

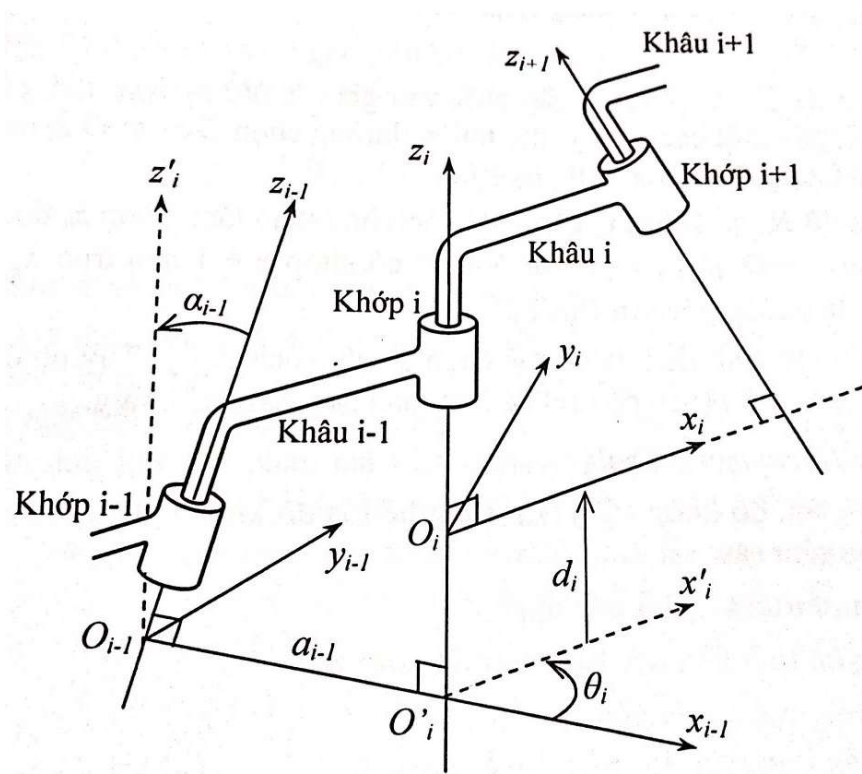
Tính toán động học thuận robot công nghiệp bằng phương pháp Đ-H-C

1. Mở đầu

Ngày nay cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ, sự ra đời của robot là một điều tất yếu. Robot ngày càng đóng vai trò quan trọng trong hầu hết các lĩnh vực của cuộc sống: Khoa học, sản xuất, y tế, quân sự, hàng không ... Trong các lĩnh vực đó, các tay máy robot có cấu trúc dạng chuỗi hiện vẫn chiếm một tỷ phần rất lớn trong công nghiệp. Với đòi hỏi ngày càng cao về việc chính xác hóa trong vận hành của robot dạng chuỗi nên việc nghiên cứu động học các robot dạng này là một vấn đề cần chú trọng và đã được nhiều nhà khoa học quan tâm. Báo cáo này tập trung trình bày nghiên cứu về động học robot dạng chuỗi dựa trên phương pháp Đ-H-C.

2. Phương pháp Denavit-Hatenberg-Craig (Đ-H-C)

2.1. Đặt các trục của hệ tọa độ khớp



Hình 1. Đặt hệ tọa độ khớp

Khớp i nối động khâu $i-1$ và khâu i .

Hệ tọa độ khớp $R_i = (O_i \ x_i \ y_i \ z_i)$ gắn chặt tại đầu khâu i .

Trục z_i dọc theo trục khớp i .

Trục $x_i \perp z_i$; [trục $x_i \perp z_{i+1}$ và hướng tới trục khớp $i+1$].

Gốc $O_i \equiv x_i \cap z_i$.

Trục y_i : sao cho R_i là hệ tọa độ thuận.

2.2. Ma trận Craig

Thực hiện 4 phép biến đổi liên tiếp để đưa hệ R_{i-1} trùng với hệ R_i :

Quay quanh x_{i-1} góc α_{i-1} để $z_{i-1} \rightarrow z'_i \parallel z_i$

Tịnh tiến dọc x_{i-1} đoạn a_{i-1} để $O_{i-1} \rightarrow O'_i$.

Quay quanh z_i góc θ_i để $x_{i-1} \rightarrow x'_i \parallel x_i$.

Tịnh tiến dọc z_i đoạn d_i .

$(\alpha_{i-1}, a_{i-1}, \theta_i, d_i)$ là 4 tham số động học Craig của khâu i : $\alpha_{i-1} = \text{const}$, $a_{i-1} = \text{const}$.

Khớp quay i : θ_i là biến khớp; $d_i = \text{const}$.

Khớp trượt i : d_i là biến khớp; $\theta_i = \text{const}$.

Ma trận Craig địa phương: ma trận biến đổi thuần nhất từ $R_{i-1} \rightarrow R_i$, ký hiệu là

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{T}_{R_x}(\alpha_{i-1}) \cdot \mathbf{T}_{T_x}(a_{i-1}) \cdot \mathbf{T}_{R_z}(\theta_i) \cdot \mathbf{T}_{T_z}(d_i)$$

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ma trận Craig địa phương $\mathbf{K}_i = \mathbf{K}_i^{i-1}$: biến đổi $R_{i-1} \rightarrow R_i$.

Ma trận Craig toàn cục $\mathbf{C}_i = \mathbf{K}_i^0$: biến đổi $R_0 \rightarrow R_i$.

Áp dụng các phép biến đổi thuần nhất từ giá đến khâu i :

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{K}_2 \cdots \mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i & \mathbf{r}_{O_i}^{(0)} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.3. Vị trí và vận tốc

Vận tốc góc của khâu i được tính từ toán tử sóng:

$$\tilde{\omega}_i^{(0)} = \dot{\mathbf{A}}_i \cdot \mathbf{A}_i^T ; \quad \tilde{\omega}_i^{(1)} = \mathbf{A}_i^T \cdot \dot{\mathbf{A}}_i \quad (3)$$

Vị trí của điểm P thuộc khâu i :

$$\hat{\mathbf{r}}_P^{(0)} = \mathbf{C}_i \cdot \hat{\mathbf{u}}_P^{(i)} \quad (4)$$

3. Các bước áp dụng phương pháp D-H-C

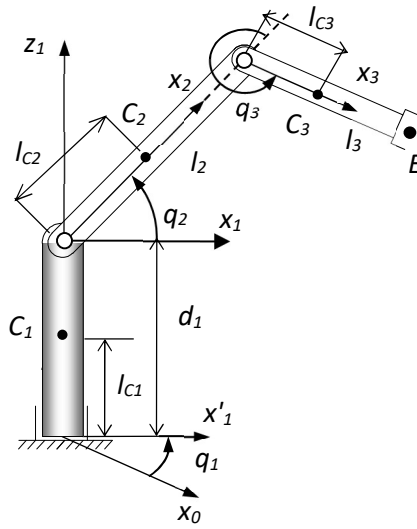
- Đánh số thứ tự các khâu từ khâu giả 0 $\rightarrow$ khâu cuối n .
- Đánh số thứ tự các khớp từ khớp 1 (khâu 0-1) $\rightarrow$ khớp n .
- Xây dựng các hệ tọa độ khớp R_i gắn chặt tại đầu khâu i .
- Lập bảng tham số Craig.
- Tính toán các ma trận Craig địa phương $\mathbf{K}_i$.
- Tính toán các ma trận Craig toàn cục $\mathbf{C}_i$.
- Tính toán vận tốc góc các khâu, vị trí và vận tốc của điểm thuộc khâu,...

4. Ví dụ

Xét robot không gian ba bậc tự do có mô hình như hình vẽ 2 Các tham số động học Craig và các tham số động lực học của robot không gian ba bậc tự do cho trên các bảng 1 và 2.

Khâu	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	d_1	q_1
2	90	0	0	q_2
3	0	l_2	0	q_3

Bảng 1 Tham số động học Craig không gian ba bậc tự do



Hình 32 Rôbot không gian 3 bậc tự do

Khâu				Khối lượng	Ma trận mômen quán tính I					
	x_C	y_C	z_C		I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	I_{xy}	I_{yz}	I_{zx}
1	0	0	$(-d_1 + l_{C_1})$	m_1	I_{1x}	I_{1y}	I_{1z}	0	0	0
2	l_{C_2}	0	0	m_2	I_{2x}	I_{2y}	I_{2z}	0	0	0
3	l_{C_3}	0	0	m_3	I_{3x}	I_{3y}	I_{3z}	0	0	0

Bảng 2 Bảng tham số động lực của robot không gian ba bậc tự do

Các ma trận Craig địa phương và toàn thể có dạng

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & l_2 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{C}_2 = \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2$$

$$= \begin{bmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 & 0 \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & -C_1 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{C}_3 &= \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2 \mathbf{K}_3 \\
&= \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & S_1 & l_2 C_1 C_2 \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -C_1 & l_2 S_1 C_2 \\ S_{23} & C_{23} & 0 & d_1 + l_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{7}$$

Tọa độ khối tâm của các khâu trong hệ quy chiếu gắn liền với khâu có dạng

$$\mathbf{u}_{C1}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_1 + l_{C1} \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{u}_{C2}^{(2)} = \begin{bmatrix} l_{C2} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{u}_{C3}^{(3)} = \begin{bmatrix} l_{C3} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

Từ đó ta suy ra tọa độ khối tâm các khâu so với hệ quy chiếu cố định R_0

$${}^m r_{C_i} = \mathbf{C}_i \mathbf{u}_{C_i}^{(i)} \Rightarrow \mathbf{r}_{C1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_1 + l_{C1} \end{bmatrix}; \mathbf{r}_{C2} = \begin{bmatrix} l_{C2} C_1 C_2 \\ l_{C2} S_1 C_2 \\ d_1 + l_{C2} S_2 \end{bmatrix}; \mathbf{r}_{C3} = \begin{bmatrix} l_2 C_1 C_2 + l_{C3} C_1 C_{23} \\ l_2 S_1 C_2 + l_{C3} S_1 C_{23} \\ d_1 + l_2 S_2 + l_{C3} S_{23} \end{bmatrix} \tag{9}$$

Các ma trận Jacobi tịnh tiến của các khâu có dạng

$$\mathbf{J}_{T1} = \frac{\partial \mathbf{r}_{C1}}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{J}_{T2} = \frac{\partial \mathbf{r}_{C2}}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} -l_{C2} S_1 C_2 & -l_{C2} C_1 S_2 & 0 \\ l_{C2} C_1 C_2 & -l_{C2} S_1 S_2 & 0 \\ 0 & l_{C2} C_2 & 0 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

$$\mathbf{J}_{T3} = \frac{\partial \mathbf{r}_{C3}}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} -l_2 S_1 C_2 - l_{C3} S_1 C_{23} & -l_{C2} C_1 S_2 - l_{C3} C_1 S_{23} & -l_{C3} C_1 S_{23} \\ l_{C2} C_1 C_2 + l_{C3} C_1 C_{23} & -l_{C2} S_1 S_2 - l_{C3} S_1 S_{23} & -l_{C3} S_1 S_{23} \\ 0 & l_{C2} C_2 + l_{C3} C_{23} & l_{C3} C_{23} \end{bmatrix} \tag{11}$$

Từ các ma trận Craig ta có các ma trận cosin chỉ hướng của các khâu so với R_0

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & -C_1 \\ S_2 & C_2 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & S_1 \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -C_1 \\ S_{23} & C_{23} & 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

Vận tốc góc các khâu được tính theo các công thức sau

$$\tilde{\omega}_1 = \dot{\mathbf{A}}_1 \mathbf{A}_1^T = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{q}_1 & 0 \\ \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$\tilde{\omega}_2 = \dot{\mathbf{A}}_2 \mathbf{A}_2^T = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{q}_1 & -C_1 \dot{q}_2 \\ \dot{q}_1 & 0 & -S_1 \dot{q}_2 \\ C_1 \dot{q}_2 & S_1 \dot{q}_2 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \omega_2 = \begin{bmatrix} S_1 \dot{q}_2 \\ -C_1 \dot{q}_2 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\tilde{\omega}_3 = \dot{\mathbf{A}}_3 \mathbf{A}_3^T = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{q}_1 & -C_1 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ \dot{q}_1 & 0 & -S_1 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ C_1 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) & S_1 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \omega_3 = \begin{bmatrix} S_1 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ -C_1 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

5. Kết luận

Báo cáo trình bày việc tính toán động học thuận tay máy robot công nghiệp bằng phương pháp Đ-H-C. Phương pháp trực quan, dễ tiếp cận đối với sinh viên mà những người mới tiếp cận. Kết quả của bài toán động học thuận là cơ sở quan trọng để tiếp tục tính toán bài toán động học ngược và động lực học tay máy công nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Văn Khang (2017): Động lực học hệ nhiều vật. Đại học Bách khoa Hà nội.
2. F. Amirouche (2006): *Fundamentals of Multibody Dynamics/ Theory and Applications*. Birkhäuser, Boston.
3. J. J. Craig (2005): *Introduction to Robotics* (3.Edition). Upper Saddle River, New Jersey.
4. E. J. Haug (1989): *Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Vol.1: Basic Methods*. Allyn and Bacon, Boston.
5. B. Heimann, W. Gerth, K. Popp (2007): *Mechatronik* (3.Auflage). Fachbuchverlag Leipzig in Carl Hanser Verlag, München.
6. J. G. De Jalon, E. Bayo (1994): *Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems*. Springer-Verlag, New York.
7. T. R. Kane, D. A. Levinson (1985): *Dynamics/ Theory and Applications*. McGraw-Hill, New York.
8. J.-P. Merlet (2000): *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
9. P. Niaravesh (2008): *Planar Multibody Dynamics*. Taylor & Francis, Boca Radon.
10. W. Schiehlen (Editor) (1990): *Multibody Systems Handbook*. Springer-Verlag, Berlin.