

(続紙 1)

京都大学	博士 (人間・環境学)	氏名	山本 真史
論文題目	鉛直方向への上肢運動の運動制御機構		
(論文内容の要旨)			
<p>私たち人間は、身体が鉛直下方向に牽引される重力環境下において、目的とする上肢の運動を適切に遂行することができる。このことは、中枢神経系が上肢に働く重力の作用を考慮して運動を計画・遂行しているためであると考えられる。鉛直上方向への上肢運動では上肢は重力に抗するように移動するのに対して、下方向への運動では上肢は重力に沿うように移動する。故に、鉛直上方向と下方向では、重力が上肢の運動に及ぼす作用が異なる。上肢の運動学的特性 (キネマティクス) を調査した先行研究は、中枢神経系が鉛直上方向と下方向で異なる重力の作用を考慮し、その作用を利用して運動制御していることを示唆している。本学位論文では先行研究で得られている示唆を踏まえ、重力情報が中枢神経系により上肢の運動制御プロセスにどのように組み込まれているかについて、その制御機構の解明を試みた。</p> <p>本学位論文は、全4章から構成される。第1章では、研究の背景、意義および目的について述べている。中枢神経系が重力の作用を考慮して上肢の運動を制御していることを報告した先行研究は、重力情報がフィードフォワード制御プロセスに組み込まれていることを示唆している。一方、重力センサーとして機能する内耳の前庭器への人為的な電気刺激が、上肢の運動遂行中のキネマティクスを変化させたことが報告されている。この知見を踏まえると、重力環境下において目的とする上肢運動を適切に遂行するためには、オンラインフィードバック制御プロセスに重力情報が組み込まれている可能性を否定できない。本学位論文では、相対的にオンラインフィードバック制御プロセスに強く依拠していると考えられる到達把握運動 (手を伸ばして物体をつかむ運動)、および物体の移動運動 (把持した物体を移動させる運動) が鉛直方向に行われる際、重力情報がオンラインフィードバック制御プロセスに組み込まれている可能性について検証した。</p> <p>第2章では、重力が鉛直上方向と下方向への到達把握運動のキネマティクスに及ぼす影響を調査した。到達把握運動は、手を物体へ移動させる到達運動成分と、物体把持のために手の姿勢を形成する把握運動成分の2つの運動成分から構成されることが考えられている。各運動成分の特徴を表すキネマティクスのパラメータを算出し、運動方向の違いによるキネマティクスの相違を調査した。その結果、到達運動成分と把握運動成分の両方において、運動方向に依存してキネマティクスに違いが生じることが明らかになった。到達運動成分のキネマティクスに関して、下方向への運動に比べて、</p>			

上方向への運動で上肢の加速時間が短くなることが確認された。この結果は、上肢の運動が重力を利用している可能性を示唆した先行研究の結果に類似していた。把握運動成分のキネマティクスに関して、下方向への運動に比べて、上方向への運動で、手を開く速度が大きいこと、かつ運動開始後早い時点で手が最大に開かれることが確認された。これらの結果は、上方向への運動において、重力が手の開きを促進するよう手指に作用していたことを示唆している。本研究結果より、中枢神経系が重力の作用を考慮していること、さらに重力の作用を利用して到達把握運動を制御していることが示唆された。本研究の結果と、到達把握運動がオンラインフィードバック制御プロセスに相対的に強く依拠するという知見を考え合わせると、重力情報がオンラインフィードバック制御プロセスに組み込まれている可能性が推察された。

第3章では、把持された物体が鉛直下方向に移動される際、物体の重量を視覚的に予測可能か否かを操作し、物体重量の大きさと移動運動のキネマティクスとの関係性を調査した。移動される物体には、物体の色情報に基づいて重量を視覚的に予測できる2種類の球体（257 gの黒球、および2 gの白球）と、重量を視覚的に予測できない2種類の球体（257 gおよび2 gの灰球）が用いられた。実験参加者はこれらの球体に到達把握運動を行った後、球体を鉛直下方向の目標位置まで移動させる課題を行った。到達把握運動の終了から球体の移動運動の終了に至るまでの移動運動を解析した結果、軽い球体に比べて、重い球体が移動された時、移動運動の加速時間が長くなっていた。また、物体重量の視覚的予測に関して、重量を予測できなかった場合に球体を把持してから移動を開始するまでの時間が延長したが、その後の球体の移動においてその影響は弱まり、軽い球体よりも重い球体で移動運動の加速時間が長くなっていた。この結果から、視覚的に物体の重量を予測できない場合、中枢神経系はオンラインフィードバック制御プロセスを介して、把持から移動にかけて得られる重量の情報に応じて運動を制御している、という可能性が考えられた。

第4章では、第2章と第3章の研究結果をもとに、これまでの先行知見を踏まえながら総合的に考察し、本研究の意義および今後の展望についてまとめている。第2章と第3章の研究結果は、重力情報が中枢神経系によって、オンラインフィードバック制御プロセスに組み込まれている可能性を示唆し、さらに、上肢に働く重力の作用が運動制御に利用されていることを示唆している。以上より、上肢の運動では、運動の計画段階のみならず遂行に至るまで、重力による作用が考慮された巧みな制御が行われているとまとめられている。

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、身体を鉛直下方向に牽引する重力環境下における、上肢運動の制御機構解明をテーマにした研究がまとめられている。ヒトは重力環境下において目的とする運動を適切に遂行しているが、このことは、中枢神経系が上肢に働く重力の作用を考慮しているためと考えられる。本論文において、申請者は、重力情報が如何に運動制御プロセスに組み込まれているかについて、その制御機構の解明を試みている。特に、重力情報がオンラインフィードバック制御プロセスに組み込まれている可能性について検討している。重力情報がどのように運動制御プロセスに組み込まれているかを明らかにすることは、重力環境下におけるヒトの運動制御機構の本質的理解を促進するものであると考えられ、その解明を試みた本論文には学術的な意義が認められる。

本論文は、鉛直方向への上肢運動を対象にした2つの実験によって構成されている。上肢を鉛直上下方向へ移動させる際、重力が上肢の運動に及ぼす作用は上方向と下方向で異なる。鉛直上方向への運動において、上肢は重力に抗するように移動するのに対して、下方向への運動では重力に沿うように移動する。第2章において、申請者は、重力が鉛直上方向と下方向への到達把握運動(手を伸ばして物体をつかむ運動)の運動学的特性(キネマティクス)に及ぼす影響を調査した。その結果、鉛直上方向と下方向との間に到達把握運動のキネマティクスに相違が生じることを明らかにした。このことから、中枢神経系が重力の作用を考慮し、重力を利用した運動制御を行っている可能性を示すと共に、重力情報がオンラインフィードバック制御プロセスに組み込まれている可能性を示唆している。この研究成果は、国際学術雑誌である **Experimental Brain Research** 誌への掲載が確定している。

第3章において、申請者は、把持された物体が鉛直下方向に移動される際、物体の重量が視覚的に予測できるか否かを操作し、物体の重量と移動運動のキネマティクスとの関係性を調査した。その結果、物体の重量に応じてキネマティクスに違いが生じ、軽い物体に比べて重い物体が移動される場合に加速時間が長くなることを明らかにした。さらに、視覚的に物体の重量を予測できなかった場合、物体が把持されてから移動が開始されるまでの時間は延長するが、その後の物体の移動において視覚的予測の影響は弱まり、重い物体で移動運動の加速時間が長くなることを示した。これらの結果は、中枢神経系は物体の重量に応じて鉛直方向への移動運動を制御していることを示唆する。さらに視覚的に物体の重量を予測できない場合、中枢神経系はオンラインフィードバック制御プロセスを介して得られる重量の情報に応じて、運動を制御していることが示唆された。

以上のように、本論文は、これまで知られていなかった上肢運動の制御機構の一端を明らかにしており、この研究分野に新たな知見を付与するものである。したがってその

新規性から、本論文は十分な学術的価値を有すると評価できる。また、本論文は、体育・スポーツ科学分野など近接する研究領域において応用、発展され得る可能性を有しており、その学際的価値も評価できる。

しかしながら、本論文の研究において、今後さらに深化させるべき課題も認められた。本論文において、申請者は、手部を対象にしたキネマティクスの解析を行っているが、手部のキネマティクスは肘関節や肩関節など近接する身体部位の運動に影響を受けるものと考えられる。故に、これらの関節の運動が手部のキネマティクスにどのように影響していたかについて検証を加えることで、包括的な理解を目指すことを求めたい。

以上より、本論文は学術的な価値が認められ、近接する領域において学際的に応用、発展される可能性を有する点でも評価できる。したがって、本論文は、共生人間学専攻 認知・行動科学講座における研究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、平成26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、京都大学学位規定第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、出版刊行上の支障がなくなるまでの間、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： 2014年4月1日以降