

(続紙 1)

京都大学	博士 (人間・環境学)	氏名	犬走 渚
論文題目	Motor Coordination of Redundant Goal-Directed Movements (冗長自由度を有する目標指向運動における運動協調)		
(論文の要旨)			
身体運動制御分野において、中枢神経系がヒト筋骨格の冗長自由度をどのように協調させるのかという問題がある。この問題に対し、多くの研究者が様々な角度から取り組んできたが、今だ解明には至っていない。本論文は、冗長自由度の協調を念頭に置き、運動学習過程における関節運動の制御機序および手足両方を用いた全身運動の制御機序を明らかにすることを目的とし、1) 中枢神経系が新しい運動スキルを学習する際、複数の関節運動をどのように協調させるのか、2) 上肢や下肢といった力学的・神経生理学的に異なる体肢を同時に用いる運動を、中枢神経系がどのように学習・制御するのかを検討した。本論文は、全6章から構成されている。 本論文では、まず本論文の概要を述べ(第1章)、身体運動制御に関する先行研究をレビューするとともに研究の理論的枠組み、問題意識、研究目的を記述した(第2章)。次に生理学実験に基づく3つの実験研究(第3章～第5章)を記述した。その後、得られた結果をこれまでの知見と照らし合わせながら総合的に考察し、スポーツ活動への応用を展開し、最後に結論を述べた(第6章)。なお、すべての実験は、京都大学大学院人間・環境学研究科人間情報研究・動物実験倫理委員会の承認を得て実施された。 第2章では、研究の枠組みとしてベルシュタインの冗長性問題を取り上げ、現在までに提唱されている運動制御理論について、バイオメカニクス、心理物理学、神経生理学、計算神経科学の観点からレビューした。その上で、本研究の問題意識および研究目的を明確にした。 第3章では、中枢神経系が新しい運動スキルを学習する際、個々の関節運動をどのように協調させるのかを検討した(承認番号: 20-H-6)。運動経験や身体特性が運動学習能力に影響を及ぼすため、単純な被験者間比較は困難である。本研究では、この課題を克服するために、指を用いて仮想腕を制御する新規運動課題を開発した。その結果、試行を重ねるにつれ標的獲得数が増加し、直線軌道からの誤差が減少した。また、仮想腕の全関節角度変化量が減少することが示され、生体力学的な制約がない状況においても、中枢神経系が運動労力コストの少ない関節運動の組み合わせを選択することが明らかとなった。 第4章および第5章では、多自由度な身体運動の協調と制御に焦点を当て、全身を用いた目的指向型運動の学習およびその制御機序を検討した。 第4章では、運動指令の時間特性および慣性モーメントが異なる上肢と下肢に着目し、中枢神経系が上肢と下肢を同時に用いる目標指向運動をどのように制御するのかを検討した			

(承認番号：22-H-35)。目標指向型運動は、二足立位維持の状態から右手・左手・右足を6方向×5距離の計30カ所に設定された標的へ到達させる課題とした。標的の提示から動き出しまでの時間、および動き出しから標的到達までの時間を比較すると、足よりも手の方が短いことが示された。この結果は、上肢と下肢の目標指向運動が同時に学習される一方で、それぞれの学習戦略が異なる可能性を示唆する。

第4章では、手足が独立して行う目標指向型運動を採用したため、全身運動において手と足が協調的に制御されるのかは明らかでなかった。そこで第5章では、この問題を解決するために、手足を同時に用いた到達運動課題を構築し、手足の運動が独立して制御されるのか、それとも協調的に制御されるのかを検討した(承認番号：23-H-9)。また、立位バランス制御の影響を排除するため、座位姿勢での手足目標指向型運動を採用した。その結果、手足の同時運動において、上肢と下肢の運動は協調的に制御されることが確認された。さらに、この協調関係は運動目標に応じて柔軟に調整されることが示された。この結果から、手足の同時運動において、手と足の運動は時間的に協調して制御され、運動開始時間の違いを補うように運動速度が調整されることが示唆された。

第6章では、総合的な考察を行い、本研究の成果をまとめた。運動学習過程における関節運動の制御機序、および手足を用いた運動の制御機序について運動学習、運動制御、生体力学の観点から考察し、今後の研究の方向性を提案するとともに、スポーツ現場や運動スキル指導への応用可能性について述べた。

以上の結果を踏まえ、本博士論文では、運動学習過程において、運動労力コストが小さくなるように関節自由度が協調すること、および手足の目標指向運動は時間的に協調して制御され、その協調関係は運動目標に応じて柔軟に調整されることを明らかにした。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、中枢神経系が筋骨格の冗長自由度をどのように協調させるのかという古典的な運動制御問題に対し、新規運動における複数関節自由度の協調、および力学的・神経生理学的特性の異なる上肢と下肢を同時に用いる全身運動の制御を明らかにすることを目的とした生理学実験研究をまとめたものである。3つの実験研究は、筋骨格の膨大な自由度を協調させながら目標値に向かって段階的に運動課題を実施する目標指向型運動を用い、運動学習過程における制御機序を検討した。

実身体を用いた運動学習実験では、被験者の運動経験や体格を統制できないという問題がある。そこで申請者は、これらの影響を排除するために、未経験の操作であり、かつ同一の身体部位を用いる運動学習実験を開発した。具体的には、左人差し指・右人差し指・右中指の動きに対応する仮想腕（肩関節・肘関節・手関節を含む）を用いた新規運動課題を設計し、繰り返し実施した。その結果、試行を重ねるにつれ標的獲得数の増加、直線軌道からの誤差および運動時間の減少、仮想腕三関節の合計関節角度変化の減少が観察された。これら結果から、生体力学的な制約がない状況においても、中枢神経系は運動労力コストの低い関節運動の組み合わせを合目的的に決定することを見出した。過去の運動経験は運動学習能力に影響を及ぼすため、従来の学習実験では被験者間の学習過程を単純に比較することが困難であった。本研究により、運動学習の上達過程における個人差を定量的に比較できる手法を確立した。この成果は、国際的に高く評価され、国際学術雑誌である Scientific Reports（第 14 巻、10421 頁、2024 年発刊）に掲載された。

運動学習およびその制御戦略に関する従来の研究は、冗長自由度の問題から上肢のリーチング課題に限定されており、全身運動の制御や学習過程は未解明のままであった。特に、全身運動の学習には二足立位バランスの影響が含まれるため、その制御機構の解明は極めて困難である。申請者は、この難題に挑戦し、立位保持中に上肢と下肢を同時に用いる目標指向運動を中枢神経系がどのように学習するのかを検討した。その結果、手の動作開始時間が足よりも早く、目標値への到達時間も短いことが示された。さらに、手足の動きを 180 度逆転させた外乱視覚情報を被験者に提示すると、足の動作開始時間が顕著に遅延することが明らかになった。これらの結果は、立位保持中の全身運動において手と足の巧緻性が異なること、また、新規な視覚運動環境において手足の両方が運動学習を行うことを示唆するものである。

さらに、立位バランスの影響を排除し、より詳細な全身運動の学習過程および制御機序を明らかにするため、申請者は新たな目標指向型運動課題を開発した。具体的には、座位姿勢において、右手・左手・右足・左足の先端位置に対応するカーソルを目標値に到達させる課

題を作成し、手足の独立運動課題および協調運動課題の両方を実施した。その結果、目標位置に応じて手足の動作開始時間や運動速度が調整されること、手足の運動には時間的協調関係が存在すること、手の動作が手足の力学的および神経生理学的特性の違いを考慮して運動速度を調整することが明らかになった。これにより、手足の状態を共有する神経機序が存在し、全身運動において手足の協調構造が機能していることが示唆された。この研究成果は、公益財団法人ヤマハ発動機スポーツ振興財団スポーツチャレンジ研究奨励を受け、さらに京都滋賀体育学会最優秀奨励賞および慧ひろば参加賞を受賞した。

運動学習研究は古くから行われているが、実験の困難さや全身運動における膨大な自由度のため、従来は上肢の実験に限定されていた。申請者は、スポーツ動作の上達やその制御に関心を持ち、全身運動の運動学習研究に挑戦し、手足の協調構造という新たな視点から学習過程を定量化することに成功した。我々の身体活動の大部分が全身運動であることを考えると、本研究は極めて独創性の高いものと評価できる。

以上の通り、本学位申請論文の研究成果は国際学術雑誌に掲載されており、その独創性と学術的価値は高く評価される。よって、本学位申請論文は、共生人間学専攻認知・行動・健康科学講座に相応しい内容を備えており、博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和7年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 令和 年 月 日以降