

研究種目：若手研究（A）
 研究期間：2007年度～2008年度
 課題番号：19686027
 研究課題名（和文） 局所観測に基づく電磁場源推定手法の開発およびそのRFIDタグ定位への応用
 研究課題名（英文） Direct reconstruction of the magnetic field source based on local measurements and its application to RFID localization
 研究代表者
 奈良 高明（NARA TAKAAKI）
 電気通信大学・電気通信学部・准教授
 研究者番号：80353423

研究成果の概要:近年ユビキタスコンピューティングのキーデバイスとしてRFIDタグが様々なモノ・ヒト・環境に貼られている。ID情報に加え位置情報が推定できれば、ロケーションウェアなインタフェースが実現できる。本研究は135kHzのパッシブタグからの応答である磁場に対し、円周上のフーリエ係数に着目し、これを直接計測するコイルを開発し、200mm四方程度の領域で8mm程度の誤差で定位するシステムを開発した。また局所観測による磁場源直接再構成手法は、脳内神経電流源推定や探傷にも有効であることも示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	4,300,000	1,290,000	5,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：センシング情報処理

1. 研究開始当初の背景

近年、ユビキタスコンピューティングのキーデバイスとしてRFIDタグが様々なモノ・人・環境に貼られるようになってきた。IDを基にネットワーク上の無尽蔵とも言える知識・情報を対象に付与することができるため非常に大きな注目を浴びている本技術において、更に動き回るモノや人に貼られたタグの位置が検出できれば、場所に応じた、ロケーションウェアなインタフェースが実現され、その展開は計り知れない。例えば、800mm程度の読取レンジをもつ135kHzあるいは13.56MHzの低周波タグ(以下、近接場タグと

呼ぶ)では、机の上程度の広さにおけるモノや作業の追跡が可能となり、製品組立過程の自動ログ化、手指の位置に応じた触覚提示インタフェース、生体内に投与・挿入した医療器具位置の追跡などが可能となる。更に、レンジが数mから数十mとなる300MHz、950MHzのタグ(以下、遠方場タグと呼ぶ)では、室内環境における盲人やロボットのナビゲーションなどが実現できる。

従来法では、超音波やレーザー測距計、屋外ではGPSなどの別のモダリティを用いるか、多数のタグを床に敷きつめリーダをもった観測者の位置を検出する手法が主流であつ

た。一方で近年、環境に必ずしも固定されていないタグを、ID情報の交信に用いる電磁場のソースとして定位する手法の開発が盛んになりつつある。タグはループコイル(135kHz, 13.56MHz, 300MHz)もしくはダイポールアンテナ(950MHz, 2.45GHz)をもち磁気双極子もしくは電気双極子ソースと見なすことができる。また複数のタグはアンチコリジョンにより識別可能であるため、単一の磁気・電気双極子が定位できるコンパクトなセンサと高速なアルゴリズムが必要となる。近接場を用いた定位手法として磁気センサアレイを用いる手法、遠方場を用いた定位手法として、電波強度、広帯域パルス波の到達時間差に基づく三角測量による定位手法が提案されている。しかしいずれもセンサを複数箇所に配置しておく必要があり、単一のコンパクトなセンサによるタグの定位にはなっていない。局所的な観測量を計測するセンサ、およびその観測量を基にタグ位置を直接推定する逆問題アルゴリズムが開発されれば、簡便・安価で高速・高精度なタグ定位システムが実現できると考えられる。

また、RFIDタグの位置推定のみならず、ソース推定には多様な応用がある。例えば、脳内神経電流源の推定、漏洩磁束探傷、画像特徴量抽出などである。これらは数学的には、磁気双極子あるいは電流双極子の位置を、それらが作る磁場から推定する逆問題として定式化される。これらの応用に対する定位システムにおいて共通に求められるのは、1) 局所的観測量からの再構成、2) 観測量からの直接的再構成、3) ソースが空間的広がりをもつ場合の再構成、以上3点であり、その開発が必須と考えられる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、RFIDタグの定位を主たる応用とし、より具体的には、生産現場における作業工程の自動ログ取得システム、物品の在庫管理、触覚インタフェースにおける位置センシングを念頭に置き、作業台・机の上など平面上に存在する135kHzのパッシブタグを定位するための、高速・高精度な磁場源推定アルゴリズムの開発と、平面型で簡易なセンサシステムの開発を目的とする。

また漏洩磁束探傷・脳内電流源推定・画像特徴量抽出にも応用可能な局所的センサ、および直接再構成アルゴリズムの開発も目的とする。

3. 研究の方法

(1) 局所観測量に基づくRFIDタグの定位

図1のように、円盤型、カード型などの近接型タグが2次元平面内を動くことを考える。2次元平面をxy平面とする。この際、タグのループアンテナの法線方向、すなわちタグの

磁気双極子は、z軸方向を向いているものとする。原点を中心にタグリーダおよび定位センサを配置する。タグのxy平面上の位置をデカルト座標で (x_0, y_0) 、極座標で (r_0, θ_0) と表す。この2次元座標を定位するのが目的である。タグのループコイルの磁気双極子を $(0, 0, p) \exp(i \omega t)$ と表す。以下では時間変化項 $\exp(i \omega t)$ は省略して記述する。

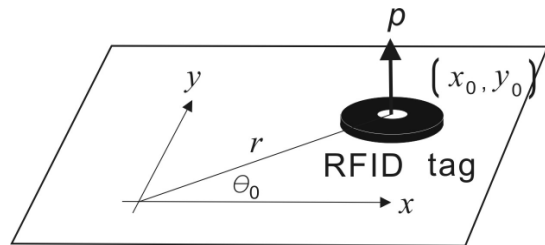


図1：問題設定

タグを磁気双極子とみなしその位置を推定する場合、磁気センサ(ループコイル)をアレイ状に配列し、非線形最適化により位置パラメタを求めるのが通常である。しかしアレイ配置によるセンサの巨大化、多チャンネル化、リアルタイム性の欠如などが問題となる。

これに対し、我々はこれまで、磁場のx微分、y微分の比をとることで、磁気双極子の偏角が決定できることを示した。これにより2チャンネルのセンサでタグの偏角が決定でき、ループコイルの1チャンネルと合わせることで2次元定位が実現できる。ただし、微分を差分により計測するグラディオメータでは、レンジの拡大に対応すべくセンサを巨大化するにつれ、近似誤差が顕著となる。そこで、磁場の高階微分を系統的に含む、磁場のフーリエ係数に着目し、1次フーリエcos係数、1次フーリエsin係数を直接計測するセンサを開発し、その出力比をとるだけで偏角が定位可能であることを示す。これにループコイルを加え、合計3チャンネルのセンサシステムで2次元定位が可能となることを示す。

(2) 双極子+四重極子の推定

タグ、漏洩磁束探傷における欠陥、脳内神経電流源など磁場源のモデルとして、1次近似として双極子が用いられるが、より現実的には空間的広がりをもったソースの推定が重要となる。この場合、双極子に加え、四重極子を配した磁場源の推定手法が重要となる。

これまで、双極子推定を函数論を用いて定式化し、観測量から書き下せる代数方程式の根として、双極子位置を決定する直接解法を提案してきた。本研究では、双極子+四重極子ソースモデルに対し、やはり代数方程式の根として位置を推定する手法を開発する。これにより、初期推定解や順問題の反復演算が不要であり、なおかつ広がりをもった磁場源

を高精度に推定するアルゴリズムが実現される。

4. 研究成果

(1) フーリエコイルによる平面上でのタグ定位

①磁気双極子とみなせるタグが作る磁場に関し、まず次の偏角推定原理を得た：

$$\frac{\int_0^{2\pi} B_z(\epsilon \cos \theta, \epsilon \sin \theta, 0) \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} B_z(\epsilon \cos \theta, \epsilon \sin \theta, 0) \cos \theta d\theta} = \frac{y_0}{x_0}$$

この式の左辺の分子は、半径 ϵ の円周上における、磁場のフーリエ \cos 係数、フーリエ \sin 係数を表している。したがって、もしこれらの2つの量が計測できれば、その比をとるだけで、直接、タグの偏角が推定できることを意味している。

②円周上のフーリエ係数を直接計測する「フーリエコイル」を提案した。これは、円周上の位置 θ におけるコイル幅を $\cos \theta$, $\sin \theta$ で変化させたコイルである。コイルにより計測されるのが、磁場にコイル面素の重みをかけた磁束(の時間変化)であることから、これらのコイルにより、フーリエ \cos 係数、フーリエ \sin 係数そのものが出力として得られる。これにより、わずか2つのセンサ出力の比をとるだけで、タグ位置の偏角が決定できる。作製したフーリエコイルを図2に示す。

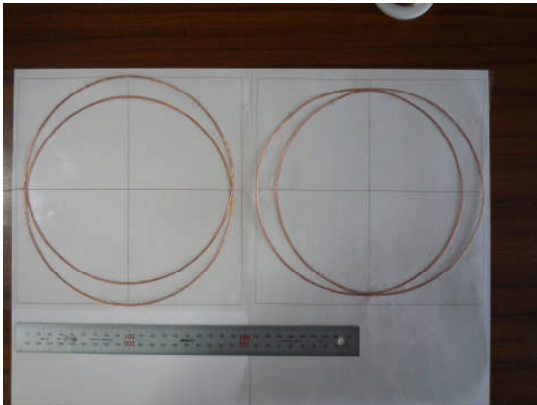
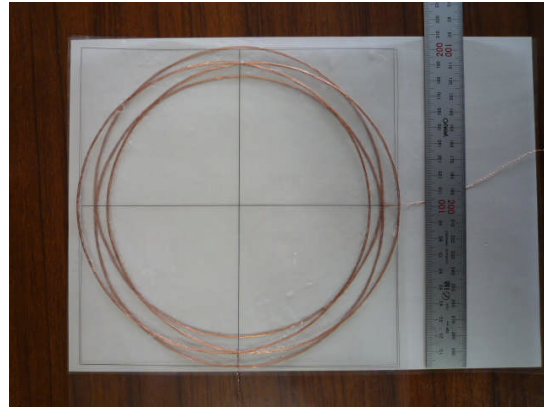


図2：(左) フーリエ \sin コイル, (右) フーリエ \cos コイル

③タグの動径方向の推定には、フーリエコイルの出力自乗和、およびループコイルの出力を用いる。結局、センサユニットは、フーリエ \cos コイル, フーリエ \sin コイル, ループコイルの3つからなる (図3)。

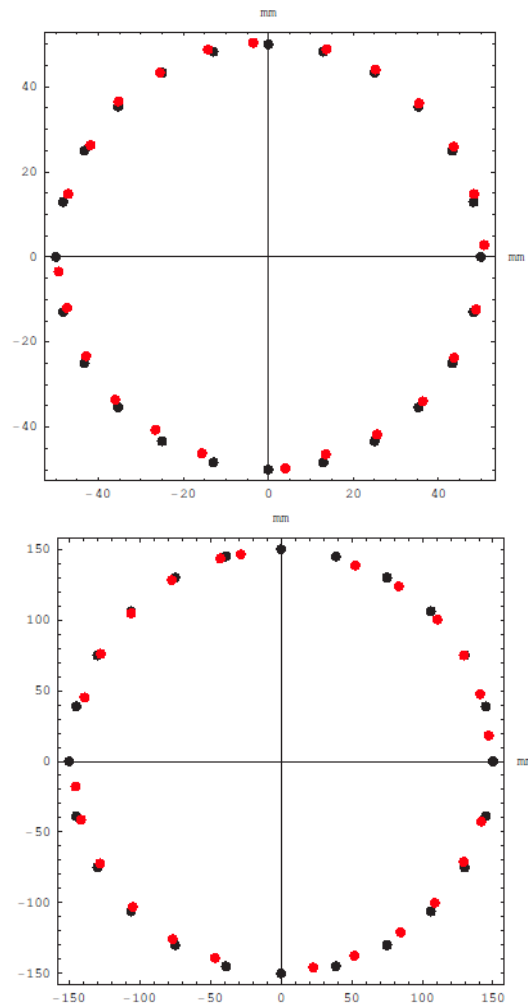
図3：センサユニット。フーリエ \cos コイル



+フーリエ \sin コイル+ループコイルの3チャンネルからなる。

④二次元位置推定誤差を図4に示す。 $r=50\text{mm}$ のとき最大誤差は 5mm 程度, $r=120\text{mm}$ のとき最大誤差 8mm 程度での定位が実現できたことがわかる。

図4：定位結果。黒丸：真のタグ位置。赤丸：



推定位置。(上) $r=50\text{mm}$ のとき。(下) $r=120\text{mm}$ のとき。最大誤差は $r=50\text{mm}$ のとき 5mm , $r=120\text{mm}$ のとき 8mm 程度である。

(2) 双極子+四重極子ソースの直接代数定位
二次元平面内にある複数の双極子ソース

に対し、複素ポテンシャルのローラン係数を考えると、ソース位置に対するモーメント問題が得られる。この連立方程式は Prony の方程式に変換可能なため、ソース位置の基本対称式が線形方程式の解として求まり、この結果、双極子位置が代数方程式の根として求まる。以上が双極子推定の直接定位法の概要である。

そこで双極子+四重極子ソースの場合にも、複素ポテンシャルのローラン係数を考えることにより、まずモーメント問題を一般化した方程式を導出した。次にこの連立代数方程式が、ソース位置の基本対称式に関する、(線形方程式でなく)連立2次方程式となることを示した。さらにこのとき、この方程式を表現する行列がハンケル行列となるため、これらの線形結合により、基本対称式に関する一次方程式系に変換可能であることを示した。これにより結局、双極子+四重極子ソースの場合にも、ソース位置を代数的に再構成することが可能となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Takaaki Nara, An algebraic method for identification of dipoles and quadrupoles, Inverse Problems, 24, 025010 (19pp.), 2008. 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① 奈良 高明, 安藤 繁, 部分境界データによる双極子推定逆問題の厳密直接代数解法, 日本応用数学会 2008 年度年会, 2008. 9. 17, 東京大学.
- ② Takaaki Nara and Shigeru Ando, A coil for measuring the Fourier coefficients of the magnetic field and its application to dipole localization, SICE Annual Conference 2008, 2008. 8. 20, Tokyo.
- ③ Takaaki Nara and Shigeru Ando, An iterative algebraic algorithm for the magnetoencephalography inverse problems, Society for Industrial and Applied Mathematics Imaging Science 2008, 2008. 7. 8, San Diego.
- ④ Takaaki Nara, Reconstruction of the number and positions of dipoles and quadrupoles using an algebraic method, The 6th international conference on inverse problems in Engineering, 2008. 6. 16, Paris.

- ⑤ Takaaki Nara, An inverse source problem for the Helmholtz equation, International Workshop on Applied Mathematics and Computational Science, 2007. 9. 26, Tokyo.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

- ①名称: 磁気センサおよび漏洩磁束探傷装置
発明者: 奈良 高明
権利者: 電気通信大学
種類: 特願
番号: 2008-186463
出願年月日: 2008. 7. 17
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奈良 高明 (NARA TAKAAKI)
電気通信大学・電気通信学部・准教授
研究者番号: 80353423