

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	双方向ブレインマシンインターフェースの感覚フィードバックに関する基礎研究
Title(English)	
著者(和文)	古林捷
Author(English)	Sho Furubayashi
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12675号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:宮下 英三,小池 康晴,藤枝 俊宣,葭田 貴子,吉村 奈津江,阪口 豊
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12675号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名	古林 捷	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名
	主査	宮下 英三	准教授	審査員	藤枝 俊宣	准教授
	審査員	小池 康晴	教授		阪口 豊	学外審査員
		吉村 奈津江	教授			
		葭田 貴子	准教授			

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は「双方向ブレインマシンインターフェースの感覚フィードバックに関する基礎研究」と題し、和文 6 章から構成されている。

第 1 章「序論」では、研究の背景と目的を述べている。まず、双方向ブレインマシンインターフェース (BMI) について説明し、次に、双方向 BMI における感覚情報のフィードバックの研究の課題を提起している。さらに、本研究の内容の理解に必要な感覚に関連する神経基盤、感覚情報のフィードバックのアプローチ、大脳皮質に対する電気刺激の基礎知識を順次説明している。最後に、本論文では、BMI の制御にて感覚情報のフィードバックが重要であることを確認し、加えて、感覚情報のフィードバックを実現するための方法として、大脳皮質の表面に貼付した電極を使用した電気刺激である直接皮質刺激 (DCS) に着目し、単極 DCS の異なる極性 (陽極および陰極) による大脳皮質内の神経細胞の活性化パターンの違いを解明することを目的として研究を行ったことを述べている。

第 2 章「運動適応のモデルに基づく感覚フィードバックの重要性」では、尤もらしい身体制御理論である最適フィードバック制御に内部モデルの更新則を加えた運動適応のモデルを提案し、そのモデルに基づいて BMI における感覚情報のフィードバックの重要性を議論している。提案した運動適応のモデルは、ヒトを対象とした腕運動の心理物理実験により、妥当性を確認している。そのモデルに基づくと、運動制御において感覚情報のフィードバックは、内部状態の更新と内部モデルの更新に必要であり、BMI を身体のように自在に扱うためには感覚情報のフィードバックが重要な要素であると主張している。

第 3 章「柔軟な薄膜を用いた皮質脳波電極の in vivo 実験」では、皮質脳波電極として新たに開発された、脳表に適合した物性を持つ薄膜電極の、in vivo における有用性を評価している。評価のために、麻酔下のラットを使用した開頭状態の急性実験を行い、ヒゲの機械刺激による体性感覚誘発電位を皮質脳波にて計測し、また、DCS により誘発されたヒゲの筋電図を計測したことを述べている。その結果、ヒゲの機械刺激による体性感覚誘発電位が皮質脳波で計測でき、さらに、DCS による筋電図が誘発できたことを述べている。これらの結果に基づいて、薄膜電極が in vivo の実験において利用可能であることが明らかになったことを述べている。

第 4 章「DCS が直下の皮質内の神経細胞に及ぼす効果」では、陽極および陰極 DCS によって刺激直後に誘発される大脳皮質内の神経細胞活動を解析し、その違いについて研究している。実験では、電極面の中央に穴のあいた薄膜電極とシリコンプローブを併用することで、単極 DCS の電極の直下における皮質内の電位を、ラットの一次体性感覚皮質を使用して計測し、さらに、解析によって DCS の大脳皮質内の 6 層の内、特に大脳皮質の出力の機能を担う錐体細胞が多く分布する II, III 層および V 層に対する影響を評価したことを述べている。その結果、陽極 DCS が陰極 DCS と比較して錐体細胞層をより活性化することが明らかとなったことを述べている。これらの結果に基づいて、陽極 DCS が陰極 DCS よりも、錐体細胞を活性化するという考察を述べている。

第 5 章「NetPyNE を用いた DCS のシミュレーション」では、現実 に即した神経細胞の特性を反映したモデルを使用した DCS のシミュレーションにより、陽極 DCS と陰極 DCS が活性化する神経細胞の種類の違いを研究している。シミュレーションには NetPyNE を用いて実装されたラットの一次体性感覚皮質の既存の詳細なモデルを利用し、まず、そのモデルに存在する異なる種類の神経細胞に対し、個別に DCS のシミュレーションを実施し、次に、神経細胞ネットワークを考慮したモデルを使用した、DCS の大規模シミュレーションを実施したことを述べている。個々の神経細胞に対する DCS のシミュレーションの結果は、陰極 DCS と比較して陽極 DCS で錐体細胞の細胞体を直接的に活性化することを示唆したと述べている。また、DCS の大規模シミュレーションの結果は、第 4 章の

実験について、電極中心の穴の有無による結果に違いがないことを示唆したことを述べている。これらの結果に基づいて、陽極 DCS が大脳皮質表面の近傍まで先端樹状突起を伸ばした錐体細胞を直接活性化し、また、陰極 DCS は他の神経細胞を介したネットワークによって間接的に錐体細胞を活性化する可能性があるとして述べている。

第 6 章「結論」では、本論文で得られた成果を総括し、今後の展望を述べている。

以上を要するに、本論文は、感覚フィードバックの重要性を運動制御理論に基づいて確認し、感覚フィードバックの方法として有用な DCS が大脳皮質内の神経細胞に及ぼす影響を明らかにしたものであり、理学上貢献するところが大きい。よって、本研究は博士（理学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。