

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：50102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03979

研究課題名（和文）Blockchainと分散学習による群ロボットの高信頼型協調動作に関する研究

研究課題名（英文）An Experimental Study for Highly-Reliable Cooperative Behavior of Swarm-Robots using Blockchain and Distributed Deep Learning

研究代表者

杉本 大志（Sugimoto, Masashi）

苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号：40780424

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、群ロボットの制御に対し、Low Power, Wide Area (LPWA)システム、BlockchainとMulti-Agent自律分散型深層学習を組み合わせたシステムを提案するという目標のもと、Dueling DQNとモデル化したLoRa無線、Blockchainを用いた協調動作システムをシミュレーション的に構築した。検証実験の結果、一般的なマルチエージェント強化学習システムと遜色ないパフォーマンスの実現を確認した。今後はシステムを実際のハードウェアに反映することで実環境における具体的な動作についての考察を行いたい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、群ロボットの制御に、Low Power, Wide Area(LPWA)システム、Blockchain、およびMulti-Agent自律分散型深層学習を組み合わせたシステムを提案した。これにより、エネルギー効率の高い広域通信技術とセキュアなデータ管理、および高度な自律学習を融合させた新たな協調動作システムを構築した。シミュレーションを通じて、Dueling DQNとLoRa無線、Blockchainを用いた本システムが、従来のマルチエージェントシステムと遜色ないパフォーマンスを発揮することを確認した。この成果は、スマートシティや農業、災害対応など広範な社会的課題への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to propose a system combining Low Power, Wide Area (LPWA) systems, Blockchain, and Multi-Agent Autonomous Decentralized Deep Learning for controlling swarm robots. We have simulated a cooperative operation system using Dueling DQN and modeled LoRa wireless communication with Blockchain. The results of our validation experiments confirmed that the system achieved performance comparable to conventional multi-agent reinforcement learning systems. Moving forward, we intend to implement the system in actual hardware to investigate its specific behavior in real-world environments.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：深層学習 LPWA 群ロボット ブロックチェーン

## 1. 研究開始当初の背景

自然界における生物の「群れ」を俯瞰すると、明らかになりリーダーがいなくてもかかわらず集団で移動する際にフォーメーションを形成したり、全体で移動速度を合わせたりと、柔軟な集団的協調を実現している。こういった機能やシステムに着想を得て提案されたものが群ロボットシステムとなる。無線通信によって互いにコミュニケーションを行うような群ロボットシステムが考案され、協調行動・意思決定に関する分散アルゴリズムが盛んに研究されてきた。

一方で、情報共有を行う頻度は多ければ多いほど、協調行動を行うための情報が揃い、最適行動を創発するための条件が満たされる。しかし、群を構成する各ロボットが任意のタイミング（非同期のUDP等）で無線通信をする場合、送信電力コストによるエネルギー消費量の増大、あるいは受信ロス、果ては無関係のロボットや他者への電波干渉が十分想定されていた。群ロボットシステムのように“Server Position”や“Client Position”が明確に定義できない場合、適用範囲や運用ロボットシステムの規模に応じたネットワークを構築し情報交換を行う必要がある。この中心役が存在しないシステムにおいてはPeer-to-Peerが最適だが、群を構成する各ロボットが自由に移動すると、通信可能範囲の制約や地形的な制約等によって通信路の信頼性が著しく低下する、もしくは通信路そのものが断絶するリスクがあるため、群を構成する各ロボットは移動に際して通信路全体が常に接続されているよう相互に監視する必要があった。しかし、ネットワークの連結性が崩れることを回避する場合、各ロボットは行動範囲を制限することで対応することとなり、ロボット間での物理的な衝突や作業区域での干渉を誘発する可能性もあり得る。

## 2. 研究の目的

これまでに、複数ロボットを使った分散型自律学習が研究されてきたが、Multi-agent分散型深層強化学習を用いた群ロボット制御に関する例はほとんど存在しなかった。しかし、研究代表者らの予備実験から、LiDARを搭載した単体ロボットにDQN(Deep Q-network)を実装して「空間探索問題」「探索搾取問題」を実環境下で取り扱った結果、一般的な強化学習に比べ極めて効率的な挙動を獲得できることを実験的に確認した。この結果より、実ロボットに対してApe-Xを搭載することで、実環境での有用性が広く認められ、学術的価値が高いと考えられる。

本研究の目的は、実環境において群ロボットが柔軟に作業を分担しながら全体として目標を達成するための、深層強化学習を活用したMulti-agent分散協調動作アルゴリズムの開発とその有用性の検証である。具体的には、ブロックチェーン技術を用いて各ロボットが共有する情報を暗号化し、盗聴や改ざんを防止する。また、各ロボットがLiDARによって得たマップや9軸センサを用いた計測結果を一元化して共有することで、各ロボットの負荷を軽減しながら、集団としての作業タスクを効率的に遂行するための協調アルゴリズムを構築することを目指す。

ブロックチェーンは、2008年に登場した分散型の台帳技術の一種である。複数拠点に分散されたサーバに、それぞれ同一の記録を同期させて一つの台帳を維持する。複数の取引をブロックとしてまとめ、数珠つなぎに分散台帳に記録する。ブロック作成の際は、取引データと共に直前ブロックのハッシュ値を持たせることにより、改ざんを実質不可能にする。ハッシュ計算により、同じデータからは同じハッシュ値が得られるが、わずかでも異なるデータを入力すると、全く異なるハッシュ値が得られるため、万一元データが改ざんされても検知が可能となる。

このような技術を活用し、群ロボットが協調して作業を遂行するための新しいアルゴリズムの開発と、その有効性を実証することを本研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、コロナ禍での行動制限が影響したため、シミュレーションベースでの提案システムの実現と有用性検討を行った。具体的には、Python環境でロボットモデルを作成し、LPWA(Low Power Wide Area)モデルやセンサモデルも同時に構築した。その後、同じくPython環境下でロボットモデルが複数存在する迷路環境下で、各ロボットがLPWAとブロックチェーンによって通信し、本研究で新規に開発したマルチエージェントDueling DQNを用いて探索行動を行った。Ape-Xの解析並びにマルチエージェント化は研究進度が遅れていたため着手できなかった。

### 3.1 システムの構築

#### 1. ロボットモデルの作成:

Python環境において、シミュレーション用のロボットモデルを作成した。各ロボットには動作やセンサ機能を搭載しており、仮想環境内での動作を再現する事が可能となった。また、ロボットモデルにはLiDARや9軸センサの機能も含み、現実のセンサデータを模倣した情報を取得する。

## 2. LPWA モデルとセンサモデルの構築:

ロボット間の通信には、LPWA (Low Power, Wide Area) 通信プロトコルを使用した。LPWA モデルをシミュレーション環境に組み込み、ロボット間の低消費電力通信を再現した。各ロボットにはセンサモデルを搭載し、環境データの収集と解析を行った。

## 3. ブロックチェーンによる通信:

ロボット間の通信にはブロックチェーン技術を導入し、各ロボットが共有する情報を暗号化した。これにより、盗聴や改ざんを防止し、安全なデータ共有を実現した。

### 3.2 アルゴリズムの開発と実装

#### 1. Dueling DQN のマルチエージェント化:

深層強化学習の一種である Dueling DQN をマルチエージェント化し、複数のロボットが協調して探索行動を行うためのアルゴリズムを開発した。各ロボットが自己学習しながら、他のロボットと協調して動作する仕組みを実現した。

#### 2. アルゴリズムの実装とシミュレーション:

開発したアルゴリズムを Python 環境で実装し、複数のロボットが協調してタスクを遂行するシミュレーションを行った。空間探索やタスク分割、衝突回避など具体的なシナリオを設定し、各シナリオにおける効率性や協調性を評価した。

### 3.3 データ収集と解析

#### 1. シミュレーションデータの収集:

各シミュレーションの実行ログやセンサデータ、ロボットの動作軌跡を収集した。各ロボットの個別データと全体としての協調データを整理し、一元化して分析した。

#### 2. パフォーマンス評価:

アルゴリズムの性能を評価するために、いくつかの評価指標 (累計獲得報酬, エネルギー消費, 通信効率など) を設定した。これらの指標に基づいて、アルゴリズムの有用性を定量的に評価した。

### 3.4 実環境への適用可能性検討

#### 1. 実環境シナリオの設定:

提案システムを実環境に適用するためのシナリオを検討した。具体的には、災害現場での探索救助群ロボットの動作や、工場内での協調作業ロボットの動作などを想定した。

#### 2. 適用可能性の評価:

シミュレーション結果をもとに、実環境での適用可能性を検討した。実環境での課題や改良点を洗い出し、シミュレーションで得た知見を反映してシステムの改良を行った。

以上の方法により、シミュレーションベースでの群ロボットシステムの有用性を検証し、実環境への適用可能性を評価した。

## 4. 研究成果

本研究では、シミュレーションベースでの群ロボットシステムの実現と有用性の検討を行い、以下の成果を得た。

### 4.1 アルゴリズムの開発と実証

#### 1. マルチエージェント化した Dueling DQN の開発:

深層強化学習を用いた Multi-agent 分散協調動作アルゴリズムを開発し、ロボット間の効率的な協調動作を実現した。各ロボットが独立に学習しながら、全体として目標を達成するための協調行動をシミュレーション環境で実証した。

#### 2. LPWA とブロックチェーンを用いた安全な通信:

LPWA 通信プロトコルとブロックチェーン技術を組み合わせ、各ロボットがセンサデータ並びに知識空間を安全に共有できるシステムを構築した。通信効率やエネルギー消費の最適化を図り、実環境での適用可能性を高めた。

### 4.2 シミュレーションによる検証と評価

#### 1. シミュレーションによる性能評価:

複数のシナリオ (空間探索, タスク分割, 衝突回避) において、提案アルゴリズムの有効性をシミュレーション環境で評価した。タスク獲得報酬, エネルギー消費, 通信効率などの評価指標に基づき、アルゴリズムの性能を定量的に評価し、優れた成果を確認した。

### 4.3 実環境への適用可能性の検討

#### 1. 実環境シナリオの設定と評価:

災害現場での探索救助群ロボットの動作や、工場内での協調作業ロボットの動作など、実環境シナリオを設定し、適用可能性を検討した。シミュレーション結果をもとに、実環境での課題や改良点を明確にし、システムの改良を行った。

### 4.4 学術的成果の発表

#### 1. 論文の投稿と採録:

本研究の成果をまとめた論文を複数の学術誌に投稿し、2本の論文が採録された。これにより、研究の学術的価値と新規性が認められた。

## 2. 学会発表:

本研究の成果を国内の学会で 5 件発表した。このうち 2 件は研究代表者が提案したオーガナイズドセッションとなっており、広く学術コミュニティに対して研究成果を共有するとともに、異なる知見や専門家からのフィードバックを得ることができた。

以上の研究成果により、提案システムの有用性と実環境への適用可能性が示され、今後のさらなる研究と実用化に向けた基盤が確立されたものと結論付ける。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Masashi SUGIMOTO, Kaito HASEGAWA, Yuuki ISHIDA, Rikuto OHNISHI, Kouki NAKAGAMI, Shinji TSUZUKI, Shiro URUSHIHARA, Hitoshi SORI	4. 巻 36
2. 論文標題 A Study for Comparative Analysis of Dueling DQN and Centralized Critic Approaches in Multi-Agent Reinforcement Learning	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 杉本 大志, 河野 成一郎, 長谷川 翔音, 曾利 仁, 漆原 史朗, 都築 伸二	4. 巻 -
2. 論文標題 マルチエージェント分散型Dueling DQNとブロックチェーンを用いた分散型学習における迷路環境での性能評価	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 産業応用工学会論文誌	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉本 大志, 都築 伸二, 漆原 史朗, 曾利 仁
2. 発表標題 深層強化学習とLPWAを用いた 群ロボット向け情報共有システムの提案
3. 学会等名 インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN 2022 in Kobe)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本 大志, 曾利 仁, 漆原 史朗, 都築 伸二
2. 発表標題 DQNにおけるモチベーション調整に関する考察
3. 学会等名 インテリジェント・システム・シンポジウム 2021 FAN 2021 Online
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本 大志, 曾利 仁, 漆原 史朗, 都築 伸二
2. 発表標題 DQNにおける個体間モチベーション調整に関する考察
3. 学会等名 第21回複雑系マイクロシンポジウム (CSMS2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 善仁, 杉本 大志, 曾利 仁, 漆原 史朗, 都築 伸二
2. 発表標題 LiDARを搭載した 屋内向け高齢者見守りロボットの直進制御についての研究
3. 学会等名 第20回情報科学技術フォーラム (FIT2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本 大志, 長谷川 翔音, 石田 勇輝, 大西 陸仁, 仲上 航希, 都築 伸二, 漆原 史朗, 曾利 仁
2. 発表標題 LoRa通信とDueling DQNを用いた自律的なエージェントの学習
3. 学会等名 インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN 2023 in Fukuoka)
4. 発表年 2023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 分担者	曾利 仁  (SORI Hitoshi)  (10353327)	津山工業高等専門学校・総合理工学科・教授   (55301)	

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	都築 伸二  (TSUZUKI Shinji)  (60236924)	愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授    (16301)	
研究分担者	漆原 史朗  (URUSHIHARA Shiro)  (90311092)	香川高等専門学校・電気情報工学科・教授    (56203)	

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