

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05884

研究課題名(和文) ユーザと機械が相互に学習するロボット操縦インタフェースの開発

研究課題名(英文) Development of Robot Control Interface based Mutual Learning of Users and Machines.

研究代表者

山本 雅人 (Yamamoto, Masahito)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40292057

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)：本研究では、ユーザの身体動作の情報などの時系列情報から意図を抽出することで、ユーザの意図通りに機械を操作可能とするインタフェースの開発を行った。特に、多自由度ロボットの操作を対象とし、あらかじめ決められたコマンドを覚えることなく、動作を繰り返す中で自ら学習し、それらの入力と動作の関係から機械も学習することでユーザが直感的に操作しやすいインタフェースを構築した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have proposed a mutual learning interface between human and machine where the machine exploits the prediction errors to read user's intention. To do this, we extracted human intention from body movements, especially hand movements, and associate with movements of multi-degree of freedom spider robot, thereby constructing interface to operate robot only from hand movements. Since the hand movements reacts the intention that varies depending on the individual user, the correspondence between the hand movements and the operation of the controlled object is built using machine learning. It is shown that the proposed interface can adapt to multiple behaviors of the robot.

研究分野：人工生命/人工知能

キーワード：インタフェース 相互学習 ニューラルネットワーク ロボット操縦 つもり制御 LSTM

1. 研究開始当初の背景

ロボットやソフトウェア技術の発展に伴い、社会や一般家庭の場において、人と機械が直接相互作用する機会が増えつつある。人と機械の相互作用に関する研究は、機械がロボットの場合は Human-Robot Interaction(HRI)と呼ばれ、ソフトウェアエージェントの場合には Human-Agent Interaction(HAI)と呼ばれ、世界中で勢力的な研究がなされている。人と直接相互作用する機械を想定する場合、従来の産業型ロボットとは異なる技術が求められる。例えば、人に危害を加えないためのソフトな材質やそのための制御方法、また、無機質な人工物の塊ではなく、感情を表現できる運動と外見をもつロボットの構築などが求められる。これらハードウェアに付随する技術は、ソフトロボティクスと呼ばれるロボットの身体性の発展とともに、外見が人らしいロボットの開発も進められており、社会への実現まであと少しのところまできている。

一方で、人が機械と相互作用するにあたり、人の負担にならないようなインタフェースの開発は遅れている。つまり、インタフェースはコマンドなどの形で機械の設計者側があらかじめ用意し、ユーザはそのコマンドを覚えることで操作方法を覚えてきた。このような方法では、ユーザはコマンドと動作の対応関係が明確でないため、ヒューマノイドロボットなど多自由度の機械を直感的に操作することは困難である。一般に、操作インタフェースの自由度に対して、機械の自由度が大きいとき、例えば、ロボットに手を振らせる行動をするときには、インタフェースを直感的に操作する方法によって手を振る動作を生成することはできない。機械学習などの技術が進歩した現在、さらに人との相互学習という技術を本研究で開発することで、このような自由度の対応しない機械もユーザの直感的操作によって操作可能となることが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、ユーザと機械が相互に学習することで、ユーザの意図通りに機械を操作することを可能とするインタフェースの開発を目的とする。ユーザがあらかじめ決められたコマンドを覚えることなく、動作を繰り返す中でユーザが学習し、それらの入力と動作の関係から機械も学習することで、ユーザが直感的に操作しやすいインタフェースの構築が可能となり、それぞれのユーザに適応したインタフェースとなることが期待できる。

ロボット制御におけるユーザと機械の動作の関係は、ロボットへの入力信号から動作への写像であると捉えることができ、入力信号は操作するユーザによって与えられる。本研究では、ユーザと機械が相互に学習することで、小さい自由度のインタフェースにより多自由度ロボットを直感的に操作可能なインタフェースの開発を行う。ロボット操作に

おいて、入力信号とロボットの動作の関係を試行錯誤的に学習して意図通りの操作を行えるよう入力信号を変化させるのがユーザの学習である。また、機械であるロボットは、入力信号の履歴からユーザの意図を読み取り、入力信号に対する出力を変更していくのが機械の学習である。本研究では、これらの学習を相互に行うことで、直感的に操作可能なインタフェースを開発する。プロトタイプ of インタフェースを開発し、実際のロボット操縦に適用することで操作特性の評価を行う。得られた評価結果から、より使いやすいインタフェースの開発や機械学習法へフィードバックし、短時間で直感的に操作可能となるインタフェースの開発を目指す。

3. 研究の方法

初年度では、課題の一つである「ユーザの学習速度と機械の学習速度のバランスをどうとるか」について取り組む。この課題遂行のためには、ロボット本体やセンサなどの機械的不安定さがあるため、実際のロボット操縦実験を対象とするのは不適切であるといえる。初年度では、よりユーザと機械の学習速度のバランスに焦点を絞るため、計算機内の仮想空間において動作するロボットを対象として研究を行う。例えば、現実の物理法則を再現した仮想空間を用意し、4脚ロボットを携帯端末によって操作することで、ロボットを移動させるようなタスクを考える。

まずは、このようなタスクにおいて、機械の学習をせずに、ユーザのみが学習を行う場合についての入力と動作の関係を検証する。入力から出力への変換の関数がユーザにとっては未知ではあるが、ユーザは試行錯誤する過程においてある入力に対するロボットの出力を観測することができるので、この関数における入力と出力の関係を推定することができる。この推定を通して、ロボットを自分の意図通りに動かすことができるまでの過程を観測する。そこからユーザの学習速度などの指標を導出するためのデータ分析を行う。

次に、ユーザの意図が明らかなタスクを設定し、機械も学習する相互学習の枠組みの中での学習速度に注目する。例えば、あるサブゴールを経由しながらボールをゴールまで移動させるといった目的(意図)が明確な問題設定を与え、ユーザの意図を機械が知り得る状況を考える。ここでは、ユーザの意図が明確なため、ユーザの入力によるロボットの動作と意図との差から、機械が誤差逆伝搬法などの方法を用いて学習することが可能となる。この問題設定において、前述のユーザの学習特性を利用し、機械の学習速度を調整することで、ユーザの意図通りの出力を出すように機械が学習を行い、その特性を分析する。

初年度に得られたユーザの意図が明確な場合におけるユーザと機械の相互学習の学

習特性を利用して、ユーザの意図が不明確なタスクにおける相互学習インタフェースを開発する。この目的のために、ユーザの入力動作を連続的に精度よく計測する操縦桿インタフェースを作成し、操縦動作からロボット動作への変換には、ユーザの連続時間の動作にも対応できるように連続時間のニューラルネットワーク(NN)やリカレントニューラルネットワーク(CTRNN: Continuous-Time Recurrent Neural Network)を用いる。ユーザの意図を推定するため、ユーザの数ステップ後の入力を予測する予測ニューロンを追加し、実際の入力との比較にもとづき学習する手法を提案する。

ここでは、ユーザの意図通りに操作できているときは、入力が安定するという仮説にもとづき入力の安定性を指標とする。入力の安定性は、予測ニューロンの予測誤差が小さいときと定義し、予測誤差がある閾値以下の場合、ニューラルネットワークの結合重みの変更を行わないことで望みの行動を安定して出力できるようにする。一方、予測ニューロンの予測誤差が大きいときは、学習により結合重みの変更を行う。

以上の方法論で相互学習を実現したインタフェースを開発し、多くの被験者による操作実験を行い、インタフェースを評価する。それらの結果から、各種パラメータの設定や学習速度の調整を行い、インタフェースの改善を行う。これらの実験を踏まえて、実機が多脚ロボットへの適用を行い、開発したインタフェースの有効性を検証しつつ、インタフェースのさらなる改善を行う。

これらの研究計画において、特に、平成28年度以降のリカレントニューラルネットワークの学習においては、計画通りに進まない可能性がある。その際は、入力の予測モデルの変更やリカレントニューラルネットワークの学習アルゴリズムについて、ネットワークを時間的に展開して誤差逆伝搬法を適用するなどの変更を検討する予定である。

4. 研究成果

平成27年度は、相互学習の枠組みの確立を目指すこと、および、ニューラルネットワークの構造の違いによる比較などについて検討した。ロボット操縦のタスクにおいて、ロボットがユーザの意図に沿った動作を繰り返し行なっているならば、ユーザはその動作に対応する特定の入力を繰り返し行うため、入力は周期的行動になると考えられる。そのため、入力が周期運動である場合にはインタフェースの変換関数を変更せず、入力が周期運動から外れた場合には変換関数を変更する、という学習を行えばよい。このような学習を実現するために、変換関数としてニューラルネットワークを用い、その出力層に予測ノードを追加することで現在の入力値から将来の入力値の変化量を予測する。もしユーザが入力として周期運動をしている

のであれば、現在の入力値から将来どのような入力値になるのが予測可能となるため、予測誤差が小さくなる。逆にユーザが周期運動をせずに入力を様々に変化させているのであれば、予測が困難となり予測誤差が増大する。これを使ってニューラルネットワークの更新を行う手法を提案した。そこで問題となる人間の学習速度と機械の学習速度のバランスをとるためのパラメータについて調査をし、適切な値に設定するための指針を得た。さらに、フィードフォワードニューラルネットワーク(FFNN)を用いた手法と、情報のフィードバック結合をもつことでフィードフォワードニューラルネットワークに比べ学習は困難であるものの、入力履歴に基づいてより複雑なパターンを表現可能なリカレントニューラルネットワーク(RNN)を用いる手法について提案し、その比較について議論した。

平成28年度は前年度で明らかとなった入力の周期的行動を予測するニューラルネットワークに対して、機械側の学習速度と人の学習速度のバランスを調整するパラメータを用いて、本年度は予測精度を上げるための実験を計画した。しかしながら、初年度で用いたリカレント型ニューラルネットワークよりも、より精度向上が見込めるという理由から、本年度は、Long short-term memory(LSTM)やGated Recurrent Unit (GRU)、さらには、階層型のリカレントニューラルネットワークの利用について検討することとした。また、ユーザの生体情報や動きの状態を入力として捉えるために、ニューラルネットワークの入力としてより情報量が大きい画像情報を対象とし時系列データの学習について検討を行った。対象問題として、まずは単一の画像を入力してロボットの自己位置を推定する方法と複数の時系列データを入力した場合における自己位置推定の精度について、時系列データを用いた方がより精度が向上することがわかった。これは、ユーザの行動履歴を時系列データとしてうまく利用して、将来の入力を予測する方法として十分に立つことが示された。

平成29年度は、これまで研究からリカレント型ニューラルネットワーク、特に Long short-term memory(LSTM)が、時系列のデータを扱うのに適していることが明らかになった。特に、ユーザの手を対象とした動作情報を時系列で扱うことで、ユーザの意図が動きの中に反映されることが明らかとなっていた。最終年度では、身体動作として情報の取得が容易な手の動作に注目したインタフェースの構築を行った。手の情報の取得には Leap Motion を使用し、得られる手の動作情報を LSTM への入力としロボット動作との対応付けを行う。一般に、手の動作と制御対象の動作の対応関係は未知であるため、つもり制御を利用することとした。つもり制御は、ロボットの動作をあらかじめ知っているコ

ーザが、ロボットの動作に合わせてあたかも自らがロボットを操っているかのように入力インタフェースである操縦桿で直観的な操作を行う。このときの操縦桿への入力と実際のロボットの動作の対応関係から学習を行うことで、ロボットを意図通りに操ることができる手法である。このつもり制御を応用して、手の動作を LSTM への入力を介してクモ型ロボットの動作と対応付けを行った。学習の結果、構築したインタフェースがどれほどの性能を有しているか、ロボットの元のインタフェースと比較した結果、ユーザはコマンドなどを覚えることなく直感的な入力のみで、元のインタフェースと同等程度に操作可能であることを示した。

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 1 件)

Wataru Noguchi, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto, Cognitive map self-organization from subjective visuomotor experiences in a hierarchical recurrent neural network, Adaptive Behavior, 査読有, pp. 1-18 (2017)

[学会発表](計 14 件)

中西 啓太, 飯塚 博幸, 山本 雅人, LSTM によるつもり動作の抽出, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 (ROBOMECH2018) 講演論文集, pp. 1-4 (2018)

中西 啓太, 飯塚 博幸, 山本 雅人, LSTM を用いた身体動作に基づくつもりインタフェース, 第 17 回複雑系マイクロシンポジウム講演論文集, pp. 48-52 (2018)

Izuho Suginaka, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto, Robustness of Mobile Robot Localization using Recurrent Convolutional Neural Network, Proceedings of the 1st International Conference on Digital Practice for Science, Technology, Education, and Management (ICDP 2018), B3-3 (2018)

杉中 出帆, 飯塚 博幸, 山本 雅人, Recurrent Convolutional Neural Network に基づく一人称視点画像からのロボットの自己位置推定, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (ROBOMECH2017) 講演論文集, pp. 1-4, 2P2-F02(2017)

Izuho Suginaka, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto, Robustness of Mobile Robot Localization using Recurrent Convolutional Neural Network, Proceedings of the 21st Asia Pacific Symposium on Intelligent and

Evolutionary Systems (IES 2017), pp. 95-100 (2017)

Wataru Noguchi, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto, The development of spatial recognition and navigation in hierarchical recurrent neural network with convolution processing, Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Life 2017, pp. 324-331 (2017)

野口 渉, 飯塚 博幸, 山本 雅人, 階層型リカレントニューラルネットワークを用いた認知地図の自己組織化と目的行動の生成, 第 16 回複雑系マイクロシンポジウム講演論文集, pp. 13-17 (2017)

杉中 出帆, 飯塚 博幸, 山本 雅人, リカレント型畳み込みニューラルネットワークを用いたロボットの自己位置推定, 第 16 回複雑系マイクロシンポジウム講演論文集, pp. 9-12 (2017)

Wataru Noguchi, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto, Hierarchical recurrent neural network model for goal-directed motion planning using self-organized cognitive map, Proceedings of the Twenty-Second International Symposium on Artificial Life and Robotics 2017 (AROB 22nd 2017), pp. 73-78 (2017)

杉中 出帆, 飯塚 博幸, 山本 雅人, 畳み込みニューラルネットワークを用いた一人称視点画像による自己位置推定, 第 15 回情報科学技術フォーラム(2016)講演論文集, pp. 57-58 (2016)

齋藤 健太郎, 飯塚 博幸, 山本 雅人, 動作の分節化を利用した相互学習インタフェース, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集. pp. 575-576 (2016)

齋藤 健太郎, 飯塚 博幸, 山本 雅人, 動作分節の獲得による人間と機械の相互学習インタフェース, 第 48 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, pp. 95-96 (2016)

麻野 将平, 飯塚 博幸, 山本 雅人, 畳み込みニューラルネットワークを用いた運動認識による入力インタフェースの構築, 第 48 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, pp. 81-84 (2016)

齋藤 健太郎, 飯塚 博幸, 山本 雅人, 入力予測誤差最小化による相互学習インタフェース, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, pp. 592-597 (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://autonomou.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山本 雅人 (YAMAMOTO, Masahito)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号： 40292057

(2)研究分担者

飯塚 博幸 (IIZUKA, Hiroyuki)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号： 30396832