

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 運動錯覚現象の誘発と制御を可能にする振動刺激条件の確立

氏名 本多正計

論文内容の要旨

日本人の死亡原因第三位である脳卒中は、有効な治療法の登場、脳卒中専門病棟の整備などにより、死亡者数は年々減少傾向（2011年 123,867人）にある。しかし、総患者数は死亡原因トップである悪性新生物（がん）とさほど変わらず、2011年には1,235千人（悪性新生物：2011年 1,526千人）もの脳卒中患者が継続的に医療を受けている。また、1999年頃よりその減少率は鈍化傾向にあり、2020年には有病者数が288万人に達するとの予想も出ている。このことは、脳卒中に罹患しても生き残れる確率が高まっていることを意味しているが、この現象が次の新しい問題を生み出している。

脳卒中を発症すると、高い確率で麻痺等の運動障害が発生する。これら障害は適切なリハビリテーション（運動機能訓練など）を実施することで、発症後6か月位までは急速に回復するが、それ以降は維持期と呼ばれ回復しにくくなり、発症者の約6割の人が後遺症に苦しんでいる。しかし、最近の脳神経科学の発展により、脳の可塑性が従来の定説よりはるかに大きく短期間で生じることが明らかにされ、大脳皮質の運動を司る領域の神経路を再建/強化（刺激）させることで、6か月を過ぎた維持期の患者でも運動機能の回復が望めることが確認されてきた。近年では、脳の可塑性に注目したリハビリテーションとして、ニューロリハビリテーションといった新しい療法（反復促通療法、CI療法、HANDS療法）が提唱されており、一定の治療効果を上げている。今後、麻痺回復のためのリハビリテーション効果をさらに引き上げていくためには、このような科学的根拠に基づいた療法を数多く提唱し、それらを治療法として手軽に受けられる環境を、患者に提供していくことが重要であると考えられる。そのためには、新しい療法に精通した療法士の育成はもちろんのこと、患者が、自宅などでも一人で訓練に励めるような、シンプルで安全かつ安価なリハビリテーションシステムの実現が必要である。

そこで本研究では、運動を司る脳領域の神経路を同じく興奮させることができる、運動錯覚というヒトの錯覚現象に着目し、最終目標として、同現象を応用した手・指の巧緻運動機能訓練用リハビリテーションシステムの開発を目指す。

運動錯覚とは、動いていない四肢があたかも動いているかのように感じられる、実際の運動と知覚される運動の間に不一致が生じる現象であり、1972年 Goodwin らによって初め

て報告された運動（固有）感覚の錯覚現象である。この現象は、ヒトの運動感覚に関する感覚情報処理研究の中で多く活用されてきており、これまでの研究によって、錯覚中に活動する脳部位が実際に四肢等を動かす時に活動する部位と同じであることがわかっている。また、軽度な感覚障害であれば、脳卒中片麻痺患者においても錯覚が誘発されることが確認されている。このことは、脳卒中片麻痺患者においても、運動錯覚を誘発させることでダメージを負った大脳皮質運動野等を刺激できるため、脳の可塑的变化を促せる可能性を示唆しており、リハビリテーション治療への応用が期待できる。また運動錯覚は、皮膚上から腱に振動刺激を与えるだけで誘発されるため、研究の進展によっては、小型の振動提示デバイスを利用して、麻痺肢の腱上の皮膚にそれらデバイスを装着するだけで運動機能訓練が行える、シンプルで安全かつ安価なシステムの実現が期待できる。

しかし現状では、同現象を工学的に応用しようとした場合、振動刺激に対する詳細な知覚特性がわかっていないため、振動提示デバイスの基本仕様も定まっておらず、小型振動提示デバイスの開発はおろか、運動機能訓練時に必要となる動きの感覚についても、その質や量を自在に誘発・制御させることが難しい状況にある。そのため、最終目標に掲げているようなリハビリテーションシステムを実現させるためには、まず、運動錯覚現象の知覚特性を詳細に調べ、同現象の自在な誘発と制御を可能にする振動刺激条件の確立と体系化が必要不可欠である。

本論文では、このような振動刺激条件の確立と体系化に向けて行った、一連の研究について言及する。本論文は6章から構成され、各章の詳細は以下に示すとおりである。

第1章では、脳卒中片麻痺患者に対するリハビリテーション分野の話題から潜在的、技術的ニーズを掘り起こし、それらニーズが運動錯覚というヒトの錯覚現象を活用することで解決できる可能性があることを示す。また、同現象を工学的に応用するための技術的課題を洗い出すとともに、研究の目的と最終目標を明確に定め、最終目標達成までの研究計画を策定する。

第2章では、本研究で扱う運動錯覚現象について概観し、同じ振動刺激によって引き起こされる緊張性振動反射との違いについて述べる。また、これまでに運動錯覚現象を多く扱ってきた感覚情報処理研究分野の先行事例から、同現象を誘発させるための刺激条件が未だ確立させていないということを明らかにし、運動錯覚現象の自在な誘発と制御を可能にする、振動刺激条件の確立と体系化の必要性や意義を唱える。

第3章では、運動錯覚現象の知覚特性を調べる上で必要となる、振動刺激量の制御とモニタリングが可能な卓上型運動錯覚誘発・評価装置の開発を行い、その基本性能ならびに知覚特性評価装置としての有効性を確認した。

その結果、本開発装置では、腱への押し込み力が1.5 N以下であれば、50 Hz から 300 Hz までの周波数範囲で最大 100 m/s^2 の振動刺激を腱に提示でき、この周波数範囲内であれば、腱にかかる実加速度を振動提示デバイス内部の加速度センサでモニタリングできることを明らかにした。また、実際に5名の実験参加者の右手橈側手根屈筋（FCR）腱を刺激し、手関節伸展方向の運動錯覚を誘発させる実験を行った。この実験では全ての実験参加者で運動錯覚の誘発が確認され、本開発装置の知覚特性評価装置としての有効性が確認された。

第 4 章では、運動錯覚現象の誘発を制御するために必要な、同現象を誘発させるための必要最低限の振動刺激値、いわゆる錯覚誘発刺激閾値の推定を試みた。

その結果、運動錯覚の刺激閾値は、接触子の押し込み力が 1.5 N 以下であれば押し込み力の影響を受けにくく、刺激の振幅を加速度次元で評価した場合、50 Hz から 90 Hz の振動刺激範囲内では 40 m/s^2 から 50 m/s^2 付近に、変位次元で評価した場合、70 Hz から 90 Hz の振動刺激範囲内では 0.15 mm から 0.2 mm 付近に存在することを明らかにした。

第 5 章では、誘発される運動錯覚の質や量を制御するために必要な、振動刺激条件を変化させた場合の錯覚知覚時の感覚尺度（静的および動的錯覚量）特性を求めた。

その結果、静的錯覚量については、押し込み力 0.3 N 時の 50 Hz と 70 Hz の振動刺激が、運動錯覚を鮮明に誘発させられることが判明し、その刺激条件であれば、加速度を増加させることで静的錯覚量を最大 2 ポイント程度まで増加させられることを明らかにした。また、動的錯覚量（伸展方向の最大運動角度）についても、押し込み力 0.3 N 時の 70 Hz の振動刺激条件であれば、加速度を増加させることで動的錯覚量を約 10 deg 程度増加させられることを明らかにした。

第 6 章では、本研究で得られた知見を総括し今後の展開や可能性について述べる。