卒業研究
プランニング問題の効果的でドメイン非依存なモデリングについて

氏名：堀江 慧
指導教官：福永 Alex
学生証番号：08-132021
所属：教養学部 学際科学科 総合情報学コース

2015 年 1 月 2 日

目次

図目次

表目次

1 序論

1.1 研究の概要

本研究で扱うプランニング問題は，現実の意思決定をモデル化した問題であり，人工知能分野の主要な問題のうちの一つとされ，かつてより広く研究の対象とされているものの一つである。この問題が解決された暁には，直面している状況や実行可能な行為といった現時点の情報を入力として，目的を達成するような実行プランを自動で得ることができるようになる。

人工知能の備える’ 知能’ の性質にふさわしいものとして汎用性が挙げられる。与えられた問題に対して，ドメイン特化の知識を人間が与えれば，よりよいパフォーマンスを挙げることができることができるであろう。(Kautz and Selman [1] など) 一方で，そのような人間の’ 知能’ を介助を得ること無くその問題解決を達成するような人工知能は，より望ましいものであるといえる。そして，そのような知能の実現は当然より困難なものとなる。

本研究では汎用モデルとそのソルバーを利用し，プランニング問題を解くドメイン非依存な手法について取り扱う。また，そのようなモデルとして SAT, 数理計画, 制約プログラミングを扱う。

ここで言うドメイン非依存性とは，プランニング問題の枠組みで表現できる問題であればどのような問題インスタンスに対しても同様の処理で解を得ることが出来る性質をいう。プランニング問題自身の柔軟性，実用性からこのドメイン非依存性は有効なものとなる。

続いて，制約プログラミングのモデルにおける global constraint に着目する。global constraint とは制約プログラミングの近年特に研究が進んでいるある特定の制約群である。

これらの制約に対しては特化したより効率的な探索アルゴリズムがそれぞれ研究されており，これらの制約を取り込んだ定式化を行えば，素朴な制約のみから作成したモデルよりも効率的に得ることができる可能性がある。また，よりリッチな制約を利用することで，モデリング自体の困難さを緩和し，等価なモデルをよりシンプルに表現することができると考えられる。

本研究では制約プログラミングのモデルでプランニング問題を扱う際に，global constraint を利用した有効な定式化な手法を提案する。

提案手法の有効性の検証として，整数計画モデルの optiplan プランナや制約モデルの GP-CSP の planning praph を利用した定式化に対して，global constraint を利用した本研究の手法による定式化を追加したプランナとの比較を行う。

1.2 背景

正確な定義は後に述べるが，プランニング問題とは例えば以下のような問に応える問題である。エアコンの電源を入れるにはどうすればよいか，部屋を綺麗にするにはどうすればよいか，洞窟の中から脱出するにはどうしたらよいか，また，スライディングタイルやハノイの塔といったパズルの類もこの枠組で表現することができる。

このように，この問題は現実の行動計画，意思決定の直接的な定式化である一方で，また，多くの現実的な問いをこの枠組みで表現することができる。

迷路の問題を元に考えてみる。迷路内で行える行為として，右に向き換えること，左に向きを換えること，向いている方向に直進すること，の 3 つの行為が可能であるものとする。この時に，迷路内のある地点にあるゴールにたどり着くようなプランを考える。ゴールに辿り着けるプランが存在するのであれば，実行可能な行為を全て列挙してしまえばゴールに辿り着くようなプランが得られるであろう。このように，初期状態から行為を実行していき，各行為の効果を書く時点での状態に反映させていくことを繰り返せば，探索によってプランを得ることができる。一方で，その探索空間の大きさはプランの深さに対して指数的に増加していくこととなる。

このように，この問題は一般には解の長さに対して指数的に探索空間の大きさが増えていき，有限多項式時間で解を求めることはできない。一方で，SAT, 数理計画問題, 制約プログラミングなどの問題も汎用な枠組み，困難な問題であることが示されていながらも，近年では比較的大規模な実用的問題でも利用されるようになってきている。このことを背景に，上に挙げた汎用モデルでプランニング問題を表現し，各モデルのソルバでプランを得るアプローチが研究されている。

先行研究としては，SAT のものとして SATPLAN, Mp, 数理計画のものとして optiplan, 制約プログラミングのものとして GP-CSP などが開発されていて，現在も引き続きより高速な手法が考案されて続けている。

モデルによるプランニング問題のアプローチの近年の成果として，Graphplan で初めて実装されたプランニンググラフを利用する方法がある。この手法では，与えられたプランニング問題からまずプランニンググラフを生成する。プランニンググラフは完全性を損なわない範囲で比較的大きく解空間を縮めることのできる問題の表現であり，このプランニンググラフ上の探索から解を発見する。

この手法は充足可能性モデルで提案され実装された後，その有効性が認められ，整数計画モデル，制約モデルにも持ち込まれている。

1.3 研究の目的

本研究はプランニング問題についてモデル表現とソルバを利用した方法によるアプローチについての研究である。プランニング問題は PSPACE 完全であることが知られている。(Bylanedr) この問題の解を得るためのアプローチとしてモデルを使ったアプローチが研究されている。このアプローチではソルバの性能向上がプ

ランニングシステムの性能に直結し，各モデルのソルバは日々進展している。しかしながら，近年の研究はモデルの中でも充足可能性モデルに関するものが多くを占めている。

この状況に対し，本研究では制約モデル，整数計画モデルでの近年のソルバの性能向上がそれぞれのプランニングシステムの性能向上にどのくらい影響を及ぼしているのかを再調査する必要があると感じた。また，特に制約モデルの近年の性能向上に大きな影響を与えている Global constraint について，それを効果的に織り込んだプランニングの定式化を示すことを目的としている。

1.4　本論文の構成

まず，プランニング問題とはどのようなものかを正確に表現するための用語の定義を行う。続いてプランニング問題を形式的に表現し，これを書き表すための形式的な言語 PDDL の説明を行う。その後，各モデルでプランニング問題の表現がどのようなものとなるかを考察し，最も素朴な SAT での表現を具体例を交えながら詳細に追うこととする。

2　プランニング問題

以下，プランニング問題の古典的な表現である古典的プランニング問題の定式化についての説明を行う。古典的プランニングとは' 状態が十分に観察可能であり，決定的であり，静的であり，離散的であり，有限である環境でのプランニング問題である。' [2] 十分に観察可能であるとは，プランニング問題の中で扱う命題に関してはその真偽が定まることである。決定的とはある状態に置いて行為を行うと至る状態が一意に定まることである。静的であるとはエージェントの行為の効果のみが環境を構成する命題の値を変化させることを述べる。離散的であるとは，扱うオブジェクトが非連続的であることを述べる。有限であるとは，命題，行為などのプランニングに関連するオブジェクトか高々有限個しか存在しないことを述べる。

また，ここで述べるもの以外にも，プランニングの表現としては多くのものが提案されていることを述べておく。

まず，世界のうちの個別の事象の状態を表現するような種々の命題というものが存在するとする。命題 P に対して，その否定を $\neg P$ と表現する。命題とその否定を合わせてリテラルと呼ぶ。また，前者を正のリテラル，後者を負のリテラルと呼ぶこともある。

P と $\neg P$ はある命題の成否と対応する変数で，同時には成り立たない。$\neg\neg P = P$ であるものとする。また，P または $\neg P$ であるものとする。(閉世界仮説)

ここで，現実の世界のうちどの事象を考慮の対象とすることで問題を十分に表現しうるか，という問題はフレーミングの問題として知られており，人工知能分野の古くから知られている難問のうちの一つで有ることを注意しておく。しかしながら，今，問題を定義するための命題の集合を定めたとすると，この命題集合の上でプランニング問題を定義することができる。

プランニング問題は以下の 4 つ組で定義される。I, G, A, P ここで，I は初期状態，G は目的状態，A は行為集合，P は命題集合である。

世界の状態 S とは，$S = (p, b) \mid p \in P, b$ は真偽値 であり，命題のすべての要素への値の割り当てを表現しているものとする。S の要素の書き換えを S[p']/b' と表すこととする。

$a = (Pre, Post)(a \in A, Pre \subseteq S, Post \subseteq S)$ 行為は上のように定義される。ここで，Pre は前提条件であり，この行為が実行される際に真となっていることを必要とする命題の集合である。一方，Post は行為の効

果であり，行為の実行後の命題の状態を表現している。真が割り当てられるべき命題，偽が割り当てられるべき命題をそれぞれ正の効果，負の効果と呼ぶ。

ここで，S に対して実行可能な行為 a とは，a の前提条件 Pre に対して $Pre \in S$ が，成立するようなもののことである。この行為を実行すると，世界の新たな状態 S' が得られる。$S' = \forall(p, b) \in PostS[p]/b$

また，初期状態 I は全ての状態変数への割り当ての組である。初期状態での全ての命題に値を割り当てることを要求する流儀もあるが，ここでは閉世界仮説を採用していることから，初期状態で正の値を割り当てられる命題の集合を S とする。$I \subseteq S$ すなわち，初期状態では I の要素に入っている命題には真が，入っていない要素には偽が割り当てられていることを要求する。

続いて，目的状態 G はプランニング問題のゴール，最終的に要求される状態の集合である。$G \subseteq S$ ここで，初期状態では集合 I に入っていない要素には偽が割り当てられることを要求していたが，目的状態では集合 G に入っていない状態に関してはなんの要求もしないことに注意する。すなわち，初期状態は状態集合の値の割り当てを一意に特定するが，目的状態では興味のある命題にのみ値の割り当てを要求する。言い換えると，初期状態は I から一意に定まるが，目的状態に関しては複数の状態への割り当てがそれを満たしうることがある。

プランニング問題の解，すなわちプランとは，初期状態を

3 モデル

以下，上述のように定義されたプランニング問題を他のモデルに変換することを考えていく。そのため，本研究で扱った他のモデルである充足可能性モデル，整数計画モデル，制約モデルの 3 つをまずは正確に定義する。

3.1 充足可能性問題

3.2 整数計画問題

線形計画問題は目的関数，変数集合，不等式制約集合から構成される。整数計画問題では，変数の定義域は離散的な値を取る。目的関数は変数集合内の変数の任意の関数である。不等式制約集合は変数集合内の任意の変数の一次結合を左辺，右辺を定数とする不等式の集合である。一般の整数計画問題では不等式制約として任意の不等式を許すこともあるが，高速に解を求める事ができる線形不等式制約が広く使われる。この研究でも，不等式制約としては線形不等式のみを認めた。

整数計画問題の全ての変数に対して，全ての不等式制約を満たすような値の割り当てを整数計画問題の実行可能解という。実行可能解の集合を実行可能領域という。整数計画問題を解くとは，実行可能領域内に含まれる変数の割り当てのうち，目的関数を最大化するような変数の割り当てを得ることをいう。

ここで，目的関数 $f(x)$ の最大化は $-f(x)$ の最小化と同値であること，任意の等式制約を不等式制約に変換できること，最小値，最大値，絶対値といったものを含む不等式の一部を線形不等式に変形できることなどが知られていることを注意しておく。線形計画問題の変形についてはなんちゃら先生のホームページ [?] が詳しい。

この変数への割り当てを整数計画問題の最適解といい，この時得られる目的関数の値を最適値という。また，整数計画問題において単に解，といった場合，実行可能解ではなく最適解を表すことが多い。

線数計画問題と充足可能性問題の応用上の大きな違いとして，目的関数の存在がある。前者にはモデルに自

然に解の評価値が与えられており，変数の値の任意の関数を目的関数として利用できることから，解の選好を自然に扱うことが出来る。生成されるプランの長さを最小化することは充足可能性問題においても行為に対応する命題の個数を最小化する，という形でモデル内で表現可能だが，実際の応用では資源の最小化，エネルギーの最小化，体積の最小化など様々な目的関数を用いて解の良さを定量化し，これをモデルの中で最適化出来ることは数理計画モデルの長所である。

3.3 制約問題

4 モデルの変換

プランニング問題を先に述べた 3 つのモデルに変換することができる。

制約モデルは，その制約として論理制約，不等式制約を利用することができるので，他の 2 つのモデルで表現することのできる問題を表現することはできる。

また，任意の論理式を論理式として同値な連言標準系に変換できることはよく知られた事実である。ここで，その連言標準系の各節内の変数の真偽値を 1,0 値として持つ変数 x_l を考え，全ての節 L_i に対して $\sum_{l \in L} x_l \geq 1$ という制約を加えることで任意の充足可能性モデルの問題は整数計画モデルの中で表現可能である。

以上に述べたことから，3 つのモデルのうち，充足可能性モデルでプランニング問題を表現することが出来たならば，整数計画モデル，制約モデルでもプランニング問題の表現が得られることがわかる。

よって，以下ではまず，[Kautz and Selman 92] で示された SATPLAN として知られるプランニング問題の制約充足モデルの表現方法について解説する。続いて，素朴な問題エンコーディングに加えて，ソルバがより高速に解を求めるための工夫として大きな効果を発揮するプランニンググラフについて説明する。

さらに，今回の実験で使用した optiplan で採用されているプランニング問題のエンコーディング方法 state change model について説明する。

4.1 SAT によるプランニング問題の表現

プランニング問題を SAT で表現するにあたって，SAT 命題に状態を対応させる必要がある。SAT 命題と状態を一対一対応させると時間の表現を含まなくなってしまうため，あるステップにおいてある状態に対応する命題が真であるということを SAT 命題を一つ使って表現する。すなわち，各ステップにおいて命題の真偽値を保持する SAT 命題を定義する。

ここで問題となるのは，事前にはプランの存在するステップの深さがわかっていないことである。そのため，まずは最大ステップ数を 1 として論理式を構成し，その論理式からプランが得られるならばそこで終了，そうでないならば最大ステップ数を増やして論理式を作成し，プランが得られるかを検証，この手順を繰り返すこととする。

また，同様に，あるステップで行為が行われるかどうかに対応する SAT 命題も最大ステップ数以下の全てのステップについて定義する。

プランニング問題を SAT に変換するには以下の条件を SAT で表現すれば必要かつ十分である。初期状態終了状態次状態公理前提条件公理排他行為公理

ここで，初期状態，終了状態は t=0, t=T での命題変数が真となっていることを要求する。次状態公理はある命題に対して，その命題が真となっているならば，直前のステップでその命題を真とする行為が実行される

こと，あるいは直前のステップでその命題は真でありかつその命題を偽とするような行為が実行されないことを要求する。前提条件公理は，ある行為を実行するならば，その直前で行為が前提条件とする命題の割り当てが満たされていることを要求する。排他行為公理は，あるステップではひとつの行為までしか実行されないことを要求する。

以上の公理群を表現する命題を節とし，これらの論理積からなる論理式の真偽値はあるステップ数までのながさの直列プランが存在することと一対一対応を持つ。

4.2 プランニンググラフ

上に述べた定式化の問題点として，不要な命題が多く存在していることがあげられる。例えば，初期状態において偽である命題を前提条件として含む行為は t=0 で決して実行されることは無いため不要である。

問題の構造から効率的にこれらのような不要な命題を除くことを可能にする工夫として，プランニンググラフを利用することが挙げられる。プランニンググラフの構成自体の実行時間は多項式オーダーで行うことができ，定式化の完全性を損なわない範囲で多くの不要な命題を除くことができるといった有効性から，この手法は充足可能性モデルにとどまらず，整数計画モデル (optiplan) や制約モデル (GP-CSP) といった他のモデルにも応用され，広く使われている。

プランニンググラフは命題から余分なものを除くかつ必要なものを除かないことから，プランニンググラフのなかで目的命題が全て活性化されるステップ T_min はプランの存在するステップ数の下限となる。この性質を利用すると，プランニングの定式化は $T = T_min$ から論理式の構成を開始することができる。

ここで，プランニンググラフによって活性化済みの命題の数は単調に増加すること，また，元のプランニング問題の命題の数は有限であることから，プランニンググラフの展開は有限回でレベルオフすることがわかる。一方，レベルオフして，かつゴール命題の全てが活性化されている場合にはその時点から有限回の展開によって解が得られることが示されている。（要出典）

4.3 state change model

本研究で扱ったプランナ optiplan では state change model という定式化を利用してプランニング問題を整数計画にエンコードしている。

state change model ではプランニング問題の命題を直接的に論理変数とせず，それらの状態遷移に対応する変数を使って間接的に命題を表現している。

state change model のうえで初期状態，終了状態，次状態公理，前提条件経理，無矛盾制約を満たす制約を記述すると以下のようになる。

5 実験

国際会議 hoge と共に行われるプランニングシステムのコンテスト International Planning Competition の過去のベンチマーク問題集 (fastdownward システムに付属しているもの) のうち，本研究で実装したプランナの対象とする問題である全てのドメイン (表に一覧した) に対して本研究で実装したプランナと比較対象のプランナ群 (表 poyo) を実行した。

ipc98: gripper, logistics98, blocks, grid, mprime, mystery, movie ipc00: miconic ipc02: depot, driverslog, zenotravel, satellite, rovers, freecell ipc04: airport, psr-small, pipesworld-tankage ipc06: tpp, storage, pathways, srucks-strips ipc08: elevators-sat08-strips, elevators-opt08-strips, parcprinter-08-strips

これらの問題集合はプランニング問題の標準的な形式である Planning Problem Definition Langage(PDDL) にしたがって記述されたドメインファイルと問題ファイルの組で与えられる。

プランナはそれらのファイルを入力とし，実行時間の制限 (hoge 分) 以内に実行可能なプランを出力出来たものをその問題を解けた，とみなし，その実行時間を記録した。実行時間の計測は入力ファイルからモデルを生成する時間と，生成したモデルを元にソルバが求解を行う時間を分けて計測した。また，出力されたプランの正しさの検証には VAL というツールを利用した。

また，実行時に生成される各ソルバの入力サイズを (algorithm) で圧縮したもののファイルサイズを比較した。この比較から，問題を各モデルに変換したソルバ入力ファイルの情報量の大きさを近似的に見積もることかできるであろう。

gurobi のバージョン, SATPLAN2006 の linux binary, Gecode のバージョン, (Mp?,) を利用し，実験はなんちゃらの ubuntu14.xx 上で行った。

5.1 optiplan

5.2 SATPLAN2006

5.3 結果

5.4 考察

6 制約モデル

一定の成果を挙げた制約モデルでのプランナの実装として GP-CSP がある。これは GRAPHPLAN の成果を取り込んだプランニンググラフ解析を行う制約モデルプランナの実装であり，システムのソルバとしては””を利用している。制約モデル，整数計画モデルの成果と比べ，制約モデルのプランナは International Planning Competition に参加した実績がない。各モデルの優劣に対して決定的な理論付けがないままに制約モデルの研究が進展していない近年の状況に対して問題意識を持ち，本研究では SAT，数理計画モデルで得られた知見を利用した制約モデルプランなの実装を行い，その性能を測定，比較した。制約モデルのソルバとしては近年の制約プログラミングソルバのコンテスト Minizinc Conpe で優秀な実績を収めている Gecode を利用した。

6.1 Gecode

Gecode はこの実装として一方，Grobal Constraint という

6.2 Grobal Constraint

6.3 実験

6.4 結果

6.5 考察

7 結論

8 謝辞

右も左もわからない私に日々教育的視点からためになるアドバイス，課題を示してくださった福永先生には最も感謝しています。また，学際科学科１期生の諸君，特に学生控室で日々議論に付き合ってくれた陣内佑くん，僕にプログラミングの手引を与えてくれ，多くを共に学ぶことのできた諸君には非常に感謝しています。

索引

参考文献

[1] Henry Kautz and Bart Selman. The role of domain-specific knowledge in the planning as satisfiability framework. *AAAI*, 1998.

[2] Russel and Norvig. *Modern Approach to Artificial Intelligence*.