

主論文の要約

論文題目 **Physical Interaction-based Robotic
Mobility Assistance via Physiological and
Kinetic Indicators**
(ロボットによる移動支援を目的とした生
理学および力学的指標に基づく身体的イン
タラクション)

氏名 板寺 駿輝

論文内容の要約

本論文は高齢者や障害者における移動動作機能の回復支援及び補助を実現するロボット技術の研究開発及びその効果検証結果についてまとめたものである。移動動作は日常生活に欠かせない運動能力であるだけではなく生活の質(QOL)の維持・向上に繋がることが知られており、この動作を支援するシステムの開発は高齢化社会において高い意義を持つものである。本研究では病院内でのリハビリテーション及び家庭内での動作支援を対象とし、それぞれに対して使用者の生理学的及び力学的指標に基づくロボット制御手法を提案している。人とロボットの身体的なインタラクションに用いられるインピーダンス制御手法に対して、逐次的な制御モデルの更新及び最適支援力の付加を行うことで、個人の残存移動能力に合わせた適応的な移動動作支援の提供を実現している。また、健常者及び高齢者による臨床実験を通じ、本論文にて提案する支援手法の有効性を検証している。

第1章では、本研究における社会的背景と目的、提案アプローチについて述べている。先進国を始めとする世界各国において少子高齢化が進行しており、高齢者に対する労働人口の割合は著しく低下している。そこで、介護労働力の不足を補うことを目的としたロボットが解決策の一つとして期待されており、特に移動支援やリハビリテーションなどの身体動作支援ロボットの市場は急速に成長している。移動支援ロボットはその構造から主に装着型と非装着型に区分される。近年、臨床研究が進められている装着型ロボットは使用者と高い一体性を持ち、直接的に支援力を使用者へ伝えられる点で優れている。その一方

で、装着型ロボットは使用者の身体に装具を固定する必要があるため、脱着の煩雑さや身体と装具の擦れによる皮膚損傷などが問題点として挙げられている。一方で、非装着型は身体への固定が必要なく、使用者はロボットを把持するだけで利用を開始できる。しかし、限られたインタラクションにおいて非装着型ロボットから効率的な支援力を提供するためには、使用者個人の差異や動的な運動動作を考慮した上で支援のタイミングや大きさなどを決定することが重要である。本論文では、後者の非装着型移動支援ロボットに着目し、上記課題の解決に取り組んでいる。技術的課題として支援性、操作性、訓練性の両立の重要性について述べ、本論文における提案手法である生理学および運動学的指標に基づいた身体的インタラクションの設計についてまとめている。

第2章では、物理的に人とロボットが触れ合うための基本的な制御手法についてまとめ、本論文において採用するインピーダンス制御について定式化及び特徴をまとめている。インピーダンス制御により、使用者はロボットのハンドルを把持し力を加えることでロボットを操作することが可能となる。この際のロボットの動作はインピーダンスモデルにおける仮想動力学パラメータによって決定される。従って、移動支援ロボットを操作する使用者は仮想動力学パラメータによって生理学的及び力学的作用を受けると考えられる。本研究では、この仮想パラメータを適切に設計することで使用者に対して様々な物理的相互作用を提供することが可能であることに着目している。本章において、インピーダンス制御モデルを採用した移動支援ロボットを直接操作する際の使用者への影響についてまとめ、移動動作支援手法のコンセプトを提案している。また、想定するロボットプラットフォームの必要機能を列挙し、本論文で用いるロボットの概要を述べている。

第3章及び第4章では、歩行訓練において適切な歩行負荷を提供するためのインピーダンス制御モデル設計手法について提案する。本研究では、理学療法士による患者の歩行リハビリテーションを代替・支援することを目的としている。想定する利用者は術後まもなくの体力向上が必要とされる回復期の患者であり、ロボットプラットフォームとして杖型歩行補助ロボット“Intelligent Cane ver.5”を用いる。第3章では、まず予備実験において若年健常者の歩行中における運動コストと杖型ロボットに採用されているインピーダンス制御モデルパラメータとの関係について検討している。ここで運動コストを表す指標として、Physiological Cost Index (PCI) を採用している。PCIは歩行前後の心拍数と歩行速度から算出され、歩行動作による消費エネルギーを表すと考えられる。本研究ではこのPCIを歩行負荷の生理学的指標として扱う。次に、インピーダンスモデルの高齢者に対する影響を検証するため、病院において4日間の臨床実験を実施している。本実験には高齢者21名が参加しており、PCIに加えてロボットから受ける力積などの力学的指標や主観的な疲れに関する指標に基づいた調査を行っている。その結果からインピーダンス制御モデルの設計によって使用者の運動負荷を選択可能であることを示している。さらに第4章では、歩行訓練時においてインピーダンス制御モデルをPCIに基づく指標に応じて更新することで、任意の運動負荷を与える歩行訓練を提案している。提案手法によって、運動前に

あらかじめ運動強度を指定することが可能となるため、個人間や日々変わる体調などの差異を吸収し、適切な運動効果を与えるリハビリテーションが実現可能になると考えられる。提案手法による実験を若年健常者において実施し、その実現可能性について確認をしている。

第 5 章では、ロボットによる日常生活における一連の移動動作に対して包括的な移動支援を行うことを目的としている。人の移動動作は起立や歩行など複数の動作状態に分けられるが、それらの動作状態をオンラインで認識し、認識結果に応じて適切な支援を提供することが日常生活における移動動作には必要であると考えられる。そこで、本研究ではロボットに搭載されている力覚センサ及び RGB-D カメラによって相互作用力及び使用者の顔位置を推定し、Variational Autoencoder (VAE) と呼ばれるニューラルネットワーク構造を用いて潜在空間へと低次元化する。本章では低次元空間において得られた入力データに対する分布から動作状態 6 状態を推定する手法を提案している。また、予め設定した各動作状態において適切なインピーダンス制御モデルに対して、推定する各状態確率によって重み付け和を取ることで、複数動作状態におけるシームレスな移動動作支援を実現している。本研究ではモバイルマニピュレータとして開発されている生活支援ロボット“HSR”を用いて、提案手法の有効性を検証する。実験を通して、使用者の動作状態のオンライン認識におけるパフォーマンス及び転倒などの未学習動作を検出する機能の評価を行っている。

第 6 章では、使用者の前方において追従し、使用者が支援を必要と感じた際にいつでも触れたり掴んだりすることが可能な同伴型杖ロボット“Intelligent Cane ver.6”について取り組んでいる。このアプローチはロボットによる移動支援を使用者が必要を感じた時にのみ提供し、不必要なインタラクションを行う必要がない。そのため、使用者は余計な身体拘束はない状態で安全な日常生活を送ることが可能になると期待される。本章では僅かな接触により重心動揺が低減できるとされるライトタッチ効果に着目し、その効果を実現可能である上記杖型ロボットを設計及びその効果検証に取り組んでいる。提案する杖型ロボットシステムによって実現されるライトタッチ効果を検証するため、モーションキャプチャ及びトレッドミルを用いた計測実験を実施している。ロボットは使用者に対して一定距離を保つように制御されている。予備実験ではロボットの同伴制御性能について検証を行っている。また、臨床実験として若年健常者 3 名がトレッドミル上で歩行し、ロボットへのライトタッチの有無による重心動揺抑制効果について検証している。これらの実験を通して、提案するライトタッチ効果に基づく同伴型ロボットによる歩行支援の実現可能性について議論している。

第 7 章では、歩行中において使用者のバランスを推定し、姿勢の安定余裕を最大化するための支援力を提供することを目的とし、モデル予測制御 (MPC) に基づく最適化アルゴリズムを提案している。本研究は、従来研究において多く用いられる静的なバランス評価ではなく、動的なバランス評価に基づいて使用者の姿勢バランスを保つための動作支援で

あり、より自然な歩行動作に近づける支援が可能となると考えられる。安定余裕の指標としてゼロモーメントポイント（ZMP）を採用し、使用者の歩行を倒立振子運動とみなすことで、使用者とロボットを含む系全体を線形なシステムとしてモデル化している。リアルタイムな身体的インタラクションに適した線形二次計画法（QP）を用いて支援力の最適化問題を解くことで、適切な支援動作の生成を実現している。数値シミュレーションと双腕移動マニピュレーションロボット“TOMM”を用いた実機実験によって、歩行時の適切なコンプライアンス動作や転倒防止動作、使用者追従動作を確認し、提案する移動支援手法の実現可能性について述べている。

第 8 章では、本論文の結論及び今後の課題について述べている。各章において提案している生理学的及び力学的指標に基づく身体的インタラクションのアプローチや、実験を通じて得られた本手法の有効性と適用可能範囲についてまとめている。特に、個人差異や動的動作を考慮した移動動作支援に関して実用化に向けた拡張性の観点から考察している。また、今後は長期の臨床実験を通して高齢者によるリハビリテーション及び移動動作支援の効果について検証する必要がある、そのために必要な課題等について述べている。