

推薦論文

回転磁石マーカに基づくスマートフォン位置推定

武島 知勲¹ 梶 克彦² 廣井 慧³ 河口 信夫³ 神山 剛⁴ 太田 賢⁵ 稲村 浩⁶

受付日 2017年3月28日, 採録日 2017年10月3日

概要: 本研究では意図的に特徴的な磁場を生成する磁場マーカを作成し、環境に設置して歩行者が所持しているスマートフォンのような端末での磁場の計測により位置推定を行う。磁場マーカにより特徴的な磁場を狭い範囲に限定して生成し、磁場マーカからの相対的な距離と角度を推定し詳細な位置推定を行う。提案する磁場マーカは、磁石の回転により特徴的な磁場を発生させ、かつ磁場マーカの磁石の向きとスマートフォンの磁気センサの値が極値をとるタイミングから、マーカとスマートフォン間の相対的な位置を推定する。提案手法は、磁場マーカとスマートフォンの距離を推定する距離推定と、磁場マーカとの相対角度推定の2段階で構成される。磁場マーカとスマートフォンとの距離の推定は2m以内ならば13cm以下の平均誤差で推定でき、1.4m以内の範囲であれば4cm以内の誤差で推定可能である。磁場マーカから見たスマートフォンの方角の推定は平均誤差が24度で標準偏差が29度の精度であった。

キーワード: 磁場マーカ, スマートフォン, 位置推定, FFT

A Smartphone Positioning Method Based on Spinning Magnet Marker

CHIIHIRO TAKESHIMA¹ KATSUHIKO KAJI² KEI HIROI³ NOBUO KAWAGUCHI³ TAKESHI KAMIYAMA⁴
KEN OHTA⁵ HIROSHI INAMURA⁶

Received: March 28, 2017, Accepted: October 3, 2017

Abstract: In this paper, we propose a smartphone positioning method based on magnetic field marker. The spinning magnet generates characteristic magnetic field. Magnetometer that equipped in smartphone measure the magnetic field, and estimate the relative location of smartphone and marker. Distance between smartphone and marker is calculated by magnetic intensit. Angle is calculated according to the angle of magnetic stick and the timing of extremum of magnetic intensity. In our experiment, when the distance of smartphone and marker is less 2m, the average error of distance estimation is 13cm. When the distance of smartphone and marker is less 1.4m, the average of distance estimation error is 4cm. In terms of angular accuracy, average error is 24 degree, and the standard deviation is 29 degree.

Keywords: Magnetic field marker, smartphone, positioning, FFT

- ¹ 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya,
Aichi 464-8603, Japan
- ² 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technol-
ogy, Toyota, Aichi 470-0392, Japan
- ³ 名古屋大学未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya Univer-
sity, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan
- ⁴ NTT ドコモサービスイノベーション部
Service Innovation Department, NTT DOCOMO, INC.,
Yokosuka, Kanagawa 239-8536, Japan
- ⁵ NTT ドコモ先進技術研究所
Research Laboratories, NTT DOCOMO, INC., Yokosuka,
Kanagawa 239-8536, Japan
- ⁶ 公立はこだて未来大学システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University
Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

1. はじめに

様々なセンサを搭載したスマートフォンの普及にともない、Google マップや Moves^{*1}, Swarm^{*2}のような位置情報を用いるサービスが増加している。このような位置情報を用いるサービスにとって位置情報の取得方法は重要である。屋外ではGPSが利用できるため高精度でユーザの位置を取得できるが、屋内ではGPSの利用は困難である。そのため屋内でも利用可能な位置推定手法が必要である。

本論文の内容は2016年7月のマルチメディア、分散、協調とモバイル DICO2016 シンポジウムにて報告され、モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム研究会主査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.moves-app.com/>

^{*2} <https://ja.swarmapp.com/>

屋内での歩行者の位置推定手法には歩行者デッドレコニングのような相対位置を推定する手法 [1] や Wi-Fi 基地局や Bluetooth を用いた位置推定のように絶対位置を推定する手法 [2], [3] などがある。これらの手法にはそれぞれ利点と欠点があり組み合わせて用いられる場合が多い [4]。

磁場は屋内位置推定に有効な情報の 1 つである [5], [6]。スマートフォンには磁気センサ（コンパスセンサ）が搭載されており、磁場を計測可能である。屋外であれば地磁気を計測して方位を計測可能であるが、屋内では建物内に埋め込まれている鉄骨が発する残留磁場によって方位を正しく取得できない。この残留磁場の Fingerprint が位置推定の手がかりとなる [5], [6]。しかし、これまでの研究から、残留磁場を利用した手法は位置推定精度が環境に依存してしまうという問題が明らかになった。他の場所に比べて特徴的な磁場であれば高い精度で推定できるが、特徴の少ない場所であると精度が低くなってしまう。そのため環境に依存しない位置推定を磁場を用いて行うためには、磁場的に特徴の少ない場所に特徴的な磁場を発生させる機器を設置する手法が有効と考える。

我々はこれまでに、意図的に特徴的な磁場を生成する磁場マーカによる位置推定手法を提案している [7]。この磁場マーカは、棒状の磁石を特定の周波数で回転させる。スマートフォンで観測した磁場の変動値を FFT にかけ周波数を読み取ればマーカの ID を識別できる。また 2 つの磁場マーカ設置により、マーカ ID の識別順序から歩行者の通過方向の検出も可能である。

本研究では上記の研究を発展させ、スマートフォンユーザが磁場マーカ圏内のどこにいるかという詳細な位置を推定するためのマーカデバイスと、位置推定手法を提案する。本磁場マーカは高精度な位置推定が必要な状況での使用を想定している。たとえば店舗内での商品までのナビゲーションを考えた場合、数 m も誤差があると、目的とする棚までは誘導できても、その棚の中の特定商品の前までのナビゲートは困難である。ここで、磁場マーカが影響を与える狭いエリア内で詳細な位置が推定可能になれば、利用者が目的とする商品までのナビゲートが可能になると考える。店側にとっても、商品に対する顧客のアプローチが正確に把握できるようになり、商品陳列やプロモーション施策などのための有益なマーケティングデータとなりうると考える。

本稿の構成は以下のとおりである。まず 2 章で BLE や磁場を用いた絶対位置推定の研究について述べる。3 章で磁場マーカを設計し、4 章で磁場マーカの実装について述べる。5 章で磁場マーカ圏内の詳細位置推定手法について述べ、6 章で提案手法の評価実験を行う。最後に 7 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

スマートフォンを用いた屋内位置推定は、加速度や角速度などの内蔵センサに基づく歩行者デッドレコニング (PDR) [1], RFID などのマーカを用いた手法 [8], Wi-Fi や BLE (Bluetooth Low Energy) などの受信電波強度の距離減衰関数から位置を推定する手法 [9], [10], 電波や磁気の Fingerprint に基づく手法 [11], [12], [13], など様々なものが提案されている。しかし、PDR は時間経過とともに初期位置からの累積誤差が蓄積する。マーカを用いた手法はカバーできる範囲が限られる。距離減衰関数から位置を推定する手法では無線電波の発信源の位置を把握する必要がある。Fingerprint に基づく手法はあらかじめ Fingerprint 作成のための電波環境調査が事前に必要となる。このようにそれぞれ短所があり、どれか 1 つの手法ですべてを解決するのは困難である。Fingerprint の事前調査を必要とせず、自己位置推定とマップ生成を同時に行う SLAM に基づく手法 [14] や、自動で環境内の無線や磁気の特徴的な地点をランドマークとして扱い位置推定精度を向上させる手法 [15], [16] も存在する。しかし、特に詳細な位置を取得したい場所が、必ずしも無線や磁気に特徴があり高い位置推定精度を達成できる場所であるとは限らない。近年はすでにこれらを統合したハイブリッド手法 [4] に研究トレンドがシフトしているが、我々は PDR, マーカ, Fingerprint 手法など個々の手法についての精度・実用性追求は手法統合時の精度・実用性の改善につながるため重要であると考えている。

本研究では、詳細な位置推定を求められる箇所に設置できるマーカの中で、特に磁場を用いた手法に注目する。磁場マーカを用いた位置推定手法として、コイルを環境に設置して位置推定を行う研究が存在する [17], [18], [19]。Angelis らの手法 [17] では環境内に数 kHz の高周波磁場を発生する送信用コイルを設置し、受信用コイルの位置を推定する。送信用コイルが発する磁場により受信用コイルに電圧が発生し、発生した電圧から送信用コイルからの相対的な距離や方向を推定する。Angelis らの手法では 1.8 kHz 以上を利用している。Blankenbach らの手法 [18] では環境内に複数のコイルを設置し、50 Hz 程度の周波数の磁場を発生させる。磁場を発生させているコイルの区別のためにコイルは順番に動かす。コイルと計測器との距離を磁場の振幅で計算し、複数のコイルとの距離から位置を推定する。Hu らの手法 [19] は 3 つのコイルをそれぞれ直交するように配置し、それぞれ別々の周波数の交流電流を流して発生する動的磁場を利用して位置推定を行っている。これらの手法は位置推定の精度が高く、Angelis らの手法では実験環境で推定誤差 10 cm 以内を達成している。しかしこれらの手法をスマートフォンを保持した歩行者の位置推定に利用するためにはいくつか課題がある。まずスマートフォン

に搭載されている磁気センサでは高周波の磁場を計測できない。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数十 Hz から数百 Hz である。たとえば、Nexus 5 では磁気センサのサンプリング周波数は 60 Hz である。サンプリング定理によってサンプリング周波数の半分の周波数までの周波数しか正確に計測できない。そのためこれらの手法のように数 kHz の磁場を利用した位置推定は現在のスマートフォンではできない。またコイルの設置、維持コストの問題がある。コイルから数 m 離れた距離に存在する磁気センサで検知可能な磁気を発生させ続けるために大きな電流を流し続ける必要がある。Blankenbachらの手法で利用しているコイルは直径 50 cm であり、電流は 15 A を使用している。しかしこのようなコイルを環境内に複数設置して使用するには維持コストがかかりすぎる。また直径 50 cm というサイズは環境内に設置するには大きすぎると考える。

3. 磁場マーカの設計

我々の手法では、狭いエリアに限定して高い精度で検出できるように磁場を利用する。磁石やコイルなどの磁場は距離の 2 乗から 3 乗に比例して減衰するため、特定の範囲内のみに影響を与えやすい。しかし、一般的な屋内環境に存在する磁場（以下、環境磁場）を利用すると場所によっては磁場マーカを検出できない可能性があるため、意図的に磁場を生成する必要がある。磁場マーカを生成し、それを磁気センサの値から検出するためには一般的な屋内環境に存在しない磁場にしなければ過検出の原因となる。この章ではまず環境磁場について述べ、その後に磁場マーカの実現方法について述べていく。

3.1 一般的な屋内の環境に存在する磁場（環境磁場）

環境磁場とは、主に地磁気と残留磁気により生じる磁場である。残留磁気とは鉄骨などの金属が帯びている磁気である [20]。鉄筋が磁化される機構の可能性として、製造時・加工時の変形、運搬・保管・溶接・組み立て時における高電圧電源により形成された磁場による帯電などがあげられる [21]。本稿では残留磁気により生じる磁場を残留磁場と定義する。

図 1 に歩行者がスマートフォンの姿勢を固定して建物内を直進歩行したときに観測される磁場の変化の例をあげる。図 1 に示すように端末の姿勢を固定して測定しているのに端末の移動によって磁場が変化する。これは、建物の構造などに用いられる鉄骨が場所ごとに異なり残留磁場が場所ごとに異なるためである。

新納は屋内で発生しうる磁場について調査している [20]。この調査では、環境磁場は直流磁場、交流磁場、変動磁場の 3 つに分類されている。直流磁場は磁石と直流電流によって発生する時間的に変動しない磁場である。交流磁場は交

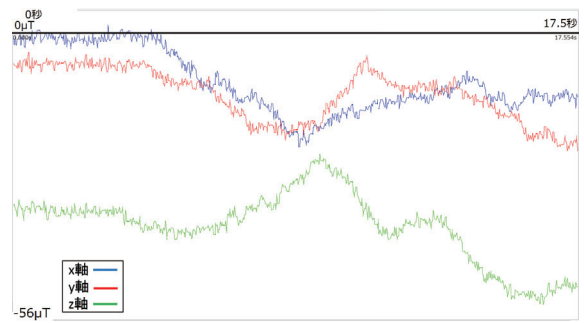


図 1 端末姿勢を固定して直進歩行したときの磁気の時系列変化
Fig. 1 Temporal sequence of magnetometer when a person walks linearly.

流電流によって発生する強さと方向が周期的に変化する磁場で、交流磁場の周波数は主に商用周波数である 50/60 Hz と等しくなる。変動磁場はその他の原因で生じる 1 Hz 以下の周波数の変動を示す磁場である。

新納は様々な環境磁場について計測している。地磁気により生じる磁場は直流磁場で磁場の強さは屋外では $46 \mu\text{T}$ であるが屋内では鉄骨や鉄筋などの影響を受けて 10～30%減少している。残留磁場は直流磁場であり磁場の強さは床から 1 m 離れた位置では最大で $130 \mu\text{T}$ と述べられている。またエレベータや屋内電気機器の発生する磁場は交流磁場であり、磁場の強さは約 $1 \mu\text{T}$ 以下と述べられている。

これらから環境磁場について考える。屋内では移動によって生じる磁場の変化の原因は残留磁場が主である。地磁気は鉄骨や鉄筋などの影響を受けて一様ではなくなっているが、その影響は残留磁場として考え無視すると、磁場の変化の原因となるのは残留磁場である。残留磁場の強さ分の変化はしうと考えると、移動により生じる磁場の変化の大きさとして $130 \mu\text{T}$ まではありうる。磁場の変化の周波数を考えると主に交流磁場と変動磁場の影響を受けるので磁場の変化の周波数は 1 Hz 以下と 50/60 Hz となる。

3.2 一般的な屋内の環境に存在しない磁場の生成手法

前節により環境磁場と区別ができる磁場マーカを生成するためには、移動によって生じる磁場変化を $130 \mu\text{T}$ 以上にするか 1 Hz より大きく 50 Hz 未満の周波数の変化を起こす必要がある。我々は環境磁場と区別ができる磁場マーカを実現するために以下の 2 つ手法を考えた。

A：複数の強力な磁石を静的に設置してノイズと区別できる大きさの変化を複数回起こす方法

B：磁場を 3～25 Hz 程度の周波数で周期的に変化させる方法

A は磁石を設置するだけなので維持コストはかからないというメリットがある。しかし $130 \mu\text{T}$ 以上の磁場を床から 1 m の地点に発生させるには、強力な磁石が必要である。たとえば直径 10 cm 長さ 10 cm のネオジム磁石を設置する

表 1 式 (1) より導出した各条件での電流量

Table 1 The amount of current derived from Eq. (1).

直径	巻き数	必要な電流量
2 m	1,000	45 mA
2 cm	1,000	1.8 A

必要がある。このような磁石は高価であるため設置コストが高くなる。さらに、誤ってこの磁石に電子機器を近づけると故障の原因となる [20] ため A の手法はとらず、B の手法を利用して磁場を生成することにした。

3.3 特徴的磁場を発生させる磁場マーカの検討

B の磁場の変化による磁場マーカの生成では意図的に環境磁場を周期的に変化させて特徴的な磁場を生成する。磁場を周期的に変化させる方法の 1 つにコイルを用いた方法が存在する。コイルが発生する磁場の式を式 (1) に示す [22]。

$$B[T] = \frac{\mu_0 I n a^2}{2(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

式 (1) の B は磁束密度、 μ_0 は真空の透磁率、I は電流、n はコイルの巻き数、a はコイルの半径、z はコイルと計測点との距離である。コイルから 1 m 離れた位置に $10 \mu\text{T}$ 以上の変化を起こすためには表 1 のような場合が考えられる。

コイルの直径を大きくすると必要な電流量は小さくなるが、設置場所が限定されてしまう。コイルの直径を小さくすると必要な電流量が大きくなり、維持コストが高くなってしまふ。磁場マーカは長時間の使用を想定しているため維持コストは低く抑える必要があり、コイルを使用した磁場の生成は行わない。

次に、コイルのほかに磁場を変化させる方法として、モータで磁石を回転させて特徴的な磁場を生成する方法を検討する。磁石の回転により磁場は周期的な変化をする。たとえば磁石を周波数 a [Hz] で回転させた場合、周囲で観測される磁場の変動を FFT (高速フーリエ変換) で周波数分析すると a [Hz] を多く含んでいる。このように磁石の回転周期と磁場の変動周期は等しくなる。モータで磁石を回転させる際には磁場を発生させるために電力を必要とせず、磁石を回転させるコストだけで周期的な磁場を生成できる。磁石にもよるが回転方法の工夫により必要な電力は抑えられると考えられる。これらの理由により磁石を回転させる手法を採用する。

提案手法の特徴と利点をまとめる。提案する磁場マーカの特徴的な点な、磁石そのものを回転させて動的磁場を発生させ、スマートフォンと磁場マーカの相対的な位置を求めるところにある。前章でも述べたとおり動的磁場を発生させるためにコイルを用いた手法は存在しているが [17], [18], [19], 提案手法はスマートフォンの磁気センサでも検出可能である。マーカサイズは磁石の直径に依存し

一辺 10 cm 程度に抑えられる。また回転させるための電力を低く抑えられる可能性があるという利点もある。

4. 磁場マーカの実装

4.1 理論式による磁石の形状の決定

磁石の形状を決める前に磁場の強度について考える。本手法は屋内での使用を考えているため強力な磁石を屋内に設置する必要がある。また歩行者の通過や位置を検出するために磁場マーカの近くを歩行者が通過する。そのため、歩行者が持っている磁気カードへの影響を考えなければならない。磁気カードが許容できる磁場の強さは直流磁場ならば $40 \sim 65 \text{ mT}$ で交流磁場なら $16 \sim 30 \text{ mT}$ である [20]。本手法では磁石は回転し磁場は時間で変化するので交流磁場と考えられる。そのため、交流磁場の $16 \sim 30 \text{ mT}$ を目安に考える。磁気カードの許容できる磁場は 30 mT が最大となっているが、実用性を考えて最小値の 16 mT を基準に考えていく。

次に歩行者が磁石にどれほど接近しうるかを検討する。静止している障害物に対する回避行動に関する研究が存在する [23]。松永の行った実験では、歩行者が静止している障害物に対して行う回避行動は携帯電話の使用にかかわらず歩行者の空間に基づいていると明らかにした。歩行者は自身の体を中心として接触領域、非接触領域、快適領域、通り抜け領域という領域を持つ。歩行者は障害物を避けて通過する場合、障害物が非接触領域に入らないように回避して通過する。体の側面だけを考えると人の体から非接触領域までの距離は 45 cm である。これにより歩行者が磁石に対して 45 cm 以内には接近する可能性は低いと考えられる。しかし、複数の人が通過する場合もこのとおりとは限らないため磁石から 15 cm 以内に近づけないようにし安全性を確保する。

磁石の磁場が 15 cm 離れた位置において磁気カードに影響を与えず、 1 m 離れた位置においても十分な影響を与えられるように磁石の形状を決定する。 1 m 離れた位置で磁場の変化幅が約 $10 \mu\text{T}$ になるようにする。安全性を考えて磁石から 10 cm の位置で磁場の強さは 16 mT 以下になるようにした。円柱磁石が作る中心軸上の磁界分布 $H_x(x)$ は図 2 のように計算できる [24]。この式の Br は標準的なネオジム磁石の残留磁束密度 $12,000 \text{ G}$ を利用する。磁石から 1 m の位置で磁場の強さが $5 \mu\text{T}$ 以上で 10 cm の位置で磁場の強さが 16 mT 以下になる形状は直径 D が 2 cm で厚さ Lm が 10 cm の円柱磁石である。

しかし、この磁石では 1 m 離れた位置に十分な影響を与えていない。そこで磁石の材質を変え図 2 の Br が $14,300 \text{ G}$ になる材質に変え、形状も直径 2.5 cm 、長さ 6 cm にした。この磁石は 1 m 離れた位置で磁場の強さが $6 \mu\text{T}$ になり、 10 cm 離れた位置で磁場の強さが 16 mT を超えない (表 2)。この磁石を用いた実験では 1 m 離れた位置で

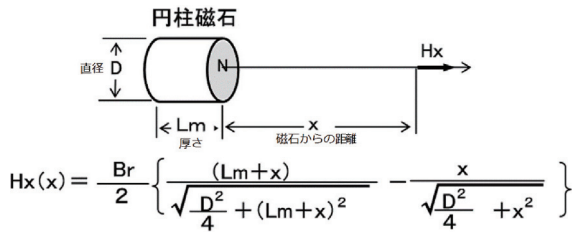


図 2 円柱磁石が作る中心軸上の磁界分布

Fig. 2 Magnetic field distribution central axis of cylinder magnet.

表 2 磁石の形状と 1 m 離れた位置での磁場の強さ

Table 2 Form of magnet and strength of magnetic field at one meter distance.

磁石直径 [cm]	磁石高さ [cm]	残留磁束密度 [G]	磁場強さ [μ T]
2	10	12,000	5
2.5	6	14,300	6

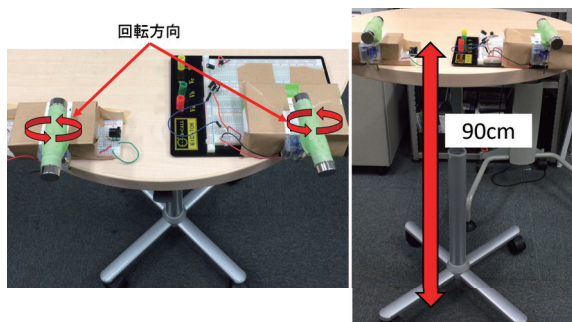


図 3 既存モータを用いて構築した磁場マーカ

Fig. 3 Magnet marker that is developed by using existing motor.

も十分な影響を与えられていると考えられる。

4.2 既存モータでの試作

まず磁石を回転させる機構を既存モータを用いて構築した。図 3 に既存モータを用いて構築した磁場マーカを示す。モータには速度を変えられるようにするために TAMIYA のミニモーター多段ギヤボックス (12 速) [25] を用いた。このモータはギアの変更により回転速度を変更できるため、磁石の回転速度を容易に変更できる。

既存モータによる磁場マーカの構築は容易に作成できる利点があるが、稼働時の騒音や長時間の稼働の困難さ、磁石が大きくなるほど安定した運用が難しいなど欠点が判明した。我々は磁場マーカの長期的な運用を考えているため既存モータによる磁場マーカの構築ではなく、次節で述べる実装方法を採用した。

4.3 3D プリンタを用いた実装

長期間の安定運用を可能にするため、我々は回転させる磁石で簡易的なモータの作成を考えた。ステッピングモータの原理は図 4 のように中心に磁石を設置し、周囲に配

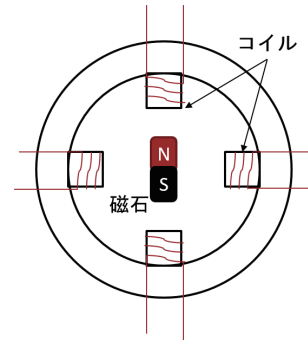


図 4 ステッピングモータの原理

Fig. 4 Principle of stepping motor.

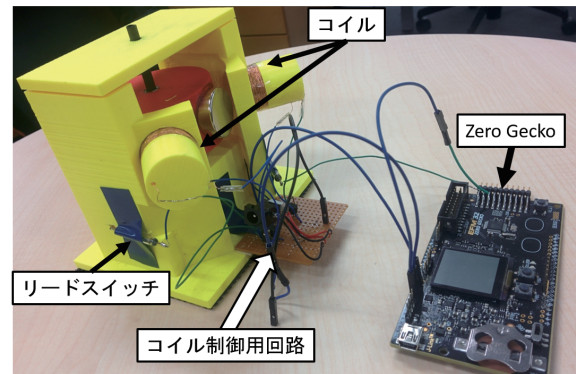


図 5 3D プリンタを用いた実装 (第 1 段階)

Fig. 5 Implementation by using 3D printer (First step).

置したコイルに順番に電流を流して回転させる [26]。我々は回転させる磁石を中心に周囲にコイルを設置し、電流を流すタイミングの制御によって磁石を回転させられると考えた。

作成した磁場マーカを図 5 に示す。磁石の周りに 2 つのコイルと 2 つのセンサを設置した。センサは磁石の接近のみを検出するリードスイッチを用いた。センサが ON になったときにコイルに電流を流して磁石を回転させる。コイルの制御には超低消費電力の 32 ビット・マイクロコントローラである Zero Gecko [27] を用いた。この Zero Gecko でセンサの入力を受け取り、コイルを制御し磁石を回転させた。

磁石は回転を維持しやすくするために摩擦を減らす工夫を行った。まず回転軸にはボールベアリングを用いて軸棒との摩擦を減らした。次に軸棒以外との接触も回転を阻害する原因となるため軸棒以外と接触しない構造を考えた。図 6 に示すように回転させる磁石と土台に浮かせるための磁石を付けて浮遊させている。これにより、磁石の大きさや重量によらず回転を維持しやすくなっている。

作成した磁場マーカは既存モータに比べて長時間稼働させても問題なく動作し稼働時の騒音も小さくなったがいくつか課題があった。稼働できる回転速度が 3 Hz から 7 Hz と狭く、磁場マーカの作り出せる識別子の数の少なさや回転させるまでの手間が課題であった。これはコイルに向い

ている磁石の磁極がリードスイッチでは取得できないためである。コイルに流せる電流の向きが変更できないため、磁石を加速できるタイミングは特定の磁極がコイルを向いたときのみになる。しかし、コイルに近づいている磁石の磁極は取得できないため確実に正しい磁極のときにコイルに電流を流すのは難しい。そこで、一番最初に近づいてきた磁極をN極であると想定してコイルを制御していた。これにより実際にN極が来るように回転をさせる必要がある、ただ回転させるだけでは稼働できない場合があった。

そこでこれらの課題を解決するためにさらに改良を行った。改良後の磁場マーカを図7に示す。改良前との違いは以下の3点である。

改良点1：センサを磁石の接近のみしか検出できないリードスイッチから磁場の強さを計測できるホールセンサに変更

改良点2：コイルに流せる電流の向きを変更できるようにフルブリッジ回路に変更

改良点3：コイル制御用回路を3Dプリンタ内部に収納

改良点1によってコイルに近づいている磁石の磁極が取得できる。これによりコイルに電流を流すタイミングの制御を磁石の磁極を考慮して行えるため回転させるまでの手間を削減できる。改良点2によって、コイルに近づいている磁極によらず磁石を加速可能となった。これにより、磁石が1回転する間に加速できる回数が2回から4回に増加し、最高回転速度が10 Hzに向上した。改良点3により回路と外部との接触が少なくなり、磁場マーカの持ち運びによって回路が故障するといった問題がなくなった。

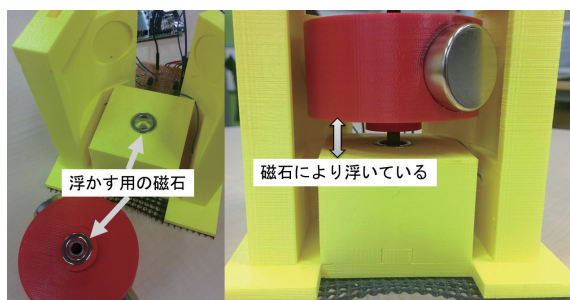


図6 磁石の浮遊機構

Fig. 6 Mechanism of magnet flotation.

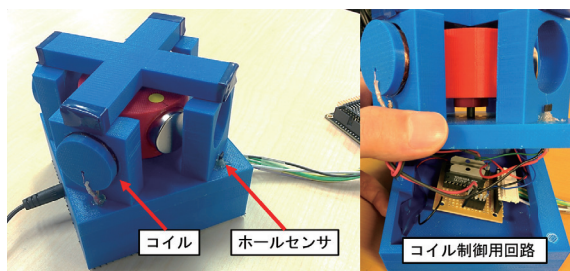


図7 3Dプリンタを用いた実装（第2段階）

Fig. 7 Implementation by using 3D printer (Second step).

また、2つのホールセンサの計測値をUARTで送信できる機能を備えた。UARTの通信速度は115,200 bpsであり、ホールセンサの値を50 Hz以上の速度で送信可能である。これにより、受け取り側は磁石がどのような角度になっているかをホールセンサの値から推定可能になる。この通信機能は次章の角度推定において使用する。

5. 磁場マーカ圏内の詳細位置推定手法

本章では磁場マーカ圏内の詳細な位置を推定する手法を提案する。マーカとスマートフォンの位置関係は、磁場マーカからの相対的な距離の推定と相対的な角度の推定によって実現する。距離は特定周波数の磁気の強さから推定する。磁場マーカの磁石の磁極がセンサの方向を向いているときにセンサの値は極値を取ると考えられる。そこで、磁場マーカの磁石の向きとスマートフォンの磁気センサの値が極値をとるタイミングを用いて相対的な角度を推定する。

5.1 距離推定

磁場マーカとスマートフォンの距離を磁気センサの値から推定するために磁気センサの値と距離との関係を調査する。磁気センサの値の変化幅（極大値と極小値の差）は磁場マーカから離れるほど小さくなる。そこで磁気センサの値の変化幅は磁場マーカとスマートフォンの距離と相関があると考えた。

はじめに、この相関関係は図2の計算式と関係があると考え検証実験を行った。図8に実験の概要図を示す。スマートフォン（Nexus 5）をディスプレイが磁場マーカの方を向くように立てて磁場マーカの近くに設置する。これは磁気センサは3軸あるがそのうちの1軸（z軸）に最も影響を与えられるようにするためである。磁場マーカとスマートフォンの距離は20 cmから100 cmまでを5 cmずつ変化させた。計測時間は10秒間で、磁場マーカの磁石の回転速度は約6 Hzである。

取得された磁気センサの値をそのまま用いるのではなく

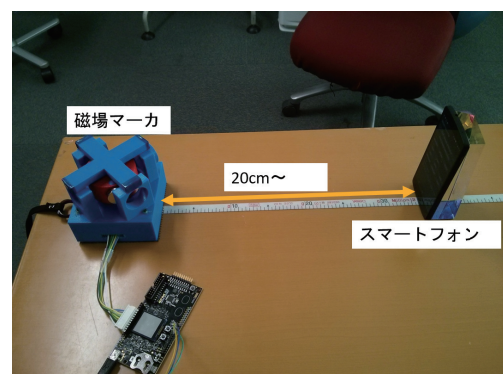


図8 磁場マーカとスマートフォンの距離を推定する実験の様子

Fig. 8 A scene of experiments of estimating distance between magnet marker and smartphone.

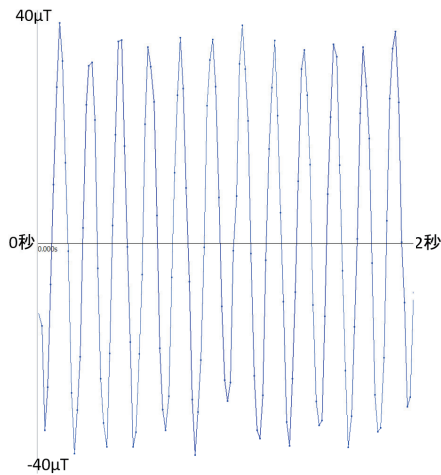


図 9 端末を固定して計測した際の磁気センサの値（バンドパスフィルタ適用後）

Fig. 9 Values of magnetometer when a device is fixed (after processing band-path filter).

ノイズ除去処理してから変化幅を取得する。磁気センサの z 軸の値に対して磁場マーカ以外の影響を除くためにバンドパスフィルタを適用する。通過周波数領域は 2 から 25 Hz である。バンドパスフィルタ適用後の波形を図 9 に示す。この図 9 の波形の極値を微分値を用いて取得する。値の傾きが正から負へ変わるときを極大値とし、負から正へ変わるときを極小値とする。10 秒間分の極大値と極小値の差を取得しその差の平均を結果とした。

この実験の結果を図 10 に示す。図 10 の赤線が計測値で青線が図 2 の計算式から導出した理論値である。60 cm より離れた場合は近い値になっているが、30 cm 以下の場合では大きく異なっている。最大で $200 \mu\text{T}$ 以上異なる場合がある。このように、図 2 の計算式からは磁場マーカとスマートフォンの距離推定は困難であると分かった。

次に、計測値は計算式から導出した値と同じように距離の累乗で減衰しているため、計測値から近似曲線を導出しその近似曲線の式から距離を導出できるのではないかと考えた。この方法の検証のため、計測回数を増やし計測値から近似曲線を導出した。各距離で新たに 3 回計測を行い、同様の処理を行った。

この実験の結果を図 11 に示す。図 11 の近似曲線は 3 回の計測結果の平均値から導出している。累乗近似曲線は $y = cx^b$ に基づいて最小二乗適合の計算を行って c と b を導出している。導出した近似曲線の決定係数 R^2 値は 0.9988 とほぼ 1 に近い値であるため、この曲線はデータに対してほぼ適合していると分かる。この近似曲線を用いて磁場の变化幅から磁場マーカとスマートフォンの距離を取得する。近似曲線の式は式 (2) であり、磁場の变化幅から距離を推測する式に式変形すると式 (3) になる (y は磁場の变化幅, x は磁石と端末の距離)。距離の推定精度が高いため、磁場マーカとスマートフォンの距離推定にはこの式

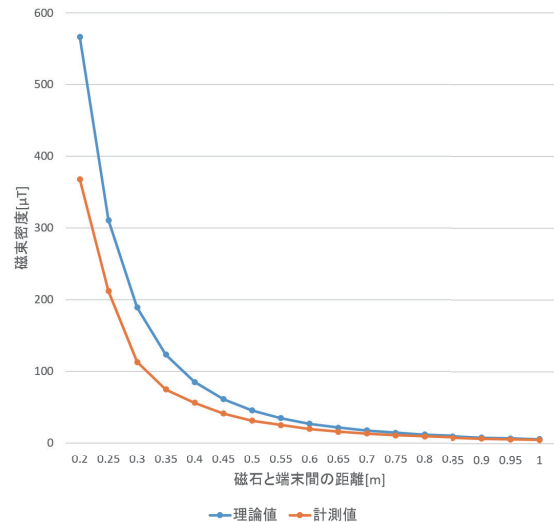


図 10 磁場マーカと端末の距離と計測値の変化幅と計測値の関係

Fig. 10 Relationship between distance from magnet marker to device and vibrational amplitude of observed value.

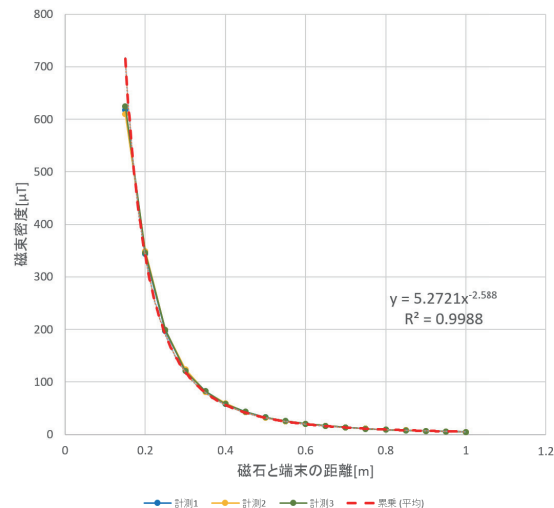


図 11 磁場マーカと端末の距離と計測値の変化幅と近似曲線

Fig. 11 Appoximated curve of distance from magnet marker to device.

を採用する。

$$y = 5.2721x^{-2.588} \quad (2)$$

$$x = \left(\frac{y}{5.2721} \right)^{\frac{1}{-2.588}} \quad (3)$$

5.2 角度推定

スマートフォンの磁場マーカからの方向を推定するために磁石の角度情報と磁気センサの値が極値を取るタイミングの情報を統合する。磁場マーカの磁石の角度情報を Zero Gecko から UART 通信により PC に送信する。またスマートフォンの磁気センサの値は UDP 通信により PC に送信する。このシステムの概要図を図 12 に示す。図 12 に示すとおり、スマートフォンは磁気センサの x , y , z 軸の値を時刻情報とともに送信している。磁場マーカは磁場マーカ

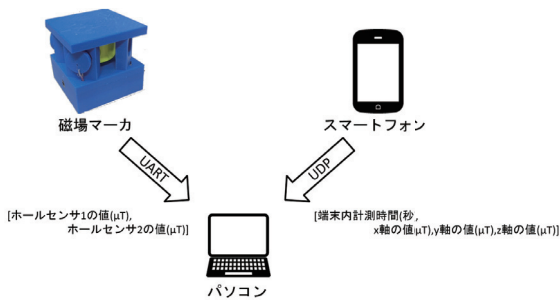


図 12 磁場マーカの情報とスマートフォンのセンサ情報の統合手法の概要図

Fig. 12 Overview of integration method of magnet marker and smartphone.

に内蔵されているホールセンサの値を送信している．Zero Gecko では時間の取得は難しかったため，磁場マーカの情報の時間は UART 通信で PC が受信した時刻を付与している．

次に受けとった磁場マーカとスマートフォンのセンサ情報を利用できる情報に変換する．まず磁気センサの極値を取るタイミングを計算するが，これは 7.1 節の距離推定と同様で z 軸の値に対してバンドパスフィルタを行った後に微分法で傾きの正負の変化を用いて取得している．磁石の角度は磁場マーカのホールセンサの値から変換している．これは各磁石の角度でのホールセンサの値を計測した結果を保存しておき，現在どの角度のときの値に近いかを判定して閾値以内であればその角度であると判定している．現在判定できる角度は 0 度，45 度，90 度，135 度，180 度，225 度，270 度，315 度の 8 分割である．このように受けとったそれぞれの情報から目的である磁気センサの値が極値を取るタイミングと磁石の角度情報を 1 つのパソコン上に統合した．

極値をとるタイミングと磁石の角度情報からスマートフォンの磁場マーカからの方向を推定する手法を図 13 を用いて説明する．図 13 の一番上のグラフは磁石の角度の時間変化を表している．図 14 に示す 8 つの角度になったときのタイミングを取得している．図 13 の一番下のグラフは 6.1 節で説明したバンドパスフィルタによるノイズ除去処理を行った後の磁気センサの値の時間変化を示している．図 13 の下 2 つのグラフに引いた緑色の線はスマートフォンの磁気センサの値が極値をとったタイミング (T_A) であり，赤色の線は磁石が正解角度になったタイミング (T_B) である．磁気センサの極値のタイミングをセンサ値の極値から取るとサンプリング周波数の関係で正しい極値のタイミングでない場合がある．そこで，磁気センサの値の変化は周期関数になっていると考え磁気センサの値が 0 になったタイミングを用いて極値をとるタイミングを取得する．図 13 の零交差点 A と零交差点 B の中心を極値のタイミングとする．

図 13 の T_A と T_B には差がある．これは磁場マーカの

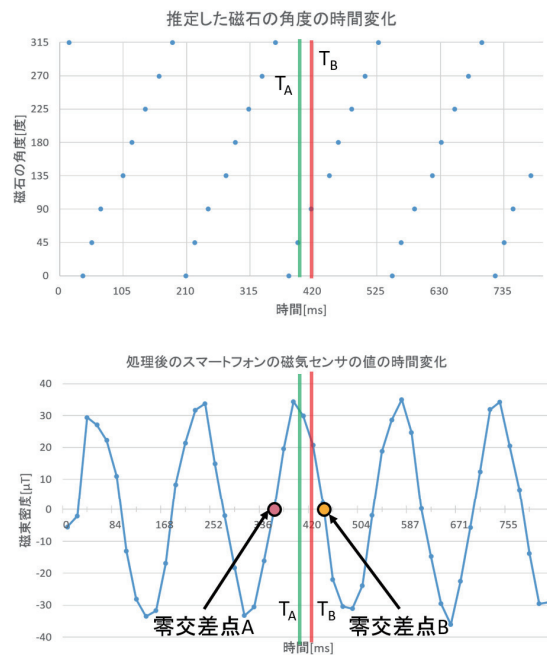


図 13 磁場マーカの角度取得の説明図

Fig. 13 Estimation method of the angle of magnet marker.

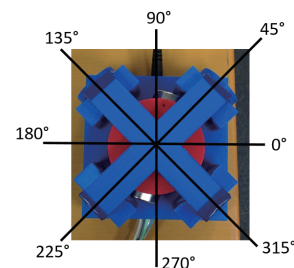


図 14 磁場マーカの磁石の取得可能な角度

Fig. 14 Grain size of stimulation angle.

情報は統合先のパソコンが時間を付与しているためその分遅延が発生していると考えられる．そのため平均的に発生する遅延として 21 ms 分を考慮して計算する．極値をとったタイミングを $T_A + 21$ として，このタイミングに最も近い角度を探索する．図 13 の場合は 90 度が最も近いタイミングとなる．ここから最も近い角度からどのくらいズレているかを計算する．現在の回転周期を T (ms) とすると，1 ms に回転する角度は $\frac{360}{T}$ となる． $(T_B - (T_A + 21)) \times \frac{360}{T}$ で最も近い角度からのズレが計算でき，最も近い角度を R とすると極値を取ったときの磁石の角度 a [度] は式 (4) のようになる．この処理は極大値，極小値に対して行われる．極小値の場合は推定した角度は逆側を向いているため 180 度分加算している．この処理を数秒間行い，最も多く推定された角度をスマートフォンがいる方向と推定している．

$$a = \begin{cases} R + (T_B - (T_A + 21)) \times \frac{360}{T} & (\text{Maximum}) \\ R + (T_B - (T_A + 21)) \times \frac{360}{T} + 180 & (\text{Minimum}) \end{cases} \quad (4)$$

現状ではスマートフォンの磁気センサの情報と磁場マー

カの磁石角度情報を PC で統合しているが、このままでは実用性が低い。そのため今後実用化するには、BLE 通信などを用いて磁場マーカとスマートフォンが直接通信し、スマートフォン側で磁場マーカの磁石角度情報を受けとるよう拡張する必要がある。

6. 評価実験

本章では、磁場マーカとスマートフォンとの位置推定精度を評価するため、距離推定と角度推定のそれぞれに関して実験を行った。

6.1 距離推定の評価

図 8 に距離推定評価実験の概要図を示す。磁場マーカの近くにスマートフォン (Nexus 5) をディスプレイが磁場マーカの方を向くように立てて設置する。磁場マーカとスマートフォンの距離は 20 cm から 200 cm までを 10 cm ずつ変化させて計測した。計測回数は各距離につき 10 回計測した。計測時間は 5 秒間で、磁場マーカの磁石の回転速度は約 6 Hz である。スマートフォンの磁気センサのサンプリング周波数は約 60 Hz である。距離推定は 64 サンプルごとに行い正解距離との誤差を計算し、5 秒間の平均誤差を結果とした。

距離推定実験の結果を図 15 に示す。青色の折れ線グラフは距離推定誤差の平均を表し、各平均から上下に伸びる線は誤差範囲を示している。誤差範囲は標準偏差である。図 15 から距離が 1.4 m 以内であれば 4 cm 以内の誤差で距離が推定できると分かった。誤差範囲は距離が大きくなるほど広がっている。これは磁場マーカから遠くなるほど磁石の影響が小さくなりノイズの影響が相対的に大きくなるためだと考えられる。実験結果からは誤差は磁場マーカとの距離が 1.2 m 以下の場合は正解距離よりも短いと推定されやすく、それ以上の距離では正解距離よりも遠いと推定されやすくなっている。これは使用した近似曲線の特徴であると考えられる。

比較のため別の近似曲線の式を用いて計算した。今回の実験データから導出した近似曲線の式は式 (5) である。

$$x = \left(\frac{y}{5.1636} \right)^{\frac{1}{2.6890}} \quad (5)$$

この式 (5) を用いて今回の実験データの推定距離と誤差を計算した結果が図 16 である。緑色の折れ線グラフは距離推定誤差の平均を表し、各平均から上下に伸びる線は誤差範囲を示している。誤差範囲は標準偏差である。図 15 と図 16 を比較すると図 16 も正解距離が大きくなるほど誤差は大きくなっているが、推定距離が正解距離よりも短く推定される距離は図 15 とは異なる。図 15 よりも図 16 は誤差が全体的に小さくなっているが、これは式 (5) が今回の実験データを用いているため式 (3) より今回の実験データを表すのに適しているためである。

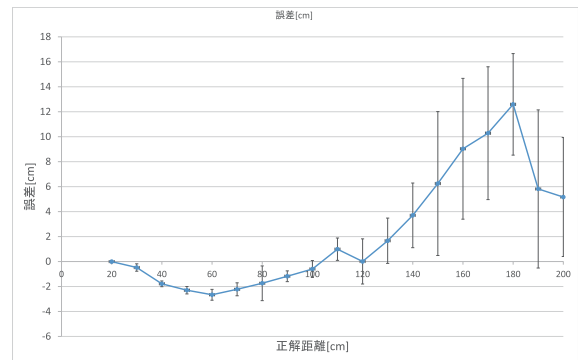


図 15 磁場マーカと端末の正解距離と誤差平均

Fig. 15 Average error of estimated distance between magnet marker and device.

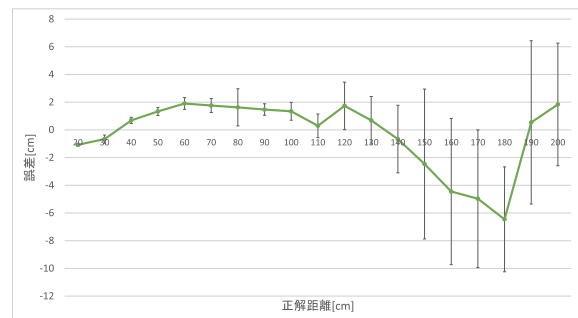


図 16 磁場マーカと端末の正解距離と誤差平均 (式 (5) を用いて導出)

Fig. 16 Average error of estimated distance between magnet marker and device (derived from Eq. (5)).

この実験により磁場マーカまでの距離が 2 m 以内であれば最大で十数 cm の誤差で距離を推定できると分かった。また磁場マーカまでの距離が 1.4 m までであれば 4 cm 以内の誤差で距離を推定可能であり十分な精度であると分かった。これにより実験データから導出した近似曲線の式が距離推定に利用可能であると分かった。

6.2 角度推定の評価

角度推定がどのくらいの精度で推定可能なのかを評価するために実験を行った。スマートフォンの磁場マーカからの方向は 0 度から 315 度までを 45 度ずつ変化させた。磁場マーカとスマートフォンの距離は 50 cm で計測は各角度で 10 回行った。スマートフォンはディスプレイが磁場マーカの方を向くように立てて設置した。計測時間は 5 秒間で角度の推定結果は極値をとった回数分推定を行い、最も多く推定された角度を推定結果としている。

図 17 に実験の結果を示す。横軸は角度誤差で縦軸は累積分布である。80%は誤差 35 度以内に収まっているが、7%程度の割合で 90 度を超える誤差が見られた。全データの平均誤差は 24 度で標準偏差は 29 度となっている。これは 90 度を超える誤差の存在が大きく影響している。90 度以上の誤差になったデータを除いた場合、平均誤差は 17

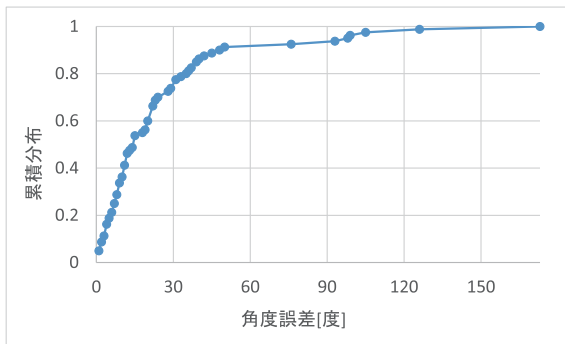


図 17 角度誤差の累積分布

Fig. 17 Cumulative distribution of angle estimation error.

度で標準偏差は 15 度であった。

この実験により磁場マーカから見たスマートフォンの方角推定が平均 24 度の誤差で推定できると分かった。また誤差の標準偏差が 29 度と大きく、最大で 160 度を超える角度誤差が確認された。平均角度誤差と誤差の標準偏差を考慮しても磁場マーカを基準とした東西南北の 4 方向のうちどの方向にスマートフォンがあるかは判定できると分かる。また、90 度を超えるような大きな誤差が生じる原因の解明と対応方法の検討が必要である。

7. 実用化に向けた検討事項

距離推定と角度推定ではスマートフォンが静止しており、スマートフォンの姿勢も磁場マーカの磁場を最も計測しやすい状態を想定して評価実験を行っている。しかし、実環境を想定した場合このように理想的な姿勢とは限らない。そのため、スマートフォンの姿勢によらず距離と角度を推定できるようにする必要がある。また角度推定では、90 度以上の誤差が発生する場合があります。これが平均誤差を大きくしている原因の 1 つとなっている。そのため、このような大きな誤差が発生する原因を解明し対策を行う必要がある。

本稿で提案している磁場マーカと位置推定手法は、静止している状態を前提としており、移動時を考慮できていない。これは角度推定において、極大値と極小値の観測を数秒行い、それを平均化して現在の角度を求めているためである。現在は角度の推定時間は 5 秒間としている。よって、人が移動している場合には角度推定に失敗してしまう。極大値と極小値の観測を 1 回行うだけで角度推定を行うという手法も考えられるが、より高精度な磁気センサデータのノイズ除去手法が必要であろう。静止を前提とした現状の磁場マーカは、たとえば店舗内プロモーションに適用できる。特定の商品棚の前で立ち止まって商品を選んで際には、ユーザはほぼ静止しているため、提案手法による位置推定を適用できる。よって、興味を持っているであろう商品に関する適切な広告をユーザに提示する、というシステムは構築可能である。移動時も磁場マーカでトラッキ

ングできるようになればより応用範囲は広がると思う。すでに我々は磁場マーカを 2 つ用いた歩行者の通過検出は実現している [7] が、磁場マーカのカバーする小さなエリア内での詳細なトラッキングには至っていない。もし可能になれば、どの商品とどの商品を買おうとして迷っているか、といったより詳細なマーケティングデータを取得できるであろう。また、PDR の累積誤差をキャンセルするためのマーカとしても利用可能になる。

また、本手法における距離推定は磁場マーカとスマートフォンの間に遮蔽物がない状態で成立するモデルである。実環境では人体、ポケット、鞆、金属のショッピングカートといった様々なものが磁場マーカとスマートフォンの間に存在する場合があるため、それらを考慮したロバストな距離推定手法に改善する必要がある。

提案手法で使用している距離推定と角度推定には、事前にキャリブレーションが必要である。距離推定のために用いる磁場の変化幅と距離の関係式 (3) や式 (5) は、ネオジム磁石の磁力や磁場マーカの素材、スマートフォンに内蔵される磁気センサの種類によって異なると考えられる。磁場の変化幅と距離の関係式である $x = (\frac{y}{a})^{\frac{1}{b}}$ における a , b を 5.1 節と同様の実験によって得る必要がある。また、角度推定のために用いる式 (4) における遅延時間（この式では 21 秒）は、磁場マーカの情報とスマートフォンの情報を統合する PC の処理能力に応じて変化すると考えられる。そのため、性能の異なる PC を用いる場合には 5.2 節に示した距離推定と角度推定のための事前計測と同様の実験によって遅延時間を計測しなければならない。広い分野での応用のためにはこのようなキャリブレーションを容易に行う方法が必要である。ただし、同じ素材の磁場マーカ、同じスマートフォン、同じ性能の PC の場合には、同一モデルが適用できると考えている。たとえば工場内の人のトラッキングの場面のように、環境内に同一素材の磁場マーカを複数配置し、作業者に同じ種類のスマートフォンを支給し、環境内を同じ種類の PC で統一できれば、その環境内については一回のキャリブレーション作業で提案手法を適用できる。

前章の実験から得られた距離推定誤差には、磁気センサ自体の熱雑音、提案した距離推定モデル自体の誤差が混在していると考えられる。また、誤差の原因の 1 つとして磁気ヒステリシスも影響している可能性がある。考えられる誤差原因の切り分けと、それに基づく高精度化は今後の検討課題の 1 つである。しかし、現行のスマートフォンを用いて前述の距離推定精度を達成できており、これは商品棚においてどの商品の前にユーザが存在しているかを推定できるレベルの精度であり、有用性は高いと考える。

8. おわりに

本稿では、磁場マーカ圏内の詳細な位置を推定するため

のマーカデバイスと検出手法を提案した。提案手法のねらいは高い位置推定精度を必要とする箇所や磁場的に特徴のない場所に磁場マーカを設置し位置推定を行うことである。したがって提案手法は他の位置推定手法との組合せが可能であり、必要な場所に磁場マーカを設置することで所望のより高い位置推定精度が実現できる。提案手法では磁石の磁場を利用しているため電波と異なり狭い範囲に限定して位置推定エリアを生成でき、その範囲内において高い精度で位置推定が可能となっている。

磁場マーカから 2m 以内の範囲でスマートフォンと磁場マーカとの距離と磁場マーカから見たスマートフォンの方角をどのくらいの精度で推定できるかを検証する実験を行った。磁場マーカとスマートフォンとの距離の推定は 2m 以内ならば最大で 13cm 以下の平均誤差で推定でき、1.4m 以内の範囲であれば 4cm 以下の誤差で推定可能である。磁場マーカから見たスマートフォンの方角の推定は平均誤差が 24 度で標準偏差が 29 度の精度であった。

今後の展望として、前章で述べた実用化に向けた検討事項に取り組んでいく予定である。また、磁場マーカと BLE ビーコンとの組合せが考えられる。提案手法は 2m 程度の狭い範囲での高精度な位置推定が可能であるが、それ以上広い範囲で位置推定を行いたい場合は別の位置推定手法を利用しなければならない。そこで、磁場マーカと BLE ビーコンを組み合わせで広い範囲を Bluetooth を用いた位置推定手法で位置推定を行い、一定の範囲内に入ったら磁場マーカで高精度に位置を推定する手法を検討している。

謝辞 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] Kamisaka, D., Muramatsu, S., Iwamoto, T. and Yokoyama, H.: Design and Implementation of Pedestrian Dead Reckoning System on a Mobile Phone, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.94, No.6, pp.1137–1146 (2011).
- [2] Krumm, J. and Hinckley, K.: The NearMe Wireless Proximity Server, *UbiComp 2004: Ubiquitous Computing*, Springer Berlin Heidelberg, pp.283–300 (2004).
- [3] Oksar, I.: A Bluetooth Signal Strength Based Indoor Localization Method, *Proc. International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP2014)*, pp.251–254, IEEE (2014).
- [4] Kemppi, P., Rautinen, T., Ranki, V., Belloni, F. and Pajunen, J.: Hybrid Positioning System Combining Angle-based Localization, Pedestrian Dead Reckoning and Map Filtering, *Proc. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2010)* (2010).
- [5] Ban, R., Kaji, K., Hiroi, K. and Kawaguchi, N.: Indoor Positioning Method Integrating Pedestrian Dead Reckoning with Magnetic Field and WiFi Fingerprints, *Proc. 8th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2015)*, pp.167–172 (2015).
- [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] 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).
- [8] 興梠正克, 酒田信親, 大隈隆史, 蔵田武志: 屋内外歩行者ナビのためのデッドレコニング/GPS/Rfid を統合した組み込み型パーソナルポジショニングシステム, 信学技報, Vol.106, No.234, pp.109–114 (2006).
- [9] LaMarca, A., Hightower, J., Smith, I. and Consolvo, S.: Self-Mapping in 802.11 Location Systems, *Proc. 7th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp2005)*, pp.87–104 (2005).
- [10] Jianyong, Z., Haiyong, L. and Zili, C.: RSSI Based Bluetooth Low Energy Indoor Positioning, *Proc. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2014)* (2014).
- [11] 藤田 迪, 梶 克彦, 河口信夫: Gaussian Mixture Model を用いた無線 LAN 位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.3, pp.1069–1081 (2011).
- [12] Faragher, R. and Harle, R.: Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.33, No.11, pp.2418–2428 (2015).
- [13] IndoorAtlas, 入手先 (<http://www.indooratlas.com/>) (参照 2017-07).
- [14] Ferris, B., Fox, D. and Lawrence, N.: WiFi-SLAM Using Gaussian Process Latent Variable Models, *Proc. 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI2007)*, pp.2480–2485 (2007).
- [15] Wang, H., Sen, S., Elgohary, A., Farid, M., Youssef, M. and Choudhury, R.R.: No Need to War-Drive: Unsupervised Indoor Localization, *Proc. 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys2012)*, pp.197–210 (2012).
- [16] Lee, S., Chon, Y. and Cha, H.: Smartphone-based Indoor Pedestrian Tracking using Geo-Magnetic Observations, *Mobile Information Systems*, Vol.9, No.2, pp.123–137 (2013).
- [17] Angelis, G.D., Pasku, V., Angelis, A.D., Dionigi, M., Mongiardo, M., Moschitta, A. and Carbone, P.: An Indoor AC Magnetic Positioning System, *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol.64, No.5, pp.1275–1283 (2015).
- [18] Blankenbach, J., Norrdine, A. and Hellmers, H.: Adaptive Signal Processing for a Magnetic Indoor Positioning System, *Proc. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2011)* (2011).
- [19] Hu, C., Song, S., Wang, X., Meng, M. 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).
- [20] 新納敏文: 環境磁場の計測と数値シミュレーションに関する研究, 岡山大学学位論文 (2000).
- [21] 石川 登: 鉄筋コンクリート部材の磁場特性と磁気シールド効果に関する研究, 清水建設研究報告, pp.49–53 (1986).
- [22] 電磁気 3, 入手先 (<http://202.253.248.12/gijutu/flow/www.kdcnet.ac.jp/buturi/kougi/buturiko/electcity/elemag3/elemag3.htm>) (参照 2015-11).
- [23] 松永文彦: 携帯電話使用が歩行回避行動に及ぼす影響について, 東京大学修士論文 (2005).
- [24] 永久磁石の設計 3 (チャージモデル), 入手先 (<http://>

www.daido-electronics.co.jp/qa/magnet_qa/documents/magnet_qa08.pdf) (参照 2015-07).

- [25] ミニモーター多段ギヤボックス (12 速), 入手先 (http://www.tamiya.com/japan/products/70190mini_multiratio/index.html) (参照 2015-02).
- [26] ステッピングモータの基本的な構造と動作原理, 入手先 (http://www.orientalmotor.co.jp/tech/webseminar/stkiso_2.1.1/) (参照 2016-01).
- [27] EFM32 Zero Gecko: Silicon Labs, 入手先 (<http://www.silabs.com/products/mcu/32-bit/efm32-zero-gecko/Pages/efm32-zero-gecko.aspx>) (参照 2016-01).

推薦文

DICOMO2016 の発表論文の中で評価員による評価結果が優れていた論文である.

(モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム
研究会主査 稲村 浩)



武島 知勲

2014 年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業. 2016 年同大学大学院修士課程修了. 屋内歩行者の位置推定に関する研究に従事.



梶 克彦 (正会員)

2002 年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業. 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等の研究に従事.



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. 災害情報通信, センサネットワークの研究に従事.



河口 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工学研究科教授. NPO 位置情報サービス研究機構 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.



神山 剛 (正会員)

NTT ドコモサービス・イノベーション部勤務. 2003 年株式会社イーグリス代表取締役, 2006 年同社退社, 東京大学新領域創成科学研究科修士課程修了を経て, NTT ドコモ入社. モバイルコンピューティング, ソフトウェア省電力化, 分散システムに関する研究に従事.



太田 賢 (正会員)

1998 年静岡大学大学院博士課程終了. 博士 (工学). 1999 年 NTT 移動通信網 (株) 入社. 現在, NTT ドコモ先進技術研究所勤務. モバイルコンピューティング, 端末セキュリティ, 分散システムに関する研究に従事. 共著『モバイルネットワーク』, 訳書『コンピュータネットワーク 第 5 版』等. 電子情報通信学会会員. 本会シニア会員.



稲村 浩 (正会員)

1990 年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了. 同年日本電信電話 (株) 入社. 1998 年より NTT ドコモ. 2016 年より公立はこだて未来大学教授. 博士 (工学). モバイルネットワーク, スマートデバイスのシステムソフトウェアに関する研究開発に従事. 電子情報通信学会, ACM, IEEE 各会員. 本会シニア会員.