

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03949

研究課題名(和文)筋シナジーの診断に基づく下肢運動のニューロリハビリテーション

研究課題名(英文)Muscle synergy approach to locomotor training in neurorehabilitation

研究代表者

宮崎 文夫 (Miyazaki, Fumio)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：20133142

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：現在、下肢のロボット療法の黎明期にある。本研究では効果的な介入の探索を目的として、サドル支持型体重免荷装置、左右分離型トレッドミル、機能的電気刺激を用いた新しい歩行訓練環境を開発した。本環境は神経筋骨格系に障害を持つ患者の歩行再建に向けて、3つの運動機能(a. バランス機能, b. 腰関節伸展, c. 足関節蹴り出し)を支援/訓練する。即ち、サドル支持型体重免荷装置と左右分離型トレッドミルによる端点介入によってaとbの機能を、足関節底背屈筋群への電気刺激介入によってcの機能を支援/訓練する。ここでは筋シナジーの指標を用いて、脳卒中リハビリテーションの評価/診断/介入における手法の可能性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Current robotic therapy for lower extremities is in its early stage of development. Aiming at exploring an efficacious intervention for locomotor rehabilitation, we investigated the gait-training device that combines saddle-seat-type body-weight support (BWS), a split-belt treadmill and functional electrical stimulation. The task-oriented approach to restoring voluntary control of locomotion in patients with neuromuscular diseases focuses on three gait functions: (a) balancing, (b) hip extension, and (c) ankle push-off. The two gait functions of (a) and (b) are supported/trained by end-effector intervention combining the saddle-seat-type BWS and a split-belt treadmill, and another function of (c) is supported/trained by muscle intervention electrically stimulating ankle dorsi/plantar flexion muscles. The study tested the feasibility for practical uses in the assessment, diagnosis, and interventions for stroke rehabilitation using the index of muscle synergies.

研究分野：ロボット工学

キーワード：リハビリテーション 脳神経疾患 知能機械 人間機械システム

1. 研究開始当初の背景

現在、我が国における脳血管疾患の総患者数は約124万人に上り、発症後の生存患者数の75%以上が脳卒中後遺症に悩まされている。その典型は運動障害(麻痺)である。近年、これらの障害を軽減するリハビリテーションに新しい潮流が生まれている。正確な運動を再現し計測できるロボット技術と神経科学に基づく運動介入を組み合わせたロボット療法によって、患者の機能回復を積極的に促進し運動能力の向上を図る試みである。これらの試みは、ニューロリハビリテーションにおけるロボット応用の潜在的可能性を示している。

一方、研究代表者らは近年、「筋シナジー解析方法、筋シナジー解析装置、及び筋シナジーインターフェース」として、筋電位情報から身体運動の協調性を抽出し身体各部の運動推定を行う技術、及びこれをロボットインタフェースへ応用する技術(特許第5158824号、国際出願WO/2011/030781)、ならびに「運動解析装置、運動解析方法及び運動解析プログラム」として、身体適所、例えば肢の先端等の動作点の運動制御に関わる特徴量(筋シナジー、剛性楕円、平衡点軌道)を算出する運動解析技術(特願2013-259093、国際出願PCT/JP2014/80764)を発明し、ヒト随意運動の運動生成機序の解明やロボットによるヒトの運動支援に貢献してきた。本研究では、これらのヒトと機械の調和技術を脳卒中患者のリハビリテーションへ応用し、障害後の運動機能回復及び運動再学習の機序の解明を試みるとともに、患者の運動機能回復を促進するロボット療法の確立を行う。

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者らの特許技術(筋シナジー抽出/予測/解析技術)とロボット技術

の融合により、脳卒中リハビリテーションの新展開を図るロボット療法の研究基盤を確立することを目的とする。ここでは、治療効果を裏付ける十分な科学的根拠が得られていない「歩行再建のための運動介入とロボットトレーニング」に焦点を当て、身体協調性(筋シナジー)に基づく身体の平衡点と剛性の調整訓練が脳卒中患者の下肢リハビリテーションに効果的であることを、臨床試験を通じ実験的に実証する。

3. 研究の方法

身体協調性の概念の下、下肢運動へロボット介入を行ない、得られた成果を統合し体系化することで、身体運動のニューロリハビリテーション手法としてまとめることを目指した。ここでは課題克服のために、具体的に以下の3つの技術課題を設定した。

- 診断 — 異常な筋シナジーの定量評価
- 治療 — 正常な筋シナジーの再獲得を促進する運動介入プロトコルの開発
- 効果 — 臨床試験による運動介入効果の科学的根拠の獲得

4. 研究成果

- (1) 診断と治療 — 筋シナジー診断に基づく歩行訓練環境

歩行運動は、環境と断続的な力学的相互作用を繰り返しながら、両脚の下肢筋群の協調が求められる高度な随意運動である。ここでは、軽～中程度の脳卒中患者の歩行訓練を想定し、図1Aのような体重免荷歩行に対して、筋シナジー抽出/予測/解析技術を適用した。サドル支持型体重免荷装置とロボット制御された左右分離型トレッドミルの介入(図1C-a, b)と、足関節底背屈筋群への機能的電

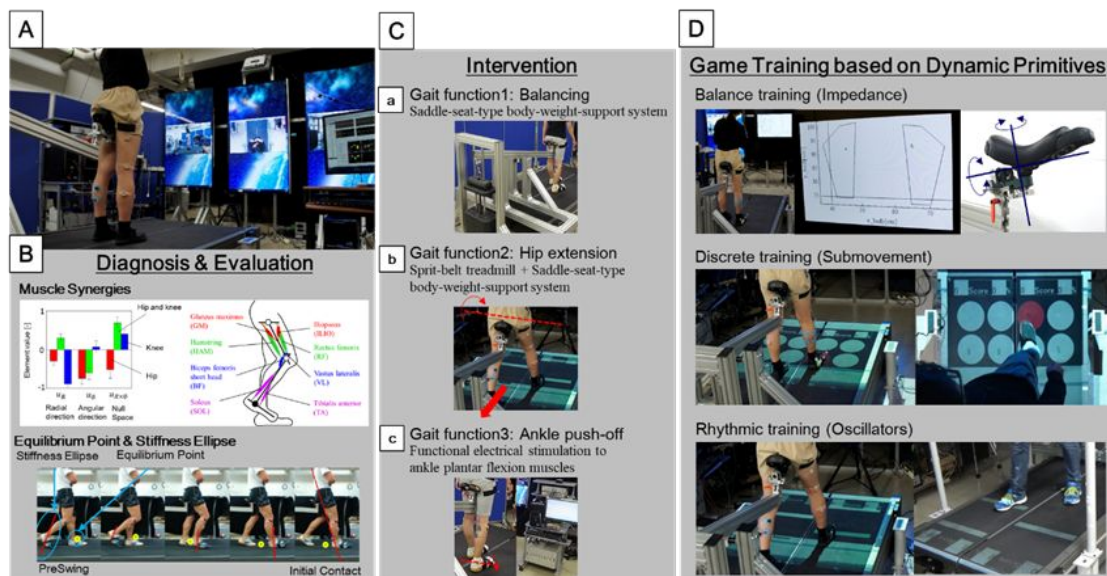
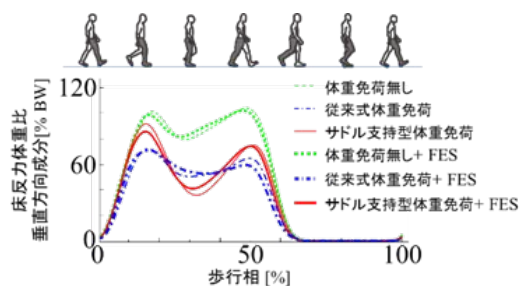


図1：筋シナジーと動的プリミティブの概念に基づく歩行訓練

気刺激（図 1C-c）の介入によって、症状に応じた訓練（動作点の剛性及び平衡点の補助/抵抗）を実施した。第一の介入は、対象の股下部を支持し体重を軽減しながら、股部と（トレッドミル上の）足部との相対位置変化を促し、対象の「バランス制御」と「股関節伸展」を訓練する。第二の介入は、「蹴り出し」をはじめとする足関節周りの歩行機能やバランス機能を訓練する。これらの介入の下、所望の運動を実現するために筋群活動がどのように組織化され、協調関係が創発されていくのかを筋シナジー診断技術で観察することにより、身体協調が再獲得・保持される過程が解析された（図 1B）。また、本システムは対象の前方と足元に映像を投影でき、患者の注意を操作しながら視聴覚によるフィードバック情報の提供が可能である。これらの機能により、動的プリミティブの概念に基づく、バランス（インピーダンス）訓練、離散運動（サブムーブメント）訓練、周期運動（オシレータ）訓練が可能である（図 1D）。これらの歩行訓練システムに係る一連の技術は特許出願された。

(2) 治療と効果 — 健常者・脳卒中患者による歩行訓練評価

提案する歩行訓練環境の有用性の科学的根拠を得るため、運動学、運動力学、生体情報等による多角的かつ体系的な評価実験を実施した。詳細な解析の結果、提案手法は、中程度以下の体重免荷（< 33% BWS）下で、低速～中速（2.5～4km/h）で歩行訓練するとき最も効果的であることが明らかとなった。初期訓練で利用頻度の高い低速歩行で介入訓練の効果を期待できることは先進的であり、対象の高いリハビリ効果が期待できる。ただし、現状、症例数が限られているため、今後さらなる研究の継続により科学的根拠を蓄積する必要がある。



中程度の免荷（33%BWS）、中速（3.5km/h）における、体重免荷方式および機能的電気刺激（FES）の有無の違いによる床反力の変化

図 2：歩行訓練環境の介入効果の一例（床反力）



図 3：歩行訓練を行う脳卒中患者の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 6 件）

1. 片岡 夏美, 平井 宏明, T. Hamilton, 渡邊 英知, 吉川 史哲, 黒岩 晃, 長川 祐磨, 二ノ丸 雄大, 佐伯 友里, 植村 充典, 宮崎 文夫, 中田 裕士, 西 知紀, 成富 博章, H. I. Krebs, “部分体重免荷, 左右分離型トレッドミル, 機能的電気刺激を用いた歩行への介入 - 新しい歩行訓練環境の提案と介入効果の基礎的検証 -”, 計測自動制御学会論文集, vol. 54, no. 4, pp. 412-420, 2018. doi: 10.9746/sicetr.54.412
2. 鎌田 一平, 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “膝装具歩行における制御戦略の解析”, 日本機械学会論文集, vol. 82, no. 843, pp. 16-00236, 2016. doi: 10.1299/transjsme.16-00236
3. 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, vol. 52, no. 1, pp. 37-45, 2016. doi: 10.9746/sicetr.52.37
4. 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*, vol. 3, 192, pp. 1-16, 2015. doi: 10.3389/fbioe.2015.00192
5. S. Furuya, K. Tominaga, F. Miyazaki, E. Altenmuller, “Losing dexterity: patterns of impaired coordination of finger movements in musician’s dystonia,” *Scientific Reports*, vol. 5, 13360, pp. 1-14, 2015. doi: 10.1038/srep13360
6. S. Furuya, T. Oku, F. Miyazaki, H. Kinoshita, “Secrets of virtuoso: neuromuscular attributes of motor virtuosity

in expert musicians,” *Scientific Reports*, vol. 5, 15750, pp. 1-8, 2015. Doi: 10.1038/srep15750

〔学会発表〕(計 31 件)

1. K. Kozasa, R. Fujihara, H. Hirai, and H. I. Krebs, “Interference electrical stimulation applied to soleus muscle in humans: preliminary study on relationship among stimulation parameters, force output and pain sensation,” *Proc. IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomedical Robotics and Biomechatronics (BIOROB2018)*, 2018. (accepted)
2. R. Fujihara, K. Kozasa, H. Hirai, and H. I. Krebs, “Alteration in foot strike pattern during running with elastic insoles: a case study on the effect of long-term training,” *Proc. IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomedical Robotics and Biomechatronics (BIOROB2018)*, 2018. (accepted)
3. B. L. Jackson, R. M. Coelho, H. Hirai, and H. I. Krebs, “An investigation into rhythmic and discrete gait using the MIT skywalker,” *Proc. IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomedical Robotics and Biomechatronics (BIOROB2018)*, 2018. (accepted)
4. N. Kataoka, H. Hirai, T. Hamilton, F. Yoshikawa, A. Kuroiwa, Y. Nagakawa, E. Watanabe, Y. Ninomaru, Y. Saeki, M. Uemura, F. Miyazaki, H. Nakata, T. Nishi, H. Naritomi, and H. I. Krebs, “Effects of partial body-weight support and functional electrical stimulation on gait characteristics during treadmill locomotion: pros and cons of saddle-seat-type body-weight support,” *Proc. 15th IEEE Int. Conf. Rehabilitation Robotics (ICORR2017)*, pp. 381-386, 2017.
5. R. S. Gonçalves, T. Hamilton, A. R. Daher, H. Hirai, and H. I. Krebs, “MIT-Skywalker: evaluating comfort of bicycle/saddle seat,” *Proc. 15th IEEE Int. Conf. Rehabilitation Robotics (ICORR2017)*, pp. 516-520, 2017.
6. E. Watanabe, H. Hirai, Y. Ninomaru, N. Kataoka, Y. Saeki, M. Uemura, F. Miyazaki, and H. I. Krebs, “Exploiting invariant structure for controlling multiple muscles in anthropomorphic legs: equilibrium-point-based control approach to constrained motion,” *Proc. Progress in Motor Control XI (PMC XI)*, 1-A-9, 2017.
7. I. Kamada, M. Uemura, H. Hirai, and F. Miyazaki, “Efficacy of a knee orthosis that uses an elastic element,” *Proc. 39th Annual Int. Conf. IEEE Engineering Medicine Biology Society (EMBC2017)*, pp. 942-945, 2017.
8. 二ノ丸 雄大, 平井 宏明, 佐伯 友里, 渡邊 英知, 片岡 夏美, 植村 充典, 宮崎 文夫, H. I. Krebs, “ヒト上肢の運動生成に関する再考 - タスク空間の座標系を符号化する筋協調と仮想軌道の解析 - ”, 第 18 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2017) 論文集, pp. 1645-1647, 2017.
9. 佐伯 友里, 平井 宏明, 二ノ丸 雄大, 片岡 夏美, 渡邊 英知, 植村 充典, 宮崎 文夫, H. I. Krebs, “サドル支持型体重免荷トレッドミルと能動式柔軟足関節装具を用いた歩行への介入”, 第 18 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2017) 論文集, pp. 1648-1650, 2017.
10. 片岡 夏美, 平井 宏明, T. Hamilton, 吉川 史哲, 黒岩 晃, 長川 祐磨, 渡邊 英知, 二ノ丸 雄大, 佐伯 友里, 植村 充典, 宮崎 文夫, 中田 裕士, 西 知紀, 成富 博章, H. I. Krebs, “サドル支持型部分体重免荷装置, 左右分離型トレッドミル, 機能的電気刺激を用いた歩行への介入とその効果”, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2017) 予稿集, RSJ2017AC3G2-06, 2017.
11. 小笹 航平, 藤原 諒, 林 伸樹, 片岡 夏美, 平井 宏明, 吉川 史哲, 黒岩 晃, 長川 祐磨, 渡邊 英知, 二ノ丸 雄大, 佐伯 友里, 植村 充典, 宮崎 文夫, 中田 裕士, 西 知紀, 成富 博章, T. Hamilton, H. I. Krebs, “部分体重免荷, 左右分離型トレッドミル, 機能的電気刺激を用いた歩行への介入と効果 - サドル支持型体重免荷の利点と限界 - ”, 第 11 回 Motor Control 研究会抄録, A05, 2017.
12. 八木 聡明, 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “足首周りの角運動量に基づく脚ロボットバランス制御の実験的検討”, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2017, 1A1-P09, 2017.
13. 鈴木 健司, 寺田 祐基, 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “可変剛性機構を用いたロボット膝装具の開発と実験的評価”, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2017, 1P1-K12, 2017.
14. E. Watanabe, T. Oku, H. Hirai, F. Yoshikawa, Y. Nagakawa, A. Kuroiwa, E. P. Grabke, M. Uemura, F. Miyazaki, and H. I. Krebs, “Exploiting invariant structure for controlling multiple muscles in anthropomorphic legs: II. experimental evidence for three equilibrium-point-based synergies during human pedaling,” *Proc. 2016 IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots (Humanoids2016)*, pp. 1167-1172, 2016. (**finalist interactive paper**)
15. F. Yoshikawa, H. Hirai, E. Watanabe, Y. Nagakawa, A. Kuroiwa, E. Grabke, M. Uemura, F. Miyazaki, and H. I. Krebs, “Equilibrium-point-based synergies that encode coordinates in task space: a practical method for translating functional synergies from human to musculoskeletal robot arm,”

- Proc. 2016 IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots (Humanoids2016)*, pp. 1135-1140, 2016.
16. 黒岩 晃, 平井 宏明, 吉川 史哲, 長川 悠磨, 渡邊 英知, 片岡 夏美, 植村 充典, 宮崎 文夫, “サドル支持型体重免荷トレッドミルと機能的電気刺激を用いた歩行への介入”, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集 (SI2016), pp. 2880-2882, 2016. (優秀講演賞)
 17. 渡邊 英知, 奥 貴紀, 平井 宏明, 吉川 史哲, 植村 充典, 宮崎 文夫, “下肢筋骨格ロボットによる前方ペダリングの再現と考察 —筋シナジーに基づくヒトの運動戦略の解析と制御への応用—”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2016) 予稿集, RSJ2016AC1U3-07, 2016.
 18. 吉川 史哲, 平井 宏明, 渡邊 英知, 植村 充典, 宮崎 文夫, “ヒト上肢の姿勢保持時における終点と平衡点の一致を利用した新しい筋シナジー推定法の提案”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2016) 予稿集, RSJ2016AC2X2-02, 2016.
 19. 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “足首周りの角運動量を用いたバランス指標に基づく脚ロボットの歩行制御”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2016) 予稿集, RSJ2016AC1X3-04, 2016.
 20. 長川 祐磨, 吉川 史哲, 平井 宏明, 黒岩 晃, 渡邊 英知, 植村 充典, 宮崎 文夫, “サドル支持型体重免荷トレッドミル歩行の運動解析: 下肢の平衡点軌道、足先剛性の可視化”, 第 10 回モーターコントロール研究会抄録, A36, 2016.
 21. 吉川 史哲, 長川 祐磨, 平井 宏明, 黒岩 晃, 渡邊 英知, 植村 充典, 宮崎 文夫, “体重免荷方式の違いが歩行に与える影響: 吊り上げ型とサドル支持型の比較”, 第 10 回モーターコントロール研究会抄録, A37, 2016.
 22. 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,” *Proc. 2015 IEEE-RAS 15th Int. Conf. Humanoid Robots (Humanoids2015)*, pp. 88-93, 2015.
 23. K. Koba, K. Uno, T. Oku, M. Uemura, H. Hirai, and F. Miyazaki, “Regulation of muscle activities for fast, accurate, and smooth movements: evolution of virtual trajectory via coupling of directional mechanical impedances,” *Proc. Progress in Motor Control X (PMC2015)*, pp. 114-115, 2015.
 24. 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,” *Proc. 14th IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. Rehabilitation Robotics (ICORR 2015)*, pp. 899-904, 2015.
 25. M. Uemura, H. Hirai, and F. Miyazaki, “Adaptive tracking control with partial regressor for multi-joint robot,” *Proc. 41st Ann. Conf. IEEE Industrial Electronics Society (IECON2015)*, pp. 004441-004446, 2015.
 26. 渡邊 英知, 奥 貴紀, 平井 宏明, 宇野 かな, 植村 充典, 宮崎 文夫, “ヒト型下肢ロボットの設計, モデル化, 制御,” 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2015), 2I2-5, 2015.
 27. 吉川 史哲, 北野 翔大, 富永 健太, 奥 貴紀, 古場 啓太郎, 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “筋シナジー制御法を実装した筋骨格アームロボットの動的挙動,” 第 33 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2015), 1A3-07, 2015.
 28. 寺田 祐基, 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “アシストロボットののための接地センサを用いない歩行相推定アルゴリズム,” 第 33 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2015), 1I1-05, 2015.
 29. 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “足首周りの角運動量に基づく脚ロボットの立位可安定性,” 第 33 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2015), 2I2-02, 2015.
 30. 辻 真緒, 富永 健太, 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “ヒール靴着用時の歩行運動における下肢の筋協調解析,” 第 33 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2015), 2L1-01, 2015.
 31. 亀田 誠二, 松岡 慎也, 富永 健太, 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “ヒトの走行運動のエネルギー解析,” 第 33 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2015), 2L1-04, 2015.
- 〔図書〕(計 1 件)
1. H. Hirai, H. Pham, Y. Ariga, K. Uno, F. Miyazaki, “Motor control based on the muscle synergy hypothesis,” *Cognitive neuroscience robotics: synthetic approaches to human understanding, volume I: synthetic approaches*, Part I, Chap. 2, pp. 25-50, Springer, 2016.
- 〔産業財産権〕
出願状況 (計 6 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：平井 宏明, 吉川 史哲, 渡邊 英知, 長川 祐磨, 黒岩 晃, 植村 充典, 宮崎 文夫

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：PCT/JP2017/32049

出願年月日：2017年9月6日

国内外の別：国外

名称：歩行訓練装置、歩行診断装置、体重免荷装置、歩行訓練方法、及び歩行診断方法

発明者：平井 宏明, クレブス ハーマノ イゴ, 渡邊 英知, 長川 祐磨, 吉川 史哲, 黒岩 晃, 片岡 夏美, 佐伯 友里, ニノ丸 雄大, 植村 充典, 宮崎 文夫

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2017-36437

出願年月日：2017年2月28日

国内外の別：国内

名称：Method for determining leg-phase shift timing, leg-phase shift timing determination apparatus, method for controlling walking assistance, and walking assistance

発明者：M. Uemura, F. Miyazaki, and H. Hirai

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：US 15/324,136

出願年月日：2016年12月14日

国内外の別：国外

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：平井 宏明, 吉川 史哲, 渡邊 英知, 長川 祐磨, 黒岩 晃, 植村 充典, 宮崎 文夫

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2016-173385

出願年月日：2016年9月6日

国内外の別：国内

名称：Movement analysis apparatus, method for analyzing movement, and movement analysis program

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

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：US 15/104,655

出願年月日：2016年6月15日

国内外の別：国外

名称：Legged mechanism, walking robot, orientation control method, and program

発明者：M. Uemura, F. Miyazaki, and H. Hirai

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：PCT/JP2016/060915

出願年月日：2016年4月1日

国内外の別：国外

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：大阪大学

種類：特許

番号：US9078585 B2

取得年月日：2015年7月14日

国内外の別：国外

〔その他〕

ホームページ：

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

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

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

ハーマノ イゴ クレブス (KREBS, Hermano Igo)

マサチューセッツ工科大学・機械工学科・

主任研究員・講師