

## 学位論文題名

## 証拠に基づく信念形成モデルに関する研究

## 学位論文内容の要旨

知識ベースシステムは近年の人工知能研究における一つの有力な考え方であり、問題解決における知識の重要性を強調する。最近では、計算機に蓄えられる知識は実際には必ずしも真ではないという観点から、知識の代わりに信念と呼ぶ場合もある。知識や信念をどのように表現し、また、それらに基づいてどのように推論するかに関して数多くの研究がある。信念を取り扱うためのアプローチは様相論理などに基づく形式的方法と確率理論や Dempster-Shafer の証拠理論(以下、D-S 理論)などに基づく数値的方法に分けることができる。これら二つのアプローチには、それぞれ一長一短があり、その特徴は互いに相補的である。形式的方法は既成の信念集合からの推論を主に論じ、信念自体の形成過程を扱わない。一方、数値的方法は信念の度合いを表わす数値を証拠に基づいて形成したり、更新する方法を主に扱い、論理的推論との関係はあまり明白でない。

本研究では、信念を扱う二つのアプローチのそれぞれ代表的な方法である信念様相論理と D-S 理論を考察の対象とし、互いに相補的性質を持つ両者の間の理論的な関係を明らかにし、D-S 理論に様相論理の構造が内在することを証明する。その結果、論理的推論は数値的方法と独立に存在するものではなく、獲得できる証拠の集積が信念を形成し、利用できる様相論理を決定することを明らかにする。次に、この結果を利用して証拠に基づく信念形成モデルを構成し、形成された信念が知識をなすための証拠の条件を提案する。このモデルは、人間が日常得られる様々な証拠に基づいて信念を形成し、確実性のある信念をその知識の体系に組み込むという考え方を論理的に定式化したものであり、形式的アプローチにおける信念形成や知識獲得に対して新たな枠組を提供する。

本論文を7章で構成する。

第1章は序論であり、信念を扱う従来の方法の特徴と問題点を論じ、一つの解決法を示唆することによって、本研究の立場と目的を明らかにする。

第2章は本研究の数学的準備をなす章であり、信念様相論理と D-S 理論に関して概要をまとめる。まず、信念様相論理の証明論および可能世界に基づく意味論、特にクリプキ・モデルとその拡張であるミニマル・モデルについて説明する。次に、信念に対する数値的アプローチとして、現在最も広い枠組を提供するファジィ測度について述べ、その特別な場合である D-S 理論に関して説明する。

第3章では、様相論理のファジィ測度に基づく有限モデルを提案し、数値的方法と形式的方法との間に健全かつ完全な関係が成り立つことを証明する。以下、ある測度に基づくモデルのクラスに関して、ある体系が健全かつ完全であるとき、その測度はその体系を決定するという。ファジィ測度に基づくモデルでは文が成り立つ世界の集合の測度値が1であるとき、その文を信じると定義する。ファジィ測度に基づくモデルがミニマル・モデルをなすことを利用して、ファジィ測度が様相論理体系 EMNP を決定することを証明する。この体系における信念は一般に論理的に閉じず、相反する文を同時に信じ得るなどの性質を持つので、ファジィ測度にはより人間的な信念論理が内在する。次に、特別なファジィ

測度を取り上げる。まず、D-S理論のplausibility関数はやはりEMNPを決定する。よって、測度値1に関する限り、plausibility関数はファジィ測度と同じ論理的性質を持つ。次に、D-S理論のbelief関数やDuboisらの必然性測度、確率は合理的信念を表現する体系KDを決定する。また、Zadehの可能性測度は体系EMFNPを決定する。この体系ではその否定を信じない文は信じるという公理が成立するので、可能性測度は閉世界仮説を表現することが分かる。最後に、Dirac測度は体系KD!を決定する。Dirac測度は前述のすべての測度の特別な場合であり、対応する論理的性質をすべて併せ持ち、その信念は古典論理モデルと同型になる。以上によって、種々のファジィ測度に内在する信念論理の体系を明らかにし、確率やbelief関数が表現する信念の合理性に対する論理的裏付けを与える。本章では、以上の議論をファジィ測度の中間値にも適用し、各値を反映させたグレード付き信念演算子を持つ多重様相論理を提案し、その性質を検討する。

第4章では、D-S理論のplausibility関数に基づく信念形成の論理的モデルを提案する。前章の結果において注目すべき点はplausibility関数の多様性である。plausibility関数はファジィ測度と同じ体系を決定する上に、特別な場合として、可能性測度や確率、Dirac測度を含むので、その測度値は証拠の状態に依存して様々な論理体系に対応する。よって、証拠が全くない状態から完全な証拠を得た状態に至る過程を、plausibility関数に基づく動的な信念形成として把握できる。そのため、現実世界を記述する論理式の候補を可能世界とみなし、証拠が生成するplausibility関数を利用して可能世界を限定する信念形成モデルを提案する。その最終目標は世界を一つに限定するDirac測度であり、そのとき、信念は古典論理モデルと同型になり、知識と呼ぶにふさわしい整合性を持つ。Dirac測度は究極の証拠であることから、世界を一つに限定する、より弱い証拠の条件も検討し、知識条件と呼ぶ。以上によって、知識獲得は世界を一つに限定する過程として理解できることを明らかにする。また、現在の証拠と知識条件を比較して、整合性のために必要な証拠を割り出す知識獲得のためのプランニング能力を併せ示す。

第5章では、証拠に基づく信念形成モデルを利用したファジィ論理の再構成について論じる。ファジィ論理の真理値1と0が主観的かつ客観的であるという矛盾を解決するために、証拠を集めて客観的真理値の可能性を限定する考え方を信念形成モデルによって定式化し、信念の各度合いに対応する信念状態の族として構成する拡張ファジィ論理を提案する。Plausibility関数が確率またはDirac測度になるとき、拡張ファジィ論理はそれぞれ、ファジィ論理または古典論理になることを示す。その結果、ファジィ論理の真理値1と0はそれぞれ、その文を信じること、および、その文の否定を信じることに対応するという新たな意味付けができる。このように、ファジィ論理の真理値は証拠に基づく信念の度合いとして、その論理的性質は信念論理によって基礎付けできることを明らかにする。

第6章では、文献検索の論理モデルを証拠に基づく信念形成によって拡張した信念検索モデルを提案する。このモデルでは索引付けや検索を信念に基づいて実行するという定式化ができ、検索の論理およびファジィ、ベクトル・モデルを一つの枠組で扱える。また、適合性に関する二つの概念「relevance」と「pertinence」による検索を信念の非単調性を利用して定式化する。ブール検索要求式に重要性を表わす数値を導入するファジィ検索要求や二値的索引付けから索引語間の関連を利用して重みを導くファジィ検索を表現する。

第7章は結論であり、本研究を総括し、今後の課題について検討する。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	新保	勝
副査	教授	伊達	惇
副査	教授	嘉数	侑昇
副査	助教授	宮腰	政明

## 学位論文題名

### 証拠に基づく信念形成モデルに関する研究

知識ベース・システムにおける知識や信念の取扱いは、近年の人工知能における重要な課題の一つであり、様相論理などに基づく形式的方法と確率理論やDempster-Shaferの証拠理論などに基づく数値的方法がある。前者は既成の信念集合からの推論を主に論じ、信念自体の形成過程を扱わないのに対し、後者は信念の度合いを表わす数値の証拠に基づく形成や更新を主に扱い、論理的推論との関係はあまり明白ではない。また、互いに相補的な特徴を持つこの両者の関係を理論的に解明する研究はほとんどない。

本論文は、様相論理のファジィ測度モデルという概念を新たに導入し、信念を扱う二つの代表的な方法である信念様相論理とDempster-Shafer理論の関係について理論的に考察を行った結果、両者の間に成り立つ健全かつ完全な関係を確立するとともに、証拠が形成する信念集合の論理的性質を詳細に検討したものであり、その主要な成果は次の点に要約される。

まず、様相論理のファジィ測度に基づく有限モデルを提案し、種々のファジィ測度モデルと様相論理体系との間に健全かつ完全な関係が成り立つことを証明している。具体的には、ファジィ測度に基づくモデルが可能世界に基づく意味論の一種であるミニマル・モデルをなすことを利用して、ファジィ測度が一つの様相論理体系を決定することを示している。特に、Dempster-Shafer理論のplausibility関数は同一の様相論理体系と健全かつ完全な関係が成り立つことから、この関数はファジィ測度と同じ論理的性質を持つことを明らかにしている。また、belief関数や必然性測度、確率は合理的信念を表現する体系であり、可能性測度は閉世界仮説を表現する体系であることや、Dirac測度が前述のすべての測度の特別な場合であり、対応する論理的性質を併せ持ち、その信念は古典論理モデルと同型になることを示している。その結果、種々のファジィ測度に内在する信念論理の体系を明らかにするとともに、確率やbelief関数が表現する信念の合理性に対する論理的裏付けを与えている。

次いで、Dempster-Shafer理論のplausibility関数に基づく信念形成の論理的モデルを提案している。この関数はファジィ測度と同じ体系を決定する上に、特別な場合として、可能性測度や確率、Dirac測度を含み、その測度値は証拠の状態に依存して様々な論理体系に対応することから、現実世界を記述する論理式の候補を可能世界とみなし、証拠が生成するplausibility関数を利用して可能世界を限定する信念形成モデルを構成している。世界を一

つに限定するDirac測度に基づく信念は古典論理モデルと同型になり、知識と呼ぶにふさわしい整合性を持ち、より弱い証拠の条件も検討すれば、知識獲得は世界を一つに限定する過程として理解できることを明らかにしている。また、現在の証拠と知識条件を比較して、整合性のために必要な証拠を割り出す知識獲得の能力があることも示している。

さらに、証拠に基づく信念形成モデルを利用したファジィ論理の再構成について論じ、証拠を集めて客観的真理値の可能性を限定する考え方を信念形成モデルによって定式化している。その際、信念の各度合いに対応する信念状態の族として構成する拡張ファジィ論理を提案し、plausibility関数が確率またはDirac測度になるとき、拡張ファジィ論理はそれぞれ、ファジィ論理または古典論理になることを示している。その結果、ファジィ論理の真理値は証拠に基づく信念の度合いとして、その論理的性質は信念論理によって基礎付けできることを明らかにしている。また、このモデルを利用して、文献検索の信念検索モデルを構成し、索引付けや検索を信念に基づいて実行する定式化を可能としている。

これを要するに、著者は、知識ベースにおける信念の取扱いについて基礎的な研究を行い、不完全な情報の下での知識獲得に関して、有益な新知見を得たものであり、知識情報工学の進歩に寄与するところ大である。

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。