

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21300202

研究課題名（和文）

ニューロリハビリテーションに着目した水陸両用歩行訓練システムの開発

研究課題名（英文）

Development of amphibious gait training system focused on neuro-rehabilitation

研究代表者

山本 紳一郎 (YAMAMOTO SHINICHIRO)

芝浦工業大学・システム理工学部・教授

研究者番号：30327762

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ヒトと同じ二関節筋を用いた駆動機構を持ち、機能する筋にはアシストしない設定が可能で、できる限り患者自らの筋神経系を使った訓練ができる水陸両用の歩行訓練システムの開発を目指してきた。最終年度には二関節筋モデルの導入による装具フレームの強度不足を解消する再設計・製作を進め、制御システムの改良、さらに独自の空気圧人工筋の開発、ユーザインターフェイス部の開発等を進め、臨床試験実施のための礎を築くことができた。

研究成果の概要（英文）：

The aim of this study is to develop the amphibious gait training system that has a drive mechanism using a bi-articular muscle like human, to function possible, using the neuromuscular system of their own patients as much as possible. We have developed the new brace frame with sufficient strength for using bi-articular muscle model, the new pneumatic artificial muscle, the improved control system, and the user interface system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2012年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：理学療法学

1. 研究開始当初の背景

本研究課題で着目している「ニューロリハビリテーション」（以下、ニューロリハ）とは、脳脊髄神経系に働きかける医学的リハビリテーションであり、特に欧米で進められてきた脊髄損傷者（以下、脊損者）のための免

荷式トレッドミル歩行訓練による多くの研究成果によって認知されてきた(Dietz and 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を

もとに、ヒト脊損者の最初のトレッドミル歩行訓練を最初に試みたことから始まっている (Barbeau et al.: Med Biol Eng Comput 1987, Barbeau and Rossignol: Brain Res 1987, Visintin and Barbeau: Can J Neurol Sci 1989). その後, Wernig らやDietzらも脊損者に免荷式トレッドミル歩行訓練を実施し, 多くの臨床成果をあげるとともに, ヒト脊髄のセントラルパターンジェネレータ (Central Pattern Generator: CPG) に関する生理学的示唆を報告している (Wernig and Müller: Paraplegia 1992, Dietz et al.: Lancet 1994, Ann Neurol 1995). 臨床的な成果の検証は, 数カ所のリハビリテーション病院等の施設において, 国を超えた大きなプロジェクトとして進行している (Wirz et al.: Arch Phys Med Rehabil 2005, Dobkin et al.: Neurorehabil Neural Repair 2007) (日本は含まれていない). 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といったことが可能となる日が近づいている (Buchli et al.: Neurodegener Dis 2007). 欧米で脊損者の免荷式トレッドミル歩行訓練が開始された1990年当初は, 1名の対麻痺 (下半身麻痺) の患者に対して, 2名の補助者 (主として理学療法士) がトレッドミルの両脇足もとに座り, 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, 当時チューリッヒ大学附属バルグリスト脊髄損傷センターに留学していた連携研究者の中澤先生によると15分間程度の訓練で補助者がかなり疲労困憊になっていたようである. さらに, 補助方法の個人差も大きく, 歩容の再現性も良くないという問題点もあった. そのため, 補助者の代わりに補助装置として機

械化 (ロボット化) することが提案され, 研究開発されたのがDriven Gait Orthosis (商品名: LOKOMAT) である (Colombo et al.: J Rehabil Res Dev 2000, Spinal Cord 2001). 現在では, 世界各国で200機以上がリハビリテーション病院等で使用されている. 申請者らは, 科研費基盤研究B (H18-H20) をHOCOMA社CEOのGery Colombo氏の協力のもとに進め, 小柄な日本人用の歩行訓練システムとして現在スイスで開発中の小児用LOKOMATを適用できるように改良することを提案し, 実際に適用できるようにしてきた. しかしながら, LOKOMATは日本で購入すると非常に高価 (約5,000万円) であり, 日本の薬事法にも通っていないことから日本での臨床導入がない (唯一, 国立障害者リハビリセンターが研究用として導入).

一方, 日本では, 水中運動療法 (水治療) が非常に盛んで, 日本各所に温泉療養型のリハビリテーション病院があり, 多くの臨床成果をあげている. 申請者らは, これまで弱重力場である水中における歩行や立位姿勢時のバイオメカニクスのおよび神経生理学的な研究を重ねてきた (Nakazawa et al.: Vestibular and Neural Front 1994, Miyoshi et al.: Disability and Rehabilitation 2003, Clin. Biomech 2005). 陸上では通常, 抗重力筋である下腿三頭筋や大腿四頭筋を使って, 起立, 歩行の運動を行っているが, 弱重力場の水中では, それらの筋群の活動が減少し, ハムストリング (大腿二頭筋等) や前脛骨筋といった屈筋群の活動が増大することが明らかになっている. 申請者らは, 自然の免荷機能を有する水 (温泉) の特性を利用して, 訓練に活用できる安価で手軽な歩行訓練システムが開発されれば, 世界に類のない日本独自の歩行訓練システムが開発できるのではないかと考えた. 日本人が他国と比べて無類の温泉好きであることから患

者のモチベーションの増大となり、さらなる効果を期待できる。事実、今回の申請で研究協力を依頼している山梨県石和温泉にある富士温泉病院の名誉院長である矢野英雄先生の診療する長機滞在型の温泉療養型歩行訓練リハビリテーションでは、全国各地から多くの患者が集まっており、常にほぼ満床の状態である。

2. 研究の目的

以上のことを踏まえ、本研究申請では、水中でも使用可能な空圧式アクチュエータを用いた水陸両用の歩行訓練システムの開発を目指すこととする。申請者らのグループは、すでに空圧式の人工筋肉を用いた歩行訓練装置の研究開発を開始している。長下肢装置を改良し、アクチュエータとして水中でも使用可能な空圧式人工筋肉をヒトの筋の配置と同様に設定（二関節筋モデルを採用）し、麻痺している筋を補助する患者に合わせた補助（アシスト）ができるように検討を進めている(Yamamoto et al.:国際学会発表 2005, 2007)。本研究課題では、このプロトタイプシステムをベースに研究開発を進めていく予定である。脊髄損傷へのロボット工学技術を用いた免荷式歩行訓練の効果は、ニューロリハに着目した多くの論文が報告されているが、より需要が見込まれる脳卒中片麻痺に対する効果は、ニューロリハの観点からの報告は少なく、運動機能や歩行機能が改善されたという報告に留まっている。脳卒中片麻痺者の脳神経系機能がその訓練によってどのように変化したかを明らかにしている報告はほとんどない。本研究課題の歩行訓練システムが開発されれば、脳卒中片麻痺に対するニューロリハの効果をより詳細に検討できるシステムとなる。

3. 研究の方法

本研究課題では、様々な運動機能障害を対象とした汎用的に使用できる水陸両用の歩行訓練システムの開発を目標としている。近年、申請者らは、空圧式人工筋肉を用いた試作機の開発を開始しており、実際に水中に沈めて歩行実験も試行してきた(Yamamoto et al.:国際学会発表 2005, 2007)。しかしながら、これまでの開発では、ハード系・ソフト系の両面において、まだ不十分な開発であった。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進めていく。

具体的な検討課題は、以下の事項であった。

- 1) フレームの材質の選定
- 2) フレーム形状の検討・製作
- 3) 空圧式人工筋肉アクチュエータの選定
- 4) アクチュエータのコネクタ形状・方法の検討
- 5) 4)によって生ずる力学的パラメータ（モーメントアーム等）
- 6) 位置や力、圧力等のセンサの選定・取付の検討
- 7) 6)の情報を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) 症状にあわせた最適な歩行運動学習モデルの検討
- 10) 免荷方法の検討および免荷装置の製作（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) 臨床実験による性能評価

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

本研究申請以前に開発してきた歩行訓練装置は、一般的な長下肢装具をベースに製作してきた。股関節、膝関節の上下にあるフレームにアルミ製のバーを取り付け、そこに人工筋肉を結束していた。人工筋端部をコネクタ用穴に通し、結束バンドによって簡易的にコネクタ用穴に結びつけている機構であったため、時折結束バンドが外れてしまう事態になることがあった。また、モーメントアームを変更しようとしても、結束バンドを切って再度結束する必要があった。したがって、結合部分を頑丈にし、大きな負荷がかかっても外れない機構、さらにモーメントアームの変更など力学的パラメータ変更への対応のための着脱が容易な機構が望まれた。平成 21 年度には、上記の問題点を踏まえたフレーム材質、形状自体からの大幅なハード面の設計変更、仕様変更について検討し、さらに、これまでの陸上用システムでは、上から吊り下げているだけの免荷装置であったので、初年度に免荷量調節が可能で身体重心の上下動に合わせた免荷機構の新たな設計開発に着手した。また、日立メディコ社製人工筋を使用していたが、開発中止となったため、人工筋のカスタマイズができなくなり、独自の人工筋開発を検討し始めた。平成 22 年度には、昨年度に着手した装具部および免荷装置の設計開発および改良を行った。さらに、独自の人工筋開発を進めた。これまでの制御系は、オープンループ制御であったため、詳細な位置制御、もしくは力制御ができなかった。すなわち、歩行速度の変更や各被検者に合わせた歩容変更が全くできない制御系であった。このソフト面も大幅な変更が必要となった。平成 23 年度には、位置や力のセンサの選定・配置、圧力センサの導入等により、単関節筋モデルおよび二関節筋モデルにおいて、圧力制御をベースにフィードバック制御を実現したが、制御系としてはかなり

不完全な内容であり、また装具フレームの強度不足による不具合が生じた。最終年度である平成 24 年度には、二関節筋モデルの導入による装具フレームの強度不足を解消する再設計・製作を進めるとともに、上記の制御システムの改良、さらに独自の空気圧人工筋の開発、ユーザインターフェイス部の開発等を中心に研究を進め、最終的には臨床試験実施のための礎を築くことができた。

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 3 件)

1) H.Ogata, D.G.Sayenko, E.Yamamoto, T.Kitamura, S.Yamamoto, T.Miyoshi,

K.Kamibayashi, K.Nakazawa: Effect of spinal cord injury and its lesion level on stretch reflex modulation by cold stimulation in humans.

Clinical Neurophysiology 122, 163–170, 2011 (査読有)

2) 柴田芳幸, 三好扶, 山本紳一郎, 空気圧人工筋を用いた免荷歩行訓練装置の開発～拮抗二関節筋と拮抗単関節筋のフィードバック制御～, 生体医工学, 48, 2, 175-180, 2010 (査読有)

3) Y.Shibata, S.Imai, T.Nobutomo, T.Miyoshi, S.Yamamoto: Development of Body Weight

Support Gait Training System using Antagonistic Bi-articular Muscle Model, The proceedings of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp4468-4471, 2010 (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

1) M.Azuwan, S.Yamamoto: Antagonistic Mono- and Bi-articular Actuators Contraction Model for Body Weight Support Gait Training System. The 7th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. Bungdung, Indonesia, 2013.3.4

- 2) M.Azuwan, S.Yamamoto: Antagonistic Mono- and Bi-Articular Pneumatic Muscle Actuator Control for Gait Training System using Contraction Model. The 4th IEEE BIOSIGNALS AND ROBOTICS. Rio de Janeiro, Brazil, 2013.2.20
- 3) M.Azuwan, S.Yamamoto: Pneumatic Muscle Actuator Kinematic Analysis for Bi-Articular Muscle of Lower Limb AIRGAIT Orthosis San Diego, USA, 2012.8.30
- 4) Y. Shibata, S. Imai, T. Nobutomo, T. Miyoshi, S. Yamamoto: Development of Body Weight Support Gait Training System using Antagonistic Bi-articular Muscle Model, The 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp4468-4471, 2010.9.2

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 紳一郎 (YAMAMOTO SHINICHIRO)
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

中澤 公孝 (NAKAZAWA KIMITAKA)
東京大学・総合文化研究科・教授
研究者番号：90360677
門田 宏 (KADOTA HIROSHI)
高知工科大学・総合研究所・講師
研究者番号：00415366