

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19732

研究課題名（和文）協調運動学習下の脳活動解析に基づく運動学習支援エージェントの最適化

研究課題名（英文）Optimization of Robotic Agent for Cooperative Motor Learning

研究代表者

近藤 敏之（KONDO, Toshiyuki）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：60323820

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、未知の手先外力が作用する運動学習課題下で、ヒトの運動学習を促進するロボットの運動支援戦略を明らかにし、アルゴリズムとして実現することを目的とする。初年度は、予備実験として人間同士の協調運動学習実験を行い、ペアとなる相手が学習者と同じ初心者でありかつともに上達することが学習者の事後の汎化性を高めることを示唆する結果を得た。二年目以降は、そのアルゴリズムをスキルレベル調節エージェントとしてロボットに実装し、被験者を用いた協調運動学習実験を行った。実験の結果、スキルレベル調節エージェントとペアを組んだ被験者が熟練者や初心者を模したエージェントと比べて有意に高い汎化性を示すことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のリハビリ支援ロボットの多くは、理学療法士が患者の状態（課題成績、取組姿勢、表情など）を随時モニタして課題の強度、難易度等を調節している状況にあるが、最適な運動支援の量と質は患者の機能改善とともに変化すると考えられる。本研究の成果から、学習者の運動技能レベルに合わせて運動支援の大きさを調節するアルゴリズムを用いることで、環境変化への適応性（運動技能の汎化性）が高まることが示された。人間と相互作用してその活動を支援する人工物の開発は、高齢者を対象とするのみならず、スポーツ技術や伝統技能の継承など、様々な人間活動を記録・活用する技術の実現にも繋がること期待される。

研究成果の概要（英文）：Recently cooperative motor experience with a novice human partner has been reported to have a positive effect on individual motor performance. In this study, we developed a robotic agent system, which could manipulate cooperative motor learning, and compared the effect of intervening strategies on individual motor performance. Experimental result suggests that motor learning with the peer, namely, motor learning with skill-level adjusting strategy is most effective, suggesting that cooperative motor learning with a peer, 'learning together and improving together', is promising for the robotic motor rehabilitation.

研究分野：知能情報学

キーワード：協調運動学習 ロボット エージェント

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超高齢社会を迎えた我が国では、脳血管疾患（脳卒中など）に起因する運動機能障害を持つ患者が増加している。これに対し、近年、ブレイン・コンピュータ・インタフェース(BCI)技術やロボット技術を活用した新たなニューロリハビリテーション手法の有効性を示唆する研究事例が世界的に多数報告されている。多くの BCI ニューロリハビリテーション研究は、随意的な運動企図と同期した感覚フィードバック（視覚、触覚及び体性感覚）を繰り返し受容する過程が、運動主体感（動かしているのは自分であるという身体意識）や身体保持感（この身体は間違いなく自分のものであるという身体意識）といった自己身体像の脳内再構成を促し、これが運動機能の再建を促進するとの仮説に基づいている。しかしながら、運動関連領域に障害を負った脳卒中患者は健常者とは異なり、運動企図はあっても適切な運動指令を生成することが困難である。このように、BCI やロボットを用いたリハビリテーション研究では、「能動性」や「運動主体感」の重要性については言及されているものの、随意的な運動に関連する運動関連領域が運動機能回復過程において果たす役割については必ずしも明確にされていない。真に有効なニューロリハビリテーション法を開発するためには、機能回復機序の理解に基づいた手法の設計が必須である。

研究代表者は、平成23年度～26年度に実施した科学研究費補助金基盤研究(B)「知的エージェント介在型運動機能再建手法の開発」において、下肢運動麻痺患者を対象とした仮想空間移動型 BCI リハビリシステムに人工知能エージェントプログラムを介在させることで、持続的な訓練を動機づける手法の開発に取り組んだ。また、一人称視点からの運動観察と機能的電気刺激による体性感覚フィードバックを組み合わせ、脳波特徴量の発現訓練を行った結果、運動主体感を高める視覚・体性感覚フィードバックを与える条件下で訓練成績が有意に向上することを確認した。しかしながら、実際のリハビリ現場では、患者の状態を考慮した課題難易度の設定は依然として人間のエキスパート、すなわち理学療法士に依存するなど、必ずしもリハビリ現場での運用を想定したロボットリハビリシステムは実現されていない。このような背景から、研究代表者は、患者の脳を可塑的に変容させ、機能改善をもたらすことを目的関数としてリハビリテーションロボットのシステム設計を行うためには、ヒトを対象とした協調運動学習に関する基礎研究が不可欠であると考えに至った。このようなヒトと相互作用してその活動を支援するロボットの開発は、高齢者を対象とするのみならず、スポーツ技術や伝統技能の継承など、様々な人間活動を記録・活用する技術の実現にも繋がると期待される。

2. 研究の目的

本研究課題申請時点におけるリハビリテーション支援システム・ロボットの多くは、理学療法士の不足を補うために、リハビリ運動課題の遂行を自動化するに留まり、理学療法士が患者の状態を随時モニタして課題の強度、難易度等を調節している状況にあった。したがって、効果的に運用するためにはシステムの中に人間のエキスパートが介在する必要があるが、本質的な自動化・省力化には至っていなかった。研究代表者が平成26年～令和元年度に実施した科学研究費補助金基盤研究(B)「受動的運動経験が運動学習に及ぼす影響の解明」によれば、ロボットを用いた受動的運動経験は、能動的な運動経験と同程度に脳内の身体表現（例えば、手先位置の知覚）を変容させることが期待できるものの、能動的な運動生成の能力については獲得されないことが示唆されている。すなわち、ロボットを用いて運動支援のすべてを行ってしまうと、患者は運動主体感や身体保持感を得ることができず、脳の可塑的な変化は生じ得ない。一方、ロボットが運動支援の量を減らしすぎると課題そのものが達成されず、脳の可塑性を促すきっかけとなる達成動機が満たされないと考えられる。このように、最適な運動支援の量と質は患者ごとに異なり、また患者の機能改善とともに変化すると考えられる。優れた理学療法士は、患者の課題成績のみならず、力学的な相互作用や表情、リハビリへの取り組み姿勢までを総合して課題難易度や支援の量を決定する技量を有していると考えられる。

脳血管疾患による運動麻痺患者には様々な機能不全が混在しており、その病態は人ごとに千差万別である。さらに同じ患者でも、急性期から回復期にかけて毎日のように病態は変化する。患者の課題成績やリハビリテーションへの取り組み姿勢から病態を推定し課題難易度や支援の量を決定する技量を持った人工知能エージェントの実現は焦眉の急である。

本研究では、ヒトと人工物が相互作用するシステムについて、脳神経科学の知見に基いた適切なフィードバックループを構成することで課題難易度や支援の量を決定可能な理学療法士代替システムの実現を最終的な目標とし、その実現に必要な脳神経科学的知見を得ることを目指す。このような観点で行われているリハビリテーションロボット研究はこれまでになく、当該研究分野にシステムニューロリハビリテーション (Systems Neuro-rehabilitation) という新たな方向性を提示するものと考えられる。

3. 研究の方法

初年度には、二者協調運動学習実験を行うための課題の設計に取り組む。その要求仕様として、

(1) ペアを組む相手の課題熟練度（初心者、熟練者）の違いが課題成績および他の新規の相手と組んだ場合の適応性に及ぼす影響を調査できること、(2) 運動課題が脳計測にアーティファクトとして影響を及ぼさないこと、の2点を考慮する必要がある。これに対し本研究では、二者協調による物体操作課題を開発し用いる。同課題は、操作対象である物体のダイナミクスと協調

相手の操作力から計算される手先反力に基づいて自らの操作力を決定する協調運動学習課題である。予備的検討として、力覚提示を省略した視覚フィードバックのみのバージョンで協調運動学習実験を実施する。これにより、ペアを組む相手の運動技能の違いが、協調運動学習の運動成績に及ぼす影響を評価する。具体的には、二者がそれぞれ利き手で操作する cursor と仮想バネで繋がれた object を協調して動かすことで target まで到達させる。ただし、各自の最適行動を探索的に学習させるため、object には未知の外力が作用するものとする。また前述の目的を達するため、被験者は初心者(Novice)同士で訓練する NN 群と、熟練者(Expert)と組んで訓練する NE 群に無作為に分けて実験を行う。協調運動学習の評価指標には、総運動時間と object の総移動距離の積を用いる。

二年目は、本研究の最終的な目的である効果的なロボットリハビリテーションへの応用を鑑みて、二者協調運動学習系における一方の操作者をロボットエージェントとするためのエージェントアルゴリズムの開発に注力する。人間の二者による協調運動学習実験の予備的検討から、熟練度が等しく劣る初心者ペアによる協調運動学習の経験が、事後の運動学習に良い効果をもたらすことが明らかになっていたことから、ロボットエージェントのアルゴリズムとして初心者と熟練者を実装する。また、人間同士のペアで訓練を行う場合は、学習を繰り返すにつれて互いに熟練度が向上していくと考えられることから、学習者の熟練度レベルを協調運動学習課題の成績で評価し、そのレベルに基づいて、ペアとなるエージェントの熟練度レベルを階段法により調節するスキルレベル調節アルゴリズムを開発し、被験者実験によりその有効性を評価する。

4. 研究成果

研究初年度の平成30年度には、予備的検討として、力覚提示を省略した視覚フィードバックのみのバージョンで協調運動学習実験を実施し、ペアを組む相手の運動技能の違いが、協調運動学習の運動成績に及ぼす影響を評価した。実験の結果、熟練者とペアを組んだ場合(NE 群)よりも、自身と同程度レベルの者とペアで組んで協調運動学習を経験した初心者(NN 群)の方が、学習後に、別の初心者と組んだときの成績が有意に高く、汎化性に優れることを明らかにした。この結果は、IEEE の国際会議 MHS2018 (名古屋大学, 12月)にて報告した。

2年目の令和元年度は、スキルレベル調節アルゴリズムの有効性を検討するため、被験者24名に協力頂いて実験を行った。被験者は無作為に8名ずつの3群に分けられ、それぞれ初心者エージェント、熟練者エージェント、スキルレベル調節エージェントと組んで協調運動学習を行った。また協調運動学習の前後には、運動技能を評価するため、単独による運動課題を実施した。協調運動学習前 (Baseline フェーズ) の単独課題の成績をグループ間で比較した結果、有意差は認められなかった。一方、協調運動学習後 (Test フェーズ) の単独課題の成績についてグループと学習セット数を要因とする分散分析を行った結果、交互作用は認められず、両要因ともに主効果が認められた。グループについて事後分析を行った結果、スキルレベル調節エージェントと組んだ群の成績が最も優れており、次に初心者エージェント群が続き、熟練者エージェント群が最も悪い成績となった。また、研究代表者が、平成30年度から令和元年度にかけて学科長、専攻長、部門長を併任し、また学部長補佐として学科改組を主導的に推進するために業務が多忙であったことに加え、令和元年年4月末より約5ヶ月間、科学研究費補助金国際共同研究強化の支援を受けて英国・レディング大学にて国際共同研究を推進したことから、当初計画していた実験計画に遅延が生じたため、研究期間を1年間延長した。

期間延長した3年目の令和2年度は、前年度までに実施した運動学習支援エージェントと被験者の協調運動学習実験の結果の解析と対外発表ならびに学術論文の執筆に従事した。力覚フィードバックが無い条件下の二者協調運動学習実験に関する論文は、日本ロボット学会の国際誌である (Advanced Robotics) 採録済みである。また、力覚フィードバックを付与した条件下の二者協調運動学習実験に関する論文は投稿中である。また、これまでの研究で高い有効性を示したスキルレベル調節エージェントについて、学習者のレベルによらずレベルをあらかじめ定められたスケジュールで段階的に上げていくレベルアップエージェントとの協調運動学習条件を追加して実験を行うことで、学習者のレベルに合わせて運動支援を行う (すなわち人と相互適応すること) が真に運動技能の向上を実現する上で重要であるか否かを実験的に明らかにすることを試みた。その結果、学習者の上達に合わせてレベルを上げるスキルレベル調節エージェントと組んだ被験者グループが、学習後に有意に高い運動成績・汎化性を示すことを明らかにした。この結果は、IEEE の国際会議 EMBC2020 と第38回日本ロボット学会学術講演会にて口頭発表した。また、協調運動学習実験の具体的な方法・結果に加えて、研究背景・目的から波及効果までを含めて日本ロボット学会の学会誌に解説記事として発表した (2020年12月号)。さらに8月には、計測自動制御学会自律分散システム部会の若手研究者向けサマースクールで「人とロボットの相互適応」という演題で講演を行い、アウトリーチ活動に努めた。

以上の結果を総合し、本研究は当初計画どおりの研究成果を達成したと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Thorne Nicolas, Honisch Juliane J., Kondo Toshiyuki, Nasuto Slawomir, Hayashi Yoshikatsu	4. 巻 13
2. 論文標題 Temporal Structure in Haptic Signaling Under a Cooperative Task	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnhum.2019.00372	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Honda Takeru, Mitoma Hiroshi, Yoshida Hirotaka, Bando Kyota, Terashi Hiroo, Taguchi Takeshi, Miyata Yohane, Kumada Satoko, Hanakawa Takashi, Aizawa Hitoshi, Yano Shiro, Kondo Toshiyuki, Mizusawa Hidehiro, Manto Mario, Kakei Shinji	4. 巻 11
2. 論文標題 Assessment and Rating of Motor Cerebellar Ataxias With the Kinect v2 Depth Sensor: Extending Our Appraisal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fneur.2020.00179	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Xinzhe, Mota Bruno, Kondo Toshiyuki, Nasuto Slawomir, Hayashi Yoshikatsu	4. 巻 15
2. 論文標題 EEG dynamical network analysis method reveals the neural signature of visual-motor coordination	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0231767
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0231767	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kondo Toshiyuki, Hayashi Yoshikatsu	4. 巻 38
2. 論文標題 Human-Robot Cooperative Motor Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 895 ~ 900
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.38.895	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yano Shiro, Hayashi Yoshikatsu, Murata Yuki, Imamizu Hiroshi, Maeda Takaki, Kondo Toshiyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Statistical Learning Model of the Sense of Agency	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpsyg.2020.539957	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nguyen Phuong Thi Mai, Hayashi Yoshikatsu, Baptista Murilo Da Silva, Kondo Toshiyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Collective almost synchronization-based model to extract and predict features of EEG signals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-73346-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimura Kotaro, Saracbasi Ozge Ozlem, Hayashi Yoshikatsu, Kondo Toshiyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Cooperative visuomotor learning experience with peer enhances adaptability to others	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.1913445	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Nguyen Thi Mai Phuong, Xinzhe Li, Yoshikatsu Hayashi, Shiro Yano, Toshiyuki Kondo
2. 発表標題 Estimation of brain dynamics under visuomotor task using functional connectivity analysis based on graph theory
3. 学会等名 The 19th annual IEEE International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE 2019), Athens, Greece (Oct 28-30, 2019).
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kotaro Nishimura, Yoshikatsu Hayashi, Shiro Yano, and Toshiyuki Kondo
2 . 発表標題 Motor Learning through Cooperative Motor Experience
3 . 学会等名 IEEE 2018 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Nicolas Thorne, Juliane Honisch, Toshiyuki Kondo, Slawomir Nasuto, Yoshikatsu Hayashi
2 . 発表標題 Emergence of long range temporal correlations in cooperative tasks
3 . 学会等名 The Second International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yuuki Fukuda, Shiro Yano, Toshiyuki Kondo
2 . 発表標題 Motor Learning through voluntary but passive motor experience
3 . 学会等名 The Second International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yoshikatsu Hayashi, Nicolas Thorne, Ozge Ozlem Saracbası, and Toshiyuki Kondo
2 . 発表標題 Temporal structure in haptic interactions and perspective of mutual motor learning for skill transfer, Workshop on the Hyper-Adaptability for Overcoming Body-Brain Dysfunction: Integrated Empirical and System Theoretical Approaches
3 . 学会等名 The 42th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuya Yoshikawa, Yoshikatsu Hayashi, Shiro Yano, and Toshiyuki Kondo
2. 発表標題 How Does Intervening Strategy in Cooperative Motor Task Affect Individual Motor Adaptation?
3. 学会等名 The 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Biologically-inspired Computing Laboratory https://www.livingsyslab.org/ 東京農工大学近藤研究室ホームページ https://www.livingsyslab.org</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	林 叔克 (HAYASHI Yoshikatsu)	レディング大学・生命科学専攻・准教授	
研究協力者	矢野 史朗 (YANO SHIRO)	東京農工大学・大学院工学研究院・助教 (12605)	
研究協力者	西村 鼓太郎 (NISHIMURA Kotaro)	東京農工大学・工学府情報工学専攻・大学院生(修士課程) (12605)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	吉川 有哉 (YOSHIKAWA Yuya)	東京農工大学・工学府情報工学専攻・大学院生（修士課程） (12605)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	University of Reading			