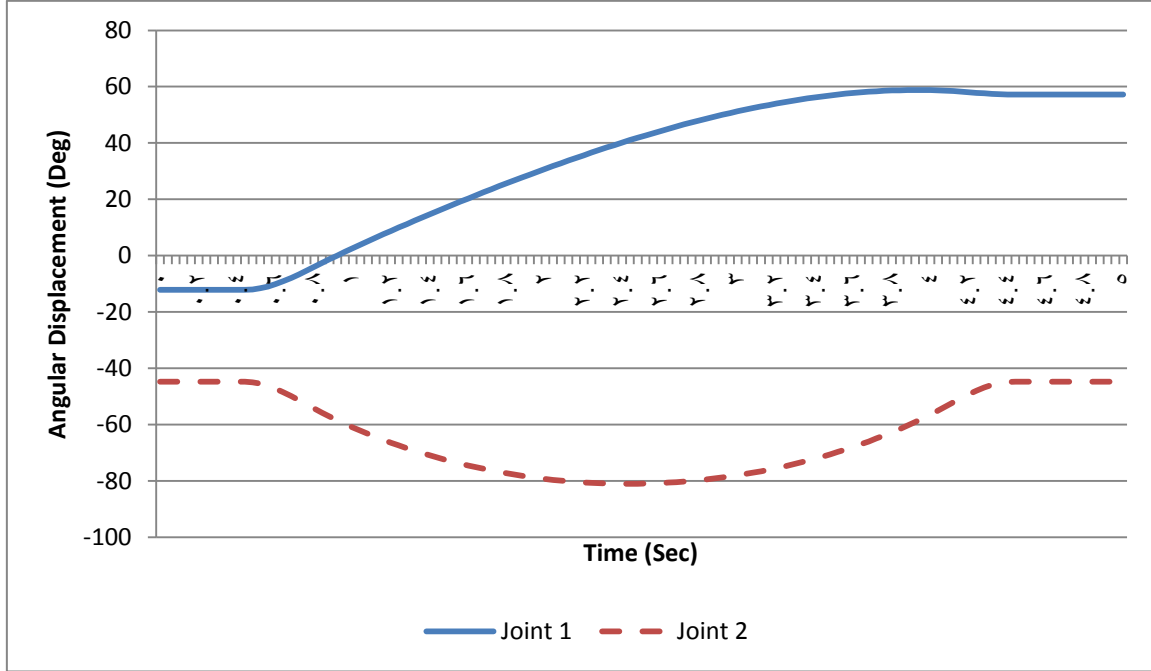
وبما أن قيم القوى الديناميكية التي تتعرض لها الحمولة وأداة الروبوت مرتبطة بقيمة التسارع الخطي، بالتالي يوضح الشكل (24) قيم التسارع الخطي الكلية التي تتعرض لها أداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار المحدد.



الشكل (24) قيمة التسارع الخطي الكلية التي تتعرض لها أداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار شبه المنحرف المعدل بنص قطر 20 mm .

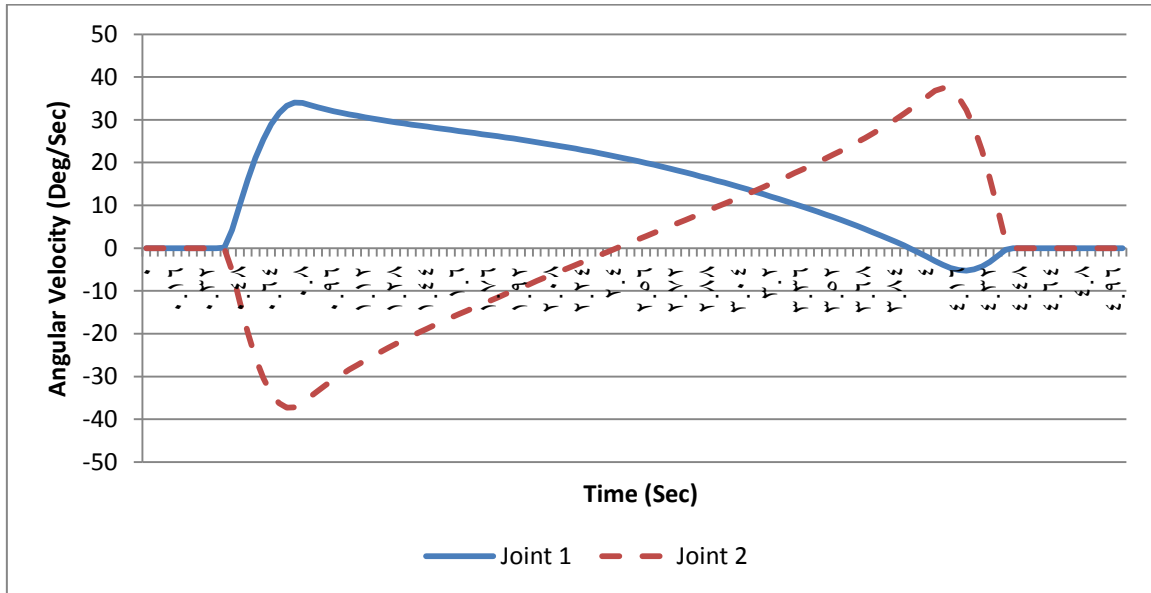
3.1. اختبار مسار شبه منحرف معدل بنصف قطر (60 mm)

بالاعتماد على نموذج الحركة العكسي للروبوت المستخدم يمكن استنتاج زوايا دوران المفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم من أجل تحريك أداة الروبوت وفق المسار المحدد كما هو موضح بالشكل (25).



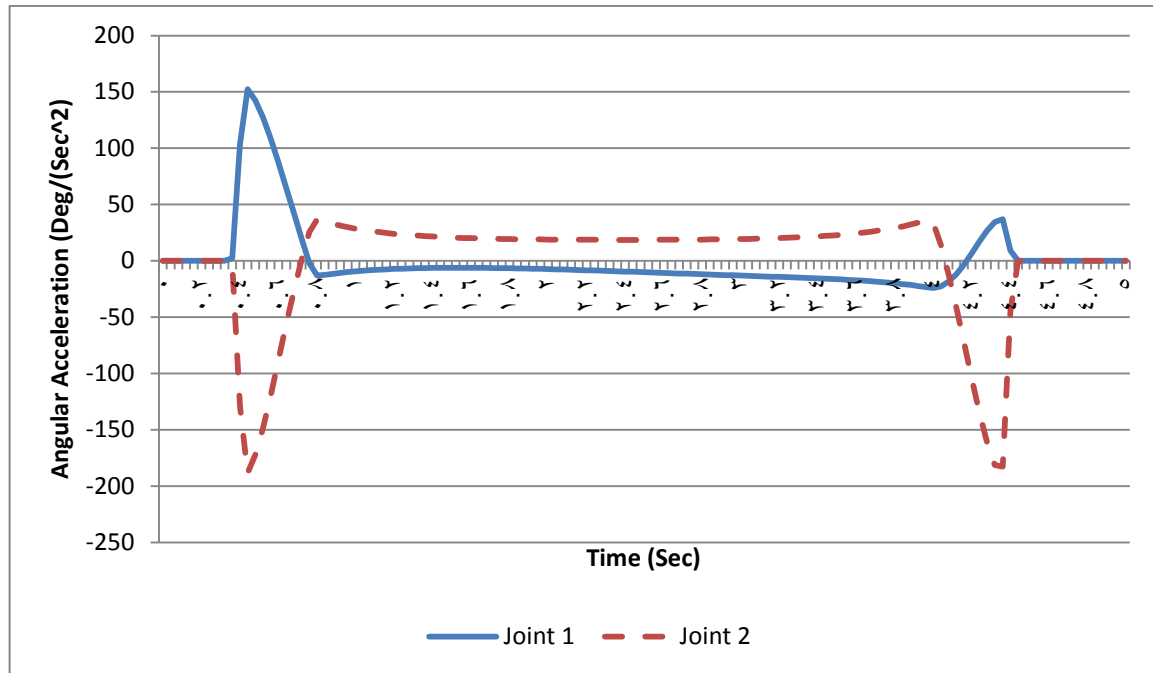
الشكل (25) زوايا دوران المفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال مسار شبه منحرف معدل بنصف قطر 60 mm.

أما الشكل (26) فيوضح قيم السرعة الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت أثناء حركته وفق المسار المحدد.



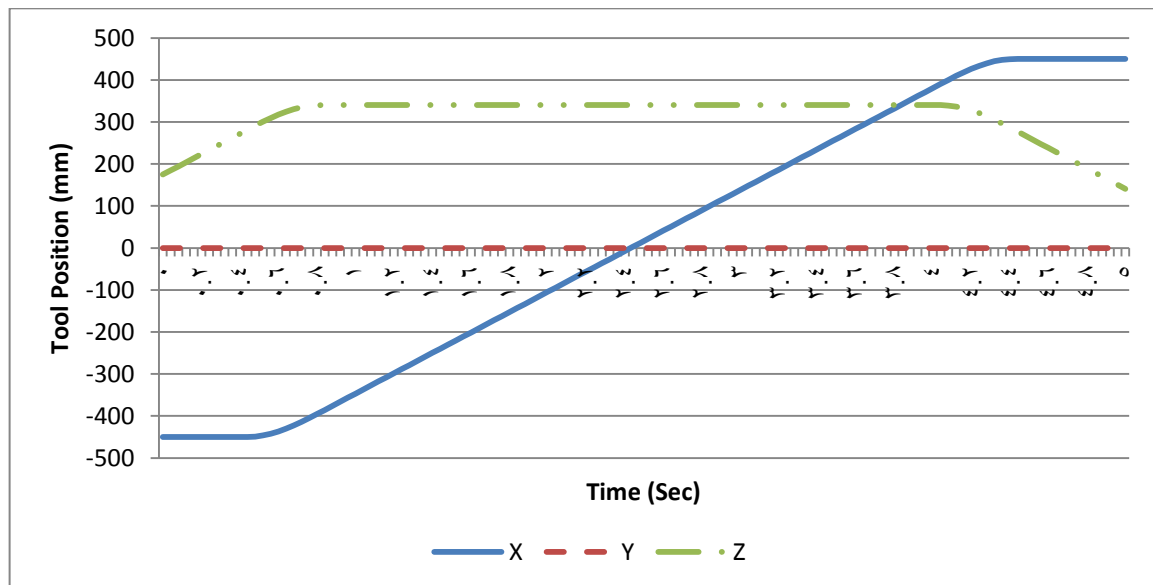
الشكل (26) السرعة الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 60 mm.

أما الشكل (27) فيوضح قيم التسارعات الزاوية لمفصل الروبوت الأول ومفصله الثاني أثناء الحركة وفق المسار المحدد.

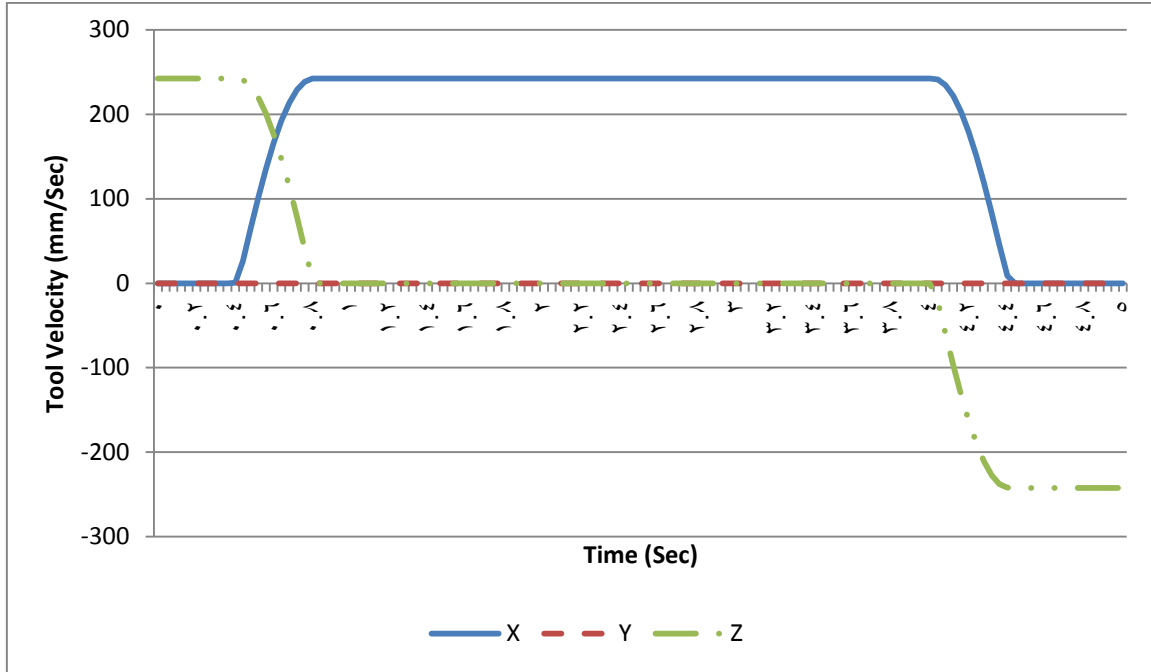


الشكل (27) التسارع الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 60 mm .

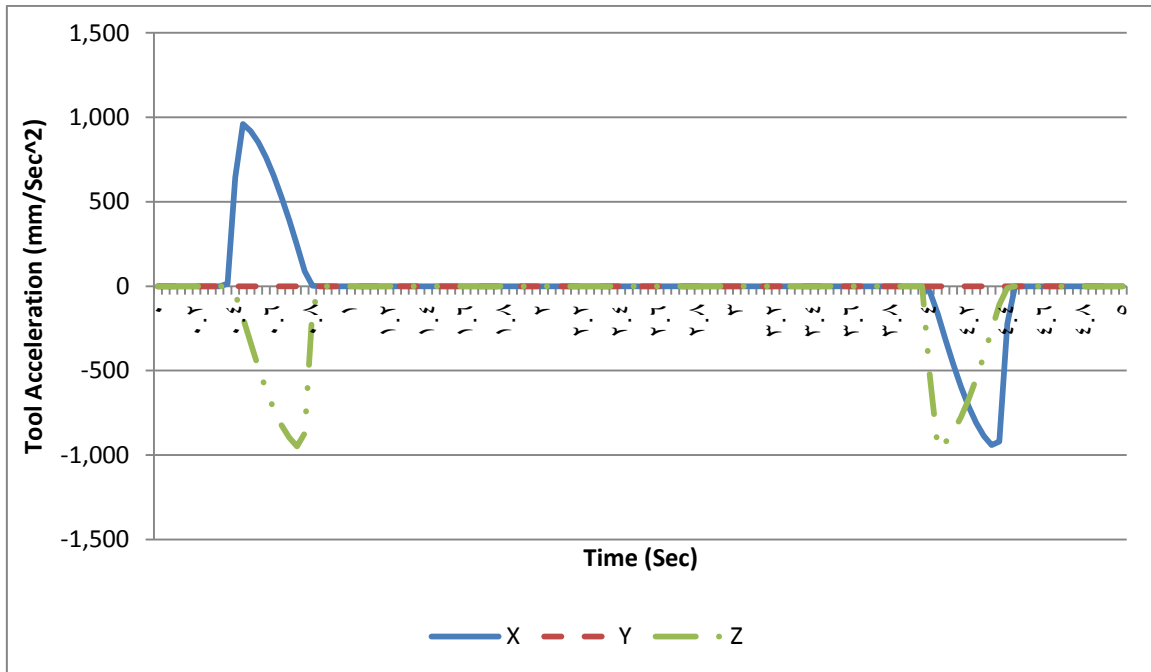
يوضح الشكل (28) إحداثيات أداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار التقليدي، أما الشكل (29) والشكل (30) فيوضحان قيم السرعة الخطية والتسارع الخطي لأداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار المحدد.



الشكل (28) إحداثيات أداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 60 mm .

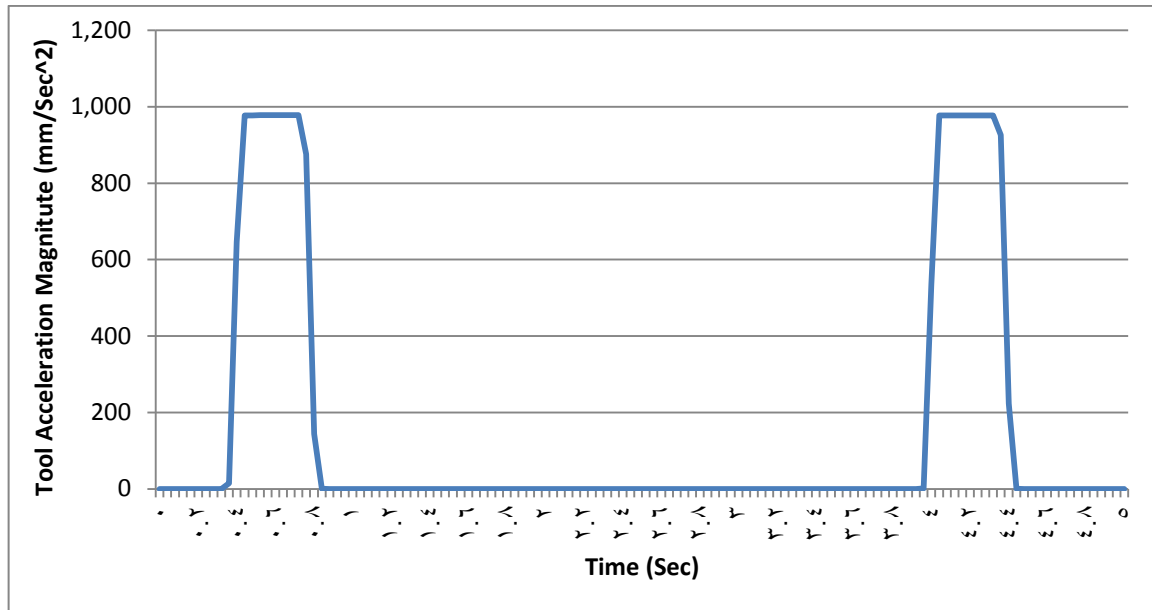


الشكل (29) السرعة الخطية لأداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 60 mm .



الشكل (30) التسارع الخطي لأداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر 60 mm .

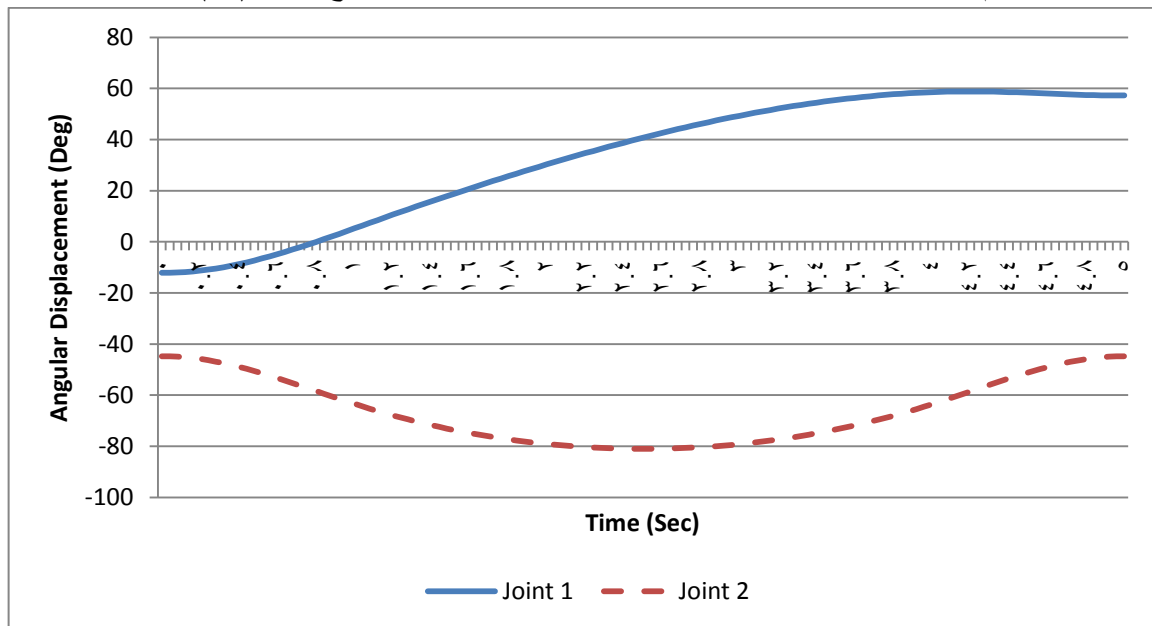
وبما أن قيم القوى الديناميكية التي تتعرض لها الحمولة وأداة الروبوت مرتبطة بقيمة التسارع الخطي، بالتالي يوضح الشكل (31) قيم التسارع الكلية التي تتعرض لها أداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار المحدد.



الشكل (31) قيمة التسارع الخطي الكلي التي تتعرض لها أداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار شبه المنحرف المعدل بنص قطر 60 mm.

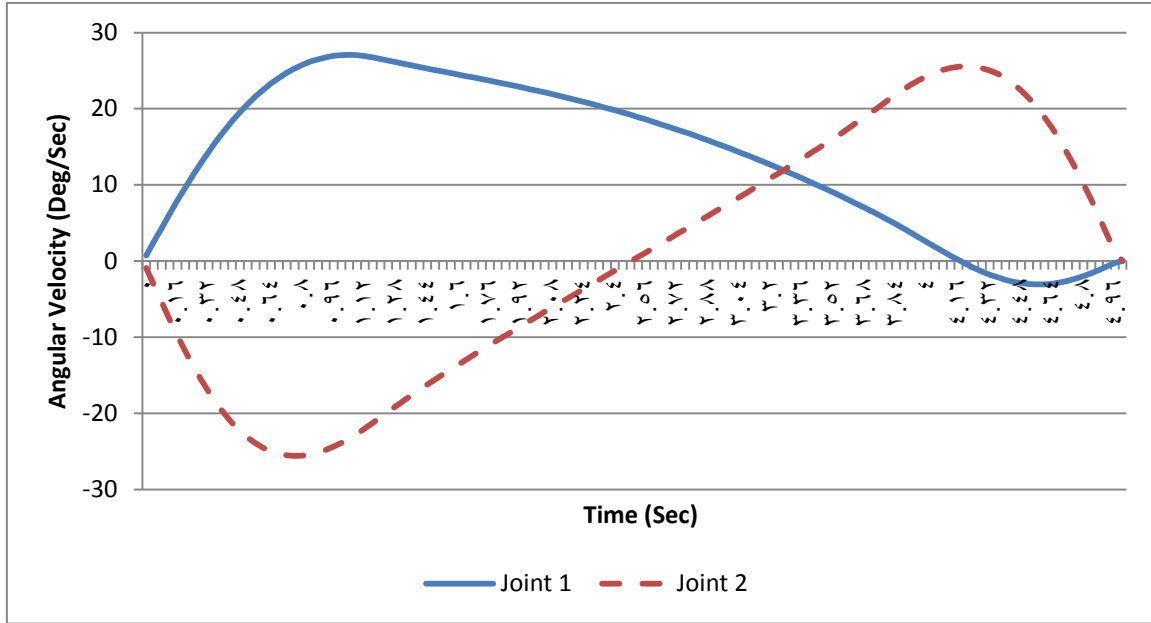
4.1. اختبار مسار شبه منحرف معدل بنصف مساوي للإرتفاع

بالاعتماد على نموذج الحركة العكسي للروبوت المستخدم يمكن استنتاج زاويا دوران المفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم من أجل تحريك أداة الروبوت وفق المسار المحدد كما هو موضح بالشكل (32).

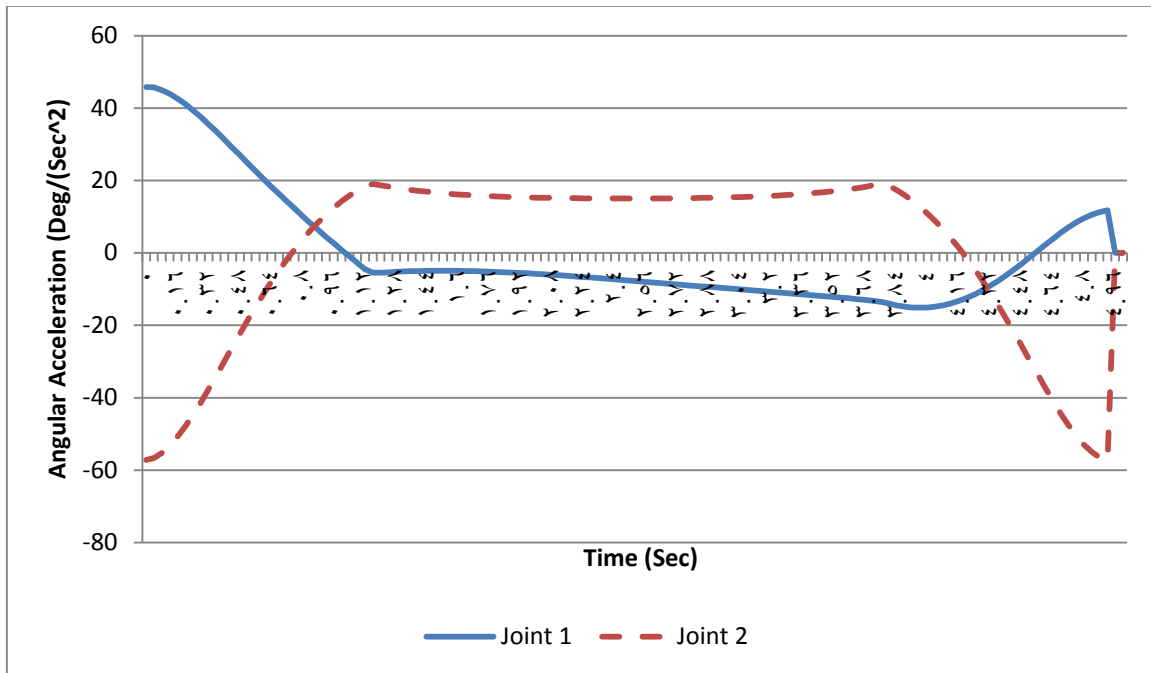


الشكل (32) زاويا دوران المفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال مسار شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع.

أما الشكل (33) والشكل (34) فيوضحان السرعات الزاوية والتسارعات الزاوية على الترتيب للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت أثناء حركة أدواته وفق المسار المحدد.

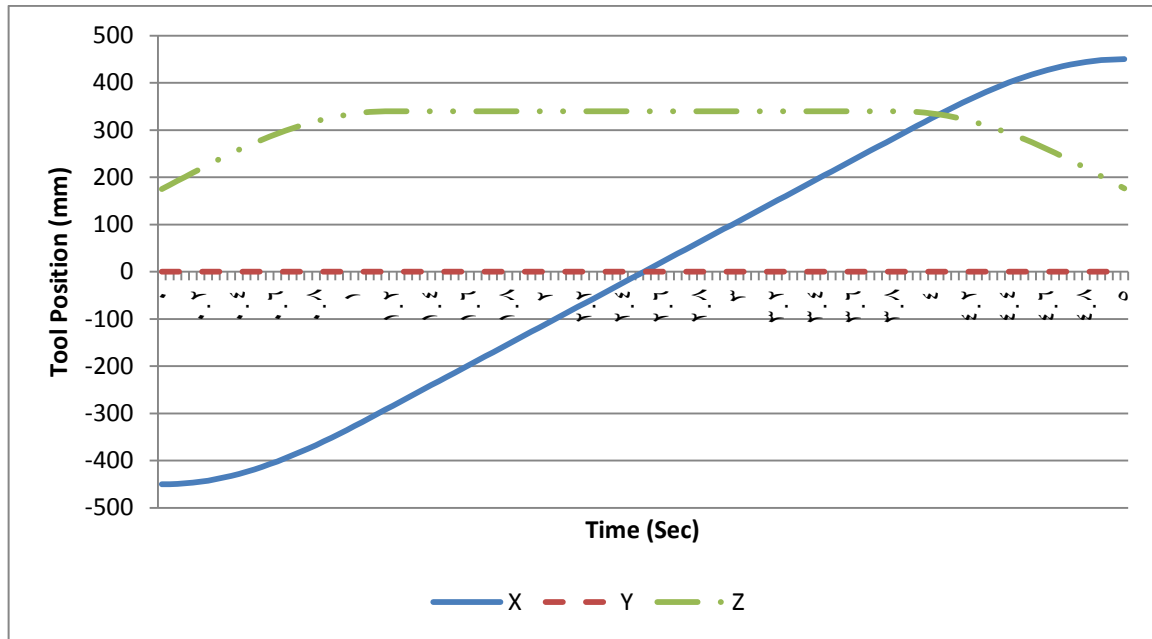


الشكل (33) السرعة الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع.

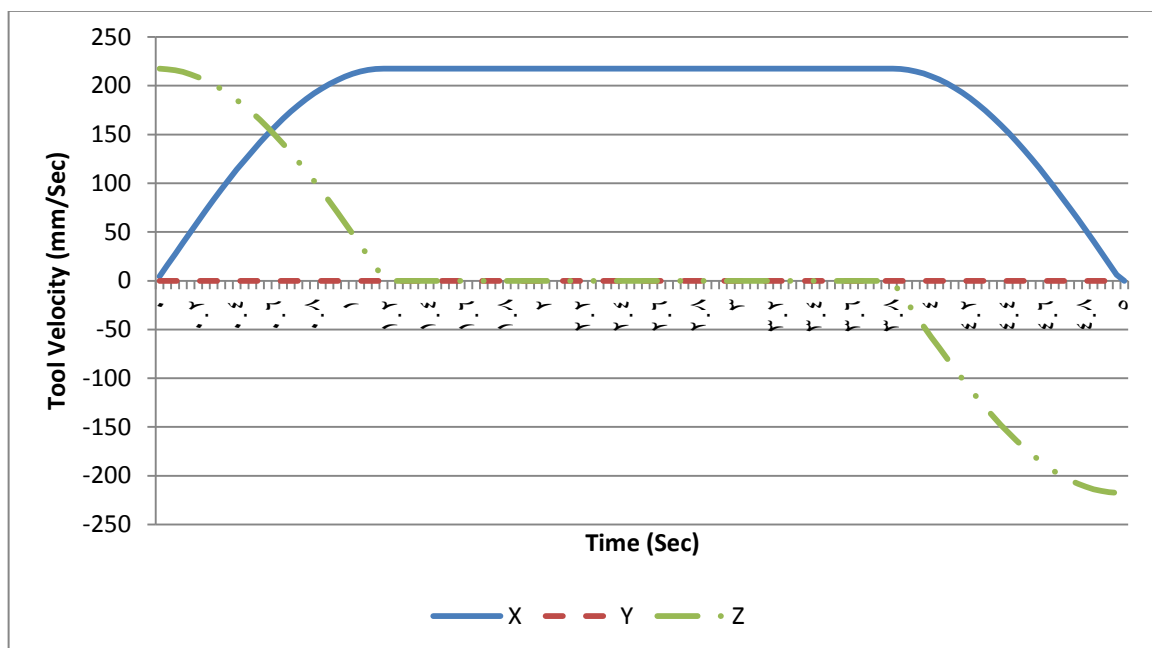


الشكل (34) التسارع الزاوية للمفصل الأول والمفصل الثاني للروبوت المستخدم في حال المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع.

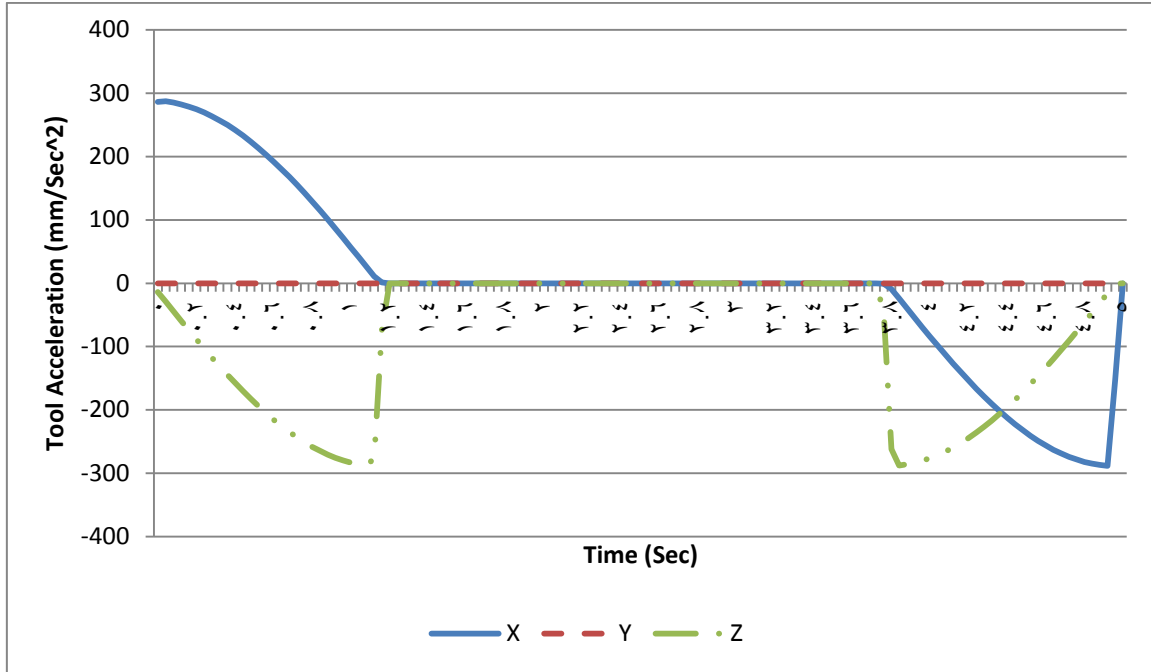
يوضح الشكل (35) إحدائيات أداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الإبتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار التقليدي، أما الشكل (36) والشكل (37) فيوضحان قيم السرعة الخطية والتسارع الخطي لأداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار المحدد.



الشكل (35) إحداثيات أداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع.

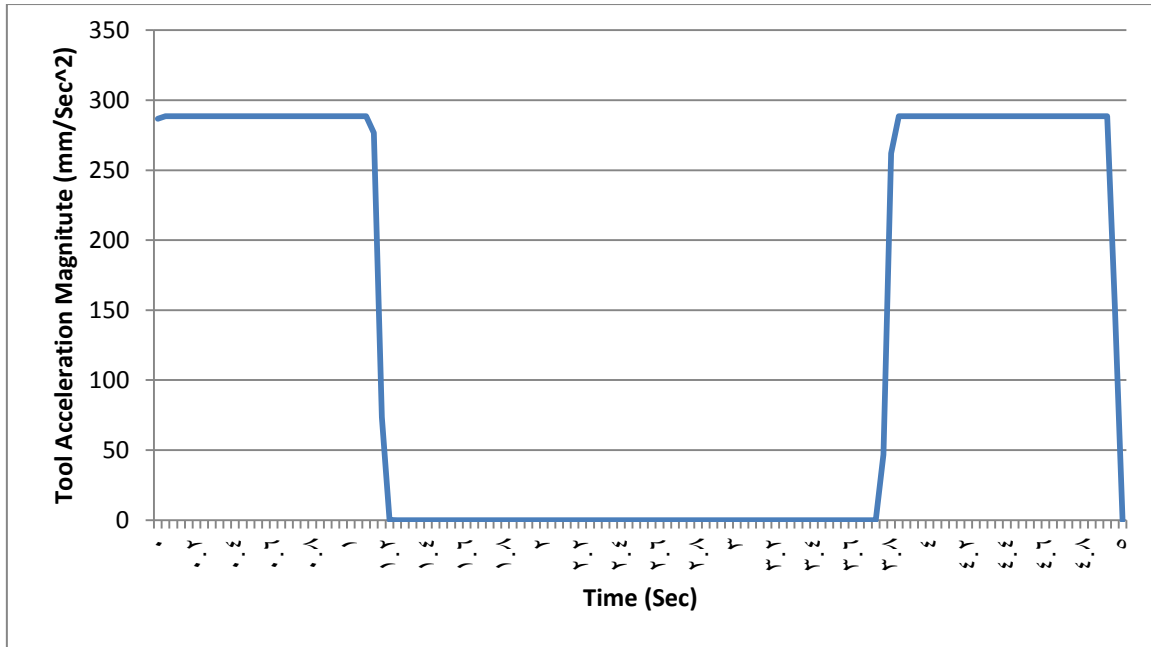


الشكل (36) السرعة الخطية لأداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع.



الشكل (37) التسارع الخطي لأداة الروبوت المستخدم أثناء حركتها من النقطة الابتدائية إلى النقطة الهدف في حالة المسار شبه المنحرف المعدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع.

وبما أن قيم القوى الديناميكية التي تتعرض لها الحمولة وأداة الروبوت مرتبطة بقيمة التسارع الخطي، بالتالي يوضح الشكل (38) قيم التسارع الكلية التي تتعرض لها أداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار المحدد.



الشكل (38) قيمة التسارع الكلية التي تتعرض لها أداة الروبوت أثناء الحركة وفق المسار شبه المنحرف المعدل بنص قطر مساوي للإرتفاع.

المناقشة:

تم في هذا البحث تقييم المسارات المقترحة وفق ثلاثة معايير هي:

- (1) القيمة العظمى للسرعة الزاوية لكل من مفصل الروبوت الأول ومفصل الروبوت الثاني أثناء حركة أداة الروبوت وفق المسار المقترح.
 - (2) القيمة العظمى للتسارع الزاوي لكل من مفصل الروبوت الأول ومفصل الروبوت الثاني أثناء حركة أداة الروبوت وفق المسار المقترح.
 - (3) أقصى قيمة تسارع خطي لأداة الروبوت أثناء حركتها وفق المسار المقترح.
- حيث تؤثر قيم السرعات الزاوية والتسارعات الزاوية لكل من مفصل الروبوت الأول ومفصل الروبوت الثاني على اختيار المشغلات (المحركات) المناسبة لمفاصل الروبوت، فكلما انخفضت قيم السرعات والتسارعات الزاوية كان بالإمكان تشغيل الروبوت لأداء مهمته باستخدام محركات ذات مواصفات أقل مما يؤدي إلى خفض تكلفة التصنيع والحفاظ على سلامة الروبوت لفترة أطول.
- أما قيم التسارع الخطي لأداة الروبوت أثناء حركتها وفق المسار المحدد فتأثر على قيم القوى الديناميكية التي يتعرض لها الروبوت والحمولة فكلما كانت هذه القيم منخفضة كلما أمكن نقل الحمولة بشكل أكثر استقراراً دون تعرض مشغلات الروبوت إلى عزوم عالية.

الجدول (3) القيم العظمى للسرعة الزاوية للمفصلين الأول والثاني للروبوت أثناء حركة أدواته وفق المسارات المقترحة.

رقم المسار	نوع المسار	أقصى سرعة زاوية لمفصل الروبوت الأول Deg/Sec	أقصى سرعة زاوية لمفصل الروبوت الثاني Deg/Sec
1	تقليدي	38	-46.86
2	شبه منحرف معدل بنصف قطر (20 mm)	36.5	-43
3	شبه منحرف معدل بنصف قطر (60 mm)	34	-37.28
4	شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع	27.08	-23.88

يظهر الجدول (3) القيم العظمى للسرعات الزاوية لكل من مفصل الروبوت الأول والمفصل الثاني لجميع المسارات المقترحة، حيث يظهر المسار شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع تفوقاً كبيراً على بقية المسارات بحيث أدى هذا المسار إلى تقليل قيم السرعات الزاوية بمقدار (28.7 %) بالنسبة للمفصل الأول وبمقدار (49 %) بالنسبة للمفصل الثاني بالمقارنة مع المسار التقليدي.

الجدول (4) القيم العظمى للتسارع الزاوي للمفصلين الأول والثاني للروبوت أثناء حركة أدواته وفق المسارات المقترحة.

رقم المسار	نوع المسار	أقصى تسارع زاوي لمفصل الروبوت الأول Deg/Sec^2	أقصى تسارع زاوي لمفصل الروبوت الثاني Deg/Sec^2
1	تقليدي	909.59	-1119.49
2	شبه منحرف معدل بنصف قطر (20 mm)	387	-425.81
3	شبه منحرف معدل بنصف قطر (60 mm)	152.28	-188.3
4	شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع	45.85	-57.15

أما الجدول (4) فيبين القيم العظمى للتسارعات الزاوية لكل من مفصل الروبوت الأول والمفصل الثاني لجميع المسارات المقترحة، حيث يظهر المسار شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع تفوقاً كبيراً على بقية المسارات بحيث أدى هذا المسار إلى خفض أعلى قيمة للتسارع الزاوي بمقدار (94.9 %) بالنسبة للمفصل الأول وبمقدار (94.8 %) بالنسبة للمفصل الثاني بالمقارنة مع المسار التقليدي.

الجدول (5) القيمة العظمى للتسارع الخطي لأداة الروبوت أثناء حركتها وفق المسارات المقترحة.

رقم المسار	نوع المسار	أقصى قيمة تسارع خطي لأداة الروبوت mm/Sec^2
1	تقليدي	8190.5
2	شبه منحرف معدل بنصف قطر (20 mm)	2874
3	شبه منحرف معدل بنصف قطر (60 mm)	977.6
4	شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع	288.6

أما الجدول (5) فيبين القيم العظمى للتسارع الخطي لأداة الروبوت أثناء حركتها وفق جميع المسارات المقترحة، حيث يظهر المسار شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع تفوقاً كبيراً على بقية المسارات بحيث أدى هذا المسار إلى خفض أعلى قيمة تسارع خطي لأداة الروبوت بمقدار (96.5%) بالمقارنة مع المسار التقليدي.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث المقارنة بين عدة أنواع لمسارات التقاط الأجسام ووضعها في أماكن محددة باستخدام روبوت تجميع انتقائي من نوع RRP، حيث تم المقارنة بين ثلاث أنواع من المسارات كما يلي:

- مسار التقليدي المكون من ثلاث مراحل (ارتفاع، انتقال إلى المنطقة الهدف من ثم مرحلة الخفض).
- مسار شبه المنحرف معدل بأنصاف أقطار مختلفة.
- مسار شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع.

حيث تم تقييم المسارات السابقة بالاعتماد على قيم السرعات والتسارعات الزاوية للمفاصل الدورانية للروبوت المستخدم بالإضافة إلى قيم التسارع الخطي لأداة الروبوت أثناء حركتها وفق المسار المحدد ذلك باستخدام برنامج Solidworks.

حيث يمكن تلخيص النتائج وفق النقاط التالية:

- أدى المسار شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع إلى تقليل قيم السرعات الزاوية بمقدار (28.7 %) بالنسبة للمفصل الأول وبمقدار (49 %) بالنسبة للمفصل الثاني بالمقارنة مع المسار التقليدي.
- أدى المسار شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع إلى خفض أعلى قيمة للتسارع الزاوي بمقدار (94.9 %) بالنسبة للمفصل الأول وبمقدار (94.8 %) بالنسبة للمفصل الثاني بالمقارنة مع المسار التقليدي.
- أدى المسار شبه منحرف معدل بنصف قطر مساوي للإرتفاع إلى خفض أعلى قيمة تسارع خطي لأداة الروبوت بمقدار (96.5%) بالمقارنة مع المسار التقليدي.

References:

- [1]L. E. G. Moctezuma, A. Lobov, and J. L. M. Lastra, "Free shape paths in industrial robots," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 3739–3743, 2012, doi: 10.1109/IECON.2012.6389296.
- [2]H. Chen and Y. Liu, "Robotic assembly automation using robust compliant control," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 2, pp. 293–300, 2013, doi: 10.1016/j.rcim.2012.09.001.
- [3]C. Pop, S. M. Grigorescu, and A. Davidescu, "Colored object detection algorithm for visual-servoing application," *Proc. Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM*, no. March, pp. 1539–1544, 2012, doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231887.
- [4]L. U. Odhner and A. M. Dollar, "The smooth curvature model: An efficient representation of Euler-Bernoulli flexures as robot joints," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 28, no. 4, pp. 761–772, 2012, doi: 10.1109/TRO.2012.2193232.
- [5]M. A. Arteaga Pérez and M. Bueno Lopez, "3D Visual Servoing Control for Robot Manipulators Without Parametric Identification," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 3, pp. 569–577, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7069076.
- [6]Y. Li and S. S. Ge, "Human-robot collaboration based on motion intention estimation," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 1007–1014, 2014, doi: 10.1109/TMECH.2013.2264533.
- [7]L. M. Capisani and A. Ferrara, "Trajectory planning and second-order sliding mode motion/interaction control for robot manipulators in unknown environments," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 8, pp. 3189–3198, 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2160510.
- [8]G. Chen, L. Zhai, Q. Huang, L. Li, and J. Shi, "Trajectory planning of Delta robot for fixed point pick and placement," *Proc. 2012 4th Int. Symp. Inf. Sci. Eng. ISISE 2012*, pp. 236–239, 2012, doi: 10.1109/ISISE.2012.59.
- [9]T. Su, L. Cheng, Y. Wang, X. Liang, J. Zheng, and H. Zhang, "Time-Optimal Trajectory Planning for Delta Robot Based on Quintic Pythagorean-Hodograph Curves," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28530–28539, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2831663.
- [10]P. D. I. Torino, "Trajectory Planning and Control of High-Speed Pick and Place in Industrial Processes," no. December, 2018.
- [11]Z. Chang, R. A. Ali, P. Ren, G. Zhang, and P. Wu, "Dynamics and Vibration

- Analysis of Delta Robot,” *Proc. 5th Int. Conf. Inf. Eng. Mech. Mater.*, vol. 21, no. Icimm, pp. 1408–1417, 2015, doi: 10.2991/icimm-15.2015.257.
- [12] “The simple solution Ideal for pick-and-place applications.”
- [13] G. Chen, L. Zhai, L. Li, and J. Shi, “Trajectory planning of Delta robot for dynamic tracking, pick and placement,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 680, pp. 473–478, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.680.473.
- [14] A. Kaleli, A. Dumlu, M. F. Çorapsiz, and K. Erentürk, “Detailed analysis of SCARA-type serial manipulator on a moving base with LabView,” *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 10, 2013, doi: 10.5772/56178.
- [15] A. K. Jha, “Analysis of Dynamics of SCORA-ER14 Robot in MATLAB,” *Int. J. Innov. Res. Adv. Eng.*, vol. 1, no. 4, pp. 145–150, 2014.
- [16] C. Urrea and J. Kern, “Trajectory tracking control of a real redundant manipulator of the SCARA type,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 215–226, 2016, doi: 10.5370/JEET.2016.11.1.215.
- [17] K. M. Myint, Z. Min, M. Htun, and H. M. Tun, “Position Control Method For Pick And Place Robot Arm For Object Sorting System,” *Position Control Method Pick Place Robot Arm Object Sorting Syst.*, vol. 5, no. 6, pp. 57–61, 2016.
- [18] S. M. Mariappan and A. Veerabathiran, “Modelling and simulation of multi spindle drilling redundant SCARA robot using SolidWorks and MATLAB/SimMechanics,” *Rev. Fac. Ing.*, vol. 2016, no. 81, pp. 63–72, 2016, doi: 10.17533/udea.redin.n81a06.
- [19] Y. Xu and R. Liu, “Dynamic modeling of SCARA robot based on Udwadia–Kalaba theory,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 10, pp. 1–12, 2017, doi: 10.1177/1687814017728450.