

## 審査の結果の要旨

氏名 尾形 邦裕

本論文は「人体力学構造と他者運動誘導を活用する身体運動スキルの解析とモデル化」と題し、介護や武術などにみられる、人が他者を対象として行う運動のスキルの解明と工学的モデル化の研究をまとめたものであり、全9章からなる。

人の身体は多リンク筋骨格系であると同時に反射や姿勢制御等により自律的に応答する。このため、人が他者を対象として行う運動には、自他各々の身体の特性と応答性、およびそれら相互結合が関与し、極めて複雑な系となる。しかし、介護や武術の熟練者は、この系の特性を適切に活用することで、効率よく高い運動性能を達成しているように見える。本研究では、その技能を具体的定量的に解明し、工学的に利用可能なモデルとして示すことを目的とした。

従来のロボティクスで介護動作の実現例はあるが、ほとんどがアクチュエータのパワーに依存した力任せな方策であり、上述の意味のスキルを体系的に扱った例はない。バイオメカニクス分野でも介護動作の研究は多いが、他者が受動的な場合に限定され、自律的応答を考慮した方策は十分に検討されていない。

以下の各章では、人体力学構造と他者の自律応答を活用した運動スキルに関して、問題分析、運動の計測及び解析、解析結果に対する力学モデルの導出、シミュレーションおよびロボットによる工学的再現、人によるスキルの再現性の検証、考察を行っている。成果として、自他身体運動スキルの解析法、スキルの構成要素とその機能的意味、スキルの工学的再現法を提示し、今後の研究課題についても具体的なデータに立脚して提案している。

第1章「序論」では、従来までの人やロボットが他者を対象として行う運動の研究成果を俯瞰することで、従来研究では十分な議論がされていない自己及び他者の運動の利用の必要性について述べている。そこで本研究では自己及び他者の身体に基づく運動スキルの解明を目的とし、高度なスキルを有する人物の運動解析によってこれを実現する。

第2章「自他身体誘導スキルと運動解析」では、他者を対象として行う運動における問題点を考察し、(1)大局的な力学構造、(2)筋骨格構造、(3)他者の身体運動の3つの要素が動作解析において重要であると捉えている。さらに、これらの要素を収斂することで動作の成否を分けるコツが得られると考察している。また、解析する動作を受け手が受動的に振る舞う場合と自律的に振る舞う場合とで分類する。

第3章「他者との協調に基づく自他身体誘導動作」では、受け手が受動的に振る舞う動作の計測及びその解析結果について述べている。本章では片手で引き上げる動作と介護における移乗動作を扱っている。これらの動作に共通する戦略として自己の体重を利用した戦略が見られた。これは力に頼らず、低コストで高いパフォーマンスを発揮することが可能となる。また、引き上げ動作は瞬間的な動作でありながら、急激な加速度変化と倒れ込みの勢いの利用という2つの力学構造が確認された。

第4章「他者の運動を誘導する人体力学構造」では、受け手の自律的応答を考慮した動作の計測及びその解析結果について述べている。本章では片手で他者を押す動作と竹刀で他者の姿勢を崩す動作を扱っている。これらの動作に共通する運動の特徴として、受け手が受ける外乱予測の攪乱にある。受け手は予測と異なる外乱に対し、姿勢調節のために後退あるいはしゃがみ込む動作を行なっている。受け手の自律的応答を含む動作はタスクの遂行では大きな力が必要に思えるが、受け手の予測を攪乱することで少ない力で実現することが可能となる。

第5章「自他身体誘導動作の力学モデルとシミュレーション」では、第3章及び第4章で解析した動作の力学モデルの導出及びシミュレーションを行うことで、これまでに得られた運動スキルに基づいて動作が再現されることを示す。(1)運動の大局的な力学構造ではZMPを入力として重心軌道を計算することで、地面との接地状態の変化から全身の運動の再現を示した。(2)人の持つ筋骨格の特性を数値計算することで、運動において手先が出す異方性のある力や多関節筋構造が運動に大きく寄与していることが示された。(3)主体者のみならず受け手を含めた動力学シミュレーションから、受け手の身体のリンク系の利用や自律反射の誘導が動作の成否において重要であることが明らかになった。

第6章「自他身体誘導スキルのロボットにおける実現」では、第5章で求めた力学モデルの工学的応用として押し動作を行うロボットを開発し、解明されたスキルに基づく押し動作の実験について述べている。このロボットは空気圧人工筋で駆動し、腕部と上体部のみ開発した。実験の結果、コツに基づく動作によって受け手の後退動作の誘導を実現できた。一方で、受け手はロボットの押し動作を受け続けることで後退動作が誘導されなくなることが見られた。これはロボットが力任せに押ししているのではな

く、受け手の予測を攪乱していたことを意味している。

第7章「自他身体誘導スキルの検証」では、第6章で開発したロボットは人の身体全体を構成するものではないため、一般人にスキルを教示することでタスクに対するパフォーマンスの変化を解析する。本研究では引き上げ動作と押し動作の2つの動作を扱った。検証実験の結果、コツの教示によるパフォーマンスの変化に有意な差が見られ、解析から得られたコツが甲野だけではなく一般に有効なスキルであることが確かめられた。一方で、各動作において甲野の運動よりもパフォーマンスが低く、本論文で得られたスキルが甲野の運動を完全に再現できていないと考えられる。

第8章「自他身体誘導スキルの考察」では、引き上げ動作を例として取り上げ、スキルの解明から再現までを概観している。本論文では大局的な力学構造、筋骨格構造、他者の身体運動に注目することで重要な運動特徴を抽出している。具体的には「ZMPの発散的振舞い」ほか5個の特徴が得られた。その運動特徴から力学モデルを導出し、動力学シミュレーション上で引き上げ動作の再現を行なっている。また、運動特徴から簡易な表現としてのコツを導出し、それを人に教示した。その結果、運動に有意な変化が確認され、解析から得られた高度なスキルの一般性を示した。最後に、引き上げ動作以外の移乗動作、押し動作、竹刀で他者の姿勢を崩すとの比較を行うことで、本論文を総括している。

第9章「結論と展望」では、以上を総括した上で、複雑な運動における高度なスキルの解明及び検証する学問体系が本論文の学術的寄与であるとし結論づけている。

以上、これを要するに、本論文は、人体力学構造と他者の身体運動を活用した四種類の運動スキルに関して、重心やZMPによる大局的力学モデル、自身の筋骨格系の機構特性、他者の身体運動、の三つの観点で統一的に解析し、「ZMPの発散的運動」ほか5個の重要な運動特徴とその機能的意味を定量的に同定し、その全てが、重心ZMP軌道の指定に基づく力学的手法、あるいは両足接地状態と肘の角度の被験者への指示といった、ごく低次元の記述から実現されることを実証した。これにより、人が他者を対象として行う運動という複雑な系における効率的なスキルの解析法と構成原理を具体的に提示し、それを人間支援ロボット等に応用する工学的方法の基礎を構築した。

以上の理由から、本論文は知能機械情報学上貢献するところ大である。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。