

推薦論文

iBeaconを用いた位置推定における人体の影響による誤差の軽減

宮崎 喬行^{1,a)} 牧田 岳大^{1,†1} 高橋 健一^{2,3} 川村 尚生^{2,3} 菅原 一孔^{2,3}

受付日 2021年3月19日, 採録日 2021年10月8日

概要: 近年, 屋内外の位置情報が様々なサービスで利用されている. 屋外の位置情報を利用したサービスの多くは GPS (Global Positioning System) を利用している. しかし, GPS は人工衛星からの電波が届きにくい屋内では正確に位置を推定することができない. そこで, 様々な屋内位置推定手法が提案されている. その中の 1 つに iBeacon 規格のビーコンの電波強度を利用した屋内位置推定手法が存在する. iBeacon は小型, 低消費電力で長時間の稼働が可能であり, 導入コストが低いという特徴がある. しかし, 様々な環境条件の影響を受け推定位置の誤差が大きという問題がある. ビーコンの電波は 2.4 GHz 帯を使用しており, 誤差の原因の 1 つとして人体の影響を受けることが分かっている. 人体を通過したビーコンの電波は大きく減衰し, 推定位置に誤差が生じる. そこで本研究では, 直前の推定位置からの移動距離と移動方向をもとに位置を推定することで人体の影響による推定位置の誤差を軽減する.

キーワード: iBeacon, 位置推定, 人体の影響, 誤差, 軽減

Considering the Effect of a Human Body for Position Estimation Using iBeacon

TAKAYUKI MIYAZAKI^{1,a)} TAKEHIRO MAKITA^{1,†1} KENICHI TAKAHASHI^{2,3} TAKAO KAWAMURA^{2,3}
KAZUNORI SUGAHARA^{2,3}

Received: March 19, 2021, Accepted: October 8, 2021

Abstract: In recent years, indoor and outdoor position information has been used in various services. The Global Positioning System (GPS) is most used to know position information. However, GPS cannot estimate the position indoors, where the signal from the satellite is difficult to receive. Thus, using the received signal strength indicator of iBeacon has been proposed. Beacon's signals are in the 2.4 GHz band, and the signal in the 2.4 GHz incurs the effect of a human body. Beacon's signal passing through a human body is greatly attenuated. This causes errors in the estimation of the position. In this study, we reduce the error of the estimated position caused by a human body. The effect of the human body is reduced by using the displacement of the estimated distance to estimate the position. In addition, the accumulated error in position estimation using the displacement of the estimated distance is correct by detecting the passage of the receiver.

Keywords: iBeacon, position estimation, effect of a human body, error, reduce

¹ 鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科
Graduate School of Sustainability Science, Tottori University, Tottori 680-0855, Japan

² 鳥取大学大学院工学研究科
Graduate School of Sustainability Science, Tottori University, Tottori 680-0855, Japan

³ 鳥取大学大学院工学部付属クロス情報科学研究センター
Cross-informatics Research Center, Tottori University, Tottori 680-0855, Japan

1. はじめに

近年, 屋内外の位置情報が様々なサービスで利用されている. 屋外の位置情報は, 車の位置を推定し目的地までの

^{†1} 現在, 株式会社 VOYAGE GROUP
Presently with VOYAGE GROUP, Inc.

^{a)} M19J4050B@edu.tottori-u.ac.jp

運転経路や周辺情報を示すカーナビゲーションシステムやスマートフォンの位置を推定し特定の位置に近づくとイベントが発生するスマートフォンゲームなどのサービスに利用されている。屋内の位置情報は、倉庫などで物品の位置を推定しその位置を示す物品位置管理システム [1] や福祉施設で人の位置を推定し危険な場所への立ち入りを監視する見守りシステム [2] などのサービスで利用されている。

屋外の位置情報を利用したサービスの多くは GPS (Global Positioning System) を利用している。GPS は人工衛星から発信される電波を利用して位置を推定する。このため、人工衛星から発信される電波が受信できる場所であれば位置を推定することが可能である。しかし、人工衛星から発信される電波の届きにくい屋内では正確に位置を推定することはできない。

そこで、WiFi のアクセスポイントを利用した手法 [3] や磁気センサを利用した手法 [4] など様々な屋内位置推定手法が提案されている。その中の 1 つとして iBeacon 規格のビーコンの電波強度を利用した手法が存在する。iBeacon は低消費電力で長時間稼働できる Bluetooth 規格である BLE (Bluetooth Low Energy) [5] を利用するビーコン規格である。iBeacon は小型であり、低消費電力で長時間の稼働が可能である。また、低価格なため導入コストが抑えられる。しかし、様々な環境条件の影響を受け推定位置の誤差が大きいという問題がある。ビーコンの電波は 2.4 GHz 帯を使用しており、誤差の原因の 1 つとして人体の影響を受けることが分かっている。人体を通過したビーコンの電波は大きく減衰し、推定位置に誤差が生じる。

そこで本研究では、Centroid 法で位置推定を行ったときの人体の影響による誤差を確認するとともに、直線に受信機を設置した場合の人体の影響による誤差を軽減する。

2. 関連研究

ビーコンの電波強度を用いた位置推定手法には Fingerprinting 法や Centroid 法が提案されている [6]。Fingerprinting 法は、位置推定を行うエリアを複数のブロックに分割し、あらかじめそれぞれのブロックで観測したビーコンの電波強度を記録する。記録した電波強度と実測値を比較することでビーコンがどのブロックに存在するかを推定する。Centroid 法は、ビーコンの電波強度からビーコンと受信機間の距離を算出し重心を求めることで位置を推定する。

iBeacon を用いた位置推定手法として、受信電波の平均値や受信信号数を考慮に入れた 3 点測位による手法 [7] や接近している 4 つのビーコンからのみの推定距離を利用する手法 [8]、ガウシアンフィルタによるノイズ除去や移動履歴による重み付き平滑化などを適応した手法 [9] などが存在する。浦野らは、文献 [10] で複数の BLE 受信機を備えたタンデム BLE スキャナを用いることでパケットロスを

抑え位置推定精度を向上させている。また、文献 [11] でデノイジングオートエンコーダーで補正した電波強度をもとに位置を推定する手法と End-to-end のニューラルネットワークで位置を推定する手法を比較している。しかし、これらの研究では人体の影響について考慮していない。

Dalkilic ら [12] は壁の影響による BLE ビーコンからの受信電波強度の変化を、Kouyoumdjieva ら [13] は人体の影響による受信電波強度の変化を調べている。Kwok ら [14] はビーコンからの信号の送信間隔や設置場所、人の有無など、様々な環境の違いによる影響を調査している。また、Rezazadeh ら [15] は高い位置にビーコンを設置することで人体の影響を受けにくいとの調査結果を報告している。しかし、調査結果を示すのみであり、人体の影響を軽減する方法については考慮していない。

岩崎ら [16] は、人体の影響を軽減するためにビーコンを体の前後に装着し前後各々のビーコンのデータから推定した位置の midpoint をとることで人体の影響を軽減している。しかし、この手法はビーコンを 2 つ所持する必要がある。星ら [17] は、ビーコンと受信機間の人や物などの遮蔽物をカメラを利用して判別し、遮蔽物の影響を受けないビーコンの電波のみを利用して三点測位で位置を推定している。しかし、この手法はビーコンと受信機のほかにカメラを利用する必要があり導入コストが高い。

古館ら [18] は、直前の推定位置からの移動変位を用いて位置を推定している。直前のデータと現在のデータの電波強度の変位からベクトル空間モデルを作成し移動方向を判別し、加速度センサで移動距離を求める。直前の推定位置から求めた移動方向と移動距離を利用して位置を推定する。本研究では、古館らと同様に直前の推定位置からの移動変位を用いて位置を推定する。しかし、古館らの研究では移動距離の推定に加速度センサを必要とする。一方で、本研究では移動距離を電波強度で推定するため加速度センサを必要としない。また、受信機の位置を推定するのではなくビーコンの位置を推定するという点でも異なる。

3. Centroid 法を用いた位置推定

我々は、ビーコンを所持した人の建物内の位置を追跡するシステムを開発している。建物内に受信機を設置し、定期的に信号を発信するビーコンを所持した人の位置を推定する。建物内に設置した受信機はビーコンの電波を検知し、検知したデータをサーバに送信する。サーバでは受信機からのデータをもとに位置を推定する。本システムでは受信機には RaspberryPi 3 model B [19]、ビーコンには MyBeacon ペンダント型 [20] を使用している。

本論文の内容は 2020 年 10 月の電気・情報関連学会中国支部連合大会にて報告され、支部長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

3.1 Centroid 法

本システムでは、ビーコンの電波強度を利用した位置推定手法に Centroid 法を利用している。Centroid 法では、複数の点の重みにより重心を求め、その重心を推定位置とする。本システムではビーコンと受信機との間の距離を重みとして利用する。ビーコンと受信機との間の距離はフリスの伝達公式 [21] を用いて計算する。ビーコンを中心として 1m 離れた地点での電波強度を p_1 [mW]、距離 r [m] での信号強度を p_r [mW] とおくと、フリスの伝達公式よりビーコンと受信機間の距離は式 (1) で表すことができる。

$$p_r = \frac{p_1}{r^2} \text{ [mW]} \quad (1)$$

一般的にビーコンの電波強度は dBm で扱われる。そこで、 p_1 [mW] を P_1 [dBm]、 p_r [mW] を P_r [dBm] に変換すると P_1 と P_r はそれぞれ式 (2)、式 (3) で表される。

$$P_1 = 10 \log_{10} p_1 \text{ [dBm]} \quad (2)$$

$$P_r = 10 \log_{10} p_r \text{ [dBm]} \quad (3)$$

式 (1) に式 (2)、式 (3) を適応すると式 (4) が得られる。

$$P_r = P_1 - 20 \log_{10} r \text{ [dBm]} \quad (4)$$

式 (4) を整理すると、距離 r は式 (5) で表すことができる。

$$r = 10^{(P_1 - P_r)/20} \text{ [m]} \quad (5)$$

式 (5) で求めた距離 r を重みと見なす。位置推定結果は、式 (6) より重心 $T(x_t, y_t)$ を計算することで求めることができる。 n は設置した受信数の数、 (x_i, y_i) は i 番目の受信機が設置された座標、 r_i は i 番目の受信機からの距離を表す。

$$T(x_t, y_t) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{r_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}}, \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{r_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}} \right) \quad (6)$$

3.2 電波の不安定さへの対応

ビーコンから発信された電波は様々な環境の影響を受け電波強度が変化する。そのため、ビーコンと受信機間の距離が一定であっても受信機が受信する電波強度は一定ではなく安定しない。電波強度が安定しないことによって推定位置に誤差が生じる。電波強度が安定しない原因として電波の反射や干渉があげられる。

ビーコンから発信された電波は壁や床に反射する。電波が反射することでビーコンから発信された電波が受信器に到達するまでの経路が延び、受信機が受信する電波強度は実際の距離の電波強度より減衰した値となる。また、ビーコンの電波は 2.4 GHz 帯を使用しており、同帯域を利用している WiFi の電波と干渉する。電波が干渉することで電波強度が増幅、または減衰する。干渉によって電波が打ち消されてしまい受信できないこともある。

そこで、電波の不安定さによる誤差を軽減するために文

献 [7], [9] を参考として以下の改良を加えた。人体の影響を受けにくいように体から離してビーコンを持ち、大学構内の廊下で実験したところ、平均誤差を約 2.13 m から約 1.46 m に約 31% 軽減することができた。以降、これらの改良を加えた方式を Centroid 法と呼び、本稿での提案手法との比較対象として用いる。

3.2.1 平均値利用

検知したビーコンの受信電波強度を直接位置推定の計算に利用した場合、細かな外乱により位置推定結果が安定しない。一定の位置で静止していても受信電波強度は変化する。しかし、推定距離の分布を調べると実際の位置付近のデータが多い。そこで、一定時間 (1 秒間) で集めたデータの受信電波強度の平均値を位置推定に利用する。

3.2.2 外れ値除去

平均に利用した検知データに平均電波強度と大きな差がある外れ値が存在する。外れ値は壁や床に反射した電波を受信しているため発生していると考えられる。外れ値を含んだまま電波強度の平均を計算すると含まれている外れ値の影響を受けて電波強度の平均が実際の値から外れた数値となる可能性がある。そこで、受信した信号を一定時間集め、平均を計算する前に受信電波強度の中央値から一定値以上離れた信号を除去する。一定値としては経験的に ± 2 dBm とした。

3.2.3 重み付け

受信機の受信回数を集計したところ、受信機の受信回数はビーコンと受信機間の距離で違いがあった。そこで、受信回数の多い受信機のデータが重視されるように、平均値の計算に利用したデータ数を基準に重み付けを行う。 i 番目の受信機のデータの受信回数を c_{ri} 、ビーコンと受信機の距離を r_i 、全体の受信機のデータの受信回数を c_a とし、重み ω_i を式 (7) より求める。このとき重心 $T(x_t, y_t)$ は式 (8) で表される。

$$\omega_i = r_i \frac{c_{ri}}{c_a} \quad (7)$$

$$T(x_t, y_t) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\omega_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i}}, \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\omega_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i}} \right) \quad (8)$$

3.2.4 指数平滑法

外れ値除去や平均値を求めた後の電波強度の平滑化を行う。指数平滑法は、過去の予測値と現在の実測値から現在の値の予測を行う。指数平滑法により、現在の電波強度の予測値 y_t は、 x_t を実測値、 y_{t-1} を直前の予測値、 α を平滑定数とすると式 (9) で表される。

$$y_t = \alpha x_t + (1 - \alpha) y_{t-1} \quad (9)$$

α は、0 に近づくほど過去の予測値を、1 に近づくほど実測値を重視する。 α としては実験の結果、最も平均誤差が少なくなった 0.6 を用いた。

4. 人体の影響による誤差

3.2 節により電波の不安定さによる誤差を軽減することができた。しかし、ビーコンを持つ位置によって人体の影響を受け推定位置に誤差が生じる。そこで、人体の影響による誤差を確認した。

4.1 人体の影響による推定位置の差

3.2 節の改良を加えた Centroid 法で位置推定を行ったときの人体の影響による推定位置の差を実験により検証した。Centroid 法により位置推定を行った結果を図 1 に示す。

実験では、2つの受信機を 0m 地点と 10m 地点に設置し、中央の 5m 地点でビーコンを胸の位置に持ち 30 秒ごとに体の向きを入れ替え、0m 地点の受信機と 10m 地点の受信機を交互に向くようにした。ビーコンの出力電波強度は -20 dBm, 1m 離れた地点での電波強度は -86 dBm, 1 秒間の発信回数は 10 回とした。

図 1 を見ると、5m 地点で静止しているにもかかわらず体の向きによって推定位置が大きく異なっていることが分かる。これは、中央の 5m 地点では 2つの受信機が受信した電波の電波強度は同じ値になるはずが、人体の影響を受けた電波の電波強度が減衰し電波強度に差が出たためである。人体を通過したビーコンの電波は大きく減衰する。ビーコンを体の前に持ったとき、後方にある受信機が受信する電波は人体の影響によって減衰した電波を受信する。これによって、推定位置は実際の位置よりも前方に推定される。

4.2 受信機との距離と人体の影響の関係

4.1 節で人体の影響によって電波が減衰することで推定位置に誤差が生じることを確認した。Centroid 法では、電波強度をもとに式 (5) よりビーコンと受信機間の距離を計算する。その距離が人体の影響によって実際の距離より遠く計算されることで誤差が生じる。そこで、ビーコンと受信機間の距離を変化させ、人体の影響によってどの位の差が出るかを検証するための実験を行った。

実験では、受信機を設置し受信機から 1m–9m のそれぞれの位置で 90 秒ずつ静止する実験を 3 回行った。ビーコンは胸の位置に持った。受信機に対して正面を向いているときは人体の影響を受けていない電波から計算した推定距離、受信機に対して反対側を向いているときは人体の影響を受けた電波から計算した推定距離となる。実験結果の平均値を図 2 に示す。

図 2 を見ると人体の影響を受けているときの推定距離と影響を受けていないときの推定距離に差があることが分かる。人体の影響を受けた電波から計算した推定距離は人体の影響を受けていない電波から計算した推定距離より遠い距離を推定している。人体の影響を受けた電波の推定距離

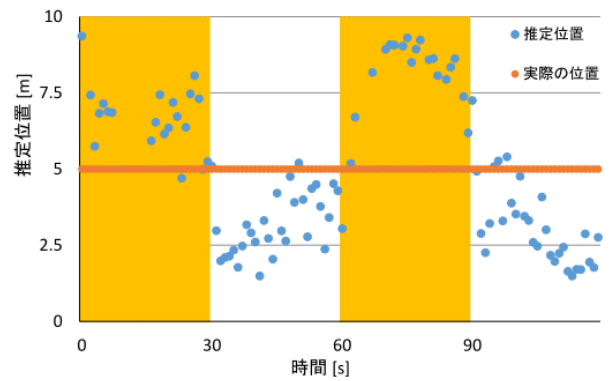


図 1 Centroid 法を用いて位置推定を行った結果

Fig. 1 Results of position estimation using the Centroid method.

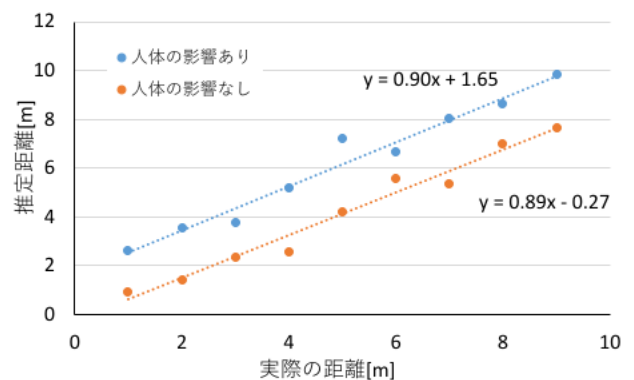


図 2 推定距離の比較

Fig. 2 Difference of estimated distance.

と人体の影響を受けていない電波の推定距離の差は各位置全体の平均で約 2.1m となった。これは人体の影響によって電波が減衰することで生じている。

しかし、受信機からの距離の変位に注目すると、人体の影響を受けた電波から計算した推定距離と人体の影響を受けていない電波から計算した推定距離の差は小さい。それぞれの距離が 1m 変化したときの推定距離の変位を計算すると、人体の影響を受けた電波の平均は約 0.90m, 人体の影響を受けていない電波の平均は約 0.89m であった。2つの差は 0.01m と大きな差はなかった。このことから、推定距離の変位は人体の影響を受けにくいことが分かる。

5. 提案手法

4 章の実験結果より推定距離の変位は人体の影響を受けにくいということが分かった。そこで、推定距離の変位を用いて人体の影響による誤差を軽減する。従来の Centroid 法による位置推定と推定距離の変位から求めた移動距離を組み合わせることで位置を推定する。

本手法は移動方向推定、移動距離推定の 2 つから構成される。移動方向推定では、過去 3 回の推定位置と Centroid 法で求めた現在の推定位置を利用して移動方向を推定する。移動距離推定では直前の推定位置 P_{t-1} からの移動距離を

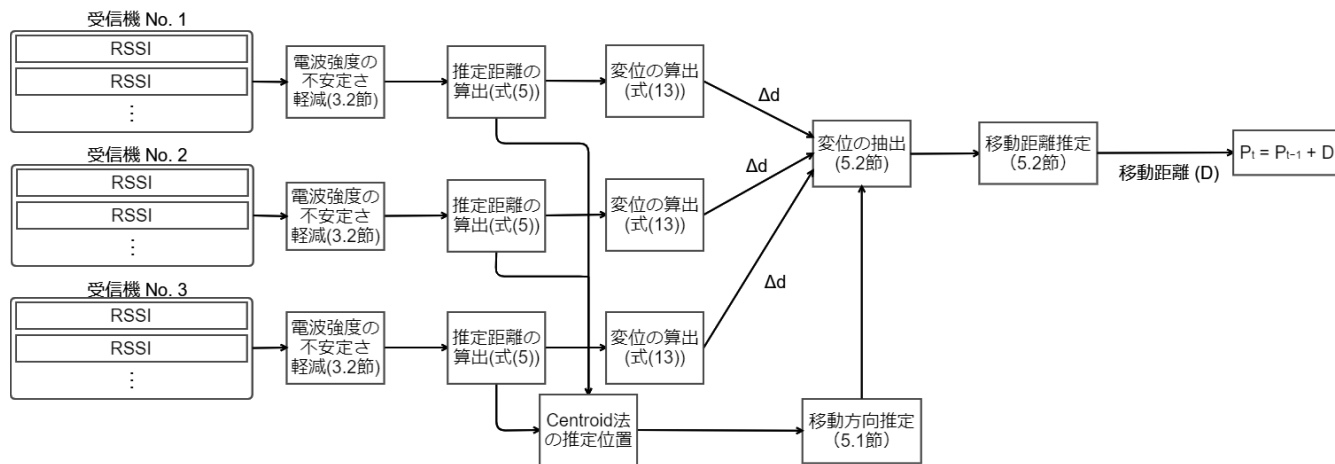


図 3 本手法のフロー

Fig. 3 The flow of the proposed method.

求める。現在の推定位置 P_t は、直前の推定位置 P_{t-1} を基準に移動方向推定で推定した方向に移動距離推定で求めた距離分移動した位置と推定する。本手法のフローを図 3 に示す。

5.1 移動方向推定

過去 3 回 ($t-3$ 時点 $\sim t-1$ 時点) の推定位置と Centroid 法で求めた現在の推定位置を利用して移動方向を推定する。推定は、4 つの推定位置から近似直線を求め、その傾きを利用して移動方向を判定する。

推定位置を y 軸、時系列を x 軸として近似直線を求める。 $Cov(X, Y)$ を共分散、 σ_x^2 、 μ_x を x の標準偏差と平均とすると、近似直線の傾き A は式 (10) で表される。

$$A = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x^2} \tag{10}$$

また、切片 B は μ_y を y の平均とすると式 (11) で表される。

$$B = \mu_y - A\mu_x \tag{11}$$

式 (10)、式 (11) から近似直線を求めると、

$$y = Ax + B \tag{12}$$

となる。この近似直線の傾き A の正負によって移動方向を推定する。

5.2 移動距離推定

移動距離推定では、電波強度から求めたビーコンと受信機間の推定距離を利用して直前の推定位置 P_{t-1} からの移動距離を求める。ビーコンと受信機間の推定距離は、式 (5) より求める。それぞれの受信機で時間 $t-1$ 時点のビーコンと受信機間の推定距離と、時間 t 時点のビーコンと受信機間の推定距離の差 (変位) を求める。 t 時点の推定距離を d_t 、 $t-1$ 時点の推定距離を d_{t-1} とすると推定距離の変位 Δd は式 (13) で表される。

$$\Delta d = d_t - d_{t-1} \tag{13}$$

このとき、推定距離の変位 Δd は、5.1 節の移動方向推定で求めた方向と違う方向に変位している場合がある。移動方向推定と違う方向に変位している場合、移動方向推定の結果、もしくは推定距離の変位のいずれかが間違っている。そこで、5.3 節の実験で移動方向推定の正解率が 95.7% であったため移動方向推定で推定された方向を正しいと仮定した。それぞれの受信機で求めた変位から 5.1 節の移動方向推定で推定された方向と同じ方向に変位している推定距離の変位のみを抽出する。

抽出した推定距離の変位に重みを付け、重み付けした結果の平均を移動距離とする。重みは、 $t-1$ 時点の受信回数と t 時点の受信回数の合計とする。抽出された推定距離の変位の数を n 、受信機 i の $t-1$ 時点の受信回数と t 時点の受信回数の合計を s_i とすると、推定移動距離 D は式 (14) で表される。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta d_i s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \tag{14}$$

このとき、推定位置 P_t は式 (15) で表される。

$$P_t = P_{t-1} + D \tag{15}$$

5.3 人体の影響による位置推定誤差の軽減効果確認実験

本手法により人体の影響を軽減できるかを検証するために、大学構内の廊下に受信機を設置して実験を行った。実験は、3 つの受信機を 0m 地点、10m 地点、20m 地点に設置し、0m 地点から 20m 地点まで一定の速度で歩き、折り返して 0m 地点まで戻ってきた。ビーコンは 1 秒間に 10 回電波を発信する設定とし、胸の位置に持った。また、位置は 1 秒間に 1 回推定することとした。Centroid 法の推定位置と提案手法の推定位置をプロットしたものを図 4 に示す。

図 4 を見ると、Centroid 法による推定位置に比べて提

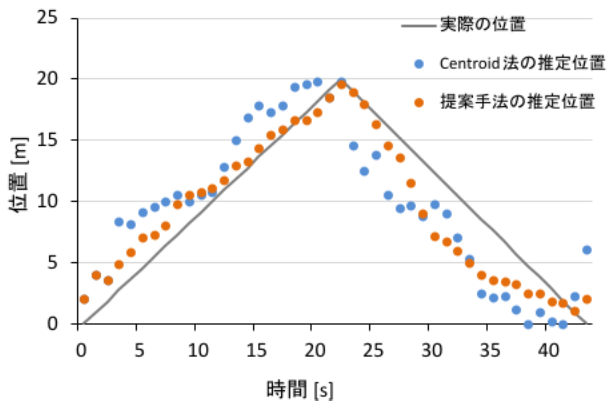


図 4 提案手法と Centroid 法の位置推定結果

Fig. 4 Results of the proposed method and the Centroid method.

案手法による推定位置は実際の位置に近い位置を推定できていることが分かる。ビーコンを胸の位置に持っているときは、進行方向と反対の背中側の電波が人体の影響を受ける。その影響で Centroid 法では人体の影響によって推定位置が実際の位置より前方に推定される。図 4 を見ると提案手法では人体の影響を軽減し、実際の位置に近い位置を推定できていることが分かる。

実験を 5 回行ったところ、移動方向推定の正解率は 95.7%であった。また、Centroid 法の平均誤差は 3.15m、提案手法の平均誤差は 1.83m となり、Centroid 法と比べて平均誤差を 41.9%軽減することができた。

しかし、図 4 の実験結果を見ると 30 秒以降から誤差が大きくなっている。これは、実際の移動距離と比較して提案手法の移動距離が小さく推定されているためである。4.2 節の実験では、1m 移動したときの変位の平均は人体の影響を受けた電波と影響を受けていない電波でそれぞれ約 0.90m と約 0.89m であり、1m より小さい値であった。このため、移動距離の変位は実際の変位より小さい値が推定される可能性が高い。その誤差が累積した結果、30 秒以降で推定位置に大きな誤差が発生していたと考えられる。

6. 累積誤差の補正

誤差の累積の影響を軽減するために受信機を通過したことを検知し位置を補正する。累積誤差の補正の流れを図 5 に示す。

6.1 受信機通過検知

受信機の通過の検知は、人体の影響によって電波強度が変化することを利用する方法と過去のデータを利用する方法の 2 つを用いる。前者の方法で受信機の通過が検知できなかった場合、後者の方法で受信機の通過を検出する。

6.1.1 電波強度の変化による受信機通過検知

人体の影響を受ける電波は、受信機を設置した位置を通過した前後で変化する。図 6 にビーコンを胸の位置に持ち

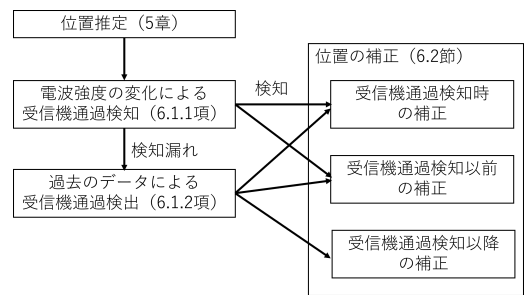


図 5 累積誤差の補正のフロー

Fig. 5 The flow of cumulative error correction.

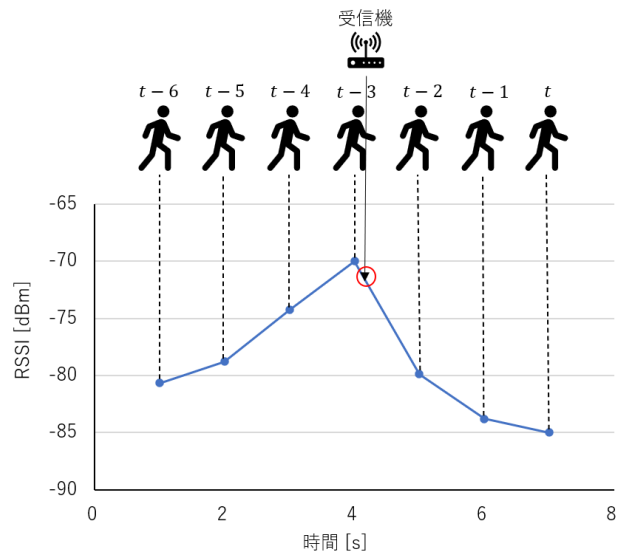


図 6 受信機を通過した際の電波強度変化

Fig. 6 RSSI before and after passing a receiver.

受信機を一定の速度で通過した際の電波強度の変化を測定した結果を示す。測定時には、4.3 秒を経過したときに受信機を通過した。図 6 を見ると 4 秒以前は電波強度が増加しており、4 秒以降は電波強度が減少している。

この特徴を利用して受信機の通過を検知するために 3 つの条件を設定した。

条件 1 $t-1$ 時点の推定距離の変位と t 時点の推定距離の変位で変位の符号が逆

条件 2 受信機に接近

条件 3 推定距離の変位の絶対値の比較

条件 1 は、 $t-1$ 時点の推定距離の変位と t 時点の推定距離の変位で変位の符号が逆であることで受信機を通過した可能性があるを判断する。受信機を通過する前は受信機に接近するため推定距離が近くなる。しかし、受信機を通過した後は受信機から離れるため推定距離が離れる。このため、一定方向に移動していても受信機を通過する前と受信機を通過した後で変位の符号が逆となる。

また、最も受信機に接近したときは、ビーコンと受信機間の推定距離が受信機から n 秒間で移動できる距離以内となる可能性が高い。 n は位置推定の時間間隔とし、本システムでは $n = 1$ としている。そこで、ビーコンと受信機間

の推定距離が n 秒間で受信機を通過できる距離以内であることで受信機に接近していると判断する (条件 2). n 秒間で移動できる距離は過去 5 回の移動距離の平均として求める. これによって, 受信機に接近していない位置での受信機通過の誤検知を防ぐ.

ビーコンを体の前に持っている場合, 受信機通過前の電波は人体の影響を受けない. しかし, 通過直後は人体の影響を受け電波が減衰する. 逆にビーコンを体の後ろに持つ場合は, 受信機通過前の電波が人体の影響を受け減衰するが, 通過直後の電波は人体の影響を受けない. これにより, 受信機通過時の推定距離の変位の絶対値と, 受信機を通過しない場合の推定距離の変位の絶対値に差が生じる. そこで, 推定距離の変位の絶対値が過去 5 回の推定距離の変位の絶対値の最大値より大きい, または最小値より小さいとき, 条件 3 にあてはまることとした.

これらのすべての条件にあてはまる場合に受信機を通過したと判定する. 受信機を 40 回通過する実験を行った結果, 65.0%の確率 (40 回中 26 回) で実際に受信機を通過したときに受信機を通過したと判定することができた. 残りの 35.0%, 14 回のうち, 条件 1 を満たすものは 12 件, 条件 2 を満たすものは 12 件, 条件 3 を満たすものは 1 件であった. また, 受信機を通過していないときに受信機を通過したと判定することはなかった.

6.1.2 過去のデータによる受信機通過検出

6.1.1 項で受信機の通過を検知できなかった場合は, 過去のデータから受信機の通過を検出する. Centroid 法と本手法の推定位置が両方とも受信機を設置している位置を通過し一定時間経過しても電波強度の変化による受信機の通過を検知できていない場合, 受信機の通過を検知できていないと判断する. ここでは受信機の通過を検知できていないと判断する時間を 5 秒^{*1}と設定した. 受信機の通過を検知できていないと判断した場合, その時点から 10 秒前までのデータを見直して受信機の通過を検出する.

受信機の通過が検知できていないと判断した時点から 10 秒前までのデータの中から推定距離の変位の符号が逆となっているものを抽出する. 抽出したデータの中から受信機との推定距離が最も近いものを受信機を通過した時点のデータであると判定する. これにより判定した結果, 6.1.1 項の方法で検知できなかった 35.0%のうちの 85.7%で実際に受信機を通過したときに受信機を通過したと判定することができた. すなわち, 6.1.1 項の手法により 65.0%で受信機通過検知ができ, 6.1.2 項の手法により全体のうちの 30.0% (35.0% × 85.7%) で受信機通過検出ができたため, 計 95.0%の受信機通過検知を正しく判定することがで

きた. 残りの 5.0%に関しては実際に受信機を通過したときではないデータを受信機通過時のデータであると判定していた.

6.2 位置の補正

受信機の通過を検知したとき, 推定位置を補正する. 位置の補正は,

- 受信機通過検知時
- 受信機通過検知時以降
- 受信機通過検知時以前

からなる.

受信機通過検知時

推定位置の補正は受信機の通過を検知したときの推定位置 (P_d) を通過を検知した受信機の位置 (P'_d) に置き換えることで行う. たとえば, 10 m 地点に設置している受信機が通過を検知したとき, 推定位置を 10 m とすることで補正する.

受信機検知時以降

6.1.1 項の方法で受信機の通過を検知した場合, 以降の推定位置は補正後の位置を基準としたものとなる. しかし, 6.1.2 項の方法で受信機の通過を検知した場合, 通過後の推定位置についても補正する必要がある. 位置の補正は, 通過を検知した後から現在までの推定位置に P'_d と P_d の差 ($P'_d - P_d$) を加えることで補正する. これによって, 受信機を通過した後の推定位置を補正する.

受信機検知時以前

受信機通過検知時以前の推定位置の補正を行う. 補正は, 前回の受信機通過検知が行われた時点までの範囲で行う. ここで, 受信機通過検知が行われた時間を d , 前回の受信機通過検知が行われた時間を s , 補正前の推定位置を P_t ($s \leq t < d$) とおく. 受信機の通過検知によって補正された位置と補正される前の推定位置の差 ($P'_d - P_d$) を求め, その差を P_t に加える.

$$P'_t = P_t + (P'_d - P_d) \quad (s \leq t < d) \quad (16)$$

このとき, P'_d の累積誤差はないが P'_{d-1} , P'_{d-2} と受信機通過検知時から離れるにつれ誤差が累積する. 一方, 補正前の推定位置 P_t では, 時間 s 時点で補正が行われているため, P_s の累積誤差はないが P_{s+1} , P_{s+2} と s 時点から離れるにつれて誤差が累積する.

そこで, P_t と P'_t の加重平均を推定位置とする (図 7). P'_t は d 時点で最も重みを付け, 離れるにつれて重みを軽くする. 一方, P_t は s 時点で最も重みを付け, 離れるにつれて重みを軽くする. このとき, 推定位置は式 (17) で表される.

$$P''_t = \frac{(d-t)P_t + (t-s)P'_t}{d-s} \quad (s \leq t < d) \quad (17)$$

*1 歩行速度や Centroid 法, 本手法の推定誤差の傾向を考慮することで, より最適な判断時間を求めることができるかもしれないが, ここでは受信機の通過を検知できていないとの判断が 5 秒で十分にできると考え 5 秒と設定した.

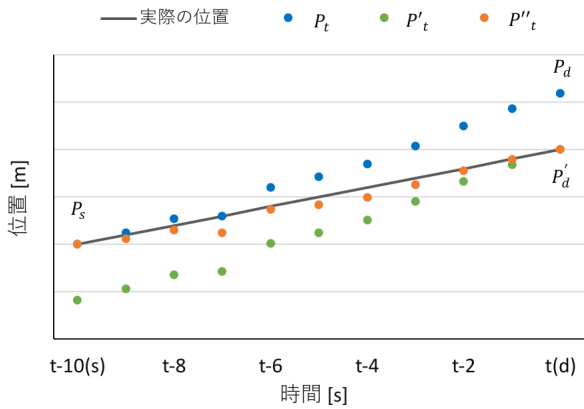


図 7 受信機通過検知以前の補正の例

Fig. 7 Example of correction for estimated positions before detecting the passage of a receiver.

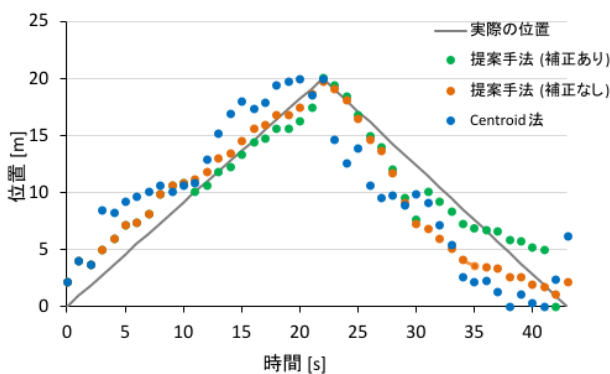


図 8 累積誤差補正を加えた位置推定結果の比較

Fig. 8 Comparison of position estimation results.

6.3 累積誤差の補正効果確認実験

受信機を通過したことを検知し補正を行うことで累積誤差を軽減できるかを検証するための実験を行った。実験は 5.3 節の実験と同じデータを利用した。Centroid 法の推定位置、提案手法の推定位置、提案手法に補正を加えた推定位置をプロットしたものを図 8 に示す。

図 8 を見ると Centroid 法の推定位置、提案手法補正なしの推定位置に比べ実際の位置に近い位置を推定できていることが分かる。12 秒と 24 秒で電波強度の変化による受信機通過が検知でき、32 秒で過去のデータを利用した受信機通過が検出できた。実験を 5 回行ったところ、6.1.1 項の手法により 65.0% の受信機通過検知が正しく行えており、6.1.2 項の手法により 25.0% の受信機通過検知が正しく行っていた。また、10.0% が受信機を通過したときではないデータを受信機通過時のデータであると判定していた。受信機の通過を検知できなかったことはなかった。また、平均誤差は 1.00 m となり、Centroid 法と比較して平均誤差を 68.3%、提案手法補正なしと比較して 45.4% 軽減できた。

7. 様々な条件下における評価実験

前章までの実験は大学構内の廊下で行ってきた。しか

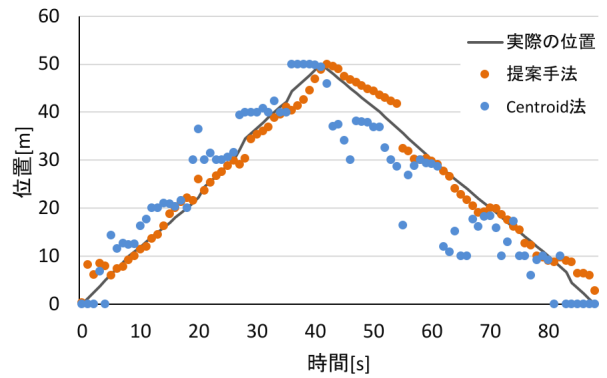


図 9 受信機を 10m 間隔で設置したときの結果

Fig. 9 Results when receivers were installed at 10 m intervals.

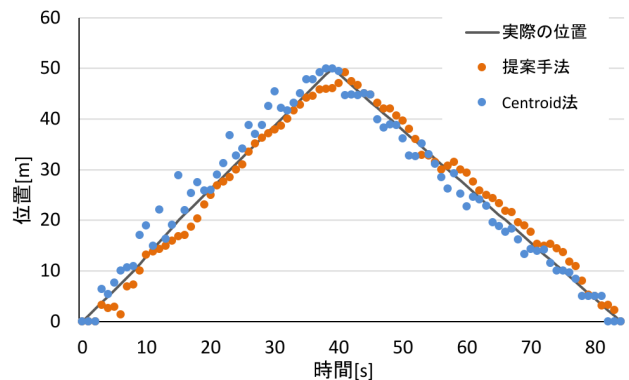


図 10 受信機を 5m 間隔で設置したときの結果

Fig. 10 Results when receivers were installed at 5 m intervals.

表 1 それぞれの受信機設置間隔での平均誤差

Table 1 Mean errors at each receiver installation intervals.

受信機設置間隔 [m]	Centroid 法 [m]	提案手法 [m]	軽減率 [%]
10	4.55	2.99	34.2
5	2.33	1.63	30.2

し、我々が実験した大学構内の廊下のみには適用できる手法であれば、異なる環境に適用できず、その有効性は低い。そこで、本章の実験は大学構内の廊下ではなく、50 m の直線が確保できる屋外の広場で行った。実験は 5 名の被験者が各実験を 5 回ずつ行った。

7.1 受信機の設置間隔を変えた実験

受信機の設置間隔の違いによる影響を確認するために受信機の設置間隔を 10 m とした場合と 5 m とした場合で実験を行った。実験では、0 m 地点から 50 m 地点まで一定速度で歩き、折り返して 0 m 地点まで戻ることとした。ピーコンは胸の位置に持った。受信機を 10 m 間隔で設置したときの結果の一例を図 9 に、5 m 間隔で設置したときの結果の一例を図 10 に示す。また、それぞれの受信機設置間隔での平均誤差を表 1 に示す。

図 9, 図 10 を見るとどちらも提案手法の方が誤差が小さいことが分かる。受信機を 10 m 間隔で設置した場合、



図 11 ビーコンの持ち方
Fig. 11 How to hold the beacon.

Centroid 法と比較して平均誤差を 34.2% 軽減できた。本実験は前章までの実験環境とは異なる屋外の広場で行っており、大学構内の廊下で有効性を確認した手法をそのまま適用している。しかし、人体の影響による推定誤差の軽減効果が確認でき、異なる環境においても有効な手法であることが確認できる。また、受信機を 5m 間隔で設置した場合、Centroid 法と比較して平均誤差を 30.2% 軽減でき、受信機の間隔によらず推定位置の平均誤差を軽減できることが確認できた。

しかし、受信機を 10m 間隔で設置した場合は、6.3 節の実験と比較して Centroid 法と提案手法のどちらも平均誤差が大きかった。これは、屋外の広場に受信機を設置したため電波が発散し、位置推定に利用できる受信数が少なかったためである。これにより、提案手法では受信機の通過検知が行われないことがあった。受信機を 5m 間隔で設置した場合は、10m 間隔で設置したときに比べ、位置推定に利用できる受信数が多くなり受信機の通過検知が正しく行えることが多く、より正しく位置推定が行えていた。

7.2 ビーコンを持つ位置を変えた実験

ビーコンを持つ位置によって人体の影響は異なる。そこで、ビーコンを持つ位置による違いを検証するための実験を行った。ビーコンは背中、腰、足、手首の位置に持った。また、人体の影響を受けない場合でも正しく位置を推定できるかを検証するために体から離れた位置で持つ実験を行った。それぞれのビーコンの持ち方を図 11 に示す。受信機は 10m 間隔で設置した。それぞれの持ち方での平均誤差を表 2 に示す。

表 2 各ビーコンの平均誤差

Table 2 Mean errors at each position.

ビーコンの位置	Centroid 法 [m]	提案手法 [m]	軽減率 [%]
体から離れた位置	2.24	1.82	18.8
胸	4.55	2.99	34.3
背中	5.41	2.85	47.3
腰	5.61	3.15	43.9
足	4.11	2.55	40.0
手首	4.14	2.47	40.3
平均	4.70	2.79	40.6

表 3 各ビーコンの仕様

Table 3 Specifications of beacons.

ビーコン	1 m 地点での電波強度 [dBm]	発信間隔 [ms]
MyBeacon	-76	100
BLEAD	-78	100

表 2 を見るとすべての持ち方で提案手法が誤差を軽減できていることが確認できる。全体の平均誤差は Centroid 法で 4.70 m、提案手法で 2.79 m であり、平均誤差を 40.6% 軽減できた。

体から離れた位置にビーコンを持っているときは、人体の影響を受けにくいので、Centroid 法と提案手法のどちらも平均誤差が小さい。これは、人体の影響を受けないことでビーコンと受信機間の推定距離が実際の距離と近い値となったためである。しかし、提案手法は Centroid 法と比べて平均誤差が小さく、人体の影響を受けにくい場合であっても位置推定結果が良いことが分かる。

また、足や手首といった人体の影響を比較的受けにくい位置にビーコンを持つ場合は、他の持ち方と比較して平均誤差が少ない結果となった。これは、体から離れた位置にビーコンを持ったときと同様に、人体の影響によるビーコンと受信機間の推定距離と実際の距離の差が小さくなることと、受信数が増えることで電波の不安定さの軽減や受信数による重み付けの効果が表れているためだと考えられる。

ビーコンの持ち方によって推定位置の平均誤差に差はあるものの、すべての持ち方で提案手法が Centroid 法に比べて平均誤差を軽減できていた。

7.3 ビーコンの種類を変えた実験

これまでの実験ではビーコンに MyBeacon を使用していた。そこで、異なるビーコンでの位置推定精度を評価するための実験を行った。ビーコンには BLEAD [22] を使用した。MyBeacon と BLEAD の発信間隔、1 m 地点での電波強度を表 3 に示す。受信機は 10m 間隔で設置し、ビーコンは胸の位置に持った。実験の結果を表 4 に示す。

表 4 を見ると BLEAD は MyBeacon と同様に Centroid 法と比較して平均誤差が軽減できていることが確認できる。

表 4 各ビーコンの平均誤差
Table 4 Mean errors for each beacon.

beacon	Centroid 法 [m]	提案手法 [m]	軽減率 [%]
MyBeacon	4.55	2.99	34.3
BLEAD	4.73	3.18	32.8

7.4 移動経路を変えた実験

7.1 節–7.3 節では受信機設置範囲内を往復する実験を行った。しかし、実際の移動は受信機設置範囲内を往復するだけではない。そこで、任意の経路での位置推定精度を検証するために実験を行った。経路は、スタート地点を中央の 25m 地点とし、ランダムに移動距離を決定し、その距離分移動した後で折り返すこととした。移動距離は 11m–19m の中から選択し、何度か折り返して合計の移動距離が 100m となるように設定した。ただし、選択した移動距離が受信機設置範囲の端 (0m 地点, 50m 地点) を超える場合は、受信機設置範囲の端で折り返すこととした。受信機は 10m 間隔で設置し、ビーコンは胸の位置に持つこととした。

5 つの任意の経路を作成し実験を行った結果、Centroid 法の平均誤差は 6.01m、提案手法の平均誤差は 4.31m であった。提案手法は Centroid 法と比較すると平均誤差を 28.3%軽減できていた。しかし、7.1 節–7.3 節の実験結果と比較すると平均誤差の軽減率は小さい。これは任意の地点で折り返すため、受信機の通過判定や移動方向判定に失敗したためであった。受信機の通過判定の失敗は、受信機付近 (受信機から 3m 以内) で折り返したときに発生していた。6.1.1 項の条件 1–3 は、受信機の直前で折り返したときも、受信機を通過したときと同様にあてはまる。これによって、受信機を通過したと判定され、受信機を通過していないにもかかわらず推定位置の補正が行われていた。また、移動方向判定では、過去の推定位置と現在の Centroid 法の推定位置から近似直線を求めて移動方向を推定している。このため、移動方向判定に失敗することがあった。

7.5 考察

本稿では直線に受信機を設置した場合の人体の影響による推定位置の誤差の軽減を試みた。しかし、実際の利用を考えると、直線だけでなく、L 字路、T 字路、交差点、さらには平面上に受信機を設置する状況が考えられる。ここでは、L 字路、T 字路、交差点への応用について考察する。

T 字路、交差点は、複数の L 字路が組み合わさったものだと考えられる。そこで、図 12 に示す L 字路上を受信機 A から受信機 B に移動する状況について考察する。

本提案手法は、主に移動方向推定、移動距離推定、受信機通過検知から構成される。

移動方向推定では Centroid 法による位置推定結果を利用している。このため、受信機 A と受信機 B を結んだ直線

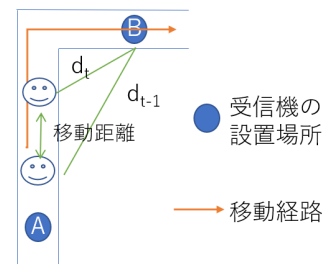


図 12 L 字路の例

Fig. 12 An example of L-junction.

上に位置が推定される。しかし、移動方向推定結果自体は受信機 A から受信機 B に向かってしていると推定される。このため、現在の移動方向推定をそのまま適用することが可能だと考えられる。

移動距離推定については現在の手法をそのまま適用することはできない。図 12 の例であれば、移動距離推定に受信機 A による推定距離の変位と受信機 B による推定距離の変位を利用する。ここで受信機 A から L 字路まで (曲がるまで) の区間を考える。このとき、現在の手法では、受信機 B による推定距離の変位は $\Delta d = d_t - d_{t-1}$ となり移動距離とはならない。このため、通路の形状を利用して三角関数で推定距離を補正することで対応可能になると考えられる。

受信機通過検知については L 字路においても受信機を通過することには変わりはない。このため、現手法をそのまま適用することが可能だと考えられる。また、受信機通過検知後の位置の補正も、通路の形状を利用して三角関数で推定距離を補正することで対応できると考えられる。

一方、平面への応用については、移動距離推定、受信機通過検知の仕組みをそのまま利用することは難しい。移動距離推定に関しては通路の形状が利用できず、三角関数による補正が難しい。受信機通過検知に関しても、受信機のある場所を通過するとは限らず、現在の手法をそのまま利用することはできない。このことについては今後の課題である。

8. おわりに

直前の推定位置からの変位を利用することで人体の影響による誤差の軽減を試みた。結果、Centroid 法と比較して人体の影響による誤差を軽減することができた。今後の課題として、折り返し時の対応や平面上に受信機を設置したときへの対応、ポケットに入れたときの影響や、歩行時の揺れによる影響を検証することがあげられる。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP20K12078 の助成を受けて行った。

参考文献

[1] 株式会社ワイズ・ラブ：物品管理位置管理 IoT サービス Xeye (スロクアイ) (オンライン), 入手先 (<https://www.xeye.jp/>) (参照 2020-05-16).

- [2] 牧田岳大, 中谷啓太, 高橋健一, 菅原一孔, 川村尚生: ビーコンを利用した福祉施設向け見守りシステムの開発, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集, pp.1637–1647 (2019).
- [3] 天野辰哉, 山口弘純, 東野輝夫, 高井峰生: クラウドセンシングによる屋内 WiFiAP の 3 次元位置推定手法, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集, pp.1637–1647 (2019).
- [4] 村田雄哉, 梶 克彦, 廣井 慧, 河口信夫, 神山 剛, 太田賢, 稲村 浩: 歩行時の磁気センシングデータを利用した屋内位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.58, No.1, pp.57–67 (2017).
- [5] Bluetooth Specification Core Version4.2 (2014).
- [6] 藪 耀介, 新井イスマイル: 校舎内における BLE 電波強度による屋内測位の性能評価, 情報処理学会第 77 回全国大会講演論文集, pp.301–392 (2015).
- [7] Thaljaoui, A., Val, T., Nasri, N. and Brulin, D.: BLE Localization using RSSI Measurements and iRingLA, *The 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp.2178–2183 (2015).
- [8] Anagnostopoulos, G.G. and Deriaz, M.: Ccuracy Enhancement in indoor Localization with the Weighted Average Technique, *The Eighth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, pp.112–116 (2014).
- [9] Jianyong, Z., Haiyong, L., Zili, C. and Zhaohui, L.: RSSI based Bluetooth low energy indoor positioning, *The 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp.526–533 (2015).
- [10] 浦野健太, 廣井 慧, 梶 克彦, 河口信夫: 配布型 BLE タグとタンデムスキャナを用いた屋内位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.1, pp.58–75 (2019).
- [11] 浦野健太, 廣井 慧, 米澤拓郎, 河口信夫: ニューラルネットワークを用いた大規模イベント向け BLE 屋内位置推定の比較評価, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集, pp.29–35 (2019).
- [12] Dalkilic, F., Cabuk, U.C., Arrkan, E. and Gurkan, A.: An Analysis of the Positioning Accuracy of iBeacon Technology in Indoor Environments, *2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, pp.549–553 (2017).
- [13] Kouyoumdjieva, S.T. and Karlsson, G.: Experimental Evaluation of precision of a Proximity-based Indoor Positioning System, *The 15th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, pp.130–137 (2019).
- [14] Kwok, C.Y.T., Wong, M., Griffiths, S., Wong, F., Kam, R., Chin, D., Xiong, G. and Mok, E.: Performance Evaluation of iBeacon Deployment for Location-Based Services in Physical Learning Spaces, *Applied Sciences*, Vol.10, p.7126 (online), DOI: 10.3390/app10207126 (2020).
- [15] Rezazadeh, J., Subramanian, R., Sandrasegaran, K., Kong, X., Moradi, M. and Khodamoradi, F.: Novel iBeacon Placement for Indoor Positioning in IoT, *IEEE Sensors Journal*, Vol.18, No.24, pp.10240–10247 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2018.2875037 (2018).
- [16] 岩崎 哲, 田中砂与子, 廣田輝直, 安藤英幸, 榎本昌一, 佐々木裕一: 近距離無線による造船所内位置計測方法の研究, 日本船舶海洋工学学会論文集, Vol.1, pp.55–61 (2005).
- [17] 星 尚志, 石塚宏紀, 小野智弘: 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, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集, pp.1540–1546 (2017).
- [18] 古館達也, 堀川三好, 菅原光政: 受信信号強度を用いた屋

内即位手法の提案, 研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), Vol.2014-ITS-59, No.21, pp.1–8 (2014).

- [19] Foundation, T.R.P.: Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi (online), available from <https://www.raspberrypi.org/> (accessed 2018-09-25).
- [20] 株式会社アプリックス: MyBeacon ペンダント型 MB002 Ac-SR2 (オンライン), 入手先 (<https://business.aplix.co.jp/product/mybeacon/mb002ac/>) (参照 2018-10-30).
- [21] 上原昭宏: iBeacon ハンドブック (2014).
- [22] 株式会社芳和システムデザイン: BLEAD (オンライン), 入手先 (<http://houwa-js.co.jp/service/blead/>) (参照 2021-01-03).

推薦文

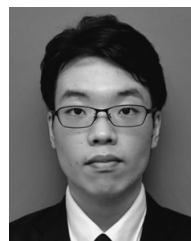
情報処理学会中国支部表彰規定に則り, 2020 年度 (第 71 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会で発表された中から, 特に優秀であることが認められた優秀論文発表賞を授賞した論文である.

(情報処理学会中国支部支部長 會澤 邦夫)



宮崎 喬行 (学生会員)

平成 8 年生. 令和元年鳥取大学工学部電気情報系学科卒業. 現在, 同大学大学院持続性社会創成科学研究科工学専攻情報エレクトロニクスコース入学. iBeacon を用いた位置推定に関する研究に従事.



牧田 岳大

平成 7 年生. 平成 30 年鳥取大学工学部知能情報工学科卒業. 令和 2 年同大学大学院持続性社会創成科学研究科工学専攻情報エレクトロニクスコース修了. 同年株式会社 VOYAGE GROUP 入社. SSP の開発に従事.



高橋 健一 (正会員)

昭和 51 年生。平成 16 年九州大学大学院システム情報科学府博士課程修了。博士 (工学)。同年財団法人九州システム情報技術研究所 (現、九州先端科学技術研究所) 入所。平成 23 年鳥取大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻准教授。現在、同大学学術研究院工学系部門准教授。情報セキュリティ、エージェントシステム、ユビキタス技術等の研究に従事。電子情報通信学会、電気学会、IEEE 各会員。



川村 尚生 (正会員)

昭和 40 年生。平成 6 年神戸大学大学院自然科学研究科博士課程単位取得退学。同年鳥取大学工学部知能情報工学科助手。現在、同大学学術研究院工学系部門教授。エージェントシステム、社会情報システムに関する研究に従事。博士 (工学)、電子情報通信学会会員。



菅原 一孔 (正会員)

昭和 31 年生。昭和 56 年東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻博士課程修了。同年神戸市立工業高等専門学校電子工学科講師。同校助教授を経て平成 6 年鳥取大学工学部電気電子工学科助教授。現在、同大学学術研究院工学系部門教授。計算機工学に関する研究に従事。平成 22 年日刊工業新聞社モノづくり連携大賞、平成 21 年船井ベストペーパー賞、平成 21 年総理大臣賞産学官連携功労者表彰、平成 20 年総務大臣表彰 U-Japan 大賞等受賞。平成 25、26 年度情報処理学会中国支部支部長、平成 21 年度電子情報通信学会中国支部支部長。工学博士。