

物理法則に基づいた定性推論†

大木 優^{††} 藤井裕一^{††} 古川康一^{††}

従来のエキスパート・システムは経験的な知識を使っており、深い知識を使っていない。そのため、問題を解くための経験的な知識をエキスパート・システムが持っていない場合には、エキスパート・システムはその問題を全く解くことができなくなってしまう。一方、深い知識を使った推論の1つに定性推論がある。この論文では物理法則に対応した知識を使って、①現在の時刻での物の関係の把握、②次の時刻の状態の推測、を行う定性推論システム Qupras (Qualitative physical reasoning system) について述べる。Qupras は、物理の教科書に現れるような物理法則に対応する知識以外に、物理の世界を構成している物の知識を使って推論を行う。Qupras は、初期の事実が与えられると、系を記述する連立微分方程式を作りながら、系を構成している物を見つけ、物と物で成り立っている物理法則を見つける。現在の時刻での物の関係がわかったならば、変化している物理量を見つけ、その値の次の時刻での値を推測する。Qupras の推論は定性推論に基づいているが、物理法則に対応する式や物理量は定性的以外に定量的にも取り扱われる。これは、式や物理量の値が定量的にわかっている場合には、定量的に取り扱った方が推論のあいまいさが減少するからである。

1. はじめに

従来のエキスパート・システムでは経験的な知識を使って故障診断や設計などが行われてきた。しかし、経験的な知識だけを使う方法では、いくつかの問題点が指摘されている。その1つは、問題を解くための経験的な知識をエキスパート・システムが持っていない場合には、エキスパート・システムはその問題を全く解くことができないことである。また、エキスパート・システムは解くべき問題領域をその領域の汎用的な基本的知識レベルで理解しているわけではないので、より知的な問題解決を行わせるには限界がある。これに対して、深い知識を使った推論(深い推論)が提唱されている¹⁾。深い知識とは、ある領域で、人間が問題解決に使う多くの経験的な知識を導いたり、説明したりできる基本的な知識である。これまでの多くのエキスパート・システムが対象としてきた工学の領域における深い知識の1つは、物理の教科書レベルの物理法則であると考えられる。

一方、深い推論を実現する方法の1つとして定性推論が提唱されており²⁾⁻⁸⁾、多くの試みがなされている。しかし、QPT (Qualitative Process Theory)²⁾を除いて多くの定性推論システムでは、対象とする物理の系を記述した連立定性方程式が前もって与えられており、深い知識を使って、系を記述する連立定性方程式を作る能力を持っていない。QPT は、物理法則より

も、変化している事象を表現するプロセス (process) と静的な事象を表現するインディビジュアル・ビュー (individual view) とを基本知識としている。そして、QPT はアクティブなプロセスとインディビジュアル・ビューを同定しながら、系の連立定性方程式を作り、系の状態や状態の遷移を推論する。しかし、QPT の枠組みは、次の理由から物理法則レベルの知識を基本的な知識とするには適当でないと考えられる。

(1) QPT は、物理法則を2つの表現で表さなくてはならない。

QPT ではプロセスとインディビジュアル・ビューを基本知識としているため、QPT の枠組みの中で物理法則を基本的な知識として表そうとする場合、変化に関する物理法則をプロセスとして、静的な現象を表す物理法則をインディビジュアル・ビューとして表す必要がある。そのため、ある物理法則を QPT で表そうとする場合、どちらの表現を使うか決める必要がある。

(2) 物理法則を定性化する必要がある。

教科書に現れる物理法則の式は一般的に定量的に記述されているが、QPT では、物理法則に対応する式を定性化する必要があり、定量的な式をそのまま使うことはできない。

(3) あらかじめ、物理量が変化すべき値の半順序関係、量空間を宣言しておく必要がある。

ある物理量が変化すべき値の半順序関係を前もって宣言する必要があるのは、状態遷移を推論するシステムとしては適当ではない。さらに、複数の物理量が変化してある同じ値を取るが、どこでそのようになる

† Qualitative Reasoning Based on Physical Laws by MASARU OHKI, YUICHI FUJII and KOICHI FURUKAWA (Institute for New Generation Computer Technology).

†† (財)新世代コンピュータ技術開発機構

か、前もってわからないような場合には、QPTの量空間では表すことができない。

(4) ある物理量が変化している時に成り立つような物理法則を表現できない。

QPTでは、アクティブなプロセスやインディビジュアル・ビューを求めた後、物理量の変化量を計算しているため、ある物理量が変化している時に成り立つような物理法則を表現することができない。

この論文では、

- (1) 物理法則に相当する知識を統一的に扱う、
- (2) 教科書に現れるような物理法則の式を定性化せずに、そのまま記述できるようにし、かつ、物理量として定性的な扱い以外にも定量的扱いを可能にする、
- (3) 量空間のような宣言が不要である、
- (4) 物理量が変化している時に成り立つような法則の記述を可能にする、

定性推論システム Qupras (Qualitative physical reasoning system) について述べる。このシステムは、物理法則レベルの知識を基本知識にして、系を記述する連立微分方程式を作りながら、

- (1) 物理システムを構成するオブジェクト(物)間の関係、
 - (2) 次の時刻に系全体として何が起こるかの状態の遷移、
- を推測する。

本論文では、第2章でQuprasの構成、知識表現そして推論メカニズムについて述べ、第3章で簡単な物理系に対してQuprasを適用した例について述べる。

2. Qupras

2.1 Qupras の概要

Quprasは、図1に示すように大きく分けて知識表現支援と推論システムからなる。知識表現支援は、オブジェクト(物)や物理に関する知識表現あるいは初期状態の定義を推論システムが使いやすいように中間形式に変換する。推論システムは、変換された初期状態を基にして、オブジェクトと物理の知識を使って、オブジェクト間にどんな物理法則が成り立っているか、また次に何が起こるかを推論する。

2.2 Qupras の知識表現

Quprasは次の3つを表現することができる。

- ①オブジェクト(物)
- ②物理法則

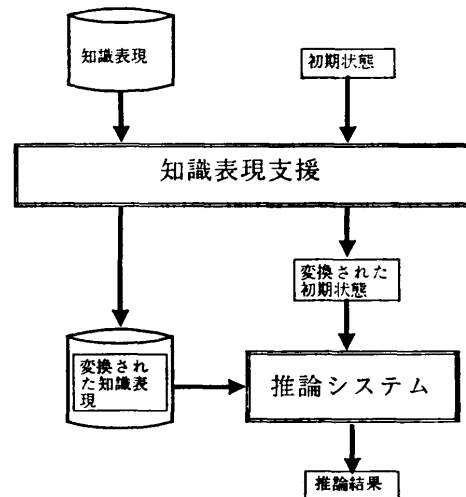


図1 Quprasの概要
Fig. 1 Outline of Qupras.

オブジェクト

- ①属性
- ②部品
- ③存在条件
- ④関係式

図2 オブジェクトの表現
Fig. 2 Representation of objects.

③初期状態

ここで、初期状態とは、系の最初の状態を定義するものである。以下、この3つについて順に説明する。

2.2.1 オブジェクトの表現

オブジェクト(物)の定義はオブジェクトのクラスを定義するものであり、その表現は図2に示すように、オブジェクトの属性および部品、存在条件、関係式からなる。属性の定義ではオブジェクトの属性を表す名前を指定する。部品は、オブジェクトが部品からできている場合にその部品を定義する。存在条件は、オブジェクトが存在するための条件を表しており、存在条件が満たされた場合、オブジェクトはアクティブとなり、そのオブジェクトが存在し、そのオブジェクトに関する関係式が成り立っていると見なされる。関係式はオブジェクトがアクティブである時に成り立つオブジェクトの属性の物理量に関する関係式である。図3にボイラ(boiler)のクラスを定義した例を示す。“object”はオブジェクトの定義を行う述語で、“boiler”はオブジェクトのクラス名である。“:”の次の変数Boilerはこのオブジェクトを示すために使われる変数である。すなわち、図3の定義はボイラ(boiler)のクラスを定義したもので、定義内でボイラ自身を参

```

object boiler:Boiler
  parts_of
    container - container ;
    heat_source - heat_source ;
  relations
    on(container!Boiler,heat_source!Boiler) ;
    melting_point@container!Boiler < temperature@heat_source!Boiler ;
end.

```

図3 ボイラの定義
Fig. 3 Definition of boiler.

照する時は Boiler という変数を使用する。“part_of”はボイラを構成するための部品を示している。この定義は、ボイラはコンテナ (container) と熱源 (heat_source) からできていることを示している。最初の“container”は部品名を示し、2番目の“container”は部品名 container で示された部品がコンテナ (container) のクラスのものであることを示している。この“boiler”の定義では存在条件がないため、ボイラが使われることが初期状態の中で指定されたならば、boiler は無条件で存在する。存在条件の必要なオブジェクトの例としては水やコンテナがある。“relations”以降はオブジェクトの属性に関する関係式が定義されている。最初関係式はボイラの部品であるコンテナ (container) は、ボイラのもう1つの部品である熱源 (heat_source) の上にあることを示している。2番目の関係式は、このボイラのクラスでは、コンテナの融点は熱源の温度より低いことを示している。次に関係式や条件のシンタックスについて述べる。

図3の例にもあるように、Qupras では特別な記法をいくつか使用する。“<部品名>!<変数>”は名前が<部品名>である部品を示す。ここで<変数>はその部品から構成される複合オブジェクトを示す。“<属性>@<オブジェクト>”は<オブジェクト>の属性の物理量を示す変数である。<オブジェクト>はオブジェクトを示す変数でも部品でもよい。図3の中で“melting_point@container!Boiler”はボイラの部品のコンテナの属性である融点 (melting_point) を表す変数である。その他、ddt(<変数>) は、<変数>が示す物理量の時間微分を表すために使われる。また、“coincidence(<変数1>, <変数2>)”は<変数1>と<変数2>を同一に見なすことを示すために使われる。すなわち、<変数1>がある値を取ったならば、<変数2>も同時にその値を取ることを意味している。

関係式の定義では上記の記法以外に物理量の関係を示す次の関係子を使う。

- (1) = 左辺と右辺の値が等しい (等号)。
- (2) :=: 左辺と右辺の符号が同じである。
- (3) <> 左辺と右辺の値が等しくない。
- (4) <:>: 左辺と右辺の符号が異なる。
- (5) >, >=, <, =< 不等号。

(2)と(4)は物理量の関係が定性的にしか判明していない場合に使うものである。関係式では右辺に四則演算を含む数式を書くことができるが、条件には、右辺に物理量を示す変数か、または定数しか書くことができない。また関係式と条件では上記の関係以外に、基本式を書くことができる。基本式は、属性の物理量との関係ではないような関係や事実を表すために用いる。図3の例の最初関係式は、量との関係ではなく、位置としての関係を示している基本式である。

関係式や物理量の取り扱いに関して、Qupras では、多くの定性推論システムと異なり、数式を定性的以外に定量的に記述することが可能であり、物理量も定性的以外に定量的に取り扱うことができる。このようにする理由は次の2つである。

(1) 物理の教科書などにある物理法則の多くは定量的に記述されており、定量的な記述が可能であれば、定性的な記述に変換せずにそのまま使うことができる。

(2) 関係式や物理量の定量的な値や記述がわかっているにもかかわらず、定性的な表現に変換することは、情報を捨てていることになり、推論のあいまいさを増やす可能性がある。例えば2つの量 A, B が定量的に 10 と 5 とそれぞれわかっている場合、次の式を定量的に評価すると、

$$C = A - B$$

C の値は定量的に 5 とわかり、定性的には正であることがわかる。しかし、多くの定性推論システムが行っているように、上の式を定性的に評価してしまうと、 A と B はともに正とわかるが、 C の定性的な値は正か負か 0 かわからなくなってしまい、 C の定性的な値として正、負、0 の 3 つの場合を仮定しないと推論を進めることができなくなる。しかし、先のように定量的に評価すると、 C の値は 5 で、定性的には正であることが一意的に決められ、推論のあいまいさがなくなる。

2.2.2 物理法則の表現

物理法則の表現を図4に示す。物理法則の表現はオブジェクトおよび適用条件、関係式からなる。オブジェクトには、物理法則が適用されるためにアクティブでなくてはならないオブジェクトを指定する。適用条件はオブジェクトの定義の存在条件に対応するものであり、物理法則を適用するために必要な条件に対応する。関係式はオブジェクト間の属性などの関係を表したもので、物理法則の式そのものに対応する。適用条件が満足され、必要なオブジェクトがアクティブであれば、物理法則はアクティブとなり、指定されたオブジェクト間に関係式が成り立っていると見なされる。厳密に言うならば、ここでの物理法則は、本来の物理法則と異なり、物理法則をどのような時に使うかを示した適用条件を含めたものである。

図5に物理法則の定義の例を示す。この例は熱移動の物理を表している。“physics”は物理法則の定義を行うための述語である。“heat_flow”はこの物理法則の名前である。“objects”の後には、2つの必要なオブジェクトが記述されている。“-”の前の変数（大文字で始まる）はオブジェクトを示すために使われる変数を示しており、“-”の後にはオブジェクトのクラスを示している。この例では、アクティブである必要なオブジェクトは“heat_source”（熱源）と“container”（コンテナ）のクラスの2つのオブジェクトである。しかし、熱移動の物理法則は、熱源とコンテナの間だけで成り立つものではなく、より一般的な物でも成り

- 物理法則
- ①オブジェクト
 - ②適用条件
 - ③関係式

図4 物理法則の表現

Fig. 4 Description of physical laws.

```
physics heat_flow
objects
  Heat_source - heat_source ;
  Container - container ;
conditions
  on(Container,Heat_source) ;
  temperature@Heat_source <> temperature@Container ;
relations
  ddt(heat@Container) := temperature@Heat_source -
                           temperature@Container ;
end.
```

図5 熱移動の定義

Fig. 5 Definition of heat flow.

立つものである。物理法則をより一般的に表現するためには、オブジェクトの定義を階層的に記述し、物理法則の定義に必要なオブジェクトのクラスとしてより上位のオブジェクトのクラスを宣言することにより可能となる。しかし、Quprasではオブジェクトの定義を階層的に記述できないため、物理法則を一般的に表現することはできない。“conditions”に続く記述はこの物理法則をアクティブにするための適用条件が示されている。“on(Container, Heat_source)”はコンテナが熱源の上にあるならばという条件を示しており、“temperature@Heat_source < > temperature@Container”は熱源の温度がコンテナの温度と等しくないならばという条件を示している。この2つの条件が満たされれば、この物理法則はアクティブになり、“relations”の後に記述されている関係式が成り立っていると見なされる。この例の関係式には、コンテナの熱量の時間微分の符号は熱源の温度とコンテナの温度の差の符号と同じであることが記述されている。Quprasでは関係式は定性的以外にも定量的にも記述することを可能にしているのも、もしコンテナの熱量の時間微分が定量的にわかるならば、例えば、次のように定量的に記述できる。

```
ddt(heat@container)=
  0.5*(temperature@Heat_source-
        temperature@Container)
```

2.2.3 初期状態の表現

初期状態は、Quprasが推論を行う最初の状態を記述するものであり、存在する可能性のあるオブジェクト、および最初に判明している事実を宣言する。図6に初期状態の例を示す。“initial_state”は初期状態を宣言するための述語である。この例は図7に示すようにボイラで水を熱する最初の状態を定義したものである。このボイラはコンテナと熱源から成り、コンテナの中に水が入っている。“objects”に続く記述は、物理法則の場合と同じで、“boiler”（ボイラ）というクラスのオブジェクト Boiler と“water”（水）というクラスのオブジェクト Water が使われる可能性があることを示している。ただし、どのオブジェクトがアクティブでどの物理法則がアクティブであるかは示されていない。“facts”に続く記述には、最初に判明している事実、すなわち、オブジェクトの属性の値に関する関係、が示されている。例えば“temperature@container!Boiler=10”はボイラの部品であるコンテナの温度が10度であることを示している。コンテ

```

initial_state initial
objects
  Boiler - boiler ;
  Water - water ;
facts
  temperature@container!Boiler = 10 ;
  in(Water,container!Boiler) ;
  content@Water > 0 ;
  temperature@Water = 10 ;
  boiling_point@Water = 100 ;
  boiling_point@Water < melting_point@container!Boiler;
  mass@container!Boiler > 0 ;
end.

```

図 6 初期状態の定義
Fig. 6 Definition of initial state.

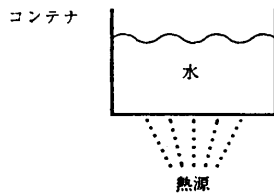


図 7 ボイラ
Fig. 7 Boiler.

ナの中に水が入っていることは、コンテナの中に水 (Water) が入っていることを示す “in(Water, container!Boiler)” と水の量が正であることを示す “content@Water>0” によって示されている。

2.3 Qupras の推論

Qupras の推論システムは、図 8 に示すように、大きく分けて、定性推論を行う部分 (定性推論部) とオブジェクトの存在条件や物理法則の適用条件の評価 (条件評価部) を行う部分からなる。定性推論部は、2つの推論からなる。1つは、ある時刻 (または時間区間) の系の状態を見つける状態内解析で、もう1つは、時間的に変化する量を見つけ、その量が次に取りうる値を見つける限界解析である。条件評価部は、定性推論部とは独立で、わかっている事実や関係式に基

- (1) 定性推論
 - ① 状態内解析
ある時刻の系の状態を見つける。
 - ② 限界解析
変化する量を見つけ、その量が次に取りうる値を推測する。
- (2) 条件評価
関係式を使って、2つの量の大小関係を定性的および定量的に評価する。

図 8 Qupras の推論
Fig. 8 Reasoning of Qupras.

づいて、ある2つの量の大小関係を調べる。条件評価部は、存在条件や適用条件が成り立っているかどうか調べるために、状態内解析や限界解析の処理中に呼び出される。以下、定性推論部と条件評価部の処理について述べる。

2.3.1 定性推論部

定性推論部は状態内解析と限界解析とからなっている。状態内解析は QPT の活性状況の決定 (determining activity) と変化の決定 (determining changes) に対応しており、限界解析は QPT のそれに対応しているが、いくつかの点で異なっている。以下、Qupras の状態内解析と限界解析について述べる。

まず、Qupras の状態内解析と QPT の活性状況の決定および変化の決定の違いについて述べる。QPT では、アクティブなプロセスやインディビジュアル・ビューをすべて求めた後に、物理量の変化について調べる。これは、QPT ではある物理量はいろいろなプロセスやインディビジュアル・ビューによって影響を受けると考え、それらからの影響の合計がその物理量への正味の影響と考えているからである。一方、Qupras では、ある物理量に複数の影響があるように見えても、その物理量への正味の影響はある物理法則からわかるはずであると考え、またそのような物理法則があると考え。そのため、Qupras では、物理量の正味の変化は何らかの物理法則によって求めることができ、その物理量の変化はその物理法則を見つけると同時に求めることができる。さらに、物理量の変化をアクティブな物理法則を求める処理と並行して求めることができるため、Qupras ではある物理量が変化していることが条件であるような物理法則を記述することができる。そのような物理法則の例として、物体の熱量が変化しているために温度が変化することを表す温度変化の法則が考えられる。

Qupras の状態内解析の処理を以下に示す。

(1) 事実 (初期状態の定義として与えられる。) や成り立っている関係式 (初期状態の定義によって与えられたり、アクティブなオブジェクトや物理法則から求められる。) を使ってアクティブでないオブジェクトの中からその存在条件を満足するオブジェクトを見つける。

(2) そのようなオブジェクトが見つかったならば、そのオブジェクトをアクティブにし、その関係式を成り立っているものとする。

(3) 次に、事実や今までに成り立っている関係式

を使って、アクティブでない物理法則の中からその適用条件を満足する物理法則を見つける。

(4) そのような物理法則があったならば、その物理法則をアクティブにし、その関係式を成り立っているものとする。

(5) (1)から(4)の処理を行って、アクティブになるオブジェクトや物理法則がなくなるまで(1)から(4)の処理を繰り返す。もし、どのオブジェクトや物理法則もアクティブにならないならば終了する。

(1)から(5)を繰り返している間に、アクティブなオブジェクトや物理法則は増え、成り立っているとわかっている関係式も増える。(5)の処理が終了した段階では、アクティブになるべきオブジェクトや物理法則はアクティブになり、わかるべき関係式はすべてわかっていることになる。そして、この関係式は、Kuipersの定性シミュレーションを行うために定性シミュレータに与える連立微分方程式に相当する⁴⁾。このように、Quprasは状態内解析を行いながら系を記述する連立微分方程式を求めます。

Quprasの限界解析は、QPTの限界解析と似ているが、変化している物理量の次を取るべき値を求める方法が異なる。QPTでは、変化している物理量の次を取るべき値を求めるために、あらかじめ与えられた量空間(quantity space)を用いているが、Quprasでは、そのような量空間は、あらかじめ与えられておらず、実行時に量空間を求める。QPTでは、次の状態である物理量を取りうる値は、あらかじめ与えられている量空間における現在の値の両隣りである。その物理量が増えていけば、次のその物理量を取りうる値は量空間での半順序関係で増加方向の隣りの値になる。QPTの量空間は、問題を解く前のある物理量がどのような値を取りうるかと与えているものであるが、一般的には、量空間は前もって与えることができない。例えば、衝突のような現象が起こるか、起こらないか、わからないような場合には、量空間を前もって与えておくことはできない。一方、Quprasでは、限界解析を行う際に、動的に量空間に相当するものを作り、変化している物理量の次に取りうる値を推測する。そのため、Quprasでは、前もって量空間を予測できなかったような現象でも推測することができる。

Quprasの限界解析の処理を以下に述べる。

(1) 時間的に変化している物理量を見つける。

(2) その物理量の値を変化する方向に変更することによって、アクティブでないオブジェクトや物理法

則がアクティブになる可能性のある値と今までアクティブなオブジェクトや物理法則がアクティブでなくなる可能性の値を求める。

(3) (2)で求めた値のうち最も現在の値に近い値を求める。

(4) 変化している物理量の値を(3)で求めた値にして、事実の中でその物理量がその値を取ることに矛盾するものを取り除く。

(5) (4)で矛盾するものを取り除いた事実と変更した物理量の値を新しい事実と見なして、次の状態内解析を行う。

2.3.2 条件評価部

条件評価部は、状態内解析でアクティブなオブジェクトや物理法則を求める際に条件を評価するため呼び出されたり、限界解析において、アクティブなオブジェクトや物理法則がアクティブでなくなる可能性のある値を求める際に呼び出される。条件評価部の仕事は、連立不等式が与えられた時にある量と別の量の大小関係を評価することである。定性推論部からは、条件評価部に“ $X > Y$ は正しいか”というような形で問い合わせがくる。条件評価部は事実や成り立っている関係式を基に定量的あるいは定性的に問い合わせを評価する。条件評価部のアルゴリズムを以下に示す。

(1) 問い合わせの両辺の変数の値を個別に求める。

(2) もし、両辺の値や符号がわかり、それを基にして問い合わせが評価できたならば終了する。

(3) (2)で評価できなかったならば、不等式の公理などを使って論理的に評価する。

たとえば、次のような関係式

$$X = 5 + C$$

$$Y = A - B$$

$$A < B$$

$$C = 5$$

を使って“ $X > Y$ ”を評価する例について考えてみる。条件評価部は、“ X ”と“ Y ”の値または符号を独立に求める。“ X ”は10と簡単に求めることができるが、“ Y ”は、直接、値や符号を求めることができず、“ $A < B$ ”という関係を使って符号が負であることがわかる。その結果、“ X ”は10で、“ Y ”は負であるため、“ $X > Y$ ”は正しいとわかる。現在のQuprasの条件評価部には、簡単なアルゴリズムしか持っていない、複雑な関係式の場合は評価できないことがある。現在、条件評価部の仕事に相当する優れたアルゴリズムがいくつか報告され^{9),10)}、Quprasの条件評価部はそれらと

置き換えることが可能である。

3. 例

図6で示したボイラで水を熱する初期状態を例にして、Quprasの実行例について説明する。この初期状態に示されている存在する可能性のオブジェクトは部品も含めて、ボイラおよびコンテナ、熱源、水である。その1つのコンテナの定義を図9に示す。この定義には存在条件が記述されており、これはコンテナの温度がコンテナの融点より低い場合だけコンテナが存在できることを示している。すなわち、コンテナの温度がコンテナの融点と同じか高くなるとコンテナは壊れてしまう。

ボイラで水を熱する状況を推論するために、6つの物理法則が使われる。

(1) 熱移動

これは既に図5に示した。

(2) 沸騰

これは、コンテナの液体の沸騰を表した物理法則である。実際の定義を図10に示す。この物理法則に必要なオブジェクトはコンテナ (container) と水 (water) である。この物理法則には、コンテナの中に水が入っていて、水の量が正で水の温度が沸点であ

```
object container:Container
  attributes
    melting_point ;
    temperature ;
    mass ;
  conditions
    temperature@Container < melting_point@Container ;
end.
```

図9 コンテナの定義

Fig. 9 Definition of container.

```
physics boiling
  objects
    Container - container ;
    Water - water ;
  conditions
    in(Water,Container) ;
    content@Water > 0 ;
    temperature@Water = boiling_point@Water ;
  relations
    ddt(content@Water) < 0 ;
    ddt(temperature@Water) = 0 ;
end.
```

図10 沸騰の定義

Fig. 10 Definition of boiling.

```
physics change_temperature_containg_liquid
  objects
    Container - container ;
    Water - water ;
  conditions
    in(Water,Container) ;
    content@Water > 0 ;
    ddt(heat@Container) <> 0 ;
    temperature@Water <> boiling_point@Water ;
  relations
    ddt(temperature@Water) := ddt(heat@Container) ;
end.
```

図11 液体が入っているコンテナの温度変化の定義

Fig. 11 Definition of temperature changing of container including water.

ば、水の量は減少し、水の温度は変化しないことを示している。

(3) 融解

これは、コンテナの融解を表した物理法則である。

(4) 液体が入っているコンテナの温度変化

この物理法則は、コンテナの熱容量が変化することは、液体の温度がそれに従って変化することを示している。実際の定義を図11に示す。これはコンテナの中に水が入っていて、コンテナの熱容量が変化していて、水の温度が沸点でなければ、水の温度の変化はコンテナの熱容量の変化と符号が同じになることを示している。

(5) 空のコンテナの温度変化

この物理法則は、コンテナの中に何も入っていない場合、コンテナの熱容量が変化することは、コンテナの温度が上昇することに対応していることを示している。

(6) 保持

これは、コンテナが物を保持することの物理法則である。実際の定義を図12に示す。これは、コンテナ

```
physics contain
  objects
    Container - container ;
    Water - water ;
  conditions
    in(Water,Container) ;
    content@Water > 0 ;
  relations
    coincidence(temperature@Container,temperature@Water) ;
end.
```

図12 保持の定義

Fig. 12 Definition of containing.

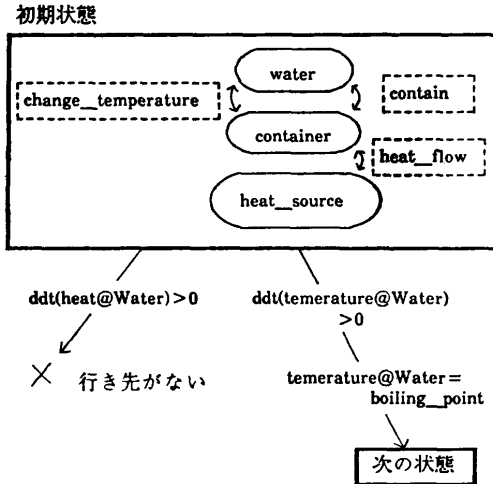


図 13 ボイラの状態遷移
Fig. 13 State transition of boiler.

の中に水が入っていれば、コンテナの温度と水の温度は同一のものとして扱うことを示している。すなわち、コンテナの中の水の温度はコンテナの温度と同じになり、かつ同じように変化することを意味している。

次に、Qupras の実行結果について説明する。Qupras は、まず、初期状態の定義を使って最初の時刻のアクティブなオブジェクトやその間に成り立つ物理法則を見つける。Qupras によって推論された最初の時刻の状態とその状態からの遷移を図 13 に示す。最初の時刻の状態には、Qupras は、4つのアクティブなオブジェクトがあることを見つける。そのうちのボイラを除いた3つのオブジェクトが図 13 に円で囲まれ示されている。また、Qupras は点線で示された3つの物理法則がそれらのオブジェクトの間に成り立っていることを見つける。次に、Qupras は時間的に変化している物理量を調べる。この状態からは、水の温度 (temperature@Water) とコンテナの熱容量 (heat@Container) が時間的に変化する物理量であることがわかるが、コンテナの熱容量を増加させても、アクティブでない物理法則がアクティブになったり、アクティブな物理法則がアクティブでなくなったりしないため、コンテナの熱容量の変化から新しい状態を予測することができない。一方、水の温度の次の取りうる値が水の沸点であることがわかる。これは、水の温度を 10 度から増加させ、沸点に達すると沸騰に関する物理法則がアクティブになる可能性があるためである。そこで、Qupras は水の温度およびコンテナの温度を沸点に変更して、次の状態を推測する。コンテナの温度を水の温度と一緒に変化させるのは、図 12

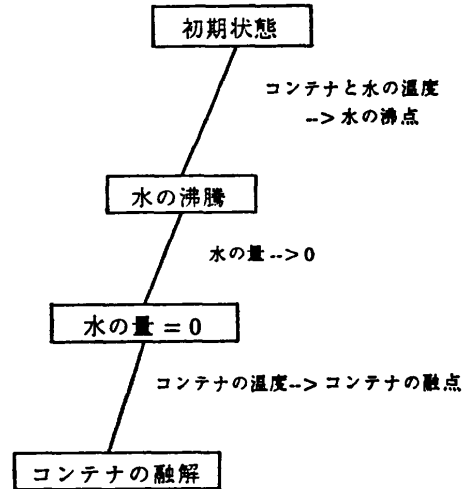


図 14 推論結果
Fig. 14 Result of reasoning.

の保持の物理法則で同一であると宣言されているからである。最後に Qupras は図 14 で表すような状態遷移を出力して終了する。この図は最初の状態で、水とコンテナの温度が沸点に変化し、その後、水が沸騰する状態になり、その状態で水の量が0になることを推測する。水の量が0の状態では、コンテナの温度が上昇していることがわかり、そして、コンテナの温度が融点に達し、コンテナが融解した状態となって、推論を終了する。

4. むすび

本論文では、オブジェクトと物理法則レベルの知識を基本知識とした定性推論システム Qupras について述べた。Qupras はオブジェクトや物理法則の知識を使って、系を記述する連立微分方程式を求めながら、現在の状態を求め、次に、現在の状態がわかったならば、変化する物理量を基にして、次の状態を推測する。

Qupras の物理法則の定義は、物理の法則をどのような条件で適用できるかを記述した一種のプロダクション・ルールと見なすことができる。そして、初期事実や成り立っている関係性はワーキング・メモリの内容と見なすことができる。しかし、一般のプロダクション・ルールと異なり、条件部の評価が単純なパターン・マッチとは異なり、連立不等式を解く必要がある点で異なっている。

Qupras の系の方程式を作成できる能力は、系の方程式が途中で変わるような現象、例えば、沸騰によっ

て水がなくなってしまうことなどを推論できる利点がある。しかし、物理法則の定義を記述することは簡単ではないし、現在の Qupras の表現能力ですべての物理法則の定義を記述できるわけではない。例えば、エネルギー保存則を記述することはできない。

Qupras は Prolog で作成され (約 3000 行)、本論文での例を含むいくつかの物理系について動作を確認している。残されている主な課題は次のとおりである。

(1) 物理法則を記述するためのより良いプリミティブを見つけること。

例えば、エネルギー保存則を記述するための適切なプリミティブを見つけることである。

(2) 条件評価部の機能を向上させること。

現在、いくつか優れたアルゴリズムが提案されており^{9),10)}、連立不等式を解く問題は定性推論の範囲で解決されつつあり、それらのアルゴリズムを導入することが考えられる。

(3) オブジェクトの定義に階層を導入して、物理法則の定義を一般的にすること。

謝辞 本研究は、溝口教授 (東京理科大学) 主催のメンタル・モデルの論文輪講会に出席できたことが、元々のきっかけであり、またその後、同教授主催の ICOT ワーキング・グループ FAI での議論によって、改善、修正されたものである。ここに、溝口教授および同ワーキング・グループの委員およびオブザーバの方々に感謝いたします。また、本研究に関して有意義な指摘や助言をしていただいた ICOT 第 5 研究室の研究員の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 上野: 知識工学入門, オーム社, 東京 (1985).
- 2) Forbus, K.D.: Qualitative Process Theory, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 95-168 (1986).
- 3) de Kleer, J. and Brown, J.S.: A Qualitative Physics Based on Confluences, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 7-83 (1986).
- 4) Kuipers, B.J.: Causal Reasoning about Causality: Deriving Behavior from Structure, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 169-203 (1986).
- 5) Nishida, T. and Doshita, S.: Reasoning about Discontinuous Change, *AAAI-87*, pp. 643-648 (1987).
- 6) 大和田, 溝口: 定性的シミュレーションとその医療診断への応用, 日本ソフトウェア科学会第 3 回大会予稿集, B-2-1, pp. 53-56 (1986).

- 7) 小高, 野村, 田岡, 山口, 溝口, 角所: 知識コンパイラの構成とその応用, 情報処理学会, 知識工学と人工知能研究会, 48-2 (1986).
- 8) 田中: 定性推論による生体動態解析, 情報処理学会, 知識工学と人工知能研究会, 49-3 (1986).
- 9) Simmons, S.: Commonsense Arithmetic Reasoning, *AAAI-86*, pp. 118-124 (1986).
- 10) 網谷, 西田, 堂下: 量に関する不十分な情報に基づく推論, 情報処理学会, 知識工学と人工知能研究会, 52-5 (1987).

(昭和 62 年 10 月 1 日受付)

(昭和 63 年 5 月 10 日採録)



大木 優 (正会員)

昭和 28 年生。昭和 51 年早稲田大学理工学部応用化学科卒業。昭和 53 年同大学院修士課程修了。同年、(株)日立製作所中央研究所に入社。

昭和 59 年より (財)新世代コンピュータ技術開発機構へ出向、現在に至る。並列問題解決およびエキスパート・システム関係の研究開発に従事。ソフトウェア科学会会員。



藤井 裕一

昭和 25 年生。昭和 47 年慶応義塾大学工学部電気工学科卒業。昭和 49 年同大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社入社。データ通信本部にて公衆データ通信システムの開発、また技術局にて DIPS の開発に従事。昭和 60 年より (財)新世代コンピュータ技術開発機構へ出向、現在同研究所第五研究室室長。知識システム構築技術の研究開発に従事。人工知能学会会員。

昭和 60 年より (財)新世代コンピュータ技術開発機構へ出向、現在同研究所第五研究室室長。知識システム構築技術の研究開発に従事。人工知能学会会員。



古川 康一 (正会員)

昭和 17 年生。昭和 40 年東京大学工学部計数工学科卒業。昭和 42 年同大学院修士課程修了。同年電気試験所 (現、電子技術総合研究所) 入所。昭和 57 年より (財)新世代コンピュータ技術開発機構へ出向、現在同研究担当次長。工学博士。第 5 世代コンピュータの基礎ソフトウェアの研究に従事。編著書に「知識情報シリーズ」(共立出版)、「Prolog 入門」(オーム社)などがある。ソフトウェア科学会、人工知能学会各会員。