

博士論文審査報告書

論 文 題 目

操作者の意図に応じて加減速可能な
トレッドミルの制御に関する研究

**Study on Treadmill Velocity Control
based on User's Intention**

申 請 者

| | |
|----------|-----------|
| 中島 | 康貴 |
| Yasutaka | NAKASHIMA |

生命理工学専攻 メディカル・ロボティクス研究

2014 年 2 月

超高齢社会に突入した日本において高齢者の生活を支援する介護福祉機器の開発は重要である。介護福祉機器では、身体能力が衰退した高齢者に対して誤操作や過度な負担を防ぐために、操作時に事前の練習や特別な訓練を必要としない操作性が求められている。そのような中で、近年、トレッドミルを用いた歩行訓練および歩行支援が注目されている。このトレッドミルを用いた歩行訓練支援では、長距離歩行を行う際の空間の確保や凹凸等の路面環境の変化等の要因に制限されず、小型の空間かつ安定した環境で長距離歩行を行うことが可能である。しかし、従来のトレッドミルを用いた歩行訓練支援では歩き始めや歩き終わり等の加減速の際に違和感が大きく、歩きにくいことが報告されている。これは、操作者の加減速の意図に関わらず、トレッドミルのベルトが常に一定の速度で回転しているため、操作者自身の意図で矢状面方向の床反力を調整しながら加減速を行う平地上での歩行と異なってしまうことが原因と考えられている。

そこで、本研究では、加減速の際の歩きにくさを改善させ、操作者が常に歩きたい速度で自由にトレッドミル上を歩行可能にする、操作者の意図に応じて加減速可能なトレッドミルの制御の構築を目的としている。これまで運動学および運動力学的指標のみに基づいて制御されていた手法や生理学的指標のみに基づいて制御されていた手法に対して、本研究のアプローチでは、操作者の歩行特性と心理特性の両者を考慮する制御手法を提案している。それは、平地歩行時の矢状面方向の床反力と歩行速度の変化の関係を規範とし、操作者の深層にある違和感を示すと考えられる脳活動情報に基づいた制御である。この制御を構築するために、2つの技術課題を設定している。1つめは、トレッドミルへの操作入力としてベルトを後方へ蹴り出す力である矢状面方向の床反力を、トレッドミル駆動用のDCモータの電流値の情報を用いて推定する技術の確立である。この手法では、歩行中の床反力の特性に注目して、モータ電流値に作用する摩擦をモデル化し除くことで、蹴り力の推定を行っている。2つめは、上記で推定したベルトを蹴る力から、ベルトの動作を決定するモデル式を導出する技術の確立である。この手法では、平地上を歩行した際の矢状面方向の床反力と歩行速度の変化のモデル式を規範とし、歩行中の脳活動情報に注目してパラメータを決定することで、ベルトの動作を決定している。

本論文は8章から構成されている。以下の各章の概要を述べる。第1章では、超高齢者社会に突入した日本が抱える介護福祉機器、生活支援機器の現状と課題について述べている。その中でも、特にこれまで開発されてきた歩行訓練および支援機器の開発動向をまとめ、従来の歩行訓練および支援機器の操作性について説明している。第2章では、本研究の開発目標である、操作者の意図に応じて加減速可能なトレッドミルの制御に必要な技術課題を抽出するために、従来のトレッドミル制御を用いた実験を行っている。その結果から、本研究で解決すべき技術課題を明らかにし、それらに対する提案手

法を述べている。第 3 章では、技術課題の 1 つ目である、操作者の蹴り力を推定する手法として、摩擦を考慮したトレッドミルの力学的モデルの構築について述べている。トレッドミルの駆動用の DC モータ電流値に作用する摩擦の影響をモデル化し、摩擦を考慮したモータ電流値と操作者の蹴り力である矢状面方向の床反力との関係式を導出している。モータ電流値からトルクや力を正確に推定する手法として、検出される出力から摩擦の影響を除くことで外力を推定する手法を挙げている。本研究では、操作者の歩行状態を把握する手法として、位置や力センサ等で常に計測する手法ではなく、トレッドミル上を歩行中の人間の動作特性を規範とした推定手法を開発している。具体的には、歩行動作に応じて変化する主要な摩擦をモデル化し、その摩擦の影響をモータ電流値から除くことで蹴り力のみが電流値に及ぼす影響を示している。ここでは、モータ電流値に作用する主要な摩擦として、ギアボックス内での歯車による摩擦の損失と、トレッドミルベルトとその下面に固定されている歩行板との間で発生する摩擦の損失の 2 つを考慮している。それぞれ、歩行速度に依存する関係式と垂直方向の床反力に依存する関係式を導出している。第 4 章では、第 3 章で構築した摩擦モデルを用いて、モータ電流値から推定した蹴り力の精度を検証するために、床反力計を用いて計測した蹴り力との比較を行っている。構築した手法によりモータ電流値から推定した蹴り力の妥当性を検証することが目的であるため、本実験では身体パラメータとして体重が大きく異なる 20 代の健常男性 2 名を被験者 A(175[cm], 83[kg]), B(166[cm], 61[kg]) として選定している。この結果より、今回推定した蹴り力の波形と床反力計で計測した波形では、踵接地時と爪先離地時に最大誤差が被験者 A は 1.2×10^2 [N], 被験者 B は 97 [N] となり、RMS 誤差は 33 [N] と 21 [N] となったが、両者の波形パターンは制動力と推進力にピークをもつ同様な傾向を示していることを確認している。第 5 章では、これまで述べてきたトレッドミル上を歩行時の運動特性だけでなく、心理特性に基づいて歩行モデルのパラメータの決定を行う手法について述べている。本研究では運動の影響と直接関与している表面筋電位の信号や心拍数、酸素消費量等の従来までの指標を用いずに、操作者の深層に内在される心理特性として脳活動情報計測に基づく実験からパラメータの決定を行っている。実験では、第 4 章で推定した蹴り力の値に対して、歩行速度の変化を増減させる 0.80, 0.90, 1.0, 1.1, 1.2 の 5 つのパラメータを用いて条件を設定している。また、その際に歩行への影響が大きいとされている一次運動野の血中 Hb 濃度について光トポグラフィを用いて計測し、条件ごとに比較を行っている。この結果より、被験者である若年健常者 10 名中 6 名において、1.0 という特定のパラメータにおいて最も脳活動が賦活しており、その他の 4 つのパラメータと比べて有意な差が見られたことを確認している。第 6 章では、第 4 章で歩行特性に応じて構築した摩擦モデルを用いて推定した蹴り力と、第 5 章で光トポグラフィを用いた計測した脳活動情報に基づき決定したパラメータを用い

て、操作者の意図に応じて加減速可能なトレッドミルの制御を構築している。

第7章では、操作者の意図に応じて加減速可能なトレッドミルの制御の評価として、第6章で構築した制御を用いて、トレッドミル上で加減速歩行を行った際の目標速度への追従性能について実験を行っている。実験では、本研究で構築した制御と従来の制御における歩行速度と蹴り力の変化、足関節の爪先位置の軌跡を計測し、平地歩行と比較を行っている。この結果より、従来の制御では、2.0[km/h]から1.0[km/h]へ減速する歩行速度の目標提示を行った場合、被験者は目標の歩行速度へ追従できず速度が収束していないのに対し、今回構築した制御では、実際の歩行速度が目標の歩行速度へ追従し、収束するような速度変化を確認している。また、平地歩行時と同様に、操作者が蹴り力を減少させるにつれて歩行速度が減少していることを確認している。次に、今回構築した制御では、従来の制御と比較して、平地歩行時により近い足関節の爪先位置の軌跡を描くことを確認している。第8章では、本研究で得られた成果をまとめ、今後解決をすべき課題に関する展望を示している。構築したトレッドミルの制御の応用として、平地歩行を模擬するトレッドミルの制御手法や片麻痺患者を対象としたリハビリテーション分野や高齢者を対象とした移動支援機への応用に向けての課題や解決指針に関して示している。

以上要するに、本論文では、高齢者の歩行訓練および支援機器の開発に向けて、これまで詳細な検討が行なわれてこなかった操作者の歩行特性と心理特性の両者を考慮した、操作者の意図に応じて加減速可能なトレッドミルの制御手法を提案している。また、提案した方法を、若年健常者を対象とした実験で検証し、有用性を示している。その結果、従来のトレッドミル上の歩行では、操作者の意図に応じて速度変化を行うことが困難であるという課題に対して、操作者の意図に応じた速度変化が可能なトレッドミルの制御を構築する技術を実現している。この知見は今後、トレッドミルを用いた歩行訓練支援技術へ適用可能であり、さらに3次元のVR画像と組み合わせて効果的な歩行訓練を支援するシステムへと発展することが期待される。このように本研究の成果は、今後の福祉およびリハビリテーション装置開発や歩行訓練支援ロボットの開発のみならず、生活支援のためのロボット学や医療福祉工学全般の発展にも大いに貢献するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。

2014年2月

| | | | |
|------|---------|---------------|------|
| (主査) | 早稲田大学教授 | 博士（工学）（早稲田大学） | 藤江正克 |
| | 早稲田大学教授 | 工学博士（早稲田大学） | 高西淳夫 |
| | 早稲田大学教授 | 工学博士（早稲田大学） | 菅野重樹 |
| | 早稲田大学教授 | 博士（工学）（早稲田大学） | 藤本浩志 |
| | 早稲田大学教授 | 博士（工学）（早稲田大学） | 宮下朋之 |