

NGHIÊN CỨU THUẬT TOÁN TÍCH HỢP SDF-DWA TRONG NHẬN BIẾT RỦI RO VÀ LẬP TUYẾN ĐƯỜNG CHỦ ĐỘNG THEO THỜI GIАН THỰC

A STUDY ON AN INTEGRATED SDF-DWA ALGORITHM FOR REAL-TIME RISK-AWARENESS AND PROACTIVE PATH PLANNING

LƯƠNG TÚ NAM¹, NGUYỄN VĂN QUẢNG², NGUYỄN XUÂN LONG^{1*}

¹Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Phòng Tổ chức - Hành chính, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: nguyensexuanlong@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.958>

Tóm tắt

Nghiên cứu này đề xuất một thuật toán tự động nhận thức rủi ro theo thời gian thực, tích hợp trường khoảng cách có dấu (SDF) để đánh giá rủi ro không gian liên tục với phương pháp tiếp cận cửa sổ động (DWA) để lập kế hoạch đường đi chủ động. Hệ thống tạo ra một bản đồ rủi ro trực quan, với chỉ số định lượng mức độ nguy hiểm, đánh giá hiệu quả các mối nguy hiểm từ cả chướng ngại vật tĩnh và tàu thuyền động. Sau đó, thuật toán sử dụng bản đồ rủi ro này trong một hàm chi phí đa mục tiêu để tự động tạo ra các quỹ đạo mượt mà, tuân thủ COLREGs, cân bằng giữa an toàn, tiến tới mục tiêu và hiệu quả điều khiển. Để chứng minh hiệu quả của thuật toán, một mô phỏng số đã được thực hiện. Kết quả mô phỏng cho thấy việc phối hợp giữa lập bản đồ rủi ro thời gian thực và lập kế hoạch đường đi chủ động mang lại hiệu quả cao trong môi trường hàng hải năng động hiện nay.

Từ khóa: Rủi ro hàng hải, nguy cơ đâm va, nhận biết rủi ro, lập tuyến đường, chỉ số rủi ro.

Abstract

This study proposes an automated real-time risk assessment algorithm that integrates a Signed Distance Field (SDF) for continuous spatial risk assessment with a Dynamic Window Approach (DWA) for proactive path planning. The system generates a visual risk map with quantitative hazard indicators, effectively assessing hazards from both static obstacles and dynamic vessels. The algorithm then uses this risk map within a multi-objective cost function to automatically generate smooth, COLREG-compliant trajectories, balancing safety, approach to the objective, and control efficiency. Numerical

simulation was conducted to demonstrate the algorithm's effectiveness. The simulation results show that the combination of real-time risk mapping and proactive path planning is highly effective in today's dynamic maritime environment.

Keywords: Maritime risk, collision risk, risk aware, path planning, risk index.

1. Mở đầu

Ngày nay, vận tải đường biển đóng vai trò lớn trong vận chuyển hàng hoá do chi phí thấp và tính kinh tế [1]. Việc lập kế hoạch chuyến đi là một phần quan trọng, ảnh hưởng nhiều đến công tác dẫn tàu an toàn, chủ yếu tập trung vào việc lựa chọn các tuyến đường đi cụ thể trong các đoạn nhất định trong môi trường phức tạp [2]. Tối ưu hóa tuyến đường của tàu đã trở thành một giải pháp quan trọng để nâng cao hiệu quả vận chuyển nhưng cũng rất khó khăn do môi trường hàng hải phức tạp, bao gồm các điều kiện thủy văn khác nhau, các loại chướng ngại vật đa dạng, cũng như các ràng buộc do quy tắc hàng hải và giới hạn khả năng điều động của tàu đặt ra [3].

Trong những năm gần đây, các học giả đã có những đóng góp đáng kể vào việc phát triển các thuật toán lập kế hoạch chuyến đi cho tàu [4]. Một số phương pháp chính có thể kể đến là các phương pháp lập tuyến đường thời tiết truyền thống, các phương pháp dựa trên dữ liệu và các phương pháp tìm kiếm đồ thị [5], các phương pháp thông minh như Artificial Potential Field (APF) [6], Rapidly-exploring Random Tree (RRT) [7], Particle Swarm Optimization (PSO) [8],... Phương pháp kết hợp phân cụm không gian (DBSCAN) với mạng nơ-ron nhân tạo được xây dựng để lập các tuyến đường đi một cách tự động giữa các cảng dựa trên dữ liệu AIS [9]. Thông qua việc khai thác dữ liệu AIS lịch sử, một phương pháp tự động tạo ra các tuyến đường đi của tàu trong các điều kiện hàng hải khác nhau cũng được lập nên dựa trên dữ liệu lớn

[10]. Phương pháp dựa trên các đơn vị lặp lại đơn giản (SRU) và dữ liệu AIS thiết kế đường đi tự động, thu được các tuyến đường ven biển, tốc độ và hướng đi được đề xuất cho các loại tàu khác nhau [11]. Thuật toán tạo hành trình tự động lấy dữ liệu quỹ đạo AIS của tàu làm đầu vào, sử dụng thuật toán Douglas - Peucker để đơn giản hóa dữ liệu quỹ đạo AIS bằng cách trích xuất các điểm đặc trưng và tự động tạo ra các tuyến đường đi của tàu [12].

Mặc dù các nghiên cứu đã áp dụng các thuật toán tối ưu hóa khác nhau vào việc lập tuyến đường của tàu, nhưng vẫn chưa có giải pháp tích hợp đánh giá dựa trên nhiều tiêu chí nhưng vẫn đảm bảo tính toán nhanh chóng. Vì vậy, nghiên cứu này đề xuất một thuật toán tích hợp, kết hợp giữa trường khoảng cách có dấu (Signed Distance Field - SDF) để đánh giá rủi ro không gian liên tục với phương pháp tiếp cận cửa sổ động (Dynamic Window Approach - DWA) nhằm tạo ra tuyến đường tối ưu trong thời gian thực. Việc xây dựng bản đồ rủi ro động, được định lượng bằng chỉ số trong khoảng $[-1, 1]$ cung cấp một biểu diễn trực quan và toàn diện về các mối nguy hại từ môi trường bằng cách hợp nhất các rủi ro dựa trên khoảng cách và vận tốc từ cả chướng ngại vật tĩnh và vật cản động. Sau đó, nhận thức rủi ro này được đưa vào DWA đa mục tiêu để tự động tạo ra các tuyến đường chủ động tuân thủ COLREGs thông qua việc tối ưu hóa hàm chi phí cân bằng giữa tính an toàn, tiến trình hướng tới đích và độ mượt điều khiển.

2. Thuật toán SDF-DWA trong nhận biết rủi ro và lập tuyến đường

2.1. Xây dựng chỉ số rủi ro hàng hải dựa trên SDF

Trường khoảng cách có dấu (Signed Distance Field - SDF) là trường vô hướng liên kết mỗi điểm trong không gian với khoảng cách có dấu đến điểm bề mặt gần nhất. Đây là phương pháp phổ biến để biểu diễn môi trường, được sử dụng phát hiện và tránh va trong lập kế hoạch chuyển động [13].

SDF có thể được coi là một hàm như sau:

$$d = \phi(x): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R} \quad (1)$$

Trong đó x là một điểm trong hệ tọa độ đã được định nghĩa trước đó. Giá trị $\phi(x)$ biểu thị khoảng cách Euclidean có dấu từ x đến một điểm trên bề mặt, với $\phi = 0$ [14].

Nghiên cứu này đề xuất một hướng tiếp cận mới để nâng cấp trường khoảng cách có dấu truyền thống nhằm cung cấp khả năng nhận biết chướng ngại vật một cách thống nhất cho hoạt động hàng hải. Các

phương pháp truyền thống chỉ mã hóa khoảng cách Euclidean đến ranh giới chướng ngại vật gần nhất, không thể chỉ ra được sự phức tạp của môi trường, biên độ an toàn hoặc rủi ro tích lũy từ các chướng ngại vật gần đó. Trong khi phương pháp SDF được cải tiến có thể đưa ra chỉ số chuẩn hóa, thể hiện rõ ràng các mức độ an toàn.

Đối với các chướng ngại vật tĩnh, hàm khoảng cách có dấu vật lý $\phi(p)$ biểu thị khoảng cách Euclidean tối thiểu từ điểm p đến ranh giới chướng ngại vật bất kỳ. Tuy nhiên, để hàm này đảm bảo an toàn hàng hải, biên độ an toàn ρ_{safe} tỷ lệ thuận với chiều dài tham chiếu của tàu L_{ref} được áp dụng như sau:

$$\phi_s^{safe}(p) = \phi_s(p) - \rho_{safe} \quad (2)$$

Đối với các chướng ngại vật động (các tàu mục tiêu đang di chuyển), cần phải xem xét đến yếu tố thời gian. Giả sử tàu i có vị trí $p_i(t)$ tại thời điểm t , vận tốc $v_i(t)$ và độ bất định $\sigma_i(t)$, hàm khoảng cách có dấu được điều chỉnh theo vận tốc như sau:

$$\phi_d(p, t) = \frac{\|p - p_i(t)\| - (R_{ship} + R_i)}{k} \quad (3)$$

Trong đó: R_{ship} là bán an toàn đối với tàu chủ; R_i là bán kính an toàn của tàu mục tiêu i hoặc bán kính ảnh hưởng chướng ngại vật tĩnh i ; k là hệ số tỷ lệ rủi ro phụ thuộc vào vận tốc, có chức năng tự động điều chỉnh nhận thức về rủi ro dựa trên chuyển động tương đối, được tính bằng công thức:

$$k = 1 + \frac{\|v_i - v_{ship}\|}{v_{max}} \quad (4)$$

Chỉ số rủi ro hàng hải tích hợp các thành phần tĩnh và động trong suốt thời gian lập kế hoạch T_h có dạng:

$$\phi_{total}(p) = \min(\phi_s^{safe}(p), \min_{t' \in [t, t+T_h]} \phi_d(p, t')) \quad (5)$$

Chỉ số rủi ro hàng hải $\phi^{index}(p)$ nằm trong khoảng $[-1, 1]$ được phát triển để chuyển đổi khoảng cách vật lý $\phi_{safe}(p)$ thành một thước đo an toàn hàng hải như sau:

$$\phi^{index}(p) = \begin{cases} -1 & \text{nếu } \phi_{total} \leq -d_{crit} \\ -0.5 - 0.5 \frac{\phi_{total}}{d_{crit}} & \text{nếu } -d_{crit} < \phi_{total} < 0 \\ 0.3 \frac{\phi_{total}}{d_{boundary}} - 0.7R(p) & \text{nếu } 0 \leq \phi_{total} < d_{boundary} \\ 0.3 + 0.7 \tanh\left(\frac{\phi(p)}{3d_{boundary}}\right) & \text{nếu } \phi_{total} \geq d_{boundary} \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó d_{crit} xác định khu vực nguy hiểm cần tránh ngay lập tức; $d_{boundary}$ xác định khu vực ranh giới để lập kế hoạch chủ động; $R(p)$ biểu thị rủi ro tích lũy từ các chướng ngại vật gần đó được tính toán thông qua công thức Gaussian:

$$R(p) = \sum_{j=1}^M \exp\left(-\frac{\max(0, \phi_j(p))^2}{\lambda_j^2}\right) \quad (7)$$

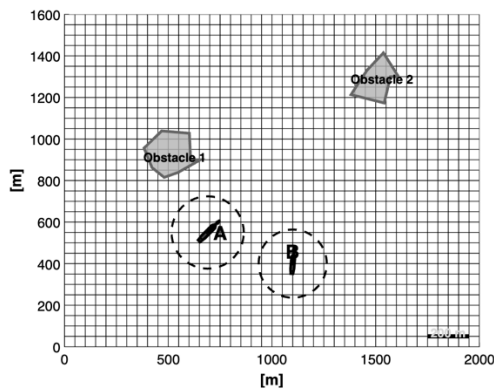
Trong đó λ_j là hệ số ảnh hưởng của chướng ngại vật j .

Các giá trị $\phi^{index}(p)$ được chuẩn hóa này cho phép đánh giá rủi ro nhất quán trong các điều kiện môi trường hàng hải khác nhau, đặc biệt trong các trường hợp mật độ tàu thuyền đông hay nhiều chướng ngại vật.

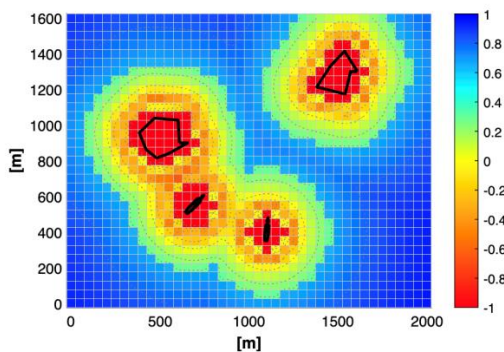
Trường SDF được cập nhật theo chu kỳ rời rạc Δt , đồng bộ với bước lập kế hoạch. Việc cập nhật thực hiện đối với 02 đối tượng: Thành phần tĩnh của môi trường được mở rộng bởi biên an toàn ρ_{safe} để tạo vùng cấm; thành phần động được tính từ trạng thái mục tiêu tại từng thời điểm dự báo trong khoảng nhìn trước T_h , sau đó lấy giá trị nguy hiểm nhất để tổng hợp thành trường ϕ_{total} . Vì vậy, mỗi lần cập nhật Δt , toàn bộ trường rủi ro được làm mới trên lưới, phản ánh đồng thời ảnh hưởng của chướng ngại vật tĩnh và các mục tiêu động. Khi dữ liệu mục tiêu động bị trễ hoặc mất trong ngắn hạn, thuật toán vẫn vận hành ổn định bằng cách duy trì dự báo trạng thái mục tiêu theo công thức:

$$p_i(t + \Delta t) = p_i(t) + v_i \Delta t \quad (8)$$

Áp dụng thuật toán SDF cải tiến đã cho kết quả đánh giá toàn diện, trực quan về rủi ro hàng hải gồm



Hình 1. Các tàu mục tiêu và chướng ngại vật tĩnh



Hình 2. Bản đồ chỉ số rủi ro hàng hải

hai tàu đang di chuyển với véc tơ vận tốc và hai chướng ngại vật tĩnh (Hình 1). Bản đồ chỉ số rủi ro được thiết lập (Hình 2) biểu thị dải giá trị từ -1,0 (nguy hiểm) đến 1,0 (an toàn), thể hiện định lượng các rủi ro xung quanh tàu cũng như chướng ngại vật. Khu vực lân cận Tàu A có mức rủi ro trung bình $\phi^{index} \approx -0,3$ do chịu tác động kép từ tàu B và chướng ngại vật tĩnh 1. Đặc biệt, vùng giao thoa giữa hai tàu được xác định là khu vực nguy hiểm nhất $\phi^{index} \approx -0,8$.

Thuật toán SDF cải tiến này có hiệu quả trong việc tích hợp đồng thời rủi ro tĩnh và động, tạo tiền đề cho việc ra quyết định tránh va thông qua việc xác định rõ các khu vực hàng hải an toàn và các khu vực nguy hiểm.

2.2. Đề xuất thuật toán lập tuyến đường dựa trên DWA

Thuật toán Dynamic Window Approach (DWA) là một phương pháp tìm đường cục bộ được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực robot di động nhờ khả năng xét đến đồng thời các ràng buộc động học và giới hạn vận tốc của phương tiện. Trong lĩnh vực hàng hải, nhiều nghiên cứu đã mở rộng hoặc cải tiến DWA nhằm thích ứng với đặc tính động lực học trong các bài toán tránh va và dẫn đường tự động [15-18].

Tuy nhiên, cho đến nay, việc tích hợp chỉ số rủi ro trực tiếp vào thuật toán DWA như một điều kiện ràng buộc trong quá trình lập kế hoạch quỹ đạo cho tàu biển vẫn còn hạn chế. Trong nghiên cứu này, CRI được kết hợp với DWA như một thành phần ràng buộc và đánh giá chi phí, nhằm nâng cao khả năng ra quyết định trong các tình huống giao thông hàng hải phức tạp, nơi tồn tại nhiều mục tiêu tĩnh và động cũng như yêu cầu tuân thủ quy tắc phòng ngừa đâm va.

Dựa trên thuật toán SDF cải tiến ở Mục 2.1, nghiên cứu đề xuất phát triển thuật toán tiếp cận cửa sổ động (Dynamic Window Approach - DWA) truyền thống nhằm tích hợp khả năng nhận thức toàn cục (global awareness) mà vẫn đảm bảo tính toán thời gian thực cho hệ thống.

Nghiên cứu sử dụng mô hình 3-DOF của tàu trên mặt phẳng ngang hai chiều, trong đó các lực nhiễu từ môi trường như gió và dòng chảy được bỏ qua để đơn giản hóa. Mối liên hệ biến đổi vectơ vận tốc giữa hệ tọa độ dẫn đường (navigation frame) và hệ tọa độ thân tàu (body-fixed frame) cùng với mô hình động lực học ba bậc tự do của tàu được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi - s \sin \psi \\ \dot{y} = v \sin \psi + s \cos \psi \\ \dot{\psi} = \omega \end{cases} \quad (9)$$

với $[x, y, \psi]$ mô tả vị trí và hướng tàu trong hệ tọa

độ dẫn đường và $[v, s, \omega]$ biểu diễn lần lượt vận tốc dọc, vận tốc ngang và vận tốc độ quay trong hệ tọa độ thân tàu.

Không gian vận tốc khả thi V_a được xác định dựa trên các ràng buộc động lực học của tàu.

$$V_a = \{(v, \omega) | v \in [0, v_{max}], \omega \in [-\omega_{max}, \omega_{max}], \dot{v} \in [\dot{v}_{min}, \dot{v}_{max}], \dot{\omega} \in [\dot{\omega}_{min}, \dot{\omega}_{max}]\} \quad (10)$$

Từ đó, cửa sổ động (dynamic window) $V_d \subseteq V_a$, bao gồm các vận tốc có thể đạt được trong chu kỳ điều khiển tiếp theo được trích xuất, tuân thủ các ràng buộc an toàn từ hàm SDF nêu trên.

$$V_d = \{(v, \omega) \in V_a | \frac{v^2}{2a_{max}} < d_{boundary} \cdot \max(0, \phi^{index}(x(t)))\} \quad (11)$$

Ràng buộc này đảm bảo tàu có khả năng dừng hẳn trước khi tiến vào các vùng có chỉ số an toàn $\phi^{index} < 0$.

Đối với mỗi cặp vận tốc $(v, \omega) \in V_d$, mô phỏng quỹ đạo dự đoán $\tau(v, \omega)$ trong khoảng thời gian dự báo $T_h = 120s$ được thực hiện. Mỗi quỹ đạo được định lượng bằng hàm chi phí đa mục tiêu:

$$C(\tau) = \omega_{collision} C_{collision}(\tau) + \omega_{goal} C_{goal}(\tau) + \omega_{COLREGS} C_{COLREGS}(\tau) + \omega_{smoothness} C_{smoothness}(\tau) \quad (12)$$

Chi phí đâm va ($C_{collision}$) tận dụng ưu thế của thuật toán SDF nâng cao để xử lý các chướng ngại vật tĩnh và động:

$$C_{collision}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \exp(-3 \cdot \phi^{index}(p(t))) \quad (13)$$

Chi phí hướng mục tiêu (C_{goal}) khuyến khích tàu di chuyển về phía điểm đích p_{goal} :

$$C_{goal}(\tau) = \frac{\|p_N - p_{goal}\|}{\|p_0 - p_{goal}\|} - 0.3 \frac{v_N \cos(\psi_N - \psi_{goal})}{v_{max}} \quad (14)$$

Chi phí tuân thủ quy tắc phòng ngừa đâm va ($C_{COLREGS}$) ràng buộc tàu có hành động tránh va phù hợp:

$$C_{COLREGS}(\tau) = \begin{cases} \mathbb{I}_{give-away} \cdot [1 - \exp(-\frac{DCPA^2}{2\sigma_c^2})] \\ \mathbb{I}_{head-on} \cdot [\max(0, \frac{\pi}{9} - |\Delta\psi|) \cdot f_{CPA}] \\ \mathbb{I}_{overtaking} \cdot [\max(0, \frac{overtaking_rate}{max_rate}) \cdot g_{DCPA}] \end{cases} \quad (15)$$

Việc phân loại tình huống và áp dụng hàm phạt để loại bỏ vi phạm thuật toán như sau:

$$C_{COLREGS}(\tau) = \sum_{s \in S} I_s(\tau) \phi_s(\tau) \quad (16)$$

với $I_s \in \{0, 1\}$ là hàm chỉ thị tình huống (được xác định từ phương vị giữa OS và TS, phù hợp COLREGs), và ϕ_s là hàm phạt liên tục phản ánh mức độ vi phạm trong từng tình huống.

Khi một tình huống được kích hoạt ($I_s = 1$), chi phí COLREGs tăng theo DCPA/CPA hoặc việc thay đổi hướng không đủ; còn trong các tình huống không liên quan thì $I_s = 0$ nên không tạo phạt. Từ đó đảm bảo quỹ đạo được chọn sẽ ưu tiên theo đúng COLREGs.

Chi phí độ mượt ($C_{smoothness}$) đảm bảo tính ổn định của hệ thống bằng cách giảm thiểu sự thay đổi đột ngột trong lệnh điều khiển:

$$C_{smoothness}(\tau) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} (\frac{|v_{k+1} - v_k|}{v_{max}} + \frac{|\omega_{k+1} - \omega_k|}{\omega_{max}}) \quad (17)$$

Tại mỗi chu kỳ DWA, các chi phí thành phần được chuẩn hóa trong tập quỹ đạo khả thi V_d theo công thức:

$$\hat{C}_k(\tau) = \frac{C_k(\tau) - \min_{\tau \in V_d} C_k}{\max_{\tau \in V_d} C_k - \min_{\tau \in V_d} C_k + \epsilon} \quad (18)$$

với $k \in \{collision, goal, COLREGS, smoothness\}$ và ϵ là hằng số nhỏ để tránh chia cho 0.

Sau chuẩn hóa, hàm chi phí tổng được viết dưới dạng:

$$J(\tau) = w_1 \hat{C}_{collision} + w_2 \hat{C}_{goal} + w_3 \hat{C}_{COLREGS} + w_4 \hat{C}_{smoothness} \quad (19)$$

với $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$.

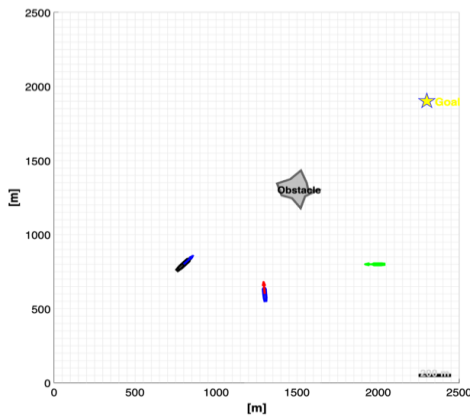
Lệnh điều khiển tối ưu (v^*, ω^*) được xác định thông qua phương pháp lấy mẫu toàn diện trong không gian V_d :

$$(v^*, \omega^*) = \underset{(v, \omega) \in V_d}{\operatorname{argmin}} C(\tau(v, \omega)) \quad (20)$$

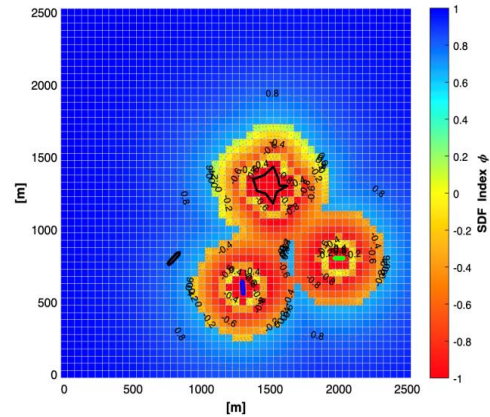
So với phương pháp DWA truyền thống, phương pháp DWA cải tiến trong nghiên cứu này tích hợp cơ chế phân cấp hành vi theo mức độ rủi ro, tối ưu hóa để tránh chướng ngại vật tĩnh đồng thời duy trì khoảng cách an toàn với các tàu mục tiêu nhưng vẫn đảm bảo bám sát lộ trình đến đích.

3. Mô phỏng số và thảo luận

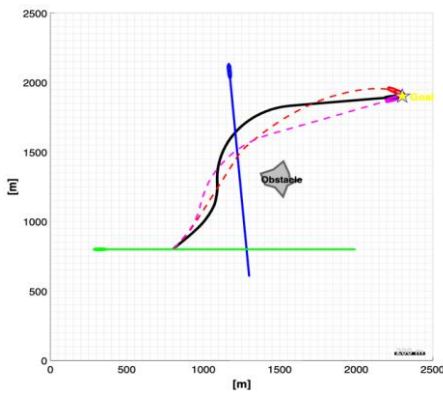
Nhằm đánh giá hiệu suất của thuật toán SDF-DWA cải tiến, một mô phỏng số được thực hiện như sau: Tàu chủ (OS) có chiều dài $L_{OS} = 120$ m và chiều rộng $B_{OS} = 24$ m, đang hành trình từ vị trí (300, 300) đến vị trí đích (1800, 1400) với vận tốc 9,7 kn. Khu vực hàng hải có một chướng ngại vật tĩnh, đường kính xấp xỉ 200 m có vị trí trực diện trên quỹ đạo tiến tới mục tiêu của OS; tàu mục tiêu 1 (TS1) có $L_{TS1} = 100$ m, $B_{TS1} = 20$ m, di chuyển theo hướng 355 từ vị trí (800, 0) với vận tốc 7.8 kn; tàu mục tiêu 2 (TS2) có $L_{TS2} = 80$ m, $B_{TS2} = 16$ m hành trình theo hướng 270 từ (1500, 300) với vận tốc 8,7 kn. Thuật toán SDF-DWA tích hợp đánh giá rủi ro không gian liên tục với tối ưu hóa quỹ đạo thời gian thực, giúp OS đồng thời duy trì biên an toàn dựa trên kích thước và vận tốc tàu, tuân thủ



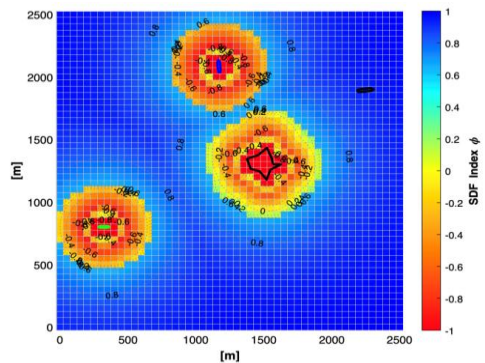
Hình 3. Vị trí ban đầu của các tàu



Hình 4. Đánh giá rủi ro ban đầu



Hình 5. Hành trình của các tàu đến mục tiêu



Hình 6. Đánh giá rủi ro tại thời điểm cuối

các quy tắc tránh va. Vị trí và đánh giá rủi ro ban đầu của mô phỏng được thể hiện ở Hình 3 và 4.

Tại thời điểm bắt đầu, OS đối mặt với một tình huống phức tạp: Khi xuất phát từ vị trí ban đầu hướng về mục tiêu, tàu nằm trên quỹ đạo có nguy cơ đâm va với TS1 và một chướng ngại vật, đồng thời quan sát thấy TS2 đang di chuyển. Bản đồ rủi ro ban đầu xác định một số khu vực nguy hiểm xung quanh các chướng ngại vật với chỉ số cụ thể.

Kết quả ở Hình 5 và 6 cho thấy hiệu quả vận hành của hệ thống tránh va chạm SDF-DWA cải tiến (đường màu đen). Theo COLREGs, OS có nghĩa vụ nhường đường cho TS1 trong tình huống cắt hướng. Thuật toán đã tính toán cho tàu chuyển hướng sang trái dựa trên kết quả phân tích các hàm chi phí. Nếu lựa chọn chuyển hướng sang mạn phải, thành phần chi phí đâm va ($C_{collision}$) sẽ tăng đột biến do tiệm cận chướng ngại vật ở khoảng cách gần. Đồng thời, chi phí độ mượt ($C_{smoothness}$) cũng sẽ tăng cao do buộc phải thực hiện các hành động tránh va liên tiếp trong một khoảng thời gian ngắn. Mặc dù Chi phí tuân thủ quy tắc phòng ngừa đâm va ($C_{COLREGs}$) có thể giảm bớt, nhưng chi phí hướng mục tiêu (C_{goal}) cũng gia tăng do

lộ trình mạn phải đòi hỏi một quãng đường vòng dài hơn. Ngược lại, khi chuyển hướng sang mạn trái đạt được giá trị tối ưu tổng thể. Phương án này duy trì rủi ro đâm va ở mức thấp, yêu cầu các lệnh chuyển hướng mượt hơn và cho phép tiến tới đích một cách trực diện hơn. Điều này cho thấy thuật toán không ưu tiên cứng nhắc bất kỳ mục tiêu đơn lẻ nào mà thay vào đó tìm kiếm điểm cân bằng tối ưu nơi tổng các chi phí thành phần có trọng số là nhỏ nhất để đạt được hiệu suất vượt trội ở các thành phần cốt lõi như tính an toàn và hiệu quả hành trình.

Để làm rõ hơn hiệu quả của thuật toán đề xuất, mô phỏng số so sánh các tuyến đường được đề xuất bởi thuật toán SDF-DWA với DWA truyền thống (nét đứt màu đỏ) và DWA-COLREGs của Liu (2024) [18] (nét đứt màu hồng) đã được thực hiện.

Trong suốt hành trình, tại mỗi điểm lấy mẫu theo bước thời gian Δt , giá trị trường SDF ϕ phản ánh mức độ an toàn tại vị trí của tàu. Trên cơ sở chuỗi giá trị này, $\%S_{danger}$ được định nghĩa là tỷ lệ thời gian tuyến đường nằm trong vùng nguy hiểm, tức các thời điểm có $\phi < 0$. Chỉ số này càng nhỏ thì quỹ đạo càng ít đi vào vùng rủi ro. Chỉ số ϕ_{avg} là giá trị trung bình của ϕ

đọc theo quỹ đạo, biểu diễn mức an toàn trung bình trong toàn bộ hành trình. Giá trị này càng lớn thì quỹ đạo càng nằm nhiều trong vùng an toàn. Ngoài ra, ϕ_{min} là giá trị nhỏ nhất của ϕ trên quỹ đạo, phản ánh mức rủi ro cực đại mà tàu đã trải qua, ϕ_{min} càng gần 0 thì mức rủi ro cực đại càng thấp.

Kết quả so sánh tại Bảng 1 cho thấy SDF-DWA có mức rủi ro thấp nhất $\%S_{danger} = 25,7\%$, $\phi_{avg} = 0,5$ và $\phi_{min} = -0,4$. Hai phương pháp còn lại đều có $\%S_{danger}$ xấp xỉ 30% và ϕ_{min} âm sâu hơn, chứng tỏ tàu đi vào vùng nguy hiểm nhiều hơn và có mức rủi ro cực đại cao hơn. Mặc dù tuyến đường đến mục tiêu của SDF-DWA là lớn nhất (2072,2m) nhưng lại đến đích nhanh nhất (373s). Điều này xuất phát từ việc thuật toán đề xuất đưa ra tuyến đường hạn chế đi vào khu vực nguy hiểm nên có thể duy trì tốc độ trung bình cao hơn. Như vậy, kết quả định lượng cho thấy phương pháp SDF-DWA đạt ưu thế rõ về an toàn mà không đánh đổi về mặt thời gian.

Bảng 1. So sánh các tuyến đường đề xuất

	DWA	DWA-COLREG	SDF-DWA
d_{min}	194.2	212.2	202.8
S_{goal}	1983.4	1939.1	2072.2
t_{goal}	466	390	373
v_{avg}	4.3	5	5.6
$\%S_{danger}$	30.25	30.25	25.7
ϕ_{avg}	0.4	0.38	0.5
ϕ_{min}	-0.92	-0.78	-0.4

4. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất thuật toán SDF-DWA cải tiến để nhận biết rủi ro thời gian thực, thông qua việc tích hợp đánh giá rủi ro không gian liên tục với lập kế hoạch quỹ đạo động. Chỉ số SDF đã chuyển đổi thành công môi trường hàng hải phức tạp thành bản đồ rủi ro trực quan, cung cấp nhận thức tức thời về các khu vực an toàn và vùng nguy hiểm. Khả năng này cho phép thực hiện các biện pháp tránh va mang tính chủ động. Việc tích hợp bản đồ rủi ro vào thuật toán DWA đã tạo ra các quỹ đạo di chuyển thông minh và ổn định trong tình huống hàng hải phức tạp. Thông qua việc cân bằng tối ưu giữa tính an toàn, hiệu quả vận hành và sự tuân thủ quy tắc bằng hàm chi phí đa mục tiêu, thuật toán đã thực hiện hành trình an toàn, bảo toàn mọi biên giới hạn an toàn trong khi vẫn duy trì hướng tới mục tiêu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.15**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Gao, P.; Xu, P.; Cheng, H.; Zhou, X.; Zhu, D. (2023), *Hybrid path planning for unmanned surface vehicles in inland rivers based on collision avoidance regulations*, Sensors, Vol.23(19), p. 8326.
- [2] Zhang, Y.; Chen, P.; Chen, L.; Mou, J. (2023), *A path planning method for the autonomous ship in restricted bridge area based on anisotropic fast marching algorithm*, Ocean Engineering, Vol.269, p. 113546.
- [3] Liu, C.; Zhang, K.; He, Z.; Lai, L.; Chu, X. (2024), *Clustering Theta* based segmented path planning method for vessels in inland waterways*, Ocean Engineering, Vol.309, p. 118249.
- [4] Öztürk, Ü.; Akdağ, M.; Ayabakan, T. (2022), *A review of path planning algorithms in maritime autonomous surface ships: Navigation safety perspective*, Ocean Engineering, Vol.251, p. 111010.
- [5] Liu, C.; Mao, Q.; Chu, X.; Xie, S. (2019), *An improved A-star algorithm considering water current, traffic separation and berthing for vessel path planning*, Applied Sciences, Vol.9(6), p. 1057.
- [6] Gan, L.; Yan, Z.; Zhang, L.; Liu, K.; Zheng, Y.; Zhou, C.; Shu, Y. (2022), *Ship path planning based on safety potential field in inland rivers*, Ocean Engineering, Vol.260, p. 111928.
- [7] Cao, S.; Fan, P.; Yan, T.; Xie, C.; Deng, J.; Xu, F.; Shu, Y. (2022), *Inland waterway ship path planning based on improved RRT algorithm*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.10(10), p. 1460.
- [8] Xue, H. (2022), *A quasi-reflection based SC-PSO for ship path planning with grounding avoidance*, Ocean Engineering, Vol.247, p. 110772.
- [9] Wen, Y.; Sui, Z.; Zhou, C.; Xiao, C.; Chen, Q.; Han, D.; Zhang, Y. (2020), *Automatic ship route design between two ports: A data-driven method*, Applied Ocean Research, Vol.96, p. 102049.
- [10] Han, P.; Yang, X. (2020), *Big data-driven automatic generation of ship route planning in complex maritime environments*, Acta Oceanologica Sinica, Vol.39(8), pp.113-120.
- [11] Zhang, S.-K.; Shi, G.-Y.; Liu, Z.-J.; Zhao, Z.-W.; Wu, Z.-L. (2018), *Data-driven based automatic maritime routing from massive AIS trajectories in the face of disparity*, Ocean Engineering, Vol.155, pp.240-250.

- [12] Zhang, D.; Zhang, Y.; Zhang, C. (2021), *Data mining approach for automatic ship-route design for coastal seas using AIS trajectory clustering analysis*, Ocean Engineering, Vol.236, p. 109535.
- [13] Zucker, M.; Ratliff, N.; Dragan, A. D.; Pivtoraiko, M.; Klingensmith, M.; Dellin, C. M.; Bagnell, J. A.; Srinivasa, S. S. (2013), *CHOMP: Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning*, The International Journal of Robotics Research, Vol.32(9-10), pp.1164-1193.
- [14] Lai, Z.; Zhao, S.; Zhao, J.; Huang, L. (2022), *Signed distance field framework for unified DEM modeling of granular media with arbitrary particle shapes*, Computational Mechanics, Vol.70, pp.763-783.
- [15] Wang, N.; Gao, Y.; Zheng, Z.; Zhao, H.; Yin, J. (2018), *A hybrid path-planning scheme for an unmanned surface vehicle*, 2018 Eighth International Conference on Information Science and Technology, Cordoba, SPAIN, pp.231-236.
- [16] Xia, G.; Han, Z.; Zhao, B.; Wang, X. (2020), *Local path planning for unmanned surface vehicle collision avoidance based on modified quantum particle swarm optimization*, Complexity 2020, pp.1-15.
- [17] Han, S.; Wang, L.; Wang, Y.; He, H. (2022), *A dynamically hybrid path planning for unmanned surface vehicles based on non-uniform Theta* and improved dynamic windows approach*, Ocean Engineering, Vol.257, p. 111655.
- [18] Liu, S.; Wang, X.; Wu, Y.; Yan, J.; Levin, E. (2024), *Path planning method for USVs based on improved DWA and COLREGs*, Intelligence & Robotics, Vol.4(4), pp.385-405.

Ngày nhận bài:	07/01/2026
Ngày nhận bản sửa:	26/02/2026
Ngày duyệt đăng:	01/03/2026