

博士學位論文要旨等の公表

学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条に基づき、当該博士の学位の授与に係る論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

氏名 中山 陽太郎

学位の種類 博士（理工学）

報告番号 甲第23号

学位授与の要件 学位規程第4条第2項該当

学位授与年月日 令和2年3月20日

学位論文題目

「粒状推論の枠組みにおける認識状況計算に関する研究」

論文審査委員 主査 教授 村井 哲也

委員 教授 山林 由明

委員 教授 工藤 康生

学 位 論 文 要 旨

光科学研究科 光科学専攻

学籍番号：D2170020

氏 名：中山 陽太郎

粒状推論の枠組みにおける認識状況計算に関する研究

人工知能とは知的な機械，特に知的な計算機のプログラムのための科学と工学の研究分野とされ，基本的な目的の一つはその初期より複雑なタスクを処理するための計算機による高度な知識表現と推論に関する研究である。

本研究では情報の部分性という概念に着目し，現実世界における不確実や不整合な情報に適切に対応できることを目的とし，不完全な情報や不整合な情報における知識表現と推論システムのための理論を提案する。知識表現や推論のための理論は，理想化された世界や限定された問題を前提として研究が進められてきたが，より応用性の高い実現可能性を考慮した知的システムにおいては，実世界における不確実性や不整合な情報に対する適応性を備えたものでなければならない。

研究の進め方として，知識表現と推論に関する基礎的な研究と，知識表現に関する応用的研究として次の二つの柱を想定する。(1) 情報の不完全性と不整合における知識表現と推論に関して，基礎となる推論と演繹システムとして非古典論理を用いた論理体系の公理化を行う。(2) 応用として，知識表現と推論の形式化として状況計算を認識論理に拡張した Lakemeyer らによる認識状況計算への適用を行う。認識状況計算の推論の表現力を拡張するため，粒状推論に基づくズーム推論を組み込み，その理論的基礎として，非古典論理に基づく公理系と意味解釈を用いる。

不完全および不整合な情報により，知識表現および推論では，部分性が重要な役割を果たす。情報の部分性は，認識状態について不完全と不整合を引き起す原因の一つであり，世界に対する不確実，または曖昧な解釈につながる。そのため，情報の部分性を考慮した推論や演繹の基礎理論として様相論理や多値論理の非古典論理を用いる。様相論理は，標準モデルに加え，スコット・モンタギュー・モデルによる近傍モデルを用い，多値論理は，強クリーネ，パラドクスの論理による三値論理，および Belnap の四値論理を扱う。

推論の基礎として，部分性を考慮した帰結関係を定義し，不完全性と不整合を扱うための多

値論理による論理体系を与えた。帰結関係は、部分性の性質に基づき体系の異なる推論の定式化を表す。これらの意味解釈として、ラフ集合理論、および可変精度ラフ集合を仮定する。また、推論の定式化として、Gentzen タイプのシーケント計算、および分析タブローによる公理化を示し、健全性と完全性定理の証明を与えた。

基礎理論の応用として、粒状計算に基づくズーム推論の認識状況計算への組み込みを行った。ズーム推論は、ズームインとズームアウトの写像関係から成り、それぞれ抽象化と具象化の推論を表現する。これらを認識的アクションとして構文的に認識状況計算に組み込むため、アクション前提条件公理、後者状況公理に対応するズーム推論の焦点の式集合との関係を示した。ズーム推論では、情報の曖昧性と明確性の表現と解釈が与えられ、非単調推論への応用が可能であることを示した。

抽象化の推論としては、一般化や典型的などの様相的解釈が可能であり、具象化は曖昧な解釈に対する確定的な解釈を与える。これらの意味解釈として、可能世界の粒状化モデルを四値論理の解釈に拡張した様相多値論理のモデルを提案した。論理システムとして、多値論理の部分的意味論に基づく帰結関係と対応付けることによって、不完全性や矛盾の演繹的制約に対応するとともに、推論の自動化の基礎を示した。

認識状況計算をズーム推論で拡張することにより、情報の粒度に基づく思考プロセスを表現し、知識表現の可能性を広げることが可能となる。概念は、二値的に固定化されるのではなく、その境界は曖昧であり、さらに動的に変化する。ある解釈は、情報の粒度の変化により異なる解釈が与えられる。また関連として人工知能研究における未解決問題の一つとされるフレーム問題について再考する。フレーム問題は、狭義には知識表現の限界に関する問題と考えられるが、情報の部分性を考慮することにより、知識表現を前提とする制約を回避し、不完全な情報においてもアクションが遂行できることを論じた。

論文審査の結果の要旨

本研究の基盤となる理論として状況計算と粒状計算の2つがある。

その第1は人工知能研究の祖の一人 McCarthy が人工知能研究の初期である 1960 年代に提唱した状況計算の理論である。人工知能は 21 世紀に入ってディープラーニングが主流であるが、伝統的手法も引き続き研究されている。状況理論はロボットなど知的エージェントに行動(アクション)を統合的に実行させるための計画立案を記述するために誕生した。状況計算はその提案者自身が発見したフレーム問題などを乗り越え、1990 年代には Reiter は非単調推論の実現のため状況計算を拡張し、また、21 世紀に入っても、様相論理の一種である認識論理(知識と信念の論理)を導入した認識状況計算への発展があり、センサーによる事実の観測だけでなく、知識(知る)や信念(信じる)に関して推論できる知的エージェントの設計を可能とした。ここで、フレーム問題は有限の存在であるエージェントが無限の情報を扱わなければならないため、人間を含む知的エージェントにとって避けられない問題である。フレーム問題の代表例としてロボットと爆薬の例がある。爆薬が仕掛けられた部屋からバッテリーを救出するべくそれが載ったワゴンを運んだが、爆薬はワゴンに仕掛けられていたため、自爆してしまう。これはある行動に付随して起きる現象を計算し切れないことが原因である。

第2は 1980 年代に始まった粒状計算の理論である。これは Pawlak が創始したラフ集合の理論に基づく。ラフ集合では全体集合に同値関係を導入し、同値類を使って、与えられた集合を上下から近似する。同値関係が既知の知識を表し、その下で与えられた集合を上下の近似として解釈する理論である。更に、粗さの異なる同値関係を異なる情報の粒度に対応させるのが粒状計算である。粒状計算では情報処理を実行する環境において粗さの異なるコンテキストにおいて適切な方法で情報処理を実行する。この考え方を論理的推論に適用するのが粒状推論である。様相論理の意味論として現在では可能世界意味論が主流であるが、通常の推論は可能世界の集合は固定される前提で実行される。しかし、粒状推論では可能世界の集合上にそのコンテキストで必要な世界間の同値関係を導入し、その結果得られる世界の同値類の商集合を新たな世界集合として組みなおし、推論を実行する。粒度の変化によって非単調推論も表現できる。

以上2つの理論を踏まえて、本論文では、粒状計算の枠組みにおいて状況計算への新しいアプローチを提案した。より具体的には、粒状推論において情報粒度を変更させる操作であるズームインとズームアウトを知的エージェントの行動(アクション)として認識状況計算に新たに導入し、エージェントがある時は詳細に、ある時は大雑把に対象を認識し、行動することを可能とした。その結果、例えば、ロボットの爆弾の例では、ズームアウトして観測し、推論すれば、爆弾の存在に気付かず、バッテリーの救出は爆弾を伴い失敗するが、ズームインすれば、バッテリーと爆弾の存在に気づき、ズームアウトの場合と同じ結論は導かないことを表現でき、その結果、フレーム問題の一つの解決を与えることができる。以上から、従来の状況計算ではエージェントは常に同じ情報粒度で処理を進めるが、本論文によって、粒度を変えて柔軟に行動するエージェントを定式化できることが示された。研究内容は研究発表会(公聴会)において詳細を発表し、参加された先生方から質疑を頂き、いずれについても明快に説明を行った。

以上を要するに、本論文は粒状計算の理論的枠組みにおいて、人工知能において伝統的な分野である認識状況計算に粒状推論を導入した結果、粒度変更の能力を持ち、より柔軟に行動できる知的エージェントの定式化できる点について新知見を得たもの

であり、この分野における今後の発展にも大きく寄与するところ大なるものである。よって、本論文は公立千歳科学技術大学大学院学則第28条及び公立千歳科学技術大学学位規定の定めるところより、博士(理工学)の学位を授与するに十分との結論に達した。

公聴会に引き続き、別室において学位論文審査委員3名による最終試験(面接)を行った。最終試験では、主査1名副査2名から著者に対して、(1)本研究の意義に関する再確認、と(2)今後の研究への展望について試問された。

最初の試問について、状況計算の歴史と現状における位置づけ、現状で状況計算において不足する要素が明確に述べられ、それは粒状推論を導入することによって解決できることが、あらためてフレーム問題の例を使って明晰に説明され、主査副査とも納得した。具体的には、状況計算は1960年代にロボットなどの知的エージェントの行動の計画立案を記述するために提案された理論であること、状況計算に基づく知的エージェントの行動にはフレーム問題は立ちはだかり、状況計算の方法に限界の可能性が見えたこと、それにもかかわらずフレーム問題の解決には人間の持つ常識が必要であることから、1990年代には常識推論を可能とする状況理論へ拡張されたこと、更に近年は、事実情報だけでなくエージェントの知識と信念の表現を可能とする認識状況計算に拡張されるなど、21世紀に入りディープラーニング全盛となっても、人工知能における伝統的研究は引き続き実施されていること、がまず説明された。続いて、伝統的な状況計算に欠けている点は情報の粒度が一定である一方、人間はコンテキストに応じて粒度を変えて推論し行動することを指摘した。そのため、粒状計算の理論を状況計算に応用するのが本論文の主要な研究課題であることが主張された。より具体的には粒状推論のズームインとズームアウトという操作を状況計算における行動として定義し、知的エージェントがその行動立案において、粒状の変更や調整を可能とすることが実現された。その結果、粗い粒度で立案するとフレーム問題は解決できないが、粒度を細かくすると解決できる例が示された。

次の試問である今後の研究への展望については、本研究で展開された理論のシミュレーションなどによる具体的検証について述べられた。特に、フレーム問題として知られているいくつかの問題に本理論で定式化し、その解決をシミュレーションすることが強調された。主査からは統合ゲーム環境であるUnity内にフレーム問題の事例を作りこみ、その環境において問題の解決をシミュレーションすることが提案された。

研究成果の発表状況については、投稿論文数も基準を超えており、情報システム工学分野への貢献度は高い。また、積極的に国内外の学会で発表し、今後の更なる研究の進展が十分に期待される。

以上を総合的に判断し、最終試験は「合格」とした。