

研究報告書

「函数論に基づく間接計測の数理基盤構築」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成27年10月～平成31年3月

研究者: 奈良 高明

1. 研究のねらい

現代社会において、所望の情報を別の物理量に変換して計測し、数理的に復元する間接計測が至る所で求められる。本研究では、(A)脳磁場逆問題、(B)燃料電池の非破壊検査、(C)瓦礫埋没者探索、の3つの間接計測に対して、函数論、ポテンシャル論的視点を導入し、従来法では推定することが困難だった課題を解決することを目的とした。

(A)脳磁場逆問題: 頭部表面で観測した磁場から脳内の神経電流源を推定する問題を脳磁場逆問題といい、脳機能解析、てんかんの診断などに用いられる。従来法は、1)複数の電流双極子の個数、位置、モーメントを求めるパラメトリック手法、2)皮質表面のメッシュ上に電流源を固定し電流強度を求めるイメージング手法に大別される。しかしながら、1)では神経活動源領域の中心位置は求まるものの、領域形状がわからず、2)では局所的な電流源が隣接する脳回に散らばって推定される問題があった。そこで、球面から皮質表面への写像を導入し、パラメトリックにソース領域形状まで求める手法を開発する。

(B)燃料電池の非破壊検査: 水素と酸素を用いて発電する燃料電池は、二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギー源として注目され、家庭用燃料電池や電気自動車へ導入されている。水素と酸素が化学結合する膜電極接合体における不純物の付着や欠陥の存在は発電分布の偏りを生じさせ、早期劣化、異常発熱や発火の原因ともなるため、非破壊検査が重要となる。そこで燃料電池の周辺で磁界を計測し、欠陥の存在、位置、形状を同定する逆問題に対し、函数論を導入し、有理型函数の極として欠陥位置を推定する手法を提案する。

(C)瓦礫埋没者探索: 雪崩埋没者がもつ低周波(457kHz)発振機により生成される磁場を計測し探索に用いる雪崩ビーコンを応用し、地震災害時の瓦礫埋没者探索手法を提案する。発振機のもつ一軸の磁気双極子アンテナのみを用いる従来法では、磁力線に沿って埋没者に大回りして接近する必要があった。そこで、発振機側でも三軸のアンテナを用い、発振機の磁気双極子を等価的に鉛直方向に向かせる、あるいはxy平面内で回転させることにより、埋没者への直線的接近が可能な手法を開発する。特に後者では、複素磁場の正負の回転周波数成分により、直接埋没者の方位角を同定可能にする。

2. 研究成果

(1) 概要

(A)脳磁場逆問題: 球面から皮質への写像を導入した上で、皮質上の領域を、球面上の円領域の像として表現する手法を開発した。球面上の円領域は中心位置と半径の3自由度により表現できるため、複雑に折りたたまれた皮質上の神経電流源領域がパラメトリックに表現できる。しかも、これらのパラメタで表した順問題解と観測磁場の二乗誤差を評価関数とする最

適化問題を考えた際、パラメタの存在範囲が超立方体となるため、評価関数のリップシツツ定数に着目した効率的な探索により大域最適解を得ることができる。提案手法の検証として、視覚刺激を与えたときの実データ解析を行い、提示した扇形のサイズに応じて、視覚野の賦活領域サイズが大きくなることを示した。これは fMRI でのみ得られていた結果と符号するものであり、なおかつ脳磁場の高時間分解能特性を活かし、賦活領域の時間発展を得ることが可能となった。また、脳磁場から計算される多重極係数の時系列からテンソルを構成する安定なパラメトリック手法も提案した。

(B)燃料電池の非破壊検査: 発電部位である膜電極接合体は十分薄く、電流はこの面に垂直に流れるという二次元モデルを用いた解析を行った。発電部に点状欠陥がある場合、周辺磁界から複素磁場を構成すると、点状欠陥位置を一位の極とする有理型関数で表されること、周辺磁界のローラン係数を計算することで欠陥位置を代数的に推定できることを示した。さらにレベルセット法を導入して欠陥形状も同定可能であることを示した。実機実験データにより、両手法により欠陥同定可能であることを実証した。

(C)瓦礫埋没者探索のための磁気双極子推定: 発振器に三軸加速度センサをつけ姿勢を検出した上で、発振機側も三軸アンテナを用いることで、探索者が埋没者に直線的に接近できる二つの手法を開発した。第一の手法では、磁気双極子が鉛直上向きになるよう三軸アンテナに交流電流を印加する方法で、探索面内で、埋没者直上から放射状に磁力線が生成されるため直線探索が可能となる。第二の手法では、磁気双極子を xy 面内で等価的に回転させることで、探索者は観測した複素磁場の正負の回転周波数成分より埋没者の方位角が推定できる。また磁場の z 成分も用いることで仰角も推定できる。さらに瓦礫中に含まれる強磁性体の影響も十分小さいことを数値シミュレーションおよび実機実験で検証した。

(2) 詳細

(A) 脳磁場逆問題におけるソース領域形状の記述と推定

皮質上の神経電流源領域形状をパラメトリックに表現するために、球面から皮質表面への写像を導入した。まず穴のない種数 0 の曲面から球面への調和写像を求める手法を用いて、MRI で得られた皮質表面上メッシュの節点から球面上の点群への写像を数値的に構成する。これにより、皮質表面上の領域が、球面上領域の像として表現できる。そこで、皮質表面上の領域を、球面上の円領域の像として推定する手法を提案した。この結果、皮質上の一つの連結領域が、球面上円領域の中心位置 (θ, ϕ) と半径 r の 3 自由度で表現されることになる。皮質上に N 個の神経電流源がある場合は、 $3N$ 個のパラメタで磁場が表現できる。そこでこの理論モデルによる磁場と観測磁場の二乗誤差を評価関数として最適化を行う。ここで、球面上円形領域の中心位置、半径には上限・下限がある。この結果、本逆問題は超直方体内に存在するパラメタの最適化問題となり、リップシツツ定数の概念に基づき、リップシツツ定数は未知のまま、効率的に大域最適解を求める最適化手法を適用することができる。

本手法の検証をまず数値シミュレーションで行った。306ch のセンサ位置における磁場を与え、10%ガウシアンノイズを加えデータとし、皮質上の単一領域を推定した。図1のように、L1 ノルム最小化を用いた従来法では神経電流領域が隣接する脳回にまで散乱して求まってしまうのに対し、提案法では連結領域がパラメトリックに求められることがわかる。

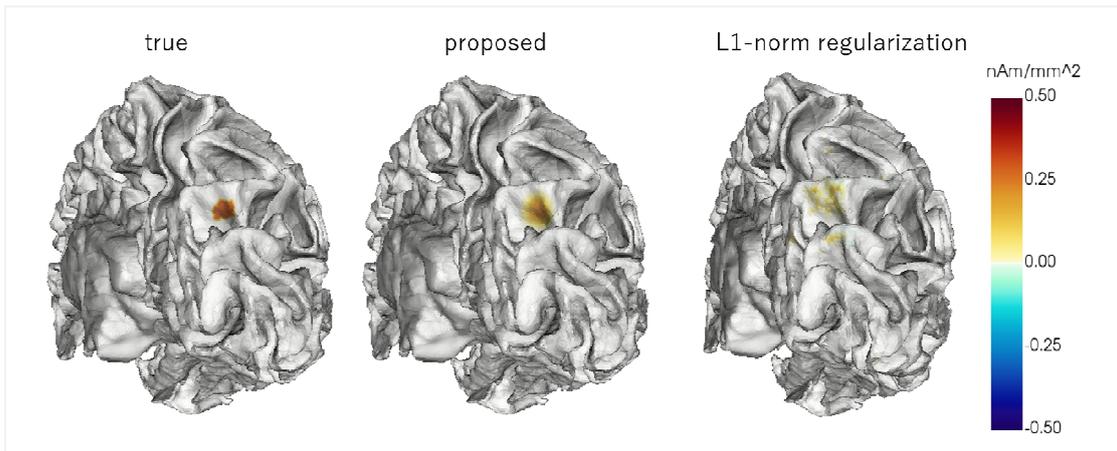


図1: 数値シミュレーション. (左) 真の神経電流源領域. (中央) 提案法による推定結果. (右) L1 ノルム最小化による推定結果.

実データを用いた検証として、CiNET の天野薫氏との共同研究で、視覚刺激を与えたときの神経活動源推定を行った。視覚刺激としては図2のように扇形の中心角が異なる3種類の縞模様を提示した。この結果、提示される刺激サイズに従い、V1 野における活動源領域の面積が広がっていくことが確認された。V1 野におけるレチノトピックマッピングはfMRIでは示されているが、提案手法によりこれがMEGでも行えることが示され、時間分解能の高い領域推定が可能となった。

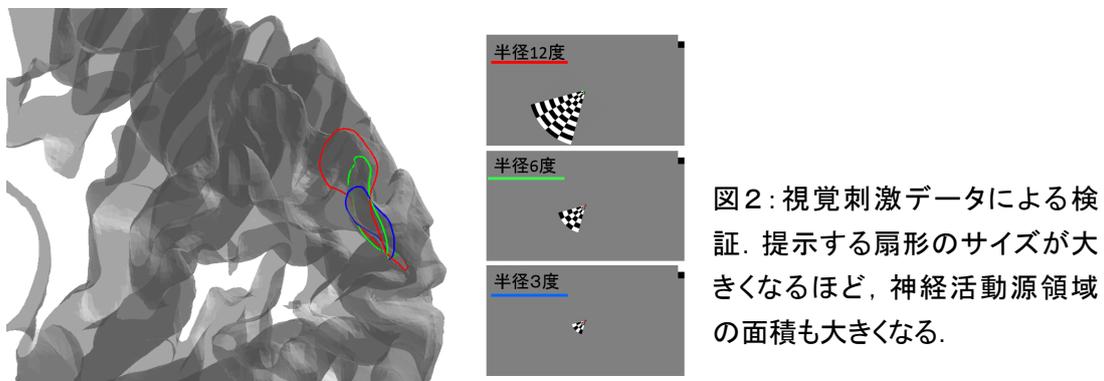


図2: 視覚刺激データによる検証. 提示する扇形のサイズが大きくなるほど、神経活動源領域の面積も大きくなる.

また、脳磁場から計算される多重極モーメントからハンケル行列を用いて双極子パラメタを推定する従来法に対し、時系列データを用いてテンソルを構成し、双極子パラメタを安定に推定する手法もあわせて開発した。

(B) 燃料電池の非破壊検査

燃料電池の構造から、膜電極接合体に対し電流が垂直に流れる二次元モデルを考え、周辺磁界を複素磁場で表現することで、点状欠陥推定問題を有理型関数の極推定問題に帰着させた。これにより、周辺磁界の複素線積分として計算されるローラン係数を用いて、点状欠陥の位置が単純な代数計算だけで同定可能となった。さらに欠陥形状も推定するため、レベルセット法を導入し、複数の欠陥が形状も含め同定可能であることを示した。

北九州市立大学の泉政明教授，大分大学の後藤雄治准教授との共同研究で実機実験による検証を行った。人工的に欠陥を作った膜電極接合体，ローラン係数に基づく欠陥位置の推定結果，レベルセット法による推定結果を図3に示す。欠陥位置や形状が同定されていることがわかる。ローラン係数法は日常的な保守における単純・高速な計算に向いており，レベルセット法は詳細な形状同定に向いていると言える。

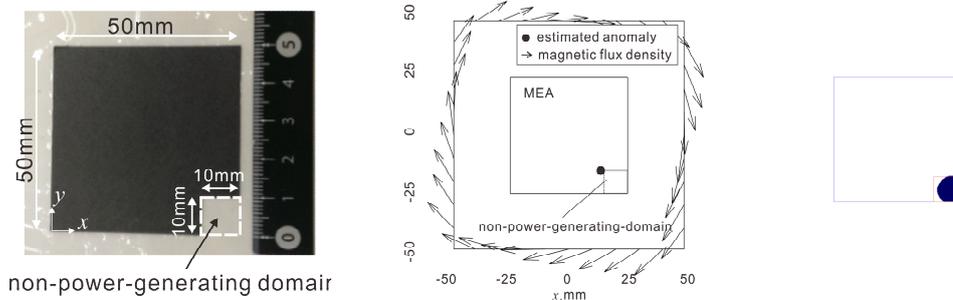


図3: (左)欠陥のある膜電極接合体. (中央)周辺磁界のローラン係数に基づく欠陥位置同定結果. (右)レベルセット法による欠陥形状の同定結果.

(C) 瓦礫埋没者探索のための磁気双極子推定

従来の雪崩埋没者ビーコンでは発振側の磁気双極子アンテナは1軸しか用いられていなかったのに対し，3軸すべてを用い，かつ，3軸加速度センサをつけ埋没姿勢も検出することで，探索者が直線的に埋没者に接近できる2つの手法を開発した。第一の方法は，磁気双極子が常に鉛直上向きになるように3軸アンテナに交流電流を印加する方法である。これにより探索平面内に，埋没者直上から放射状にのびる磁力線分布が生成されるため，探索者は磁力線に沿って埋没者直上まで直線的に進むことができる。第二の方法は，発振器の磁気双極子が xy 平面内で等価的に回転するように3軸アンテナに交流電流を印加する方法である。このとき探索者が観測する磁場ベクトルの xy 成分から複素磁場を構成すると，その正負周波数成分から方位角が推定できることを示した。磁場の z 成分も加えることで仰角が推定できることも併せて示した。

また，円周アレイ状に配置したアンテナを用い，観測磁場の荷重積分量により発振機位置を直接推定する手法も開発した。さらに，瓦礫中に含まれる金属，特に強磁性体の影響を解析し，強磁性体は等価的に多重極子で表現可能であること，その影響は強磁性体近傍にとどまることを示し，実機実験による検証を行った。

3. 今後の展開

(A) てんかん原性領域の推定に応用展開する。既に，広島大学の橋詰顕医師，飯田幸治准教授，栗栖薫教授との共同研究を始めており，従来の双極子推定法ではてんかん原性領域の中心位置しかわからなかったデータを用いて，側頭葉に広がった領域を推定することに成功している。今後時系列解析を行ったうえで，皮質電極における電位計測結果と照合し，手術計画の一助となるようにする。

(B) 膜電極接合体を複数個，層状にスタックされた燃料電池が広く用いられており，この場合，各層で欠陥部位を回り込むような電流分布となるため，三次元モデルが必要となる。そこでレベ

ルセット法と代用電荷法を組み合わせ、各層の欠陥部の代用電荷を動かしながら反復計算することにより欠陥部を推定する手法を開発する。すでに予備実験で2層の場合、欠陥形状の推定に成功しており、多層の場合へと拡張する。

(C) 提案手法は低周波発振機を埋没者が保有している必要がある。まずは消防隊員などレスキュー隊員が保持し、二次災害時に用いることが考えられる。また、探索者側に回転磁気双極子を設置し、埋没者のもつスマートフォンの3軸磁気センサと3軸加速度センサを用い、埋没者から見た探索者の方位角・仰角を推定した上で、探索者にBluetoothで通信するシステムを開発する。方位角・仰角の推定には本研究で開発した手法をそのまま用いることができ、実際のスマートフォンを用いて、既に5~6m四方の領域で方向が推定可能なことを確認している。

4. 自己評価

函数論・ポテンシャル論的視座を入れることにより初めて導かれる手法により、従来困難だった課題を解決するという目的に沿った成果が得られたと考える。脳磁場逆問題では、領域を写像で表すというリーマンの写像定理の考え方に基づき、皮質表面上の領域を球面上の単純領域の像として表すことで、従来困難だった脳回・脳溝にまたがる連結領域の推定が可能となった。時間分解能の高さも活かし、これまで従来法で行われてきた推定課題を本手法で推定しなおすことで、新たな解釈が可能となる事例が多数考えられる。燃料電池の非破壊検査では、留数定理に基づき、点状欠陥位置が簡単に推定できるようになった。観測量としてローラン係数に注目すべきことが提言され、新たなセンサ開発につながる。瓦礫埋没者探索で確立された原理は、埋没者が発振機をもたないシステムの礎となる。今後の展開に記載した携帯端末を用いる手法につなげることで、実装展開が見込める。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. T. Nara, M. Koike, S. Ando, Y. Gotoh, and M. Izumi, Estimation of localized current anomalies in polymer electrolyte fuel cells from magnetic flux density measurements, AIP Advances, 6, 056603 (8 pages), 2016.
2. T. Nara, H. Takeda and S. Ando, Effect of ferromagnetic objects in rubble on rescue beacon searches, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 52, 61-66, 2016.
3. Y. Higuchi, T. Nara, and S. Ando, Complete Set of Partial Differential Equations for Direct Localization of a Magnetic Dipole, IEEE Transactions on Magnetics, 52, 4000910 (10 pages), 2016.
4. H. Miyoshi, T. Nara, Y. Gotoh, and M. Izumi, Level set method-based identification of locations and shapes of fuel cell defects, SICE JCMSI, 11, pp.470-476, 2018.
5. K. Kabashima, T. Wu, and T. Nara, Reconstruction of current dipoles based on tensor decomposition of multipole coefficients, JSIAM Letters, Vol. 11, 2019, (accepted).

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

T. Nara, Biomagnetic inverse problems: magnetic resonance electrical property tomography (MREPT) and magnetoencephalography (MEG), The 9th International Conference on Inverse Problems and Related Topics (ICIP2018), KN-08, Singapore, Aug. 16, 2018. (Invited)

T. Nara, K. Watanabe, K. Kabashima and K. Amano, An inversion method for magnetoencephalography (MEG) based on a mapping from a sphere to the cortical surface, The 12th ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME2018), pp.70-71, Matsue, Japan, Sep. 7, 2018.

A. Chiba and T. Nara, Searching an avalanche victim using a transmitter with a rotating magnetic dipole, INTERMAG 2018, CV-10, pp. 89, Singapore, Apr. 25, 2018.

T. Nara and T. Go, A Tensor Decomposition Method for Inverse Source Problems, SIAM Conference on Applied Algebraic Geometry (AG17), p.80, Atlanta, Jul. 31, 2017.

函数論の計測工学への応用(1) コーシーの定理と非破壊検査, 数理のクロスロード, 数学セミナー-2018年5月号, 57-61, 2018.

函数論の計測工学への応用(2) プローニー法と脳磁場逆問題, 数理のクロスロード, 数学セミナー-2018年6月号, 57-61, 2018.

函数論の計測工学への応用(3) 非斉次コーシー-リーマン方程式に基づく癌・腫瘍診断, 数理のクロスロード, 数学セミナー-2018年7月号, 55-59, 2018.

2016 計測自動制御学会 SI2016 優秀講演賞

2017 計測自動制御学会計測部門論文賞