

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12502

研究課題名(和文)物押しとドア開けに隠れたスキルのモデル化への挑戦

研究課題名(英文)Modeling skills for pushing objects and open various types of doors

研究代表者

高松 淳(Takamatsu, Jun)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：90510884

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、1. 操作対象物の不確実性を含めたモデル化と、2. モデル化に基づきヒューマノイドロボットの動作生成をする手法を構築した。前者に対し、ニューラルネットワークを拡張することで不確かさがある場合の出力確率分布の計算手法を確立し、シンボルレベル(例:押す、突き出す)のスキル表現とパラメータレベルの最適化が可能な学習手法を開発した。後者に対し、前者によって得られる動作目標を実現するための、目標手先軌道や手先力から、重心・全身の動きを高速に計算する手法を開発し、実際にヒューマノイドロボットを用いても押し動作を実現した。

研究成果の概要(英文):In this research, we achieve 1. the method for modeling the uncertainty of the object to manipulate and 2. the method for generating the whole body motion of a humanoid robot. To achieve the former method, we develop the method to estimate the probabilistic distribution of the uncertainty using neural networks and the method to optimize not only symbolic-level skill types (e.g., push and thrust), but also skill parameters. To achieve the latter, we develop the method to quickly calculate the center of mass and the whole body motion, which satisfy the inputted hand trajectories and force profiles. We achieve that the humanoid robot HRP4 pushes a box.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ヒューマノイドロボット 動作スキル 不確かさ 学習 全身動作

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットによる生活支援を実現する上で、ロボットの物体操作能力を人間に近づけることは重要な課題である。この課題が挑戦的であるのは、操作対象物が解析的にモデル化しにくい特性を含み、状態やパラメータの次元が膨大になるためである。さらにこれらの変数には観測やモデル化誤差による不確かさが含まれている。

「スキル」の集合(スキルライブラリ)は、この問題を解決する考え方のひとつとして、模倣学習の文脈で研究されてきた。研究の主流は、(1) シンボルで表されるスキルの遷移で静的な行動を表現する方法から、(2) 動的なタスクの模倣学習へと転換し、(3) ごく最近両者を統合したアプローチへ発展させる動きがある。(1) ではスキルの抽出、(2) では転移したスキルをロボットが追加で学習することが焦点となる。しかし、(3) ではシンボルレベルの行動計画・学習と制御信号レベルでの行動計画・学習の融合が進んでおらず、ブレイクスルーが期待されている。

### 2. 研究の目的

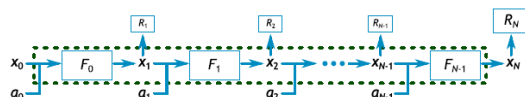
本研究では、(1) 操作対象物の不確実性を含めたモデル化と、(2) モデル化に基づくヒューマノイドロボットの動作生成の2つの方法を組み合わせることで、上記問題を解決する。前者によりロボットの行動設計のための指針を導き、後者によりその指針に従う実ヒューマノイドロボットの動作生成を可能にする。両者を組み合わせて人間に近い物体操作能力(例：タスク達成時間)を実現する。

### 3. 研究の方法

前者を研究協力者の山口が、後者を研究代表者の高松が担当した。

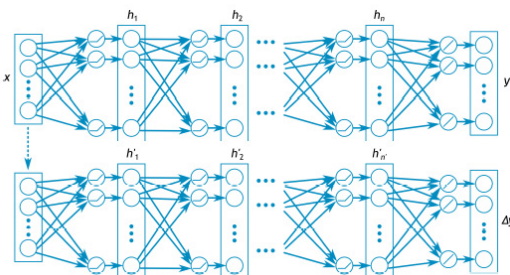
#### (1) 操作対象物のモデル化

まずは単一スキルでの操作対象物のモデル化について取り組んだ。モデルベース強化学習、具体的には微分動的計画法を用いた。ある時間  $t$  における環境の状態を  $x_t$ 、そのときの行動を  $a_t$  としたとき、行動と状態の関係  $x_{t+1} = F(x_t, a_t)$  とその時の報酬  $R(x_t)$  がモデル化できれば最適な行動を計画することができる。回帰器として近年高い性能を発揮することで注目されている深層ニューラルネットワークを用い、下図のネットワークを構成しモデルを学習した。



操作対象物の不確実性を扱うために状態  $x_t$  を正規分布で表すこととした。具体的には、回帰器  $F$  が平均と分散の両方を出力するようにした。しかし、そのような変更を加えたため、ニューラルネットワークの学習において

平均、分散に関する勾配を計算する必要が生じた。そこで、各ネットワークにおける入力を正規分布で近似することで、近似ではあるが解析的に勾配を計算することに成功した。これにより、単一スキルのモデル化手法の構築に成功した。

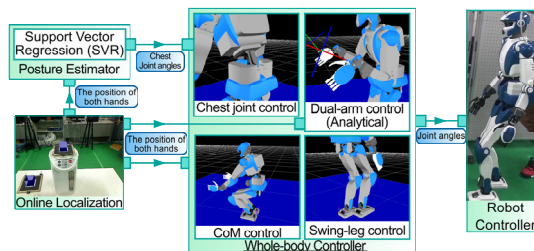


次に、複数スキルでの操作対象物のモデル化に取り組んだ。具体的には、あらかじめスキルの遷移をグラフ構造で表現し、スキルの遷移ごとに関数  $F$  を定義・学習することで対応した。これらの構造を学習可能にするためには、グラフ構造にループが含まれていないこと望ましい。そこで一回の動作において、各スキルの適用回数を制限することで、グラフ構造を疑似的に木構造に変換し学習可能にする方法を提案した。

#### (2) ヒューマノイドロボットの動作生成

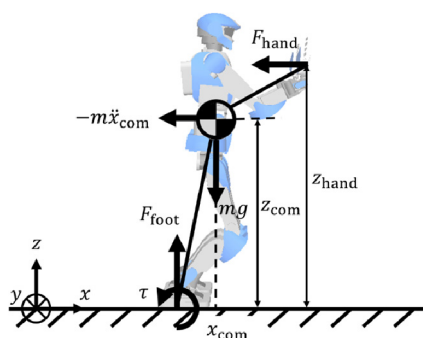
物体操作を伴うロボットの行動は、①操作対象物体に到達するリーチング動作と、②操作対象物に適切な働きかけをするインタラクション動作、の2つに分けられる。

リーチング動作の目的は、目標手先位置を満たす全身の姿勢を決定することである。目標手先位置と腰姿勢の関係に着目し、それを機械学習によって決定する方法を提案した。人の体は腰を起点に独立した4つのリンク構造となっているため、腰の位置・姿勢が決まれば少ない自由度の逆運動学を複数解く問題に簡略化され、これによりバランスも考慮した高速な動作生成法を実現した。



インタラクション動作において必要となるのは、全身の動的バランスを考慮しながら操作対象物に適切な働きかけをすることである。そのため、(1) 外力の影響を受けながら動的バランスを確保する必要があること、(2) 操作対象物の反応に対し、実時間でフィードバックをかける必要があること、の2点を解決する必要がある。前者に対し、もの押し動作中の外力を考慮した予見制御により

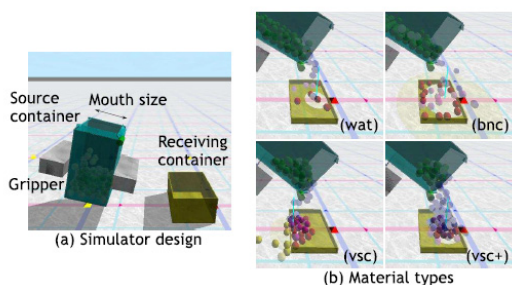
重心軌道を生成する方法を提案し、後者に対し、解析的逆運動学を利用した高速な分解角運動量制御法を提案した。



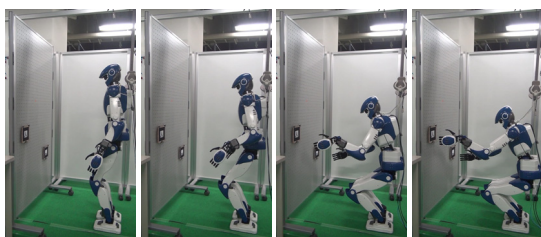
$$ZMP_x = (1 \quad 0 \quad -z_c/g) \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{pmatrix} + \frac{z_{hand}}{mg} f_{dx}$$

#### 4. 研究成果

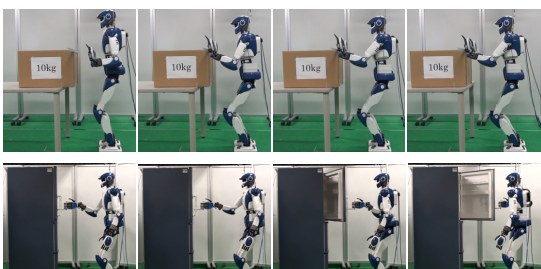
前者の手法を適用することで、粘性の異なる物体が入った注ぎ動作において、単なる傾ける動作や、ふる動作、タッピングする動作など状況に応じてスキルを使い分ける能力を獲得することに成功した。



後者のリーチング動作生成手法を適用することで、重心の上下移動も含めた動作を、実ヒューマノイドロボット HRP-4 を用いて実現することに成功した。



また、インタラクション動作生成手法を適用することで、もの押し動作や、ドア開け動作を自然な速度で実現することができた。



両者の手法の統合にはいたらなかったものの、ロボットの物体操作能力を人間に近づけるための要素技術の構築には成功したといえる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① S. Tsuchihiro, Y. Hakamata, G. A. Garcia R., J. Takamatsu, and T. Ogasawara, “Real-Time Whole-Body Motion Generation Using Torso Posture Regression and Center of Mass”, ROBOMECH Journal, Vol. 5:8, pp. 1-13, 2018. 査読有.  
<https://doi.org/10.1186/s40648-018-0105-y>.

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① 築地原 里樹, 袴田 有哉, G. A. Garcia R., 高松 淳, 小笠原 司, “胴体姿勢推定を用いた高速なヒューマノイドロボットの全身動作生成”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2017.
- ② 山口 明彦, 松原 崇充, 原田 研介, “マニピュレーションのためのロボット知能と学習”, 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, 2017.
- ③ S. Tsuchihiro, Y. Hakamata, G. A. Garcia R., J. Takamatsu, and T. Ogasawara, “Accelerating Whole-body Motion Generation Using Regression of the Torso Posture of a Humanoid Robot”, In Proc. of the 16th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2016), pp. 16-21, 2016.
- ④ Y. Hakamata, S. Tsuchihiro, J. Takamatsu, and T. Ogasawara, “Whole body motion generation of humanoid robot using a predicted reaction force”, In Proc. of the 16th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2016), pp. 95-100, 2016.
- ⑤ J. Takamatsu, S. Tsuchihiro, Y. Hakamata, and T. Ogasawara, “Achieving Real-Time Humanoid Motion Generation and Natural Speed Pushing/Pulling Motion using Experiences”, Korea-Japan Workshop on Robotics and Information Technology for Better Quality of Life, 2016.
- ⑥ A. Yamaguchi and C. G. Atkeson, “Neural Networks and Differential Dynamic Programming for Reinforcement Learning Problems”, In Proc. of the 2016 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2016), pp. 5434-5441, 2016.

- ⑦ A. Yamaguchi and C. G. Atkeson,  
“Differential Dynamic Programming for  
Graph-Structured Dynamical Systems:  
Generalization of Pouring Behavior with  
Different Skill”, In Proc. of the 16th  
IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots  
(Humanoids 2016), pp. 1029-1036, 2016.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

研究代表者

<http://robotics.naist.jp/~j-taka/>

研究協力者

<http://akihikoy.net/info/>

動画等

<https://www.youtube.com/watch?v=aM3hE1J5W98>

[https://youtu.be/\\_ECmnG2BLE8](https://youtu.be/_ECmnG2BLE8)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高松 淳 (Jun Takamatsu)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：90510884

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

## (4) 研究協力者

山口 明彦 (Akihiko Yamaguchi)