

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K11941

研究課題名（和文）受動型センシングによるメンテナンスフリーな状況認識技術の開発

研究課題名（英文）Development of Maintenance-free Context Recognition by Passive Sensing

研究代表者

内山 彰（Uchiyama, Akira）

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：70555234

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、人の行動などの状況認識を低コストに実現するため、電力の供給が不要なバッテリーレスタグや、環境発電による継続動作が可能な超低消費電力タグを用いた受動型センシングによるメンテナンスフリーな状況認識技術の開発に取り組んだ。また、銅箔テープなどの導電性素材を用いたバッテリーレスタグを設計し、その反射パターンを利用して深層学習を用いたタグ識別手法を開発した。さらに、Wi-Fi CSIを用いた屋内人数推定手法や、超低消費電力なタグを用いたCSIによる状況認識手法を開発した。これらの成果は国際会議や国際論文誌などで発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Wi-Fi CSIを用いた状況認識技術は導入コストの低い手法として注目を集め、活発に研究が行われてきた。一方、これまでにWi-Fi CSIを用いた見守りや在室検知などいくつかのサービスが登場しているが、普及には至っていない。この原因として、対象が複数存在する場合にそれらの区別がつかない、明確な電波の変化が現れにくいといった認識可能な行動に限られる、という課題が存在する。本研究成果は、これらの課題解決に資するものであり、Wi-Fi CSIを用いた状況認識技術の普及につながるいくつかのアプローチを確立できたと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we focused on developing maintenance-free context recognition techniques using passive sensing with batteryless tags that require no power supply and ultra-low power tags capable of continuous operation through environmental power generation. We designed batteryless tags using conductive materials such as copper foil tape and developed a tag identification method using deep learning based on the reflected RF signal patterns. Additionally, we developed an indoor people counting method using Wi-Fi CSI (Channel State Information) and context recognition techniques using Wi-Fi CSI with ultra-low power tags. These achievements were presented at various venues including international conferences and published in international journals.

研究分野：モバイルコンピューティング

キーワード：Wi-Fi CSI バッテリーレスセンシング 状況認識

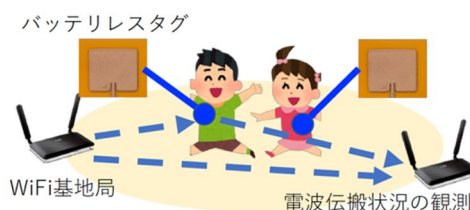
1. 研究開始当初の背景

人の行動などの状況認識の重要性は年々高まっている。例えば、人工知能やロボットなどが適切なフィードバックや制御を行うためには、対象の状況を把握することが必要不可欠である。また、スマートホームなどの環境側で現在の状況を認識し、適切な家電制御を行うなどのサービスも検討されている。多くの状況認識に関する研究では、スマートフォンやスマートウォッチなどのデバイスから得られる加速度や角速度などのセンサ情報を基に、状況認識を実現している。しかし、いずれもバッテリーによって動作するため、充電の手間がかかったり、導入コストがかかるという課題がある。

これに対して、既に普及している Wi-Fi の電波伝搬状況を利用した受動型センシングによる状況認識技術が近年では注目を集めている。これらの技術では、人の動きが作り出す電波伝搬の変化を Wi-Fi 基地局などの観測機でとらえることによって、インフラ側で状況認識を行う。しかしながら、対象が複数存在する場合にそれらの区別がつかない、明確な電波の変化が現れにくいといった認識可能な行動が限られる、といった課題が存在する。

2. 研究の目的

本研究では、複数対象の状況認識を導入・メンテナンスの観点から低コストに実現することを目的とする。このため、バッテリーレスタグを用いた受動型センシングによるメンテナンスフリーな状況認識技術の開発に取り組む。バッテリーレスタグを腕、足、衣服、鞆など様々な部位に装着したり、モノに貼り付けたりすることで、それらの動きに伴う Wi-Fi 電波の変化を環境に設置した基地局でとらえる受動型センシングによって、状況認識を行う(図)。



バッテリーレスタグは Wi-Fi の周波数帯に合わせて調整するため、何も装着しない場合と比べてより顕著に電波伝搬の変化が生じる。例えば、Wi-Fi 送受信機間でアンテナを保持して手を動かした場合に、動きに合わせて位相の分散が顕著に変化する。したがって、従来の Wi-Fi 受動型センシングでは困難であった細かな動きもとらえられる可能性がある。さらに、タグごとにアンテナの特性を変えることによって、複数存在するタグのうち、電波伝搬に影響を及ぼしているタグを判別する。これによって複数のタグが存在する場合であっても、それぞれの影響を分離し、個別の状況認識を実現する。既に普及している Wi-Fi を利用するため、導入コストは低く抑えられる。また、バッテリーレスタグの充電は不要なため、メンテナンスフリーでの状況認識が実現できる。

3. 研究の方法

どのようにしてタグの区別を実現するかは、本研究における大きな課題の一つである。これに対して、本研究ではタグごとに固有の電波反射特性を持つよう、あらかじめ設計を変えておくことによって、受信機で観測される電波の状態から、どのタグが影響を及ぼしているかを区別する。具体的には、タグ固有の発振周波数を設定しておくことで、タグ固有の周波数シフトを生じさせたり、共振器を利用してタグ固有の周波数を減衰させる、といった方法を検討する。シミュレーションや実機実験により性能を評価し、タグの分離性能や利用可能な距離、机・パーティション・人体などの障害物の影響などを明らかにすることで、本手法の実現可能性を示す。

4. 研究成果

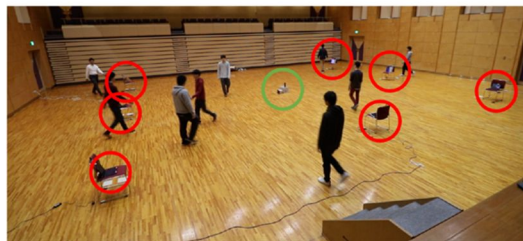
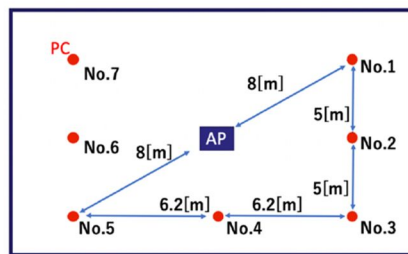
本研究では、(1)バッテリーレスタグの設計、(2)Wi-Fi チャンネル状態情報(CSI)を用いたセンシング方式の開発、(3)バッテリーレスタグを用いたセンシング方式の開発、に取り組んだ。また、当初想定していなかった展開として、(4)超低消費電力なタグを用いた Wi-Fi CSI センシングの性能向上にも取り組んだ。

(1) バッテリーレスタグの設計

3D プリンタを用いてダイポールアンテナを製作し、その特性調査を行った。その結果、3D プリンタによるアンテナ製作では、導電性素材の特性を考慮した印刷が必要となるため、印刷速度や抽出温度、厚みなどの細やかな調整が必要であることが確認された。製作したダイポールアンテナをバッテリーレスタグとして利用するためには、アンテナにより電波になんらかの影響を与え、識別可能とする必要がある。この初期検討として、ダイポールアンテナの中央に物理スイッチを取り付け、その ON/OFF を切り替えることでアンテナ特性を変化させ、周囲の電波に揺らぎを生じさせる。物理スイッチの ON/OFF を電子回路的に再現し、実験を行ったところ、アンテナと受信機が 1.5m 程度の距離であればスイッチング速度に応じた周波数シフトが検出可能なことを確認した。

(2) Wi-Fi チャンネル状態情報(CSI)を用いたセンシング方式の開発

歩行に伴う人の動きによって Wi-Fi 電波が変動することを利用し、屋内環境における人数推定手法を設計した。提案手法では Wi-Fi サブキャリアごとの振幅および位相の分散を特徴量として、機械学習により推定モデルを構築する。右図に示す屋内環境での実験により、平均絶対誤差 0.39 人で 0-9 人の人数を推定可能なことを確認した。



● 受信機(PC) ● 送信機(アクセスポイント)

また、複数本のアンテナで構成されるアンテナアレイを用いて CSI により取得したアンテナ間位相差から、電波の到来角が推定できる。この原理を応用し、アンテナアレイから見た方向が分かっている送信機からの直接波を除去することで、周辺環境による反射波の電波強度マップを構築する手法を構築した。また、実環境でソフトウェア無線を用いた電波反射強度マップの測定を実施し、見守り応用を想定して人の姿勢認識モデルを構築した。さらに、Wi-Fi チャンネル状態情報を利用した在室推定手法を開発し、姿勢認識モデルと組み合わせることで、生活サイクルのモニタリングや見守りへの適用可能性を確認した。

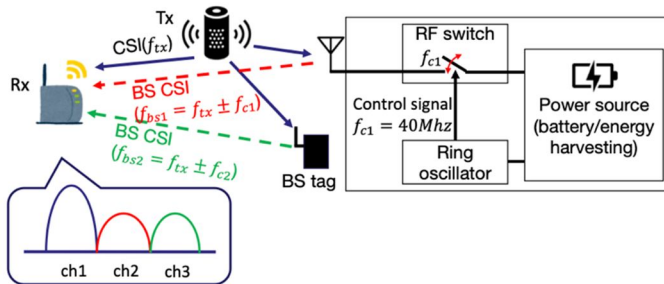
(3) バッテリレスタグを用いたセンシング方式の開発

固有の形状を持つ銅などの導電性素材を用いたバッテリレスタグを用いて、その反射パターンを利用して深層学習を用いたタグ識別手法の検討を行った。本手法では、(2)で構築したアンテナアレイを用いた電波強度マップ構築手法を利用し、シミュレーションにより得られた反射波の空間的な電波強度分布を入力として、タグを識別する。性能評価により、9種類のタグを 90%程度の正解率で識別できることが分かった。

(4) 超低消費電力なタグを用いた Wi-Fi CSI センシングの性能向上

環境発電で永続動作可能なレベルのわずかな電力消費を許容することによって、バッテリレスタグでは実現できない電波変動を生み出すことができる。さらに検出可能距離を延伸させるため、観測期間を長くすることでノイズとの分離を実現する手法を開発した。これにより、送信機・受信機とタグ間の距離がそれぞれ 10m の場合であっても、タグの検出が可能であることを確認した。さらに、環境発電型タグを利用したメンテナンスフリーな状況認識技術を開発した。タグに搭載された物理スイッチの開閉状態を接触や傾きなどの物理的な動きと連動させることにより、特定の動きがある場合のみ、タグ特有の反射波が観測されるようにして、消費電力を大幅に低減させることに成功している。

また、開発した超低消費電力なタグを用いて、Wi-Fi CSI の観測を周波数的・空間的に増加させる手法を開発した。本手法では、環境発電型タグで既存送受信機間での Wi-Fi CSI 観測 packets を反射し、別チャンネルにシフトさせることによって、新たな Wi-Fi デバイスを設置することなく、タグからの反射波をあたかも別の Wi-Fi デバイスから別チャンネルで送信された Wi-Fi CSI パケットであるかのように受信できる(上図)。Wi-Fi CSI による状況認識は、一般的に観測が増えるほど性能向上が見込めるため、本手法によって状況認識の性能向上が期待される。



研究期間全体を通じて、本研究課題では、人の行動などの状況認識を低コストに実現するため、電力の供給が不要なバッテリレスタグや環境発電による継続動作が可能な超低消費電力タグを用いた受動型センシングによるメンテナンスフリーな状況認識技術の開発に取り組んだ。また、銅箔テープなどの導電性素材を用いたバッテリレスタグを設計し、その反射パターンを利用して深層学習を用いたタグ識別手法を開発した。これらの成果は国際会議や国際論文誌などで発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nakagawa Yoshihiro, Maeda Toru, Uchiyama Akira, Higashino Teruo	4. 巻 30
2. 論文標題 BAAS: Backscatter as a Sensor for Ultra-Low-Power Context Recognition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 130 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjip.30.130	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 Uchiyama Akira, Saruwatari Shunsuke, Maekawa Takuya, Ohara Kazuya, Higashino Teruo	4. 巻 29
2. 論文標題 Context Recognition by Wireless Sensing: A Comprehensive Survey	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 46 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjip.29.46	査読の有無 無
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17件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yu Sugimoto, Hamada Rizk, Akira Uchiyama, Hirozumi Yamaguchi
2. 発表標題 Towards Environment-Independent Activity Recognition Using Wi-Fi CSI with an Encoder-Decoder Network
3. 学会等名 Workshop on Body (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Viktor Erdelyi, Kazuki Miyao, Akira Uchiyama, Tomoki Murakami
2. 発表標題 Towards Activity Recognition Using Wi-Fi CSI from Backscatter Tags
3. 学会等名 The 21st International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Teruo Higashino, Akira Uchiyama, Hirozumi Yamaguchi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, and Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 A New Problem Setting for Mobile Robots Based on Backscatter-Based Communication and Sensing
3. 学会等名 SSS 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森田幸歩, 内山彰, 東野輝夫
2. 発表標題 時系列WiFiイメージを用いた深層学習によるタグ識別法の検討
3. 学会等名 第29回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大河原一輝、内山 彰、エルデーイ ヴィクトル、村上友規、アベセカラ ヒランタ、東野輝夫
2. 発表標題 Wi-Fiイメージングによる行動認識の検討
3. 学会等名 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshihiro Nakagawa, Toru Maeda, Akira Uchiyama, and Teruo Higashino
2. 発表標題 Design and Evaluation of a Frequency Shift Backscatter Tag for Context Recognition
3. 学会等名 In Adjunct Proceedings of the 2021 International Conference on Distributed Computing and Networking (ICDCN '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森田幸歩, 中川善博, 内山彰, 東野輝夫
2. 発表標題 対象識別に向けたWiFiイメージングのシミュレーションによる検討
3. 学会等名 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大河原一輝, 内山彰, エルデーヴィクトル, 村上友規, アベセカラヒランタ, 東野輝夫
2. 発表標題 Wi-Fi CSIを用いたイメージングに関する基礎検討
3. 学会等名 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川善博, 前田透, 内山彰, 東野輝夫
2. 発表標題 状況認識のための周波数シフト型Backscatterタグの設計と評価
3. 学会等名 第28回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森田幸歩, 前田透, 中川善博, 内山彰, 東野輝夫
2. 発表標題 Wi-Fi電波を用いたイメージングによる対象識別法の検討
3. 学会等名 マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム2020論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahide Mizutani, Akira Uchiyama, Tomoki Murakami, Hirantha Abeysekera, Teruo Higashino
2. 発表標題 Towards People Counting Using Wi-Fi CSI of Mobile Devices
3. 学会等名 in Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruo Higashino, Akira Uchiyama, Shunsuke Saruwatari, Hirozumi Yamaguchi, Takashi Watanabe
2. 発表標題 Context Recognition of Humans and Objects by Distributed Zero-Energy IoT Devices
3. 学会等名 in Proceedings of 39th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田 透, 内山 彰, 東野 輝夫
2. 発表標題 行動認識のためのWi-Fi Backscatterセンサの設計と評価
3. 学会等名 信学技報, vol. 119, no. 436, SeMI2019-134
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水谷 優秀, 内山 彰, 村上 友規, アベセカラ ヒランタ, 東野 輝夫
2. 発表標題 モバイル端末のWi-Fiチャンネル状態情報による人数推定手法の提案
3. 学会等名 信学技報, vol. 119, no. 406, SeMI2019-102
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田 透, 内山 彰, 東野 輝夫
2. 発表標題 バッテリーレス行動認識のためのWi-Fi Backscatterセンサの基本性能評価
3. 学会等名 第27回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川 善博, 前田 透, 内山 彰, 東野 輝夫
2. 発表標題 Wi-Fi電波による行動認識に向けたバッテリーフリータグの基礎検討
3. 学会等名 情報処理学会研究報告, Vol.2019-MBL-93
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水谷 優秀, 内山 彰, 東野 輝夫, 村上 友規, アベセカラ ヒランタ
2. 発表標題 モバイル端末のWi-Fiチャンネル状態情報による混雑推定法の提案
3. 学会等名 マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム2019論文集
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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