

BLE ビーコンを用いた物体状態推定手法

大鐘 勇輝¹ 水野 涼雅¹ 梶 克彦¹

概要：近年 IoT の普及によって様々なセンサが家電に取り付けられ、そこから得られる情報によりログデータの取得が可能となった。ログデータはセンサが搭載されている家電では収集が容易であるが、特殊なセンサの無い家電や扉、椅子といった家具ではデータの収集が難しい。これまでそのような家電や家具などの状態推定には加速度センサや Wi-Fi の電波が用いられてきたが、移動の有無や推定対象物の大きさによって推定精度が大きく左右される問題があった。そこで本研究では、Bluetooth Low Energy ビーコン(以下 BLE ビーコンと呼称)を家電や家具などモノの中に直接入れ、状態によって変化する BLE ビーコンの電波強度をもとに推定を行う手法を提案する。BLE ビーコンの電波は微弱であるため、環境の変化による電波の乱れが発生しやすい。そのため提案手法では、取得した電波強度データに対しデジタルフィルタの一つであるローパスフィルタを適用しノイズの除去を行う。また、本手法では推定対象物の移動も考慮するため、簡単な閾値処理だけでは推定が困難である。そこで、安定センシング区間という概念を導入し、電波強度が安定している区間を利用し推定精度の向上を試みる。見つかった安定センシング区間に對し動的に変更できる閾値を用いて状態推定を行う。上記の方法を冷蔵庫の開閉や金庫の開閉、座椅子の着座の状態推定に適用し推定精度を確かめた。その結果、冷蔵庫の開閉推定では N % の精度で状態推定でき、金庫の開閉推定では N % の精度で、座椅子の着座推定では N % の精度で推定できた。今後は判定のための閾値を見直し精度を高める。

キーワード：ビーコン電波による物体の状態推定、安定センシング区間、ログ、ローパスフィルタ

Proposal of Object State Estimation Method using BLE Beacon

YUKI OGANE¹ RYOGA MIZUNO¹ KATSUHIKO KAJI¹

1. はじめに

通信インフラの整備と IoT の発展により、現在では様々なモノがインターネットに繋がるようになった。エアコンや照明、家の鍵から車に至るまで、数年前ではインターネットとは無関係だったものが今では当たり前のようにインターネットに接続されている。IoT に対応した家電は遠隔からの機器の操作や機器の状態の通知、使用ログの保存が可能であり、例えば IoT に対応したエアコンでは家の外から電源の ON・OFF や電気使用量のログの確認ができる。こうした利便性から日々新たな IoT 家電が生まれ続けており、総務省が公開している資料 [1] によると 2020 年には約 300 億の IoT デバイスが稼働していると予想さ

れている。IoT デバイスの増加により家中にそれらが設置されると、そこから得られる使用データから行動パターンといったログデータが取得できる。ログデータは、環境に合わせた電力制御や老人の異常行動の検知など幅広い分野への応用が期待できる。

しかし、これらのデータは IoT に対応した家電でないと取得できず、金庫や椅子、扉といった家電以外のモノではセンサが無いためデータ収集が不可能という問題がある。この解決策として、(1) 加速度センサや回転センサを使う方法と、(2)Wi-Fi 電波のチャネルの状態情報を用いた方法がある。(1) の方法は直接モノの動きを観測できるため安定した精度で状態推定ができる反面、センサー単体での動作が難しく取得したデータの保存・解析に専用の機器が必要である。また(2) の方法では対象物のそれぞれにセンサ

¹ 愛知工業大学 情報科学部情報科学科

を付ける必要が無い一方、状態の推定に Wi-Fi 電波の反射波を用いるという特徴から小さな対象物への適用は不得意である。

そこで本研究では汎用的な機器のみで動作でき、かつ小さな対象物でも高い精度で状態推定できる手法を提案する。具体的には日常の生活空間内における家電・家具の内部に Bluetooth Low Energy ビーコン（以下 BLE ビーコン）を設置し、送信される電波をスマートフォンで受信した際の受信電波強度をもとにモノの状態推定を行う手法である。BLE ビーコンは小型・省電力なため長期間の稼働が可能であり、また電波が微弱なので障害物の有無により電波強度が変化しやすく状態推定に適している。加えて BLE ビーコンの電波はスマートフォンで受信できるため、電波の受信に特別な機器を必要とせず、UUID, major, minor の情報から各 BLE ビーコンの識別ができるため、1 台のスマートフォンで複数の BLE ビーコンを監視できる。

システム概要図を図 1 に示す。本手法では、BLE ビーコンを金庫や冷蔵庫であれば開閉を行う蓋や扉の部分に、椅子では座面のクッション下へ設置し推定を行う。この時、受信したデータをそのまま使用するとノイズの影響により正確な推定ができないため、収集したデータに対してフィルタ処理を施しノイズを取り除き状態の推定を行う。

本稿の構成は以下の通りである。2 章では、屋内日常物における状態推定に関する既存研究を紹介し、その問題点を述べる。3 章では、既存手法における問題点を解決するために、本研究の BLE ビーコンを使用してモノの状態推定を行う手法を述べる。4 章では、本研究で提案した手法の評価と考察を行う。最後に 5 章で、本研究のまとめと考察を行う。



図 1 システム概要図

2. 関連研究

室内にある物の状態推定には、加速度センサや振動センサなどを利用する方法や Wi-Fi の電波を利用する方法など

様々な手法が提案されてきた。前川ら [2] は様々なセンサを搭載したセンサノードをモノに取り付け、そこから得られるセンサ情報と事前に用意しておいたそのモノ固有の状態遷移図を比較し、自動でモノの状態と何に付けられているのか推定をしている。角速度や照度などから、センサノードが取り付けられている状況や状態変化を検出するという手法である。この手法ではセンサノードがどんなモノに付いていてどんな状態変化をしたか推定が可能である。

消費電力の変化から電気機器の状態推定を行っている研究がいくつかある。上田ら [3] は機器やコンセントごとの消費電力を計測できる細粒度電力センサを使用し、電気機器の電力消費の変化から浪費電力の検出・分類を行っている。また、山田ら [4] は電気機器の運転モードの切り替えや開閉などの状態変化によって起こる消費電力の変化から状態の推定を行い、さらに複数の電気機器の状態変化を時系列に並べ人物の位置推定を行っている。これら二つの手法では、電気機器の状態変化から起こる消費電力の増減に着目し推定を行っているため、電化製品に対しては有効な手法ある。一方で、電気を用いない家具や雑貨に対しては適用が不可能である。

日常生活空間内での扉の開閉推定を行う尾原ら [5] の研究では、Wi-Fi のチャンネル状態情報を用いて物体の移動から発生するドップラー効果や電波の到来方向からドアの開閉状態を検知している。この研究では推定の対象物は扉であるある程度大きさがあるモノであるため、Wi-Fi チャンネル状態情報に影響を及ぼしやすくこの手法は有効である。

しかし、小さな箱の開閉や移動した先での状態変化を推定する事は難しいため、我々は BLE ビーコンを用いて電波強度の変化から状態変化の推定を行う。BluetoothLowEnergy の技術は近年、広告配信や位置推定など様々な用途に使われている。例えば SNS サービスを提供している LINE では、BLE ビーコンを使用して決済ができるサービスを提供している [6]。その他にも BLE ビーコンの電波は在室検知や位置、状態推定など多くの研究に利用されている。在室検知では各個人がビーコンを持ち、室内に設置された受信機で在室や滞在を検知する研究が行われている [7], [8]。また LE ビーコンの受信機との距離による減衰や、障害物による電波の減衰などによって変化する電波強度をもとに、複数の受信機を用いて位置の推定や状態の推定をする研究が数多く行われている [7], [9], [10]。

これらで利用されているように、BLE ビーコンの電波は微弱であるため数 m の距離の変化や障害物などにより電波の減衰が起こる。この現象を利用し我々は日常の生活空間内におけるモノの状態変化推定を行う。

3. 物体内部に配置した BLE ビーコンの電波強度を用いた状態推定

本研究では冷蔵庫や金庫、座椅子などの内部に図 2 の

BLE ビーコンを設置し、その電波強度の変化からモノの状態推定を行う。冷蔵庫(図 3)では扉の棚部分、金庫(図 4)では開閉する蓋の部分、座椅子(図 5)では人が座る座面の部分や背もたれの部分のカバー裏へ BLE ビーコンの設置を行う。これにより扉の開閉や人の着座などのモノの状態変化から BLE ビーコンの遮蔽状態が変化するため、外側に設置する受信機からみた BLE ビーコンの電波強度が変化する。この変化する電波強度をもとに設置対象の状態変化の推定を行う。



図 2 BLE ビーコン



図 3 冷蔵庫の状態と設置したビーコン

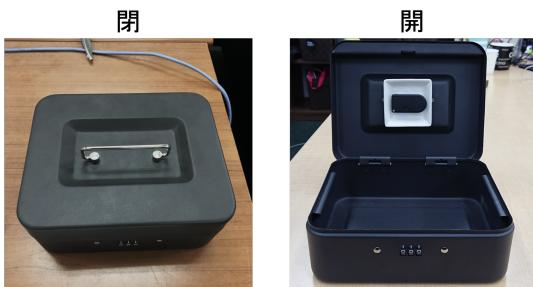


図 4 金庫の状態と設置したビーコン

BLE ビーコンの状態変化による電波強度の変化を利用した研究に池田ら [11] の研究がある。この研究は複数ある BLE ビーコンの中からある一つを手で覆ったり開いたりするパカパカという動作からその BLE ビーコンを特定し、管理を容易にするというものである。人は水分を含んでおり電波を減衰させやすいためパカパカ動作により BLE ビー



図 5 座椅子の状態と設置したビーコン

コンの遮蔽状態が変わり、電波を受信機で受信した際の電波強度も変化する。モノの状態変化時にはこのパカパカと同じ状態になるため状態の推定が可能であると考えられる。

3.1 電波強度のデータ収集対象及び前提

本研究では受信機としてスマートフォンを使用するため、専用の Android アプリケーションを作成し電波強度の情報を収集する。その際 BLE ビーコンを識別するための UUID, major, minor を BLE ビーコンを設置する対象と紐付けし、どの BLE ビーコンの値がどの対象物の物なのか把握できるようにしている。また BLE ビーコンの電波送信設定は小さな変化も検知可能にするため送信強度は 0dBm、送信間隔は 100ms と設定した。

3.2 BLE ビーコン取り付け位置の検討

BLE ビーコンの取り付け位置や付け方を変えると電波強度の変化に現れる特徴も変えられる。例えば箱型で蓋の開閉を行う金庫のようなものであれば、BLE ビーコンを箱内部の底に設置する場合と蓋の裏に設置する場合を考えられる(図 6)。さらに、対象の材質が電波を通しやすいために状態変化しても電波強度に大きな変化が現れないモノもあるため、図 6 のように電波に指向性をもたせるアダプタを取り付け電波強度にはっきりとした変化が出るようにする。この指向性アダプタとは、図 7 のような金属や陶器のパ



図 6 指向性アダプタ有り無しの画像

ラボラアンテナのような形状の物を指し、これを取り付けると電波が拡散せず収束して一方向のみへ飛ぶようになる。その結果、特定の方向に向かって飛ぶ電波が強まり、状態変化によって電波強度に大きな変化が現れるようになる。



図 7 本研究で使用した指向性アダプタ

図 8 にそれぞれの取り付け方による金庫開閉時の電波強度の波形を示す。この図にはそれぞれ開いている状態と閉じている状態の正解ラベルをつけてある。BLE ビーコンを金庫内部の底につけた場合にはあまり大きな変化は見られず、蓋の裏側に BLE ビーコンを設置した場合では大きな変化が見られる。さらに指向性アダプタをつけた場合にはよりくっきりと電波強度に差が現れる。このようにして状態推定対象に合わせて BLE ビーコンの取り付け方を工夫し、状態変化によって電波強度に大きな変化が現れるようにし状態推定を行う。

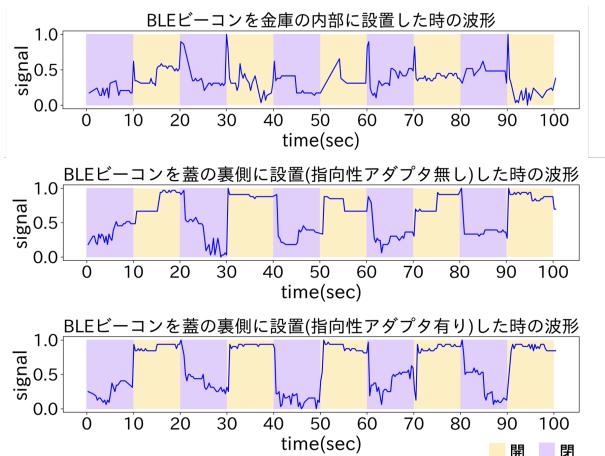


図 8 ビーコン取り付け位置毎の電波強度変化

3.3 状態推定アルゴリズム

本手法では BLE ビーコンから発せられる電波をスマートフォンで受信し、その受信強度の値から状態を推定する。図 9 は金庫の開閉を行ったときの電波強度の値に、移動平均を用いたローパスフィルタをかけて小さな揺らぎを除去したグラフである。

収集した電波強度の値を正規化し 0 から 1 の値に変換する。一時的な障害物があった場合や状態変化に際した人間の影響などにより電波強度にローパスフィルタでは除去しきれない揺らぎが発生する事があるため、梶ら [12] が提案している安定センシング区間という概念を利用し推定精度の高精度化を図る。安定センシング区間とは一定時間以上センシングが安定して行えている区間を指す。本手法は

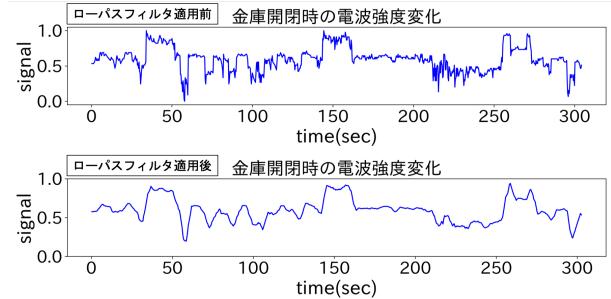


図 9 ローパスフィルタ適用前後の電波強度グラフ

データをスマートフォンで収集した後に適用可能なオフライン手法である。

3.3.1 安定センシング区間

本手法では推定対象物の移動も考慮するため、安定センシング区間の判定には移動平均を計算したのち閾値を用いて判定を行う。

物体が状態変化をせず移動した場合、徐々に電波強度は変化するため単純な閾値を用いた推定では長距離移動し電波強度が大幅に減衰した際に誤判定が起こってしまう。そこで取得したすべてのデータから数サンプルごとに移動平均を求め、ある値に着目した際にその値が直前の値から上限下限閾値の範囲内であり、かつ一定時間以上経過している場合に安定センシング区間とする。この時の上限・下限閾値を今回使用した BLE ビーコンの特徴や推定対象に合わせて定める。

図 10 は BLE ビーコンを遮蔽物のない状態で測定した電波強度のグラフであり、ここから BLE ビーコンの電波は周期的に電波強度の変化が見られる。この BLE ビーコン特有の周期的な強度変化により安定センシング区間の判定が不安定になるため、適切な閾値を設定する必要がある。対象の状態変化による電波強度の変化と BLE ビーコン特有の電波強度の変化を考慮して動的に閾値を設定する。

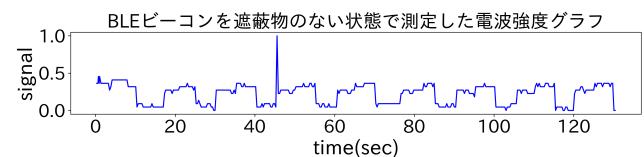


図 10 BLE ビーコンを遮蔽物のない状態で測定した電波強度グラフ

オフラインプログラムでは受信電波強度とその受信時間が記録されたファイルからデータを読み込み処理を行い状態を推定する。読み込んだ受信電波強度の数値は 0~1 の値に正規化し、ローパスフィルタをかけてノイズを取り除く。次に安定センシング区間を見つけるため受信電波強度から移動平均を算出する。時系列に並んだ移動平均データを走査し、次の値が予め設定しておいた閾値内に受信電波強度の値が収まっているか確認する。もし閾値を超えた場合は、超える直前の受信電波強度 $\pm X$ (X は任意の値) の

値を新しい閾値として設定する。これを繰り返し安定センシング区間の判定が終わったら、最後に見つけたそれぞれの安定センシング区間がネガティブな状態かポジティブな状態か判定を行う。判定は、各安定センシング区間の受信電波強度の平均値が受信電波強度の中央値に 0.1 を足した値より大きいか小さいかで判定を行う。

3.3.2 状態変化の推定

推定結果の状態をネガティブな状態とポジティブな状態の 2 つの状態とする。ポジティブな状態とは BLE ビーコンが外に出ていて電波の受信がしやすく、電波強度の値が高い状態の事を指す。具体的には金庫の開閉であれば開いている状態である。ネガティブな状態とは BLE ビーコンが外に出ておらず電波の受信が難しく、電波強度の値が低い状態の事を指す。具体的には金庫の開閉であれば閉じてある状態である。判定された安定センシング区間内の平均値をそれぞれ求め、すべての安定センシング区間の平均値の中央値より高いか低いかでネガティブポジティブの判定を行う。

4. 評価実験

本稿で提案した手法の推定精度を確かめるため、いくつかのモノへ BLE ビーコンを設置し評価実験を行った。BLE ビーコンを設置する対象は、冷蔵庫、金庫、座椅子とし、金庫と座椅子については移動を考慮した状態変化に対し推定精度を測定した。評価の方法は開閉などの状態変化をランダムな間隔で行い、その推定結果と正解ラベルを比べて正答率を算出して行う。

4.1 実験端末の選定

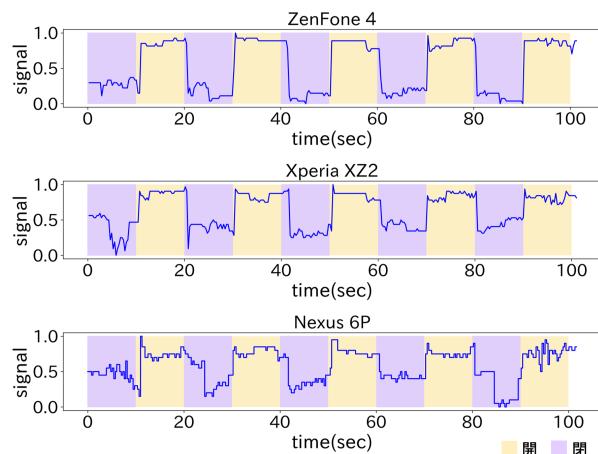


図 11 機種ごとの精度比較

Bluetooth のセンサ精度は端末毎に異なるため、実験に用いる端末は変化を正しく捉えられる端末を使うのが望ましい。そこで 3 機種を用意し、同一環境下で金庫の蓋の開閉を行い測定精度の比較を行った。今回用意した端末は Xperia XZ2, Nexus 6P, ZenFone 4 である。金庫開閉時の

電波強度変化を各端末で収集し、その波形を比較した結果を図 11 に示す。図の紫色の部分は蓋が閉まっている状態を黄色の部分は蓋が開いている状態を示している。3 機種の精度を比較した結果、Nexus 6P では全体的に小さなノイズが発生しているが ZenFone 4 と Xperia XZ2 ではそれが少ない。また、Xperia XZ2 と Nexus 6P は測定開始直後は測定値が安定せず正しく変化を捉えられていない。

本手法では電波強度の急激な変化と安定センシング区間の判定が重要となるため、測定ノイズが少なく電波を正確に捉えられる必要がある。そのためこの 3 機種のうち一番ノイズが少なく、正解ラベルと比べもっともらしい値を捉えられる ZenFone 4 を受信機として使用する。また、本研究では金庫などの移動を伴う比較的小さなモノにも BLE ビーコンを取り付けるため、使用する BLE ビーコンはできるだけ小さい方が望ましい。そのため使用する BLE ビーコンは、軽量・小型という理由からフォーカスシステムズ社の FCS13012 を使用する。

4.2 冷蔵庫の開閉における推定精度の測定

図 3、図 12 のようにセンサと受信機を設置して評価実験を行った。実験は日常の使用を模倣し、冷蔵庫のドアを開けて、中からペットボトルを取り出し、ドアを閉めるという動作をランダムな間隔で行い、その状態変化を捉えられるか評価を行った。

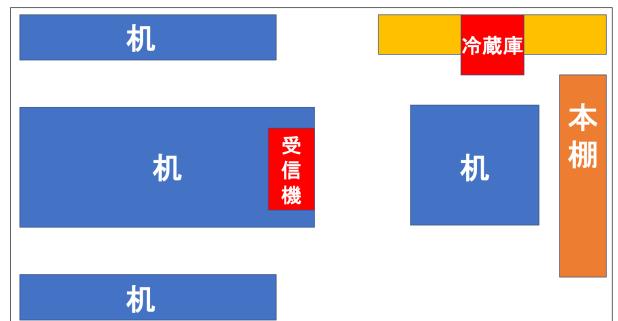


図 12 冷蔵庫と受信機の位置関係図

日常使いにおいて冷蔵庫を開ける動作時間は約 7 秒程度であるため本実験でもそれを模倣し、閉めている状態はランダムに 1 分から 5 分程度の時間を設ける。この時冷蔵庫が開いている状態も推定可能にするため安定センシング区間を判定する閾値はそれぞれ、値の閾値を ± 0.23 、時間の閾値を 2 秒に設定した。BLE ビーコンを扉の棚へ置いただけではあまり電波強度に変化が見られなかったため、電波強度の変化を大きくさせるよう 3.2 章で述べた指向性アダプタを取り付けた。推定結果を図 13 に、正解率の一覧を表 1 に示す。図 13 の白色の範囲は安定センシング区間ではない状態を、緑色の範囲はネガティブな状態（ドアが閉まっている状態）を、赤色の範囲はポジティブな状態（ドアが開い

ている状態)を示している。また、表1には各試行における正解率とその累計正解率、及び推定ラベルを張った区間のうち正解した区間の割合を示している。

同様の実験を3回行った結果1回だけ不正解があり、全体の正解率は98.0%となった。誤判定された400秒付近のグラフを見てみると他と比べて受信電波強度の変化が小さく、安定センシング区間と判定されていない。

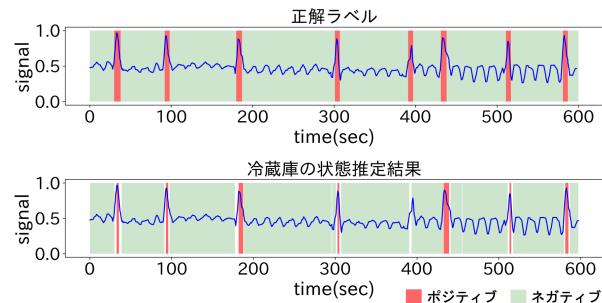


図13 冷蔵庫の状態推定結果グラフ

表1 冷蔵庫の開閉における状態推定精度

試行回数	正答率	正解数	不正解数
1	94.1%	16	1
2	100%	17	0
2	100%	17	0
回数でみた累計正解率		98.0%	
推定ラベルの正解割合		99.2%	

4.3 金庫の開閉における推定精度の測定

図4、図14のようにセンサと受信機を設置して評価実験を行った。金庫は図14に黒丸で示したように3箇所の場所に移動させて蓋の開閉を行い、推定中にモノの移動が行われても状態推定が可能かを確かめた。この時、金庫を開けている時間は約20秒程度であり、閉めた状態はランダムに30秒から2分程度継続させた。また、安定センシング区間を判定する閾値はそれぞれ、値の閾値を ± 0.23 、時間の閾値を4.5秒に設定した。

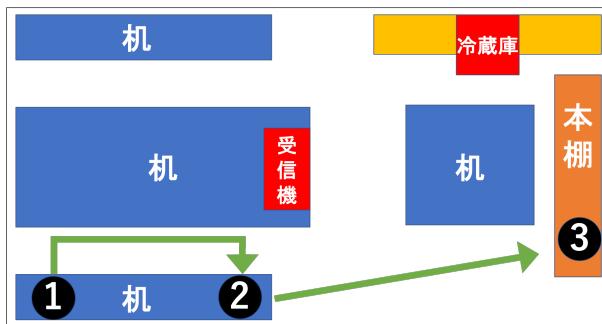


図14 金庫と受信機の位置関係図

推定結果を図15に、正解率の一覧を表2に示す。図15

の白色の範囲は安定センシング区間ではない状態を、緑色の範囲はネガティブな状態(蓋が閉まっている状態)を、赤色の範囲はポジティブな状態(蓋が開いている状態)を示しており、図中の番号は図14内の番号と対応している。また、表2には各試行における正解率とその累計正解率、及び推定ラベルを張った区間のうち正解した区間の割合を示している。

同様の実験を3回行った結果、N % の状態推定精度であった。正解ラベル通りの推定ができていなかった2番の場所での推定結果を見ると、蓋が閉まった後も数秒間蓋が開いていると推定されてしまっている。

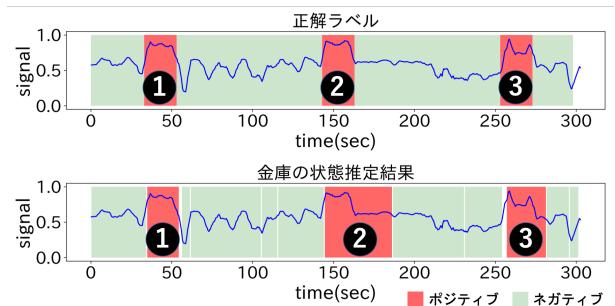


図15 金庫の状態推定結果グラフ

表2 金庫の開閉における状態推定精度

試行回数	正答率	正解数	不正解数
1	100%	7	0
2	100%	7	0
2	100%	7	0
回数でみた累計正解率		100%	
推定ラベルの正解割合		93.8%	

4.4 座椅子の着座における推定精度の測定

図5、図16のようにセンサと受信機を設置して評価実験を行った。座椅子に座っている時間として30秒から1分30秒程度を、座っていない時間として30秒から2分程度を設定した。推定結果を図17に、正解率の一覧を表3に示す。この時安定センシング区間を判定のための閾値はそれぞれ、値の閾値は ± 0.25 、時間の閾値は5秒に設定した。

表3 座椅子への着席における状態推定精度

試行回数	正答率	正解数	不正解数
1	100%	7	0
2	100%	7	0
2	100%	7	0
回数でみた累計正解率		100%	
推定ラベルの正解割合		98.9%	

図17の白色の範囲は安定センシング区間ではない状態を、緑色の範囲はネガティブな状態(人が座っている状態)

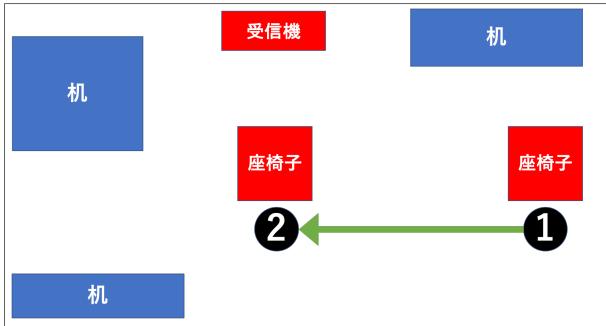


図 16 座椅子と受信機の位置関係図

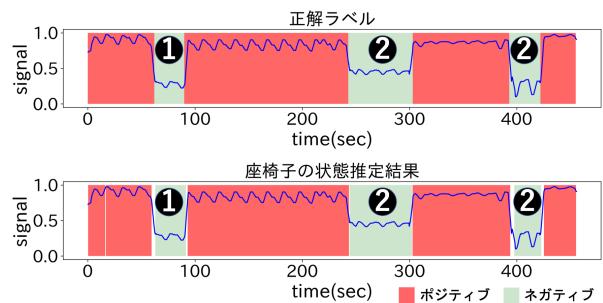


図 17 座椅子の状態推定結果グラフ

を赤色の範囲はポジティブな状態(人が座っていない状態)を示しており、図中の番号は図 16 内の番号と対応している。また、表 3 には各試行における正解率とその累計正解率、及び推定ラベルを張った区間のうち正解した区間の割合を示している。同様の行動を 3 回行った結果、N % の精度で状態推定を行う事ができた。

5. 評価実験の考察

評価実験の結果、冷蔵庫や金庫、座椅子ではそれぞれ N % 以上の精度で推定可能であった。冷蔵庫と金庫の実験で上手く推定出来なかった箇所では安定センシング区間の判定が上手くできていない箇所がほとんどであった。冷蔵庫や金庫の状態推定の一部では安定センシング区間の判定が上手くいっておらず、それにより推定結果も異なる。BLE ビーコン特有の周期的な電波強度の変化が安定センシング区間の判定に影響するため少し大きめの閾値を取った結果、電波強度の変化がこの閾値を超えない所があった。そのため状態が変化した後であっても前の状態が続いていると判定されてしまい誤判定が発生したと考えられる。安定センシング区間の判定に用いる閾値を見直す事により精度を高められるだろう。座椅子の状態変化時には受信電波強度が大きく変化した。人体は水分を含んでいるため電波をさえぎりやすいため人が座っていない時と座っている時の電波強度の変化が大きく、はっきりと差が出ていたためビーコン特有の周期的な変化に影響されず推定ができると考えられる。

本稿の評価実験の対象は金属や人体などでビーコンの電

波が遮られるため電波強度が大きく変化した。そのため本手法が適用できる。しかし電波をあまり遮らない材質のものであれば、状態変化が起きても電波強度に変化が現れないため本手法を適用できない。

6. まとめ

本稿では BLE ビーコンの電波強度を用いて日常の生活空間内の金庫や座椅子などのモノの状態推定を行う手法を提案した。これまでモノの状態推定には消費電力の監視や Wi-Fi の電波などが用いられてきたが、それらの手法は電気の通っていないモノや小型で移動が頻繁に行われるようなモノの状態推定には向きであった。そのため我々は BLE ビーコンを冷蔵庫や金庫といった物体内部に設置し、状態変化によって変化する BLE ビーコンの電波強度の変化に着目し状態推定を行う。

アルゴリズムに安定センシング区間という概念を利用し、移動も考慮したモノの状態推定を実現した。瞬間的な変化や人などの障害物の通過などにより電波の揺らぎが発生すると推定結果への影響が出ると考えられるため、安定センシング区間という概念を利用して電波強度が安定した状態での推定や移動も考慮した推定を行う。また、BLE ビーコンに指向性を持たせるアダプタを取り付けて電波強度変化の特徴を大きく変化させ、電波を通しやすい材質のモノであっても推定が行えるようにした。

評価実験では冷蔵庫や金庫、座椅子に BLE ビーコンを設置し日常での使用を模倣した開閉や着座動作を行い、推定精度を確かめた。冷蔵庫の開閉では N % の精度で、金庫の開閉では M %、座椅子の着座では M % の精度で推定が出来た。金庫や座椅子では移動を伴っていたが推定が可能であった。しかし電波強度の変化の具合により推定が不完全である部分もあるため、安定センシング区間の判定や状態判定のための閾値を見直し改善を図っていく。

今後の課題として、現状では安定センシング区間の判定に用いる閾値は手動で設定しなければならず、適切な値を探すためにあらかじめ何度か試行させる必要がある。よってアルゴリズムを改良して自動で適切な閾値を設定する手法の確立を目指す。

参考文献

- [1] 『平成 29 年版 情報通信白書』：入手先 <<http://www.soumu.go.jp/johotsusintoeki/whitepaper/ja/h29/pdf/n3300000.pdf>>， p.125, (参照 2019 年 4 月 24 日)。
- [2] 前川拓也, 柳沢豊, 岡留剛. Tag and Think : センサネットワークを前提としたモノ自身とその状態の推定, 情報処理学会研究報告ユビキタスコンピューティングシステム(UBI), Vol. 2007, No. (14(2007-UBI-013)), pp. 211-218, 2007.
- [3] 上田泰嵩, 梶克彦, 河口信夫. 細粒度電力センシングに

- による浪費電力の検出、マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム論文集, pp. 1817-1821, 2010.
- [4] 山田祐輔, 加藤丈和, 松山隆司. スマートタップネットワークを用いた家電の電力消費パターン解析に基づく人物行動推定, 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol. 2011-UBI-31, No. 4, pp. 1-6, 2011.
- [5] 尾原和也, 前川卓也, 村上友規, アベセカラヒランタ. Wi-Fi チャネル状態情報を用いた教師無し学習によるドアの開閉検知手法, 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol. 2018-UBI-60, No. 1, pp. 1-7, 2018.
- [6] LINE 公式ブログ: 入手先 <<http://official-blog.line.me/ja/archives/73098915.html>> (参照 2019 年 4 月 24 日).
- [7] 堀川三好, 工藤大希, 岡本東, 村田嘉利. 移動するモノを対象とした Internet of Things の提案, 第 80 回全国大会講演論文集, Vol. 2018, No. 1, pp. 471-472, 2018.
- [8] 浦野健太, 廣井慧, 梶克彦, 河口信夫. 配布型 BLE タグとタンデムスキャナを用いた屋内位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 60, No. 1, pp. 58-75, 2019.
- [9] 渡邊洸, 高橋雄太, 大坪敦, 藤本まなと, 荒川豊, 安本慶一. BLE ビーコンと反響音センシングによる屋内スポット推定, マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2018 論文集, Vol. 2018, pp. 620-626, 2018.
- [10] Hsi-Yuan Tsai, Guan-Heng Chen, Huang-Chen Lee. Using low-cost, non-sensor-equipped BLE beacons to track people's movements, IPSN '17 Proceedings of the 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, pp. 291-292, 2017.
- [11] 池田翔太, 梶克彦. BLE ビーコンをパカパカ, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol. 2016, pp. 899-904, 2016.
- [12] 梶克彦, 河口信夫. 安定センシング区間検出に基づく 3 次元歩行軌跡推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 1, pp. 12-24, 2016.
- [13] Rachael Purta, Aaron Striegel. Estimating dining hall usage using bluetooth low energy beacons, UbiComp '17 Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers, pp. 518-523, 2017.
- [14] Subham De, Shreyans Chowdhary, Aniket Shirke, Yat Long Lo, Robin Kravets, Hari Sundaram. Finding by Counting: A Probabilistic Packet Count Model for Indoor Localization in BLE Environments, WiNTech '17 Proceedings of the 11th Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation CCharacterization, pp. 67-74, October 20 - 20, 2017.
- [15] 梶岡慎輔, 山本大介, 打矢隆弘, 斎藤彰一, 松尾啓志, 内匠逸. BLE ビーコンを用いた位置推定による 打刻システムの運用と課題, 研究報告インターネットと運用技術 (IOT), Vol.2016-IOT-35, No. 12, pp.1-7, 2016.