

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360096

研究課題名(和文)筋シナジー解析に基づくヒト随意運動の多様性と巧みさに関する研究

研究課題名(英文)Muscle Synergy Approach to Motor Control and Learning in Human Movements

研究代表者

平井 宏明(HIRAI, HIROAKI)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：60388147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヒト随意運動において中枢神経系が選択した運動解を身体協応の観点から解析することで、冗長筋骨格系におけるヒトの運動制御・運動学習の解明を試みた。「筋シナジー抽出/予測/解析技術」を運動解析ツールとして用い、筋レベルにおける身体協応の機能を解明し、これに基づく身体運動制御モデルを構築した。また、提案手法を用いて、冗長自由度を有する筋骨格構造体の運動制御法を確立した。

研究成果の概要(英文)：In everyday life, the central nervous system always selects an appropriate solution among the enormous possibilities for achieving a desired movement. In this study, we focused on body coordination, in particular at the muscle level, to unravel the mechanism to control the neuro-musculoskeletal system with multiple redundant muscles. New technology on muscle synergy analysis revealed two functions of muscle synergies and we proposed the model of motor control and learning based on muscle synergies. The validity of the proposed method was confirmed by some experiments including the control of a human-like musculoskeletal robot system.

研究分野：ロボット工学

キーワード：運動制御 運動学習 人間機械システム リハビリテーション コーチング ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

身体運動の冗長性とそれに関わる制御問題は、運動生理学における古典的な未解決問題である。問題提起を行った Bernstein は上記問題を身体システムの組織化現象と捉え、身体運動の協応、すなわち、シナジーが神経-筋-骨格系の自由度の拘束に貢献することを示唆している。しかし、Bernstein が提示するシナジーの概念は広く受け入れられているものの、その実態は未だ曖昧なままである。こうした中、研究代表者らは近年、シナジーの実態解明に繋がる強力な運動解析法を発明した(国際特許 PCT/JP2010/65395 他)。本技術を用いると、随意運動中の筋群活動の協調パターンをリアルタイムに可視化でき、動作点の詳細な運動(平衡点と剛性)を推定することができる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒト随意運動において中枢神経系が選択した運動解を身体協応(シナジー)の観点から解析することで、冗長筋骨格系におけるヒトの運動制御の解明することである。ここでは、研究代表者らの有する「筋シナジー抽出/予測/解析技術」を運動解析ツールとして用い、筋レベルにおける身体協応の2つの機能(パターン共有機能、誤差補償機能)を解明し、これに基づく身体運動制御モデルを構築する。また、提案手法を用いて、冗長自由度を有する筋骨格構造体(ヒトや筋骨格ロボット)の運動制御法を確立する。本研究は、運動生理学における未解決問題(Bernstein 問題)へのチャレンジである。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、シナジーの概念が持つ2つの機能に着目し、個別にアプローチを行う。

シナジー機能 1: パターン共有(多数の構成要素を協調させてパターンを共有する機能)
シナジー機能 2: 誤差補償(構成要素の相補的な誤差補償により全体を安定化する機能)
その後、個々のアプローチの成果を統合し、シナジーの共通概念の下でその体系化を図る。

4. 研究成果

シナジーの機能が筋骨格構造体の運動制御に深く関わることを示す顕著な例として、以下の3つの研究成果を報告する。

(1) 運動学習と運動多様性

未習熟運動は練習を重ねることによってその技能を向上させることができる。ここでは、健常者の上肢運動(非利き手による螺旋描画運動)を対象に、運動の学習過程における身体協応の変化を解析し、運動習熟とシナジー(パターン共有、誤差補償)の関係を明らかにした。図1は「筋シナジー抽出/予測/解析技術」及び「多自由度筋協調モデル」に

よって推定された3つの身体協応の指標(筋シナジー、手先剛性、手先平衡点)を示している。また、図2は運動習熟とともに運動学指標が改善される中、上記3つの運動力学指標も互いに影響(補償)しながら変化している様子を示している。特に、運動学習過程において、筋シナジーは共有され一定であるのに対し、手先剛性と手先平衡点は劇的に変化している。これらの運動指標の詳細な解析により、運動習熟には、手先剛性の低い偏角方向の運動について、平衡点軌道の内部モデルを獲得することが重要であることが明らかとなった。上記結果は、身体協応に基づく運動介入に重要な示唆を与えている。

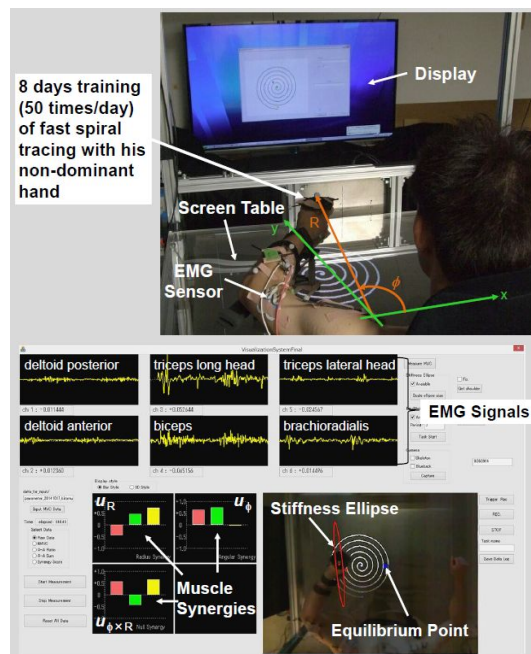


図1: 螺旋描画運動を訓練する被験者。開発されたロボット訓練システムにより、リアルタイムに、筋シナジー、手先剛性、手先平衡点の3つの身体協応の指標が推定される。

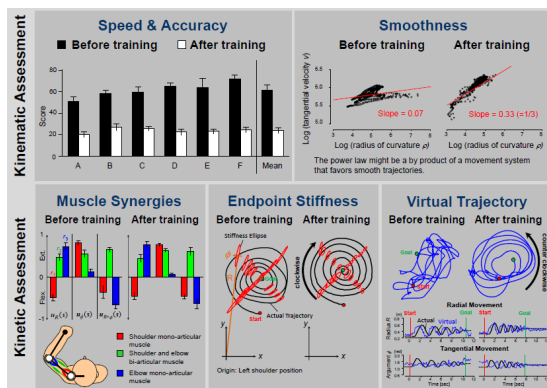


図2: 運動学習効果を測る5つの指標。A. スパイラルテスト(左上)、B. 1/3乗則(右上)、C. 筋シナジー、D. 手先剛性、E. 手先平衡点軌道。運動学評価指標(A, B)、運動力学評価指標(D, E)ともに8日間の練習によって運動が大幅に改善されたことを示している。一方、筋シナジー(C)は、運動学習過程において不変であった。

(2) 運動再学習と運動多様性

運動麻痺は訓練（リハビリテーション）を重ねることによって失われた機能を回復することができる。ここでは、脳卒中患者の上肢運動（麻痺側による円描画運動）を対象に、運動の再学習過程における身体協応を解析することで、その柔軟な修復能力を定量評価し、運動再学習とシナジーの関係を明らかにした。図3は、提案手法を用いて2.5ヶ月のリハビリテーション（FIMスコア、訓練前：44/126点、訓練後：66/126点）とシナジーの関係を示したものである。訓練後では、筋シナジー及び手先剛性の2つの身体協応の指標において大幅な改善が見られ、手先平衡点においても完全ではないものの運動回復が認められた。パターン共有としての筋シナジーが先に回復することは、本機能が運動制御の根幹に関わっていることを示唆している。患者は明らかに回復過程にあり、訓練を継続することによって更なる運動改善が期待される。上記結果は、シナジーの概念が（健常者のみならず）脳卒中患者の運動評価や診断、さらには運動支援や訓練に有用であることを示している。

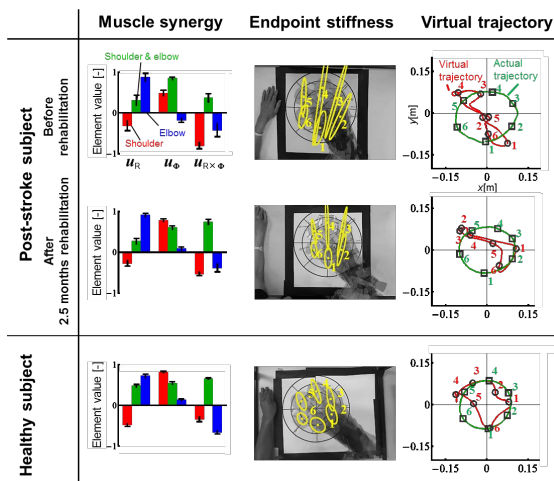


図3：脳卒中患者のリハビリテーションによる身体協応の回復。2.5ヶ月の運動訓練によって、2つの身体協応の指標（筋シナジー、手先剛性）に大きな改善が認められた。訓練後には、理想となる健常者のパターンに近づいていることが確認される。なお、もう1つの身体協応の指標である手先平衡点軌道については回復の途中と考えられる。これらの変化は運動学（緑線）からは観測されない点は注目に値する。

(3) 冗長筋骨格系の運動制御法の体系化

(1)(2)では、上肢運動に対する「筋シナジー抽出/予測/解析技術」の適用例を述べたが、本技術は下肢運動についても同様に用いることができる。ここでは、提案手法の妥当性を裏付ける1例として、人間から抽出したシナジー機能をヒトを模擬した筋骨格下肢ロボットに実装することで、ヒト運動技能の再現を行った（図4、5）。健常者の随意運動時（ペダリング運動）の筋活動からシナジー機

能を抽出し、ヒトと同様な滑らかな運動の再現に成功している。

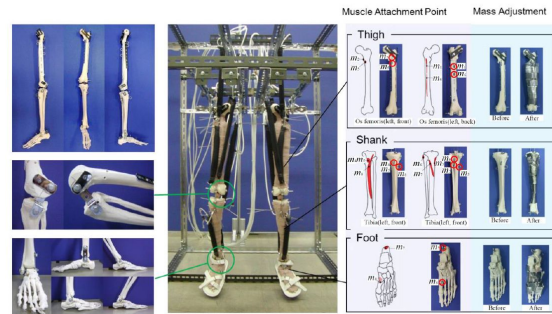


図4：筋骨格下肢ロボット。身体各部の寸法、質量、質量中心、筋付着位置等は全てヒトの計測データを参考に作成されている。両脚に取り付けられた16本の空気圧人工筋はシナジー制御によりコントロールされる。

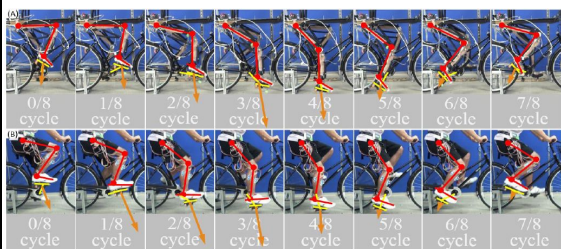


図5：ヒト随意運動から抽出したシナジー機能の筋骨格下肢ロボットへの移植。ヒトペダリング時の筋群活動から抽出した筋シナジー、足先剛性、足先平衡点をロボットに実装し、ヒトと同様な滑らかな運動を再現した。（下肢の運動学（赤）、ペダル角度（黄）、ペダル踏力（橙））

上記(1)(2)(3)を含む本研究で得られたシナジーに関する一連の成果は、後述の学術論文10件、学会発表54件、図書1件、特許4件にまとめられている。今後は研究事例を増やし、更なるエビデンスの強化に努める予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

富永健太, 飯村太紀, 植村充典, 平井宏明, 宮崎文夫, ヒトの下肢運動に関わる不変量としての筋シナジー, 計測自動制御学会論文集, 52(1), 37-45, 2016. (査読有)
DOI: 10.9746/sicetr.52.37

H. Hirai, F. Miyazaki, H. Naritomi, K. Koba, T. Oku, K. Uno, M. Uemura, T. Nishi, M. Kageyama, and H. I. Krebs, On the origin of muscle synergies: invariant balance in the co-activation of agonist and antagonist muscle pairs, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 3(192), 1-16, 2015. (査読有)
DOI: 10.3389/fbioe.2015.00192

宇野かな, 奥貴紀, 古場啓太郎, 植村充典, 平井宏明, 宮崎文夫, 水平面内におけるヒト上肢運動時のEMG信号を利用した筋シ

ナジー, 平衡点軌道および手先剛性の新しい評価法の提案, 日本ロボット学会誌, 32(7), 603-614, 2014. (査読有)
DOI: 10.7210/jrsj.32.603

H. Pham, Y. Ariga, K. Tominaga, T. Oku, K. Nakayama, M. Uemura, H. Hirai, F. Miyazaki, Extraction and implementation of muscle synergies in neuro-mechanical control of upper limb movement, *Advanced Robotics*, 745-757, 28(11), 2014. (査読有)
DOI: 10.1080/01691864.2013.876940

K. Matsui, Y. Hishii, K. Maegaki, Y. Yamashita, M. Uemura, H. Hirai, F. Miyazaki, Equilibrium-point control of human elbow-joint movement under isometric environment by using multichannel functional electrical stimulation, *Frontiers in Neuroscience*, , 8(164), 1-9, 2014. (査読有)
DOI: 10.3389/fnins.2014.00164

有賀陽平, 前田大輔, 宇野かな, H. T. T. Pham, 植村充典, 平井宏明, 宮崎文夫, 筋拮抗比と筋活性度を用いた拮抗駆動装置の線形制御と筋電インタフェースへの応用, 日本ロボット学会誌, 31(5), 517-526, 2013. (査読有)
DOI: 10.7210/jrsj.31.517

平井宏明, 飯村太紀, 井上恵太, 宮崎文夫, 筋拮抗比の概念に基づくヒト歩行動作の運動要素分解, 日本ロボット学会誌, 30(5), 524-533, 2012. (査読有)
DOI: 10.7210/jrsj.30.524

[学会発表](計 54 件)

E. Watanabe, T. Oku, H. Hirai, K. Uno, M. Uemura, and F. Miyazaki, Exploiting invariant structure for controlling multiple muscles in anthropomorphic legs: an inspiration from electromyography analysis of human pedaling, 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2015), 88-93, 3-5th November 2015, Seoul (Korea). (査読有)
DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2015.7363536

T. Oku, K. Uno, T. Nishi, M. Kageyama, K. Koba, M. Uemura, H. Hirai, F. Miyazaki, and H. Naritomi, A feasibility study to assess intralimb coordination in stroke rehabilitation: two indices of mechanical impedance by coactivation of agonist muscles, 14th IEEE/RAS-EMBS International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR2015), 899-904, 11-14th August, 2015, Singapore (Singapore). (査読有)
DOI: 10.1109/ICORR.2015.7281317

K. Koba, K. Murakami, T. Oku, K. Uno, P. Phatiwuttipat, Y. Yamashita, M. Uemura, H. Hirai,

and F. Miyazaki, Tacit representation of muscle activities during coordination training: muscle synergy analysis to visualize motor enhancement in virtual trajectory of multi-joint arm movement, 5th IEEE RAS&EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob2014), 270-275, 12-15th August, 2014, Sao Paulo (Brazil). (査読有)
DOI: 10.1109/BIROB.2014.6913788

K. Uno, T. OKU, P. Phatiwuttipat, K. Koba, Y. Yamashita, K. Murakami, M. Uemura, H. Hirai, and F. Miyazaki, A novel muscle synergy extraction method to explain the equilibrium-point trajectory and endpoint stiffness during human upper-limb movements on a horizontal plane, 5th IEEE RAS&EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob2014), 621-626, 12-15th August, 2014, Sao Paulo (Brazil). (査読有)
DOI: 10.1109/BIROB.2014.6913847

T. Oku, K. Uno, T. Nishi, M. Kageyama, P. Phatiwuttipat, K. Koba, Y. Yamashita, K. Murakami, M. Uemura, H. Hirai, F. Miyazaki, and H. Naritomi, Pilot study on quantitative assessment of muscle imbalance: differences of muscle synergies, equilibrium-point trajectories, and endpoint stiffness in normal and pathological upper-limb movements, 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2014), 5784-5787, 26-30th August, 2014, Chicago (USA). (査読有)
DOI: 10.1109/EMBC.2014.6944942

T. Oku, K. Inoue, Pham T. T. Hang, K. Tominaga, D. Maeda, M. Uemura, H. Hirai, and F. Miyazaki, Analysis of muscle coordination in human pedaling and implementation with a musculoskeletal robot, 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2012), 606-611, 1st December, 2012, Osaka (Japan). (査読有)
DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651582

D. Maeda, K. Tominaga, T. Oku, Pham T. T. Hang, S. Saeki, M. Uemura, H. Hirai, and F. Miyazaki, Muscle synergy analysis of human adaptation to a variable-stiffness exoskeleton: human walk with a knee exoskeleton with pneumatic artificial muscles, 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2012), 638-644, 1st December, 2012, Osaka (Japan). (査読有)
DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651587

Y. Ariga, D. Maeda, H. Pham, M. Uemura, H. Hirai, and F. Miyazaki, Novel equilibrium-point control of agonist-antagonist system with

pneumatic muscles II, application to EMG-based human-machine interface for an elbow-joint system, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), 4380-4385, 10th October, 2012, Vilamoura (Portugal). (査読有)
DOI: 10.1109/IROS.2012.6385790

Y. Ariga, H. T. T. Pham, M. Uemura, H. Hirai, and F. Miyazaki, Novel equilibrium-point control of agonist-antagonist system with pneumatic artificial muscles, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2012), 1470-1475, 15th May, 2012, St. Paul (USA). (査読有)
DOI: 10.1109/ICRA.2012.6224662

〔図書〕(計 1 件)

H. Hirai et al., Springer, Cognitive Neuroscience Robotics: Synthetic Approaches to Human Understanding, Volume I: Synthetic Approaches, Part I, 2015, Chap. 2.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称：運動解析装置，運動解析方法及び運動解析プログラム

発明者：F. Miyazaki, H. Hirai, M. Uemura, K. Uno, and T. Oku

権利者：Osaka University

種類：特許

番号：PCT/JP2014/80764

出願年月日：2014 年 11 月 20 日

国内外の別： 国外

名称：脚相移行タイミング判定方法，脚相移行タイミング判定装置，歩行支援制御方法及び歩行支援装置

発明者：植村充典，宮崎文夫，平井宏明

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2014-141865

出願年月日：2014 年 7 月 10 日

国内外の別： 国内

名称：運動解析装置，運動解析方法及び運動解析プログラム

発明者：宮崎文夫，平井宏明，植村充典，宇野かな，奥貴紀

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2013-259093

出願年月日：2013 年 12 月 16 日

国内外の別： 国内

取得状況 (計 1 件)

名称：Muscle synergy analysis method, muscle synergy analyzer, and muscle synergy interface

発明者：F. Miyazaki, H. Hirai, S. Kawagoe, K. Matsui, and T. Nakano

権利者：Osaka University

種類：特許

番号：US9078585 B2

取得年月日：2015 年 7 月 4 日

国内外の別： 国外

〔その他〕

ホームページ等

<http://robotics.me.es.osaka-u.ac.jp/MiyazakiLab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平井 宏明 (HIRAI, Hiroaki)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号：60388147

(2) 研究分担者

宮崎 文夫 (MIYAZAKI, Fumio)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：20133142

植村 充典 (UEMURA, Mitsunori)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：00512443