

## MỘT PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC MỚI ĐỂ ĐIỀU KHIỂN ROBOT CÁ DẠNG CARANGIFORM BẮM THEO QUỸ ĐẠO CHO TRƯỚC

### THE NEW DYNAMIC ANALYSIS APPROACH AND TRAJECTORY FOLLOWING CONTROL OF A CARANGIFORM FISH ROBOT

Hoàng Khắc Anh, Phạm Văn Anh,  
 Nguyễn Tấn Tiến, Võ Tường Quân  
 Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM

Ngày tòa soạn nhận bài 20/4/2015, ngày phân biện đánh giá 22/4/2015, ngày chấp nhận đăng 27/4/2015

#### TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu một phân tích động lực học mới để điều khiển robot cá 3 khớp dạng Carangiform bám theo lộ trình xác định với đề xuất sử dụng kết hợp phương trình Newton-Euler và Euler-Lagrange. Robot cá được thiết kế bao gồm 2 phần: phần đầu và phần đuôi. Việc điều khiển phần đuôi của robot cá - được phân tích bằng lý thuyết động lực học tay máy robot - sẽ giúp rôbot cá di chuyển theo lộ trình xác định, chẳng hạn như có thể điều khiển robot cá di chuyển trong mặt phẳng nằm ngang. Trong bài báo này, các nghiên cứu tập trung vào việc điều khiển robot cá bơi theo quỹ đạo cho trước trong mặt phẳng ngang và di chuyển đến độ sâu mong muốn trong mặt phẳng Oyz chưa được xem xét đến. Một bộ điều khiển Fuzzy và Adaptive BackStepping đã được phát triển để điều khiển phần đuôi giúp rôbot cá bám theo quỹ đạo cho trước.

**Từ khóa:** robot cá, động lực học tay máy, bộ điều khiển backstepping, bộ điều khiển Fuzzy

#### ABSTRACT

This paper proposes a new dynamic analysis to control a 3-joint Carangiform fish robot swim to along a desired trajectory by using Newton-Euler and Euler-Lagrange concepts. The fish robot is designed into two parts: the head and the tail of the fish robot. The tail of the fish robot will be analyzed quite similarly to the analysis of the dynamic model of the manipulator. By controlling the tail with respect to the desired profiles, one can control the fish robot on the horizontal plane. To simplify, it is assumed that the motions of the fish robot include two main actions: the movement of fish robot on the horizontal plane and movement of fish robot to the desired depth. The movement of the fish robot to the desired depth is ignored. In this paper, the authors only focus on the control on the fish robot to swim following the desired trajectory on the horizontal plane. Fuzzy and Adaptive Back Stepping controllers are developed to control the tail for this purpose.

**Key words:** fish robot, dynamic model, backstepping controller, fuzzy controller.

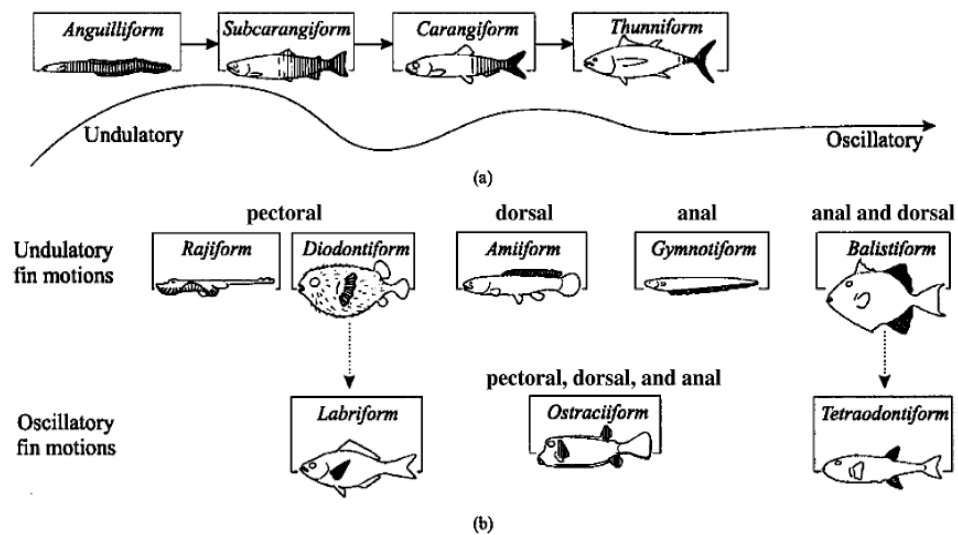
#### 1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, hướng nghiên cứu về robot cá đang phát triển rất mạnh và đã đạt được nhiều thành tựu đáng kể. J. Edward Colgate và Kevin M. Lynch đã công bố một bài báo rất có ý nghĩa trình bày tổng quan lại tất cả về thiết kế cơ khí cũng như việc điều khiển bơi cho robot

cá [1]. Mặt khác về phân loại robot cá, ta có thể chia chúng làm hai dạng chính dựa vào hình dáng bơi của chúng: BCF (Body and/or Caudal Fin) và MPF (Median and/or Paired Fin) [2]. BCF dựa trên những thay đổi hình dạng của thân, đuôi và vây đuôi để tạo lực

đầy. Dạng MPF thì dựa vào sự dao động của vây hông hoặc vây kết hợp. Trong thực tế ta có thể nhận định rằng, cá dạng BCF phổ biến hơn dạng MPF và có bốn dạng bơi chủ yếu: Anguilliform, Subcarangiform, Carangiform và Thunniform. Trong đó, dạng Carangiform là dạng di chuyển với biên độ dao động của thân và đuôi là tương đối nhỏ. Vì vậy, trong các dạng của BCF, hầu hết robot cá đều phát triển dựa theo dạng Carangiform bởi tính linh hoạt và dễ điều khiển của nó. Thông thường, robot cá dạng Carangiform được thiết kế với dạng 3 khớp hoặc 4 khớp. Motomu Nakashima và các cộng sự đã mô tả phương trình số học và kinh nghiệm thiết kế robot cá 2 khớp

và sử dụng “self-excitation” [3] và nhận thấy rằng robot cá có thể bơi với vận tốc lớn nhất là 0.42m/s. Trong một nghiên cứu khác, QinYan cùng các cộng sự đã phát triển robot cá với 4 khớp đuôi và xác định được các thông số ảnh hưởng đến robot cá như tần số, biên độ, chiều dài sóng, độ lệch pha và các hệ số đến vận tốc di chuyển của robot cá [4]. Việc thiết kế và điều khiển robot cá như cá thật bằng cách sử dụng các cấu trúc liên tục thay vì rời rạc là những đóng góp có ý nghĩa [5]. Feitian Zhang và các cộng sự đã phát triển robot cá bằng việc kết hợp thể mạnh của tàu lượn dưới nước và robot cá tạo ra một robot cá có khả năng di chuyển linh động [6].



Hình 1: Hai dạng di chuyển của cá: (a) Dạng BCF; (b) Dạng MPF [1]

Mô hình hóa và mô phỏng là hai việc quan trọng trong điều khiển robot, chúng sẽ giúp ta có được những kinh nghiệm trong việc thay đổi các thông số hệ thống trước khi thiết kế robot cá thật. Trong bài báo này, các tác giả sẽ trình bày phương pháp mô hình động lực học mới cho robot với ý tưởng thiết kế là sự kết hợp động lực học của AUVs (Autonomous Underwater Vehicle - thiết bị tự động di chuyển dưới nước) và động lực học cánh tay robot. Sau phần thiết kế bên ngoài, các bộ điều khiển sẽ giúp robot cá di chuyển theo quỹ đạo

mong muốn sẽ được thảo luận. Như ta đã biết robot cá là hệ phi tuyến, do đó chúng ta có thể sử dụng bộ điều khiển thông minh hoặc bộ điều khiển phi tuyến để điều khiển robot cá theo quỹ đạo mong muốn. Trong bài báo này các tác giả sử dụng bộ điều khiển thông minh Fuzzy và bộ điều khiển phi tuyến Adaptive Back Stepping để điều khiển chuyển động đuôi từ đó điều khiển robot cá di chuyển trong mặt phẳng ngang. Cuối cùng, một vài kết quả mô phỏng sẽ được giới thiệu để chứng minh tính hiệu quả và tính khả thi của phương pháp đã đề xuất.

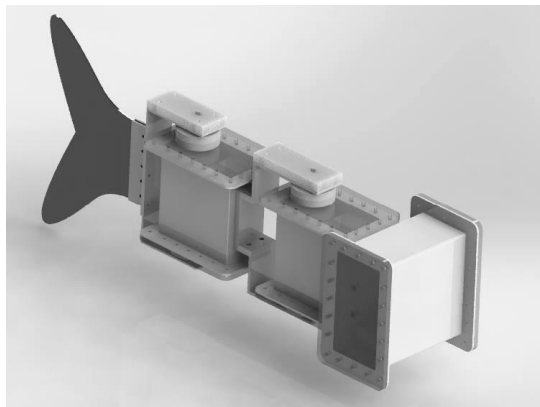
## 2. MÔ HÌNH HÓA ROBOT

Thiết kế của robot cá được đề xuất như trong hình 2: robot cá có 3 khớp đuôi và phần đầu, đuôi của robot được tạo bởi 2 khớp chủ động và 1 khớp bị động. Robot cá di chuyển

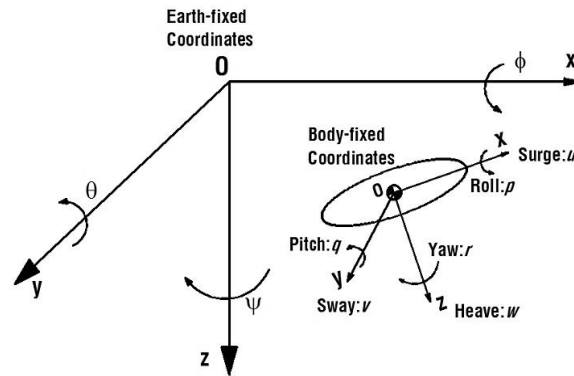
trong mặt phẳng ngang bằng cách sử dụng dao động của đuôi để tạo ra lực đẩy giúp robot cá di chuyển đến phía trước. Các thông số điều khiển cho robot cá được trình bày trong bảng 1.

**Bảng 1:** Các thông số điều khiển cho robot cá

Bậc tự do	Chuyển động tịnh tiến & chuyển động xoay	Vận tốc dài & vận tốc xoay	Vị trí & Góc Euler (Hệ tọa độ trái đất)
1	surge	u	x
2	sway	v	y
3	heave	w	z
4	roll	p	$\phi$
5	pitch	q	$\theta$
6	yaw	r	$\psi$



**Hình 2:** Cấu trúc của robot cá dạng Carangiform



**Hình 3:** Hệ tọa độ gắn trên robot và hệ tọa độ cố định gắn trên trái đất

Ý tưởng của bộ động lực học được phát triển dựa trên phương trình Newton-Euler và động lực học tay máy. Phương trình chuyển động của phần đầu robot cá là phương trình phi tuyến và được mô tả trong phương trình (1) [8]:

$$M^* \cdot \dot{v} + [C(v) + D(v)] \cdot v + g(\eta) = F \quad (1)$$

Trong đó:

$M^*$ : ma trận khối lượng

$C(v)$ : ma trận lực Coriolis và lực hướng tâm

$D(v)$ : ma trận giảm chấn

$g(\eta)$ : Ma trận kết quả của trọng lực và lực Archimedes

$F$ : Ma trận lực và moment tác động xét trong hệ tọa độ địa phương

$v$ : ma trận vận tốc tịnh tiến và quay trong hệ tọa độ địa phương

$$v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^{-1}$$

Phương trình (1) mô tả phương trình động lực học cho đầu robot cá trong không gian 6 bậc tự do với hệ tọa độ địa phương. Chúng ta có mối quan hệ giữa vận tốc tịnh tiến trong hệ tọa độ địa phương và toàn cục:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(n_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong đó:

$$J_1(n_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\sin\theta\cos\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

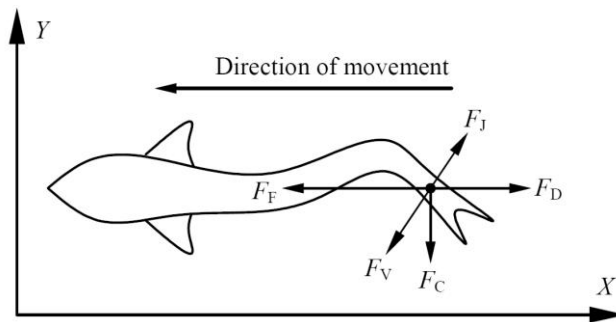
$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(n_2) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3)$$

Với:

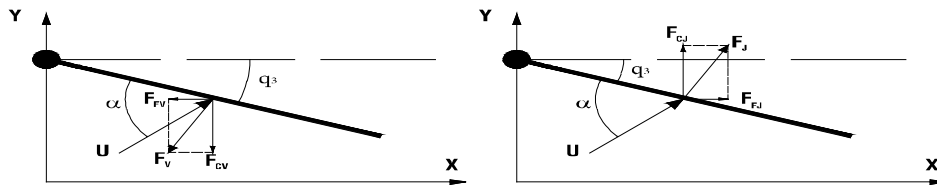
$$J_2(n_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix}$$

Chúng ta cần lưu ý là ma trận thì không xác định tại một số giá trị của góc pitch ( độ),

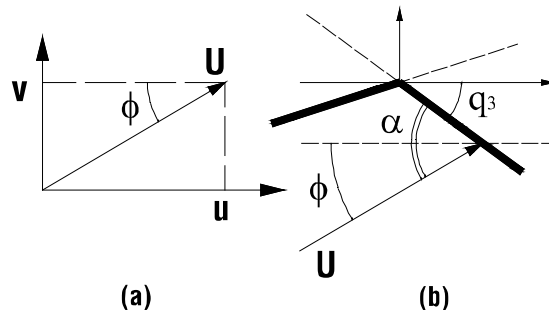
tuy nhiên điều đó chúng ta có thể bỏ qua vì robot chỉ di chuyển trong mặt phẳng nằm ngang. Lực đẩy được tạo ra bởi đuôi robot cá. Giá trị của lực phụ thuộc vào tần số và biên độ của đuôi.  $F_V$  là lực quán tính chất lỏng và  $F_J$  là lực nâng của vây đuôi.  $F_F$  là lực đẩy tại vây đuôi,  $F_C$  là thành phần lực ngang tại vây và  $F_D$  là lực cản. Theo [3, 7], phương trình của các lực tác động tại vây đuôi được mô tả trong các phương trình (4) và (5).



Hình 4: Mô hình các lực tác động lên robot [7]



Hình 5: Các lực tác động lên đuôi



Hình 6: (a) Mối quan hệ giữa U, u, v; (b) Sơ đồ tính toán góc tấn công [7]

$$F_V = \pi\rho L_1 C^2 \dot{U} \sin\alpha + \pi\rho L_1 C^2 \dot{\alpha} U \cos\alpha \quad (4)$$

$$F_J = 2\pi\rho L_1 C U^2 \sin\alpha \cos\alpha \quad (5)$$

$$F_F = F_{FV} - F_{FJ} = (F_V - F_J) \sin(q_3) \quad (6)$$

$$F_C = F_{CV} - F_{CJ} = (F_V - F_J) \cos(q_3) \quad (7)$$

Trong đó  $L_1$  là chiều dài quét của đuôi, là trọng lượng riêng của nước,  $U$  là vận tốc tương đối tại trọng tâm của vây, là góc tấn công và  $2C$  là chiều dài từ phần đầu đuôi robot đến phần cuối đuôi robot. Ta có các biến tổng

quát ( $i=1, 2, 3$ ) (hình 8), là vận tốc của nước theo phương Ox,  $v$  là vận tốc của nước theo phương Oy và được tính toán:

$$v = \dot{y}_{c3} = l_1 \dot{q}_1 \cos q_1 + l_2 \dot{q}_2 \cos q_2 + l_3 \dot{q}_3 \cos q_3$$

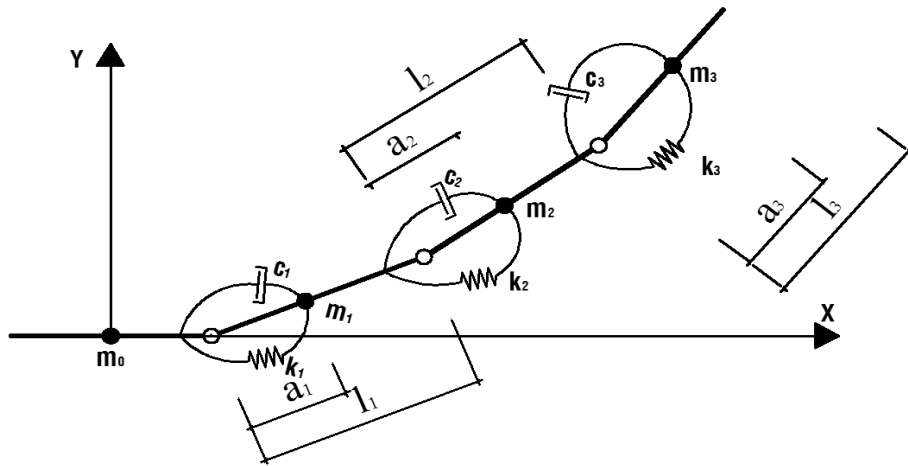
$$\dot{U} = \frac{v}{U} = \frac{v}{U} (l_1 \dot{q}_1 \cos q_1 + l_2 \dot{q}_2 \cos q_2$$

$$+ l_3 \dot{q}_3 \cos q_3)$$

$$- \frac{u}{U} (l_1 \dot{q}_1^2 \sin q_1 + l_2 \dot{q}_2^2 \sin q_2 + l_3 \dot{q}_3^2 \sin q_3)$$

$$\alpha = \phi + q_3$$

$$\cos\alpha = \frac{u}{U} \cos q_3 - \frac{v}{U} \sin q_3; \sin\alpha = \frac{v}{U} \cos q_3 + \frac{v}{U} \sin q_3$$



Hình 7: Mô hình phân tích của đuôi cá

Đuôi của robot cá được mô hình như hệ thống tay máy 3 khớp và được trình bày trong hình 7. Mô hình có hệ số lò xo  $k_1$  tại khớp thứ nhất,  $k_2$  tại khớp thứ hai và  $k_3$  tại khớp cuối. Chúng ta có thể bỏ qua  $k_1, k_2$  bởi vì chúng rất nhỏ. Các giá trị  $c_1, c_2$  và  $c_3$  là các hệ số giảm chấn tại tâm của các khớp. Chúng ta áp dụng phương trình Euler-Lagrange cho đuôi của robot cá. Lực tổng quát bao gồm moment của các động cơ và moment tạo ra bởi  $F_F$  and  $F_C$ , bởi vì robot chỉ di chuyển trong mặt phẳng Oxy. Ta có:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i$$

Trong đó:  $L$  là hàm năng lượng,  $Q_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) là các biến tổng quát và là lực tổng quát.

Phương trình của hệ thống robot cá 3 khớp

được viết như bên dưới:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Chi tiết các ma trận  $M_{ij}$  và  $N_i$  được trình bày trong phần phụ lục ( $i, j = 1, 2, 3$ ).  $T_i$  là momen của động cơ tại khác khớp ( $i = 1, 2, 3$ ). Để giải phương trình 8, chúng ta cần các biến tổng quát ( $q_i$  ( $i=1, 2, 3$ )), sau đó tính  $F_F$  và  $F_C$ .

Trong bài báo này ta chỉ tập trung vào các di chuyển trong mặt phẳng Oxy, dựa vào phương trình (1), phương trình chuyển động của phần đầu robot cá được trình bày như trong phương trình (9):

$$\begin{cases} m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + z_g(pr + \dot{q})] = \sum X_{ext} \\ m[\dot{v} - wp + ur + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] = \sum Y_{ext} \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_g(\dot{v} - wp + ur)] = \sum N_{ext} \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó:

m: khối lượng của robot

$(x_g, y_g, z_g)$ : Tọa độ trọng tâm của robot trong

hệ tọa độ địa phương

$I_{zz}, I_{yy}, I_{xx}$ : Moment quán tính theo các trục  
 $Oz, Oy$  và  $Ox$

$\sum X_{ext}, \sum Y_{ext}$ : Tổng lực dọc trục  $Ox, Oy$

Tổng moment quay quanh trục  $Oz$

Chúng ta có:

$$\sum X_{ext} = F_F - F_{dx} \quad (10)$$

$$\sum Y_{ext} = F_C - F_{dy} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum N_{ext} = & (x_g W - x_b B) \cos \theta \sin \phi \\ & + (y_g W - y_b B) \sin \theta - F_C (a_0 + l_1 \cos q_1) \end{aligned} \quad (12)$$

Trong đó:

$$M_c = M_{c1} + M_{c2} + M_{c3}$$

$$M_{c1} = c_1 \dot{q}_1 a_0$$

$$M_{c2} = c_2 \dot{q}_2 \cos q_1 (a_0 + l_1 \cos q_1)$$

$$M_{c3} = c_3 \dot{q}_3 (a_0 + l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_2) \cos q_2$$

Với  $l$  là tọa độ điểm đặt của lực đẩy Archimedes trong hệ tọa độ địa phương,  $W$  là trọng lực của robot cá,  $B$  là lực Archimedes và  $l$  là các moment gây ra bởi lực giãm chẵn tại các khớp thì:

- Lực cản theo phương trục  $Ox$  ( $F_{dx}$ ) được tính toán:

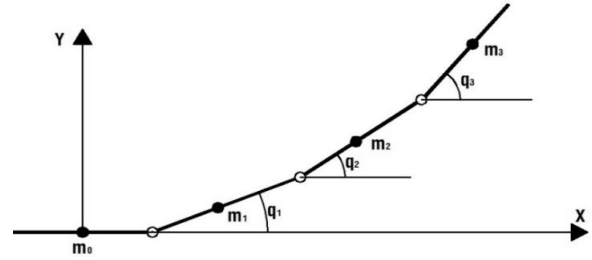
$$F_{dx} = \frac{1}{2} \rho V^2_x C_D S_x \quad (13)$$

Lực cản theo phương trục  $Oy$  ( $F_{dy}$ ) được tính toán:

$$F_{dy} = \frac{1}{2} \rho V^2_y C_D S_y \quad (14)$$

Với  $\rho$  là khối lượng riêng của nước;  $V_x, V_y$  là vận tốc tương đối của ro-

bot đối với nước theo trục  $Ox$  và  $Oy$ ;  $C_D$  hệ số cản;  $S_x, S_y$  là diện tích cản của robot cá theo phương  $Ox$  và  $Oy$ . ( $S_y \gg S_x$ )



Hình 8: Các biến khớp tổng quát trong hệ tọa độ địa phương

### 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Trong phần này, chúng ta thiết kế hai bộ điều khiển cho robot cá. Sử dụng bộ điều khiển Fuzzy hoặc bộ điều khiển Adaptive BackStepping, chúng ta điều khiển đuôi của robot cá di chuyển theo biên dạng mong muốn. Với biên dạng mong muốn đó, đuôi của robot tạo ra lực và moment để điều khiển robot. Bởi vì đuôi của robot có thiết kế giống như hệ thống cánh tay robot công nghiệp nên mỗi khớp sẽ có một bộ điều khiển riêng.

#### A. Bộ điều khiển Fuzzy

Ngày nay, bộ điều khiển Fuzzy logic ngày càng được ứng dụng nhiều để điều khiển các hệ thống tuyến tính và phi tuyến. Bộ điều khiển Fuzzy có hai tín hiệu đầu vào (sai số (e) và độ biến đổi sai số (ec)) và một tín hiệu đầu ra T (Moment của động cơ tại các khớp). Ta chọn hàm liên thuộc dạng tam giác cho các biến đầu vào và đầu ra. Phương pháp giải mờ là phương pháp trọng tâm COG. Bộ luật Fuzzy được giới thiệu trong bảng 2.

**Bảng 2:** Bộ luật Fuzzy

T	ec							
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	ZE
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
	ZE	PM	PM	PS	NS	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	PB	PB	PB	NM	NM	NB	NB

### B. Bộ điều khiển Adaptive Back Stepping

Bộ điều khiển BackStepping là một bộ điều khiển hệ phi tuyến thường được dùng cho các ứng dụng bám theo quỹ đạo cho trước. Trong bài báo này ta lấy ý tưởng thiết kế từ tài liệu tham khảo [8] để thiết kế bộ điều khiển Adaptive Back Stepping:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Ta định nghĩa:  $H = -M^{-1}N$ ,  $S_1 = q$ ;  $S_2 = \dot{q}$  (16)

Phương trình (16) trở thành:

$$\dot{s}_1 = s_2 \quad ; \quad M(\dot{s}_2 + H) = T \quad (17)$$

Đặt:

$$\begin{aligned} e_1 &= q_{ref} - s_1 \quad ; \\ e_2 &= \omega_{ref} - s_2 \quad ; \\ \omega_{ref} &= \varepsilon_1 e_1 + \dot{q}_{ref} \end{aligned}$$

Trong đó:

- $e_1$ : sai số góc quay các khớp của robot
- $e_2$ : sai số vận tốc góc các khớp của robot

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{\omega}_{ref} - \dot{s}_2 = (\varepsilon_1 \dot{e}_1 + \ddot{q}_{ref}) - M^{-1}T + H \\ &= (-\varepsilon_1^2 e_1 + e_2 \varepsilon_1 + \ddot{q}_{ref}) - M^{-1}T + H \end{aligned} \quad (18)$$

Dựa vào phương trình (18) ta chọn tín hiệu điều khiển:

$$T = \hat{M} \begin{pmatrix} (1 - \varepsilon_1^2)e_1 + \\ e_2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \ddot{q}_{ref} + \hat{H} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Trong phương trình (19), và là các ma trận ước lượng của ma trận  $M$  và  $H$ . Ta định nghĩa sai số ước lượng:

$$\bar{M} = M - \hat{M} \quad ; \quad \bar{H} = H - \hat{H};$$

Thay phương trình (19) vào phương trình (18):

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= -e_1 - e_2 \varepsilon_2 \\ &\quad + M^{-1} \bar{M} \left( (1 - \varepsilon_1^2)e_1 \right. \\ &\quad \left. + e_2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \ddot{q}_{ref} \right. \\ &\quad \left. + \hat{H} \right) + \bar{H} \end{aligned} \quad (20)$$

Các ma trận ước lượng được tìm bằng cách sử dụng hàm Lyapunov. Ta chọn:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} e_1^T e_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2 \\ &\quad + \frac{M^{-1T}}{2} \bar{M}^T \bar{M} + \frac{1}{2} \bar{H}^T \bar{H} \end{aligned} \quad (21)$$

Đạo hàm cấp một của hàm Lyapunov được trình bày trong phương trình (22):

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1^T \dot{e}_1 + e_2^T \dot{e}_2 + M^{-1T} \bar{M}^T \\ &\quad \left( -\frac{d}{dt} \hat{M} \right) + \bar{H}^T \left( -\frac{d}{dt} \hat{H} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

Thay phương trình (20) vào (22):

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\varepsilon_1 e_1^T e_1 - \varepsilon_2 e_2^T e_2 + (M^{-1} \bar{M})^T \\ &\quad \left[ e_2 \left( (1 - \varepsilon_1^2)e_1 + e_2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \ddot{q}_{ref} + \hat{H} \right) - \frac{d}{dt} \hat{M} \right] \\ &\quad + \bar{H}^T \left[ e_2 - \frac{d}{dt} \hat{H} \right] \end{aligned}$$

Mục đích của ta cần tìm là  $\dot{V} < 0$  vì vậy ma trận ước lượng có thể được chọn:

$$\frac{d\hat{M}}{dt} = e_2 \begin{pmatrix} (1 - \varepsilon_1^2)e_1 \\ +e_2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \\ +\ddot{q}_{ref} + \hat{H} \end{pmatrix}; \quad \frac{d\hat{H}}{dt} = e_2$$

Khi đó:  $\dot{V} = -\varepsilon_1 e_1^T e_1 - \varepsilon_2 e_2^T e_2 < 0$ .

Vậy hệ thống ổn định.

## 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Dựa vào phương trình chuyển động của robot cá được giới thiệu ở phần 2 và áp dụng hai bộ điều khiển Fuzzy và Adaptive Back Stepping được thiết kế ở phần 3 ta tiến hành mô phỏng điều khiển góc yaw của robot. Từ đó ta có thể điều khiển robot cá trong mặt phẳng Oxy với quỹ đạo mong muốn. Đầu tiên,

ta sẽ kiểm tra điều khiển robot với góc yaw mong muốn cho trước. Kết quả mô phỏng sẽ giới thiệu đáp ứng góc yaw của robot cá và vận tốc góc của góc yaw. Cuối cùng ta sẽ điều khiển robot bám theo quỹ đạo mong muốn.

**A. Điều khiển góc yaw**

Góc yaw mong muốn là  $60^\circ$ . Biên dạng mong muốn của đuôi robot cá là dạng hình sin với phương trình như sau:

$$q_{1ref} = D + A\sin(2\pi ft + \varphi_1) ;$$

$$q_{2ref} = D + A\sin(2\pi ft + \varphi_2)$$

Trong đó: D là góc mong muốn.

Kp: Hệ số tỷ lệ dương.

error\_yaw: Sai số góc yaw.

A: biên độ của hàm sin.

f: tần số của hàm sin.

$\varphi_1$  và  $\varphi_2$ : góc lệch pha.

**Bảng 3: Thông số mô hình của robot cá**

$I_{xx} = 0.01304 (m^4)$	$S_x = 0.021 m^2$	$i_2 = 0.195(m^4)$	$i_3 = 0.215(m^4)$
$I_{yy} = 0.3722 (m^4)$	$i_1 = 0.813(m^4)$	$m_2 = 0.06 (kg)$	$m_3 = 0.0286 (kg)$
$I_{zz} = 0.3626 (m^4)$	$m_1 = 0.354 (kg)$	$l_2 = 0.088 (m)$	$l_3 = 0.11 (m)$
$m_0 = 1.54 (kg)$	$l_1 = 0.167 (m)$	$k_3 = 15 \times 10^{-2}$	$a_3 = 0.055 (m)$
$\rho = 998 kg/m^3$	$a_1 = 0.115 (m)$	$a_2 = 0.035 (m)$	$c_3 = 5$
$C_D = 0.5$	$c_1 = 12 \times 10^{-2}$	$c_2 = 8 \times 10^{-2}$	

**- Bộ điều khiển Fuzzy**

Ta chọn:

$$K_p = 1, A = 0.0873 rad,$$

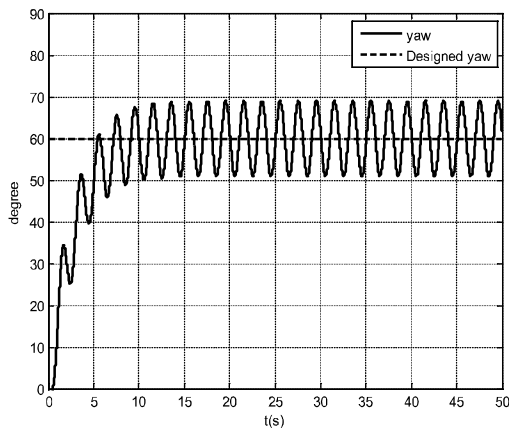
$$f = 0.5 Hz, \varphi_1 = -\frac{\pi}{12} rad;$$

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{12} rad.$$

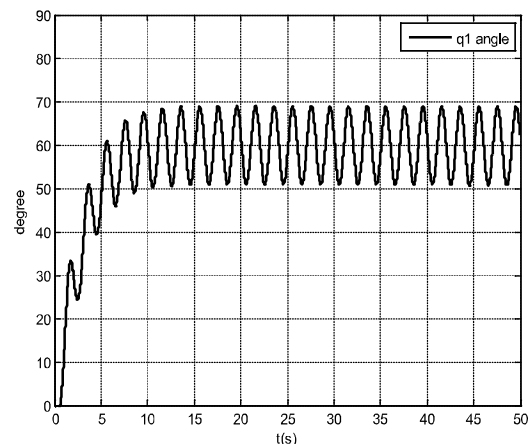
Đáp ứng của robot cá được trình bày trong hình 9. Ta nhận thấy bộ điều khiển mất 10

giây để điều khiển robot đạt được góc yaw mong muốn. Các giá trị biến tổng quát  $q_i (i=1, 2, 3)$  đã được chuyển qua hệ tọa độ toàn cục. Khi đạt được giá trị góc mong muốn, góc yaw của robot cá vẫn tiếp tục dao động với biên độ nhỏ khoảng  $\pm 10^\circ$ . Điều này là bình thường giống với cá thật.

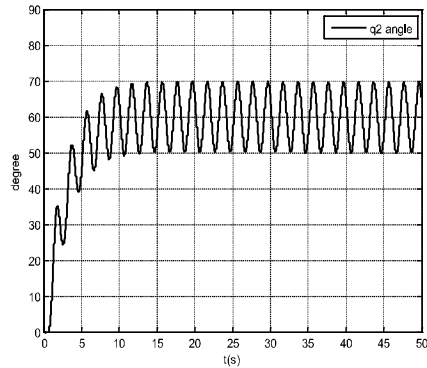
Điều khiển góc yaw mong muốn là  $60^\circ$ .



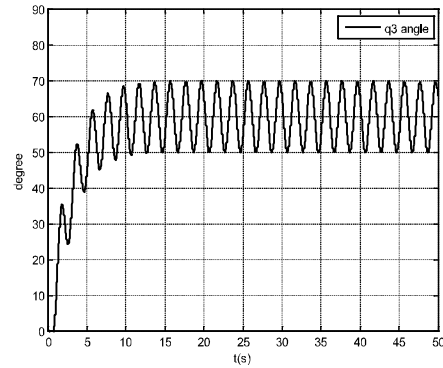
**Hình 9: Đáp ứng góc yaw với góc mong muốn  $60^\circ$**



**Hình 10: Đáp ứng góc  $q_1$  của đuôi robot**



Hình 11: Đáp ứng góc  $q_2$  của đuôi robot



Hình 12: Đáp ứng góc  $q_3$  của đuôi robot

### - Bộ điều khiển Adaptive BackStepping

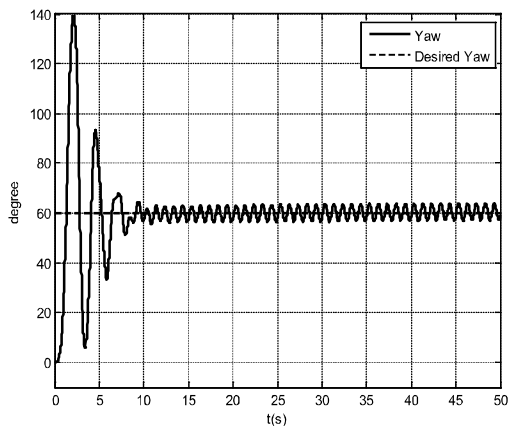
Ta chọn:

$$K_p = 0.51, A = 0.1745 \text{ rad}, f = 1 \text{ Hz}, \varphi_1 = -\frac{\pi}{12} \text{ rad}; \varphi_2 = \frac{\pi}{12} \text{ rad}; \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.8.$$

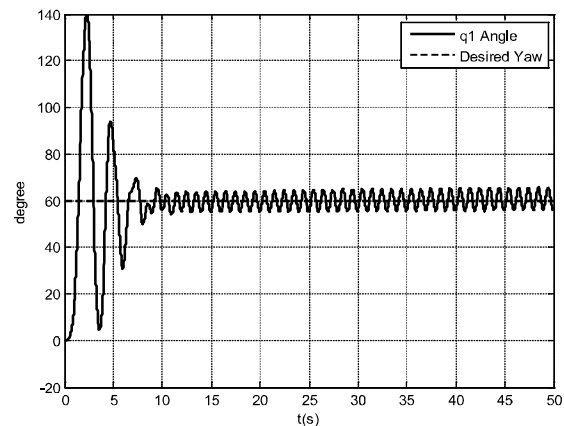
Đáp ứng góc yaw được trình bày trong hình 13. Dựa vào đây ta thấy hệ thống đạt

Trường hợp góc yaw mong muốn là 60 độ.

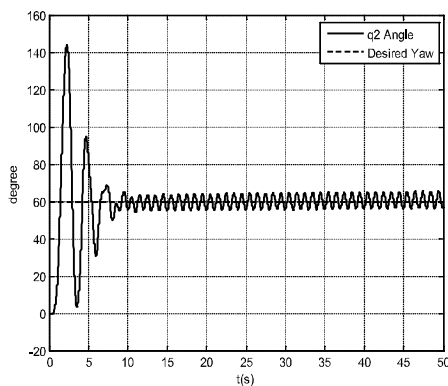
ổn định ở giây thứ 10. Góc yaw có dao động mạnh ở những giây đầu nhưng sau đó đã đạt được trạng thái ổn định với góc yaw mong muốn. Thời gian hoạt động sau đó đáp ứng có đặc điểm giống với bộ điều khiển Fuzzy.



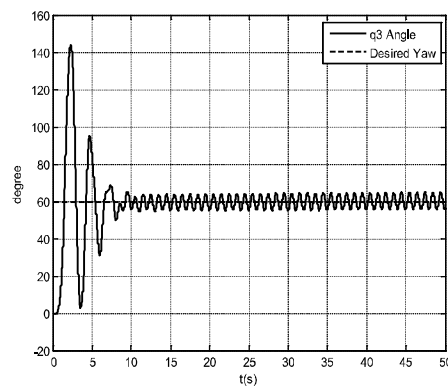
Hình 13: Đáp ứng góc yaw với góc mong muốn 60°



Hình 14: Đáp ứng góc  $q_1$  của đuôi robot



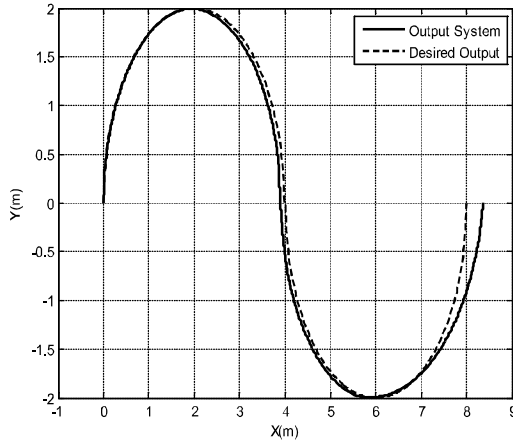
Hình 15: Đáp ứng góc  $q_2$  của đuôi robot



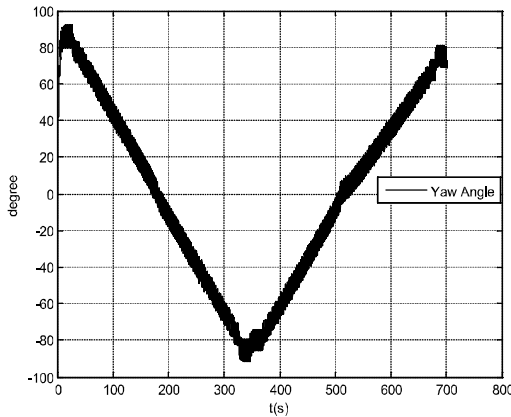
Hình 16: Đáp ứng góc  $q_3$  của đuôi robot

**B. Điều khiển robot theo quỹ đạo mong muốn**

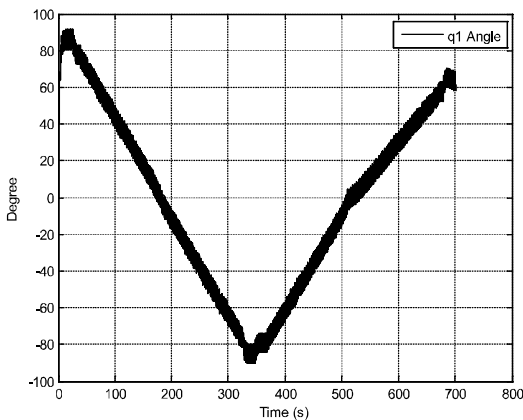
Trong phần này robot cá sẽ được điều khiển để bám theo quỹ đạo mong muốn cho trước. Đường liên tục là đáp ứng vị trí của robot cá, đường đứt gạch là quỹ đạo mong muốn.



Hình 17: Đáp ứng vị trí của robot



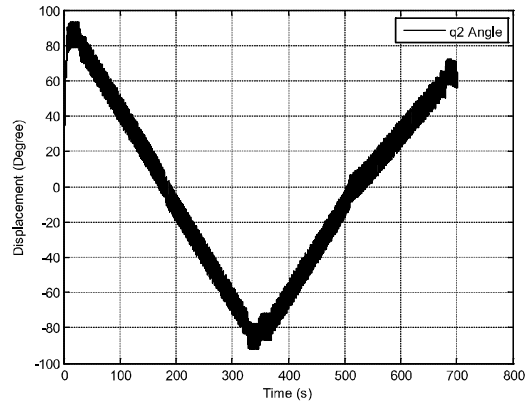
Hình 18: Đáp ứng góc yaw của robot



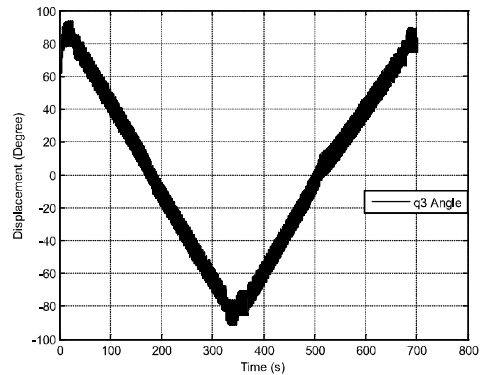
Hình 19: Đáp ứng góc  $q_1$  của đuôi

**- Bộ điều khiển Fuzzy**

Đáp ứng của robot khi áp dụng bộ điều khiển Fuzzy điều khiển di chuyển trong mặt phẳng nằm ngang được thể hiện qua hình 17.



Hình 20: Đáp ứng góc  $q_2$  của đuôi

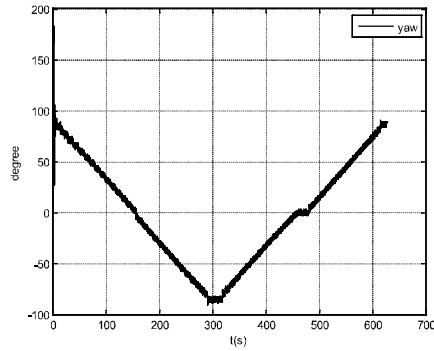


Hình 21: Đáp ứng góc  $q_3$  của đuôi

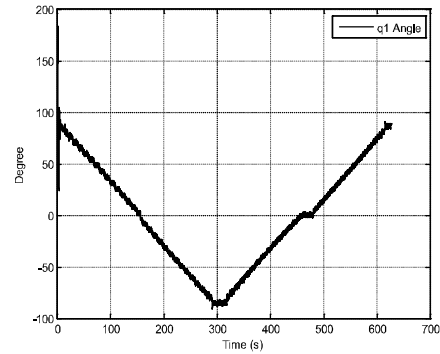
Trong hình 18, robot cá có thời gian hoàn thành quỹ đạo mong muốn là 700 giây. Sai số xuất hiện theo phương Ox khoảng 0.4m.

**- Bộ điều khiển Adaptive BackStepping**

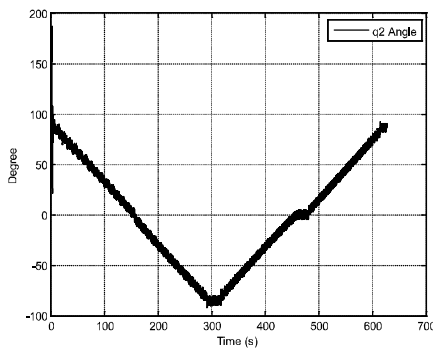
Đáp ứng của robot khi sử dụng bộ điều khiển Adaptive BackStepping để điều khiển robot cá bơi theo quỹ đạo mong muốn được trình bày trong hình 26. Hình 22-25 thể hiện các đáp ứng góc của các khớp đuôi. Tất cả các giá trị của góc đã được quy đổi sang hệ tọa độ toàn cục.



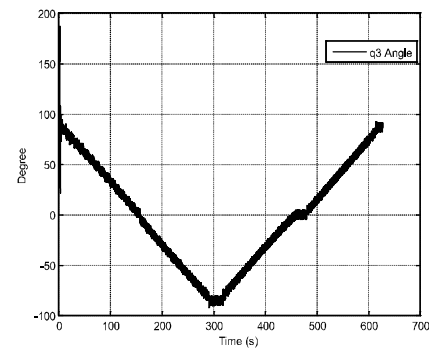
Hình 22: Đáp ứng góc yaw của robot



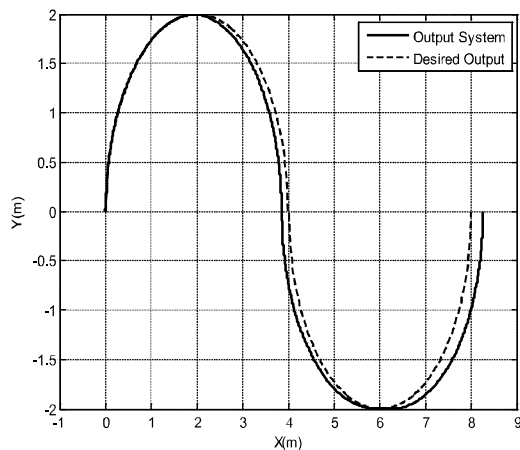
Hình 23: Đáp ứng góc  $q_1$  của đuôi robot



Hình 24: Đáp ứng góc  $q_2$  của đuôi



Hình 25. Đáp ứng góc  $q_3$  của đuôi



Hình 26: Đáp ứng vị trí của robot trong hệ tọa độ toàn cục.

Trong hình 26, ta thấy robot cần khoảng 600 giây để hoàn thành quỹ đạo mong muốn. Khoảng cách lệch theo phương Ox là khoảng 0.3m.

## 5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, phương trình động học của robot cá 3-khớp dạng Carangiform được giới thiệu. Dựa vào phương trình động lực học

ta thiết kế 2 bộ điều khiển là Fuzzy và Adaptive BackStepping để điều khiển robot trong mặt phẳng nằm ngang. Kết quả mô phỏng nhận thấy bộ điều khiển Adaptive BackStepping cho đáp ứng tốt hơn bộ điều khiển Fuzzy về thời gian đáp ứng cũng như sai số vị trí cuối hành trình. Tuy nhiên ban thời gian đầu hoạt động bộ điều khiển Fuzzy cho kết quả đáp ứng về góc ổn định hơn. Ta thấy sai số của góc yaw sai lệch khoảng độ. Sai số này hoàn toàn có thể chấp nhận được vì thực tế cá thật khi di chuyển thì vẫn tạo ra góc lệch nhỏ. Qua quá trình mô phỏng ta cũng đánh giá được mức độ chính xác của phương trình động lực học mới mà các tác giả đã xây dựng. Mô hình động lực học được xây dựng theo phương pháp đã trình bày ở các phần trên là có thể chấp nhận được. Có thể sử dụng để tiến hành mô phỏng đánh giá các thông số của robot.

Trong những phần tiếp theo, các tác giả sẽ tiến hành thực nghiệm để có thể đánh giá tốt hơn về mặt thực tế phương pháp xây dựng mô

hình này và đánh giá được các bộ điều khiển đã được xây dựng, bằng cách so sánh kết quả lý thuyết mô phỏng được và kết quả thực nghiệm. Sau đó các tác giả có thể nghiên cứu giải quyết bài toán điều khiển độ sâu cho robot.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (VNU-HCM) trong khuôn khổ đề tài mã số B-2013-20-01.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Edward Colgate, *Member, IEEE*, and Kevin M. Lynch, *Member, IEEE, Mechanics and Control of Swimming: A Review*, IEEE Journal Of Oceanic Engineering, Vol. 29, No. 3, July 2004.
- [2] Michael Sfakiotakis, David M. Lane and J. Bruce C. Davies, *Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion (Translation Journals style)*, IEEE Journal Of Oceanic Engineering, Vol. 24, No. 2, April 1999.
- [3] Motomu Nakashima, Norifumi Ohgishi and Kyosuke Ono, *A study on the Propulsive Mechanism of a Double Joint Fish Robot Utilizing Self-Excitation Control*, JSME International Journal, Series C, Vol. 46, No. 3, 2003.
- [4] Qin Yan, Zhen Han, Shi-wu Zhang, Jie Yang, *Parametric Research of Experiments on a Carangiform Robotic Fish*, Journal of Bionic Engineering 5 (2008).
- [5] Hadi EL Daou, Taavi Salumäe, Asko Ristolainen, Gert Toming, Madis Listak, and Maarja Kruusmaa, *A Bio-mimetic Design and Control of a Fish-like Robot using Compliant Structures*, The 15th International Conference on Advanced Robotics Tallinn University of Technology Tallinn, Estonia, June 20-23, 2011
- [6] Feitian Zhang, John Thon, Cody Thon and Xiaobo Tan, *Miniature Underwater Glider: Design, Modeling, and Experimental Results*, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA May 14-18, 2012
- [7] Tuong Quan Vo, Hyoung Seok Kim, Byung Ryong Lee, *Propulsive Velocity Optimization of 3-Joint Fish Robot Using Genetic-Hill Climbing Algorithm*, Journal of Bionic Engineering, Vol. 6, pp. 415-429, 2009.
- [8] Ola-Erik Fjellstad, *Control of Unmanned Underwater Vehicles in Six Degrees of Freedom A Quaternion Feedback Approach*, Dr.Ing Thesis, Department of Engineering Cybernetics, The Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, November 1994.