

Đề xuất phương pháp mô hình hóa rủi ro va chạm tàu thuyền trong vận tải hàng hải dựa trên logic mờ có xem xét tới ảnh hưởng góc tiếp cận của tàu

Proposing a method to model ship collision risk in maritime transport based on fuzzy logic considering the influence of ship approach angle

Đặng Quốc Hải*, Đinh Gia Huy, Phạm Thái Hoàng

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

*Tác giả liên hệ: danghai25091984@gmail.com

Ngày nhận bài: 5/10/2023; Ngày chấp nhận đăng: 6/11/2023

Tóm tắt:

Việc mô hình hóa và nhận thức rủi ro va chạm tàu thuyền ở các vùng nước phức tạp đông đúc đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện giám sát và quản lý, nâng cao an toàn vận tải đường biển. Bài báo đề xuất một phương pháp mô hình hóa rủi ro va chạm tàu thuyền trong một khu vực dựa trên logic mờ có xem xét ảnh hưởng của góc tiếp cận giữa hai tàu. Phương pháp sử dụng hệ thống mờ phân cấp gồm hai hệ mờ với hệ mờ 1 dùng để tính toán rủi ro va chạm tạm thời, hệ mờ 2 dùng kết quả của hệ mờ 1 kết hợp với đầu vào là góc tiếp cận giữa hai tàu để tính toán rủi ro va chạm chính thức. Bài báo tập trung đề xuất phương pháp, riêng mô phỏng sẽ thực hiện trong nghiên cứu tiếp theo. Mô hình này có thể cung cấp cơ sở quan trọng cho công tác giám sát và đánh giá rủi ro va chạm hàng hải của tàu thuyền cho các cơ quan quản lý hàng hải.

Từ khoá: Va chạm hàng hải; Logic mờ; Rủi ro va chạm; Dữ liệu AIS.

Abstract:

Modeling and assessing the collision risk of ships in complex and crowded water areas plays an important role in improving marine traffic monitoring and management to enhance the safety of maritime transport. To model the collision risk assessment of ships in an area, this paper proposes a method to model ship collision risk based on fuzzy logic considering the influence of the approach angle between two ships. The method uses a hierarchical fuzzy system consisting of two fuzzy systems, fuzzy system 1 is used to calculate temporary collision risk, and fuzzy system 2 will use the output of fuzzy system 1 combined with input which is the approach angle between two ships to calculate the final collision risk. The fuzzy systems constructed in this paper are all modeled from expert knowledge allowing any officer to reference the calculation results of experts in approach situations. The paper only proposes the method, result verification can be done by simulation which will be done in further study. This model can provide an important basis for monitoring and assessing maritime collision risk and maritime risk assessment of ships for maritime administrations.

Keywords: Maritime collision risk; Fuzzy logic; Regional collision risk; AIS data.

1. Giới thiệu

Khoảng 80% khối lượng vận tải hàng hoá quốc tế trên thế giới được thực hiện bằng con đường vận tải đường biển [1], với số lượng và mức độ

phức tạp lớn của giao thông hàng hải, va chạm tàu thuyền là một trong những tai nạn phổ biến nhất trên thế giới, dẫn đến thiệt hại nghiêm trọng về nhân mạng và tài sản cũng như ô nhiễm môi trường biển. Để nâng cao an toàn vận tải

hàng hải của vùng nước ven bờ và cảng, nhiều quốc gia đã thiết lập hệ thống dịch vụ giao thông hàng hải (Vessel traffic system - VTS) để giám sát tình trạng hoạt động của tàu thuyền trong vùng nước thuộc phạm vi tài phán. Sự giám sát của VTS là một cơ sở hỗ trợ quan trọng để giảm thiểu tai nạn giao thông hàng hải. Hệ thống được trang bị thiết bị cảm biến, truyền thông và máy tính tiên tiến để thu thập dữ liệu giao thông hàng hải và tiến hành đánh giá tình huống, cung cấp hướng dẫn cho hoa tiêu. Trong đó, đánh giá rủi ro va chạm tàu thuyền khu vực trong vùng nước phức tạp là một chức năng quan trọng của VTS, đồng thời là công nghệ then chốt của giám sát trên bờ, có ý nghĩa rất lớn để đảm bảo an toàn giao thông hàng hải và phát triển thông minh của ngành Vận tải biển. Tuy nhiên, các trạm VTS chỉ hoạt động ven bờ, đối với các tàu hoạt động trên biển xa cũng tồn tại rất nhiều rủi ro, và việc đánh giá nguy cơ đâm va ở các khu vực vùng biển đông đúc chưa thực sự được quan tâm.

Bài báo này đề xuất một phương pháp mô hình hóa rủi ro va chạm tàu thuyền dựa trên logic mờ xem xét ảnh hưởng góc tiếp cận của tàu. Phương pháp này có thể được sử dụng cho việc đánh giá định lượng rủi ro hàng hải của tàu thuyền và hỗ trợ nhanh chóng, đồng thời, đóng vai trò nâng cao tinh thần cảnh giác cho sĩ quan trực ca.

2. Các nghiên cứu liên quan

Để giảm thiểu xảy ra các tai nạn va chạm tàu thuyền, các nhà khoa học trên thế giới đã tiến hành rất nhiều nghiên cứu về rủi ro va chạm tàu thuyền từ nhiều góc độ khác nhau, và đã đạt được kết quả nghiên cứu rất ấn tượng. Theo nội dung và phương pháp nghiên cứu được áp dụng, nhóm tác giả chia các nghiên cứu hiện có thành ba hướng tiếp cận.

2.1. Xác định rủi ro va chạm tàu thuyền dựa trên dữ liệu tai nạn lịch sử

Nghiên cứu về rủi ro va chạm tàu thuyền dựa trên dữ liệu tai nạn lịch sử chủ yếu sử dụng dữ

liệu tai nạn hàng hải lịch sử và các yếu tố va chạm của tàu thuyền để phân tích, thu được xác suất rủi ro. Fujii và cộng sự [2] thu được xác suất va chạm tàu thuyền bằng cách thống kê dữ liệu tai nạn lịch sử. Wan [3] sử dụng dữ liệu thu thập trong hai tháng, các thông tin về tiếp cận tàu thuyền, tốc độ gió và tầm nhìn làm biến kiểm soát và sử dụng mô hình Probit để vẽ phương trình trạng thái của rủi ro va chạm tàu thuyền. Wan thiết lập mô hình Probit có sắp xếp thứ hạng của mức độ nghiêm trọng va chạm giữa hai tàu bằng cách sử dụng dữ liệu tai nạn va chạm trong một thập kỷ trước đó, và kết luận rằng lỗi cảnh giới luôn đóng vai trò quyết định trong việc làm tăng rủi ro va chạm. Mandal và cộng sự [4] sử dụng dữ liệu AIS được thu thập trong ba tháng để tính toán rủi ro tàu thuyền bằng phương pháp định lượng sử dụng mô hình hồi quy Probit. Yu và cộng sự [5] sử dụng một lượng lớn dữ liệu lịch sử để đánh giá rủi ro va chạm dưới các điều kiện môi trường sử dụng mạng Bayesian.

Hướng nghiên cứu này đòi hỏi chất lượng dữ liệu cao và dữ liệu tai nạn va chạm đầy đủ để hỗ trợ độ chính xác của kết quả nghiên cứu. Đồng thời, các phương pháp nghiên cứu rủi ro va chạm tàu thuyền không thể giám sát rủi ro theo thời gian thực, và chỉ đánh giá trong khu vực vùng biển có dữ liệu lịch sử.

2.2. Xác định rủi ro dựa vào vùng nguy hiểm xung quanh tàu

Phương pháp chủ yếu là xác định các tàu thuyền khác có đe dọa đến tàu mục tiêu bằng cách lấy tàu làm trung tâm và có một vùng cảnh báo xung quanh (vùng nguy hiểm xung quanh tàu - ship domain). Davis và cộng sự [6] đề xuất khái niệm vùng nguy hiểm xung quanh tàu như một phạm vi cảnh báo rủi ro, khi sử dụng ship domain làm giới hạn cảnh báo tàu thuyền tiếp cận vào khu vực domain tức là nguy hiểm đã hiện diện. Dinh và cộng sự [7] đưa ra một phương pháp mới xác định ship domain nhỏ nhất, khi tàu mục tiêu tiếp cận domain này tức là khả năng va chạm rất lớn.

Hướng nghiên cứu đề cập chủ yếu xem xét rủi ro va chạm tàu thuyền từ góc độ tàu tiếp cận đơn lẻ.

2.3. Phương pháp dựa trên các thông số tránh va chạm

Phương pháp các thông số tránh va chạm chủ yếu là tính toán va chạm tàu thuyền bằng toán học. So với phân tích dữ liệu lịch sử, hướng nghiên cứu này dễ dàng thu thập dữ liệu và phát hiện rủi ro va chạm theo thời gian thực. Lisowski và cộng sự [8], Szlapczynski [9] sử dụng chuẩn Euler để tính toán rủi ro va chạm. Zhen và cộng sự [10] lần đầu tiên phân cụm dữ liệu AIS để thu được cụm tiếp cận tàu, và sử dụng hàm toán học để biểu thị mối quan hệ giữa DCPA, TCPA và rủi ro va chạm. Gang và cộng sự [11] sử dụng phương pháp đánh giá toàn diện mờ để tính toán chỉ số rủi ro va chạm, trong đó, các tham số là DCPA, TCPA, khoảng cách, hướng tương đối và tỷ lệ tốc độ. Do các yếu tố không chắc chắn khác nhau của tàu khi đi biển, một số nhà nghiên cứu sử dụng phương pháp xác suất để mô hình hóa rủi ro va chạm tàu thuyền. Xin và cộng sự [12] sử dụng dữ liệu AIS để định lượng sự không chắc chắn của quỹ đạo tàu, xác định hàm mật độ của phân bố quỹ đạo tàu, và sau đó dự đoán rủi ro va chạm tàu. Các phương pháp mô hình hóa khác như logic mờ [13], quy trình phân tích thứ bậc [14], phương pháp yếu tố vật cản tốc độ [15] sử dụng gián tiếp DCPA hoặc TCPA mô hình hóa. Zhao và cộng sự [16] cải thiện độ chính xác của việc xác định rủi ro va chạm bằng cách sử dụng phương pháp yếu tố vật cản, tốc độ và tối ưu hóa các yếu tố vận tốc từ nghiên cứu của các nhà khoa học trước.

Hướng tiếp cận này xem xét thông tin động của tàu và có thể phản ánh rủi ro va chạm của tàu theo thời gian thực, đây cũng là phương pháp nghiên cứu rủi ro phổ biến gần đây. Tuy nhiên, nhược điểm của các nghiên cứu này là không xem xét ảnh hưởng của môi trường tự nhiên đến rủi ro va chạm tàu thuyền và hậu quả của va chạm tàu thuyền, một số nghiên cứu chỉ

xem xét rủi ro va chạm đơn tàu không xem xét rủi ro nhiều tàu. Khi môi trường xung quanh đông đúc và phức tạp, sự tiếp cận lẫn nhau của nhiều tàu có thể mất kiểm soát, dẫn đến tăng rủi ro va chạm một cách nhanh chóng, nhưng các mô hình hiện có không thể giải quyết các tình huống như vậy hoặc chỉ một phần.

Logic mờ có khả năng bắt chước sự phán đoán và lập luận không chắc chắn của bộ não con người. Nó sử dụng kinh nghiệm của con người để thu được kết quả và được ứng dụng rộng rãi trong đánh giá rủi ro giao thông vận tải hàng hải. Do đó, bài báo này trình bày một phương pháp rủi ro va chạm tàu thuyền khu vực dựa trên logic mờ.

Logic mờ sử dụng khái niệm hàm thành viên để xử lý các quan hệ đầu vào và mô phỏng bộ não con người nhằm thực hiện các lập luận (nếu...thì...) dựa trên quy tắc. Do các rủi ro của tàu chủ yếu do yếu tố con người gây ra, và kinh nghiệm điều khiển tàu phong phú, việc phán đoán và xử lý các rủi ro tàu phải đối mặt dễ dàng hơn. Do đó, logic mờ mô phỏng bộ não con người để thực hiện lập luận theo quy tắc được mô hình hoá để cảnh báo rủi ro va chạm tàu thuyền một cách tự động và liên tục.

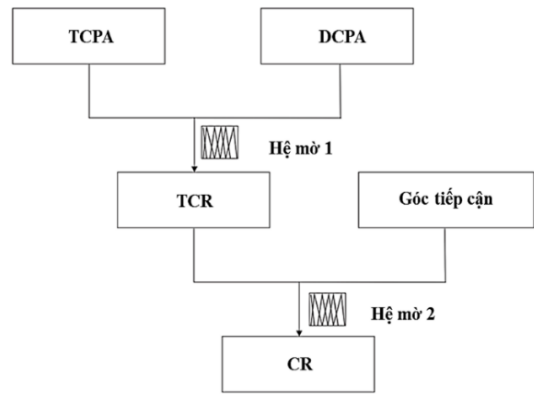
Nghiên cứu áp dụng phương pháp logic mờ có lợi thế trong việc định lượng rủi ro va chạm của tàu thuyền với nhiều điều kiện hoạt động khác nhau.

3. Đề xuất mô hình hoá đánh giá rủi ro va chạm tàu thuyền sử dụng logic mờ

Bài báo đề xuất phương pháp mô hình hoá đánh giá rủi ro va chạm tàu thuyền dựa vào việc xây dựng hệ thống mờ phân cấp (Hierarchical Fuzzy System) (Hình 1). Xây dựng hệ mờ 1 với đầu vào là thời gian tới cận điểm (Time to Closest Point of Approach – TCPA) và khoảng cách tới cận điểm (Distance to Closest Point of Approach – DCPA), đầu ra là rủi ro tạm thời (Temporary Collision Risk – TCR). Sử dụng kết quả Temporary Collision Risk làm đầu vào cùng với góc tiếp cận cho hệ mờ 2. Hệ mờ 2 cho

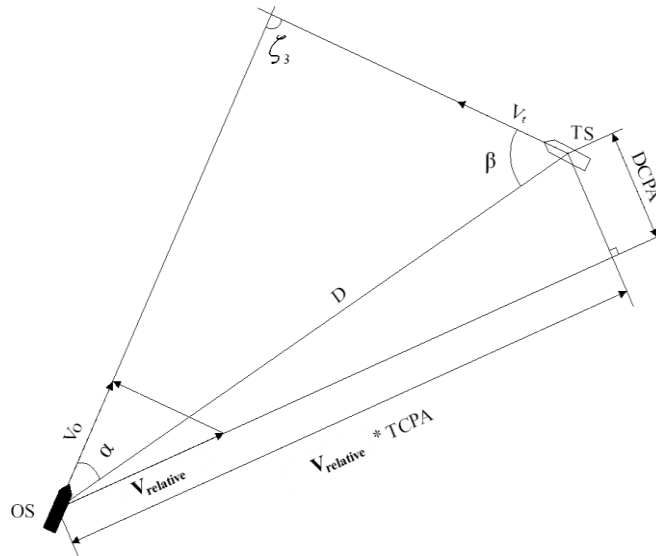
ra kết quả là rủi ro va chạm cuối cùng (Collision Risk - CR).

Ưu điểm của phương pháp này là giảm số luật logic cần xây dựng cho mỗi hệ mờ lẻ, dễ dàng hơn trong việc tinh chỉnh từng hệ mờ con, kết hợp được nhiều thông tin đầu vào liên quan để đưa ra dự báo chính xác hơn. Nhìn chung, đây là cách tiếp cận khả thi và hiệu quả để xây dựng hệ thống logic mờ dự báo rủi ro va chạm.



Hình 1. Hệ thống mờ phân cấp tính toán CR.

3.1. Tính toán thời gian tới cận điểm (TCPA) và khoảng cách tới cận điểm (DCPA)



Hình 2. DCPA và TCPA trong tình huống tiếp cận giữa 2 tàu.

Trong phần này, việc tính toán hai thông số đầu vào cho bộ Fuzzy là TCPA và DCPA được thực hiện liên tục theo thời gian thực. Cách xác định DCPA và TCPA có thể được mô tả bằng Hình 2, trong đó, V_o là vận tốc của tàu chủ, V_t là vận tốc của tàu mục tiêu, D là khoảng cách từ tàu chủ đến tàu mục tiêu, α là góc tương đối của tàu mục tiêu so với tàu chủ và β là góc tương đối của tàu chủ so với tàu mục tiêu. Trong nghiên cứu của Đinh và cộng sự [13] đã chứng minh và sử dụng công thức sau để tính toán:

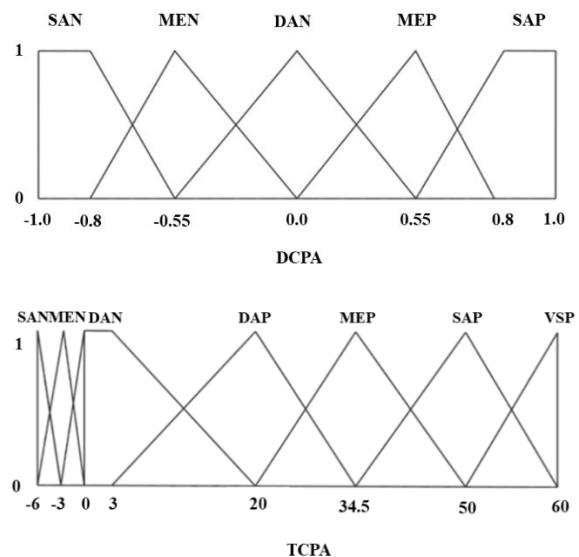
$$DCPA = \frac{D(V_o \sin \alpha - V_t \sin \beta)}{\sqrt{V_o^2 + V_t^2 + 2V_o V_t \cos(\alpha + \beta)}} \quad (1)$$

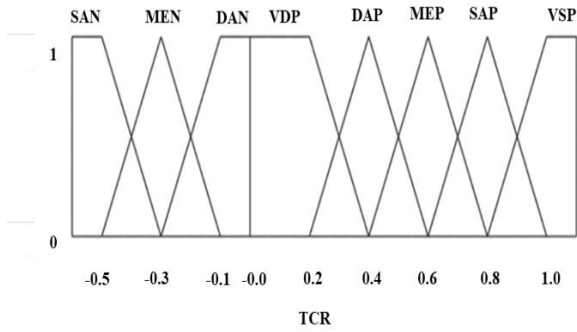
$$TCPA = \frac{D(V_o \cos \alpha - V_t \cos \beta)}{V_o^2 + V_t^2 + 2V_o V_t \cos(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

Kết quả tính toán DCPA và TCPA được làm đầu vào để tính toán rủi ro tạm thời (Temporary Collision Risk - TCR)

3.2. Xây dựng hệ mờ 1 đánh giá nguy cơ đâm va tạm thời (TCR)

Hệ mờ được sử dụng ở đây theo nghiên cứu của Đinh và cộng sự [13] được thể hiện tại Hình 3.





TCPA		DCPA							
		SAN	MEN	DAN	VDP	DAP	MEP	SAP	VSP
DCPA	SAN	SAN	SAN	SAN	SAP	SAP	VSP	VSP	VSP
	MEN	SAN	MEN	DAN	DAP	MEP	SAP	VSP	VSP
	DAN	SAN	MEN	DAN	VDP	DAP	MEP	SAP	VSP
	MEP	SAN	MEN	DAN	DAP	MEP	SAP	VSP	VSP
	SAP	SAN	SAN	SAN	SAP	SAP	VSP	VSP	VSP

Hình 3. Hệ mờ 1 tính toán TCR.

Trong đó:

SA: An toàn;

ME: Trung bình;

DA: Nguy hiểm;

VD: Rất nguy hiểm;

Các chữ cái N, P phía sau biểu thị giá trị âm (Negative) và dương (Positive). Trong các hệ thống mờ dựa trên luật, mối quan hệ giữa các biến được biểu diễn bằng các luật mờ ở dạng:

- Nếu DCPA ở mức SAN và TCPA ở mức SAN thì CR ở mức SAN;

- Nếu DCPA ở mức SAP và TCPA ở mức VSP thì CR ở mức VSP.

Kết hợp biến ngôn ngữ bằng công thức (3):

$$\mu(x, y) = I(\mu_A(x), \mu_B(y)) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3)$$

Trong đó:

μ_A, μ_B : Hàm tư cách thành viên của biến ngôn ngữ A, B khi có đầu vào x, y;

x, y: Giá trị đầu vào.

Giải mờ bằng phương trình trọng tâm (4) như sau:

$$CR = cog(C) = \frac{\sum_{j=1}^F \mu_C(cr_j) cr_j}{\sum_{j=1}^F \mu_C(cr_j)} \quad (4)$$

Với:

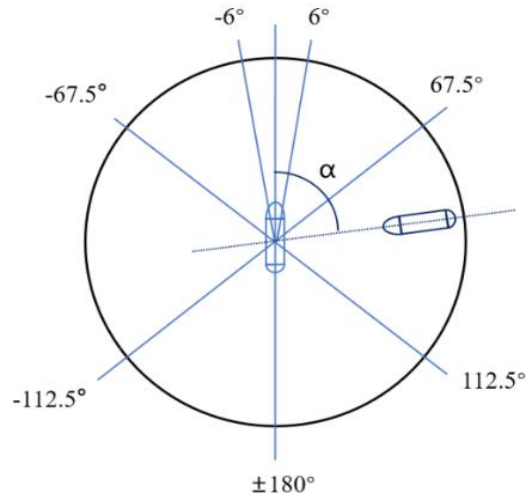
μ_C : Hàm tư cách thành viên của các biến ngôn ngữ nói chung;

cr_j : Tọa độ trọng tâm của biến ngôn ngữ thứ j.

Như vậy, phương pháp giải mờ Center of Gravity (COG) được sử dụng để tính toán TCR thông qua hệ mờ.

3.3. Xây dựng hệ mờ 2 đánh giá nguy cơ đâm va (CR)

Các góc tiếp cận của tàu mục tiêu (Target ship – TS) so với tàu chủ (Own ship – OS) được mô tả như Hình 4.



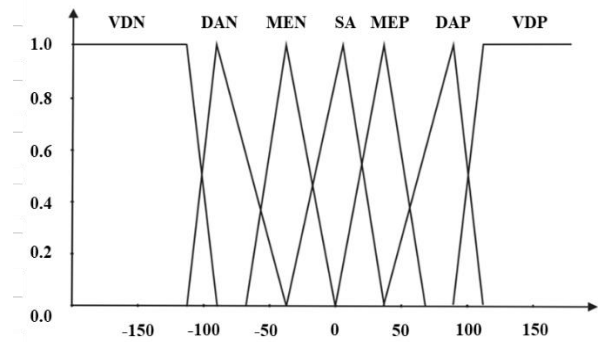
Hình 4. Góc tiếp cận của tàu mục tiêu.

Các góc giao cắt tàu khác nhau trong va chạm giữa hai tàu có những tác động khác nhau đến tàu. Giả sử rằng, góc giao cắt tàu liên quan đến vị trí va chạm của tàu. Lei và cộng sự thông qua mô phỏng phần tử hữu hạn và đánh giá rủi ro kết luận rằng phần nghiêm trọng nhất của hậu quả va chạm là cabin đuôi tàu, tiếp theo là khoang hàng tàu, và ít gây hại nhất là mũi tàu [17]. Trong nghiên cứu này, dựa trên bản đồ tình huống tiếp cận tàu điển hình (Hình 4) do Feng và cộng sự đề xuất [18], làm ranh giới khu

vực va chạm. Giả sử các góc va chạm $112,5^\circ \sim 180^\circ$ và $-112,5^\circ \sim -180^\circ$ là phần đuôi tàu bị va chạm, giữa $\pm 67,5^\circ \sim \pm 112,5^\circ$ và giữa $\pm 6^\circ \sim \pm 67,5^\circ$ là phần giữa tàu bị va chạm, và giữa $-6^\circ \sim 6^\circ$ là phần mũi tàu bị va chạm. Các giá trị ngôn ngữ mờ của góc va chạm được định nghĩa như sau: $S = (-37,6,6,37)$, $M = (0, \pm 37, \pm 67,5)$, $B = (\pm 37, \pm 90, \pm 112,5)$, $VB = (\pm 90, \pm 112,5, \pm 180, \pm 180)$. Hàm thành viên được thể hiện trong Hình 5.

Như vậy, với các hàm ngôn ngữ đầu vào đã được xây dựng cho góc tiếp cận và sử dụng làm biến đầu vào thứ nhất cho hệ mờ 2. Biến đầu vào thứ hai chính là biến đầu ra ở hệ mờ 1, TCR được sử dụng làm biến đầu vào cho hệ mờ 2. Ngoài ra, hàm ngôn ngữ rủi ro va chạm (Collision Risk - CR) chính thức cũng tương tự

như hàm ngôn ngữ TCR ở đầu ra. Luật suy diễn được đề xuất dựa vào các nghiên cứu ý kiến chuyên gia trong lĩnh vực điều khiển tàu biển được thể hiện như trong Bảng 1. Phương pháp giải mờ được sử dụng công thức (3) và phương trình (4) như đối với hệ mờ 1.



Hình 5. Hàm ngôn ngữ góc tiếp cận.

Bảng 1. Luật suy diễn mờ cho hệ mờ 2.

TCR \ GRA	SAN	MEN	DAN	VDP	MEP	SAP	VSP
VDN	MEN	DAN	DAN	VDP	VDP	MEP	MEP
DAN	MEN	DAN	DAN	VDP	VDP	MEP	MEP
MEN	SAN	MEN	DAN	VDP	MEP	SAP	VSP
SA	SAN	SAN	MEN	VDP	MEP	SAP	VSP
MEP	SAN	MEN	DAN	VDP	MEP	SAP	VSP
DAP	MEN	DAN	DAN	VDP	VDP	MEP	MEP
VDP	MEN	DAN	DAN	VDP	VDP	MEP	MEP

4. Kết luận

Bài báo đã đề xuất một phương pháp mới để mô hình hóa và đánh giá rủi ro va chạm của tàu thuyền trong một khu vực cụ thể dựa trên lý thuyết logic mờ. Phương pháp sử dụng hệ thống logic mờ phân cấp gồm hai hệ con, trong đó, hệ con thứ nhất tính toán rủi ro va chạm tạm thời từ các thông số TCPA và DCPA, hệ con thứ hai kết hợp kết quả với góc tiếp cận giữa hai tàu để đưa ra nhận định rủi ro va chạm cuối cùng. Ưu điểm của phương pháp này là có thể mô hình hóa được các luật đánh giá rủi ro dựa trên kiến thức và kinh nghiệm của các chuyên gia hàng hải, đồng thời kết hợp yếu tố ảnh hưởng góc tiếp

cận để nâng cao độ chính xác. Kết quả nghiên cứu có thể cung cấp cơ sở khoa học cho công tác giám sát an toàn hàng hải và quản lý giao thông tàu thuyền tại các khu vực vùng biển đông đúc. Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình đề xuất được kiểm định với dữ liệu thực tế và mô phỏng để hoàn thiện hơn.

Tài liệu tham khảo

[1] *Review of maritime transport*, United Nations Conference on Trade and Development, 2020. [Online]. Available: <https://unctad.org/topic/transport-and-trade-logistics/review-of-maritime-transport>.

- [2] Y. Fujii and R. Shiobara, "The Analysis of Traffic Accidents," *J. of Nav.*, vol. 24, no. 4, pp. 534–543, Oct. 1971, doi: 10.1017/s0373463300022372.
- [3] P. Wan, "Risk Degree Analysis of ship collision risk in channel based on ordered Probit model," *China Saf. Sci. J.*, Jan. 2012, [Online]. Available: <http://www.cssjj.com.cn/EN/Y2012/V22/I2/134>.
- [4] S. Mandal, V. Nagarajan, and O. P. Sha, "Navigational safety and traffic pattern analysis using AIS data on the western coast of India," *Cur. Sci.*, vol. 114, no. 12, Jun. 2018, Art. no. 2473, doi: 10.18520/cs/v114/i12/2473-2481.
- [5] Q. Yu, K. Liu, Z. Yang, H. Wang, and Z. Yang, "Geometrical risk evaluation of the collisions between ships and offshore installations using rule-based Bayesian reasoning," *Rel. Eng. & Sys. Saf.*, vol. 210, Jun. 2021, Art. no. 107474, doi: 10.1016/j.ress.2021.107474.
- [6] P. V. Davis, M. J. Dove, and C. T. Stockel, "A computer simulation of marine traffic using domains and arenas," *J. of Nav.*, vol. 33, no. 2, pp. 215–222, May 1980, doi: 10.1017/s0373463300035220.
- [7] G. H. Dinh and N.-K. Im, "The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area," *Int. J. of e-Nav. and Mar. Eco.*, vol. 4, pp. 97–108, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.enavi.2016.06.009.
- [8] J. Lisowski, "Game control of moving objects," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 35, no. 1, pp. 373–378, Jan. 2002, doi: 10.3182/20020721-6-es-1901.01287.
- [9] R. Szłapczyński, "A Unified Measure Of Collision Risk Derived From The Concept Of A Ship Domain," *J. of Nav.*, vol. 59, no. 3, pp. 477–490, Aug. 2006, doi: 10.1017/s0373463306003833.
- [10] Z. Rong, M. Riveiro, and Y. Jin, "A novel analytic framework of real-time multi-vessel collision risk assessment for maritime traffic surveillance," *Ocean Eng.*, vol. 145, pp. 492–501, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.015.
- [11] G. Liu, Y. Wang, Y. Sun, L. Zhou, and M. Zhang, "Estimation of vessel collision risk index based on support vector machine," *Adv. in Mech. Eng.*, vol. 8, no. 11, Nov. 2016, Art. no. 168781401667125, doi: 10.1177/1687814016671250.
- [12] X. Xin *et al.*, "A probabilistic risk approach for the collision detection of multi-ships under spatiotemporal movement uncertainty," *Rel. Eng. & Syst. Saf.*, vol. 215, Nov. 2021, Art. no. 107772, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107772>.
- [13] G. H. Dinh and N.-K. Im, "A study on the construction of stage discrimination model and consecutive waypoints generation method for ship's automatic avoiding action," *Int. J. of Fuz. Log. and Intell. Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 294–306, Dec. 2017, doi: 10.5391/ijfis.2017.17.4.294.
- [14] Y. Zhao, W. Li, and P. Shi, "A real-time collision avoidance learning system for Unmanned Surface Vessels," *Neurocomputing*, vol. 182, pp. 255–266, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.neucom.2015.12.028.
- [15] Y. Huang, P. Van Gelder, and Y. Wen, "Velocity obstacle algorithms for collision prevention at sea," *Ocean Eng.*, vol. 151, pp. 308–321, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.001.
- [16] L. Zhao and X. Fu, "A novel index for real-time ship collision risk assessment based on velocity obstacle considering dimension data from AIS," *Ocean Eng.*, vol. 240, Nov. 2021, Art. no. 109913, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109913.
- [17] Z. Lei *et al.*, "Research on defining the dangerous zone of ship collision damage," *J. of Wuhan Uni. of Tech. (Transportation Science and Engineering)*, vol. 42, no. 02, pp. 292–297, Feb. 2018, doi: 10.3963/j.issn.2095-3844.2018.02.025.
- [18] S. Feng *et al.*, "A Study of Test Methods and Indicators for Marine Intelligent Anti-collision Strategy," *J. of Transp. Inf. and Saf.*, vol. 37, no. 05, pp. 84–93, Oct. 2019, doi: 10.3963/j.issn.1674-4861.2019.05.012.