

Integration of Industrial and Surgical Robotic Systems:

A Case Study of Combining the SCARA Robot with the Da Vinci Robot

Asst-Prof. Lara Fathi Kadid, Lecturer. Hasan Khaled Kazzaz*, Eng. Mohamad Adib Mohamad Taki Eddin Issa

Faculty of Engineering | Cordoba Private University | Syria

Received:

16/07/2025

Revised:

04/08/2025

Accepted:

27/08/2025

Published:

15/09/2025

* Corresponding author:
kazzazhasan@gmail.com

Citation: Kadid, L. F., Kazzaz, H. KH., & Issa, M. A. (2025). Integration of Industrial and Surgical Robotic Systems: A Case Study of Combining the SCARA Robot with the Da Vinci Robot. *Journal of engineering sciences and information technology*, 9(3), 68 – 87.

[https://doi.org/10.26389/
AISRP.N180725](https://doi.org/10.26389/AISRP.N180725)

2025 © AISRP • Arab Institute for Sciences & Research Publishing (AISRP), United States, all rights reserved.

• Open Access



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC) license.

Abstract: Objectives: The field of robotics is rapidly evolving toward more precise, flexible, and cost-effective solutions in industrial and medical environments. This study explores the potential of integrating a Selective Compliance Assembly Robot Arm (SCARA) (Revolute-Prismatic-Revolute-Revolute) (RPRR), known for its high speed and precision in repetitive horizontal and vertical movements used in industrial or assistive tasks such as handling instruments, with the da Vinci surgical robot, which is characterized by its high-precision control and ability to perform precise and complex movements in surgical procedures. This integration aims to design a hybrid system that leverages the characteristics and advantages of both industrial and surgical robots, with the goal of opening new horizons in precision automation, particularly in the fields of biomanufacturing and complex surgical procedures. It seeks to leverage the characteristics of each robot to enhance work efficiency, reduce operating time, and increase the level of precision, safety, and adaptability to advanced, highly sensitive environments. Methods: This study builds a prototype demonstrating the communication and mutual control mechanism between the SCARA robot, which is characterized by its precision and speed in horizontal and vertical movements, and the surgical tools of the da Vinci robot, which perform complex and precise surgical movements inside the patient's body. The main goal of the proposed robot is to combine the performance stability of industrial robots with the flexibility and precision of surgical robots, paving the way for the development of low-cost robots that combine the advantages of industrial and surgical robots to perform surgeries with high efficiency. Results: The SolidWorks simulation environment was used to analyze the motion of the robotic arm proposed in this research. The motion transmission mechanism was studied through the torque required to move the joint and the joint's angular motion. Experimental results demonstrated a 20-fold increase in torque at the third joint (9600 N.mm compared to the required torque of 8550 N.mm), with arm movement from 0° to 90° in approximately 2.2 seconds. and a 123% factor of safety (F O S) was achieved for the second joint.

Keywords: da Vinci robot, Hybrid robot, Industrial robots, SCARA robot, Surgical robots.

التكامل بين الأنظمة الروبوتية الصناعية والجراحية:

دراسة حالة لدمج روبوت SCARA مع روبوت da Vinci

الأستاذ المساعد / لارا فتحي قديد، المدرس / حسن خالد قزاز، م. محمد أديب محمد تقى الدين عيسى

كلية الهندسة | جامعة قرطبة الخاصة | سوريا

المستخلص: الأهداف: يشهد مجال الروبوتات تطويراً متسارعاً نحو ابتكار حلول أكثر دقة ومرنة وأقل كلفة في البيئات الصناعية والطبية. تعمل هذه الدراسة إلى استكشاف إمكانيات دمج روبوت SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) من نوع RPRR(Revolute-Prismatic-Revolute) المعروف بسرعته العالية ودقته في الحركات الأفقيّة والرأسيّة المتكررة المستخدمة في تنفيذ المهام الصناعية أو مهام المساعدة مثل تناول الأدوات، مع روبوت دافنشي (da Vinci) الذي يتميز بتحكمه على الدقة وقدرته على أداء حركات دقيقة ومعقدة في العمليات الجراحية. يهدف هذا الدمج إلى تصميم منظومة هجينة تستفيد من خصائص وإيجابيات كل من الروبوتات الصناعية والجراحية بهدف فتح آفاق جديدة في الأتمتة الدقيقة، وخاصة في مجالات التصنيع الحيواني والعمليات الجراحية المعقدة، والعمل على توظيف خصائص كل روبوت لتعزيز كفاءة العمل وتقليل زمن العمليات التي ينجزها الروبوت الهجين المقترن وزيادة مستوى الدقة والأمان والقدرة على التكيف مع البيئات عالية الحساسية المتقدمة. المنهجية: تم في هذه الدراسة بناء نموذج أولي يوضح آلية التواصل والتحكم المتبادل بين روبوت SCARA والذي يتميز بدقته وسرعته في الحركات الأفقيّة والرأسيّة، وبين الأدوات الجراحية الخاصة بروبوت دافنشي والتي تتميز بتنفيذ حركات جراحية معقدة ودقيقة داخل جسم المريض. الهدف الرئيسي من الروبوت الدمج بين استقرار أداء الروبوتات الصناعية والمرنة والدقة الخاصة بالروبوتات الجراحية مما يمهد الطريق نحو بناء روبوتات منخفضة الكلفة تجمع بين ميزات الروبوتات الصناعية والجراحية. يهدف إجراء العمليات الجراحية بكفاءة عالية. النتائج: استخدمت بيئة المحاكاة Solidworks بهدف تحليل حركة ذراع الروبوت المقترن في هذا البحث، حيث تم دراسة آلية نقل الحركة من خلال العزم المطلوب لتحرير المفصل والحركة الزاوية للمفصل أيضاً. أظهرت النتائج التجريبية زيادةً في عزم الدوران بمقدار 20 ضعفاً في المفصل الثالث 9600 N.mm مقارنةً بالعزم المطلوب 8550 N.mm، وزمن حركة 2.2 ثانية لتحرير الذراع من 0° إلى 90°. كما تم تحقيق عامل أمان (F.O.S) بنسبة 123% للمفصل الثاني.

الكلمات المفتاحية: الروبوتات الجراحية، الروبوتات الصناعية، روبوت SCARA، روبوت Da Vinci، روبوت هجين.

المقدمة:

مع التطور المتسارع والكبير للتكنولوجيا الطبية لرعاية المرضى وتحسين جودة الحياة في العقدين الماضيين، ظهرت العديد من الروبوتات الجراحية التي تستخدم في الممارسة السريرية بهدف تسهيل العمليات الجراحية والحصول على نتائج أفضل من تقليل للمضاعفات الجراحية، وسرعة تعافي للمرضى. البداية كانت مع الجراحة بالمنظار أو الجراحة طفيفة التوغل (Minimally Invasive Surgery MIS) حيث يتم الوصول إلى أي نقطة في الجسم من خلال شقوق صغيرة وبالاعتماد على مجموعة من الأدوات الجراحية الدقيقة ومنظار وكاميرا صغيرة. تتطلب هذه الجراحة دقة وثبات عالي في حركة هذه الأدوات، وهي خصائص يصعب تحقيقها بشكل تام بدوياً (Gao et al,2021; Yang et al,2017; D'Ettorre et al,2024). يعتمد المنظار الجراحي بمساعدة الروبوت (Robotic-assisted MIS - RMIS) على نفس مبدأ الجراحة طفيفة التوغل، مع فارق جوهري يتمثل في تشغيل الأدوات والمنظار عبر محركات وأنظمة تحكم متقدمة، مما يوفر للأدوات براعة ودقة محسّتين، إلى جانب رؤية أوضح لموقع الجراحة (Da Vinci). يُعد روبوت دافنشي (Da Vinci) من أبرز الأنظمة المستخدمة في هذا المجال، حيث يُوظَّف لإجراء عمليات جراحية دقيقة في مناطق تشريحية متعددة من جسم الإنسان، بمرونة وكفاءة عالية.

يستخدم هذا الروبوت في العديد من غرف العمليات عبر العالم حيث يساهم في تقديم الدعم للجراحين من خلال التصغير الميكانيكي للحركات والرؤية ثلاثية الأبعاد وتنوع الحركات المستقلة التي ينفذها هذا الروبوت مما يساهم في رفع كفاءة تلك العمليات الجراحية وتقليل الأخطاء البشرية.

يتكون روبوت دافنشي من ذراعين: ذراع التحكم الرئيسي (Master Tool Manipulator MTM)، أو الذراع الرئيسية، التي يتحكم بها المشغل، وذراع التحكم الثانوي من طرف المريض (Patient Side Manipulator PSM)، أو الذراع التابعة، التي تعمل على المريض مباشرةً. تُستخدم حركات ذراع التحكم الرئيسي للتحكم في ذراع التحكم التابعة من طرف المريض (Shaw et al,2024). يتمتع روبوت دافنشي بست درجات حرية (Degrees of Freedom DOFs) وهي تمثل عدد الحركات المستقلة التي يمكن للروبوت أن يؤديها، أي كل درجة حرية تعني إمكانية الحركة في اتجاه معين (Shaw et al,2024). على الرغم من الكفاءة العالمية لروبوت دافنشي، إلا أن هناك العديد من التوجهات التي تعمل على استكشاف طرق التكامل بين الأنظمة الروبوتية في مختلف المجالات بهدف تحسين أداء النظام بشكل عام وتخفيض الكلف التشغيلية. تبرز في هذا السياق أهمية روبوت SCARA المستخدم في المجال الصناعي وبالتالي في تطبيقات النقل والتجميع والتي تتطلب الدقة والسرعة في الحركات الأفقية والعمودية ومن أهم إيجابيات هذا الروبوت سرعة الاستجابة والدقة العالمية والبنية البسيطة والكلفة التشغيلية المنخفضة بالمقارنة مع الأنظمة الروبوتية الأخرى (Nguyen et al, 2023). انطلاقاً من المزايا السابقة من الممكن الاعتماد على روبوت SCARA للقيام بمهام مساعدة أو محورية في البيئات الجراحية. يهدف هذا البحث إلى اكتشاف مدى إمكانية التكامل والدمج بين روبوت دافنشي وروبوت SCARA ضمن إطار عمل واحد يجمع بين إمكانيات وقدرات الروبوتات الجراحية ومرونة وكفاءة الروبوتات الصناعية.

مشكلة الدراسة:

يشهد سوق الروبوتات الصناعية تطويراً قوياً ومستمراً حيث بلغ حجم السوق العالمي أكثر من 34 مليار دولار أمريكي في عام 2024، مع توقعات نمو هذا السوق بنسبة 9.9% حتى عام 2030 مما يعكس زيادة الطلب على الروبوتات في مجال التطبيقات الصناعية (Grand View Research, 2024). وعلى التوازي أحدثت الروبوتات الطبية ثورة كبيرة في المجال الطبي، حيث يشهد سوق الروبوتات الجراحية توسيعاً سريعاً حيث وصل حجم هذا السوق حوالي 10.5 مليار دولار أمريكي في عام 2024 ومن المتوقع أن يصل إلى أكثر من 65 مليار دولار أمريكي عام 2034 مدعوماً بالتطورات في روبوتات الجراحة الدقيقة مثل روبوت دافنشي والتطبيقات المتعددة مثل جراحة الأعصاب والعيان، إلخ (Expert Market Research, 2024). عملت العديد من الأبحاث على بناء وتطوير العديد من النماذج بهدف مواكبة هذه الأسواق الصاعدة والتغلب على العديد من المشكلات التي تواجه الباحثين في هذا المجال، لذلك يمكن صياغة مشكلة الدراسة في التساؤلات التالية:

- 1 هل من الممكن العمل على إيجاد توازن وتكامل فعال بين متطلبات العمل الدقيق في المجال الجراحي والسرعة وكفاءة عالية في المجال الصناعي.
- 2 هل من الممكن الدمج بين التصميم الميكانيكي لروبوت SCARA وروبوت دافنشي.
- 3 هل من الممكن قيادة كل من روبوت SCARA وروبوت دافنشي بنظام تحكم واحد.
- 4 هل من الممكن تجاوز قلة الأبحاث العلمية التي تتناول التكامل بين الروبوتات ذات الاستخدام المختلف.
- 5 هل من الممكن التغلب على نقص وغياب المعايير الموحدة للتكميل بين الروبوتات ذات الاستخدام المختلف.

فرضيات الدراسة: تفترض الدراسة:

1. تفترض الدراسة المقترحة في هذا البحث أن الدمج بين روبوت SCARA وروبوت دافنشي يساهم في تحسين الكفاءة التشغيلية للمهام الجراحية.

2. يمكن أن يوفر استخدام روبوت SCARA الزمن اللازم لتنفيذ العمليات الجراحية بالاعتماد على سرعة استجابته الآلية والفعالة.
3. تفترض الدراسة أيضاً أن الروبوت المجنح المقترن في هذه الدراسة سيكون أقل كلفة من تطوير روبوت جراحي جديد.
4. يمكن أن يساهم الروبوت المقترن في هذه الدراسة إلى توسيع استخدامات الروبوتات الجراحية لتشمل مهام صناعية دقيقة جداً والعكس صحيح.

المبحث الأول- الإطار النظري والدراسات السابقة

أولاً- الإطار النظري

يعتمد هذا البحث على عدد من المفاهيم والمسائل التي تتعلق بالأنظمة الروبوتية بشكل عام والأنظمة الروبوتية الصناعية والجراحية بشكل خاص على اعتبار أن البحث يركز على بناء روبوت هجين يعتمد على كل من روبوت SCARA وروبوت دافنشي. يركز الإطار النظري في هذا البحث على الدراسات المرجعية الخاصة بكل من روبوت SCARA وروبوت دافنشي. كما أنه يتضمن منهجية التصميم والتي تتكون من المتطلبات الوظيفية للروبوت المقترن والتي تعبّر عن درجات الحرية الخاصة بالروبوت ونموذج الحركة الأمامية والعكسية.

ثانياً- الدراسات السابقة

• الدراسات المرجعية الخاصة بروبوت SCARA:

في السنوات الأخيرة شهدت الأنظمة الروبوتية تطويراً هائلاً، حيث ظهرت الروبوتات الصناعية كعنصر أساسي في خطوط الإنتاج وذلك نتيجة العديد من المزايا والمواصفات التي تتمتع بها انطلاقاً من الدقة وصولاً إلى السرعة وخصوصاً في المهام المتكررة، وكان من أبرزها روبوت SCARA. في المقابل ساهمت الروبوتات الجراحية، وفي مقدمتها روبوت دافنشي في إحداث ثورة في العمليات الجراحية الدقيقة حيث يتميز هذا النظام بقدرته العالية على تنفيذ عمليات جراحية معقدة عبر شقوق صغيرة، مما يقلل المضاعفات التي تحدث بعد العمل الجراحي ويسمح في سرعة عملية التعافي.

تشير بعض الدراسات السابقة إلى أن الدمج بين الروبوتات الصناعية والجراحية يمكن أن يسهم في تطوير أنظمة هجينية تجمع بين دقة التحكم الجراحي والأداء العالي والكلفة المنخفضة للروبوتات الصناعية. وبالرغم من وجود العديد من الدراسات حول تطوير كل روبوت على حدة، إلا أن الدراسات التي تتناول التكامل بين روبوت SCARA وروبوت دافنشي لا تزال قليلة مما يبرر الحاجة إلى استكشاف هذا المجال من كافة الجوانب بهدف تحديد الإمكانيات والتحديات المرتبطة به.

شملت العديد من الدراسات العمل على تحسين الدقة الهندسية والحركية، وذلك من خلال زيادة درجات الحرية الخاصة بذراع الروبوت.

1. البحث في المرجع (Cao et al, 2024) عمل على تصميم وتطوير روبوت هجين بأربع درجات حرية من أجل تشغيل الروبوت بسرعات عالية في مساحات عمل كبيرة، يجمع الروبوت المقترن بين مزايا روبوت SCARA التقليدي والروبوتات الهجينية بهدف الوصول إلى أداء عالي في البيانات الصناعية، مما يجعله مناسباً لتطبيقات التعبئة والفرز. قام الباحثون بالتحقق من جودة التصميم من خلال المندقة التحليلية وبناء نموذج أولي ومقارنته مع روبوت SCARA التقليدي. على الرغم من المزايا التي قدمها البحث، فإن الدراسة لم تقدم نتائج عدديّة تبين قياسات دقة الأداء للروبوت المقترن.

2. في المرجع (Nguyen et al, 2023) عمل الباحثون على تحليل مصفوفة جاكوفي (Jacobian Matrix) بهدف تحديد التكوينات (Configurations) التي تؤدي إلى فقدان درجة حرية أو أكثر للروبوت في المرجع (Cao et al, 2024) مما يؤدي إلى مشكلات في التحكم بالحركة الخاصة بالروبوت. واقتصر الباحثون تصميم مسارات عمل خاصة بالروبوت خالية من هذه التكوينات الشاذة وتعديل الأبعاد الهندسية للروبوت من أجل تخفيض نسبة الوصول إلى تلك التكوينات أو الحالات.

3. قام (Febrianto et al., 2024) بالعمل على تطوير الذراع الخاصة بروبوت SCARA بخمس درجات حرية من أجل استخدامه للأغراض التعليمية في مختبرات STEM حيث قدم هذا البحث تصميم ذو كلفة تصميمية منخفضة لروبوت SCARA بالإضافة إلى الدقة وسهولة الاستخدام في البيانات التعليمية. وفق نتائج البحث فإن إضافة درجة حرية إضافية يمكن أن يساهم في توسيع مجال العمل الخاص بالروبوت.

4. ركزت الدراسات السابقة أيضاً على أنظمة التحكم في روبوتات SCARA والتي تلعب العامل الحاسم في تحقيق الأداء المطلوب للروبوت وبالتالي التحديد في البيانات الصناعية التي تتطلب سرعة ودقة عالية والتي تقسم إلى: أنظمة التحكم التقليدي أو التحكم التناسبي- التكاملـيـ التفاضلي (PID)Proportional-Integral-Derivative والمُستخدمة على نطاق واسع بسبب فعاليتها في الأنظمة الخطية أو البسيطة. أنظمة التحكم بالمنطق الضبابي (Fuzzy Logic Control) والتي تعتمد على قواعد خاصة بالمنطق الضبابي بدلاً من

المعادلات الرياضية مما يساهم في التكيف مع ظروف التشغيل المختلفة. أنظمة التحكم بطريقة الانزلاق (Sliding Mode Control) وتحكم بالاعتماد (Adaptive Control) والتي تعمل على تعديل الاستجابة بشكل تلقائي وفق خصائص النظام أو متغيرات البيئة المحيطة ويستخدم بشكل واسع في الأنظمة غير الثابتة. أنظمة التحكم القوى (Robust Control) والتي تعمل على المحافظة على الأداء في حال وجود متغيرات كبيرة في البيئة المحيطة وفي حالات الشك وعدم اليقين .(Tay et al., 2022)

5. استعرضت الدراسة المقترحة في المرجع (Bouzid et al., 2024) استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية ANN بهدف زيادة كفاءة الحركة العكسية (Inverse Kinematics) في روبوت SCARA وهي مشكلة تتعلق في حساب قيم الإحداثيات الخاصة بزايا النذر أو المفاصل والتي تحقق موضعًا معيناً للذراع، واستعرضت الدراسة المقارنة بين خوارزميات تدريب متعددة.
6. قدم الباحث (Kapusi et al., 2022) آلية دمج شبكات التعلم العميق (شبكة YOLO) مع روبوت SCARA بهدف تمكينه من اكتشاف الأجسام في بيئات العمل الصناعية وفي الزمن الحقيقي أو الفعلي.
7. الدراسة المقترحة في المرجع (Al Mashhadany et al., 2022) تقدم تصميماً لروبوت SCARA قابل لإعادة التشكيل (Reconfigurable Robot) يتميز بإمكانية تعديل المساحة الفيزيائية الخاصة به من خلال تغيير الوحدات المكونة له ولزيادة وتحسين الاستقرار الخاص بالروبوت تم استخدام طرق تحليل العناصر المحدودة (Finite Element Method) وخوارزمية تحكم محسنة تسمى Pre-Filter لتخفييف الاهتزازات الناتجة عن الفجوات بين مفاصل الروبوت وذلك عند تشغيل الروبوت بسرعة عالية والتعامل مع الأجسام بأحمال مختلفة.
8. عملت الدراسة المقترحة في المرجع (Meindl et al., 2024) على تحسين دقة روبوت SCARA من خلال تطوير نظام ذكي يعتمد على التعليم المعزز (Reinforcement Learning) من أجل استخدامه في تنفيذ حقن عضلة القلب بشكل آلي وهو إجراء طبي يحتاج إلى حركة موجهة ودقيقة للغاية. ويتبع النظام المقترح في هذا المرجع التكيف الذاتي مع متغيرات بيئه العمل والتعلم الذاتي من خلال تكرار المهام. الجدول (1) يلخص الدراسات المرجعية السابقة.

الجدول (1): الدراسات المرجعية الخاصة بروبوت SCARA

نوع التطوير	الباحث	العام	الإجراء	المهدف من التطوير	مجال التطبيق
تطوير عتادي	Cao et al. [6]	2024	تطوير روبوت هجين بأربع درجات حرية	السرعة	البيئة الصناعية ذات المساحة الواسعة
تطوير برمجي	Febrianto et al. [7]	2024	تطوير روبوت SCARA بخمس درجات حرية	الدقة والكلفة المنخفضة	البيئة التعليمية
تطوير برمجي	Nguyen et al. [5]	2023	تحليل مصفوفة جاكوفي (Jacobian Matrix) هدف تحديد التكوينات (Configurations) التي تؤدي إلى فقدان درجة حرية أو أكثر للروبوت	حل مشكلة التكوينات الشاذة SCARA في روبوت	البيئة الصناعية
تطوير برمجي	Tay et al. [8]	2022	المقارنة بين أنظمة التحكم المستخدمة في SCARA روبوت	تحقيق الأداء المطلوب للروبوت	البيئة الصناعية
تطوير برمجي	Bouzid et al. [9]	2024	استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية لتحسين الحركة العكسية لروبوت SCARA	تحسين كفاءة نظام التحكم بالاعتماد على الشبكات العصبية ANN الاصطناعية	البيئة الصناعية
تطوير برمجي	Kapusi et al. [10]	2022	العمل على دمج شبكة SCARA مع روبوت YOLO	اكتشاف الأجسام في الزمن الحقيقي	البيئة الصناعية

نوع التطوير	الباحث	العام	الإجراء	الهدف من التطوير	مجال التطوير
	Meindl et al. [12]	2024	استخدام التعلم المعزز في SCARA تطوير روبوت	زيادة دقة الروبوت والتعلم الذاتي من خلال تكرار المهام	البيئة الطبيعية
تطوير عتادي وبرمجي	Al Mashhadany et al. [11]	2022	بناء روبوت قابل لإعادة التشكيل واستخدام خوارزمية تحكم محسنة	تحسين التصميم الهيكلي لمقاومة الاهتزازات وزيادة الثبات والدقة	البيئة الصناعية

• الدراسات المرجعية الخاصة بروبوت دافنشي:

تم تطوير روبوت دافنشي بهدف زيادة كفاءته من خلال التعويض عن الجاذبية وتحسين نماذج التحكم مما يساعد في دقة واستقرار الحركات أثناء الجراحة. كما تم العمل على دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة مثل التعلم بالتقليد لتمكن الروبوت من تعلم مهام جراحية معقدة من خلال مشاهدة مجموعة فيديوهات مما يؤدي إلى فتح أفق جديدة من التطوير في عالم الروبوتات الجراحية (Shaw et al., 2024).

- عمل (Hwang et al., 2020) على تطوير روبوت دافنشي وتحسين دقته واستقلاليته في تنفيذ بعض المهام الجراحية البسيطة لتخفييف الأعباء عن الجراحين وذلك بالاعتماد على خوارزميات معالجة الصور والاستشعار بالعمق، لم يتطرق الباحثون إلى أي تعديل عتادي لروبوت دافنشي. أظهرت النتائج التجريبية نجاح الروبوت في تنفيذ المهام الموكولة إليه بنسبة 86.9% باستخدام ذراع واحدة وبنسبة 78.0% باستخدام ذراعين، مع متوسط الزمن اللازم لنقل الكتلة الواحدة يساوي 10.02 ثانية و 5.72 ثانية على الترتيب.
 - عمل الباحثون (Gao et al., 2022) على استخدام تقنية SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) وهي مجموعة من الخوارزميات التي تمكن الروبوت الجراحي من تحديد موقعه في بيئته عمل غير معروفة له مسبقاً. تم دمج تقنية SLAM مع الصور الملونة ذات العمق RGB-D من أجل تأمين التنقل الدقيق والمبادر في بيئه عمل الروبوت المعقدة من أجل تحديد موقعه في الزمن الحقيقي وبناء خريطة دقيقة لتلك البيئة.
 - استخدم الباحثون (Kim et al., 2024) المحولات (Transformers) لتعليم الروبوت المهام الجراحية المعقدة وذلك من خلال التعلم بالتقليد (Imitation Learning) للحركات والقرارات الجراحية عبر تسجيلات مرئية لعمليات جراحية تنفذ من قبل جراحين ماهرين.
 - اعتمد الباحثون (Zhang et al., 2024) التحكم المشترك بين الإنسان والروبوت من أجل الجمع بين مزايا كل من الإنسان والروبوت من أجل أداء العمليات الجراحية المعقدة. تم استخدام تقنيات التعلم عن طريق المحاكاة (Learning from Demonstration-LfD) لبناء نظام تحكم فعال مشترك بين الإنسان والروبوت. أظهرت النتائج التجريبية على روبوت دافنشي أن التطوير المقترن خفض الزمن اللازم لتنفيذ المهام الجراحية.
 - عمل الباحثون على الاستفادة من النماذج اللغوية التوليدية مثل ChatGPT في روبوت دافنشي بهدف تقديم الدعم للجراحين خلال العمليات الجراحية عبر واجهات تفاعلية تعتمد على معالجة اللغات الطبيعية. الغاية الأساسية من هذا الدمج العمل على تحسين دقة وكفاءة المهام الجراحية والتقليل من الأخطاء الطبية (Pandya et al., 2023).
 - روبوت دافنشي Da Vinci SP المطور في البحث (Kwak et al., 2022) من خلال منصة SP(Signal Port) والتي يتم من خلالها إجراء شق جراحي واحد يدخل من خلاله الروبوت إلى جسم المريض بدلاً من عدة شقوق، مما يقلل من التداخل الجراحي ويوفر حرية الحركة داخل الجسم ويسهل الوصول إلى مناطق صعبة.
 - قام الباحثون (Francavill et al., 2022) على دراسة استئصال البروستات من خلال أربعة أجيال من روبوت دافنشي وتحليل النتائج الخاصة بكل جيل. تم الانطلاق من الجيل الأول Da Vinci Standard والذي يتمتع بأدوات صلبة وشبه ثابتة ورؤية ثلاثة الأبعاد محدودة. أما الجيل الثاني Da Vinci Si حيث يتمتع بأذرع أكثر مرونة وتحكم ودقة أفضل مقارنة بالجيل الأول. الجيل الثالث Da Vinci Xi والذي يملك تصميماً أكثر انسيابية والجيل الرابع Da Vinci SP الذي يقوم بإجراء الجراحة عبر شق صغير بهدف تقليل التداخل الجراحي وتحقيق تحكم عالي الدقة عبر منفذ واحد. الجدول (2) يلخص الدراسات المرجعية السابقة.
- الجدول (2): الدراسات المرجعية الخاصة بروبوت دافنشي.

نوع التطوير	الباحث	العام	الإجراء	الهدف من التطوير	مجال التطوير
تطوير عتادي	Kwak et al. [18]	2022	الاعتماد على منصة SP	تقليل التداخل الجراحي	البيئة الطبيعية
	Francavill et al. [19]	2022	الاعتماد على منصة SP	تقليل التداخل الجراحي	البيئة الطبيعية

نوع التطوير	الباحث	العام	الإجراء	الهدف من التطوير	مجال التطبيق
تطوير برمجي	Hwang et al. [13]	2020	استخدام تقنيات معالجة الصورة	تحسين الدقة والاستقلالية	البيئة الطبية
	Gao et al. [14]	2022	استخدام تقنية SLAM مع الصور الملونة ذات العمق	تطوير طريقة تحليل البيانات في بيئه عمل الروبوت	البيئة الطبية
	Kim et al. [15]	2024	استخدام المحولات (Transformers) لتعليم الروبوت المهام الجراحية المعقدة	تعليم الروبوت المهام الجراحية المعقدة	البيئة الطبية
	Zhang et al. [16]	2024	استخدام تقنيات التعلم عن طريق المحاكاة من تجربة (Learning from Demonstration-LfD)	تخفيض الزمن اللازم لتنفيذ المهام الجراحية	البيئة الطبية
	Pandya et al. [17]	2023	استخدام النماذج اللغوية التوليدية	تحسين دقة وكفاءة المهام الجراحية والتقليل من الأخطاء الطبية	البيئة الطبية

منهجية التصميم:

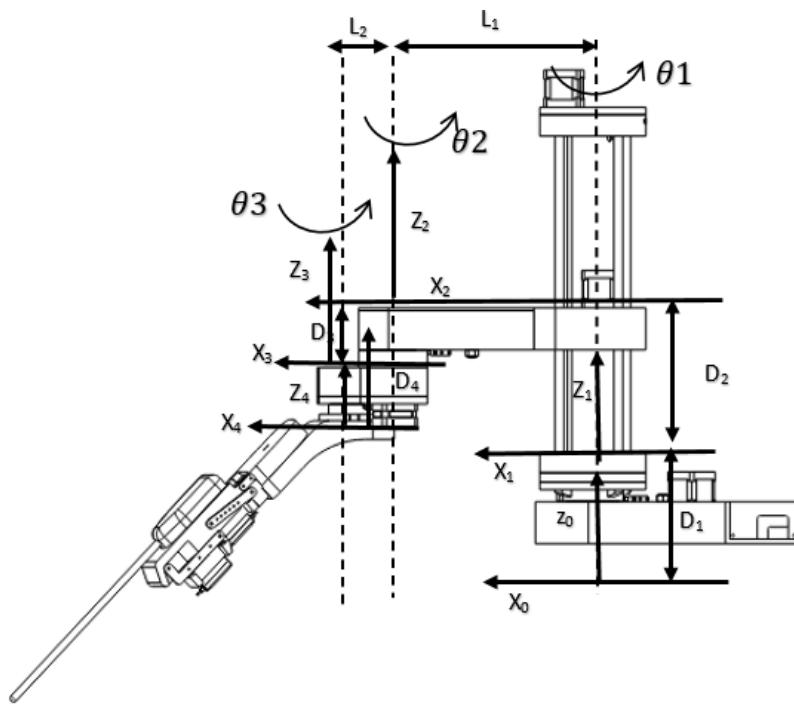
يعمل الروبوت المقترن في هذا البحث على التكامل الوظيفي بين روبوت SCARA الصناعي وروبوت دافنشي الجراحي وذلك عبر الدمج بين الهيكل الميكانيكي لروبوت SCARA والذي يتميز بدقتته وسرعته في الحركات الأفقية والرأسية، وبين الأدوات الجراحية الخاصة بروبوت دافنشي والتي تميز بتنفيذ حركات جراحية معقدة ودقيقة داخل جسم المريض. الهدف الرئيسي من الروبوت المقترن الدمج بين استقرار أداء الروبوتات الصناعية والمرونة والدقة الخاصة بالروبوتات الجراحية مما يمهّد الطريق نحو بناء روبوتات منخفضة الكلفة تجمع بين ميزات الروبوتات الصناعية والجراحية بهدف إجراء العمليات الجراحية بكفاءة عالية.

تعمل منهجية التصميم في هذا البحث وفق عدة مراحل وخطوات متتالية سوف نركز على هذه الخطوات في الفقرات التالية:
المتطلبات الوظيفية للروبوت المقترن: تم في الخطوة الأولى تحليل المتطلبات الوظيفية بهدف تحديد مجال ونطاق الحركة المطلوبة وعدد درجات الحرية اللازمة لتنفيذ المهام الجراحية. يتكون الروبوت المقترن في هذا البحث من أربع درجات حرية، أما نموذج الحركة فيقسم إلى نموذج الحركة الأمامية ونموذج الحركة العكسية في هذا الجزء من الدراسة سوف نقوم بشرح الحركة الأمامية للروبوت المقترن ومن ثم الحركة العكسية للروبوت المقترن أيضاً.

نموذج الحركة الأمامية: تتألف ذراع الروبوت المقترن في هذا البحث والذي يعتمد على الهيكل الميكانيكي لروبوت SCARA من مجموعة من الأجزاء المتصلة مع بعضها البعض من خلال عدد من المفاصل الانزلاقية والدورانية، تحدد الحركة الأمامية في روبوت SCARA العلاقة بين كل من موضع وسرعة وتسارع كل مفصل من مفاصل ذراع الروبوت. يتم تحديد نظام الاحداثيات الخاص بكل مفصل بالاعتماد على مصفوفة التحويل T_i^{i-1} والتي تربط بين كل مفصلين متتاليين متقاررين والمعادلة رقم (1) تحدد الحركة الأمامية لذراع الروبوت

$$T_n^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 \dots \dots \dots T_n^{n-1} \quad (1)$$

أما الشكل (1) يوضح شكل ذراع الروبوت المقترن في هذا البحث مع المحاور الاحداثية الخاصة بمفاصل الذراع:



الشكل (1): ذراع الروبوت البجين المقترن.

من خلال الشكل (1) ونظام الاحداثيات المرفق بالروبوت يمكن توضيح بارامترات الشكل (1) التي توضح الزوايا الخاصة بزاوية دوران كل مفصل والروابط فيما بينها والتي تُعرف بجدول بارامترات Denavit-Hartenberg في الجدول (3) (Nguyen,2023) (Cao,2024).

. Denavit-Hartenberg (3): بارامترات

النقطة	زاوية الميل, α_i	طول الوصلة, a_i	الزاوية, θ_i	الإزاحة, d_i
1-0	0	0	θ_1	d_1
2-1	0	L_1	0	d_2
3-2	0	L_2	θ_2	d_3
4-3	0	0	θ_3	d_4

: (Cao,2024) (Nguyen,2023) Denavit-Hartenberg رقم (2) وذلك بالاعتماد على طريقة

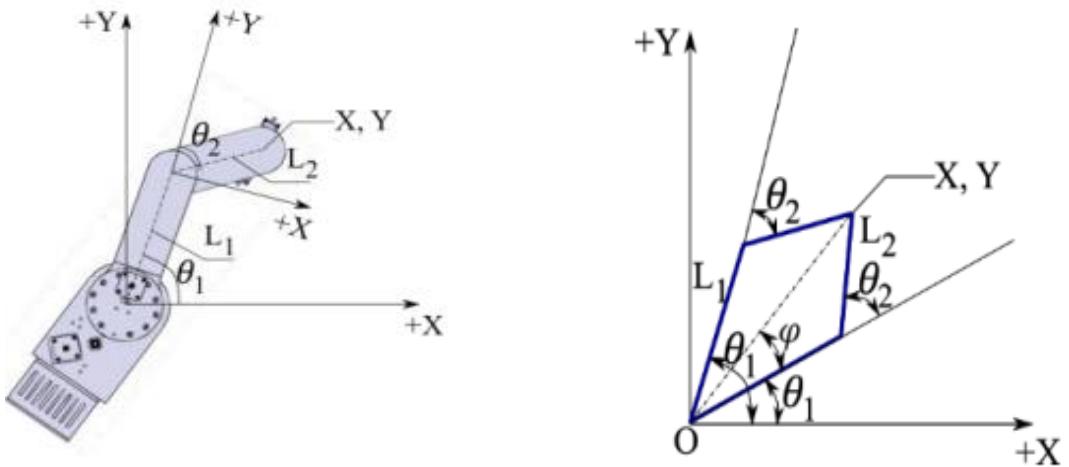
$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & L_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ومن خلال ضرب مصفوفات التحويل السابقة نحصل على الموقع الأفقي (y) للطرف النهائي والتوجيه النهائي للمحور (z) وبالتالي المصفوفة النهائية للحركة الامامية للروبوت توضحها المعادلة رقم (3) (Nguyen,2023) (Cao,2024)

$$T_1^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_2 - d_3 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

نموذج الحركة العكسية: تعمل الحركة العكسية على تحديد قيم متغيرات المفصل وذلك من خلال موقع واتجاه الطرف النهائي، أي من أجل إيصال الطرف النهائي إلى الموقع المطلوب لابد من تحديد قيمة زاوية المفصل ومقدار الإزاحة أو الحركة الانتقالية من خلال نموذج الحركة العكسية. يمكن القيام بعدد من الحلول من أجل الوصول إلى الموقع المطلوب. من خلال العمود الرابع في مصفوفة الحركة الامامية الموضحة في المعادلة رقم (3) يمكن أن نحدد احداثيات ذراع الروبوت بالنسبة لمبدأ الاحداثيات، والشكل (2) يوضح المحاور الاحداثية لذراع الروبوت .(Nguyen,2023) (Cao,2024)



الشكل (2): المحاور الابعادية لذراع الروبوت.

من المعادلة (3) للحركة الأمامية يمكن تحديد موضع ذراع الروبوت من خلال المعادلات التالية:

$$Y = L_1 C_1 + L_2 C_{12} \quad (4)$$

$$Y = L_1 S_1 + L_2 S_{12} \quad (5)$$

بتربيع وجمع المعادلتين السابقتين (4) و (5) نجد:

$$Y^2 + X^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 C_2 \quad (6)$$

وبالتالي قيمة الزاوية θ_2 تحسب من خلال المعادلة التالية:

$$\theta_2 = \pm \arccos \left(\frac{Y^2 + X^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \right) \quad (7)$$

أما من الشكل (2) من الممكن أن نلاحظ:

$$\theta_1 + \varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (8)$$

$$\sin \varphi = \frac{L_2 S_2}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (9)$$

ومن المعادلتين السابقتين نجد:

$$\varphi_2 = \pm \arccos \left(\frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 \sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (10)$$

$$\theta_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{Y}{X} \right) \pm \arccos \left(\frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 \sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (11)$$

تستخدم مصفوفة جاكobi بهدف إيجاد العمليات الحسابية الخاصة بمسار الحركة لذراع الروبوت، كما أنها تستخدم من أجل إيجاد التكوينات الشاذة والتي تؤدي إلى فقدان درجة حرية أو أكثر للروبوت. يمكن إيجاد كل من السرعة الانتقالية والزاوية لذراع الروبوت بناء على موضع الطرف النهائي (End Effector). يتم تحديد سرعة الطرف النهائي من خلال المعادلة التالية:

$$v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = [J_v(\theta_1, \theta_2)] \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

حيث يُعبر عن السرعة الخاصة بالذراع أو الطرف النهائي من خلال $\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$ و J_v تعبّر عن مصفوفة جاكobi. يتم الحصول على مصفوفة جاكobi من خلال المعادلات التالية:

$$J_v(\theta) = \begin{bmatrix} -L_1 S_1 - L_2 S_{12} & L_2 S_{12} & 0 \\ L_1 C_1 + L_2 C_{12} & L_2 C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$J_\omega(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

أما محدد جاكobi فيتم حسابه من خلال العلاقة التالية:

$$\det J_v(\theta) = L_1 L_2 S_2 \quad (15)$$

أحد أهم المشكلات التي تواجهها الأنظمة الروبوتية هي التكوينات الشاذة (Singularity Configurations)، تُعد هذه التكوينات عاملًا حاسمًا في تحديد القدرات الحركية للروبوت، إذ تتعكس بشكل مباشر على كفاءته ودقة استجابته. كما تؤثر في آليات التحكم وخوارزمياتها، مما يجعل ضبطها من العناصر الأساسية لتحقيق أداء ميكانيكي متوازن ومتوافق مع متطلبات عمل الروبوت. من الممكن تفادي هذه الحالات وذلك من خلال اتباع منهجين رئيسيين: المنهج الأول يعتمد على اختيار الأبعاد الهندسية الصحيحة بالنسبة إلى ذراع الروبوت للتقليل من احتمال حدوث هذه التكوينات الشاذة. أما المنهج الثاني يتمثل من خلال إيجاد مساحة عمل خالية من تلك التكوينات وتصميم مسار عمل ضمن تلك المساحة بما يضمن تجنب تلك التكوينات خلال تنفيذ المهام المطلوبة من قبل الروبوت.

بصورة عامة يصل ذراع روبوت SCARA إلى التكوينات الشاذة عندما ينعدم محدد مصفوفة جاكobi $\det J_v(\theta)$ أي عند تحقق أحد الشرطين التاليين: $\theta_2 = 0^\circ$ أو $\theta_2 = 180^\circ$ وهذا الحالتين التي يكون فيها ذراع الروبوت إما ممتد بشكل كامل أو مطويًا بشكل كامل على نفسه مما يؤدي إلى فقدان درجات الحرية الخاصة بحركة الذراع (Nguyen, 2023). ومن أجل تجنب هذه الحالة لا بد من العمل على تكبير قيمة محدد جاكobi أو تقليل قيمة $\cos^2 \theta_2$ مما يضمن استمرار عمل ذراع الروبوت بشكل مستقر وأمن، فعند تنفيذ سلسلة من المهام على نقاط محددة في مساحة عمل معينة يمكن حساب الموضع المثالي للروبوت من خلال تقليل قيمة المعادلة (16) التالية:

$$F = \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_2(x_i, y_i) \rightarrow \min \quad (16)$$

أما القيود الخاصة بمساحة العمل فهي موضحة في المعادلة (17):

$$R_{max} = L_1 + L_2$$

$$R_{min} = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1 L_2 \cos\left(180 - \frac{\theta_{2max}}{2}\right) \quad (17)$$

حيث، θ_{2max} أقصى مدى حركة لزاوية المفصل θ_2 . في الروبوت المقترن في هذا البحث تم ضبط كل من $L_1 = 250\text{mm}$ و $L_2 = 200\text{mm}$.

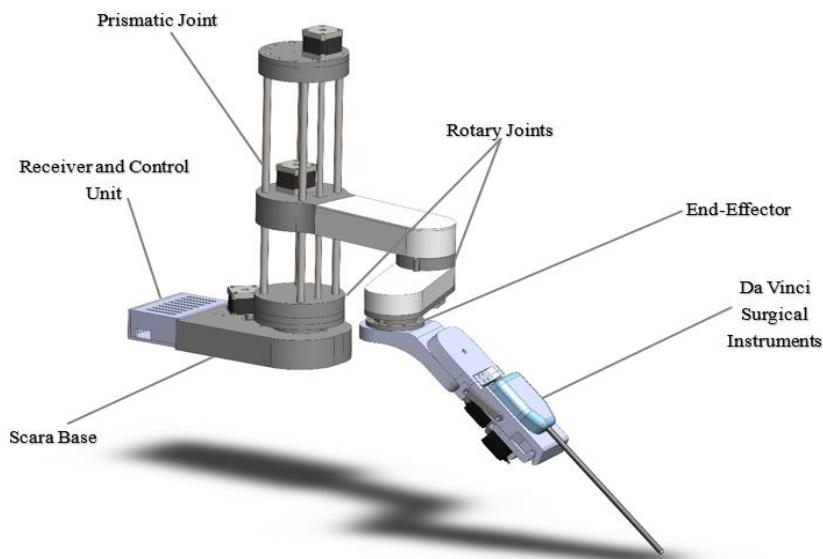
المبحث الثاني- مواد البحث وطرائقه

في البداية لابد من الإشارة إلى العناصر الميكانيكية الأساسية للروبوت المقترن، حيث تم الاعتماد على الدمج بين الهيكل الميكانيكي SCARA، الذي يتميز بدقته وسرعته في الحركات الأفقية والرأسية، وبين الأدوات الجراحية الخاصة بروبوت دافشي والتي صممّت لتنفيذ حركات جراحية معقدة ودقيقة داخل جسم المريض. ولأجل تحقيق هذا الدمج، تم إجراء بعض التعديلات على النراع النهائي (End Effector) لروبوت SCARA بحيث تتلاءم مع أدوات دافنشي الجراحية، مما يتّبع محاكاة دقيقة للحركات الجراحية الخاصة بيد الجراح.

يتكون الروبوت المقترن في هذا البحث:

- الجسم أو الهيكل الأساسي (SCARA Base): يعمل على دعم الحركات الأفقية والرأسية للروبوت.
- وحدة الاستقبال والمعالجة (Receiver and Prosses Unit): تحتوي على لوحة التحكم ومشغلات المحركات ودارة الاستقبال.
- المفصل الدورانية والمزلقة (Prismatic and Rotary Joints): تتحكم بأذرع الروبوت وتحدد درجات الحرية الخاصة بها.

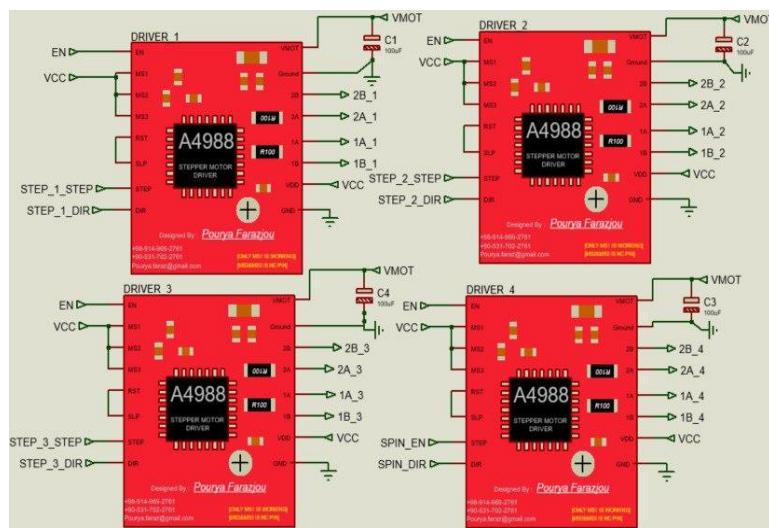
- الذراع أو الطرف النهائي (End Effector) وتم تصميمه بشكل يلاءم أدوات روبوت دافنشي الجراحية الدقيقة، مثل: أداة حمل الإبر الدقيقة (Micro Needle Drivers)، وملقط ماريلاند ثنائي القطبية (Maryland Bipolar Forceps)، والمقص منعني أحادي (Cadiere Forceps)، وملقط الإمساك بالأنسجة (Monopolar Curved Scissors)، وملقط كاديير (ProGrasp Forceps).
- وحدة الإرسال والتحكم (Transmitter and Control Unit): تتكون من مقبض تحكم (Joystick) ووحدة اتصال لإرسال بيانات الحركة.
- ويُظهر الشكل (3) مكونات الروبوت المقترن في هذا البحث:



الشكل (3): مكونات الروبوت الهجين المقترن.

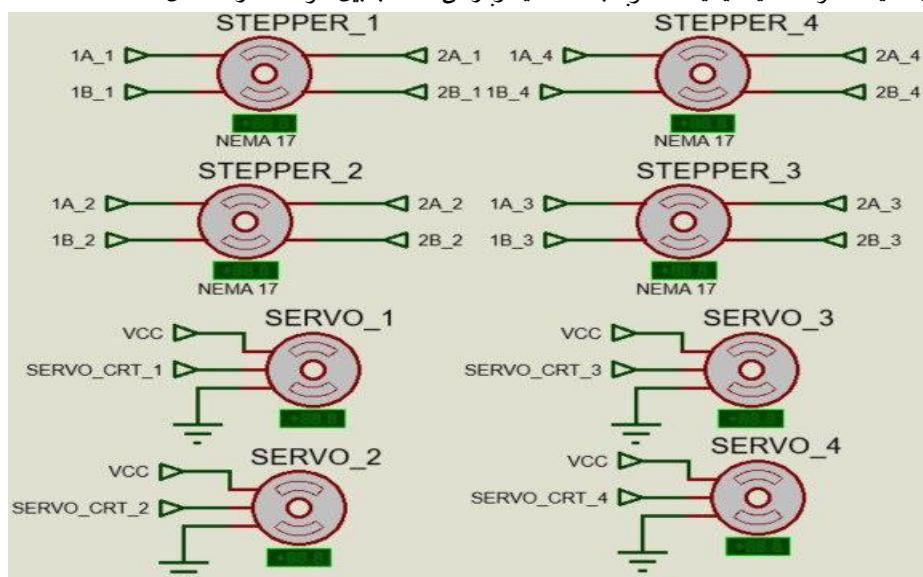
جرى تصميم النموذج ثلاثي الأبعاد للروبوت المقترن باستخدام برنامج Solidworks. وذلك بهدف بناء تصور تفصيلي يوضح المكونات الأساسية للروبوت المقترن من أذرع، ووصلات، ومشغلات (Actuators)، وأدوات الجراحية. ولغرض التحكم بحركة الروبوت المقترن، استُخدمت شريحة Arduino Mega التي تتيح إمكانية ربط وحدات تحكم متعددة مع محركات دقيقة ذات استجابة عالية مثل محركات السيرفو (Servo Motors) القادرة على تحقيق حركات دقة ومتكررة بكفاءة عالية. يتكون الروبوت من العناصر الآتية:

- أربع محركات خطوية (Stepper Motor) من نوع NEMA17 للتحكم بحركة المفاصل (Joints).
- أربع محركات سيرفو (Servo Motor) من نوع MG996R للتحكم بحركة الأدوات الجراحية (أدوات دافنشي الجراحية Da Vinci Instrument).
- أربع متحكمات (A4988 Driver) للتحكم في عمل محركات NEMA17 بشكل دقيق.
- لوحة تحكم (Arduino CNC Shield) جرى دمج المتحكمات عليها لتسهيل عملية التركيب والبرمجة.
- يبيّن الشكل (4) آلية توصيل متحكمات A4988 بمحركات NEMA17.



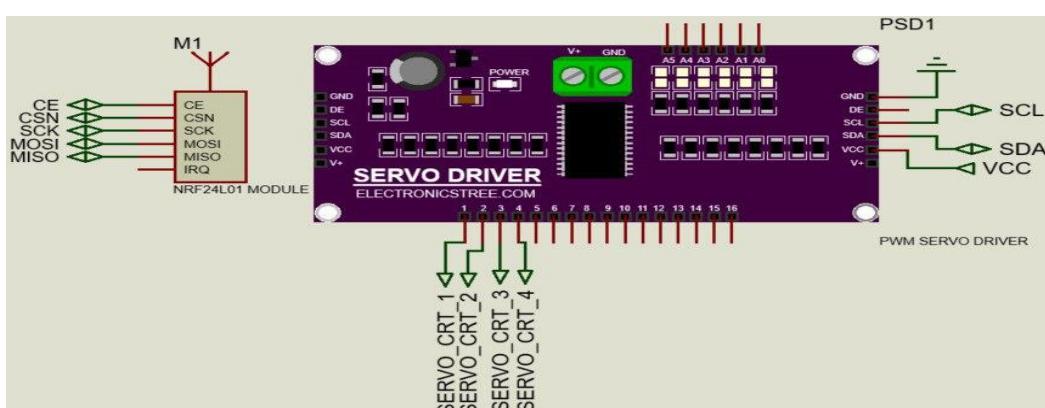
.الشكل (4): توصيل متحكمات A4988 بمحركات NEMA17

أما الشكل (5) يبين طريقة توصيل المحركات الخطوطية من نوع NEMA 17 ومحركات السيرفو من نوع MG996R مع وحدة التحكم، وذلك لضمان تنفيذ الحركات الميكانيكية المطلوبة بدقة عالية وبتزامن مناسب بين الوصلات والمفاصل.



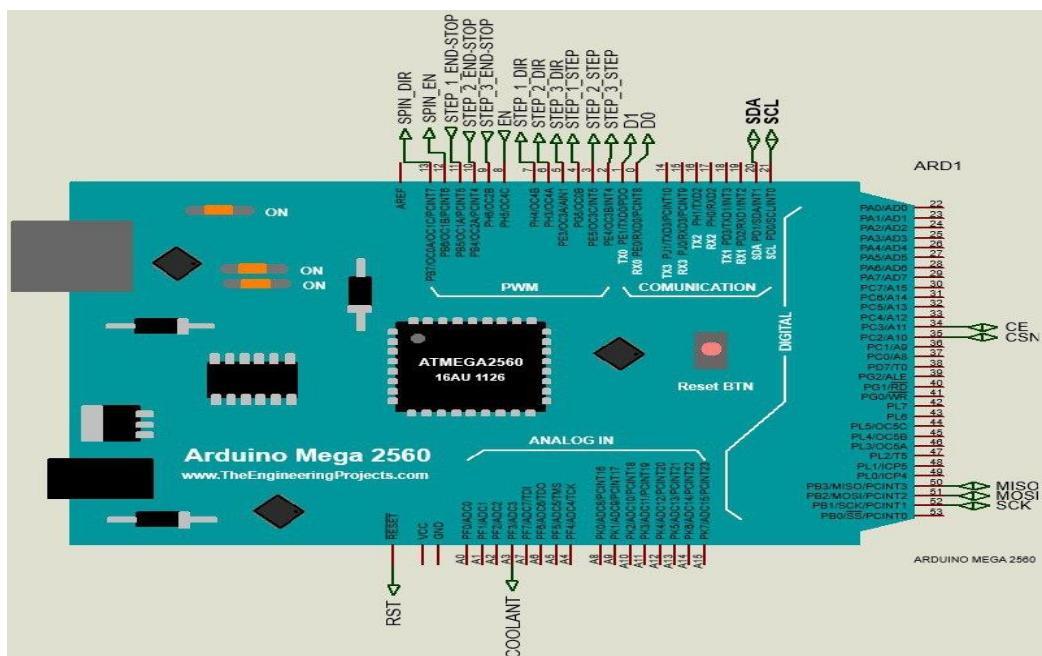
.الشكل (5): توصيل محركات NEMA17 ومحركات MG996R

- شريحة NRF24L01: تستخدم لربط وحدة التحكم مع المستقبل، حيث تستقبل بيانات الحركة المطلوبة (عدد الخطوط لكل مفصل) وتنقلها للمعالج. الشكل (6) يوضح آلية توصيل شريحة الاستقبال بالإضافة إلى توصيل المتحكم من نوع PCA9685.



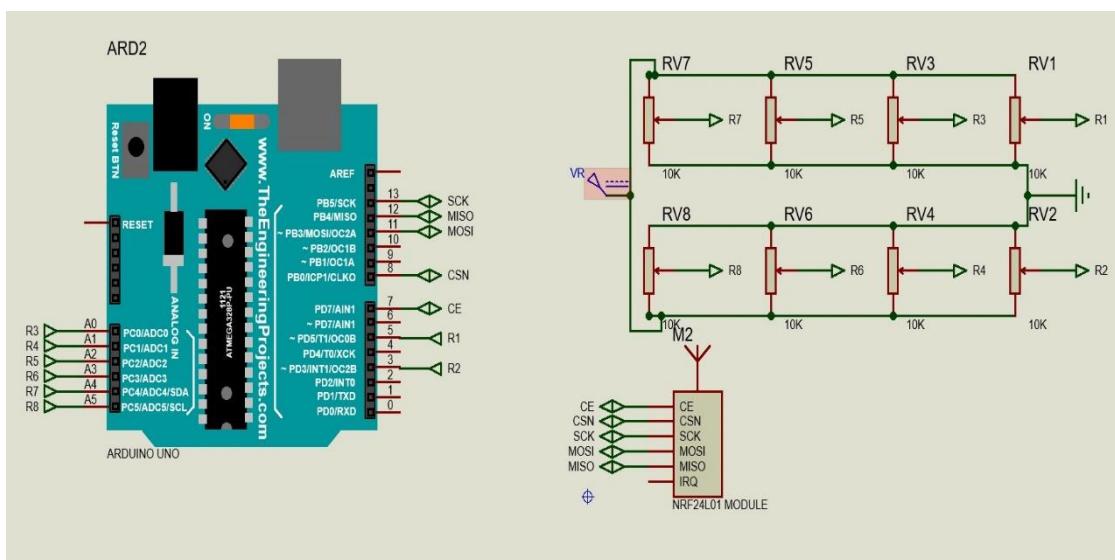
.الشكل (6): توصيل وحدة الاستقبال NRF24L01 ومحكم PCA9685

تم تجميع هذه المكونات وربطها مع شريحة اردوينو ميغا (Arduino Mega) وبرمجتها للقيام بالوظيفة المطلوبة. الشكل (7) يبين توصيل لوحة اردوينو ميغا والمنافذ المستخدمة.



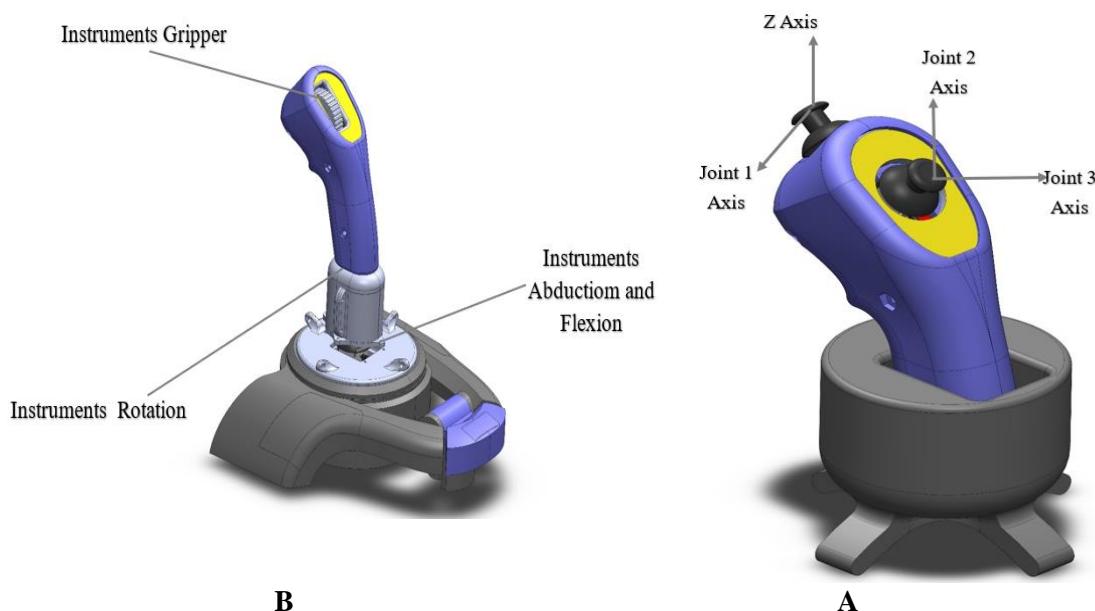
الشكل (7): توصيل لوحة الاردوينو ميغا والمنافذ المستخدمة.

يتألف قسم الإرسال والتحكم من مقبضي تحكم (Joysticks) موصولين مع شريحي أردوينو أونو (Arduino uno) التي تتولى معالجة الإشارات الناتجة عن حركة المستخدم وتحويلها إلى قيم رقمية. بعد ذلك ترسل هذه القيم عبر وحدة الاتصال اللاسلكي NRF24L01 إلى وحدة المعالجة في ذراع الروبوت، حيث تستقبل البيانات وتتحول إلى أوامر تشغيلية للتحكم بحركة المفاصل. ويُوضّح الشكل (8) البنية العامة لتوسيع العناصر المكونة لقسم الإرسال والتحكم.



الشكل (8): توصيل العناصر المستخدمة في قسم الإرسال والتحكم.

يتألف المقبض الأول من وحدتين من عصي التحكم التنااظرية مزدوجة المحاور نوع KY023 (Joystick Module). تقوم العصي الأولى بالتحكم بحركة المفصل الأول (Joint 1-Axis) والمحور العمودي للذراع (Joint Z-Axis) ، في حين تتحكم العصي الثانية بحركة المفصل الثاني (Joint 2-Axis) والمفصل الثالث (Joint 3-Axis). يوضح الشكل (A-9) بين تصميم المقبض الأول.

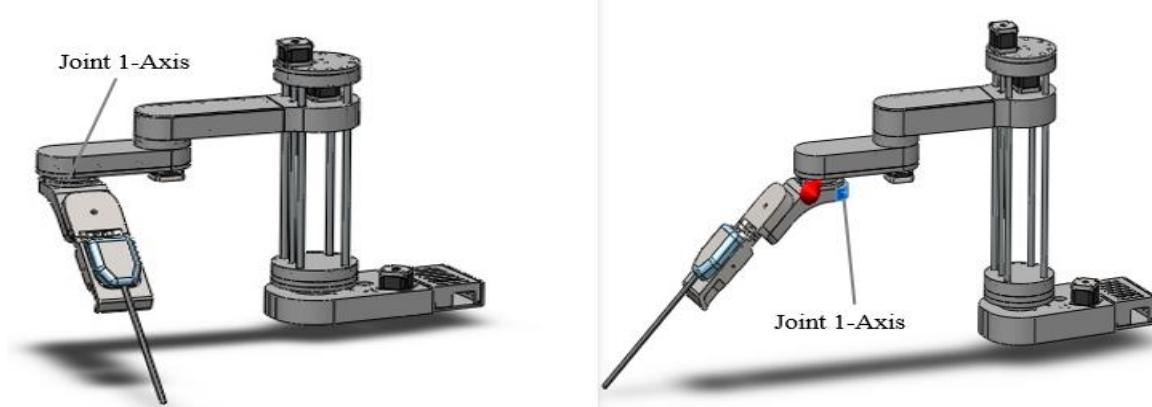


الشكل (9): تصميم المقبض الأول والثاني.

يتتألف المقبض الثاني من عصى تحكم تناطيرية مزدوجة المحاور نوع (Joystick Module) KY023 (Instrument Flexion and Abduction) في أداة دافنشي الجراحية، بالإضافة إلى مقاومتين متغيرات بقيمة 10Kom، تستخدم المقاومة الأولى للتحكم بحركة الالتفاف للأداة الجراحية (Instrument Rotation)، بينما تستخدم المقاومة الثانية للتحكم بمقبض الأداة الجراحية (Instrument Gripper). يوضح الشكل (B-9) تصميم المقبض الثاني.

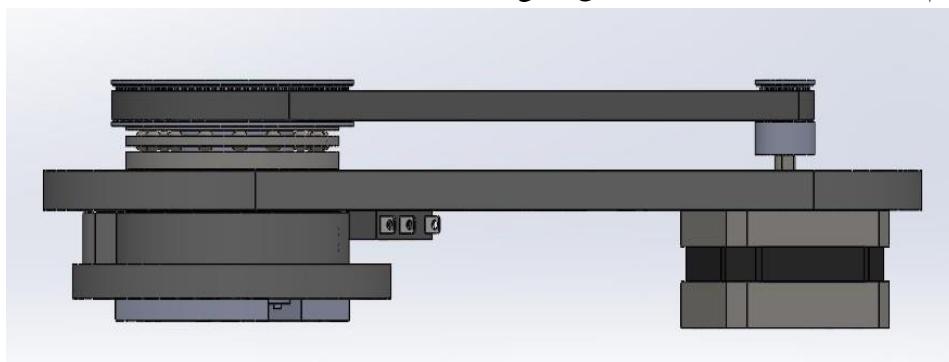
مناقشة النتائج

استخدمت بيئة المحاكاة Solidworks لتحليل حركة ذراع الروبوت والعمل على التأكيد من قدرة الروبوت المقترن من تفزيذ المهام الجراحية المطلوبة منه ضمن المجال التشغيلي المطلوب، والعمل على دراسة استجابة النظام للتأخيرات الزمنية والحركات الاهتزازية الناتجة. تم اختيار Solidworks لعدة أسباب أهمها: يوفر أدوات متقدمة لتحليل أجزاء ومكونات الروبوت مما يسمح القيام بمحاكاة دقيقة لمفاصل الروبوت المقترن، والتكامل العالي مع النماذج ثلاثية الأبعاد، والدقة العالية في تقدير زمن الاستجابة وعزم الدوران. قمنا بدراسة آلية نقل الحركة من خلال العزم المطلوب لتحريك المفصل ومنحى الحركة الزاوية للمفصل أيضاً، وهدف اختبار الصدق والثبات الخاص بالنتائج التجريبية والتأكد من مطابقة نتائج المحاكاة مع القيم الفعلية للروبوت المقترن استخدمت حساسات لقياس العزم الخاص بكل مفصل بالإضافة إلى جهاز لتسجيل زمن حركة الذراع من حركة الزاوية 0 إلى الزاوية 90 درجة مما وفر دقة قياس ضمن هامش خطأ لا يتجاوز $\pm 0.5\%$. وقمنا بتكرار عمليات القياس لكل مفصل من مفاصل الروبوت المقترن خمس مرات على الأقل وبفترات زمنية مختلفة. سوف يتم استعراض البارامترات السابقة لكل مفصل من مفاصل الروبوت المقترن، بالنسبة للمفصل الأول والموضح في الشكل (10):



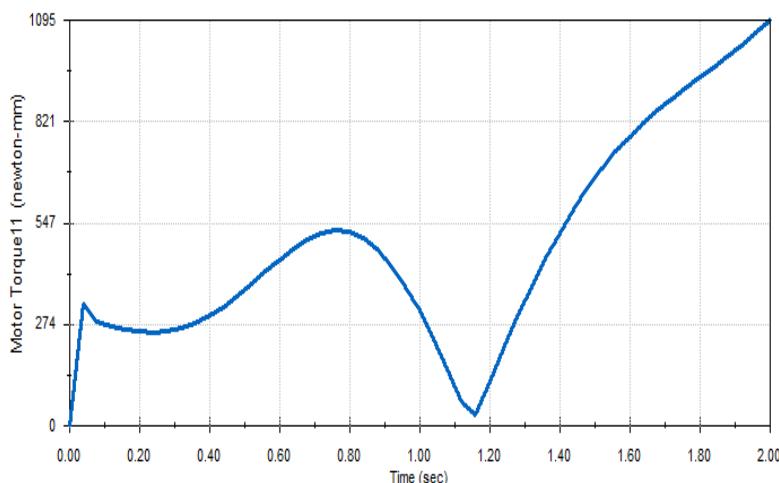
الشكل (10): المفصل الأول في الروبوت المقترن.

الشكل (11) يوضح تصميم آلية نقل الحركة الدورانية بنسبة تروس 90 إلى 20 المستخدمة في محور الذراع (Joint 1). هذه النسبة تؤدي إلى زيادة عزم الدوران بمقدار 4.5 أضعاف، مما يسمح للذراع بحمل أوزان أثقل، بينما تقل السرعة الدورانية بنفس النسبة.



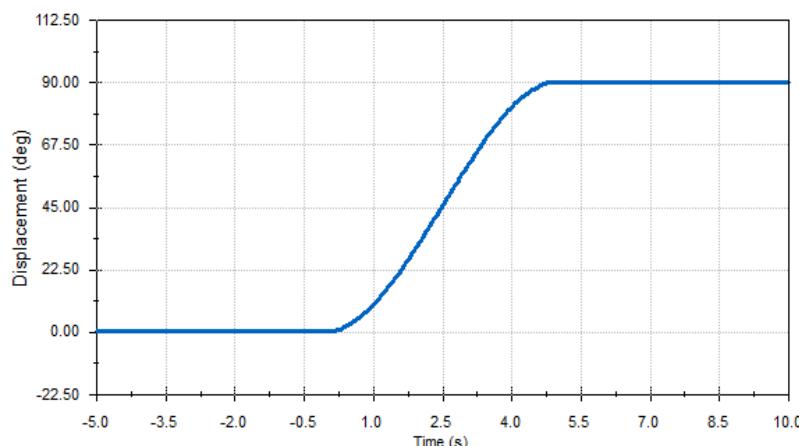
الشكل (11): تصميم آلية نقل الحركة الدورانية في المحور الأول.

بموجب الحسابات التي تم اجرائها على نسب التحويل، العزم المولود إلى نقطة الدوران لمotor الدوران الاول (Joint 1) هو $Torque = 1920 \text{ N.mm}$ والعزم اللازم لتحريك المفصل الأول هو 1095 N.mm . الشكل (12) يوضح العزم المطلوب للتحريك. بعد اجراء الدراسة العزم اللازم والعزم المولود للتحريك. وبالتالي يكون عامل الأمان (Factor Of Safety) F.O.S أكبر بنسبة 75%.



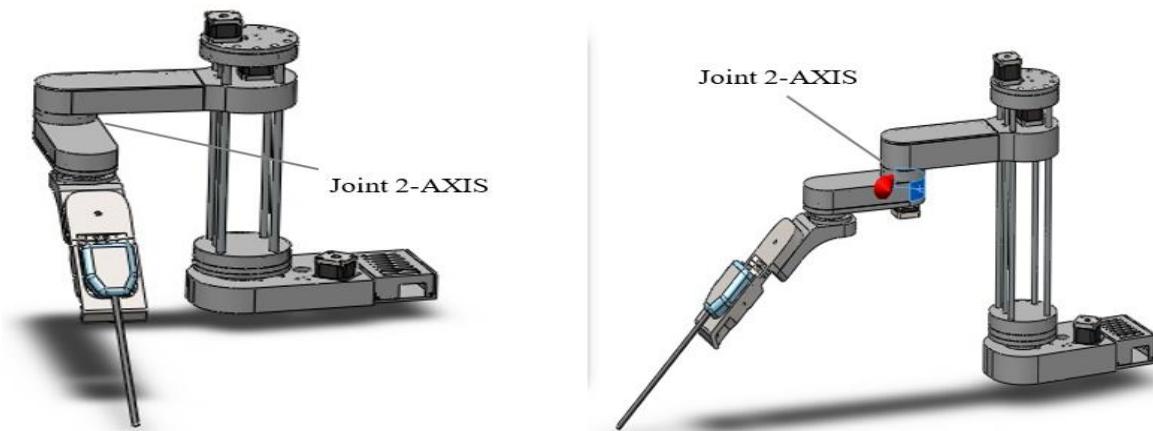
الشكل (12): العزم المطلوب لتحريك المفصل الأول.

يوضح منحنى الحركة الزاوية الاستجابة الخطوية للمفصل الأول (Joint 1) في الشكل (13)، حيث يتحرك الذراع من زاوية 0 إلى 90 درجة خلال فترة زمنية تقارب 5 ثانية. يتميز المنحنى بجزء متزايد تدريجياً يمثل تسارع الذراع، يليه جزء ثابت يدل على وصول الذراع إلى الزاوية المطلوبة واستقرارها.



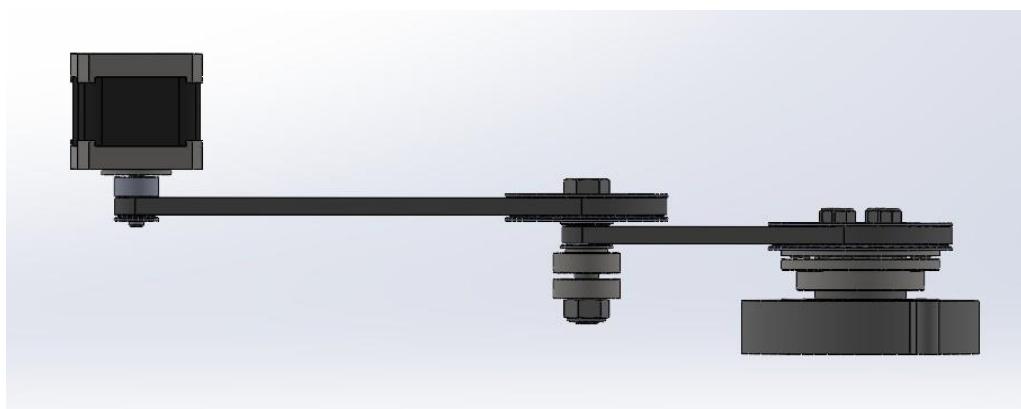
الشكل (13): منحنى الحركة الزاوية للمفصل الأول.

أما المفصل الثاني والموضح في الشكل (14):



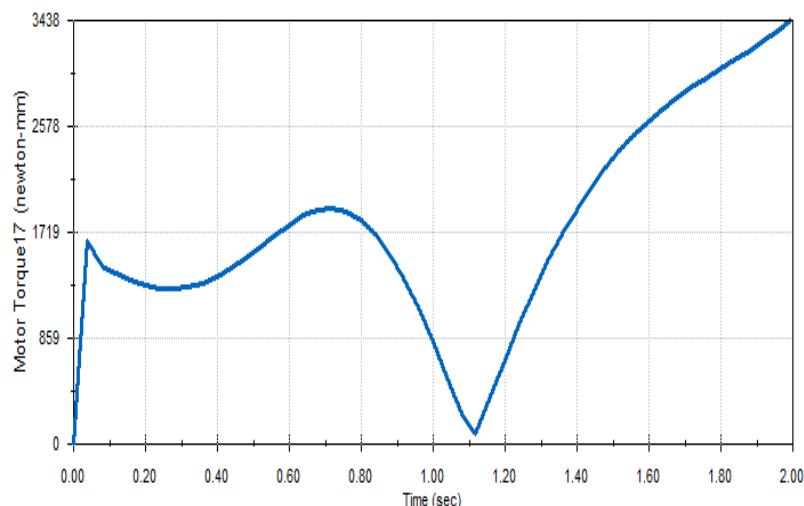
الشكل (14): المفصل الثاني في الروبوت المقترن.

الشكل (15) يوضح تصميم آلية نقل الحركة الدورانية بنسبة تروس 80 إلى 20 ثم 23 إلى 92 المستخدمة في المحور الثاني (Joint 2). هذه النسبة تؤدي إلى زيادة عزم الدوران بمقدار 16 مرة، مما يسمح للذراع بحمل أوزان أثقل، بينما تقل السرعة الدورانية بنفس النسبة.



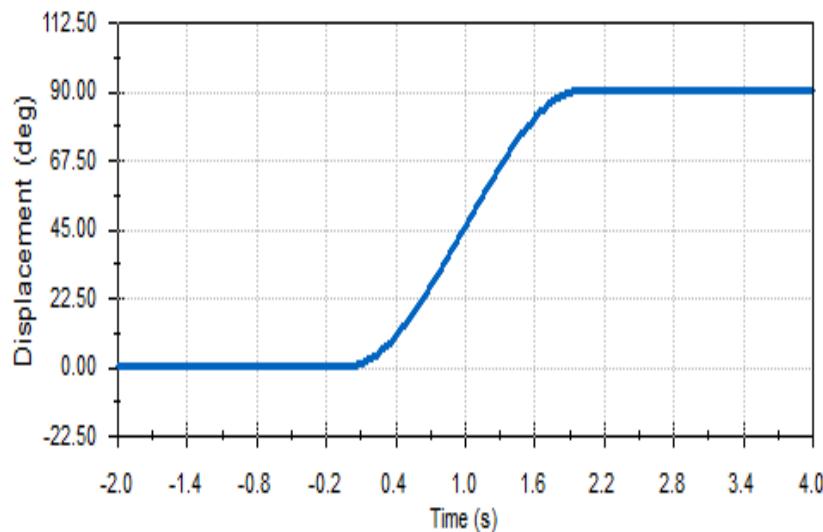
الشكل (15): تصميم آلية نقل الحركة الدورانية في المحور الثاني.

بموجب الحسابات التي تم اجرائها على نسب التحويل، العزم المولى إلى نقطة الدوران لمحور الدوران الثاني (Joint 2) هو $Torque = 7680 \text{ N.mm}$ والعزم الازم لتحريك المفصل الثاني هو 3438 N.mm . الشكل (16) يوضح العزم المطلوب لتحريك. بعد اجراء الدراسة العزم اللازم والعزم المولى للاحريك، وبالتالي يكون عامل الأمان (Factor Of Safety) F.O.S أكبر بنسبة 123%.



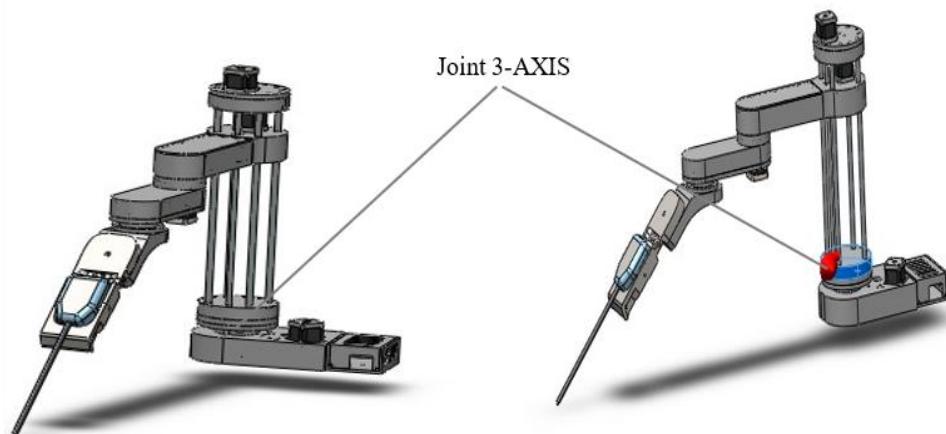
الشكل (16): العزم المطلوب لتحريك المفصل الثاني.

يوضح منحنى الحركة الزاوية الاستجابة الخطوية للمفصل الثاني (Joint 2) في الشكل (17)، حيث يتحرك الذراع من زاوية 0 إلى 90 درجة خلال فترة زمنية تقارب 2.2 ثانية. يتميز المنحنى بجزء متزايد تدريجياً يمثل تسارع الذراع، يليه جزء ثابت يدل على وصول الذراع إلى الزاوية المطلوبة واستقرارها.



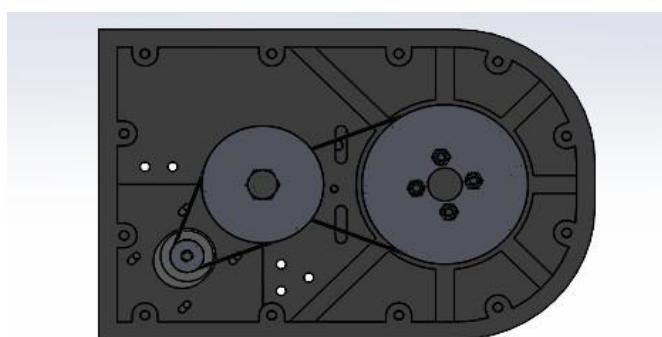
الشكل (17): منحنى الحركة الزاوية للمفصل الثاني.

أما المفصل الثالث والموضح في الشكل (18):



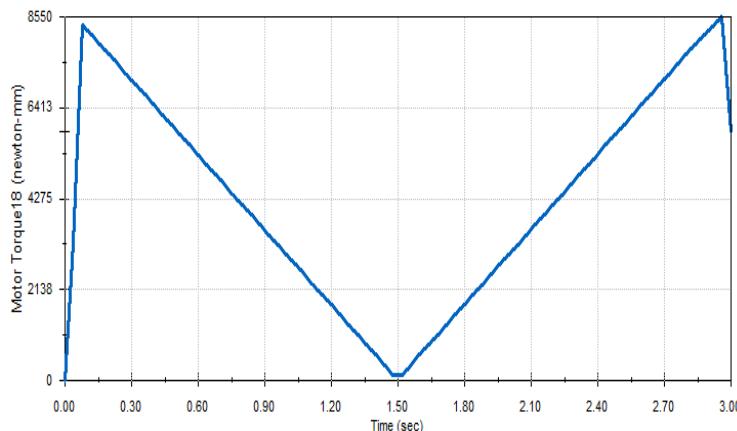
الشكل (18): المفصل الثالث في الروبوت المقترن.

الشكل (19) يوضح تصميم آلية نقل الحركة الدورانية بنسبة ترموس 80 إلى 20 ثم 22 إلى 110 المستخدمة في المحور الثالث (Joint 3). هذه النسبة تؤدي إلى زيادة عزم الدوران بمقدار 20 مرة، مما يسمح للذراع بحمل أوزان أثقل، بينما تقل السرعة الدورانية بنفس النسبة.



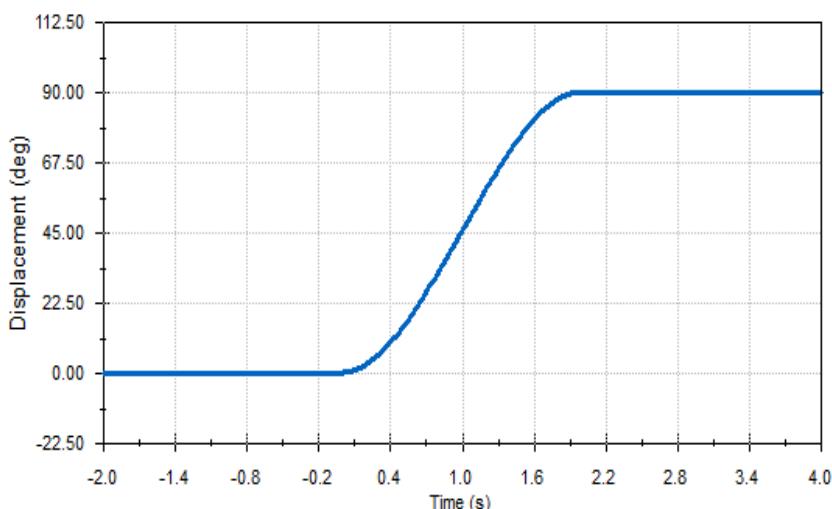
الشكل (19): تصميم آلية نقل الحركة الدورانية في المحور الثالث.

بموجب الحسابات التي تم اجرائها على نسب التحويل، العزم المولد إلى نقطة الدوران لمotor الدوران الثالث (Joint 3) هو Torque = 9600 N.mm والعزم اللازم لتحريك المفصل الثالث هو 8550 N.mm الشكل (20) يوضح العزم المطلوب للتحريك. بعد اجراء الدراسة العزم اللازم والعزم المولد للتحريك، وبالتالي يكون عامل الأمان (Factor Of Safety) أكبر بنسبة 12%.



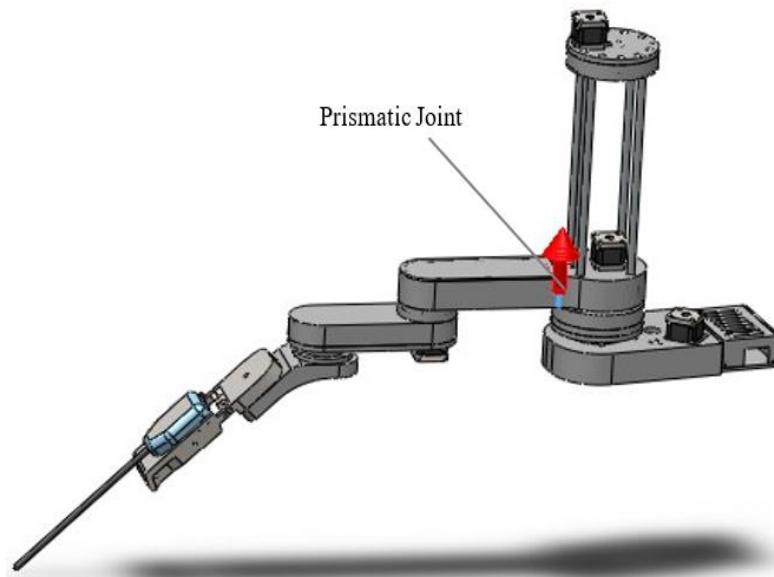
الشكل (20): العزم المطلوب لتحريك المفصل الثالث.

يوضح منحنى الحركة الزاوية الاستجابة الخطوية للمفصل الثالث (Joint 3) في الشكل (21)، حيث يتحرك الذراع من زاوية 0 إلى 90 درجة خلال فترة زمنية تقارب 2.2 ثانية. يتميز المنحنى بجزء متزايد تدريجياً يمثل تسارع الذراع، يليه جزء ثابت يدل على وصول الذراع إلى الزاوية المطلوبة واستقرارها.



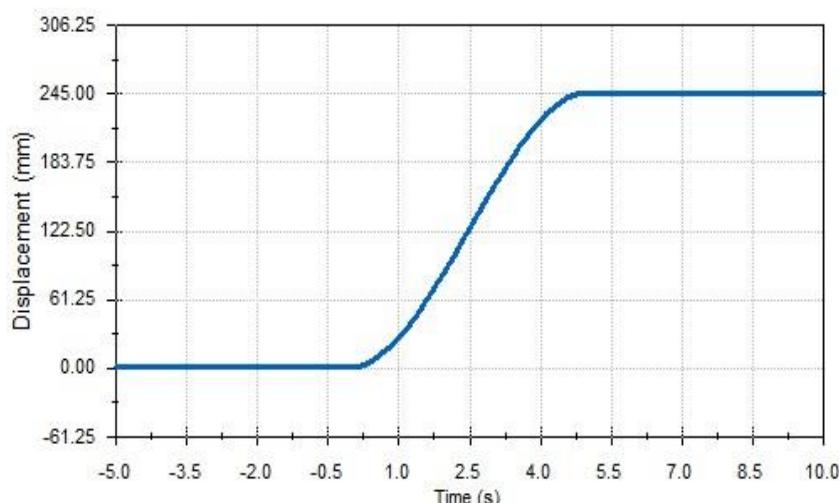
الشكل (21): منحنى الحركة الزاوية للمفصل الثالث.

أما المفصل الرابع والموضح في الشكل (22):



الشكل (22): المفصل الرابع في الروبوت المقترن.

يوضح منحنى الحركة الزاوية الاستجابة الخطوطية لمفصل الانزلاق (Prismatic Joint) في الشكل (23)، حيث يتحرك الذراع من ارتفاع 0 إلى 245mm خلال فترة زمنية تقارب 5.5 ثانية. يتميز المنحنى بجزء متزايد تدريجياً يمثل تسارع الذراع، يليه جزء ثابت يدل على وصول الذراع إلى الزاوية المطلوبة واستقرارها.



الشكل (23): منحنى الحركة الرأسية لمحور الانزلاق.

مما سبق نجد أن هناك اختلاف في قيم العزم وعامل الأمان الخاص بكل مفصل من مفاصل الروبوت المقترن ويعود السبب في ذلك إلى اختلاف الأدوار ومتطلبات التحميل والوظائف الميكانيكية لكل مفصل.

بسبب عدم وجود أرقام كمية دقيقة فيأغلب الأبحاث السابقة سوف نقوم بعملية مقارنة نوعية تركز على عدد من الجوانب أهمها التصميم والأداء الحركي والملوئنة والتكلفة وسهولة التكامل مع وروبوت da Vinci القياسي وروبوت SCARA القياسي والروبوت المقترن في المرجع [6] لأن روبوت هجين مطور بأربع درجات حرية وهو روبوت مشابه للروبوت المقترن في هذا البحث والجدول (4) يلخص أهم جوانب المقارنة.

الجدول (4): المقارنة مع الأبحاث السابقة.

عنصر المقارنة	الروبوت المقترن في هذا البحث	Cao et al. [6]	روبوت القاري	da Vinci روبوت القاري
التصميم	روبوت هجين بأربع درجات حرية يجمع بين روبوت da SCARA مع روبوت Vinci بهدف تحقيق	ثلاث درجات حرية يتميز بسرعته العالية في الحركات الأفقية	روبوت تقليدي يمتلك ست درجات حرية يتميز بتحكمه عالي الدقة وقدرته على أداء حركات	

عنصر المقارنة	الروبوت المقترن في هذا البحث	Cao et al. [6]	робوت القباري	SCARA روبوت القباري	da Vinci روبوت القباري
المواءمة بين السرعة والدقة العالية.	كثيرة.		والراسية المتكررة المستخدمة في تنفيذ المهام الصناعية.	والسرعه العاليه في البيانات الصناعية.	دقّيّة ومعقّدة في العمليات الجراحية.
الأداء الحركي	المواءمة بين السرعة والدقة.	السرعه العاليه في مساحات العمل الكبيرة.	السرعه العاليه في البيانات الصناعية.	السرعه العاليه جداً مع سرعة منخفضه نسبياً.	الدقّه العاليه جداً مع سرعة منخفضه نسبياً.
المرونة	المرونة في التعامل مع مهام جراحية متعدّلة.	المرونة في التطبيقات الصناعية.	المرونة في تطبيقات صناعية محددة.	مرونة عالية في التحكم الدقيق الخاص بالمهام الجراحية.	مرونة عالية في التحكم العاليه في التحكم.
التكلفة	التكلفة المنخفضة نسبياً نتيجة الاعتماد على الجمع بين روبوت SCARA مع روبوت da Vinci.	-	التكلفة المنخفضة نسبياً بسبب بساطة التصميم.	التكلفة المرتفعة نتيجة التعقيد الكبير والتقنيات المستخدمة في هذا الروبوت.	التكلفة المرتفعة نتيجة التعقيد الكبير والتقنيات المستخدمة في هذا الروبوت.
سهولة التكامل	إمكانية الدمج مع أنظمة تحكم وبرمجيات متقدمة بسهولة.	-	محدوّدية التوافق مع أنظمة تحكم متقدمة أو بيانات تشغيلية متغيرة.	محدوّدية التوافق مع أنظمة تحكم متقدمة أو بيانات تشغيلية متغيرة.	التوافق مع أنظمة تحكم مخصصة للمجال الطبي.

التوصيات:

- بناءً على تأثير الدراسة التي تؤكد أن التكامل بين الأنظمة الروبوتية الصناعية والجراحية يمثل فرصة هامةً لتصميم روبوتات هجينية تجمع بين كفاءة الأنظمة الصناعية ودقة الأنظمة الجراحية، توصي الدراسة بما يلي:
- انطلاقاً من القيم المختلفة للعنز وعامل الأمان الخاصة بكل مفصل من مفاصل الروبوت من الممكن في الأبحاث المستقبلية بناء تصميم مخصص ومحسن لكل مفصل من أجل زيادة كفاءة الروبوت وتعزيز موثوقيته ومتانته والعمل على تخفيض استهلاك الطاقة.
 - تحسين دقة قراءة الحركة في قسم الإرسال واستخدام حساسات مثل Rotary Decoder.
 - العمل على إضافة بعض حساسات الحركة لحساب تموير الذراع لزيادة دقة الروبوت المقترن.
 - بناء نموذج متعدد الأذرع بهدف تحسين أداء الروبوت المقترن وزيادة سرعة ودقة العمل.
 - العمل على تدعيم عمل الروبوت من خلال استخدام خوارزميات تعلم الآلة والتعلم العميق من أجل تطوير نظام التحكم الخاص بالروبوت المقترن.
 - من الممكن القيام باختبار الروبوت في الدراسات والأبحاث المستقبلية في بيئه تشغيل فعلية بهدف تعليم النتائج والتحقق من انخفاض زمن الإجراء الطبي وقياس دقة التموير، إلخ.
 - بالاعتماد على النتائج التجريبية في هذا البحث من الممكن أن تركز الأبحاث المستقبلية على تطوير آليات تحكم برمجي متقدمة بهدف زيادة الدقة والتكامل للروبوت المقترن.

References

- Yang, G.-Z. et al. (2017), "Medical robotics—Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy," *Science Robotics*, 2(4), eaan9801, <https://doi.org/10.1126/scirobotics.eaan9801>.
- Gao, A. et al. (2021), "Progress in robotics for combating infectious diseases," *Science Robotics*, 6(52), eabf1462, <https://doi.org/10.1126/scirobotics.eabf1462>.
- D'Ettorre, C. et al. (2021), "Accelerating surgical robotics research: a review of 10 years with the da Vinci research kit," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 29(4), 56–78, <https://doi.org/10.1109/MRA.2021.3089164>.
- Shaw, A. (2024), "Advancement in gravity compensation and control for da Vinci surgical robot," *IEEE, ICIIBMS 2024, Track 2: Artificial Intelligent, Robotics and UAV, Control Engineering, and Human-Computer Interaction*.

- Nguyen, V. D. et al. (2023), "Identification of singular configuration for 4-DOF RPRR SCARA robot," International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 12(12).
- Cao, W. et al. (2024), "Design and development of a new 4 DOF hybrid robot with SCARA motion for high-speed operations in large workspace," Mechanism and Machine Theory, 198, 105280, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2024.105280>.
- Febrianto, R. et al. (2024), "Design and development of a 5-DOF SCARA robot arm for robotics education in a stem laboratory," *ijcs*, 13(5).
- Tay, S. H. et al. (2022), "A Review of SCARA robot control system," Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET).
- Bouzid, R. et al. (2024), "ANN approach for SCARA robot inverse kinematics solutions with diverse datasets and optimisers," Applied Computer Systems, 29(1), 24–34, <https://doi.org/10.1007/s10489-023-04913-y>.
- Kapusi, T. P. et al. (2022), "Application of deep learning in the deployment of an industrial SCARA machine for real-time object detection," Robotics 2022, 11(69), <https://doi.org/10.3390/robotics11040069>
- Al Mashhadany, Y. et al. (2024), "Design and analysis of a hybrid intelligent SCARA robot controller based on a virtual reality model," Journal of Robotics and Control (JRC), 5(6), <https://doi.org/10.18196/jrc.v5i6.23158>
- Meindl, M. et al. (2024), "Autonomous iterative motion learning (ai-mole) of a SCARA robot for automated myocardial injection," arXiv:2409.06361v1 [cs.RO] 10 Sep 2024.
- Hwang, M. et al. (2020), "Applying depth-sensing to automated surgical manipulation with a da Vinci robot," arXiv:2002.06302v1 [cs.RO] 15 Feb 2020.
- Gao, C. et al. (2022), "RGB-D semantic slam for surgical robot navigation in the operating room," arXiv:2204.05467v1 [cs.RO] 12 Apr 2022.
- Kim, J. et al. (2024), "Surgical robot transformer (SRT): imitation learning for surgical tasks," arXiv:2407.12998v1 [cs.RO] 17 Jul 2024.
- Zhang, D. et al. (2022), "Human-robot shared control for surgical robot based on context-aware sim-to-real adaptation," arXiv:2204.11116v3 [cs.RO] 4 Jun 2022.
- Pandya, A. (2023), "Chat GPT-enabled daVinci surgical robot prototype: advancements and limitations," Robotics 2023, 12(97), <https://doi.org/10.3390/robotics12040097>.
- Kwak, Y. et al. (2022), "Da Vinci SP single-port robotic surgery in gynecologic tumors: single surgeon's initial experience with 100 cases," Yonsei Medical Journal, 63(2), 179-186.
- Francavilla, S. et al. (2022), "Radical prostatectomy technique in the robotic evolution: from da Vinci standard to single port-a single surgeon pathway," J Robot Surg, 16(1), 21-27, <https://doi.org/10.1007/s11701-021-01194-8>.
- Grand View Research. (2024), "Industrial Robotics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type, By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2024 – 2030", Retrieved August 12, 2025 from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-robotics-market>
- Expert Market Research. (2024), "Surgical Robotics Market Report and Forecast 2024-2034", Retrieved August 12, 2025 from <https://www.expertmarketresearch.com/reports/surgical-robotics-market>