

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K24324

研究課題名（和文）新規歩行パターンの学習における筋協調システムの形成機序の解明

研究課題名（英文）Muscle coordination system in learning process during novel walking patterns

研究代表者

木伏 紅緒（Kibushi, Benio）

早稲田大学・スポーツ科学学術院・助教

研究者番号：30844998

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：ヒトの筋骨格系における無数の筋を協調的に制御する戦略として、筋シナジーに基づく制御が提唱されている。筋シナジーに基づく制御は歩行のリハビリテーションにおいても有用であることが示唆されているものの、筋シナジーが何らかの運動を学習する過程でどのように変化していくのかという、「筋シナジーの形成機序」は解明されていない。そこで本研究では、神経生理学的・計算論的手法を用い、新規歩行パターンの学習における筋シナジーの形成機序を明らかにすることを目指した。研究期間中では、実験課題で用いるビジュアルフィードバックシステムの構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの研究は、歩幅やストライド時間といった歩行全体に関する指標に着目して学習を評価していたため、どの筋シナジーが学習によって変化し、貢献するのかが判別不可能であるという問題点があった。この問題の解決にあたり、足部軌道をリアルタイムストリーミングして離地時と接地直前の遊脚速度をビジュアルフィードバックするシステムの構築を行った。これにより、歩行を構成するサブタスクを学習していく過程で筋シナジーがどのように変化するかという基礎科学的知見が得られる。そしてこの概念を応用して新たなリハビリテーション方法の開発に貢献できると考えている。

研究成果の概要（英文）：Muscle synergies have been proposed as a control strategy for many muscles in the human musculoskeletal system. Although it has been suggested that the concept of muscle synergies is useful in gait rehabilitation, it has not been known well how muscle synergies are modified during the learning process of a movement. In this study, we aimed to elucidate the mechanism of muscle synergy modification in learning novel gait patterns by neurophysiological and computational methods. During the research period, we constructed a system that provides real-time streaming of the foot trajectory and visual feedback of the swing leg velocity during the toe-off and just before the heel strike.

研究分野：運動制御

キーワード：表面筋電図 キネマティクス 運動学習 バイオフィードバック

1. 研究開始当初の背景

ヒトの筋骨格系は約 200 種以上の骨および約 400 種以上の骨格筋という莫大な自由度で構成されており、神経機構に冗長自由度の低次元化を担う機構を仮定しないと、筋骨格系の協調的な制御は達成しえないと考えられてきた。この課題に対する制御戦略のひとつとしては、筋シナジーというモジュール式制御機構が提唱されている [1]。筋シナジーは、いくつかの筋を協調的に制御する機構を指す (図 1)。近年では、脊髄損傷によって歩行機能を著しく低下させたラットに対して健全な筋シナジーを基にした電気刺激を脊髄

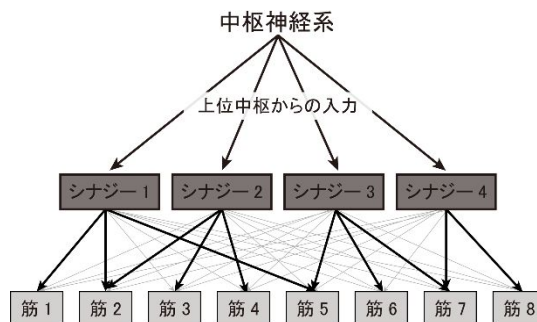


図1 筋シナジーを介した歩行の制御機構

に与えると、歩行機能に改善がみられると報告された [2]。この研究によって、筋シナジーがリハビリテーションに応用可能であることが実験的に示された。しかし、実際のリハビリテーションへの応用を想定し、新しい歩行パターンを獲得する過程での神経生理学的な変化を筋シナジーの観点から明らかにした研究はごくわずかである [3]。そのため、筋シナジーに基づくニューロリハビリテーションの有用性の背景となるエビデンスが不足しているという問題点がある。歩行の制御機構の解明やリハビリテーション技術の向上の観点から、「新規歩行パターンを学習する過程でどのように筋シナジーを形成していくのか？」という疑問を解決する必要がある。

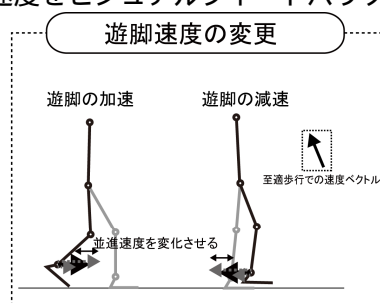
2. 研究の目的

本研究の目的は「新規歩行パターンの学習における筋協調システムの形成機序の解明」である。本研究の独創的な点は、歩行タスクと関連付けた学習課題を設定する点である。これまでの研究は、歩幅やストライド時間といった歩行全体に関する指標に着目して学習を評価していたため [4,5]、どの筋シナジーが学習によって変化し、貢献するのかが判別不可能であるという問題点があった。これらの問題を解消するにあたり、遊脚を加速または減速させるこれまでにない学習課題を考案した。

3. 研究の方法

(1)【実験方法】遊脚速度を変化させる課題

二足歩行では、遊脚初期（足部の離地直後）に遊脚を加速させ、遊脚後期（次の踵接地の前）に遊脚を減速させている。この課題では、遊脚の並進速度をビジュアルフィードバックして、遊脚時の加速と減速を変化させる (図 2 上段)。具体的には、動作分析システムで計測された足部の位置座標値を数値計算ソフトウェアリアルタイムストリーミングして遊脚時の速度をリアルタイムに計算し、その結果を被検者に提示する。目標とする遊脚速度となるように被検者に歩行をしてもらい、遊脚速度を変化させる。



(2)【分析方法】筋シナジーの分析

筋シナジーは表面筋電図から抽出される。したがって、下肢の多数の筋を対象に表面筋電図の計測（腓腹筋内側頭、ヒラメ筋、前脛骨筋、外側広筋、大腿直筋、半腱様筋、大腿二頭筋、中殿筋、大殿筋）を行う。そして、その表面筋電図データに行列分解を施すことによって、各筋への重みづけを表す空間パターンと、筋シナジーの時間的な活動パターンとして筋シナジーを定量する (図 2 下段)。例えば、図

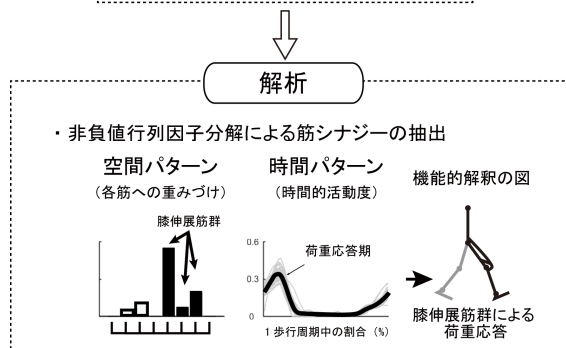


図2 研究の方法

2の筋シナジーは膝伸展筋群に対しての重みづけが高く、歩行中の荷重応答期に動員されている筋シナジーであるため、膝伸展筋群による荷重応答を担う筋シナジーであると解釈できる。遊脚速度を変えた時に、筋シナジーの重みづけや活動度にどのような調整がなされるのかを分析する。

4. 研究成果

(1)【研究の主な成果】

足部軌道をリアルタイムストリーミングして離地時と接地直前の遊脚速度をビジュアルフィードバックするシステムの構築を行った(図3)。具体的にどのようなシステムかという点、動作分析システムによって、足部に貼付した反射マーカの位置座標値を数値計算ソフトウェアのMATLABにリアルタイムストリーミングし(図3上段)、その位置座標値を用いて離地する瞬間と接地直前の遊脚速度を算出し、被検者に遊脚速度をビジュアルフィードバックするシステムである(図3下段)。

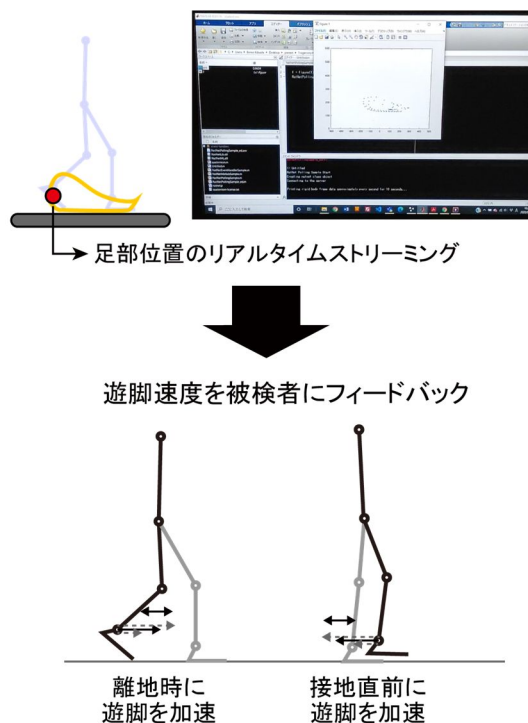


図3 ビジュアルフィードバックシステムの概要

(2)【今後の展望】

当初の計画では、実験、分析、研究成果の学会発表までを予定していた。しかしながら、新型コロナウイルス感染拡大により大学への入構が制限されたこと、人間を対象とした研究を実施する際の感染防止対策の策定期間が必要であったことなどが影響し、研究の進行が大幅に遅れた。そのため、研究期間内での成果は、ビジュアルフィードバックシステムの構築に留まった。本研究課題を発展させた研究課題が「若手研究」として採択されたため、今後は若手研究と併せて、本課題での実験、分析、研究成果の公表を進めていく予定である。なお、本研究に不可欠な高額機材(動作分析システム等)はすでに購入済みである。あとは実験に係る消耗品や被検者への謝礼、論文投稿に係る費用等、比較的少額の経費が必要であるが、これに関しては学内研究費等で賄い、本研究の実験、分析、成果の公表を進める予定である。

参考文献

- [1] Tresch, M. C., Saltiel, P., & Bizzi, E. (1999). The construction of movement by the spinal cord. *Nature Neuroscience*, 2(2), 162–167. <https://doi.org/10.1038/5721>
- [2] Wenger, N., Moraud, E. M., Gandar, J., Musienko, P., Capogrosso, M., Baud, L., Le Goff, C. G., Barraud, Q., Pavlova, N., Dominici, N., Minev, I. R., Asboth, L., Hirsch, A., Duis, S., Kreider, J., Mortera, A., Haverbeck, O., Kraus, S., Schmitz, F., ... Courtine, G. (2016). Spatiotemporal neuromodulation therapies engaging muscle synergies improve motor control after spinal cord injury. *Nature Medicine*, 22(2), 138–145. <https://doi.org/10.1038/nm.4025>
- [3] Ranganathan, R., Krishnan, C., Dhaher, Y. Y., & Rymer, W. Z. (2016). Learning new gait patterns: Exploratory muscle activity during motor learning is not predicted by motor modules. *Journal of Biomechanics*, 49(5), 718–725. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.02.006>
- [4] Choi, J. T., & Bastian, A. J. (2007). Adaptation reveals independent control networks for human walking. *Nature Neuroscience*, 10(8), 1055–1062. <https://doi.org/10.1038/nn1930>
- [5] Roemmich, R. T., Long, A. W., & Bastian, A. J. (2016). Seeing the Errors You Feel Enhances Locomotor Performance but Not Learning. *Current Biology*, 26(20), 2707–2716. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.08.012>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Benio Kibushi, Motoki Kouzaki & Yoshinobu Kawahara	4. 巻 9
2. 論文標題 Data-driven spectral analysis for coordinative structures in periodic human locomotion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16755
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-53187-1	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Benio Kibushi, Yosuke Shinsawa, Motoki Kouzaki.
2. 発表標題 Tuning muscle coordination patterns with learning the power clean.
3. 学会等名 European College of Sport Science 24th Annual Congress.（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木伏紅緒、新澤庸介、神崎素樹
2. 発表標題 パワークリーン動作の技術向上に伴う筋協調パターンの調整
3. 学会等名 第32回日本トレーニング科学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木伏紅緒、神崎素樹
2. 発表標題 至適なストライド長・ストライド時間での歩行における筋協調の制御
3. 学会等名 日本運動生理学会27回大会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------