

Thiết kế bộ điều khiển bám đường cho phương tiện thủy sử dụng thiết bị đẩy khớp nối từ

Trần Ngọc Huy, Phạm Nguyễn Nhựt Thanh, Võ Hồng Thái Bảo

Tóm tắt—Vấn đề điều khiển phương tiện tự động bám theo một mục tiêu hay một quỹ đạo định sẵn do có nhiều ứng dụng quan trọng trong các lĩnh vực như quân sự, quan trắc địa hình, khảo sát chất lượng môi trường nên đã được nghiên cứu ở rất nhiều nước trên thế giới. Bài báo này trình bày kết quả tìm hiểu phương pháp điều khiển phương tiện thủy trên mặt nước sử dụng thiết bị đẩy khớp nối từ để bám theo các quỹ đạo hình xung vuông hay zig-zag bằng cách sử dụng giải thuật đường ngắm (Line of sight, LOS) kết hợp với bộ điều khiển cuộn chiếu (Backstepping). Hệ thống được xét ở đây sẽ bao gồm 3 khối chính là Dẫn đường – Điều khiển – Vận hành (Guidance – Control – Ship). Trong đó Guidance sẽ giúp chọn điểm waypoint hình thành quỹ đạo, sử dụng giải thuật LOS với khoảng cách lookahead để điều chỉnh và tính ra góc ψ mong muốn (góc heading). Control với giải thuật Backstepping sẽ tính lực và moment áp vào mô hình động học của tàu trong khối Ship. Vị trí và góc của tàu sẽ được feedback trở về 2 khối Guidance-Control để tính toán và xử lý. Tính hiệu quả của thuật toán sẽ được trình bày qua kết quả mô phỏng sử dụng MATLAB/SIMULINK.

Từ khóa—Dẫn đường, đường dẫn, đường ngắm, khoảng cách phía trước, điều khiển, bộ điều khiển cuộn chiếu

1 GIỚI THIỆU

Những ngày nay nhiều ứng dụng thực tế về việc khảo sát sông, hồ, biển... được thúc đẩy do

Bài báo này được gửi vào ngày 25 tháng 05 năm 2017 và được chấp nhận đăng vào ngày 19 tháng 09 năm 2017.

Công trình nghiên cứu này được thực hiện tại Phòng thí nghiệm trọng điểm Quốc gia Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống và được tài trợ bởi ĐHQG TP.HCM trong đề tài mã số C2017-20b-01

Trần Ngọc Huy, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM
Phạm Nguyễn Nhựt Thanh, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

Võ Hồng Thái Bảo, Phòng thí nghiệm trọng điểm Quốc gia Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, ĐHQG-HCM

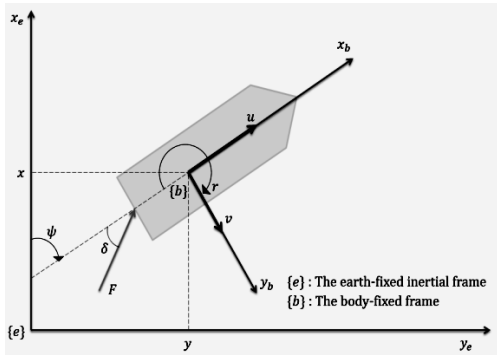
môi trường sống của con người bị thu hẹp dần và cần tìm nguồn tài nguyên, môi trường mới cũng như đảm bảo an toàn cho khu vực sinh sống của chính mình. Đối mặt với vấn đề này nhiều ứng dụng đã được phát triển và một trong số đó là tàu tự hành trên mặt nước để thu thập số liệu. Trên thế giới đã phát triển nhiều loại tàu tự hành với nhiều mục đích khác nhau (cũng có thể là đa nhiệm vụ) như tàu AutoCat của học viện MIT hoàn thành năm 2000, tàu HWT X-1 của Mỹ được hoàn thành năm 2007, Viknes USV được phát triển năm 2008 bởi Đại học Khoa học và Công nghệ Norwegian, tàu UMV – O sản xuất bởi công ty Yamaha của Nhật, USV-ZhengHe 101 của Trung Quốc, Wave Glider USV được sản xuất bởi hãng Liquid Robotics ở Mỹ. Ngoài ra một số ứng dụng của dạng tàu tự hành này cũng được mô tả trong các kết quả nghiên cứu [1-3].

Muốn phát triển tàu tự hành cần có các hệ thống dẫn đường và điều khiển tự động để tàu có thể tự đi theo một quỹ đạo đã định trước. Trong khuôn khổ bài viết ta sẽ xoay quanh vấn đề khảo sát môi trường do đó thường yêu cầu tàu đi theo các quỹ đạo quen thuộc như sóng vuông hay zig-zag tức là đi qua các điểm mong muốn cho trước (way-point tracking control) được đề cập trong [4]. Bài viết sẽ trình bày cách để xây dựng một bộ Guidance để tạo đường dẫn bằng phương pháp Line of sight (LOS) và thiết kế một bộ điều khiển để bám theo góc ψ mong muốn từ Guidance và đạt được vận tốc mong muốn trong quá trình di chuyển bằng thuật toán điều khiển cuộn chiếu.

2 XÂY DỰNG PHƯƠNG TRÌNH TOÁN

Với $\eta = [n, e, \psi]^T$ là ba bậc tự do biểu thị vị trí (x, y) và góc heading (ψ) của tàu trong hệ qui chiếu quán tính cố định trên trái đất và $v = [u, v, r]^T$ biểu thị tương ứng với các vận tốc tuyến tính gọi là surge (u) và sway (v) và vận tốc góc yaw (r) trong hệ qui chiếu cố định trên tàu. Theo [5] phương trình động lực học của tàu là:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)v \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau \end{cases} \quad (1)$$



Hình 1. Các tham số chuyển động của tàu

trong đó $R(\cdot)$ là ma trận xoay bậc ba với

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

và M là ma trận quán tính hệ thống có các thành phần cụ thể như

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & mx_G - Y_r \\ 0 & mx_G - N_v & I_z - N_r \end{pmatrix}$$

với $N_v = Y_r$ và $M = M^T > 0$.

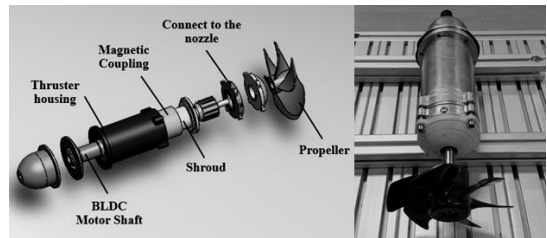
$C(v)$ là ma trận Coriolis và $D(v)$ là ma trận Damping. Trong khuôn khổ bài viết ta sẽ đơn giản hóa và chỉ quan tâm các yếu tố ảnh hưởng đến tàu trong điều kiện di chuyển chậm nên sẽ hợp hai ma trận $C(v)$ và $D(v)$ thành một ma trận $N(v)$ duy nhất như trong [6]. Các thành phần cụ thể trong ma trận sau khi đơn giản hóa được chỉ ra bên dưới:

$$N(v) = \begin{pmatrix} n_{11} & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & n_{23} \\ 0 & n_{32} & n_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & mu - Y_r \\ 0 & -N_v & mx_g u - N_r \end{pmatrix}$$

Trong đó x_G là khoảng cách từ trọng tâm của tàu đến gốc tọa độ của hệ quy chiếu gắn trên tàu. Các thành phần $\{X_{(.)}, Y_{(.)}, N_{(.)}\}$ là các tham số thủy học theo các ký hiệu của [7]. Tín hiệu điều khiển $T = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T = [F, Y_\delta, N_\delta]^T$ trong đó F là lực đẩy

từ thiết bị đẩy, δ là góc bánh lái điều khiển. Từ đây ta có thể thấy rằng chỉ có hai ngõ vào điều khiển là F và δ và mong muốn điều khiển là tác động vào τ_1, τ_3 nhưng phải chú ý rằng khi tác động τ_3 cũng sẽ tạo ra τ_2 với tỉ lệ là $A = Y_\delta / N_\delta$. Lúc này phương trình động lực học cho tàu sẽ được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)v \\ M\dot{v} + N(v)v = [F, Y_\delta, N_\delta]^T \end{cases} \quad (2)$$



Hình 2. Mô hình thiết bị đẩy khớp nối từ

Phương trình lực đẩy chân vịt có dạng [8]:

$$T = \rho n^2 D^4 \left(\frac{V_p}{nD} \right)^c \left(\frac{\eta}{\rho n D^2} \right)^f \left(\frac{p_0 - e}{\rho n^2 D^2} \right)^g \quad (3)$$

Trong đó: D - Đường kính chân vịt; V_p - Vận tốc tiến; n - Số vòng quay; ρ - Khối lượng riêng của chất lỏng; η - Hệ số nhớt động lực học; $p_0 - e$ Áp suất tĩnh trên trục chân vịt.

3 THIẾT KẾ BỘ GUIDANCE

Guidance: Trong trường hợp này được định nghĩa là quá trình dẫn một vật thể đi về phía một điểm cố định. Guidance có thể được thiết kế cho tất cả các loại phương tiện trên không, trên cạn, trên mặt nước hay dưới nước. Trong hình thức đơn giản nhất của nó, hệ thống dẫn đường được chia làm hai loại chính:

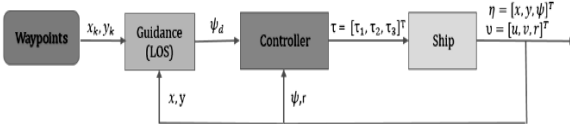
+ Target tracking: hướng vật thể mong muốn (cụ thể ở đây là hệ thống tàu thuyền trên mặt nước) bám theo một mục tiêu nhất định. Để thực hiện mục đích trên đòi hỏi quỹ đạo của tàu phải phụ thuộc theo thời gian.

+ Path following: hướng mục tiêu kiểm soát hội tụ và đi theo một con đường đã được định sẵn mà không có bất kì một sự ràng buộc nào về thời gian.

Trong bài viết này chúng ta sẽ tập trung tìm hiểu “guidance for path following”. Rất nhiều phương pháp đã được đưa ra nghiên cứu cho vấn đề này, trong đó các phương pháp phổ biến thường thấy là Line of Sight (LOS), Pure Pursuit (PP), Constant Bearing (CB). Line of Sight tuy là một phương pháp đơn giản nhất nhưng nhiều thí nghiệm cũng như áp dụng thực tế đã chứng minh tính hiệu quả

của nó trong hệ thống bám đường đặc biệt khi sử dụng cho những phương tiện tàu thuyền trên mặt nước. Hệ thống LOS thường được kết hợp với hệ thống tự động điều khiển phân đầu để tính góc bánh lái thích hợp hay nói cách khác là kết hợp với hệ thống điều khiển để tạo ra lực moment tương ứng có thể hướng phương tiện đi theo góc ψ mong muốn, toàn bộ hệ thống sau đó được đưa qua mô hình động học của tàu để trả về về vị trí và vận tốc của nó như hình 3.

Với mục đích khảo sát chất lượng môi trường nước, quỹ đạo đường đi được xem là những quỹ đạo zig-zag hay sóng vuông (hình ảnh quỹ đạo được minh họa trong phần mô phỏng), thì phương pháp LOS cho đường thẳng là phương pháp thích hợp nhất. Trong bài viết này phương pháp được chọn lựa là “LOS with lookahead distance”. Với bất kỳ một vị trí nào bên ngoài đường đi mong muốn, giải thuật LOS này sẽ giúp phương tiện hội tụ về một điểm mong muốn trên quỹ đạo và bám theo quỹ đạo đó. Tùy thuộc vào cơ chế động học của tàu chúng ta sẽ đặt vận tốc U , bán kính hội tụ R và khoảng cách lookahead Δ sao cho sai số vị trí và độ quán tính của tàu là nhỏ nhất.



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống dẫn đường

Horizontal-Plane Path Following (Bám đường trên mặt phẳng ngang)

Khi xét những phương tiện di chuyển trên mặt nước hay nói cách khác là mặt phẳng ngang xy , chúng ta sẽ có phương trình động học cho tàu khi đó sẽ là

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (4)$$

Tốc độ tổng của tàu được xét theo phương ngang là

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

Với $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$, $0 < U_{\min}$

Tùy theo cấu trúc tàu mà vận tốc U và bán kính hội tụ R được chọn thích hợp để khi tàu di chuyển qua điểm waypoint sẽ có quán tính nhỏ, đảm bảo sai lệch về đường đi nằm trong phạm vi cho phép.

Giả sử rằng phương tiện đang được hội tụ về đường kết nối các điểm tham chiếu (way-point) $wpt_k - wpt_{k+1}$, sai số along track (x_e) và cross track (y_e) của tàu khi đó được định nghĩa bởi công thức:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = R^T(\alpha_p) \begin{bmatrix} x - x_k \\ y - y_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong đó x_k, y_k là vị trí của điểm waypoint thứ k trong hệ tọa độ NED ($k = 1 \dots N$); x, y là vị trí hiện tại của con tàu trong hệ tọa độ NED; R^T là ma trận quán tính trong chuyển hệ tọa độ, được xác định theo công thức:

$$R(\alpha_p) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_p) & -\sin(\alpha_p) \\ \sin(\alpha_p) & \cos(\alpha_p) \end{bmatrix} \in SO(2) \quad (7)$$

Khi khai triển ra chúng ta sẽ có:

$$\begin{aligned} x_e &= (x - x_k) \cos(\alpha_p) + (y - y_k) \sin(\alpha_p) \\ y_e &= -(x - x_k) \sin(\alpha_p) + (y - y_k) \cos(\alpha_p) \end{aligned} \quad (8)$$

Với α_p là góc tiếp tuyến được xác định theo công thức

$$\alpha_p = \text{atan2}(y_{k+1} - y_k, x_{k+1} - x_k) \quad (9)$$

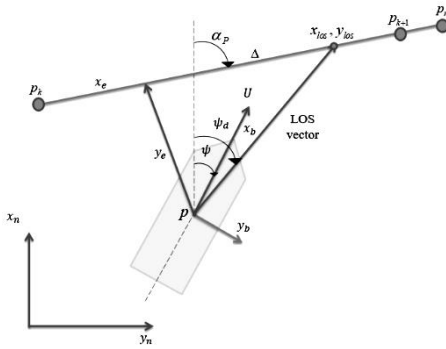
Mục đích là kiểm soát sai số cross track nằm trong giới hạn cho phép hay nói cách khác:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_e(t) = 0 \quad (10)$$

Lưu ý rằng đối với những ứng dụng mà thuật toán của nó có sự ràng buộc về thời gian chúng ta cần phải giới hạn thêm sai số dọc (x_e) về bán kính hội tụ còn nếu chỉ xét bài toán dò đường chúng ta chỉ cần kiểm soát (y_e).

Thuật toán dẫn đường LOS

Tùy theo nhiều mục đích ứng dụng, phương tiện sử dụng hay phương pháp dẫn đường mà vector LOS có thể được định nghĩa theo nhiều cách khác nhau. Cụ thể trong ứng dụng path following cho phương tiện trên mặt nước, LOS được xem như là một vector có điểm đầu đặt tại trọng tâm của thuyền và điểm cuối đặt tại một điểm (x_{los}, y_{los}) trên đường tiếp tuyến nối 2 điểm waypoint p_k và p_{k+1} . Vị trí điểm (x_{los}, y_{los}) sẽ cách điểm chiếu vuông góc của tàu trên đường tiếp tuyến (điểm giao giữa y_e và đường mong muốn) một khoảng cách $\Delta > 0$. Tùy thuộc vào đặc tính động học của tàu hay vấn đề quan tâm là độ chính xác hoặc hiệu suất mà ta chọn Δ cho thích hợp. Nếu xét Δ là hằng số thì khi giá trị Δ càng nhỏ, phương tiện hội tụ về quỹ đạo mong muốn càng nhanh, tuy nhiên góc ψ sẽ thay đổi liên tục nhiều lần, đòi hỏi góc bánh lái thay đổi liên tục theo, hệ thống có thể đáp ứng không kịp và thời gian đáp ứng tăng kéo dài quá trình đi hết quỹ đạo của phương tiện. Để giải quyết vấn đề trên, người ta có thể xét Δ có giá trị thay đổi theo thời gian từ nhỏ đến lớn.



Hình 4. Mô hình cho vector LOS của tàu thuyền trong trường hợp không xét góc trượt bên β

Như hình 4, ta có thể xác định góc ψ mong muốn của tàu theo công thức:

$$\psi_d = \alpha_p + \arctan\left(\frac{-y_e}{\Delta}\right).$$

Lấy đạo hàm của y_e trong công thức (8) ta được:

$$\dot{y}_e = -\dot{x} \sin(\alpha_p) + \dot{y} \cos(\alpha_p),$$

$$= -(u \cos(\psi) - v \sin(\psi)) \sin(\alpha_p) + (u \sin(\psi) + v \cos(\psi)) \cos(\alpha_p),$$

$$= u \sin(\psi - \alpha_p) + v \cos(\psi - \alpha_p)$$

Biến đổi công thức (11) ở dạng biên độ pha chúng ta nhận được:

$$\dot{y}_e = \sqrt{u^2 + v^2} \sin(\psi - \alpha_p) = U \sin(\psi - \alpha_p)$$

Lưu ý: trong thực tế khi tàu di chuyển sẽ có thành phần ngoại lực như gió, dòng chảy... hay những nhiễu không mong muốn tác động làm cho tàu đáng lý di chuyển theo phương của góc ψ sẽ bị lệch đi thêm một thành phần góc nhỏ trượt β .

Khi đó công thức ψ_d, y_e trở thành:

$$\psi_d = \alpha_p + \arctan\left(\frac{-y_e}{\Delta}\right) - \beta$$

$$\dot{y}_e = U \sin(\psi - \alpha_p + \beta)$$

Với β được định nghĩa động học là $\beta = \text{atan2}(v, u)$. Ta sẽ đánh giá ảnh hưởng của β với ngoại lực từ môi trường (cụ thể ở đây là gió, dòng chảy) tới chất lượng của hệ thống trong phần mô phỏng bên dưới.

Chúng ta có thể giải quyết những vấn đề mà khoảng cách Δ mạng lại như đã đề cập ở trên bằng cách xây dựng Δ như một biến có giá trị thay đổi theo thời gian:

$$\Delta = (\Delta_{\max} - \Delta_{\min}) e^{-K_{\Delta} y_e^2} + \Delta_{\min}$$

Trong đó $\Delta_{\max}, \Delta_{\min}$ và hằng số biểu thị tốc độ hội tụ K_{Δ} có thể chọn từ mô hình tàu hay từ thực nghiệm.

4 THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Với việc sử dụng phương pháp LOS cho bộ Guidance, về phương thức điều khiển để đạt được mục đích tự động lái phân đầu và vận tốc mong muốn trong quá trình di chuyển người ta có thể sử dụng nhiều cách điều khiển khác nhau để kết hợp với bộ Guidance một cách dễ dàng và phù hợp như PID, Sliding mode... Trong bài viết này ta sẽ trình bày một phương pháp tiếp cận khác để giải quyết hai vấn đề tự động lái phân đầu và vận tốc mong muốn trong một bộ điều khiển duy nhất cho tàu là giải thuật cuốn chiếu. Cuốn chiếu là giải thuật điều khiển bền vững được xây dựng dựa trên định lý Lyapunov, do đó ta có thể dễ dàng phát triển thêm cho bộ điều khiển để đảm bảo cho các nhiễu môi trường và các loại nhiễu khác. Sau đây ta sẽ trình bày cụ thể cách xây dựng bộ điều khiển để thực hiện chức năng tự động lái phân đầu và đạt được vận tốc mong muốn.

Tiếp tục khai triển ta thu hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{\psi} = r \\ m_1 \dot{u} + n_{11} u = \tau_1 \\ m_{22} \dot{v} + m_{23} \dot{r} + n_{22} v + n_{23} r = A \tau_2 \\ m_{33} \dot{r} + m_{32} \dot{v} + n_{32} v + n_{33} r = \tau_3 \end{cases} \quad (15)$$

Bước 1:

$$\text{Đặt: } \begin{cases} z_1 = \psi - \psi_d \\ z_2 = v - \alpha \end{cases}$$

Trong đó $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]^T$ và $z_2 = [z_{2,1}, z_{2,2}, z_{2,3}]^T$

Đạo hàm z_1 ta có:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= r - r_d \\ &= h^T v - r_d \quad h = [0 \ 0 \ 1]^T \\ &= \alpha_3 + h^T z_2 - r_d \end{aligned}$$

Tương tự đạo hàm cho z_2

$$\begin{aligned} M \dot{z}_2 &= M \dot{v} - M \dot{\alpha} \\ &= \tau - N v - M \dot{\alpha} \end{aligned}$$

Bước 2 :

Định nghĩa hàm Lyapunov điều khiển (CLF) như sau

$$V = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^T M z_2$$

Ta có đạo hàm của theo thời gian của nó là:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= z_1 \dot{z}_1 + z_2^T M \dot{z}_2 \\ &= z_1 (\alpha_3 + h^T z_2 - r_d) + z_2^T (\tau - N v - M \dot{\alpha}) \end{aligned}$$

Chọn luật điều khiển ảo:

$$\alpha_3 = -cz_1 + r_d \quad (16)$$

trong đó $c > 0$ là hằng số dương. Từ đây thế α_3 vào V ta có kết quả sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -cz_1^2 + z_1 h^T z_2 + z_2^T (\tau - N\nu - M\dot{\alpha}) \\ &= -cz_1^2 + z_2^T (hz_1 + \tau - N\nu - M\dot{\alpha}) \end{aligned}$$

từ đây luật điều khiển sẽ được chọn như sau:

$$\tau = -Kz_2 + N\nu + M\dot{\alpha} - hz_1 \quad (17)$$

trong đó $K = K^T = \text{diag}(k_1, k_2, k_3)$ là ma trận đường chéo với các hệ số dương. Khi đó:

$$\dot{V} = -cz_1^2 - z_2^T Kz_2 < 0$$

Điều này chứng tỏ với luật điều khiển τ đã xác định ở công thức (17) thì với tính chất của hàm CLF ta sẽ có $z_{(t)} \rightarrow 0$ tức là vấn đề autopilot đã được giải quyết. Tiếp theo chúng ta sẽ xem xét về bài toán vận tốc.

Bước 3:

Chú ý rằng $\tau = [F, Y, \delta, N, \delta]^T = [\tau_1, A\tau_3, \tau_3]^T$ kết hợp với (4.3) ta có:

$$\begin{cases} \tau_1 = m_{11}\dot{\alpha}_1 + n_{11}u - k_1(u - \alpha_1) \\ A\tau_3 = m_{22}\dot{\alpha}_2 + m_{23}\dot{\alpha}_3 \\ \quad + n_{22}v + n_{23}r - k_2(v - \alpha_2) \\ \tau_3 = m_{32}\dot{\alpha}_2 + m_{33}\dot{\alpha}_3 + n_{32}v \\ \quad + n_{33}r - k_3(r - \alpha_3) - z_1 \end{cases} \quad (18)$$

Ở đây τ_1 sẽ được chọn để đảm bảo $u = u_d$. Mà từ hệ phương trình của thuyền ta kết hợp với (18) suy ra

$$\begin{aligned} \tau_1 &= m_{11}\dot{u} + d_{11}u \\ &= m_{11}\dot{\alpha}_1 + n_{11}u - k_1(u - \alpha_1) \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow m_{11}(\dot{u} - \dot{\alpha}_1) + k_1(u - \alpha_1) = 0$$

Chọn $\alpha_1 = u_d$ để thỏa mãn chỉ tiêu.

Bây giờ ta cần cân bằng τ_3 trong (17) và (18) để tìm ra α_2 . Ta có:

$$\begin{aligned} m_{22}\dot{\alpha}_2 + m_{23}\dot{\alpha}_3 + n_{22}v + n_{23}r - k_2(v - \alpha_2) &= A\tau_3 \\ \Leftrightarrow m_{22}\dot{\alpha}_2 + m_{23}\dot{\alpha}_3 + n_{22}v + n_{23}r - k_2(v - \alpha_2) &= A(m_{32}\dot{\alpha}_2 + m_{33}\dot{\alpha}_3 + n_{32}v + n_{33}r - k_3(r - \alpha_3) - z_1) \\ \Leftrightarrow (m_{22} - Am_{32})\dot{\alpha}_2 + n_{22}(v - \alpha_2) + n_{22}\alpha_2 &+ n_{23}(r - \alpha_3) + n_{23}\alpha_3 + m_{23}\dot{\alpha}_3 - k_2(v - \alpha_2) \\ &= A(m_{33}\dot{\alpha}_3 + n_{32}(v - \alpha_2) + n_{32}\alpha_2 + n_{33}(r - \alpha_3) \\ &\quad + n_{33}\alpha_3 - k_3(r - \alpha_3) - z_1) \\ \Leftrightarrow (m_{22} - Am_{32})\dot{\alpha}_2 &= -(n_{22} - An_{32})\alpha_2 + \chi \end{aligned} \quad (19)$$

Trong đó

$$\begin{aligned} \chi &= -(m_{23} - Am_{33})(c^2 z_1 - cz_{2,3} + \dot{r}_d) \\ &\quad - (n_{22} - An_{32})z_{2,2} \\ &\quad - (n_{23} - An_{33})(z_{2,3} - cz_1 + r_d) \\ &\quad + k_2 z_{2,2} - A(k_3 z_{2,3} + z_1) \end{aligned}$$

Với kết quả trên ta đã giải quyết được hai vấn đề autopilot và vận tốc đã đề ra đồng thời cũng đảm bảo cho mỗi quan hệ ràng buộc giữa τ_2 và τ_3 trong tính chất qua lực điều khiển tàu. Việc thiết kế bộ điều khiển đã hoàn thành ta sẽ kiểm tra thực nghiệm chất lượng bằng cách mô phỏng và đánh giá kết quả trong phần kế tiếp.

5 MÔ PHỎNG

Để đánh giá chất lượng bộ điều khiển đã thiết kế cho các ứng dụng thực tế ta sẽ thực hiện mô phỏng trong các điều kiện ngoại lực tác động từ môi trường như gió, dòng chảy để so sánh với trường hợp không có tác dụng của ngoại lực.

a) Gió:

Công thức tính toán cho ngoại lực gió đối với tàu chuyển động về phía trước với giả sử vận tốc tuyến tính của gió là V_w và hướng gió trong hệ qui chiếu $\{e\}$ là β_w theo [6]:

Vận tốc của gió trong hệ qui chiếu $\{e\}$:

$$u_w = V_w \cos(\beta_w - \psi),$$

$$v_w = V_w \sin(\beta_w - \psi)$$

Lực gió:

$$\tau_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a V_{rw}^2 \begin{bmatrix} C_X(\gamma_{rw}) A_{Fw} \\ C_Y(\gamma_{rw}) A_{Lw} \\ C_Z(\gamma_{rw}) A_{Fw} \\ C_K(\gamma_{rw}) A_{Lw} H_{Lw} \\ C_M(\gamma_{rw}) A_{Fw} H_{Fw} \\ C_N(\gamma_{rw}) A_{Lw} H_{oa} \end{bmatrix}$$

trong đó

ρ_a : là tỉ trọng không khí

$V_{rw}^2 = \sqrt{u_{rw}^2 + v_{rw}^2}$: là vận tốc tuyến tính tương ứng của gió so với thuyền

$\gamma_{rw} = -a \tan 2(v_{rw}, u_{rw})$: là góc tác động của gió vào thuyền

với $u_{rw} = u - u_w$ và $v_{rw} = v - v_w$

Đối với tàu có biên dạng đối xứng thì có thể xấp xỉ cho tàu chuyển động theo phương ngang các thành phần sau:

$$C_x(\gamma_{rw}) \approx -c_x \cos(\gamma_{rw})$$

$$C_y(\gamma_{rw}) \approx c_y \sin(\gamma_{rw})$$

$$C_N(\gamma_{rw}) \approx c_n \sin(2\gamma_{rw})$$

trong đó các tính toán thực nghiệm cho thấy rằng $c_x \in \{0,5;0,9\}$, $c_y \in \{0,7;0,95\}$, $c_n \in \{0,05;0,2\}$

b) Dòng chảy:

Giả sử dòng chảy có vận tốc tuyến tính là V_c và hướng dòng chảy trong hệ qui chiếu $\{e\}$ chỉ xét theo phương ngang là β_c . Khi đó ta có vận tốc của dòng chảy xét trong hệ qui chiếu $\{e\}$ là:

$$u_c = V_c \cos(\beta_c - \psi), v_c = V_c \sin(\beta_c - \psi)$$

Theo [6] thì phương trình động lực học bao gồm cả dòng chảy cho tàu di chuyển theo phương ngang với giả sử dòng chảy thay đổi rất chậm sẽ là :

$$M\dot{v}_r + C(v_r)v_r + D(v_r)v_r = \tau$$

trong đó $v_r = v - v_c$ với $v_c = [u_c, v_c, 0]^T$ và $\dot{v}_c \approx 0$.

Do đó với cách thiết kế bộ điều khiển ở phần trên ta chỉ việc thay thế v thành v_r và các thành phần bên trong tương ứng của nó sẽ vẫn giữ nguyên được sự chính xác trong phương thức điều khiển trong trường hợp bao gồm cả dòng chảy. Tiếp theo ta sẽ thực hiện mô phỏng để đánh giá chất lượng của bộ điều khiển.

Các thông số sử dụng để mô phỏng được lấy từ mô hình tàu CyberShip II (CS2) có khối lượng là 15 kg và chiều dài 1.255 m của phòng thí nghiệm Mariner Cybernetics (MCLab) thuộc học viện NTNU trong [6] vì có tính tương đồng trong hình dáng (tàu một thân) và cách thức điều khiển (chỉ tác động lực đẩy tới τ_1 và góc bánh lái τ_3).

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 25,8 & 0 & 0 \\ 0 & 33,8 & 1,0115 \\ 0 & 1,0115 & 2,76 \end{pmatrix}$$

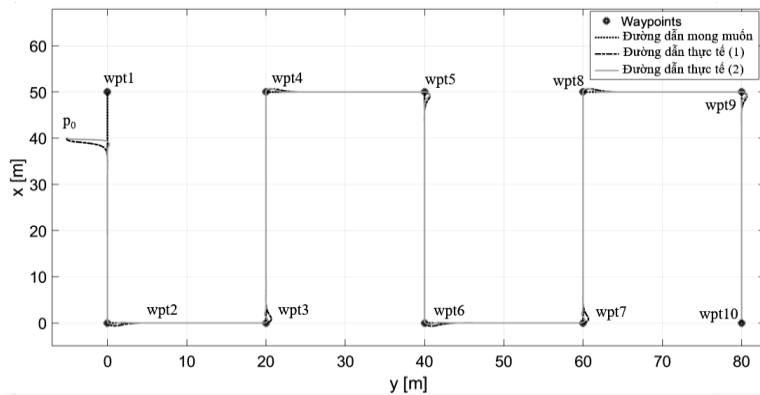
$$N = \begin{pmatrix} n_{11} & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & n_{23} \\ 0 & n_{32} & n_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0,1 \\ 0 & 0,1 & 0,5 \end{pmatrix}$$

Các thông số cài đặt cho mô phỏng được chọn trong các công thức (17), (18) và (19) là $c = 1,75$; $k_I = 25$; $k_2 = 10$; $k_3 = 15$; $A = 1,2$.

Trường hợp 1: Sóng vuông và không có ngoại lực (hình 5)

Thiết đặt các giá trị ban đầu: $p_0 = (x_0; y_0) = (40, 5)$, $\psi_0 = -\pi$. Các điểm waypoint $(x; y)$ bao gồm: wpt1 = (50; 0); wpt2 = (0; 0); wpt3 = (0; 20); wpt4 = (50; 20); wpt5 = (50; 40); wpt6 = (0; 40); wpt7 = (0; 60); wpt8 = (50; 60); wpt9 = (50; 80); wpt10 = (0; 80).

Nhận xét: Đường dẫn với $\Delta =$ hằng số sẽ hội tụ về đường mong muốn chậm hơn so với đường dẫn có Δ là một biến đã được xây dựng như một phương trình thay đổi theo thời gian.

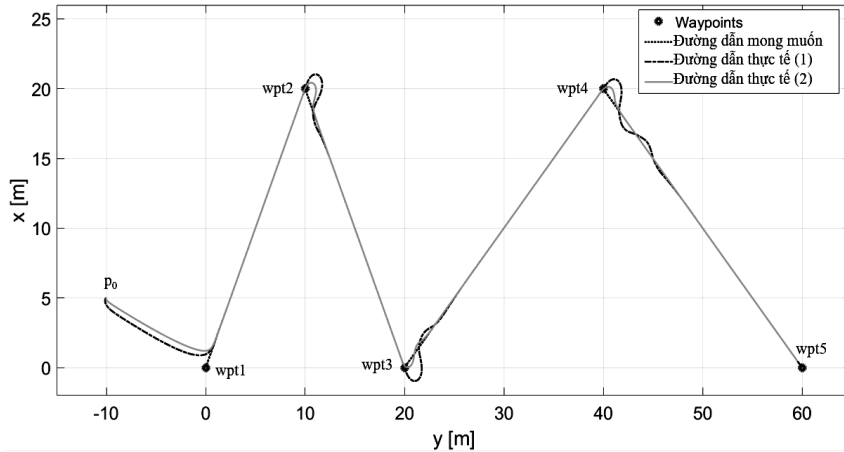


Hình 5. Đường dẫn thực tế hội tụ về đường dẫn mong muốn với khoảng cách $\Delta =$ hằng số $= 0.5m$ (chấm gạch), và với khoảng cách Δ thay đổi theo thời gian $\Delta_{max} = 0.5m$, $\Delta_{min} = 0.1m$, $K_\Delta = 1$ (nét liền)

Trường hợp 2: Zig-zag và không có ngoại lực (hình 6)

Thiết đặt các giá trị ban đầu: $p_0 = (x_0; y_0) = (5; -10)$, $\psi_0 = -\pi$. Các điểm waypoint $(x; y)$: wpt1 = (0; 0); wpt2 = (20; 10); wpt3 = (0; 20); wpt4 = (20; 40); wpt5 = (0; 60).

Nhận xét: Khi vận tốc là 1 m/s thì bán kính $R = 0,7m$ sẽ giúp đối tượng sau khi qua bộ điều khiển bám theo quỹ đạo mong muốn. Nhưng khi vận tốc tàu tăng lên, nếu vẫn chọn bán kính hội tụ nhỏ ($R = 0,7m$) thì khi qua các điểm waypoint do vận tốc lớn nên quán tính tàu lớn sẽ làm đường đi thực tế không bám tốt theo được đường đi mong muốn.



Hình 6. Đường dẫn thực tế hội tụ về đường mong muốn với vận tốc $U = 1$ m/s (nét liền) và với vận tốc $U = 2$ m/s (đường chấm gạch). Cả 2 hình đều chọn bán kính hội tụ $R = 0,7$ m.

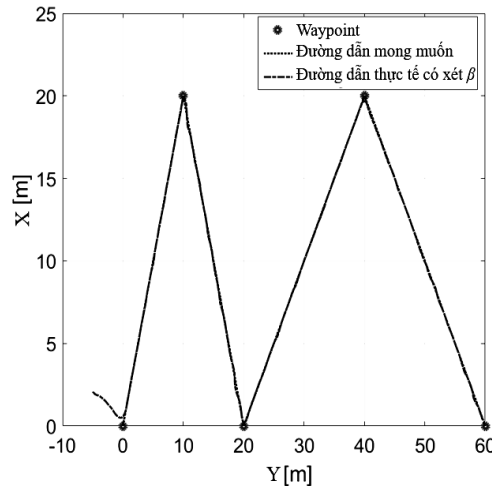
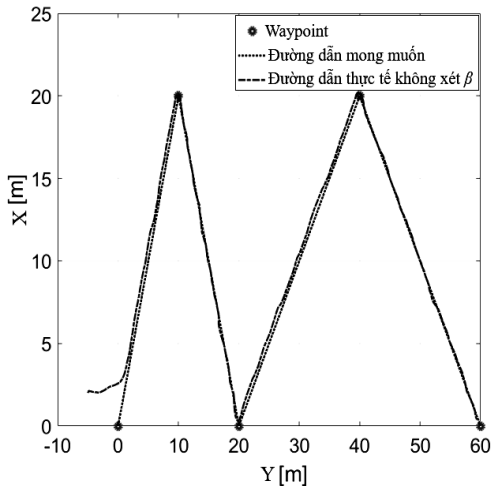
Trường hợp 3: Zig-zag và có ngoại lực (hình 7)

Thiết đặt các giá trị ban đầu:

$$p_0 = (x_0; y_0) = (-5; 2), \psi_0 = 0.$$

Các điểm waypoint $(x; y)$: wpt1 = (0; 0); wpt2 = (20; 10); wpt3 = (0; 20); wpt4 = (20; 40); wpt5 = (0; 60).

Nhận xét: Trong điều kiện có nhiều gió và dòng chảy, hướng đi chuyên của con tàu sẽ bị lệch đi một thành phần trượt bên mà ta gọi đó là β , nếu không bù trừ thành phần này hệ thống sẽ không thể bám theo đường đi mong muốn như minh họa cụ thể trong hình 7.



Hình 7. Đường dẫn thực tế hội tụ về đường mong muốn với vận tốc $U = 1$ m/s trong điều kiện có nhiều sóng gió với hình bên trái là không xét đến thành phần biến β và hình bên phải là có bù sung thành phần β trong thuật toán LOS của hệ dẫn đường.

6 KẾT LUẬN

Trong bài viết này ta đã nêu ra hai vấn đề chính cho một tàu tự hành là tự động lái phần đầu và đạt được vận tốc mong muốn trong quá trình di chuyển, đồng thời cũng trình bày phương hướng giải quyết và thiết kế bộ Guidance và Controller cho nó. Các kết quả thu được qua mô phỏng là phù hợp và khả quan với thực tế. Khả năng hội tụ về đường đi mong muốn và đi trên đó cho thấy tính chính xác của Guidance và chất lượng của

Controller. Bên cạnh đó việc so sánh tác động của tỉ lệ giữa bán kính hội tụ R , và vận tốc cũng như sự thay đổi độ lớn Δ của tàu đến chất lượng quỹ đạo sẽ giúp người thiết kế hiểu rõ tính chất các thông số để tinh chỉnh chúng cho phù hợp và đạt được chỉ tiêu mong muốn cũng được trình bày rõ ràng trong phần mô phỏng. Ta cũng có thể phát triển thêm cho bộ điều khiển bằng cách đánh giá các thành phần không chắc chắn và sử dụng hàm Lyapunov để giải quyết và đảm bảo cho bộ điều khiển làm việc tốt trong điều kiện có nhiễu. Nhìn chung bài viết đã

đưa ra vấn đề trong tàu tự hành và đề ra phương pháp giải quyết, kết quả mô phỏng đã giải thích và chứng minh cho chất lượng và tính khả thi cho phương pháp này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Micaelli A, & Samson C. *Trajectory tracking for unicycle-type and two-steering-wheels mobile robots*. Research report 2097. Inst. National de Recherche en Informatique et en Automatique (1993).
- [2] Hauser J, & Hindman R. *Maneuver regulation from trajectory tracking: feedback linearizable systems*. Proceedings of the IFAC symposium on nonlinear control systems design. IFAC, Lake Tahoe, CA, USA, 595–600 (1995).
- [3] Hauser J, & Hindman R. Aggressive flight maneuvers. Proceedings of the 36th IEEE conference on decision & control. *IEEE*, San Diego, CA, USA, 4186–4191 (1997).
- [4] Pettersen KY, & Lefeber E. Way-point tracking control of ships. Proceedings of the 40th IEEE conference on decision & control. *IEEE*, Orlando, FL, USA, 940–945 (2001).
- [5] Fossen TI. *Marine Control Systems Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine cybernetics AS (2002).
- [6] Fossen TI. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley, New York (2011).
- [7] The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid, Technical and Research Bulletin No. 1–5 (1950).
- [8] James R. Wilkins IV. *Propeller Design Optimization for Tunnel Bow Thrusters in the Bollard Pull Condition*. B.S., Systems Engineering United States Naval Academy, 2004.



Trần Ngọc Huy nhận bằng thạc sĩ và tiến sĩ tại Khoa Cơ khí trường Đại học Korea Maritime and Ocean University năm 2012 và 2015. Tác giả hiện là giảng viên khoa Điện – Điện tử, trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM. Tác giả nghiên cứu về lĩnh vực robot, hệ thống định vị và cơ điện tử.



Phạm Nguyễn Nhật Thanh sinh năm 1995 hiện đang theo học tại Khoa Quản lý và Tự động hoá tại Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM. Các hướng nghiên cứu của tác giả robot, hệ thống định vị và cơ điện tử.



Võ Hồng Thái Bảo sinh năm 1995 hiện đang theo học tại Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM. Các hướng nghiên cứu của tác giả robot, hệ thống định vị và cơ điện tử.

A study on tracking controller design for unmanned surface vehicles using magnetic coupling thruster

Tran Ngoc Huy, Pham Nguyen Nhut Thanh, Vo Hong Thai Bao

Abstract—Controlling the unmanned surface vehicles to follow the object or define trajectory have many important applications in the field as military, survey quality environment so this problem has been much research on the world. This report represents the method to control the unmanned surface vehicles which use thruster with coupling follow square or zig-zag trajectories using the Line of Sight (LOS) algorithm combined with the Backstepping Controller. The system consists of three main blocks, Guidance - Control - Ship. Guidance will help to select waypoints to create the trajectory

the use the LOS algorithm with lookahead distance to adjust and calculate the desired heading angle ψ . Control with the Backstepping algorithm will calculate the force and moment to apply to the dynamic model of the Ship. The position and heading angle of the vehicles will be feedback to the two Guidance-Control blocks for calculation and updating. The effectiveness of the algorithm will be presented in simulation results with MATLAB / SIMULINK

Keywords—Guidance, Path-Following, Line of sight, Lookahead distance, Control, Backstepping.