

回転磁石マーカによるスマートフォンの3次元位置推定手法

渡邊 康祐¹ 廣井 慧² 神山 剛³ 佐野 博之⁴ 塚本 昌克⁴ 片桐 雅二⁴ 池田 大造⁴ 梶 克彦⁵
河口 信夫²

概要: 本研究では動的磁場を発生させる回転磁石マーカを開発し、スマートフォンの3次元位置を推定する手法を提案する。我々はこれまで、回転磁石マーカによる通過検出や位置推定手法について検討してきた。提案手法では、回転磁石マーカが生み出す磁気をスマートフォンに搭載されている磁気センサで検知し、回転磁石マーカのモータの角度データと照らし合わせてスマートフォンの詳細な3次元位置を推定する。まず、回転磁石が3次元極座標に発生させる磁気を検出し、磁気と3次元位置との理論式を構築した。方位角は磁場のノルムが極大値をとる時のモータの角度データを用いて推定し、仰角は磁気データと仰角の関係式を求めて推定する。距離は磁場のノルムが回転磁石マーカからの距離に依存することを利用して推定する。提案手法の推定精度を調べる実験として、回転磁石マーカとスマートフォンの距離を1.0mで固定し、いくつかの位置で方位角、仰角を推定した結果、方位角は全ての計測位置で平均誤差11°以内、仰角は全ての計測位置で平均誤差10°以内で推定可能であった。また、回転磁石マーカとスマートフォンの距離を50cm~4.0mまで50cm刻みとし、方位角と距離の推定を10回ずつ行った結果、方位角推定は3.0°以内であれば平均誤差14°以内、距離推定は3.0m以内の距離であれば平均誤差19cm以内の精度で可能で推定可能であった。提案手法によって、我々のこれまでの手法と比較して、3次元位置推定の実現、推定精度の向上、推定可能距離の延長に成功した。

A Three-Dimensional Smartphone Positioning Method using Spinning Magnet Marker

KOSUKE WATANABE¹ KEI HIROI² TAKESHI KAMIYAMA³ HIROYUKI SANO⁴
MASAKATSU TSUKAMOTO⁴ MASAJI KATAGIRI⁴ DAIZO IKEDA⁴ KATSUHIKO KAJI⁵
NOBUO KAWAGUCHI²

1. はじめに

近年、スマートフォンの普及に伴い様々な場面で位置情報を用いたサービスが利用できるようになった。例えば、GoogleMaps^{*1} や NAVITIME^{*2} といった目的地までの経路をナビゲートするアプリや、Ingress^{*3} や Geocaching^{*4} といった位置情報を利用したゲームアプリなどがある。これ

らのサービスの多くはGPS (Global Positioning System) を利用しているため、人工衛星からの電波が届きにくい屋内での利用が困難になるという問題が存在する。屋内における詳細な位置推定が可能になれば、ショッピングモールなどの広い屋内でのナビゲートや、イベント会場における展示物の周辺での人の動きを把握できるようになると考えられる。そのためには、スマートフォンの3次元位置を数cm程度の誤差で推定する手法やスマートフォンの姿勢を推定する手法が必要である。

現在様々な屋内位置推定手法が研究されている。例えば、Wi-Fiのアクセスポイントから発せられる電波を用いた手法 [1][2] や Bluetooth を用いた手法 [3][4]、UWB (Ultra Wide Band) を用いた手法 [5]、超音波を用いた手法 [6] などがある。これらの手法にはそれぞれ長所と短所が存在

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 NTT ドコモ サービスイノベーション部

⁴ NTT ドコモ 先進技術研究所

⁵ 愛知工業大学 情報科学部

*1 GoogleMaps: <https://www.google.co.jp/maps>

*2 NAVITIME: <https://www.navitime.co.jp/>

*3 Ingress: <https://www.ingress.com/>

*4 Geocaching: <https://www.geocaching.com/play>

する。Wi-Fiのアクセスポイントを用いた手法では10m～100m程度の精度で位置推定が可能だが、数cm程度の詳細な位置情報を必要とする場面では有効ではない。また遮蔽物が存在すると推定精度に影響が出るといった問題がある。Bluetoothを用いた手法では数m～数10m程度の精度で位置推定が可能だが、詳細な位置推定が必要な条件では有効ではないと考えられる。UWBを用いた手法では数cm～1m程度の精度で位置推定が可能であるが、位置推定を行うために専用の端末が必要となる。超音波を用いた手法では数m以内の距離であれば数cm～数10cm程度の精度で位置推定が可能であるが、超音波を発するスピーカとスマートフォンとの間に遮蔽物が存在すると推定精度に大きく影響するといった問題がある。

我々はこれまで磁気焦点を当て、屋内位置推定手法の研究を行ってきた。スマートフォンには磁気センサが搭載されており、数 μT 以下の磁気を検知可能である。この磁気センサは地磁気を利用した電子コンパスなどのアプリに使われている。磁気を用いるメリットとして、Wi-FiやBluetooth、UWBなどの電波を用いた手法と異なり、物質を構成する原子による散乱が起きにくく、さらに電子の励起エネルギーとして吸収されにくいこと、また遮蔽物の影響を受けにくい点などが挙げられる。

我々は回転磁石マーカと呼ばれる装置を用いて振動する動的磁場を意図的に発生させ、その磁気を用いて通過検出[8]やスマートフォンの位置推定を行う手法[9]を検討した。動的磁場を用いることのメリットとして、地磁気などの環境磁気が存在する状況下でも信号処理によって動的磁場の判別が可能になることが挙げられる。

本研究では回転磁石マーカを用いたスマートフォンの3次元位置推定について提案する。表1に我々のこれまでの研究(参考文献[8][9])との比較を示す。まず、磁気と3次元位置との関係を明らかにするため、回転する磁石が発生させる磁気を理論的に考察した。次に、推定精度を高めるためステッピングモータを用いて磁石を回転させる回転磁石マーカを開発した。これによって、以前の研究[9]では回転磁石マーカによる方位角推定が 45° ずつ8方向でしかできなかったが、モータのステップ角度である 3.6° ずつ100方向での方位角推定が可能になり、モータの角度データを位置推定に利用することで、推定精度の向上を実現した。さらに、これまでは2次元的位置推定しかできなかったが、仰角を推定する手法を検討したことでスマートフォンの3次元的位置推定が可能になった。そして、計測した磁気データにノイズを軽減する処理を加えたことで推定精度が向上し、推定可能な距離を2.0m～3.0m延長することにも成功した。

本論文の構成を以下に示す。まず2章で屋内位置推定の関連研究について述べる。次に、3章で回転磁石マーカを用いた3次元位置推定手法について述べ、4章で評価手法の

表1 回転磁石マーカを使ったこれまでの研究との比較

	推定項目	推定可能方位角	推定距離限界 [m]
これまでの研究(参考文献[8][9])	通過検出, 位置(2次元)	8方向	2.0
本研究	位置(3次元)	100方向	3.0

検討について述べる。そして、5章で提案手法の評価実験について述べ、最後に6章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

磁気を用いた位置推定にはいくつかの手法が存在する。我々が行った研究では、Murataらが建物内の残留磁気を用いた屋内位置推定手法[7]を検討している。この手法では、あらかじめ建物内に存在している残留磁気を計測してFingerprintを作成し、それを用いることで屋内位置推定を行う。しかし、この手法では推定精度が環境に大きく依存してしまう問題があった。

また、磁気を用いた3次元位置推定システムとしてPolhemus社製のPOLHEMUS^{*5}が存在する。これは、使用者がセンサを装着し、専用の磁場発生装置による磁気をセンシングして、モーションキャプチャーなどのリアルタイム位置測位を可能にするものである。しかし、専用の機器を腕や腰に装着する必要があるため、多数の人の位置を推定する場面では有効ではないと考えられる。

磁石を用いた位置推定手法として、Schlageterらは2次元的に配置したホールセンサを用いて磁石の3次元位置を推定する手法[10]を検討している。この手法は磁石が発生させる磁気を磁気センサで検知して磁石の3次元位置を推定する。また、磁気を発生させるために永久磁石を用いているため、コストを低く抑えられる。しかし、地磁気などの環境磁気が存在している状況下では永久磁石が発生させた磁気の判別が難しく、推定可能な場所が限定されると考えられる。また複数の磁気センサを必要とするため、スマートフォンを用いた位置推定に利用することはできない。

動的磁場を用いた位置推定手法として、Papernoらは回転するコイルに電流を流して発生する動的磁場を利用した位置推定手法[11]を検討している。この手法ではコイルの回転速度や磁気センサが検知した磁気の情報から3次元位置を推定する。Huらは3つのコイルをそれぞれ直交するように配置し、それらに別々の周波数の交流電流を流すことで発生する動的磁場を利用した位置推定手法[12]を検討している。この手法では磁気センサは異なる3つの周波数で振動する動的磁場を検知し、その磁気データから磁気センサの3次元位置を推定する。これらの手法は動的磁場を

*5 POLHEMUS: <http://www.ddd.co.jp/polhemus/>

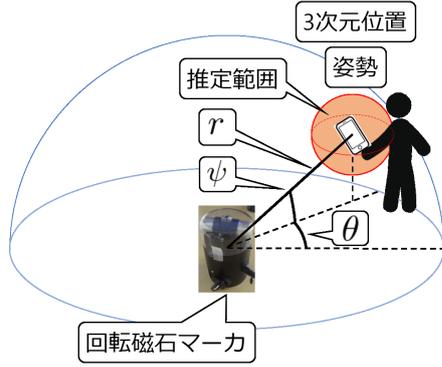


図 1 回転磁石マーカによる位置推定のイメージ

用いた手法であるため、環境磁気の影響下での位置推定が可能であると考えられる。しかし、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り、維持コストの面で問題がある。また磁気を発生させるために数 kHz の交流電流を用いているが、スマートフォンのサンプリング周波数は数 10Hz~100Hz 程度であるため、サンプリング定理から数 kHz の周波数成分を持つ磁気を正しく復元することはできない。

以上の関連研究から、スマートフォンを用いて位置推定するためには、低いサンプリング周波数でも検知できるような低周波で振動する磁気を用いる必要があり、維持コストを低く抑えるために電流を用いることなく磁気を発生させる手法の検討が必要であると考えられる。

我々は磁石を回転させて発生する磁場から位置を推定する手法を検討した、その推定手法の内容を次の章から述べる。

3. 3次元位置推定手法

磁気センサは x, y, z 軸成分を持っており、それらの値はスマートフォンの 3次元位置及び姿勢と関係している。そのため、回転磁石による磁場を調べれば、スマートフォンの 3次元位置推定と姿勢推定が可能になると考えられる。図 1 に本提案のコンセプトを示す。本研究は回転磁石マーカを中心とした 3次元極座標におけるスマートフォンの位置 (r, θ, ψ) を回転磁石マーカによる磁気とそのモータ角度から推定する手法を提案する。

本章ではまず、回転する磁石が 3次元位置に発生させる磁気の理論式を導出する。次に、磁気値とモータの回転角度からスマートフォンの 3次元位置を推定する方法を検討する。以後、 r を距離、 θ を方位角、 ψ を仰角と呼ぶことにする。

3.1 回転磁石による磁気

推定を行うため、回転磁石が位置 (r, θ, ψ) に発生させる磁気の式を求める。3次元極座標における磁気を図 2 のよ

うに定義する。ここで、 ω はモータの回転速度、 t は時刻である。次に、磁気を直交座標系での磁気成分 H_x, H_y, H_z で表すことを考える。図 2 の H_r, H_φ のようにそれぞれ定義すると H_x, H_y, H_z は $H_r(r, \theta, \psi), H_\varphi(r, \theta, \psi)$ を用いて次のように書くことができる。

$$H_x = H_r(r, \theta, \psi) \cos \psi \cos \theta + H_\varphi(r, \theta, \psi) \cos \psi \cos \theta_\varphi \quad (1)$$

$$H_y = H_r(r, \theta, \psi) \cos \psi \sin \theta + H_\varphi(r, \theta, \psi) \cos \psi \sin \theta_\varphi \quad (2)$$

$$H_z = H_r(r, \theta, \psi) \sin \psi + H_\varphi(r, \theta, \psi) \sin \psi_\varphi \quad (3)$$

ここで、磁石が発生させる磁気を磁気双極子が発生させる磁気で近似できると仮定する。磁気双極子が発生させる磁気は距離 r が磁気双極子間の距離よりも十分に大きい時、円電流が発生させる磁気と等しいとみなせる。このことから、 $H_r(r, \theta, \psi), H_\varphi(r, \theta, \psi)$ は次のように表すことができる。

$$H_r(r, \theta, \psi) \rightarrow H_r(r) \cos \varphi \quad (4)$$

$$H_\varphi(r, \theta, \psi) \rightarrow H_\varphi(r) \sin \varphi \quad (5)$$

これらの関係より、式 (1)(2)(3) は次の式に書き直せる。また、以後 $H_r(r), H_\varphi(r)$ を単に H_r, H_φ と表す。

$$H_x = H_r \cos \varphi \cos \psi \cos \theta + H_\varphi \sin \varphi \cos \psi \cos \theta_\varphi \quad (6)$$

$$H_y = H_r \cos \varphi \cos \psi \sin \theta + H_\varphi \sin \varphi \cos \psi \sin \theta_\varphi \quad (7)$$

$$H_z = H_r \cos \varphi \sin \psi + H_\varphi \sin \varphi \sin \psi_\varphi \quad (8)$$

次に図 2 より、 $\varphi, \theta_\varphi, \psi_\varphi$ と方位角 θ 、仰角 ψ 、モータの回転角 ωt との関係式を導くことができる。

$$\cos \varphi = \cos \psi \cos(\theta - \omega t) \quad (9)$$

$$\cos \theta_\varphi = -\frac{\sin^2 \psi \cos(\theta - \omega t)}{\sqrt{1 - \cos^4 \psi \cos^2(\theta - \omega t)}} \quad (10)$$

$$\cos \psi_\varphi = \sqrt{\frac{1 - \cos^4 \psi \cos^2(\theta - \omega t)}{1 - \cos^2 \psi \cos^2(\theta - \omega t)}} \quad (11)$$

このことから H_x, H_y, H_z を方位角 θ 、仰角 ψ 、モータの回転角 ωt で表すと次のようになる。

$$H_x = H_r \cos^2 \psi \cos \theta \cos(\theta - \omega t) - H_\varphi \frac{\sin^2 \psi \cos(\theta - \omega t)}{\sqrt{1 - \cos^2 \psi \cos^2(\theta - \omega t)}} \quad (12)$$

$$H_y = H_r \cos \psi \sin \theta \sqrt{1 - \cos^2 \psi \cos^2(\theta - \omega t)} - H_\varphi \frac{\sin(\theta - \omega t)}{\sqrt{1 - \cos^4 \psi \cos^2(\theta - \omega t)}} \quad (13)$$

$$H_z = H_r \sin \psi \cos \psi \cos(\theta - \omega t) + H_\varphi \frac{\sin \psi \cos \psi \cos(\theta - \omega t)}{\sqrt{1 - \cos^2 \psi \cos^2(\theta - \omega t)}} \quad (14)$$

これらの式を用いて、方位角 θ と磁気、仰角 ψ と磁気の関係式を導出する。

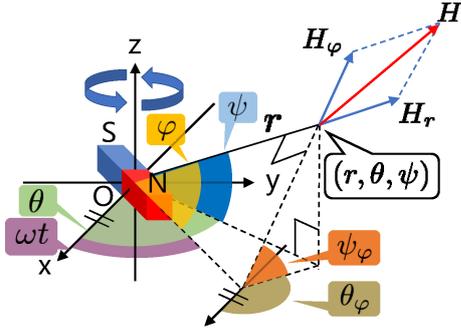


図 2 回転磁石による磁気

3.2 方位角推定

磁場のノルムとモータの回転角度 ωt を利用して方位角 θ を推定する。スマートフォンの位置 (r, θ, ψ) での磁場のノルムは式 (12)(13)(14) から次の式になる。

$$H = \sqrt{H_\varphi^2 + (H_r^2 - H_\varphi^2) \cos^2 \psi \cos^2(\theta - \omega t)} \quad (15)$$

この式から仰角 $\psi \neq 90^\circ$ とすると、 $\theta - \omega t = 0^\circ, 90^\circ$ の時、磁場のノルムが最大になることがわかる。つまり磁場のノルムが最大となった時のモータの角度 ωt から方位角 θ を推定できる。ただしノルムが最大となる方位角 θ が 2 つ存在するため、推定される方位角 θ が 2 つ存在する問題がある。

3.3 仰角推定

磁気の直角座標成分 H_x, H_y, H_z を用いて仰角 ψ を推定する。式 (12)(14) に位置 $\theta = \omega t$ 、式 (13) に $\theta = \omega t + \pi/2$ を代入すると次の式が導ける。

$$H_x = -H_\varphi + (H_r + H_\varphi) \cos^2 \psi \quad (16)$$

$$H_y = H_\varphi \quad (17)$$

$$H_z = (H_r + H_\varphi) \cos \psi \sqrt{1 - \cos^2 \psi} \quad (18)$$

式 (16)(17)(18) を仰角 ψ について解くと次の式になる。

$$\psi = \arccos \left(\frac{H_x + H_y}{\sqrt{(H_x + H_y)^2 + H_z^2}} \right) \quad (19)$$

ここで、 H_x, H_z は $\theta = \omega t$ で H_y は $\theta - \omega t = 0^\circ, 90^\circ$ でそれぞれ最大値を取るため、式 (19) における H_x, H_y, H_z にそれぞれの磁気データの振幅を代入すれば仰角 ψ を推定できる。ただし、ノルムを利用した方位角 θ の推定とは異なり、磁気の直角座標成分 H_x, H_y, H_z はスマートフォンの姿勢に依存するため、あらかじめスマートフォンの姿勢を取得し、回転磁石マーカと座標系と一致させる必要がある。

3.4 距離推定

磁場のノルムの振幅が回転磁石マーカからの距離に依存することを利用して、スマートフォンの回転磁石マーカからの距離を推定する。我々は以前の研究 [9] で回転磁石マーカを用いた距離推定の検討を行った。その際、回転磁石マー

カとスマートフォン間の距離とノルムの振幅との関係を計測し、その計測値から求めた近似曲線を用いて距離を推定した。2章で磁石による磁気を磁気双極子による磁場で近似したので、円柱磁石が中心軸上に発生させる磁気は距離に反比例すると仮定する。近似曲線による推定精度の違いを調べるため、式 (20)(21) の 2 つに対して近似曲線を求めた。ここで、 h_{norm} は磁場のノルムの振幅、 d は回転磁石マーカからの距離、 A, B, C はフィッティングパラメータである。

$$h_{norm} = Ad^{-B} + C \quad (20)$$

$$h_{norm} = Ad^{-B} \quad (21)$$

4. 評価手法の検討

本章では、3章で示した 3次元位置推定手法の評価手法を検討する。本研究の目標はスマートフォンの 3次元位置を推定することであるが、今回は最初の段階として、方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r をそれぞれ個別に推定し、それらの推定精度を確認することを目的とした。

まず、推定精度を向上させるため新たに作成した回転磁石マーカについて説明する。次に、それぞれの実験での共通設定について説明する。最後に、推定精度を向上させるために磁気データに対して施したノイズの影響を軽減する処理について説明する。

4.1 回転磁石マーカ的设计

評価実験を行うため、新たに回転磁石マーカを作成した。これまでの我々の研究 [9] で作成した回転磁石マーカでは方位角 θ を 45° 刻みの 8 方向でしか推定できなかった。今回我々は推定精度を高めるため、磁石を回転させるモータにステッピングモータ (MERCURY MOTOR SM-42BYG011-25) を採用した。ステッピングモータを用いることでモータの角度データを方位角 θ の推定に利用できる。さらに、モータのステッピング角度である 3.6° 刻みの 100 方向での方位角 θ の推定が可能になった。このモータに対して 3D プリンタで作成した台を用いて磁石を回転軸に固定する。図 3 に実際に作成した回転磁石マーカを示す。

次に、このステッピングモータを RaspberryPi^{*6} に接続し、モータの角度データと時刻データを RaspberryPi に記録する。次に、スマートフォンと RaspberryPi の時刻を NTP (Network Time Protocol) によって同期させる。実験後、RaspberryPi に記録されたデータとスマートフォンに記録されたデータをパソコンに送信し、それぞれのデータを照らし合わせることでそれぞれの推定を行う。実験の概要を図 5 に示す。

4.2 実験の共通設定

実験に使用するスマートフォンは iPhone 6 Plus、磁気セ

*6 RaspberryPi: <https://www.raspberrypi.org/>



図 3 回転磁石マーカー

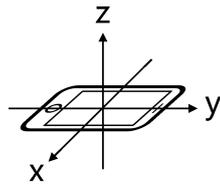


図 4 スマートフォンの座標系

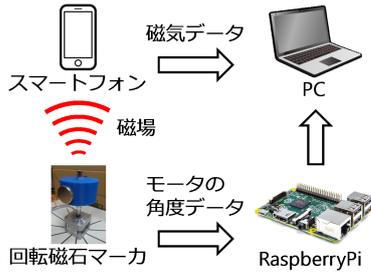


図 5 実験の概要

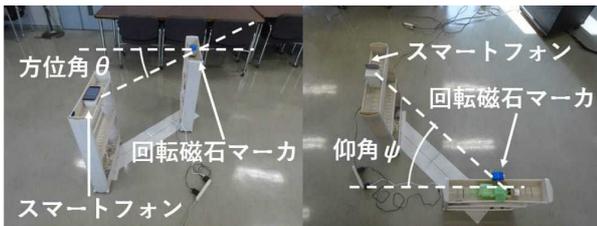


図 6 実験の様子, (左) 方位角推定, (右) 仰角推定

ンサのサンプリング周波数は 100Hz とした。モータの回転速度は 1Hz とし, 方位角 $\theta = 0^\circ$ の位置から回転を始めるものとした。今回の実験では, 回転磁石マーカーと座標系が一致するようにスマートフォンの姿勢を固定して実験を行った。実験の際のスマートフォンの座標系は図 4 の通りである。また各計測において, 環境磁気の実験結果に与える影響を抑えるため, スマートフォンを中心に回転磁石マーカーを移動させて計測した。実際に行った実験の様子を図 6 に示す。

4.3 磁気データに対する処理

ここでは磁気データに含まれるノイズの影響を軽減するために行った処理について説明する。回転磁石マーカーからの距離が離れるに従い, 回転磁石マーカーによる磁気の影響よりもノイズの影響が相対的に強くなり, 磁気データから回転磁石マーカーによる磁気を判別することが困難になる。そのため, 得られた磁気データに対して以下で述べる処理を施した。またこれらの処理を施した例として, 回転磁石マーカーからの距離 2.0m, 方位角 $\theta = 0^\circ$ で計測した磁気データの x 軸成分の場合を挙げる。

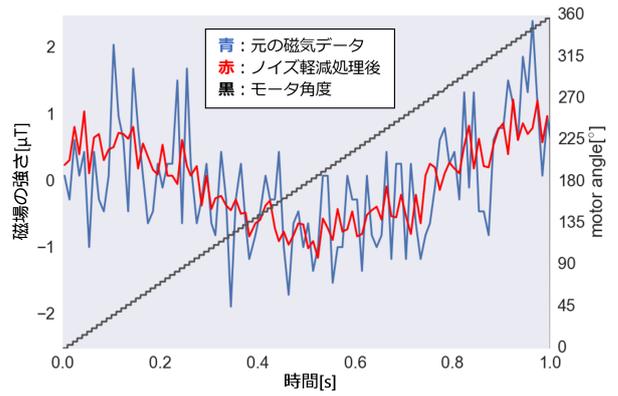


図 7 ノイズ軽減前後の比較

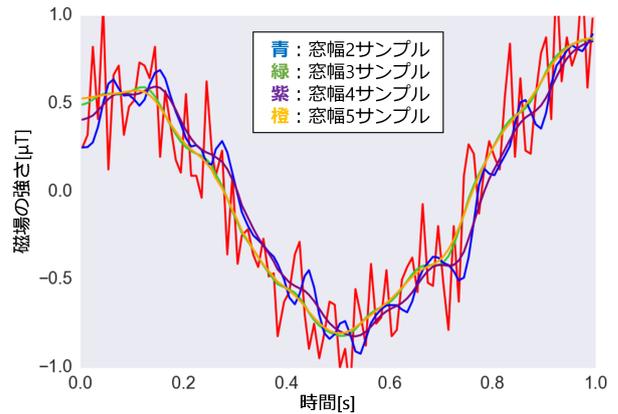


図 8 窓幅の違いによる結果の比較

4.3.1 ノイズの軽減

磁気データに含まれるノイズがランダムなものであると仮定すると, 振動の位相を揃えた磁気データを足し合わせることでノイズによる影響が軽減されると考えられる。そこでまず, 得られた磁気データから計測時間 10 秒分のデータを取り出し, そのデータをモータの回転周期である 1 秒ごとに区切って 10 個のデータに分割する。次に, これら 10 個のデータの時刻を全て 0~1 秒とし, データの平均をとる。

元の磁気データと実際に処理を施した後の磁気データを図 7 に示す。この図から, 処理を施す前と比べて磁気データの振動の特徴がより明確に表れていることがわかる。これは前述の処理によってノイズが軽減したためと考えられる。また, モータの回転角度が 0° の時に磁気データの x 軸成分が最大になっており, 3 章で求めた式 (12) に方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$ を代入した場合に対応していることがわかる。

4.3.2 平滑化処理

前述の処理によってノイズの影響を軽減できたと思われるが, 依然としてノイズの影響は残っており, 推定結果に影響を及ぼすと考えられる。そこで移動平均を利用して磁気データの平滑化を行った。適切な平滑化を行うため, 窓幅と移動平均を計算する回数をいくつか変えて移動平均を計算した。

図 8 に移動平均処理の回数を 5 回で固定し, 窓幅をいく

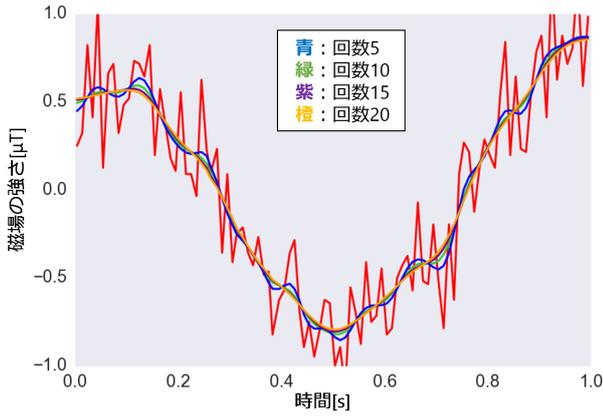


図 9 移動平均処理の回数による結果の比較

つか変えて計算した結果を示す。またここでは、図を見やすくするために縦軸のスケールを図 7 と変えている。窓幅 2 サンプルでは平滑化が十分に行われていないように見えるが、窓幅 3 サンプル以降では結果に目立った変化が表れなかった。このことから、今回は窓幅 3 サンプルで十分な処理が行われていると判断した。

次に、図 9 に窓幅 3 サンプルで固定し、移動平均処理の回数をいくつか変えて実行した結果を示す。移動平均処理の回数が 5 回の際では十分に平滑化されていないように見えるが、10 回以降では結果に目立った変化が表れなかった。このことから、今回は移動平均処理の回数 10 で十分な処理が行われていると判断した。

以上の結果から、窓幅 3 サンプル、移動平均処理の回数 10 として磁気データの平滑化を行った。

4.3.3 カーブフィッティング

これまでの処理で得られたデータに対してカーブフィッティングを行い、それぞれの軸成分ごとの磁気データの近似曲線を求めた。3 章での議論から、磁気センサが検知する磁気の強さを以下の式 (22) で定義される正弦波でカーブフィッティングした。また今回は回転磁石マーカのモータの回転速度が 1Hz だとわかっているものとした。ここで、 h は磁気の値、 D, E, F はフィッティングパラメータである。

$$h = D \sin(2\pi(\omega t + E)) + F \quad (22)$$

以上の処理を x, y, z 軸それぞれの磁気データに対して行い、それら 3 つの近似曲線から方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r を推定する。

5. 評価実験

本章では 4 章で検討した評価手法による実験の結果を示す。今回の実験では方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r をそれぞれ推定し、個別に推定結果を評価する。

5.1 方位角推定の評価

回転磁石マーカとスマートフォンの距離を 1m で固定し、

表 2 方位角 θ の推定結果

方位角 [°]	0		45		90		135		180	
	θ'_1	θ'_2								
平均誤差 [°]	10	9	11	10	1	4	6	3	4	2
標準偏差 [°]	5	3	3	3	5	5	6	3	6	6

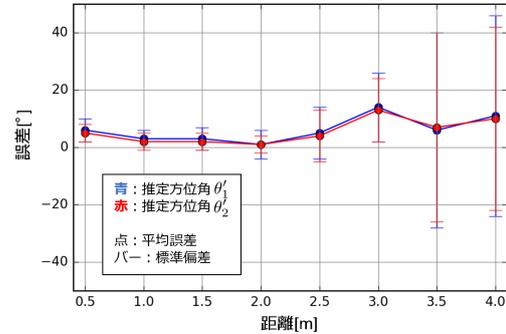


図 10 距離ごとの方位角 θ の推定精度

方位角 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ の 8 か所で計測した。計測時間は各場所で 10 秒、推定回数は各方位角 θ で 10 回ずつ行った。結果を表 2 に示す。それぞれの推定結果は小数点以下を四捨五入した。2 章で触れたように、本手法では推定される方位角が 2 つ存在する。それらの推定方位角を θ'_1, θ'_2 とする。ここで、平均誤差は 10 回の推定方位角の平均から正解方位角を引いた値の絶対値をとった値である。次に、方位角の推定精度と磁気マーカからの距離との関係を知るため、方位角を $\theta = 0^\circ$ で固定し、回転磁石マーカからの距離が 50cm ~ 4.0m を 50cm 間隔の 8 か所場所で方位角 θ の推定を行った。結果を図 10 に示す。それぞれの推定結果は小数点以下を四捨五入した。距離 3.0m までの推定では、平均誤差の最大値が 14° 以下、標準偏差が 12° 以下の精度であった。一方、3.5m、4.0m での計測では、平均誤差が 11° 以下ではあるものの、標準偏差がいずれも 30° を超えており、推定精度の安定性が減少していることがわかる。

5.2 仰角推定の評価

仰角推定を行う際、距離を一定に保ったまま様々な仰角で計測することが望ましいが、一定の距離を保ったまま仰角 ψ のみを変化させて計測を行うことは難しい。そこで今回の計測では回転磁石マーカとスマートフォンを同じ向きに横向きにして仰角を推定した (図 6)。

スマートフォンの設置場所は回転磁石マーカからの距離を 1m で固定し、仰角 $\psi = -60^\circ, -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の 5 か所で計測した。計測時間は各場所で 10 秒、推定回数は各場所で 10 回ずつ行った。また方位角 θ が 2 つ推定されてしまうため仰角 ψ も 2 つ推定される。2 つの推定仰角をそれぞれ ψ'_1, ψ'_2 とする。

結果を表 3 に示す。それぞれの推定結果は小数点以下を

表 3 仰角 ψ の推定結果

仰角 [°]	-60		-30		0		30		60	
	ψ'_1	ψ'_2								
平均誤差 [°]	8	10	5	2	4	3	3	4	0	4
標準偏差 [°]	10	2	2	2	1	1	1	1	2	2

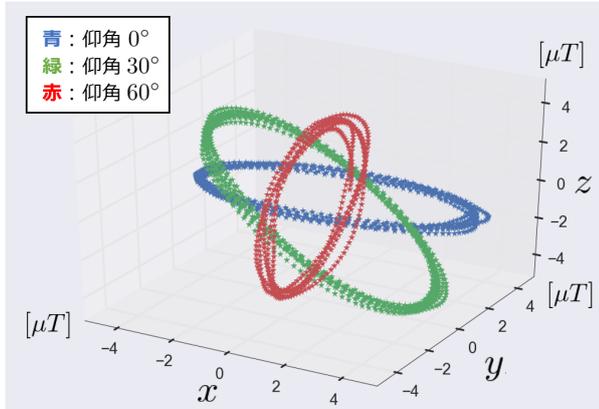


図 11 仰角ごとの磁気データ

四捨五入した。推定仰角 ψ'_1, ψ'_2 の平均誤差は 10° 以内となっており、方位角 θ の推定と同程度の推定精度であることがわかる。

標準偏差は仰角 -60° の場合を除けば 2° 以下となっており、方位角 θ の推定よりも低い値であることがわかる。これは仰角 ψ の推定に磁気の数値のみを用いたため、モータ角度 ωt を用いた方位角 θ の推定とは異なり、モータの回転の安定性の影響を受けにくいためだと考えられる。

また仰角 -60° においてのみ標準偏差が大きくなっている原因は、計測時に回転磁石マーカを横向きに倒したことにより、仰角の推定結果に影響が出たと考えられる。また、仰角推定時の磁気データの様子を図 11 に示す。図から回転磁石マーカが発生させる磁気ベクトルがスマートフォンを中心に楕円に近い形状を描くことがわかる。さらに仰角 ψ によってその楕円が傾いていき、仰角 $\psi = 60^\circ$ でほぼ垂直になっている様子がわかる。

5.3 距離推定の評価

回転磁石マーカからのスマートフォンの距離を推定するため、距離とスマートフォンが検知するノルムの振幅との関係を調べておく必要がある。そのため、回転磁石マーカとスマートフォンとの距離を $30\text{cm} \sim 4.0\text{m}$ まで 10cm ごとに変化させ磁気データを計測した。計測時は方位角 $\theta = 0^\circ$ 、仰角 $\psi = 0^\circ$ とし、計測時間はそれぞれ 15 秒とした。

この実験によって得られた磁気データに対して 3 章で述べた処理を施し、磁場のノルムの近似曲線を求めた。求めたノルムの近似曲線の極大値から極小値を引き、2 で割った値をノルムの振幅とした。これらの 38 個のデータに対してカーブフィッティングを行うことで近似曲線を求めた。

求める近似曲線は 2 章で示した式 (20)(21) の 2 つに対し

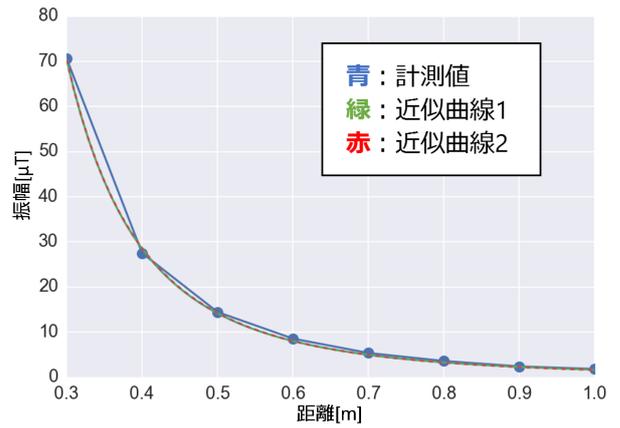


図 12 距離と磁場のノルムの振幅の関係 ($0.3\text{m} \sim 1.0\text{m}$)

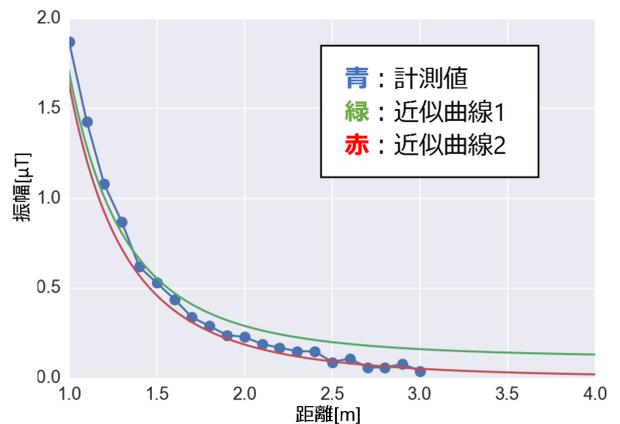


図 13 距離と磁場のノルムの振幅の関係 ($1.0\text{m} \sim 4.0\text{m}$)

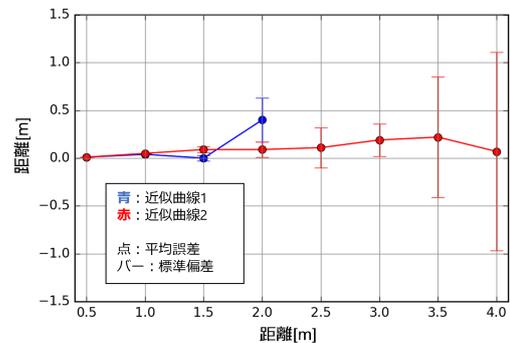


図 14 距離推定の推定精度

て行った。以後、式 (20) を近似曲線 1、式 (21) を近似曲線 2 と呼ぶことにする。カーブフィッティングの結果、近似曲線 1 のパラメータは $A = 1.590, B = 3.146, C = 0.111$ 、近似曲線 2 のパラメータは $A = 1.636, B = 3.124$ となった。決定係数で評価した結果、近似曲線 1 は 0.9997 、近似曲線 2 は 0.9996 であったため、2 式ともよく近似できていると考えられる。これらの近似曲線の様子を図 12, 13 に示す。

次に、求めた近似曲線を用いて距離推定を行った。推定した距離は $50\text{cm} \sim 4.0\text{m}$ を 50cm 間隔の 8 か所、計測時間は 1 回あたり 15 秒、各計測場所で 10 回計測を行い、その

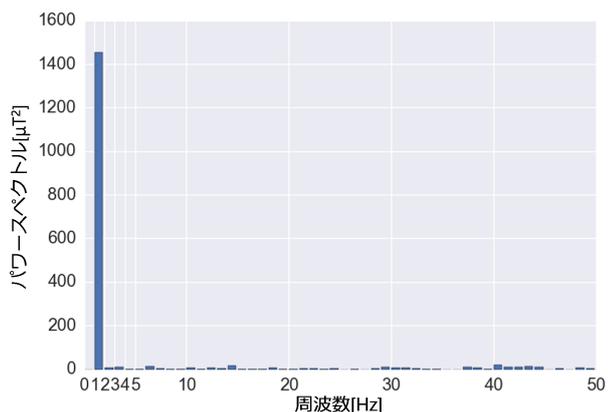


図 15 2.0m での磁気の x 成分のパワースペクトル

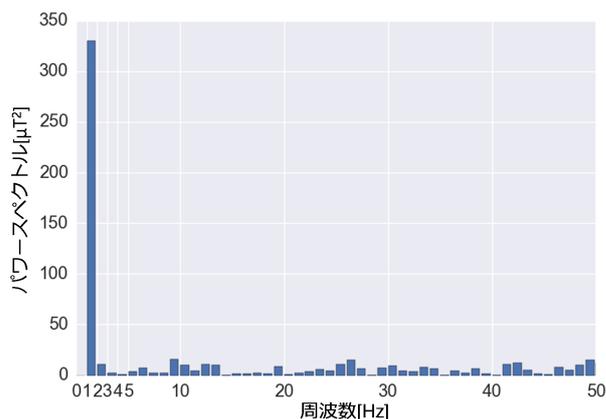


図 16 2.5m での磁気の x 成分のパワースペクトル

平均誤差と標準偏差を導出した。その結果を図 14 に示す。推定結果は小数第三位以下を四捨五入した。

近似曲線 1 による推定結果は 1.5m までは近似曲線 2 よりも高い精度となっているが、2.0m での推定で大きくズレが生じ、2.5m 以降では距離推定できなかった。この理由は図 13 (緑) からわかるように、近似曲線 1 は 1.0m 以上の距離で計測データからのズレが生じており、さらに、ノルムの振幅の値がフィッティングパラメータ $C = 0.111$ より小さくなると、それに対応する距離が存在しないため推定が不可能になるからである。一方、近似曲線 2 による推定結果は 2.0m 以上の推定では近似曲線 1 よりも精度が高く、また 2.5m 以上の距離でも推定が可能であった。距離 3.0m までの推定では平均誤差が 19cm 以下、標準偏差が 17cm 以下の精度であった。距離 3.5m、4.0m の推定では、平均誤差が 22cm 以下ではあるものの、それぞれ標準偏差が 50cm 以上、1.0m 以上となっており、距離が遠ざかるにつれて推定精度の安定性が減少していることがわかる。

回転磁石による磁気の影響を調べるため、それぞれの実験での磁気 x 軸成分のパワースペクトルを図 15~図 19 に示す。距離 3.0m までのパワースペクトルでは、モータの回転速度である 1Hz にピークが表れていることがわかる。しかし、距離 3.5m 以上では 1Hz のピークはノイズと同程度の大きさになっており、スマートフォンが回転磁石マーカによる磁気を検知しているかどうかを判別することが困難になると考えられる。このピークの減少をどれだけ抑えられるかが今後の課題である。

ここで、今回の結果と我々がこれまでに行った研究 [9] を比較する。表 4 に比較結果を示す。過去の研究では、1.4m までの推定では平均誤差 4cm 以内、2.0m までの推定では平均誤差 13cm 以内の推定精度であった。今回の結果は 2.0m までの推定で平均誤差 9m 以内、標準偏差 8cm 以内であるため、過去の結果と比べて推定精度が向上していることがわかる。また、過去の研究では 2.0m までしか距離推定ができなかったが、今回の研究では 3.0m 以上の距離でも距離推定が可能になった。

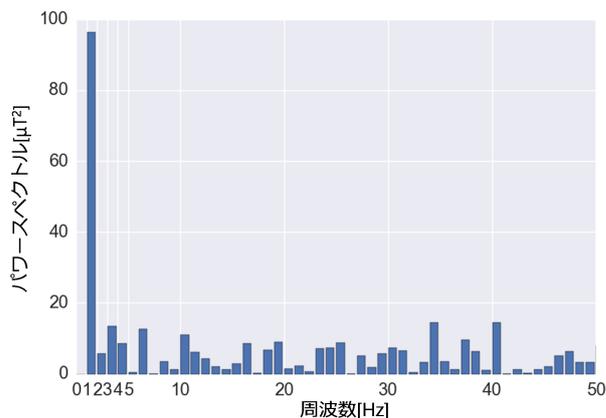


図 17 3.0m での磁気の x 成分のパワースペクトル

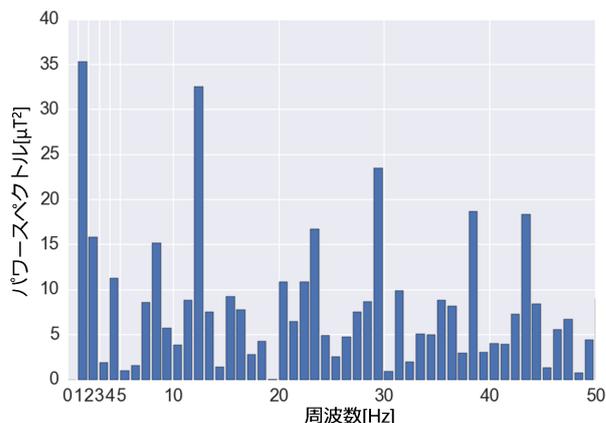


図 18 3.5m での磁気の x 成分のパワースペクトル

表 4 これまでの研究との距離推定誤差の比較

	1.4m まで	2.0m まで	3.0m まで
これまでの研究 (参考文献 [9])	4cm	13cm	測定不能
本研究	1cm 以下	9cm	19cm

今回の距離推定に用いた近似曲線はいずれも決定係数が 1 に近い値であったが、図 13 から 1.0m~4.0m の範囲では必ずしも十分に近似できていないように思われる。そのため、より適切な近似曲線を求めることで推定精度を向上さ

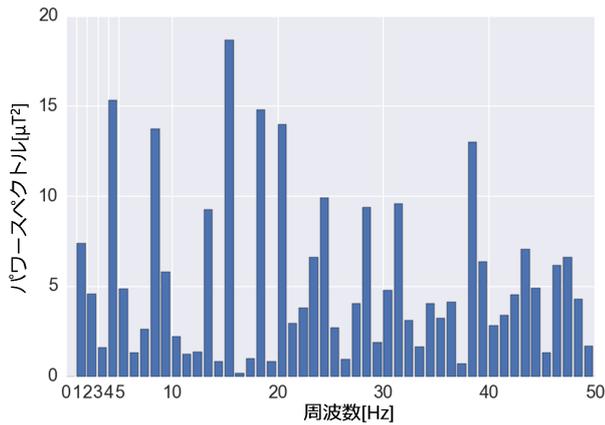


図 19 4.0m での磁気の x 成分のパワースペクトル

せられる可能性がある。

また距離が離れるにしたがって標準偏差が増加していく原因は、距離が離れるにしたがってノイズの影響が大きくなり、3章で示した方法でノイズの影響を十分に軽減できなくなるためだと考えられる。そのため、推定精度を向上させるためノイズの影響を軽減する処理をさらに工夫する必要がある。

6. まとめと今後の課題

本研究では回転磁石マーカを用いたスマートフォンの3次元位置推定手法を検討した。検討手法では回転磁石マーカが発生させる動的磁場をスマートフォンの磁気センサで検知し、その磁気データからスマートフォンの3次元位置を推定する。評価実験により、距離を1mで固定した場合の実験では、方位角 θ が平均誤差 11° 以下、標準偏差 6° 以下、仰角 ψ が平均誤差 10° 以下、標準偏差 10° 以下で推定が可能であった。次に回転磁石マーカからの距離と推定精度との関連を確認する実験を行った。距離 r を0.5m~4.0mを0.5m刻みで行った実験では、距離 r が平均誤差19cm以下、標準偏差21cm以下、方位角 θ が平均誤差 14° 以下、標準偏差 12° 以下で推定が可能であった。

今回検討した手法では3m以内の範囲であれば3次元的位置の推定が可能である。また今回、NTTドコモとの共同研究で回転磁石マーカのプロトタイプを製作し、先に行われた情報処理学会第79回全国大会において展示を行った。図20にその様子を示す。この展示ではスマートフォンの3次元位置を回転磁石マーカによって推定し、その高さに応じてディスプレイに表示されている広告の位置が変化するということが行われた。

今後の課題として、推定精度の向上と推定可能距離の拡大のため、磁気データにおけるノイズの影響を抑える手法の検討する必要がある。また、今回の実験ではスマートフォンが静止している状態で推定したが、今後リアルタイムでのスマートフォンの3次元位置推定の実現を検討する必要がある。さらに、今回は3次元位置推定のみを考えたが、今

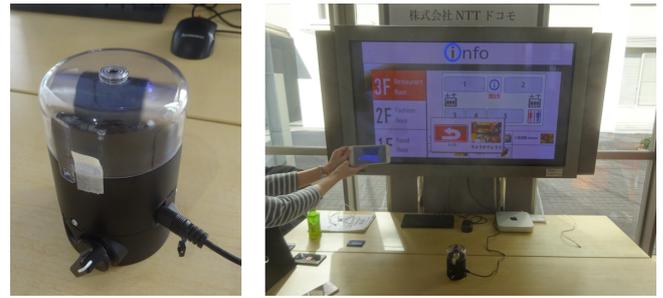


図 20 情報処理学会でのデモの様子

後スマートフォンの姿勢推定を検討する予定である。姿勢推定によって推定方位角 θ が2つ存在する問題も解決可能だと考えられる。

参考文献

- [1] Krumm, J., Hinckley, K., The NearMe Wireless Proximity Server, In Proceedings of The International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp '04), pp.283-300, 2004.
- [2] Zhuang, Y., Syed, Z., Georgy, J., 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.
- [3] Oksar, I., A Bluetooth Signal Strength Based Indoor Localization Method, In Proceedings of 2014 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), pp.251-254, 2014.
- [4] Rida, M., Liu, F., Jadi, Y., Algawhali, A., Askourih, A., Indoor Location Position Based on Bluetooth Signal Strength, In Proceedings of the 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering, pp.769-773, 2015.
- [5] Muller, P., Wymeersch, H., Piche, R., UWB Positioning with Generalized Gaussian Mixture Filters, Mobile Computing, IEEE Transactions on, Vol.13, Issue10, pp.2406-2414, 2014.
- [6] Medina, C., Segura, J., Angel, D., Ultrasound indoor positioning system based on a low-power wireless sensor network providing sub-centimeter accuracy, Sensors (Switzerland), Vol.13, Issue.3, pp.3501-3526, 2013.
- [7] Murata, Y., Kaji, K., Hiroi, K., Kawaguchi N., Pedestrian Dead Reckoning based on Human Activity Sensing Knowledge, In Proceedings of the 2nd International Workshop on Human Activity Sensing Corpus and its Application (HASCA2014), pp.797-806, 2014.
- [8] 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, 2017.
- [9] 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. DICOMO2016.
- [10] Schlageter, V., Drljaca, P., Popovic, R., Kucera, P., A Magnetic Tracking System based on Highly Sensitive Integrated Hall sensors. JSME International Journal Series C, Vol.45, Issue.4, pp.967-973, 2002.
- [11] Paperno, E., Sasada, I., Leonovich, E., A New Method for Magnetic Position and Orientation Tracking, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.37, Issue.41, pp.1938-1940, 2001.

- [12] Hu, C., Song, S., Wang, X., Meng, M., Li, B., A novel positioning and orientation system based on three-axis magnetic coils, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.48, Issue.7, pp.2211-2219, 2012.