

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14198

研究課題名（和文）筋シナジーと動的プリミティブの概念に基づく脳卒中への運動介入とロボット療法

研究課題名（英文）Robotic therapy after stroke: novel interventions based on muscle synergies and dynamic primitives

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） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：現在、ロボット療法（特に下肢運動）は黎明期にあり、次世代医療の発展へ向けて正しい介入と誤った介入を見極めながら、臨床エビデンスの蓄積によって効果的な運動療法を開発することが求められている。本研究では、脳卒中リハビリテーションにおける運動協調に着目し、大阪大学とMIT研究チームが開発したシナジー診断技術とロボット療法技術を組み合わせることで、新しいロボット介入試験を実施し、シナジーと動的プリミティブの概念の下で効果を検証した。

研究成果の概要（英文）：Robotic therapy, especially for lower extremity function, currently stands at the early stage of development. The next generation of robot-aided neuro-rehabilitation requires assessing the effect of interventions correctly and collecting clinical evidence to develop an efficacious intervention. Stroke rehabilitation requires motor coordination. By combining the method of “synergy assessment” and the “robotic therapy” developed by the Osaka University and MIT researchers’ team, we developed a novel robotic-intervention test and validated it in the framework of synergies and dynamic primitives (submovements, oscillators, and impedance).

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

近年、脳卒中後の運動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。神経科学に基づく運動介入と正確な運動を再現し計測できるロボット技術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を向上させる試みである。本試みは、神経リハビリテーションにおけるロボット応用の潜在的な可能性を示している。しかし、我が国のロボット療法技術は未だ黎明期にあり、欧米諸国に遅れをとっている。現在、正しい介入と誤った介入を適切に見極めながら、臨床エビデンスの蓄積によって効果的な運動療法を開発することが求められている。一方、申請者らは近年、「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、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、インピーダンス、平衡点）を推定する運動解析技術を発明し、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、この新しい運動理論に基づくヒトと機械の調和技術を脳卒中患者の運動療法へ展開し、障害後の運動再学習の機序の解明を試みるとともに、患者の運動回復能力を積極的に引き出し運動改善を図るロボット訓練法の確立を目指す。

### 2. 研究の目的

本研究では、脳卒中のリハビリテーションを「身体協調に基づく中枢神経系の機能回復」と捉え、患者の身体協調の再獲得と保持を促進するロボット訓練法を開発を行う。新運動理論の下、筋シナジー抽出/予測/支援技術より診断される身体協調に基づくインピーダンスと平衡点の調整訓練が運動の再学習を促進し、運動改善に効果的であることを臨床試験より検証する。

### 3. 研究の方法

身体協調性の概念の下、上肢/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 — 異常な身体協調性の定量評価
- 治療 — 正常な身体協調性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) 上肢訓練

脳卒中患者の運動訓練と運動再学習  
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調を解析することで、その柔軟な修復能力を定量評価し、運動再学習と身体協調の関係を明らかにした。図1はロボット訓練システムにより力覚提示を受けながらタスクを遂行する患者の様子を示したものである。筋シナジーと密接な関わりを持つ手先剛性楕円と手先平衡点の変化をディスプレイに提示し、患者の視覚フィードバックを利用した訓練が可能となっている。図2はタスク遂行時の手先剛性を摂動法（従来法）と筋電図解析（提案手法）の2つの方法で推定した結果である。両結果の類似は筋シナジー診断技術に基づく身体協調解析が（少なくとも軽度の）脳卒中患者に適用可能であることを示している。そこで、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）と身体協調の関係について解析を行った（図3）。訓練後では、筋シナジー及び手先剛性の2つの身体協調の指標において大幅な改善が見られ、手先平衡点軌道においても完全ではないものの運動回復が認められた。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。

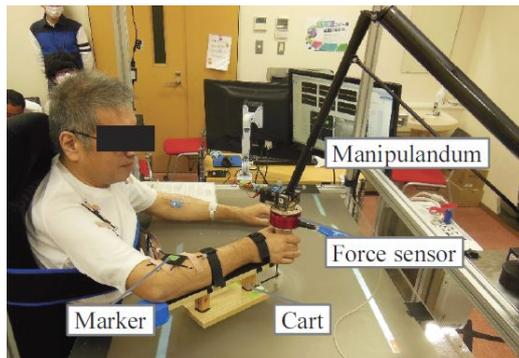


図1：力覚提示ロボットにより運動外乱を受ける脳卒中患者A

$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$D_{ss}$	$D_{sc}$	$D_{ca}$	$D_{cc}$	$K_{ss}$	$K_{sc}$	$K_{ca}$	$K_{cc}$
Nm/(rad/s <sup>2</sup> )			Nm/(rad/s)				Nm/rad			
0.231	0.203	0.132	5.832	1.317	1.622	1.043	101.1	25.51	19.90	30.44

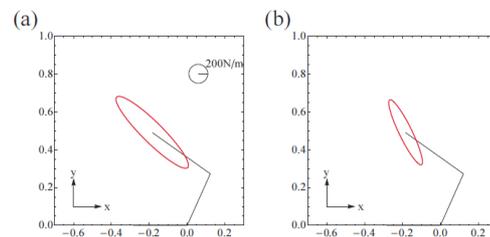
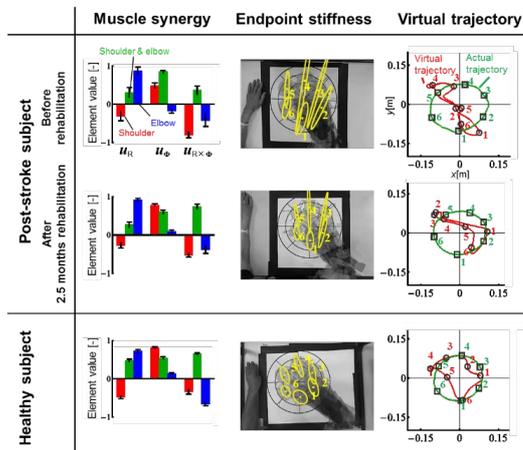


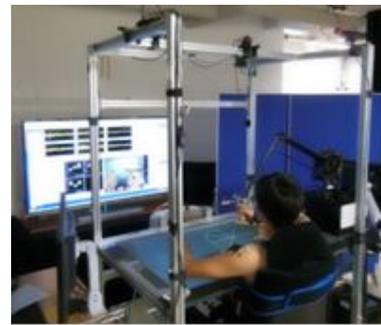
図2：脳卒中患者Aの手先剛性。(a)機械的摂動による推定 (b)筋電図解析による推定。



**図3：脳卒中患者のリハビリテーションによる身体協調の回復**．2.5 ヶ月の運動訓練によって，2 つの身体協調の指標（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つの身体協調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に注目し値する．

臨床応用へ向けたシナジー診断技術の洗練化

筋シナジー診断において，患者への負担となる最大随意収縮時の筋電位を計測することなしに高い精度で筋シナジーと平衡点の推定を可能にする新しい診断法を開発した．上述の成果を臨床へ応用する際に実用面で重要となる技術である．これらの技術が実装された研究代表者らのロボット訓練システム（図4）は可搬式でオールインワンの訓練環境を提供できるように設計されている．必要な運動機能や症状に応じて訓練内容を変更，追加することでロボット訓練ワークステーションとして機能することができる．本技術を含む一連の手法は国内外に特許出願されている．

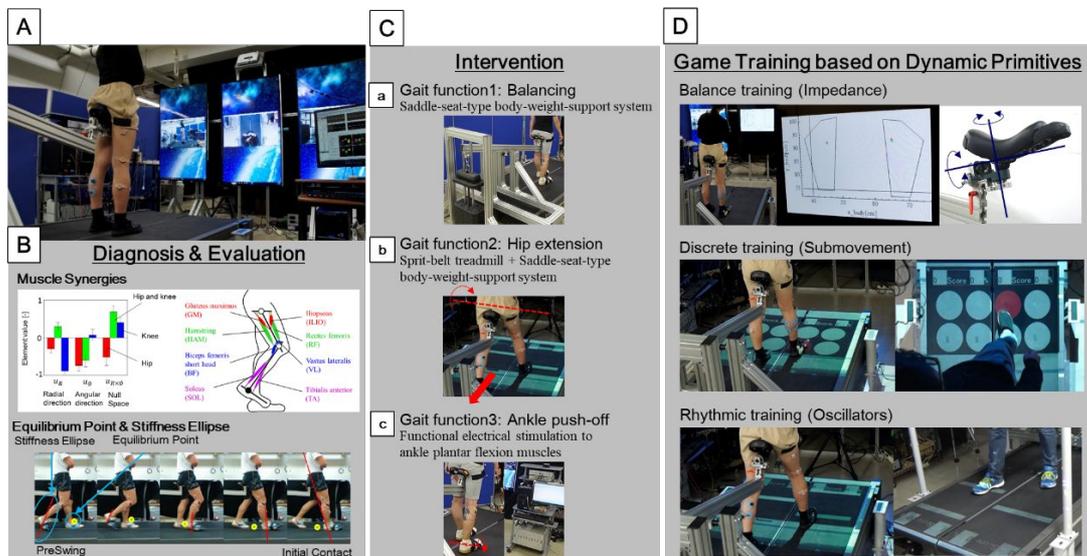


**図4：上肢訓練ロボットシステム**

(2) 下肢訓練

筋シナジー診断に基づく歩行訓練環境

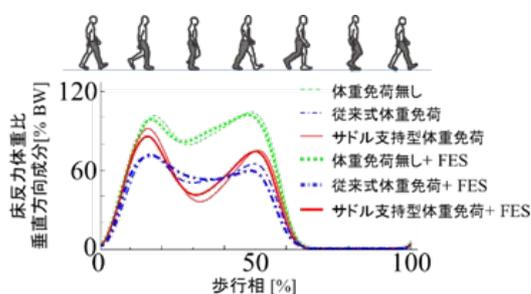
歩行運動は，環境と断続的な力学的相互作用を繰り返しながら，両脚の下肢筋群の協調が求められる高度な随意運動である．ここでは，軽～中程度の脳卒中患者の歩行訓練を想定し，図5Aのような体重免荷歩行に対して，筋シナジー診断技術を適用した．サドル支持型体重免荷装置とロボット制御された左右分離型トレッドミルの介入（図5C-a, b）と，足関節底背屈筋群への機能的電気刺激（図5C-c）の介入によって，症状に応じた訓練（動作点の剛性及び平衡点の補助／抵抗）を実施した．第一の介入は，対象の股下部を支持し体重を軽減しながら，股部と（トレッドミル上の）足部との相対位置変化を促し，対象の「バランス制御」と「股関節伸展」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5B）．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，



**図5：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**

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7D）。これらの歩行訓練環境に係る一連の技術は特許出願された。

健康者・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除（ $< 33\%$  BWS）下で，低速～中速（ $2.5 \sim 4\text{km/h}$ ）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。



中程度の免除(33%BWS)、中速(3.5km/h)における、体重免除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8：歩行訓練環境の介入効果の一例（床反力）



図9：歩行訓練を行う脳卒中患者B

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 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, “部分体重免除, 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

〔学会発表〕(計 21 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.
- 〔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 0 件）

〔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

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

### (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