

THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC CỤM MÀNG VÂY MỀM CHO ROBOT BƠI PHÒNG SINH HỌC SỬ DỤNG CHUYỂN ĐỘNG MPF

DESIGN AND DYNAMIC ANALYSIS OF A SOFT FIN MODULE FOR A BIO-INSPIRED SWIMMING ROBOT WITH MPF LOCOMOTION

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

Nghiên cứu này đề xuất một cụm vây mềm cho robot bơi phỏng sinh học sử dụng cơ chế vận động MPF. Mỗi chi vây được xác định cần ba bậc tự do để tái hiện chuyển động uốn sóng tự nhiên. Cụm vây được điều khiển bởi một trục cam duy nhất với 9 cặp cam lệch pha tạo sóng lan truyền. Hệ thống tích hợp cơ cấu điều chỉnh góc trung vị từ -90° đến $+90^\circ$, giúp điều hướng robot trong không gian 3D. Mô phỏng cho thấy moment truyền động trên trục cam dao động trong khoảng 1000-4200Nmm và moment xoay khung có thể đạt 57000Nmm. Thiết kế này giúp giảm số nguồn dẫn động, đồng bộ hóa chuyển động và phù hợp với các hệ robot bơi nhỏ gọn, tiết kiệm năng lượng.

Từ khóa: Robot bơi phỏng sinh học; Màng vây mềm; Chuyển động MPF.

ABSTRACT

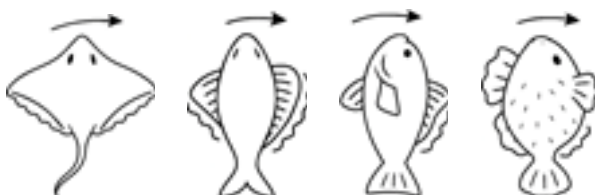
This study proposes a soft fin module for a bio-inspired swimming robot using MPF (Median and Paired Fin) locomotion. Each fin ray is designed with three degrees of freedom to replicate natural wave-like motion. A single camshaft drives 9 out-of-phase cams to generate traveling waves. The system also includes a mechanism to adjust the median plane angle from -90° to $+90^\circ$ for 3D orientation. Simulations show camshaft torque varies from 1000 to 4200 N•mm, and torque for median angle control reaches up to 57000 N•mm. The design reduces actuators, ensures smooth coordination, and suits compact, energy-efficient robotic systems.

Keywords: Bio-inspired swimming robot; Soft fin membrane; MPF locomotion.

1. GIỚI THIỆU

Trong các ứng dụng khảo sát, quan trắc và bảo trì môi trường biển, robot bơi ngày càng được quan tâm. Tuy nhiên, các hệ truyền động sử dụng chân vịt truyền thống thường gây nhiễu dòng, hiệu suất thấp khi di chuyển chậm, và không phù hợp với môi trường chật hẹp hoặc cần độ yên tĩnh cao [1]. Do đó, robot bơi phỏng sinh học – mô phỏng cơ chế vận động của cá – đang nổi lên như một hướng tiếp cận hiệu quả hơn [2].

Trong tự nhiên, cá thường bơi theo hai cơ chế chính: BCF (Body-Caudal Fin) và MPF (Median and Paired Fin) [3]. Cơ chế MPF đặc biệt phù hợp cho robot hoạt động chậm, ổn định và định hướng chính xác, nhờ sử dụng chuyển động mềm dẻo của các vây ngực, vây lưng và hậu môn. Dựa trên đặc điểm đó, nhiều thiết kế robot MPF đã được phát triển, như: kiểu rajiform ở cá đuối, balistiform ở triggerfish, labriiform ở cá thia, và diodontiform ở cá nóc – mỗi kiểu có đặc trưng truyền động riêng (Hình 1).



rajiform balistiform labriiform diodontiform
Hình 1. Phân loại chuyển động MPF

Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu hiện tại hoặc sử dụng nhiều động cơ độc lập gây phức tạp, hoặc thiếu sự đồng bộ trong mô hình hóa động học của màng vây. Để giải quyết điều này, nghiên cứu này hướng tới phát triển một cụm màng vây mềm sử dụng cơ cấu truyền động cam-con lăn duy nhất, có thể tạo sóng lan truyền và điều khiển hướng chuyển động 3D, từ đó tạo nền tảng cho các robot bơi phỏng sinh

học nhỏ gọn, tiết kiệm năng lượng và hiệu quả cao.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHÂN TÍCH MÔ HÌNH

2.1. Mô hình hóa màng vây liên tục

Để mô phỏng chuyển động uốn sóng của cá theo cơ chế MPF, nghiên cứu xây dựng mô hình toán cho màng vây liên tục dựa trên cơ sở rời rạc hóa thành các tia vây (fin rays). Mỗi tia vây đóng vai trò là một vector dao động trong mặt phẳng, kết nối biên trong và biên ngoài của màng vây đàn hồi.

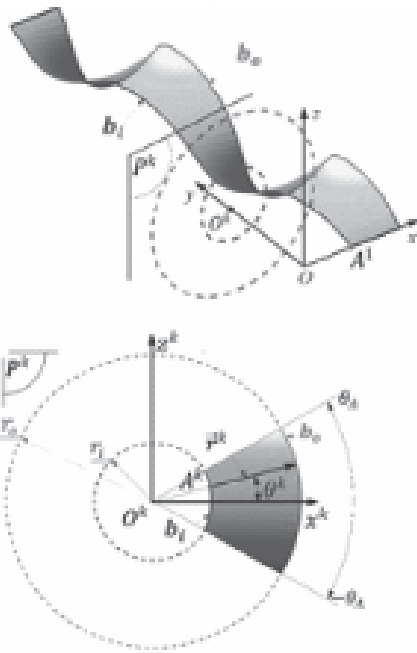
- Bậc tự do 1: Mô tả sự dao động góc của từng chi vây (tia vây) theo dạng sóng lan truyền. Màng vây được rời rạc hóa thành n chi vây đều nhau, mỗi chi vây có góc dao động được định nghĩa bởi:

$$\theta_k(t) = A \sin \left(2\pi f t + \frac{2\pi N k}{n} \right) \quad (1)$$

Với: A – Biên độ dao động; f – Tần số sóng; n – Số bước sóng trên chiều dài vây; N – Số tia vây; k – Chỉ số tia vây, $k = 0, 1, \dots, N-1$.

Để đảm bảo dao động nhịp nhàng và không làm rách màng vây, các tia cần dao động đồng bộ theo biên dạng cong, tạo ra sự lan truyền sóng mượt mà từ đầu đến cuối vây. Ngoài góc dao động, mỗi tia vây cần thêm hai bậc tự do nữa.





Hình 2. Mô hình rời rạc hóa màng vây thành các tia vây dao động có định hướng

- Bậc tự do 2: Điều chỉnh hướng tiếp tuyến tại điểm gốc tia vây để phù hợp với độ cong tức thời của màng. Góc này được xác định bởi góc giữa vector tiếp tuyến tại biên trong và mặt phẳng chuẩn (Oxy):

$$\gamma^k(t) = \arccos\left(\frac{\vec{T}_k \vec{n}}{\|\vec{T}_k\| \|\vec{n}\|}\right) \quad (2)$$

- Bậc tự do 3: Đảm bảo độ dài cong giữa các tia vây không thay đổi theo thời gian (duy trì dạng sóng ổn định), được mô tả bằng ràng buộc đạo hàm toàn phần:

$$\frac{d}{dt} \int_0^k \frac{\partial \vec{r}(n, t)}{\partial n} dn = 0 \quad (3)$$

Từ ba phương trình (1)-(3), ta xác lập rằng mỗi tia vây cần 3 bậc tự do để tái hiện chuyển động sinh học chính xác của màng vây mềm: dao động, định hướng tiếp tuyến, và duy trì độ cong lan truyền.

Mô hình này là nền tảng để xác định yêu cầu thiết kế cho cụm chi vây và cơ cấu truyền động tương ứng trình bày ở các mục sau.

2.2. Mô hình động học cụm chi vây

* Cấu trúc khung đỡ và định nghĩa vector chi vây

Trong cụm màng vây, mỗi chi vây (fin ray) được định nghĩa là một vector $\vec{r}^k$ nối từ điểm gốc trên biên trong b_i đến điểm ngọn trên biên ngoài b_o của màng vây (xem Hình 2). Mỗi vector này nằm trên mặt phẳng riêng (x^k, z^k) ứng với tia vây thứ k , có gốc tại O^k và tạo với trục tham chiếu một góc dao động tức thời θ_k .

Chiều dài vector $\vec{r}^k$ là không đổi, bằng hiệu số bán kính giữa hai đường tròn cơ sở:

$$\|\vec{r}^k\| = r_o - r_i$$

Hệ thống khung đỡ được tổ chức sao cho các tia vây được bố trí đều theo một góc tổng cộng θ_A , với trục Oy làm tâm xoay chính, tạo nên dạng hình quạt trải đều theo mặt phẳng Oxz.

* Mối quan hệ giữa dao động và cấu trúc hình học

Để đảm bảo chuyển động liên tục và đồng bộ của màng vây, các tia vây cần dao động theo một biên độ và pha nhất định, như đã mô tả trong phương trình (1). Góc θ_k điều khiển hướng lắc của tia vây thứ k , đóng vai trò là bậc tự do đầu tiên trong mô hình.

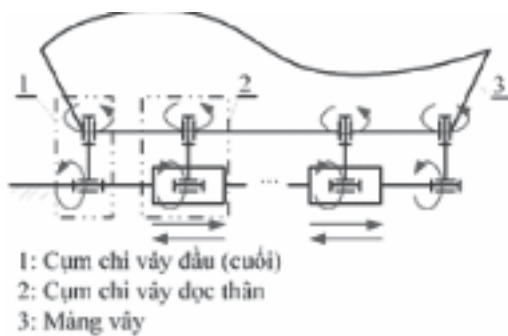
Đồng thời, sự thay đổi vector tiếp tuyến tại điểm gốc A^k cho biết mức độ cong cục bộ của màng vây - thể hiện bậc tự do thứ hai (góc tiếp tuyến ϕ_k). Bậc tự do thứ ba được đảm bảo

bởi điều kiện giữ nguyên độ cong tổng thể giữa các tia vây – tức là các tia không được làm rách, căng hoặc trùng màng vây – như đã trình bày trong phương trình (3).

Như vậy, mỗi cụm chi vây hoạt động vừa đảm bảo cấu trúc hình học ổn định, vừa tái hiện được dạng sóng uốn lan truyền dọc theo chiều dài màng, đóng vai trò thiết yếu trong hiệu quả đẩy của robot bơi.

3. THIẾT KẾ CƠ CẤU TRUYỀN ĐỘNG CAM – CON LẮN

3.1. Nguyên lý hoạt động



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý cụm chi vây với 3 bậc tự do điều khiển

Để tạo dao động tuần hoàn cho mỗi tia vây, nghiên cứu đề xuất sử dụng cơ cấu cam - con lăn - cần lắc, trong đó một cam đĩa quay đều tác động lên con lăn gắn vào đầu cần lắc, tạo ra chuyển động góc dao động θ_k của chi vây. Để đảm bảo sự tiếp xúc liên tục trong suốt chu kỳ hoạt động - đặc biệt ở các pha hồi chuyển - cơ cấu sử dụng cặp cam liên hợp (conjugate cams). Hai cam này được thiết kế có biên dạng đối xứng và lệch pha, giúp giữ con lăn luôn tiếp xúc mà không cần lò xo hay ép cơ khí, từ đó giảm rung động và lực phản hồi không mong muốn.

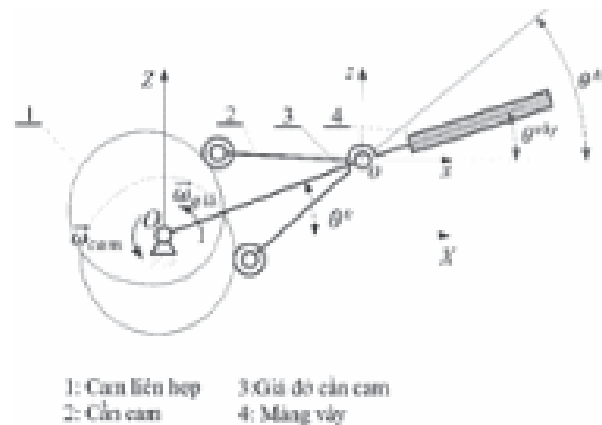
Trong thiết kế, đường biên cam được

xây dựng dựa trên hàm điều khiển dạng harmonic, vì loại này đảm bảo gia tốc và vận tốc biến thiên liên tục, giúp hệ thống vận hành trơn tru trong môi trường nước. Biểu thức dao động góc của cần lắc có dạng:

$$\theta(t) = \frac{\theta_{\max}}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right) \quad (4)$$

Với: $\theta_{\max}$ – Biên độ dao động cực đại;
T – Chu kỳ chuyển động.

3.2. Mô hình động lực học



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý hệ cam-con lăn-cần lắc 2 bậc tự do

Cơ cấu cam-cần-con lăn được mô hình hóa động lực học dựa trên định luật II Newton cho chuyển động quay. Gọi J_c , J_r lần lượt là mô men quán tính của cam và cần lắc, τ_c , τ_r là moment tác động tương ứng, ta có:

$$J_c \ddot{\theta}_c = \tau_{\text{motor}} - F_t R \quad (5)$$

$$J_r \ddot{\theta}_r = F_t l_r \quad (6)$$

Với: F_t – Lực tiếp tuyến giữa cam, con lăn; R – Bán kính tác dụng lực trên cam; l_r – Khoảng cách từ trục quay đến điểm tiếp xúc trên cần. 

Cam đóng vai trò truyền động chính, tạo ra lực F_t làm cần lắc dao động và dẫn động chi vây. Khi có nhiều cụm chi vây (ví dụ 9 cụm), các cam sẽ được đặt lệch pha trên cùng một trục cam trung tâm, tạo ra dạng sóng lan truyền dọc theo chiều dài màng vây.

3.3. Cơ cấu điều chỉnh góc trung vị

Ngoài chuyển động dao động, nghiên cứu còn tích hợp khung quay trung vị – cho phép toàn bộ cụm màng vây xoay quanh trục O_y một góc $\theta_m \in [-90, +90]$. Việc điều chỉnh góc này mô phỏng chuyển động pitch/yaw của cá, cho phép robot định hướng không gian 3D. Việc thay đổi θ_m sẽ làm thay đổi mặt phẳng dao động của tất cả chi vây, ảnh hưởng trực tiếp đến hướng đẩy của robot.

4. THIẾT KẾ MODULE MÀNG VÂY MPF

4.1. Cấu trúc tổng thể

Module màng vây MPF được thiết kế gồm ba thành phần chính:

- Cụm chi vây (fin rays): Gồm nhiều tia vây mềm bố trí dọc theo chiều dài màng vây, mỗi tia được dẫn động bằng một cơ cấu cam-con lăn-cần lắc riêng biệt.
- Trục cam trung tâm: Mang nhiều cặp cam liên hợp, mỗi cặp lệch pha với nhau để tạo dạng sóng lan truyền.
- Khung quay trung vị: Giá đỡ có khả năng xoay toàn bộ cụm chi vây quanh trục O_y để thay đổi hướng đẩy của robot trong không gian 3D.

4.2. Tạo chuyển động sóng lan truyền

Để mô phỏng chuyển động uốn sóng của cá, các cam trên trục được bố trí lệch pha

đều nhau. Ví dụ, với 9 chi vây, độ lệch pha giữa hai cam liên tiếp là:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n}{N} \quad (7)$$

Với: n – Số bước sóng cần tái hiện trên chiều dài màng vây; N – Số lượng chi vây.

Việc phân pha chính xác này đảm bảo sóng lan truyền liên tục từ đầu đến cuối màng vây, tăng hiệu quả đẩy và tính ổn định của robot khi bơi.

4.3. Mô hình 3D và bố trí thực tế

Mô hình 3D của module được xây dựng trên phần mềm CAD (ví dụ SolidWorks), với cụm chi vây lắp vào trục cam thông qua cơ cấu cần lắc. Các khung đỡ và trục quay được bố trí sao cho:

- Đảm bảo góc trung vị tùy biến ($\pm 90^\circ$);
- Giảm không gian lắp đặt nhờ cơ cấu đồng trục;
- Đồng bộ hóa chuyển động giữa các chi vây nhờ truyền động cơ học tập trung;
- Toàn bộ module có thể được tích hợp vào thân robot bơi và điều khiển bởi một hoặc hai động cơ trung tâm, tùy theo cấu hình đối xứng trái-phải.

4.4. Ưu điểm thiết kế

- Tiết kiệm năng lượng: Chỉ cần 1 nguồn truyền động cho nhiều chi vây;
- Dễ điều khiển: Biên độ và pha sóng được xác định cơ học, không cần điều khiển điện tử riêng cho từng tia vây;
- Khả năng mở rộng: Có thể tăng số chi vây để mô phỏng các kiểu bơi khác nhau (rajiform, balistiform, v.v.);
- Tính module cao: Dễ chế tạo, lắp ráp và thay thế từng cụm chi vây.

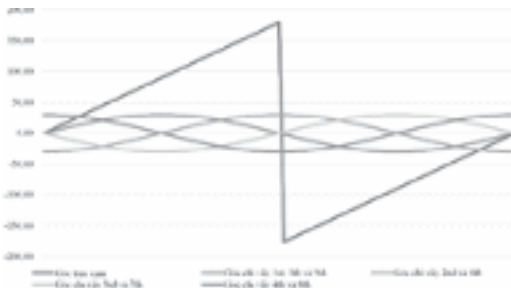
5. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

5.1. Mô phỏng dao động chi vây

Mô hình mô phỏng được thiết lập để đánh giá chuyển động của các chi vây trong module khi trục cam quay đều ở tốc độ 60 vòng/phút. Với 9 chi vây bố trí dọc theo màng vây và có cam lệch pha, kết quả cho thấy:

Các chi vây dao động đối xứng theo biên độ khoảng $\pm 30^\circ$;

- Chu kỳ dao động của từng chi vây là đồng bộ theo thiết kế cam harmonic;
- Pha dao động giữa các chi vây tạo thành sóng lan truyền đều từ đầu đến cuối màng vây.



Hình 5. Quan hệ giữa góc quay trục cam và góc dao động chi vây

Điều này chứng minh hiệu quả của phương pháp truyền động cam-con lăn trong việc mô phỏng chuyển động MPF dạng sóng tự nhiên.

5.2. Moment tác động lên trục cam

Moment cần thiết để duy trì quay trục cam được tính toán từ mô hình động lực học. Với mỗi chi vây chịu tải trọng 60N tại khoảng cách 70mm từ trục xoay, tổng moment biến thiên tuần hoàn với biên độ dao động $1000 \div 4200\text{Nmm}$.

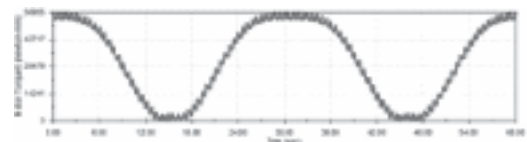
Moment đạt đỉnh tại các thời điểm nhiều chi vây đồng thời đi qua pha đảo chiều. Chu kỳ dao động moment cũng trùng với chu kỳ quay của trục cam. Kết quả này cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, không xuất hiện quá tải đột ngột, và hoàn toàn có thể dẫn động bởi một động cơ công suất vừa phải.

5.3. Moment điều chỉnh góc trung vị

Việc xoay khung trung vị trong khoảng $\pm 90^\circ$ được mô phỏng bằng hàm sin để đại diện cho thay đổi tư thế của robot. Khi tắt cả các chi vây đang dao động và mang tải, moment cần để quay khung giá trị lớn đáng kể $\sim 57000\text{Nmm}$.

Nguyên nhân là do quán tính tổng hợp của các cụm cam – cần – chi vây, đặc biệt ở vị trí xa tâm xoay. Biểu đồ moment theo thời gian cho thấy dao động lớn và có biên độ siêu cao tần – hệ quả của hiện tượng cộng hưởng pha giữa các chi vây.

Kết quả này chỉ ra rằng: Hệ truyền động góc trung vị cần một động cơ mạnh độc lập, đồng thời cần kiểm soát tốc độ thay đổi góc để tránh vượt quá ngưỡng tải trọng cơ học cho phép.



Hình 6. Moment cần thiết để thay đổi góc trung vị trong chu kỳ hình sin

5.4. Mô hình 3D tổng thể robot

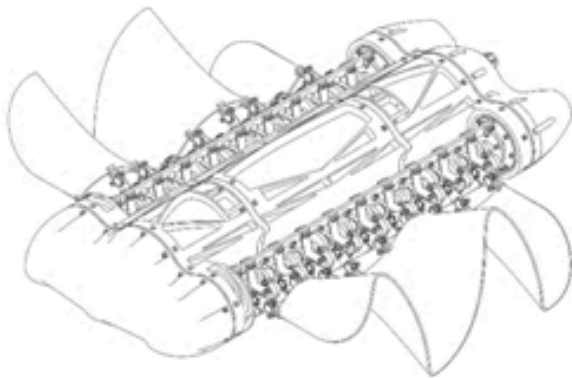
Toàn bộ module màng vây được tích hợp thành hai dây đối xứng hai bên thân robot (trái và phải), kết nối với trục cam thông qua bánh răng hoặc dây đai. Hệ thống có thể vận hành bằng:



- Một động cơ trung tâm cho cả hai cụm, hoặc:

- Hai động cơ riêng biệt nếu muốn điều khiển hướng độc lập từng bên.

Mô hình CAD cho thấy cấu trúc nhỏ gọn, dễ lắp ráp, và tiềm năng tích hợp với vỏ robot thực tế.



Hình 7. Mô hình 3D robot bơi tích hợp hai cụm màng vây hai bên thân

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất phương pháp thiết kế cụm màng vây mềm cho robot bơi MPF, dựa trên mô hình hóa liên tục và rời rạc. Mỗi tia vây được xác định cần 3 bậc tự do để tái hiện chính xác chuyển động sóng mềm dẻo. Hệ truyền động sử dụng cơ cấu cam-con lăn liên hợp để điều khiển đồng bộ nhiều chi vây bằng một trục cam duy nhất, kết hợp với khung quay trung vị giúp định hướng 3D.

Mô phỏng cho thấy hệ thống vận hành ổn định với moment trục cam 1000-4200 N•mm, và moment xoay trung vị lên tới 57000 N•mm. Thiết kế CAD hoàn chỉnh sẵn sàng chế tạo, phù hợp với các robot bơi nhỏ gọn hoạt động trong môi trường nước 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]. M. Sfakiotakis, D. M. Lane, and J. B. C. Davies, "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion". IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 24, no. 2, pp. 237–252, Apr. 1999, doi: 10.1109/48.757275.
- [3]. 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.
- [4]. CN213921435U (zh), 2021-08-10, Chi et al. (2022), "Snapping for high-speed and high-efficient, butterfly swimming-like soft flapping-wing robot".
- [5]. CN113320665A, BEIHANG UNIV, "Long-fin fluctuation propulsion bionic underwater robot".
- [6]. CN113696685B, Xian Jiaotong University, "Arrangement of propulsion or steering means on amphibious vehicles".
- [7]. Benjamin Pietro Filardo, "Apparatuses, Methods And Systems For Harnessing The Energy Of Fluid Flow To Generate Electricity Or Pump Fluid". United States Patent Application Publication, 2019.