

# 磁束密度のフーリエ成分に基づく回転磁気マーカの位置推定

千葉 昭宏<sup>1,a)</sup> 奈良 高明<sup>1</sup>

受付日 2019年7月26日, 採録日 2020年1月16日

**概要:** 屋内での高精度な位置情報は、工場での無人搬送車の制御や商業施設での人のナビゲーションなど、様々なアプリケーションにとって不可欠である。本研究では、回転する磁石を磁気マーカとして用いて、3軸磁気センサで観測される磁束密度の回転周波数に関するフーリエ成分から、磁気マーカの方位角、天頂角、距離を直接推定する手法を提案する。本手法では、磁気マーカの回転に関する位相を知ることなく定位可能で、センサとマーカとの通信は不要である。また、観測される信号の最大値を検知する必要がないため、ノイズに対しても頑健という特徴がある。磁石を回転させた磁気マーカの3次元位置を磁気インピーダンスセンサを用いて推定したところ、 $z = 150$  mmの $xy$ 平面(4,000 mm × 2,500 mm)において、絶対誤差の平均は91.7 mmであった。また、磁気マーカとセンサの間に金属の遮蔽物があったとしても同程度の精度で定位可能であった。

**キーワード:** 逆問題, 屋内位置推定, 磁気インピーダンスセンサ

## Localization of a Rotating Magnetic Marker on the Basis of the Fourier Components of Its Magnetic Flux Density

AKIHIRO CHIBA<sup>1,a)</sup> TAKA AKI NARA<sup>1</sup>

Received: July 26, 2019, Accepted: January 16, 2020

**Abstract:** Indoor localization of robots and vehicles under the effect of occlusion is still a challenge. This paper presents a novel method for estimating the position of a magnetic marker, which is attached to a robot or moving vehicle, for indoor localization. We derive a formula to compute the azimuth and zenith angles as well as the distance of a rotating magnet from the Fourier components of the magnetic flux density at a marker's rotating frequency. The method does not require the temporal change in the direction of the magnetic moment, which eliminates the necessity of communication between the sensor and marker, and enhances robustness to environmental noise. The method is experimentally verified for average errors of the estimated three-dimensional position of 91.7 mm in a 4,000 mm by 2,500 mm domain where  $z = 150$  mm. Also, we verified that the marker can be estimated even if the marker and sensor are separated by a metal shield.

**Keywords:** inverse problems, indoor localization, magnetic impedance sensor

### 1. はじめに

屋内における正確な位置情報の把握は、搬送ロボットの制御 [1] や工場での無人搬送車の管理 [2], 人のナビゲーションなど [3], [4], [5], 様々なアプリケーションを実現するために必要不可欠である。しかしながら、屋内では、Global Positioning System (GPS) を使用できないという課題が

あった [6].

従来、屋内定位手法として、様々な手法が提案されている。Parkら [7] は、パッシブ型の Radio Frequency Identification (RFID) タグを床に敷設し、移動するロボットに搭載した RFID リーダでタグを読み取ることにより、ロボットの位置を推定している。しかし、精度良く推定するためには、大量のタグを高密度に敷設する必要があり、敷設の手間が課題であった。また、Nagaiら [8] は、屋内の位置と、そこで観測される地磁気を対応させて記録したマップを用いて、観測された地磁気のパターンをマップから検索する

<sup>1</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8654, Japan  
<sup>a)</sup> chiba@alab.t.u-tokyo.ac.jp

ことで、マップ内での位置を推定する手法を提案している。しかし、事前にマップの作成が必要で、什器の移動などによって観測される地磁気のパターンに変化が生じた場合は、再度マップを作り直す必要があるといった課題があった。また、simultaneous localization and mapping (SLAM) を用いた手法も提案されている [9], [10], [11] が、環境が変化したときに再学習が必要という課題は変わらない。また、WiFi [12], [13] や Bluetooth Low Energy (BLE) [14] などの電波強度に基づく手法も提案されている。浦野ら [14] は、屋内において移動する被験者に BLE タグを持たせ、環境中に配置したスキャナを用いて電波強度を観測し、パーティクルフィルタによって位置を推定している。事前学習が必要ないという利点がある一方で、23 m × 70 m の範囲における推定された位置の平均誤差は 3.6 m である。こうした比較的周波数の高い電波を用いた手法では、人体による電波強度の減衰や什器などの金属によるマルチパスの影響で誤差が大きいという課題が指摘されている [6]。こうした環境中の人などの動的遮蔽物の影響を考慮して位置推定に有効な BLE ビーコンを選択することで、推定精度を向上させる手法 [15] も提案されているが、実環境での平均誤差は 70 cm にとどまっている。工場や倉庫などを走行するロボットや無人搬送車、ベルトコンベアを流れる荷物などの移動体の位置推定を考えたとき、人が往来し、金属製の棚に囲まれるような環境において、数 m 四方の範囲で数 cm から十 cm 程度の精度の位置推定が求められると考えられる。

上記の電波を用いた手法に対して、磁場を用いた手法は、人体や非磁性の金属の影響を受けにくいという利点がある。一方で、磁束密度の大きさが距離の 3 乗に反比例して減衰することから定位範囲が限定されるという課題があるが、電波を用いた手法を併用することで解決することも考えられる。そこで、本研究では、金属や人体の影響を受けずに、屋内の数 m 四方の範囲において、誤差数 cm から十 cm 程度の高精度な定位を実現するために、磁石と磁気センサを用いた手法を提案する。本論文では、位置を推定する対象に取り付けられ磁場を発する磁場源を「磁気マーカ (または、単にマーカ)」と呼ぶ。ロボットや無人搬送車のような移動体に磁場を発生させる磁気マーカを取り付け、その磁場を環境中に配置した磁気センサで計測し、そのセンサから見た相対的な磁気マーカの位置を把握することを想定する。

従来、磁気双極子を磁気マーカとして用いて、その磁場を磁気センサアレイで観測し、非線形最小自乗問題を解くことにより、磁気マーカの位置を推定する方法が提案されている [16], [17], [18], [19], [20]。また、磁気双極子を水平面内で回転させることで発生する特徴的な磁場を用いて位置推定する手法も提案されている。Paperno ら [21] は、2 つの直交するコイルに位相が 90 度異なる信号を入力する

ことにより、磁気モーメントが回転するような磁場を発生させている。計測用のコイルで観測される磁場の大きさが最大、または、最小になる時刻を検知することによって、そのコイルの 3 次元位置を推定している。また、Watanabe ら [22] は、磁石をモータで機械的に回転させた磁気マーカを提案し、スマートフォンに内蔵された磁気センサで観測された磁場の強度が最大になったときに、磁気マーカが水平面内で向いている方向を検出することで、マーカから見たスマートフォンの方位角を推定している。さらに、仰角および距離も観測される磁場から推定することで、半径 3 m の範囲において、方位角の平均誤差 1°, 仰角の平均誤差 4°, 距離の平均誤差 9 cm で、スマートフォンの 3 次元位置推定を実現している。Kim ら [23] は、ロボットアームの先端に取り付けられた回転する磁石を用いて、人の体内にあるカプセル内視鏡の位置を推定している。しかしながら、これらすべての手法では、電気的または機械的に変化させられる磁気モーメントの方向を時系列として把握する必要がある。そのために、中央処理系 (PC) を用意して、磁気センサの信号だけでなく、磁気マーカを回転させるモータの回転角度の情報も取り込んだうえで処理する必要がある。さらに、磁気センサと磁気マーカとで時刻の同期も必要になる。結果として、定位システムが複雑になるという課題がある。また、磁場の最大値の検出は、ノイズの影響を受けやすく、頑健性に課題がある。

そこで、本研究では、回転する磁気双極子を備えた磁気マーカを用いて、センサから見たマーカの位置を磁気モーメントの向きを知ることなく直接推定する手法を提案する。これにより、磁気マーカを回転させるモータの回転角度の情報をいわずに磁気センサの情報のみから定位可能な簡便なシステムを実現する。本論文では、方位角と天頂角、センサとマーカ間の距離が磁束密度のフーリエ成分 (マーカ回転周波数成分) を用いて直接表せることを示す。この結果、観測された磁束密度に対して直交検波することで、磁気モーメントの位相を把握することなく、マーカの位置を推定することができる。これにより、Signal-to-noise (SN) 比が低くなるような場合であっても安定した位置推定の実現が期待される。

本論文の構成は、以下のとおりである。2 章では、観測される磁場のフーリエ成分から磁気双極子の位置を定位する方法を述べる。3 章で、実験により、提案手法の精度を検証する。さらに、移動するマーカの位置をリアルタイムに計測できることを検証する。また、センサとマーカ間に遮蔽物がある場合の精度についても検証する。5 章で結論を述べる。

## 2. 提案手法

### 2.1 問題設定

図 1 に示すように、3 軸磁気センサは、原点に配置され、

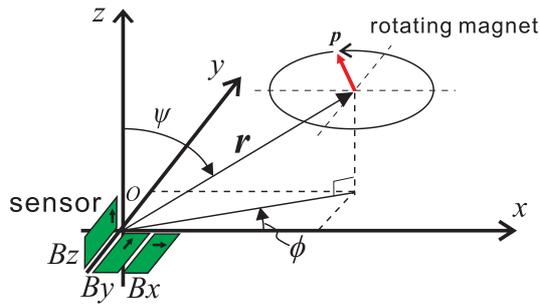


図 1 問題設定  
Fig. 1 Problem setting.

その座標系と世界座標系は一致しているものとする。磁気マーカーが、位置

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \psi \cos \phi \\ r \sin \psi \sin \phi \\ r \cos \psi \end{pmatrix} \quad (1)$$

に配置され、その磁気モーメントが

$$\mathbf{p}(t) = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p \cos(\omega t + \theta_0) \\ p \sin(\omega t + \theta_0) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

で表されるように  $xy$  平面に平行に回転するとき、原点で観測される磁場は、

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3(\mathbf{p}(t) \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^5} - \frac{\mathbf{p}(t)}{|\mathbf{r}|^3} \right) \quad (3)$$

で表される。ここで、 $\mu_0$  は真空の透磁率である。 $p$  は磁気モーメントの大きさで、既知である。 $\omega$  は磁気モーメントの回転の角周波数であり、未知である。実際には観測される磁束密度の時系列に Fast Fourier Transform (FFT) を施し、得られる最大のピーク周波数を  $\omega$  とすることによって決定される。 $\theta_0$  は磁気モーメントの回転の初期位相であり、未知である。本研究では、 $0 \leq \phi < \pi$ ,  $0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2}$  とする。これは、磁気マーカーがセンサの前面かつ上方に存在すると仮定することに相当し、センサを屋内の壁側の床に設置して屋内の移動体を定位する状況を想定したものである。

本研究では、式 (3) で表される磁束密度を観測し、センサから見たマーカーの方位角  $\phi$ 、天頂角  $\psi$ 、距離  $r$  を推定する。提案手法では、初期位相によらずに、つまりは、時刻  $t$  における位相  $\omega t + \theta_0$  を知ることなくマーカーの位置を推定する。

## 2.2 提案手法

ここでは、磁束密度のフーリエ成分から  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $r$  を推定する定位式を導く。まず、角周波数  $\omega$  のときの磁束密度の 1 次のフーリエ  $\cos$  係数とフーリエ  $\sin$  係数を

$$I_k = \int_0^{NT} B_k \cos \omega t dt, \quad Q_k = \int_0^{NT} B_k \sin \omega t dt \quad (4)$$

と置く。ここで、 $T = \frac{2\pi}{\omega}$  で、 $N$  は整数、 $k = x, y, z$  である。このとき、式 (2), (3) から、 $\theta_0$  を消去することができ、

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \frac{(I_x + Q_y)(I_y + Q_x) + (I_y - Q_x)(I_x - Q_y)}{(I_x + Q_y)(I_x - Q_y) - (I_y + Q_x)(I_y - Q_x)} \quad (5)$$

が得られる。すなわち、方位角  $\phi$  を  $B_x$  と  $B_y$  の回転周波数におけるフーリエ成分で表すことができる。同様にし、天頂角  $\psi$  についても、 $I_k$ ,  $Q_k$  を用いて

$$\psi = \arctan \sqrt{\frac{(I_x - Q_y)^2 + (Q_x + I_y)^2}{I_z^2 + Q_z^2}} \quad (6)$$

と表すことができる。

式 (5), (6) のより簡単な表現を求めるために、ここで  $B_x + iB_y$  を観測量とすることを考える。式 (2), (3) から

$$B_x + iB_y = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \left( \frac{3 \sin^2 \psi}{2} e^{-i(\omega t + \theta_0 - \phi)} + \frac{3 \sin^2 \psi - 2}{2} e^{i(\omega t + \theta_0 - \phi)} \right) e^{i\phi} \quad (7)$$

と表されるから、 $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分は、

$$\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{-i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3 \sin^2 \psi - 2}{2} NT e^{i\theta_0} \quad (8)$$

$$\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3 \sin^2 \psi}{2} NT e^{-i\theta_0} e^{i2\phi} \quad (9)$$

と書ける。同様にして、 $B_z$  は

$$B_z = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3 \sin \psi \cos \psi}{2} (e^{-i(\omega t + \theta_0 - \phi)} + e^{i(\omega t + \theta_0 - \phi)}) \quad (10)$$

と表され、その正負の周波数成分は

$$\int_0^{NT} B_z e^{-i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3 \sin \psi \cos \psi}{2} NT e^{i\theta_0} e^{-i\phi} \quad (11)$$

$$\int_0^{NT} B_z e^{i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3 \sin \psi \cos \psi}{2} NT e^{-i\theta_0} e^{i\phi} \quad (12)$$

と表される。以上より、まず、式 (9), (12) より、 $\psi$  は

$$\psi = \arctan \left| \frac{\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt}{\int_0^{NT} B_z e^{i\omega t} dt} \right| \quad (13)$$

と表され、天頂角を求めることができる。さらに、式 (8), (9) から、

$$\int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt = \left( \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{NT}{2} \right)^2 (3\sin^2\psi)(3\sin^2\psi - 2)e^{i2\phi} \quad (14)$$

となり、式(14)左辺の複素量の偏角から方位角を求めることができる。ここで、式(14)の偏角は、 $3\sin^2\psi - 2$ の正負によって変化することに注意しなければならない。つまり、 $3\sin^2\psi - 2$ が正の場合は、

$$\arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt = 2\phi \quad (15)$$

となり、

$$\phi = \frac{\arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt}{2} \quad (16)$$

となる。一方で、 $3\sin^2\psi - 2$ が負の場合は、

$$\arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt = 2\phi + \pi \quad (17)$$

となり、

$$\phi = \frac{\arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt}{2} - \frac{\pi}{2} \quad (18)$$

となる。こうして、式(13)より $\psi$ を推定した後、方位角 $\phi$ は、 $3\sin^2\psi - 2 > 0$ のとき、式(16)を用いて、 $3\sin^2\psi - 2 < 0$ のとき、式(18)を用いて求められる。

さらに、センサとマーカの間の距離は、次の手順で求められる。式(8)、(9)より、

$$\left[ \frac{4\pi r^3}{p\mu_0 NT} \right]^2 \left[ \left| \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \right|^2 + \left| \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt \right|^2 \right] = \left[ \frac{3\sin^2\psi}{2} \right]^2 + \left[ \frac{3\sin^2\psi - 2}{2} \right]^2 \quad (19)$$

となる。式(19)の左辺は0とならないので、任意の $\psi$ に対して次式が成り立つ。

$$r = \left[ \frac{p\mu_0 NT}{8\pi} \times \sqrt{\frac{(3\sin^2\psi)^2 + (3\sin^2\psi - 2)^2}{\left| \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \right|^2 + \left| \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt \right|^2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

こうして、磁気モーメントの大きさ $p$ が既知であれば、推定された $\psi$ を式(20)に代入することによって、距離 $r$ を推定することができる。

式(13)、(16)、(18)、(20)は、任意の $\theta_0$ に対して成立するため、提案手法では、位相を知ることなく、直交検波によって得られる $B_x + iB_y$ と $B_z$ のマーカ回転周波数成分から磁気マーカの3次元位置を推定することができる。

### 3. 実験

提案手法の有効性を確かめるために、磁石と磁気センサを用いた実験を実施し、屋内での磁気マーカの位置推定の精度を評価した。

#### 3.1 装置

図2と図3にマーカとセンサをそれぞれ示す。マーカは磁石とそれを回すモータ(KM-1, Keigan)で構成され、磁石にはパイプ型のネオジウム磁石(長さ27mm, 外径23mm, 内径13mm)を4つ直列に接続したものをを用いた。磁石付近での磁束密度の大きさは最大50.5mTであった。モータの回転数は、240rpm(4Hz)に設定した。センサには、磁気インピーダンス(magnetic impedance: MI)センサ(MI-CB-1DH, Aichi Micro Intelligent)を用いた。図3に示すように、3つのMIセンサをそれぞれの磁場の計測方向が直交するように配置した。3つのMIセンサを、発振器(MI-CB-1DH-OSC, Aichi Micro Intelligent)に接続し、同期して計測した。それぞれのセンサの出力を、AD変

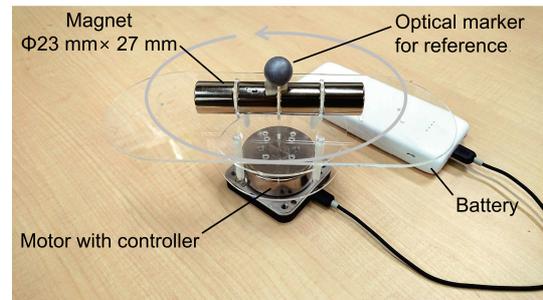


図2 磁気マーカ  
Fig. 2 Magnetic marker.

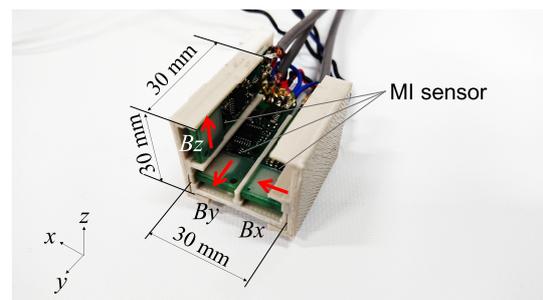


図3 センサユニット  
Fig. 3 Sensor unit.

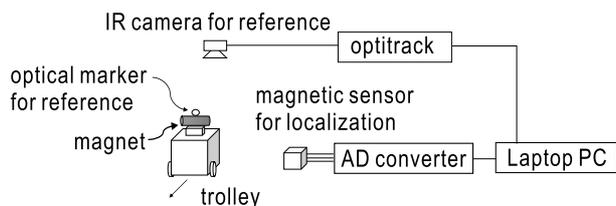


図 4 実験セットアップ

Fig. 4 Experimental setup.

換ボード (NI9215, National Instruments) を用いて 2kHz で同期してサンプリングした。

### 3.2 手順

図 4 に、実験環境の模式図を示す。マーカを台車に載せ、 $xy$  平面に平行な平面上を移動させた。実験では、以下の手順でマーカの位置を推定した。まず、磁気マーカから発せられる磁場を、センサで 1 秒間計測し、FFT によりピーク周波数を計算した。次に、 $\omega$  を FFT で検出されたピーク周波数、 $NT = 1s$  として計測した信号に対して、式 (8), (9), (12) を計算した。そして、式 (13) から天頂角  $\psi$ 、式 (16) または式 (18) から方位角  $\phi$  を推定した。センサとマーカとの距離を、式 (20) を用いて推定した。磁場の計測と同時に、光学式の追跡装置 (Flex 3, Optitrack) を用いて参照用の位置を計測し、提案手法によって推定された位置と参照用の位置の誤差を評価した。実験データの計測から推定処理まで、MATLAB R2018b を用いて処理した。

なお、磁気モーメントの大きさ  $p$  は、 $\mathbf{r}^\dagger = (x^\dagger, y^\dagger, z^\dagger)$ ,  $x^\dagger = -1,000, -500, \dots, 1,000$  mm,  $y^\dagger = 1,000, 1,500, \dots, 3,000$  mm,  $z^\dagger = 350$  mm であらかじめ計測した磁束密度に対して、式 (19) を用いて、最小自乗問題を解くことで  $p$  を決定した。

また、マーカがセンサに近づきすぎて、センサ出力の振幅が MI センサの出力の最大値および最小値である  $\pm 2.5V$  を超えてしまう場合は、以下の方法で信号の振幅を推定した：センサの出力が負から正、または、正から負に変化する時刻を 0 秒とし、0 秒付近のサチュレーションを起こしていない信号  $d_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ) とその時刻  $t_i$  に対して、最小自乗問題  $\sum_{i=1}^M |d_i - (A \sin \omega t_i + c)|^2 \rightarrow \min$  を解くことにより、信号の振幅  $A$  と定数  $c$  を求めた。

### 3.3 実験条件

提案手法の有効性を確認するために、4つの実験を実施した。まず、提案手法の精度を検証するために、マーカをおおよそ  $\mathbf{r}^* = (x^*, y^*, z^*)$ ,  $x^* = -2,000, -1,500, \dots, 2,000$  mm,  $y^* = 500, 1,000, \dots, 3,000$  mm,  $z^* = 150, 350$  mm の位置に配置し、それぞれの位置で提案手法によって 10 回位置を推定し、図 8 の \*印で示す位置との誤差と標準偏差を評価した (実験 1)。なお、\*印で示す位置は光学式の追跡

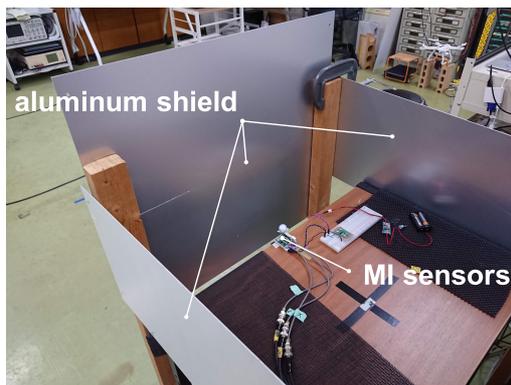


図 5 実験の様子 (実験 3)

Fig. 5 Experimental environment in experiment 3.

装置で観測した位置であり、実際の位置とは多少のずれがある。次に、移動する対象の追跡精度を検証するために、 $4,000$  mm  $\times$   $2,500$  mm の範囲において、 $xy$  平面内でマーカを移動させながら 0.25 秒間隔で位置を推定した (実験 2)。ただし、実験 2 では、 $NT = 0.25s$  とした。さらに、センサ周辺に存在する金属が位置推定に与える影響を検証するために、実験 1 と同様の条件でセンサ付近にアルミ板を配置した状態で位置を推定し、誤差と標準偏差を評価した (実験 3)。図 5 に示すように、厚さ 2 mm のアルミ製の金属板をセンサの周囲三方に配置した環境で、マーカの位置を推定した。実験 1 と同様に図 10 の \*印の位置に配置されたマーカの位置を推定した。最後に、センサとマーカが完全に遮蔽されるような状態での実験として、センサを置いた部屋の外にマーカを置いた状態で、マーカの位置を推定した (実験 4)。図 11 (a), 図 11 (b) に示すように、磁気マーカを部屋の外に配置した。センサとマーカは、鉄筋コンクリートの壁と鉄製の扉、鉄製の棚で隔離された。マーカは、 $\mathbf{r}^+ = (x^+, y^+, z^+)$ ,  $x^+ = -4,000, 2,000, \dots, 4,000$  mm,  $y^+ = 4,000, 5,000$  mm,  $z^+ = 860$  mm の  $xy$  平面に平行な平面上を移動させた。部屋の中で観測された磁束密度から、部屋の外に置かれたマーカの位置を 10 回推定し、その誤差と標準偏差を評価した。部屋の外では光学式の追跡装置を使用できなかったため、参照用の位置はメジャーを用いて計測した。

### 3.4 実験結果

図 6 に  $(x, y, z) = (0, 3,000, 150)$  mm において観測された磁束密度の時系列を示す。MI センサの感度は  $1V/\mu T$  なので、この例では、おおよそ  $0.3\mu T$  の磁束密度が観測されていることになる。図 7 にセンサ-マーカ間の距離と観測された MI センサの信号強度の関係を示す。図 8 に実験 1 の結果を示す。提案手法で推定された位置の平均値を○印で、光学式の追跡装置で計測した参照用の位置を\*印で示した。標準偏差はエラーバーで表した。推定された位置と参照用の位置の絶対誤差の平均と標準偏差は、

表 1 推定された位置と参照用の位置との誤差 (実験 1)

Table 1 The errors and standard deviations of the estimated positions of experiment 1.

	$\phi$ , deg.	$\psi$ , deg.	$r$ , mm	$x$ , mm	$y$ , mm	$z$ , mm
$z = 150$ mm	$2.0 \pm 1.9$	$0.6 \pm 0.3$	$19.8 \pm 11.3$	$63.2 \pm 75.2$	$48.7 \pm 54.2$	$23.2 \pm 14.6$
$z = 350$ mm	$2.3 \pm 2.0$	$0.5 \pm 0.4$	$21.4 \pm 13.4$	$71.5 \pm 71.8$	$46.2 \pm 52.3$	$19.6 \pm 13.1$

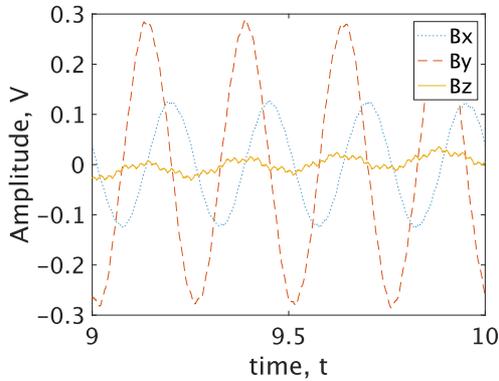


図 6 観測された磁束密度

Fig. 6 Measured magnetic flux density.

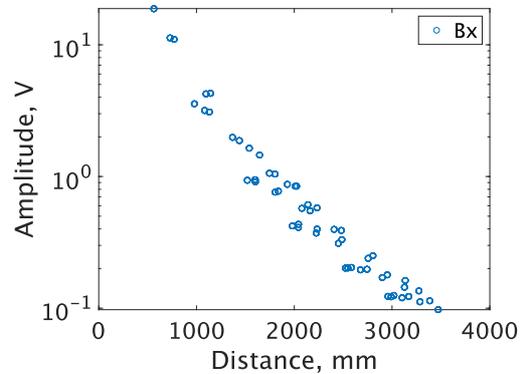


図 7 マーカ距離と観測される信号強度の関係

Fig. 7 Relationship between the distance of the marker and the amplitude of MI sensor.

表 2 推定された 3 次元位置と参照用の位置との誤差

Table 2 Three-dimensional errors and standard deviations of the estimated positions.

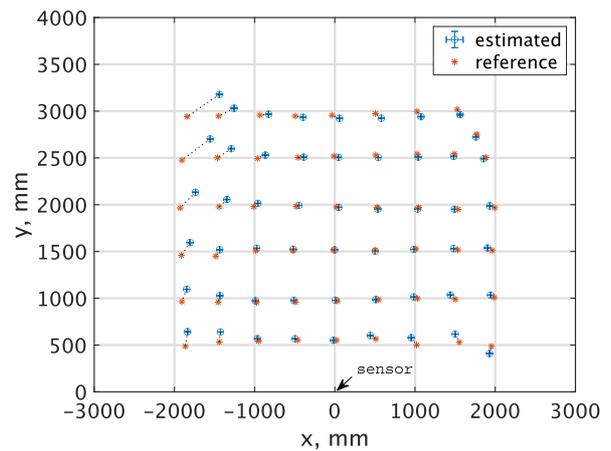
	Error, mm (experiment 1)	Error, mm (experiment 3)
$z = 150$ mm	$91.7 \pm 85.4$	$94.7 \pm 81.5$
$z = 350$ mm	$94.5 \pm 82.3$	$107.6 \pm 86.7$

$z = 150$  mm のとき,  $91.7 \pm 85.4$  mm,  $z = 350$  mm のとき,  $94.5 \pm 82.3$  mm であった. 表 1 に, 推定された方位角, 天頂角, 距離,  $x$  座標,  $y$  座標,  $z$  座標と参照用の位置との誤差の平均値と標準偏差を示す.

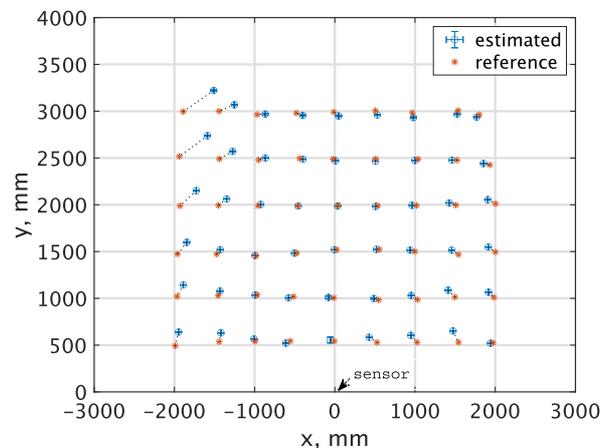
図 9 に実験 2 の結果を示す. 図 9(a) に, 提案手法で推定した位置の軌跡と, 参照用の位置の軌跡を示す. 図 9(b) に, 各時刻の  $x$  座標,  $y$  座標,  $z$  座標を示す. 参照用の位置から求められたマーカの瞬時時速の平均は,  $3.1$  km/h ( $0.88$  m/s), 最大は  $6.1$  km/h ( $1.7$  m/s) であった. 120 回測位した結果, 最大誤差は,  $321.3$  mm, 平均誤差は,  $162.7$  mm, 誤差の標準偏差は,  $74.9$  mm であった.

図 10 に実験 3 の結果を示す. 提案手法で推定された位置の平均値を○印で, 光学式の追跡装置で計測した参照用の位置を\*印で示した. 標準偏差はエラーバーで表した. 推定された位置と参照用の位置の絶対誤差の平均と標準偏差は,  $z = 150$  mm のとき,  $94.7 \pm 81.5$  mm,  $z = 350$  mm のとき,  $107.6 \pm 86.7$  mm であった. また, 比較のために表 2 に, 実験 1 と実験 3 の結果をまとめた.

図 11(c) に実験 4 の結果を示す. 提案手法で推定された位置の平均値を○印で, 参考にメジャーで計測した参照用の位置を\*印で示した. 標準偏差はエラーバーで表した.



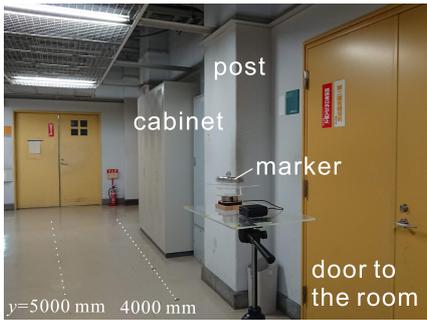
(a)  $z = 150$  mm



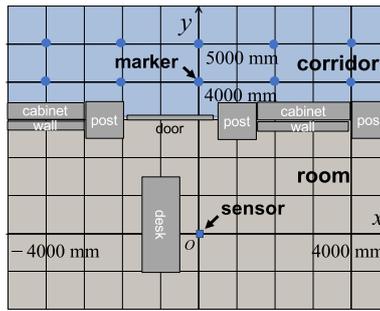
(b)  $z = 350$  mm

図 8 実験 1 の結果

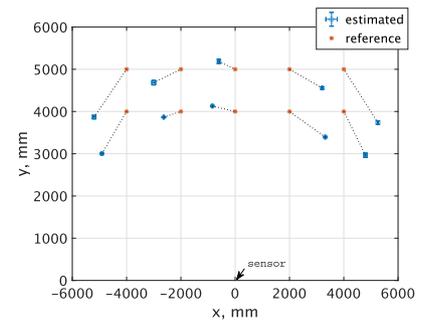
Fig. 8 Result of experiment 1.



(a) Setup for experiment 4



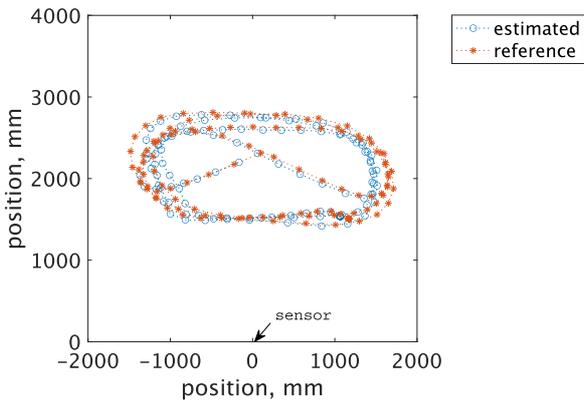
(b) Arrangement for experiment 4



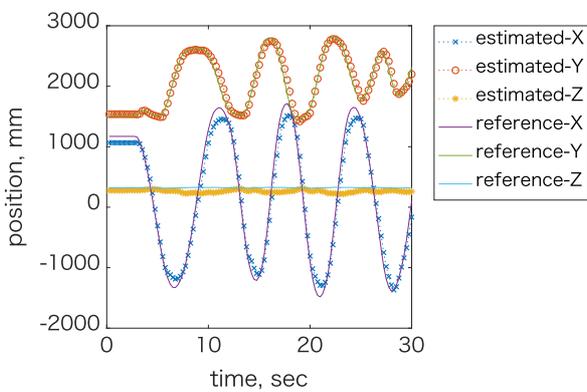
(c) Result of experiment 4

図 11 実験 4 の実験環境と実験結果

Fig. 11 Setup and result of experiment 4.



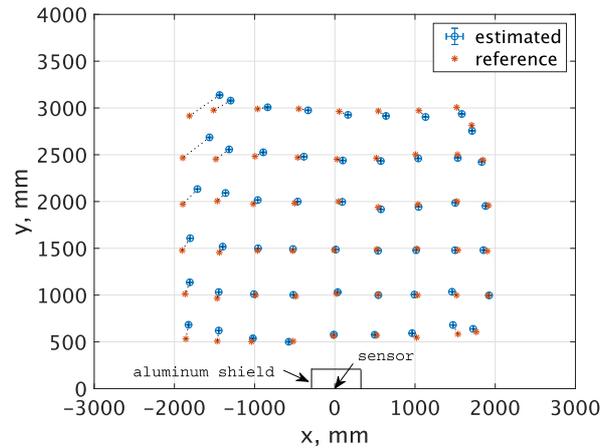
(a) Loci of the estimated and reference positions



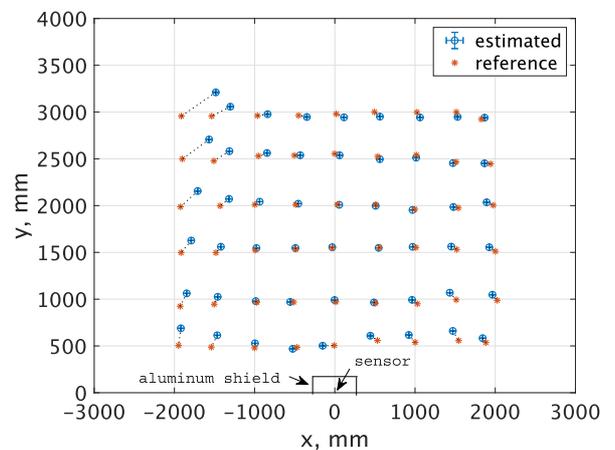
(b) Performance for tracking the moving marker

図 9 実験 2 の結果

Fig. 9 Result of experiment 2.



(a)  $z = 150$  mm



(b)  $z = 350$  mm

図 10 実験 3 の結果

Fig. 10 Result of experiment 3.

#### 4. 考察

図 8 および表 1 より、 $4,000 \text{ mm} \times 2,500 \text{ mm}$  の範囲において、回転するモーメントの位相を得ることなく、マーカの位置を正確かつ安定に推定することができた。参考までに原点に配置したセンサからマーカまでの直線距離を求めたところ、 $z = 150 \text{ mm}$  の条件では、最小  $563.0 \text{ mm}$ 、最大

$3,474.0 \text{ mm}$ 、平均  $2,180.0 \text{ mm}$ 、 $z = 350 \text{ mm}$  の条件では、最小  $627.8 \text{ mm}$ 、最大  $3,557.5 \text{ mm}$ 、平均  $2,218.0 \text{ mm}$  であった。この結果は、工場や倉庫などの屋内において、移動体の位置を推定するのに十分な精度だと思われる。また、図 8 に示す計測点における標準偏差の平均値は、 $z = 150 \text{ mm}$  の条件では、 $12.1 \text{ mm}$ 、 $z = 350 \text{ mm}$  の条件では、 $14.5 \text{ mm}$  と

非常に小さかった。使用する磁石の強度や実験環境の SN 比が異なるため、一概には定量的な比較はできないが、既存手法 [22] ではセンサとマーカの距離が離れるにつれて標準偏差が増大する傾向があった。提案手法では、直交検波を用いることにより、センサとマーカの距離が遠く SN 比が低い状況でも有効な位置推定を実現したと考えられる。図 8 より、推定値は、参照用の位置に対して、 $x > 0$  の領域では  $x$  軸に負の方向に、 $x < 0$  の領域では  $x$  軸に正の方向に推定される傾向があった。これは実験に使用した  $B_x$  を計測するセンサと  $B_y$  を計測するセンサの感度の比による誤差であると思われる。  $B_x$ ,  $B_y$  を計測するセンサの出力をキャリブレーションすることで、この誤差は小さくなると思われる。また、 $x = -2,000$  mm のときの誤差が大きいことが分かる。これは、 $x = -2,500$  mm 付近に鉄製の什器が存在することに起因すると思われる。什器の存在により、観測される  $B_x$  の時系列の振幅が本来の値よりも小さくなり、方位角が実際の位置よりも小さく推定されたと考えられる。磁場の回転周波数成分が環境中の磁性体によって歪められるとすれば、それは推定精度に影響すると考えられる。しかしながら、実験環境中には様々な磁性体が存在し、たとえば、図 8 で  $y = 3,500$  mm の直線上にスチール製の事務机が並んでおり、そして、 $x = -2,500$  mm の付近には、鉄製の除振台がある。しかしながら、定位結果に影響を与えているのは、 $1,100$  mm  $\times$   $700$  mm の鉄板を備える除振台のみであり、磁性体の巨大な塊に対しては、局所的ながら影響を考慮すべきであると考えられる。筆者らは、固定双極子がつくる磁場に対する磁性体の影響を等価多重極でモデリングする手法 [24] を提案しており、同様の議論を回転双極子に対して適用して、磁性体の影響を詳細に解析することは今後の課題としたい。

図 9 より、平均  $3.1$  km/h ( $0.88$  m/s)、最大  $6.1$  km/h ( $1.7$  m/s) で移動する磁気マーカの位置を推定することができた。図 9(b) より、 $x$  座標が正の領域では  $x$  座標の誤差は負となり、 $x$  座標が負の領域では  $x$  座標の誤差は正になっている。これは、静止した状態の実験 1 の誤差の傾向と一致する。また、実験 1 に比べて平均誤差が大きいのは、 $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  を計測している間にもマーカが移動していることによる誤差だと思われる。回転するマーカが水平方向に移動することにより、観測される磁束密度の波形が歪み、回転角周波数以外の成分が発生することによる誤差と思われる。しかし、その誤差は、工場や倉庫などで稼働する一般的な移動ロボットなどの移動体の大きさに比べて小さい。式 (13), (16), (18), (20) は、固定された磁気双極子に対する推定式であり、移動する場合の波形の変化と推定精度への影響の解析については、今後の課題としたい。また、 $y$  座標に比べて  $x$  座標の誤差が大きいという誤差傾向は、実験 1 の誤差傾向と一致する。なお、図 9(b)において、計測開始直後の数秒間、マーカは静止しており、そ

のときの誤差は移動に起因するものではない。

図 10 および表 2 より、センサがアルミ板で囲まれるような状態であっても、 $4,000$  mm  $\times$   $2,500$  mm の範囲において、アルミ板が存在しない場合と同等の精度で磁気マーカの位置を推定できることが分かる。環境中の非磁性の金属の存在に影響されることなく、精度良く推定できることは、磁場を用いる利点である。また、図 10 より、 $x = -2,000$  mm のときの誤差が大きい、実験 1 と同様の理由で、 $x = -2,500$  mm 付近に鉄製の什器が存在することに起因すると思われる。

図 11(c) より、提案手法は部屋の外に配置されたマーカのおおよその位置も推定可能であった。マーカとセンサの間に壁などの遮蔽物があったとしても位置を推定できるという、従来の手法に比べた磁気マーカを用いた手法の利点を示しており、遮蔽物の多い倉庫などで移動体を追跡するのに提案手法は有効であると思われる。図 11(c) を見ると、 $x = -4,000, 2,000, 4,000$  mm の地点における誤差が、他の地点に比べて大きい。これは、鉄製の棚が近傍に存在することに由来していると思われる。環境中の磁性体が推定精度に与える影響の調査は、今後の課題としたい。

また、本研究では、磁気マーカの回転角周波数  $\omega$  を未知として、観測される磁束密度の時系列に FFT を施した結果から得られる最大のピーク周波数を検波周波数として位置を推定した。これは、あらかじめ磁気マーカの回転角周波数を把握しなくてもマーカ位置を推定することを可能にする。また、ノイズによって回転角周波数はずれるような場合でも、推定ごとに検波周波数を求めることで、頑健にマーカ位置を推定できると考えられる。

本研究で使用した MI センサの感度は  $1$  V/ $\mu$ T であり [25]、図 7 のグラフより、 $3$  m の距離でおおよそ  $0.1$   $\mu$ T の磁束密度が観測されている。ここで、本センサは nT オーダの磁束密度の変動を観測できる [25] ため、現状の磁束密度の 100 分の 1 程度まで観測できるとすれば、現在の 4~5 倍程度の距離まで観測可能であることが期待される。本論文では、1 つのセンサで少なくとも  $2,500$  mm  $\times$   $4,000$  mm の範囲において平均誤差  $100$  mm 以下で位置推定可能であることを示した。このセンサを矩形の領域の頂点に配置すれば、少なくとも  $5,000$  mm  $\times$   $8,000$  mm の範囲での定位が可能になると考えられる。この 4 つのセンサの組を最小ユニットとして、ユニットを並べて複数配置すれば、さらに広範囲の定位が可能になるとと思われる。

## 5. 結論

本論文では、磁気モーメントが回転する磁気マーカの位置を推定する手法を提案した。センサから見たマーカの天頂角、方位角、距離を、磁気モーメントの初期位相を知ることなく磁束密度のフーリエ成分のみで直接推定する手法を提案した。マーカの 3 次元位置を、 $4,000$  mm  $\times$   $2,500$  mm の範囲

において、誤差 91.7 mm の精度で推定した。また、センサがアルミ板で囲まれた状態においても、4,000 mm × 2,500 mm の範囲において、誤差 94.7 mm の精度で推定した。これは、提案手法が環境中の非磁性の金属の影響を受けにくいことを示している。さらに、部屋の内部に配置されたセンサを用いて、部屋の外部に配置されたマーカのおおよその位置を推定できることを実験的に示した。提案手法は、遮蔽物が多く存在するような倉庫のような環境においてもマーカの位置を推定できると考えられる。

環境中に複数の移動体が存在するような場合、それぞれの移動体に磁気マーカを搭載することが考えられる。それぞれの磁気マーカに固有の回転周波数を割り当て、観測された磁束密度に対して、それぞれの周波数成分を求めることによって、それぞれのマーカの位置を推定することが可能である。複数の磁気マーカの推定や、定位範囲の拡大は、今後の課題としたい。

#### 参考文献

- [1] 村井亮介, 酒井龍雄, 上松弘幸, 中嶋久人, 三谷宏一, 北野齊: 自律移動ロボット群による搬送システムの実用化, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.3, pp.311–318 (オンライン), DOI: 10.7210/jrsj.28.311 (2010).
- [2] 小林樹矢, 山本 寛, 山崎克之: 作業車の稼働状況を観測する ZigBee ネットワークシステムの開発と実証実験・評価, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J99-B, No.10, pp.859–870 (2016).
- [3] Elloumi, W., Latoui, A., Canals, R., Chetouani, A. and Treuillet, S.: Indoor Pedestrian Localization With a Smartphone: A Comparison of Inertial and Vision-Based Methods, *IEEE Sensors Journal*, Vol.16, No.13, pp.5376–5388 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2016.2565899 (2016).
- [4] 木村峻介, 松本卓人, 矢澤櫻子, 星野准一, 李 昇姫, 浜中雅俊: 屋内位置検出を利用した子ども見守りサービスシステム, 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.1, pp.856–868 (2015).
- [5] 磯田達也, 井上創造, 花沢明俊, 野原康伸, 白水麻子, 杉山康彦, 平田真理, 町田京子, 中島直樹: 携帯センサと近接センサを用いた看護師業務分析, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.10, pp.2197–2209 (2016).
- [6] Dardari, D., Closas, P. and Djuric, P.M.: Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.64, No.4, pp.1263–1278 (online), DOI: 10.1109/TVT.2015.2403868 (2015).
- [7] Park, S. and Hashimoto, S.: Autonomous Mobile Robot Navigation Using Passive RFID in Indoor Environment, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.56, No.7, pp.2366–2373 (online), DOI: 10.1109/TIE.2009.2013690 (2009).
- [8] Nagai, I., Sakai, J. and Watanabe, K.: Indoor Self-Localization Using Multiple Magnetic Sensors, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.31, No.2, pp.203–211 (online), DOI: 10.20965/jrm.2019.p0203 (2019).
- [9] Tsubouchi, T.: Introduction to Simultaneous Localization and Mapping, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.31, No.3, pp.367–374 (online), DOI: 10.20965/jrm.2019.p0367 (2019).
- [10] Hwang, S.-Y. and Song, J.-B.: Monocular Vision-Based SLAM in Indoor Environment Using Corner, Lamp, and Door Features From Upward-Looking Camera, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.58, No.10, pp.4804–4812 (online), DOI: 10.1109/TIE.2011.2109333 (2011).
- [11] Beul, M., Droeschel, D., Nieuwenhuisen, M., Quenzel, J., Houben, S. and Behnke, S.: Fast Autonomous Flight in Warehouses for Inventory Applications, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.3, No.4, pp.3121–3128 (online), DOI: 10.1109/LRA.2018.2849833 (2018).
- [12] Koo, J. and Cha, H.: Localizing WiFi Access Points Using Signal Strength, *IEEE Communications Letters*, Vol.15, No.2, pp.187–189 (online), DOI: 10.1109/LCOMM.2011.121410.101379 (2011).
- [13] Feng, C., Au, W.S.A., Valaee, S. and Tan, Z.: Received-Signal-Strength-Based Indoor Positioning Using Compressive Sensing, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.11, No.12, pp.1983–1993 (online), DOI: 10.1109/TMC.2011.216 (2012).
- [14] 浦野健太, 廣井 慧, 梶 克彦, 河口信夫: 配布型 BLE タグとタンデムスキャナを用いた屋内位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.1, pp.58–75 (2019).
- [15] 星 尚志, 石塚宏紀, 小林亜令, 南川敦宣: 動的遮蔽物を考慮した BLE による屋内位置推定手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.1, pp.48–57 (2019).
- [16] Hashi, S., Tokunaga, Y., Yabukami, S., Toyoda, M., Ishiyama, K., Okazaki, Y. and Arai, K.I.: Development of Real-Time and Highly Accurate Wireless Motion Capture System Utilizing Soft Magnetic Core, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.41, No.10, pp.4191–4193 (2005).
- [17] Yabukami, S., Kanetaka, H., Hashi, S., Arai, K.I. and Sato, T.: Jaw Tracking System Using Resonated Wireless Markers, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.45, No.10, pp.4880–4883 (2009).
- [18] Hashi, S., Yabukami, S., Kanetaka, H., Ishiyama, K. and Arai, K.I.: Numerical Study on the Improvement of Detection Accuracy for a Wireless Motion Capture System, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.45, No.6, pp.2736–2739 (2009).
- [19] Plotkin, A. and Paperno, E.: 3-D magnetic tracking of a single subminiature coil with a large 2-D array of uniaxial transmitters, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.39, No.5, pp.3295–3297 (online), DOI: 10.1109/TMAG.2003.816750 (2003).
- [20] Yang, W., Hu, C., Meng, M.-H., Song, S. and Dai, H.: A Six-Dimensional Magnetic Localization Algorithm for a Rectangular Magnet Objective Based on a Particle Swarm Optimizer, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.45, No.8, pp.3092–3099 (online), DOI: 10.1109/TMAG.2009.2019116 (2009).
- [21] 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 (online), DOI: 10.1109/20.951014 (2001).
- [22] Watanabe, K., Hiroi, K., Kamiyama, T., 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.27, pp.10–24 (online), DOI: 10.2197/ipsjip.27.10 (2019).
- [23] Kim, M.-G., Hong, Y.-S. and Lim, E.-J.: Position and orientation detection of capsule endoscopes in spiral motion, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.11, No.1, pp.31–37 (online), DOI: 10.1007/s12541-010-0004-5 (2010).
- [24] Nara, T., Takeda, H. and Ando, S.: Effect of ferro-

magnetic objects in rubble on rescue beacon searches, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.52, No.1-2, pp.61-66 (online), DOI: 10.3233/JAE-162194 (2016).

- [25] Aichi Micro Intelligent Corporation (online), available from <https://www.aichi-mi.com/e-home-new/highly-sensitive-magnetometers/type-dh/>.



千葉 昭宏 (正会員)

2011年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。2013年同大学大学院情報理工学研究科知能機械工学専攻博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。現在、東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学

専攻博士課程在籍。電磁波を用いた位置推定に関する研究に従事。計測自動制御学会，日本医療情報学会各会員。



奈良 高明

1995年東京大学工学部計数工学科卒業。2000年同大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻博士課程修了。博士(工学)取得。同年日本学術振興会特別研究員(PD)。2002年国立情報学研究所助手。2003年東京大学大学院情報学環講師。2007年電気通信大学知能機械工学科准教授。2013年東京大学大学院情報理工学系研究科准教授。2017年より同教授。逆問題の計測法と解析法の研究に従事している。

院情報学環講師。2007年電気通信大学知能機械工学科准教授。2013年東京大学大学院情報理工学系研究科准教授。2017年より同教授。逆問題の計測法と解析法の研究に従事している。