

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11494

研究課題名（和文）広域環境地図生成のためのブロックチェーンを用いた複数ロボット間データ共有システム

研究課題名（英文）Data sharing systems among mobile robots with blockchain for map generation of wide environments

研究代表者

森岡 一幸 (Morioka, Kazuyuki)

明治大学・総合数理学部・専任教授

研究者番号：40408711

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：仮想通貨の基盤技術であるブロックチェーンをロボットネットワークシステムに適用して、各ロボットのデータの所有権および価値に基づいたデータ共有システムを開発した。都市環境下で移動ロボットが自律走行する際、走行に必要な箇所の環境地図をその所有者からブロックチェーンを通じて取得し、価値に応じた対価を支払うことで、都市環境内を走行できるシステムである。価値のある地図の所有者はその所有権を守ることができ、他のロボットは必要に応じて地図を取得できる、ロボットネットワークシステムが構築可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

たくさんの自律移動ロボットが生活環境内に存在することになる未来社会を念頭に置くと、走行に必要な情報をロボット間で共有することが有効である。自律走行に有益な情報を所有するロボットが、価値や所有権に応じた対価を受け取る仕組みにより、環境内の情報の収集や提供に対してのインセンティブになり、走行に必要な情報の更新や共有が促進される。本研究は、そのような複数ロボットが存在する環境下での情報基盤として、ブロックチェーンに基づく手法が適用できる可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The project proposed a data sharing system based on data ownership and value for robot network systems using blockchain, that is a basic technology of virtual currency. When mobile robots travel autonomously in city environments, the robots obtain necessary maps for navigation from the blockchain network in the proposed system. The robots pay compensations for the map owner robot according to the value of the map. Then, the robots can achieve autonomous navigation based on the data sharing system. The proposed system can provide robot network systems that can preserve ownership of the maps and supply the maps to the other robots.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：移動ロボット ブロックチェーン 情報共有 環境地図 自律走行

1. 研究開始当初の背景

近年、人間の生活環境における移動ロボットの自律走行に関する研究が盛んに行われている。一般的な自律走行ロボットシステムは、静的な構造物や特徴点に基づいて生成された詳細な環境地図を事前に作成し、実際に走行する際には環境地図とセンサデータをマッピングすることでロボットの自己位置を推定し、地図上で経路計画も行い走行する。多数のロボットがこの仕組みにより長距離の自律走行を実現していることから、その有効性は明らかである。

一方で、環境地図は従来から提案されてきた SLAM アルゴリズム等を用いて、事前に取得した大量のセンサデータから作成する必要がある。ロボットの自律走行可能な領域を広げるためには新たに走行する場所の環境地図が必要であり、また時間の経過に伴い環境地図は変化するため定期的な更新作業も必要になる。そのような地図の新規生成および更新のためには、その都度新たにセンサデータを取得しなければならない。自律移動ロボットを広く普及させるためには、環境地図の生成と更新のためのセンサデータの継続的な取得方法、そしてデータ取得インフラについても議論することが求められている。

2. 研究の目的

本研究では、自律移動ロボットの走行のための広域環境地図を生成・更新していくことのできる環境データ取得インフラのシステム構成について研究した。特に、データ取得インフラとしてブロックチェーン技術を適用した自律分散かつ持続可能なシステム構成を提案した。

ブロックチェーンとは、仮想通貨の基盤技術として近年注目を集めている、分散型データ管理技術である。中央集権的なサーバーを持たず P2P 技術を用いて管理する分散型台帳であり、ネットワークに繋がる多数のノードがチェーンのように繋がったデータ(ブロック)を互いに監視することで、データの改ざんや破損に極めて強いシステムが構築できる。このようなシステムの高い信頼性に対して価値を見出し、仮想通貨が成り立っている。

自律移動ロボットにとっての環境地図は、我々人間にとっての通貨と同様に行動のためには必要不可欠のものであり、ブロックチェーンにて流通・管理していく枠組みとの親和性があると考えている。

3. 研究の方法

当初の研究目的としていた、多数の移動ロボットや移動体、センサをネットワーク化し、ブロックチェーンによる「センサデータの分散管理をしていく、センサデータ取得インフラ」ではなく、最終的に構築したシステムは、「環境地図を分散管理し、必要に応じて取得するロボット向け地図情報管理インフラ」を構築した。都市環境を再現した仮想環境内に複数の移動ロボットを配置して、ブロックチェーンとやり取りして走行に必要な環境地図を取得して対価を支払うシステムを ROS ベースで構築し、その挙動を確認した。また、データ共有インフラとして、当初はセンサデータの共有を想定していたが、前述の通り環境地図の共有インフラとしてシステム構築し、さらには移動ロボットの走行における知能(行動モデル)自体を共有し、所有者に対価を払うようなネットワーク型のロボット知能を考案するに至り、その関連研究にも取り組んだ。具体的な研究方法は以下の通りである。

A. 仮想環境における移動ロボットシミュレータの開発

ゲームエンジンである Unity 内に仮想的な都市環境を構成、車輪型移動ロボットを多数配置して、移動ロボットネットワークのシミュレータを開発した。各移動ロボットは Docker コンテナ内で動作する Ubuntu および ROS ベースのシステムで制御される。自律移動は、一般的な二次元の占有格子地図に基づく手法で実現される。そのため各移動ロボットはセンサとして 2D-LiDAR を搭載する。

B. ブロックチェーンを用いた地図情報共有インフラの構築と実験

前述した都市環境をいくつかの領域に分割し、各領域で占有格子地図を生成する。都市環境内に存在する移動ロボットのうち、いくつかのロボットが各占有格子地図の所有者となり、その所有情報と地図データのハッシュ値を Ethereum のプライベートチェーンに登録する。都市環境内を走行する移動ロボットは、走行時に必要な地図情報をブロックチェーンから呼び出し、自律走行に使用、地図の所有者に対価を支払うという仕組みである。実際に長期間の走行実験を行い、地図の所有者への対価の支払いと、環境内に存在するすべての移動ロボットの自律走行が達成できることを示す。

C. 行動モデル共有インフラのための基礎検討

前述した B では環境地図をブロックチェーンで登録・管理して走行時に活用する仕組みを考案したが、近年は事前に作成した環境地図を使用せず、深層強化学習により獲得した知能(行動モデル)を使って走行する手法も見られるようになってきている。研究の過程で、そのような知能自体もブロックチェーンで登録・管理してロボットネットワーク内で活用していくことも可能ではないかという着想を得て、そのための基礎研究として環境の特徴ごとに適した行動モデルを切

り替えて走行するようなロボットシステムについても研究する。

4. 研究成果

前述したA~Cについて、それぞれ研究成果を述べる。

A. 仮想環境における移動ロボットシミュレータの開発

図1に示すようなUnity内の仮想的な都市環境を開発し、ROSベースの移動ロボットを多数配置できる、移動ロボットシミュレータとして完成させた。

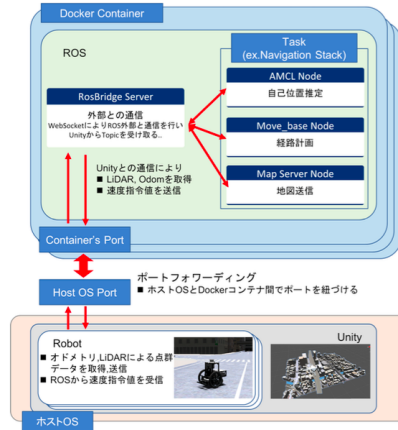


図1 移動ロボットシミュレータ

B. ブロックチェーンを用いた地図情報共有インフラの構築と実験

都市環境内の占有格子地図の所有情報と地図データのハッシュ値をEthereumのプライベートチェーンに登録する。そのために図2に示すようなIPFSを用いたデータ共有システムを構成した。このシステムを用いて、実際に長期間の走行実験を行った結果を図3、図4に示す。図3はMapC内に存在する移動ロボットが、途中MapDを通過し、最終的にはMapA内の目的地まで走行の様子を示している。各地図はブロックチェーンから読み出すことで都市環境内の目的地まで走行できるシステムとなることを示した。また、図4は実験中の各ロボットのEthereum残高の推移を示しており、地図を所有する4台のロボットの残高が増大していく様子を示している。これは、走行に必要な地図を使用する際に、所有者への対価の支払いが行われ、提案したシステムにより地図情報の所有権が守られた状態で環境内に存在する任意のロボットが地図を用いて自律走行するようなシステムを構築可能であることを示したといえる。

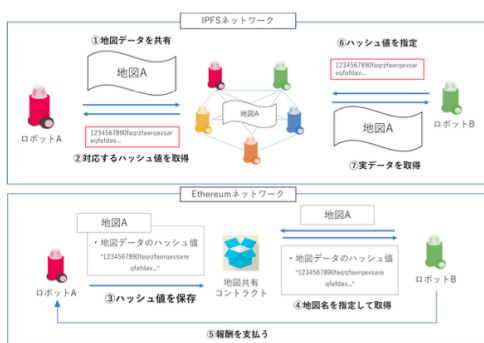


図2 データ共有システム



図3 実験結果例 (ロボットの走行経路)

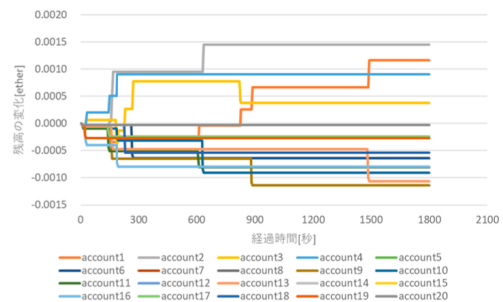


図4 実験結果例 (ロボットの走行経路)

C. 行動モデル共有インフラのための基礎検討

前述したとおり、深層強化学習により獲得した行動モデルもブロックチェーンで登録・管理してロボットネットワーク内で活用していくことも可能ではないかという着想を得て、そのための基礎研究として環境の特徴ごとに適した行動モデルを切り替えて走行するようなロボットシステムについても研究した。具体的には、単眼カメラのみを外界センサとした移動ロボットの都市環境内の自律走行のための行動学習や、環境の特徴に応じた行動モデルの切り替えシステムを提案した。行動モデルを用いた仮想環境内の走行や、行動モデルを切り替えることで特徴が異なる環境でも走行可能になることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuki Shibata; Kazuyuki Morioka	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of mobile robot network based on data sharing in the Ethereum platform	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	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) 10.1109/SII55687.2023.10039100	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 Ryota Suenaga ; Kazuyuki Morioka	4. 巻 1
2. 論文標題 Rowma: A Reconfigurable Robot Network Construction System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 pp.537-542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IEEECONF49454.2021.9382637	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 Koki Yokoyama ; Kazuyuki Morioka	4. 巻 1
2. 論文標題 Autonomous Mobile Robot with Simple Navigation System Based on Deep Reinforcement Learning and a Monocular Camera	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 pp.525-530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII46433.2020.9025987	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 Ryota Suenaga ; Kazuyuki Morioka	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of a Web-Based Education System for Deep Reinforcement Learning-Based Autonomous Mobile Robot Navigation in Real World	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 pp.1040-1045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII46433.2020.9025980	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 Naomichi Otake ; Kazuyuki Morioka	4. 巻 1
2. 論文標題 Target Human Detection Based on Matching of Walking Motion Signals Between Smartphone and Robot for Human Following	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 pp.410-415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII46433.2020.9026192	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 Kato Yuki、Morioka Kazuyuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Autonomous Robot Navigation System Without Grid Maps Based on Double Deep Q-Network and RTK-GNSS Localization in Outdoor Environments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 pp.346-351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII.2019.8700426	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 Otake Naomichi、Morioka Kazuyuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Human Following Robot System That Integrates Global and Local Following for Smartphone Users	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 pp.357-362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII.2019.8700410	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 -

〔学会発表〕 計30件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 柴田雄貴, 森岡一幸
2. 発表標題 ブロックチェーンを用いた移動ロボット間のデータ共有ネットワークにおける自律走行シミュレーション
3. 学会等名 第28回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 海保諒, 鶴田龍登, 湯浅連, 森岡一幸
2. 発表標題 自動生成した仮想都市環境において深層強化学習により獲得した行動モデルを用いた実環境での移動ロボットの自律走行システム
3. 学会等名 第28回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 海保諒, 鶴田龍登, 森岡一幸
2. 発表標題 三次元都市環境自動構築と深層強化学習による単眼カメラ画像入力に基づいた自律走行モデル獲得
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 湯浅連, 森岡一幸
2. 発表標題 環境に応じた行動モデル生成と切り替えに基づく移動ロボットの自律走行システム
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 海保諒, 鶴田龍登, 森岡一幸
2. 発表標題 単眼カメラ画像入力に基づく自律走行モデル獲得のためのシミュレーション環境最適化
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴田雄貴, 森岡一幸
2. 発表標題 大規模ロボットネットワークシミュレータの開発
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口詩織, 森岡一幸
2. 発表標題 走行環境に適応する移動ロボットの行動モデルの転移学習による短時間での獲得
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪口岳広, 末永良太, 森岡一幸
2. 発表標題 移動ロボット呼び出しネットワークシステムにおける地図上でのロボット選択アプリケーションの開発
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松原佑樹, 末永良太, 森岡一幸
2. 発表標題 ロボットネットワークにおける自己位置の共有に基づく複数移動ロボットの協調ナビゲーションシステム
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田雄貴, 森岡一幸
2. 発表標題 大規模ロボットネットワークのためのシミュレータの構築
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 湯浅連, 森岡一幸
2. 発表標題 適応的な行動モデル選択とウェイポイント設定に基づく移動ロボットの自律走行システム
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 海保諒, 鶴田龍登, 森岡一幸
2. 発表標題 シミュレーション環境の多様化による移動ロボットの汎用的な行動モデル獲得
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚谷将人, 森岡一幸
2. 発表標題 深層強化学習による特定の人間に追従する移動ロボットの行動モデルの獲得
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田雄貴, 森岡一幸
2. 発表標題 共有するデータの所有者と価値を考慮したロボットネットワークの構築
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横山光希, 森岡一幸
2. 発表標題 2次元形状分類による強化学習に基づく行動モデルの切り替えを用いた汎用性のある自律走行システムの提案
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口詩織, 森岡一幸
2. 発表標題 GANで作成した多様な環境地図を使用した未知の環境でも走行できる移動ロボットの汎用的な行動モデルの獲得
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 猪口岳広, 末永良太, 森岡一幸
2. 発表標題 任意のユーザーと移動ロボットを柔軟に接続して操作できるネットワークシステムの開発と運用
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山光希, 森岡一幸
2. 発表標題 複数台の移動ロボットによる通行者情報地図の更新手法
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末永良太, 森岡一幸
2. 発表標題 移動ロボットの自律走行を支援するための情報共有システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古谷琢海, 加藤勇氣, 森岡一幸
2. 発表標題 移動ロボットの自律走行のための深層強化学習で与える報酬による走行経路への影響
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大竹直道, 森岡一幸
2. 発表標題 移動ロボットの人間に対する局所的追従のためのスマートフォンと測域センサを用いた追従対象の検出
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末永良太, 森岡一幸
2. 発表標題 ROSで動作するロボットをクラウドで管理し任意のノードを実行可能なWebシステムの開発と応用
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山光希, 森岡一幸
2. 発表標題 単眼カメラから得られる深度情報を用いた深層強化学習に基づく移動ロボットの自律走行システム
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古谷琢海, 森岡一幸
2. 発表標題 深層強化学習による行動学習に基づく占有格子地図を必要としない移動ロボットの自律走行システム
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤勇氣, 森岡一幸
2. 発表標題 Double Deep Q-Networkによる行動学習に基づく移動ロボットの自律走行
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大竹直道, 森岡一幸
2. 発表標題 Wi-Fi電波強度マップに基づいたスマートフォンを所持した人を追従する移動ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山光希, 森岡一幸
2. 発表標題 ブロックチェーンを用いた知能化空間のためのセンサデータ共有システム
3. 学会等名 日本機械学会ROBOMECH2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤勇氣, 森岡一幸
2. 発表標題 深層強化学習による行動学習に基づく移動ロボットの屋外公共空間における自律走行
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大竹直道, 森岡一幸
2. 発表標題 人間追従ロボットのためのスマートフォンと測域センサを用いた人の歩行状態のマッチング
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山光希, 森岡一幸
2. 発表標題 ブロックチェーンを用いた移動ロボットのための環境地図共有システム
3. 学会等名 計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

明治大学森岡研究室HP https://moriokalab.com
--

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

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
---------	---------