

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14988

研究課題名（和文）携帯端末を活用した電波環境の多次元ビッグデータ解析による無線周波数資源の開拓

研究課題名（英文）Development of wireless resources via multi-dimensional radio environment analysis with crowdsensing mobile terminals

研究代表者

佐藤 光哉（Sato, Koya）

電気通信大学・人工知能先端研究センター・助教

研究者番号：60822533

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：無線ビッグデータに基づく受信電力特性の多次元内挿法を確立した。具体的に、従来方式が固定基地局・単一周波数での空間内挿にのみ対応していたところ、空間-周波数軸内挿への拡張および送信位置の一般化に成功した。送受信者双方が移動するシステムや、複数周波数を使用するシステムの受信電力特性も精度良く推定できる。また、車両向け通信システムを対象に無線ビッグデータを活用した通信方式を提案し、通信効率が改善可能であることを示した。最後に、発展的課題として分散連合機械学習を活用した端末間での高速高精度なデータ解析法を提案し、無線環境の時系列データ等を効率よく学習できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線システムの需要増大に伴い、新規システムへ割り当てる帯域の不足や既存システムの混雑といった問題が年々深刻化している。本研究を通して得られた成果により、限られた無線周波数資源の無駄のない活用の実現が期待される。例として、他者への干渉が小さく済みそうな帯域を積極利用し、かつ通信品質が不安定な箇所は避けることで安定かつ高速な通信を実現するといった使い方が挙げられる。スマートフォンやIoTセンサはもちろん、車車間通信のような信頼度が求められるシステムをサポートする基盤技術となるであろう。

研究成果の概要（英文）：We established a multidimensional interpolation method based on big wireless data for received power characteristics. Specifically, the method was extended to joint spatial-frequency interpolation and generalized to any transmission locations, whereas the conventional method only supports spatial interpolation for a fixed base station and single frequency band. Next, a communication scheme utilizing big wireless data was proposed for vehicular communication systems. We showed that the big data-aided communication design improves communication efficiency. Finally, we proposed a fast and accurate data analysis method among terminals using decentralized federated learning as an advanced topic. It was shown that this method efficiently learns wireless channels.

研究分野：無線通信、空間統計、機械学習

キーワード：無線通信 電波伝搬 周波数共用 空間統計 機械学習

## 1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワークや車車間通信といったモノのインターネットの普及に伴い、無線機器の数が指数的に増加している。一方、無線通信を利用可能な周波数帯域の大半は既存システムに割り当て済みであり、今後登場する新規システムに割り当てられる帯域が不足している状況にある。限られた周波数資源を有効利用するためには、通信相手側の受信電力や他者への干渉量の適切な制御が重要であり、電波環境情報の正確な推定が不可欠となる。一方で、これらの特性は構造物の位置などに応じて複雑に変化することから正確な推定が困難であり、通信信頼度向上の障壁となっている。即ち、あらゆる通信場所における、数百 MHz-数十 GHz に渡る各周波数での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最重要課題である。

従来、電波伝搬推定においてはエリアを郊外や都市のように大別した上での経験則に基づく手法が一般的だった。しかし、このような手法は高い汎用性を有する一方、適用モデルと実環境の不一致や伝搬特性の局所変動により推定精度に限界があった。近年この問題に対し、電波環境をビッグデータ解析するクラウド型データベースが注目されている。この手法では、一般ユーザの端末が移動観測した電波環境情報をクラウドに集約する。該当エリアにおける平均受信電力特性を周辺の観測情報やその空間相関性から空間的に補間するといったビッグデータ解析を通して該当エリアにおける電波伝搬特性や利用傾向の正確な推定が可能となり、通信効率の抜本的改善に寄与できる。現行のデータベースの議論において、電波環境が推定できる周波数帯は観測可能な周波数帯と同一である。観測端末としての実用が想定されている機器は無線 LAN (2.4GHz 帯および 5GHz 帯) やスマートフォン (800MHz 帯や 2GHz 帯) といった我々が日頃利用する機器であり、データベースが利用可能な周波数帯、即ちデータベースによって周波数利用効率を改善可能な周波数帯も現状これらの帯域に限られる。加えて、送信位置が固定されたシステムを前提とするなど、データベースを適用可能なシステムはわずかである。クラウド型データベースを適用可能な周波数帯域および場所を拡大することで、既存システムおよび新規システム双方の収容台数を飛躍的に拡大でき、今後の数百億台が競合する無線通信システムへの対応が可能であると考えられる。

## 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ本研究では、高精度かつ汎用性の高いクラウド型の電波環境推定法及びそれに基づく通信方式の確立を目的とした。

## 3. 研究の方法

主としてクラウドセンシングに基づく電波マップの効率的な構築法に着目し、計算機シミュレーションと実験双方から検討を行った。電波マップは、ある送信局に関する場所ごとの平均受信電力値を可視化したマップである。これを通信設計の補助情報とすることで、端末間の干渉電力計算や通信チャネル選択の最適化へ応用できる。データ解析法の適用先拡大とそれを用いた無線通信設計、分散連合機械学習への拡張による時系列解析の3課題に大別して研究を進めた。

## 4. 研究成果

### (1) 電波マップの多次元内挿技術（文献①-④他）

従来、データを活用する電波マップ構築に関する議論は、位置が固定された送信局が利用するある単一周波数上の平均受信電力値の空間内挿に関するものが主だった。そこで、送信位置の一般化および内挿の周波数軸への拡張を行った（文献①②他）。また、これらの成果は、国内研究会において招待講演やパネル討論の形で複数発表した（文献②③他）。空間内挿に関するデモプログラムを GitHub で公開するなど（文献④）、研究成果の普及に努めた。

#### ① ニューラルネットおよびクリギングを用いた送信位置の一般化

送信位置の一般化では、送受信位置双方が異なる環境における異リンク間の受信電力値の空間相関性に着目した方式を提案した。テレビ放送波や携帯電話基地局のような送信位置固定のシステムにおいては、平均受信電力の空間相関特性が観測点の距離に対する指数減衰モデルに従うことが経験的に知られていた。従来の送信位置固定環境における電波マップ構築法は、この点に着目して推定地点近辺の観測結果に加重平均を施し、推定結果を得る。クリギングや逆距離加重補間法に基づき、近隣の観測結果へ大きな重み係数を与えることで、空間相関性を加味した良好な内挿を実現できる。一方、都市部での端末間通信のような送受双方が移動する環境においては、その相関が送受信端末の移動距離の和に従って指数減衰することが知られていた。そこで、重み係数の大小を、内挿対象の無線リンクと観測リンク間の送受信端末の移動距離の和の大小に依存させる内挿方式を提案した。あらかじめニューラルネットを用いた非線形回帰分析により距離減衰成分を除去し、常クリギングを用いた加重平均により任意の送受信リンクにおける

シャドウイング成分を求める。これらの手順により、送信位置を一般化した上での受信電力の空間内挿を実現できる。

本方式の特性を明らかにするため、車車間通信システムを用いて得られたデータセットによる精度評価を行った。本データセットは、DSRC (Dedicated Short Range Communications) に準拠する通信機を具備した車両 3 台による屋外の走行実験を通して得られたものである。中心周波数は 5890MHz であり、米国カリフォルニアの California Partners for Advanced Transportation Technology (PATH) にて観測が行われた。図 1 に、観測データ数に対する二乗平均平方誤差 (RMSE: Root Mean Squared Error) 特性を示す。本評価では、交差検証を 1000 回繰り返し、RMSE の 90 パーセント値を受信電力の推定精度と定義した。評価対象は、最小二乗法による距離減衰推定 (OLS: Ordinary Least Squares)、その結果にクリギングを組み合わせた方式 (OLS+Kriging)、ニューラルネットを用いた距離減衰推定 (FFNN: Feedforward Neural Network)、そして提案方式である (NNRK: Neural Network Residual Kriging)。提案方式を用いることで、データサイズによらず他の方式と比較して精度良く推定できることを実証した。データ活用による受信電力推定の適用先の大幅な拡大が期待される。

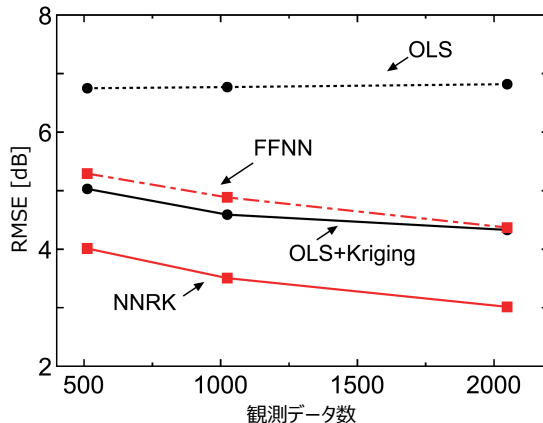


図 1 車車間通信環境における空間内挿の推定精度特性 (文献①より)

## ② 受信電力値の周波数相関性に着目した空間-周波数軸内挿への拡張

屋外での無線通信における平均受信電力特性は、空間軸に加え、周波数軸上でも高い相関性を有することが関連検討により明らかにされていた。この点に着目し、クリギングを用いた空間内挿の周波数軸拡張を行なった。具体的に、シャドウイング特性は数百 MHz 程度離れていても 0.7 を超える高い相関性を示す。そこで、複数周波数軸上で観測されたシャドウイング特性を同受信位置における推定対象である周波数上のシャドウイング特性とみなす前処理法を提案した。これにより、対象周波数上で十分な観測が実施できない場合でも複数の受信電力特性の空間データを取得した上でクリギングによる空間内挿を適用できる。

図 2 に、計算機シミュレーションによる提案手法の動作例を示す。本例は、位置固定の送信局が複数周波数を使用できるケースを模擬している。観測周波数を 400MHz および 1500MHz とし、800MHz 上での電波マップ構築を行なった。図より、800MHz 上の観測結果が得られない場合でも受信電力の局所変動を推定できることがわかる。RMSE 特性の評価を通して、提案手法を用いることで従来方式比較して 1dB 以上精度良く電波マップを構築できることを明らかにした。

近年、無線システムの需要拡大に伴い、各国で多くの周波数帯域の再編が検討されている。利用可能周波数が追加可能であることが決定した後に都度受信電力の観測実験を行うことは回避することが、観測コストの面から望ましい。本方式により、過去に観測した複数周波数・複数位置での受信電力特性を活用した、低コストかつ高精度な無線環境推定の実現が期待できる。

## (2) 無線ビッグデータを活用した通信設計による周波数利用効率の改善 (文献⑤-⑦ 他)

次に、電波マップを活用した通信効率改善法に関する検討を行った。具体的に、自動運転の実用化に向けて今後の更なる普及が見込まれる車車間/路車間通信システムを対象に、送信電力設計法および車載映像の安定かつ高画質なストリーミング法の検討の 2 つに従事した。

送信電力設計法では、クラウドに蓄積した瞬時受信電力の経験累積分布関数に基づく送信電力制御方式を提案した。通信路が遮蔽される車車間通信環境を対象とした特性評価により、観測データ数の増加に応じて通信成功確率を改善できることを明らかにした。同様に、他ユーザへの干渉を抑制しながら自リンクの送信可能電力を向上可能であり、無線ビッグデータ活用によって通信効率を改善できることを示した。

また、車載映像の安定かつ高画質なストリーミング法の検討では、複数の遠隔運転車両が走行す

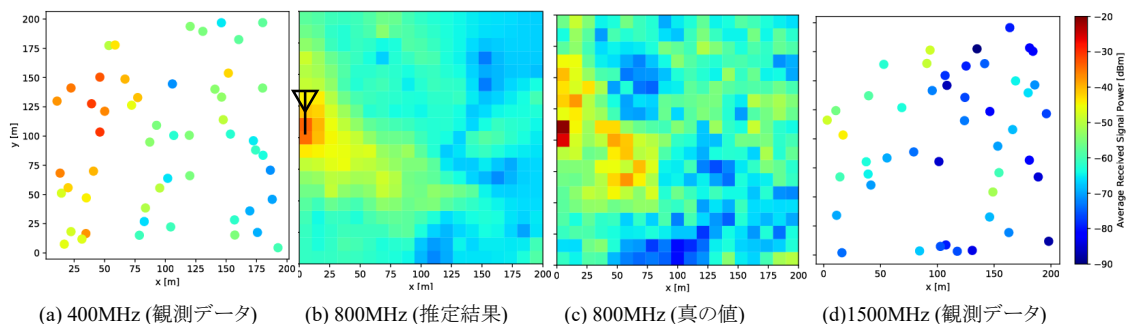


図 2 空間-周波数内挿による電波マップの構築例

る環境対象に、基地局側からの各車両の通信パラメータ設計法に着目した。基地局が電波マップに基づいて各車両のQoS (Quality of Service)を予測し、その結果に基づいて伝送映像の圧縮率を適応制御する。圧縮伝送された映像は、基地局側で深層学習器を用いた超解像により限られた劣化で伝送可能である。実際の車載映像を用いたエミュレーション評価により、限られた無線リソースでも安定した画質で複数の車載映像をストリーミング可能であることを明らかにした。成果(1)で確立した電波マップ構築法と併用することで、無線通信の効率・安定化への寄与が期待できる。

### (3) 分散連合機械学習に基づく即応的データ解析技術 (文献⑧他)

以上の検討は、観測データをクラウド側で処理する、集中制御型のデータ解析方式である。一方、無線周波数資源の開拓という本研究の目的を踏まえると、遠隔のクラウドサーバへのデータのアップロードに要する通信コストも極力抑えることが好ましい。そこで、発展的課題として分散連合機械学習を活用したデータ解析に関する検討を行った。分散連合機械学習は、分散型のトポロジ上で(即ち、集中制御サーバを介さず近隣の端末間で)協調して機械学習を実施する方式である。端末内でのローカル機械学習とその結果の共有を繰り返すことで、効率的なデータ解析の実現が期待されている。本学習方式を活用し、取得した電波環境情報を活用の上、近隣端末と協調しローカルネットワーク上で他周波数軸上の時間軸での電波環境特性を機械学習する手法を検討した。ここでは、モデルパラメータの共有に要する通信時間と学習精度の間にトレードオフが存在する点に着目した通信時間最小化問題として定式化し、学習精度を保ちつつ実行時間を高速化する送信レート設計法を提案した。

本方式の特性は、変調識別を対象に RadioML2016.10b データセットを用いて評価した。計算機シミュレーションにより、端末6台が分散連合機械学習を行う環境を模擬し、無線環境の学習時間特性の評価を行なった。図3に、所望精度達成に要した平均学習時間を示す。横軸は学習における平均化行列の固有値に基づく値であり、ネットワークの疎密さを表現する。本パラメータを適切に設定することで、高速・高精度な変調識別が可能であることを明らかにした。

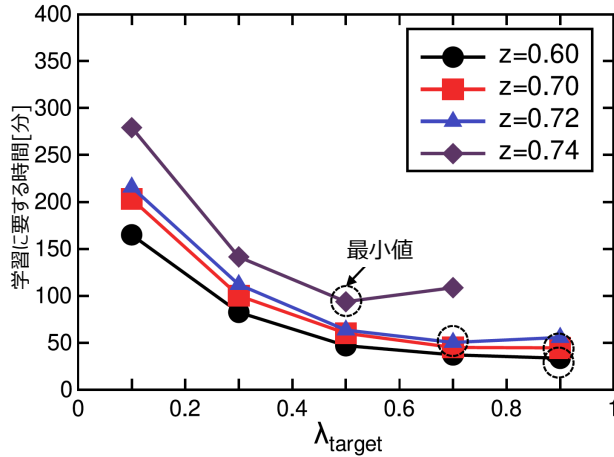


図3 学習時間特性 (文献⑧より)

#### <引用文献>

- ① Koya Sato, Kei Inage, and Takeo Fujii, "On the Performance of Neural Network Residual Kriging in Radio Environment Mapping," IEEE Access, vol. 7, no. 1, pp. 94557-94568, 2019.
- ② 佐藤光哉, "[招待講演] 無線環境の可視化: 空間統計学の基礎とその多次元拡張," 電子情報通信学会 信号処理研究会, vol. 121, no. 144, SIP2021-30, pp. 12-17, 2021年8月.
- ③ 佐藤光哉, "[パネル討論] 周波数共有におけるデータ駆動型電波伝搬推定の動向と課題," 電子情報通信学会スマート無線研究会, SR2020-45, pp. 146-151, 2020年11月.
- ④ <https://github.com/ksatolab-uec/radiomap-construction>
- ⑤ Keita Katagiri, Koya Sato, and Takeo Fujii, "Estimation of the Number of Obstacles Based on p-value for V2V Communications," Proc. IEICE ICETC2021, Online, Dec. 2021.
- ⑥ Keita Katagiri, Koya Sato, and Takeo Fujii, "Empirical CDF-based power control method for obstructed V2V communications," Proc. IEICE ICETC2021, Online, Dec. 2021.
- ⑦ Kohei Kato, Katsuya Suto, and Koya Sato, "Deterministic Video Streaming with Deep Learning Enabled Base Station Intervention for Stable Remote Driving System," IEEE ICC 2021 Workshop on Time-sensitive and Deterministic Networking (TsDN), Online, June 2021.
- ⑧ Koya Sato and Daisuke Sugimura, "Rate-Adapted Decentralized Learning Over Wireless Networks," IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw., vol. 7, no. 4, pp. 1412-1429, Dec. 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Koya Sato and Daisuke Sugimura	4. 巻 7
2. 論文標題 Rate-Adapted Decentralized Learning Over Wireless Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking	6. 最初と最後の頁 1412 ~ 1429
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCCN.2021.3074908	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Koya Sato, Kei Inage, and Takeo Fujii	4. 巻 7
2. 論文標題 On the Performance of Neural Network Residual Kriging in Radio Environment Mapping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 94557 ~ 94568
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2928832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Keita Katagiri, Koya Sato, Kei Inage, and Takeo Fujii	4. 巻 10
2. 論文標題 Radio Map Extrapolation Using Compensated Empirical CDF Under Interference-Limited Observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 54936 ~ 54946
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3174702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 佐藤光哉
2. 発表標題 〔パネル討論〕 周波数共用におけるデータ駆動型電波伝搬推定の動向と課題
3. 学会等名 電子情報通信学会 スマート無線研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片桐啓太, 佐藤光哉, 藤井威生
2. 発表標題 車車間通信のためのp値を用いた遮蔽車両台数推定法
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koya Sato, Yasuyuki Satoh, and Daisuke Sugimura
2. 発表標題 Network-Density-Controlled Decentralized Parallel Stochastic Gradient Descent in Wireless Systems
3. 学会等名 IEEE ICC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoji Uesugi, Keita Katagiri, Koya Sato, Kei Inage, and Takeo Fujii
2. 発表標題 Clustering of Signal Power Distribution Toward Low Storage Crowdsourced Spectrum Database
3. 学会等名 IEEE VTC2019-Fall Workshop on 5G and Beyond Technologies for Ultra-Dense Environments (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤光哉, 稲毛契, 藤井威生
2. 発表標題 電波マップの周波数-空間補間に関する検討
3. 学会等名 電子通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤光哉, 杉村大輔
2. 発表標題 無線環境における送信レート適応化に基づく分散機械学習の高速化
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤光哉, 稲毛契, 藤井威生
2. 発表標題 電波マップの周波数-空間補間に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keita Katagiri, Koya Sato, and Takeo Fujii
2. 発表標題 Empirical CDF-based power control method for obstructed V2V communications
3. 学会等名 IEICE ICETC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keita Katagiri, Koya Sato, and Takeo Fujii
2. 発表標題 Estimation of the Number of Obstacles Based on p-value for V2V Communications
3. 学会等名 IEICE ICETC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Kato, Katsuya Suto, and Koya Sato
2. 発表標題 Deterministic Video Streaming with Deep Learning Enabled Base Station Intervention for Stable Remote Driving System
3. 学会等名 IEEE ICC 2021 Workshop on Time-sensitive and Deterministic Networking (TsDN) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤光哉
2. 発表標題 無線環境の可視化: 空間統計学の基礎とその多次元拡張
3. 学会等名 電子情報通信学会 信号処理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

電波マップの空間内挿に関するデモプログラム: <a href="https://github.com/ksatolab-uec/radiomap-construction">https://github.com/ksatolab-uec/radiomap-construction</a>
--

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

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