

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21833

研究課題名（和文）マルチエージェントシステムに基づくIoTサービスの実現

研究課題名（英文）Realizing IoT Services Based on Multiagent Systems

研究代表者

林 冬恵（Lin, Donghui）

岡山大学・自然科学学域・准教授

研究者番号：90534131

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、Internet of Things（IoT）環境においてマルチエージェントの技術を導入し、高品質なIoTサービスを設計し実現することを試みた。まず、動的IoT環境において、サービスとサーバの関係を分析し、3種類のマルチエージェント意思決定問題のモデルを構築した。次に、マルチエージェント強化学習の手法に基づき、IoTネットワーク上のリソース割り当てのメカニズムを提案した。最後に、タスクオフロードング及びエッジデバイス上の分散連合学習の実証研究を行い、理論研究の成果を実世界に反映した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、サービスコンピューティングとマルチエージェントシステムの2つ分野に跨る課題を挑戦することである。まず、マルチエージェントシステムの観点からIoTサービスの実現に関する取り組みは独創的な点であり、IoTサービス設計に関する方法論の提案と実践はサービスコンピューティング分野に貢献している。次に、IoTサービスに取り組むことによって、従来のマルチエージェントシステム研究分野において新しい研究課題の創出と応用分野の開拓に対する貢献が大きい。また、IoTサービスの実現に関する基礎研究を行うと共に実際のIoT環境でその効果を検証し、社会的な意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：This research aims at designing and realizing high-quality IoT services by introducing the methodologies of multi-agent systems into the Internet of Things (IoT) environments.

First, we analyzed the relationship between IoT services and various servers in the IoT networks, and proposed three types of multi-agent decision making models for dynamic IoT environments. Then, we proposed several mechanisms of resource allocation on IoT networks based on multi-agent reinforcement learning methods. Finally, we conducted empirical research on task offloading and distributed federated learning on edge devices to demonstrate the effectiveness of this research.

研究分野：マルチエージェントシステム

キーワード：Internet of Things マルチエージェントシステム IoTサービス 強化学習

## 1. 研究開始当初の背景

近年、産業界では、**Internet of Things (IoT)** によって生まれる大規模のデータを人工知能の技術を用いて処理・分析するニーズが増えているが、IoT に関する学術的な研究は主に人工知能の分野ではなく、サービスコンピューティングや分散システムなどの分野で行われてきた。一方、IoT 環境の大規模性と動的性、異質性を対応するため、複数のエージェントから構成され、互いに協調しながら問題解決を行うマルチエージェントシステムがデザインパラダイムと実装方法として考えられる。そこで、マルチエージェントシステムの方法論を用いて高度な IoT サービスを実現することで、サービスコンピューティングと人工知能の2つ研究分野に貢献できると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、IoT の大規模性と動的性、異質性を対応するため、マルチエージェントの技術を導入し、実世界において高品質な IoT サービスを設計し実現することである。そのためには、まず、大規模マルチエージェントシステムの構築を行い、超多数の IoT デバイスとデバイス間のインタラクションをモデリングできるようにする。次に、IoT ネットワークのリソース割り当てメカニズムを実現し、デバイスによる動的なデータ処理及びサービス実行を効率的に行うことを可能とする。最後に、マルチエージェントシミュレーションを用いて実際のシステム設計を行い、多数多様なデバイスによる複雑なインタラクションを仮想空間で実証実験し、高品質な実世界 IoT サービスを実現する。

## 3. 研究の方法

本研究は実世界の IoT サービスの設計を対象とし、マルチエージェントシステムを軸に以下の2つの理論研究課題に取り組んできた。また、研究方法として、理論研究と実証研究を、当初より並行して実施した。

(1) IoT 環境のためのマルチエージェントシステムの構築：従来のユビキタスコンピューティング環境における大規模マルチエージェントシステムは、計算型シミュレーションを行う目的が多かったため、多数のエージェントの動作が如何に高速に並列処理されるのが課題であった。一方、IoT 環境の社会システムを想定する場合、多数多様なデバイスやサーバで動作するエージェントによるインタラクションを扱うため、分散処理が課題である。そこで本研究では、エージェント同士が通信プロトコルによって自己組織化しネットワークを形成し、各デバイスやサーバに分散した多数の問題解決エージェントのインタラクションを制御するマルチエージェントシステムを構築した。

(2) IoT ネットワークのリソース割り当てメカニズムの実現：マルチエージェントシステムとしてモデリングした IoT 環境では、集中処理型のクラウドサーバのほか、IoT ネットワークに分散されるエッジサーバが多数配備される。デバイスからのデータ収集や簡単な計算処理は近いエッジサーバで行うことによって高速の応答が実現可能になる。一方、デバイスの状態がしばしば変化するため、動的要素を考慮する必要がある。そこで本研究では、IoT ネットワークの特徴に基づき、マルチエージェント動的意思決定の仕組みを提案し、IoT ネットワークにおけるエージェントの動的リソース割り当てメカニズムを実現した。

## 4. 研究成果

本研究は、Internet of Things (IoT) 環境においてマルチエージェントの技術を導入し、高品質な IoT サービスを設計し実現することを目的とし、「IoT 環境のためのマルチエージェントシステムの構築」と「IoT ネットワークのリソース割り当てメカニズムの実現」といった2つ理論研究項目から構成され、実証研究と並行して実施した。研究期間全体を通じて実施した研究の成果は以下の通りである。

### (1) IoT 環境のためのマルチエージェントシステムの構築

IoT 環境においては、多数のデバイスやサーバが存在するが、課題の焦点を絞るために、図1で示すように、サーバを中心とするマルチエージェントシステムを対象に本研究を実施した。

まず、高品質な IoT サービスを実現するために、IoT サービスとサーバの関係の多様性を分析し、3種類のマルチエージェントシステムを構築した。具体的に、複数のサーバが協力してサービスを実行するシステムと、グラフ構造を持つサービスを IoT ネットワーク上に実行するシステム、サービスを分散的に IoT ネットワーク上に実行するシステムが挙げられる。次に、IoT 環境の不確実性と動的性質を考慮する上で、前述の3種類のマルチエージェントシステムにおいて、IoT サービスを配備・実行するためのサーバのリソース割り当てに関する動的意思決定問題のモデルを提案した。

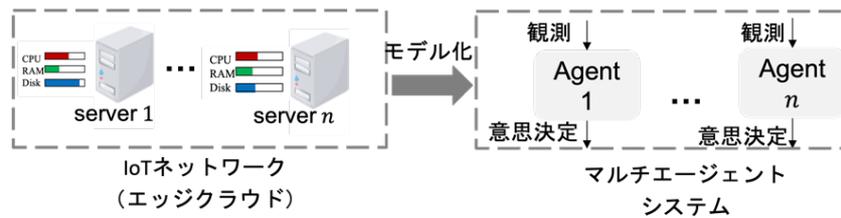


図1 マルチエージェントシステムに基づく IoT ネットワークのモデリング

(2) IoT ネットワークのリソース割り当てメカニズムの実現

研究成果(1)で提案した3種類のマルチエージェント動的意識決定問題のモデルに対して、マルチエージェント強化学習の手法に基づき、IoT ネットワークにおけるリソース割り当てのメカニズムをそれぞれ提案した。

まず、複数のサーバが協力してサービスを実行するシステムにおいては、各々のサーバの現在の状態に応じて、複数のサーバ連合を形成し、サービスの実行を最適なサーバ連合への割り当てを行う強化学習の手法を提案した。次に、グラフ構造を持つサービスをIoT ネットワーク上に実行するシステムにおいては、サービスの構造とサーバの状態の動的変化に対して同時に処理できるグラフ畳み込み強化学習手法を提案した。最後に、サービスを分散的にIoT ネットワーク上に実行するシステムにおいては、システム全体の価値関数を各々のサーバの局所価値関数に分解する強化学習手法を提案した。

実験によって、3種類のマルチエージェント動的意識決定問題のモデルにおいて、既存手法に比べて提案手法の有効性を示した。

(3) IoT ネットワーク上におけるサービス実行に関する実証実験

本研究では、理論研究と並行して、IoT サービスに関わるタスクオフローディング(図2)やエッジデバイス上の分散連合学習といった2種類の実証実験を実施した。

まず、タスクオフローディングの実証では、提案したマルチエージェント強化学習の手法を適用することで、エッジクラウド上の動的タスクに対して、自律的に最適な実行サーバを決定しシステム全体の遅延を改善できることを示した。次に、エッジデバイス上の分散連合学習に関する実証実験では、エッジデバイスに分散される画像処理の実データを用いて評価し、本研究で提案した手法を用いることで、連合学習の精度を保持すると共にシステム全体の遅延を改善できることを示した。

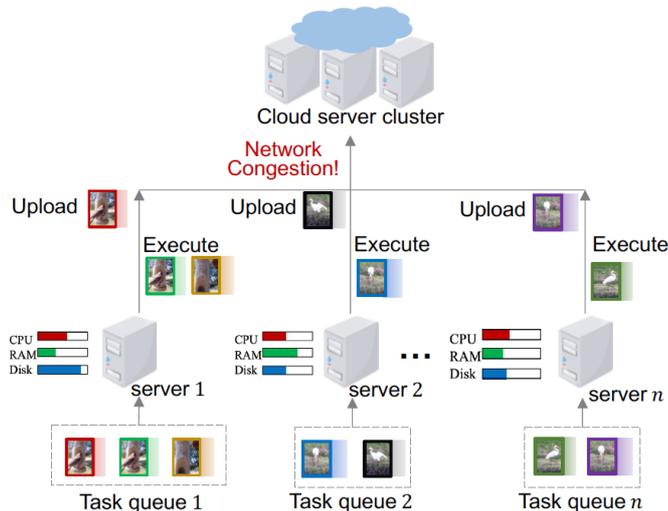


図2 IoT ネットワークにおけるタスクオフローディング

本研究の研究成果は、電子情報通信学会英文誌、サービスコンピューティングの中核的な国際会議 IEEE SCC や ICSOC 及びエージェントに関する国際会議 IEEE ICA や IEEE/WIC/ACM WI-IAT において、多数の論文を発表し、サービスコンピューティングと人工知能(マルチエージェントシステム)の2つ分野に貢献した。また、研究期間内に、協調的エッジクラウドなどいくつかの新規研究課題を考案し、今後も継続的に本研究と関連する理論研究と実証研究を実施していく予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Chou Huichen, Lin Donghui, Ishida Toru	4. 巻 21
2. 論文標題 Understanding Open Collaboration of Wikipedia Good Articles with Factor Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Information and Knowledge Management	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0219649222500307	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 DING Shiyao, LIN Donghui	4. 巻 E105.D
2. 論文標題 Multi-Agent Reinforcement Learning for Cooperative Task Offloading in Distributed Edge Cloud Computing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 936 ~ 945
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2021dap0010	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 DING Shiyao, LIN Donghui	4. 巻 E105.D
2. 論文標題 Deep Coalitional Q-Learning for Dynamic Coalition Formation in Edge Computing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 864 ~ 872
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2021kbp0007	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 Chou Huichen, Lin Donghui, Nakaguchi Takao, Ishida Toru	4. 巻 30
2. 論文標題 TMchain: A Blockchain-based Collaboration System for Teaching Materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 343 ~ 351
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2197/ipsjip.30.343	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 大川 楠人、林 冬恵、村上 陽平、中口 孝雄	4. 巻 J105-D
2. 論文標題 異種のIoTデバイスとWebサービスの相互運用のためのIoTサービス基盤	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 41～51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2021SKP0023	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8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Shiyao Ding
2. 発表標題 Multi-Agent Reinforcement Learning for Task Allocation in Cooperative Edge Cloud Computing
3. 学会等名 The 19th International Conference on Service-Oriented Computing (PhD Symposium) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiyao Ding, Donghui Lin, and Xin Zhou
2. 発表標題 Graph Convolutional Reinforcement Learning for Dependent Task Allocation in Edge Computing
3. 学会等名 The 5th IEEE International Conference on Agents (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Huichen Chou, Donghui Lin, Takao Nakaguchi, and Toru Ishida
2. 発表標題 A Blockchain-based Collaboration Framework for Teaching Material Creation
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Human-Computer Interaction (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 冬恵
2. 発表標題 Dynamic Task Allocation for Cost-Efficient Edge Cloud Computing
3. 学会等名 第20回 情報科学技術フォーラム (FIT2021) トップコンファレンスセッション
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 冬恵
2. 発表標題 サービス指向コレクティブインテリジェンス: Webサービス基盤からIoTサービス基盤へ
3. 学会等名 コレクティブインテリジェンスシンポジウム2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiyao Ding and Donghui Lin
2. 発表標題 Dynamic Task Allocation for Cost-Efficient Edge Cloud Computing
3. 学会等名 The 17th IEEE International Conference on Services Computing (IEEE SCC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Bowen Wei, Donghui Lin, and Shiyao Ding
2. 発表標題 A Constraint-based Approach to Edge Resource Allocation for Complex Event Processing
3. 学会等名 The 2020 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shiyao Ding and Donghui Lin
2. 発表標題 A Coalitional Markov Decision Process Model for Dynamic Coalition Formation among Agents
3. 学会等名 The 2020 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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

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