

# 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

渡邊 洸<sup>1</sup> 高橋 雄太<sup>1</sup> 大坪 敦<sup>1</sup> 藤本 まなと<sup>1</sup> 荒川 豊<sup>1,2</sup> 安本 慶一<sup>1</sup>

**概要：**日常的に人々の健康状態を客観的に評価する指標としてライフログが注目されている。従来のライフログアプリケーションはGPSによる位置情報を取得する屋外向けのサービスが多い中、近年では屋内位置推定のためのデバイスや手法を利用した屋内向けのサービス開発も進んでいる。GPSによる屋外位置情報は「職場」や「自宅」といった行動エリアの情報に変換されることが多く、位置精度の高さは求められていない。そのため、屋内向けライフログサービスにおける位置情報も「学生部屋」や「教授室」といった、屋内スポットの識別のみが求められている。奈良先端科学技術大学院大学では、学内ユーザ向けのライフログアプリケーションの開発促進のため、2017年10月頃から構内に約100個のBLEビーコンを設置している。従来研究に多い、屋内の位置精度向上ではなく、少数ビーコンを用いた屋内の生活行動スポットの推定を目標としている。しかしながら、少数ビーコンによるスポット推定は難しい。そこで、本研究では、少数ビーコンによる屋内スポット推定に加え、屋内環境情報である反響音の取得による二段階スポット推定手法を提案する。提案手法の有効性を検証するため、評価実験を行った。その結果、反響音を併用する提案手法は、RSSI値のみでは識別が難しい屋内スポットの判別に効果があることが示された。

## Indoor Spot Estimation with BLE Beacons and Sound Echo Sensing

KO WATANABE<sup>1</sup> YUTA TAKAHASHI<sup>1</sup> ATSUSHI OTSUBO<sup>1</sup> MANATO FUJIMOTO<sup>1</sup>  
YUTAKA ARAKAWA<sup>1,2</sup> KEIICHI YASUMOTO<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年、人々の健康状態、QOL (Quality Of Life)、生産性を客観的かつ日常的に評価するために、継続的なライフログ収集が重要視されている。ライフログの中でもユーザの位置情報は重要であり、スマートフォンを用いた多くのアプリケーションは位置情報を収集している [1][2][3]。位置情報は、主にユーザの「生活リズム」や「生活行動」の取得を目的として利用される。そのため、ライフログにおける位置情報は位置測位精度の高さよりも、位置情報から得られる日常生活での「行動エリア」の認識が重要となっている。

ライフログアプリケーションの多くは、GPS (Global Positioning System) を用いて位置情報を取得している。GPSの電波は物体に当たると反射、屈折するため、ユーザが屋内にいる際の位置情報の取得に適していない。従っ

て、ライフログアプリケーションのほとんどは屋外でのマクロなライフログ情報を収集している。しかし、最近では「宅内における高齢者の日常生活行動 (ADLs: Activities of Daily Living) の取得による見守りサービス [4]」や「デイケアセンターにおける高齢者の行動履歴自動生成システム [5]」といった、屋内での位置情報の取得による、ミクロなライフログの収集も行われるようになってきている。この背景には、屋内位置情報を取得するデバイスや手法の発展の影響が大きい。

屋内位置推定には、Bluetooth [6]、WiFi [7]、磁場 [8]、赤外線 [9]、慣性航法装置 (INS) [10] といった、カメラを利用しない、プライバシーを考慮した推定手法がいくつか提案されている。その中でも、Bluetoothを用いた Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコンは、WiFi よりも位置推定に適し [11]、低消費電力、なおかつスマートフォンで継続的に電波取得が行えるため様々な場面で用いられている。

BLE ビーコンの利用例として、主に「ナビゲーション」や「出欠管理」に用いられることが多い。国土交通省によると、2020年の東京オリンピックの開催をきっかけに、屋

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
Nara Institute of Science and Technology  
<sup>2</sup> JST さきがけ  
JST PRESTO

内向けナビゲーションシステムの開発を目的として、成田空港、日産スタジアム、新宿駅周辺、東京駅周辺に BLE ビーコンの設置が予定されている [12]。また、名古屋工業大学では、「BLE 打刻システムの開発と運用」を目的として、2016 年 4 月に約 1600 個の BLE ビーコンが学内に設置された [13]。このような「ナビゲーション」や「出欠管理」といった用途では、ユーザの位置情報をリアルタイムに、精度高く推定する必要がある。そのため、これまで行われてきた屋内位置推定に関する研究は位置測位精度の向上を目的としたものが多かった。その手法の多くは複数のビーコンを利用した三辺測量法 [14] や fingerprinting [15] といった手法であり、導入コストの大きさがデメリットとして考えられている。

奈良先端科学技術大学院大学（以降、奈良先端大）では、学内における不特定多数のユーザのライフログ収集を目的として、2017 年 10 月頃から学内に約 100 個のビーコンを設置している。これまでの BLE ビーコンの用途とは異なり、本システムは、高い位置測位精度ではなく、「学生部屋」や「教員部屋」といった屋内の部屋単位（以降、屋内スポット）の識別結果を必要としている。また、ライフログの収集を行う上で、長期的なデータの収集が望ましく、長期間におよぶ実験を考慮したビーコンの選択が求められる。その他に、不特定多数の被験者を確保するためにユーザに必要なデバイスを最小限にすることも要件として考慮する。前述した要件を満たす条件とその課題を以下に示す。

- 屋内スポット推定における要件：

- R1. 高い位置精度を必要としないため、コスト削減のために最小限のビーコンのみを設置すること。
- R2. 長期的な運用を実現するために、電池交換が不要な電源タップを利用した USB ドングル型の超小型ビーコンを使用すること。
- R3. 不特定多数のユーザ確保のため、BLE ビーコンとスマートフォンのみを利用すること。

- 屋内スポット推定の課題：

- C1. 安価なビーコンの電波は指向性が無いため、最小限の BLE ビーコンでは電波強度 (RSSI) が類似しているスポットの推定が難しい。
- C2. 設置するビーコンは電源タップの所在に依存し、設置箇所の自由度が低い。
- C3. スマートフォンの機種によって取得可能なデータが変化する。

要件 R1-R3 を満たし、かつ、課題 C1-C3 の解決が可能な、BLE ビーコンを用いた屋内スポット推定を目指す。上記の要件と課題を考慮すると、ユーザが所持するデバイスは BLE ビーコンではなくスマートフォンの方が制約条件が少ないため、今回はスマートフォンをユーザ端末として使い識別精度の向上を目指す。

本稿では、屋内向けライフログサービスのための BLE

ビーコンと反響音を用いた二段階屋内スポット推定手法を提案する。本手法は、BLE ビーコンの電波強度によって屋内スポット推定を行い、その後 BLE ビーコンでは推定精度の低かったスポットにおいて反響音の取得を行うことで、屋内スポットの推定精度の向上を実現する。

本手法の有効性を検証するため、評価実験を行った。まずはじめに、複数もしくは 1 つの BLE ビーコンから得られる電波強度を用いて、7 箇所の屋内スポット推定精度の評価を行った。その結果、複数の BLE ビーコンが設置された場合、全ての屋内スポットにおいて 90 % 以上の識別精度を達成したが、1 つの BLE ビーコンのみ設置されている数カ所において識別精度が低くなることが確認された。そこで、識別精度の低いスポットに対して、反響音の取得による屋内スポット推定を行った結果、いくつかのパターンにおいて誤認識が発生するものの、比較的高精度に屋内スポットを推定できることがわかり、二段階屋内スポット推定手法の有効性が示された。

本稿の構成は以下の通りである。第 2 章では、屋内の環境情報の収集による位置推定手法に関する従来研究について述べ、それらの手法を利用するメリットとデメリットについて考察する。第 3 章では、提案手法の全体像、提案手法の技術的な実現方法を述べる。第 4 章では、実験環境と方法について述べ、第 5 章で結果の評価を行う。最後に、第 6 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 関連研究

本章では、屋内の環境情報を用いた屋内位置推定に関する既存研究について述べる。

### 2.1 LED 照明を用いた位置推定

Gligoric らは、室内の照明から出力される Light Emitting Diodes (LEDs) の信号を用いた屋内位置推定手法を提案している [16]。提案手法の利用シーンとしては、オープンスペースオフィスや工場のような LED 照明が使われている広い屋内施設を想定している。彼らは VLC (Visual Light Communication) と呼ばれる手法を用いて屋内位置推定を行っている。具体的には、LED 照明から出力される信号の可視光における波長の違いを利用することで屋内のどこの照明かを特定し、その後周辺の照明を含め複数の LED 照明からの得られた距離 (LOS: Line-Of-Sight) の情報を合算することで位置推定を行う手法である。本手法は、必要なデバイスが最小限で導入コストがかからないことが最大のメリットである。一方で、照明が点いていない場合、施設が LED 照明を使用していない場合に手法が利用できないことがデメリットとして挙げられる。他にも本研究の要件である、被験者のスマートフォンを利用できることを考慮すると、iPhone の輝度センサでは可視光の周波数の取得が難しいことや、機種によって輝度値を取得できないこと

が問題点となる。

## 2.2 気圧情報を用いた位置推定

Xia らは、ユーザの持つスマートフォンに内蔵された気圧センサから得られた気圧情報と、屋内に配置した複数のバロメータから得られた数値をクラウド上で比較することによるフロアの位置推定手法を提案した [17]。この Multi-reference barometer floor positioning (MBFP) 手法は、クラウド上でスマートフォンのセンサ値と室内に置かれたバロメータのセンサ値を比較するため、時刻によって変動しやすい気圧でもリアルタイムに位置推定の特徴量として扱えることがメリットである。しかしながら、屋内スポットの推定を行う上で、必要となるバロメータが各部屋に配置する必要があることから、導入コストがデメリットとして挙げられる。他にも全てのスマートフォンに気圧センサが搭載されていないため、デバイス非依存でないことがデメリットとして挙げられる。

## 2.3 BLE ビーコンと PDR を用いた位置推定

Li らはスマートフォンに内蔵された加速度とジャイロセンサを用いた位置推定の従来手法である Pedestrian-Dead-Reckoning (PDR) と BLE ビーコンを用いた屋内位置推定手法を提案している [18]。PDR は基準となる位置からの移動距離と角度を計算することによってユーザの位置を推定する手法である。Li らは従来の PDR に加え、BLE ビーコンをランドマークとして屋内の数カ所に配置することで、これまで生じていた移動誤差を各所で補正する手法を提案した。Li らの報告によると 15m 間隔に 1 つのビーコンを設置することで高い位置測位精度を達成できることがわかっている。そのため、少ないビーコンによる位置推定が可能であることが手法のメリットとして挙げられる。しかし、本手法はスマートフォンの電源が切れて再度起動した際の位置推定が難しいことや加速度・ジャイロセンサがスマートフォンによっては内蔵されていないため、デバイス非依存ではないことがデメリットとして挙げられる。

## 3. 屋内スポット推定の提案手法

本章では、本研究での提案手法、提案手法に用いる BLE ビーコン、スマートフォンによる反響音の取得方法について述べる。

### 3.1 提案手法について

第 2 章で述べた、関連研究を踏まえ、本研究では BLE ビーコン、スマートフォンによる反響音を用いた室内スポット推定手法を提案する。本手法では、まず、BLE ビーコンの信号をもとに機械学習を用いて室内スポット推定を行い、利用者がいる可能性の高い室内スポットを選出する。使用する機械学習モデルが確率が出力可能なモデルであ

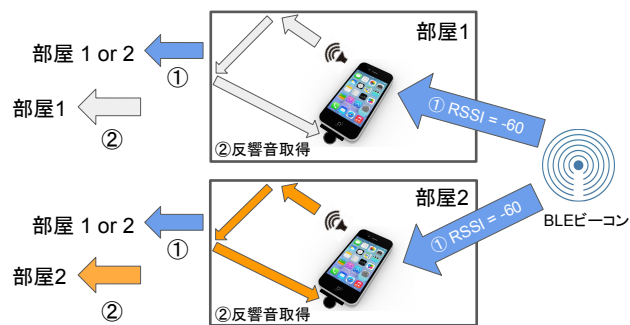


図 1: 提案手法の概略図

ば、ビーコンのみでの推定が難しいことを判断できるため、1 つのスポットの識別確率が 90% 以上でない場合は、反響音を用いた 2 段階目のスポット推定を行う。2 段階目の屋内スポット推定では、室内の特徴を直接収集できることから反響音を用いることにした。スマートフォンから非可聴音を発信し、その反響音の取得し、スポット推定に利用する。また、音を利用するメリットとして、スマートフォンに内蔵されたマイクとスピーカが端末の種類に依存しないことが考えられる。ここで、提案手法の推定の流れを示す。

- (1) BLE ビーコンから得られる電波強度によって屋内スポット推定を行なう。
- (2) 推定の識別確率が 90% を下回った場合のみ、BLE ビーコンの識別から得られるスポットの候補を導出する。
- (3) 反響音の取得を行い、BLE ビーコンによって推定されたスポット候補から 1 つに絞り込む。

### 3.2 BLE ビーコンから得られるデータの扱いについて

本研究では、株式会社エクスフロンティアによって開発された超小型 USB ドングルサイズのビーコンを使用する [19]。設置された BLE ビーコンから出力される固有 ID (UUID, Major, Minor) と RSSI の値は、ユーザのスマートフォンで継続的に取得する。取得したデータのうち、固有 ID はビーコンの設置箇所を把握するために用い、RSSI の数値はそのビーコンからの距離を取得するために用いる。また、ビーコン側の出力のタイミングを考慮し、スマートフォンでは、1Hz 間隔でビーコンからの情報を継続的に取得するようにする。

### 3.3 スマートフォンによる反響音の取得方法について

スマートフォンより非可聴音の発信と録音を行う。部屋の構造や設置物によって反響音が異なるため、この反響度合いの違いを機械学習によって学習・認識させることによってスポット (部屋など) の推定を行う。

#### 3.3.1 非可聴音の発信

人に聞こえない、かつスマートフォンによって発信と録

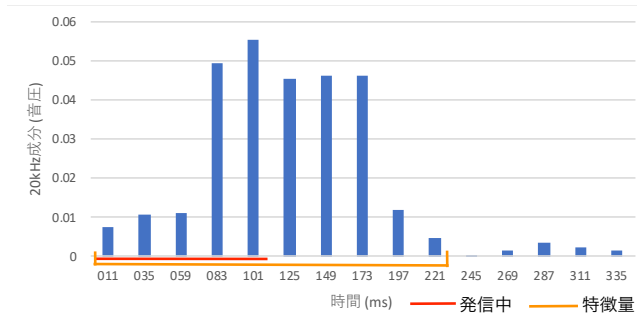


図 2: 特徴量として使用する反響音 (例)

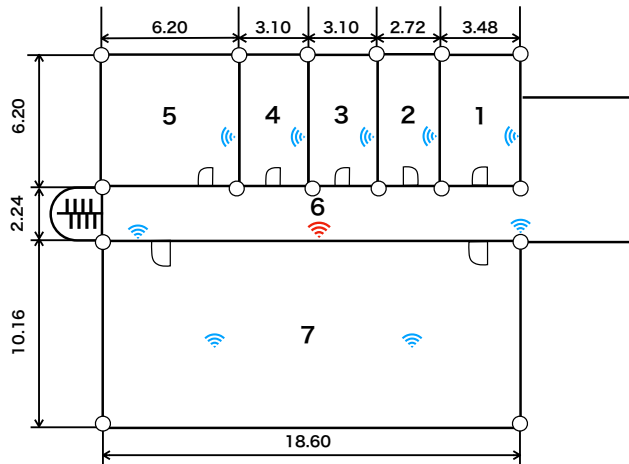


図 3: 実験環境の見取図

音が可能な 20kHz 正弦波を用いる。発信時間は、反響音の特徴を取得するのに十分な時間である 0.1 秒とする。

### 3.3.2 反響音の取得と特徴量の抽出

マイクより収録した音声データから、随時離散フーリエ変換を行い反響音である 20kHz 成分のみを取り出す。音声データのサンプリングレート (1 秒あたりのサンプル数) は 44100Hz であり、1024 サンプル毎にフーリエ変換することによって、0.1 秒間ごとに 4~5 回、20kHz 成分を取得することができる。本実験では、図 2 に示すように、非可聴音の発信タイミングから反響音が消えるまでの  $10 \times 1024$  サンプル区間 (約 0.2 秒分) の 20kHz 成分を特徴量として利用する。

## 4. 実験方法

本章では、提案手法の有用性を検証するための実験環境と実験内容について述べる。

### 4.1 実験環境について

本研究の実験は、奈良先端大・情報科学研究科 A 棟 4 階にて行なった。図 3 に実験環境の見取り図を示す。図中の赤と青の電波マークは BLE ビーコンの設置箇所を示し、赤色のビーコンが奈良先端大によって設置された BLE ビーコン、青色の BLE ビーコンは実験のために新たに置いた



図 4: スマートフォンの配置箇所

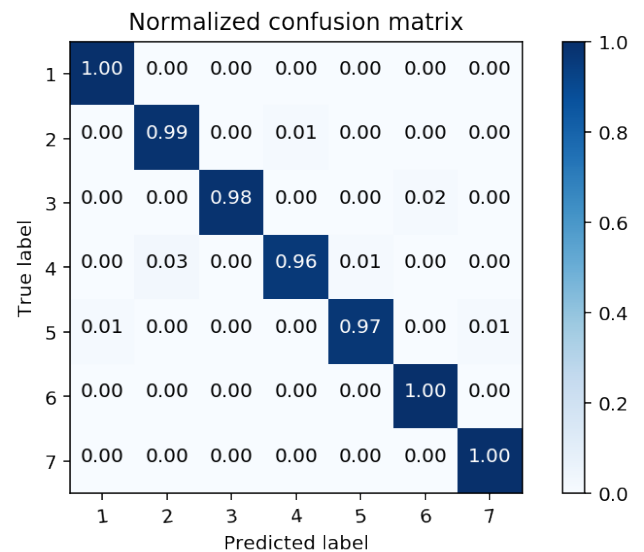


図 5: 複数の BLE ビーコンによる屋内スポット識別結果の混同行列

ビーコンとなっている。青色のビーコンは、提案手法の結果との精度比較のため、新たに設置した。

### 4.2 実験内容

本実験では、図 4 のように、スマートフォンを机や椅子に置いた状態でない、識別する部屋は全部で 7 箇所となっている。実験では、スマートフォンを各部屋に 5 分間ずつ机の上に置き、各部屋に対して 300 サンプル分の BLE ビーコンのデータ収集を行なった。反響音は、識別率の低い屋内 1 箇所につき、計 250 秒間 (計 500 サンプル分) の屋内における反響音データの収集を行なった。

## 5. 評価結果

本章では、まずはじめに、BLE ビーコンによる屋内スポット推定の結果を示す。その後、BLE ビーコンによる識別率が 90 % を下回った箇所において、反響音による屋内スポット推定を行ない、提案手法の有効性を評価する。

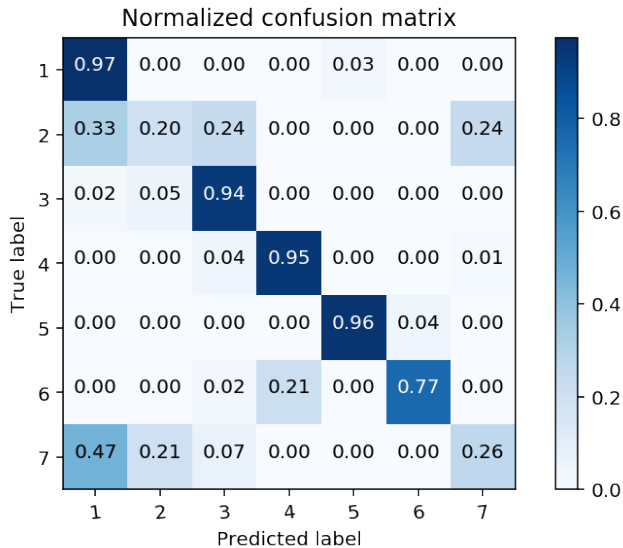


図 6: 1つの BLE ビーコンによる屋内スポット識別結果の混同行列

### 5.1 BLE ビーコンによる屋内推定結果

本実験では、BLE ビーコンから得られた RSSI 値に SVM (Support Vector Machine) を適用し、屋内スポットの識別精度を求めた。

複数の BLE ビーコンを設置した場合、図 5 に示すように、識別精度は全てのスポット推定において 90 % を上回った。これは、推定したい各屋内スポットにビーコンを設置していたため、最も近いビーコンから得られる電波強度が高く、障害物が少なかったことが高い認識精度につながったと考えられる。

一方、BLE ビーコンが 1 つのみ設置されている場合は、図 6 に示すように、複数のビーコンを設置した場合と比較して、スポット推定の精度が大幅に下がり、数カ所において推定精度が 90 % を下回った。これは、ビーコン 1 個の場合、RSSI の値のみが特徴量として与えられるため、電波強度の類似したスポットや環境の変化による受信電波強度の変化に大きく影響を受けたと考えられる。90 % 以下の精度となったのは、部屋 2, 6, 7 で、特に部屋 2 と 7 での識別率は 30% を下回る結果となった。BLE ビーコンの電波強度はビーコンとスマートフォンとの間の壁や人物などの障害物によって大きく変化してしまう。そのため、人通りの多い、「秘書室」と「学生室」に相当する部屋 2 や部屋 7 は、電波強度に大きな変動があったと考えられる。そこで、提案手法である反響音を用いた屋内スポットの 2 段階認識を適用し検証する。

### 5.2 反響音による推定結果

BLE ビーコンによる推定結果のうち、識別精度が 90 % 以下であった 3 つの部屋 (2, 6, 7) について、反響音による識別を行った。図 6 に示すように、部屋 2 においては、部

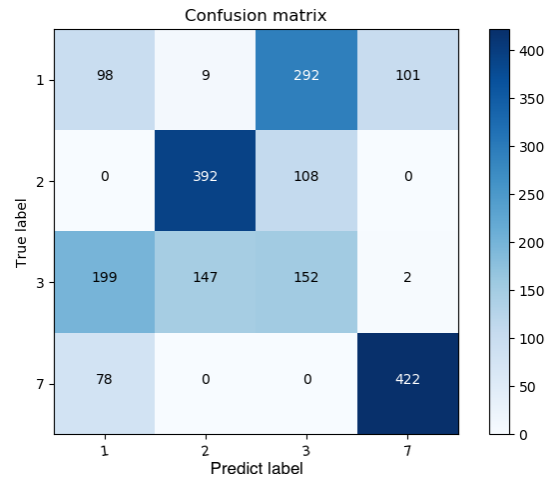


図 7: 反響音による部屋 1, 2, 3, 7 の識別結果の混同行列

表 1: 反響音による部屋 1, 2, 3, 7 の識別結果

部屋	適合率	再現率	F 値
1	0.26	0.20	0.22
2	0.72	0.78	0.75
3	0.28	0.30	0.29
7	0.80	0.84	0.82
平均	0.51	0.53	0.52

屋 1, 3, 7 に誤判別されていることが見て取れ、部屋 7 においては、部屋 1, 2, 3 に誤判別されていることが見て取れる。そのため、部屋 2 と部屋 7 に関しては、部屋 1, 2, 3, 7 において反響音による識別を行うものとする。次に、部屋 6 においては、図 6 に示すように、部屋 3, 4 に誤判別していることが見て取れる。そのため、部屋 6 に関しては、部屋 3, 4, 6 において反響音による識別を行うものとする。

反響音は各部屋において 5 箇所測定し、1 回の測定につき 20kHz 音サンプルを 100 個取得した。得られたサンプルを 3 層ニューラルネットワークを用いて学習・識別し、leave-one-out 交差検証を用い識別精度を求めた。

#### 5.2.1 部屋 1, 2, 3, 7 の識別結果

図 7 に部屋 1, 2, 3, 7 の識別結果の混同行列を示し、表 1 に適合率、再現率、F 値を示す。識別結果から、平均 F 値: 52% を達成しているが、部屋によっては識別精度が大きく異なっていることがわかる。特に、部屋 1 は部屋 3 に誤判別されており、部屋 3 は部屋 1 と誤判別されているパターンが多く見受けられる。これは部屋 1, 3 の室内の構造や物の配置状況が似通っていたためと考えられる。また、部屋 2 においては、タンスやソファなどの物が置いてあり、部屋 7 においては、他の部屋と比較して非常に広い空間であり、反響音に大きな違いが生じたため、識別精度が比較的高くなったと考えられる。

#### 5.2.2 部屋 3, 4, 6 の識別結果

図 8 に部屋 3, 4, 6 の識別結果の混同行列を示し、表 2 に適合率、再現率、F 値を示す。この 3 部屋においては、平均



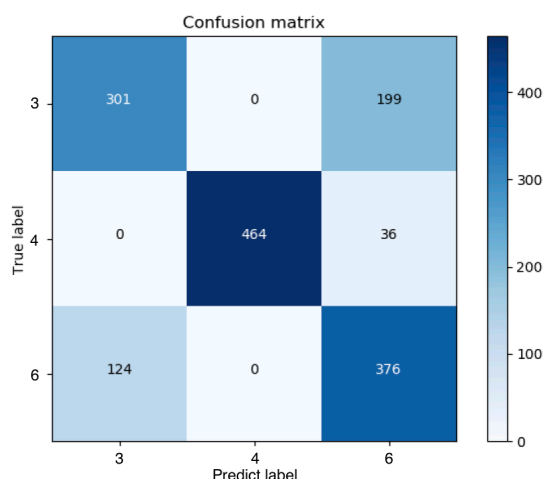


図 8: 反響音による部屋 3, 4, 6 の識別結果の混同行列

表 2: 反響音による部屋 3,4,6 の識別結果

部屋	適合率	再現率	F 値
3	0.71	0.60	0.65
4	1.00	0.93	0.96
6	0.62	0.75	0.68
平均	0.77	0.76	0.76

F 値：76%の識別精度を達成した。特に、部屋 4 に関しては、F 値：96%と高い識別精度を達成でき、部屋の特徴を正確に識別できていることがわかる。しかしながら、部屋 3 は部屋 6 に誤判別されていることが見て取れ、部屋 6 は部屋 3 に誤判別されているパターンも一定数見て取れる。

部屋 4 に関しては、書類棚やソファなども設置されいるため、他の部屋と比較して特徴が現れやすいこともあり、高精度に識別できたと考えられるが、部屋 3（もしくは部屋 6）に関しては、物がほとんどなく、今回測定した部屋 6（もしくは部屋 3）と比較的類似した構造になっていると考えられるため、反響音も似たようなものとなった結果、誤判別が一定数発生したと考えられる。

### 5.2.3 考察

以上の識別結果より、部屋によって識別精度が大きく変化することが明らかになった。これは音の反響具合が部屋によってはあまり変化がない場合があることに加え、機械学習の入力として用いている反響音の特徴量が 10 個であり、細かな反響音の違いが学習できていない可能性が考えられる。そのため、より識別精度を向上させるには、反響音の取得時間を長くして特徴量を増やす他、部屋ごとに特徴のある環境音も合わせて特徴量として使用することが挙げられる。

## 6. おわりに

本稿では、屋内向けライフログサービスのための BLE ビーコンと反響音を用いた二段階屋内スポット推定手法を提案した。具体的には、本手法は、BLE ビーコンの電波強

度によって屋内スポット推定を行い、その後 BLE ビーコンでは推定精度の低かったスポットにおいて反響音の取得し、屋内スポット推定を行なった。本手法の検証実験として、まずはじめに複数もしくは 1 つの BLE ビーコンから得られる電波強度を用いて 7 箇所の屋内スポット推定精度の評価を行なった。その結果、複数の BLE ビーコンが設置された場合は、全ての屋内スポットにおいて 90 % 以上の識別精度を達成したが、1 つの BLE ビーコンのみ設置されている場合は、数カ所において識別精度が低い場所が確認された。そこで、識別精度の低いスポットに対して、反響音の取得による二段階屋内スポット推定手法を適用することにより、いくつかのパターンにおいて誤認識が発生するものの、比較的高精度に屋内スポットを推定できることがわかった。その結果、本研究において、反響音を特徴量とする二段階屋内スポット推定手法を用いることの有効性が示された。

今後の課題として、二段階認証時に取得した反響音の特徴量のみでは、細かな反響音の違いが取得できていなかったことが本研究から明らかとなったため、反響音の取得時間を長くして特徴量を増やすなどの工夫を行うことや、部屋ごとに特徴のある環境音も合わせて取得することで屋内スポットの推定精度の向上を目指すことが挙げられる。また、BLE ビーコンによる屋内スポット推定精度が低い場所の傾向は分かっておらず、どのような場面において反響音の取得が有効であるかの検証が必要である。

謝辞 本研究の一部は、JST さきがけ「行動認識と行動介入による情報駆動型社会システムの実証」(16817861) の支援により実施した。

## 参考文献

- [1] ProtoGeo: Moves, <https://moves-app.com/>.
- [2] レイ・フロンティア株式会社: SilentLog, <https://silentlog.com/ja/>.
- [3] ソニーモバイルコミュニケーションズ株式会社: Lifelog, <https://www.sonymobile.co.jp/myxperia/app/lifelog/>.
- [4] 佐土原健: 日常行動識別のための文字列カーネルを用いた時系列データの分節, 人工知能学会全国大会論文集, Vol. 28, pp. 1-4 (2014).
- [5] 藤本まなと, 駒井清顕, 荒川 豊, 諏訪博彦, 柏本幸俊, 安本慶一: デイケアセンターにおける高齢者の行動履歴自動生成システムの開発, 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. 1504-1509 (2016).
- [6] Danis, F. S. and Cemgil, A. T.: Model-Based Localization and Tracking Using Bluetooth Low-Energy Beacons, *Sensors*, Vol. 17, No. 11, p. 2484 (2017).
- [7] Rizos, C., Dempster, A. G., Li, B. and Salter, J.: Indoor positioning techniques based on wireless LAN (2007).
- [8] De Angelis, G., Pasku, V., De Angelis, A., Dionigi, M., Mongiardo, M., Moschitta, A. and Carbone, P.: An indoor AC magnetic positioning system, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 5, pp. 1267-1275 (2015).

- [9] Hevesi, P., Wille, S., Pirkel, G., Wehn, N. and Lukowicz, P.: Monitoring household activities and user location with a cheap, unobtrusive thermal sensor array, *Proceedings of the 2014 ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing*, ACM, pp. 141–145 (2014).
- [10] Dehghanian, V. and Lowe, M.: Rss-ins integration for cooperative indoor positioning, *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2016 International Conference on*, IEEE, pp. 1–7 (2016).
- [11] Zhao, X., Xiao, Z., Markham, A., Trigoni, N. and Ren, Y.: Does bluetooth measure up against wifi? a comparison of indoor location performance, *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference; Proceedings of, VDE*, pp. 1–6 (2014).
- [12] 国土交通省: 報道発表資料, <http://www.metro.tokyo.jp/tosei/hodohappyo/press/2016/11/25/documents/2511.pdf> (2016).
- [13] 榎輔梶岡, 大介山本, 隆弘打矢, 彰一齋藤, 啓志松尾, 逸内匠: 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, 技術報告 12, 名古屋工業大学情報基盤センター, 名古屋工業大学情報基盤センター, 名古屋工業大学情報基盤センター, 名古屋工業大学情報基盤センター, 名古屋工業大学情報基盤センター, 名古屋工業大学情報基盤センター (2016).
- [14] Rida, M. E., Liu, F., Jadi, Y., Algawhari, A. A. A. and Askourih, A.: Indoor location position based on bluetooth signal strength, *Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference on*, IEEE, pp. 769–773 (2015).
- [15] Benaissa, B., Hendrichovsky, F., Yishida, K., Koppen, M. and Sincak, P.: Phone Application for Indoor Localization Based on Ble Signal Fingerprint, *New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2018 9th IFIP International Conference on*, IEEE, pp. 1–5 (2018).
- [16] Gligoric, K., Ajmani, M., Vukobratovic, D. and Sinanovic, S.: Visible Light Communications Based Indoor Positioning via Compressed Sensing, *arXiv preprint arXiv:1805.01001* (2018).
- [17] Xia, H., Wang, X., Qiao, Y., Jian, J. and Chang, Y.: Using multiple barometers to detect the floor location of smart phones with built-in barometric sensors for indoor positioning, *Sensors*, Vol. 15, No. 4, pp. 7857–7877 (2015).
- [18] Li, J., Guo, M. and Li, S.: An indoor localization system by fusing smartphone inertial sensors and bluetooth low energy beacons, *Frontiers of Sensors Technologies (ICFST), 2017 2nd International Conference on*, IEEE, pp. 317–321 (2017).
- [19] 株式会社エクスフロンティア: BeaconUSB, <http://exfrontier.co.jp/products/beacon/>.