

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2006 年度～2008 年度  
 課題番号：18300185  
 研究課題名 (和文) ロボット型免荷式歩行訓練システムの開発  
 研究課題名 (英文) Development of robotic gait training system with weight bearing  
 研究代表者 山本 紳一郎 (YAMAMOTO SHINICHIRO)  
 芝浦工業大学・システム工学部・准教授  
 研究者番号：30327762

## 研究成果の概要：

本研究課題では、1) LOKOMAT のハードウェアおよびソフトウェアを日本人用に開発すること、2) 制御対象となっていない足関節トルクに着目し、足関節トルクを自在に制御できるシステムを開発し、新たに足関節スティフネスを調節する訓練システムを提案すること、3) 対麻痺者や片麻痺者などの運動機能障害者に適用し、実際の臨床的效果を検討することが主たる目標であった。おおむね目標は達成したが、3) の有用な臨床的效果を検討するまでには至らなかった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2007 年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2008 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

## 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：運動療法学

## 1. 研究開始当初の背景

日本では脊髄損傷が毎年 5000 人以上発生しており、のべ 20 万人以上が対麻痺を抱えて生活している。対麻痺の程度は、損傷した脊髄レベルや完全麻痺か不全かによって異なるが、下肢もしくは四肢麻痺となり、多くの場合、車いす生活を余儀なくされる。これまでは、その障害を一生涯、“受容”しなければならず、大きな精神的苦痛を乗り越えなければならなかった。しかしながら、90 年代前半からの欧米の研究で早期リハビリテーション訓練として脊髄損傷者歩行訓練が行われるようになり、特に不全麻痺者への効果が著しく、立位歩行が可能になる割合

が格段に高まった。その先駆的な研究を始めたのが、カナダの Barbeau ら、ドイツの Wernig らやスイスの Dietz らである。Wernig ら (1995) は、不全麻痺者の 80～90% が自立歩行 (杖や歩行器含む) の再獲得に成功している (従来の方法では 10～40% 程度)。この訓練は、トレッドミル上で体重を免荷し、理学療法士 2 名以上で受動的に両脚を歩行様に動かす訓練であった。この訓練理論は、神経生理学分野における脊髄ネコの動物実験で証明されてきたセントラルパタージェネレータ (CPG) と様々な脊髄反射回路の可塑性が根底にある。Dietz ら (1994, 1995) は、この免荷式トレッドミル歩行訓練を縦断的

に研究した結果、下肢筋群に生じる筋活動が増幅されると同時に、そのパターンが徐々に健常者の歩行時のパターンと類似することを発見し、筋活動の増幅と活動パターン (co-ordination) の改善という神経筋系の適応変化が起こることを明らかにした。これは、動物実験で明らかになっている脊髄中枢の可塑性の存在を支持する結果であり、この訓練理論を裏付けるエビデンスとなった。

しかしながら、日本では、積極的にこの訓練が取り入れられていないのが現状である。これまでなぜ日本のリハビリテーション研究者がこのリハビリテーション技術の導入できなかったのは、保険点数にさえられないことと、理学療法士への啓蒙不足、さらには患者の“受容”の妨げと考えられてきたことが主な理由として考えられる。事実、先駆的に行ってきた前述した Dietz 教授のスイス・チューリッヒ大学附属病院バルグリスト脊髄損傷センター研究所 (以下、バルグリスト脊損研究所) のグループでも、この免荷式歩行訓練開始当初 (1990 年代前半) では、理学療法士の体力的な問題で 15 分間程度しか継続できなかった。このような背景から、バルグリスト脊髄損傷センター研究所およびチューリッヒ工科大学の共同研究プロジェクトによって、1996 年からトレッドミル免荷式ロボット型歩行訓練システムの開発が進められたのである。

元来、この免荷式歩行訓練は、Hesse らのグループによる 90 年代後半の脳卒中片麻痺にも効果を示す報告がいくつかあったが、脊髄損傷者ほどの明らかな効果ではなかった。しかしながら、現在、LOKOMAT プロジェクトチームでは、効果的なバイオフィードバックのシステムの開発研究を進めており (例: 患者が発揮している力などを表示して目標値を提示する)、これが開発されると、片麻痺者にもより大きな効果が期待できるようになる。もし片麻痺者にも十分な効果があるのであれば、日本では 200 万人近い患者が対象となる。すなわち、この歩行訓練システムがこれまでの脳卒中後のリハビリテーションプログラムをブレイクスルーする可能性も秘めている。さらには、不完全脊髄損傷者にとっても歩行訓練しながら居眠りする (大脳皮質を使わない) こともなくなり、脊髄中枢のニューラルネットワークの再構築だけでなく、大脳皮質系の活性化も期待できる。また、近年、同じチューリッヒ工科大学の Schwab のグループらにみられるような神経細胞の結合技術の研究が世界各国で盛んに行われるようになった。もしヒトで実現すれば、完全損傷者も神経結合し、免荷歩行訓練を行うことにより、歩行の再獲得に期待が持てるようになる。

この LOKOMAT 訓練を国際共同研究として進

めることによって、すでにスイスのチューリッヒ、バーゼルやアメリカのシカゴなどのリハビリテーションセンターで得られている豊富な臨床データを使って日本人用のシステムを開発できる。日本でもいくつかロボット型歩行訓練装置の開発計画が進められているが、この LOKOMAT ほど世界各国に臨床データを豊富に持っている開発研究は、皆無である。しかしながら、LOKOMAT もまだ開発途上にあり、免荷機構や装具およびトレッドミルの細部にわたる多くの問題点が指摘されており、継続して開発研究が続けられている。

## 2. 研究の目的

本研究プロジェクトでは、この LOKOMAT を日本に導入して、日本人用のハードウェアおよびソフトウェアの開発だけでなく、生理学的研究のエビデンスに基づく訓練システムおよびプログラムの開発を目指し、国際共同研究として進める。現に、その第一号として、国立障害者リハビリテーションセンター研究所へ導入された。本研究では、そのプロトタイプを使って、開発研究を進めることができた。

本研究では、3 年間の期間内に以下のこと目標とした。

- 1) LOKOMAT のハードウェアおよびソフトウェアを日本人用に開発すること。
- 2) 昨年度まで研究代表者が LOKOMAT プロジェクトチームの一員としてバルグリスト脊髄損傷研究所にて開始した足関節トルクに着目した研究を継続して行い、新たな足関節ステイフネスを調節する訓練システムを開発すること。
- 3) 日本の対麻痺者、片麻痺者の LOKOMAT での臨床的効果を明らかにすること。
- 4) 日本の対麻痺者、片麻痺者の LOKOMAT 歩行訓練のデータベースを作成し、今後の臨床歩行訓練の一助となること。

## 3. 研究の方法

研究目標 1) において、LOKOMAT のハードウェアおよびソフトウェアを日本人用に開発することが必要となることには、いくつかの理由があった。この国リハ研究所に導入された LOKOMAT は、特に日本人の障害を持った高齢者にとって使用できる身体的特性が仕様から外れていた。スイスで開発された LOKOMAT の設計仕様では 150cm 以上というコンセプトであったが、実際に身長が 150cm 台の日本人だとかなり不具合を生じるのが現状であり、160cm 台でもいくつかの不具合が生じる。逆に大きい分には 200cm 以上であっても問題ない。問題は、日本人 (特に高齢者) の下肢長であり、装具および固定用カフが大きすぎて、うまく回転中心にモータの回転軸を設定できなかったり、内腿でカフがぶ

つかったりする。また、免荷用に使用するハーネスのサイズも大きすぎる。ちなみに、現在、175cmの研究代表者が被検者として行う場合、使用しているハーネスは一番小さいSサイズである。ソフトウェアについては、日本語版の製作が望まれる。というのも、使用者の問題だけでなく、バイオフィードバックで、患者にもモニターを見せて、わかりやすく情報を表示する工夫が今後必要となることから、ソフトウェアの日本仕様も必要であると考えた。日本人の対麻痺者および片麻痺者の身長、体重、下肢長などの身体的特性についての調査から開始した。その後、現行のLOKOMATをどのように仕様変更すれば、日本人の障害者が使用可能になるか人間工学的に検討する。具体的には、モータ回転軸の調整方法、大腿・下腿を固定するカフの形状および大きさ、カフの固定デバイスのメモリ位置の変更、ハーネスの形状および大きさなどについて、詳細に検討した。ソフトウェアについては、現行のドイツ語および英語版のソフトウェアの日本語版を作成し、稼働できるようにした。また、日本人にわかりやすいバイオフィードバック方法について検討し、ソフトウェアの開発を行った。

これらのハードウェアやソフトウェアの設計・開発は、研究代表者と分担研究者(H20以降連携研究者)である米田教授が担当した。平成17年度中に日本人仕様のためのハードウェア変更内容をまとめて、研究分担者らとともにスイス・バルグリスト脊損研究所およびHOCOMA社において、これらの変更点について打ち合わせを行い、平成19年度中に日本人仕様のハードウェア製作を開始した。足関節スティフネスを調節できる機構の開発は、平成16年度から研究代表者が予備研究をスイス・バルグリスト脊損研究所で行ってきたので、そのデータをもとに、日本で使用できる計測デバイスを設計、開発した。生理学的な訓練理論からすると、アキレス腱にかかる張力の求心性入力が脊髄中枢への入力刺激に重要だと仮説が立てられており(Dietz and Herkema 2004)、その調節機構を開発することでより効率的な訓練システムにできると考えられる。また、常に足関節トルクを簡便に計測できる方法を考案し、訓練システムに組み込むことを目指した。平成16年当時、バルグリスト脊損研究所で予備実験時に使用していたのは、足関節背屈用パネ付きストラップに小さなロードセルを取り付けた計測デバイスであったが、ストラップが緩んでいないときの底背屈トルクは計測できても、緩んでしまうと計測できない欠点があった。すなわち、一歩行周期の間に必ずトルクが計測できない局面があった。この点を解決する方法を検討した。

#### 4. 研究成果

国リハ研究所でLOKOMATがすでに稼働できる状態にあり、科研費補助金の採用決定と同時に研究を開始できた。導入されたLOKOMATでは、欧米人の体型にあわせた設計であるため、特に日本人の障害者を持った高齢者の身体的特性が仕様から外れていた。日本人仕様にするため、開発元であるスイス・HOCOMA社のCEOであるGery Colombo氏に協力を要請し、その対策を検討した。その結果、HOCOMA社で開発中である小児障害者用のデバイスを日本人用に適用できるのではないかと結論となったが、本研究の予算では購入不可能であるため、今後、他の研究費の獲得によって、小児用デバイスを導入することを目指すこととなった。しかしながら、以降、そのための研究助成金の採択は得られなかった。今後もさらなる研究費の獲得を目指して、様々な研究助成に応募していく予定である。また、日本人用ソフトウェアの開発のため、HOCOMA社からユーザインターフェイス部(GUI)のソフトウェア提供の協力を得ることができたので、それをもとにGUIを改良した。並行して、足関節スティフネスの調節機構および反射計測装置の開発を行った。H16年度から予備研究をスイス・バルグリスト脊損センター研究所で行ってきたので、その基礎データをもとに、日本で使用できる計測デバイスを設計、開発を進めた。また、生理学的な訓練理論より、アキレス腱にかかる張力の求心性入力が入力が脊髄中枢への重要な指標であることから、アキレス腱にかかる張力を簡便に計測できる方法を開発することに着手した。これらの計測デバイスを訓練システムに組み込むことを目指した。最終的には、以下の研究目標別の研究成果をあげることができた。

研究目標1)は、LOKOMATのハードウェアおよびソフトウェアを日本人用に開発することであった。スイスHOCOMA社との打合せで、ハードウェアの日本人仕様の変更は、現在開発中の小児用ロコマットの導入で日本人の体格をカバーできることが確認されており、次年度以降の導入を目指すこととなったが、本研究予算では購入不可能であるため、今後他の研究費の獲得によって、小児用デバイスを導入することを目指すこととなった。ソフトウェアの日本語化は、昨年度、HOCOMA社からグラフィカル・ユーザー・インターフェイス(GUI)の提供を受けて開発した。

研究目標2)は、制御対象となっていない足関節トルクに着目し、足関節トルクを自在に制御できるシステムを開発し、新たに足関節スティフネスを調節する訓練システムを提案することであった。足関節スティフネスの調節機構および反射計測装置の開発を進め、いくつかの課題が残るもののプロトタイプを開発し試行した。生理学的な訓練理論より、アキレス腱にかかる張力の求心性入力が入力が脊髄中枢への重要な指標であることから、アキレス腱にかかる張力を簡便に計測できる

方法を開発した。今後はこれらの計測デバイスを訓練システムに組み込むことを目指す。研究目標3)4)では、対麻痺者や片麻痺者などの運動機能障害者に適用し、実際の臨床的効果を検討することが主たる目標であったが、健常成人に試行するに留まり、その目標達成は実現できなかった。

#### 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1件)

① 笹川直人, 三好扶, 山本紳一郎: 逆説的筋線維長動態とヒト身体重心位置との関係性, 生体医工学 (掲載予定) 2009, 査読有

[学会発表] (計16件)

① Yamamoto S, Shimizu C, Yamamoto H, Miyoshi T, Koyama H, Komeda T: Different contraction pattern of lower leg muscle fiber between swaying and tiptoe standing in human upright posture. 4th EMBEC 2008.11.25, Antwerp, Belgium

② Sasagawa N, Miyoshi T, Yamamoto S: Change of muscle fiber length in vivo during walking as revealed by ultrasound images 4th EMBEC 2008.11.25, Antwerp, Belgium

③ Shibata Y, Takagi M, Miyoshi T, Aoyama R, Yamamoto S, Kawakami Y: Development of gait training system using bi-articular muscle model. 7th IFPS International Symposium on Fluid Power 2008.9.16 Toyama, Japan

④ 齋藤広枝, 内川岳人, 笹川直人, 小山浩幸, 山本紳一郎: アキレス腱の張力計測デバイスの開発, ライフサポート学会, 人と福祉を支える技術フォーラム 2009, 2009.2.28, 東京

⑤ 伊藤良, 門田宏, 山田和俊, 三好扶, 山本紳一郎: 超音波画像を用いた足関節筋群の伸張反射感受性の評価, ライフサポート学会, 人と福祉を支える技術フォーラム 2009, 2009.2.28, 東京

⑥ 室井昌紀, 山田和俊, 喜多村拓, 青山亮太, 山本紳一郎: ヒト立位時の姿勢反射計測システムの開発, ライフサポート学会, 人と福祉を支える技術フォーラム 2009, 2009.2.28, 東京

⑦ 島田佳世子, 山田和俊, 門田宏, 加藤智久, 山本紳一郎: ヒト立位時の振動刺激に対する姿勢変調の計測および評価, ライフサポート学会, 人と福祉を支える技術フォーラム 2009, 2009.2.28, 東京

⑧ 猿渡穂高, 門田宏, 山田和俊, 喜多村拓, 山本紳一郎: ヒト歩行時の姿勢反射計測システムの開発, ライフサポート学会, 人と福祉を支える技術フォーラム 2009, 2009.2.28, 東京

⑨ 笹川直人, 三好扶, 小山浩幸, 米田隆志, 山本紳一郎: 超音波画像を用いた運動時下腿筋線維長生体内計測, ライフサポート学会, 人と福祉を支える技術フォーラム 2009, 2009.2.28, 東京

⑩ 山本紳一郎, 西井崇浩, 三好扶, 中澤公孝, 赤居正美, 齋藤英朗: 脊損者歩行訓練のための計測デバイスの開発, 第47回日本生体医工学会大会, 2008.5.8, 神戸

⑪ 中島剛, 上林清孝, 喜多村拓, 赤居正美, 山本紳一郎, 中澤公孝: 歩行時の末梢感覚入力が手関節屈筋H反射に与える影響, 第47回日本生体医工学会大会, 2008.5.8, 神戸

⑫ 喜多村拓, 山本紳一郎 他4名: 手関節屈筋H-反射に対する受動ステップの影響, 第20回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2008.1.25, 東京

⑬ 藤田雅子, 山本紳一郎 他5名: 歩行中のヒラメ筋H反射変調の機序, 第20回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2008.1.25, 東京

⑭ 齋藤英朗, 山本紳一郎 他1名: ヒト歩行時の伸張反射計測システムの開発, 第20回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2008.1.25, 東京

⑮ 藤田雅子, 山本紳一郎 他5名: 歩行中のヒラメ筋H反射変調における体性感覚の影響, ライフサポート学会, 人と福祉を支える技術フォーラム 2008, 2008.3.1, 東京

⑯ 西井崇浩, 山本紳一郎 他2名: アキレス腱の張力計測デバイスの開発, ライフサポート学会, 人と福祉を支える技術フォーラム 2008, 2008.3.1, 東京

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・システム工学部・生命科学

科・准教授

研究者番号：30327762

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

米田 隆志(KOMEDA TAKASHI)

芝浦工業大学システム工学部機械制御シ

ステム学科・教授

研究者番号：90011030

赤居 正美(AKAI MAMI)

国立障害者リハビリテーションセンタ

ー・病院長

研究者番号：80143452

中澤 公孝(NAKAZAWA KIMITAKA)

国立障害者リハビリテーションセンタ

ー・研究所・部長

研究者番号：90360677