

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ VÀ ĐIỀU KHIỂN THIẾT BỊ ROV

Phạm Minh Thiên Thành, Vy Văn Cần, Nguyễn Duy Anh

Trường Đại Học Bách Khoa – ĐHQG TpHCM

Tóm tắt: Bài báo trình bày về kết quả của việc nghiên cứu, thiết kế và điều khiển một thiết bị ROV (remotely operated vehicle) phục vụ cho việc nghiên cứu tàu biển, bao gồm thiết kế phần cứng và phần điều khiển. Thiết bị ROV này được trang bị các loại cảm biến sau, gồm: Cảm biến góc gyroscope, cảm biến gia tốc, cảm biến la bàn số và cảm biến áp suất. ROV hoạt động với sáu thruster (chân vịt), trong đó hai thruster dùng để di chuyển lên – nổi và bốn thruster để di chuyển các hướng trong mặt phẳng ngang. Truyền nhận tín hiệu cảm biến và lệnh điều khiển thông qua chuẩn truyền RS485. Bộ điều khiển PID được sử dụng trong điều khiển heading và điều khiển độ sâu. ROV được điều khiển thông qua một giao diện được lập trình trên phần mềm Matlab, giao diện này giúp điều khiển các hướng và hiển thị các thông số của cảm biến.

Chỉ số phân loại: 2.3

1. Giới thiệu

Các thiết bị dưới nước không người lái (Unmanned underwater vehicles - UUV) được chia làm hai loại chính: ROV và AUV (autonomous underwater vehicle). Thực tế AUV chính là một loại ROV cải tiến, chúng khác nhau ở chỗ AUV có thể hoạt động hoàn toàn tự động mà không cần có sự can thiệp của con người. Bài báo tập trung nghiên cứu về kết cấu cơ khí, phần điều khiển của người vận hành thông qua dây dẫn có sử dụng giao diện điều khiển. ROV có thể thực hiện được nhiều nhiệm vụ dưới nước như quan sát dưới nước, đo nồng độ, độ ô nhiễm, nghiên cứu khoa học phục vụ cho cuộc sống... ROV hoạt động với độ chính xác cao, an toàn, đáng tin cậy. Trong tương lai, với vài sự thay đổi trong kết cấu, ROV chắc chắn sẽ thực hiện được nhiều nhiệm vụ khó khăn hơn nữa.

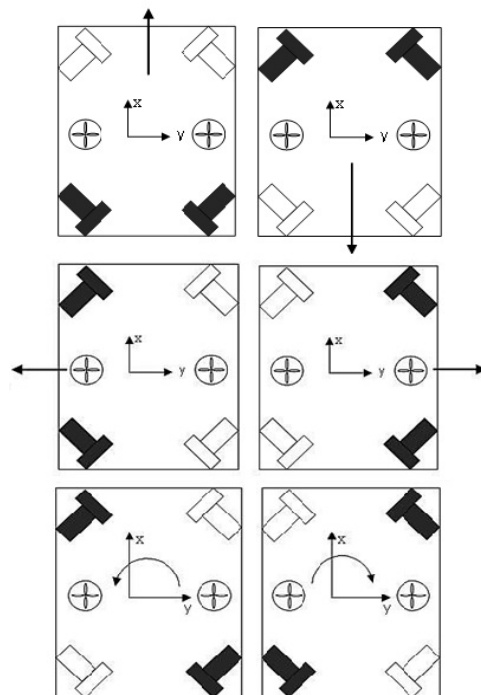
Mục tiêu của đề tài là thiết kế và phát triển một loại ROV nhỏ với chi phí thấp, cấu trúc cơ khí vững chắc, tự cân bằng và di chuyển dựa vào việc áp dụng các kiến thức được học. Thuật toán điều khiển được xây dựng để di chuyển một cách linh hoạt theo nhiều hướng ví dụ xoay trái, xoay phải, tiến, lùi, duy trì độ sâu mong muốn, duy trì với một vận tốc cho trước. ROV hoạt động thông qua bộ điều khiển PID, các thông số được tìm thông qua phương pháp thử - sai. Bên cạnh đó, các giá trị trả về từ cảm biến la bàn với sai số là $\pm 2^\circ$ và sai số từ cảm biến độ sâu là $\pm 0.03\text{m}$. Bài báo được chia làm ba phần

chính, gồm thiết kế cơ khí, thiết kế điện và giải thuật điều khiển.

2. Thiết kế cơ khí

Bố trí thruster

ROV được thiết kế với 6 thruster, cho phép ROV thực hiện các di chuyển surge, sway, heave, pitch và yaw. Mỗi thruster được chế tạo từ một động cơ DC chống nước, với lớp vỏ bên ngoài được in 3D để gá đặt và bảo vệ cánh quạt. Cần chú ý là với bất kỳ cặp thruster nào đang hoạt động thì hai thruster đó cũng phải quay ngược chiều nhau để đảm bảo ROV không bị xoay theo định luật bảo toàn động lượng.



Hình 1. Các hướng di chuyển của ROV.

Kết cấu khung ROV

Kết cấu khung ảnh hưởng nhiều sự cân bằng của thiết bị trong môi trường nước. Để di chuyển linh hoạt cần hạn chế tối đa lực cản của nước lên ROV, khối lượng tổng thể cũng không được quá lớn. Từ đó ta chọn khung ROV là một kết cấu gồm nhiều ống kết nối với nhau bởi cơ hoặc tề. Khi lựa chọn vật liệu làm kết cấu khung, ta cần chú ý những vấn đề sau đây:

Có độ bền cơ học cao, chịu lực tốt để không bị biến dạng khi di chuyển thiết bị hoặc va chạm với vật cản, dễ thay thế khi có hư hỏng;

Dễ dàng tháo lắp để có thể thay thế hoặc thêm bớt các phụ kiện theo yêu cầu.

Với những yêu cầu trên, ta lựa chọn khung ROV làm bằng ống inox là thích hợp.

Kiểm tra sự nổi và độ cân bằng

Phao kết hợp với phần khung tạo lực nâng cho toàn ROV. Đồng thời tạo sự cân bằng cho ROV trong nước. Vật liệu chọn làm phao là hộp bảo quản Interlock có dung tích là 1.6L, được làm từ nhựa PET cao cấp, có độ bền cao, trong suốt. Để góp phần làm gọn mô hình thì phao nổi kiêm cả chức năng chứa bộ điều khiển bên trong. Khi các phao đặt ở bên trên thì điểm đặt lực của lực đẩy Archimede sẽ ở trên cao hơn so với điểm đặt lực của lực trọng trường. Khi các phao đặt ở bên trên thì điểm đặt lực của lực đẩy Archimede sẽ ở trên cao hơn so với điểm đặt lực của lực trọng trường. Khi các điểm đặt lực này càng xa nhau thì ROV càng dễ tự cân bằng. Độ lớn của hai lực phía trên càng lớn, cũng như cánh tay đòn càng lớn sẽ dẫn đến moment lực càng lớn. Khi có một lực nào đó làm ROV mất cân bằng thì moment này cũng sẽ đưa ROV lại vị trí cân bằng cũ. Với thiết kế hai phao đặt đối xứng sang hai bên, sẽ phân tán lực Archimede, làm tăng tính ổn định cho ROV.

ROV nổi hay chìm phụ thuộc vào mối tương quan giữa trọng lượng và lực đẩy Archimede, ta có công thức sau:

$$F = \rho g V$$

Trong đó:

ρ : Mật độ chất lỏng;

g : Gia tốc trọng trường, $g = 9.81\text{m/s}^2$;

V : Thể tích phần chất lỏng bị chiếm chỗ.

Các trường hợp có thể xảy ra:

Nếu $B > W$, ROV sẽ nổi;

Nếu $B < W$, ROV sẽ chìm;

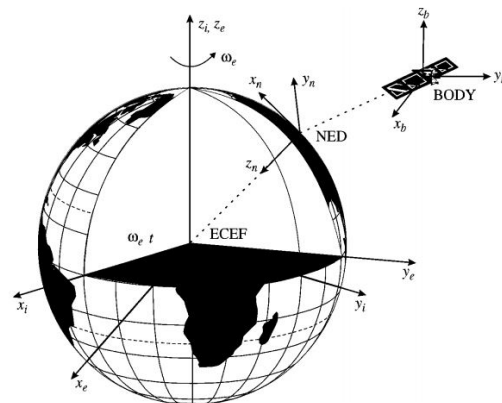
Nếu $B = W$, ROV sẽ duy trì ở vị trí nó đang ở.

Với B là trọng lực, W là lực Archimede.

Qua thực nghiệm sau khi chế tạo, ROV nổi khi ở trạng thái tự nhiên. Trọng tâm khối lượng ROV thấp hơn trọng tâm phao nổi nên ROV ở trạng thái cân bằng. Khối lượng chênh lệch với thể tích không nhiều, thuận lợi cho việc cân chỉnh và lặn nổi của ROV.

Hệ trục tọa độ

Khi phân tích chuyển động của ROV trong sáu DOF, để thuận tiện người ta đưa ra hai hệ trục tọa độ có tâm Trái đất làm tham chiếu [1].



Hình 2. Các hệ trục tọa độ.

Bảng 1. Qui ước ký hiệu các đại lượng.

DOF	Hướng chuyển động	Lực và moment	Vận tốc dài, vận tốc góc	Vị trí, góc Euler
1	surge	X	u	x
2	sway	Y	v	y
3	heave	Z	w	z
4	roll	K	p	ϕ
5	pitch	M	q	θ
6	yaw	N	r	ψ

Hệ trục tọa độ NED: $\{n\} = (x_n, y_n, z_n)$ với gốc O_n thường được định nghĩa như là một mặt phẳng tiếp xúc trên bề mặt Trái đất di chuyển cùng với ROV nhưng có các trục hướng theo các hướng khác so với các trục cố định của ROV.

Hệ trục tọa độ BODY: $\{b\}=(x_b, y_b, z_b)$ với gốc O_b là một hệ tọa độ chuyển động nhưng cố định so với ROV.

Nếu xoay hệ trục tọa độ $\{b\}$ xung quanh trục z, y, x của hệ trục tọa độ $\{n\}$ ta có các ma trận chuyển đổi lần lượt như sau[1]:

$$R_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix}, R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix},$$

$$R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Chúng ta kết hợp 3 phép xoay ở trên để có được ma trận chuyển đổi R_b^n :

$$R_b^n = R_{z,\psi}R_{y,\theta}R_{x,\phi}$$

$$= \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

Ta có được ma trận chuyển đổi vận tốc góc từ hệ tọa độ $\{b\}$ sang hệ tọa độ $\{n\}$ như sau:

$$\omega_b^n = T_b^n \dot{\theta}, \quad T_b^n = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix}$$

Động học

Ta được phương trình động như sau:

$$\dot{\eta} = J(\eta)V$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_b^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{b/n}^b \\ \omega_{b/n}^b \end{bmatrix}$$

Động lực học

Phương trình chuyển động động lực học phi tuyến của ROV như sau^[1]:

$$M\dot{V} + C(V)V + D(V)V + g(\eta) + g_0 = \tau + \tau_{wind} + \tau_{wave}$$

Trong đề tài này chỉ giới hạn ở nước tĩnh trong hồ nên có thể bỏ qua ảnh hưởng của dòng chảy, ảnh hưởng của gió và của sóng. Phương trình chuyển động của ROV cuối cùng là:

$$M\dot{V}_r + C(V_r)V_r + D(V_r)V_r + g(\eta) + g_0 = \tau$$

Trong đó:

$M = M_{RB} + M_A$: Ma trận lực quán tính.

$C(V_r) = C_{RB}(V_r) + C_A(V_r)$: Ma trận lực hướng tâm Coriolis.

$D(V_r)$: Ma trận lực cản.

$g(\eta)$: Vector trọng lực/lực nổi và moment (lực phục hồi).

g_0 : Vector trọng lực thêm vào để làm ROV cân bằng.

τ : Vector lực điều khiển đầu vào.

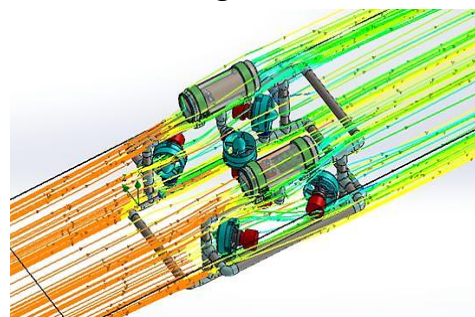
Xác định các thông số mô hình hóa

Các thông số lực cản tuyến tính và phi tuyến có thể được ước lượng từ phương trình lực cản (drag force) như sau:

$$F_{drag} = p_1 v^2 + p_2 v + p_3$$

Với v là vận tốc ROV đang khảo sát, p_1 là hệ số lực cản bậc 2, p_2 là hệ số lực cản tuyến tính, p_3 là hệ số offset của phương trình.

Để xác định F_{drag} ta sử dụng phần mềm SolidWorks mô phỏng dòng chảy với các vận tốc khác nhau tác động lên ROV.



Hình 3. Mô phỏng lực cản.

Bảng 2: kết quả mô phỏng lực cản

Vận tốc (m/s)	$F_{drag}(N)$		
	Phương tiến	Phương lặn	Phương ngang
0	0	0	0
0,3	2,41	7,41	4,96
0,6	9,48	29,51	19,80
1	26,23	81,88	54,94

Bảng 3. Các giá trị đại lượng trong phương trình mô hình hóa

Hệ số	Giá trị	Hệ số	Giá trị	Hệ số	Giá trị
X_u	4,925 kg	X_u	0,03 kg/s	$X_{u u }$	26,15 kg/m
Y_v	4,925 kg	Y_v	0,05 kg/s	$Y_{v v }$	81,8 kg/m
Z_w	4,925 kg	Z_w	0,12 kg/s	$Z_{w w }$	54,83 kg/m
K_p	0,535 kgm ²	K_p	0,068 kgm/s	$K_{p p }$	0,231 kgm
M_q	0,31 kgm ²	M_q	0,225 kgm/s	$M_{q q }$	0,118 kgm
N_r	0,33 kgm ²	N_r	0,109 kgm/s	$N_{r r }$	0,156 kgm

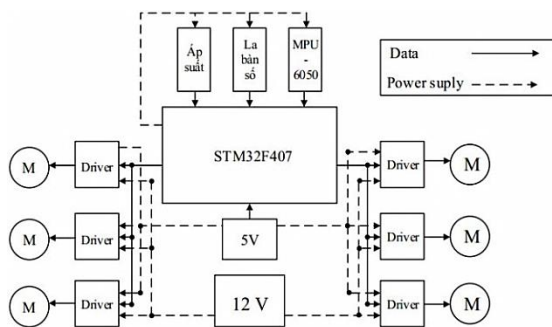
3. Thiết kế điện

Cảm biến

Để điều khiển ROV được chính xác, chúng ta cần nhận tín hiệu từ các cảm biến. ROV được trang bị cảm biến la bàn HMC5883L đọc về giá trị góc heading, cảm biến góc xoay MPU 6050 đọc về giá trị góc pitch được xử lý qua bộ lọc Kalman, cảm biến áp suất MPXH6400A đọc về giá trị áp suất của nước sau đó tính toán để cho ra giá trị độ sâu.

Vi điều khiển, driver động cơ

Vi điều khiển cần phải đủ mạnh, số lượng chân nhiều và tốc độ xử lý cao. Với yêu cầu trên, chọn vi điều khiển STM32F407VG để điều khiển toàn bộ ROV.



Hình 4. Sơ đồ điện của ROV.

Sử dụng driver VNH2SP30-E tích hợp 1 mạch cầu H (full bridge) được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống tự động. Driver có thể dùng điều khiển động cơ có công suất lớn (dòng max có thể lên tới 30A). Ngoài ra, mạch có cơ chế bảo vệ quá áp, quá nhiệt.

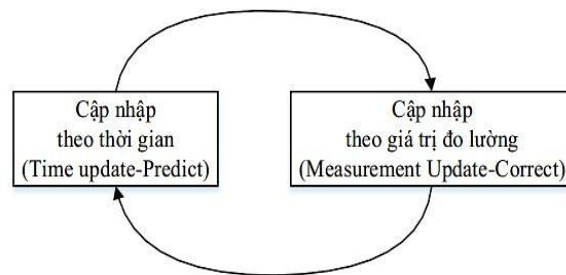
Mạch giao tiếp giữa vi điều khiển với máy tính:

Để đảm bảo không gian làm việc của thiết bị lặn và nơi đặt máy tính an toàn, ta cần dây cáp điều khiển dài khoảng 15m. Với khoảng cách trên, để truyền tốc độ cao và chính xác ta dùng chuẩn truyền RS485.

4. Giải thuật điều khiển

Bộ lọc Kalman

Bộ lọc Kalman sẽ kết hợp các giá trị đọc được từ cảm biến gyroscope và cảm biến gia tốc, từ đó đưa ra giá trị góc chính xác nhất đã loại cũng như triệt tiêu điểm trôi của gyro. bỏ các nhiễu của cảm biến gia tốc.

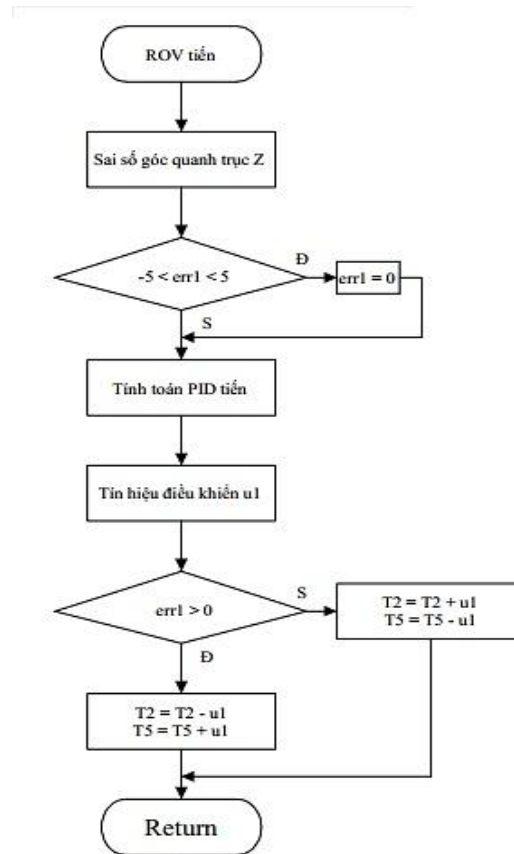


Hình 5. Hai quá trình của bộ lọc Kalman.

Giải thuật điều khiển ROV

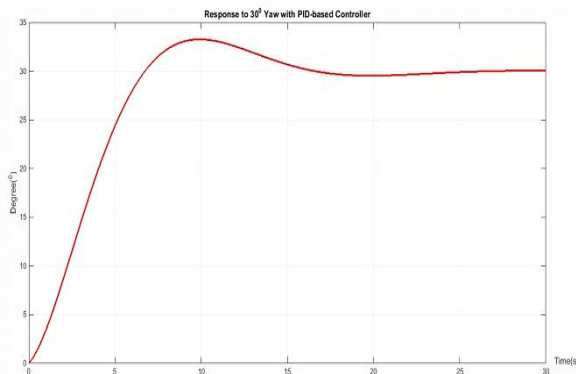
Để điều khiển ROV di chuyển theo các hướng cơ bản, ta sử dụng ba bộ điều khiển PID độc lập cho giá trị đầu vào là độ sâu h đọc từ cảm biến độ sâu, góc lệch của thiết bị quanh trục x (trục roll), góc lệch của thiết bị quanh trục z (trục yaw).

Khi vi điều khiển nhận tín hiệu từ máy tính, hàm ngắt uart được thực hiện. Vi điều khiển kiểm tra ký tự rồi tách chuỗi dữ liệu, lưu vào biến chỉ định trước trong chương trình. Từ đó thực hiện lệnh tương ứng với ký tự nhận được.



Hình 6. Giải thuật điều khiển ROV tiến.

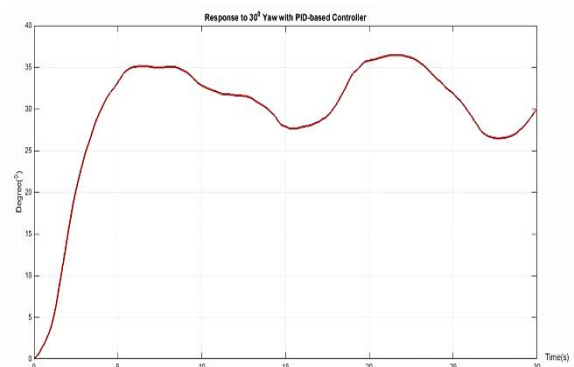
Sau đây là minh họa cho giải thuật tiến của ROV có sử dụng bộ điều khiển PID. Các giải thuật khác tương tự.



Hình 7. Đáp ứng của hệ thống khi không có nhiễu.

Mô phỏng bộ điều khiển PID

Ta tiến hành mô phỏng ROV xoay quanh trục Z một góc 30° , ta được đồ thị đáp ứng của hệ thống khi không có nhiễu:

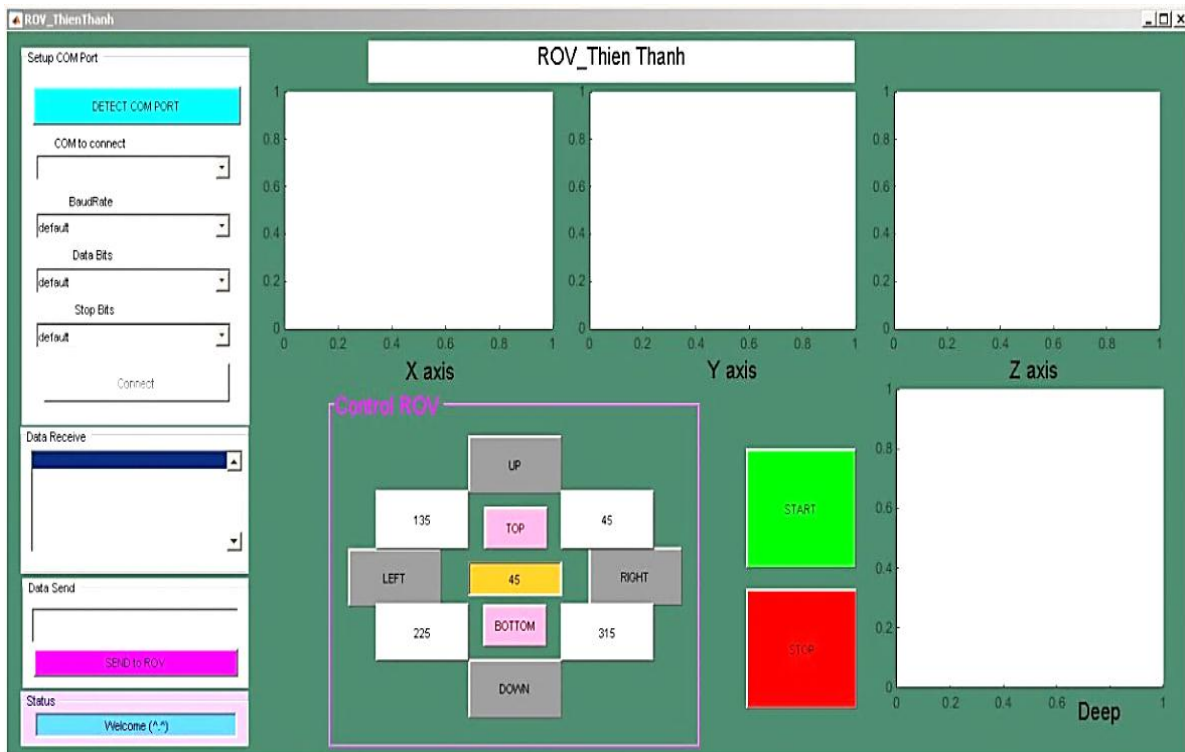


Hình 8. Đáp ứng của hệ thống khi có nhiễu

Ta tiến hành thêm nhiễu vào phương trình mô hình hóa, ta được đáp ứng như hình sau:

Giao diện điều khiển

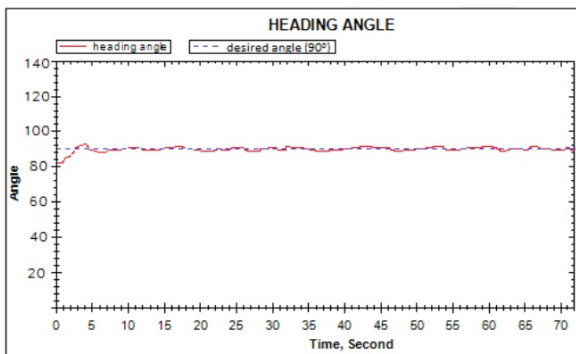
Giao diện điều khiển được thiết kế trong Matlab, để dễ dàng lấy số liệu trong quá trình thực nghiệm.



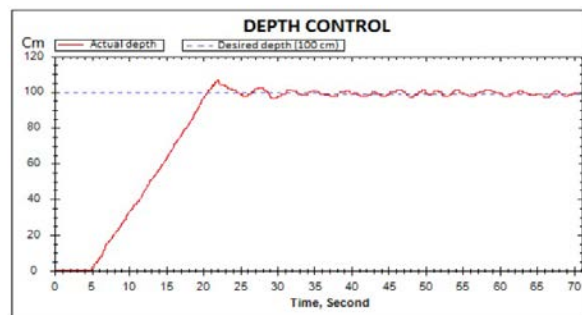
Hình 9. Giao diện điều khiển ROV.

Kết quả thực nghiệm:

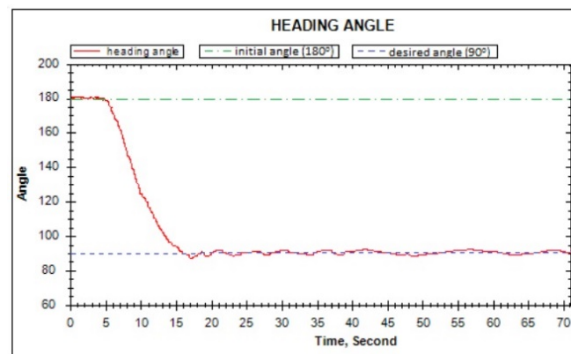
ROV có thể lặn sâu dưới mặt nước 5m mà không gặp vấn đề gì về việc chống nước. Đảm bảo được an toàn cho mạch điện bên trong. Tiến hành thử nghiệm các chuyển động cơ bản của ROV để kiểm tra độ chính xác của bộ điều khiển PID. Cho ROV tiến với góc heading là 90^0 , thực hiện lặn ở độ sâu 1m. Thực hiện thử nghiệm nhiều lần để kiểm tra tính ổn định của hệ thống. Trong quá trình thử nghiệm, điều chỉnh các hệ số của bộ điều khiển PID cho đạt được kết quả tốt nhất theo phương pháp thử-sai. Kết quả của thực nghiệm được minh họa ở hình bên dưới.



Hình 10. ROV tiến với góc mong muốn là 90^0



Hình 11. ROV xoay 90^0



Hình 12. ROV lặn 1m

Hình 10 cho ta thấy đáp ứng góc heading của ROV khi xoay từ góc ban đầu 82^0 đến góc mong muốn là 90^0 với thời gian là 2.5s, độ sai số lớn nhất trong trường hợp này là $\pm 2^0$. Tương tự, hình 11 cho ta thấy đáp ứng góc heading của ROV khi xoay từ 180^0 về 90^0 trong thời gian 10.5s, độ sai lệch lớn nhất là $\pm 2^0$. Hình 12 cho ta thấy đáp ứng của

ROV khi lặn ở độ sâu 1m. Trong trường hợp này, sai số lớn nhất là $\pm 0.03\text{m}$ với thời gian đáp ứng là 18s. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, đáp ứng được yêu cầu đặt ra.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày về vấn đề nghiên cứu thiết kế, mô hình thực nghiệm và giải thuật để điều khiển ROV. Với việc kết hợp các phần cơ, điện, hardware/software và bộ điều khiển trong quá trình thiết kế. Các hướng nghiên cứu tiếp theo có thể là ROV bám theo quỹ đạo cho trước, gắn thêm camera và tay máy để có thể quan sát và hoạt động nhằm thay thế con người dưới đáy biển. Đây là một đề tài hay, với nhu cầu hiện tại của nước ta, nhà nước cần đầu tư phát triển các dạng mô hình ROV để giảm giá thành cũng như phụ thuộc vào nước ngoài. □

Tài liệu tham khảo

- [1] Thor Inge Fossen. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, 2011.
- [2] Robert D. Christ and Robert L. Wernli. The ROV manual – the user guide for Remotely Operated vehicles, 2014.
- [3] Thor Inge Fossen. Marine Control Systems – Guidance, Navigation and Control of Ship, Rigs and Underwater Vehicles, 2002.
- [4] Hung Duc Nguyen, Sachith Malalagama, Dev Ranmuthugala. Design, modelling and simulation of remotely operated vehicles, 2013.
- [5] Louis Andrew Gon Zalez. Design, modelling and control of an Autonomous Underwater Vehicle, 2004.
- [6] J.H.A.M. Vervoort. Modeling and control of Unmanned Underwater, 2009
- [7] R.L.Eubank, A Kalman Filter Primer, 2006.

Ngày nhận bài: 1/3/2018

Ngày chuyển phản biện: 5/3/2018

Ngày hoàn thành sửa bài: 26/3/2018

Ngày chấp nhận đăng: 3/4/2018