

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MÁY IN 3D – FDM TỐC ĐỘ CAO

DESIGN AND FABRICATION OF A HIGH-SPEED FUSED DEPOSITION MODELING (FDM) 3D PRINTER

Võ Ngọc Anh Tuấn*, Vũ Hoàng Thái Duy, Lê Trung Hòa

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

*Email tác giả liên hệ: vnaturan@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày về việc thiết kế và chế tạo máy in 3D – FDM tốc độ cao bằng hệ thống truyền động CoreXY và hệ thống điều khiển tối ưu tốc độ di chuyển của cụm đầu in trong không gian XY. Thiết kế nhằm tối ưu tốc độ và thời gian in khi sử dụng công nghệ in 3D trong quy trình tạo mẫu nhanh bằng nguyên lý bồi đắp vật liệu. Bài báo trình bày một cách cụ thể từ thiết kế cơ khí, điều khiển máy in 3D bằng hệ điều hành Raspberry Pi kiểm soát quá trình in bằng những thông số được căn chỉnh PID tự động và từ đó đem mẫu in đi kiểm nghiệm kích thước, chất lượng sản phẩm và độ bền kéo đối với từng loại nhựa. Bài báo sẽ dựa vào các nghiên cứu đã thực nghiệm để áp dụng hệ quả để nghiên cứu tìm ra những thông số in làm tăng chất lượng sản phẩm và tối ưu thời gian tạo mẫu với cơ cấu CoreXY để phát triển công nghệ tạo mẫu nhanh phục vụ trong học tập, cơ khí và y tế trong tương lai.

Từ khóa: Máy in 3D FDM; Truyền động CoreXY; In mẫu 3D tốc độ cao.

ABSTRACT

This paper presents the design and fabrication of a high-speed 3D printer based on Fused Deposition Modeling (FDM) technology, utilizing a CoreXY motion system and an optimized control mechanism to enhance the printhead's movement within the XY plane. The design is focused on maximizing printing speed and minimizing production time in the context of rapid prototyping using additive manufacturing principles. The paper details the complete development process, including mechanical design and the integration of a Raspberry Pi-based operating system for printer control. The control system employs auto-tuned PID parameters to regulate motion precision, ensuring consistent print quality. Printed samples are evaluated for dimensional accuracy, surface quality, and tensile strength across different thermoplastic materials. Based on experimental results, the study identifies optimal printing parameters that improve product quality and reduce prototyping time using the CoreXY architecture. The findings aim to contribute to the advancement of rapid prototyping applications in education, mechanical engineering, and medical fields.

Keywords: FDM 3D Printer; CoreXY Motion System; High-Speed 3D Printing.

1. GIỚI THIỆU

Máy in 3D là một công nghệ sản xuất tiên tiến dựa trên nguyên lý gia công cộng dồn vật liệu (Additive Manufacturing - AM), trong đó vật thể được tạo ra bằng cách xếp chồng từng lớp vật liệu theo mô hình thiết kế số. Công nghệ này đã phát triển mạnh mẽ trong nhiều lĩnh vực, từ công nghiệp, y tế, hàng không vũ trụ đến sản xuất sản phẩm tiêu dùng. Trong số các phương pháp in 3D hiện nay, Fused Filament Fabrication (FFF), còn được gọi là Fused Deposition Modeling (FDM), là một trong những công nghệ phổ biến nhất. Phương pháp này sử dụng sợi nhựa nhiệt dẻo như PLA, ABS, PETG... được nung chảy và đùn qua vòi phun để tạo thành vật thể theo từng lớp. Tuy nhiên, quá trình in 3D vẫn tồn tại nhiều thách thức như độ chính xác kích thước, chất lượng bề mặt, kiểm soát độ co rút vật liệu và đặc biệt là tối ưu hóa tốc độ in. Phương pháp AM đang thu hút được sự quan tâm mạnh mẽ trong môi trường học tập, khuôn đúc, y tế, các sản phẩm nghệ thuật. Các ứng dụng cũng đã nêu và cung cấp các ứng dụng mới đã được đề cập gần đây [1-6].

Hiện nay, các nghiên cứu đã phân tích động học cơ cấu CoreXY tối ưu tốc độ in lên hệ thống in 3D [7] nhưng để áp dụng vào thực nghiệm để thực hiện chế tạo và phát triển hệ thống điều khiển từ đó đi kiểm nghiệm mẫu in và kiểm bền từ đó đánh giá kết quả. Trong bài báo sẽ nêu rõ phân thiết kế cơ khí và các chức năng điều khiển làm tăng năng suất in và giảm sai số khi in bằng thuật toán PID bao gồm: nhiệt độ, cân bằng, khử rung cùng lúc đó giám sát quá trình in thông qua màn hình hoặc điện thoại thông minh khi kết nối cùng địa chỉ IP wifi phản hồi từ camera bằng hệ điều hành do Raspberry Pi tạo ra.

2. THIẾT KẾ HỆ THỐNG CƠ KHÍ

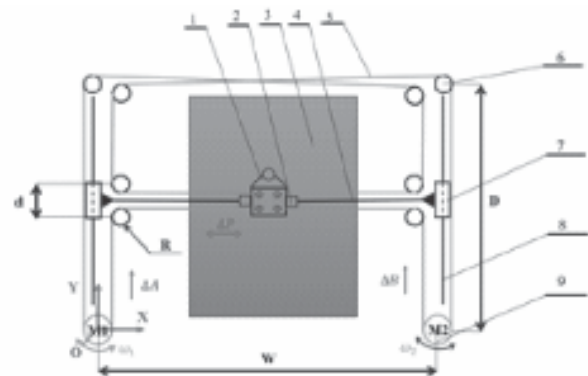
Quy trình thiết kế hệ thống cơ khí:

Bảng 1. Thông số thiết kế máy in 3D

Thông số	Giá trị
Kích thước máy	435 x 410 x 500 (mm)
Kích thước mẫu lớn nhất	200 x 200 x 200 (mm)
Vật liệu tạo mẫu	PLA, PETG, ABS...
Đường kính dây nhựa	1.75 mm
Số lượng đầu đùn	1 đầu đùn
Vận tốc đầu in khi đùn	$V = 100-300 \text{ mm/s}$
Vận tốc khi chạy không tải	$V = 300 \text{ mm/s}$

2.1. Cụm trục di chuyển XY

Cụm trục di chuyển XY là thành phần cấu tạo tạo chuyển động quan trọng nhất của đầu in trong mặt phẳng XY thì phải đảm bảo được các yếu tố sau: độ cứng vững, êm ái, đơn giản, tạo được gia tốc lớn khi in và giảm được gia tốc quán tính. Từ sơ đồ động của nguyên lý CoreXY phân tích động học cơ cấu như Hình 1 đưa ra mối tương quan giữa các đại lượng trong cơ cấu như sau:



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý CoreXY được áp dụng

Trong đó:

(1) Đầu in nhựa	(6) Pully dẫn hướng
(2) Con trượt vuông trục X	(7) Con trượt vuông trục Y
(3) Bàn gia nhiệt	(8) Thanh ray trục Y
(4) Thanh ray trục X	(9) Động cơ bước chủ động
(5) Dây đai răng GT2	

Phân tích động học cơ cấu CoreXY:

Độ dịch chuyển của đầu in phụ thuộc vào lượng dịch chuyển của dây đai theo công thức sau:

$$\begin{cases} \Delta X = \frac{\Delta A + \Delta B}{2} \\ \Delta Y = \frac{\Delta A - \Delta B}{2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta A = \Delta X + \Delta Y \\ \Delta B = \Delta X - \Delta Y \end{cases} \quad (1)$$

Từ lượng dịch chuyển theo trục X và Y từ đó tìm được độ dịch chuyển được biểu diễn theo ma trận Jacobian (J).

$$\Delta p = R \cdot J \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

$$\text{Với } J = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}; \Delta \theta = \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \end{bmatrix}$$

Trong đó:

- J: Ma trận Jacobian là ma trận xác định chuyển động của pulley tới vị trí đầu in;
- $\Delta \theta$: Góc quay của 2 động cơ bước dẫn động;
- R: Bán kính của pulley đai được sử dụng.

Sau khi có lượng dịch chuyển thì lấy đạo hàm của lượng dịch chuyển đầu in theo thời gian sẽ có phương trình vận tốc của đầu in như sau:

$$v_p = \frac{dp}{dt} = R \cdot J \cdot \frac{d\theta}{dt} = R \cdot J \cdot \omega \quad (3)$$

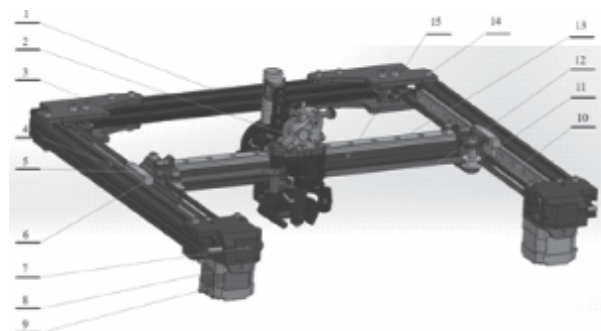
$$\text{Với, } \omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}$$

Trong đó: ω_1 và ω_2 là vận tốc góc của hai động cơ chủ động.

Motor dẫn động động cơ NEMA 17 42STH48-2504AC của LDO motors là động cơ được sử dụng rộng rãi máy in 3D với góc bước $1,8^\circ$. Tính toán độ dịch chuyển và vận tốc tối đa mà hệ thống CoreXY có thể đạt được như sau:

Số bước (bước/vòng)	Góc quay (rad)	Độ dịch chuyển tối đa (mm)	Số vòng quay tối đa (RPM)	Thời gian (giây)
200	2π	37,7	477	1

Từ những tính toán và lựa chọn các chi tiết cơ khí thì được thiết kế như hình sau:



Hình 2. Thiết kế cụm XY

(1) Thanh nhôm gá pulley dẫn hướng	(9) Động cơ dẫn động
(2) Cụm đầu in	(10) Thanh ray trục Y
(3) Gá pulley dẫn hướng	(11) Pully không răng
(4) Thanh nhôm trục Y	(12) Đai răng GT2
(5) Con trượt vuông	(13) Thanh ray trục X
(6) Bộ gá thanh trục X	(14) Pully răng
(7) Bộ gá motor dẫn động	(15) Thanh nhôm trục X
(8) Tám gá căng đai	

2.2. Cụm trục Z

Cụm Z được dùng để dịch chuyển bàn in theo trục Z cần phải độ chính xác của từng lớp in và chất lượng nên sử dụng truyền động vít me – đai ốc, bàn in và khung đỡ cần phải đảm bảo độ cứng vững thì được gia công CNC. Thiết kế cụm trục Z như hình:



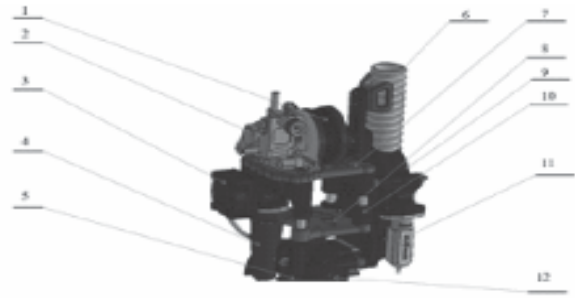
Hình 3. Thiết kế cụm bàn in Z

Trong đó:

(1) Động cơ tời nhựa	(7) Tấm trên gá đầu in
(2) Bộ tời nhựa	(8) Quạt lưu thông không khí
(3) Hoạt heatsink cho đầu in	(9) Tấm dưới gá đầu in
(4) Đầu in	(10) Tấm sau
(5) Dẫn không khí quạt làm mát nhựa	(11) Cảm biến cân bàn
(6) Ống dẫn dây điện	(12) Tấm gá cảm biến gia tốc

2.3. Cụm đầu in 3D

Cụm đầu in được sử dụng bộ tời nhựa trực tiếp được dẫn động bởi động cơ Nema14 36STH20-1004HG thông qua bộ truyền bánh răng để tăng moment khi đùn nhựa trực tiếp vào đầu gia nhiệt. Cụm đầu in được tích hợp thêm cảm biến cân bàn tự động Bltouch, công tắc hành trình trục X được thiết kế như hình:

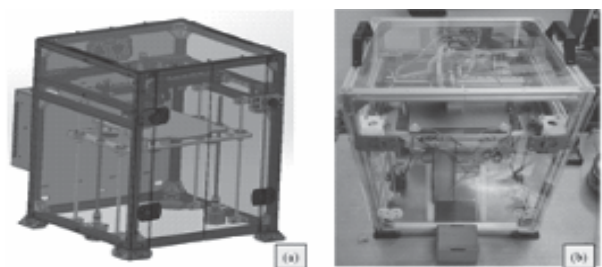


Hình 4. Thiết kế cụm đầu in của máy in 3D

Trong đó:

(1) Động cơ tời nhựa	(7) Tấm trên gá đầu in
(2) Bộ tời nhựa	(8) Quạt lưu thông không khí
(3) Hoạt heatsink cho đầu in	(9) Tấm dưới gá đầu in
(4) Đầu in	(10) Tấm sau
(5) Dẫn không khí quạt làm mát nhựa	(11) Cảm biến cân bàn
(6) Ống dẫn dây điện	(12) Tấm gá cảm biến gia tốc

Mô hình tổng thể của máy sau khi thiết kế trên phần mềm Solidworks và thực hiện và lắp ráp.



Hình 5. (a) Thiết kế trong phần mềm 3D, (b) Mô hình thực tế của máy khi chế tạo

3. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN

Công nghệ in 3D đang phát triển mạnh mẽ và đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp chế tạo, y tế và giáo dục. Trong

đó, máy in 3D sử dụng cơ cấu CoreXY kết hợp với firmware Klipper mang lại khả năng điều khiển chính xác, tốc độ cao và tối ưu hóa chất lượng sản phẩm. Bài báo này tập trung nghiên cứu cấu trúc hệ thống điều khiển máy in 3D CoreXY sử dụng Klipper, làm rõ nguyên lý hoạt động của các thành phần chính và phân tích các thuật toán điều khiển tiên tiến.

Hệ thống điều khiển máy in 3D CoreXY bao gồm các thành phần chính sau:

- Raspberry Pi (Bộ điều khiển chủ - Host Controller):

- Thực hiện xử lý các thuật toán phức tạp như động học CoreXY, Input Shaping và Pressure Advance.

- Tiếp nhận và giải mã lệnh G-code từ người dùng thông qua giao diện web (Mainsail/Fluidd).

- Gửi lệnh điều khiển qua cổng USB tới vi điều khiển chính (MCU).

- Mainboard MKS Robin Nano V3.1 (Vi điều khiển - MCU STM32F407):

- Tiếp nhận lệnh từ Raspberry Pi và thực thi điều khiển các thiết bị phần cứng.

- Điều khiển các động cơ bước (X, Y, Z, Extruder), bộ gia nhiệt (hotend, bàn nhiệt) và cảm biến (BLTouch, ADXL345).

4. KIỂM NGHIỆM

4.1. Kiểm nghiệm kích thước

Mẫu in kiểm tra kích thước như hình 6 có khối hình chữ nhật 20x20x20 mm và tốc độ di chuyển đầu in giữ trung bình cố định là 200 mm/s.

Độ lệch kích thước được tính theo công

thức sau theo ba phương X, Y, Z:

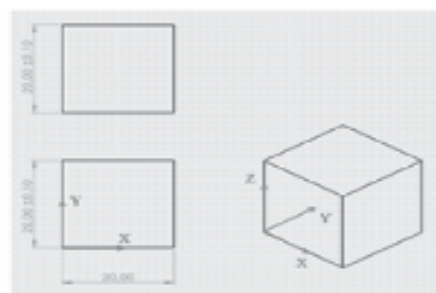
$$\Delta L_i = |\bar{L}_i - L_c|$$

- $\bar{L}_i$: Các giá trị trung bình đo trên mẫu theo phương **X** ($\bar{X}_i$), **Y** ($\bar{Y}_i$), **Z** ($\bar{Z}_i$);

- L_c : Kích thước danh nghĩa trên mẫu thử;

- ΔL_i : Sai số tuyệt đối của mẫu thử so với kích thước danh nghĩa theo phương X, Y, Z;

- i: Số thứ tự của đối tượng đo.



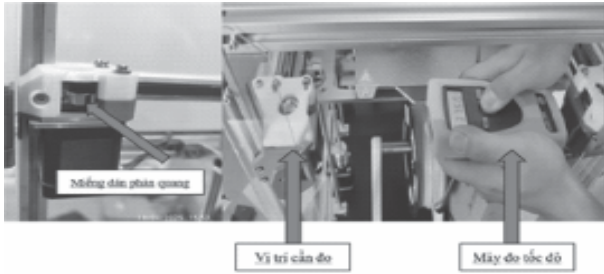
Hình 6. Mẫu in 3D để kiểm nghiệm sai số theo 3 phương X, Y, Z

Bảng 1. Kết quả sai số kích thước mẫu theo 3 phương X, Y, Z

Loại nhựa	Miền dung sai phương X (mm)	Miền dung sai phương Y (mm)	Miền dung sai phương Z (mm)
PETG	20 ± 0,054	20 ± 0,023	20 ± 0,147
PLA	20 ± 0,06	20 ± 0,017	20 ± 0,121

4.2. Kiểm nghiệm tốc độ

Phương pháp đo vận tốc bằng quang học sử dụng ánh sáng (laser hoặc LED) và cảm biến ảnh để thu tín hiệu phản hồi từ bề mặt vật thể mà không cần tiếp xúc. Thông qua phân tích biến đổi cường độ, tần số Doppler hoặc vị trí bóng sáng trên cảm biến, hệ thống cho biết chính xác vận tốc, khoảng cách hay độ dày. Kỹ thuật này mang lại kết quả nhanh, chính xác và an toàn và được thực hiện như hình 7.



Hình 7. Quy trình đo tốc độ quay của động cơ thực tế

Bảng 2. Bảng kết quả đo tốc độ của động cơ từ máy đo tốc độ quang học.

Tốc độ đầu in thiết lập trên phần mềm (mm/s)	Tốc độ vòng quay theo tính toán (RPM)	Tốc độ đầu in di chuyển đầu in theo thực tế (mm/ s)	Tốc độ vòng quay theo thực tế (RPM)
25	37,5	25,49	38,24
50	75	49,65	74,47
100	150	99,93	149,9
120	180	120,27	180,4
170	255	167,4	251,1
200	300	199,6	299,4
250	375	238,6	357,9
300	450	286,2	429,3
350	525	365,93	548,9

Bảng 3. Bảng kết quả đo tốc độ cấp liệu của động cơ từ máy đo tốc độ quang học.

Tốc độ thiết lập trên phần mềm (mm/ s)	Tốc độ vòng quay theo tính toán (RPM)	Tốc độ cấp liệu đầu in theo thực tế (mm/ s)	Tốc độ vòng quay cấp liệu theo thực tế (RPM)
10	101,63	10,44	106,128
15	152,45	15,81	160,644
20	203,26	21,17	215,116
25	254,08	26,73	271,612
30	304,89	31,79	323,048

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chế tạo thành công máy in 3D đạt tốc độ đầu in 350 mm/s, vượt mục tiêu với kết quả thực tế 365,93 mm/s. Sai số giữa tốc độ thiết lập và đo được dưới 5% ở hầu hết dải tốc độ, chứng tỏ hệ thống điều khiển và cơ cấu truyền động ổn định. Tuy nhiên, tại tốc độ tối đa, sai số dương +4,5% cho thấy cần tối ưu quán tính cơ học và khả năng tản nhiệt. Kết quả mở ra tiềm năng ứng dụng công nghiệp, đồng thời đề xuất cải tiến thuật toán điều khiển và vật liệu để nâng cao độ ổn định ở tốc độ siêu cao. ❖

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh (HCMUT – VNU-HCM) đã tài trợ và tạo điều kiện thuận lợi để thực hiện đề tài theo mã số SVTC-2024-CK-111. ❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025
Ngày phản biện: 21/5/2025

Tài liệu tham khảo:

[1]. Ali Kamrani, Emad Abouel Nar (2006), “Rapid prototyping: Theory and practice”. Springer.

[2]. Gideon N. Levy, Ralf Schindel, J.P. Kruth (2003), “Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives”. CIRP Annals - Manufacturing Technology.

[3]. Trần Ngọc Hiền, Trần Ngọc Tú (2012), “Tích hợp kỹ thuật thiết kế ngược và công nghệ tạo mẫu nhanh trong chế tạo cơ khí”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng.

[4]. “Thiết kế chế tạo máy in chi tiết nhựa 3D”. Bộ môn Cơ khí chính xác và Quang học, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

[5]. Nguyễn Thanh Hải, “Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ và quỹ đạo đầu đùn đến chất lượng sản phẩm trong quá trình FDM (Fused Deposition Modeling)”. Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh, 2013.

[6]. Pham, D. and Gault, “A comparisons of Rapid prototyping technologies”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998.