Al-imad Journal of Humanities and Applied Sciences (AJHAS)
مجلة العماد للعلوم الإنسانية والتطبيقية
ISSN: 3106-0323
Volume 2 – Issue 2 – 2026
Pages 764-782

Design and Implementation of a CNC Numerical Control System Using Arduino Microcontroller

Hassan Alghamoudi[1], Ali Salam Alatrsh[2], Sadek M. F. Elkuri, Naji Gajam[4], Taha Arfa[5], Abraheem Almaroush[6]
[1,2,3,4,5,6] Department Electric and Electronic, College of Engineering, Nalut University, Jado, Libya
[1] algammodi@yahoo.com, [2] a.alatrash@nu.edu.ly, [3] a.alkiri@nu.edu.ly,
[4] giam_2011@yahoo.com, [5] tahanalutwar15@gmail.com, [6] ebrahem2000.said20@gmail.com

تصميم وتنفيذ نظام تحكم رقمي CNC باستخدام المتحكم الدقيق أردوينو

حسن على القمودي[1*] ، علي سالم الاطرش[2*] ,الصادق محمد الكري[3*], ناجي محمد قجام[4*], طه عرفة[5*],ابراهيم المرعوش[6*]
[1,2,3,4,5,6] قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، كلية الهندسة جادو، جامعة نالوت ، ليبيا

Received: 24-07-2026; Accepted: 28-08-2026; Published: 04-09-2026

Abstract:
Computer Numerical Control (CNC) is one of the most widely used machines in modern industries. Many tasks requiring repetitive movements or operations have been replaced by CNC machines rather than human labor, as human focus decreases over time while machines maintain consistent product quality and quantity throughout continuous operation. However, the cost of industrial CNC machines is very high, making them unsuitable for small-scale projects or home use. This project aims to design a low-cost CNC machine based on Arduino capable of performing drawing operations according to user-defined scale. This low-cost machine was developed to be suitable for small businesses and home use. The machine was implemented at a total cost of 570 Libyan Dinars and was practically tested by drawing various geometric shapes and texts. Results showed acceptable accuracy of up to ±0.2 mm with smooth motion and fast motor response. The machine was calibrated, its settings adjusted, and potential issues such as X-axis direction reversal were analyzed with appropriate solutions proposed.

Keywords: CNC, Arduino UNO, Stepper Motors, G-code, Digital Drawing.

الملخص
تعد آلات التحكم الرقمي بالحاسوب (*Computer Numerical Control – CNC*) من أكثر الآلات شيوعًا واستخدامًا في الصناعات في الوقت الحاضر. فقد تم استبدال العديد من الأعمال التي تتطلب حركات أو عمليات متكررة يوميًا بالاعتماد على آلات *CNC* بدلًا من الإنسان، وذلك لأن تركيز الإنسان ينخفض مع مرور الوقت، في حين تحافظ الآلة على جودة وكمية الإنتاج بشكل ثابت مع استمرار العمل. ومع ذلك، فإن تكلفة آلات *CNC* المستخدمة في الصناعات مرتفعة جدًا، مما يجعلها غير مناسبة للاستخدام في المشاريع الصغيرة أو للاستخدام المنزلي. يهدف هذا البحث إلى تصميم آلة *CNC* منخفضة التكلفة تعتمد على أردوينو وقادرة على تنفيذ عمليات الرسم وفق المقياس الذي يحدده المستخدم. وقد تم تطوير هذه الآلة منخفضة التكلفة لتكون مناسبة للشركات الصغيرة والاستخدام المنزلي. تم تنفيذ الآلة بتكلفة إجمالية بلغت 570 دينار ليبي وبإمكانيات محلية، وتم اختبارها عمليًا من خلال رسم أشكال هندسية

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ونصوص مختلفة. أظهرت النتائج دقة جيدة تصل إلى $0.2mm \pm$ مع حركة سلسة واستجابة سريعة للمحركات. كما تمت معايرة الآلة وضبط إعداداتها، وتم تحليل المشاكل المحتملة.

الكلمات المفتاحية: التحكم الرقمي بالحاسوب، أردوينو أونو، محركات الخطوة، *G-code*، رسم رقمي.

1. المقدمة

تُعرّف الأتمتة (Automation) بأنها إنجاز العمل باستخدام أنظمة التحكم مثل التحكم الرقمي بالحاسوب (CNC). نشأت تقنية CNC في الولايات المتحدة الأمريكية خلال الخمسينيات من القرن الماضي، وتحديداً في عام 1952 عندما نجح باحثو معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT) في بناء أول نموذج أولي لآلة تفريز تعمل بالتحكم الرقمي [1]. وقد قادت هذه التقنية الصناعة نحو تطور ملحوظ وأحدثت ثورة في عالم التصنيع. آلة CNC هي آلة يتم التحكم فيها بواسطة الحاسوب من خلال بيانات إدخال تتضمن أوامر وأكواد رقمية وحروفًا ورموزًا. وقد استُخدمت آلات CNC على نطاق واسع في المجال الصناعي كنظام للتحكم الآلي، حيث تمكنت من استبدال العديد من المهام التي كانت تتطلب عمالة مكثفة وتكراراً يومياً، مع الحفاظ على كمية وجودة الإنتاج ثابتة مع مرور الوقت [2].

من خلال تشغيل المنتجات باستخدام آلة CNC، يمكن ضمان دقة تصنيع عالية جداً تصل إلى (1/1000) mmفي عمليات الإنتاج الكمي. هذا المستوى من الدقة يصعب تحقيقه بالطرق اليدوية والتقليدية. وبالتالي، يمكن تقليل الحاجة إلى التدخل البشري بشكل كبير، حيث تساعد المكنة (Mechanization) المشغلين في تقليل الجهد العضلي المطلوب للعمل، كما تقلل من الاعتماد على القدرات الذهنية والحسية للإنسان، مما يحد من الأخطاء البشرية ويزيد من كفاءة الإنتاج [3].

يمكن لآلة CNC أن تعمل بشكل شبه آلي أو آلي بالكامل وفقًا للبرنامج الذي يحدده المستخدم. في العقود الأخيرة، ومع التطور السريع في تكنولوجيا المتحكمات الدقيقة (Microcontrollers) والبرمجيات مفتوحة المصدر، أصبح من الممكن تصميم وبناء آلات CNC منخفضة التكلفة تعتمد على منصات مثل Arduino، مما جعل هذه التقنية في متناول الهواة والمؤسسات التعليمية الصغيرة [4].

أجريت العديد من الدراسات البحثية بهدف تقليل تكلفة آلات CNC والسعي إلى توسيع نطاق استخدامها في مجالات عمل مختلفة. هذه الدراسات تراوحت بين تطوير آلات رسم بسيطة (Plotters) إلى آلات حفر وتفريز متقدمة قادرة على العمل على مواد متنوعة مثل الخشب والبلاستيك والمعادن الخفيفة [5].

تتنوع آلات التحكم الرقمي CNC بشكل كبير لتلبي مجموعة واسعة من التطبيقات الصناعية والحرفية. يمكن تصنيف هذه الآلات بناءً على وظيفتها وطريقة عملها والمواد التي تتعامل معها [6]. تعتبر آلة التفريز (CNC Milling Machine) من أكثر أنواع آلات CNC شيوعاً واستخداماً في المجال الصناعي. تعمل هذه الآلة باستخدام التحكم الحاسوبي لقطع المواد المختلفة، حيث يمكنها ترجمة برامج محددة من الأرقام والحروف لتحريك الأداة بعدة طرق. تتميز بقدرتها على أداء وظائف متنوعة تشمل التفريز السطحي، التفريز الكتفي، الثقب، والخراطة. تتوفر معظم هذه الآلات بتكوينات تتراوح بين ثلاثة وستة محاور، مما يمنحها مرونة عالية في تنفيذ الأشكال المعقدة. آلة الخراطة (CNC Lathe) هي ايضا آلة CNC تقوم بقص قطع العمل أثناء دورانها. تتميز بقدرتها على إجراء قطع دقيقة بسرعة باستخدام أدوات متنوعة. على الرغم من أن هيكلها مشابه لمخارط التشغيل اليدوية التقليدية، إلا أنها أكثر دقة منها بشكل ملحوظ. غالباً ما تحتوي آلات الخراطة على عدد محاور أقل مقارنة بآلات التفريز، مما يجعلها أكثر اكتنازاً. يمكنها قراءة كل من G-code ولغات البرمجة الأخرى الخاصة بها. من الات المتقدمة *CNC* آلة القطع بالليزر (CNC Laser Cutter) وهي التي تستخدم شعاع ليزر عالي الطاقة لقطع أو نقش المواد المختلفة. تعمل هذه الآلة بتوجيه من نظام التحكم الرقمي الذي يحدد مسار شعاع الليزر بدقة عالية وفقاً للتصميم المطلوب. تتميز آلات القطع بالليزر بقدرتها على العمل على مجموعة واسعة من المواد، بما في ذلك المعادن، البلاستيك، الخشب، الأكريليك، الجلود، والورق. يمكن ضبط شدة الليزر وسرعة الحركة وفقاً لنوع المادة وسمكها، مما يمنحها مرونة عالية في التعامل مع مختلف التطبيقات. آلة الالتقاط والوضع (CNC Pick And Place) هي آلة CNC متخصصة تستخدم بشكل رئيسي في تجميع لوحات الدوائر المطبوعة، حيث تقوم بالتقاط المكونات الإلكترونية الصغيرة من بكرات التغذية

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ووضعها بدقة على أماكنها المحددة على اللوحة. تكمن أهمية هذه الآلات في أنها تحل محل التجميع اليدوي الذي يستغرق وقتاً طويلاً ويكون عرضة للأخطاء البشرية مثل الاتجاه غير الصحيح للمكونات. فهي لا تعمل فقط على تسريع الإنتاج، بل تقضي أيضاً على مصادر الخطأ البشري بشكل كبير [7] .

1.1. أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى تحقيق ما يلي:

- تصميم وبناء آلة تخطيط باستخدام التحكم الرقمي بالحاسوب (CNC Plotter) منخفضة التكلفة تعتمد على منصة Arduino ومكونات متوفرة محلياً، بحيث تكون في متناول الهواة.
- تطوير نظام تحكم متكامل باستخدام برامج مفتوحة المصدر مثل GRBL، Arduino IDE، Inkscape، وUniversal Gcode Sender.
- تمكين الآلة من الرسم ثنائي الأبعاد (2D) بحيث تستطيع رسم النصوص والأشكال الهندسية والتصاميم المختلفة على الورق والأسطح المستوية.
- جعل الآلة قابلة للتطوير بحيث يمكن مستقبلاً إضافة وحدات أخرى مثل الليزر للحفر أو المغازل الصغيرة للتفريز، مما يحولها إلى آلة متعددة الاستخدامات.
- تقديم نموذج تعليمي عملي يساعد في فهم أساسيات التحكم الرقمي بالحركة، وبرمجة المتحكمات الدقيقة، وتوليد أكواد G-code.

2.1. أهمية البحث او الدراسة

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من عدة جوانب هي:

- **الجانب الاقتصادي:** تقدم الدراسة نموذجاً عملياً لآلة CNC بتكلفة منخفضة (تتراوح بين 400 و1000 دينار الليبي)، مما يجعلها بديلاً اقتصادياً للآلات التجارية الباهظة الثمن. هذا يتيح للهواة والمؤسسات التعليمية الصغيرة امتلاك مثل هذه التقنية.
- **الجانب التعليمي والأكاديمي:** يمثل البحث منصة تعليمية متكاملة لفهم مبادئ التحكم الرقمي، وتصميم الأنظمة الميكانيكية والإلكترونية، وبرمجة المتحكمات الدقيقة، وتوليد أكواد G-code.
- **ربط الجانب النظري بالتطبيق العملي:**
  - يوضح البحث إمكانية الاستفادة من البرمجيات والأجهزة مفتوحة المصدر(Open Source) لبناء أنظمة معقدة بتكلفة منخفضة. كما يقدم نموذجاً قابلاً للتطوير والتحسين، حيث يمكن إضافة ميزات جديدة مثل الحفر بالليزر أو التفريز الخفيف في المستقبل.
  - يساهم البحث في إيجاد حلول محلية لمشاكل توفر المواد وارتفاع تكلفة الاستيراد، من خلال الاعتماد على مكونات متوفرة في الأسواق المحلية.

3.1. الدراسات السابقة

- **دراسة Yousif Mohsin Hasan وآخرون (2018):** قدم الباحثون دراسة حول تصميم وتصنيع آلة Plotter ثلاثية المحاور باستخدام Arduino وCNC Shield. تم تصميم الهيكل الميكانيكي باستخدام برنامج Solidworks، مع استخدام محركات خطوة للتحكم في المحاور X وY و Z. تم استخدام برنامج Easel لتصميم الرسومات وتوليد أكواد G-code. أظهرت النتائج قدرة الآلة على رسم النصوص والأشكال الهندسية بدقة مقبولة [1].
- **دراسة Raashika R وElangovan S (2024):** طور الباحثان آلة CNC متعددة الاستخدامات باستخدام منصة Arduino. أظهرت الدراسة أن الآلات التجارية تحقق دقة تصل إلى 0.01mm. تم اختبار الآلة على صور بصيغة JPG وملفات (CAD)، وأظهرت النتائج إمكانية استخدامها في تطبيقات متعددة مثل الحفر على لوحات PCB والنقش [2].

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- **دراسة Puja Girhe وآخرون (2018):** صمم الباحثون آلة CNC مصغرة أوتوماتيكية لرسم وثقب لوحات PCB. اعتمدت الدراسة على متحكم ATMEGA328 في Arduino، واستخدمت لغة G-code للتحكم. أظهرت النتائج أن الآلة توفر دقة عالية مع تقليل عبء العمل والجهد البشري [3].
- **دراسة Barra Jabbar وآخرون (2018):** قدم الباحثون دراسة حول تصميم وتحليل آلة CNC Plotter مصغرة. تم تصميم الهيكل باستخدام برنامج Solidworks، وتم استخدام محركات خطوة للتحكم في المحاور X و Y و Z. تم معايرة المحركات حيث وجد أن المحرك يحتاج 5 خطوات لتحريك 1mm. استخدمت الدراسة برنامج Easel لتوليد أكواد G-code وأظهرت النتائج قدرة الآلة على رسم الأشكال الهندسية والنصوص بدقة [4].
- **دراسة Syed Fazle Hyder وآخرون (2020):** صمم الباحثون آلة CNC Plotter ثلاثية المحاور باستخدام محركي خطوة للمحورين X و Y، ومحرك سيرفو للمحور Z. استخدمت الدراسة متحكم Arduino Uno R3 ولوحة CNC Shield V3. تم استخدام برنامج Inkscape لتحويل التصميم إلى G-code، وبرنامج Processing لإرسال الأوامر إلى الآلة. أظهرت النتائج إمكانية رسم الأشكال الهندسية والنصوص بدقة عالية [5].
- **دراسة Mohammad Nasir Khan وآخرون (2022):** قدم الباحثون دراسة حول تصميم آلة CNC للقطع بالليزر باستخدام Arduino. تم تصميم الهيكل باستخدام برنامج Siemens NX 12.0 مع تعديلات لتحقيق الاستقرار المطلوب. تم استخدام برنامج Inkscape لتصميم الأشكال وتحويلها إلى G-code، وبرنامج Universal G-code Sender لإرسال الأوامر إلى الآلة. كما تم محاكاة الدائرة الإلكترونية باستخدام برنامج Proteus للتحقق من صحة توصيلات Arduino والمحركات الخطوة. أظهرت النتائج أن الآلة توفر حلاً للقطع بالليزر مناسباً للصناعات الصغيرة [19].
- **دراسة Jash Raval وآخرون (2021):** قدم الباحثون دراسة حول تطوير آلة CNC Plotter مصغرة يتم التحكم فيها بواسطة الأوامر الصوتية .استخدمت الدراسة متحكم Arduino UNO ولوحة CNC Shield للتحكم في ثلاثة محركات خطوة. تم استخدام Python لتحويل الأوامر الصوتية إلى نص باستخدام مكتبات التعرف على الكلام (Speech Recognition)، ثم تحويل النص إلى أكواد G-code باستخدام برنامج Inkscape. أظهرت النتائج أن النظام يعمل بكفاءة مع زمن استجابة يتراوح بين 6-7 ثوانٍ لتحويل الصوت إلى نص، مما يتيح التحكم بالآلة عبر الأوامر الصوتية [20].

4.1.التعقيب على الدراسات السابقة (بيان الفجوة البحثية)

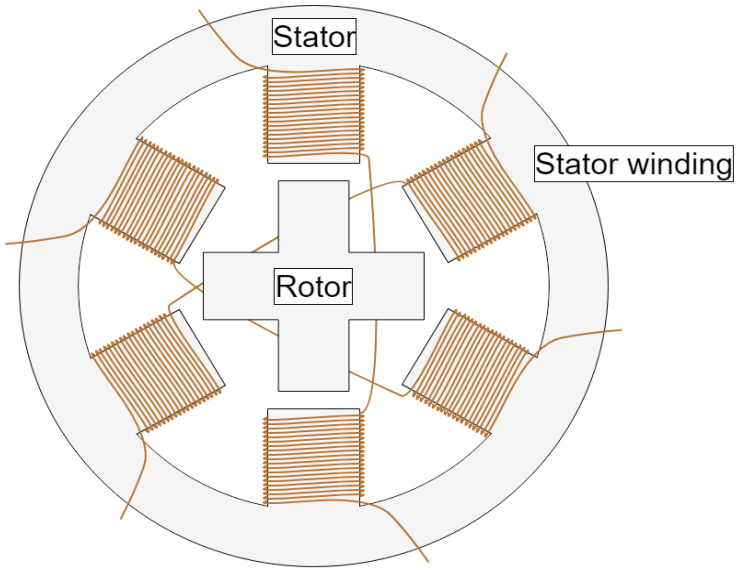
يأتي هذا البحث استكمالاً لتلك الجهود والدراسات السابقة، حيث يسعى إلى تصميم وتنفيذ آلة CNC Plotter منخفضة التكلفة باستخدام متحكم Arduino، مع التركيز على استخدام مكونات متوفرة محلياً لتكون نموذجاً عملياً سهلا يمكن الاستفادة منه في الأغراض التعليمية والتدريبية.

2. المكونات الاساسية للألة CNC

1.2.محركات الخطوة

تعد محركات الخطوة من المكونات الأساسية في آلات التحكم الرقمي CNC، حيث تعمل كمحركات رئيسية للحركة في هذه الأنظمة. تستخدم آلات CNC المعلومات الرقمية المولدة من الحاسوب للتحكم في مسار الحركة، وتلعب هذه المحركات دوراً حاسماً في تحقيق الدقة والكفاءة المطلوبة. فمحركات الخطوة (Stepper Motors) هي نوع فريد من المحركات الكهربائية التي تعمل بالتيار المستمر بدون فرش (Brushless DC Motor)، وتتميز بقدرتها على التحكم الدقيق في موقعها دون الحاجة إلى أي نظام تغذية راجعة [8]. كما هو الحال مع جميع المحركات الكهربائية، يتكون محرك الخطوة من جزء ثابت (Stator) وجزء متحرك (Rotor). يحتوي الجزء الثابت على أسنان ملفوف عليها ملفات كهربائية، بينما يتكون الجزء المتحرك إما من مغناطيس دائم أو قلب حديدي متغير الممانعة (Variable Reluctance) [9].

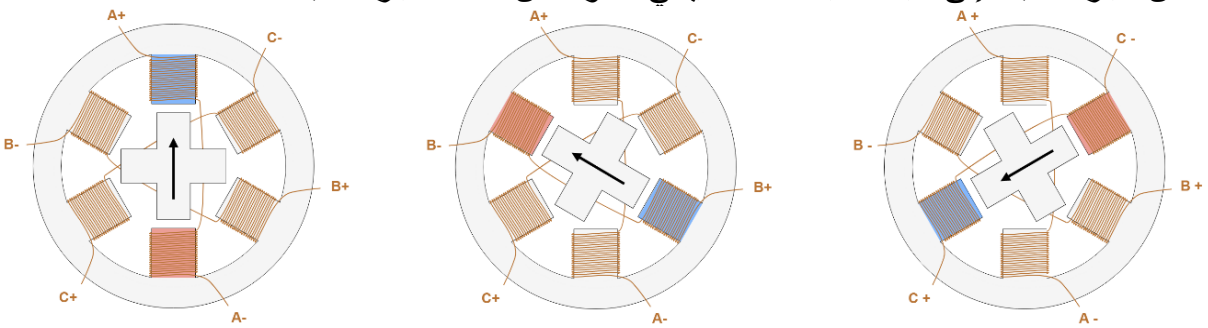
 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



شكل 1: الجزء الثابت والدوار في محرك الخطوة.

يعتمد مبدأ العمل الأساسي للمحرك على ما يلي, عند تغذية طور واحد أو أكثر من أطوار الجزء الثابت، يتولد مجال مغناطيسي نتيجة مرور التيار في الملفات، فيتجه الجزء الدوّار للاصطفاف مع هذا المجال, ومن خلال تغذية الأطوار المختلفة بشكل متتابع يمكن تدوير الجزء الدوّار بزوايا محددة للوصول إلى الموضع النهائي المطلوب.

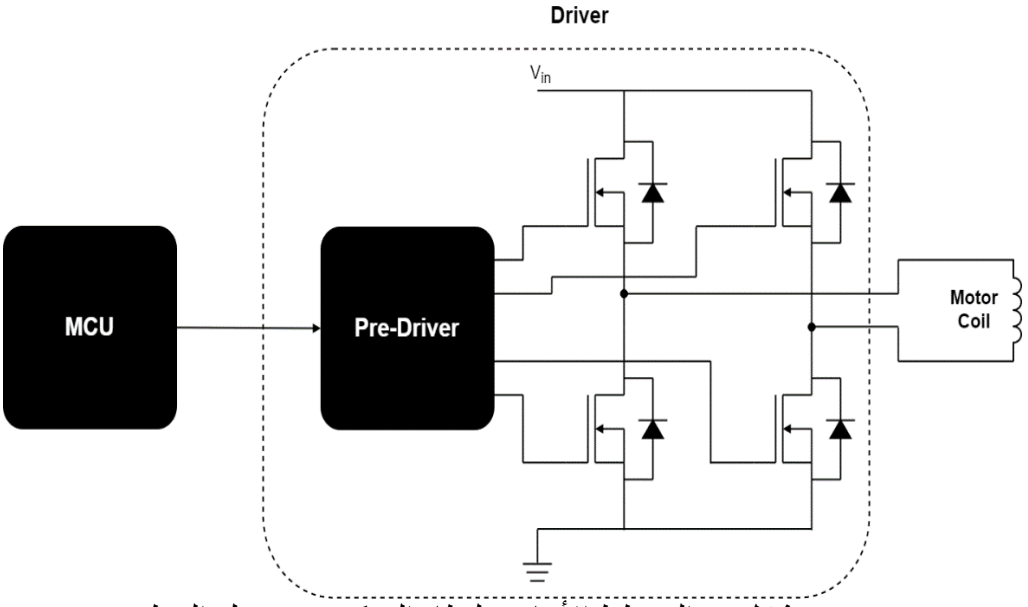
يوضح الشكل (2) تمثيلًا لمبدأ العمل. في البداية يتم تغذية الملف A، فيصطف الجزء الدوّار مع المجال المغناطيسي الناتج عنه, وعند تغذية الملف B يدور الجزء الدوّار بزاوية 60° باتجاه عقارب الساعة ليتماشى مع المجال المغناطيسي الجديد. ويحدث الأمر نفسه عند تغذية الملف C في الصور. تشير ألوان أسنان الجزء الثابت إلى اتجاه المجال المغناطيسي المتولد عن ملفات الجزء الثابت.



شكل 2: حركة محرك الخطوة

لتحقيق حركة الجزء المتحرك، يجب تنشيط ملفات المحرك بتسلسل محدد لتوليد المجال المغناطيسي المطلوب. يمر نظام التحكم في عدة مراحل منها, جسر الترانزستور (Transistor Bridge) الذي يتحكم في التوصيل الكهربائي لملفات المحرك. تحتاج كل مرحلة من مراحل التحكم إلى جسر ترانزستور خاص بها. يقوم المشغل المسبق (Pre-driver) بتحكم في تنشيط الترانزستورات، ويتم بدوره التحكم فيه بواسطة وحدة التحكم الدقيقة (MCU), وأخيرا يتم برمجة وحدة التحكم الدقيقة بواسطة المستخدم لتوليد إشارات محددة للمشغل المسبق للحصول على سلوك المحرك المطلوب. يوضح الشكل (3) تمثيلًا مبسطًا لمخطط التحكم في محرك الخطوة, ويمكن أن يكون كل من المشغل المسبق وجسر الترانزستورات مدمجين في جهاز واحد يُعرف باسم المشغل (Driver).

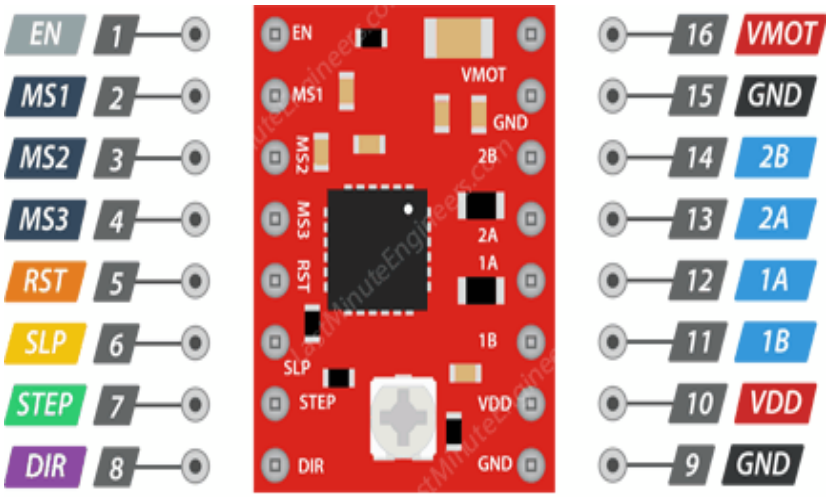
 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



شكل 3: المخطط الأساسي لنظام التحكم في محرك الخطوة

2.2.مشغل محرك الخطوة A4988

مشغل المحرك (A4988) هو دائرة متكاملة صغيرة مصممة للتحكم بمحركات الخطوة ثنائية القطب. يُستخدم هذا المشغل بشكل واسع في مشاريع الروبوتات والطابعات ثلاثية الأبعاد وآلات CNC نظراً لقدرته على تشغيل المحركات. يتميز A4988 بوجود مترجم مدمج يبسط عملية التحكم بشكل كبير, فبدلاً من الاضطرار إلى إرسال تسلسلات معقدة من الإشارات إلى أربعة أسلاك مختلفة، يقوم هذا المترجم بالعملية المعقدة نيابة عن المستخدم، حيث يحتاج فقط إلى التحكم بطرفين بسيطين, طرف STEP لتحديد حركة الخطوة، وطرف DIR لتحديد الاتجاه [13].



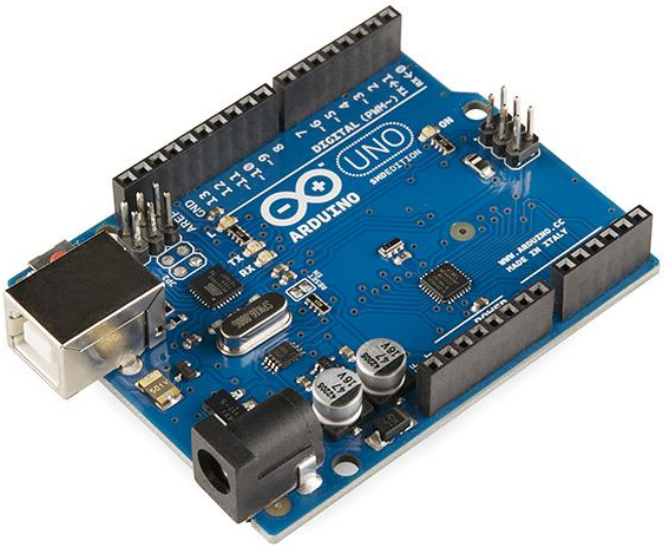
شكل 4: أطراف المشغل A4988

3.2.المتحكم الدقيق أردوينو أونو Arduino Uno Microcontroller

لوحة أردوينو أونو (Arduino Uno R3) هي لوحة تحكم دقيق (Microcontroller Board) تعتمد على المعالج ATmega328P، وهي اللوحة الأكثر شيوعاً واستخداماً في عائلة أردوينو. تم إصدارها في عام 2011، ويأتي اسم "أونو" (Uno) من اللغة الإيطالية بمعنى "واحد"، وقد تم اختيار هذا الاسم للدلالة على إصدار برنامج أردوينو IDE 1.0.

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

تتميز هذه اللوحة بأنها مزودة ببرنامج تحميل أولي (Bootloader) مثبت مسبقاً، مما يسهل تحميل الأكواد دون الحاجة إلى مبرمج خارجي. تعتبر لوحة أردوينو أونو اللوحة المرجعية لمنصة أردوينو، وتحظى بدعم واسع من مجتمع المستخدمين، مما يجعلها خياراً مثالياً في مجال الإلكترونيات المضمنة والمشاريع التعليمية [15].

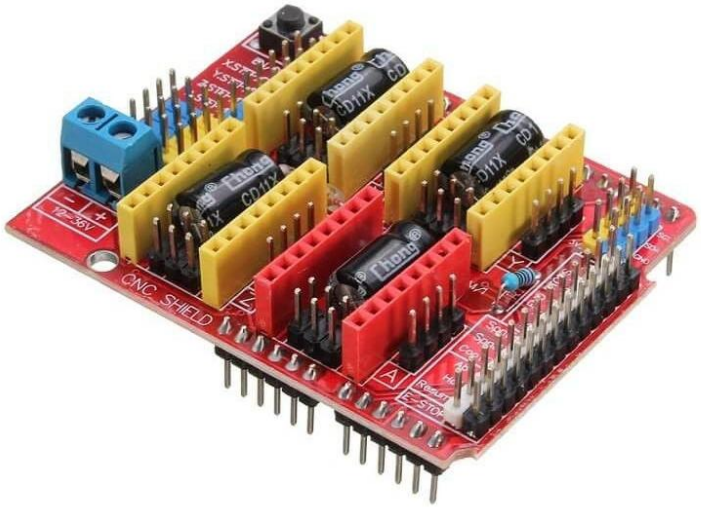


شكل 5: لوحة أردوينو أونو Arduino Uno

4.2.لوحة CNC Shield V3

لوحة CNC Shield V3 هي لوحة توسعة (Shield) مصممة لتوضع فوق لوحة Arduino UNO، وتهدف إلى توفير حل تحكم منخفض التكلفة لآلات CNC المختلفة. تم تصميم هذه اللوحة لتكون متوافقة مع برنامج GRBL، وهو مترجم أوامر G-code مفتوح المصدر. يمكن استخدام CNC Shield للتحكم في أنواع متعددة من آلات CNC بما في ذلك آلات التفريز، وآلات النقش والقطع بالليزر، وآلات الرسم (Drawing Machines)، والطابعات ثلاثية الأبعاد، أو أي مشروع يتطلب تحكمًا دقيقًا في محركات الخطوة.

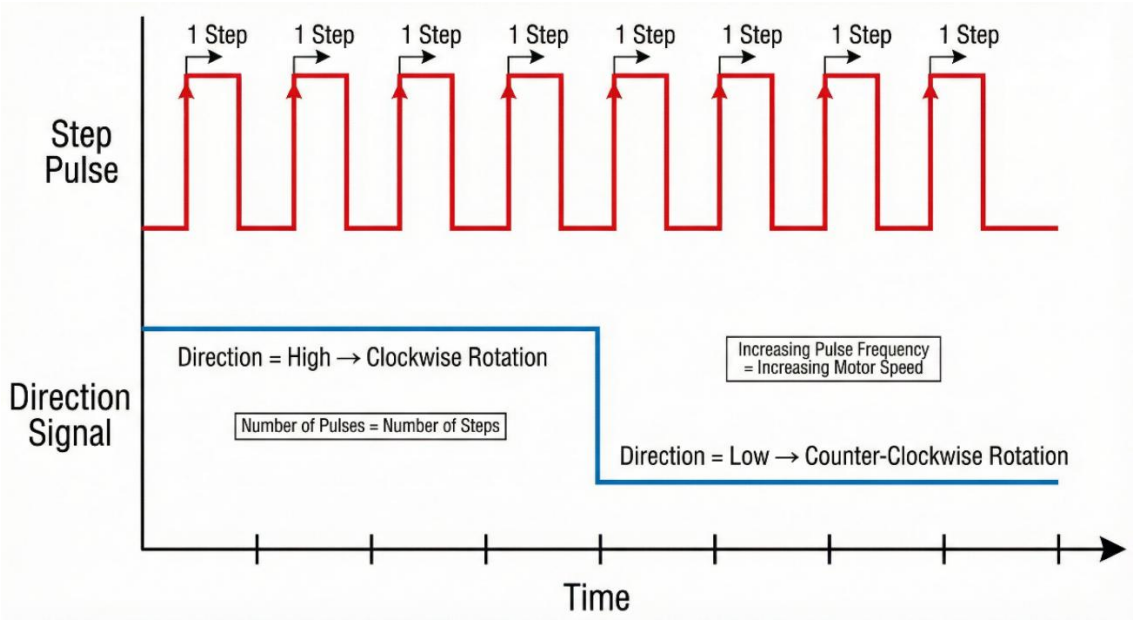
تعمل هذه اللوحة مع مشغلات محركات من نوع Pololu والمتوافقة معها، مثل A4988 أو DRV8825 ذو التيار العالي. تتكون المجموعة الأساسية لتشغيل CNC Shield من ثلاث مكونات رئيسية، لوحة CNC Shield نفسها، ومشغلات المحركات (Stepper Drivers)، ولوحة Arduino UNO [14].



شكل 6: لوحة CNC Shield V3

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

تعتمد طريقة التحكم في محركات الخطوة في هذا البحث على واجهة Step/Direction (الخطوة والاتجاه)، وهي الطريقة الأكثر شيوعاً في أنظمة CNC والطابعات ثلاثية الأبعاد. تستخدم هذه الواجهة مع مشغلات المحركات وتعمل بمبدأ بسيط للغاية حيث يرسل المتحكم (Arduino) إشارتين فقط إلى المشغل, إشارة Step (نبضة الخطوة) بحيث كل نبضة كهربائية يرسلها الأردوينو إلى طرف STEP تجعل المحرك يتقدم خطوة واحدة في الاتجاه المحدد. إذا أردت زيادة سرعة المحرك، كل ما عليك فعله هو زيادة عدد النبضات المرسلة في الثانية. تردد النبضات هو الذي يحدد السرعة الزاوية للمحرك. اما الإشارة Direction (اتجاه الدوران) وهي إشارة ثنائية الحالة (HIGH أو LOW) ترسل إلى طرف DIR. عندما تكون HIGH، يدور المحرك في اتجاه عقارب الساعة (أو في اتجاه معين حسب توصيل الأسلاك)، وعندما تكون LOW، يدور في الاتجاه المعاكس. يوضح شكل (7) علاقة إشارات Step وDirection. بحيث كل نبضة على طرف Step تدفع المحرك خطوة واحدة، بينما يحدد مستوى إشارة Direction اتجاه الدوران.



شكل 7: إشارات النبضات Step Pulses وعلاقتها باتجاه الحركة Direction

3. البنية البرمجية لنظام التحكم في آلة CNC

من اهم البرامج المستخدمة في هذا البحث هي على النحو التالي:

1.3.لغة G-code

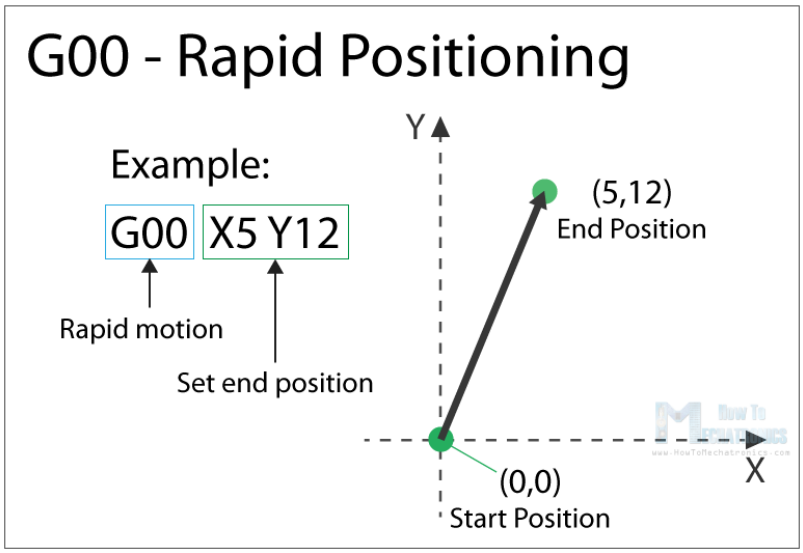
هي لغة برمجة تستخدم في آلات التحكم الرقمي CNC لتوجيه حركة الالة. G-code هي اختصار لـ "Geometric Code"، وهي لغة تُستخدم لإعطاء التعليمات للألة حول مكان التحرك، وبأي سرعة، وأي مسار يجب اتباعه. فعلى سبيل المثال في حالة الات التفريز أو المخارط، تتحرك أداة القطع وفق هذه الأوامر لتتبع مساراً محدداً وإزالة المواد للحصول على الشكل المطلوب. تتكون أوامر G-code من حرف متبوع برقم، وغالباً ما يتبعها إحداثيات X وY وZ ومعدل التغذية F. يمكن تقسيم السطر الواحد على سبيل المثال إلى الهيكل التالي [16].

G01 X247.951560 Y11.817060 Z-1.000000 F400.000000

وهو يعني تحرك في خط مستقيم إلى موضع محدد, X, Y, Z وهي الإحداثيات التي يجب التحرك إليها, و F معدل التغذية (السرعة) التي سيتم بها تنفيذ الحركة. ومن أهم أوامر G-code المستخدمة:

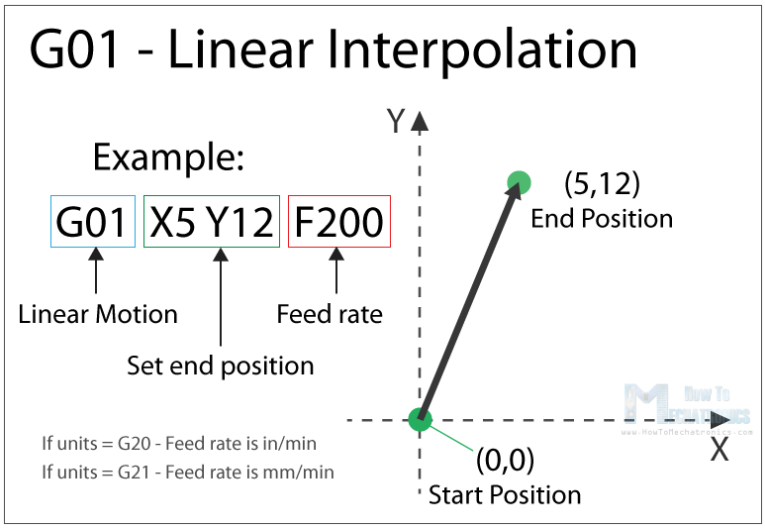
 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- **G00 – التحريك السريع (Rapid Positioning):** يقوم هذا الأمر بتحريك الألة بأقصى سرعة من الموضع الحالي إلى نقطة محددة. يتحرك المحوران في نفس الوقت بحيث يكملان الحركة معاً، مما ينتج حركة في خط مستقيم إلى الموضع الجديد. يُستخدم هذا الأمر للحركات غير القطعية، بهدف نقل الألة بسرعة إلى الموضع المطلوب لبدء العمل.
-



شكل 8: التحريك السريع Rapid Positioning

- **G01 – الاستيفاء الخطي (Linear Interpolation):** يقوم هذا الأمر بتحريك الألة في خط مستقيم بمعدل تغذية محدد. يتم تحديد الموضع النهائي بإحداثيات X وY وZ، والسرعة بقيمة F. يقوم متحكم الماكينة بحساب النقاط المتوسطة لتحقيق هذا الخط المستقيم. يُستخدم هذا الأمر عندما تؤدي الألة وظيفتها الرئيسية، مثل قطع المواد في خط مستقيم.

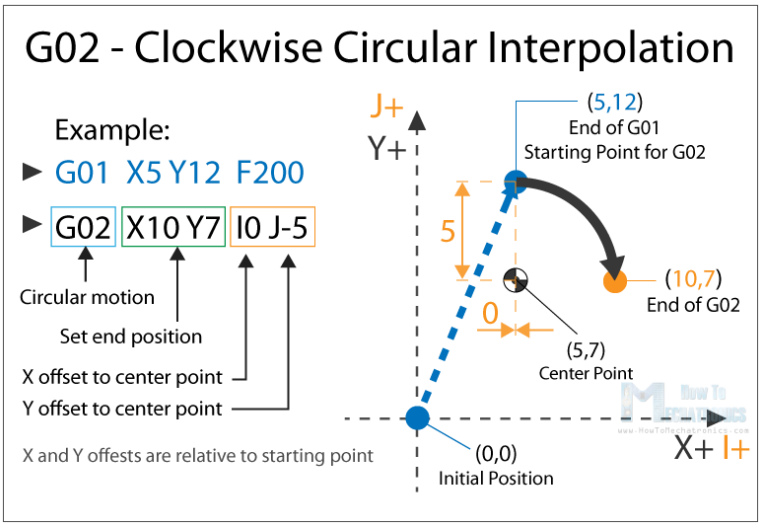


شكل 9: الاستيفاء الخطي Linear Interpolation

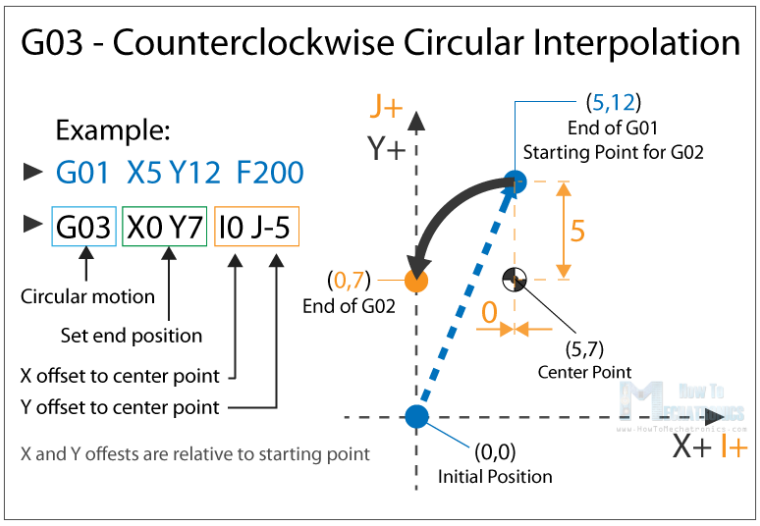
- **G02 - G03 – الاستيفاء الدائري (Circular Interpolation):** هذان الأمران يقومان بتحريك الألة في مسار دائري باتجاه وعكس عقارب الساعة. بالإضافة إلى إحداثيات نقطة

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

النهاية. يجب تحديد مركز الدائرة باستخدام المعاملين I و J. قيم I و J هي إزاحة نسبية من نقطة البداية إلى مركز الدائرة.



شكل 10: الاستيفاء الدائري باتجاه عقارب الساعة



شكل 11: الاستيفاء الدائري عكس عقارب الساعة

كما ان هناك اوامر مثل G20 / G21 – اختيار وحدات القياس, و G28 – العودة إلى نقطة المرجع (Return Home) و G90 / G91 – تحديد نظام الإحداثيات .....الخ.

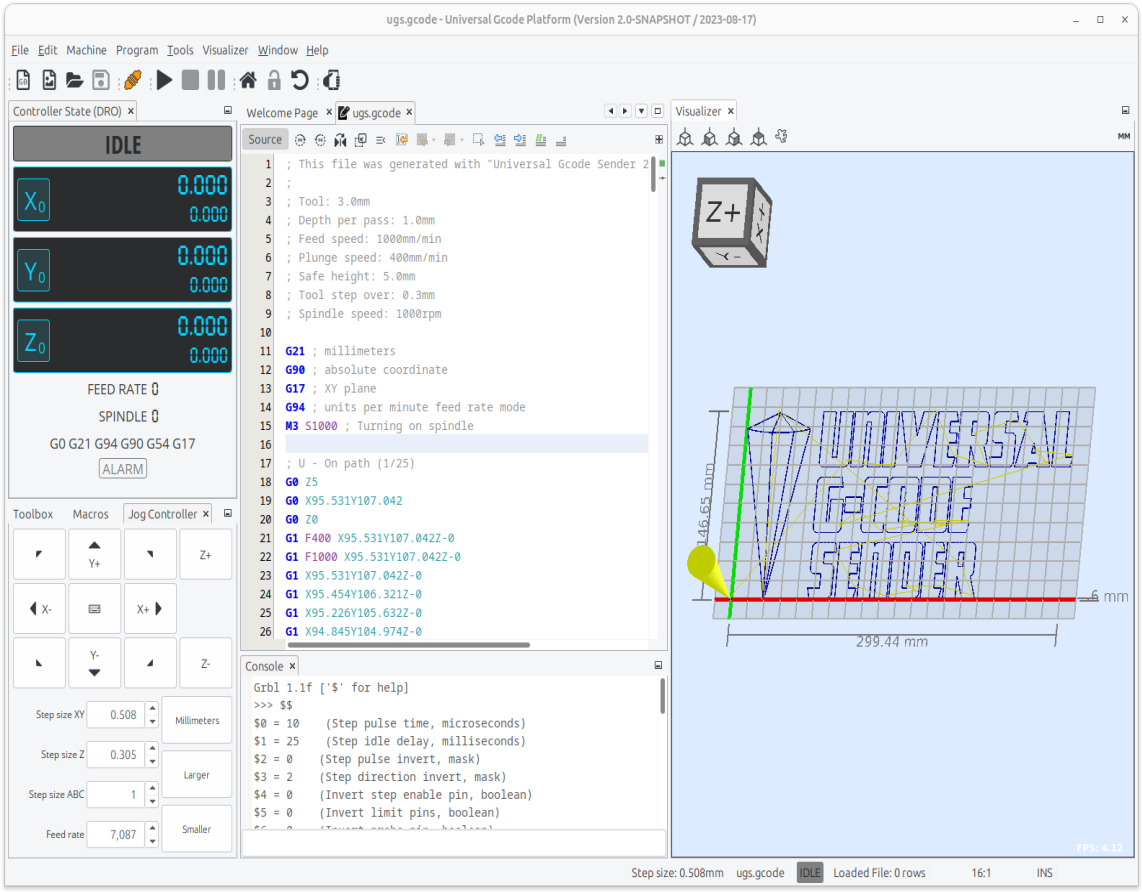
2.3.البرنامج الثابت GRBL Firmware

يُعد GRBL برنامجًا مجانيًا ومفتوح المصدر يُستخدم للتحكم في حركة الآلات التي تتحرك أو تُصنّع الأشياء أو تُحرّكها، ويعمل على مجموعة واسعة من المتحكمات الدقيقة. يُستخدم GRBL لتشغيل الكثير من أجهزة CNC المختلفة مثل الموجهات والمخارط وآلات التفريز وأجهزة الليزر وغيرها، ويُعتبر فعليًا معيارًا لأنظمة CNC مفتوحة المصدر . تم إصدار النسخة الأولى من GRBL عام 2009 بواسطة Simen Svale Skogsrud، ثم تم تطويره لاحقًا, حيث تم تحسينه ليصبح نظام تحكم عالي الكفاءة يعمل على عائلة لوحات Arduino. يتميز GRBL بكفاءته العالية في استغلال معالجات Atmel ذات 8-بت المستخدمة في لوحات Arduino، ويُعد إنجازًا مميزًا في هندسة البرمجيات نظرًا لقدراته الكبيرة رغم محدودية إمكانيات هذه المعالجات [17].

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

3.3.برنامج Universal G-code Sender (UGS)

هو برنامج تحكم مجاني يُستخدم للتواصل بين الحاسوب وآلة CNC. يشير مصطلح "Universal" إلى قدرته على العمل مع خيارات برامج ثابتة ومتعددة، بما في ذلك GRBL وTinyG و Smoothieware وcore2G [18]. يعمل UGS كبرنامج وسيط يسمح للمستخدم بالتحكم في الآلة من خلال الحاسوب، ويوفر مزايا مهمة مثل رؤية مسار الأداة في الوقت الفعلي Real-time View وإشراف أكبر على أداء الآلة.

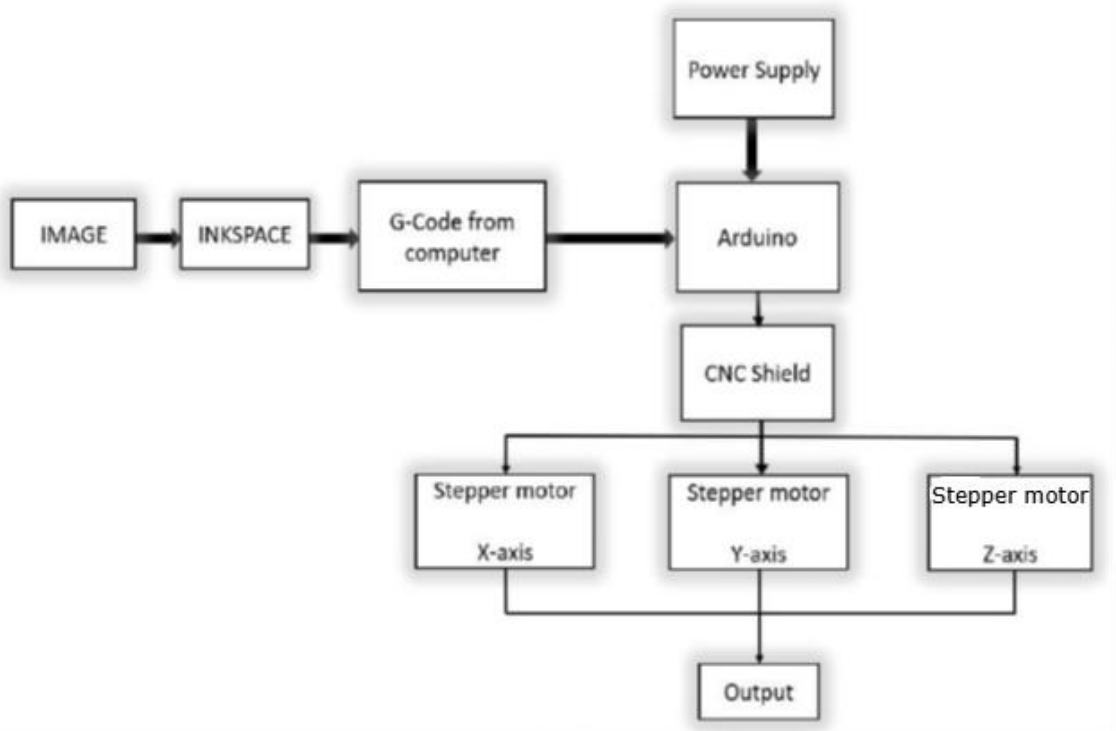


شكل 12: واجهة برنامج Universal G-code Sender (UGS)

4. مبدأ عمل آلة الرسم الرقمي (CNC Plotter)

يعتمد نظام آلة CNC Plotter على مبدأ التحكم الرقمي بالحركة، حيث تبدأ عملية التشغيل بإرسال أوامر الرسم أو القطع من الحاسوب إلى لوحة Arduino Uno على شكل تعليمات G-code. يقوم الأردوينو بمعالجة هذه الأوامر وتحويلها إلى إشارات تحكم رقمية خاصة بكل محور. تنتقل هذه الإشارات إلى لوحة CNC Shield V3 المثبتة أعلى الأردوينو، والتي تقوم بدورها بتوجيه الإشارات إلى مشغلات المحركات. يحوّل المشغل هذه الإشارات إلى نبضات تيار كهربائي متتابعة تُغذي ملفات محرك الخطوة، مما يؤدي إلى دوران المحرك بدقة زاوية محسوبة. تتحول هذه الحركة الدورانية عبر القضيب اللولبي إلى حركة خطية، فتتحرك العربة على المحاور X و Y و Z حسب الأوامر المرسلة.

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



شكل 13: مخطط توضيحي لمبدأ عمل آلة CNC Plotter

تُعد معايرة الآلة الخطوة التالية بعد الانتهاء من بناء الجزء المادي (Hardware)، حيث تُعتبر هذه المرحلة ضرورية لضمان تطابق الحركة الفعلية مع القيم البرمجية, في الإعدادات الافتراضية لبرنامج التحكم. حيث قيمة معامل الخطوات لكل مليمتر (Steps/mm) مضبوطة على Initial Steps/mm ، وهي قيمة لا تتوافق مع البنية الميكانيكية للآلة المصممة, وتعني هذه القيمة أن المحرك يحتاج إلى Initial خطوة لقطع مسافة 1mm، مما يؤدي هذا إلى حركة غير دقيقة أثناء التجربة العملية. لإجراء المعايرة، تم اعتماد Target Length/mm كقيمة مرجعية للاختبار في المحور X. عند تنفيذ أمر الحركة بمقدار Target Length/mm، تكون الماكنة تحركت فعليًا مسافة Actual Length/mm بدلًا من Target Length/mm ، مما يدل على أن القيمة المضبوطة أكبر بكثير من القيمة الصحيحة. لذلك كان من الضروري تعديل قيمة Final Steps/mm باستخدام العلاقة التالية:

$$\text{Final Steps/mm} = \left(\frac{\text{Target Length}}{\text{Actual Length}}\right) \times \text{Initial Steps/mm}$$

بناءً على ذلك، تم ضبط المحورين X و Y على قيمة Final Steps/mm ، بحيث يقابل كل 1mm في البرنامج 1mm حركة فعلية على الآلة. أما بالنسبة للمحور Z، ونظرًا لاختلاف آلية الحركة المستخدمة فيه (محرك مشغل الأقراص)، فقد تم ضبط القيمة على XFinal Steps/mm بعد إجراء المعايرة العملية, حيث يتطلب هذا النظام عدد خطوات أقل لقطع نفس المسافة. بعد إتمام عملية الضبط، أصبحت العلاقة بين الإحداثيات البرمجية والحركة الفعلية علاقة مباشرة ودقيقة، بحيث أصبح كل 1mm في أوامر G-code يقابله 1mm حركة حقيقية على آلة الـ CNC.

لتنفيذ أي رسم على آلة CNC يجب أولًا تحويل التصميم الهندسي إلى لغة تفهمها الألة, وهي مجموعة من الأوامر البرمجية التي تحدد مسار حركة المحاور، سرعة التغذية، ونقاط رفع وخفض الأداة، بحيث تتحول الرسومات الرقمية إلى حركات ميكانيكية على أرض الواقع. تُستخدم برامج التصميم الهندسي

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

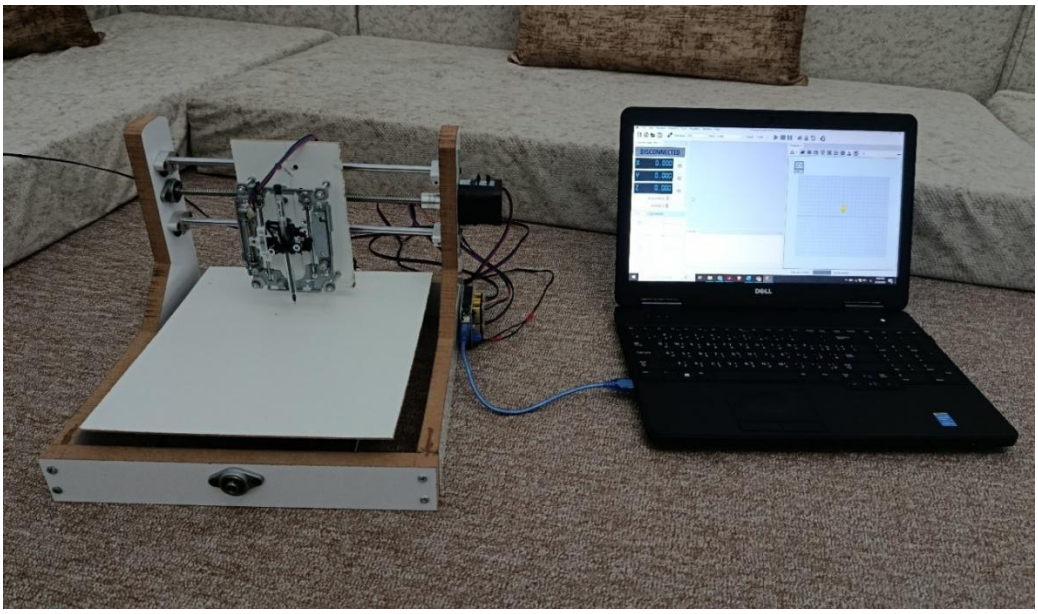
لإنشاء النماذج ثنائية أو ثلاثية الأبعاد، ثم تُستخدم برامج توليد المسارات لتحويل هذه التصاميم إلى ملف قابل للتنفيذ.

```
(Start cutting path id: path243)
(Change tool to Default tool)

G00 Z[5.000000*#11+#8]
G00 X[136.196920*#10+#6] Y[178.245390*#10+#7]

G01 Z[-0.125000*#11+#8] F [#20](Penetrate)
G01 X[136.076000*#10+#6] Y[178.020600*#10+#7] Z[-0.125000*#11+#8] F [#21]
G01 X[135.824850*#10+#6] Y[178.150820*#10+#7] Z[-0.125000*#11+#8]
G01 X[135.939570*#10+#6] Y[178.377170*#10+#7] Z[-0.125000*#11+#8]
G01 X[136.196920*#10+#6] Y[178.245390*#10+#7] Z[-0.125000*#11+#8]
G00 Z[5.000000*#11+#8]

(End cutting path id: path243)


(Start cutting path id: path243)
(Change tool to Default tool)

G00 Z[5.000000*#11+#8]
G00 X[136.928660*#10+#6] Y[177.346220*#10+#7]

G01 Z[-0.125000*#11+#8] F [#20](Penetrate)
```

شكل 14: محرر لـ G-code

5. الاختبارات وعرض النتائج Results and discussion

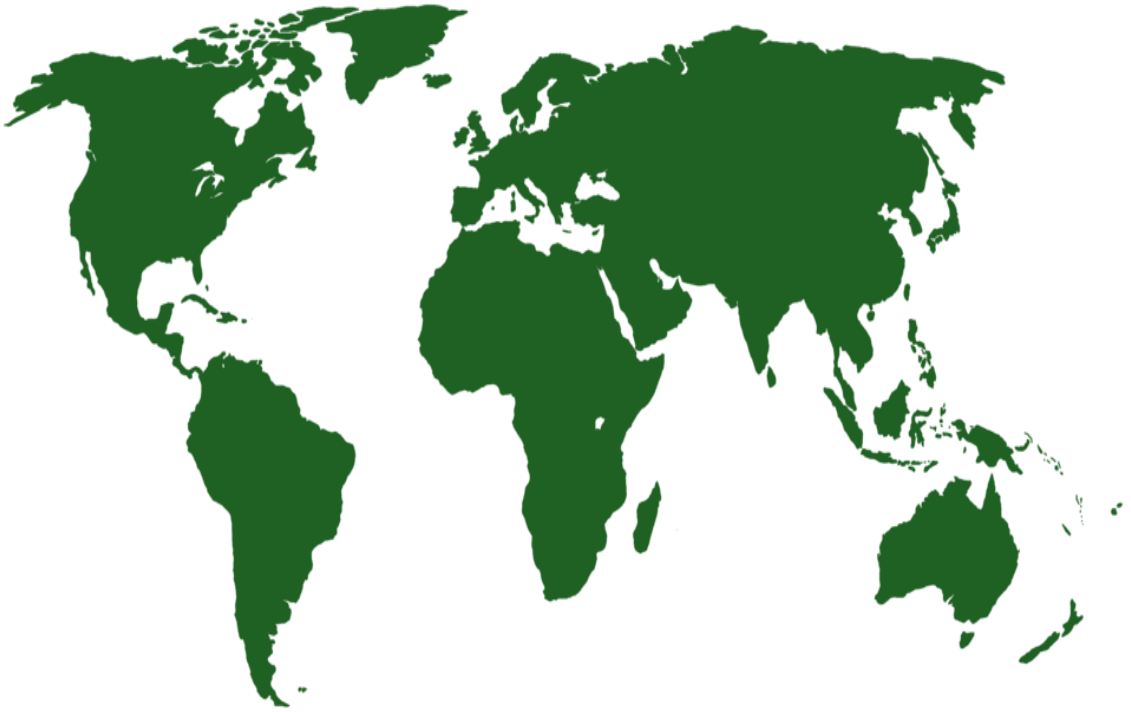
بعد الانتهاء من تجميع الآلة وبرمجتها، تم إجراء سلسلة من الاختبارات العملية للتحقق من أدائها ودقتها، والتأكد من قدرتها على تنفيذ الرسومات المطلوبة بشكل صحيح. يوضح الشكل (15) العتاد (Hardware) والبرمجيات (Software) الخاصة بآلة CNC Plotter. تم استخدام القلم كأحد المكونات لتنفيذ عملية الرسم في الجزء المادي من النظام. تم توصيل مصدر طاقة بلوحة CNC Shield لتشغيل المحركات, بينما تم استخدام كابل USB المتصل بلوحة المتحكم الدقيق Arduino Uno لتزويدها بالطاقة وإرسال التعليمات إليها.



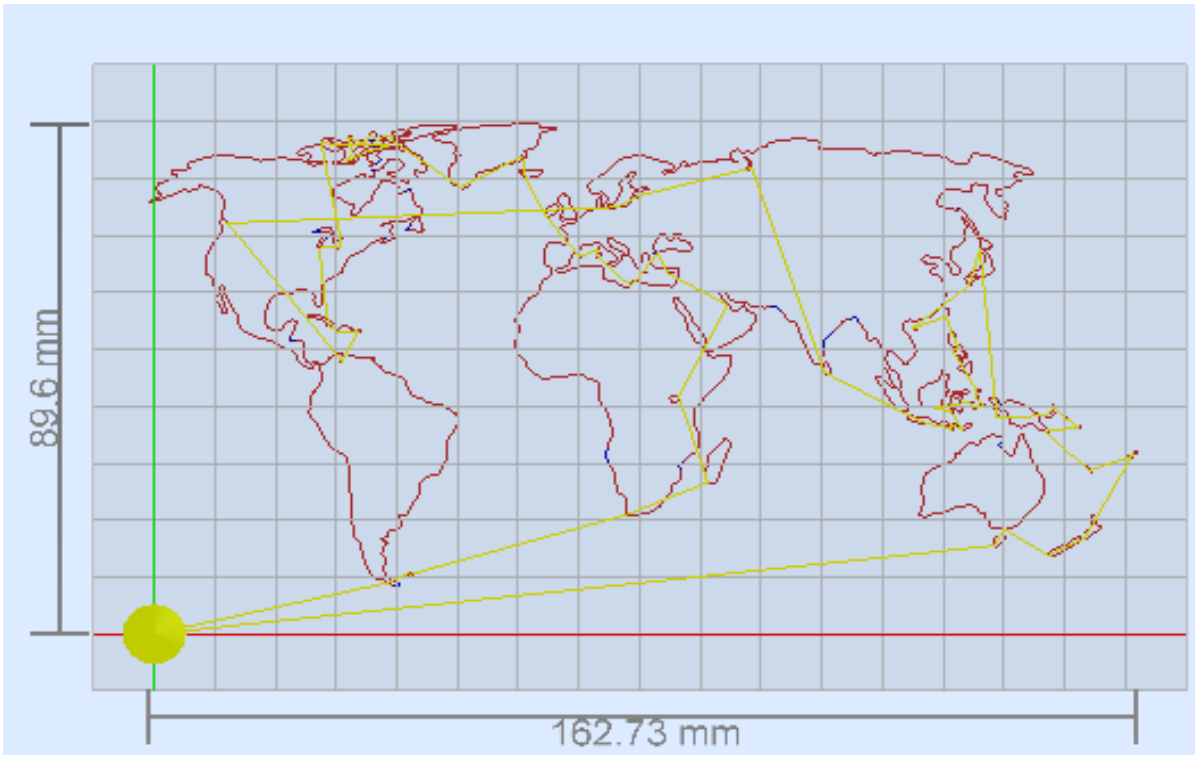
شكل 15: العتاد والبرمجيات الخاصة بآلة CNC Plotter

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

تم أولًا استيراد الصورة الأصلية إلى برنامج Inkscape ثم تتبعها وتحويلها إلى صورة Bitmap. بعد الانتهاء من عملية التتبع، تم إنشاء مسار (Path) للصورة ثم تصديرها بصيغة ملف G-code. بعد ذلك، تم فتح ملف G-code باستخدام برنامج UGS لتنفيذ عملية الرسم.



شكل 16: الصورة الاصلية المستوردة عبارة عن (خريطة العالم)



شكل 17: مسار G-code لخريطة العالم

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

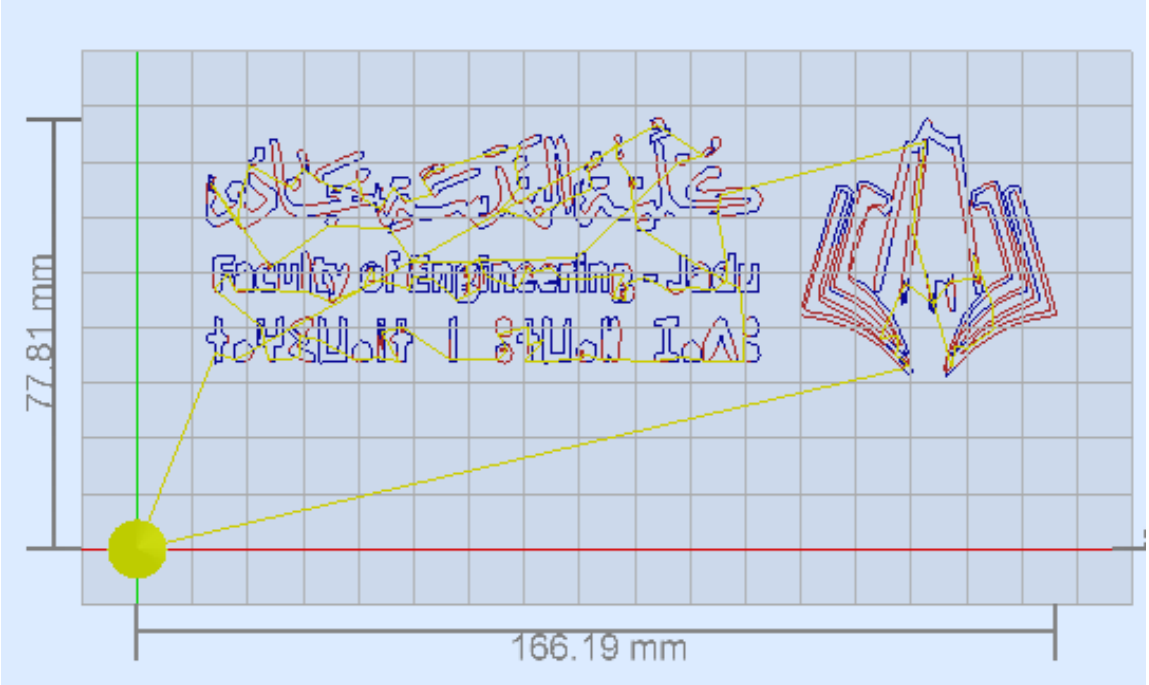
شكل 18: الصورة المرسومة بالالة لخريطة العالم

تم تنفيذ عملية رسم الصورة مرة واحدة، وكانت النتيجة مطابقة تمامًا لمسار الصورة المعروض في البرنامج. وتوضح هذه النتيجة أن المحركين الخطويين في المحور X والمحور Y يعملان بتزامن ودقة جيدين أثناء الحركة. كما بلغ الزمن المستغرق لتنفيذ رسم صورة خريطة العالم 72 ثانية.

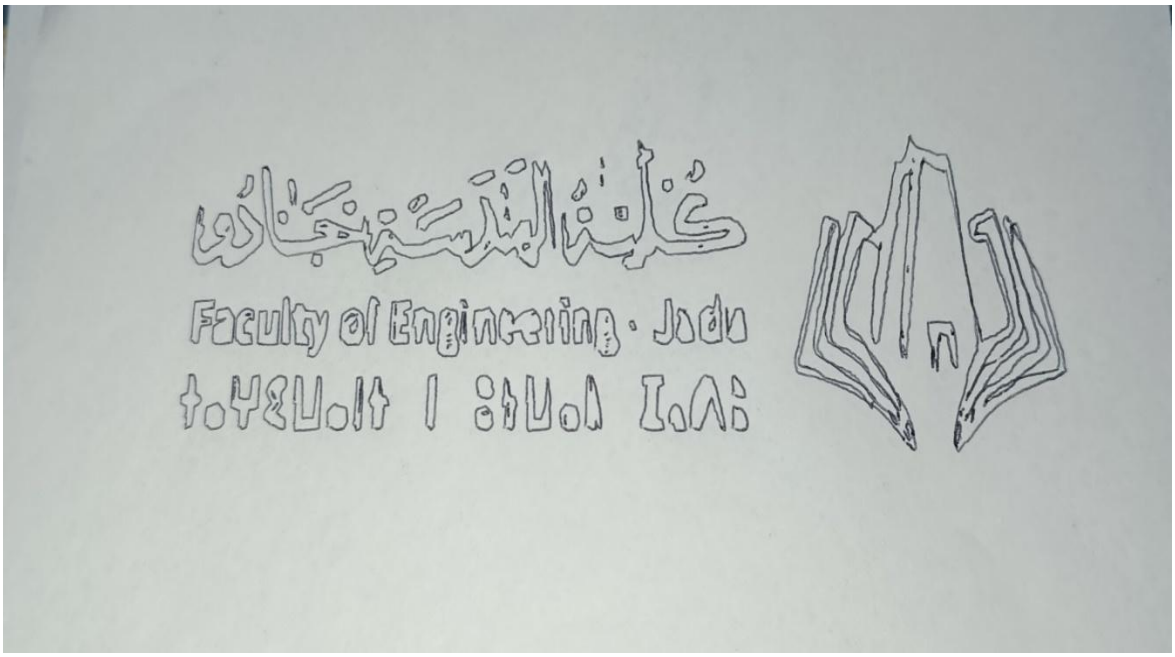
كُلِّيَّةُ الهَنْدَسَةِ جَادُو
Faculty of Engineering - Jadu

شكل 19: الصورة الاصلية المستوردة (شعار كلية الهندسة جادو)

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



شكل 20: مسار G-code (شعار كلية الهندسة جادو)



شكل 21: الصورة المرسومة (شعار كلية الهندسة جادو)

بعد الانتهاء من بناء الآلة واختبارها وتحليل النتائج، تأتي الخاتمة لمناقشة ما تم تحقيقه، وتقييم مدى نجاح البحث في تلبية الأهداف الموضوعة، واستخلاص الدروس المستفادة ومناقشة النتائج، وتقديم توصيات للتحسينات المستقبلية. ومن خلال تقييم البحث، يمكن تحديد الميزات التالية:

- **التكلفة المنخفضة:** تعتبر التكلفة الإجمالية للبحث اقتصادية جداً مقارنة بالآلات التجارية، مما يجعله في متناول الهواة.
- **البساطة في التصميم والتنفيذ**: استخدام مكونات متوفرة وسهلة التركيب، مع الاعتماد على برامج مفتوحة المصدر، جعل البحث مناسباً في مجال التحكم الرقمي.

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- **المرونة وقابلية التطوير:** يمكن تطوير الآلة مستقبلاً بإضافة ميزات جديدة مثل محددات النهاية، أو تحسين الأداء باستخدام مكونات أفضل، أو حتى تحويلها إلى آلة حفر باستخدام محرك مغزل.
- **القيمة التعليمية:** ساهم البحث في فهم أعمق لأنظمة التحكم الرقمي والحركة، وكيفية عمل آلات CNC، وأساسيات برمجة الأردوينو وتوليد أكواد G-code.

6. التوصيات والتحسينات المستقبلية

بناءً على التجارب العملية وتحليل النتائج، تم اقترح مجموعة من التحسينات للمشاريع المستقبلية التي يمكن أن ترتقي بالآلة من مجرد نموذج تعليمي إلى أداة عملية أكثر تطوراً.

فيما يتعلق بالمكونات الميكانيكية، يوصي بإضافة Limit Switches للمحاور X و Y، وذلك لتحديد نقطة الصفر (Homing) تلقائياً عند بدء التشغيل، مما يزيد الدقة ويوفر الوقت ويجعل تشغيل الآلة أكثر احترافية. كما يقترح استخدام هيكل معدني مصنوع من الألمنيوم بدلاً من الخشب، حيث يزيد ذلك من المتانة والثبات الهيكلي، ويقلل الاهتزاز أثناء الحركة، مما يحسن دقة الرسم وجودة المخرجات, بالإضافة إلى ذلك يفضل تركيب محرك NEMA 17 للمحور Z بدلاً من محرك مشغل اقراص DVD، مما يحسن دقة وقوة رفع وخفض القلم، ويتيح إمكانية استخدام أدوات أثقل في المستقبل مثل وحدة الليزر (Laser Module) للحفر على الخشب والأكريليك والجلد، أو محرك مغزل (Spindle Motor) صغير للحفر على البلاستيك و(PCB) والمعادن الخفيفة، مما يحول الآلة من مجرد طابعة للرسم إلى آلة حفر وتفريز متعددة الاستخدامات. كما أن زيادة مساحة العمل يتيح رسم تصاميم أكبر وأكثر تنوعاً.

أما بالنسبة للتحكم والتشغيل، فيمكن إضافة شاشات (LCD) ووحدة تحكم يدوية، مما يتيح تشغيل الآلة والتحكم بها دون الحاجة إلى توصيلها بكمبيوتر بشكل دائم، ويجعلها أكثر استقلالية.

أخيراً، على المستوى البرمجي، يمكن تطوير واجهة تحكم بسيطة مخصصة لهذا المشروع، تسهل على المستخدمين الجدد عملية ضبط الإعدادات وتشغيل الرسومات. كما أن إضافة مكتبة من الرسومات الجاهزة التي يمكن للمستخدم استدعاؤها وتنفيذها بضغطة زر، ستجعل تجربة المستخدم أكثر سلاسة ومتعة.

7. الخاتمة

تم في هذا البحث بنجاح تصميم وبناء آلة CNC Plotter تعمل باستخدام متحكم Arduino UNO، واعتماداً على مكونات متوفرة محلياً وبتكلفة منخفضة بلغت حوالي 570 دينار ليبي. أثبتت الآلة من خلال الاختبارات العملية قدرتها على رسم أشكال وهندسية ونصوص مختلفة بدقة جيدة، مما يجعلها مناسبة للأغراض التعليمية والتدريبية للهواة, وإمكانية وسهولة تصنيع آلات CNC اخرى بسيطة بتكلفة اقتصادية منخفضة تناسب الهواة. أظهرت الاختبارات التي أجريت ايضا أن الآلة قادرة على رسم أشكال مختلفة بدقة تصل إلى 0.2± mm في المحورين X و Y، وهي دقة مناسبة للاستخدامات التعليمية والرسومات. كما أن جودة الخطوط كانت جيدة مع استخدام أقلام حبر عادية. أثبتت البرامج المستخدمة (GRBL، Inkscape، Universal Gcode Sender) كفاءة عالية وسهولة في الاستخدام, مع توفر دعم كبير عبر الإنترنت.

على الرغم من وجود بعض التحديات ونقاط الضعف، مثل استخدام هيكل خشبي ومحرك مشغل اقراص DVD للمحور Z، إلا أن البحث حقق أهدافه الأساسية بنجاح وقدم نموذجاً عملياً متكاملاً لفهم أنظمة التحكم الرقمي بالحركة. ساهم البحث في اكتساب خبرات قيمة في مجالات التصميم الميكانيكي، والتركيب الإلكتروني، وبرمجة المتحكمات، وتوليد أكواد G-code. نأمل أن يكون هذا البحث مفيداً للباحثين والهواة الراغبين في دخول عالم آلات التحكم الرقمي CNC.

References

[1] Yousif Mohsin Hasan, Layth Fadhil Shakir, Hassan Hamed Naji. (2018). "Implementation and Manufacturing of a 3-Axes Plotter Machine by Arduino and CNC Shield". University of Al- Qadisiyah, Iraq. (ICETA 2018).

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

[2] Raashika R, Elangovan S. (2024). "Design and Development of a Low-Cost Multipurpose Arduino CNC plotter for Industrial Applications". PSG College of Technology, India.
[3] Puja Girhe, Shubham Yengar, Arpita Chirde. (2018). "Arduino Based Cost Effective CNC Plotter Machine". DES's COET, India. (IJETER).
[4] Barra Jabbar, Sujud Abd-Alstar, Ahmed Jasim, Ahmed Yahya, Mohammed Iskander. (2018). "Design and Analysis Mini CNC Plotter Machine". University of Al-Qadisiyah, Iraq.
[5] Syed Fazle Hyder, Mohammed Ibrahim, Mohd Zeeshan Adan, Fazal Mohammed. (2020). "CNC PLOTTER MACHINE". Nawab Shah Alam Khan College of Engineering and Technology, India.
[6] Universal Technical Institute (UTI). (2020, June 21). Types of CNC Machines. https://www.uti.edu/blog/cnc/6-cnc-machines.
[7] Rust, Evan. (2026, March 21). This Open Source Pick-and-Place Machine Is Low-Cost Yet Highly Capable. Hackster.io. https://www.hackster.io/news/this-open-source-pick-and-place-machine-is-low-cost-yet-highly-capable-8a9e39e8edbe
[8] Dejan, (2022, May 15). Stepper Motors and Arduino – The Ultimate Guide. How To Mechatronics. https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/stepper-motors-and-arduino-the-ultimate-guide/
[9] Monolithic Power Systems. (2020). Stepper Motors: Basics, Types, Uses and Working Principles (Version R1.0).
SIMTACH. (2024, May 20). Stepper Motors in CNC Machines. https://www.simtachmotor.com/stepper-motors-in-cnc-machines/
[11] MotorMicro. (2025). How Does a NEMA 17 Stepper Motor Work? Principles & Uses Guide. https://www.motormicro.com/how-nema-17-stepper-motor-works-principles-uses
[12] Codrey Electronics. (2019, October 17). How to Play with a Salvaged Bipolar Stepper Motor?. https://www.codrey.com/electronic-circuits/how-to-play-with-a-salvaged-bipolar-stepper-motor/
[13] Last Minute Engineers. (2018, November 28). *In-Depth: Control Stepper Motor with A4988 Driver Module & Arduino*. https://lastminuteengineers.com/a4988-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/
[14] Protoneer. (n.d.). CNC Shield Guide (Version 3.00). Maker Hardware.
[15] How To Mechatronics. (2020, May 6). G-code Explained | List of Most Important G-code Commands. https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/
[16] How To Mechatronics. (2020, May 6). G-code Explained | List of Most Important G-code Commands. https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/
[17] The Grbl Project. (n.d.). What is GRBL?. https://www.grbl.org/what-is-grbl
[18] SelfCAD. (2022, September 1). Universal Gcode Sender: What You Need to Know. https://www.selfcad.com/blog/universal-gcode-sender
[19] Mohammad Nasir Khan, Ambuj Maheshwari, Himanshu Verma. (2022). "Study and Design of Arduino

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Based CNC Laser Cutting Machine". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1224, 012008.

[20] Jash Raval, Hrithik Sable, Akash Singh, Srujal Shah, Prof. Sagar Mhatre. (2021). "Voice controlled mini CNC plotter". SSRN Electronic Journal.

[21] Motion Control Tips. (2016, December 27). FAQ: How to set a stepper motor's current limit and why is it important?. https://www.motioncontroltips.com/faq-set-stepper-motors-current-limit-important/

[22] ArduFocus. (n.d.). A4988 Motor Current Tuning. https://ardufocus.com/howto/a4988-motor-current-tuning/

[23] Abdulwahid A. Khalleefah, Omar G. Mrehel, & Abdurazaq Elbaz. (2026). Economic Load Dispatch Optimization Using the Jaya Algorithm: A Case Study on the Libyan Power Grid. International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications, 18(8s), 552–564. https://doi.org/10.70917/ijcisim-2026-3297.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **AJHAS** and/or the editor(s). **AJHAS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).