

## 論文内容の要旨

博士論文題目

Disentangled Dynamics Learning through Randomized-to-Canonical Visual Translation for Sim-to-Real Robotic Manipulation

(Sim-to-Real ロボットマニピュレーションのための Randomized-to-Canonical 視覚変換を通じたもつれのないダイナミクスの学習)

氏名

山之口 智也

(論文内容の要旨)

多様な視覚マニピュレーションの実行はロボットの実応用に向けた重要な課題の一つであり、視覚ダイナミクスを用いたモデルベース制御が有効なアプローチとして知られている。しかし、視覚ダイナミクスはデータ駆動的に大量のデータに依存した深層学習によって獲得されるため、実環境でのデータ収集が共通した大きな問題となる。この問題に対し、シミュレータで収集したデータから視覚ダイナミクスを学習し実環境へ転移することを目指した Sim-to-Real 転移が近年注目されている。中でもドメイン乱択化のアプローチが注目されており、シミュレータで様々な視覚パターンの画像の見え方の遷移を学習しておくことで、実画像の見え方の遷移にも汎化することが期待できる。しかし、表現能力の限界からモデルは限られたパターンの視覚ダイナミクスしか学習できないため、現状ではビジュアルリアリティギャップの小さなテスト環境にしかモデルを転移できていない。また、学習すべきパターンの組み合わせの問題から、ダイナミクスリアリティギャップについては考慮できていない。

本研究では、ビジュアルリアリティギャップが大きく、かつダイナミクスリアリティギャップも含むテスト環境に対して視覚ダイナミクスの Sim-to-Real 転移が可能な学習フレームワークを提案する。従来手法が画像のダイナミクスを直接学習しているのに対し、本手法ではまず画像のタスク関連特徴を抽出し、その上でダイナミクスを学習することで、もつれのない視覚ダイナミクスを学習する。画像の見た目の特徴がダイナミクスから切り離されることで、視覚特性に依らない共通のダイナミクスを学習することができ、その上で物理特性に関する環境変動を捉えることができる。また、ダイナミク

スについても環境に固有の変動要因とそれ以外の動的な情報を切り分けることで、もつれのないダイナミクス学習を可能にする。提案手法の有効性を確認するため、二つの拡張事例を通じて検証を行った。一つ目の拡張事例では、バルブ回転タスクにおいてビジュアルリアリティギャップの大きなテスト環境に対する Sim-to-Real 転移の性能を検証し、提案手法が広範囲のテスト環境に転移できることを確認した。二つ目の拡張事例では、ビジュアルとダイナミクスの両方のリアリティギャップを含むテスト環境に対し、Sim-to-Sim 転移の性能を検証した。ここでは、物体押しタスクにおいて、ダイナミクスの環境変動としてテスト環境において操作物体のサイズを変動させた上でモデルの転移を行った。実験の結果、提案モデルはタスク関連特徴の上でダイナミクスの環境変動を捉えることで、物体サイズに応じた柔軟なマニピュレーションが可能であることを確認した。結論として、視覚とダイナミクスの両方についてもつれのないダイナミクス学習を行うことで、広範囲のテスト環境に視覚ダイナミクスを転移できることが確認できた。

(論文審査結果の要旨)

本論文では、実世界のロボットによる視覚に基づく多様なマニピュレーションの実現に向けて、シミュレータで収集したデータから視覚ダイナミクスを学習し実環境へ転移する Sim-to-Real 転移と、獲得されたモデルに基づくモデルベース制御のアプローチについて検討している。特に、本論文では、従来研究では取り扱いが困難であった、ビジュアルリアリティギャップが大きくかつダイナミクスリアリティギャップも含むテスト環境に対して、視覚ダイナミクスの Sim-to-Real 転移が可能な学習フレームワークを提案した。本手法では画像のタスク関連特徴を抽出し、その上でダイナミクスを学習することで、もつれのない視覚ダイナミクスを学習する。画像の見た目の特徴がダイナミクスから切り離されることで、視覚特性に依らない共通のダイナミクスを学習することができ、その上で物理特性に関する環境変動を捉えることができる。

二つの適用事例を通じて、提案手法の有効性を検証している。一つ目の事例では、ロボットハンドによるバルブ回転タスクにおいてビジュアルリアリティギャップの大きなテスト環境に対する Sim-to-Real 転移の性能を検証し、提案手法が広範囲のテスト環境に転移できることを確認した。二つ目の事例では、ビジュアルとダイナミクスの両方のリアリティギャップを含むテスト環境に対し、Sim-to-Sim 転移の性能を検証し、物体サイズに応じた柔軟なマニピュレーションが可能であることを確認した。タスク関連情報を含む正準画像に基づく Sim-to-Real 転移可能なダイナミクス学習というアプローチを開拓しており、今後の発展が期待できる成果である。その根幹的なアイデアの新規性と実験検証に裏打ちされた実用性・有用性の観点で、高い学術的価値が認められる。

公聴会では、適用可能な応用範囲、数理的な前提の整理、各タスクの詳細情報、「もつれ」の定量化、カノニカル画像の選定方法など、多岐にわたる項目について審査委員との質疑が行われた。その後の最終審査において、すべての質問への回答と論文修正について説明が行われ、適切な対応がとられたことを審査員全員で確認した。

本論文は、ビジュアルリアリティギャップが大きく、かつダイナミクスリアリティギャップも含むテスト環境に対して Sim-to-Real 転移が可能な視覚ダイナミクスの学習フレームワークを提案した。シミュレーションおよび実ロボットを用いたタスクに対する評価実験を実施していることに鑑み、新規性および有用性の観点から一定の学術的意義があるものと評価できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。