مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (4) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (4) 2016

تصميم وتنفيذ مُناول روبوتي تسلسلي صناعي بأربع درجات حرّية مُقاد كهربائياً

الدكتور ثائر أحمد ابراهيم*

(تاريخ الإيداع 8 / 2 / 2016. قُبِل للنشر في 21/ 7 / 2016)

□ ملخّص □

يتمحور العمل في هذا البحث حول تصميم مُناول روبوتي تسلسلي صناعييمتلك أربعدرجاتحرية (4-DOF) يقوم بأعمال المُناولة على خطوط الإنتاج وأعمال التوضيب للقطع الصغيرة،ويتميز بالمرونة وبإمكانية الانسجام مع الروبوتات الأخرى ضمن منطقة العمل.

يوضّح البحث التوصيف الميكانيكي للمُناول ودراسة النموذج الحركي المباشر والنموذج الحركي العكسي بالإضافة إلى دراسة المسار. محركات المُناول الكهربائية هي محركات السيرفو (DC Servo motor). تصميم نظام القيادة الالكتروني للمُناول يستخدم شريحة الآردوينو (Arduino UNO).

تُتيح الواجهة التطبيقية التخاطبية، التي تم بنائها ضمن البيئة البرمجية (Microsoft Visual Studio)،التحكُم بسهولة بالمُناولالروبوتي.حيث يحاكي نموذج المُناول الثلاثي الأبعاد (3D) حركته على أرض الواقع.

يُناقش القسم الأخير من البحث نتائج اختبار النموذج التطبيقي للمُناول الروبوتيالذي قمنا بتصميمه وتنفيذه.

الكلمات المفتاحية: مُناول روبوتي تسلسلي ، 4 درجات حرّية، ال حركية المباشرة والعكسية ، محركات السيرفو الآردوينو،الفيجوال استوديو، برنامج الأنفينتور.

* مدرس – قسم الأتمتة الصناعية – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (4) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (4) 2016

Design and implementation of a serial manipulator industrial robot with (4-DOF) electrically controlled

Dr. Their Ahmad Ibrahim*

(Received 8 / 2 / 2016. Accepted 21 / 7 / 2016)

□ ABSTRACT □

This research is centered on design of a serial industrial manipulator with 4 degrees of freedom(4-DOF) in order to manipulation on production linesand packaging tasks of small pieces, it is characterized by flexibility and the possibility of compatibility with other robots in the work area.

Research explains the Mechanical description of the manipulator and the study of the inverse kinematic and direct kinematics in addition to the study of the path of the manipulator.Manipulator electric engines are servo motors (DC Servo motor). The design of the electronic driving system of the robot depends on the Arduino Board(Arduino UNO).

The application interface, which was built within the software (Microsoft Visual Studio), allows to easily control the manipulator.Where the robot three-dimensional model (3D) simulates the movement of the robot at work.

In the latter part of the research we discussed practical prototype test results of the robotic manipulator that we have designed and implemented.

Keywords: Serial manipulator, direct/Inverse kinematics, servo motor, Arduino, Visual Studio, AutoDesk Inventor.

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

مقدمة:

في الحقيقة، الروبوت ليس سوى الحلقة الأخيرة من عملية أتمتة طويلة، حيث يُعتبر الروبوت في العصر الحالي من بين المُنتجات التي تعمل جنباً إلى جنب مع الإنسان في المجال الصناعي.

المُناولات الروبوتية الصناعية (Manipulator industrial Robots): هي آلة أو آلية (ذراع) تتألف عادةً من سلسلة من القطع المرتبطة مع بعضها البعض بواسطة مفاصل بحيث تؤمن حركة دورانية أو حركة انسحابية بهدف مسك ونقل الأشياء بحريّة في مختلف الاتجاهات (ويمكن أيضاً أن يُركّب عليها أدوات تلزم العملية الصناعية مثلاً: مثقب، فرد بخ دهان، أداة لحام، ...الخ). ويمكن أن تكون هذه المُناولات الروبوتية مُقادة بواسطة مُشغّل أو وحدة قيادة الكترونية أو برنامج حاسوبي.

الروبوت الذي سنقوم بتصميمه عبارة عن مُناولقادر على القيام بأعمال التوضيب (التقاط – نقل – وضع)، ويقوم بإنجاز تلك العمليات بإيعاز من برنامج حاسوبي،يُستخدم في الأعمال الرتيبة (العمليات المُتكررة) حيث أن دورة العمل تتألف من أعمال مُتتالية لا تتغير من دورة إلى أخرى، وذلك عندما يُراد إنجاز العمل في مكان مُحدد من المصنع (على خط انتاج مثلا) . والميزة المهمة لهذا لروبوت هي إمكانية إعادة مُعايرته برمجيا بسرعة وخاصة في ظروف التبديل المُتكرر لمواضعالعملية الانتاجية.سوفنُسلطالضوءفي هذا العمل على المبادئالأساسية في تصميم مُناول روبوتي يُستخدم في أعمال التوضيب منخلالالتركيزعلى شرح خطوات التصميم (وخاصة دراسة الحركية،دارات القيادةالإلكترونية والتصميم البرمجي) وفي النهاية سنقومبمناقشة نتائج التنفيذ العملي.

أهميّة البحث وأهدافه:

تكمُن أهمية البحث في وضع خطوات التصميم، بشكل مبسط، لمُناول روبوتي تسلسلي يُستخدم في الصناعة، على خطوط الانتاج، وما يترتب على ذلك من فوائد تقنية تتعلق بالجانب الفني للعمل: انجاز الأتمتة الشاملة للإنتاج وبالتالي رفع انتاجية العمل. وفي نفس الوقت تحرير الانسان من الأعمال الرتيبة ومن ظروف العمل الغير مريحة والتي يمكن أن تكون غير صحية، وبالتالي الحد من الأخطار المهنية، التي من شأنها التقليل من الهدر، وهذا بدوره ليس قيمة تقنية فحسب بل وله قيمة اجتماعية أيضاً. إضافة إلى الجانب الاقتصادي المُتمثل في توفير تكلفة الإنتاج وفي السيطرة على الطاقة الإنتاجية للمصنع، مع الأخذ بعين الاعتبار أن كلفة الاستثمار الأولي للمُناول الروبوتي يُمكن أن تُغطى سريعاً وخاصة في العمليات كثيرة التعداد.

يهدف البحث إلى تصميموتنفيذذراعروبوتي صناعي، مُناولتسلسلي،(Manipulator Serial robot) يمتلك أربعدرجاتحرية (4 DOF)بهدف مناولة المواد (Manipulation) قادرعلىالقيامبمهمات الالتقاطوالوضع (Pick & Place) للقطع الصغيرة، وهذا الذراعالروبوتي مُبرمج لتنفيذ مهامه بصورة مكررة ودقيقة.يتضمن العمل التوصيف الميكانيكي للمُناول الروبوتيواجراء الدراسات التصميميةالكهربائية، التحكمية والبرمجية.

المُناولالروبوتي ذو نظام قيادة كهربائي و يتألف من أربعة مفاصل دوّارة لتأمين حرية الحركة في فضاء العمل(Work space). ويتميز بمرونة في العمل (مرونة الوصول إلى فوق أو تحت الجسم) وبإمكانية الانسجام مع روبوتات أخرى تعمل ضمن نفس منطقة العمل. ومن المزايا التي يتمتع بها هذا الروبوت إمكانية إعادة مُعايرته برمجياً ليتكيف مع متطلبات العملية الانتاجية (التبدلات في مكان العمل)، وهو مُخصص للقيام بالعمليات المتكررةكثيرة التعداد.

تم إجراء البحث في قسم الأتمتة الصناعية – كلية الهندسة التقنية في جامعة طرطوس خلال الفترة الممتدة من 2015/8/1م إلى 2015/12/20م.

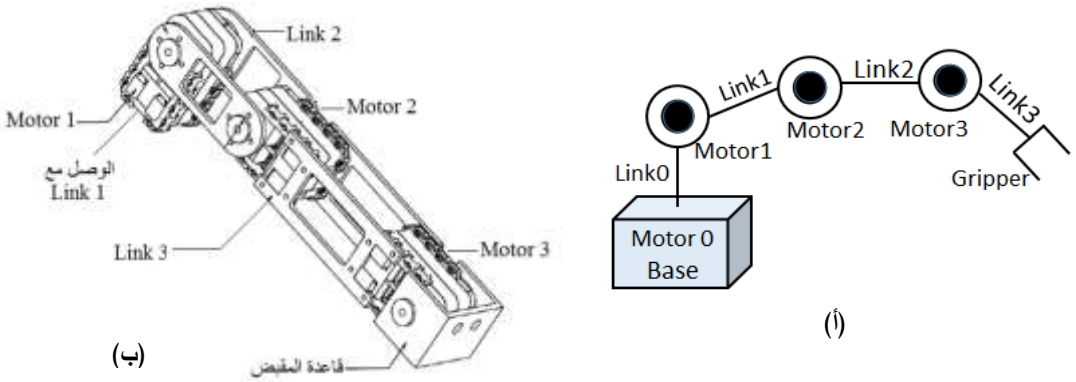
طرائق البحث ومواده:

في البداية قمنابالتوصيف الميكانيكي للمناول الروبوتي وذلك باستخدام البرنامج المُتخصص في التصميم الميكانيكي "AutoDesk Inventor Professional 2014"،وقمنا بدراسة حركية الروبوت المباشرةوحركيته العكسية (Direct and Inverse Kinematics)،ثم قمنا بالتنفيذ العملي للجسم الميكانيكي للمُناول. المرحلة التالية هيإختيار المحركات الكهربائية الأنسب،وهي محركات السيرفو (DC servo motor).ثم القيام بتصميم نظام القيادة الالكتروني(Electronic Drive Design) باستخدام شرائح الآردوينو (Arduino Shields) التي تعتمد على المُتحكمات الصغريّة الـ AVR.المرحلة الأخيرة هي القيام بالتصميم البرمجي (Programming)، حيث قمنابنباء برنامج التحكم باستخدام البيئة البرمجية (Microsoft visual studio).وفي النهاية قمنا بمناقشة نتائج اختبار النموذج التطبيقي للمُناول الروبوتيالذي قمنا بتصميمه.

3- التوصيف الميكانيكي للذراع الروبوتي:

قمنا بدراسة الحلال تصميمي الأنسب من حيث التكلفة والقدرة على تصنيع قطع الذراع في السوق المحلية، حيث اخترنا المواد الأخف وزنا والأكثر متانة من أجل تقليل العزم المطلوب تقديمه من المحركات.تم تصنيع جميع قطع المناول من مادة *البلكسيغلاس* (زجاج الإكراليك) لتوافرها في السوق المحلية ولسهولة تشكيل القطع المطلوبة عن طريق القص على آلة الليزر، سماكة قطع المُناولتساوي 5mm. لم نتوسع في دراسة التصميم الميكانيكي، رغم أهميتها،لضيق المساحة المخصصة للبحث من جهة وللتركيز على الجانب الالكتروني والبرمجي من جهة أخرى.

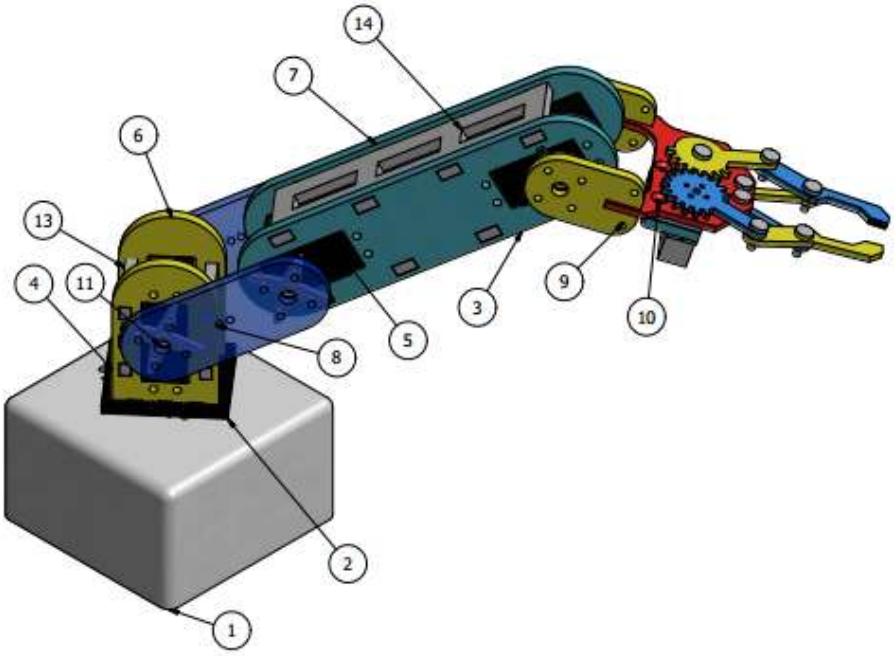
يتكون المناول،بشكل أساسيمن: قاعدة الذراع (Base)، سلسلة حركية مُؤلفة من أربعة وصلات (links) والقبضة (Gripper) التي هي النهاية المؤثرة (End-Effector)، كما يوضح الرسم التخطيطي في الشكل (1-أ). يُحقق هذا التصميم أربع درجات حريّة، ويمتاز بأن الوصلات المربوطة بالمحركات تحد من الخلوص الميكانيكي الذي قد ينتج عن المحرك، الشكل (1-ب).تُعطي درجة الحريّة الرابعة (زاوية توجيه القبضة) للمُناول مرونة في الحركة ضمن فضاء العمل، حيث تُتيح أكثر من طريقة لالتقاط الجسم وهي غير مُقيدة بزاوية واحدة (كما هو حال المُناولات ذات درجات الحريّة الثلاث)،مما يزيد من إمكانية التقاط الأجسام رغم وجود العقبات. [1]، [2]، [3]



الشكل (1):أ) مخطط ذراع الروبوت. ب) السلسلة الحركية.

من أجل التصور الميكانيكي للذراع قمنا باستخدام برنامج " AutoDesk Inventor 2014 Professional" الذي يختص بالهندسة الميكانيكية من ناحية التصميم والمحاكاة.[4]

يوضح الشكل التالي (الشكل 2) منظور عاملللمُناول الروبوتيالمُراد تصنيعه بالإضافة لأرقام القطع المُشكّلة له ونبيين في الجدول التالي(جدول 1) توصيف القطع المُصنع منها جسم المُناول الروبوتي.



الشكل (2):منظورعام للمُناول الروبوتي.

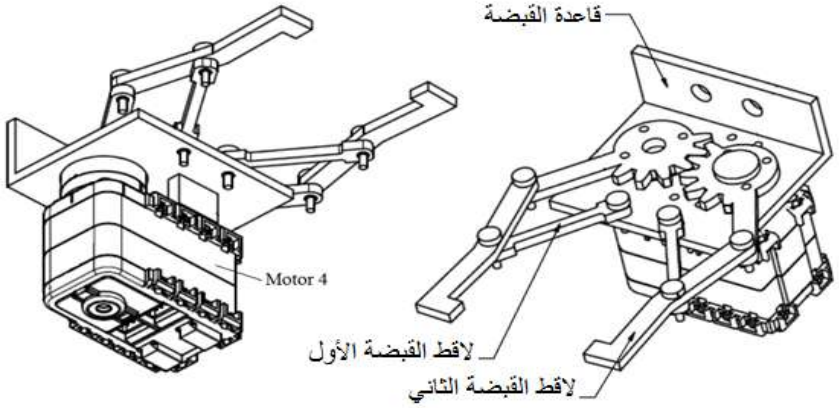
الجدول (1): توصيف القطع المُصنع منها جسم المُناول الروبوتي.

Item	QTY	Name	Description
1	1	Base1	قاعدة الروبوت (صندوق خشبي ويمكن ان يكون معدني) يتوضع بداخلها وحدة التغذية وبطاقة التحكم، ويُثبت عليها المحرك الذي يعطي درجة الحريّة الأولى حول محور الدوران الشاقولي.

2	1	Base2	القاعدة الفعّلية التي تحمل الذراع، حيث تدور هذه القطعة مع المحرك الأول الذي يعطي درجة الحريّة الدورانية حول المحور الشاقولي.
3	1	Hand3	تشكل هذه القطعة الجزء المُتحرك من درجة الحريّة الثالثة.
4	1	Hand1	القطعة التي تحمل المحرك الذي يعطي درجة الحريّة الثانية.
5	4	Motor1	محرك كهربائي.
6	1	Hand1-2	مهمة هذه القطعة هي تدعيم القطعة رقم 4 ومساعدتها على حمل باقي أجزاء الذراع.
7	1	Hand3-1	تقوم هذه القطعة بمساعدة القطعة Hand3 على تحمل وزن الذراع وتوزيع الحمولة.
8	2	Hand2	يتم تثبيت هذه القطعة مع الجزء الدوّار من المرحلة الثانية وتتحرك معه من جهة، ومن جهة أخرى تشكل قاعدة لدرجة الحريّة الثالثة.
9	2	Hand4	تمثل هذه القطعة الجزء المُتحرك من درجة الحريّة الرابعة ويتم تثبيت مقبض الذراع عليها.
10	1	Hand	مقبض الذراع.
11	4	Motorflinch	مروحة محرك السيرفو.
13	2	Hand1-fix	مهمة هذه القطعة هي الربط بين القطعتين Hand1وHand1-2 لزيادة المتانة.
14	2	Hand3-fix	تقوم هذه القطعة بالربط بين القطعتين Hand3 وHand3-1 من الجهة العلوية والسفلية.

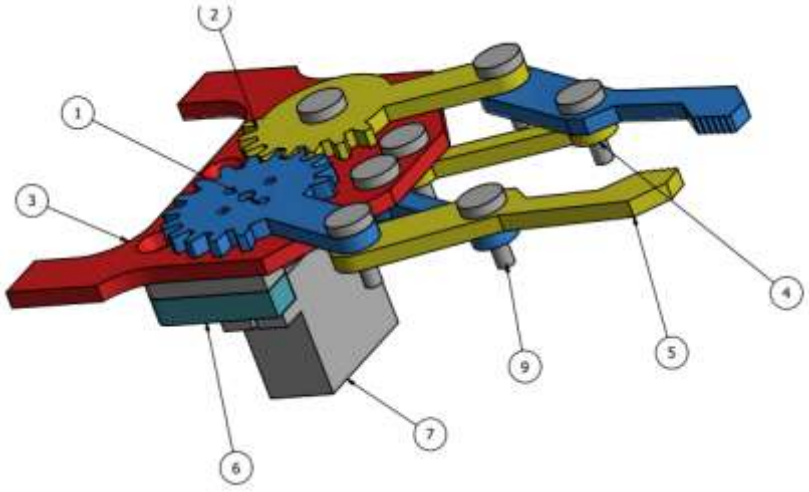
القبضة:وهي الكتلة المسؤولة عن التقاط الحمل، ويوجد عدة حلول وتصاميم لتحقيق هذا الغرض ولكن تم اختيار التصميم المُبين في الشكل التالي، الشكل (3)، لأنه يحقق توازن القبضة عند الفتح والإغلاق.[5]

عند تصميم القبضة تم مراعاة وضع نقاط تثبيت المسنن وجذع القبضة وطرف القبضة بحيث تشكل متوازي أضلاع مما يحقق توازيا دائما للطرف اللاقط للحمل كما هو مبين في الشكل (3).



الشكل (3): منظور عام لقبضة الروبوت.

يوضح الشكل التالي (الشكل 4) منظور عاملقبضةالمُناول الروبوتي، ونبيين في الجدول التالي توصيف وعدد القطع المُشكّلة للقبضة.



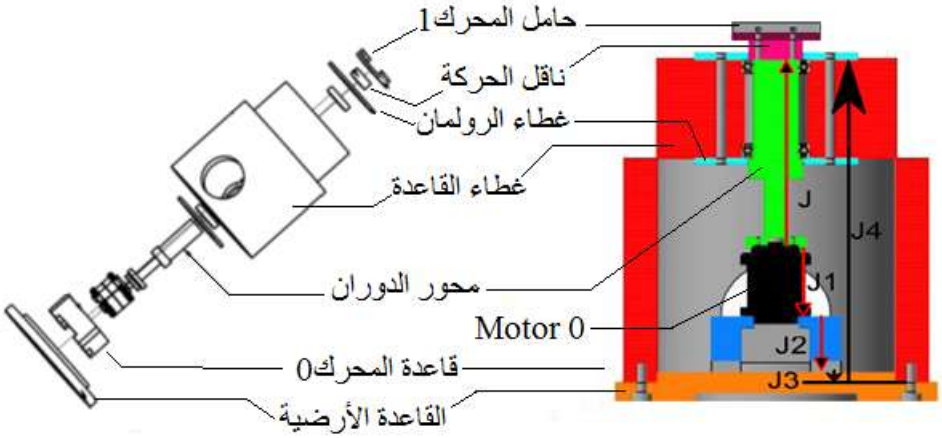
الشكل (4):منظور عام لقبضةالمُناول الروبوتي.

الجدول (2): توصيف القطع المُشكّلة للقبضة.

Item	QTY	Name	Description
1	1	Serrated1	مسنن أول ذو ذراع.
2	1	Serrated2	مسنن ثاني ذو ذراع.
3	1	Base	قاعدة تُثبت عليها أجزاء المقبض
4	2	Arm4	قطعة مثبت عليها طرف الملقط الثاني.
5	2	tongs	الطرف الأول للملقط.
6	2	Fix motor hand	قطعة وسيطة لتثبيت المحرك عليها.
7	1	Motor	محرك القبضة.
9	7	Screw axis	أداة للربط بين الاجزاء المتحركة في المقبض.

القاعدة:إضافة إلى وظيفتها في تثبيت المُناولفإنها تقوم بتأمين درجة الحرية الأولى (DOF−0)، الدوران حول محور يعامد مستوى استنادها على الأرض. يبين الشكل (5) مقطع طولي للمنظور الثلاثي الأبعاد لكتلة القاعدة.

تمت دراسة سلسلة الأبعاد لكتلة القاعدة لضمان جودة التجميع، ولضمان أن السطح العلوي لمحور الدوران يبقى تحت السطح السفلي للرولمان العلوي(ضمان التماس المباشر بين ناقل الحركة والرولمان العلوي).



الشكل (5):مقطع طولي للمنظور الثلاثي الأبعاد لكتلة قاعدةالمُناول.

الرولمانات:لضمانسلاسة دوران محور الدوران، كان لابد من استخدام رولمانيين (دحاريج كروية)،وسنعرض فيما يلي كيفية اختيارهما انطلاقا من المعادلة التالية.

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \times N}\left(\frac{C}{P}\right)^3$$

حيث:

L_{10h}: مدة الحياة الإسمية بعدد ساعات العمل (20000h).N: سرعة الدوران(60rpm).

C:الحمل الديناميكي (N).P:الحمل الديناميكي المكافئ(100N).

انطلاقاً من الحمل الديناميكي وبالاعتماد على جداول الرولمانات نجد أن الرولمان 6900zz ذو قطر داخلي 10mm هو الأنسب،ولكن تم اختيار الرولمان 61804 ذو قطر داخلي 20mm لتوافره في السوقالمحلي.

3-1- دراسة حركة المُناول الروبوتي (Kinematics of robot manipulator):

يمكن أن نعرّف علم الحركة (Kinematics) بأنه العلم الذي يهتمبدراسة كلا الخصائص الهندسية والزمنية بالنسبة لحركة بنية الروبوت من دون الإشارة إلى السبب الذي أدى إلى حدوثها، وهنا نميز النموذجين التاليين:[6]، [7]

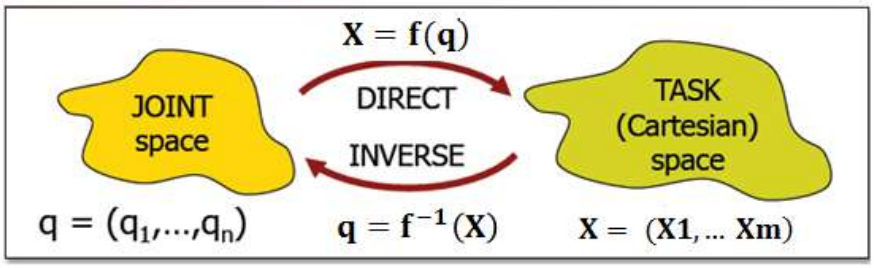
-النموذج الحركي المباشر (Direct Kinematics):ويهدف إلى إيجاد جملة العلاقات التي تُعبر عن وضع القبضة كتابع للمفاصل الدورانية q الواصلةبينالوصلات L، يكتب هذاالنموذج كما يلي، الشكل (6):

$$X = f(q)$$
$$X = [x, y, z, \alpha] \quad , q = [q_1, q_2, q_3, q_4]$$

-النموذج الحركي العكسي(Inverse Kinematic): وهو عبارة عن جملة العلاقات التي تُحدد المفاصل q كتابع لموضع القبضة في فضاء العمل.الدراسة الأهم هي الحركة العكسية للروبوت حيث نحدد النقطة الهدف المُراد الوصول إليها ونقوم على أساسها بإيجاد زوايا المفاصل المناسبة لهذه النقطة من العلاقة التالي، الشكل (6):

$$q = f^{-1}(X)$$

تكمُن المشكلة في إيجاد المعادلات المناسبة التي تعطينا قيم هذه الزوايا واختيار الحل الأمثل من بين العدد الكبير من الحلول المُتاحة لدينا، حيث أن دراسة هذه المواضيع تمثل أهم نقطة في علم الحركة عند الروبوتات.

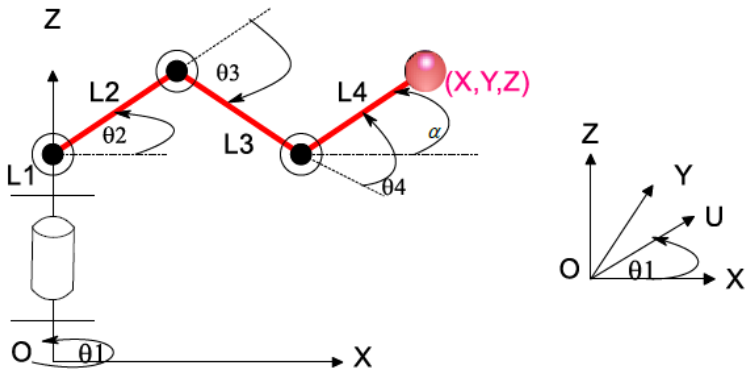


الشكل (6):بارامترات الحركة (parameterizations Kinematics)،
n=درجة الحرية (dof)، m≥ 6

3-1-1- حل النموذج الحركي المباشر:

يبين الشكل التالي، الشكل (7)، نموذج المُناول الروبوتي ذو درجات الحريّة الأربعة(4-DOF)، قيد الدراسة.
بإسقاط الشعاع U على المحورين (X ،Y)، نجد:

$$X = U * cos(\theta 1)$$
$$Y = U * sin(\theta 1)$$



الشكل (7):نموذج المُناول الروبوتي (4-DOF).

ولكن الشعاعU يكتب كما يلي:

$$U = l_2 * cos(\theta_2) + l_3 * cos(\theta_2 + \theta_3) + l_4 * cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

ومنه يكتب الشعاعين (X ،Y)كالتالي:

$$X = l_2 * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_1) + l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_1) + l_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) * \cos(\theta_1) \quad (1)$$

$$Y = l_2 * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) + l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_1) + l_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) * \sin(\theta_1) \quad (2)$$

وبالإسقاط على المحور Z:

$$Z = l_1 + l_2 * \sin(\theta_2) + l_3 * \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_4 * \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (3)$$

ولدينا زاوية توجيه القبضة:

$$\alpha = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (4)$$

3- 1-2- حل النموذج الحركي العكسي:

نُلاحظ مما سبق أن:

$$\theta_1 = tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right)$$

وبتربيع المعادلة (1) و(2) نجد ما يلي:

$$X^2 + Y^2 = [l_2 * \cos(\theta_2) + l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)]^2$$

بعزل الحدود الثابتة والمعلومة نحصل على الثابت A_1:

$$A_1 = \sqrt{X^2 + Y^2} - l_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = l_2 * \cos(\theta_2) + l_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

وأيضا من المعادلة (3) وبعزل الحدود الثابتة والمعلومة نحصل على الثابت A_2:

$$A_2 = Z - l_4 * \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - l_1 = l_2 * \sin(\theta_2) + l_3 * \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

بتربيع وجمع الثابتين نحصل على ما يلي:

$$A_1^2 + A_2^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2 * l_2 * l_3 * \cos(\theta_3)$$

وبالتالي أصبحت الزاوية الثالثة معلومة:

$$\theta_3 = \mp cos^{-1}\left(\frac{A_1^2 + A_2^2 - l_2^2 - l_3^2}{2 * l_2 * l_3}\right)$$

$$A_1 = (l_2 + l_3 * \cos(\theta_3)) * \cos(\theta_2) - (l_3 * \sin(\theta_3)) * \sin(\theta_2))$$

$$A_2 = (l_2 + l_3 * \cos(\theta_3)) * \sin(\theta_2) + (l_3 * \sin(\theta_3)) * \sin(\theta_2)$$

بالحل المشترك للمعادلتين الأخيرتين، نجد الزاوية الثانية:

$$\theta_2 = atan_2(\sin(\theta_2), \cos(\theta_2))$$

أما الزاوية الرابعة ولأخيرة فهي كالتالي:

$$\theta_4 = \alpha - \theta_2 - \theta_3$$

3-2- مسارالمناول الروبوتي (Path of the manipulator):[8]

تُعرفالحركةبالقيمةالابتدائيةوالنهائيةللزمنوبشروطالموضعوالسرعةوالتسارعفياللحظتين البدائية والنهائيةحيثتؤولهذهالمسألةلإيجادتابعكثيرحدوديكونشكلهالعام كما يلي:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \cdots + a_n t^n$$

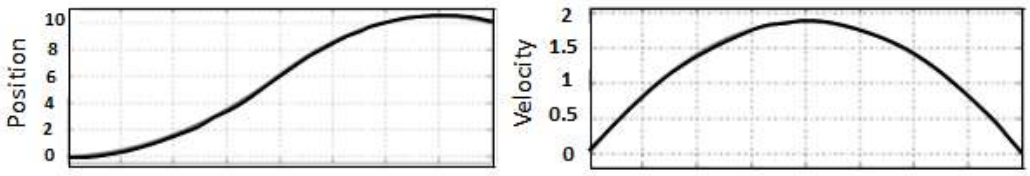
وتعتمددرجةكثيرالحدود n علىعددالشروطالتييجبتحقيقها، وفيحالتنافرضأربعةشروط.

بدايةنفرضأنمجالالعملالزمني$[t_0, t_f]$، ومنه تكون الشروط كما يلي:

$$q(t_0) = q_0$$

$$q(t_1) = q_1$$
$$v(t_0) = \dot{q}(t_0) = 0$$
$$v(t_1) = \dot{q}(t_1) = 0$$

ومنهيكونمنحنيالموضعومنحنيالسرعةكمافي الشكل التالي (الشكل 8):



الشكل (8):منحنيالموضعومنحنيالسرعة.

وتُصبح المسألة الآن : حساب مُعاملات تابع كثيرات الحدود α_iأيإيجادحلمشتركلأربعمعادلاتبأربعةمجاهيلحيثيتم الحصولعلىتلكالمعادلاتمنالشروطالمفروضة مُسبقاً.

وبفرض أن($T_0 = 0$) نجد ما يلي:

$$a_0 = q_0$$
$$a_1 = 0$$
$$a_2 = \frac{3}{t_f^2}(q_f - q_0)$$
$$a_3 = \frac{2}{t_f^3}(q_f - q_0)$$

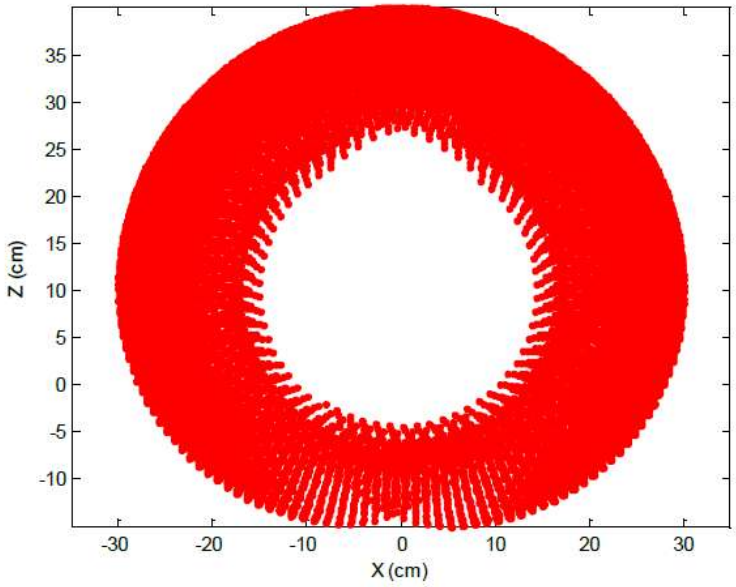
كماسبقتمايجادمُعاملاتكثيرالحدودلتوليدالمسار (ولكنمنأجلنقطةالبدائيةوالنهائية)،أمافيحالأردناتوليدالمسار عبرعدةنقاطمعلومةفيُصبحللسرعةالبدائيةوالنهائيةللقطعالمستقيمة(الوصلات)قيمغيرمعدومة،وتصبحالمُعاملاتكالتالي:

$$a_0 = q_0$$
$$a_1 = \dot{q}_0$$
$$a_2 = \frac{3}{t_f^2}(q_f - q_0) - \frac{2}{t_f}\dot{q}_0 - \frac{1}{t_f}\dot{q}_f$$
$$a_3 = \frac{2}{t_f^3}(q_f - q_0) + \frac{1}{t_f^2}(\dot{q}_0 + \dot{q}_f)$$

3-3- فضاء العمل(Work Space):

لتوجيهالمُناولبشكلصحيحضمنفضاءالعمل،وللتأكدمنأنالاحداثياتالمُعطاةللمُناولعنطريقنموذج الحركة العكسيقابلةللوصولإليها،تمتدراسةفضاءالعملفيالمستوي (X, Z). أمافضاءالعملالكليفيكوننـاتجعندوران المستويالسابقحولالمحور Z.

يُظهر الشكل التالي فضاء العمل ضمن المستوي(X, Z) بغض النظرعن زاوية توجيه القبضة.



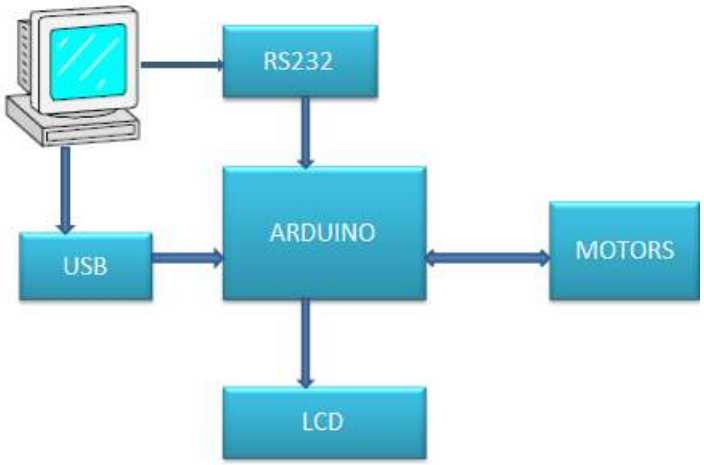
الشكل (9):فضاء العمل ضمن المستوي(x, z).

4- دارات القيادةالإلكترونية (drivesElectronic):

تتألف دارة القيادةبشكل أساسي من شريحة آردوينو (ARDUINO)يتم برمجتها عن طريق الحاسب باستخدام البيئة البرمجية (Arduino IDE)حيث يتم إرسال الأوامر إليها من الحاسب عن طريق الوصلة التسلسلية (RS232) لتُنفذ التعليمات ولتُرسلها بدورها إلى المحركات، بالإضافة إلى شاشة إظهار كريستالية متصلة بالشريحة.يبين الشكل التالي (الشكل 10)المخطط الصندوقي لدارةالقيادةالإلكترونية.

تتلخص الوظائف الأساسية لهذه الدارة، بما يلي: استقبال التعليمات من الحاسب عبر الوصلة التسلسلية وصولا للمُعالج، وتوليد أوامر التحكم وإرسالها للمحركات. يتم التخاطب بين الحاسب والمُعالج عن طريق بوابة تسلسلية ويتم التخاطب مع المحركات بتقنية التعديل النبضي العرضاني(PWM).

وبما أنه لدينا خمسة محركات كهربائية، نختار الشريحة الإلكترونيةبحيث يكون المُتحكم ذو خمسة عدّادات لذلك تم اختيار مُتحكمالـ AVR نوعAtmega328(من شركةAtmel) حيث نجد أن الشريحة Arduino Uno التي تعتمد على هذا المُتحكم هي الأكثر مناسبة للعمل.[9]، [10]



الشكل (10):المخطط الصندوقي لدارةالقيادةالإلكترونية.

4-1- الآردوينو (Arduino):

الآردوينوعبارة عن لوحه تطوير إلكترونيةتتكون من دارة إلكترونية مفتوحة المصدر مع مُتحكم صغرّي(مُتحكمات الـ AVR)على لوحة واحدة يتم برمجتها بواسطة الحاسب، وهي مُصممة لجعل عملية استخدام الإلكترونيات التفاعلية في مشاريع مُتعددة التخصصات أكثر سهولة. يعتمد الآردوينو في برمجتهعلى لغة البرمجة (C/C^{++}) والتي تُعتبر من أشهر لغات البرمجة المُستخدمة في كتابة برامج المُتحكمات الصغرّية.[11]

الشريحةArduino UNO:تحوي دارتها على 14 مدخل/مخرج من النوع الرقمي Digital، من هذه المخارج يوجد 6 مخارج يمكن استخدامها كمخارج PWM. أيضا تحوي الدارة على مداخل تماثلية Analog، الشكل 11.

الشكل (11):BoardArduino UNO.

يمكن استخدام الأرجل الرقمية (Digital pins)كمداخل ومخارج عبر التعليمة (PinMode).

تعمل هذه الأرجل على جهد قيمته (5 فولت) ويمكن أن تؤمن سحب للتيار بحدود (40 ميلي أمبير) وتتصل كل رجل بمقاومة داخلية (internal pull-up resistor)،بالإضافةإلى ذلك يوجد مهام خاصة تختص بها بعض الأرجل.

4-2- المحركات الكهربائية (Electric motors):

هناك حلين مُمكنين بالنسبة للمحركات الكهربائية للمُناولالروبوتي:

الحلالأول:هو استعمالمحركاتالتيارالمستمر (DC motor)، يحتاج هذا النوع من المحركاتإلىمُرّمزدوراني (Encoder)للتمكُنمنالتحكمبموضعه،وهذايؤديإلىصعوبةفيالتصميموزيادةفيالوزن،إضافةإلىصعوبةالتحكُمبالمحركاتالخمسة التي يحتاجها المُناولبشكلمتزامن.

الحلالثاني:هواستعمالمحركات السيرفو (Servo motor DC)، وهي أفضلمنسابقتهامنحيثالوزنوالتركيبوالتحكُموالذي يتم عنطريقإشارةPWM التي نحصل عليها من شريحة الـ Arduino، حيث يتم التحكُم بالموضع بالدقة المطلوبة بسهولة دون الحاجة لمُرّمز خارجي.

لذلك قمنا باختيار محركات السيرفو، والتي عادةً تأتي مع علبة تروس (Gear) وناقل حركة (Shaft) مما يُعطي الحركة عزماًودقة أكبر ويستطيع هذا المحرك الدوران (180درجة) وفي بعض الأنواع (360 درجة). [5]

والجدير بالذكر أن بيئة آردوينو البرمجية تحويمكتبة (Servo Library) التيتتيح إمكانية التحكُم في أغلب محركات السيرفو بسهولة.

وعند البحث في السوق المحلي (بين المحركات المتوفرة) تم اختيار المحرك نوع TowerPro MG945 "Servo" من أجل جسم المُناول (أربعة محركات)، والمحرك نوع "SG90 9 g Micro Servo"من أجل القبضة (محرك واحد). وانطلاقا من العزوم وقدرة التحميل للمحركات التي تم اختيارها (الجدول 3 والجدول 4) قمنا باختيار أبعاد وأوزان المُناول الروبوتي.

الجدول (3):المواصفات الفنية الرئيسية لمحرك السيرفو (TowerPro MG945).

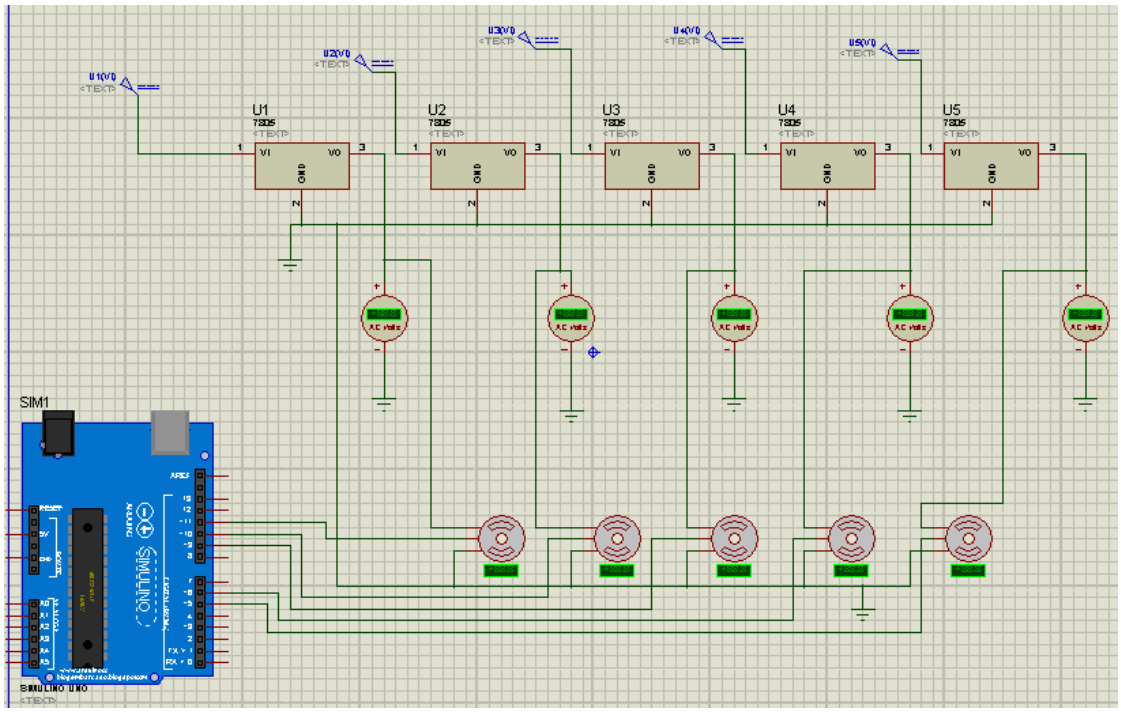
TowerPro MG945 Servo –Basic Information	
Modulation	Digital
Torque	4.8V: 138.9 oz-in (10.00 kg-cm) 6.0V: 166.7 oz-in (12.00 kg-cm)
Speed	4.8V: 0.23 sec/60° 6.0V: 0.20 sec/60°
Weight	1.94 oz (55.0 g)
Dimensions	Length: 1.60 in (40.7mm) Width: 0.78 in (19.7mm) Height: 1.69 in (42.9 mm)
Gear Type	Metal
Rotation/Support	Dual Bearings

الجدول (4): المواصفات الفنية الرئيسية لمحرك السيرفو (SG90 9 g Micro).

G90 9 g Micro Servo – Basic Information	
Modulation	Analog
Torque	25.0 oz-in (1.80 kg-cm)
Speed	0.12 sec/60°
Weight	0.32 oz (9.0 g)
Dimensions	Length:0.91 in (23.0 mm) Width:0.48 in (12.2 mm) Height:1.14 in (29.0 mm)
Gear Type	Plastic
Rotation/Support	Bushing

الآن، وبعد اختيار المحركات الكهربائية نقوم بربط محركات السيرفوالخمسة إلىلوحة الآردوينو،ومن أجل حماية لوحة الآردوينو من سحب التيار العالي نقوم بتغذية المحركات من دارة تغذية خارجيه ونأخذ فقط التحكم من لوحة الآردوينو.

تحتوي دارة التغذية المُستخدمة والمبينة على الشكل التالي(الشكل 12) على مُنظمات جهد 5V (7805)، مُنظم لكل محرك من المحركات الخمسة.



الشكل (12):وصل محركات السيرفو إلى الآردوينو وإلى منظمات الجهد.

5- التصميم البرمجي (Programming):

باستخدام اللغة C# ضمن البيئة البرمجية (Microsoft Visual Studio) تم بناء واجهة تطبيقية تخاطبيةتُمكّن المُستخدم من التحكُم بالمُناولالروبوتي بالإضافة إلى بناء نموذجثلاثي الأبعاد (3D) للمُناول باستخدام مكتبةOpen GL تحاكي حركة المُناولوتوضح زواياها.[13]

5-1- الواجهة البرمجية على الحاسب:

تم تصميم واجهة برمجية تقوم بوظيفة تأمين التراسل بين الحاسب وشريحة الآردوينو والتي تقوم بدورها بالتحكُم بالمُناولالروبوتي.تتكون هذه الواجهة البرمجية من ثلاث واجهات فرعية، سنقوم بتسليط الضوء عليها بشكل مختصر.

■**الواجهة الأولى:** مهمتها تأمين الاتصال بين الحاسب والآردوينووتحديد بارامترات الاتصال، الشكل (13).

الشكل (13):واجهة الاتصال بالروبوت.

-الأمر 'Connect' وظيفته تأمين الاتصال مع الوصلة التسلسلية RS232 وفي حال لم يكن هناك أي وصلة يقوم بإظهار رسالة خطأ.

-أما الأمر الثاني 'Disconnect'فمهمته إغلاق الوصلة التسلسلية ويرافق ذلك ظهور شكل يوضح أنه تم اغلاق الاتصال.

يتم تحديد بارامترات الاتصال عن طريق تعبئة حقول(اختيارمن القيم المُتاحة) الجزء "Communication Properties".

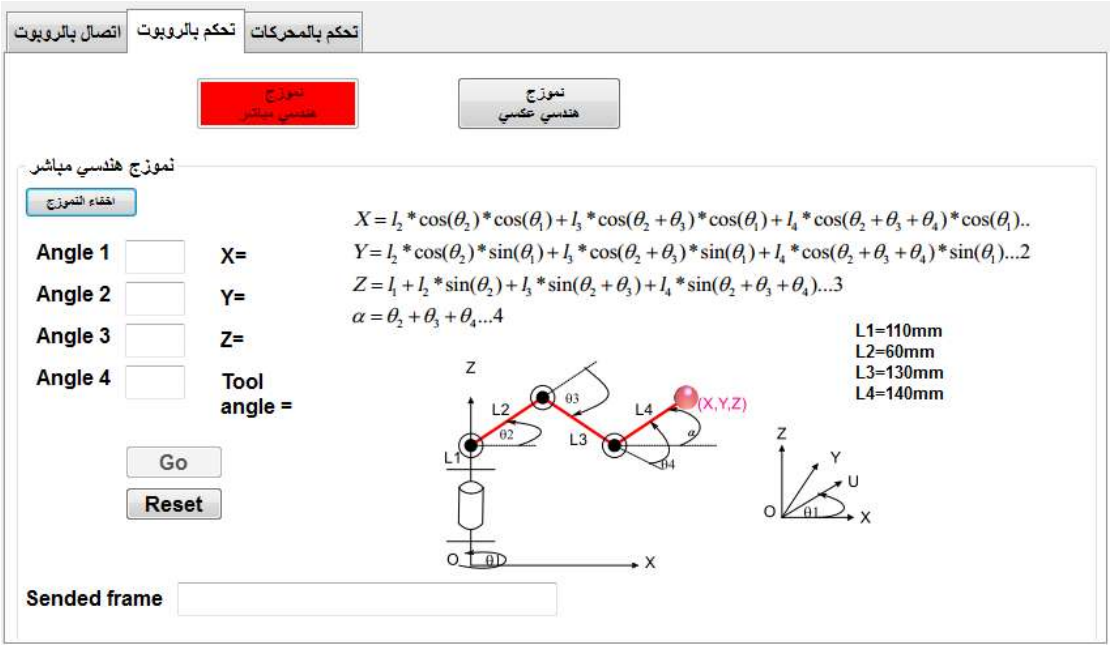
بعد تحقيق الاتصال مع بطاقة الآردوينو عبر الوصلة التسلسلية وتحديد بارامترات الاتصال ننتقل للحديث عن الواجهة الثانية.

■**الواجهة الثانية:**مهمتها عرض النموذج الهندسي المباشر والنموذج الهندسي العكسي(الشكل 14)، حيث يتم التحكم بالذراع وفق أحد النموذجين عن طريق أزرار الواجهة، وسنقوم بشرح الوظائف الخاصة بهما.

الشكل (14): واجهة التحكم بالذراع الروبوتي (النموذج الهندسي المباشر والعكسي).

لدينا الزرين (نموذج هندسي عكسي) و (نموذج هندسي مباشر) عند اختيار أحد الأمرين "نموذج هندسي عكسي" و"نموذج هندسي مباشر" يتم عرض واجهة التحكم الخاصة بالنموذج المطلوب، كما يلي:

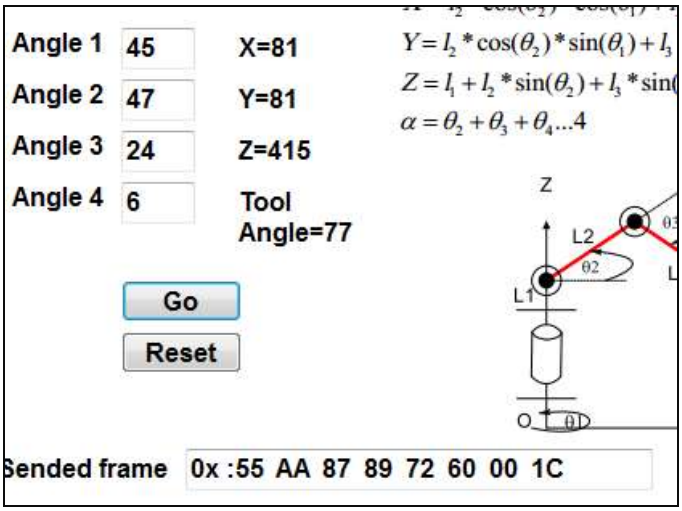
- "نموذج هندسي مباشر":عند اختيار هذا الأمريتم عرض معادلاتهوأبعاد الذراع كما يوضح الشكل (15).



الشكل (15): واجهة التحكم بالذراع الروبوتي(النموذج الهندسي المباشر).

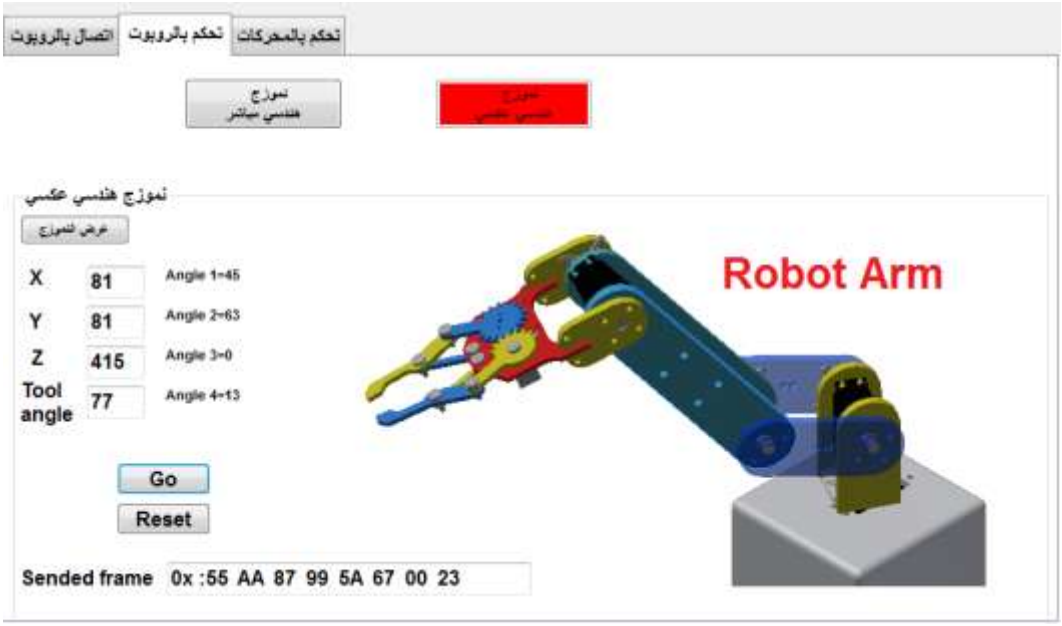
بعد ملئ الحقول بقيم زويا المحركاتتُفعّل الأمر " Go" الذي يقوم بعرض قيم متحولات الوضع للنهاية الطرفية للذراع مع زاوية ميلها "tool angle" كما يوضح الشكل التالي (الشكل 16).

يُظهر الحقل النصي"Sended frame" شكل (frame) الذي يتم إرساله من الحاسب إلى شريحة الآردوينو والمكتوب بلغة (HEX)، أما الأمر "Reset" فوظيفته العودة إلى الوضع البدائي.



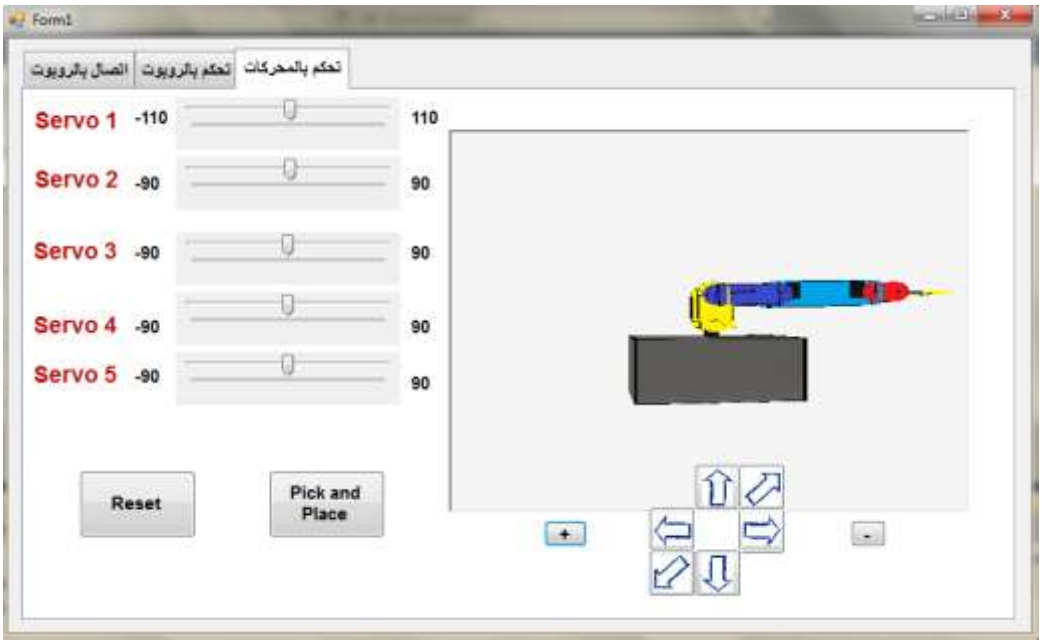
الشكل (16):تنفيذ النموذج الهندسي المباشر.

●"نموذج هندسي عكسي":انطلاقا من هذا النموذج، وبعد تعبئة معلومات الموقع، يتم الحصول على قيم الزوايا والتي يتم إرسالها إلى شريحة الآردوينو، الشكل 17.



الشكل (17): واجهة التحكم بالذراع الروبوتي(النموذج الهندسي العكسي).

■**الواجهة الثالثة:**مهمتها التحكُم بالمُناول الروبوتي من خلال التحكُم بالزاوية الخاصة بكل محرك من المحركات الخمسةوتنفيذ البرنامج المُعد لتحقيق التطبيق (pick and place)،أي نقل القطع والتبديل بينها، بالإضافة إلى عرض نموذج ثلاثي الأبعاد (3D) للذراع الروبوتي يوضح زوايا المحركات ووضعيات المُناول، الشكل 18.



الشكل (18):واجهة التحكم بمحركات المُناول الروبوتي.

تتعلق زاوية كل محرك بوضعية المنزلق (sliding bar) الخاص به،يقوم الأمر " pick and place" بتنفيذ مهمة تم برمجتها سابقا في الكود البرمجي، في حين أن مهمة الأمر " Reset"إعادة الروبوت إلى الوضع البدائي،أما مجموعة أزرار الأسهم فتقوم بتدوير الذراع حول المحاور الأساسية الثلاثة.

تم برمجة شريحةالآردوينوبحيث تستقبل الأوامر من الحاسب عن طريق الوصلة التسلسلية لتقوم بتحليل هذه الأوامر وتطبيقها على المحركات لتتحرك إلى الزاوية المطلوبة.

5-2- الخطوط الأساسية في الكود البرمجي:

تابع تغليف البيانات (Encapsulate):

يتم إرسال زوايا المحركات التي تم تحديدها في الواجهة الحاسوبية إلى شريحة الآردوينو عن طريق إطار المعطيات.

يتكون هذا الإطار من ثلاث أجزاء، الجزء الأول هو عبارة عن رأس الإطار(Header) حيث نقوم بتوزيعه على بايتيناثنين (2Byte)، والجزء الثاني هو البيانات وتتوزع على خمسة بايتات (5Bytes) بايت لكل زاوية محرك والجزء الثالث هو بايت التحقق (CRC) ويتم حسابه بطريقة خاصة ببروتوكول الاتصال.

CRC	Data5	Data4	Data3	Data2	Data1	Header2	Header1

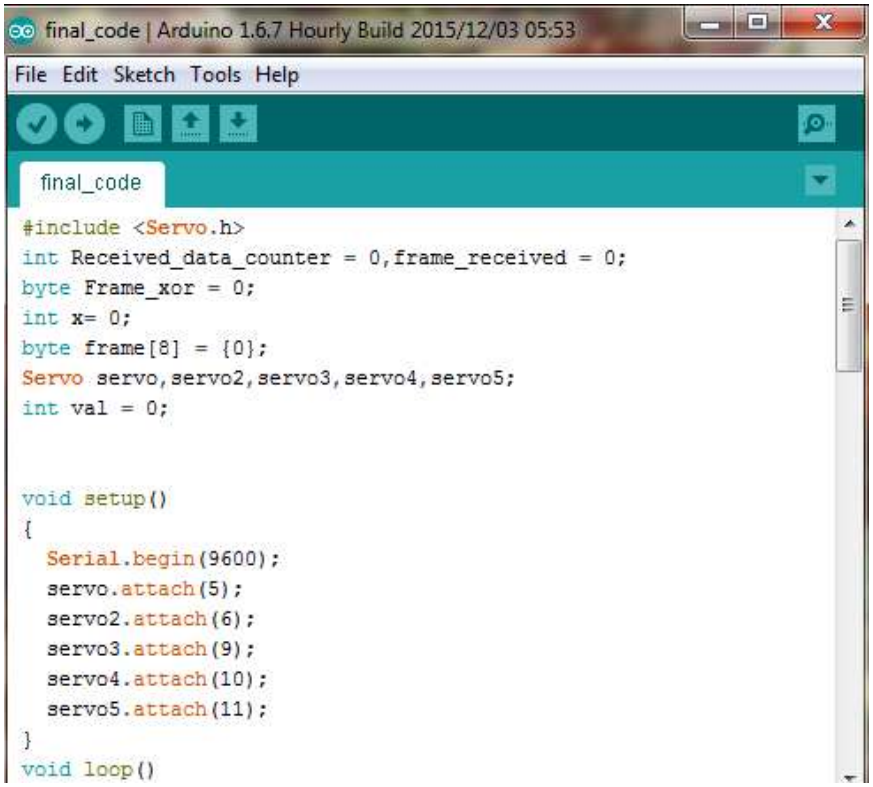
توابعمكتبةOpen GL:

قمنا ببناء نموذج ثلاثي الأبعاد للمُناول الروبوتيباستخدام مكتبة Open GL وتضمينها في البرنامج الكلي للمشروع. حيث قمنا ببناء جميع أجزاء الروبوت بالاعتماد على شكلين أساسيين فقط، هما:نمط المكعب (Cube)والنمط الأسطواني (Cylinder)، ومن ثم تم استدعاء هاذين النمطين لبناء جميع أجزاء المُناول الروبوتي (وذلك عبر دمجهما مع بعضهم البعض).

5-3- الجزء البرمجي الخاص ببطاقة الآردوينو:

تم برمجة شريحةالآردوينو باستخدام البرنامج الخاص بها (Arduino C) وذلك من خلال البيئة البرمجية (Arduino IDE).[14]، [15]

تقوم فكرة البرنامج على تفعيل الإرسال والاستقبال في شريحةالآردوينو حيث يتم استقبال الأوامر من الحاسب عن طريق الوصلة التسلسلية وتحليل هذه الأوامر ومن ثم تطبيقها على محركات السيرفو، الشكل (19).



الشكل (19): جانب من الجزء البرمجي المتعلق بشريحة الآردوينو.

النتائج والمناقشة:

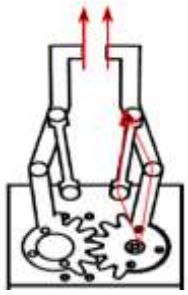
قمنا في هذا البحثباجراء الحسابات التصميمية والدراسة الهندسية من أجل تصميممُناولروبوتي صناعي بأربع درجات حريّةذو نظام قيادة كهربائي، يقوم بأعمال المناولة على خطوط الإنتاج وأعمال التوضيب للقطع الصغيرة.

وذلك حسب تسلسل خطوات العمل التالية:

- التوصيف الميكانيكيللمُناول الروبوتي في بيئة "AutoDesk Inventor".
- دراسة النموذج الحركي المباشر والنموذج الحركي العكسي.
- دراسة المسارللمُناولالروبوتي.
- اختيار المحركات الكهربائية: وهي محركات السيرفو (DC Servo motor).
- تصميم نظام القيادة الالكتروني باستخدام شريحةالآردوينو (Arduino UNO).
- بناء واجهة تطبيقية تخاطبيةفي البيئة البرمجية (Microsoft Visual Studio) للتحكُم بالمُناولالروبوتي مع بناء نموذجثلاثي الأبعاد (3D).

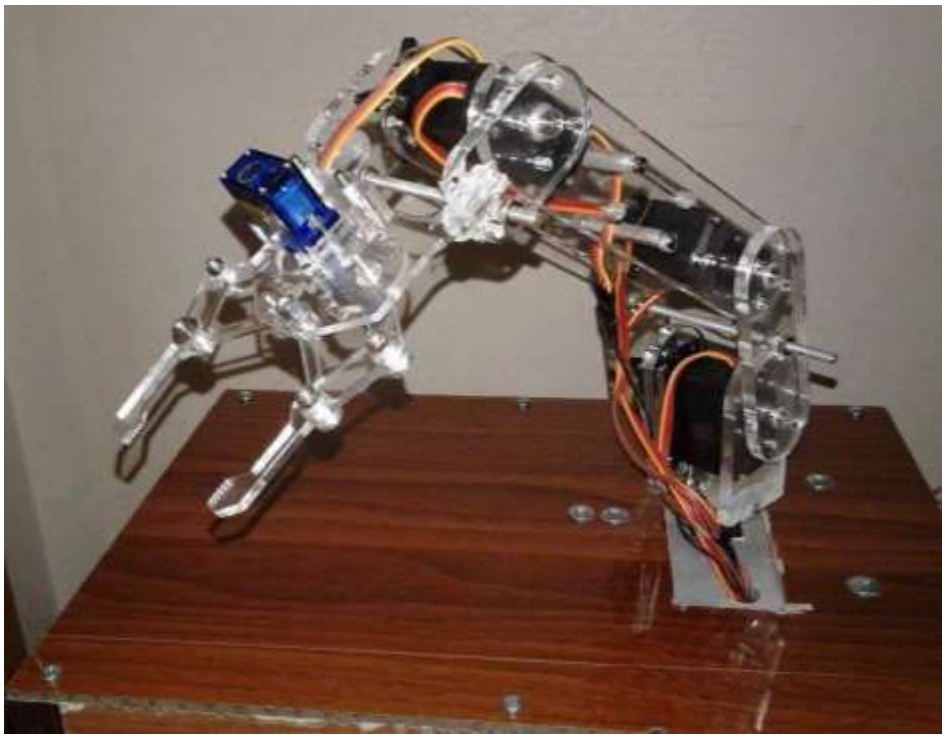
يبين الشكل (20) الشكل النهائي للنموذج التطبيقي للمناول الروبوتي الذي قمنا بتصميمه وفق الخطوات السابقة الذكر، وسنقوم بمناقشة نتائج اختبار هذا النموذجفيما يلي:

- الحلالتصميمي الميكانيكي مُناسبمنحيثالتكلفة والقدرة على تصنيع المُناول(انطلاقا من السوق المحلية):حيث تم تصنيع جميع قطع المُناول من مادة *البلكسيغلاس* (زجاج الإكراليك) لتوافرها في السوق المحلية ولسهولة تشكيلها، إضافة إلى أنها خفيفة الوزن مما يفيد في تقليل العزم المطلوب تقديمه من المحركات الكهربائية.
- يمتاز الحلالتصميمي للمناول بأن الوصلات (Links) المربوطة بالمحركات تحد من الخلوص الميكانيكي الذي قد ينتج عن المحرك.
- تم تصميم قبضة المُناول بحيث تُشكل نقاط التثبيت (للمسنن، وللجذع ولطرف القبضة) متوازي أضلاع، كما هو مبين في الشكل جانباً، مما يحقق التوازن في عمل القبضة (أثناء الفتح والإغلاق).



- امتلاك المُناول لأربع درجات حرّيةيُؤمن مرونة في عمله ضمن منطقة العمل، بالإضافة إلى أن درجة الحرّية الرابعة (المتعلقة بزاوية توجيه القبضة)تُعطي أكثر من طريقة لالتقاط الجسم وبالتالي هي ليست مُقيدة بزاوية واحدة.

- إمكانية معايرة المُناول بسهولة ممايُتيح له التكيّف مع الظروف والشروط المختلفة لمتطلبات العملية الانتاجية.
- تبين من خلال البحث أنالمحركات الكهربائية نوع سيرفو (DC servo motor) هي الحل الأفضل عند التصميم الكهربائي للمناولات وذلك من الناحية التحكُمية لما تتمتع به من مواصفات جيدة من حيث سهولة التحكُم بها عبر تقنية التعديل النبضي العرضاني (PWM)، بالإضافة إلى احتواء الآردوينو على مكتبة خاصة للتحكُم بهذه المحركات.
- تتيحالواجهة التطبيقيةالتخاطبيةالتي تم بنائها ضمن بيئة (Microsoft visual studio) التحكُم بالمُناول الروبوتي بأكثر من أسلوب، حيث تمت برمجة المُناول لتنفيذ مهامه بصورة مكررة ودقيقة وبعدة أوجه.يُمكّن النموذجالثلاثي الأبعاد (3D) الذي تم تصميمه للمُناول من محاكاة حركتهعلى أرض الواقع.



الشكل (20): الشكل النهائي الذراع الروبوتي المُنفذ.

الاستنتاجات والتوصيات:

إن درجة الحرّية الرابعة تعطي للذراع مرونة في الحركة ضمن فضاء العمل، مما يزيد من إمكانية التقاط الأشياء رغم وجود العقبات، وهذا ما يميز هذاالمُناول عن المُناولات ذات درجات الحرّية الثلاث، وهي أكثر انسجاماً مع الروبوتات الأخرى التي يُمكن أن تعمل ضمن نفس منطقة العمل.

المنصة الالكترونية الآردوينو هي بيئة مفتوحة المصدر (Open Source) تتيح سهولة التصميم بما تملكه من بيئة تطوير متكاملة حيث توفر مكتباتها الوقت على مصممي نظام التحكم. وهي تؤمن نبضات التحكم الدقيقة التي يحتاجها محرك السيرفو.

استطاعتالأذرعالروبوتية، في الآونة الأخيرة، فرضسيطرتهافي عملياتالأتمتة الصناعية، لذلك نوصي بالدعم المادي للأبحاث المتعلقة بهذا الموضوع ليتم تصنيعها محليا. لما لذلك من فوائد تقنية تتعلق بالجانب الفني للعملية الانتاجية إضافة إلى الجانب الاقتصادي المُتمثل في التوفير الحاصل في تكلفة الإنتاج آخذين بعين الاعتبار أن كلفة الاستثمار الأولي للروبوت يمكن أن تُغطى سريعاً وخاصة في العمليات كثيرة التعداد.

المراجع:

[1] RavikumarMourya; and all.*Design and Implementation of Pick and Place Robotic Arm*. IJRRCME, Vol. 2, Issue 1, 2015.

[2] Ashraf Elfasakhany; and all.*Design and Development of a Competitive Low-Cost Robot Arm with Four Degrees of Freedom*. Scientific Research, Modern Mechanical Engineering, 10.4236/mme,2011.

[3]AyokunleAwelewa; and all. *Development of a Prototype Robot Manipulator for Industrial Pick-and-Place Operations*. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS, Vol.13 No.05, 2013.

[4] Waguespack, C.*Mastering Autodesk Inventor 2014 and Autodesk Inventor LT 2014*. Wiley& Autodesk,Canada, 2013, 1034pages.

[5] Vaibhav, V.*Design analysis and place robot with mechanical gripper*.Impact Factor 1.5015(UIF), Vol. 2, Issue– 2, 2015.

[6] JADRAN, L.; ROTH, B.*Advances in Robot Kinematics Mechanisms and Motion*.Springer, Netherlands, 2006, 500 pages.

[7] Shweta Patil; Sanjay L.Position Control of Pick and Place Robotic Arm. EIE's 2nd Intl' Conf.Comp, 2012.

[8] Cubero,S. *Industrial Robotics Theory, Modelling and Control*. pro literaturVerlag, Germany, 2007, 964 pages.

[9] GoldyKatal;and all. *Design and operation of synchronized robotic arm*. IJRET, Vol. 02 Issue08, 2013.

[10]Naveen Kumar; and all.*Design and Analysis of Carrying Robot Using Arduino Board Control System*. Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR), Vol. 2, Issue. 3, 2016.

[11] Margolis,M.*Arduino CookBook*. O'Reilly Media, 2014, 800pages.

[12] Riazollah,Fi.*Servo Motors and Industrial Control Theory*.Second Edition,Springer, 2014, 235 pages.

[13] Mayo, J. *Microsoft Visual Studio 2010 A Beginner's Guide*. McGraw-Hill Companies, 2010, 449 pages.

[14]Massimo B. *Getting Started with Arduino*, Second Edition, O'Reilly, USA, 2011,130pages.

[15]Julien B. *C Programming for Arduino*, Packt Publishing, Birmingham – UK, 2013, 512 pages.