

研究終了報告書

「未知物体操作のための位置と力情報を用いた End to End Learning」

研究期間: 2017 年 10 月～2021 年 3 月

研究者: 境野 翔

1. 研究のねらい

工場・農場での多くの作業は未だに肉体労働に頼らざるをえない。なぜロボットで完全に代替できないのか。その最大の理由は、現在のロボットは事前に与えられた目標軌道に追従することを目的としており、個体差の大きい物体や変形しやすい柔軟物、すなわち未知物体への対応力がないからである。逆に言えば、ロボットを用いた未知物体操作技術が確立されれば工場や農場での完全無人化が現実のものとなる。

1 台のロボットで多様な物体を操作できるようになるためには、多様な条件に適応し対応できるソフトウェアの開発が不可欠である。近年、深層学習を用いたロボット制御も広く研究され始めているが、未だに未知物体の操作における動作成功率並びに動作速度を人間と同レベルにするための方法論はあきらかになっていない。その理由は大別して3つに分けられる。1. 従来は特にカメラを用いた画像情報に注力するものが多かったが、カメラでは微細な接触状況を判断することが不可能。2. ロボット制御では一度の試行に必要な時間が物理現象の時定数・むだ時間によって支配されてしまい、試行回数を増やすことが困難。3. ロボットでは応答値しか計測できず、指令値を外的に計測することはできない。よって、制御系の入力である指令値と出力である応答値を紐付けるモデルは構築困難。

そこで本研究課題では、マスタ・スレーブの2台のロボットを同期させ同時に力覚フィードバックを実現する遠隔操作制御であるバイラテラル制御を用いることでこれを解決する。バイラテラル制御を用いることの利点としては以下の3点があげられる。1. 力制御を用いた力覚フィードバックがあるため物体との接触時の力を検知し制御する動作のデータを収集することが可能。2. バイラテラル制御を用いることで、人間がマスタを操作するとスレーブでの環境を直接操作しているかのような臨場感の高い操作が可能であるため、環境操作時のなめらかで早い動作のデータを収集することが可能。すなわちデータの質を向上可能。3. バイラテラル制御ではマスタの応答値がスレーブの指令値として入力されるため、スレーブの指令値と応答値の双方度を同時に計測可能であり、対象の入出力関係を予測させる教師あり学習と呼ばれる非常に学習の容易なデータを収集可能。

以上のように、バイラテラル制御を用いて人間並の環境への適応能力と動作速度を両立するロボット制御AIを確立し、汎用的な物体操作が可能なロボットを実現することを目的とする。

2. 研究成果

(1) 概要

研究代表者はバイラテラル制御する際の位置/力応答のデータを収集すれば、ニューラルネットワーク(NN)を利用して位置制御と力制御をロボットに教示できることをあきらかにした。バイラテラル制御ならば人間はロボットの状況を認識できるため、人間とロボットの身体機構の相違すら補正できるからだ。さらに、バイラテラル制御では制御の遅延や環境と

の相互作用を操作者が知覚できるため、人間並みの高速かつ動的な物体操作が可能になった。また、プログラミング不要で人間が数回動作を教示するだけでよい。

例えば、定規の傾きを変えて複数の動作を教示すると、分度器や波型定規などの初見の文房具を使用可能になった。これは、力まで制御することで、「拘束に倣う」というタスクの本質を教示できたからだ。1 次元的な教示動作を複数与えるだけで 2 次元的な動作を獲得できたとも言える。さらに、ロボットのセンサでの応答値と実際に描画した曲線を比較すると、あきらかに描画した曲線のほうがなめらかであった。力制御を内包する制御系を用いて道具を利用することで、ロボット自身の位置制御性能を上回る制御が実現できたのである。

また、消しゴムを用いた字消動作も容易に実現できた。位置指令値のみを予測するとわずかな高さの変動でも摩擦で動かなくなるもしくは全く紙面に力を印加できない状態になるが、提案手法では力制御を内包しているためカメラを用いずに容易に紙面の高さの変動に対応できた。また、これは慣性力を陽に用いる動的な動作でもあるため人間並みの高速動作ができなければ実現不可能な例である。

さらに、人間とロボットが協調した物体運搬動作も提案手法で容易に実現可能であった。人間の動作は事前に不明であるため非常に困難なタスクだが、提案手法では未教示の物体であっても問題なく動作するばかりか、道具や環境の変動にもロバストであり、さらに、人間が意図的に外乱を加えても運搬物を落下しなかった。提案手法の成功率は 98.3%であり、研究代表者の知識範囲で他に実現出来ている例を知らない画期的成果である。

その他にも、モップがけ、豆腐のような柔軟食品の運搬、書字など、いずれもこれまで困難であるとされてきたタスクを提案手法で実現できることを実証した。よって、教示動作を変えるだけでソフトウェア的に汎用的な物体操作技能をロボットが獲得できるようになったため、本研究課題の目的は達成されたと考える。

(2) 詳細

研究テーマ A「バイラテラル制御を用いた模倣学習」

本テーマでは、バイラテラル制御を用いて収集したデータを用いて、汎用的かつ高速な動作をロボットに模倣させるための基盤技術を開発した。ここでは主に 2 つの技術を開発した。

① 予測すべき物理量の解明

提案手法ではバイラテラル制御を用いて教師データを収集するときには、マスタ・スレーブの 2 台を用いる。続いて、マスタの挙動を再現するように NN を学習させるとスレーブを単体動作させても、NN からの指令により適切に自律動作できるようになる。教師データを収集する際、マスタとスレーブの応答値や、その際の制御入力を保存することが可能であり、自律動作時にはスレーブの応答値のみ計測可能である。よって、NN のモデルの入力はスレーブの応答値となるが、出力はマスタの応答値をスレーブの指令値として予測するモデルと、スレーブへの制御入力自体を予測するモデルの二者が選択可能であり、どちらがよいかは自明ではない。

NN の予測は計算コストが高いため、センシングのサンプリングタイムから比較するとか

なりそのサンプリングタイムは長くなる。例えば、センシングは 1ms、NN は 20ms ほどが典型的な数値である。よって、マスタの応答値をスレーブの指令値として予測した場合、20ms ごとに更新される指令値に対して、1ms ごとに制御入力更新される。一方、制御入力を直接予測した場合、20ms ごとに制御入力更新されるため、ロボットは離散的な挙動を示しがちであることがあきらかになった。また、予測誤差があった際にもマスタの応答値を予測させるモデルの優位性があきらかになった。すなわち、マスタの応答値を誤って予測した場合は安定的に誤った場所へスレーブが動作するが、制御入力を誤って予測した場合は制御器の安定性を保証することすらできなくなってしまう暴走してしまう。以上のように、スレーブの応答値からマスタの応答値を予測するモデルが適切であった。また、マスタの応答値にはマスタからスレーブまでの制御の遅延を補償するための人間の技能が抽出されているため、人間並みの環境適応能力と高速動作を両立した物体操作が可能になった。

[5-(3)-5]

②教師データのダウンサンプリングと水増し

過度に早いサンプリングで時系列データを予測すると、短周期(高周波)の動作の予測を過剰に行うモデルとなってしまうため、適度にデータをダウンサンプリングして間引くことが重要である。よって、長周期の動作になるほど大量にダウンサンプリングしなければならずデータ効率が悪かった。

そこで、ダウンサンプリングする際、データの開始時刻を 1 ステップずつずらしながらダウンサンプリングすることで教師データを水増しする手法を開発した。すなわち、1ms ごとに収集したデータを 20ms ごとの教師データにダウンサンプリングする際は、データの開始時点を増やしたダウンサンプリングデータを生成することで、教師データを 20 倍にすることが可能になる。結果として、消しゴムによる字消では 3 回、定規を用いた描線は 11 回程度と、非常に少ない教師データで適切な動作を予測できるようになった。[5-(1)-1]

以上の 2 つの基盤技術は単純であるがゆえに強力かつ汎用的であり、これ以降の研究テーマでも使用した。

研究テーマ B「長周期動作の模倣学習」

本テーマでは比較的長期のタスクを行うための基礎技術を確認した。こちらにも主に 2 つの技術を開発した。

① 複数の動作周期の入力

ロボットに文字「A」を書かせるタスクの場合、一文字を書く際には 2 から 5s ほどの時間がかかるが、紙面との接触の制御は ms オーダーでの制御が必要である。このような時間レンジが異なるタスクを同時に機械学習に学習させることは困難である。なぜならば、短周期のタスクを実現できるように行動推定周期を短くすると、長周期のタスクの実現には非常に遠い未来までの予測が必要となってしまうからだ。そこで、長周期の運動データに関しては時間的に荒くサンプリングし、短周期の運動データは時間的に密にサンプリングするモデルを開発した。文字を書くタスクの場合は、位置・速度情報に関しては 400ms に一度入力情報が更新され、力情報に関しては 20ms に一度入力情報が更新されるモデルとすることで、長周期の位置変動に関わる予測ステップ数を低減した。結果として、これまで困難であった書

字が可能になった。本成果により異なる時間レンジの要求を複数内包するタスクであっても自律的に学習・動作生成することができるようになった。[5-(3)-3]

② 自己回帰モデルによる長期的な予測誤差の評価

提案手法では、スレーブの現在の応答値から 1 ステップ先のマスタの応答値を予測する。よって、1 ステップ先のスレーブの応答値を予測できなければ、2 ステップ先のマスタの応答値を予測できない。結果として NN のモデルの学習時に数ステップ先の誤差までを計算できず、長期的な予測誤差を評価したモデルを構築することが不可能であった。よって、動作のブレが大きくなることや、瞬間的に異常値が計測されてしまった場合には不安定になりやすいことが問題であった。

これを解決するため、マスタとスレーブの現在の応答値からマスタとスレーブ双方の 1 ステップ先の応答値を予測するモデルを提案した。本モデルを用いることで、再帰的に N ステップ先の応答値を予測することができるようになるため、学習時に長期的な予測誤差を評価することができるようになり、教師データ数を減らしても安定的な学習が可能になった。さらに、マスタとスレーブの相互作用を学習できる形のモデルであるため汎化性能も向上し、[5-(3)-3]の手法と比較しても未知環境に対する適応能力が向上した。

研究テーマ C「バイラテラル制御の性能向上」

バイラテラル制御の制御性能が提案手法のボトルネックとなっているため、それを改善する手法を 2 つ開発した。

①. 機能的電気刺激を用いたバイラテラル制御

バイラテラル制御では人間へのよい力覚フィードバックを実現するマスタロボットの多自由度化が技術障壁となっていた。本研究では、ロボットの代わりに人間の筋を外部電流により駆動する機能的電気刺激を用いることで、マスタロボット不要のバイラテラル制御系を実現した。肩と肘の 3 次元運動をロボットと同期させることで、ジェンガを引き抜くタスクにおいて、バイラテラル制御なしの状態と比較して成功率が 75%から 100%に向上し、タスク実行時間もほぼ半減した。[5-(1)-2]

②. 油圧アクチュエータを用いた広帯域制御

人間へのよい力覚提示を実現できるアクチュエータである油圧アクチュエータの一種の電気静油圧アクチュエータにおいて、作動油の漏れ、作動油の圧縮に伴う共振、静止摩擦を補償できる制御系を構築した。結果、従来の剛体モデルを用いた制御系の 3 倍以上広い制御帯域を実現したと同時にモデル化誤差に対する高いロバスト性も実現した。本論文は高く評価され、電気学会産業応用部門論文賞を受賞した。[5-(1)-3]

3. 今後の展開

さががけでの研究の社会実装に向けて、A-STEP 産学共同育成型に応募し採択された。12 月 1 日より研究を開始し、さががけでは不十分な成果となった社会実装を完遂することを目指している。

さががけで提案した手法は比較的短期間・高速の動作は他を圧倒する反面、長期間・低速の動作では AI の学習が不安定になる問題があった。よって、階層化モデルを更に発展させること、画像や音声等複数センサ情報を統合させること、複数タスクを組み合わせる手法を開発

すること、以上 3 点によりこの問題を解決し実用レベルの物体操作 AI を確立することを目指す。

4. 自己評価

①研究目的の達成状況、

本研究課題の成果により、人間並みの環境への適応能力と高速動作を両立するという、これまで困難であると考えられていた物体操作技能をロボットに獲得させることに成功した。特に、人間とロボットが協調した物体運搬のタスクにおいては、「不定形物や未教示物を操作可能」、「道具の長さや机の高さが変動しても対応可能」、「カメラ不要」、「人間が無理やり押し返しても対応可能」、「人間並の高速動作」という一つでも困難である要求をすべて同時にほぼ 100%成功させたことは特記すべきである。これは、AI を高度化するのではなく、実現困難であった部分は人間に学習させ AI はそれを模倣することにのみ注力できたからである。よって、当初の目的は達成できたと考える。

しかし、その一方で 3 自由度ロボットを用いたタスクに力点を置きすぎってしまったことは反省すべきである。実験が容易であることや安価であることを理由に当該ロボットを頻繁に用いていたが、結果として研究代表者が主張するほどの汎用的な物体操作ではないとの印象を与えている可能性がある。よって、今後は 7 自由度ロボットや双腕ロボットを用いたより具体的かつ実用的なタスクに注力する予定である。

②研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

上で述べたとおり、安価かつ実験が容易な 3 自由度ロボットを用いて実験をすすめたため実験の試行回数を増やすことが容易であり、円滑な研究の遂行ができた。特に、本研究課題では実験の試行回数が多いためロボットが破損することが多く、その際に時間のかかる修理ではなく再購入で対応できたことも研究を加速させることに貢献した。

しかし、その一方でロボットの購入費用の一部を人件費により配分すべきではなかったかとの反省はある。すなわち、単純なプログラムのコーディングや環境整備に関しては外注してしまい、新しいアルゴリズム開発のみに注力できる体制を取った方が良かったかもしれない。

③研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

これまでの AI を用いたロボット制御は主に AI の専門家が研究していたが、今回の成果により、制御の専門家が当該分野に参加できる道筋をあきらかにしたのが、本研究課題の学術的な最も大きな貢献であると考えている。すなわち、高度な物体操作には賢い認識や判断が重要であるとこれまでは考えられていたが、早く精密な力制御があれば高度な認識が不要であることを示したのである。これは人間が記号化困難な実世界のインタラクションを「なんとなく」制御し、汎用的な物体操作ができる事実とも一致する。よって、今後は制御の世界から人間の運動技能について解明していく。

一方、中国や東南アジアに代表される新興国の安い労働力を背景にした価格競争力が日本の産業に大きな打撃を与えている。さらに新型コロナウイルスの蔓延により人間の肉体労働に依存することへの大きなリスクも顕在化してきた。いずれにしてもこれまでにないレベルでの肉体労働の大幅な機械化が求められている。本研究課題が真に社会へ実装されたならば、この要求に答えることができるため、社会・経済への計り知れないインパクトがあると考えている。よって、これからは社会実装に向けた実証研究に注力する。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 15件

1. Ayumu Sasagawa, Kazuki Fujimoto, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: "Imitation Learning Based on Bilateral Control for Human-Robot Cooperation," IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 5, No. 4, pp. 6169–6176, 2020.

バイラテラル制御を用いることでロボットの現在の応答値から次の指令値を予測することができるモデルを生成可能になった。その結果、環境変動への適応性と高速動作を両立する人間の物体操作技能を模倣する AI を構築できた。人間と協調した物体運搬タスクにおいて、不定形物・未知物を操作可能、カメラ不要、道具の長さや机の高さが変動しても対応可能、人間並の高速動作、という一つでも困難なことを全て同時にほぼ 100%の成功率で実現した。

2. Yuu Hasegawa, Tomoya Kitamura, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: "Bilateral Control of Elbow and Shoulder Joints Using Functional Electrical Stimulation Between Humans and Robots," IEEE Access, Vol. 8, No. 1, pp. 15792–15799, 2020.

バイラテラル制御では人間へのよい力覚フィードバックを実現するマスタロボットの多自由度化が技術障壁となっていた。本研究では、ロボットの代わりに人間の筋を外部電流により駆動する機能的電気刺激を用いることで、マスタロボット不要のバイラテラル制御系を実現した。肩と肘の 3 次元運動をロボットと同期させることで、ジェンガを引き抜くタスクにおいて、バイラテラル制御なしの状態と比較して成功率が 75%から 100%に向上し、タスク実行時間もほぼ半減した。

3. **Sho Sakaino**, Tomoki Sakuma, Toshiaki Tsuji: "A Control Strategy for Electro-hydrostatic Actuator Considering Static Friction, Resonance, and Oil Leakage," IEEE Journal of Industry Applications, Vol. 8, No. 2, pp. 279–286, 2019.

人間へのよい力覚提示を実現できるアクチュエータである油圧アクチュエータの一種の電気静油圧アクチュエータにおいて、作動油の漏れ、作動油の圧縮に伴う共振、静止摩擦を補償できる制御系を構築した。結果、従来の剛体モデルを用いた制御系の 3 倍以上広い制御帯域を実現したと同時にモデル化誤差に対する高いロバスト性も実現した。本論文は高く評価され、電気学会産業応用部門論文賞を受賞した。

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 2 件(特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	境野 翔
	発 明 の 名 称	行動推定装置、行動推定方法、および行動推定プログラム
	出 願 人	埼玉大学
	出 願 日	2018/4/15
	出 願 番 号	2018-78057
	概 要	100 字程度
2	発 明 者	
	発 明 の 名 称	
	出 願 人	

	出 願 日	
	出 願 番 号	
	概 要	

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【Journal Award】

1. Kyo Kutsuzawa, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji, “Trajectory Adjustment for Nonprehensile Manipulation Using Latent Space of Trained Sequence-to-Sequence Model,” Advanced Robotics Excellent Paper Award, 9 月 16 日, 2020 年.
2. **Sho Sakaino**, 佐久間智輝, 辻俊明 “A Control Strategy for Electro-hydrostatic Actuator Considering Static Friction, Resonance, and Oil Leakage,”電気学会産業応用部門論文賞, 電気学会, 8 月 25 日, 2020 年.

【査読付き国際会議】

3. Kazuki Fujimoto, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Time Series Motion Generation Considering Long Short-Term Motion,” in Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.6842–6848, 2019.
4. Daisuke Okumura, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Miniaturization of multistage high dynamic range six-axis force sensor composed of resin material,” in Proceedings of 2019 International Conference on Robotics and Automation, pp. 4297–4302, 2019.
5. Tsuyoshi Adachi, Kazuki Fujimoto, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Imitation Learning for Object Manipulation Based on Position/Force Information Using Bilateral Control,” in Proceedings of, pp. 3648–3653, 2018.