

Tăng lực đẩy của Robot cá bằng Compressed Unimorph Piezoelectric Composite Actuator

• Nguyễn Quang Sáng

Trường Đại học Tiền Giang – sang1nguyenquang@yahoo.com

(Bài nhận ngày 28 tháng 12 năm 2010, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 16 tháng 08 năm 2014)

TÓM TẮT:

Trong nghiên cứu này, chúng tôi trình bày một robot cá vận hành bằng compressed light-weight piezo-composite actuator (CLIPCA). Vận tốc bơi, lực đẩy, và lực cản của robot cá được đánh giá bằng thực nghiệm để đánh giá ảnh hưởng khi light-weight piezo-composite actuators (LIPCA) được đặt dưới lực nén. Vận tốc bơi của robot cá được đo với 4 diện tích đuôi cá khác nhau. Bên cạnh đó, lực cản của robot cá được xác định bằng thực nghiệm và tính toán bằng mô hình trên máy tính. Để đo lực cản của robot cá, chúng tôi đã dùng một hệ thống đo lực, dành cho lực nhỏ, sử dụng máy quay phim tốc độ cao (a high speed camera). Kết quả đạt được từ đo đạc cho thấy sự gần đúng với kết quả thu được từ mô hình hóa trên máy tính. Trong nghiên cứu này chúng tôi cũng trình bày một hệ thống đo lực đẩy, nó có thể bỏ qua ảnh hưởng rung động từ hệ thống, để đo lực đẩy nhỏ của robot cá. Lực đẩy của robot cá đã tăng 11% khi LIPCA được đặt dưới lực nén. Tuy nhiên, lực cản của robot cá đã tăng do diện tích của mặt cắt ngang tại giữa thân robot cá tăng lên khi sử dụng CLIPCA.

1. GIỚI THIỆU

Những thiết kế sử dụng chân vịt đã và đang được phát triển, sử dụng rộng rãi trong các thiết bị vận hành trong môi trường nước. Tuy nhiên chúng vẫn có nhiều giới hạn, ví dụ như, hiệu suất năng lượng và khả năng xoay trở thấp [1]. Mặt khác, vận tốc và khả năng xoay của các thiết bị sử dụng thiết bị đẩy là chân vịt thì trái ngược nhau; thiết bị có thể di chuyển với vận tốc cao thì lại có khả năng xoay trở kém, và ngược lại.

Ngoài ra, hiệu suất năng lượng của chân vịt chỉ được thiết kế tối ưu cho một dải tốc độ nhất định. Để vượt qua những khuyến điểm này, các nhà khoa học đã nghiên cứu về chuyển động của động vật dưới nước. Sau hàng triệu năm tiến hóa, sinh vật trong môi trường nước, đặc biệt là cá, có

hiệu suất sử dụng năng lượng và khả năng xoay trở trong môi trường nước tốt hơn bất kỳ thiết bị truyền thống sử dụng thiết bị đẩy là chân vịt [2,3]. Bên cạnh đó, di chuyển êm ái cũng là một ưu điểm của cá.

Những nghiên cứu trước đây về robot cá, như RoboTuna [4], RoboPike [5], VCUUV [6], BoxyBot [7], đã mở ra nhiều hứa hẹn tốt đẹp cho tương lai của robot cá. Trong nghiên cứu về robot cá, lực cản và lực đẩy là các thành phần quan trọng và được nghiên cứu trong các tài liệu. Các nghiên cứu này có thể được nghiên cứu kỹ lưỡng bằng thực nghiệm và bằng computational fluid dynamics (CFD). Barrett *et al.* đã trình bày một cơ cấu đo lực cản để đo lực cản của một con

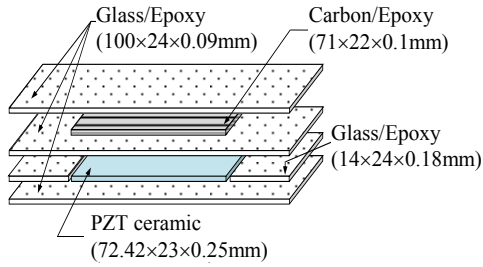
robot cá [8]. Trong hệ thống này, robot cá được di chuyển bởi một thanh có biên dạng khí động. Với cùng phương pháp này, Listak đã đo lực cản của một robot cá tự hành. Bên cạnh nghiên cứu robot bằng phương pháp thực nghiệm, các nhà nghiên cứu đã dùng phương pháp mô phỏng trên máy tính. Phương pháp này giúp các nhà nghiên cứu hiểu rõ hơn về dòng lưu chất xung quanh cá trong khi nó di chuyển. Adkins sử dụng một mô hình CFD để đánh giá dòng lưu chất xung quanh cá trong khi bơi [10]. Dòng lưu chất xung quanh cá có thể được khảo sát bằng cách thay đổi biên độ và tần số của quá trình bơi. Để đánh giá xoáy và lực đẩy được tạo ra trong lúc bơi, Zhang đã xây dựng một mô hình dựa trên việc giải các phương trình Navier-Stokes dùng lưới phi cấu trúc [11]. Kowalczyk đã sử dụng phần mềm thương mại ANSYS (CFX-10.0) để mô hình hóa chuyển động của đuôi cá ở hai dạng: undulatory và oscillatory [12]. Tác giả đã nghiên cứu tác động của xoáy và vận tốc của lưu chất xung quanh đuôi cá ở các chuyển động khác nhau của đuôi cá.

Ngày nay, thay cho việc sử dụng các động cơ điện tiên tiến, các nhà nghiên cứu với ý tưởng sáng tạo đang cố gắng sử dụng cơ bắp nhân tạo (artificial muscle), dựa trên vật liệu thông minh, để cho ra đời loại robot cá mới [13-22]. Cơ bắp nhân tạo có nhiều ưu điểm so với động cơ điện, như cơ cấu vận hành đơn giản, suất tiêu hao điện năng thấp, và tạo ra tín hiệu điện từ bé. Trong các loại vật liệu thông minh, vật liệu áp điện có một số ưu điểm riêng, ví dụ như đáp ứng nhanh và êm, tạo ra lực lớn, và suất tiêu hao điện năng thấp [23]. Cho nhiều loại ứng dụng, chúng tôi đã phát triển một loại actuator, được gọi là light-weight piezo-composite actuator (LIPCA) [24]. Trong nghiên cứu trước, chúng tôi đã trình bày một robot cá vận hành bằng bốn LIPCA [25]. Các

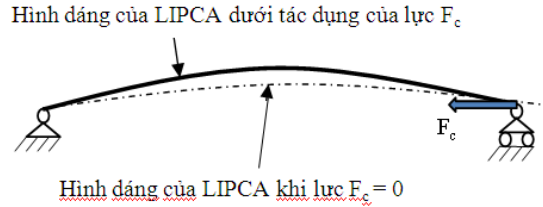
tính năng của robot cá được nâng cao trong mô hình thứ hai [26]. Robot cá có thể bơi với vận tốc 7.7 cm/s với tần số đập đuôi là 3.9 Hz. Robot cá có thể bơi sang trái và phải bằng cách thay đổi góc đập của đuôi. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đặt LIPCA dưới một lực nén, gọi là CLIPCA, trong khi vận hành robot cá [27]. Với việc sử dụng CLIPCA, chúng tôi hy vọng có thể tăng được lực đẩy của robot cá. Tuy nhiên, kích thước của robot cá khi sử dụng CLIPCA to hơn mô hình sử dụng LICPA [26]. Chúng tôi đánh giá lực đẩy và lực cản của robot cá và so sánh với robot cá vận hành bằng LIPCA. Để đo lực cản, chúng tôi sử dụng một cơ cấu đo lực và so sánh với kết quả của việc tính toán bằng mô hình hóa trên máy tính sử dụng modul CFD của phần mềm ANSYS. Ảnh hưởng của dây điện cũng được xem xét đến. Trong các phần tiếp theo, robot cá có thể vận hành bằng CLIPCA sẽ được gọi là CLIPCA robot và robot cá được trình bày ở nghiên cứu trước (vận hành bằng LIPCA) sẽ được gọi là LIPCA robot cá [26].

2. COMPRESSED LIGHT-WEIGHT PIEZOCOMPOSITE ACTUATOR

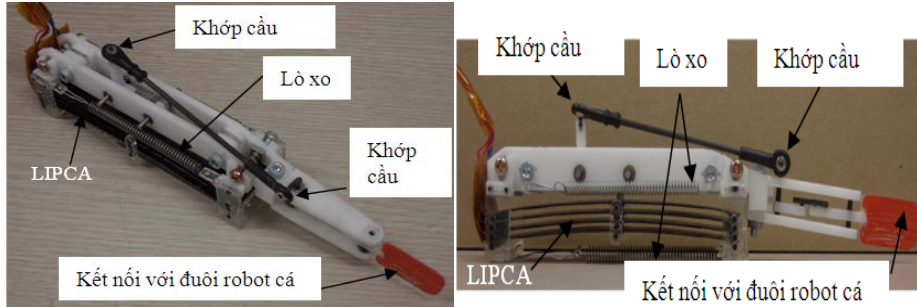
LIPCA là dạng actuator được cấu tạo từ nhiều lớp, nó tạo ra biến dạng cong. Nó gồm có 3 lớp glass/epoxy, một lớp carbon/epoxy, và một lớp PZT như trình bày trong hình 1. CLIPCA là LIPCA được đặt dưới một lực nén dọc trục, F_c . Lực nén này được đặt tại một đầu của LIPCA như trong hình 2, lực nén này có độ lớn là 9 N [27]. Lực này nhỏ hơn một ít so với lực buckling của LIPCA. Một sự kích thích điện sẽ có vai trò như là “cò súng” để xây ra hiện tượng buckling của LIPCA trong khi chịu lực nén. Dưới lực nén, CLIPCA có thể tạo ra chuyển vị lớn gấp đôi và 26% lực lớn hơn LIPCA do hiện tượng buckling [27]. Trong robot cá, chúng tôi sử dụng lò xo để tạo ra lực nén trên LIPCA.



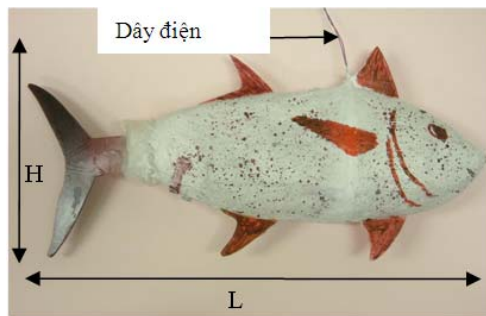
Hình 1. Cấu trúc thiết kế của LIPCA



Hình 2. Biến dạng của LIPCA dưới lực nén



Hình 3. Cơ cấu dẫn động của robot cá sử dụng bốn LIPCA



Hình 4. CLIPCA robot cá

3. CƠ CẤU DẪN ĐỘNG

Nguyên lý hoạt động và thiết kế của cơ cấu dẫn động đã được trình bày chi tiết trong nghiên cứu trước đây [26]. Cơ cấu dẫn động của robot cá được chế tạo bằng acrylic, thanh carbon, và các khớp cầu. Chúng tôi sử dụng bốn miếng LIPCA, được đặt phía bên dưới của cơ cấu dẫn động. Bốn lò xo được sử dụng để tạo ra một lực nén là 36 N cho bốn LIPCA. Hai lò xo được đặt phía trên LIPCA và hai cái khác được đặt phía bên dưới

LIPCA. Hình 3 cho thấy hình dạng của cơ cấu dẫn động sử dụng CLIPCA.

Cơ cấu dẫn động của CLIPCA robot cá được vận hành với một điện áp 250 V peak-to-peak (V_{pp}) có dạng sóng hình vuông, được tạo ra từ một nguồn năng lượng bên ngoài robot cá. Nguồn năng lượng này là một hệ thống bao gồm một power amplifier (MATSUSADA model AML-1.5B40-LC), một function generator (AGILENT 33220A) để điều khiển dạng sóng

của điện áp và một oscilloscope (TEKTRONIKS TDS 2024) để kiểm tra điện áp đã được tạo ra.

4. ROBOT CÁ

Thân của CLIPCA robot cá được chế tạo từ acrylic và làm kín bằng silicon. Hình dáng thân của CLIPCA robot cá được mô phỏng theo hình dáng thân của cá ngừ, vì cá ngừ là một trong các loại cá bơi nhanh nhất. Đuôi của CLIPCA robot cá cũng được mô phỏng theo đuôi của cá ngừ. Đuôi của CLIPCA robot cá có chiều dày là 1 mm và được chế tạo từ vật liệu dẻo. Như trong trình bày trong hình 4, CLIPCA robot cá có chiều dài là 26 cm, chiều 12.3cm, và rộng 44 cm (L × H × W). Do sự biến dạng của LIPCA khi chịu lực nén, diện tích mặt cắt ngang tại giữa thân của CLIPCA robot lớn hơn khoảng 8.4% so với diện tích mặt cắt ngang tại giữa thân của LIPCA robot [26].

5. THÍ NGHIỆM

Tốc độ bơi của robot cá

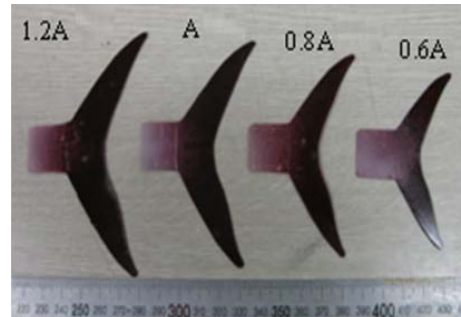
Để đánh giá tác động của lực nén, tốc độ bơi của CLIPCA robot cá được dẫn động bằng LIPCA và CLIPCA đã được đo. CLIPCA robot cá dẫn động bởi LIPCA nghĩa là thân robot là của CLIPCA robot cá và được dẫn động bằng bốn LIPCA không chịu lực nén. Chúng tôi sử dụng bốn đuôi khác nhau về diện tích (giống nhau về hình dạng) như trình bày trong hình 5 để tìm ra kích thước đuôi thích hợp. diện tích đuôi cá có diện tích lần lượt là 8.4 cm² (0.6A), 11.2 cm² (0.8A), 14 cm² (A), 16.8 cm² (1.2A).

Chúng tôi sử dụng một hồ nước có đường kính trong là 1.6 m để đo tốc độ bơi của robot. Trong suốt quá trình thí nghiệm, dây điện, kết nối CLIPCA robot cá với nguồn năng lượng bên ngoài, được treo phía trên hồ nước khoảng 2.5 m. Thời gian t là thời gian để CLIPCA robot cá bơi

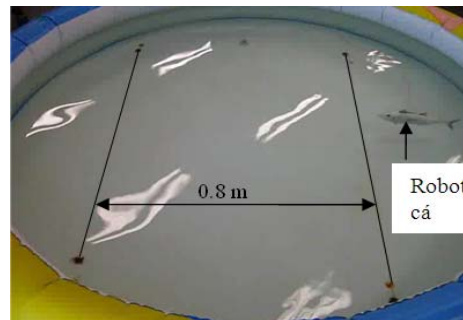
hết quãng đường 0.8 m sau khi được gia tốc sau một quãng đường 0.2 m (như trong hình 6). Tốc độ trung bình của CLIPCA robot cá được tính như sau:

$$v = s/t, \quad (1)$$

ở đây v là tốc độ trung bình (m/s), s là quãng đường bơi của robot, trong thí nghiệm này s = 0.8 m, và t là thời gian robot bơi hết quãng đường s (giây).



Hình 5. Bốn đuôi khác nhau.



Hình 6. Thí nghiệm đo tốc độ bơi của robot.

Đo lực đẩy

Để so sánh lực đẩy tạo ra bởi LIPCA robot cá trong nghiên cứu trước, chúng tôi đã đo lực đẩy được tạo ra bởi CLIPCA robot cá với đuôi cá là 0.6A. Đây là đuôi đã tạo ra lực đẩy lớn nhất trong nghiên cứu trước [26]. Trong thí nghiệm đo lực, CLIPCA robot cá được kết nối với một load cell

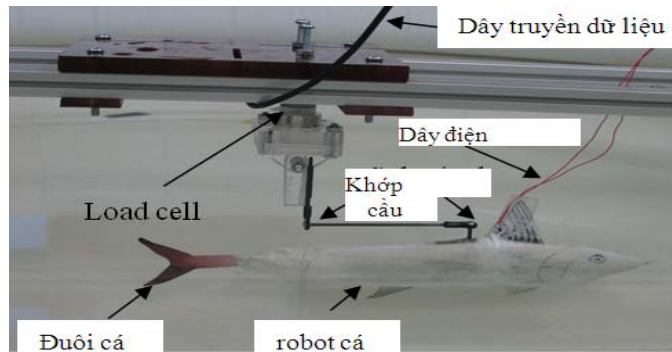
(Nano 17 Transducer ATI) thông qua hai khớp nối cầu như trong hình 7. Khớp nối cầu có thể giảm ảnh hưởng của dao động theo phương đứng được tạo ra bởi chuyển động lên xuống của CLIPCA. Dữ liệu từ load cell được thể hiện và lưu trong máy tính.

Đo lực cản

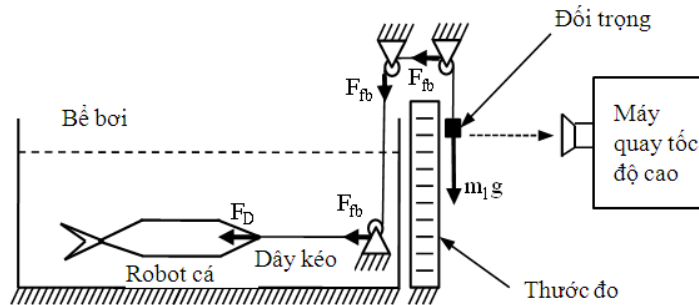
Trong phần này, chúng tôi đo lực cản của cả hai robot cá: CLIPCA robot cá và LIPCA robot cá, nhằm đánh giá ảnh hưởng của việc gia tăng diện tích mặt cắt ngang. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của dây điện cũng được xem xét bằng cách đo lực cản của LIPCA robot cá khi kết nối và không kết nối với dây điện.

Lực cản của hai robot cá đã được đánh giá bằng phương pháp thực nghiệm và bằng CFD.

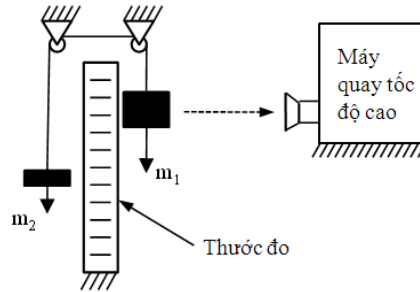
Trong các nghiên cứu trước đây, các nhà nghiên cứu đo lực đẩy của robot bằng một hệ thống dẫn (a driving system) [8,9]. Robot cá sẽ được kéo ở một vận tốc không đổi và lực đẩy được đo đồng thời. Tuy nhiên, một hệ thống kéo như vậy chỉ phù hợp với robot có kích thước lớn, có lực cản lớn hơn nhiều so với tín hiệu nhiễu. Với mô hình robot cá nhỏ, lực cản nhỏ, lực cản phải được đo bằng phương pháp khác. Trong thí nghiệm đo lực cản, chúng tôi kéo robot cá bằng một đối trọng nhỏ trên quãng đường dài 1 m. Khối lượng của đối trọng được đo bằng cân Samsung CASBEE (có độ phân giải là 0.01 gram). Chuyển động của đối trọng được ghi lại bằng camera tốc độ cao (PHOTRON FASTCAM-ultima APX 120K), và lưu lại trong máy tính như trình bày trong hình 8.



Hình 7. Hệ thống đo lực đẩy của robot cá



Hình 8. Sơ đồ đo lực cản của robot cá có kích thước nhỏ.



Hình 9. Sơ đồ đo lực ma sát của ổ bi.

Lực cản của robot cá được tính như sau:

$$F_D = m_1 g - 3F_{fb}, \quad (2)$$

ở đây F_D là lực cản của robot cá (N), m_1 là khối lượng của đối trọng (kg), g là gia tốc trọng trường (m/s^2), và F_{fb} là lực ma sát của một ổ bi dẫn hướng (N).

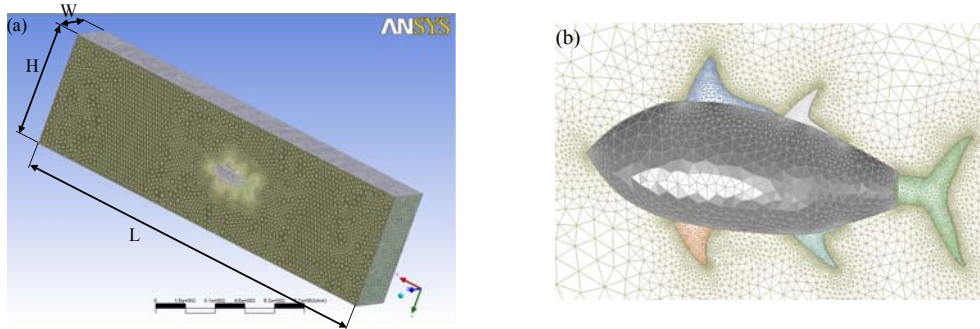
Trong hệ thống đo lực cản, chúng tôi sử dụng ba ổ bi nhỏ để dẫn hướng một sợi dây kéo nhỏ nhẹ, được dùng để kết nối robot cá và đối trọng. Chúng tôi giả sử rằng lực ma sát của 3 ổ bi là bằng nhau ở vận tốc nhỏ, ngay cả khi có một ổ bi được đặt trong nước. Vận tốc kéo được định nghĩa là vận tốc không đổi của robot cá khi được kéo bằng đối trọng. Tại các vận tốc kéo khác nhau, lực ma sát của ổ bi là khác nhau. Do đó, lực ma sát của ổ bi đã được xác định ở các vận tốc kéo khác nhau như trong hình 9. Với mỗi vận tốc kéo khác nhau, m_2 đã được lựa chọn sao cho thỏa mãn hai điều kiện: m_1 trong thí nghiệm đo lực ma sát bằng với m_1 trong thí nghiệm đo lực đẩy và m_2 phải di chuyển với vận tốc bằng vận tốc kéo. Lực ma sát của ổ bi được tính như sau:

$$F_{fb} = 0.5(m_1 - m_2)g, \quad (3)$$

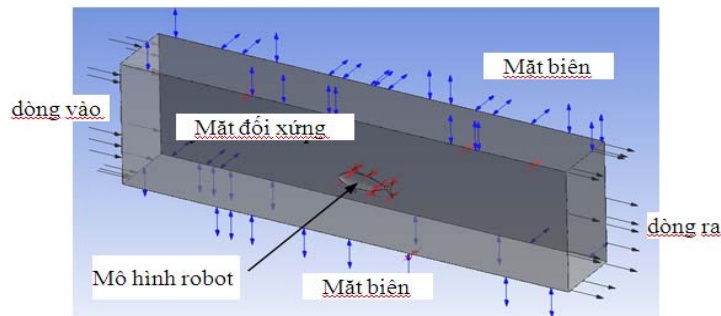
ở đây m_2 là khối lượng của đối trọng (kg).

Mô hình tính toán để phân tích lực cản của cá hai robot cá: CLIPCA robot cá và LIPCA robot cá sử dụng phần mềm CFD (ANSYS-CFX). Mô hình được xây dựng một nửa do tính đối xứng của robot cá. Kích thước mô hình của CLIPCA robot cá, như trong hình 10a, là 30 cm rộng, 60 cm cao, và 200 cm dài ($W \times H \times L$). Hình 10b cho thấy lưới xung quanh của CLIPCA robot cá. Lưới phi cấu trúc với 622,156 phần tử có 148,857 nút và 320,789 phần tử có 1,309,025 nút được sử dụng cho LIPCA robot cá và CLIPCA robot cá.

Thay vì robot cá di chuyển tới trước với vận tốc không đổi v , robot cá đã được xem như một non-slip wall, trong khi đó một dòng lưu chất đi vào với vận tốc v tại dòng input. Bề mặt có robot cá được chọn là mặt đối xứng, trong khi đó ba bề mặt khác xung quanh robot được chọn là trạng thái biên hở (open boundary condition) với áp suất tương đối là 0 (hình 11). Một vận tốc pháp tuyến từ 0.02 m/s đến 0.077 cm/s được sử dụng tại dòng vào (inlet), và điều kiện tại dòng ra (outlet) là áp suất tĩnh bằng 0. Dòng chảy được giả sử là dòng chảy tầng trong phân tích CFD bởi vì mô hình này có số Reynold nhỏ hơn 20,000, số này nhỏ hơn 105 [28].



Hình 10. Mô hình tính toán của CLIPCA robot cá: (a) lưới của mô hình tính; (b) lưới xung quanh robot cá.



Hình 11. Điều kiện biên của mô hình tính.

6. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

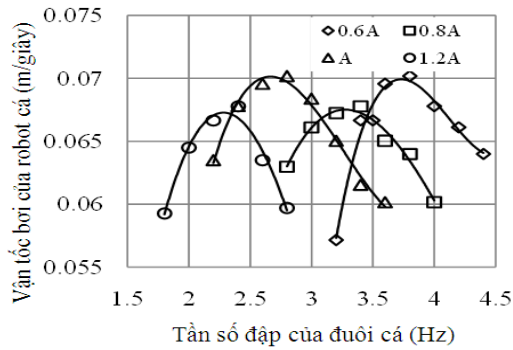
Tốc độ bơi

Hình 12 và hình 13 lần lượt trình bày tốc độ bơi của CLIPCA robot cá được dẫn động bằng LIPCA và CLIPCA. Với mỗi kích thước đuôi khác nhau, CLIPCA robot cá có một tần số đập đuôi tối ưu khác nhau. Khi CLIPCA robot cá được dẫn động bằng LIPCA, tốc độ bơi lớn nhất như trong hình 12 là khoảng 0.07 m/s tại tần số đập đuôi là 2.8 Hz với đuôi 0.6A và 3.8 Hz với đuôi A. Tốc độ bơi nhanh nhất đã chậm hơn khoảng 10% so với tốc độ bơi của LIPCA robot cá như đã trình bày trong nghiên cứu trước, khoảng 0.077 m/s. Nguyên nhân chính dẫn đến điều này là do diện tích mặt cắt ngang của CLIPCA robot cá lớn hơn LIPCA robot cá. Khi CLIPCA robot cá được dẫn động bằng CLIPCA, nó có thể bơi với vận tốc là 0.076 m/s tại tần số đập đuôi tối ưu là 4.3 Hz với đuôi 0.8A như trình

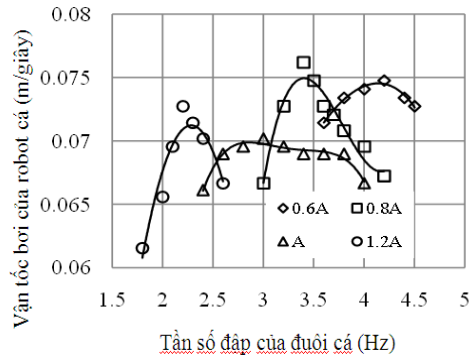
bày trong hình 13. Kết quả này cho thấy rằng CLIPCA robot cá dẫn động bằng CLIPCA có thể bơi nhanh hơn. Tuy nhiên, tốc độ bơi nhanh nhất của CLIPCA robot cá chỉ bằng với tốc độ bơi nhanh nhất của LIPCA robot cá [26].

Lực đẩy của robot cá

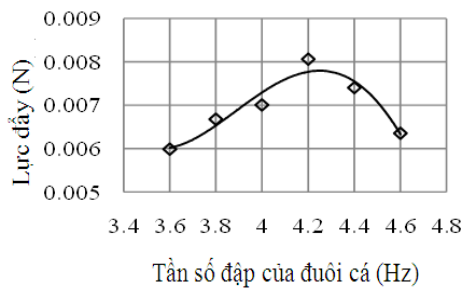
Hình 14 biểu diễn lực đẩy trung bình của CLIPCA robot cá dẫn động bằng CLIPCA. Lực đẩy trung bình cao nhất tạo ra khi sử dụng đuôi 0.6A là 0.008 N với tần số đập đuôi là 4.2 Hz. So sánh với nghiên cứu trước, lực đẩy trung bình là 11% cao hơn lực đẩy trung bình của LIPCA robot cá, khoảng 0.0072 N. Kết quả cho thấy rằng lực dẫn động đã được tăng lên khi LIPCA được đặt dưới lực nén. Tuy nhiên, sự tăng lên của lực dẫn động nhỏ hơn sự tăng lên của lực tĩnh của LIPCA, lực tĩnh tăng lên khoảng 26% [27]. Điều này là do lực ma sát trong hệ thống dẫn động.



Hình 12. Tốc độ bơi của CLIPCA robot cá dẫn động bằng LIPCA.



Hình 13. Tốc độ bơi của CLIPCA robot cá dẫn động bằng CLIPCA.



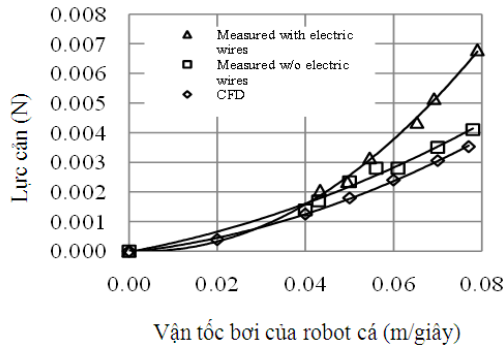
Hình 14. Lực đẩy trung bình của CLIPCA

Lực cản của robot cá

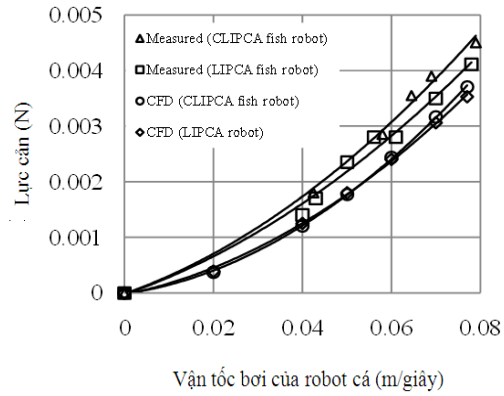
Hình 15 trình bày lực cản của LIPCA robot cá. Kết quả cho thấy rằng sự hiện diện của dây điện ảnh hưởng đến với lực cản của tốc độ bơi tăng lên. Lực cản của LIPCA robot cá đã tăng lên 49% tại vận tốc tối đa khi nó được kết nối với dây điện. Tại tốc độ là 0.077 m/s, lực đẩy và lực cản của LIPCA robot cá phải gần bằng nhau. Tuy nhiên, lực cản nhỏ hơn lực đẩy, lực đẩy khoảng 0.072 N. Nguyên nhân là do sự vắng mặt của lực cản gây ra do chuyển động lắc trong quá trình bơi của robot cá. Kết quả chỉ ra rằng hệ thống đo lực cản đã hoạt động tốt. Kết quả đo lực cản của robot cá khi không kết nối với dây dẫn gần đúng với kết quả từ phân tích CFD, với sự khác biệt

nhỏ, khoảng 16%. Sai số này có thể do robot cá đã bị kéo hơi lệch hướng so với phương của lực kéo.

Trong hình 16, chúng ta có thể thấy lực cản của CLIPCA robot cá được xác định bằng CFD và thực nghiệm tại vận tốc bơi tối đa lớn hơn lực cản của LIPCA robot cá lần lượt là 5% và 8%. Kết quả này có thể giải thích tại sao tốc độ bơi của CLIPCA robot cá dẫn động bằng CLIPCA hầu như bằng với vận tốc bơi của LIPCA robot cá. Mặc dù lực đẩy đã được tăng lên nhờ vào việc sử dụng lực nén trên LIPCA trong CLIPCA robot cá, nhưng lực cản cũng đã tăng vì diện tích mặt cắt ngang tăng lên.



Hình 15. Lực cản của LIPCA robot cá



Hình 16. So sánh lực cản của CLIPCA robot cá và LIPCA robot cá (không kết nối với dây điện)

7. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, việc tăng lực đẩy của robot cá dẫn động bằng LIPCA được đặt dưới lực nén đã được đánh giá. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng lực đẩy của robot cá đã tăng lên 11% khi LIPCA đặt dưới một lực nén. Chúng tôi cũng trình bày một hệ thống đo lực cản của robot cá. Kết quả đo lực cản của robot gần đúng với kết quả từ CFD. Lực cản của CLIPCA robot cá từ

tính toán CFD và thực nghiệm lớn hơn 5% và 8% so với lực cản của LIPCA robot cá, do diện tích lớn của mặt cắt ngang tại giữa thân của CLIPCA robot cá. Do đó, CLIPCA robot cá không thể bơi nhanh hơn LIPCA robot cá. Ngoài ra, ảnh hưởng của dây điện cũng được xác định. Lực cản của robot cá tăng tại vận tốc bơi tối đa đã tăng nhiều khi robot cá kết nối với dây điện.

Increment thrust of fish robot by using Compressed Unimorph Piezoelectric Composite Actuator

- Nguyen Quang Sang

Tien Giang University - sang1nguyenquang@yahoo.com

ABSTRACT:

In this work, we have presented a fish robot actuated by four compressed light-weight piezo-composite actuators. Swimming speed, thrust, and drag of the fish robot were

experimentally examined to verify effect of the applied compressive force on force actuation, consequently on swimming speed of fish robot. The swimming speed of the fish robot was measured for four different tail fin areas. The drag of the fish robot was estimated by experiment and computational fluid dynamics (CFD) simulation. For drag measurement, we have presented an apparatus to measure relatively small drag by using a high speed camera. The measured drag agreed well with the calculated one by the CFD. We have also suggested a thrust measurement apparatus, where we can ignore effect of vibratory motion of the system. The thrust of the fish robot was increased about 11% due to the applied compressive force on the piezoceramic actuators. However, the drag of the fish robot was also increased due to increment of the cross section area.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. O. Young, M. Sfakiotakis, D. M. Lane, and J. B. C. Davies, Review of fish swimming modes for aquatic locomotion, *IEEE J. Oceanic Engineering*, vol. 24, 237–252, (1999).
- [2] D. Barrett, M. Grosenbaugh, and M. Triantafyllou, The optimal control of a flexible hull robotic undersea vehicle propelled by an oscillating foil, *Proc. IEEE AUV Symp. 1*, 1-9, (1996).
- [3] J. Yu, M. Tan, S. Wang, and E. Chen, Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part B 34*, 1798-810, (2004).
- [4] D. Barrett, MIT Ocean Engineering Testing Tank Biomimetics Project: RoboTuna, <http://web.mit.edu/towtank/www/tuna/robotuna.html>, (2000).
- [5] J. M. Kumph, The MIT Robot Pike Project, <http://www.mit.edu/afs/athena/org/t/towtank/OldFiles/www/pike/index.html>, (2000).
- [6] J. M. Anderson, P. A. Kerrebrock, The vorticity control unmanned undersea vehicle (VCUUV): an autonomous robot tuna, *11th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Tech.*, pp. 65-70, (1999).
- [7] D. Lachat, *BoxyBot, the fish robot - Design and realization, biologically inspired robotic group (BIRG)*, (2005).
- [8] D. S. Barrett, M. S. Triantafyllou, D. K. P. Yue, M. A. Grosenbaugh, and M. J. Wolfgang, Drag reduction in fish-like locomotion, *J. Fluid Mech.* 392, 183-212, (1999).
- [9] M. Listak, G. Martin, D. Pugal, A. Aabloo, and M. Kruusmaa, Design of a semiautonomous biomimetic underwater vehicle for environmental monitoring, *Int. Sym. on Comp. Intelligence in Robotics and Automation*, 9-14, (2005).
- [10] D. Adkins, Y. Y. Yan, CFD simulation of fish-like body moving in viscous liquid, *J. of Bionic Engineering 3*, 147-153, (2006).
- [11] Z. Zhang, A. J. Gil, O. Hassan, and K. Morgan, The simulation of 3D unsteady incompressible flows with moving boundaries on unstructured meshes, *Computers and Fluids 37*, 620-631, (2008).
- [12] W. Kowalczyk, A. Delgado, Simulation of fluid flow in a channel induced by three types of fin-like motion, *J. of Bionic Eng.* 4, 165-176, (2007).
- [13] B. Kim, D. Kim, J. Jung, and J. Park, A biomimetic undulatory tadpole robot using

- ionic polymer–metal composite actuators, *Smart Mater. Struct.* 14, 1579–1585, (2005).
- [14] M. Yamamura, K. Takagi, Z. W. Luo, K. Asaka, Y. Hayakawa, M. Onishi and S. Hirano, An autonomous ray-like swimming robot with IPMC artificial muscle, *Artificial Muscles -A Nanobiotechnology Research: The Perspective of Artificial Muscle*, (2006).
- [15] X. Ye, Y. Su, and S. Guo, A centimeter-scale autonomous robotic fish actuated by IPMC actuator, *IEEE, Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, 262-267, (2007).
- [16] S. Yeom, I. Oh, A biomimetic jellyfish robot based on ionic polymer metal composite actuators, *Smart Mater. Struct.* 18, (2009).
- [17] Z. Wang, G. Hanga, J. Li, Y. Wang, and K. Xiao, A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin, *Sensors and Actuators A* 144, 354–360, (2008).
- [18] M. Terada, H. Sumoto, and S. Yamaguchi, A study on characteristics of a flexible body for a fish type robot, *Pro. of the Eighteenth (2008) Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Canada, July (2008).
- [19] Y. Zhang, Y. Song, J. Yang, and K. H. Low, Numerical and experimental research on modular oscillating fin, *J. Bionic Eng.* 5, 13-23, (2008).
- [20] A. Suleman, C. Crawford, Design and testing of a biomimetic tuna using shape memory alloy induced propulsion, *Comp. and Struct.* 86, 491-499, (2008).
- [21] W. Tedy, S. Heo, H. C. Park, and N. S. Goo, Mechanical design of biomimetic fish robot using LIPCA as artificial muscle, *Key Engineering Materials*, Vols. 326-328, 1443-1446, (2006).
- [22] S. Heo, W. Tedy, H. C. Park, and N. S. Goo, Effect of an artificial caudal fin on the performance of a biomimetic fish robot propelled by piezoelectric actuators, *J. of Bionic Eng.* 4, 151-158, (2007).
- [23] W. Tedy, S. Heo, H. C. Park, and N. S. Goo, Design and experimental parameteric study of a fish robot actuated by piezoelectric actuators, *J. of Intelligent Mat. Syst. and Struct.* 20, 751-758, (2009).
- [24] K. J. Yoon, K. H. Park, S. K. Lee, N. S. Goo, and H. C. Park, Analytical design model for a piezo-composite unimorph actuator and its verification using lightweight piezo-composite actuators, *Smart Material Structure* 13, 459-467, (2004).
- [25] Q. S. Nguyen, S. Heo, H. C. Park, N. S. Goo, T. Kang, and K. J. Yoon, A fish robot driven by piezoceramic actuators and miniaturized power supply, *Int. J. of Con., Auto., and Syst.* 7, 267-272, (2009).
- [26] Q. S. Nguyen, S. Heo, H. C. Park, and D. Y. Byun, Performance evaluation of an improved fish robot actuated by piezoceramic actuators, *Int. Symp. on Intelligent Unmanned Syst.*, Jeju, South Korea, (2009).
- [27] Q. V. Nguyen, H. C. Park, and N. S. Goo, Performance analysis of a piezoceramic unimorph actuator under compressive mechanical load and electric field, *J. of Korean Physics Society* 51, S56-S61, July (2007).
- [28] P. J. B. Hart, J. D. Reynolds, *Handbook of fish biology and fisheries*, Blackwell publishing 1, (2002).