

Faculty of Engineering
Department of Control &
Robotics Eng.



كلية الهندسة
قسم التحكم والروبوت

منصة تعليمية تفاعلية لدراسة حركيات الأذرع الروبوتية

تقرير مشروع التخرج 1 المقدم إلى هندسة التحكم والروبوت كاستيفاء لإنجاز مقرر مشروع التخرج 1 في
هندسة التحكم والروبوت لطلاب المرحلة الجامعية الأولى

إعداد

صبا الحمصي

إشراف

د. شادي البيطار

Academic Year 2024-2025

إقرار المشرف

أشهد بأن هذا المشروع بعنوان

والمعد من قبل الطالبة صبا الحمصي

قد تم تحت إشرافي في قسم هندسة التحكم والروبوت وهو جزء من متطلبات إنجاز المشروع

تخرج 1

في هندسة التحكم والروبوت.

المرتبة العلمية

الاسم.....

التوقيع.....

التاريخ.....

ملخص المشروع:

يقدم هذا المشروع تصميم وتنفيذ ذراع روبوتية مستوية بأربع درجات حرية أعظمية مخصصة للتطبيقات التعليمية في مجال الأذرع الآلية.

يوفر المشروع منصة عملية منخفضة التكلفة وبسيطة التركيب تتيح لطلاب الجامعات دراسة وتحليل النموذج الهندسي المباشر والعكسى بطريقة عملية، مما يساعدهم على فهم العلاقات الرياضية والحركية التي تحكم حركة الأذرع الصناعية.

تم بناء الذراع بأربع وصلات متحركة تمثل أربع درجات حرية أعظمية، ما يسمح بتنفيذ نطاق واسع من الحركات مع الحفاظ على بساطة التصميم، يتم التحكم بالذراع من خلال واجهة برمجية بلغة بايثون تقوم بحساب زوايا كل وصلة وفقاً للنموذجين المباشر والعكسى، حيث تُرسل القيم المحسوبة إلى لوحة Arduino Uno التي تدير محركات Servo MG945 لتحقيق الحركات المطلوبة بدقة مناسبة.

يمتاز المشروع بكونه تعليمياً بسيطاً ومنخفض الكلفة، ويركز على الجانب الأكاديمي وتطبيق المفاهيم النظرية عملياً، دون الحاجة إلى أنظمة تغذية راجعة (Feedback) أو تقنيات معقدة، مما يسهل على الطلاب إجراء التجارب وفهم مبادئ التصميم والتحكم الحركي، مع إمكانية تطويره مستقبلاً بإضافة مستشعرات أو تحسينات في التحكم.

Abstract

This project presents the design and implementation of a planar robotic arm with four degrees of freedom (4-DOF) developed primarily for educational applications in the field of robotic manipulators. The system provides a practical, low-cost, and easy-to-assemble platform that enables university students to study and analyze both forward and inverse kinematics in a hands-on manner, helping them understand the mathematical and kinematic relationships that govern the motion of industrial robotic arms.

The arm is constructed with four movable links representing four degrees of freedom, allowing a wide range of planar motions while maintaining a simple and accessible design. Control of the arm is achieved through a Python-based interface specifically developed to calculate the required joint angles according to the forward and inverse kinematic models. The computed values are then transmitted to an Arduino Uno board, which drives MG945 servo motors to accurately execute the desired motions.

This project is educational, cost-effective, and straightforward, focusing on the academic application of theoretical concepts without relying on feedback systems or complex technologies. Its simplicity makes it ideal for student experiments and for learning the fundamentals of robotic design and motion control, while also offering future expansion potential through the addition of sensors or more advanced control techniques.

فهرس المحتويات

II.....	إقرار المشرف.....
III.....	ملخص المشروع:.....
IV.....	Abstract
VIII	جدول الأشكال:.....
X	جدول الاختصارات.....
1.....	الفصل الأول.....
2.....	مقدمة عامة:..... 1.1
2.....	أهمية الروبوتิก:..... 1.1
2.....	تطبيقات الأذرع الآلية:..... 1.3
5.....	الفصل الثاني.....
6.....	التعريف بالمشروع:..... 2.1
6.....	الهدف من المشروع:..... 2.2
7.....	الشروط الوظيفية:..... 2.3
7.....	خطوات العمل:..... 2.4
7.....	المخطط الصندوقي:..... 2.5
8.....	الملخص:..... 2.6
9.....	الفصل الثالث.....
9.....	النمذجة الهندسية الحركية.....
10.....	النموذج الهندسي المباشر: 3.1

10	: (Denavit-Hartenberg - DH) منهجية دينيفيت-هارتنبرغ	3.1.1
11	خطوات تطبيق منهجية DH	3.1.2
11	أهمية النموذج الهندسي المباشر:	3.1.3
12	التحديات والقيود:	3.1.4
12	النموذج الهندسي العكسي:	3.2
13	منهجيات النموذج الهندسي العكسي:	3.2.1
14	أهمية النموذج الهندسي العكسي:	3.2.2
14	التحديات والقيود:	3.2.3
15	الدراسة النظرية لذراع بدرجات حرية مختلفة:	3.3
15	ذراع مستوية بدرجتي حرية:	3.3.1
16	ذراع مستوية بثلاث درجات حرية:	3.3.2
17	ذراع مستوية بأربع درجات حرية حركية:	3.3.3
20	الفصل الرابع	
20	التصميم الميكانيكي	
21	التصميم الهندسي:	4.1
21	مكونات المنصة:	4.2
25	الفصل الخامس	
25	الجزء العتادي والبرمجي	
26	القسم العتادي :	5.1
26	المحركات المستخدمة:	5.1.1
27	Arduino UNO لوحة	5.2

28	القسم البرمجي:	5.3
28	:Arduino IDE بيئة	5.3.1
29	الواجهة البرمجية التفاعلية:	5.3.2
30	:solidworks برنامج	5.3.3
30	:VS Code برنامج	5.3.4
32		الفصل السادس ..
33	نص التجربة الأولى (درجتي حرية):	6.1
34	نص التجربة الثانية (ثلاث درجات حرية):	6.2
35	نص التجربة الثالثة (ثلاث درجات حرية مع فائضية):	6.3
36		الآفاق المستقبلية:
37		المراجع:

جدول الأشكال:

الشكل-1- المخطط الصندوقي للنظام	7
الشكل-2- تحديد الغريمات للذراع بدرجتي حرية	15
الشكل-3- تحديد الغريمات للذراع بثلاث درجات	16
الشكل-4- تحديد الغريمات للذراع بأربع درجات	17
الشكل-5- المنصة المدرosaة	22
الشكل-6- القطعة الأولى المصممة بواسطة solidworks	22
الشكل-7- القطعة الثانية المصممة بواسطة solidworks	23
الشكل-8- طريقة تثبيت القطعة بالمحركات	23
الشكل-9- تثبيت الذراع الثاني	24
الشكل-10- محرك السيرفو	26
الشكل-11- جدول المقارنة بين المحركات	27
الشكل-12- دارة ARDUINO UNO	28
الشكل-13- برنامج ARDUINO-IDE	28
الشكل-14- الواجهة البرمجية	29
الشكل-15- برنامج SOLIDWORKS	30
الشكل-16- برنامج VS-CODE	31
الشكل-17- تجربة ومحاكاة الذراع بدرجتي حرية- نموذج مباشر	33
الشكل-18- تجربة ومحاكاة الذراع بدرجتي حرية- نموذج عكسي	33
الشكل-19- تجربة ومحاكاة الذراع بثلاث درجات حرية- نموذج مباشر	34

- الشكل-20- تجربة ومحاكاة الذراع بثلاث درجات حرية- نموذج عكسي 34
- الشكل-21- تجربة ومحاكاة الذراع بأربع درجات حرية- نموذج مباشر 35
- الشكل-22- تجربة ومحاكاة الذراع بأربع درجات حرية- نموذج عكسي 35

جدول الاختصارات

DOF	Degree of freedom
FK	Forward Kinematic
IK	Inverse Kinematic
DH Table	Denavit-Hartenberg Table
IDE	Integrated Development Environment
VS-CODE	Visual Studio Code
PWM	Pulse Width Modulation
PCB	Printed Circuit Board
CAD	Computer Aided Design

الفصل الأول

مقدمة عامة

1.1 مقدمة عامة:

تُعد الأذرع الروبوتية مكونات أساسية في العديد من التطبيقات الصناعية والخدمية، وتتطلب حركتها الدقيقة والتحكم بها فهماً عميقاً لعلاقتها الهندسية.

1.1 أهمية الروبوتات:

هو مجال متعدد التخصصات يجمع بين الهندسة (الميكانيكية، الكهربائية، الإلكترونية) وعلوم الحاسوب والذكاء الاصطناعي والعلوم المعرفية تبرز أهمية هذا العلم في حل المشكلات المعقدة حيث يوفر الأدوات والمنهجيات اللازمة لمواجهة تحديات عالمية معقدة سواء كانت هذه التحديات تتعلق بتحسين الإنتاجية في الصناعة أو إجراء عمليات جراحية دقيقة أو استكشاف الفضاء أو التعامل مع الكوارث الطبيعية لتقديم حلول مبتكرة وفعالة، وتحسين جودة الحياة من خلال أتمتة المهام الشاقة والخطيرة، وتحسين ظروف العمل وزيادة السلامة للبشر. كما أنه يفتح آفاق جديدة في مجالات مثل الرعاية الصحية لتعزيز الصحة ورفاهية الأفراد، وتوفير فرص عمل في مجالات متخصصة مثل تصميم الروبوتات وبالتالي يعد محركاً رئيسياً للتقدم التكنولوجي وحلّاً لمشكلات معقدة، ومُحسِّناً لجودة الحياة، ومُعزِزاً للنمو الاقتصادي والبحث العلمي.

1.3 تطبيقات الأذرع الآلية:

تعد الأذرع الآلية النوع الأكثر شيوعاً من الروبوتات الصناعية والخدمية، تُصمم هذه الأذرع لتحاكي حركة الذراع البشرية وت تكون عادةً من سلسلة من الوصلات والمفاصل التي تتيح لها نطاقاً واسعاً من الحركة تلعب دوراً محورياً في تحسين الكفاءة والإنتاجية والجودة والسلامة ولها تطبيقات كثيرة في مختلف المجالات ومنها:

- في الطب: تحدث الروبوتات الطبية ثورة في الرعاية الصحية حيث تساهم في تحسين النتائج للمرضى وتقليل الأخطاء البشرية ومن تطبيقاتها الجراحة الروبوتية ك روبوت دافنشي الجراحي الذي يسمح للجراحين بإجراء عمليات جراحية معقدة بأقل تدخل جراحي مما يقلل من النزيف ووقت التعافي للمريض

ويوفر هذا النظام رؤية ثلاثية الأبعاد مكثفة وأدوات صغيرة جداً ذات مرونة عالية تتجاوز قدرة اليد البشرية، وأيضاً في مجال جراحة العظام حيث يعد روبوت "ماكو" وهو روبوت يساعد في جراحات استبدال الركبة والورك بدقة متناهية لتحقيق معاذة أفضل للمفاصل الاصطناعية، إضافة إلى مجال الأطراف الاصطناعية حيث تم تطوير أطراف صناعية ذكية تتحرك وتسشعر بطرق تحاكي الأطراف الطبيعية لمساعدة وتحسين حياة ذوي الاحتياجات الخاصة، بالإضافة إلى روبوتات إعادة التأهيل والصيدليات الروبوتية وروبوتات التعقيم والتنظيف الطبية.

• في الصناعة: تُعد الصناعة من المجالات الرائدة في تبني الروبوتات حيث أدت الأذرع الآلية إلى تحولات جذرية في مجال صناعة السيارات حيث تستخدم الأذرع الآلية في لحام هيكل السيارات والطلاء إضافة إلى تجميع المحركات وتركيب المكونات الداخلية والخارجية بدقة وسرعة هائلة، وفي الصناعات الإلكترونية حيث تستخدم الأذرع الآلية في تجميع المكونات الدقيقة للوحات الدوائر المطبوعة (PCBs) ولحام المكونات الصغيرة وختبار المنتجات الإلكترونية، إضافة إلى فرز المنتجات الغذائية وعمليات التعبئة والتغليف وأنمتة خطوط الإنتاج وفي الصناعات التحويلية الثقيلة كصناعة الصلب والمعادن حيث تقوم الروبوتات بمناولة المواد الساخنة والخطرة والقطع والتشكيل.

• في الزراعة: تُسهم الروبوتات الزراعية في مواجهة تحديات الأمن الغذائي ونقص الأيدي العاملة، وقد برزت استخدامات الأذرع الآلية فيها في الحصاد الآلي حيث صممت أذرع روبوتية مزودة بأنظمة رؤية حاسوبية يمكنها التعرف على الفاكهة والخضروات الناضجة وقطفها بدقة دون إتلاف المحصول، وفي الزراعة الدقيقة ورش المبيدات والأسمدة حيث تستخدم أذرع روبوتية محمولة على مركبات لرش المبيدات والأسمدة بشكل مستهدف على النباتات الفردية، مما يقلل من استخدام المواد الكيميائية ويقلل من

التلوث البيئي، وفي مراقبة صحة المحاصيل من خلال أذرع مزودة بحساسات وكاميرات لمراقبة نمو النباتات واكتشاف الأمراض أو الآفات مبكراً.

- في الهندسة والبناء: تُعزز الروبوتات الكفاءة والدقة والسلامة في المشاريع الهندسية وموقع البناء من خلال تقنيات البناء الآلي حيث تقوم أذرع روبوتية ضخمة مزودة بمرشات بناء الجدران أو هيكل المبني باستخدام مواد الخرسانة وهو ما يسرع من عملية البناء ويقلل التكاليف، وفي لحام وقطع المعادن في الموقع وفي التقسيم حيث تقوم أذرع روبوتية مزودة بكاميرات وحساسات بتقسيم الهياكل المعقده مثل الجسور وخطوط الأنابيب للكشف عن الشقوق أو التلف، كما تستخدم الأذرع الروبوتية في رسم المخططات المعقده أو تشكيل نماذج ثلاثة الأبعاد بدقة.

إضافة إلى ذلك لها أهمية كبيرة في مجالات أخرى كالتعليم والبحث حيث تُستخدم الأذرع الروبوتية كأدوات تعليمية لتدريس مفاهيم الروبوتات والبرمجة والميكانيكا والتحكم الآلي في الجامعات والمدارس وتطوير خوارزميات جديدة للذكاء الاصطناعي والرؤية الحاسوبية، وفي الفضاء تستخدم الأذرع الروبوتية على المحطات الفضائية لإجراء الصيانة ومساعدة رواد الفضاء في مهام خارج المركبة ولأخذ عينات من التربة والصخور.

أثبتت الأذرع الآلية أهميتها القصوى في تحقيق قفزات نوعية في مختلف القطاعات الاقتصادية والخدمية من خطوط الإنتاج الصناعية عالية الكفاءة إلى غرف العمليات الجراحية الدقيقة، ومن الحقول الزراعية الذكية إلى الواقع الهندسي المعقده، حيث ساهمت في رفع مستوى الإنتاجية وتحسين الجودة وتعزيز السلامة وفتح آفاق جديدة للابتكار.

الفصل الثاني

تعريف بالمشروع

2.1 التعريف بالمشروع:

في هذا المشروع سنقوم بتطوير وتصميم منصة تعليمية تفاعلية لمقررات الأذرع الآلية، تركز بشكل خاص على التطبيق في الجانب العملي، ستم دراسة حالة النموذج الهندسي المباشر (Direct Kinematics) والنموذج الهندسي العكسي (Inverse Kinematics) في حركة الذراع الآلية.

تُقدم المنصة بيئة تعليمية بسيطة ومحاكاة بصرية تُمكّن الطالب من استكشاف المفاهيم النظرية لهذه النماذج، ومن ثم تطبيقها عملياً من خلال إدخال قيم مختلفة لمتغيرات المفاصل أو إحداثيات نهاية الذراع، حيث ستتوفر المنصة واجهة برمجية تُمكّن الطالب من إدخال وإجراء الحسابات الرياضية المتعلقة بالنماذجين ومن ثم التحقق من صحة النتائج المحسوبة يدوياً وبرمجياً بمقارنتها مع المخرجات التي ستطبق على المحركات المثبتة على المنصة.

2.2 الهدف من المشروع:

نهدف من خلال هذا المشروع إلى تحقيق الأهداف الرئيسية التالية:

- 1) تبسيط المفاهيم المعقدة: تزيل صعوبة فهم النموذج الهندسي المباشر والعكسي، والتي تشكل تحدياً للطلاب بسبب طبيعتها الرياضية والهندسية المجردة، وذلك من خلال تطبيق عملي تفاعلي مبسط.
- 2) تعزيز الفهم النظري: من خلال تمكين الطالب من ربط المعادلات والنظريات الهندسية بحركة الروبوت الفعلية، ليزيد من فهمه لكيفية تأثير تغيير قيم المفاصل على موضع وتوجيه نهاية الذراع.
- 3) توفير أداة للتدريب والممارسة: إتاحة الفرصة للطالب لممارسة حل مشكلات النموذج الهندسي (المباشر والعكسي) لعدد من تكوينات الروبوتات الافتراضية وبدرجات حرية مختلفة والحصول على تغذية راجعة فورية حول دقة حساباتهم.
- 4) تحفيز التعلم النشط: تشجيع الطالب على التجربة والاستكشاف بدلاً من الاقتصار على تلقى المعلومات النظرية، وإسقاط المفاهيم النظرية المجردة على التطبيق العملي.
- 5) دعم المناهج التعليمية: تقديم مورد تعليمي إضافي يُكمّل المحاضرات النظرية والمخترفات التقليدية لمقرر الأذرع الآلية، ويساهم في رفع جودة التعليم في هذا المجال.
- 6) توفير بيئة اختبار: بناء ذراع روبوتية يمكن الطالب من محاكاة حركة ذراع آلية بسيطة، مما يُساعدهم على تصور النتائج والتأكد من صحة حلولهم قبل الانتقال إلى أنظمة روبوتية فعلية أكثر تعقيداً.

2.3 الشروط الوظيفية:

- (1) أبعاد المنصة $75\text{ cm} \times 75\text{ cm}$
- (2) عدد الروابط الأعظمي أربع روابط.
- (3) التحكم بالمنصة يتم عن طريق الحاسب بواسطة واجهة برمجية.
- (4) المحركات المستخدمة هي محركات سيرفو $.mg\ 945, 180\text{ degree}$

2.4 خطوات العمل:

1. تحديد متطلبات المشروع
2. الدراسة النظرية للنموذج الهندسي المباشر والعكسى.
3. التصميم الميكانيكي
4. تجيز الجزء البرمجي والواجهات.
5. توثيق النتائج

2.5 المخطط الصنودقي:



الشكل-1- المخطط الصنودقي للنظام

2.6 الملخص:

يهدف هذا المشروع إلى تطوير منصة تعليمية تفاعلية تمكّن الطلاب من دراسة وفهم حركيات الأذرع الروبوتية (النموذج الهندسي المباشرة والعكسية) بطريقة عملية. تعتمد المنصة على ذراع روبوتية بسيطة مكونة من عدد متغير من المفاصل الخاضعة للتحكم، بحد أقصى أربع درجات حرية، وتتحرك ضمن مستوى واحد باستخدام محركات سيرفو.

يتضمن واجهة برمجية مطورة بلغة بايثون لإدخال قيم جدول (Denavit–Hartenberg DH)، حيث يتم حساب الوضع النهائي للذراع وتحويلها إلى أوامر تُرسل إلى متحكم أردوينو للتحكم في حركة المحركات.

تسهم المنصة في تعزيز الفهم العملي للمفاهيم النظرية وتعد أداة تعليمية فعالة ضمن مقررات التحكم والروبوتات.

الفصل الثالث

النمذجة الهندسية الحركية

3.1 النموذج الهندسي المباشر:

هو أحد طرق دراسة الأذرع الآلية حيث يصف كيفية تحديد موقع وتوجيه نهاية الذراع الروبوتية بناءً على قيم زوايا مفاصلها أو إزاحتات مفاصلها الخطية، يُعد النموذج الهندسي المباشر ركيزة أساسية في فهم وتحليل سلوك الأذرع الروبوتية من خلال توفير طريقة منهجية لتحديد موقع واتجاه نهاية الذراع بناءً على تكوين مفاصلها، ويُعد هذا النموذج ضرورياً لمهام تخطيط المسار والمحاكاة والتحكم في موضع الروبوت، وهو يمثل العلاقة الرياضية التي تربط بين متغيرات المفاصل (joint variables) للروبوت وموضع وتوجيه نهاية الذراع الروبوتية في الفضاء ثلاثي الأبعاد.

تُعبر نتيجة النموذج الهندسي المباشر عادةً عن طريق مصفوفة تحويل متجانسة (homogeneous transformation matrix) تمثل موضع واتجاه إطار نهاية الذراع بالنسبة لإطار القاعدة للروبوت. توجد عدة منهجيات لبناء النموذج الهندسي المباشر، وأكثرها شيوعاً هي منهجية دينيفيت-هارتبرغ (Denavit-Hartenberg - DH).

3.1.1 منهجية دينيفيت-هارتبرغ (Denavit-Hartenberg - DH):

هي طريقة قياسية لوصف البنية الهندسية للأذرع الروبوتية وتحويلها إلى معادلات رياضية لتوحيد طريقة تمويع الإحداثيات لكل مفصل بحيث يصبح بناء مصفوفات التحويل واضح، تُعد هذه المنهجية هي الطريقة الأكثر استخداماً لنموذج الحركة المباشرة للأذرع الروبوتية المتسلسلة، حيث تعتمد هذه المنهجية على تعريف أربع متغيرات (أو معلمات) لكل وصلة في الروبوت لوصف العلاقة الهندسية بين إطارات متجاورين للمفاصل، تُعرف هذه المتغيرات بمعاملات DH وهي:

- θ_i : هي زاوية الدوران حول المحور z_{i-1} وهو مقدار الدوران المطلوب لمحاذة x_i مع x_{i-1} .
- d_i : هي الإزاحة على طول z_{i-1} وهي المسافة على محور z_{i-1} من الإطار $i-1$ إلى نقطة التقاطع مع المحور x_i .
- a_{i-1} : يمثل طول الوصلة، وهو المسافة على محور x_i من z_{i-1} إلى z_i .
- α_{i-1} : زاوية الدوران حول المحور x_i لمحاذة z_{i-1} مع z_i .

تُستخدم هذه المعلمات لتحديد مصفوفة تحويل متاجنة لكل وصلة، والتي تحول الإحداثيات من الإطار i إلى الإطار $1 - i$ ، ولكن قبل حساب معلمات DH يجب إسناد نظام إحداثي لكل وصلة من خلال تحديد محاور كل مفصل بما فيها المفصل الأول والمفصل n .

للحصول على مصفوفة التحويل الكلية T_N^0 من إطار القاعدة إلى إطار نهاية الذراع يتم ضرب المصفوفات الفردية لجميع الوصلات بشكل متسلسلي، حيث N هو عدد الوصلات في الروبوت، وتحتوي هذه المصفوفة على معلومات الموضع في العمود الأخير ومعلومات الدوران في الجزء العلوي الأيسر (مصفوفة دوران 3×3).

$${}^{i-1}_iT = \begin{matrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

$${}_n^0T = {}_1^0T \cdot {}_2^1T \cdot {}_3^2T \cdot \dots \cdot {}_{n-1}^nT$$

3.1.2 خطوات تطبيق منهجية DH:

- (1) تعريف إطارات المفاصل: لكل مفصل، يتم تحديد إطار إحداثيات خاص به.
- (2) تحديد محاور Z: يجب أن يكون محور Z لكل مفصل متطابقاً مع محور دوران المفصل (المفاصل الدورانية) أو محور حركة المفصل (المفاصل المنزلقة).
- (3) تحديد محاور X: يتم اختيار محور X عمودياً على محور Z السابق ويتقاطع معه.
- (4) حساب معلمات DH: تُحسب قيم $\theta_i, d_i, \alpha_{i-1}, a_{i-1}$ لكل وصلة بناءً على هندسة الروبوت.
- (5) بناء مصفوفات التحويل: تُستخدم معلمات DH لبناء مصفوفات التحويل المتاجنة لكل وصلة.
- (6) حساب مصفوفة التحويل الكلية: يتم ضرب المصفوفات بعضها البعض للحصول على مصفوفة التحويل النهائية لنهاية الذراع.

3.1.3 أهمية النموذج الهندسي المباشر:

- (1) تخطيط المسار (Path Planning): يسمح بتحديد مسار حركة نهاية الذراع في الفضاء بناءً على تسلسل من قيم مفاصل محددة.
- (2) المحاكاة (Simulation): يُستخدم في محاكاة حركة الروبوت بصرياً لتقييم الأداء وتحديد الاصطدامات المحتملة قبل التنفيذ الفعلي.

(3) التحكم في موضع الروبوت (Robot Position Control): على الرغم من أن التحكم المباشر يعتمد غالباً على النموذج الهندسي العكسي، إلا أن النموذج المباشر ضروري للتحقق من الموضع الفعلي بعد تنفيذ حركة معينة.

(4) معايرة الروبوت (Robot Calibration): يستخدم في عمليات معايرة الروبوت لتحسين دقة النموذج وتقليل الأخطاء الموضعية.

(5) تحليل مساحة العمل (Workspace Analysis): يساعد في تحديد الحجم والشكل الكلي لمساحة العمل التي يمكن للروبوت الوصول إليها.

3.1.4 التحديات والقيود:

(1) التعقيد الحسابي: بالنسبة للروبوتات ذات الدرجات الكبيرة من الحرية (DOF)، يمكن أن تصبح عملية ضرب المصفوفات معقدة حسابياً، ولكنها لا تزال قابلة للتنفيذ.

(2) الحساسية للأخطاء الهندسية: دقة النموذج تعتمد بشكل كبير على دقة القياسات الهندسية للروبوت (أطوال الوصلات، زوايا الانحراف).

(3) لا يحل النموذج الهندسي المباشر مشكلة إيجاد قيم المفاصل المطلوبة للوصول إلى موضع وتوجيه معين لنهاية الذراع. هذه المشكلة تُعرف بالنموذج الهندسي العكسي وهي أكثر تعقيداً وتنطلب غالباً حلولاً تكرارية أو متعددة.

3.2 النموذج الهندسي العكسي:

النموذج الهندسي العكسي (IK) يعالج المشكلة الأكثر تعقيداً وأهمية في التحكم بالروبوت وهي تحديد قيم زوايا المفاصل المطلوبة لتحقيق موضع وتوجيه محدد لنهاية الذراع في الفضاء، تهدف مسألة إيجاد النموذج العكسي إلى إيجاد العلاقات التي تعطي حالة الدخل (زوايا المحركات) بدلاً عن حالة الخرج (موقع الجسم الطرفي واتجاهه)، وبالتالي هو العملية الرياضية التي تُحدد قيم متغيرات المفاصل التي يجب أن تتخذها الأذرع الروبوتية لكي تصل نهاية الذراع إلى موضع واتجاه معينين في الفضاء ثلاثي الأبعاد بالنسبة لإطار القاعدة، وهي أكثر أهمية من النموذج المباشر لأنها تُستخدم لخطيط الحركة.

حل مسألة النموذج العكسي ليس دائماً بسيطاً، فقد تكون معادلاتها غير خطية وبالتالي الحل قد يكون صعب أو غير موجود، وقد توجد حلول متعددة أو عدم وجود حل يحدد مساحة العمل للروبوت.

3.2.1 منهجيات النموذج الهندسي العكسي:

3.2.1.1 الحلول التحليلية:

تتضمن هذه الطريقة استخدام العلاقات الهندسية أو الجبرية الصريحة لحل المعادلات التي تربط بين موضع وتوجيه نهاية الذراع ومتغيرات المفاصل، وتعد هذه الطريقة:

- دقة: توفر حلولاً دقيقة رياضياً (باستثناء أخطاء التقدير الرقمي).

- سرعة: تعد سريعة جداً بمجرد اشتقاق المعادلات.

- تحديد جميع الحلول الممكنة: في حال وجود حلول متعددة، يمكنها تحديدها جميعاً.

إلا أن هذه الطريقة لها عيوب عديدة تتبلور في كونها ممكنة فقط لأنواع معينة من الروبوتات مثل الروبوتات ذات الهياكل البسيطة وبعدد درجات حرية يصل إلى 6 أو 7، وقد تكون المعادلات التحليلية صعبة الاشتقاق وتحتاج إلى خبرة كبيرة في الهندسة والرياضيات.

3.2.1.2 الحلول العددية:

تُستخدم هذه الطرق عندما يكون من الصعب أو المستحيل إيجاد حل تحليلي كما في الروبوتات ذات درجات الحرية العالية أو الهياكل المعقدة، تعتمد على بدء محاولة حل من تكوين مفصل أولي ثم التكرار تدريجياً لقليل الخطأ بين موضع نهاية الذراع الحالي والموضع المستهدف، وتعد هذه الطريقة:

- قابلة للتطبيق على أنواع مختلفة من الروبوتات بغض النظر عن تعقيدها.

- تعد سهلة البرمجة نسبياً بالمقارنة مع اشتقاق الحلول التحليلية.

إلا أن هذه الطريقة لها عيوب عديدة تتبلور في كونها أبطأ فهي تتطلب عمليات حسابية متكررة قد تكون بطيئة، كما أنها قد لا تصل إلى حل في جميع الحالات، خاصة إذا كانت النقطة المستهدفة قريبة من النقاط الشاذة أو خارج مساحة العمل، وقد تقع في الحد الأدنى المحلي حيث تقارب إلى حل قريب من الحل الأمثل ولكنه ليس الأفضل، وتتأثر بنقطة البداية فتعطي حلولاً مختلفة بناءً على التكوين الأولي للمفاصل.

3.2.1.3 النقاط الشاذة:

تعد النقاط الشاذة تحدياً رئيسياً في النموذج الهندسي العكسي، خاصة عند استخدام الحلول العددية التي تعتمد على معكوس مصفوفة الجاكوبيان حيث تصبح المصفوفة عند هذه النقاط غير قابلة للعكس، مما يعني أن الروبوت يفقد القدرة على التحرك في اتجاه معين، كما عندما يكون معصم الروبوت ممتدًا بالكامل حيث يصبح من المستحيل تغيير اتجاه نهاية الذراع حول محور معين دون تحريك الكتف، ومنه يجب أن تأخذ خوارزميات تخطيط المسار في الاعتبار هذه النقاط لتجنبها أو التعامل معها.

3.2.2 أهمية النموذج الهندسي العكسي:

يعتبر النموذج الهندسي العكسي ذو أهمية بالغة في تطبيقات الروبوتات لعدة أسباب:

(1) **تخطيط المسار والتحكم:** في معظم التطبيقات العملية لا تُعطى الروبوتات أوامر مباشرة لزوايا المفاصل

بل تُعطى أوامر لموضع وتوجيه معين يجب أن تصل إليه نهاية الذراع تترجم هذه الأوامر إلى حركة

بواسطة النموذج الهندسي العكسي.

(2) يسمح للمبرمجين بتحديد نقاط الهدف في مساحة العمل دون الحاجة إلى معرفة تكوين المفصل

المقابل، مما يُسهل عملية برمجة الروبوت بشكل كبير.

(3) **تجنب العوائق:** عند تخطيط مسار للروبوت يستخدم النموذج العكسي لتحديد تكوينات المفصل التي

تسمح لنهاية الذراع بالوصول إلى الهدف مع تجنب الاصطدام بالعوائق.

(4) **التفاعل مع البيئة:** يسمح للروبوتات بالتفاعل بفعالية مع الأشياء في بيئتها من خلال تحديد تكوينات

المفصل اللازمة للإمساك بشيء ما أو إدخال قطعة أو تنفيذ مهمة معينة.

(5) **التحكم في القوة:** في التطبيقات التي تتطلب تفاعلاً محسوساً مع البيئة يستخدم النموذج العكسي

للحفاظ على قوة أو ممانعة محددة من خلال حساب التغيرات اللازمة في المفاصل.

3.2.3 التحديات والقيود:

تُعد مشكلة النموذج الهندسي العكسي أكثر تعقيداً من النموذج الهندسي المباشر للأسباب التالية:

(1) **الحلول المتعددة:** بالنسبة لموضع وتوجيه معين لنهاية الذراع قد يكون هناك حل واحد أو عدة حلول أو

عدد لا نهائي من الحلول أو لا يوجد أي حل على الإطلاق حيث يعتمد عدد الحلول على درجة حرية

الروبوت (DOF).

(2) عدم وجود حلول: قد يكون الموضع المطلوب خارج مساحة عمل الروبوت وفي هذه الحالة لا يوجد حل ممكن.

(3) النقاط الشاذة: يفقد عندها الروبوت درجة أو أكثر من درجات الحرية، مما يؤدي إلى صعوبة أو استحالة التحكم في اتجاه معين لنهاية الذراع، وتصبح مصفوفة الجاكوبيان غير قابلة للعكس مما يعيق الحلول التحليلية والتكرارية.

(4) التعقيد الحسابي: خاصة بالنسبة للروبوتات ذات درجات الحرية العالية.

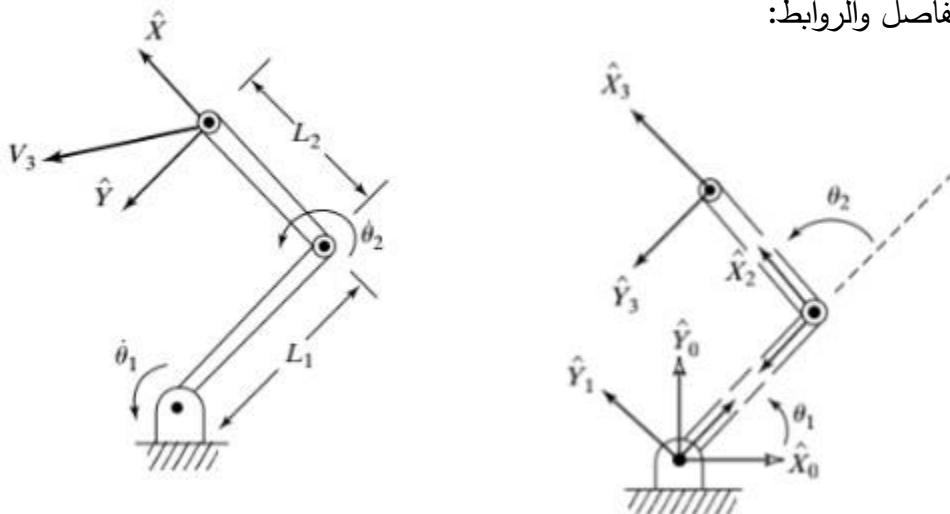
3.3 الدراسة النظرية لذراع بدرجات حرية مختلفة:

تتضمن الدراسة النظرية شرح النماذج الرياضية والهندسية لذراع المستوية حسب عدد مفاصلها، فهي تتحرك في مستوى ثنائي الأبعاد (XY) ودرجات الحرية تشير إلى عدد المفاصل الدوارة، وتشمل رسم الذراع، جداول DH Parameters، معادلات الكينماتيكس المباشرة والعكسية.

3.3.1 ذراع مستوية بدرجتي حرية:

تتألف الذراع من مفصلان دورانيان متاليان تتحرك جميعها ضمن مستوى واحد، لدراسة الذراع يجب أن:

1. تحديد المفاصل والروابط:



الشكل-2- تحديد الفريمات لذراع بدرجتي حرية

2. تحديد جدول DH بعد تحديد إطار الإحداثيات لكل مفصل:

I	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	0	0	θ_2

3. إيجاد مصفوفة التحويل لكل مفصل:

$${}_1^0T = \begin{vmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad {}_2^1T = \begin{vmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

4. حساب مصفوفة التحويل الكلية:

$${}_2^0T = {}_1^0T \cdot {}_2^1T$$

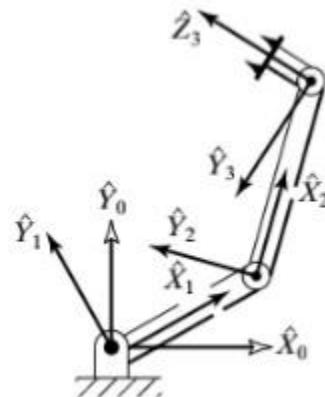
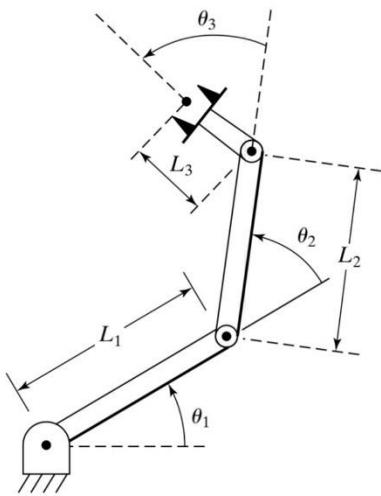
$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

3.3.2 ذراع مستوية بثلاث درجات حرية:

تتألف الذراع من ثلاثة مفاصل دورانية متتالية تتحرك جميعها ضمن مستوى واحد، لدراسة الذراع يجب أن:

1. تحديد المفاصل والروابط:



الشكل-3- تحديد الفريمات للذراع بثلاث درجات

2. تحديد جدول DH بعد تحديد إطار الإحداثيات لكل مفصل:

I	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	0	0	θ_2
3	l_3	0	0	θ_3

3. إيجاد مصفوفة التحويل لكل مفصل:

$${}^0T = \begin{vmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad {}^1T = \begin{vmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$${}^2T = \begin{vmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

4. حساب مصفوفة التحويل الكلية:

$${}^0T = {}^0T \cdot {}^1T \cdot {}^2T$$

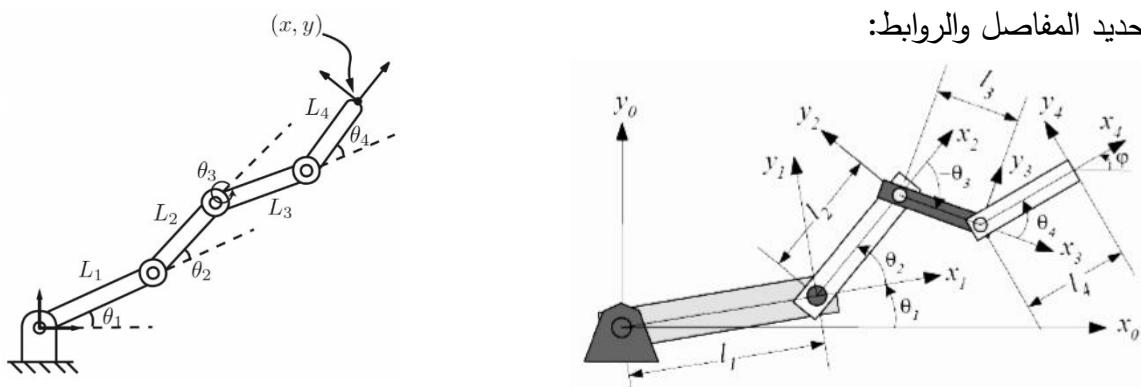
$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

3.3.3 ذراع مستوية بأربع درجات حرية حركية:

تتألف الذراع من أربع مفاصل دورانية متتالية تتحرك جميعها ضمن مستوى واحد، لدراسة الذراع يجب أن:

1. تحديد المفاصل والروابط:



الشكل-4- تحديد الفريمات للذراع بأربع درجات

2. تحديد جدول DH بعد تحديد إطار الإحداثيات لكل مفصل:

I	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	0	0	θ_2
3	l_3	0	0	θ_3
4	l_4	0	0	θ_4

3. إيجاد مصفوفة التحويل لكل مفصل:

$$\begin{array}{c|c} \begin{matrix} {}^0T = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \begin{matrix} {}^1T = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \hline {}^2T = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \begin{matrix} {}^3T = \begin{pmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & l_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \end{array} \end{matrix}$$

4. حساب مصفوفة التحويل الكلية:

$${}^0T = {}^0T \cdot {}^1T \cdot {}^2T \cdot {}^3T$$

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

بما أن عدد المفاصل لهذا الذراع أكبر من عدد إحداثيات نهاية الذراع، فإن النظام يُعد فائضاً

.(Redundant)

تؤدي هذه الفائضية إلى وجود حلول متعددة لمعادلات النموذج العكسي، الأمر الذي يتيح اختيار الحل الأنسب وفق معايير إضافية مثل تجنب الاصطدام أو تحسين استهلاك الطاقة، وبالتالي يمكن اعتماد عدة طرق رئيسية لحل النموذج العكسي، من أبرزها:

- (1) الحل التحليلي: تقوم هذه الطريقة على اشتقاق معادلات تربط موضع نهاية الذراع بمتغيرات المفاصل، ثم حلها جبرياً للحصول على القيم المطلوبة مباشرة، تمتاز هذه الطريقة بالدقة الفورية وإمكانية الحصول على جميع الحلول، لكن تصبح معقدة أو غير ممكنة كلما ازداد عدد درجات الحرية.
- (2) الطرق العددية: تعتمد على البحث التكراري للوصول إلى مجموعة زوايا تحقق الموضع المطلوب دون الحاجة لاشتقاق معادلات مغلقة، إذ تبدأ الخوارزمية بتخمين ابتدائي لقيم المفاصل ثم تحسب الخطأ بين الموضع الناتج والموضع المطلوب وتقلله تدريجياً باستخدام خوارزميات مثل نيوتن-رافسون أو التدرج النزولي، تسمح هذه الطريقة بدمج قيود إضافية لكنها قد تحتاج إلى حسابات متكررة وحذر في اختيار القيم الابتدائية.
- (3) طريقة الجاكوبيان: تستند إلى العلاقة بين سرعات المفاصل وسرعة نقطة النهاية عبر مصفوفة الجاكوبيان حيث يحسب شبه معكوس الجاكوبيان لتوليد تغييرات صغيرة في زوايا المفاصل تقلل الفرق بين الموضع الحالي والمطلوب، ويكرر ذلك حتى الوصول للحل.
- تتيح هذه الطريقة التعامل مع الفائضية عبر استغلال فضاء عدم (Null Space) لتحقيق أهداف ثانوية مثل تحسين توزيع زوايا المفاصل أو الابتعاد عن النقاط الشاذة لكنها قد تواجه صعوبات قرب هذه النقاط.
- (4) الطرق الهجينة (Hybrid Approaches): تدمج بين الحل التحليلي والعددي، كأن يستخدم الحل التحليلي لتقليل عدد المتغيرات قبل تطبيق طريقة عددية أو جاكوبيان لإكمال الحل، يوفر هذا الدمج توازناً بين سرعة الحل ودقة النتائج، ويخفف من تعقيد الحسابات.
- في هذا المشروع تم تطبيق النموذج العكسي برمجياً باستخدام طرق الجاكوبيان، مع الاستفادة من فائض درجات الحرية لتحديد الحلول الأكثر ملاءمة والتحكم بسلوك المفاصل ضمن الحدود الميكانيكية المتاحة.

الفصل الرابع

التصميم الميكانيكي

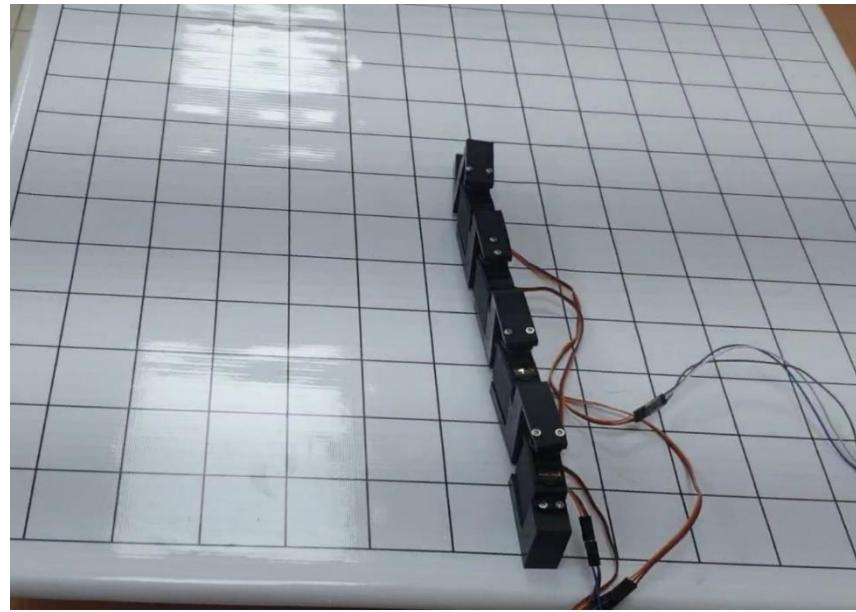
4.1 التصميم الهندسي:

يعتمد التصميم الهندسي على مجموعة من القطع البلاستيكية التي تمت صناعتها بواسطة طابعة ثلاثة الأبعاد بعد تصميمها ببرنامج solidworks بالإضافة لمنصة خشبية تثبت عليها الذراع مزودة بشبكة إحداثيات لتسهيل معاينة موقع الذراع، تتمثل الأجزاء المصممة بذراع ترتبط بمحور المحرك وبالمحرك التالي لتحريكه وقطع لتثبت الذراع والمحرك على المنصة.

الهدف من التصميم تأمين قاعدة ثابتة للذراع تسمح بحركتها وفق المطلوب مع سهولة التصنيع والتجميع لذلك تم اعتماد تصميم ميكانيكي بسيط يعتمد على القطع المطبوعة لسهولة توفيرها، حيث يسهل هذا الاختيار عملية التصنيع والتركيب ويقلل التكلفة والوقت اللازمين لتأمين المواد، مما يجعل إعادة تنفيذ المشروع أو صيانته مستقبلاً أمراً عملياً ومتاحاً للجميع.

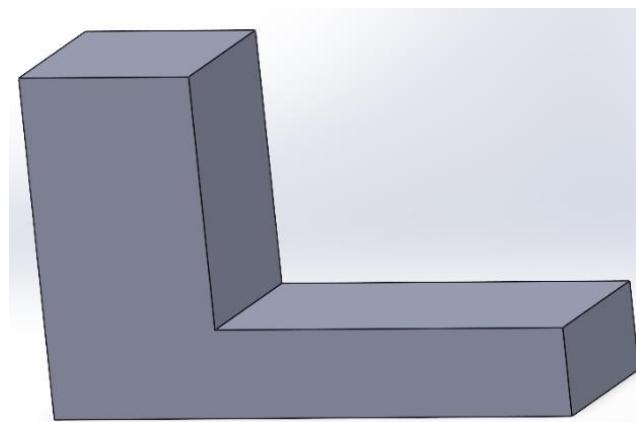
4.2 مكونات المنصة:

1. قاعدة التثبيت الأساسية: تشكّل القاعدة العنصر الأساسي الذي يحمل كامل هيكل الذراع ويضمن ثباته أثناء التشغيل، صُممّت على شكل لوحة مستطيلة من الخشب يوفر دعماً صلباً يقلّل من الاهتزازات أثناء عمل السيرفو ويسمح بالحركة السلسة للذراع، بأبعاد $80 \times 80\text{cm}$ مزودة بشبكة إحداثيات الهدف منها معرفة موقع النهاية الطرفية للذراع، يثبت عليها الذراع بواسطة براغي تثبيت.



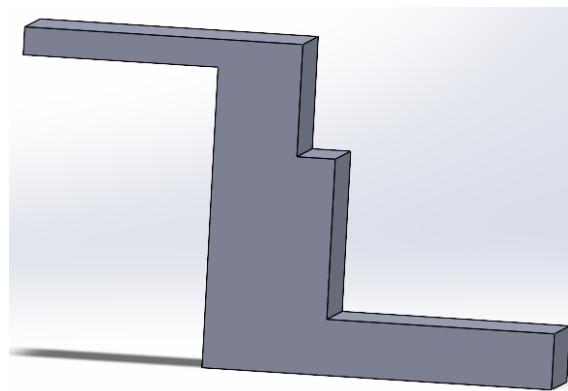
الشكل-5- المنصة المدرستة

2. حامل الذراع: هو القطعة المخصصة لتحمل ولتنبيت محرك السيرفو الأول للذراع، مطبوعة من مادة PLA، تم تصميم القطعة بأبعاد تتناسب مع حجم المحرك وبسمكية تمنع الانحراف أو الاهتزاز ، يثبت الحامل في القاعدة الخشبية باستخدام براغي صغيرة مع إمكانية فكه بسهولة لأغراض الصيانة.



الشكل-6- القطعة الأولى المصممة بواسطة solidworks

3. الذراع الأول: يمثل الذراع الأول المرحلة الأولى من الحركة، يتكون من قطعة مطبوعة تربط المحرك المثبت في القاعدة بالذراع الثاني (المحرك الثاني) ويتيح الدوران حول المحور العاكس، صمم بعرض يناسب عرض المحركات وبطول 8cm لتتناسب أطوال المحركات مع إضافة مجال حرية الحركة دون احتكاك وبسماكة مناسبة لتحمل وزن المحرك وبقى الذراع، تثبت هذه القطعة بمحور دوران المحرك الأول من طرف ومن الطرف الآخر يثبت عليها المحرك التالي بواسطة براغي تثبيت.



الشكل-7- القطعة الثانية المصممة بواسطة solidworks



الشكل-8- طريقة تثبيت القطعة بالمحركات

4. الذراع الثاني: يرتبط الذراع الثاني بشكل مباشر مع الذراع الأول عبر القطعة المطبوعة ويكمel حركة الذراع، صمم بمرنة تسمح له بالحركة ضمن المجال المحدد إذ ترتبط القطعة مع محور حركة المحرك السابق من جهة وتحمل المحرك الذي سيرتبط بنفس هذه القطعة ليشكل الوصلة التالية للذراع من جهة أخرى مع مراعاة وجود مسافات كافية لتمديد الأساند وتجنب احتكاكها بالمفاصل أثناء التشغيل.



الشكل-9- تثبيت الذراع الثاني

ومن خلال تكرار تثبيت القطعة السابقة بالمحركات في كل مرة نحصل على وصلة جديدة للذراع لتصل للحد الأعظمي المطلوب، إذ راعت هذه الآلية سهولة الفك والتركيب وبساطة التصميم وتقليل الكلفة من خلال استخدام نفس القطعة لكل أجزاء الذراع.

الفصل الخامس

الجزء العتادي والبرمجي

5.1 القسم العادي:

5.1.1 المحركات المستخدمة:

تتم استخدام محركات سيرفو 945 mg 180Degree متصلة ببعضها البعض بأجزاء مطبوعة ثلاثة

الأبعاد، لتمثل الذراع وموصله بدارة أردوينو للتحكم في حركتها من خلالواجهة برمجية.

- المواصفات العامة:

نوع المحرك سيرفو رقمي، زاوية الدوران حوالي $0^{\circ} - 180^{\circ}$ وبعزم دوران 10 - 12 كغ.سم

وتقدر سرعة استجابته تقريباً $0.2 \text{ ثانية}/60^{\circ}$ وبجهد التشغيلي: 4.8 - 6 فولت، الإشارة PWM.

يتتألف من تروس معدنية متانة عالية ومقاومة للاهتراء مقارنة بالتروس البلاستيكية ومحرك DC

داخلي مع دائرة تحكم لتحويل إشارة PWM إلى حركة دقيقة.



الشكل-10- محرك السيرفو

5.1.1.1 اختيار المحركات:

تم اختيار المحركات المستخدمة بناءً على العزم الموضح بالشكل التالي، إضافة لتوفرها وإمكانية التحكم في سرعتها، فهو يعد من المحركات التي تستخدم في المشاريع التي تتطلب دقة عالية وقوة عزم جيد وقدرة على حمل أوزان متوسطة بالإضافة إلى استجابته السريعة ودقته في تحديد الزوايا.

المحرك	الفيدباك	الوزن	التحكم	السعر	التوفر
SG90 9G 180d	لا يدعم	1.8 Kg.cm	زاوية	4\$	متوفّر
SG90 9G 360d	لا يدعم	1.8 Kg.cm	سرعة واتجاه	4\$	متوفّر
MG945 180d	لا يدعم	12 Kg.cm	زاوية	8\$	متوفّر
MG945 12KG 360d	لا يدعم	12 Kg.cm	سرعة	8\$	متوفّر
MG996R 55G 180d	لا يدعم	11 Kg.cm	زاوية	8\$	طلب مسبق
MG996R 55G 360	لا يدعم	11 Kg.cm	سرعة	8\$	طلب مسبق
MG995 55G 180d	لا يدعم	10 Kg.cm	زاوية	6\$	طلب مسبق
MG90S 9G 180d	لا يدعم	2.2 Kg.cm	زاوية	8\$	طلب مسبق
MG90S 9G 360d	لا يدعم	2.2 Kg.cm	سرعة	9\$	طلب مسبق
S3003 180d	لا يدعم	3.5 Kg.cm	زاوية	5\$	طلب مسبق، 4-6 أسلال
S3003 360d	لا يدعم	3.5 Kg.cm	سرعة	5\$	طلب مسبق، 4-6 أسلال
SPT4510HV-180d	يدعم	25 Kg.cm	زاوية وموضع	40\$	طلب مسبق
HD-1501MG 17KG	لا يدعم	17 Kg.cm	زاوية	50\$	طلب مسبق
Fs 90R 360d	لا يدعم	1.5 Kg.cm	سرعة	10\$	طلب مسبق
AX-12A	يدعم	15 Kg.cm	سرعة وزاوية وموضع	130\$	طلب مسبق، 6-4 أسلال
STS3215	يدعم	20 Kg.cm	زاوية وموضع	15\$	طلب مسبق، 8-4 أسلال
SCS115	يدعم	12 Kg.cm	زاوية وموضع	17\$	طلب مسبق، 8-4 أسلال
LX-224	يدعم	24 Kg.cm	سرعة وموضع	35\$	طلب مسبق، 2-3 أسلال
RDS3225	يدعم	25 Kg.cm	سرعة وموضع	45\$	طلب مسبق، 3-2 أسلال
RDS51150	يدعم	50_55 Kg.cm	سرعة وموضع	65\$	طلب مسبق، 3-2 أسلال
TD-7120MG	لا يدعم	30 Kg.cm	زاوية	17\$	طلب مسبق، 3-2 أسلال

الشكل-11- جدول المقارنة بين المحركات

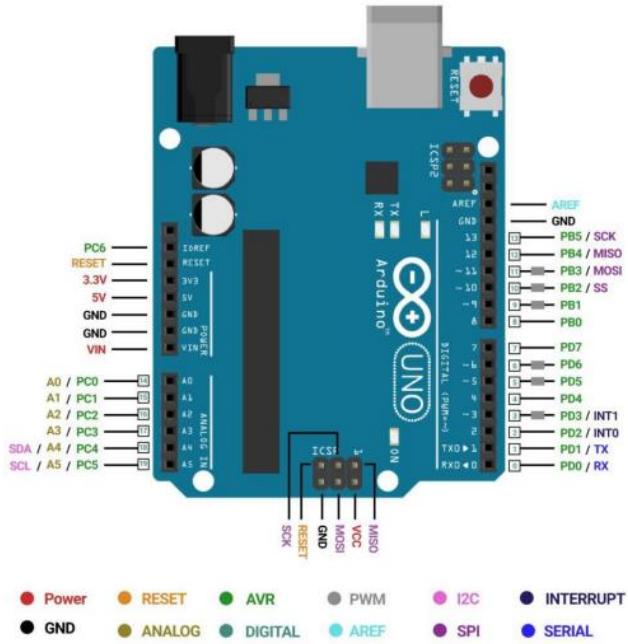
5.1.1.2 التحكم بالمحركات:

يتم التحكم بمحركات السيرفو MG945 باستخدام إشارة النسبة PWM التي يرسلها المتحكم الدقيق بعد حساب المطلوب في الواجهة البرمجية إذ تتحاطب المحركات مع الحاسب عن طريق المنفذ التسلسلي، تحدد مدة النبضة (Pulse Width) الزاوية التي يدور إليها المحرك.

5.2 لوحة Arduino UNO

هي بطاقة تحكم الكترونية مفتوحة المصدر تعمل على وحدة التحكم الصغيرة Microchip Atmega328P وقد تم تجهيزها بمجموعة من منافذ الإدخال والإخراج الرقمية والتماثلية، حيث تحتوي البطاقة على 14 مدخل/مخرج رقمي (ستة منها تتيح إخراج إشارات PWM) وستة منافذ تماثلية وهي قابلة للبرمجة باستخدام بيئة Arduino IDE وهي البيئة التطويرية المتكاملة للأردوينو.

تم استخدامها في هذا المشروع للتحكم بالمحركات بعد استقبال أوامر الحركة من الجزء البرمجي.



الشكل-12- دارة ARDUINO UNO

5.3 القسم البرمجي:

5.3.1 Arduino IDE بيئة

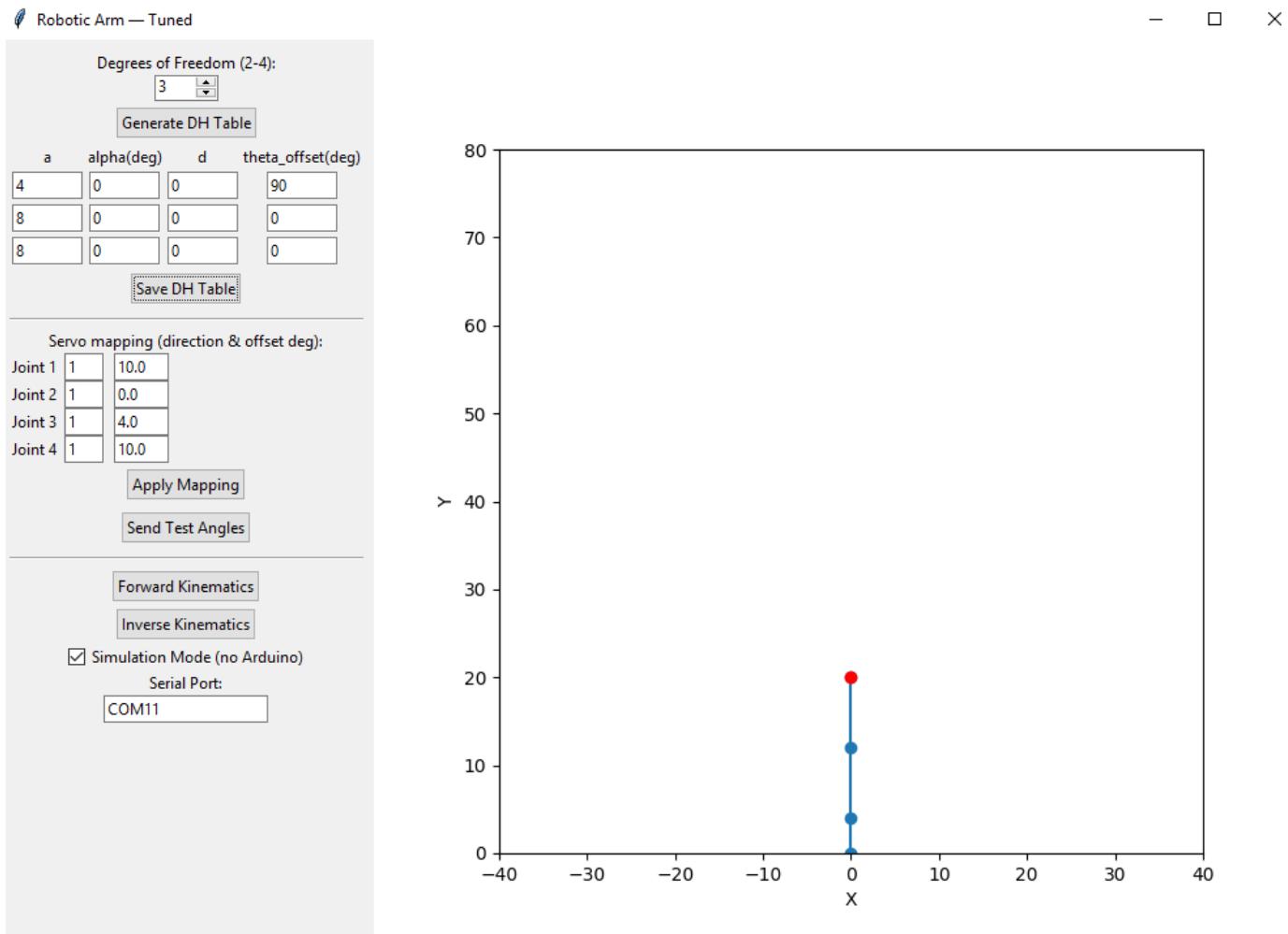
هي الأداة البرمجية التي يستخدمها المطوروون لكتابه وتحميل واختبار الأكواد البرمجية على لوحات أردوينو، وهي بيئة تطوير متكاملة تمكّن المبرمجين من كتابة الأكواد بلغة Arduino (التي تستند إلى C/C++)، ورفع هذه الأكواد على لوحة أردوينو (مثـل Arduino Uno أو Arduino Mega) للتفاعل مع الأجهزة الإلكترونية المتصلة بها.



الشكل-13- برنامج ARDUINO-IDE

5.3.2 الواجهة البرمجية التفاعلية:

تم بناء واجهة برمجية تفاعلية بلغة python للتحكم بالمنصة باستخدام النموذج الهندسي المباشر والنموذج العكسي، حيث سيتم حساب إحداثيات النقطة التي ستتحرك نحوها ال end effector في الحالة الأولى وفي الحالة الثانية يتم إدخال الإحداثيات التي ستصل إليها الذراع ف يتم حساب قيم الزوايا اللازمة لتحقيق ذلك، وعرض شبكة إحداثيات تظهر موقع الذراع على المنصة، تسمح الواجهة البرمجية بالاتصال ببطاقة Arduino، و اختيار النموذج المراد للتحكم بالمنصة من خلاله.



الشكل-14- الواجهة البرمجية

5.3.3 :solidworks برنامج

هو برنامج تصميم باستخدام الحاسوب (CAD) متطور يتيح إنشاء وتحليل وتحسين التصاميم الهندسية على أساس المبادئ العلمية، يستخدم البرنامج خوارزميات رياضية متقدمة لتمثيل الأشكال الهندسية والسطوح في الفضاء ثلاثي الأبعاد بدقة، ويعتمد على النمذجة البارامترية لتعريف الأشكال الهندسية والعلاقات باستخدام المعلمات والقيود، كما يوفر العديد من الأدوات لتحليل وتقدير التصاميم.

يمتاز بسهولة النمذجة وتحريك النموذج واختباره وهو يختص بتصميم المجسمات الهندسية ثلاثة الأبعاد ويقدم حلًا متكاملاً لمشاهدة التصاميم الهندسية بشكل ثلاثي الأبعاد وواعي إلى أقصى حد ويعتبر المحاكي الأمثل والذي يساعد في خلق رؤية أوضح للتصاميم والاحتراكات الهندسية، يمتاز بعمل الرسومات التخطيطية للآلات والمعدات وتصميم الهياكل الملحومة بسهولة وسرعة والقضاء على التدخلات والتحقق من الاصطدامات بين المكونات لضمان التشغيل السليم.

تم استخدام البرنامج في هذا المشروع لتصميم قطع تحمل المحركات وتؤمن اتصالها ببعضها ليتم التحكم الصحيح فيها بحيث تتناسب أبعاد هذه القطع مع متطلبات وقطع المشروع.



الشكل-15- برنامج SOLIDWORKS

5.3.4 VS Code : برنامج

محرر أكواد مجاني ومفتوح المصدر، يعد أداة قوية وسريعة لكتابة الأكواد، يتميز بخفة وسهولة استخدامه مع دعم واسع للغات البرمجة المختلفة مثل Python، C/C++، يتميز بعدة مميزات أهمها:

- تميز بناء الجملة وتصحيح الأخطاء مدمج لاختبار الأكواد أثناء التشغيل ودعم متعدد اللغات

البرمجة مع إمكانية إضافة إضافات لتوسيع الوظائف بالإضافة إلى تكامله مع Git لإدارة نسخ الملفات وحفظ التعديلات ويتميز بواجهة سهلة مع إمكانية تخصيص الألوان والاختصارات.

دوره في المشروع هو كتابة أكواد التحكم بالأردوينو وتصميم واجهة محاكاة لعمل الذراع والتأكد من خلو الأكواد من الأخطاء قبل رفعها إلى لوحة التحكم.



الشكل-16- برنامج VS-CODE

الفصل السادس

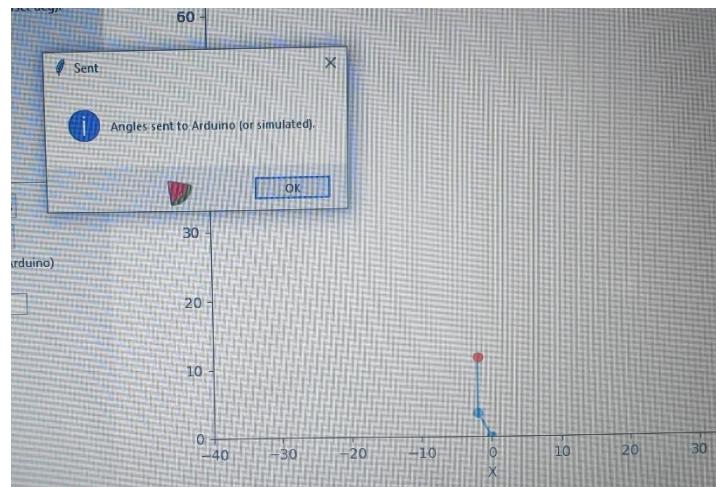
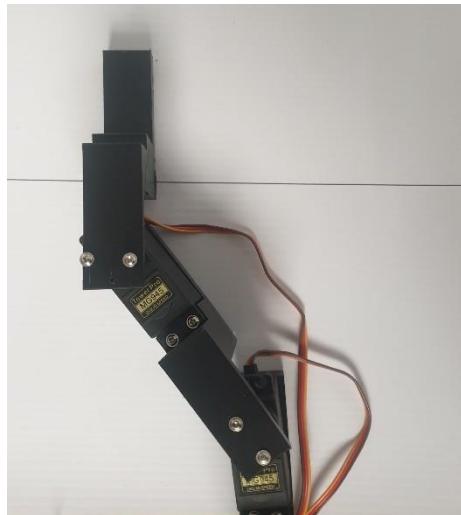
النتائج العملية

6.1 نص التجربة الأولى (درجتي حرية):

عند تجربة الذراع بدرجتي حرية كانت الحركة مرنة وسلسة وسريعة والدقة كانت ممتازة وبالتالي الحركة مستقرة وتم الوصول للنقاط المحددة بدقة بمساحة عمل تتمثل بنصف دائرة قطرها 16cm تقريباً وفيما يلي توثيق

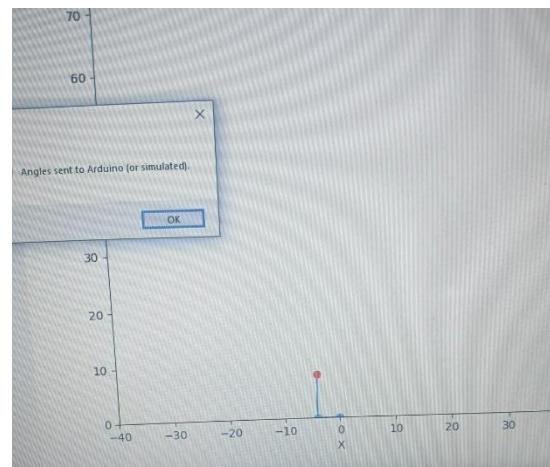
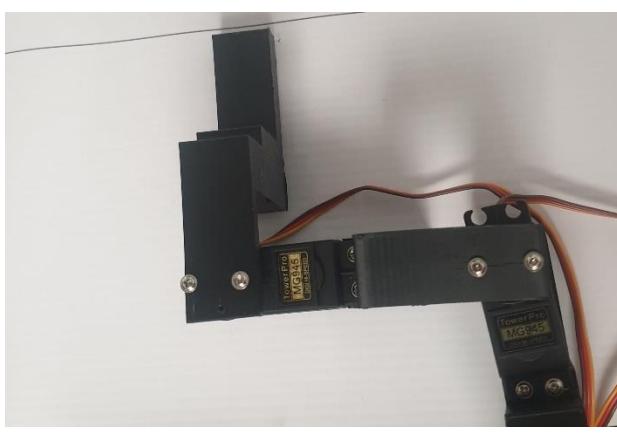
للنتيجة:

- النموذج المباشر: القيم المدخلة 30,0



الشكل-17- تجربة ومحاكاة الذراع بدرجتي حرية- نموذج مباشر

- النموذج العكسي: القيم المدخلة 3,4



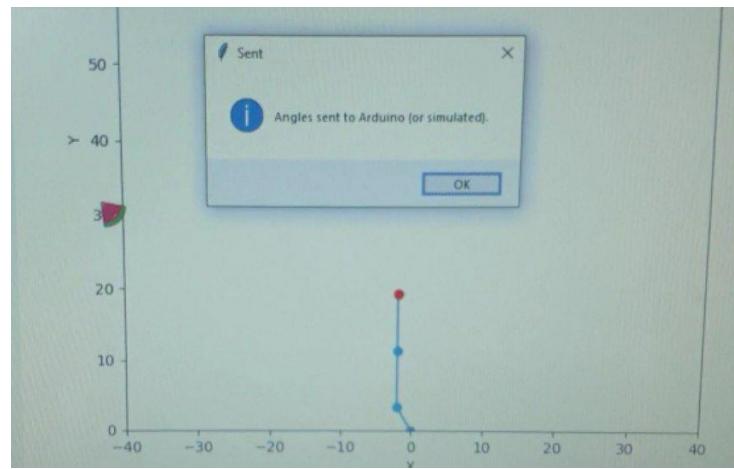
الشكل-18- تجربة ومحاكاة الذراع بدرجتي حرية- نموذج عكسي

6.2 نص التجربة الثانية (ثلاث درجات حرية):

عند تجربة الذراع بثلاث درجات حرية كانت الحركة مرنة وبسلاسة جيدة وسريعة والدقة ممتازة وبالتالي الحركة مستقرة وتم الوصول للنقاط المحددة بدقة أيضاً وكانت مساحة العمل تمثل بنصف دائرة قطرها

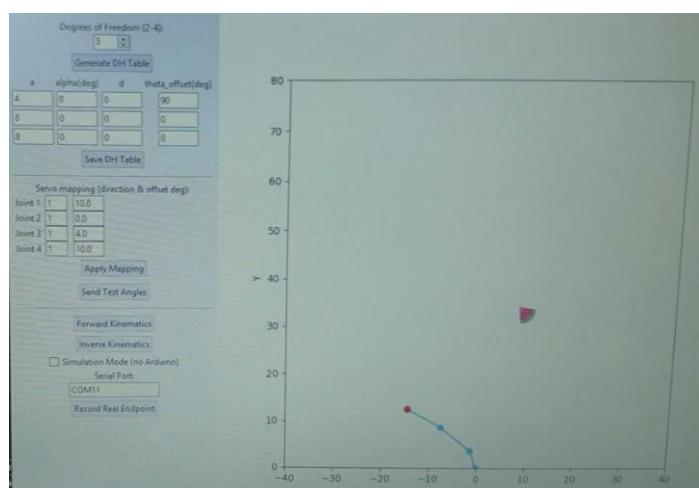
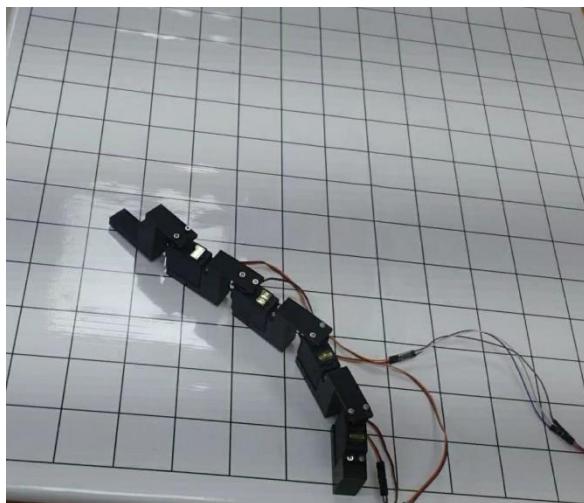
24cm تقريباً وفيما يلي توثيق للنتيجة:

- النموذج المباشر: قيم الزوايا المدخلة 30,0 -30,0



الشكل-19- تجربة ومحاكاة الذراع بثلاث درجات حرية- نموذج مباشر

- النموذج العكسي: القيم المدخلة 20,10

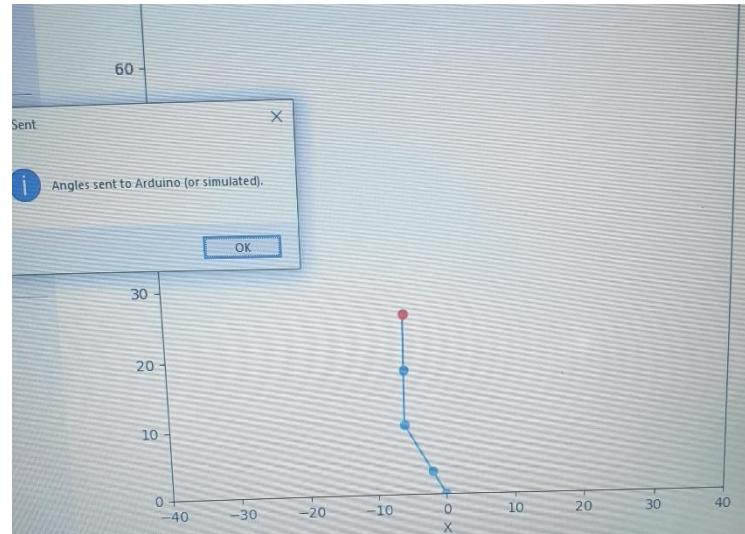
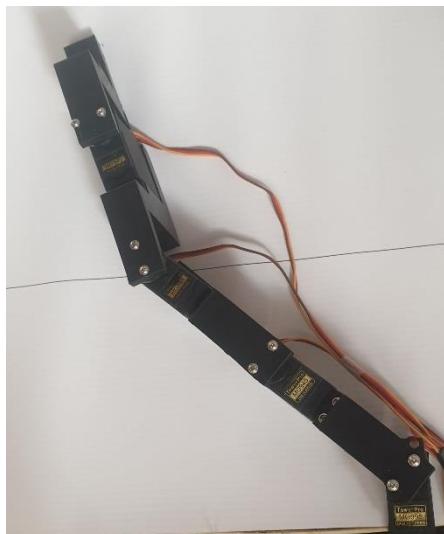


الشكل-20- تجربة ومحاكاة الذراع بثلاث درجات حرية- نموذج عكسي

6.3 نص التجربة الثالثة (ثلاث درجات حرية مع فائضية):

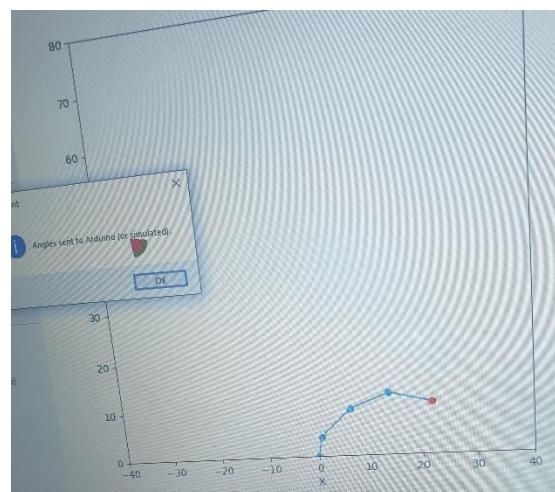
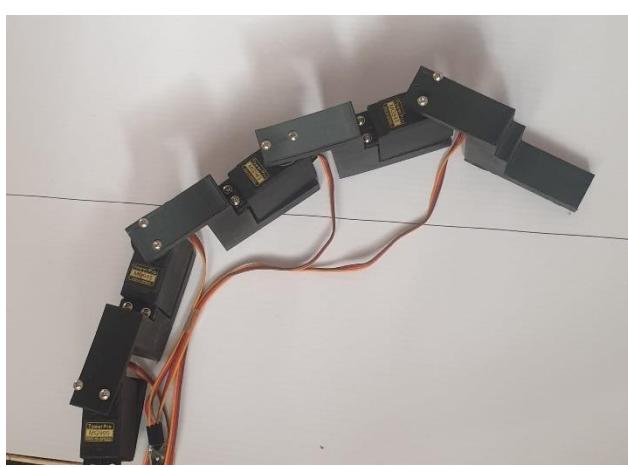
عند تجربة الذراع بأربع درجات حرية كانت الحركة أقل مرونة وبسلامة جيدة وسريعة وبدقة أقل من التجارب السابقة بسبب الاحتكاك مما سبب انحراف بسيط في الوصول للنقاط المحددة وكانت مساحة العمل تتمثل بنصف دائرة قطرها 30cm تقريباً فيما يلي توثيق للنتيجة:

- النموذج المباشر: القيم المدخلة $30,0, -30,0$



الشكل-21- تجربة ومحاكاة الذراع بأربع درجات حرية- نموذج مباشر

- النموذج العكسي: القيم المدخلة $22,10,10,22$



الشكل-22- تجربة ومحاكاة الذراع بأربع درجات حرية- نموذج عكسي

الآفاق المستقبلية:

- I. دراسة النموذج الديناميكي للذراع: في الجزء الحالي من المشروع تم التركيز على النموذج الهندسي فقط، مستقبلاً يمكن دراسة النموذج الديناميكي للذراع لتحديد القوى المؤثرة على كل وصلة أثناء الحركة والعزوم المطلوبة للحركات عند سرعة معينة وحمل معين وبالتالي تحسين استهلاك الطاقة وحماية المحركات من الحمل الزائد ويمكن من تنفيذ مهام معقدة.
- II. إضافة كاميرا: تركيب كاميرا على طرف الذراع أو في البيئة المحيطة لتتبع المسارات تلقائياً والحصول على تغذية راجعة بهدف تحسين دقة الوصول إلى الأهداف.
كما يمكن دمج النظام مع خوارزميات التحكم الذكية لتعديل الحركة حسب مدخلات الكاميرا في الوقت الحقيقي.
- III. تطوير التحكم بالسرعة وتوليد المسارات: دمج التحكم بالسرعة لكل وصلة لتسهيل الحركات الدقيقة أو السريعة واستخدام خوارزميات توليد مسارات سلسة لتقليل الاحتكاك وتحسين الأداء.
- IV. تثبيت الدارة بعد طباعتها على شكل دارة PCB لتسهيل العمل بها والتعديل.
- V. تأمين محركات ذات إمكانيات أفضل لتحسين دقة الحركة والتحكم وزيادة سرعة الاستجابة وتوسيع نطاق التطبيقات الممكنة للذراع الروبوتية وتطوير استخداماتها.

المراجع:

- [1] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 4th ed. Pearson, 2017.
- [2] B. Siciliano and O. Khatib, Eds., *Springer Handbook of Robotics*, 2nd ed. Springer, 2016.
- [3] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, 2nd ed. Wiley, 2020.
- [4] Microsoft, “Visual Studio Code – Code Editing. Redefined,” [Online]. Available: <https://code.visualstudio.com/>.
- [5] Dassault Systèmes, “SOLIDWORKS 3D CAD Software – Overview and Applications,” [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/>.
- [6] Arduino, “Arduino Official Website – Boards, Software and Documentation,” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [7] Tower Pro, “MG945 High Torque Servo Motor Specifications (180°),” [Online]. Available: <https://www.towerpro.com.tw/product/mg945/>.