

学位論文の要約

大学院人間・環境学研究科
共生人間学専攻
山本 真史

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いるためであると考えられる。例えば、本棚に並ぶ書籍に手を伸ばす、書籍をつかむ、そしてそれを手元に近づけるという行為を適切に行える理由は、その行為の遂行中に上肢に働く重力の作用を、中枢神経系が考慮しているためであろう。中枢神経系が上肢に働く重力の作用を考慮している理由は、単に目的とする運動を達成するためだけではないと考えられる。以下に述べるように、中枢神経系は重力の作用を利用して運動を制御していることが推察される。上肢を用いて鉛直方向に運動を行う際、重力は、運動の方向により、上肢の運動に異なる作用を及ぼす。上方向へ運動が行われる場合、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。このように、鉛直上方向と下方向では、重力が運動に及ぼす作用に違いが生じる。これまでに行われたヒトの運動学的研究から、中枢神経系は、運動方向により異なる重力の作用を考慮し、重力を巧みに利用した制御を行っていることが示唆されている。したがって、中枢神経系が重力情報を運動制御プロセスに組み込むことは、目的の運動を達成することの他、重力を利用した運動の遂行を可能にするために有効であることが示唆される。以上を受けて、本学位論文では、重力情報が中枢神経系によって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。

本学位論文は、全4章で構成される。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。これまでに、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示した研究報告がいくつか見られ、重力情報は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が示唆されてきた。しかしながら、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運動学的特性（キネマティクス）を変化させることが報告されており、この知見を踏まえると、重力環境下において上肢の運動を遂行するためには、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、これまで得られている知見に基づいて検討した。

第2章では、重力が鉛直方向への到達把握運動のキネマティクスに与える影響を調査した。実験参加者は、鉛直軸上に520 mmの距離を隔てて位置する2つの球体に対して、一方の球体から他方の球体へと鉛直方向に手を移動させる到達把握運動を行った。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と考えられている。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、運動方向によりキネマティクスの相違が存在することが確認された。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、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。この運動方向に依存した上肢の加速時間の相違は、上肢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する。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、上方向への運動において、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。これらの結果に見られる把握運動成分のキネマティクスは、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たことを反映していると考えられた。このことは、中枢神経系が、把握運動成分の制御において重力を利用していたことを示唆している。本研究において、鉛直方向への到達運動成分および把握運動成分の両方で、運動方向に応じたキネマティクスの特異性が観察されたことは、中枢神経系が重力の作用を考慮し、また重力を利用することにより運動制御していることを示唆する。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時、とりわけ物体の重量を視覚的に予測することが困難な時、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について検討した。移動される物体には、物体の色情報に基づいて視覚的に重量を予測できる2種類の球体（257 gの黒球、および2 gの白球）、と物体の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）が使用された。実験では、これ

ら4種類の球体のいずれかが実験参加者の前方かつ上方に配置され、実験参加者はそ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、球体の重量に応じてキネマティクスに違いが生じることが分かった。軽い球体が鉛直下方向に移動された時に比べて、重い球体が移動された場合、移動運動の加速時間は大きな値を示した。また、物体重量の視認性の影響に関して、視覚的に球体の重量を予測できなかった場合、球体を把持してから移動を開始するまでの時間は延長したが、その後の球体の移動運動においては視認性の影響は弱まり、軽い球体よりも重い球体で移動運動の加速時間は大きな値を示し、物体重量の影響が強く見られた。これらの結果は、中枢神経系が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、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、という可能性が示唆される。

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述べている。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上肢の運動制御に利用されていることを示唆している。本研究の成果は、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きたこれまでの先行研究の知見に加え、オンラインフィードバック制御プロセスにおいても重力情報が組み込まれている可能性を示した点である。このことは、私たち人間が重力環境下において上肢を用いた運動を行う際の、運動制御メカニズムに関する新たな学術的知見を加えたと言える。さらに、本研究の結果は、鉛直方向への上肢の運動制御において、中枢神経系は上肢に働く重力の作用を利用して運動の制御を行っている可能性を示唆し、同様の示唆が為されてきた先行研究を支持すると考えられる。このことから、重力は筋力の一部に代わり上肢を鉛直下方向に牽引する動力源として利用されていると考えられる。重力を利用した運動制御の利点は、筋出力に伴う生理学的エネルギー消費を減少させ得る点、さらに、運動の正確性を低下させ得る筋出力に伴う信号強度依存ノイズを減少させ得る点にあると考えられる。本研究の成果は、高い運動パフォーマンスが要求されるスポーツの実践と指導の現場において有効に活用され、さらに応用、発展されることが期待される。