

筋シナジの診断に基づくロボット介入とその効果

—— 脳卒中リハビリテーションの新展開 ——

—— Robot-assisted intervention in stroke rehabilitation :
a new approach based on assessment of muscle synergies ——



2161017

研究代表者	大阪大学大学院 基礎工学研究科	准教授	平 井 宏 明
共同研究者	大阪大学大学院 基礎工学研究科	名誉教授	宮 崎 文 夫

【研究の目的】

現在、我が国のロボット療法は黎明期にあり、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。本研究では、脳卒中リハビリテーションにおける運動の協調性に着目し、研究代表者らの「シナジー診断技術」と「ロボット療法技術」の融合により、ニューロリハビリテーションの新展開を図るロボット介入方法の確立を目指す。具体的には、研究代表者らの仮説「身体協調に基づく身体の剛性と平衡点の調整訓練が脳卒中患者の運動再学習を促進し、運動機能回復に効果的である」ことを臨床試験を通して実証することを目的とした。

【研究の内容、成果】

シナジーの概念の下、上肢・下肢運動へそれぞれロボット介入を行ない、得られた結果を統合し、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。ここでは課題達成のために克服すべき以下の3つの技術課題を設定した。

- ・ 診断－異常な身体協調の定量評価
- ・ 治療－正常な身体協調の再獲得を促進する介入プロトコルの開発
- ・ 効果－臨床試験による介入効果の科学的根拠の獲得

上肢訓練

① 健常者の運動訓練と運動学習

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調の変化を解析し、運動習熟と身体協調の関係を明らかにした。図1は「シナジー診断技術」及び「多自由度筋協調モデル」によって推定された3つの身体協調の指標（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しながら変化している様子を示している。これらの運動指標の詳細な解析により、運動の習熟には、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、身体協調に基づく運動介入に示唆を与えるとともに、身体協調の概念が運動の評価や診断、さらには運

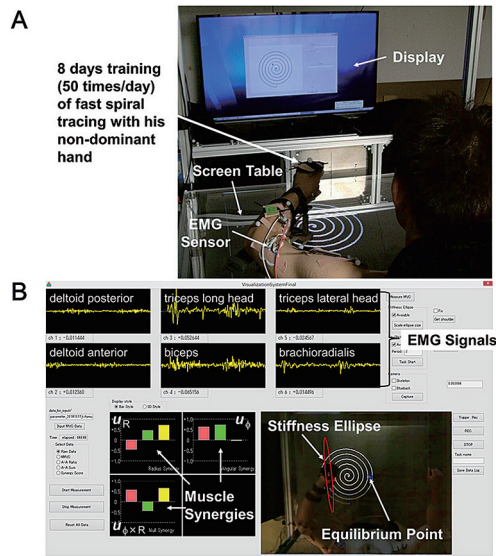


図1 (A) 螺旋描画運動を訓練する健常者。(B) ロボット訓練システムにより、筋シナジー、手先剛性、手先平衡点の3つの身体協調の指標がリアルタイムに推定される。

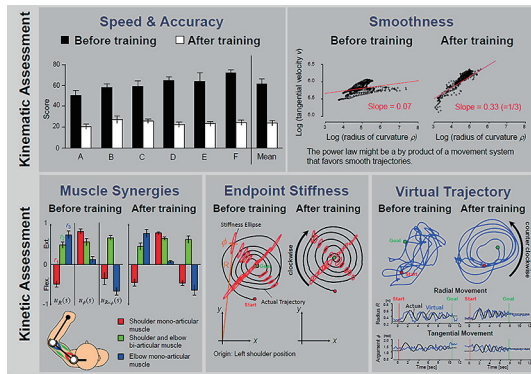


図2 運動学習効果を測る5つの指標。A. スパイラルテスト (左上), B. 1/3乗則 (右上), C. 筋シナジー, D. 手先剛性, E. 手先平衡点軌道。運動学評価指標 (A, B), 運動力学評価指標 (C, D, E) とともに8日間の練習によって運動が大幅に改善されたことを示している。

動の支援や訓練に有用であることを指し示している。

② 脳卒中患者の運動訓練と運動再学習

運動麻痺は練習（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3は口

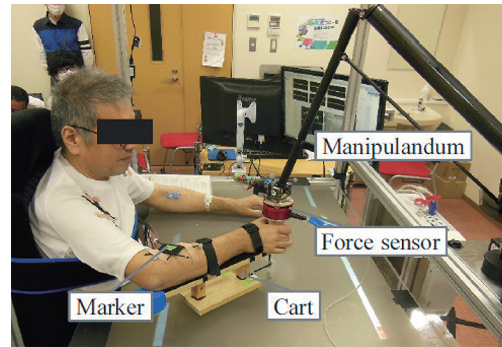


図3 力覚提示ロボットにより運動外乱を受ける脳卒中患者 A

Z_1	Z_2	Z_3	D_{xx}	D_{xy}	D_{yy}	D_{ee}	K_{xx}	K_{xy}	K_{yy}	K_{ee}
Nm/(rad/s ²)			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

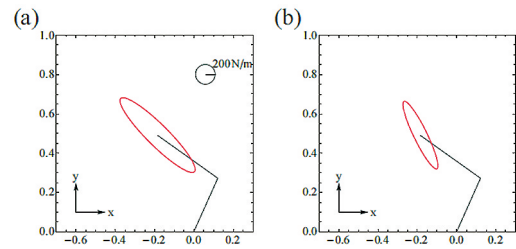


図4 脳卒中患者 A の手先剛性。(a) 機械的摂動による推定。(b) 筋電図解析による推定。

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4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5）。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。

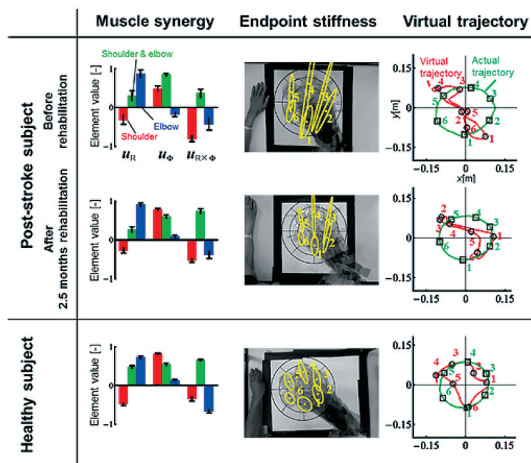


図5 脳卒中患者 A のリハビリテーションによる身体協調の回復。2.5ヶ月の運動訓練によって、2つの身体協調の指標（筋シナジー、手先剛性）に大きな改善が認められた。訓練後には、理想となる健常者のパターンに近づいていることが確認される。なお、もう1つの身体協調の指標である手先平衡点軌道については回復の途中と考えられる。これらの変化は運動学（緑線）からは観測されない点は注目に値する。

③ 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6）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た。

下肢訓練

① 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7Aのような体重免荷歩行に対して、「シナ

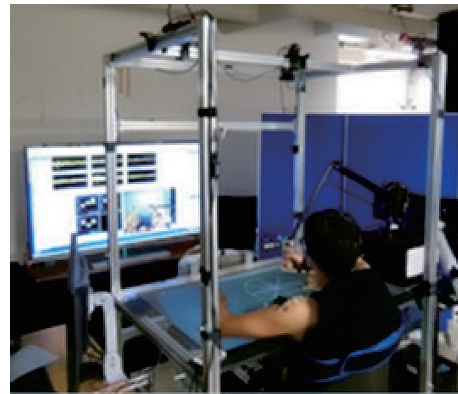


図6 上肢訓練ロボットシステム

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7C-a, b）と、足関節底背屈筋群への機能的電気刺激（図7C-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7B）。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7D）。なお、これらの一連の技術は特許出願された。

② 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

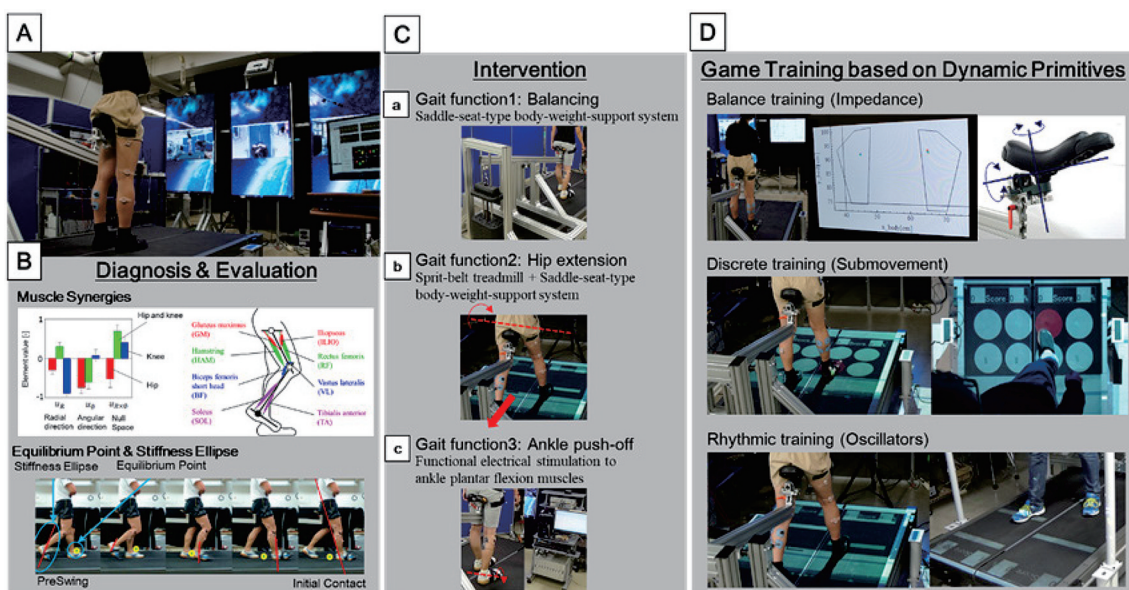


図7 筋シナジーと動的プリミティブの概念に基づく歩行訓練

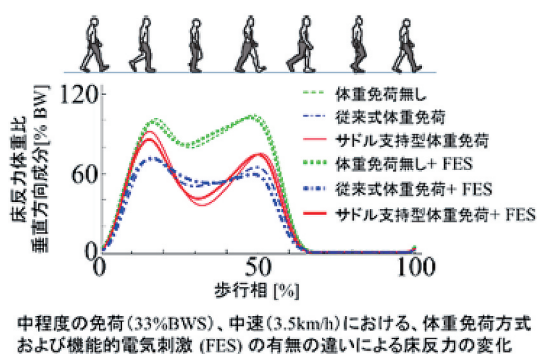


図8 歩行訓練環境の介入効果の一例(床反力)



図9 歩行訓練を行う脳卒中患者B

より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(2.5～4 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。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では予備的ではあるが、仮説を裏付ける複数の知見を得ることができた。今後は、よ

り強力な科学的根拠の獲得へ向けて、病院、海外研究機関、大手企業と連携しながら、国際共同研究を継続していく予定である。

[成果の発表、論文等]

[1] 片岡夏美, 平井宏明, Taya 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, Hermano Igo 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.

[2] 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. Biomed. Rob. Biomechatron. (BIO ROB2018)*, pp. 922-927, 2018.
- [3] 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. Biomed. Rob. Biomechatron. (BIO ROB2018)*, pp. 1038-1043, 2018.
- [4] 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. Biomed. Rob. Biomechatron. (BIO ROB2018)*, pp. 390-395, 2018.
- [5] 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, *15th IEEE Int. Conf. Rehabilitation Robotics (ICORR2017)*, pp. 381-386, 2017.
- [6] 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.
- [7] 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, *Progress in Motor Control XI (PMC XI)*, 1-A-9, 2017.
- [8] 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 Eng. Med. Biol. Soc. (EMBC2017)*, pp. 942-945, 2017.
- [9] (特許) 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: 運動解析装置, 運動解析方法及び運動解析プログラム, PCT/JP2017/32049, 大阪大学, 2017年9月6日.
- [10] (特許) 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, 二ノ丸雄大, 植村充典, 宮崎文夫: 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, 特願 2017-36437, 大阪大学, 2017年2月28日.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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)
- [14] 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.
- [15] 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)
- [16] (書籍) 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.
- [17] (特許) F. Miyazaki, H. Hirai, M. Uemura, K. Uno, and T. Oku: Motion analysis apparatus, method for analyzing motion, and motion analysis program, US20160324436A1, Osaka University, Nov. 10, 2016.
- [18] (特許) 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: 運動解析装置, 運動解析方法及び運動解析プログラム, 特願 2016-173385, 大阪大学, 2016年9月6日.