

採 択 番 号 05601
研究開発課題名 City as a Service を支えるデジタルツインを持続可能な状態で自己成長させる
 エコシステム

(1) 研究開発の目的

本研究開発課題では、Beyond 5G(B5G) 技術を活用した様々な City as a Service を生み出すために、実空間（フィジカル空間）をサイバー空間内にモデル化するデジタルツインを、持続可能な状態で自己成長させるエコシステムを実現する。近年、デジタルツインは、未来都市の実現の有力な手段として注目され、広く実証が進められている。しかしながら、デジタルツインをどのように最新の状態に更新し持続させていくか、ということが検討されている例は少なく、実証例はまだない。これに対して、本研究開発課題では、まちの住民も参加し、最新のデジタルツインを共創していくアプローチを採用する。この共創型デジタルツインの実現のため、研究開発項目1「ゼロタッチに自己成長するIoT ネットワーク」、研究開発項目2「IoT データの信頼性保証技術」、研究開発項目3「プロトタイプ実装およびフィールド実証」を推し進める。

研究開発項目1「ゼロタッチに自己成長するIoT ネットワーク」では、B5G に具備すべき「拡張性」、「自律性」に関する要素技術の確立に挑戦する。具体的には、非中央集権的にゼロタッチでIoT ネットワークを自己成長させるための、ゼロタッチネットワーク形成手法、ネットワーク自らが必要に応じてデータ処理機能呼び出し、デジタルツインを形成し、またそのデータを流通させる機能、さらには、効率的にデータを発見する手法をそれぞれ確立する。さらに、サービスの持続可能性を向上させるためのインセンティブ付与に関する仕組みも検討する。

研究開発項目2「IoT データの信頼性保証技術」では、B5G に具備すべき「信頼性」に関する要素技術の確立に挑戦する。具体的には、上記の研究開発項目1で生成、流通されたデータに対して、AI の推論や学習時に有益となるか、あるいは、有害となるか（例えば、誤検知を引き起こす可能性があるか、より正確なモデル構築に寄与するか、など）、データそのものが持つ品質や危険性の推定を可能にするデータの目利き技術の確立に挑戦する。また、ブロックチェーンを利用したデータの真正性を検知する技術、ストリーム処理可能なブロックチェーンを利用したデータの自浄作用を実現するシステム設計に挑戦する。さらに、取得したデータのデータ流通の高信頼化技術として、情報指向型ネットワークとブロックチェーン技術を利用した無線センサネットワークにおける高信頼なデータキャッシュ技術についても検討する。

研究開発項目3「プロトタイプ実装およびフィールド実証」では、研究開発項目1と研究開発項目2で確立した技術を具備したLiDAR センサやスマートポール（ドローンの飛行を模擬可能なポール）を利用した2種類のスマートセンサシステムを、エコシステムのプロトタイプとしてそれぞれ実装する。この時、エコシステムのアーキテクチャについても設計し、このアーキテクチャに従いスマートセンサシステムのプロトタイプ実装を行う。ここで実装したスマートセンサシステムを柏の葉スマートシティに追加していくことで、柏の葉スマートシティにおけるデジタルツインが非中央集権的に自己成長していくことを検証し、エコシステムの有効性を明らかにする。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 6 年度（3 年間）

(3) 受託者

学校法人早稲田大学<代表研究者>
学校法人芝浦工業大学
学校法人片柳学園
株式会社ガイアックス
学校法人福岡大学

- (4) 研究開発予算（契約額）
 令和4年度 100 百万円
 ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目1 ゼロタッチに自己成長するIoT ネットワーク

- 研究開発項目 1-a) ゼロタッチIoT ネットワーク形成 (早稲田大学)
 研究開発項目 1-b) 柔軟かつ効率的な要求データの検索 (東京工科大学)
 研究開発項目 1-c) インセンティブ付与に関する仕組み (早稲田大学、芝浦工業大学)

研究開発項目2 IoTデータ信頼性保証技術

- 研究開発項目 2-a) AI用データの品質および危険性のリアルタイム推定技術 (芝浦工業大学)
 研究開発項目 2-b) ブロックチェーンを利用したデータ改ざん検知技術 ((株)ガイアックス)
 研究開発項目 2-c) ブロックチェーンネットワークシステム ((株)ガイアックス)
 研究開発項目 2-d) 情報指向型ネットワークを利用した高信頼データキャッシュ技術 (福岡大学、早稲田大学)

研究開発項目3 プロトタイプ実装とフィールド実証

- 研究開発項目 3-a) アーキテクチャ設計 (早稲田大学)
 研究開発項目 3-b-①) プロトタイプ①：3Dセンサシステム (早稲田大学、福岡大学)
 研究開発項目 3-b-②) プロトタイプ②：スマートポール (芝浦工業大学)
 研究開発項目 3-c) フィールド実証 (早稲田大学、芝浦工業大学)

(※フィールド実証は、早稲田大学および芝浦工業大学が主に共同して進めるが、東京工科大学、ガイアックス、福岡大学も連携して実施を行う。)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	1	1
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	55	55
	標準化提案・採択	2	2
	プレスリリース・報道	6	6
	展示会	3	3
	受賞・表彰	2	2

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目1 ゼロタッチに自己成長するIoT ネットワーク

研究開発項目 1-a) ゼロタッチIoT ネットワーク形成

早稲田大学は、ゼロタッチなIoT ネットワークの形成を実現するため基本方式として A) IoT 機器起動時に IoT ネットワークの形成のための設定ファイルをやり取りするためのプロトコルの設計、B) AIによるデータ処理機能とネットワーク機能との分離独立を可能とする情報指向サービスメッシュの設計をそれぞれ設計した。特に、後者の②については、将来的に動的にネット

ワークの設定を変更、修正したとしても、通信機能やデータ処理機能への影響を最小化できるよう設計した。また、研究室内の実験環境においてそれぞれの動作検証を通して、ワンタッチで簡易にIoTネットワークの形成が可能である見込みを得た。

研究開発項目 1-b) 柔軟かつ効率的な要求データの検索

東京工科大学は、先行検討を進めていた IPFS における Kademia の効率化を図る KadRTT について、必要となるパラメータを自動調整する方式を確立した。シミュレーション環境において、手動設定する場合と同等、あるいは向上が見込めることを確認した。また、より柔軟な検索を実現するため、属性指定への対応を可能とするデータ構造の基本設計を完了した。

研究開発項目 1-c) インセンティブ付与に関する仕組み

早稲田大学と芝浦工業大学は共同して、インセンティブ付与に関する仕組みとしてデータ提供者および消費者間の対価分配の最適化に向けて、デジタルツインの共創を協力ゲームと見立て、提携型ゲームを利用したデータ取引のモデル化を検討した。特に、空港ゲームを参考とし、データ消費者のみに注目した対価分配モデルを設計し、基礎的な数値評価を済ませた。限定的な条件下においてだが、空港ゲームを適用することによって、データ提供者に対する適切な報酬の分配の導出が可能となる知見を得た。

研究開発項目 2 IoT データ信頼性保証技術

研究開発項目 2-a) AI 用データの品質および危険性のリアルタイム推定技術

芝浦工業大学は、A) 都市において想定されるタスク群の洗い出し、それらの品質や定義についての検討、B) 複数のタスクに向けたデータ取得と検証のための環境構築、C) 毒データが危険性に与える影響の調査と仮説構築についてそれぞれ実施した。これによって、データの品質および危険性の推定技術手法の検証環境の初期構築を済ませ、リアルタイム推定の考案に向けた筋道を得た。

研究開発項目 2-b) ブロックチェーンを利用したデータ改ざん検知技術

株式会社ガイアックスは、デジタル署名を使ったデータ登録者の真正性担保の機能および機械学習モデルの改ざん防止機能について、それぞれ設計およびプロトタイプを作成を行った。作成したプロトタイプを利用し、ローカルネットワークおよび AWS 環境下において、設計した機能群が正常動作することを確認した。また、後者の機械学習モデルの改ざん防止機能は、芝浦工業大学との共同での特許出願を完了した。

研究開発項目 2-c) ブロックチェーンネットワークシステム

株式会社ガイアックスは、先に記した先行研究で利用していた IoT 向けブロックチェーンシステムのバージョン更新とそれに伴う性能評価を行い、約 10 倍のシステム性能の向上を確認した。また、ワンタッチでブロックチェーンノードへの参加を可能とする方式の検討とプロトタイプ化を行った。本方式を利用することで、ワンコマンドで、ブロックチェーンに参加しデータの共有を開始できる知見を得た。

研究開発項目 2-d) 情報指向型ネットワークを利用した高信頼データキャッシュ技術

福岡大学は、A) KOIL Mobility Field において実証実験するために必要なセンサノードデバイス（地上および上空を想定）のためのテストデバイス開発、B) プロトタイプネットワーク環境の構築・基礎評価として、一対の Terragraph (TG) を用いた疎通確認・通信スループット計測の実施、C) 自己成長につながるゼロタッチ技術として、下位レイヤに焦点を当てた高信頼データキャッシュ技術の基礎設計をそれぞれ実施した。実施した内容より、今回利用したミリ波リンク (Terragraph) において、リンク間を人が横断することで、スループットが最大 50% 程度減少することが見られたが、3D センシングデータを無線伝送するために十分なスループットが得られることを確認した。また、情報指向型無線センサネットワーク (ICWSN) における高信頼データキャッシュ技術の設計方針を得た。

研究開発項目3 プロトタイプ実装とフィールド実証

研究開発項目3-a) アーキテクチャ設計

早稲田大学は、先行研究してきた仮想IoTシステム（VirIoT）について、ブロックチェーンを適用した分散型仮想IoTシステムのアーキテクチャの設計を行った。また、アーキテクチャの動作検証として、GitHubにて公開を行ってきたVirIoTのソースコードを利用し、ブロックチェーン対応として新たに実装をした。本実装コードを新たにGitHubへ公開するとともに、研究室環境にて基本動作確認を行った。基本動作確認より、ブロックチェーンを適用することによる分散かつ非集権的にIoTデータやサービスの連携の実現可能性を得た。

研究開発項目3-b-①) プロトタイプ①：3Dセンサシステム

早稲田大学は、3Dセンサシステムのプロトタイプに向けて、3D LiDARセンサを利用した点群キャプチャ、点群で表現された空間データの位置合わせ、点群ストリーミングのそれぞれの処理機能を実装した。また実装したプロトタイプを利用して大学内を利用した動作検証を実施した。本動作検証を通じて、共創型で広範囲な3次元点群データの取得と空間の再構成の実現可能性を得た。なお、福岡大学で実施したプロトタイプ実装は、研究開発項目2-dにて報告した通りである。

研究開発項目3-b-②) プロトタイプ②：スマートポール

芝浦工業大学は、プロトタイプとして、風力により自立することが可能なスマートポールを用いたセンサシステムを実装することを目標としている。2022年12月までに、A) 様々なセンサデバイス類を搭載することを確認するためのスマートポールの動作確認実験、B) フィールド実証に向けた機器の選定と動作確認実験、C) 試作的なシステムをスマートポールに搭載したシステムの動作検証を実施した。本動作検証を通して、安全性の観点で1名の補助員をポールの監視に必要ではあるものの、安定的に自立する見込みを得た。また、地対地、空対地、地対空、空対空の通信実験を実施し、それぞれ通信特性に顕著な違いが得られることを確認し、スマートポールの有用性の指針を得た。

研究開発項目3-c) フィールド実証

早稲田大学は、Terragraphによるミリ波ネットワークの動作確認および性能検証をキャンパス内にて実施した。本キャンパス内実験を通じて、最大100mの距離を離れたとしても安定して有線ネットワークと同等の通信速度（約950Mbps）が得られることが分かった。また、本機器を実証フィールドであるKOIL Mobility Fieldに持ち込み、疎通確認も行った。

芝浦工業大学は、プロトタイプと関連して実証用の機材の動作確認を並行して実施した。特に実証環境を意識して、関連機器の通信、電源供給、連携方法の体系化を検討し、実環境での実証実験に応用する際の懸念点を洗い出しながら検証を行った。計算機材や電源機材を地上にオフロードすることで、高性能化した未来のドローンが浮動している状況を擬似的に再現できる見込みを得た。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目1 ゼロタッチに自己成長するIoTネットワーク

研究開発項目1-a) ゼロタッチIoTネットワーク形成

2023年度までに、研究室内の小規模ネットワーク環境（最大5台）において、ゼロタッチ形成の特性評価を完了する。評価に基づきゼロタッチ形成の方式改良を検討および実装する。

2024年度までに、2023年度検討した方式の改良を完了し、より大きなネットワーク規模（10台以内）において、ゼロタッチ形成方式の実装を完了する。

研究開発項目1-b) 柔軟かつ効率的な要求データの検索

2023年度までに、データの属性（例えば、日時やセンサの設置場所など）や属性値の範囲を指定した検索手法の基本設計を完了する。このとき、単一の研究室ネットワーク（5台以内）規模を想定する。

2024年度までに、要求データ検索の効率化を図り、Terragraphによるミリ波ネットワー

クを利用した、より大規模なネットワーク上（2 拠点以上）において、100 ミリ秒の検索時間を達成する。

研究開発項目 1-c) インセンティブ付与に関する仕組み

2023 年度までに、インセンティブ付与に関する仕組みの基本構造の設計および評価を完了する。また、柏の葉の市民やスマートシティ関係者にヒアリングを行い、さらなる機能拡張を図る。

2024 年度までに、インセンティブ付与の仕組みに協力ゲーム理論を実装し、評価する。また、柏の葉の市民やスマートシティ関係者にヒアリングを行い、さらなる機能拡張を図る。

研究開発項目 2 IoT データ信頼性保証技術

研究開発項目 2-a) AI 用データの品質および危険性のリアルタイム推定技術

2023 年度までに、フレームレート 10fps に対し処理がオーバーフローしないよう、すなわち 1 フレームあたり 100 ミリ秒以下で推定を行う。

2024 年度までに、3D センシングデータを受信している状況で、フレームレート 10fps に対し処理がオーバーフローしないよう、すなわち 1 フレームあたり 100 ミリ秒以下で推定を行う。

研究開発項目 2-b) ブロックチェーンを利用したデータ改ざん検知技術

2023 年度までに、ブロックチェーンネットワークシステムへのデータ改ざん検知の基本機能の統合を完了する。

2024 年度までに、LiDAR センサや 3D 点群データを利用したデータ改ざん検知のストリーミング処理が可能な形で、ブロックチェーンネットワークシステムへの統合を完了する。

研究開発項目 2-c) ブロックチェーンネットワークシステム

2023 年度までに、ブロックチェーンへの書き込みと正真性を確保したデータがストリーミングで取得可能なシステムの構築を行う。適宜、オフラインによるデータ圧縮も適用する。

2024 年度までに、任意の参加者が 3D センサシステムを追加してもデータ共有が可能なネットワークの構築を完了する。また、スケールアップ可能で事前承認なしにノードを追加できるブロックチェーンの確立をする。適宜、オフラインによるデータ圧縮も適用する。

研究開発項目 2-d) 情報指向型ネットワークを利用した高信頼データキャッシュ技術

2023 年度までに、約 10 台の無線ノードを相互接続し、ICN に基づき取得したデータを授受できるようなネットワークを構築する。さらに、ブロックチェーンを利用したセキュアな管理方式の基本設計を完了する。

2024 年度までに、上記の ICN による無線センサネットワークの構築を完了するとともに、データをブロックチェーンによってセキュアに管理する方式を完了する。

研究開発項目 3 プロトタイプ実装とフィールド実証

研究開発項目 3-a) アーキテクチャ設計

2023 年度までにエコシステムのアーキテクチャ設計を完了する。

研究開発項目 3-b-①) プロトタイプ①：3D センサシステム

2023 年度までに、エコシステムのアーキテクチャに従い 3D センサシステムのプロトタイプ実装を進める。（最大 5 台）ただし、センサデバイスの数に限りがあるため、全てにセンシング機能を含めず、適宜、オフラインで取得したデータもセンサデータとして模擬することとする。

2024 年度までに、3D センサシステムのプロトタイプ実装を完了する。（最大 10 台）ただし、センサデバイスの数に限りがあるため、全てにセンシング機能を含めず、適宜、オフラインで取得したデータもセンサデータとして模擬することとする。

研究開発項目 3-b-②) プロトタイプ②：スマートボール

2023 年度までに、エコシステムのアーキテクチャに従いスマートボールを利用したセンサシステムのプロトタイプ実装を進める。(最大 5 本) ただし、センサデバイスの数に限りがあるため、全てにセンシング機能を含めずに、適宜、オフラインで取得したデータもセンサデータとして模擬することとする。

2024 年度までに、エコシステムのアーキテクチャに従いスマートボールを利用したセンサシステムのプロトタイプ実装を完了する。(最大 10 本) ただし、センサデバイスの数に限りがあるため、全てにセンシング機能を含めずに、適宜、オフラインで取得したデータもセンサデータとして模擬することとする。

研究開発項目 3-c) フィールド実証

2023 年度までに、KOIL Mobility Field に設置されている Wi-Fi やミリ波ネットワーク (Terragraph) を利用してスマートセンサシステム (最大 5 台) によってゼロタッチに IoT ネットワークが形成され、3D データの流通が行えることを明らかにする。

2024 年度までに、KOIL Mobility Field に設置されている Wi-Fi やミリ波ネットワーク (Terragraph) を利用して、ブロックチェーンによるデータが保護機能も搭載された 3D センサシステム (最大 10 台) でデジタルツインが実現でき、さらに、デジタルツインへの寄与に対する報酬の分配が適切に行われることを明らかにする。

(9) 外国の実施機関

Università degli Studi di ROMA “Tor Vergata” (イタリア)

Jozef Stefan Institute (スロベニア)

WINLAB (アメリカ)