

博士論文概要

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

2013年11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疲労や誤操作を防ぐために、使用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。高齢者や障害者を対象とした歩行訓練および歩行支援ではトレッドミルが注目されている。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では常に一定の速度で回転する制御が用いられてきたため、使用者が矢状面方向の床反力を発生させながら歩行速度を調節し行う平地上での歩行と異なり、歩き始めや歩き終わり等の加減速歩行時に違和感が大きく、歩きにくいことが報告されている。本研究では、加減速歩行時の歩きにくさを改善させ、使用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する。トレッドミルと平地では慣性の影響があるため、完全に同一な運動を再現することは困難である。平地歩行を錯覚させるトレッドミルの制御手法として、歩行中にトレッドミルの傾斜を変化させ使用者の重心の影響を錯覚させる手法や使用者の視覚情報を遮断し歩行速度の影響を錯覚させる手法等が考えられるが、いずれも機器の大型化や転倒のリスク等が課題として挙げられる。本研究のアプローチでは、これまで考慮されてこなかった歩行特性と心理特性の両者を満たすために、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、使用者の深層にある違和感を示すとされる脳活動情報に基づいた新たな制御手法を提案する。

この制御には、2つの技術課題を設定した。1つめは、トレッドミルへの操作入力であるベルトを後方へ蹴り出す力について、トレッドミル駆動用のDCモータの電流値の情報だけで、正確かつリアルタイムに推定する手法の確立である。この手法では、モータ電流値に外乱として働く摩擦を、歩行時の床反力の特性を利用して、モデル化し除くことで、蹴り力の推定を行うものである。2つめは、トレッドミル上を歩行時の脳活動情報に基づいて、歩行速度に寄与するパラメータを決定する手法の確立である。この手法では、歩行時の一次運動野の血中Hb濃度を光トポグラフィにより計測を行い、最も賦活するパラメータを決定する。以上より、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おいて、使用者の蹴り力に応じてトレッドミルの速度が変化し、使用者が平地のようにトレッドミル上で加減速歩行が可能であることがわかり、本手法の有効性を確認した。

本論文は1章から8章にて構成される。以下に各章の内容について示す。

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た。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と高齢者の歩行特性および心理特性との関係性について説明した。次に、歩行訓練や歩行支援の分野で注目されているトレッドミルを用いた機器について言及

し、これまでのトレッドミルの開発課題を示した。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、従来の制御の概要とその問題点をまとめた。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に注目し、平地歩行時の使用者の重心周りの運動方程式をたて、トレッドミル上での使用者の蹴り力に応じて、歩行速度を決定する制御アルゴリズムを提案した。本研究の先行研究に対して優位な点が「歩行特性と心理特性に基づいて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導出することで、これまで実現することができなかった、操作者の意図に応じた加減速歩行を可能にする点」にあることを明示した。

第3章では、使用者の蹴り力を正確かつリアルタイムに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た。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使用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た。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、外乱オブザーバーを用い、出力から摩擦の影響を除くことで外力を推定する手法が挙げられる。この手法を適用するためには、歩行速度や歩行相等の歩行状態に応じて変化する摩擦の影響を考慮したトレッドミルの力学的モデルの構築が不可欠である。しかし、安価かつ小型であり利便性の高いことが望ましいとされる歩行訓練および支援機器において、使用者の歩行状態をリアルタイムかつ正確に計測するために必要な多数のセンサの取り付けは困難とされている。本研究では、使用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た。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た。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、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た。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た。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])として選定した。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では 1.2×10^2 [N]、被験者Bでは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が分かった。

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た。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、使用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た。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た。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た。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、その他のパラメータと比べて有意な差が見られた。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た。

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、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た。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が見られた。今回構築した制御では、平地歩行時と同様に、使用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が確認できた。また、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が確認できた。これは、従来の制御を実装したトレッドミル上の歩行では、蹴った力に応じて使用者の意図した速度変化を行うことができず、使用者が歩行中に歩容を保つことが困難であったことに対し、今回構築した制御アルゴリズムを実装したトレッドミル上の歩行における結果では、蹴った力に応じて使用者の意図した速度変化を行うことができ、使用者が歩行中に歩容を保つことが可能であったとためだと考えられる。

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た。また、構築したトレッドミルの制御の応用として、片麻痺患者を対象としたリハビリテーション分野やアスリートを対象としたスポーツ分野への応用に向けての課題や解決指針に関して示した。以上より、高齢者の歩行訓練および支援機器の開発に向けて、直感的な加減速歩行を可能にするために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、使用者の歩行特性と心理特性を考慮した開発設計と、それに基づく制御手法の有効性を示した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 中島 康貴 印

(2013年 11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
査読付論文	
○	[1] 中島康貴 , 安藤健, 小林洋, 二瓶美里, 藤江正克, 平地のように加減速歩行が可能なトレッドミルの制御手法の開発, バイオメカニズム, Vol. 21, pp.157-166, 2012.
○	[2] 中島康貴 , 大木英一, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 歩行支援機 Tread-Walk 2 の操作性向上のための制御アルゴリズムの構築—摩擦を考慮したトレッドミルの力学的モデルを用いたモータ電流値からの蹴り力推定—, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.7, pp.776-782, 2010.
	[3] Yasutaka Nakashima , Takeshi Ando, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Gait-controlled Mobility-aid Robot: Treadmill Motor Current Based Anteroposterior Force Estimation Using Frictional Model Reflects Characteristics of Ground Reaction Force, Proceedings of the third IEEE RAS / EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BIOROB 2012) , pp.1305-1310, 2012.
	[4] Yuki Yokoo, Yasutaka Nakashima , Satoshi Miura, Yoshikazu Ogaya, Takeshi Ando, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Brain Activity Measurement Based Evaluation of Active Control of a Treadmill, Proceedings of the 2012 The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems/The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2012), pp.1201-1206, 2012.
	[5] Yasutaka Nakashima , Takeshi Ando, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Treadmill Motor Current based Real-time Estimation of Anteroposterior Force Using Ground Reaction Force Approximation Depending on Gait Cycle, Proceedings of the 2011 IEEE/EMBS International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2011), pp.1583-1589, 2011.
○	[6] Yasutaka Nakashima , Eiichi Ohki, Takeshi Ando, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Treadmill Motor Current based Real-time Estimation of Anteroposterior Force during Gait, Proceedings of the 2010 IEEE/EMBS International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2010), pp.475-478, 2010.
	[7] 中島康貴 , 安藤健, 小林洋, 二瓶美里, 藤江正克, 平地のように加減速歩行が可能なトレッドミルの制御手法の開発, 第 22 回バイオメカニズム・シンポジウム, pp.191-199, 2011.
講演	[8] 中島康貴 , 横尾勇樹, 鋸屋宜和, 三浦智, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 上肢の運動情報に基づいたトレッドミルの制御の評価, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2012 (LIFE 2012), GS3-4-1, 2012.
	[9] 中島康貴 , 横尾勇樹, 鋸屋宜和, 三浦智, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 蹴り力に応じたトレッドミルの制御の評価-制御パラメータの違いがハンドルにかかる力へ及ぼす影響の検討-, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2012), 4C1-6, 2012.
	[10] 中島康貴 , 鋸屋宜和, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 移動支援機 Tread-Walk の操作性向上のための制御アルゴリズムの構築 —ハンドルにかかる力を指標としたトレッドミルの制御の評価—, 第 24 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD 24), pp.141-142, 2012.
	[11] 中島康貴 , 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 利用者の蹴った力に応じて回転するトレッドミルを用いた屋内型歩行リハビリシステムの提案～蹴り力に応じたトレッドミルの制御手法の

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 査読付論文	<p>開発～, 第 12 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI 2011), 2011.</p> <p>[12] <u>中島康貴</u>, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 蹴り力に応じたトレッドミルの制御手法の開発～トレッドミル歩行時の運動評価～, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011－Assistive Technology, Bio Medical Engineering and Life Support 2011－ (ABML 2011), 2011.</p> <p>[13] <u>中島康貴</u>, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 蹴り力に応じたトレッドミル上における加速減速歩行時の運動解析, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2011), 1N2-1, 2011.</p> <p>[14] <u>中島康貴</u>, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, トレッドミルのモータ電流値を用いた歩行相・歩行速度に応じた蹴り力推定手法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH 2011), 2P2-C02, 2011.</p> <p>[15] <u>中島康貴</u>, 大木英一, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 歩行支援機 Tread-Walk 2 の操作性向上のための制御アルゴリズムの構築－モータ電流値を用いたトレッドミル歩行時の蹴り力リアルタイム推定－, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会－Welfare, Wellbeing, Life Support 2010－ (WWLS 2010), pp.516-517, 2010.</p> <p>[16] <u>中島康貴</u>, 大木英一, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 歩行支援機 Tread-Walk 2 の操作性向上のための制御アルゴリズムの構築－モータ電流値からの蹴り力推定－, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2009), 1C2-04, 2009.</p> <p>[17] <u>中島康貴</u>, 渡邊峰生, 東野達也, 井上淳, 川村和也, 貴嶋芳文, 東祐二, 湯地忠彦, 藤元登四郎, 藤江正克, 片麻痺患者の歩行訓練支援に向けた理学療法士の介助動作を再現するロボットの開発-片麻痺患者のハンドリング動作計測に基づく力学的モデルの構築-, 第 23 回バイオメカニズム・シンポジウム, pp.321-332, 2013.</p> <p>[18] <u>中島康貴</u>, 渡邊峰生, 東野達也, 井上淳, 川村和也, 貴嶋芳文, 東祐二, 湯地忠彦, 藤元登四郎, 藤江正克, 片麻痺患者の歩行訓練支援に向けた理学療法士の介助動作を再現するロボットの開発, 第 18 回ロボティクスシンポジウム, pp.1-8, 2013.</p> <p>[20] Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Kazuya Kawamura, Masatoshi Seki, <u>Yasutaka Nakashima</u>, Takehiko Noguchi, Masahiro Kasuya, Yuki Yokoo, Masakatsu G. Fujie, Intuitive Operability Evaluation of Robotic Surgery Using Brain Activity Measurements to Clarify Immersive Reality, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, No.1, pp.5614-5623, 2012.</p> <p>[21] Takeshi Ando, Eiichi Ohki, <u>Yasutaka Nakashima</u>, Yutaka Akita, Hiroshi Iijima, Osamu Tanaka, Masakatsu G. Fujie, A Gait Phase Measurement System using Treadmill Motor Current, Advanced Robotics, Vol. 26, No.13, pp.1727-1746, 2012.</p> <p>[22] Takeshi Ando, Eiichi Ohki, <u>Yasutaka Nakashima</u>, Yutaka Akita, Hiroshi Iijima, Osamu Tanaka, Masakatsu G. Fujie, Pilot Study of Split Belt Treadmill Based Gait Rehabilitation System for Symmetric Stroke Gait, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24, No.5, pp.884-893, 2012.</p> <p>[23] 安藤健, 大木英一, <u>中島康貴</u>, 秋田裕, 飯島浩, 田中理, 藤江正克, 左右分離型トレッドミルを用いた歩行相フィードバックシステム, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.783, pp.4189-4203, 2011. 等, その他 14 件.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 講演	<p>[24] 松本侑也, 陳瑋煒, 雨宮元之, 金石大祐, 中島康貴, 小林洋, 關雅俊, 安藤健, 飯島浩, 長岡正範, 藤江正克, ふるえ抑制ロボットにおける効果的にふるえを抑制可能なフレーム形状の工学的検討, 第 14 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI 2013), 3F1-2, 2013.</p> <p>[25] 中山正之, 井上淳, 金石大祐, 雨宮元之, 中島康貴, 小林洋, 藤江正克, 膝関節軌道と股関節屈曲角速度に基づくつまずき発生判別アルゴリズムの構築 ～つまずき防止用下肢装具の要求仕様導出～, 2013 年日本機械学会年次大会 (JSME 2013), J241031, 2013.</p> <p>[26] 雨宮元之, 金石大祐, 松本侑也, 中島康貴, 小林洋, 關雅俊, 藤江正克, 装着型ロボット使用時の代償運動を低減する肘・前腕連動機構の開発～食器位置と代書運動低減効果の関係検証～, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2013), 3C3-02, 2013.</p> <p>[27] 河野信哉, 中島康貴, 小林洋, 藤江正克, 上肢と下肢の協調性に基づく歩行の運動機能評価に関する検討, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2013), 3F2-03, 2013.</p> <p>[28] 金石大祐, 松本侑也, 雨宮元之, 中島康貴, 小林洋, 關雅俊, 安藤健, 飯島浩, 長岡正範, 藤江正克, 加速度と姿勢情報を用いた本態性振戦患者の患部特定手法の構築, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2013 (LIFE 2013), GS3-4-7, 2013.</p> <p>[29] 滝澤和弥, 中島康貴, 小林洋, 藤江正克, 高齢者の転倒防止に向けた視覚遮断歩行訓練による動的バランス能力向上効果の検証, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH 2013), 1A1-C13, 2013.</p> <p>[30] 松本侑也, 關雅俊, 安藤健, 小林洋, 中島康貴, 飯島浩, 長岡正範, 藤江正克, 本態性振戦患者の表面筋電位を用いた随意動作識別アルゴリズムにおける振戦の特徴変化に応じたパラメータチューニング, 第 22 回ライフサポート学会フロンティア講演会, A6-4, 2013. 等, その他 12 件.</p>
その他 解説	<p>[31] 藤江正克, 中島康貴, 作業療法と科学技術の融合, 日本作業療法士協会学術誌「作業療法」, Vol.31, pp.517-522, 2012.</p> <p>[32] 藤江正克, 中島康貴, 小林洋, ヒトの動作の先を読む賢い制御を取り入れた自立支援機器の開発-歩く動作を増幅する移動支援機と腕のふるえを抑える食事支援ロボット装具の紹介-, 長寿科学振興財団機関誌「Aging & Health」, Vol.63, pp.8-11, 2012.</p> <p>[33] 藤江正克, 小林洋, 渡辺広樹, 中島康貴, 医工融合への challenge～医師の経験と知識を力学的に表現する～, 第 51 回日本生体医工学会大会-パネルディスカッション「医工融合への提言」-, PD1-1, 2012.</p>
その他 受賞	<p>[34] 第 3 回日本ロボット学会ロボティクスシンポジウム研究奨励賞, 第 18 回ロボティクスシンポジウム, 片麻痺患者の歩行訓練支援に向けた理学療法士の介助動作を再現するロボットの開発, 2013.</p> <p>[35] 日本機械学会畠山賞, 2009.</p>