

氏 名	岩 沼 宏 治
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 3 年 4 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 60 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	サーカムスクリプションに基づく計算法に関する 基礎的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 野口 正一 東北大学教授 伊藤 貴康 東北大学教授 佐藤 雅彦 東北大学教授 白鳥 則郎

論 文 内 容 要 旨

将来に目標とされる高度に知的な情報処理システムを実現するためには、不完全な情報からある種の常識を用いて妥当な結果を推論する手法、即ち常識推論手法を開発することが極めて重要である。本研究では常識推論における有用な機械的推論手法を開発することを目的として、推論モデルとしてサーカムスクリプションを採用し、その機械的な計算手法についての理論的な考察を行う。

サーカムスクリプションは常識推論を行うための一つの数学的モデルであり、近年の多くの研究によって、その有用性が示されている。サーカムスクリプションの実用化を図る上での最も重要な研究課題は、その機械的な計算手法の開発である。サーカムスクリプションは一般に 2 階論理式として定式化されるために、その機械的な計算が極めて難しい。これまでも幾つかの計算手法が開発されてはいるが、実際の計算にはどれも制約が多く、問題がある。本論文では、種々あるサーカムスクリプションのうちでも最も基本的である述語サーカムスクリプションと、その一般形である並列サーカムスクリプションを考察の対象とし、その演繹計算を 2 階論理ではなく、1 階論理の枠組みで行うための手法について考察を行う。そして幾つかの機械的な計算手法を導出する。具体的な内容は以下のとおりである。

1 章は序論である。

2 章から 4 章では述語サーカムスクリプションを考察し、その機械的な計算手法について議論する。述語サーカムスクリプションは最も基本的で重要であるにも関わらず、その計算手法はこれま

であり研究されていない。

2章では、3章以降での議論に先立ち、極小化された述語の1階の定義式の導出について考察する。サーカムスクリプションの計算は、本来2階論理の上で行うのが自然であると考えられるが、一般に2階の演繹計算は極めて難しい。そのため3章以降では、サーカムスクリプションを1階論理の枠組みで計算する手法について考察を行う。2階計算を1階計算で近似する場合に問題となるのは、2階論理での述語変数の具体化計算 (instantiation) である。これに対応する計算は1階計算には存在しない。サーカムスクリプションの計算においては、極小化された述語の具体化、即ち1階の定義式の導出計算が特に問題となる。もし自明でない定義式が導出できれば、それを利用したサーカムスクリプションの種々の変換、計算が可能となるからである。そのため2章ではまず、Lifschitzの基本結果である点別サーカムスクリプションに着目し、定義式の導出について考察を行う。点別サーカムスクリプションは、2階論理式として定義された述語サーカムスクリプションの1階の近似式であり、定義式を導出する上で極めて興味深い性質を持つ。ここではまず具体例を通して点別サーカムスクリプションを再考察し、その不明瞭性と冗長性を指摘する。次にそれらを排除する手法を順次与えていく。その結果として述語サーカムスクリプション上の極小定義式を導出する。極小定義式は極小化した述語の (外延集合の) 定義と見なせる1階の論理式であり、論理型プログラムにおける述語の完備形定義式 (predicate completion) の一般化となっている。この結果は既存の Reiter の結果を包含しており、極めて重要なものである。

3章では、極小定義式を用いた述語サーカムスクリプションノ1階論理式への等価変換について考察する。これまでも1階論理式への変換は幾つか研究されている。しかし、これら一連の研究では再帰論理式が殆ど取り扱われていない。これは、再帰論理式を制約とする述語サーカムスクリプションは、一般に数学的帰納法を導き、1階論理式への変換が原理的に不可能であることに起因するものと思われる。しかし全ての論理式に本質的な再帰が出現するわけではない。またそもそも一般の論理式における“再帰”という概念自身が、これまでは明確にされてはいなかった。従ってこの定義次第では、“再帰”が出現しない論理式でも十分興味深いクラスが構成できると考えられる。3章ではまず、一般の論理式に於ける“述語の再帰”という概念を考察し、“非再帰性”を静的 (構文的) に決定可能な形で定式化する。次にこの定義の下で、非再帰的な論理式を制約とする述語サーカムスクリプションが極小定義式を用いた1階の述語方程式へ等価変換出来ることを示す。“述語の再帰”はかなり一般的な定義となっており、 \exists と \forall 記号が入れ子に束縛しているような複雑な論理式の上にも再帰関係が定義できる。またそのために、かなり複雑な論理式が非再帰的と判定できる。既存の手法と比較しても、変換条件および変換した1階論理式が極めて自然なものとなっており、有用であると考えられる。

4章では再帰的な制約式を取り扱うために、質問の等価変換に基づく述語サーカムスクリプションの計算手法について考察する。制約A上の述語Pのサーカムスクリプション $\text{Circ}[A; P]$ の真偽計算、即ち $\text{Circ}[A; P] \models B$ の判定計算は、極小化述語Pが質問Bに負に出現しないとき、 $A \models B$ の計算と等価となることはよく知られている。制約Aは1階論理式であるから、この場合のBの真偽は1階論理上で計算できる。当然、一般の質問Bは上の条件を満たさない。しかし満たす

ように等価変換できる質問もかなり多いと考えられる。問題はとその具体的な変換方法である。4章ではその変換手法として、述語サーカムスクリプション上での質問の等価変換手法を考察する。ここで与える等価変換手法は、質問中の極小化述語の負の出現を2章の極小定義式に置き換えて消去を図るものであり、サーカムスクリプション上での否定の再帰的計算手法と見なせる。本論文では、サーカムスクリプションの制約式と質問を節集合に限定して、この等価変換手法を導出原理風の質問変換手法として定式化する。この導出原理風の変換手法は論理型プログラムの否定計算と密接な関係にあり、Negation as Failure規則の一般化規則となっている。全ての質問が上述の論理式へ変換できるわけではないが、再帰的な節と非確定的な節双方が統一的に取り扱え、有用であると考えられる。また質問変換手法は、これまでPrzymusińskiのMILO導出法を除いて殆ど研究されていない。本変換手法とは違って、MILO導出法は等価変換ではなく、また基礎節集合しか取り扱えない。本変換手法は一般の節集合を取り扱うことができ、有用であると思われる。

4章の後半では、この質問変換手法の変換の戦略について考察する。本変換手法は非決定的な手法であり、質問に対する可能な変換は一般に複数存在し、一意には定まらない。よって変換の戦略が極めて重要な問題となる。特に正規化戦略、即ち極小化述語が負に出現しない論理式（正規化論理式）に変換できる質問を必ずそのように変換する戦略、を明らかにすることは極めて重要である。そこで本変換手法と論理型プログラムの否定計算、即ち有限失敗SLD木の導出計算との関連を考察し、結果として、ある種の公平（fair）な戦略が本質問変換手法の正規化戦略となることを明らかにする。

最後の5章と6章では並列サーカムスクリプションの計算手法について考察する。並列サーカムスクリプションは述語サーカムスクリプションにパラメーター機能を付加して一般化したものである。述語サーカムスクリプションに比べて、より強力な極小化の能力を持ち、その上の演繹推論はより複雑な人間の推論過程を模倣できると考えられている。しかし、その機械的な計算手法は殆ど研究されていない。

5章では並列サーカムスクリプションのパラメーターの消去手法について考察する。並列サーカムスクリプションにおけるパラメーターの存在は、サーカムスクリプションの機械的な取扱いを極めて困難にする。並列サーカムスクリプションを更に一般化したものとして優先順位付きサーカムスクリプションがあるが、その論理型プログラムへの等価変換でも、パラメーターの取扱いは極めて難しい問題として残されている。従って、述語サーカムスクリプションの種々の一般形を機械的に計算するためには、パラメーターの取扱い手法、特にその消去手法を開発することが極めて重要な問題となる。しかし、この問題はこれまであまり研究されていない。5章ではまず初めに、パラメーターを消去するための2つの基本定理を示す。1つは冗長なパラメーターの消去定理であり、もう1つはパラメーターの置き換え定理である。この2つの定理の組合せは強力であり、既存のパラメーター消去手法はこの定理から自然に導出される。次にこの基本定理から、2つの新しい消去手法を導出する。1つは制約に正にのみ、あるいは負にのみ出現するパラメーターを消去する手法である。もう1つはパラメーターを極小、極大定義式で置き換えて消去する手法である。本論文での消去手法を用いれば、既存の手法では扱えない \exists と \forall 記号双方で束縛されたようなパラメーター

も、再帰関係が無ければ消去でき、有用であると考えられる。

6章では、3章及び4章の結果と5章の結果を組み合わせ、並列サーカムスクリプションの1階論理式への等価変換手法と質問変換手法について議論する。前半の6.2節では1階論理式への等価変換について議論する。まず並列サーカムスクリプションの全てのパラメーターを系統的に消去するための十分条件と消去手法を示し、次に1階論理式へ変換するための十分条件と変換手法を考察する。本変換手法を用いれば、 \exists と \forall 記号双方で束縛されている制約上の並列サーカムスクリプションなど、既存の手法では扱えないものも1階論理式へ変換でき、有用であると考えられる。

後半の6.3節では質問変換手法について議論する。並列サーカムスクリプション上の真偽計算 $\text{Circ}[A; P; q] \models B$ は、質問Bに極小化述語Pが負に出現せず、かつパラメーターqが全く出現しないならば、 $A \models B$ の1階計算に帰着できる。しかし質問中のパラメーターの消去は一般に極めて難しい。本論文では質問中の極小化述語の負の出現の消去手法について議論する。この問題はパラメーターを消去する問題の重要な部分問題ともなっている。並列サーカムスクリプションへの質問に出現する極小化述語を消去する場合、4章の手法を直接適用することはできない。もとの質問にパラメーターが出現しない場合でも、変換するとパラメーターが出現してしまう場合が存在するからである。6.3節では、4章の消去手法を適用したときに、パラメーターを新たに出現させないための手法について考察する。そのための手法として5章のパラメーター消去手法を利用する。そして最後に、この手法と導出原理を併用して、パラメーターが出現する質問の機械的な計算手法について議論を行う。

審査結果の要旨

高度な知的情報処理システムを実現するためには、不完全な情報から常識的な結論を機械的に推論する手法を開発することが極めて重要である。本論文の著者は、常識推論のための有効な推論手法を開発することを目的に、サーカムスクリプションに基づく計算法に関する理論的な研究を行なった。本論文はその成果をまとめたもので、全編7章より成る。

第1章は序論である。

第2章では、2階の論理式として定式化される述語サーカムスクリプションを機械的に計算するため、述語サーカムスクリプションの1階の極小定義式を新たに導き、その性質を明らかにしている。本章での結果は、第3章以降での議論を展開するための重要な基礎を与えている。

第3章では、2階の論理式である述語サーカムスクリプションを1階の論理式に変換する手法について考察している。まず、一般の論理式での再帰の概念を定式化し、次に非再帰的な制約上の述語サーカムスクリプションが、第2章で与えた極小定義式を用いて1階の論理式へ等価変換できることを示している。

第4章では、再帰的な制約式を対象にした述語サーカムスクリプションを計算するために、これまでほとんど研究されていなかった質問変換に基づく述語サーカムスクリプションの計算法について考察している。初めに、極小定義式を用いた質問の等価変換法を導いている。次に、変換の計算戦略について考察し、公平な計算戦略が正規化戦略となることを導いている。本手法は論理型プログラムにおける否定の計算法を一般化したものであり、重要な成果である。

第5章では、述語サーカムスクリプションを一般化した並列サーカムスクリプションを対象とし、その計算法について研究している。並列サーカムスクリプションを困難にしている原因がパラメータの存在であることから、著者は、その消去法について考察し、パラメータ消去のための基本定理を与え、次にこの定理に基づいたいくつかのパラメータ消去法を導出している。

第6章では、第3章、第4章と第5章の結果を用いて、並列サーカムスクリプションを1階の論理式へ等価変換する手法と質問変換に基づく計算法を導出している。この変換法は第3章での変換法の一般化であり、既存の手法では変換できなかった並列サーカムスクリプションが変換可能となる。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、今後の知識工学における重要な分野であるサーカムスクリプションの機械的計算法について研究し、サーカムスクリプションに基づく常識推論を実現するための基礎理論を与えたもので、知識工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。