

環境変化を考慮したBluetoothビーコンに基づく デバイスフリー屋内測位機構

The Device-free Localization System based on Bluetooth Beacons
Considering the Environmental Changes

杉野 恭兵^{*1}
Kyohei Sugino

大園 忠親^{*1}
Tadachika Ozono

新谷 虎松^{*1}
Toramatsu Shintani

^{*1}名古屋工業大学大学院情報工学専攻

Department of Computer Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

Device-free Indoor Localization is important to detect abnormality of elderly people of distant place. Bluetooth beacons have two advantages; cheap and driving for long time without exchange of batteries. Therefore, we can set its more flexibly than other devices, e.g. camera devices. We propose a Device-free Localization (DFL) method using multiple Bluetooth beacons. Existing DFL techniques are influenced by surround environment. To adapt DFL techniques to environment, we applied obtained data clustering by the unsupervised learning. We verified the efficacy of the proposed method by experiments, and we show that our method realized DFL with 95% by the unsupervised learning.

1. はじめに

ユーザがスマートフォンなどの測位用端末を携帯する必要のないデバイスフリー測位 (Device-free Localization: DFL) が、屋内でのユーザ測位に有用であるため注目されている [Pirzada 14]。一般的に、ユーザが測位用端末を携帯することを想定した屋内測位手法は、ショッピングモールなどの施設でユーザにサービスを提供することに適している。しかし、在宅しているユーザは測位用端末を携帯せずに屋内を移動するので、屋内ではデバイスフリーな測位が望まれる。屋内でのデバイスフリー測位を必要とする問題の一つに、高齢者の遠隔介護支援が挙げられる。子世帯と別居している遠隔地の高齢者の様子を見守る場合、高齢者が測位用端末を携帯して自宅内を移動することは難しい (測位用端末の携帯を忘れたり、習慣を変えることに抵抗がある)。高齢者に限らず、誰もが自宅や勤務地にて短時間存在する場合、測位用端末の携帯を忘れたり、携帯の必要がないと判断して移動したりすることがある。本研究では、屋内の特定の位置に在室するデバイスフリーなユーザの測位に焦点を当てる。

既存の DFL 手法には、プライバシー侵害もしくは設置位置の制約という問題がある。例えば、カメラを用いた映像の画像処理によるユーザ測位が挙げられる。撮影した時系列順の画像から差分をとることでユーザの在室状況を推定することができるが、カメラを屋内に設置することでユーザがプライバシーを侵害されると感じる可能性がある。特に、高齢者は監視されていることを嫌がり、機器を除去するという可能性が考えられる。ユーザに嫌悪感を与えない測位のためには、測位用機器を見えないようにして配置することが有効である。例えば、赤外線や超音波センサを用いた測位は、指向性を必要とする点で人を検出する範囲は広くない。ユーザが特定の位置にいることを測位するためには、対応する場所に機器を設置する必要がある。

安価かつ省電力で駆動する Bluetooth ビーコンは、屋内に柔軟に設置可能であるという利点がある。我々はこれまでに、近年注目されている Bluetooth ビーコンの電波強度を用いた DFL 手法を提案し、遠隔介護支援システムを開発した [杉野 16]。

Bluetooth ビーコンから発する電波を測位用端末で受信したときの受信電波強度 (Received Signal Strength Indication: RSSI) の減衰から、人の有無を検出することができる。

しかし、RSSI が設置環境に依存するため、人検出のための RSSI の閾値の調整が課題である。また、部屋の家具の配置などが変化した場合にも、閾値が変化すると考えられる。本手法は電波を利用するため、雨による部屋の湿度変化によって RSSI が大きく変動する。本稿では、環境変化の例として湿度の変化を扱う。そして、複数の Bluetooth ビーコンの RSSI をベクトルとしてクラスタリングを行うことで、電波強度による環境変化を考慮した人認識手法を検討する。

2. 関連研究

既存の DFL 手法は、精度、経済的なコストおよび設置者の負担といった点において利点と欠点がある。本章では、各 DFL における問題を示して、それらを解決するための Bluetooth ビーコンの利点を述べる。

2.1 デバイスフリー測位

DFL 手法の例として、カメラや圧力、赤外線センサを利用したものが [Kivim 14]。カメラによる測位の課題として、測位対象のプライバシーを保護する必要がある。画像処理の過程でプライバシーが保護されるとしても、カメラのレンズを自分に向けられることで測位対象は嫌悪感を抱く。また、長期間動作させる場合に、カメラは電源に接続する必要があるものが多く、設置位置が電源の位置に依存する。これらの問題を考慮すると、測位対象の映像を取得することがなく、外部からの電源供給を必要としないセンサが DFL において有効であるといえる。圧力センサは電源付近から床下を通して設置することで、カメラによる測位の問題を解決できる。しかし、測位対象とする範囲を広くするとその面積だけコストがかかる。また、一般的に床下に設置されるため、設置の負担が大きい。赤外線センサは指向性を持ち、前方数 m の範囲の障害物を検出する。認知症患者を対象とした遠隔介護において、患者は自宅の環境の変化を嫌うため、なるべく機器を隠すことが望まれる。赤外線は透明な物質以外を通過しないので、センサ部分を露出させる必要がある。その際、設置方法によって赤外線の放射範囲が制限され、人検出の範囲が小さくなる可能性がある。

連絡先: 杉野 恭兵, 名古屋工業大学大学院, 愛知県名古屋市昭和区御器所町, 052-735-5584, sugikyo@toralab.org

電波強度を利用した DFL として、Wi-Fi アクセスポイントなどの無線 LAN 機器を利用する研究が進められている [川村 11, 伊沢 11]。ユーザが機器を携帯する測位の場合、複数の地点で各機器が発信する電波を受信し、その地点の RSSI を記録するフィンガープリント方式に基づく手法が普及している。フィンガープリント方式は、RSSI 調査の段階で記録した電波強度と位置をひもづけ、運用段階では測定した RSSI の組み合わせと近い RSSI と対応する位置を推定位置とする手法である [Wang 13]。電波強度に基づく DFL の多くはフィンガープリント方式に基づいており、RSSI 調査の段階で位置推定の対象とする地点に人がいる場合の RSSI の分布を記録する [Hong 15]。あとは同様に RSSI の対応する地点を人の推定位置と定める。フィンガープリント方式による DFL は、推定位置ごとに RSSI を測定する必要があり、各地点での RSSI を記録する作業が負担となる点が問題となる。

2.2 Bluetooth ビーコン

本研究では、Bluetooth 4.0 で駆動する Bluetooth ビーコンを用いる。Bluetooth Low Energy (BLE) とも呼ばれている Bluetooth 4.0 は省電力性を追求した規格であり、電池の交換がなくとも数年間稼働することを可能にしている。Bluetooth ビーコンは数種類の情報を含むパケットを数百ミリ秒の間隔で送信する。Bluetooth ビーコンは 2.4GHz 帯の電波を用いており、基本的に無指向性である。近年、BLE 対応のモバイル端末が普及しており、BLE 規格の Bluetooth 電波を送受信することができる。BLE 非対応の PC の場合、USB ドングルを接続することによって BLE に対応させることが可能になる。

Apple 社が提供する iBeacon をはじめとして、BLE 対応機器が BLE 規格の電波を受信すると、距離の推定値とその精度が同時に提供される仕組みが普及しつつある。一般的な Bluetooth ビーコンの利用方法として、スマートフォンを携帯しているユーザが Bluetooth ビーコンに近づくと、端末のアプリケーションを介してクーポンなどのサービスが提供されることが挙げられる。Bluetooth 電波は距離によって減衰するため、受信機であるモバイル端末が測定した RSSI が大きければ機器同士が近く、RSSI が小さければ遠いと推定できる。Bluetooth ビーコンが発信する電波に含まれる情報は 3 種類の ID であり、これらを工夫することで Bluetooth ビーコンの個体やシステムを区別する。

遠隔地のユーザの様子を屋内測位によって見守る、遠隔介護のような場面において、Bluetooth ビーコンの利点は 3 つ挙げられる。1 つ目は価格が数百円という安価であるため、複数個利用してもコストが抑えられること。2 つ目は電池交換無しで数年間という長期間動作するため、メンテナンスの手間が少なく済むことである。3 つ目は、小型であり電池による電源供給で動作するため、屋内に柔軟に配置できることである。現状、受信機としてスマートフォンやタブレットなどのモバイル機器、および PC が対応する。既存の DFL 手法には無線機器を利用する手法が多い。小型かつ安価であり、2.4GHz 帯の電波を発するという点で他の無線機器と同等の機能を有する Bluetooth ビーコンは、価格が数千円の Wi-Fi 機器の代替品にできると考えられる。Bluetooth ビーコンは小型かつ有線接続を必要としないため、Wi-Fi 機器よりも多くの台数を屋内に柔軟に設置することができる。上述したフィンガープリント法であっても、参照する電波強度のデータ数が増えることで、より詳細な位置推定が可能になると考えられる。

Bluetooth 電波は水によって干渉を受けるため、人体中の水分でも同様のことがいえる。Bluetooth 送受信機間に人がいる場

合、受信機に到達する電波は減衰して RSSI は低下する。周囲の壁の材質によって電波が反射および吸収されるため、障害物のない室内でも RSSI は変動する。先行研究では、人体による Bluetooth 電波の減衰を利用して Bluetooth ビーコンによる DFL を実現したが、湿度などの環境変化に対応するために、閾値の調整が必要な点が課題であった。

3. Bluetooth ビーコンに基づく屋内測位機構

複数の Bluetooth ビーコンの発信する電波の RSSI から人を測位する手法と、環境変化に対応する手法について提案する。

3.1 Bluetooth ビーコンに基づく DFL のための予備実験

Bluetooth ビーコンによる人検出のために、Bluetooth 電波の人体による減衰についての予備実験を示す。測位実験を行った環境とその際の設定を表 1 に示す。Bluetooth 電波の周囲の環境によるゆらぎを抑えるために、連続する 3 つのサンプル値を平均して RSSI を平滑化した。その結果から、送受信機間に人がいる場合といない場合の RSSI の分布を得た。2 つの分布は乖離しており、それぞれの RSSI の最頻値は 10dB 程度離れていることを確認した。2 つの分布の交点付近に閾値を設定することで、人の識別が可能になる。

上記の結果から、2 つの RSSI の分布の平均値を閾値に設定して、人検出の認識率を求めた。同時に、本手法が適用可能な Bluetooth 機器間の距離を知るため、機器間の距離を変化させた場合の認識率を求めた。実験環境と設定は表 1 に示す通りである。認識率は「送受信機間に人がいるとき、人を検出する割合」とした。送受信機間の距離を 1~5m の範囲で 1m ずつ変化させた実験を行った結果、送受信機間の距離が 3m 以内であれば、80%以上の認識率で人を検出できた。受信機を中心に半径 3m の範囲内のユーザを検出することができるので、5m 四方の広さの部屋において適用できると考えられる。

上記の実験結果から、Bluetooth ビーコンと受信機が 1 対 1 の場合での DFL が、10 畳程度の部屋において 80%の精度で実現できることを示した。同じ場所に置く Bluetooth ビーコンの数を増やすことで、単位時間あたりのサンプル数が増えるので、より精度が向上すると考えられる。Bluetooth 電波は距離によって指数関数的に小さくなる。

機器間の距離が遠いと認識率が低下する原因として、人がいる場合といない場合の両方の RSSI が小さくなるため、区別が難しくなるのだと考えられる。複数の Bluetooth ビーコンを用いる場合、それぞれの端末から発する電波の強度には個体差がある。また、空気中の湿度によって RSSI は変動する。表 2 に、3 個の Bluetooth ビーコンを用いた屋内の湿度ごとの RSSI の平均値を示す。湿度 35%と 70%の場合では、RSSI が約 5dB 変化している。こうした変化がある場合、識別のための RSSI の閾値を変更する必要がある。

3.2 複数の Bluetooth ビーコンによる測位手法の提案

複数の Bluetooth ビーコンから構成されるベクトルからなるクラスタが、測位対象の有無で分けられると仮定した。すなわち、得られた RSSI のベクトルが属するクラスタによって人の有無を判別可能であると考えた。具体的には、5m 四方程度の部屋に設置された、 N 個の Bluetooth ビーコンの RSSI を参照する手法を提案する。 N 個の Bluetooth ビーコンから得られる RSSI を、Bluetooth 受信機側で定期的 (今回は 1 秒ごと) に更新する。 N 個の Bluetooth ビーコンの RSSI から成

表 1: 測位の環境および設定

項目	内容
測定場所	6m × 10m の会議室
送信機	MyBeacon MB004
受信機	MacBook Pro Retina 13
送受信機間の距離	1m
測定回数	各 100 回
被験者	20 代男性
被験者の位置	機器間の中央

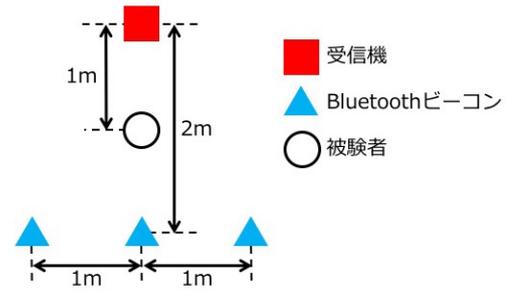


図 1: 実験環境

表 2: 湿度による RSSI の変化

Bluetooth ビーコン	RSSI(dB)	
	湿度 35%	湿度 70%
ビーコン A	-46.6	-50.0
ビーコン B	-48.7	-55.2
ビーコン C	-53.6	-60.0

るベクトルを 1 つの RSSI ベクトルとする。環境変化に対応した測位のために、クラスタリングを一定時間 T ごとに行う必要があるため、 T 個の RSSI ベクトルを 1 回のクラスタリングに用いるデータとする。一定間隔で RSSI の観測を行い、 T 個の RSSI ベクトルの測定で得られた $N \times T$ 個のデータから、人を検出するための閾値を決定する。3.1 で示したように、Bluetooth 機器間にユーザが存在することで RSSI は著しく減衰する。よって、 N 次元の RSSI ベクトルの場合は、人が存在する場所に対応する Bluetooth ビーコンの RSSI のみが小さくなると思われる。そのような特徴を検出するために、測定した RSSI ベクトルの集合に対してクラスタリングを行い、人がいる場合とない場合のクラスタに分類する。本手法で目指すのは、測位対象の有無を教師データとして入力せずに、RSSI ベクトルから閾値を求めることである。本手法では、教師なし学習として非階層型クラスタリングを用いる。環境変化に対応した DFL のするための基礎として、ユーザがいるかないかの 2 状態に分類する。具体的には、クラスタ数を 2 つに設定して、K-means 法によって RSSI ベクトルを分類する。

本稿で実施した実験では、測位対象が Bluetooth 機器間にいる場合と居ない場合と同じ回数の測位を行った。K-means 法は各クラスタ内のデータ集合がおよそ同じ数になる場合を想定しているため、本実験手法に適しているといえる。K-means 法において、測位地点の総数のみを入力することで、データ集合を測位地点に適するように分類できると考えている。受信機が測定する RSSI は、周囲の水分量や測位対象が身につけている服の材質などによって変動する。本手法によって、定期的にクラスタリングを行うことで、環境の変化に伴い、適切な RSSI の閾値を決めることが可能になる。例えば、現在の RSSI が RSSI の大きなクラスタに含まれればユーザは存在しないと判定するように閾値を定めればよい。

4. 実験および評価

本章では、クラスタリングによる人認識手法の有効性を実験によって検証する。複数の Bluetooth ビーコンを用いて取得したデータを元にクラスタリングを行い、その分類の精度を評

価する。

4.1 実験内容と結果

3 個の Bluetooth ビーコン (A, B, C) を用いて、図 1 に示すように Bluetooth 送受信機および被験者を配置した。Bluetooth 送受信機は表 1 と同じものである。測位回数は、被験者が機器間にいる場合とない場合にそれぞれ 1,000 回とした。湿度による環境変化を考慮し、湿度 35% と 70% の場合での実験を行った。3 個の Bluetooth ビーコンから取得した RSSI から、測位対象が機器間にいる場合とない場合の測定回数ごとの RSSI を測定した。測定結果から、Bluetooth ビーコンごとに RSSI の平均値には個体差があり、壁による反射や吸収によって RSSI にはゆらぎがあった。被験者が機器間にいるとき、障害物の存在によってゆらぎが更に大きくなっており、被験者がいないときと比べて RSSI 平均値は全体的に小さい。湿度 35% の場合での RSSI ベクトルを K-means 法によって 2 つのクラスタに分類した結果を図 2 に示す。図では、クラスタ 1 が機器間に測位対象がいなかったときの RSSI ベクトルの集合であり、クラスタ 2 が測位対象がいる場合である。クラスタは RSSI ベクトルの大きさによって分類されており、平面によって分けられている。湿度 70% の場合もほぼ同様の形になっており、各クラスタの重心が少し移動したグラフとなった。

4.2 評価

3 個の Bluetooth ビーコンの組み合わせでクラスタリングを行い、得られた適合率と再現率から算出した F 値を図 3 に示す。図より、1 個の Bluetooth ビーコンではクラスタリングの精度が低い。Bluetooth ビーコンを 3 個に増やすことで、精度が 5 ~ 10 ポイント程度向上した。1 個の Bluetooth ビーコンでは RSSI のゆらぎがそのまま分類の精度に影響するが、複数の Bluetooth ビーコンの RSSI を参照することで、1 個のビーコンのゆらぎを緩和できていると考えられる。3 個の Bluetooth ビーコンを用いて、F 値 0.97 という十分な精度で教師なし学習によるクラスタリングが行えた。フィルタやスムージングを用いることで、わずかな不正解データも対処することが可能になると考えられる。以上の結果から、本キャリアレーション手法によって、95% 以上の精度で Bluetooth ビーコンによる DFL が実現可能であると考えられる。表 3 に、湿度ごとの RSSI ベクトルの平均値とクラスタリングの F 値を示す。湿度の上昇によって、RSSI が低下し、各クラスタの重心はずれている。しかし、それぞれの状態でクラスタリングを行うことで、約 95% の精度で人の有無を識別できているといえる。実験結果から、RSSI ベクトルのクラスタリングによって、湿度変化に対応した人認識がされているといえる。

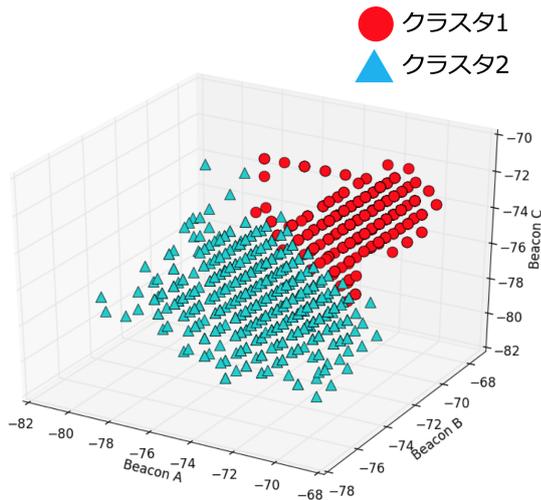


図 2: クラスタリング結果 (湿度 35%)

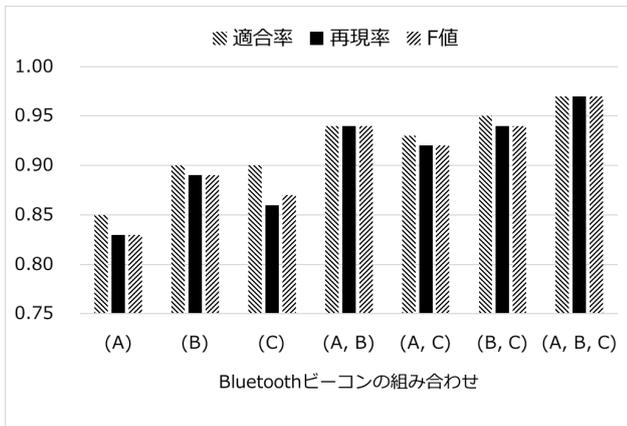


図 3: Bluetooth ビーコンの組み合わせごとの評価 (湿度 35%)

5. おわりに

本稿では, Bluetooth ビーコンに基づく DFL のための人認識手法について提案し, その有効性を示した. 複数の Bluetooth ビーコンから取得した RSSI ベクトルから, ベクトル集合に対して K-means 法でクラスタリングを行った. 屋内の環境変化を考慮して, 異なる湿度での電波強度の変化に対応する手法を提案した. 本稿で実施した実験では, 測位対象がいるかいないかを判定するため, ベクトルを 2 つのクラスタに分類した. クラスタリングの結果, ベクトルは各 Bluetooth ビーコンの RSSI の大きさによって分類されており, そのクラスタリング精度は 95% 以上であった. 教師なし学習によって, ユーザの測位を実施するために十分な精度が得られたといえる. 本手法はフィンガープリント法と比較して, 事前準備の手間が少ないので, DFL におけるユーザの負担の軽減が可能になる. さらに, Bluetooth ビーコンの個数および配置を変更した場合や, 湿度や障害物によって RSSI が変動した場合にも, 逐次クラスタリングを行うことで検出のための閾値を最適化することができると考えられる. 今後は, クラスタリングに必要な学習デー

表 3: 湿度による RSSI の変化

湿度	クラスタ	RSSI 平均値 (dB)			F 値
		A	B	C	
35%	クラスタ 1	-71.11	-70.82	-73.20	0.97
	クラスタ 2	-73.73	-73.55	-76.71	
70%	クラスタ 1	-76.14	-75.85	-78.28	0.94
	クラスタ 2	-78.83	-78.60	-81.89	

タを収集する時間帯やサンプル数と, それらを動的に適用させる方法について検討する.

参考文献

- [Pirzada 14] N. Pirzada, M. Nayan, F. Subhan, M. Hassan, and M. Khan, “Device-free Localization Technique for Indoor Detection and Tracking of Human Body: A Survey,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol.129, No.15, pp.422-429, 2014.
- [杉野 16] 杉野 恭兵, 丹羽 佑輔, 白松 俊, 大園 忠親, 新谷 虎松, “Bluetooth に基づく人感センサを利用した遠隔介護支援システムの試作,” *電気学会論文誌 C*, Vol.136, No.2, pp.218-225, 2016.
- [Kivim 14] T. Kivimäki, T. Vuorela, P. Peltola, and J. Vanhala, “A Review on Device-Free Passive Indoor Positioning Methods,” *International Journal of Smart Home*, Vol.8, No.1, pp.71-94, 2014.
- [川村 11] 川村 諒, 久保田 真一郎, 副島 慶人, 古川 誠一, 杉谷 賢一, “既設アクセスポイントを利用した屋内位置情報取得システムのための位置推定精度による分析,” *情報処理学会論文誌*, Vol.52, No.3, pp.1357-1364, 2011.
- [伊沢 11] 伊沢 亮一, 毛利 公美, 森井 昌克, “無線 LAN 端末を利用した移動体位置推定法,” *情報処理学会論文誌*, Vol.52, No.9, pp.2841-2852, 2011.
- [Wang 13] J. Wang, Q. Gao, Y. Yu, P. Cheng, Lifei. Wu, and H. Wang, “Robust device-free wireless localization based on differential RSS measurements”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.60, No.12, pp.5943-5952, 2013.
- [Hong 15] J. Hong and T. Ohtsuki, “Signal Eigenvector-Based Device-Free Passive Localization Using Array Sensor,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology* ” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.64, No.4, pp.1354-1363, 2015.