

回転磁石マーカを用いた スマートフォン所持者の2次元経路推定

渡邊 康祐¹ 廣井 慧² 米澤 拓郎² 梶 克彦³ 河口 信夫^{1,2}

概要: スマートフォンやタブレット型端末の普及によって、様々な場面で位置が活用されるようになった。我々の目的は誤差数 cm のスマートフォン位置情報に基づいた新たなサービスの創出である。我々はこれまで、回転磁石マーカを用いたスマートフォン位置推定手法を研究してきた。回転磁石マーカとは強力な磁石を回転させ、スマートフォンの磁気センサで検知可能な動的磁気を発生させる装置である。我々は以前の研究で、回転磁石マーカを用いたスマートフォンの移動経路推定手法を提案した。この以前の研究では、ベルトコンベアを用いてスマートフォンを移動させた結果、回転磁石マーカから 1m 離れた直線経路を平均誤差 10 cm 以下で推定した。本研究では、人がスマートフォンを持って移動している場合について、同様の手法を用いて移動経路を推定し、その推定精度を評価した。評価実験の結果、回転磁石マーカからの距離が 1m の直線経路を歩いた場合、移動経路を平均誤差 19 cm で推定できた。また、提案手法のロバスト性を調べるため、スマートフォンをポケットに収納し、同じ経路で移動経路を推定した。その結果、回転磁石マーカからの距離が 1m の直線経路を歩いた場合、スマートフォンの初期位置を平均誤差 21 cm で推定可能であった。以上の検討から、歩行者がスマートフォンを所持している場合について、以前我々が提案した手法を用いて移動経路を推定できることを確認した。

A Smartphone Two-Dimensional Path Estimation Method using the Spinning Magnet Marker

KOSUKE WATANABE¹ KEI HIROI² TAKURO YONEZAWA² KATSUHIKO KAJI³
NOBUO KAWAGUCHI^{1,2}

1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレット型端末などの普及に伴って位置情報を利用する場面が増加している。位置情報の活用例として、Google Maps^{*1}などのナビゲーションサービスや、TAGCAST^{*2}や beacapp HERE^{*3}などの屋内位置推定サービスがある。我々の目的は、精度数 cm の位置情報に基づいた新しいサービスの創出である。複数人が存在する公共施設等において、指向性を持つパラメトリック・スピーカーや点音源の制御 [1] による個人に併せた情報伝達や、指向性マイクロフォン [2] の制御による音声イ

ンタフェースの多人数対応などを実現するためには、精度数 cm の位置情報取得が重要になる。これらの技術を組み合わせたサービスの例として、超指向性を持ったパーソナライズド・デジタルサイネージによる歩行者への情報表示が想定される。デジタルサイネージ前の歩行者の位置を精度数 cm で推定し、歩行者が認識しやすい場所に視覚的^{*4}・聴覚的・触覚的 [3] 情報を提示できれば、より効率的な情報伝達や効果的な広告の表示が可能になる。

現在、多くの屋内位置推定手法が研究、利用されており、オフィスでの在席管理や、倉庫での物品管理などに利用されている。屋内位置推定手法の例として、Wi-Fi アクセスポイントを用いた手法 [4] [5]、BLE (Bluetooth Low Energy) を用いた手法 [6] [7] がある。これらの手法はスマートフォンの位置を誤差数 cm で推定するのは難しく、

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科

² 名古屋大学 未来社会創造機構

³ 愛知工業大学 情報科学部

^{*1} <https://www.google.com/maps/>

^{*2} <https://tagcast.jp/>

^{*3} <https://jp.beacapp-here.com/>

^{*4} <http://www.optronics-media.com/news/20140603/23042/>

我々の目的に対して推定精度が不十分である。また他の位置推定手法に UWB (Ultra Wide Band) を用いた手法 [8] がある。この手法は機材を設置すれば、精度 15 cm 程度で端末位置を推定できるが、利用するために専用端末の所持や、UWB の送信機を天井に設置するなどのコストが必要になる。スマートフォンの移動経路を推定する手法として、PDR (Pedestrian Dead Reckoning) [9] [10] [11] がある。これらの手法は端末に内蔵された加速度センサとジャイロセンサを用いる手法で、スマートフォンでも利用可能手法だが、推定精度を誤差 10 cm 以下に抑えるのが難しい。

我々の目的に適した位置推定手法として動的磁気を用いた手法 [12] [13] [14] [15] がある。これらの手法は、他の手法と比較して遮蔽物の影響を受けにくい利点があり、端末位置を誤差数 cm で推定できるため、推定精度の面で我々の目的に適していると考えられる。しかしながら、これらの手法をスマートフォンの移動経路に対して用いるのは難しい。なぜなら、これらの手法では数 kHz 以上の動的磁気を用いて短時間での位置推定を繰り返し、端末の移動経路を推定しているが、スマートフォンに搭載されている磁気センサのサンプリング周波数は最大で 100 Hz 程度であるため、短い間隔で位置推定を繰り返すのが難しいためである。

スマートフォンでも動的磁気を用いた位置推定を可能とするため、これまでに我々は回転磁石マーカによる位置推定手法 [16] [17] を提案してきた。回転磁石マーカとは強力な磁石をモータで回転させ、1 Hz~10 Hz の動的磁気を発生させる装置である。図 1 に我々が開発した回転磁石マーカを示す。磁気の発生に磁石を用いるため、電磁石を用いる手法と比較してコストを抑えることができ、発生する磁気の周波数が 1 Hz~10 Hz であるため、スマートフォンのセンサのサンプリング周波数でも計測可能である。これらの研究では磁気の振幅からスマートフォンの 3 次元位置を平均誤差数 cm で推定可能だが、ノイズ軽減のために同じ場所に 10 秒程度静止する必要があるため、スマートフォンの移動経路の推定が困難な問題があった。

我々は以前に、回転磁石マーカを用いたスマートフォンの移動経路推定手法 [18] を検討した。この以前の研究ではベルトコンベアを用いてスマートフォンを移動させ、その推定精度を評価した結果、回転磁石マーカからの距離が 1 m の直線経路の時、平均誤差 10 cm 以下での経路推定が可能であった。本研究では、歩行者がスマートフォンを所持している時の移動経路推定の精度を評価した。人がスマートフォンを所持して移動する時、ベルトコンベアを用いた場合と異なり、移動中に人が遮蔽物となる。また、人の移動速度が一定ではないため、それらの要素が推定精度に影響を及ぼすと考えられる。評価実験の結果、回転磁石マーカからの距離が 1 m の時、平均誤差 19 cm の精度で推定可能であった。また、スマートフォンをズボンのポケッ

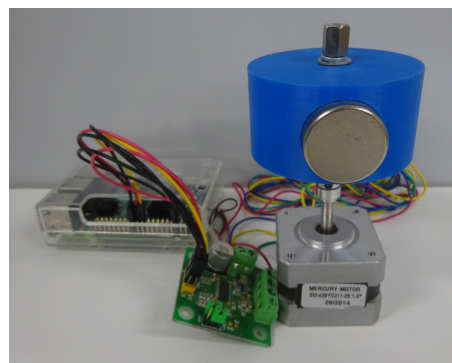


図 1: 回転磁石マーカ

トに入れた状態で同様の経路を歩いた結果、その推定精度は回転磁石マーカからの距離が 1 m の直線経路の時、平均誤差 21 cm であり、手で持った場合と比べて衣服の影響を大きく受けないことがわかった。

本論文の構成を以下に示す。まず 2 章で屋内位置推定の先行研究を紹介する。次に 3 章でスマートフォンの移動経路を推定する手法を説明し、4 章で提案手法による推定精度の評価実験を示す。最後に 5 章で本論文のまとめと今後の課題を示す。

2. 関連研究

2.1 電波を用いた位置推定

位置推定手法の一つに Wi-Fi アクセスポイントからの電波を利用する手法が研究されている。この手法では Wi-Fi アクセスポイントによる電波強度の fingerprint を作成し、推定に利用する手法などが研究されている。Zhuang らはクラウドソーシングを利用して fingerprint を作成する手法 [4] を検討し、平均誤差 6m 以内での位置推定に成功している。Alam らは電波強度の fingerprint を用いた端末の 3 次元位置推定を研究 [5] し、平均誤差 4.62m の 3 次元位置推定を達成したと述べている。これらの手法は Wi-Fi アクセスポイントが設置されている施設では追加設備を導入する必要がないなどのメリットがある。

電波を利用した位置推定手法として、BLE 技術を用いた手法が多く研究されている。この手法では BLE ビーコンから発せられる電波強度を利用して端末の位置を推定する手法などが研究されている。Park らは 4 つの BLE ビーコンを同一球面上に配置し、それぞれの電波強度から球面内のデバイスの 3 次元位置を推定する手法 [7] を研究をしている。Rida らは天井に等間隔で BLE ビーコンを配置してスマートフォンの 2 次元位置を推定する手法 [6] を検討し、0.5m~1m の精度でスマートフォンの 2 次元位置を推定した。BLE ビーコンが比較的安価で低消費電力であることから、これらの手法は設置コスト、ランニングコストが比較的低い利点がある。

また電波を利用した他の手法として、UWB 技術を用いた

位置推定手法の研究が存在する。この手法では、500 MHz～数 GHz の電波を用いたパルス信号を利用し、信号の到達速度の差を利用して位置推定する手法 [8] などが研究されている。また、UWB 技術を用いた商用製品のひとつに Ubisense RTLS (Real Time Location System)*⁵がある。このサービスでは、専用タグが発する電波を屋内に 30 m～40 m 間隔で設置したセンサーが受信し、タグの 3 次元位置を 15 cm 程度の精度で推定する。

2.2 端末のモーションセンサを用いた位置推定

スマートフォンの 2 次元移動経路を推定する手法として PDR がある。PDR は端末に内蔵されている加速度センサやジャイロセンサを用いて端末所持者の移動経路を推定する手法である。PDR は移動距離が長くなるほど誤差が蓄積して推定精度が低下するため、上述の Wi-Fi や BLE を用いる手法などと組み合わせる場合が多い。Qian らはフロアプランとパーティクルフィルタを用いた PDR [9] を研究し、平均誤差 0.5 m 程度でのリアルタイム経路を推定達成した。Ho らは PDR による移動距離の推定手法 [10] を研究し、10 m 歩いた時の移動距離を平均誤差 0.5 m 以下で推定した。Kuang らはスマートフォン所持者がスキップやジャンプなどの縦方向に速度が発生する運動はしないと仮定した PDR [11] を研究し、全長およそ 80 m に渡る経路を平均誤差 1 m 程度で推定した。これらの手法はスマートフォンの移動経路推定に適しているが、誤差 10 cm 以下の精度で推定するのは難しく、我々の目的とする精度の推定には適していない。

2.3 磁気を用いた位置推定

我々の目的とする精度を満たす位置推定手法として動的磁気を用いた手法がある。Paperno らは動的磁気が 3 次元空間に発生させる磁気ベクトルと 3 次元位置との理論的な関係を明らかにした [12]。Hu らは直交させた 3 つのコイルから異なる周波数の動的磁気を発生させ、磁気センサの 3 次元位置と姿勢を推定する手法 [13] を検討した。彼らはこの研究で、縦 500 mm、横 400 mm、高さ 400 mm の 3 次元空間内で、平均誤差 10 cm 以下で磁気センサの位置を推定した。Pirkl らはコイルを巻きつけた 1 辺 16 cm の立方体を 4 つ使用し、その立方体から 4 m 以内の範囲で平均誤差 4 cm で磁気センサの位置推定を実現している [14]。また POLHEMUS*⁶は動的磁気を用いた位置推定製品を販売している。これらの商品では使用者が全身に専用器具を装着して、リアルタイムな位置推定やモーションキャプチャーなどを可能にし、磁場の発生装置から 3 m 以内の範囲で誤差 1 cm の 3 次元位置推定を実現している。

磁気を用いた手法の利点は、Wi-Fi や BLE、UWB など

の電波を利用する手法と異なり、遮蔽物の影響を受けにくい点である。また、動的磁気を用いた位置推定手法は、磁気発生装置から数 m 以内の領域であれば、端末の 3 次元位置を数 mm～数 cm の精度で推定可能であり、我々の目的とする誤差 10 cm のスマートフォンの経路推定に適している。しかしながら、これらの手法をスマートフォンで利用するのは難しい。なぜなら、推定に必要な強さの動的磁気を発生させるため、コイルに数 MHz～数 kHz の電流を流す必要があるが、スマートフォンの磁気センサのサンプリング周波数は最大 100 Hz 程度であるため、サンプリング定理から数 kHz の動的磁気を正しく計測できないためである。

動的磁気を用いてスマートフォンの位置を推定するため、我々は回転磁石マーカを開発した。回転磁石マーカとは、強力な磁石をモータで回転させ、1 Hz～10 Hz の動的磁気を発生させる装置である。磁場の発生に磁石を用いるため、スマートフォンの磁気センサで検知可能な周波数の動的磁気を発生させられ、またコイルを用いた場合よりも必要な電流の量を抑えられる。武島らは、回転磁石マーカを用いたスマートフォン所持者の通過検出 [19] を検討している。この研究では回転磁石マーカからの距離 75 cm で 100 % の精度の通過検出を達成した。武島らはまた、回転磁石マーカを用いたスマートフォンの 2 次元位置推定手法 [16] を検討している。この研究では、回転磁石マーカからの距離 2 m で平均誤差 13 cm の距離推定、距離 0.5 m で平均誤差 24° の方位角推定を達成した。また、我々は以前に回転磁石マーカを用いたスマートフォンの 3 次元位置推定手法 [17] を検討した。評価実験の結果、距離 2 m、方位角 0°、仰角 0° の位置で方位角を平均誤差 3°、仰角を平均誤差 3°、距離を平均誤差 2 cm でスマートフォンの 3 次元位置を推定した。

これらの研究ではスマートフォンが静止していると仮定し、磁石の回転周期毎に計測した磁気の振幅から 3 次元位置を推定した。しかし、スマートフォンが移動する時、移動に伴う磁気の変化で計測した磁気が周期的にならないため、磁気の振幅からスマートフォンの移動経路を推定するのが難しい。そこで我々は以前、一定時間計測した磁気のパターンからスマートフォンの移動経路を推定する手法 [18] を提案した。この以前の研究では、ベルトコンベアを用いてスマートフォンを移動させ、その推定精度を評価した。本研究では人がスマートフォンを所持して歩いている場合について推定精度を評価した。

3. 移動経路推定手法

3.1 磁気の近似式

スマートフォンの移動経路を推定するため、回転磁石マーカによる磁気の影響下で、移動しているスマートフォンが計測する磁気の近似式を導出する。今回、スマート

*⁵ <https://ubisense.net/en>

*⁶ <https://www.ddd.co.jp/polhemus/>

フォンは2次元平面内を移動すると仮定し、回転磁石マーカによる磁気を図2のように表す。ここで、 t は時刻、 ω は磁石の回転速度、 r, θ はそれぞれ2次元極座標の距離、方位角を示し、 H_r は磁気の動径方向、 H_θ は動径方向と垂直な磁気成分を示している。この時、磁石による磁気の直交座標成分 H_x, H_y は2次元極座標 (r, θ) を用いて以下のように書ける。

$$H_x = H_r \cos(\theta - \omega t) - H_\theta \sin(\theta - \omega t) \quad (1)$$

$$H_y = H_r \sin(\theta - \omega t) + H_\theta \cos(\theta - \omega t) \quad (2)$$

$$H_z = 0 \quad (3)$$

また我々の以前の研究と同様、磁石を磁気双極子として近似すると、式(1)(2)の H_r, H_θ は距離 r の3乗に反比例する値とみなせる。そこで H_r, H_θ を磁石によって定まる定数 A, B を用いて以下のように表す。

$$H_r = \frac{A}{r^3} \quad (4)$$

$$H_\theta = \frac{B}{r^3} \quad (5)$$

式(4)(5)を式(1)(2)(3)に代入すると以下の式が導出できる。

$$H_x = \frac{A+B}{2r^3} \cos(2\theta - \omega t) + \frac{A-B}{2r^3} \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$H_y = \frac{A+B}{2r^3} \sin(2\theta - \omega t) + \frac{A-B}{2r^3} \sin(\omega t) \quad (7)$$

さらに上式(6)(7)から磁気ノルムを導出すると以下の式になる。

$$H = \sqrt{\frac{B^2}{r^6} + \frac{A^2 - B^2}{r^6} \cos^2(\theta - \omega t)} \quad (8)$$

上式(6)(7)または式(8)の r, θ にスマートフォンの移動経路を表す式を代入すれば、その経路上でスマートフォンが計測する磁気ノルム、もしくは磁気のx軸、y軸成分を求められる。

3.2 経路の定式化

まずx軸に対して平行な経路を定義する。図3にスマートフォンの経路を示す。スマートフォン所持者はx軸に平行な向きに移動するとし、初期位置を x_0, y_0 、x軸方向の速さを v_x と定義する。この時、式(8)における距離 r と方位角 θ は次のように書ける。

$$r = \sqrt{x_0^2 + (y_0 + v_y t)^2} \quad (9)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_0 + v_y t}{x_0}\right) \quad (10)$$

移動中にスマートフォンが計測する磁気は、その経路を特徴づけるパラメータによって定まる。例えば、直線経路を移動するスマートフォンが計測する磁気ノルムは式

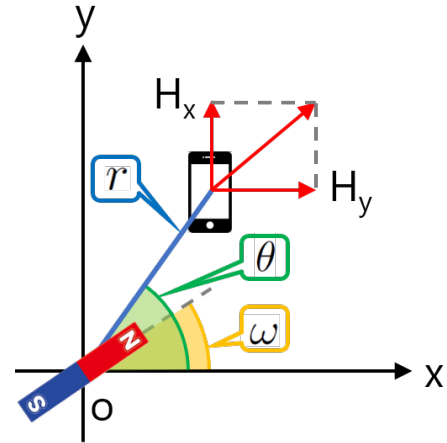


図2: 2次元平面内での回転磁石マーカによる磁気

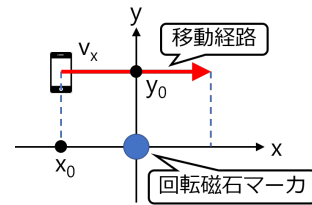


図3: 直線移動するスマートフォンの経路

(9)(10)が示すように、その初期位置 x_0, y_0 とその速度 v_x に依存する。この時、 x_0, y_0, v_x をフィッティングパラメータとして、計測した磁気ノルムを式(8)でカーブフィッティングすれば、求めた x_0, y_0, v_x の最適解を式(9)(10)に代入してスマートフォンの経路を推定できる。今回、カーブフィッティングのアルゴリズムに Levenberg-Marquardt 法を使用し、フィッティングパラメータの初期値を全て1として実行した。

3.3 環境磁気軽減手法

3.1では、移動しているスマートフォンが回転磁石マーカから受ける磁気の近似式を導出した。しかしながら、実環境では建物や電子機器などが発する磁気の影響を受けるため、移動に伴って $10 \mu\text{T} \sim 100 \mu\text{T}$ の磁気の変動が起きる。これらの磁気は回転磁石マーカによる磁気よりもはるかに大きくなることもあり、経路推定に大きな影響を及ぼす。そこで、我々は計測した磁気から環境磁気の影響を軽減する処理を検討した。

まず、計測された磁気を窓幅3の単純移動平均を用いて平滑化する。次に、計測された磁気が極大値もしくは極小値になる時刻を取得し、それらの中間の時刻での磁気値を線形に補間する。そして、その線形で補間した磁気を環境磁気として、もとの磁気データから引く。以上の処理によって、計測された磁気に含まれる環境磁気の影響を軽減した。

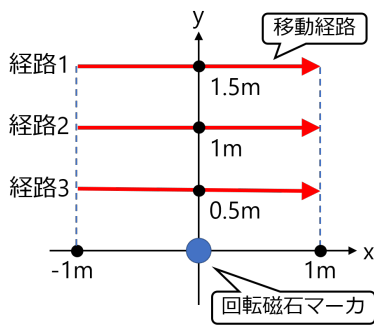


図 4: 正解経路

4. 移動経路推定の評価実験

4.1 実験設定

経路推定の前に、我々は 3.1 の式 (4)(5) で導入した磁石に依存する定数 A, B を計測する実験をした。式 (8) より、距離 $r = 1\text{m}$ 、方位角 $\theta = 0^\circ$ 、 $\omega t = 0$ の時の磁気ノルムの値が定数 A 、 $\omega t = \pi/2$ の時が定数 B に対応することが分かる。そこで、回転磁石マーカから 1m 離してスマートフォンを設置し、 10 秒間磁気を計測する。次に、計測した磁気ノルムの極大値と極小値を取得し、それぞれの極値の平均をそれぞれ定数 A, B とする。実験の結果、定数は $A = 6.77\ \mu\text{T}$ 、 $B = 3.04\ \mu\text{T}$ であった。

図 4 は推定した正解経路を示している。スマートフォンの初期位置の x 座標はすべて 1m 、 y 座標はそれぞれの経路で 0.5m 、 1m 、 1.5m 、移動経路の長さは全て 3m とし、これらの経路をそれぞれ経路 1、2、3 と定義する。歩行者はスマートフォンを手に所持した状態、ポケットに収納した状態のそれぞれで 3m の経路上を 10 秒間かけて歩くものとする。回転磁石マーカの回転数は 1Hz とし、実験に使用したスマートフォンは iPhone 6 Plus、磁気センサのサンプリング周波数は 100Hz に設定した。また、各時刻で正解経路と推定経路の距離を算出し、その距離を計測時間で平均したものを推定精度とする。それぞれの経路で 5 回ずつ経路を推定し、平均誤差と標準偏差を算出する。

4.2 推定結果

図 5 はそれぞれの経路での、式 (8) で求めた理論上の磁気と計測した磁気、推定経路での磁気の比較である。この図が示すように、経路 1 (距離 0.5m) では理論上の磁気、計測した磁気、推定経路での磁気がほぼ一致している様子が分かる。一方で経路 2 (距離 1m) では、磁気値が急激に減少し、経路 3 (距離 1.5m) では推定が困難になっている様子が分かる。また、いずれの場合も正解経路での磁気と計測した磁気との間に位相のずれが見られるが、これらは人の歩く速度が一様でないために生じたものだと考えられる。

図 6 は正解経路と推定経路の比較を示している。この図では、正解経路を赤色の矢印で示し、推定経路を半透明の青色で示した。図が示すように、経路 1 (距離 0.5m) と経路 2 (距離 1m) では赤色の矢印と青色の矢印がほぼ重なっている様子が分かる。一方で経路 3 (距離 1.5m) では、経路 1、2 と比較して推定経路にばらつきが見られ、回転磁石マーカからの距離によって経路推定の精度が低下している様子が分かる。図 8 は各経路での推定結果で、点は平均誤差、バーは標準偏差である。この図が示すように、回転磁石マーカから経路 1 (距離 0.5m) では平均誤差が 10cm であるのに対し、経路 3 (距離 1.5m) では推定精度が大きく低下している。これは図 6 が示す傾向と一致している。

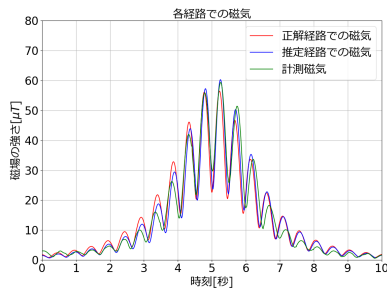
また、図 7 はスマートフォンをポケットに収納した場合の正解経路と推定経路の比較を示している。手で持って移動した場合の図 6 と比較して、ほぼ同様の精度で推定できている様子が分かる。図 9 は各経路での推定結果で、点は平均誤差、バーは標準偏差である。この図が示すように、回転磁石マーカから経路 1 (距離 0.5m) では平均誤差が 21cm であり、先ほどの図と同様にスマートフォンを手に所持している場合とほぼ変わらない精度であることが確認できる。以上の実験結果から、回転磁石マーカから 1m 離れている直線経路では、スマートフォンを手に所持している時、平均誤差 19cm 、スマートフォンをポケットに収納している時、平均誤差 21cm で推定可能であった。

5. おわりに

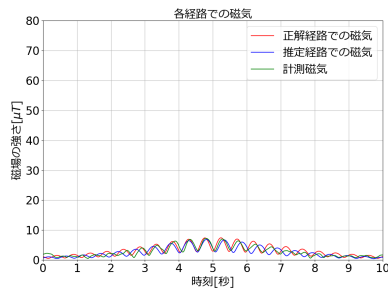
本研究では、人がスマートフォンを所持して歩いている場合について、回転磁石マーカを用いた移動経路推定を評価した。評価実験の結果、回転磁石マーカからの距離が 1m の直線経路において、歩行者の移動経路を平均誤差 19cm で推定した。また、スマートフォンをポケットに収納した状態で同じ経路を歩いて推定した結果、回転磁石マーカからの距離が 1m の直線経路において、歩行者の移動経路を平均誤差 21cm で推定した。以上の検討から、以前ベルトコンベアを用いて評価した提案手法が、スマートフォンを人が所持している場合でも利用可能であることを確認した。

今後の課題として、スマートフォンの 3 次元の移動経路推定が挙げられる。そのためには、磁気各成分を利用するため、スマートフォンの姿勢も推定する必要がある。また他の課題として、複数の回転磁石マーカを用いたスマートフォンの移動経路推定が挙げられる。複数の回転磁石マーカを用いれば、スマートフォンの経路推定の範囲を拡大でき、さらに推定精度の向上が期待される。

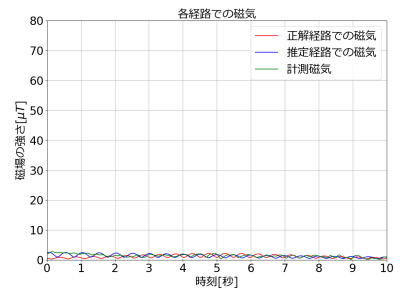
謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP17H01762 の助成を受けたものです。



(a) 経路 1 (距離 0.5 m)

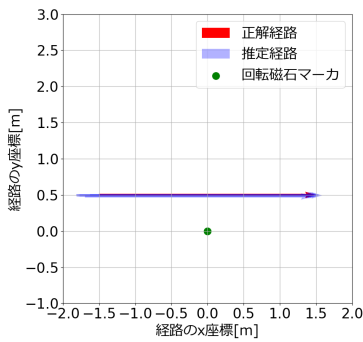


(b) 経路 2 (距離 1 m)

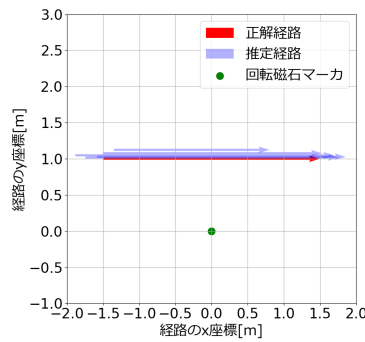


(c) 経路 3 (距離 1.5 m)

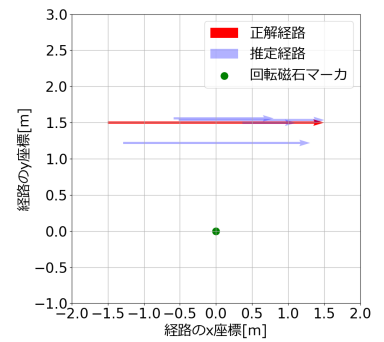
図 5: 正解経路での磁気, 計測磁気, 推定経路での磁気の比較



(a) 経路 1 (距離 0.5 m)

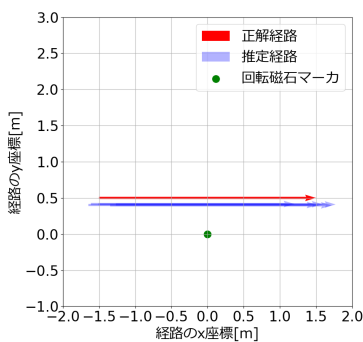


(b) 経路 2 (距離 1 m)

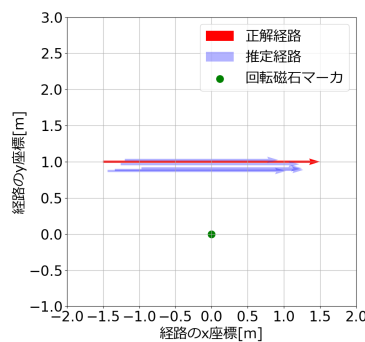


(c) 経路 3 (距離 1.5 m)

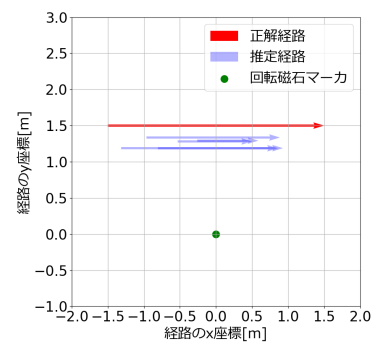
図 6: 正解経路と推定経路の比較 (手持ち時)



(a) 経路 1 (距離 0.5 m)



(b) 経路 2 (距離 1 m)



(c) 経路 3 (距離 1.5 m)

図 7: 正解経路と推定経路の比較 (ポケット収納時)

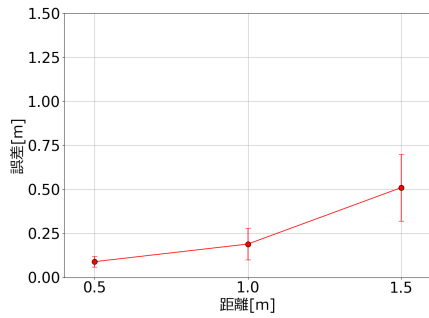


図 8: 経路推定の結果 (手持ち時)

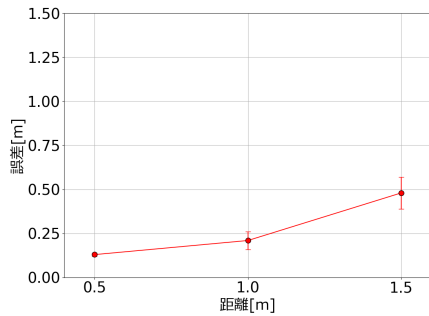


図 9: 経路推定の結果 (ポケット収納時)

参考文献

- [1] Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, and Ipppei Suzuki. Holographic Whisper: Rendering Audible Sound Spots in Three-Dimensional Space by Focusing Ultrasonic Waves. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4314–4325. ACM, 2017.
- [2] Florian Heller and Jan Borchers. Audioscope: Smartphones as Directional Microphones in Mobile Audio Augmented Reality Systems. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 949–952. ACM, 2015.
- [3] Azusa Kadomura, Akira Matsuda, and Jun Rekimoto. Casper: A Haptic Enhanced Telepresence Exercise System for Elderly People. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, p. 2. ACM, 2016.
- [4] Yuan Zhuang, Zainab Syed, Jacques Georgy, and Naser El-Sheimy. Autonomous Smartphone-Based WiFi Positioning System by using Access Points Localization and Crowdsourcing. *Pervasive and mobile computing*, Vol. 18, pp. 118–136, 2015.
- [5] Shuaib Alam, Salman Atif, Saddam Hussain, and Ejaz Hussain. 3-Dimensional Indoor Positioning System based on WI-FI Received Signal Strength using Greedy Algorithm and Parallel Resilient Propagation. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 116, No. 18, pp. 32–38, 2015.
- [6] Mohamed Er Rida, Fuqiang Liu, Yassine Jadi, Amgad Ali Abdullah Algawhari, and Ahmed Askourih. Indoor Location Position based on Bluetooth Signal Strength. In *2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering*, pp. 769–773, 2015.
- [7] Hyunwook Park, Jaewon Noh, and Sunghyun Cho. Three-Dimensional Positioning System using Bluetooth Low-Energy Beacons. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 12, No. 10, 2016.
- [8] Cemin Zhang, Michael Kuhn, Brandon Merkl, Mohamed Mahfouz, and Aly E Fathy. Development of an UWB Indoor 3D Positioning Radar with Millimeter Accuracy. In *Microwave Symposium Digest, 2006. IEEE MTT-S International*, pp. 106–109, 2006.
- [9] Jiuchao Qian, Ling Pei, Jiabin Ma, Rendong Ying, and Peilin Liu. Vector Graph Assisted Pedestrian Dead Reckoning using an Unconstrained Smartphone. *Sensors*, Vol. 15, No. 3, pp. 5032–5057, 2015.
- [10] Ngoc-Huynh Ho, Phuc Truong, and Gu-Min Jeong. Step-Detection and Adaptive Step-Length Estimation for Pedestrian Dead-Reckoning at Various Walking Speeds using a Smartphone. *Sensors*, Vol. 16, No. 9, p. 1423, 2016.
- [11] Jian Kuang, Xiaoji Niu, and Xingeng Chen. Robust Pedestrian Dead Reckoning Based on MEMS-IMU for Smartphones. *Sensors*, Vol. 18, No. 5, p. 1391, 2018.
- [12] Eugene Paperno, Ichiro Sasada, and Eduard Leonovich. A New Method for Magnetic Position and Orientation Tracking. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4, pp. 1938–1940, 2001.
- [13] Chao Hu, Shuang Song, Xiaojing Wang, Max Q-H Meng, and Baopu Li. A Novel Positioning and Orientation System based on Three-Axis Magnetic Coils. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 7, pp. 2211–2219, 2012.
- [14] Gerald Pirkl and Paul Lukowicz. Robust, Low Cost Indoor Positioning using Magnetic Resonant Coupling. In *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 431–440, 2012.
- [15] Gerald Pirkl, Peter Hevesi, Jingyuan Cheng, and Paul Lukowicz. mBeacon: Accurate, Robust Proximity Detection with Smart Phones and Smart Watches using Low Frequency Modulated Magnetic Fields. In *Proceedings of the 10th EAI International Conference on Body Area Networks*, pp. 186–191, 2015.
- [16] 武島知勲, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫, 神山剛, 太田賢, 稲村浩. 回転磁石マークに基づくスマートフォン位置推定. *情報処理学会論文誌*, Vol. 59, No. 1, pp. 138–149, 2018.
- [17] Kosuke Watanabe, Kei Hiroi, Satoshi Kamiyama, Hiroyuki Sano, Masakatsu Tsukamoto, Masaji Katagiri, Daizo Ikeda, Katsuhiko Kaji, and Nobuo Kawaguchi. A Smartphone 3D Positioning Method using a Spinning Magnet Marker. *Journal of Information Processing*, Vol. 60, No. 1, pp. 1882–7764, 2019.
- [18] 渡邊康祐, 廣井慧, 梶克彦, 河口信夫. 回転磁石マークを用いた基礎的なスマートフォン経路推定. 第 2018 巻, pp. 1048–1055, 2018.
- [19] 武島知勲, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫, 神山剛, 太田賢, 稲村浩. 通路に設置した回転する磁石による歩行者の通過検出手法. *情報処理学会論文誌*, Vol. 58, No. 1, pp. 43–56, 2017.