

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

中川 善博^{1,a)} 前田 透^{1,b)} 内山 彰^{1,2,c)} 東野 輝夫^{1,d)}

概要：充電や電池交換といったメンテナンスの手間がかからない行動認識手法として、ワイヤレスセンシングが注目を集めている。ワイヤレスセンシングでは、人の動きに伴って生じる電波の変動を観測することにより、行動を認識する。一方で、複数の人が存在する場合にはそれらの影響が混在することとなり、分離が困難になるという課題がある。これに対して、タグごとに固有の周波数減衰を作り出す LiveTag の原理を利用することで、スペクトラムパターンによるタグ識別を実現し、複数の人による電波変動の影響を分離できる可能性がある。そこで本研究では、Wi-Fi 電波を用いたワイヤレスセンシングによる行動認識の高度化を目指し、電波に固有の影響を及ぼすバッテリーフリータグに関する基礎検討を行う。まず、バッテリーフリータグのプロトタイプを作成し、形成可能なスペクトラムパターンの性質について報告する。さらに、測定結果に基づき、行動認識への応用時に生じる課題を検討する。

1. はじめに

ウェアラブル端末やスマートフォンのように様々なセンサを活用した人々の行動認識は、ヘルスケアやナビゲーションなどの様々な応用が期待されており、多数の研究がなされている [1]。しかし、高齢者の見守りのように日常的に利用するサービスにおいては、ウェアラブル端末を身につける必要があったり、端末を充電する手間が大きく、継続性に課題が残っている。これに対して、Wi-Fi や RFID などの電波を利用し、非侵襲的に行動を認識するワイヤレスセンシングが注目を集めている [2], [3], [4]。

ワイヤレスセンシングでは、人の動きに応じて変動する電波を観測することで行動を認識する。このため、対象環境に送信機と受信機を設置すれば良く、ウェアラブルセンサなどのバッテリーで動作するデバイスをユーザが身につける必要が無い。例えば、Wi-Fi のチャンネル状態情報 (CSI: Channel State Information) を利用した手法では、サブキャリアごとの位相および振幅に基づき、様々な行動を認識できることが報告されている [5], [6]。また、RFID を利用したワイヤレスセンシングも近年では盛んに研究が行われている。

RFID タグはリーダーからの電波により給電され、電波を反射することで通信を行う backscatter により、ID などのデータをリーダーに送信する。このため、電池交換に伴うメンテナンスの手間がかからないというワイヤレスセンシングの利点は保持したまま、電波を反射しているタグの識別が実現できるという点で、Wi-Fi によるワイヤレスセンシングと比べて姿勢や心拍などのより詳細な動きの認識が可能である [7], [8]。Wi-Fi を用いたワイヤレスセンシングでは、新たな設備の導入が不要というメリットがあるが、複数の人による影響を分離できないという課題がある。一方、RFID を用いたワイヤレスセンシングでは、複数の人による影響を分離できるが、センシングのために新たな設備を導入する必要があり、導入コストの面で課題がある。

そこで本研究では、Wi-Fi 電波を用いた行動認識の高度化を目指し、電波に固有の影響を及ぼすバッテリーフリータグに関する基礎検討を行う。タグごとに固有の周波数減衰を作り出す LiveTag[9] の原理を利用することで、スペクトラムパターンによるタグ識別を実現し、複数の人による電波変動の影響分離を試みる。このため、まずバッテリーフリータグのプロトタイプを作成し、タグ上の共振器によって形成されるスペクトラムパターンの性質について測定を行う。さらに、測定結果に基づき、バッテリーフリータグを行動認識へ応用した際に生じる課題の検討を行う。

2. LiveTag の原理と本研究の狙い

LiveTag[9] はマイクロコントローラなどの電力により動

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² JST さきがけ

a) y-nakagawa@ist.osaka-u.ac.jp

b) t-maeda@ist.osaka-u.ac.jp

c) uchiyama@ist.osaka-u.ac.jp

d) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

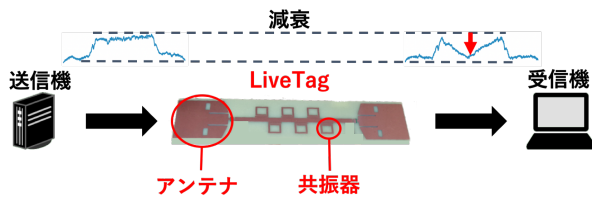


図 1 LiveTag 基本原理

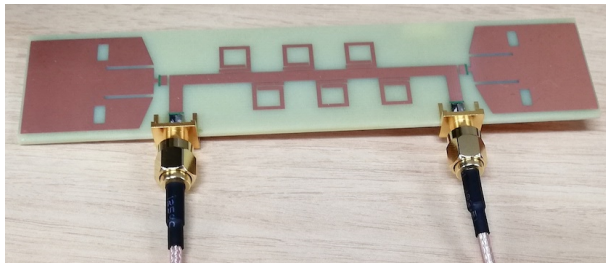


図 2 LiveTag プロトタイプ

作する回路が一切不要なチップレスのタグである。図 1 に LiveTag の概要を示す。LiveTag は 2 本のアンテナと伝送路および伝送路に沿って設置された共振器によって構成される。共振器は設計に応じた周波数帯域の電波を減衰させる性質があるため、一方のアンテナから入力された電波は、伝送路を通過してもう一方のアンテナから出力されるまでに、共振器による減衰の影響を受ける。したがって、広帯域かつ強度が一定の電波を LiveTag に入力すれば、出力される電波のスペクトラムには、共振器の組み合わせに応じた谷（ノッチ）が表れる。LiveTag の考案者である Gao らは文献 [9] において、共振器に人の指が触れることで、スペクトラムのノッチが消失することを利用し、ワイヤレスセンシングによるタッチ検出を実現している。

我々の研究グループでは、LiveTag を環境に設置したり、人が身につけたりすることで、RFID のように対象の識別を実現することを想定している。さらに、LiveTag が反射するスペクトラムパターンの変動を観測することで、ワイヤレスセンシングによる行動認識の実現を目指している。本研究では、この際の課題を明らかにするため、まず LiveTag を再現し、人の動きによる影響やセンシング可能な範囲などの基本性能に関する検討を行う。

3. LiveTag の基本特性評価

3.1 評価環境

LiveTag の行動認識への応用可能性を検討するため、文献 [9] を基に LiveTag のプロトタイプを開発した（図 2）。プロトタイプでは、アンテナの代わりに SMA コネクタを接続し、タグの特性を直接測定できるようになっている。共振器の数が多ほど減衰量が多くなるため、プロトタイプでは 1 つのタグに対して同じ共振器を 6 つに取り付けている。高周波回路では、基板の材質や伝送路の幅、長さな

ど多種多様な要因によって回路特性が変化する。したがって、設計が同じであっても同一の特性が得られるとは限らない。このため、LiveTag の再現にあたっては、綿密なシミュレーションを行ったうえで、最終的に数パターンのプロトタイプを作成し、微調整するといったアプローチが必要となる。本研究では、我々が使用する素材に適した共振器の設計を調べるため、LiveTag の設計データに基づき、1 辺の長さが異なる共振器を 5 種類 (No.1-5) 作成し、それぞれの特性を測定した。

測定にはソフトウェア無線フロントエンド NI USRP-2944R を使い、LiveTag の伝送路の両端に接続された SMA コネクタをそれぞれ USRP の出力、スペクトラムアナライザ Keysight MXA Signal Analyzer N9020B に接続した。これによって、Wi-Fi を想定した帯域幅 100MHz の OFDM 信号を LiveTag に入力し、他方から出力される電波のスペクトラムを観測した。

3.2 評価結果

図 3 に 5 種類のタグから出力された電波のスペクトラムを示す。青色の線がタグを介した場合、オレンジ色の線がタグを介さないときのスペクトラムの平均の振幅を示している。いずれのタグにおいてもノッチが生じていることが目視できるが、ノッチの周波数帯は異なっていることが分かる。

表 1 にノッチの幅と深さの平均を示す。共振器の大きさは 1 辺の長さを示しており、共振周波数はノッチが最も深くなる周波数を表している。ノッチの深さはタグを経由しないときと中継したときの共振周波数の振幅の差を示している。文献 [9] では、1 辺のサイズが 7mm のスパイラル型共振器 1 個の減衰量は約 7 db であることが示されている。このため、タグを経由した場合とそうでない場合の電波強度の差が共振器 1 つ分 (7db) 以上存在する帯域をノッチと定義し、共振周波数およびノッチ幅・深さの平均を計算した。この結果より、共振器のサイズが大きくなるにつれて、共振周波数が小さくなる結果が得られた。このような結果が得られた理由は、RLC 直列回路における共振周波数の式から説明できる。タグの共振器の共振周波数 f_0 は以下の式 (1) で表される。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

L と C はそれぞれ、コイルの自己インダクタンス、コンデンサの電気容量であり、共振器や基板の素材、共振器の大きさなどから決定される。共振器が大きくなるほど、 $\sqrt{LC}$ が大きくなるため、共振器のサイズが大きくなるほど共振周波数が低くなる。

なお、No.5 のノッチ幅は大きく、他のタグと比較して振幅が大きくなっているが、各タグには中心周波数のみを変えた同じ強さの電波を入力しているため、No.5 の測定時

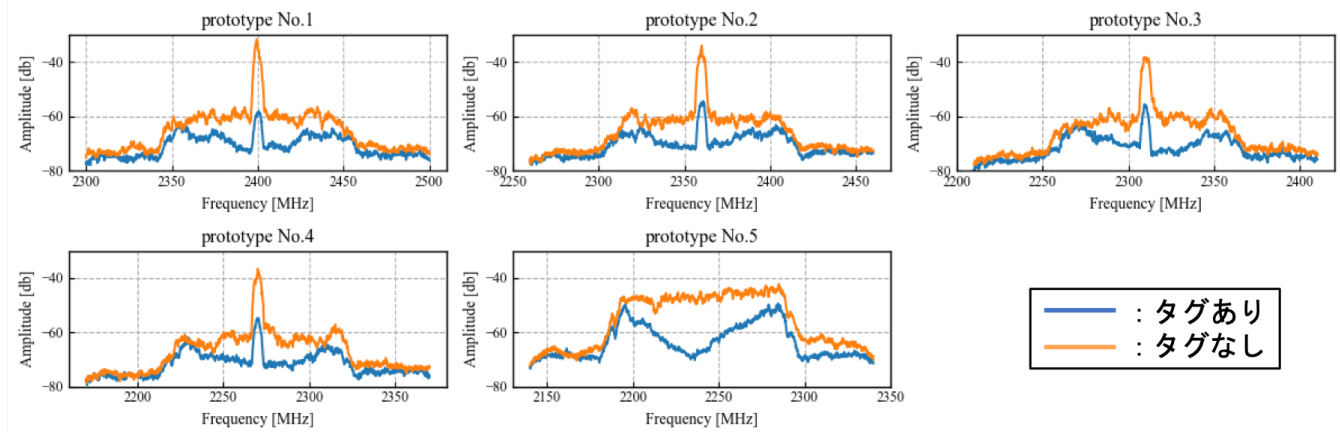


図 3 LiveTag から出力されたスペクトラム

表 1 ノッチの幅と深さ

タグ No	共振器の大きさ [mm]	共振周波数 [MHz]	ノッチの幅 [MHz]	ノッチの深さ [db]
No.1	7.25	2400	82	24.8
No.2	7.35	2360	86	20.9
No.3	7.45	2310	73	18.4
No.4	7.55	2270	74	18.7
No.5	7.65	2240	112	19.4

のみ、正しく電波が入力されなかった可能性がある。このため、今後さらに調査を行う。以上の結果から、共振器のサイズによるノッチの幅や深さ、共振周波数の変化の傾向は、おおよそ文献 [9] 通りの結果を得ることができた。

今回作成したプロトタイプでは、2.4GHz よりもやや低い周波数帯にノッチが表れた。このことから、Wi-Fi の周波数帯を利用するためには、共振器のサイズをやや小さくする必要があることが分かった。設計上の課題としては、Wi-Fi の帯域幅に対してノッチ幅が大きいことが挙げられる。Wi-Fi の帯域幅により多くのノッチを組み込むためには、共振器を増やすことで減衰量を増やし、ノッチの中心周波数付近の狭帯域のみを監視するといった工夫が必要となる。また、電波暗室等で実際に電波を発生させ、アンテナを経由したタグの特性を評価することも必要である。

4. まとめと今後の展望

本研究では、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として、LiveTag を再現し、共振器の基本特性に関する調査を行った。その結果、共振器のサイズに応じて、形成されるノッチの幅や共振周波数について、おおよそ報告されている通りの傾向が得られることが分かった。

我々の目的は、LiveTag 周辺に固有のスペクトラムパターンが生じることを利用して、複数の人が混在する環境での行動認識において、対象の識別を実現することである。行動認識のアプローチとして、従来のワイヤレスセンシングと同様に人の動きによる電波の変動を捉えることが考えられる。さらに、LiveTag の共振器部分に振動スイッチを取

り付けることによって、LiveTag の動きに合わせてノッチの有無が切り替えられる可能性がある。これによって、物理的な人の動きそのものがノッチの有無として直接観測されるため、人の動きが電波に与える影響を電波的な観点からより強調して観測できる可能性がある。

今後、バッテリーフリータグを用いた Wi-Fi による行動認識を実現するため、人の行動がスペクトラムパターンに与える影響や、スペクトラムパターンをセンシング可能な範囲に関する調査などを進める予定である。これらの調査を通して、LiveTag を応用した行動認識のためのバッテリーフリータグの設計を行い、ワイヤレスセンシングの高度化によるメンテナンスフリーな行動認識の実現を目指す。

参考文献

- [1] Lara, O. D. and Labrador, M. A.: A Survey on Human Activity Recognition using Wearable Sensors, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 15, No. 3, pp. 1192–1209 (2013).
- [2] Xiao, N., Yang, P., Yan, Y., Zhou, H. and Li, X.: Motion-Fi: Recognizing and Counting Repetitive Motions with Passive Wireless Backscattering, *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 2024–2032 (2018).
- [3] Ma, J., Wang, H., Zhang, D., Wang, Y. and Wang, Y.: A Survey on Wi-Fi Based Contactless Activity Recognition, *Proceedings of Int'l IEEE Conferences on Ubiquitous Intelligence Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress (UIC/ATC/ScalCom/CBDCoM/IoP/SmartWorld)*, pp. 1086–1091 (2016).

- [4] Wang, Y. and Zheng, Y.: Modeling RFID Signal Reflection for Contact-free Activity Recognition, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 4, pp. 193:1–193:22 (2018).
- [5] Zeng, Y., Pathak, P. H. and Mohapatra, P.: WiWho: WiFi-Based Person Identification in Smart Spaces, *15th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 1–12 (2016).
- [6] Pu, Q., Gupta, S., Gollakota, S. and Patel, S.: Whole-home Gesture Recognition Using Wireless Signals, *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking, MobiCom '13*, pp. 27–38 (2013).
- [7] Wang, C., Liu, J., Chen, Y., Xie, L., Liu, H. B. and Lu, S.: RF-Kinect: A Wearable RFID-based Approach Towards 3D Body Movement Tracking, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 1, pp. 41:1–41:28 (2018).
- [8] Wang, C., Xie, L., Wang, W., Chen, Y., Bu, Y. and Lu, S.: RF-ECG: Heart Rate Variability Assessment Based on COTS RFID Tag Array, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 2, pp. 85:1–85:26 (2018).
- [9] Gao, C., Li, Y. and Zhang, X.: LiveTag: Sensing Human-Object Interaction through Passive Chipless WiFi Tags, *15th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 18)*, pp. 533–546 (2018).