

レーダ技術と機械学習の融合による「電波の見える化」とその B5G/6G 通信応用

代表研究者

市毛 弘一

横浜国立大学大学院工学研究院・教授

1 はじめに

Beyond 5G (B5G) および 6G に代表される次世代無線通信システムの実現に向けて、ミリ波帯やサブテラヘルツ帯を活用した超高速・大容量通信技術の研究開発が世界的に進められている。一方で、高周波数帯の電波は建物や樹木などの遮蔽物の影響を受けやすく、通信品質が大きく変動することが知られている。そのため、通信システムの設計や最適化を行うためには、電波がどのように伝搬し、どの位置で受信可能となるのかを高精度に把握することが重要である。また、自動運転やスマートシティ、インフラ監視などの分野では、レーダを用いた環境認識技術の重要性が高まっており、周辺空間を高精度に計測するためのセンシング技術が求められている。

このような背景のもと、本研究では「電波の見える化」をキーワードとして、レーダセンシング技術と機械学習技術の融合による新たな電波環境認識技術の実現を目指した。具体的には、レーダセンシング分野においては、少数アンテナ素子で高分解能な空間認識を実現するための拡張アレー処理やスパースアレー技術に関する研究を進めた。一方、電波伝搬推定分野においては、生成 AI を活用した仮想都市モデル生成技術と機械学習による伝搬推定技術の高度化を行った。さらに、グラフ表現や画像特徴量を活用した新たな伝搬経路学習手法を検討し、電波伝搬現象をより物理的に解釈可能な形で学習する手法についても研究を進めた。

本研究で得られた成果は、将来の B5G/6G 通信システムにおける無線ネットワーク設計や、都市空間のデジタルツイン構築、自動運転支援システムなどへの応用が期待される。以下では、レーダセンシング分野および電波伝搬推定分野における主な研究成果について述べる。

2 レーダセンシング分野における成果の概要

レーダセンシング分野では、ミリ波 MIMO レーダを対象として、高分解能なターゲット検出および到来方向推定技術に関する研究を行った。自動運転や先進運転支援システム (ADAS) では、車両周辺に存在する複数の歩行者や障害物を正確に検出することが求められる。しかしながら、実用的なレーダシステムではアンテナ数や計算資源に制約があり、従来のフーリエ変換ベースの信号処理では十分な角度分解能を得ることが難しいという課題がある。

この課題に対し、本研究では拡張アレー処理技術を導入した。特に、カトリ・ラオ積を用いた仮想アレー拡張技術に着目し、少数素子のアレーからより多くの自由度を有する仮想アレーを構成する手法について検討した。これにより、実際のアンテナ素子数を増加させることなく、高分解能な DOA 推定を実現できることを示した。また、ビームフォーマ法、MUSIC 法、2 次元 MUSIC 法などの代表的な高分解能推定法に対して仮想アレー拡張を適用し、推定精度および分解能の改善効果を評価した。

シミュレーション評価では、ターゲット間距離や到来角差を変化させながら複数ターゲットの分離性能を評価した。その結果、カトリ・ラオ積を利用した拡張アレー処理は、従来手法と比較して優れた角度分解能を有し、ターゲット間隔が非常に近い場合でも高い分離性能を維持できることを確認した。さらに、電波暗室内で取得した実測データを用いて評価を行い、実環境においても有効性を確認した。

また、アレー構造そのものの高度化にも取り組んだ。従来の等間隔アレーではなく、スパースアレー構造を活用することで、限られた素子数でより高い自由度を実現する研究を進めた。特に、素子間隔の最大化と冗長性の低減を両立する新しいアレー配置設計について検討し、高分解能推定性能と実装容易性を両立できる可能性を示した。

さらに、実システムにおいて問題となる素子位置誤差や相互結合の影響についても解析を行った。実際のアンテナアレーでは製造誤差や設置誤差により理想的な素子配置が実現できない場合が多い。そこで、素子位置誤差に対する各種 DOA 推定法のロバスト性を評価し、特定の手法が位置誤差に対して高い耐性を有することを確認した。これらの成果は、将来の高性能レーダシステムの実用化に向けた重要な知見を与えるものである。

3 電波伝搬推定分野における成果の概要

電波伝搬推定分野では、機械学習と生成 AI を活用した新しい電波伝搬解析技術の研究を行った。従来、都市環境における電波伝搬解析にはレイトレーシング法が広く用いられている。レイトレーシング法は高精度な解析が可能である一方、都市全体を対象とした場合には膨大な計算コストを必要とする。この課題を解決するため、機械学習によりレイトレーシング結果を近似する研究が盛んに行われている。

しかし、機械学習モデルを高精度化するためには大量の学習データが必要であり、実在都市のみから十分な学習データを取得することは容易ではない。本研究では、拡散モデルを用いた仮想都市生成技術を提案した。実在都市データから建物配置の特徴を学習し、自然な都市構造を有する仮想都市マップを生成することで、多様な伝搬環境を人工的に作り出すことを可能とした[1]。図 1 に、拡散モデルによる仮想 3 次元都市マップの構築例を示す。また、図 2 に、生成画像の特徴制御の例を示す。

さらに、生成された都市画像に高さ情報を付与することで 3 次元都市モデルを構築し、Wireless InSite を用いたレイトレーシング解析によって伝搬損失データを生成した。その結果、仮想都市を利用したデータ拡張によって、機械学習による伝搬推定精度が向上することを確認した。

また、Diffusion Model の課題であった生成時間の長さを改善するため、Consistency Model を導入した。Consistency Model は、従来の拡散モデルに比べて極めて少ない生成ステップで高品質な画像生成を実現できる。評価の結果、生成時間を大幅に削減しながら、伝搬推定精度をさらに向上できることを示した。これは、生成 AI を活用した伝搬データ拡張の実用性を高める重要な成果である。

さらに、電波伝搬現象そのものを学習するための新たな特徴表現についても研究を進めた。一つは、建物配置画像をグラフ構造として表現し、反射や回折を含む伝搬経路を推定するグラフ表現学習手法である。これにより、従来の単純な画像入力では表現が難しかった伝搬経路の構造を学習できる可能性を示した。また、送信点と受信点の間に存在する建物配置を側面画像として表現し、さらに複数方向からの側面画像を利用することで、屋上伝搬や遮蔽効果をより適切に表現する手法についても検討した。

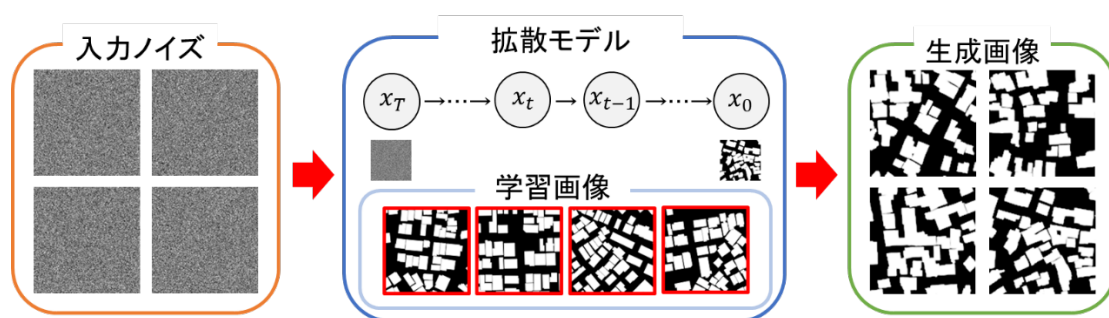
これらの成果により、伝搬推定モデルの高精度化だけでなく、伝搬メカニズムそのものを考慮した解釈性の高い機械学習モデルの実現可能性を示した。今後は、仮想都市生成技術と伝搬経路学習技術を統合し、デジタルツイン環境におけるリアルタイムな電波環境予測への応用を進める予定である。

4 まとめ

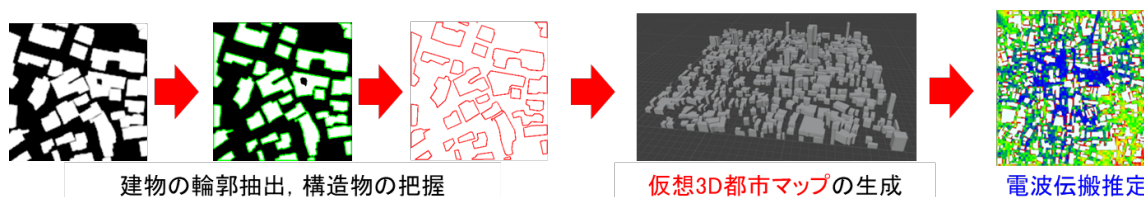
本研究では、レーダセンシング技術と機械学習技術を融合し、「電波の見える化」を実現するための基盤技術を構築した。レーダセンシング分野では、拡張アレー処理、スパースアレー技術、高分解能 DOA 推定技術に関する研究を通じて、少数アンテナ素子で高精度な空間認識を実現するための技術確立した。また、実環境で問題となる素子位置誤差や相互結合の影響についても検討し、ロバストなセン

シング技術の実現に向けた知見を得た。一方、電波伝搬推定分野では、Diffusion Model や Consistency Model を活用した仮想都市生成技術を提案し、生成 AI による伝搬データ拡張の有効性を示した。さらに、グラフ表現や側面画像を活用した新しい伝搬経路学習手法を提案し、電波伝搬の物理的特徴を考慮した機械学習モデルの構築を進めた。

これらの研究成果は、B5G/6G 通信システムの設計・運用に必要となる電波環境解析技術の高度化に大きく貢献するものである。今後は、レーダセンシングによる環境認識技術と機械学習による電波伝搬推定技術を統合し、都市空間全体の電波環境をリアルタイムに可視化するデジタルツイン基盤の構築を目指す。さらに、通信ネットワークの最適化、自動運転支援、スマートシティ運用などへの展開を進め、次世代情報通信社会を支える基盤技術として発展させていく予定である。

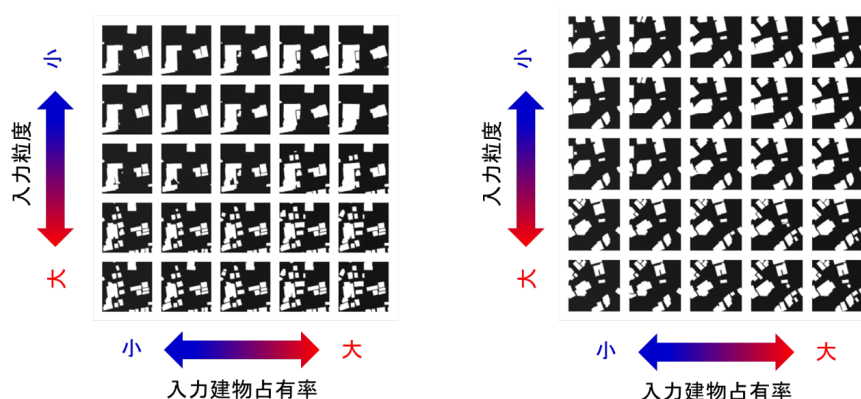


(a) 拡散モデル DDPM による地図画像の生成



(b) 地図画像の 3D モデル化とレイトレース法による分析

図 1 : 拡散モデルによる仮想 3 次元都市マップの構築例。



(a) 生成画像の特徴制御の例 (その 1)

(b) 生成画像の特徴制御の例 (その 2)

図 2 : 入力パラメータの追加による生成画像の特徴制御の例。

【参考文献】

- [1] 伊地知遼, 片岡龍一郎, ワンダレスティーブン, 市毛弘一, 國方翔太, 齋藤涼, 柏木克久, "MIMO レーダにおける指向性偏差の DOA 推定精度への影響の評価", 電子情報通信学会技術報告, no. SIP2025-89, 2026 年 1 月.
- [2] 片岡龍一郎, 伊地知遼, ワンダレスティーブン, 市毛弘一, 國方翔太, 齋藤涼, 柏木克久, "クロネッカー積制約付き指向性誤差モデルに基づくMIMOレーダの高精度キャリブレーション", 電子情報通信学会技術報告, no. SIP2025-90, 2026 年 1 月.
- [3] R. Hagiwara, K. Yuasa, K. Ichige, T. Nagao, T. Hayashi, "Diffusion Model-Based Virtual 3D City Augmentation for EM-Wave Propagation Analysis", IEEE Access, vol. 13, pp. 137816-137826, Aug. 2025.
- [4] K. Yuasa, K. Ichige, T. Nagao, T. Hayashi, "Radio Propagation Prediction Using Machine Learning and Multiple Side-View Images", Proc. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 471-472, Oct. 2025.
- [5] 湯浅一暉, 市毛弘一, 長尾竜也, 天野良晃, "グラフ表現を用いた伝搬経路学習", 電子情報通信学会技術報告, no. AP2025-78, 東京, 2025 年 9 月.
- [6] R. Hagiwara, K. Yuasa, K. Ichige, T. Nagao, T. Hayashi, "Virtual 3-D City Augmentation and Its Application to Learning-Based Radio Propagation Prediction", Proc. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 988-989, Oct. 2025.
- [7] 松下晶, 湯浅一暉, ワンダレスティーブン, 市毛弘一, 長尾竜也, 青木宏樹, 林高弘, "コンシステンシーモデルを用いた仮想都市マップ生成とその電波伝搬損失推定応用", 電子情報通信学会総合大会, no. B-1A-5, 2026 年 3 月.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Diffusion Model-Based Virtual 3D City Augmentation for EM-Wave Propagation Analysis	IEEE Access vol. 13, pp. 137816-137826	2025 年 8 月