

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 牧田 岳大¹ 高橋 健一^{2,3} 川村 尚生^{2,3} 菅原 一孔^{2,3}

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いという問題がある. ビーコンの電波は 2.4Ghz 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.

Considering the Effect of Human Body for Position Estimation using iBeacon

TAKAYUKI MIYAZAKI¹ TAKEHIRO MAKITA¹ KENICHI TAKAHASHI^{2,3} TAKAO KAWAMURA^{2,3}
KAZUNORI SUGAHARA^{2,3}

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) を使用している. 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) [1] 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 2.4Ghz 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, 人体の影響による推定位置の誤差を軽減する.

¹ 鳥取大学大学院 持続性社会創生科学研究科

² 鳥取大学大学院 工学研究科

³ 鳥取大学 工学部附属クロス情報科学研究センター

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 [2]. 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、予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。

また、ビーコンの電波強度をもとにした位置推定には受信機を設置しビーコンの位置を推定する手法とビーコンを設置し受信機の位置を推定する手法が存在する。

2.1 ビーコンの位置推定

浦野ら [5] の研究では、デノイズ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の位置推定精度を比較している。デノイズングオートエンコーダーを利用した手法は、デノイズングオートエンコーダーで補正した電波強度をもとに三点測位ベースのアルゴリズムで位置を推定する。End-to-end のニューラルネットワークを利用した手法は、時系列に並べた電波強度から位置を推定する。しかし、人体の影響については考慮していない。

岩崎ら [6] の研究では、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中点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。

2.2 受信機の位置推定

酒井ら [7] の研究では、複数のビーコンから受信した電波の中から電波強度の高い 4 つを抽出しその 4 つの電波強度をもとに三点測位で位置を推定している。しかし、人体の影響を受けた電波については考慮していない。

星ら [8] の研究では、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他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 [9] の研究では、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サーバーに送信する。サーバーでは受信機から送信された電波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[10]、ビーコンには MyBeacon ペンダント型 [11] を使用している。

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 [12] 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 $p_1[\text{mW}]$ 、距離 $r[\text{m}]$ での信号強度を $p_r[\text{mW}]$ 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、 $p_1[\text{mW}]$ を $P_1[\text{dBm}]$ 、 $p_r[\text{mW}]$ を $P_r[\text{dBm}]$ 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 を重みとみなす。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 電波の不安定さによる誤差

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機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 2.4Ghz 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の改良を加えた．この改良により平均誤差は約 2.13m から，約 1.46m となり約 31%軽減することができた．我々が加えた改良?を以下に示す．

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大きく変化する．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，一定時間で集めたデータの受信電波強度の平均値を利用する．

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 $\pm 2\text{dBm}$ 以上離れた信号を除去する．

3.2.3 重み付け

受信機の受信信号数を集計したところ，受信機の受信信号数は，ビーコンと受信機間の距離で違いがあった．そこで，受信数信号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数を c_a とし，重み ω_i を式 (7) より求める．この時重心 $T(x_t, y_t)$ 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 は 1 以下の係数とすると式 (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．指数平滑法を行うことによって受信数が少なく外れ値や平均で除去できなかったノイズを軽減することができる．

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できた．しかし，ビーコンを持つ位置によって人体の影響による誤差が発生する．そこで，人体の影響による誤差を確認した．

4.1 人体の影響による誤差の確認

人体の影響による誤差を確認するための実験を行った．受信機は約 8 m 間隔で壁の高い位置 (約 2m) に直線に設置し，ビーコンを体の前と後ろのに所持して位置推定を行った．図 2 に左から右に歩いて移動した時の位置推定結果を示す．

2 つのビーコンは 1 人で所持しており実際の距離は体の前後程度しか離れていないにもかかわらず，推定位置に大きく差が出た．体の前に持っているビーコンは実際の位置より前に位置が推定され，体の後ろに持っているビーコンは実際のより後ろに位置が推定されている．ある時において，体の前に持ったビーコンの推定位置と体の後ろに持ったビーコンの推定位置の差は約 6m であった．

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時，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，推定位置に誤差が生じる．

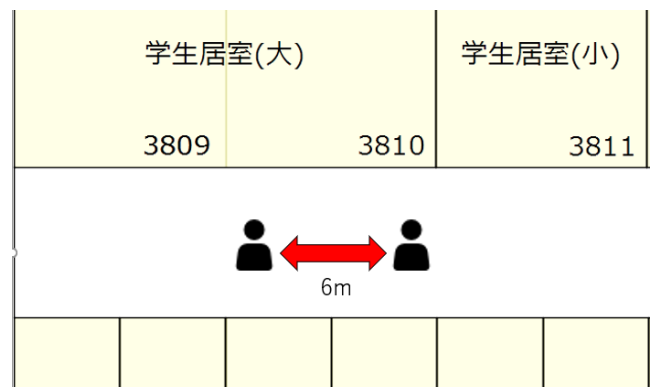


図 1 人体の影響による誤差

4.2 人体の影響による推定位置の差

Centroid 法で位置推定を行った時の人体の影響による推定位置の差を検証した。Centroid 法により位置推定を行った結果を図 2 に示す。実験では、2つの受信機を 0m 地点と 10m 地点に 10m 離して設置し、中央の 5m 地点でビーコンを持って立ち電波強度を計測した。ビーコンは胸の位置に持ち 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-20dBm、1m 離れた地点での電波強度は-86dBm、1 秒間の発信回数は 10 回とした。

図 2 を見ると、5m 地点で静止しているにも関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。胸側の受信機と背中側の受信機の電波強度の差は平均で 7.0dBm であった。また、受信信号数の平均は胸側の受信機 5.3 回/秒、背中側の受信機 3.0 回/秒であった。

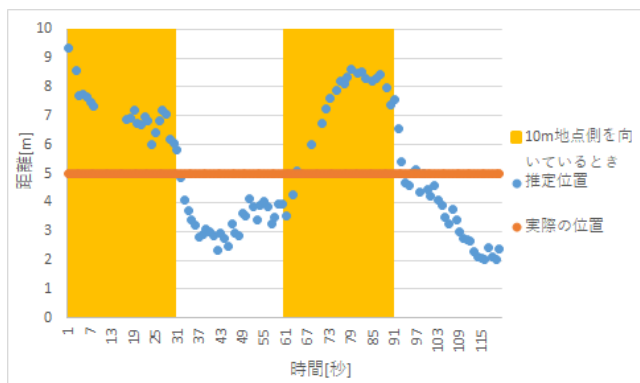


図 2 Centroid 法を用いて位置推定を行った結果

4.3 人体の影響による推定距離の差

4.1 節、4.2 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がわかった。Centroid 法では、電波強度をもとにビーコンと受信機間の距離を計算しその距離を使用して位置を推定している。そこで、人体の影響による推定距離の差がビーコンと受信機間の距離によってどのような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 秒ずつ静止し体の向きを反転し 90 秒間静止する実験を 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、体の向きを反転し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した。結果の平均値を図 3 に示す。

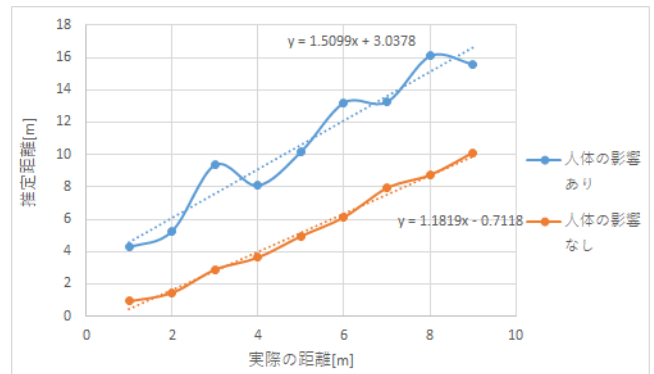


図 3 電波強度の比較

図 3 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わかる。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 3.5m と大きく異なった。そこで、実際の距離が変化したときの推定距離の変位に注目した。実際の距離が変化したときの推定距離の変位は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より少ない。実際に人体の影響を受けた電波と人体の影響を受けていない電波それぞれで実際の距離が 1m 変化した時の推定距離の変位を計算した。結果、直前の位置との推定距離の変位は、人体の影響を受けた電波が各所の平均で約 1.0m、人体の影響を受けていない電波が各所の平均で 0.89m であった。2つの差は 0.11m 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とわかった。

5. 提案手法

4 節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わかった。そこで、直前のデータとの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。現在の推定位置 P_t 、直前の推定位置を P_{t-1} とする。移動距離推定では直前の推定位置 P_{t-1} からの移動距離を求める。移動距離を求める際、移動距離だけでなく移動方向を求めることも可能である。しかし、この方法で求めた移動方向の正解率は 66.4%と低かった。そこで、移動距離推定と別に移動方向を推定する。Centroid 法で求めた過去 3 回の推定位置と現在の推定位置を利用して移動方向を推定する。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。

5.1 移動方向推定

Centroid 法で求めた過去 3 回の推定位置と現在の推定位置を利用して移動方向を推定する。推定は、過去 3 回と現在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。ここで利用している 4 つの推定位置は移動方向推定と移動距離推定から求めた位置 P_t ではなく Centroid 法で求めた推定位置である。このため、移動方向推定で利用する推定位置は人体の影響を受けている。しかし、移動方向を推定する際、4 つの推定位置が全て人体の影響を受けているため近似直線の傾きには影響しない。そのため、移動方向推定において人体の影響を受けない。

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。

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

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

$$B = \mu_Y - A\mu_X \quad (11)$$

式 (10)、式 (11) から近似直線を求めると、

$$y = Ax + B \quad (12)$$

となる。受信機を直線に設置した場合、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、直前の推定位置 P_{t-1} からの移動距離を求める。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からの移動距離を推定する。ビーコンと受信機間の推定距離は、式 (5) を使用して求める。受信機各々で直前のビーコンと受信機間の推定距離と現在のビーコンと受信機間の推定距離の変位を求める。現在の推定位置 P_t の時の推定距離を d_t 、直前の推定位置 P_{t-1} の時の推定距離を d_{t-1} とすると推定距離の変位 Δd は式 (13) で表される。

$$\Delta d = d_t - d_{t-1} \quad (13)$$

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推定距離の変位が存在する場合が存在する。移動方向推定と違う方向に変位している場合、電波の不安定さによる影響を軽減できない可能性がある。移動方向推定で判定された方向を正しいと仮定した場合、この情報は正確ではない。そこで、移動方向推定で判定された方向を正しいと仮定し、受信機各々で求めた変位から 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つけ、重み付けした結果の平均を移動距離とする。重み付けは、3.2 節の平均

の計算に利用した直前の推定位置 P_{t-1} 時のデータ数と現在の推定位置 P_t 時のデータ数の合計を重みとする。データ数が多いほど平均値や外れ値除去の効果があり信頼できる値である。また、人体の影響を受けた電波は同じ距離でも受信数が少なくなることから、データ数で重みづけを行うことによって人体の影響を受けていない値を重視することができる。抽出された推定距離の変位の数 n 、受信機 i の直前の推定時のデータ数と現在の推定時のデータ数の合計を s_i とすると、推定移動距離 D は式 (14) で表される。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta d_i s_i|}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad (14)$$

5.3 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の実験を行った。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 地点まで行き、折り返して 0m 地点まで一定速度で歩いた。ビーコンは胸の位置に持った。Centroid 法の推定位置、提案手法の推定位置をプロットした図を図 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わかる。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、推定位置の平均誤差は 1.83m となり、Centroid 法と比べて平均誤差を 41.2% 軽減することができた。

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、推定位置を実際の位置に近い位置を推定できていることがわかる。しかし、実験の後半の 28 秒付近から誤差が大きくなっている。これは、27 秒～29 秒付近で移動距離が実際より大きく推定されているためである。その誤差が累積した結果、30 秒付近では推定移動距離が正しく計算されているにもかかわらず、推定位置に大きな誤差が発生していた。

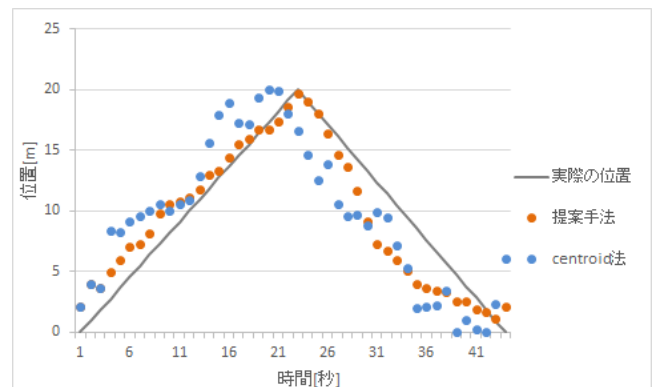


図 4 提案手法と Centroid 法の位置推定結果比較

5.4 考察

実験結果から、本手法では Centroid 法と比較して人体の影響による誤差を軽減して位置を推定することができた。しかし、本手法は直前の推定位置からの変位を利用して位置を推定していることから誤差が累積し位置推定が進むにつれて誤差が大きくなる可能性がある。

このため、誤差の累積を補正するための手法を検討する必要がある。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。ビーコンを胸の位置に所持している場合、受信機を通過すると人体の影響を大きく受けることとなり、電波強度が大きく変化する。そこで、受信機の通過を検知し、その情報により累積した誤差を補正する。受信機の通過の検知は、受信した電波強度が直前のいくつかの電波強度と比較して大きく減衰していれば受信機を通過したと判定する。この補正によって、受信機を通過することで誤差の累積が解消できるものと考える。

6. おわりに

本研究では、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に成功した。今後の課題として、位置推定を行うにつれて累積する誤差の補正を本手法に追加することがあげられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20K12078 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 物品管理位置管理 IoT サービス Xeye (スロクアイ). <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. 874-881, 2019.
- [3] Bluetooth Specification Core Version4.2, 2014.
- [4] 藪野介, 新井スマイル. 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.301-302, 2015.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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, Vol. 2016f, pp. 53-56, 2016.
- [10] 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.
- [11] 古舘達也, 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.
- [12] Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.org/>. (参照 2018-09-25).
- [13] MyBeacon ペンダント型 MB002 Ac-SR2. <https://business.aplix.co.jp/product/mybeacon/mb002ac/>. (参照 2018-09-25).
- [14] 上原昭宏. iBeacon ハンドブック. 達人出版, 2014.
- [15] 牧田岳大, 高橋健一, 川村尚生, 菅原一孔. iBeacon を用いた位置推定における精度向上. 電気・情報関連学会中国支部第 69 回連合大会講演論文集, 2018.