

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700188

研究課題名(和文) 確率的模倣学習に基づく動作の言語化

研究課題名(英文) Motion to Text Based on Probabilistic Imitation Learning

## 研究代表者

杉浦 孔明 (Sugiura, Komei)

独立行政法人情報通信研究機構・ユニバーサルコミュニケーション研究所情報活用基盤研究室・主任研究員

研究者番号：60470473

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：他者の行動を見て模倣することは、知能の根源である。本研究の目的は、刻一刻と変わる環境や状況に対応可能かつ人間らしい自然な動作を再現できるオンライン模倣学習手法を開発することである。そのために、参照点に依存した隠れマルコフモデル(RPD-HMM)から生成された最尤軌道を基準とした逐次動作生成手法を開発した。ベースライン手法との比較評価実験を行い、軌道の滑らかさおよび生成誤差の面で提案手法が有効であることを示した。実ロボットによる機能検証のため日用品ハンドリングタスクを行うサービスロボットを構築し、音声対話を通じた学習動作の実行を可能とした。

研究成果の概要(英文)：Imitation learning has been paid much attention from the robotics and artificial intelligence communities. This project focuses on an online imitation learning method based on the maximum likelihood trajectories given by reference-point-dependent hidden Markov Models (RPD-HMMs). In the experiments, a user demonstrated the manipulation of objects so that the motion could be learned. The experimental results have shown that the proposed method decreases the average generation error in the trajectories. The proposed method is deployed on a service robot that generate learned motions through spoken dialogues.

研究分野：ロボット対話

キーワード：模倣学習 知能ロボティクス 機械学習 動作認識 ヒューマンロボットインタラクション 軌道生成

## 1. 研究開始当初の背景

他者の行動を見て模倣することは、知能の根源である。行動の模倣と学習を研究することは、広汎な工学的応用につながるだけでなく、人間の行動の総合的理解を与える。本研究は、刻一刻と変わる環境や状況に対応可能かつ人間らしい自然な動作を再現できる模倣学習手法を開発することを目的とする。

生活支援ロボットにとって、「XをYにのせる」「Zを回す」などの日用品をハンドリングする機能は必要不可欠であるが、各種の日用品や棚に対応する動作をすべて人手でプログラムすることは現実的ではない。模倣学習分野では、物体操作を確率モデルにより表現し、様々な状況に対応させるアプローチが広く研究されている。既存研究では、操作軌道を2つのオブジェクト間の相対軌道として表現し、隠れマルコフモデル(HMM)などの確率モデルを用いて軌道を学習させるものが多い。我々が提案した参照点に依存したHMM(RPD-HMM[1])では、最尤軌道の生成は可能であるが逐次的な生成ができないという問題があった。

## 2. 研究の目的

本研究は、刻一刻と変わる環境や状況に対応可能かつ人間らしい自然な動作を再現できる模倣学習手法を開発することを目的とする。物体操作の模倣学習手法では、操作軌道を2つのオブジェクト間の相対軌道として表現し、確率モデルを用いて軌道を学習させるものが多い。模倣学習の分野では、隠れマルコフモデル(HMM)を用いて軌道を逐次的に生成する手法(例えば[2])が提案されているが、この手法では最尤軌道が得られる保証がない。一方、我々が提案したRPD-HMMでは、最尤軌道の生成は可能であるが逐次的な生成ができないという問題があった。そこで本研究では、RPD-HMMから生成された最

尤軌道を基準とした逐次動作生成手法を開発する。

## 3. 研究の方法

「XをYにのせる」や「Zを回す」など参照点に依存した動作の模倣では、世界座標系での動作軌道の模倣に意味はなく、適切な座標系を推定し軌道を汎化しなければならない。いま、ロボットがオブジェクトを動かす軌道を模倣学習の枠組みで得ることを考える。これまで我々はHMMから連続的な軌道を生成するために、RPD-HMM[1]を用いて尤度最大化基準による軌道生成を行なう手法を提案済みである。

RPD-HMMは連続軌道を閉形式で求められるという利点があり、音声合成分野で実績がある。一方、ロボティクスへの応用では時々刻々と変化する環境に応じて軌道を変更できないという問題があった。すなわち、ロボティクスでは逐次型の動作生成に対応することが望ましい。

一方、Calinonらは、HMMとGaussian Mixture Regressionに基づく逐次型の動作生成手法を提案した[2]。本研究では、この手法とRPD-HMMを組み合わせることで逐次型動作生成を行う。具体的には以下の式により逐次的な軌道生成を行う。

$$\dot{x}_t = \hat{x}_t + \Sigma_{\dot{x}x} \Sigma_{xx}^{-1} (\hat{x}_t - x_t)$$

ここに、速度 $\hat{x}$ はRPD-HMMから得られる。 $\Sigma_{\dot{x}x}$ および $\Sigma_{xx}$ はそれぞれ位置と速度の共分散および位置の共分散であり、RPD-HMMの学習時に得られた値を用いればよい。上式に補正項を加えれば、動的に障害物を回避することが可能である。補正項がない場合(障害物がない場合など)には、生成される軌道は最尤軌道と一致する。以上より、RPD-HMMによる最尤軌道を基準とした逐次型の更新式が得られた。

#### 4. 研究成果

- (1) 提案手法が滑らかな軌道を生成できることを示すために、人為的に外力  $K$  を加えた場合を想定した実験を行なった。図 1 に、「オブジェクト 4 にオブジェクト 10 を載せる」動作に対して生成された軌道の例を示す。図において、(1)はベースラインであり、(2)~(4)は提案手法において外力  $K$  を、(2) $K=4$ 、(3) $K=8$ 、(4) $K=12$ 、とした場合に対応する。(1)の軌道ではトラジェクタがオブジェクト 9 と衝突しているが、(3)のように外力を加えることで障害物回避が可能なのがわかる。

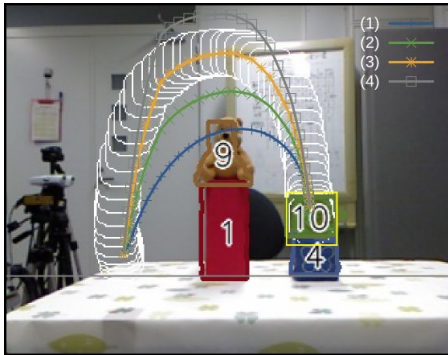


図 1 提案手法による「のせる」動作の生成。(1)ベースライン、(2)~(4)提案手法。白い緑取りの軌道は被験者が実行した軌道である。

- (2) 定量的な比較のため、提案手法およびベースライン手法により生成された軌道を、被験者が実行した軌道と比較し、軌道の誤差を評価した。評価尺度として、時系列の比較のために一般的に用いられているユークリッド距離を用いた。図 2 に誤差を示す。図 2 より、(a)~(e)の動作において、ベースライン手法に比べて提案手法の誤差が小さいことがわかる。

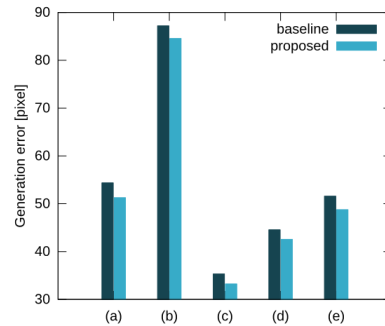


図 2 軌道生成誤差の比較。(a)載せる、(b)飛び越えさせる、(c)上げる、(d)下げる、(5)回す。

- (3) 実ロボットを用いて動作検証を行うため、ロボットプラットフォーム Daia を構築し音声対話により模倣学習を行う枠組みを構築した。Daia は、上半身ヒューマノイド(川田工業製 HIRO)、全方位移動台車(Neobotix 製 OmniDriveModule)、レーザレンジファインダ(北陽電機製 UTM-30LX)2 台、RGB-D カメラ(Microsoft 製 Kinect)、指向性マイクロホン(三研マイクロホン製 CS-3e、スピーカ(ヤマハ製 NX-U10)からなる。日用品をハンドリングさせる動作に対して提案手法を適用し、有効性を検証した。図 3 に適用例を示す。



図 3 日用品操作の模倣学習に対する提案手法の適用例

- (4) 本研究の社会展開活動の一環として、各種講演会における招待講演を通じて技術知識の普及に努めた。また、日本ロボット学会学術講演会において「確率ロボティクスとデータ工学ロボティクス」に関するオーガナイズドセッションを開催し、最大規模の参加者を集めるなど、

ロボティクスへの統計的機械学習の応用に対して先導的な活動を行った。

#### <引用文献>

K. Sugiura, N. Iwahashi, H. Kashioka, and S. Nakamura: "Learning, Generation, and Recognition of Motions by Reference-Point-Dependent Probabilistic Models", *Advanced Robotics*, Vol. 25, No. 6-7, pp. 825-848, 2011.  
Calinon, S., D'halluin, F., Sauser, E. L., Caldwell, D. G., and Billard, A. G.: *Learning and Reproduction of Gestures by Imitation*, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 17, No. 2, pp. 44-54, 2010.

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計 2 件)

杉浦孔明, 長井隆行, "ロボカップ@ホームにおける日用品マニピュレーション", *日本ロボット学会誌*, Vol. 31, No. 4, pp. 370-375, 2013. (査読なし)  
杉浦孔明, "ロボット対話 -実世界情報を用いたコミュニケーションの学習-", *人工知能学会誌*, Vol. 27 No. 6, pp. 580-586, 2012. (査読なし)

##### [学会発表](計 7 件)

杉浦孔明, "ロボットによる大規模言語学習に向けて~クラウドロボティクスとビッグデータの利活用~", *関係論的システムデザイン研究センター第9回シンポジウム*, 同志社大学(京都市), 2015. (招待講演, 査読なし)  
杉浦孔明, "サービスロボットの音声対話技術とクラウドロボティクスの展望", *Japan Robot Week 2014 けいはんなロボットフォーラム*, 東京ビッグサイト(東京都江東区), 2014. (招待講演, 査読なし)  
D. Holz, L. Iocchi, J. Ruiz-del-Solar, K. Sugiura, and T. van der Zant: "RoboCup@Home | a competition as a testbed for domestic service robots," In *Proc. 1st International Workshop on Intelligent Robot Assistants*, July 15, 2014, Padova, Italy. (査読有)  
杉浦孔明, "実世界知識を扱う音声対話技術とクラウドロボティクスへの展開", *第39回人工知能学会 AI チャレンジ研究会*, pp.25-32, 京都大学(京都市), 2014. (招待講演, 査読なし)  
杉浦孔明, "実世界知識を扱う音声対話技術とサービスロボットへの応用", *第80回ロボット工学セミナー*, 東京大学(東京都文京区), 2013. (招待講演, 査読なし)  
杉浦孔明, 岩橋直人, 柏岡秀紀: "物体操

作タスクのためのペナルティ項付き尤度最大化による HMM 軌道生成", 第 13 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, pp. 2305-2306, 福岡国際会議場(福岡市), 2012. (査読なし)

杉浦孔明, 岩橋直人, 柏岡秀紀: "物体操作タスクにおけるマクロパラメータを用いた HMM 軌道生成", 第 30 回日本ロボット学会学術講演会, 3N2-5, 札幌コンベンションセンター(札幌市), 2012. (査読なし)

#### [その他]

<http://komeisugiura.jp/>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

杉浦孔明 (Sugiura, Komei)  
独立行政法人情報通信研究機構・ユニバーサルコミュニケーション研究所情報活用基盤研究室・主任研究員  
研究者番号: 60470473