

令和 6 年度研究開発成果概要書

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と呼び出し、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正真性を検知する技術、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年度から令和6年度までの総額300百万円（令和6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       | 3     | 0       |
|       | 外国出願       | 1     | 0       |
| 外部発表等 | 研究論文       | 10    | 3       |
|       | その他研究発表    | 174   | 49      |
|       | 標準化提案・採択   | 6     | 1       |
|       | プレスリリース・報道 | 6     | 0       |
|       | 展示会        | 7     | 3       |
|       | 受賞・表彰      | 9     | 3       |

(7) 具体的な実施内容と最終成果

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

実施計画に従い、ゼロタッチIoTネットワーク形成方式の設計を実施した。IPFS ネットワークを利用して実行コマンド一つ（ワンタッチ）でノード構築から自動的なIPFS ネットワークの形成まで実現できることを確認している。最終的に、Amazon Web Service（AWS）環境上で10台のインスタンス上に、IPFS、ブロックチェーンノードを自動構築し、ネットワー

クの自動形成がなされることを検証した。さらに、ゼロタッチIoT ネットワーク形成の拡張方式として、情報指向ネットワーク (ICN) サービスメッシュ方式を提案した。ICN サービスメッシュを適用することで、IPFS やデータ処理サービスに対して、サービス側のプログラム改変を最小化しつつ、各サービスに対して ICN ネットワークの適用が可能となることを示している。これにより、IPFS のコンテンツ検索時間を 50-60% 高速化できることを、ICN サービスメッシュのデータ転送時間を 50% 高速化できることを、それぞれ確認した。

#### 研究開発項目 1-b) 柔軟かつ効率的な要求データの検索

実施計画に従い、既存の IPFS 実装に対して複数属性及び範囲指定機構を汎用的に利用可能な形で組み込んだ。さらに、2 拠点ネットワークにおいて合計 140 ノードで、3 属性での AND 検索で 1 秒程度、10 属性での AND 検索に 2 秒程度で該当するコンテンツ情報群の取得に成功した。

#### 研究開発項目 1-c) インセンティブ付与に関する仕組み

実施計画に従い、データ消費者・データ提供者の両面に基づく報酬分配モデルの設計および評価を実施した。本評価結果より、インセンティブ設計において、提携型モデルの適用可能性を得ている。また、点群データ特性にも注目した報酬分配モデルの拡張版も提案した。特に、収集される点群データの品質に着目した際、品質要件は、データ提供（データ収集）に対するインセンティブに大きな影響を及ぼすことをモデルより導いた。

#### 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

実施計画に従い、ストリーミング処理可能なリアルタイム推定処理とその並列化アルゴリズムの実機実装を実現した。実機実装において、処理遅延の目標である 100 ミリ秒以下を確認した。更なる応用として、再帰的な点群予測に基づく危険性や品質推定、及びリアルタイムなフレーム補間処理を提案し、その部分的な性能評価を完了した。

##### 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

実施計画に従い、ブロックチェーンを利用したデータや機械学習モデルの改ざん検知技術確立した。さらに、AWS や柏の葉スマートシティ (KOIL MOBILITY FIELD) に設置した実機 PC を利用した接続検証、性能評価実験を完了した。

##### 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

実施計画に従い、ブロックチェーンを利用したセンサデータ共有システムの設計を完了するとともに、ゼロタッチでのブロックチェーンノードへの参加方式の設計も完了した。また、ブロックチェーンと IPFS をそれぞれ統合し、データの正真性を確保したデータを地産地消する効率的なインフラ構成の方式検討も実施した。最終的に、柏の葉スマートシティ現地環境 (KOIL MOBILITY FIELD) および Amazon Web Service (AWS) への組み込みを実施し、10 台のインスタンス上で自動構築可能であること、点群データの登録・取得が可能であることをそれぞれ確認した。

##### 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

実施計画に従い、情報指向無線センサネットワークのテストベッド実装開発し、情報指向無線センサネットワークのデータ収集の信頼性向上のための要素技術確立し、ハードウェア装置を用いた現実的な環境下で評価した。また、高信頼ゼロタッチセンサノードの実装開発および

KOIL MOBILITY FIELD および福岡大学近郊エリアの2箇所にて運用を行い、提案手法の有効性を確認した。

### 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

実施計画に従い、エコシステムのアーキテクチャの設計を完了した。エコシステムが掲げる「自己成長」をサービスエリアの拡大と再定義し、ゼロタッチ形成技術を自己成長させるための要素技術として整理した。本アーキテクチャに従い、3D データ（点群データ）について、第三者機関を介さずに、データ提供者・消費者間で売買することが可能な 3D センサシステムのアーキテクチャの設計を完了した。本アーキテクチャについては、知財を 2 件獲得するとともに、ITU-T SG-20 において 1 件の標準化提案を行った。

### 研究開発項目 3-b-①) プロトタイプ①：3D センサシステム

実施計画に従い、3-a にて設計したアーキテクチャに従い 3D センサシステムを形成するノードを 10 台まで構築した。それぞれのノードを構築する際、システムに対して、位置情報（緯度・経度）を入力することで、その場所を管理する地域サーバとして自動構築できる点、IPFS およびブロックチェーンネットワークも自動形成できる点、各地域サーバに対して、点群データを登録・取得できる点をそれぞれ確認した。3D センサシステムが将来的に具備する必要がある要旨技術群（空間点群の位置合わせ手法、空間点群ストリーミング手法、点群のダウンサンプリング手法）についてもそれぞれ研究開発を進めた。

### 研究開発項目 3-b-②) プロトタイプ②：スマートポール

実施計画に従い、本研究課題における実験に適合するよう、スマートポールの改修等を行い、通信機器やセンサ機器の搭載や応用拡大の可能性を示した。通信機器、センサ機器を搭載し、複数のスマートポールを用いた実機実験の可能性を検証した。ポールの基本特性や空の通信やセンシングにおける特性を解析し、後述するフィールド実証に寄与することを確認した。

### 研究開発項目 3-c) フィールド実証

実施計画に従い、柏の葉スマートシティ・早稲田大学・芝浦工業大学を含む 5 拠点に対して、各拠点のデータ管理を担う地域サーバを 7 台展開し、点群データの登録・購入ができることを確認した。特に柏の葉スマートシティの一角である KOIL 16 Gate にて、街の 3D 点群データを収集し、3D センサシステムへと登録した。また、街のデジタルツインのため、3D センサシステム上で、得られた 3D 点群データから 3D マップ化し登録した。これら登録された点群データは、保有者・貢献度・価格を設定しており、検証用のトークンを利用した購入、貢献度に応じて各保有者へ購入代金の支払いが適切に行われることを、仮想通貨 Wallet アプリ（MetaMask）を利用して確認した。

スマートポールの実証として、複数台のスマートポールを用いて擬似的なドローンネットワークを構築した。本構築環境を利用し、ミリ波通信を用いたドローン間通信の模擬とその通信特性解析を実施した。その際、Terragraph による 60GHz ミリ波マルチホップ通信及びその応用システムを本ポール上で実現した。

## (8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

### (ア) 計画

本研究課題の成果展開先として、スマートシティ分野に限らず、コンテンツ・データ取引分野へのリーチを計画している。特に、例えば、PLATEAU では提供されていないような 3D 都市モデルや、屋内設備（例えば、駅や商用施設）の日々の状態などのリアルタイムなデータを収集したいと思うニーズに対して、本研究成果を活用していくことを検討する。これにより、都市にいる人や施

設利用者といったデータ収集に直接的に関わり合いの無い人を巻き込みデータ収集の効率化・持続化を図る。初期段階では、明確なニーズがあるユースケースに対して、本研究成果を展開していき、共創型デジタルツインの成功事例を獲得することを計画する。

その後、本研究課題に係る関係者らが発起人となり、分散型自律組織（DAO）を組成し、データ収集、データ利用等に関わり合いたい人を巻き込み、参加者同士が協力しあって組織運営が可能な形で本研究成果を活用したユースケースの実証を目指す。DAOの組成を確実にするために、マーケットの形成の目処が立ち、インセンティブモデルの有用性の検証が進んだところで、DAOプロジェクトとして社会実装を進めることを検討する。その際、DAOの組成支援の実績豊富な共同提案者である株式会社ガイアックスの支援を受けて進めることを計画する。現在、Web3による分散型物理インフラネットワークであるDePIN（Decentralized Physical Infrastructure Network）が、より効率的で透明性の高い自営可能なインフラとして注目を浴びつつある[1]。本研究提案は、DePINと同じ思想を持っており、我が国でのDePINの実現例として、本研究提案の社会実装をすすめる。デジタルツインのデータを集約・提供しながら展開していくことを目指す。DePINの他の適用事例として、地図情報を収集するHivemapper[2]というサービスが現在広まりつつあるが、本研究提案が目指すものは3D都市モデル（街のデジタルツイン）版であるという差異がある。

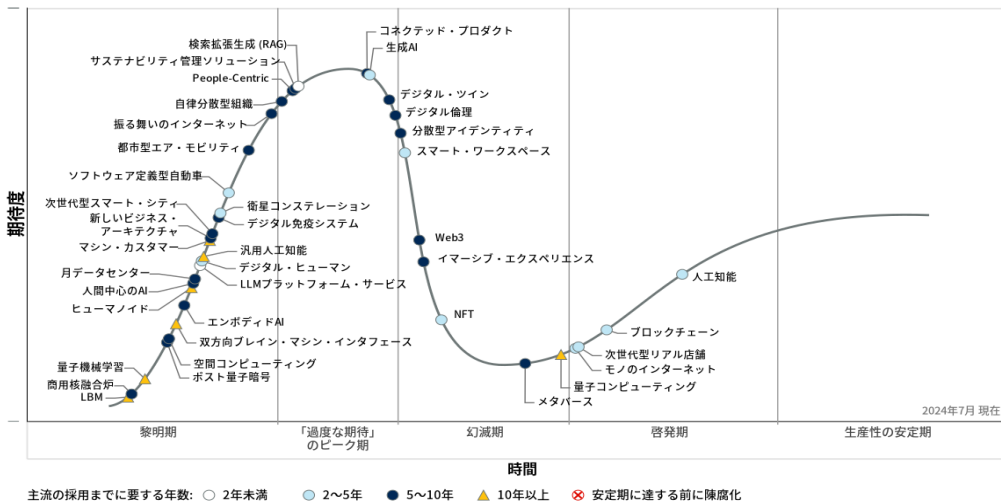
[1] DePIN 解説記事: <https://seleck.cc/depin>

[2] Hivemapper: <https://beemaps.com/network/coverage>

### （イ）展望

ブロックチェーンの発展に伴い、近年 DePIN (Decentralized Physical Infrastructure Network) という新しい概念に注目されている。DePIN は、ブロックチェーン技術や分散型台帳を活用して物理インフラの運用や管理を分散化するコンセプトである。このモデルでは、中央集権的な管理や所有権の集中を排除し、ネットワークの参加者がインフラの構築、運用、利用に関与することで、より効率的かつ透明性のある仕組みを提供する。特に、IoT やスマートシティ技術の進展に期待されており、分散型運用、インセンティブ構造、トラストレスかつ透明性の高い仕組み、効率性とスケラビリティといった特徴を持つ。IPFS を進化させるために、報酬の仕組みを入れてファイル保存の永続化を可能にした FileCoin も DePIN の一種である。最近では、天候データを民営的に蓄積・売買できる Nubila というプロジェクトも注目されている。2024 年 7 月に 250 万ドルの資金調達に完了し、2024 年 10 月には世界中で約 1.6 万箇所に観測キットを展開している。本研究開発課題で実現するエコシステムも同様の成果が期待され、デジタルツインのデータ作成を一社で行うには大きな投資を必要とするが、市民の参加を促すインセンティブモデルを使って広域に展開していくことが期待できる。

日本における未来志向型インフラ・テクノロジーのハイプ・サイクル：2024年



Gartner

図 1. ガートナー社 テクノロジー・ハイプサイクル（2024 年度版）より引用

2027年にはインフラに必要なソフトウェアは揃う見込みである。また、LiDAR搭載のスマートフォンの普及も進み、図1に示すように、ガートナー社のテクノロジーハイブ・サイクルによるとデジタルツインも幻滅期を超え啓発期に入るため、そのデータを必要とする事業やプロジェクトが増加し需要が高まることが予想される。このタイミングで、スマートフォンによるワンストップアプリケーションを展開することにより爆発的に利用が伸びることが期待できる。

さらに、2030年には、データの取得・更新・利用・分配が非集中型（Web3.0型）で展開される類似サービスが多く展開される世の中の実現となるよう、本研究開発課題がモデルケースとなることを目指す。

(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）