

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03556

研究課題名（和文）相互運用性と自己組織性を持つIoTサービス基盤の研究

研究課題名（英文）Research on Interoperable and Self-organizing IoT Service Infrastructure

研究代表者

林 冬恵（LIN, Donghui）

岡山大学・環境生命自然科学学域・准教授

研究者番号：90534131

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、インターネット上のWebサービスと物理世界の各種デバイスを相互運用可能なIoTサービス基盤を実現し、利用者の状況に応じたサービス環境を自律的に構築できるための技術の開発を行った。まず、IoTの異質性による課題に取り組み、多種多様なWebサービスとIoTデバイスとの相互接続と運用を可能とした。次に、IoTサービス基盤の自己組織化を実現するため、マルチエージェント方法論に基づいて、IoTネットワークにおけるタスク割り当てとリソース割当に関するアルゴリズムを開発した。最後に、スマートホーム環境を想定した実証研究を行い、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、産業界のIoTフレームワークの乱立によるデバイスの異質性を想定し、WebサービスとIoTデバイスが混在するサービス基盤の相互運用性を保証する点が独自のであり、またマルチエージェントの観点からIoTの動的性質に対応するためのサービス基盤の自己組織化に関する取り組みは創造的な点である。さらに、本研究は、基礎研究と実証研究を当初より並行して実施し、一般化可能なIoT現場で基礎研究の効果を検証することで、社会的な意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：This research developed technologies to establish an IoT service platform that facilitates interoperability between Web services on the Internet and various physical devices, and self-organization of service environments tailored to various user situations. First, the research addressed the challenges posed by IoT heterogeneity, allowing for the seamless interconnection and operation of a diverse range of Web services and IoT devices. Then, to achieve the self-organization of the IoT service platform, algorithms were developed for the autonomous task allocation and resource allocation in the IoT networks based on the multi-agent methodologies. Finally, a proof-of-concept study was conducted within smart home environments, demonstrating the application of theoretical research results in a real-world setting.

研究分野：サービスコンピューティング

キーワード：Internet of Things IoTサービス マルチエージェントシステム Webサービス 相互運用性

1. 研究開始当初の背景

近年、IoT 技術の発展によって、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高まっている。スマートホームやヘルスケアなどの産業領域において様々な物理的なデバイスがインターネットに繋がり、各種アプリケーションにより自動的に制御されるようになってきている。学术界では、IEEE は 2014 年に IoT Journal を発刊し、ACM も 2020 年に Transactions on Internet of Things を創刊した。従来インターネット上に限られてきた Web サービスの研究を中心としたサービスコンピューティング分野においても、IoT サービスやエッジコンピューティングに関する研究が年々増えている。

一方、本格的に実世界のための IoT サービス基盤を構築するには、2 つの困難に立ち向かう必要がある。まず、IoT システムの実装方法や通信プロトコル、各種 IoT デバイスの規格はメーカーや産業領域ごとに異なっているため、IoT のフレームワークが乱立し相互運用が困難な状況にある。次に、IoT 環境の動的性質により、持続的に IoT サービス基盤を維持することが困難である。そこで本研究は、それらの課題に対応するため、相互運用性と自己組織性を着目した IoT サービス基盤の構築を目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、インターネット上の Web サービスと物理世界の各種デバイスを相互運用可能な IoT サービス基盤を実現し、利用者の状況に応じたサービス環境を自律的に構築できるようにすることである。具体的には、まず、IoT の異質性による課題に取り組み、サービスオントロジーを構築することによって多種多様な Web サービスと IoT デバイスとの相互接続と運用を可能とする。次に、利用者の状況が頻繁に変化する IoT 環境の動的性質に対応するため、IoT ネットワークの自律的再構成及びマルチエージェント協調によるリソース割当アルゴリズムを開発し、IoT サービス基盤の自己組織化を実現する。

3. 研究の方法

本研究は IoT サービス基盤の実現を対象とし、サービスコンピューティングを軸に以下の 2 つの基礎研究課題に取り組んだ。また、研究方法として、IoT サービス基盤に関する基礎研究とスマートホームなどの事例における実証研究を、当初より並行して実施した。

(1) IoT サービス基盤の相互運用性の保証

IoT の異質性をなくすためには、デバイスおよび Web サービスの機能を標準に基づいて統一した記述方法で記述する必要がある。例えば、W3C や ISO などの標準化組織が 10 年以上に渡り、IoT の相互運用性を向上するための標準を策定している。しかしながら、独自の標準を確立できる望みがある限り、巨大企業が協調に二の足を踏むため、IoT 世界の分断につながる恐れがある。また、標準化されたものに脆弱性がある場合、IoT 環境全体の破壊的見直しを目の当たりにすることになる。そこで、本研究は IoT デバイスの異質性を想定する上で相互運用性に着目し、サービスの機能を基本要素として分解し、サービスの基本要素またはそれらの組み合わせによりサービスインタフェースを設計し基盤に登録する。これにより、アプリケーション開発者から見ると、同じ機能のサービスは相互運用可能になる。

(2) IoT サービス基盤の自己組織化の実現

持続的な IoT サービス基盤を実現するため、IoT の動的性質に対応することが重要である。そのため、自己組織化に基づいて安定な IoT ネットワークネットワークを維持する必要がある。具体的に、本研究ではまず利用者の状況に変化が生じる場合、状況に応じた IoT ネットワークを自律的に再構成する仕組みを考案する。また、IoT サービスに関わるタスクを実行するサーバの自己組織化を実現するため、マルチエージェント協調手法を提案し、動的リソース割当最適化アルゴリズムを開発する。

4. 研究成果

本研究は、「IoT サービス基盤の相互運用性の保証」と「IoT サービス基盤の自己組織化の実現」といった 2 つ研究項目から構成され、基盤研究と共に IoT サービス基盤に関する実証研究を実施した。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 サービス基盤の相互運用性の保証

本研究課題では、IoT アプリケーションを容易に構築するため、異種の IoT デバイスと Web サービスを相互運用可能な IoT サービス基盤を実現した。具体的には、IoT サービスの機能を軸に IoT デバイスと Web サービスを標準化し、イベント処理に基づく基盤を提案し、IoT アプリケーションにおけるイベント処理を実現した。図 1 に提案した IoT サービス基盤のアーキテクチャを示す。センサー、アクチュエータ、Web サービスは IoT サービスである。また、Web サービスは機能の種類によって、センサーのようにデータを提供する場合もあればアクチュエータのように駆動が必要な場合もある。アダプターは、異なる仕様を持つ IoT サービスそれぞれに対して標準インタフェースに従って実装される。デバイス・サービスマネージャーは、IoT サー

ビスの登録管理を行う。コレクターは、Web サービスやセンサーごとのデータフォーマットや仕様の違いをアダプターで吸収してから、標準インタフェースを用いてデータを取得し他のモジュールに渡す。パブリッシャーは、データをIoTアプリケーションへ配信する。インボーカーは、駆動リクエストをアクチュエータやWeb サービスに送信する。CEP (Complex Event Processing, 複合イベント処理) プロセッサは、イベントデータベースを用いて、ルールの実行、複合イベントの検出、及びアクチュエータの駆動やWeb サービスの実行を行う。イベントマネージャーは、原子イベントと複合イベントの配備管理を行う。また、マネージャー、コレクター、インボーカーのAPI機能が提供される。このアーキテクチャに基づいて、IoT サービス基盤ソフトウェアを実装し、Githubに公開した。さらに、IoT サービス基盤の分散運用に向けて、独立して運用されるIoT サービス基盤を接続してIoT サービスを共有するための機構を実装した。

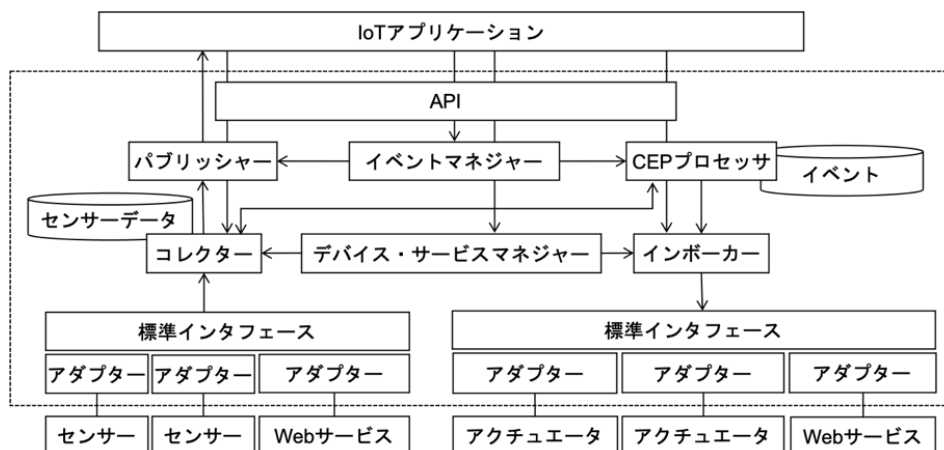


図1 IoT サービス基盤のアーキテクチャ

IoT サービス基盤ソフトウェアは、IoT サービスの管理機構、IoT サービスと外部とのインタラクションを制御する機構、イベント処理の管理・実行機構を提供するが、特定のIoTアプリケーションの応用領域に依存しない。IoT サービス基盤を運用するには、以下の4種類のステークホルダーがいる。IoT サービス基盤運営者は、実世界の特定の応用領域のニーズに応じて、IoT サービスの標準インタフェースを実装することで、様々な応用領域のIoT サービス基盤を構築し公開する。IoT サービス提供者は、IoT サービス基盤運営者が提供する基盤におけるIoT サービスの標準インタフェースに従って、様々なIoT サービスのアダプターを実装し、IoT サービスの登録と、原子イベントの定義、複合イベントの記述を行う。IoT アプリケーション開発者は、IoT サービス基盤上のIoT サービスを用いて、一般のIoT アプリケーション利用者向けに様々なIoT アプリケーションを開発する。

提案した基盤の応用例として、スマートホーム環境における対話エージェントを実装した。具体的には、スマートホーム環境に関わる標準インタフェースを設計し、合計20種類以上の具体的なIoT サービスを実装し、相互運用可能な形でIoT サービス基盤に登録することで、対話エージェントアプリケーションから容易に利用するために提供した。また、IoT アプリケーション開発者のコスト削減に関する分析及び対話エージェントアプリケーションの応答速度に関する評価を行うことで、提案したIoT サービス基盤の有効性と実用可能性を示した。

(2) IoT サービス基盤の自己組織化の実現

IoTの動的性質に対応するため、本研究課題では、持続的なIoT サービス基盤のネットワークの維持の実現を目的とし、特にサーバネットワークの自己組織化に取り組んだ。IoT サービス基盤におけるサーバネットワークでは、IoT サービスに関わる大量なタスクを処理する必要があるため、集中処理型のクラウドサーバのほか、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。IoT 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、デバイスが動的に移動する機会が多いため、IoT サーバネットワークにおける動的リソース割当アルゴリズムやタスク割当アルゴリズムを開発した。

まず、IoT サーバネットワークの特徴に基づき、協力的強化学習という新しいマルチエージェント協力学習の仕組みを実現した。協力的強化学習の手法では、IoT 環境の動的変化をマルコフ決定過程によってモデル化し、分散エッジサーバ同士の提携行動が可能であり、IoT サービスからのリソース要求に対して、図2で示すように、効用を最大化するよう提携関係を更新するとともにサーバ間でリソースの再割り当てを行う。次に、IoT アプリケーションに関わるタスクを分散化されたIoT サービス基盤に割り当てる場面を焦点に、価値分解ネットワークに基づく強化学習手法を適用した。具体的には、分散基盤の遅延とエネルギーの消費量を最小化する全体価値関数を各々の基盤の局所価値関数に分解し、各々の基盤が局所的にタスク割り当ての方策を学習する手法を実現した。また、実証研究では、IoT サービス基盤におけるタスクオフローディング

グの具体例を想定した実験を実施し、自己組織化された IoT サービス基盤の性能に関する有効性を示した。

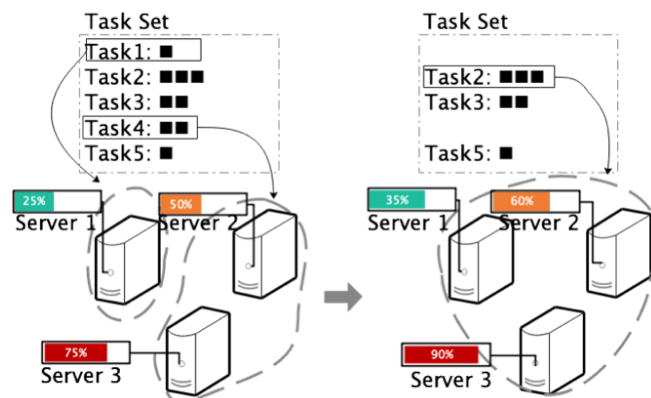


図2 IoT サービス基盤におけるサーバネットワークの自己組織化

本研究の研究成果は、電子情報通信学会論文誌、情報処理学会論文誌、データ工学に関するトップ国際会議 IEEE ICDE、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、大規模言語モデルと IoT サービス基盤の融合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 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 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17件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Xin Zhou, Donghui Lin, Yong Liu, Chunyan Miao
2. 発表標題 Layer-refined Graph Convolutional Networks for Recommendation
3. 学会等名 The 39th IEEE International Conference on Data Engineering (IEEE ICDE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 横辻龍太郎, 林冬恵
2. 発表標題 大規模言語モデルに基づくIoTサービスの実現
3. 学会等名 第86回情報処理学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 北和樹, 林冬恵
2. 発表標題 エッジAIにおける軽量化した推論モデルの性能分析
3. 学会等名 第86回情報処理学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yohei Murakami, Narifumi Oi, Koki Okubo
2. 発表標題 Service Clustering with Graph Embedding of Heterogeneous Networks
3. 学会等名 The 22nd IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大井也史, 村上陽平
2. 発表標題 異種ネットワークを用いたサービスクラスタリング
3. 学会等名 電子情報通信学会サービスコンピューティング研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷川凌也, 大谷雅之, 波部齊, 阿部孝司, 井口信和
2. 発表標題 トラッキングカメラデータを用いた屋内位置推定アルゴリズム評価手法
3. 学会等名 第50回知能システムシンポジウム
4. 発表年 2023年

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 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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Donghui Lin	4. 発行年 2024年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 309
3. 書名 Designing and Analyzing Human-in-the-Loop Service Compositions. In: Murakami, Y., Kimura, K. (eds) Human-Centered Services Computing for Smart Cities.	

〔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	村上 陽平 (MURAKAMI Yohei) (00435786)	立命館大学・情報理工学部・教授 (34315)	
研究分担者	大谷 雅之 (OTANI Masayuki) (00782682)	近畿大学・理工学部・講師 (34419)	

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

シンガポール	南洋理工大学			
--------	--------	--	--	--