

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05315

研究課題名(和文)身体動作再現のための体表面への力学的刺激による行動誘発

研究課題名(英文)External physical stimulus on skin surface for inducing human body motion

研究代表者

牧野 泰才(Makino, Yasutoshi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00518714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、皮膚表面に対して外部から刺激を与え特定の行動を誘導する方法を提案し、その性能を検証した。主に二種類の方法でこれを実現した。一つは前腕の皮膚にせん断変形を提示することで、肘関節の屈曲運動を誘発するという方法であり、もう一つはジャイロ効果を利用し、回転円盤を手首に固定した状態で手を振ることで手首の旋回運動を誘発するという方法である。これら手法を実装していく中で、歩行のような人が無自覚に行っている動作については、外部からの刺激に対してロバストに行動を継続してしまう傾向が見られた。そこで、適切なタイミングで刺激を提示できるよう、人の動作をリアルタイム予測するシステムも開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we propose methods that stimulate the skin surface from the outside to induce specific behavior, and verified their performances. We proposed two methods. One is to induce flexion movement of the elbow joint by presenting shear deformation to the forearm. The other one is to use the gyroscopic effect to make user's wrist rotate. By attaching rotating disks to the wrist, the force is given when the arm swings perpendicular to the rotational axis. As we implemented these methods, there was a tendency to continue behavior against the external stimuli especially when the behavior is unconsciously performed by people like walking. Therefore, we also developed a system for real-time prediction of human motion so that stimulus can be presented at an appropriate timing during such motions.

研究分野：触覚情報処理

キーワード：触覚ディスプレイ 身体性 行動予測

・ 研究開始当初の背景

インターネットの普及に伴い、人が物事を記憶する必要が薄れてきている。例えば旅行先での電車の乗り継ぎや到着後の道順などは、必要に応じて適宜検索するのが一般的になっており、予め調べて記憶したりする必要がない。人が従来記憶してきた機能の一部は外部に保存する方向で技術が進歩しつつある。では、現在の技術で全ての記憶をインターネット上に外在化できるかというところではない。一般的に記憶は以下のように分類できるとされており、この分類では、外在化できるのは宣言的記憶である。

- ・ 宣言的記憶：言語として記述できる記憶。更に以下の2つに分類される。
  - － 意味記憶：事実や知識の記憶。既に辞書という形で外部に保存され、古くから共有・活用されている。
  - － エピソード記憶：何らかのイベントについての記憶。日記などの文字情報のほか、写真やビデオなど視聴覚情報として記録される。
- ・ 手続き記憶：言語で記述するのが難しい記憶。動作の反復により獲得される「体で覚えている」記憶。

従来の科学技術は、前者の宣言的記憶の補助として利用されてきた。とくにエピソード記憶は、近年の高速通信の実現により、写真やビデオなどの視聴覚情報をクラウドに保管し共有することが容易になってきている。また、従来のVR技術などは、このエピソード記憶をいかに記録し、それをいかにリアルに再構築するか、に焦点を当てていたと捉えることもできる。

本研究で対象とするのは、後者の手続き記憶である。従来の技術でも、例えば自転車の乗り方について、詳細な両足の移動軌跡や重心変動を記録することはできる。これは、手続き記憶の宣言的記憶化と捉えることができ、人がどのように身体を利用しているのかを理解するには役立つ。しかし、このような情報は、他者が記憶・体験できる形ではなく、宣言的記憶のように共有や活用ができない。

本提案は、身体動作を再現する手法を提案し、手続き記憶の共有、活用を目指すものである。

2. 研究の目的

研究期間を通じ、本研究は主に2つのテーマについての研究を行った。当初の予定は1つめのものであるが、その結果を受け、2つめの研究テーマへとシフトした形である。以下にその2つを順に記す。

1) 本研究では当初、人の動作の記録と再生を目的とし、皮膚に適切な力学的刺激を与えたときの無意識的反応を利用して動作指示を行うウェアラブル機器の研究開発を行うことを目指した。簡便な動作指示装置の実現により、過去の自身や他者の動作の追体験、

反復動作による運動の習得などが可能になると考えた。

2) 研究期間の後半では、人の動作の予測についての検証を主に行うこととした。これは、外的に刺激を与えた場合であっても、例えば歩行のような無自覚的な行動については、非常にロバストに動作を継続してしまうということが分かってきたためである。そのような行動の中で、外部からの刺激にリアクションを取りやすいようなフェーズ、そうではないフェーズを議論するためにも、動作の推定を行い、適切なタイミングを推定しやすくする必要があると考えた。

3. 研究の方法

1) と 2) についてそれぞれを記し、最後に両者を統合した基礎研究について述べる。

1) 外部刺激を利用した行動の誘導

前腕部の皮膚をせん断変形させると、肘を曲げたり伸ばしたりしなくなるという感覚が生じることを発見し、それを実際にウェアラブルデバイスとして実装し評価した。

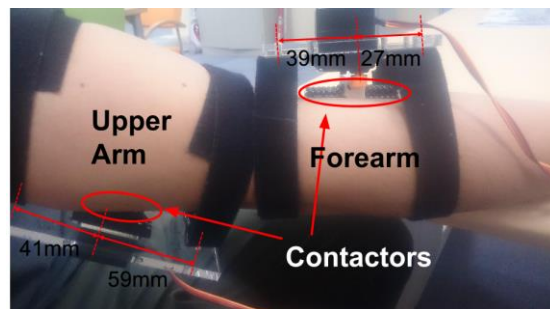


図1 せん断変形による肘関節の屈曲誘導装置

皮膚のせん断変形とは別に、ジャイロモーメントを利用し、四肢の回転動作に付随して回転力を提示し、手首や足首の方向を変化させるようなデバイスを実装し評価した。このような装置では、実際に力が生じるため、四肢をリラックスした状態でスイングしたような場合には手首、足首が想定通りの方向に回転することを確認できた。

一方で、それを使用して歩行時に無意識的に方向を誘導制御するような刺激を与えた場合には、ほとんどその足首の角度変化が歩行方向の変化に寄与しないことが確認された。すなわち、歩行のような無自覚的に継続することが可能な一連の動作については、外力が加わったとしても、それに抗して安定動作するように、フィードバックがかかってしまうということが確認された。



図2 試作したジャイロ効果による手首旋回装置



図3 円盤の回転方向制御により、手首の旋回方向を制御

## 2) 機械学習を利用した動作の予測

前節で記載したように、外部から触覚刺激を与えて行動の誘導を行おうとした場合に、行動のフェーズに依って、誘導をしやすい状態としにくい状態というのが存在する可能性があることを確認した。であるならば、そのようなフェーズに応じた刺激を提示する必要がある。ジャイロ効果による装置のような場合には、回転始動から一定の回転数に到達するまでに時間がかかるため、適切なタイミングで適切な強度の刺激を与えるためには、動作を予測し、それに応じて刺激を提示する必要があると考えた。

そこで、研究期間の最後の一年は主に、人の行動の予測がどの程度できるのかを、機械学習を利用して推定することを課題として取り組んだ。具体的には、図4に示すように Kinect という深度センサを利用して人体の3次元的な骨格座標を取得した。その時間推移を図5に示す。このような動作0.33秒分をニューラルネットワークで学習させ、0.5秒後の身体位置を正解とすることで、未来の動作予測を実現した。

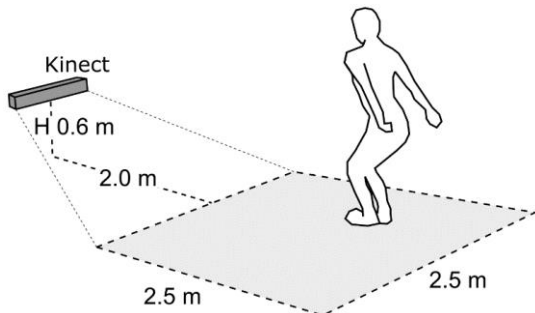


図4 Kinect を利用した動作計測

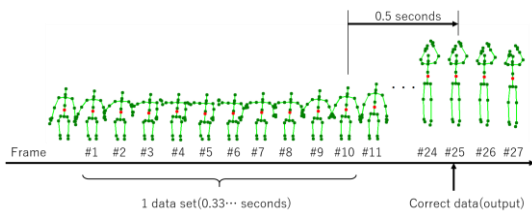


図5 時系列骨格情報を利用したジャンプ動作の位置推定。

以上のように、動作の誘導と予測とを組み合わせることで、普段出来ないようなタスクを簡単にこなせるようになるのではないかと考え、1次元のレール上に配置された倒立

振子を手動で安定化させる、というタスクを考えた。図6のように、被験者は手を使って倒立振子を移動させ、安定的に立たせることとする。この際に、動作を推定しながら、適切なフィードバックを与えることで、振子自体を目視しなくても、安定に立てられるのではないかと考えた。

結果としては、視覚的な刺激で情報をフィードバックした場合には、振子自体を隠して目視できなくしても、訓練すれば1分以上安定に保つことができるようになることが確認された。一方、触覚刺激の場合には、振動刺激やせん断刺激などいくつかの種類の刺激で試してみたものの、安定化には至らなかった。このようなタスクの場合、現在の位置からどの程度ずらすべきか、という量的な指示が必要となるが、触覚を介したフィードバックにおいては、そこを適切に行うのが困難であったことが原因と考えられる。これについては、今後の課題と考えている。

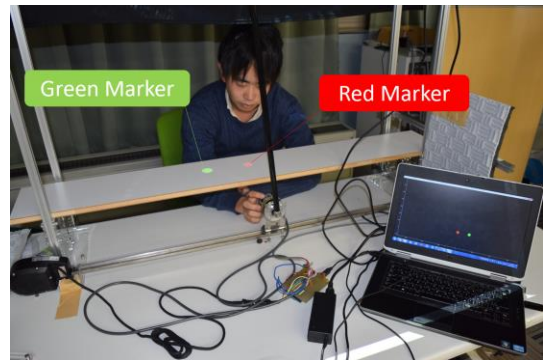


図6 倒立振子の手動安定化と、そのための視触覚フィードバックシステム

## 4. 研究成果

### 1) 外部刺激を利用した行動の誘導

まず前提として、このような装置を装着し、行動を誘導するという研究は、ハンガー反射という現象を利用したものがほぼ同時期に行われていた程度であり、ほとんど前例が無い。つまり、どちらの手法についても行動誘導のための外部からの触覚刺激法についての基礎研究として、重要な成果であると考えている。ただし、このような動作の誘導が行えるような触覚刺激を、もう少しシステムティックに探索する手法が検討できればより良かったと考えている。

また、このような装置により動作の誘導ができるという結果の他に、外部触覚刺激により動作を誘導する場合の反応速度についても調べた。当初の期待としては、触覚という反射を伴ったモダリティの活用により、他の感覚よりも反応速度の早いリアクションが生成されることを目指していたが、実際は、触覚のみの場合には、視覚的にLEDで指示を出した場合に比べてその反応速度は遅くなることが確認された。一方で、視覚と触覚を同時に提示した場合には視覚のみの場合よ

りも反応速度が早くなる傾向が得られた。これは、皮膚のせん断変形に限らず、単に振動のみでも現れた傾向であった。このような、触覚を利用した動作誘導刺激の反応速度についての知見はこれまでに知られていない新しいものであり、本研究の成果である。

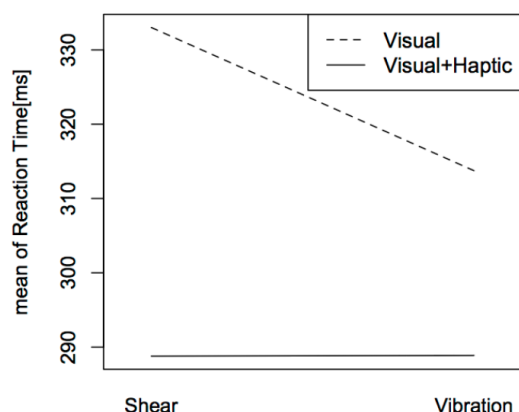


図6 せん断刺激, 振動刺激の二種類の刺激に対する, 視覚のみ, 視覚+触覚の刺激についての反応速度. 視覚のみのほうが有意に反応速度が遅くなる傾向が見られた

## 2) 機械学習を利用した動作の予測

図7に跳躍動作をリアルタイム予測した際の写真を示す. 右下のPC画面内の緑の骨格が現在の姿勢を, 赤の骨格が予測された0.5秒後の姿勢を示す. 図からも明らかなように, まだ跳躍する前から, 予測画像はどちらに跳躍するかを予測していることが確認できる. 様々な跳躍動作を学習させることで, 誤差3cm程度で重心位置の推定を行うことが可能となった.

歩行についても同様に学習と予測を行い, こちらは重心の予測誤差で2cm以下の精度で予測できることを確認した.

このような動作予測の結果を利用すると, 人がどの程度前から予備動作を開始し, それがどの程度変更しにくいものであるか, というあたりの検討が可能になる. 例えば跳躍動作の場合には0.5秒後を3cm以内程度の精度で予測することが出来たが, これは全身にその予備動作が生じているためである. 一方, 手腕のみを動作させるような場合には, 予備動作が少なくても十分に早く動かすことが可能であるため, 予測の精度が下がるということが確認された.

このような大きな予備動作を伴う行動に対して, 外的に刺激を与えたときにその一連の動作シーケンスにどの程度の影響が出るのか, それによって行動を変容させられるのかはまだ検証しておらず, 今後検討していきたい事項の一つである.

以上のように, 外部からの触刺激に基づく行動の変容をきっかけとして, 人の行動の予測までを行ったのが本研究である. 今後は, 人の動作のロバスト性について, よ

り詳細に検証して行きたいと考えている. 例えば急に現れた外乱に対して, 人が瞬間的に行動を変化させるような場合, それを同じような予測で推定できるのか, そのような行動の変化が起こっている最中に, 外的に刺激を与えることで, その行動変化を特定の形に誘導できないか, というような点を検討していきたいと考えている.



図7 跳躍動作のリアルタイム予測

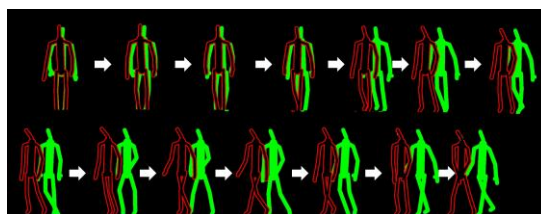


図8 歩行時の動作予測

## 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0件)

[学会発表] (計21件)

(査読付き国際会議)

- [1] T. Ichiyama, A. Matsubayashi, Y. Makino, and H. Shinoda, "Real-time control operation support of unstable system by visual feedback," IEEE VR 2018.
- [2] Y. Makino, Y. Horiuchi, and H. Shinoda. "Body Motion Estimation by Machine Learning," IDW '17, Dec. 6-8, 2017 (招待講演)
- [3] Y. Horiuchi, Y. Makino, and H. Shinoda. 2017. Computational foresight: realtime forecast of human body motion. In SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies (SA '17).
- [4] Y. Horiuchi, Y. Makino, and H. Shinoda. 2017. Computational Foresight: Forecasting Human Body Motion in Real-time for Reducing Delays in Interactive System.
- [5] Y. Horiuchi, K. Yoshida, Y. Makino, and Shinoda, H. (2017, June). Rubber hand illusion using invisible tactile stimulus. In World Haptics Conference (WHC), 2017
- [6] Y. Horiuchi, K. Odani, Y. Makino, and H. Shinoda: Rubber hand illusion using tactile projector, Asia Haptics 2016.

- [7] H. Miyahara, Y. Makino, and H. Shinoda: Inducing Wrist Twist during Arm Swing by using Gyro Effect, Asia Haptics 2016.
- [8] K. Shikata, Y. Makino, H. Shinoda: Inducing Elbow Joint Flexion by Shear Deformation of Arm Skin, Proc. 2015 IEEE World Haptics Conference (WHC), WIP-30 (Work-in-Progress Papers), 2015.

(国内会議)

- [1] 一山 智弘, 吉田 健太郎, 堀内 悠生, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “触覚による不安定システムの制御動作支援,” 第 18 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, pp. 2096-2101, Dec. 20-22, 2017.
- [2] 堀内 悠生, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “機械学習を用いた 3 次元骨格情報を用いた運動の予測,” 第 18 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, pp. 2538-2542, Dec. 20-22, 2017
- [3] 堀内 悠生, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “ニューラルネットワークを用いた身体動作履歴に基づく身体運動の予測,” 第 22 回バーチャルリアリティ学会大会, 2E2-05, Sep 27-29, 2017.
- [4] 一山智弘, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “触覚フィードバックによる不安定システムの制御,” 第 22 回バーチャルリアリティ学会大会, 3D2-01, Sep 27-29, 2017.
- [5] 一山智弘, 牧野泰才, 篠田裕之, “触覚フィードバックによる倒立振子の手動安定化,” 第 34 回センシングフォーラム 資料, pp. 303-304, Sep. 1, 2017.
- [6] 堀内 悠生, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “ニューラルネットワークを用いた身体動作履歴に基づく重心座標の予測,” 第 34 回センシングフォーラム 資料, Sep. 1, 2017.
- [7] 宮原 寛和, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “ジャイロ効果による歩行時の進行方向誘導を目的とした足への力覚提示,” 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, pp. 1365-1369, Dec. 15-17 2016.
- [8] 宮原 寛和, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “ジャイロ効果による歩行時の足首回転制御に基づく進行方向誘導,” 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 11A-02, Sep 14-16, 2016.
- [9] 堀内 悠生, 尾谷 和則, 篠田 裕之、牧野 泰才 “触覚プロジェクタを用いたラバーハンドイリュージョン” 第 2 1 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 12B-04, Sep 14-16, 2016.
- [10] 牧野泰才, 四方紘太郎, 篠田裕之: 視覚情報に基づく行動判断における触覚刺激付与の効果, 1P1-12b7, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市西区, June 8-11, 2016.
- [11] 宮原 寛和, 牧野 泰才, 篠田 裕之: ジャイロ効果による歩行時の進行方向誘導, ロボ

ティクス・メカトロニクス講演会 2016 論文集, No16-2, 1A2-14b1(1)-(2), June 8-11, 2016.

- [12] 宮原 寛和, 牧野 泰才, 篠田 裕之: ジャイロ効果による四肢運動時の行動誘導を目的としたウェアラブルデバイス, 第 16 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, pp. 0927-0929, Dec. 14-16, 2015.
- [13] 宮原 寛和, 牧野 泰才, 篠田 裕之: ジャイロ効果による運動時の四肢の行動誘導, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 433-434, Sep. 9-11, 2015.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.hapis.k.u-tokyo.ac.jp/?portfolio=computational-foresight>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牧野 泰才 (MAKINO, Yasutoshi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号 : 00518714