

XÁC ĐỊNH CÁC ĐIỂM KỶ DỊ VÀ VÙNG LÂN CẬN CỦA CHÚNG TRONG KHÔNG GIAN LÀM VIỆC CỦA CÁC CHUỖI ĐỘNG HỌC PHẪNG, MẠCH KÍN DỰA TRÊN CHỈ SỐ TRUYỀN CHUYỂN ĐỘNG

IDENTIFYING SINGULAR POINTS AND THEIR NEIGHBORS IN THE WORKSPACE OF PLANAR CLOSED-LOOP MECHANISMS BASED ON MOTION TRANSMISSION INDEX

NGUYỄN ĐỨC SANG*, NGUYỄN ĐÌNH KHIÊM

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: sangnd.vck@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Các điểm kỳ dị trong không gian làm việc của các cấu trúc động học mạch kín hay các robot song song là vấn đề thu hút rất nhiều sự quan tâm, nghiên cứu vì nó là nguyên nhân dẫn đến mất khả năng điều khiển chuyển động do sự thay đổi đột ngột (tăng, giảm) về số bậc tự do của cơ cấu nếu rơi vào cấu hình kỳ dị. Trong bài báo này, tác giả trình bày việc xác định các điểm kỳ dị và vùng lân cận của chúng trong không gian làm việc của các chuỗi động học phẳng mạch kín bằng phương pháp tiếp cận mới dựa trên góc áp lực. Bên cạnh đó, phương pháp này cũng cho phép đánh giá chất lượng các vùng hoạt động trong không gian thao tác của các cơ cấu phẳng này thông qua chỉ số truyền chuyển động (motion transmission index). Phương pháp được minh họa bằng việc phân tích cơ cấu 4 khâu bản lề, robot song song 2 bậc tự do. Các kết quả phân tích về điểm kỳ dị cũng như lân cận của chúng rất có ý nghĩa và được coi như là bước đầu tiên trong việc thiết kế cũng như điều khiển các cơ cấu động học.

Từ khóa: Robot song song, động học, mạch kín, vùng làm việc, điểm kỳ dị, góc áp lực, motion transmission index.

Abstract

Singular configurations in the workspace of planar closed-loop mechanism or parallel robot attracts intensive attention of researchers since this is the direct cause of uncontrolled phenomenon as the sudden changes (gain or lose) in the degree of freedom (DoF) of mechanisms when then they encounter these configurations. This paper presents a novel method to identify singular points and their neighbors in the workspace based on pressure angle. In addition, this method also allows us to evaluate the performance of the areas in the task space

through motion transmission index (MTI). The method is demonstrated by 2 examples with a four-bar linkage mechanism and 2 DoFs parallel robot. The results shown are important and being used as the first step in the design and control of the closed-loop mechanisms.

Keywords: Parallel robot, kinematics, closed-loop, workspace, singularity, pressure angle, chỉ số truyền chuyển động.

1. Giới thiệu chung

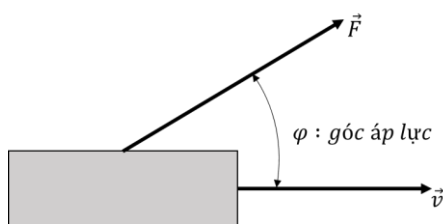
Robot song song và các chuỗi động học mạch kín ngày càng được sử dụng rộng rãi trong thực tế do những ưu điểm vượt trội của nó so với các cánh tay robot công nghiệp truyền thống. Những lợi thế nổi bật như độ cứng vững lớn, độ chính xác cao, khả năng chịu tải lớn cũng như tốc độ di chuyển nhanh của khâu thao tác giúp robot song song được ứng dụng trong các dây chuyền sản xuất thực phẩm, thiết bị y tế hay các thiết bị mô phỏng bay,... Tuy nhiên, chúng lại có nhược điểm về không gian làm việc nhỏ, độ linh hoạt thấp khi so sánh với các robot cánh tay (robot chuỗi hở) có cùng kích thước [2]. Hơn nữa, một vấn đề rất quan trọng trong nghiên cứu các cấu trúc động học kín này đó là việc tồn tại các điểm kỳ dị (singular points) trong vùng làm việc của chúng. Khi robot hoạt động và đi qua các điểm này có thể xảy ra hiện tượng mất điều khiển do thay đổi đột ngột số bậc tự do (tăng hoặc giảm) của cơ cấu. Vì vậy, nghiên cứu về các điểm kỳ dị cũng như vùng lân cận được đặc biệt chú ý trong thiết kế cấu trúc của các robot song song. Việc xác định các điểm này có thể thực hiện bằng cách phân tích ma trận Jacobian hoặc dựa trên lý thuyết xoắn ốc (screw theory). Tuy

nhiên các phương pháp này cũng có những nhược điểm nhất định. Đối với phương pháp ma trận Jacobian, việc tìm nghiệm của định thức ma trận ở dạng giải tích chỉ cho ta được các điểm kỳ dị cụ thể và không phải lúc nào cũng giải được do đặc tính của các phương trình phi tuyến [3]. Trong khi đó lý thuyết xoắn ốc dù tổng quát áp dụng được cho nhiều loại cấu trúc và cho phép xác định các vùng lân cận của điểm kỳ dị nhưng lại không được sử dụng rộng rãi trong thực tế do khó tiếp cận với những người nghiên cứu [4].

Trong bài báo này, tác giả sử dụng phương pháp mới dựa trên góc áp lực để xác định các cấu hình kỳ dị cũng như các vùng lân cận của chúng; đồng thời cũng phân đoạn chất lượng của các vùng hoạt động trong không gian làm việc của các chuỗi động học mạch kín, phẳng bởi chỉ số truyền chuyển động (MTI). Phần còn lại của bài báo, tác giả trình bày về góc áp lực và chỉ số truyền chuyển động (Mục 2), đồng thời minh họa phương pháp với cơ cấu 4 khâu bản lề (Mục 3), áp dụng vào robot song song 2 bậc tự do (Mục 4), sau đó đưa ra nhận xét và kết luận (Mục 5).

2. Góc áp lực (Pressure Angle) và Chỉ số truyền chuyển động MTI (Motion Transmission Index)

Góc áp lực được định nghĩa là góc nhọn tạo bởi phương của lực tác dụng lên vật và phương của vecto vận tốc chuyển động của vật như Hình 1.



Hình 1. Góc áp lực

Độ lớn công suất của lực \vec{F} tác dụng lên vật khi đó được tính bởi công thức:

$$A = \vec{F}\vec{v} = |\vec{F}||\vec{v}|\cos(\varphi) \quad (1)$$

Ở đây, ta định nghĩa chỉ số truyền chuyển động MTI (Motion Transmission Index):

$$MTI = \cos(\varphi) \in [0,1] \quad (2)$$

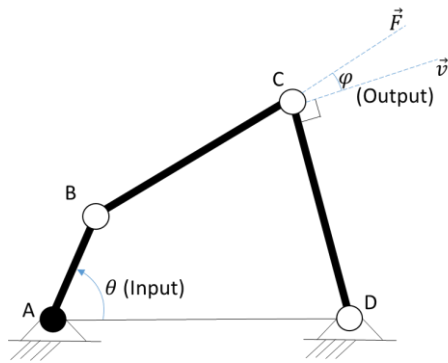
Khi lực tác dụng vuông góc với phương của

vecto vận tốc, góc áp lực bằng 90° , lực này sinh công suất bằng không và chỉ số truyền chuyển động $MTI = \cos(90^\circ) = 0$. Ngược lại, khi lực tác dụng cùng phương với vecto vận tốc, góc áp lực bằng không, lực này sinh công suất cực đại và chỉ số truyền chuyển động $MTI = \cos(0^\circ) = 1$. Ở Mục 3 và 4, ta sẽ ứng dụng chỉ số MTI trong việc xác định các điểm kỳ dị và vùng lân cận của chúng trong không gian làm việc của cơ cấu thông qua việc khảo sát giá trị của chỉ số MTI. Khi MTI bằng không hoặc xấp xỉ không, nghĩa là cơ cấu đang ở vị trí của điểm kỳ dị hoặc lân cận điểm kỳ dị do lực truyền động không sinh ra công. Ta sẽ phân tích chỉ số MTI qua các ví dụ với cơ cấu 4 khâu bản lề và robot song song 2 bậc tự do.

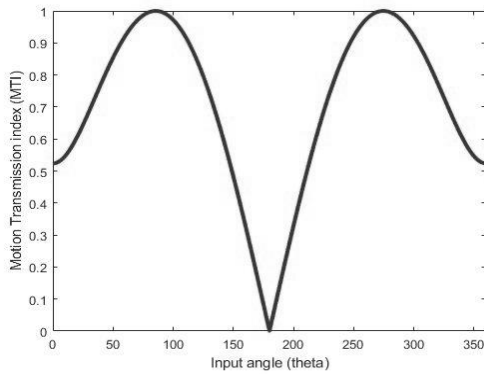
3. Cơ cấu 4 khâu bản lề

Cơ cấu 4 khâu bản lề gồm 3 thanh động gắn với đế cố định bằng các khớp quay như trong Hình 2. Cơ cấu được dẫn động bởi động cơ đặt tại khớp A (Input), C là điểm tác động-điểm làm việc của cơ cấu (Output). Khi cơ cấu hoạt động, lực sẽ được truyền dọc theo thanh BC, phương của vecto vận tốc của điểm C sẽ vuông góc với thanh CD do nó quay quanh điểm D cố định. Từ đó, ta xác định được góc áp lực $\varphi = 90^\circ$ của cơ cấu. Ứng với mỗi góc θ ở đầu vào, ta sẽ xác định được góc áp lực φ ở đầu ra.

Khi, chỉ số $MTI = 0$, nghĩa là lực truyền chuyển động dọc trục BC sinh ra công bằng không, đây là một cấu hình kỳ dị trong vùng làm việc của cơ cấu 4 khâu bản lề và hiệu quả truyền chuyển động bằng không. Để thuận tiện cho minh họa, ta giả sử cơ cấu 4 khâu có kích thước đảm bảo cho khâu AB có thể quay toàn vòng với: $AB=0,25$, $BC=0,3$; $CD=0,45$, $AD=0,5$. Bằng việc giải bài toán động học ngược về vị trí, ta vẽ được đồ thị mối quan hệ giữa góc đầu vào θ và chỉ số MTI như trong Hình 3. Nhìn vào đồ thị ở Hình 3, ta thấy khi góc $\theta = 180^\circ$, chỉ số $MTI=0$. Ở vị trí này, thanh AB nằm ngang về bên tay trái, các thanh BC và CD cũng nằm ngang và cơ cấu mất đi 1 bậc tự do, đây là 1 dạng cấu hình kỳ dị. Như vậy, chỉ số MTI giúp ta xác định được cấu hình kỳ dị trong không gian làm việc của cơ cấu 4 khâu. Hơn nữa, khi chỉ số MTI càng tiến về 0, nghĩa là cơ cấu này đang ở lân cận của điểm kỳ dị và sắp tiến tới cấu hình kỳ dị (có sự thay đổi số bậc tự do đột ngột).



Hình 2. Cơ cấu 4 khâu bản lề



Hình 3. Mối quan hệ giữa góc dẫn động và MTI

4. Robot song song 2 bậc tự do

Robot song song 2 bậc tự do trong mặt phẳng, (hay còn gọi là cơ cấu 5 khâu) với 4 khâu động và 1 khâu cố định, thường được ứng dụng trong gấp thả sản phẩm ở tốc độ cao [8]. Robot này được dẫn động bởi 2 động cơ đặt vào các khớp A_1, A_2 (Input), P là điểm tác động cuối của Robot (Output). Các khâu chủ động, bị động có kích thước bằng nhau tương ứng (do cấu trúc song song): $A_1B_1=A_2B_2=L_a$; $B_1P=B_2P=L_p$; khoảng cách giữa 2 khớp chủ động $A_1A_2=d$.

4.1. Xác định chỉ số truyền chuyển động

Để xác định chỉ số truyền chuyển động cho robot song song 2 bậc tự do, trước tiên ta cần xác định các góc áp lực tương ứng với các khớp dẫn động. Để xác định góc áp lực φ_1 ứng với khớp dẫn động A_1 , ta sẽ hóa cứng các khớp dẫn động còn lại của cơ cấu. Do cơ cấu có 2 khâu dẫn động nên để xác định góc áp lực φ_1 ứng với khớp dẫn động A_1 , ta chỉ cần hóa cứng khớp dẫn động A_2 , tức là khâu A_2B_2 trở thành khâu cố định. Lúc này, cơ cấu chỉ còn 1 bậc tự do và có thể xem như là 1 cơ cấu 4 khâu bản lề ở Mục 3.

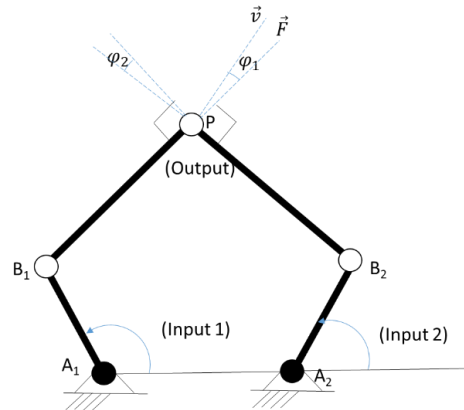
Từ đó ta dễ dàng xác định được các góc áp lực φ_1, φ_2 như Hình 3. Khi đó, chỉ số truyền chuyển động cho robot song song 2 bậc tự do sẽ được xác định bởi công thức 3 dưới đây:

$$MTI = \min(\cos(\varphi_i)) = \min(\cos(\varphi_1), \cos(\varphi_2)) \in [0,1] \quad i = 1,2 \quad (3)$$

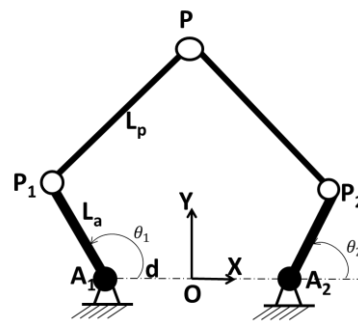
Cũng cần chú ý rằng, do tính chất đối xứng trong cấu trúc của robot song song 2 bậc tự do nên 2 góc áp lực trong trường hợp này bằng nhau. Để có thể xác định phân bố của chỉ số MTI trong vùng làm việc, trước tiên ta cần giải quyết bài toán động học ngược nhằm tìm ra mối quan hệ giữa vị trí của điểm P (Output) và 2 góc dẫn động đầu vào θ_1, θ_2 .

4.2. Động học ngược

Trong bài toán động học ngược, tọa độ của điểm thao tác P sẽ được cho trước và chúng ta cần:



Hình 4. Các góc áp lực φ_1, φ_2



Hình 5. Sơ đồ động học

Tìm các góc dẫn động θ_1, θ_2 . Ở đây, chúng ta sử dụng phương pháp giải tích. Chọn hệ tọa độ Oxy cố định với O là trung điểm của A_1A_2 . Vị trí của điểm P và 2 điểm P_1 được miêu tả bởi:

$$\mathbf{p} = [x \ y]^T; \quad \mathbf{p}_1 = [L_a \cos(\theta_1) - d, \ L_a \sin(\theta_1)]^T; \quad (4)$$

$$\mathbf{p}_2 = [L_a \cos(\theta_2) + d, \ L_a \sin(\theta_2)]^T;$$

Mặt khác ta có phương trình ràng buộc về hình học:

$$|PP_i| = L_p \quad (5)$$

Đồng nhất 2 phương trình dạng đại số ở (4) và dạng hình học ở (5), ta được:

$$\begin{cases} (x - L_a \cos(\theta_1) + d)^2 + (y - L_a \sin(\theta_1))^2 = L_p^2 \\ (x - L_a \cos(\theta_2) - d)^2 + (y - L_a \sin(\theta_2))^2 = L_p^2 \end{cases} \quad (6)$$

Từ (6), ta có thể tìm được các góc dẫn động nếu biết trước tọa độ của P theo công thức:

$$\theta_i = 2 \tan^{-1}(d_i) \quad (7)$$

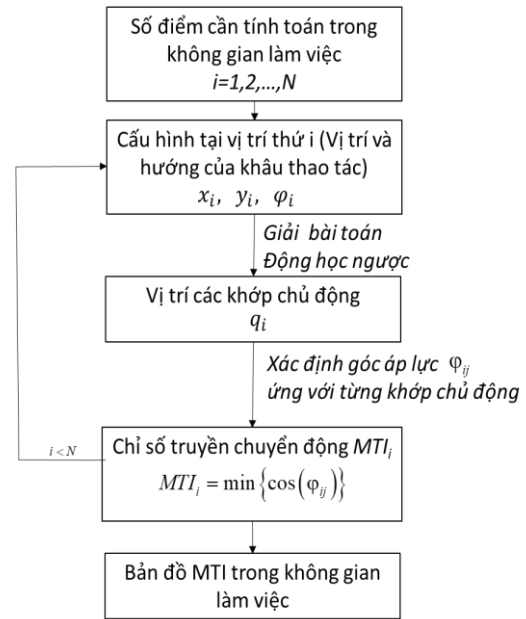
Với:

$$\begin{aligned} a_i &= L_a^2 + y^2 + (x \pm d)^2 - L_p^2 \pm 2(x \pm d)L_a \\ b_i &= -4yL_a; \quad c_i = L_a^2 + y^2 + (x \pm d)^2 - L_p^2 \pm 2(x \pm d)L_a \end{aligned} \quad (8)$$

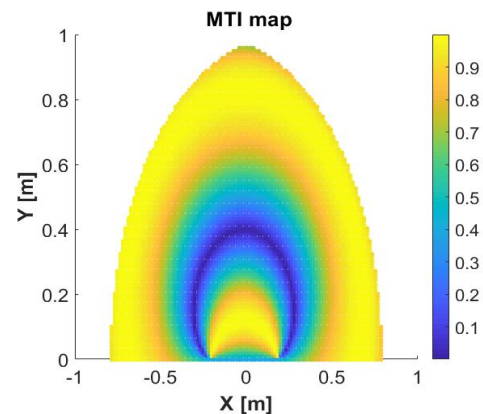
Mặc dù bài toán động học ngược có 4 nghiệm, nhưng ta chọn một nghiệm ứng với cấu hình thường được sử dụng trong thực tế như ở Hình 4, 5.

4.3. Phân bố chỉ số truyền chuyển động MTI trong vùng làm việc

Với mỗi tọa độ điểm P trong không gian làm việc, nhờ giải bài toán động học ngược ở Mục 4.2, ta sẽ tìm được các góc dẫn động tương ứng, tức là xác định được cấu hình của Robot. Đồng thời ta cũng sẽ tìm được giá trị của chỉ số truyền chuyển động từ Mục 4.1 tương ứng với mỗi tọa độ điểm P. Hay nói cách khác, ta sẽ xác định được một chỉ số MTI ứng với mỗi cấu hình của Robot, nhờ đó ta có thể xác định được bản đồ phân bố chỉ số MTI trong toàn bộ vùng làm việc của Robot. Sơ đồ quy trình tính toán và thiết lập bản đồ MTI được thể hiện trong Hình 6. Để minh họa, ta giả sử các kích thước của các khâu: $L_a=L_p=0,5$; $d=0,2$ (m). Bản đồ phân bố chỉ số MTI trong không gian làm việc của robot song song 2 bậc tự do khi đó được thể hiện ở Hình 7. Nhìn vào đồ thị này, ta thấy trong không gian làm việc tồn tại những vùng màu xanh, tức là có chỉ số MTI=0 hoặc rất nhỏ $MTI < 0,1$. Đây là những vùng mà robot rơi vào cấu hình kỳ dị hoặc lân cận của kỳ dị và chúng ta cần tránh robot hoạt động ở những khu vực này do sẽ gặp hiện tượng mất điều khiển và bất ổn định (cơ cấu sẽ bị thay đổi số bậc tự do một cách đột ngột). Đây có thể xem là những vùng hoạt động nguy hiểm, hay chất lượng thấp, đặc trưng bởi chỉ số MTI xấp xỉ 0.



Hình 6. Sơ đồ quy trình tính toán chỉ số



Hình 7. Bản đồ phân bố chỉ số MTI trong không gian MTI trong không gian làm việc

5. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã sử dụng chỉ số truyền chuyển động MTI để xác định điểm kỳ dị và lân cận của chúng trong không gian làm việc của các cơ cấu động học phẳng, kín với việc phân tích hai ví dụ cụ thể gồm cơ cấu 4 khâu phẳng và robot song song 2 bậc tự do. Việc chỉ ra các vùng nguy hiểm (thể hiện bởi chỉ số MTI xấp xỉ 0) là một kết quả quan trọng cho các bài toán thiết kế và điều khiển sau này.

Lời cảm ơn

Bài báo này là sản phẩm của đề tài nghiên cứu khoa học cấp Trường năm học 2019 - 2020: “Thiết kế, chế tạo Robot song song hai bậc tự do”, được hỗ trợ kinh phí bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N.D. Sang, Y. Takeda, D. Matsuura and Y. Sugahara, "Kinematic Design of Five-bar Parallel Robot by Kinematically Defined Performance Index for Energy Consumption", *EucoMes Mechanisms and Machine Science*, pp. 239-247, 2018.
- [2] J.P. Merlet, "Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 128, pp. 199-206, 2006.
- [3] C. Gosselin, J. Angeles, "Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, pp. 281-290, 1990.
- [4] J.S. Wang, Xin-Jun Liu, "Performance evaluation of parallel manipulators: Motion/force transmissibility and its index", *Mechanism and Machine Theory*, pp. 1462-1476, 2010.
- [5] Xin-Jun Liu, Chao Wu, Jinsong Wang, "A New Approach for Singularity Analysis and Closeness Measurement to Singularities of Parallel Manipulators", *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 4, 2012.
- [6] Kristan Marlow, Mats Isaksson, Saeid Nahavandi, "Motion/Force Transmission Analysis of Planar Parallel Mechanisms With Closed-Loop Subchains", *Journal of Mechanism and Robotics*, Vol. 8, 2016.
- [7] Yukio TAKEDA, Hiroaki FUNABASHI, "Motion Transmissibility of In-Parallel Actuated Manipulators", *The Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 38, pp.749-755, 1995.
- [8] Xin-Jun Liu, Jinsong Wang, G. Pritschow, "Kinematics, singularity, and workspace of planar 5R symmetrical parallel mechanisms", *Mechanism and Machine Theory*, pp.145-169, 2006.

Ngày nhận bài:	16/3/2020
Ngày nhận bản sửa:	24/3/2020
Ngày duyệt đăng:	27/3/2020