

## XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC NGƯỢC CHO MÁY IN 3D FDM KHỔ NHỎ

Thân Văn Ngọc<sup>1\*</sup>, Nguyễn Thị Lục<sup>1</sup>, Nguyễn Đăng Ninh<sup>1</sup>,  
Nguyễn Thành Trung<sup>1</sup>, Đặng Thị Tố Loan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Lâm nghiệp

### TÓM TẮT

Ngành công nghệ in 3D và việc sử dụng máy in 3D ngày càng phát triển mạnh mẽ, sự đa dạng và hoạt động chính xác của sản phẩm ngày càng được nâng cao. Công nghệ in FDM (Fused Deposition Molding) được phát triển rộng rãi với những ưu điểm đa dạng đòi hỏi về vật liệu, dễ kiểm, không độc hại, kết cấu máy đơn giản, dễ dàng chế tạo, sửa chữa và giá thành rẻ phù hợp với thị trường... Nghiên cứu khảo sát động học và động lực học của máy in 3D sử dụng công nghệ in FDM, cho ta thấy được chuyển động của các khâu đều là chuyển động tịnh tiến và phương trình chuyển động mong muốn tuân theo hàm điều hòa nên các khâu cũng chuyển động tuân theo hàm điều hòa. Khảo sát động lực học ngược của máy in 3D là từ vị trí mong muốn thông qua phương trình động lực học ta tính được lực, mô men điều khiển tác động vào các khâu. Sau quá trình tính toán, khảo sát bằng phần mềm Matlab ta có kết quả lực lớn nhất tác động vào khâu X là 0,015 kN, khâu Y là 0,045 kN và khâu Z là 8,831 kN. Lực này chủ yếu phụ thuộc vào gia tốc và khối lượng của khâu nên cũng sẽ tuân theo chu kỳ.

**Từ khóa:** động học, động lực học ngược, máy in 3D FDM, mô hình hóa.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ in 3D ra đời cách đây hơn 30 năm và đang ngày càng phát triển, không chỉ giúp cho việc chế tạo khuôn mẫu được chính xác và dễ dàng hơn mà còn tìm được nhiều ứng dụng trong thực tế cuộc sống. Công nghệ in 3D hiện được ứng dụng nhiều và ngày càng phổ biến trong các lĩnh vực sản xuất công nghiệp, xây dựng, y tế - chăm sóc sức khỏe, giáo dục...

Việc nghiên cứu tính toán thiết kế và chế tạo máy in 3D đã thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học trong khoảng ba thập niên gần đây. Các công trình của nhóm tác giả Samuel N. Bernier, Bertier Luyt và Tatiana Reinhard (2015) với mô hình vật thể được cắt thành hàng trăm lớp in, mỗi lớp được chuyển thành một đường dẫn để máy đi theo trong khi in 3D. Một số giải pháp công nghệ cho in 3D kim loại (DMSL, EBDM, DMD, SLM), của thực phẩm (ép đùn) và các bộ phận cơ thể chưa được đưa vào chương này. Một số kỹ thuật khác cũng đang trong quá trình nghiên cứu, hoặc chỉ dành cho sử dụng công nghiệp. Lựa chọn của nhóm tác giả trong danh sách này giải quyết phần lớn các lựa chọn tạo mẫu nhanh có sẵn cho người tiêu dùng ngay lập tức dưới dạng dịch vụ hoặc trong máy in 3D cá nhân. Hoặc là các công trình nghiên cứu về máy in 3D của James Floyd Kelly (2013), của Asadi Aaron (2015)

\*Corresponding author: thanvanngoc@gmail.com

đều nghiên cứu về cách thiết kế và chế tạo máy in 3D với mô hình vật thể trong 100 ngách khác nhau: y tế, kỹ thuật, xây dựng, thể thao...

Ở Việt Nam hiện nay máy in 3D không còn quá xa lạ, các nhà sáng tạo trẻ, nhà khoa học trẻ tại các trường đại học chuyên ngành kỹ thuật và tự động hóa ở Việt Nam như ở trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Đại học Công nghiệp Hà Nội... cũng đã tự chế tạo máy in 3D cho cá nhân phục vụ làm đề tài khoa học, luận văn thạc sĩ và thậm chí phục vụ cho quá trình thương mại. Con số đã lên đến hàng chục ngàn, trăm ngàn đơn vị sản xuất có tổ chức và đơn vị cá nhân.

Tại Việt Nam, việc nghiên cứu về máy in 3D ứng dụng trong ngành khuôn mẫu đã được nghiên cứu từ nhiều năm với nhiều công trình như: Năm 2016 đồng tác giả Đặng Cảnh Hà, Trần Văn Lân, Nguyễn Trọng Kha đã nghiên cứu về: "*Thiết kế và chế tạo máy in 3D sử dụng kết cấu corexy*". Tác giả Phan Hà Nhật Tân và Nguyễn Phương nghiên cứu: "*Nghiên cứu và thi công máy in, scan 3D*", đã ứng dụng máy in 3D để thi công ra máy scan 3D năm 2016. Tác giả Nguyễn Vĩnh Hưng và Nguyễn Phi Long nghiên cứu: "*Thiết kế, thi công mô hình máy in 3D dùng Kit Arduino*" trong nghiên cứu tiến hành thiết kế và lắp ráp ra máy in 3D dùng Kit Arduino kết quả rất tốt năm 2016. Tác giả Liêu Chí Thăng năm 2016

nghiên cứu: “Nghiên cứu chế tạo máy in 3D dạng SCARA”, chế tạo ra máy in 3D dạng Scara, nghiên cứu các kiểu đường chạy nhựa sử dụng đối với các mẫu in để tối ưu mẫu in.

Trong bài báo này, dựa trên các mẫu thiết kế có sẵn, cụ thể máy in 3D công nghệ FDM của đề tài nghiên cứu cấp cơ sở của Bộ môn Cơ sở kỹ thuật, Khoa cơ điện và Công trình, Trường Đại học Lâm nghiệp, nhóm tác giả đã mô hình hóa và tính toán động lực học cho mô hình máy in 3D.

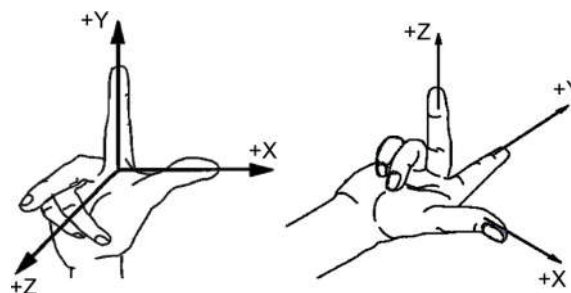
## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Một trong các phương pháp hay được sử dụng để xây dựng mô hình động học và động lực học hệ nhiều vật rắn ghép nối với nhau bằng các khớp, chủ yếu là khớp quay và khớp tịnh tiến, là phương pháp ma trận Denavit-Hartenberg (DH) và sử dụng phương trình Lagrange loại II. Chi tiết về nội dung phương pháp này có thể tham khảo trong các tài liệu Nguyễn Văn Khang (2017), Nguyễn Văn Khang, Chu Anh Mỹ (2011). Từ mô hình xây dựng được ta đi giải bài toán động học ngược và động lực học ngược. Kết quả khảo sát các phương trình bài báo đã sử dụng phần mềm *matlab - simulink* được trình bày trong tài liệu Nguyễn Quang Hoàng (2019), cho ra được đồ thị hàm tọa độ, vận tốc, gia tốc, lực điều khiển của các khâu.

### 2.1. Xây dựng mô hình động học máy in 3D FDM

#### 2.1.1. Bài toán động học

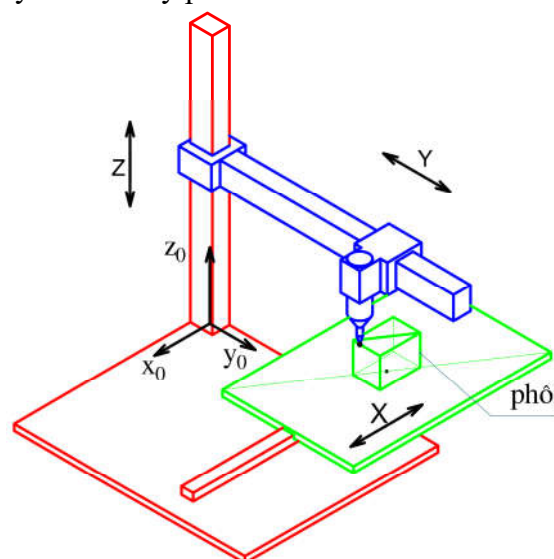
Khảo sát động học máy in 3D FDM gồm: Xác định vị trí đầu đùn, vận tốc và gia tốc đầu đùn từ dịch chuyển của các khâu. Không gian thao tác của đầu đùn được giới hạn là 20 x 20 x 30 cm. Ta có thể in các chi tiết có kích thước trong vùng không gian thao tác. Xây dựng các trục tọa độ của máy cho phép ta xác định được chiều chuyển động của các khâu đã được trình bày trong tài liệu Trần Văn Địch (2004). Chọn hệ trục tọa độ Đề-các trong không gian ba chiều  $X, Y, Z$  có chiều dương xác định theo quy tắc bàn tay phải được thể hiện trên hình 1 (ngón tay cái chỉ chiều dương của trục  $X$ , ngón tay giữa chỉ chiều dương của trục  $Z$ , ngón tay trỏ chỉ chiều dương của trục  $Y$ ).



Hình 1. Hệ trục tọa độ theo quy tắc bàn tay phải

Máy in 3D là một loại máy công cụ điều khiển số, chi tiết phôi gia công được xem như cố định và luôn gắn với hệ trục cố định tại đó. Ta quy ước hệ trục tọa độ của máy như sau:

- + Trục  $Z$  trùng với trục chuyển động của trục chính;
- + Trục  $X$  nằm trong mặt phẳng song song với bàn máy;
- + Trục  $Y$  vuông góc với hai trục còn lại theo quy tắc bàn tay phải.



Hình 2. Hệ trục tọa độ gắn lên lên máy in 3D

#### 2.1.2. Tính toán động học

Máy in 3D cũng là một loại robot công nghiệp, được tạo thành bởi một tập hợp các khâu (links) ta coi các khâu được liên kết với nhau bởi các khớp (joints). Một phương pháp thường dùng để phân tích động học và động lực học của hệ nhiều như trên là phương pháp ma trận Denavit-Hartenberg (DH). Bằng việc sử dụng các phép biến đổi thuần nhất và ma trận biến đổi thuần nhất ta có thể mô tả vị trí tương đối và hướng giữa các khâu kế tiếp bằng một ma trận  $A$ . Đơn giản hơn,  $A$  là một ma trận biến đổi thuần nhất bởi phép quay và phép tịnh tiến tương đối giữa hệ tọa độ của hai khâu

kề nhau. Ta kí hiệu  ${}^0A_1$  là ma trận mô tả hướng và vị trí của khâu đầu tiên,  ${}^1A_2$  là ma trận mô tả hướng và vị trí của khâu thứ 2 so với khâu thứ nhất. Như vậy hướng và vị trí của khâu thứ hai so với hệ tọa độ gốc được xác định bởi ma trận T bằng tích các ma trận:

$$T_2 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \quad (1)$$

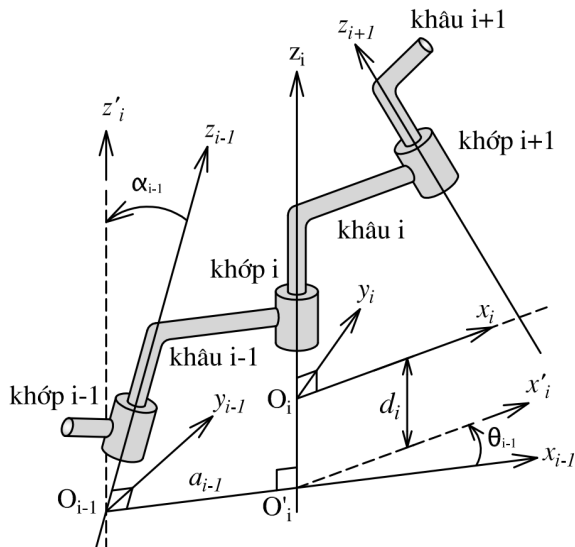
Tương tự,  ${}^2A_3$  là ma trận xác định hướng và vị trí của khâu 3 so với khâu 2. Ta cũng có:

$$T_3 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \quad (2)$$

Nếu hệ có n khâu, ta có:

$$T_n = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot \dots \cdot {}^{n-1}A_n \quad (3)$$

$T_n$  là ma trận mô tả hướng và vị trí của khâu chấp hành cuối đối với hệ tọa độ gốc.



Hình 3. Biểu diễn các thông số của khớp quay

Để xác định được các ma trận A theo Denavit-Hartenberg (DH) ta phải đi xây dựng một hệ tọa độ khớp  $(Oxyz)_i$  tuân theo các quy luật sau:

+ Trục  $z_i$  được chọn dọc theo trục khớp động thứ  $i$ ;

+ Trục  $x_i$  được chọn theo đường vuông góc chung của hai trục  $z_i$  và  $z_{i+1}$ , hướng từ  $z_i$  tới  $z_{i+1}$ . Nếu trục  $z_i$  cắt trục  $z_{i+1}$  thì trục  $x_i$  được chọn tùy ý, miễn là vuông góc với trục  $z_i$ . Nếu  $z_i // z_{i+1}$  có vô số đường vuông góc chung, trục  $x_i$  chọn theo hướng pháp tuyến chung;

+ Góc tọa độ  $O_i$  là giao điểm của  $x_i$  và  $z_i$ ;

+ Trục  $y_i$  được chọn theo quy tắc bàn tay phải.

Hệ tọa độ  $(Oxyz)_i$  được gọi là hệ tọa độ khớp. Hệ tọa độ này gắn liền vào khâu  $i$ , đặt tại khớp  $i$ .

Vị trí của hệ tọa độ khớp  $i$  đối với hệ tọa độ khớp  $i-1$  được xác định bằng bốn tham số động học như sau:

+  $a_{i-1}$  : góc quay quanh trục  $x_{i-1}$  để trục  $z_{i-1}$  tiến tới  $z'_i$  song song với trục  $z_i$ ;

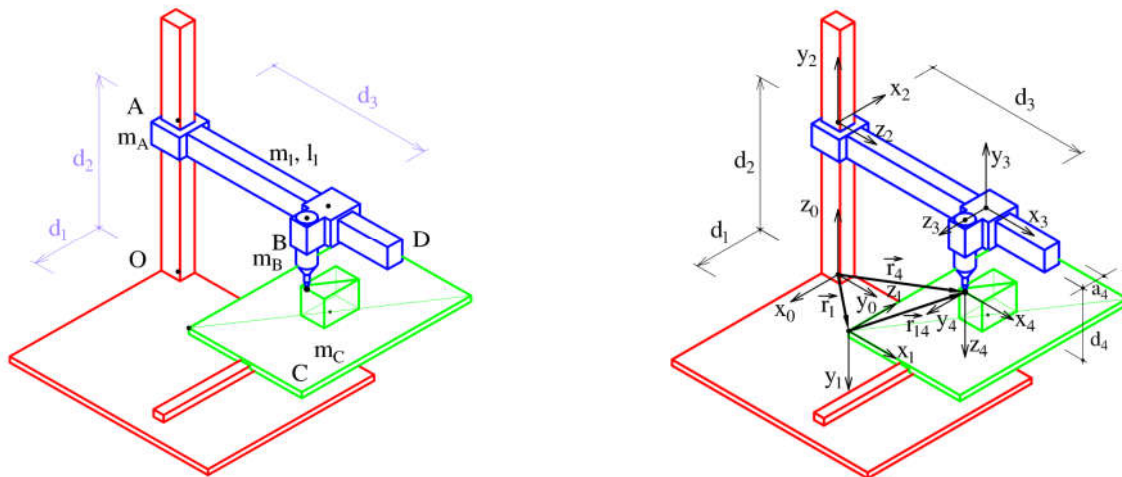
+  $a_{i-1}$  : đoạn dịch chuyển tịnh tiến dọc trục  $x_{i-1}$  để gốc  $O_{i-1}$  tiến đến  $O'_i$ ;

+  $\theta_i$  : góc quay quanh trục  $z_i$  để trục  $x_{i-1}$  tiến tới  $x'_i$  ( $x'_i // x_i$ );

+  $d_i$  : đoạn dịch chuyển tịnh tiến dọc trục  $z_i$  để trục  $x'_i$  tiến tới  $x_i$  (hay  $O'_i$  tiến tới  $O_i$ ).

Bốn tham số  $a_{i-1}$ ,  $a_{i-1}$ ,  $\theta_i$ ,  $d_i$  được gọi là các tham số động học Denavit-Hartenberg, gọi tắt là DH. Trong đó  $a_{i-1}$ ,  $a_{i-1}$  là các hằng số, còn  $\theta_i$  là biến khớp nếu khớp là khớp quay và  $d_i$  là biến khớp nếu khớp là khớp tịnh tiến.

Dựa vào cách xác định hệ tọa độ theo DH và sơ đồ động học của máy in 3D FDM, ta có hệ tọa độ gắn vào các khâu của máy như sau (hình 4).



Hình 4. Hệ trục tọa độ máy và sơ đồ động học của máy in 3D

Từ sơ đồ động học của máy in 3D ta thấy máy có 4 khâu và 3 bậc tự do. Khâu 0 là khâu đế cố định, khâu 1 là bàn gia nhiệt chuyển động theo phương trục  $x$ , khâu 2 chuyển động theo trục  $z$ , khâu 3 là chuyển động theo trục  $y$ ,

khâu 4 là khâu thao tác cuối chứa đầu đùn gắn liền với khâu 3. Các khâu đều chuyển động tịnh tiến. Như vậy ta có bảng thông số động học của máy như bảng 1.

**Bảng 1. Bảng các thông số động học máy**

Khâu	$\theta_i$	$a_i$	$a_i$ (m)	$d_i$ (m)	Biến khớp
1	0	0	-	$d_{x01},$ $d_{y02},$ $d_{z03}$	$d_1$
2	0	$-90^0$	0	$d_2$	$d_2$
3	0	$-90^0$	0	$d_3$	$d_3$
4	0	$90^0$	$a_4$	$d_4$	-

Do khâu 1 là bậc tự do thuần túy nên:

$d_{x01} = d_1, d_{y01} = 0,045 \text{ m}, d_{z01} = 0,09 \text{ m}$  và vị trí đầu đùn so với khâu 3 là:  $a_4 = 0,04 \text{ m}, d_4 = 0,05 \text{ m}$ .

Ma trận xác định hướng và vị trí của các khâu 1 so với khâu đế:

$${}^0\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{x01} \\ 0 & 1 & 0 & d_{y01} \\ 0 & 0 & 1 & d_{z01} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ma trận xác định hướng và vị trí của các khâu 4 so với khâu đế:

$$\mathbf{T}_4 = {}^0\mathbf{A}_2 {}^2\mathbf{A}_3 {}^3\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Do đầu đùn chuyển động tương đối so với bàn gia nhiệt, ta đi xây dựng quan hệ giữa vị trí của đầu đùn so với bàn gia nhiệt:

Gọi  $O_4$  là vị trí của đầu đùn ta đã xác định được tọa độ thông qua  $\mathbf{T}_4$ . Ta có:

$$\vec{r}_4^{(0)} = \vec{r}_1^{(0)} + \vec{r}_{14}^{(0)} \quad (6)$$

Phương trình ma trận tương ứng (6) có dạng:

$$\mathbf{r}_4^{(0)} = \mathbf{r}_1^{(0)} + \mathbf{r}_{14}^{(0)} = \mathbf{r}_1^{(0)} + {}^0\mathbf{A}_1 \mathbf{r}_{14}^{(1)} \quad (7)$$

Theo phương pháp ma trận DH, phương trình (7) sẽ có dạng:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_4^{(0)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{A}_1 & \mathbf{r}_1^{(0)} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{14}^{(1)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Hay:

$$\begin{bmatrix} x_4^{(0)} \\ y_4^{(0)} \\ z_4^{(0)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{x01} \\ 0 & 1 & 0 & d_{y01} \\ 0 & 0 & 1 & d_{z01} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{14}^{(1)} \\ y_{14}^{(1)} \\ z_{14}^{(1)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Từ (9) ta thiết lập mối quan hệ chuyển động giữa vị trí đầu đùn so với phôi:

$$\begin{bmatrix} x_{14}^{(1)} \\ y_{14}^{(1)} \\ z_{14}^{(1)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 - d_{x01} \\ d_3 - d_{y01} \\ d_2 - d_4 - d_{z01} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

**Ma trận vận tốc giữa đầu đùn và phôi:**

Ta có hệ thức  $x = f(q)$ . Khi đó, vận tốc chính là đạo hàm bậc nhất của véc tơ  $x$  theo thời gian, ta có:

$$\dot{x} = \frac{\partial f}{\partial q} \dot{q} = J(q)\dot{q} \quad (11)$$

Trong đó:

$$J(q) = \frac{\partial f}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Như vậy ta tính toán được ma trận Jacobian để xác định vận tốc:

$$J(q) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Vậy ta có:

$$\dot{\mathbf{r}}_{14}^{(1)} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ma trận gia tốc giữa đầu đùn so với phôi:

$$\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (15)$$

Do hệ các khâu chuyển động tịnh tiến nên

$$\dot{J}(q) = 0.$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{14}^{(1)} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{d}_1 \\ \ddot{d}_2 \\ \ddot{d}_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

## 2.2. Xây dựng mô hình động lực học, động lực học ngược máy in 3D

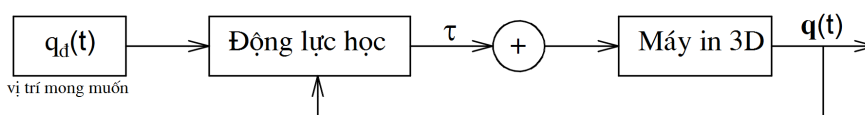
### 2.1.1. Bài toán động lực học

Phương trình tổng quát động lực học của hệ nhiều vật được thiết lập bằng phương trình Lagrange II có dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (17)$$

với  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T = [d_1, d_2, d_3]^T$  là véc tơ tọa độ suy rộng,  $\mathbf{M}(\mathbf{q})$  là ma trận khối lượng suy rộng,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  là ma trận Côriôlis và ly tâm,  $\mathbf{g}(\mathbf{q})$  là ma trận lực suy rộng do trọng lực,  $\boldsymbol{\tau}$  là ma trận lực/mô men điều khiển để thực hiện chuyển động mong muốn.

Sơ đồ khối điều khiển máy in 3D có dạng:



Hình 5. Sơ đồ khối điều khiển máy in 3D

Từ phương trình động lực học, ta có hai bài toán cơ bản là bài toán động lực học thuận và bài toán động lực học nghịch. Bài toán động lực học thuận: Cho biết lực/mô men điều khiển tạo ra từ các động cơ tìm chuyển động của robot:  $\tau \rightarrow (q, \dot{q}, \ddot{q})$ ; Bài toán động lực học ngược: cho trước các chuyển động mong muốn tìm lực/mô men điều khiển các động cơ để thực hiện chuyển động đó:  $(q, \dot{q}, \ddot{q}) \rightarrow \tau$ .

### 2.2.2. Xây dựng phương trình động lực học cho máy in 3D

- Động năng của hệ:

$$T = T_A + T_1 + T_B + T_C \quad (18)$$

Trong đó:

$T_A$ : động năng của vật nặng tại liên kết ngàm

$$A: T_A = \frac{1}{2} m_A \cdot \dot{q}_2^2$$

$T_1$ : động năng của thanh ngang AB:

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 \cdot \dot{q}_2^2$$

$T_B$ : động năng của con chạy B:

$$T_B = \frac{1}{2} m_B \cdot (\dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2)$$

$T_C$ : động năng của bàn chạy:  $T_C = \frac{1}{2} m_C \cdot \dot{q}_1^2$

Vậy động năng của toàn hệ:

$$T = \frac{1}{2} m_C \cdot \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} (m_A + m_1 + m_B) \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} m_B \cdot \dot{q}_3^2$$

- Thế năng của hệ:

$$V = (m_A + m_1 + m_B) \cdot g \cdot q_2 \quad (19)$$

- Hàm Lagrange:

$$L = T - V$$

- Sử dụng phương trình Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} m_C & 0 & 0 \\ 0 & m_A + m_1 + m_B & 0 \\ 0 & 0 & m_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (m_A + m_1 + m_B)g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Kết quả tính toán động học

Ta đã xây dựng được mối quan hệ chuyển động giữa phiê và đầu đùn ở (10).

Giả sử quỹ đạo đường chuyển động mong muốn có phương trình như sau:

$$x = 0,05 \cdot \sin(t), y = 0,05 \cdot \cos(t), z = 0,01 \cdot \cos(t) \quad (22)$$

Khi giải bài toán động học ngược, tọa độ đầu đùn sẽ thay đổi theo ba trục  $x, y, z$  thông qua ba tọa độ suy rộng  $q_1 = d_1, q_2 = d_2, q_3 = d_3$ . Như vậy thay vào (22) ta có:

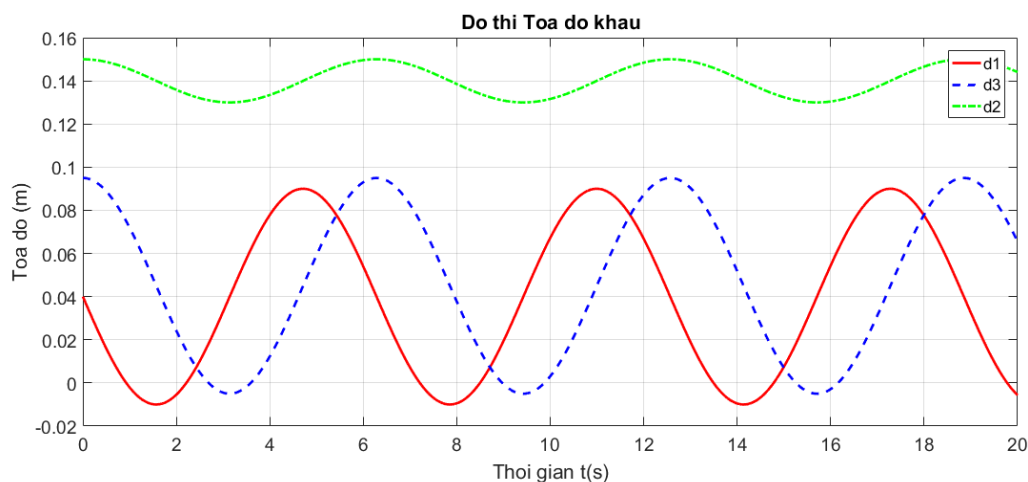
Triển khai (20) viết dưới dạng ma trận, ta được phương trình động lực học của máy in 3D như sau:

$$\begin{bmatrix} 0,05 \sin(t) \\ 0,05 \cos(t) \\ 0,01 \cos(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 - d_{x01} \\ d_3 - d_{y01} \\ d_2 - d_4 - d_{z01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,04 - d_1 \\ d_3 - 0,045 \\ d_2 - 0,14 \end{bmatrix} \quad (23)$$

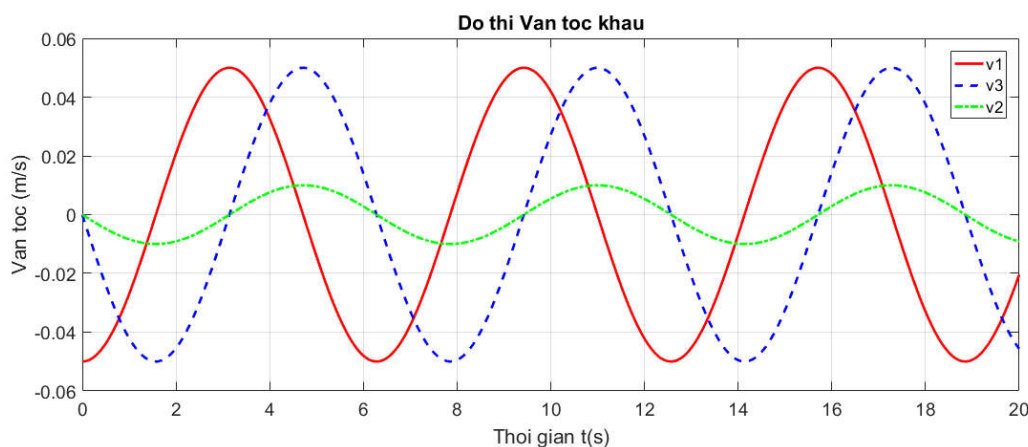
Suy ra:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_3 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,04 - 0,05 \sin(t) \\ 0,05 \cos(t) + 0,045 \\ 0,01 \cos(t) + 0,14 \end{bmatrix} \quad (24)$$

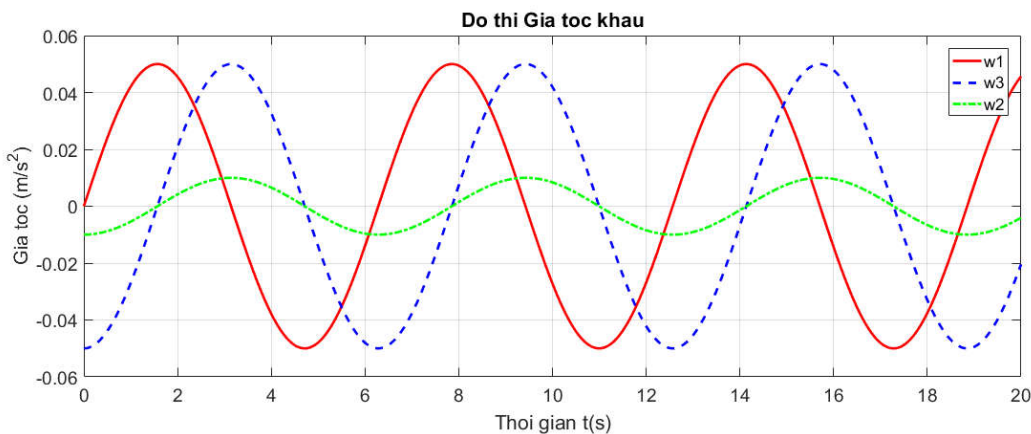
Triển khai biểu thức (24) bằng phần mềm Matlab thu được kết quả các giá trị về tọa độ suy rộng của các khâu khớp theo thời gian như trên hình 6; 7; 8.



Hình 6. Đồ thị tọa độ khâu theo thời gian



Hình 7. Đồ thị vận tốc khâu theo thời gian



Hình 8. Đồ thị gia tốc khâu theo thời gian

Qua các đồ thị hình 6, 7, 8 ta nhận thấy, quỹ đạo mong muốn là hàm điều hòa nên vận tốc, gia tốc của nó cũng là hàm điều hòa do vậy khi tính toán động học ta cũng nhận được chuyển động, vận tốc, gia tốc của các khâu cũng tuân theo hàm điều hòa. Ta nhận thấy rằng gia vận tốc và gia tốc của khâu 2 (chứa cả khâu 3) tương đối nhỏ, do trong quá trình in thì khoảng các các

lớp in theo thiết kế tương đối nhỏ 0,2 mm. Còn vận tốc và gia tốc của của khâu 1 và 3 lớn hơn vì chuyển động tạo hình chủ yếu dựa vào chuyển động của hai khâu này.

**3.3. Kết quả tính toán động lực học ngược**

Thông số của máy in 3D được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Các thông số của tay máy hai khâu đàn hồi

$m_A$	0,2 (kg)	Khối lượng tại đầu A
$m_1$	0,5 (kg)	Khối lượng thanh ngang AB
$m_B$	0,2 (kg)	Khối lượng đầu đùn
$m_C$	0,3 (kg)	Khối lượng bàn in
$g$	9,81 (m/s <sup>2</sup> )	Gia tốc trọng trường

Bàn in có kích thước 20 x 20 cm. Chiều cao in tối đa 30 cm.

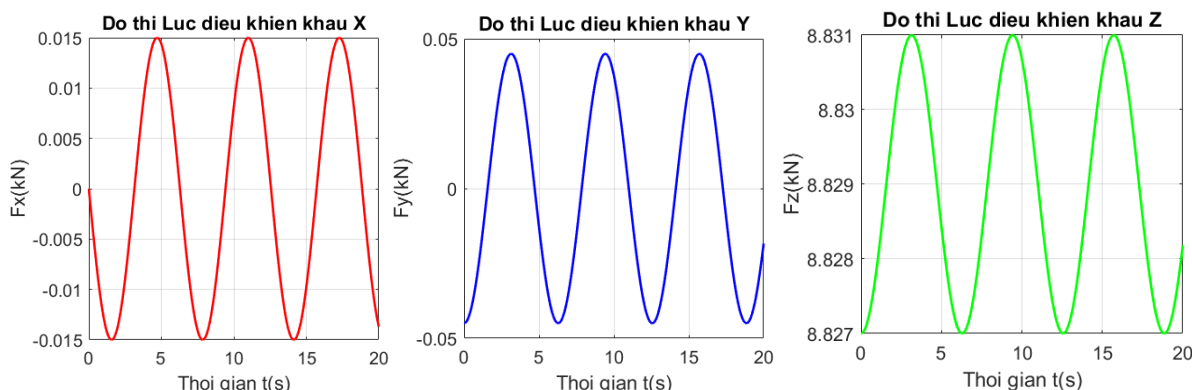
Bỏ qua cản tại các khâu, viết lại phương trình động lực học (21) dưới dạng tổng quát:

$$M(q)\ddot{q} + g(q) = \tau \tag{25}$$

Từ (24) tính các đạo hàm cấp 2 và thay các

đạo hàm cấp 2 vào (21), ta tính được các lực/mô men điều khiển cho các khâu để thực hiện các chuyển động mong muốn.

Thực hiện triển khai (25) trong phần mềm matlab ta được kết quả tính như hình 9.



Hình 9. Đồ thị lực điều khiển các khâu theo thời gian

Qua đồ thị thể hiện lực điều khiển tại các khâu trên hình 9, ta nhận thấy, khi cho các chuyển động là hàm điều hòa thì lực điều khiển cũng tuân theo quy luật của hàm điều hòa. Lực

điều khiển khâu 1 (khâu X) và khâu 3 (khâu Y) tương đối nhỏ do hai khâu này không chịu tác dụng của trọng lực trong quá trình chuyển động. Ngược lại, lực điều khiển tác dụng vào

khâu 2 (khâu Z) lớn hơn do khâu này chứa cả khâu 3 và chịu tác dụng của trọng lực.

#### 4. KẾT LUẬN

- Đối với khảo sát động học của máy in 3D, do các khâu đều chuyển động tịnh tiến và phương trình chuyển động mong muốn tuân theo hàm điều hòa nên các khâu cũng chuyển động theo hàm điều hòa. Vận tốc và gia tốc các khâu thay đổi theo chu kỳ do vị trí của chúng cũng thay đổi theo chu kỳ là 6s.

- Đối với khảo sát động lực học của máy in 3D, từ vị trí mong muốn thông qua phương trình động lực học ta tính được lực điều khiển tác động vào các khâu. Lực lớn nhất tác động vào khâu X là 0,015 kN, khâu Y là 0,045 kN và khâu Z là 8,831 kN. Lực này chủ yếu phụ thuộc vào gia tốc và khối lượng của khâu nên cũng sẽ tuân theo chu kỳ. Ta thấy gia tốc của khâu 1 và 3 lớn do cần sự dịch chuyển nhanh theo hai phương x và y nhưng do khối lượng khâu nhỏ nên lực sẽ nhỏ hơn. Còn khâu 2 chuyển động theo trục z, có gia tốc nhỏ do khoảng cách các lớp in nhỏ nhưng lực tác động vào lớn hơn hai khâu 1 và 3 do khối lượng khâu lớn (chứa cả khâu 3 – đầu đùn) và chịu tác động của trọng lực.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Samuel N. Bernier, Bertier Luyt, and Tatiana Reinhard, 2015, “*Design for 3D printing*”, published by Maker Media, Inc., 1160 Battery Street East, Suite 125, San Francisco.
2. James Floyd Kelly, 2013, *Build Your Own 3D Printer and Print Your Own 3D Objects*, published by Que Publishing, ISBN.
3. Asadi Aaron, 2015, *3D Make & Print Second Edition*, published by Imaging Publishing.
4. Nguyễn Cảnh Hà, Trần Văn Lân, Nguyễn Trọng Kha, Trần Minh Thế Uyên, 2016, *Thiết kế chế tạo máy in 3D sử dụng cơ cấu core-xy*, Đồ án tốt nghiệp Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh.
5. Phan Hà Nhật Tân và Nguyễn Phương, 2016, *Nghiên cứu và thi công máy in, scan 3D*, Đồ án tốt nghiệp, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh.
6. Nguyễn Vĩnh Hưng và Nguyễn Phi Long, 2016, *Thiết kế, thi công mô hình máy in 3D dùng Kit Arduino*, Đồ án tốt nghiệp, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh.
7. Liêu Chí Thắng, *Nghiên cứu chế tạo máy in 3D dạng SCARA*, 2016, Đồ án tốt nghiệp, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh.
8. Nguyễn Văn Khang, 2017, *Động lực học hệ nhiều vật*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.
9. Nguyễn Quang Hoàng, 2019, *Matlab và Simulink cho kỹ sư*, NXB Bách Khoa Hà Nội.
10. Nguyễn Văn Khang, Chu Anh Mỹ, 2011, *Cơ sở robot công nghiệp*, NXB Giáo dục Việt Nam.
11. Trần Văn Địch, 2004, *Công nghệ CNC*. NXB Khoa học và Kỹ thuật.

## BUILDING REVERSE DYNAMICS MODELS FOR MINI SIZE 3D FDM PRINTERS

Than Van Ngoc<sup>1\*</sup>, Nguyen Thi Luc<sup>1</sup>, Nguyen Dang Ninh<sup>1</sup>,  
 Nguyen Thanh Trung<sup>1</sup>, Dang Thi To Loan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vietnam National University of Forestry

### SUMMARY

The 3D printing technology industry and the use of 3D printers are increasing development including the variety and precision of products are increasingly enhanced. The FDM (Fused Deposition Molding) technology is widely developed with the advantages of a wide variety of materials, easy to find, non-toxic, simple in structure, easy to fabricate, to repair, and low in price. suitable for the market... Surveying the dynamics and dynamics of 3D printers using FDM printing technology, we can see that the motion of the stitches is the translational motion and the desired motion equation. obey the harmonic function, so the stages also move according to the harmonic function. Investigating the reverse dynamics of the 3D printer is from the desired position through the kinetic equation, we can calculate the force, the controlling torque on the stages. After the calculation and survey by Matlab software, we have the result that the largest force impacting on stage X is 0.015 kN, stitch Y is 0.045 kN and stitch Z is 8,831 kN. This force mainly depends on the acceleration and weight of the stitch so it will also follow the cycle.

**Keywords:** dynamic models, FDM 3D printer, inverse dynamic, modeling.

Ngày nhận bài : 20/9/2020  
 Ngày phản biện : 03/12/2020  
 Ngày quyết định đăng : 14/12/2020