

## 推薦論文

## 回転磁石マーカを用いたスマートフォン2次元経路推定

渡邊 康祐<sup>1,a)</sup> 廣井 慧<sup>2</sup> 米澤 拓郎<sup>2</sup> 梶 克彦<sup>3</sup> 河口 信夫<sup>1,2</sup>

受付日 2019年5月7日, 採録日 2019年11月7日

**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、位置情報を利用する機会が増加している。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。高精度な位置推定手法に動的磁気を用いるものがあるが、スマートフォンの磁気センサのサンプリング周波数では既存手法を利用するのが難しい。本研究では回転磁石マーカを用いて、スマートフォンの2次元移動経路を推定する手法を提案する。回転磁石マーカとは、強力な磁石を回転させて動的磁気を発生させる装置である。本研究では一定時間計測した磁気のパターンから経路を推定する手法を提案し、動的磁気によるスマートフォンの移動経路推定を可能にした。我々はまず、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した。次に、計測した磁気に対して導出した近似式でカーブフィッティングし、スマートフォンの移動経路を推定する手法を検討した。さらに、提案手法による推定精度を評価するため、ベルトコンベアを用いてスマートフォンを移動させて実験した。評価実験の結果、回転磁石マーカからの距離が1mの直線経路で、スマートフォンの移動経路を平均誤差9cmで推定可能であった。また、スマートフォンごとの推定精度を比較した結果、スマートフォンの違いによって推定精度に大きな変化がないことを確認した。また、磁石の回転数と推定精度の関係を調べた結果、回転数が2Hzのときに推定精度が最も向上することを確認した。

**キーワード:** 屋内位置推定, 磁石, 磁気, 回転磁石マーカ

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

KOSUKE WATANABE<sup>1,a)</sup> KEI HIROI<sup>2</sup> TAKURO YONEZAWA<sup>2</sup> KATSUHIKO KAJI<sup>3</sup> NOBUO KAWAGUCHI<sup>1,2</sup>

Received: May 7, 2019, Accepted: November 7, 2019

**Abstract:** With the spread of smartphone and tablet, more people use location information services. Our purpose is to develop new services based on the location information of smartphone with accuracy within few centimeters. A method using dynamic magnetism can estimate a position of a magnetic sensor within a few centimeters. However, it is difficult for smartphone to use the method using convention dynamic magnetism, because the smartphone's magnetic sensor is low performance. In this paper, we propose a method to estimate a two-dimensional moving path of a smartphone with high accuracy using spinning magnet marker (SMM). The SMM is a device that generates a dynamic magnetism by spinning a powerful magnet. In the proposed method, it is possible to estimate the moving path of smartphone by using magnetism pattern. First, we derived approximated magnetism equation generated by the SMM. Next, we considered the method of estimating the two-dimensional moving smartphone path by performing curve fitting with the approximated equation for the measured magnetism. Finally, In order to evaluate the proposed method, we conducted experiments using a belt conveyor to move a smartphone. As a result of the experiments, in case of the straight path 1 m away from the SMM, we estimated the moving path with the average error 9 cm. In addition, according to the result of experiments to compare the accuracies by smartphones, we confirmed that almost there is no difference due to the difference in the smartphones. Furthermore, the result of experiments to investigate a relationship between spinning frequency of the magnet and the accuracies showed that when magnetism frequency is 2 Hz, the accuracy is the best.

**Keywords:** indoor positioning, magnet, magnetism, spinning magnet marker

## 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ともな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<sup>\*1</sup>などのナビゲーションサービスや、TAGCAST<sup>\*2</sup>やbeacapp HERE<sup>\*3</sup>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などにおいて、指向性を持つパラメトリック・スピーカや点音源の制御 [1] による個人にあわせた情報伝達や、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<sup>\*4</sup>・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、利用されている。これらの手法は、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、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 程度の端末位置を推定できるが、利用するためには専用端末の所持や、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ため、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にするため、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 は我々が開発した回転磁石マーカである。磁気の発生に磁石を用いるため、コイルに電流を流す手法と比較して磁気の発生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を推定するのが困難であるという問題があった。

本研究では、回転磁石マーカを用いたスマートフォンの 2 次元移動経路推定手法を提案する。前述のとおり、スマートフォンでは 100 Hz 以上の動的磁気を正確に計測できないため、磁気の周期ごとに位置推定する方法では経路推定が難しい。そこで我々は、一定時間計測した磁気から経路を推定する手法を提案し、動的磁気を用いたスマートフォンの経路推定を可能にした。

本提案手法では、まず回転磁石マーカが発生させる磁気とスマートフォンの移動経路を定式化する。次に、計測磁気を導出した磁気の式でカーブフィッティングしてスマートフォンの移動経路を推定する。そして、提案手法による推定精度を定量的に評価するため、ベルトコンベアを作成してスマートフォンを移動させて評価実験する。実験結果から、回転磁石マーカから 1 m 離れた直線経路で、スマートフォンの移動経路を平均誤差 9 cm で推定した。また、異なるスマートフォンで推定した結果、推定精度が大きくスマートフォンに依存しないことを確認し、磁石の回転数が 2 Hz のときに最も精度が良くなることを確認した。

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

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-0814, Japan

<sup>2</sup> 名古屋大学未来社会創造機構  
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

<sup>3</sup> 愛知工業大学情報科学部  
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technology, Toyota, Aichi 470-0392, Japan

a) nabeko@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

本論文の内容は 2018 年 7 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウムにて報告され、同プログラム委員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。

\*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/>

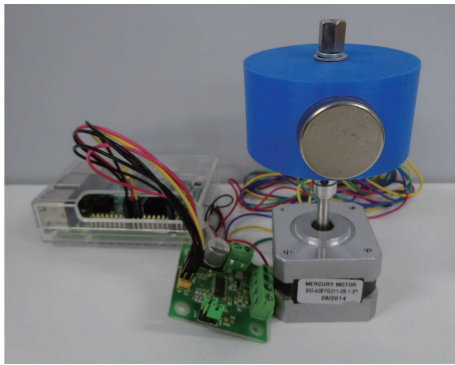


図 1 回転磁石マーカー

Fig. 1 Spinning magnet marker.

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

屋内位置推定手法の1つに、Wi-Fi アクセスポイントを利用する手法がある。この手法では、Wi-Fi アクセスポイントが発する電波の強度の fingerprint を作成して推定に利用する。たとえば、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 6 m 以内での位置推定に成功している。また、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 4.62 m の 3 次元位置推定を達成したと報告している。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メリットがある。

そのほかの位置推定手法として、BLE (Bluetooth Low Energy) を用いた手法がある。この手法では、BLE ビーコンが発する電波の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。たとえば、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。また、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、誤差 0.5 m ~ 1 m の精度でスマートフォンの 2 次元位置を推定した。また、商用製品として Quupa<sup>\*5</sup>がある。この商品では部屋に設置した BLE 受信機がタグが発する信号を受信し、0.5 m 程度の精度でタグの位置を推定する。これらの手法では、BLE ビーコンが安価で低消費電力であることから、設置コストやランニングコストが比較的低いメリットがある。BLE を利用したこれらの手法はスマートフォンでも使用可能であるが、遮蔽物によって発生するマルチパスの影響を受けるため、人

\*5 <https://quuppa.com/>

がたくさんいる環境では推定精度が低下する。また、精度 10 cm 以下の位置推定が難しいため、我々の目的には適していないと考えられる。

他には UWB (Ultra Wide Band) 技術を用いた位置推定手法が存在する。この手法では、500 MHz 以上の帯域幅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から端末の位置を推定する手法 [8] が研究されている。また、UWB 技術を用いた商用製品の 1 つに Ubisense RTLS (Real Time Location System)<sup>\*6</sup>がある。この製品では、タグが発する電波を 30 m ~ 40 m 間隔で設置したセンサが受信し、タグの 3 次元位置を 15 cm 程度の精度で推定する。UWB 技術による位置推定手法は精度 10 cm ~ 1 m であり、前述の手法と比較して高精度であるが、専用端末が必要であることや、UWB 発信機の設置などにコストがかかるため、我々の目的には利用できない。

### 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有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 50 cm 程度でのリアルタイム経路を推定を達成した。Ho らは PDR による移動距離の推定手法 [10] を研究し、10 m 歩いたときの移動距離を平均誤差 50 cm 以下で推定した。Kuang らはスマートフォン所有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 にわたる経路を平均誤差 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 以下で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

そのほかの位置推定手法として、静的磁気を用いる手法がある。例として、建物内に存在する環境磁気の fingerprint を作成して位置を推定する手法 [18] や、磁石を 2 次元平面上に配置し、その磁気を利用して磁気センサの位置を推定する手法 [19] などがある。また、IndoorAtlas<sup>\*7</sup>は建物内でスマートフォンが計測した磁気から fingerprint を作成し、1 m ~ 3 m の精度で位置を推定するサービスを提供している。これらの手法はスマートフォンでも利用可能だが、推定誤差を 1 m 以下に抑えるのが難しいため、誤差数 cm のスマートフォン位置推定には適していない。

\*6 <https://ubisense.net/en/>

\*7 <https://www.indooratlas.com/>

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]。さらに、Pirklらはコイルに交流電流を流して動的磁気を発生させ、スマートフォンとスマートウォッチの接近検知の研究をしている [15]。この研究で、彼らは90%以上の確率で端末の接近検知に成功している。またPOLHEMUS<sup>\*8</sup>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、磁気の発生装置から数 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 kHz～数 MHz 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。コイルを用いる場合、発生する磁気の強さはコイルに流す電流の周波数に依存する。そのため、文献 [13]、[14] などで行われている磁気の周波数をスマートフォンで検知可能な周波数にすると、磁気の強さが 1/10 以下になり、スマートフォンが検知可能な磁気の影響範囲が著しく低下する。より強い磁気を発生させるには電流を強くする方法があるが、数 cm の大きさのコイルで 1 m 離れた場所にスマートフォンで検知可能な磁気を発生させるためには、1 A 以上の電流を流し続ける必要があり、長時間の使用には不向きである。一方で磁気の発

生に磁石を用いている本手法では、磁石の回転数を 1 Hz～10 Hz にしても発生する磁気の大きさは変わらないため、低周波数の磁気を用いた位置推定が可能になる。また、磁石を回転させるために使用する電力は、コイルを用いた場合の電力よりも低いため、必要な電力の量を抑えられる利点がある。

武島らは、回転磁石マーカを用いたスマートフォン所有者の通過検出 [20] 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% の精度の通過検知を達成した。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 50 cm 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。

本研究では、回転磁石マーカを用いてスマートフォンの2次元の移動経路を推定する手法を提案する。以前の3次元位置推定の研究ではスマートフォンが静止していると仮定し、磁石の回転周期ごと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、実用上磁石の回転数を 10 Hz 以上で長時間回転させ続けるのは難しく、人の移動速度を 1 m/s～3 m/s と仮定すると、磁石の回転数 10 Hz においても、磁気を計測している間に 10 cm～30 cm 程度の誤差が生じるため、我々の目的である誤差 10 cm 以下の位置推定を歩行者に対して実現するのは難しい。そこで我々は、動的磁気の周期ごとではなく、各時刻でのスマートフォンの位置を推定するため、一定時間計測した磁気から移動経路を推定する手法を提案し、動的磁気によるスマートフォンの移動経路推定を可能にした。

### 3. スマートフォンの経路推定手法

#### 3.1 回転磁石マーカによる磁気の定式化

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、 $\omega$  は磁石の回転速度、 $r$ 、 $\theta$  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、 $H_\theta$  は動径方向と垂直な磁気成分を示している。このとき、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  $(r, \theta)$  を用いて以下のように書ける。

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

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

\*8 <https://www.ddd.co.jp/polhemus/>

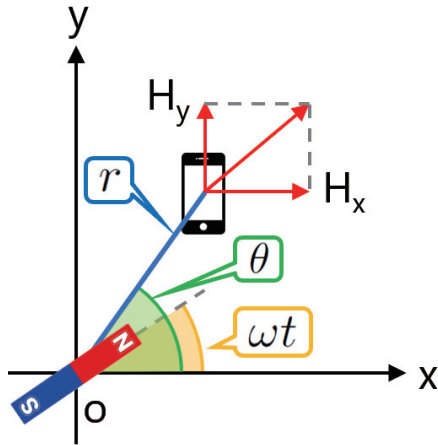


図 2 2次元平面内での回転磁石マーカによる磁気

Fig. 2 Magnetism generated by the SMM in a 2D plane.

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

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  $H_r$ ,  $H_\theta$  は距離  $r$  の 3 乗に反比例する値と見なせる。さらに  $H_r$  は磁気ノルムの磁石の長さ方向への射影、 $H_\theta$  はそれに直交する向きへの射影なので、磁石によって定まる定数  $A$ ,  $B$  を用いると、磁石の回転角  $\omega t$  に対する  $H_r$ ,  $H_\theta$  は以下のように表せる。

$$H_r = \frac{A}{r^3} \cos(\theta - \omega t) \quad (4)$$

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

これらを式 (1), (2) に代入すると、磁気の各軸成分は以下のように書ける、

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

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

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 (8) の  $r$ ,  $\theta$  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

この節では、スマートフォンの移動経路を定式化する。我々の以前の 3 次元位置推定手法 [17] ではスマートフォンが静止しているとし、磁石の回転周期ごとの磁気成分の振幅から位置を推定した。しかしながら、スマートフォンが移動しているとき、磁気値は時間に応じて変化するため、移動経路に応じた磁気を定式化する必要がある。そこで、スマートフォンの移動経路が直線的な経路と途中で折れ曲

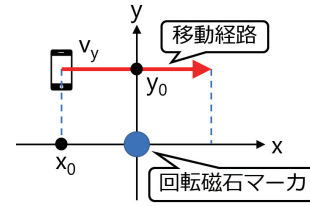


図 3 直線移動するスマートフォンの経路

Fig. 3 Straight path of a moving smartphone.

がる経路で表せると仮定し、それぞれの経路を定式化する。

まず、スマートフォンが直線的に移動している場合を考える。図 3 はスマートフォンの経路を示している。このときのスマートフォンの経路を初期位置  $x_{start}$ ,  $y_{start}$ , 最終位置  $x_{end}$ ,  $y_{end}$  と定義する。このとき、式 (8) における距離  $r$  と方位角  $\theta$  は次のように書ける。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (9)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (10)$$

ここで、

$$x_{start} \leq x \leq x_{end} \quad y_{start} \leq y \leq y_{end} \quad (11)$$

とする。

次に、途中で折れ曲がる経路について検討する。スマートフォンが初期位置  $x_{start}$ ,  $y_{start}$  から回転磁石マーカに近づき、時刻  $t = t_0$  で最も回転磁石マーカに近い位置  $x_{closest}$ ,  $y_{closest}$  に到達し、その後進行方向を変えて最終的に位置  $x_{end}$ ,  $y_{end}$  に到達するとき、磁気ノルムはステップ関数  $\delta(t)$  を用いて次の式で書ける。

$$H = \sqrt{\frac{B^2}{r^6} + \frac{A^2 - B^2}{r^6} \cos^2(\theta - \omega t) \delta(-t + t_0)} + \sqrt{\frac{B^2}{r^6} + \frac{A^2 - B^2}{r^6} \cos^2(\theta - \omega t) \delta(t - t_0)} \quad (12)$$

ここで、 $t < t_0$  のとき、

$$x_{start} \leq x \leq x_{closest} \quad y_{start} \leq y \leq y_{closest} \quad (13)$$

また  $t_0 < t$  のとき、

$$x_{closest} \leq x \leq x_{end} \quad y_{closest} \leq y \leq y_{end} \quad (14)$$

ステップ関数  $\delta(t - t_0)$  の定義は、

$$\delta(t - t_0) = 1 \quad (t > t_0) \quad (15)$$

$$\delta(t - t_0) = 0 \quad (t < t_0) \quad (16)$$

である。

### 3.3 カーブフィッティングによる経路推定

スマートフォンがある経路を移動中に計測する磁気は、その経路を特徴づけるパラメータによって定まる。たとえ

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 (9), (10), (11) が示すように、その初期位置  $x_{\text{start}}$ ,  $y_{\text{start}}$  と最終位置  $x_{\text{end}}$ ,  $y_{\text{end}}$  に依存する。このとき、これらのパラメータ  $x_{\text{start}}$ ,  $y_{\text{start}}$ ,  $x_{\text{end}}$ ,  $y_{\text{end}}$  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、その最適解からスマートフォンの経路を推定することができる。観測データと式 (8) のカーブフィッティングには非線形最小二乗和を計算する必要があるため、非線形最小二乗和を計算するアルゴリズムとして一般的な Levenberg-Marquardt 法を使用し、フィッティングパラメータの初期値をすべて 1 とした。

### 3.4 環境磁気軽減手法

3.1 節では、移動しているスマートフォンが回転磁石マーク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、移動にともなって  $10 \mu\text{T} \sim 100 \mu\text{T}$  の磁気の変動が起きる。これらの磁気は回転磁石マーク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 サンプル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。

## 4. 評価実験

### 4.1 回転磁石マーク

本研究では図 1 に示した回転磁石マークと同じものを使用した。回転磁石マークの磁石の回転部にはステップモータを使用し、Raspberry Pi<sup>\*9</sup>を用いて制御した。我々の以前の研究 [16] では、回転磁石マークに使用する磁石として、歩行者が 15 cm 以内に近づいたときに磁気カードに影響が出ない強さの磁石とし、表面磁束密度が 6,400 G、大きさが直径 2.5 cm、高さ 3 cm の円柱型のネオジウム磁石を使用した。本研究でも回転磁石マークを使用する状況は同じであるため、この研究と同じ磁石を使うものとした。

### 4.2 シミュレーションとの比較

我々は評価実験の前に、3.1 節で導出した近似式をシミュレータとの比較によって評価した。シミュレータには 3 次元磁場解析ソルバ Qm<sup>\*10</sup>を用いた。このシミュレータは磁気モーメント法を用いて磁場を計算し、磁性体の材質や運動に応じて 3 次元空間に発生させる磁場をシミュレ

ートできる。シミュレータでの磁石のサイズを回転磁石マークで使用している磁石と同じ体積にするため、縦 2.2 cm、横 3 cm、高さ 2.2 cm の直方体として設定した。また回転磁石マークの磁石とシミュレーションでの磁石の磁気的な性質を同じにするため、シミュレーションでの磁石の磁化曲線を残留磁束密度 14,300 G、保磁力 10,000 Oe に設定した。そして磁石を原点に固定し、z 軸周りに 1 Hz で反時計回りに回転するよう設定した。移動経路は初期位置  $x_0 = 0.5 \text{ m}$ ,  $y_0 = -1 \text{ m}$ , 速度  $v_y = 0.1 \text{ m/s}$  で 20 秒間移動するとし、シミュレータによる磁気と式 (6), (7) による磁気値を比較した。

図 4(a), 4(b) はシミュレーション結果と式 (6), (7) との比較である。赤線と緑線はそれぞれ磁気の x 軸成分と y 軸成分のシミュレーション結果を示し、青色と黄色の点線はそれぞれ磁気の x 軸成分と y 軸成分の式 (6), (7) を示している。黒線は x 軸成分のシミュレーション結果と式 (6), 灰線は y 軸成分のシミュレーション結果と式 (7) との差の絶対値を示している。黒線が示すように、x 軸成分では 10 秒付近に数  $\mu\text{T}$  の差が見られるが、それ以外ではシミュレーション結果と近似式との間にほとんど差は見られず、また灰線が示すように y 軸成分に関してはシミュレーション結果と近似式にはほとんど差がないことが分かる。以上の比較から、スマートフォンが等速直線運動する経路において、3.1 節で導出した磁気の近似式は 3 次元磁場解析ソルバ Qm のシミュレーション結果とほぼ同じ精度であると考えられる。

### 4.3 実験の設定

経路推定の精度を定量的に評価するため、我々はベルトコンベアを作成して実験した。金属製の部品は磁気を帯びるため、フレームとプーリーをプラスチックを材料として用いる 3D プリンタで作成し、ネジはポリカーボネイト製、ナットは塩化ビニル製のものを用いた。回転磁石マークの推定可能範囲が 2 m ~ 3 m であったことから、推定可能なスマートフォンの移動経路は 2 m 程度であると想定し、長さ 1 m のベルトコンベアを 2 台作成した。また、ベルトコンベアを動作させるモータには回転磁石マークに使用したステップモータと同じ物を使用し、モータが発する磁気の実験に与える影響を軽減するため、モータをベルトコンベアの端に取り付け、モータから 10 cm 以上離れた区間を実験に使用した。方位角  $\theta = 0^\circ$  の基準は回転磁石マークの磁石の N 極が x 軸の正の向きになる方向とした。また今回、実験で磁気を計測するアプリには HascLogger<sup>\*11</sup>を用いた。

評価実験では時刻  $t = 0$  で回転磁石マークの磁石の方位角を  $\theta = 0^\circ$  に設定し、ベルトコンベアを起動させると同

\*9 <https://www.raspberrypi.org/>

\*10 <http://www.slock.co.jp/Qm3/index.html/>

\*11 <http://hasc.jp/hc2011/hasclogger.h-tml/>

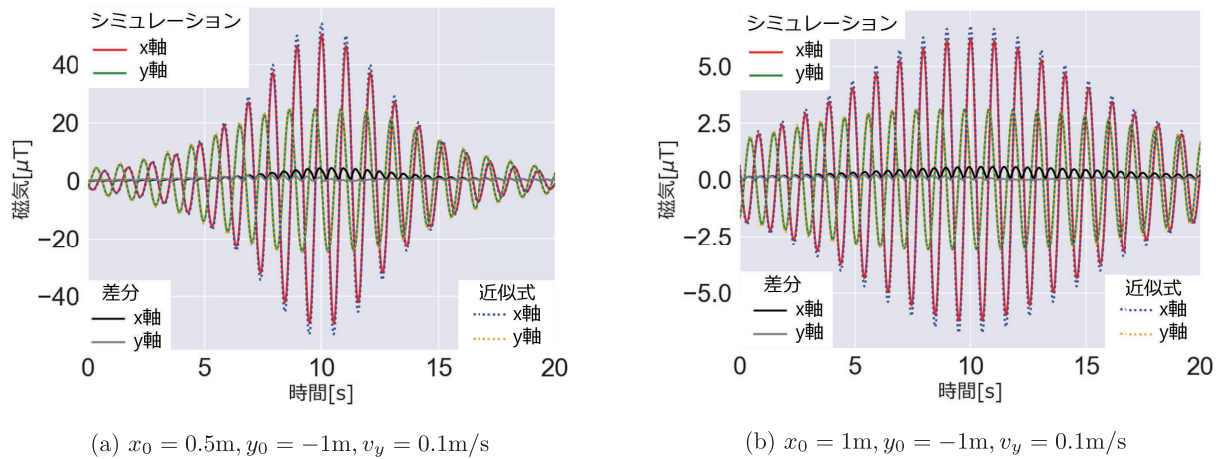


図 4 シミュレーション結果と近似式の比較

Fig. 4 Comparison between simulation result and approximated magnetism.

時に磁石を回転させる。実用面では、回転磁石マーカとスマートフォンの時刻を NTP (Network Time Protocol) で誤差数 10 ms で同期させ、回転磁石マーカの方角データを BLE を用いてスマートフォンに送信する。次に、スマートフォンが受信した方角データを式 (8) 内の位相に初期位相として加えて経路推定をする必要がある。また、今回の評価実験ではスマートフォンが移動するタイミングを既知として計測しているが、実際の運用では歩行者が回転磁石マーカの磁気の範囲に出入りするタイミングは分からない。そのため、実際には計測データのうち磁気ノルムが最も高い値をとった時刻を基準とし、その基準時刻から 10 秒前後の磁気データを用いて経路を推定する形になると考えられる。

#### 4.4 環境磁気軽減手法の評価

経路推定実験の前に、我々は 3.4 節で検討した環境磁気軽減手法の影響を評価した。評価方法は以下のとおりである。まず、特定の経路を移動したときに計測した回転磁石マーカの磁気に対して、あらかじめスマートフォンが同じ経路を移動したときの環境磁気を計測しておき、計測した回転磁石マーカの磁気から環境磁気を引いた磁気と、計測した回転磁石マーカの磁気に対して 3.4 節で検討した環境磁気軽減手法を施した場合で比較する。まず環境磁気を計測するため、回転磁石マーカをスマートフォンから十分遠方に離し、スマートフォンをベルトコンベアを用いて x 軸の正の向きに 2m 移動させて磁気を計測した。次に、回転磁石マーカをベルトコンベアから距離 50 cm の場所に設置し、磁石の回転数を 1 Hz に設定した。そして、先ほどと同様にスマートフォンをベルトコンベアを用いて x 軸の正の向きに 2m 移動させて磁気を計測した。使用した端末は iPhone 6 Plus、磁気センサのサンプリング周波数は 100 Hz である。

図 5 は計測した環境磁気と、環境磁気を軽減する前の

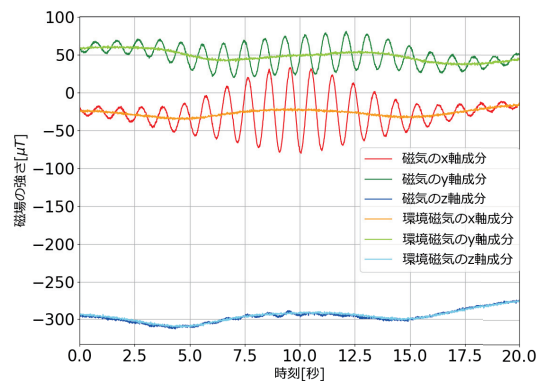


図 5 計測磁気と環境磁気

Fig. 5 Measured magnetism and environmental magnetism.

回転磁石マーカによる磁気のグラフである。図が示すように、各成分の磁気はそれぞれ直流成分を持ち、振動の中心が 0 から大きく離れている。また、移動にともなって振動中心が移動してしており、その振動中心が環境磁気とほぼ一致している様子が分かる。図 6 は回転磁石マーカの磁気から環境磁気を引いたものと、回転磁石マーカの磁気に環境磁気軽減処理を施した磁気との比較である。図が示すように、いずれの成分も振動中心が 0 に補正されており、また環境磁気軽減手法による磁気と環境磁気を引いた後の磁気とがほぼ一致している様子が分かる。以上の評価から、3.4 節で検討した環境磁気軽減手法は、事前に環境磁気のみを計測し、回転磁石マーカを設置して計測した磁気から環境磁気を引いた場合とほぼ同等の効果があることが分かった。

#### 4.5 経路推定の評価

経路推定の前に、我々は 3.1 節の式 (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。定数  $A$ ,  $B$  はスマートフォンに搭載されている磁気センサに依存すると考えられるため、経路推定の前に計測が必要であ

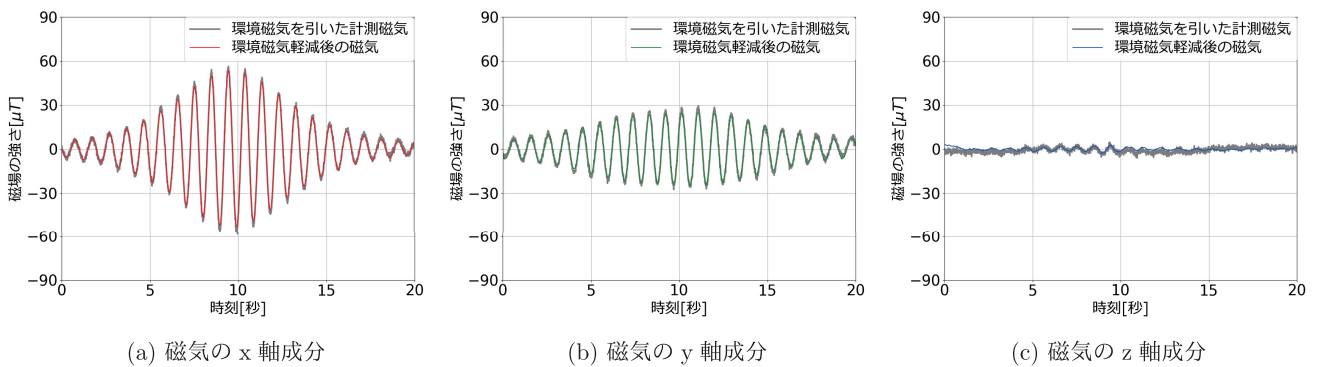
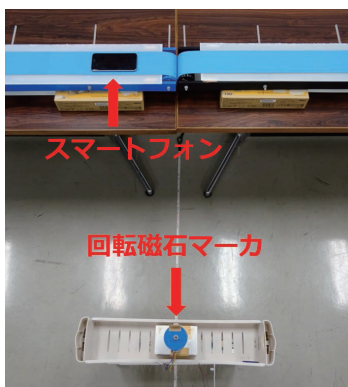
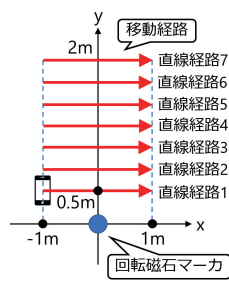


図 6 環境磁気軽減手法後の磁気と環境磁気を引いた磁気との比較

Fig. 6 Comparison between magnetism after environmental magnetism reduction and magnetism subtracted by environmental magnetism.



(a) 実験の様子



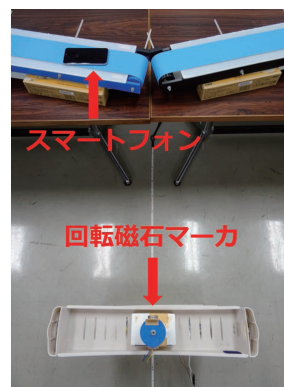
(b) 推定経路

図 7 直線経路での実験

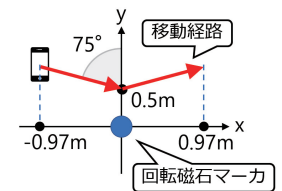
Fig. 7 Experiment on straight path.

る。これらはスマートフォンごとに計測する必要がある一方で、回転磁石マークの磁石はすべて同じものを使用するため、回転磁石マークごとに計測する必要はない。式 (8) より、距離  $r = 1\text{m}$ 、方位角  $\theta = 0^\circ$ 、 $\omega t = 0$  のときの磁気ノルムの値が定数  $A$ 、 $\omega t = \pi/2$  のときが定数  $B$  に対応することが分かる。そこで、回転磁石マークから  $1\text{m}$  離してスマートフォンを設置し、 $10\text{s}$  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。

提案手法の推定精度を評価するため、我々は今回、スマートフォンが等速直線運動する経路と、折れ曲がる経路について評価実験した。図 7(a) は等速直線運動する経路の実験の様子である。床からの磁気の影響を抑えるため、ベルトコンベアを高さ  $1\text{m}$  程度のテーブルの上に設置し、高さをそろえるために回転磁石マークを高さ  $1\text{m}$  程度プラスチック製の台の上に設置して実験した。図 7(a) は推定した直線経路を示している。ここで、通路を歩いている歩行者が興味を引く対象を見つけたとき、遠方から対象物に接近し、その後離れていくと予想されるため、スマートフォンが進行方向を変えるのは回転磁石マークに最も近づいた



(a) 実験の様子



(b) 推定経路

図 8 折れ曲がる経路での実験

Fig. 8 Experiment on curved path.

タイミングとした。スマートフォンの速度はすべて  $x$  軸の正の向きで  $v_x = 0.1\text{m/s}$  とし、初期位置の  $x$  座標はすべて  $-1\text{m}$ 、 $y$  座標はそれぞれの経路で  $0.5\text{m}$ 、 $0.75\text{m}$ 、 $1\text{m}$ 、 $1.25\text{m}$ 、 $1.5\text{m}$ 、 $1.75\text{m}$ 、 $2\text{m}$  とし、それぞれの経路を直線経路 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 と呼ぶことにする。回転磁石マークの回転数を  $1\text{Hz}$  とし、それぞれの経路で 5 回ずつ経路を推定し、その平均誤差と標準偏差を算出する。この際、それぞれの経路の始点と終点はスマートフォンが経路の終点に到達した後、3.3 節で述べた方法で推定する。実験に使用したスマートフォンは iPhone 6 Plus で、磁気センサのサンプリング周波数を  $100\text{Hz}$  に設定した。また、すべての時刻に関して正解経路と推定経路の距離を計算し、その平均を推定精度とする。

また、 $0.1\text{m/s}$  は人の移動速度としては遅いが、今回の実験における磁石の回転数やスマートフォンの速度、スマートフォンのサンプリング周波数をそれぞれ 10 倍すれば、スマートフォンの移動速度  $1\text{m/s}$  の場合と同等な条件であると考えられる。現時点でのスマートフォンでは  $100\text{Hz}$  の 10 倍以上のサンプリング周波数を持つ機種はないため、今回の実験は今後スマートフォンのサンプリング周波数が向



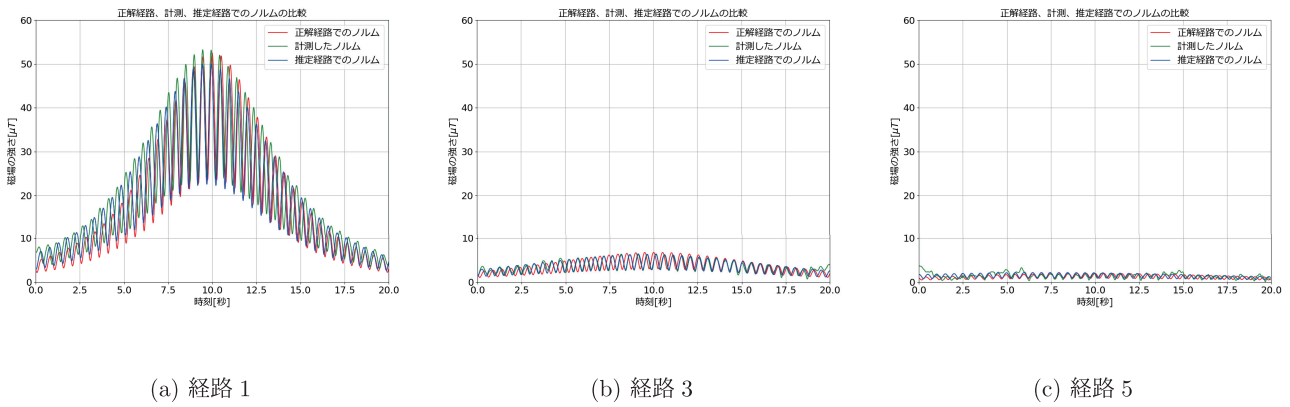


図 9 計測したノルムと推定したノルムの比較

Fig. 9 Comparison between measured norm and estimated norm.

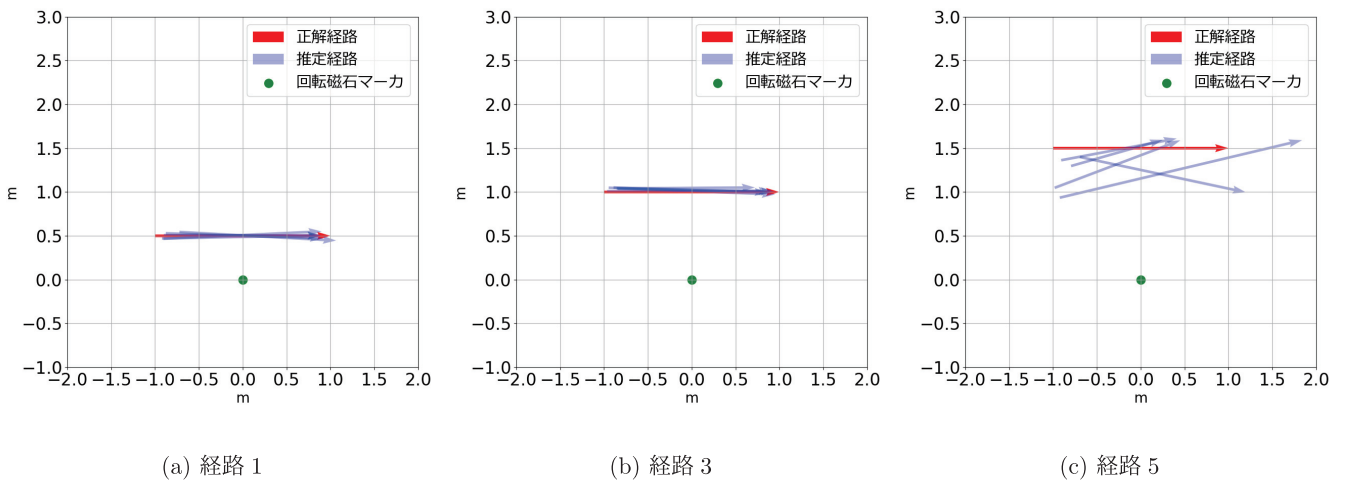


図 10 正解経路と推定経路の比較：直線経路

Fig. 10 Comparison between true path and estimated path: straight path.

上することを前提として以上の設定とした。

図 8 (a) は折れ曲がる経路での実験の様子である。2つのベルトコンベアを一定の角度で固定するため、3Dプリンタで部品を作成し、ベルトコンベアに装着した。図 8 (b) は推定した経路を示している。ベルトコンベア y 軸に対してそれぞれ  $75^\circ$  の角度で固定した。このとき、スマートフォンの初期位置は  $x_0 \approx -0.97\text{ m}$ ,  $y_0 \approx 0.76\text{ m}$ , スマートフォンの速度は  $0 \leq t < 10$  で  $v_x \approx 0.10\text{ m/s}$ ,  $v_y \approx -0.03\text{ m/s}$ ,  $t > 10$  で  $v_x \approx 0.10\text{ m/s}$ ,  $v_y \approx 0.03\text{ m/s}$  となる。

図 9 は直線経路 1, 3, 5 で計測した磁気と推定経路での磁気の比較を示している。この図において、赤色のグラフは 3.1 節で求めた磁気の式に正解経路を代入した際の磁気を示しており、緑色が計測した磁気、青色が推定経路での磁気である。この図が示すように、推定経路では正解磁気、計測磁気、推定経路での磁気がほぼ一致している様子が分かる。直線経路 3, 5 では、磁気値が急激に減少している様子が分かる。図 10 は正解経路と推定経路の比較を示している。正解経路を赤色の矢印で示し、推定した経路は半透明の青色で示した。この図が示すように、直線経

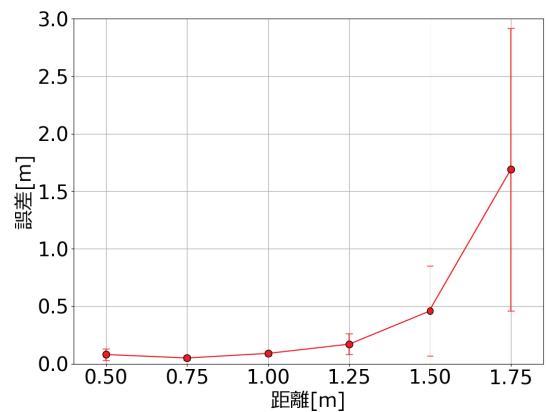
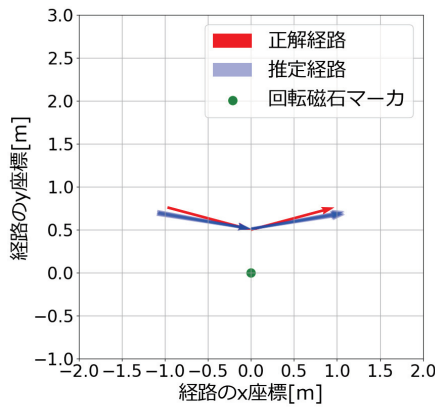


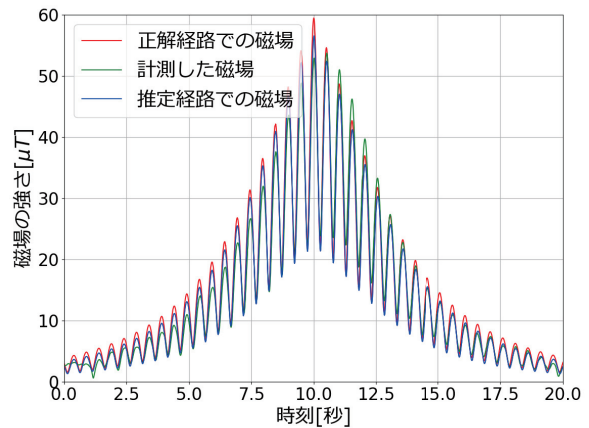
図 11 直線経路での推定結果

Fig. 11 Estimation result on straight path.

路 1 と直線経路 3 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。一方で直線経路 5 では、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推定精度が低下している様子が分かる。図 11 は各経路での推定結果を示している。この図から分かるように、回



(a) 正解経路と推定経路の比較



(b) 計測磁気と推定経路での磁気

図 12 正解経路と推定経路の比較：折れ曲がる経路

Fig. 12 Comparison between true path and estimated path: curved path.

転磁石マーカから距離 1 m 以内では平均誤差が 10 cm 以下であるのに対し、1.25 m~1.5 m で急激に推定精度が低下し、1.5 m 以上ではほぼ推定できていないことが分かる。また、経路 7 の推定結果は他の経路と比較して平均誤差、標準偏差ともに著しく増加し、推定できているとはいえない結果になったため、図 11 では省略した。以上の実験結果から、回転磁石マーカから 1 m 離れている直線経路では、スマートフォンの移動経路を誤差 10 cm 以下の推定が可能であった。

図 12 (a) は折れ曲がる経路での正解経路と推定経路の比較を示す。図が示すように、正解経路に近い経路が推定できていることが分かる。このとき、経路推定の平均誤差は 0.09 m、標準偏差は 0.01 m であった。また、図 12 (b) は計測した磁気と推定経路での磁気の比較を示している。直線経路と比較して、スマートフォンが最も回転磁石マーカに近づく時刻で急激に磁気ノルムが強くなる様子が見られ、推定経路での磁気は正解経路での磁気を再現できていることが分かる。

#### 4.6 推定精度のスマートフォン依存性評価

4.5 節では、iPhone 6 Plus を用いて移動経路推定の精度を評価した。今回、推定精度はスマートフォンが搭載している磁気センサの種類に依存すると仮定し、いくつかの機種で推定精度を評価した。実験に使用したスマートフォンは、AQUOS R2 SH-M09, moto z3 play, OPPO CPH1877, ZenFone 5Z Z01RD, Huawei nova 3 (PAR-LX9) の 5 台で、磁気センサのサンプリング周波数はすべて 100 Hz で計測した。これらのスマートフォンで経路推定するために、まず、4.5 節と同様の条件で各スマートフォンでの磁気定数  $A$ ,  $B$  を導出した。その結果を表 1 に示す。表が示すように、定数  $A$ ,  $B$  の値は各スマートフォンで  $2\mu\text{T}\sim 3\mu\text{T}$  程度の違いが見られた。評価実験では、正解経路を図 7 (b)

表 1 各スマートフォンでの磁気定数

Table 1 Magnetic constant of each smartphone.

	AQUOS R2 SH-M09	moto z3 play	OPPO CPH1877	ZenFone 5Z Z01RD	Huawei nova 3 (PAR-LX9)
A [ $\mu\text{T}$ ]	7.45	7.27	5.71	6.40	5.96
B [ $\mu\text{T}$ ]	2.91	2.99	2.76	2.78	2.79

表 2 スマートフォンごとの推定精度 (50 cm)

Table 2 Estimation accuracy for each smartphone (50 cm).

	AQUOS R2 SH-M09	moto z3 play	OPPO CPH1877	ZenFone 5Z Z01RD	Huawei nova 3 (PAR-LX9)
平均誤差 [m]	0.09	0.10	0.09	0.07	0.07
標準偏差 [m]	0.03	0.02	0.01	0.03	0.01

表 3 スマートフォンごとの推定精度 (100 cm)

Table 3 Estimation accuracy for each smartphone (100 cm).

	AQUOS R2 SH-M09	moto z3 play	OPPO CPH1877	ZenFone 5Z Z01RD	Huawei nova 3 (PAR-LX9)
平均誤差 [m]	0.10	0.11	0.15	0.11	0.16
標準偏差 [m]	0.01	0.04	0.03	0.04	0.06

に示す直線経路 1, 3 とし、そのほかの条件は 4.5 節と同様の条件で実験した。

表 2 は直線経路 1 での推定結果を示している。表が示すように、いずれのスマートフォンでも平均誤差 10 cm 以下で推定されており、スマートフォンごとの精度の差も 0.03 m 程度と大きな違いは見られなかった。また、表 3 は直線経路 3 での推定結果を示している。表が示すように、いずれの推定精度も平均誤差 0.10 m~0.16 m 程度に収まっていた。以上の評価から、スマートフォンでの推定精度に大きな違いは見られず、本提案手法による経路推定は精度がスマートフォンに大きく依存しないことが分かった。

#### 4.7 推定精度と磁石の回転数との関連性

4.5 節, 4.6 節では回転磁石マーカの磁石の回転数を 1 Hz

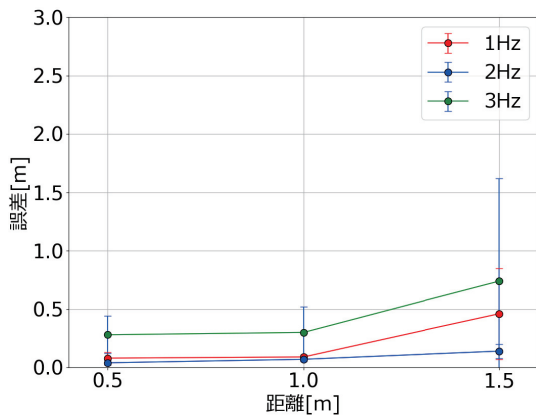


図 13 磁石の回転数と推定精度

Fig. 13 Magnet spinning speed and estimation accuracy.

として実験したが、我々は回転磁石マーカの磁石の回転数と推定精度との関連を調べた。正解経路は図 7(b) の直線経路 1, 3, 5 とし、それぞれの計測場所で磁石の回転数を 2Hz, 3Hz のそれぞれについて実験した。使用するスマートフォンは iPhone 6 Plus とし、そのほかの実験条件はすべて 4.5 節と同様とする。

図 13 は実験結果を示している。図が示すように、直線経路 1 のときはどの磁石の回転数でも推定精度に大きな違いは見られない。しかし、直線経路 3 では、回転数 1Hz と 2Hz の精度はほぼ同じであるのに対して、3Hz では推定精度が低下した。さらに直線経路 5 では、回転数 1Hz でも推定精度が低下しているのに対し、2Hz のときでは精度 15 cm 以下を保っている様子が分かる。以上の評価実験から、磁石の回転数が 2Hz のときでは推定精度が向上し、3Hz のときでは推定精度が減少する傾向が見られた。2Hz で推定精度が向上したのは、ノイズに対して回転磁石マーカによって発生する磁気の周波数成分が強くなったためであると考えられる。一方で 3Hz で精度が低下したのは、1 章でも述べたようにスマートフォンの磁気センサのサンプリング周波数は 100 Hz 程度であるため、磁石の回転数が上がり過ぎて回転磁石マーカによる磁気の計測が難しくなったためであると考えられる。

#### 4.8 実験結果の考察

4.5 節～4.7 節の実験結果から、磁石の回転数が 2Hz のとき、回転磁石マーカから 1.5 m 以内の距離ではスマートフォンの経路を誤差 10 cm 以下で推定可能であった。そのため、本手法では誤差数 cm の精度を維持するために 3 m 間隔で回転磁石マーカを設置する必要がある。同様の推定精度を実現する手法として 2.1 節でもあげた UWB による手法があるが、この手法では受信機を 5 m～40 m で設置するため、本手法よりも設置間隔を広くできる。しかしながら、本手法の利点として 2.3 節でも述べたように、磁気を用いた手法は遮蔽物の影響を受けにくいいため、スマートフォ

ンと回転磁石マーカの間に見通し線を確保する必要がない点がある。また、回転磁石マーカは設置に特別な器具や準備を必要としないため、UWB を用いた手法と比較して設置コストが抑えられるなどの利点があると考えられる。

今回は経路推定のために 20 秒間磁気データの計測を行ったが、1 章で示したようなリアルタイム位置推定のためには計測時間を短縮する必要がある。推定のための計測時間を短くするには磁石の回転数を速くする方法が考えられるが、4.7 節で示したように磁石の回転数を 3Hz 以上にするると推定精度が減少したため、現時点のスマートフォンでは磁石の回転数 3Hz 以上で推定精度を維持するのは難しい。今後、スマートフォンのサンプリング周波数が向上し、より高速な磁石の回転での推定が可能になれば、リアルタイム位置推定が可能になると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、回転磁石マーカを用いたスマートフォンの 2 次元移動経路の推定手法を提案した。我々の目的は、スマートフォンの移動経路を誤差 10 cm 以下で推定し、高精度な位置情報に基づいた新たな屋内位置サービスを創出することである。高精度な位置推定手法として動的磁気を用いたものがあるが、スマートフォンの磁気センサのサンプリング周波数では動的磁気を用いた既存手法の利用が難しい。そこで我々は、動的磁気の周期ごとに位置推定するのではなく、一定時間計測した磁気のパターンから移動経路を推定する手法を提案し、動的磁気によるスマートフォン経路推定を可能にした。

我々はまず、回転磁石マーカによって発生する磁気の影響下で、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した。次に、計測した磁気データに対して、スマートフォンの初期位置、最終位置などをフィッティングパラメータとして導出した近似式でカーブフィッティングし、スマートフォンの移動経路を推定する手法を提案した。そして、我々は定量的な経路推定評価のためにベルトコンベアを作成し、スマートフォンが直線移動する経路と、途中で折れ曲がる経路について実験した。その結果、磁石の回転数が 1Hz のとき、回転磁石マーカから距離が 1 m の直線経路において、スマートフォンの経路を平均誤差 9 cm 以下で推定可能であった。また、経路推定の精度を複数のスマートフォンで評価し、推定精度がスマートフォンの機種に大きく影響しないことを確認した。さらに、回転磁石マーカの磁石の回転数を変えて経路推定精度を評価し、磁石の回転数が 2Hz のときに最も精度が向上することを確認した。

今後の課題として、移動しているスマートフォンの姿勢推定があげられる。今回の研究では、2 次元平面を移動するスマートフォンの経路推定に磁気ノルムを用いたが、3 次元的な経路を推定するには、磁気各軸成分を利用する

必要がある。その際、スマートフォンの姿勢を推定し、各軸成分を回転磁石マーカの座標系と一致させる必要がある。また今回の評価実験はスマートフォンの移動速度、磁石の回転数を想定している速さの1/10で実験したが、今後現実的な歩行速度での評価実験が必要である。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あげられる。複数の回転磁石マーカを配置すれば、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, JST OPERA (JPMJOP1612) および NICT 委託研究の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] Ochiai, Y., Hoshi, T. and Suzuki, I.: Holographic Whisper: Rendering Audible Sound Spots in Three-Dimensional Space by Focusing Ultrasonic Waves, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.4314–4325, ACM (2017).
- [2] Heller, F. and Borchers, J.: Audioscope: Smartphones as Directional Microphones in Mobile Audio Augmented Reality Systems, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.949–952, ACM (2015).
- [3] Kadomura, A., Matsuda, A. and Rekimoto, J.: Casper: A Haptic Enhanced Telepresence Exercise System for Elderly People, *Proc. 7th Augmented Human International Conference 2016*, p.2, ACM (2016).
- [4] Zhuang, Y., Syed, Z., Georgy, J. and El-Sheimy, N.: Autonomous Smartphone-Based WiFi Positioning System by using Access Points Localization and Crowdsourcing, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol.18, pp.118–136 (2015).
- [5] Alam, S., Atif, S., Hussain, S. and Hussain, E.: 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] Er Rida, M., Liu, F., Jadi, Y., Algawhari, A.A.A. and Askourih, A.: Indoor Location Position based on Bluetooth Signal Strength, *2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering*, pp.769–773 (2015).
- [7] Park, H., Noh, J. and Cho, S.: Three-Dimensional Positioning System using Bluetooth Low-Energy Beacons, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol.12, No.10 (2016).
- [8] Zhang, C., Kuhn, M., Merkl, B., Mahfouz, M. and Fathy, A.E.: Development of an UWB Indoor 3D Positioning Radar with Millimeter Accuracy, *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, pp.106–109 (2006).
- [9] Qian, J., Pei, L., Ma, J., Ying, R. and Liu, P.: Vector Graph Assisted Pedestrian Dead Reckoning Using an Unconstrained Smartphone, *Sensors*, Vol.15, No.3, pp.5032–5057 (2015).
- [10] Ho, N.-H., Truong, P. and Jeong, G.-M.: 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] Kuang, J., Niu, X. and Chen, X.: Robust Pedestrian Dead Reckoning Based on MEMS-IMU for Smartphones, *Sensors*, Vol.18, No.5, p.1391 (2018).
- [12] Paperno, E., Sasada, I. and Leonovich, E.: A New Method for Magnetic Position and Orientation Tracking, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.37, No.4, pp.1938–1940 (2001).
- [13] Hu, C., Song, S., Wang, X., Meng, M.Q.-H. and Li, B.: A Novel Positioning and Orientation System based on Three-Axis Magnetic Coils, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.48, No.7, pp.2211–2219 (2012).
- [14] Pirkl, G. and Lukowicz, P.: Robust, Low Cost Indoor Positioning using Magnetic Resonant Coupling, *Proc. 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, pp.431–440 (2012).
- [15] Pirkl, G., Hevesi, P., Cheng, J. and Lukowicz, P.: mBeacon: Accurate, Robust Proximity Detection with Smart Phones and Smart Watches using Low Frequency Modulated Magnetic Fields, *Proc. 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: 回転磁石マーカ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] Watanabe, K., Hiroi, K., Kamiyama, S., Sano, H., Tsukamoto, M., Katagiri, M., Ikeda, D., Kaji, K. and Kawaguchi, N.: A Smartphone 3D Positioning Method using a Spinning Magnet Marker, *Journal of Information Processing*, Vol.60, No.1, pp.1882–7764 (2019).
- [18] 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).
- [19] Schlageter, V., Besse, P.-A., Popovic, R.S. and Kucera, P.: Tracking System with Five Degrees of Freedom using a 2D-Array of Hall Sensors and a Permanent Magnet, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.92, No.1, pp.37–42 (2001).
- [20] 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).

### 推薦文

DICOMO2018 の発表論文の中で特に評価が高かったため。また、本研究は回転磁石マーカが発する磁気をスマートフォンの磁気センサで取得し、スマートフォンの位置を平均誤差 5.4 cm 以下、速度を平均誤差 0.01 m/s という精度で推定できることを示しており、スマートフォンの高精度な位置情報によるサービスの創出に貢献できる有用な研究であることが認められるため。

(マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウムプログラム委員長 福澤寧子)



渡邊 康祐 (学生会員)

2013年首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻修士課程修了。2018年名古屋大学大学院工学研究科電気電子・情報工学専攻修士課程修了を経て、同大学博士課程学生。



廣井 慧 (正会員)

2004年東北大学工学部電子工学専攻卒業。同年東日本電信電話株式会社入社。2011年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科修士課程修了。2014年同大学院メディアデザイン研究科博士(メディアデザイン学)。

同年名古屋大学未来社会創造機構特任助教を経て、2018年から同大学工学研究科助教。災害情報通信、センサネットワークの研究に従事。



米澤 拓郎 (正会員)

2010年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期課程博士号取得後、同大学院特任助教、特任講師、特任准教授を経て、2019年より名古屋大学大学院工学研究科准教授。主に、ユビキタスコンピューティングシステム、

ヒューマンコンピュータインタラクション、センサネットワーク等の研究に従事。ACM, 各会員。



梶 克彦 (正会員)

2002年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。2007年同大学大学院情報科学研究科博士課程修了。博士(情報科学)。NTTコミュニケーション科学基礎研究所リサーチアソシエイト、名古屋大学大学院工学研究科助教を経て、

2015年より愛知工業大学情報科学部准教授。日本ソフトウェア科学会会員。屋内位置推定、遠隔コミュニケーション支援の研究に従事。



河川 信夫 (正会員)

1990年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。1995年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程満了。同年同大学工学部助手、同大学講師、准教授を経て、2009年より同大学大学院研究科教授。NPO位置推定サービス研究機構 Lisra 代表理事。モバイルコミュニケーション、

ユビキタスコンピューティング、行動センシングの研究に従事。博士(工学)。ACM, IEEE, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 日本音響学会各会員。本会シニア会員。