

# 回転磁石マーカを用いた基礎的なスマートフォン経路推定

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

**概要:** 近年, スマートフォンの普及により, 位置情報を利用する機会が増加した. 我々の目的は誤差数 cm のスマートフォンの 3 次元位置情報に基づいた新たなサービスの創出である. 本研究では回転磁石マーカを用いて, スマートフォンの基礎的な移動経路を推定する手法を提案する. 回転磁石マーカは強力な磁石を用いて動的磁気を発生させる装置で, スマートフォンの磁気センサで検知可能な磁気を発生させる. 我々はこれまで, 回転磁石マーカを用いて, スマートフォン所有者の通過検出や, 静止しているスマートフォンの 3 次元位置を推定する手法を提案してきた. 今回はその手法を拡張するため, スマートフォンの基礎的な移動経路推定の検討を行った. まず回転磁石マーカが発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. 次にスマートフォンを移動させて, 回転磁石マーカによる磁気を計測する. 得られた磁気データに対して, 導出した近似式でカーブフィッティングし, スマートフォンの初期位置と速度を推定する手法を検討した. 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, スマートフォンの初期位置を平均誤差 5.4cm 以下, 速度を平均誤差 0.01m/s 以下で推定した.

## A Basic Smartphone Trajectory Estimation Method using the Spinning Magnet Marker

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

### 1. はじめに

スマートフォンの普及によって, 位置情報を活用する機会が増えている. 我々はスマートフォンの 3 次元位置を誤差数 cm で推定し, 滞在している部屋やエリアなどの位置情報だけでなく, 室内のどこにいて, どの方向を向いているか, などのより詳細な位置情報の取得を目指す. それらの位置情報から, 特定領域での人々の行動パターンや, 興味の対象などを認識でき, 人と物の位置関係に基づいた新たなサービスを創出できると考えられる. 例えば, 洋服店では特定商品の周囲にいる人の位置情報から商品への注目度を取得したり, スマートフォン所有者の趣味・趣向を認識し, その人の趣味に合ったコーディネートを進めるなどのサービスを提供できる.

現在, 様々な位置推定手法が検討されており, それぞれにメリット, デメリットが存在する. 例えば, Wi-Fi アクセスポイントを用いた手法 [1] [2], BLE (Bluetooth

Low Energy) 技術を用いた手法 [3] [4], UWB (Ultra Wide Band) 技術を用いた手法 [5] などがある. これらの手法は機材を設置すれば, 数 10m 以上の領域内の端末位置を推定できるが, スマートフォンの 3 次元位置を誤差数 cm で推定することは難しく, 我々の目的に適した手法ではない.

端末の位置を誤差数 mm~数 cm で推定できる手法として, 動的磁気を用いた手法 [6] [7] [8] [9] が研究されている. 動的磁気とは, 一定の周期で強さが変化する磁気で, 他の手法と比較して遮蔽物の影響を受けにくい性質がある. そのため, 動的磁気を用いた手法は我々の目的に適している. しかしながら, この手法をスマートフォンに対して用いるのは難しい. なぜなら, 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 100Hz 程度であるのに対し, これらの手法では数 k Hz 以上の動的磁気を用いているためである.

我々は回転磁石マーカを開発し, スマートフォンでも利用可能な動的磁気を用いた手法を提案した. 回転磁石マーカとは強力な磁石をモータで回転させ, 特定の周波数成分を持つ動的磁気を発生させる装置である. 磁気の発生に磁

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院 工学研究科

<sup>2</sup> 名古屋大学 未来社会創造機構

<sup>3</sup> 愛知工業大学 情報科学部

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る。また、発生させる磁気の周波数は数 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。

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 [10] や、スマートフォンの 2 次元位置推定手法 [11] を検討した。また我々は以前、回転磁石マーカを用いて、静止しているスマートフォンの 3 次元位置を推定する手法 [12] [13] を検討した。本研究では、我々がこれまで検討した手法を拡張するため、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の基礎的な検討をした。目的は、スマートフォンが等速直線運動する経路と、途中で進行方向を変える経路の推定手法を検討し、その推定精度を評価することである。評価実験から、回転磁石マーカから 1m 離れた直線経路では、スマートフォンの初期位置を誤差数 5.4cm 以下、速度を平均誤差 0.01m/s 以下で推定可能であった。

本論文の構成は以下に示す通りである。まず、2 章で位置推定に関する研究をいくつか紹介する。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 章で提案手法の評価実験を示す。最後に、5 章でまとめと今後の課題を示す。

## 2. 関連研究

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 [1] 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 [2] 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 [4] 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 [3] 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、500MHz~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 [5] などが研究されている。また、UWB 技術を用いた商用製品の一つに Ubisense RTLS (Real Time Location System)\*<sup>1</sup>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 30m~40m 間隔で設置したセンサーが受信し、タグの 3 次元位置を 15cm 程度の精度で推定する。

数 mm 以上の精度で端末の位置を推定可能な手法として磁気を用いた手法が研究されている。磁気を用いた手法は、強さが変化する動的磁気を用いるものと、強さがほぼ一定の静的磁気を用いる手法に分けられる。静的磁気を用いた手法では、建物内に存在する残留磁気から fingerprint を作成して推定する手法 [14] や、磁石を配置して磁気センサの位置を推定する手法 [15] などがある。静的磁気を用いた手法はその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る。しかしながら、地磁気などの環境磁気の影響を受けるため、我々の目的には適していない。

動的磁気を用いた手法では、一定の周期で強さが変化する磁気を利用して端末の位置を推定する。Paperno らは動的磁気を用いた位置推定手法の理論的な検討 [6] をしている。また、Hu らは 3 つのコイルを直交させ、それぞれ異なる周波数の動的磁気を発生させて磁気センサの 3 次元位置と姿勢を推定する手法 [7] を検討している。彼らはこの研究で、縦 500mm、横 400mm、高さ 400mm の 3 次元空間内で、平均誤差 1mm 以下、姿勢を平均誤差 1 以下の推定を達成している。Pirkl らはコイルを巻きつけた 1 辺 16cm の立方体を 4 つ使用し、4m までの距離で平均誤差 4cm の精度での推定を実現している [8]。また、Pirkl らはコイルを用いて動的磁気を発生させ、スマートフォン、スマートウォッチの接近検知をする手法を研究 [9] している。この研究で彼らは、90 % 以上の確率での接近検知に成功している。動的磁気を用いた商用製品として POLHEMUS\*<sup>2</sup>が存在する。この商品では全身に専用器具を装着し、リアルタイム位置推定やモーションキャプチャーなどを可能にする。動的磁気を用いた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、また静的磁気を用いた手法と同様に遮蔽物の影響を受けにくい利点がある。そのため、我々の目的とする誤差数 cm でのスマートフォンの 3 次元位置推定に適している。しかしながら、これらの手法をスマートフォンに対して適用するのは困難である。なぜなら、これらの手法では数 MHz~数 k Hz の磁気を利用しているのに対し、スマートフォンのサンプリング周波数は数 10Hz 程度であるため、数 k Hz 以上の動的磁気の磁気を正しく検知できないためである。

\*<sup>1</sup> <https://ubisense.net/en>

\*<sup>2</sup> <https://www.ddd.co.jp/polhemus>

動的磁気を用いた手法をスマートフォンで使用するため、我々は回転磁石マーカを用いた手法を検討した。回転磁石マーカとは、モータで強力な磁石を回転させ、数 Hz の周波数成分を持つ動的磁気を発生させる装置である。発生する磁気はスマートフォンのサンプリング周波数でも検知可能で、磁気の発生に磁石を用いているため、磁気の発生コストを抑えられる。

武島らは、回転磁石マーカを用いてスマートフォン所有者の通過検出をする手法 [10] 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 75cm 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 [11] 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 2m で平均誤差 13cm の距離推定、距離 50cm で平均誤差 24° の方位角を達成した。

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 [12] [13] を検討した。この研究では、距離、方位角に加えて仰角を推定する手法を検討し、スマートフォンの 3 次元位置を推定した。評価実験の結果、距離 2m、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 2cm の精度で推定が可能であった。さらに磁気データに含まれるノイズを軽減する処理を検討し、推定精度を向上し、推定可能範囲を 2m から 3m に拡大した。

本研究では、我々はこれまで検討してきた手法を拡張し、回転磁石マーカを用いて、移動しているスマートフォンの経路を推定する手法を検討する。

### 3. 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。我々の以前の研究 [13] と同様に、回転磁石マーカによる磁気を図 1 のように表す。また以前の、磁石を磁気双極子として近似し、磁石による磁気の直交座標成分  $H_x, H_y, H_z$  を 3 次元極座標  $(r, \theta, \psi)$  を用いて以下の式を導出した。

$$H_x = H_r \cos \varphi \cos \psi + H_\varphi \sin \varphi \cos \psi \cos \theta_\varphi \quad (1)$$

$$H_y = H_r \sin \varphi \cos \psi \sin \theta_\varphi \quad (2)$$

$$H_z = H_r \cos \varphi \sin \psi + H_\varphi \sin \varphi \sin \psi \quad (3)$$

ここで、

$$\cos \varphi = \cos \psi \cos \omega t \quad (4)$$

$$\cos \theta_\varphi = \sin \omega t \frac{\cos^2 \psi \sin \omega t \cos \omega t}{\sqrt{1 - \cos^2 \psi \cos^2 \omega t (1 + \sin^2 \psi)}}$$

$$-\cos \omega t \sqrt{1 - \frac{\cos^4 \psi \sin^2 \omega t \cos^2 \omega t}{1 - \cos^2 \psi \cos^2 \omega t (1 + \sin^2 \psi)}} \quad (5)$$

$$\cos \psi_\varphi = \sqrt{\frac{1 - \cos^2 \psi \cos^2 \omega t (1 + \sin^2 \psi)}{1 - \cos^2 \psi \cos^2 \omega t}} \quad (6)$$

である。

静止しているスマートフォンでは 3 次元で検討したが、今回はスマートフォンは 2 次元平面を移動するものとし、 $z = 0$  とする。式 (1)(2)(3) に  $\psi = 0^\circ$  を代入すると、2 次元平面での磁気の式が得られ、以下のように書ける。

$$H_x = H_r \cos(\theta - \omega t) \cos \theta - H_\varphi \sin(\theta - \omega t) \sin \theta \quad (7)$$

$$H_y = H_r \cos(\theta - \omega t) \sin \theta + H_\varphi \sin(\theta - \omega t) \cos \theta \quad (8)$$

$$H_z = 0 \quad (9)$$

磁石を磁気モーメントとして近似しているため、これらの式における  $H_r, H_\varphi$  は距離の 3 乗に反比例する定数であるとみなせる。そこで以下のように表す。

$$H_r = \frac{A}{r^3} \quad (10)$$

$$H_\varphi = \frac{B}{r^3} \quad (11)$$

我々の以前の研究では、15cm 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を使用している。この時と同じ磁石を使用する時、上式 (10)(11) の定数は  $A = 6.77\mu T, B = 3.04\mu T$  となる。式 (10)(11) を式 (7)(8)(9) に代入すると以下の式が導出できる。

$$H_x = \frac{A+B}{2r^3} \cos(2\theta - \omega t) + \frac{A-B}{2r^3} \cos(\omega t) \quad (12)$$

$$H_y = \frac{A+B}{2r^3} \sin(2\theta - \omega t) + \frac{A-B}{2r^3} \sin(\omega t) \quad (13)$$

さらに上式 (12)(13) から磁気ノルムを導出すると以下の式になる。

$$H = \sqrt{\frac{B^2}{r^6} + \frac{A^2 - B^2}{r^6} \cos^2(\theta - \omega t)} \quad (14)$$

これらの式の  $r, \theta$  にスマートフォンの経路を表す式を代入すれば、その経路における磁気の近似式を求められる。

本研究では基礎検討として、スマートフォンが等速直線運動をしている場合を考える。図 2 はスマートフォンの経路を示している。スマートフォンは y 軸に平行な向きに等速直線運動するものとし、初期位置を  $x_0, y_0$ 、y 軸方向の速さを  $v_y$  と定義する。この時、式 (12)(13)(14) における距離  $r$  と方位角  $\theta$  は次のように書ける。

$$r = \sqrt{x_0^2 + (y_0 + v_y t)^2} \quad (15)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_0 + v_y t}{x_0}\right) \quad (16)$$

上式 (15)(16) と式 (12)(13)(14) が、回転磁石マーカの影響

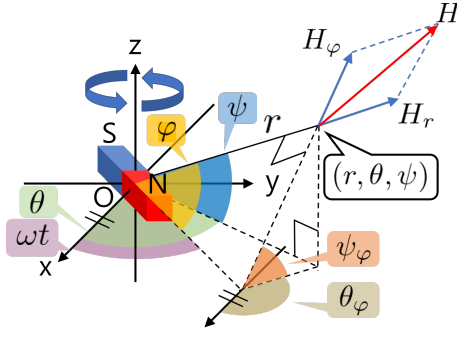


図 1 回転磁石マーカーによる磁気

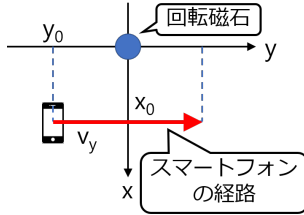


図 2 等速直線運動するスマートフォンの経路

下で、2次元平面内を等速直線運動しているスマートフォンが計測する磁気の近似式である。

ここまでスマートフォンが等速直線運動をする経路を検討したが、スマートフォンが途中で進行方向を変える経路について検討する。スマートフォンが速度  $v = (-v_x, v_y)$  で回転磁石マーカーに近づき、時刻  $t = t_0$  で進行方向を変え、 $v = (v_x, v_y)$  で回転磁石マーカーから遠ざかる経路の場合、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。

$$H = \sqrt{\frac{B^2}{r_1^6} + \frac{A^2 - B^2}{r_1^6} \cos^2(\theta_1 - \omega t) \delta(-t + t_0)} + \sqrt{\frac{B^2}{r_2^6} + \frac{A^2 - B^2}{r_2^6} \cos^2(\theta_2 - \omega t) \delta(t - t_0)} \quad (17)$$

ここで、

$$r_1 = \sqrt{(x_0 + v_x t)^2 + (y_0 + v_y t)^2} \quad (18)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y_0 + v_y t}{x_0 + v_x t}\right) \quad (19)$$

$$r_2 = \sqrt{(2|(x_0 + v_x t_0)| - x_0 - v_x t)^2 + (y_0 + v_y t)^2} \quad (20)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{y_0 + v_y t}{(2|(x_0 + v_x t_0)| - x_0 - v_x t)^2}\right) \quad (21)$$

これらの近似式を用いて移動しているスマートフォンの経路を推定する。

### 3.2 シミュレーションとの比較

3.1 で導出した近似式を評価するため、シミュレータを用いた検討を行った。シミュレータには3次元磁場解析ソルバ Qm<sup>\*3</sup>を用いた。回転磁石マーカーの磁石と同じ体積に

<sup>\*3</sup> <http://www.slock.co.jp/Qm3/index.html>

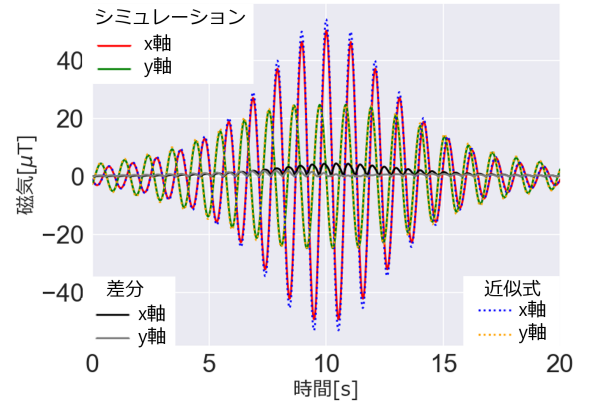


図 3 シミュレーション結果と近似式の比較:  $x_0 = 0.5\text{m}, y_0 = -1\text{m}, v_y = 0.1\text{m/s}$

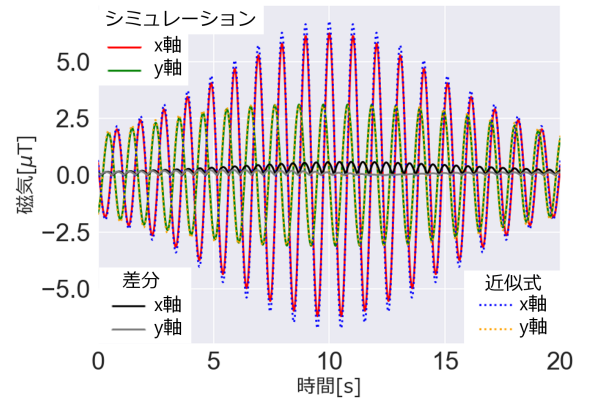


図 4 シミュレーション結果と近似式の比較:  $x_0 = 1\text{m}, y_0 = -1\text{m}, v_y = 0.1\text{m/s}$

なるように、サイズを縦 2.2cm、横 3cm、高さ 2.2cm の直方体に設定し、また材質を同じにするため、BH 曲線を残留磁束密度 14,300G、保磁力 10,000Oe に設定した。磁石を原点を中心に 1Hz で反時計回りに回転させる。そして、磁気の検出点を初期位置  $x_0 = 0.5\text{m}, y_0 = -1\text{m}$  から速度  $v_y = 0.1\text{m/s}$  で 20 秒間移動させた。

図 3, 4 はシミュレーション結果と磁気の近似式 (12)(13) 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、青線と黄色の点線はそれぞれ磁気の x 軸成分と y 軸成分の近似式 (12)(13) 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近似式 (12) との差の絶対値を計算したものである。この黒線が示すように、10 秒付近では数  $\mu\text{T}$  の差が見られるが、それ以外ではほとんど差が見られない。灰線は y 軸成分のシミュレーション結果と近似式 (13) との差の絶対値を示している。この灰線が示すように、シミュレーション結果と近似式 (13) にはほとんど差がないことが分かる。

以上の結果から、スマートフォンが等速直線運動する経路において、3.1 で導出した近似式は 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。

### 3.3 環境磁気の軽減

3.1で、回転磁石マーカの影響下で、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。しかし、地磁気や建物の鉄骨に含まれる環境磁気などの影響で、実際に計測される磁気データは近似式から大きく異なる。そこで経路推定の前に、計測された磁気データから環境磁気の影響を軽減する処理を行う必要がある。

環境磁気の影響を軽減するため、計測された磁気データを回転磁石マーカの磁石の回転周期ごとに分割し、それぞれの区間での磁気の平均値を計算する。そして、得られた平均値を磁気データから引いて環境磁気の影響を軽減する。

### 3.4 近似式によるカーブフィッティング

スマートフォンが等速直線運動する時に計測される磁気ノルムは式(14)が示すように、その初期位置 $x_0, y_0$ と速度 $v_y$ に依存する。そこで、計測された磁気ノルムに対して初期位置 $x_0, y_0$ 、速度 $v_y$ をフィッティングパラメータとして式(14)でカーブフィッティングし、得られた最適解を初期位置 $x_0, y_0$ 、速度 $v_y$ の推定値とみなす。

スマートフォンが途中で方向転換する場合は、初期位置 $x_0, y_0$ と速度 $v_x, v_y$ をフィッティングパラメータとして式(17)でカーブフィッティングし、得られた最適解を初期位置 $x_0, y_0$ 、速度 $v_x, v_y$ の推定値とみなす。

今回、カーブフィッティングにレーベンベルクマルカート法を使用し、スマートフォンの初期位置 $x_0, y_0$ 、速度 $v_x, v_y$ の初期値を全て1とする。また、スマートフォンのy軸方向の速度の向きは既に分かっているものとする。

## 4. 評価実験

### 4.1 実験準備

評価実験に際して、スマートフォンを等速直線運動させるため、我々はベルトコンベアを作成した。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を用いた。またスマートフォンの進行方向が途中で変わる経路を推定するため、二つのベルトコンベアを開発した。

我々は今回、スマートフォンが等速直線運動する経路と、途中で進行方向を変える経路について評価実験した。図5(a)は等速直線運動する経路の実験の様子である。環境磁気の影響を抑えるため、ベルトコンベアをテーブルの上に設置し、回転磁石マーカをプラスチック製の台の上に設置して実験した。図5(b)は推定した経路を示している。スマートフォンの速度は全てy軸の正の向きで $v_y = 0.1\text{m/s}$ とし、初期位置のy座標はすべて $-1\text{m}$ 、x座標はそれぞれの経路で $0.5\text{m}, 1\text{m}, 1.5\text{m}, 2\text{m}$ とした。

図6(a)は途中で進行方向を変える経路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

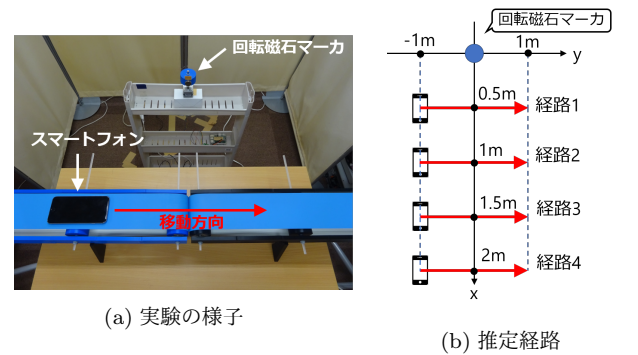


図5 等速直線運動する経路の実験

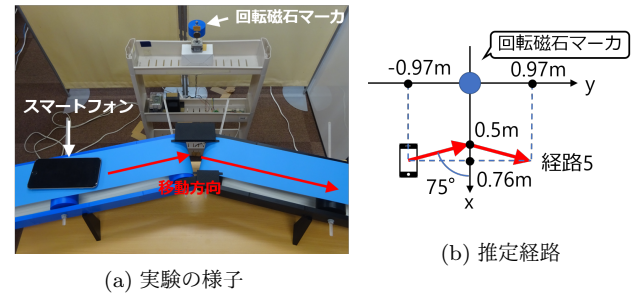


図6 進行方向を変える経路の実験

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6(b)は推定した経路を示している。スマートフォンが移動する向きをy軸の正の向きとし、ベルトコンベアはx軸に対してそれぞれ75°の角度で固定した。この時、スマートフォンの初期位置は $x_0 \approx 0.76\text{m}$ 、 $y_0 \approx -0.97\text{m}$ 、スマートフォンの速度は $0 \leq t < 10$ で $v_x \approx -0.03\text{m/s}$ 、 $v_y \approx 0.10\text{m/s}$ 、 $t > 10$ で $v_x \approx 0.03\text{m/s}$ 、 $v_y \approx 0.10\text{m/s}$ となる。

回転磁石マーカの磁石の回転数を1Hzとし、磁石のN極がx軸の正の向きになる方向を方位角0°の基準とした。計測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。計測時間は1回ごとに10秒、計測は各推定経路ごとに5回ずつ行った。

### 4.2 実験結果

まず、3.3で述べた環境磁気軽減処理の結果について示す。図7は経路2において計測された磁気の各軸成分を示している。図の黒線は3.3で示したノイズ軽減処理前の磁気、赤、緑、青線は処理後の各磁気成分を示している。各図の黒線が示しているように環境磁気の軽減処理前では、計測される磁気は $30\mu\text{T}$ の範囲で変化しており、磁気の平均値が $0\mu\text{T}$ から大きく外れている。一方で各図の赤、緑、青線が示すように、軽減処理後の磁気はおおよそ $0\mu\text{T}$ を中心に、磁石の回転周期である1秒ごとに振動している様子が見られる。

図8, 9, 10は各推定経路で計測された磁気ノルムと、カーブフィッティングによって求められた近似曲線を示してい



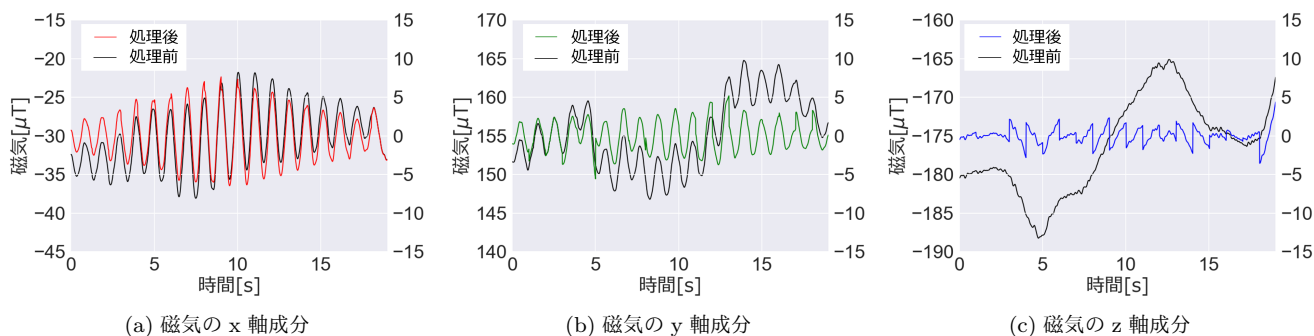


図 7 環境磁気の軽減前と後の比較, 左軸: 黒, 右軸: 青

表 1 経路推定の結果

	推定経路 1			推定経路 2			推定経路 3			推定経路 4			推定経路 5			
	cm		m/s	cm		m/s	cm		m/s	cm		m/s	cm		m/s	
	$x_0$	$y_0$	$v_x$	$x_0$	$y_0$	$v_x$	$x_0$	$y_0$	$v_x$	$x_0$	$y_0$	$v_x$	$x_0$	$y_0$	$v_x$	$v_y$
正解値	0.5	-1	0.1	1	-1	0.1	1.5	-1	0.1	2	-1	0.1	0.76	-0.97	-0.03	0.1
平均誤差	3.0	4.6	0.01	0.4	5.4	0.00	9.8	17.3	0.03	33.8	6.0	0.03	5.7	11.6	0.01	0.01
標準偏差	0.0	1.1	0.00	0.5	3.2	0.00	2.1	27.4	0.04	3.7	2.1	0.02	1.8	6.8	0.00	0.00

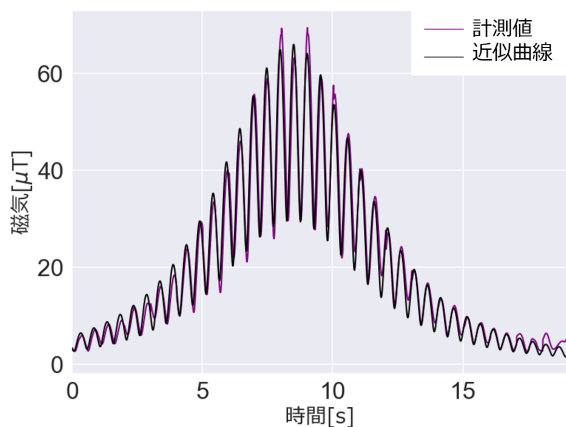


図 8 磁気ノルム: 推定経路 1

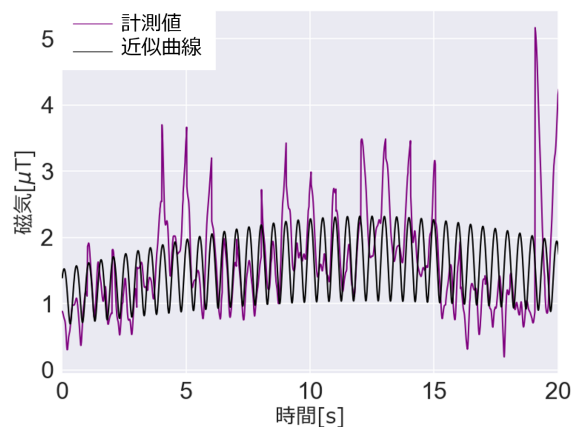


図 10 磁気ノルム: 推定経路 3

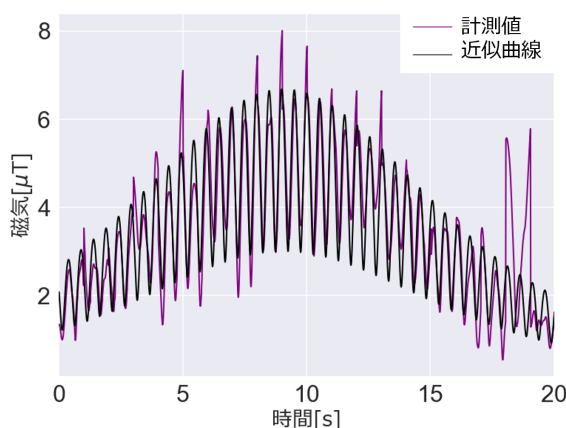


図 9 磁気ノルム: 推定経路 2

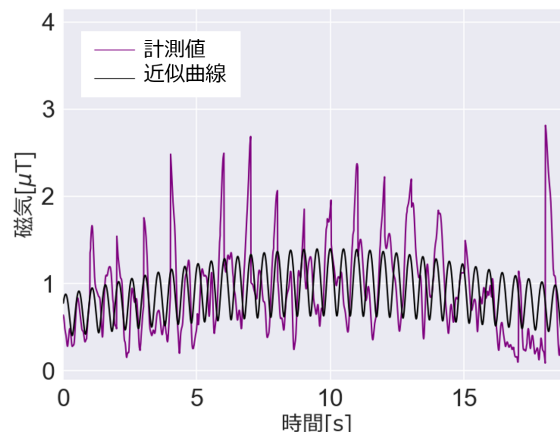


図 11 磁気ノルム: 推定経路 4

る。推定経路 1, 2 での近似曲線と比較して, 推定経路 3, 4 では計測した磁気からのずれが大きくなっている。この原因は, 距離が遠ざかると回転磁石マーカによる磁気の変化よりも環境磁気の変化の方が大きくなり, 図 7 に見られる

ような, 環境磁気の影響を軽減する処理によって生じる不連続な磁気データの影響が大きくなるためである。

表 1 は各推定経路での推定結果を示している。推定結果は, 初期位置を小数点以下第 1 位まで, 速さを小数点以下

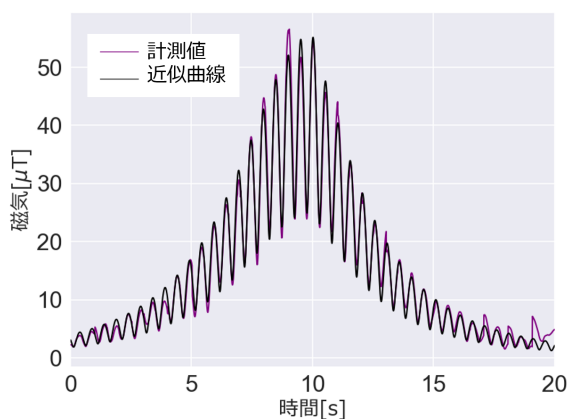


図 12 磁気ノルム：推定経路 5

第 2 位までで示した。推定経路 1, 2 では，初期位置の平均誤差が 5.4cm 以内，速度の平均誤差が 0.01m/s 以下である。一方で経路 3 では，初期位置  $y_0$  の平均誤差，標準偏差が大きくなっている。この原因は，フィッティングパラメータが局所解に陥った場合，推定される初期値，速度が正解値から大きく異なる値になるためである。

以上の実験結果から，等速直線運動をしているスマートフォンの場合，回転磁石マークから 1m 離れている経路では，初期位置を平均誤差 5.4cm 以下，速度を平均誤差 0.01m/s 以下で推定できた。

## 5. おわりに

本研究では，回転磁石マークを用いたスマートフォンの移動経路推定の基礎的な検討を行った。目的は，スマートフォンが等速直線運動する経路と，進行方向を変える経路についての推定手法の検討と，その推定精度の評価である。

我々はまず，回転磁石マークが発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，速度をフィッティングパラメータとして近似式でカーブフィッティングし，初期位置と速度を推定する手法を提案した。

次に我々はベルトコンベアを開発し，スマートフォンが等速直線移動する経路と，途中で進行方向を変える経路について評価実験を行った。その結果，回転磁石マークからの最近接距離が 1m の直線経路において，等速直線運動しているスマートフォンの経路推定を平均誤差 5.4cm 以下で達成した。

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挙げられる。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，磁気的各軸成分を利用する。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クの座標系と一致させる必要がある。また他の課題として，複数の回転磁石マーク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クを配置すれば，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。

本研究は JSPS 科研費 JP17H01762 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 渡邊康祐，廣井慧，神山剛，佐野博之，塚本昌克，片桐雅二，池田大造，梶克彦，河口信夫. 回転磁石マークによるスマートフォンの 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 (DICO2017), pp. 1588-1597, 2017.

- [13] Kosuke Watanabe, Kei Hiroi, Satoshi Kamiyama, Hiroyuki Sano, Masakatsu Tsukamoto, Masaji Katagiri, Daizo Ikeda, Katsuhiko Kaji, and Nobuo Kawaguchi. A Three-Dimensional Smartphone Positioning Method using a Spinning Magnet Marker. In *10th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2017)*, pp. 1-7, 2017.
- [14] 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.
- [15] V Schlageter, P-A Besse, RS Popovic, and P Kucera. 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.