東京電機大学大学院

学位論文内容の要旨

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		

本論文は，近年，期待が高まるロボットの実世界応用に貢献する基盤技術として，種々のロボットが様々な環境において適応的に動作するために，ヘテロジーニアスなMulti-agent robot system (MARS) を対象に，Multi-agent reinforcement learning (MARL) を行う各ロボットが多様な環境で学習した知識を，外部ストレージに保管・共有し，その知識をロボット間で利活用する仕組みを提案している．MARSでは，従来，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いる．そこで，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MARLが研究されている．しかし，強化学習エージェントやロボットの実世界応用を実現するためには，学習アルゴリズムだけでなく，学習した知識の共有・再利用，知識の獲得判定，獲得知識の保存・処理など関連機能との統合が不可欠であり，さらにMARSのテロジーニティを考慮する必要がある．そこで本論文では，ヘテロジーニアスなMARSを構成する強化学習エージェントやロボットによる知識の共創を提案し，新たに知識共創フレームワークを提案・検討した．知識共創フレームワークを構成する主たる要素技術として，以下の機能を提案・開発し，実験により有用性を確認した．

- ヘテロジーニアスな MARL における転移学習法
- 知識の再利用時における転移率調整法
- 強化学習における自律的収束推定法
- 外部計算機資源（クラウドコンピューティング）を用いた獲得知識の統合手法

本論文は全 7 章から構成される．序論は，現在の MARS や MARL の既存研究を，知識の保存や共有，再利用の観点から分類・考察し，本研究の意義と研究目的を論じている．第 2 章では，序論で述べた関連研究を整理し，現状における関連研究の課題と本論文における議論点を述べている．

第 3 章では，ヘテロジーニアスなエージェント間における転移学習法と，新たにエージェントがシステムに参加した場合における Inter-task mapping (ITM)の設計作業量削減を目的に，Ontology-based inter-task mapping (OITM)を用いた階層的転移学習を提案した．本手法は，これまでホモジーニアスなシステムを対象にエージェントごとに個別に設計すること

を想定している ITM を，オントロジにより統合することでヘテロジーニアスなシステムでの ITM の記述を支援・管理することを可能にする．これにより，新たなエージェントが OITM に接続されれば，既に接続されているエージェント群の知識が再利用可能となる．追跡問題を対象に，ロボットの行動空間と状態空間，および，ホモジーニアスとヘテロジーニアスの様々な組み合わせの実験条件下で計算機実験を行った結果，全ての条件において既存の転移学習と同様に，転移の効果（ジャンプスタート）が発現し知識の再利用が可能であることを示した．さらに，知識の関数近似によるデータ量軽減化に関しても計算機実験を行い，特に人工ニューラルネットワークにおける知識の関数近似が，階層的転移学習に悪影響を及ぼさないことを確認した．

第 4 章では，Taylor らが提唱した転移学習のように，単純に知識を再利用すると負の転移が発現する可能性を指摘し，転移率を導入した知識の再利用法を提案した．Takano らは既に転移率に相当するパラメータを提案していたが，再利用する知識が常にバイアスとして新たに学習する知識に影響を及ぼす．その再現実験では，転移は可能であるが最終的な獲得知識に悪影響が現れるケースを確認できた．そこで，本章ではエージェントが新たな環境で十分に学習が進んだ場合には，再利用する知識の利用度合を低下させる手法を提案した．最短経路問題や追跡問題を用いた計算機実験から，既存手法では転移の効果が十分に得られない場合においても，提案手法によりジャンプスタートの発現や，転移無しで十分学習した場合と同等のパフォーマンスが獲得できることを確認した．

第 5 章では，これまで人間の目視や直感に依存して判断されていた強化学習の収束判定（知識の獲得）を，エージェント自身に行わせることを目的に，強化学習の学習曲線がフラクタル性を持つと仮定して，フラクタル次元解析を用いた収束推定法を提案した．効果の検証のため画像処理を用いたフラクタル次元解析による収束推定法と，数値情報から直接フラクタル次元を計算する収束推定法を提案した．最短経路問題や追跡問題を用いた計算機実験により，学習の収束が推定可能であることを確認し，また学習曲線にフラクタル性が存在する可能性を実験的に示した．

第 6 章では，学習により獲得した知識の処理方法を議論し，特に，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た．計算機実験により評価を行った結果，同目的異解法の関係にある知識を統合することで，新たな環境でも知識の再利用が可能であることを確認した．

第 7 章では，本論文で得られた成果をまとめ結論を述べた．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た．本論文で得た成果により，知識共創フレームワークは，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・展望として本論文では解決しなかった課題を述べ，さらに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た．