

主 論 文 要 旨

氏 名

川 口 拓 之

主 論 文 題 目 :

頭部組織の光伝播解析に基づく光脳機能トポグラフィーの画像再構築法

(内容の要旨)

光脳機能トポグラフィーは、頭皮上に装着した複数のファイバースコープによって近赤外光を頭部組織に照射・検出し、脳活動に伴う脳組織の局所的な血液量変化を検出光量変化として捉えることで、脳組織表面の活動部位を画像化する方法である。光脳機能トポグラフィーは、医療分野のみならず、心理学、教育学といった脳科学に関する幅広い分野で利用されている。一方で、画像の空間分解能や再現性が不十分であるといった技術的問題点が指摘されている。これらの問題点は主として頭部組織の散乱に起因すると考えられている。しかし、頭部組織内における光伝播は実測できないため、一般的な光脳機能トポグラフィーでは、散乱による探測領域の広がり(空間感度分布)の影響を無視し、単純なマッピングと補間によって画像化を行っている。本研究では、成人頭部の解剖学的構造と光学特性を仮想空間上で統合したモデルを構築し、脳組織における光伝播を解析した。このことで、空間感度分布を正確に推定することを可能にし、空間感度分布を用いた画像再構築アルゴリズムによって光脳機能トポグラフィーの空間分解能と再現性の向上を図ることを目的とした。

第 1 章では、本研究の背景と従来の研究を概説した。

第 2 章では、光脳機能トポグラフィーの基礎となる近赤外分光法の原理および提案する画像再構築法の数学的背景である逆問題、生体組織内の光伝播を解析するための理論についてまとめた。

第 3 章では、空間感度分布を先験情報とする画像再構築法を提案し、ヒト頭部の構造を多層の平行平板で単純化したモデル内の光伝播を解析し、ファイバースコープの装着密度と画像化に用いるアルゴリズムが、脳機能画像の空間分解能と再現性に及ぼす影響について述べた。シミュレーションの結果から、一般に用いられているプローブ密度とマッピング法の組合せで測定を行った場合、実際の脳活動領域よりも面積が 4 ~ 20 倍に広がった脳機能画像が得られていることが分かった。さらに、同一の脳活動を測定した場合でも、プローブの装着位置に依存して脳機能画像の広がりが変化し、プローブ装着位置が画像の再現性に影響していることが明らかになった。これらの問題は、プローブの装着密度を約 2 倍に向上させ、新たに提案した空間感度分布を用いた画像再構築法を適用することで改善できた。ヒト頭部組織を模擬した平行平板ファントムを対象とした実測においても、同様の結果が得られた。

第 4 章では、実際のヒト脳機能計測と同等の条件でシミュレーションを行うため、磁気共鳴イメージング法で取得した頭部組織の 3 次元構造と各組織の光学特性を仮想空間上で統合したバーチャル頭部ファントムを構築し、脳組織の光伝播を解析した結果について述べた。時間分解計測によってヒト頭部組織内をパルス光が伝播する時間を実測し、バーチャル頭部ファントムの光伝播解析結果と比較することで、モデルが妥当であることを示した。また、光伝播解析の結果から、頭皮や頭蓋骨などの厚さの不均一性が、脳組織中の空間感度分布に及ぼす影響を明らかにした。

第 5 章では、バーチャル頭部ファントムを被験者と想定することで、画像再構築に用いる空間感度分布の推定方法を評価した結果を述べた。平行平板モデル、複数の被験者の平均的な頭部構造を示す標準頭部モデル、被験者本人の頭部モデルに対する空間感度分布を推定し、これらの空間感度分布を用いて光脳機能トポグラフィーの画像再構築を行った結果を比較した。標準頭部モデルで求めた空間感度分布を用いることで十分な空間分解能と再現性がある画像が得られ、脳機能測定を行う被験者本人の頭部構造を測定しなくても、提案した画像再構築法が適用できることを示した。

第 6 章では、結論として各章で得られた結果をまとめ、本研究の成果と今後の展望を述べた。

以上