

## 研究終了報告書

## 「ワイヤレスセンシングによる Sustainable IoT 基盤開発」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：内山 彰

## 1. 研究のねらい

IoT化されるモノの数は膨大になることが予想されており、バッテリーの充電や交換に伴うメンテナンスの手間も膨大となる。したがって、IoTの普及にあたっては、メンテナンスフリー化の実現が急務である。特に、今後急速な需要の増加が予想される高齢者の見守りやヘルスケアといった用途において、メンテナンスの手間をユーザーに課すこと無く、それらを実現することが重要である。

Wi-FiやBluetoothなどの無線通信にはmWレベルの電力が必要であり、IoTデバイスの消費電力のほとんどを占める。このため、無線電力伝送や環境発電により、充電の手間を大幅に軽減したり、充電なしでIoTデバイスを動作させるための技術開発が進められている。しかしながら、無線電力伝送では、伝送距離に対して急激に電力が減衰するため、広範囲をカバーするためには高出力の電波を利用したり、給電対象に接近する必要があるため、手間や安全性の面で課題がある。一方、電波・光・振動などの環境発電は、環境に依存して発電量が変動するため安定性の確保が困難なうえ、小さなIoTデバイスでは発電量が限られ、 $\mu\text{W}$ レベルにとどまる。したがって、従来のバッテリーに依存したIoTのあり方だけでは次世代のIoT実現は困難である。

これに対して、backscatter通信は消費電力を大幅に抑えられるという点で大きな可能性を有しており、重要な要素技術の一つである。しかし、センサデータを処理・送信するためにはセンサそのものだけでなくマイクロコントローラーなどの消費電力の大きい構成部品が必要になる。一方、Wi-Fiなどの通信に使われてきた電波を直接センシングに利用するワイヤレスセンシングが注目を集めており、電波の変化を観測することで人や物の動きや行動をセンシングできることが明らかになっている。しかし、現状では複数の対象（人や物）が存在する場合に個々の電波への影響を分離できず適用が困難であったり、検出された動きが何による物であるのか、という対象識別が考慮されていないため、実環境への適用には課題が残されている。

この課題を解決するため、本研究ではワイヤレスセンシングの性能を向上させるメンテナンスフリータグを開発するとともに、それらを用いたコンテキスト認識技術の開発を行う。これにより、メンテナンスや導入にかかる手間を大幅に削減可能な次世代型IoTの基盤技術を創出する。

## 2. 研究成果

## (1) 概要

本研究では、ワイヤレスセンシングの普及において重要な課題である、対象識別の実現や学習データ収集の省力化を実現するための研究に取り組んだ。

対象識別可能で学習データ不要な方式として、 $\mu\text{W}$ レベルの消費電力で動作するbackscatterタグを開発し、それを用いたコンテキストセンシング手法を考案した<sup>[1]</sup>。タグの物理スイッチがONの時のみ、基地局からの送信波がタグで反射された際に、発振器による周波数シフトが発生する。受信機で当該周波数シフトの有無を観測することによって、あらかじめ登録されたシフト周波数に応じたスイッチのON/OFF状態が観測される。スイッチの状態が

コンテキストと紐付くように設計を工夫することで、コンテキストの状態を周波数シフトの有無として、電波で直接観測できる。

また、バッテリーレスタグを用いた方式として、導電性テープなどで固有形状を持たせたパターンを形成し、Wi-Fi 電波の反射強度分布を観測することで、対象識別を行う手法を考案した。反射波の強度分布は解析的モデルに基づき取得可能であり、この結果を深層学習で構築したモデルによって識別する。シミュレーションにより、9 種類のタグパターンに対して、91.23%の正解率を達成した。

既存の Wi-Fi 機器を用いたワイヤレスセンシングの拡張として、端末位置の変化に頑健な人数推定法や、backscatter タグを用いて空間的に CSI 観測を増やす方式を考案した<sup>[3]</sup>。タグに FPGA oscillator を搭載し、 $\mu\text{W}$  レベルの消費電力で Wi-Fi チャンネル間の周波数シフトを実現することで、タグを環境に設置しておくだけで CSI 観測を増やすことができ、ワイヤレスセンシングの性能向上につながる。また、Wi-Fi CSI を用いたコンテキストセンシングにおいて、解析的モデルや深層学習を用いて環境非依存なモデルを構築するための研究にも取り組んだ。

また、本さがけ研究を通じて様々な連携を実現できた。まず、同領域 2 期生の猿渡 PI と連携して、技適対応無線基地局の設計開発を実施した。この基地局を用いて、backscatter タグの到来角推定やタグ検出法の検討を実施した。また、同領域 1 期生の若土 PI、同領域 2 期生の杉浦 PI と連携して、時間領域応答技術を利用したワイヤレスセンシングにおけるタグ識別数の拡張技術に関する共著論文が採択された<sup>[2]</sup>。さらに、2021 年 9 月に実施したオウル大学チームとのワークショップをきっかけとして、Sustainable IoT の実現に向けた課題と必要技術に関してオウル大学のグループとの議論を深め、今後の連携の基礎を築いた。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A「メンテナンスフリータグによる対象識別および学習データ不要なワイヤレスセンシング技術の確立」

ワイヤレスセンシングにおける対象識別と学習データ収集にかかる労力の課題を解決するため、 $\mu\text{W}$  で動作可能な backscatter タグを開発し、それを用いたコンテキストセンシング方式を確立した<sup>[1]</sup>。Interscatter と呼ばれる技術を利用して、市販の Bluetooth Low Energy (BLE) デバイスにより狭帯域な搬送波を送出し、送信機 (Exciter) として利用し

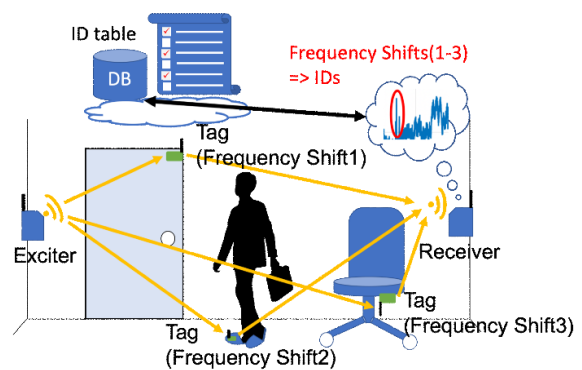


図 1 backscatter タグによるコンテキスト推定

た。タグの物理スイッチが ON の時のみ、Exciter の電波がタグで反射する際に発振器による周波数シフトが発生する。受信機で周波数解析を行い、当該周波数シフトの有無を観測することによって、あらかじめ登録されたシフト周波数に応じたスイッチの ON/OFF 状態が観測される。スイッチの状態がコンテキストと紐付くようにスイッチの設計を工夫することによって、コンテキストの状態を周波数シフトの有無として、電波で直接観測することが可能となる (図 1)。周波数シフトタグを用いたコンテキスト推定のコンセプトアプリケーションとして、着座セン

サ、歩数計、扉開閉センサ、温度計などを実装し、動作確認を行った。

開発したシステムに対して、人体による遮蔽の影響やセンシング可能な範囲、同一周波数帯での Wi-Fi 通信による影響など、実環境での使用を想定した性能評価を行った。その結果、送受信機からそれぞれ 3m 以内の範囲にタグが存在する状況であれば、周波数シフトのピークを検知可能なことが分かった(図 2)。また、人体による遮蔽の影響は、送受信機の至近で顕著なもの、見通しの遮蔽にも比較的堅牢なことが分かった。これは、周辺環境の反射により、電波が到達するという良い影響が得られたものと考えられる。

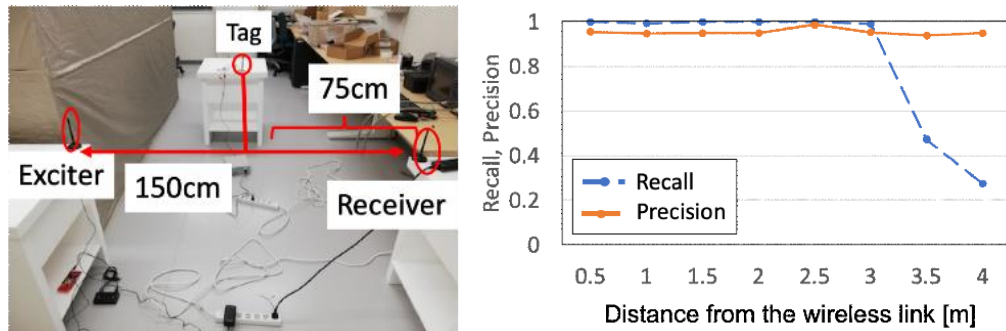


図 2 センシング可能距離の評価

研究テーマ B「バッテリーレスタグによる対象識別法の設計」導電性素材で異なる形状のタグを作成し、服に織り込んだり物に貼り付けたりすることで、Wi-Fi イメージングにより対象を識別する手法を設計し、シミュレーションによる性能評価を行った。Wi-Fi イメージはフェージングの影響を受け、同じ形状のタグでも場所によって結果が異なることが課題である。そこで、図 3 のように、対象が移動している、または受信アンテナアレイが動くことを想定し、Wi-Fi イメージの時系列データを入力とする深層学習モデルを構築した。Resnet、DenseNet121 などのいくつかの画像認識モデルを用いて、時系列の入力数分並べて転移学習することで、9 種類の異なる形状を持つタグの分類性能を評価した結果、91.23%の正解率を達成できることが分かった。

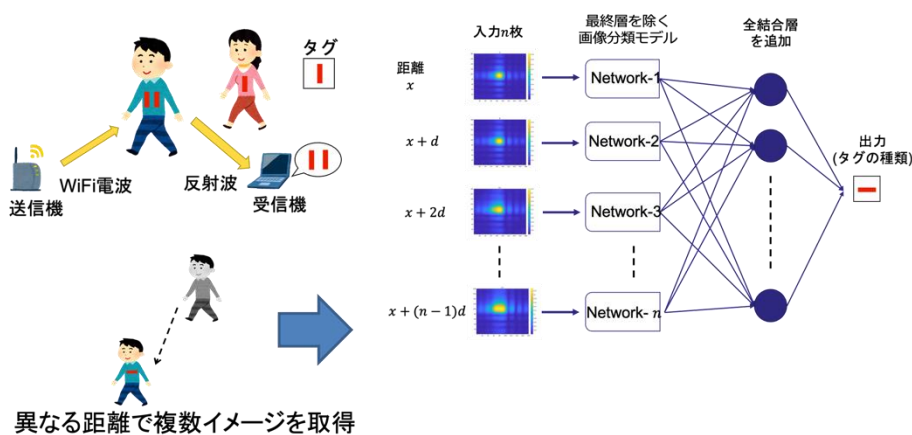


図 3 Wi-Fi イメージングによるタグ識別法の概要

研究テーマ C「バッテリーレスタグにおけるパルス幅を用いたタグ識別子の次元拡張」

バッテリーレスタグの識別法として、研究テーマ B ではタグの形状そのものを識別子として利用しているが、共振器などでタグごとに固有の周波数応答特性を持たせることで、識別子とし

て利用することも可能である。そこで、同領域の若土 PI(1 期生)、杉浦 PI(2 期生)と共同で、パルス幅に応じた固有の応答特性を持たせたタグを設計し、バッテリースタグの識別子の次元拡張を実現した。本成果は共著論文として論文誌に掲載されている<sup>[2]</sup>。

#### 研究テーマ D「Wi-Fi CSI を用いたワイヤレスセンシングの性能向上」

Wi-Fi CSI は送受信機間の電波伝搬状況を表す情報で、既存の Wi-Fi デバイスで取得可能なため、多くのコンテキストセンシングに関する研究が行われている。一方、電波伝搬の状況は環境ごとに異なるため環境依存性が高く、環境ごとに学習データが必要になることが多い。この問題を解決するため、本研究では Wi-Fi CSI から環境に依存しない特徴量を抽出する手法を検討している。具体的には、解析的なモデルに基づく手法と深層学習に基づく手法を検討している。解析的なモデルでは、アンテナアレイを用いた到来角、Time of Flight、Doppler Shift の同時推定結果を特徴量とした行動認識モデルの構築を行っている。また、深層学習を用いて環境非依存な特徴量を抽出する手法の構築も行っている。いくつかの異なる環境における学習データを収集し、それらから Autoencoder を用いて環境に依存しない特徴量の抽出を試みる。Autoencoder の構造を工夫し、一つの encoder に対して環境ごとに複数の decoder を設け、共通の encoder によって圧縮された特徴量から、異なる環境の decoder が入力データを復元できるよう学習を行う。これによって、encoder は環境に依存しない特徴量抽出器として利用できる。本手法の基礎的な成果は、モバイルシステム分野で著名な国際会議 MobiSys 2023 のワークショップに採択された。

また、Wi-Fi CSI は観測のために Wi-Fi デバイスが必要であり、その数が多いほど性能は向上することが知られている。そこで、Wi-Fi CSI の観測を増やすため、環境に複数の backscatter タグを設置しておき、送信機からの Wi-Fi CSI 観測用パケットを別の Wi-Fi チャンネルに周波数シフトさせ、受信機で観測する。これにより、Wi-Fi デバイスを増やすことなく、メンテナンスフリーな backscatter タグを環境に常時設置しておくだけで、低コストで Wi-Fi CSI の観測数を増やすことができる。Wi-Fi チャンネル間の周波数シフトを実現するためには 20MHz、40MHz、120MHz といった発振機が必要であり、通常の発振機では消費電力が大きくなってしまう。μW レベルでこれらの発信周波数を実現するため、FPGA により ring oscillator を構成し、backscatter タグに搭載する。本成果は、パーベイシブコンピューティング分野で著名な国際会議 PerCom 2023 の Work in Progress セッションに採択された<sup>[3]</sup>。

### 3. 今後の展開

バッテリースタグの実機による評価およびそれを用いたコンテキストセンシング手法の設計については、さらなる検討の余地があり、本研究でのシミュレーションを中心とした成果を基に研究の発展が見込めると考えている。また、社会実装のためには具体的なサービスとの連携が必要不可欠であり、応用研究を中心に他分野の研究者らと連携した展開を進めていく予定である。これらを通じて実証実験などを行い、その後のベンチャー立ち上げや技術移転等による社会実装につなげる必要があると考えている。

### 4. 自己評価

ワイヤレスセンシングにおける対象識別や学習データ収集負荷の低減という目的に対して、超低消費電力な backscatter タグを利用したコンテキストセンシングについては、タグの設計からコン

テキストセンシングの手法までの一連の流れを確立できたと考える。また、バッテリーレスタグを用いたセンシングについては、シミュレーションによる形状の認識やパルス幅を用いたタグ設計などの基礎部分が確立できた。一方、実機による評価およびそれを用いたコンテキストセンシング手法の設計については、さらなる検討の余地があり、本成果を基に研究の発展が見込めると考えている。ワイヤレスセンシングは IEEE 802.11bf において標準化も進められており、今後企業の注目も高まってくると考えられる。それに先駆けて、ワイヤレスセンシングの本質的な課題解決に取り組んだことで、将来的な社会への波及効果が期待できる。

研究実施にあたっては、大学院生を研究補助者として雇用し、円滑な研究の推進に努めた。一方、研究開始後数ヶ月で、新型コロナウイルス感染症の影響により、機材の納期が大幅に遅れたり、予定していた旅費が執行できなくなるなど、予算計画の変更が必要になったが、探索的研究のための機材購入に充当するなど、有効に予算を活用できたと考える。

## 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: 8件

1. Y. Nakagawa, T. Maeda, A. Uchiyama, and T. Higashino, “BAAS: Backscatter as a Sensor for Ultra-Low-Power Context Recognition”, *Journal of Information Processing*, Vol. 30, pp.130-139, 2022.

メンテナンスフリーで学習データ不要なワイヤレスセンシングを実現するため、backscatter タグを設計開発し、それを用いたコンテキストセンシング手法を提案した。タグは  $\mu\text{W}$  レベルの消費電力で動作し、FPGA やマイクロコントローラーを使用しないため、容易に製作が可能である。タグを付与する対象のコンテキストに応じて、タグに搭載された物理スイッチが ON/OFF されることで、タグからの反射波における周波数シフトの有無としてコンテキストのセンシングが可能であることを確認している。

2. M. Tashiro, A.A. Fathnan, Y. Sugiura, A. Uchiyama, and H. Wakatsuchi, “Metasurface-Inspired Maintenance-Free IoT Tags Characterised in Both Frequency and Time Domains”, *Electronics Letters*, 2022.

従来のバッテリーレスタグでは、タグごとに共振器特性を変えることで、吸収量の大きい周波数の組み合わせを作り、識別子として利用する。これに対して、同さきかけ領域の若土 PI が有するパルス幅に応じて応答特性が変化する電磁材料を組み合わせることで、同一周波数でも照射時間に応じて応答特性を変えることができ、応答パルス幅と応答周波数の組み合わせによるタグ識別が実現できることを示した。

3. V. Erdelyi, K. Miyao, A. Uchiyama, and T. Murakami, “Towards Activity Recognition Using Wi-Fi CSI from Backscatter Tags”, *International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2023) Work in Progress*, 2023.

Backscatter タグを用いて、既存の Wi-Fi 機器で取得可能な CSI を用いたコンテキストセンシングの性能を向上させる手法を考案した。Wi-Fi センシング性能向上のため、多数の Wi-Fi デバイスを設置することは導入・維持管理のコストが高い。そこで、環境に複数の backscatter タグを設置しておき、送信機からの Wi-Fi CSI 観測用パケットを別の Wi-Fi チャンネルに周波数

シフトさせ、受信機で観測する。これにより、メンテナンスフリーな backscatter タグを環境に常時設置しておくだけで、低コストで Wi-Fi CSI の観測数を増やせることを示した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1 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)

- 最優秀論文賞, 情報処理学会第 28 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ実行委員会, 中川善博, 前田透, 内山彰, 東野輝夫, 2020 年 11 月.
- IPSJ/IEEE Computer Society Young Computer Researcher Award, 2022 年 1 月.
- JIP Specially Selected Paper, Information Processing Society of Japan, Yoshihiro Nakagawa, Toru Maeda, Akira Uchiyama, and Teruo Higashino, 2022 年 2 月.