

THIẾT KẾ CƠ CẤU TRUYỀN ĐỘNG VÂY DỰA TRÊN CƠ CẤU BỐN KHÂU KHÔNG GIAN

DESIGN OF A SPHERICAL FOUR-BAR MECHANISM FOR ROBOTIC FISH FINS

Nguyễn Văn Bình Dương^{1,2}, Phan Hoàng Long^{1,2,3}, Nguyễn Huy Hùng⁴, Dương Văn Tú^{1,2,3},
Nguyễn Tấn Tiến^{1,2,3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

*Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu thiết kế cơ cấu bốn khâu bản lề cầu ứng dụng trong chi vây robot cá mô phỏng sinh học. Cơ cấu được phân tích bằng phương pháp công suất để xác định tỷ số vận tốc và moment truyền động, từ đó đánh giá hiệu suất truyền lực. Mối quan hệ phi tuyến giữa các thông số hình học và lợi thế cơ học được mô hình hóa bằng hồi quy bội bậc ba, tinh giản bằng thuật toán AIC. Kết quả mô hình cho thấy độ phù hợp cao ($R^2 > 0.96$), xác định vai trò then chốt của góc thiết kế trong việc tối ưu moment đầu vào. Cơ cấu sau đó được chế tạo và thử nghiệm trên mô hình robot cá, xác nhận tính khả thi và hiệu quả truyền động trong môi trường nước.

Từ khóa: Bản lề cầu; Robot cá; Truyền lực; Tối ưu hóa hình học.

ABSTRACT

This paper presents the design of a spherical four-bar mechanism for robotic fish fins. The mechanism is analyzed using power methods to evaluate velocity ratios and torque transmission efficiency. A nonlinear relationship between geometric parameters and mechanical advantage is modeled using cubic regression and simplified via AIC-based selection. The resulting model achieves high accuracy ($R^2 > 0.96$), confirming the critical role of angular parameters in torque optimization. The mechanism is fabricated and tested on a robotic fish prototype, demonstrating reliable underwater performance.

Keywords: Spherical hinge; Robotic fish; Torque transmission; Geometric optimization.

1. GIỚI THIỆU

Robot cá mô phỏng sinh học là hướng nghiên cứu thu hút trong lĩnh vực cơ điện tử và robot học mềm nhờ khả năng mô phỏng chuyển động hiệu quả, linh hoạt và thân thiện với môi trường nước [1], [2]. Đặc biệt, các hệ thống sử dụng cơ chế vây kiểu MPF (Median and/or Paired Fin propulsion), như ở loài *Gymnarchus niloticus*, cho phép robot di chuyển ổn định và điều hướng chính xác trong không gian hẹp [3].

Một thách thức quan trọng trong thiết kế robot cá là hệ thống truyền động từ động cơ đặt bên trong thân đến cụm chi vây bên ngoài – vốn dao động biên độ nhỏ và đòi hỏi độ chính xác cao. Các cơ cấu truyền thống như bánh răng, trục vít hoặc dây đai thường không phù hợp do độ ồn, ma sát lớn, khó bảo trì trong môi trường ẩm ướt và không dễ tích hợp vào cấu trúc nhỏ gọn.

Trong bối cảnh đó, cơ cấu bốn khâu bản lề cầu (spherical four-bar linkage) được xem là giải pháp truyền động khả thi nhờ cấu trúc gọn nhẹ, chỉ một bậc tự do, truyền chuyển động quay ổn định trong không gian ba chiều mà không cần các phần tử ăn khớp [4], [5]. Ngoài ra, cơ cấu này hoạt động mượt mà trong môi trường nước và dễ tích hợp trong robot có kích thước hạn chế. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào phân tích động học [6], [7], trong khi mối liên hệ định lượng giữa thông số hình học và hiệu suất truyền động (moment, tỉ số vận tốc, lợi thế cơ học) chưa được làm rõ một cách hệ thống.

Từ đó, nghiên cứu này hướng đến việc phân tích, mô hình hóa và tối ưu hóa cơ cấu bản lề cầu, tập trung vào mối quan hệ giữa các tham số hình học và moment truyền động. Mục tiêu là xác định vùng thiết kế tối ưu giúp giảm moment đầu vào, đồng thời vẫn đảm bảo khả năng truyền tải, từ đó hỗ trợ ứng dụng hiệu quả

cơ cấu trong thiết kế robot cá thế hệ mới.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Động học cơ cấu

Cơ cấu bốn khâu bản lề cầu là một hệ thống chỉ có một bậc tự do, trong đó góc quay đầu vào α tại trục khớp A sẽ xác định duy nhất góc quay đầu ra β tại trục khớp D. Mối quan hệ hình học giữa α và β được xác định bởi phương trình Freudenstein dạng cầu:

$$\cos\phi = A\cos\alpha + B\cos\beta + C$$

Trong đó, các hệ số A, B, C là hàm của thông số hình học (các góc giữa trục khớp), được tính trước theo thiết kế.

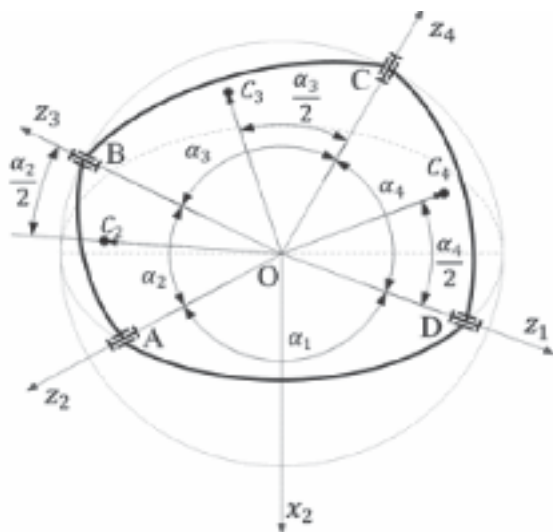
Dựa trên phương trình này, ta có thể xác định vận tốc góc đầu ra từ vận tốc đầu vào bằng đạo hàm theo thời gian:

$$\omega_{out} = \frac{d\beta}{dt} = \frac{d\beta}{d\alpha} = \omega_{in}$$

Hệ số $d\beta/d\alpha$ chính là tỷ số truyền vận tốc tức thời, đóng vai trò như một Jacobian động học. Biểu thức này phản ánh rõ bản chất phi tuyến của cơ cấu: cùng một vận tốc đầu vào nhưng vận tốc đầu ra biến thiên mạnh theo vị trí cấu hình.

Tương tự, bằng đạo hàm bậc hai, ta cũng có thể xác định gia tốc góc đầu ra dựa vào gia tốc đầu vào và đạo hàm của tỷ số truyền. Tuy nhiên, trong phạm vi nghiên cứu này, trọng tâm được đặt vào vận tốc và moment - hai yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến truyền lực.

Những kết quả này là cơ sở để đánh giá hiệu suất truyền động của cơ cấu tại mỗi vị trí vận hành, và làm tiền đề cho việc xây dựng mô hình động lực học và tối ưu hóa thiết kế. 



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý cơ cấu bốn khâu bản lề không gian

2.2. Động lực học cơ cấu

Để mô tả moment truyền động, nghiên cứu sử dụng phương pháp công suất tức thời. Theo định lý bảo toàn công suất, moment đầu vào M_{in} cần thỏa mãn:

$$M_n \omega_{in} = M_{out} \omega_{out} + P_g$$

Với: M_{out} – Moment tải tại khâu ra; P_g – Công suất do trọng lượng các khâu sinh ra.

Sử dụng quan hệ vận tốc đã phân tích trước đó, moment đầu vào được suy ra theo:

$$M_{in} = M_{out} \frac{d\beta}{d\alpha} + M_g$$

Trong đó, phần tử $d\beta/d\alpha$ phản ánh rõ mức độ khuếch đại hoặc suy giảm moment giữa đầu vào và đầu ra tại từng cấu hình. Tại các vị trí gần “điểm chết” động học, tỷ số truyền tiệm cận 0 hoặc ∞ , khiến moment yêu cầu tăng vọt – đây là hiện tượng phi tuyến đặc trưng của cơ cấu bản lề cầu.

Ngoài ra, để đánh giá hiệu suất truyền moment tại mỗi cấu hình, nghiên cứu sử dụng đại lượng tỷ số truyền lực moment:

$$\eta = \frac{M_{in}}{M_{out}}$$

Giá trị η càng nhỏ thì hiệu suất truyền lực càng cao, tức moment đầu vào cần thiết càng thấp. Phân tích sự biến thiên của η trên toàn bộ không gian thiết kế là cơ sở để xây dựng mô hình tối ưu hóa sau này.

Dựa trên phân tích động lực học, moment đầu vào M_{in} phụ thuộc mạnh vào cấu hình hình học của cơ cấu – cụ thể là hai góc thiết kế chính α và β . Để khảo sát định lượng ảnh hưởng này, nghiên cứu tiến hành xây dựng tập dữ liệu mô phỏng, trong đó các giá trị moment được tính toán tương ứng với nhiều tổ hợp góc đầu vào-ra thuộc phạm vi thiết kế.

2.3. Mô hình hồi quy và tối ưu hóa

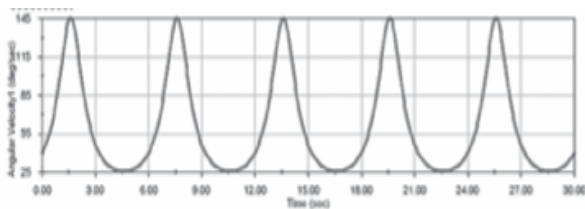
Từ tập dữ liệu thu được, nghiên cứu sử dụng hồi quy bội bậc ba (cubic multiple regression) để xây dựng mô hình phi tuyến mô tả mối quan hệ giữa các tham số hình học (biến đầu vào) và tỷ số truyền lực moment η (biến đầu ra). Mô hình ban đầu bao gồm các biến tuyến tính, bậc hai, bậc ba và các tương tác giữa α , β .

Để đảm bảo mô hình không quá phức tạp và tránh hiện tượng dư thừa tham số, thuật toán lựa chọn mô hình stepwise theo tiêu chí Akaike (AIC) được áp dụng. Nhờ đó, mô hình hồi quy cuối cùng chỉ giữ lại các biến có ảnh hưởng thống kê rõ rệt, đồng thời vẫn duy trì độ phù hợp cao ($R^2 > 0.96$).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô phỏng động lực học của cơ cấu

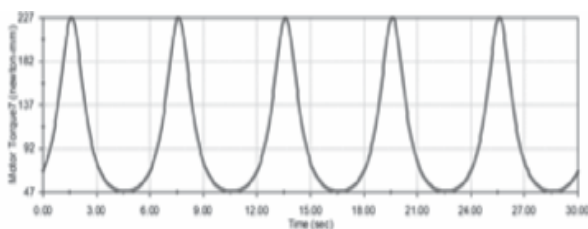
Dựa trên mô hình công suất đã xây dựng, nghiên cứu tiến hành mô phỏng quá trình truyền động của cơ cấu bốn khâu bản lề cầu với moment tải không đổi. Mô phỏng cho thấy vận tốc góc đầu ra biến thiên mạnh theo thời gian, dù vận tốc đầu vào giữ không đổi. Hiện tượng này phản ánh tính phi tuyến động học của cơ cấu do hệ số truyền $d\beta/d\alpha$ thay đổi liên tục theo cấu hình.



Hình 2. Vận tốc góc đầu ra theo thời gian

Hình 2 cho thấy vận tốc góc khâu ra dao động mạnh và không đều.

Tương ứng, moment đầu vào M_{in} cũng dao động theo chu kỳ chuyển động, với các pha cực đại khi cơ cấu tiệm cận vị trí “điểm chết” (Jacobian tiến về 0). Khi đó, hệ số truyền lực η tăng vọt, làm tăng đáng kể yêu cầu công suất đầu vào.



Hình 3. Moment đầu vào theo thời gian

Hình 3 cho thấy sự tăng vọt moment tại các pha không thuận lợi.

3.2. Khảo sát ảnh hưởng các thông số hình học

Để đánh giá ảnh hưởng của hình học đến hiệu suất, nghiên cứu khảo sát nhiều tổ hợp góc α và β , đồng thời tính toán giá trị η . Kết quả được tổng hợp trong bảng số liệu, cho thấy khi α giảm (góc khâu vào ngắn hơn), giá trị η giảm rõ rệt - tức cơ cấu yêu cầu moment đầu vào thấp hơn.

Bảng 1. Bảng giá trị về α_1 , α_2 và M_A

TT	α_1	α_2	M_A	TT	α_1	α_2	M_A
1	90	80	11.428	19	70	30	1.462
2	90	70	5.671	20	70	20	1.282
3	90	60	3.732	21	70	15	1.203
4	90	50	2.747	22	60	50	1.737
5	90	45	2.144	23	60	45	1.629
6	90	30	1.732	24	60	30	1.366
7	90	20	1.428	25	60	20	1.227
8	90	15	1.303	26	60	15	1.165
9	80	70	3.848	27	50	45	1.479
10	80	60	2.877	28	50	30	1.286
11	80	50	2.285	29	50	20	1.179
12	80	45	2.065	30	50	15	1.131
13	80	30	1.580	31	45	30	1.250
14	80	20	1.347	32	45	20	1.158
15	80	15	1.248	33	45	15	1.115
16	70	60	2.357	34	30	20	1.099
17	70	50	1.969	35	30	15	1.073
18	70	45	1.817				

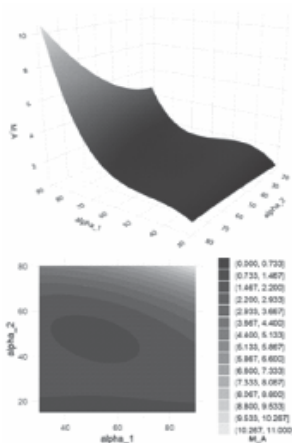
Bảng 1 cho thấy η có xu hướng giảm theo α .

Kết quả này là tiền đề để xây dựng mô hình hồi quy ở bước sau, đồng thời cung cấp cái nhìn ban đầu về vùng cấu hình hình học tối ưu – nơi hiệu suất truyền lực đạt cao nhất. 

3.3. Kết quả hồi quy và phân tích thống kê

Dựa trên dữ liệu mô phỏng thu được từ khảo sát các tổ hợp góc thiết kế α và β , nhóm nghiên cứu xây dựng mô hình hồi quy bội bậc ba nhằm mô tả mối quan hệ phi tuyến giữa hình học cơ cấu và hiệu suất truyền lực - được đại diện bởi hệ số truyền lực moment η .

Mô hình ban đầu bao gồm đầy đủ các thành phần: tuyến tính, bình phương, lập phương, cũng như các tương tác hai chiều giữa hai biến α và β . Để tránh dư thừa tham số và đảm bảo tính gọn nhẹ, thuật toán lựa chọn biến stepwise theo tiêu chí thông tin Akaike (AIC) được áp dụng. Kết quả là mô hình tối ưu giữ lại 6 biến quan trọng, trong đó các thành phần chứa α cho thấy ảnh hưởng vượt trội. Điều này cho thấy góc α (góc đầu vào) đóng vai trò quyết định đến moment truyền động, trong khi β có ảnh hưởng tương đối yếu hơn nếu xét riêng lẻ.



Hình 4. M_A và biểu đồ contour của mô hình

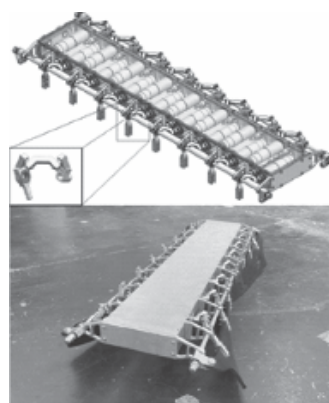
Biểu đồ contour thu được từ mô hình hồi quy thể hiện rõ một vùng thiết kế tối ưu, tại đó hệ số η đạt giá trị nhỏ nhất – tương ứng với hiệu suất truyền lực cao. Cụ thể, khi α nằm trong khoảng $45^\circ \div 60^\circ$, η giảm đáng kể bất kể β thay đổi, cho thấy tính ổn định của vùng thiết kế này.

Phân tích phần dư cho thấy các giả định của mô hình hồi quy được thỏa mãn: phần dư phân bố gần chuẩn (theo biểu đồ Q – Q), không xuất hiện phương sai thay đổi đáng kể ở các biên thiết kế, và không có điểm ngoại lệ ảnh hưởng mạnh (Cook's distance < 0.5). Những kết quả này khẳng định độ tin cậy của mô hình và khả năng áp dụng nó như một công cụ hỗ trợ thiết kế, cho phép dự đoán trước hiệu suất truyền động dựa trên các thông số hình học đầu vào.

4. THIẾT KẾ VÀ THỬ NGHIỆM

Dựa trên kết quả mô hình hồi quy và biểu đồ đánh giá hiệu suất, nghiên cứu lựa chọn một tập giá trị góc thiết kế nằm gần vùng tối ưu, cụ thể là $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 30^\circ$. Cặp góc này không đạt cực tiểu tuyệt đối của hệ số truyền lực η , nhưng đảm bảo cân bằng giữa hiệu suất và khả năng bố trí cơ khí thực tế, đặc biệt trong không gian hạn chế của robot cá.

Một mô hình CAD 3D của cơ cấu bốn khâu bản lề cầu được dựng để kiểm tra khả năng lắp ghép, bố trí động cơ và gắn kết cụm chi vây. Từ đó, nguyên mẫu được chế tạo bằng vật liệu nhựa cứng nhẹ, sử dụng trục xoay thép và gối đỡ ma sát thấp nhằm giảm tiêu hao cơ học trong điều kiện hoạt động thực.



Hình 5. Mô hình 4 khâu bản lề không gian và thực tế

Thử nghiệm sơ bộ trong môi trường nước cho thấy cơ cấu hoạt động ổn định, phản hồi nhanh và không có hiện tượng trễ hoặc kẹt. Chuyển động dao động của chi vây được tái hiện mượt mà, phù hợp với yêu cầu ứng dụng MPF. Moment đầu vào đo được phù hợp với giá trị dự báo từ mô hình hồi quy, xác nhận tính khả thi của phương pháp thiết kế tối ưu hóa dựa trên phân tích công suất và thống kê.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày một phương pháp tiếp cận toàn diện trong thiết kế và tối ưu hóa cơ cấu bốn khâu bản lề cầu, ứng dụng cho robot cá mô phỏng sinh học.

Thông qua phân tích động học, động lực học bằng phương pháp công suất và mô hình hóa hồi quy thống kê, nghiên cứu đã xác định rõ ảnh hưởng của các góc hình học đến hiệu suất truyền lực.

Mô hình hồi quy bội bậc ba đạt độ phù hợp cao ($R^2 > 0.96$), cho phép dự đoán hiệu quả hệ số truyền lực theo các tham số thiết kế. Kết quả cho thấy góc đầu vào α là yếu tố chi phối khả năng truyền moment, đồng thời giúp xác định vùng thiết kế tối ưu trong không gian hình học của cơ cấu.

Nguyên mẫu cơ cấu đã được thiết kế, chế tạo và thử nghiệm thành công trên robot cá mô phỏng. Kết quả thực nghiệm phù hợp với mô phỏng, chứng minh tính khả thi và hiệu quả của phương pháp thiết kế đề xuất trong điều kiện ứng dụng thực tế.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ trong khuôn khổ đề tài

mã số ĐTĐL.CN-41/22. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ♦

Ngày nhận bài: **08/7/2025**

Ngày phản biện: **23/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. G. Li, G. Liu, D. Leng, X. Fang, G. Li, and W. Wang, "Underwater Undulating Propulsion Biomimetic Robots: A Review". Jul. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/biomimetics8030318.
- [2]. H. Zhou et al., "Bio-inspired Flow Sensing and Prediction for Fish-like Undulating Locomotion: A CFD-aided Approach". J. Bionic Eng., vol. 12, no. 3, pp. 406-417, Jul. 2015, doi: 10.1016/S1672-6529(14)60132-3.
- [3]. F. Liu, K. M. Lee, and C. J. Yang, "Hydrodynamics of an undulating fin for a wave-like locomotion system design". IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 17, no. 3, pp. 554-562, 2012, doi: 10.1109/TMECH.2011.2107747.
- [4]. K. H. Shirazi, "Computer modelling and geometric construction for four-point synthesis of 4R spherical linkages". Appl Math Model, vol. 31, no. 9, pp. 1874-1888, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.apm.2006.06.013.
- [5]. J. Schuler, J. Ketchel, and P. Larochelle, "Computer-aided modeling and manufacturing of spherical Mechanisms via a novel Web tool". J. Comput Inf. Sci. Eng., vol. 7, no. 4, pp. 339-346, Dec. 2007, doi: 10.1115/1.2795307.
- [6]. G. Figliolini, C. Lanni, and R. Kaur, "Kinematic Synthesis of Spherical Four-bar Linkages for Five-Poses Rigid Body Guidance". In Mechanisms and Machine Science, Springer Science and Business Media B.V., 2019, pp. 639-648. doi: 10.1007/978-3-030-20131-9_64.
- [7]. A. Tang. Yang, "Static Force and Torque Analysis of Spherical Four-Bar Mechanisms", 1965. [Online] Available: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [8]. J. Angeles and S. Bai, Mathematical Engineering.