

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23240028

研究課題名(和文) 運動学習・支援のための多次元情報記録・提示とモデルベース強化学習

研究課題名(英文) Multi-dimensional information recording/presentation and Model-based Reinforcement Learning for Motor Learning/Assistance

研究代表者

柴田 智広 (Shibata, Tomohiro)

九州工業大学・生命体工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：40359873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,500,000円

研究成果の概要(和文)：Assist-As-Needed原理に基づいた強化学習エージェントが個人適応的にヒトの運動学習を支援することにより、その運動学習を促進可能であることを科学的に示した。また姿勢異常を呈する疾患を持つ症例のための姿勢評価、フィードバックトレーニングシステムを開発し、めまい平衡系疾患およびパーキンソン病を対象に姿勢リハビリテーションに関する医工連携を進め、後者については、在宅における姿勢リハビリテーションの実施可能性および即時効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：We showed a reinforcement-learning agent incorporating the Assist-As-Needed principle can accelerate motor learning by its individual adaptivity. We also developed an In-home posture evaluation and visual-feedback training system for patients having postural deformities, and applied for dysequilibrium and Parkinson's disease. In particular, we were able to show a feasibility of the system for in-home postural rehabilitation and its immediate but short term effectivity.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：ロボティクス 人間機械系 強化学習 生体計測 運動学習支援

1. 研究開始当初の背景

スポーツトレーニングやリハビリテーションなどの分野では、運動学習理論や学習支援(介入)戦略の体系が構築されてきた(谷, 2005)が、実際にはそれぞれの支援者が各自の経験に基づいて支援を行っている側面が大きく、情報科学技術の導入も進んでいない。また近年、モーションキャプチャや筋電図を計測し、筋骨格モデルに基づく筋活動推定が可能になってきた(Murai ら, 2009)が、熟達者と非熟達者の筋活動の差異をどのようにして埋めればよいのか方法論が無く、また筋活動の差異を埋めることの妥当性も検証されていない。その他、ロボットを用いた個人適応的な理学療法支援研究(Duschau-Wicke ら, 2010)も行われてきたが、健常者の運動軌道为目标軌道としていた。理学療法の世界では、障害者の目標軌道に健常者の軌道を用いることは必ずしも良くないことが知られている。

このような状況に対し、申請者は、運動のゴールを報酬関数によって記述し、詳細な学習者のモデルや、目標軌道が不要な、モデルフリー型の強化学習を用いる方法を提案した。そして、健常者のスポーツとして、最も運動が単純なものの一つと考えられるダーツ投擲運動を対象として実験を進めている。しかし、この単純な対象ですら、様々なタイプの被験者が存在し、モデルフリー型の強化学習だけでは支援が容易ではないと考えられる。

参考文献

- ・ 谷 浩明. (2005). 運動学習に効果的な練習方法とは何か. 理学療法, 22(7), 982-988.
- ・ Murai, A., et al. (2009) Computationally fast estimation of muscle tension for realtime Bio-feedback. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2009), pp. 6546-6549.
- ・ Duschau-Wicke, et al. (2010) Patient-cooperative control increases active participation of individuals with SCI during robot-aided gait training. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 7 (43)

2. 研究の目的

本研究の目的は、スポーツトレーニングやリハビリテーションなどの運動学習を認知的・物理的に支援する個人適応的なシステムを構築することと、その有用性を実証実験により示すことである。

個人適応的な支援は強化学習によって実現する。学習者の運動学習の様子、また支援者が介入する様子は、モーション、筋電図などの身体情報や、脳波や脳表面の酸素状態などの脳活動関連情報、また学習者や支援者の発

話情報などの多次元情報として計測する。支援は、ロボット、視覚、言語などにより多次元的に行う。実証実験は、健常者向け、非健常者向けにそれぞれ異なるタスクを設定し実施する。モデルフリーだけでなくモデルベース強化学習による個人適応的な支援を行うためには、記録した多次元情報から行動予測モデルを機械学習によって獲得する。

3. 研究の方法

健常者に対しては、ダーツ投擲運動とドラム演奏運動を題材として研究を進めた。ダーツ投擲運動は、体幹は静止し、片腕のみ鉛直平面内で動作させるという、ヒトの投擲運動の中でも最も単純な動作の一つと言え、科学研究に適している。基礎的なドラム演奏運動は演奏時には体幹は動かさず四肢を動かす運動であり、非常に単純な演奏課題により熟達研究が可能である(4. 研究成果の章で後述)。脳活動計測は近赤外分光法(Near-InfraRed Spectroscopy)を用いた。

非健常者に対しては、当初歩行リハビリテーションの強化学習を計画していたが、国立リハビリテーションセンターの装置の故障や、代表研究者が当初所属していた奈良先端科学技術大学院大学の装置の故障および修復不能という事態になり、中途での計画変更を余儀なくされた。研究代表者は研究分担者の為井らと、姿勢異常を呈する疾患を持つ症例のためのMicrosoft Kinectと任天堂Wii バランスボードを用いた姿勢評価、フィードバックトレーニングシステム(iPosture)を開発し、為井は椅子からの立ち上がり介助動作の学習支援を、研究分担者の和田は、めまい平衡系疾患の姿勢リハビリテーションを、研究分担者の岡田は、姿勢異常を呈するパーキンソン病患者のリハビリテーションを題材に基礎研究を推進した。また研究代表者は、指のリハビリテーションへの応用を想定した、前腕筋電位信号から指5本の連続的な姿勢(関節角度)をリアルタイム推定する基礎研究を行った。

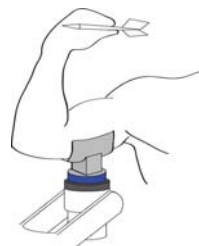
4. 研究成果

(1) 健常者に対する運動学習支援に関する研究

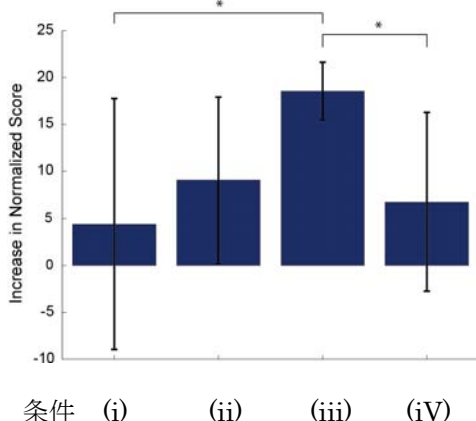
ダーツ投擲運動は以前から研究代表者が取り組んできた研究であり、本補助金の支援を得て、さらに内容を深めた上で、英文ジャーナル誌に発表(雑誌論文③)できた。

より具体的にはダーツボードの中央を最高得点としてそこからダーツが実際に刺さったところまでの距離をスコアとし、本研究では提案手法が他の手法より効率的に非熟達者のスコアを上昇させることを示すことができた。

非熟達者は投擲運動中に肘肩の位置の変動が大きいことが判明したため、ロボッ



トマニピュレータにより、非熟達者の上腕を下側から無拘束で支えることとした（下図参照）。非熟達者は投擲前からマニピュレータの先に上腕を置くことができるが、無拘束なので投擲の際にはマニピュレータの先に上腕を置かず投擲することもできる。このマニピュレータの先端には、力センサも装着されて、ヒトがマニピュレータ先端にかけた力（マニピュレータ側から見ると支援力）を計測した。マニピュレータの運動を鉛直軸に拘束し、仮想インピーダンス制御を行い、仮想バネ定数を調整することで、上腕が置かれた際の支援力を調整した。スコアと支援力の線形和を報酬関数として、投擲中の肘および肩の位置変動量を状態変数として、仮想バネ定数を方策パラメータとして、一投を1試行とする強化学習を構成した。これにより、「スコアが上昇すれば支援力を減らす」という AAN を実装した。提案手法の有効性は、i) ロボット無条件、ii) ロボット固定（マニピュレータ位置固定）条件、iii) 提案手法適用条件、iv) 仮想バネ定数が全員に対して一投につき一定量減弱される仮想バネ定数定速減弱条件、の結果を比較することにより、提案手法が唯一他の条件に対し統計的な優位性を示すことができた（下図および雑誌論文③参照）。



一方、実験参加者の投擲運動および学習支援パターンの時間変化を解析したところ、実験参加者毎のバラつきが大きく、モデルを抽出するには至らなかった。

ドラム演奏課題の第一の目的は、非熟達者と熟達者の演奏時脳活動パターンを比較すること、また非熟達者の脳活動パターンが学習時に熟達者のそれに近づいてゆくかを見ることであった。演奏時には体幹は動かさず四肢を動かす課題であり、近赤外分光法（Near-InfraRed Spectroscopy）により非熟達者と熟達者の演奏時に、前頭部、頭頂部、および側



頭部を計測した。

課題は下図のように易課題（左）と難課題（右）を用意した。易課題は非熟達者と熟達者双方にとり容易なドラムパターンであり、難課題とは非熟達者にとっては演奏が困難だが、熟達者にとっては容易なドラムパターンとした。難課題に対する成功率が高い被験者はスクリーニングテストによって実験参加者から除いた。実験は3日間に渡って両課題を実施した。非熟達者の成績は有意に上昇した。個人解析では、難課題の成功率上昇に伴って脳活動が有意に減少する領域が見つかったが、グループ解析ではそれが認められなかった。すなわち、課題学習中の脳活動パターンの時間変化を解析したところ、実験参加者毎のバラつきが大きく、モデルを抽出するには至らなかった。

- (2) 非健常者に対する運動学習支援（リハビリテーション）に関する研究研究代表者は研究分担者の為井らと、医療、介護施設や在宅において簡便に姿勢評価、姿勢フィードバックトレーニングを行うことが可能となる。iPostureを開発し、その姿勢評価の結果の信頼性や妥当性を確認した（Orito, et al., 2014）。為井らは、iPostureを利用し研究分担者の和田、岡田らと共同するとともに、高齢者の椅子からの立ち上がり介助動作の学習支援を目指し基礎研究を推進した。熟達した介護士は、被介助者の立ち上がり動作における力学的エネルギー効率を高める可能性を見出した（発表準備中）。研究分担者の和田は、めまい平衡系疾患の姿勢リハビリテーションに、口角部への振動刺激による効果がある可能性を見出した。強化学習による調整すべきパラメータを刺激時間として、パイロット実験を行い、有望な結果が得られつつある。



研究分担者の岡田は、姿勢異常を呈するパーキンソン病患者に iPosture を導入し (次ページ冒頭の図参照. (A)パーキンソン病患者による在宅リハビリの様子, (B) iPosture による視覚的な姿勢フィードバックの様子), 姿勢リハビリテーションの実施可能性および即時効果を確認した (雑誌論文①および学会発表②参照).

長期効果が認められなかった原因は大きく2点あると考えられる. 第1に, 視覚的な姿勢フィードバックに依存した神経回路が特異的に訓練されたことが考えられる. 第2に, 姿勢異常の原因は認知系と制御系に分けられると考えられるが, 本システムの方法がその両方を訓練できるかは不明である. 姿勢異常患者の主観的な鉛直方向 (Subjective Visual Vertical; SVV) は実際の鉛直方向からずれていることが多いことはよく知られている. そこで本課題研究では, 和田と協力して頭部に関する主観的な鉛直方向のずれを計測する装置を開発し, 岡田は身体に関する主観的な鉛直方向のずれを計測する装置を開発した. 今後は, 視覚的な姿勢フィードバック情報への依存度を減らす AAN 原理を導入した訓練が, SVV の改善や姿勢の改善にどのような効果を及ぼすか検証を行う必要がある.

また研究代表者は, 前腕8か所の筋電位信号から指5本の連続的な姿勢 (各関節角度) を, 神経生理学の知見と機械学習を組み合わせることで, リアルタイムに高い精度で推定をする手法を確立した (雑誌論文②). 本手法の適用範囲は指運動に留まらないと考えられるため, 今後様々な部位のリハビリテーションへの応用が期待される.

以上のように, 本研究は当初計画からは変更を余儀なくされたが, AAN 原理に基づく強化学習エージェントがヒトの運動学習を促進可能であることを科学的に示し, まためまい平衡系疾患およびパーキンソン病を対象に姿勢リハビリに関する医工連携を進め, 在宅リハビリシステムの実施可能性や有効性を示すことができ, また, 今後取り組むべき重要な課題を抽出するなど, 重要な成果を収めることができた.

参考文献

・Orito, Y., Funaya, H., Tamei, T., Shibata, T., Ikeda, K, Development of Low-cost and Accurate Posturography Using Kinect for

In-home Rehabilitation of Balance Disorders, The 19th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2014, pp.18-188.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① Okada, T., Shibata, T., Tamei, T., 他6名, In-Home posture evaluation and visual feedback training to improve posture with a Kinect-based system in Parkinson's Disease, Journal of Novel Physiotherapies, 査読有, 4:232, 2014, 10.4172/2165-7025.1000232.
- ② Ngeo, J., Tamei, T. and Shibata, T., Continuous and simultaneous estimation of finger kinematics using inputs from an EMG-to-muscle activation model, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 査読有, 11:122, 2014, 10.1186/1743-0003-11-122
- ③ Obayashi, C., Tamei, T. and Shibata, T., Assist-as-needed robotic trainer based on reinforcement learning and its application to dart-throwing, Neural Networks, 査読有, 53, 2014, pp.52-60, 10.1016/j.neunet.2014.01.012

[学会発表] (計 10 件)

- ① Ngeo, J., Tamei, T., and Shibata, T., Estimation of continuous multi-DOF finger joint kinematics from surface EMG using a multi-output Gaussian process, The 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2014年8月28日, Chicago, USA
- ② Okada, Y., Shibata, T., Tamei, T., 他6名. In-home posture evaluation and visual feedback training to improve posture with a Kinect-based system MDS 18th International Congress of Parkinson's Disease and Movement Disorders, 2014年6月10日, Stockholm, Sweden
- ③ 柴田智広, 適応的なロボットによるヒトの運動学習や生活機能の支援, 日本生理人類学会第69回大会, 2013年10月26日, 同支社大学京田辺キャンパス
- ④ Shibata, T., Adaptive assistive robotics, International Workshop on Advances in Robotics, 2012年7月6日, New Delhi, India
- ⑤ Tamei, T., Obayashi, C. and Shibata T. Throwing darts utilizes the interaction torque of the elbow joint,

The 33rd Annual International
Conference of the IEEE Engineering
in Medicine and Biology Society, 2011
年 8 月 31 日, Boston, USA

准教授

研究者番号： 6 0 5 8 1 3 2 9

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.brain.kyutech.ac.jp/~tom/kaken/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 智広 (SHIBATA, Tomohiro)
九州工業大学・生命体工学研究科・教授
研究者番号： 4 0 3 5 9 8 7 3

(2) 研究分担者

為井 智也 (TAMEI, Tomoya)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教
研究者番号： 4 0 5 4 8 4 3 4

(3) 研究分担者

岡田 洋平 (OKADA, Yohei)
畿央大学・健康科学部・助教
研究者番号： 8 0 5 1 1 5 6 8

(4) 研究分担者

和田 佳郎 (WADA, Yoshiro)
奈良県立医科大学・医学部・講師
研究者番号： 8 0 2 4 0 8 1 0

(5) 研究分担者

小町 守 (KOMACHI, Mamoru)
首都大学東京・システムデザイン研究科・