

学位論文審査の結果の要旨

報告番号	先端科学技術 甲第一〇五号	氏名	河野 仁
論文題目	複数台異種学習ロボットによる知識の共創に関する研究		
論文審査委員	主査 鈴木 剛 月本 洋 中島 克人 五十嵐 洋 神村 明哉 (産業技術総合研究所)		

ロボットを含む様々なエージェントが独立／並列／協調的に作業を実行することで、作業効率の向上、作業形態の柔軟性・多様性、システムの頑健性などを実現する **Multi-agent robot system (MARS)**は、1980年代より国内外で盛んに研究されており、近年では、倉庫ロボット群による物品搬送や、無人化施工ロボット群による廃炉作業に関わる瓦礫の自動撤去など、実環境でのタスク実行においても有用性が確認されている。一方で、**MARS**では、複数エージェントを合目的に秩序立てて、様々な環境に適応的に動作させることが困難であることが知られており、**MARS**を構成する自律エージェントが、強化学習により環境適応的な動作や協調行動の獲得を行う **Multi-agent reinforcement learning (MARL)**が研究されている。従来、**MARL**の研究では、いくつかの環境設定においてエージェント間の協調動作が獲得されているが、1) 学習に長時間かつ多数の試行錯誤が必要となる、2) エージェントは遭遇した環境に対する振る舞いのみしか学習できない、3) 個々のエージェントにおいて獲得する知識の記憶容量に限界がある、などの課題があった。

本論文は、これらを解決する手段として、**MARS**を構成するヘテロジーニアスなエージェント群が学習により獲得した知識を、クラウドコンピューティングを用いて保管・共有し、さらにその知識を他ロボットに転移して利用（転移学習）する“知識共創フレームワーク”を提案し、計算機実験から提案手法や要素技術の有用性を確認している。ここでの「知識」とは、学習により得られるQテーブル、つまり、ある時点の環境状態入力に対して選択される動作価値の集合を指す。エージェントは、最初期の学習には時間がかかるが、その後はクラウド上に保管された学習知識を利活用することで、新たな環境に適応可能となる。また、種々多数のエージェントが多様な環境で様々なタスクを学習し、その知識を保管・共有・再利用することで、効果は拡大する。このシステムを実現するために、本論文では4つの課題を挙げ、それを解決する要素技術を提案している。

(1) **MARL**の代表的なアプローチとして、Taylorらの **Inter-task mapping (ITM)**を用いた転移学習があるが、ヘテロジーニアスな複数エージェント間における転移学習に対応していない。そこで、オントロジの概念を **ITM**に適用した **Ontology-based inter-task mapping (OITM)**と、それを用いた階層的転移学習を提案し、追跡問題を対象に、ヘテロジーニティを含む実験条件下で計算機実験を行い、知識の転移が可能であることを確認している。

(2) 転移学習では知識の利用度合いを決定するパラメータが提案されているが、既存手法

では条件によって転移効果が得られない場合があった。そこで、学習進度に応じた知識転移率調整法を提案し、計算機実験から、既存手法では転移効果が十分に得られない条件においても、転移の効果が得られたことを確認している。

(3) クラウドへの学習知識のアップロードのために、これまで人間が判断していた学習進度を、エージェントで判定可能にする必要がある。そこで、強化学習の学習曲線にフラクタル性があることを実験的に示し、フラクタル次元解析を用いた学習曲線の収束推定法を提案している。最短経路問題や追跡問題を用いた計算機実験により、提案手法により学習収束が推定可能であることを確認している。

(4) 個々のエージェントが類似の環境やタスクにおいて強化学習により獲得した知識を、クラウドを活用して統合する手法を提案している。同目的異解法の関係にある知識を統合することで、新たな環境においても知識の再利用が可能であることを確認している。

以上の各要素技術の検討と開発、評価を通じて、知識共創フレームワークの有用性を議論しており、本論文で得た成果により、本フレームワークは、**MARS** の実世界応用の基盤技術として、**MARL** の有用性拡大に寄与するものと結論付けている。また、今後の課題として、各要素技術の標準化、実世界における実機検証の重要性、長期的な運用における体制に関して述べている。従来、**MARL** で用いられる学習理論や知識共有手法は、**MARS** の実世界応用に関して有用性が示されつつも実用化が進んでいない。本論文では、この問題に対して具体的なシステム構成を提案し、運用の仕組みを与えている。すなわち、学習知識の保管・共有・再利用を行うための要素技術開発と、それらを統合し運用するフレームワークの構築を行い、**MARL** を用いた **MARS** の実世界応用について議論している。

近年、政府による低価格かつ使い易いロボットの普及支援や、社会的課題解決へ向けたロボット革命実現会議、企業によるロボットサービスへの取り組みなど、ロボット技術の実世界応用への期待がますます高まっていく中、**MARL** による知識共創システムは、ロボットの開発者・利用者が複雑なプログラミング作業を行わなくても、ロボットを起動してネットワークに接続することで、クラウド上の知識を利用し環境適応的に振る舞うことが期待できる。さらに、同種あるいは多様な環境やタスクにおける知識の蓄積による、動作のブラッシュアップやアップデートなども可能と考えられる。知識共創システムでは、クラウドコンピューティングおよび種々ネットワーク技術を用いたサービスの提供により、エージェントが特定のサーバやリソースに依存することなく、ユビキタスに知識の共有・利活用が可能であり、多様な実環境で適応的な動作が期待されるロボットの基盤技術として貢献できると考える。

以上、本論文において著者が検討して得た結論に記された事柄は、今後のロボット技術の実世界応用を実現するための有用な基盤技術であり、また、学術的にも優れていると判断できることから、本論文の価値は工学的な観点から十分に評価できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。