

令和元年6月27日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04311

研究課題名（和文）触覚情報に基づく人の運動の特徴量抽出と技能再現

研究課題名（英文）Skill Reproduction and Motion Feature Extraction Based on Haptic Information

研究代表者

辻 俊明（TSUJI, Toshiaki）

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60434031

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,900,000円

研究成果の概要（和文）：ロボットが高度な技能運動を実現するための運動制御技術の確立を目指した。技能運動中の力学的な制約を満たした軌道を自律的に生成するため、モデル予測制御で生成した軌道をニューラルネットワークで学習するシステムを開発した。お好み焼きのひっくり返し動作のデモンストレーションから、提案のシステムが動力学的な強い制約を伴う系の軌道計画に適していることが確認された。また、モデル予測制御に基づくシミュレーション結果から学習したシステムが高い汎化性能を持つことが示された。実行された動作の成否を判定するアルゴリズムを追加することにより、自律的にタスクの成功率合いを評価しながら学習効果を高められることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、ロボットがモデル予測制御に基づくシミュレーション結果の集積により、力学的制約を持つ動作を自律的に取得できるようになることを実証している。また、お好み焼きをひっくり返すという動作は強度の力学的制約を持つことから、高度な運動技能を持つロボットにも本理論を適用できることが示されている。ロボットによる高次技能運動の実現は自動化技術を発展させるうえで欠かせない目標であり、本研究成果はその核となる課題を解決していることから、その学術的・社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This project aimed at developing a motion control technique for dexterous manipulation. Since dexterous manipulation needs to solve the trajectory planning under physical constraints, a neural network system learning from database generated by simulation based on model predictive control was developed. The experimental demonstration of a pancake flipping motion shows that the proposed method solves the trajectory planning issue under kinodynamic constraints. It was also shown that the proposed method shows a high generalization performance. An algorithm to identify success/failure of the motion was added to improve the learning performance of the system.

研究分野：制御工学

キーワード：運動制御 機械学習 運動技能 力制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ロボティクスは日本の成長戦略の一端を担う分野として期待されている。高度な技能を持った作業を自律的に遂行する運動制御技術を目標として研究する者は多く、特に把持、マニピュレーションを自動化する試みが活発に進められている。しかし把持した物体やロボットハンドで環境に接触しながら技能運動を実現する技術は極めて限定的にしか実現されておらず、その体系は未だ確立されていない。産業的な観点のみならず学術的な観点からも、その期待に応える技術的ブレイクスルーが学界において待望されている。一方、人工知能の分野では IoT、ビッグデータ技術の進展を背景に深層学習の技術が飛躍的に発展している。本研究課題は深層学習をロボット技術に導入することで高度な技能を自律的な制御で実現する方法論を確立することを目指す。深層学習が画像処理系で特に高い性能を得ていることは広く知られているが、2013 年以降はロボットへ適用例も国際会議等で発表されるようになってきている。画像処理系の隆盛に対してロボットでの研究例が多くない理由は、学習に必要なデータの蓄積が困難な点にある。例えば 2015 年 10 月に発表されたマサチューセッツ工科大学の研究ではロボットが深層学習で道具を掴めるようになったとの報告がなされているが、その技能の実現のために 100 時間実験を繰り返し、学習する必要がある。深層学習を用いて一般的なロボット技能を実現するためにはロボットで学習用運動データをいかに獲得するかが鍵となる。

応募者は 2009 年から 2014 年までリハビリ支援ロボットを用いた運動データベース生成のプロジェクトを主導し、リハビリの運動データを解析する技術を開発した。次にその発展形として、リハビリに限らず様々な日常の作業を計測・データベース化し、その情報を解析する技術を開発した。これらの研究活動の過程で運動療法、歩行訓練、調理動作、机での作業等を自律的に記録するシステムが構築されている。また、リハビリに関する前者 2 例については介護施設で継続的にデータを収集する体制が整っている。また、科研費の研究課題では 2012 年から 2014 年まで触覚信号処理の基礎技術を開発している。これらの研究成果として深層学習で人の運動情報をクラスタリングする技術が得られている。本研究課題はこれらの研究成果に基づきこれらを発展させるものである。

2. 研究の目的

ロボットが高度な技能の作業を遂行するためには技能のコツに相当するものを抽象化し、抽出したうえで制御に利用する必要がある。そこで本研究課題ではリハビリのために構築された、人の運動データベースを用いた深層学習システムを構築する。多層のニューラルネットワーク (DNN) が画像の特徴量を自動的に抽出するという特性を運動に転用し、学習された DNN のノードが運動のどのような特徴量に対応するかを解析する。得られた特徴量の高次表現から技能のコツに相当するものを抽出し、制御系に実装することで高度なロボット技能を実現する。

3. 研究の方法

(1) 技能運動のデータベース化

既に申請者はリハビリでの運動を対象とした健常者・非健常者のデータを集積しており、かつ介護施設での訓練結果が定期的に更新できる体制になっている。しかし技能の特徴量を得るには不足な部分も残されているため研究の進行に合わせてデータを付加的に収集した。データの蓄積は本研究課題の要であるため、本項目は全ての期間実施し続けた。

(2) 学習アルゴリズムの実装

(1) で得られたデータを入力とする多層の DNN を構築した。時系列データで変数が多くないという類似点から、音声認識での先行研究およびロボットの先行研究を参考に技能運動を再生成するアルゴリズムを構築した。併せてクラスタリングと成功失敗判定を実施するアルゴリズムを構築した。

(3) 学習結果の比較・解析

(2) で開発した DNN のプログラムで学習を行わせた。元となるデータベースの内容によって学習結果が異なることを利用し、様々な分類での学習結果を比較した。

(4) ロボットへの DNN の実装

(1) ~ (3) で得られた知見をもとに、技能運動をロボットに実装した。DNN の出力は技能が適切に遂行されているか否かを判定するのに高い性能を示すと予想されるが、マニピュレーションの自律的軌道生成に寄与するアルゴリズムに発展させられる見込みは得られていなかった。そこで自律的軌道生成技術の一つとして古くから知られているモデル予測制御と組み合わせることで学習結果から高度な技能を取得するロボットを実現した。

4. 研究成果

慣性力で対象物を操作する動的マニピュレーションを実現する手法として、モデル予測制御 (MPC) が有効であるが計算量が膨大という問題点がある。この問題点を解決するため MPC の制御則をディープニューラルネットワーク (DNN) に学習させることを試みた。提案する学習方法の検証として、動的マニピュレーションの一つであるお好み焼きをひっくり返す動作を扱った。

本手法では MPC で様々なパターンの行動を生成し、その結果をニューラルネットワークで学習させる。図 1 の緑線のように目標位置と摩擦係数のパラメータを変更しながら、DNN に学習させる方法を提案した。このような学習の枠組みを作り、複数のパラメータで学習することに

より、MPC で検討をしていないような条件において動作を生成する場合にもニューラルネットワークの汎化性能によって動的制約を満たした軌道を生成可能になる。

図1の手法で学習させたDNNに異なる条件を与えた計2本の軌道を生成し、お好み焼きがひっくり返るかを検証した。生成軌道とフィードバック制御によって再現された軌道を図2に示す。

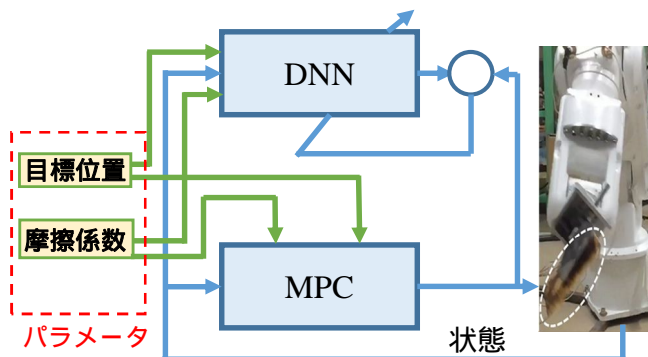


図1 動的マニピュレーションの機械学習システム

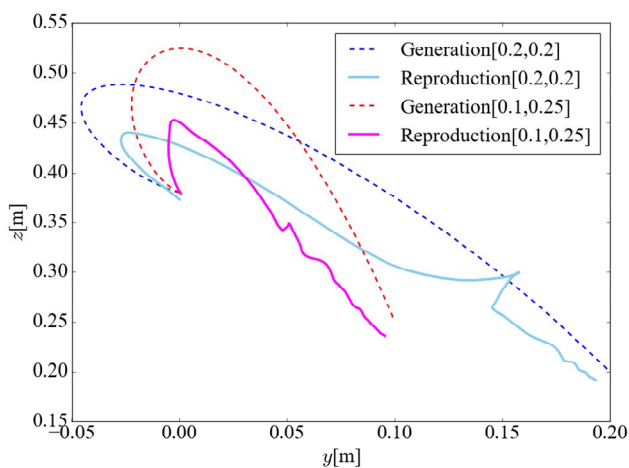


図2 動的マニピュレーションの実験結果

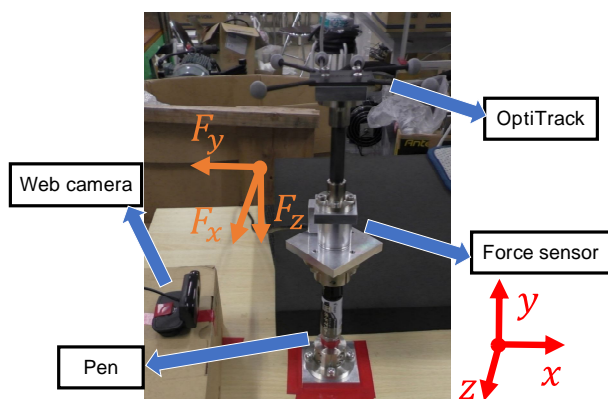


図3 ペンの嵌め合い動作記録システム

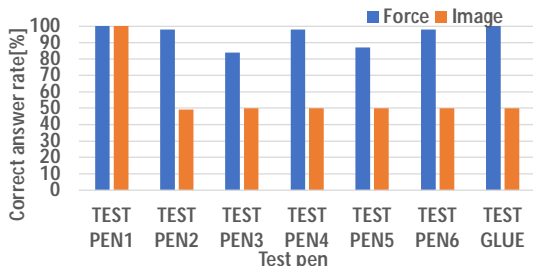


図4 成否判定の正解率

この図から DNN が目標位置への軌道を生成することが確認された。また、お好み焼きがひっくり返ることから動力学的制約を満たす軌道の自律的生成が実現されていることが確認された。

これらの軌道生成によってタスクが完了されたかを確認する手法を併せて提案した。未知のテストデータにも対応可能なタスクの成否判定を実現するために力情報を用いたニューラルネットワークによる成否判定を提案した。成否判定を行うタスクとしてペンの蓋の嵌め合いを対象とした。

その実験系を図3に示す。ペンの蓋のはめ合いタスクで、モーションキャプチャ(OptiTrack)で位置情報(x, y, z)を、力覚センサで力情報 F_z を、Web カメラで画像情報を取得した。なお、Web カメラとペンの位置関係は一定であり、位置情報と力情報としてサンプリングタイムが 20m/sec の連続データを、画像情報としてタスク終了後の画像データ

1枚を取得した。学習データとして成功データ500、失敗データ500の合計1000データを使用し、テストデータとして成功データ50、失敗データ50の合計100データを使用した。上記のようなデータをペン(PEN1~PEN6)とスティックのり(GLUE)の計7種類の対象物で取得した。取得したデータを用いてニューラルネットワークで訓練および成否判定を行った。PEN1で学習してPEN1~PEN6, GLUEで成否判定を行った結果を図4に示す。画像情報では学習していないペンに対して成否判定が出来なかったが、力情報では成否判定が出来た。学習するペンの種類を増やした場合もほぼ同様な結果となった。なお、位置情報を用いた場合、学習したペンと同じ種類のペンであっても成否判定が出来なかった。このことから、

力情報の利用によって嵌め合い動作の成否判定の性能が抜本的に向上されることが確認された。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- [1] M. Sekiya, S. Sakaino, and T. Tsuji: "Linear Logistic Regression for Estimation of Lower Limb Muscle Activations," IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering, Vol.27, No.3, 2019. (Open Access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8637973/>).
- [2] K. Kutsuzawa, S. Sakaino, and T. Tsuji: "Sequence-to-Sequence Model for Trajectory Planning of Nonprehensile Manipulation Including Contact Model," IEEE Robotics and Automation Letters, 2018. (Open Access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8410030/>)
- [3] T. Tsuji, K. Kutsuzawa, and S. Sakaino: "Optimized Trajectory Generation based on Model Predictive Control for Turning Over Pancakes," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 7, No. 1, pp. 22-28, 2018.
- [4] T. Tsuji, K. Kutsuzawa, and S. Sakaino: "Acceleration Control for Dynamic Manipulation of a Robot Turning Over Objects," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 2, No. 4, pp. 2328-2335, 2017. 2017/05
- [5] T. Tsuji, T. Seki, S. Sakaino: "Intrinsic Contact Sensing for Touch Interface with Movable Structure," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 9, pp. 7342-7349, 2017. 2017/04
- [6] K. Kutsuzawa, S. Sakaino, T. Tsuji: "A Control System for a Tool Use Robot: Drawing a Circle by Educing Functions of a Compass," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 29, No. 2, pp. 395-405, 2017.

〔学会発表〕(計7件)

- [1] R. Koike, S. Sakaino, and T. Tsuji: "Hysteresis Compensation in Force/Torque Sensor based on Machine Learning," The 44th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON2018), pp. 2769-2774.
- [2] Y. Okubo, J. Tsunoda, S. Sakaino, and T. Tsuji: "Desktop upper limb rehabilitation robot using omnidirectional drive gear," 12th France-Japan Congress, 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2018.
- [3] D. Furuta, K. Kutsuzawa, S. Sakaino, and T. Tsuji: "LSTM learning of inverse dynamics with contact in various environments," 12th France-Japan Congress, 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2018.
- [4] M. Kawazawa, S. Sakaino, and T. Tsuji: "High Backdrivability Control Based on Estimation of Shaft Torsion Using Load Side Angle Sensor," The 44th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON2018), pp. 5457-5462.
- [5] K. Kutsuzawa, S. Sakaino, and T. Tsuji: "Sequence-to-Sequence Models for Trajectory Deformation of Dynamic Manipulation," Proc. of the 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 5227-5232, 2017.
- [6] 沓澤 京, 境野 翔, 辻 俊明, "訓練済み軌道生成モデルを用いた新たな動作目標への軌道最適化," 第36回日本ロボット学会学術講演会, 2E2-06
- [7] 川澤優大, 境野翔, 辻俊明, "R/C サーボモータの軸ねじれの推定に基づく高バックドライバビリティ制御," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2A1-C15

〔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://robotics.ees.saitama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：久保田圭祐，大河原寛

ローマ字氏名：Kubota Keisuke, Hiroshi Okawara

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。