

研究終了報告書

「物理空間と電脳空間を接続するための電波空間 API の実現」

研究期間:2020 年 11 月～2024 年 3 月

研究者:猿渡 俊介

1. 研究のねらい

本研究では IoT で未だ解決できていない重要な課題「物理空間をセンシングして電脳空間に取り込むためのエネルギーをどうするのか？」に取り組んだ。1999 年のスマートダストの論文の時点でエネルギーが課題であることは認識されていたものの、センサネットワーク、M2M、IoT と時代と共に流行り言葉が移り変わってもエネルギーの課題は 20 年前から解決されていない。物理空間の情報を取得したくてセンサをばらまいているのに、エネルギーの制約からデータの収集頻度を抑えなければならないという矛盾が存在する。また、バッテリーの進化はこの 20 年で 4 倍の密度向上にしか達していない。2000 年代に活発に研究されてきた低消費電力通信プロトコルの研究は IoT デバイスの受信待機時のエネルギー消費を抑えることには成功したものの、センシングやデータ送信時のエネルギーの課題は依然として残っている。猿渡自身も 2002 年にセンサネットワークの研究を始めたときから基盤技術と応用技術の両方に取り組んできたが、IoT 関連の応用の多くが「物理空間をセンシングして電脳空間に取り込むためのエネルギーをどうするのか？」が社会展開の障壁となり続けていると感じている。

図 1 に本研究の漠然としたイメージを示す。図 1 に示した通り、本研究では、電波空間を物理空間と電脳空間を接続するための API と見立て、電波空間を自由自在に操作する技術を実現することで「物理空間をセンシングして電脳空間に取り込むためのエネルギーをどうするのか問題」を抜本的に解決することを試みた。



図 1

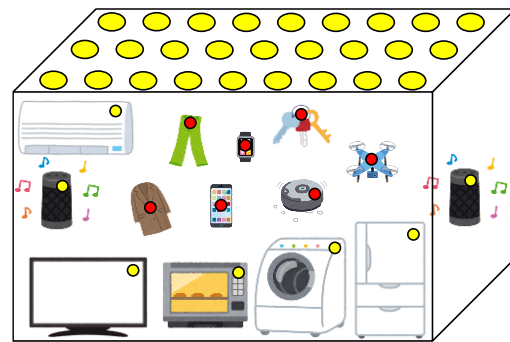


図 2

図 2 により具体的なイメージを示す。黄色い丸が電波空間 API モジュール、赤い丸がバックスキャタ機能と電力受電機能を有した IoT デバイスモジュールである。天井のライト、テレビ、エアコンなど家庭用電源に有線接続されたありとあらゆるモノに電波空間 API モジュールを組み込み、電波空間 API モジュールが相互に連携することで

1. 電波を用いて物理空間の情報を抽出するワイヤレスセンシング機能（図 3）を実現すると共に、スマートウォッチ、服、鍵など物理空間に存在する家庭用電源に接続

されていない IoT デバイスに対して

2. バックスキャッタ技術による超低消費電力通信機能 (図 4)
3. 複数アンテナ分散型電波電力供給機能 (図 5)

を提供する。

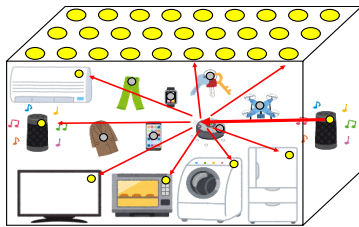


図 3

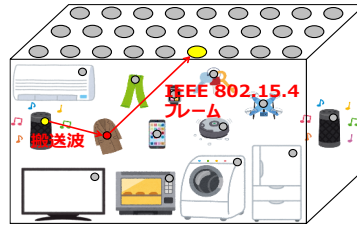


図 4

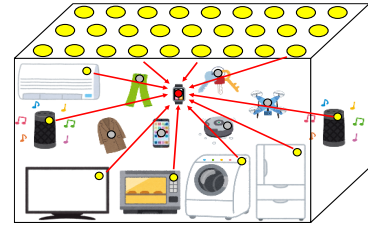


図 5

2. 研究成果

(1) 概要

本プロジェクトの成果としては、上記のワイヤレスセンシング、バックスキャッタ通信、電波電力伝送の3つ以外も含めて多様な観点から様々な成果が得られた。ワイヤレスセンシングでは、WiFi の CSI を用いた手法でコロナ禍の運動不足を検出する技術[成果 5-(1)-3]や、ミリメートル精度の位置検出技術[成果 5-(3)-2]を実現した。バックスキャッタ通信では、多数の IoT デバイスにおいて疑似同期を取ったり[成果 5-(3)-3]、Carrier Emitter と受信機を選択を工夫したり[成果 5-(1)-1]することで同時に複数の IoT デバイスが存在する場合のバックスキャッタ通信成功率を向上できる仕組みを実現した。電波電力伝送では、関数フィッティングを利用した位相最適化やバックスキャッタ通信と山登り方を組み合わせた方法など様々な位相最適化アルゴリズムを実現した[成果 5-(1)-2]。

これらの成果は、以下の 4 つの視点に分類できる。1 つ目は、発表した論文・特許などの研究成果そのものに直結した「1. 直接的な成果」、2 つ目は、受賞などの自身の研究が評価されたことによる「2. 副次的な成果」、3 つ目は、共同研究などの猿渡自身の研究範囲を広げる「3. 拡張的な成果」、4 つ目は、猿渡自身が本プロジェクトで目標としていたことを達成した「4. 個人的な成果」である。

1. 直接的な成果としては、提案当初からターゲットとしていたワイヤレスセンシング関連で原著論文 4 件・国際会議 3 件、バックスキャッタ通信関連で原著論文 3 件・国際会議 3 件、電波電力伝送では原著論文 2 件・国際会議 2 件と全ての研究項目で当初の予定を上回る成果が得られた。猿渡のさきがけを振り返ってみると、さきがけを通じて得られたアドバイスや共同研究者と共に当初の計画になかったことにも果敢にチャレンジできたことが大きかったと言える。定量的な数字だけここで述べると、トータルでは原著論文 16 件(最大 IF=5.9)、国際会議 17 件(トップ国際会議含む)、特許 12 件(国際特許含む)と 3 年半のプロジェクトとしては十分な成果が得られた。2. **副次的な成果**としては、情報処理学会において出版された論文の中で最も優れている論文に与えられる論文賞を受賞したり、国際会議で Best Paper Award をいただいたり、招待講演で 7 件講演したりした。特にワイヤレスセンシングが B5G/6G でも取り入れられる動きが加速している関係で、B5G/6G の文脈で招待講演を依頼されることが増えている。3. **拡張的な成果**と

してはさがけを中心に多様なコラボレーションが生まれて科学研究費基盤 A を代表者として獲得したり、国際連携で米国 UCSD の Dinesh Bharadia との共同研究が始まったり研究活動に広がりが出ている。本終了報告書作成時には間に合わなかったが、岡山大・山内(1 期生)、吉岡(領域アドバイザー)と IoT マルウェアに関する共同研究で論文誌の投稿準備中であったり、Dinesh Bharadia と国際特許の取得準備中であったりと本報告書に記載している内容よりも派生して成果が増え続けている。**4. 個人的な成果**としては、猿渡が学生時代より目標としていたトップ国際会議「ACM SenSyS」に採択された。ACM SenSyS での採択は日本人初である。

(2) 詳細

ここでは本さがけ開始時に計画していた 1. ワイヤレスセンシングの成果、2. バックスキャッタ通信の成果、3. 複数アンテナ分散型電波電力伝送の成果の 3 つに加えて、本さがけプロジェクトを進める過程で生まれた 4. 派生的成果について述べる。

2-(2)-1. ワイヤレスセンシングの成果

ワイヤレスセンシングは 3 つの中でも猿渡自身が 3 年目に最も注力したこともあり、結果として最も目立った成果が出た。ここでは、XRLoc、CBR-ACE の 2 つの成果を報告する。

XRLoc は AirTag などの UWB を用いた IoT デバイスをミリメートルの精度で位置検出できる技術である。既存の技術が約 10cm の精度であったのに対して、TDoA と PDoA を巧みに組み合わせることで測位精度を約 10 倍、測位頻度を約 100 倍向上させた。主に XR (VR/AR/MR) の応用を想定しており、屋内でマイクロドローンを飛ばしたり、工場において人とロボットがぶつからないようにしたり、多数の UWB タグを体に張り付けてボディトラッキングを実現して VR 空間に自分自身のコピーを投影したりなどの応用を考えている。本研究はコンピュータネットワーク分野のトップ国際会議 (CORE Conference Ranking[参考 7-1]で A*) である ACM SenSyS 2023 に採録されるなど国際的に高い評価を得ている。

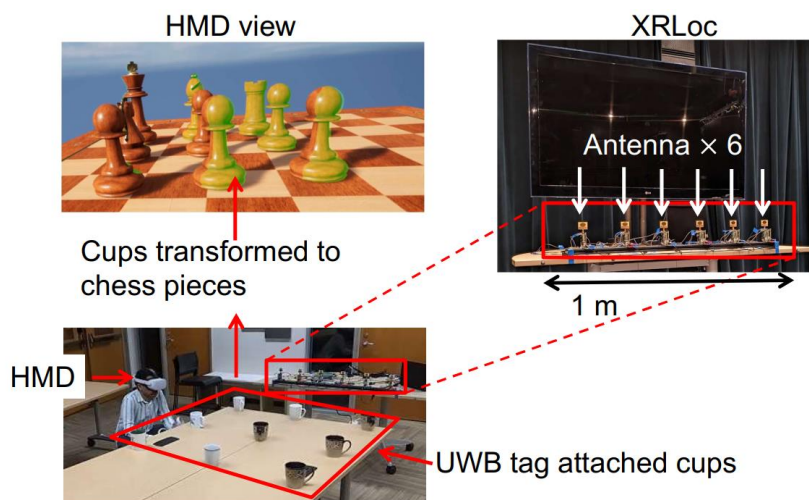


図 6

CBR-ACE は、コロナ禍での課題に着想を得たユーザの運動状況をモニタリングするシステムである。コロナ禍では、ステイホームが推奨されてリモートワークが増加すると共に、外出しな

いことによる運動不足による健康被害が課題となった。この課題に対して、CBR-ACE では、家庭の無線 LAN の基地局が設置されているだけで、ユーザが特殊なデバイスを装備することなく、ユーザの運動状況をモニタリングできる技術を提案・実装・評価している。先行研究では概念実証を目的としていたがゆえに、特殊なデバイスを用いてかつ低精度でしか活動状況を把握することができなかった。それに対して CBR-ACE では、センシングの情報源としての観点から IEEE 802.11ac/ax が MIMO 伝送を行うときに送受する Compressed Beamforming Report の持つ特性について分析しつつ、人物の運動回数推定を対象に市販の機器のみを用いたセンシングシステムを構築する手法およびその実装について提案した。CBR-ACE は情報処理学会において 2022 年度に最も優れた論文に贈られる論文賞を受賞している。また、当該分野においてトップ国際会議である ACM SIGCOMM 掲載論文[参考 7-2]から引用もされている。さらに、本研究の過程で開発したオープンソースの WiPiCap [参考 7-6]はダウンロード数が世界中から毎月数十件以上あり、世界的な研究コミュニティへの貢献も大きい。

2-(2)-2. バックスキャッタ通信の成果

バックスキャッタ通信では、社会展開を見据えて MAC プロトコルに関して多角的な観点から研究を行い、IF=5.9 の国際論文誌を始めとした多くの成果が出た。具体的には、FDMA を用いた手法[成果 5-(3)-4]、同一周波数におけるバックスキャッタ通信同時送信手法[成果 5-(3)-5]、全二重通信を用いたバックスキャッタ隠れ端末問題解決手法[成果 5-(3)-1]、受信機能を持たないバックスキャッタタグにおいて疑似同期を用いることで衝突回避を行う手法[成果 5-(3)-3]などを提案した。

本報告書では、いくつかの成果の中でバックスキャッタ通信を実際に社会展開することを意識した[成果 5-(3)-3]について報告する。バックスキャッタ通信の多くの既存研究は、LNA (Low Noise Amplifier) を用いない包絡線検出器を用いた超低消費電力受信回路を使ってバックスキャッタタグ側でも低消費電力な受信を実現して MAC プロトコルの制御を行っている。しかしながら、超低消費電力受信回路は LNA を用いていないがゆえに通信距離が短いため、結果としてバックスキャッタ通信の通信可能距離も短くなる。タグ側の回路が複雑になって価格が上昇するという問題も生じる。そこで[成果 5-(3)-3]では、タグ側の送信に疑似乱数を用いた規則性を持たせると同時に、Carrier Transmitter が送信するタイミングを Backscatter 通信の受信を失敗した情報をもとにタグの送信タイミングを推定することで、疑似的な同期を行ってパケットロス率を削減する手法を実現した。

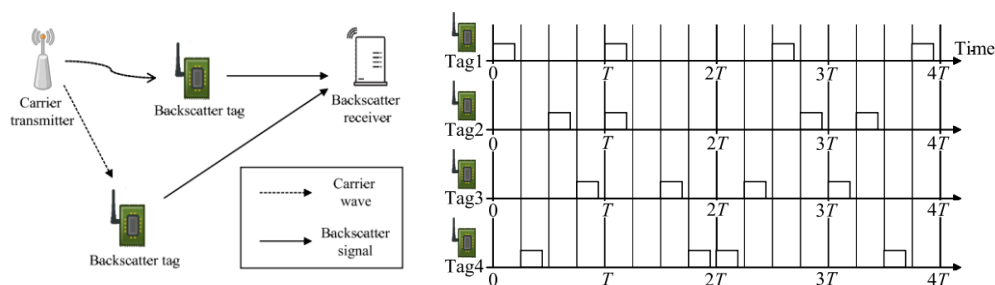


図 7

2-(2)-3. 複数アンテナ分散型電波電力伝送の成果

複数アンテナ分散型電波電力伝送では、空間に分散的に配置された多数の送信アンテナから送出された電波の位相を制御して IoT デバイスの地点でお互いに強め合うように重ね合わせることで電波電力伝送を実現する技術である。ビームフォーミングを用いた電波電力伝送がアンテナと IoT デバイスの間に立った人への影響が大きいのにに対して、複数アンテナ分散型電波電力伝送は IoT デバイスの場所のみで強め合うように制御可能である点が利点である。本さがけプロジェクトでは主に送信アンテナの位相調整アルゴリズムとその実証に取り組み、CPC 法や Power-aware LM 法[成果 5-(1)-2]などの手法を提案した。IEEE ICCE 2022 ではベストペーパーアワードの 2 位(210 論文中)を獲得するなど国際的にも高く評価されている。

本報告書では、いくつかの成果の中で、既存の手法よりもより正確かつ高速に位相の最適化が可能な Power-aware LM 法[成果 5-(1)-2]について報告する。既存の位相制御手法では、受電側の IoT デバイスにおける RSSI の計測と各送信アンテナの位相の調整とを相互に繰り返しながら位相の最適化を行っていた。それに対して Power-aware LM 法では RSSI の計測と位相調整を分離することで最適化時間を約 62%削減することに成功した。具体的には、まず、RSSI 計測フェーズでは送信アンテナの位相を連続的に変更しながら IoT デバイスの受電アンテナからの反射信号を RSSI として取得する。次に取得した RSSI の情報から複数アンテナ分散型電波電力伝送のモデルのパラメータ値を LM 法によるフィッティングで推定する。最後に得られたフィッティング関数において RSSI が最大となる点を算出する。

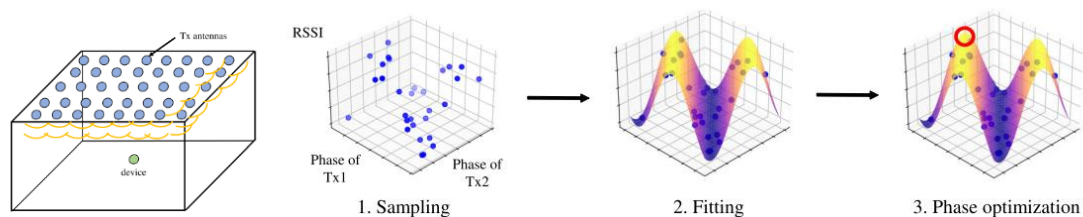


図 8

2-(2)-4. 派生的成果

さがけの領域会議での他の採択メンバーとの交流から以下のような様々な共同研究や研究プロジェクトが生まれた。

1. 杉浦 (さがけ IoT・1 期)、若土 (さがけ IoT・1 期)、志賀 (さがけ社会情報基盤・OB) とのコラボレーションで科研費の基盤(A)に代表者として採択された。杉浦はワイヤレス通信の理論研究社、若土はメタサーフェスのデバイス研究者、志賀は時刻同期技術の研究者である。それぞれの知見を持ち寄って次世代のワイヤレスネットワークの実現に向けて研究プロジェクトを進めている。

2. 米国 UCSD の Dinesh Bharadia との国際協力体制を実現した。領域会議で知り合った志賀がたまたま Dinesh Bharadia と繋がっていたことで紹介してもらって国際共同研究がスタートした。その成果の 1 つが ACM SenSys 2023 での採択である[成果 5-(3)-2]。Dinesh Bharadia は若干 34 歳ながら発表論文の総引用数が 1 万件を超えるワイヤレスネットワークシステムの若手トップ研究者である。Full Duplex Radios [参考 7-3]が Dinesh Bharadia の最も目立っている研究であるが、SpotFi [参考 7-4]などのワイヤレスセンシングや、BackFi [参考 7-5]などのバックスキッタ通

信でも顕著な業績を出しており、猿渡の興味分野との共通点が多い。現在も[成果 5-(3)-2]の拡張や B5G/6G に向けた研究プロジェクトを共同で進めている。

3. 山内(さがけ IoT・1期)、吉岡 (さがけ IoT・領域アドバイザー)とのコラボレーションで IoT マルウェアに関する共同研究をスタートした。猿渡自身は CTF などのセキュリティ関連の競技に参加することがあったものの、セキュリティ自体を研究テーマにしたことはほとんどなかった。さがけ領域会議での出会いをきっかけに共同研究がスタートし、ポスター発表ではあるもののセキュリティのトップ国際会議で発表したり[成果 5-(3)-5]、論文誌への投稿準備を進めたりと順調に成果が出ている。

3. 今後の展開

電脳物理工学分野という新たな分野を目指していきたい。さがけ IoT を通して、理論系の研究者、デバイス系の研究者と議論・共同研究する機会があった。その中で、電脳空間と物理空間が融合する時代の流れに鑑みると技術者がカバーしなければならない範囲も増え続けている。どのような枠組みでアプローチするかはまだ模索中であるが、情報理論、通信理論、信号処理、ネットワークシステム、電磁材料、半導体、センサデバイス、ロボティクスを融合させた知識体系・技術体系の創出を目指したい。

4. 自己評価

当初の予定を上回る成果が得られた。特に学生の頃より 20 年以上目指していた ACM SenSyS 2023 に採択されたことが大きい。個別の技術を見ても、ワイヤレスセンシング、バックスキヤット通信、電波電力伝送それぞれにおいて原著論文が複数採択されている上に、情報処理学会論文賞や国際会議の Best Paper Award などの受賞、多数の特許の取得など数多くの成果が得られた。さらに、さがけ IoT の他の採択者と共に新たな研究プロジェクトを立ち上げたり、米国 UCSD の Dinesh Bharadia と共に国際共同研究が始まったりと今後への発展も期待できる結果となった。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文): 全16件中報告書に関係する3件を掲載

1. Ousmane Zeba, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, “MAC Protocols for High Capacity and Increased Reliability in Bistatic Backscatter Networks for Internet of Things,” Computer Networks, Vol.232, pp.1–9, 2023.
2. Kentaro Hayashi, Kazuki Aiura, Yuki Tanaka, Kazuhiro Kizaki, Takuya Fujihashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, “Curve Fitting-based Phase Optimization for Microwave Power Transfer,” IEEE Access, Vol.10, pp.23902–23912, 2022.
3. Sorachi Kato, Tomoki Murakami, Takuya Fujihashi, Takashi Watanabe, Shunsuke Saruwatari, “CBR-ACE: Counting Human Exercise using Wi-Fi Beamforming Reports,” Journal of Information Processing, Vol.30, pp.66–74, 2022.

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 11 件。加えて、成果(3)-2 における米国での特許を Dinesh Bharadia

と共に出願中である。

(3) その他の成果: 国際会議 17 件、招待講演 7 件等から関連する成果を記載

1. Natsuki Ikuo, Sorachi Kato, Takuma Matsukawa, Tomoki Murakami, Takuya Fujihashi, Takashi Watanabe, Shunsuke Saruwatari, “CSI2PC: 3D Point Cloud Reconstruction Using CSI,” IEEE Consumer Communications and Networking Conference (IEEE CCNC), pp.1–6, 2024. (accepted)
2. Aditya Arun, Shunsuke Saruwatari, Sureel Shah, Dinesh Bharadia, “XRLoc: Accurate UWB Localization to Realize XR Deployments,” The 21st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (ACM SenSys'23), pp.1–15, 2023.
3. Ryosuke Koizumi, Yohei Konishi, Kazuhiro Kizaki, Takuya Fujihashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, “Asynchronous MAC Protocol for Receiver-Less Backscatter Tag,” IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC), pp.1–6, 2023.
4. Yohei Konishi, Shinsuke Ibi, Kazuhiro Kizaki, Takuya Fujihashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, “Harmonics-Controlled Frequency Division Multiple Access without Harmonics and Sidebands Interference in Backscatter Communications,” IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC), pp.1–6, 2022.
5. Yutaro Osako, Toshihiro Yamauchi, Katsunari Yoshioka, Takuya Fujihashi, Takashi Watanabe, Shunsuke Saruwatari, “Poster: A Visualization Result of String based CPU Architecture Independent IoT Malware Clustering,” The Network and Distributed System Security Symposium (NDSS'22), pp.1–2, 2022.

6. 参考文献

1. CORE Conference Ranking, <http://portal.core.edu.au/conf-ranks/>
2. C. Wu, X. Huang, J. Huang, G. Xing, “Enabling Ubiquitous WiFi Sensing with Beamforming Reports,” In Proceedings of the ACM SIGCOMM 2023 Conference (pp. 20-32), 2023.
3. Dinesh Bharadia, Emily McMilin, Sachin Katti, “Full Duplex Radios,” Proceedings of the ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication (ACM SIGCOMM'13), pp. 375-386, 2013.
4. Manikanta Kotaru, Kiran Joshi, Dinesh Bharadia, Sachin Katti, “SpotFi: Decimeter Level Localization Using WiFi,” Proceedings of the ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication (ACM SIGCOMM'15), 2015.
5. Dinesh Bharadia, Kiran Raj Joshi, Manikanta Kotaru, Sachin Katti, “BackFi: High Throughput WiFi Backscatter,” Proceedings of the ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication (ACM SIGCOMM'15), 2015.
6. “WiPiCap: Capturing Wi-Fi CSI Frames Using RaspberryPi,” <https://github.com/watalabo/WiPiCap>