

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 8 月 30 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25282161

研究課題名(和文) ヒト下肢筋機能と同等にアシストできる免荷式歩行訓練システムの開発

研究課題名(英文) Development of body weight support gait training system to assist like actual lower limb function

研究代表者

山本 紳一郎 (Yamamoto, Shin-ichiroh)

芝浦工業大学・システム理工学部・教授

研究者番号：30327762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、ニューロリハビリテーションの概念に基づくヒトと同じ二関節筋を用いた駆動機構を持つ、下肢筋機能と同等にアシストできる免荷式歩行訓練システムを開発することを最終目標としてきた。最終年度にはこれまでの二関節筋モデルによる制御システムを大幅に改良し、実際の歩行訓練速度に適用できる位置制御モデルでの稼働が可能となった。今後の臨床試験実施のための礎を築くことができたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to develop the body weight support gait training system to assist like the actual lower limb function. We have developed the new position control system for the body weight support gait training system to able to apply the actual gait training speed.

研究分野：リハビリテーション工学

キーワード：歩行訓練 ニューロリハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

「ニューロリハビリテーション」とは、脳脊髄神経系に働きかけるリハビリ手法であり、特に欧米で進められてきた脊髄損傷者のための免荷式トレッドミル歩行訓練による研究成果によって認知されている(Dietz & Harkema: J Appl Physiol 2004). 免荷式トレッドミル歩行訓練は、1980年代後半に、Barbeauらがネコやラットを用いた動物実験の結果に基づき、ヒト脊損者の最初の免荷式歩行訓練を最初に試みたことから始まり(Barbeau & Rossignol: Brain Res 1987, Visintin & Barbeau: Can J Neurol Sci 1989), その後 Wernig らや Dietz らも脊損者に免荷式歩行訓練を実施し、多くの臨床成果からヒト脊髄のCPG (Central Pattern Generator) に関する生理学的示唆を報告した(Wernig & Müller: Paraplegia 1992, Dietz et al.: Lancet 1994). また、近年の再生医療の発展もめざましく、多くの研究者が神経を再生する研究に取り組んでおり、将来的には脊損者の神経を再生し、免荷式歩行訓練によって、歩行機能を再獲得することを目指した研究プロジェクトも進んでいる (Buchli et al.: Neurodegener Dis 2007). 当初は、1名の対麻痺(下半身麻痺)の患者に対して、2名の補助者(理学療法士)がトレッドミルの両脇に座り、足首と膝を両手で抱え、トレッドミル速度に応じた歩容になるようにサポートしていた。この補助者の姿勢と作業は、身体的負担が大きく、歩容の再現性も良くないという問題点があった。そこで、補助装置がロボット化されたのが Driven Gait Orthosis (LOKOMAT) である(Colombo et al.: J Rehabil Res Dev 2000). 現在では世界各国で300機以上が病院や研究所で使用されている。他にも多くのロボット型歩行訓練装置が開発されているが、近年の臨床研究ではロボット歩行訓練の効果を疑問視する報告もあり、多くの議論がなされている(Hornby et al. Stroke 2008, Westlake et al. J Neuro Eng Rehab 2009). ロボットが麻痺肢を完全に受動運動とすれば、患者の随意運動が低下しモチベーションも上がらず、最大限の訓練効果が得られないことを示唆している。患者の随意運動を最大限に引き出す

には、麻痺筋の程度に合わせた最小限のアシストにする必要がある。これまでのロボット型歩行訓練装置の多くは、モータを各関節軸に取り付けており、個々の麻痺筋にあわせたアシストは困難である。なぜなら、ヒトの歩行には多くの骨格筋が使用され、その麻痺の程度は個々の筋で一定ではなく、特にスムーズで効率的な運動を実現する役割をもつ二関節筋に対するアシストも不可能である。

2. 研究の目的

以上のような研究背景を踏まえて、本研究はニューロリハビリテーションの概念に基づいて、様々な運動機能障害者の症状に対する多様な訓練処方をもつ二関節筋に対するアシストも不可能である。

以上のような研究背景を踏まえて、本研究はニューロリハビリテーションの概念に基づいて、様々な運動機能障害者の症状に対する多様な訓練処方を可能とするより訓練効果が期待できる免荷式歩行訓練システムを開発することを最終目標とした。

本研究では、4年間の期間内に以下のことを目標とした。

- 1) 位置制御、力制御が可能な空圧式人工筋を用いた免荷式歩行訓練システムを開発する。
- 2) 二関節筋を用いたヒトと筋配置が同様なシステムとし、その制御方法を確立する。
- 3) 自動学習機能を持たせて、麻痺筋へのアシストを最適化するシステムとする。
- 4) 対麻痺者、片麻痺者への臨床実験を行い、その性能を明らかにし、評価する。
- 5) 上記の研究開発の水中運動療法に使用できるシステムを検討し、そのプロトタイプを試作する。

3. 研究の方法

具体的に検討してきた課題は、以下の事項である。

- 1) 二関節筋モデルに適した装具フレーム設計のためのシミュレーション
- 2) 1)に基づく装具フレームの設計と製作
- 3) 空圧式人工筋アクチュエータの新規開発と製作
- 4) 3)で開発したアクチュエータの要素実験
- 5) 4)から得られる力学的パラメータの制御系への適用
- 6) 新たな角度、力、圧力等のセンサの選定・取

付の検討

- 7) 6)の情報を用いたフィードバック制御系および制御パラメータの検討（二関節筋の制御法含む）
- 8) 歩行調節パラメータの検討と制御系への連動
- 9) 麻痺症状にあわせた最適な歩行運動学習モデルの検討
- 10) 免荷方法の再検討および免荷装置の製作・改良（トレッドミルを使う場合と使わない場合）
- 11) 歩行訓練装置とダブルベルトトレッドミルとの連携方法の検討
- 12) ユーザ（障害者、高齢者および検者）の特性に合わせたマンマシンインターフェイスの検討・製作
- 13) 安全システムの検討・製作
- 14) 臨床研究による評価

上記以外にも検討課題が出てきた場合には、その都度システム開発計画を立案し、研究課題を遂行した。

4. 研究成果

平成24年度まで、以前の科研費を原資として空圧式人工筋肉を用いた試作機を開発しており、研究成果を報告してきたが、これまでの開発では実際に臨床研究に試行するには全く不十分な内容であった。本研究課題によって、開発コンセプトに適合したハード・ソフトの再検討と詳細設計、人工筋肉（特に二関節筋）の最適な制御および自動学習モデルの検討を新たに進める。H25年度は、装具部および免荷部、制御部各々の開発チームを結成し、これまでの歩行訓練装置の問題点を洗い出し、役割分担し、再設計案を検討した。

平成25年度、26年度の研究成果によって、これまでの試作機をもとにした開発コンセプトに適合したハード、ソフトの両面での再検討が進み始めた。ハード面では、装具部、免荷部およびアクチュエータであるマッキベン型人工筋の再設計に着手し、様々な試作をすることができた。

装具部は、二関節筋の作働範囲において、関節の運動として機能しない特異点がいくつか存在し、

十分に二関節筋の性能を発揮できる装具フレームを設計できていなかったが、この点を克服する二関節筋モデルに適した装具フレームの再検討を行い、設計・製作することができた。

免荷部は、カウンターウェイト方式を用いていたが、身体重心の上下動による慣性が問題だったため、人工筋をアクチュエータとする再設計を行い、新たな免荷部を製作した。

これらの装具部および免荷部の制御系の検討（主に位置制御フィードバック）も進めてきたが、まだ未確立であり、平成27年度の検討課題となった。さらに、力制御フィードバックの導入も検討する予定であったが、そこまで着手できなかった。同様に平成27年度の検討課題となった。

平成27年度までの研究成果によって、これまでの試作機をもとにした開発コンセプトに適合したハード、ソフトの両面で再検討された装具部、免荷部およびアクチュエータであるマッキベン型人工筋の再設計に着手し、様々な試作を続けてきた。装具部は、二関節筋の作働範囲において、関節の運動として機能しない特異点がいくつか存在し、十分に二関節筋の性能を発揮できる装具フレームを設計できていなかったが、この点を克服する二関節筋モデルに適した装具フレームの再検討を行い、設計・製作することができた。免荷部は、カウンターウェイト方式を用いていたが、身体重心の上下動による慣性が問題だったため、人工筋をアクチュエータとする再設計を行い、新たな免荷部を製作した。これらの装具部および免荷部の制御系の検討（主に位置制御フィードバック）を進めてきたが、免荷部の制御については、27年度の進捗でようやく制御可能なレベルまでこぎつけた。しかしながら、装具部の制御系の改善までには至らなかった。28年度には力制御フィードバックの導入も含めた制御系の改善が大きな検討課題であったが、ダブルベルトトレッドミルの不調によって、進捗が遅れたこともあり、あまり研究の進捗がみられなかったが、平成29年度には制御システムを大幅に改善することに成功し、臨床で適用できる時速2kmの実用歩行速度に対応した装具の位置制御を

実現できた。また、力（インピーダンス）制御モデルの開発にも着手し、今後の開発に繋げることができた。

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 12 件）

- 1) N Nazmi, M Azizi A Rahman, S Yamamoto, SA Ahmad, SA Mazlan, H Zamzuri: Assessment on Stationarity of EMG Signals with Different Windows Size During Isotonic Contractions. Applied Sciences 2017, 7(10): 1050, DOI: 10.3390/app7101050 (査読有)
- 2) 櫻田武, 後藤彩, 中嶋剛, 森田光哉, 平井真洋, 山本紳一郎, 渡辺英寿, 川合謙介: 脳卒中患者の認知運動機能連関に関する個人差とその神経基盤, 機能的脳神経外科 56, 62-67, 2017(査読有)
- 3) N Nazmi, M Azizi A Rahman, S Yamamoto, SA Ahmad, H Zamzuri, SA Mazlan: A Review of Classification Techniques of EMG Signals during Isotonic and Isometric Contractions. Sensors 16(8):1304 · 2016 DOI: 10.3390/s16081304 · License: CC BY 4.0 (査読有)
- 4) T Ogawa, T Sato, T Ogata, S Yamamoto, K Nakazawa, N Kawashima: Rhythmic arm swing enhances patterned locomotor-like muscle activity in passively moved lower extremities. Physiological Reports, 3, 2015, DOI: 10.14814/phy2.12317 (査読有)
- 5) K Yaeshima, D Negishi, S Yamamoto, T Ogata, K Nakazawa, N Kawashima: Mechanical and neural changes in plantar-flexor muscles after spinal cord injury in humans. Spinal Cord 53(7), 2015 DOI: 10.1038/sc.2015.9, IF:1.80 (査読有)
- 6) A Azaman, S Yamamoto: Analysis of joint stiffness of human posture in response to balance ability and limited sensory input during dynamic perturbation', Int. J. Experimental and Computational Biomechanics. Vol. 3(2): 83-100, 2015 (査読有)
- 7) M Azuwan, S Yamamoto: Recent Trend in Lower-Limb Robotic Rehabilitation Orthosis: Control Scheme and Strategy for Pneumatic Muscle Actuated Gait Trainers," Robotics, vol. 3 (2014), pp 120-148, MDPI Publishing Corporation, Basel, Switzerland. doi:10.3390/robotics3020120 (査読有)
- 8) F Prattico, M Azuwan, S Yamamoto: Computed-torque method for the control of a 2 DOF orthosis actuated through pneumatic artificial muscles: a specific case for the rehabilitation of the lower limb. Indian Ocean of Science and Technology 2014, ISSN: 2312-1874, 2014 (査読有)
- 9) F Prattico, M Azuwan, S Yamamoto: Couple

- Control Model Implementation on Antagonistic Mono- and Bi-Articular Actuators. Indian Ocean of Science and Technology 2014, ISSN: 2312-1874, Article 3-2014 (査読有)
- 10) A Azaman and S Yamamoto: Ankle Joint Stiffness and Damping Pattern under Different Frequency of Translation Perturbation. Applied Mechanics and Materials 2013, 393: 703-708. (査読有)
 - 11) M Azuwan, S Yamamoto: Design and Evaluation of the AIRGAIT Exoskeleton: Leg Orthosis Control for Assistive Gait Rehabilitation, Journal of Robotics, vol. 2013, Article ID 535106, 20 pages, Hindawi Publishing Corporation, 2013. doi:10.1155/2013/535106. (査読有)
 - 12) M Azuwan, T Nobutomo, S Yamamoto: Development of Gait Training System Powered by Antagonistic Mono-and Bi-Articular Actuators Using Contraction Model Control Scheme, Applied Mechanics and Materials, vol. 393 (2013), pp 525-531, Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.393.525 (査読有)

〔学会発表〕（計 20 件）

- 1) M. Nagai, S. Yamamoto, N. Kawashima: Classification of the Gait Behavior based on Data Obtained from Diverse Patient Populations, 5th International Conference on Biological and Medical Sciences (ICBMS2017), 2017. 8.24.
- 2) T. Sato, S. Yamamoto, N. Kawashima: Gait adaptation during split-belt treadmill walking under mild extent of split-belt speed ratio in patients post stroke, The proceedings of 38th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Orlando, Florida, USA, Aug 18, 2016
- 3) Y. Shimizu, T. Kitamura, S. Yamamoto, N. Kawashima: Real-time coil navigation system for TMS mapping in motor cortex, The proceedings of 38th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Orlando, Florida, USA, Aug 18, 2016
- 4) T.V. Thuc, F. Prattico, M.A.M. Dzahir, S. Yamamoto, A novel Treadmill Body Weight Support System using Pneumatic Muscle Actuators, EMBC 2014, Chicago, USA, 27-30/08/2014.
- 5) 飯村仁一, 川上拓真, 滝口理一, 萩原杜子, 柴田芳幸, 山本紳一郎: 空気圧人工筋を用いた免荷式歩行訓練システムの開発〜リアルタイム計測制御系の構築〜: 第30回バイオエンジニアリング講演会, p90, 京都大学百周年時計台記念館, 2017. 12. 14
- 6) 滝口理一, Tan Van Thuc, Dao Quy Thinh, 川上拓真, 飯村仁一, 萩原杜子, 柴田芳幸, 山本紳一郎: 空気圧人工筋を用いた免荷式歩行訓練システムの開発〜免荷装置を用いた歩行姿勢制御と評

備～：第30回バイオエンジニアリング講演会，
p89 都大学百周年時計台記念館，2017.12.14

7) 萩原杜子，Dao Quy Thinh，Tan Van Thuc，川
上拓真，飯村仁一，滝口理一，柴田芳幸，山本紳
一郎：空気圧人工筋を用いた免荷式歩行訓練シス
テムの開発～動力付下肢装具を用いた関節トルク
の制御～：第30回バイオエンジニアリング講演
会，p91，京都大学百周年時計台記念館，
2017.12.14

8) 黒田明拓，山本紳一郎，非愛知諒，河島則天：
周期的な床面動揺に対する姿勢調節特性：第30
回バイオエンジニアリング講演会，p80，京都大
学百周年時計台記念館，2017.12.14

9) 諫山敦成，山本紳一郎：移動型免荷式歩行訓
練システムの開発：第30回バイオエンジニアリ
ング講演会，p267，京都大学百周年時計台記
念館，2017.12.15

10) 川上拓真，飯村仁一，滝口理一，萩原杜子，
山本紳一郎：アキレス腱張力計測デバイスの開発
と計測方法の検討，LIFE2017，御茶ノ水大学，
2017.9.17

11) 山本紳一郎：ニューロリハビリテーションに
基づく歩行訓練システムの開発．第31回日本酸
化ストレス学会関東支部会，芝浦工業大学豊洲キ
ャンパス，2016.12.17

12) 永井滯，藤尾公哉，山本紳一郎，河島則天：
クラスター分析を用いた加齢/障害に伴う歩行停
滞の分類評価，LIFE2016，東北大学，仙台，
2106.9.6，

13) 佐藤浩司，横山光，山本紳一郎，河島則天：
Split-belt トレッドミルにおける免荷歩行時の運
動学習，LIFE2016，東北大学，仙台，2106.9.6

14) 清水悠功，山本紳一郎，河島則天：大脳皮質
運動野のTMS マッピングを精度高く実現するリア
ルタイムコイルナビゲーションシステムの開発，
LIFE2016，東北大学，仙台，2106.9.6

15) 佐藤浩司，山本紳一郎，河島則天：第55回
日本生体工学会大会，富山，2106.4.27

16) 清水悠功，喜多村拓，山本紳一郎，河島則
天：磁気刺激コイル定位システムを活用した精度
の高い運動野マッピング手法の開発，第28回バ
イオエンジニアリング講演会，東京工業大学大岡
山キャンパス，2016.01.09

17) 吉川知博，瀬谷泰我，M Azuwan，小林亘，柴
田芳幸，山本紳一郎：空気圧人工筋を用いた免荷
式歩行訓練システムの開発～空気圧人工筋の開
発と評価～，第23回ライフサポート学会フロン
ティア講演会，p105，東京理科大学葛飾キャン
パス，2014.2.28

18) 今出亘彦，赤木亮太，山本紳一郎，アキレス
腱張力の非侵襲計測デバイスの開発，第23回ラ
イフサポート学会フロンティア講演会，p45，東
京理科大学葛飾キャンパス，2014.2.28

19) 今出亘彦，原周平，山本紳一郎：アキレス腱
張力の非侵襲計測デバイスの開発と定量的評価：
第26回バイオエンジニアリング講演会，p361-
362，東北大学片平キャンパス，2014.1.12

20) 今出亘彦，原周平，山本紳一郎：アキレス腱
張力の非侵襲計測デバイスの開発：LIFE2013 生
活生命支援医療福祉工学系学会連合大会，p74，

山梨大学，2013.9.4

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 紳一郎 (YAMAMOTO Shin-ichiroh)
芝浦工業大学・システム理工学部・教授
研究者番号：30327762

(2) 連携研究者

- 1) 河島 則天 (KAWASHIMA Noritaka)
国立障害者リハビリセンター研究所・室長
研究者番号：30392195
- 2) 柴田 芳幸 (SHIBATA Yoshiyuki)
都立産業技術高専・ものづくり工学科・准教授
研究者番号：50614319