

論文審査の結果の要旨

氏名 宇野 裕

本論文は全7章よりなり、MEG計測データの時間構造に着目し、MEGノイズを推定・除去する方法の検討と提案を行った。

第1章では、MEG計測の背景を説明し、MEG計測におけるノイズの性質について説明し、これらのノイズに対処するべく提案された主な既存手法の概略とその有効性と問題点を概説した。MEGデータのノイズ除去法は大きく4つに分類できる。参照チャンネルを利用する手法、空間フィルタ、時間構造を利用したフィルタ、多変量解析の応用である。第一章ではこれら4クラスでの代表的な手法を説明し、その有効性、問題点を概説した。

第2章はこれまでの研究を踏まえ提案した新しい手法を述べた。その手法は、MEG計測データの生成モデルを観測データから推定し、その最適推定モデルを用いて、MEGデータの推定値を得る方法である。すなわち、まずMEGデータの生成モデルを次のように与える。

$$m_t = s_t + e_t + n_t$$

ここで m_t はあるチャンネルにおける時刻 t でのMEG計測値であり、 s_t は誘発脳磁場成分、 e_t は l_s 次元の線形システムから生成される背景雑音成分、 n_t は確率的に揺らぐセンサ雑音及びモデル化誤差成分であり、平均0、分散 σ_n^2 のガウス過程である。ここで、 e_t は次に示すような自己回帰過程であると仮定する。

$$e_{t+1} = \sum_{i=0}^{l_s} a_i e_{t-i} + v_t$$

ただし、 v_t は平均0、分散 σ_e^2 、のガウス過程である。提案手法は、ターゲットとする脳活動が含まれていないデータのプレ区間(s_t が0の区間)を利用して、背景雑音モデルを学習する。最適モデルを決定するときの評価関数として、赤池情報量基準(AIC)を用いる。その定義式は次式である。

$$AIC = -2 \log p(m_1, \dots, m_T | \theta) + 2M$$

ここで $p(m_1, \dots, m_T | \theta)$ を、モデルパラメータ θ が与えられたときに観測時系列 $\{m_1, \dots, m_T\}$ が観測される条件付き同時確率密度関数とし、これは時系列モデルの対数尤度と等しい。また、 M はモデルパラメータ数である。ここでのモデルパラメータベクトル θ は具体的には、 e_t の回帰係数 $\{a_1, \dots, a_{l_s}\}$ とその入力となるガウス過程の分散 σ_e^2 、センサノイズの分散 σ_n^2 から構成される。最適な背景雑音の近似モデルを探索するには、AICを評価関数として非線形最適化を行い、モデルパラメータとその次数を決定すればよい。これらの背景雑音モデルを学習した後に、脳磁場を含むデータにおいて、同様に誘発脳磁場のモデルを推定する。誘発脳磁場の構造はAR過程を仮定し、

$$s_{t+1} = \sum_{i=0}^{l_s} b_i s_{t-i} + w_t$$

で与える。ここで、 w_t は平均0、分散 σ_s^2 のガウス過程である。

第3章は数値実験により提案手法の有効性を検討した。計算機で作成した誘発脳磁場成分を、MEG ノイズデータと合成したデータセットを作成し、提案手法でのノイズ除去の結果と、独立成分分析(ICA)との結果を比較した。作成したデータセットは、実ノイズデータに擬似生体信号(以後、信号と記述する)を加算して作成した。信号は20Hzと70Hzにピークを持つようなARモデルに白色ガウス雑音を入力として与えた時の出力を、電流双極子のモーメントとし、その磁束を求めたものを使用した。この結果、提案手法はICAと比較して全般にSN比の改善がよいことが示された。

第4章では、実際のMEG計測で得られた誘発脳磁場を利用して、提案手法の有効性を検討した。その結果から我々の手法の問題点を指摘し、それを解決するために手法の拡張を行った。一般に誘発脳磁場のパワーは大きく時間変化している。定常AR過程のパワースペクトル $p(f)$ とモデルパラメータとの関係は

$$p(f | \{a_1, \dots, a_m\}, \sigma^2) = \frac{\sigma^2}{\|1 - \sum_{j=1}^m a_j e^{-2\pi i j f}\|^2}$$

で書けるので、定常AR過程では誘発脳磁場のパワーの時間変化を適切に扱えないことがわかる。そこで、誘発脳磁場の近似モデルとして、ARモデルの入力のガウス過程の分散が時変であるモデル $\sigma_{s,t}^2$ に拡張した。さらに、この分散 $\sigma_{s,t}^2$ が急変することは現実的でないので、モデルに平滑化制約を課した。

第5章では、提案手法を実行するうえで問題となる演算時間について検討した。上述のような動的に変化する、より複雑なモデルパラメータを推定するために、演算効率の観点からパーティクルフィルタ(PF)を利用した。PFは一般の確率分布を、その分布の標本の集まりで近似を行い、その時間発展と新たな観測値を用いたフィルタ分布を逐次的に計算するアルゴリズムであり、並列計算に向けたものである。このPFの演算の処理時間を短縮させるために、Graphics Processing Unit(GPU)を用いたプログラムを作成し、超並列演算の概要について説明した。

第6章は、新たな提案手法を用いて、数値実験を行いその性能を評価し、その結果について検討を行った。推定に用いた信号にはパワーの時間変動が大きい二つの電流双極子によって生成される誘発脳磁場様の信号を用いた。その結果から磁場マップを再構成しダイポール推定を行った結果、真値 $(-4, 5, 4)$ cm, $(-4, -5, 4)$ cm に対し、 $(-4.59, 5.43, 4.34)$ cm, $(-4.90, -5.69, 4.72)$ cm に GOF=79.89 で推定できた。推定位置の誤差はそれぞれ0.84cm, 1.15cmとなり、単一試行データでもかなり良い推定ができることを示した。

第7章では、研究のまとめと考察、将来の展望について述べた。MEGデータの時間構造を活用することで、単一試行データからでも誘発脳磁場の検出が可能であることを数値実験により示した。また、提案手法と既存の手法を組み合わせることで、ノイズ除去性能の向上が図れることを数値実験により示した。今後の展望としては、加算平均によって得られた誘発脳磁場を用いた数値実験を行い、その有効性を確認すること、その次に実際のMEGデータを単一試行で解析することが挙げられる。

なお、本論文第2章と第6章は、武田常広との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって、博士(科学)の学位を授与できると認める。