

令和 2 年 5 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00306

研究課題名（和文）次世代型自動衝突回避システムのための基盤技術の創出

研究課題名（英文）Creation of Fundamental Technologies for Next-generation Automatic Collision Avoidance System

研究代表者

平山 勝敏（Hirayama, Katsutoshi）

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号：00273813

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代型自動衝突回避の基盤技術として、これまでに開発した船舶衝突回避のための分散衝突回避アルゴリズムをさらに発展させるとともに、船舶に限らず様々な移動体に対して自動衝突回避を実現する汎用的な仕組みを考案する。主な成果は以下の4点である。(1)新規のアルゴリズムを開発し、その汎用性を高めるために機能を大幅に拡張した、(2)現実的かつ多様なシナリオのもとでのアルゴリズムの性能評価を行った、(3)衝突回避を包含する高度なタスクへの適用を試みた、(4)衝突回避を含む移動体群のさらなる組織的行動を実現すべく新しい技術との融合を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した船舶衝突回避のための分散衝突回避アルゴリズムDSSAに関する論文は、海事系分野におけるトップクラスの国際学術論文誌The Journal of Navigationに掲載され、さらにScopusにおいてTop 6.13%論文に位置付けられている。また、DSSAの発展版であるDSSA+に関する論文も、海事系分野における著名な国際学術論文誌TransNavに掲載された。このように本研究は、分散衝突回避アルゴリズムという基本アイデアを当該分野に広く認知させたという点で大きな意義があったと考える。

研究成果の概要（英文）：In this project, as the fundamental technologies of next-generation automatic collision avoidance, we have further enhanced distributed collision avoidance algorithms for ship collision avoidance that has been developed so far. We have also tried to develop general-purpose mechanisms that would be applied to any vehicles other than ships. The main achievements of this project are as follows. (1) We have developed a new algorithm and its functions were greatly expanded to enhance its versatility. (2) We have evaluated the performance of algorithm under realistic and diverse scenarios. (3) We have incorporated and tested the algorithm into the system that achieves more advanced tasks including collision avoidance, and (4) We have pursued to integrate the basic idea of algorithm with another technology in order to realize more organized behavior of vehicles.

研究分野：知能情報学

キーワード：分散衝突回避 フリートコントロール マルチエージェント経路発見

1. 研究開始当初の背景

海上交通の分野では、船舶衝突回避は重要な研究テーマであり、経路探索等の情報科学的手法を用いた研究が活発に進められている。2 船のみが関わる 1 対 1 の状況では、国際条約で単純な衝突回避ルールが定められているが、ある船舶が複数の船舶と遭遇する 1 対多の状況に対しては、状況が複雑なため明示的なルールが存在しない。そのため、遺伝的アルゴリズム、アントコロニー法、進化計算等による経路探索、バイズモデルを用いた経路推定等の研究が行われている。

研究代表者らは、マルチエージェントシステムの分野で分散探索に関する基礎研究に取り組んでおり、近年、その技術を船舶衝突回避問題に適用し、まだ初期段階ではあるが衝突回避の自動化に向けた一定の成果を得ている。その基本アイデアは、従来研究が扱っていた 1 対多状況を、多対多状況のマルチエージェントシステムとしてモデル化し、各船舶の「意図」や「計画」などの高度情報を送受信させることにより、単一船舶のみならず全船舶の最適な経路を同時に求めるといったものである。

2. 研究の目的

本研究では、次世代型自動衝突回避の基盤技術として、これまでに開発した船舶衝突回避のための分散衝突回避アルゴリズムをさらに発展させるとともに、船舶に限らず様々な移動体（車、移動ロボット、ドローンなど）に対して自動衝突回避を実現する汎用的な仕組みを考案する。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、本研究では主に以下の 4 つの研究課題に取り組んだ。

- (1) 分散確率的探索に基づく分散衝突回避アルゴリズムの開発と拡張
- (2) 分散衝突回避アルゴリズムにおける非協力エージェントの影響評価
- (3) 自律編成型艦隊制御のための基礎的研究
- (4) マルチエージェント経路発見問題に対する新しい定式化と解法

4. 研究成果

(1) 分散確率的探索に基づく分散衝突回避アルゴリズムの開発と拡張

多対多状況下での船舶自動衝突回避を実現する新しいアルゴリズムとして DSSA を考案し、従来アルゴリズムである DLSA および DTSA に比べて圧倒的に少ない通信コストで従来と同様の衝突回避が実現できることを幾つかのシナリオを用いた実験により定量的に示した [Kim, 2017]。なお、本論文は Scopus において Top 6.13% 論文とされており、海事系分野で高く評価されている。

また、DSSA では、全船舶（移動体）は常に一定速度で航行するものとし、衝突を回避する局面で次に選択する針路（舵角）を互いの意図として事前に交換することにより協力的に針路を決定するが、本研究では、衝突回避の際に針路変更だけでなく速度変更も考慮に入れた新しい分散衝突回避アルゴリズム DSSA+ を考案した。DSSA+ の手続きは基本的には DSSA と同じだが、針路変更だけでなく速度変更も衝突回避手段として考慮するため、DSSA+ の探索空間は DSSA の探索空間よりも格段に大きくなる。しかしながら、幾つかのシナリオを用いた実験による評価の結果、DSSA+ による各移動体がたどる軌跡の質は例えば図 1 に示すように劇的に改善されることが分かった [Hirayama, 2019]。

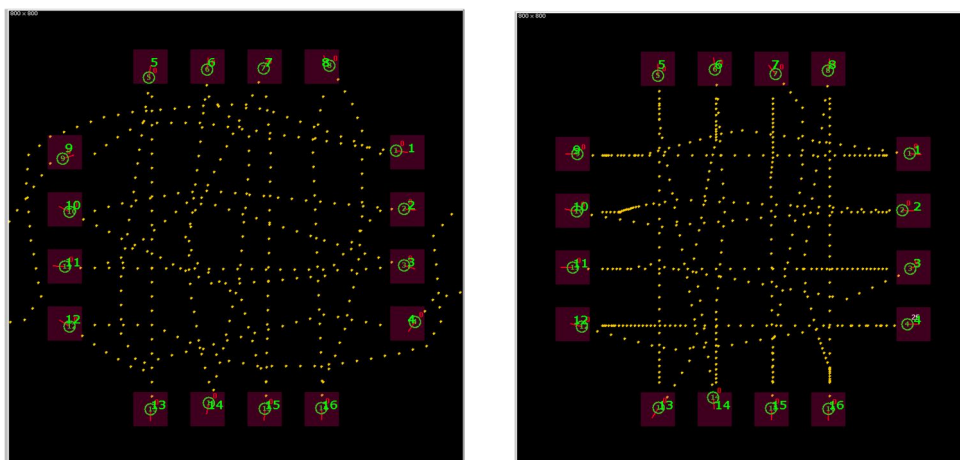


図 1 DSSA (左図) と DSSA+ (右図) による移動体の軌跡の一例

(2) 分散衝突回避アルゴリズムにおける非協力エージェントの影響評価

DSSA 等の分散衝突回避アルゴリズムでは、AIS のような通信機能をもった船舶同士が互いの意図を交換することにより、衝突を回避する針路を自動的に決定する。しかし、その一方で、現実の海上輸送においては、AIS 搭載義務のない漁船やプレジャーボートのような小型船が大きく船舶衝突事故に関係している。本研究では、すべての船舶が通信機能をもつ「協力的な船舶 (Co-Ship)」と仮定する DSSA において、通信機能をもたない「非協力的な船舶 (Solo-Ship)」の存在が性能にどう影響するかをシミュレーション実験により調べた。その結果、系内において Solo-Ship の割合を増やすと衝突回数は明らかに増加するが、衝突は常に Solo-Ship 同士または Solo-Ship と Co-Ship の間で起こり、Co-Ship 同士の間で衝突が起こることはなかった[唐渡, 2018]。これらの事実より、多数の船舶が往来する複雑な環境においては、AIS を搭載し DSSA 等の分散衝突回避アルゴリズムを用いて協力的に衝突回避することが有益であると確認することができた。

(3) 自律編成型艦隊制御のための基礎的研究

艦隊制御とは、複数の船舶からなる船団に対し、各船舶の現在位置や目標位置および速度等を適切に設定するタスクと見なすことができる。通常の艦隊制御では、旗艦あるいは地上の司令部等の司令拠点から与えられた指令をもとに、指令された編隊を組むべく各船舶が自身の動作を制御する。しかし、この場合、司令拠点による詳細な指示が不可欠であり、仮に司令拠点との通信に障害が生じた場合には編隊を正しく組むことができないことや、臨機応変な編隊の制御ができないという問題点がある。この問題点に対し、本研究では、各船舶に与える司令を最小限にし、どの船舶がどの場所にもどのように行くべきかについては、分散最適化アルゴリズムを用いて自律的に船舶自身が決定する自律編成型艦隊制御 (Self-Organizing Fleet Control (SOFC)) という枠組みを導入した。SOFC では、それぞれが自律的に動作する複数のエージェントに対し、目標位置の候補となる集合を入力として与え、各エージェントは自身の目標位置とその目標位置までの経路を出力する。[塩田, 2019]では、エージェントの現在位置集合と目標位置集合間のマッチング問題を分散環境で解く分散ラグランジュ緩和プロトコルを用いて各エージェントの目標位置を決め、その後、分散船舶衝突回避アルゴリズムを用いて各エージェントの目標位置までの経路を決定する 2 段階の分散解法を提案し、試験的な評価を行った。

(4) マルチエージェント経路発見問題に対する新しい定式化と解法

マルチエージェント経路発見 (MAPF) とは、複数のエージェントに対して、それぞれの初期位置から目標位置まで互いに衝突することなく移動できる最適な経路を求める問題である。様々な定式化がある中で、最近、共通の移動回数制限の下で目標位置に到達できるエージェントの数を最大化する問題 (MAPF-DL) の定式化とそのアルゴリズムが提案された。しかしながら、その定式化によれば、移動回数制限の下で目標位置に到達できるエージェントに対しては、互いに衝突しない経路を求める一方で、目標位置に到達できないエージェントに対しては、移動開始時において初期位置から除去し、初めから存在していなかったかのように扱う。本研究では、この点を修正した新しい定式化を導入し、0-1 整数計画ソルバーに基づく解法およびラグランジュ分解調整法に基づく解法を提案し、ベンチマーク問題例を用いてそれぞれの性能を評価した[原田, 2020]。

[Kim, 2017] Dong-Gyun Kim, Katsutoshi Hirayama, Tenda Okimoto: Distributed Stochastic Search Algorithm for Multi-ship Encounter Situations, The Journal of Navigation, Vol.70, Issue 4, pp.699--718, July 2017

[唐渡, 2018] 唐渡 裕基, 平山 勝敏, 沖本 天太, 金 東均: 分散確率的探索アルゴリズムを用いた船舶衝突回避における非協力船舶の影響, 2018 年度人工知能学会全国大会 (第 32 回) (JSAI-2018) 講演論文集, 2018 年 6 月 7 日, 鹿児島。

[塩田, 2019] 塩田 知広, 宮家 昂希, 平山 勝敏, 沖本 天太: 分散最適化アルゴリズムによる自律編成型艦隊制御に関する一考察, 情報処理学会第 81 回全国大会講演論文集, 2019 年 3 月 16 日, 福岡

[Hirayama, 2019] Katsutoshi Hirayama, Koki Miyake, Tomohiro Shiota, Tenda Okimoto: DSSA+: Distributed Collision Avoidance Algorithm in an Environment where Both Course and Speed Changes are Allowed, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.13, No.1, pp. 117--124, March 2019

[原田, 2020] 原田 拓歩, 國師 大朗, 平山 勝敏, 沖本 天太: 移動回数制限付きマルチエージェント経路発見問題の新しい定式化と解法, 2020 年度人工知能学会全国大会 (第 34 回) (JSAI-2020) 講演論文集, 2020 年 6 月 10 日, 熊本

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Donggyun Kim	4. 巻 25(3)
2. 論文標題 A Study on Intention Exchange-based Ship Collision Avoidance by Changing the Safety Domain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety	6. 最初と最後の頁 259 ~ 268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7837/kosomes.2019.25.3.259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsutoshi Hirayama, Koki Miyake, Tomohiro Shiota, Tenda Okimoto	4. 巻 13(1)
2. 論文標題 DSSA+: Distributed Collision Avoidance Algorithm in an Environment where Both Course and Speed Changes are Allowed	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation	6. 最初と最後の頁 117 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12716/1001.13.01.11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Donggyun Kim, Katsutoshi Hirayama, Tenda Okimoto	4. 巻 70(4)
2. 論文標題 Distributed Stochastic Search Algorithm for Multi-ship Encounter Situations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Navigation	6. 最初と最後の頁 699 ~ 718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S037346331700008X	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 原田 拓歩, 平山 勝敏, 沖本 天太, 國師 大朗
2. 発表標題 移動回数制限付きマルチエージェント経路発見問題の新しい定式化と解法
3. 学会等名 2020年度人工知能学会全国大会 (第34回) (JSAI-2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩田 知広, 平山 勝敏, 沖本 天太
2. 発表標題 DSSA+for3D: 分散確率的探索アルゴリズムDSSA+の3次元空間への拡張
3. 学会等名 2020年度人工知能学会全国大会(第34回)(JSAI-2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩田 知広, 宮家 昂希, 平山 勝敏, 沖本 天太
2. 発表標題 分散最適化アルゴリズムによる自律編成型艦隊制御に関する一考察
3. 学会等名 情報処理学会第81回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮家 昂希, 平山 勝敏, 塩田 知広, 沖本 天太
2. 発表標題 速度制御を考慮に入れた分散衝突回避アルゴリズム
3. 学会等名 情報処理学会第81回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 唐渡 裕基, 平山 勝敏, 沖本 天太, 金 東均
2. 発表標題 分散確率的探索アルゴリズムを用いた船舶衝突回避における非協力船舶の影響
3. 学会等名 2018年度人工知能学会全国大会(第32回)(JSAI-2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Marika Ivanova, Pavel Surynek, Katsutoshi Hirayama
2. 発表標題 Area Protection in Adversarial Path-finding Scenarios with Multiple Mobile Agents on Graphs - A Theoretical and Experimental Study of Strategies for Defense Coordination
3. 学会等名 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART-2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮田直人, 平山勝敏, 沖本天太
2. 発表標題 時間拡張グラフ上のナンバーリンクパズルとしてのマルチエージェント経路発見
3. 学会等名 情報処理学会第80回全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 唐渡裕基, 平山勝敏, 沖本天太, 金東均
2. 発表標題 分散確率的探索アルゴリズムを用いた船舶衝突回避における非協力船舶の影響
3. 学会等名 2018年度人工知能学会全国大会(第32回)(JSAI-2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Donggyun Kim, Kaoru Hirota, and Yaping Dai
2. 発表標題 Cost Function for Ship Collision Avoidance in Distributed System
3. 学会等名 5th International Workshop on Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics (IWACIII-2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	金 東均 (Kim Donggyun)	木浦海洋大学・Division of Navigation Science・Assistant Professor	
研究協力者	スリネック パベル (Surynek Pavel)	チェコ工科大学・Faculty of Information Technology・Associate Professor	