

# 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

前田 透<sup>1</sup> 内山 彰<sup>1</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup>

概要：近年、ヘルスケアや高齢者の見守りなどの目的で、人の行動認識への関心が高まっている。これまでにスマートフォンやスマートウォッチを利用した手法が実現されているが、充電や電池交換に伴う管理の手間が課題となっている。これに対し、我々はマイコンなどの電力を必要とするチップを搭載しない Wi-Fi Backscatter センサの利用を検討している。Wi-Fi Backscatter センサはアンテナと振動スイッチにより構成され、腕などの人体や名札などの身につける物に装着することを想定する。Backscatter センサでは、人の動きによって生じる振動によりスイッチの ON/OFF が切り替わることで、アンテナ特性が変化する。したがって、Wi-Fi 電波がアンテナに到達し、反射される電波には人の動きに応じた変化が生じる。この変化を Wi-Fi 基地局などの環境に設置された受信機で観測することによって、人の行動認識の実現を試みる。本研究では、Backscatter センサによる行動認識の実現可能性を検討するため、Backscatter センサの試作および基本性能に関する評価を行う。Backscatter センサの試作には 3D プリンタや銅線を用いる。電波暗箱内で基本性能の評価を行ったところ、送受信アンテナ間距離 50cm で、スイッチングレート 7.5Hz 以上、出力電力 0dBm 以上のときに Backscatter センサによるスイッチングを 100%検出可能なことが分かった。

## 1. はじめに

近年、ヘルスケアや高齢者の見守りなどの目的で、人の行動認識への関心が高まっている。これまでにスマートフォンやスマートウォッチを利用した様々な行動認識手法が提案されている。しかし、これらのセンサを利用することは端末の消費電力の増加を招き、充電や電池交換にコストがかかるという課題が依然として残っている。このため EnOcean [1] のように、様々な省電力化の取り組みが存在するが、動作頻度などの機能を制限するアプローチが中心であり、頻繁な動きを伴う行動のセンシングなど、機能を制限することが本質的に困難な場合には十分な性能が得られないことが懸念される。

これに対して、我々の研究グループでは Printed Wi-Fi [2] を応用したワイヤレスセンシングによるバッテリーレスな行動認識の実現を目指している。Printed Wi-Fi では、導電性素材を用いて 3D プリンタでアンテナを作成し、そのアンテナのインピーダンスの変化を物理的なスイッチの ON/OFF の切り替えで作りに出している。これによって、Wi-Fi 基地局から送出された電波に対して、アンテナからの反射波の強弱を生み出し、風や水流といった物理的な動きを特定の

周波数の電波変動に変換することに成功している。我々はこの技術を応用し、人の動きをスイッチの ON/OFF に変換可能な Wi-Fi Backscatter センサ（以降、Backscatter センサと呼ぶ）の設計開発に取り組むとともに、それに基づく行動認識手法の設計を検討している。Backscatter センサはダイポールアンテナおよび振動スイッチで構成され、マイコンなどのチップがないためバッテリーなしで動作する。人の動きに応じて振動スイッチの ON/OFF が切り替わるため、Backscatter センサにより生じる電波変動のパターンを観測することによって、機械学習などによる行動認識が実現できる見込みがある。図 1 のように屋内環境において、Wi-Fi 基地局と受信機が存在し、Backscatter センサが衣服などに取り付けられているような環境を想定する。

本研究では、Backscatter センサによる行動認識の実現可能性を調査するため、Backscatter センサの試作と基本的な性能評価を行う。Backscatter センサのプロトタイプは Passive Wi-Fi を基に 3D プリンタや銅線を用いて作成する。このセンサの性能を調査するため、モーターで周期的に Backscatter センサのスイッチの ON/OFF を切り替える機構を作成し、電波暗箱を用いてスイッチングレートおよび Wi-Fi 出力が受信機でのスイッチング検出性能に与える影響を評価した。その結果、送受信アンテナ間距離 50cm の環境下で、スイッチングレート 7.5Hz 以上、出力

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science & Technology, Osaka University

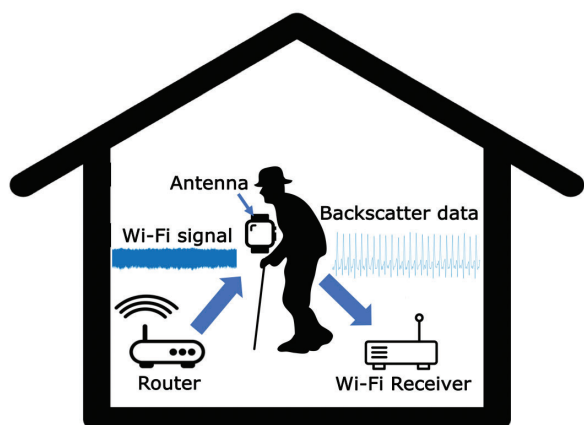


図 1 想定環境

電力 0dBm 以上のときに Backscatter センサによるスイッチングを 100%検出可能なことが分かった。

## 2. 関連研究

### 2.1 行動認識

ユーザが身につけたセンサから得られるデータを解析することで「歩いている」、「走っている」などの行動や状況を認識する行動認識は、これまで広く研究が行われてきた。行動認識には精度と分解能が高い加速度センサが主に用いられているが [3]、ジャイロセンサと組み合わせたもの [4] や、地磁気センサを組み合わせたもの [5]、位置情報データを用いたもの [6–8] など、様々なセンサが利用されている。また、省電力な人の行動・状況認識として、気圧センサを用いたもの [9] や、低サンプリングレートの加速度データの補完 [10]、人の動きから得られる発電量から行動を推定するもの [11] など、多くの取り組みがある。しかし、これらは依然としてバッテリーに依存しており、電池交換や充電のための管理コストがかかるという課題は解決されていない。これに対し本研究では、計算コストが高い受信信号の処理や分類などは電力供給が可能なパソコンなどの受信機で行い、センサとしてはバッテリーを搭載していないアンテナを使用するため、完全にバッテリーレスでの動作が可能である。

Wi-Fi の通信時に得られるチャネル状態情報 (CSI) を利用した行動認識 [12, 13] は、必要な機器が基地局と受信機のみであり、追加のセンサが必要ないことから、近年注目されている。しかし、設置環境ごとに学習が必要であることや、複数の人が存在する時に人物の識別ができないという課題がある。これに対し、我々は管理の手間が無い Backscatter センサを人に装着することで、複数の人が存在する状況でも Backscatter センサを装着した人のみを対象とした行動認識を実現する。さらに、Backscatter センサは物理的な振動をそのまま電波の変動に変換するため、フェージングなどによる複雑な環境の影響を含む CSI と異

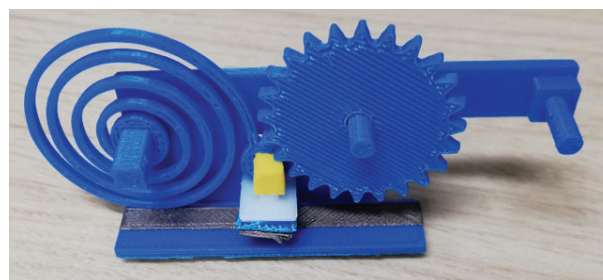


図 2 作成した Printed Wi-Fi のプロトタイプ

なり、環境ごとの学習なしでも行動認識を実現できる見込みがある。

### 2.2 Backscatter 通信

Ambient Backscatter [14] の発表以来、様々な backscatter 通信の方式が提案されている。Ambient Backscatter は、TV などの環境に存在する電波を反射・非反射の状態を切り替えることで、非常に少ない消費電力での無線通信が実現できるが、通信距離や速度に限られる。これに対して、電波の自己干渉を無くし、通信可能距離を伸ばす手法 [15] や、複数アンテナを利用することで通信可能距離と通信速度を上昇させる手法 [16] などが提案されている。また、既存の Wi-Fi インフラを再利用する Wi-Fi Backscatter [17] では、最大 1 kbps の通信速度と最大 2.1 メートルの通信範囲を実現している。さらに、Passive Wi-Fi [18] では基地局側で送出する電波を制御することで、Wi-Fi と同様な通信速度である 1Mbps から 11Mbps で 100 フィートの通信距離を実現しており、これらは環境発電で動作する新しい無線デバイスの普及につながる技術である。

Backscatter 通信では、周囲の環境電波に対して反射・吸収の 2 状態を切り替えることで通信を行うため、電波を生成するための電力が不要であり、無線通信にともなう消費電力を大幅に削減することができる。これに対して本研究で用いる Backscatter センサでは、人の動きに応じて振動スイッチにより反射・吸収の 2 状態を切り替え、Backscatter 通信と同一の原理によって直接電波変動として送信する。これによって、人の動きによって生じる振動を送信するセンサとしての利用を検討している。

## 3. Printed Wi-Fi の概要

Printed Wi-Fi では、導電性素材を用いて 3D プリンタで印刷可能なバッテリーレスセンサの作成に成功している。図 2 は公開されている 3D モデルを利用して作成した Printed Wi-Fi のプロトタイプである。プラスチック素材で印刷されたスプリングとギア、および導電性素材で印刷されたアンテナとスイッチで構成されている。アンテナ長はそれぞれ 2.7cm であり、2.4GHz 帯向けに設計されている。ギアが回転することによってスイッチが ON/OFF される仕組みになっており、これにともなってアンテナのインピーダ



(a) ダイポールアンテナ



(b) アルミホイルスイッチ

図 3 使用アンテナとスイッチ

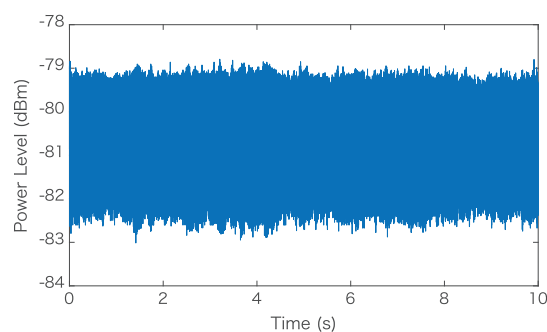
ンスが切り替わるため、電波の反射・吸収の状態が切り替わる。吸収状態から反射状態になり、また吸収状態に戻るまでの期間を1周期と定義した時、その1秒あたりの振動回数を以降ではスイッチングレートと呼ぶ。吸収・反射状態の切り替えによって生じる電波変動は、4.2節で述べるフィルタ処理を行うことにより、Wi-Fi 受信機で抽出される。抽出された電波変動に対して周波数解析によるスイッチングレートの推定を行うことにより、ギアの回転速度を推定することができる。このため、ギアに羽根を付けるといった工夫によって風量計や水流計を実現可能である。文献 [2] では、送信出力電力 30dBm、スイッチングレート 45Hz、アンテナと受信機の距離が 0.5m の環境において、基地局から 14m 離れた場所でも受信機でスイッチにより生じる電波変動を観測可能なことが報告されている。

Printed Wi-Fi では、ギアを回転させる動力として風力、水流、人力を利用した例を紹介しており、それぞれ風力計、水流計、ボタンやスライドバーとして利用できることが示されている。我々はこの機構を人の動きを送信するセンサとして活用することで、行動認識が可能であると考えている。

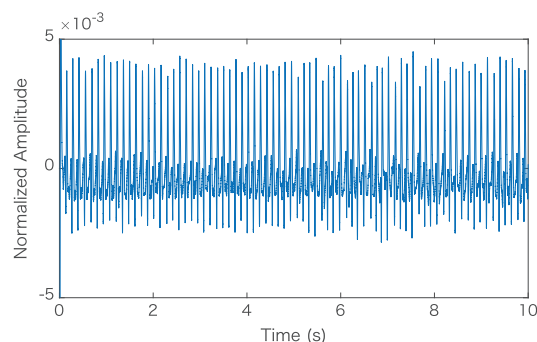
## 4. システム設計

### 4.1 Backscatter センサ設計

電波を反射するアンテナは、導電性の素材である銅やアルミ、鉄などの他に、3D プリンターで印刷可能な Electrifi Conductive Filament [2] 等が利用可能である。本研究では、これらの素材の中で入手が容易である銅線 (IW-252) をアンテナとして利用する。アンテナの種類は Printed Wi-Fi にてダイポール、ボウタイ、パッチの3つのアンテナが比較されており、その中でダイポールアンテナが最も受信電力が大きいと報告されている。また、実装が容易であるこ



(a) フィルタ前



(b) フィルタ後

図 4 Wi-Fi 受信電力レベル

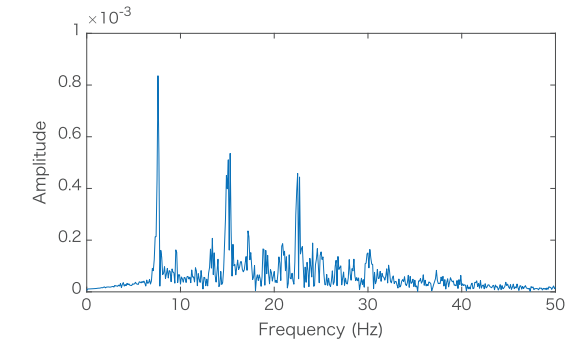
とから、本研究ではダイポールアンテナを採用する。使用するアンテナを図 3(a) に示す。2つの銅線は長さがそれぞれ 2.7cm であり、Wi-Fi の 2.4GHz 帯に合わせて設計されている。

Backscatter センサでは、おもりとばねによって ON/OFF が切り替わる振動スイッチの利用を想定しているが、本研究では基本性能を評価するため、振動スイッチの代わりに図 3(b) に示すようなアルミホイルにより作成したスイッチを利用する。このスイッチの接触 (ON)・非接触 (OFF) で銅線の接続・遮断を切り替えることで、電波の反射・吸収状態を切り替える。

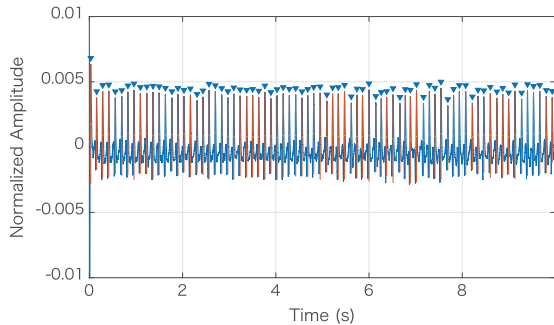
### 4.2 受信処理

受信機では、Printed Wi-Fi でセンサから送られてきた波形を抽出する手順と同様に、Wi-Fi の受信電波から Backscatter センサにより生じる電波変動を抽出する。まず、Wi-Fi 受信機は受信した電波の電力レベル (図 4(a)) を取得する。得られた電力レベルを -1 から 1 の範囲で正規化し、100Hz 以下を通す次数 10 の IIR ローパスフィルタを適用することで、通信に使用される高周波成分を除去し、センサにより生じる電波変動の波形を抽出する。さらに、ウィンドウ幅 0.03s の移動平均を減ずることで、人の動きなどの低周波成分を除去する。

上記のフィルタ処理を行った後の波形の例を図 4(b) に示す。得られた波形に周波数解析 (5(a)) やピーク検出 (5(b)) を適用することで Backscatter センサにおいて発生して



(a) 周波数スペクトラム



(b) ピーク検出

図 5 Backscatter センサデータの抽出

いる振動の頻度（スイッチングレート）や回数を抽出することができる。本研究では、周波数解析で得られたスイッチングレート  $f$ [Hz] からピーク間隔  $1/f$ [sec.] を求め、 $[1/f - 1/10f, 1/f + 1/10f]$  の期間内に存在する 0.003 以上のピークを Backscatter センサによる電波変動として検出するものとした。これらのパラメータは経験的に定めた。

## 5. Backscatter センサの基本性能評価

### 5.1 評価環境

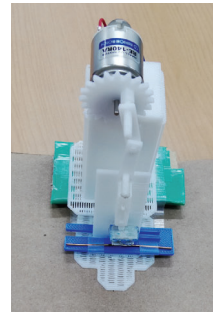
#### 5.1.1 測定環境

Backscatter センサの基本性能を評価するため、周囲の電波の影響を受けない電波暗箱内で実験を行った。使用した電波暗箱はマイクロニクス社の MY3720 であり、周波数帯 600MHz~6GHz で 60dB 以上のシールド性能と、2.4GHz 以上で 20dB 以上の電波吸収性能を持つ。

電波の送信・受信には National Instruments 社の USRP2944R を使用し、送受信アンテナはそれぞれ利得 3dBi と利得 2dBi のものを使用した。送信では、トーン周波数 20kHz の連続波を出力している。また、本実験では、ノイズの極力少ないデータの取得を目的として、送信周波数帯は Wi-Fi で利用されている 2.4GHz 帯ではなく、2.3GHz を使用することとした。

評価指標として、以下で定義される検出率を用いる。

$$\text{検出率} = \frac{\text{検出ピーク数}}{\text{周期数}} \times 100[\%] \quad (1)$$



(a) モーター機構



(b) 全体像

図 6 実験環境

表 1 スwitchングレートの変化と検出率

スイッチングレート (Hz)	検出率 (%)
1	0
2	0
7.5	100
10	100
20	100
30	100

#### 5.1.2 スwitchングレート制御機構

センサの基本性能を評価するには、一定の周期でスイッチを切り替える必要がある。そこで、電圧で回転速度が変化するモーターを利用した。モーターは 1Hz, 2Hz の低速測定用と、7.5Hz から 30Hz の高速測定用の 2 種類を使用した。図 6(a) のように、モーターの回転をスイッチの切替に変換する機構は円運動を直線運動に変換するスライダクランク機構を採用し、主に 3D プリンターで作成した。

図 6(b) に、電波暗箱と送受信アンテナを含む実験環境を示す。電波暗箱の大きさの制限により、送受信アンテナ間の距離は 50cm で固定とし、その間に Backscatter センサとスイッチングレート制御機構を設置した。

### 5.2 スwitchングレートの変化

スイッチングレートが検出率に及ぼす影響を調べるため、送信電力を 10dBm で固定し、スイッチングレートを 1Hz から 30Hz まで変化させて検出率の変化を評価した。Backscatter センサは受信機から 20cm の距離に設置した。結果を表 1 に示す。スイッチングレートが高い時には検出率が 100% と安定して検出できている。しかし、1Hz や 2Hz のようにスイッチングレートが低いときには全く検出できていない。この原因はローパスフィルタで波形を抽出した後移動平均によって低周波数成分を除去しているからである。Backscatter センサは人の体に身につけることを想定しており、人の動きは 1Hz から 2Hz であるため、低周波成分が除去できていることは良い結果であると言える。この結果から、7.5Hz などの人の動きより高い周期で振動スイッチの ON/OFF を切り替えることができれば、受信機側で振動に起因する電波変動を検出可能であるといえる。

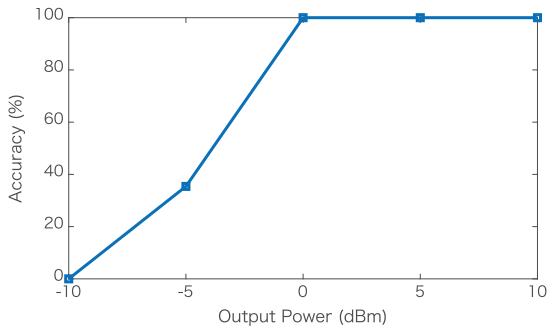


図 7 出力電力とビット検出率

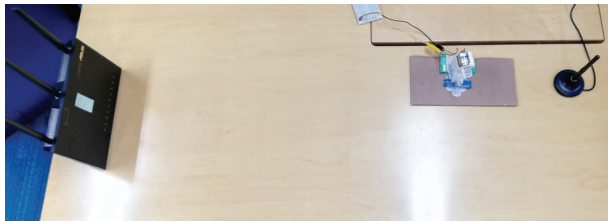


図 8 Wi-Fi 基地局を用いた実験環境

### 5.3 送信電力の変化

日本国内において、Wi-Fi から送信される電波の最大出力電力は電波法によって 10dBm と定められている。そのため、送信電力を 10dBm から減らしていき、検出可能な送信時出力電力の限界を評価した。図 7 に結果を示す。出力電力が 0dBm 以上であればビット検出率が 100%であるが、それ以下の場合にはセンサから送られてきた波形の振幅が小さくなり、検出が難しくなる。-10dBm では、周波数解析による特徴的な周波数が見られなかったため検出率が 0%となった。Printed Wi-Fi [2] では、送信電力は米国の FCC ルール内の出力である 30dBm を利用しているが、これは日本国内における 10dBm の 100 倍となる。したがって、日本国内においては Backscatter センサの利用可能範囲が基地局から数 m 程度の範囲に限られる可能性がある。

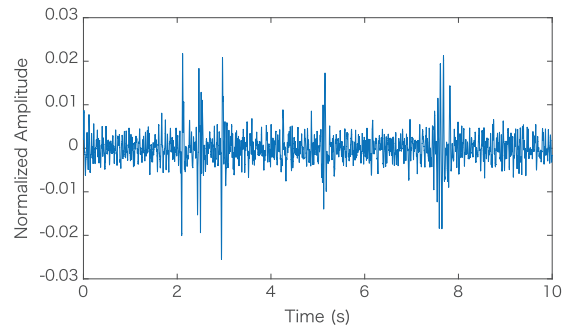
## 6. Wi-Fi 基地局利用時の評価

### 6.1 評価環境

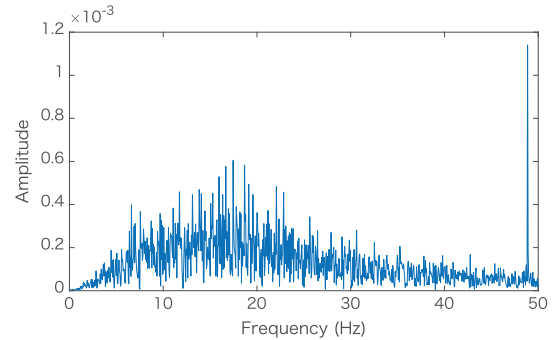
Wi-Fi 電波を利用した場合の実験環境を図 8 に示す。基地局には 2.4GHz 帯のチャンネル 4、ビーコン間隔 20ms に設定された ASUS AC1900 を利用する。5.1.1 節では基地局から連続波を出力したが、通常の Wi-Fi 基地局は連続波を出力する機能を持たない。そこで、Wi-Fi 基地局に接続したノート PC から ping コマンドを flood モードで基地局に送り続けることで継続的なトラフィックを生成した。

### 6.2 評価結果

モーターの回転によるスイッチングレートを 10Hz に固定し、実験を行った。4.2 節のフィルタ処理後に得られた波形を図 9(a) に、周波数解析後のスペクトラムを図 9(b)



(a) フィルタ処理後の波形



(b) 周波数スペクトラム

図 9 Wi-Fi 利用時の受信データ

に示す。周波数解析の結果から、Wi-Fi 基地局のビーコン間隔である 50Hz 付近にピークが見られるが、Backscatter センサのスイッチングレートである 10Hz 付近にピークは見られない。また、同じフィルタ処理後のデータである図 4(b) と図 9(a) を比較すると、振幅のスケールが大きく異なることがわかる。この結果から、低周波成分である 10Hz から 20Hz 間のノイズが特に多く、それらのノイズに Backscatter センサの電波変動が埋もれてしまったと考えられる。このようなノイズの原因として、ping が一定の周期で送信しているわけではないことや、周辺基地局や Wi-Fi デバイスからの電波も受信していることなどが考えられる。このため、実環境においてはこれらの課題解決が必要となることが分かった。

## 7. まとめと今後の課題

本研究では、バッテリーレスでの行動認識を実現するため、Backscatter センサのプロトタイプを開発し、その基本性能評価を行った。銅線とアルミホイルを利用して Backscatter センサの評価を行ったところ、電波暗箱内において送受信機間隔 50cm、送信電力 0dBm 以上のとき、10Hz 以上のスイッチングレートであれば検出率 100%となることが分かった。一方、Wi-Fi 基地局を利用して屋内環境で同様の評価を行った結果、周辺 Wi-Fi 機器の影響などにより検出が困難になることが分かった。

今後、実環境における課題の詳細な分析を行うため、以下のような実験に取り組む予定である。

- 一軒家など周辺に他の Wi-Fi 基地局が少ない環境での Wi-Fi 基地局を利用した実験
- 電波暗室を利用し、送受信機や Backscatter センサの位置関係を様々に変化させた実験
- Wi-Fi を利用した連続波、もしくはそれに近い電波出力方法の調査とそれを用いた実環境での実験

また、Backscatter センサを振動スイッチにより実装し、歩行などの行動ごとに性能を評価することも必要である。我々は、振動スイッチを利用することで人の動きをスイッチの切り替えに変換可能と考えているが、5.2 節で述べたように人の動きはフィルタ処理によって除去されるため、スイッチングレートをより高周波にする機構を検討する予定である。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP18H05393, JP70555234, JP19H05665 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Milenkovic, M. and Amft, O.: An Opportunistic Activity-sensing Approach to Save Energy in Office Buildings, *Proceedings of the Fourth International Conference on Future Energy Systems(e-Energy '13)*, pp. 247–258 (2013).
- [2] Iyer, V., Chan, J. and Gollakota, S.: 3D Printing Wireless Connected Objects, ACM (2017).
- [3] Bao, L. and Intille, S. S.: Activity recognition from user-annotated acceleration data, *Proceedings of the 2nd International Conference on Pervasive Computing(Pervasive 2004)*, pp. 1–17 (2004).
- [4] Kunze, K. and Lukowicz, P.: Dealing with sensor displacement in motion-based onbody activity recognition systems, *Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous Computing(UbiComp '08)*, pp. 20–29 (2008).
- [5] Lee, S.-W. and Mase, K.: Activity and location recognition using wearable sensors, *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 1, No. 3, pp. 24–32 (2002).
- [6] Zhu, C. and Sheng, W.: Realtime recognition of complex human daily activities using human motion and location data, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 59, No. 9, pp. 2422–2430 (2012).
- [7] Carrion, C., Pereira, F., Ball, R., Zhao, F., Kim, Y., Nawarathne, K., Zheng, N., Zegras, C. and Ben-Akiva, M.: Evaluating FMS: A preliminary comparison with a traditional travel survey, Technical report, Transportation Research Board 93rd Annual Meeting (2014).
- [8] Cottrill, C., Pereira, F., Zhao, F., Dias, I., Lim, H., Ben-Akiva, M. and Zegras, P.: Future mobility survey: Experience in developing a smartphone-based travel survey in singapore, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2354, pp. 59–67 (2013).
- [9] Sankaran, K., Zhu, M., Guo, X. F., Ananda, A. L., Chan, M. C. and Peh, L.-S.: Using mobile phone barometer for low-power transportation context detection, *Proceedings of the 12th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems(SenSys '14)*, pp. 191–205 (2014).
- [10] Nakajima, Y., Murao, K., Terada, T. and Tsukamoto, M.: A method for energy saving on context-aware system by sampling control and data complement, *Wearable Computers (ISWC), 2010 International Symposium on*, IEEE, pp. 1–4 (2010).
- [11] Khalifa, S., Hassan, M. and Seneviratne, A.: Pervasive self-powered human activity recognition without the accelerometer, *2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, IEEE, pp. 79–86 (2015).
- [12] Wang, Y., Liu, J., Chen, Y., Gruteser, M., Yang, J. and Liu, H.: E-eyes: Device-free Location-oriented Activity Identification Using Fine-grained WiFi Signatures, *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '14, ACM, pp. 617–628 (2014).
- [13] Wang, W., Liu, A. X., Shahzad, M., Ling, K. and Lu, S.: Understanding and Modeling of WiFi Signal Based Human Activity Recognition, *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '15, ACM, pp. 65–76 (2015).
- [14] Liu, V., Parks, A., Talla, V., Gollakota, S., Shyam-nath and Wetherall, D. and Smith, J. R.: Ambient Backscatter: Wireless Communication out of Thin Air, *SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 43, No. 4, pp. 39–50 (2013).
- [15] Varshney, A., Harms, O., Penichet, C.-P., Rohner, C., Hermans, F. and Voigt, T.: LoRea: A backscatter architecture that achieves a long communication range, *Proceedings of the 15th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems(SenSys '17)* (2017).
- [16] Parks, A. N., Liu, A., Gollakota, S. and Smith, J. R.: Turbocharging ambient backscatter communication, *Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM(SIGCOMM '14)*, pp. 619–630 (2014).
- [17] Kellogg, B., Parks, A., Gollakota, S., Smith, J. R. and Wetherall, D.: Wi-fi Backscatter: Internet Connectivity for RF-powered Devices, *Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM*, SIGCOMM '14, ACM, pp. 607–618 (2014).
- [18] Kellogg, B., Talla, V., Gollakota, S. and Smith, J. R.: Passive Wi-Fi: Bringing Low Power to Wi-Fi Transmissions, *Proceedings of the 13th Usenix Conference on Networked Systems Design and Implementation(NSDI'16)*, pp. 151–164 (2016).