

NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP TẾ BÀO TỰ ĐỘNG VÀ THUẬT TOÁN BAYES ĐỂ MÔ PHỎNG LUỒNG GIAO THÔNG HÀNG HẢI

STUDY ON THE APPLICATION OF CELLULAR AUTOMATA METHOD AND
BAYESIAN ALGORITHM TO SIMULATE MARITIME TRAFFIC FLOW

NGUYỄN THANH TÙNG*, MAI XUÂN HƯƠNG, NGUYỄN TRUNG CHÍNH

Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: tungnt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo đề xuất một phương pháp mô phỏng luồng giao thông hàng hải bằng cách kết hợp tế bào tự động (Cellular Automata - CA) và thuật toán Bayes, nhằm nâng cao độ chính xác trong dự báo và phân tích các mô hình di chuyển của tàu thuyền. Mô hình CA được sử dụng để mô phỏng động lực học không gian - tuần tự của các tàu thuyền, trong khi thuật toán Bayes giúp xử lý tính bất định và cập nhật xác suất dựa trên dữ liệu thực tế thu được từ Hệ thống nhận dạng tự động (Automatic Identification System - AIS). Mô hình kết hợp CA-Bayes cho phép tận dụng ưu điểm của cả hai phương pháp và phản ánh chính xác hoạt động của tàu thuyền trong khu vực nghiên cứu. Mô hình được thử nghiệm và so sánh với dữ liệu AIS tại cảng Dafeng, Trung Quốc.

Từ khóa: Tế bào tự động, thuật toán Bayes, luồng giao thông hàng hải, dữ liệu AIS.

Abstract

This article propose a novel approach to simulate complex maritime traffic flow by combining Cellular Automata (CA) and Bayesian algorithms, aiming to enhance the predictive accuracy and analytical capabilities for ship movement patterns. The CA model is employed to simulate the spatio-temporal dynamics of vessels, while the Bayesian algorithm addresses uncertainties and updates probabilities based on real-world data from the Automatic Identification System (AIS). The integrated CA-Bayes model leverage the strength of both approaches, enabling a more accurate representation of ship behavior in the study area. The model was tested and validated against AIS data from Defeng Port, China.

Keywords: Cellular Automata, Bayesian Algorithm, Maritime Traffic Flow, AIS Data.

1. Mở đầu

Với sự tăng lên của nhu cầu thương mại quốc tế trong bối cảnh toàn cầu hóa hiện nay, các tuyến đường hàng hải, đặc biệt là các kênh luồng hàng hải đứng trước áp lực lớn để duy trì khả năng vận hành một cách an toàn và hiệu quả. Sự gia tăng của mật độ tàu thuyền qua lại, biến động khó lường của thời tiết, hay hạn chế về hạ tầng kỹ thuật như độ sâu luồng lạch, cầu cảng chật hẹp,... đã tạo ra bài toán nan giải cho các nhà quản lý. Việc không xử lý tốt lưu lượng tàu có thể dẫn đến sự ùn tắc, chậm trễ lịch trình, thậm chí còn tiềm ẩn rủi ro tai nạn nghiêm trọng, ảnh hưởng đến an ninh hàng hải và môi trường. Từ thực tế này, việc xây dựng các mô hình mô phỏng chính xác để dự báo và quản lý luồng giao thông trở thành yêu cầu cấp thiết.

Một số mô hình sử dụng các công thức kinh nghiệm để tính toán năng lực thông qua cho các luồng sông nội địa hoặc kênh đào [1], hay mô hình lý thuyết như lý thuyết hàng đợi (queuing theory) [2] và lý thuyết theo đuôi (car-following theory) [3, 4]. Các mô hình này tuy hữu ích nhưng tồn tại những hạn chế như: Không phản ánh được biến động thời gian thực của môi trường như tai nạn bất ngờ, hành vi con người; ngoài ra các mô hình này đều coi toàn bộ luồng hàng hải như một thể đồng nhất, không phân biệt các đoạn luồng đặc thù như: Khu vực hay xảy ra tai nạn, khu vực giao cắt, khu vực cong.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất một hướng tiếp cận mới, kết hợp giữa Tế bào tự động (Cellular Automata - CA) và thuật toán Bayes để tạo ra mô hình mô phỏng linh hoạt và thực tế hơn. Trong đó, phương pháp Tế bào tự động sử dụng hệ thống cấu trúc lưới rời rạc và các quy tắc cập nhật theo trạng thái theo từng bước thời gian, cho phép vẽ lại chân thực cách các tàu di chuyển, tránh nhau, hoặc phản ứng với các vật cản hay sự cố trong kênh hàng hải, cũng như phản ánh với các đoạn luồng phức tạp như đoạn luồng cong, khu vực giao cắt, khu vực luồng lạch hẹp [5, 6, 7]. Bên cạnh đó, phương pháp dùng thuật toán Bayes đóng vai trò xử lý thông tin, cung cấp khung lý thuyết xác suất để giúp tích hợp các nguồn dữ liệu như dữ

liệu từ Hệ thống nhận dạng tự động AIS vào mô hình [8]. Tại Việt Nam, phương pháp tế bào tự động từng được sử dụng trong nghiên cứu biến đổi địa hình khu vực sông Cỏ [9] hay mô phỏng chuyển động của luồng giao thông đường bộ [10]. Thuật toán Bayes cũng hay được sử dụng khi tính toán đánh giá nguyên nhân đâm va của tàu thuyền [11].

Phương pháp kết hợp CA-Bayes này cho phép các quy tắc di chuyển của tàu trong CA được điều chỉnh linh hoạt dựa trên xác suất được tính toán từ bộ lọc Bayes (Bayesian filtering), cho phép mô phỏng các kịch bản phức tạp như tránh né tàu, phản ứng với thay đổi môi trường. Ví dụ như khi hệ thống Bayes tính toán xác suất xuất hiện khu vực sắp xảy ra ùn tắc do một yếu tố bất ngờ, mô hình CA sẽ ngay lập tức điều chỉnh lộ trình của các tàu ảo để tránh khu vực đó, mô phỏng cách thức điều phối viên hàng hải đưa ra quyết định trong thực tế.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp

2.1. Phương pháp tế bào tự động (CA)

Phương pháp CA là mô hình toán rời rạc gồm một lưới các ô (cells) với mỗi ô có trạng thái xác định và thay đổi theo quy tắc cập nhật dựa trên trạng thái của chính nó và các ô lân cận.

Mô hình luồng hàng hải được xây dựng trên cơ sở phương pháp CA bao gồm các thành phần sau:

Một mạng lưới 2D: Mô phỏng luồng hàng hải, trong đó luồng hàng hải được chia thành các ô (cell) có kích thước cố định (ví dụ: Mỗi ô = 50m chiều rộng x 100m chiều dài).

Tập trạng thái: $S = \{0,1\}$ (0: Ô trống, 1: Ô bị chiếm bởi tàu).

Lân cận (Neighborhood):

- *Lân cận Von Neumann (4 hướng):* Bao gồm 4 ô liền kề theo trục ngang/dọc. Kiểu lân cận này phù hợp với mô phỏng chuyển động đơn hướng như tàu chỉ di chuyển tiến, lùi, trái, phải) [12].

- *Lân cận Moore (8 hướng):* Bao gồm 8 ô xung quanh, cả chéo. Kiểu lân cận này phù hợp cho mô phỏng chuyển động đa hướng phức tạp như khi tàu xoay hướng, tránh vật cản [13].

Quy tắc cập nhật:

Ô (i,j) có trạng thái $s_{(i,j)}^t \in \{0,1\}$, trạng thái tại thời điểm $t+1$ được cập nhật phụ thuộc vào trạng thái hiện tại và các ô lân cận, cụ thể như sau:

Bước 1: Xác định hướng di chuyển:

CA sử dụng một Ma trận chuyển hướng dạng hình vuông $N \times N$, với N là số hướng có thể di chuyển (8 hướng trong lân cận Moore). Mỗi phần tử P_{ij} trong ma

trận biểu thị xác suất để tàu chuyển từ hướng i sang hướng j . Tổng các phần tử trên mỗi hàng bằng 1. Ma trận tổng quát có dạng sau:

$$P = \begin{bmatrix} P_{0^\circ \rightarrow 0^\circ} & P_{0^\circ \rightarrow 45^\circ} & \cdots & P_{0^\circ \rightarrow 315^\circ} \\ P_{45^\circ \rightarrow 0^\circ} & P_{45^\circ \rightarrow 45^\circ} & \cdots & P_{45^\circ \rightarrow 315^\circ} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{315^\circ \rightarrow 0^\circ} & P_{315^\circ \rightarrow 45^\circ} & \cdots & P_{315^\circ \rightarrow 315^\circ} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Tàu tại (i,j) có thể di chuyển sang một trong các ô lân cận trống với xác suất ưu tiên theo hướng mục tiêu.

Ví dụ:

- Hướng ưu tiên: Hướng Bắc (đi lên) $\rightarrow$ Xác suất chọn: $P_{up} = 0,6$.

- Các hướng khác: $P_{other} = \frac{0,4}{7} \approx 0,057$

Tuy nhiên trên thực tế tàu sẽ có xác suất rẽ trái, phải nhẹ (hướng 45° hoặc thấp hơn so với hướng ban đầu) cao hơn mức trên (0.15), và các hướng còn lại là rất thấp (trừ trường hợp khẩn cấp). Do đó ma trận chuyển hướng trong trường hợp này trở thành:

$$P = \begin{bmatrix} 0,6 & 0,15 & 0,05 & 0 & \cdots & 0 & 0,15 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

(Tàu có 60% giữ hướng Bắc, 15% chuyển hướng Đông Bắc hoặc Tây Bắc, 5% chuyển hướng Đông hoặc Tây)

Bước 2: Tránh va chạm

Nếu nhiều tàu cùng hướng đến một ô trống, chỉ 1 tàu được chọn ngẫu nhiên.

$$s_{(i,j)}^{t+1} = \begin{cases} 1 & (\text{nếu được chọn}) \\ 0 & (\text{nếu không}) \end{cases} \quad (3)$$

Bước 3: Tính tốc độ và áp dụng nhiễu:

Do luồng hàng hải được phân đoạn thành các khu vực với hình dạng khác nhau, nên quy tắc cập nhật sẽ được bổ sung như sau:

- Đối với đoạn kênh thẳng: Áp dụng quy tắc di chuyển cơ bản, tốc độ ổn định, có thể áp dụng mô hình Nagel-Schreckenberg cải tiến [14]:

+ Tăng tốc nếu khoảng cách an toàn đủ lớn.

+ Giảm tốc nếu đến gần tàu khác.

+ Áp dụng quy tắc nhiễu ngẫu nhiên: Thêm xác suất giảm tốc độ để mô phỏng hành vi lái tàu thực tế, ví dụ với $P_{slow} = 0,2$ sẽ khiến cho tốc độ tàu có xác suất 20% giảm 1 đơn vị so với tốc độ hiện tại.

- Đối với đoạn cong, hoặc đoạn giao cắt, giao thông phức tạp: Thiết lập vùng cảnh giác (Warning zones) với quy tắc giảm tốc độ:

$$v_{curve} = \frac{v_{straight}}{1 + \alpha \times \kappa} \quad (4)$$

Trong đó:

- α : Hệ số an toàn (0,1-0,3). Hệ số này được xác định từ thử nghiệm mô phỏng các kịch bản va chạm tại đoạn cong PQ:

+ Nếu $\alpha < 0,1$: Tốc độ giảm không đủ, tỉ lệ va chạm $> 10\%$.

+ Nếu $\alpha > 0,3$: Tốc độ giảm quá mức, gây ùn tắc cục bộ.

- κ : Độ cong của luồng. Được xác định bằng bán kính cong của luồng $\kappa = 1/R$ (R: Bán kính cong của luồng tính bằng số ô).

- Công thức tổng quát:

Trạng thái mới của ô (i, j) phụ thuộc vào trạng thái của lân cận Moore và quy tắc ưu tiên:

$$s_{(i,j)}^{t+1} = f\left(\sum_{(k,l) \in N_{(i,j)}} \omega_{(k,l)} \cdot s_{(k,l)}^t\right) \quad (5)$$

Trong đó:

- $\omega_{(k,l)}$: Trọng số ưu tiên hướng tương ứng với ô (k, l) ;

- f : Hàm kích hoạt (Ví dụ: $f(x) = 1$ nếu $x > 0,5$).

2.2. Thuật toán Bayes trong xử lý bất định

Phương pháp Bayes cung cấp một khung toán học để xử lý tính bất định trong mô phỏng hàng hải thông qua việc cập nhật xác suất dựa trên dữ liệu quan sát.

Định lý Bayes được biểu diễn như sau[11]:

$$P(H|E) = \frac{P(E|H) \cdot P(H)}{P(E)} \quad (6)$$

Trong đó:

- $P(H|E)$: Xác suất hậu nghiệm (posterior) của giả thuyết H sau khi quan sát bằng chứng E .

- $P(H)$: Xác suất tiên nghiệm (prior) của H trước khi có dữ liệu.

- $P(E|H)$: Likelihood - Xác suất quan sát E nếu H đúng.

Phương pháp Bayes sử dụng để xử lý 2 yếu tố chính trong mô phỏng luồng hàng hải: Tốc độ và Hướng đi.

Đối với tốc độ, phương pháp này tích hợp các thông số mật độ luồng, khoảng cách an toàn và tốc độ hiện tại để điều chỉnh tốc độ tàu, giảm thiểu rủi ro va chạm. Dưới đây là *Công thức Bayes cho xác suất giảm tốc H_{slow}* :

$$P(H_{slow}|D, d, v) = \frac{P(D, d, v|H_{slow}) \cdot P(H_{slow})}{P(D, d, v)} \quad (7)$$

Biến đầu vào:

D : Mật độ tàu (số tàu/ô trong bán kính n ô);

d : Khoảng cách đến tàu phía trước (ô, tính theo hướng di chuyển);

v : Tốc độ hiện tại (ô/bước);

Xác suất tiên nghiệm $H_{slow} = 0,2$ dựa trên kinh nghiệm hoặc dữ liệu lịch sử.

Likelihood tỉ lệ tương đối với D, d theo công thức:

$$P(D, d, v|H_{slow}) \propto e^{\alpha D + \beta \cdot \frac{1}{d}} \quad (8)$$

Trong đó α và β là hệ số an toàn tương ứng cho mật độ tàu và khoảng cách, hệ số này được xác định bằng phương pháp thử công và điều chỉnh dựa trên dữ liệu AIS và kết quả mô phỏng. Khi mật độ tàu D tăng giá trị hàm mũ tăng sẽ khiến Likelihood giảm tốc cao hơn và ngược lại. Khi khoảng cách d giảm, giá trị hàm mũ tăng, Likelihood giảm tốc tăng cao.

Đối với chuyển hướng, dựa trên hướng hiện tại của tàu và điều kiện môi trường (vật cản, hướng tàu khác) có thể sử dụng *Công thức Bayes cho xác suất chuyển hướng* như sau:

$$P(\theta_{out}|\theta_{in}, E) = \frac{P(E|\theta_{out}) \cdot P(\theta_{out}|\theta_{in})}{P(E)} \quad (9)$$

Biến đầu vào:

- θ_{in} : Hướng hiện tại;

- E : Sự kiện môi trường (ví dụ: Vật cản ở hướng dự định).

Công thức (9) sẽ trực tiếp tác động vào Ma trận chuyển hướng của tàu, làm thay đổi xác suất chuyển hướng của tàu sang hướng mới phù hợp hơn. Ví dụ khi $\theta_{in} = 0^\circ$ và vật cản xuất hiện thì $P(\theta_{out} = 45^\circ|\theta_{in}, E)$ trong (2) tăng từ 0,15 lên 0,3.

2.3. Kết hợp CA và Bayes trong mô phỏng luồng hàng hải

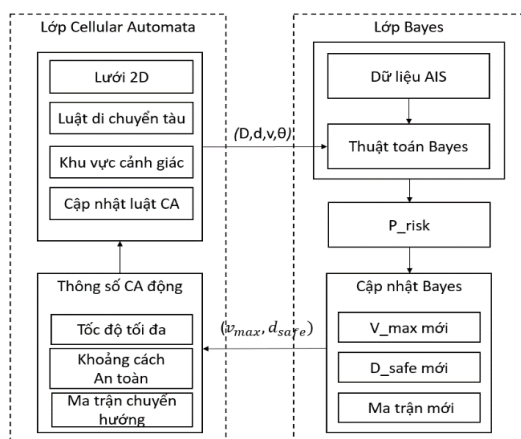
Mô hình lai kết hợp CA - Bayes tận dụng ưu điểm xử lý không - thời gian của CA với khả năng xử lý bất định của Bayes. Mô hình bao gồm 2 lớp như sau:

Lớp CA:

Thiết lập lưới không gian 2D, thiết lập tốc độ và hướng đi ban đầu của tàu. Áp dụng quy tắc di chuyển cứng như tránh va chạm bằng cách giảm tốc khi khoảng cách đến mục tiêu nhỏ hơn khoảng cách an toàn. Ưu tiên hướng an toàn thông qua ma trận chuyển hướng. Bổ sung yếu tố nhiễu để mô phỏng hành vi con người và ảnh hưởng môi trường đến tốc độ tàu.

Lớp Bayes:

Xử lý dữ liệu bằng cách tính P_{Risk} theo thời gian thực từ dữ liệu (AIS), sau đó tối ưu hóa tham số của CA (tốc độ tối đa, khoảng cách an toàn, hướng ưu tiên).



Hình 1. Sơ đồ hoạt động của mô hình CA-Bayes

Cơ chế tương tác:

- Luồng dữ liệu CA → Bayes:

CA cung cấp dữ liệu đầu vào cho Bayes bao gồm Mật độ tàu D , khoảng cách d , tốc độ v và hướng đi của tàu θ . Ví dụ như khi tàu tiến đến gần vật cản, CA sẽ truyền giá trị d để Bayes tính toán P_{risk} .

- Luồng điều chỉnh Bayes → CA:

Bayes sẽ điều chỉnh động tham số CA dựa trên P_{risk} về tốc độ, khoảng cách an toàn và hướng đi. Ví dụ như sau:

$$v_{max-new} = v_{max} \cdot (1 - 0.5P_{Risk}) \quad (10)$$

$$d_{safe-new} = d_{safe} \cdot (1 + P_{Risk}) \quad (11)$$

Mô hình kết hợp này cho phép cung cấp một khuôn khổ linh hoạt để mô phỏng luồng hàng hải trong điều kiện thực tế, mô hình này có khả năng thích ứng và ứng phó với các tình huống phức tạp và bất ngờ một cách linh hoạt hơn so với 2 phương pháp riêng lẻ.

3. Thiết kế mô hình mô phỏng luồng kết hợp CA và Bayes

3.1. Dữ liệu và công cụ

Dữ liệu được thu thập từ cảng Dafeng, Trung Quốc trong 2 tháng 5-6/2020, bao gồm: Vị trí (kinh độ, vĩ độ); tốc độ, hướng di chuyển; kích thước tàu. Đây là một cảng có mật độ giao thông cao, từ 1200-1500 tàu/tháng, phù hợp để kiểm tra áp lực luồng, luồng có một đoạn cong PQ có bán kính 500m, góc quay 70° , là khu vực có nhiều va chạm xảy ra và có bộ dữ liệu AIS đầy đủ, tin cậy.

Dữ liệu được xử lý làm sạch bằng cách loại bỏ các bản ghi thiếu thông tin hoặc nhiễu. Sau đó được chuẩn hóa từ tọa độ địa lý sang tọa độ ô CA. Các tàu được phân loại theo kích thước như Bảng 1.

Công cụ sử dụng là Python để xây dựng mô hình

CA-Bayes, với các thư viện Pandas, NumPy, PyMC3 để xử lý và tính toán, các công cụ Matplotlib và Folium để minh họa mô phỏng và các kết quả.

3.2. Triển khai mô hình

Thiết lập CA với các thông số chính sau:

Luồng CA:

Không gian CA được mô hình hóa từ đoạn luồng dài 46.7km, được chia thành 934 ô, mỗi ô dài 50m có trạng thái nhị phân (0: Trống, 1: Có tàu) và sử dụng lân cận Moore 8 hướng để xử lý chuyển động phức tạp. Trong đó đoạn cong PQ dài khoảng 1km được coi là vùng cảnh giác có nguy cơ đâm va cao, đoạn này được chia thành 20 ô.

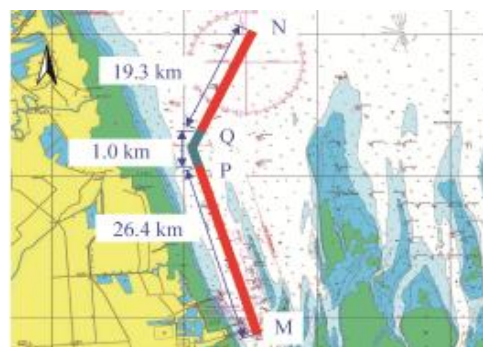
Cập nhật CA:

Các tàu di chuyển trong khu vực có tốc độ từ 5-20km/h (tương ứng 1 - 4 ô/bước), mật độ tàu ban đầu được xác định bằng phân phối Poisson ($\lambda = 0,3$ tàu/phút). Ngưỡng rủi ro va chạm là 25%.

Bảng 1. Thông tin về kích thước tàu và số tế bào mà tàu chiếm chỗ khu vực cảng Dafeng

Trọng tải / T	Kích thước tàu/m			Số cell tàu chiếm chỗ/ô
	Dài	Rộng	Mớn nước đầy tải	
150 000	289	45.0	17.9	6
100 000	250	43.0	14.5	5
50 000	223	32.3	12.8	5
10 000	135	20.5	8.5	3
5 000	115	18.8	7.0	2
3 000	96	16.6	5.8	2

Các tàu di chuyển vào khu vực vùng cảnh giác sẽ giảm 30% tốc độ so với tốc độ hiện tại, ngoài ra còn có 10% giảm tốc độ do nhiễu ngẫu nhiên.



Hình 2. Khu vực luồng cảng Dafeng

Khoảng cách an toàn tối thiểu là 2 ô (100m) giữa các tàu, tự động điều chỉnh dựa trên kích thước tàu.

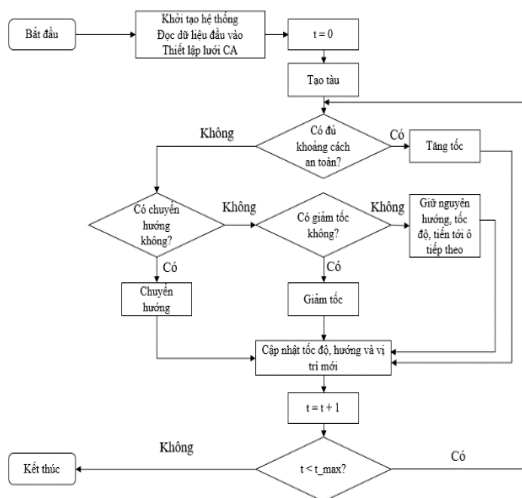
Hướng di chuyển được xác định thông qua ma trận xác suất chuyển hướng, có kiểm tra va chạm bằng cơ chế ưu tiên ngẫu nhiên.

Tích hợp Bayes vào mô hình:

Lớp Bayes được xây dựng với các biến ngẫu nhiên và xác suất có điều kiện. Trong đó biến ngẫu nhiên sẽ bao gồm: Mật độ tàu, khoảng cách an toàn và tốc độ tàu hiện tại được lấy từ lưới CA, từ điều kiện giao thông đó lớp Bayes tính toán ra Nguy cơ đâm va từ các biến trên. Các xác suất hậu nghiệm được tính toán liên tục, bao gồm xác suất giảm tốc và xác suất chuyển hướng theo công thức (7), (9) và cập nhật ngược lại vào lưới CA theo công thức (10) và (11).

Mô phỏng thời gian thực:

Hệ thống mô phỏng hoạt động theo chu kỳ 30 giây/bước. Dữ liệu dòng tàu được sinh ngẫu nhiên theo quy luật Poisson ($\lambda = 0,2$ tàu/phút - số liệu này có thể thay đổi để phù hợp với thực tế) phản ánh lưu lượng trung bình tàu tại cảng. Thuộc tính tàu như kích thước, tốc độ được lấy từ mẫu phân phối thực tế.



Hình 3. Lưu đồ chương trình mô phỏng

Trong mỗi chu kỳ, hệ thống thực hiện:

1. Cập nhật vị trí và trạng thái tàu theo quy tắc CA;
2. Thu thập dữ liệu môi trường;
3. Tính toán xác suất rủi ro bằng mạng Bayes;
4. Tự động điều chỉnh thông số khi xác suất va chạm vượt ngưỡng 0,3.

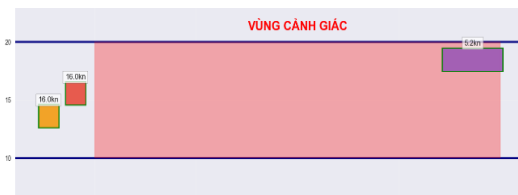
Cơ chế phản hồi bao gồm: Khi xác suất va chạm >30%, hệ thống sẽ tự động giảm λ xuống 0,1 tàu/phút, tăng khoảng cách an toàn lên 10% và phân bổ lại luồng giao thông.

3.3. Phân tích ổn định của mô hình mô phỏng

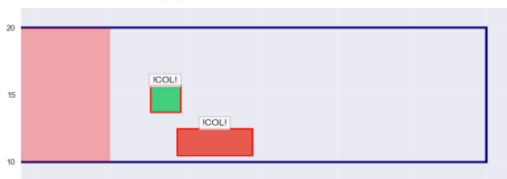
Mô hình được kiểm định qua 100 lượt mô phỏng với các kịch bản khác nhau, trong mỗi kịch bản các thông số đầu vào được thay đổi để mô phỏng đa dạng các tình huống. Kết quả cho thấy hệ thống duy trì được hiệu suất ổn định với thông lượng tàu tối đa 554 tàu/ngày với sai số <5%.



(a) Màn hình chính



(b) Chưa có va chạm



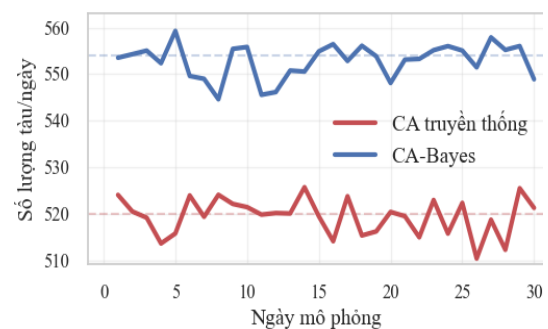
(c) Xây ra va chạm

Hình 4. Màn hình chương trình mô phỏng

4. Kết quả và đánh giá

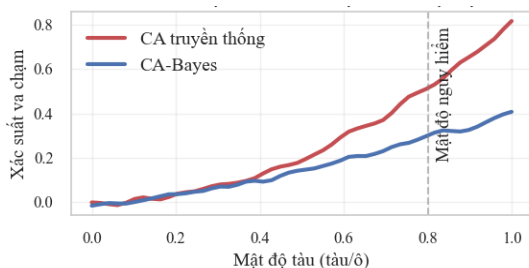
Để kiểm tra kết quả của mô phỏng, nhóm tác giả đã so sánh mô phỏng bằng CA-Bayes với mô phỏng bằng CA đơn thuần trên cùng một tập dữ liệu và cùng khu vực cảng.

4.1. Kết quả mô phỏng theo phương pháp CA đơn thuần và CA-Bayes

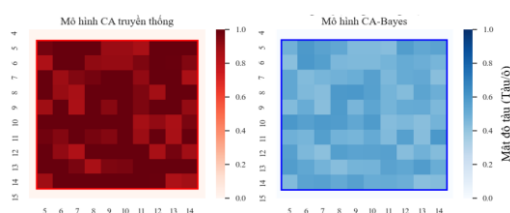


Hình 5. Biểu đồ so sánh thông lượng tàu giữa mô hình CA truyền thống và mô hình CA-Bayes

Sau 100 lượt mô phỏng, mỗi lượt mô phỏng 30 ngày tàu chạy qua khu vực luồng. Kết quả mô phỏng của 2 phương pháp được thể hiện trên các Hình 5, 6 và 7.



Hình 6. Đồ thị xác suất va chạm theo mật độ tàu



Hình 7. Bản đồ nhiệt mật độ tàu tại đoạn cong PQ (vùng cảnh giác)

4.2. Phân tích kết quả

Mô hình CA-Bayes cải thiện so với mô hình CA truyền thống trên cả ba khía cạnh: Năng lực thông qua, an toàn hàng hải và khả năng thích ứng. Cụ thể như sau:

- Năng lực thông qua đạt 554 tàu/ngày, cao hơn 6.5% so với mô hình CA đơn thuần (520 tàu/ngày). Sự cải thiện này đến từ cơ chế điều chỉnh động khoảng cách an toàn dựa trên xác suất rủi ro, giúp tối ưu hóa không gian luồng lạch mà vẫn đảm bảo an toàn.

- Về an toàn: Giảm 50% va chạm so với mô hình CA truyền thống nhờ dự báo sớm rủi ro thông qua phân tích đa yếu tố (Mật độ tàu, khoảng cách an toàn, vận tốc). Cụ thể, nhờ thuật toán Bayes phát hiện các tình huống nguy hiểm tiềm ẩn khi xác suất va chạm vượt 0,3, từ đó kích hoạt cơ chế giảm tốc độ và điều chỉnh lộ trình tự động. Ngược lại, mô hình CA chỉ phản ứng cơ học khi khoảng cách vật lý giữa các tàu vượt ngưỡng an toàn, làm giảm khả năng phòng ngừa tai nạn so với CA-Bayes.

- Xử lý trong khu vực cảnh giác: Khi đi vào khu vực PQ các tàu đều phải giảm tốc độ, trong khi đó các tàu chạy tại các khu vực khác vẫn di chuyển với tốc độ bình thường theo phương pháp CA truyền thống, có thể dẫn đến ùn tắc, điều đó thể hiện ở bản đồ nhiệt của tàu đi qua khu vực này luôn ở mức cao, mật độ có thể lên đến gần 1 tàu/ô. Ngược lại, với phương pháp CA-Bayes, việc tăng/giảm tốc độ được xác định theo xác suất rủi

ro hiện tại, các tàu có khả năng tăng tốc trở lại nếu xét thấy đảm bảo an toàn, dẫn đến việc thoát tàu khỏi khu vực nhanh hơn, thể hiện ở bản đồ nhiệt khu vực có rất ít ô đạt đến mức 0,8 tàu/ô (Hình 7).

- Về tính thích ứng: Mô hình CA-Bayes có thể mô phỏng các trường hợp phức tạp như biến động lưu lượng khi số lượng tàu tăng đột biến, mô hình sẽ nhanh chóng đưa ra điều phối phù hợp. Hoặc mô hình có thể kết hợp với các thông số khác như thông tin thời tiết, để đưa ra xác suất giảm tốc và điều chỉnh vào mô hình.

Bảng 2. So sánh hiệu suất giữa mô hình CA và CA-Bayes

Chỉ tiêu	Mô hình CA truyền thống	Mô hình CA-Bayes	Độ cải thiện
Thông lượng tàu (tàu/ngày)	520 ± 15	554 ± 10	+6.5%
Tỷ lệ va chạm (%)	1.8 ± 0.3	0.9 ± 0.2	-50%
Thời gian xử lý (ms)	150 ± 20	95 ± 15	-36.7%
Dự báo chính xác sự cố (%)	75 ± 5	92 ± 3	+22.7%
Thời gian chờ trung bình (phút)	45 ± 8	32 ± 5	-28.9%

5. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã đề xuất một mô hình mô phỏng luồng giao thông hàng hải, sử dụng phương pháp tế bào tự động và thuật toán Bayes. Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình tăng 6,5% thông lượng tàu (554 tàu/ngày), giảm 50% tỷ lệ va chạm so với mô hình CA đơn thuần, đồng thời đưa ra cảnh báo rủi ro dựa trên phân tích đa yếu tố. Việc cập nhật trạng thái tàu theo thời gian thực và tự động điều chỉnh quy tắc đảm bảo cân bằng giữa hiệu suất và an toàn. Hướng phát triển tiếp theo tập trung tối ưu hóa thuật toán cho các khu vực phức tạp (như luồng lạch

hẹp, đi qua khu vực bến đỗ đông đúc) và tích hợp thông tin thời tiết, cũng như tích hợp AI dự báo môi trường dài hạn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.16**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Ding, X. Xu (2015), *Main Channel Capacity of the Yangtze River Based on OD Network Model*, Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), Vol.39, pp.751-754.
- [2] Ö. Uğurlu, E. Yüksekıldız, E. Köse (2014), *Simulation Model on Determining of Port Capacity and Queue Size: A Case Study for BOTAS Ceyhan Marine Terminal*, Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.8, pp.143-150.
- [3] J. Zhu, W. Zhang (2009), *Calculation Model of Inland Waterway Transit Capacity based on Ship-following Theory*, Traffic and Transportation Engineering, Vol.9, pp.83-87.
- [4] J. Chen, L. Lin, R. Jiang (2016), *Assigning On-ramp Flows to Maximize Capacity of Highway with Two On-ramps and One Off-ramp in Between*, Physica A-Statistical Mechanics and its Applications, Vol.465, pp.347 - 357.
- [5] L. Qi (2017), *Research on Ship Traffic Flow in Waterway based on Cellular Automata*, Doctor Thesis, Dalian Maritime University, Dalian, China.
- [6] J. Ke (2012), *Study on Navigable Hydro-junction Organization Mode with Cellular Automata*, Doctor Thesis, Wuhan Maritime University, Wuhan, China.
- [7] L. Chen, J. Qi, J. Shi (2023), *A cellular automata ship traffic flow model considering navigation rule in narrowing channel*, Alexandria Engineering Journal, Vol.69, pp.715-726.
- [8] J. Pearl (1988), *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., CA, United States.
- [9] Nguyễn Thanh Bằng, Doãn Hà Phong (2022), *Spatial and Temporal Modeling of Land use/Land cover Change at the Ca River Basin (North Central Viet Nam) Using Markov Chain and Cellular Automata Approach*, Vietnam Journal of Hydro - Meteorology, Vol.10, pp.35-54 .
- [10] Ngô Việt Đức, Chu Công Minh (2014), *Ứng dụng mô hình tác tử vào mô phỏng dòng xe hỗn hợp trên đường*, Tạp chí Giao thông vận tải, số 10/2014.
- [11] Trần Đức Phú (2020), *Ứng dụng mạng Bayes đánh giá nguyên nhân đâm va của phương tiện thủy trong quá trình hàng hải*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 63, tr.57-62.
- [12] J. Von Neumann, A. W. Burks (1966), *Theory of self-reproducing automata*, Urbana, University of Illinois Press.
- [13] H. Akin, S. Uğuz, I. Siap (2011), *Characterization of 2D Cellular Automata with Moore Neighborhood over Ternary Fields*, Vol.1389.
- [14] K. Nagel, M. Schreckenberg (1992), *A cellular automaton model for freeway traffic*, Journal de Physique I.

Ngày nhận bài:	10/04/2025
Ngày nhận bản sửa:	18/04/2025
Ngày duyệt đăng:	19/04/2025