

BLEを用いた屋内位置推定におけるヒトによる電波強度のゆらぎに応じた特徴量補正手法の提案と評価

酒井 翔悟¹ 梶岡 慎輔¹ 松尾 啓志¹

概要：現在，学内に BLE を用いて出欠確認を行う位置推定システムが稼働している．講義中において学生の座席の位置を推定することが可能な，高精度な屋内位置推定が実現できれば，ビッグデータとして活用できることが期待される．高精度な屋内位置推定方法として，電波強度のパターンマッチングを行うフィンガープリント法がある．フィンガープリント法の問題点として，学生が多く着席している教室などでは，ヒトが動くことで電波強度が変動するため，位置推定精度が低下するということが挙げられる．本稿では，受信電波強度の変動をゆらぎと定義し，複数のビーコン発信機のうち，見通しが良い，ゆらぎの小さいビーコン発信機を信頼し，見通しが悪い，ゆらぎの大きいビーコン発信機を信頼しないことで，ヒトが存在する環境で位置推定精度を向上させることを目指す．提案手法を用いて基礎評価を行い，位置推定結果が改善することを確認した．

キーワード：K 近傍フィンガープリント，IoT，特徴選択

1. はじめに

近年，省電力無線通信を行う Bluetooth Low Energy (BLE) に対応したデバイスが普及し注目を集めている．モバイル端末は電力に限りがあるため，通信を行う際，省電力性が求められる．BLE を用いることで，より長時間通信を行うことが可能となる．また，IoT の拡大により，モバイル端末やセンサが，様々な場所でインターネットに接続され，様々な情報がビッグデータとして，収集することが可能となっている．収集したビッグデータを利用して，様々なサービスを提供しようとする試みが行われている．BLE を用いた通信を行うことで，モバイル端末が，ビッグデータを利用したサービスを実現することに期待が集まっている．特に，モバイル端末が無線電波発信源の電波強度を受信することによって位置推定を行う，高精度な屋内位置推定サービスに注目が集まっている．

従来，無線 LAN[1][2] や無線センサネットワーク [3] を用いて，多数の屋内測位技術が研究されてきた [4]．

屋外における位置推定を行う方法として GPS が用いられている．しかし，屋内では，衛星電波が届かないため，GPS を用いることができない．屋内位置推定を行う方法として，端末が受信した基地局電波の到来時刻や到来時間

差，受信電波強度から距離に基づいて電波が減衰する物理モデルに基づいて，位置推定を行う方法が考えられてきた．しかし，屋内では，シャドウイングやマルチパスの影響を受けるため，正確な電波減衰モデルを作成することができない．

高精度な屋内位置推定方法として，フィンガープリント法が広く用いられている [5]．フィンガープリント法では，モバイル端末が未知の地点で観測した電波強度と，あらかじめ，特定の地点で事前測定した電波強度のパターンマッチングを行うことで位置推定を行う．そのため，電波の回折，反射，吸収が起こる屋内環境で比較的高精度な位置推定を行うことができる．また，無線 LAN や Bluetooth の電波強度を用いることで，普及しているモバイル端末で特別な装置の必要なしに低コストで位置推定を行うことができる．

位置推定精度は，テンプレートデータが様々な事前観測点で様々な異なる強さの電波強度を取得できるかに依存する．つまり，設置場所が固定されている電波発信源に依存する．より高精度な位置推定を行うためには，電波発信源の密度を増やし，多くのビーコン発信機，事前観測点で，様々な異なる強さの電波強度を取得する必要がある．

無線 LAN を用いた位置推定は数多く行われてきた．しかし，無線 LAN は一般に設置コストが高く，また，電源供給源の存在する場所にしか設置できないため，無線 LAN

¹ 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

を高密度に設置することは、非現実的であった。また、無線 LAN は通信を最適化するところに配置してあるため、位置推定に適した場所に配置されているとは限らない。最近、省電力、低価格、電池駆動のため手軽に設置可能である、Bluetooth Low Energy (BLE) [6] ビーコンを用いることで、高精度な位置推定が実現されようとしている [7]。

高精度な位置推定を実現することにより、学内で行われている講義の出欠確認や、学生の座席の位置と成績の関係を分析することが可能になることが期待されている。

高精度な屋内位置推定手法であるフィンガープリント法を用いて位置推定を行う場合、事前測定において電波強度を取得した環境と、観測した電波強度を取得した環境が異なると、位置推定精度が低下する。例えば、ビーコン発信機と端末との間に、ヒトが存在すると、ヒトがいない状況で事前測定した環境と異なり、電波強度が変動や減衰をし、同じ測定点での電波強度に差が出るため、パターンマッチングを行うと精度が下がる。そこで、ヒトによる影響を受けたビーコン発信機から取得した電波強度がパターンマッチングを行う際、相違度計算に与える影響を小さくすることで、ヒトによる環境変化の影響を小さくし、位置推定手法を改善する手法を提案する。

2. 関連研究

電波強度を用いた位置推定手法について紹介する。

電波発信源と端末との間に、壁などの固定された障害物があるときに、障害物による電波の減衰をモデル化 [1] するなど、電波強度の変動を補正する研究はされてきた。しかし、今まで、高密度に電波発信源を設置するのと、ヒトによる電波減衰を高精度にモデル化することが難しかったため、ヒトがいる状況で高精度な位置推定を行う研究はされて来なかった。

電波モデルを用いた位置推定では高精度な位置推定を行うことが難しいと考えられている。高精度な屋内位置推定方法として、フィンガープリント法が広く用いられている [5]。

K 近傍フィンガープリントにおいて、相違度計算の際に電波発信源の重み付けを行い、教師データと RSSI 差が大きい可能性が高い、ゆらぎが大きい電波発信源が相違度計算に与える影響を少なくすることで、位置推定精度を改善する研究を紹介する。

屋内ロボットナビゲーションにおいて、ヒトが部屋の中をランダムに動いている状態で、平均電波強度が小さいほど分散が大きくなるという線形な関係を見出し、ロボットが観測した平均電波強度から、分散が大きい電波強度が相違度計算に与える影響を小さくする手法が提案されている [8]。しかし、ヒトが密集している状況では、電波強度は不規則に変動するため、分散と平均値の線形な関係を見つけないのは難しいため、相違度計算に用いる重み付けを行う

ことが難しい。

屋外で位置推定を行う際、相違度計算を行う際に、電波伝搬モデルを用いて、電波強度が強いほどアクセスポイントを信頼する重み付けをする手法が提案されている [9]。しかし、屋内では電波環境が電波伝搬モデルと大きく異なるので、電波強度に基づいた重み付けは有効ではない。

無線 LAN を用いた位置推定において、無線 LAN の設置場所は通信目的に最適化されており、位置推定目的に配置されていないので、ビル内で電波強度の最大値の大きい無線 LAN アクセスポイントを選択することで、位置推定を向上させる手法が提案されている [10]。しかし BLE は任意の場所に設置でき、また、狭い部屋の中では、電波の干渉で電波の強め合いや弱めあいがおきるため、必ずしも最大値の大きいビーコン発信機が端末から近い場所にあるとは限らない。

2.1 K 近傍フィンガープリント

高精度な屋内位置推定方法である、K 近傍フィンガープリントについて説明する。フィンガープリント法では、端末が未知の地点で観測した電波強度と、あらかじめ特定の地点で事前測定した、事前測定点の電波強度のパターンマッチングを行う。

$$D(j) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (r_k - s_{jk})^2}$$
$$EPOS = \frac{\sum_{i=1}^k (D(i)^{-1} \cdot Pos(i))}{\sum_{i=1}^k D(i)^{-1}}$$

$D(j)$ は j 番目の事前測定点で測定した電波強度と観測した電波強度の相違度 (小さいほど似ていることを示す)、 N はビーコン発信機の個数、 r_k は k 番目のビーコン発信機の観測電波強度、 s_{jk} は j 番目の事前観測点における k 番目のビーコン発信機の電波強度を示す。 $Pos(j)$ は j 番目のフィンガープリントの座標を表しており、 $D(j)$ の小さい $top-k$ と $D(j)$ に対応する座標から、推定座標 $EPOS$ を得る。

2.2 K 近傍フィンガープリントの問題点

電波強度を用いたフィンガープリント法による位置推定手法は、一般に、事前測定点間の電波強度の違いが明確なほど、また事前測定点の数が十分多く、電波強度の変動が小さいほど正確な推定が行える。学生が多く着席している教室では、ヒトが動くことで電波強度の変動や減衰が生じ、事前測定した電波強度の値と差が生じるため、それが位置推定精度低下の要因となる。

ヒトによる電波強度のゆらぎについて説明する。例えば、

ビーコンと端末とヒトとが、図1のような位置にあるとき、端末が受信した電波強度は図1に示されるグラフのようになる。グラフの縦軸は電波強度、横軸は時間、凡例はヒトの人数を表す。ビーコン発信機と端末の間にヒトがいない場合、ビーコン発信機から受信した電波はビーコン発信機から端末まで直接届くため、電波強度をゆらが無い。しかし、ビーコン発信機と端末の間にヒトが大勢いる場合、ヒトによって電波が吸収、回折するため、ビーコン発信機からの電波強度はゆらぎ、減衰する。

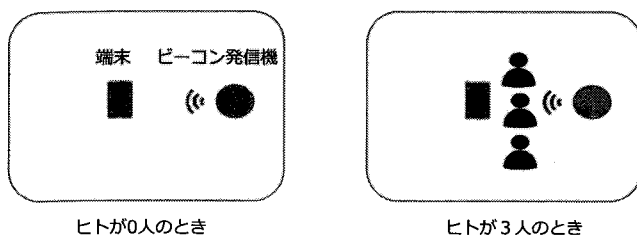


図1 ビーコン発信機と端末の間のヒトの位置

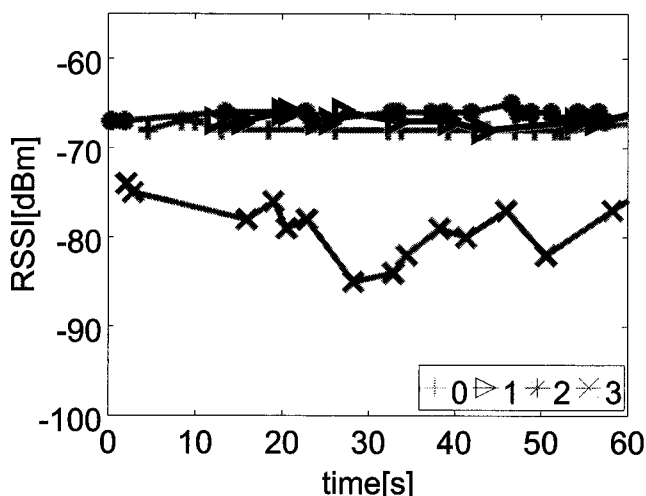


図2 ヒトの人数別 電波強度の時間的推移

3. 提案手法

この章では、電波強度のゆらぎの大きいビーコンの影響を抑えることで位置推定精度を向上させる提案手法について説明し3.2節でゆらぎの大きいビーコンが位置推定精度に与える影響を説明し、そして2節で提案手法を説明する。

3.1 電波強度のゆらぎの大きいビーコン発信機が位置推定に与える影響

電波強度のゆらぎが大きいビーコン発信機が位置推定結果に及ぼす影響を検証するために、電波強度のゆらぎを分散で評価し、観測した30秒の電波強度の分散が一定の閾値A(本稿ではA=10とする)より大きいビーコン発信機を相違度計算に選択しない方法(以後、ビーコン選択手法と呼ぶ)を評価した。

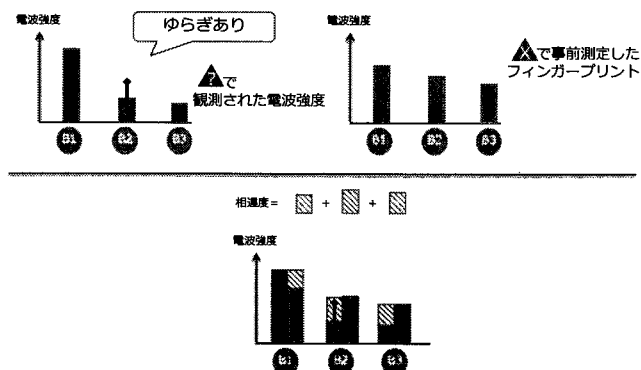


図3 既存手法における相違度計算

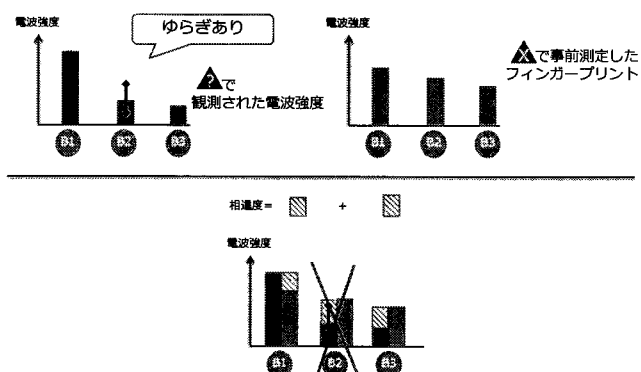


図4 ビーコン選択手法における相違度計算

ビーコン発信機を選択による相違度計算の例を図4を用いて説明する。左上のグラフはある未知の地点で観測された電波強度で、右上のグラフは事前測定したフィンガープリントを表している。縦軸は平均電波強度の強さを表し、横軸はビーコン番号を表している。そして、ある地点で観測されたビーコン発信機2の電波強度がゆらいでいるとする。このとき、ある地点で観測された電波強度と測定点Xの電波強度の相違度を計算するとき、既存手法であるK近傍フィンガープリント法では、図3の下図のようにそれぞれのビーコン発信機ごとに求めた電波強度の差の総和が相違度となるが、ビーコン発信機を選択する手法では、図4の下図のように電波強度のゆらぎが大きいビーコン発信機2の電波強度の差を用いないことで、ゆらぎの大きい電波強度が、相違度計算に与える影響を小さくする。ゆらぎの大きい電波強度は真の地点の電波強度と大きく異なるので、影響を小さくすることで、位置推定精度を改善することができると思われる。

分散が閾値Aより大きいビーコン発信機を相違度の計算に用いないとき、位置推定結果の平均誤差が改善するか検証した。閾値Aは平均8割のビーコン発信機が位置推定に使われる値とした。相違度計算にすべてのビーコンを用いる既存手法、分散が閾値Aより大きいビーコンを相違度計算に用いないビーコン選択手法を用いて評価した。チャレンジデータとして、座席に8人座っているときで電波強度を測定した状況のデータを用いた。

簡易検証結果を図5に示す。

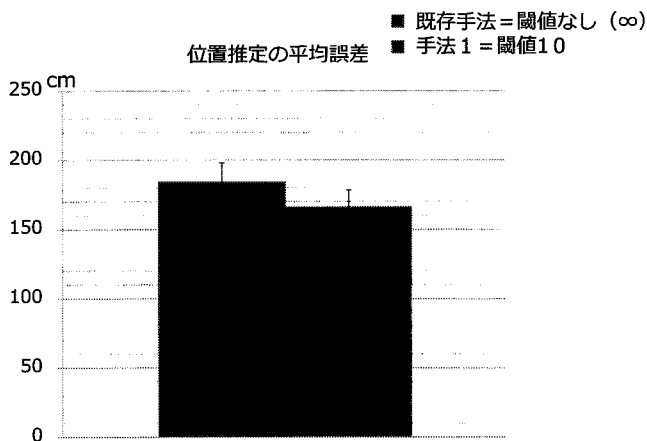


図5 ビーコン選択手法による位置推定の平均誤差

グラフの縦軸は位置推定の平均誤差を表している。誤差は正解の地点と推定した地点のユークリッド距離を表す。エラーバーは80%の信頼区間を表す。

赤の既存手法はすべてのビーコンを用いて位置推定を行う場合青の手法1はビーコン選択手法を表す。ともに $k=3$ を用いた。

密度低のとき、閾値を10に設定した手法1では、相違度計算の際にゆらぎの大きいビーコンを使わないため、位置推定結果が改善することが確認できた。

つまり、分散が一定以上のビーコン発信機を相違度計算に用いないことで、位置推定結果は改善することを確認した。

図6にヒトがいる時のチャレンジデータを用いた時の電波強度の差と分散の関係を表したグラフである。点はビーコン発信機ごとに正解の地点の電波強度からチャレンジデータの電波強度を引いた値で横軸は電波強度の分散を表す。

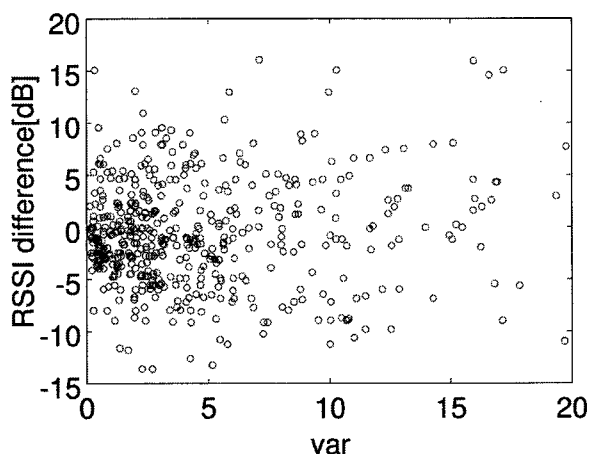


図6 チャレンジデータごとの分散と電波強度の差

グラフより、分散が大きい電波強度は電波強度の差が大

きい傾向にあると考えられる。相違度計算を行う際、分散が一定以下の電波強度は分散が小さいほど信用し、分散が大きいほど信用しないことで、位置推定結果が改善できるのではないかと考えた。

3.2 提案：ビーコン発信機の重み付け

電波強度のゆらぎに応じてビーコン発信機に重み付けを行うことで、ゆらぎの大きいビーコンが相違度に与える割合を小さくすることで、位置推定の精度を向上させる方法を提案する。

提案手法による相違度計算の概念を図7を用いて説明する。図7の左上のグラフはある未知の地点で観測された電波強度で、右上のグラフは地点Xで事前測定したフィンガープリントを表している。

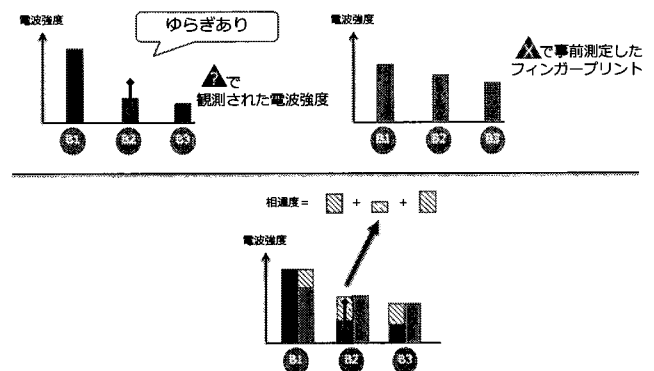


図7 提案手法における相違度計算

ある地点で観測されたビーコンB2の電波強度がゆらいでいるとする。ある地点で観測された電波強度と事前測定点Xの電波強度の相違度を計算するとき、既存手法であるK近傍フィンガープリント法では、それぞれのビーコン発信機ごとに求めた電波強度の差（赤斜線）の総和が相違度となるが、提案手法では、下の図のように、電波強度のゆらぎが大きいビーコンB2の電波強度の差を小さくすることで、ゆらぎの大きいビーコンの電波強度が、相違度を与える影響を小さくする。

ゆらぎは電波強度の分散で評価し、分散が大きいほど相違度に影響を与えにくいように重み付けを行う。 j 番目の事前測定点で測定した電波強度とある地点で観測した電波強度の相違度 $D(j)$ は以下の式で計算する。

$$D_j = \sqrt{\sum_{k=1}^N \{w_{jk}(r_k - s_{jk})\}^2}$$

$$w_{jk} = \frac{f(p_{jk})}{\sum_{l=1}^N f(p_{jl})}$$

$$f(x) = \begin{cases} -\frac{1}{A}x + 1 & (0 \leq x < A) \\ \epsilon & (x \geq A) \end{cases}$$

N はビーコン発信機の個数, r_k は k 番目のビーコン発信機の観測電波強度, s_{jk} は j 番目の事前観測点における k 番目のビーコン発信機の電波強度を示す. $f(x)$ は測定した電波強度からビーコン発信機ごとに求めた分散から重みを計算する関数である. ϵ は十分に小さい数を表す. w_{jk} は j 番目の事前観測点における k 番目のビーコン発信機の重みを表す. 重み w_{jk} は分散が大きいほど, 相違度の影響を受けにくいように行う. 今回は閾値 $A = 10$ より大きい分散のビーコンは相違度計算に用いない. p_{jk} は j 番目の事前観測点における k 番目のビーコン発信機の観測電波強度の分散, このように分散が小さいビーコンを信用し, 分散が大きいビーコンを信用しないことにする. また, 一定以上大きい分散のビーコンは用いないようにする.

4. 評価

提案手法の有効性を確認するため, 位置推定精度の評価を行った.

電波強度の測定は約 $7\text{m} \times 7\text{m}$ の図8のような部屋で行った. 席と席の間隔は 85cm である. 端末は Nexus7(2013)1 台を用い, 8 人着席して, 研究ミーティングを行っている時に机の上に端末を図8の測定点に示す位置に置き, ビーコン収集アプリを起動して3分間電波強度を測定した.

測定点は, 6 台の机の上に各三点ずつ計 18 点定めた. ビーコン発信機は図8の緑丸に示す6点に配置した. 部屋の高さは約 3m である. ビーコン発信機はなるべく障害物の影響を受けないようにするため, 高さ約 $2\text{m}30\text{cm}$ の場所に設置した.

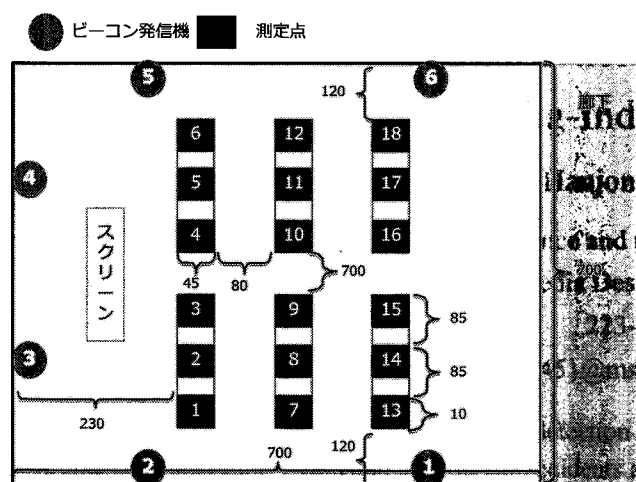


図8 電波強度を測定した部屋の見取り図 (単位は cm)

図9に位置推定の平均誤差を比較したグラフを示す. 誤差は真の地点と推定地点とのユークリッド距離を表す. 既存手法はK近傍フィンガープリント, 手法1はゆらぎが大きいビーコン発信機の電波強度を相違度計算に用いないビーコン選択手法, 手法2はゆらぎに応じてビーコン発信機の重み付けを行う提案手法を示す. エラーバーは95%信

頼区間を表す. 提案手法では既存手法に比べ 30cm 位置推定精度が改善することが確認できた.

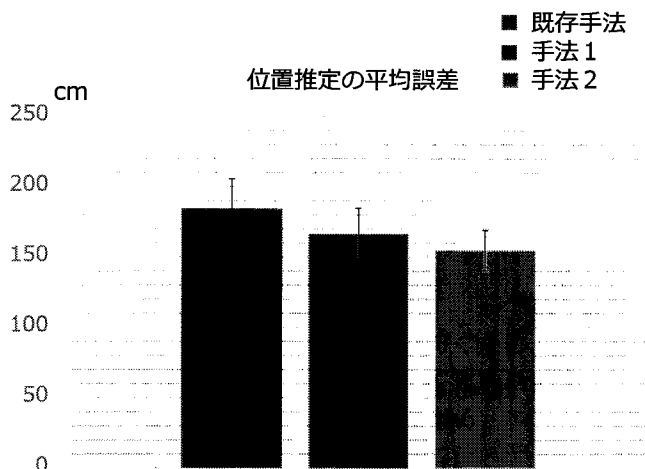


図9 位置推定の平均誤差

(赤: 既存手法, 青: ビーコン選択手法, 緑: 提案手法)

また, 分散が大きいビーコン発信機の影響を小さくすることで, 真の地点の電波強度とチャレンジデータの電波強度の差が他の地点と比べて小さくなることを確認した. そして, 相違度とそれに対応する地点の値を確認すると, 真の地点に近い地点が, 提案手法では既存手法に比べて, 選ばれやすくなっていることが確認できた.

ビーコン選択手法や提案手法で位置推定精度が低下するチャレンジデータでは, 相違度計算に使われるビーコン発信機数が3以下になっているデータが存在した. このような場合は提案手法の位置推定精度が低下する. 選択ビーコン発信機数が少ない場合に, 位置推定の精度を向上させることは課題である.

図10に地点ごとの平均誤差を示す. 1は既存手法, 2はビーコン選択手法, 3は提案手法を示す. 縦軸は測定点ごとの平均推定誤差, 横軸は測定点番号を表す. 測定点9は

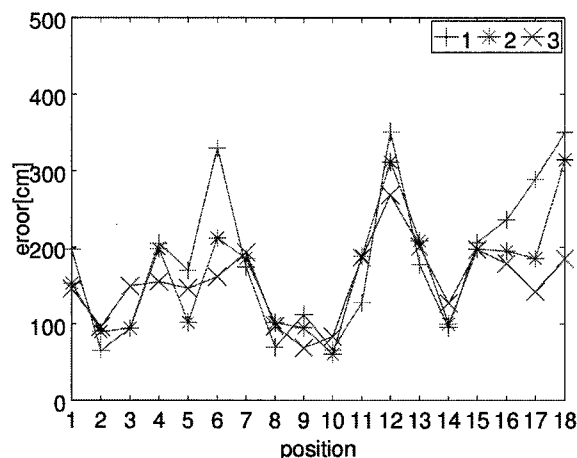


図10 測定点ごとの平均誤差

(1: 既存手法, 2: ビーコン選択手法, 3: 提案手法)

他の地点に比べて、3手法とも位置推定結果がよく、測定点12では3手法とも位置推定結果が悪くなった。

図11に測定点9-12における電波強度の差と分散の関係を示す。4枚のタイトルは測定点、縦軸はその測定点の教師データの電波強度からその測定点のチャレンジデータの電波強度を引いた値である。色と形が同じ点は同じチャレンジデータであることを示す。

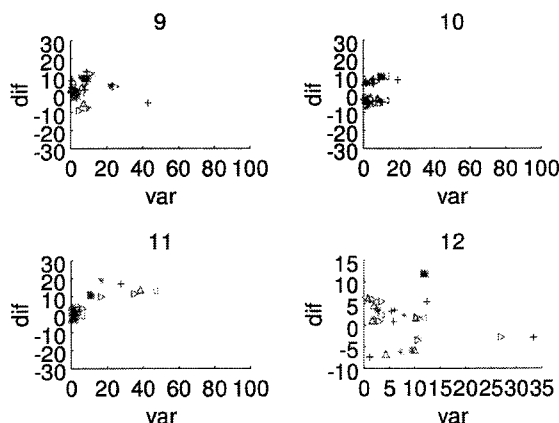


図11 測定点9-12における電波強度の差と分散

図10において、測定点12で3手法とも悪くなった原因は、図11より、分散が低いチャレンジデータが真の地点での教師データと電波強度が大きく異なっていたためだと考えられる。測定点12での位置推定の精度は、測定点ごとに補正を行うことで、向上できると考えている。

5. まとめ

本論文ではヒトの動きで電波強度がゆらぐビーコンが位置推定に与える影響を小さくすることで、位置推定精度を向上する手法を提案した。部屋の中に8名のヒトが存在する状況で位置推定を行い、既存手法に比べ、提案手法の位置推定精度が約30cm改善することを確認した。今後の課題として、ヒトの密度がより高い状況で位置推定を行い、提案手法の有効性を確認するとともに、ビーコン発信機の選択に用いる閾値をヒトの密度に応じて動的に設定することが挙げられる。さらに、より実的な状況で位置推定を行うために、異なる環境で位置推定を行い、提案手法の有効性を確かめる必要がある。

参考文献

- [1] P. Bahl and V. N. Padmanabhan. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In *Proceedings of INFOCOM 2000*, Vol. 2, pp. 775-784. IEEE, March 2000.
- [2] S. Ito and N. Kawaguchi. Bayesian based location estimation system using wireless LAN. In *Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, pp. 273-278,

March 2005.

- [3] Jeril Kuriakose, Sandeep Joshi, R Vikram Raju, and Aravind Kilaru. A review on localization in wireless sensor networks. In *Advances in signal processing and intelligent recognition systems*, pp. 599-610. Springer, 2014.
- [4] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 37, No. 6, pp. 1067-1080, November 2007.
- [5] P. Prasithsangaree, P. Krishnamurthy, and P. Chrysanthis. On indoor position location with wireless LANs. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Vol. 2, pp. 720-724 vol.2, September 2002.
- [6] Bluetooth SIG. Specification of the Bluetooth system v4.0. <http://www.bluetooth.org/>.
- [7] S. Kajioka, T. Mori, T. Uchiya, I. Takumi, and H. Matsuo. Experiment of indoor position presumption based on RSSI of Bluetooth LE beacon. In *Proceedings of IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 337-339, October 2014.
- [8] Xin Song, Feng Yang, Lianghui Ding, and Liang Qian. Weight adjust algorithm in indoor fingerprint localization. In *Proceedings of International Conference on Signal Processing and Communication Systems*, pp. 1-5, December 2012.
- [9] X. Liang, X. Gou, and Y. Liu. Fingerprint-based location positioning using improved KNN. In *Proceedings of IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, pp. 57-61, September 2012.
- [10] E. Laitinen and E. S. Lohan. Are all the access points necessary in WLAN-based indoor positioning? In *Proceedings of International Conference on Location and GNSS (ICL-GNSS)*, pp. 1-6, 2015.