

Analysis of Joint Coordination in Human Multi-joint Movements and Modeling of Synergistic Control of Redundant Joints

(身体運動の関節間協調の解析及び 冗長多関節を制御するシナジーモデルの構築)

東郷 俊太

要旨

人間の身体は多くの自由度を有しているため、タスクを達成するための関節の動きの組み合わせは無数に存在する。人間はこの冗長性問題を何らかの方法で解き、巧みに運動を遂行している。本研究では、シナジーによる関節間協調の観点から、人間がどのように冗長な関節を制御しているのかを明らかにすることを研究目的とした。関節間協調とは、タスクを達成するために制御しなければならない性能変数は高い精度で実現し、性能変数に影響を与えない関節角のばらつきは許容する制御方策である。この関節間協調の制御メカニズムを調べるためには、人間が運動タスクを実行中の身体動作を計測・解析し、その結果をうけ制御モデルを構築する必要がある。提案する人間の関節間協調を実現するシナジーモデルは、タスク達成に関係の無いばらつきを許容するという、従来のロボット制御にはみられない、新しい視点に基づいている。本研究では、身体の関節間協調の制御メカニズムを明らかにするために、三段階のより具体的な研究課題を設定し、研究を進めた。

第一の研究課題では人間の巧みな動作の一つである、コップの水をこぼさずに運ぶ動作に着目した。第2章で、関節間協調を定量的に評価する UCM 解析を用いて、手先振動を抑制する動作に対する関節間協調を調べた。性能変数として手先ジャークとコップ角度に着目し、タスクを達成するためには手先ジャークを小さくし、コップ角度を一定に保つことが重要であることを、被験者がコップの水をこぼさずに運ぶ動作を計測し、検証した。UCM 解析により、まず関節角の分散を手先ジャークとコップ角度にそれぞれ影響を与えない成分 (UCM 成分) と影響を与える成分 (ORT: orthogonal 成分) に分割した。その結果、手先ジャーク、コップ角度に関わる UCM 成分は ORT 成分よりも大きかったことから、手先ジャークを小さくし、コップ角度を一定に保つために、各関節が協調して制御されていたことが示された。第3章前半では、手先振動を抑制するための感覚情報を調べた。手先振動抑制中に被験者の手元の視覚を遮断し、性能変数である手先ジャークとコップ角度を計測することにより、視覚情報の役割を調べた。その結果、短時間の視覚遮断では手先ジャーク、コップ角度共に視覚遮断の影響は見られなかった。一方、長時間の視覚遮断では手先ジャークに影響は見られなかったが、コップ角度はゆっくりとドリフトしていった。また、手先ジャークに関する関節間協調は視覚遮断の影響を受けなかったが、コップ角度に関する関節間協調は長時間の視覚遮断により協調の度合いが低下した。これらの結果は、視覚情報の役割はコップ角度の間欠的なキャリブレーションであることを示した。また、手先ジャークは視覚情報がなくても抑制できることも示した。第3章後半では、LED による教示実験を行なった結果、被験者は手先ジャークのみを小さくする、

あるいはコップ角度の分散のみを小さくすることができた。この結果は、性能変数である手先ジャークとコップ角度は独立に制御可能であることを示し、それらの制御器も独立に存在することを示唆した。第4章では、利用可能な身体自由度と関節間協調の関係について調べた。水平方向の正弦波振動を発生させる揺動台装置を開発し、被験者はコップを保持した状態で揺動台装置の上で直立姿勢を維持した。その際、被験者の足首、膝関節を装具により固定し、利用可能な身体自由度を変化させた。その結果、被験者は下肢拘束の数によらず、手先のジャークを小さくすることができた。また振動速度の増加、拘束箇所の増加によって、関節角は手先ジャークに影響を与えない方向により大きくばらついた。これらの結果から、タスクが難しくなると、それを達成するために協調の度合いを高める方策をとったと考えられる。また、下肢拘束条件への適応の早さから、一意な関節角軌道を決定しているというよりも、筋の弾性要素を利用して振動を抑制していることが示唆された。この結果を受け、第5章では、手先振動抑制の制御モデルを筋の弾性要素の観点から提案した。前半では、手先振動抑制中の手先に外乱を与え、その応答を計測した。結果として、同程度の大きさの外乱を手先に与えた際、コップに水が入っている条件で手先の変位が最大となった。この結果は、手先振動を抑制するために、関節の柔らかさである関節スティフネス、あるいは主動筋と拮抗筋の釣り合い位置である平衡点を調節していることを示唆した。後半では、関節スティフネスと平衡点の調節の観点から、手先振動を抑制する制御モデルを提案した。関節スティフネスを小さくすることで振動を抑制する受動的制振方法と、平衡点を調節することで振動を抑制する能動的制振方法を提案した。能動的制振方法として、作業空間の仮想平面と手先を仮想的なダンパで繋ぐ、スカイフック理論を応用した。これら二つの制振方法を用いて、3リンクアームの肩の部分が正弦波振動を受ける状態で、手先の振動を抑制するシミュレーション実験を行なった。シミュレーション実験と比較するために、前章で開発した揺動台装置を用いて、被験者の肩に正弦波振動を与える計測実験も行なった。その結果、水が入ったコップを保持した場合は肩よりも手先ジャークが小さくなり、石が入ったコップを保持した場合は肩よりも手先ジャークが大きくなった。スカイフックモデルに基づいて平衡点を調節する方法により、この実験結果はよく再現された。このことは、手先ジャークを抑制するために、人間は関節スティフネスを調節しているというよりも平衡点を調節している可能性が高いことを示唆した。以上、第一の研究課題を通して、コップの水をこぼさずに運ぶための制御メカニズムを明らかにすることができた。

第二の研究課題では、より一般的な多関節運動における関節間協調の制御メカニズムを明らかにした。第6章では、より一般的な多関節運動として一次元軌道追従タスクを考えた。このタスクは、目標の手先軌道と自身の手先位置が一次元の視覚情報で与えられる。関節間協調を実現するための制御モデルとして、UCM解析の考え方に基づいたUCM参照フィードバック制御法を提案した。UCM参照フィードバック制御法は、時々刻々と目標UCMを生成し、UCM上の最適な一点を時々刻々選択し続けることによって、運動を生成する。生理学的なノイズのある条件下でUCM参照フィードバック制御法により、3リンクアームに一次元軌道追従タスクを行なわせるシミュレーション実験を行なった。また、被験者が一次元軌道追従タスクを行なう計測実験も行なった。その結果、UCM参照フィードバック制御法は被験者の関節間協調を含む、腕運動の多くの特徴をよ

く再現できた。このことは UCM 参照フィードバック制御法の妥当性を示すとともに、人間の制御系に UCM が獲得されている可能性を示した。さらに、UCM 参照フィードバック制御法を 3 リンクアームのロボット実機の制御にも適用した。

第三の研究課題では、得られたモデルをさらに検証し、人間の制御モデルとしての妥当性を議論した。第 7 章前半では、中枢神経系が UCM を獲得しているかどうかを計測実験により調べた。一次元軌道追従タスクにおける目標軌道を一次元から二次元に変化させると、運動方向と直交する方向が UCM 方向から ORT 方向へと変化する。このとき手先に直交方向の機械的な外乱を与え、腕運動の応答を調べた。また外乱を機械ではなく視覚によってのみ与えた場合の腕運動も計測した。その結果、機械的な外乱を与えた場合、手先にかかった力や、関連する筋活動の大きさが目標軌道の次元によって有意に異なり、その差異は視覚情報のみで外乱が与えられた場合の応答よりも早い時間に表れた。このことは、人間は体性感覚のフィードバック制御系にタスク達成に関係する外乱かどうかを判別する機構、すなわち UCM が獲得されていることを示唆した。第 7 章後半では、UCM をニューラルネットによって表現する、UCM ネットワークを提案した。シミュレーション実験により、UCM ネットワークによって 2 リンクアームの逆キネマティクスである UCM を生成可能であることを示し、UCM 参照フィードバック制御法に組み込むことで 2 リンクアームを制御できることを示した。第 8 章では、冗長方向の運動を調べた。一次元軌道追従タスクを垂直面で行ない、冗長な方向が重力方向と一致する問題を考えた。この運動課題を達成するために、重力を補償し水平面と同様の運動を行なう、冗長方向の目標軌道を生成する、平衡点の動かし方の制約を用いるという 3 つの制御方策を考えた。平衡点の動かし方の制約として、UCM 参照フィードバック制御法に平衡点を動かす枠組みを組み合わせた際に、初期姿勢と初期平衡点の相対距離ベクトルが保持され、時々刻々更新できないという制約を考えた。シミュレーションと計測実験の結果から、被験者が垂直面で一次元軌道追従タスクを行なった場合、手先軌道は重力方向に遷移し、その腕運動は平衡点の動かし方に制約のある UCM 参照フィードバック制御法でよく再現できた。この結果は、冗長方向の運動に対して、筋の粘弾性によるブレーキのみではなく、何らかの制御が働いていることを示しており、垂直面での一次元軌道追従タスクにおける冗長方向の運動は、平衡点の動かし方の制約によって制御されていることを示唆した。

以上の三段階の研究課題を経て、本研究では人間の関節間協調動作の計測・解析を行い、関節間協調を実現する制御モデルを提案した。手先振動抑制動作に対する計測実験の結果、関節間協調とそれに関わる感覚情報の働き、身体自由度の数が与える影響、関節スティフネス、平衡点の調節方法を明らかにした。提案したシナジーモデルは、タスク達成に関係の無いばらつきを許容する関節間協調動作の特徴をよく再現した。平衡点を調節する考え方をシナジーモデルに導入することによって、冗長方向の関節間協調運動の特徴を再現することができた。また、関節間協調、平衡点、関節スティフネスの関連の考察と提案した協調制御モデルから、より広範囲の協調運動制御と学習のメカニズムを説明することができた。さらに、本研究の成果は、冗長ロボットアームの制御実験で示したように、様々な冗長システムの協調制御へ応用可能である。