

Mô hình hóa và điều khiển dựa trên động lực học ngược tay máy phẳng hai khâu đàn hồi

Modeling and inverse dynamic based control of a two-link flexible planar manipulator

Nguyễn Quang Hoàng^{1,*}, Trương Quốc Chiến¹, Đinh Công Đạt^{1,2,*}, Thân Văn Ngọc^{1,3}

¹*Viện Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội*

²*Khoa Khoa Học Cơ Bản, Trường Đại học Mỏ - Địa chất*

³*Khoa Cơ Điện Công Trình, Trường Đại học Lâm Nghiệp*

Email: hoang.nguyenquang@hust.edu.vn; dinhcongdat@hung.edu.vn

Tóm tắt

Từ khóa:

Mô hình hóa; Phương pháp phần tử hữu hạn; Điều khiển chuyển động; Tay máy đàn hồi; Mô phỏng số.

Vì lý do tiết kiệm vật liệu và giảm thời gian tăng tốc, các tay máy robot ngày càng được thiết kế mảnh hơn và do đó tính đàn hồi của các khâu là không thể bỏ qua trong việc khảo sát động lực học và thiết kế bộ điều khiển chuyển động. Do biến dạng của khâu khi chuyển động nên bài toán điều khiển chuyển động trở nên phức tạp và khó đảm bảo để điểu cuối bám theo quỹ đạo mong muốn. Bài báo này trình bày việc mô hình hóa tay máy phẳng có khâu đàn hồi bằng phương pháp phần tử hữu hạn và phương trình Lagrange loại 2. Trên cơ sở phương trình vi phân chuyển động nhận được, các bộ điều khiển PD cho bài toán vị trí và bộ điều khiển dựa trên động lực học ngược tay máy rắn cho bài toán điều khiển quỹ đạo được thiết kế. Các mô phỏng số được thực hiện đối với tay máy phẳng để minh họa cho thuật giải đề xuất.

Abstract

Keywords:

Modeling; Finite element method; Motion control; Flexible robot manipulators; Numerical simulation.

Due to material savings and acceleration time reducing, robot manipulators are designed to be slender. Therefore, the elasticity of links couldn't be neglected in dynamic analysis and control design. Due to the elastic deformation of links, the motion control problem becomes complicated and it is difficult to ensure that the end-effector follows the desired trajectory. This paper presents the modeling of flexible manipulators by finite element methods and the Lagrangian formulation. Based on equations of motion, a PD controller and controller based on inverse dynamics of rigid manipulator for a flexible manipulator are designed. Numerical simulations are implemented for a two degree of freedom flexible planar manipulator to illustrate the proposed algorithm.

Ngày nhận bài: 30/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 14/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, tay máy robot được sử dụng rộng rãi trong hầu hết các lĩnh vực công nghiệp, y tế, hàng không... Để bỏ qua biến dạng đàn hồi, tay máy robot truyền thống được thiết kế có độ cứng cao, do đó có thể được mô hình như hệ các vật rắn tuyệt đối được liên kết bởi các khớp quay hoặc khớp tịnh tiến để thuận tiện cho việc điều khiển hệ thống. Để tăng độ cứng tay máy, các nhà chế tạo thường tăng kích thước. Điều này làm tăng khối lượng của các khâu và do đó làm tăng kích thước của các cơ cấu dẫn và truyền động, và dẫn tới tăng lượng tiêu thụ năng lượng cho robot. Việc chế tạo tay máy robot nhẹ và mạnh hơn có chi phí vật liệu và năng lượng thấp hơn, nhưng việc giảm khối lượng khâu sẽ dẫn đến việc giảm độ cứng của khâu. Khi đó, các tay máy trở nên dễ biến dạng hơn và khó khăn hơn để điều khiển chính xác. Bởi vậy, đối với bài toán động lực học ngược và điều khiển robot có các khâu mảnh, nhẹ hoặc các cơ cấu chuyển động với vận tốc và gia tốc lớn, cũng như tải trọng làm việc lớn, tính chất đàn hồi của khâu là không thể bỏ qua. Loại tay máy đàn hồi này thường được ứng dụng trong các lĩnh vực như thám hiểm không gian, tự động hóa sản xuất, xây dựng, mỏ, nơi mà đòi hỏi tay máy có khối lượng nhỏ và không gian làm việc lớn.

Việc nghiên cứu tay máy đàn hồi đã thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học trong khoảng ba thập niên gần đây. Đã có rất nhiều công trình nghiên cứu về động lực học và điều khiển tay máy có khâu đàn hồi. Các công trình này được tổng hợp trong các bài nghiên cứu tổng quan như [1-4, 12, 13]. Nhìn chung các công trình tập trung vào việc mô hình hóa và thiết kế điều khiển cho tay máy đàn hồi. Trong đó năm phương pháp chính được sử dụng để mô hình hóa khâu đàn hồi, bao gồm: 1. phương pháp tham số tập trung (lumped parameter method, LPM) [15], 2. phương pháp sai phân hữu hạn (finite difference method, FDM), 3. phương pháp khai triển theo các hàm riêng giả định hay phương pháp Ritz-Galerkin (Assumed mode method, AMM) [9, 10, 11], 4. phương pháp phần tử hữu hạn (finite difference method, FEM) [14, 16], 5. phương pháp phần tử hữu hạn rắn (rigid finite element method, RFEM) hay còn gọi là phương pháp hệ nhiều vật rắn (Multibody System, MBS) [19]. Mỗi phương pháp đều có những ưu nhược điểm, với phương pháp sai phân hữu hạn các đạo hàm riêng theo biến không gian được thay thế bằng các công thức sai phân. Khó khăn của phương pháp tham số tập trung là việc xác định các thông số của bộ lò xo và cản nhớt tương đương. Đối với phương pháp Ritz-Galerkin ta cần phải xác định được các hàm riêng giả định, thường mô hình khâu bằng phần tử dầm hai đầu bản lề hoặc một đầu ngàm một đầu tự do. Trái lại, với phương pháp phần tử hữu hạn các hàm dáng được cho trước với toàn bộ lớp bài toán đưa về mô hình dầm Euler - Bernoulli.

Bên cạnh việc mô hình hóa, các luật điều khiển vị trí và quỹ đạo của các khâu cũng được quan tâm nghiên cứu. Rất nhiều luật điều khiển từ tuyến tính, phi tuyến, bền vững, thích nghi, logic mờ, sử dụng mạng nơ ron,... đã được thiết lập và áp dụng đối với tay máy đàn hồi [7, 8-10, 18, 19].

Trong bài báo này, phương pháp phần tử hữu hạn và phương trình Lagrange loại 2 được sử dụng để xây dựng mô hình động lực cho tay máy phẳng dạng chuỗi có hai khớp tịnh tiến và quay với các khâu đàn hồi. Trên cơ sở phương trình vi phân chuyển động nhận được, cho phép thiết kế bộ điều khiển PD cho bài toán vị trí và bộ điều khiển dựa trên động lực học ngược tay máy rắn cho bài toán điều khiển quỹ đạo. Bố cục của bài báo gồm 5 phần: phần 1 tổng quan, phần 2 trình bày việc áp dụng phương pháp FEM vào việc xây dựng phương trình vi phân chuyển động cho hệ tay máy phẳng hai khâu. Phần 3 trình bày hai luật điều khiển đơn giản cho hai loại nhiệm vụ khác nhau. Phần 4 trình bày các kết quả mô phỏng số của hai luật điều khiển chuyển động. Cuối cùng là phần kết luận.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC TAY MÁY ĐÀN HỒI HAI KHÂU

2.1. Mô hình động lực học cho tay máy bằng các phần tử hữu hạn

Phương trình vi phân chuyển động của tay máy chuỗi đàn hồi được thiết lập bằng phương pháp FEM và phương trình Lagrange loại 2 có dạng ma trận như sau

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{B}\boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

với $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_r^T, \mathbf{q}_f^T]^T$ là véc tơ tọa độ suy rộng chứa tọa độ suy rộng rắn và tọa độ suy rộng đàn hồi, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ là ma trận khối lượng suy rộng, \mathbf{K} là ma trận độ cứng suy rộng, \mathbf{D} là ma trận cản, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ là ma trận Côriôlis và ly tâm, $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ là ma trận lực suy rộng do trọng lực. Chi tiết về việc xây dựng phương trình này có thể tham khảo trong các tài liệu [1, 17, 20, 21].

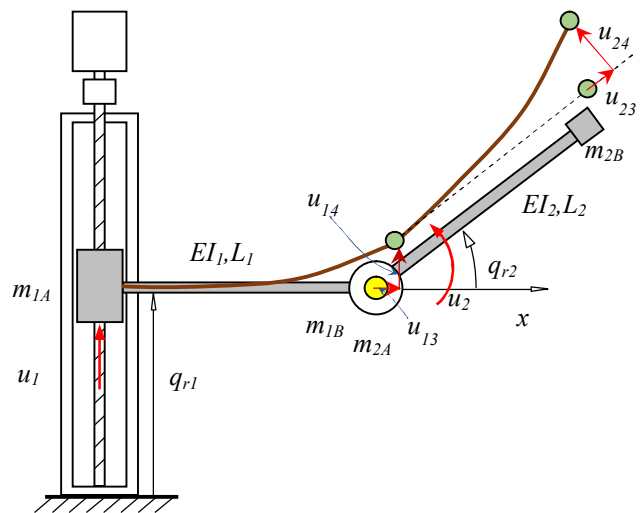
2.2. Phương trình vi phân chuyển động của tay máy đàn hồi T-R

Xét tay máy hai khâu đàn hồi có các khớp tịnh tiến và quay như trên Hình 1. Thông số của các khâu được cho trong bảng 1. Thông qua một số kết quả trong [20], [22] ta thấy khi lấy số phần tử của một khâu là 1, 2, 3, 4 dẫn đến kết quả không khác biệt nhiều nhưng khối lượng tính toán tăng đáng kể, vậy trong bài này ta sử dụng mô hình một phần tử cho mỗi khâu. Các tọa độ suy rộng cho các khâu là

$$\mathbf{q}_1 = [q_{r1}, u_{13}, u_{14}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{q}_2 = [y_{O2}, \theta_2, u_{23}, u_{24}]^T, \quad (3)$$

$$y_{O2} = q_{r1} + u_{13}, \theta_2 = q_{r2} + u_{14}$$



Hình 1. Tay máy 2 khâu T-R

Và tọa độ suy rộng chung cho cả tay máy như sau

$$\mathbf{q} = [q_{r1} \quad q_{r2} \quad u_{13} \quad u_{14} \quad u_{23} \quad u_{24}]^T \quad (4)$$

Trong đó $u_{13}, u_{14}, u_{23}, u_{24}$ lần lượt là biến dạng dài và uốn tại điểm cuối thanh 1 và 2.

Bảng 1. Các thông số của tay máy hai khâu đàn hồi

Thông số	Khâu 1	Khâu 2
$\rho = 8000$ (kg/m ³);	$L_1 = 0,5$ (m); $N_1 = 1$;	$L_2 = 0,40$ (m); $N_2 = 1$;
$b = 0,02$ (m);	$m_1 = \rho \cdot A \cdot L_1$ (kg);	$m_2 = \rho \cdot A \cdot L_2$ (kg);
$h = 0,005$ (m);	$m_{e1} = m_1/N_1$ (kg);	$m_{2A} = 0,05 \cdot m_2$ (kg);
$A = b \cdot h$ (m ²);	$m_{1A} = 0,05 \cdot m_1$ (kg);	$m_{e2} = m_2/N_2$ (kg);
$E = 2 \times 10^{10}$ (N/m ²);	$m_{1B} = 0,05 \cdot m_1$ (kg);	$m_{2B} = 0,05 \cdot m_2$ (kg);
Hệ số cản tại hai khớp:	$I_{1A} = 0,0001$ (m ⁴);	$I_{2A} = 0,0001$ (m ⁴);
$d1 = 0,10, d2 = 0,10$;	$I_{1B} = 0,0001$ (m ⁴);	$I_{2B} = 0,0001$ (m ⁴);
Hệ số cản Rayleigh	$L_{1e} = L_1/N_1$ (m);	$L_{2e} = L_2/N_2$ (m);
$\delta = 0,0005$;	$I_1 = b \cdot h^3/12$ (m ⁴);	$I_2 = b \cdot h^3/12$ (m ⁴);
$Damp = \delta \cdot K$;	$E_{I1} = E \cdot I_1$ (N, m ²)	$E_{I2} = E \cdot I_2$ (N, m ²);

Sử dụng phần mềm Maple ta nhận được các ma trận khối lượng và độ cứng cho từng khâu của tay máy như sau:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} m_{1e} + m_{1A} + m_{1B} & \frac{1}{2} m_{1e} + m_{1B} & -\frac{1}{12} m_{1e} l_{1e} \\ & \frac{13}{35} m_{1e} + m_{1B} & -\frac{11}{210} m_{1e} l_{1e} \\ dx & & \frac{1}{105} m_{1e} l_{1e}^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_1 = \frac{EI_1}{l_{1e}^3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & -6l_{1e} \\ 0 & -6l_{1e} & 4l_{1e}^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Ma trận khối lượng \mathbf{M}_2 cỡ 4x4 đối xứng có các phần tử nửa tam giác trên như sau:

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} m_{2e} + m_{2A} & \left(\frac{m_{2e}}{2} + m_{2B}\right) l_{2e} \cos(q_2) & \left(\frac{m_{2e}}{2} + m_{2B}\right) \cos(q_2) & -\frac{m_{2e} l_{2e}}{12} \cos(q_2) \\ +m_{2B} & (1/3)m_{2e} l_{2e}^2 + I_{2A} & \frac{7}{20} m_{2e} l_{2e} + m_{2B} l_{2e} & -\frac{m_{2e} l_{2e}^2}{20} + I_{2B} \\ & +m_{2B} l_{2e}^2 + I_{1B} & \frac{13m_{2e}}{35} + m_{2B} & -\frac{11m_{2e} l_{2e}}{210} \\ dx & & & \frac{m_{2e} l_{2e}^2}{105} + I_{2B} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_2 = \frac{EI_2}{l_{2e}^3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12 & -6l_{2e} \\ 0 & 0 & -6l_{2e} & 4l_{2e}^2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Với khối lượng và chiều dài phần tử là $m_{1e} = m_1 / N_1$, $l_{1e} = L_1 / N_1$, $l = 1, 2$.

Ghép nối các ma trận khối lượng và độ cứng các khâu lại ta thu được ma trận khối lượng $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ và ma trận độ cứng \mathbf{K} của cả hệ cỡ 6x6 dạng đối xứng với các phần tử:

$$M_{11} = m_{1e} + m_{1A} + m_{1B} + m_{2e} + m_{2A} + m_{2B};$$

$$M_{12} = \frac{1}{2} m_{2e} l_{2e} \cos(q_{r2} + u_{14}) + m_{2B} l_{2e} \cos(q_{r2} + u_{14})$$

$$M_{13} = \frac{m_{1e}}{2} + m_{1B} + m_{2e} + m_{2A} + m_{2B}$$

$$M_{14} = -\frac{m_{1e} l_{1e}}{12} + \frac{m_{2e} l_{2e} \cos(q_{r2} + u_{14})}{2} + m_{2B} l_{2e} \cos(q_{r2} + u_{14});$$

$$M_{15} = \frac{m_{2e} \cos(q_{r2} + u_{14})}{2} + m_{2B} \cos(q_{r2} + u_{14}); \quad M_{16} = -\frac{m_{2e} l_{2e} \cos(q_{r2} + u_{14})}{12}$$

$$M_{22} = \frac{m_{2e} l_{2e}^2}{3} + I_{2A} + l_{2e}^2 m_{2B} + I_{2B}; \quad M_{23} = \frac{m_{2e} l_{2e} \cos(q_{r2} + u_{14})}{2} + m_{2B} \cos(q_{r2} + u_{14}) l_{2e}$$

$$M_{24} = \frac{m_{2e} l_{2e}^2}{3} + I_{2A} + l_{2e}^2 m_{2B} + I_{2B}; \quad M_{25} = \frac{7(m_{2e} l_{2e} + l_{2e} m_{2B})}{20}; \quad M_{26} = -\frac{m_{2e} l_{2e}^2}{20} + I_{2B}$$

$$\begin{aligned}
 M_{33} &= \frac{13m_{1e}}{35} + m_{1B} + m_{2e} + m_{2A} + m_{2B} \\
 M_{34} &= -\frac{11m_{1e}l_{1e}}{210} + \frac{m_{2e}l_{2e}\cos(q_{r2} + u_{14})}{2} + m_{2B}\cos(q_{r2} + u_{14})l_{2e} \\
 M_{35} &= \frac{m_{2e}\cos(q_{r2} + u_{14})}{2} + m_{2B}\cos(q_{r2} + u_{14}) ; M_{36} = -\frac{m_{2e}l_{2e}\cos(q_{r2} + u_{14})}{12} \\
 M_{44} &= \frac{m_{1e}(l_{1e}^2)}{105} + I_{1B} + \frac{m_{2e}(l_{2e}^3)}{3} + I_{2A} + l_{2e}^2m_{2B} + I_{2B} ; M_{45} = \frac{7m_{2e}l_{2e}}{20} + m_{2B}l_{2e} \\
 M_{46} &= -\frac{m_{2e}l_{2e}^2}{20} + I_{2B} ; M_{55} = \frac{13m_{2e}}{35} + m_{2B} ; M_{56} = -\frac{11m_{2e}l_{2e}}{210} ; M_{66} = \frac{m_{2e}l_{2e}^2}{105} + I_{2B}
 \end{aligned}$$

Ma trận độ cứng tổng thể có dạng

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12I_1E_1}{l_{1e}^3} & \frac{-6I_1E_1}{l_{1e}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6I_1E_1}{l_{1e}^2} & \frac{4I_1E_1}{l_{1e}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12I_2E_2}{l_{2e}^3} & \frac{-6I_2E_2}{l_{2e}^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-6I_2E_2}{l_{2e}^2} & \frac{4I_2E_2}{l_{2e}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ma trận Coriolis và ly tâm $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ được xác định từ ma trận khối lượng $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ theo công thức Christoffel [22] hoặc sử dụng tích Kronecker [6]. Bỏ qua cản trong của vật liệu khâu, ma trận cản \mathbf{D} có được do cản nhớt tại các khớp dẫn động. Véc tơ lực suy rộng $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ có được từ biểu thức thế năng do trọng lực, $\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{0}$ khi tay máy chuyển động trong mặt phẳng ngang.

3. ĐIỀU KHIỂN TAY MÁY CÓ KHẤU ĐÀN HỒI

Nhiệm vụ của bài toán điều khiển tay máy đàn hồi là đưa ra qui luật lực/mô men dẫn động tác dụng làm cho điểm cuối của tay máy đạt đến vị trí mong muốn hay quỹ đạo mong muốn với độ chính xác càng cao càng tốt. So với điều khiển tay máy cứng, việc điều khiển tay máy đàn hồi gặp nhiều khó khăn hơn, bởi vì trong quá trình chuyển động các khâu của tay máy thường bị kích thích dao động do tính đàn hồi của nó. Ở đây ta xét bài toán điều khiển tay máy trong không gian khớp. Hai bài toán được đặt ra ở đây: 1. điều khiển vị trí $\mathbf{q}_r \rightarrow \mathbf{q}_{r,d} = const$; 2. điều khiển bám quỹ đạo $\mathbf{q}_r(t) \rightarrow \mathbf{q}_{r,d}(t)$.

3.1 Điều khiển vị trí: điều khiển PD

Luật điều khiển PD+ bù trọng lực được áp dụng đối với tay máy như sau:

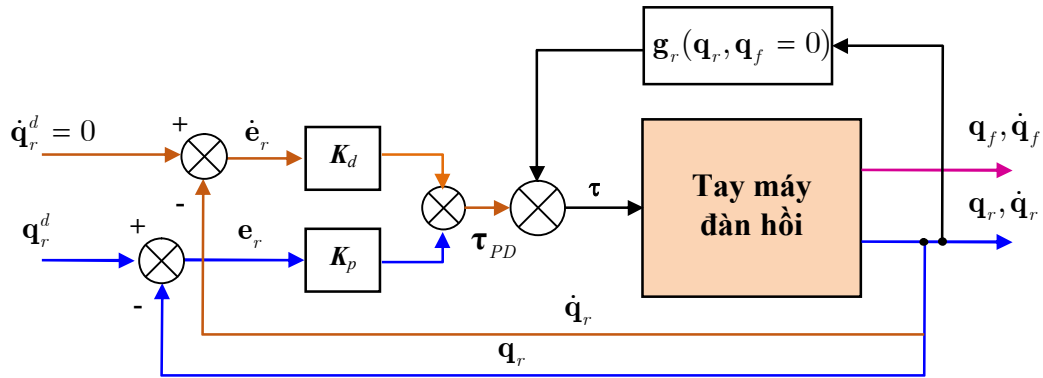
$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_{r,d} - \mathbf{q}_r) + \mathbf{K}_d(\mathbf{0} - \dot{\mathbf{q}}_r) + \mathbf{g}_r(\mathbf{q}_r, \mathbf{q}_f = 0)$$

với các ma trận vuông $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_d > 0$ có cỡ bằng số khớp của tay máy. Tính ổn định của hệ được khảo sát nhờ hàm trữ năng sau

$$V = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + \Pi(\mathbf{q}) + \frac{1}{2} (\mathbf{q}_{r,d} - \mathbf{q}_r)^T \mathbf{K}_p (\mathbf{q}_{r,d} - \mathbf{q}_r)$$

Lưu ý rằng $\partial \Pi / \partial \mathbf{q} = \mathbf{K}\mathbf{q} + \mathbf{g}(\mathbf{q})$. Đạo hàm V theo thời gian và sử dụng tính chất phản đối xứng của ma trận $[\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})]$, ta được $\dot{V} = -\dot{\mathbf{q}}_r^T (\mathbf{D}_r + \mathbf{K}_d) \dot{\mathbf{q}}_r \leq 0$.

Sơ đồ khối của điều khiển PD được thể hiện như trên hình 2.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển PD + bù trọng lực

3.2. Điều khiển PD tăng cường dựa trên mô hình động lực tay máy rắn

Giả sử rằng biến dạng của các khâu là nhỏ, do đó ta có thể sử dụng mô hình động lực ngược tay máy rắn là cơ sở để tính lực/mô men dẫn động. Theo đó ứng với chuyển động cho trước của các khớp $\mathbf{q}_r^d(t)$ ta xác định được lực/mô men như sau:

$$\boldsymbol{\tau}_r^d(t) = \mathbf{M}_r(\mathbf{q}_r^d) \ddot{\mathbf{q}}_r^d + \mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r^d, \dot{\mathbf{q}}_r^d) \dot{\mathbf{q}}_r^d + \mathbf{D}_r \dot{\mathbf{q}}_r^d + \mathbf{g}_r(\mathbf{q}_r^d). \quad (9)$$

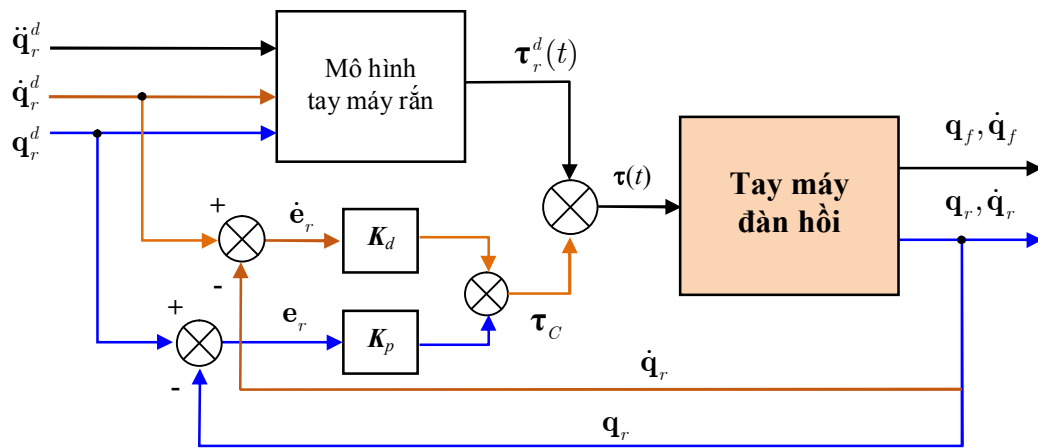
Đề khâu dẫn của tay máy đàn hồi chuyển động bám theo luật chuyển động đề ra và có thể làm giảm dao động của tay máy, ở đây đề xuất thêm một mô men điều khiển tăng cường dạng PD như sau:

$$\boldsymbol{\tau}_C = \mathbf{K}_p \mathbf{e}_r + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}_r, \text{ với } \mathbf{e}_r = \mathbf{q}_r^d - \mathbf{q}_r \quad (10)$$

Như thế mô men tác dụng lên cơ cấu đàn hồi sẽ là

$$\boldsymbol{\tau}_a = \boldsymbol{\tau}_r^d(t) + \boldsymbol{\tau}_C = \boldsymbol{\tau}_r^d(t) + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_r + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}_r, \quad (11)$$

với $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_d$ là các ma trận xác định dương cỡ $n \times n$. Sơ đồ khối của điều khiển dựa trên động lực học ngược tay máy rắn được thể hiện như trên hình 3. Theo sơ đồ điều khiển này, ta không phải đo chuyển động do biến dạng.



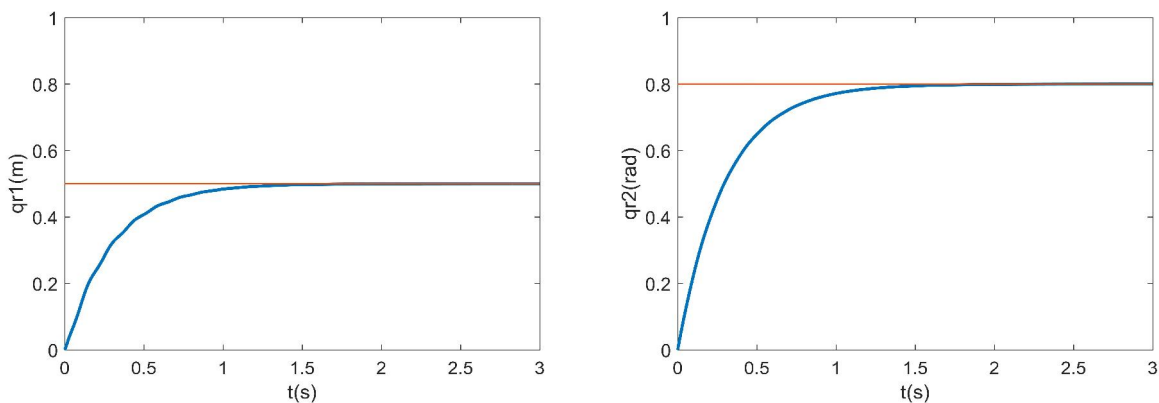
Hình 3. Sơ đồ điều khiển dựa vào động lực học ngược + PD tăng cường

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

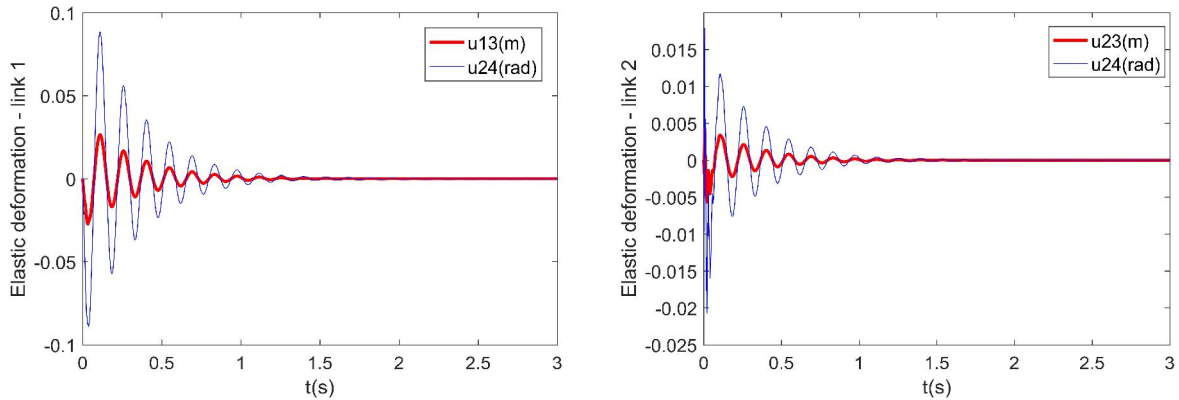
4.1. Mô phỏng số bài toán điều khiển vị trí

Thực hiện triển khai sơ đồ điều khiển PD + bù trọng lực (hình 2) trong Matlab/simulink với các thông số tay máy đàn hồi như trong bảng 1. Mục tiêu là muốn điểm cuối di chuyển đến vị trí mong muốn $\mathbf{r}_E = [0.7787, 0.7869]^T$. Điều kiện đầu của các tọa độ suy rộng được chọn $\mathbf{q}_r(0) = [0, 0]^T$, $\mathbf{q}_f(0) = [0, 0, 0, 0]^T$.

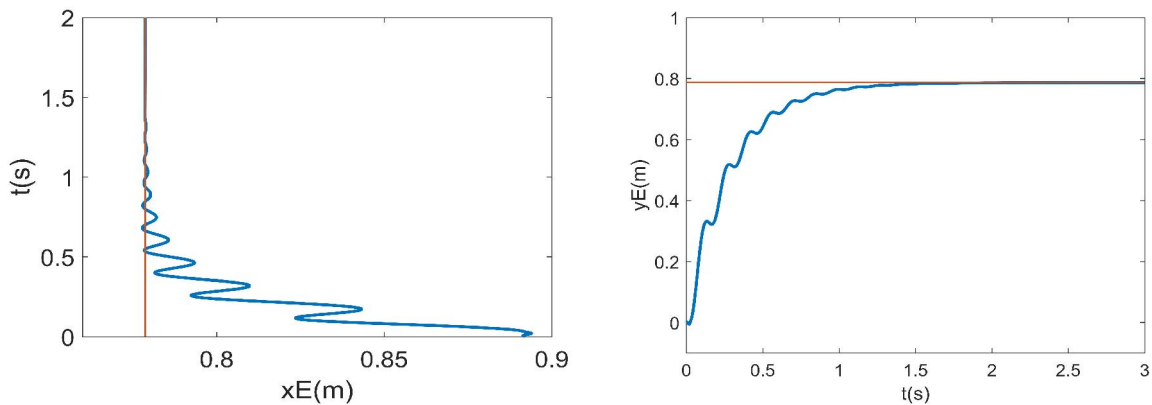
Các thông số của bộ điều khiển được chọn: $\mathbf{K}_p = 400 * \text{diag}([1, 1])$, $\mathbf{K}_d = 120 * \text{diag}([1, 1])$. Thực hiện mô phỏng trên phần mềm MATLAB, kết quả mô phỏng số trong trường hợp này được đưa ra trên các hình 4 đến 6.



Hình 4. Đồ thị tọa độ khớp rắn theo thời gian



Hình 5. Đồ thị biến dạng uốn và biến dạng góc của mặt cắt ngang cuối mỗi khâu theo thời gian



Hình 6. Đồ thị tọa độ điểm cuối theo thời gian

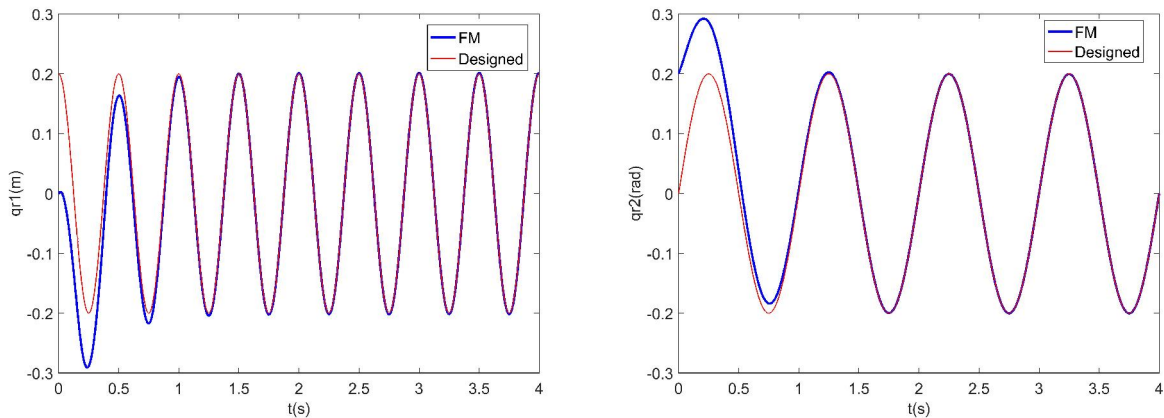
Nhận xét: Chuyển động của tọa độ khớp tương đối trơn tru và đạt đến vị trí mong muốn sau khoảng 1,5(s). Đồ thị hình 6 cho thấy điểm tác động cuối tiệm cận và đạt đến vị trí mong muốn. Tuy nhiên, do có chuyển động biến dạng nên trong quá trình chuyển động dao động trong hệ xuất hiện nhưng tắt dần. Từ kết quả này có thể thấy rằng với bộ điều khiển PD vị trí mong muốn của điểm cuối có thể đạt được.

4.2. Mô phỏng số bài toán điều khiển quỹ đạo

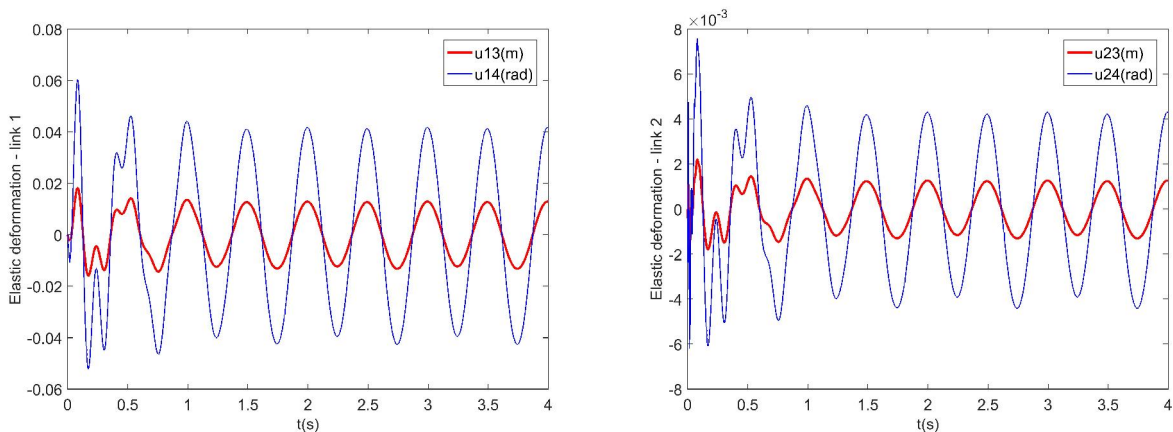
Thực hiện triển khai sơ đồ điều khiển dựa trên động lực học ngược tay máy rắn + PD tăng cường (hình 3) trong Matlab/simulink. Mục tiêu là muốn tọa độ khớp chủ động \mathbf{q}_r chuyển động theo qui luật mong muốn cho bởi các hàm liên tục theo thời gian

$$\mathbf{q}_r(t) = [0, 2 \sin(4\pi t + \pi / 2), 0, 2 \sin(2\pi t)]^T.$$

Các thông số của bộ điều khiển được chọn: $\mathbf{K}_p = 400 * \text{diag}([1,1])$, $\mathbf{K}_d = 120 * \text{diag}([1,1])$. Điều kiện đầu của các tọa độ suy rộng được chọn $\mathbf{q}_r(0) = [0, 0, 2]^T$, $\dot{\mathbf{q}}_r(0) = [0, 0, 0]^T$. Thực hiện mô phỏng trên phần mềm MATLAB, kết quả mô phỏng số trong trường hợp này được đưa ra trên các hình 7 và 8.



Hình 7. Đồ thị tọa độ khớp rắn theo thời gian



Hình 8. Đồ thị biến dạng uốn và biến dạng góc của mặt cắt ngang cuối mỗi khâu theo thời gian

Nhận xét: Các đồ thị $q_{r1}(t)$ và $q_{r2}(t)$ trên hình 7 cho thấy rằng các chuyển động cho trước của khớp dẫn được điều khiển bám theo chuyển động mong muốn sau thời gian khoảng 1(s). Khi chuyển động của các khớp dẫn bám theo chuyển động mong muốn thì chuyển động đàn hồi xuất hiện như một dao động bình ổn. Hiện tượng này là do chuyển động đặt cho các khớp là chuyển động tuần hoàn.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày mô hình động lực của tay máy phẳng hai khớp tịnh tiến và quay (T-R) có khâu đàn hồi. Phương trình vi phân chuyển động của tay máy đàn hồi có dạng tương tự như tay máy toàn khâu rắn. Từ các phương trình vi phân chuyển động này đáp ứng của hệ được mô phỏng bằng Matlab/simulink với hai bộ điều khiển: PD cho điều khiển vị trí và PD kết hợp với động lực học ngược tay máy cứng. Các kết quả mô phỏng cho thấy với bài toán điều khiển vị trí, bộ điều khiển truyền thống PD có thể đáp ứng được. Tuy nhiên, thời gian để dao động tắt còn tương đối lớn. Với bài toán điều khiển bám quỹ đạo, trong bài báo mới chỉ áp dụng đối với trường hợp cho trước chuyển động của khớp dẫn. Bài toán điều khiển bám quỹ đạo trong không gian thao tác sẽ được quan tâm trong thời gian tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ahmed A. Shabana (1997): *Flexible Multibody Dynamics: Review of Past and Recent Developments*. Multibody System Dynamics 1: 189–222.
- [2]. Santosha Kumar Dwivedy and Peter Eberhard (2006): *Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review*. Mechanism and Machine Theory 41 749–777.
- [3]. K. Lochan, B.K. Roy, B. Subudhi (2016): *A review on two-link flexible manipulators*. Annual Reviews in Control, Volume 42, Pages 346-367.
- [4]. Yanqing Gao, Fei-Yue Wang, Zhi-Quan Zhao (2012): *Flexible Manipulators: Modeling, Analysis and Optimum Design*, Academic Press.
- [5]. Nguyen Van Khang (2007): *Dynamics of Multibody Systems (in Vietnamese)*. Science and Technics Publishing House, Hanoi.
- [6]. Nguyen Van Khang (2011): *Kronecker product and a new matrix form of Lagrangian equations with multipliers for constrained multibody systems*. Mechanics Research Communications 38, 294-29.
- [7]. Zhi-Cheng Qiu (2012) *Adaptive nonlinear vibration control of a Cartesian flexible manipulator driven by a ballscrew mechanism*. Mechanical Systems and Signal Processing, **30**, pp. 248–266.
- [8]. Dadfarnia, M., Jalili N., Xian B., Dawson D. M. (2004): *Lyapunov-Based Vibration Control of Translational Euler-Bernoulli Beams Using the Stabilizing Effect of Beam Damping Mechanisms*. Journal of Vibration and Control, **10**, pp. 933–961.
- [9]. Benosman M., Le Vey G. (2002) *Joint trajectory tracking for planar multi-link flexible manipulator*. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Washington D.C., pp. 2461–2466.
- [10]. Yang H., Krishnan H., Ang Jr. M. (1997): *A simple rest-to-rest control command for a flexible link robot*. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Albuquerque. New Mexico, pp. 3312–3317.
- [11]. Benosman M., Le Vey G., Lanari L., De Luca A. (2001): *Rest-to-Rest Motion for Planar Multi-Link Flexible Manipulator Through Backward Recursion*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, **126**(1), pp. 115-123.
- [12]. R. E. Valembois, P. Fiset, and J. C. Samin (1997): *Comparison of Various Techniques for Modelling Flexible Beams in Multibody Dynamics*. Nonlinear Dynamics 12: 367–397.
- [13]. Tamer M Wasfy and Ahmed K Noor (2003): *Computational strategies for flexible multibody systems*. Appl Mech Rev vol 56, no 6, pp.533-613.
- [14]. Javier García de Jalón, Eduardo Bayo (1994): *Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems, The Real-Time Challenge*. Springer-Verlag New York, Inc.
- [15]. Sang-Myeong Kim (2015): *Lumped Element Modeling of a Flexible Manipulator System*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, VOL. 20, NO. 2, 967-974.
- [16]. Usoro, P.B., Nadira, R., and Mahil, S.S. (1986). *A Finite Element/Lagrange Approach to Modeling Lightweight Flexible Manipulators*. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 108: 198-205.

- [17]. Seifried, R. (2014): *Dynamics of Underactuated Multibody Systems - Modeling, Control and Optimal Design*. Solid Mechanics and Its Applications, Vol. 205, Springer.
- [18]. Lammerts, I. M. M. (1993). *Adaptive computed reference computed torque control of flexible manipulators*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, DOI: 10.6100/IR402510..
- [19]. Yuangang Tang, Fuchun Sun, Zengqi Sun (2006): *Neural network control of flexible-link manipulators using sliding mode*. Neurocomputing 70, 288–295.
- [20]. Hoang. N. Q., (2017). *Ảnh hưởng của luật chuyển động đến mô men dẫn động và dao động của tay máy có khâu đàn hồi*. Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Tập 2 Động lực học và điều khiển, Hà Nội.
- [21]. Ahmed A. Shabana: *Dynamics of Multibody Systems*. Cambridge University Press 2005.
- [22]. L. Sciavicco and B. Siciliano(2012). *Modelling and control of robot manipulators*. Springer Science & Business Media, 2012.