

TÍNH TOÁN THIẾT KẾ ROBOT LEO DÂY SỬ DỤNG CƠ CẤU BỐN KHÂU BẢN LỀ

Đặng Anh Tuấn, Dương Phạm Tường Minh
Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

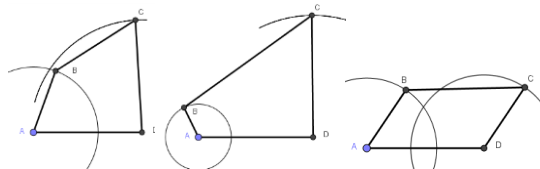
TÓM TẮT

Bài báo đề xuất phương pháp tính toán và phân tích động học cho robot di chuyển trên dây sử dụng cơ cấu bốn khâu bản lề. Bằng phương pháp giải tích, mô hình động học của robot được đưa vào khảo sát các thông số như độ nghiêng thân, vận tốc di chuyển trung bình, vị trí và quỹ đạo chân của robot. Dựa vào kết quả đã tính toán, các thông số kích thước phù hợp được đưa nhằm đảm bảo khả năng di chuyển ổn định và cân bằng cơ cấu. Công suất cần thiết cho động cơ cũng được xác định sử dụng phương pháp di chuyển khả dĩ đảm bảo điều kiện di chuyển đều của robot. Kết quả tính toán ứng dụng thiết kế mô hình thực để đánh giá khả năng làm việc.

Từ khóa: Cơ cấu bốn khâu; phương pháp giải tích; động học; động lực học; Matlab

GIỚI THIỆU

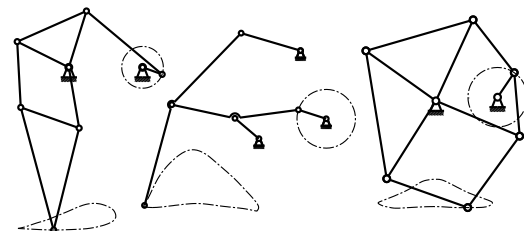
Cơ cấu bốn khâu là một trong những cơ cấu nguyên lý máy đầu tiên được thiết kế và sử dụng. Do kết cấu đơn giản và tính chất chuyển động đa dạng, ta có thể tìm thấy hình ảnh của các cơ cấu bốn khâu trong hầu hết các lĩnh vực trong cuộc sống, kể cả trong sinh học (cụ thể là các chuyển động phỏng sinh học) hay các kết cấu kỹ thuật [1]. Cơ cấu bốn khâu bản lề được ứng dụng rộng rãi trong thiết kế các bộ phận máy, biến chuyển động của quay khâu dẫn thành các chuyển động phức tạp của khâu đầu ra (Hình 1).



Hình 1. Các dạng cơ cấu 4 khâu bản lề

Một số biến thể của cơ cấu bốn khâu bản lề được phân tích, nghiên cứu và được xem như là các mô hình cơ sở để xây dựng nên các bộ phận máy sử dụng phổ biến trong cuộc sống (bộ phận giảm chấn bánh xe tàu hỏa, khung xe đạp, đầu nghiêng đá, tay kẹp robot... [3]). Một số cơ cấu robot di chuyển trên nền phẳng được đề xuất và thiết kế chạy thử như cơ cấu Jansen, Klann, ... đã được nghiên cứu về động học [4], hay cơ cấu Jansen đã được phân tích

đánh giá các thông số để đưa ra nhận xét về chuyển động, ma sát với nền để xác định công suất động cơ... [5] trên cơ sở các cơ cấu này, Amanda Ghassaei đề xuất kết cấu và chế tạo thử nghiệm cơ cấu di chuyển mới và so sánh mô hình thu được với mô hình Theo Jansen về kích thước mô hình, quỹ đạo chuyển động chân, vị trí khối tâm các khâu [6] ... Những cơ cấu này đều có đặc điểm chung là trong một khoảng chu kỳ chuyển động của khâu dẫn, quỹ đạo của một điểm trên cơ cấu thực hiện chuyển động chạy ngang đóng vai trò điểm tựa trên mặt đất để cả cơ cấu di chuyển về phía trước (Hình 2).



Hình 2. Các dạng cơ cấu di chuyển (từ trái sang phải): Cơ cấu Jansen; Cơ cấu Klann; Cơ cấu Ghassaei

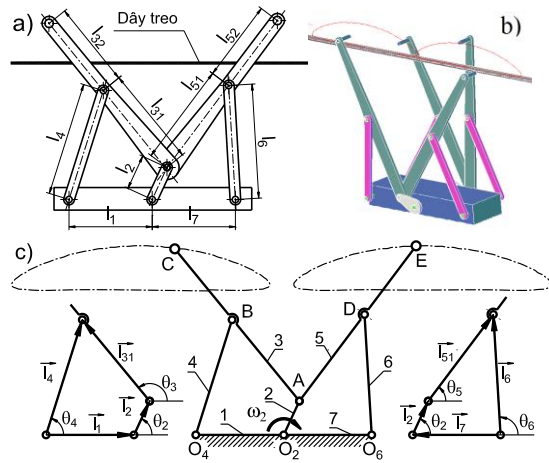
Cơ cấu di chuyển dạng treo ngược có quỹ đạo của điểm chân và phần thân nằm về hai phía khác nhau của phần chuyển động thẳng, cho phép cơ cấu có thể chuyển động khi treo ngược nhờ các chân bám tựa trên một thanh hoặc dây treo cố định. Dù chuyển động không dùng bánh xe nhưng cơ cấu có thể di chuyển nhẹ nhàng và cho phép treo tải với khối lượng

*Tel: 0985 059022, Email: anhtuan679@gmail.com

lớn. Có khá nhiều mô hình thiết kế dựa theo nguyên lý chuyển động cơ cấu dạng này, nhưng chưa có nghiên cứu nào tập trung vào quá trình tính toán cụ thể cho các trường hợp chịu tải cũng như đánh giá độ ổn định trong quá trình leo dây của cơ cấu.

PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC CƠ CẤU

Trên cơ sở mô hình cơ cấu được đề xuất như Hình 3, quá trình phân tích động học cơ cấu với các giá trị đầu vào là kích thước các khâu được thực hiện với các nội dung gồm: Phân tích vị trí cơ cấu xác định các thông số động học cơ cấu (vận tốc, gia tốc...):



Hình 3. Kết cấu robot treo dạng 2D (a), 3D (b) và lược đồ cơ cấu (c)

Xây dựng phương trình chuỗi động cho nhánh trước (nhóm khâu 1, 2, 3, 4) và sử dụng phương pháp số phức để biến đổi về hệ phương trình: $\vec{l}_1 + \vec{l}_2 + \vec{l}_{31} = \vec{l}_4$

$$\Leftrightarrow l_1 e^{jq_1} + l_2 e^{jq_2} + l_{31} e^{jq_3} = l_4 e^{jq_4} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} l_4 \sin q_4 - l_{31} \sin q_3 = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin q_2 \\ l_4 \cos q_4 - l_{31} \cos q_3 = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_2 \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó, $\vec{l}_i$ là vector xác định khâu và θ_i là góc tạo bởi $\vec{l}_i$ với chiều dương trục x.

Giải hệ phương trình (2) ta xác định được giá trị θ_3, θ_4 theo góc quay của khâu dẫn θ_2 .

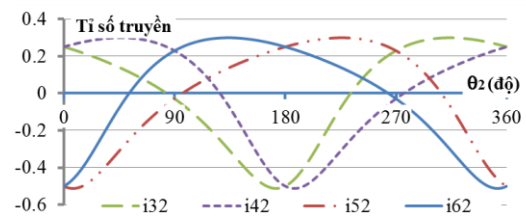
Tiếp tục tính toán cho nhóm cơ cấu bốn khâu 7, 2, 5, 6 và áp dụng công thức Euler để biến đổi về hệ phương trình: $\vec{l}_7 + \vec{l}_2 + \vec{l}_{51} = \vec{l}_6$

$$\Leftrightarrow l_7 e^{jq_7} + l_2 e^{jq_2} + l_{51} e^{jq_5} = l_6 e^{jq_6} \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} l_6 \sin q_6 - l_{51} \sin q_5 = l_7 \sin q_7 + l_2 \sin q_2 \\ l_6 \cos q_6 - l_{51} \cos q_5 = l_7 \cos q_7 + l_2 \cos q_2 \end{cases} \quad (4)$$

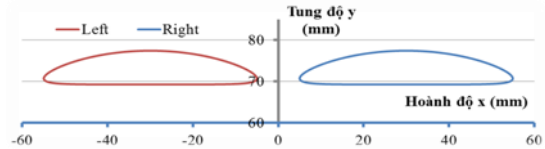
Tiếp tục giải hệ phương trình này ta xác định được giá trị θ_5, θ_6 theo góc khâu dẫn θ_2 .

Với cơ cấu được khảo sát có $l_1=l_7=30$; $l_2=10$; $l_{31}=l_{51}=l_{32}=l_{52}=l_4=l_6=40$ và $\theta_1=\theta_7=0^\circ$, ta thu được đồ thị biến đổi của vận tốc góc các khâu ($\omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$), giá trị của các thông số này tỉ lệ thuận với vận tốc góc khâu dẫn (ω_2), và ta có thể biểu diễn đồ thị biến đổi tỉ số truyền $i_{k2}=\omega_k/\omega_2$ được mô tả như Hình 4.

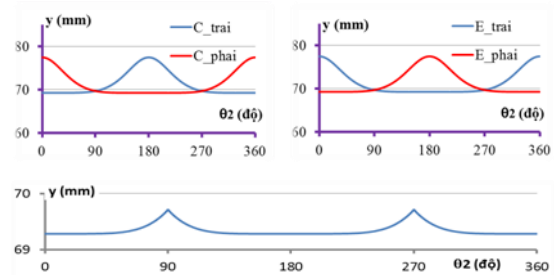


Hình 4. Đồ thị thay đổi tỉ số truyền (i_{k2}) giữa các khâu ω_k và ω_2 theo góc quay của khâu dẫn θ_2

Vị trí các điểm C (bên trái) và E (bên phải) được xác định theo các vector thành phần: $\vec{R}_C = \vec{l}_2 + \vec{l}_{31} + \vec{l}_{32}$, $\vec{R}_E = \vec{l}_2 + \vec{l}_{51} + \vec{l}_{52}$ với quỹ đạo chuyển động được mô tả trong Hình 5.



Hình 5. Quỹ đạo các điểm C (trái) và E (phải)



Hình 6. Tung độ các chân và quỹ đạo di chuyển theo phương y của cơ cấu

Bài toán về chuyển động của cơ cấu liên quan đến trạng thái di chuyển của cơ cấu tại thời điểm các chân (cụ thể là 2 chân trước và 2 chân sau của cơ cấu) tỳ lên dây treo, trong đó vị trí tỳ dây mỗi phía được xác định theo mối quan hệ: $y_{\text{trước}} = \min(y_{C\text{trái}}; y_{E\text{phải}})$ và $y_{\text{sau}} = \min$

($y_{\text{Etrái}}; y_{\text{Ephải}}$). Từ đó, độ nhấp nhô của thân robot (quỹ đạo di chuyển phương y) được xác định theo Hình 6.

Kết quả thu được trên đồ thị tương ứng với các góc khâu dẫn θ_2 là 91° và 271° (lệch pha 180°). Dựa vào kết quả trên đồ thị và kiểm nghiệm chuyển động mô hình, ta có bảng tổng hợp các thời điểm làm việc của mỗi chân:

Bảng 1. Trạng thái tỳ dầy của các chân

θ_2	$0^\circ \div 91^\circ$	$91^\circ \div 271^\circ$	$271^\circ \div 360^\circ$
Chân trước	$C_{\text{trái}}$	$C_{\text{phải}}$	$C_{\text{trái}}$
Chân sau	$E_{\text{phải}}$	$E_{\text{trái}}$	$E_{\text{phải}}$
Số chân tỳ dầy	2	2	2

Khi cơ cấu di chuyển luôn chỉ có 2 chân tiếp xúc với dây. Căn cứ vị trí của các chân, độ nghiêng của thân được xác định và mô tả theo góc lệch dạng biểu thức: $\tan \varphi = \Delta y / \Delta x$ (với $\Delta y = |y_{\text{trước}} - y_{\text{sau}}|$ và $\Delta x = |x_{\text{trước}} - x_{\text{sau}}|$). Kết quả khảo sát cho thấy φ nằm trong khoảng giá trị $[-0,0014^\circ; 0,0014^\circ]$ ảnh hưởng không đáng kể đến chuyển động của toàn cơ cấu.

Đạo hàm các phương trình (1) và (3), ta được phương trình vận tốc:

$$l_2 \omega_2 e^{j(\theta_2 + \frac{\pi}{2})} + l_{31} \omega_3 e^{j(\theta_3 + \frac{\pi}{2})} = l_4 \omega_4 e^{j(\theta_4 + \frac{\pi}{2})} \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} l_2 \omega_2 \sin \theta_{2v} + l_{31} \omega_3 \sin \theta_{3v} = l_4 \omega_4 \sin \theta_{4v} \\ l_2 \omega_2 \cos \theta_{2v} + l_{31} \omega_3 \cos \theta_{3v} = l_4 \omega_4 \cos \theta_{4v} \end{cases} \quad (6)$$

$$l_2 \omega_2 e^{j(\theta_2 + \frac{\pi}{2})} + l_{51} \omega_5 e^{j(\theta_5 + \frac{\pi}{2})} = l_6 \omega_6 e^{j(\theta_6 + \frac{\pi}{2})} \quad (7)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} l_2 \omega_2 \sin \theta_{2v} + l_{51} \omega_5 \sin \theta_{5v} = l_6 \omega_6 \sin \theta_{6v} \\ l_2 \omega_2 \cos \theta_{2v} + l_{51} \omega_5 \cos \theta_{5v} = l_6 \omega_6 \cos \theta_{6v} \end{cases} \quad (8)$$

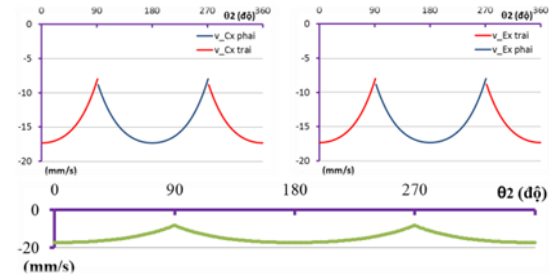
Với $\theta_{iv} = \theta_i + \frac{\pi}{2}$ là phương của của vector vận tốc và ω_i là vận tốc góc khâu tương ứng.

Giải các hệ (6) và (8) xác định được vận tốc góc các khâu 3, 4, 5, 6. Khi đó, vận tốc các điểm C và E tương ứng sẽ là:

$$\begin{cases} v_{Cy} = l_2 \omega_2 \cos \theta_2 + (l_{31} + l_{32}) \omega_3 \cos \theta_3 \\ v_{Cx} = l_2 \omega_2 \sin \theta_2 + (l_{31} + l_{32}) \omega_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} v_{Ey} = l_2 \omega_2 \cos \theta_2 + (l_{51} + l_{52}) \omega_5 \cos \theta_5 \\ v_{Ex} = l_2 \omega_2 \sin \theta_2 + (l_{51} + l_{52}) \omega_5 \sin \theta_5 \end{cases} \quad (10)$$

Cơ cấu chuyển động trên dây treo ngang nên ta chỉ khảo sát các giá trị v_{Cx} và v_{Ex} tại thời điểm các chân tỳ dầy (vận tốc cơ cấu sẽ xác định theo vận tốc các điểm này). Kết hợp với số liệu trong Hình 6, ta có đồ thị vận tốc của các chân di chuyển như Hình 7:



Hình 7. Đồ thị vận tốc theo phương x của các chân và vận tốc trung bình của cơ cấu

Sử dụng phương pháp đổi giá, thay vì khảo sát vận tốc các chân với giá cố định, ta có các chân tỳ trên dây cố định, và cơ cấu sẽ bị đẩy về phía trước với vận tốc đúng bằng vận tốc trung bình cộng của vận tốc các chân C, E với $v_{\text{coca}} = (v_{\text{trước}} + v_{\text{sau}}) / 2$. Mặt khác, sẽ xuất hiện sự trượt do chênh lệch vận tốc tịnh tiến của 2 chân tỳ dầy, với $v_{\text{trượt}} = |v_{\text{trước}} - v_{\text{sau}}|$ (giá trị đo được là $10^{-3} \omega_2$ (rất nhỏ so với vận tốc di chuyển của cơ cấu $v = (8,2 \div 17,3) \omega_2$ nên có thể bỏ qua hiện tượng trượt này).

PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC CƠ CẤU

Quá trình tính toán động lực học cơ cấu cho phép xác định tải trọng tác dụng lên từng khâu, khớp trong cơ cấu, từ đó đưa ra kết cấu khâu phù hợp và thông số động cơ cần thiết để hệ làm việc được. Trên cơ sở mô hình được đề xuất, tải trọng được xác định bởi khối lượng cơ cấu (P_Σ) đặt lên dây sẽ phân bố qua các chân để tác dụng xuống dây. Áp dụng phương pháp di chuyển khả dĩ để xác định công suất trên khâu dẫn theo biểu thức:

$$\overrightarrow{P_E} v_E + \overrightarrow{P_C} v_C + \overrightarrow{G_i} v_{Si} + \overrightarrow{P_{qi}} v_{Si} + \overrightarrow{M_{qi}} \omega_i = P_{cb} \quad (11)$$

Với: $P_{C,E} = \frac{P_\Sigma}{i}$ là phản lực từ dây tác dụng lại

lên cơ cấu, xác định theo tổng tải trọng P_Σ tác dụng trên dây và số chân tỳ dầy $i=2$. Do các điểm tỳ dầy khảo sát có $v_E \gg v_C \gg \bar{v}$ nên có thể coi $\sum \overrightarrow{P_{C,E}} v_{C,E} = \overrightarrow{P_\Sigma} \cdot \bar{v}$ (12)

$G_i = -m_i g$ là trọng lượng khâu.

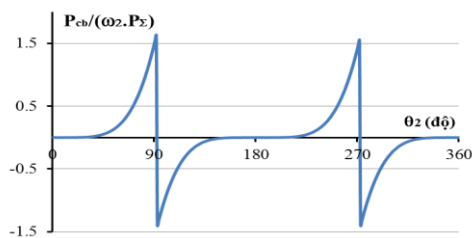
$\overline{P_{qi}} = -m_i \overline{a_{Si}}$ là lực quán tính của khâu.

$\overline{M_{qi}} = -J_{Si} \varepsilon_i$ là momen quán tính của khâu.

P_{cb} là giá trị công suất cân bằng trên khâu dẫn (động cơ) để cân bằng với các thành phần tác dụng của ngoại lực.

Do kích thước các khâu tương đối nhỏ, mà tải trọng đặt trên cơ cấu khá lớn so với các thành phần lực do khâu sinh ra (mômen quán tính, trọng lực, lực quán tính...) nên có thể bỏ qua các thành phần lực này. Lúc này phương trình (11) có thể rút gọn về dạng: $P_{cb} = \overline{P_{\Sigma}} \cdot \overline{v_G}$ (12)

Ta có đồ thị giá trị P_{cb} theo góc khâu dẫn θ_2 và tỉ lệ thuận với tốc độ của động cơ ω_2 và tải trọng của ngoại lực P_{Σ} (Hình 8).



Hình 8. Đồ thị công suất động cơ cân bằng cơ cấu
Khi đó, công suất động cơ cần thiết để robot có thể vận hành khi chịu tải trọng P_{Σ} :

$$P_{dc} = \max(P_{cb}) = 1,6 \cdot \omega_2 \cdot P_{cb} \text{ (W)} \quad (13)$$

Đồng thời ta cũng có thể xác định tải trọng giới hạn từ thông số đầu vào của động cơ. Ví dụ: với động cơ có công suất 20W, số vòng quay $n=30$ vòng/phút, cơ cấu với kích thước mô hình đã cho sẽ di chuyển trên dây với $v_{\max} = \frac{17,3 \cdot 30 \cdot 2\pi}{60} = 54,35 \text{ (mm/s)}$ và tải trọng nâng giới hạn (kể cả khối lượng cơ cấu) có thể lên

$$\text{tới } P_{\Sigma \max} = \frac{P_{dc}}{1,626 \cdot \omega_2} = \frac{20}{1,6 \cdot \pi} = 3,98 \text{ (N)}$$

KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất phương pháp tính toán và phân tích động học cho cơ cấu robot treo dạng

bốn khâu bản lề, cơ cấu thu được có khả năng dịch chuyển trên dây treo với độ ổn định cao. Khác với việc giải bằng phương pháp họa đồ (phương pháp lượng giác), việc xây dựng mô hình dạng số phức giúp quá trình tính toán được thực hiện chính xác và có thể tích hợp với phần mềm tính toán như Excel, Matlab, C, ... sẽ cho kết quả nhanh chóng. Căn cứ vào quá trình phân tích động học quá trình di chuyển các chân robot, việc xác định các điều kiện làm việc (vận tốc di chuyển, độ đảo mặt sàn, vị trí chịu tải trọng...) được thực hiện tương đối đơn giản. Từ kết quả tính toán thu được, có mở rộng tính toán với các cơ cấu robot đồng dạng, giúp xác định các thông số tổng quát như công suất động cơ, tải trọng tác dụng, vận tốc di chuyển hay độ ổn định của sàn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. M. Muller (1996), A Novel Classification of Planar Four-Bar Linkages and its Application to the Mechanical Analysis of Animal Systems, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 351, 689-720
2. L. Roy, A. Sen, R. P. Chetia and M. J. Borah (2008), "Analysis and Synthesis of Fourbar Mechanism", *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol 3(2), pp. 171-186
3. Artobolevsky I. I. (1975), *Mechanisms in Modern Engineering Design*, Vol.1, Mir Publishers.
4. Kazuma Komoda, Hiroaki Wagatsuma (2016), "Energy-efficacy comparisons and multibody dynamics analyses of legged robots with different closed-loop mechanisms", *Multibody System Dynamics*, Jun 2017, Vol 40(2), pp. 123-153.
5. Ingram A.J.(2006), *A new type of mechanical walking machine*, Ph.D. thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering Technology, University of Johannesburg, Johannesburg, Department of Physics and Astronomy, South Africa.
6. Ghassaei Amanda (2011), *The Design and Optimization of a Crank-Based Leg Mechanism*, PhD Thesis, Pomona College.
7. Shigley J.E., Uicker J.J (1981), *Theory of machines and mechanisms*, Mc.Graw-Hill.

SUMMARY

DESIGN ROPE CLIMBING ROBOT USING FOUR BAR MECHANISM**Dang Anh Tuan*, Duong Pham Tuong Minh***Thai Nguyen University of Technology*

The paper proposes a kinematic calculating and analyzing method for robots moving on a wire using a four-bar mechanism. By using analytical methods, the kinematic model of robot is included to examine parameters such as leg tilt, average moving velocity, position and trajectory of robot's leg. Based on the calculated results, suitable size parameters are proposed to ensure the stable and balanced movement of the structure. The power required for the engine is also determined by using a principle of virtual displacement that ensures a uniform movement of the robot. Calculation results are used to design the actual model to evaluate the robot's ability to work.

Keywords: *Four-bar mechanism, Analysis, Kinematic, Dynamic, Matlab*

Ngày nhận bài: 01/11/2017; **Ngày phản biện:** 15/11/2017; **Ngày duyệt đăng:** 05/01/2018

*Tel: 0985 059022, Email: anhtuan679@gmail.com