

平成 30年 1月 22日

埼玉工業大学大学院工学研究科長殿

学位論文審査委員会

主査 曹 建庭



副査 吉澤 浩和



副査 渡部 大志



副査 山崎 隆治



副査 趙 启 斌



学位（博士）論文及び最終試験の審査結果について（報告）

専攻名：博士後期課程 電子工学専攻

学籍番号：1422001

院生氏名：崔 高超

論文題目：多変量脳波の特徴分析と脳死判定及び脳コンピュータインターフェースへの応用

上記の学位（博士）論文について、平成30年1月22日に審査および最終試験を行い、その結果を下記のとおり報告します。

記

1 学位論文の内容の要旨（別紙）

2 審査意見：

本審査委員会は、申請者から提出した学位申請論文「多変量脳波の特徴分析と脳死判定及び脳コンピュータインターフェースへの応用」の最終審査を行い、本論文が博士学位申請に値するものと認定した。また、本学課程博士学位審査基準に照らして学位申請を行う諸条件を満たすものであることを認定し、全員一致で学位論文及び最終試験が合格とする結論を達した。

3 学位に付記する専攻分野の名称（いずれかを○で囲む）

工学

学術

4 学位を授与できるか否かの意見

1) 審査結果（いずれかを○で囲む）

① 学位論文及び最終試験の判定 合格 不合格

2) 意見

論文概要

脳波 (EEG) は脳から生じる電気活動を電極で記録した生体信号である。脳研究や臨床目的で EEG の計測は非常に広く用いられる。本論文の主な研究内容は EEG に基づいた脳死判定 (Brain death determination, BDD) 及び脳コンピュータインターフェース (Brain computer interface, BCI) である。

脳死とは人の脳幹を含めた脳全ての機能が不可逆的に停止した状態と定義されている。BDD の研究に基づいた、自発呼吸の有無及び脳波の平坦性検査のリスクを避け、脳死判定の時間を短縮するため、EEG 予備検査システムを導入された[1][2]。本論文では EEG 予備検査システムで脳波のエネルギー、脳波の複雑度及び脳内情報の流れ間の関連性の三つ特徴を解析する。

脳波のエネルギー特徴分析について、経験的モード分解法 (EMD) を用い、単一チャンネルデータを異なる周波数を有する成分に分解する。EMD が多チャンネル脳波の特徴を同時に抽出することができないという欠点を克服するため、EMD の拡張アプローチである多変量経験的分解法 (MEMD) が提案された[3]。しかし、MEMD を用い、EEG のエネルギー変化の過程を観察することが困難である。

本論文では時間の経過に伴う脳エネルギーの動的変化を可視化するため、ダイナミック多変量経験的モード分解法 (Dynamic-MEMD) を提案する。Dynamic-MEMD は MEMD の適応アルゴリズムである。EEG エネルギー変化を可視化するため、EEG 信号の時間座標に沿った時間領域で MEMD を拡張する。Dynamic-MEMD 分析法に基づいた、時系列で EEG エネルギーを計算するだけでなく、EEG データの損失やノイズ干渉による誤った結果を避ける。更に、リアルタイム BDD システムの開発に適用することができる。

複雑度の特徴分析について、ダイナミック ApEn 分析法が脳死判定に応用する提案された[4]。この方法に基づいた、EEG 信号が時間座標に沿って、複雑度の変化過程を観察することができる。しかし、この方法により、異なる EEG 律動に複雑度を分析することができないため、順列エントロピー (permutation entropy, PE) 分析法で EEG 律動の複雑度の分析を適用する。PE の分析結果により、alpha 波、theta 波及び delta 波に脳死患者の各チャンネルの複雑度が昏迷患者より高いである。

脳内情報流れの関連性特徴分析について、Dynamic-MEMD 分析法及び PE 分析法では脳内情報流れの関連性を分析しないため、偏有向コヒーレンス (partial directed coherence : PDC) 分析法を適用された。PDC はチャンネル間の

直接的なフローのみを示す[5]。分析結果では脳死患者より、昏迷患者の各チャンネルの関連性が強いであり、健常者よりも低いことが分かった。

BCI とは、脳の電気活動による発生した EEG 特徴信号を用いて様々な装置を脳で操作できるシステムである。EEG を特徴信号用いた BCI パラダイムにおいて、運動想起(MI)による BCI、事象関連電位 P300 を用いた BCI、定常的視覚誘発電位(SSVEP)を用いた BCI など、様々な研究がある[6][7][8]。

P300 による BCI は、最も有効なパラダイムの 1 つであり、高い精度と短いトレーニング時間の利点を持っている。P300 とは、互いに識別可能な 2 種類以上の感覚刺激をランダムに呈示し、低頻度の刺激を選択的に注意させることにより、刺激後約 250~500msec という長潜時で出現する陽性電位である。従来の BCI システムには視覚若しくは聴覚により、単一の感覚刺激で特徴成分を誘発される。古典の P300 による BCI システムには視覚若しくは聴覚により、単一の感覚刺激で特徴成分を誘発される。単一の感覚刺激による BCI システムでは情報転送速度 (ITR) が低いである。また、同じ種類の刺激を長時間受け入れ、疲労感を感じさせる。この場合、ユーザは環境ノイズの影響を受けやすいであり、BCI システムのパフォーマンスを低下させる。

本論文では混合刺激(視覚+聴覚)に基づいた新型ハイブリッド脳コンピュータインターフェース (Hybrid-BCI) システムを提案した。言い換えれば、ユーザは Hybrid-BCI を使用する時に 2 種類の外部感覚刺激 (視覚刺激及び聴覚刺激) を同時に受けることになる。Hybrid-BCI システムでは、単一の感覚刺激に基づいた BCI システムより、顕著的な誘発電位 P300 を得ることができた。同じ特徴抽出と分析方法に基づいた、より高い分類精度と情報伝達率が得られる。

第 1 章では BDD 及び BCI システムについて研究背景・目的を述べる。BDD 研究について脳死の定義及び臨床的に脳死判定のプロセスが紹介される。また、脳死判定研究の意義及び EEG 予備検査システム導入の重要性を論じる。BCI システム研究について BCI の定義及びパラダイムについて説明する。また、BCI システムの応用と研究の意義を述べる。

第 2 章では脳死判定に関する EEG 特徴分析方法について述べる。EEG エネルギー特徴分析についてダイナミック多変量経験的モード分解法 (Dynamic-MEMD) を提案する。また、複雑度の特徴分析について順列エン

トロピー特徴分析法と脳死データ解析の適用を論じる。EEG 各チャンネルの関連性を研究するため、脳ネットワークの構築に関する PDC 分析法と脳死データ解析の適用を述べる。

第 3 章では Dynamic-MEMD, PE 及び PDC に基づいた、脳死判定に関する EEG 特徴分析結果を検討する。EEG エネルギー特徴分析について、Dynamic-MEMD により、時系列で EEG エネルギーを分析することができる。複雑度の特徴分析について順列エントロピー特徴分析法により EEG 律動の複雑度を分析する。脳内情報流れの関連性を分析するため、PDC 分析法に基づいた、脳ネットワークを構築する。

第 4 章では P300 による BCI 及びハイブリッド BCI システムを説明し、特徴成分 P300 抽出及び分類法を紹介する。更に EEG データが欠落している場合、テンソル分解法に基づいたデータ補完方法を論じる。

第 5 章では混合刺激（視覚+聴覚）に基づいた新型ハイブリッド脳コンピュータインターフェース（Hybrid-BCI）システム実験を行う。従来の単一刺激 BCI システムにより、ハイブリッド BCI が顕著的な誘発電位 P300 を得ることができ、高い認識精度とデータ転送率を実現することができた。一方、EEG でデータ欠落の場合、テンソル分解法を使って欠落したデータを補完することができた。

第 6 章では本論文の結論と今後の課題を纏める。BDD に関する研究には、Dynamic-MEMD に基づいた時系列で EEG エネルギーを分析することができ、EEG エネルギーの変化過程を観察することができた。順列エントロピー特徴分析法により、EEG 律動で脳死の EEG 信号が高い複雑度を持っていることが分かった。PDC 分析法により、昏迷患者の脳内情報流れの関連性が、脳死患者より強いであり、健常者よりも低いことが分かった。BCI に関する研究には Hybrid-BCI システムによる 2 種類の外部感覚刺激（視覚刺激及び聴覚刺激）を同時に受ける時に、単一の感覚刺激に基づいた BCI システムより、顕著的な誘発電位 P300 を得ることができた。被験者が外部からの影響を受けやすい問題を改善され、制御精度が向上した。

今後の課題：BDD について、提案した分析法及びテンソル分析法に基づいたリアルタイム EEG 予備検査システムを構築する。BCI について、最良のハイブリッド刺激を探し、高性能ハイブリッド BCI システムを開発する。