

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02111

研究課題名（和文）ヒトとロボットの協調運動学習系における運動学習促進アルゴリズムの検討

研究課題名（英文）A study on the algorithms for accelerating human motor learning under human-robot cooperative motor learning system

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） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ヒトとロボットの協調運動学習において、学習が促進される条件の解析ならびに脳活動の動的機能結合解析を実施した。実験の結果、初心者エージェントは熟練者エージェントよりも事後の運動成績が有意に高いこと、被験者の運動技能レベルにあわせて成長するレベル調節エージェントが最も運動学習促進効果が高いことを明らかにした。また、テンソル分解とTVGL法を組合せた動的機能結合解析手法を提案した。医学的に脳状態の正解ラベルが付された睡眠脳波に適用し、多チャンネル脳波に内在する時空間特徴量を潜在変数の動的グラフ構造として抽出した結果を睡眠モードの正解ラベルと比較することで、その有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ヒトとロボットの協調運動学習を対象に、ロボットエージェントの制御アルゴリズムを4種類（初心者、熟練者、レベル調節、固定成長）考案し、被験者実験を行った。実験の結果、被験者の運動技能レベルにあわせてともに成長するレベル調節エージェントが最良であることが示された。ロボットリハビリテーションにおける最適な支援の量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ことから、本研究の成果は、将来のロボットリハビリテーション開発にとって有益と考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed four robotic agents, which could manipulate cooperative motor learning, and compared the effect of their intervening strategies (i.e., novice, expert, level-up, and skill-level-adjustment agents) on individual motor performance. The result suggests that the novice agent realizes significantly higher posterior motor performance than the expert agent. Moreover, we found that skill-level adjust agent, which grows with the subject's motor skill level, is able to provide even better motor support than the others. We also proposed a dynamic functional connectivity analysis method that combines tensor decomposition and TVGL methods. We applied the method to sleep EEG, --- the brain states are medically labeled ---, and verified the validity.

研究分野：知能情報学

キーワード：協調運動学習 動的機能結合解析 リハビリ

1. 研究開始当初の背景

日本は世界に先駆けて社会の超高齢化が進行した国であり、近年、急速に発展する ICT や人工知能、ロボティクス技術を活用して、高齢者の認知・運動機能を高め、健康寿命を伸ばす方法論、特にリハビリテーション支援システムの開発が期待されている。しかしながら、現状のリハビリテーション支援ロボットの多くは、リハビリ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難易度等を調節している状況にあり、本質的な自動化・省力化には至っていない。例えば、ロボットアームが麻痺肢をある軌道にそって動かした場合、患者は腕を動かしているのは自分自身であるという身体意識（運動主体感）を得ることができない。固縮した筋を刺激して関節可動域を確保するという観点から言えば、受動的運動経験も重要なリハビリ介入と考えられるが、運動学習の観点からは、脳の可塑的な変化は期待できない。これに対し申請者は、平成 28～31 年度に受けた基盤研究 (B)「受動的運動経験が運動学習に及ぼす影響の解明」において、運動企図を伴わない完全に受動的な運動経験では能動的に運動を実行するための運動スキルは獲得されないが、主体的な運動計画を持つ場合には、たとえロボットによる受動的経験であっても身体図式（脳内の体性感覚地図）が更新されることや、事後の随意的な運動学習を促進することの 2 点を明らかにしている。

一方、ロボットによる支援の量（すなわち運動課題の難易度）を患者の機能レベルに照らして調節することについても、十分な自動化は実現されていない。当然ながら、ロボットによる運動支援を増やしすぎれば上記の問題が発生し、逆に支援を減らしすぎると課題そのものが達成されず達成動機が満たされない。このように、最適な支援の量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。この能力をシステム化するために必要となる知見を得ることが本研究の学術的目的である。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに申請者らが取り組んできた、ロボットマニピュランダムを用いた仮想環境下の受動的運動学習に関する研究（平成 28～31 基盤研究 (B)）を発展させ、ヒトがロボットと協調して運動学習を行う過程で運動技能を獲得・改善していくことを暗黙的に支援するロボット用エージェントプログラムを構築することを目的とする。優れた理学療法士が体現している課題難易度・支援量の調整をシステムとしてモデル化し、真に有用なりハビリテーションロボットの実現に繋がる学術的知見を得る。また、学習者の運動学習への取り組み状態に応じた支援レベルの調節を実現するため、協調運動学習下の学習者の脳状態を、脳波の位相同期特徴量の機能的結合解析等により異なる学習モードとして類別化する方法についても検討する。

このようなヒト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と期待される。

ロボットによる支援がヒトの運動学習を促進する条件を明らかにするため、二者が力学的に相互作用する中で行う協調運動学習を研究対象とする。例えば、書道教室で師範が生徒の手をとって手本となる動作を体得させるような状況を考える。このとき、師範が提示する軌道が正確であることは、生徒の運動学習にどのように影響を及ぼすであろうか。また、生徒の技能レベルによってもその効果に違いがあるのではないか。

これらの点について明らかにするための具体的な研究計画として、本研究では、人間同士が力学的に相互作用する中で行う協調運動の学習において、ペアを組む相手の課題習熟度（初心者、熟練者）の違いが、当該学習者の (1) 協調運動学習課題の成績および (2) 新規の相手とペアを組んだ場合の適応性に及ぼす影響を調査する（研究項目 1）。熟練者と組んで協調運動学習を行う場合、学習開始時から課題達成に向けて最適な支援が受けられるため、見かけの運動成績は向上するものの、獲得される内部モデルは必要最小限のものに留まると予想される。一方、初心者とペアを組んで学習を行う場合には、相手のダイナミクスが不確定要素となり、内部モデルの獲得には時間を要するが、多様な状況を経験できるため、適応性が高まると予想される。

研究項目 1 の実験結果をもとに、協調相手を務めるロボットエージェントの制御アルゴリズムを構築する。熟練者、初心者のエージェントを基礎として構築し、単体で用いるのみならず、段階的に運動支援レベルを変更・調節可能なアルゴリズムを開発する。開発した各種の制御アルゴリズムを用いて協調運動学習実験を行い、被験者実験を行う。協調運動学習の前後で、被験者単独の運動技能の変化を評価することで、個人の運動学習の促進に有効な制御アルゴリズムを考察する（研究項目 2）。

また、協調運動学習の課題成績のみならず、協調運動学習時の学習者の脳活動（脳波）を計測し、機能的ネットワーク解析を行うことで、学習者の脳状態を複数のモードとして類別化することを試みる（研究項目 3）。

3. 研究の方法

初年度は、研究項目1として、二者が協調して運動学習を行う際の脳機能ネットワークの解析に適した協調運動学習課題の設計に取り組む。課題の要求仕様としては、①ペアを組む相手の熟練度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、および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、が挙げられる。これに対し本研究では、ハプティックロボット (Phantom Premium 1.5HF, 設備備品) を用いた視覚運動課題を構築する。

本課題は、二者がそれぞれ利き手で操作するカーソルと仮想バネで繋がれた仮想物体を協力して動かすことで指定されたターゲットまでできる限り速やかに到達させるものとする。ただし、各自の最適行動を探索的に学習させるため、仮想物体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、被験者は初心者とペアで訓練する NN 群、熟練者と組んで訓練する NE 群に無作為に分ける。被験者は各群 8 ペア (16 名)、計 32 名に協力を要請する。実験は、学習者の初期運動スキルを同定するためのベースラインフェーズ、実験グループごとに異なる技能レベルを有する他者と協調して運動学習を行う学習フェーズ、協調運動学習後の個人の成績を評価するための評価フェーズの 3 つのフェーズをこの順に行う。協調運動学習の結果が学習者個人の運動成績に及ぼす影響を調査するため、ベースラインならびに評価フェーズでは、単独による運動技能の評価テストを実施する。協調運動学習の評価指標には、仮想物体の総運動時間ならびに総移動距離の積を用いる。

二年目は、研究項目2として、協調運動学習の相手をロボットエージェントに変更して、研究項目1と同様の課題を用いた協調運動学習実験を行う。一年目に取り組んだ人間同士の協調運動学習実験のデータを解析することで、協調運動学習を支援するロボットエージェントの制御アルゴリズムを設計する。実験には、独自開発したロボットマニピュランダムを用いる。被験者は、利き手でマニピュランダムのハンドルを把持、操作する。本研究では、未知外力が作用する力場環境下で、被験者とロボットエージェントが物理的に相互作用しながら、ともに把持する仮想物体を目標地点まで到達させる協調到達運動を実験課題とする。

本実験では、この協調到達運動課題をともに行ったロボットエージェントの戦略の違いが、被験者単独の運動技能や適応性に及ぼす影響を定量化する。協調運動学習の結果が学習者個人の運動成績に及ぼす影響を調査するため、ベースラインならびに評価フェーズでは、単独による運動技能の評価テストを実施する。協調運動学習の評価指標には、仮想物体の総運動時間ならびに総移動距離の積を用いる。

本研究の三年目には、研究項目3として、ロボットエージェントと人間を協調運動学習させる際の運動・脳波データを分析し、ヒト-ヒト間相互適応とヒト-ロボット間相互適応の特徴を明らかにする。協調運動学習下の学習者の脳活動を高密度脳波計 (g.tec, g.Hlamp, 64 チャンネル、現有備品) により計測し、脳活動の動的機能結合解析を実施する。これにより学習者の脳状態を複数のモードとして類別化することを試みる。モードごとに協調運動課題の成績を分析することにより、患者の脳状態に基づいて最適な支援を提供するリハビリテーション支援システムの実現に向けた知見を得る。

4. 研究成果

初年度の令和2年度には、ヒト対ヒトの協調運動学習実験を実施した。ハプティックロボット2台 (うち1台は本科研費にて設備備品として導入。もう1台は現有備品) を使用して視覚運動学習実験課題を開発した。開発には Open Haptics ライブラリを使用した。実験中、協調相手を直視することができないように、実験装置はパーティションで囲った。

右利きの成人男性12名を被験者としてリクルートし、ヒト対ヒトの協調運動学習実験を行った。実験は、運動課題の練習に加えて基準となる運動成績を記録するためのベースラインフェーズ、実験条件ごとに他者と協調して到達運動学習を経験する学習フェーズ、学習後の運動成績を評価するための評価フェーズで構成した。被験者の適応性は、学習後の評価フェーズにおいて、初めてペアを組んだ相手との協調運動課題の成績から評価した。

実験の結果、初心者同士で協調運動学習課題を経験した被験者は、熟練者 (実験者) と組んで課題を経験した被験者よりも事後の適応性が高いことを示唆する結果を得た。この成果は、2編の学術論文[Nishimura 2021][Saracbası 2021]として発表した。

また、令和2年度には、ハプティックデバイスを用いて、移動する視覚ターゲットを追跡運動中のヒトの脳波を計測し、位相同期特徴量から、運動中の制御モードの推定を行う研究も併せて実施した。この成果は国際共同研究として実施し、学術論文[Li 2020]として発表した。

二年目の令和3年度には、前年度までに実施したヒト対ヒトの協調運動学習実験の考察をもとに、協調運動学習のためのロボット制御アルゴリズムを開発し、被験者実験を実施した。

実験では、20-23歳の右利きの成人男性24名を被験者としてリクルートし、8名ずつの3群に分け、それぞれ異なる戦略をプログラムされたロボットエージェントとの協調運動学習実験を行った。3種類のロボットエージェントは、それぞれ、高速に最適な運動支援を行う熟練者エージェント (Expert)、低速かつ時にランダムな運動支援を行う初心者エージェント (Novice)、学習者の運動成績の向上にあわせて支援を段階的に Novice から Expert に調節・変更するレベル調節エージェント (Skill-level adjust) とした (図1)。

実験の結果、Novice エージェントと組んで協調運動学習課題を経験した被験者は、Expert エー

エージェントと組んで課題を経験した被験者よりも評価フェーズの最初から運動成績が有意に高いことを示唆する結果となった(図2)。さらに、レベル調節エージェントと組んだ被験者は、Noviceエージェントと組んだ被験者よりも、さらに良い運動成績を示した。

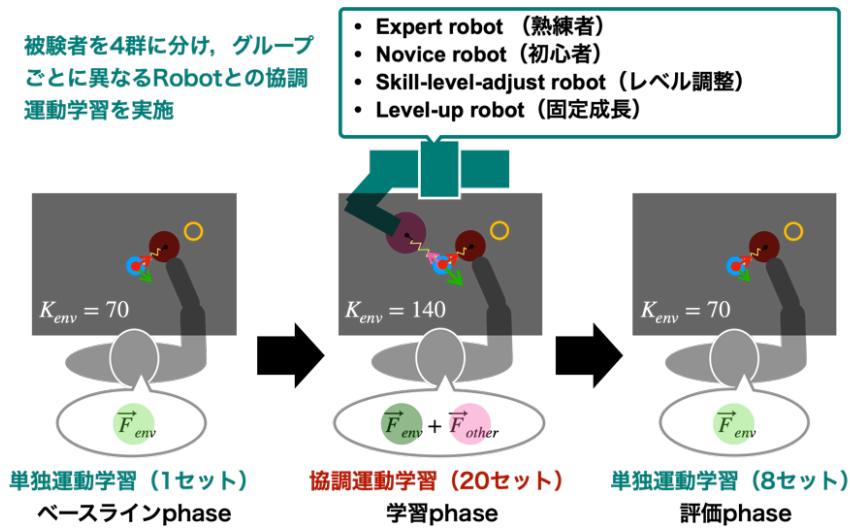


図1 協調運動学習実験と比較したロボットエージェントアルゴリズム

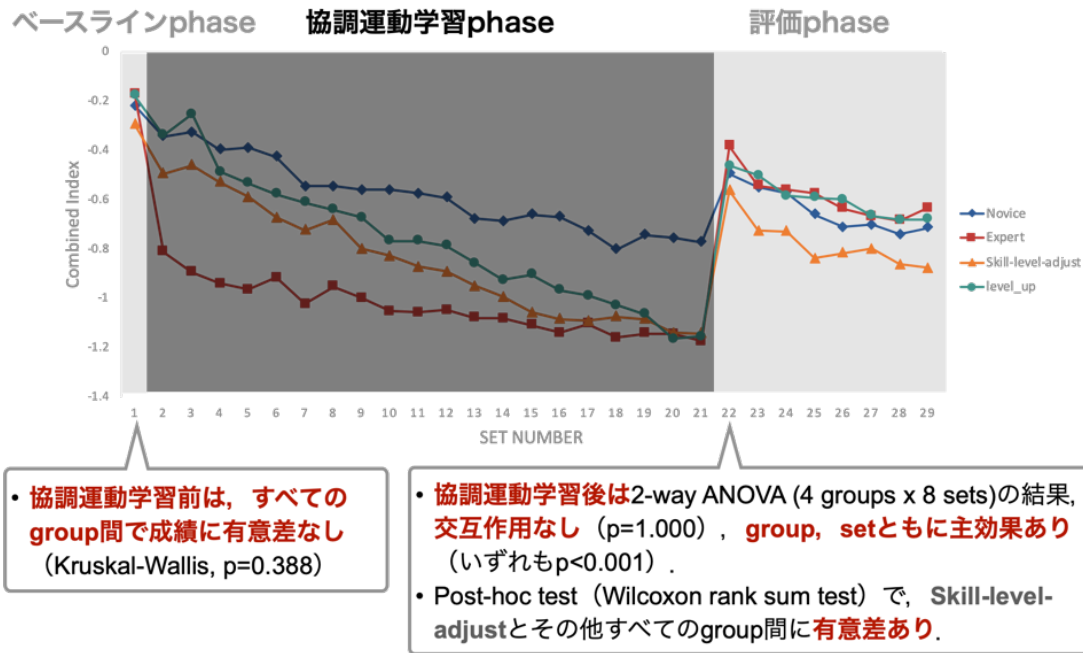


図2 協調運動学習実験の実験結果

最終年度の令和4年度には、前年度の協調運動学習実験で有効性が示されたレベル調節エージェントの本質が、「段階的なレベルの変更」にあるのか、あるいは「学習者の成長に合わせてレベルを変更」することにあるのかを確認する目的で、エージェントのレベルをあらかじめ定めた訓練スケジュールにそって機械的に変更する固定成長エージェント (Level-up) を導入して、前年度と同様の実験を行った(図1)。20代の右利きの成人男性8名を新たに被験者としてリクルートし、被験者総数は32名となった。

実験の結果、固定成長エージェントと組んだ被験者は、レベル調節エージェントのみならず、Noviceエージェントと組んだ被験者と比べても、事後の運動技能が低い傾向を示した(図2)。この結果から、エージェントのレベルをあらかじめ定めたスケジュールで段階的にNoviceからExpertに変更することよりも、学習者の成長に合わせて調節することが運動成績の向上において重要であることが明らかとなった。この傾向は、人間の初心者同士がペアを組んで課題を行った場合に学習成績が最も良い結果になったという先行研究の報告と合致する。なぜなら、ペアとなる相手が人間の場合は、本実験のNoviceエージェントとは異なり、学習フェーズにおいて相互適応が生じていたと考えられるからである。この成果は、国際会議[Yoshikawa 2021]、解説論文[近藤 2020]として発表した。

以上に述べた協調運動学習実験の結果から、学習者のレベルに合わせて支援の大きさを調節

するロボットエージェントと組んで協調運動を行った経験が、その後の個人の運動学習過程において、より高い学習効果をもたらす可能性が実験的に示された。一方、協調運動学習において獲得された運動技能が脳に長期記憶として定着するか否か、さらに学習を促進させるためにはどのような相互作用戦略が最適であるか、などについて引き続き検討の余地がある。

また、最終年度には、テンソル分解と TVGL 法を組合せた動的機能結合解析手法を提案した。協調運動学習下の脳活動計測はデータ数が十分に集録できなかったため、同手法を医学的に脳状態（睡眠モード）の正解ラベルが付された睡眠脳波に適用し、多チャンネル脳波に内在する時空間特徴量を潜在変数の動的グラフ構造として抽出した。抽出されたグラフ構造をクラスタリングした結果を睡眠モードの正解ラベルと比較することで、その有効性を検証した。この成果の一部は、解説論文[近藤 2022]として報告した。

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概ね達成したと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 5件）

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 該当する
1. 著者名 Nishimura Kotaro, Saracbası Ozge Ozlem, Hayashi Yoshikatsu, Kondo Toshiyuki	4. 巻 35
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 835～841
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Sakabe Naoko, Altukhaim Samirah, Hayashi Yoshikatsu, Sakurada Takeshi, Yano Shiro, Kondo Toshiyuki	4. 巻 15
2. 論文標題 Enhanced Visual Feedback Using Immersive VR Affects Decision Making Regarding Hand Use With a Simulated Impaired Limb	5. 発行年 2021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.2021.677578	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 Saracbası Ozge Ozlem, Harwin William, Kondo Toshiyuki, Hayashi Yoshikatsu	4. 巻 15
2. 論文標題 Mutual Skill Learning and Adaptability to Others via Haptic Interaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurorobotics	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/fnbot.2021.760132	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 近藤 敏之	4. 巻 61
2. 論文標題 脳活動に内在する動的構造の推定と構成論的モデル化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 276 ~ 281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.61.276	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 Niiyama Saki, Yano Shiro, Kondo Toshiyuki	4. 巻 34
2. 論文標題 Cerebral Activity-Based Quantitative Evaluation for Attention Levels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 739 ~ 745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p0739	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 -

1. 著者名 Matsuda Eiko, Misawa Daichi, Yano Shiro, Kondo Toshiyuki	4. 巻 34
2. 論文標題 Olfactory Cues to Reduce Retrograde Interference During the Simultaneous Learning of Conflicting Motor Tasks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 746 ~ 755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p0746	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 -

1. 著者名 Yamamoto Naoya, Matsumoto Takato, Sudo Tamami, Miyashita Megumi, Kondo Toshiyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Ring-shaped wearable device for logging finger usage in daily life	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MHS56725.2022.10092178	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 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

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

1. 発表者名 Saki Niiyama, Shiro Yano, and Toshiyuki Kondo
2. 発表標題 Identification of the Cerebral Region Responsible for Top-Down Attention Using Near-Infrared Spectroscopy Signal
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

1. 発表者名 Kosuke Sakai, Shiro Yano, and Toshiyuki Kondo
2. 発表標題 Extraction of graphical structure embedded in human periodic motions
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

1. 発表者名 Kosei Nakayashiki, Yoshikatsu Hayashi, Tamami Sudo, Toshiyuki Kondo
2. 発表標題 Effects of visual feedback on event-related desynchronization during isometric grasping
3. 学会等名 The 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nguyen Thi Mai Phuong, Minh Khanh Phan, Yoshikatsu Hayashi, Murilo Baptista, Toshiyuki Kondo
2. 発表標題 Collective Almost Synchronization Modeling Used for Motor Imagery EEG Classification
3. 学会等名 The 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ozge Ozlem Saracbası, William Seymour Harwin, Toshiyuki Kondo, Yoshikatsu Hayashi
2. 発表標題 Dual Instability against to Sequential Learning via Haptic Interaction
3. 学会等名 The 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Samirah Altukhaim, Toshiyuki Kondo, Yoshikatsu Hayashi
2. 発表標題 Enhancement of Sense of Ownership and Sense of Agency using Virtual Reality and Haptic Feedback
3. 学会等名 The 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Biologically-inspired Computing Laboratory
<https://www.livingsyslab.org>

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	宮下 恵 (Miyashita Megumi)		
研究協力者	林 叔克 (Hayashi Yoshikatsu)		

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	レディング大学	アバーディーン大学	