

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00477

研究課題名(和文)身体動作の運動学習過程における学習進展の可視化技術の研究

研究課題名(英文) Research on visualization technology of learning progress in motor learning process

研究代表者

内田 雅文(Uchida, Masafumi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：00245341

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、書写・運筆やスポーツ・ダンス、機器操作の習得過程において、刻々と変化する身体動作から学習の進展を可視化するための技術の開発を目的として実施された。同期タッピングによる従来研究の知見から身体動作の習熟過程を認知的制御系から身体的制御系への遷移の過程と定め研究は展開された。身体動作に關与する制御系の違いは、当該動作が反復的であればその運動の主たる周期に対して相応に遊離して捕捉される。前者の系が優位であれば白色ノイズ的にゆらぎ、後者が優勢になれば白色ノイズから相応に遊離してゆらぐ。本研究ではこのゆらぎの変化を利用して運動学習の進展状況を可視化する学習支援が検討された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

運動学習支援の従来研究には運動を構成する部分要素を分析する類が数多く、また感覚フィードバック技術等を用いた所望の身体動作との差分修正の試みも含め、身体動作それ自体の運動性能や目標からの齟齬を提示する類のパフォーマンスの可視化が大勢である。本研究では、所望の身体動作の習得過程における学習進展にフォーカスし、当該身体動作のゆらぎを介してパフォーマンスの実行に關与する運動制御系の変化を定量評価する点に学術的意義がある。また、本研究は日常生活上の課題(ペンタブレット上の運筆、触刺激提示を伴うトレッドミル上での歩行、スマートフォン操作の運指動作)をフォーカスしている点において社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a technology to visualize the mastery degree from ever-changing body movements in motor learning such as handwriting practice, dance, sports, and equipment operation that requires skill. Based on the findings of previous studies using synchronous tapping, this study was carried out on the assumption that the process of mastering physical movements is a process of control system transition from cognitive control to physical control. Differences in the control system involved in a body movement are observed in characteristic deviations from the main cycle of the movement, if the body movement is repetitive. If the former system is dominant, the motion will fluctuate like white noise, and if the latter system is dominant, the fluctuation will deviate from white noise to a reasonable degree and fluctuate. This study examined a learning support that uses the changes in the fluctuations of body movements to visualize the progress of motor learning.

研究分野：学習支援システム

キーワード：身体動作 ゆらぎ 運動学習支援

1. 研究開始当初の背景

本研究では、運動学習の進展具合を定量評価して可視化する運動学習の支援について検討された。運動学習の過程は一般に、脳内の運動イメージと現実の運動行為との齟齬修正のプロセスと説明される。これを支援する従来技術として、運動イメージ自体の正誤はともかくもフォーム、正確性、速度、適応性、恒常性など、運動を構成する部分要素を分析する類は枚挙の暇がない。また、目標との差分修正のサポートとして、種々のメディアを介する感覚フィードバック技術の応用も旧来より多数行われている。何れにせよ従来研究は、身体動作それ自体のクオリティや目標からの齟齬を学習者へ提示する、いわゆる身体動作のパフォーマンスの可視化が大勢である。こうした技術は運動学習の出口支援に当たるが、運動学習上、当該身体動作を教示する技術も運動学習の入口支援として相応に重要である。パワーアシストや臨床の機能的電気刺激、バーチャルリアリティ分野において展開盛んな各種感覚フィードバック技術の適用等は、当該学習の円滑な進展を促す。運動学習の入口と出口を合わせて技(所望の身体動作)の伝・授となるが、本研究の前段のフェーズであった触刺激による身体動作の提示技術は伝を担う触覚ディスプレイ技術であった。本研究では、学習者が当該身体動作を習得する過程における伝のその先、授に至るまでの進展のプロセスをフォーカスし、身体動作のパフォーマンスではなく、そのパフォーマンスの実行に参与した当該システムの変容や遷移に基づく運動学習の評価指標の創出をモチベーションとした。仮に学習評価のための試行に十分なパフォーマンスが認められなくとも、その実行に参与したシステムが参照できれば、運動学習上、習熟の進行状況は相応に推測できるはずである。結果として当該学習者のパフォーマンス実行への過剰な意識・ストレスを抑え、学習へのモチベーションの維持向上を促し、学習の円滑化と学習効果の促進、運動学習に付随する様々な周辺事象におけるヒューマンエラーの抑制効果も期待される。

2. 研究の目的

本研究は、書写・運筆練習や各種スポーツ・ダンスの運動学習、熟練を要する機器操作の習得過程において、時々刻々の身体動作から学習の進展具合を可視化する運動学習の支援技術の開発を目的とする。ヒトの身体動作の制御は認知的制御と身体的制御とに2重化されており、身体動作の学習過程は前者の制御から後者の制御へ、制御系遷移のプロセスと解釈される。このときの身体動作が反復的であれば、その運動の主たる変動からの齟齬(ズレ)の傾向は、前者優位なら白色ノイズ的に、後者優勢へのシフトに伴い白色ノイズから徐々に遊離しながらゆらぐ。ここで、身体動作の反復なる行動自体、運動学習上反復練習がそれに該当し、運動学習の現場において極めて頻繁に観察される日常的かつ身近な事象であることを付記しておく。本研究は、反復的な身体動作の中からゆらぎを抽出して白色ノイズからの遊離具合に基づいて定量化することにより、当該身体動作のパフォーマンスではなくそのパフォーマンスの背景にある運動制御系に基づき運動学習の進展具合を可視化する方法について検討したものである。

3. 研究の方法

本研究で取り上げた身体動作は、ペンタブレッド上の運筆動作、触刺激提示を伴うトレッドミル上での歩行動作、スマートフォン操作の運指動作である。それぞれの身体動作において同期タッピング課題と組み合わせた二重課題法に基づく実験系が設計された。

ペンタブレッド上の運筆動作の実験を一例として、本研究で用いた実験のフレームワークを説明する。運筆動作の実験システムのベースは2017年度(1年目)に構築され、以後、各実験に応じて適宜構成要素を取捨選択して使用された。本研究において設計されたフレームワークは、「一定間隔で提示される聴覚刺激」と「この聴覚刺激を合図に開始するタスク」(タスクは身体動作に応じて定まる。この例は一文字手書き運筆がタスクになる)および「それに続く次の聴覚刺激に合わせてタップ」で構成されている点に特徴がある。被験者は、ペンタブレッド上で課題文字一文字を手書きする。本研究では課題文字として電・通・大のほか3文字を取り上げた。一文字を書き始めるタイミングは聴覚刺激によって伝えられ、この聴覚刺激に続く次の聴覚刺激に合わせてペン先で指定箇所をタップする。の一連を1試行と定め、この場合約250試行反復して実験1セットする。セットを重ねる毎に当該身体動作への習熟は進展するはずである。1試行毎にタブレットを通してタブレット面上を移動するペン先位置座標が記録されるが、研究では各試行における手書き文字の始点、終点、およびタップ点の記録時刻および位置座標が抽出され、時間要素および空間要素なる成分の時系列が導出された。空間要素は始点、終点、タップ点の位置座標から導出され、一方、時間要素は1試行中の聴覚刺激立ち上がり時刻、始点の記録時刻、終点の記録時刻およびタップ時刻を組み合わせる6つの時間である。導出された時系列には、非定常時系列の自己相似性に基づくゆらぎ解析法 Detrended Fluctuation Analysis 法(DFA法と略記する)が適用されて白色ノイズからの遊離具合を定量化、運動学習の進展状況との間で比較照合された。

4. 研究成果

本研究は、書写・運筆やスポーツ・ダンス、熟練を要する機器操作における反復練習を想定し、時々刻々変化する身体動作から学習の進展具合を可視化する運動学習の支援技術の開発を目的として実施された。当該身体動作において認知的制御が優位であれば、その運動はより白色ノイ

ズ的にゆらぎ、反復練習の結果として身体的制御優勢へと移行すれば、観察されるゆらぎは白色ノイズから相応にシフトしてゆらぐことになる。本研究は、この身体動作のゆらぎの変化を利用して運動学習の進展状況を定量化、可視化する方法を検討したものである。本研究で設計された実験フレームワークの下、検討された身体動作はペンタブレット上の運筆動作、触刺激提示を伴うトレッドミル上での歩行動作、スマートフォン操作の運指動作であった。本研究を通して得られた成果は学術論文7編、国際会議発表10件、国内学会発表3件にて公表された。以下、2017年度から四ヶ年の成果を年度毎に整理する。

(1) 2017年度；先行研究で構築された既存の実験システムにおける一部構成要素の更新と、マイクロフォンアレイおよびドップラー・レーダー距離センサの導入により、身体動作のゆらぎ解析のための実験システムが構築された。このシステムは動態計測系(身体各部位の位置・速度・加速度および重心動揺)と生理計測系(脳波、皮膚表面筋電位、末梢皮膚温度、呼吸および瞬目)からなる。種々の身体動作から主たる変動を抽出するためには非接触非侵襲な計測手段のレパトリートとパラエティを確保することが肝要と考えられる。呼吸信号の抽出においては、マイクロフォンアレイによる計測および独立成分分析適用の有効性に関する知見を得た。また、瞬目信号を抽出においては、ドップラー・レーダー距離センサによる計測と主成分分析適用の有効性に関する知見を得た。また、具体的な身体動作として運筆動作を取り上げ、本研究のフレームワークの下、時間要素および空間要素の時系列を導出してDFA法を適用、ゆらぎの性質と時間スケール、および注意資源との関連性について調査検討を行った。

(2) 2018年度；本研究では所望の身体動作が学習者に伝えられていることを前提として身体動作の習熟評価を検討している。身体動作教示の手段は先行研究の経緯から触覚ディスプレイの利用を想定した。歩行動作の教示誘導を目的とした当該先行研究では、触覚ディスプレイから出力されるMatrix-Shaped Tactile Stimuli (MSTSと略記する)なる触刺激を体幹部へ提示する実験が行われた。歩行動作時の体幹部へMSTS提示すると左右方向に身体動揺する可能性が示唆されたが、実験上の制約に課題を残していた。本研究ではMSTSを出力する触覚ディスプレイの幅を拡張し、MSTSの身体動作への効果の増強を図った。さらにトレッドミル上、通常歩行時の体幹部へMSTS提示し、動態計測および加速度計測した時系列をクラスタ分析してMSTSの効果の評価した。一方、運筆動作の習熟評価に関しては、1被験者当たり6セット分の実験データを取得し、運筆動作のゆらぎと運筆習熟との関連性を調査した。当該フレームワークから導出される時系列は時間要素6種類、空間要素6種類であった。従来のDFA法はCrossover現象なる特有の課題を有しているが、本研究でのDFA法適用に当たっては、適用する時系列が極めて短い点も問題であった。研究ではDFA法における時間スケール上、局所的なゆらぎの性質を評価する指標を考案し、この指標に基づいて時間スケールとゆらぎの性質および課題文字との関連性に関する知見を得た。

(3) 2019年度；運動学習における習熟評価のフレームワークに基づいて1被験者当たり6セットの実験により運筆動作のゆらぎと運筆習熟との関係が検討された。また、身体動作としては運指動作を新たに取り上げ、当該フレームワークに基づいて実験を行い、その習熟過程を調査した。運指動作は日常片時も止むことなく、しかしながら極めて繊細な制御が求められる、多分に随意的な動作である。運筆動作も運指運動を一部含むが、運筆動作は必ずしも手指に限定された動作ではなく、前腕の指を含む手全体、状況によっては前腕および全身にまで及ぶ動作である。手指によって一度筆記具がホールドされれば、運指動作なくとも運筆は成立する。この観点において本研究では、運指動作と運筆動作とは異なる身体動作として切り分けられるものと仮定して調査検討された。スマートフォンのディスプレイ上に表示される一文字をキータップすることをタスクと定め、当該フレームワークに則って実験系が構成された。ディスプレイ上に表示されるキーボードのタイプは2種類、一般に普及している五十音配列フリック式入力キーボード(通常キーボード)と、いろは歌順にキー配置を変更したいいろは配列フリック式入力キーボード(特殊キーボード)を用意した。前者は日常的に使用されているため十分に習熟された運指動作を、後者は未経験なキー配置に基づく未熟な運指動作からの習熟の進展を想定した。通常キーボードと特殊キーボードそれぞれの実験から5つの時間要素の時系列を導出し、ゆらぎの性質と運指動作習熟との関係性を調査した。本研究のフレームワークが運筆動作以外に適用された事例としてスマートフォン操作が追加されたことにより、結果的に当該フレームワーク適用の柔軟性が検討された。

(4) 2020年度；研究課題の最終年度として研究全体を総括すると共に、本研究の遂行を通して新たに判明した課題が整理された。本研究は、身体動作として視覚的にその動きが観察される運動に限定して展開された。結果として、連続する2つの身体動作の合間に挿入される身体動作の一時的な停止状態、いわゆる間に関するゆらぎは検討の対象から外れることになった。今後は、この間を含む身体動作全般をフォローする運動学習支援システムを目指し、間を伝える要素技術創出のための間の構造化および差別化が求められた。

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 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Keisuke Tanaka, Ken Arai and Masafumi Uchida	4. 巻 25
2. 論文標題 Evaluation of task difficulty based on fluctuation characteristics in writing task	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics, Springer	6. 最初と最後の頁 17-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-019-0570-w	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 Masaki Terada and Masafumi Uchida	4. 巻 24
2. 論文標題 Time series analysis of body sway caused by several matrix-shaped tactile stimuli on body trunk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics, Springer	6. 最初と最後の頁 270-277
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-018-0472-8	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 Amir Maleki and Masafumi Uchida	4. 巻 23
2. 論文標題 Non-contact measurement of eyeblink by using Doppler sensor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Artif Life and Robotics, Springer	6. 最初と最後の頁 279-285
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-017-0414-x	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 Masayuki Miwa and Masafumi Uchida	4. 巻 23
2. 論文標題 Non-contact measurement of respiratory cycles using a microphone array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Artif Life and Robotics, Springer	6. 最初と最後の頁 255-260
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-017-0413-y	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 Tanaka Keisuke, Uchida Masafumi	4. 巻 26
2. 論文標題 Evaluation of handwriting task difficulty based on detrended fluctuation analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Artif Life and Robotics, Springer	6. 最初と最後の頁 169-175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-020-00672-w	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 Miyamae Hiroki, Hori Katsuki, Uchida Masafumi	4. 巻 16
2. 論文標題 Control System Using Time State Control Form for Balloon Robot	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 412-418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.23311	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 Hiroki Miyamae and Masafumi Uchida	4. 巻 25
2. 論文標題 Constructing a control system using a time-state control form for a fish-type balloon robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Artif Life and Robotics, Springer	6. 最初と最後の頁 316-321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-019-00581-7	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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Masafumi Uchida
2. 発表標題 Fluctuation Analysis of Repetitive Writing Motion by Using DFA
3. 学会等名 25th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 出納優、内田雅文
2. 発表標題 触刺激の運筆動作に及ぼす影響に関する動態計測
3. 学会等名 電気学会・計測/知覚情報合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Tanaka and Masafumi Uchida
2. 発表標題 Evaluation of Handwriting Task Difficulty Based on Detrended Fluctuation Analysis
3. 学会等名 The 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 25th 2019) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新井健、熊谷亮、内田雅文
2. 発表標題 運筆動作におけるゆらぎに関する一考察
3. 学会等名 電気学会産業計測制御研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗原勇樹、小牧絢航、内田雅文
2. 発表標題 触刺激の歩容へ及ぼす影響に関する実験的検討
3. 学会等名 IEEE主催2018年度第2回学生研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisuke Tanaka, Ken Arai, and Masafumi Uchida
2. 発表標題 Evaluation of task difficulty based on fluctuation characteristics in writing task
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 24th 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Miyamae and Masafumi Uchida
2. 発表標題 Control of Fish type Balloon Robot using time-state control form
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 24th 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fluctuation Analysis of Synchronous Repetitive Handwriting
2. 発表標題 Ryo Kumagai and Masafumi Uchida
3. 学会等名 8th International Conference on Unsolved Problems on Noise (UPoN 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Kumagai and Masafumi Uchida
2. 発表標題 Single Trial Analysis of Body Sway Caused by Several Matrix-shaped Tactile Stimuli on Body Trunk
3. 学会等名 2017 International Conference on Noise and Fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Terada and Masafumi Uchida
2. 発表標題 Detrended Fluctuation Analysis of Repetitive Handwriting
3. 学会等名 HCI International 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Terada and Masafumi Uchida
2. 発表標題 Time Series Analysis of Body Sway Caused by Several Matrix-shaped Tactile Stimuli on Body Trunk
3. 学会等名 The 23th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenkou Komaki, Hiroshi Kamoshita, and Masafumi Uchida
2. 発表標題 Gait Analysis Based on Transfer Entropy Method for Gait Stabilization
3. 学会等名 The 23th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Kataoka and Masafumi Uchida
2. 発表標題 Trajectory Generation for Balloon Robot by Using Time-State Control Form Extended to Three Dimensions Space
3. 学会等名 The Twenty-Sixth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------