

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手B

研究期間：2010～2012

課題番号：22700198

研究課題名（和文）機械学習を用いた環境相互作用の未知な対象物操作の学習制御

研究課題名（英文）Learning control of object manipulation with unknown environmental interaction based on machine learning

研究代表者

小林 祐一（KOBAYASHI YUICHI）

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：60373304

研究成果の概要（和文）：本研究では、ロボットと環境の間の相互作用が未知である場合に、ロボット自身の試行錯誤と観測したデータをもとに物体操作の制御を行う学習法を提案した。パターン分類学習法を強化学習、モデル予測制御などのロボット制御法に適用した方法を提案し、物理シミュレーションによる評価を通じて提案する手法が事前の試行錯誤にもとづいて得た情報にもとづいて適切な制御を実現できることを示した。

研究成果の概要（英文）：We proposed a learning control method of object manipulation, where physical interaction between the robot and its environment is unknown. Pattern classification method was integrated with control methods such as reinforcement learning and model predictive control. It was verified in experiment using physical simulation that the proposed method can realize appropriate robot control based on information obtained by off-line trial and errors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：ロボット行動学習，物体操作，機械学習，最適制御

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットの制御において、対象との接触は、精確なモデル化が困難な問題である（図1参照）。対象との接触を含んだロボット制御問題は単一の学習制御（強化学習など）の枠組みだけでは実現が困難である。一方、機械学習分野では近年様々な学習手法が開発され、ロボット制御への適用により、物体との接触を含んだ制御問題にアプローチすることが

有望である。しかし、ロボット制御への適用・融合はまだ十分に研究されていない。

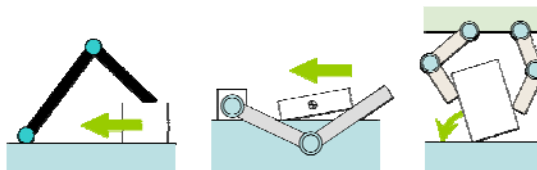


図1：環境相互作用を含むロボット制御問題

## 2. 研究の目的

本研究では、摩擦による滑り・非滑りや接触・非接触などの物体とロボットとの間の接触（力学的相互作用）を含むようなロボット制御問題において、機械学習の手法と最適制御・強化学習等の制御手法を統合することにより精確なモデル化が困難な制御問題の学習制御法を提案する。

具体的には、図1に示すような複数種類の物体操作課題を設定し、ロボットと物体、物体と環境（床面）との接触に関する物理的知識を用いずに、実際のロボットおよび物体の挙動を観測した情報のみにもとづいて物体を望ましい位置・姿勢に制御することを目的とする。従来型の学習法との比較を通じて、接触モードの切り替わりに注目した学習法の有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

ロボットと対象の接触状態（滑り・非滑り）の変化が起きる接触モードの切り替わる境界を推定する機構を導入し、その推定結果を利用した学習制御法を構築する(図2参照)。物体とロボットハンド・アームを含んだ物理シミュレーションの構築と実機ロボットの2種類の環境によって提案手法を評価・検証する。

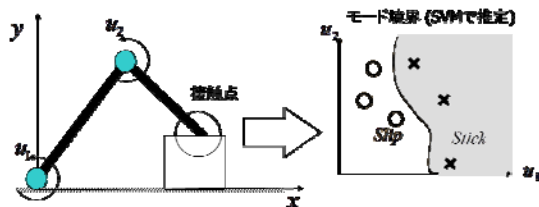


図2：接触モード切り替わり境界の推定

モードの切り替わり境界推定には機械学習によるパターン分類学手法の一つであるSVM（サポートベクターマシン）を用いる。望ましい接触モードを維持しているかどうかをパターン分類により表現し、観測データにもとづいて学習・予測する。また、制御法には最適制御の枠組みを用いる。モード切り替わり境界の推定結果を利用する方法として強化学習とモデル予測制御に2種類を提案しその性能を検証する。

## 4. 研究成果

物体操作に関する前提知識を利用しない学習制御法の提案として、以下の3つの成果を得た。

### (1) 強化学習とモード切り替わり境界の推定を組み合わせた物体操作の学習法

SVMを用いたモード切り替わりの推定器と強化学習とを組み合わせた学習制御法(図3右側)を構築し、リンク型マニピュレータによる物体の引き寄せ動作(図3左側)に適用して検証した。物体の引き寄せに関わる報酬信号に加え、望ましいモードを維持したかどうかの情報を学習器にフィードバックすることで学習を加速させる。物体とロボットアームとの間の滑りを発生させずに物体を手前に引き寄せる動作を試行錯誤により獲得させた。

1000回の試行の後で得られた物体の位置・速度空間での軌跡を図4右側に示す。図右上の状態から、目標とする領域(図左上)に到達していることがわかる。一方、従来型のActor-Critic法による学習結果を図4左側に示す。モード切り替わりの情報を明示的に使用せず通常の強化学習のみを用いた場合、モードを維持できずにタスクを途中で失敗する試行が多く発生し、10万回の試行を経ても十分な軌道を得ることができなかった。図中の軌道は、同条件で学習した際、目標状態に到達せず途中でタスクに失敗している従来法による制御結果の例(1000~7000試行、1000試行毎)を示す。

これらの結果から、提案するパターン分類学習と強化学習とを組み合わせた学習制御手法の有効性を確認することができた。

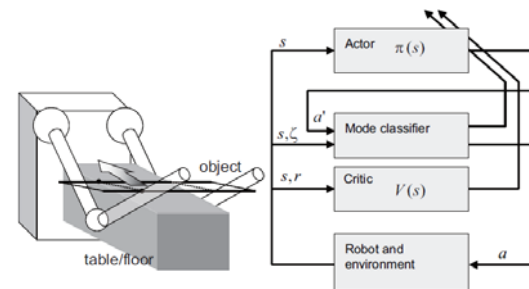


図3：物体の引き寄せ動作と制御器構成

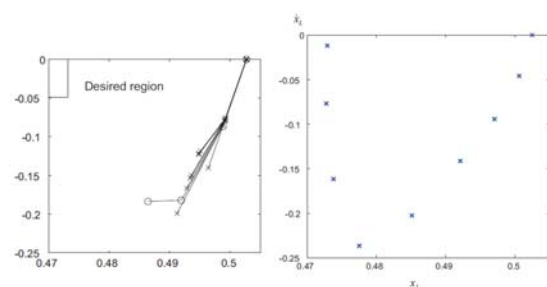


図4：学習結果の従来法(左)との比較

(2) モード切り替わり境界推定とモデル予測制御を用いたハンド・アームシステムによる物体回転動作の生成

接触に関するモード切り替わり境界の推定結果をより明示的に利用し、得られた拘束条件のもとで最適制御を行う手法をモデル予測制御と組み合わせた手法として提案した。図5左側に示すようなマニピュレータ・ハンドからなる物体操作系を構築するとともに、実機と同様の構成の物理シミュレーションを構築し、手法の検証を行った。タスクとして物体の回転操作を設定し、滑りを回避しながら物体を回転により目標の姿勢に遷移させることを目的とした。

図5,6に示すような、物体に働く過剰な内力を抑制するとともに滑りにより物体の回転操作が可能であることが確認できた。図6は各指に働く接触力を示す。拘束条件として課した上限値を超えない範囲で各指の接触力が遷移していることがわかる。

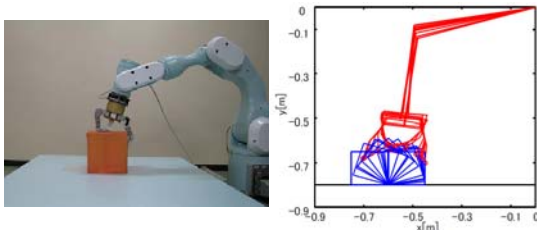


図5：接触モード切り替わり境界の推定

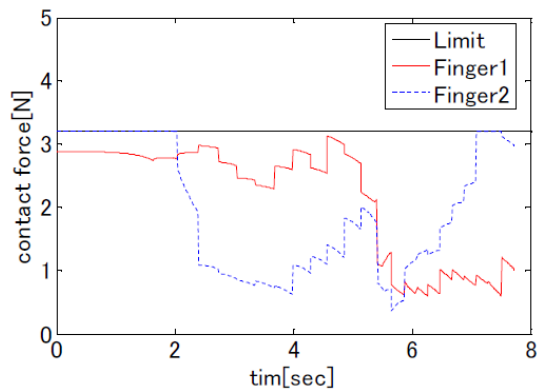


図6：両指にかかる接触力の推移

(3) ヒューマノイドロボットによる物体抱え上げ動作における機械学習法の適用と検証

提案する物体操作方法の適用対象を広げるために、多関節の両腕を有するヒューマノイドロボットによる抱え上げ動作におけるモデルの事前知識を要しない動作学習法を提案・実装した。具体的には、ヒューマノイド

ロボットと机の上に置かれた物体とを含んだ力学シミュレーションを構成し、その中で物体を抱え上げる動作を種々行わせ、物体の滑りにより抱え上げ動作が失敗する状況を事前にデータとして収集した。この観測データのみから、望ましくない滑りの発生を避けるための制御則を非線形正準相関分析により構築し、シミュレーションにおいて87%の識別率が得られた。従来型の主成分分析にもとづいた予測法と比較して、平均10%の性能改善を得ることができた。

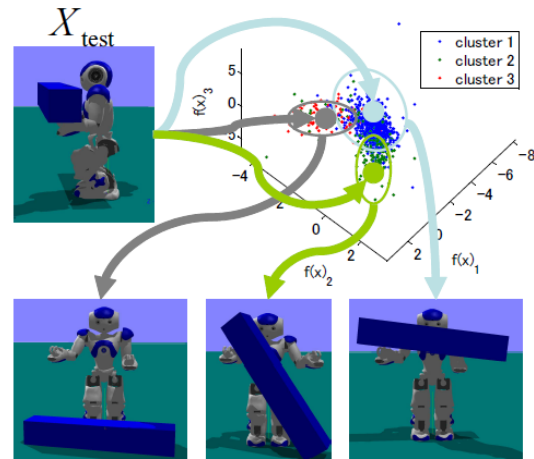


図6：ヒューマノイド抱え上げ動作の教示

## 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)

N. Kawarai and Y. Kobayashi, Learning of whole arm manipulation with constraint of contact mode maintaining, Journal of Robotics and Mechatronics, (査読有) Vol. 22, No.4, 542-550, Aug. 2010.

〔学会発表〕(計8件)

① S. Uematsu, Y. Kobayashi, T. Kaneko, A. Shimizu, Prediction of object manipulation using tactile sensor information by a humanoid robot, Proc. of IEEE Int. Symposium on Robotic and Sensors Environments, 37-42, Magdeburg (Germany), 2012年11月16日.(査読有)

② 植松重之, 小林祐一, 金子透, 清水昭伸, 体性感覚情報を用いた抱え上げ動作達成の認識と予測, 第30回日本ロボット学会学術講演会, AC3N2-3, 2012年9月19日.

③ 篠田真也, 小林祐一, 植松重之, モデル予測制御による接触モデルを学習・修正可能な

物体操作法, 第 24 回自律分散システム・シンポジウム資料, 151-156, 2012 年 1 月 28 日.

④植松重之, 小林祐一, 力覚情報を用いた抱え上げ動作のための特徴抽出, 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, 2409-2412, 2011 年 12 月 24 日.

⑤染井貴之, 松井良介, 小林祐一, 空間認知のための画像特徴による身体図式獲得, 第 38 回知能システムシンポジウム資料, 361-364, 2011 年 3 月 16 日.

⑥植松重之, 篠田真也, 高崎雄太, 小林祐一, 近似関数の局所特徴に基づいた対象物操作獲得のための探索戦略, 第 38 回知能システムシンポジウム資料, 149-152, 2011 年 3 月 16 日.

⑦高崎雄太, 小林祐一, SVM による接触モード推定を用いたオンライン対象物操作学習, 第 23 回自律分散システム・シンポジウム資料, 79-84, 2011 年 1 月 30 日.

⑧篠田真也, 小林祐一, 高崎雄太, 河原井伸行, 接触モード境界推定に基づいたモデル予測制御による対象物操作, 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, 1944-1947, 2010 年 12 月 24 日.

[その他]

ホームページ等

滑り・非滑りの接触モードの切り替りを考慮した対象物操作の学習

[http://sensor.eng.shizuoka.ac.jp/~koba/previous\\_research/research\\_j.html#manipulation](http://sensor.eng.shizuoka.ac.jp/~koba/previous_research/research_j.html#manipulation)

力覚センサ情報を用いたヒューマノイドロボットによる物体抱え上げ動作の教示

[http://sensor.eng.shizuoka.ac.jp/~koba/previous\\_research/research\\_j.html#hold\\_up\\_teaching](http://sensor.eng.shizuoka.ac.jp/~koba/previous_research/research_j.html#hold_up_teaching)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 祐一 (KOBAYASHI YUICHI)

静岡大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 60373304

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし