

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560283

研究課題名(和文) 最適免荷と自由歩行を実現する歩行訓練ロボット -ゼログラビティリハビリへの挑戦-

研究課題名(英文) Development of Walking Training Assist Robot with Optimal Hoisting Control and Omnidirectional Movements-Challenge to Zero Gravity Rehabilitation

研究代表者

寺嶋 一彦(Terashima, Kazuhiko)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60159043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、歩行訓練中の床反力による下肢への負担を軽減しながら、運動機能回復の促進を目指したテーラーメイドなリアルタイム免荷式全方向移動型歩行訓練システムの構築を行った。最適な目標免荷量の値に制御すると共に、思う方向に歩行できる全方向自動追従制御を実現した。免荷量を動的に制御することで、単脚支持期や重心の偏りにより増加する床反力を抑制する床反力一定制御システムの構築を行った。これにより、患部に過大な床反力を負荷させることなく安全に早期歩行訓練を行うことが可能になった。最後に、健常者と実際に歩行訓練を行っている患者を被験者として実験を行い、提案するシステムの有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In this paper, omnidirectional mobile hoisting-type walking training system is proposed and built. Tailormade optimal walking robot with hoisting control and omnidirectional moving is developed. Constant control against floor repulsive force is realized using feedback control of hoisting force with load cell. Further omnidirectional walking training can be realized by differential drive and steering system(DDSS) developed by author. Omnidirectional movements are exploited by DDSS and feedback of leg's movements using laser sensor.

This robot suggests that zero gravity walking is possible in the proposed control system. The usefulness of the proposed walking assist robot is demonstrated by several laboratory and hospital experiments.

研究分野：制御工学、ロボット工学

キーワード：リハビリ制御 免荷力制御 歩行支援 全方向移動 差動駆動操舵機構 パワーアシスト 歩行訓練 姿勢推定

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の歩行リハビリテーションでは、歩行器、平行棒等を用いたリハビリ訓練が行われている。これら訓練器具の問題点として、訓練者自身の体重を両腕で支持する必要があるため、上肢の筋力が衰えている高齢者は立位姿勢を維持することが困難であり、転倒の危険性が大きいことから、介護者のサポートが不可欠となっている。また、転倒の恐怖から訓練に対して消極的になる傾向もみられる。これらの問題を解決するため、パワーアシストスーツや吊り上げ式の体重免除歩行訓練器等が開発され、高い訓練効果があると報告されている。パワーアシストスーツは、体に装着したアクチュエータによって歩行を補助するため、筋力が減少した訓練者において有効であるが、装具の拘束感や訓練者個別の体格や病状への調整に時間がかかることが問題である。

(2) 吊り上げ式の体重免除歩行訓練器は、訓練者の体を吊り上げ、下肢にかかる負荷を減少することにより、手術後の早期歩行訓練が可能である。しかし、現在の装置において、免荷量は、歩行中一定で、重りや手でロープの巻き上げを調整している。免荷量の調整は、理学療法士の従来からの経験等により決定され最適なものではなく、現状では明確な基準がない。従来訓練機では、歩行訓練が固定場所という拘束がつき、健常者のような全方向への自由移動が叶えられない。そこで、それらを満足させる歩行ロボットを本研究で開発するに至った。

## 2. 研究の目的

(1) 歩行中の下肢にかかる床反力、重心移動の変化、脚の振り出し等を計測して、歩行周期と床反力の変移を解析して、最適な目標免荷量の推定と制御、訓練者姿勢制御および無重力提示の下での全方向移動制御の原理を構築して、様々な症状の患者に対応した全

方向移動型体重免除機構の最適システムを構築する。本研究では、システム構築から実機製作および実証実験を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 歩行挙動の計測・解析：免荷量制御システムの構築のため歩行の計測・解析を行う。測域センサにより脚の振り出しを、床反力計を用いて左右の脚にかかる荷重を、加速度センサおよび免荷ロープのロードセルを用いて体の姿勢変化を各々計測する。また、センサの再現性の確認として、モーションキャプチャを用いる。計測したデータを用いて、免荷時の姿勢変化の力学的な解析を行う。

(2) 最適免荷・姿勢推定：前述の計測データを用いて、歩行中の姿勢および床反力の関連性の解析を行い、歩行の状態を推定し、各歩行周期における免荷量、タイミング、周期を導出する。また、ヒューマンダイナミクスを考慮した人体のモデリングを行い、免荷量と姿勢の関係性のシミュレーションを下に、歩行訓練中の歩行挙動に応じた最適な目標免荷量推定の原理を解明する。また、転倒防止、姿勢推定アルゴリズムも構築を行う。

(3) 免荷量の最適制御システムの構築：前述の基礎実験とヒューマンダイナミクスに基づいて得られた関係則より、最適免荷量を推定し、それを目標値としてフィードバック制御を行う。制御の流れを図3に示す。歩行訓練を開始すると、CCDカメラ、測域センサおよび加速度センサを用いて歩行を計測し、歩行挙動(歩幅・歩行周期・姿勢変化)の推定を行い、構築のアルゴリズムを用いて最適な目標免荷量を導出する。そして同時に、目標免荷量になるようにモータを駆動させてロープの巻き上げ・下げを制御する。リアルタイム制御系としては、安全でロバストな最適制御を設計・構築する。この時、ロープにかかる荷重の変化を計測

し、目標のロープ荷重から著しく違う場合は、訓練者の拒否反応と捉え免荷量の修正を行う。

(4) 全方向移動制御：地面が足についている状況での免荷歩行訓練では、全方向移動のため、従来のレーザセンサを用い、足の動きから行きたい方向の意図推定をする。前後、左右、斜め、回転のアルゴリズムを導出する。ただし、既設の図7の車輪部を、四輪の全方向車輪に代え、全方向移動が可能なシステムにする。字頁で述べる無重力歩行訓練では足が浮き上がるので、レーザは使わずカメラ等を用いる。

(5) 意図推定に基づく無重力感覚提示全方向移動システムの提案：前述の体重免荷システムは、ある程度自重を支えることが可能な患者を対象としている。しかし、重度の歩行障害を持つ難病や脊髄損傷等の患者に対しても体を動かして、運動器および脳機能の活動を促す必要がある。このような患者を対象とした無重力感覚免荷提示による活発な全方向移動運動を促進する歩行支援ロボットを構築する。インピーダンス制御を使用し、ロープの巻き上げをばねのように制御することにより、無重力に近い感覚を提示する。移動方向は、障害者の微妙な体や足の動きを、カメラと加速度センサより取得し、その情報を基に申請者の開発したニューラル・ファジィ方式を用い、進みたい方向の意図推定を行い、それに基づき全方向移動の運動計算式よりコントロールする。これは、車椅子に乗っている感覚とは異なり、あたかも、歩行ができる錯覚や快適感を与える状況であり、また脳や身体に好影響を与える可能性がある。

#### 4. 研究成果

(1) 開発した全方向移動型免荷式歩行訓練支援ロボット：構築した全方向移動型免荷式歩行訓練ロボットを図1に示す。車輪は、タイヤでできており、5枚の平歯車を用い差

動駆動操舵機構（DDSS）を構成している。



図1 構築した全方向移動型免荷式歩行訓練支援ロボット

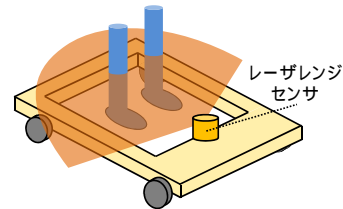


図2 自動追従制御の概略図

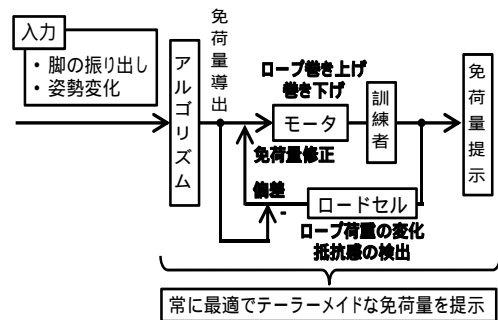


図3 最適免荷制御のアルゴリズムと制御システム

さらに、オフセット機構を用いていることから、全方向移動が可能となった。図2に示すように訓練者が足を出すと、レーザでその距離を測定し、それにより、ロボットが動く。足の出す方向や、足の歩幅により、行きたい方向や速度が決まり、それに従いロボット動くため、歩行訓練者は、吊り下げにより倒れることなく、自分の思うように歩行することができる。ゆっくり歩幅を出せば、ゆっくり動き、早く足を出せば、ロボットは早く動くため、歩行訓練者の思い通り歩行訓練ができ

る制御アルゴリズムを構築した。なお、シミュレーション解析だけでなく、実験によっても、思いの通り全方向に移動できることが検証された。

(2) 免荷の制御方法：本システムは、移動式歩行訓練器において床反力を制御するシステムであるため、フォースプレートなど設置式の床反力計で床反力を直接計測しフィードバックするようなことができない。そのため、床反力計は使用せず、ロープの吊上げ力をロードセルで測定し、また、重心偏度を用いて床反力を推定し、左右のワイヤの免荷量 $FL$ 、 $FR$ を制御することにより間接的に床反力の制御を行う。本システムでは、従来の免荷手法と同様に最初に一定量の免荷を行う。単脚支持期には、立脚側で全体重を支持する必要がある。そのため、単脚支持期においては直立時の床反力まで追加免荷する必要がある。開発した歩行訓練ロボット図1は、左右独立免荷が可能であり、追加免荷量を任意の比率で左右のワイヤに配分することができる。図3にその免荷量制御のアルゴリズムを示す。

またこの制御方式の確立により、完全吊上げにより、脚部へのゼログラビティ状態を生み出すことができる。しかし、装置の関係上、本研究では、成人男性の50%免荷の状態が最大免荷となった。今後、モータ部を容量の大きいものに交換し、ゼログラビティ状態での実験を行う。

(3) 実験結果：構築した免荷制御システムの有効性を実機実験により検証した。被験者は健常者および医療財団法人慈強会松山リハビリテーション病院の患者である。患者を対象とした実験は、「国立大学法人豊橋技術科学大学ヒトを対象とする研究規定」と「松山リハビリテーション病院倫理委員会」に申請し、被験者の同意のもと安全と倫理に配慮して行った。実験は、重心の左右揺動およびその場での足踏み動作を行い、その時の床反力を設置型フォースプレート(Kistler社製)で計測した。なお、免荷制御システムのPIDコントローラゲインは、ジューラ・ニコラスの限界感度法を基準に微調整を施して決定した。

健常者の場合：足踏み動作においては、全体重が立脚に作用する単脚支持期において、

床反力の増加を抑制できていることを確認した。しかし、両脚支持期と単脚支持期の遷移期間において、床反力が大きく増加した。遷移期間で目標免荷量への免荷量の追従性が悪化した。これは、ワイヤの巻き上げを行っている間に、遊脚の振り上げがPID制御によって外乱となっていたことが原因であると考えられる。今回は使用者の振る舞いを外乱としてモデル化していなかったため、脚の動きによる外乱によって免荷量の追従性が悪化してしまった。今後は、目標免荷量への追従性と外乱抑制を両立させた免荷制御系の構築が必要である。

患者の場合：床反力が目標値付近で抑制できているのに対して、左脚の床反力が目標値を大きく下回り、左側へ移動するときに上昇するというような変化が確認された。これは、患部である左脚に体重をかけないように無意識に右に寄っていたためである。患部の過剰な保護は、安全の観点からは良いが、訓練としては非効率となる。また、重心が片側に寄った歩き方を覚えてしまう可能性もあり、正しい歩行姿勢を再獲得することができない。今後は、患者の姿勢補正を行い、正しい姿勢で患部に適切に負荷を与えられるようにする必要がある。一方、足踏み動作では、単脚支持期の立脚側床反力が目標値を大きく超えた。単脚支持期であるにもかかわらず、追加免荷量がほとんどなかった。単脚支持期において重心位置が立脚上に無く、適切な追加免荷量が設定されなかったと考えられる。このことから、重心の偏りを推定するには、両脚と重心の位置関係のみでは記述できなく改善の余地がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

寺嶋一彦, 山本たつ子: 使いやすい福祉機器・ロボットをどう開発するかー工学と福祉の連携, 月刊福祉, 97(7), 38-45, (2014)

〔学会発表〕(計 2件)

1. 水尻雄貴, 寺嶋一彦: 重心移動を考慮した免荷式歩行訓練器の床反力一定制御システムの開発, 日本機械学会東海学生会 第46回学生員卒業研究発表講演会, 学内指導学生, (2015).

2. 水尻雄貴, 鈴木裕一, 寺嶋一彦: 重心移動を考慮した免荷式歩行訓練器の床反力動的制御システムの開発, 第33回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2015), 2A1-03, (2015).

〔図書〕(計 1件)

, 寺嶋一彦監修: 今後の高齢化社会に求められる生活支援(福祉・介護・リハビリ)ロボット技術, 情報機構, (2015)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.syscon.me.tut.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

寺嶋一彦 (TERASHIMA, Kazuhiko)  
豊橋技術科学大学・工学(系)研究科  
(研究院)・教授  
研究者番号: 60159043

(2)研究分担者

鈴木重行 (SUZUKI, Shigeyuki)  
名古屋大学・医学系研究科(保健)・教授  
研究者番号: 60179215

(3)連携研究者

南 哲人 (MINAMI, Tetsuto)  
豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端  
融合研究所・准教授  
研究者番号: 70415842