

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名      Hernandez Arieta, Alejandro

Hernandez Arieta, Alejandro (ヘルナンデス・アリエタ・アレハンドロ) 提出の本論文は「Development of a multi-channel functional electrical stimulation system for prosthetic applications of limbs (四肢の運動機能補助のための多チャンネル機能的電気刺激システムの開発)」と題し、全6章よりなり、神経及び四肢の障害者の日常生活支援に必要な感覚や運動機能を回復するための統合システムの開発目的として執筆した論文である。

一般に障害者に対して、これまで行われてきた日常生活支援機器の開発は、感覚情報提示に主眼を置いたものか、それとも、運動機能補助を行うものなどの二種類に大きく分類され、これらの研究が独自に進められてきた。しかしながら、人の感覚と運動の機能は、多くの場合、協調して仕事を行うように作られているため、能動的な運動意図に適合する感覚情報が随意に取得できる必要がある。そこで、この論文では、感覚情報提示と運動機能補助の両方が同時に提供できるような電気刺激法と装置を提案し、随意的な運動意図を反映した感覚フィードバック付の目的行動の遂行を補助するシステムの開発を試みている。また、電気刺激法による感覚情報提示と運動機能補助に特有の課題は次の3項目に整理される。1) 高電圧な電気刺激を用いると、筋肉を特定して刺激を行うことが困難となること。2) 一定の電気刺激に対して個人差や刺激への慣れを起こすこと。3) 刺激に対する挙動が非線形であるため、身体の応答が予測困難となることなどが挙げられる。これら3項目の課題に対応するために、多チャンネル機能的電気刺激システムが提案されている。本論文は、序論と結論の他、4つの章により構成されており、以下に各章における要約を記述する。

序論では、日常生活の環境下において必要となる運動と感覚の機能について概観し、経皮的電気刺激を使用することで運動と感覚の機能を代替する基本的な考え方と、その必要性、および適用範囲について述べている。

第二章は、経皮的電気刺激の神経および筋に対する影響に関する研究背景について述べられている。経皮的電気刺激が求心性と遠心性の両方の神経経路に作用し、感覚系と運動系に対する刺激が、反射やそれに伴う筋紡錘の収縮現象を発生する原理について示されている。また、他の機械的刺激法や侵襲型の刺激法に対する優位性についての論拠が示されており、経皮的電気刺激法を用いて、筋紡錘へ刺激を行う研究や、上皮受容器に対して電氣的に知覚フィードバックを提示する研究についての詳しい動向についても示されている。

第三章では、本論文で提案する四肢の運動機能補助のための多チャンネル機能的電気

刺激システムについて述べられている。刺激関数は、リハビリテーションやスポーツ医学で一般的に用いられているロシア式矩形波型電気刺激を基礎として用い、これを拡張することにより経皮電氣的刺激を発生させる方法を採用している。拡張方法は、ロシア式矩形波に対して、高調波の搬送波信号を重畳し、さらに間欠区間を導入することにより、刺激侵入深度の調整と電気エネルギー強度の調整を可能としている。提案システムの基本機能の評価結果として、電気刺激への慣れが減少すると、低電圧でも総体的な筋収縮を発生させられることが確認されており、筋収縮を随意的に制御できる最適な刺激パターンを発見している。さらに、触覚情報の感覚フィードバックにおいても筋収縮を阻害せず、同時に最も高い識別率を達成する刺激パターンを発見している。

第四章では、下肢に麻痺を有する者の運動補助の課題に対して応用が試みられており、歩行と階段昇降の機能の補助に関して述べられている。下肢の筋収縮は筋繊維への電気刺激でも起こすことは可能であるが、神経支配とは無関係な運動となるため、本論文では対象外とされ、反射経路への電気刺激に限定して行うことにより、随意的な運動を誘発することに成功している。被験者は、腰椎 L4L5S1 の疾患により、大腿直筋、腓腹筋を除くほとんどの筋への神経支配を損傷しており、立上がり動作のみが可能であり、脚の振り出し・振り戻し動作は左右ともに不可能な状態である。本論文では、この被験者に対して、提案システムを適用することにより、随意に脚の振り出し・振り戻しを可能とし、歩行の前進後退と階段の昇降を実現している。

第五章では、触覚情報の感覚フィードバックのアプリケーションのひとつとして、筋電義手の触覚センサーとして提案法を利用した場合の効果について述べている。効果を確かめるために、筋電義手を用いたときの全脳の賦活パターンを fMRI と SPM を用いて解析しており、種々の条件での触覚フィードバックに対する応答を定量化している。特筆すべき成果は、筋電義手に精密な触覚フィードバックを入れることにより、世界に先駆けて錯覚などの特異な脳活動が脳一次運動感覚野および頭頂連合野、帯状回、運動前野で発生する効果が得られており、その結果として、人の能動触覚の機能が復活することが確かめられている。被験者は、右手根関節離断の前腕切断者 1 人と健常者 2 名に対して、10 パターンの制御自由度を有する 5 指筋電義手を用いて、球握りと鉛筆握りの識別実験を行っている。実験条件は、触覚フィードバックの有無、触覚フィードバックに応答遅れを入れた場合、視覚フィードバックの有無である。実験結果は、触覚フィードバックを入れずに筋電義手を作動させた場合においては、頭頂連合野の賦活が顕著であり、視覚に頼った運動制御が行われていることと、運動野の賦活強度が、実験回数に比例して強くなっていくこと、感覚野に賦活は見られないことが示されている。一方、触覚フィードバックを入れた場合には、その応答遅れが 0.5s までは、頭頂連合野の賦活が消えてゆくこと。また、触覚フィードバックを入れる場所に因らず、常に、右手感覚野に強い賦活が観察され、錯覚現象が現れること。さらに、運動野のみならず、

前頭前野を除くほとんどの部位で、実験回数に反比例して賦活強度が減少することが確認されている。

結論では、本研究の成果についてまとめられている。

- ・ 日常生活における人の感覚と運動の機能再建を図ることを目的として、多チャンネル機能的電気刺激システムを提案することにより、感覚情報提示と運動機能補助の両方が同時に提供できる機能が実現されていること。
- ・ 提案システムを下肢に麻痺を有する者の運動補助の課題に対して応用した結果、反射経路への電気刺激に限定して行うことにより、随意に脚の振り出し・振り戻しを可能とし、歩行の前進後退と階段の昇降を実現していること。
- ・ 筋電義手の触覚センサーとして提案法を応用した結果、錯覚などの特異な脳活動が脳一次運動感覚野および頭頂連合野、帯状回、運動前野で発生する効果が得られており、その結果として、人の能動触覚の機能が復活することを確かめたこと。

これらの成果は、感覚と運動の機能を再建するための方法論の新規性と有効性を示していると考えられる。これはロボット工学において、また福祉工学の研究において価値ある成果を得たと評価でき、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)学位請求論文として合格と認められる。