

ĐIỀU KHIỂN LỰC TƯƠNG TÁC CHO ROBOT SONG SONG DẪN ĐỘNG DÂY CÁP SỬ DỤNG CẤU TRÚC VÒNG PHẢN HỒI KÉP

Nguyễn Thanh Hải
Trường Đại học Thủy lợi, email: nthai@tlu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

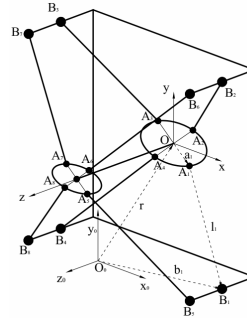
Robot song song dẫn động dây cáp (Cable-driven parallel robots) thuộc dạng robot song song, trong đó, các khâu, khớp cứng được thay thế bằng dây cáp để dẫn động cho khâu thao tác. Việc thay thế các khâu, khớp cứng bằng dây cáp mang lại nhiều ưu điểm như không gian làm việc lớn, kết cấu đơn giản, tỷ lệ tải trọng/khối lượng của robot cao, và khả năng thay đổi cấu hình của robot là rất tốt. Loại robot này đã được áp dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như nâng chuyển, cứu hộ cứu nạn... Tuy nhiên, số lượng các nghiên cứu về nhóm robot này trong các ứng dụng yêu cầu điều khiển lực tương tác với môi trường còn rất ít [1].

Trong nghiên cứu này, cấu trúc điều khiển vòng phản hồi kép (double-loop control) được sử dụng để điều khiển đồng thời vị trí và lực tiếp xúc của khâu thao tác của robot song song dẫn động dây cáp. Cụ thể, vòng điều khiển ngoài điều chỉnh giá trị quỹ đạo mong muốn ban đầu để đảm bảo lực tương tác, dựa trên sai số lực tương tác. Vòng điều khiển trong điều khiển robot bám theo quỹ đạo mong muốn mới.

Với việc kết hợp hai vòng điều khiển, vòng điều khiển lực và vòng điều khiển vị trí, ta có thể điều khiển giá trị lực tương tác theo một phương nhất định, đồng thời điều khiển vị trí và hướng của robot theo những phương còn lại. Đây là yêu cầu thiết yếu trong các ứng dụng như gia công, lắp ráp hay bảo dưỡng các cấu trúc lớn như tàu biển, tòa nhà cao tầng...

2. MÔ HÌNH ROBOT SONG SONG DẪN ĐỘNG DÂY CÁP

Mô hình robot song song dẫn động dây cáp được sử dụng trong nghiên cứu này sử dụng 8 dây, thuộc cấu hình dư dẫn động. Sơ đồ động học của robot và các hệ trục tọa độ được thể hiện trong Hình 1. Các điểm treo cố định, B_i , thường được đặt xung quanh không gian làm việc của robot. Các điểm treo này được nối với các điểm treo trên khâu thao tác, A_i , bằng các dây cáp.



Hình 1. Cấu hình robot song song dẫn động dây cáp

Chuyển động của khâu thao tác được thực hiện bằng việc thay đổi chiều dài/lực căng trên các dây cáp cần thiết. Ví dụ, việc giảm chiều dài/lực căng trên dây 1, 2, 5, và 6 đồng thời với việc tăng chiều dài/lực căng 3, 4, 7, và 8 một cách phù hợp sẽ làm khâu thao tác chuyển động theo chiều dương trục O_0x_0 . Tương tự, khi tăng chiều dài/lực căng dây 1, 2, 3, và 4, đồng thời giảm chiều dài/lực căng dây 5, 6, 7, và 8 sẽ tăng lực tương tác của khâu thao tác với mặt làm việc (theo phương O_0z_0).

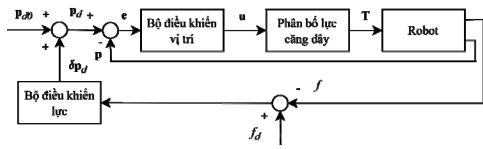
Vị trí khâu thao tác và chiều dài các dây được thể hiện thông qua phương trình động học ngược

$$l_i = \sqrt{\mathbf{b}_i - \mathbf{r} - \mathbf{R}\mathbf{a}_i}. \quad (1)$$

trong đó, l_i là chiều dài dây thứ i , \mathbf{b}_i và \mathbf{r} lần lượt là vector tọa độ điểm B_i và vị trí khâu thao tác trong hệ tọa độ cố định $O_{\rho}x_{\rho}y_{\rho}z_{\rho}$, \mathbf{R} là ma trận quay giữa hệ tọa độ cố định và hệ tọa độ $Oxyz$ gắn liền với khâu thao tác. \mathbf{a}_i là vector tọa độ điểm A_i trong hệ tọa độ $Oxyz$.

3. CẤU TRÚC ĐIỀU KHIỂN VÒNG PHẢN HỒI KÉP

Cấu trúc điều khiển vòng phản hồi kép gồm hai vòng phản hồi, vòng trong và vòng ngoài. Trong nghiên cứu này, vòng ngoài sử dụng bộ điều khiển lực. Bộ điều khiển này, dựa vào sai số giữa lực tương tác thực tế và lực tương tác mong muốn, sẽ tính toán và điều chỉnh giá trị quỹ đạo mong muốn ban đầu, \mathbf{p}_{d0} . Bộ điều khiển ở vòng trong là bộ điều khiển vị trí. Bộ điều khiển này sẽ điều khiển robot bám theo giá trị vị trí mong muốn mới, \mathbf{p}_d , Hình 2.



Hình 2. Cấu trúc điều khiển vòng phản hồi kép cho robot song song dẫn động dây cáp

Có nhiều cách lựa chọn hai bộ điều khiển trên. Đối với bộ điều khiển lực tương tác, phổ biến nhất là bộ điều khiển trở kháng (Impedance Controller), một luật điều khiển chuyên cho điều khiển tương tác lực, và các biến thể của nó [2]. Bộ điều khiển trở kháng có dạng:

$$m_d \delta \ddot{z} + b_d \delta \dot{z} + c_d \delta z = \delta f. \quad (2)$$

trong đó: m_d , b_d , c_d lần lượt là quán tính, hệ số cản nhớt và độ cứng mong muốn; $\delta f = f - f_d$ là sai số lực tương tác; δz , $\delta \dot{z}$ và $\delta \ddot{z}$ là lượng điều chỉnh theo phương z , δz , và đạo hàm cấp 1, cấp 2 của nó (giả thiết lực tương tác mong muốn theo phương z). Lượng điều chỉnh quỹ đạo, $\delta \mathbf{p}_d$, được xác định

$$\delta \mathbf{p}_d = \left[\mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \delta z \end{bmatrix}^T \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]^T \quad (3)$$

Bằng việc lựa chọn các hệ số m_d , b_d , c_d , ta có thể thiết lập mối quan hệ giữa sai số lực tương tác, δf , và lượng điều chỉnh quỹ đạo, $\delta \mathbf{p}_d$, mong muốn, qua đó thiết lập tính chất của tương tác lực giữa robot và môi trường.

Đối với bộ điều khiển vị trí, đã có nhiều nghiên cứu về các bộ điều khiển khác nhau cho robot song song dẫn động dây cáp như bộ điều khiển trượt và các biến thể, điều khiển theo phương pháp cuộn chiếu, bộ điều khiển ứng dụng mạng thần kinh...

Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển PID được lựa chọn cho vòng điều khiển vị trí bởi cấu trúc đơn giản, chất lượng tương đối tốt [3]. Thực tế, hơn 90% các bộ điều khiển trong công nghiệp sử dụng bộ điều khiển PID hoặc biến thể bởi tính hiệu quả của nó. Bộ điều khiển PID trong không gian làm việc có dạng

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_i \int \mathbf{e} dt + \mathbf{K}_d \frac{d\mathbf{e}}{dt}. \quad (4)$$

trong đó, \mathbf{K}_p , \mathbf{K}_i , \mathbf{K}_d là các ma trận chứa tham số của bộ điều khiển, \mathbf{u} là mô men cần thiết tác động lên động cơ để thay đổi chiều dài dây, $\mathbf{e} = \mathbf{p}_d - \mathbf{p}$ là sai số vị trí của robot so với giá trị mong muốn.

4. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

Trong phần này, cấu trúc điều khiển vòng phản hồi kép trình bày trong phần 3 sẽ được áp dụng để điều khiển robot song song dẫn động dây cáp được mô tả trong phần 2. Các thông số của robot và bộ điều khiển được thể hiện trong Bảng 1.

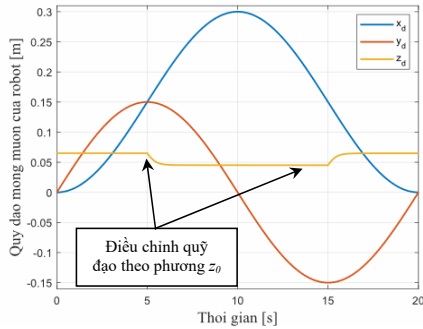
Quỹ đạo mong muốn ban đầu là quỹ đạo tròn bán kính 0.15 [m] trong mặt phẳng x_0-y_0 và hằng số theo phương z_0 :

$$\begin{cases} x = -0,15 \cdot \cos(0,1 \cdot \pi \cdot t) + 0,15 \\ y = 0,15 \cdot \sin(0,1 \cdot \pi \cdot t); z = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

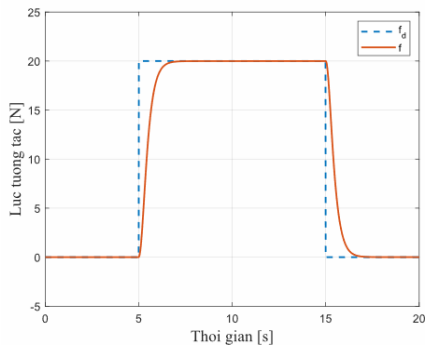
Trong vòng 10 giây, từ giây thứ 5 đến giây thứ 15, lực tương tác mong muốn với mặt làm việc là 20 [N], thời gian còn lại là 0 [N]. Các kết quả được thể hiện trong các Hình 3, 4, và 5.

Bảng 1. Thông số hình học của robot và các hệ số của bộ điều khiển

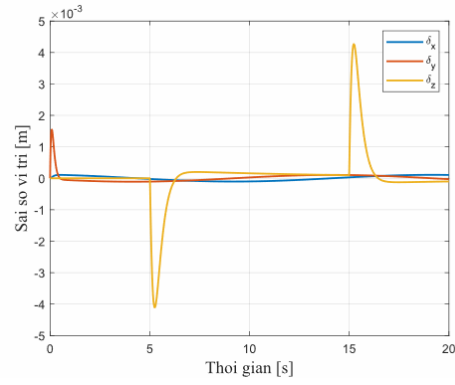
Thông số hình học của robot	
Khối lượng khâu thao tác: 1.91 kg;	
Vị trí các điểm treo trên khung:	
$\begin{bmatrix} x_B \\ -y_B \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ 0 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} -x_B \\ y_B \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -x_B \\ -y_B \\ 0 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} x_B \\ z_B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_B \\ z_B \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} -x_B \\ z_B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -x_B \\ z_B \end{bmatrix}$
Vị trí các điểm treo trên khâu thao tác:	
$\begin{bmatrix} x_A \\ -y_A \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ 0 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} -x_A \\ y_A \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -x_A \\ -y_A \\ 0 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} x_A \\ z_A \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_A \\ z_A \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} -x_A \\ z_A \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -x_A \\ z_A \end{bmatrix}$
Với $x_B = 0.683$ m, $y_B = 0.836$ m, $z_B = 0.106$ m và $x_A = 0.0424$ m, $y_A = 0.0212$ m, $z_A = 0.6$ m.	
Thông số bộ điều khiển	
IC: $\alpha = 1$ Ns ² /m $\beta = 500$ Ns/m $\gamma = 0$ N/m	
PID: $\mathbf{K}_p = [25, 25, 25, 25, 25, 0]^T$;	
$\mathbf{K}_i = [2.5, 2.5, 2.5, 2.5, 2.5, 0]^T$;	
$\mathbf{K}_d = [4, 4, 4, 4, 4, 0]^T$.	



Hình 3. Quỹ đạo mong muốn có sử dụng bộ điều khiển lực



Hình 4. Lực tương tác theo phương z



Hình 5. Sai số vị trí trong quá trình chuyển động

Tại giây 5, để tạo lực tương tác 20 [N] với mặt làm việc, quỹ đạo mong muốn theo phương z_0 được thay đổi bởi vòng điều khiển lực. Tương tự, lực tương tác thay đổi tại giây thứ 15 nhờ sự thay đổi quỹ đạo theo phương z_0 , **Hình 3** và **4**. Hoạt động của bộ điều khiển vị trí được thể hiện trên **Hình 5**. Sai số vị trí được duy trì nhỏ (dưới 5 [mm]). Hầu hết quá trình, sai số vị trí nhỏ hơn 1 [mm].

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đề xuất cấu trúc vòng phản hồi kép để điều khiển đồng thời vị trí và lực tương tác cho robot song song dẫn động dây cáp. Các kết quả thu được thể hiện tính hiệu quả của phương pháp và tiềm năng ứng dụng trong thực nghiệm.

6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Pott, Cable-driven parallel robots: Theory and application, vol. 120. 2018.
- [2] X. Sheng and X. Zhang, "Fuzzy adaptive hybrid impedance control for mirror milling system," *Mechatronics*, vol. 53, no. November 2017, pp. 20-27, 2018.
- [3] M. A. Khosravi and H. D. Taghirad, "Robust PID control of fullyconstrained cable driven parallel robots," *Mechatronics*, vol. 24, no. 2, pp. 87-97, 2014.