

TỐI ƯU GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN MÁY IN BÁNH 3D

Optimizing the algorithm control of 3D cake printer

Nguyễn Vũ Quỳnh¹, Lưu Hoàng Sơn², Nguyễn Tấn Nhật³, Lê Hiền⁴

¹vuquynh@lhu.edu.vn

Khoa Cơ Điện – Điện Tử Trường Đại học Lạc Hồng

Đến tòa soạn: 20/12/2014; Chấp nhận đăng: 15/2/2015

Tóm tắt. Bài báo này trình bày các bước thiết kế máy in bánh 3D, thiết kế bộ điều khiển 3 trục cho máy. Bộ điều khiển được mô phỏng bằng Simulink/Modelsim và thực nghiệm trên Kit DE2-70 để kiểm nghiệm thuật toán trước khi lắp đặt vào máy thực tế. Bộ điều khiển tốc độ và vị trí cho động cơ servo là bộ điều khiển mờ kết hợp phương pháp điều khiển vector. Ngôn ngữ lập trình mô tả phần cứng được sử dụng để thực thi thuật toán điều khiển. Cuối cùng kết quả mô phỏng và thực nghiệm được so sánh và thảo luận.

Từ khóa: 3D printer; Control; FPGA

Abstract. This work presents the design of a 3D cake printer. The controller is co-simulated by Simulink/Modelsim and experimented with the DE2-70 FPGA board of Altera. A fuzzy-based and vector controller are then designed for controlling the speed and position of a servo motor. Next, the control algorithms are implemented using VHDL. Additionally, simulation and experimental results are compared and discussed.

Keywords: 3D printer; Control; FPGA

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
e, de	vòng/phút	Biến ngôn ngữ đầu vào của bộ điều khiển mờ
$A_r^*(k)$	vòng/phút	Tốc độ đặt
$A_r(k)$	vòng/phút	Tốc độ phản hồi
$C_{m,n}, d_{n,m}$		Tham số điều chỉnh cho bộ điều khiển mờ
i_q, i_d	Ampe	Dòng điều khiển trên trục q và d

Chữ viết tắt

FPGA	Field programmable gate array
VHDL	Very high speed IC hardware description language
SVPWM	Space vector pulse width modulation
PID	Proportional integral derivative
DSP	Digital signal processor
ADC	Analog to digital converter
QEP	Quadrature encoder pulse
CPU	Central processing unit
FC	Fuzzy controller

1. GIỚI THIỆU

Trong thời buổi hiện nay và trong tương lai luôn cần sự tiết kiệm về không gian, thời gian, năng lượng tiêu thụ và hơn thế nữa là hướng đến sức khỏe của con người. Nguy cơ cháy nổ, âm khói, tiêu tốn nhiều năng lượng ở các dụng cụ nhà bếp truyền thống, mất nhiều thời gian cho bữa ăn nhẹ lẫn ăn chính vì vậy việc ra đời chiếc máy in bánh 3D sẽ đáp ứng được nhu cầu trong tương lai.

Đầu tiên phải nói đến sự tiện dụng của máy là rút ngắn thời gian chế biến bánh, người dùng có thể ăn thức ăn ngay khi máy làm xong hoặc có thể cho vào lò vi sóng ít phút. Điều này rất tiện dụng cho người thường xuyên bận rộn nhưng muốn ăn những chiếc bánh nghệ thuật do mình tự chế biến, một bữa sáng nhanh chóng và đầy đủ dưỡng chất cho các thành viên trong gia đình. Chiếc máy sẽ giúp tự làm những chiếc bánh yêu thích đẹp mắt phù hợp với họ

mà chỉ có những người đầu bếp giỏi mới làm được trước đó, những lúc buồn hay vui thì chiếc bánh vẫn “đẹp” và “ngon”.

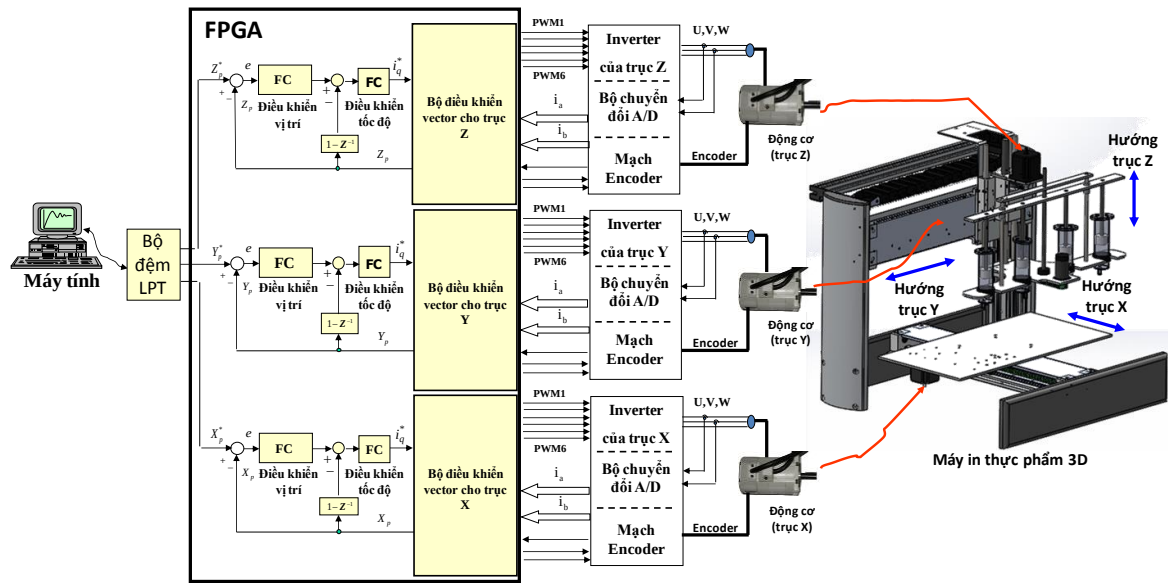
Công nghệ in 3D đã và đang tạo ra bước tiến đột phá trong kỹ thuật chế tạo mẫu, máy in bánh 3D đã được các đơn vị ngoài nước nghiên cứu [1-2]. Trong nước đã có nhiều đơn vị thiết kế và chế tạo thành công máy in 3D nhưng chưa có bất cứ đơn vị nào tiến hành nghiên cứu sản phẩm in bánh 3D.

Hệ thống sử dụng 3 động cơ trục chính để điều khiển vôi phun bánh trong không gian X, Y và Z (Hình 1). Bài báo ứng dụng bộ điều khiển mờ, phương pháp điều khiển vector và điều chế vector không gian dựa trên ngôn ngữ mô phỏng phần cứng để thiết kế bộ điều khiển. Hiện nay rất nhiều phương pháp điều khiển đã được nghiên cứu như điều khiển thích nghi, điều khiển thông minh. Hầu hết các bộ điều khiển đều sử dụng chip xử lý tín hiệu số (DSP), với nhược điểm là chiếm nguồn tài nguyên và tốn nhiều thời gian để phát triển ứng dụng. Trong khi đó công nghệ FPGA là một ngôn ngữ lập trình phần cứng với đầy đủ những tính năng như tính toán nhanh, tiêu thụ năng lượng ít, tích hợp CPU, độ chính xác cao, v.v.[3-4].

Ý tưởng thiết kế bộ điều khiển vector là moment và các thành phần từ hóa của từ thông stator được điều khiển độc lập. Dòng điện ba pha stator được biến đổi thành vector dòng điện cung cấp cho bộ điều khiển (như thể hiện trong Hình 1). Một khi các thông số bộ điều khiển được chọn lựa tốt dòng điện điều khiển $i_d \approx 0$, giúp cho việc điều khiển động cơ servo tương tự với việc điều khiển động cơ một chiều. Moment của động cơ được điều khiển thông qua dòng điện trên trục q (i_q) [5]. Hình 1 mô tả cấu trúc của bộ điều khiển trục X, Y và Z và cấu trúc phần cứng của máy in.

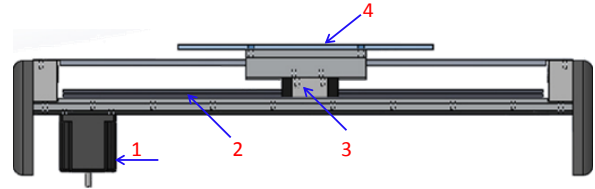
2. CẤU TRÚC PHẦN CỨNG

Kiểu dáng bánh cần in được thiết kế trên máy tính thông qua phần mềm CAD. Sau đó được chuyển qua phần CAM để xuất ra tập lệnh G.

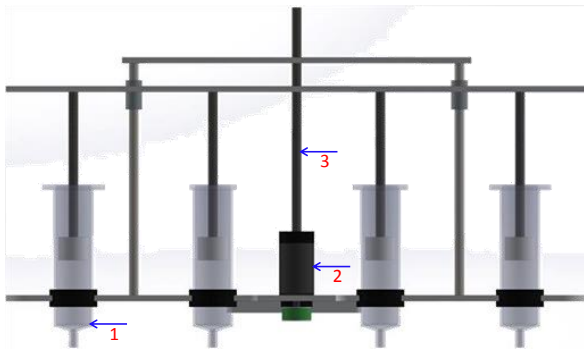


Hình 1. Cấu trúc bộ điều khiển và phần cứng của máy

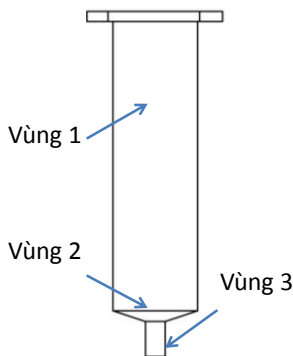
Động cơ đầu phun nhiên liệu được cấp điện khi máy bắt đầu chạy theo hành trình. Giới hạn hành trình của ba trục X, Y và Z lần lượt là 370mm, 370mm và 145mm. Đầu phun nhiên liệu được thiết kế gồm 4 cơ cấu song song. Hình 2 bao gồm đầu đùn (1), động cơ (2), trục vít ép nhiên liệu cho đầu đùn (3).



Hình 4. Cơ cấu truyền động trục X.



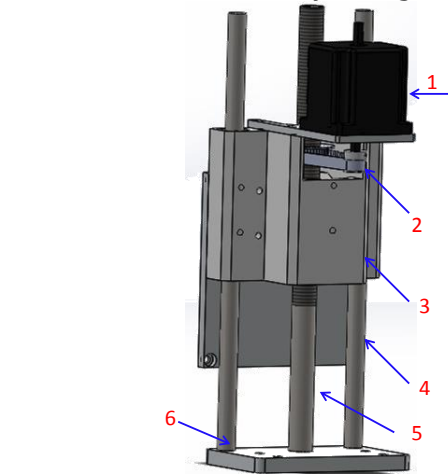
Hình 2. Cấu tạo đầu phun nhiên liệu



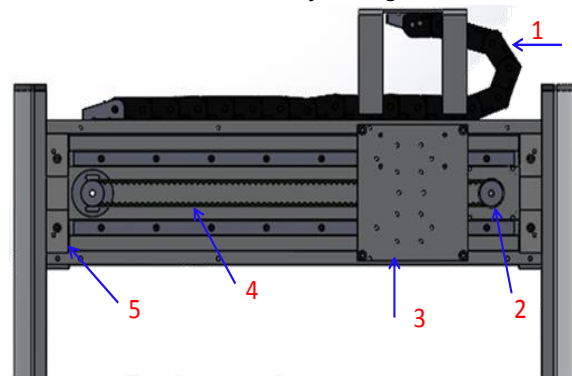
Hình 3. Cấu tạo của đầu đùn

Các thông số thiết kế của đầu đùn được mô tả như trong Hình 3. Phần nhiên liệu chuyển động của vật liệu trong đầu đùn được phân làm ba vùng: vùng chảy tầng (vùng 1), vùng chảy rối (vùng 2), vùng đồng nhất (vùng 3) [4].

Hình 4 mô tả cấu tạo của cơ cấu truyền động trục X gồm một động cơ PMSM (1), dây đai kéo bàn đỡ sản phẩm gắn trên trục X (2), rãnh mang cá (3), bàn đỡ sản phẩm (4).



Hình 5. Cơ cấu truyền động trục Z



Hình 6. Cơ cấu truyền động trục

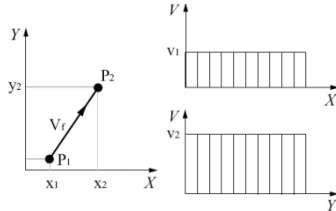
Hình 5 mô tả cơ cấu truyền động của trục Z bao gồm động cơ (1), bulley và dây đai (2), ổ bi và giá đỡ (3), thanh trượt dẫn hướng (4), trục vít me bi (5), cơ cấu đỡ đầu phun nhiên liệu (6).

Hình 6 bao gồm thang cấp (1), động cơ (2), giá đỡ trục Z (3), dây đai kéo trục Y (4), thanh trượt dẫn hướng (5).

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

3.1 Phương pháp nội suy

Để có thể tạo hình dạng phức tạp cho sản phẩm máy được thiết kế với 3 trục điều khiển. Chuyển động của đầu phun được chia thành những thành phần tương ứng với mỗi trục, quỹ đạo của đầu phun được tạo ra thông qua sự kết hợp dịch chuyển riêng lẻ của ba trục X, Y và Z. Hình 7 minh họa việc di chuyển đầu phun từ điểm P₁ đến điểm P₂ với tốc độ V_f trong mặt phẳng XY. Trong thời gian di chuyển trong mặt phẳng XY, trục Z cũng được cấp xung để di chuyển một đoạn tương ứng theo yêu cầu. Việc nội suy các biên dạng phức tạp bằng cách chia nhỏ thành các đoạn thẳng.



Hình 7. Phương pháp di chuyển của đầu phun

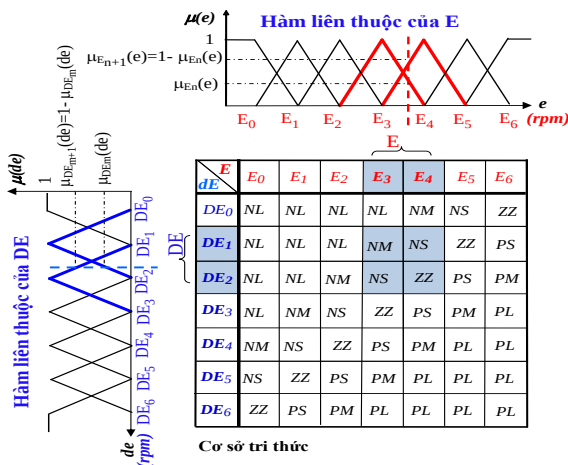
3.2 Bộ điều khiển mờ

Bộ điều khiển mờ được sử dụng để điều khiển tốc độ và vị trí cho từng trục. Tín hiệu đầu vào của từng bộ điều khiển là độ sai lệch giữa giá trị đặt với giá trị phản hồi đo được trên động cơ và độ sai lệch biến đổi theo thời gian [5].

$$e(k) = A_r^*(k) - A_r(k) \quad (1)$$

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

Luật điều khiển được xây dựng với cấu trúc
Nếu e = E_m và de = DE_n thì U_f = C_{m,n} (3)



Hình 8. Hàm liên thuộc và cơ sở tri thức cài đặt cho các luật điều khiển của bộ điều khiển mờ

Hàm liên thuộc của bộ điều khiển FC là tam giác đối xứng (Hình 8) vì vậy hàm tính giá trị ngõ ra của bộ điều khiển mờ được xác định như sau [5]:

$$u_f(e, de) = \frac{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} c_{m,n} [\mu_{E_n}(e) * \mu_{DE_n}(de)]}{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} [\mu_{E_n}(e) * \mu_{DE_n}(de)]} \quad (4)$$

$$\square \sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} c_{m,n} * d_{n,m}$$

Như mô tả ở Hình 8, dựa vào hàm liên thuộc, mỗi giá trị của e và de đầu vào ta có thể xác định được 2 giá trị DE và 2 giá trị E, dựa trên luật điều khiển ta tính toán được 4 giá trị của c_{m,n} là NM, NS, NS và ZZ với d_{n,m} được xác định như sau:

$$d_{nm} = \mu_{E_n}(e) - \mu_{DE_m}(de) \quad (5)$$

$$d_{n,m+1} = \mu_{E_n}(e) * \mu_{DE_{m+1}}(de) = \mu_{E_n}(e) * (1 - \mu_{DE_m}(de)) \quad (6)$$

$$d_{n+1,m} = \mu_{E_{n+1}}(e) * \mu_{DE_m}(de) = (1 - \mu_{E_n}(de)) * \mu_{DE_m}(de) \quad (7)$$

$$d_{n+1,m+1} = \mu_{E_{n+1}}(e) * \mu_{DE_{m+1}}(de) = (1 - \mu_{E_n}(e)) * (1 - \mu_{DE_m}(de)) \quad (8)$$

$$\text{và } d_{nm} + d_{n,m+1} + d_{n+1,m} + d_{n+1,m+1} = 1 \quad (9)$$

```

pwm_counter: block
signal D : STD_LOGIC := '0';
signal Q : STD_LOGIC_VECTOR (11 downto 0) := (others => '0');
begin
process (clk)
begin
if clk'event and clk='0' then
-----
if D='0' then
if Q < x"619" then -- 010000001111=x"40F"
D <= '0';
Q <= Q+x"1";
else
D <= '1';
Q <= x"61A";
end if;
end if;
if D='1' then
if Q > x"001" then
D <= '1';
Q <= Q-x"1";
else
D <= '0';
Q <= x"000";
CMFPA <= CMFPA1;
CMFPB <= CMFPA2;
CMFPC <= CMFPA3;
end if;
end if;
end if;
end if;

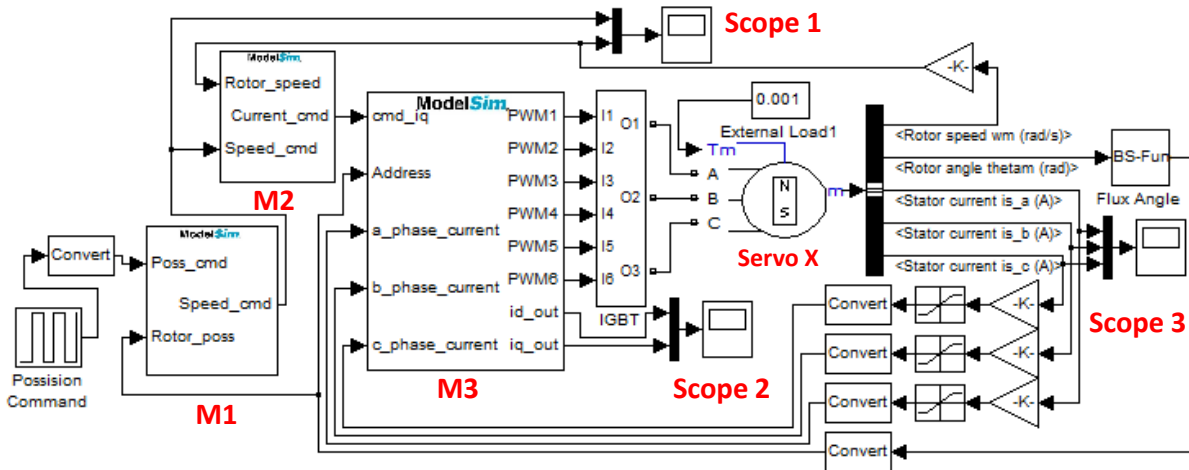
```

Hình 9. Bộ tạo sóng mang trong khối SVPWM được lập trình bằng VHDL

4. MÔ PHỎNG

Sơ đồ khối tổng quát mô tả toàn bộ hệ thống ở Hình 1. Để dễ dàng kiểm tra tính hiệu quả và chính xác của thuật toán điều khiển, bài báo thực hiện mô phỏng toàn bộ thuật toán bằng cách nhúng mã VHDL vào môi trường Simulink/Matlab để vẽ các dạng sóng đáp ứng trên động cơ khi tín hiệu điều khiển ở ngõ vào thay đổi.

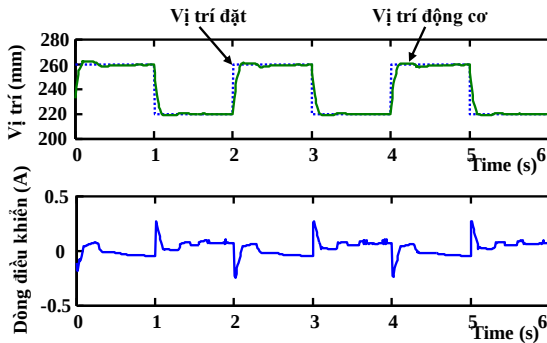
Tần số chuyển mạch của SVPWM được thiết kế là 16kHz và thời gian trì hoãn đóng cắt giữa khóa điện tử công suất phía trên và phía dưới là 1.2μs. Sử dụng thư viện Power system blockset để thiết kế bộ biến tần dựa trên công nghệ IGBT, nguồn DC và PMSM.



Hình 10. Mô hình mô phỏng Simulink – Modelsim của trục x

Trong mô hình Simulink-Modelsim (Hình 10) M1 được nhúng mã VHDL của bộ điều khiển vị trí; M2 chứa mã VHDL của bộ điều khiển tốc độ; M3 chứa mã VHDL của bộ điều khiển vector và SVPWM.

Số lượng công logic và bộ nhớ hệ thống đã sử dụng trong mô phỏng được liệt kê ở Bảng số 1. Thông số của động cơ dùng trong mô phỏng liệt kê ở Bảng số 3. Giá trị tốc độ đặt ω_r^* được thay đổi nhằm kiểm tra đáp ứng tốc độ của động cơ. Kết quả đáp ứng vị trí của động cơ được thể hiện ở Hình 11.



Hình 11. Đáp ứng tốc độ, dòng điều khiển và dòng ba pha của động cơ

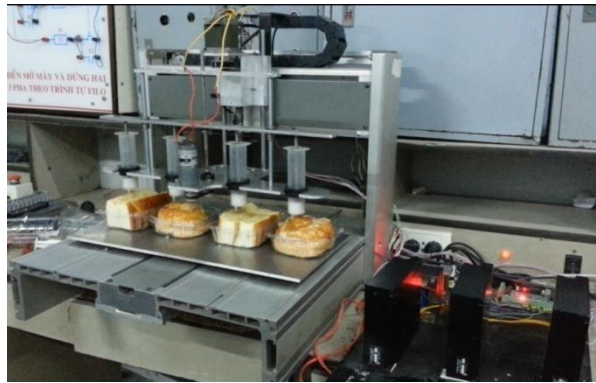
Đáp ứng vị trí động cơ bám rất tốt đường vị trí đặt, với một chút vọt lố. Dòng điều khiển i_d xấp xỉ bằng 0. Kết quả mô phỏng đã thể hiện tính hiệu quả và chính xác của thuật toán điều khiển.

5. THỰC NGHIỆM

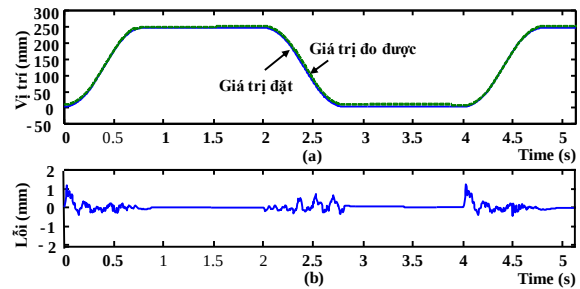
Sau khi kiểm chứng toàn bộ các chức năng của hệ thống thông qua mô phỏng, mã VHDL được tải vào chip FPGA DE2-70 để kiểm nghiệm lại lần nữa thông qua hệ thống thực tế. Tổng quan về hệ thống thực nghiệm được mô tả ở Hình 12.

Các thành phần chính bao gồm máy in bánh 3D, board mạch điều khiển sử dụng FPGA của Altera, mạch đệm công suất, inverter. Động cơ servo sử dụng trong hệ thống có thông số trong Bảng số 4. Trong thực nghiệm có thêm 2 đoạn mã VHDL của ADC và QEP được thêm vào để đọc tín hiệu dòng điện và góc quay của PMSM. Tài nguyên FPGA sử dụng trong thực nghiệm liệt kê ở Bảng số 2.

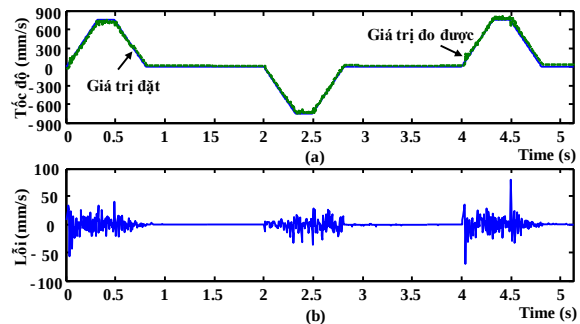
Tương tự với phần mô phỏng, phần thực nghiệm cũng thay đổi giá trị đặt của tốc độ để kiểm tra đáp ứng của động cơ. Từ Hình 13 và Hình 14 cho thấy vị trí động cơ đáp ứng rất tốt với sự thay đổi của giá trị đặt, hoàn toàn không bị vọt lố cả về tốc độ lẫn vị trí. Kết quả thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển động cơ đã đáp ứng rất tốt cho hệ thống.



Hình 12. Phần cứng thử nghiệm của máy



Hình 13. Đáp ứng vị trí của động cơ



Hình 14. Đáp ứng tốc độ của động cơ

6. KẾT LUẬN

So sánh kết quả mô phỏng ở Hình 11 và thực nghiệm ở Hình 13 và Hình 14 cho thấy, đáp ứng tốc độ của động cơ ở cả ba trục hoạt động hoàn toàn chính xác cả về vị trí và tốc độ. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy sức mạnh của điều khiển mờ và điều khiển vector, các kết quả mô phỏng và thực nghiệm chứng minh được hệ thống đã được thiết kế chính xác và hoạt động hiệu quả. Sự di chuyển chính xác của từng thành phần trục X, Y và Z đã giúp cho máy có thể in được những sản phẩm có chi tiết sắc sảo, nâng cao sự hấp dẫn của sản phẩm do máy làm ra.

Bảng 1. Tài nguyên FPGA sử dụng trong mô phỏng

Thông số	Les	RAM bits
Bộ điều khiển tốc độ	6,129	0
Bộ điều khiển vị trí	5,821	0
Bộ điều khiển dòng điện	6,255	73,728

Bảng 2. Tài nguyên FPGA sử dụng trong thực nghiệm

Thông số	Les	RAM bits
Bộ điều khiển tốc độ	6,129	0
Bộ điều khiển vị trí	5,821	0
Bộ điều khiển dòng điện	6,255	73,728
CPU	4,226	75,264
ADC	1,314	0
QEP	594	0

Bảng 3. Thông số của động cơ servo trong mô phỏng

Thông số	Giá trị
R	1.3Ω
L _d , L _q	6.3mH
P	4
J _m	0.000108 kg*m ²
F	0.0013 N*m*s

Bảng 4. Thông số của động cơ servo trong thực nghiệm

Thông số	Giá trị
K _t	0.64 Nm
V và I	92 V, 1.6 A
Công suất	0.2 kW
Tần số	200 Hz
Vòng quay	3000 r/min

7. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. Marks, "The many flavours of printing in 3D", New Scientist, vol. 211, no. 2823, pp.18, ISSN 0262-4079, [http://dx.doi.org/10.1016/S0262-4079\(11\)61818-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0262-4079(11)61818-6), 30 July 2011.
- [2] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution, Business Horizons", vol. 55, no. 2, pp.155-162, ISSN 0007-6813, <http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>, March-April 2012.
- [3] Y.S. Kung and M.H. Tsai, "FPGA-based speed control IC for PMSM drive with adaptive fuzzy control", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 22, no. 6, pp. 2476-2486, Nov. 2007.
- [4] E.Monmasson and M. N. Cirstea, "FPGA design methodology for industrial control systems – a review", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no.4, pp.1824-1842, Aug. 2007.
- [5] N. V. Quynh, Y. S. Kung, P. V. Dung, K. Y. Liao, and S. W. Chen, "FPGA-Realization of Vector Control for PMSM Drives," Applied Mechanics and Materials, vol. 311, pp. 249-254, February 2013.
- [6] Đặng Văn Nghin, "Nghiên cứu thiết kế chế tạo và điều khiển CNC hệ thống tạo mẫu nhanh", Viện Cơ học và Tin học Ứng dụng – Viện Hàn lâm khoa học và Công nghệ Việt Nam, 10/2013.
- [7] Y. S. Kung, N. V. Quynh, C. C. Huang, and L. C. Huang, "Simulink/ModelSim co-simulation of sensorless PMSM speed controller," in Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2011 IEEE Symposium on, pp. 24-29, 2011.

TIỂU SỬ TÁC GIẢ



Nguyễn Vũ Quỳnh

Sinh năm 1979. Anh nhận bằng thạc sỹ về thiết bị, mạng và nhà máy điện của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh năm 2005 và bằng Tiến sỹ về Kỹ thuật điện của Trường Southern Taiwan University of Science and Technology, Đài Loan năm 2013. Hiện anh là giảng viên Khoa Cơ điện – Điện tử - Đại học Lạc Hồng. Hướng nghiên cứu chính là thiết kế và thực hiện các hệ thống đo lường, điều khiển, các hệ thống nhúng, bộ điều khiển thông minh và FPGA.

Lê Hiền

Sinh năm 1992, hiện là sinh viên năm cuối ngành Cơ điện tử Trường Đại học Lạc Hồng. Các hướng nghiên cứu chính là thiết kế cơ khí, CNC.



Nguyễn Tấn Nhật

Sinh năm 1993, hiện là sinh viên năm cuối ngành Điện – Điện tử của Trường Đại học Lạc Hồng. Các hướng nghiên cứu chính là thiết kế hệ thống điện, hệ thống lạnh.