

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02122

研究課題名(和文) 個々の運動学習特性に適したバイオフィードバックシステム構築とリハビリ機器への応用

研究課題名(英文) Development of Biofeedback Application for Several Rehabilitation Systems
Adapted by Individual Motor Learning Property

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) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では訓練者のモチベーションを無知覚・無意識(インプリシット)に高められるバイオフィードバック機能の創成を目標とした。リアルタイムに視覚・体性感覚フィードバックをしつつ、個々の訓練に適した歩行・立位姿勢訓練システムの開発を目指した。開発した歩行・立位姿勢訓練システムにおいて、インプリシットな至適訓練手法を確立し評価した。また、免荷式歩行訓練システムのバイオフィードバックシステムを開発し、下肢動作をアシストする装具部と体重を軽減する免荷部において、様々なパラメータをフィードバックできるシステムを組み込んだ。最終的には、研究目標は完全には達成できなかったが、目標達成に向けた道筋ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の目的は、障害者や高齢者の訓練モチベーションを無知覚・無意識(インプリシット)に高められる新たなバイオフィードバックシステムを歩行・立位姿勢訓練システムに組み込むことであった。そのプロトタイプは組み込むことができた。また最終的な開発目標が達成できたわけではないが、そのマイルストーンは得られたのではないかと思われる。将来的にテーラーメイドなリハビリ訓練処方が可能となれば、臨床的にも大いに意義ある研究成果となるのではないかと思われる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research thesis is to develop the biofeedback system that the subject's motivation made implicitly. This research project aimed at the development of the gait & standing posture training system suitable for individual property in real time. We have developed and evaluated the optimum training method in the gait & standing posture training system. In addition, we have developed the biofeedback system of various parameters in unloading gait training system. The final aim of this research project was not achieved completely, but we have gotten some milestones for the final achievement.

研究分野：リハビリテーション工学

キーワード：ニューロリハビリテーション 視覚フィードバック バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

日本では死因としての脳卒中は減少しているが、脳卒中片麻痺者は年間約30万人ずつ増加し、300万人以上と推定されている。高齢片麻痺者がますます増加し、今後訓練を支えるセラピスト不足が懸念される。これは世界各国同様傾向であり大きな国際問題である。それゆえ近年のリハビリ工学研究ではロボット技術を用いた訓練システムの開発研究が非常に多い。しかしながら、ロボット訓練では患者のモチベーション維持が難しく、その効果を疑問視する研究報告も多い。免荷式トレッドミル歩行訓練は、特に欧米での脊損者用訓練の成果として広く認知されてきた(Dietz ら: 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結果に基づくヒト脊損者の免荷式歩行訓練を最初に試みたことから始まり(Barbeau ら: Brain Res 1987, Can J Neurol Sci 1989)、その後 Wernig らや Dietz らも脊損者の免荷式歩行訓練の臨床成果からヒト脊髄の Central Pattern Generator(以下,CPG)に関する神経生理学的示唆を報告した(Wernig ら: Paraplegia 1992, Dietz ら: Lancet 1994)。また、再生医療の発展も著しく、脊損者の神経再生後の歩行機能再獲得を目指した研究プロジェクトも進められた(Buchli ら: Neurodegener Dis 2007)。日本でも大阪大学や慶応大学の研究グループが薬理的処理や iPS 細胞等を用いた再生医療による脊損治療に取り組みつつある。

欧米で免荷式歩行訓練を最初にロボット化したのが LOKOMAT であり(Colombo ら: J Rehabil Res Dev 2000)、現在では世界各国で1000機以上が使用されている(日本では国立リハに1台のみ導入)。日本でも LOKOMAT とは異なる様々な歩行訓練装置が開発(一部商品化)されている。しかしながら、世界各国における臨床研究からロボット歩行訓練の効果を疑問視する報告も多い(Hornby ら: Stroke 2008, Westlake ら: J Neuro Eng Rehab 2009)。これらの報告では、ロボットにより麻痺肢を受動運動させると、患者の随意運動が低下するだけでなくモチベーションも下がり、訓練効果が小さいことを示唆している。また、個々人の運動機能障害者の麻痺が個々の筋で異なるため、患者の随意運動を最大限に引き出すには麻痺筋に合わせた最小限のアシストにする必要があると考える。しかしながら、多くの歩行訓練装置はモータを各関節軸につけているため、個々の麻痺筋の程度に合わせたアシストができない。特に関節トルクのパワーを効果的に末端へ伝達し、スムーズな運動を実現する役割をもつ二関節筋を考慮した開発研究はない。これらの点を踏まえ、申請者らは二関節筋を含むヒト骨格筋配置と同様な空気圧人工筋による免荷式歩行訓練システムを提唱し、麻痺筋の程度に合わせたアシストができるシステム AirGait を開発してきた(H25~30:基盤研究 B)。しかしながら、麻痺筋毎のアシストであっても、訓練者のモチベーション維持には結びつかない。したがって、本研究課題で最も困難となる「学術的問い」はヒト個々人のモチベーションを失わないための至適な訓練方法が確立できるかどうかである。誰しも訓練ではどうしても楽な運動手段を選んでしまいがちで、運動機能障害者であれば、モチベーションが高くないと麻痺筋を使おうとする努力はしない。LOKOMAT にしても申請者らの開発した AirGait にしてもこの点が最も大きな課題である。

近年の Kim ら(Front Hum Neurosci 2018, Ann Biomed Eng 2018)の報告では、異なる歩幅を視覚フィードバックさせることにより無知覚・無意識(インプリシット)に訓練効果

を向上でき、目標値に合わせる指示をしなくてもフィードバック情報の操作することでインプリシットな訓練効果が期待できることを示唆した。これらは申請者らの違う条件での追実験でも明らかになっている。この原理を用いれば、本研究課題の「学術的問い」を克服する一助になるのではないかと考えた。申請者ら(櫻田ら 2018, Sakurada ら 2019)は、片麻痺者や健常者によって運動学習を促進させる最適な注意の向け方(内的 or 外的:自身の身体の動き or 目標物)が個々人で異なることを脳活動計測から明らかにした。これらの研究をもとに、本研究課題で開発するシステムによって訓練者個々人の最適なバイオフィードバックパラメータを見出すことができれば、訓練者がインプリシットな状況でモチベーションを低下させず、より訓練効果を高められる歩行訓練システムの開発ができるのではないかと考えた。

一方で、これまで申請者らは上記歩行訓練システムとは別に6自由度可動できるモーションベースを用いて立位姿勢に動的な外乱を加えて姿勢評価するとともにバランス訓練ができるシステムも並行して開発してきた。このシステムにもインプリシットな訓練効果が得られる個々人の最適なバイオフィードバックパラメータを見出すシステムを組み込むことができるのではないかと考えた。

これまで内外で開発されてきた免荷式トレッドミル歩行訓練装置やウエアラブルな歩行訓練装置では、歩行速度やアシスト強度の設定は、訓練を処方する医師や理学療法士(PT)の経験によって主観的に決定されている。歩行速度や免荷量、アシスト強度等を個々の訓練者に応じて客観的に最適化することは未だできておらず、今なおきちんとした客観的定義がないといえる。

2. 研究の目的

研究背景を踏まえて、本研究課題では、個々の障害者・高齢者の運動学習特性に合わせた最適な視覚・体性感覚等のバイオフィードバックを見出すシステムの開発により、学術的問いである個々人のモチベーションを最大限に引き出す至適な訓練方法を確立し、歩行・立位姿勢訓練システムに組み込むことを目指した。麻痺程度に応じた最適歩行速度(左右差含む)や麻痺筋へのアシスト強度の設定、最適な注意の向け方(運動学習特性)の客観的な同定による個々の訓練者に最適なりハビリ訓練処方を見出し、様々なリアルタイムでインプリシットなバイオフィードバックシステムを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本システムは、3次元動作解析や床反力計付きトレッドミル、床反力計付6軸モーションベースや装具・アクチュエータに装着される様々なセンサ類(力覚、位置、圧力等)および生体信号としての脳血流、脳波、筋電図(EMG)等によって多くのパラメータのリアルタイムなフィードバックを実現させるが、提示方法としてバーチャルリアリティ(VR)や拡張現実(AR)の実装も検討し、より訓練効果を高めることができるシステム開発を行った。

本研究では、4年間の期間内に以下の項目を実現することを目指した。

1. 歩行訓練および立位姿勢訓練用のリアルタイムな動作解析とバイオフィードバックシステムの開発

個々人に最適なフィードバック方法を検討し、随時必要なパラメータをフィード

バックできるシステムとするため、3次元動作解析システムおよび床反力計付トレッドミルにより、歩行動作のリアルタイム解析を行い、重心位置や歩幅、ケーデンス、各身体部位の位置や角度、視線等の様々なパラメータをフィードバックできるシステムを開発した。また、VRやARを用いたアバターや目標物の提示方法も検討した。

立位姿勢訓練では、3次元動作解析システムおよび床反力計付6軸モーションベースにより、立位姿勢のリアルタイム解析を行い、重心位置や各身体部位の位置や角度、視線等の様々なパラメータをフィードバックできるシステムを開発した。

2. インプリシットな至適訓練手法の開発と評価

上記1のフィードバックシステムを用いて、訓練者にどのように操作してバイオフィードバックすれば、訓練効果が高まるか検討した。具体的には、歩幅をモニターでのグラフやVRでのアバター ARでの足跡の情報としてフィードバックした場合、あえて実際とは異なる情報（狭い歩幅）を提示し、より歩幅を大きくするように操作し、その効果を検討した。歩幅でなくても、何らかのモチベーションが高まる目標物を設ける等、様々なフィードバック方法が考えられ、どのような手法が訓練に効果的か検討した。また、立位姿勢では、重心位置を前後に揺らす外乱を与えるとともに、立位姿勢をより動揺させるような床面傾斜を与えた時のインプリシットな条件とエキスプリシットな条件を比較し、その効果を検討した。最終的には様々なバイオフィードバック訓練方法を取り入れた歩行・立位訓練システムの開発を目指した。

3. 免荷式歩行訓練システムAirGaitのバイオフィードバックシステムの開発

AirGait は、上記 1~2 とは別にヒトの下肢動作をアシストする装具部と体重を軽減する免荷部で構成されており、それらの持つセンサ情報から多くのパラメータを制御システムに利用しているが、それらの情報をバイオフィードバックできていなかった。上記 1~2 の成果と連携し、バイオフィードバックできるシステムに改良した。装具部では、訓練者が発揮した個々の筋力をバイオフィードバックさせ、より麻痺筋の貢献度をあげるように随意的に努力できる提示方法を検討した。また、免荷部では、免荷量を一定にするのではなく、様々な免荷量に動揺させ、徐々に負荷をかける等、リアルタイムに負荷を可変できるシステムとした。

4. 研究成果

1. 歩行訓練および立位姿勢訓練用のリアルタイムな動作解析とバイオフィードバックシステムの開発

3次元動作解析と床反力計付きダブルベルトトレッドミルを用いて、歩行動作のリアルタイム解析を行い、訓練者のアバター動作と足跡ターゲットをバイオフィードバック提示するシステムを開発した。また、3次元動作解析と床反力計付き6軸モーションベースを用いて、立位姿勢外乱印加時の姿勢動揺のリアルタイム解析を行い、バイオフィードバックできるシステムを開発した。

2. インプリシットな至適訓練手法の開発と評価

上記1のシステムにおいて、インプリシットおよびエキスプリシットなバイオフィードバックによる訓練効果を検討した。

歩行訓練システムでは、前方スクリーンにVRによるアバターとターゲット足跡を視覚フ

ィードバックさせ、インプリシット条件では歩幅を操作していることを知覚させず、エクスプリシット条件では歩幅を操作していることを知覚させ、その効果を比較検討した。その結果、インプリシット条件では、後効果が有意に高まることが示唆された。

立位姿勢訓練システムでは、インプリシットおよびエクスプリシットな床面傾斜状況で、前後方向への外乱を与えた時の姿勢動揺について、比較検討した。その結果、インプリシット条件では、エクスプリシット条件より外乱に対して有意に大きく姿勢動揺することが明らかになった。

3. 免荷式歩行訓練システム AirGait のバイオフィードバックシステムの開発

下肢動作をアシストする装具部と体重を軽減する免荷部において、様々なパラメータをフィードバックできるシステムを開発した。装具部では、訓練者の個々の筋力をフィードバックさせ、より麻痺筋の貢献度をあげるように随意的に努力できる提示方法を開発した。さらに麻痺が軽い筋には、アシストしない運動処方ができるファジー制御モードを組み込んだ。また免荷部では、歩行フェイズに合わせて免荷量を操作し、歩幅を広げたり狭めたりする介入ができるシステムを構築した。

上記の研究成果から、研究の最終目標としては、完全には達成できなかったといえるが、今後の目標達成に向けたある程度の道筋ができたと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Sakurada Takeshi、Matsumoto Mayuko、Yamamoto Shin-ichiroh | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Individual Sensory Modality Dominance as an Influential Factor in the Prefrontal Neurofeedback Training for Spatial Processing: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Systems Neuroscience | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnsys.2022.774475 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Seiji Matsumura, Ken Ohta, Shin-ichiroh Yamamoto, Yasuharu Koike and Toshitaka Kimura | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 Comfortable and Convenient Turning Skill Assessment for Alpine Skiers Using IMU and Plantar Pressure Distribution Sensors | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Sensors | 6. 最初と最後の頁 834 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s21030834 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Dzahir, Mohd Azuwan Mat, Yamamoto, Shin-ichiroh | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Inverse Modeling of Nonlinear Artificial Muscle Using Polynomial Parameterization and Particle Swarm Optimization | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Advances in Materials Science and Engineering | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2020/8189157 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Mayuko Matsumoto, Takeshi Sakurada, Shin-ichiroh Yamamoto | 4. 巻 15(8) |
| 2. 論文標題 Distinct bilateral prefrontal activity patterns associated with individual modality dominance in working memory during sequential motor learning | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Plos One | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0238235 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 Van-Thuc Tran, Sasaki Kota, Yamamoto Shin-ichiroh | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Influence of Body Weight Support Systems on the Abnormal Gait Kinematic | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 APPLIED SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 4685 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10134685 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |

[学会発表] 計18件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 木村翔, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 Split-belt Treadmillによるインプリントな介入が歩行適応に与える影響 |
| 3. 学会等名 第33回ライフサポート学会フロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 萬澤連, Vu Thuy Nguyen, 柴田芳幸, 櫻田武, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 空気圧人工筋を用いた免荷式歩行訓練システムの開発～体幹姿勢制御機構の開発と評価～ |
| 3. 学会等名 第33回ライフサポート学会フロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 保坂岳道, 柴田芳幸, 櫻田武, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 視覚フィードバックを活用し無意識下に歩行に介入した場合の効果の検証 |
| 3. 学会等名 LIFE2023 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 横山翔, 志水宏太郎, 山本紳一郎, 河島則天 |
| 2. 発表標題 円軌跡到達動作を用いた上肢運動機能障害者の新しい評価方法の考案 |
| 3. 学会等名 LIFE2023 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大久保幸香, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 確率共振を用いた前庭器への電気刺激による立位姿勢制御の変化 |
| 3. 学会等名 LIFE2023 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 鷺谷健悟, Vu Thuy Nguyen, 柴田芳幸, 櫻田武, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 空気圧人工筋を用いた歩行リハビリ用ロボット装具の開発 |
| 3. 学会等名 LIFE2023 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤秀亮, 山本紳一郎, Nur Fatin Fatina Binti Mohd Ramli |
| 2. 発表標題 確立共振を利用した白杖使用時の立位バランス機能向上に関する研究 |
| 3. 学会等名 第31回ライフサポート学会フロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 温井崇仁, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 確立共振を利用した手指触覚向上システムの開発 |
| 3. 学会等名 第31回ライフサポート学会フロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 宮田朋実, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 非侵襲型アキレス腱張力計測デバイスの開発 |
| 3. 学会等名 第31回ライフサポート学会フロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 保坂岳道, 中村謙介, 佐々木滉大, 神山智輝, Vu Thuy Nguyen, 柴田芳幸, 櫻田武, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 アバターを用いた歩行訓練用視覚フィードバックシステムの開発 |
| 3. 学会等名 第31回ライフサポート学会フロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 涌井萌, Nur Fatin Fatina Binti Mohd Ramli, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 インプリシットな床面状態の変化が立位姿勢制御に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 第36回ライフサポート学会大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 吉崎文崇, 赤木亮太, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 非侵襲型計測デバイスを用いた歩行中におけるアキレス腱力学的特性の推定 |
| 3. 学会等名 第30回ライフサポート学会フロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 峰岸春菜, 柴田芳幸, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 アバターを用いた歩行訓練用視覚フィードバックシステムの開発及び評価 |
| 3. 学会等名 第30回ライフサポート学会フロンティア講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石崎里紗, 櫻田武, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 学童期・青年期における運動歴を背景とした個人の注意適正 |
| 3. 学会等名 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉崎文崇, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 非侵襲計測デバイスを用いた歩行中のアキレス腱張力の推定 |
| 3. 学会等名 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 峰岸春菜, 柴田芳幸, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 歩行訓練における視覚フィードバックシステムの評価 |
| 3. 学会等名 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 萩原悠太, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 確率共振を利用した手のリハビリテーションシステムの開発 |
| 3. 学会等名 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石崎里紗, 櫻田武, 山本紳一郎 |
| 2. 発表標題 学童期・青年期のスポーツ経験に基づく個々の注意機能形成の可能性 |
| 3. 学会等名 第35回 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 櫻田 武 (Sakurada Takeshi) (40588802) | 成蹊大学・理工学部・准教授 (32629) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 柴田 芳幸 (Shibata Yoshiyuki) (50614319) | 東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授 (52605) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |