

# 研究終了報告書

## 「動画クラウドセンシングによる無線資源の開拓」

研究期間：2021 年 10 月～2024 年 3 月

研究者：佐藤 光哉

### 1. 研究のねらい

本研究では、無線通信における長年の重要課題である複雑な電波伝搬特性の推定を、イメージセンサ活用により高精度に実現するフレームワークの構築を目的とする。

スマートフォンやモノのインターネット (IoT: Internet of Things) の普及に伴い、無線端末の数が指数的に増加している。通信場所や目的等の要件も多様化しており、数百億台もの端末が社会基盤の構築のために多種多様な通信を行なう時代を迎えつつある。一方、無線通信に適した周波数帯域には限りがあることから、無線通信の品質確保が困難になっている。このような問題に対するアプローチは、大きく次のような方策に分類できる：(a) 自システム内でのパラメータ適応化による周波数利用効率の抜本的改善、(b) 既存の無線システムとの周波数共用。

いずれの方策においても、通信相手側の受信電力や他者への干渉量を適切に制御するためには電波伝搬特性の正確な推定が不可欠である。一方で、電波伝搬特性は構造物に応じて複雑に変化することから経験則に基づく電波伝搬モデルでは正確な推定が困難であり、過密化する無線端末を収容する障壁となっていた。近年は受信電力のクラウドセンシングと深層学習に基づく電波マップによりその精度を大幅に改善できることが明らかにされているが、観測コストや端末の持ち方に応じた受信電力変動に起因する観測精度といった問題があり、特に端末座標の取得が困難となる屋内や都市部においては実用面で大きな課題が残る。即ち、あらゆる場所における電波伝搬特性をいかに正確に推定するかが IoT 時代における無線通信システムの持続的拡大に向けた重要課題である。

以上を踏まえ本研究では、イメージセンサの取得情報からの構造物情報の抽出による、電波伝搬シミュレーションフレームワークの設計を実施する。電波伝搬特性は、送受信者および構造物の位置関係によって一意に決まる。理論上はレイトレーシングによって電波伝搬特性の高精度な事前推定が可能だが、これには構造物や障害物、地形といった情報の正確なモデリングが重要である。こういった情報をイメージセンサ活用によって取得することで、無線周波数資源の高効率利用に資する手軽かつ高精度な電波伝搬推定の実現を目指す。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

電波伝搬推定手法の設計と、推定を高精度化したことによる周波数利用効率改善効果の定量評価に関する検討の二軸体制で研究を進めた。電波伝搬推定手法の設計においては、近年のオープン 3D 都市モデルの発展を踏まえ、事前情報として使用可能な構造物情報は活用し、その上で不足情報をイメージセンサで補うという方針とした。Project PLATEAU に代表されるオープン 3D 都市モデルは、モデルの詳細さ (LOD: Level of Detail) を4段階に分割・定義している。都市部においては既に LOD1, 2 のデータ整備が進められており、これらを活用可能である。一方、屋内情報は最も詳細な LOD4 に該当する上、オープンデータとしての公開が困難

である。以上を踏まえ、次のように LOD1, 2 で対応可能な環境はそのように設計し、LOD4 側をイメージセンサで補う方針での推定設計を行なった：

- 屋外：オープン 3D 都市モデルネイティブ対応レイトレーシングの実装と検証
- 屋内：イメージセンサ活用による構造物および障害物のモデリング

屋内向けに設計したモデリング手法では、RGB-D センサを用いて撮影した画像群から屋内の障害物や構造物を点群へと変換する。それらを深層学習に基づくセマンティックセグメンテーションにより分類した上、立方体の集合へと近似する。ただちに商用レイトレーシングシミュレータへの入力情報として活用可能な形式としてモデリングすることで、電波伝搬特性の正確なシミュレーションを半自動化できる。これらの手法は、LTE 商用基地局(屋外都市部)やコンシューマ向け屋内無線 LAN を対象とした実証により評価した。その結果、本研究を通して設計した手法によって、高精度な電波伝搬推定が可能であることを明らかにした。

また、電波伝搬推定精度が向上した場合の通信効率の改善効果の定量評価を実施した。レイトレーシングに基づく無線システム設計への応用を想定し、ベイズ最適化による送信局パラメータ設計法を提案した上、計算機シミュレーションにより、面的な周波数利用効率を改善可能であることを示した。加えて、発展的検討の位置付けで分散機械学習に着目し、空中計算を活用した学習および通信の高速・高精度設計法を提案した。無線ネットワーク上での分散ガウス過程回帰において、事前シミュレーション等から取得した通信路の統計情報を活用することで、瞬時の通信路情報が得られない場合も回帰精度の劣化を抑制しつつ、かつ通信遅延を端末台数非依存にできることを示した。

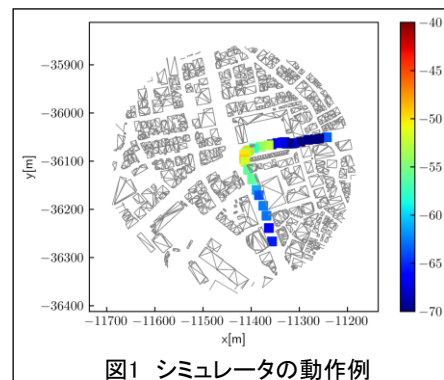
## (2) 詳細

具体的に、4つの成果に分類できる。以下にそれぞれの詳細を記す。

[成果 1: オープン 3D 都市モデル対応型レイトレーシングシミュレータの実装と精度評価]

Project PLATEAU において公開される LOD1, LOD2 にネイティブ対応したレイトレーシングシミュレータの Python 実装を行ない、その精度を検証した。本シミュレータは、レイラウンチング法に基づく。任意の座標を中心とした一定半径以内の地形および構造物情報を抽出し、任意の送受信点間での電波伝搬シミュレーションが可能である(図 1)。

シミュレータの動作検証のため、東京都港区における屋外商用 LTE 基地局を用いた対象とした精度評価を行なった。本基地局から送信される 2.6GHz 帯および 3.5GHz 帯の信号を無指向性アンテナで移動観測したデータセットを用意し、直線環境および交差点環境それぞれ2周波数分、計4シナリオにおけるレイトレーシングの結果と実測値の比較評価を行なった。ここでは、レイトレーシングの計算結果を推定値とした場合に加え、それらの値と最小二乗法(OLS: Ordinary Least Squares)から距離減衰特性を推定し、得られた曲線を推定結果とした場合の手法を提案手法として評価した。加えて、今回の 4 シナリオを表現可能な比較用モデルとして、フリスの伝達公式と二波モデルを用意した(表 1)。



レイトレーシングのみを用いた場合、二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Squared Error) が 4.3–5.1 dB 程度となった。また、いずれのシナリオにおいても OLS を併用することで 0.1–1.5 dB 程度の精度の改善が確認

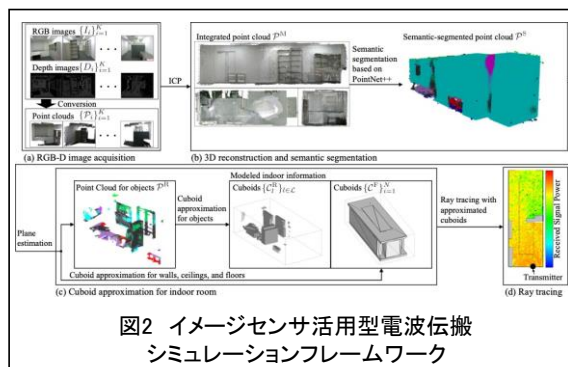
表1 屋外環境におけるRMSE特性

| シナリオ                | Ray Tracing (RT) | RT w/ OLS    | Friis | Two Ray |
|---------------------|------------------|--------------|-------|---------|
| 直線<br>(2615.20MHz)  | 4.074            | <b>3.099</b> | 6.032 | 6.627   |
| 交差点<br>(2615.20MHz) | 4.953            | <b>4.088</b> | 4.358 | 7.625   |
| 直線<br>(3530.20MHz)  | <b>4.100</b>     | 4.257        | 4.118 | 6.909   |
| 交差点<br>(3530.20MHz) | 4.402            | <b>4.025</b> | 4.285 | 7.009   |

できる。フリスの伝達公式および二波モデルに基づく手法と比較すると4シナリオ中 3 シナリオにおいて OLS 併用型の方が高精度であった。直線環境(3530.20MHz)のみフリスの伝達公式の方が約 0.1 dB 高精度であったが、一方で OLS 併用型の方式は環境を問わず精度が 3.1–4.3 dB 程度である。総じて、オープン 3D 都市モデルの使用により他手法と比較して安定した精度が得られることが確認できた。

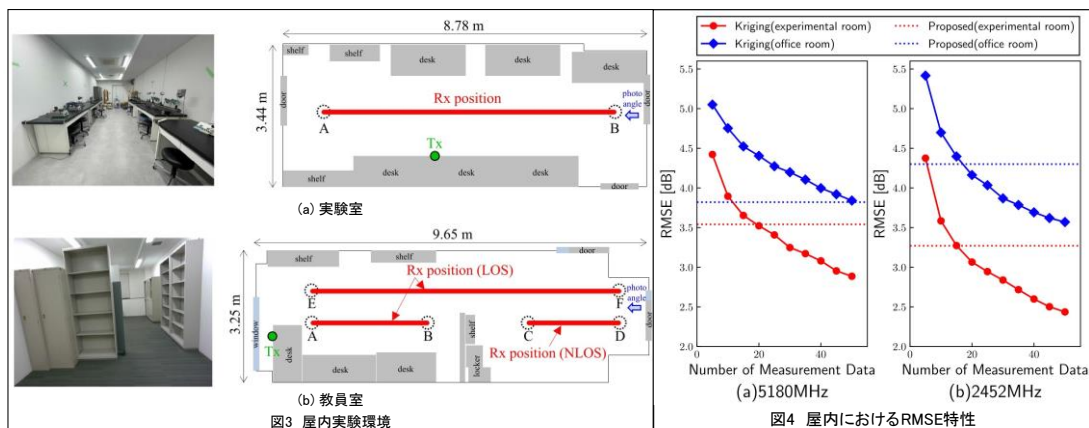
## [成果 2: 屋内無線のための RGB-D センサ活用型電波伝搬シミュレーションフレームワーク]

LOD1, 2 では対応不可能な環境をサポートするため、屋内環境を対象に、RGB-D センサを活用した屋内環境モデリング方式を設計した (図2)。本フレームワークでは、予め推定対象となる部屋を RGB-D センサにより移動撮影する。得られた画像群を点群へ展開した後、点群のセマンティックセグメンテーションを可能とする PointNet++により、得られた点群を机や



棚、壁などへ分類する。その後、分類された要素ごとに点群を立方体へと近似し、最終的なモデリング結果とする。このように立方体の集合へと近似することで、商用レイトレーシングシミュレータの補助情報として活用可能であり、シミュレータの導入の障壁の1つとなっていた、入力情報の観測に要するコストを大幅に削減できる。

本手法の精度評価のため、屋内無線 LAN を対象とした観測実験を行なった。ここでは、比較的障害物が少なく見通しが取りやすい実験室と、棚や机と行った障害物が多い環境である教員室の2環境を用意した。それぞれで 2GHz 帯および 5GHz 帯の無線 LAN アクセスポイントの受信電力を観測し、評価用データセットを構築した (図3)。RMSE 特性を図4に示す。ここでは、



比較手法として、高精度な電波伝搬手法であるクリギングに基づく電波マップ構築を用いた。また、提案手法内でのレイトレーシングシミュレータは Wireless InSite とした。比較手法は、観測データ数の増加に従い RMSE 特性が改善可能である。提案手法以上の精度も達成可能であるが、その差は十分な観測を行なった後で 1dB 未満である。比較手法におけるデータ観測では、受信位置の取得が必須である。屋内環境においては GPS の使用が困難である上、端末位置の手動測位にはコストを要するなど、実用面での課題が多い。一方、提案手法において点群の位置は画像間の特徴から抽出される情報であり、撮影時の測位が不要である。提案手法により、観測コストを抑えつつ高精度な電波伝搬シミュレーションが可能であるといえる。

### [成果 3: ベイズ最適化に基づく無線システム設計法の構築]

成果 1, 2 で得られた内容の活用を想定した無線システム設計法を検討した。具体的に、無線システムの事前設計における重要パラメータである送信局の配置と送信電力の、ベイズ最適化フレームワークを提案した。

ここでは、複数送信局を用いて面的に同一のサービスを展開するシステムに着目した、面的な平均スループット最大化を実現する最適化方式を設計した。詳細な電波伝搬特性は、送信局の位置決定後はじめて明らかになる。こういった無線システム設計のためには送信局のパラメータ設計と電波伝搬シミュレーション、パラメータの更新を繰り返すといった流れが設計例となるが、

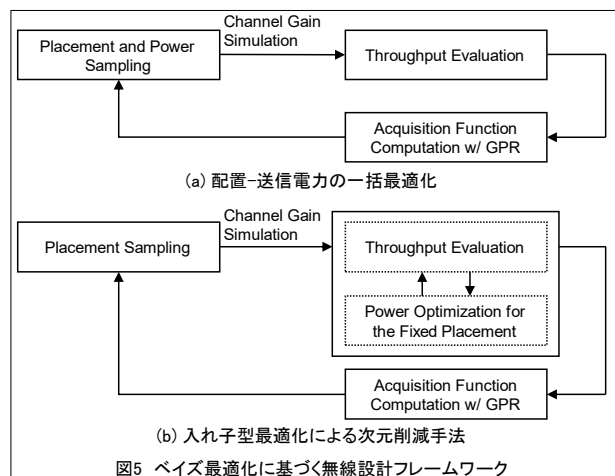


図5 ベイズ最適化に基づく無線設計フレームワーク

レイトレーシングに代表されるように高精度な電波伝搬シミュレーションは膨大な演算コストを要することから、少ないシミュレーション回数で設計を済ませることが望ましい。そこで、ベイズ最適化により限られたシミュレーション回数での高効率な無線システム設計の実現をねらう。

ここでは、送信局配置と送信電力全てを1つのベイズ最適化の中で実現する方式(図 5(a))と、まず配置のみベイズ最適化に基づいてサンプリングし、その配置の中で送信電力を最適化する次元削減手法(図 5(b))の2つを提案した。後者によって、送信局数が増加した際の最適化の収束性劣化を改善できる。これらの手法の特性は、計算機シミュレーションにより評価した。ここでは、電波伝搬特性の影響を評価するため、レイトレーシング等を活用して正確な伝搬特性が推定できる場合と、距離減衰のみ推定できる場合の特性を評価した。その結果、入れ小型の次元削減によって配置-電力の一括最適化と比較して平均スループットを大きく改善できる他、いずれの手法においても、高精度な電波伝搬特性を用いることでさらなる特性が得られることを確認した。

### [成果 4: 分散機械学習タスクを対象とした空中計算の設計と通信改善効果の評価]

通信効率の改善効果評価に関連した発展的な話題として、無線ネットワーク上での分散機械学習の高精度・低遅延化に資する通信設計を行なった。特に、分散ガウス過程回帰に基づいてネットワーク上で回帰分析を実施する際の空中計算法を提案した。空中計算は、アナログ

変調の重畳結果からネットワーク上で通信と計算を同時に実現する通信手法である。分散機械学習においても各端末が学習したパラメータ群のサーバ側での平均化に空中計算を適用することでサーバ-端末間の通信回数を大幅に削減できるが、瞬時の通信路状態情報の取得が不可欠であり、特に無線ネットワーク上での使用において大きな課題があった。

ここでは、統計的な通信路状態情報に基づく変復調設計を行なった。統計情報であれば事前の電波伝搬シミュレーションによって取得可能であり、実現可能性が大幅に増す。無線通信における電波マップ構築を対象とした回帰タスクにより、提案した変復調設計を用いることで RMSE の劣化を抑制しつつ、瞬時の通信路状態情報の取得が不要であることを確認した。本手法における1回の回帰分析に要する通信回数は、分散端末の台数に依存せず1回で済む。高精度な電波伝搬シミュレーションが通信効率改善に大幅に寄与することを示しつつ、新たな分散機械学習向け通信手法を示すことができた。

#### [その他、広義の成果]

領域内外の多岐に渡る研究者らとの連携体制の構築ができた。まず、成果 2 の実現にあたり、点群の処理やレイトレーシングへの知見が不可欠であった。画像処理や信号処理を専門とする研究者らと本コンセプトに関して議論を深め、以降、共同研究へと発展した。結果、佐藤を責任著者とした原著論文 1 編の採択に至った他、現在も本体制での議論を継続している。

また、無線分野と AI 分野の境界領域に関する講演の招待や依頼を複数受けることができた。これまで、IEICE 情報理論研究会や無線通信システム研究会、信号処理シンポジウムといった場で本研究に直接的/間接的双方に関連する講演を行っており、幅広い分野の研究者らへ成果をアピールする機会に恵まれた。異分野での講演と自身の成果波及、その内容を受けての新たな招待/依頼、という好循環が得られており、例えば、科研費 基盤 B および挑戦的研究(開拓)に分担者として申請し、両課題とも採択されている。これまで無線分野に留まっていた自身の活動の幅を大きく拡大できたといえる。

最後に、新たな研究提案が JST さきがけ「社会変革に向けた ICT 基盤強化」領域に採択された。本提案は、分散センシングにおける観測座標の不要化を目指す新たなコンセプトである。ACT-X 内での種々の実験を通して得られた、測位に要するコストやプライバシーへの懸念といった知見に基づくものである。引き続き、関連分野のさらなる進展を目指す。

### 3. 今後の展開

2年半での活動を通し、電波伝搬推定へイメージセンサを応用するというコンセプトを提案・実証できた。以下に、現時点で残る課題を踏まえた今後の展開を記す。

#### [屋内外情報のシームレスシミュレーションフレームワーク]

本研究では、オープン 3D 都市モデルを基軸に、成果 1 で LOD1-2 を、成果 2 で LOD4 をサポートする形でシミュレーションフレームワークを構築した。それぞれ屋外/屋内で精度が得られることを確認したが、無数のシステムが混在する実環境においては、両者を一緒に取り扱い可能な方式が重要である。成果 2 で構築したイメージセンサ応用方式によって屋内環境を立方体の集合へとモデリングできるものの、その結果はあくまで相対座標系の上で得られる情報であり、現時点では、オープン 3D 都市モデルの補完情報として直ちに連携可能なもので

はない。そのため、モデリング結果とオープン 3D 都市モデルのマッチングアルゴリズムの考案が重要である。本研究を通し、本研究者自身に画像処理に関連する知見が大きく深まった他、関連分野の研究者らとのネットワークを構築できた。今後はこれらの体制を継続し、シームレス化に取り組みたい。

#### [ベイズ最適化フレームワークの実証実験]

成果 3 で述べたベイズ最適化フレームワークの評価結果は、計算機シミュレーションに基づくものである。本研究成果の推進に向けては、実際の電波伝搬特性の影響や、電波伝搬シミュレーションの誤差の影響を整理した上でのフレームワークのさらなる深化が重要である。

まずは無線 LAN や Bluetooth ビーコンといったシステムを用いた実験を行い、提案手法の有効性を示すことが次の1歩となる。その上で国内外のデモセッション等へ積極的に持ち込み、産学連携へと発展させることが、本成果の次の展開へ繋がると見込んでいる。

#### [センシング精度の緩和に向けて]

成果 2 の実証実験では Intel RealSense D455 を使用した。予備実験の段階で、視野角や最大レンジが劣る廉価機種におけるモデリングに苦戦するなど、現時点ではセンサ側の性能が重要であることを確認している。研究成果の波及に向けては、センサ特性に堅牢な手法設計も必須である。近年はスマートフォンに搭載された LiDAR を使用した 3D スキャナの普及が急速に進んでいる。まずはスマートフォン等に搭載されるイメージセンサを用いて成果 2 で構築した手法の動作検証を行い、その精度を向上する発展的手法を検討することで、成果波及につながる展開に繋がると見込まれる。

特に、深層学習の活用方法の見直しでさらなる精度が得られる可能性が高い。成果 2 ではセマンティックセグメンテーションにおいて学習済みの PointNet++を使用した。実際に電波伝搬シミュレーションを実施する上では、画像群に含まれる情報を立方体の集合へとモデリングできればよく、画像群を入力、モデリング結果を出力とした End-to-End な学習/推論設計により、センサの特性も踏まえた学習が実現できると予想される。

#### [イメージセンサの無線通信応用のリアルタイム化]

本研究では、予め取得した画像群を事後处理的に活用するシミュレーションフレームワークの設計に従事した。実際の通信環境においては、人や車両など、リアルタイムに移動する物体が大きく無線システムへと作用する。これらを正確に追従する上でイメージセンサ類は有用な方式であり、これらを活用した、いわゆるデジタルツイン設計により次世代無線システムへと寄与できるシステムが創出できると期待される。

こういった撮影とモデリングの繰り返し自体は、成果 2 での設計手法を複数繰り返すことで対応できると考えられる。一方、画像群はリアルタイムに伝送する情報としてはリッチな部類である。周波数利用効率向上のためにリッチなデータを常時伝送しては本末転倒となる可能性が高く、いかにリアルタイムの観測情報を抑えつつ通信環境を模擬できるかが重要課題となると予想される。近年は、センサ側の計算能力も大幅に向上している。エッジ学習を併用した特徴量抽出等でこのような課題を打破できると考えられる。本研究の次のステップにおいては、伝送情報とそこから得られる価値に着目した展開を実施したい。

#### 4. 自己評価

##### [研究目的の達成状況]

十二分に達成できたと評価している。まず、イメージセンサ活用による受信電力推定精度改善および通信効率改善の2点を示すことができ、当初の目的を無事達成できた。その上で、通信効率の改善効果を定量評価する中で、ベイズ最適化の無線システム設計応用や、空中計算の高精度化など、新規領域での成果を副産物的に得ることができた。

##### [研究の進め方]

研究代表者の所属機関の異動と ACT-X での研究開始時期が重複し、研究体制の構築に苦戦したもの、柔軟なスケジュール調整や領域内外の研究者らとの連携により、本研究者主導で円滑に研究を進めることができた。

特に、領域内でのコメントを参考に、研究提案時点では計画になかったオープン 3D 都市モデルの活用に着目できたことは、研究を進める上で重要な点である。結果、自身の提案コンセプトの大局的な位置付けを早期に明確化できたと考えている。

##### [研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果]

早期にイメージセンサ活用に関する成果を発表することができたことが、今後大きな波及効果につながると考えている。近年はスマートフォンを使用した 3D スキャンのような関連技術が急速に発展している。そういった手法も併用可能となりうるシミュレーションフレームワークを早期に打ち出すことに成功した点は、ACT-X での研究成果の波及に向けて重要な評価事項である。

研究期間内に複数の講演依頼を受けることができた点も、科学技術及び社会・経済への波及に繋がるものと評価している。例として、IEICE スマート無線研究会において、デジタルツイン無線システムに関する特集セッションで依頼講演を実施した。本コンセプトが新規領域の一端を担う可能性のある技術であると一定量受容されたことの結果であると考えており、この芽を大事に育て、今後の産学連携へと派生させていきたい。

## 5. 主な研究成果リスト

## (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 2件

1. N. Suga, Y. Maeda and **K. Sato** (責任著者), "Indoor Radio Map Construction via Ray Tracing With RGB-D Sensor-Based 3D Reconstruction: Concept and Experiments in WLAN Systems," IEEE Access, vol. 11, pp. 24863–24874, 2023. (原著論文)

屋内を対象とした、イメージセンサ活用型電波伝搬シミュレーション手法を提案した。RGB-D 画像と点群の分類結果から、屋内の構造や障害物の配置といった情報を立方体の集合へと再構成し、レイトレーシングの入力情報として活用する半自動的シミュレーションフレームワークを設計した。無線 LAN を用いて 2GHz 帯および 5GHz 帯双方で実験を行ない、実測フィールドバック型の方式と比較して遜色ない電波伝搬推定精度が得られることを実証した。

2. **K. Sato**, "Over-the-Air Gaussian Process Regression Based on Product of Experts," 2022 IEEE GLOBECOM Workshops: Edge Learning over 5G Mobile Networks and Beyond, Dec. 2022. (査読付き国際会議論文)

レイリーフェージング通信路上でのガウス過程回帰への空中計算法を提案した。分散ガウス過程回帰により、ガウス過程回帰の演算量を大幅に削減できる一方、無線ネットワークでは端末台数に応じた通信遅延が問題となる。瞬時通信路状態情報が正確に得られる場合とその統計的情報のみが得られる場合の 2 つにおける回帰結果の空中計算に基づく合成手法を提案した。電波マップ構築タスクでの評価により、精度劣化を抑制しつつ通信遅延を改善できることを示した。

## (2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものも含む)

## (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- A) **佐藤光哉**, "[チュートリアル] ガウス過程に基づく推論とその応用例," 第 38 回信号処理シンポジウム, 2023 年 11 月.
- B) **佐藤光哉**, "[依頼講演] 6G 時代に向けた電波マップ活用の動向," IEICE RCS 研究会, 2023 年 10 月
- C) **佐藤光哉**, "[依頼講演] デジタルツイン無線システムを支える地理空間データモデリング," 移動通信ワークショップ, SR2022-83, p.3, 2023 年 3 月.
- D) **佐藤光哉**, 菅宣理, 前田慶博, "イメージセンサおよび三次元再構成を用いた屋内電波伝搬シミュレーションの自動化に向けた検討," 信学技報, SR2022-12, pp.55-57, 2022 年 5 月.
- E) **佐藤光哉**, "オープン 3D 都市モデルを用いた電波伝搬シミュレータの実装と評価," 信学技報, SR2021-113, pp.121-123, 2022 年 3 月.