

論文内容の要旨

博士論文題目 非侵襲脳活動計測を用いた手指運動情報の抽出

氏 名 南部 功夫

近年、非侵襲に計測された脳活動から運動や知覚を解読・予測する手法(デコーディング)が発展してきている。この手法は、脳活動に含まれる詳細な情報表現を探り、脳活動を使ったインターフェース(ブレインマシンインターフェース: BMI)への応用を可能とする。ヒトの運動制御においてもデコーディングを用いることで、これまでに手や腕の運動パターンや筋活動を予測する試みが行われてきた。さらに詳細な運動情報を抽出し日常における様々な運動を予測するため、本論文では近赤外分光計測画像法(NIRS)と機能的核磁気共鳴画像法(fMRI)を用いて計測した脳活動から詳細な運動情報の抽出を試みた。

まず、日常生活においても使用可能で BMI への応用を視野に入れた NIRS を使い、異なる強さを持つ手指筋出力時系列情報の再構成を行った。これまでの NIRS を使った研究では単純な運動の二値判別を行うものが多く、単純な運動においても詳細な情報を抽出できるかについては調べられていなかった。そこで、NIRS を用いた運動情報予測性能を二値判別以上に拡張するため、線形回帰の枠組みを用いて指の力の時系列を再構成した。ここでは関連度自動決定事前分布(ARD)を導入したスパース線形回帰と呼ばれるアルゴリズムを用いることで、力と関連がある情報(NIRS チャンネル)を自動的かつ効率的に選び、より精度の高い筋出力の再構成を実現した。この再構成には対側感覚運動野周辺の NIRS チャンネルが使用され、特に課題開始から 4 秒後の脳活動が最も貢献していた。このことから、スパース線形回帰は時空間的に生理学的な知見と一致するような課題関連脳活動を自動的に選んでいることがわかった。

次に、詳細かつ複雑な運動に関する脳内情報表現を探り、BMI へと発展させることを目的として、空間分解能の高い fMRI を用いて運動系列の予測・推定を行った。これまで fMRI で計測した脳活動から、手の運動パターンや腕の筋活動度の予測が可能となってきた。しかし、指などのさらに詳細な運動や、単なる効果器の違いではない運動情報を予測することが可能であるのかは検討されていない。そこで、本論文では運動の基本要素である運動系列に着目し、fMRI の脳活動から運動系列の予測を試みた。四本の指を用いて実行順序が異

なる単純な二つ指伸展運動系列を運動課題として設定し、運動系列の判別を試みた。その結果、対側感覚運動野では運動開始時の脳活動から、上頭頂領域、頭頂間溝といった領域からは運動実行時の脳活動から、高い判別率で運動系列を予測することができた。

これら二つの実験結果は、非侵襲脳活動計測手法の NIRS と fMRI から運動情報の予測が可能であることを示唆するものであり、将来的には脳活動から情報を抽出して機械や情報機器を操作するブレインマシンインターフェースへの応用も期待できる。

(論文審査結果の要旨)

非侵襲に計測された脳活動から運動や知覚を解釈・予測する手法(デコーディング)は, 脳活動に含まれる詳細な情報表現を探り, また脳活動を使ったインターフェース(ブレインマシンインターフェース; BMI) への応用を可能とする. 運動制御の文脈では, これまでに単純な運動の二値判別は実現されているが, こうした研究成果を現実世界での運動デコーディングへと拡張するためには, 二値以上の判別や複雑な運動課題に対しても高精度の予測ができるのかを調べる基礎研究が必須である. 本論文では非侵襲脳活動計測技術の中でも, 特に近赤外分光計測画像法 (NIRS) と機能的核磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いて計測した脳活動から詳細な運動情報の抽出を試み, もって現実世界での運動デコーディングへの展開可能性を論じている. 本論文の主な成果は以下のように要約される.

1. NIRS を使って手指で生成された力の時系列情報の再構成を行い, 単純な運動課題情報ではあるものの二値以上の精度での予測(再構成)に成功した. これまで NIRS を使った研究では二値情報の予測が多かったが, 関連のある情報を自動的かつ効率的に選択する線形回帰法を用い, 感覚運動野周辺の信号による高精度の筋出力再構成を可能とした.
2. fMRI を用いて指の運動系列の判別を行い, 詳細かつ複雑な運動情報の予測が可能であることを示した. 異なる二つの指運動系列を実行している時の脳活動から系列判別を行い, 複数の脳領域の活動から高精度での判別を可能とした. 有意に判別可能となる時間は脳領域によって異なり, これは運動系列に関連した異なる情報処理過程を示唆した.

本論文における二つの成果は, 非侵襲脳活動計測である NIRS と fMRI から詳細な運動情報が解釈・予測できることを示すものである. これは, 将来的な高精度 BMI への基礎的技術を提供するのみならず, 運動時の脳情報表現の解明という科学的な成果でもある.

以上のように, 脳情報処理機序の解明とその工学応用に貢献し, また学術的な意義も大きいことから, 本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める.