



Designing & Development of a Whisker-Sensor-Based Robot

Hamed F. Alsahin Saleh^{1*}, Fathalla I. Solman², Zead Hamad Abdulkarim³, Salem M. Arhouma Elgatani⁴

^{1,2,3} Department of Electrical Engineering, College of Engineering Technologies, Alqubah, Libya

⁴ Department of Electrical Engineering, Higher Institute of Science Technology, AL-Tamimi, AL-Tamimi, Libya

*Corresponding author: hlibya60@gmail.com

Received: June 29, 2025

Accepted: September 07, 2025

Published: September 11, 2025

Cite this article as: H, F, A, Saleh., F, I, Solman., Z, H, Abdulkarim., S, M, A, Elgatani. (2025) Designing & Development of a Whisker-Sensor-Based Robot. Libyan Journal of Medical and Applied Sciences (LJMAS). 2025;3(3):144-151.

Abstract:

Rats use their whiskers as tactile sensors to explore and understand their surroundings. One of the key behaviors observed in rodents is "active whisking", where they continuously move their whiskers back and forth to gather sensory information. This enables them to detect various object features such as texture, size, shape, and distance. In this study, soft resistive sensors are embedded into artificial whisker follicles, offering a simple, robust, and effective method for detecting environmental changes. The main objective of this research is to design and simulate a small robotic device capable of navigating through a maze. The robot uses the whisker-inspired sensors to detect and respond to obstacles. Upon encountering an obstacle, it reverses direction to its previous reference point before continuing along an alternate path. The robot starts at a designated point (e.g., Point A) and autonomously finds its way to a target location (Point B), choosing among different possible routes. Key design considerations include the control unit, wheel configuration, baseline diameter, sensing circuit, and stepper motor integration. The robot's circuit was simulated using the PROTEUS design tool, while hardware implementation was carried out using MPLAB software and the ICD3 programming device.

Keywords: Robot, Whisker Sensor, an obstacle, PROTEUS software, ICD3 programming device.

تصميم وتطوير روبوت قائم على حساس الشعيرات الحسية

حامد فضل الله الصالحين صالح^{1*}، فتح الله ابراهيم سليمان²، زياد حمد عبد الكريم³، سليم محمد أرحومة⁴
^{3,2,1} قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، كلية التقنيات الهندسية، القبة، ليبيا
⁴ قسم الهندسة الكهربائية، المعهد العالي للعلوم والتقنية، التميمي، ليبيا

الملخص

تستخدم الفئران شواربها كمستشعرات لمسية لاستكشاف البيئة من حولها وفهمها. ومن السلوكيات الأساسية التي تلاحظ لدى القوارض هو التحريك النشط للشوارب، حيث تقوم بتحريك شواربها باستمرار ذهاباً وإياباً لجمع المعلومات الحسية. يساعدها هذا السلوك في التعرف على خصائص مختلفة للأجسام مثل الملمس، الحجم، الشكل، والمسافة. في هذه الدراسة، تم دمج مستشعرات مقاومة ناعمة داخل بصيلات شوارب صناعية، مما يوفر طريقة بسيطة وفعالة وموثوقة للكشف عن التغيرات في البيئة. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تصميم ومحاكاة جهاز روبوتي صغير قادر على التنقل داخل متاهة. يستخدم الروبوت مستشعرات مستوحاة من الشوارب لاكتشاف العقبات والتفاعل معها. وعند مواجهته لعقبة، يقوم بتغيير اتجاهه والعودة إلى نقطة مرجعية سابقة، ثم يتابع السير في مسار بديل. يبدأ الروبوت من نقطة محددة (مثل النقطة A) ويجد طريقه تلقائياً إلى الموقع الهدف (النقطة B)، ويختار بين مسارات متعددة ممكنة. تشمل الاعتبارات التصميمية الرئيسية وحدة التحكم، تكوين العجلات، القطر الأساسي، دائرة الاستشعار، وتكامل المحرك الخطي. تم محاكاة دائرة الروبوت باستخدام برنامج التصميم (PROTEUS)، في حين تم تنفيذ الجانب العملي باستخدام برنامج MPLAB وجهاز البرمجة ICD3.

الكلمات المفتاحية: روبوت 1، حساس الشعيرات الحسية 2، مطب 3، برنامج PROTEUS 4، جهاز البرمجة ICD3 5.

مقدمة

تلعب المحركات الخطوية دورًا مهمًا في التطبيقات التقنية عبر العديد من التخصصات الهندسية مثل الهندسة الميكانيكية، التحكم في العمليات، الهندسة الصناعية والكهربائية، الأتمتة، التحكم الرقمي باستخدام الحاسوب (CNC)، البصريات، الطباعة، وغيرها. تشمل التطبيقات العملية لها: الخياطة، الطحن، الحفر، التحكم في الأدوات، أجهزة الرسم، محركات الأقراص، الطابعات، التحكم في الصمامات، والروبوتات. مثال جيد على تطبيقات المحركات الخطوية هو عمليات التصنيع. كما يشير الاسم، فإن المحركات الخطوية تدور في خطوات مميزة [1] وهذا يتيح نظام التحكم المفتوح. طالما أن المحرك يعمل ضمن خصائص عزم الدوران المحددة له، فإن موقع عمود المحرك يكون دائمًا معروفًا. مقارنةً بالمحركات التقليدية، توفر المحركات الخطوية الفوائد التالية ولها العيوب التالية [2].

المزايا

- يمكن التحكم فيها عبر حلقة مفتوحة؛ يمكن تحديد موضع العمود بدقة ببساطة عن طريق إرسال إشارات خطوة.
- لا تستخدم فرشاة في البناء/التشغيل.
- سهل الاتصال بالميكروكنترولر.
- دقة خطوة جيدة بدون أخطاء تراكمية.
- عزم كامل من الوضع الثابت.
- عزم متبقي جيد، يمكن قفل المحرك في الموضع.

العيوب

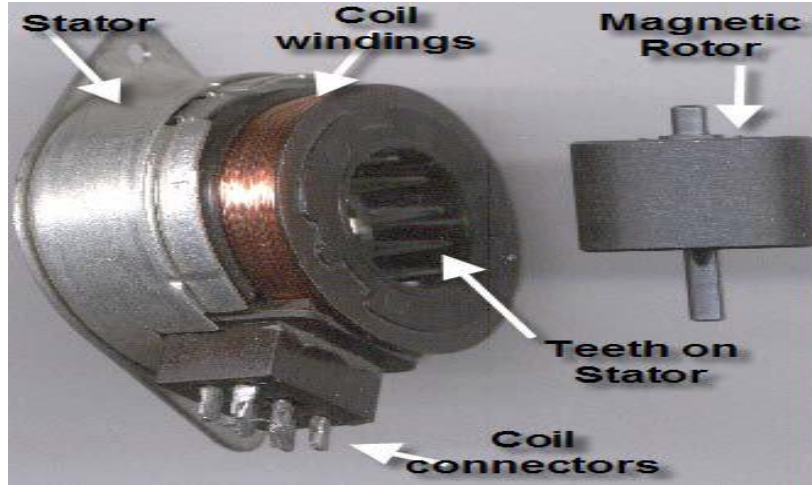
- سرعة محدودة.
 - يقل العزم مع زيادة السرعة الدورانية.
 - قد يظهر بعض الرنين الميكانيكي عند معدلات خطوة معينة مما قد يسبب اهتزاز وفقدان العزم.
 - بشكل عام، تكون المحركات الخطوية متاحة فقط بتصنيف طاقة منخفض.
- هناك ثلاثة أنواع أساسية من المحركات الخطوية. وهي المحرك ذو المغناطيس الدائم، والمحرك ذو التردد المتغير، والمحرك الهجين. في المناقشة والتجربة التي سنتبع، سنقوم فقط بدراسة المحرك الخطوي ذو المغناطيس الدائم [3].

البناء والتشغيل

قد يكون للجزء الدوار (الدافع) مغناطيسًا دائمًا أو مغناطيسًا كهربائيًا. الجزء الثابت من المحرك، وهو الجزء الذي لا يدور، يحتوي على عدة لفات. يتم ترتيب هذه اللفات بطرق مختلفة وهذا يحدد الأنواع المختلفة للمحركات الخطوية. يحتوي الجزء الثابت للمحرك على عدة أقطاب يتم تغيير قطبيتها بواسطة مفاتيح إلكترونية [4] النتيجة الإجمالية للتحويل هي تدوير القطبين الشمالي والجنوبي للجزء الثابت. سيتماشى القطب الشمالي للجزء الدوار مع القطب الجنوبي للجزء الثابت. مع دوران المجال الثابت خلال خطوات، سيتبع للجزء الدوار ذلك في نفس الطريقة خطوة بخطوة. للحصول على دقة أفضل، يتم تشكيل أسنان صغيرة على للجزء الدوار والجزء الثابت. هذه الأسنان لا تتلامس مع بعضها البعض ولكنها تعمل كمسارات ذات مقاومة منخفضة. هناك ترتيبان أساسيان لللف في لفات الجزء الثابت لمحرك خطوي ذو طورين [5].

ثنائي القطب وغير ثنائي القطب

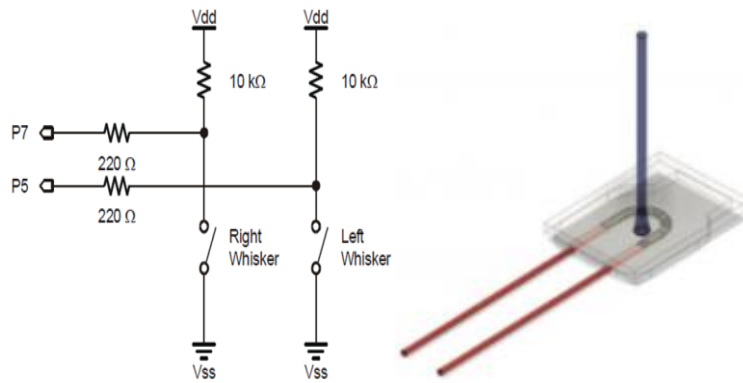
في القيادة ثنائية القطب، توجد لفاتان، حيث تقوم المحركات الجزئية عادةً بتوفير أقطاب لتقليل زاوية الخطوة إلى بضع درجات. لكن عدد الملفات وطريقة القيادة تبقى كما هي. أما المحركات غير ثنائية القطب فهي متشابهة إلا أن اللفات تكون مزدوجة (بوفابرال)، أي أنه يتم لف لفة ثانية على كل قطب في الاتجاه المعاكس حتى يمكن عكس التدفق. كما هو موضح في الشكل (1) الذي يبين تفاصيل التركيب الداخلية للمحرك



الشكل 1. يبين تفاصيل التركيب الداخلية لمحرك الخطوة

المستشعر المستخدم مع الروبوت

تم استخدام مستشعر الشوارب في هذه المحاكاة وتصميم الجهاز الروبوتي. مستشعرات الشوارب هي مستشعرات قريبة يمكنها اكتشاف العائق الموضوعة في مسارها. تعمل كمفتاح؛ عندما يتم اكتشاف جسم، يتم تنشيط مفتاح الشوارب وترسل إشارة تماثلية إلى وحدة التحكم التي تقوم بدورها بتحويل الإشارة إلى إشارة رقمية. يعتمد دوران المحرك الخطوي على الإشارة المرسلة من مستشعر الشوارب [6]. تستخدم مستشعرات الشوارب بشكل واسع كمتبع للجدار، حيث تقوم بتوجيه الروبوت عبر مساره. وهي غير متأثرة بالغبار أو الضوء كما يمكن ملاحظته في أنواع أخرى من المستشعرات. يمكن تصنيعها من سلك مرن يتم تثبيته في مقدمة هيكل الروبوت [7]. نطاق الإشارة التماثلية لمستشعر الشوارب يتراوح من 45 إلى 85. يمكن استخدام مفتاح شوارب واحد لتحديد والتعرف على جسم، ولكن هذه الطريقة بطيئة جدًا، لأنه بعد كل قراءة يجب إعادة توجيه الشارب لقياس نقطة اتصال أخرى في موقع مختلف.



الشكل 2. يبين المخطط التخطيطي لحساس الشعيرات

تكوين العجلات

يستخدم الروبوت المتنقل محركًا تفاضليًا بعجلتين مع نقطة اتصال في الأمام. توفر العجلات الدعم، والثبات، والاحتكاك الكافي لدفع الروبوت. يقوم المحرك الخطوي بتشغيل العجلات لإجراء التحركات اللازمة. تم اختيار قطر العجلة ليكون 0.06 مترًا. نفترض عدم وجود انزلاق للعجلات، مما يعني أن الروبوت سيحافظ على سرعته ودقته في جميع الأوقات. تكمن ميزة استخدام روبوت مزود بعجلات في أنه يسهل التنقل بدقة. تم اختيار المسافة بين العجلتين (الخط الأساسي) لتكون 0.16 متر، وهي أقل من قطر المتاهة. السبب في ذلك هو تمكين الروبوت من التنقل بحرية. يتم توضيح روبوت محرك تفاضلي بعجلتين مع نقطة اتصال ثالثة في الشكل أدناه.



الشكل 3. يبين قيادة تفاضلية بعجلتين مع نقطة اتصال ثالثة

وحدات تحكم محركات الخطوة

توجد العديد من وحدات تحكم المحركات الخطوة IC المصممة خصيصاً لتقليل عدد الرقائق وتقليل متطلبات البرمجيات الخاصة بالتحكم. على عكس واجهة محرك الخطوي البسيطة التي تتوقع أن يقوم الميكرو كونترولر بتوليد إشارات التحكم بأربعة أطوار وتوفير المتتابعات الخاصة بالاتجاه وأنماط التشغيل الأخرى، تتطلب هذه الأجهزة فقط دبابيس تحكم واحدة مما يوفر حلاً بسيطاً لواجهة التحكم. وحدة التحكم IC للمحرك الخطوي المستخدمة في تجربتنا هي MC3479. تم تصميم هذه الوحدة لقيادة محرك خطوي ذو طورين بطريقة ثنائية القطب [8]. يتكون الجهاز من أربع أقسام إدخال، قسم فك التشفير/التتابع، ومرحلتين من الحماية ضد الجهد العكسي (Back EMF) لملفات المحرك الخطوي. توفر الوحدة وضع التشغيل للاتجاهين (إلى الأمام/إلى الخلف) وأوضاع الخطوة الجزئية (Half Step) والخطوة الكاملة (Full Step). يُظهر الشكل 5 مخطط الكتلة للجهاز [9].

الميكرو كونترولر PIC المستخدم في البحث

من أجل تحقيق أهداف هذا البحث، تم اختيار المتحكم الدقيق (PIC18F2420/2520/4420/4520) باعتباره أحد أهم الوحدات الإلكترونية المستخدمة في تشغيل ومعالجة إشارات المستشعرات، نظراً لخصائصه التقنية التي تجمع بين سعة ذاكرة جيدة، وإمكانيات متعددة للاتصال [10]، بالإضافة إلى وحدات مدمجة للتحكم في إشارات الإدخال والإخراج. ويعرض الجدول رقم (1) أهم الخصائص التقنية للمتحكمات الدقيقة المستخدمة في هذا البحث.

الجدول 1. يبين الخصائص التقنية الأساسية للمتحكمات الدقيقة من عائلة (PIC18F)

Device	Flash (bytes)	Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	MSSP SPI	MSSP Master I2C	EUSART	Comp.	Timers 8/16-bit
PIC18F2420	16K	8192	768	256	25	10	2/0	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2520	32K	16384	1536	256	25	10	2/0	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4420	16K	8192	768	256	36	13	1/1	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4520	32K	16384	1536	256	36	13	1/1	Y	Y	1	2	1/3

الهدف الرئيسي من هذا البحث

الهدف الأساسي من هذا البحث هو دراسة تصميم وتكامل وتطبيق تقنيات مستشعرات الشوارب في الأنظمة الروبوتية، مع التركيز على تعزيز قدرات الاستشعار اللمسي، وتحسين آليات التغذية الراجعة في الزمن الحقيقي، وتمكين الروبوتات من التنقل والتفاعل بشكل ذاتي في البيئات غير المنظمة.

الأهداف المحددة:

1. تطوير وتحسين تصاميم مستشعرات الشوارب التي تحاكي الأنظمة الحسية البيولوجية في الحيوانات، بهدف تعزيز دقة وحساسية الاستشعار للمس.
2. دراسة تقنيات دمج المستشعرات (Sensor Fusion) التي تجمع بين مستشعرات الشوارب وأنواع أخرى من المستشعرات) مثل الرؤية، و (LiDAR) لتوفير وعي بيئي أكثر شمولاً للروبوتات.
3. استكشاف خوارزميات التحكم التي تعالج بيانات مستشعرات الشوارب، مما يمكن الروبوت من تعديل سلوكه بناءً على المدخلات المسية في الزمن الحقيقي، وتحسين قدراته في التنقل وتجنب العقبات والتعامل مع الأجسام.
4. تقييم الأداء العملي للروبوتات المزودة بمستشعرات الشوارب في بيئات ديناميكية وغير منظمة، مثل مهام البحث والإنقاذ، والروبوتات المساعدة، والمهام الاستكشافية التي تكون فيها المستشعرات البصرية غير فعالة.
5. تقييم متانة وطول عمر مستشعرات الشوارب في البيئات التشغيلية القاسية، واقتراح حلول لتحسين مقاومة المواد وسهولة صيانة المستشعرات.
6. دراسة التطبيقات المحتملة في مجال التفاعل بين الإنسان والروبوت (HRI) ، حيث يمكن لمستشعرات الشوارب أن تعزز قدرة الروبوت على الإحساس بلمس الإنسان أو قربه والاستجابة له بشكل أكثر فعالية.

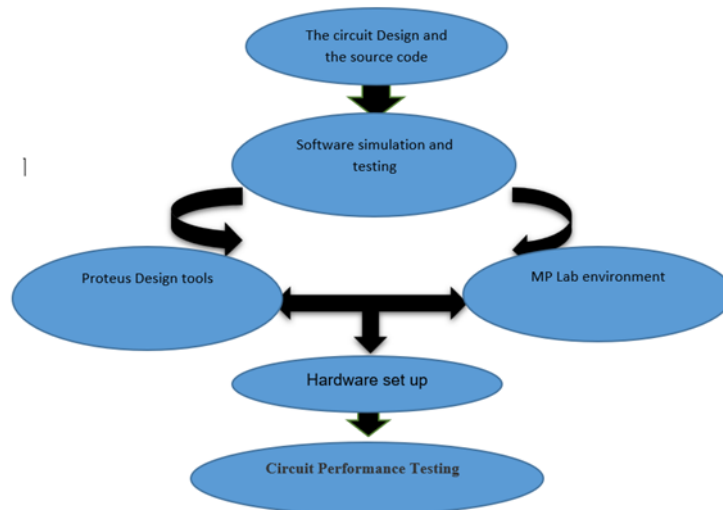
المنهجية

تم تقسيم منهجية هذا المشروع إلى جزئين رئيسيين: الجزء الأول يتعلق بمحاكاة البرمجيات، بينما الجزء الثاني يتعلق بالتنفيذ العملي للأجهزة. لكي يكون المشروع ناجحاً، يجب تنفيذ كلا الجانبين البرمجي والعملي للأجهزة بنجاح.

نهج البحث

محتويات النظام المصمم:

1. برنامج Proteus للمحاكاة.
 2. المكونات على لوحة التجارب (Breadboard).
 3. الدائرة العملية مع الميكرو كونترولر الفعلي.
 4. ربط جهاز ICD3 بين الميكرو كونترولر والحاسوب.
 5. إعداد الأجهزة باستخدام برنامج MPLAB.
- لتصميم روبوت شوارب يمكنه استشعار العوائق في طريقه عبر المتاهة، يجب تركيب مستشعر الشوارب والمحركات الخطوة معاً، ويجب استخدام أداة التصميم MP Lab IDE لربط جهاز ICD3 بالميكرو كونترولر الفعلي.

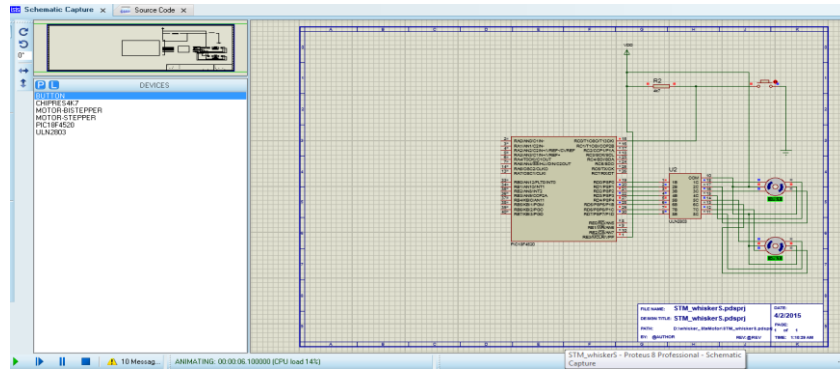


الشكل 4. مخطط منهجية البحث

نتائج المحاكاة

تم استخدام برنامج Proteus لمحاكاة الدائرة الموضحة أدناه. يحتوي المحاكاة على ميكرو كونترولر PIC 182045 في الرقائق الموضحة في المحاكاة، والذي سيتم برمجته في برنامج PROTEUS في هذه الحالة.

دائرة استشعار الجدار
يتم عرض مخطط الدائرة لمحرك الخطوة الذي تم محاكاته في Proteus في الشكل أدناه.



الشكل 5. يبين دائرة محرك الخطوة

الجانب العملي

في هذه الدائرة، استخدمنا لوحة تطوير PIC18F4520 والأجهزة المرتبطة بها في ربط محرك الخطوة الخارجي التجريبي وتقييم بعض أساليب التشغيل كما تم شرحه سابقاً.

الأجهزة المستخدمة

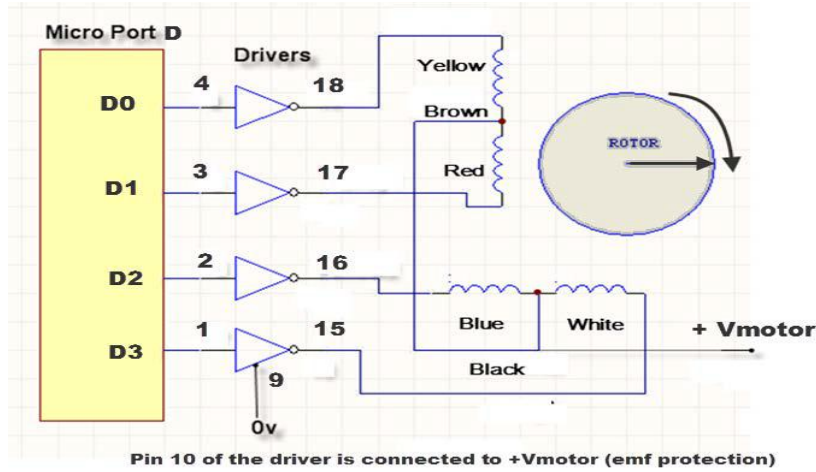
- جهاز كمبيوتر بنظام Windows XP أو أعلى مع MPLAB 8.50 أو أعلى ومترجم MCC18 C.
- جهاز Microchip MPLAB ICD3.
- لوحة تطوير PIC18.
- مصدر طاقة مزدوج (PSU) يوفر 5 فولت و 8 فولت (أو 5 فولت منفصل و 8 فولت منفصل).
- محرك الخطوة الخارجي.
- لوحة تحكم لمحرك الخطوة.
- لوحة I/O مع جهاز Darlington Driver IC.
- مستشعر ولوحة توقيت.
- وصلات لتوصيل PSU و USB و ICD3.
- روابط الأسلاك لإنشاء اتصالات الدائرة.
- ذاكرة فلاش وكتيب لتوثيق تقدمك وحفظ ملفاتك.

ربط محرك الخطوة مع ميكرو كونترولر

يوضح الشكل (6) أدناه واجهة بسيطة لمحرك الخطوة مع ميكرو كونترولر PIC. تعتمد السواقات على جهاز Darlington Driver IC (ULN2803). يتم من خلالها تقديم البيانات الكاملة للجهاز في الملحق.

طريقة الربط:

- الدبوس 10 من جهاز Darlington Driver هو لدارات حماية ضد الجهد العكسي (Back-EMF) داخل جهاز IC يجب توصيل هذا الدبوس بـ +V للمحرك.
- "قبل إجراء أي اتصال، قم بإزالة جميع اتصالات الطاقة من النظام".
- قم بتوصيل الأربعة LSBs من منفذ D (D0-D3) إلى مدخلات جهاز Darlington Driver.
- يتم توصيل المخرجات المقابلة للمحرك إلى الملفات الأربعة المناسبة لمحرك الخطوة.
- قم بتوصيل الأرضي المشترك إلى الدبوس 9 من جهاز Driver.
- لهذه التجربة الخاصة، استخدم مصدر طاقة 5 فولت لـ +V للمحرك.



الشكل 6. يبين توصيلات النظام

النتائج التطبيقية وتنفيذ النموذج العملي

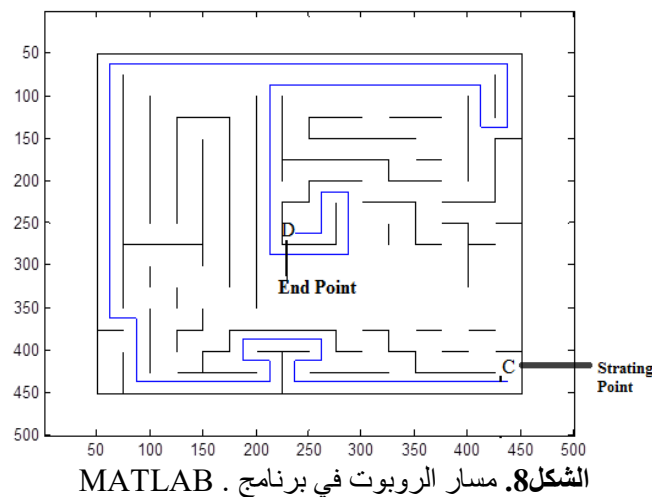
في المرحلة النهائية من هذا البحث، وبعد استعراض الجوانب النظرية والتصميمية المتعلقة بالمتحكمات الدقيقة وتقنيات الاستشعار اللمسي، تم الانتقال إلى الجانب التطبيقي عبر تنفيذ نموذج عملي لروبوت مزود بمستشعرات شوارب حيوية. يوضح الشكل (7) الروبوت الحساس المزود بالمستشعرات، حيث تم دمج وحدات الاستشعار مع هيكل الروبوت لتحقيق استشعار أدق للبيئة المحيطة والتفاعل مع العوائق المختلفة.

أما الشكل (8) فيعرض مسار حركة الروبوت داخل بيئة محاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink، حيث تم اختبار كفاءة النظام في تتبع المسار المحدد والتفاعل مع المتغيرات البيئية.

تُظهر هذه النتائج أن الروبوت نجح في الجمع بين التحليل البرمجي والمحاكاة النظرية من جهة، والتنفيذ الفيزيائي الميداني من جهة أخرى، وهو ما يعكس تكامل المنهجية المتبعة في هذه الدراسة، بدءاً من التصميم وصولاً إلى الاختبار العملي.



الشكل 7. روبوت حساس المستشعر



النتائج

1. تنفيذ وتكوين الأجهزة: تم تصميم وتنفيذ تكوين الروبوت بدقة بلغت 100% وفق الأبعاد المحددة مسبقاً، مما يعكس نجاح عملية النمذجة والمحاكاة.
2. محاكاة الحساس والمحرك: أظهرت نتائج المحاكاة في برنامج Proteus أن معدل استجابة حساس الشعيرات للكشف عن العوائق بلغ نسبة فعالية تقديرية تتجاوز 95% في الظروف المثالية، مع توافق كامل مع أداء المحرك المتدرج.
3. تجنب العقبات: أثبتت الاختبارات أن الروبوت يقوم بالدوران العكسي بنسبة نجاح 100% عند مواجهة أي عائق، مما يدل على موثوقية الخوارزمية المعتمدة.
4. دقة الحساسات: أظهرت الحساسات قدرة عالية على نقل البيانات إلى وحدة التحكم بضمن استجابة شبه لحظي (<1 ثانية)، مما يضمن تحديد اتجاه العجلات بدقة.
5. فعالية تقنية الشعيرات: بينت النتائج أن حساسات الشعيرات توفر إدراكاً لمسياً محسناً مقارنة بالحساسات التقليدية (مثل IR)، حيث تعزز من دقة التفاعل مع البيئة بنسبة تقديرية تصل إلى 20-30%.
6. التحديات التقنية: لوحظت بعض التحديات المتعلقة بمدى تحمل الحساسات وظروف التشغيل (مثل الاحتكاك المتكرر أو التشويش البيئي)، وهو ما يتطلب تحسينات مستقبلية في المواد والتصميم.
7. آفاق مستقبلية: تشير النتائج إلى إمكانية تطوير حساسات الشعيرات لزيادة الكفاءة بنسبة متوقعة تصل إلى 40% عند دمجها مع أنظمة استشعار أخرى مثل الرؤية الحاسوبية أو الحساسات فوق الصوتية.
8. قابلية التطبيق: تعزز هذه النتائج فرص تطبيق التقنية في مجالات متعددة مثل الأتمتة الصناعية، الروبوتات المساعدة، والاستكشاف، مما يفتح المجال أمام أبحاث متقدمة في مجال الإدراك اللمسي الروبوتي.

المراجع:

1. Bansal, A., & Agrawal, S. (2012). A robust maze solving algorithm for a micromouse robot. *Advanced Materials Research*, 403, 4762-4768.
2. Deb, S. R., & Deb, S. (1994). *Robotics technology and flexible automation*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
3. Mallik, A., Liu, D., & Kapila, V. (2023). Analyzing the outcomes of a robotics workshop on the self-efficacy, familiarity, and content knowledge of participants and examining their designs for end-of-year robotics contests. *Education and Information Technologies*, 28(6), 7225-7264.
4. Slušný, S., Neruda, R., & Vidnerová, P. (2010). Comparison of behavior-based and planning techniques on the small robot maze exploration problem. *Neural networks*, 23(4), 560-567.
5. Murphy, R. R. (2019). *Introduction to AI robotics*. MIT press.
6. Mitchinson, B., & Prescott, T. J. (2013). Whisker movements reveal spatial attention: a unified computational model of active sensing control in the rat. *PLoS computational biology*, 9(9), e1003236.
7. Chelghoum, A., Wang, Q., & Wang, K. (2017). Design and simulation of autonomous mobile robots obstacle avoidance system. In *Transactions on Edutainment XIII* (pp. 165-180). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
8. Gardner, J. F., & Velinsky, S. A. (2000). Kinematics of mobile manipulators and implications for design. *Journal of Robotic Systems*, 17(6), 309-320.
9. Intelligent Autonomous Systems Society. (1992). *Robotics and Autonomous Systems* (Vol. 9). Elsevier Science Publishers.
10. Lepora, N. F., Pearson, M., & Cramphorn, L. (2018, October). TacWhiskers: Biomimetic optical tactile whiskered robots. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 7628-7634). IEEE.