

学位論文題名

様相論理および可能性理論に基づく
知識ベース管理の定式化に関する研究

学位論文内容の要旨

情報処理技術の高速化に伴って、大量の情報蓄積、処理する技術の必要性が高まっている。蓄積された情報を知識ベースとして扱うためには、知識ベースを管理する機能が必要となるが、知識ベースおよびその管理システムに関する研究は理論的定式化と実用的応用の両面から行われている。知識ベース管理に関する問題の一つとして、知識ベースに対して情報の追加、削除などの操作を施した場合に、いかにして知識ベースの整合性を保つかが挙げられる。所有する情報の整合性に関する議論は論理学や哲学、人工知能などの分野で行われているが、この問題を論理や確率、ファジィ測度などの枠組で定式化し、その理論的性質を扱う研究は信念変更の理論と呼ばれている。

論理的枠組における信念変更は、信念修正と信念更新とに大別される。信念修正は、得られた新情報が所有する情報と論理的に矛盾する場合に、所有する情報に間違いがあるとみなして、その誤りを新情報に基いて訂正し、論理的整合性を保とうとする操作である。これに対して信念更新は、現実世界が動的に変化したことによって、現実世界の状況と所有する情報とが食い違うようになったとみなして、そのような世界の変化を所有する情報に反映させる操作である。しかし、これらの方法は本質的に異なる操作とみなされており、信念修正と信念更新を統一的に扱った研究は行われておらず、これらの操作についての関連性は明らかにされていない。

数値的な枠組での信念変更の定式化としては、ファジィ測度の一種である可能性理論の枠組での定式化が試みられている。可能性理論の枠組では、所有する情報を可能な状況の集合から閉区間 $[0, 1]$ への可能性分布と呼ばれる関数で数値的に表現する。従来の研究では、信念修正の操作と、信念更新の操作の一部が定式化されている。しかし、信念更新の従来の定式化には不十分な点が多く、また、信念更新の他の操作についてはまだ定式化されていない。

本論文では、これらの問題に基いて、信念修正と信念変更の操作を統一的な枠組で扱い、これらの操作の関連性を明らかにする。また、信念変更をそれぞれ様相論理と可能性理論に基いて定式化し、その性質について考察する。

第1章では、序論として研究の背景と本研究の位置づけおよび目的について述べている。

第2章では、本論文の数学的準備として、様相論理とファジィ測度の一種である可能性理論について概要をまとめている。まず、様相論理の証明論と可能世界に

基づく意味論, 特にクリプキ・モデルについて説明する。次に, ファジィ測度について述べ, その特別な場合である可能性理論について説明する。

第3章では, Alchourronらが提案した信念修正とKatsuno and Mendelzonが提案した信念更新について, その関連性を明らかにする。まず, 信念修正と信念更新について概略を述べ, Katsuno and Mendelzonによる更新と消去の操作について, これらの操作を特徴づけるメタ論理的な公準に不十分な点があることを指摘し, その不備を補う。次に, 更新から消去を定義する同一性と消去から更新を定義する同一性をそれぞれ提案し, 不備を補った公準に基づく更新と消去について, 相互に定義可能な性質が成り立つことを示す。更に, 修正および縮小から消去を定義する同一性を提案し, これらの同一性に基づく相互定義について, 可換な性質が成り立つことを示す。相互定義に関する可換性は, 信念変更を行う種々の操作間の関連を明らかにする。

第4章では, 信念変更の操作の中で特に更新と消去に着目し, これらの操作を様相論理, 具体的にはVakarelovが提案した矢印の様相論理を, 矢印の間の順序関係について扱えるように拡張した順序を持つ矢印の様相論理に基いて定式化する。まず, 有向グラフの構造的な性質と矢印の間の順序関係を表現する, 順序を持つ矢印の様相論理のフレームとモデル(以下, OAモデル)を提案する。また, 順序を持つ矢印の様相論理体系OAL (ordered arrow logic)を提案し, OALはすべてのOAモデルのクラスに対して健全かつ完全であることを示す。次に, 更新と消去の操作を, 所有する情報を表す論理文の集合のそれぞれのモデル w に対して, w において最も「起こりやすい」状態遷移を選択する操作に基づいて定義すると, それぞれKatsuno and Mendelzonの更新の性質および消去の性質を満たすことを示す。更に, 更新と消去の操作およびそれぞれの操作が満たすべき性質は, OALの論理文として明示的に表現できることを示す。このことは, 更新と消去の操作はOALにおける論理演算として表現できることを意味する。

第5章では, 可能性理論の枠組における信念更新の厳密な定式化を行う。まず, Dubois and Pradeによる可能性理論における更新の定式化では, 更新の結果が常に構成できるとは限らないことを指摘し, 可能性理論における更新の操作を正確に再定式化することでこの問題を解決する。また, 論理的枠組における消去の操作および対称的消去の操作を可能性理論の枠組で新たに定式化し, その性質について考察する。更に, 不確実な情報に基づく信念更新を提案し, その性質について考察する。特に, 不確実な情報に基づく信念更新は, 特殊な場合として確実な情報に基づく信念修正と信念更新, および不確実な情報に基づく信念修正を含んでおり, より一般的な信念変更の枠組であることを示す。

第6章では, 結論として, 本論文で得られた結果について考察し, 今後の研究の方向性と課題を示す。また, 本論文での主な定理および補題, 命題について, 証明を付録として添付している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 達 惇
副 査 教 授 新 保 勝
副 査 教 授 宮 腰 政 明
副 査 助 教 授 村 井 哲 也

学 位 論 文 題 名

様相論理および可能性理論に基づく

知識ベース管理の定式化に関する研究

知識ベースに含まれる情報を変更した場合に知識ベースの整合性を保つという問題は、人工知能の分野で基礎的理論と工学的応用の両面から研究されている。この問題を論理、確率およびファジィ測度に基づいて定式化し、その性質を扱う研究は信念変更の理論として扱われており、これは新たに得た情報に基づいて知識ベースに論理矛盾が生じた場合に訂正を行う信念修正という課題と、現実世界の動的な変化を知識ベースに反映させる信念更新という課題の二つに分かれる。

論理的枠組に基づく従来の研究では、これら二つの課題は本質的に異なる操作とみなされており、両者の関連性は追究されていなかった。これは確率およびファジィ測度に基づく研究においても同様であり、可能性理論を用いた信念修正と信念更新の操作の一部が構築されているが、これら二つの課題を包括的に扱うには至っておらず、これらの操作は知識ベース管理に関する応用研究において活用される段階に至っていない。

本論文は、知識ベースの整合性を保つ様々な操作の統一的な取り扱いと情報工学における応用を目的として、知識ベース管理における信念変更を記述する公準を定式化し、それぞれの操作の関連性を明らかにしている。第一段階として、古典命題論理に基づいて、知識ベースの整合性を保つ様々な操作の関連性を明らかにし、第二段階として、従来の研究で一部が構築されている可能性理論に基づく信念変更の厳密な定式化を行い、統一的な枠組の構築を行っている。第三段階として、様相論理に基づく知識ベース管理の定式化および統一的な枠組の構築を行っている。

第1章では、本論文の背景、目的および構成について述べている。

第2章では、様相論理および可能性理論について、本研究に用いる成果を抽出して整理するとともに、信念変更に関する従来の研究の概要を述べている。

第3章では、古典命題論理に基づいて、知識ベースの整合性を保つ二つの課題である信念修正および信念更新の関連性を明らかにしている。まず、信念更新の操作の一部である更新操作および消去操作について、消去操作を記述する既存の公準の不備を解消し、それら二つの操作を相互に定義することが可能であることを証明した。更に、信念修正の操作である修正操作および縮小操作を用いて、更新操作および消去操作を構成することが可能であることを証明し、知識ベースの整合性を保つ様々な操作の関連性を明らかにしている。

第4章では、様相論理に基づく知識ベース管理の定式化および統一的な枠組の構築を行っている。まず、状態遷移図の構造を表現する矢印の様相論理について、状態遷移の発生に関する選択の順序を与えて論理を拡張し、この論理に意味論を与えるモデルを考案して、それを詳述している。この拡張した論理が全てのモデルのクラスに対して健全かつ完全であることを証明するとともに、知識ベースの整合性を保つ操作を統一的に扱う枠組を構築している。

第5章では、従来の研究で一部が構築されていた可能性理論に基づく信念変更の厳密な定式化を行い、それらを統一的に扱う枠組を構築している。まず、可能性理論における更新操作について、従来の定式化の不備を解消し、消去操作と対称的消去操作を新たに考案している。更に、不確実な情報に基づく信念更新という概念を創出し、可能性理論に基づく信念変更のそれぞれの操作はその新しい概念に基づいて取り扱うことができることを論じている。

第6章では、本論文のまとめおよび今後の課題について述べている。また、本論文で示されている定理および補題について、証明を付録として添付している。

これを要するに、著者は、知識ベースの整合性を保つ様々な操作の関連性を明らかにし、様相論理および可能性理論に基づいてそれらの操作を統一的に扱う枠組を構築し、知識ベース管理への応用に関する新知見を得たものであり、情報工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。