船舶群行動モデルにおける情報探索空間の影響

稲石 正明*・近藤 逸人*・川口 明**

Influence of Information Search Space in Ship Cluster Behavior Model

Masaaki INAISHI, Hayato KONDO and Akira KAWAGUCHI

Abstract

This paper presents a study of the relationship between the emergence characteristics of a ship cluster and the size of information search space using an autonomous ship behavior cluster model. First, we tested four different decision-making functions, and chose one function that led to highest stability in terms of the ship cluster configuration. Then, using this function, we evaluated the relationship between the decision-making distance (i.e. information search space size), and the cluster characteristics. As the number of ships used for decision-making increased, the stability of the cluster configuration also increased. When the decision-making distance was relatively small (below 3 nautical miles), the cluster configuration became instable irrespective of the number of ships involved, and the feature of the ship cluster configuration in this range was clarified.

Keywords: Group Navigation, Complex System, Search Space, Ship Agents, Artificial Intelligence

キーワード: 群行動, 複雑系, 探索空間, 船舶エージェント, 人工知能

1. はじめに

著者ら^{(1)~(7)}は、船舶交通流を船舶の集団運動と捉え、その集団運動を再現する自律型群行動モデルを提案し、船舶の群行動が発現することや群の行動特性などを明らかにした。そして、個々の船舶の行動規範は単純でも、複数の船舶が集まると、その行動を推測することが非常に難しくなるという複雑系の特徴を持つことを示した。

船舶運航場において、各船舶はそれぞれの局所的情報のみに基づいて行動しており、その相互作用から全体の協調が生み出され、群としての交通流が形成されているとみなすことができる。前報までのモデルにおいては、情報探索空間は無量大に相当し、実際に意思決定に利用される情報はある特定の船舶や位置に関する一組の情報（距離と方位）である。しかし、実際の船舶運航場におい

ては、意思決定に利用される情報の量は、船舶のセンサ能力に依存した情報探索空間の大きさに左右される。そして、収集された複数の船舶の情報を総合的に処理して、意思決定を行っているものと考えることができる。船舶群行動シミュレータの開発には、センサ機能、意思決定機能およびエフェクタ機能から構成される船舶エージェントの行動特性に影響を及ぼす情報探索空間の大きさと意思決定方法についての検討が重要である。

本研究の目的は、前報の自律型群行動モデル⁽⁷⁾を用いて、群の創発や群行動特性に及ぼす情報探索空間の大きさの影響について考察を加えるものである。本研究では、はじめに情報探索空間の大きさによって意思決定に利用する情報の量が異なる、四種類の意思決定機能を設計する。創発される群の安定性や設定した形状を維持する能力など

* 正会員 東京海洋大学海洋工学部 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

inaishi@e.kaiyodai.ac.jp, hkondo@e.kaiyodai.ac.jp

** 非会員 The City University of New York (Convent Avenue at 138th Street New York, N.Y. 10031)

akira@cs.cuny.cuny.edu

を評価項目として、シミュレータモデルとして望ましい意思決定機能を選択する。次に、群の特性値⁽³⁾(船舶間の平均距離と群のアスペクト比)や集団形状に及ぼす情報探索空間の影響について検討を行う。本研究では、情報探索空間の大きさを定量的に表すために、自船位置を中心にした円の半径で情報探索空間の大きさを表し、この半径を意思決定距離 (Decision-Making Distance) DMD [nautical mile]と呼ぶ。

2. 船舶の群行動

2.1 群行動モデル

群行動モデル⁽⁷⁾は、航海目標に到達するための力(達成力 F_g)と群れを形成するための力(収縮力 F_c と膨張力 F_e)の二種類から構成される。各々の船舶は、達成力、収縮力および膨張力ベクトルの合成ベクトル F の向き θ の方向へ、設定速力 Sp [nautical mile/hour]で進む。合成ベクトル F は式(1)で表され、 F_x 、 F_y は F の x 、 y 方向の成分で、式(2)と式(3)で表される。ここで、添字 g は達成力、 c は収縮力、 e は膨張力、 x 、 y は x 、 y 方向成分、 c_x 、 c_y は収縮力の x 、 y 成分、 e_x 、 e_y は膨張力の x 、 y 成分を表す。本研究では達成力の大きさを一定値、 $w_g=10.0$ とした。 F の向き(新針路) θ は、式(4)で表される。設定針路 Co [rad]と力の向き θ [rad]は、北を 0 [rad]にし、時計回りに角度をとる。船舶の位置を (x_t, y_t) 、シミュレーション時間間隔を ΔT [hour]とすると、単位時間後の船舶の位置 (x_{t+1}, y_{t+1}) は式(5)で表される。

$$F = F_g + F_c + F_e = (F_x, F_y) \quad (1)$$

$$F_x = w_g \cdot \sin(Co) + F_{cx} + F_{ex} \quad (2)$$

$$F_y = w_g \cdot \cos(Co) + F_{cy} + F_{ey} \quad (3)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{F_x}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{F_y}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (4)$$

$$(x_{t+1}, y_{t+1}) = (x_t + Sp \cdot \sin \theta \cdot \Delta T, y_t + Sp \cdot \cos \theta \cdot \Delta T) \quad (5)$$

2.2 情報探索空間と意思決定機能

意思決定機能として、膨張力に関するシグモイド関数⁽⁷⁾の定数設定方法(PE-PおよびPE-DMD)と膨張力ベクトルの決定方法(FE-PおよびFE-DMD)を組合せた、Table 1に示す四種類の意思決定機能(Decision-Making Function) DMFを設定した。

収縮力における情報探索空間の大きさは、単なるセンサ能力に相当するので、シグモイド関数の定数設定方法(PC-DMD)と収縮力ベクトルの決定方法

Table 1 Decision-Making Functions

Functions		DMF-0	DMF-1	DMF-2	DMF-3
Coefficients of Sigmoid Function	a_c	Ships in DMD (PC-DMD)	Ships in DMD (PC-DMD)	Ships in DMD (PC-DMD)	Ships in DMD (PC-DMD)
	b_c				
	a_e	Proximity Ship (PE-P)	Ships in DMD (PE-DMD)	Proximity Ship (PE-P)	Ships in DMD (PE-DMD)
	b_e				
Decision-Making	F_c	Ships in DMD (FC-DMD)	Ships in DMD (FC-DMD)	Ships in DMD (FC-DMD)	Ships in DMD (FC-DMD)
	F_e	Proximity Ship (FE-P)	Proximity Ship (FE-P)	Ships in DMD (FE-DMD)	Ships in DMD (FE-DMD)

(FC-DMD)はそれぞれ一種類で、Table 1の意思決定機能で共通である。

(1) 収縮力ベクトル F_c の決定 (FC-DMDと略記)

F_c は、情報探索空間内の船舶を自船と同じ集団に帰属する船舶と判断し、その船舶集団の重心に向かって働く。収縮力の大きさ w_c は、式(6)で求める。 L_c [nautical mile]は、ある時間における自船と重心までの距離である。収縮力の向き θ_c は、自船から重心への方位角を与える。 F_{cx} 、 F_{cy} を式(7)に示す。

(2) 収縮力の定数設定 (PC-DMDと略記)

式(6)の a_c と b_c は、シグモイド関数を規定する定数であり、船舶集団の初期設定位置から決定される。 b_c は、自船と情報探索空間内の船舶集団の重心までの距離を与える。 a_c は、 $L_c=0.0$ の時にシグモイド関数の出力が $w_c \div 0.0$ となるように、式(8)で求める。

$$w_c = \frac{1}{1 + \exp(-a_c(L_c - b_c))} \quad (6)$$

$$(F_{cx}, F_{cy}) = (w_c \cdot \sin \theta_c, w_c \cdot \cos \theta_c) \quad (7)$$

$$a_c = \frac{1}{b_c} \ln \alpha, \quad \alpha = 10^4 \quad (8)$$

(3) 膨張力ベクトル F_e の決定

F_e の決定方法には、自船に一番近い船舶を対象にする場合と、情報探索空間内の全船舶を対象にする場合の二種類がある。

① 自船に一番近い船舶を対象 (FE-Pと略記)

膨張力の大きさ w_e は、前報⁽⁷⁾と同様、式(9)で求める。 L_e [nautical mile]は、ある時間における自船に最も近い船舶までの距離である。膨張力の向き θ_e は、自船に最も近い船舶の方位角に π [rad]を加えた値を与える。 F_{ex} 、 F_{ey} を式(10)に示す。

$$w_e = \frac{1}{1 + \exp(-a_e(L_e - b_e))} \quad (9)$$

$$(F_{ex}, F_{ey}) = (w_e \cdot \sin \theta_e, w_e \cdot \cos \theta_e) \quad (10)$$

②情報探索空間内の全船舶を対象(FE-DMDと略記)

自船と情報探索空間内のある船舶に対して、膨張力の大きさ w_{ei} を式(9)で、膨張力の向き θ_{ei} を方位角に π [rad]を加えた値として求め、膨張力の x 、 y 成分を求める。これを情報探索空間内の全船舶($i=1 \cdots n$)に対して行う。そして、 x 、 y 成分のそれぞれの算術平均値を膨張力ベクトルの x 、 y 成分とする。 F_{ex} 、 F_{ey} を式(11)に示す。

$$\begin{aligned} (F_{ex}, F_{ey}) &= \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_{ei} \cdot \sin \theta_{ei}), \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_{ei} \cdot \cos \theta_{ei}) \right) \\ &= \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + \exp(-a_e(L_{ei} - b_e))} \cdot \sin \theta_{ei} \right), \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + \exp(-a_e(L_{ei} - b_e))} \cdot \cos \theta_{ei} \right) \right) \quad (11) \end{aligned}$$

(4)膨張力の定数設定

シグモイド関数の定数、 a_e と b_e は、船舶の初期設定位置から決定されるが、膨張力ベクトルの決定方法と同様、二種類の設定方法がある。

①自船に一番近い船舶を対象 (PE-Pと略記)

b_e は、自船に最も近い船舶までの距離を与える。 a_e は $L_e=0.0$ の時、シグモイド関数の出力が $w_e \doteq 1.0$ となるように式(12)で求める。

②情報探索空間内の全船舶を対象(PE-DMDと略記)

b_e は、式(13)で表される、全船舶に対する自船と他船との距離 L_i の算術平均値を与える。 a_e は PE-Pと同様、式(12)で求める。

$$a_e = \frac{1}{b_e} \ln \frac{1}{\alpha}, \quad \alpha = 10^4 \quad (12)$$

$$b_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (13)$$

シミュレーションは、船舶を基盤目状に配置した初期位置 (アスペクト比 $h=1$ 、船舶数 $V=4 \sim 121$ までの 10 種類) から開始する。また、基盤目状に配置した船舶の初期間隔は、0.5 から 2 マイルまで 0.5 マイル間隔で四ケースを設定した。意思決定距離 DMD は 0.0 から 0.1 マイル刻みで、全船舶を情報探索空間に含むことができる値 (初期間隔によって異なる) まで変化させた。各船舶の設定針路は $C_0 = \pi/2$ 、設定速度は $S_p = 15$ とし、シミュレーション時間間隔は $\Delta T = 4/60$ とした。

3. 情報探索空間の影響

3.1 意思決定機能と船舶集団の安定性

船舶数 $V=100$ 、初期間隔が 1.0 マイルで 1000 シミュレーション時間後 (実時間で約 66.7 時間) の船舶集団のアスペクト比 h と意思決定距離 DMD の関係を Fig.1 に示す。意思決定機能が DMF-0、DMF-2 および DMF-3 の場合、 $DMD \leq 3.0$ の時、 h は大きく変動するが、 DMD が増すにつれて変動幅が減少し、一定の値に漸近する。DMF-0 と DMF-3 は、 $DMD \leq 3.0$ の範囲を除いて、同じような傾向を示しており、 DMD が増加すると $h=1.0$ に近い値を示している。DMF-1 と DMF-2 は、 DMD が増加しても $h=1.0$ にならない。また、DMF-1 は他のモデルに比べて DMD の値に関係なく変動している。

初期間隔が 1.0 マイル、 $DMD=16.0$ 、1000 シミュレーション時間後の形状維持比 F_R と船舶数 V の関係を Fig.2 に示す。 F_R は、シミュレーション開始時の船舶集団の形状がある時間にどの程度維持されているかを示す値で、式(14)で定義した。

$$F_R = \frac{1}{V_e} \sum_{i=0}^V \sqrt{(X_{it} - X_{i0})^2 + (Y_{it} - Y_{i0})^2} \quad (14)$$

ここで、 X 、 Y は、ある船舶位置を原点とした直交座標値で、添字 it は時間 t における i 番目の船を、 i_0 は $t=0$ における i 番目の船を表す。 F_R が小さいほど初期設定の形状を維持していることを表す。 V が増すと F_R は増加傾向を示すが、DMF-3 の増加傾向は他のモデルに比べて小さく、 F_R の値も小さい。意思決定機能 DMF-3 は、他の DMF に比べて形状維持能

Fig.1 Effect of the decision making function on the aspect ratio

Fig.2 Effect of the decision making function on the cluster configuration ratio

Fig.3 Effect of the decision making function on the steady rate

力が高いことがわかる。

船舶間の平均距離 M [nautical mile] の時間変化率が 10^{-4} 以下の時、集団の形状が安定していると定義し、集団形状の安定性について検討を行った。1000 シミュレーション時間における、形状の安定率 S_R と船舶数 V の関係を Fig.3 に示す。 S_R とは、 $DMD = 1.0$ から情報探索空間内に全船舶が含まれる DMD までの全シミュレーションケース数に対する安定的な集団を形成するシミュレーションケース数の割合で定義した。 S_R が 1 に近いほど安定性が高く、0 に近いほど非定常で微小な振動や不規則な動きをしていることを示している。DMF-0 と DMF-1 は V に関係なく S_R は低く、不安定な意思決定機能といえる。DMF-3 と DMF-2 は $V < 64$ では S_R に差はないが、 $V > 64$ の場合、DMF-3 は DMF-2 に比べて大きな S_R を示した。意思決定機能 DMF-3 は、他の DMF に比べて安定性が優れていることがわかる。

船舶数が多くて DMD が小さい場合、意思決定機能に関係なく衝突は発生する。しかし、船舶数が多くても DMD がある値を超えると衝突は発生しない。衝突が発生しなくなる DMD の値は、DMF-0 と DMF-1 に比べて DMF-2 と DMF-3 の方が小さい。意思決定機能 DMF-3 は、他の DMF に比べて初期形状の維持能力、集団形状の安定性および衝突発生特性において優れていた。このことから、多くの他船情報を用いて意思決定を行うと、船舶集団は初期形状を維持しやすく、安全で安定な船舶集団を形成することができることが明らかになった。

Fig.4 Effect of initial interval

3.2 意思決定距離と群の創発

前節の検討結果から、以後は意思決定機能 DMF-3 を用いて、意思決定距離と群の創発特性について検討を行う。船舶の初期間隔の影響を、縦軸にアスペクト比 h を横軸に意思決定距離 DMD をとって Fig.4 に示す。船舶数 $V=100$ 、基盤目配列の初期間隔を 0.5、1.0、1.0 および 2.0 マイルに変えたときの結果である。 h の特性に及ぼす初期間隔の影響は少なく、

Fig.1 と同じ特性を示した。初期間隔が大きくなると、 h が大きく変動する DMD の範囲と $h < 1.0$ から $h = 1.0$ に漸近する DMD の範囲は拡大される。

初期間隔が 1.0 マイルの時の船舶間の平均距離 M と意思決定距離 DMD の関係を Fig.5 に示す。 $DMD \leq 1.0$ では、他船との相互作用が働かないので形状の変化はなく、 M は一定値をとる。 $DMD > 1.0$ では、Fig.1 のアスペクト比 h と同様、 M が大きく変動する範囲が存在する。船舶数が多いほど変動範囲は広いが、船舶数が少なくてもこの現象は現れる。 M の極大値を示す DMD では、アスペクト比は必ず $h > 1.0$ の極大値を示す。 M が大きく変動する範囲からさらに DMD が増加すると、 M は微小な変動を伴うものの、徐々に増加していく。そして、全船舶に対して相互作用が働くような DMD の値になると、 M は一定値を示す。この一定値は、 $DMD = 0.0$ に対する値（初期設定位置に対する M の値）よりわずかに低い値を示した。

創発される船舶集団の特徴的な形状を Fig.6 に示す。船舶数 $V=100$ で、1000 シミュレーション時間後の船舶位置を示す。x 軸、y 軸の一目盛は 5 マイルに相当する。Fig.6(a) はシミュレーション開始時の形状を示す。Fig.6(b) から (h) の図中には意思決定距離 DMD の値を示している。Fig.6(b)、(c)、(d) および (f) では、集団の形状は安定していない。そして、シミュレーションをさらに進めると、y 方向に拡大された形状になるが、集団の幾何学的な特徴は同じであった。また、Fig.6(e)、(g) および (h) では、船舶集団

Fig.5 Effect of the decision making distance on the mean distance

の形状は安定しており、シミュレーション時間をさらに進めても形状の変化は起こらない。Fig.5 で示した、船舶間の平均距離 M が大きく変動する範囲 ($1.0 \leq DMD < 3.0$) では、Fig.6(b) から (g) に示すように、 DMD のわずかな違いでも集団の形状は大きく異なることがわかる。また、Fig.5 で示した、 M の極大値を示す DMD の場合、Fig.6(d) のような形状を示し、アスペクト比は $h > 1.0$ となる。 $DMD > 3.0$ では、Fig.6 (g) のような形状から徐々にアスペクト比が増加し、 $DMD = 16.0$ では、Fig.6 (h) のように初期設定形状に近い集団形状を発現する。本研究のシミュレーション範囲では、全船舶数の 30~40% 以上の船舶の情報から意思決定を行うならば、複数の船舶集団に分裂することはない。

Fig.6 Cluster configuration

4. おわりに

群の創発や群行動特性に及ぼす情報探索空間の大きさの影響について考察を行った。情報探索空間内の情報の利用方法が異なる四種類の意思決定機能に対して、創発される群の安定性などについて検討を行った。さらに、群の安定性などに優れた意思決定機能を用いて、船舶間の平均距離、アスペクト比、形状維持比などの集団行動の特性値および船舶集団の幾何学的形状に及ぼす情報探索空間の大きさの影響について考察を加えた。

各々の船舶が多くのお船情報を用いて意思決定を行うと、船舶集団は初期形状に近い集団形状を発現し、安全で安定的な集団を形成することができることを明らかにした。意思決定距離が小さい場合、集団の平均距離やアスペクト比が大きく変動する範囲の存在および大きく変動する時の船舶集団の幾何学的形状の特徴を明らかにした。全船舶数の30~40%以上の船舶の情報から意思決定を行うならば、この変動する範囲を避けることができ、複数の船舶集団に分裂することはないなどの知見を得ることができた。

今後は、航路を航行する船舶集団の表現モデルの開発を進めて行く予定である。

参考文献

- (1) 稲石正明、今宿智仁：自律型群行動モデルによる海上交通流の再現ーモデルの提案と行動特性の検討ー、日本航海学会論文集、No.103、pp.103-110、2000.
- (2) M. Inaishi and A. Kawaguchi: "Ship group Navigation Assessment", Proc. 2003 International Conference on Computer, Communication and Control Technologies, pp.410-415, 2003.
- (3) 稲石正明、川口明：船舶群行動シミュレーションー自律型群行動モデルの出力特性ー、日本航海学会論文集、No.109、pp.89-96、2003.
- (4) M. Inaishi and A. Kawaguchi: "A Ship Behavior Cluster Model for Maneuverability and Marine Traffic", Proc. 2004 Hawaii International Conference on Computer Sciences, pp.53-60, 2004.
- (5) 稲石正明、近藤逸人、川口明：船舶群と船舶群の遭遇シミュレーション、日本航海学会論文集、No.110、pp.1-7、2004.
- (6) A. Kawaguchi, X. Xiong, M. Inaishi and H. Kondo: "A Computerized Navigation Support for Maneuvering Clustered Ship Groups in Close Proximity", Proc.2004 International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications, pp.313-318, 2004.
- (7) 稲石正明、近藤逸人、川口明：予測型エージェントを用いた船舶の群行動に関する研究、日本航海学会論文集、No.111、pp.243-249、2004.
- (8) Reynolds, C.: "Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model", Computer Graphics, 21, 4 (Proceedings of SIGGRAPH '87), 25-34, 1987.
- (9) N. Shimoyama, K. Sugawara, T. Mizuguchi, Y. Hayakawa and M. Sano: "Collective Motion in a System of Motile Elements", Physical Review Letters, 76, 3870-3873, 1996.
- (10) 三宮信夫、田雅杰、中峯浩：魚群行動モデルにおける協調行動の創発、計測自動制御論文集、Vol.35、No.11、pp.1370-1376、1999.

質疑応答

萩原秀樹（東京海洋大学）：

興味深い御発表をありがとうございました。*DMD* が小さい時の群の形成について、*DMD* が0.1マイル異なっても形成される群の形状が全く違うものになることの理由について教えてください。

稲石正明：

船舶エージェント間の相互作用の積み重ねの結果として群が形成されます。このような複雑系の特徴として、個々の船舶エージェントの意思決定ルールは単純でも複数の船舶エージェントの相互作用により、行動を推測することが難しくなることがあげられます。このため、御質問の *DMD* のわずかな違いで異なる形状の群が生成される理由を明確に答えることはできません。ただ、*DMD* の大きさの違いで意思決定に利用される船舶数が場所によって異なることが主因であるとは推定しております。碁盤目に配置された集団の角と中央位置の船舶は、同じ *DMD* でも意思決定に使用される船舶の情報量は異なります。特に、群の形成に及ぼす角に位置する船舶の影響が大きいものと考えております。