

学位論文題名

協調動作の自己組織性

学位論文内容の要旨

従来、身体運動の制御の研究は制御側である中枢神経系と制御対象である筋骨格系を分離し、制御側に運動を制御する明確なプログラムが運動の事前に確定するとの前提に基づき展開されてきた。これに対して、中枢神経系と筋骨格系が相互作用することを前提とし、物理システムで構築された自己組織化理論を用いて身体運動にアプローチする新たな研究分野が生まれつつある。この分野での研究は、身体運動を身体を構成する多数の要素の協調として捉える視点で展開されており、身体運動現象の特徴の一つである運動のマクロな構造が突然変化する相転移現象を説明することに成功してきた。しかし、これらの研究は非常に歴史が浅く、さらにその多くのモデルは一部の運動現象が自己組織化する物理システムの特徴と類似することから理論的に構築されたもので、必ずしも身体運動現象を十分に検証したものではない。また、包括的な先行研究も少ないので、そこでの研究の問題点も十分明らかにされていない。

そこで本論文は第1章(緒言)において、1)自己組織化の理論を用いた身体運動の諸研究がそれぞれどのような前提に立脚して展開されているか、さらに2)どのような身体運動を対象として研究が展開されているか、という視点で先行研究を検討すると同時に、それらの研究の現時点での到達点を明らかにした。1)の課題に対しては、Bernsteinのシナジーの流れに立脚する研究(Kelso, Hakenの一連のシナジェティクスを用いた研究)と、Gibsonの生態心理学の流れに立脚する研究(Kugler, Turveyらの自己組織化する情報システム理論)の2つの流れがあることを明らかにし、これらの2つの研究は運動システムを構成する多数の要素である筋の活動と神経系の場が相互作用するという共通の前提があるものの、多数の要素が場を検知する速度が無限か有限かの重要な違いがあることを指摘した。2)の課題を検討するに当たり、身体は質量を持つ複数のセグメントの総体であることとその運動は重力下において行われることを基盤として、身体運動を重心の動的安定性の維持と重心まわりの相対運動(動作)から構成されていると考えた。このように身体運動の構成を考えると、自己組織化理論を用いた研究が着目してきたのは、四肢間の動作と四肢が物体を移動させる際の動作だけであることを明らかにした。以上の先行研究の検討結果から、身体運動全般の自己組織性を検討するために、1)全身の自律的な協調性と、2)四肢そのものの動作における筋活動の自律的な協調性を実験的に検証すること、さらに3)要素と場の相互作用の関係を実験的に検証することとして本論文の目的を整理し提示した。そして続く3つの章で、その課題を実験的に検討した。

第2章においては、全身の自律的な協調性を実験的に検討することを目的として、その身体運動現象として立位姿勢を対象とした。立位姿勢は厳密には静止ではなく身体重心が複雑に変動することが知られている。そこで実験では、この変動は全身の動きが協調する結果生じている現象であるという仮説を設定し、それを実証するために2つの方法を用いた。第1に、姿勢が単なる静止状態ではなく全身の運動が協調した動的な安定状態であるなら、静止状態と身体を動かしながら立位姿勢を維持している状態での足圧中心

の変動の構造に類似性があると考え、それを実験的に検討した。実験は、5名の被験者にフォースプレート上で身体各部位を動かさず直立姿勢を維持する試技と腕の前後への周期運動を行いながら直立姿勢を維持する試技を行わせ、足圧中心の時間的変動を記録した。その結果、両試技の足圧中心の時間的変動を位相空間で表すことによって定性的に類似した構造のアトラクターが得られ、その類似性がアトラクターの次元解析によって定量的に確認された。さらに、足圧中心の時間的変動のスペクトル解析を行い、両試技のスペクトルの型が類似していたことから、両試技の足圧中心の構造の類似性が周波数領域からも確認された。2番目に、立位姿勢で観察される変動が身体内部の運動の情報を受け入れ処理する能力があるかを情報理論を用いて検討した。その方法として、まず同じ被験者に前腕の肘関節まわりの屈伸運動を行わせ、運動中の肘関節角度変化を記録した。前腕部の運動を対象としたのは、立位姿勢において最も頻繁にかつ不規則に運動する部位と考えられるからであり、実験では肘関節を一定のリズムと不規則なリズムで屈伸運動する2試技を行わせた。これらの関節運動から得られたデータと足圧中心の変動データの相互情報量を計算することによって足圧中心のアトラクターの情報処理能力を分析した。その結果、足圧中心のアトラクターは情報を受け入れ蓄積する能力が、関節運動のアトラクターより相対的に優れていた。以上の結果から、足圧中心の変動は運動システムの動的な安定を保つために生じている現象であり、立位姿勢は身体安定を維持するために全身が協調している状態であると考えられた。

第3章においては、四肢の動作中の筋活動の協調性を検討することを目的として、その身体運動現象として前腕の肘関節まわりの周期運動を対象とした。実験を設定するにあたり非線形力学の分野で詳細に検討されてきた強制振り子の数値実験の結果を参考にした。この数値実験では、振り子の挙動は強制力の振動数だけで決定せず振り子の固有振動数の影響が表れ複雑になることが明らかにされている。したがって、振り子と仮定された前腕部を常に駆動力の周波数で周期運動させる場合には、前腕部の固有振動数を運動の周波数に応じて調整しなければならない。実験は、5名の被験者に1.4Hzから3.4Hzまで0.2Hzずつ変化する発振器からの周期音を聞かせながら、その周期音に屈伸運動の半周期が合うように肘関節の屈伸運動を20秒間行わせ、その際の肘関節角度変化をストレインゲージ型のゴニオメーターを用いて測定した。その結果、周波数が増加しても関節運動の秩序状態が維持されることが確認された。さらに、位相図上で表された肘関節運動の周期運動の軌道の分析によって、周期運動の周波数が増加するほど関節スティッフネスの値も増加し、その結果として前腕部の振り子としての特性である固有振動数も増加していると考えられた。関節スティッフネスは屈筋と伸筋の協同収縮の度合いによって変化することから、肘関節の運動中、屈筋と伸筋が前腕振り子の周期運動の周波数と前腕振り子の固有振動数が一致するように協調して活動していると考えられた。

第4章においては、身体運動システムにおける要素と場の相互作用が隷従原理として近似できるかを検討するために、指のタッピング運動で生じる時間的なゆらぎを詳細に検討した。実験は、5名の被験者に各自の一定のリズムで指のタッピング運動を800回行わせ、その時間間隔の変動をハースト指数を用いて分析した。その結果、タッピングの時間間隔の変動には長期の持続性が認められた。この結果から、定常状態の運動においても運動を生じさせる多数の要素で形成される場は時間的に変動することが明らかにされた。また、その変動は各要素が場を検知する速度は有限なので、各要素が検知する場と全体の場が一致しないために生じると考えられ、隷従原理をそのまま身体運動に適用することは困難であることが示唆された。

第5章総括においては、第2章から第4章までの実験結果をもとに身体運動の自己組織性を包括的に検討し、第6章結論において、本論文の結論を以下のように導いた。

- 1) 重力下にある全身の安定は、身体の運動に関与する多数の要素が自律的に協調している動的な安定

状態である。また四肢の動作中，屈筋と伸筋は自律的に協調している。これらのことから，身体運動システムは多数の要素が自律的に協調するシステムとして捉えられると考えられた。2) 身体運動システムは自律的に変動する性質を内在している。さらにその変動性によって，運動の時間的な構造が生成されることが考えられた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	須田	力
副査	教授	中川	功哉
副査	助教授	陳	省仁
副査	助教授	矢野	徳郎
副査	助教授	保延	光一
副査	助教授	阿江	通良 (筑波大学体育科学系)

学位論文題名

協調動作の自己組織性

近年、非線形・非平衡系（開放系）の生体機構の探索に自己組織化理論を適用する研究が精力的に進められ、身体運動の研究においても、運動を多数の要素の協調による複雑なシステムとしてモデル化し、システムのマクロな秩序形成を制御系からの一方向的なものではなく、システムを構成する自律性をもった要素の相互作用としてとらえようとするアプローチが始まった。

本論の第1章では、身体運動の自己組織化に関する諸研究を検討した結果、それらが Bernstein(1967)に端を発し Kelso, Haken, Kay によって代表されるシナジェティクス論に依拠する研究と Gibson (1979)の生態心理学的アプローチに立脚し Kugler, Turvey らに代表される自己組織化する情報システム理論の研究に大別され、これら2つの研究の潮流には運動システムを構成する多数の要素である筋の活動と神経系の活動の場が相互に作用するという共通の前提がありながら、多数の要素が場を検知する速度が有限か無限（隷従原理）かの論点が曖昧にされている問題点を摘出した。この章の要旨は、日本バイオメカニクス学会の機関誌に紹介されたが、従来の身体運動への視点を再吟味させる波紋を投げ、この研究分野における課題の整理と方向づけの役割を果たした。

これまでの身体運動の研究においては、安定した立位姿勢とはゆるぎのない状態であり、中心位置からの動揺度の大小から安定度を評価しそこで生じた変動は意味のないノイズあるいは誤差という見方が支配していた。しかし最近の研究から、この動揺は全身の運動が協調することによって運動システムの動的な安定を保つために生じているという新たな視点が提起されている。

第2章では、ランダム歩行モデルから立位姿勢における運動制御の仮説を提案した Collins と DeLuca の研究に依拠し、立位の静止姿勢と立位姿勢で上肢を

歩行のように周期運動する状態での足圧中心の動揺の時系列データを、埋め込み法を用いて3次元の位相空間でアトラクターを再構成する手法と相関次元法による次元解析を行い、再構成されたシステムがカオスかどうか判定する最大リアプノフ指数を算出する研究手法によって、姿勢の動的な安定性に以下の新しい知見を提示した。(1) それまで異なった系によって制御されていると考えられていた2つの運動が類似性を持ち、同様な姿勢調整システムによって調整されている可能性がある、(2) その動揺は、Collins と DeLuca がいう確率論的なゆらぎではなく、カオス的なゆらぎである、(3) 立位姿勢で生じるアトラクターが肘関節まわりの屈伸運動のアトラクターよりも情報処理能力が優れている結果から、足圧中心の変動を生じる構造は、身体の各部位が運動してもその情報を受取り蓄積する情報処理能力がある。この成果は、Human Movement Science (1995) に掲載され国際的に大きなインパクトを与え、国内においては日本バイオメカニクス学会奨励賞の評価を受けるに至った。

第3章では、四肢の一関節に限定した動作を対象として、速度の変化に対応して屈筋と伸筋が協調して関節スティフネスを変化させ、前腕振り子の周期運動の周波数と前腕振り子の固有振動数が一致するように活動している様相を明らかにすることによって運動の自己組織性を単関節運動のレベルにおいても確証した。

要素と場の関係は、シナジェティックス論では隷従原理として身体運動に適応できるとの見方に立つ。この立場においては人の周期的な運動で観察される変動は、独立な確率過程としてモデル化できることになる。第4章では、この仮説を指のタッピング運動で生じる時間的なゆらぎをハースト指数を用いて検討した。この成果は Human Movement Science(1995) に前掲論文とは別に掲載され、これまで Schöner ら、Kelso ら、Kay によって運動系に起因するノイズや確率論的なゆらぎとして措定されていた時間間隔の変動が動的な構造を持ち、隷従原理で近似できないという判断を下した。

第5章および第6章では、先行研究の吟味と3つの実験結果から抽出された考察にもとづき、身体運動の基盤となる基礎的な動作が、神経系と筋骨格系の不断の相互作用によって自律的に変動する性質を内在し、さらにその変動性によって運動の時間的な構造が生成されるという理論を提示した。

これら一連の研究成果にもとづく重要な指摘を実際の身体運動に適用するには今後実験的な検証を必要とするが、ヒトの身体運動の研究へ大きく貢献したと評価する。

以上のような審査内容を踏まえ、本論文の著者・山田憲政は、北海道大学博士(教育学)の学位を授与される資格があるものと認める。