



الجمهورية العربية السورية
جامعة المنارة
كلية الهندسة
قسم هندسة الميكاترونكس

نمذجة وتصميم ذراع روبوت متسلسل بأربع درجات حرية

مشروع تخرج 2

إعداد الطالب

أحمد كابر

إشراف

الدكتور المهندس: علاء الدين حسام الدين

العام الدراسي 2022-2023

الفهرس

1	الفهرس
3	قائمة الأشكال.....
5	الملخص:
6	الفصل الأول: الهدف من المشروع:.....
6	1-1. مقدمة:
7	2-1. مشكلة البحث وأهدافه:
8	3-1. خطة البحث:
10	الفصل الثاني: الدراسات المرجعية:.....
10	1-2. الروبوتات المتلاعبة التسلسلية:
14	الفصل الثالث: النمذجة الرياضية والتطبيق العملي للمشروع:
14	1-3. مراحل العمل.....
14	3-1-1. تصميم ذراع الروبوت.....
15	3-1-2. تصميم علبة السرعة لكل مفصل
19	3-2. الدراسة الديناميكية
19	3-2-1. ديناميك الجسم الصلب
21	3-2-2. تحويل النموذج إلى خطي
22	3-3. نموذج التحكم بحلقة مغلقة باستخدام Pole Placement:.....
24	3-3-2. دراسة تأثير نظام تحكم بحلقة مغلقة للوصول إلى زاوية مرجعية
36	3-4. التحكم بالنموذج الفيزيائي للروبوت

38:Arduino I/O Package مع MATLAB/Simulink باستخدام	1-4-3
تصميم دائرة التحكم	
استجابة المنظومة تحت تأثير نظام التحكم:	2-4-3
40	
النتائج	43
التوصيات	44
المراجع	45

قائمة الأشكال

- الشكل 1 من اليمين إلى اليسار استجابة عزوم المحركات باستخدام FBL، التحليل الزمني للمنظومة تحت تأثير FBL.... 10
- الشكل 2 المخطط التدفقي لعملية التحكم مدعومة من خوارزمية الواقع المعزز 11
- الشكل 3 مقارنة بين مرجع الموضع الزاوي و الموضع الزاوي الحقيقي مع خطأ المقارنة 12
- الشكل 4 مقارنة بين مرجع الموضع والموضع الحقيقي مع خطأ المقارنة 13
- الشكل 5 الروبوت بعد أن تم تجميعه على SolidWorks 15
- الشكل 6 تعشيق مسننات المفصل الأول 16
- الشكل 7 تعشيق مسننات المفصل الثاني والثالث 17
- الشكل 8 الية نقل الحركة (السير التوقيتي مع البكرة التوقيتية) 18
- الشكل 9 نموذج الروبوت على بيئة Simulink 20
- الشكل 10 نموذج الروبوت تحت تأثير دخل خطوي 20
- الشكل 11 الاستجابة الخطوية الواحدية للإزاحة الزاوية بدلالة الزمن 21
- الشكل 12 نموذج التحكم المستخدم 23
- الشكل 13 نموذج التحكم بحلقة مغلقة مع نموذج العزم المضاف من التغذية الأمامية 23
- الشكل 14 نمذجة العزم المضاف τd 24
- الشكل 15 الموضع الزاوي للمفصل الأول $\theta 1$ بالنسبة الزمن 26
- الشكل 16 السرعة الزاوية للمفصل الأول $\omega 1$ مقدرة بال $rads$ بالنسبة للزمن 26
- الشكل 17 التسارع الزاوي للمفصل الأول $\alpha 1$ مقدرة بال $rads^2$ بالنسبة للزمن 27
- الشكل 18 الموضع الزاوي للمفصل الثاني $\theta 2$ بالنسبة للزمن 27
- الشكل 19 السرعة الزاوية للمفصل الثاني $\omega 2$ مقدرة بال $rads$ بالنسبة للزمن 28
- الشكل 20 التسارع الزاوي للمفصل الثاني $\alpha 2$ مقدرة بال $rads^2$ 28
- الشكل 21 الموضع الزاوي للمفصل الثالث $\theta 3$ بالنسبة للزمن 29
- الشكل 22 السرعة الزاوية للمفصل الثالث $\omega 3$ مقدرة بال $rads$ بالنسبة الزمن 29
- الشكل 23 التسارع الزاوي للمفصل الثالث $\alpha 3$ مقدر بال $rads^2$ بالنسبة الزمن 30
- الشكل 24 الموضع الزاوي للمفصل الرابع $\theta 4$ بالنسبة الزمن 30
- الشكل 25 سرعة الزاوية للمفصل الرابع $\omega 4$ مقدرة بال $rads$ مع الزمن 31
- الشكل 26 تسارع الزاوية للمفصل الثالث $\alpha 4$ مقدرة بال $rads^2$ مع الزمن 31
- الشكل 27 الموضع الصفري للروبوت قبل تحركه بشكله على بيئة Simscape 32
- الشكل 28 الموضع النهائي للروبوت على بيئة Simscape بعد إزاحته بالزوايا المرجعية السابقة $\theta 1, 2, 3, 4$ 33
- الشكل 29 العزم المطلوب لتحريك المحرك الأول ليصل للزاوية المرجعية $\theta 1 = 60^\circ$ 34
- الشكل 30 العزم المطلوب لتحريك المحرك الثاني ليصل للزاوية المرجعية $\theta 2 = 60^\circ$ 34
- الشكل 31 العزم المطلوب لتحريك المحرك الثالث ليصل للزاوية المرجعية $\theta 3 = -90^\circ$ 35
- الشكل 32 العزم المطلوب لتحريك المحرك الرابع ليصل للزاوية المرجعية $\theta 4 = 30^\circ$ 35
- الشكل 33 الشكل النهائي للروبوت بعد تجميعه 37

- الشكل 34 الشكل النهائي للروبوت من منظور آخر بعد تجميعه.....37
- الشكل 35 المحركات والتوصيلات مع الية النقل المستخدمة.....38
- الشكل 36 دائرة التحكم للنموذج الفيزيائي للروبوت39
- الشكل 37 دائرة تمثل تحويل العزم المحدد إلى جهد PWM.....39
- الشكل 38 المفصل الأول في الموضع الصفري40
- الشكل 39 المفصل الأول في الموضع النهائي41
- الشكل 40 استجابة المحرك الأول تحت تأثير التحكم بحلقة مغلقة بطريقة pole placement.....41

الملخص:

تُعد أذرع الروبوتات التسلسلية Serial Robot Arm من أفضل التقنيات الحديثة لإدارة خطوط الإنتاج لسهولة التعامل معها وبساطة تصميمها وإتباع منهجية خطوات موحدة لدراسة أي ذراع روبوت تسلسلي مهما تعقدت درجات حرته، مما يعطي أهمية كبيرة لدراسة هذه الأنظمة الروبوتية دراسة تفصيلية من أجل أن تتم عملية تصنيعها وتشغيلها بشكل مثالي وتقليل حدوث الخطأ أثناء التحكم الآلي أقل ما يمكن، تأتي فكرة المشروع مكملة ما تم إنجازه في المرحلة الأولى من مشروع التخرج بحيث سيتم الاستفادة من الدراسة الحركية المجردة Kinematic لبرمجة الذراع وإعطاء الإحداثيات في المحاور (x,y,z) ليتم تحويلها بما يكافئها من إحداثيات θ كما سيتم الاستفادة من الدراسة الديناميكية Dynamic لتحديد عزوم المحركات المطلوبة مع بناء علبة سرعة مناسبة في حال كان عزم المحرك غير كافي ولتخفيض سرعة المحرك، كما ستستخدم لتوصيف المنظومة بموديل رياضي. سيطرح البحث فكرة جديدة لجعل المنظومة خطية والتخلص من تأثير الاضطرابات الداخلية التي تسببها المنظومة ذات نفسها التي بدورها تجعل المنظومة لا خطية عن طريق التحويل إلى جملة خطية باستخدام التغذية المباشرة Feed Forward Linearization لتوليد العزم المكافئ للتغلب على الاضطرابات التي تسببها المنظومة عند كل موضع زاوي ، لتتم بعدها دراسة تحليل زمني للمنظومة لتلبية رغبات التحكم ثم بناء منظومة السيرفو Servo Mechanism المناسبة، سيتم في نهاية البحث إنشاء موديل رياضي والتحكم به باستخدام MATLAB/Simulink وإنشاء نموذج مصغر واقعي Prototype والتحكم بموضعه لإنشاء مهمة بسيطة مثل رفع جسم صغير ووضعه في مكان آخر.

الفصل الأول: الهدف من المشروع:

1-1. مقدمة:

الأنظمة الروبوتية هي من أكثر الأنظمة الهندسية تعقيداً كونها تنطوي على العديد من الأنظمة المتصلة مع بعضها والتي تعمل بشكل متزامن وبأسلوب متكامل من أجل أن يؤدي الروبوت عمله وفق المطلوب، فيمكن النظر للروبوت على أنه تراكب منظومة ميكانيكية متمثلة بأذرع ومفاصل ومكونات ميكانيكية أخرى للربط بين أجزائه المادية مع منظومة كهربائية وإلكترونية تتمثل بالمشغلات (المحركات)، دارات القيادة، الحساسات والمتحكمات.

يحتاج نظام الروبوت المتكامل الى دراسة عميقة وتفصيلية تشمل كافة مراحل تشغيله وعمله، إن دراسة أية منظومة روبوت على مختلف أنواعها يمكن التحدث عنها وفق خطوات مرتبة تبدأ بالدراسة الحركية المجردة لمنظومة الروبوت Kinematics وهذا يتضمن الدراسة الحركية المجردة الموجهة Kinematics للتحويل ما بين إحداثيات (x,y,z) و θ والعكس أي أنه من خلال الدراسة الحركية المجردة يمكن معرفة وتحديد إحداثيات حركة الروبوت المعممة وذلك تبعاً لدرجة حرية الروبوت ومستويات حركته، ويتم الاهتمام بشكل خاص بحركة المفاصل والوصلات الفعالة (أي المتصلة مباشرة مع المشغلات) كونها تنقل الحركة إلى باقي أجزاء الروبوت، أيضاً من خلال الحركة العكسية المجردة يتم تحديد الإحداثيات المعممة التي يتوجب على المفاصل التحرك وفقها من أجل انتقال إحداثيات المؤثر النهائي End-effector للروبوت الى إحداثيات جديدة في الفراغ، بعد ذلك يتم إجراء الدراسة الديناميكية للروبوت والهدف الأساسي للدراسة الديناميكية هو تحديد العزوم المطلوبة من المشغلات أثناء عمل الروبوت ودراسة نظام التحكم عليها لتطبيقه بشكله الكهربائي والبرمجي، وبالتالي يمكن من خلال ذلك تحديد عزوم ومواصفات المحركات المطلوبة للروبوت، بعد ذلك في المراحل اللاحقة سيتم تصميم منظومة التحكم الآلي بالروبوت والتي تهتم بشكل أساسي في تحقيق الإشارات المرجعية للروبوت (زاوية ، موضع) تنطوي منظومة التحكم على اختيار خوارزمية التحكم الأفضل والمناسبة لمنظومة الروبوت المدروسة، فتختلف خوارزميات التحكم من روبوت الى آخر تبعاً لتصميمه ووظيفته وتتطلب في أي حالة من الحالات السابقة معرفة وتحديد بارامترات الديناميك بشكل جيد من أجل مراقبة وقياس قيم المتغيرات على خرج الروبوت لبناء نظام خطي يعتمد بشكل أساسي على التحكم بالتغذية الأمامية مع قياس بارامترات خرج الروبوت لتوليد العزوم المكافئة للتغلب على الاضطرابات التي تولدها المنظومة، وبالتالي تشكيل الأوامر المناسبة من خلال المتحكم من أجل جعل حركة الروبوت موافقة تماماً للمرجع، أيضاً تشمل منظومة التحكم دراسة الحساسات واختيار أنواعها ومواصفاتها حسب

الغرض من التحكم إن كان سرعة أم موضع وأنظمة القيادة للمحركات، في هذه الدراسة سيتم تسليط الضوء على نمذجة ومحاكاة وتطبيق نموذج مصغر لمنظومة المتلاعب التسلسلي ذو الأربع درجات حرية والاستفادة بدءاً من الدراسة الحركية المجردة ومروراً بالدراسة الديناميكية ثم التحكم بالتغذية الأمامية التي توفر عزوم المحركات واستطاعتها المناسبة، ثم تصميم نظام التحكم الآلي (منظومة السيرفو) من أجل موضع المؤثر النهائي عن طريق التحكم بموضع المشغلات وذلك بالاستعانة ببرنامج MATLAB-Simulink. سيتم عرض النقاشات والنتائج التي تتصل بهذه الدراسة في الفصول القادمة

1-2. مشكلة البحث وأهدافه:

تكمن مشكلة البحث في دراسة منظومة روبوت تسلسلي رباعي المفاصل والتحكم به للوصول إلى موضع محدد وتصميم نموذج فيزيائي مصغر متحكم به عن طريق MATLAB/Simulink. يهدف البحث بشكل أساسي لعدة بنود:

- ❖ تطوير الموديل السابق للروبوت ليصبح أكثر واقعية من أجل التطبيق الفيزيائي للروبوت مع محاولة تضمين جميع القطع المستخدمة كي يتم حساب عطالاتها وكتلتها باستخدام SolidWorks.
- ❖ بناء موديل رياضي يمثل الديناميك باستخدام MATLAB/Simulink مكتبة Simscape/Multibody physics عن طريق تحويل الموديل المصمم على برنامج SolidWorks إلى بيئة Simulink.
- ❖ بناء موديل خطي عن طريق التحويل إلى جملة خطية باستخدام التغذية المباشرة Feedforward Linearization، مع أخذ كل من قيم الموضع والسرعة من قياس الحساس لتوليد العزم المكافئ للتغلب على قوى الجاذبية وكوريوليس.
- ❖ تعيين الأقطاب المرغوبة للمنظومة بحيث تكون الاستجابة critically damped اعتماداً على قيمة زمن الاستقرار t_s .
- ❖ التحكم بموضع المحركات للوصول إلى نقطة محددة باستخدام Pole Placement وإيجاد استجابة الموضع مع الزمن مع تبيان النتائج والمنحنيات.
- ❖ إنشاء نموذج فيزيائي للروبوت يتم التحكم به باستخدام لوحة Arduino مع حزمة لوحة التطوير خاصة على Simulink مع استخدام مكتبة Robotics System Toolbox.

1-3. خطة البحث:

تم إنشاء خطة البحث وفقاً للمراحل التالية:

1. تصميم عناصر الروبوت:

(a) تصميم موديل CAD (Computer-Aided Design) باستخدام برنامج SolidWorks لوصلات الروبوت باستخدام مادة الأكريليك (Plexi).

(b) تصميم موديل CAD للمؤثر النهائي مصنع من مادة الأكريليك (Plexi).

(c) تصميم موديل CAD لكافة عناصر الروبوت المستخدمة لربط المفاصل مع بعضها مع إدراج تصاميم المحركات لأخذ الكتل والعطالات بالحسبان بشكل دقيق كي يكون الموديل الرياضي أقرب ما يمكن للموديل الفيزيائي.

(d) تصميم عناصر نقل الحركة وعلب السرعة المناسبة (مسننات، سير تواقتي) لكل مفصل بناءً على العزم المطلوب تحقيقها مع الأخذ بعين الاعتبار نسب تضخيم العزم مع تخفيض السرعة.

2. نمذجة الروبوت:

(a) تم تصميم موديل الروبوت وتجميعه بواسطة بيئة Assembly على برنامج SolidWorks ثم تم تصدير الموديل إلى بيئة MATLAB/Simulink ليظهر الموديل الرياضي للروبوت بشكل Block Diagram مكون من Blocks تابعين لمكتبة Simscape/Multibody physics.

(b) تم تصميم موديل التحكم بالتغذية المباشرة باستخدام مكتبة Robotics System Toolbox والذي بدوره سيؤمن الشكل الخطي للمنظومة عن طريق تعويض العزم المطلوب للتغلب على كل من قوى كوريوليس والجاذبية.

(c) سيتم مقارنة الاستجابة قبل وبعد بناء الموديل الخطي.

(d) بناء دارة التحكم بالتغذية الراجعة للتحكم بموضع الروبوت باستخدام خوارزمية Pole Placement وتم اعتماد طريقة Pole Placement للجزء التطبيقي لأسباب سيتم توضيحها ومناقشتها في فصول لاحقة من خلال استجابة موضع الروبوت مع الزمن.

3. التحكم بالنموذج الفيزيائي للروبوت:

(a) تم قص القطع التي ستمثل الوصلات من مادة Acrylic وكانت أطوالها بناءً على منطقة عمل مفترضة وتناسباً مع آليات نقل الحركة الموجودة.

(b) تم استخدام ثلاث محركات DC لبناء منظومة السيرفو يدوياً، بينما تم استخدام محرك DC Servo مصنع مسبقاً من أجل التحكم بموضع آخر وصلة والتي تمثل طول المؤثر النهائي لأسباب سيتم توضيحها في فصول لاحقة.

تم تطبيق طريقة التحويل إلى جملة خطية باستخدام التغذية المباشرة (التحكم باستخدام التغذية المباشرة) لتوليد العزم المطلوب لكل محرك كي يتغلب على قوى كوريوليس والجاذبية باستخدام مكتبة Robotics System Toolbox مع حزمة خاصة للوحة تطوير Arduino على بيئة Simulink وتم أخذ قيم الموضع الحالي للروبوت اعتماداً على قراءات حساس موضع Magnetic Encoder لمحرك القاعدة ومقاومة متغيرة للمحركين الثاني والثالث.

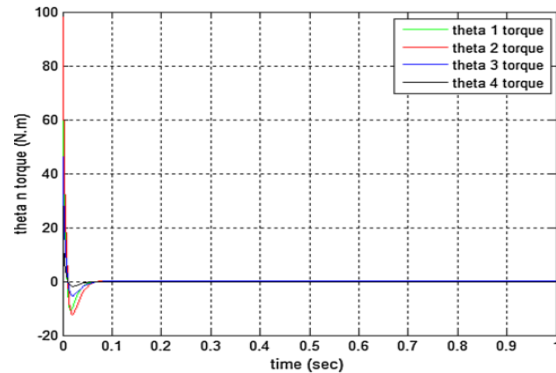
(c) تم تصميم نظام التحكم بحلقة مغلقة باستخدام Simulink بعد معايرته رياضياً مسبقاً وتم ربطه مع حزمة Arduino ليعمل بشكل مكافئ مع التحكم باستخدام التغذية المباشرة لتأدية المهام المطلوبة من الروبوت بالانتقال من موضع لآخر بشكل جيد.

الفصل الثاني: الدراسات المرجعية:

1-2. الروبوتات المتلاعبة التسلسلية:

اقترح الباحث^[1] Al-Qahtani et al لحل مشكلة التحكم في المتلاعب التسلسلي، ديناميكية صحيحة بحيث يجب أن يكون نموذج الروبوت المتلاعب في متناول اليد وقريب من الواقع قام الباحث أولاً بدراسة النموذج الديناميكي للروبوت المناور التسلسلي المصمم على أرض الواقع على أساس مبدأ أويلر لاغرانج للحصول على معادلات الحركة للمفاصل المشغلة للروبوت، تم الاستخدام والاستفادة من المصفوفة اليعقوبية ومصنوفات عزوم العطالة المعممة لكل مفصل، علاوة على ذلك، يجب استنتاج الخصائص الأساسية لمعادلات لاغرانج ليتم تحليل النموذج الديناميكي بغرض التحكم، يتم بعدها تصميم وحدة تحكم PID للتحكم في موضع الروبوت عن طريق تفصيل النموذج الديناميكي ثم لتحقيق الأداء الأفضل، يتم استخدام خوارزمية التطور التفاضلي لاختيار معاملات وحدة تحكم PID كما يتم أيضاً استخدام استجابة التحكم عن طريق تحويل النظام إلى جملة خطية عن طريق التغذية الراجعة الراجعة Feedback Linearization (FBL) في تتبع مسار المخطط المرجعي لموضع المناور كما تكشف النتائج أن المتحكم PID مقترناً بخوارزمية التطور التفاضلي والتحويل إلى جملة خطية عن طريق التغذية الراجعة يعزز هذا النوع الهجين من التحكم من أداء الاستجابة الآلية لحركة الروبوت. كما وجد أن زيادة كتل وصلات المناور لا تؤثر على أداء المتحكم PID في الموضع ولكن يلزم وجود عزم دوران أعلى للتحكم في هذه الحالات.

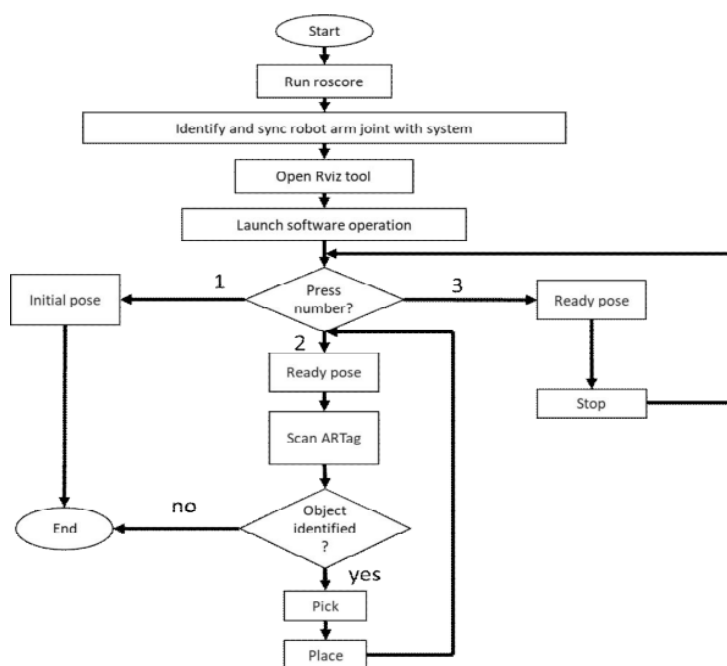
Theta	Controller	Overshoot (%)	Settling time (s)	Rise time (s)
θ_1	PID	2.2940	0.4007	0.0563
	FBL	0.0004	0.0585	0.0336
θ_2	PID	1.5022	0.0976	0.0583
	FBL	0.0004	0.0585	0.0336
θ_3	PID	3.1471	0.7505	0.0638
	FBL	0.0004	0.0585	0.0336
θ_4	PID	3.3943	0.8327	0.0606
	FBL	0.0004	0.0585	0.0336



الشكل 1 من اليمين إلى اليسار استجابة عزوم المحركات باستخدام FBL، التحليل الزمني للمنظومة تحت تأثير FBL

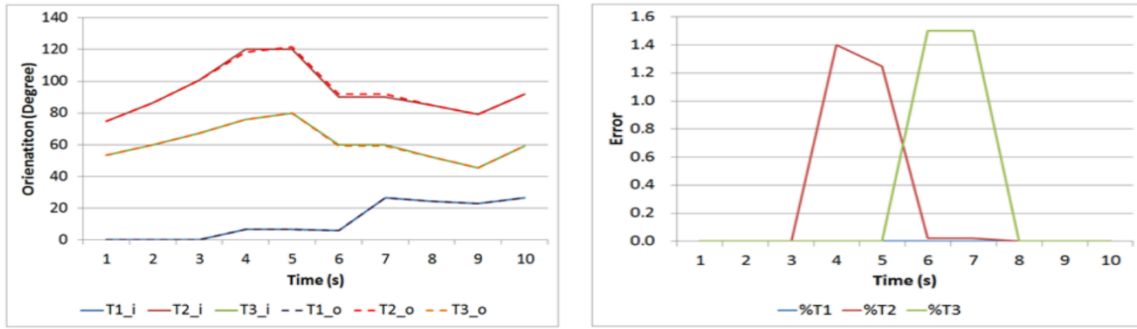
قام الباحث^[2] Mhd.Mazlan et al بإنشاء واقع معزز (AR) Augmented Reality وهو شكل من أشكال المعلومات وتكنولوجيا الاتصالات التي توفر المرئيات الافتراضية لزيادة المعلومات عن النموذج المدروس (مثل

الصور أو الرسوم المتحركة أو الفيديو) على الواقع المادي من خلال أجهزة الكمبيوتر، تهدف هذه الدراسة بشكل أساسي إلى استخدام تقنية AR على نظام ذراع الروبوت تسلسلي بأربع درجات حرية والعمل على بيانات التغذية الراجعة (قراءة الحساسات) لهذا النظام بحيث يتم تطبيق تقنية AR على علامة AR (AR-Tag)، وبيانات AR-Tag يتم الحصول عليها باستخدام كاميرات ثلاثية الأبعاد أو كاميرات مثبتة في العمق، يعمل هذا النظام الروبوتي على استرداد الكائنات المستهدفة الموجودة في منطقة المسح بحيث تم مسحها بالكاميرات. بعد أن يصل الكائن إلى الهدف يتم تحديد موقعه، فيقوم ذراع الروبوت بتحريك الكائن المستهدف إلى موقع الهدف. يعمل النظام من خلال دمج ذراع الروبوت بكل من خوارزميات التحكم والواقع المعزز. كما يتم استخدام خوارزمية التحكم لتتحكم في حركة ذراع الروبوت وتموضعه بشكل دقيق، في حين أن الخوارزمية AR لتحديد علامات AR-Tag، كما تركز الدراسة بشكل أساسي على بناء خوارزمية فعالة للواقع المعزز لتحديد الهدف والأشياء غير المستهدفة واختبار تلك الخوارزمية على ذراع روبوت حقيقي. تشير النتائج إلى أنه يمكن لذراع الروبوت التقاط الكائن المستهدف بنجاح، ويمكن للكاميرا قراءة إحداثيات AR-Tag بدقة عالية بحيث تكون العلامة تقع على الكائن الهدف. لذلك يمكن القول إن هذا البحث نجح في تطوير نظام ذراع الروبوت القائم على AR لإنجاز أي مهمة تتعلق بالتقاط منتج والتموضع في مكانه المثالي أو ما يسمى Pick & Place.

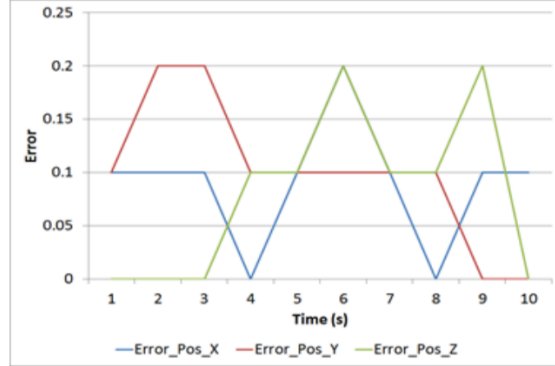
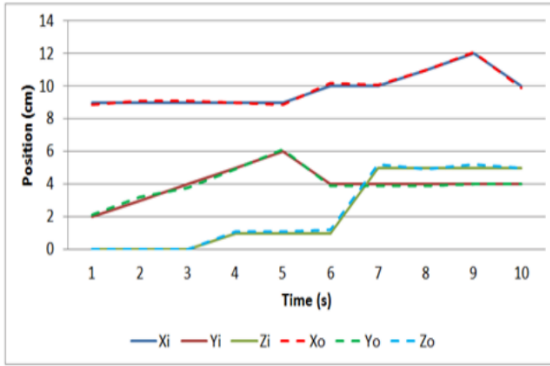


الشكل 2 المخطط التدفقي لعملية التحكم مدعومة من خوارزمية الواقع المعزز

قام الباحث [3] Dewi et al باقتراح ذراع روبوت مناور تسلسلي مناسب لاستبدال البشر العاملين في زراعة الطماطم لضمان التعامل مع الطماطم بكفاءة عالية دون تعريضها للتلف. فلذلك إن أفضل تصميم لهذا الروبوت هو استخدام أربع وصلات تتمتع بمرونة قوية في إحداثيات محاور x و y و z . وباستخدام الحركة العكسية المجردة وتطبيق التحكم المنطقي الضبابي (FLC) Fuzzy Logic Control تنتج لدينا حركة دقيقة وسلسة، يتم تصميم نموذج الحركة العكسية المجردة الأكثر كفاءة لإيجاد موضع وحركة ذراع الروبوت عن طريق تعديل المعاملات الميكانيكية (موضع زاوي، طول الوصلة). يستخدم التحكم بالمنطق الضبابي طريقة حديثة للسيطرة على المناور وذلك عن طريق جلب البيانات من الحساسات لتعيين الموضع الصحيح وحركة المؤثر النهائي. كما تتم مقارنة المعاملات المتوقعة مع النتائج التجريبية لإظهار فعالية التصميم المقترح لنموذج التحكم الضبابي. فكانت أخطاء الموضع (في المحور x و y و z) هي 0.1% و 0.1% و 0.04% . وأخطاء الموضع الزاوي لكل مفاصل الروبوت (θ_1 و θ_2 و θ_3) هي 0% و 0.7% و 0.3% . إن التحكم باستخدام FLC يضبط الزاوية المناسبة للمحرك المؤازر (θ_4) المسؤولة عن حركة قابض المؤثر النهائي، والنتائج التجريبية تتوافق مع قواعد FLC كمدخل لنظام التحكم بحركة القابض النهائي، إن الذراع المناور الذي تمت مناقشته في هذه الدراسة هو ذراع تسلسلي تمت دراسته بطريقة FLC واختيار موضع الروبوت بشكل دقيق في كل لحظة لنقل الطماطم المحصودة إلى نظام تعبئة مخصص.



الشكل 3 مقارنة بين مرجع الموضع الزاوي و الموضع الزاوي الحقيقي مع خطأ المقارنة



الشكل 4 مقارنة بين مرجع الموضع والموضع الحقيقي مع خطأ المقارنة

الفصل الثالث: النمذجة الرياضية والتطبيق العملي للمشروع:

سنستعرض في هذا الفصل ما تم إنجازه من المراحل الخاصة بتحقيق هدف المشروع، حيث تم في البداية تعديل نموذج الذراع الذي تم إنشائه في المرحلة الأولى من مشروع التخرج لجعله مناسب أكثر للتطبيق كما تم استخدام توابع الدراسة الحركية العكسية المجردة المدروسة في المرحلة الأولى ليصبح نموذج الروبوت أكثر فاعلية عن طريق إعطائه إحداثيات موضع (x, y, z) ويقوم الحاسب بحساب $\theta_{1,2,3,4}$ المقابلة للموضع المطلوب، بدلاً من الاعتماد على الموديل المباشر الذي يقوم بإعطاء إحداثيات (x, y, z) بناءً على الزوايا المدخلة، ثم تم استخدام بيئة Simulink/Simscape لتمثيل الديناميك للروبوت ثم بناء منظومة السيرفو (التحكم بحلقة مغلقة) انطلاقاً من ديناميك المنظومة والمحركات المستخدمة بعد حساب معاملاتهما من عطالات وكتل وعزوم عطالة من جانب ديناميك الجسم الصلب مع اختيار نسب التضخيم لعلم السرعة وآليات نقل الحركة المناسبة للعزم بناءً على العزوم المسموح بها والمطلوبة ليتم بعدها استخدام البرنامج المكتوب على بيئة MATLAB لتعيين قيم ثوابت التحكم ومناقشة النتائج.

3-1. مراحل العمل

3-1-1. تصميم ذراع الروبوت

تم تصميم القطع الخاصة بالذراع بواسطة برنامج SolidWorks، وهي تتألف من:

- [1]. أربع وصلات تم اعتماد أطوالها تبعاً لمساحة عمل مفروضة على اعتبار أن صفر الروبوت هي السطح الملامس للأرض $(l_1 = 198.33mm)$ طول الوصلة الثانية $(l_2 = 182mm)$ وعليه تصميم آلية نقل الحركة للوصلة الثالثة التي تم تصميم طولها ليكون $(l_3 = 182mm)$ وعليه تكون وصلة المؤثر النهائي مع طول المؤثر النهائي $(l_4 = 182.53mm)$.

تم تنفيذ كل من الوصلات باستخدام مادة الأكريليك، يوضح الشكل 5 طريقة تجميع القطع السابقة.

- [2]. محاور مختلفة تم استخدام المحاور المتواجدة في المخبر مع قطع تثبيت خاصة بها.

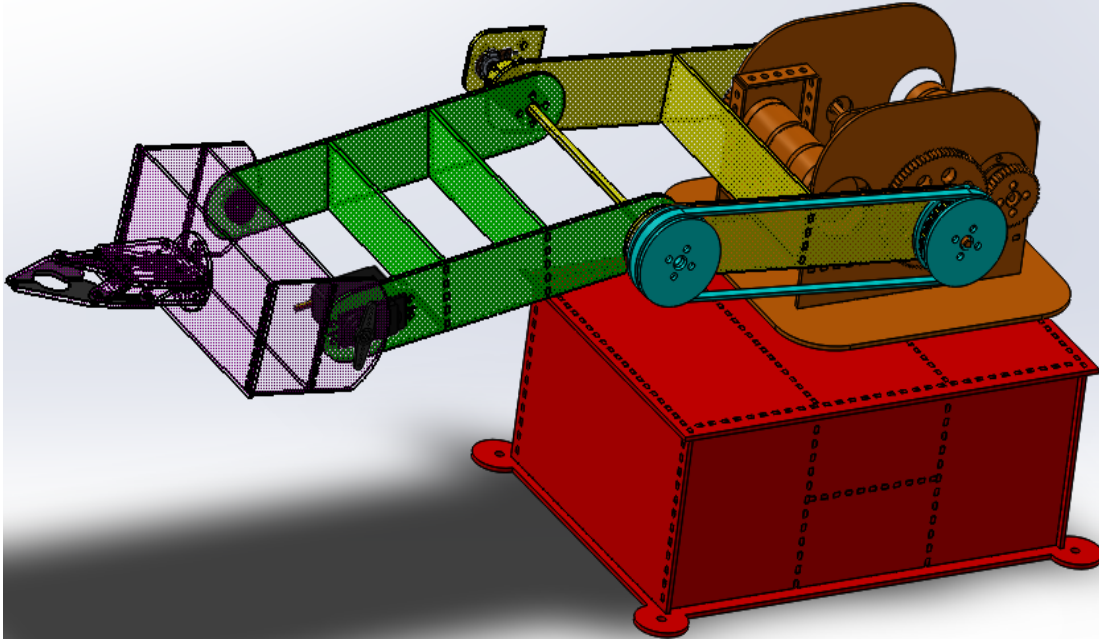
- [3]. رولمانات دورانية ball bearings لتخفيف الاحتكاكات بين المحاور والوصلات.

- [4]. 3 محركات DC اثنان من نوع Matrix-am NeveRest Orbital 20 Gearmotor 14-0011 ومحرك

HS- TETRIX MAX TorqueNADO With 60:1 Gearbox (stock) ومحركين سيرفو الأول من نوع HS-

485HB Deluxe HD Ball Bearing Standard Servo

يكون الشكل النهائي للروبوت بعد تجميع جميع قطعه.
 باللون الأحمر القاعدة الثابتة والتي يتموضع عليها الوصلة الأولى، باللون البني المفصل الأول مع الوصلة الأولى، باللون الأصفر المفصل الثاني مع الوصلة الثانية باللون الأزرق الية نقل الحركة السير التوقيتية مع البكرة التوقيتية ليكون باللون الأخضر والأرجواني كل من الوصلتين الثالثة والرابعة على التوالي.



الشكل 5 الروبوت بعد أن تم تجميعه على SolidWorks

3-1-2: تصميم علبة السرعة لكل مفصل

تم تصميم علبة سرعة مناسبة لكل مفصل لكي تستطيع المشغلات الوصول للعزم المحتاج بسرعة منخفضة وبدون الحاجة لاستهلاك عزم كبير من المحرك مع تحقيق العزم الأعظمي المحتاج للتغلب على قوى كوريوليس والجاذبية، تم استخدام مسننات مصنعة مسبقا مناسبة للعزم المطلوبة كما تمت دراسة آلية تعشيقها بعد حساب الموديول لكل مسنن والقطر الخطوي (قطر التعشيق) وفق الطريقة التالية:

$$OD = PCD + 2M \dots (1)$$

$$PCD = MT \text{ حيث أن:}$$

$$OD = MT + 2M$$

$$OD = M(T + 2) \Rightarrow M = \frac{OD}{T + 2}$$

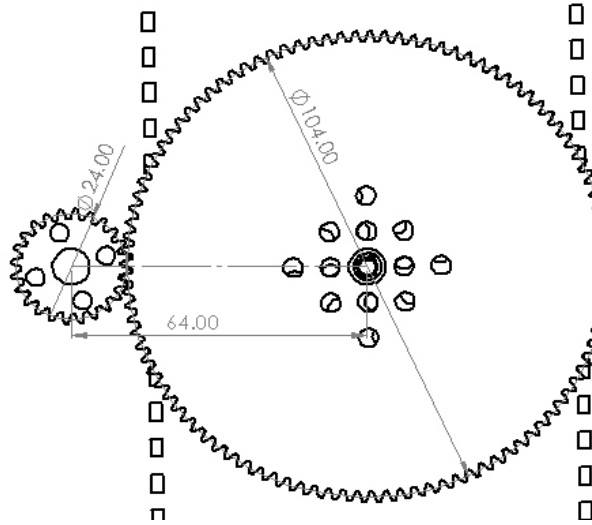
فيمكن حساب نصف قطر التعشيق حسب القانون التالي: $PCD = M \times T \dots (2)$

حيث أن:

- Outside diameter (OD) (القطر الخارجي للمسنن).
- Pitch Circle Diameter (PCD) (قطر الخطوي) (قطر التعشيق).
- Module (M) رقم الموديول.
- number of teeth (T) عدد الأسنان لكل مسنن.

تم تعشيق مسنن قائد مشدود على محور محرك القاعدة عدد أسنانه 24 مع مسنن مقاد عدد أسنانه 104 بحيث يحقق نسبة نقل 13/3 وهي قيمة مناسبة رغم أن عزم المحرك الأعظمي قادر تحريك القاعدة والتغلب على الكتل والعطالات ليصل للتسارع المطلوب ولكن تم اختيار نسبة النقل لتخفيض التيار الأعظمي المار بدارة القيادة علما أن التيار الأعظمي للمحرك يصل ل 8Ampere والتيار الأعظمي المسموح بمروره بدارة القيادة المستخدمة L298 هو 2Ampere، فيكون الموديول للمسننين حسب العلاقة (1) $1mm$ ويكون نصف قطر التعشيق الأول للمسنن القائد من العلاقة (2) $24mm$ وللمسنن المقاد $104mm$ ومنه قطر التعشيق $64mm = \frac{104+24}{2}$.

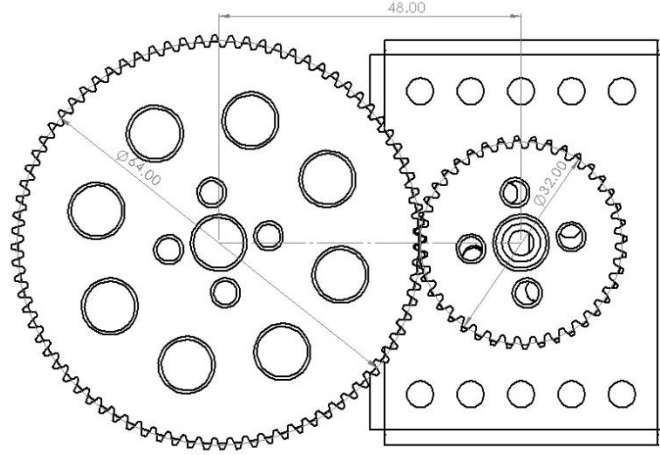
يوضح الشكل التالي طريقة تعشيق المسننات باستخدام برنامج SoildWorks:



الشكل 6 تعشيق مسننات المفصل الأول

تم تعشيق مسنن قائد مشدود على محور المحرك الذي يقوم بتحريك الوصلة الأولى عدد أسنانه 40 مع مسنن مقاد عدد أسنانه 80 بنسبة نقل تصل ل 2 من عزم المحرك الأعظمي فيكون الموديول للمسننين المستخدمين حسب العلاقة (1) $0.8mm$ وقطر التعشيق للمسنن القائد انطلاقا من القانون رقم (2) $32mm$ ويكون نصف

قطر التعشيق للمسنن المقاد 64mm وقطر التعشيق الكلي $\frac{32+64}{2} = 48mm$ وكذلك الأمر بالنسبة للمحرك الثالث الذي سيحرك الوصلة الثالثة مع ذات النسبة النقل لنفس المسننات بقطر التعشيق ذاته. يوضح الشكل التالي طريقة تعشيق المسننات باستخدام برنامج SoildWorks:



الشكل 7 تعشيق مسننات المفصل الثاني والثالث

في معظم الأحيان تكون كتل وعطالات المحركات كبيرة نسبياً مقارنة بالوصلات لذلك لا يفضل وضعها على المفاصل تماماً بل من الأفضل تموضعها على القاعدة ونقل الحركة للمفصل المرغوب تحريكه باستخدام أحد آليات نقل الحركة تم اختيار آلية الحركة بالسيور التوقيتية مع بكرات توقيتية مناسبة (Timing Belt with timing pulleys) نظراً لجودتها من ناحية أنها تمتلك حد أدنى من الضوضاء واهتزازتها قليلة حركتها دقيقة لا يوجد انزلاق مع كفاءة ميكانيكية عالية تصل ل 98%^[4]، تم استخدام سير من نوع 202XL مصنّع مسبقاً بطول كامل يبلغ 513.08 mm وعليه تم تصميم البكرات التوقيتية حسب التوصيات المقترحة^[5] ليكون قطرها الخارجي 46.98 mm فيمكن حساب طول البعد الأعظمي المسموح من مركز البكرة الأولى للثانية انطلاقاً من القانون التالي:

$$L = \frac{L_{total} - C}{2} \dots (3)$$

حيث أن:

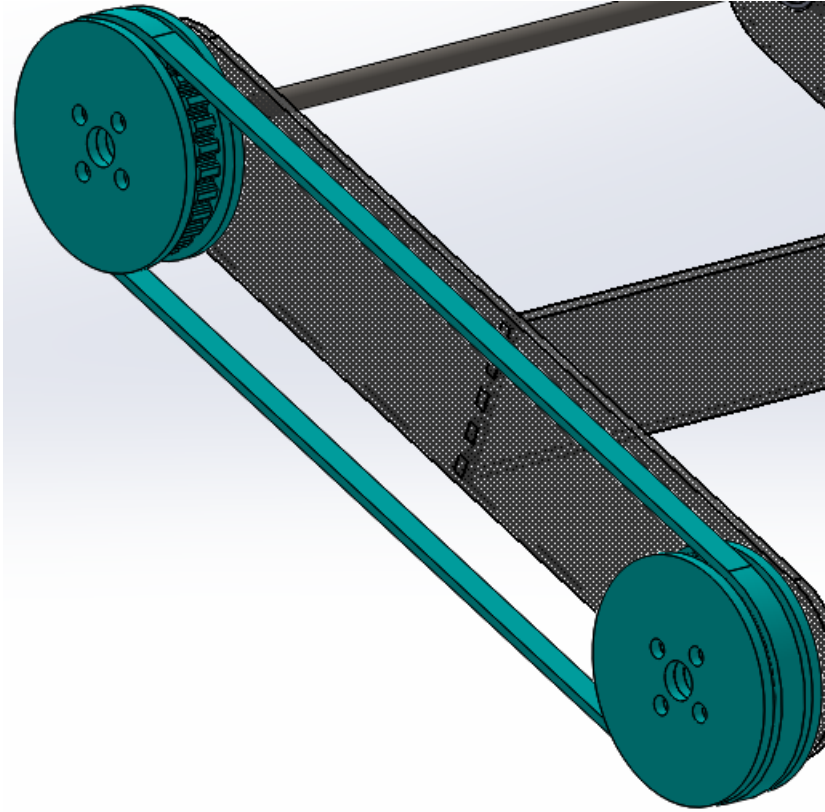
- (L) البعد بين مركزي البكرة

- محيط بكرة من البكرات (C)
- طول السير التوقيتي (L_{total})

ومنه يمكن حساب البعد بالشكل التالي مع تسامح $\pm 0.7mm$:

$$L = \frac{513.08 \times 2\pi \times 23.49}{2} = 182.7mm$$

فيكون الشكل النهائي للسير التوقيتي بعد تعشيقه مع البكرات:



الشكل 8 آلية نقل الحركة (السير التوقيتي مع البكرة التوقيتية)

3-2: الدراسة الديناميكية

3-2-1: ديناميك الجسم الصلب

تم توصيف ديناميك المنظومة باستخدام طريقة Lagrange [6] الموصوفة بالمعادلة التالية:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \dots (4)$$

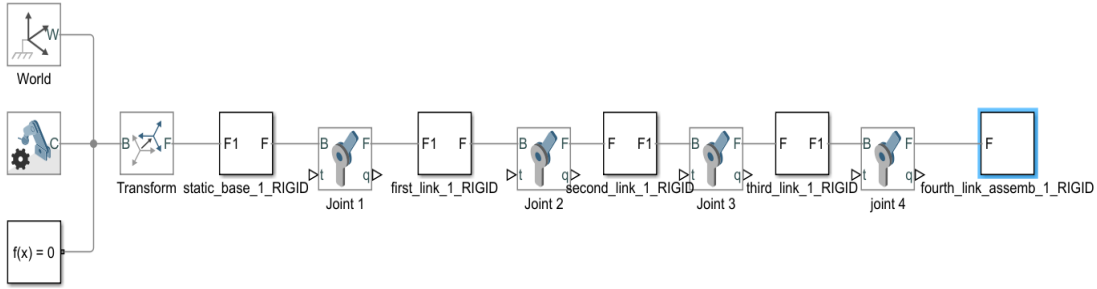
في المرحلة الأولى وفق برنامج تمت كتابته على بيئة MATLAB وكانت المشكلة الأساسية هي تجميع حدود معادلات العزوم للحصول على مصفوفات الكتلة والعتالة ومصفوفة كوريوليس وشعاع الجاذبية لكل مفصل بحيث تكون المصفوفات منفصلة عن بعضها.

حيث أن:

- M : مصفوفة العتلات والكتل المتناظرة المتعلقة بحد التسارع $\ddot{\theta}$.
- C : مصفوفة التسارع المضاف (قوى كوريوليس) مضمن بها القوى النابذة المركزية المتعلقة بحد الموضع الزاوي θ والسرعة الزاوية $\dot{\theta}$.
- G : شعاع الحدود الناتجة عن اشتقاق الطاقة الكامنة E_p المتعلق بالموضع الزاوي θ (حد الجاذبية).
- τ : عزم المحرك.

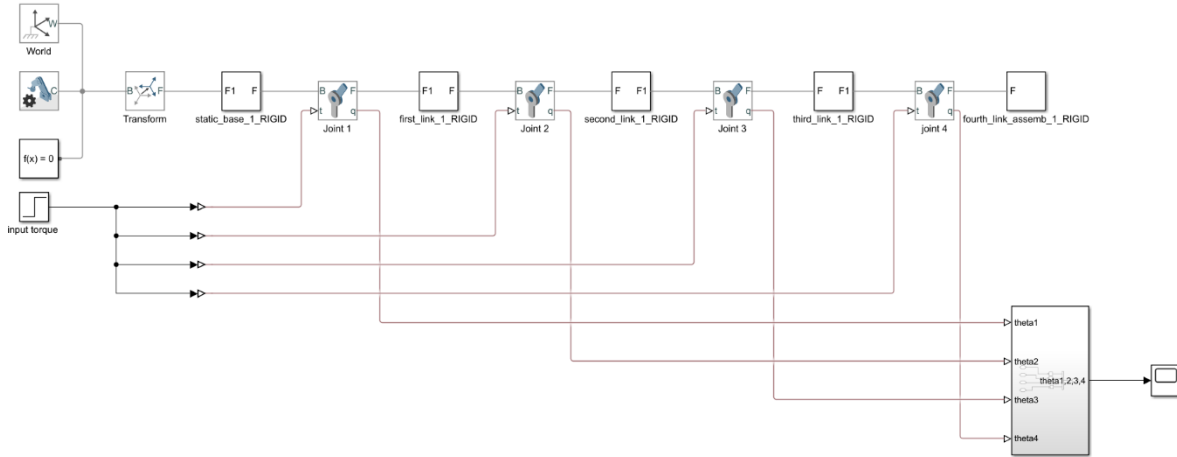
وعليه تم تطوير طريقة أخرى للحصول على المصفوفات مستقلة عن بعضها باستخدام MATLAB/Simulink باستخدام مكتبة Robotic system toolbox والتي يمثل كل عنصر مستخدم بها أحد حدود Lagrange لتوصيف معادلات الديناميك ليتم بعدها توصيف استجابة المنظومة تحت العزوم المستخرجة بتمثيل الروبوت على بيئة Simulink/Simscape.

تم توصيف الروبوت المصمم على بيئة Simscape حيث تم في البداية رسم الروبوت باستخدام Solidworks وتم تعيين أطواله بناءً على منطقة عمل مفترضة ثم تعريف محاور دورانه وانتقاله اعتماداً على Denavit Hartenberg^[7] التي تم انشائها في المرحلة الأولى من المشروع ثم تم تجميع قطع الروبوت على بيئة Assembly ثم تم نقلها إلى بيئة MATLAB وعليه يصبح نموذج الروبوت ضمن بيئة Simulink/Simscape بالشكل التالي:



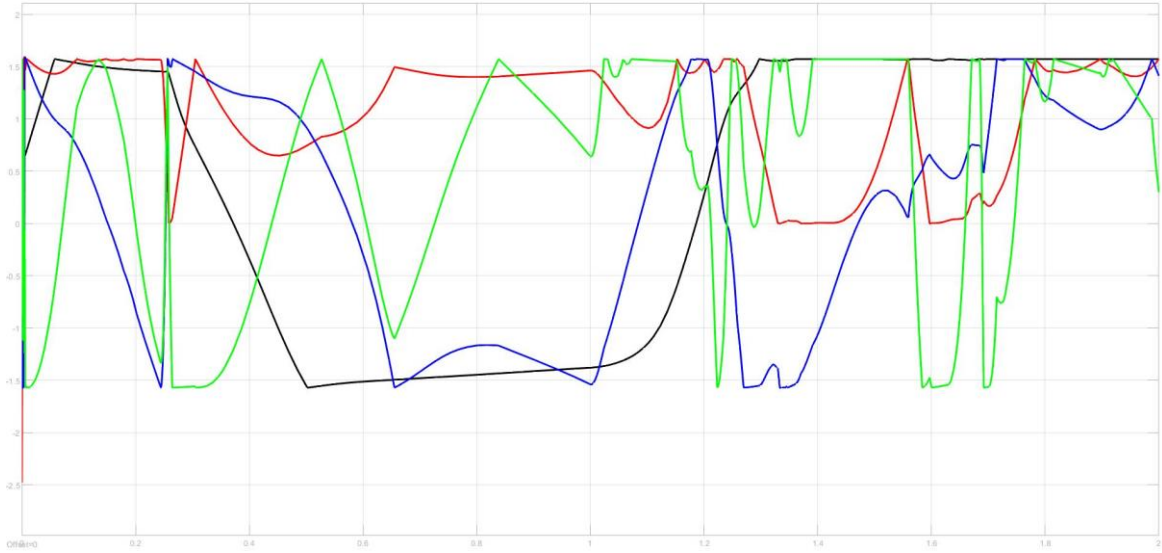
الشكل 9 نموذج الروبوت على بيئة Simulink

حيث يتم توصيل كل Block يمثل link من الموجودين في المخطط التالي مع الذي يليه بواسطة Block يمثل مفصل من مفاصل الروبوت (Joint_{1,2,3,4}) Revolute يتم تحديد دخل عزم لكل مفصل وخرج موضع زاوي (q).



الشكل 10 نموذج الروبوت تحت تأثير دخل خطوي

يبين الشكل 10 تطبيق دخل خطوي واحد على كل مفصل من مفاصل الروبوت وقياس الازاحة الزاوية لكل مفصل، وتبين الخطوط البيانية في الشكل 11 استجابة الازاحة الزاوية بدلالة الزمن لكل المفاصل على حدى للدخل الخطوي الواحد المطبق على شكل عزم دوراني حول كل مفصل، يتضح من معاينة الاستجابة ان المنظومة غير مستقرة وتبدي استجابة لاختطية وبالتالي يكون من الصعب تطويع استجابة المنظومة بمعايير مرغوبة (زمن استقرار T_s ، خطأ حالة مستقرة...) بدون استعمال نظام تحكم بحلقة مغلقة.



الشكل 11 الاستجابة الخطوية الواحدية للإزاحة الزاوية بدلالة الزمن

3-2-2. تحويل النموذج إلى خطي

كما ذكر سابقا من غير الممكن التحكم باستجابة المنظومة بدون استخدام نظام تحكم بحلقة مغلقة ولتتم معايرة المتحكم بشكل صحيح ودقيق للحصول على الاستجابة المرغوبة يجب تكوين نموذج خطي للنظام الديناميكي ومن ثم تصميم المتحكم على أساس ذلك النموذج، ان لاختية النظام تأتي بشكل مباشر من معادلات الحركة:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \dots (4)$$

حيث ان تبعية المصفوفات M, C, G لـ θ تعطي جداءات بين المشتقات المختلفة للتابع $\theta(t)$ وتجعل المعادلات التي تصف الحركة لاختية وبالتالي، من أجل التغلب على اللاختية المعقدة للنظام، يجب أولاً إقصاء متجه قوى كوريوليس وقوى النابذة المركزية جنباً إلى جنب مع متجه قوى الجاذبية، ويتم ذلك باستخدام التغذية الأمامية بمكافئة القوى السابقة بعزم الدوران يقوم المتحكم بحسابه لحظياً $\tau_d(t)$:

$$\tau_d(\dot{\theta}, \theta, t) = C(\dot{\theta}, \theta) + G(\theta) + U(t) \dots (5)$$

حيث ان $U(t)$ هو عزم الدخل مضاف لعزم التغذية الأمامية وعليه تصبح معادلة الحركة للمتلاعب التسلسلي بتعويض (5) ب (4):

$$\begin{aligned} \tau &= M(\theta)\ddot{\theta} + C(\dot{\theta}, \theta) + G(\theta) \\ \tau_d &= M(\theta)\ddot{\theta} + C(\dot{\theta}, \theta) + G(\theta) \end{aligned}$$

$$C(\dot{\theta}, \theta) + G(\theta) + U(t) = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\dot{\theta}, \theta) + G(\theta)$$

$$U(t) = M(\theta)\ddot{\theta} \dots (6) \text{ باختزال المعادلة تصبح:}$$

$$U(t) = M(\theta)u(t) \dots (7)$$

$$M(\theta)u(t) = M(\theta)\ddot{\theta} \dots (8)$$

$$u(t) = \ddot{\theta} \dots (9)$$

ومنه يكون التسارع الزاوي لكل مفصل في الروبوت مساويا للدخل $u(t)$.

3-3: نموذج التحكم بحلقة مغلقة باستخدام Pole Placement:

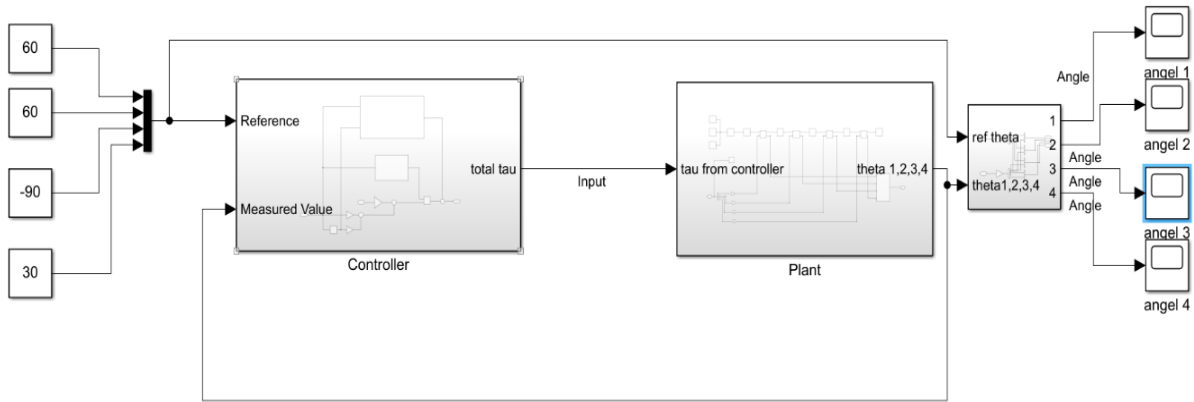
يمكن الاستعانة بتقنيات "تموضع الأقطاب" (Pole Placement)^[7] والتي تستند على نقل أقطاب المنظومة الى المواضع المرغوبة من أجل تحقيق متطلبات التحكم للحالة العابرة المنظومة (مثلا: قيم مطلوبة لزمن الاستقرار t_s ، وتجاوز الحالة المستقرة M_p)، وأيضا تصحيح خطأ الحالة العابرة وذلك كله من خلال الاختيار الملائم لقيم الكسب (gain values) على مسار الرجعة (من أجل تحسين الحالة العابرة) وعلى المسار الأمامي (من أجل تصحيح خطأ الحالة المستقرة)، العلاقة التالية توضح استخدام تقنية تموضع الأقطاب من أجل تحسين دقة التموضع بجعل الدخل $u(t)$ مساوي للدخل الناجم عن نظام تحكم بالحلقة المغلقة وباستخدام طريقة Pole Placement في معايرة المتحكم يكون الدخل:

$$u(t) = RK_r - (K_1\theta + K_2\dot{\theta}) \dots (10)$$

حيث أن:

- K_1, K_2 تمثل قيم الكسب على مسار الرجعة.
- K_r ثابت كسب مضروب بالمرجع يمثل مقلوب خطأ الحالة المستقرة.
- R المرجع (Set point).
- $u(t)$ شعاع التحكم.

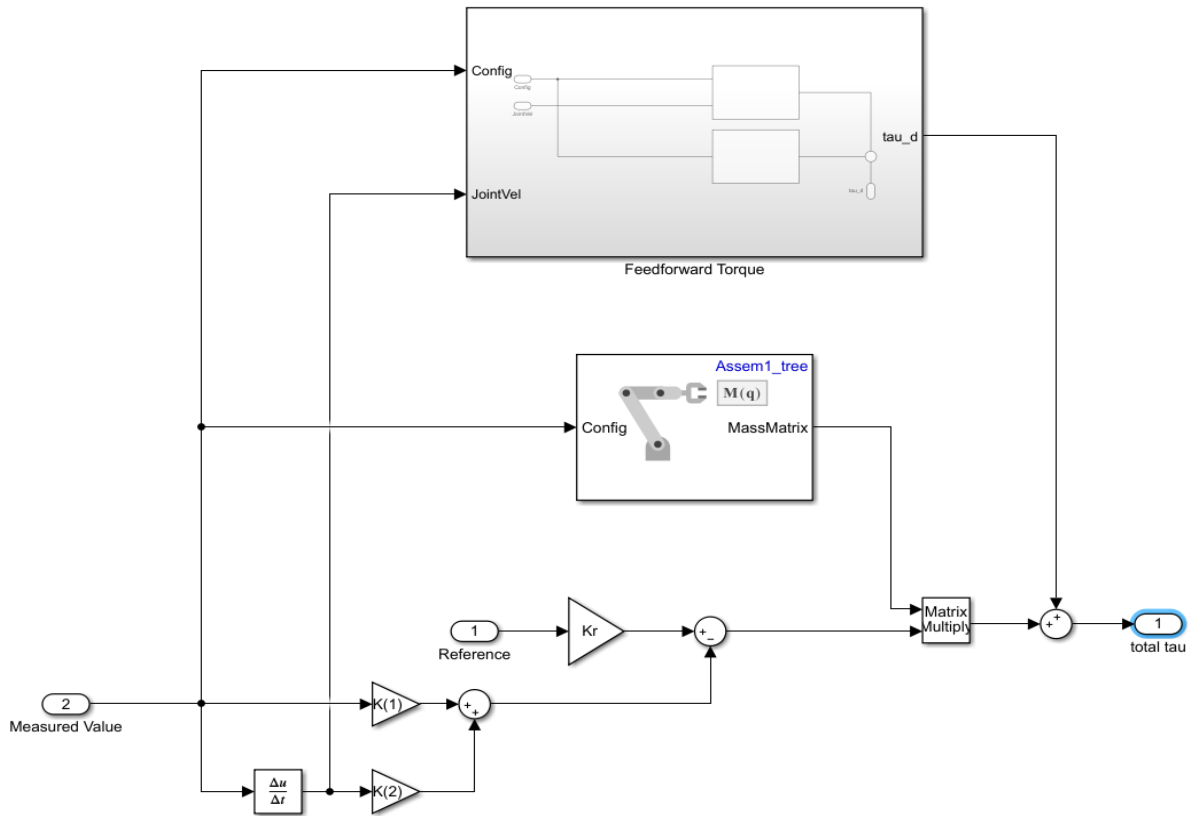
ويمكن تمثيل مخطط التحكم باستخدام MATLAB/Simulink بحلقة مغلقة مع التحكم بالتغذية الأمامية لتحقيق التحكم وفق الشكل التالي:



الشكل 12 نموذج التحكم المستخدم

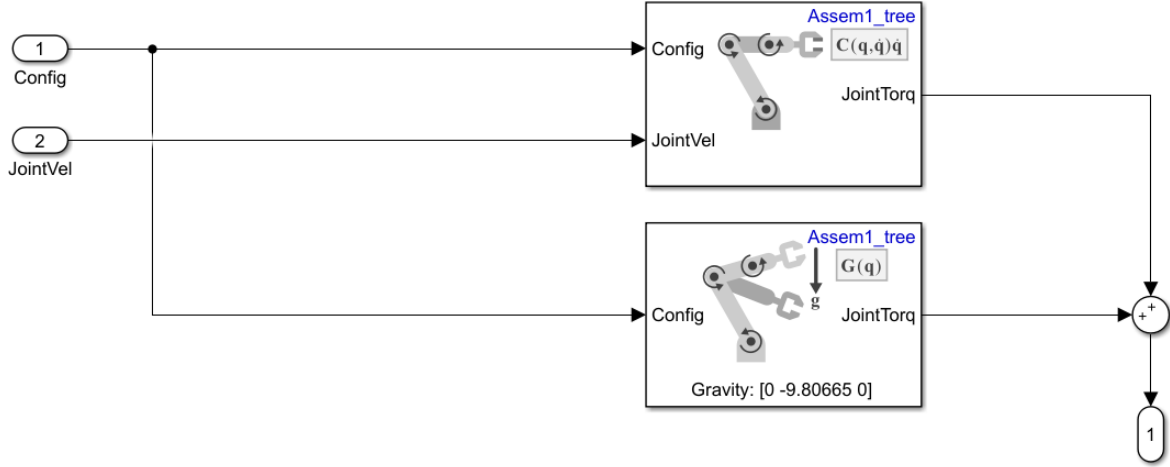
يوضح الشكل 12 نموذج التحكم بالحلقة المغلقة، يمكن توضيح تفاصيل عمل نظام التحكم عن طريق معاينة

الشكل 13.



الشكل 13 نموذج التحكم بملققة مع نموذج العزم المضاف من التغذية الأمامية

يتم قياس الخرج (إزاحة زاوية) وارجاعه الى المتحكم حيث يتم ضربه بثابت K_1 واشتقاقه وضربه بثابت اخر K_2 ومن ثم طرح النتيجة من القيمة المرجعية المضروبة بثابت K ، تحدد استجابة المنظومة عن طريق الاختيار الصحيح للثوابت المذكورة، وضرب النتيجة الكلية بمصفوفة الكتل وعزوم العطالة ومن ثم إضافة العزم τ_d الموضح في الشكل 14 إليها، فتكون النتيجة هي العزم اللازم إدخاله الى النظام عن طريق المشغلات المستخدمة.



الشكل 14 نمذجة العزم المضاف τ_d

3-3-2. دراسة تأثير نظام تحكم بحلقة مغلقة للوصول إلى زاوية مرجعية

تم تصميم المتحكم ليكون أسرع ما يمكن بدون تجاوز للقيمة المستقرة أي يجب أن تكون الاستجابة critically damped أي يجب أن تكون نسبة التخماد $\zeta = 1$ أي أنه ما يهم في هذه الاستجابة هو زمن الاستقرار فقط Settling Time وعلى أساسه يتم حساب الأقطاب $\lambda_{1,2}$ المرغوبة التي يجب أن تكون حقيقية متساوية.

يعطى الحل العام لمنظومة مرتبة ثانية على الصورة التالية^[8]:

$$y(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 t e^{\lambda_2 t} \dots (11)$$

حيث أن: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ وعليه تصبح المعادلة من الشكل $y(t) = e^{\lambda t}(c_1 + c_2 t)$

من أجل دخل خطوي واحد Unit-step response تصبح العلاقة:

$$y(t) = 1 + e^{\lambda t}(c_1 + c_2 t)$$

$$\dot{y}(t) = \lambda e^{\lambda t}(c_2 t + c_1) + c_2 e^{\lambda t}$$

بفرض أن الشروط الابتدائية معدومة: $y(t) = 0, t = 0, \dot{y}(t) = 0$

ومنه تكون قيمة $c_1 = -1, c_2 = \lambda$

ومن العلاقة يمكن حساب زمن الاستقرار t_s عند $\pm 0.02\%$ من المرجع.

$$0.98 = 1 + e^{\lambda t_s}(-1 + \lambda t_s)$$

فتصبح العلاقة التي تعبر عن زمن الاستقرار t_s بدلالة الأقطاب $\lambda_{1,2}$ لمنظومات Critically damped:

$$-e^{\lambda t_s}(-1 + \lambda t_s) = 0.02 \dots (13)$$

لا يمكن حل العلاقة الجبرية السابقة (13) بالطرق التحليلية المعروفة لذلك نلجئ للطرق العددية^[9]

وعليه نحصل على العلاقة التالية التي تمثل خط مستقيم:

$$\lambda t_s \simeq 5.834 \dots (14)$$

$$\lambda \simeq \frac{5.834}{t_s} \text{ ومنه:}$$

وعليه عند زمن استقرار مفروض مقداره $t_s = 5 \text{ second}$

يكون القطب المكرر المرغوب الذي يحقق زمن الاستقرار المطلوب هو: $\lambda = -1.167$

وعليه تكون المعادلة المساعدة characteristic equation المرغوبة:

$$(\lambda + 1.167)^2 = 0 \Rightarrow \lambda^2 + 2.3335\lambda + 1.3613 = 0 \dots (15)$$

بتعويض المعادلة (9) (10) تصبح المعادلة بالشكل التالي:

$$\ddot{\theta} = RK_r - (K_1\theta + K_2\dot{\theta}) \dots (16)$$

وباعتبار أن: $\theta = e^{\lambda t}$ ، ونريد إيجاد المعادلة المساعدة للمنظومة أي عند الحل العام أي عندما الدخل يكون

مساوي للصفر أي $R = 0$:

$$\lambda^2 e^{\lambda t} + K_1 e^{\lambda t} + K_2 \lambda e^{\lambda t} = 0$$

$$(\lambda^2 + K_2 \lambda + K_1) e^{\lambda t} = 0$$

وبما أنه لا يمكن أن يكون $e^{\lambda t} = 0$ يكون (17) $(\lambda^2 + K_2 \lambda + K_1) = 0 \dots$

وبمساواة العلاقتين (15) مع (17):

$$\lambda^2 + 2.3335\lambda + 1.3613 = \lambda^2 e^{\lambda t} + K_2 \lambda e^{\lambda t} + K_1 e^{\lambda t}$$

$$\lambda^2 + 2.3335\lambda + 1.3613 = (\lambda^2 + K_2 \lambda + K_1)$$

وتكون قيمة قيم الكسب على التغذية الراجعة التي تحقق زمن الاستقرار المطلوب:

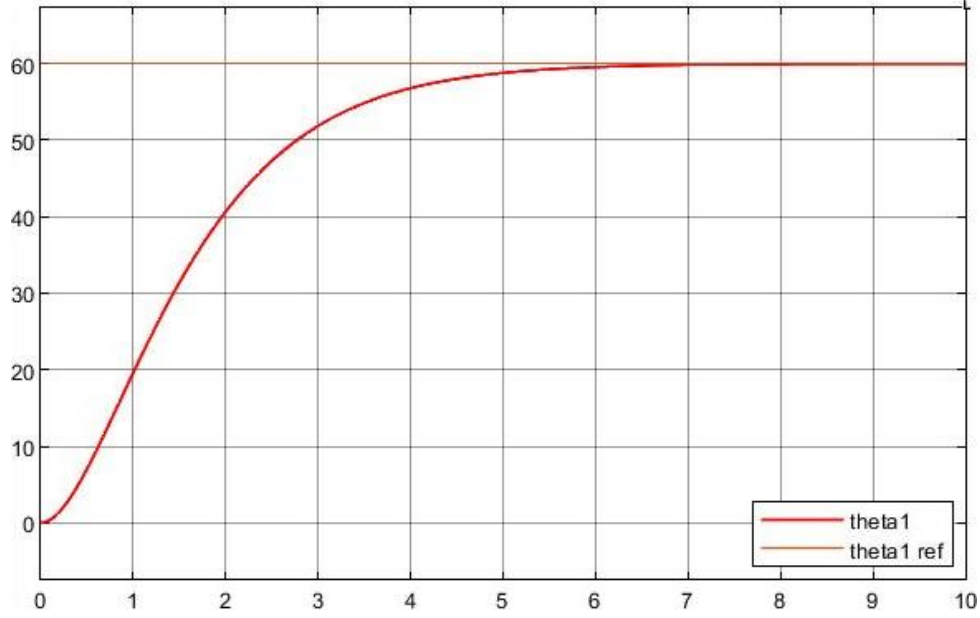
$$K_1 = 1.3638, K_2 = 2.3356$$

وتكون قيمة ثابت الكسب الذي يلغي خطأ الحالة المستقرة Steady state const

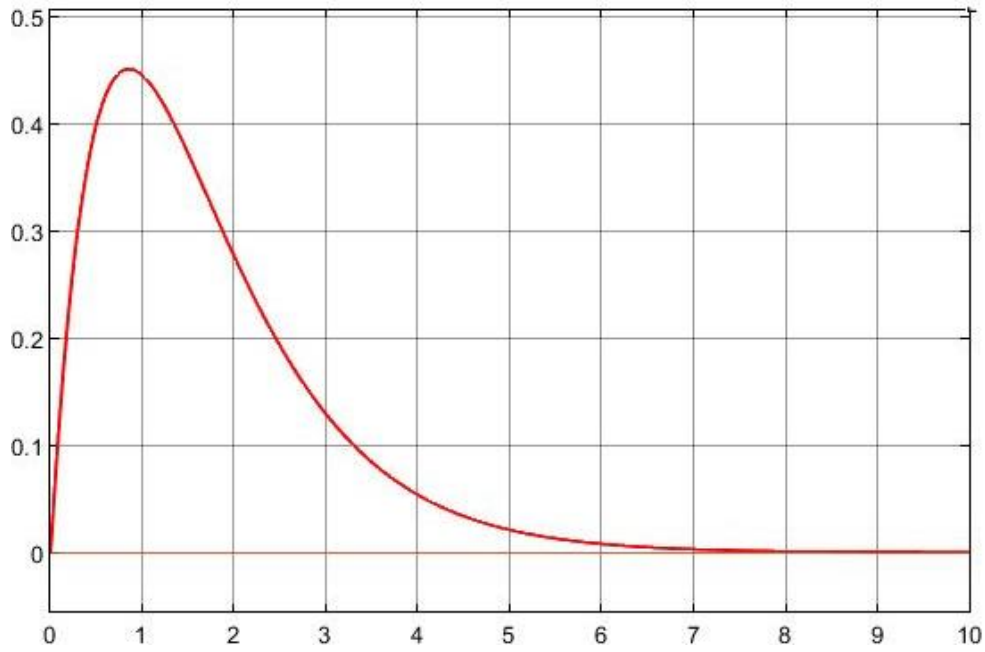
$$K_r = \frac{1}{\text{steady state const}} = \frac{1}{0.7333} = 1.3638$$

وعليه تكون استجابة المنظومة عند قيمة الزوايا التالية:

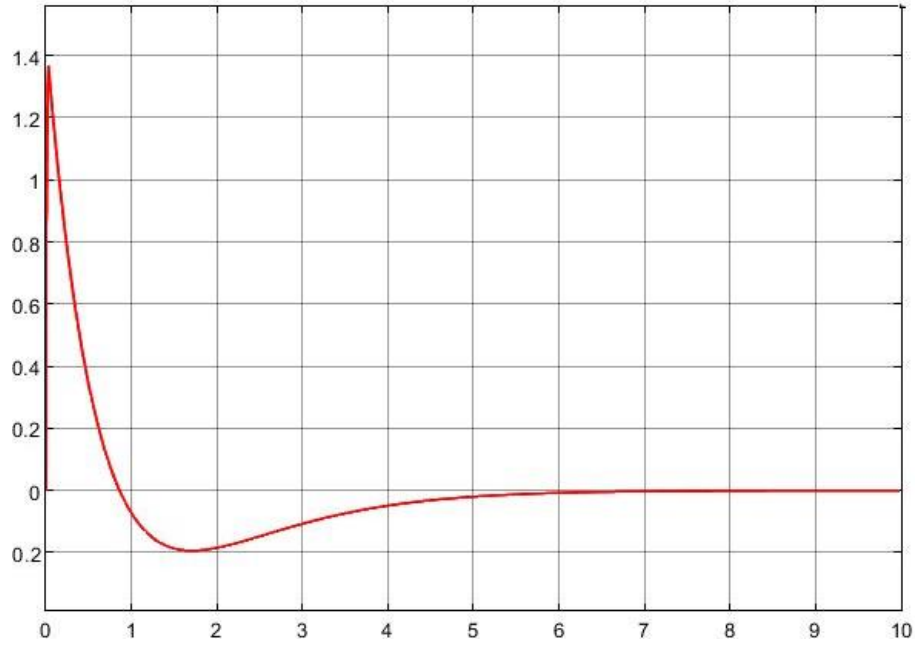
$$\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 60^\circ, \theta_3 = -90^\circ, \theta_4 = 30^\circ$$



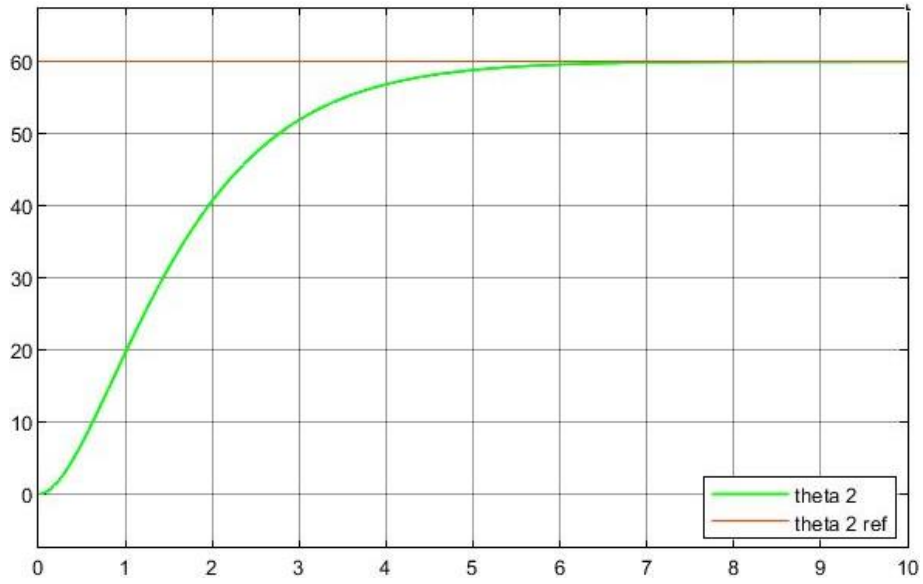
الشكل 15 الموضع الزاوي للمفصل الأول θ_1 بالنسبة الزمن



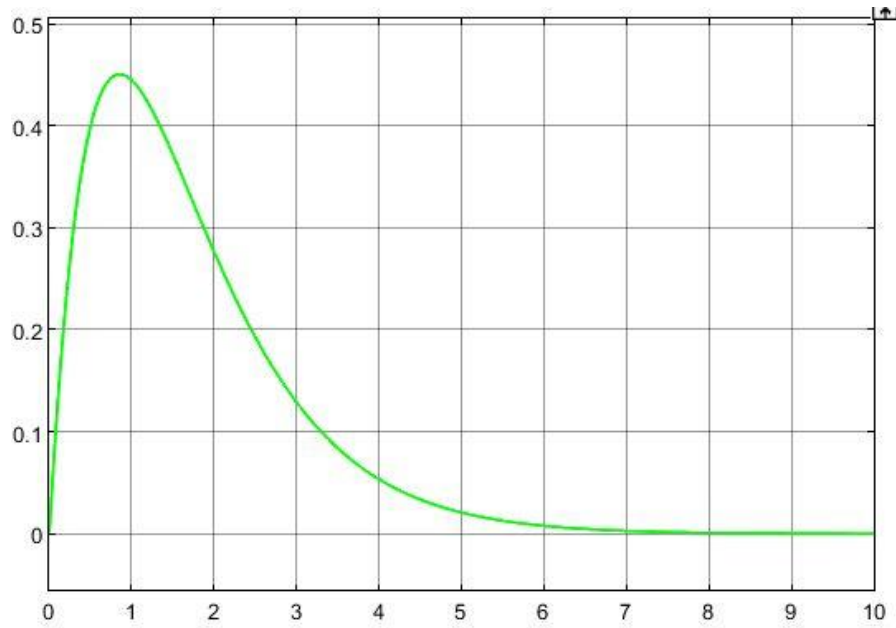
الشكل 16 السرعة الزاوية للمفصل الأول ω_1 مقطرة بال $\frac{rad}{s}$ بالنسبة للزمن



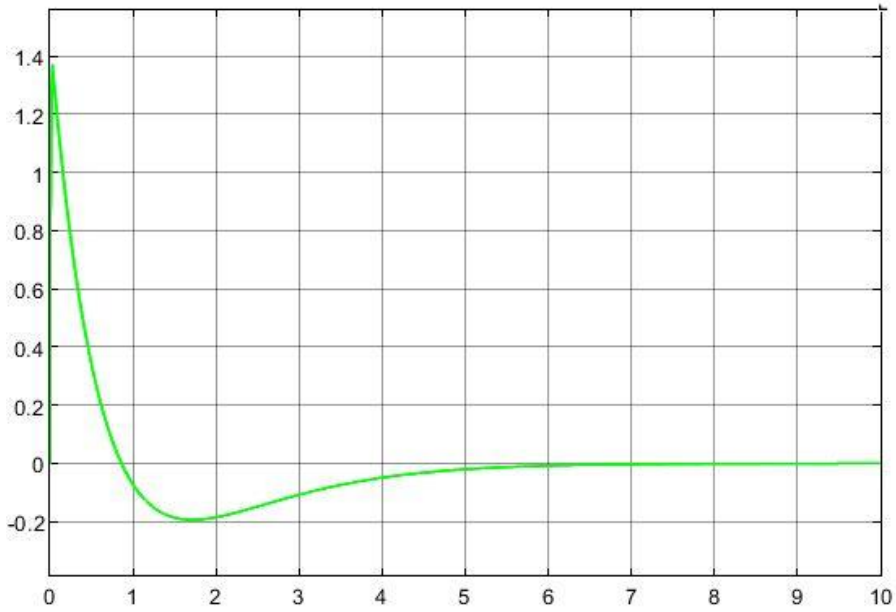
الشكل 17 التسارع الزاوي للمفصل الأول α_1 مقدرة بال $\frac{rad}{s^2}$ بالنسبة للزمن



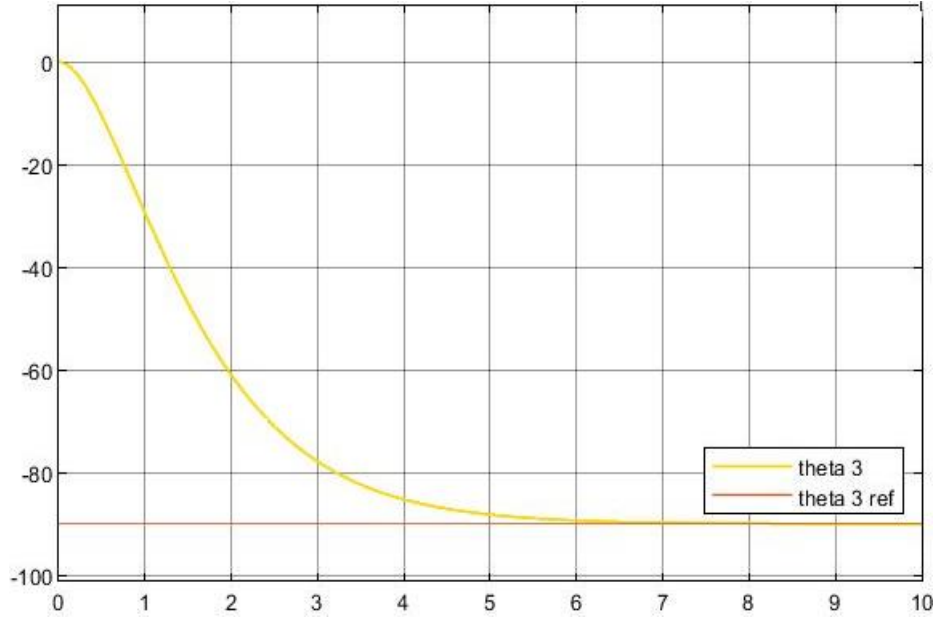
الشكل 18 الموضع الزاوي للمفصل الثاني θ_2 بالنسبة للزمن



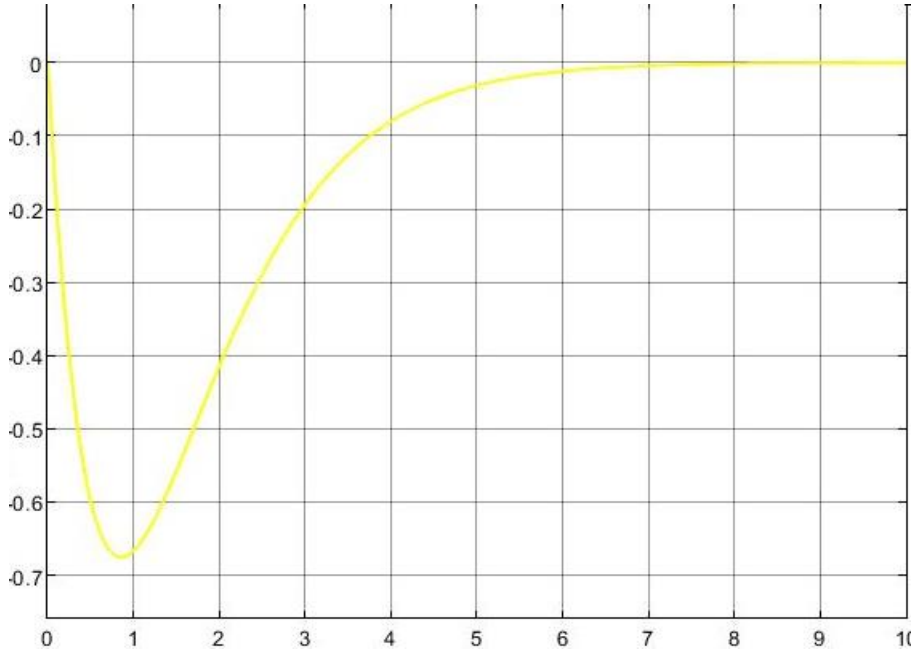
الشكل 19 السرعة الزاوية للمفصل الثاني ω_2 مقدرة بال $\frac{rad}{s}$ بالنسبة للزمن



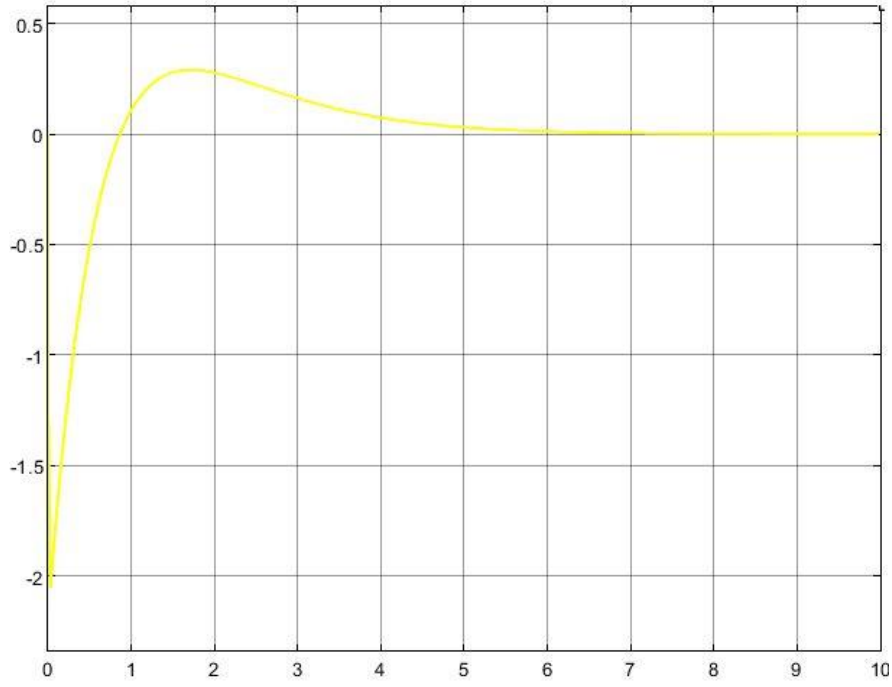
الشكل 20 التسارع الزاوي للمفصل الثاني α_2 مقدرة بال $\frac{rad}{s^2}$



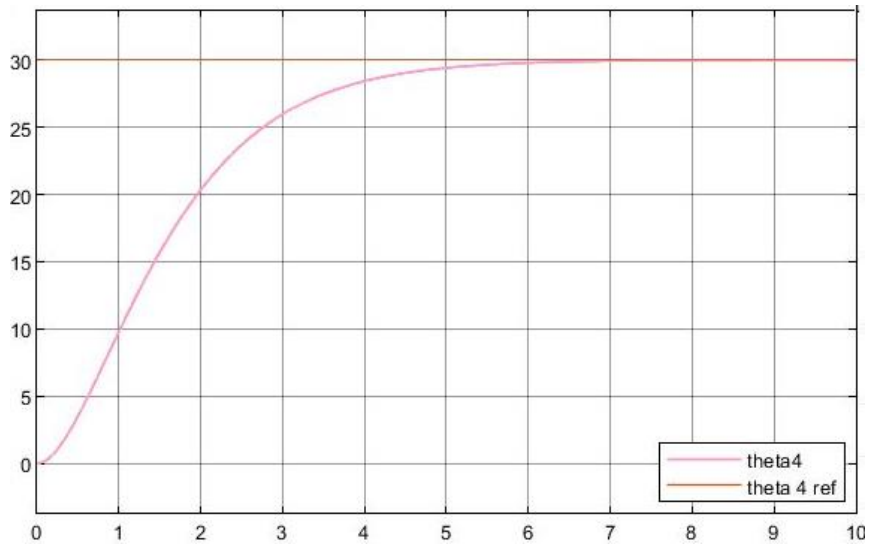
الشكل 21 الموضع الزاوي للمفصل الثالث θ_3 بالنسبة للزمن



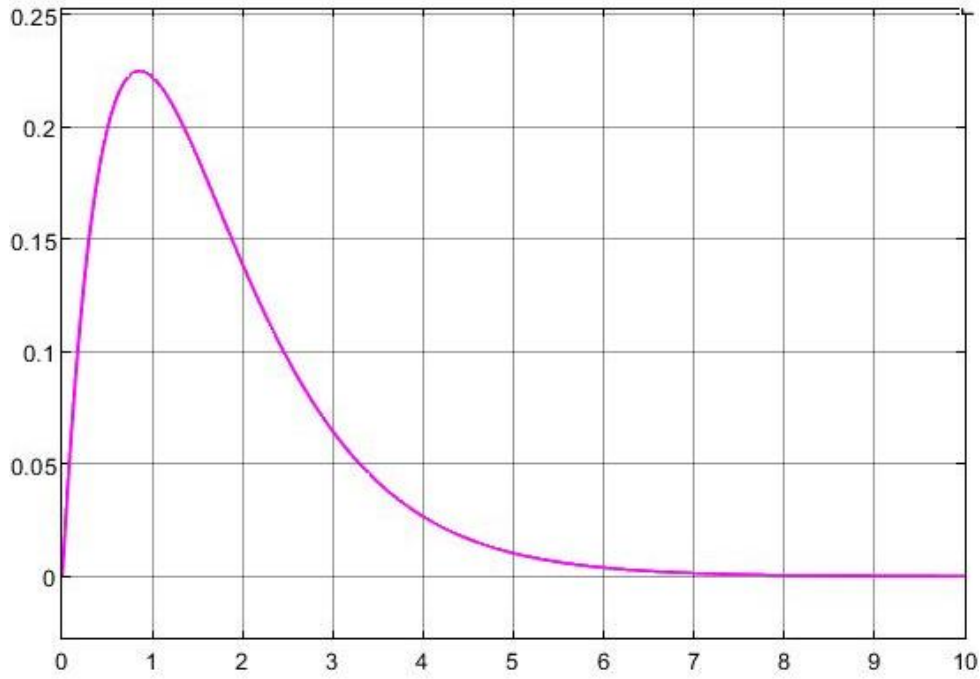
الشكل 22 السرعة الزاوية للمفصل الثالث ω_3 مقدرة بال $\frac{rad}{s}$ بالنسبة للزمن



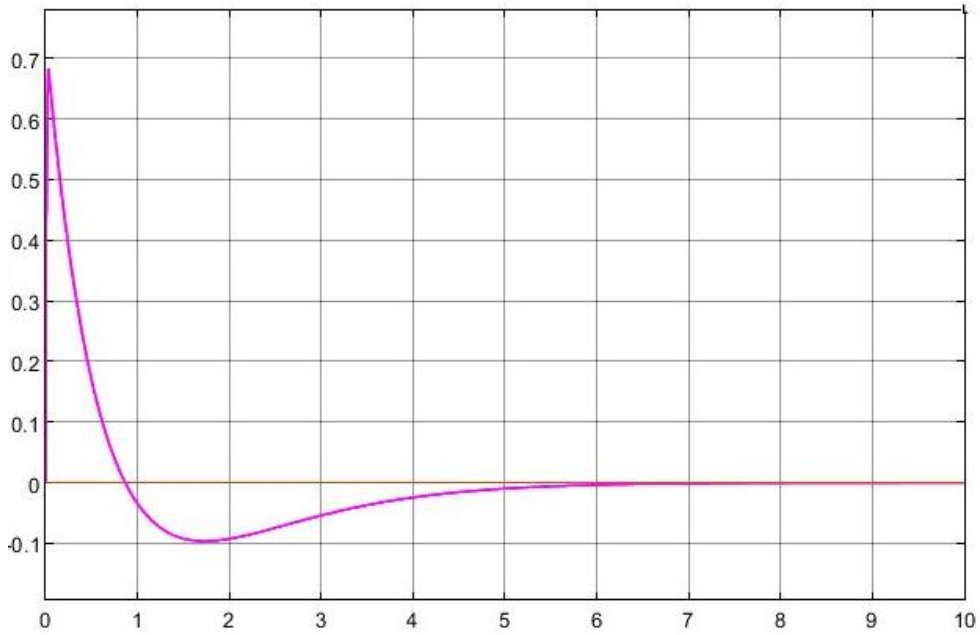
الشكل 23 التسارع الزاوي للمفصل الثالث ω_3 مقدر بال $\frac{rad}{s^2}$ بالنسبة الزمن



الشكل 24 الموضع الزاوي للمفصل الرابع θ_4 بالنسبة الزمن

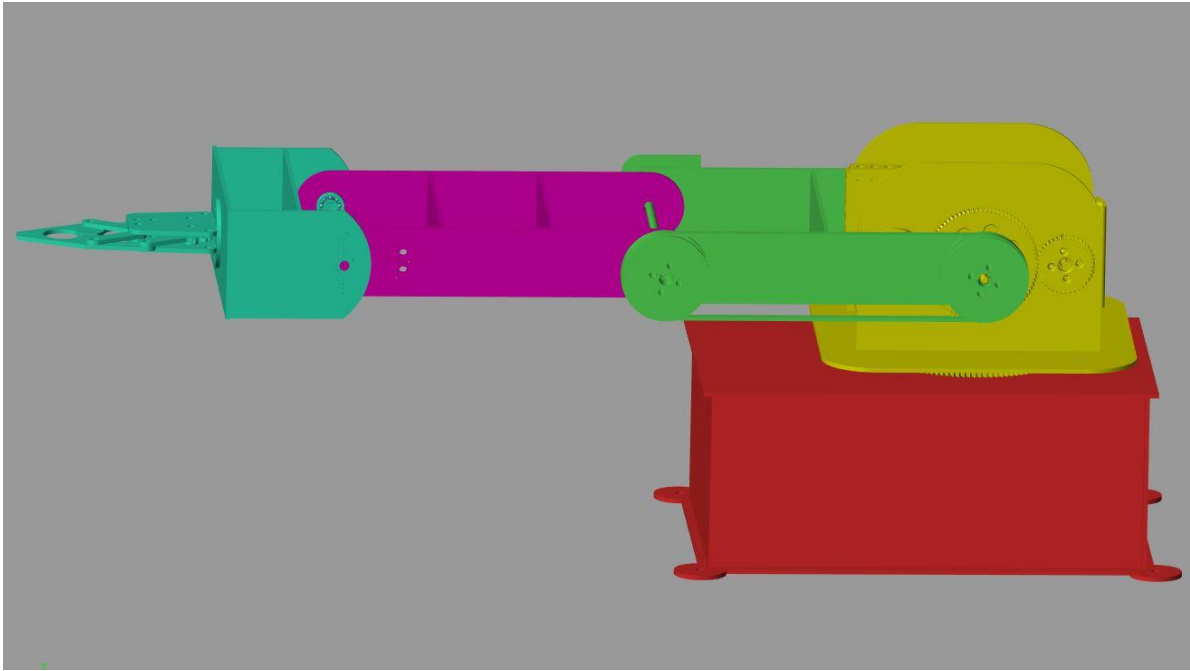


الشكل 25 سرعة الزاوية للمفصل الرابع ω_4 مقدرة بال $\frac{rad}{s}$ مع الزمن

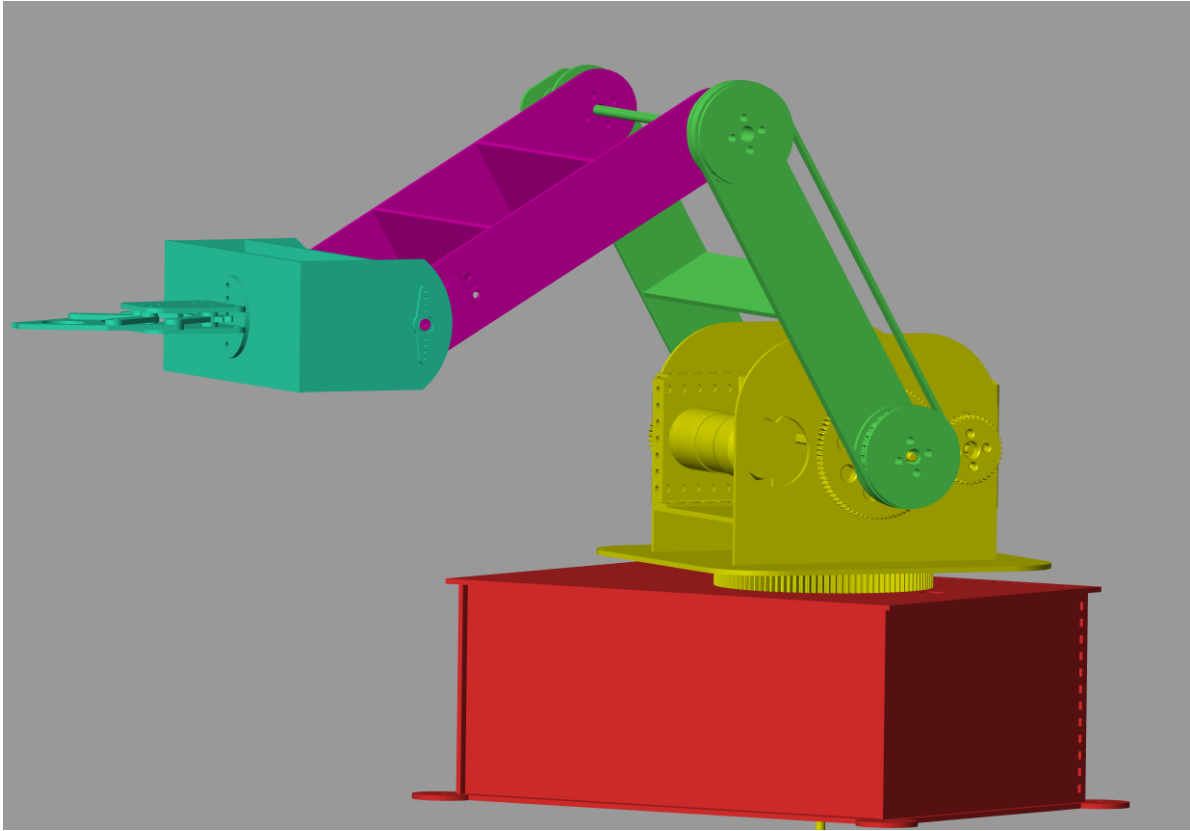


الشكل 26 تسارع الزاوية للمفصل الثالث α_4 مقدرة بال $\frac{rad}{s^2}$ مع الزمن

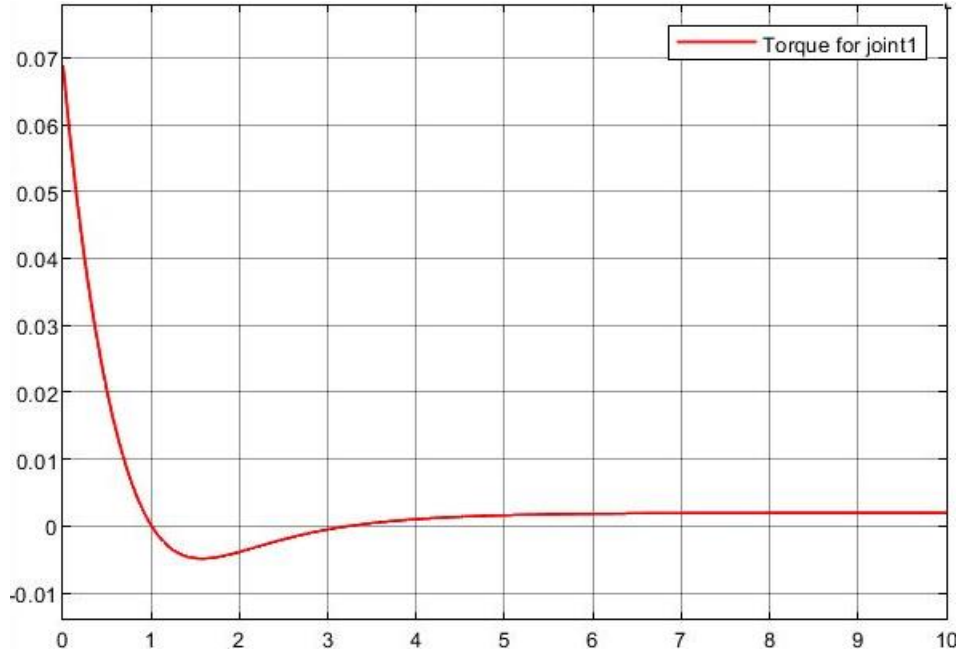
نلاحظ أن جميع المفاصل استجابت لمنظومة التحكم المختلطة ما بين طريقة Pole Placement و طريقة feed forward torque لجعل المنظومة خطية و أمكن تطويعها ضمن متطلب التحكم (زمن الاستقرار) $t_s = 5$ ووصلت إلى الحد المرجعي دون أي تجاوز للقيمة المستقرة وعليه يمكن استنتاج أنه لا يمكن التحكم بحلقة مغلقة دون معرفة ديناميك المنظومة وفهمه بشكل دقيق وتحديد كتل وعطالات ومراكز ثقل الجسم ثم تعويضها لمعرفة القوى المؤثرة على الجسم ومكافئتها بالعزوم المناسبة ثم الانتقال للتحكم بحلقة مغلقة الذي تبقى وظيفته الأساسية أن يوصل المنظومة إلى المرجع المطلوب ويضيف عزم مناسب للعزم المقدم من الديناميك ليقدم العزم المناسب حسب معايرة دقيقة وصحيحة للمتحكم للتغلب على القوى والمؤثرات التي لم يُستطع تضمينها في الموديل الرياضي ويصل الروبوت للموضع المطلوب.



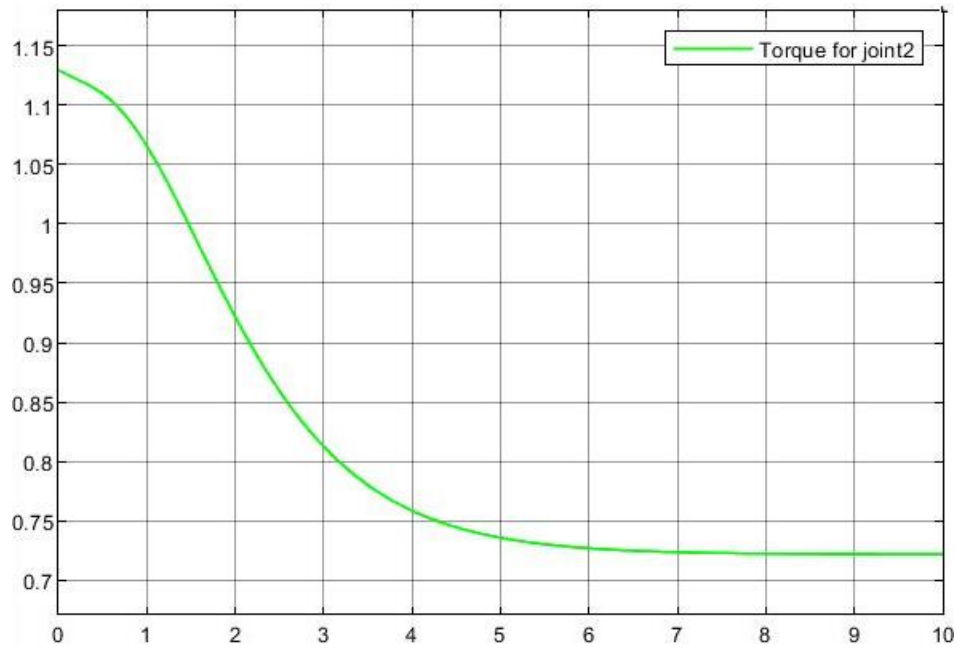
الشكل 27 الموضع الصفري للروبوت قبل تحركه بشكله على بيئة simscape



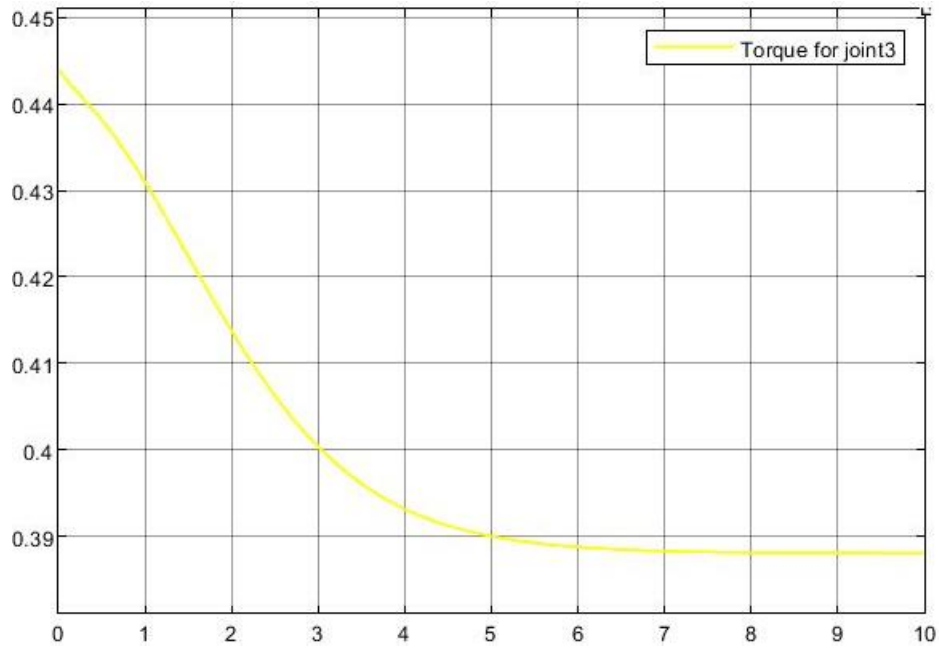
الشكل 28 الموضع النهائي للروبوت على بيئة Simscape بعد إزاحته بالزوايا المرجعية السابقة $\theta_{1,2,3,4}$



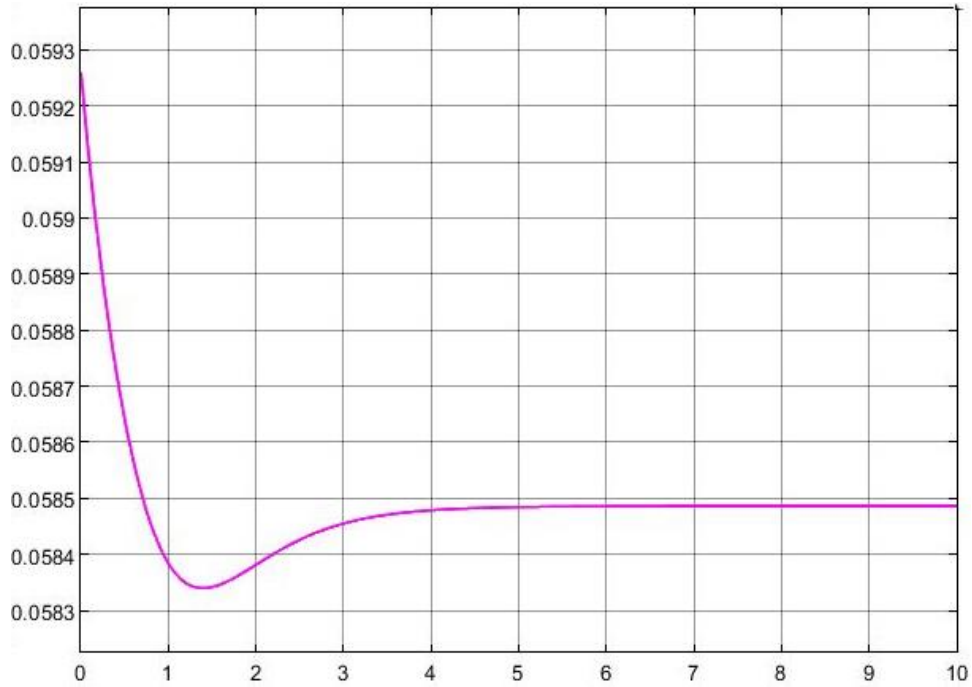
الشكل 29 العزم المطلوب لتحريك المحرك الأول ليصل للزاوية المرجعية $\theta_1 = 60^\circ$



الشكل 30 العزم المطلوب لتحريك المحرك الثاني ليصل للزاوية المرجعية $\theta_2 = 60^\circ$



الشكل 31 العزم المطلوب لتحريك المحرك الثالث ليصل للزاوية المرجعية $\theta_3 = -90^\circ$



الشكل 32 العزم المطلوب لتحريك المحرك الرابع ليصل للزاوية المرجعية $\theta_4 = 30^\circ$

يمكن الاستنتاج من المنحنيات السابقة أن منحنى استجابة عزم محرك المفصل الأول الشكل 21 أن العزم الأعظمي المحتاج لكي يقوم المحرك بالتغلب على عزوم العطالة الدورانية والكتلة للوصلة المحمولة عليه ليصل l_1 للموضع الزاوي المطلوب هو ($\tau_1 = 0.06 N.m$) ونظراً لعدم وجود عزوم خارجية قوى (جاذبية) حول المفصل الأول سوى عزم المحرك الأول فقط يستنتج أن القيمة منطقية مقارنة بقيم مصفوفة العطالة المتغلب عليها مع الأخذ بالعلم أن نوع المادة والذي هو أكريليك Plexi هو العامل الأساسي في الموضوع.

كما نستنتج من الشكل 22 أن منحنى استجابة عزم محرك المفصل الثاني العزم الأعظمي المحتاج لكي يقوم المحرك بالتغلب على الكتل للوصلة المحمولة عليه l_2 مضاف إليها عزوم عطالة الوصلة الثانية والثالثة l_3, l_4 وكتلة المفصل الثالث والرابع فيكون العزم الأعظمي المحتاج ($\tau_2 = 1.13 N.m$) ونظراً لأن المحرك الثاني يتغلب على عطالته وعطالة الوصلتين اللاحقتين l_3, l_4 مضافاً لهما العزوم الناتجة عن ثقل الوصلات فمن الطبيعي أن تكون قيمة عزم المحرك الثاني هي القيمة الأعلى بين باقي قيم عزوم المحركات الأخرى ليصل للموضع المطلوب.

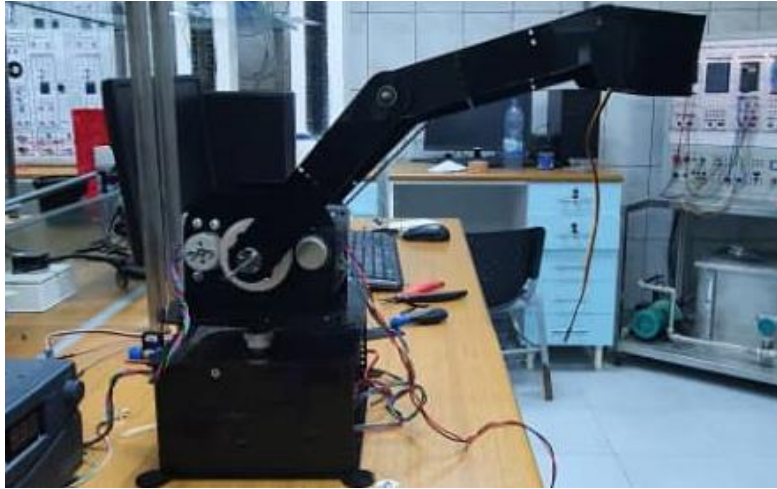
وعليه من الشكل 23 يمكن تحديد العزم الأعظمي للمحرك الثالث للوصول للموضع الزاوي المطلوب ($\tau_3 = 0.444 N.m$) وكما ذكر سابقاً هو أقل من العزم المطلوب من المحرك الثاني نظراً لما يتغلب عليه من عطالات وقوى.

ومن الشكل 24 نجد أن العزم الأعظمي المحتاج من المحرك الأخير هو ($\tau_4 = 0.059 N.m$) وهي القيمة الأصغر بين المشغلات الثلاث الأخيرة وذلك تبعا لعدم وجود سوى وصلة واحدة l_4 وهي المؤثر النهائي والذي يتم التغلب على عزم عطالتها وتقلها.

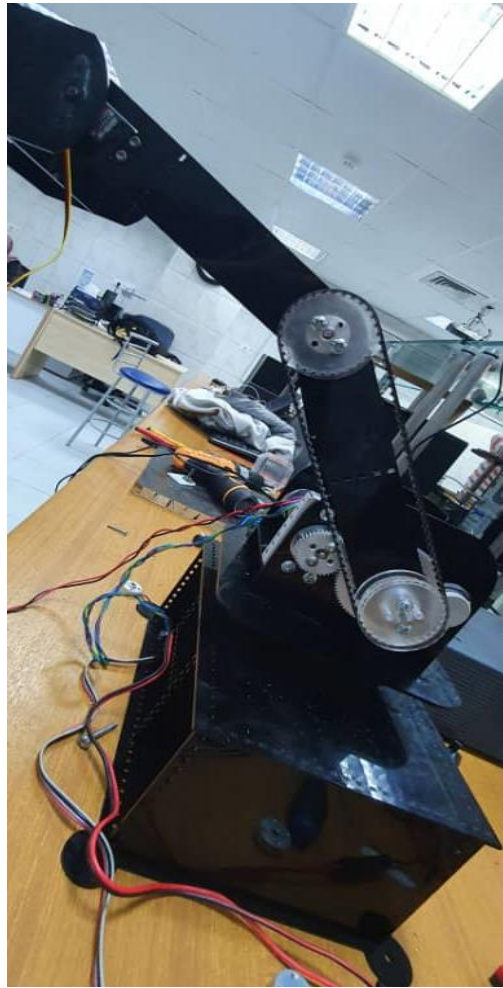
3-4. التحكم بالنموذج الفيزيائي للروبوت

في البداية تم قص قطع الروبوت على آلة ليزر من مادة الأكريليك plexi ومن بعدها تم تجميع قطعه مع استخدام قطع تثبيت ومحاور ومسننات مع 3 محركات DC من تجهيزات المخبر لصناعة منظومة السيرفو تمت دراسة مواصفاتها ولوحظ سرعة حالتها العابرة للسرعة لذلك كان بالإمكان تجاهل حالتها العابرة نظراً لوصولها لحالتها المستقرة خلال أجزاء من عشر الثانية.

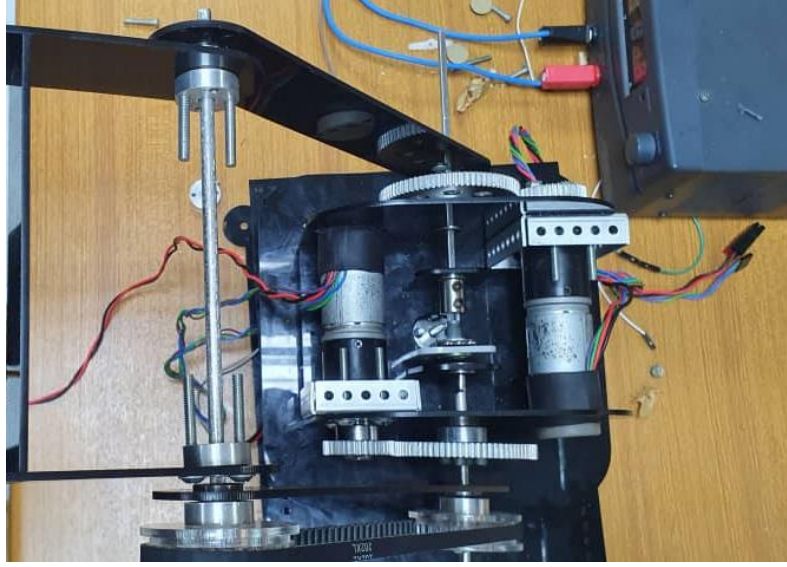
وتم استخدام محرك Servo DC مصنع مسبقاً للتحكم بالوصلة الأخيرة نظراً لعدم توافر التجهيزات المناسبة من محركات والية نقل وعليه يكون شكل الروبوت النهائي بعد تجميعه.



الشكل 33 الشكل النهائي للروبوت بعد تجميعه



الشكل 34 الشكل النهائي للروبوت من منظور آخر بعد تجميعه

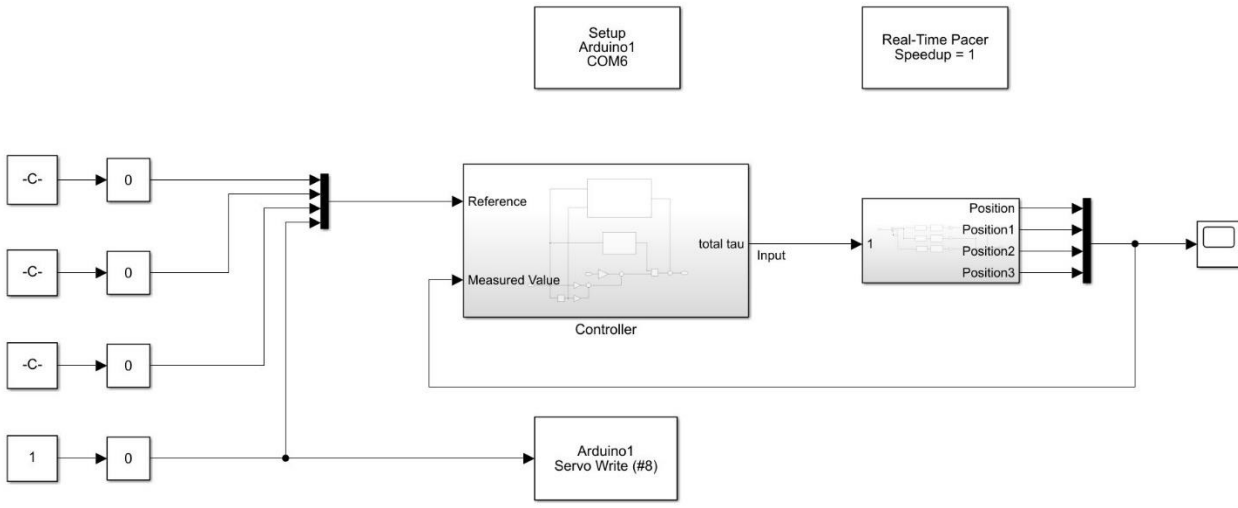


الشكل 35 المحركات والتوصيلات مع الية النقل المستخدمة

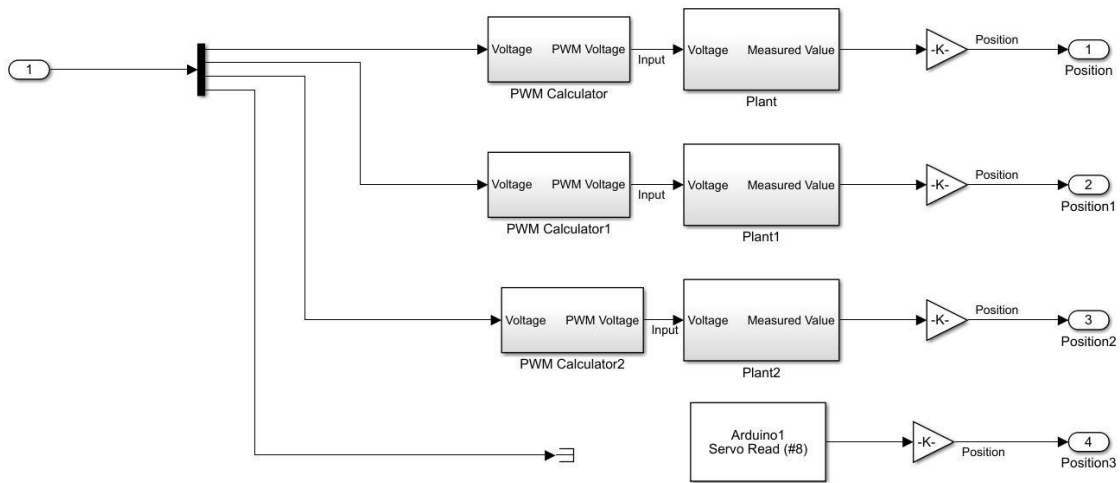
تم استخدام MATLAB/Simulink مع مكتبة خاصة للوحة تطوير Arduino مع دائرة التحكم التي تم تصميمها سابقا لجعل المنظومة خطية مع نفس قيم الكسب على خط الرجعة للمحركات الثلاثة الأولى ونفس قيمة ثابت الكسب على التغذية الأمامية لكن بيْدَل plant block ب blocks لمكتبة Arduino I/O مناسبة لقراءة الدخل والخرج لقيم الحساسات.

3-4-1. تصميم دائرة التحكم باستخدام MATLAB/Simulink مع Arduino I/O Package:

تم استخدام بيئة Simulink مع حزمة خاصة للوحة تطوير Arduino مع مكتبة Robotic System Toolbox وذلك لبرمجة الروبوت وتحريكه فيزيائيا حيث تم استخدام مكتبة Robotic System Toolbox لتمثيل نموذج العزم المضاف بالتغذية الأمامية أي تحويل الجملة لخطية، ومكتبة Arduino I/O للتعامل مع قراءة الحساسات وإعطاء المحركات أوامر التحكم المناسبة للقيام بالانتقال من موضع لآخر.



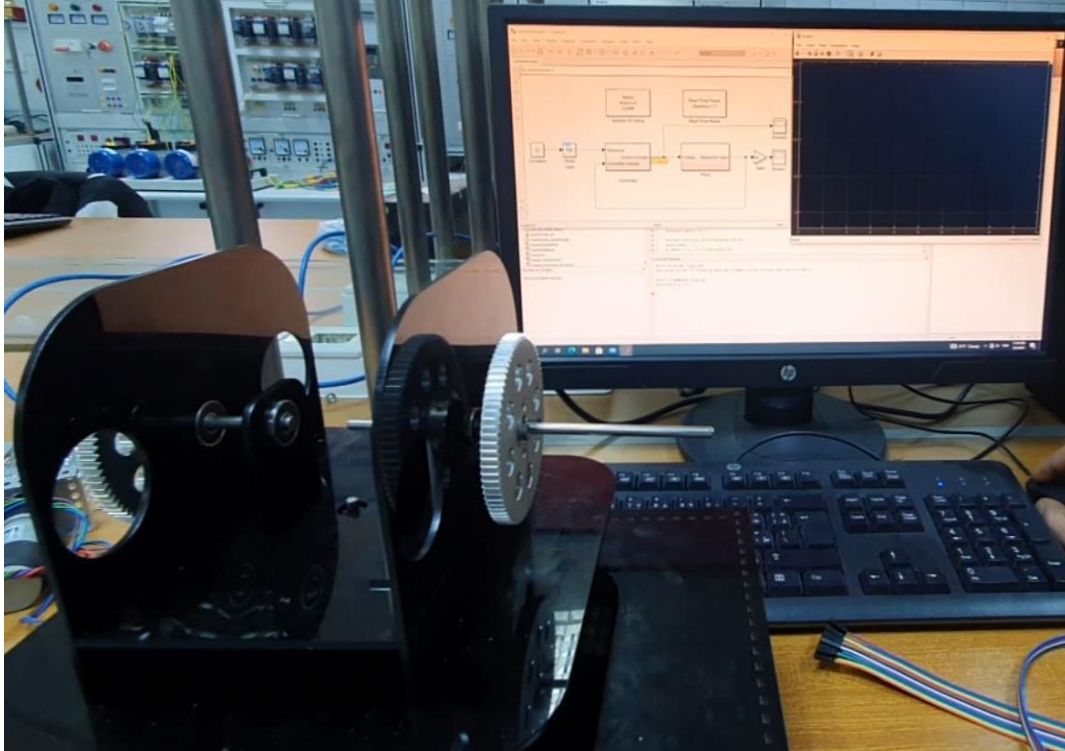
الشكل 36 دائرة التحكم للنموذج الفيزيائي للروبوت



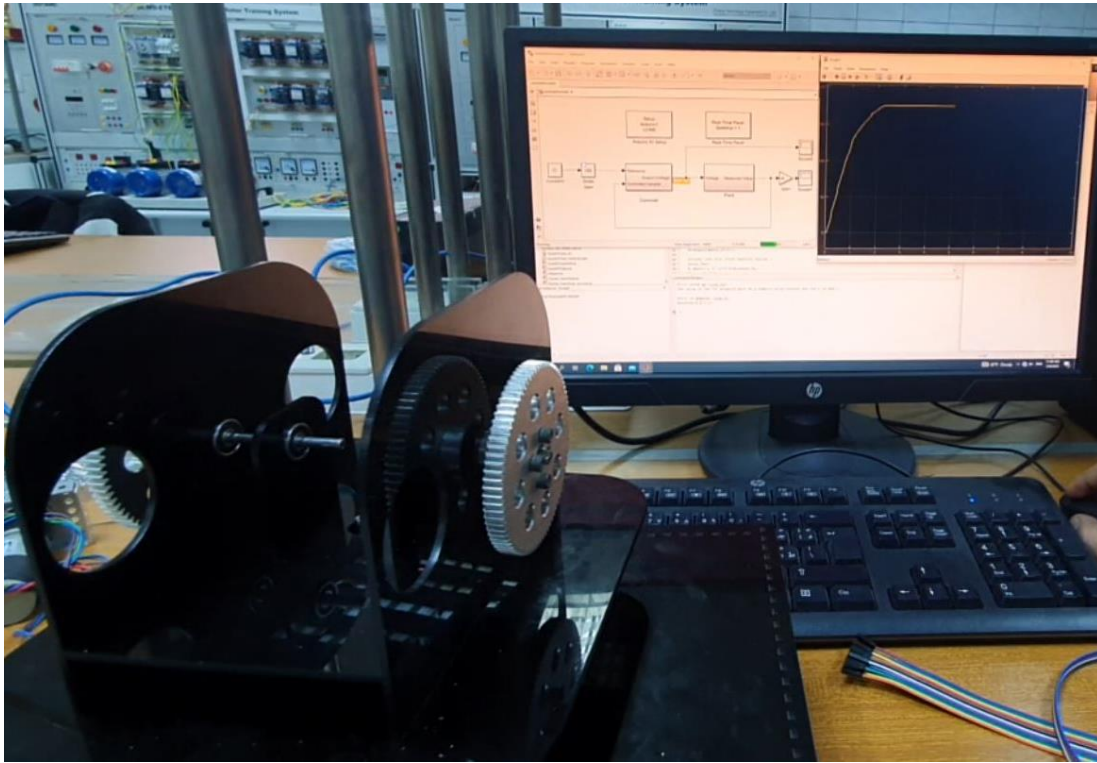
الشكل 37 دائرة تمثل تحويل العزم المحدد إلى جهد PWM

3-4-2. استجابة المنظومة تحت تأثير نظام التحكم:

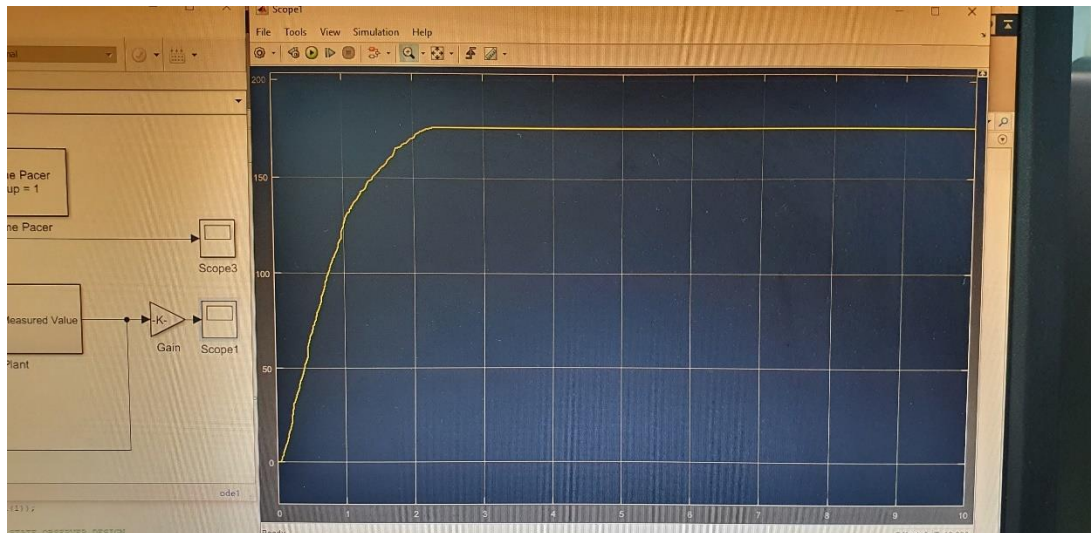
يمكن ومما سبق تبيان أن دارة التحكم لن تختلف كثيرا سوى أن الجهد سوف يصبح متقطع وذلك عن طريق استخدام PWM يقوم المتحكم بحسابه وأن النظام Plant فيزيائيا سيصبح قراءة الحساسات وعليه تكون استجابة المنظومة تحت تأثير دخل واحد لنفس متطلبات التحكم السابقة مع الأخذ بعين الاعتبار أن المحرك الأخير هو محرك Servo أي يجب تغذيته بجهد متقطع فقط بتردد مقداره $50H_z$ دون تطبيق دارة التحكم عليه وحسب عرض النبضة يتجه للموضع المطلوب.



الشكل 38 المفصل الأول في الموضع الصفري



الشكل 39 المحرك الأول في الموضع النهائي



الشكل 40 استجابة المحرك الأول تحت تأثير التحكم بحلقة مغلقة بطريقة pole placement

وعليه يتم تطبيق نظام التحكم بحلقة مغلقة لكل من المفصلين الثاني والثالث مع نظام التحكم بالتغذية الأمامية للتغلب على القوى الخارجية والاضطرابات التي تسببها الوصلات الأخرى، لم يتم تجريب حركة المفاصل فيزيائياً نظراً لأن نتائج المحاكاة تطلبت عزم كبير للتحويل والتغلب على القوى مما يستلزم تيار كبير وهو من الغير ممكن نظراً لعدم وجود التجهيزات المناسبة من منابع جهد وبطاريات كما أن المعالج المستخدم لتنفيذ خوارزمية التحكم غير قادر على معالجة وتلقّي الأوامر لتسيير المحركات سوياً.

النتائج

- ❖ تم بناء موديل رياضي يمثل الديناميك باستخدام MATLAB/Simulink مكتبة Simscape/Multibody physics عن طريق تحويل الموديل المصمم على برنامج SolidWorks إلى بيئة Simulink.
- ❖ تم بناء موديل خطي عن طريق التحويل إلى جملة خطية باستخدام التغذية المباشرة Feedforward Linearization، مع أخذ كل من قيم الموضع والسرعة من قياس الحساس لتوليد العزم المكافئ للتغلب على قوى الجاذبية وكوريوليس.
- ❖ تم تعيين الأقطاب المرغوبة للمنظومة بحيث تكون الاستجابة critically damped اعتمادا على قيمة زمن الاستقرار t_s .
- ❖ تم التحكم بموضع المحركات للوصول إلى نقطة محددة باستخدام Pole Placement وإيجاد استجابة الموضع مع الزمن مع تبيان النتائج والمنحنيات، حيث تحققت متطلبات التحكم المرغوبة.
- ❖ تم إنشاء نموذج فيزيائي للروبوت يتم التحكم به باستخدام لوحة Arduino مع حزمة لوحة التطوير خاصة على Simulink مع استخدام مكتبة Robotics System Toolbox.
- ❖ نلاحظ أن جميع المفاصل استجابت لمنظومة التحكم الهجينة ما بين طريقة Pole Placement و طريقة Feed Forward Torque لجعل المنظومة خطية و أمكن تطويعها ضمن متطلب التحكم زمن الاستقرار $t_s = 5$ ووصلت إلى الحد المرجعي دون أي تجاوز للقيمة المستقرة وعليه يمكن استنتاج أنه لا يمكن التحكم بحلقة مغلقة دون معرفة ديناميك المنظومة وفهمه بشكل دقيق وتحديد كتل وعطالات ومراكز ثقل الجسم ثم تعويضها لمعرفة القوى المؤثرة على الجسم ومكافئتها بالعزم المناسبة ثم الانتقال للتحكم بحلقة مغلقة الذي تبقى وظيفته الأساسية أن يوصل المنظومة إلى المرجع المطلوب ويضيف عزم مناسب للعزم المقدم من الديناميك ليقدّم العزم المناسب حسب معايرة دقيقة وصحيحة للتحكم للتغلب على القوى والمؤثرات التي لم يُستطع تضمينها في الموديل الرياضي ويصل الروبوت للموضع المطلوب.

التوصيات

1. إجراء دراسة أكثر دقة لنوع المادة المستخدمة ومقاطع وصلات الروبوت.
2. استخدام منبع جهد مستمر متغير بدلا من تقطيع الجهد للحصول على مستويات جهد مختلفة للتخلص من مشكلة تقطيع الجهد باستخدام PWM.
3. تضمين احتكاك كولوم والاحتكاك اللزج كقوة يجب التغلب عليها لزيادة دقة النموذج الديناميكي.
4. تصميم observer بعد دراسة المنظومة إن كانت observability لمراقبة متغير السرعة.
5. تنفيذ خوارزمية التحكم الهجينة على معالج متقدم مع التأكد من وجود تجهيزات مناسبة من منابع تغذية وذلك بعد التأكد من العزوم والتيارات المطلوبة باستخدام المحاكاة.

المراجع

1. H. M. Al-Qahtani · Amin A. Mohammed · M. Sunar; Dynamics and Control of a Robotic Arm Having Four Links; Arab J Sci Eng; Vol. 4, No. 2, October 2016; 1841:1852
2. Muhammad Aqif Izzat Mazlan et al. Robot Arm System Based on Augmented Reality Approach; International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, Volume 8. No. 10, October 2020; 6879: 6884.
3. Tresna Dewi, Siti Nurmaini, Pola Risma, Yurni Oktarina, Muhammad Roriz; Inverse kinematic analysis of 4 DOF pick and place arm robot manipulator using fuzzy logic controller; International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE); Vol. 10, No. 2, April 2020; 1376:1386.
4. Case, R. Y. (1999). "Timing" Belt Drive Engineering Handbook.
5. Products, S. D. (2002). Handbook of Timing Belts and Pulleys: Featuring PowerGrip GF2 Series.
6. Taylor, J. R. (2004). Classical Mechanics. Univ Science Books.
7. Lawrence, D. A., Williams, R. L. (2007). Linear State-Space Control Systems. United Kingdom: Wiley.
8. Simmons, G. F. (2016). Differential Equations with Applications and Historical Notes. CRC Press.
9. Nise, N. S. (2015). Control Systems Engineering, 7th Edition. Wiley Global Education.