

氏名	あらざ 標 ただ し 之 肅 之
学位(専攻分野)	博士(情報学)
学位記番号	情博第190号
学位授与の日付	平成18年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	情報学研究科知能情報学専攻
学位論文題目	Applications of Automated Theorem Proving Methods to Multi-Agent Systems (マルチエージェントシステムへの自動定理証明手法の応用)
論文調査委員	(主査) 教授 佐藤雅彦 教授 山本章博 教授 湯浅太一

論文内容の要旨

本論文は、ネットワーク上で自律的に動作し、メッセージ交換により互いに協調して動作するソフトウェアであるエージェントに対し、自動定理証明のさまざまな手法を利用して、その開発を効率化する方法を提案するものであり、以下の6章からなる。

第1章は序章であり、マルチエージェントシステムとは何か、またどのように利用されており、今後どのように発展する可能性があるかを説明し、次いでエージェントを効率よく開発するために、本論文でどのような課題に取り組むかを述べ、最後に本論文の構成を示している。

第2章では、マルチエージェントシステムのモデルについて説明している。自動定理証明の手法の応用を議論するために、ここではマルチエージェントシステムの計算モデルを定める。まず、知的なシングルエージェントの動作記述の一般的なフレームワークであるBDIアーキテクチャ(Belief, Desire, Intentionといった心的な概念でエージェントの状態を論理的に表現し、その状態に対する判断で、コミットメント戦略などを利用した行動選択を行う枠組み)と、実用的な分散システムの記述モデルであるSDL(Specification and Description Language)を概観し、これらのモデルの基本アイデアに基づいて、マルチエージェントシステムの計算モデルを提案している。

第3章では、エージェントの知識に関する推論方式を論じている。知的エージェントの状況判断メカニズムを与える、知識と信念に関する推論のシステムを実現するため、さまざまな様相論理体系に汎用的に適用可能な様相論理の定理証明方法を導入している。対象となる体系のクラスは、Kripkeモデルの到達可能関係が一階述語論理で定義可能なクラスで、エージェントの知的推論能力を表現するのに十分広いクラスである。証明の手法は、prefixedタブロー法を拡張して、様相論理を到達可能関係に関する一階述語論理式に変換し、一階述語論理の定理証明器で証明する。変換は、様相論理の単純な解釈による変換ではなく、タブロー法のモデル論的なアイデアを利用して行われ、導出される一階論理式の中の述語は、Kripkeモデルの到達可能関係を表す述語のみで、もとの様相論理式に含まれる命題変数に対応する述語は現れない。章の後半で、この定理証明法の正当性を、モデル論的な議論で示している。

第4章では、エージェントのコミットメント戦略の実現に関して論じている。コミットメント戦略とは、エージェントの動作を先読みして、現在エージェントが持っているIntention(サブゴール)が、Desire(最終ゴール)を達成する手段になるかを検証し、手段にならない場合は、そのIntentionを捨てるといった、Intentionの保持・非保持を判断する動作戦略である。この章では、この先読みの動作をシステムの検証という立場で定式化している。ただし、検証されるシステムの将来の動作では、やはりコミットメント戦略が用いられることを前提とするので、検証を再帰的に行う複雑な問題となる。ここでは、状態遷移木に、C/D付値という新たな概念を導入し、再帰的な検証構造を定式化している。さらに、その定式化に基づくIntentionの保持・非保持判断の決定的手続きを与え、その正当性を時相論理のモデル論的議論で証明している。

第5章では、エージェントプログラムの実用的な形式的検証手法を導入している。第2章で導入したマルチエージェント

システムのモデルに基づいたプログラム言語で、直接モデルチェック（時相論理 CTL）で検証可能なものを提案している。そこでは、エージェントプログラムが与えられたとき、エージェントのインタラクションの部分を、そのプログラムの意味に従って統語解析し、そこからマルチエージェントシステムの状態遷移を論理式で表したものを導出し、その式を元に、シンボリックモデル検査を行っている。さらに、この言語に特化したプログラムの slicing の方法を導入し、形式的検証の効率化を図っている。

第6章は結論であり、本論文を総括し、今後の研究課題を議論している。

論文審査の結果の要旨

近年、Web アプリケーションや Web サービスのように、インターネット上でサービスを提供するための枠組みが、電子のサービス基盤として発展しつつある。

そのような状況の中で、エージェントシステムは次世代のサービス基盤として注目を集め、さまざまな方向に研究が展開している。本論文では、知的な振る舞いをするソフトウェアであるエージェントを、効率よく開発するために、自動定理証明手法を利用したエージェントの実行及び開発基盤を提案している。得られた主な成果は、次の通りである。

(1) エージェントの知的推論の基盤となる、様相論理の自動定理証明法を新たに考案し、その正当性を証明した。この自動定理証明法は、その汎用性と効率を考えた場合、従来の証明法よりも総合的に優れており、また、その手続きもユニークなアイデアから導かれている。この証明法により、様々な知的推論能力をもつエージェントを同じ基盤で開発することが可能になる。

(2) エージェントの動作を、エージェント自身の先読み判断で効率化するコミットメント戦略を定式化し、停止性が保証されたコミットメント戦略の実行方式を考案した。その定式化にあたっては、C/D 付値という新しい概念が導入され、微妙な特性を示すコミットメント戦略の定式化に成功している。また、提案された実行方式の停止性の証明でも、数理論理的に興味深い手法が考案されている。

(3) エージェントの自律性のため、複雑な挙動を示すエージェントプログラムに対し、一般のエージェント開発者が容易に利用できる形式的検証の枠組みを示した。そこでは、形式的検証に適したプログラム言語を導入し、また、検証の効率化をはかるプログラムスライシングの方法も導入した。ここで提案された方法は、類似の研究の中で、プログラム言語の実用性、および検証の効率という点で優れている。

本論文により、エージェントの開発者は、エージェントの知的な振る舞いを、数理論理的な基盤に立って、容易に実現でき、さらに開発したエージェントの動作テストも正確に行うことが可能になる。これは実用上、重要な成果である。また、提案された手続きの正当性を示す過程で、興味深い数理論理的手法を新たに導入し、学術的な寄与も大きい。

よって本論文は、博士（情報学）の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成18年2月15日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。