

氏名 山本祐輔
学位の種類 博士（応用情報科学）
学位記番号 博情第70号
学位授与年月日 令和5年 3月24日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当（課程博士）
論文題目 精神状態の違いにおける脳波と心電図の定量化と判別評価

論文審査委員 (主査) 教授 水野（松本）由子
(副査) 教授 竹村匡正
(副査) 教授 原口亮

学位論文の要旨

現代社会は「ストレス社会」とも言われており、人は日々ストレスや不安にさらされている。厚生労働省による国民生活基礎調査では、国民の半数が不安や悩みを抱えていると報告されている。生体はストレスが与えられると、神経生物学的反応の異常をきたし、不安症状を引き起こす。症状が慢性化すると、不安障害やうつ症状、トラウマなど様々な精神疾患を引き起こす。近年において、不安障害および心的外傷後ストレス障害、うつ病は、ここ数十年の間に急増している。精神疾患は、感情や意欲、思想、身体のような面に症状が現れるが、早期に発見されて適切な治療を受ければ大部分が改善するといわれている。そのため、自分自身の精神状態を客観的かつ定量的に理解できるような取り組みが必要となっている。

精神状態を客観的かつ定量的に評価できる指標として、脳波と心電図があげられる。脳波と心電図は、人の精神状態に伴って、規則的な変化を示す生理指標であり、これらの指標を用いた特徴抽出に関する研究が盛んに行われている。他方、得られた特徴量から精神状態を判別する方法として、深層学習があげられる。深層学習では、ニューラルネットワークが注目されており、入力されるデータの種類によって様々なニューラルネットワークが考案されている。

そこで、本研究では、精神状態を客観的かつ定量的に理解できるようなシステムを作るべく、精神状態の違いを脳波や心電図を用いて脳機能および自律神経機能を定量的に評価し、その値を用いたニューラルネットワークが精神状態判別にどのように影響するかを評価した。

第1章では、研究背景と目的について記述している。

第 2 章では、脳波において電極のパワースペクトル値の相関値であるコヒーレンス値を用いた脳機能ネットワークに着目し、グラフ理論解析により不安状態の異なる脳の機能的接続性を調べた研究成果について記述している。この研究の結果、不安の高い人は、不安の低い人より脳全体で情報処理を行っており、安静・快刺激においても特性不安の低い人が不快刺激を受けた時と同程度の情報処理を行っていることが明らかになった。また、ネットワークの構造に関して、特性不安の高い人は、特性不安の低い人よりも統合されていない非効率的なネットワーク構造を有しており、脳機能ネットワーク密度が疎であり、脳領域間の経路長が長いことが明らかとなった。

第 3 章では、情動判別に関する機械学習の研究において脳と心臓の生体信号が別々に用いられることが多いことから、解剖学的に繋がりがあがる脳と心臓という 2 つの臓器から生じる生体信号から得られるそれぞれのパワースペクトル値に着目し、脳波のパワースペクトル値と心電図のパワースペクトル値を組み合わせることで、不快刺激によるストレスの検出精度が向上するかについて調べた。この研究の結果、脳波と心電図の活動は、安静刺激時と不快刺激時で異なり、脳波と心電図の同時記録による脳波と心電図を組み合わせたデータセットを入力に用いることで、不快刺激によるストレスの検出精度を向上させられることが明らかとなった。

第 4 章では、第 2 章で得た知見から、不安状態の異なる脳の機能的接続性が経時的にどのように変化し不安状態に影響するかを調べるために、不安状態の異なる脳の機能的接続性を経時的に定量評価し、その値を用いたニューラルネットワークとリカレントニューラルネットワークの精度を比較した研究成果について記述している。この研究の結果、脳の機能的接続性において、不安状態が異なることで情動刺激に対する脳機能ネットワークの情報処理過程やネットワーク構造が経時的に異なり、深層学習において、脳の機能的接続性を示す指標であるコヒーレンス値とグラフ理論指標の時系列データはリカレントニューラルネットワークにおいて、より高い不安状態の識別が可能であるが明らかになった。

第 5 章では、これまでの研究で得られた主要な知見に基づき本論文の総括をまとめた。これらの一連の研究から得られた知見は、以下の 2 点である。

第一に、精神状態の違いにより、脳波においてはグラフ理論解析によって脳の機能的接続性が異なることを、心電図においてはパワースペクトル解析によって脳波活動に伴って変化することをそれぞれ捉えることが出来た点である。第二に、それらの特徴を組み合わせるニューラルネットワークに入力することが、精神状態判別の精度向上につながることを示すことが出来た点である。これらのことが本論文の成果である。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ヒトの精神状態について、脳波と心電図を用いた深層学習に基づき、その特徴を定量的に調べ、不安などの精神状態の違いにおける脳内情報処理過程のメカニズム解明を目的として行った研究について記したものである。博士論文は次の章より構成されている。

第1章では、研究背景と目的について記述している。

第2章では、脳波において電極のパワースペクトル値の相関値であるコヒーレンス値を用いた脳機能ネットワークに着目し、グラフ理論解析により不安状態の異なる脳の機能的接続性を調べた研究成果について記述している。この研究の結果、不安の高い人は、不安の低い人より脳全体で情報処理を行っていることが明らかになった。また、ネットワークの構造に関して、特性不安の高い人は、特性不安の低い人よりも統合されていない非効率的なネットワーク構造を有しており、脳機能ネットワーク密度が疎であり、脳領域間の経路長が長いことが明らかとなった。

第3章では、情動判別に関する機械学習の研究において、解剖学的に繋がりがあある脳と心臓という2つの臓器から生じる生体信号に着目し、脳波のパワースペクトル値と心電図のパワースペクトル値を組み合わせることで、不快刺激によるストレスの検出精度が向上するかについて調べた。この研究の結果、脳波と心電図の同時記録を入力に用いることで、不快刺激によるストレスの検出精度を向上させられることが明らかとなった。

第4章では、不安状態の異なる脳の機能的接続性が経時的にどのように変化し不安状態に影響するかを調べるために、不安状態の異なる脳の機能的接続性を経時的に定量評価し、ニューラルネットワークとリカレントニューラルネットワークの精度を比較した研究成果について記述している。この研究の結果、脳の機能的接続性において、不安状態が異なることで情動刺激に対する脳機能ネットワークの情報処理過程やネットワーク構造が経時的に異なり、深層学習において、脳の機能的接続性を示す指標であるコヒーレンス値とグラフ理論指標の時系列データはリカレントニューラルネットワークにおいて、より高い不安状態の識別が可能であるが明らかになった。

第5章では、これまでの研究で得られた主要な知見に基づき本論文の総括をまとめた。本博士論文より得られた一連の研究から得られた知見は、第一に、精神状態の違いにより、脳波においてはグラフ理論解析によって脳の機能的接続性が異なることを、心電図においてはパワースペクトル解析によって脳波活動に伴って変化することをそれぞれ捉えることが出来た点である。第二に、それらの特徴を組み合わせるとニューラルネットワ

一クに入力することが、精神状態判別の精度向上につながることを示すことが出来た点である。

以上を総合した結果、本審査委員会では、本論文が「博士（応用情報科学）」の学位授与に値する論文であると全員一致により判定した。