

学位論文題名

# Studies on Detection and Clustering of Sensory and Motor Patterns from Cortical Signals

(大脳皮質信号からの感覚, 運動パターンの検出と  
クラスタリングに関する研究)

## 学位論文内容の要旨

本論文では, 皮質電図(ECoG; Electrocorticogram)に着目し, 大脳表面から信号を計測・特徴を抽出する低侵襲計測システムの構築を目的とし, 皮質電図を用いた信号計測をベースとした, 新しい脳と計算機のインターフェースの構築手法を模索した研究成果をまとめたものである。本研究の, 将来的な目標は適応型電動義装具を開発することにある。ところで, ここで言う適応型電動義装具とは, 患者の意思や作業環境に応じて電動義装具を自律的に操作・制御可能な機能を有することのできるような, いわゆる知的デバイスを指すものとする。このような機能を持つある一つのデバイスは自己組織化機能をも持つゆえ, 複数の動作パターンに対する補助を行うことも可能とする。

具体的には, 重度患者に対しても有効な手法として, タスクにより変動する脳の活動を直接計測し, この結果を利用した制御システムを内在する知的デバイス開発を構築することを考える。この時, デバイスを設計・開発するために考慮しなければならない重要な要素は, i)侵襲のより低い計測システムの構築 ii)患者にとって使用しやすい義装具の開発 iii)患者側の学習負荷の軽減 iv)個人差の存在する神経応答特性への対応 v)実時間処理などがあげられる。これらの中でも本論文では, 特に i), iv)に力点を置く。

以上の準備の下, 本論文は, 皮質電図として表出する神経信号の計測による動作パターン検出とそのクラスタリングにターゲットを絞る。前者は, 計測された神経信号から動作パターンへの意味付けに対するアプローチであり, 後者は, 上述するデバイスにおいてパターンマッチングを行う際のそれら神経信号-動作パターンの利用性を高めるためのアプローチである。これらを実現するため, 本論文では, 情報処理機構として, SOM(Self-organizing map)を用いることにより, 各個体差間の神経信号応答の相違を吸収するとともに, これらの信号抽出およびクラスタリングに関するアプローチを行う。ところで, 本計測手法は, 脳に対して侵襲性を有すため人間にはこれを直接行えない。そこでその代替としての実験モデルとしてラットを用いている。

実験の第一段階として, 皮質電図を用いることは, 広範囲にわたる運動制御信号を計測できる可能性があり, EEG よりさらに正確かつ高速なパターン検出, およびそのクラスタリングが行えるとの仮定に基づきラットを被験動物として多くの実験を行った。得られたデータを分析し種々の知見が得られたが, 特に, 動作の ON/OFF 信号を 3 割のエラー率

でその検出を行えるという結論が得られた。これは、大局的な神経活動を観測しているためと考えられ、実際の運動野の神経活動電位が重畳された形で発現した信号であり、局所的な神経活動とのマッチングを行わなければ、その大局的な信号特性を定義することは難しく、多面的な計測信号の評価をすることが困難であることを示唆する。

これらの経過を他の切り口から評価することを目的に、実験の第二段階として、局所的な神経活動サイドからの評価をも行った。ところでラット行動下の運動野における局所的な神経活動を多点で計測するのは容易ではない。そのため、まず、ラットひげに対応して存在する体性感覚野(バレル野)に着目し、感覚パターンに対する神経応答の分類を試みた。これは、体性感覚信号に対するバレル野での応答特性に関する知見が多く得られており、また、神経応答特性の意味付けを行いやすいという立場から、ひげ刺激パターンに対して計測された感覚応答信号の分類を試みた。しかし、単層に対して金属電極を用いて信号の計測を行ったため、信号特性の同時性は保証されない問題が明らかになった。この問題を解決するために、同時多点計測システムの設計・製作を行った。その際、従来の手法では、位置精度、計測電極形状が大きくなってしまおうという観点から、マイクロファブリケーション技術が有効となることを示し、その優位性を利用してシリコンマイクロプローブの製作も行い、その有用性を示した。

以下に5章からなる本論文の構成を示す。

第1章では、導入として研究を概観するとともに、研究領域、本研究の新規性、工学への貢献について論じている。

第2章では、運動パターンの検出、およびクラスタリング手法について述べている。まず、運動パターン検出には、信号計測が必要であり、本論文で注目する皮質電図の生理学的知見、およびここで実現する計測手法について記述している。そして、実際にラットを被験動物として大脳皮質運動野の表層に設置した電極により運動時の電位計測を行った。こうして計測された信号をもとにSOMによるクラスタリングを試み、得られたデータを分析し、議論を展開している。その際、ラット自由行動下における動作評価が非常に困難であるため、ラットの胸を拘束した状態での歩行に関する電位計測を行い、動作のON/OFFに関しては、3割のエラー率が存在するという結果を明らかにしている。

第3章では、局所的な神経応答からの大局的神経応答を評価することを目的として行った。ラット体性感覚野に存在するバレル野からの各層に対して計測した神経信号をSOMにより分類した一連の結果を示している。この結果から、体性感覚信号に対するバレル野における神経応答特性に関する知見が多く得られており、また、刺激パターンに対する神経応答特性の意味付けを行いやすいという観点から、バレル野で4種類のひげ刺激パターンに対して計測された信号の分類を試みた結果について論じている。また、微小領域での多点同時計測を実現するためのシステム構築のため、マイクロファブリケーション技術を用いた多点計測可能な異方性エッチングのみによる簡素化した形状形成プロセスを提案し、提案手法に基づいて多点プローブを製作しこれを用いて実際に計測を行いその有用性を示している。

第4章は、Future Worksとして、本研究において散在する種々の問題に対する今後の課題についてまとめている。

第5章で、論文全体を概して議論し、総括している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇  
副 査 教 授 大 内 東  
副 査 教 授 大 森 隆 司  
副 査 教 授 和 田 充 雄

学 位 論 文 題 名

## Studies on Detection and Clustering of Sensory and Motor Patterns from Cortical Signals

(大脳皮質信号からの感覚，運動パターンの検出と  
クラスタリングに関する研究)

本論文は脳-アクチュエータ系を用いた適応型電動義装具を開発することを目的として皮質電図(ECoG; Electrocorticogram)に着目し，大脳表面から信号を計測・特徴を抽出する低侵襲計測システム構築手法を模索した研究成果をまとめたものである。ここでその開発目的とする適応型電動義装具とは，患者の意思や作業環境に応じて電動義装具を自律的に操作・制御可能な機能を有することのできるような，いわゆる知的デバイスを指し，重度患者に対しても有効な手法として，タスクにより変動する脳の活動を直接計測し，この結果を利用した制御システムを内在する知的デバイス開発を構築することを試みたものである。システム設計に際しての仕様条件としては i)侵襲のより低い計測システムの構築 ii)患者にとって使用しやすい義装具の開発 iii)患者側の学習負荷の軽減 iv)個人差の存在する神経応答特性への対応 v)実時間処理などを考慮し特に，本論文では，特に i), iv)に力点が置かれ，皮質電図として表出する神経信号の計測による動作パターン検出とそのクラスタリングを中心に議論が展開されている。前者は，計測された神経信号から動作パターンへの意味付けに対するアプローチであり，後者は，設計されたデバイスにおいてパターンマッチングを行う際のそれら神経信号-動作パターンの利用性を高めるためのアプローチである。目的のためそれぞれ相補的役割を持つ二段階に渡る実験を行っている。第一段階としては皮質電図を用い広範囲にわたる運動制御信号を計測できる可能性を追及するために，ラットを被験動物として多くの実験を行っている。さらに，実験の第二段階として，局所的な神経活動サイドからの評価をも行うことを目的にラット行動下の運動野における局所的な神経活動を多点計測のために，ラッ

トひげに対応して存在する体性感覚野(バレル野)に着目し、感覚パターンに対する神経応答の分類をも試みている。

本論文の概略は以下の通りである。

第1章では、導入として研究を概観するとともに、研究領域、本研究の新規性、工学への貢献について論じている。

第2章では、運動パターンの検出、およびクラスタリング手法について述べている。まず、運動パターン検出には、信号計測が必要であり、本論文で注目する皮質電図の生理学的知見、およびここで実現する計測手法について記述している。そして、実際にラットを被験動物として大脳皮質運動野の表層に設置した電極により運動時の電位計測を行い多くの有用なデータを得ている。こうして計測された信号をもとに SOM によるクラスタリングを試み、得られたデータを分析し、議論を展開している。その際、ラット自由行動下における動作評価が非常に困難であるため、ラットの胴を拘束した状態での歩行に関する電位計測を行い、動作の ON/OFF に関しては、3割のエラー率が存在するという結果を明らかにしている。

第3章では、局所的な神経応答からの大局的神経応答を評価することを目的として行っている。ラット体性感覚野に存在するバレル野からの各層に対して計測した神経信号を SOM により分類した一連の結果を示している。この結果から、体性感覚信号に対するバレル野における神経応答特性に関する知見が多く得られており、また、刺激パターンに対する神経応答特性の意味付けを行いやすいという観点から、バレル野で4種類のひげ刺激パターンに対して計測された信号の分類を試みた結果について論じている。また、微小領域での多点同時計測を実現するためのシステム構築のため、マイクロファブリケーション技術を用いた多点計測可能な異方性エッチングのみによる簡素化した形状形成プロセスを提案し、提案手法に基づいて多点プローブを製作しこれを用いて実際に計測を行いその有用性を示している。

第4章は、Future Works として、本研究において散在する種々の問題に対する今後の課題についてまとめている。

第5章は総括である。

これを要するに、著者は新しく脳-アクチュエータ系を用いた知的デバイスとしての適応型電動義装具を開発することを目的として、大脳表面から信号を計測・特徴を抽出する低侵襲計測システム構築手法を提案し、ラットを用いた実験によりその有用性を定量的に評価した。これにより適応型電動義装具開発の分野において多くの新知見を得たものであり、複雑系工学、福祉工学、ロボット工学、および情報工学の研究分野に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。