

動的遮蔽物を考慮した BLE による屋内位置推定手法の提案

星 尚志¹ 石塚 宏紀¹ 小野 智弘¹

概要：近年、屋内測位技術に関する研究開発が進み、市場への導入も徐々に実施されてきている。ショッピングモール等の店舗内における屋内測位では、Wi-Fi や BLE などの送信ビーコンを設備側に設置して、ユーザのスマートフォンなどを想定した受信機側で受信した各送信ビーコンの電波受信信号強度から位置を同定する手法が主に用いられている。しかしながら、Wi-Fi や BLE の通信帯域は、2.4GHz 帯であり、電波の反射、遮蔽、回折の影響が大きく、特に水分を多く含む人物による遮蔽の影響は大きい。そのため、店舗の天井や柱などの高所に送信ビーコンを設置できない場合、頻繁に起こる人々の往来による不定期な電波遮蔽によって測位精度が著しく低下してしまう。そこで本論では、カメラによる人物検知技術を利用して、時刻毎に動的遮蔽物である人物の位置を取得し、屋内測位による位置推定時において、動的遮蔽物による影響が小さい送信ビーコンを選択して位置を推定する手法を提案する。提案手法の評価において、我々は、実店舗における人物の動線データを利用した提案手法のシミュレータを実装した。結果として、本シミュレーション環境において提案手法が優位であり、同環境下において平均測位誤差が、1.2m 改善することが明らかになった。

An indoor location estimation using BLE beacons considering movable obstructions

HISASHI HOSHI¹ HIROKI ISHIZUKA¹ CHIHIRO ONO¹

1. はじめに

近年、屋内位置推定に関する研究が盛んに行われており、スマートフォンなどの携帯端末に搭載されたセンサ群や、Wi-Fi, BLE(Bluetooth Low Energy) のような無線信号を用いた屋内位置推定は、実用化に向けた開発 [1], [2] が進められており、屋内位置推定の利活用は、駅構内でのナビゲーションや商業施設での位置情報を連動したクーポン配布など個人向けサービスに利用されている [3]。一方で、小売店店舗内の来店者及び店員の行動を可視化し、分析することで、サービス品質や来店者満足度の向上を目指すような法人向けサービスへの活用も期待されている [4]。

屋外において位置を計測できるシステムとして GPS(Global Positioning System) が存在するが、GPS は複数衛星から受信した電波を計算することで位置を求めるため、ビルや屋根のような衛星からの信号を遮る障害物がない開かれた屋外において精度良く位置を測位可能であ

る。しかし、ショッピングモールや地下のように GPS 衛星からの電波が遮蔽される環境では大きく測位精度が劣化する問題点がある。

また近年スマートフォン利用者が増加しており、スマートフォンに内蔵された加速度センサやジャイロセンサなど、慣性センサを用いて位置を推定する PDR(Pedestrian Dead Reckoning) と呼ばれる手法も研究されてきた [5]。PDR は周囲の環境による影響を受けにくく、単体で位置推定可能であることから、屋内での利用に期待がされている。しかしながら PDR は人物の移動を相対的に追跡して推定する相対位置推定であり、実際の人物位置からの誤差が累積してしまうという問題点がある。その為、長期的に動作させる場合には、ある一定のタイミングで絶対位置推定などを行い推定位置を補正する技術が必須となる。

絶対位置推定の手法として、天井や壁に設置したカメラを用いる研究も行われている。カメラを用いた手法では、映像における背景を事前に保存しておき、背景との差分から人物位置を推定する方式 [6] や、人物画像を大量に学習

¹ 株式会社 KDDI 総合研究所

させておき、映像内にパターンとマッチした座標に人物が存在するとする機械学習を用いた方式 [7], また, 人物を検出した後, その人物の追跡には前フレームの人物領域と現在のフレームの人物領域を比較して位置を推定する方式 [8] が存在する. 最近では, 色情報の他に距離情報も同時に取得できる RGB-D カメラが比較的安価に入手できるようになってきたことから, RGB-D カメラを用いた研究 [9] も進められている. カメラを用いる手法では, 手前にある物体が背後にある物体を隠して見えなくなるオクルージョン問題や, 人物の位置を推定する際に複数人物が存在する環境下ではどの推定人物がどの個体か同定することができないという問題点が存在する.

一方で無線信号を用いた絶対位置推定も研究が行われており, この手法は配置位置が既知な無線信号受信機, 若しくは送信機が存在する環境で, ユーザも電波受信機, 若しくは送信機を持ち歩くことで, 受信した際の電波強度を用いてユーザの位置を推定する技術である. 無線信号を用いるため, 送信機と受信機の間には障害物が存在する場合には電波の反射, 遮蔽, 干渉などの影響を受け, 位置推定精度が劣化するという問題点がある. これまでにもフロア内の椅子・机などの静的な遮蔽物の位置を考慮し, 電波送信機の配置を最適化して位置推定精度の向上を図る研究 [10] が行われており, 静的遮蔽物に関する問題は解決されている.

しかしながら, オフィスや小売店のような無線信号を用いた測位が行われる環境では, 人物のように移動する遮蔽物が多数存在することが考えられるが, 動的遮蔽物を考慮した手法は未だ提案されていない. 動的遮蔽物が存在する場合, 事前に静的遮蔽物を考慮した最適な電波送信機の配置をしても, 動的遮蔽物による遮蔽が発生することで大きな測位精度の劣化を招く. 代表的な無線信号を用いた絶対位置推定の例として, Wi-Fi や BLE を用いた手法が研究されているが, これらの電波は 2.4GHz 帯の通信帯域を用いているため, 電波の反射, 遮蔽の影響を受けやすく, 水分を多く含む人物による受信電波強度の劣化も著しい. しかし, BLE 位置推定は無線信号送信機 (BLE ビーコン) が小型で設置が容易, コストも低く, スマートフォンなどでも通信が可能であることから, 屋内位置推定にとっても有効であると考えられる [11]. そこで本研究では, 無線信号, 特に BLE を用いた屋内位置推定を対象とした研究課題として, 測位環境に電波を吸収する動的な遮蔽物である人物の往来を考慮した位置推定手法を提案する. 本研究におけるシステム構成図を図 1 に示す. 本システムでは静的遮蔽物と無線信号送信機である BLE ビーコンが複数設置されているフロアにおいて, 動的遮蔽物である人物によって BLE ビーコンからの電波が遮蔽される環境を想定しており, BLE 受信機を所持している人物の位置を推定するシステムである. また図 1 に示すように天井に設置したカメラでフロア映像を撮影する. フロア上には動的遮蔽物が複数存在するため

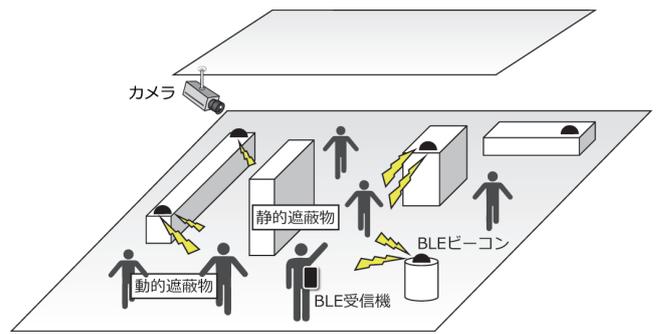


図 1 システム構成図

推定人物の同定は不可能だが, 複数の動的遮蔽物の位置は取得可能である. 測位時において動的遮蔽物の位置を取得してその座標を遮蔽物位置としてフロア情報を更新し, 事前設置した複数の BLE ビーコンの中から測位に最適な送信機を選択して利用することで, 動的遮蔽物数が存在する環境において, 既存手法と比較してユーザの位置推定誤差が優位であることを示した. また配置 BLE ビーコン数による平均位置推定誤差においても, より少ない送信機の数で測位可能であることを示した.

2. 関連研究

屋内における位置推定は, 慣性センサを用いる手法, カメラを用いる手法, 無線信号を用いる手法などが存在する. 本章では位置推定誤差が累積せず, 遮蔽物によるオクルージョンが発生しない無線信号を用いる絶対位置推定に焦点を当てて紹介する.

2.1 Wi-Fi を用いた屋内位置推定に関する研究

Duc ら [12] は Wi-Fi を用いた位置推定手法として, Triangulation という手法を利用している. Triangulation は端末と基地局間の距離と RSSI の減衰関係から距離を近似する式を定義し, 基地局からの推定距離と基地局との相対的な位置関係を元に測位を行う. 3 箇所以上の基地局から端末までの推定距離を算出し, それぞれの距離の和が最小になるように最小二乗法によって位置を推定する. Triangulation は基地局の配置が偏っている場合でも推定精度が低下しない利点があるが, 3 箇所以上の基地局で端末からの電波を受信できないと測位不可能であることと, 観測される RSSI には揺らぎが生じ推定距離に誤差が含まれるなどの問題点が存在する.

暦本ら [13] は加重平均法と呼ばれる手法を提案している. 加重平均法とは, 複数の基地局座標からの推定距離を重みとして位置の重み付き平均を行うことで推定位置と決定する方式である. 基地局座標からの推定位置は Triangulation と同様に端末と基地局間の距離と RSSI の減衰関係から距離を近似する. ある観測点で受信した Wi-Fi 基地局数を k , 観測点で受信した Wi-Fi 基地局の位置を $PS_n(x, y)$ と

し、各 Wi-Fi 基地局からの推定距離を $dist(RSSI_n)$ としたとき、推定距離 $dist(RSSI_n)$ が重みとなる。すなわち求める推定位置 $pos(x, y)$ は式 1 で表すことができる。

$$pos(x, y) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^k \frac{1}{dist(RSSI_i)} P S_i(x, y) \quad (1)$$

$$W = \sum_{i=1}^k \frac{1}{dist(RSSI_i)}$$

加重平均法は、Wi-Fi 基地局の配置密度が高い地点に推定位置が収束してしまう問題点や、1 箇所の Wi-Fi 基地局からの電波しか受信できなかった場合にはその Wi-Fi 基地局の位置が推定位置になってしまうという問題点がある。

また Bahl ら [14] は Wi-Fi からの電波について、Scene Analysis と呼ばれる手法を用いて位置を推定している。Scene Analysis は測位空間の緯度経度情報と基地局からの電波情報を結びつけた電波環境マップを事前に収集しておき、位置推定時に実際に観測した電波情報とパターンマッチングを行うことで絶対位置を推定する方式である。この手法は主に Fingerprint とも呼ばれている。

鬼倉ら [15] は、Wi-Fi を用いた位置推定手法として、Triangulation と Scene Analysis(Fingerprint) を組み合わせた手法を提案している。Fingerprint によって推定位置の候補を複数限定し、候補地点の中から Triangulation を用いて算出された地点を推定位置とすることで、2 種類の手法を組み合わせて精度向上を図っている。

2.2 BLE を用いた屋内位置推定に関する研究

山口ら [16] は BLE タグからの電波を用い、Fingerprint 方式で位置推定を行っている。その際に BLE タグの個数を最大 16 個から 1 つずつ減らしながら計算によって測位精度を評価している。BLE タグは棚やカウンターの上に設置されているが、このような遮蔽物による影響や、動的な遮蔽物が存在する環境下における位置測位手法については言及されていない。

また浦野ら [17] は BLE タグを人物の首から下げ、BLE 電波受信機であるスキャナーがフロア内に多数設置してある環境での位置推定手法を提案している。位置推定には各スキャナーで受信した受信電波強度を用いて最尤推定により決定している。最尤推定とは電波送信機からの受信電波がガウス分布に従うと仮定した時に、 n 番目の受信機からの距離 R_n を条件とする RSSI 値 P_n の確率密度関数 $f(P_n|R_n)$ を算出して、それぞれの確率密度関数の積 $f(P|R) = f(P_1|R_1)f(P_2|R_2)\cdots f(P_n|R_n)$ が最大となる座標を推定位置とする手法である。

2.3 遮蔽物を考慮した BLE 測位に関する研究

岡ら [10] は、無線信号の送受信間に静的遮蔽物がある場合において、直接波が届く場合に比べて受信信号強度が弱

くなることでノード間の距離が実際よりも長く推定され、位置推定精度に悪影響を及ぼす問題に対して、固定された遮蔽物のあるノード間の場合には異なる電波減衰モデルを用いることで精度向上を図る手法を考案している。既存研究では静的な遮蔽物を前提とした測位時に利用する無線信号送信機の最適配置について考慮しているが、実環境において最も測位精度に影響を及ぼす可能性が高い動的な遮蔽物である人物を考慮していない。

2.4 研究課題と本論の貢献

既存の無線信号を用いる手法では、動的遮蔽物を考慮していなかった。そのため、フロアの天井や柱などの理想的な位置に電波送信機を設置することが困難なショッピングモールや小売店などで、さらに動的遮蔽物が複数存在する環境で活用する場合には、事前の想定よりも電波の反射・遮蔽が発生するため位置推定誤差が増加する。本研究では動的遮蔽物による遮蔽を最小限にするため、位置推定を行う毎に動的遮蔽物の位置を更新して位置を推定することで、動的遮蔽物を考慮した位置推定が可能となる。

3. 事前検証

Bluetooth の通信帯域は 2.4GHz 帯を用いているため、岡ら [10] が述べているように、送信機と受信機の上に机や壁などが存在する場合に電波の反射、遮蔽、回折の影響を受ける。特に水分による電波の吸収が発生することから、水分を多く含む人物による遮蔽の影響は多大である。すなわち小売店やショッピングモールなどの屋内位置推定の利用が想定される場面では人物が多数存在することが考えられるため、人物による電波の遮蔽は位置推定精度に多大な影響を与える。我々は人物がどの程度電波を遮蔽するかを、BLE ビーコンから 0.5m 及び 5.0m 離れた地点で計測することで調査を行なった。BLE ビーコンを設置し、受信機を前後の腰に装着することで、自身が BLE ビーコンからの電波を遮蔽する環境を再現した。BLE ビーコンは芳和システムデザイン製の BLEAD®Version 2、受信機は BLE 電波を受信可能な専用のデバイスを作成した。BLE ビーコンから 1m の距離で計測される受信電波強度である TxPower は -78dBm とした。また受信機の BLE 受信速度は 1Hz である。場所は電波無響室で行い、電波の反射が発生しない環境で行なった。実験は以下の手順で 8 回行なった。

- 受信機を前後の腰に装着
- BLE ビーコンから 0.5m の地点に 1 分静止
- BLE ビーコンから 5.0m の地点まで歩行して 1 分停止
- 180 度方向転換して 1 分静止
- BLE ビーコンから 0.5m 地点まで歩行して 1 分停止

静止時における集計結果を表 1 に示す。集計は静止時のみのデータを用いた。この結果から、同じ送受信間距離でも、人物の存在によって大きく受信電波強度が劣化するこ

とがわかる。また 5.0m の地点で人物によって遮蔽される場合、電波を受信することができなかった。本事前検証によって、人物による電波の遮蔽は位置推定に大きな影響を与えることがわかる。

表 1 電波無響室での測定結果

送受信間距離	遮蔽物	平均受信電波強度 [dBm]	分散
0.5m	なし	-67.6	3.2
0.5m	あり	-91.6	6.1
5.0m	なし	-67.7	2.8
5.0m	あり	受信不可	-

4. 電波伝搬モデル

受信電波強度は主に距離によって減衰する。一般に式 2 で表すことができる。

$$rssi(r) = p_0 - 10d \log_{10} r [dBm] \quad (2)$$

ここで r は BLE ビーコンからの距離、 p_0 は BLE ビーコンから 1m の距離で計測される受信電波強度、 d は電波の減衰を表す定数である。また受信電波強度は距離だけでなく遮蔽物の影響によっても減衰するものとする。本研究では遮蔽物の数に比例して受信電波強度が減衰するものとした。この減衰が $r_{loss}[m]$ の電波伝搬による減衰と等価であるとした場合、電波伝搬モデルは式 3 で表すことができる。

$$rssi(r) = p_0 - 10d \log_{10}(r + nr_{loss}) [dBm] \quad (3)$$

ここで n は BLE 送受信間に存在する静的遮蔽物の数である。本モデルで静的遮蔽物が存在する場合の電波減衰を可視化したものを図 2 に示す。図 2 は左上に設置された BLE ビーコンからの電波が、距離と遮蔽物によってどのくらい減衰するかを式 3 に従い計算したものである。遮蔽物の有無によって電波減衰の度合いが異なることがわかる。本モデルで静的遮蔽物が存在する環境で BLE ビーコンを等間隔に設置した場合の位置推定誤差をシミュレーションした。図 3 は 2 パターンの静的遮蔽物配置で、三点測位による位置推定誤差をシミュレーションした結果である。図 3 より遮蔽物に囲まれ BLE ビーコンからの電波が遮蔽される位置では位置推定誤差が増加していることがわかる。

5. 提案手法

本研究では、動的遮蔽物として人物が店舗内を往来する環境において、位置推定に利用する BLE ビーコンを逐次的に選択して位置推定を行う手法を提案する。BLE ビーコンの選択は、動的遮蔽物である人物の位置をカメラによる人物追跡システム [6] により認識し、遮蔽物の位置情報を更新することで位置推定に優位な BLE ビーコンを選択する。これにより、位置推定を行う毎にフロア内の動的な遮蔽物の位置が把握できるため、測位精度を向上させるこ

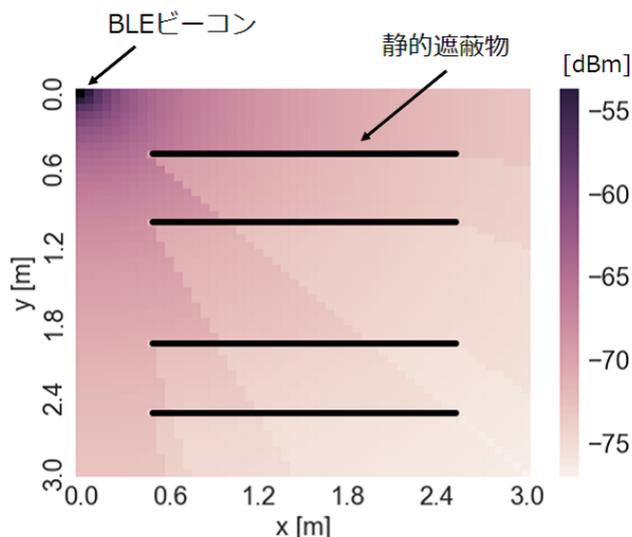


図 2 静的遮蔽物の影響による電波伝播の可視化

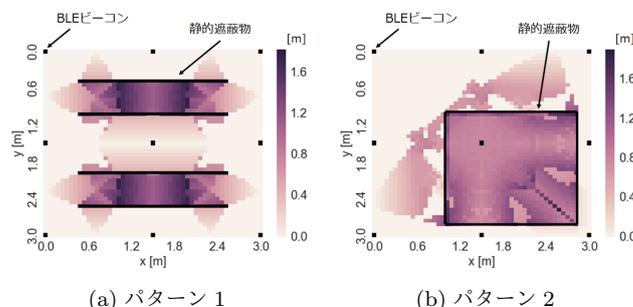


図 3 BLE ビーコンを等間隔に配置した際の誤差分布

とが可能である。本手法は BLE ビーコンをフロアに配置する事前配置フェーズと、BLE ビーコンを選択して位置を推定する位置推定フェーズに分かれている。各フェーズの詳細は次節に示す。

5.1 事前配置フェーズ

前処理として、静的遮蔽物を含むフロア情報から文献 [10] を元にした手法により n 個の BLE ビーコンを事前配置する。ここで静的遮蔽物とは机や椅子のような短時間で移動しない物体のことを指し、 n 個の BLE ビーコンの配置は 1 つずつ決定される。また BLE ビーコンの配置可能な候補箇所は歩行の妨げにならない壁沿い及び静的遮蔽物上とし、この BLE ビーコン配置候補点の集合を $A_{all} \subset S$ とする。ここで S は位置推定範囲の座標の集合とする。位置推定範囲はフロアを 0.5m 毎のグリッド状に区切った際の各格子点の座標である。ある BLE ビーコンの配置パターン $A \subset A_{all}$ に対して、観測者の位置を $u \in S$ としたとき、観測者と BLE ビーコン間の電波シミュレーションにより、推定位置が $e \in S$ となる確率 $P(A, u, e)$ を最尤推定によって算出する。その後、各観測者の位置 u に対して、位置推定の誤差の期待値 $E(A, u)$ を次の式 4 で定義する。

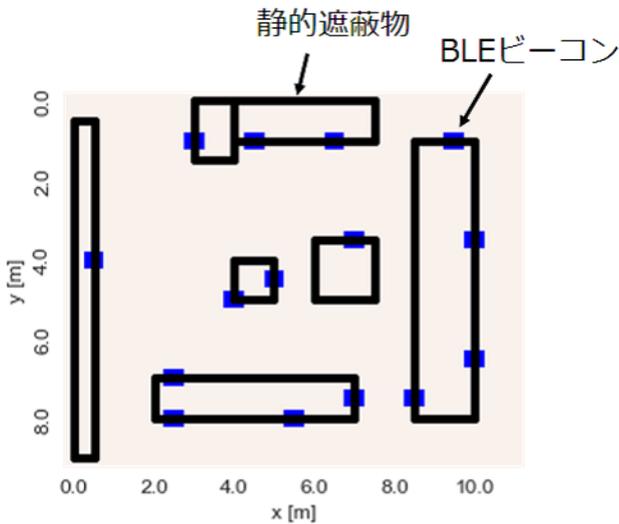


図4 フloor図と最適 BLE ビーコン配置

$$E(A, u) = \sum_{e \in R} \|u - e\| P(A, u, e) \quad (4)$$

また BLE ビーコン配置に関するコスト関数 $C(A)$ を位置推定範囲全体での $E(A, u)$ の総和 $C(A)$ として式5で定義する。

$$C(A) = \sum_{u \in S} E(A, u) \quad (5)$$

このコスト関数の値によって、BLE ビーコンの配置を1つずつ評価する。BLE ビーコン配置を $A_i (C A_{all})$, $i + 1$ 番目に配置する BLE ビーコン配置を a_{i+1} とし、下記式を満たすように a_{i+1} を決定していき、最適配置 $A_{opt} (C A_{all})$ を決定する

$$a_{i+1} = \arg \min_{a \in A_{all}} C(A_i \cup \{a\}) \quad (6)$$

ただし $A_0 = \phi$ である。以上により決定した A_{opt} の座標に BLE ビーコンを配置する。例として図4にフロア配置図と BLE ビーコン数 $n = 15$ とした際の最適 BLE ビーコン配置を示す。

5.2 位置推定フェーズ

位置推定フェーズの処理概要図を図5に示す。位置推定時においては、人物追跡 [6] により、人物を含む動的遮蔽物の存在する座標を特定し、その座標を遮蔽物座標としてフロア情報を更新する。その後、動的遮蔽物による影響を受けている BLE ビーコンを除外するために、 n 個の BLE ビーコン A_{opt} から位置推定部で最適な位置測位が可能な BLE ビーコン m 個を選択する。選択には事前配置と同様の手順で BLE ビーコンを1つずつ選択していく。すなわち選択候補点が既設されている n 個の BLE ビーコン座標の集合 A_{opt} となり、その座標を入力として m 個の最適 BLE ビーコンを選択する。選択した m 個の BLE ビーコンにより最尤推定結果を用いて位置推定を行う。

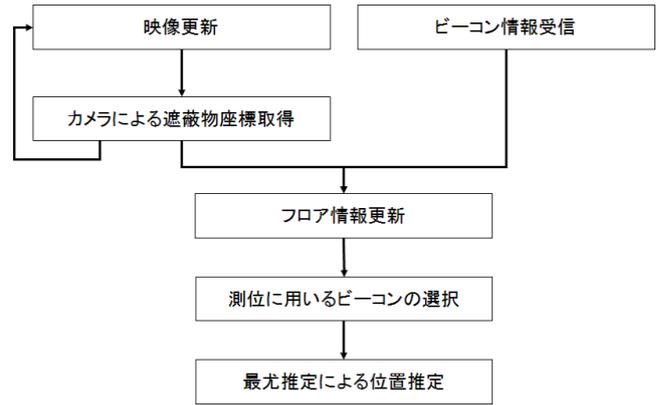


図5 位置推定フェーズの処理概要図

6. シミュレーションによる評価

本論では、動的遮蔽物として複数の人物が往来する環境下をシミュレーションにて再現し、提案手法と既存手法における測位精度の評価を実施する。シミュレーションでは、BLE 送受信間の動的遮蔽物数による評価と測位時に利用候補とする BLE ビーコン数による評価を行い、動的遮蔽物が多数存在する環境での提案手法の有効性を確かめた。

6.1 シミュレーション環境

本シミュレーションは測位対象となるフロア内が人物で混雑している状況を想定し、その中の1つの動線について1[s]間隔で測位を行う。動線は実際の小売店で人物が歩行したものを採用しており、カメラ映像から手動でラベル付けすることで真の位置が既知である。フロア混雑度として、フロア内人数をフロア面積で除算した値 $congestion$ を定義し、 $congestion > 0.1$ である環境を想定する。今回想定したフロア面積は約 $100m^2$ であり、実際の映像の混雑しているシーンで人物が10人以上映っていた事から0.1とした。例として、図6において $congestion > 0.1$ となるシーンを示す。図6の赤色の点が人物を表しており、人物が10人以上存在するため、BLE ビーコンからの電波が遮蔽されやすいことがわかる。また BLE 電波には平均0, 分散 σ^2 の白色ノイズが付加されるものとする。ここで、事前実験により $\sigma^2 = 8$ とした。評価は既存手法 [10] と比較するものとし、電波伝搬モデルにおけるパラメータも既存手法 [10] と同様に $p_0 = -67.50$, $d = 1.133$, $r_{loss} = 0.628$ とした。

6.2 BLE 送受信間の動的遮蔽物数による評価

複数の人物の動線について、BLE 送受信間の動的遮蔽物数による位置推定誤差を評価した。BLE ビーコンからの電波は距離によって減衰するが、約 $3m$ 以上離れると受信強度の分散が大きくなり、正確に受信できなくなる [18]。そこで、今回は約 $100m^2$ のフロアで BLE ビーコンが平均 $1.5m$ 以内に存在するために、 $100/1.5^2\pi > 15$ より事前配

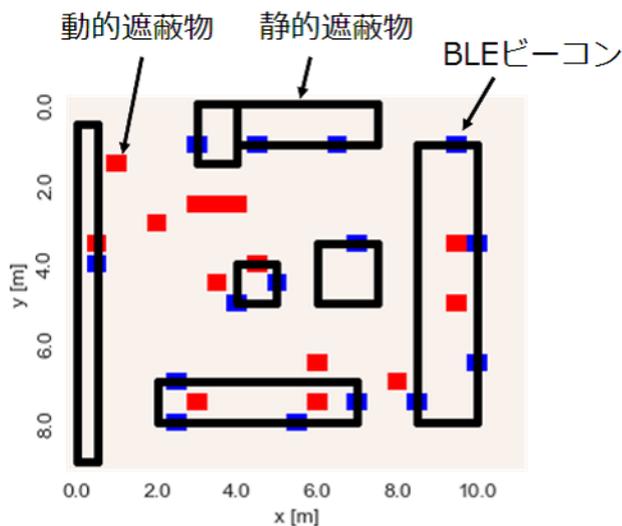


図 6 $congestion > 0.1$ となる例

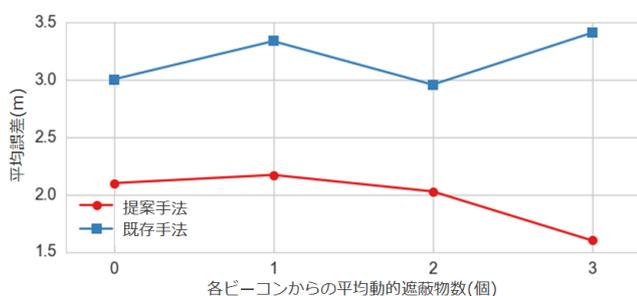


図 7 動的遮蔽物数による平均位置推定誤差の比較

置した BLE ビーコン数を $n = 15$ とした。位置推定に用いる BLE ビーコン数 m を 1 から 15 まで増加させ、時刻毎に平均した結果を図 7 に示す。これより、既存手法では動的遮蔽物数が 3 つまでは誤差が増加しているが、提案手法では誤差を抑制できており、動的遮蔽物の数によらず位置推定に優れた BLE ビーコンを選択できていると考えられる。また、動的遮蔽物が 0 個、つまり動的遮蔽物が存在しない場合でも、提案手法は誤差が少なかった。これは既存手法は位置推定地点全体で平均して誤差が最小になる地点に配置を行っているが、提案手法は位置推定を行う毎に、優れた BLE ビーコンを選択できるためである。提案手法は既存手法と比較して、位置推定誤差の平均が $1.20[m]$ 改善した。

6.3 BLE ビーコン数による評価

事前に配置された BLE ビーコンから測位時に選択される最適 BLE ビーコン数 m による位置推定誤差を評価した。事前配置した BLE ビーコン数は $n = 30$ とし、 m を 1 から 30 まで増加させ、時刻毎に平均した結果を図 8 に示す。これより、既存手法は BLE ビーコンの数が増加するに伴い誤差が低くなるが、それ以降は一定の誤差となった。一方で提案手法は選択 BLE ビーコン数に依らず誤差

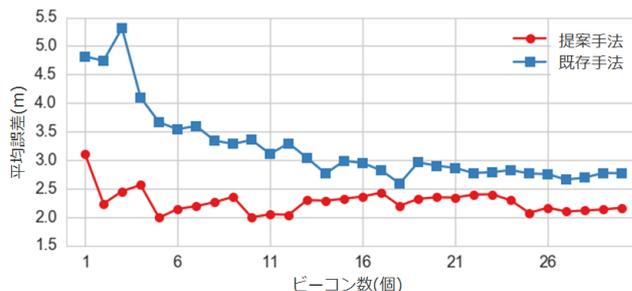


図 8 配置 BLE ビーコン数による平均位置推定誤差の比較

が一定となっており、BLE ビーコン数が増加すると既存手法と提案手法の誤差の差が小さくなることがわかった。これは、ビーコン数が増えると既存手法と提案手法で選択する BLE ビーコンが似てくるためであると考えられる。既存手法はフロア全体を平均して測位精度が良くなるように BLE ビーコンを配置してあるが、提案手法で測位毎に最適な BLE ビーコンを選択できるため、BLE ビーコン数が少なくても低い誤差になったと考えられる。また BLE ビーコン数が多くなると、その分既存手法でも測位に使用可能な BLE ビーコンが増えるので、提案手法との差が小さくなったと考えられる。

7. 終わりに

本研究では屋内における絶対位置推定について、BLE を用いた位置推定に着目し、特に動的遮蔽物である人物の往来を考慮した位置推定手法を提案した。シミュレーションにより BLE 送受信間の動的遮蔽物数による評価と測位時に利用候補とする BLE ビーコン数による評価を行い、提案手法では動的遮蔽物が多数存在する環境において既存手法よりも優位性があることを示した。また提案手法では少ない BLE ビーコン数で既存手法よりも低い位置推定誤差を達成することができることを示した。今後は実環境による実験・評価や、より動的遮蔽物に堅牢な手法を検討する予定である。

参考文献

- [1] セブン銀行, "京急線に設置の ATM でビーコンを活用した実証実験を開始", <http://www.sevenbank.co.jp/corp/news/2017/pdf/2017030101.pdf> (2017/04/19 アクセス)
- [2] LINE, "【LINE / キリン BV】「LINE」を活用した新たな自動販売機サービス「Tappiness (タピネス)」を 17 年春より展開!", <https://linecorp.com/ja/pr/news/ja/2017/1637> (2017/04/19 アクセス)
- [3] Nobuo Kawaguchi, Kei Hiroi, Atsushi Shionozaki, Masamichi Asukai, Toshimine Nasu, Yu Hashimoto, Takeharu Nakamura, Tetsuya Gotou, Shinsuke Ando, "Wi-Fi Human Behavior Analysis and BLE Tag Localization: A Case Study at an Underground Shopping Mall", MOBIQUITOUS 2016 - 13th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services, pp.151-159, Nov. 2016.
- [4] RetailNext, "RETAILNEXT のしくみ", <https://retailnext.net/ja/how-it-works-jp/> (2017/04/19 アクセス)

- [5] 上坂 大輔, 村松 茂樹, 岩本 健嗣, 横山 浩之, "手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案", 情報処理学会論文誌 vol.52(2), pp.558-570, Feb. 2011.
- [6] 小林 達也, 加藤 晴久, 菅野 勝, "単眼全方位カメラを用いた遮蔽に頑健な人物動線追跡手法の提案", 信学技報, vol. 116, no. 411, PRMU2016-146, pp. 321-326, Jan. 2017.
- [7] Yuki Nagai, Naoya Makibuchi, Daisuke Kamisaka, Jianfeng Xu and Shigeyuki Sakazawa, "3D Person Tracking In World Coordinates and Attribute Estimation with PDR", Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia, pp.1139-1142, Oct. 2015.
- [8] 小阪 勇気, 平山 高嗣, 岩井 儀雄, 谷内田 正彦, "全方位画像を用いた歩行軌跡による確率的人物行動認識システム", 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM) 2005-CVIM-149(23), pp.163-170, May, 2005.
- [9] 木原 渉, 河畑 凌, 大西 正輝, 興梠 正克, 蔵田 武志, "屋内環境における人の位置計測に向けた RGB-D カメラに映る PDR 利用者の同定", 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM) 2016-CVIM-200 pp.1-6, Jan. 2016.
- [10] 岡 海人, 五十嵐 正樹, 内山 英昭, 島田 敬士, 長原 一, 谷口 倫一郎, "無線位置推定における遮蔽物を考慮したアンカーノード配置", マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2015) シンポジウム pp.799-802, Jul. 2015.
- [11] 石塚 宏紀, 上坂 大輔, 黒川 茂莉, 渡邊 孝文, 村松 茂樹, 小野 智弘, "BLE シグナルと PDR によるハイブリッド屋内測位手法の基礎検討~Open Beacon Field Trial 参加における実験結果の共有~, 研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL) 2014-MBL-71(21), pp.1-6, May, 2014.
- [12] Tran Xuan Duc, 宮崎 和哉, 西尾 信彦, "無線 LAN 位置マーカ方式測位への状況適用型測位手法", マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, Vol.2012, pp.1017-1026, Jul. 2012.
- [13] 暦本 純一, 塩野崎 敦, 末吉 隆彦, 味八木 崇, "PlaceEngine-実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤", インターネットコンファレンス論文集, Vol.2016, pp.95-104, 2006.
- [14] P.Bahl, V.N.Padmanabhan, "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System", INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, Vol.2, pp.1017-1026, 2012.
- [15] 鬼倉 隆志, 高柳 健司, 望月 祐洋, 村尾 和哉, 西尾 信彦, "無線 LAN の端末側測位と基地局側測位を用いた測位精度改善手法", 情報処理学会研究報告. UBI, 2015-UBI-46(3), pp.1-8, May, 2015.
- [16] 山口 修平, 荒井 大輔, 大岸 智彦, "BLE タグを用いた屋内位置測位における設置タグ数の影響評価", 信学技報, vol. 114, no. 478, IN2014-146, pp. 151-156, Mar. 2015.
- [17] Kenta Urano, Kei Hiroi, Kei Hiroi, Nobuo Kawaguchi, "A Location Estimation Method using BLE Tags Distributed Among Participants of a Large-Scale Exhibition", MOBIQUITOUS 2016 - 13th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services, pp.124-129, Nov. 2016.
- [18] Apple, "Getting Started with iBeacon Version 1.0", <https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf>, Jun. 2014.