

[別紙 2]

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 加藤 龍

加藤 龍(かとう りゅう) 提出の本論文は「信号の個人差と時変性に適応する筋電義手を用いた運動機能再建に関する研究」と題して全 7 章で構成され、信号の個人差と時変性という不安定な信号特性に適応する新しい筋電義手の開発と、手指を失った切断者の運動機能再建に対する義手適用効果について調査することを目的として執筆した論文である。

特筆すべき成果としては、本論文で提案した表面筋電位(EMG)を用いた動作意図識別法を、ヒトの手指の筋骨格構造と触覚を模した五指ロボットハンドに適用した結果、従来の筋電義手に比べ、**長期安定的に高精度で多くの動作を実現する筋電義手を構成し、これに対する工学的・脳科学的、臨床的側面から詳しい解析結果が述べられている**ことである。

本論文は、序章と結論のほか五つの章から構成される。

序章においては、本論文の意義と目的、および、研究背景について述べられており、本論文の独創性および独自性について、筋電義手研究を取り巻く関連技術の研究動向と定量的な比較に基づいて明らかにされている。

第二章においては、筋電義手の構成要件と評価方法がヒトの手指機能と比較することにより論じられている。特に作業療法におけるヒトの手指の機能的役割や構造から、関連技術に対する機能要求を整理・分析した結果が示されている。それら機能要求から、義手で実現すべき構成要件とその評価方法を導出することにより、提案している筋電義手の評価基準の正当性が示されている。

第三章においては、信号の個人差と時変性に適応し、安定した動作識別を実現するための On-line 学習メカニズムを導入した動作意図識別法を提案されている。この手法は、EMG の振幅・周波数情報からニューラルネットワーク(識別関数)により動作識別し、同時に、EMG パターンと識別結果を監視することで信号の特徴空間上での分布変化を検知して訓練データの修正・識別関数の再学習を行う方式が提案されている。また、信号の特徴空間上での分布変化は手指動作の連続性から変化に関する基準を定義し、この基準を用いて訓練データを自動的に修正する方式と、さらに、システムによる訓練データ修正の制御(抑制)の概念を導入し、異なる動作の訓練データが特徴空間上の分布の競合することを防ぐため、「ベクトル量子化と条件付き情報エントロピー」による訓練データの競合度を定義し、これに基づいた修正法についても提案されている。これらの提案手法の性能評価は前腕動作の識別率を用いて行われており、**少数の筋電センサ(3個)から最大前腕12動作(切断者)を10時間連続して、90%以上の高い識別率が維持される**ことが示されている。また、適応機能を有する義手がどの程度ヒトへの介入をすべきかといったヒトと義手の相互適応の関係性をエントロピー基準により論じられている。

第四章においては、筋骨格系と感覚系の代替を目的として、干渉駆動関節と触覚フィードバックを有する五指ロボットハンドの開発について論じている。干渉駆動関節とは、各関節に複数のアクチュエータからの動力路を全て接続し、アクチュエータ間の出力比率を適宜調整することにより、任意の関節を駆動する機能を有するとともに、複数のアクチュエータの出力の重畳を可能とした機構である。本論文では、これを指・手首関節に採用したロボットハンドに関する設計方法とその性能評価の結果、**多自由度(18 関節自由度, 13 制御自由度)、軽量(成人男性の前腕程度の重量)、かつ高把持力(55[N])を有する**ことが示されている。一方、触覚フィードバックの実装では、ハンドの指先・掌に設置された圧力センサを刺激トリガとすることにより、**表面電気刺激を用いたフィードバックシステム**が提案されている。この方法の設計法とその性能評価の結果、日常生活

活での使用範囲において**非侵襲で低エネルギーにかつ少数の電極で刺激が可能である**ことが示されている。

第五章では、筋電義手使用時における切断者の脳機能変化を解析するために、fMRI を用いた脳機能計測を行い、その検証結果が述べられている。運動感覚に関する義手使用時の脳機能解析の結果、(1)義手への習熟により運動感覚野の賦活が増大・局在化すること、(2)義手の長期安定した動作が一次運動野の賦活に大きく影響すること、(3)能動的に得られる触覚は運動と対側であっても錯覚に類似した反応として同側の一次感覚野を賦活させること、(4)残存する運動イメージが一次運動野と前頭前野の賦活に大きく影響すること、という**4つの脳機能に関する適応現象を明らかにし、提案する筋電義手の運動機能再建への有効性が示されている**。

第六章では、提案する筋電義手の臨床評価を行うため、手指機能が必要となる83項目からなる日常生活動作(ADL)の実現性を評価した結果が示されている。その結果、主体的な役割に筋電義手を用いて実現できるADLは、健常者のADL全体の約61%であり、市販の筋電義手と比較して10%以上高い結果という結果が得られている。また日常生活の動作事例解析から、**手指機能と手首機能を同時に再建することが、自然な形での運動機能代替には重要である**ことを明らかにしている。

第七章では、論文全体に亘る結論として以下のことが述べられている。

#### ■信号の動的特徴に適応する筋電義手の開発

信号の個人差と時変性に適応する筋電義手として、下記の三つの身体代替機能を実現したこと。

- (1) 表面筋電位からの On-line 学習型の動作意図識別法を構築し、日常生活に必要な手指機能を満足する動作数を長期安定的に識別可能な方法論を確立。
- (2) 筋骨格系の代替として自由度・高出力・軽量を実現するワイヤ駆動型干渉駆動関節を構築し、よりヒトの手に近い性能を持つロボットハンドを実現。
- (3) 触覚系の代替として表面電気刺激による触覚フィードバックを構築し、触覚を有する実用義手を実現。

#### ■運動機能再建に対する義手適用効果の調査研究

- (1) FMRI により個性適応型筋電義手を使用時の脳機能解析を行い、「習熟過程における脳賦活変化」「触覚フィードバックによる錯覚による脳の適応」「運動イメージがもたらす運動野への影響」を明らかにし、義手の安定駆動と触覚の重要性。
- (2) 日常生活上における提案筋電義手の運動機能再建への適用効果を解析し、手指機能と手首機能を同時に再建することが健常者と同様な自然な形での運動機能を代替が重要であること。

本論文は、日常生活に必要な手指機能を満足する制御の安定性と精度を有する筋電義手を開発し、その有効性が示されている。このような高い適応機能を有する筋電義手は世界的に見ても類はなく、医工学分野において価値ある成果を得たと評価でき、また、工学全般の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。