

## Tối ưu Giải thuật Điều khiển Máy in Bánh Chocolate 3D

### Optimizing the Algorithm Control of a 3D Chocolate Cake Printer

<sup>1</sup>Nguyễn Vũ Quỳnh, <sup>2</sup>Lâm Thành Hiền

Khoa Cơ Điện – Điện Tử Trường ĐH Lạc Hồng

e-Mail: <sup>1</sup>vuquynh@lhu.edu.vn, <sup>2</sup>lthien@lhu.edu.vn

#### Tóm tắt

Bài báo này trình bày các bước thiết kế máy in bánh chocolate 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.

#### 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.

#### Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$e, d_e$	vòng/p hút	Biến ngôn ngữ đầu vào của bộ điều khiển mờ
$A_r^*(k)$	vòng/p hút	Tốc độ đặt
$A_r(k)$	vòng/p hút	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

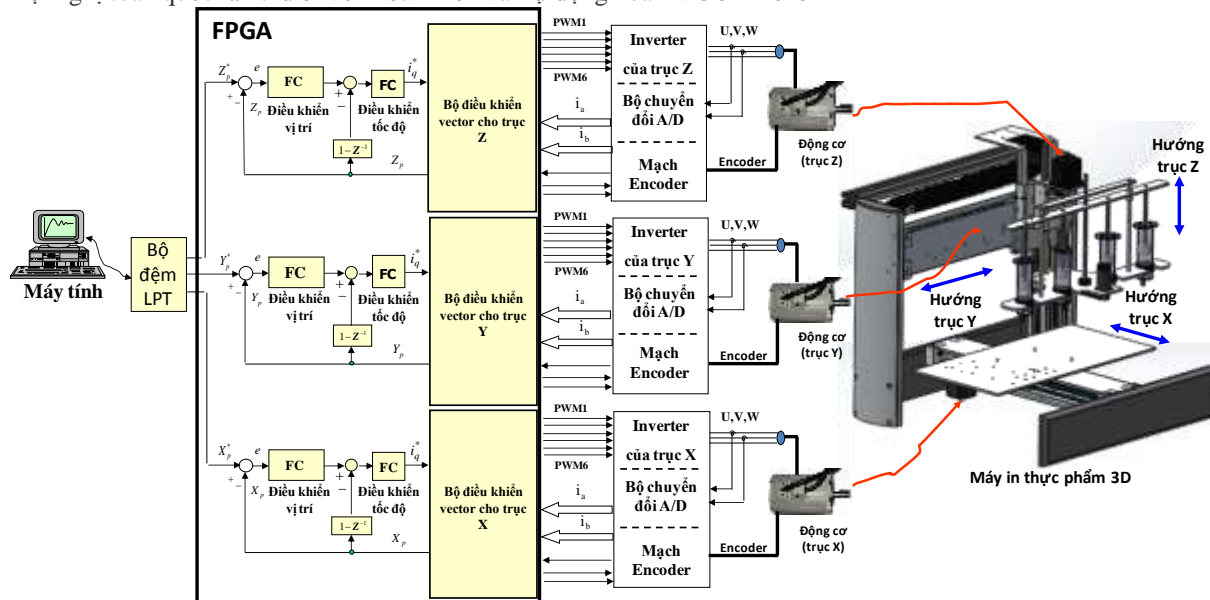
Đầu tiên phải nói đến sự tiện dụng của máy rút ngắn thời gian chế biến bánh, người dùng có thể ăn thức ăn

ngay khi máy làm xong. Điều này rất tiện dụng cho người thường xuyên bận rộn nhưng muốn ăn những chiếc bánh nghệ thuật do mình tự chế biến. Đặc biệt trong thời buổi công nghệ hiện nay, nhà hàng ứng dụng công nghệ cao đang bắt đầu phát triển trong nước, chiếc máy không chỉ giúp thiết kế mẫu bánh dễ dàng hơn, thay đổi mẫu nhanh hơn, mà còn làm cho hình ảnh nhà hàng trở nên chuyên nghiệp trong mắt khách hàng. Tính mới ở đây là máy giúp tiếp kiệm khuôn và không gian làm việc. Trong công nghiệp các nhà sản xuất phải rót dịch chocolate vào khuôn sau đó làm lạnh để làm cứng chocolate rồi tách khuôn. Máy in 3D có thể thay thế hoàn toàn các loại khuôn truyền thống, rút ngắn tối đa thời gian tạo mẫu bánh.

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 chocolate 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 chocolate 3D.

Hệ thống sử dụng 3 động cơ trục chính để điều khiển vòi phun chocolate trong không gian X, Y và Z (H.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...[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 (H.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]. H.1 mô tả cấu trúc của bộ điều khiển trục X, Y và Z và cấu trúc phần cứng của máy in.



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

## 2. Nguyên liệu Chocolate

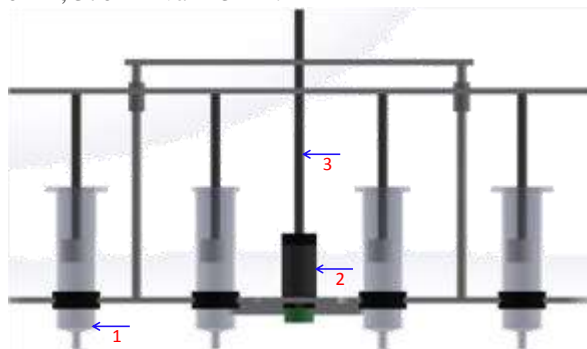
Chocolate rất sợ nhiệt độ cao và nắng chiếu trực tiếp vì một khi chocolate đã chảy, nó dễ dàng kết tinh lại thô nhám, mất ngon. Nhiệt độ tối ưu để bảo quản chocolate là 20 đến 25°C nên rất phù hợp đặt máy in trong phòng làm việc có trang bị máy lạnh.

Nguyên liệu dùng cho máy in có thể từ bột Chocolate đen: chocolate liquor 40%, bơ ca cao 12%, đường 47,5%, chất nhũ hóa 0,5%, hương vani hoặc Chocolate trắng: Bơ ca cao 23%, Sữa bột nguyên kem 30%, đường 46,5%, chất nhũ hóa 0,5%, hương vani. Ngoài ra nguyên liệu còn có thể sử dụng từ các loại chocolate bán sẵn trên thị trường. Khi chọn được loại nguyên liệu thích hợp thì cần phải cách thủy ở nhiệt độ 70-80°C để chocolate tan chảy hoàn toàn, hạn chế tối đa việc cho chocolate tiếp xúc với hơi nước trong quá trình cách thủy. Nếu chỉ cần một giọt nước dính vào thì cả mẻ socola sẽ bị nhạt, bị sùi làm mất ngon chiếc bánh làm ra.

Sau khi cách thủy khoảng 10 phút, dịch chocolate được rót trực tiếp vào đầu đùn để máy in bánh 3D có thể bắt đầu hoạt động.

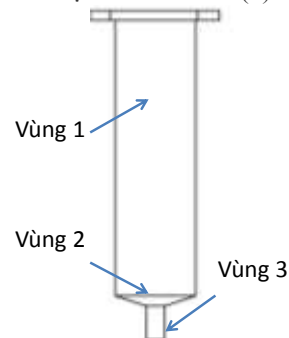
## 3. Cấu trúc phân cứng:

Kiểu dáng chocolate 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. Phần mềm điều khiển máy in chocolate 3D đọc tập lệnh G để nội suy, tính toán số lượng xung cấp cho động cơ ở cả ba trục. 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.



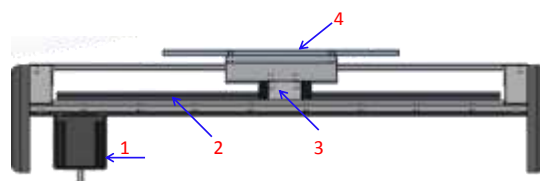
H.2 Cấu tạo đầu phun nhiên liệu

Đầu phun nhiên liệu được thiết kế gồm 4 cơ cấu song song để tăng tốc độ in bánh. H.2 bao gồm đầu đùn (1), động cơ (2), trục vít ép nhiên liệu cho đầu đùn (3).



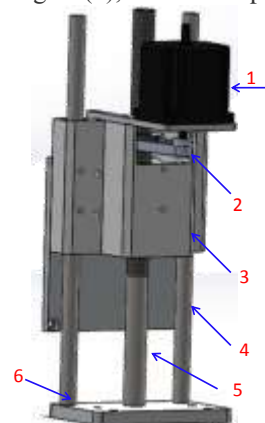
H.3 Cấu tạo của đầu đùn

Các thông số thiết kế của đầu đùn được mô tả như trong H.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].



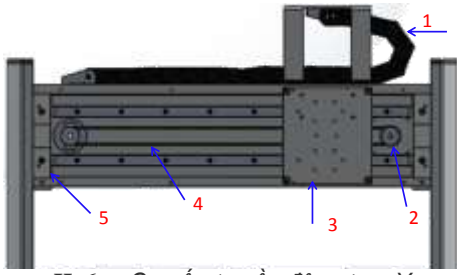
H.4 Cơ cấu truyền động trục X.

H.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).



H.5 Cơ cấu truyền động trục Z

H.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).



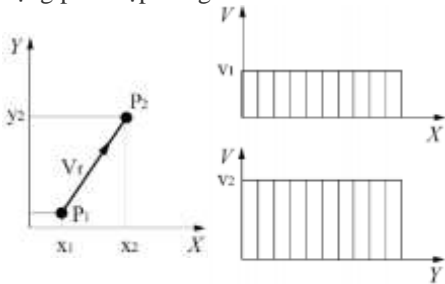
H.6 Cơ cấu truyền động trục Y

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

#### 4. 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 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. H.7 minh họa việc di chuyển đầu phun từ điểm P<sub>1</sub> đến điểm P<sub>2</sub> với tốc độ V<sub>f</sub> 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.



H.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].

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

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

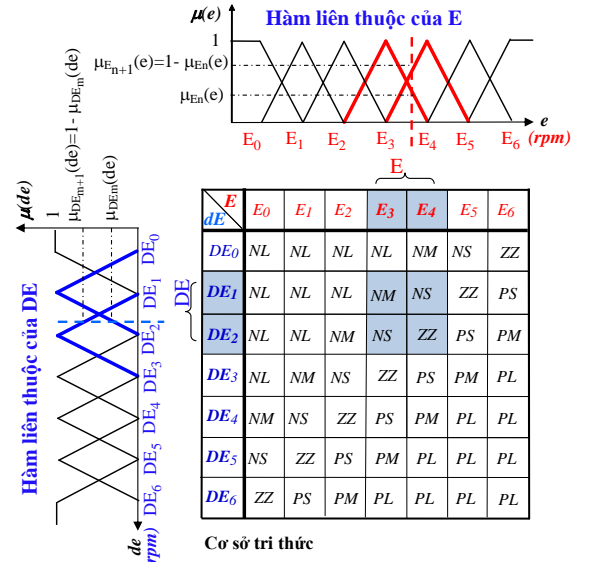
Luật điều khiển được xây dựng với cấu trúc

$$\text{Nếu } e = E_m \text{ và } de = DE_n \text{ thì } U_f = C_{m,n} \quad (3)$$

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

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

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



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

Như mô tả ở H.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<sub>m,n</sub> là NM, NS, NS và ZZ với d<sub>n,m</sub> được xác định như sau:

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

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

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

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

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

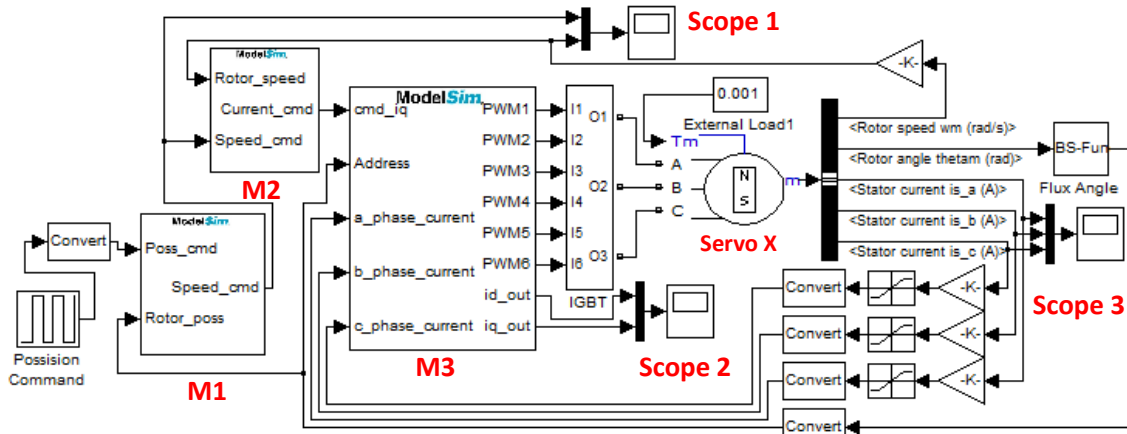
#### 5. Mô phỏng

Sơ đồ khối tổng quát mô tả toàn bộ hệ thống ở H.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.

Trong mô hình Simulink-Modelsim (H.9) 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 cổng 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<sub>r</sub><sup>\*</sup> 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 H. 11. Đáp ứng vị trí động cơ bám rất tốt đường vị trí đặt, với một chút xúu vọt lố. Dòng điều khiển i<sub>d</sub> xấp xỉ bằng không. Kết quả mô phỏng đã thể hiện tính hiệu quả và chính xác của thuật toán điều khiển.

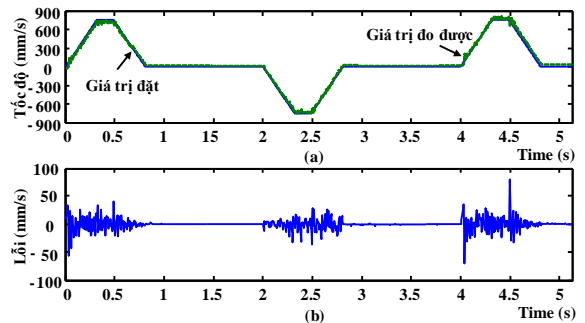


H. 9 Mô hình mô phỏng Simulink – Modelsim của trục x

```

pen_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 <= '0';
Q <= Q-x"1";
else
D <= '0';
Q <= x"000";
CMPFAR<=CMPR1;
CMPFBK<=CMPR2;
CMPFCK<=CMPR3;
end if;
end if;
end if;
end process;
end block;
    
```

H. 10 Bộ tạo sóng mang trong khối SVPWM được lập trình bằng VHDL



H. 13 Đáp ứng tốc độ của động cơ

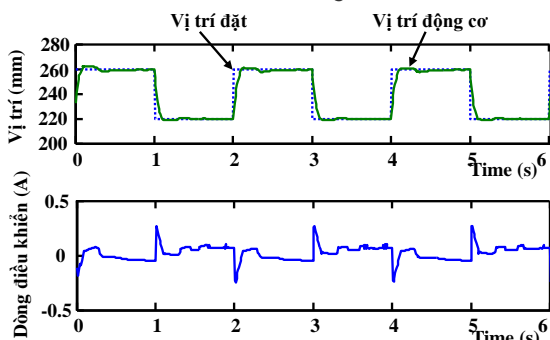
Sau khi kiểm chứng toàn bộ các chức năng của hệ thống thông qua mô phỏng, mã VHDL được tải vào chip FPGA DE2-70 để kiểm nghiệm lại lần nữa thông qua hệ thống thực tế. Tổng quan về hệ thống thực nghiệm được mô tả ở H.12. Các thành phần chính bao gồm máy in chocolate 3D, board mạch điều khiển sử dụng FPGA 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 H.12 và H.13 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. Đầu phun chocolate có đường kính 1.2mm, tốc độ in 20mm/s, sai số trục X, Y và Z lần lượt là 0.12, 0.5 và 0.25. Thời gian in một số mẫu đơn giản được mô tả trong H.15-H.18.

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

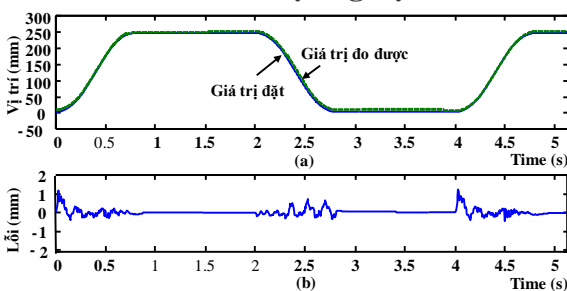
Bảng 2. Tài nguyên FPGA sử dụng trong thực nghiệm

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



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

## 6. Thực nghiệm



H. 12 Đáp ứng vị trí của động cơ

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

Thông số	Giá trị
R	1.3Ω
L <sub>d</sub> , L <sub>q</sub>	6.3mH
P	4
J <sub>m</sub>	0.000108 kg*m <sup>2</sup>
F	0.0013 N*m*s

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

Thông số	Giá trị
K <sub>t</sub>	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. Kết luận

So sánh kết quả mô phỏng ở H.11 và thực nghiệm ở H.12-13 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.

**H. 14** Phần cứng thử nghiệm của máy**H. 15** Thời gian hoàn thành là 5.5 phút**H. 16** Thời gian hoàn thành 3.5 phút**H. 17** Thời gian hoàn thành 6 phút**H. 18** Thời gian hoàn thành 5 phút

## Tài liệu tham khảo

- [1] Paul Marks, "The many flavours of printing in 3D, *New Scientist*", Volume 211, Issue 2823, 30 July 2011, Page 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).
- [2] Barry Berman, "3-D printing: The new industrial revolution, *Business Horizons*," Volume 55, Issue 2, March–April 2012, Pages 155-162, ISSN 0007-6813, <http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
- [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 Nghìn, "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, 2011, pp. 24-29



**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 2013. Hiện anh là giáo 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.



**Lâm Thành Hiển** sinh năm

1970. Anh nhận bằng thạc sỹ về ứng dụng công nghệ thông tin của viện INFOTECH, Pháp, năm 2004 hiện tại anh đang làm nghiên cứu sinh tại Viện Công nghệ Thông tin, Viện Hàn lâm

Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Hướng nghiên cứu chính là hệ thống thông tin và xử lý ảnh.