مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٧) العدد(١١) ٢٠٢٣
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (7) No. (11) 2023

تصميم وتنفيذ مركبة روبوتية مُستقلة قادرة على تجنب العوائق واختيار المسار الأقصر في التنقّل

أ. د. م. ثائر أحمد ابراهيم *

أ. د. م. بسام عطية **

م. محمد فؤاد السّماك***

(تاريخ الإيداع ٢٧/ ٧/ 2023 – تاريخ النشر ٩/ ١١/ 2023)

□ ملخّص □

تُعتبر المركبات المقادة آلياً AGV (Automatic Guided Vehicles) والروبوتات المتحركة المستقلة AMR (Autonomous Mobile Robots) من الروبوتات المُتحركة المُستخدمة في التصنيع والأعمال اللوجستية لتحسين العمليات الانتاجية وتعزيز الكفاءة، وذلك من خلال استخدامها في العديد من المهام مثل نقل المواد، وترتيب المستودعات، وتوزيع المنتجات داخل المصانع.

الـ AGV والـ AMR هي مظلة واسعة تنضوي تحتها العديد من العلوم الهندسية والبرمجية لإنتاج روبوتات مُتحركة ذات قدرات تنقّل ذاتية.

تم في هذا العمل شرح خطوات ومراحل تصميم وتصنيع مركبة روبوتية مُستقلة قادرة على تجنب العوائق، بما في ذلك تصميم الهيكل الرئيسي والأنظمة الكهربائية والتحكّمية بالإضافة إلى التصميم البرمجي.

من أجل اختيار المسار الأقصر في التنقّل واستكشاف البيئة المحيطة والبحث عن المسار الأمثل وكشف العوائق تم الاعتماد على خوارزمية "البحث بالعمق أولاً" "DFS" (Depth–First Search). كما تم توضيح مخطط الفئات لبرنامج استكشاف الخريطة وإيجاد المسار باستخدام الرسوم البيانية.

أظهرت الاختبارات البرمجية والعملية في بيئة التصنيع الحقيقة المبنية على نهج "Matrix production" نجاح المركبة الروبوتية المُصممة في جميع الحالات حيث تم العثور على المسار الأمثل بين عقدة الانطلاق والعقدة الوجهة (العقدة الهدف) وتم تجنب العوائق بنجاح.

الكلمات المفتاحية: الروبوتات المُتحركة، خوارزمية البحث بالعمق أولاً، تجنب العوائق، تحديد المسار، استكشاف الخريطة، الإنتاج المصفوفي.

* أستاذ في قسم هندسة الأتمتة الصناعية – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – طرطوس – سوريا.

** أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سوريا.

*** طالب دكتوراه في قسم هندسة الأتمتة الصناعية – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – طرطوس – سوريا.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٧) العدد(١١) ٢٠٢٣
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (7) No. (11) 2023

Design and Implementation of an Autonomous Robotic Vehicle Capable of Avoiding Obstacles and Choosing the Shortest Path in Navigation.

Pro. Their Ibrahim [*]
Pro. Bassam Ateiah [**]
Eng. Mohammad Fouad Al-Sammak [***]

(**Received ٢٧/٧/2023.Accepted 9/11/2023)**

□**ABSTRACT** □

AGV (Automatic Guided Vehicles) and AMR (Autonomous Mobile Robots) are considered mobile robots used in manufacturing and logistics operations to improve production processes and enhance efficiency, by using them in many tasks such as material transportation, warehouse arrangement, and product distribution within factories.

The AGV and the AMR are a large umbrella that includes many engineering and software sciences to achieve the production of mobile robots with autonomous mobility capabilities.

In this work, the steps and stages of designing and manufacturing an autonomous robotic vehicle capable of avoiding obstacles are explained, including the design of the main structure, electrical and control systems, as well as the software design.

In order to choose the shortest path in navigation, explore the surroundings, search for the path and detect the obstacles, the "DFS" (Depth-First Search) algorithm was adopted. The Category Diagram of the map exploration and path finding program was also shown using Graphs.

The software and practical tests in the real environment "Matrix production" show the success of the designed robotic vehicle in all cases, and a path is found between the starting node and the destination node (the target node), and the obstacles were successfully avoided.

Key words: Mobile robots, depth-first search algorithm, obstacle avoidance, pathfinding, map exploration, Matrix production.

[*]Professor at Industrial Automation Engineering Faculty, Tartous University, Tartous, Syria.

[**]Professor at Electromechanical Engineering Faculty, Tishreen University, Lattakia, Syria.

[***]Phd Student at Industrial Automation Engineering Faculty, Tartous University, Syria.

١- مقدمة:

استطاعت الروبوتات المُتحركة، في الآونة الأخيرة، من الدخول إلى العديد من المجالات والاستخدامات لما تتمتع به من ميزات تساهم في تحسين كفاءة العمل وزيادة الانتاج. ففي المجال الصناعي تقوم المركبات الروبوتية بتنفيذ العديد من المهام بشكل متقن، مثل: نقل المواد، وترتيب المستودعات، وتوزيع المنتجات داخل المصنع [2].

تُعتبر الـ AGV (Automatic Guided Vehicles) والـ AMR (Autonomous Mobile Robots) من الروبوتات المُتحركة المستخدمة بكثرة في التصنيع والأعمال اللوجستية [1]. تتميز هذه المركبات بالقدرة على التنقل ذاتياً والتعامل بمرونة مع البيئة المحيطة [4].

يتطلب تصميم المركبة الروبوتية مهارات متقدمة في عدة مجالات تكنولوجية كالهندسة الميكانيكية والهندسة الكهربائية وهندسة التحكّم بالإضافة إلى التمكّن من البرمجيات [3]. وتتضمن عملية تصنيع المركبة الروبوتية عدة خطوات أساسية أهمها تجميع الهيكل الأساسي للمركبة وتركيب العناصر والتجهيزات الكهربائية والإلكترونية وتثبيت البرمجيات وأنظمة التوجيه اللازمة للتحكّم في حركة المركبة وأداء المهام المطلوبة [5-6].

بعد اكتمال عملية التصنيع، تخضع المركبة الروبوتية لعمليات الاختبار وإجراء التعديلات اللازمة لتحسين أدائها وضمان استجابتها السليمة للتحديات المختلفة وتوافق أدائها مع المواصفات والمعايير المطلوبة [7-8].

تعتبر الشركات المُصنعة المُتخصصة في هذا المجال من مثل Kuka أحد الأطراف الرئيسية في تطوير وتصنيع هذه الروبوتات المتحركة الحديثة [9][10].

يتمحور العمل في هذا البحث حول تصميم وتنفيذ مركبة روبوتية مُستقلة AMR بخبرات محلية تستطيع العمل بكفاءة في بيئة المستودعات والمصانع (ويمكن استثمارها في تطبيقات مختلفة في عدة مجالات) بحيث تكون قادرة على تجنب العوائق واختيار المسار الأقصر في التنقّل وتتمتع بمجموعة من الميزات التي تساهم في تحسين وتطوير العمليات الصناعية.

سنقوم بتوضيح وشرح خطوات تصميم وتنفيذ المركبة الروبوتية ومناقشة نتائج اختبار النموذج التطبيقي للمركبة الروبوتية التي تم تّصميمها في بيئة تصنيع مبنية على نهج "Matrix production" وهو نهج تصنيع يُستخدم في العمليات الصناعية لتحقيق الكفاءة وزيادة الإنتاجية [11][12].

٢- أهمية البحث، وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في مواكبة التطور التقني وتوطين التقنية الروبوتية في القطاعات الاستراتيجية، بما في ذلك القطاع الصناعي، والذي يُعدّ من القضايا ذات الأهمية البالغة. ويأتي هذا البحث بهدف تصميم وتنفيذ مركبة روبوتية للاستخدام الصناعي تتمتع بمجموعة من الميزات التي تساهم في تحسين وتطوير العمليات الصناعية، ومن بين هذه الميزات:

١. للمركبة الروبوتية القدرة على تجنب العقبات والعوائق المادية الموجودة في بيئتها: وهو أمر ضروري لتحسين كفاءة العمليات الصناعية وتجنب التصادمات التي قد تؤدي إلى إتلاف المعدات أو التأخير في العمليات الانتاجية.

٢. استئناف التوجه إلى الموقع الهدف: تستطيع المركبة الروبوتية استئناف تنفيذ المهام والانتقال إلى الموقع الهدف بعد تعرضها لأي توقف غير متوقع، مما يحسن من استمرارية العملية الصناعية ويقلل من الزمن الضائع.

٣. تحديث الخريطة بشكل مُستقل: تمتلك المركبة الروبوتية إمكانية تحديث الخريطة التي تستخدمها للتنقل بشكل مستقل، مما يسمح لها بالتعامل مع التغيّرات في بيئتها وتحديث البيانات بشكل دوري، وهذا يساهم في دقة تنقلها وتفادي العقبات.

٤. حل مشكلة توليد المسار في حال تغيّر خريطة المسارات الحقيقية: تعتبر هذه الميزة من الأهمية البالغة في البيئات الصناعية المُعقدة حيث يمكن أن تتغير مسارات العمل والخرائط الحقيقية بشكل متكرر. فعندما تمتلك المركبة الروبوتية القدرة على حل مشكلة توليد المسار بشكل ذكي ومستقل، يمكنها أن تستمر في أداء المهام بكفاءة وفعالية دون التأثر بتلك التغييرات.

بشكل عام، يهدف هذا البحث إلى تصميم وتنفيذ مركبة روبوتية ذاتية القيادة جديدة بالكامل واستخدام الخبرات المحلية لتحسين وتوطين هذه التقنية في القطاعات الإنتاجية والخدمية وحتى العسكرية. تنفيذ مثل هذه المركبة الروبوتية يمكن أن يساهم بشكل كبير في تحسين الإنتاجية والكفاءة والأمان في العمليات الصناعية مما ينعكس ايجاباً على الناحية الفنية وكذلك تحقيق توفير اقتصادي.

٣- طرائق البحث، ومواده:

في البداية قمنا بالتصميم الميكانيكي للمركبة الروبوتية وذلك باستخدام البرنامج المُتخصص في التصميم الميكانيكي "AutoDesk Inventor Professional 2021"، ثم قمنا بالتنفيذ العملي للجسم الميكانيكي للمركبة. المرحلة التالية هي اختيار المحركات الكهربائية الأنسب، وهي محركات الخطوة (Stepper Motor). ثم القيام بتصميم الأنظمة الكهربائية والتحكّمية الخاصة بالمركبة (نظام الدفع الكهربائي، المُتحكّم على متن المركبة، والرادار). ومن ثم برمجة العتاد الصلب (Firmware) باستخدام البيئة (C++).

المرحلة الأخيرة هي القيام بالتصميم البرمجي (Programming)، حيث قمنا ببناء برنامج التحكّم ورسم وتحديث الخريطة باستخدام البيئة البرمجية (C#). وفي النهاية قمنا بمناقشة نتائج اختبار النموذج التطبيقي للمركبة الروبوتية التي قمنا بتصميمها في بيئة تصنيع المبنية وفق النهج "Matrix production".

٤- تصميم وتنفيذ المركبة الروبوتية:

يتطلب تصميم وتصنيع المركبة الروبوتية المستقلة مهارات متقدمة في عدة مجالات تكنولوجية كالهندسة الميكانيكية والهندسة الكهربائية وهندسة التحكم بالإضافة إلى التصميم البرمجي.

نُلخص فيما يلي أهم خطوات التصميم والتنفيذ:

- تجميع الهيكل: تتضمن هذه الخطوة بناء الهيكل الأساسي للمركبة، والذي يشمل الإطار والمحاور والعجلات. قمنا باستخدام عمليات التصنيع التقليدية واليدوية مثل اللحام والتشكيل الميكانيكي لتجميع الهيكل.
- تركيب العناصر والتجهيزات الكهربائية والإلكترونية: والتي تشمل التجهيزات الكهربائية والعناصر الإلكترونية اللازمة لتحريك المركبة ولعملية المراقبة، والحساسات وأجهزة الاستشعار، بالإضافة إلى وحدات التحكّم وأنظمة الاتصالات.

- تثبيت البرمجيات وأنظمة التوجيه اللازمة: للتحكّم في حركة المركبة وأداء المهام المطلوبة، تتضمن هذه البرامج أنظمة التوجيه والتحكّم في المسار.
- الاختبار وتحسين الأداء: بدايةً إجراء الاختبارات للتحقق من أداء المركبة وتوافقها مع المواصفات والمعايير المطلوبة، ومن ثم ضبط البرمجيات وإجراء التعديلات اللازمة لتحسين الأداء وضمان السلامة والموثوقية.
- تجميع الأجزاء النهائية: بعد اجتياز المركبة لعمليات الاختبار والتحسين، يتم تجميع جميع الأجزاء النهائية للحصول على المركبة بصورتها النهائية.

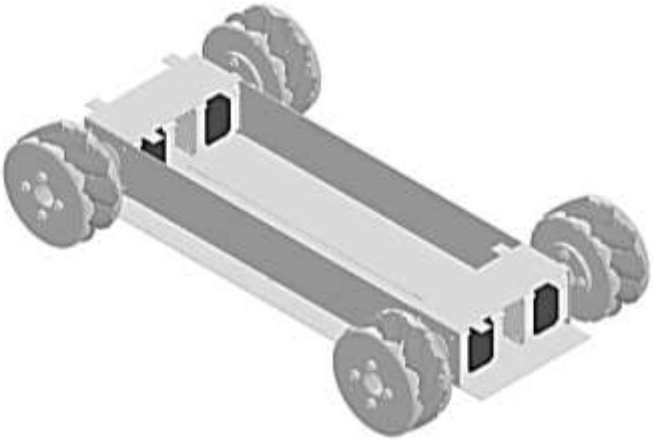
٤-١- القسم الميكانيكي:

٤-١-١- هيكل المركبة (Chassis):

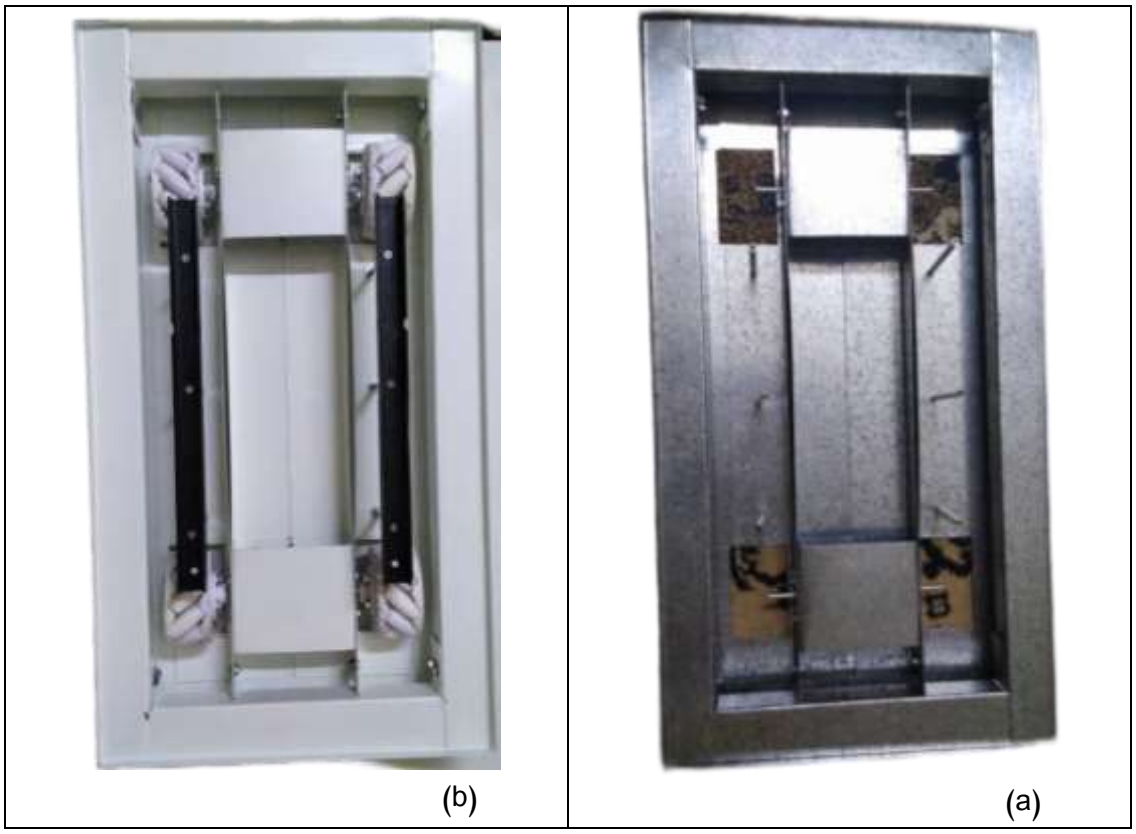
يُعتبر الهيكل القسم الداعم الرئيسي للمركبة الذي يحمل جميع المكونات الأساسية، مثل المستشعرات والمحركات وأجهزة التحكّم والبطاريات. تم تصميم الهيكل لتحمّل حمولة ثابتة لا تقل عن 10Kg، وتم تصنيع الهيكل بشكل يدوي من الفولاذ المُجلفن لحمايته من التآكل والصدأ بسماكة 0.5mm، وزن المركبة حوالي 4.32Kg، وتم ربط أقسام المركبة المختلفة باستخدام البراغي. يوضّح الشكل (1) تصميم الهيكل مع العجلات ويبين الشكل (2) الهيكل المجمع والمُنفذ للمركبة الروبوتية. يُظهر الجدول (1) المواصفات الميكانيكية للمركبة المُصممة.

٤-١-٢- العجلات (Wheels):

قمنا باختيار عجلات الميكانوم (Mecanum Wheels) لأنها تتيح للمركبة القدرة على التنقّل بكفاءة في العديد من الظروف والتضاريس المختلفة وتؤمن حركة دقيقة وقدرة على التحرك في مساحات ضيقة وتغيير الاتجاه بسرعة، وتتميز بتصميمها الفريد الذي يسمح للمركبة بالتوجيه والتحكّم بشكل مُستقل لكل عجلة مما يسمح بالحركة الجانبية والميلان بفضل تصميمها المرن وقابلية توجيهها. تم تصميم العجلات باستخدام برنامج التصميم الثلاثي الأبعاد "Autodesk Inventor Professional" حيث تمت الاستفادة من مكتبات الطباعة ثلاثية الأبعاد التي يتضمنها البرنامج. ثم قمنا بطباعة العجلات باستخدام طباعة ثلاثية الأبعاد.



الشكل (1): تصميم هيكل المركبة



الشكل (2): الهيكل وجسم المركبة المنفذ والمجمع ((a) من دون عجلات، (b) مع عجلات).

الجدول (1): المواصفات الميكانيكية للمركبة المصممة

المواصفات	الطول [mm]	العرض [mm]	الارتفاع [mm]	قطر العجلة [mm]	وزن المركبة [kg]
	585	320	100	80	4.32

٤-٢- تصميم الأنظمة الكهربائية والتحكّمية:

يتضمن تصميم الأنظمة الكهربائية والتحكّمية للمركبة مجموعة من الأنظمة والمُتحكّمات التي تسهم في دفع المركبة وتأمين التحكّم الفعّال بها، يبين الشكل (3) المخطط الصندوقي لأنظمة المركبة، وتشمل ما يلي:

١) نظام دفع المركبة الكهربائي (Vehicle Propulsion):

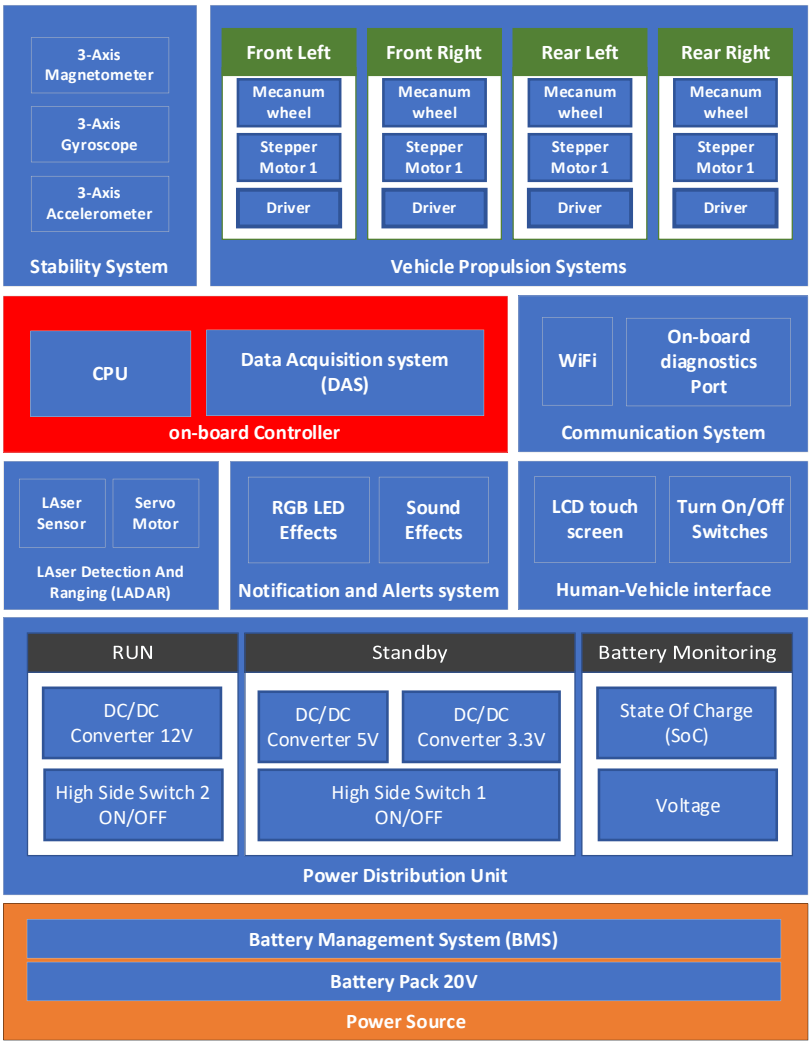
-العجلات: استخدمنا العجلات من نوع "Mecanum Wheels" لتحريك المركبة وتعديل اتجاهها.

-المحركات الكهربائية: اخترنا المحركات الخطوي من نوع "Stepper HS840117 Motor" والتي تُستخدم في تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية.

-قيادة المحركات: من أجل التحكّم في تشغيل وإيقاف المحركات وتوجيهها استخدمنا المُشغّل "DRV8825".

٢) المُتحكّم على متن المركبة (On-board Controller):

يلعب هذا المُتحكّم دوراً حاسماً في تنظيم العمل والتحكّم في النُظم الرئيسية المرتبطة بالمركبة. يلبي المُتحكّم "ATmega2560" احتياجات ومتطلبات التحكم بالمركبة (ذاكرة فلاش ٢٥٦KB، وذاكرة رام ٨KB).



الشكل (3): المخطط الصندوقي للأنظمة الالكترونية والتحكّمية داخل المركبة

٣) وحدة إدارة البطاريات (Battery Management System – BMS):

البطاريات هي مصدر الطاقة الرئيسي للمركبة الكهربائية، تم توصيل حزمة خلايا ليثيوم أيون الخاصة بالمركبة بتكوين 4S–2P. من أجل إدارة البطاريات، استخدمنا وحدة جاهزة وهي عبارة عن نظام متكامل لمراقبة وإدارة أداء البطاريات لضمان أداءها الأمثل والحفاظ على عمرها الافتراضي.

٤) وحدة توزيع الطاقة (Power Distribution Unit – PDU):

مهمة هذه الوحدة هي توزيع الطاقة الكهربائية من مصدر الطاقة (البطاريات) إلى مختلف المكونات في المركبة.

٥) نظام الاستقرار والتغذية العكسية (Stability and Feedback System):

استخدمنا المُتحكّم MPU9250-6500 لضمان استقرار المركبة وتحقيق التحكّم الدقيق في حركتها، والذي يشمل ما يلي:

- **وحدة قياس التسارع (Accelerometer):** لقياس التسارع الخطي وقوة الجاذبية. توفر هذه الوحدة قياساً للمحاور الثلاثة (X,Y,Z)، وبالتالي يمكنها تحديد الحركة والميل والاهتزاز.
- **وحدة قياس الدوران (Gyroscope):** لقياس السرعة الزاوية والدوران
- **وحدة قياس المجال المغناطيسي (Magnetometer):** لقياس المجال المغناطيسي وتحديد اتجاه وشدة المجال المغناطيسي المحيط. وتستخدم في تطبيقات التوجيه.

٦) نظام الاتصالات (Communication System):

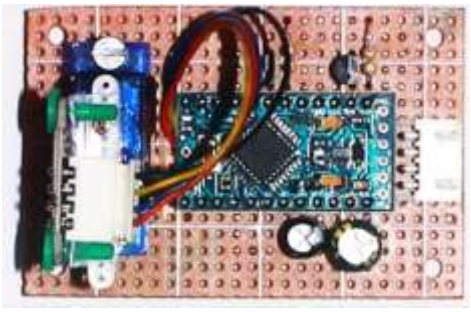
لتأمين التواصل بين مختلف المكونات والنُظم داخل المركبة. استخدمنا نظام الاتصال اللاسلكي بالمركبةESP-now (Wireless Communication with the Vehicle).

٧) نظام الإنذارات والإشعارات (Notification and Alarm System):

يتألف بشكل رئيسي من نظامين، النظام الصوتي (Sound System): يقوم بإصدار إشعارات صوتية. والنظام الضوئي (Lighting System): يقوم بإصدار إشارات ضوئية.

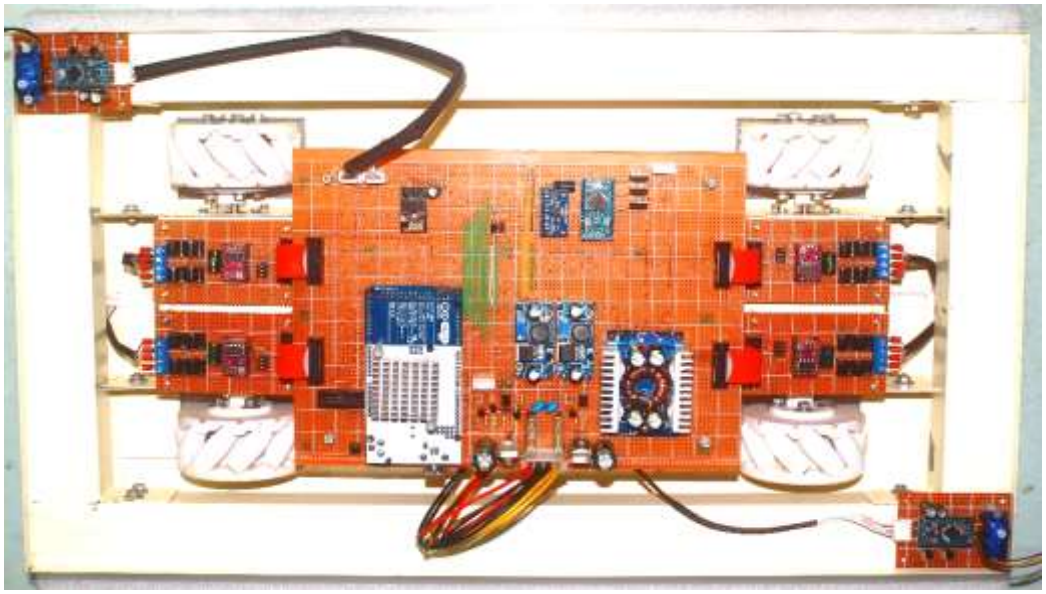
٨) رادار المركبة (LADAR – Laser Detection and Ranging):

يُستخدم لاكتشاف وتحديد مدى العوائق المحيطة بالمركبة باستخدام تقنية الليزر. و يتكون رادار المركبة المُصمم من ثلاث مكونات رئيسية: حساس المسافة VL53L0X، محرك سيرفو، متحكّم. تم دمج المكونات الثلاثة السابقة لتصنيع رادار المركبة، كما هو مبين في الشكل (4)، الذي سيوفر المعلومات المطلوبة لتحدث الخريطة.



الشكل (4): رادار المركبة المُنفذ.

تم تجميع الأنظمة والمكونات السابقة الذكر لتوفير دفع فعّال وآمن للمركبة الروبوتية وتوفير التحكّم اللازم بها. يبين الشكل (5) صورة المركبة المُنفذة بجميع محتوياتها.

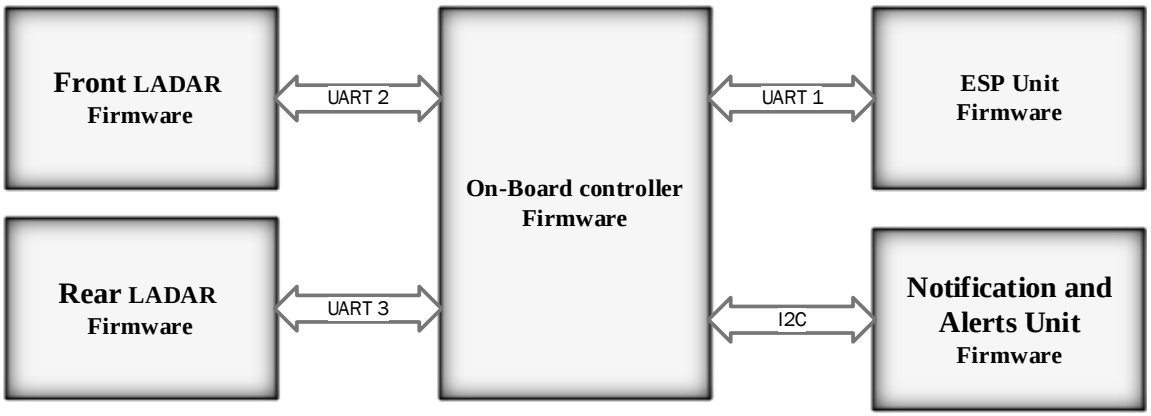


الشكل (5): المركبة المنفذة وتظهر عليها المكونات المستخدمة في تصميمها.

٤-٣- التصميم البرمجي:

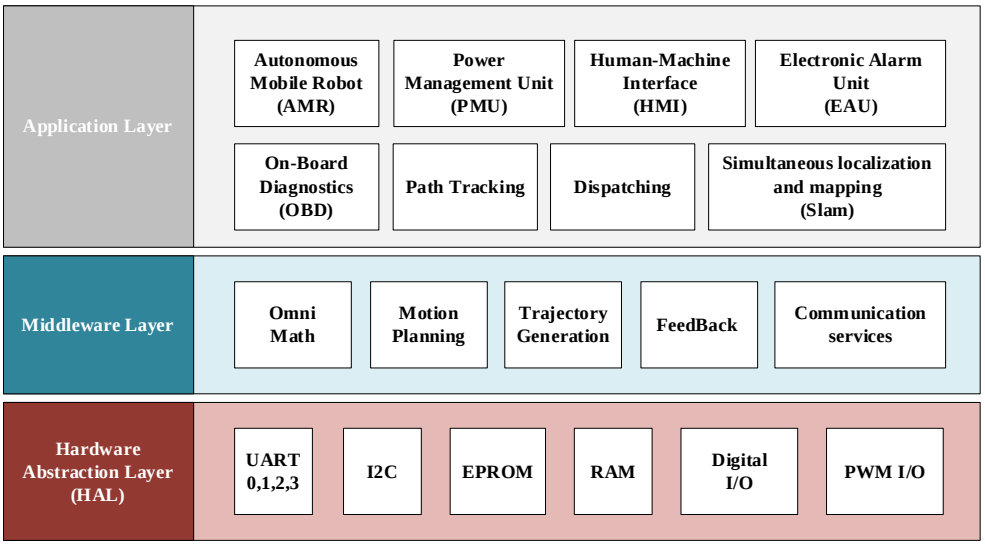
٤-٣-١- التصميم البرمجي للعتاد الصلب:

تحتوي المركبة على خمسة برامج للعتاد الصلب، الشكل (6)، تقوم بمهام مختلفة وبشكل مستقل لتحقيق التحكّم الموزّع بالمركبة وتتواصل مع "المُتحكّم على متن المركبة" بتقيات الاتصال UART و I2C، وهذه البرامج هي: برنامج المُتحكّم على متن المركبة، برنامج وحدة الاتصال "ESP Unit"، برنامج رادارات المركبة "LADARs" وبرنامج وحدة الاشعارات والتحذيرات.



الشكل (6): البرامج الثابتة (برامج العتاد الصلب) ضمن المركبة وتقنيات التواصل فيما بينها.

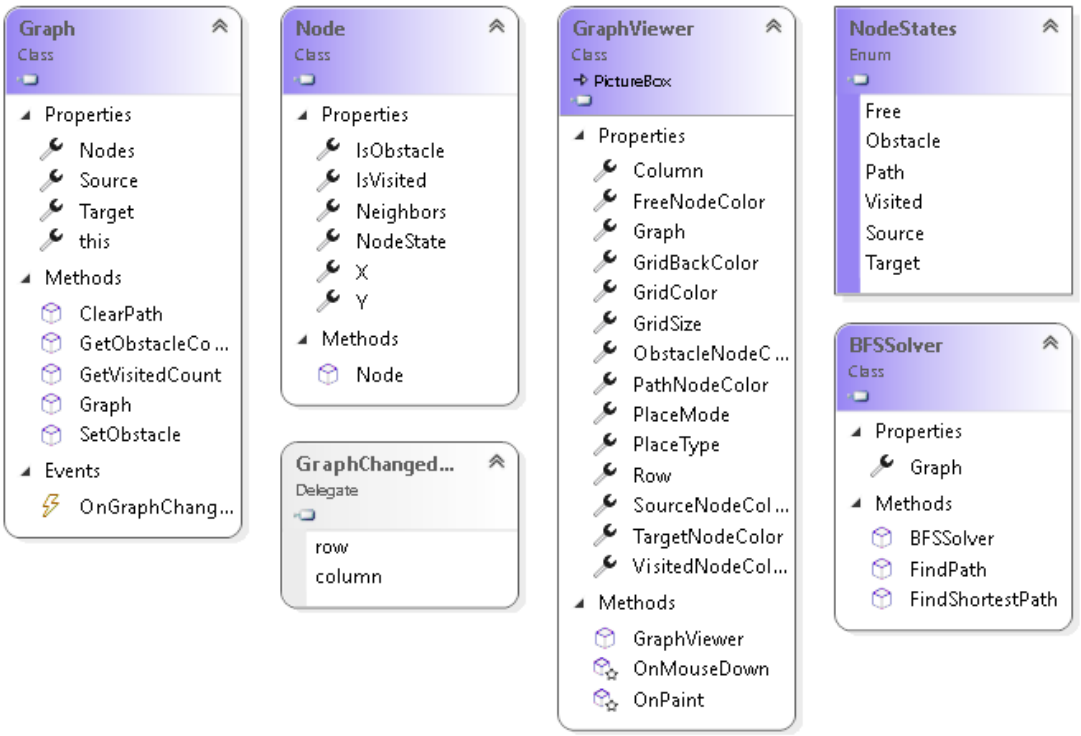
تم تمثيل وتصميم برنامج العتاد الصلب "للمُتحكّم على متن المركبة" على شكل طبقات، كما في الشكل (7).



الشكل (7): طبقات برنامج العتاد الصلب على متن المركبة.

٤-٣-٢- التصميم البرمجي لبرنامج استكشاف الخريطة وإيجاد المسار:

قمنا بتصميم برنامج لاستكشاف الخريطة وإيجاد المسار، حيث يبين الشكل (8) مخطط الفئات (Classs) للبرنامج المُصمم. تعتبر خوارزمية البحث بالعمق أولاً "Depth–First Search (DFS)" قلب هذا التصميم، وهي خوارزمية تستخدم في البحث والتنقيب في الرسوم البيانية (Graphs). تستكشف DFS الرسم البياني عن طريق الانتقال عبر الأفرع (Branches) حتى تصل إلى نهاية فرع معين قبل الانتقال إلى الفرع التالي. تستكشف الخوارزمية الفروع عميقاً قبل أن تعود إلى فروع أخرى. التنفيذ الأساسي لخوارزمية "DFS" يعتمد على الاستكشاف المتكرر(Recursion) أو استخدام القوائم (Stack) لتتبع الفروع، يحقق البرنامج المُصمم كلا الطريقتين.



الشكل (8): مخطط الفئات (Classs) لبرنامج استكشاف الخريطة وإيجاد المسار.

قمنا باستخدام خوارزمية "DFS" لحل مجموعة من المشاكل المتعلقة بالتنقّل والاستكشاف، وهي:

- استكشاف البيئة: لاستكشاف البيئات غير المعروفة بواسطة المركبة. حيث تبدأ المركبة من موقع معين ويستخدم "DFS" للتحرك في اتجاه واحد في الوقت الحالي، ويستكشف الأجزاء غير المكتشفة من البيئة حتى يتم استكشاف البيئة بأكملها، مما يمكن أن يساعد المركبة في رسم خريطة البيئة المحيطة وتحديد المسارات الممكنة للتنقل فيها.
- البحث عن المسار: للبحث عن المسار الأمثل بين نقطتين محددتين في البيئة، حيث يتم اتباع العقد المجاورة حتى يتم الوصول إلى الهدف.
- الكشف عن العوائق: في بعض الأحيان، تحتاج المركبة إلى كشف العوائق أو العقبات في البيئة المحيطة بها. باستخدام DFS، يمكن للمركبة استكشاف البيئة وتحديد المواقع التي تحتوي على العوائق وتمييزها بشكل مناسب.
- الاستكشاف والملاحة في الـ Graphs: تُستخدم الـ Graphs في تمثيل الروابط بين الأجزاء المختلفة في الخريطة. تستخدم المركبة خوارزمية DFS للملاحة في هذه Graphs وتحديد الطرق الممكنة للوصول إلى العقدة المستهدفة.

تتبع خوارزمية DFS الخطوات التالية:

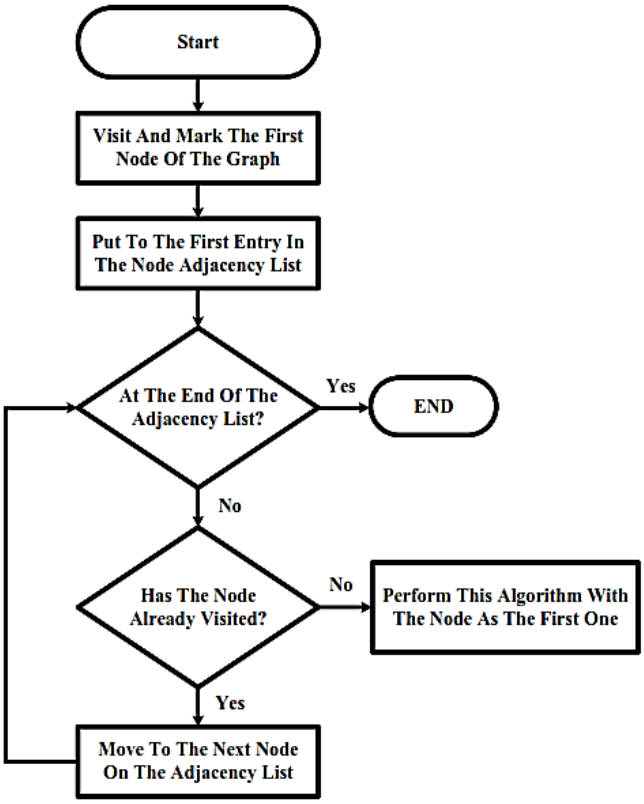
١. تبدأ الخوارزمية بتحديد العقدة الأولى للاستكشاف.
٢. تقوم بزيارة العقدة الحالية وتعليمها بأنها تمت زيارتها.
٣. تقوم بالتحقق من الجيران المتصلين بالعقدة الحالية.

٤. إذا وجدت جاراً لم يتم زيارته، تقوم بتكرار الخطوات ٢ و ٣ لهذا الجار.

٥. إذا تم زيارة جميع الجيران، تقوم بالعودة إلى العقدة السابقة وتستكشف الجيران اللاحقين.

٦. يتم تكرار العملية حتى يتم استكشاف جميع العقد.

و يبين الشكل(٩) المخطط التدفق للخوارزمية DFS.



الشكل(٩) المخطط التدفق للخوارزمية DFS.

و يبين الشكل(١٠) شبه الكود للخوارزمية DFS.

```
Data: s : the start node, target: the function that identifies a
      target node, neighbors: the function that returns the
      neighbors of a node.
Result: The shortest path between u and a target node.
if target(s) then
  return [s]
end
for v ∈ neighbors(u) do
  path ← call DFS on v
  if path ≠ ∅ then
    path ← prepend v to path
    return path
  end
end
return ∅
```

الشكل(١٠) شبه الكود للخوارزمية DFS.

٤-٣-٢-١- شرح البرنامج المُصمم لاستكشاف الخريطة والبحث عن المسار:

يسمح هذا البرنامج الذي قمنا بتصميمه بإنشاء شبكة مستطيلة ووضع عقدة إعاقة في أي موقع نرغب به عن طريق استخدام الأمر "SetObstacle"، ويمكّن أيضاً من حساب عدد العقد التي تمت زيارتها باستخدام الدوال المناسبة.

نبين فيما يلي أهم بارامترات البرنامج:

- "Graph":

-يتم إنشاء الشبكة باستخدام مصفوفة ثنائية الأبعاد من العقد "Nodes".

-يتم إنشاء اتصالات الجيران لكل عقدة وتحديد العقدة البداية "Source" والعقدة الهدف "Target".

-يتم تعيين حالة العقدة البداية والعقدة الهدف من خلال "NodeStates.Source" و"NodeStates.Target"، على التوالي.

-تعريف حدث "GraphChangedHandler" والذي يستخدم للإشعار عند حدوث تغيير في الشبكة (عند تغيير حالة العقدة).

- الخواص:

-"Source" و "Target": تحتوي على العقدة البداية والعقدة الهدف.

-"Nodes": مصفوفة ثنائية الأبعاد تحتوي على جميع العقد في الشبكة.

- الدوال:

-"SetObstacle(int row, int column)": تُستخدم لتعيين حالة العقدة في الصف والعمود المحددين بـ"NodeStates.Obstacle" لتمثيل وجود عقدة إعاقة.

-"GetVisitedCount": لحساب عدد العقد التي تمت زيارتها.

-"GetObstacleCount": لحساب عدد عقد الإعاقة.

-"ClearPath": تُستخدم لإزالة أي مسار سابق وإعادة جميع حالات العقد إلى الحالة "NodeStates.Free" (الحرّة).

- "BFSSolver":

تعتمد هذه الفئة على الفئة "Graph" التي تم تنفيذها سابقاً وتستخدم خوارزمية DFS (البحث بالعمق أولاً) للعثور على أقصر مسار بين عقدة البداية وعقدة الهدف في الشبكة.

- الدوال:

-"FindPath(Node startNode, Node goalNode)": تُستخدم للبحث عن أي مسار بين عقدة البداية وعقدة الهدف. يتم استدعاء الدالة 'DFSUtil' لإجراء البحث.

-"DFSUtil(Node currentNode, Node goalNode, List<Node> path)": دالة خاصة تنفذ البحث بواسطة خوارزمية DFS. إذا تم العثور على العقدة الهدف، يتم إضافتها إلى المسار ويتم إرجاع قيمة true، وإذا لم يتم العثور على الهدف في هذا العقد يتم استكشاف المسارات الأخرى.

-"FindShortestPath(Node startNode, Node goalNode)": تُستخدم للبحث عن أقصر مسار بين عقدة البداية وعقدة الهدف باستخدام خوارزمية DFS.

- "ConstructPath(Node startNode, Node goalNode)": دالة خاصة تُستخدم لبناء المسار بعد العثور على الهدف بواسطة DFS. وتقوم بتجميع العقد من الهدف إلى البداية باستخدام (parentMap) وإضافتها إلى القائمة المسار وتعيين حالات العقد على المسار باستخدام "NodeStates.Path".

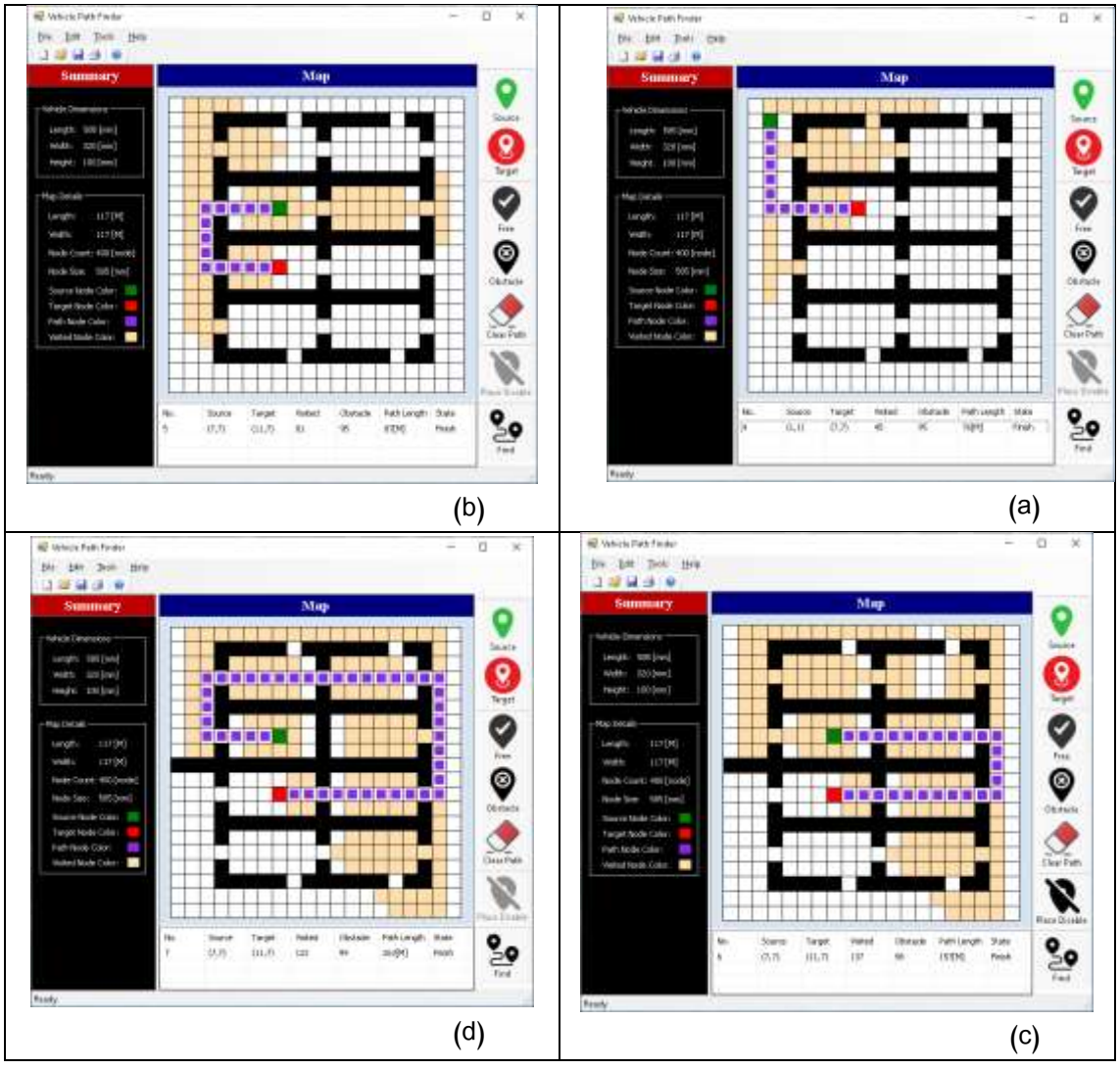
٥- النتائج والمناقشة:

تم اجراء أربع اختبارات للخوارزمية DFS التي ستستخدم في تخطيط مسار المركبة المصممة، ضمن خريطة مبنية على النهج المصفوفي للتحقق من أداء الخوارزمية، الشكل (١١)، وتم تحديد نقاط البدء والهدف كما في الجدول (2).

تمثل حالات الاختبار a و b البحث عن المسار الأقصر من عقدة البداية إلى عقدة الهدف.

أما حالات الاختبار c و d فتمثل البحث عن المسار الأقصر في حال تحديث الخريطة.

يبين الشكل (١١) والجدول (2) نتائج الاختبارات.



الشكل (١١): تخطيط مسارات التنقل للمركبة في الحالات الأربعة.

الجدول (٢): نتائج إيجاد المسار الأقصر و تحديث الخريطة

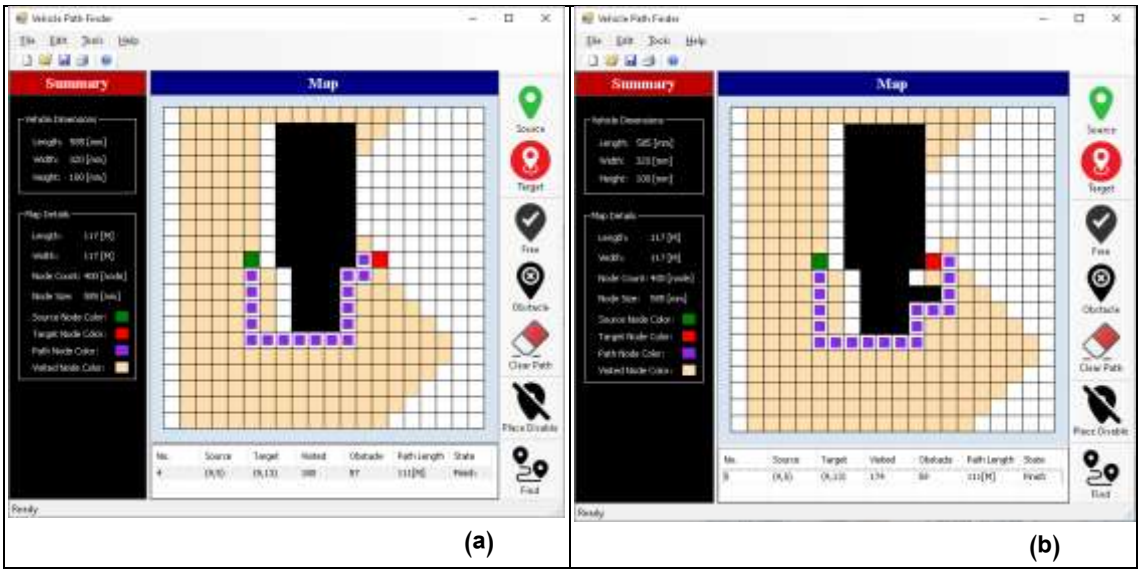
الحالة	عقدة الانطلاق	عقدة الوجهة	العقد المستكشفة	العوائق	طول المسار	حالة البحث
a	(1,1)	(7,7)	٤٥	٩٥	76 M	تم إيجاد مسار
b	(7,7)	(11,7)	٨١	٩٥	87 M	تم إيجاد مسار
c	(7,7)	(11,7)	137	98	M ١٥٧	تم إيجاد مسار
d	(7,7)	(11,7)	١٢٢	٩٩	263 M	تم إيجاد مسار

من خلال دراسة الحالات السابقة، يمكن ملاحظة أن البحث تم بنجاح في جميع الحالات وتم العثور على مسار بين عقدة الانطلاق والعقدة الوجهة. وقد تم استكشاف عدد مختلف من العقد والعوائق الموجودة في الشبكة وحساب طول المسار المكتشف لمختلف الحالات.

وفقًا للحالة d، تم استكشاف أكبر عدد من العقد (١٢٢ عقدة) وكان هناك ٩٩ عقدة تحتوي على عوائق أثناء العثور على المسار، يمكن تعليل هذا العدد الأكبر من العقد بسبب أن هذا المسار كان هو الأطول أو لأن الخوارزمية واجهت بعض التحديات في هذه الحالة مما استدعى استكشاف عدد أكبر من العقد.

ثم قمنا باختبار المركبة الروبوتية التي قمنا بتصميمها وتنفيذها في بيئة حقيقة بحيث يظهر عائق بشكل مفاجئ على المسار المخطط، الشكل (١٢-a)، ويبين الشكل(١٢-b) المسار الجديد الذي يحقق تجنُب العائق وبلوغ المركبة نقطة الهدف.

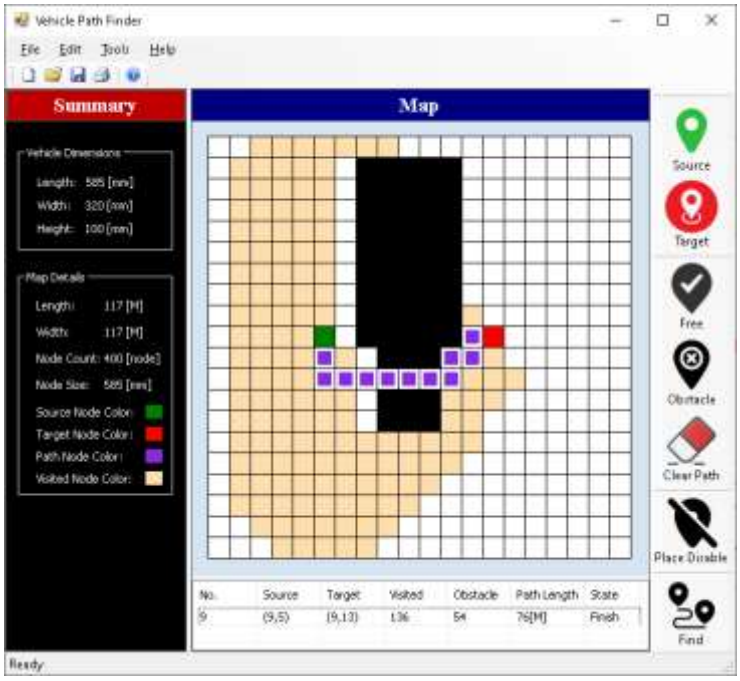
نوضح على الشكل (13) التنفيذ العملي للمركبة الروبوتية أثناء سيرها في بيئة عمل حقيقية (والتي هي عبارة عن مخزن للعدد الصناعية) أثناء ظهور عائق بشكل مفاجئ.



الشكل (12): المسار المخطط والمسار الجديد عند ظهور عائق بشكل مفاجئ.

الشكل (13): المركبة في بيئة حقيقة (مخزن للعدد الصناعية) بحيث يظهر عائق بشكل مفاجئ.

وتم اجراء اختبار آخر يبين قدرة المركبة على اكتشاف المسار الأقصر، الشكل (14). واتباع المركبة للمسار الأقصر في بيئة حقيقة عند تحديث الخريطة الحقيقة وبلوغ المركبة نقطة الهدف، الشكل (15).



الشكل (14): قدرة المركبة على اكتشاف المسار الأقصر.

الشكل (15): اتباع المركبة للمسار الأقصر في بيئة حقيقة عند تحديث الخريطة الحقيقة وبلوغ المركبة نقطة الهدف.

٦- الاستنتاجات والتوصيات

قمنا في هذا العمل بشرح خطوات تصميم وتنفيذ مركبة روبوتية مُستقلة جديدة بالكامل قادرة على تجنب العوائق واختيار المسار الأقصر في التنقّل.

تتميز المركبة الروبوتية بتصميم متكامل يتضمن عجلات الميكانوم التي تسمح بحركة مرنة وفعّالة على مختلف الأسطح، كما تحتوي على جهازين رادار لاستكشاف البيئة المحيطة. تقوم المركبة المُصممة بتحليل البيئة المحيطة والكشف عن العوائق والتنقل ذاتياً من نقطة البداية إلى النقطة المستهدفة دون التدخل البشري وبأقصر مسار.

تم القيام بوضع بالخوارزميات والنماذج الحسابية للتحكم التي تُمكّن المركبة من الاستجابة الذاتية للبيانات المُستشعرة واتخاذ القرارات المناسبة وتجاوز العوائق الثابتة أثناء حركتها.

بينت الاختبارات التي تم اجرائها قدرة المركبة على اكتشاف وتحديد المسار الأقصر من عقدة البداية إلى عقدة الهدف في بيئة عمل حقيقة، وذلك حتى في حالة تحديث الخريطة. كذلك تمكّنت المركبة من تجنُب العوائق الثابتة والتي تظهر بشكل مفاجئ على المسار المخطط وتمكّنت من بلوغها نقطة الهدف.

تبيّن من خلال تجريب النموذج التطبيقي للمركبة أنها تستطيع العمل بكفاءة في بيئة المستودعات والمصانع. يمكن زيادة متانة هيكل المركبة ولكن في المقابل سيؤدي ذلك لزيادة وزنها وبالتالي يجب استبدال المحركات الكهربائية المستخدمة بمحركات ذات عزم أقوى تناسب مع وزن المركبة الجديد وتتيح لها التحرك بسلاسة على مختلف أنواع الأسطح.

يمكن استخدام هذه المركبة الروبوتية في مجموعة متنوعة من المهام مثل الاستكشاف وتوصيل البضائع والاستخدامات الصناعية وحتى في التطبيقات العسكرية.

استطاعت المركبات الروبوتية، في الآونة الأخيرة، فرض سيطرتها على عمليات الأتمتة الصناعية، فنوصي باستثمار تقنيات الذكاء الاصطناعي لرفع كفاءة المركبة أكثر، كذلك نوصي بتوفير الدعم المادي للأبحاث المتعلقة بهذا الموضوع ليتم تصنيعها محلياً. لما لذلك من فوائد تقنية تتعلق بالجانب الفني للعملية الانتاجية إضافة إلى الجانب الاقتصادي المُتمثل في التوفير الحاصل في تكلفة الإنتاج آخذين بعين الاعتبار أن كلفة الاستثمار الأولي للمركبات الروبوتية يمكن أن تُغطى سريعاً.

المراجع:

[1] A. Loganathan, N. Ahmad, "*A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation*", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol 40, Article ID 101343, 2023.

[2] Raj, R.; Kos, A. *"A Comprehensive Study of Mobile Robot: History, Developments, Applications, and Future Research Perspectives*". Appl. Sci. 2022.

[3] M. Kamedu ła, N. Kashiri, and N. G. Tsagarakis, *"Wheeled motion kinematics and control of a hybrid mobility CEN- TAURO robot*," Robotics and Autonomous Systems, vol. 128, no. jun, Article ID 103482, 2020.

[4] J. Zhang and X. Liu-Henke, *"Model-based design of the ve- hicle dynamics control for an omnidirectional automated guided vehicle (agv),"* in 2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM), pp. 1–6, Bialystok, Poland, July 2020.

[5] K. Aloui, A. Guizani, M. Hammadi, T. Soriano, and M. Haddar, "*Integrated design methodology of automated guided vehicles based on swarm robotics*," Applied Sciences, vol. 11, no. 13, 2021.

[6] M. De Ryck, D. Pissoort, T. Holvoet, and E. Demeester, "*Decentral task allocation for industrial AGV-systems with resource constraints,"* Journal of Manufacturing Systems, vol. 59, pp. 310–319, 2021.

[7] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. *Scaramuzza, Intro- duction to Autonomous Mobile Robots*, %e MIT Press, 2nd ed. edition, 2011.

[8] L.Schulze, S.Behling, and S.Buhrs, *Intelligent Transportation Systems: Automated Guided Vehicle Systems in Changing Logistics Environments.* AIP Conference Proceedings Volume 1019: 1st Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation (CISA 08), pp. 53- 58. Annaba, Algeria, 30.06.-02.07.2008.

[9] S. A. Reveliotis, "*Conflict resolution in AGV systems*," IIE Trans. (Institute Ind. Eng., vol. 32, no. 7, pp. 647–659, 2000.

[10] "*Ericsson and China Mobile Unveil 5G-Powered AGV*," Port Technology International, 12-Jul-2019.

[11] J. Lee, C.-H. Hyun, and M. Park, "*A Vision-Based Automated Guided Vehicle System with Marker Recognition for Indoor Use*," Sensors, vol. 13, no. 8, pp. 10052–10073, Jul. 2013.

[12] C. F. Wu, W. Xiao-Long, C. Qing-Xie, C. Xiao-Wei, and L. Guo-Dong, "," Proc. - 2017 Chinese Autom. Congr. CAC 2017, vol. 2017- January, pp. 217–222, 2017.