The Effect Of Joint Offset Between The First And Second Axes On Kinematic Performance Of Anthropomorphic Robots

Dr. Bassel Kaddar*
Taymaa Shneiaa**

(Received 17 / 10 / 2024. Accepted 18 / 12 / 2024)

□ ABSTRACT □

In this study, we examine a family of manipulators with six revolute joints, where the first joint axis is perpendicular to the subsequent parallel joint axes.This structure is the most widespread among industrial robots and is used in the basis of human-like robots called anthropomorphic. Although the kinematic characteristics of such robots are generally known in terms of the shape of the workspace and the presence of singular points, there remains a gap in knowing which one is the best with the variation of DH parameters. The members of this family are characterized by being non-specific and consequently none of them are cuspidal. Thus they does not have the ability to change their posture without passing through a singularity. This explains why there was almost no interest in classifying such family of robots in terms of their kinematic performance according to DH parameters, especially with the presence of other robots that are more attractive in terms of their stable dynamic performance such as parallel robot, and the existence of orthogonal robots of which families with distinctive features were found in terms of their kinematic properties. In this study, we are interested to select from the design parameters space the optimal DH parameters for the aforementioned family of robots that improves their kinematic properties, namely the offset between the first and the second joint axes. In the design optimization problem, several kinematic criteria were adopted separately, such as manipulability and dexterity. These robots were then divided into classes according to the shape of the worst region in the work space according to the values of one of the DH parameters.

Keywords: Industrial robot (manipulator), robot design Kinematic(performance), ease of movement(Manipulability), robot efficiency (Dexterity), robot workspace, singularity points, Jacobian matrix.

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Assistant Professor - Department of Design and Production Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University- Latakia- Syria.**
****Postgraduate student (Master) - Department of Design and Production Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University- Latakia- Syria. Taymaa.shneiaa1@gmail.com**

تأثير الإزاحة المفصلية بين المحور الأول والثاني على الأداء الحركي للروبوتات الشبيهة باليد البشرية anthropomorphic

د. باسل قدار*

تيماء شنيعه**

(تاريخ الإيداع 17 / 10 / 2024. قُبِل للنشر في 18/ 12 / 2024)

□ ملخّص □

في هذه الدراسة يتم دراسة إحدى عائلات الروبوتات المتسلسلة سداسية درجة الحرية المفصلية الدورانية ذات محور ازواج شاقولي ومحورين متعامدين معه ومتوازيين فيما بينهما. هذه البنية هي الأكثر انتشاراً بين الروبوتات الصناعية وتستخدم في قاعدة الروبوتات الشبيهة باليد البشرية . على الرغم من كون الخصائص الحركية لمثل هذه الروبوتات معروفة بشكل عام من حيث شكل فضاء العمل ووجود النقاط المتفردة، إلا أنه تبقى فجوة في معرفة أياً منها هو الأفضل مع تغير بارامترات DH المميزة للروبوت. إن أفراد هذه العائلة تتسم بأنها غير نوعية وبالتالي فإن أياً منها لا يتمتع بكونه ذو نتوءات Cuspidal وبالتالي لا يتمتع بإمكانية تغيير وضعيته إلى أخرى في نفس الموقع دون المرور بنقاط متفردة. هذا ما يفسر أنه لم يتم الاهتمام بتصنيف هذه العائلة من الروبوتات من حيث ادائها الحركي بحسب بارامترات DH، لاسيما بوجود روبوتات أخرى أكثر جذباً من حيث استقرار أدائها كالروبوتات التفرعية وحتى روبوتات من النمط المتسلسل ذات المحاور المتعامدة مثنى والتي وجد منها عائلات ذات سمات مميزة من حيث خصائها الحركية.

في هذه الدراسة نهتم باختيار بارامترات البعد من بارامترات DH للعائلة المشار لها من الروبوتات بما يحسن خصائصها الحركية. في مشكلة التحسين للتصميم تم اعتماد عدة معايير حركية كسهولة الحركة والبراعة كل على حدا. كما تم تقسيم هذه الروبوتات الى اصناف وفقاً لشكل المنطقة الأسوأ في فضاء العمل بحسب قيم أحد بارامترات DH.

الكلمات المفتاحية: روبوت صناعي (مناول)، تصميم الروبوت، الأداء الحركي، سهولة الحركة، كفاءة الروبوت، فضاء عمل الروبوت، نقاط التفرد، مصفوفة يعقوبيان.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* **مدرس – قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.**

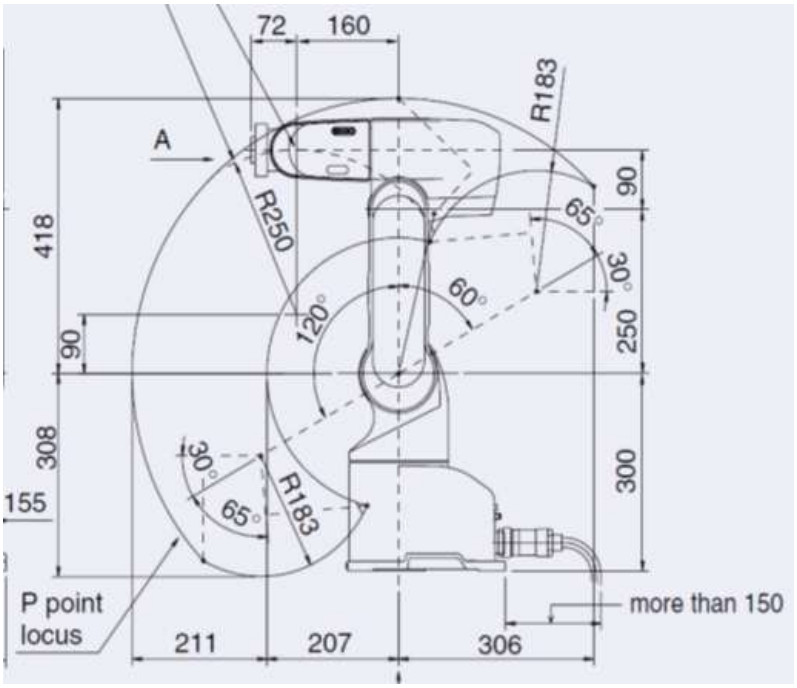
** **طالب دراسات عليا(ماجستير)- قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.**

Taymaa.shneiaa1@gmail.com

مقدمة:

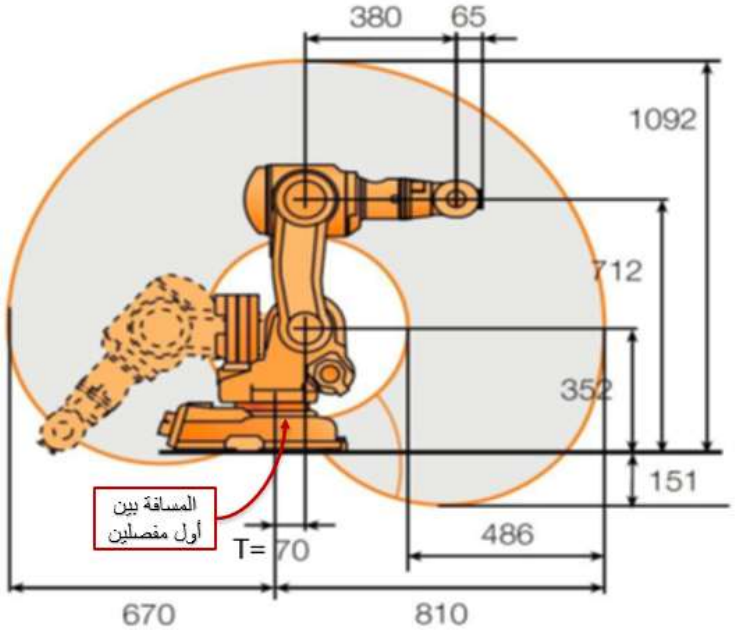
السمة الرئيسية للروبوت هي هيكله الميكانيكي. إذ يتكون الهيكل الميكانيكي للروبوت المناول من سلسلة من الأجسام الصلبة (الروابط) المترابطة عن طريق المفاصل؛ يتميز المناول بذراع تضمن الحركة، ومعصم يمنح البراعة، ومؤثر نهائي تؤدي المهمة المطلوبة من الروبوت [1],[2].

نلاحظ أن محور المفصل الأول في روبوت متسوبيشي متقاطع مع محور المفصل الثاني .



الشكل (1) مسقط جانبي لروبوت Mitsubishi

على خلاف نماذج كثيرة من الروبوتات الصناعية التي لا يتقاطع فيها المحوران بل يبتعدان عن بعضهما بمسافة معينة T.



الشكل (2) مسقط جانبي للروبوت ABB IRB 140

عرض مشكلة البحث:

لا تتمتع الروبوتات المستخدمة في الصناعة ذات الشكل الشبيه باليد البشرية بمزايا حركية مقارنة بروبوتات أخرى كالمتعامدة. اتجه الصناعيون الى التبسيط في بارامتراتها الهندسية ما جعلها غير قادرة على تغيير موضع نهايتها المنفذة دون المرور بالنقاط المتفردة. لم يعر أغلب الباحثين الاهتمام بتصنيف هذه الروبوتات واهتموا بتصنيفات الروبوتات الأخرى كالتفرعية والمتعامدة نظرا لمزاياها سواء الديناميكية أو الحركية. رغم كون معظم الروبوتات الشبيهة باليد البشرية هي الأكثر استخداماً في الصناعة حتى يومنا هذا، لا تتوفر تصنيفات لها تخدم الصناعي لتبيان الأفضل بينها وفقاً لتغير بارامتراتها الهندسية المميزة لكل منها من أجل تطبيقات حركية معينة.

تتواجد في بعض هذه الروبوتات المسماة Anthropomorphic إزاحة لمحور المفصل الأول عن محور المفصل الثاني في حين لايمتلك بعضها الآخر هذا البعد. لاتوجد شروحات لتفسير تأثير هذه الازاحة أو عدمها ولا لتغيراتها من روبوت لروبوت آخر على الخصائص الحركية. من المهم فهم تأثير تغيير الابعاد المختلفة لهذه الروبوتات على تحسين الأداء الحركي للروبوت وذلك ما لم يتم عمله حتى الآن.

أهمية البحث ومواده:

أهمية البحث:

* تكمن بتوفير بيانات للصناعيين تساعدهم في اختيار الروبوتات الأنسب لتطبيق صناعي معين من بين شريحة من الروبوتات الشبيهة باليد البشرية ذات الشكل الهندسي المبسط ومعرفة كيفية استثمارها.

* توفير معلومات للمصممين لتحسين تصميماتهم و فهم كيفية تغير فضاء عمل الروبوت مع تغير بارامتراته المميزة وتوزع نقاطه المتفردة والنقاط الأسوأ في فضاء عمله من حيث الخصائص الحركية لتطوير سلسلته الحركية.

هدف البحث:

* فهم تأثير الابعاد الهندسية المميزة والمسماة بارامترات دنافيت هارتنبرغ DH على الخواص الحركية للروبوت.

* الاختيار الأمثل لأحد البارامترات المميزة للروبوت ، وبشكل أكثر تحديداً الازاحة الأفقية لمحور المفصل الأول عن محور المفصل الثاني، بناءً على معايير الأداء الحركي وذلك للحصول على البنية المثلى للروبوت للقيام بمهامه وفق المعايير المطلوبة .

طرائق البحث ومواده:

- ✓ دراسة النموذج الحركي للروبوت المدروس ببارامترات هندسية مميزة معينة.
- ✓ إيجاد العلاقة الرياضية للنقاط المتفردة من انعدام مصفوفة اليعقوبيان للروبوت بالاستعانة ببرنامج ماتلاب.
- ✓ حساب معايير الأداء الحركي المقترحة المحلية.
- ✓ كتابة خوارزمية لحساب المعايير العامة للأداء الحركي على كامل فضاء عمل الروبوت.
- ✓ تنفيذ محاكاة لتغير معايير الأداء مع تغير أحد البارامترات المميزة ضمن برنامج ماتلاب Matlab.
- ✓ تحليل شكل فضاء العمل والنقاط المتفردة والرديئة فيه للتصاميم الناتجة مع تغير البارامتر المميز للوصول للتصميم الأفضل.

متغيرات البحث: المسافة الأفقية بين محوري المفصلين الأول والثاني للروبوت الصناعي المدروس الشبيه بليد البشرية

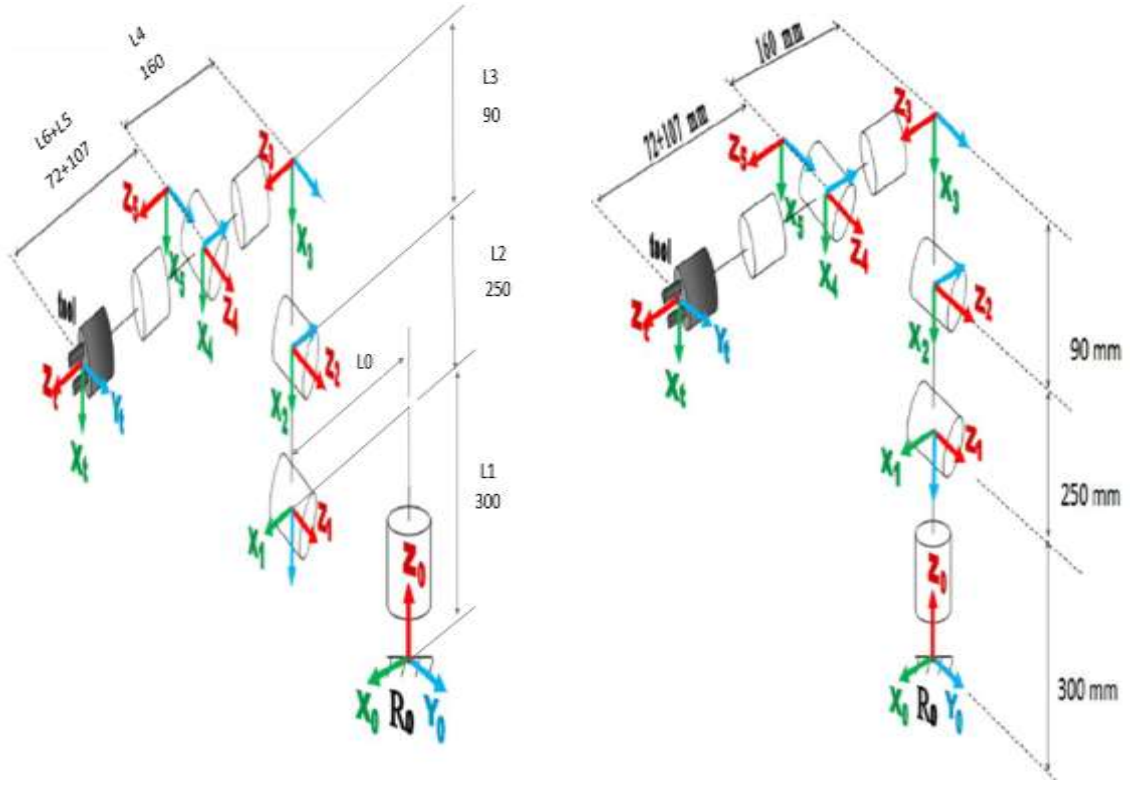
قيود البحث:

القيود المفصلية لتصميم الروبوت المدروس Mitsubishi RV−1A بالتحديد الزاويتين q_2 , q_3

حيث $q_2 = [-60, +120]$, $q_3 = [+60, +155]$

الروبوت قيد الدراسة:

الروبوت المرجعي للدراسة هو روبوت سداسي درجة الحرية المفصلية نوع ميتسوبيشي Mitsubishi RV−1A. السلسلة الحركية له مبينة بالشكل (3−a). سيتم فيما يلي استعراض بارامتراته ونماذجه الهندسية والحركية. أما السلسلة الحركية بالشكل (3−b) فتمثل نفس الروبوت ولكن بعد إضافة البعد الافقي والذي سيتم اعتباره كمتغير في هذا البحث وتوضيح تأثيره لاحقا على الخصائص الحركية للروبوت.



b a

الشكل (3) السلسلة الحركية لروبوت Mitsubishi RV−1A

إن بارامترات DH [3] المميزة للروبوت المدروس مبينة بالجدول التالي:

Link	المفصل	d_i	θ_i	a_i	α_i
0−1	دوراني	L_1	θ_1^*	L_0	−90
1−2	دوراني	0	θ_2^*	$-L_2$	0
2−3	دوراني	0	θ_3^*	$-L_3$	90
3−4	دوراني	L_4	θ_4^*	0	−90
4−5	دوراني	0	θ_5^*	0	90
5−6	دوراني	0	θ_6^*	0	0
6−t		$L_{5+}\ L_6$	0	0	0

الجدول (1) بارامترات DH لروبوت (6−axis robot arm) Mitsubishi RV−1A حيث L_0=0

يستخدم في النموذج الهندسي المباشر مجموعة من العلاقات لتحديد موضع النهاية المنفذة بالنسبة لنقطة مرجعية. تبين هذه العلاقات احداثيات النهاية المنفذة X في فضاء العمل work-space بدلالة المتغيرات المفصلية q [3].

يكتب النموذج الهندسي المباشر بالشكل:

$$X = f(q)$$

حيث أن q هو متجه المتغيرات المفصلية بحيث $q = [q_1 . q_2 \dots \dots \dots q_n]^T$

إن النموذج الهندسي المباشر لهذا الروبوت المعبر عن موقع النهاية المنفذة t بالنسبة للإحداثيات المرجعية 0 بالعلاقة:

$$\mathbf{P}_0^t = \begin{bmatrix} L_4S_{23}C_1 - [S_5(S_1S_4 - C_{23}C_1C_4) - S_{23}C_1C_5](L_5 + L_6) - C_1(L_3C_{23} + L_2C_2) \\ L_4S_{23}S_1 + [S_5(C_1S_4 + C_{23}C_4S_1) + S_{23}C_5S_1](L_5 + L_6) - S_1(L_3C_{23} + L_2C_2) \\ L_1 + L_4C_{23} + (-S_{23}C_4S_5 + C_{23}C_5)(L_5 + L_6) + L_3S_{23} + L_2S_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

حيث أن :

$Sinq_i = S_i$, $Cosq_i = C_i$, i,j=1−n , $Sin(q_i + q_j) = S_{ij}$, $Cos(q_i + q_j) = C_{ij}$

n عدد المفاصل، و ستعتمد هذا الترميز فيما يلي من الدراسة.

النموذج الحركي للروبوتات :

يعطي النموذج الحركي المباشر للروبوت سرعة النهاية المنفذة $\dot{X}$ بدلالة السرعات المفصلية $\dot{q}$ (joint velocities). ويكتب على النحو التالي:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q}$$

حيث J هي مصفوفة اليعقوبيان .

يمكن الحصول على مصفوفة اليعقوبيان عن طريق مفاضلة X = f (q) باستخدام المشتق الجزئي $\partial f/\partial q$، بحيث أن كل عنصر من مصفوفة اليعقوبيان ذو ترتيب السطر *i* و العمود *j* يعطى كما يلي:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j}$$

حيث $i = 1, \dots, m$ و $j = 1, \dots, n$,

n عدد درجات الحرية المفصلية للروبوت و m هو عدد عناصر الشعاع X.

يستفاد من هذا المحدد في إيجاد النقاط المتفردة أو ما قد يسمى في بعض المراجع العربية النقاط الميتة singularities، وذلك بجعل قيمة المحدد مساوية للصفر وإيجاد قيم المتغيرات المفصلية التي تسبب انعدامه ومن ثم إيجاد صورة هذه النقاط في فضاء العمل وفق العلاقة $X = f(q)$. يفيد تحديد هذه النقاط في معرفة حدود فضاء العمل للروبوت غير أن خصائص الروبوت الحركية تتعرض للخلل في مثل هذه النقاط حيث أن رتبة المصفوفة تقل مرتبة واحدة على الأقل وتفقد نهاية الروبوت المنفذة درجة حرية واحدة على الأقل. ورغم تواجده هذه النقاط على حدود فضاء العمل غير أن هذه النقاط تسبب مشكلة كبيرة لدى تواجدها ضمن فضاء عمل الروبوت.

دراسة الخصائص الحركية للروبوت :

في هذه الدراسة ستتم الدراسة الحركية لروبوت ميتسوبيشي بإضافة بعد أفقي بعد المفصل الأول L0 كما في معظم الروبوتات الصناعية وفق معيار سهولة الحركة ومؤشر الايزوتروبي دراسة خواص المنطقة الحسنة في فضاء العمل. إن مصفوفة اليعقوبيان تعبر عن إمكانية الروبوت لتغيير موقع النهاية المنفذة مع تغير الازاحات المفصلية وهي بالتالي تحتوي خلاصة الخصائص الحركية للروبوت. فيما يلي نستعرض مصفوفة اليعقوبيان للروبوت Mitsubishi RV−1A:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$J_{11} = S_1(L_3C_{23} - L_0 + L_2C_2) - L_4S_{23}S_1$$
$$J_{12} = C_1(L_4C_{23} + L_3S_{23} + L_2S_2)$$
$$J_{13} = C_1(L_4C_{23} + L_3S_{23})$$
$$J_{14} = 0$$
$$J_{15} = 0$$
$$J_{16} = 0$$
$$J_{21} = L_4S_{23}C_{1-}C_1(L_3C_{23} - L_0 + L_2C_2)$$
$$J_{22} = S_1(L_4C_{23} + L_3S_{23} + L_2S_2)$$
$$J_{23} = S_1(L_4C_{23} + L_3S_{23})$$
$$J_{24} = 0$$
$$J_{25} = 0$$
$$J_{26} = 0$$
$$J_{31} = 0$$
$$J_{32} = L_3C_{23} - L_4S_{23} + L_2C_2$$
$$J_{33} = L_3C_{23} - L_4S_{23}$$
$$J_{34} = 0$$
$$J_{35} = 0$$
$$J_{36} = 0$$
$$J_{41} = 0$$
$$J_{42} = -S_1$$
$$J_{43} = -S_1$$
$$J_{44} = S_{23}C_1$$
$$J_{45} = -C_4S_1 - C_{23}C_1S_4$$
$$J_{46} = S_{23}C_1C_5 - S_5(S_1S_4 - C_{23}C_1C_4)$$
$$J_{51} = 0$$
$$J_{52} = C_1$$
$$J_{53} = C_1$$
$$J_{54} = S_{23}S_1$$
$$J_{55} = C_1C_4 - C_{23}S_1S_4$$
$$J_{56} = S_5(C_1S_4 + C_{23}C_4S_1) + S_{23}C_5S_1$$
$$J_{61} = 1$$
$$J_{62} = 0$$
$$J_{63} = 0$$
$$J_{64} = C_{23}$$
$$J_{65} = S_{23}S_4$$
$$J_{66} = C_{23}C_5 - S_{23}C_4S_5$$

إن محدد المصفوفة السابقة يعطى بالعلاقة (3) :

$$det\,\mathbf{J} = -S_5L_2\left[\frac{L_3^2S_2}{2} - \frac{L_2L_3S_{23}}{2} + \frac{L_4^2S_2}{2} - \frac{L_2L_4C_{(q_2-q_3)}}{2} + \frac{L_2L_3S_{(q_2-q_3)}}{2} - \frac{L_3^2S_{(q_2+2q_3)}}{2} + \frac{L_4^2S_{(q_2+2q_3)}}{2} - \frac{L_2L_4C_{23}}{2} - L_3L_4C_{(q_2+2q_3)} + L_0L_3S_3 + L_0L_4S_3\right] \quad (3)$$

حيث

أن محدد روبوت Mitsubishi RV−1A يمكن إيجاده من العلاقة (3) عندما $L_0=0$

من خلال تحليل العلاقة (3) نلاحظ أن تفردات الروبوت Mitsubishi RV−1A تعتمد فقط على q_2,q_3,q_5 .

ونلاحظ أيضاً أن العلاقة تتأثر بالأبعاد $L_4 .\ L_0,\ L_2,\ L_3$

عادةً ما يتم تصميم المفاصل الثلاثة الأولى للروبوت من أجل أداء الحركة الإجمالية (تحديد الموقع) للمؤثر النهائي، ويتم استخدام المفاصل المتبقية لتحديد الاتجاه. وبالتالي، فإن المفاصل الثلاثة الأولى والأذرع المرتبطة بها تشكل الكتف أو هيكل تحديد المواقع. المفاصل والوصلات الأخرى تشكل المعصم لتحديد الاتجاه.

إن جميع البارامترات البعدية أو الزاوية المتعلقة بالازواجات الثلاث الأخيرة لاتظهر في العلاقة باستثناء q5، لذلك نكتفي بدراسة تأثير نقاط التفرد ذات الصلة بالموقع دون الاتجاه.

يتم إيجاد نقاط التفرد بجعل المحدد في العلاقة (3) مساوياً للصفر.

$$\mathbf{det}\ (\mathbf{J}) = 0$$

لذلك ينعدم المحدد عندما $L_2 = 0$ وذلك يجعل الروبوت في وضعية تفرد Singularity ، أي أنه لا يمكن الاستغناء عن الوصلة الثانية أياً كانت قيم باقي الوصلات والزوايا، لذلك قمنا بتقييس أبعاد وصلات الروبوت بالنسبة للبعد L_2.

أبعاد الروبوت بعد التقييس:

L1 = 1.2 , L2 = 1 L2 , L3 = 0.36 L2

L4 = 0.64 L2 , L5=0.42 L2 , L6=0.28 L2

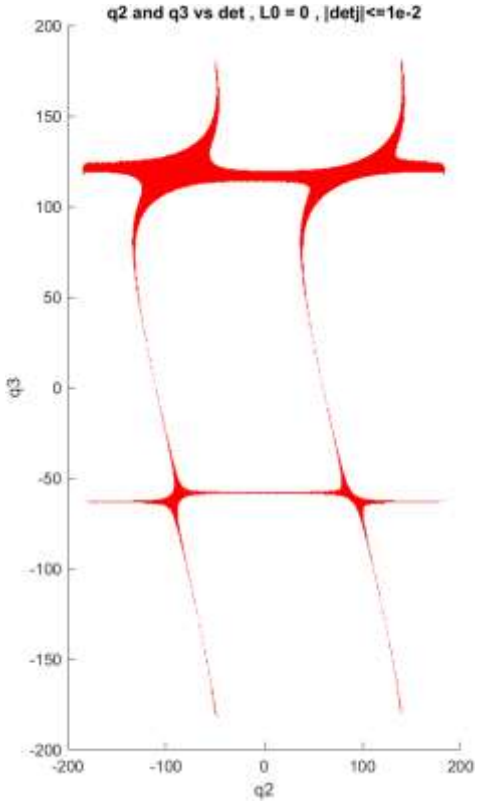
أوعندما :

$$S_5 = 0 \quad \rightarrow$$
$$q_5 = 0 \text{ أو } q_5 = -\pi \text{ أو } q_5 = \pi$$

بالنسبة للحد المتبقي

$$\left[\frac{L_3^2 S_2}{2} - \frac{L_2 L_3 S_{23}}{2} + \frac{L_4^2 S_2}{2} - \frac{L_2 L_4 C_{(q_2-q_3)}}{2} + \frac{L_2 L_3 S_{(q_2-q_3)}}{2} - \frac{L_3^2 S_{(q_2+2q_3)}}{2} + \frac{L_4^2 S_{(q_2+2q_3)}}{2} - \frac{L_2 L_4 C_{23}}{2} - L_3 L_4 C_{(q_2+2q_3)} + L_0 L_3 S_3 + L_0 L_4 S_3\right] = 0 \quad (4)$$

فمن الصعب إيجاد حل جبري صريح باستخدام أمر "Solve" في MATLAB لذلك سيتم اظهار منحنيات النقاط المتفردة بشكل تقريبي دون استخدام الحل الجبري وذلك بمسح نقاط الفضاء المفصلي التي تقل فيها قيمة المحدد عن مقدار صغير نسبياً كما موضح بالشكل (4) [4],[5].



الشكل (4) توضع التفرد في الفضاء المفصلي للروبوت المدروس

يوضح الشكل وجود صعوبة في انتقال النهاية المنفذة للذراع من منطقة إلى أخرى بسبب مرورها عبر منحنيات Singularity ذات اللون الأحمر (مناطق استعصاء في الحركة).

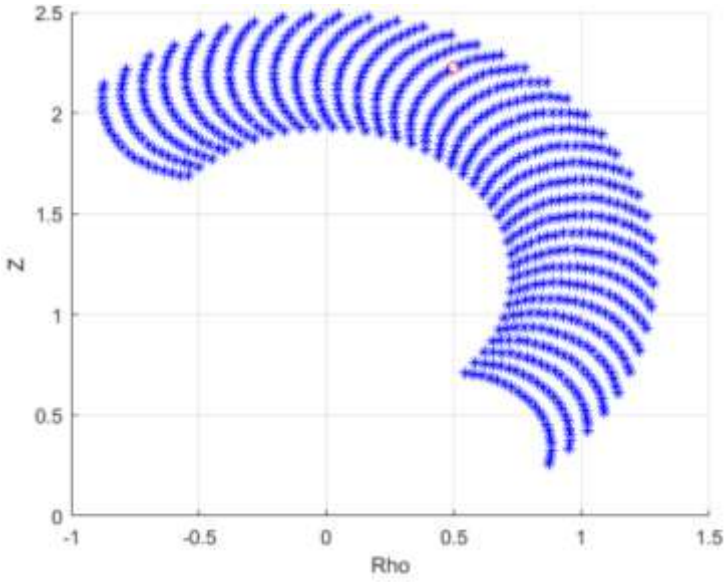
فضاء عمل الروبوت:

قمنا بمسح جميع القيم الممكنة للمتغيرات المفصليةq_2 و q_3 لروبوت ميتسوبيشي وأوجدنا صورتها وفق النموذج المباشر، العلاقة (5).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathrm{X} = f(\mathbf{q}) \quad (5)$$

باعتبار أن فضاء العمل متماثل حول محور دوران المفصل الأول، تم تمثيله باستخدام المحورين ρ, z حيث $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ وجعل $q_1 = 0$. ثم تم مسح قيم المتغيرات المفصلية بدقة درجة وإيجاد صورة كل منها وفق النموذج الهندسي المباشر مع اعتبار القيود المفصلية للروبوت Mitsubishi وللتذكير فهي تأخذ القيم أدناه بالنسبة للمفصلين الثاني والثالث. تم إظهار فضاء العمل في بيئة ماتلاب Matlab .

$$q_2 = [-60, +120] \text{ و} q_3 = [+60, +155]$$



الشكل (5) فضاء العمل للروبوت ميتسوبيشي RV1A

L_0=0 , L_1=1.2 , L_2=1 , L_3=0.36 , L_4=0.64

معايير الأداء الحركي للروبوتات الصناعية :

تعتمد معايير الأداء الحركي بشكل أساسي على مصفوفة اليعقوبيان للروبوت. يمكن استخدامها كمؤشر لمدى قرب النهاية المنفذة من النقاط المتفردة حيث تأخذ قيماً معينة في هذه النقاط، لذا يمكن قياس القرب أو البعد من هذه النقاط (التي يختل الأداء الحركي للروبوت فيها أو بالقرب منها). كما يمكن قياس مدى تجانس حركة الروبوت بالاتجاهات المختلفة. و سنشير فيما يلي فقط الى المعايير التي تم استخدامها في هذه الدراسة.

- **معيار سهولة الحركة و المناورة Manipulability [6]:**

هو معيار لتحديد او تقييم سهولة التغيير للموقع والاتجاه للنهاية المنفذة للروبوت .

يستخدم معيار سهولة الحركة لتحديد أو تقييم سهولة التغيير للموقع والاتجاه للنهاية المنفذة للروبوت بطريقة عشوائية.

يعطى معيار سهولة الحركة μ بالعلاقة :

$$\mu = \sigma_1\sigma_2 \dots \sigma_m$$

كما ويكتب كالتالي:

$$\mu = \sqrt{det(\mathbf{J}\,\mathbf{J}^{\mathrm{T}})} = \sigma_1\sigma_2 \dots \sigma_m$$

في حال كانت مصفوفة اليعقوبيان مربعة،يمكن أن نكتب:

$$\mu = \sqrt{det(\mathbf{J}\,\mathbf{J}^{\mathrm{T}})} = |det(\mathbf{J})|$$

حيث أن $\sigma_1\sigma_2 \dots \sigma_m$ هي القيم المتفردة لمصفوفة اليعقوبيان.

إن هذا المعيار هو معيار محلي تختلف قيمته من نقطة لأخرى في فضاء العمل فهو يعطينا سهولة الحركة للذراع في وضعية معينة.

لايجاد معيار لسهولة الحركة يشمل كامل فضاء العمل، نقوم بإيجاد المعيار العام μ_g (μ−global) عن طريق قيم معامل سهولة الحركة المحلية لكافة نقاط فضاء العمل و تقسيم المجموع على عدد هذه النقاط كما يلي:

$$\mu_g = \frac{\sum \mu}{\sum n}$$

حيث أن μ: هي معيار سهولة الحركة لكل نقطة من فضاء العمل.

n: هو عدد نقاط فضاء العمل.

- **مؤشر الايزوتروبي Isotropy [7]:**

وهو مؤشر العدد الخاص condition number أو ما يسمى برقم الحالة لمصفوفة اليعقوبيان والذي يمكن ان يحدد كالنسبة بين القيمة الشاذة العظمى والقيمة الشاذة الدنيا،يفيدهذا المعيار فيتقييمحالةعملالجملةإذاكانت جيدة أم لا وذلك بالاعتماد على قيمته]∞+ ,1].ويعطى بالعلاقة: $K = \frac{\max(\sigma)}{\min(\sigma)}$

حيث أن σ تمثل القيم المفردة لمصفوفة اليعقوبيان.

مدى مرونة الروبوت يمكن تقييمه باستخدام القيمة المعكوسة لـ k، وتدعى ب كفاءة الروبوت Dexterity أي:

$\frac{1}{K} = \frac{\min(\sigma)}{\max(\sigma)}$ يعتبر المعيار رقم الحالة أفضل مايمكن عندما $K^{-1} = 1$

إن هذا المعيار هو معيار محلي تختلف قيمته من نقطة لأخرى في فضاء العمل فهو يعطينا مقدار كفاءة الذراع في وضعية معينة، لذلك نقوم بإيجاد المعيار العام لكفاءة الذراع ($DEXTERITY_{global}$) والذي يحسب بالقانون

$$k_g^{-1} = \frac{\sum k^{-1}}{\sum n}$$

حيث أن k^{-1}: هي معيار كفاءة الروبوت لكل نقطة من فضاء العمل.

n: هو عدد نقاط فضاء العمل.

منهجية البحث:

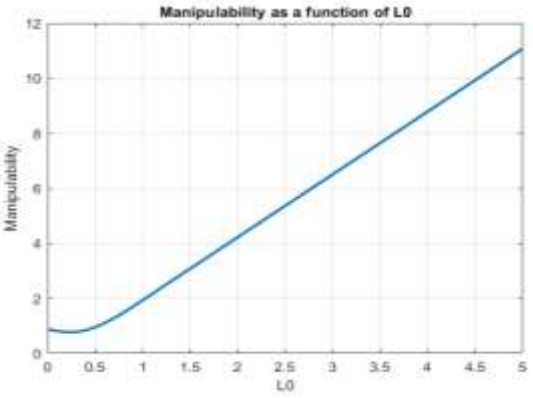
- دراسة تغير المعيار المدروس مع تغير L0 وأيضاً تغيره مع L0,L3 معاً و مع L0,L4 بحيث يمكن اعتبار كل منها مسألة تحسين التصميم.
- سيتم اعتماد معيارين شاملين لفضاء العمل (معيار في كل مرة تتم فيها الدراسة):
- معيار يستند الى سهولة الحركة manipulability.
- معيار يستند الى درجة التجانس الحركي (الكفاءة) dexterity.
- دراسة تغير شكل فضاء العمل مع توزع النقاط جيدة الخواص مع تغير البعد L_0 .

النتائج والمناقشة:

- **تغيرات معيار سهولة الحركة والمناورة $Manipulability_{global}$ مع الأبعاد المختلفة:**

بعد إجراء دراسة معامل سهولة الحركة العام μ_g لروبوت ميتسوبيشي لاختيار الطول الأنسب للبعد L_0 المضاف بعد المفصل الأول .

قمنا بدراسة تغير معامل سهولة الحركة $manipulability_{global}$ مع تغير الطول L_0:

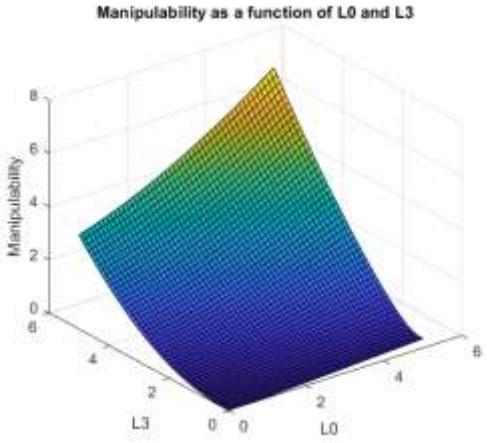


الشكل (6) تغير معيار سهولة الحركة مع تغير طول L0
L1=1.2 , L2=1 , L3=0.36 , L4=0.64

من الشكل نلاحظ أن نلاحظ أن معيارسهولة الحركةيبدأ بقيمة منخفضة عندL0 = 0 ، ثم تنخفض بشكل طفيف قبل أن تبدأ بالزيادة عند القيمة L0 = 3 مع زيادة L0 هذا يشير إلى أن زيادة طول L0 بعد قيمة معينة يعزز سهولة الحركة بشكل كبير، مما يعني أن الروبوت يصبح أكثر كفاءة في التحرك ضمن فضاء العمل.

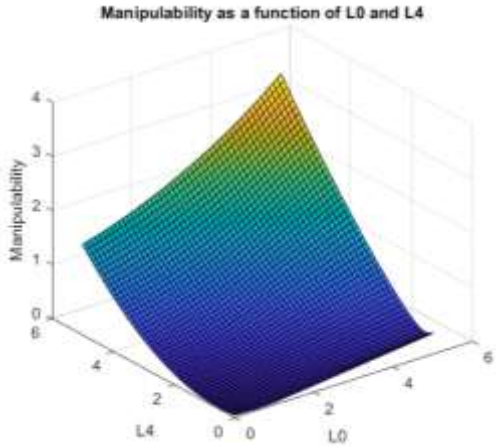
باجراء مسح لقيم معامل سهولة الحركة ضمن مجال لتغيرات كل من L_0 و L_3 معاً

وأيضاً ضمن مجال لتغيرات بإجراءL_0و L_4 معاً نجد:



الشكل (7) تغير معيار سهولة الحركة مع تغير L0 وL3
L1=1.2 , L2=1 , L4=0.64

نلاحظ أنه بازدياد الطولين L_0 وL_3 معاً يزداد بشكل ملحوظ معامل سهولة مما يعزز القابلية للحركة بسهولة بشكل ملحوظ.



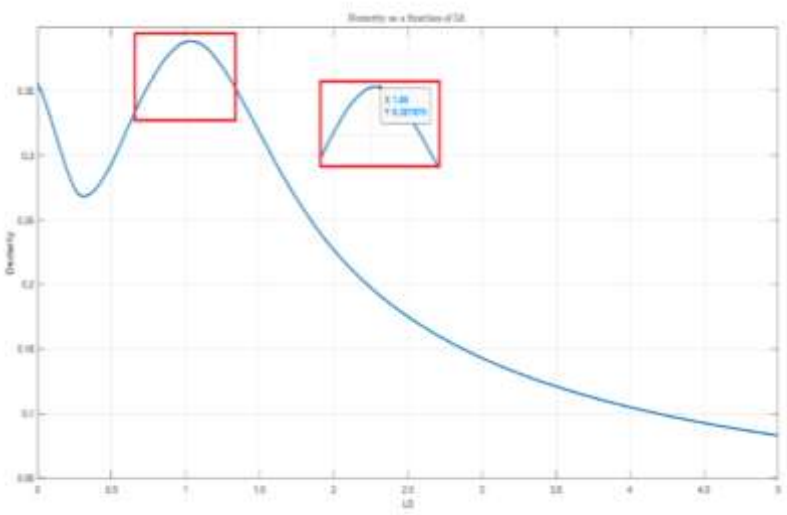
الشكل (8) تغير معيار سهولة الحركة مع تغير L0 وL4
L1=1.2 , L2=1 , L3=0.36

نلاحظ أنه بازدياد الطولين L_0 وL_4 معاً يزداد بشكل ملحوظ معامل سهولة مما يعزز القابلية للحركة بسهولة بشكل ملحوظ.

إن تزايد قيمة معامل سهولة الحركة مع تزايد أبعاد الروبوت غير مفاجئ حيث أن هذا المعيار يقيس حجم مخطط السرعة للنهاية و التي تزداد بزيادة بعد القبضة عن النقطة المرجعية لقاعدة الروبوت، إلا أن هذا المعيار لايقيس مدى تجانس هذه الحركة في الاتجاهات المختلفة كما أنه لايعتبر مقياساً جيدا بالقرب من النقاط المتفردة حيث أن خواص الروبوت الحركية تكون شديدة التباين وفق الاتجاه المختلفة. لذلك، أوصى المحللون العدديون برقم حالة المصفوفة condition number كونه مقياساً جيدا لدرجة تجانس الحركة وتوحدها في الاتجاهات المختلفة.

- **تغير معامل الكفاءة** $DEXTERITY_{global}$ **مع الأبعاد المختلفة:**

قمنا بدراسة تغير معامل الكفاءة $DEXTERITY_{global}$مع تغير الطول L_0 وكانت النتائج كالتالي:



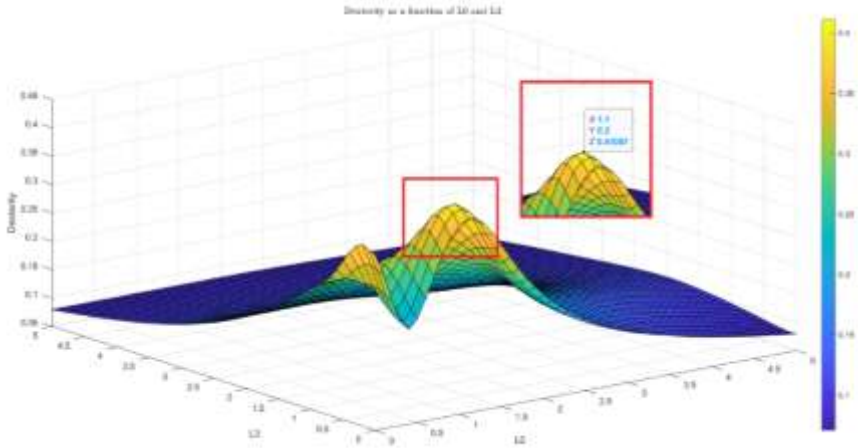
من الشكل نلاحظ أنه يتناقص $DEXTERITY_{global}$ حتى الطول L_0 = 0.3 بعدها يتزايد $DEXTERITY_{global}$ حتى الوصول إلى الطول L_0 = 1.06 بعد ذلك $DEXTERITY_{global}$ مهما زاد طول L_0 .

هذا يشير إلى أن هناك قيمة مثلى لـ$DEXTERITY_{global}$ عند قيمة معينة ل L_0تعزز من درجة كفاءة الروبوت.

الشكل (9) تغير Dexterity مع تغير L0

L1=1.2 , L2=1 , L3=0.36 , L4=0.64

باجراء مسح لقيم معامل $DEXTERITY_{global}$ضمن مجال لتغيرات كل من L_0 و L_3 معاً نجد:

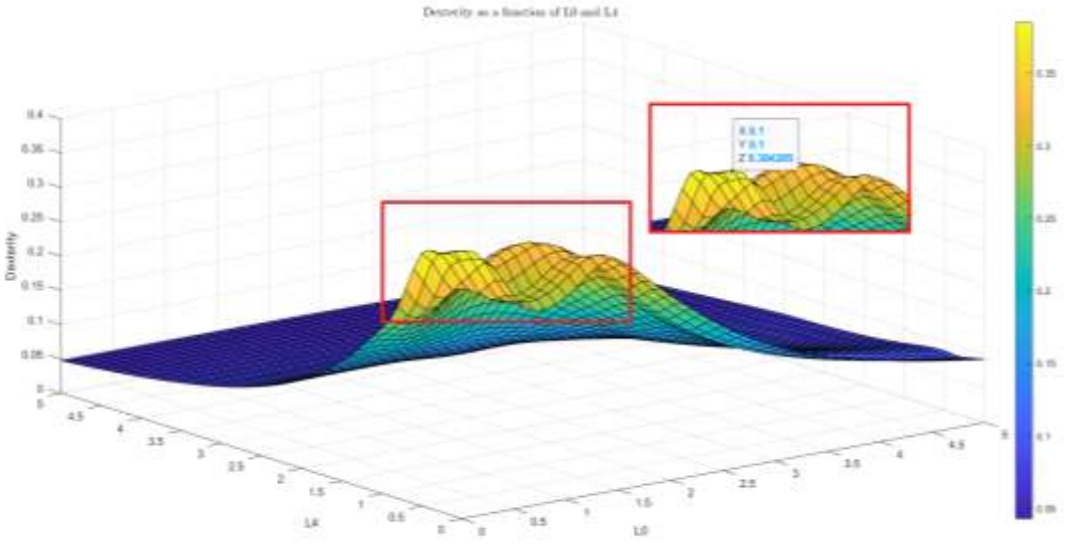


الشكل (10) DEXTERITYglobal مع تغير L0 و L3 معاً

L1=1.2 , L2=1 , L4=0.64

من الشكل (10) نلاحظ أن القيمة $DEXTERITY_{global}$ تكون عند الأطوال L_0 = 1.1 و L_3 = 0.2 .

باجراء مسح لقيم معامل $DEXTERITY_{global}$ ضمن مجال لتغيرات كل من L_0 و L_4 معاً نجد:



الشكل (11) DEXTERITYglobal مع تغير L0 و L4 معاً

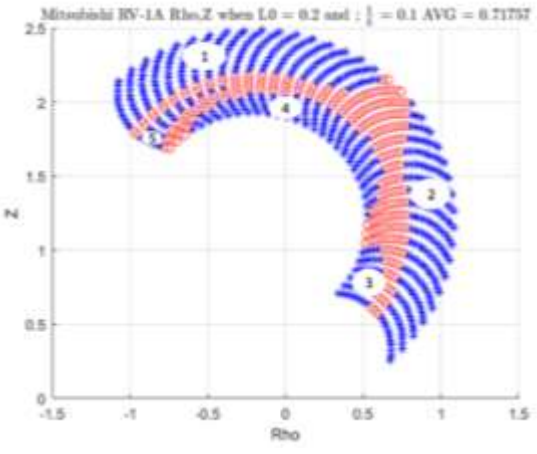
L1=1.2 , L2=1 , L3=0.36

من الشكل نلاحظ أن القيمة $DEXTERITY_{global}$ تكون عند الأطوال $L_0 = 0.1$ و $L_4 = 0.1$.

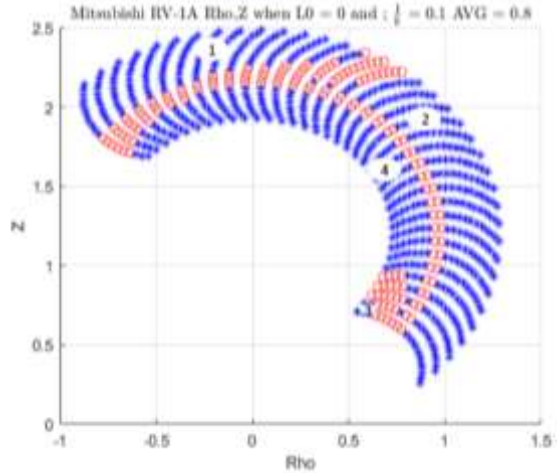
- **دراسة خواص المنطقة الحسنة في فضاء العمل:**

قمنا بمسح قيم المتغيرات المفصلية بدقة درجة وإيجاد صورة كل منها وفق النموذج الهندسي المباشر مع اعتبار القيود المفصلية للروبوت Mitsubishi. أيضاً قمنا بمسح قيم المتغيرات المفصلية عندما $1/K<0.1$ (باللون الأحمر) والتي تمثل النقاط غير متقاربة الخواص في فضاء العمل وتصعب فيها الحركة على عكس النقاط باللون الأزرق في فضاء العمل والتي تحقق الشرط $1/K>0.1$ والتي تكون متقاربة الخواص وتكون الحركة سهلة ضمنها في فضاء العمل.

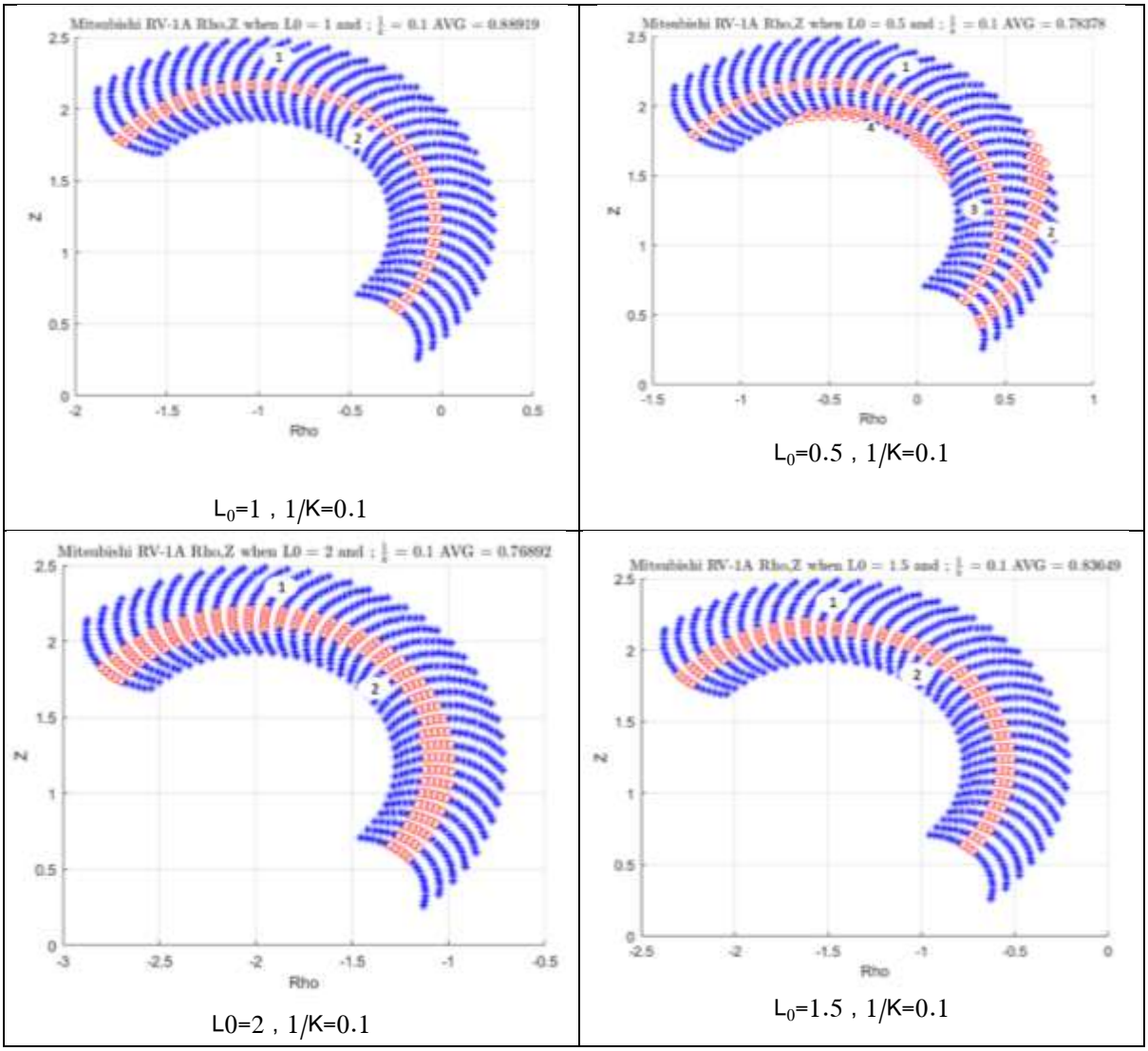
وقمنا بملاحظة الاختلافات الموجودة في فضاءات العمل عند أطوال مختلفة ل L0 كما في الشكل (12) :



$L_0=0.2$, $1/K=0.1$



$L_0=0$, $1/K=0.1$



L_0=1 , 1/K=0.1

L_0=0.5 , 1/K=0.1

L0=2 , 1/K=0.1

L_0=1.5 , 1/K=0.1

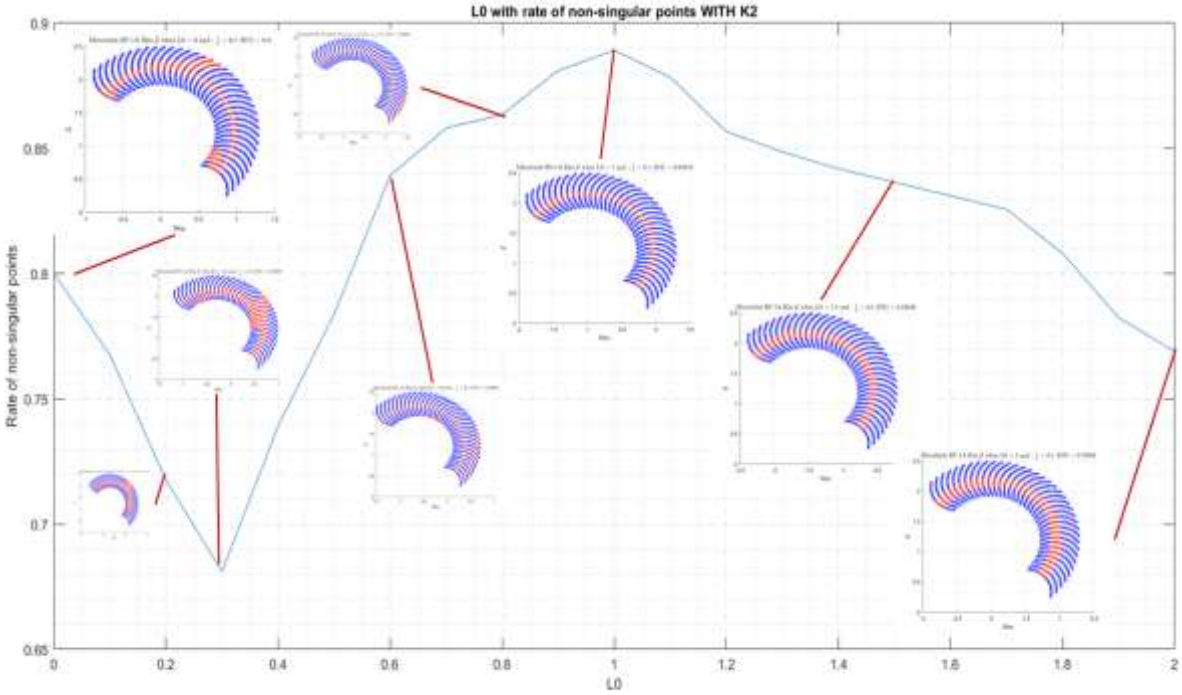
الشكل (12) الاختلافات في فضاء العمل مع تغير البعد L_0

نلاحظ أنه عندما L_0=0 وجود صعوبة في انتقال النهاية المنفذة للذراع من المنطقة 1 إلى المنطقة 4 أي أن النهاية المنفذة ستعبر من المنطقة الحمراء (مناطق استعصاء في الحركة)، مع التنويه إلى أن قيمة DEXTERITYglobal مرتفعة في الشكل 4-4 وهي قريبة من القيمة المثلى ل $DEXTERITY_{global}$ التي تقابل الطول عند الطول L_0=1.06.

كما ونلاحظ أن نقاط العبور الحمراء تقل وتغير مكان تموضعها بتغير الطول L_0 كما في الشكل السابق عندما L_0=0.5 .

فيما نلاحظ أيضاً أنه عند البعد L_0=1 يتم الانتقال من المنطقة 1 إلى المنطقة 2 بالمرور ضمن منطقة حمراء لذلك نقوم بدراسة نسبة (المنطقة الزرقاء) الحسنة الخواص إلى فضاء العمل كاملاً وذلك لحساب المنطقة حسنة الخواص (متقاربة الخواص) ودرسنا تغير L_0 وحصلنا على النتائج التالية:

- دراسة المنطقة عندما 1/k> 0.1:

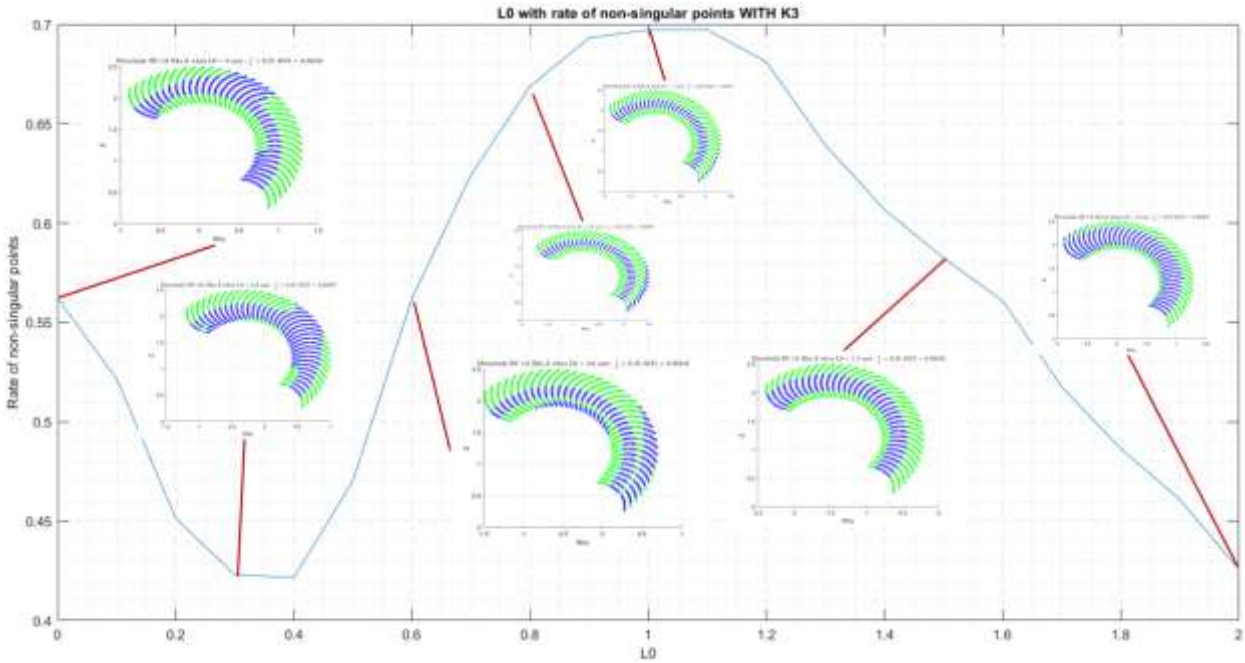


الشكل (13) توزع المنطقة حسنة الخواص في فضاء العمل مع تغير البعد L_0 عندما 1/k> 0.1

يشير المخطط إلى قيمة عظمى تقابل الطول L_0=1.

- دراسة المنطقة عندما 1/k> 0.25:

وتمثل هذه الدراسة نسبة المنطقة الخضراء (ذات الحركة الأسهل) إلى المنطقة الزرقاء (ذات الحركة الأصعب).



الشكل (14) توزع المنطقة حسنة الخواص في فضاء العمل مع تغير البعد L_0 عندما 1/k> 0.25

يشير المخطط إلى قيمة عظمى تقابل المجال[1:1.1]=L0.

نستنتج بعد دراسة عدد من معايير الأداء الحركي يستحسن إضافة البعدL0 بعد المفصل الأول في روبوت ميتسوبيشي بطول ضمن المجال [1:1.1]=L_0 حيث يؤدي الروبوت مهامه بكفاءة أكبر مقارنة مع كفاءته بدون البعد L_0 .

وهذه النتائج تتوافق مع قيمةL0 في الشكل (13).

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

[1] تمت دراسة تغير معيار سهولة الحركة العام $Manipulability_{global}$ مع تغير كل من البارامترات L0,L3,L4 على حدا ، وكانت النتيجة في كل الحالات أنه يزداد معامل سهولة الحركة كلما زادت أطوال الأبعاد إلى أبعاد غير محدودة، ومنه نستنتج أنه هذا المعيار غير كاف لتقييم التصاميم أي لابد من إيجاد معايير أخرى .

[2] معيار سهولة الحركة لايعتبر مقياساً جيداً بالقرب من النقاط المتفردة حيث أن خواص الروبوت الحركية تكون شديدة التباين وفق الاتجاه المختلفة.

[3] بدراسة تغير معيار التجانس الحركي $DEXTERITY_{global}$ مع تغير كل من البارامترات L0,L3,L4 على حدا، أعطت النتائج أطوال مثلى للوصلات عند قيم مثلى ل $DEXTERITY_{global}$.

[4] عند دراسة تغير $DEXTERITY_{global}$ مع البعد L0 لوحظ أنه يستحسن إضافة البعد L_0=1.06 بين المفصلين الأول والثاني لروبوت ميتسوبيشي إذ تكون كفاءة الروبوت عند ذلك البعد عظمى.

[6] بدراسة البعد L0 بالاعتماد على مساحة وتوزع المنطقة حسنة الخواص في فضاء العمل تمت الدراسة بحالتين عندما $1/k > 0.1$ وعندما $1/k > 0.25$ وكان البعد الأمثل ضمن المجال [1:1.1]=L_0 .

نستنتج مما سبق أنه يستحسن إضافة بعد أفقي لروبوت ميتسوبيشي Mitsubishi RV-1A بعد المفصل الأول L_0 وذلك بناءً على عدة معايير:

1. معيار سهولة الحركة العام $Manipulability_{global}$.
2. معامل رقم الحالة k العام (كفاءة الروبوت $DEXTERITY_{global}$).
3. دراسة خواص المنطقة الحسنة في فضاء العمل .

تم التوصل إلى أن الطول الأمثل للبعد L_0 في جميع المخططات الناتجة عن تلك الدراسات تم التوصل إلى طول أمثلي للبعد ضمن المجال [1:1.1]=L_0.

التوصيات:

1. دراسة تأثير الأبعاد الأخرى على الخصائص الأخرى للروبوت وهو ما يتم العمل عليه .

2. المعيار الحالي لا يأخذ بعين الاعتبار أن تكون منطقة العمل متصلة أي خالية من نقاط التفرد ويمكن تطوير المعيار بحيث يأخذ بعين الاعتبار ما سبق كما في الدراسة [11] .

3. يمكن إيجاد القيم المثلى لبارامترات DH ضمن فضاء بارامترات التصميم مع اعتبار عدة معايير حركية معاً لتتحول المسألة الى مشكلة يمكن حلها بخوارزميات التحسين متعددة المعايير.

References:

[1] Raut, Nalin, Abhilasha Rathod, and Vipul Ruiwale. "Forward kinematic analysis of a robotic manipulator with triangular prism structured links." *Int. J. Mech. Eng. Technol.(IJMET)* 8.2 (2017): 08-15.

[2] Khalil, W., and E. Dombre. "Transformation Matrix Between Vectors Frames and Screws." *Modeling, Identification and Control of Robots*. Butterworth-Heinemann, 2002. 13-34.

[3] "Introduction to Robotics" by S.K. Saha Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2008

[4] Bouzgou, Kamel, and Zoubir Ahmed-Foitih. "Geometric modeling and singularity of 6 DOF Fanuc 200IC robot." *Fourth edition of the International Conference on the Innovative Computing Technology (INTECH 2014)*. IEEE, 2014.

[5] Abdolmalaki, Reza Yazdanpanah. "Geometric Jacobians derivation and kinematic singularity analysis for smokie robot manipulator & the Barrett WAM." arXiv preprint arXiv:1707.04821 (2017).

[6] Chiriatti, Giorgia, Alessandro Bottiglione, and Giacomo Palmieri. "Manipulability optimization of a rehabilitative collaborative robotic system." Machines 10.6 (2022): 452.

[7] Klein, Charles A., and Bruce E. Blaho. "Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators." The international journal of robotics research 6.2 (1987): 72-83.

[8] Raza, Kazim, Tauseef Aized Khan, and Naseem Abbas. "Kinematic analysis and geometrical improvement of an industrial robotic arm." Journal of King Saud University-Engineering Sciences 30.3 (2018): 218-223.

[9] Akkar¹, Hanan AR, and Ahlam Najim A-Amir. "Forward Kinematics and Workspace Analysis of 6DOF Manipulator Arm Applied on Lab VIEW." (2017).

[10] Zou, Zhihong. "A general method for the manipulability analysis of serial robot manipulators." International Journal of Advanced Robotic Systems 20.6 (2023): 17298806231210665.

[11] Zein, Mazen, Philippe Wenger, and Damien Chablat. "An exhaustive study of the workspace topologies of all 3R orthogonal manipulators with geometric simplifications." Mechanism and Machine Theory 41.8 (2006): 971-986.

[14] Baili, Maher, Philippe Wenger, and Damien Chablat. "A classification of 3R orthogonal manipulators by the topology of their workspace." IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004. Vol. 2. IEEE, 2004.

[15] Ottaviano, Erika, Marco Ceccarelli, and Manfred Husty. "Workspace topologies of industrial 3R manipulators." International Journal of Advanced Robotic Systems 4.3 (2007): 38.

[16] Wenger, Philippe, and Damien Chablat. "A review of cuspidal serial and parallel manipulators." Journal of Mechanisms and Robotics 15.4 (2023): 040801.