

Modeling And Simulation Of A 5-Axis Rv-2aj Robot Using Simmechanics

Dr. Rabie Habib *

(Received 5 / 2 / 2019. Accepted 3 / 3 / 2019)

□ ABSTRACT □

In this paper, mathematical model for industrial robot (Mitsubishi RV-2aj) was found, besides mechanical model for robot was designed using solidworks software, CAD files were exported to Matlab\Simmechanics library, besides mathematical model (forward kinematics model, inverse kinematics model) and mechanical model were merged with user interface windows designed in Matlab\GUI.

Proposed model presents accurate model describes robot motion, that allows user to test robot motion.

Besides, virtual paths (rectangular, semicircular paths) were generated for robot's tool moving to reach to target point, tested paths properties (joint torque, elapsed time, travel distance) were calculated and compared with each other according to purpose of robot tool movement.

Keywords: Industrial Robot Arm Modeling, Path Planning, Forward kinematics, Inverse kinematics, Mitsubishi RV-2aj.

* Associate professor, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria

نمذجة روبوت Mitsubishi RV-2aj خماسي درجة الحرية باستخدام Simmechanics

د. ربيع حبيب*

(تاريخ الإيداع 5 / 2 / 2019. قُبِلَ للنشر في 3 / 3 / 2019)

□ ملخص □

تم في هذا البحث ايجاد النموذج الرياضي للروبوت الصناعي (Mitsubishi RV-2aj)، كما تم تصميم النموذج الميكانيكي للروبوت باستخدام برامج الـ SolidWorks وتوريد ملفات الـ CAD إلى مكتبة SimMechanics\Matlab بالإضافة إلى دمج النموذج الرياضي (نموذج الحركة الأمامي ونموذج الحركة العكسي للروبوت) والنموذج الميكانيكي مع واجهة تخاطب مع المستخدم مصممة باستخدام GUI\Matlab. يقدم النموذج المقترح نموذج دقيق يحاكي مميزات الروبوت المستخدم مما يتيح اختبار حركات الروبوت ويجاد طريقة حركته كما تم اختبار النموذج من خلال اختبار نموذج الحركة الأمامية ونموذج الحركة العكسية ويجاد مسارات حركة أداة الروبوت اثناء حركة محددة من قبل المستخدم. تم توليد مسارات افتراضية تعبر عن حركة أداة الذراع الآلي للوصول إلى نقطة الهدف مع الأخذ بعين الاعتبار الشكل المنحني والمستطيل لهذه المسارات. وتم الحصول على مميزات المسارات (عزوم المفاصل، زمن الانتقال ومسافة الانتقال) باستخدام برنامج الماتلاب والمقارنة فيما بينها تبعاً للهدف المراد تنفيذه بواسطة الروبوت.

الكلمات المفتاحية: نمذجة روبوت صناعي، تصميم مسار، الحركة الأمامية، الحركة العكسية، Mitsubishi RV-2aj.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

مقدمة

انتشر استخدام الروبوتات في العديد من المجالات منها الصناعية، الطبية، العسكرية، الفضائية، حيث يمكنها تنفيذ العديد من المهام مثل اللحام، الفك والتجميع، النقل والمناولة.... الخ وذلك ضمن شروط عمل معقدة ومتنوعة. اهتم الصناعيون بتطوير مصانعهم لزيادة الانتاج وخفض التكاليف وتحسين جودة المنتج من خلال استخدام الروبوتات الصناعية في قيادة وانهاء معظم العمليات الانتاجية، حيث تتصف الروبوتات بأنها هيكل ميكانيكية قابلة للبرمجة لأداء مهام لا يستطيع الانسان القيام بها، حيث تتميز بالدقة والسرعة والوثوقية مقارنة بالأعمال التي يؤديها الإنسان [1].

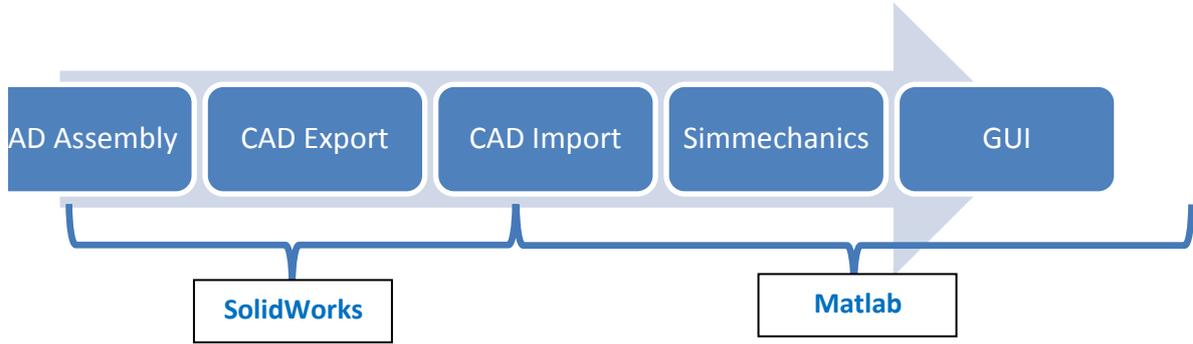
ومع الانتشار الكبير للروبوتات الصناعية وازدياد دقة وأهمية المهام الموكلة اليها بالإضافة إلى امكانية وجود عمال في محيط عمل الروبوت، دعت الحاجة إلى ايجاد برامج تمكن المصممين من نمذجة واختبار الروبوت وتطوير نظام التحكم الخاص به في بيئة عمل افتراضي قبل تركيبه في بيئة العمل النهائية مما ساهم في تخفيض كلفة تصميم الروبوت والحفاظ على سلامة العمال المتواجدين في منطقة عمله [2]. في هذا البحث تم دراسة الروبوت (Mitsubishi RV-2aj) وبناء برنامج لنمذجته انطلاقاً من ايجاد النموذج الأمامي والعكسي له واختبار حركته بالاعتماد على Gui \Matlab و Simmechanics\Matlab بالإضافة إلى تصميم النموذج الميكانيكي للروبوت بالاعتماد على برنامج الـ Solidworks.

أهمية البحث و أهدافه

تكمن أهمية البحث في ايجاد النموذج الأمامي والعكسي للروبوت الصناعي (Mitsubishi RV-2aj) والاعتماد على النماذج السابقة في بناء برنامج يتيح للمستخدم برمجة حركات الروبوت واختباره ومشاهدة آلية حركته مما يضمن عدم وجود أخطاء أثناء التشغيل الفعلي للروبوت، بالإضافة إلى أن البرنامج المقترح يمكن أن يشكل أداة تعليمية مفيدة تتيح للطلاب ذو الاختصاص [2].

طرائق البحث و مواد

بما أن الهدف الاساسي من البحث هو ايجاد النموذج الرياضي لروبوت خماسي درجة الحرية من نوع (Mitsubishi RV-2aj) باستخدام برنامج الـ Matlab، فإنه يلزم لإتمام البحث انجاز المراحل الموضحة بالشكل (1)، بحيث تكون المرحلة الأولى هي البدء بالتصميم الميكانيكي لهذا الروبوت باستخدام برنامج التصميم الهندسي SolidWorks وحفظ التصميم باستخدام ملفات STL، وفي المرحلة الثانية يصدر هذا التصميم إلى برنامج Matlab/Simulink/SimMechanics لاستنتاج النموذج الرياضي للروبوت. أما المرحلة الثالثة فتتطلب ربط النموذج الرياضي بواجهة تخاطب تمكن المستخدم من نمذجة حركات الروبوت انطلاقاً من دراسة الحركة الأمامية (Forward Kinematic) والحركة العكسية (Inverse Kinematic) للروبوت المستخدم [3] [4].

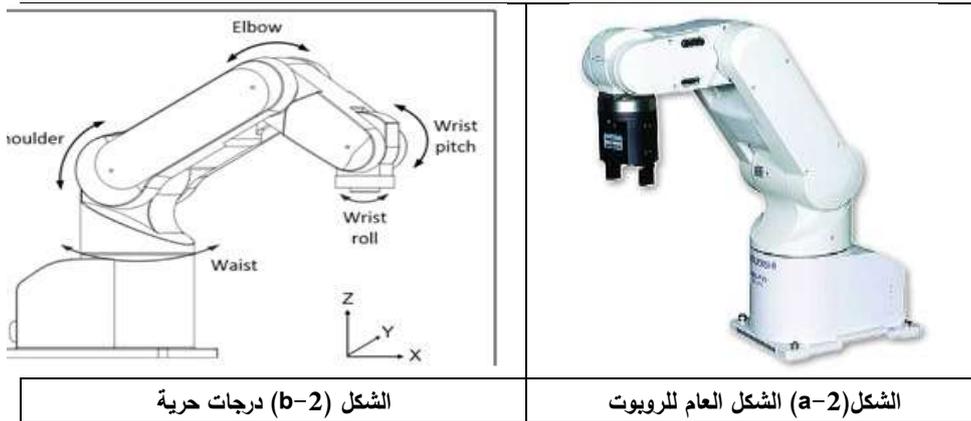


الشكل (1) مراحل تصميم ونمذجة الروبوت Mitsubishi RV-2aj

نمذجة روبوت Mitsubishi RV-2aj

يستخدم هذا الروبوت في العمليات الصناعية حيث يمتلك خمس درجات حرية كما هو مبين بالشكل (b-2). مهمة هذا الروبوت التقاط منتج ما من مكان محدد ونقله في فضاء ثلاثي البعد إلى مكان آخر وإعادة تكرار العملية مرات متعددة في اليوم.

كما يوضح الشكل (a-2) والجدول (1) شكل الروبوت ومواصفات المفاصل (مجال زاوية الدوران، أقصى سرعة زاوية للمفصل). فيما يوضح الشكل (3) والجدول (2) الأبعاد الهندسية للروبوت المستخدم [4].



الشكل (b-2) درجات حرية

الشكل (a-2) الشكل العام للروبوت

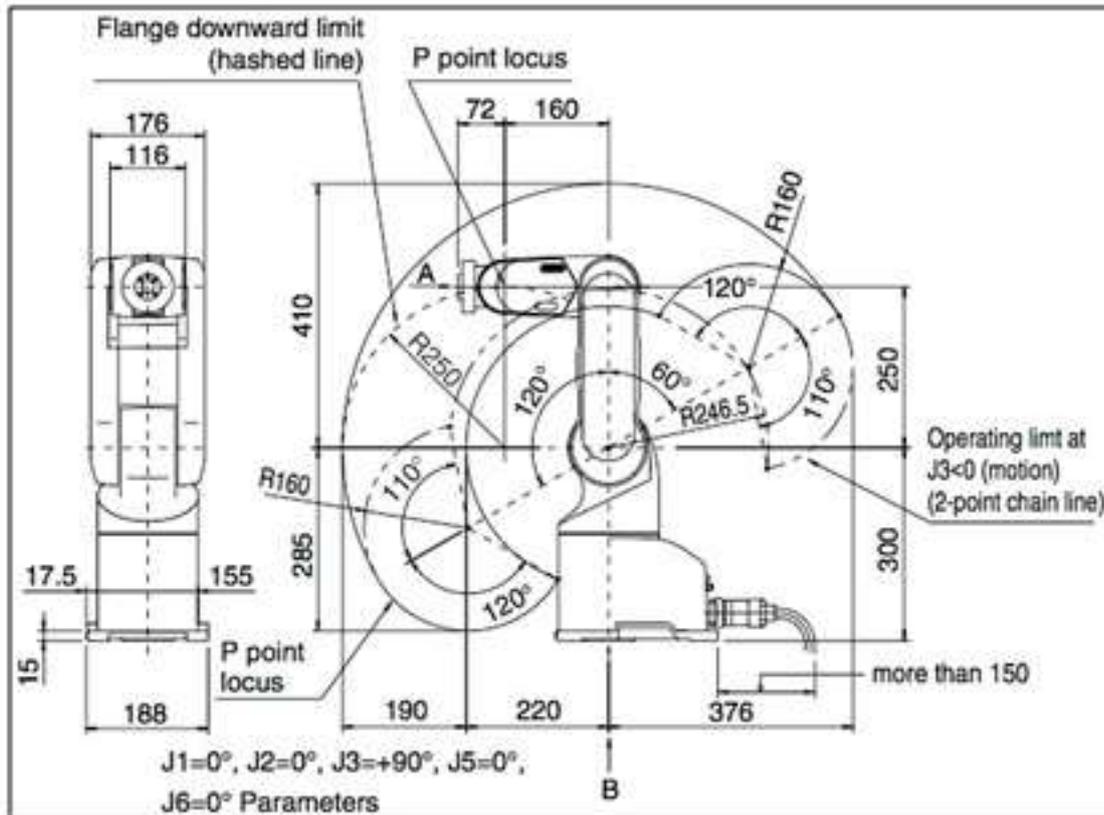
الشكل (2) الرسوم التوضيحية للروبوت Mitsubishi RV-2aj [4] [5]

الجدول (1) الأبعاد الهندسية للروبوت Mitsubishi RV-2aj

رقم	اسم المفصل	مجال زاوية دوران	أقصى سرعة زاوية
1	القاعدة (waist)	$300(-150 \text{ to } +150)^\circ$	$180^\circ/\text{s}$
2	الكتف (Shoulder)	$180(-60 \text{ to } +120)^\circ$	$90^\circ/\text{s}$
3	المرفق (Elbow)	$230(-110 \text{ to } +120)^\circ$	$135^\circ/\text{s}$
4	دوران المعصم (wrist pitch)	$320(-160 \text{ to } +160)^\circ$	$180^\circ/\text{s}$
5	دوران المعصم (wrist Roll)	$400(-200 \text{ to } +200)^\circ$	$210^\circ/\text{s}$

الجدول (2) مواصفات مفاصل الروبوت Mitsubishi RV-2aj [4] [5]

البعد (mm)	الوصلة
300	البعد بين القاعدة والكتف
250	البعد بين الكتف والمرفق
160	البعد بين المرفق والمعصم
72	البعد بين المعصم وأداة الروبوت

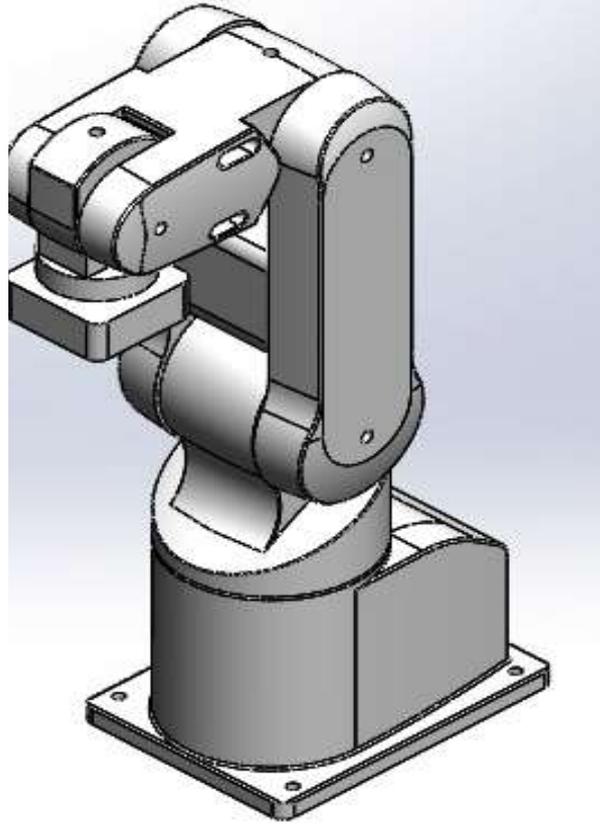


الشكل (3) الرسم التفصيلي للأبعاد الهندسية للروبوت المستخدم [6].

تصدير ملفات الـ CAD إلى برنامج Matlab

تم بناء النموذج الميكانيكي للروبوت باستخدام برنامج SolidWorks من خلال تصميم كل عنصر من عناصر الروبوت على حدة وفقاً لأبعاد الهندسية الموضحة في الشكل (3) والجدول (2)، ومن ثم تجميع هذه العناصر مع بعضها البعض لتشكيل النموذج النهائي للروبوت في فضاء ثلاثي الأبعاد كما هو موضح بالشكل (4)، وذلك من خلال ربط العناصر مع بعضها البعض بالازدواج الحركي الملائم (مفصل حركي)، حيث يمتلك كل مفصل من المفاصل الخمسة درجة حرية وحيدة وهي الدوران حول محور المفصل.

بالاعتماد على مكتبة SimMechanics في الـ Matlab تم استيراد ملفات الـ CAD من برنامج SolidWorks وذلك بعد أن تم توليد ملفات STL و XML لجميع الأجزاء المكونة للروبوت.

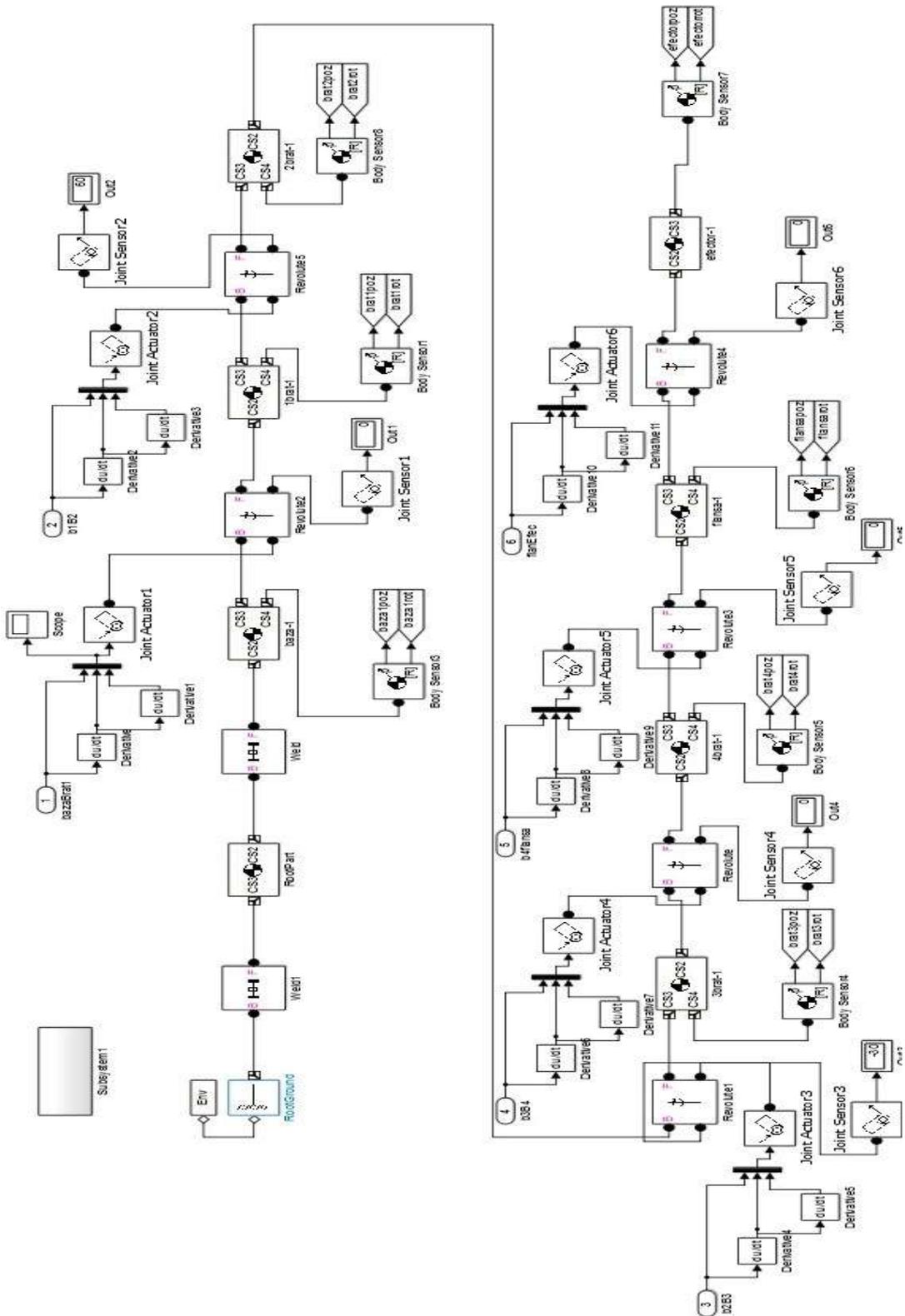


الشكل (4) النموذج الميكانيكي للروبوت باستخدام برنامج الـ Solidworks

نمذجة الروبوت باستخدام مكتبة SimMechanics

بعد استكمال عملية استيراد ملفات الـ CAD للروبوت إلى برنامج Matlab يتم توليد النموذج المكافئ له بالاستعانة بمكتبة SimMechanics والموضح بالشكل (5).

النموذج المولد لا يضم على أية مشغلات للمفاصل وحساسات لذلك يتم تطبيق الحركة الدورانية على المفاصل الدورانية للروبوت بالاعتماد على بلوكات المشغلات (actuator blocks)، كما يتم إضافة الحساسات على المفاصل في النموذج والتي تعطي على خرجها موضع وسرعة المفصل.



الشكل (5) نموذج الروبوت Mitsubishi RV-2 باستخدام مكتبة SimMechanics Simulink

أما بالنسبة إلى دخل التحكم (مشغلات المفاصل (joint actuators)) فيتم عن طريق ارسال التعليمات المناسبة عن طريق المستخدم من خلال واجهة التخابط GUI المصممة والمبينة بالشكل(6).



الشكل(6) واجهة الـ GUI المصممة للتحكم بنموذج الروبوت المقترح

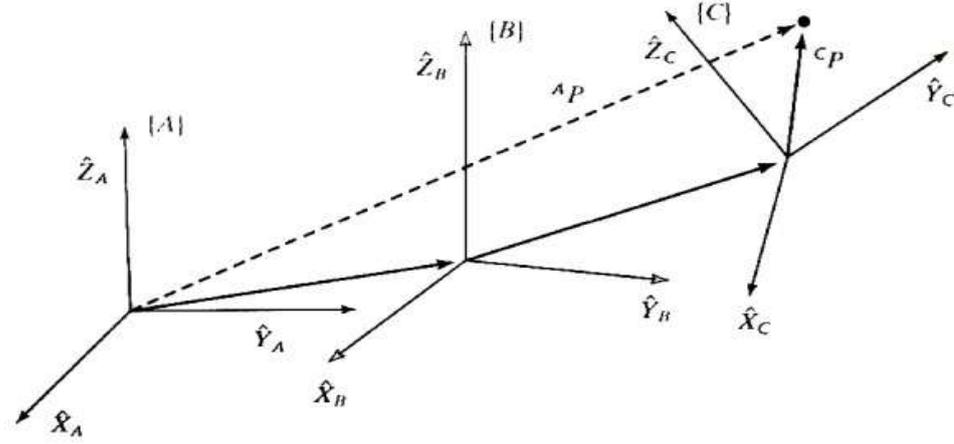
لاستكمال بناء النموذج للروبوت Mitsubishi RV-2aj يجب دراسة نموذج الحركة المباشر والعكسي مروراً بإيجاد تمثيل دينايفيت-هارينترغ.

تمثيل دينايفيت-هارينترغ (D-H) Denavit-Harbenterg

تتكون الروبوتات من وصلات ومفاصل، بحيث تؤدي كل وصلة حركة انسحابية أو دورانية تبعاً لنوع المفصل. وإن أقرب مثال على ذلك هو ذراع الإنسان المكون من العظام التي تمثل الوصلات والملتصدة فيما بينها بمفاصل دورانية كمفصل الكتف ومفصل المرفق. وتعتبر المفاصل الدورانية الأكثر استخداماً لبناء الروبوتات وخصوصاً الروبوتات الصناعية[9].

تحتوي الروبوتات على عدة وصلات تشكل بين محاور دورانها زوايا أويلر (Euler angles) لتكافئ المعصم في ذراع الإنسان. كما تحتوي نهايتها على المنفذ الطرفي (end-effector) كمقبض والذي يشابه بعمله أصابع اليد لالتقاط الأجسام. يهدف إيجاد النموذج الرياضي الممثل للروبوت على تحديد موضع واتجاه المنفذ الطرفي (-end effector) مقارنة بالقاعدة، وبالتالي يجب علينا تعيين الأطر الإحداثية (Coordinate Frames) لقاعدة و نهاية الروبوت بالإضافة إلى جميع المفاصل[9].

يمكن تمثيل انتقال إطار (Frame) بالنسبة لإطار آخر من خلال الشعاع ${}^i p_{i+1} : 3 \times 1$.



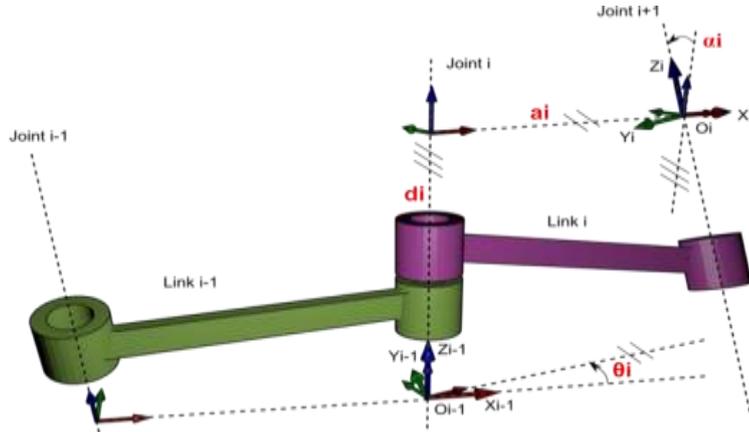
الشكل (7) إطارات الإحداثيات [10]

أما تمثيل دوران إطار بالنسبة للإطار آخر يتم من خلال مصفوفة الدوران ${}^{i-1}_i R : 3 \times 3$. في النهاية لتمثيل انتقال ودوران الإطار i بالنسبة للإطار $i-1$ ، باستخدام مصفوفة ${}^{i-1}_i T : 4 \times 4$ التي يمكن إيجادها من خلال العلاقة (1):

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} {}^{i-1}_i R & {}^{i-1}_i P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

كما تم استخدام تمثيل دينايفيت-هارينترغ المعدلة Denavit-Harberterg (D-H) لوصف تمثيل الإطارات في الروبوتات. وكما يوضح الشكل (8) تعرف بارامترات تمثيل دينايفيت-هارينترغ كالتالي [11] [13]:

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



الشكل (8) إطارات الوصلة وبارامترات الحركة

عند استخدام تمثيل دينايفيت-هارينترغ عندها يمكن تمثيل مصفوفة التحويل العامة وفق الآتي:

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i \alpha_i & s\theta_i \alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i \alpha_i & -c\theta_i \alpha_i & \alpha_i s\theta_i \\ 0 & \alpha_i & \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

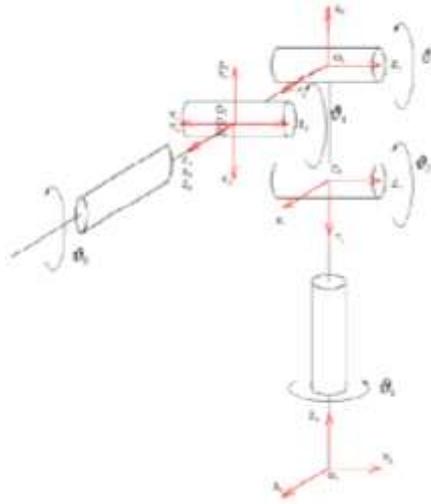
بحيث تم استخدام الاختصارات التالية في كتابة المعادلات: $c\theta_i = \cos \theta_i$ و $s\theta_i = \sin \theta_i$.

يتم حساب مصفوفة التحويل النهائية من أجل N مفصل في الذراع الآلي. بين القاعدة و نهاية الذراع الآلي من خلال جداء مصفوفات التحويل لجميع المفاصل كما يلي:

$${}^0T_N = {}^0T_1 T_2 T \dots \dots T_{N-1} T, N = \text{joints Number} \quad (3)$$

تعرف هذه العملية بالحركة الأمامية للذراع (المباشر) الذي يعرف بحساب موضع واتجاه المنفذ الطرفي (end-effector) انطلاقا من معرفة بارامترات المفاصل. على عكس ذلك، تحدد الحركة العكسية بحساب متغيرات المفاصل من خلال معرفة موضع واتجاه نهاية الروبوت. تمكن صعوبة الحركة العكسية بوجود عدة حلول ممكنة لاستنتاج متغيرات المفاصل والتي تتحقق من خلالها معرفة الموضع والاتجاه المراد لنهاية الروبوت [10] [16].

يوضح الشكل (9) مواضع الإطارات وأبعاد الروبوت المستخدم والبارامترات الأربعة لكل مفصل d_i ، α_i ، a_i و θ_i . أما الجدول (3) فيوضح بارامترات تمثيل دينايفيت-هارينترغ للروبوت Mitsubishi RV-2aj.



الشكل (9) بارامترات الحركة واسناد الإطارات للروبوت Mitsubishi RV-2aj

الجدول (3) بارامترات تمثيل دينايفيت-هارينترغ للروبوت Mitsubishi RV-2aj

$\theta_i [^\circ]$	$d_i [m]$	$a_i [m]$	$\alpha_i [^\circ]$	i
θ_1	0.3	0	-90	1
θ_2	0	0.25	0	2
θ_3	0	0.16	0	3
θ_4	0	0	-90	4
θ_5	0.072+0.108	0	0	5

الحركة الأمامية (Forward Kinematics)

يتم استخدام الحركة الأمامية لتحديد إحداثيات أداة الروبوت بالنسبة لمركز قاعدة الروبوت من خلال معرفة زوايا دوران المفاصل وذلك من خلال ايجاد مصفوفة التحويل لكل سطر من اسطر الجدول (3) ومن ثم نستخدم المعادلة (3) لاستنتاج مصفوفة التحويل النهائية والتي هي عبارة عن جداء مصفوفات التحويل لكل مفصل [17] [18].

$${}^0T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_{xw} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_{yw} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_{zw} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

بحيث

$r_{11} = s_1 * s_5 - c_5 * (c_4 * (c_1 * s_2 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3) + s_4 * (c_1 * c_2 * s_3 + c_1 * c_3 * s_2))$	(5)
$r_{12} = c_5 * s_1 + s_5 * (c_4 * (c_1 * s_2 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3) + s_4 * (c_1 * c_2 * s_3 + c_1 * c_3 * s_2))$	
$r_{13} = s_4 * (c_1 * s_2 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3) - c_4 * (c_1 * c_2 * s_3 + c_1 * c_3 * s_2)$	
$r_{21} = -c_1 * s_1 - c_5 * (c_4 * (s_1 * s_2 * s_3 - c_2 * c_3 * s_1) + s_4 * (c_2 * s_1 * s_3 + c_3 * s_1 * s_2))$	
$r_{22} = s_5 * (c_4 * (s_1 * s_2 * s_3 - c_2 * c_3 * s_1) + s_4 * (c_2 * s_1 * s_3 + c_3 * s_1 * s_2)) - c_1 * c_5$	
$r_{23} = s_4 * (s_1 * s_2 * s_3 - c_2 * c_3 * s_1) - c_4 * (c_2 * s_1 * s_3 + c_3 * s_1 * s_2)$	
$r_{31} = -c_5 * (c_4 * (c_2 * s_3 + c_3 * s_2) + s_4 * (c_2 * c_3 - s_2 * s_3))$	
$r_{32} = s_5 * (c_4 * (c_2 * s_3 + c_3 * s_2) + s_4 * (c_2 * c_3 - s_2 * s_3))$	
$r_{33} = s_4 * (c_2 * s_3 + c_3 * s_2) - c_4 * (c_2 * c_3 - s_2 * s_3)$	
$P_{xw} = a2 * c_1 * c_2 - d5 * (c_4 * (c_1 * c_2 * s_3 + c_1 * c_3 * s_2) - s_4 * (c_1 * s_2 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3)) + a3 * c_1 * c_2 * c_3 - a3 * c_1 * s_2 * s_3$	
$P_{yw} = a2 * c_2 * s_1 - d5 * (c_4 * (c_2 * s_1 * s_3 + c_3 * s_1 * s_2) - s_4 * (s_1 * s_2 * s_3 - c_2 * c_3 * s_1)) + a3 * c_2 * c_3 * s_1 - a3 * s_1 * s_2 * s_3$	
$P_{zw} = d1 - a2 * s_2 - d5 * (c_4 * (c_2 * c_3 - s_2 * s_3) - s_4 * (c_2 * s_3 + c_3 * s_2)) - a3 * c_2 * s_3 - a3 * c_3 * s_2$	

علما انه تم استخدام الاختصارات التالية في كتابة المعادلات: $c_i = \cos(\theta_i)$ و $s_i = \sin(\theta_i)$ وأن:

$$d_1 = 0.3, \quad d_5 = 0.072 + 0.108, \quad a_2 = 0.25, \quad a_3 = 0.16$$

الحركة العكسية (Inverse Kinematics)

تهدف الحركة العكسية إلى تحديد قيم زوايا دوران المفاصل من خلال معرفة احداثيات أداة الروبوت. كما تكمن صعوبة الحركة العكسية في وجود عدة حلول ممكنة لقيم زوايا المفاصل من أجل موضع وحيد لأداة الروبوت. من أجل ايجاد نموذج الحركة العكسية للروبوت RV-2AJ يتم الاعتماد على قاعدة فيثاغورث وقوانين المثلثات، بالاعتماد على الشكل (10) الذي يوضح المنظر العلوي للروبوت يمكن ايجاد زاوية دوران المفصل الأول كما يلي [19]:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (6)$$

ولدينا

$$x' = x - l_3 \cos \phi \quad (7)$$

$$y' = z - l_3 \sin \phi \quad (8)$$

وبالتالي يمكن حساب زاوية دوران المفصل الثاني وفق العلاقة التالية:

$$\theta_2 = \gamma \mp \arccos \left(\frac{-(x'^2 + y'^2 + l_1^2 - l_2^2)}{2l_1 \sqrt{x'^2 + y'^2}} \right) \quad (9)$$

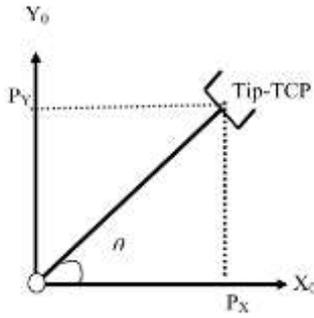
بحيث:

$$\gamma = \text{atan2} \left(\frac{-y'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}, \frac{x'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \right) \quad (10)$$

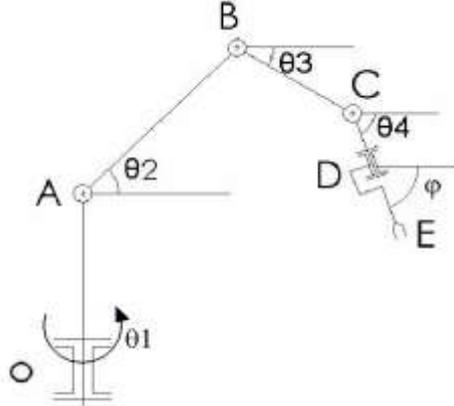
$$\theta_3 = \text{atan2} \left(\frac{y' - l_1 \sin \theta_1}{l_2}, \frac{x' - l_1 \cos \theta_1}{l_2} \right) - \theta_2 \quad (11)$$

وبالتالي:

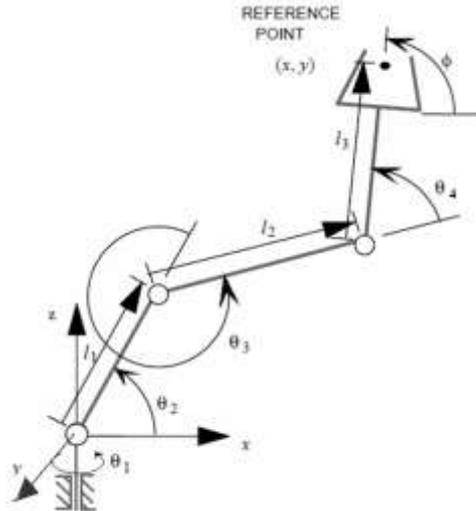
$$\theta_4 = \phi - \theta_2 - \theta_3 \quad (12)$$



الشكل(10) المسقط العلوي للروبوت المستخدم لإيجاد النموذج العكسي



الشكل(11) المسقط الجانبي للروبوت المستخدم لإيجاد النموذج العكسي



الشكل(12) المسقط العلوي للروبوت المستخدم لإيجاد النموذج العكسي

النتائج والمناقشة:

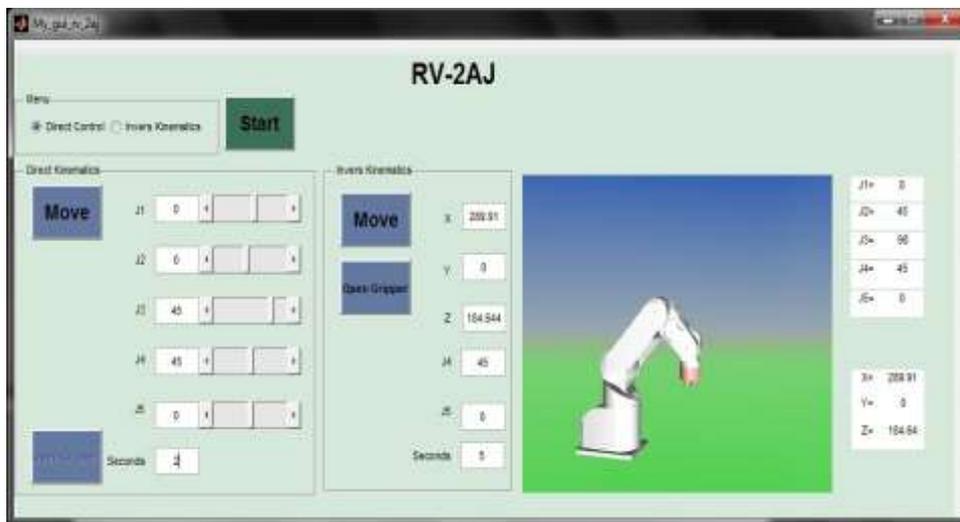
نموذج الحركة الأمامي:

لاختبار نموذج الحركة الأمامي للروبوت تم اختيار مجموعة من القيم لزوايا مفاصل الروبوت ومن ثم إيجاد احداثيات أداة الروبوت الناتجة عن العمليات الحسابية وفق العلاقات الرياضية في الفقرة 3.3.

يوضح الجدول التالي النتائج لعملية الاختبار :

رقم الموضع	قيم زوايا مفاصل الروبوت					احداثيات الأداة وفق النموذج المقترح		
	$\theta_1 [^\circ]$	$\theta_2 [^\circ]$	$\theta_3 [^\circ]$	$\theta_4 [^\circ]$	$\theta_5 [^\circ]$	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1 HP	0	0	0	0	0	410	0	120
2	0	0	45	-45	0	363.1	0	6.86
3	0	-30	30	0	0	376.5	0	245
4	0	-60	60	0	0	285	0	336.5
5	0	-60	60	-90	0	465	0	516.5
6	-45	-60	60	-90	0	328.8	-328.8	516.5

كما يوضح الشكل (13) والشكل (14) أمثلة لبعض حالات اختبار نموذج الحركة الأمامي للروبوت المستخدم.



الشكل (13) واجهة المستخدم المصممة في حالة اختبار النموذج الأمامي في الموضع (2)



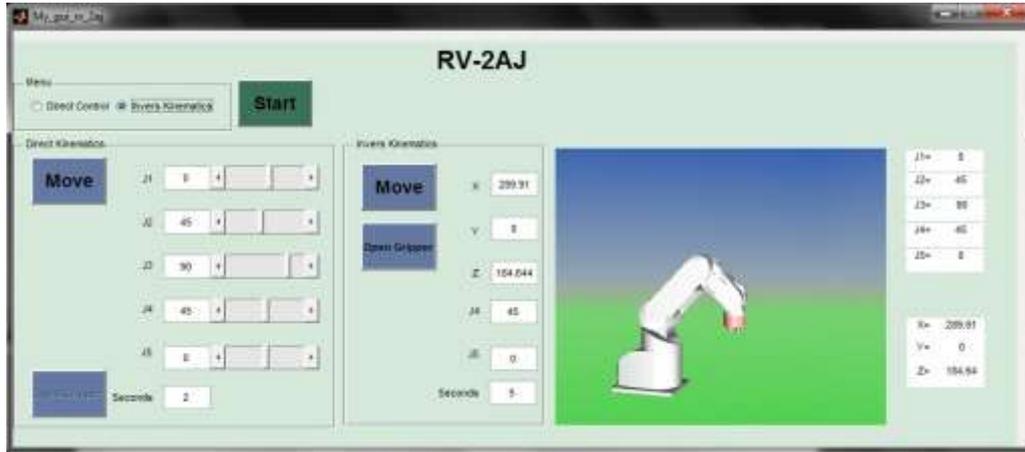
الشكل (14) واجهة المستخدم المصممة في حالة اختبار النموذج الأمامي

نموذج الحركة العكسي:

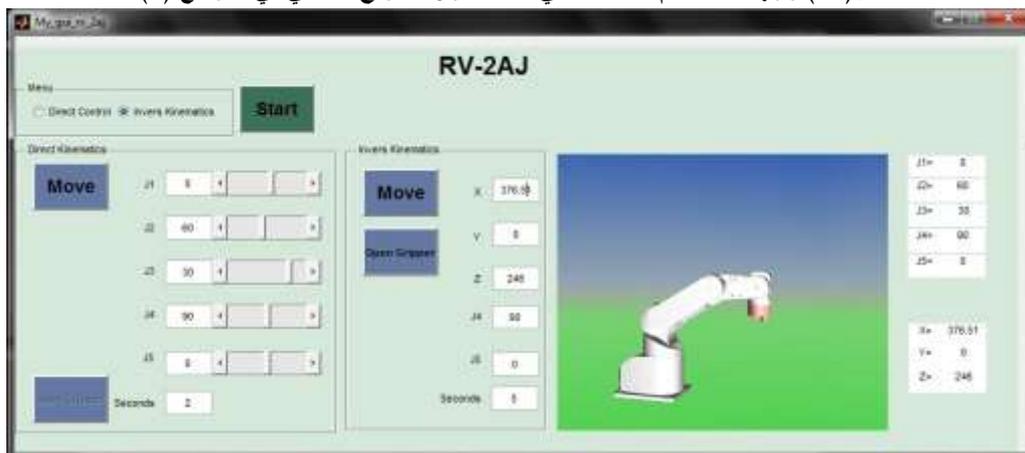
لاختبار نموذج الحركة العكسي للروبوت تم اختيار احداثيات مختلفة لأداة الروبوت ومن ثم إيجاد زوايا دوران مفاصل الروبوت التي تحقق هذه الإحداثيات. يوضح الجدول التالي النتائج لعملية الاختبار:

رقم الموضع	احداثيات الأداة وفق النموذج المقترح			قيم زوايا مفاصل الروبوت				
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	θ_1 [°]	θ_2 [°]	θ_3 [°]	θ_4 [°]	θ_5 [°]
1 HP	410	0	120	0	0	0	0	0
2	363.1	0	6.86	0	0	45	-45	0
3	376.5	0	245	0	-30	30	0	0
4	285	0	336.5	0	-60	60	0	0
5	465	0	516.5	0	-60	60	-90	0
6	328.8	-328.8	516.5	-45	-60	60	-90	0

كما يوضح الشكل (15) والشكل (16) أمثلة لبعض حالات اختبار نموذج الحركة العكسي للروبوت المستخدم.



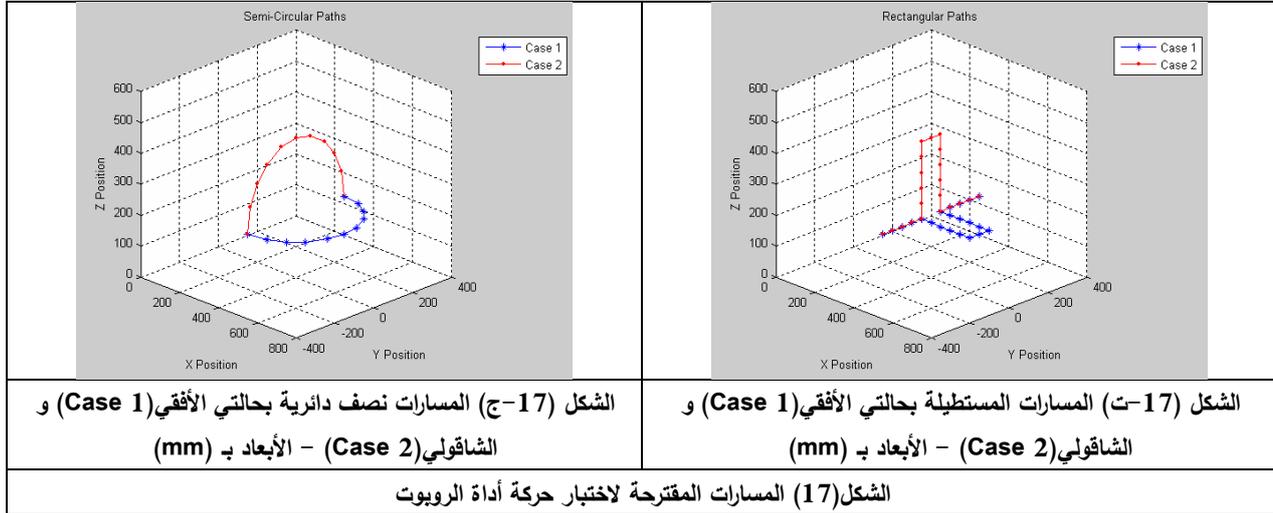
الشكل (15) واجهة المستخدم المصممة في حالة اختبار النموذج العكسي في الموضع (2)



الشكل (16) واجهة المستخدم المصممة في حالة اختبار النموذج العكسي

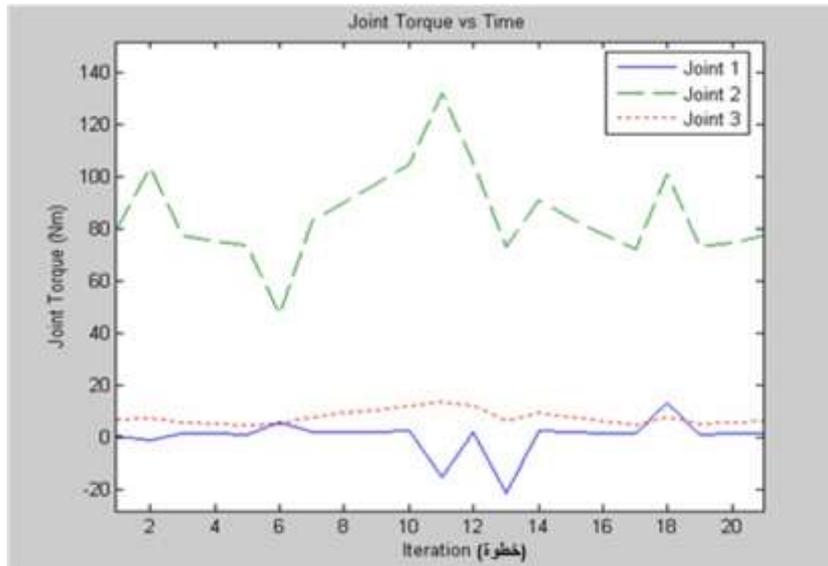
اختبار حركة الروبوت:

تم توليد مسارات افتراضية تعبر عن حركة أداة الذراع الآلي للوصول إلى نقطة الهدف مع الأخذ بعين الاعتبار الشكل المنحني والمستطيل لهذه المسارات المبينة بالشكل (17). وتم الحصول على مميزات المسارات (عزوم المفاصل، زمن الانتقال ومسافة الانتقال) كما هو مبين بالجدول (3) باستخدام برنامج الماتلاب. سوف يتم عرض نتائج عملية النمذجة لحركة الوصلات الثلاث الأولى للذراع الآلي لمحاكاة المسارات المقترحة وإيجاد قيمة العزم لكل منها.



حالة مسار بشكل مستطيل (case 1)

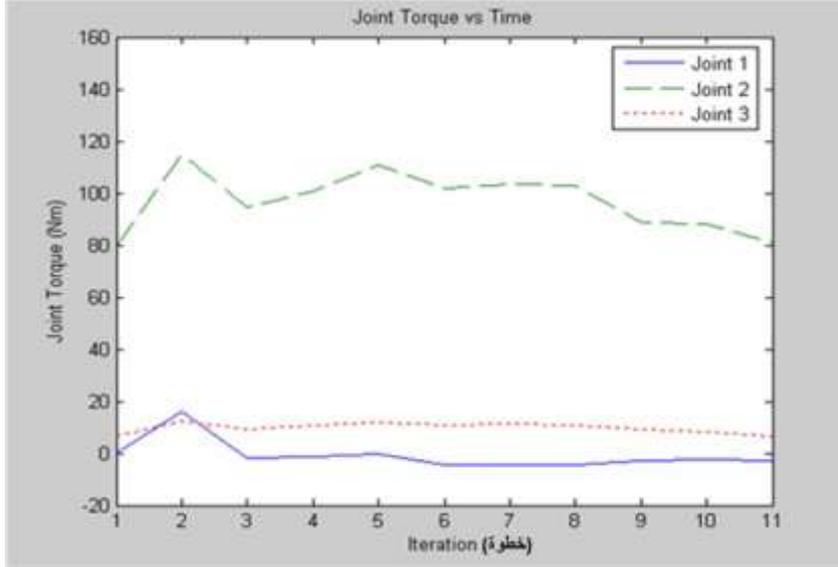
يمتلك هذا المسار أكبر مسافة انتقال بين جميع المسارات المختبرة (1000 mm) ويتم الانتقال على كامل المسار خلال (4.3 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (18) وجود خمسة قمم احداها عند بداية الحركة و البقية عند نقاط الانعطاف.



الشكل (18) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل مستطيل أفقي (Case 1)

حالة مسار بشكل نصف دائري (case 1)

يمتلك هذا المسار مسافة انتقال هي (785 mm) و يتم الانتقال على كامل المسار خلال (2.5 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (19) وجود قمة وحيدة في بداية المسار.



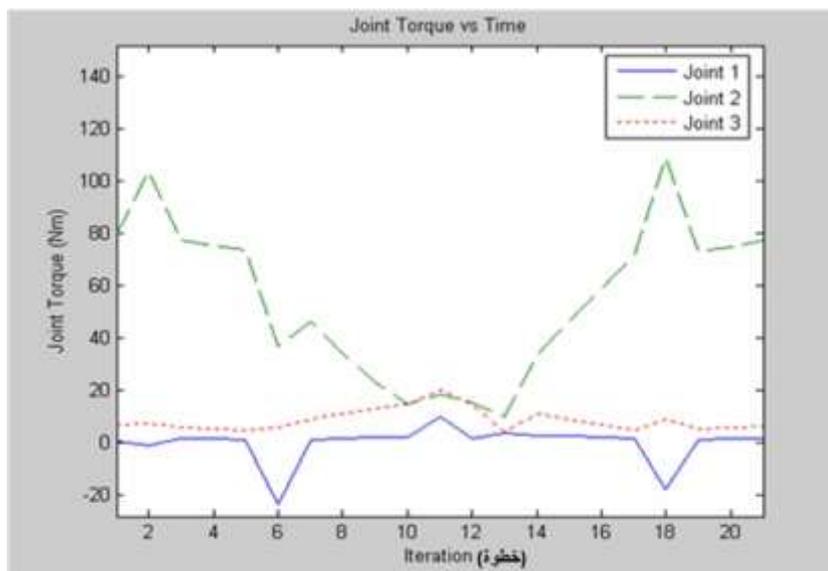
الشكل(19) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل نصف دائري أفقي (Case 1)

من دراسة المسارات الأفقية يمكننا استنتاج النقاط التالية:

- ✓ يعتبر المسار بشكل نصف دائري أفضل المسارات الأفقية المقترحة من حيث زمن الانتقال ومسافة الانتقال.
- ✓ يعتبر المسار بشكل مستطيل من أسوأ المسارات بسبب طول المسار والزمن اللازم للانتقال على كامل المسار.
- ✓ تحتوي مخططات العزم - الزمن على عدة قمم بسبب التغيرات المفاجئة في اتجاه حركة الذراع الآلي الناتجة عن تغيرات في قيم التسارعات الخطية بالتالي التأثير على قيم عزوم المفاصل.
- ✓ يتميز المسار بشكل نصف دائري بدرجة كبيرة من النعومة بالتالي لا توجد تغيرات مفاجئة باتجاه حركة الذراع الآلي، مما ينعكس على مخططات عزوم المفاصل فنلاحظ اختفاء جميع القمم في المخططات ما عدا أول قمة عند بدء حركة الذراع الآلي.

حالة مسار بشكل مستطيل (case 2)

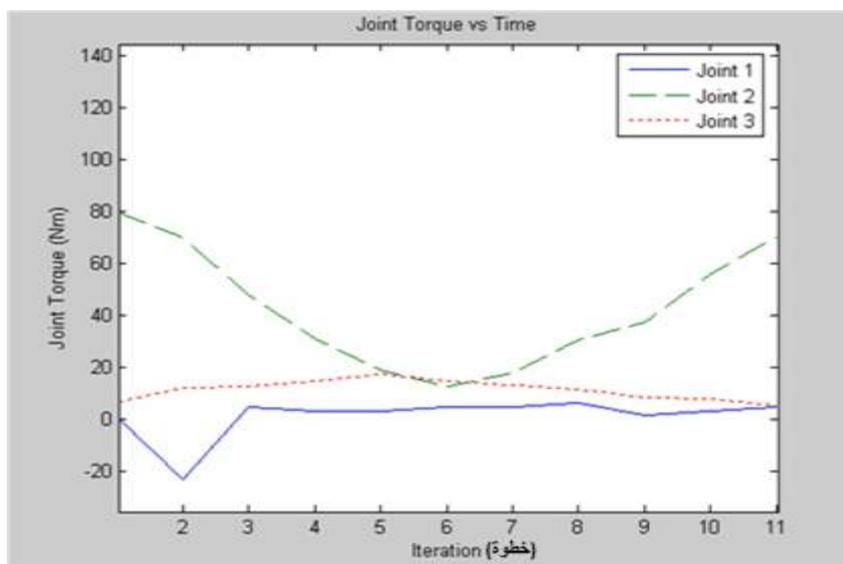
يمتلك هذا المسار مسافة انتقال تبلغ قيمتها (1000 mm) و زمن للانتقال على كامل المسار (4.3 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (20) وجود قمم في بداية المسار وعند نقاط الانعطاف، بالإضافة إلى تعرض المفصل الثاني لعزوم أكبر من بقية المفاصل على طول المسار كونه يحمل ثقل الوصلة الثانية والثالثة للذراع الآلي.



الشكل (20) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل مستطيل شاقولي (Case 2)

حالة مسار بشكل نصف دائري (case 2)

يمتلك هذا المسار مسافة انتقال تبلغ قيمتها (785 mm) و زمن للانتقال على كامل المسار (2.5 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (21) وجود قمم في بداية المسار وعند نقاط الانعطاف، بالإضافة إلى تعرض المفصل الثاني لعزوم أكبر من بقية المفاصل على طول المسار كونه يحمل ثقل الوصلة الثانية والثالثة للذراع الآلي.



الشكل (21) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل نصف دائري شاقولي (Case 2)

من دراسة المسارات الشاقولية يمكننا استنتاج النقاط التالية:

- ✓ يظهر التأثير الكبير للجاذبية الأرضية خصوصا عند تحريك المفصل الثاني باتجاه الأعلى أو الأسفل، مما يسبب بظهور قمم في منحنى العزم تعبر عن قيم مرتفعة للعزم في هذا المفصل.

✓ أما بالنسبة إلى عزوم المفاصل فإن المسار بشكل نصف دائري هو الأفضل كونه يتمتع بدرجة كبيرة من النعومة بالتالي لا توجد تغيرات مفاجئة باتجاه حركة الذراع الآلي، مما ينعكس على مخططات عزوم المفاصل فنلاحظ اختفاء جميع القمم في المخططات ما عدا أول قمة عند بدء حركة الذراع الآلي.

الاستنتاجات والتوصيات

تم في هذا البحث ايجاد النموذج الرياضي للروبوت الصناعي (Mitsubishi RV-2aj)، كما تم تصميم النموذج الميكانيكي للروبوت باستخدام برامج الـ SolidWorks وتوريد ملفات الـ CAD إلى مكتبة SimMechanics\Matlab بالإضافة إلى دمج النموذج الرياضي (نموذج الحركة الأمامي ونموذج الحركة العكسي للروبوت) والنموذج الميكانيكي مع واجهة تخاطب مع المستخدم مصممة باستخدام GUI\Matlab. يقدم النموذج المقترح نموذج دقيق يحاكي مميزات الروبوت المستخدم مما يتيح اختبار حركات الروبوت وايجاد طريقة حركته كما تم اختبار النموذج من خلال اختبار نموذج الحركة الأمامية ونموذج الحركة العكسية وايجاد مسارات حركة أداة الروبوت اثناء حركة محددة من قبل المستخدم.

مما سبق يمكننا تلخيص النتائج في حالة المسارات الشاقولية و الأفقية وفق الجدول التالي:

الجدول (4) نتائج اختبار المسارات المقترحة من حيث زمن الانتقال و مسافة الانتقال و الطاقة المستهلكة

شكل المسار	حالة المسار	زمن الانتقال (Sec)	مسافة الانتقال (mm)
مستطيل	أفقي (case 1)	4.3	1000
نصف دائري	أفقي (case 1)	2.5	785
مستطيل	شاقولي (case 2)	4.3	1000
نصف دائري	شاقولي (case 2)	2.5	785

تناول البحث دراسة مجموعة من المسارات لحركة الأذرع الآلية للانتقال من نقطة البداية إلى نقطة الهدف مع وجود عائق في منتصف المسار يمنع الحركة بشكل مستقيم بين نقطتي البداية والهدف. تم خلال البحث دراسة كل مسار مقترح وفق مستويين أفقي وشاقولي، ومن تم مقارنة النتائج كل على حدى من حيث عزوم المفاصل، زمن الانتقال ومسافة الانتقال.

يختلف تقييم المسارات المختبرة وفق متطلبات العمل و رغبة المصنع، فإذا كان زمن الانتقال له تأثير كبير على عملية الانتاج أو العملية المطلوب تنفيذها من الذراع الآلي يجب أن تنجز بأسرع شكل ممكن، فمن البديهي أن يتم اختيار المسار ذو أقل زمن انتقال، فمن ضمن المسارات المقترحة فإن المسار بشكل نصف دائري يتميز بأقل زمن انتقال و مسافة انتقال.

أما إذا كان الهدف الحفاظ قدر الإمكان على سلامة محركات الذراع الآلي فمن الضروري اختيار مسار ناعم قدر الإمكان لتجنب الصدمات الميكانيكية الناتجة عن القمم أو قيم مرتفعة في عزوم المفاصل، وهو ما يتميز به المسار بشكل نصف دائري.

كما يمكننا ملاحظة قيم عزوم للمفصل الثاني أعظم منها في بقية المفاصل وذلك في جميع المسارات المختبرة وفي حالتها المسارات الأفقية والشاقولية، يمكن تفسير ذلك كون المفصل الثاني يتحمل وزن الوصلة الثانية والثالثة من

الذراع الآلي بالإضافة إلى أن حركة هذا المفصل وشعاع الجاذبية الأرضية يقعان في مستو واحد، أي يكون تأثير الجاذبية على هذا المفصل أعظم من تأثيرها على بقية المفاصل في الذراع الآلي.

مما سبق يمكننا استنتاج مجموعة من النقاط العامة نتلخص بما يلي:

- ✓ المسار ذو أقل مسافة انتقال يتطلب زمن انتقال أقل واستهلاك أقل من الطاقة.
- ✓ يجب قدر الامكان تجنب المسارات التي تمتلك تغيرات مفاجئة في اتجاه الحركة (المسار بشكل مستطيل) لأنها تعرض محركات الذراع الآلي إلى قيم عزوم مرتفعة.

كما يوصي البحث بالنقاط التالية:

1. تطوير النموذج المقترح ليشمل نماذج السرعة والتسارع للروبوت المقترح.
2. إضافة نماذج روبوتات صناعية أخرى إلى النموذج المقترح.
3. دمج لغتي البرمجة (MELFA و MOVMASTER) مع النموذج المقترح لإضافة امكانية برمجة الروبوتات والتحكم فيها بشكل فعلي.

المراجع

- [1] R. Manseur, "A Software Package For Computer-Aided Robotics Education", pp.1409-1412, 26th Annual Frontiers in Education - Vol 3, 2004.
- [2] Bakikoyuncu, and Mehmet Güzel, "Software Development For the Kinematic Analysis Of A AL5B Robot Arm", p.waset volume 24 October 2007 ,1307-6884.
- [3] Osman Gürdal, Mehmet AlbayrakAndTuncayAydogan, "Computer Aided Control And Simulation Of Robot Arm Moving In Three Dimension", Electrical & Computer Education Department, Isparta / Turkey, 2006.
- [4] IldikoPasc, RaduTarca, Florin Popentiu-Vladicescu, The VRML Model And VrSimulation For A Scara Robot, Annals Of The Oradea University, Fascicle Of Management And Technological Engineering, Volume Vi (Xvi), 2007.
- [5] Martin Rohrmeier, "Web Based Robot Simulation Using VRML", Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference.
- [6] Arya Wirabhuanan1, Habibollah bin Haron "Industrial Robot Simulation Software Development Using Virtual Reality Modeling Approach (VRML) and MATLAB- Simulink Toolbox", University Teknologi Malaysia, 2008.
- [7] Muhammad IkhwanJambak, HabibollahHaron, DewiNasien, "Development of Robot Simulation Software for Five Joints Mitsubishi RV-2AJ Robot using MATLAB/Simulink and V-Realm Builder", Fifth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, 2008.
- [8] E. Kolberg, and N Orlev, "Robotics Learning as a Tool for Integrating Science-Technology curriculum in K-12 Schools," 31st Annual Frontiers in Education Conference.Impact on Engineering & Science Education.Conference Proceedings, Reno, NV, USA, 2007.
- [9] D.P. Miller and C. Stein,"So That's What Pi is For" and Other EducationalEpiphanies from Hands-on Robotics, in Robots for kids: Exploring new technologies for learning experiences,
- [10] A. Druin, A. & J. Hendler (Eds.) San Francisco, CA: Morgan Kaufmann 2010.

- [11] K. Wedeward, and S. Bruder, "Incorporating Robotics into Secondary Education," Robotics Manufacturing Automation and Control. Vol.14.Proceeding of the 5th Biannual World Automation Congress ISORA 2010 and ISOMA, Orlando, FL, USA.2010.
- [12] N. M. F. Ferreira and J. A. T. Machado, "RobLib: an educational program for robotics," Symposium on Robot Control , Vienna, Austria, Volume:2, PP 563-568, 2010.
- [13] R.R. Murphy, "Robots and Education", Intelligent.Systems IEEE, Vol. 15, No. 6, pp. 14 -15, 2011.
- [14] K. T. Sutherland, "Undergraduate robotics on a shoestring," IEEE Intelligent Systems, Volume: 15,. Issue: 6, pp. 28-31, 2011.
- [15] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control, 1st Edition, John Wiley & Sons.2012.
- [16] Johan J.Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, 3rd Edition, pp 109-114, Prentice Hall, 2012.
- [17] LenielBraz de Oliveira Macaferi, "Construction and Simulation of a Robot Arm with Opengl", May 16, 2011.
- [18] Sreekanth Reddy Kallem, "Artificial Intelligence in the Movement of Mobile Agent (Robotic)", International Journal of Computer Engineering & Technology (IJCET), Volume 4, Issue 6, 2013, pp. 394 - 402, ISSN Print: 0976 – 6367, ISSN Online: 0976 – 6375.
- [19] Srushti H. Bhatt, N. Ravi Prakash and S. B. Jadeja, "Modelling of Robotic Manipulator Arm", International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET), Volume 4, Issue 3, 2013, pp. 125 - 129, ISSN Print: 0976 – 6340, ISSN Online: 0976 – 6359.