

学位論文題名

宣言的プログラムを用いた問題解決に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

問題解決あるいはプランニングとは、初期状態と目標状態と、状態を変更するいくつかのオペレータが与えられたとき、初期状態を目標状態に変化させるオペレータ列、すなわちプランを求めることをいう。

問題を解く場合、問題が複雑であればあるほどの確で柔軟な解決方法は見つけ難くなり処理コストは増大する。そこで、複雑な問題に対してどのようにすれば確で柔軟な解決方法を見つけることができ、かつ処理コストを少なくして問題を解くことができるかという研究がさまざまな分野で行なわれている。このような研究を進める上で、問題をどのように表現するかという点やどのようにして問題を効率的に解き、かつ正当な解を得ることができるかという点が重要になる。

問題解決の方法にはいろいろあるが、本論文では、問題を宣言的プログラムによって表現し、解が正当であることを保証できる宣言的プログラムの理論を採用する。さらに、問題を効率的に解くために、変換ルールの合成と抽象化を用いたプランニングという手法を提案する。

論理プログラムでは、原子論理式(アトム)は関数記号と述語記号から構成される。しかし、引数が項だけの表現では扱える問題が限られてくる。また、得られる結果が充分でないことがありうる。そこで、論理プログラムを拡張した宣言的プログラムが必要になる。宣言的プログラムは、項は勿論、集合表現や制約表現など、いろいろな領域のさまざまな問題を自然に表現することができる。問題の表現力が豊かになることで、問題の処理できる範囲も拡張する。

また、宣言的プログラムの理論は、いかに複雑な問題が与えられても得られる結果が正しいことを保証できる「論理プログラムの理論を拡張した新しい理論的枠組み」である。この理論によって、問題解決の正当性が保証される。

本論文では、これら問題表現と問題解決の正当性に留意して、問題解決の方法である「変換ルールの合成と抽象化を用いたプランニング」を行なう。

まず、変換ルールの合成法について述べる。変換ルールとは、ある状態から別の状態への変更を記述する規則である。変換ルールの合成とは、いくつかの変換ルールを数回連続して利用することによって到達する状態に、1回の変換で到達させることのできる新しい変換ルールを作ることであり、ルールの学習などの基礎となる技術である。ルール適用の結果の良否は、どんな変換ルールをどのように組合わせて用いるかに左右される。

変換ルールの状態を宣言的プログラムを用いて集合で表現する。論理プログラムでは、

単一化子は1つしか存在しない。しかし、集合オブジェクトは複数の元を持つことから、合成のための「集合オブジェクトどうしの単一化」は単一化子が複数ありうる。そのために、集合オブジェクトどうしの単一化に対する新しい単一化子の概念である「単一化子集合(複数個の単一化子)」を新しく導入する。この複数の単一化子の1つ1つに対して合成ルールが求められる。従って、得られる合成ルールは複数ありうる。

変換ルールの合成は、unfold 変換によって行なう。unfold 変換とは、確定節の head を body に展開することによって、プログラムを別のプログラムに変更する変換である。unfold 変換によって、プログラムが等価なプログラムに変更されるとき、その unfold 変換は正当である。宣言的プログラムの unfold 変換は、論理プログラムの unfold 変換の自然な拡張で、単一化子集合によって、1つの展開節から複数の生成節(合成ルール)を得ることがありうる。

複雑な対象を扱う変換ルールの場合、人間が変換ルールを最適に記述するのは困難である。宣言的プログラムの unfold 変換によって得られる複数の合成ルールには、ユーザが意図するものとしめないものが含まれる。論理プログラムの unfold 変換による合成では、1つの合成ルールしか得ることができず、この中からユーザが欲しい有用なルールを選び出すことは困難である。しかし、宣言的プログラムの unfold 変換による合成では、ユーザの意図(例)に対応した合成ルールを自動的に得ることができる。

次に、準同型変換による抽象化を用いたプランニングについて述べる。

一般に、問題を抽象化することで、与えられた問題の詳細を隠し、より大局的かつ簡単な問題に置き換えることができる。これによって、問題を大まかな枠組みで捉えて問題解決し、その解を基にして元の問題を効率的に解決することが多くの場合期待できる。複雑な問題になればなるほど、抽象化を用いて解く効果は大きくなると考えられる。

そこで、具体的な問題が与えられたとき、どのように抽象的な問題を作るかという点や抽象化された問題の解を利用して、どのように具体的な問題の解を得るかという点がポイントになる。

本論文では、準同型変換による抽象化によって抽象的な問題を作る。準同型変換による抽象化の枠組みでは、具体的な世界と抽象的な世界を特殊化システムによって別々に規定し、これらの世界の間準同型変換を導入する。特殊化システムは、原子論理式の集合や代入の集合によって規定される。準同型変換とは具体的な世界から抽象的な世界への写像で、写像前の詳しい世界の状態間の関係が、写像後の世界においても縮小版として保持されているものをいう。最下段で導入された準同型変換は、プログラム間の変換として拡張され、具体プログラムを抽象プログラムへ対応づける。さらに、具体プログラムの宣言的意味と抽象プログラムの宣言的意味の間準同型定理が成り立つ。これより、抽象化による解法の正当性の根拠を得ることができる。

準同型変換による抽象化は、従来のプランニングシステム(ABSTRIPS,NOAH)のようなオペレータの抽象化のみならず、状態の要素も抽象化することができる。状態について抽象化を行なうことで、状態の要素の数が減って、詳細な状態を持つ問題が大局的かつ簡単な状態を持つ問題に変換される。

準同型定理より、解くべき具体的な問題を抽象化を用いずにプランニングした解を、準同型変換によって抽象化したものは、抽象的な問題をプランニングした解に含まれる。従って、解くべき具体的な問題の解を求めるとき、準同型変換すれば抽象的な問題の解となるような道筋だけに限定して探索を行なう。これによって、解の探索範囲を限定し探索量を大幅に減らすことが、準同型変換に基づく問題解決の目指すところである。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	宮本衛市
副査	教授	新保勝
副査	教授	大内東
副査	助教授	赤間清

学位論文題名

## 宣言的プログラムを用いた問題解決に関する基礎的研究

人工知能分野における問題解決あるいはプランニングとは、対象の初期状態と目標状態、および状態を変換させるいくつかのルールが与えられたとき、初期状態を目標状態に遷移させるルール列、すなわちプランを求めることである。プランニングにおける基本的課題はプランの探索であるが、プランの探索効率、適切なルールの利用や大まかなプランに誘導された探索などによって大きく改善できる場合がある。このため、新しい変換ルールの合成方法や抽象化を用いたプランニングの手法が研究されている。しかし合成や抽象化に関する従来の研究は、知識表現方法が限られているために、十分広範囲な領域の問題に対して理論的正当性を保証した方法を提示できていない。そこで本研究では、プランニング問題に対し、宣言的プログラムの理論に基づいて問題を表現し、解決する枠組を提案し、変換ルールの合成と抽象化によるプランニングに関して、明快な理論的基礎づけを持つ新しい方法を提案している。

問題解決の対象となる領域はいろいろなものが考えられる。しかし、従来の論理プログラムではデータ構造が限られており、自然な表現のできない領域が数多く存在する。不適切な表現を用いると、変換ルールの合成などのような一般規則を生成する処理は、見通しが悪くなり、多くの場合意味ある合成結果を導くことが事実上不可能になる。

そこで本研究では、論理プログラムの表現力を大きく拡張した宣言的プログラムを用いている。宣言的プログラムを用いれば、項だけでなく、集合表現や制約表現などを用いて、いろいろな領域の問題を自然に表現することができ、課題をうまく解決できる範囲も拡大する。

ルール合成とは、いくつかの変換ルールを適用してある状態から別の状態へ変換する操作を、1回の変換で到達させることのできる新しいルールを作り出すことである。プランニングにおける探索の良否は、どんな変換ルールをどのように組合わせて用いるかに左右されるので、良い組合せのルールを合成しておくことで、探索を効率化できる。本研究では、合成ルールを、宣言的プログラムに対する unfold 変換によって求める方法を提案している。unfold 変換とは、確定節の head を body に展開することによって、プログラムを別のプログラムに変更する変換である。この方法は、複雑な対象に対する

ルール合成においても、合成ルールが正しいことを保証しており、論理回路の合成システムに対するルール獲得などに応用することができることが示された。

宣言的プログラムの unfold 変換では、複数の合成ルールを生み出すことがありうる。それらの合成ルールには、ユーザが意図するものとしなないものが含まれる。本研究では、ユーザの意図に対応した合成ルールを自動的に選別する方略を示している。このような場合、ルール合成を論理プログラムの unfold 変換によって行なおうとすると問題が生じる。論理プログラムでは1つの合成ルールしか得ることができず、その中に有用なルールと有用でないルールの情報が混在しているため、ユーザが欲しい有用なルールだけを選び出すことは困難である。

与えられたプランニング問題をそのまま解くかわりに、いったん抽象化した問題を解き、その抽象解を手掛かりにしてもとの問題を解くのが、抽象化に基づくプランニングである。これに関しても既存の研究では、十分広範囲な領域を扱い、しかも理論的に明快な方法は提案されていない。

本研究では、宣言的プログラムの理論における準同型変換の理論に基づいて、抽象化に基づくプランニングに対する新たな方法を提案している。準同型変換は、具体的な世界から抽象的な世界への写像で、写像前の詳しい世界の状態間の関係が、写像後の世界においても縮小版として保持されているものをいう。準同型変換は、プログラム間の変換に拡張され、さらに、具体プログラムと抽象プログラムの宣言的意味を結び付けている。抽象化による解法の正当性の根拠は、宣言的意味に関する準同型定理によって確保されている。

これを要するに、本研究は、いろいろな領域における問題解決を、適切なデータ構造を用いて自然に表現する枠組を導入し、問題解決におけるルールの合成と抽象化による解法に関して、正当性を持ち、適用範囲の広い新しい方法を提案し、高度な問題解決システムを構築するための基礎的な知見を得ており、情報工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。