

機関番号：12612

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010年度

課題番号：21760311

研究課題名 (和文) ソース推定逆問題の直接代数解法と応用

研究課題名 (英文) An algebraic method for inverse source problems and its applications

研究代表者

奈良 高明 (NARA TAKAAKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：80353423

研究成果の概要 (和文)：人間の頭部表面で観測した磁場から脳内の電流源を推定する逆問題に対し、電流源を囲まない開曲面上におかれたセンサで計測したデータから、電流源の位置を直接、反復計算なく推定する手法を提案し、実際の脳磁場データで検証した。また配管に磁場を加え、配管表面の腐食傷などを検出する非破壊検査逆問題において、従来のように多数のセンサをアレイ状に並べることなく、磁場のフーリエ係数と呼ばれる2つの量を測るだけで傷の位置が推定できることを示し、そのためのセンサ構造を設計・製作し、実証した。

研究成果の概要 (英文)：We considered the magnetoencephalography inverse problem and proposed a method for estimating the neural current inside the human brain from the magnetic field measured by sensors on a surface that does not enclose the current source. The advantages compared to the conventional methods are that it does not require an initial guess of the solution and iterative computing. Also, for non-destructive inspection of a steel pipe, we proposed two sensors that measure the so-called Fourier coefficients of the magnetic field. Compared to the conventional method using a sensor array, our method can localize a crack on the surface of the pipe by using the two sensors only.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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、逆問題、スマートセンサ、数理工学、非破壊検査、脳磁場、漏洩磁束探傷

## 1. 研究開始当初の背景

物理的な場を観測し、それを生み出した原因を推定するソース推定逆問題には、工学的に広範な応用がある。例えば、人間の頭部表面で電位・磁場を観測し、脳内の神経電流源の位置、向き、強度、分布を推定する脳波・脳磁図逆問題や、表面に傷をもつ鉄鋼材料を磁

化したとき生じる漏洩磁束を観測し、傷の位置、大きさを推定する非破壊検査などである。これらの問題に対し、従来法では、ソースを囲むようにセンサをアレイ状に配置する、もしくはセンサアレイをスキャンすることで、場の空間分布を計測するのが通常である。その上で、ソースが存在する対象領域に設定し

た格子点上に双極子ソースを配置し線形方程式を解いて双極子モーメントの分布を求めるか、もしくは、個数、位置、モーメントが未知である双極子を仮定し、非線形最小二乗法により未知パラメタを求めることでソース同定が行われていた。しかしながら、前者の線形手法では、1)劣決定系で一意解がない、2)正則化により解が滑らかになりすぎる、3)工学上重要なソース分布の中心が精度良く検出できない、という問題点があり、後者の非線形手法は、1)双極子個数の推定が困難、2)初期解が必要、3)順問題の反復計算が必要、4)局所最適解に陥る、という問題点があった。

そこで我々はソースをパラメトリックに推定する非線形手法の立場に立脚しつつ、観測データからソースパラメタを直接推定する研究を行ってきた。ポアソン方程式のソース項同定に関し、データの荷重積分によって計算されるローラン係数あるいは多重極展開係数を介して、ソースパラメタが直接再構成できることを示した。さらにこの解法を脳波・脳磁図逆問題に適用し、脳内の電流双極子の個数を含めたパラメタがノイズ環境下で推定できることを示した。またソースの空間的広がりを推定すべく、ソースの双極子+四重極子モデルに対する直接解法を二次元問題において提案した。以上の解法は、上記、従来の非線形手法の4つの欠点を解消するものである。しかしながら、1)本手法は本質的にGreen-Gaussの定理に立脚しており、ソースを囲む閉曲線/面上のデータを必要とし、部分的境界データしか得られない場合誤差が生じる、2)ソースの広がり具合に応じて、双極子+四重極子に加え更に高次の多重極子を加えた3次元問題の解法が望まれる、という問題点が尚残されていた。

また、磁場を計測するセンサアレイ出力を前提とするのではなく、直接法に適した計測手法およびセンサを開発し、逆問題の入力と解法を一体化させた研究も行っていた。磁気双極子ソースの定位において、コンパクトな局所的センサの必要性から、磁場とその勾配テンソルを計測するセンサを開発し、直接再構成公式による定位実験で有効性を確認した。さらに円周上での磁場の1次のローラン係数、すなわち1次のフーリエ係数を直接計測するコイルを開発し、これにより直接、鋼板上の傷位置が推定できることを示していた。

## 2. 研究の目的

以上の背景を基に、以下を明らかにすることを本研究の目的とした：

(1) 部分境界、すなわちソースを囲まない開いた曲線(二次元の場合)/曲面(三次元の場合)で観測したデータから、ソースパラメタを直接再構成する手法を導出する。

(2) 上記で開発する手法を脳磁図データに適用することで、半球面上に配置された磁気センサデータを基に、広がりを持った複数の神経活動源の活動中心および分散をパラメトリックに推定する。

(3) 一次のフーリエ係数を計測するセンサを配管探傷に適用し、高速に傷重心位置を推定可能であることを検証する。

## 3. 研究の方法

### (1)

①平成21年度では、二次元問題を考察した。ソースを囲まない開曲線上でのデータからソースを直接再構成する手法に関して、まず複数の極をもつ有理関数が満たす微分方程式を導出した。その上で、これに荷重 $z^n$ をかけ開曲線上で積分することにより、極の基本対称式に関する線形な項および積分境界値項から成る方程式を得る。こうして得られる方程式系を適切な重みづけで足し合わせることで、積分境界値項がキャンセルし、極の基本対称式に関する線形方程式を得る。このとき必要となるデータは、開曲線上のデータのみである。こうして、開いた曲線上のデータから、極の基本対称式を決定し、一変数代数方程式の根として極を求めることができる。従来の閉曲線データを仮定した直接法や、開曲線上データを用いた線形最小二乗法に対し、精度・安定性ともに向上することを数値シミュレーションで示した。さらに本手法の推定結果を初期値とし、非線形最適化をかけることで、大域最適解に収束することを示した。

②平成22年度では、三次元問題を考察した。磁場の多重極展開を有限で打ち切ったとき、多重極係数と開曲面上のデータの間に関係が成り立つ。これにより、従来のように閉曲面上データの積分によらず、開曲面上データから最小二乗法を用いて多重極係数が計算可能となる。この際、係数行列の悪条件性に対する正則化として打切特異値分解を用い、打切次数の決定には、再構成したソースパラメタによる磁場分布とデータとの適合度を用いることができる。得られた多重極係数を用い、昨年度まで開発してきた直接解法を適用することで、順問題解の反復計算なくソースパラメタを推定することが可能である。

### (2)

①ファントムヘッドを用いて、部分境界データからソース推定が可能であることを検証する。打切特異値分解の次数の決定に際しては、ある打切次数を固定した場合に得られる再構成結果から順問題解を計算し、Goodness of Fit (GoF) を求める。打切次数を変化させて同様の計算を行い、GoFが最大となる打切

次数を選択する．この打切次数のとき，推定位置誤差が最小となることを確認する．センサは168個のラディアルグラディオメータを用いる．

②右手指先にパルス状電気刺激を与えたときの体性感覚野に活動源をもつ脳磁図の解析を行い，提案手法の検証を行う．

③双極子+四重極子を用いた脳磁場データ解析を数値シミュレーションにより行う．特に皮質のしわ構造により双極子が逆向きに配置される状況に対して，従来の双極子モデルよりも四重極子を加えたモデルの方が精度高く位置推定可能であることを示す．

(3)

図1のように配管断面にxy平面をとり，配管内壁の偏角 $\phi_0$ の位置に傷があるとする．配管に交流磁界を印加すると，傷位置にあたかも磁気双極子が存在するような漏洩磁束が生じる．ここで配管内部の半径Rの円周上において，漏洩磁束の1次フーリエcos係数およびsin係数を計測する図2，3のようなセンサを同心で配置する．このとき，フーリエsin係数/フーリエcos係数の比から， $\tan \phi_0$ が求められる．そこでパイプ内壁の傷位置 $\phi_0$ を2chのセンサで計測するシステムを構築する．

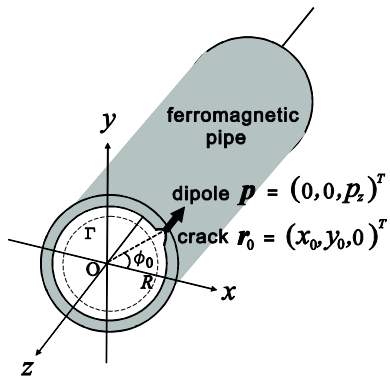


図1：漏洩磁束配管探傷のモデル．内壁に傷のある配管に交流磁界をかけると，等価的に磁気双極子があると見なせる．

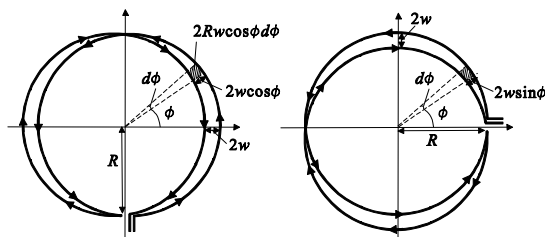


図2：(左)磁場の円周上フーリエcos係数を計測するセンサ(右)フーリエsin係数を計測するセンサ

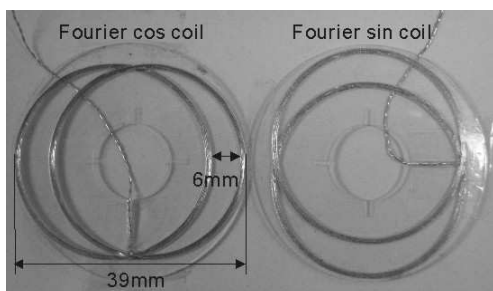


図3：(左)フーリエcosコイル，(右)フーリエsinコイル

#### 4. 研究成果

(1)

①二次元平面上の開曲線上で有理関数の値を観測し，その極を代数的に再構成する手法を導出した．すなわち，関数値の荷重積分を観測量とし，極の基本対称式に関する線形方程式を導出した．この結果，極位置が一変数の代数方程式の根として求めることが可能となった．閉曲線上のセンサ欠損部におけるデータの外挿と極再構成を反復する従来法に対し，部分境界データから直接，代数的に極位置が求められることが大きな利点である．

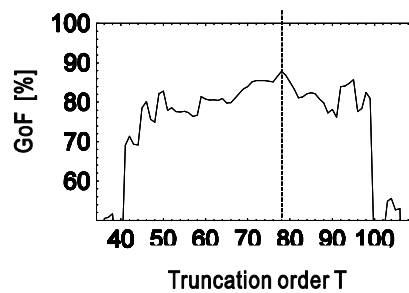
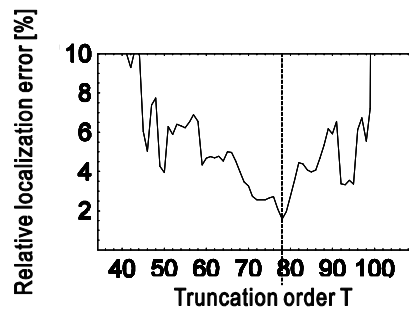
②三次元問題に関し，ソースを囲まない開いた曲面上データと磁場の多重極展開係数に関する線形方程式を，打切特異値分解を用いて解き，得られた多重極係数から，直接法でソースを再構成する手法を構築した．従来，直接法の誤差要因となっていた閉曲面上でのデータ欠損に対する有効な手法であるといえる．

(2)

①ファントムヘッドを用いた定位結果の例を示す．図4上は打切特異値分解の次数に対する位置推定誤差を，図4下は打切特異値分解の次数に対するGoFの値を示す．この例では，打切次数78のときGoFが最大となり，このとき位置推定誤差が最小となることがわかる．すなわち，GoFの値から最適な打切次数が求められることがわかる．図5は双極子の再構成結果である．どの場所においても，位置推定誤差最小値およびGoF最大値は同一の打切次数で得られた．

図4上：打切次数と相対位置推定誤差．

図4下：打切次数とGoF．GoFを最大にする打切次数が，位置推定誤差を最小にすることがわかる打切次数が，位置推定誤差を最小にすることがわかる．



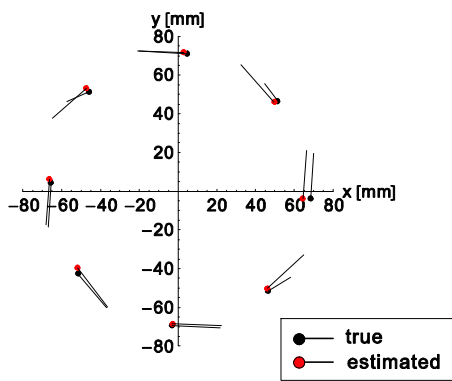


図5：ファントムヘッドを用いた電流双極子の位置推定結果

②右指にパルス状電気刺激を与えたとき、101msec後のMEGデータを用いた再構成結果を図6に示す。左右の体性感覚野に2個の双極子が推定されていることがわかる。また双極子を3個として推定すると、3個目の双極子の磁化モーメントは2個目の磁化モーメントの0.0002倍となり、双極子個数は実質的に2個であると判定できることもわかる。

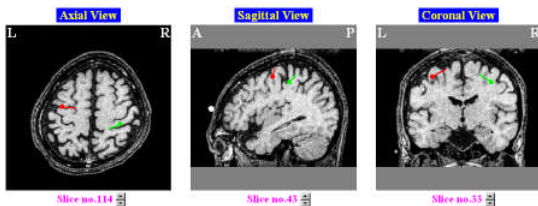


図6：右手指先にパルス状電気刺激を与えたとき101msec後の双極子再構成結果。左右の体性感覚野に定位されていることがわかる。

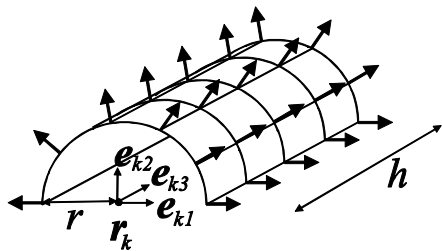


図7：半円筒上の分布双極子。r=h=5mm.

③頭部半径を120mmとし、図7のような半円筒表面に双極子が分布したソースを考え、等価双極子モデル、および双極子+四重極子モデルを用いた再構成結果の比較を行った。図8のように分布ソースの等価双極子が頭部の動径方向を向く場合、外部に磁場を作らないサイレントソースとなる。このため双極子モデルでの位置推定誤差は120mmとなり全

く位置推定できない。これに対し、双極子+四重極子モデルを用いると、位置推定誤差は1.4mmであり精度の良い推定が実現される。これは大脳皮質の形状により、これまでの等価双極子モデルでは必ずしも十分でないことを示唆しているといえる。

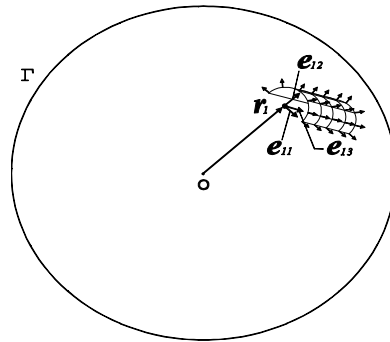


図8：等価双極子が頭部動径方向を向くと、半円筒ソースは四重極性となる。

(3) 図9は、傷の配管円周位置に対する推定誤差である。直径500mmの磁性管内壁および外壁に存在するφ10mmの円形傷の円周方向位置が定位できることを実験的に示した。

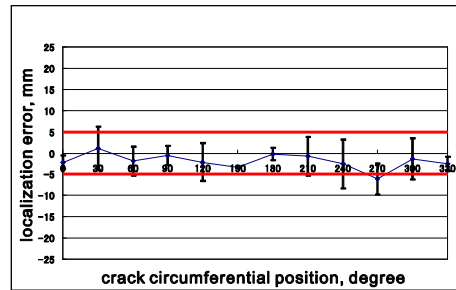


図9：傷位置の偏角に対する推定位置誤差。

## 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5件)

① Takaaki Nara, Yuushi Takanashi, and Masashi Mizuide, A sensor measuring the Fourier coefficients of the magnetic flux density for pipe crack detection using the magnetic flux leakage method, Journal of Applied Physics, 109, 07E305, 2011, 査読有。

② Abdellatif El Badia and Takaaki Nara, An inverse source problem for quasi-static Maxwell's equations, Journal of Inverse and Ill-posed Problems, 18, 741-764, 2011, 査読有。

③ 奈良 高明, 磁場のフーリエ係数計測用コイルの開発と漏洩磁束探傷への応用, 検査技術, 15, 8-13, 2010, 査読無。

④ Takaaki Nara and Shigeru Ando, Direct localization of poles of a meromorphic function from measurements on an

incomplete boundary, Inverse Problems, 26, 015011(26pp), 2010, 査読有.

⑤Shigeru Ando and Takaaki Nara, An exact direct method of sinusoidal parameter estimation derived from finite fourier integral of differential equation, IEEE Trans. Signal Processing, 57, 3317-3329, 2009, 査読有.

〔学会発表〕(計13件)

①Takaaki Nara, Yuushi Takanashi, and Masashi Mizuide, A sensor measuring the Fourier coefficients of the magnetic flux density for the pipe crack detection using the magnetic flux leakage methods, 55<sup>th</sup> Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Hyatt Regency Atlanta, Atlanta, USA, 2010年11月17日.

②奈良 高明, 安藤 繁, 磁場源拘束偏微分方程式と荷重積分法に基づく磁気双極子位置推定の直接代数法, 日本応用数学会 2010 年度年会, 明治大学(東京都), 2010年9月6日.

③ Takaaki Nara, Yuushi Takanashi, and Hiroyuki Watanabe, Two-dimensional localization of a magnetic dipole from its first order Fourier coefficients of the magnetic flux density, SICE Annual Conference 2010, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan, 2010年8月21日.

④奈良 高明, 電流双極子・四重極子モデルに対する直接解法, 第25回日本生体磁気学会大会論文集, さわやか千葉県民プラザ(千葉県), 2010年7月29日.

⑤ Takaaki Nara and Shigeru Ando, Identification of poles of a meromorphic function and its application to inverse source problems, 数値解析と数値計算アルゴリズムの最近の展開, 京都大学数理解析研究所研究集会, 京都大学, 2009年12月16日.

⑥奈良 高明, 多重極ソースモデルを用いた脳磁場逆問題の直接解法, 日本応用数学会 2009 年度年会, 大阪大学, 2009年9月28日.

⑦奈良 高明, 高梨 祐史, 渡邊 裕俊, 磁場のフーリエ係数計測コイルの開発と磁気双極子推定・漏洩磁束探傷への応用, 第33回日本磁気学会学術講演会, 長崎大学, 2009年9月15日.

⑧奈良 高明, 脳磁図(MEG)逆問題の数理と解法一定式化・従来法・直接法-(招待講演), 画像計測研究会 2009, 核融合科学研究所, 岐阜県土岐市, 2009年9月4日.

〔産業財産権〕

○取得状況(計1件)

名称: 磁気センサおよび物品位置推定装置  
発明者: 奈良 高明, 橋本 光男, 小泉 捷平, 鈴木 啓介

権利者: 電気通信大学

種類: 特許

番号: 2010-047874

取得年月日: 2010年2月4日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.inv.mce.uec.ac.jp/nara/index-j.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奈良 高明 (NARA TAKAAKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・助教

研究者番号: 80353423

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし