

《様式B》

研究テーマ	「 低周波における電磁界解析の高速化と脳波源推定への応用 」		
研究責任者	所属機関名	名古屋工業大学	
	官職又は役職	助教	
	氏 名	伊藤 孝弘	メールアドレス ito.t@nitech.ac.jp
共同研究者	所属機関名		
	官職又は役職		
	氏 名		

(平成 29 年度募集) 第 30 回 助成研究 完了報告書

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要 (1, 000 字程度)

※産業技術として実用化の可能性や特許出願 (予定も含む) の有無についてもご記載ください。

観測情報から脳の各部位における機能を調査することを脳機能イメージングといい、高度医療をはじめとする種々の分野で応用が期待されている。脳活動の観測手法として、臨床現場では頭皮・頭蓋骨を切開し直接電極を貼付して観測するものもあるが、事前診断などの用途では非侵襲に観測することが求められる。脳波(脳電図/EEG)は頭皮表面の電位を観測する非侵襲かつ安価なシステムであり、時間分解能がよく広く利用される一方で、空間分解能が低いという問題がある。本研究の目的は、EEG を用いた脳波源推定における推定精度の改善である。核磁気共鳴(MR)画像に基づいた 3 次元人体頭部モデルを計算機上で再現し、大規模電磁界解析を行うことで、高精度な脳波源推定が可能なシステムの開発を目指した。MR 画像を利用することにより、個々人の頭部構造の違いを考慮でき、従来の脳電図に比べて飛躍的に高分解能な推定を可能にすることが期待される。

従来手法の空間分解能が低かった理由のひとつが、計算量が現実的ではないという問題である。3 次元解析では、最小単位ボクセルの分解能を倍にする (一辺の長さを半分にする) と、解析点はその 3 乗の 8 倍と爆発的に増加してしまう。この問題に対し、本研究では、サブグリッド法によるボクセルの平均化と、電気回路理論に基づいた後処理を組み合わせることで、計算量をほぼ増やすことなく分解能を上げる手法を開発した。

計算機シミュレーションの結果、提案手法により算出された体内誘導電界は従来

手法の詳細計算と比較して妥当な誤差範囲に収まり、有効性を示した。脳波源推定精度については、ランダムフォレストを用いた推定手法においておよそ 12.4mm を達成することが分かった。電磁界解析手法の改善、また信号源推定手法の改善によって、本推定精度はさらに向上するものと見込まれるため、今後も洗練していく予定である。

サブグリッド法による高速電磁界解析手法は、生体信号解析だけでなく、低周波電磁界ばく露に対する人体安全性評価などの計算電磁気学分野において転用可能であると予想される。また、現段階ではまだ計算誤差の定量評価が十分でなく、実用化の可能性や特許性は低いものと予想される。

2. 実施内容および成果の説明 (A 4 で、5 ページ以内)

研究背景・目的

ヒトの脳活動を観測し、医療やエンターテイメントなど広く利活用することが提案されている。医療現場では、頭皮・頭蓋骨を切開し直接電極を貼付して観測するものもあるが、事前診断などの用途では非侵襲に観測することが求められる。非侵襲で脳活動を測定するシステムとして、脳血流の変化を捉える fMRI や、頭部周辺の磁界を捉える MEG がある。これらは共にシールドルームなどの大掛かりな設備が必要であり、コストも高いが、これらを組み合わせた階層変分ベイズ推定法は空間分解能に優れ、主に研究や医療用途に用いられている。

一方で、脳波(脳電図/EEG)は頭皮表面の電位を観測する脳活動計測システムである。比較的安価で簡易なシステムであり、時間分解能がよいという特性がある。この理由から脳波は広く利用されているが、空間分解能が低く、波源推定精度が十分ではない。脳波源を設定する際、脳内を微小区間に分割し、それぞれの領域の電流を未知数として頭表観測電位から解く問題設定となっているが、大抵の場合において観測電極数は未知数より非常に少ない。線形システムでは、これは不良設定問題と呼ばれ、解が無限に存在する。これに対し、何らかの制約条件を付加することで尤もらしい解を算出するアルゴリズムが研究されている。広く知られている脳波源推定法として最小ノルム(Minimum norm:MN)法や Low resolution electromagnetic tomography(LORETA)がある。MN 法、LORETA とともに制約条件の都合から、電流分布がなめらかになる特徴がある。LORETA を改良した sLORETA や eLORETA も提案されているが、これらが目指しているのは実用的で生理学的に意味づけができる解の計算であり、代償として解像度が

低いという問題がある。また、これらの従来手法では等方性の球を仮定した理論式による係数行列の算出を行っている。これらの理由により、高度医療を見据えた高精度波源推定、また被験者個人に合わせたパーソナライズ化などには適さないことが予想される。

これに対し、本研究の目的は、EEGを用いた脳波源推定における高精度波源推定法の構築である。核磁気共鳴(MR)画像に基づいた3次元人体頭部モデルを生成、電気定数を各生体組織に割り当てることで計算機上でヒトの頭部を再現し、大規模電磁界解析を行うことで、高精度な脳波源推定が可能なシステムの開発を目指した。MR画像を利用することにより、個人個人の頭部構造の違いを考慮でき、従来の脳電図に比べて飛躍的に高分解能な推定を可能にすることが期待される。その際、電磁界計算の計算量は考慮すべき問題のひとつである。3次元解析では、最小単位ボクセルの分解能を倍にする（一辺の長さを半分にする）と、解析点はその3乗の8倍と爆発的に増加してしまう。計算コストの削減のため、本研究では、サブグリッド法によるボクセルの平均化と、電気回路理論に基づいた後処理を組み合わせることで、計算量をほぼ増やすことなく分解能を上げる手法を開発した。また、脳波源推定手法としてランダムフォレストを用いた回帰学習を提案した。これは、脳波源推定の逆問題において、従来、線形逆フィルタによって実現していた部分を機械学習に置き換えるものであり、従来法と同等の推定精度を達成しながらも計算量の削減が見込まれる。計算機シミュレーションによって上記提案手法の特性評価を行い、有効性を検討した。

サブグリッド法による電磁界解析の高速化

中間周波帯電磁波による誘導電界計算（ドシメトリ）を対象として、サブグリッド法適用による計算誤差の算出、また計算量の比較を行った。電磁界計算手法としてスカラーポテンシャル有限差分（SPFD）法を用いた。SPFD法は、ボクセルモデルの格子点上に電気スカラーポテンシャルを未知数として配置し、マクスウェルの方程式の低周波近似式をすべての格子点で連立方程式として解くものであり、構成方程式は以下のように表される。

$$\sum_{n=1}^6 S_n \phi_n - \left(\sum_{n=1}^6 S_n \right) \phi_0 = j\omega \sum_{n=1}^6 (-1)^n S_n l_n A_n$$

ここで、 ϕ_n は節点 n における電気スカラーポテンシャル、 A_n は点 n に平行な辺上外部磁気ベクトルポテンシャル、 l_n は辺 n の長さ、 S_n は辺 n のエッジコンダクタンス、

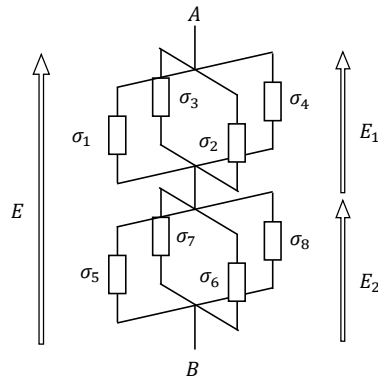


図 1. サブグリッド法の等価回路表現

ω は角周波数である。得られたスカラーポテンシャル分布の勾配と外部磁気ベクトルポテンシャルから、内部での誘導電界が算出される。本研究では、情報通信研究機構により開発された人体モデル TARO を用い、均一ばく露解析による評価を行った。人体モデルは各ボクセルが 51 種類の組織に識別されており、それぞれに電気定数が割り当てられている。人体モデルは空間分解能が 2mm のモデルと 1mm のモデルを用意し、2mm モデルの従来法解析、1mm モデルの従来法解析、1mm モデルをサブグリッド法によって 2mm に変換した解析、をそれぞれ実施し比較した。

サブグリッド法は、ボクセルの平均化手法のひとつである。従来、エッジコンダクタンスは辺に接する 4 つのボクセルの導電率の平均値を用いてきた。ここでは、高解像度のモデル情報を用いて 1 段階粗いボクセルの有効導電率を求め利用する。図 1 に示すボクセルモデルの集中定数等価回路に基づき、8 つのボクセルに対する有効導電率を計算する。点 A, B 間は、4 つのボクセルが並列に配置され、直列に 2 段連なっていると解釈できる。また、低周波領域では等価回路上の容量成分は十分大きなインピーダンスをもつため無視することができる。このとき、ボクセルの 1 辺の長さを l とすると、A・B 間のコンダクタンス G_{AB} は

$$G_{AB} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4)(\sigma_5 + \sigma_6 + \sigma_7 + \sigma_8)}{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4) + (\sigma_5 + \sigma_6 + \sigma_7 + \sigma_8)} l$$

となり、有効導電率とボクセルサイズの積で表される。そして、この電気回路より、

$$E_1 = \frac{2(\sigma_5 + \sigma_6 + \sigma_7 + \sigma_8)}{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6 + \sigma_7 + \sigma_8} E$$

$$E_2 = \frac{2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4)}{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6 + \sigma_7 + \sigma_8} E$$

として高分解能化を行った。x,y,z の各方向について空間分解能が半分の分布を求め、ベクトルの大きさとして誘導電界を計算した。

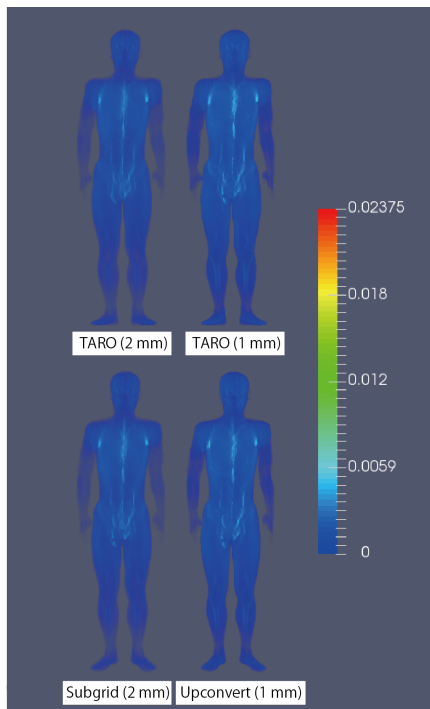


図 2.4 モデルの誘導電界解析結果 [V/m]

計算機シミュレーションの結果は図 2 のようになり、1mm に高分解能化した解析結果(Upconvert 1mm)は、高解像度解析(1mm)とほぼ同等の電界分布となっており、最大値・99%ile 値ともに妥当な値となることを確認した。

ランダムフォレストによる脳波源推定

ランダムフォレストは決定木を用いたアンサンブル学習器であり、本研究では回帰機械として利用した。順問題としてランダムな脳表面位置に波源を配置した際の電磁界解析を行い、電極での観測電位を計算した。配置波源位置と観測電位の組を 700 点生成し、学習させた。また、クロスバリデーションによるハイパーパラメータの決定を行った。その後、ランダムな 300 点に対し、順問題の解析による観測電位の計算、また構築した位置推定器による推定位置の算出を行った。図 3 に推定例を示す。低雑音環境(SNR=40dB)の場合、設定波源に非常に近い位置を出力することができた。平均推定誤差を調査したところ、SNR=40[dB]においては 12.4mm の推定精度を達成することが分かった。また、計算時間を算出したところ、全探索する手法では 6.7 秒を要したのに対し、本手法では 0.018 秒で計算可能であり、およそ 370 倍の計算速度を達成した。電磁界解析手法の改善、また信号源推定手法の改善によって、本推定精度はさらに向上するものと見込まれるため、今後も洗練していく予定である。

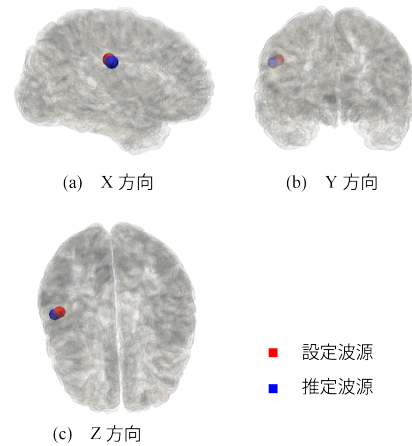


図 3 SNR=40[dB]における推定例