

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02371

研究課題名（和文）説明可能なAIによる複数他船の避航操船アルゴリズム

研究課題名（英文）Collision avoidance algorithm for multiple target ships by explainable AI

研究代表者

間島 隆博（Majima, Takahiro）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30392690

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：日本は、世界でも有数の輻輳海域を有するため、自動運航船の実現には、高度な自動避航操船アルゴリズムが求められる。本研究では衝突リスクの指標であるOZT（Obstacle Zone by Target）を用いて、避航操船アルゴリズムを構築するとともに、それを試行するための航海シミュレーション環境を整備した。避航操船アルゴリズムには、知識ベースによる手法と、説明可能なAIである学習分類子法の2手法を研究開発した。知識ベース手法では、輻輳海域である東京湾内の船舶交通流を再現したシミュレーション環境で試行し、学習分類子法は、他船との基本的な見合い関係で衝突せずに目的地に到達する操船方法を学習させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶による国内貨物輸送量はトンマイルベースで40%を超えており、輸送効率が高く、国内物流の要となっている。また、日本周辺は世界でも有数の輻輳海域であり、船舶の海難事故の8割が人為的要因で発生している。自動運航船の実現は、安全、経済、環境や、労働力不足といった問題の解決にもつながり、社会的意義は大きい。しかし、船舶の衝突事故では、人命損失や甚大な環境破壊の可能性が懸念されるため、避航操船アルゴリズムには説明が付き手法が望まれる。本研究で応用した学習分類子法は、説明可能なAIであり、避航操船に初めて応用された例となるため、学習分類子法の可能性を拡張する意味で学術的にも意義深い。

研究成果の概要（英文）：Japan has one of the most congested sea areas in the world, and therefore, an advanced automatic collision avoidance maneuvering algorithm is required to realize a maritime autonomous surface ship. In this study, we developed ship collision avoidance algorithms using OZT (Obstacle Zone by Target), an indicator of collision risk, and a navigation simulation environment to test the algorithms. Two algorithms were developed for the collision avoidance: a knowledge-based method and a learning classifier system, which is an explainable AI. The knowledge-based method was tested in a simulation environment that reproduced vessel traffic flow in Tokyo Bay, a congested sea area. The learning classifier system was used to learn how to maneuver a vessel to reach its destination without collision in a basic situation with other vessels.

研究分野：マルチエージェントシステム

キーワード：避航操船 学習分類子システム OZT COLREGs

1. 研究開始当初の背景

避航操船アルゴリズムは、自動運航船の実現に欠かせない技術である。特に、日本周辺海域は、多数の船舶が複雑に入り組んだ経路を航行する世界でも有数の輻輳海域であり、高度な自動避航操船の実現が求められる。通常、衝突リスクの算定や衝突警報を発する際、その指標として、最接近距離 (DCPA) や最接近時間 (TCPA) が併用して利用されるが、その運動状態での衝突の可能性の度合いを示唆するにとどまり、具体的な避航操船法を提供するものではない。また、複数の相手船に対する避航を考慮したと表すアルゴリズムにおいても、対象を 1 隻に限定した避航処理を逐次的に重ねる方法が取られており、真の意味で複数船を同時に考慮しているわけではない。本研究の提案者が、研究開発した衝突リスクの指標である OZT (Obstacle Zone by Target。以下、OZT) は、図 1 のように、侵入することが許されない海域を複数の相手船に対して図示することができ、曖昧なパラメータによる経験的な調整がないため、アルゴリズムを構成しやすく、衝突警報システムとしての応用も可能となる。

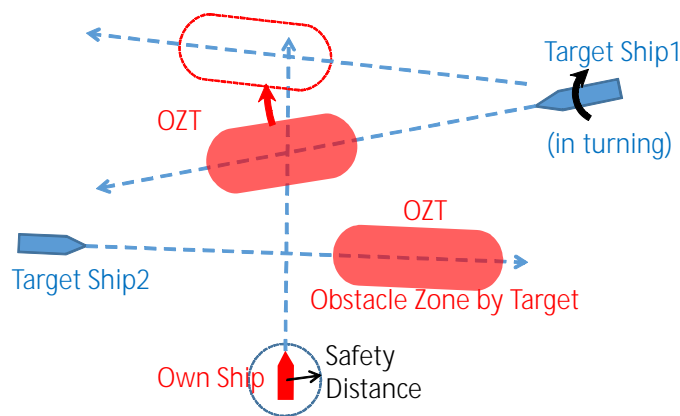


図 1 OZT (Obstacle Zone by Target) のイメージ

また、人工知能の研究分野である機械学習では、ディープラーニング (以下、DL と略す。) が盛んに研究され、深層強化学習を避航操船機能へ応用する試みもあるが、学習結果はブラックボックス化され、小回りの効く小型船を対象とし、大きな時定数を持つ大型船 (舵を切っても、変針するために数分を要することもある。) を対象としたものではない。しかしながら、学習分類子法 (Learning Classifier System。以下、LCS) は、強化学習の一種であり、シミュレータや現実世界で経験を通して試行錯誤的に IF-THEN ルール (ある状態においてとるべき行動の規範) を自動的に作り上げる能力を持ち、ブラックボックス化の問題を避けることができる。

2. 研究の目的

複数の見合い船を対象とした、自動避航操船アルゴリズムを、説明可能な AI である学習分類子法を用いて研究することが目的である。そのために、複数の相手船との衝突リスクを同時に見積もることができる OZT を活用した避航経路の算定方法を研究開発する。さらに、アルゴリズムには、原則的に右転による回避行動を求める海上衝突予防法に沿った操船が可能となり、変針に時間が係る時定数が大きな船を自船の対象とすることとする。また、このアルゴリズムに LCS の応用について研究する。なお、アルゴリズムの妥当性は、多数の船舶が行き交う、東京湾などの輻輳海域において取得された AIS (自動船舶識別装置) 情報を基礎とするシミュレーションにより試行する。

3. 研究の方法

3. 1. OZT による複数相手船を対象とした知識ベースの避航操船アルゴリズム

避航操船アルゴリズムが適用される船舶 (自船) は、通常、計画航路を Way Point (以下、WP) の点列位置情報として持ち、衝突の危険が無い場合は、この計画航路に沿って航行する。ここで、図 1 のように、OZT により衝突の可能性のある船舶を検知した場合、図 2 に示すように、自船の進行方向に仮想的な避航経路ネットワークを張り、OZT と重なるノード及びリンクを除去し、次に向かうべき WP への経路を最短路探索アルゴリズムにより求める。また、現実的な自律的避航を模擬するために、船体運動モデルとして図 3 および次式に示す KT モデルを導入し、舵角や機関出力の制御として PID 制御のアルゴリズムを組み込む。

$$\frac{d\psi}{dt} = r, \quad \frac{dr}{dt} = -\frac{r}{T} + \frac{K}{T} \delta, \quad \frac{d\delta}{dt} = \frac{\delta_E - \delta}{T_E}$$

ここで、T：追従性指数、K：旋回性指数、r：重心軸の回頭角速度、 δ ：舵角、 δ_E ：指示舵角、 T_E ：舵角の追従性指数

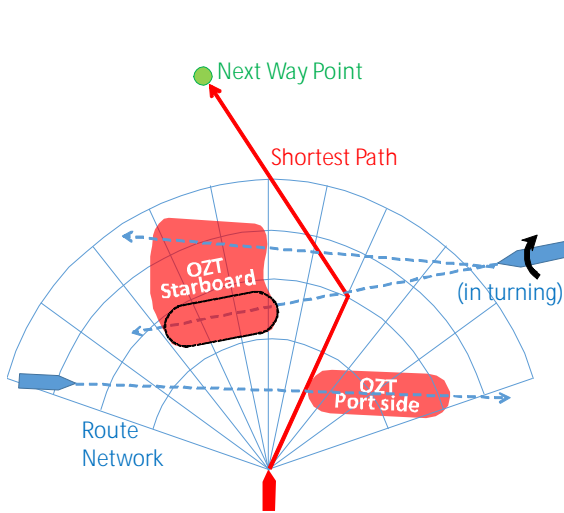


図2 避航経路導出方法のイメージ

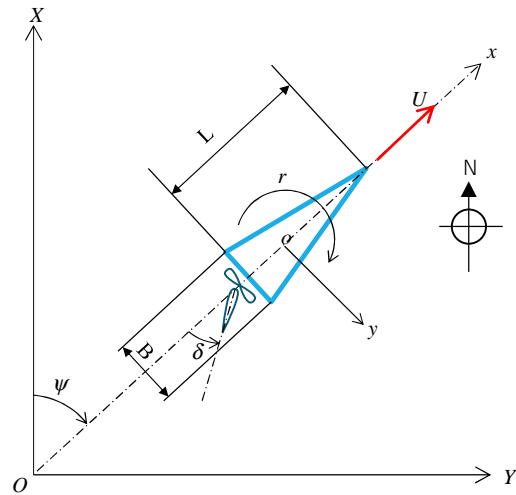


図3 KTモデルの変数、座標

また、これらのアルゴリズムを試行するシミュレーション環境を構築するために、AIS（船舶自動識別装置）情報を収集、データベース化し、計算機上に現実の海域の交通流を再現できる環境を構築する。

3.2. LCSによる避航操船アルゴリズム

LCSは強化学習の一種であり、“状態 行動”で表される分類子の更新に、遺伝的アルゴリズムを組み合わせた手法である。図4に本研究の問題に対するLCSの学習過程をイメージとして示す。なお、LCSは多くの派生版があるが、ここでは、最も簡易なZCS(Zeroth Level Classifier)を利用した。

航海シミュレーションによる環境の中で、図中Own Shipで表される学習主体である自船が、自船を取り巻く状態を、図の通りエンコード化された、State=01000 1001 001110000として、検知・認識し、その状態において衝突せずに次のWPに短時間で到達することを達成するために取るべき行動（図中Action=10が選択され、指示舵角+15°による面舵を意味する。）を実行する。目標達成時に得られる図中Rewardで表される報酬により、分類子（図中Classifierで表され、“状態 行動”の組み合わせの情報を持つ。）に対する評価値（図中Strength）を上げ、行動決定過程を洗練することにより学習を進めるシステムである。

このため、環境から検知されたStateに適合する（Stateの#は、0でも1でも構わないことを意味）分類子が図中Match Setに登録され、その中で高いStrengthの合計値を持つActionを支持したClassifierがAction Setに登録される。このActionに対応する指示舵角が操船に反映されるが、WPへの到達といった目的を達成した場合、環境からRewardが得られ、Action Setの中の分類子のStrengthが上昇する。また、本件のように、目標達成までに複数のステップが必要な問題では、Rewardが発生した前ステップのAction SetにあったClassifierのStrengthを上昇させる、Internal Reinforceの過程が必要となる。なおStateは、WPの距離と方位、および、OZTの方位を図5のようにエンコード化した。

LCSの特徴の一つは、選択された行動に至る過程が明確に記録される点が挙げられる。この点において判断過程がブラックボックスとなるDLと一線を画し、操船行動に至った理由の説明が可能な情報を提供できる。

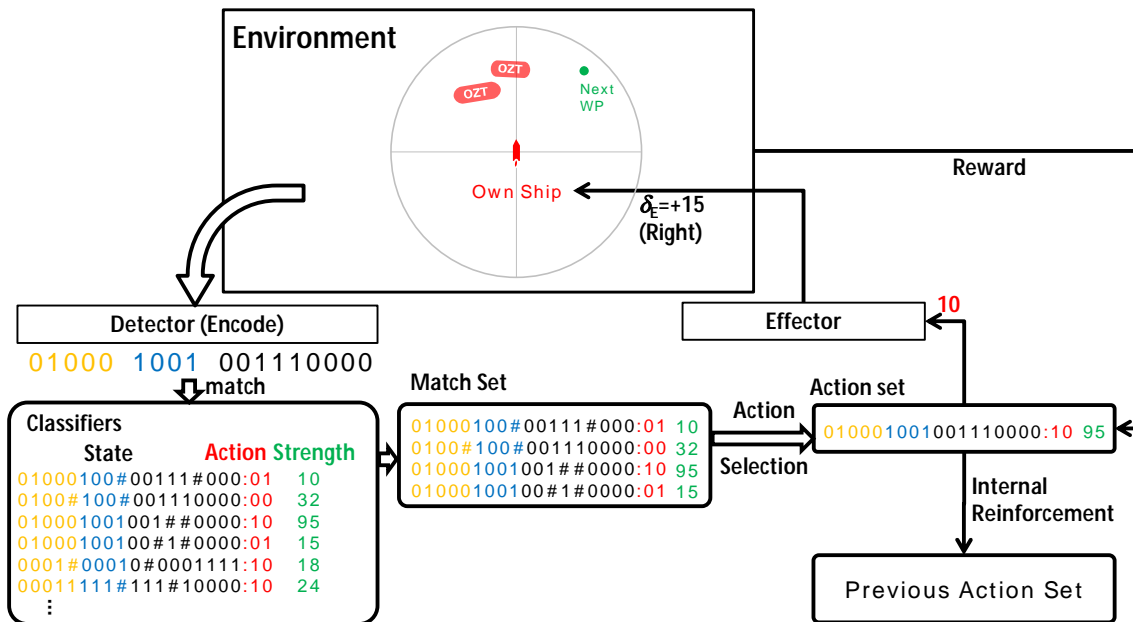


図 4 ZCS の学習過程のイメージ

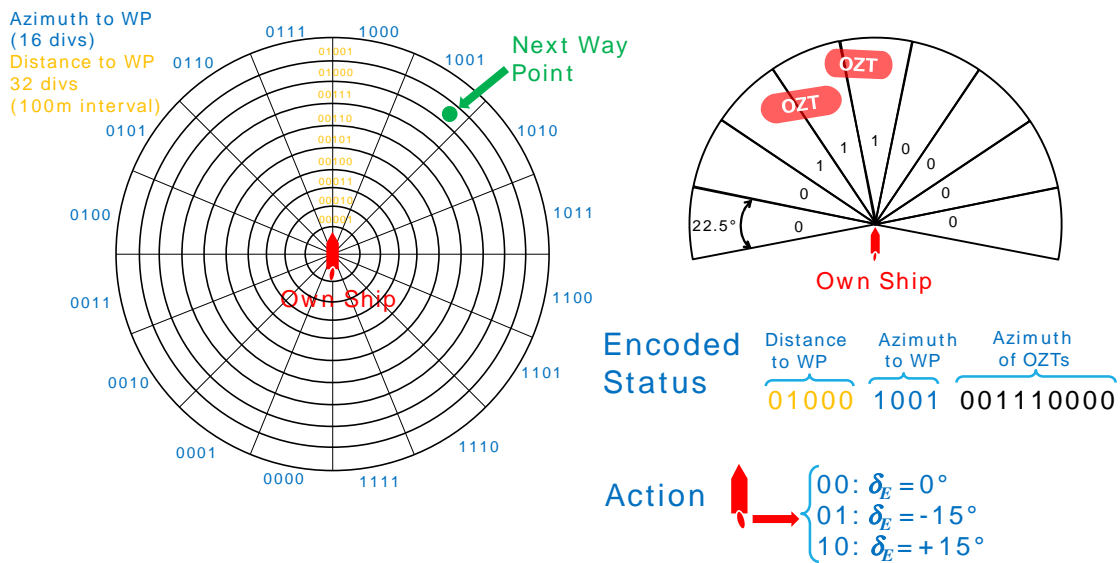


図 5 状態と行動のエンコード化

4. 研究成果

知識ベースの避航アルゴリズムを実装した自船（全長 80m のタンカーを想定）を、図 6 に示す東京港から東京湾口へ向かう計画航路で航海させて試行した。なお図中の色付けされた海域は、過去の衝突や乗揚げ事故の発生頻度を表している。また、計画航路は、「最短航路」と、上述の過去の事故海域を避けるように設定した「最小危険度航路」の 2 種類を用意した。他船の交通流データには、2017 年 5 月 10-16 日の 7 日間、15:00 から 3.5 時間分の AIS データを用い、毎日 1 回、7 航海(x2 計画航路)のシミュレーションを行った。この航海シミュレーション中の自船の周辺と船橋から目視できる状況を図 7 に示す。

航海シミュレーションの結果を図 8 に示す。なお、このシミュレーションでは、自船のみが避航し、他船と衝突することは無かった。図中、横軸は出港からの経過時間、縦軸は、衝突の危険度である。衝突の危険度は、経過時間を 5 分間隔に区切り、その時間区間に安全航過距離として設定した自船から 320m の範囲に入った他船の滞在時間（秒）とした（シミュレーションの時間間隔は 1 秒に設定されており、安全航過距離内に常に 1 隻の他船が存在する場合、縦軸の値は 300 となる。）。図 8 のピークが現れる時間帯は 2 航路で異なり、「最小危険度航路」のトータル衝突の危険度は、「最短航路」の危険度の 1/3 ほどになった。

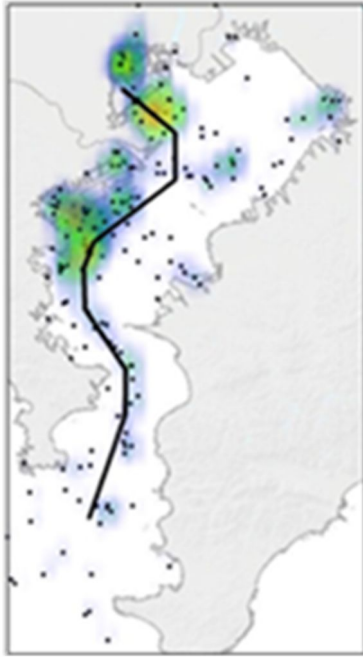


図 6 東京湾内の海難事故発生点と計画航路(黒い実線)

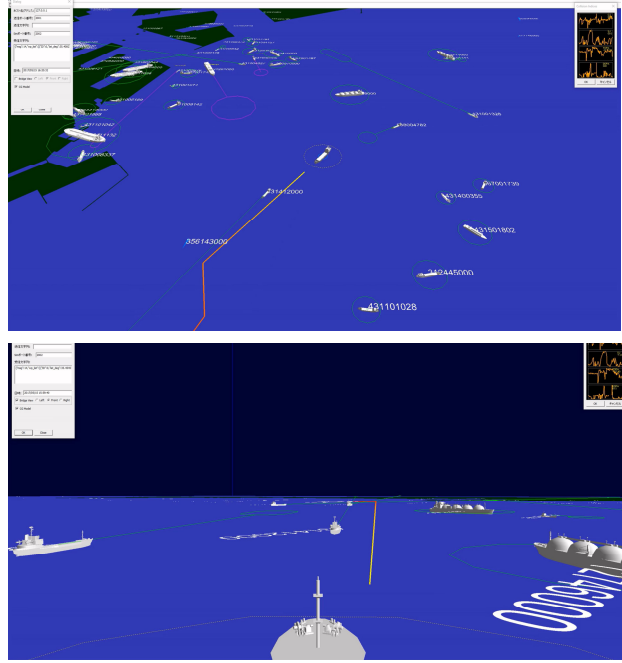


図 7 東京湾内航海シミュレーションの様子

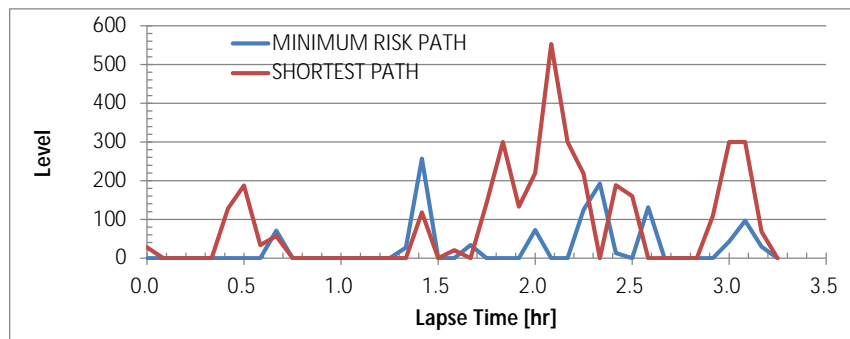


図 8 最短航路と最小危険度航路の危険度の比較

次に LCS による避航操船アルゴリズムについて、自船、他船ともに 80m のコンテナ船を想定し、図 9 に示す基本的な見合い関係における避航操船の学習を行った。なお、自船と 2 隻の他船は、設定海域の中央で衝突する設定となっており、他船は避航操船を行わない。学習結果として、3 隻の航跡を図 10 に示す。自船は他船との衝突海域を避け、避航操船を行った後、WP へ到達することが出来た。

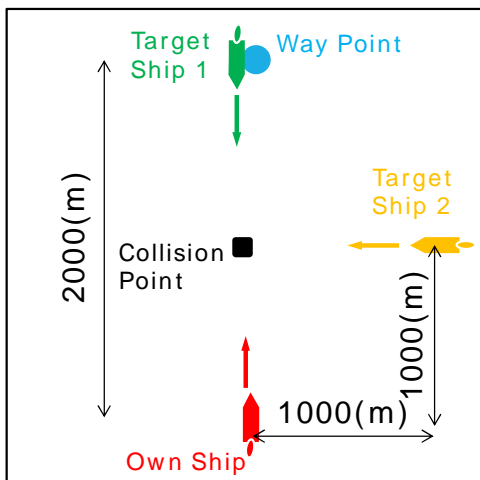


図 9 自船と 2 隻の他船との初期配置

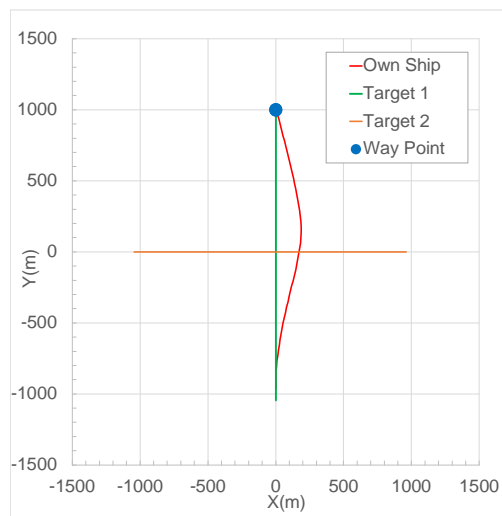


図 10 LCS の学習結果による航跡

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 河野 航大, 梶原 奨, 高野 諒, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹	4. 巻 12
2. 論文標題 時間的・空間的観点に基づく粒子群最適化と差分進化の個体別選択	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 進化計算学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 高野 諒, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹	4. 巻 11
2. 論文標題 評価値軸・設計変数上の解の継続変化に対する群知能アルゴリズムのためのメカニズムの設計とその追従性の評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 進化計算学会論文誌	6. 最初と最後の頁 29~44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11394/tjpnsec.11.29	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 Uwano Fumito, Takadama Keiki	4. 巻 1
2. 論文標題 Reward Value-Based Goal Selection for Agents' Cooperative Route Learning Without Communication in Reward and Goal Dynamism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SN Computer Science	6. 最初と最後の頁 Article No.182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42979-020-00191-2	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 Sawada Ryohei, Sato Keiji, Majima Takahiro	4. 巻 0
2. 論文標題 Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 0
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-020-00755-0	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29件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Tadokoro, M., Sato, H., and Takadama, K.
2. 発表標題 XCS with Weight-based Matching in VAE Latent Space and Additional Learning of High-Dimensional Data
3. 学会等名 2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maekawa, Y., Kawano, K., Kajihara, S., Fukumoto, Y., Sato, H., Takadama, K.
2. 発表標題 Finding Many Good Solutions by Multi-Swarm Optimization for Multiple Robots: The Niching Migratory Multi-Swarm Optimiser with Limited Movement
3. 学会等名 The 26th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fukumoto, Y., Tadokoro, M., and Takadama, K.
2. 発表標題 Cooperative Multi-agent Inverse Reinforcement Learning Based on Selfish Expert and its Behavior Archives
3. 学会等名 The 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Uwano, F. and Takadama, K.
2. 発表標題 Directionality Reinforcement Learning to Operate Multi-Agent System without Communication
3. 学会等名 The 11th International Workshop on Optimization and Learning in Multiagent Systems (OptLearnMAS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高玉 圭樹
2. 発表標題 説明可能なAI: 学習分類子システム
3. 学会等名 海上技術安全研究所 海洋リスク評価系、知識・データシステム系講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田所 優和, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹
2. 発表標題 次元削減ルールの復元における過剰一般化と被覆における過剰特化を回避するXCS による高次元ルールの解釈性向上
3. 学会等名 進化計算学会, 第14回進化計算シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田所 優和, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹
2. 発表標題 VAEの潜在変数空間における分布ベース照合に基づく学習分類子システム
3. 学会等名 計測自動制御学会, システム・情報部門 学術講演会 2020 (SSI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前川裕介, 河野航大, 梶原奨, 福本有季子, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹
2. 発表標題 複数局所解探索のための複数群間移動に基づく粒子群最適化: 実ロボット環境に向けた個体数固定と同時移動への展開
3. 学会等名 進化計算学会, 第14回進化計算シンポジウム 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野 航大, 梶原 奨, 田所 優和, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹
2. 発表標題 重みベクトルと混雑距離における解選択の相互補完に基づく進化計算: MOEA/D と NSGA-II の融合
3. 学会等名 進化計算学会, 第14回進化計算シンポジウム 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福本 有季子, 速水 陽平, 前川 佳幹, 高玉 圭樹
2. 発表標題 個別探索から生成された行動系列の優先付けに基づくマルチエージェント逆強化学習
3. 学会等名 計測自動制御学会, システム・情報部門 学術講演会 2020 (SSI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田 涼平
2. 発表標題 深層強化学習を用いた複数の船舶を考慮した自動避航操船
3. 学会等名 海上技術安全研究所報告第20巻第4号
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 間島 隆博
2. 発表標題 自動運航船の実現に向けた避航操船技術の研究開発
3. 学会等名 令和2年(第20回)海上技術安全研究所講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 間島 隆博, 佐藤 圭二, 澤田 涼平
2. 発表標題 自動運航船の避航アルゴリズムの開発とシミュレータ
3. 学会等名 日本人間工学会関東支部第50回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sawada, R.
2. 発表標題 Automatic Collision Avoidance Using Deep Reinforcement Learning with Grid Sensor
3. 学会等名 The 23rd Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Majima, T., Takadama, K., Watanabe, D., Aratani, T. and, Sato, K.
2. 発表標題 Application of Multi Agent System and Transition Matrix Analysis to Logistics System for Equal Distribution under Disaster Situation
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Majima, T.
2. 発表標題 Smoother Sailing with the Internet of Things -Leveraging AI Technology for Safe & Efficient Navigation and Operations at Sea-
3. 学会等名 Smart Maritime Network Tokyo Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Sato, K.
2 . 発表標題 A Navigational Information Display System for Supporting Decision Making for Collision Avoidance -Utilizing Obstacle Zone by Target (OZT)-
3 . 学会等名 e-Navigation Underway Conference North America (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tadokoro, M., Hasegawa, S., Tatsumi, T., Sato, H., and Takadama, K.
2 . 発表標題 Local Covering: Adaptive Rule Generation Method Using Existing Rules for XCS
3 . 学会等名 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takadama, K., Yamazaki, D, Nakata, M., and H. Sato
2 . 発表標題 Complex-Valued-based Learning Classifier System for POMD Environments
3 . 学会等名 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takano, R., and Takadama, K.
2 . 発表標題 Toward Tracking to Serial Movement for Two Swarm Intelligence Algorithms in Dynamic Environments
3 . 学会等名 The 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Kajihara, S., Kobayashi, R., Takano, R., Takadama, K., Aratani, T., and Majima, T.
2. 発表標題 Towards Adaptation to Environmental Change without Network Revision in Urban Transit Network Design Problem
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadokoro, M., Hasegawa, S., Tatsumi, T., Sato, H., and Takadama, K.
2. 発表標題 Knowledge Extraction from XCSR Based on Dimensionality Reduction and Deep Generative Models
3. 学会等名 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 間島 隆博
2. 発表標題 海事産業のビッグデータとAIの応用
3. 学会等名 全国水産高等学校長協会・全国水産高等学校実習船運営協会・全国高等学校水産教育研究会総会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 間島 隆博
2. 発表標題 船舶の自律化について
3. 学会等名 日本海運経済学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 圭二
2. 発表標題 自動避航アルゴリズムの開発
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会東部支部ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 間島 隆博, 南 真紀子, 澤田 涼平, 福戸 淳司
2. 発表標題 自動避航操船の計算アルゴリズムの開発
3. 学会等名 海上技術安全研究所報告, 第19巻別冊, pp.73-76
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 圭二, 澤田 涼平, 福戸淳司
2. 発表標題 航行妨害ゾーン (OZT) 可視化による避航判断支援システムの開発
3. 学会等名 海上技術安全研究所報告, 第19巻別冊, pp.67-71
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田所 優和, 長谷川 智, 辰巳 嵩豊, 高玉 圭樹
2. 発表標題 Local Covering: 保持分類子の条件部一般化に基づくXCSの適応的ルール生成法
3. 学会等名 第13回進化計算シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高野 諒, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹
2. 発表標題 評価値軸・設計変数上の解の継続変化に対する群知能アルゴリズムのメカニズムの設計とその追従性評価
3. 学会等名 第13回進化計算シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Kajihara, S., Sato, H., and Takadama, K.	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 16
3. 書名 Applications of Evolutionary Computation, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12694	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 周辺状態表現方法、避航動作学習プログラム、避航動作学習システム、及び船舶	発明者 澤田涼平	権利者 海上技術安全研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-132152	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	澤田 涼平 (Sawada Ryohei) (00825911)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	
研究分担者	高玉 圭樹 (Takadama Keiki) (20345367)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 (12612)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	福戸 淳司 (Fukuto Junji) (40360713)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	
研究分担者	佐藤 圭二 (Sato Keiji) (90734244)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関