

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：25403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500179

研究課題名(和文) 強化学習ベース多船航路探索法に基づく海上交通アセスメントツールの実現

研究課題名(英文) A Development of Marine Traffic Assessment Tool Constructed by Reinforcement Learning Based Search Method for Ships' Courses

研究代表者

神尾 武司 (KAMIO, TAKESHI)

広島市立大学・情報科学研究科・講師

研究者番号：20316136

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：船舶運航において安全性と効率性を勘案した航路を事前に選定することは極めて重要である。この要求を満足するために、本研究では、多船航路探索用マルチエージェント強化学習システム(MARLS)をベースとして現実的な海域状況に対応可能な海上交通アセスメントツールを構築した。具体的には、衝突に関する因果情報の抽出方法および航路の安全性と効率性に関する評価方法を提案し、MARLSの修正を適宜行った。計算機実験により、MARLSが現実的な海域状況に対応可能な海上交通アセスメントツールへと拡張されたことを確認した。

研究成果の概要(英文)：It is very important to decide the safe and efficient courses before actual navigation. To satisfy this requirement, in this research, we have constructed the marine traffic assessment tool based on the multi-agent reinforcement learning system (MARLS) to find ships' courses which we had proposed before. Specifically, we have proposed the extraction method for the causal information of collisions and the evaluation method for the safety and efficiency of courses. Moreover, we have modified our MARLS appropriately. Finally, it has been confirmed by numerical experiments that our MARLS can be used as the marine traffic assessment tool for the actual environment of sea area.

研究分野：ソフトコンピューティング, 通信・信号処理

キーワード：マルチエージェントシステム 強化学習 多船航路探索 先験的知識 航法 安全性 効率性

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初、研究代表者は知能情報学と船舶に係わる工学的分野の技術交流を目指して、多船航路探索用マルチエージェント強化学習システム(Multi-Agent Reinforcement Learning System: MARLS)を提案していた。このMARLSは、他船との衝突状況を観測し、これを海の交通ルールである“航法”と常時照らし合わせることで、各船の行動選択を制限しながら現実世界においても適用可能な航路の探索を行うシステムである。つまり、MARLSは各船が選択した行動系列だけでなく、衝突状況判定およびその解除がどのような状況で行われたかを同時に記録できるため、航路獲得までの因果情報を抽出できるという特徴を本質的に有している。この事実から、研究代表者はMARLSから得られる因果情報を適宜利用することで、現実的な海域状況を考慮した海上交通アセスメントツール(ルールの有効性や限界を実船舶による実験に先立って調べるためのツール)を実現できる可能性を見出した。さらに、平成22年7月1日には「港測法及び海上交通安全法の一部を改正する法律」が施行されていたため、MARLSを海上交通アセスメントツールとして発展させることは社会的要請に合致すると考えた。以上が“多船航路探索用MARLSに基づく海上交通アセスメントツールの実現”を目指すに至った経緯である。

2. 研究の目的

船舶は大量の物資を低コストで運搬できる重要な輸送手段であるが、衝突などの事故が発生した場合、経済や環境に多大な損失を与えるため、安全性と効率性を勘案した航路を事前に選定することは船舶運航にとって極めて重要である。特に、操船者も判断に迷うような多船間の複雑な出会い状況に対して、有用な航路や知見が事前に示されれば、操船者の負担軽減や事故の回避につながることになる。そこで本研究では、多船航路探索用マルチエージェント強化学習システム(MARLS)をベースとして、現実的な海域状況に対応可能な海上交通アセスメントツールを構築することを最終的な目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、研究開始時点で研究代表者が既に提案していた多船航路探索用マルチエージェント強化学習システム(以後、従来MARLSと呼ぶ)をベースとして行われた。以下では、従来MARLSを概説した上で、本研究の研究方法について述べる。

(1) 従来MARLSの概要

① 処理フロー

まず、各エージェントは自船 $k$ の視野範囲(自船 $k$ を中心とした半径 $R_k$ の円)に存在する他船 $j$ を検知し、両者の位置関係と航法に基

づく衝突状況判定モデルを比較することで衝突状況を判定する(衝突状況判定ラベル $J_{kj}$ の決定)。一方、他船 $j$ との衝突回避の達成、衝突状況判定からの乖離、視野範囲外への他船 $j$ の移動のいずれかの条件を満足する場合、現在の衝突状況判定が解除される( $J_{kj}$ をフリーに設定)。さらに、各エージェントは衝突状況判定の結果から航法(他船との衝突回避のための国際規則)または目的地指向性(衝突の危険がない船舶は針路を回復し、目的地に向かうという一般的なルール)による行動選択制限(Limited Action Selection: LAS)を受けながら、強化学習による航路探索を行う。その結果、現実世界においても適用可能な航路が獲得される。

② 衝突状況判定モデル

典型的な衝突状況(行会い、横切り、追越し)に対する判定モデルをFig.1に示す。このモデルでは他船 $j$ の回頭中心を原点に、船首角を零に座標変換する。その上で、自船 $k$ の位置と船首角 $\phi_k$ に従って、他船 $j$ に対する衝突状況が判定される。例えば、自船 $k$ が船舶 $k_3$ と同様に $A_{jk} \in A_{C3}$ 、 $\phi_k \in A_3$ を満足するならば、自船 $k$ と他船 $j$ は横切り状況にあり、他船 $j$ を避ける必要がないと判断する。つまり、 $J_{kj}$ は横切り(回避不要)となる。

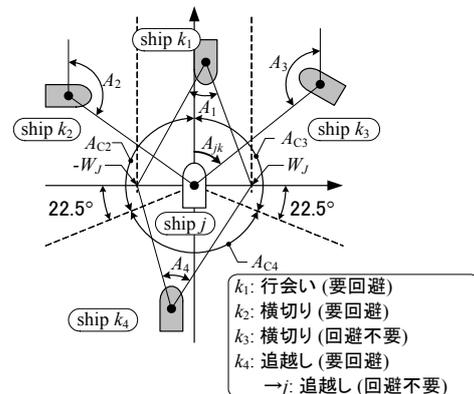


Fig.1 航法に基づく衝突状況判定モデル

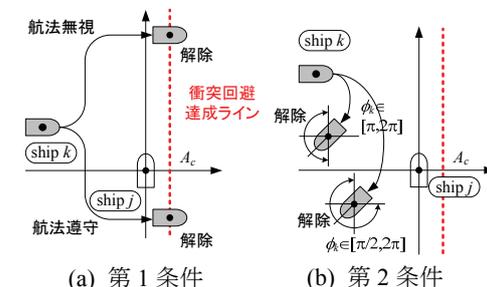


Fig.2 判定解除モデル：横切り(要回避)

③ 衝突状況判定解除モデル

衝突状況判定の解除条件には以下の3つがある。第1条件は自船 $k$ が他船 $j$ との衝突回避を達成することであり、第2条件は現在の自船 $k$ と他船 $j$ の関係が衝突状況判定と乖離

することであり、第3条件は他船  $j$  が自船  $k$  の視野範囲外に移動することである。第3条件は自明であるので、ここでは具体例として、自船  $k$  が横切り(要回避)である場合の第1, 2条件を Fig.2(a), (b)にそれぞれ示す。

#### ④ 行動選択制限

行動選択制限は従来 MARLS の最大の特徴であり、これにより現実世界においても適用可能な航路が獲得される。

具体例を Fig.3 に示す。Fig.3(a)は、横切り(要回避)の衝突状況にある自船  $k$  が航法によって右に舵を切る(つまり、舵角  $\delta_k \geq 0$ ) ように行動選択制限  $LAS_{NR}$  を受けている様子を表している。ただし、必要以上に右に回頭することを避けるため、船首角  $\phi_k$  が角度  $A_{LAS}$  以上の場合、この制限は解除される。一方、Fig.3(b)は、衝突の危険がない自船  $k$  の針路が右に逸れた場合 ( $-\pi < A_{Gk} < -\theta$ ) に目的地指向性に基づいて左に舵を切る(つまり、舵角  $\delta_k \leq 0$ ) ように行動選択制限  $LAS_{GO}$  を受けている様子を表している。

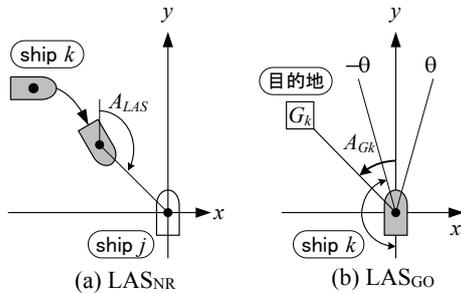


Fig.3 行動選択制限

#### (2) 研究方法

研究目的を達成するために、3つのテーマを柱として研究を実施する。

第1のテーマは『衝突予測や衝突原因把握のための因果情報の抽出』であり、第2のテーマは『航路の安全性と効率性の評価』であり、第3のテーマは『海域形状などの現実的環境を考慮してのシステムの拡張』である。第1, 2のテーマは本研究で想定する海上交通アセスメントツールとしての使用目的に関連するものであり、第3のテーマは第1, 2のテーマを通じて完成する海上交通アセスメントツールの雛型を実用レベルに引き上げるための研究である。以上3つの研究テーマの完了をもって“多船航路探索用 MARLS に基づく海上交通アセスメントツールの実現”とする。

#### 4. 研究成果

ここでは、研究方法で述べた3つの研究テーマを実施することで得られた主な成果と今後の展望について述べる。

##### (1) 衝突状況と安全度に基づく因果情報の抽出

###### ① 手法の概要

従来 MARLS は、各船が選択した行動系列だけでなく、衝突状況判定およびその解除がどのような状況で行われたかを同時に記録できる。つまり、航路の探索過程で発生する衝突に対して、これらの情報を効果的に抽出できれば、従来 MARLS を衝突予測や衝突原因把握に利用可能なアセスメントツールとして発展させることになる。しかしながら、これを達成するためには、航路の探索過程で発生した衝突がどの時点で確定したかを特定する枠組みが必要となる。

そこで提案手法では、航法が定める衝突状況と他船衝突に対する安全度(詳しくは4-(1)-②で説明)を組み合わせることで、上記の要求を満足する枠組みを従来 MARLS に取り入れた。これにより、自船  $k$  は Fig.1 に示した衝突状況判定モデルに基づいて他船  $j$  との衝突状況を把握し、安全度( $S_{kj}$ )を通じて他船との衝突の可能性を常時観測できることになる。さらに、安全度( $S_{kj}$ )がある閾値を下回った時点で他船との衝突が確定したと判断し、それ以降の安全度や行動系列などを衝突予測や衝突原因把握のための因果情報として提示できるように従来 MARLS の機能を拡張した。

##### ② 他船衝突に対する安全度

衝突に関する因果情報を効果的に抽出するために考案した他船衝突に対する安全度( $S_{kj}$ )の計算モデルを Fig.4 に示す。Fig.4(a)は自船  $k$  のパーソナルエリア( $PA_k$ )を表しており、現実の操船者は  $PA_k$  の内部に他船が侵入した場合、衝突の危険を強く感じると言われている。そこで提案手法では、Fig.4(b)に示すように、他船  $j$  と  $PA_k$  の位置関係に基づいて安全度の計算を行っている。具体的には、他船  $j$  が自船  $k$  の視野範囲(半径  $R_k$  の円)外にあれば  $S_{kj} = 100\%$  とし、 $PA_k$  の内部にあれば  $S_{kj} = 0$  とした。それ以外の場合、 $S_{kj} = 100 \times (D_{kj} - D_0) / (R_k - D_0)$  で算出した。

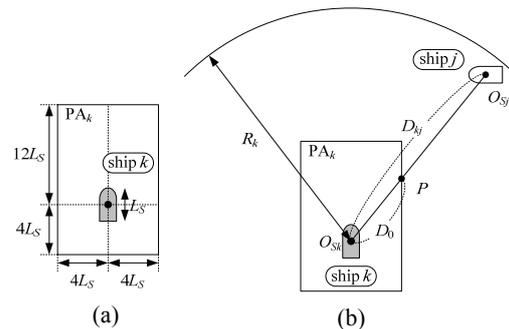


Fig.4 安全度( $S_{kj}$ )の計算モデル

##### (2) 航路の安全性と効率性の評価に基づく MARLS の修正

###### ① 従来 MARLS の問題点

前述した他船衝突に対する安全度  $S_{kj}$  は他船との衝突がどの時点で確定したかを特定する指標である。ただし、航路の安全性を測ることも当然可能である。そこで、航路の安全性を  $S_{kj}$  とし、航路の効率性を総航路長とし

た上で、従来 MARLS をいくつかの多船航路探索問題に適用し、航路の評価を行った。その結果、システムによって航路の安全性と効率性が評価できることが確認されると同時に、安全性が十分確保されているにも拘らず、不要に大きな回避を含んだ航路を獲得するという事例が確認された。そこで、このような航路が獲得されるまでの因果情報を検証したところ、従来 MARLS における回避航路の探索方法に問題があることが明らかとなった。

従来 MARLS では、自船  $k$  が他船  $j$  を回避する必要がある場合、自船  $k$  には航法に基づく行動選択制限  $LAS_{NR}$  が適用される (Fig.3 参照)。その結果、Fig.5 に示されるように、探索 (つまり、強化学習) の初期段階では比較的大きな回避行動がとられる傾向が見られるが、探索が進むにつれて航路長は短くなり、理想的には最適航路が発見される。しかし、時間的な制約から探索が打ち切られることもあるため、不要に大きな回避を含んだ航路の獲得という現象を引き起こしたと考えられる。

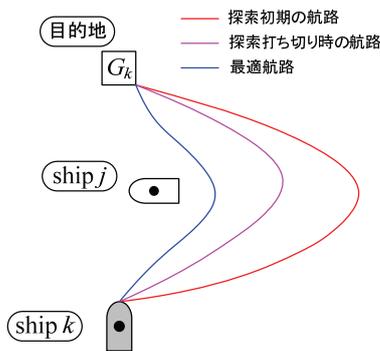


Fig.5 従来 MARLS における回避航路の探索

以上の通り、安全性と効率性の評価および因果情報の検証によって、不要に大きな回避を含んだ航路が獲得されるメカニズムが明らかとなった。その原因を単に探索の打ち切りと捉えず、航法に基づく行動選択制限  $LAS_{NR}$  (つまり、他船衝突回避ルール) の不備にあると考えれば、第 1,2 の研究テーマを通じて海上交通アセスメントツールの雛型が完成したといえる。つまり、従来 MARLS の問題点とそのメカニズムを明らかにしたという事実は本研究において最も大きな成果の 1 つである。

## ② 修正 MARLS の提案

従来 MARLS において不要に大きな回避を含んだ航路が獲得される原因を他船衝突回避ルール ( $LAS_{NR}$ ) の不備にあるした場合、この問題を解決するには、航路探索の初期段階において比較的大きな回避行動がとられるという傾向を抑制すればよい。つまり、衝突の危険が十分小さい場合、回避行動を開始せず、進路を維持すれば、自然と大きな回避が抑制されると考えられる。この考えに基づい

て、自船  $k$  が他船  $j$  を回避する必要がある場合であっても、安全度  $S_{kj}$  が基準値  $S_{ref}$  以上であれば、安全性が十分に確保されていると判断し、目的地指向性に基づく行動選択制限  $LAS_{GO}$  を適用する。一方、 $S_{kj}$  が基準値  $S_{ref}$  を下回る場合、従来 MARLS と同様、航法に基づく行動選択制限  $LAS_{NR}$  を適用する。つまり、修正 MARLS では Fig.6 に示されるように、適用すべき行動選択制限が切り替えられる。

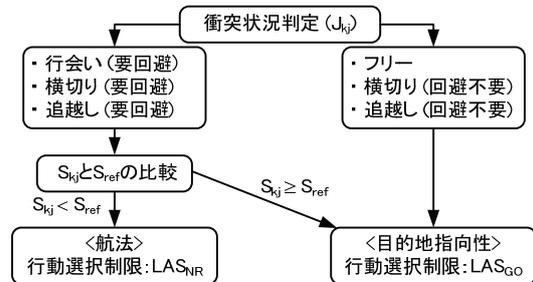


Fig.6 修正 MARLS における行動選択制限

## ③ 修正 MARLS の性能評価

修正 MARLS の性能を評価するために行った計算機実験の結果を示す。テスト問題は  $75L_S \times 75L_S$  ( $L_S$  は船体長) の海域に 6 隻の船舶が存在する多船航路探索問題である (Fig.7 参照)。議論の簡単化のため、船舶に関するパラメータはスタート ( $S_k$ ) およびゴール ( $G_k$ ) 位置以外は全て共通とし、海上保安大学の練習船こじまの値を採用した。また、MARLS に関するパラメータは修正 MARLS において  $S_{ref} = 70\%$  とする以外はすべて共通とした。

30 回の試行実験を通じて得られた結果を Fig.8, Table1, Table2 に示す。Fig.8 は従来 MARLS と修正 MARLS による典型的な獲得航路であり、各航路上のマーカーは 60 秒ごとの船舶の位置を表している。Table1 は総航路長の比較であり、 $L_{AVE}$ ,  $L_{MIN}$ ,  $L_{MAX}$  は総航路長の平均, 最小, 最大をそれぞれ表している。また、Table2 は総航路長に対する試行回数分布である。

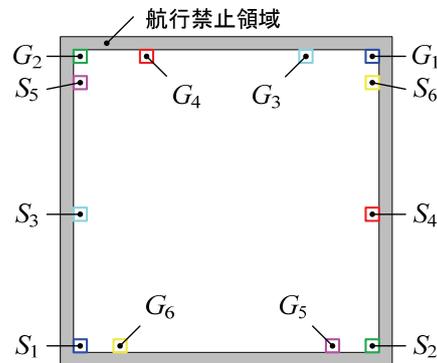


Fig.7 テスト問題

これらの結果から、修正 MARLS では従来 MARLS において観測された不要に大きな回避を含んだ航路を獲得するという問題の発生が抑制されていると判断できる。さらに、

Fig.8 に示した典型的な獲得航路から，従来 MARLS では第 3 船舶が航法を遵守しようとして大きな回避行動をしているのに対し，修正 MARLS では第 3 船舶は無理に航法を遵守することなく，安全かつ効率的な航路を選択していることが確認できる。

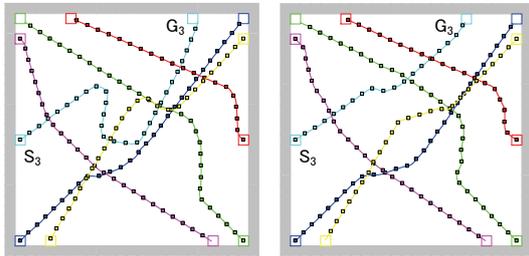


Fig.8 典型的な獲得航路

Table 1 総航路長の比較

	$L_{AVE}$ [m]	$L_{MIN}$ [m]	$L_{MAX}$ [m]
従来 MARLS	56393	52661	60836
修正 MARLS	53098	52216	57066

Table 2 総航路長に対する試行回数の分布

	総航路長の範囲 [ $\times 10000m$ ]					
	[5.2, 5.3)	[5.3, 5.4)	[5.4, 5.5)	[5.5, 5.6)	[5.6, 5.8)	[5.8, 6.1)
従来 MARLS	4	2	0	5	12	7
修正 MARLS	15	13	1	0	1	0

(3) 現実的な海域に対応可能なシステムへの拡張

従来 MARLS において想定している海域は Fig.7 に示すように航行可能な範囲は限定されているものの，その中では自由な航行が許された海域である．したがって，海域内の固定障害物や港湾の出入口など現実的な海域を想定してシステムを拡張することは海上交通アセスメントツールを実現する上で必要不可欠である．

そこで本研究では，海域形状をグリッドベースで任意に設定できるようにシステムを拡張した．さらに，MARLS による多船航路探索の状況をリアルタイムで観測するためにグラフィカル出力の機能を追加した．

Fig.9 にシステムによるグラフィカル出力のウィンドウ画面を示す．さらに，Fig.10 と Fig.11 では現実的な海域を想定した実験で獲得された典型的な航路を示す．Fig.10 の海域は範囲が限定された海域の中に固定障害物が存在する場合であり，全 6 船舶が障害物に衝突することなく，航法を遵守した航路を獲得していることが確認できる．一方，Fig.11 の海域は港湾の出入口を想定しており，出入口の左右でそれぞれ 2 隻の船舶(全 4 船舶)が行会い衝突状況にある．また，左の 2 船舶は右の 2 船舶よりも低速で移動している．この

ような状況では，第 2 船舶(低速)が第 1 船舶(低速)を右に避けるだけでなく，第 3 船舶(高速)の進路を妨害しないようにさらに右に避けている様子が確認できる．

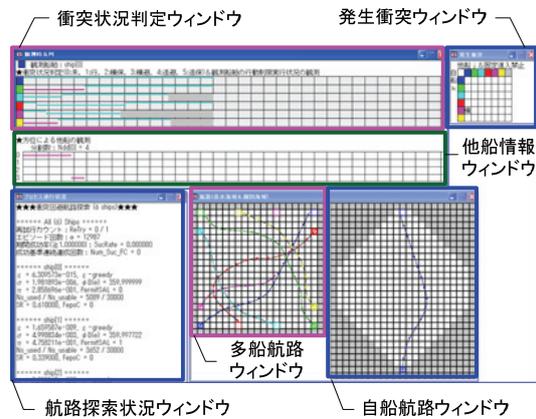


Fig.9 MARLS によるグラフィカル出力

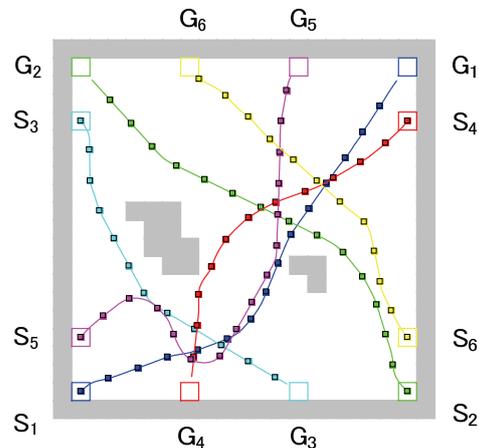


Fig.10 内部に固定障害物がある海域 (海域サイズ:  $42L_S \times 42L_S$ )

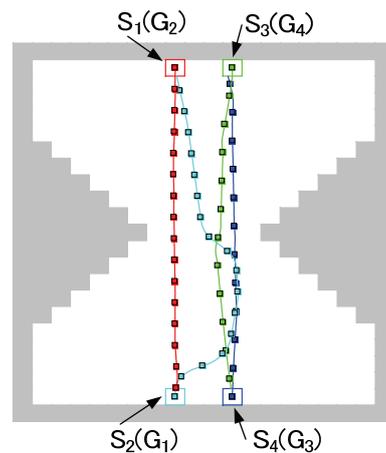


Fig.11 港湾の入り口を想定した海域 (海域サイズ:  $46L_S \times 40L_S$ )

(4) 今後の展望

本研究を通して，多船航路探索用 MARLS を現実的な海域にも対応可能な海上交通ア

セサメントツールに発展させることができた。しかしながら、問題の大規模化・複雑化に伴って航路獲得に要する時間が大幅に増加することは想像に難くない。

そこで今後は、セルグリッド環境のマルチエージェントシミュレータにより近似的な航路を求め、これを基点とすることで多船航路探索用 MARLS における航路獲得の時間的な効率化を図る予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 神尾武司, 三堀邦彦, 田中隆博, 藤坂尚登, “強化学習ベース多船航路探索法による衝突回避ルールの評価,” 電子情報通信学会 2015 年総合大会 講演論文集, 査読無, p175, 2015.
- ② M. Nakayama, T. Kamio, K. Mitsubori, T. Tanaka, and H. Fujisaka, “Multi-Agent Reinforcement Learning System to Find Efficient Courses for Ships,” Proc. of IEEE International Workshop on Computational Intelligence and Applications, 査読有, pp.89-94, 2014.
- ③ M. Nakayama, T. Kamio, K. Mitsubori, T. Tanaka, and H. Fujisaka, “Reinforcement Learning Based Search for Ships’ Courses Controlled by Safety,” Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 査読有, pp.28-31, 2014.
- ④ 中山雅博, 神尾武司, 三堀邦彦, 田中隆博, 藤坂尚登, “強化学習ベース多船航路探索法への安全性の導入,” 電子情報通信学会 2014 年総合大会 講演論文集, 査読無, p161, 2014.
- ⑤ T. Tanigawa, T. Kamio, K. Mitsubori, T. Tanaka, H. Fujisaka, and K. Haeiwa, “Modified Multi-Agent Reinforcement Learning System to Find Ships’ Courses,” Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 査読有, pp.487-490, 2013.
- ⑥ 中山雅博, 谷川大洋, 三堀邦彦, 田中隆博, 藤坂尚登, 生岩量久, 神尾武司, “強化学習ベース多船航路探索法の改良,” 電子情報通信学会 2013 年総合大会 情報・システムソサイエティ特別企画 学生ポスターセッション予稿集, 査読無, ISS-P-102, pp.2, 2013.
- ⑦ 谷川大洋, 神尾武司, 三堀邦彦, 田中隆博, 藤坂尚登, 生岩量久, “強化学習ベース多船航路探索法における行動選択制限の改良,” 電子情報通信学会技術報告, 査読無, NLP2012-144, pp.1-5, 2013.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

神尾 武司 (KAMIO TAKESHI)  
広島市立大学・情報科学研究科・講師  
研究者番号：20316136

### (2)連携研究者

三堀 邦彦 (MITSUBORI KUNIIHIKO)  
拓殖大学・工学部・准教授  
研究者番号：20559223

田中 隆博 (TANAKA TAKAHIRO)  
海上保安大学校・国際海洋政策研究センター・准教授  
研究者番号：10439523