

学位論文題名

神経系と筋骨格系の相互作用からみた 身体運動のパターン形成

－筋骨格系の力学特性と運動パターン形成の関連－

学位論文内容の要旨

我々の身体運動の生成には、全く異なる法則で作用する2つのシステムが相互に関与している。一つは中枢神経系から構成され、その活動ダイナミクスが力学法則に拘束されない（されたとしてもその影響は極めて小さい）神経系であり、もう一つは質量を持ち、力学法則に拘束される筋骨格系である。それぞれに膨大な自由度を有し、全く異なった理に沿って作動するこの2つのシステムは如何に関わり、如何なる秩序によって特定の運動パターンを形成するのか？この問題は、運動制御研究における重要な焦点の一つとなっている。

この問題を扱う代表的なアプローチとして、まず理想的な運動軌道を決定し、その軌道の実現に必要な関節トルクや外界との相互作用にともなう力を逆計算することにより運動出力を生成するという計算理論的アプローチが挙げられる。このアプローチでは神経系を制御側、筋骨格系を被制御側として明確に分離する。効果器（筋骨格系）の力学特性や周囲の環境、その軌道達成に特定のダイナミクス等は内部モデルにおいて学習、保存され、一度学習されるとフィードフォワード制御によりスムーズな運動が可能となるとされている。しかしながら、このアプローチは運動計画の事前決定を前提としており、我々の身体運動を取り巻く内外の環境の非定常性、および筋骨格系において生じる運動の非予測性に対応するのは困難であることが指摘されている。

この問題を解決するため、神経系による一方向的な制御概念を捨て、システムを構成する要素間の相互作用に重点をおいた自己組織論的アプローチが身体運動研究に導入されるようになった。このアプローチにおいては、複数の要素が相互作用によって自律的に秩序のある全体のパターンを生成することを前提としており、制御自由度の膨大さや運動計画の事前決定に関連する問題からは回避される。とりわけ、自己組織化する情報システム（self-organizing information system）は、要素として自ら力を発揮し運動できる生命体を想定し、知覚に関する情報システムと生命体の動きに関わる力学システムという異なる2つのシステムを同時に考慮している。近年、このシステムの理論が身体運動に適用され、このことが神経系－筋骨格系の相互作用を前提とした運動研究の発端となった。

このアプローチに関連する一連の研究は四肢運動のパターン形成に関する重要な示唆をもたらし、現在も積極的に展開されている。しかしながら、これらの研究は主に被験者が快適と感じる状態（至適状態）において形成された運動パターンの検討に焦点を置いており、様々な状況に対して適応しうる身体運動の側面に関しては十分検討されていない。第一章において先行研究を検討した結果、筋骨格系の力学特性（慣性モーメントおよび固有振動数）と身体運動のパターン形成の関連に関する以下の3つの課題が明らかとなった。

- 随意的により多様な周波数および振幅を生成しなければならない運動において、筋骨格系の慣性モーメントや固有振動数がどのような制約をもたらすか検討する必要がある。（課題1）
- 至適周波数前後の運動において、筋骨格系の固有振動数を変化させる関節スティフネスがど

のように調整されているかを、実測値を用いて検討する必要がある。(課題2)

- 立位上肢運動時の姿勢協調パターンを、上肢の固有振動数に着目して検討する必要がある。(課題3)

これらの課題を検討するため本論では3つの実験を設定し、各々の課題における身体運動パターン形成と筋骨格系の力学特性との関連を神経系-筋骨格系の相互作用を前提とした観点から検証した。

第2章では課題1に関連する実験を行った。この実験では、周期運動とは対極的に可能な限り周期も周波数も不規則に動かす課題(以下ランダム運動)において、その運動自由度の上限や周波数特性に筋骨格系の力学特性がどのように反映されているかを検討した。その結果、ランダム運動の運動自由度は従来想定されていたよりも低次元に制限されており、より慣性モーメントが大きい近位の部位の運動ほど自由度は制限される傾向にあった。また、ランダム運動の不規則性は同じ部位でも慣性モーメントの大きさによって変化し、固有振動数や慣性モーメントの影響を反映してパターンが形成されていることが示された。これらの結果から、筋骨格系の力学特性はたとえ非周期的な運動であっても運動パターン形成を規定する拘束力を持つことが示唆された。さらにコンピューターシミュレーションや筋電図解析の結果を検討した結果、このようなランダム運動における自由度の制限は神経系-筋骨格系の相互作用の結果生じていることが示唆された。

第3章では課題2に関連する実験を行った。この実験では、新たに関節スティフネス測定システムを設計することによって周期運動時の関節スティフネスの実測を試み、至適周波数以外の運動周波数においてどのように関節スティフネスが調整されているのかを検討した。その結果、関節スティフネスはいずれの慣性条件においても至適周波数付近の運動周波数時に最小となり、至適周波数よりも高い運動周波数領域においては運動周波数の増加に伴い増大する一方で、至適周波数よりも低い運動周波数領域においては逆に減少する傾向を示した。さらに、関節トルクに対する関節スティフネスの比率は至適周波数付近の運動周波数を境界として異なる傾向を示した。これらの結果は、運動周波数と至適周波数の関係に関連して関節スティフネス調整に関与する要因が変化している可能性を示唆した。

第4章では課題3に関連する実験を行った。この実験では、様々な周波数での上肢周期運動時、上肢の固有振動数が立位時の姿勢協調パターンの形成にどのような影響をもたらすのかを検討した。その結果、最大運動周波数の40-45%に相当する運動周波数(以下40-45%max)より低周波数の試技においては上肢運動と股関節運動が、一方40-45%maxより高周波数の試技においては上肢運動と足関節運動が高い相関関係を示した。また、40-45%maxを境界に関節トルクの発揮パターンが変化し、股関節と足関節の筋仕事が運動周波数に対して逆の変化を示した。さらに、40-45%maxという運動周波数は被験者の上肢の固有振動数とほぼ一致した。これらの結果は、段階的な上肢運動周波数変化に伴い姿勢協調パターンは2つの協調パターンに収束すること、そしてこれら2つのパターン形成の境界は上肢の固有振動数であることを示唆した。

以上3つの実験結果をもとに、第5章では神経系-筋骨格系の相互作用による身体運動パターン形成の側面を包括的に検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 身体運動の自由度は神経系と筋骨格系の相互作用により自律的に制限され、結果的に筋骨格系の力学特性を反映する。
- 2) 速度あるいは周波数を変動パラメータとする運動パターンの生成において、筋骨格系の固有振動数はパターン変化の分岐点としての役割を果たす。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 山 田 憲 政
副 査 教 授 須 田 力
副 査 助 教 授 矢 野 徳 郎
副 査 助 教 授 保 延 光 一
副 査 室 長 中 澤 公 孝

(国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所運動機能系研究部神経筋機能障害研究室)

学 位 論 文 題 名

神経系と筋骨格系の相互作用からみた 身体運動のパターン形成

－筋骨格系の力学特性と運動パターン形成の関連－

本論文の目的は、身体運動の生成に筋骨格系の固有振動数が如何に関与しているかを明らかにすることである。通常、我々の筋骨格系は、様々な運動感覚情報が中枢にフィードバックされ、それが統合された運動プログラムによって制御されると考えられているので、制御される筋骨格系の運動に自身の力学的特性である固有振動数が如何に関与するのかと問うことは一見奇異に感じられるが、その発想の転換こそが本研究および身体運動の自己組織研究が採用する独創的なアプローチの仕方である。

本論文は、6つの章から構成されている。第1章は文献研究であり、これまでの身体運動制御研究を計算論的アプローチと自己組織論的アプローチに分けそこでの研究の到達点をそれぞれ明らかにし、さらに、本論文が採る自己組織論的アプローチでの研究成果を、運動生成への筋骨格系の影響という観点から検討し、本研究を遂行するための課題を次の3つに整理して提示した。1) 随意的に複雑な身体運動を生成させる際に、筋骨格系の慣性モーメントや固有振動数が如何にその運動に制約をもたらすのか。2) そのような複雑な運動は幅広い運動周波数から構成されるが、運動周波数の変化に伴い関節の剛性（関節スティフネス）が如何に調整されているのか。3) 四肢が幅広い運動周波数で運動中、姿勢を維持する部位は如何にその部位の運動に協調しているのか。続く3つの章が本研究の中心を成すもので、上記の3つの課題

を検討する実験研究で構成されている。

第2章における実験1では、被験者が行うできるだけ不規則な関節運動の周波数分析、運動自由度の推定、さらにエントロピーの概念を用いた複雑性の解析を行った。その結果、人ができる限り不規則に動かそうとする自己の身体は、低次元の自由度で拘束されており、さらにその平均パワー周波数は運動部位の固有振動数とほぼ一致することを明らかにした。第3章における実験2では、これまで困難とされてきた関節の鉛直運動の幅広い周波数での関節スティフネスの測定を、測定器と測定方法を新たに開発することによって行った。その結果、運動部位の固有振動数前後で非線形的に関節スティフネスの値が変化することを発見し、関節スティフネスの調整において運動部位の固有振動数が関与していることを明らかにした。第4章における実験3は、上肢が様々な運動周波数で周期運動する際の姿勢部位の挙動を検討した。その結果、上肢の固有振動数の前後で姿勢パターンが大きく異なることから、身体の部分運動と姿勢の協調においても、運動部位の力学特性である固有振動数が関与していることを明らかにした。なお、これらの実験研究の主要部分は審査制のある国際誌 (Experimental Brain Research) に原著論文として公表され、この分野の専門研究者による客観的な評価を受けている。

第5章では上記の3つの研究結果を総合的に考察し、第6章で次の2つの結論を導いている。1) 身体運動の自由度は、神経系と筋骨格系の相互作用により自律的に制限され、結果的に筋骨格系の力学特性を反映する。2) 速度あるいは周波数を変動パラメーターとする運動パターンの生成において、筋骨格系の固有振動数はパターン変化の分岐点としての役割を果たす。

本研究は、大きく2つの面から評価される。一つは運動制御研究における新たな知見を提示する実験研究としてであり、もう一つはその実験研究を支える計測・分析法の開発研究としてである。

前者における評価の第1は、制御されると考えられてきた筋骨格系の運動に、自身の固有振動数が主な影響を及ぼすことを、関節の不規則運動、関節のスティフネス調整、そして関節運動と姿勢の協調という身体運動の基盤となる部分の関節運動およびその部分運動に協調する全体の運動で実証したことである。第2に、この主要な研究成果に付随して、身体運動の自由度が4次元以内の低い制御自由度であること、そして関節の位相関係に基づいた姿勢パターンが部分動作の固有振動数を境界にして大きく2つに分けることができることを共に始めて明らかにしたことが挙げられる。

後者の身体運動研究における計測・分析についてであるが、生体の運動の実験研究では機械を対象とした実験とは異なり、センサーの装着方法など多くの制約が課されることから、いかに工夫して目的とするパラメーターの計測を行うかが新たな知見を得るために重要な鍵となりうる。その中でも関節スティフネスの測定は困難であり、重要な制御パラメーターであるにもかかわらず数少ない研究が特化された運動において測定してきたに過ぎなかった。このような現状で、新たに測定器と計算方法を開発し、幅広い運動

周波数における関節スティフネスの定量化に成功したことが本研究の評価される点である。さらにエントロピー概念の身体運動の複雑性の評価への導入、実験ノイズに強い次元解析の方法の身体運動研究への適用もこの分野の研究の発展に貢献したと評価できる。

以上の内容から、審査委員一同は、阿部匡樹の学位請求論文が博士論文に相当すると判断し、阿部匡樹を博士（教育学）の学位を受ける資格があると認める。