

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG HỆ THỐNG THỬ NGHIỆM SỐ (DIGITAL TESTBED) PHỤC VỤ NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN, TÁC ĐỘNG MÔI TRƯỜNG VÀ ĐỘNG LỰC HỌC TÀU THỦY

RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF A DIGITAL TESTBED FOR
 STUDYING SHIP MOTION CONTROL, ENVIRONMENTAL EFFECTS,
 AND SHIP DYNAMICS

NGUYỄN CÔNG VINH

Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: vinhnc@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.992>

Tóm tắt

Trong lĩnh vực điều khiển chuyển động tàu thủy, đã có nhiều công trình nghiên cứu chuyên sâu về mô hình động lực học tàu thủy, các thuật toán điều khiển tự động và tác động của môi trường biển đến chuyển động của con tàu. Đây là ba lĩnh vực nghiên cứu khác nhau nhưng có sự kết nối, sử dụng kết quả của nhau. Bài báo đề xuất Hệ thống thử nghiệm số (Digital Testbed) nhằm tạo cầu nối giữa các nghiên cứu nói trên, phục vụ công tác nghiên cứu, so sánh và đánh giá trong nghiên cứu điều khiển, tác động môi trường và động lực học tàu thủy. Digital Testbed được triển khai trong môi trường MATLAB/Simulink với kiến trúc mô-đun, cho phép kết nối linh hoạt giữa mô hình tàu thủy, mô hình tác động môi trường và các bộ điều khiển khác nhau. Phần thực nghiệm trong bài báo sử dụng một số mô hình tàu do Fossen đề xuất được điều khiển bởi các máy lái PID và Fuzzy Logic nhằm minh họa khả năng ứng dụng của hệ thống thử nghiệm số.

Từ khóa: Digital Testbed, máy lái tự động tàu thủy, mô hình động lực học tàu thủy, MATLAB/Simulink.

Abstract

In the field of ship motion control, numerous studies have been conducted on ship dynamic modeling, automatic control algorithms, and the effects of the marine environment on vessel motion. These represent three distinct research areas; however, they are closely interconnected and make use of each other's results.

This paper proposes a Digital Testbed system to serve as a bridge between these research domains, supporting research, comparison, and evaluation in studies of ship control, environmental

disturbances, and ship dynamics. The Digital Testbed is implemented in the MATLAB/Simulink environment with a modular architecture, enabling flexible integration between ship models, environmental disturbance models, and different control algorithms.

The experimental section of the paper employs several ship models proposed by Fossen, controlled by PID and Fuzzy Logic autopilots, in order to demonstrate the applicability of the proposed digital testing system.

Keywords: Digital Testbed, marine autopilot, ship dynamics modeling, MATLAB/Simulink.

1. Mở đầu

Nghiên cứu về mô hình động lực học và tự động điều khiển tàu thủy dưới tác động của các yếu tố môi trường biển là hướng nghiên cứu phổ biến trong lĩnh vực khoa học và công nghệ hàng hải. Các vấn đề liên quan đến mô phỏng chuyển động tàu, thiết kế hệ thống điều khiển và phân tích ảnh hưởng của môi trường biển có ý nghĩa quan trọng cả về mặt lý thuyết lẫn ứng dụng thực tiễn.

Trong thực tế, các công trình nghiên cứu thường tập trung chuyên sâu vào một trong ba nhóm vấn đề chính: (i) xây dựng và phân tích mô hình động lực học, mô phỏng chuyển động con tàu [3], [5]; (ii) thiết kế, đánh giá các hệ thống điều khiển tự động như máy lái tự động [6], [9], hệ thống vây giảm lắc [2], hệ thống định vị tàu [7]; hoặc (iii) mô hình hóa và phân tích tác động của môi trường biển thông qua các mô hình sóng, gió và dòng chảy [5]. Mặc dù các hướng nghiên cứu này có mối liên hệ chặt chẽ, song chúng thường được triển khai tương đối độc lập bởi các nhóm nghiên cứu khác nhau, trong những điều kiện và bối cảnh khác nhau.

Sự phân tách này dẫn đến hạn chế trong việc tích

hợp và khai thác tổng hợp các kết quả nghiên cứu chuyên sâu. Cụ thể, các nghiên cứu về bộ điều khiển thường được kiểm nghiệm trên các mô hình đối tượng với mức độ phức tạp hạn chế [6]; ngược lại, các nghiên cứu tập trung vào mô hình động lực học tàu thủy sử dụng các thuật toán mô phỏng tiên tiến nhưng lại được thử nghiệm với những bộ điều khiển cơ bản [5].

Trên thế giới, hệ thống thử nghiệm số - Digital Testbed (sau đây gọi tắt là Hệ thống Digital Testbed) đã được phát triển như một hướng tiếp cận hiệu quả nhằm kết nối mô hình động lực học, mô hình môi trường và hệ thống điều khiển tạo thành một hệ thống phục vụ thực nghiệm [4], [8]. Cách tiếp cận này tạo điều kiện kết nối các kết quả nghiên cứu độc lập; cho phép một nghiên cứu dễ dàng được kiểm nghiệm trên nhiều đối tượng là kết quả của những nghiên cứu chuyên sâu khác, đồng thời nâng cao khả năng so sánh với các nghiên cứu cùng lĩnh vực, qua đó gia tăng giá trị khoa học và tính ứng dụng của các công trình nghiên cứu.

Xuất phát từ thực tiễn đó, việc xây dựng một Hệ thống Digital Testbed phục vụ nghiên cứu chuyên động và điều khiển tàu thủy dưới tác động của môi trường biển là cần thiết và có ý nghĩa cả về khoa học lẫn thực tiễn.

2. Hệ thống Digital Testbed

Với mục tiêu nêu trên, nhóm tác giả đã xây dựng Hệ thống Digital Testbed trong môi trường MATLAB/Simulink với định hướng như sau:

- Hệ thống được tổ chức thành ba khối chức năng chính, bao gồm: (i) khối điều khiển, (ii) khối mô phỏng môi trường và (iii) khối đối tượng điều khiển (mô hình động lực học tàu).
- Các mô-đun được liên kết thông qua chuẩn truyền thông hàng hải NMEA
- Hệ thống có thể hoạt động ở chế độ mô phỏng theo tốc độ xử lý của máy tính hoặc ở chế độ thời gian thực, tùy theo mục đích nghiên cứu và thử nghiệm.

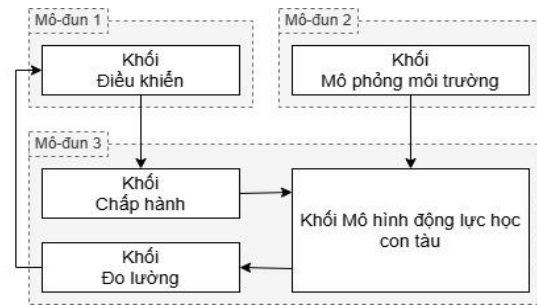
Với kiến trúc trên, mỗi nhóm nghiên cứu có thể đóng gói kết quả của mình dưới dạng một mô-đun độc lập và dễ dàng kết nối với các mô-đun khác chứa kết quả nghiên cứu của đồng nghiệp. Khi vận hành ở chế độ thời gian thực, Hệ thống Digital Testbed có khả năng kết nối trực tiếp với các thiết bị hàng hải thật, mở rộng phạm vi ứng dụng từ mô phỏng thuần túy sang thực nghiệm tích hợp.

Sơ đồ tổng thể và cấu trúc chi tiết của các mô-đun được trình bày trong Hình 1.

Mô-đun 1: Khối điều khiển

Khối điều khiển chứa các bộ điều khiển chuyển động của tàu thủy như máy lái tự động, bộ điều khiển hướng đi, điều khiển quỹ đạo hoặc điều khiển bám tuyến, điều khiển giảm lắc,...

Tín hiệu đầu vào của khối điều khiển bao gồm thông tin trạng thái tàu (vị trí, vận tốc, hướng đi, độ nghiêng,...) được phản hồi từ khối đo lường. Dựa trên các thuật toán điều khiển được thiết kế, khối điều khiển tạo ra tín hiệu điều khiển gửi tới khối chấp hành.



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống

Mô-đun 2: Khối mô phỏng môi trường

Khối mô phỏng môi trường đảm nhiệm việc mô phỏng các tác động ngoại lực của môi trường như sóng, gió và dòng chảy,...

Các mô hình môi trường có thể được xây dựng theo nhiều mức độ phức tạp khác nhau, từ các mô hình tuyến tính đơn giản đến các mô hình phổ sóng, gió ngẫu nhiên hoặc dòng chảy không đồng nhất.

Dữ liệu môi trường được truyền trực tiếp tới khối mô hình động lực học con tàu, tác động tới chuyển động của con tàu cũng như kết quả làm việc của bộ điều khiển.

Mô-đun 3: Mô hình động lực học con tàu, cơ cấu chấp hành, đo lường và lưu trữ

Mô-đun 3 tích hợp ba khối chức năng chính:

Khối mô hình động lực học con tàu

Đây là khối mô phỏng chuyển động của tàu theo các phương trình động lực học 0. Khối này nhận đồng thời tác động từ khối chấp hành và khối môi trường, sau đó tính toán trạng thái chuyển động của tàu theo thời gian thông qua phương trình:

$$M\ddot{v} + C(v)\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

Trong đó, ma trận khối lượng tổng hợp M bao gồm hai thành phần là khối lượng thân tàu (rigid body) và khối lượng gia tăng (added mass) do tương tác thủy động giữa thân tàu và môi trường nước. Ma trận này phản ánh đặc tính quán tính của hệ thống và có ảnh hưởng trực tiếp đến đáp ứng động lực học của tàu. Ma trận $C(v)$ mô tả các lực quán tính phụ thuộc vận tốc,

thể hiện tính phi tuyến đặc trưng của chuyển động tàu thủy. Ma trận giảm chấn $D(v)$ biểu diễn các lực cản thủy động, thường bao gồm cả thành phần tuyến tính và phi tuyến theo vận tốc. Các lực và mô men thủy tĩnh được mô tả thông qua vectơ $g(\eta)$, phản ánh ảnh hưởng của lực nổi và mô men phục hồi đến chuyển động của tàu, đặc biệt đối với các chuyển động lắc ngang và lắc dọc. Vectơ τ là tổng các lực và mô men tác dụng lên tàu, bao gồm lực điều khiển sinh bởi các hệ thống chấp hành như chân vịt và bánh lái, cũng như các lực môi trường như gió, sóng và dòng chảy.

Khối cơ cấu chấp hành

Nhận tín hiệu điều khiển từ khối điều khiển và mô phỏng động học của các cơ cấu chấp hành như bánh lái, chân vịt hoặc hệ thống đẩy phụ. Khối này chuyển đổi tín hiệu điều khiển thành lực và mô-men tác động lên thân tàu. Đó chính là một phần của thành phần lực và mô men τ trong công thức (1).

Khối đo lường và lưu trữ

Có nhiệm vụ thu thập và xử lý các biến trạng thái của con tàu (vị trí, vận tốc, hướng đi, gia tốc,...), mô phỏng tín hiệu từ các thiết bị đo trên buồng lái. Dữ liệu đo lường được phản hồi về khối điều khiển để hình thành vòng điều khiển kín.

Kết quả đo lường được cũng sẽ được lưu trữ để phục vụ cho việc nghiên cứu.

3. Kết quả thực nghiệm

3.1. Điều kiện thực nghiệm

Việc thực nghiệm được thực hiện trong môi trường Simulink của Matlab nhằm đánh giá khả năng kết nối các mô hình tàu thủy, bộ điều khiển và môi trường vào Hệ thống Digital Testbed. Kết quả thực nghiệm không có mục đích đánh giá, so sánh chất lượng của các bộ điều khiển, mô hình tàu hay mô hình môi trường.

Kết nối giữa các khối trong thực nghiệm được mô

tả tại bài báo này được thực hiện qua đường kết nối của Simulink.

Hai loại máy lái tự động được sử dụng trong nghiên cứu gồm máy lái PID truyền thống và máy lái mờ (Fuzzy). Để ngắn gọn trong diễn đạt, sau đây hai máy lái này sẽ được gọi tên là Máy lái PID và Máy lái Fuzzy.

Phương trình điều khiển của Máy lái PID được triển khai ở dạng rời rạc trong MATLAB/Simulink như sau:

$$e(k) = \Psi_d(k) - \Psi(k) \tag{2}$$

$$\delta(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) T_s + K_D \frac{(e_k - e_{k-1})}{T_s} \tag{3}$$

Trong đó:

- K_P - Hệ số khuếch đại tỉ lệ;
- K_I - Hệ số khuếch đại tích phân;
- K_D - Hệ số khuếch đại vi phân;
- T_s - Chu kỳ lấy mẫu;
- $\Psi_d(k)$ - Hướng đi yêu cầu;
- $\Psi(k)$ - Hướng đi hiện tại.

Các hệ số K_P, K_I, K_D của máy lái được lựa chọn trong quá trình thực nghiệm để phù hợp với đối tượng điều khiển (con tàu).

Máy lái Fuzzy được thiết kế với các hàm thuộc đầu vào, đầu ra mô phỏng theo cách lái của một thủy thủ lành nghề với hai đầu vào là Độ lệch hướng đi $\Delta\Psi$ và Tốc độ chuyển hướng r của tàu. Thông số các hàm thuộc này được thể hiện trên Bảng 1 và Bảng 2.

Máy lái Fuzzy có một đầu ra là góc bẻ lái δ với hàm thuộc như trong Bảng 3.

Bộ điều khiển Fuzzy của máy lái sử dụng 63 luật mờ tạo lên bề mặt điều khiển như trong Hình 2.

Trong thực nghiệm, các máy lái nêu trên điều khiển hai mô hình tàu điển hình do Fossen đề xuất, đó

Bảng 1. Hàm thuộc đầu vào 1 của Máy lái Fuzzy ($\Delta\Psi$)

-vb	-b	-m	-s	zero	+s	+m	+b	+vb
zmf	trapmf	trapmf	trimf	trimf	trimf	trapmf	trapmf	smf
[-55 -50]	[-55 -50 -40 -25]	[-27 -25 -20 -4.5]	[-5 -1.5 0]	[-1 0 1]	[0 1.5 5]	[4.5 20 25 27]	[25 40 50 55]	[50 55]

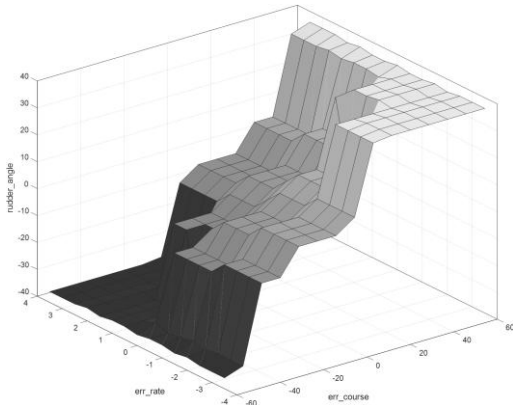
Bảng 2. Hàm thuộc đầu vào 2 của Máy lái Fuzzy (r)

-b	-m	-t	zero	+t	+m	+b
zmf	trimf	trimf	trimf	trimf	trimf	smf
[-3 -1.5]	[-2 -1.8 -0.3]	[-0.31 -0.2 -0.08]	[-0.12 0 0.12]	[0.08 0.2 0.31]	[0.3 1.8 2]	[1.5 3]

Bảng 3. Hàm thuộc đầu ra Máy lái Fuzzy (δ)

-b	-m	-t	zero	+t	+m	+b
zmf	trimf	trimf	trimf	trimf	trimf	smf
[-3 -1.5]	[-2 -1.8 -0.3]	[-0.31 -0.2 -0.08]	[-0.12 0 0.12]	[0.08 0.2 0.31]	[0.3 1.8 2]	[1.5 3]

là mô hình tàu container L=175m và mô hình tàu chở dầu (Tanker) có các thông số như trong Bảng 4.



Hình 2. Bề mặt điều khiển Máy lái Fuzzy

Bảng 4. Thông số các tàu trong thực nghiệm [3]

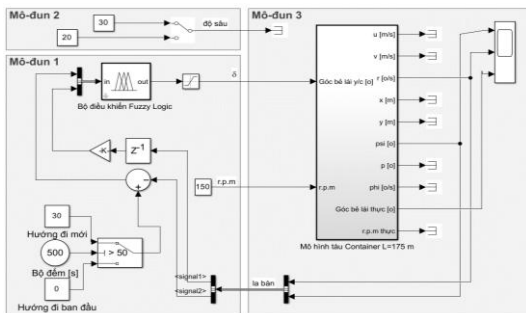
Mô hình	Chiều dài (m)	Tốc độ (hải lý/giờ)	Lượng giãn nước (tấn)
Container	175	14-16	30,000
Tanker	260	12-14	200,000

Tình huống thực nghiệm như sau: Tàu chạy ổn định trên hướng đi $\Psi = 0^\circ$; tại giây thứ 50, hướng đi yêu cầu được chuyển sang hướng $\Psi = 30^\circ$.

Tác động của môi trường đến đặc tính điều động của con tàu và chất lượng điều khiển của máy lái được thực nghiệm với mô hình tàu Tanker tại hai điều kiện: Mớn nước sâu (30m) và tại mớn nước hạn chế (20m).

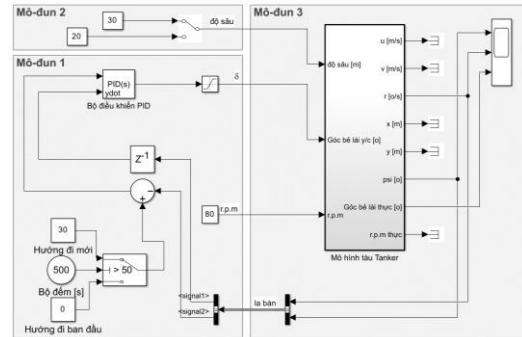
Hệ thống tự động ghi lại dữ liệu phục vụ việc đánh giá trong nghiên cứu như hướng mũi tàu Ψ , tốc độ quay trở của con tàu r , góc bẻ lái δ .

Sơ đồ khối thể hiện các bài thực nghiệm như trên Hình 3 và Hình 4. Toàn bộ hệ thống (phương trình động lực học của con tàu, các máy tự động lái điều khiển hướng đi) được thiết lập trong môi trường Matlab/Simuink.



Hình 3. Sơ đồ khối thực nghiệm với mô hình tàu Container với Máy lái Fuzzy

Các khối đo lường cũng như các kết nối đều sử dụng các khối có sẵn của Simulink. Dữ liệu truyền giữa các khối được thể hiện trên các đường kết nối trên Hình 3 và Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ khối thực nghiệm với mô hình tàu Tanker với Máy lái PID

Việc chuyển hướng đi ban đầu $\Psi = 0^\circ$ sang hướng đi mới $\Psi = 30^\circ$ tại giây thứ 50 được thực hiện qua bộ đếm thời gian và chuyển mạch trong Mô-đun 1 như trên Hình 3, Hình 4.

Trong thực nghiệm, mỗi máy lái đều được thử nghiệm với cả hai Tàu Tanker và Tàu Container. Do vậy ngoài các bài thử nghiệm được thể hiện tại Hình 3, Hình 4 còn có hai bài thực nghiệm với sự hoán đổi mô-đun 1 trong sơ đồ tại Hình 3 với mô-đun 1 trong sơ đồ tại Hình 4.

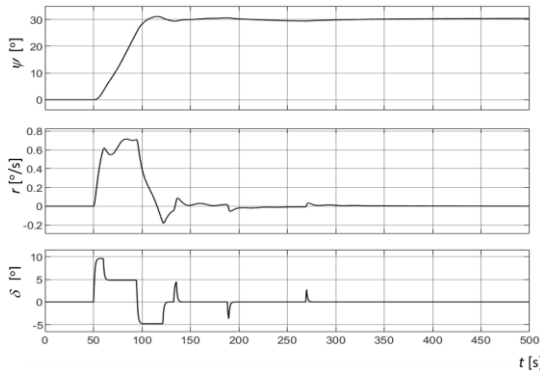
Dữ liệu được hệ thống tự động ghi lại được thể hiện trên các đồ thị từ Hình 5 đến Hình 9.

3.2. Kết quả thực nghiệm với máy lái Fuzzy

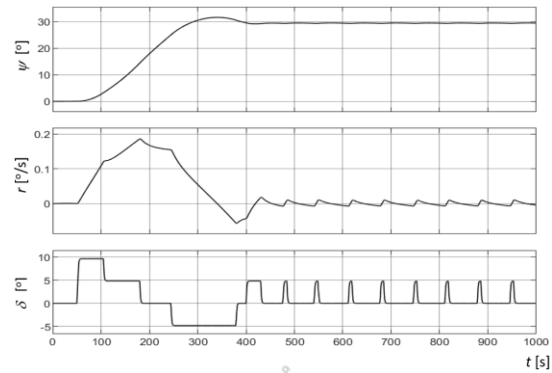
Hình 5 và Hình 6 trình bày kết quả thực nghiệm của máy lái Fuzzy với hai mô hình tàu Container và mô hình tàu Tanker.

Bộ điều khiển Fuzzy Logic của máy lái tự động có các hàm thuộc được thiết kế mô phỏng theo cách lái tàu của một thủy thủ với việc chia góc bẻ lái thành 3 cấp độ (góc bẻ lái lớn, góc bẻ lái trung bình và góc bẻ lái nhỏ) (Bảng 3) và điều chỉnh thời gian giữ bánh lái ở các góc này tùy theo vận tốc góc r (tốc độ quay trở) và độ lệch hướng đi $\Delta\Psi$ của con tàu. Với thuật toán này, bộ điều khiển có dải thích ứng rộng, có thể điều khiển nhiều đối tượng có đặc tính điều khiển dạng phi tuyến khác nhau.

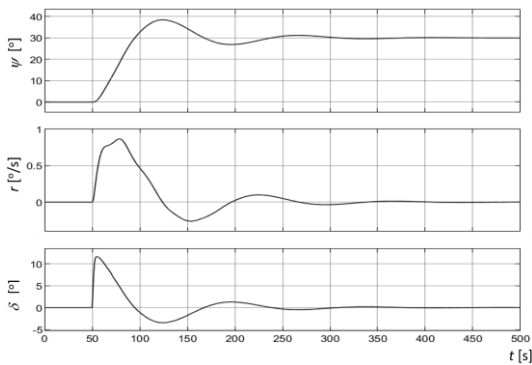
Trong bài thực nghiệm với mô hình tàu Container (có tốc độ cao, lượng giãn nước trung bình), Máy lái Fuzzy cần thời gian quá độ để hoàn thành việc chuyển hướng 30° là 100 giây (Hình 5). Đối với mô hình tàu Tanker, do tàu có quán tính lớn nên thời gian quá độ tăng lên đến 400 giây (Hình 6).



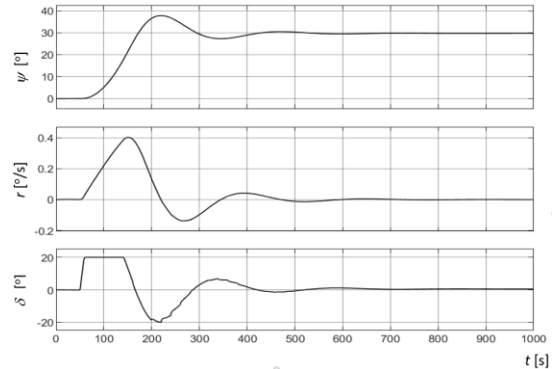
Hình 5. Máy lái Fuzzy điều khiển mô hình tàu Container



Hình 6. Máy lái Fuzzy điều khiển mô hình tàu Tanker



Hình 7. Máy lái PID điều khiển mô hình



Hình 8. Máy lái PID điều khiển mô hình

3.3. Kết quả thực nghiệm với Máy lái PID

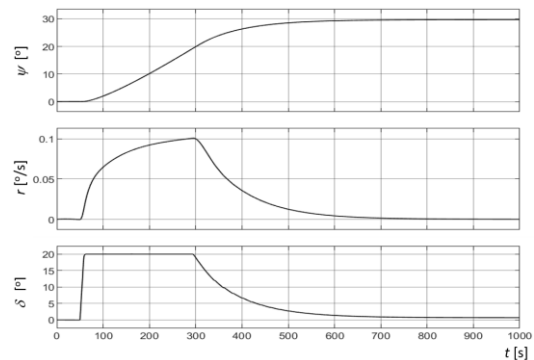
Hình 7 và Hình 8 trình bày kết quả mô phỏng chuyển động của hai mô hình tàu khi sử dụng Máy lái PID. Mô hình tàu Container hoàn thành việc chuyển hướng với thời gian quá độ là 200 giây với độ quá điều chỉnh là 8°. Mô hình tàu Tanker hoàn thành việc chuyển hướng với thời gian quá độ là 400 giây với độ quá điều chỉnh là 8°.

3.4. Ảnh hưởng của điều kiện môi trường đến việc điều khiển con tàu

Để minh họa việc sử dụng Hệ thống Digital Testbed trong việc thử nghiệm tác động của môi trường đối với việc điều khiển con tàu, tàu Tanker được thực nghiệm ở 2 độ sâu khác nhau: Độ sâu 30m và độ sâu 20m. Kết quả thu được như trên Hình 8 và Hình 9.

Món nước của tàu Tanker là 18m, do vậy ở vùng nước có độ sâu 30m, hoàn toàn không xảy ra hiệu ứng nước nông. Kết quả thực nghiệm được thể hiện tại Hình 8. Tại khu vực nước có độ sâu 20m, tác động từ hiệu ứng nước nông thể hiện rõ ràng như trên Hình 9. Máy lái cần tới 650 giây để hoàn thành việc chuyển hướng

con tàu từ $\psi = 0^\circ$ tới $\psi = 30^\circ$. Sau khi hoàn thành việc chuyển hướng, bánh lái vẫn phải duy trì lệch một góc từ 1° đến 2° để chống lại hiệu ứng nước nông có xu hướng làm mũi tàu đạt về một bên (Hình 9).



Hình 9. Máy lái PID điều khiển mô hình tàu Tanker khi có hạn chế món nước

4. Kết luận

Các kết quả các thực nghiệm trên đã minh họa việc sử dụng Hệ thống Digital Testbed trong hoạt động nghiên cứu tự động điều khiển, tác động môi trường và động lực học tàu thủy.

Người nghiên cứu về điều khiển tàu có thể kết nối bộ điều khiển của mình vào hệ thống để chạy thử, hiệu chỉnh với nhiều đối tượng điều khiển (con tàu) khác nhau; có thể so sánh kết quả làm việc của bộ điều khiển của mình với bộ điều khiển của các tác giả khác.

Cũng tương tự như vậy, người nghiên cứu về động lực học tàu thủy hoàn toàn có thể thực nghiệm mô hình tàu của mình với nhiều loại máy lái, điều kiện thời tiết khác nhau để hiệu chỉnh đặc tính điều động của con tàu đang được nghiên cứu, thiết kế.

Trong tương lai, Hệ thống Digital Testbed có thể phát triển theo hướng sau:

- Tập hợp nhiều mô hình động lực học tàu thủy, mô hình nhiễu động môi trường thành một thư viện chung phục vụ cho các nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy.

- Thiết kế Hệ thống Digital Testbed thành các mô đun chạy độc lập trên các máy tính riêng biệt và cho phép kết nối thông qua các cổng vật lý theo chuẩn hàng hải (NMEA). Bằng cách này, việc triển khai các thực nghiệm khi nghiên cứu tại phòng làm việc sẽ rất gần với việc lắp đặt, thử nghiệm trên tàu thật.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.18**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] *Autonomous Ship Verification & Evaluation Research Center — S-TAS Simulation Testbed for Autonomous Ship* (2024), Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering.
- [2] Nguyễn Quang Duy (2021), *Thiết kế bộ điều khiển vây giảm lắc tàu thủy dựa trên mạng thần kinh phân hồi*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 67, tr.11-17.
- [3] Fossen, T. I. (2011), *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley & Sons.

- [4] Gezer, E. C., Moreau, M. K. I., Høgden, A. S., Nguyen, D. T., Skjetne, R., & Sørensen, A. (2025), *Digital-physical testbed for ship autonomy studies in the Marine Cybernetics Laboratory basin*, arXiv.
<https://arxiv.org/abs/2505.06787>
- [5] Đoàn Hữu Khánh, Đinh Anh Tuấn, Hoàng Đức Tuấn (2022), *Xây dựng, phân tích động lực học của mô hình tàu container 3D 6 bậc tự dưới tác động của sóng và gió*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 72, tr. 15-21.
- [6] Vương Đức Phúc, Đỗ Văn A, Lê Văn Tâm (2022), *Bộ điều khiển mờ lai trong hệ thống tự động lái tàu thủy*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 72, tr.05-08.
- [7] Nguyễn Hữu Quyền, Phan Đăng Đào (2022), *Nghiên cứu bộ điều khiển dự báo mô hình để tiết kiệm năng lượng cho hệ thống định vị động tàu biển*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 85, tr.15-21.
- [8] Rybczak M., Rak A (2020), *Prototyping and Simulation Environment of Ship Motion Control System*, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.14, No.2, pp. 367-374.
doi: 10.12716/1001.14.02.13
- [9] Witold Gierusz, Nguyen Cong Vinh, Andrzej Rak (2007), *Maneuvering control and trajectory tracking of very large crude carrier*, Ocean Engineering Vol.34, Issue 7, pp.932-945.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2006.06.003.

Ngày nhận bài:	02/02/2026
Ngày nhận bản sửa:	03/03/2026
Ngày duyệt đăng:	09/03/2026