

氏 名 児玉 謙太郎

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 1802 号

学位授与の日付 平成27年9月28日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 身体-環境システムにおける両手協調ダイナミクス

論文審査委員 主 査 准教授 稲邑 哲也  
教授 山田 誠二  
教授 佐藤 健  
准教授 坊農 真弓  
准教授 三嶋 博之 早稲田大学

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

本研究は、身体-環境システムという観点から両手の体肢間協調ダイナミクスを実験的に検証し、身体-環境、体肢間協調-姿勢の相互作用について明らかにすることを目的とする。

身体-環境システムとは、身体運動研究の分野において、身体運動をそれが遂行される環境との関係から捉え、身体-環境間、身体要素間の相互作用から創発する現象とみなす立場（システム論的アプローチ）から捉えた際の身体と環境からなるシステムのことである。また、体肢間協調とは、複数の体肢が特定の時空間的パターンを維持しつつ運動することである。体肢間協調は、歩行や走行などの全身で行う移動行動の基礎にあるだけでなく、右手で握ったハサミで左手で把持した紙を切るといった手先で行う巧みな行為の基礎にもある、身体運動の重要な要素である。身体運動の研究分野では、古くから、体肢の運動がそれを支える姿勢と分離できないこと、両者が階層的な入れ子関係にあること、身体はシステムとして捉えられること、が理論的に指摘されてきた。しかし、システム論的アプローチによる身体運動の基礎研究（実験的研究）では、手足・指先などの体肢の運動と全身の姿勢とは別々に研究され、既存のモデルにおいても両者の関係は検討されていない。その背景には、両者を同時に計測する技術的課題、両者の関係を同時に検討する実験的な枠組み、複雑な両者の関係を定量化する解析手法の道具立ての不という方法論上の問題があった。

そこで、本研究では、両者の相互作用関係を明らかにするために、実験計画法による実験的検証を行うとともに、両者のデータ（体肢の運動データと足圧中心データ）の同時計測、及び、情報学の理論に基づくデータ解析手法を用いた両者の時系列データの分析を行った。両者の関係を検証する実験的枠組みについては、体肢間協調と姿勢の組織化の双方に共通する理論的基盤でありながら、未だ両者の統一的理解は達成されていない Dynamical Systems Approach の枠組みを採用し、両手の指の協調運動課題を実施しながら、それを支える姿勢の動揺を同時に計測・分析した。以上の方法によって、身体-環境、及び、体肢-姿勢の相互作用関係を調べた。

第3章では、身体（指先）が環境に接触することにより体肢間協調運動は安定する、という仮説を検証した実験1について報告する。実験課題は、体肢の運動の特異点（屈曲のピーク）で指先が環境に接触するタッピング課題を採用した。実験1の結果、指先と環境の接触がない指振り課題を実施した先行研究、及び、そのモデルの予測とは異なり、不安定とされている逆位相パターンの運動が安定化し、仮説が支持された。

第4章では、体肢間協調の安定化をもたらす要因を特定するため、指先が環境に接触することで得られる触覚情報が安定化の要因である、という仮説を検証した実験2について報告する。実験条件として、指先が接触する環境特性を Hard 条件（指先で力を加えることで物理的に身体を支持できるほどの反作用力が得られる条件）と、Soft 条件（指先で力を加えても物理的には身体を支持できるほどの反作用力は得られず触覚情報のみ得られる条件）、No contact 条件（指先で接触するものがなく力も触覚情報も得られない条件）の3水準で検討した。実験2の結果、指先で触覚情報が得られれば体肢間協調が安定化することが示され、仮説が支持された。

第5章では、姿勢の安定性を操作し姿勢が不安定化すると体肢間協調の安定性も低下す

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

る、という仮説を検討した実験 3 について報告する。姿勢安定性に関わる要因としては、体位と支持面（身体と環境の接触面）を操作した。体位については、座位と立位の 2 水準を検討し、立位のほうが、支持基底面が小さいため姿勢は不安定だと仮定した。支持面については、Hard 条件（表面が硬く力学的にも安定し接触面から自己身体と環境についての触覚情報が得やすい）、Soft 条件（軟らかいクッションを用いて力学的に不安定で接触面からの触覚情報が得にくい）の 2 水準を検討した。実験 3 の結果、Soft 条件のほうが体肢間協調の安定性が低い傾向が示され、また、体位により体肢間協調のダイナミクスが異なり、不安定な立位条件では体肢間協調の逆位相パターンが不安定化することが示され、仮説が支持された。

また、実験 1～実験 3 で仮説の検証を行った他、本研究では、次のような 2 つの新たな発見が得られた。1 つめは、実験 3 において姿勢要因（体位・支持面）の操作が姿勢の安定性に及ぼす影響について、姿勢の安定性が低下すると予想された立位条件や Soft 条件のほうが、むしろ姿勢が動的に安定化するということである。この結果については、姿勢というグローバルなレベルで身体システムが不安定化した場合、それを補償し、体肢の先端レベルでの課題の達成を支えるように、姿勢がより柔軟で適応的な状態へと組織化した結果の現れではないかと解釈された。2 つめは、実験 2 と実験 3 で体肢-姿勢間の協調について分析した結果、体肢間の協調パターン（位相パターン）によって、体肢-姿勢間の協調パターンも異なるという発見である。これらの結果に共通する傾向として、同位相の場合、左右の指と姿勢の前後方向の協調が強まり、逆位相の場合、左右の指と姿勢の左右方向の協調が強まる傾向が観察された。この結果については、体肢レベルの課題によって、体肢-姿勢間の協調パターンが変わり、身体システム全体が柔軟に組織化する可能性を示唆すると考察された。

以上の結果から示唆される本研究の学術的意義は、次のようにまとめられる。まず、従来の体肢間協調モデルに新たな変数として「環境との接触（それによってもたらされる触覚情報）」や「体肢の運動を支える姿勢の安定性」といった要因を考慮する必要性を実験的に示した点に、身体運動研究分野に対する本研究の学術的意義がある。これらの要因は、従来のモデルでは十分に検討されていない新規な点を含んでいるため、今後、モデル化へ向けてのさらなる展開が求められる。また、体肢の運動と姿勢の同時計測、2 時系列データ間の非線形解析の採用により、体肢-姿勢の関係を検証できることを示した点で、本研究は、身体運動研究分野の新たな研究領域を開拓し、さらなる理論的・実験的研究の展開を動機付けるため、当該分野への貢献が認められる。

(別紙様式 3)  
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨  
Summary of the results of the doctoral thesis screening

本審査は7月9日と15日の2回に渡って行われた。それぞれの回で、主査および審査委員2名が出席し、申請者が約45分間の口頭発表を行った後、審査員からの質問・応答および口頭試問を約20分間行った。

本論文は、身体-環境システムという観点から両手運動の体肢間協調ダイナミクスを実験的に検証し、身体-環境、体肢間協調-姿勢の相互作用を明らかにすることを目的としている。体肢間協調とは、複数の体肢が特定の時空間的パターンを維持しつつ協調的に運動することであり、歩行や走行などの移動行動の基礎にあるだけでなく、左手で把持した紙を右手で握ったハサミで切るというような巧みな行為の基礎となり、身体運動の重要な要素である。身体運動研究分野では古くから、体肢の運動がそれを支える姿勢と分離できないこと、両者が階層的な入れ子関係になることが理論的に指摘されてきた。しかし、従来までに、手足・指先などの体肢の運動と全身の姿勢とは個別に研究されてきており、システム論的アプローチによるモデル化を試みる研究でも、両者の関係を同時に定量化し解析する手法が確立しておらず、十分な議論がなされていなかった。そこで、本研究では、体肢の運動データと足圧中心データを同時計測し、情報学の理論に基づく解析手法を用いて、両者の相互作用を明らかにする試みを行った。

第1章では、研究の背景と目的が述べられ、第2章で、身体運動と知覚研究分野における関連する先行研究が整理され、従来までの限界点とそれを突破するアプローチの重要性が述べられている。歴代の関連研究との関係性が詳細に述べられており、本研究の位置づけが明確に記述されていることが確認された。

第3章では、「身体（指先）が環境に接触することにより体肢間協調は安定する」という仮説が提案され、人差し指と中指で交互に机を周期的に叩くタッピング課題に関する実験結果が述べられた。指先と環境の接触がない指振り課題に関する先行研究で予測される結果と異なり、タッピングの位相が逆位相であっても運動が安定化した。この実験結果により、提案した仮説が支持されることが確認された。

第4章では、体肢間協調の安定化をもたらす要因を特定するため、「指先が環境に接触することで得られる触覚情報が安定化の要因である」という仮説の検証について述べられた。指先が接触する物体が堅い物体、やわらかい物体、接触はしない、という3条件でのタッピング課題に対する実験結果が示され、指先で触覚情報が得られれば体肢間協調が安定化し、姿勢を維持するために必要となるほどの大きさの力が介在する必要性がないことが確認された。

第5章では、「姿勢の安定性を操作し姿勢が不安定化すると体肢間協調の安定性も低下する」という仮説が検証された。座位と立位（立位の方が床面との接触面積が小さく不安定）の二つの姿勢に対して、堅い床とやわらかいクッションの二つの異なる材質の物体上での、タッピング課題について実験結果が示された。その結果、姿勢が不安定な傾向となる立位の場合とやわらかいクッションの場合において体肢間協調の安定性が低下することが確認され、仮説が支持された。

第6章では、支持された仮説から導き出される知見が整理され、「環境との接触（それによってもたらされる触覚情報）」および「体肢の運動を支える姿勢の安定性」の要因を考慮する必要性を実験的に示した点が、身体運動研究分野における本研究の学術的意義であることが述べられた。さらに、非線形時系列解析を行った結果、姿勢が不安定化する場合

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

であっても、変動する姿勢パターンの中に動的な自己相関性が見られ、体肢-姿勢間の協調を議論するためには、従来手法では発見できない側面があることが示された。

これらの知見は英文ジャーナル PLOS ONE の論文として採択されており、心理学的な身体運動研究分野においての評価を受けている。さらに、情報学的な側面からも非線形時系列解析に基づく新たな知見を導出しており、その学術的意義も確認された。また、予備審査の際に審査委員から、曖昧な専門用語の定義や用語の用法についての改善の必要性が指摘されたが、十分に改良されていることが確認された。以上により、本論文は情報学分野における学術的意義が高く、学位を授与するのに十分なレベルであると判断された。