

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	家庭環境に向けた人間行動観察学習システムのためのトップダウン知識に基づく把持・操作スキルライブラリ的设计
Title(English)	
著者(和文)	齊藤大智
Author(English)	Daichi Saito
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第327号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小池 英樹,篠田 浩一,三宅 美博,金崎 朝子,井上 中順
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第327号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名	齊藤大智	
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	小池英樹	教授	審査員	井上中順	准教授
	審査員	篠田浩一	教授			
		三宅美博	教授			
金崎朝子		准教授				

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文では、「家庭環境に向けた人間行動観察学習システムのためのトップダウン知識に基づく把持・操作スキルライブラリの設計」と題し、人間行動観察学習システムに組み込み可能な Grasp, In-hand manipulation, Compliant manipulation に対する動作プリミティブの導出と、そのプリミティブスキルの学習設計について述べている。本論文は和文 8 章からなる。

第 1 章「序論」では、研究の背景として、家庭用ロボットにおける汎用的な作業スキルの学習の重要性と作業の多様化によるスキル獲得の困難さを述べている。そして、解決策として作業全体を適当なプリミティブに分割して各プリミティブに対して再利用可能なスキルを学習させる従来手法があるが、対象作業に応じて恣意的にスキル列挙をしておき動作の漏れが生じるという問題を指摘している。この問題を解決できる分野として、動作目的や物体への接触状態の変化の観察から得られるトップダウン知識を用いて網羅的に動作プリミティブを導出する分野である人間行動観察学習 (Learning-from-Observation, LfO) が存在するが、これまでの多くの研究では工場環境を想定してプリミティブを導出していたことを指摘している。この LfO を家庭環境に拡張するために、本論文では LfO で得られてきたトップダウン知識に基づいて、家庭内作業で基礎的で頻出である Grasp, In-hand manipulation, Compliant manipulation をプリミティブに再分類し、家庭環境のような非構造化環境でも再利用可能なプリミティブスキルの学習を行うことを述べている。

第 2 章「関連研究」では、非構造化環境におけるスキル獲得に関する関連研究を概観し、その後、Grasp, In-hand manipulation, Compliant manipulation のそれぞれの動作に対して、(1)家庭内作業において適したプリミティブの選択が可能であるか、(2)非構造化環境において再利用可能なスキルであるかという二つの視点から関連研究をまとめ上げている。第 3 章「トップダウン知識に基づくロボットスキルライブラリの設計の提案」では、本論文の焦点とそのアプローチについて述べている。プリミティブスキルの学習設計ではプリミティブ内の動作が持つ共通要素に着目した設計を行うことで非構造化環境でも再利用可能なスキルの学習を行うことを述べている。さらに、本論文で提案するスキルライブラリを LfO システムへ組み込んだシステム全体像についても述べている。

第 4 章「Grasp に関するスキルライブラリの設計」では、家庭内作業における把持プリミティブとその学習方法を提案している。まず、既存の人間の把持分類とロボットの把持分類を比較することで力のかけ方という観点でロボット把持を分類した Force-exertion type を新たに提案している。次に、把持は接触点によって特徴づけられるということから、接触点位置に関する報酬設計を用いたプリミティブスキルの学習を提案している。シミュレーションと実機実験において、物体の位置姿勢や形状、アプローチ方向を変えた際の成功数を調査した。実機では、六種類の物体の中で五種類の物体では 5 回全ての試行で、残りの一種類では 5 回中 4 回で把持に成功したことを述べている。また、LfO システムと組み合わせることで、冷蔵庫の重い扉を開くという適切なプリミティブ選択が必要な作業が可能になることを示している。さらに、提案スキルがモジュールとして組み込み可能であり、他の様々な作業に対しても再利用可能であることを確認している。

第 5 章「In-hand manipulation に関するスキルライブラリの設計」では、把持プリミティブの遷移を行うための in-hand manipulation に対するプリミティブとその学習方法を提案している。まず、接触状態遷移に基づくプリミティブ (APriCoT) を導入している。APriCoT を導出するために、まずあり得る接触状態を列挙し、それらの遷移を考察している。実験では、active-force closure で箱を掴んだ状態から開始し、箱を半回転させて active-force closure で箱を掴んだ状態で終了する操作を対象として、既存研究との比較や提案手法の成功率を調査している。既存手法では対象操作は学習できない一方で、提案手法では学習できることを示している。また、物体の位置姿勢や

形状を変化させた際に 92.0%の成功率で操作が可能であることを確認している。

第 6 章「Compliant manipulation に関するスキルライブラリ的设计」では、既存の物体拘束に基づいた compliant manipulation の分類に基づいてプリミティブ設計をし、プリミティブに含まれる複数動作に再利用可能なスキル(Constraint-aware policy)を提案している。スキル学習の際に、物体拘束に基づいて設計された環境と報酬設計を用いた学習設計を提案している。本論文では、物体拘束が Prismatic 拘束の場合と Revolute 拘束の場合に対して学習設計をしている。シミュレーションと実機実験においてプリミティブ内の多様な操作に対する提案スキルの成功数を調査し、再利用可能性を検証している。シミュレーション実験では、引き出し開け、板引き、棒引き、ドア開け、ハンドル回しに対して 13 回の試行全てで成功したことを報告している。また、実機実験では引き出し開けによってスキルの sim2real 性能を確認しており、10 回中 7 回成功したことを述べている。

第 7 章「議論」では、まず(1)家庭内作業において適したプリミティブの選択が可能であり、(2)非構造化環境において再利用可能なスキルを持つスキルライブラリの一部が設計できたことを確認している。そして、今後の展望や本論文の限界についてまとめ、今後の研究に対して手がかりを残している。

第 8 章「結論」では、第 3 章から第 6 章で述べた提案や実験結果をまとめ、提案手法による汎用的なスキル獲得に対する利点を述べている。また、本論文で提案したプリミティブは Lf0 だけではなく、他のタスクプランナに対しても貢献できる可能性があることを述べている。

以上、本論文では、多様な家庭内作業に対する汎用的なスキル獲得という目的に対して、トップダウン知識から家庭内作業を網羅的に複数のプリミティブに分類し、そのプリミティブに対して非構造化環境でも再利用可能なスキルを設計することを提案した。提案手法は Grasp, In-hand manipulation, Compliant manipulation の三つの動作に適用された。実験によって適切なプリミティブ選択が必要な作業が提案プリミティブによって遂行可能になり、プリミティブスキルが実際に非構造化環境でも再利用可能であることが示された。以上から、本論文は工学的に高い貢献があると判断し、博士(工学)の学位として十分価値があると認められる。

注意:「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。