

# 論文内容の要旨

申請者氏名 OCHOA REY CYNTHIA MARIA

Imitation Learning (IL) has emerged as a promising approach for teaching robots to perform tasks through human demonstrations. However, its application to developing generalist robot planners—robots capable of achieving diverse goals—remains hindered by two key challenges: (i) error accumulation caused by discrepancies between human demonstrations and robotic execution, commonly referred to as error compounding, and (ii) limited generalization across diverse goals, as models are typically restricted to tasks with previously demonstrated goals. To overcome these limitations, this thesis proposes a novel method grounded in interactive hierarchical human demonstrations and an enriched dataset, termed meta-sub-goal data, which captures causal relationships among sub-goals. Through human-robot online interactions, a human expert provides corrective demonstrations reducing error compounding. Simultaneously, the meta-sub-goal data enables the robot to learn causal dependencies between sub-goals, allowing it to execute new plans for final goals beyond those explicitly demonstrated. The proposed approach is validated through simulations and real-robot experiments in a kitchen-like environment with varying task complexities. The results demonstrate significant improvements in task execution accuracy and generalization across diverse goals. These findings underscore the potential of Interactive IL, combined with task structure understanding, to advance robotic learning for complex real-world applications.

# 論文審査結果の要旨

申請者氏名      OCHOA REY CYNTHIA MARIA

本論文では、多様なタスクに対処可能な汎用ロボットプランナーの模倣学習を実現することを目的とし、人間による階層的な教示データを活用した新しい学習フレームワーク「Interactive Sub-goal Planning Imitation Learning (ISPIL)」を提案している。本手法は、長期的タスク遂行中の誤差蓄積や、多様な最終ゴールへの一般化能力の不足という課題に対処するものである。具体的には、サブゴール間の因果関係を捉える「メタ・サブゴールデータ」と物理的なロボット動作データを組み合わせて階層型方策を学習し、サブゴールの因果構造を理解することで、未学習の新しい最終ゴールにも柔軟に対応可能なプランニングを実現する。さらに、学習プロセスには新規状態を検出するモジュールを導入し、ロボットが未知状態に遭遇した際には人間からの補正デモンストレーションを要求することで誤差蓄積を抑える工夫が施されている。

提案手法ISPILの有効性は、シミュレーションおよび実ロボット環境を用いて検証された。シミュレーション実験では、キッチン環境を模した場面でISPILが多様な最終ゴールに対して高い成功率を示し、作業中の外乱に対しても高いロバスト性を発揮することが確認された。また、実ロボット実験では、人間がリアルタイムで補正データを提供する仕組みを導入し、現実のキッチン環境でISPILの適用可能性を示した。これらの結果は、ISPILが複雑な現実環境における模倣学習の限界を克服し、ロボットの長期的なタスク遂行能力を向上させることを実証しており、今後の応用が期待される学術的価値の高い成果である。

公聴会では、ISPILの汎用性と学習データ依存性、タスクを高・低レベルに分割する基準、新規性と不確実性の区別、ならびに人間介入要件の制限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。また、実験の詳細な説明の拡充、ISPILの人間デモンストレーションに対する誤差感度、モーションプランニングやモデルベース制御との比較、ISPILの前提条件や要件についても議論が交わされた。さらに、大規模言語モデル(LLM)の活用や記号表現の利点、エピソード数を基準とした評価指標の妥当性、実タスクへの適用可能性についても具体的な指摘と議論が行われた。

その後の最終審査では、すべての質問に対する回答および論文修正内容が説明され、その対応が適切であることが審査委員全員により確認され、本論文は承認された。

本論文は、階層的なデモンストレーションに基づき、タスクの階層構造を考慮した新しい模倣学習フレームワーク「ISPIL」を提案したものである。特に、サブゴール間の因果関係を利用した計画生成と、低レイヤーの行動の統一的かつインタラクティブな学習を可能にした点で新規性が高く、一定の学術的意義と応用可能性を有するものと評価できる。したがって、博士(工学)の学位論文として十分に価値あるものと認める。