



THIẾT KẾ MÁY CNC MINI ĐA TÍNH NĂNG

Phạm Minh Châu¹, Lưu Thiện Quang¹

¹Trường Đại học Giao thông Vận tải thành phố Hồ Chí Minh

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 01/12/2017

Ngày nhận kết quả bình duyệt:
03/01/2019

Ngày chấp nhận đăng:
02/2020

Title:

Design multi-function mini
CNC machine

Keywords:

Multifunction CNC, 3 in 1
CNC machine

Từ khóa:

Máy CNC mini đa năng, máy
CNC mini tích hợp

ABSTRACT

Small scale mechanical manufacture becomes the popular trend in the world nowadays. Small size CNC systems including lathe, mill, 3D printer and laser cutting machine are popular and widely developed. Ordinarily, these machines on the market are single-function even though they have similar kinetic structures. This paper proposes the idea of multifunction mini CNC machine for reducing the cost of machinery. It helps transform a design into a real product easier and faster. Also, more people such as technical students, designers, researcher can approach and utilize this effective tool in their work. This paper illustrates a design of mini CNC with interchangeable tool modules including mill, 3D printing and laser cutting. The design is based on mechanical materials, electronic components and manufacturing technics available in Viet Nam; CNC controller softwares are free.

TÓM TẮT

Sản xuất, chế tạo cơ khí quy mô nhỏ đang trở thành xu hướng của thế giới. Các máy gia công phục vụ cho mục đích này như máy phay, tiện CNC mini, máy in 3D, máy cắt laser... được ưa chuộng và phát triển nhiều hơn. Những loại máy này trên thị trường có những tính năng riêng biệt mặc dù chúng có chung kết cấu động học. Ý tưởng thiết kế một máy CNC mini tích hợp nhiều tính năng gia công giúp giảm chi phí mua sắm nhiều máy móc được đề xuất trong bài báo này. Nó khiến việc biến ý tưởng thiết kế thành sản phẩm trở nên dễ dàng và nhanh chóng hơn; nhiều người có thể tiếp cận và sử dụng máy CNC trong công việc của mình như sinh viên kỹ thuật, nhà thiết kế, nhà nghiên cứu... Bài báo mô tả thiết kế máy CNC mini với module gia công có thể thay đổi bao gồm phay, in 3d và cắt laser. Thiết kế dựa trên vật liệu cơ khí, mạch điện tử và công nghệ gia công sẵn có trong nước; các phần mềm sử dụng điều khiển máy CNC là miễn phí.

1. GIỚI THIỆU

Theo Yung C. Shin, Henry Chin và Michael J. Brink (1991) máy CNC ra đời giúp cải thiện năng suất sản xuất công nghiệp, nâng cao độ chính xác, chất lượng sản phẩm. Ngành gia công cắt gọt kim loại là một ví dụ rõ rệt nhất hưởng lợi từ công

nghệ này. Theo Heisel và M Gringel (1999) máy tiện CNC có thể hoạt động 24/7 với độ chính xác và năng suất cao nhất thay vì đòi hỏi một thợ tiện có tay nghề và kinh nghiệm chỉ làm việc 8 giờ/ngày như phương pháp sản xuất truyền thống.

Trong hệ thống CNC, các chi tiết cơ khí được thiết kế trên các phần mềm máy tính chuyên dụng, gọi chung là (CAD). Sau đó bản thiết kế chuyển sang phần mềm hỗ trợ gia công, tính toán nguyên công, quỹ đạo chuyển động của đầu công tác, quy trình công nghệ...(CAM). Phần mềm sẽ xuất ra file G-code cho từng nguyên công với máy gia công cụ thể như: Cưa, phay, tiện, in 3D hay cắt laser...

Các máy CNC cao cấp thường tích hợp đa chức năng có thể gia công những chi tiết phức tạp trong một lần gá phôi. Điều này giúp giảm những sai sót, thời gian và chi phí sản xuất.

Máy CNC hiện đại được thiết kế ở quy mô công nghiệp với nhiều tính năng tích hợp có giá thành rất cao. Tuy nhiên, sự ra đời của những phương thức sản xuất mới, quy mô nhỏ, chi tiết sản phẩm nhỏ, yêu cầu tiêu chuẩn vừa phải thì những thế hệ máy này thường không hiệu quả trong đầu tư khai thác sử dụng. Theo M Kumar và V Puttige (2014) và Sundar Pandian và S. Raj (2013) nhu cầu về thế hệ máy CNC mini là tất yếu với hàng loạt những lợi ích có thể mang lại như giá thành rẻ, tiết kiệm không gian và năng lượng tiêu thụ. Những người không chuyên như kiến trúc sư, nhà thiết kế... cũng có thể sở hữu máy CNC phục vụ cho công việc với chi phí đầu tư thấp. Chế tạo máy CNC kích thước nhỏ cũng đơn giản hơn bởi những yếu tố như độ rung hay tiếng ồn cũng tác động ít hơn trong quá trình vận hành; vật liệu hay

kiểu dáng cũng trở nên linh hoạt hơn. Bên cạnh đó, các phần mềm và mạch điện tử điều khiển cũng được chia sẻ rộng khắp trong cộng đồng cũng góp phần khiến việc chế tạo một chiếc máy CNC mini trở nên dễ dàng hơn bao giờ hết.

Các máy CNC mini như cắt laser, in 3D, phay có chung kết cấu động học và có thể dùng chung các phần mềm điều khiển. Khác biệt duy nhất là đầu công tác cho từng nhiệm vụ gia công. Việc tích hợp 3 tính năng trong một máy giúp giảm đáng kể chi phí đầu tư. Bài báo trình bày ý tưởng module hóa các đầu công tác để có thể tháo lắp dễ dàng cho từng yêu cầu gia công. Bên cạnh đó, tác giả trình bày lý thuyết nội suy máy CNC Phần 2, thiết kế cơ khí chi tiết của máy CNC đa tính năng Phần 3, hệ thống điện Phần 4 và phần mềm điều khiển Phần 5, kết quả Phần 6.

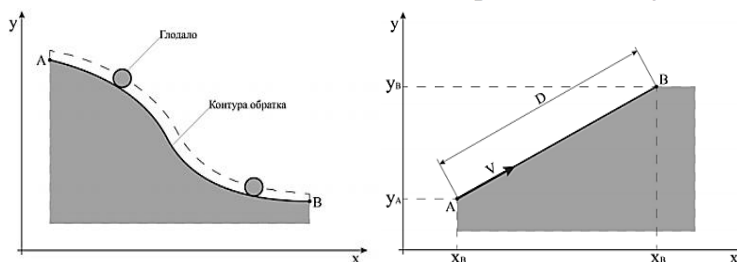
2. ĐỘNG HỌC MÁY CNC

Bài toán động học của máy CNC là các phương pháp nội suy quỹ đạo công tác, trong đó nội suy đường thẳng và nội suy đường tròn là 2 bài toán cơ bản nhất tạo nên tất cả quỹ đạo chuyển động tự động của máy.

2.1 Nội suy đường thẳng

Theo hình 1, chuyển động từ điểm A đến B được thực hiện bằng cách di chuyển theo quỹ đạo thẳng với vận tốc V. Khoảng cách giữa 2 điểm là D có giá trị:

$$D = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \quad (1)$$



Hình 1. Quỹ đạo chạy dao với phôi (trái) và phương pháp nội suy đường thẳng (phải)

Thời gian nội suy khi dao di chuyển từ A đến B, biết khoảng cách D và vận tốc V: $T = D/V$

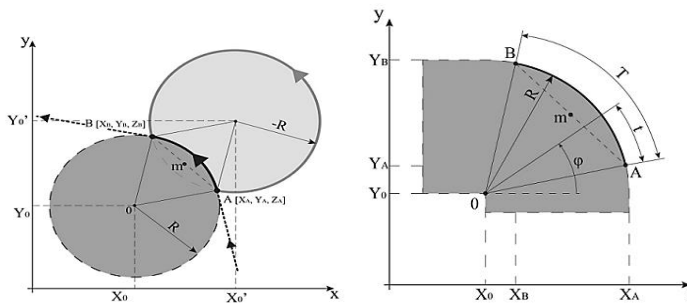
Chuyển động được thực hiện bằng cách phối hợp chuyển động của 3 trục tọa độ x, y, z tức thời của đầu công tác, được mô tả bằng hệ phương trình theo thời gian như sau:

$$\begin{cases} x(t) = x_A + \int_0^t x dt = x_A \int_0^t \frac{x_{Bt} - x_{B(t-1)}}{T} dt \\ y(t) = y_A + \int_0^t y dt = y_A \int_0^t \frac{y_{Bt} - y_{B(t-1)}}{T} dt \\ z(t) = z_A + \int_0^t z dt = z_A \int_0^t \frac{z_{Bt} - z_{B(t-1)}}{T} dt \end{cases} \quad (2)$$

Nếu thời gian nội suy bị chia thành N khoảng lấy mẫu, thời gian nội suy sẽ có giá trị $Dt = T/N$, phương trình tọa độ dao sẽ có dạng:

$$\begin{cases} x(t) = x(nDt) = x_A + \frac{x_B - x_A}{N} n \\ y(t) = y(nDt) = y_A + \frac{y_B - y_A}{N} n \\ z(t) = z(nDt) = z_A + \frac{z_B - z_A}{N} n \end{cases} \quad (3)$$

Với $n = 1, 2, \dots, N$



Hình 2. Phương pháp nội suy đường tròn (trái) và tính toán các thông số nội suy (phải)

Trong công thức mô tả cung của đường, tọa độ tâm: X_0, Y_0 được định nghĩa bởi tọa độ điểm đầu và điểm cuối của cung và bán kính. Mỗi liên hệ được mô tả bởi hệ phương trình sau:

2.2.1 Theo chiều dương của bán kính R:

$$\begin{cases} x_0 = x_m + \sqrt{R^2 - (D/2)^2} \frac{y_A - y_B}{D} \\ y_0 = y_m + \sqrt{R^2 - (D/2)^2} \frac{x_A - x_B}{D} \end{cases} \quad (5)$$

2.2.2 Theo chiều âm của bán kính R:

Theo đó, quỹ đạo di chuyển của dao được tạo thành bởi những bước nhỏ hợp thành từ quỹ đạo của 3 trục x,y và z hay a. Độ chính xác của phép nội suy phụ thuộc vào độ lớn của mỗi bước này. Bước càng nhỏ thì độ chính xác cũng như độ phân giải càng cao. Giá trị của mỗi bước được mô tả:

$$\left| \frac{x_B - x_A}{N} \right|, \left| \frac{y_B - y_A}{N} \right|, \left| \frac{z_B - z_A}{N} \right| \quad (4)$$

2.2 Nội suy đường tròn

Nội suy quỹ đạo đường tròn bằng cách phối hợp bài toán điều khiển điểm tới điểm của đường tròn trong phương trình thời gian (đường tròn được chia làm nhiều điểm, quỹ đạo thật được tạo ra bằng nối các điểm lại với nhau). Thông số hình học được mô tả bởi phương trình: Vị trí hiện tại của dao công tác (X_A, Y_A và Z_A) kết hợp với điểm cuối của cung (X_B, Y_B và Z_B) và bán kính của phép nội suy cung tròn R. Giá trị của R có thể được mô tả là chiều dương hoặc âm, nên có 2 giải pháp nội suy: 2 cung nội suy.

$$x_0 = x_m - \sqrt{R^2 - (D/2)^2} \frac{y_A - y_B}{D} \quad (6)$$

$$y_0 = y_m - \sqrt{R^2 - (D/2)^2} \frac{x_A - x_B}{D}$$

Với x_m và y_m là trung điểm của đoạn thẳng nối A và B:

$$x_m = \frac{x_B + x_A}{2}; y_m = \frac{y_B + y_A}{2} \quad (7)$$

D là khoảng cách ngắn nhất giữa 2 điểm A, B:

$$D = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (8)$$

Bán kính của đường cong nội suy được lấy giá trị tuyệt đối. Theo hình phương trình tham số cung là:

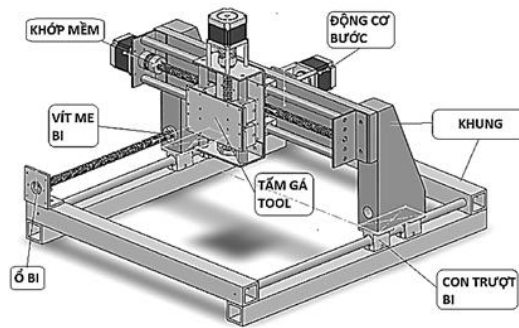
$$x = x_0 + R \cos j ; y = y_0 + R \sin j \quad (9)$$

Với $j = \frac{2p}{T}t$, ta có:

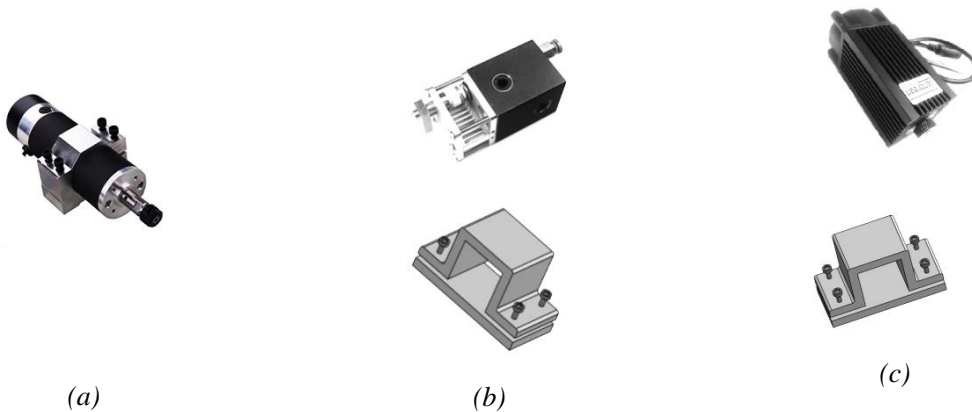
$$x = x_0 + R\left(\frac{2p}{T}t\right); y = y_0 + R\left(\frac{2p}{T}t\right) \quad (10)$$

3. THIẾT KẾ CƠ KHÍ

Máy CNC đa năng được thiết kế nâng cấp máy CNC 3 trục cơ bản hình 3 với tám gá tool có thể linh hoạt gá lắp các đầu công tác khác nhau bao gồm spindle chạy dao phay, đầu in 3D và đầu cắt laser, hình 4. Chi tiết gá được thiết kế riêng cho từng đầu công tác bằng nhôm, gia công phay CNC.



Hình 3. Kết cấu tổng quát 3D máy phay CNC



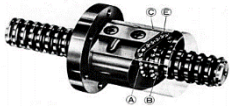
Hình 4.(a) gá spindle, (b) gá đầu in 3D, (c) gá đầu cắt laser.

Khung máy sử dụng nhôm tấm. Ưu điểm của lựa chọn này là giá thành vật liệu rẻ, sẵn có, gia công và lắp ghép đơn giản và độ cứng vững đủ cho máy nhỏ. Kích thước máy trong thiết kế là 60x60x40cm, phạm vi hoạt động 40x35x20cm.

Các chi tiết cơ khí thường dùng cho chế tạo máy CNC mini được sử dụng trong thiết kế như vít me

bi, con trượt bi, ổ bi, khớp mềm; nhằm đảm bảo độ chính xác và làm việc lâu dài của máy. Động cơ truyền động là động cơ bước, phù hợp với thiết kế máy nhỏ vì nó có giá thành rẻ, dễ điều khiển, độ chính xác cao, bảng 1.

Bảng 1. Chi tiết cơ khí máy CNC



Hình 5. Vít me bi

Vít me được chế tạo với độ chính xác cơ khí cao và chịu tải trọng lớn cũng như ma sát nội nhỏ nhất.

Cơ cấu cơ khí để biến đổi chuyển động quay sang tịnh tiến với tỉ số truyền xác định và ma sát nhỏ. Các rãnh vít được thiết kế để bi trên con chạy lăn trên theo 1 vòng tuần hoàn kín nhằm loại bỏ ma sát trượt trong cơ cấu này.



Hình 6. Ổ bi

Trong máy CNC ổ bi được đỡ 2 đầu các trục vít me bi.

Ổ bi là chi tiết máy rất phổ biến để giảm ma sát trong các chuyển động quay và chịu tải trọng gây ra trên trục.



Hình 7. Khớp mềm

Khớp mềm nối trục động cơ và trục vít me bi trong máy CNC

Khớp mềm là chi tiết để nối 2 trục và truyền chuyển động quay. Khớp mềm với đệm cao su đàn hồi ở giữa có tác dụng chống giật và hiệu chỉnh ít nhiều sự sai số đồng trục trong thi công cơ khí.



Hình 8. Chi tiết thanh trượt và con trượt

Con trượt bi sẽ chịu tải trọng của chuyển động tịnh tiến mỗi trục.

Thanh trượt được chế tạo bằng thép có độ cứng lớn, tuyệt đối thẳng và có độ bóng bề mặt cao. Con trượt bi được thiết kế đồng bộ với thanh trượt, chuyển động tịnh tiến với ma sát nhỏ nhất và độ rơ ít nhất bằng cách loại bỏ ma sát trượt bởi sự chuyển động lăn của bi.

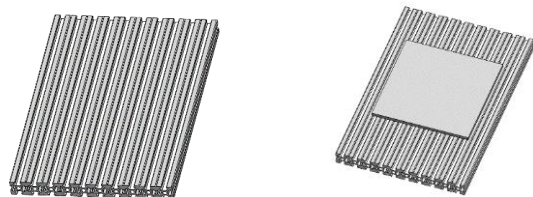


Hình 9. Động cơ bước

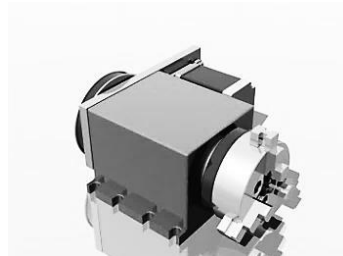
Loại động cơ bước phổ biến được dùng là loại 2 pha với mỗi bước 1.8 độ, với công suất có thể đạt tới 19kg/cm và 2.5A.

Động cơ bước là động cơ không chổi than, đồng bộ, nó chuyển đổi tín hiệu xung thành chuyển động quay trên trục động cơ với những bước đều nhau. Vị trí hay vận tốc mong muốn của trục động cơ được tính toán chính xác bởi tần số cũng như thứ tự cuộn dây được cấp xung, nó cũng có thể được điều khiển giữ vị trí với momen lớn mà không cần đến tín hiệu phản hồi.

Bàn máy là nhôm định hình với các rãnh để gá lắp phôi cho nguyên công phay, có thể gắn thêm bàn nhiệt khi in 3D hoặc tháo rời ra cho nguyên công cắt laser, hình 10.



Hình 10. Bàn máy cho nguyên công phay (trái) và gắn thêm bàn nhiệt khi in 3D (phải)



Hình 11. Kết cấu cơ khí trục A với mâm cặp

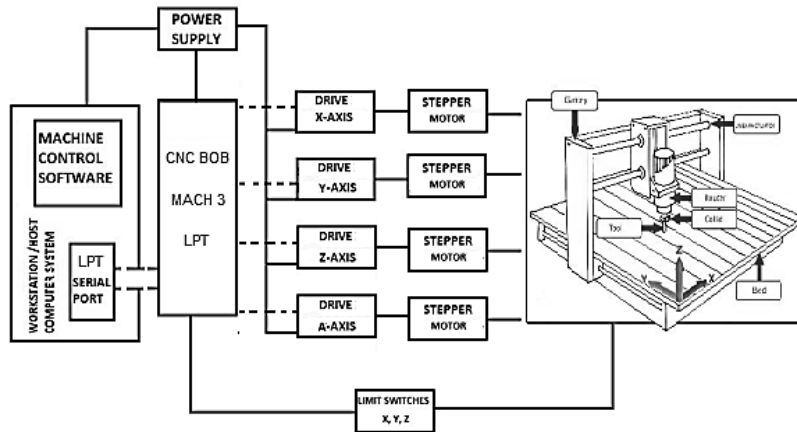
Ngoài ra, máy có thể nâng cấp thành máy phay 4 trục với việc thêm 1 trục quay A được gá trên bàn phi song song với trục X hoặc Y. Những chi tiết đòi hỏi chuyển động quay khi gia công, phi sẽ được kẹp lên bàn gá gắn với trục A bằng mâm kẹp như trên máy tiện, hình 11.

4. HỆ THỐNG ĐIỆN VÀ ĐIỀU KHIỂN

Máy tính (PC) điều khiển trực tiếp chuyển động của máy bằng phần mềm chuyên dụng MACH3

qua truyền thông LPT đến mạch CNC BOB. Mạch thu tín hiệu quỹ đạo chuyển động của mỗi trục (vị trí và vận tốc), xử lý và xuất xung đến từng bộ driver điều khiển động cơ chuyển động của từng trục, hình 12.

Các máy CNC mini dùng động cơ bước công suất nhỏ. So với các cơ cấu điều khiển vòng kín như servo có giá thành cao thì đây là sự lựa chọn phù hợp.

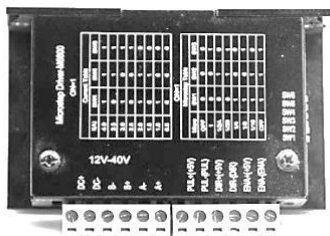


Hình 12. Sơ đồ cấu trúc hệ thống điện và điều khiển.

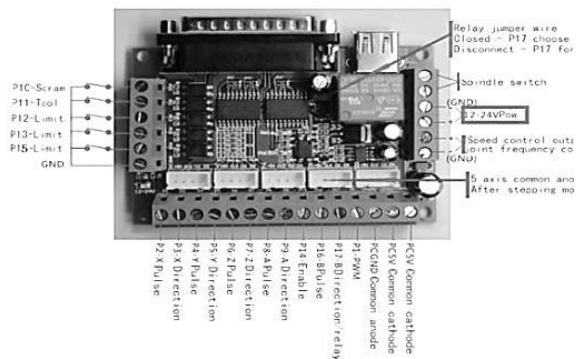
4.1 Driver động cơ bước

Driver động cơ bước phổ biến là M6600 hình 13 sử dụng IC Driver TB6600HQ/HG Toshiba có độ tin cậy cao, tản nhiệt tốt và hoạt động ổn định.

- Có dải nguồn đầu vào từ 12 đến 40V
- Có thể chọn độ phân giải 1/1 đến 1/16 bước



Hình 13. Driver M6600 điều khiển động cơ bước



Hình 14. Mạch CNC BOB MACH3 LPT

4.3 Mạch CNC BOB MACH3 LPT

Mạch với cổng giao tiếp song song LPT của máy tính để nhận lệnh từ phần mềm MACH3 và điều khiển các cơ cấu chấp hành như xuất xung điều khiển động cơ, kích relay bơm nước giải nhiệt, đọc công tắc hành trình máy hay xuất xung PWM điều khiển Spindle, bộ đèn nhựa in 3D và cường độ đầu cắt laser.

Mạch BOB hình 14 được thiết kế hỗ trợ điều khiển 5 trục. Tất cả các cổng điều khiển đầu ra đều được cách ly opto và mạch đệm để cho tín hiệu ổn định nhất. So với một số mạch truyền thông USB mới phát triển thì LPT vẫn có nhiều

ưu điểm hơn về giá thành và tốc độ truyền tín hiệu.

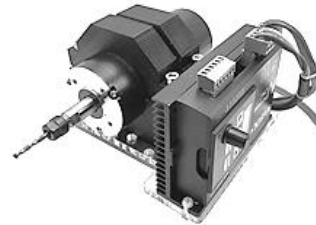
4.4 Spindle

Spindle mang dao cắt (phay) được điều khiển theo quỹ đạo gia công để cắt gọt phôi tạo ra sản phẩm gia công. Tùy vào công suất và mục tiêu thiết kế máy có thể chọn Spindle là motor 3 phase hay DC với driver điều khiển tương ứng. Trong thiết kế này tác giả chọn spindle 3 phase công suất 800w.

Spindle 3 pha cho dải công suất lớn, giải nhiệt bằng nước (cần phải trang bị thêm 1 máy bơm) độ bền cao nhưng giá thành đắt. Việc cài đặt biến tần thì theo hướng dẫn của nhà sản xuất, hình 15.



Hình 15. Spindle 3 phase với biến tần điều khiển



Hình 16. Spindle DC và driver

Spindle DC thì ngược lại nhưng phù hợp với nhu cầu máy nhỏ cho những mục đích gia công vật liệu mềm, mỏng như gỗ hay píp, hình 16.

4.4 Đầu in 3D

Module in 3D hình 17 bao gồm đầu phun nhựa được gia nhiệt và motor đèn nhựa. Motor đèn nhựa được điều khiển bằng mạch BOB. Mạch công suất cho khâu gia nhiệt được chọn là mạch IRF 520, công suất ~100W, hình 18.



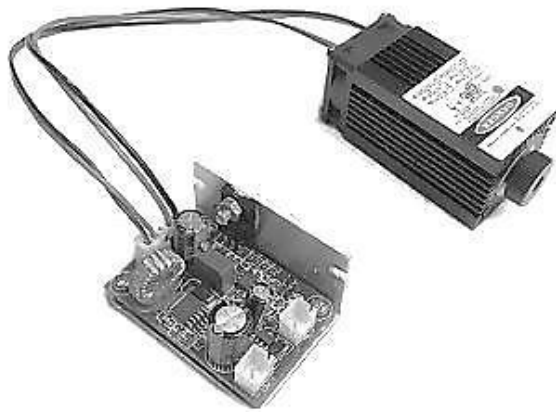
Hình 17. Module đầu in 3D



Hình 17. Module gia nhiệt

4.5 Đầu cắt laser

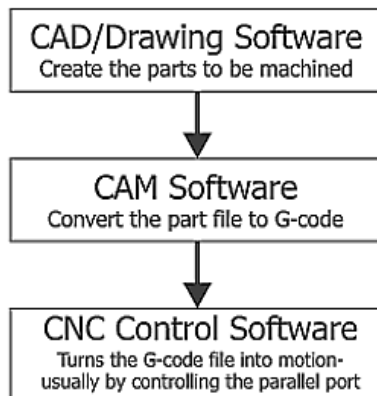
Đầu phóng laser diod 10W đi kèm với mạch công suất có thể điều chỉnh cường độ laser, hình 18.



Hình 18. Laser diod và driver

5. PHẠM MỀM

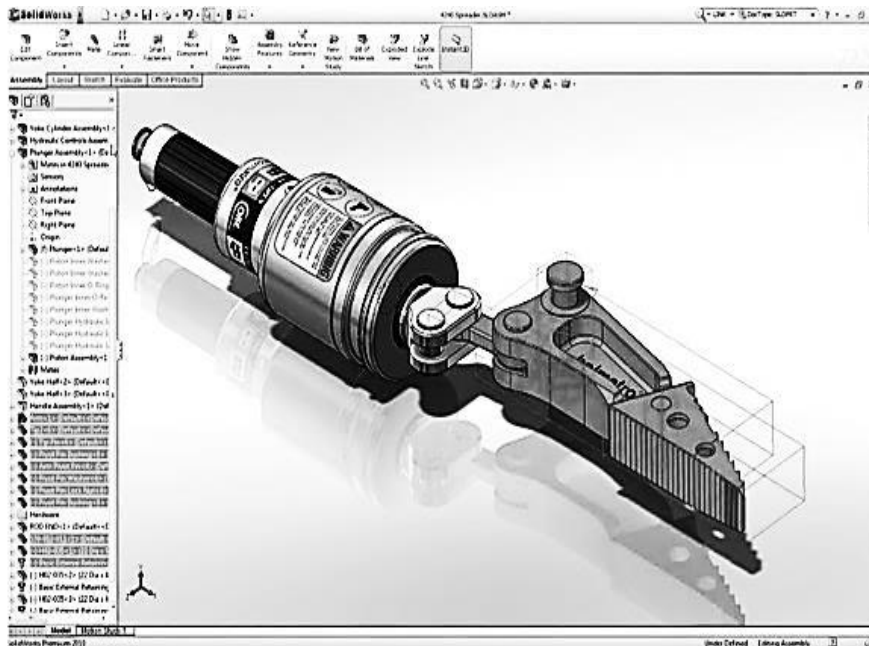
Có 3 khâu chính cũng là 3 phần mềm chính được sử dụng trong vận hành máy CNC mini, được mô tả ở hình 19.



Hình 19. Các phần mềm phục vụ máy CNC

5.1 Phần mềm thiết kế

Gọi chung là CAD, các phần mềm Pro Engineer, Solid work hay Inventer được dùng để tạo ra các thiết kế 3D hay 2D phục vụ cho mục đích gia công. Hoặc người ta có thể dùng các phần mềm và máy quét 3D chuyên dụng để tái tạo sản phẩm thật thành dữ liệu 3D.

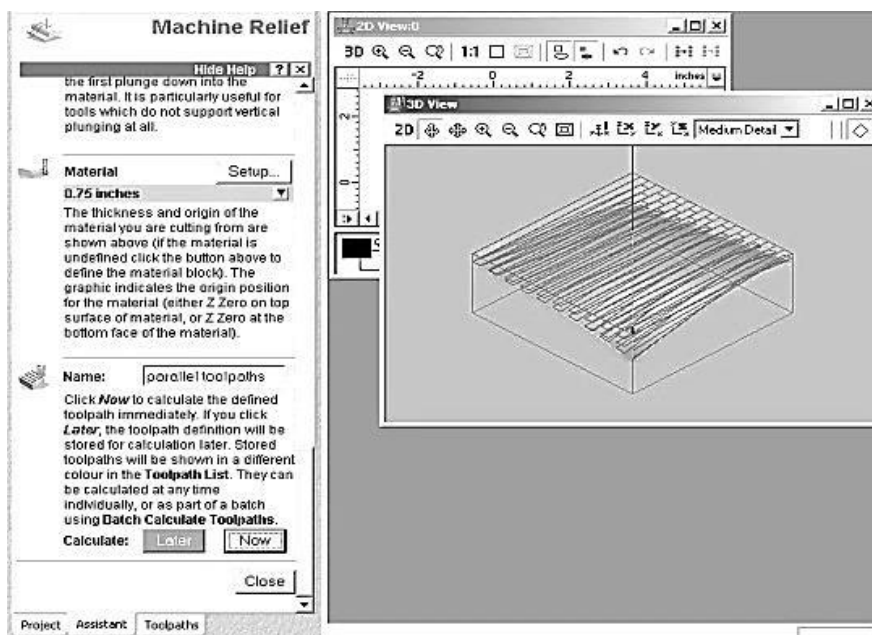


Hình 20. Phần mềm Solidwork dùng thiết kế và tạo file gia công cho phần mềm CAM

5.2 Phần mềm tạo quỹ đạo chạy dao

Gọi chung là phần mềm CAM, như các phần mềm MasterCAM, ArtCAM hoặc được tích hợp sẵn trong các phần mềm CAD. File thiết kế CAD thường được lưu ở định dạng file STL sẽ được

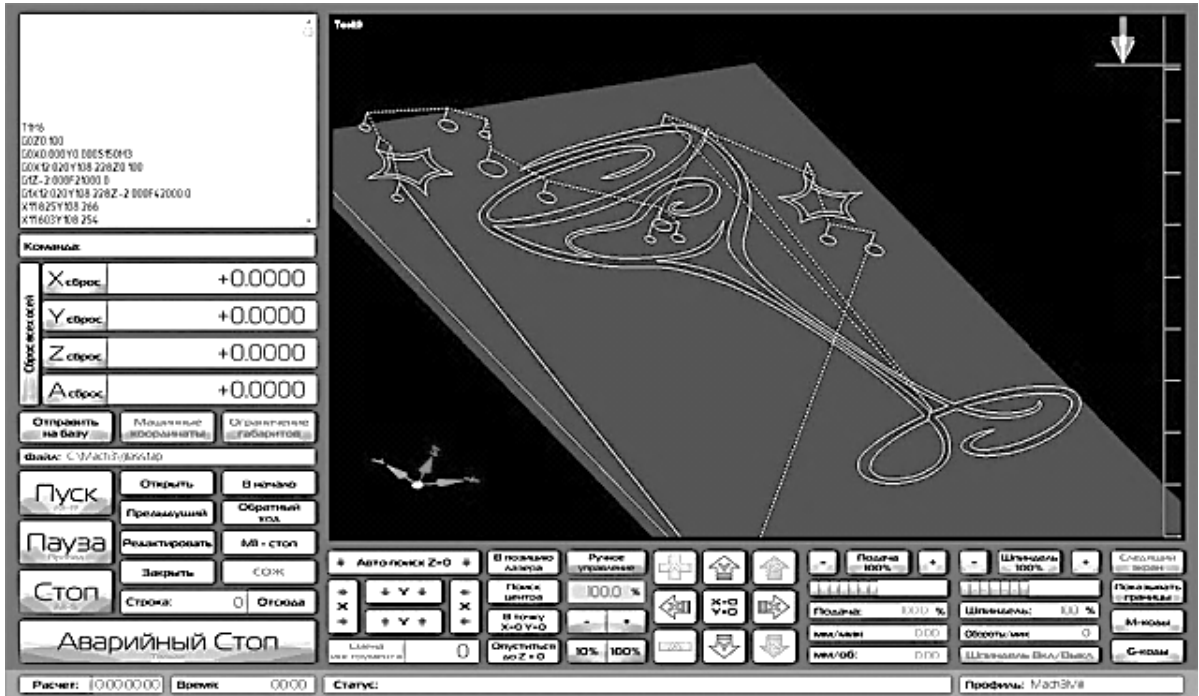
chuyển đổi thành định dạng gia công sau khi đã chọn kích thước dao, tốc độ cắt, kiểu gia công. Đầu ra của phần mềm này là dữ liệu quỹ đạo bao gồm vị trí, tốc độ dao phục vụ cho gia công sản phẩm (mã G-code).



Hình 21. Phần mềm Artcam, tạo quỹ đạo chuyển động cho đầu công tác, xuất file G-code cho Mach 3

5.3 Phần mềm điều khiển máy CNC

Phần mềm MACH3 thiết lập các thông số máy như vận tốc, gia tốc, tọa độ điểm đầu của máy, giám sát và điều khiển bằng tay trực tiếp. Từ file G-code tạo ra bởi phần mềm CAM, nó gửi trực tiếp dữ liệu qua cổng LPT đến mạch BOB để điều khiển động cơ.



Hình 22. Phần mềm Mach 3 với giao diện điều khiển và giám sát

6. KẾT QUẢ

Máy CNC hình 23 sau khi thi công được chạy thử nghiệm và đánh giá với những điều kiện khác nhau, tập trung chủ yếu vào những tiêu chí như độ phẳng bề mặt gia công (phay), độ chính xác khi chạy biên dạng vuông, tròn. Đánh giá cho thấy sản phẩm đạt độ chính xác cao khi chạy với các quỹ đạo khác nhau như điếm tới điếm, đoạn thẳng theo các trục x, y, z. Phương pháp sử dụng thước có độ chính xác đến 0.01 mm và mỗi phép đo

thực hiện 3 lần. Sai số giữa các lần thử nghiệm tối đa vào khoảng 0.08 mm.

Khung cơ khí được gia công khoan, taro, cắt bằng máy CNC nên đảm bảo độ chính xác khi lắp ghép. Khung cơ khí cứng vững, lắp ghép bằng bulong và các phụ kiện chuyên dụng của máy CNC mini, Khối lượng máy 40kg với kích thước 60x60x40 cm không rung khi chạy với các điều kiện gia công khác nhau.

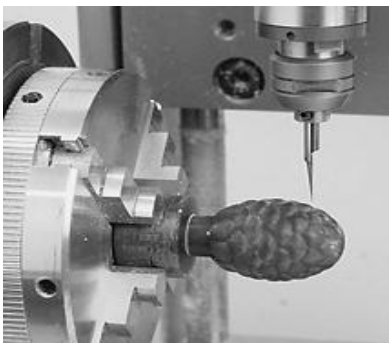


Hình 23. Máy CNC khi gắn module play

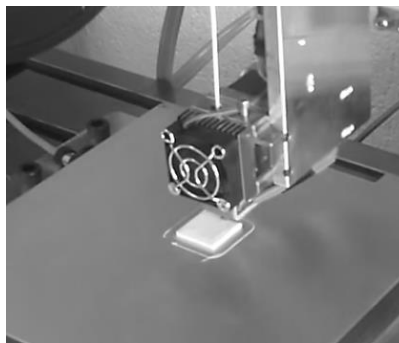
Các bộ driver và động cơ bước hoạt động tin cậy khi chạy vi bước 1/8. Driver giải nhiệt tốt bằng vỏ nhôm, có bảo vệ quá dòng khi động cơ bị kẹt. Thử nghiệm hoạt động liên tục trong 15 giờ. Nhiệt độ vỏ động cơ ổn định ở 42 °C và tản nhiệt driver ở 52 °C khi chạy nguyên công play nhôm độ sâu

cắt 0.5 mm với tốc độ cao nhất 150 mm/s. Ở nguyên công in 3D và cắt laser, máy chạy gần như không tải.

Phần mềm Mach 3 điều khiển máy CNC với các tài liệu có sẵn trên mạng, dễ dàng trong việc thiết lập các thông số máy như tốc độ, gia tốc, IO...



Hình 24. Máy gắn module play gia công chi tiết gắn trên trục A

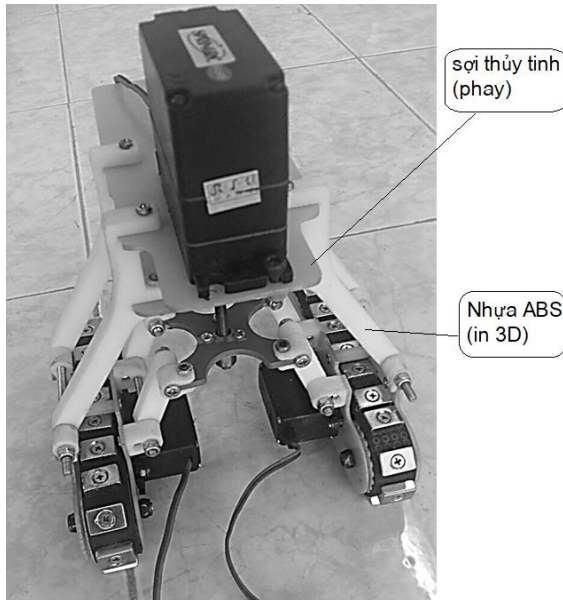


Hình 25. Máy gắn module in 3D



Hình 26. Máy gắn module cắt laser

Sản phẩm đầu tiên được gia công trên máy CNC đa năng là các chi tiết cơ khí của một robot tự hành, với các tấm sợi thủy tinh được gia công phay và phần khung được in 3D bằng nhựa ABS hình 27.



Hình 27. Các phần mềm phục vụ máy CNC

7. KẾT LUẬN

Máy CNC mini là một công cụ tuyệt vời trong các ngành cơ khí chế tạo, thiết kế. Việc làm chủ kỹ thuật chế tạo máy CNC đa năng với giá thành rẻ khiến cho nhiều người có thể tiếp cận và sử dụng.

Bài báo đã trình bày những khâu chính trong việc thiết kế và chế tạo 1 máy CNC với 3 tính năng phay, in 3D và cắt laser; đáp ứng đầy đủ nhu cầu trong việc chế tạo những chi tiết cơ khí nhỏ, phù hợp với điều kiện sản xuất quy mô nhỏ với chi phí đầu tư mua sắm máy móc thấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Andrei., & I. Nae, "Practical applications performed by a stepper motor CNC router", 2010.
- Heisel & M Gringel. (1999). Machine Tool Design Requirements for High Speed Machining. *Journal of Manufacturing Systems*. 6, 78-90.
- M Kumar & V Puttige (2014). Low cost automation for CNC machining center. *IJMET*, 3, 156-170.
- P.A. Sherring da Rocha Jr., R.D.S. Souza, & M.Emilia de Lima Tostes, "Prototype CNC machine design", 2012.
- Sundar Pandian & S. Raj. (2013). A low cost build your own three axis cnc mill prototype. *IJMET*. 45-60.
- Wu, C. L., Haboush, R. K., Lymburner, D. R., and Smith, G. H., "Closed-Loop Machining Control for Cylindrical Turning" *Modeling, Sensing, and Control of Manufacturing Systems, PED* Vol. 23, ASME, 1986, 189-204.
- Xu, Y. Li, J. Sun & S. Wang, "Research and development of open CNC system based on PC and motion controller", 2012
- Yung C. Shin, Henry Chin, & Michael J. Brink. (1991). Characterization of CNC machining centers. *Journal of Manufacturing Systems*. (13)1, 169-178.