

ビーコンセンシングによる滞在空間同定手法

岩本尚弥

大阪公立大学

sh22276b@st.omu.ac.jp

Location Identification Method based on Beacon Sensing Technology
NAOYA IWAMOTO OSAKA METROPOLITAN UNIVERSITY

概要：本研究は、屋内空間における滞在場所の同定精度向上を目的とし、Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコンと受信信号強度指示 (RSSI) を用いた新たな滞在空間同定手法を提案する。既存の IC カード打刻システムでは、打刻者の滞在を保証できないという課題がある一方で、Global Positioning System (GPS) は屋内環境での利用に限界がある。このような背景から、高精度な屋内空間推定技術が求められている。BLE ビーコンは簡単なソリューションを提供するものの、RSSI は多重波の影響を受けやすく、推定精度に課題が残る。そこで本研究では、複数の BLE ビーコンから得られる RSSI 値に対しファジィ推論を適用することで、RSSI 値の不確実性を考慮した高精度な空間同定を目指す。実験を通じて提案手法の空間推定精度を評価し、既存手法と比較することでその有効性を検証する。本研究は、屋内におけるより信頼性の高い位置情報サービスの実現に貢献することを目指す。

1 はじめに

近年、大学や企業における出席・勤怠管理システム等の打刻システムでは、学生証や社員証に搭載された IC カードを用いる手法が広く普及している。しかし、IC カードによる打刻は、打刻者が実際にその空間に滞在している事実を保証するものではない。そのため、代理打刻などの不正行為を完全に排除することは困難である。

一方、屋外における位置推定技術としては、Global Positioning System (GPS) が広く普及している。しかしながら、GPS は屋外環境での利用に最適化されており、屋内環境や地下空間等の電波遮蔽環境下では精度が著しく低下することが知られている。このような背景から、近年、屋内空間における高精度な空間推定技術へのニーズが高まっており、その解決策の一つとして、Bluetooth Low Energy (以下、BLE と記す) ビーコンを用いた空間推定技術が注目されている。BLE とは、無線 PAN 技術であ

る Bluetooth の一部で、バージョン 4.0 から追加になった低消費電力の通信モードである。

BLE ビーコンを用いた屋内空間推定では、ビーコンから発信される電波の受信時に得られる受信信号強度指示 (Received Signal Strength Indication, 以下 RSSI と記す) を利用して、受信機とビーコン間の距離を推定することが一般的である。RSSI は、受信した電波の強度を示す指標であり、受信機で受信した信号の電力を、1 ミリワット (mW) を基準としたデシベル値 (dBm) で対数表示するものである [1]。しかし、障害物が多い環境下では、電波の反射や回折による多重波伝搬の影響を受け、RSSI 値が大きく変動することが知られている。したがって、BLE ビーコンを用いた空間推定技術において、RSSI 値を用いた空間推定精度の向上が重要な課題となっている。

本研究では、前述の課題に対し、RSSI 値を用いた新たな滞在空間同定手法を提案する。提案手法では、BLE ビーコンを用いて受信機が滞在する空間

を同定するために、複数のビーコンから受信する RSSI 値に対し、ファジィ推論に基づく推定手法を適用する。ファジィ推論は、不確実な情報を取り扱うための数理的な手法であり、不確かさを表現するファジィ集合を用いて推論を行う [2]。提案手法では、受信機が複数のビーコンから受信する RSSI 値をファジィ集合としてモデル化し、ファジィ集合演算を用いて滞在空間を同定する。提案手法の有効性を検証するため、実験を行い、その空間推定精度を評価する。

2 関連研究

RSSI 値を用いた空間同定手法として、既存手法には三角測量法や最近傍法、指紋法などがある。三角測量法は、受信機が複数のビーコンから受信した RSSI 値を用いて、受信機の位置を推定する手法である。酒井ら [3] は、複数ビーコンと三角測量法を用いて、屋内位置推定を行っている。最近傍法 (Proximity 法) は、受信する RSSI 値が最も大きいビーコンが存在する空間を推定する手法である。指紋法は、事前に推定対象となる空間内の複数地点において RSSI 値を計測しデータベースに記録しておき、実際に推定する際には、記録した値とパターンマッチングを行う手法である。高山ら [4] の研究では、位置指紋とデッドレコニングで得られる合成位置指紋を用いて、より高精度な空間同定を実現している。

一方で、RSSI 値はノイズや干渉などによるマルチパスの影響を受けやすく、三角測量法のように距離計算を行う際に誤差が大きくなりやすい。また、最近傍法では部屋内に設置されたビーコンの数について考慮されていない。指紋法は、事前に計測したデータベースとのマッチングを行うため、同定空間内の複数地点で事前に計測を行う必要がある。

3 滞在空間同定の提案手法

上記の課題に対し、本研究では、BLE ビーコンを用いた滞在空間同定手法を提案する。提案手法では、複数の BLE ビーコンから得られる RSSI 値に対し、ファジィ推論を適用することで、不確実な

RSSI 値に対しても高精度な空間同定を実現する。以下に、提案手法の概要を説明する。

3.1 メンバーシップ関数の定義

RSSI 値の曖昧さを表現するため、本研究では三角形メンバーシップ関数を採用する。三角形メンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ は、以下の式で定義される。

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{if } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{if } b < x < c \\ 0 & \text{if } x \geq c \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 x は入力変数（本研究では RSSI 値）、 a 、 b 、 c は三角形の頂点を定義するパラメータである。RSSI 値 x とパラメータ a , b , c を入力として、その RSSI 値が定義されたファジィ集合にどの程度所属するかを示す所属度を 0 から 1 の間の値で出力する。

3.2 ファジィ集合の定義

RSSI 値を表現するファジィ集合として、「非常に強い (definitelyStrong)」、「強い (veryStrong)」、「やや強い (strong)」、「中程度 (medium)」、「弱い (weak)」、「非常に弱い (veryWeak)」の 6 つの言語変数に対応するファジィ集合を定義する。これらの関数は、受信した RSSI 値がそれぞれの電波強度にどの程度合致するかを評価する。例えば、 $\text{veryStrong}(rssi)$ は、RSSI 値が「強い」というファジィ集合にどの程度所属するかを返す。

3.3 滞在空間の推定

提案手法における滞在空間の推定は、各部屋に設置されたビーコンから受信した RSSI 値に基づいて行われる。まず、ビーコンからの情報が全くない場合は、ビーコンが検出されていないと判断する。

部屋 R_i のスコア $S(R_i)$ は、検出された各デバイスの RSSI 値に基づいて計算される。デバイス d_j の RSSI 値を r_j とし、対応する各ファジィ集合の所属度を $\mu_{\text{definitelyStrong}}(r_j)$, $\mu_{\text{veryStrong}}(r_j)$, $\mu_{\text{strong}}(r_j)$, $\mu_{\text{medium}}(r_j)$, $\mu_{\text{weak}}(r_j)$, $\mu_{\text{veryWeak}}(r_j)$ とする。

部屋 R_i のスコア更新は、以下の式で表される。なお、係数は経験則に基づいて設定を行った。

$$\begin{aligned}\Delta S(R_i, d_j) = & \mu_{\text{definitelyStrong}}(r_j) \\ & + 0.7 \cdot \mu_{\text{veryStrong}}(r_j) + 0.4 \cdot \mu_{\text{strong}}(r_j) \\ & + 0.3 \cdot \mu_{\text{medium}}(r_j) + 0.2 \cdot \mu_{\text{weak}}(r_j) \\ & + 0.1 \cdot \mu_{\text{veryWeak}}(r_j)\end{aligned}$$

部屋 R_i の最終的なスコアは、その部屋で検出された全てのデバイスからのスコア増分を合計することで得られる。 D_i を部屋 R_i で検出されたデバイスの集合とすると、部屋 R_i のスコア $S(R_i)$ は以下のようになる。

$$S(R_i) = \sum_{d_j \in D_i} \Delta S(R_i, d_j) \quad (3)$$

最終的に、部屋の推定は各部屋のスコア $S(R_i)$ のうち、最大のスコアを持つ部屋を推定結果として採用する。

$$\text{推定された部屋} = \arg \max_{R_i} S(R_i) \quad (4)$$

なお、RSSI 値はマルチパスなどの影響を受けやすいため、以下の漸化式を用いて、 $[0, T]$ までのスコアの総和をスコアとして計算する。本実験では $T = 25[\text{s}]$ と設定した。

$$S_t(R_i) = \begin{cases} S_{t-1}(R_i) + \sum_{d_j \in D_i} \Delta S_t(R_i, d_j) & \text{if } t > 0 \\ 0 & \text{if } t = 0 \end{cases} \quad (5)$$

4 実験手法

実験の目的は、複数ビーコンから受信する RSSI 値から滞在空間同定を行うにあたって、従来手法と提案手法の空間同定精度を比較することである。従来手法として、近傍ビーコンの RSSI 値を用いた最近傍法を採用し、提案手法と比較する。なお、ドア前などの境界部分では複数回の推定を行った。

4.1 実験環境

実験は大阪公立大学杉本キャンパスの工学部 F 棟 6 階で実施した。図 1 に示すように、実験環境は F601, F602, F612 の 3 つの部屋と、それぞれの部屋の前の廊下側のドア前に設置されたビーコンからの RSSI 値を受信することで、滞在空間を同定

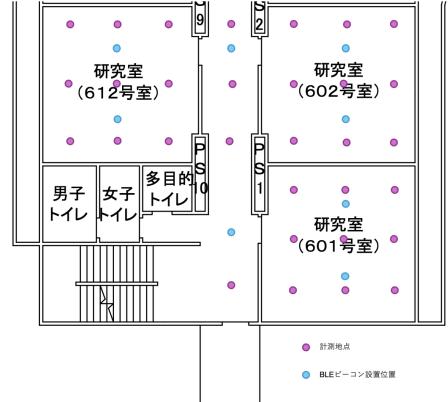


図 1 ビーコン設置位置と観測位置

した。なお、実験はドアを開けた状態で行った。また、実験機材は以下を用いた。

- Android 端末 (moto g64 5G, Android 14)
- サンワ 温度・湿度センサー搭載 BLE ビーコン (MM-BLEBC7)

なお、ビーコン発信間隔は 1 秒間隔、ビーコンの発信電波強度は-8dBm とした。また、ビーコンの設置方法は図のような形で天井に設置した。教室と廊



図 2 ビーコンの設置方法

下は図 3,4,5,6 のようになっている。

4.2 実験用スマートフォンアプリ

実験を行うにあたって、Flutter を用いてスマートフォンアプリを開発した。実装した機能には、ビーコンからの RSSI 値の取得、滞在空間同定、実験結果の記録・表示が含まれる。また、アプリの UI は、図 2 のようになっており、各種情報を確認する



図3 F601



図4 F602



図5 F612



図6 廊下

ことができる。



図7 スマートフォンアプリのUI

4.3 実験

今回は、2つの実験を行った。それぞれの実験で適合率、再現率、F値を評価した。適合率は、推定された結果のうち、実際に正しい結果の割合を示す。再現率は、実際に正しい結果のうち、推定によって正しく検出された結果の割合を示す。F値は、適合率と再現率の調和平均であり、全体的な性能を示す指標である。

実験1：教室にのみビーコンを設置し、どの教室に滞在しているかを推定の精度を評価する。

実験2：ビーコンを教室と廊下側のドア前に設置し、どの教室の前にいるかを推定の精度を評価する。

5 実験結果

5.1 メンバーシップ関数の決定

1m の距離でビーコンからの RSSI 値を計測し、その結果を以下の図のようになつた。また、最頻値、最大値、最小値を求めるとき、以下の表のようになつた。上記の結果を参考にし、RSSI 値のぶれ

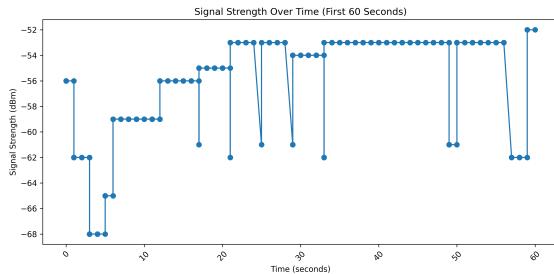


図 8 RSSI 値の計測結果

表 1 1m 地点における RSSI 値の統計

最頻値	最大値	最小値
-53	-52	-68

を考慮し、メンバーシップ関数のパラメータを決定した。この際、1m の距離で受信する RSSI 値の最頻値を veryStrong に対応させた、また、strong, medium, weak, veryWeak に対応するパラメータはそれぞれ、5dBm ずつずらすことで決定した。なお、definitelyStrong と veryWeak は、0dBm と -100dBm に対応させた。各ファジィ集合に対応するパラメータは以下の通りである。

表 2 ファジィ集合の定義

ファジィ集合	a	b	c
非常に強い (definitelyStrong)	0	-24	-53
強い (veryStrong)	-48	-58	-68
やや強い (strong)	-58	-68	-78
中程度 (medium)	-68	-78	-88
弱い (weak)	-78	-88	-98
非常に弱い (veryWeak)	-88	-98	-100

5.2 実験 1

最近傍法と提案手法における、適合率、再現率、F 値を以下の表に示す。また、最近傍法と提案手法の

表 3 最近傍法による滞在空間同定結果

部屋	適合率	再現率	F 値
F601	0.90	0.90	0.90
F602	0.80	0.80	0.80
F612	0.90	0.90	0.90
平均	0.87	0.87	0.87

表 4 提案手法による滞在空間同定結果

部屋	適合率	再現率	F1 値
F601	1.00	1.00	1.00
F602	1.00	1.00	1.00
F612	1.00	1.00	1.00
平均	1.00	1.00	1.00

混同行列を以下の図に示す。最近傍法では、窓際や

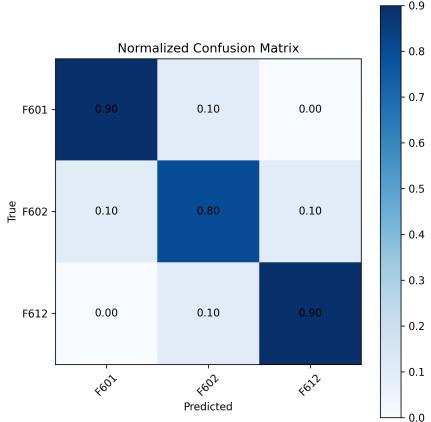


図 9 最近傍法の混同行列

ドア前などでご推定を行うことがあった。一方で、提案手法では全ての地点で正確な推定を行うことができた。

5.3 実験 2

最近傍法と提案手法における、適合率、再現率、F 値を以下の表に示す。また、最近傍法と提案手法の混同行列を以下の図に示す。最近傍法では、ドア前

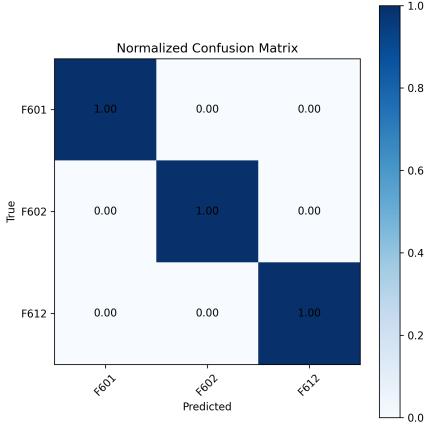


図 10 提案手法の混同行列

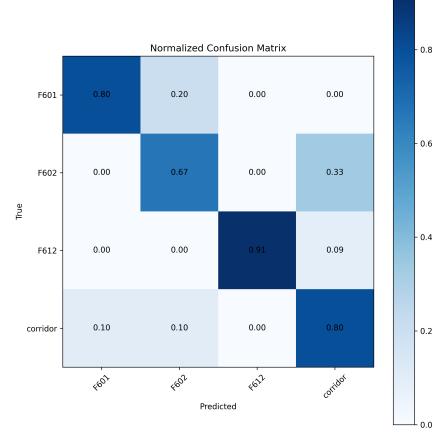


図 11 最近傍法の混同行列

表 5 最近傍法による滞在空間同定結果

部屋	適合率	再現率	F1 値
F601	0.89	0.80	0.84
F602	0.67	0.67	0.67
F612	1.00	0.91	0.95
廊下	0.67	0.80	0.73
平均	0.81	0.79	0.73

表 6 提案手法による滞在空間同定結果

部屋	適合率	再現率	F1 値
F601	1.00	0.90	0.95
F602	0.90	1.00	0.95
F612	1.00	1.00	1.00
廊下	1.00	1.00	1.00
平均	0.97	0.97	0.97

での部屋と廊下の誤推定が多かった。部屋の中心部の推定においても廊下と誤推定した例もあった。一方で、提案手法では誤推定が少なく堅牢であった。

5.4 考察

本実験では、BLE ビーコンを用いた屋内位置推定において、最近傍法と提案手法の性能を比較した。

5.4.1 実験 1 に関する考察

実験 1 の結果（表 3 および表 4）から、提案手法は全ての部屋において適合率、再現率、F 値が 1.00 となり、優れた滞在空間同定性能を示した。これ

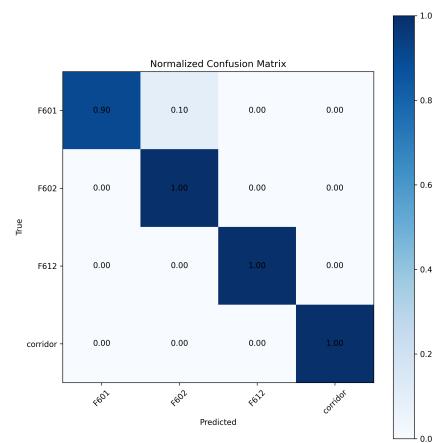


図 12 提案手法の混同行列

は、提案手法が RSSI 値の変動に対してロバストであり、部屋の境界付近においても安定した推定が可能であることを示唆している。一方、最近傍法では平均適合率、平均再現率、平均 F 値が 0.87 であり、提案手法と比較して性能が劣ることが明らかになった。混同行列（図 3）からもわかるように、最近傍法では特定の場所（窓際やドア付近など）で誤推定が発生する傾向が見られた。これは、単一の最も強いビーコンに依存する最近傍法の特性上、RSSI 値の変動や環境の影響を受けやすいことが原因と考えられる。

5.4.2 実験 2 に関する考察

実験 2 では、廊下を推定対象に加えたことで、より実環境に近い複雑な条件下での性能評価を行った。実験の結果（表 5 および表 6）を比較すると、提案手法は最近傍法と比較して、全ての空間（部屋および廊下）において顕著に高い適合率、再現率、F 値を示した。特に、最近傍法では平均適合率が 0.81、平均再現率が 0.79、平均 F 値が 0.73 であるのに対し、提案手法ではそれぞれ 0.97、0.97、0.97 と大幅な向上が見られた。混同行列（図 5）を分析すると、最近傍法ではドア前において部屋と廊下の間で誤推定が頻発していることが確認できる。さらに、部屋の中心部においても廊下と誤推定されるケースが見られた。これは、廊下に設置されたビーコンの RSSI 値が、部屋の位置によっては部屋に設置されたビーコンと同程度になる、あるいは一時的に強くなる場合に、最近傍法が誤った推定を行うためと考えられる。対照的に、提案手法では誤分類が非常に少なく、廊下のような曖昧な空間においても高い同定精度を維持していることが示された。これは、ファジィ推論が複数のビーコンからの RSSI 値を総合的に評価し、それぞれの RSSI 値の曖昧さを考慮して推論を行うため、単一の RSSI 値の変動に影響されにくいという利点が發揮された結果と言える。

5.4.3 提案手法の有効性

実験 1 および実験 2 の結果から、提案手法は最近傍法と比較して、屋内滞在空間同定において顕著な性能向上を実現していることが明らかになった。特に、RSSI 値の変動が大きい環境や、部屋の境界付近、廊下のような複数のビーコンからの電波が混在する曖昧な空間において、提案手法の優位性が明確に示された。これは、提案手法が RSSI 値を直接用いるのではなく、ファジィ集合を用いて RSSI 値の強度を言語的に表現し、その曖昧さを考慮した推論を行うためと考えられる。複数のビーコンからの情報を統合的に扱うことで、単一のビーコンの RSSI 値の変動に左右されず、より安定した推定が可能になったと言える。

6 おわりに

今回の実験結果から、ファジィ推論を用いた提案手法は、RSSI 値の変動に強く、よりロバストな滞在空間同定を実現できることが示唆された。特に、廊下のような曖昧な空間においても高い精度を維持できる点は、実環境への応用において大きな利点となるだろう。今後の課題としては、より大規模な環境や動的な環境における性能評価、また、RSSI 値以外のセンサ情報を組み合わせた位置推定手法の検討が挙げられる。提案手法のさらなる拡張と応用により、屋内位置推定技術の向上が期待される。

参考文献

- [1] 中井若菜, 川濱悠, 勝間亮, 単位 RSSI 値の強弱の推定による位置推定精度の向上, 2017 年度情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集, ISSN 1884-197X (2017).
- [2] 水本雅晴, ファジィ推論(1)(ファジィ理論入門(8)), 日本ファジィ学会誌, 4(2), pp. 256-264 (1992).
- [3] 酒井 瑞樹, 森田 裕之, Bluetooth を用いた屋内位置推定手法の提案, 経営情報学会 全国研究発表大会要旨集, pp.53-56, (2016).
- [4] 高山 智史, 梅澤 猛, 大澤 範高, 「複数地点の位置指紋を使った非線形回帰モデルによる屋内位置推定」『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』, pp. 610-619, (2018).
- [5] 国土交通省 國土地理院 測地部, 屋内測位のための BLE ビーコン設置に関するガイドライン〈平成 29 年度版 Ver.1.0〉 (2018).
- [6] 渡邊洸, 高橋雄太, 大坪敦, 藤本まなど, 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, pp. 620-626 (2018).