

地磁気センサと BLE ビーコンを用いた低コスト屋内混雑度推定システム

友浦一樹^{†1}

立命館大学 情報理工学研究科^{†1}

吉田政望^{†2}

立命館大学 情報理工学研究科^{†2}

野口拓^{†3}

立命館大学 情報理工学部^{†3}

1. はじめに

近年、コロナ禍の影響により、感染症対策の観点からユーザと商業施設の両方から混雑度推定の需要が増している。混雑度推定とは、一定空間内の群衆密度を推定することである。例えば、ショッピングモールを任意のエリアに分割し、エリア別の混雑度推定ができると3密（密閉、密集、密接）の回避ができ、感染症対策に活用できる。

混雑度推定には様々な手法が存在する。特に GPS (Global Positioning System) で得られる位置情報を利用した混雑度推定は手軽でかつ正確に混雑度推定が可能であるが、屋内や地下では衛星からの電波が十分に届かず、機能しない。そのため、屋内ではカメラや Wi-Fi, Bluetooth 等を用いたものが主流となっている。しかし、カメラや Wi-Fi 等を利用するとコストが高くなる傾向がある。

そこで本稿では、安価な BLE (Bluetooth Low Energy) ビーコンとスマートフォンに標準搭載されている地磁気センサを用いて既存システムと比較して低コストな屋内混雑度推定システムを提案する。本提案システムは、屋内を任意の数にエリア分割し、エリアごとの人数を把握することで混雑度推定を行う。この手法では、エリアの境界をまたぐユーザの移動に着目し、BLE ビーコンの配置と地磁気収集場所を限定することで、既存システムと比較して導入コストを削減している。

本提案システムの有効性を示すために、エリア推定精度について、実証実験を行い BLE のみを用いたシステムとの比較を行う。続いて、コスト削減効果を検証するため、実在する大規模商業施設におけるデータ収集コストの評価を行う。

2. 屋内端末位置推定技術

2.1. 地磁気測位

地磁気とは、地球の磁場のことであり、屋内では地球の磁場の影響だけでなく、建物の鉄筋などの金属が地磁気に影響を与える。そのため、位置によって磁気の特徴が異なる。地磁気測位は、前述のように位置によってわずかに違いのある地磁気を収集し、大きさと方向を位置ごとにデータベースに保存する。地磁気センサは、 x, y の2軸または、 x, y, z の3軸のタイプがあり、それぞれの方向の磁力の値を取得する。地磁気測位は、事前に収集されてデータベースに登録されている地磁気とスマートフォン等が搭載している地磁気センサが収集した地磁気の特徴を用いてマッチングを行い、その合致度合によって位置を推定する。マッチングは機械学習を用いて行う。スマートフォンを用いた地磁気測位の既存研究 [1] では、各場所の地磁気の特徴のみではなく、ユーザが通過した経路の一連の磁気特性を特徴として利用する。まず、ビル内を一定の速度で歩行し、データを収集する。この経路で得たデータと事前に収集したデータを機械学習を用いてマッチングを行い、ユーザの経路を推定する。この手法は実験場が細い廊下のみであり、広いエリアで測位した際に精度が低下すると考えられる。

2.2. Bluetooth を用いた位置推定

2.2.1 Bluetooth を用いた位置測位

Bluetooth を用いた位置測位は、固定された Bluetooth ビーコンとスマートフォンが通信を行うときに確認できる RSSI (Received Signal Strength Indicator) を用いてユーザの位置を推定する手法である。

RSSI とは、Bluetooth や Wi-Fi などの無線通信機器が受信する信号の強度を示す指標である。RSSI は数値が大きいくほど信号強度が強く、無線通信機器同士の距離が近いほど大きくなる。この関係を式 1 に示す。 R は RSSI (受信信号強度)、 T は送信出力、 D は発信機と受信機の距離を表す。図 1 は式 1 をグラフにしたものである。図 1 では T を -4dBm に設定している。 R と T が分かれば、式 1 を用いて距離 D が推定できる。

Low-cost Indoor Congestion Estimation System Using Geomagnetic Sensors and BLE Beacons

^{†1} KAZUKI TOMOURA, Ritsumeikan University Graduate School of Information Science and Engineering

^{†2} MASAMI YOSHIDA, Ritsumeikan University Graduate School of Information Science and Engineering

^{†3} TAKU NOGUCHI, Ritsumeikan University College of Information Science and Engineering

$$R = T - \log_{10} D \quad (1)$$

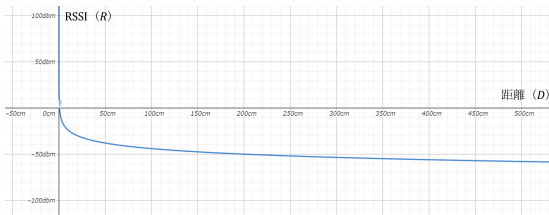


図1 RSSI の距離特性

3つ以上のビーコンを利用し、それぞれのビーコンからユーザの距離が推定できると、それらの情報を元にユーザの位置を1つに推定できる。このような手法を3点測位と呼ぶ。自由空間においては、RSSIは距離と反比例して小さくなるため、距離の測定が簡単に行えるが、実際の空間では地面や壁などによる反射波の影響や障害物による電波の減衰など様々な要因によって、距離とRSSIが反比例しない場合がある。そのため、事前にRSSIを収集し、地磁気測位と同様に、各場所で収集されたRSSIをデータベースに記録する必要がある。また、この手法では、位置測位を行うすべての場所において複数のビーコンからの電波が届くようにビーコンを配置する必要がある。

2.2.2 BLE ビーコンを用いた混雑度推定システム

既存研究 [2] では、複数の BLE ビーコンを用いて大規模イベント会場での混雑度を推定している。BLE ビーコンは安価かつ通信時の消費電力も少ない。この研究では、BLE ビーコンを会場内に複数配置し、各ユーザのスマートフォンからビーコンの電波受信情報を収集することでビーコン周辺にいるユーザ数を把握している。しかし、既存のビーコンを用いた手法では、位置測位と同様に混雑度を推定したい範囲すべてをカバーできるようにビーコンを配置する必要がある。そのため、建物や施設が大きくなればなるほどコストが増加する。

3. 地磁気と受信信号強度を用いた低コスト屋内混雑度推定システム

3.1. 概要

広い範囲をカバーできる屋内混雑度推定は、Wi-Fi や Bluetooth など、システムの導入の際に、既存インフラや新たな機器の設置が必要である。しかし、広大な範囲を電波でカバーする必要があることから、必要な機器数も膨大となり導入コストが高くなる傾向がある。そのため、既存システムと比較して導入コストの低いシステムの需要が増している。本稿では、地磁気センサと BLE ビーコンを用いた混雑度推定システムを提案する。本提案システムは、BLE

ビーコンの設置場所と地磁気を収集するエリアを限定することで、既存システムと比較して BLE ビーコンの設置数を減らし、任意のエリアごとの混雑度を推定できる。

3.2. システム構成

本提案システムの構成図を図2に示す。まず、ユーザはスマートフォンに搭載されている地磁気センサと BLE 機能を用いて地磁気データと RSSI を収集し、サーバへ送信する。サーバは、スマートフォンから受信したデータが事前にデータを収集し作成したデータセットとの類似度を機械学習を用いて算出し、比較することでユーザの位置を推定し、推定した位置情報を元に混雑度を推定する。

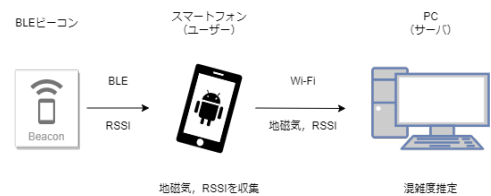


図2 本提案システムの構成

3.3. 混雑度推定システム

3.3.1 推定手法の概要

本提案システムは、導入コストを削減するために屋内を任意の数のエリアに分割し、そのエリアの境界にのみ BLE ビーコンを設置し、境界内でのみ地磁気の事前収集を行う。BLE ビーコンは1つで境界を1つ以上カバーできるように設置する。境界とエリアはそれぞれ番号ラベルを付与し、管理する。例を図3に示す。提案システムは、ユーザの所在エリアを推定し、エリア内のユーザ数を把握することでエリア別の混雑度推定を行う。ユーザの所在エリアは、ユーザのスマートフォンから収集された地磁気と RSSI のデータを用いて推定する。エリアを推定するためにユーザの境界通過を検知する。まず、BLE ビーコンの電波範囲内で取得した地磁気と RSSI を用いてユーザの現在地がエリアの境界内か境界外なのかを推定する。ユーザの現在地が境界内であれば、機械学習を用いてユーザの所在エリアを推定する。また、ユーザの現在地が境界外であれば、推定の履歴から境界内で最後に推定されたエリアをユーザの所在エリアとする。

混雑度推定までの手順を以下に示す。

1. 事前に各境界に、境界全体をカバーできるように BLE ビーコンを設置する。地磁気センサを用いて境界内の地磁気を収集する。
2. 境界ごとに収集した地磁気データをデータセットにする。

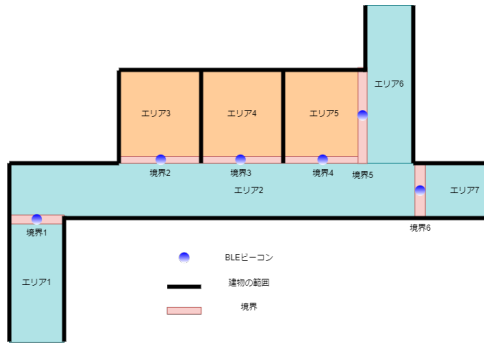


図3 BLEビーコンの配置例

3. ユーザはスマートフォンを用いて地磁気と RSSI を常に収集し、サーバに送信する。
4. サーバは、スマートフォンから受信したデータとデータセットを用いて機械学習を行い、ユーザの所在エリアを推定する。
5. エリア別のユーザ数を元にエリアごとの混雑度を算出する。

3.3.2 事前データ収集

本提案システムでは、事前に境界内の地磁気を収集し、データセットを作成する。データの収集はスマートフォンの地磁気センサを用いて行い、3 軸 (x, y, z) の地磁気を収集する。境界内での位置推定を行うために、境界をさらに分割しグリッドを作成する。地磁気収集はグリッド単位で行う。図 4 は境界内部の詳細である。グリッドのサイズは小さいほど高い密度でデータセット作成を行うことができるため、精度が高くなる。今回は、地磁気を用いた既存研究 [3] を参考に境界は 1 辺 1m のグリッドで構成する。また、それぞれのグリッドは所属エリアとグリッド番号が定められる。図 4 の例ではエリア 1 とエリア 2 に分類されるグリッドが存在する。スマートフォンを用いてグリッドごとに地磁気の事前データ収集を行う。収集は、それぞれのグリッドの中心で行う。また、地磁気値はスマートフォンの姿勢に依存するため、1 グリッドにつき 24 方向のデータを収集する。スマートフォンの姿勢を 3 軸 (x, y, z) で示す場合、初期の姿勢を $(0, 0, 0)$ とする。この状態からそれぞれの軸を 90 度ずつ回転させ、スマートフォンの姿勢が重複しないように $(0, 0, 0), (0, 90, 0), (0, 180, 0), (0, 270, 0), (0, 0, 90), (0, 90, 90), (0, 180, 90), (0, 270, 90), (0, 0, 180), (0, 90, 180), (0, 180, 180), (0, 270, 180), (0, 0, 270), (0, 90, 270), (0, 180, 270), (0, 270, 270), (90, 0, 0), (90, 90, 0), (90, 180, 0), (90, 270, 0), (180, 0, 0), (180, 90, 0), (180, 180, 0), (180, 270, 0)$ の 24 方向とする。データ収集は 0.5 秒間隔で、1 方向につき 5 秒間行う。

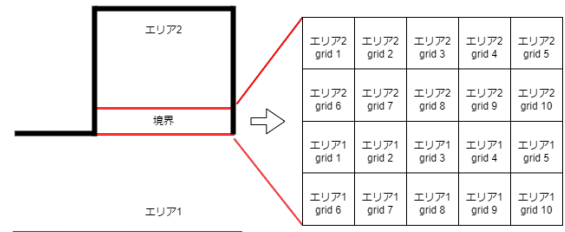


図4 境界の詳細

3.3.3 データセット作成

収集した地磁気データからエリア推定に利用する機械学習用のデータセットを作成する。データセット作成の手順を以下に示す。

1. 24 方向の地磁気データをそれぞれ x, y, z 軸ごとに平均化し、特徴量とする。
2. 平均化した 3 軸の地磁気を利用して地磁気のノルムを算出し、新たな特徴量として追加する。これは式 2 で算出される。 N はノルム、 x_a, y_a, z_a はそれぞれ x, y, z の地磁気の平均を示す。

$$N = \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} \quad (2)$$

3. 平均化した地磁気データにラベル付けを行う。ラベルは、データを収集したグリッドの番号、所属するエリア、および境界番号で構成される。
4. 1, 2, 3 と同様の手順で、1 グリッドにつき 24 方向分のデータセットが作成できる。

3.3.4 ユーザの動作と推定例

図 5 にユーザのエリア移動例を示す。ユーザは矢印に沿って点 1, 2, 3 を順番に通過すると仮定する。ユーザは初期状態ではエリア推定履歴を持っていない。本提案システムは、ユーザが境界を通過した場合には、ユーザの所在グリッドを推定し、そのグリッドに対応したエリアをユーザの所在エリアとする。ユーザは、入口の境界の右半分を通過した際にエリア 1 と推定される。その後、点 1 に到達するまでの境界外では直前の所在エリア履歴からエリア 1 と推定される。さらに点 1 の境界の下半分にユーザが存在する場合はエリア 1、上半分に存在する場合はエリア 2 と推定される。次に点 1 から点 2 までは境界外のためユーザの所在エリア履歴の中で最新の所在エリアであるエリア 2 と推定される。その後、点 2 で境界内の下半分を通過したとき、エリア 1 に更新される。その後、点 2 から点 3 までは境界外のため履歴からエリア 1 と推定される。

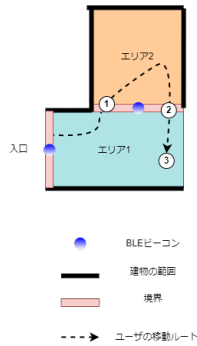


図5 ユーザの移動例

3.3.5 最近隣境界の判定

本提案システムでは、境界の通過を検知してエリアを推定する。そこで、ユーザがどの境界を通過しようとしているのか判定する必要がある。これは、3.3.1 項でラベル付けした境界の番号ラベルを用いてデータセットの中から最も近い境界の番号ラベルが付与されているデータセットを選択するために行う。ユーザに最も近い境界は BLE ビーコンを用いて判定する。ユーザが BLE ビーコンからの電波が届かない場所にいる場合は、3.3.4 項で述べた境界外での処理と同様に直前の所在エリア履歴によるエリア推定が行われる。BLE ビーコンと境界は紐づけられており、ユーザの現在地に最も近い BLE ビーコンが判明すると最も近い境界も判明する。このユーザの現在地に最も近い BLE ビーコンは BLE ビーコンから発信されている電波の RSSI を用いて判定する。2.2 節で述べたように RSSI は発信元と距離が近いほど大きくなる特性がある。これを利用し、最も RSSI が大きい BLE ビーコンに紐づけされている境界が最も近い境界と判定される。

図 6 はユーザに最も近い境界を判定する例である。ユーザは現在地で境界 1 と境界 2 の BLE ビーコンの電波を受信している。境界 1 の BLE ビーコンによる電波の RSSI は -50.3dBm であり、境界 2 の BLE ビーコンによる電波の RSSI は -69.1dBm である。RSSI は前述のように距離が近いほど強く、大きな値になるため RSSI が -50.3dBm である境界 1 が最も近い境界だと判定できる。なお、RSSI が同じ値になった場合は境界に割り当てられた番号の小さい境界と判定される。

3.3.6 境界の内外判定

サーバはユーザが収集したデータと事前に収集したデータセットを利用してエリア推定を行う。その際にユーザが境界内に居るのか境界外に居るのかを判定する必要がある。この境界の内外判定を、3 軸 (x, y, z) の地磁気およびノルムで構成される 4 次元ユークリッド空間上のユークリッド距離を利用して行う。まず、ユーザの収集したデータと

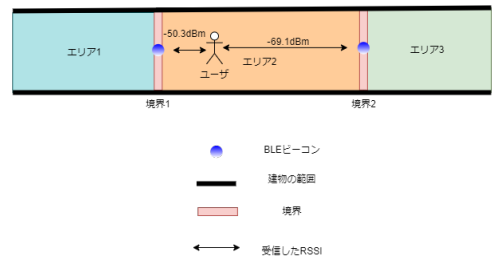


図6 最も近い境界の例

3.3.5 項で判定したユーザに最も近い境界の番号ラベルが付与されているデータセットのユークリッド距離を算出する。ユークリッド距離の閾値を設定し、算出したユークリッド距離が閾値未満の場合は境界内、閾値以上の場合は境界外と判定する。ユークリッド距離は式 3 で算出される。 E は算出されるユークリッド距離を示す。 $x_m, x_n, y_m, y_n, z_m, z_n$ は地磁気データ、 N_m, N_n はノルムを示す。 m は事前に収集したデータ、 n はユーザが収集したデータを添字である。

$$E = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 + (z_m - z_n)^2 + (N_m - N_n)^2} \quad (3)$$

3.3.7 エリアの推定

3.3.6 項でユーザが境界内であると判定された場合、エリア推定を行う。エリア推定には機械学習の k 近傍法 (k-nearest neighbor algorithm, k-NN) を用いる。このアルゴリズムは、データを分類する際に予測データに近いデータ k 個の多数決によってクラスを推測するものである。位置ごとの特徴を収集し、類似度によって位置推定を行う、フィンガープリント法の既存研究 [4][5] では、他のアルゴリズムと比較して k 近傍法が最も精度が良いとされている。

3.3.5–3.3.7 項までのエリア推定の手順を以下に示す。

1. RSSI を用いてユーザに最も近い境界を判定する。
2. 最も近い境界のデータセットを用いて境界の内外判定を行う。
3. 境界外と判定された場合、履歴から前回のエリアと推定される。境界内と判定された場合、k 近傍法を用いて境界内のデータセットの内、最も収集データに近いデータセットを算出する。
4. 算出された最も収集データに近いデータセットのエリアラベルを参照し、ユーザの所在エリアを推定する。

3.3.8 閾値の決定法

3.3.6 項で述べたように、境界の内外判定を行う際に、ユークリッド距離の閾値が必要となる。この閾値の決定は 2 ステップで行う。はじめに、スマートフォンの姿勢を固定した実験を行う。実験で取得した地磁気データは、実験シナリオと整合する必要があることを利用して、閾値の適切な

範囲を決定する。続いて、スマートフォンの姿勢を固定しない実験を行い、得られた閾値の範囲内でエリア推定精度が最も高くなる閾値を決定する。

スマートフォンの姿勢を固定した実験によるデータ収集

適切なユークリッド距離の閾値範囲を決定するため、はじめにスマートフォンの姿勢を固定した実験を行う。図7に実験シナリオを示す。この実験では、ユーザの移動経路とスマートフォンの姿勢を固定し、実験の誤差要因を可能な限り取り除く。ユーザは0.7–1.0m/sで歩行する。

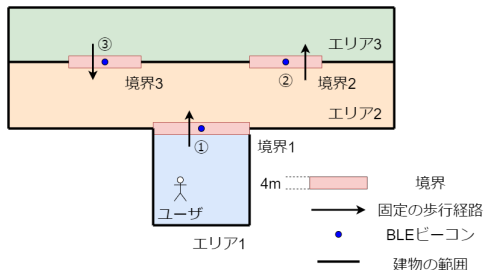


図7 スマートフォンの姿勢を固定した実験シナリオ

この実験の手順を以下に示す。

1. スマートフォンを用いて境界内の地磁気を収集する。地磁気はスマートフォンの姿勢を固定した1方向(x , y , z)を収集する。
2. 境界ごとに収集した地磁気データをデータセットにする。
3. スマートフォンを用いて図7の3つの境界を矢印の番号と方向に従い通過しつつ地磁気データとRSSIを収集する。まず、エリア1から開始し、境界1を通過しエリア2に入る。次にエリア2から境界2を通過し、エリア3に入る。最後にエリア3から境界3を通過し、エリア2に戻る。境界の通過は任意のタイミングで行い、すべての境界の通過時間が合計1分間になるように行う。また、スマートフォンの姿勢は一定姿勢で固定して実験を行う。データの収集間隔は3.3.2項と同様に0.5秒である。
4. 収集した合計120個のデータをサーバに送信する。
5. 1–4を1回として合計3回行う。

閾値の範囲決定方法

収集した1回120個のデータの内、閾値内に収まるべきデータ数を求める。閾値内に収まるべきデータ数は、実験においてユーザが境界内にいたときに収集されたデータ数である。これをユーザが通過した境界内の距離とデータ収集間隔、ユーザの歩行速度を用いて式4で求めることができる。

x は閾値内に収まるべきデータ数、 d は通過する境界内の距離、 v は歩行速度、 t はデータ収集間隔を表す。

$$x = \frac{d}{v \times t} \quad (4)$$

この実験では歩行速度は0.7–1.0m/sである。また、通過する境界内の距離は合計3つの境界を通過するため図7より12mとなる。データ収集間隔は0.5秒である。式4に上記の数値を代入した結果、この実験1回での理想的な閾値内のデータ数は24–34個となる。

図8はこの実験3回の平均データ120個の閾値ごとのデータ分布である。また、閾値は0.1刻みで変化させる。この結果より、実験シナリオと同じエリア推定結果となっている閾値は3.8–4.2である。これにより、境界の内外判定を行うために利用すべきユークリッド距離の閾値の範囲は3.8–4.2であると判明した。

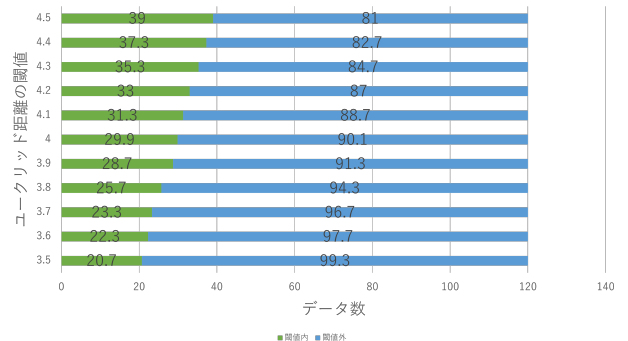


図8 実際のデータ分布

閾値の決定

図9は閾値の範囲3.8–4.2でのスマートフォンの姿勢を固定した実験におけるエリア推定の精度である。精度は閾値ごとに式5で算出される。この範囲内では閾値ごとの差は小さく、最大の差は閾値4.2と閾値4.1のときで2%である。範囲内で最も推定精度が高いのは閾値4.2の85.3%である。

$$\text{エリア推定精度} = \frac{\text{エリア推定の正解データ数}}{\text{収集データ数}} \quad (5)$$

閾値3.8–4.2の範囲内で本提案システムのエリア推定の精度が最大になるようにユークリッド距離の閾値を1つに決定する必要がある。そのために、スマートフォンの姿勢を固定しないエリア推定実験を行い、その結果を利用する。図10はこの実験の様子である。実験の手順を以下に示す。データ収集やデータセットは、3.3.2項、3.3.3項の手順に従って作成する。

1. 境界1, 2, 3で事前にデータ収集を行う。

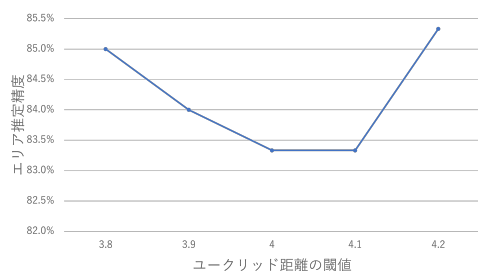


図 9 閾値ごとのエリア推定精度

2. 収集した地磁気データを用いてデータセットを作成する。
3. ユーザはエリア内を 1 分間スマートフォンの姿勢、移動経路、歩行速度を自由に歩行しつつ、スマートフォンでデータ収集を行う。
4. データセットと 1 分間歩行したデータを利用し、エリア推定を行う。
5. 実際にユーザが居たエリアと比較し、精度を算出する。
6. 1-5 を 1 回として合計 6 回行う。

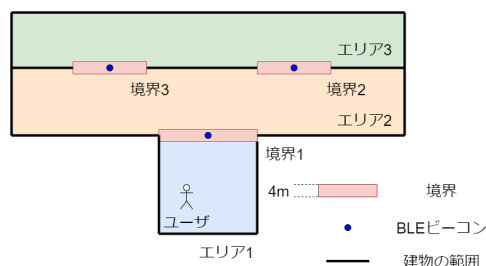


図 10 エリア推定の実験

図 11 はこの実験のエリア推定の精度である。data1-6 は、合計 6 回行った実験それぞれの精度である。また、図 12 は図 11 の data1-6 の平均精度である。精度は、方向を固定した実験と同様に式 5 で算出される。平均の精度は、閾値 3.8 が 72.1% と最も低くなっている。一方、閾値 4.2 は 78% と最も精度が高い。この結果からユークリッド距離の閾値は、端末の姿勢を固定した実験結果から得られた範囲である 3.8-4.2 の中から、端末の姿勢を固定しない実験結果で最もエリア推定精度の良い閾値 4.2 を選択するべきであることが示された。

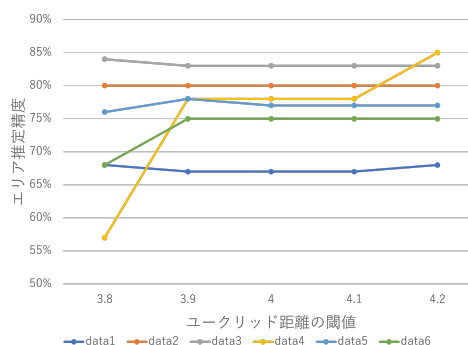


図 11 エリア推定精度

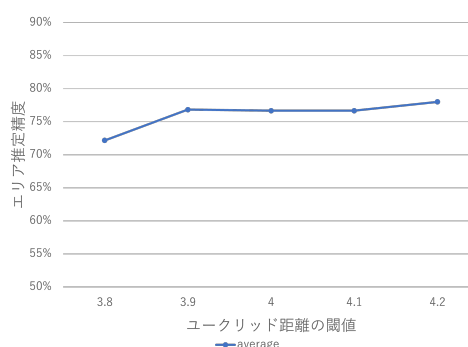


図 12 エリア推定精度の平均

4. 性能評価

4.1. エリア推定精度評価

本稿では、大学内の建物を利用した評価実験によるエリア推定の精度と実際の利用を想定した導入コストの評価を行った。また、本提案システムを BLE ビーコンのみを用いた手法と比較し、精度と導入コストの差を評価した。精度の評価は、評価実験を大学内の建物であらかじめ決めたエリア内でエリア推定を行い、結果を評価する。評価実験での BLE ビーコンはサンワサプライ社の MM-BLEBC5 を利用する。また、スマートフォンは Google 社の Android スマートフォンである、Nexus5 を利用する。コストの評価は、実在する施設を参考に BLE ビーコンの価格と事前データ収集における導入コストを算出することで行う。本提案システムの評価実験は、3.3.8 項の閾値の決定で述べた実験と同様に合計 6 回行う。エリア推定精度は、3.3.8 項の実験と同様に式 5 で算出する。

4.1.1 比較システムの概要

本提案システムに対する比較システムとして BLE ビーコンのみを用いた混雑度推定システム [2] を利用する。このシステムは、BLE ビーコンからの電波をユーザのスマー

トフォンで受信した際の RSSI のみを利用する．評価実験を行う各エリアの中心に 1 つずつ BLE ビーコンを設置する．ユーザのエリアは，データ収集の際に最も RSSI の強い BLE ビーコンの配置されているエリアと推定される．この比較システムで評価実験と同様の場所でエリア推定を行い，精度を比較する．

4.1.2 比較システムの実験内容

本提案システムと同様の場所でこの比較システムの評価実験を行う．この実験は精度に焦点を当てたものである．ビーコンの個数や境界の距離については，4.2 項で述べる．図 13 は実験の様子である．手順を以下に示す．

1. エリアの中心に BLE ビーコンを設置する．
2. エリア内をスマートフォンでデータ収集しつつ，1 分間スマートフォンの姿勢，移動経路，歩行速度を自由に歩行する．
3. 収集したデータと実際にユーザが居たエリアを比較し，精度を算出する．
4. 1-3 を 1 回として合計 6 回行う．

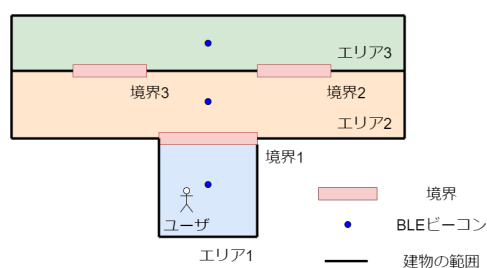


図 13 BLE ビーコンのみを用いた比較システムの実験

4.1.3 実験結果

表 1 にエリア推定精度の実験結果を示す．実験結果としては，本提案システムのエリア推定精度の最低値は 68%，最高値は 85% となり，平均値は 78.1% となった．比較システムの実験結果としては，最低値は 72%，最高値は 85% となり，平均値は 79.3% となった．

表 1 提案システムと比較システムの精度

手法	収集データ数	正解データ数	平均精度(%)
提案システム	720	562	78.1
比較システム	720	571	79.3

4.2. コスト評価

実際の施設を想定して BLE ビーコンと地磁気データの収集コストを算出する．BLE ビーコンの価格は今回使用したものを参考に，1 個 5000 円と仮定する．また，BLE ビーコンの通信半径は 15m とする．事前データ収集は 3.3.2 項と

同様にデータ収集を行うと仮定すると，1 グリッドにつき 2 分，境界の長さ 1m（4 グリッド）につき 8 分の時間がかかる．さらに，データ収集のための移動時間も考慮し，今回は 1m につき 9 分の収集時間が必要と仮定する．これをコストに換算するために日本の平均時給 [6] を参考にする．日本の平均時給は 961 円である．計算の簡略化のために時給 1000 円と仮定すると，データ収集 1m につき，150 円となる．これらの前提を元に本提案システムと BLE ビーコンのみを用いた比較システムにおける導入コストを算出する．

評価の場所は滋賀県草津市のイオンモール草津と滋賀県大津市のフォレオ大津一里山を想定する．イオンモール草津は店舗面積が約 78,000m² の大型ショッピングモールである．フォレオ大津一里山は店舗面積が約 41,000m² のショッピングモールである．これらを店舗ごとのエリア分割とジャンルごとのエリア分割の 2 つの手法で一定空間ごとにエリア分割する．ショッピングモールでは，店舗のジャンルによって店舗の配置が決められている．図 14 にジャンルによってエリア分割したイオンモール草津 1 階のフロアマップ [7] を示す．黄色が飲食，緑色がファッション，青色が雑貨，紫色がサービス，桃色がイオンスタイル（スーパーマーケット）となっている．店舗ごとのエリア分割では，通路をファッションエリア通路と飲食エリア通路の 2 種類に分割した．ジャンルごとのエリア分割手法では粒度が大きく，店舗ごとのエリア分割手法では粒度が小さくなる．この分割手法を各フロアに適用し，イオンモール草津ではジャンルごとのエリア数は 15，店舗ごとのエリア数は 178 となった．フォレオ大津一里山も同様の手法でフロアマップ [8] に基づいてエリア分割を行い，エリア数はジャンルごとの分割が 9，店舗ごとの分割が 98 となった．エリア数と境界数は比例しており，境界数が少ない程，地磁気収集コストと BLE ビーコン数が減少し，コストが低下する．

表 2 はイオンモール草津をエリア分割した場合のコストである．この場合，本提案システムは，BLE ビーコンのみのシステムと比較して約 13.1% のコスト削減ができる．また，表 3 はフォレオ大津一里山を店舗ごとにエリア分割した場合のコストである．この場合，本提案システムは，BLE ビーコンのみのシステムと比較して約 19.4% のコスト削減ができる．表 4 はこの方法でイオンモール草津をジャンルごとエリア分割した場合のコストである．この場合，本提案システムは，約 56.4% のコスト削減ができる．また，表 5 はフォレオ大津一里山をジャンルごとにエリア分割した場合のコストである．この場合，本提案システムは，BLE ビーコンのみのシステムと比較して約 53.4% のコスト削減ができる．つまり，本提案システムは，BLE ビーコンのみのシステムと比較してエリア分割の粒度が粗いほどコスト削減できることが示された．



図 14 イオンモール草津 1 階 [7]

表 2 イオンモール草津における店舗ごとのコスト表

店舗ごと	BLEビーコンコスト	地磁気収集コスト	合計コスト
提案手法	210個 × ¥5,000 =¥1,050,000	1107m × ¥150 =¥166,050	¥1,216,050
比較手法	280個 × ¥5,000 =¥1,400,000	0m × ¥150 =¥0	¥1,400,000

表 3 フォレオ大津一里山における店舗ごとのコスト表

店舗ごと	BLEビーコンコスト	地磁気収集コスト	合計コスト
提案手法	113個 × ¥5,000 =¥565,000	558m × ¥150 =¥83,700	¥648,700
比較手法	161個 × ¥5,000 =¥805,000	0m × ¥150 =¥0	¥805,000

表 4 イオンモール草津におけるジャンルごとのコスト表

ジャンルごと	BLEビーコンコスト	地磁気収集コスト	合計コスト
提案手法	82個 × ¥5,000 =¥410,000	682m × ¥150 =¥102,300	¥512,300
比較手法	235個 × ¥5,000 =¥1,175,000	0m × ¥150 =¥0	¥1,175,000

5. おわりに

本稿では、安価な BLE ビーコンとスマートフォンに標準搭載されている地磁気センサを用いて既存システムと比較して低コストかつ同等の精度を持つ屋内混雑度推定システムを提案した。評価の結果、本提案システムは、BLE ビーコンのみのシステムと比較して同程度のエリア推定精度を保ちながらコストを削減できることを示した。また、エリア分割の粒度が粗いほど、コストを削減することができた。

今後の展望としては、実際に大規模な商業施設で実験を行い、周囲の環境による影響も考慮する。また、今回は考慮していなかった閾値の決定コストや効率的な閾値の決定手法についても考慮する。

表 5 フォレオ大津一里山におけるジャンルごとのコスト表

ジャンルごと	BLEビーコンコスト	地磁気収集コスト	合計コスト
提案手法	54個 × ¥5,000 =¥270,000	468m × ¥150 =¥70,200	¥340,200
比較手法	146個 × ¥5,000 =¥730,000	0m × ¥150 =¥0	¥730,000

参考文献

[1] Shervin, S. and Shahrokh, V.: GIPSy: Geomagnetic Indoor Positioning System for Smartphones, *IPIN* (2015).

[2] Sato, D., Mihara, Y., Sato, Y., Tanaka, Y., Miyamoto, M. and Sakuma, S.: BLE ビーコンを利用した混雑度可視化サービス, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム, Vol. 8, No. 1 (2018).

[3] Azuma, K. and Arai, I.: 相互補完型 Wi-Fi, 地磁気フィンガープリンティング手法の評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 2 (2017).

[4] Ranimol, J. and Swapna, B, S.: Indoor Positioning Using WiFi Fingerprint, *ICCSDET* (2018).

[5] Devin, Ryan, R., Marcel, Bonar, K. and Maria, Irmina, P.: Multi-Floor Indoor Positioning Mobile Application using Earth’s Magnetic Field, *IEEE* (2017).

[6] ”日本労働組合連合会 | 労働・賃金・雇用 最低賃金労働・賃金・雇用”, <https://www.jtuc-rengo.or.jp/activity/roudou/chingin/>, (参照 2022).

[7] ”イオンモール草津 | フロアガイド”, <https://kusatsu.aeonmall.com/floorguide/>, (参照 2022-12-01).

[8] ”ショッピングガイド (フロア 1F) — フォレオ大津一里山公式ホームページ”, <https://otsu.foleo.jp/shop/?search=floor-1>, (参照 2022-12-01).