正方形境界上の荷重積分センサを用いた RFID タグの定位

千葉 昭 宏*・奈良 高 明*

Two-dimensional Localization of an RFID Tag by Using
a Weighted Integral Sensor on a Square Boundary

Akihiro CHIBA* and Takaaki NARA*

This paper presents a novel method for the localization of a passive Radio Frequency Identification (RFID) tag in two-dimensional (2D) space. First, in a 2D square domain inside which an RFID tag is freely placed and moved, we show that a line on which the RFID tag exists can be estimated from the weighted integrals of the magnetic field created by the tag along the boundary of the domain. Then, for measuring them, we develop a square-shaped magnetic sensor composed of three coils only: two pairs of oppositely-wound rectangle coils connected in series on the parallel sides of the squared domain, and four bow-tie-shaped coils connected in series on all sides. Using the developed sensor with the side length of 200 mm, a low frequency (135 kHz) RFID tag was localized in the square area 160 mm on the side with the average error 3.6 mm at 80 points.

Key Words: RFID, localization, inverse problem, weighted integral

1. はじめに

近年, Radio Frequency Identification (RFID) が, ユビキタスコンピューティングのキーデバイスとして注目されている¹⁾. RFIDにより, タグ付けされた物体に関する膨大な情報を, タグに記録された ID 番号からデータベースを用いて参照できるようになっている.

ID 番号に加えて, RFID タグもしくはリーダの位置情報も推定できれば, さらに高度なロケーションウェアシステムが実現できる²⁾. たとえば, Ultra High Frequency (UHF) 帯 (920 MHz, 2.5 GHz) の RFID を用いて, 屋内環境下におけるロボットや物体などの位置を推定し, 追跡する手法が提案されている^{3), 4)}. UHF 帯の RFID では遠方場で通信を行なうため数 m~数十 m 四方の領域で位置推定可能であるという特徴がある反面, 人体による吸収や金属反射の影響を受けやすく, 位置推定精度は高々 50 cm 程度というのが現状である. この問題点の解決手段として UHF 帯の電磁波を平面内に局在化させた二次元通信シートによるデバイスの定位⁵⁾, あるいは, ストリップラインアンテナを用いた一次元の RFID タグの定位⁶⁾も提案されている.

一方, High Frequency (HF) 帯 (13.56 MHz) のタグを用

い, 机や棚の上など比較的狭い領域において, 薬品^{7), 8)}や書籍⁹⁾の位置を管理するシステムや, Low Frequency (LF) 帯 (135 kHz) のタグを用いたテーブルトップインタフェース (TTI)¹⁰⁾が開発されている. LF/HF 帯の RFID では近接場で通信を行なうためレンジが高々 1 m 程度と限られる反面, 環境中の金属の影響を受けづらく, 人体を透過するという大きな特徴があり, 金属製の物品棚や書棚の周りで, 複数操作者が頻繁に手をかざすような状況において有効である. ただし, これら従来システムにおいては, リーダの通信範囲内におけるタグの有無により位置検出を行なっているため, 机や棚の上にリーダを多数配置する必要がある上, 位置解像度はリーダの通信範囲で決まってしまうため, たとえば, HF 帯タグを用いた薬品管理システムでは, 一つの引出しに 18 個のリーダをアレイ状に配置する手法⁷⁾や, 400 個の各引出しに一つずつリーダを配置する方法⁸⁾などが開発されているが, 膨大なリーダが必要な上, リーダの通信範囲内にある複数タグの位置を別々に推定することはできなかった. HF 帯タグを用いた書籍管理システム⁹⁾では一つの棚に一つのリーダが配置されており, 得られるのはどの棚に本があるかの情報までであった. また LF 帯タグを用いた TTI システム DataTiles¹⁰⁾では, タグを内蔵した物体を, 机に配置した 12 個のアンテナ付近のあらかじめ決められた位置にしか置くことができないという制約があった.

ここでもし LF/HF 帯リーダの数百 mm 四方程度の通信範囲内にある複数タグ位置を個別に, 数 mm の精度で推定するセンサが開発できれば, たとえば医療現場で用いるワゴンにおいて, タグを付けた薬品ビンを所定の位置に置かなかった

* 電気通信大学大学院情報理工学研究科 調布市調布ヶ丘 1-5-1

* Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu

(Received January 31, 2012)

(Revised October 19, 2012)

ときに警告を出すようなシステムが、一つのリーダだけを用いて実現できるであろう。さらに分解能の高さから検体を入れた試験管の位置管理にも応用可能と考えられる。またそうしたセンサを書棚に複数配置すれば、書棚のどのブロックに本があるかだけでなく、本一冊一冊の位置が把握でき、棚卸が簡単になり、機械による整列作業なども可能であろう。また、TTIへの応用では、たとえば、RFIDタグを内蔵したコマを地図上に配置し、地図上でそのコマの近くに情報を表示するようなGeographic Information System (GIS)としての利用法が考えられる。さらに、アクティブLF帯タグは水中や地中でも通信可能であり、かつ通信レンジも数m程度と比較的長いことから、砂礫移動検出¹¹⁾、砂浜内センシングシステム¹²⁾などで利用されており、こうした対象の位置推定も将来的には応用対象となり得よう。

以上の背景から、本論文では、金属や人体の影響を受けづらい近接場で通信するLF/HF帯タグを想定し、比較的狭い二次元平面上(～数百mm四方程度)でタグの位置を高精度(～数mm程度)に推定するための手法およびセンサを開発することを目的とする。近年、さまざまな物理場や信号を時空間の有限領域で荷重積分した値から、場のソースパラメータや信号の特徴パラメータを代数演算で厳密に求める手法^{13)~15)}が逆問題で注目されており、この手法から得られる初期解や拘束条件を用いて非線形最適化問題を解くことにより、ローカルミニマムへの収束を防いだり、計算時間を短縮したりできることが示されている。われわれは、この手法を低周波パッシブタグの定位に応用し、正方形境界に沿う磁場の荷重積分量を3種類計測することで、タグ位置が推定できることを示す。さらに、これら3種類の荷重積分量を直接計測するコイルを開発する。これにより、一つのリーダと、正方形境界上にのみ配置された簡便なセンサシステムで、正方形内部にある複数のタグが個別に定位可能となる。

本論文は、以下の構成になっている。2章では、RFIDタグの定位原理と磁気センサの設計について述べる。つぎに3章では、開発した正方形センサを使った実験について述べる。本論文では、LF帯のタグを用いた検証実験を行なう。最後に結論を述べる。

2. 原 理

2.1 問題設定

通信周波数が135 kHzあるいは13.56 MHzのRFIDタグは、タグ内部にRFIDリーダと通信するためのループアンテナを備えており、通信時に準静的な磁場を周囲に発生する。その波長は通信レンジに比べ十分長い。そこで、われわれはRFIDタグを磁気双極子とみなし、タグの発する近接磁場を正方形境界上に配置したセンサを用いて計測し、その位置を推定する。

Fig. 1のように、RFIDタグが xy 平面上の $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, 0)^T$ にあるとすると、RFIDタグにより生じる磁場は

Fig. 1 A problem setting: the position of the RFID tag $\mathbf{r}_0$ is estimated using the magnetic sensor placed along the boundary of a square Γ

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3\mathbf{p} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^5} - \frac{\mathbf{p}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^3} \right) e^{i\omega t} \quad (1)$$

で表わされ、その z 方向成分は

$$B_z(\mathbf{r}, t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_z}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^3} e^{i\omega t} \quad (2)$$

で表わされる。ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 ω は通信角周波数である。以降の式において、 $e^{i\omega t}$ は省略する。また、タグの姿勢は $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)^T$ とする。本論文では、磁気双極子の姿勢 $\mathbf{p}$ は既知とする。

Fig. 1のように、一辺 $2a$ の正方形境界上に磁場センサを配置し、タグの位置 (x_0, y_0) を推定する逆問題を本論文では考える。正方形の中心を原点とし、正方形境界を Γ で表わす。

2.2 磁場の荷重積分に基づくタグ定位原理

本節では、 Γ 上の観測量を用いてRFIDタグの位置 x_0 と y_0 に関する線形な方程式を導く。まず、 B_z の勾配をとると

$$\nabla B_z(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3p_z}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^5} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = -3B_z(\mathbf{r}) \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2} \quad (3)$$

となる。両辺に $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2$ をかけて、 Γ に沿って線積分すると

$$\int_{\Gamma} |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2 \nabla B_z(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{s} = -3 \int_{\Gamma} B_z(\mathbf{r}) (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \cdot d\mathbf{s} \quad (4)$$

が得られる。ここで、 $d\mathbf{s}$ は Γ 上の線素である。(4)式左辺の被積分関数は

$$\begin{aligned} |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2 \nabla B_z(\mathbf{r}) &= \nabla(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2 B_z(\mathbf{r})) - B_z(\mathbf{r}) \nabla |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2 \\ &= \nabla(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2 B_z(\mathbf{r})) - 2B_z(\mathbf{r})(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \end{aligned}$$

と書けるため、(4)式は

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} \nabla(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2 B_z(\mathbf{r})) \cdot d\mathbf{s} - 2 \int_{\Gamma} B_z(\mathbf{r})(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \cdot d\mathbf{s} \\ = -3 \int_{\Gamma} B_z(\mathbf{r})(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \cdot d\mathbf{s} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここで、(5)式の左辺第一項は、 Γ が閉曲線であるため、0となる。よって、

$$\int_{\Gamma} B_z(\mathbf{r})(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (6)$$

を得る。以上は、任意の閉曲線 Γ に対して成り立つ磁気双極子タグ位置 $\mathbf{r}_0$ の線形方程式である¹⁵⁾。

Fig. 2 Structure of coils

本論文では、特に Γ を正方形境界とする．このとき、(6) 式は

$$\begin{aligned}
 & x_0 \int_{-a}^a (B_z(x, -a, 0) - B_z(x, a, 0)) dx \\
 & + y_0 \int_{-a}^a (B_z(a, y, 0) - B_z(-a, y, 0)) dy \\
 & = \int_{-a}^a x (B_z(x, -a, 0) - B_z(x, a, 0)) dx \\
 & + \int_{-a}^a y (B_z(a, y, 0) - B_z(-a, y, 0)) dy \quad (7)
 \end{aligned}$$

と書ける．ここで、 Γ の辺に沿う線積分量として

$$A = \int_{-a}^a (B_z(x, -a, 0) - B_z(x, a, 0)) dx \quad (8)$$

$$B = \int_{-a}^a (B_z(a, y, 0) - B_z(-a, y, 0)) dy \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 C &= \int_{-a}^a x (B_z(x, -a, 0) - B_z(x, a, 0)) dx \\
 &+ \int_{-a}^a y (B_z(a, y, 0) - B_z(-a, y, 0)) dy \quad (10)
 \end{aligned}$$

を定義すると、(7) 式は

$$Ax_0 + By_0 = C \quad (11)$$

と書ける．(11) 式は、(8) 式から (10) 式で表わされる荷重積分量 A, B, C を計測することにより、RFID タグを通る直線を推定できることを示している．

直線上にあるタグの二次元位置は、非線形最適化を用いて推定する．すなわち、拘束条件付きの非線形最適化問題

$$\begin{aligned}
 J(x^*, y^*) &= |A(x^*, y^*) - A'|^2 + |B(x^*, y^*) - B'|^2 \rightarrow \min \\
 \text{s.t. } & A'x^* + B'y^* = C'
 \end{aligned}$$

の解としてタグ位置 (x_0, y_0) を求める．ここで、 A' と

Table 1 Experimental equipments

Equipment	Pieces	Model	Remark
RFID reader	1	Texas Instruments, RI-STU-MB2A-03	communication frequency: 135 kHz
RFID antenna	1	Texas Instruments, RI-ANT-G02E	size: 200 mm × 200 mm × 16 mm
RFID tag	1	Texas Instruments, RI-TRP-IR2B-30	size: 31.2 mm × φ 3.85 mm
Low-pass filter	4	Daishin Musen, DF-200L	cutoff frequency: 200 kHz
Amplifier	3	NF, CA-261F2	gain: 40 dB
AD converter	2	Interface, PCI-3525	2 channels synchronous sampling

B' は、それぞれ荷重積分量 A と B の計測値である。 $A(x^*, y^*), B(x^*, y^*)$ は、タグ位置が (x^*, y^*) であるとしたときに (8) 式および (9) 式より求められる理論値である。直線上に解を拘束することにより、一変数の最適化問題となり、 x 座標または y 座標のどちらかを推定するだけで、もう一方の座標は直線の方程式より求められる。位置推定の安定性を高めるために、 $|A'| < |B'|$ である場合、(11) 式を y_0 に対して解いた式を代入した評価関数 $J(x^*, -\frac{A'}{B'}x^* + \frac{C'}{B'})$ を最小化するような x_0 を推定する。一方、 $|A'| > |B'|$ である場合、評価関数 $J(-\frac{B'}{A'}y^* + \frac{C'}{A'}, y^*)$ を最小化するような y_0 を推定する。

2.3 センサ設計

従来の磁気双極子推定においては、磁束密度の空間分布をコイルやホール素子を用いたセンサアレイで計測する方法が一般的であるが、インタフェースなどへの応用におけるリアルタイム定位の必要性から、少ないチャンネル数での計測方法が求められる。本節では、磁束密度の荷重積分量を直接計測するためのセンサの構造について述べる。

Fig. 2(a) は、荷重積分量 A を計測するコイルを示している (A コイルと呼ぶ)。A コイルは、 x 軸に平行な Γ 上の二辺に配置された、幅 ε 、長さ $2a$ の短冊型のコイルで構成される。 $y = -a$ と $y = a$ の辺上において、幅 ε はコイル内の y 方向の磁束密度変化に対し十分小さいとすれば、Fig. 2(a) に示す微小領域 $\varepsilon\Delta x$ を通過する磁束は、それぞれ $\varepsilon B_z(x, -a, 0)\Delta x$ と $\varepsilon B_z(x, a, 0)\Delta x$ で示される。よって、 $y = -a$ と $y = a$ に沿う短冊型コイルの内部を通過する磁束は、それぞれ $\int_{-a}^a \varepsilon B_z(x, -a, 0)dx$ と $\int_{-a}^a \varepsilon B_z(x, a, 0)dx$ で表わされる。そこで、Fig. 2(a) に示すように、それらを逆巻きで直列に接続すると、発生する誘導起電圧は

$$\varepsilon \int_{-a}^a (B_z(x, -a, 0) - B_z(x, a, 0))dx = \varepsilon A \quad (12)$$

に比例する。

同様に、Fig. 2(b) のように y 軸に平行な二辺上に配置されたコイル (B コイルと呼ぶ) において発生する誘導起電圧は

$$\varepsilon \int_{-a}^a (B_z(a, y, 0) - B_z(-a, y, 0))dy = \varepsilon B \quad (13)$$

に比例する。

また、(10) 式で示される x, y によって重み付けられた磁束密度 B_z の積分量は Fig. 2(c) に示すようなコイルを用いて

直接計測する。たとえば、 $x = a$ において、荷重 y 付きの B_z の荷重積分量は、Fig. 2(d) に示すように幅 y 座標に応じて 0 から ε へ線形に変化させた“蝶ネクタイ型コイル”を用いて計測する。このとき、Fig. 2(c) に示す微小領域を通過する磁束は $\frac{\varepsilon y}{a} B_z(a, y, 0)\Delta y$ と表わされる。よって、Fig. 2(d) に示すように $y > 0$ と $y < 0$ のコイルを逆巻きで直列に接続することにより、 $x = a$ 上の蝶ネクタイ型コイルを通過する磁束は、 $\frac{\varepsilon}{a} \int_{-a}^a y B_z(a, y, 0)dy$ で表わされる。他の三つの辺においても、同様に蝶ネクタイ型コイルを通過する磁束は、(10) 式の各項を $\frac{\varepsilon}{a}$ 倍した式で表わされる。こうして、四つの蝶ネクタイ型コイルを直列に接続すると

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon}{a} \int_{-a}^a x (B_z(x, -a, 0) - B_z(x, a, 0))dx \\ & + \frac{\varepsilon}{a} \int_{-a}^a y (B_z(a, y, 0) - B_z(-a, y, 0))dy = \frac{\varepsilon}{a} C \end{aligned} \quad (14)$$

に比例する誘導起電圧を得る。つまり、Fig. 2(c) に示すように最大幅が ε の蝶ネクタイ型コイル四つを直列に接続したセンサによって荷重積分量 C を直接計測できる。このセンサを C コイルと呼ぶ。

Fig. 2(e) は、A コイル、B コイル、C コイルを原点を中心組み合わせたセンサユニットを示している。これら三つのコイルを用いて、(8) 式から (10) 式で表わされる荷重積分量 A, B, C を直接計測することにより、RFID タグの推定位置を直線上に拘束することができる。

3. 実験

3.1 装置

実験に使用した主な機器を Table 1 に示す。本システムは、RFID システムと計測システムに分けられる。RFID システムは、リーダーとアンテナ、タグで構成され、計測システムは、センサユニットとローパスフィルタ、増幅器、AD 変換ボード、PC で構成される (Fig. 3, Fig. 4)。センサからの出力信号は、PC に接続された AD 変換ボードまで同軸ケーブルを通じて伝送される。

本実験では、RFID システムを使って指定したタグを応答させ、タグの発する応答信号を計測システムを使って計測した。応答信号は、123.2 kHz と 134.2 kHz の二つの周波数を用いた Frequency Shift Keying (FSK) で変調される。応答信号の中でも 123.2 kHz の信号が続くプレビットと呼ばれる部分の信号を計測した。タグは、リーダーがアンテナから送信

Fig. 3 Layout of the system

Fig. 4 Equipments

Fig. 5 Sensor unit

信号をタグに送っている間は反応せず、送信信号が終わってから応答信号を発するので、リーダが送信を開始してからブレイクが発せられるまでの約 152 ms 待機してから、10 波の信号をサンプリングした。A コイル、B コイル、C コイルから得られたサンプリングデータを直交検波し、それぞれのセンサコイルからの信号の振幅と位相を取得した。各センサコイルからの信号の位相と、計測領域を囲むようにして巻かれた一辺 $2a$ の正方形ループコイルからの信号との位相差を求めることで荷重積分量の正負を判定した。

本実験では、 $a = 100$ mm, $\varepsilon = 15$ mm のセンサを製作した。センサコイルは、アクリル製の土台に沿って直径 0.2 mm の UEW 銅線を 30 回巻いて製作した。Fig. 5 に、センサユニットを示す。

3.2 直線の推定および二次元定位

Fig. 6 に、タグが $y = 50$ mm の直線上を移動したときの

Fig. 6 Estimated lines: the points are real positions of tags

(11) 式で定義される推定直線を示す。図中の点が実際のタグ位置である。得られた直線は、タグ位置の近傍を通過していることがわかる。直線がタグ位置から最も離れている $x = 80$ mm の点に対する直線においても、タグ位置から直線までの距離は 5.7 mm であった。

つぎに、推定直線を拘束条件に用いて、タグを 160 mm 四方の正方形領域内の 80 地点で定位した。Fig. 7(a) に二次元位置推定結果を示す。図中の丸印はタグの真の位置、×印は推定位置を示している。それぞれの地点において 10 回、荷重積分量 A, B, C を計測した。計測値には、キャリブレーションを施した。たとえば、荷重積分量 A の計測値 A' について、つぎの評価関数を最小化するようなパラメタ α, β を求めた。

$$J(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^N |A(x_i, y_i, 0) - (\alpha A'_i + \beta)|^2 \quad (15)$$

ここで、 i は計測地点の番号を示しており、 N は計測地点の総数である。 $A(x_i, y_i, 0)$ と A'_i はそれぞれ i 番の地点での理論値と計測値である。同様にして荷重積分量 B, C の計測値についてもキャリブレーションを施した。位置推定誤差は平均 3.6 mm, 最大 20.0 mm だった。それぞれの地点における標準偏差は、図中に推定値を中心とする楕円で示した。最大標準偏差は、 x 方向 2.0 mm, y 方向 1.3 mm であり、図中ではほぼ楕円が見えない程度に安定した推定が実現されている。

原点においては荷重積分量 A, B, C の値が理論的に 0 となるので、位置推定できない。しかしながら、適切な閾値を決めることで、原点近傍の判断をすることは可能である。

姿勢によらずに定位できることを示すために、鉛直の状態から x 軸方向に 45° 傾けたタグを 160 mm 四方の正方形領域内の 80 地点で定位した。実験方法は、鉛直の場合と同様である。結果を Fig. 7(b) に示す。位置推定誤差は平均 7.2 mm, 最大 40.9 mm だった。鉛直の場合に比べ、タグの姿勢を 45° 傾けると誤差が大きくなっている。特にセンサコイルに近い 32 点の誤差が大きい。しかしながら、薬品の管理のように隣

(a) 2D localization result measured at 80 points except the origin when the tag was perpendicular to the xy -plane.

(b) 2D localization result measured at 80 points except the origin when the elevation and azimuth angles of the tag were 45 and 0 degrees, respectively.

Fig. 7 2D results of RFID localization

りあうタグの順番を把握したい場合などにおいて、許容される誤差は隣接する薬品との間隔であり、 $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ の範囲において誤差はタグ間隔 20 mm 以内に収まっているので、センサ中央の領域において、物品の管理などを想定した場合、有効であるといえる。Fig. 7(b) は、本論文で提案する手法が、磁気双極子の姿勢によらずに、その位置を推定できることを示している。

3.3 考察

Fig. 7 から、位置推定誤差の平均 3.6 mm に比べ、定位結果の標準偏差が小さいことがわかる。A コイル、B コイル、C コイルは、いずれも差動計測器であり、環境ノイズに対して安定な推定が実現していると考えられる。

Fig. 6 において、タグがセンサコイルに近づいた場合の直線推定精度は、センサコイルから離れている場合に比べて悪化している。そこで、数値シミュレーションにより、誤差傾向の原因を調べた。シミュレーションの計算および結果の描画には、*Mathematica* 5.2 を使用した。シミュレーションでは、タグはセンサ領域内部において $y = \frac{a}{2}$ の直線上を移動するとした。

はじめに、厳密に荷重積分量 A, B, C が計測できるとして、(11) 式で定義される直線を推定した。Fig. 8(a) は、第一象限において点で表わされる地点にタグがあった場合の推定直線を示している。図に示すように、タグ位置を通る直線を得ることができる。

Fig. 8(b) は、センササイズ $a = 100\text{ mm}$ 、 $\varepsilon = 15\text{ mm}$ である A コイル、B コイル、C コイルを用いて荷重積分量 A, B, C を計測した場合の推定直線とタグの位置を示している。図に示すように、 $x < 80\text{ mm}$ の範囲においてはタグ位置の近傍を通る直線を得ることができる。しかし、 $80\text{ mm} \leq x < 100$

mm の範囲においては、推定直線がタグ位置から離れている。これは、タグがセンサコイルに近づいた場合、 $x = a$ 上に配置されたセンサコイル内部の x 軸方向の磁束の変化が無視できなくなるためと考えられる。

また、Fig. 7(a) から、センサ辺に近い領域では、位置推定結果が真の位置よりも座標軸方向に寄る傾向が見られる。これは、二次元推定においてタグ位置を直線上に拘束したことにより、安定して高速に解を推定できるものの、直線推定の精度が二次元位置推定の精度に直接影響することになり、直線推定精度が悪いと推定解が真値から離れた位置に収束するためだと考えられる。

これらの原因により、Fig. 7(a) に示される位置推定誤差は Γ の辺に近い所で増加する。今後の課題として、誤差を改善するために、コイル内に磁性体のコアを入れるなどして、センサの感度を保ちながらセンサコイルの幅 ε を小さくする必要があると考えられる。

Fig. 7(b) から、タグの姿勢が傾いた場合、鉛直な場合に比べて誤差が大きくなった。センサユニットは 3 コイルを積み重ねた層構造であり、A コイル、B コイル、C コイルの z 方向の位置にずれがある。これにより発生する各コイル間の出力比の違いが誤差の原因と考えられる。

本論文では、タグの姿勢を固定したまま定位実験を行なったが、得られたセンサ出力より姿勢を推定することにより、姿勢が変化するような場合においても有効なシステムを作ることができる。

4. 結 論

本論文では、正方形境界上に配置された荷重積分センサを用いて、二次元平面上において RFID タグの位置を推定する

Fig. 8 Results of simulations

方法を示した。正方形境界上の磁場の荷重積分量からタグ位置を通る直線が得られる。また、短冊型のコイルと蝶ネクタイ型のコイルを組み合わせ、荷重積分量を直接計測可能なセンサを開発した。二組の逆方向に巻かれた短冊型コイルは線積分量の差を計測し、蝶ネクタイ型コイルは辺上の位置 x, y に応じた荷重付きの積分量を計測できる。

開発した一辺 200 mm の正方形磁気センサによって、160 mm 四方の領域内の 80 点において位置推定誤差（平均 3.6 mm, 最大 20.0 mm）の精度でタグの定位が実現された。また、タグの姿勢を傾けた状態でも有効であることが示された。 x 軸方向に 45° 傾けた状態において、位置推定誤差（平均 7.2 mm, 最大 40.9 mm）の精度で定位可能だった。本論文ではタグの姿勢は既知としたが、直線上での位置に加え、姿勢もあわせて非線形最適化で推定することが考えられ、これは今後の課題とする。

本実験によって示された位置推定精度をもつシステムは、ワゴン上の薬品ビンの管理のような応用に対して適用可能と考えられる。今後さらにセンササイズを拡大するとともに、通信周波数 13.56 MHz の HF 帯タグへ本手法を適用する。

謝辞 本研究の一部は、富士通株式会社、財団法人守谷育英会の支援を受けた。

参考文献

- 1) K. Finkenzeller: *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, J. Wiley & Sons (2003)
- 2) I. Álvarez, P. Malagón, M. Zapater, J. Goyeneche and J. Moya: RFID Performance in Localization Systems, *Ambient Assisted Living*, **6693**, 73/78 (2011)
- 3) D. Hähnel, W. Burgard, D. Fox, K. Fishkin and M. Philipose: Mapping and Localization with RFID Technology, *Proc. IEEE International Conference Robotics*, **1**, 1015/1020 (2004)
- 4) C. Wang, H. Wu and N. Tzeng: RFID-Based 3-D Position-

- ing Schemes, *INFOCOM 2007, 26th IEEE International Conf. on Computer Communications*, 1235/1243 (2007)
- 5) K. Nakatsuma and H. Shinoda: High Accuracy Position and Orientation Detection in Two-Dimensional Communication Network, *Proc. 28th International Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2297/2306 (2010)
- 6) K. Nakatsuma, A. Noda and H. Shinoda: Passive RFID Tag Positioning Using 1D Stripline-shaped Antenna, *Proc. SICE Annual Conference 2011*, 827/830 (2011)
- 7) E. Becker, V. Metsis, R. Arora, J. Vinjumur, Y. Xu and F. Makedon: SmartDrawer: RFID-based smart medicine drawer for assistive environments, *Proc. 2nd International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 49 (2009)
- 8) C.-H. Chang, Y.-L. Lai and C.-C. Chen: Implement the RFID Position Based System of Automatic Tablets Packaging Machine for Patient Safety, *J. Medical Systems*, **36**-6, 3463/3471 (2012)
- 9) 池田大輔：高性能 RFID リーダ付き書架の性能評価と新たな図書館サービスの提案, 情報処理学会研究報告, 情報学基礎研究会報告, **2005**-108, 19/30 (2005)
- 10) J. Rekimoto, B. Ullmer and H. Oba: DataFiles: A modular platform for mixed physical and graphical interactions, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 269/276 (2001)
- 11) 角, 石田, 佐竹: アクティブタグ技術に応用した砂礫移動に関するトレーサ調査手法の開発, *水工学論文集*, **54**, 1123/1128 (2010)
- 12) 唐木伊助: 鴨川シーワールド海亀の保護活動, 自動認識, **24**-13, 9/12 (2011)
- 13) S. Ando and T. Kurihara: Direct estimation of wave source location from weighted integral measurements on finite boundary, *Proc. SICE Annual Conference 2010*, 2752/2757 (2010)
- 14) S. Ando and T. Nara: An exact direct method of sinusoidal parameter estimation derived from finite Fourier integral of differential equation, *IEEE Trans. Signal Processing*, **57**-9, 3317/3329 (2009)
- 15) T. Nara, Y. Takanashi and M. Mizuide: A sensor measuring the Fourier coefficients of the magnetic flux density for pipe crack detection using the magnetic flux leakage

method, J. Applied Physics, **109**-7, 07E305 (2011)

〔著 者 紹 介〕

千 葉 昭 宏 (学生会員)

2011 年, 電気通信大学電気通信学部知能機械工
学科卒業. 同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進学. 現在に至る.

奈 良 高 明 (正会員)

2000 年, 東京大学大学院工学系研究科先端学際
工学博士課程修了. 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
年東京大学情報学環講師, 2007 年電気通信大学准
教授, 現在に至る. 逆問題の解法と計測法の研究
に従事.