WiFiバックスキャッタータグを用いた 非接触生活行動認識システムの提案

伊勢田 氷琴1 安本 慶一1 内山 彰2 東野 輝夫3

概要:本論文では,家具や建具,生活用品に取り付けた WiFi バックスキャッタータグを用いて,家庭内の 日常生活行動を認識する手法及びシステムを提案する。提案システムでは、周波数シフト型バックスキャッ タータグと、受信した WiFi 信号の周波数シフトを捉えることができるソフトウェア制御型 WiFi デバイ スである SDWiFi を用いる. 提案手法では、SDWiFi の送信機から伝送される無線信号に対し、生活行動 に伴うタグの動きが与える周波数シフトを、SDWiFi の受信機で検知し、家のオブジェクト(家具・建具・ 日用品など)がどのような順序で動かされたのかといった情報から生活行動を非接触に認識する.提案手 法の実現可能性を調べるため、NAIST スマートホームにおいて、SDWiFi の送信機と受信機、WiFi バッ クスキャッタータグの様々な位置関係や角度に対し、タグの動きを検出可能かどうか実験を行った。1-2m 離して SDWiFi の送信機・受信機を設置し,タグを送信機に近い場所から受信機に近い場所まで変更した 結果、タグの位置が送信機あるいは受信機に近い(25cm 程度)時に、77.6-100%以上の精度で認識できた. 一方で、送受信機間の距離が 2m、送信機・受信機とタグの位置が距離が 1m 程度の時は、精度が 46.3%程 度まで悪化した.また、タグと送信機-受信機を結ぶ直線の間の角度によっても、精度が 46.3-87.6%まで 大きく変化することが確認された.最後に、シンク水栓のレバー、キッチンの引き出し、冷蔵庫のドアに タグを取り付けて動かしたところ、認識精度は、それぞれ、92%、24.6%、52%となった。以上より、現状 では,送信機・受信機の近くにタグを設置しなければならないという制約は存在するものの,SDWiFi の 送受信機およびタグの位置関係や角度を適切に設定することによる提案手法の実現可能性が示された.

Investigating a contact-less daily living activities recognition system using WiFi backscatter tags

Hikoto Iseda¹ Keiichi Yasumoto¹ Akira Uchiyama² Teruo Higashino³

1. はじめに

家電の最適制御や高齢者の見守りシステム,健康支援アプリケーションなどのコンテキストアウェアサービスを実現するためには,家庭内における住人の生活行動を認識する基盤が必須である.これまで提案されてきた生活行動認識手法を大別すると,(1) スマートフォンやウェアラブル端末などを身体に身につける方式 [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], (2) 環境中にセンサを設置する方式に分けることができる [8], [9], [10]. 前者は常にセンシングデバイスを身につける必要があるため,高齢者など,センサの装着が身体的に

負担になる利用者に適用することは困難である。後者は配線や設置のコストが高く,カメラやマイク等を使用する場合にはプライバシー侵害の懸念もある。これらの課題を解決するために,近年 (3) 環境発電型デバイスを使用する方法 [11], [12], [13], [14] や,(4)WiFi CSI や WiFi バックスキャッター等の既設のインフラをそのまま利用する行動認識技術が注目されている [15], [16], [17], [18]. しかし,これらの手法は,認識できる行動の種類が少ない,限られた状況下でしか行動認識ができない,特殊なデバイスが必要となる等の課題を抱えている.

本研究では、周波数シフト型 WiFi バックスキャッター タグ(以降、バックスキャッタータグと呼ぶ)を非接触型 センサとして用いた生活行動認識手法を提案する. バック

¹ 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

² 大阪大学大学院 情報科学研究科

³ 京都橘大学 工学部情報工学科

スキャッター通信とは、電波の反射/吸収を切り替えるこ とでデータ通信を行う技術である. 本研究では RFID のよ うに複雑な通信を行うバックスキャッターではなく, アン テナと発信器および物理スイッチ(傾斜スイッチ)から構 成され、タグに動きが加わることで周波数シフトを発生さ せる周波数シフト型バックスキャッタータグを使用し、周 波数シフトを起こすタグの集合やその発生パターンが生活 行動ごとに異なることを学習することで生活行動認識を行 う. 本研究で用いるバックスキャッタータグは、内部にマ イクロコンピュータや FPGA を持たないため、ボタン電 池一つで長期間使用することができ、小型かつ複雑な設計 を必要としない. バックスキャッタータグは周囲の人やモ ノの動きによって周波数シフトを発生させるため、周波数 シフトを認識するだけで容易にタグの動きの識別が可能で あり、周囲の電波環境による影響も受けにくい. 本研究で は、Nakagawa らが開発した、上記の特徴を持つ周波数シ フト型バックスキャッタータグおよびソフトウェア制御可 能な WiFi 無線機(以降, SDWiFi と呼ぶ) から成るシス テム [19] を使用し、バックスキャッタータグを非接触のセ ンサとして使用し、行動認識を行う手法を提案する.

提案手法では、家の住人が生活行動に伴って使用する家具や建具、その他日常使用するオブジェクトの動きをWiFiバックスキャッタータグで検知し、どのタグがどのような順序で動いたのかの検知結果をもとに生活行動を推定する。本稿では、提案手法の実現可能性を調べるため、まず、一般家庭の居住環境を再現したNAISTスマートホーム内において、どのような条件でバックスキャッタータグの動きの検出・識別が可能かを調査することを目的とする.

実験にはNAISTスマートホーム内に2台のSDWiFi装置(送信機、受信機)と1-8個のバックスキャッタータグを使用し、SDWiFiとバックスキャッタータグの位置関係、バックスキャッタータグのアンテナの方向、バックスキャッタータグの個数をそれぞれ変えながら、タグの動き(タグを立てた時に周波数シフトが発生)の検出を行う実験を実施した。検出を行うために、取得した信号に対するFFTと、バンドパスフィルタの適用などの前処理を行なった上で、周波数シフトを検知するピーク検知アルゴリズムを適用した。

実験の結果,送受信機間の距離が 1m の際には F値の平均で 100%, 2m の際にも平均で 59%の精度で立てたタグの検出が可能であり,タグのアンテナの向きと検出率には明確な関係性が存在しないことが分かった。また,バックスキャッタータグはタグが複数個存在する環境中においても,各タグの周波数シフトの幅を違った値に設定することで,動いているタグを識別することが可能である。実際に冷蔵庫の扉,引き出し,水栓のレバーにタグを設置し,動いているタグを識別する実験を実施した結果,平均で 0.564の精度で動かしているタグを識別できることが分かった.

以上より、提案手法の実現可能性が示された.

2. 関連研究と本研究の位置づけ

本章では、家での生活行動認識について、接触型センサを使った研究、非接触型センサを使った研究、環境発電を使った研究、WiFi や RFID を使った研究、バックスキャッターを使った研究に分けて概観する.

2.1 接触型センサによる行動認識手法

スマートフォンやウェアラブルセンサを利用して人の動 きを直接的に計測することで行動認識を行う手法は、これ までに数多く提案されてきた. Attal らは三軸加速度セン サ, ジャイロセンサ, 磁気センサ等のセンサ類を被験者の 胸部・右大腿部・左足首に装着することで、「立つ」、「座 る」、「歩く」等、12種類の行動を識別する手法を提案し ている.機械学習アルゴリズムにはk-NNを使用し、F値 で 0.989 の精度を出している [1]. また, Balli らはスマー トウォッチに搭載された三軸加速度センサー・ジャイロセ ンサ・歩数計・心拍センサから得られるデータを、主成分 分析による次元削減と RandomForest を利用することによ り、「歩く」、「座る」、「PC 操作」、「静止状態」、「座る」な ど8種の動作の識別において、F値で0.985の精度を出し た [2]. Chen らは、スマートフォンに搭載された三軸加速 度センサおよびジャイロセンサを用いて「小走り」、「歩 く」、「階段を登る/下る」、「ジャンプ」の5種類の行動認識 において F 値で 0.9626 の精度を出している [3]. このよう に、ウェアラブルデバイスやスマートフォンを用いた手法 は、全般的に精度が非常に高いという特徴がある.

2.2 非接触型センサによる行動認識手法

センサ類を人の体ではなく,環境側に設置する手法も 多く存在する. 代表的な例として, Cook らが提案した CASAS [8] が挙げられる. CASAS は、光量センサ、気温 センサ, モーションセンサ, ドアセンサ, データサーバなど からなるスマートホームキットであり、10種の行動を平均 で 0.581 の精度で認識することに成功している [8]. Sasaki らは家電の利用状況から行動認識を行う手法を提案し,9 種の行動を平均で 0.675 の精度で認識している [9]. Mastui らはSALON と呼ばれる PIR センサ, 気温・湿度・騒音な どが計測可能な環境センサ、ドアセンサ、環境発電によっ て駆動するアノテーション用ボタン、データ収集・解析用 サーバからなるシステムを提案し、「入浴」、「食事」、「調 理」、「睡眠」、「外出」の5種の行動認識において、0.723の 再現率を達成している [10]. このような環境中にセンサを 設置する手法は、人の身体に制約をもたらさないという意 味で負担の少ないセンシング手法であると言える.

2.3 環境発電を使用した行動認識手法

前述の2種類の手法は共通してバッテリーの交換や電源の設置,配線といった設置・維持コストの発生が課題とされている。そこで、環境中に存在する光や振動等の微量なエネルギー源から発電を行い、センシングと行動認識を行うシステムが提案されている。Sandhuらが提案したSolARは、手首に太陽電池とマイコンを装着し、行動によって変化する発電量から行動認識を行う。SolARでは、「階段の昇降」、「歩く」、「走る」、「座る」、「立つ」など5種の行動を、屋内では0.9158の精度で認識可能である[11]。また、Stirapongsasらは、batterflyと呼ばれるアナログPIRセンサと生活行動を推定する機械学習モジュールを搭載したエッジデバイスを開発した。デバイスを部屋の数カ所に設置し、複数デバイスがそれぞれ推定した行動の多数決を取ることで、「移動」、「読書」、「静止」、「筆記」、「無人」の5種の行動を0.6359の精度で認識している[12]。

2.4 WiFi や RFID を使用した行動認識手法

WiFi は現在多くの家庭で導入されているが、このような既存のインフラを使用して行動認識を試みる研究もある。例えば、Wang らは WiFi 通信時に得られる、通信電波の位相と振幅の情報を持つチャンネル状態情報(CSI)を用いて「歩く」、「走る」、「歯を磨く」といった 9 種類の行動を0.96 の精度で認識している。 また、パッシブ RFID タグと RFID リーダを身体に装着することで行動認識を行なった事例も存在する [15].

2.5 バックスキャッターを用いた行動認識手法

Liu らによって考案されたアンビエントバックスキャッ ターは、周囲に存在する RF を利用して環境発電を行いな がら内部のマイコンやセンサを駆動するとともに、周囲の RF に対する反射/吸収を切り替えることで通信を行う技 術である [16]. バックスキャッター通信では、通信電波を 生成するために必要な増幅器を必要としないため、非常に 小さい電力で無線通信を実現できる技術として注目されて いる. Li らは人の動きによって、バックスキャッターの 周波数シフトの特性が変化することを利用して、机の周囲 で行う「座る」、「立つ」、「タイピングする」といった行動 を 0.934 の精度で認識することに成功している [17]. また, Ryoo らはバックスキャッタータグの中に人間の行動に応 じて電波の振幅を動的に変更する機構を埋め込むことによ り、「歯磨き」や「歩行」など8種類の行動を0.94の精度 で認識している [18]. また, Vikram らが開発した Printed Wi-Fi は、伝導性材料を3 Dプリンターで加工することで アンテナを作成し、水や風の流れを物理スイッチの on/off に変換し、アンテナインピーダンスを変化させることで物 理的な動きを捉えることに成功している [20].

2.6 先行研究の課題

非接触型センサによる行動認識手法は、高い精度を持つものの、常にセンサを身につける必要があるという点で特に高齢者等にとって負担が大きいと言える、また、従来の非接触型センサによる行動認識は、広範な生活行動の認識に成功している例が多い一方で、数多くのセンサを家の中に配置・配線し、さらに定期的な交換等メンテナンスが求められるため、設置・維持コストが高いという課題がある、環境発電技術を用いることで、これらの課題を一部解決することができるが、現状では広範な生活行動を認識するには至っていない。加えて、これらの手法は特殊なデバイスを必要とするため、一般家庭への導入は容易ではない。

一方で、WiFi の電波を使用する手法は、既に家庭内に導 入されているインフラを使用して行動認識を行うことがで きるメリットがある. また, バックスキャッターを用いた 手法は, 通信を行うためのタグが必要となるものの, 追加 的な電源を必要とせず、細かな人の動きもとらえることが できるという点で優れている. しかし、WiFi の電波を直 接使用する手法は、環境からの影響を強く受けるため、環 境ごとの学習が必要となる. また, RFID を使用する手法 は検出範囲が広く、バッテリーレスである点がメリットだ が、RFIDを読み取るための特殊なリーダーが必要となり、 一般家庭への導入は困難である. さらに, バックスキャッ ター技術を使用する手法に関しては、少ない電力で駆動さ せるために, 使用可能なマイコンやセンサに強い制約が存 在するため、その設計と運用は非常に困難である。加えて、 バックスキャッター技術を使用したこれらの研究は、セン サからの距離や場所が限定された状況下での運用に止まっ ている. 現状, 一般家庭で行われる広範な生活行動の認識 に応用された例は著者らが知る限り存在しない.

以上より,先行研究には,(1) 身体的負担が大きい,(2) 設置・維持コストが高い,(3) 設置条件など環境依存性が高い,(4) 広範な生活行動を認識できないといった 4 つの課題があると言える.

2.7 提案手法の位置づけ

そこで本研究では,(1) 身体的負担が大きいウェアラブルデバイス等を使用しない,(2) 配線や電池交換が不要,(3) どのような屋内レイアウトの住宅でも機能する,(4) 広範な生活行動を認識可能の 4 つの要件を満たす生活行動認識システムを提案する.

具体的には、Nakagawa らが開発したアンテナと物理スイッチ、発振機およびバッテリーで構成された周波数シフト型 WiFi バックスキャッタータグ [19] を非接触センサとして使用し、一般家庭での使用を想定した生活行動認識システムを提案する。本システムで使用するバックスキャッタータグは、センサやマイコンを内部に持たないシンプルな構成だが、外部から動きを加えることで物理スイッチの

on/off が切り替わり、タグの可変内部抵抗に応じた周波数シフトを観測することができる. バックスキャッタータグの識別とその動きを同時に学習することで、生活行動に応じたタグの動きの変化を捉えることが可能である.

本手法では小型バックスキャッタータグを非接触センサとして使用し、ドアや家電など家庭内の様々なオブジェクトに設置するため、ユーザへの身体的負担を最小限に抑えつつ、多種多様な生活行動を識別可能である(要件1,4).また、バックスキャッター技術を使用するため、定期的な電池交換や配線等の設置・維持コストも小さく、無線電波として、一般家庭でも広く使用されている、WiFiを使用することで既存のインフラを活用することが可能である(要件2).加えて、周波数シフト型のシンプルな構成のタグを使用することで、場所的・空間的な制約を受けることなく、タグの識別が容易である(要件3).

3. WiFi バックスキャッターを使った生活行 動認識システム

ソフトウェア無線機基地局2台とバックスキャッタータ グ群,これらを制御しデータを蓄積するクラウドから構成 される生活行動認識システムを提案する.

3.1 提案システムの概要

本システムの全体像を図1に示す.後述するように、本研究で使用するバックスキャッタータグは、動きが加わることで物理スイッチのon/offが切り替わり、それによって、受信機が受け取る信号において、内部の可変抵抗に応じた周波数シフトを発生させることができる。本システムでは、バックスキャッタータグを引き出しやドア、便器の蓋などに設置し、生活行動に伴ってこれらのタグに加えられる動きから発生する周波数シフトを、後述するピーク検知アルゴリズムによって観測する。これにより、どのタグがいつ動いたのかが分かるため、タグの動きの有無と生活行動の関係を、機械学習を用いて解析する。

3.2 システム構成

提案するシステムを、(1)家具や家電、ドアや引き出し 等の動きを検出するために使用するバックスキャッタータ グ群、(2)WiFi の無線信号の送受信を行うソフトウェア 無線基地局の SDWiFi AP 群と AP が受信した信号デー タを蓄積する SDWiFi Cloud、(3)信号データを処理し 動きがあったタグを検出する周波数シフト検出部、(4)一 定時間のタグの動きから生活行動を認識する生活行動認識 モデル、で構成する.以下にそれぞれの詳細を述べる.

3.2.1 WiFi バックスキャッタータグ

本研究では Nakawaga らが開発した周波数シフト型バックスキャッタータグ [19] を使用する. バックスキャッタータグの外観を図 2 に示す. 従来のバックスキャッターは環

境中の電波から発電を行い、その微小な電力によってマイコンやアンテナ、センサ等を駆動させることで通信を行う技術である。しかし、Nakagawa らが指摘するように、マイコンやセンサの消費電力も考慮した設計を行う必要があるため、この技術を直接的に応用して状況認識を行うことは非常に困難である [19].例えば、生活行動認識を行うためには、人の動きを捉えるモーションセンサや、周囲の騒音や湿度を観測する環境センサ等が必要であり、このような多機能なセンサから得られる大量のデータを送信することは、バックスキャッター通信で想定される数 μ W 程度の発電量では困難である.

そこで本研究ではアンテナ、発振機、傾斜スイッチおよびバッテリーのみで構成される周波数シフト型バックスキャッタータグを使用する。傾斜スイッチはタグ内部の基盤に対する重力方向への傾きや、外からの動きに応じて、発振機およびRFスイッチへの電源供給のon/offを切り替えることができる。回路に電源が供給されると、発振機に予め設定された可変抵抗に応じた信号が生成され、RFスイッチのon/offの切り替わりに応じたアンテナのインピーダンスの変化によって散乱波に周波数シフトが生じる。

3.2.2 SDWiFi AP/Cloud

本システムでは WiFi の電波を発生させる基盤としてソフトウェア無線基地局 SDWiFi AP を使用する. SDWiFi の外観を図3に示す. SDWiFi はソフトウェア制御で WiFi の周波数帯域における任意の周波数によって通信を行うことができる. 通信はパケット単位で行われ, パケットヘッダには制御情報が, ペイロード部には sine 波の波形が格納されている. バックスキャッタータグが環境中に存在する場合, 周波数シフトの影響によってペイロード内のデータが変化し, sine 波の周波数空間が変化することで周波数シフトを観測することができる. また, SDWiFi AP は2本のアンテナを備えており, 位相差から散乱波の到来角の情報も含むため, タグの位置も推定することができる [21].

また、SDWiFi Cloud は SDWiFi AP が取得したパケットを取得し、データを収集する基盤である SDWiFi AP とはルータを介して同じネットワークで接続されており、SDWiFi AP からのパケットを最短 1 秒間隔で取得することができる.

3.2.3 周波数シフト検出部

まず、前述の手法で SDWiFi AP/Cloud からバックスキャッタータグが存在する空間で周波数シフトの影響を受けたパケットの情報、すなわち sine 波の生信号を取り出す. sine 波の生信号は、 $\mathbf Z$ 4 に示すように $\mathbf Z$ 1 波と $\mathbf Z$ 波に分けて取得できるため、これらを合成して一つの sine 波を取り出す.

この生信号に対し,周波数シフトの影響を確認するために高速フーリエ変換(FFT)を施す.バックスキャッター通信は反射波にデータを載せる技術だが,この反射波には環

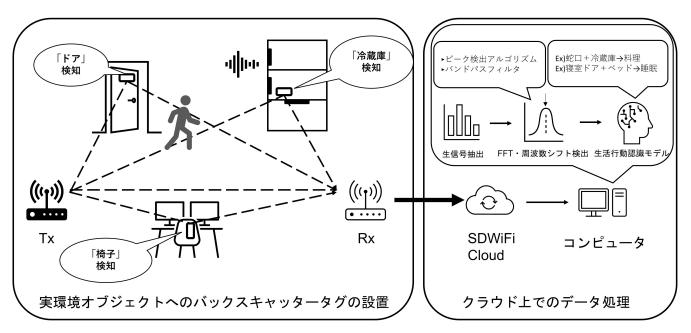


図1 システム概要



図 2 バックスキャッタータグ



🗵 3 SDWiFi AP

境から様々なノイズが加わるため、単一のパケットを FFT にかけた結果からは周波数シフトとノイズを区別できない。しかし、反射波はノイズと異なり、バックスキャッター通信が行われている間は継続的に受信可能であるという特性を生かし、複数パケットの FFT の結果を重畳し、周波数シフトを観測する。即ち、i 番目のパケットに対して FFT を行った結果を F_i とし、 $\forall i \in \{1,2\dots,n\}$, $|\mathbf{F}_i| = k$ を満たすとき、重畳するパケットの数を \mathbf{t} として $\mathbf{W} = \sum_{i=1}^t \mathbf{F}_i$

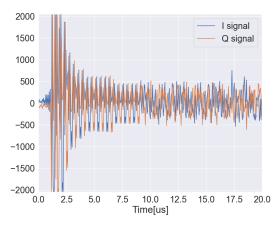


図 4 生信号

となるベクトル W を求める.

sine 波の周波数を $5.0 \mathrm{MHz}$, タグに設定する周波数シフト幅を $1.0 \mathrm{MHz}$ に設定し、バックスキャッタータグを AP間に立てて設置して周波数シフトを発生させ、重畳するパケットの数を 10 個として、上記の処理を施した結果を可視化すると**図 5** のようになる.図 5 より、sine 波の周波数からちょうど $1.0 \mathrm{MHz}$ 離れた赤い矢印で示した部分にピークが出ていることが分かる.これが周波数シフトである.

この周波数シフトを観測するために,下記 Algorithm に示すピーク検出アルゴリズムを使用する.ピーク検出アルゴリズムを適用する前に,各タグに周波数シフト幅を予め設定できる特性を生かし,バンドパスフィルタを適用して設定した周波数領域を予め抜き出す.array[] は,FFT の結果(対象周波数近辺のみ),TH は,ピークとそうでないところの差を表す係数である.このピーク検知アルゴリズムでは,配列 array の N_1 個分の移動平均 ave1 を計算し,

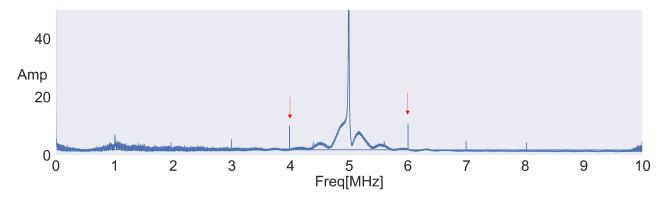


図 5 周波数シフトの例

Algorithm ピーク検知アルゴリズム

```
1: function Peak_detection(array, N_1, N_2, TH)
2:
         result \leftarrow False
3:
         for i = 0 to array.length - N do
4.
             ave1 \leftarrow \sum_{1 \le j \le N_1 - 1} array[i + j]/N_1
             ave2 \leftarrow \sum_{1 \leq j \leq N_2-1} array[i+j+N_2]/N_2 if ave2 > ave1 \times TH then
5:
6:
 7:
                  result \leftarrow True
             end if
8:
9:
         end for
10:
         return result
11: end function
```

それを TH 倍した値より、次の N_2 個分の移動平均 ave2 が大きいような場合にピークが存在するとみなし、 True を返し、ピークを発見できなかった場合には False を返す.

3.2.4 生活行動認識モデル

タグの集合を T とする. ウィンドウ幅 W (例えば、300 秒), サンプリング周期 P (例えば 10 秒) に対し, W の間に動きを検出したタグの時系列情報を配列 b[0..W/P-1] で表す. $b[i] \in \mathbf{2}^T$ は、時刻 i に動きを検出したタグの部分集合の情報である. $\mathbf{2}^T$ は T の全ての部分集合である.

M 個のサンプル $b_0,...,b_{M-1}$ と行動ラベル $l_0,...,l_{M-1}$ に対し,機械学習モデルを学習する.機械学習モデルとして,ランダムフォレストを使用することを想定している.

4. 実験

提案したシステムの実現可能性を検証するために、周波数シフト型バックスキャッタータグを使用し、どのような条件で周波数シフトが検出可能か実験を行なった.具体的には、APとタグとの距離、タグのAPに対する方向、環境中に存在するタグの個数を変えながら、床に対して垂直に立てているタグを検出する実験と、実際にキッチンに存在する冷蔵庫、水栓、引き出しにタグを取り付け、動かしているオブジェクトを検出する実験を行った.本実験は、実際の住環境での応用可能性を確かめるために、図6に示すNAISTスマートホーム内にて行なった.



図 6 NAIST スマートホーム

4.1 AP 間とタグの距離の検出率に対する影響

AP 間の距離と、AP とタグとの距離が検出率に及ぼす影 響について実験を行なった. AP 間の距離については, 直 線距離で 1m および 2m 離した条件で行い、タグは送信機 (Tx) と受信機 (Rx) を結ぶ直線状を Tx から 0.25m ずつ Rx に近づけた位置に設置し実験を行なった. 各 Tx とタ グとの距離について、1分ずつ、1つのタグを立てた場合 と寝かせた場合のデータを取り、これを3セッション繰り 返した. 前処理として生信号に FFT をかけ、これを複数 パケット分重畳し, バンドパスフィルタを適用し, 周波数 シフトが発生する周波数領域を抽出し、ピーク検知アルゴ リズムを適用した. 比較のために、以下の実験では全て重 畳するパケットの数は10個分、即ち10秒分に固定した. また、ピーク検知アルゴリズムのパラメータとして、平均 値の何倍をピークと見なすのかを決定する係数 TH につ いては、1.2に固定し、平均を計算する際の標本数である N_1, N_2 はそれぞれ, 10, 3 とした.

AP 間の距離が 1 mの場合の F 値と混同行列を**表 1**, 図 7 に、2 m の場合の F 値と混同行列を**表 2**, 図 8 に示す.

これらの結果から、AP間の距離に関わらず、タグと AP間の距離が短いほど、即ちタグが Tx か Rx のいずれかに近いほど検出率が高まることが分かった。特に、AP 間の距

離が 1 m の場合は、タグと AP との距離にかかわらず 100% の精度でタグを検出することができた。 2 m の場合は,Rx や Tx から近い場合には比較的精度が高いが,Tx または Rx から離れるほど精度が落ちることが分かった.

4.2 タグの向きの検出率に対する影響

この実験ではタグの向きが検出率に及ぼす影響を検証する。図 10 に示すように、Rx に対する向きを、Tx から Rx の方向にタグの表面(アンテナがある面)を向けた場合を起点に時計回りに 30 度ずつ回転させ、それぞれ方向 $1\sim$ 方向 8 とラベリングした。本研究で使用するバックスキャッタータグはプリントアンテナを備えており、基盤と垂直方向に指向性を持っている。タグを方向 1 に向けて立てている図 9 の場合、タグのプリントアンテナは Rx を向いている.

AP 間の距離は 2m とし、AP とタグとの距離は、前節の実験で Rx からの距離が近いときに安定した精度が出ることを確認したため、Rx から 0.25m 離した位置に設置した。各方向についてタグを立てた場合と寝かせた場合について1分ずつデータを取得した。その他の実験条件は前節と同様である。結果は表 3 および図 11 に示す通りである。これらの結果から、いずれの方向においても、本来存在する周波数シフトを検出できないエラーが多いものの、タグのアンテナの方向と検出率には明確な関係性が存在しないことが分かった。

4.3 タグの個数の検出率に対する影響

この実験では環境中に存在するタグの個数が検出率に及ぼす影響を検証する. 8 個のタグを用意し, $\mathbf{表}$ 4 に示すように,シフト幅(可変抵抗)を設定し,一つずつタグを立てた場合と寝かせた場合のデータを 1 分ずつ取得した. AP間の距離は 1m とし,AP とタグとの距離は,4.1 節の実験で Tx 或いは Rx からの距離が近いときに安定した精度が出ることを確認したため,Rx から 0.25m 離した位置に設置した.

実験の結果を**表 5** に、3 セッションを合計した混同行列を**図 12** に示す.これは、タグを 1 個ずつ立てた場合の結果である.表 5 から,ID2 のタグを除いて,1.0 の精度でタグを検出可能であることが分かった.また,図 12 からは,ID2 の場合はタグが立っているにも関わらず周波数シフトを観測できないケースが多いことが分かった.

一方,複数のタグを同時に立てた場合,ピークの検出は出来なかった.ピーク値が下がったためであると思われる.ピーク検出アルゴリズムの閾値 TH を調整することで対応可能かどうか調査が必要である.

4.4 バックスキャッタータグによる生活用品の動き認識 前節までの実験を通して、比較的近距離であれば複数の

タグが環境中に存在した場合でも高い精度で立てているタ グを検出できることが分かった. 本節では実際にバックス キャッタータグを実環境のオブジェクトに設置し、その動 きを認識できるか検証する. 今回の実験では場所をキッチ ンに限定し、表 4 における ID1, ID2, ID3 の 3 つのタグ をそれぞれ、冷蔵庫、水栓レバー、引き出しの3か所に取 り付けた. タグを取り付けた様子は図 13 に示す通りであ る. また, 前節までの実験を通してタグは Tx あるいは Rx 付近かつ、AP 間の距離が短いほどタグの検出率が高まる ことが分かった. そのため、タグと AP までの距離が異な る 2 つのレイアウトで実験を行った. AP のレイアウトは 図 14 に示す通りである. また, Tx および Rx とタグとの 間の距離は表 6 および表 7 に示す通りである. レイアウト 1では Rx を ID3 に近づけ、レイアウト 2では Rx を ID2 に近づけた. また、いずれの場合も AP 間の Line of Sight が確保されるように設置している.2つのレイアウトで、 引き出しを開けた状態、水栓のレバーを上に挙げ水を出し ている状態、冷蔵庫のドアを開け閉めしている状態、何も していない状態をそれぞれ1分ずつ行い、3セッション分 のデータを収集した.

実験の結果を表 8 に示す. また, 3 セッションを合計した混同行列を表 15 に示す. 2 つのレイアウトを比較すると,レイアウト1の方が平均的に高い精度だが, ID3 を全く検出できていない. また,レイアウト1,2 のいずれの場合も本来存在する周波数シフトを検出できないエラーが多発していることが分かった. また,レイアウト1は ID3 の近くに設置したにも関わらず, ID3 を検出できず,反対に ID2の検出率が高く,レイアウト2は Rxを ID2 付近に設置したものの, ID2の検出率は下がり,反対に ID3の検出率は上昇することが分かった. これは,レイアウト1の場合には引き出し本体が ID3の反射波に干渉する一方,冷蔵庫の扉を開いたとき ID2が Rxに近づき,レイアウト2では冷蔵庫の扉が ID2の反射波に干渉する一方で, ID3の反射波は干渉するものがなく直接 Rxに届くことができたためと考えられる.

5. 考察

実験を通して、APを直線状に配置た場合し、その間でタグを寝かせた/立てた状態を、距離が 1m の際には F 値の平均で 0.943、2m の際にも平均で 0.761 の精度で認識が可能であることが分かった。また、タグのアンテナの向きと検出率には明確な関係性が認められなかった。さらに、バックスキャッタータグが環境中に複数個存在する場合であっても、立てている特定のタグは ID2 を除き、100%の精度で識別することが可能であった。また、実際にキッチンの水栓のレバー、冷蔵庫の扉、引き出しに設置し、どのオブジェクトを開けている或いは動かしているかを識別するタスクでは、APを適切に配置することで各オブジェク

表 1 AP 間の距離が 1m の場合のタグ検出率の F 値

	$0.25 \mathrm{m}$	$0.50 \mathrm{m}$	$0.75 \mathrm{m}$
session1	1.0	1.0	1.0
session2	1.0	1.0	1.0
session3	1.0	1.0	1.0
Average	1.0	1.0	1.0

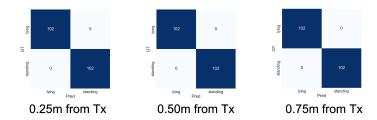


図7 AP 間の距離が 1m の場合の混同行列

表 2 AP 間の距離が 2m の場合のタグ検出率の F 値

	0.25M	0.50M	0.75M	1.00M	1.25M	1.50M	1.75M
session1	0.33	1.0	0.33	0.33	0.91	0.33	1.0
session2	1.0	1.0	1.0	1.0	0.33	0.48	1.0
session3	1.0	1.0	1.0	0.33	0.39	0.44	1.0
Average	0.776	1.0	0.776	0.62	0.543	0.416	1.0

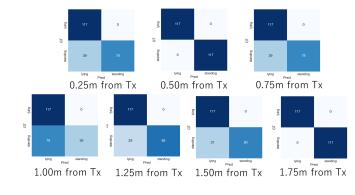


図 8 AP 間の距離が 2m の場合の混同行列



図9 方向1のときのタグの向き

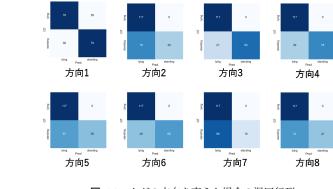


図 11 タグの方向を変えた場合の混同行列

方向7 方向6 方向6 方向5 | 方向1 下X 方向4 方向2 Rx 方向3

図 10 タグの方向

トを平均で 0.5815 の精度を出すことができた. また, 各実験の混同行列を見ると, 殆ど一貫した性質としてピークを誤検知するエラーよりも, 本来発生している周波数シフトを観測できないエラーが多いことが分かった.

以上の実験結果から、バックスキャッタータグを安定的に検出するためには、AP間の距離およびバックスキャッタータグと APの距離がある程度短く、間に障害物が存在しない環境が必要であると考えられる。特に、バックスキャッタータグを動かすオブジェクトに設置する場合には、動かしている間にも Line of sight が確保される必要がある。また、今回の実験ではタグの動きや傾きに応じて周波数シフトを発生させる汎用タグを使用したが、ハードウェアの特性上、このような汎用タグは動きの小さい引き戸のようなオブジェクトや、人が使用する際に状態が変化しない椅子やテーブルの使用を検出することができないと

表3 タグの方向を変えた場合の検出率のF値

		/ /	- / 3 3 0	<i></i>	D(H-) I	1		
	方向 1	方向 2	方向 3	方向 4	方向 5	方向 6	方向 7	方向 8
session1	0.33	1.0	1.0	1.0	0.59	0.95	0.33	0.46
session2	0.33	0.33	0.94	0.33	1.0	0.94	0.73	0.91
session3	1.0	0.69	0.69	0.33	0.33	0.33	0.33	0.57
Average	0.553	0.554	0.876	0.553	0.64	0.74	0.463	0.646

表 4 シフト幅の設定

* / I III / III / I
Shift Frequency
$1.00 \mathrm{MHz}$
$1.25 \mathrm{MHz}$
$1.50 \mathrm{MHz}$
$1.75 \mathrm{MHz}$

表 5 タグごとの検出率の F 値

10						
	ID1	ID2	ID3	ID4		
session1	1.0	0.33	1.0	1.0		
session2	1.0	1.0	1.0	1.0		
session3	1.0	1.0	1.0	1.0		
Average	1.0	0.776	1.0	1.0		

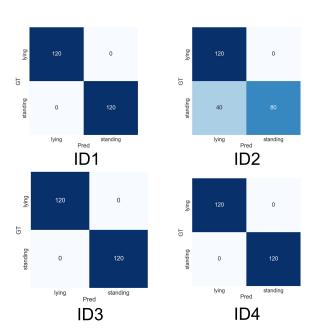


図 12 タグの数を変えた場合の混同行列

いう問題がある.

以上のことから、実際の住環境において広範な生活行動 の認識を可能とするためには、AP を複数個所に設置した り、各家電や家具に応じた動きや状態を検出可能なスイッ チを備えたバックスキャッタータグを開発する必要がある と考えられる.

6. まとめと今度の課題

本稿では, 家具や建具, 生活用品に取り付けた周波数シ フト型 WiFi バックスキャッタータグが生活行動に伴って



ID1 (冷蔵庫)



ID2(水栓のレバー)



ID3 (引き出し)

図 13 タグを設置している様子

動かされたときの周波数シフトを検知することで、家庭内 の日常生活動作を認識する手法を提案した. 提案手法の 実現可能性を調査するため、NAIST スマートホーム内に、 周波数シフト型バックスキャッタータグと、WiFi 信号を 送受信しタグによる周波数シフトを捉えることができる SDWiFi の送信機・受信機からなるテスト環境を構築した.

タグと AP 間の距離および角度を変えてタグの動き(周 波数シフト)検出を試みた結果、タグと AP 間の距離を比 較的近距離かつ適切な角度に設置するという条件のもとで は、100%近い精度でタグの動きの検出が可能なことがわ



レイアウト1



レイアウト2

図 **14** AP の設置レイアウト

かった. また,タグを水栓のハンドル,キッチンの引き出し,冷蔵庫のドアに取り付けて動かしたところ,レイアウト 1 の場合には 95%,78.3%,0%,レイアウト 2 の場合には 92%,24.6%,52%の精度で検出ができた.

今回得られた結果においては、SDWiFi の送受信機を 1-2m といった比較的短距離に設置しなければならず、高精度にタグを認識するためにはバックスキャッタータグが Tx または Rx の近く設置する必要があることがわかった. これらは家に設置し広い範囲で利用するためには制限となる. 今後、SDWiFi の出力の変更、バックスキャッタータグのアンテナ感度の変更、AP の複数個所への設置や家具・家電の動きに応じたスイッチを備えたバックスキャッタータグの開発などを通して、これらの制限を緩めることが可能かを検討していく.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H05665 の助成を受けたものです.

参考文献

- Ferhat Attal, Samer Mohammed, Mariam Dedabrishvili, Faicel Chamroukhi, Latifa Oukhellou, and Yacine Amirat. Physical Human Activity Recognition Using Wearable Sensors. Sensors, Vol. 15, No. 12, pp. 31314–31338, 2015.
- [2] Serkan Balli, Ensar Arif Sağbaş, and Musa Peker. Human activity recognition from smart watch sensor data

- using a hybrid of principal component analysis and random forest algorithm. *Measurement and Control*, Vol. 52, No. 1-2, pp. 37–45, 2019.
- [3] Yufei Chen and Chao Shen. Performance Analysis of Smartphone-Sensor Behavior for Human Activity Recognition. *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 3095–3110, 2017.
- [4] Katsunori Ohnishi, Atsushi Kanehira, Asako Kanezaki, and Tatsuya Harada. Recognizing Activities of Daily Living With a Wrist-Mounted Camera. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR, June 2016.
- [5] Avgoustinos Filippoupolitis, Babak Takand, and George Loukas. Activity Recognition in a Home Setting Using Off the Shelf Smart Watch Technology. In 2016 15th International Conference on Ubiquitous Computing and Communications and 2016 International Symposium on Cyberspace and Security, IUCC-CSS, pp. 39– 44, 2016.
- [6] Saisakul Chernbumroong, Shuang Cang, Anthony Atkins, and Hongnian Yu. Elderly activities recognition and classification for applications in assisted living. Expert Systems with Applications, Vol. 40, No. 5, pp. 1662– 1674, 2013.
- [7] Yugo Nakamura, Yuki Matsuda, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. WaistonBelt X: A Belt-Type Wearable Device with Sensing and Intervention Toward Health Behavior Change. Sensors, Vol. 19, No. 20, pp. 1–21, 2019.
- [8] Diane J. Cook, Aaron S. Crandall, Brian L. Thomas, and Narayanan C. Krishnan. CASAS: A Smart Home in a Box. Computer, Vol. 46, No. 7, pp. 62–69, 2013.
- [9] Wataru Sasaki, Masashi Fujiwara, Hirohiko Suwa, Manato Fujimoto, Yutaka Arakawa, Aki Kimura, Tomoko Miki, and Keiichi Yasumoto. Daily Living Activity Recognition through Time Series Analysis of Data Obtained with ECHONET Lite Appliances and Motion Sensors. JSAI Technical Report, Type 2 SIG, Vol. 2018, No. SAI-031, p. 05, 03 2018.
- [10] Tomokazu Matsui, Kosei Onishi, Shinya Misaki, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, and Keiichi Yasumoto. SA-LON: Simplified Sensing System for Activity of Daily Living in Ordinary Home. Sensors, Vol. 20, No. 17, 2020.
- [11] Muhammad Moid Sandhu, Sara Khalifa, Kai Geissdoerfer, Raja Jurdak, and Marius Portmann. SolAR: Energy Positive Human Activity Recognition using Solar Cells. In 2021 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom, pp. 1–10, 2021.
- [12] Sopicha Stirapongsasuti, Shinya Misaki, Tomokazu Matsui, Hirohiko Suwa, and Keiichi Yasumoto. Batterfly: Battery-Free Daily Living Activity Recognition System through Distributed Execution over Energy Harvesting Analog PIR Sensors. In 2021 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCOSS, pp. 54–56, 2021.
- [13] Hui Huang, Xian Li, Si Liu, Shiyan Hu, and Ye Sun. TriboMotion: A Self-Powered Triboelectric Motion Sensor in Wearable Internet of Things for Human Activity Recognition and Energy Harvesting. *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 5, No. 6, pp. 4441–4453, 03 2018.
- [14] Yoshinori Umetsu, Yugo Nakamura, Yutaka Arakawa, Manato Fujimoto, and Hirohiko Suwa. Ehaas: Energy harvesters as a sensor for place recognition on wearables. In 2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom, pp. 1–10, 2019.

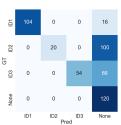
表 6 レ<u>イアウト 1 の各 AP とタグ</u>間の距離

	Tx	Rx
Tx	-	$1.25 \mathrm{m}$
Rx	$1.25 \mathrm{m}$	-
ID1	$0.8 \mathrm{m}$	$0.6 \mathrm{m}$
ID2	$0.4 \mathrm{m}$	$1.6 \mathrm{m}$
ID3	1.25m	$0.3 \mathrm{m}$

表 8 AP レイアウト 1 のときの検出率の F 値

	水栓のレバー	冷蔵庫	引き出し	無し
session1	1.0	0.46	0.0	0.54
session2	0.9	0.96	0.0	0.62
session3	0.95	0.93	0.0	0.62
Average	0.95	0.783	0.0	0.593

レイアウト1



レイアウト2

図 15 各レイアウトの混同行列

- [15] Liang Wang, Tao Gu, Xianping Tao, and Jian Lu. Toward a wearable rfid system for real-time activity recognition using radio patterns. *IEEE Transactions on Mo*bile Computing, Vol. 16, No. 1, pp. 228–242, 2017.
- [16] Vincent Liu, Aaron Parks, Vamsi Talla, Shyamnath Gollakota, David Wetherall, and Joshua R. Smith. Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., Vol. 43, No. 4, p. 39–50, aug 2013.
- [17] Xiang-Yang Li, Manjiang Yin, Yanyong Zhang, Panlong Yang, Chengchen Wan, Xing Guo, and Haisheng Tan. Back-guard: Wireless backscattering based user sensing with parallel attention model. *IEEE Transactions* on *Mobile Computing*, pp. 1–16, 2022.
- [18] Jihoon Ryoo, Yasha Karimi, Akshay Athalye, Milutin Stanaćević, Samir R. Das, and Petar Djurić. Barnet: Towards activity recognition using passive backscattering tag-to-tag network. In Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '18, p. 414–427, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [19] Yoshihiro Nakagawa, Toru Maeda, Akira Uchiyama, and Teruo Higashino. Baas: Backscatter as a sensor for ultralow-power context recognition. *Journal of Information Processing*, Vol. 30, pp. 130–139, 02 2022.
- [20] Vikram Iyer, Justin Chan, and Shyamnath Gollakota. 3d printing wireless connected objects. ACM Trans. Graph., Vol. 36, No. 6, nov 2017.
- [21] 山口雄大, エルデーイヴィクトル, 内山彰, 東野輝夫. Backscatter タグを用いた music 法による到来角推定の性 能評価. Technical Report 28, 大阪大学大学院情報科学研 究科, 大阪大学大学院情報科学研究科, 大阪大学大学院情 報科学研究科, 京都橘大学工学部情報工学科, may 2022.

表 7 レ<u>イアウト 2 の</u>各 AP とタグ間の距離

	Tx	Rx
Tx	-	$0.85 \mathrm{m}$
Rx	$0.85 \mathrm{m}$	-
ID1	0.35m	$1.25 \mathrm{m}$
ID2	$0.85 \mathrm{m}$	$0.2 \mathrm{m}$
ID3	0.75m	$1.6 \mathrm{m}$

表 9 AP レイアウト 2 のときの検出率の F 値

	水栓のレバー	冷蔵庫	引き出し	無し
session1	1.0	0.6	0.1	0.57
session2	0.77	0.00	0.46	0.46
session3	0.99	0.14	1.0	0.68
Average	0.92	0.246	0.52	0.57