

《展望・解説》

定性推論とその応用

西 田 豊 明*

ABSTRACT Qualitative reasoning is concerned with modeling and implementing human-like capability of reasoning about physical world. This paper overviews principles and techniques developed in qualitative reasoning. This paper consists of two parts. The first part presents some of the basic techniques employed in qualitative physics, qualitative calculus and envisionment in particular. The importance of causal analysis is emphasized. The second part gives a brief survey on current trends and highlights new research areas, including order of magnitude reasoning, temporal constraint propagator, resolving ambiguity of envisionment, abstraction by time scale, aggregation, qualitative phase space analysis, qualitative kinematics, comparative analysis, tools, and application to engineering problem solving.

1. はじめに

我々のまわりには物理, 化学, 生体, 経済システムをはじめとして, さまざまな種類の動的システムがある。そのような動的システムのふるまいについて考えるとき, 人間はかなりの場合定性的な思考を行なっていると思われる。定性推論はこのような直観を形式化し推論法としてまとめたものである。動的システムの解析という面ではシミュレーション技術と関わりが深い, とくに定性推論でねらっているのは, 次のような場合に適用できる解析法の開発である。

- (1) 系のふるまいの定性的な性質を知りたい。
 - (2) 系のふるまいの仕組みを知りたい。
 - (3) 系の挙動解析を自動化したい。
 - (4) 計算量の大きな計算を行なう前に粗い解析を行なって計算の指針を得たい。
 - (5) モデルに基づく知識ベースシステムのための推論エンジンを作りたい。
- また, この研究を通じて人間が動的な系を理解するプロセスをモデル化するという認知科学 (Cognitive Science) からの興味もある。

定性推論では, (a) 人間は系の動態を理解しようとするとき, まず大ざっぱで定性的な思考を行なうこと, (b) 形式的な求解法では切り捨てられていた因

果関係が重要な役割を果たすこと, に着目した。この観点からの研究は1970年代後半から, *J. de Kleer, J. S. Brown, K. Forbus, B. Kuipers, B. Williams* らによって行なわれ, 1984年の Artificial Intelligence 誌第24巻で特集号が組まれた^{2), 3), 8), 13), 31)}。実は, それよりかなり前に, *H. A. Simon* の経済モデルの定性解析の研究があったが, 人工知能分野ではあまり知られていなかった¹¹⁾。その後, 応用問題への適用, 新しい手法の開発などが行なわれ, 現在, 次世代エキスパートシステムのための要素技術として注目されはじめている。

2. 定性推論の基礎的な手法

この節では, 定性推論の手法のうち, 1984年ころまでに確立された基本的なものについて簡単に説明する。

2.1 実数領域の意味的な量子化

物理システムのモデルでは, ふつう, 各状態変数の値は実数である。しかし, 系のふるまいを定性的に捉えたいときは, 具体的な値ではなく, 値の範囲だけについて論じればよいことが多い。そこで実数領域をいくつかの区間量子に分けて, 変数値が同じ区間に属するときは, 系の状態が定性的に等しくなるようにすることが考えられる。変数 x が区間量子 I に属することを $[x]=I$ と書き, x の定性値が I であるという。多くの場合, 次のような1個の境界標 (landmark) による区間量子化が基本的である:

$$\{x|x<0\}, \{x|x=0\}, \{x|x>0\}$$

Qualitative Reasoning and its Application. By Toyooki Nishida (Faculty of Engineering, Kyoto University).

*京都大学工学部

表 1 定性計算の規則

+	-	0	+
-	-	-	?
0	-	0	+
+	?	+	+

×	-	0	+
-	+	0	-
0	0	0	0
+	-	0	+

上の基本的な分割では、定性値の集合 $\{+, 0, -\}$ が次のように定義される：

$$[x] = + \leftrightarrow x > 0$$

$$[x] = 0 \leftrightarrow x = 0$$

$$[x] = - \leftrightarrow x < 0$$

$+, 0, -$ が定性値であることを強調するために、 $[+]$, $[0]$, $[-]$ という記法を用いることがある。この定義から表 1 のような演算規則が成り立つ。表では、 $[+]$ $+[-]$, $[-] + [+]$ のところに示した？ マークは、値が定義されないことを示す。一般に、

$$[x \times y] = [x] \times [y]$$

は常に成り立つが、 $[x + y]$ と $[x] + [y]$ は常に等しいとは限らない。

最近の研究では、応用問題において量子化（とくに変数値の量子化）はそれほど強力な推論法を提供しないことが指摘され、第 3.1 節で述べる量の大きさの程度に関する推論の方が有用であると考えられはじめている。

2.2 時間軸の意味的な量子化

変数値の量子化と同様に、時間軸に対しても意味的な量子化が行なわれる。すなわち、 t と t' が同一の時間量子に属するためには t と t' における系の状態が定性的に等しくなければならない。変数値の量子化と異なり、時間の量子化は解析に先立ってあらかじめ与えておくことはできず、処理の進行にともなって漸次行なわれていくことになる。また、イベントの起きる時刻の前後関係は議論の対象になるが、絶対的な時刻との間の関係は議論されない。

定性推論では、通常、状態変数は連続的に変化するものと仮定する。すなわち、変数値が一旦開区間に入ると、ある一定の時間の間続けてそこに留まらなければならない。また隣の区間に移るためには必ず境界標を通らなければならない。境界標は瞬間的に通過することができる。

このように、状態は一定時間持続するものと瞬間的に終了するものの 2 つのタイプに分けられる。これに対応して時間量子も、持続的な状態に対応する時区間と、瞬間的な状態に対応する瞬間の 2 つのタイプに分けられる。実時間は稠密であるから、ある時点の直前

表 2 挙動推定のための主な規則²⁾

<p>(1) 量子化された領域での変数の連続性 いま t と t' を定性推論によって量子化される時間領域上の連続する二つの時間量子としよう。 $\{-, 0, +\}$ で量子化された時間の領域では変数の連続性の条件は次のように規定される。</p> <p>時間の関数 $f(t)$ が連続 \Leftrightarrow 任意の隣接する時間量子 t と t' において、 $f(t) \neq 0$ ならば、$f(t') = f(t)$ または 0 $f(t) = 0$ ならば、$f(t')$ は任意</p>
<p>(2) 定性的積分規則 t' における変数 x の値 $x(t')$ を t における x の値 $x(t)$ とその導関数 $[dx/dt]$ によって次のように拘束する。</p> $[x(t')] = [x(t)] + [dx/dt(t)]$
<p>(3) 矛盾回避の原則 (Contradiction Avoidance Rule) 定性的積分規則によって各変数毎に局所的に予測されたすべての可能性に対応する変化が実際に起こり得るとは限らない。次状態における変数値の組合せは、対象系の拘束条件を全て満足するものでなければならない。</p>

／直後の時点は存在しないが、量子化された時間領域では、与えられた瞬間や時区間の直前／直後の時区間や瞬間が定義される。

2.3 変数の間の関係の記述

変数の間の関係は微分方程式を用いて記述される。あらかじめ量子化された値しか取り扱わないことがわかっている場合には複雑な非線形方程式を単純なもので代用できる。（ただし、これには曖昧性が増えて役にたたなくなるという批判もある。）また、*Kuipers* や *Forbus* のシステム^{13), 8)}では、変数の間の関係が厳密にわからないときでも推論を行なえるように、次のような定性的な関係を用意している。

$$Y = M^+(X) \text{ または } Y \propto_q + X :$$

X が増加すると Y も増加する。

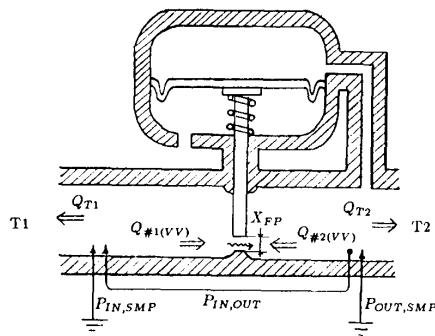
$$Y = M^-(X) \text{ または } Y \propto_q - X :$$

X が増加すると Y は減少する。

2.4 挙動推定

定性推論の中心は系の取り得るあらゆる動作系列を求める挙動推定 (Envisionment) とよばれるプロセスである。挙動推定には表 2 のような規則が用いられる。挙動推定のプロセスは、状態内解析 (Intrastate Analysis) と状態間解析 (Interstate Analysis) に分けられる。状態内解析では与えられた状態における各状態変数の値を求める。状態間解析では、与えられた状態が次にどの状態に遷移し得るかを解析する。

状態内解析には制約伝播 (Constraint Propagation) が用いられることが多い。直観的にいうと、制約伝播は値のわかっているところから次々に値を求めていく方法である。一般に、系が本質的に同時 (simultaneous) であれば制約伝播は行き詰まりに陥る。しかし、定性推論では各変数の値は高々有限個の定性値の中のうちのひとつであるから、制約伝播が行き詰まっ



(a) 構造

$$\begin{aligned} \partial P_{IN,OUT} + \partial P_{OUT,SMP} - \partial P_{IN,SMP} &= 0 & (1) \\ \text{圧力の定義} \\ \partial P_{IN,OUT} - \partial Q_{\#1(VV)} + \partial X_{FP} &= 0 & (2) \\ \text{バルブの通過流量は圧力差が大きいほど、} \\ \text{そして開口幅が大きいほど大きい。} \\ \partial Q_{T1} + \partial Q_{\#1(VV)} &= 0 & (3) \\ \text{入力結合における流量の保存} \\ \partial Q_{\#1(VV)} + \partial Q_{\#2(VV)} &= 0 & (4) \\ \text{バルブにおける流量の保存} \\ \partial Q_{T2} + \partial Q_{\#2(VV)} &= 0 & (5) \\ \text{出力結合における流量の保存} \\ \partial X_{FP} + \partial P_{OUT,SMP} &= 0 & (6) \\ \text{出力圧が上昇に応じて} \\ \text{バルブの開口幅が減少する} \\ \partial P_{OUT,SMP} - \partial Q_{T2} &= 0 & (7) \\ \text{出力圧が上昇すると、出力端子からの} \\ \text{流出量が増加する} \end{aligned}$$

(b) 定性方程式

図1 圧力レギュレータ

でも適当な定性値を仮定して先に進み、矛盾が生じたとき別の可能性を探るという弛緩 (relaxation) 法を用いることができる。

ところが、弛緩法には2つの問題がある。第1に、解の探索過程が組合せ爆発に陥ってしまうこと、第2に求解過程からメカニズムの説明を生成すると不自然な説明が得られる可能性があることである。

第2の問題について例を用いて説明しよう。図1(a)は圧力レギュレータと呼ばれる装置の断面図を示している。圧力レギュレータはパイプを通る流体の圧力を一定に保つための装置である。

バルブの質量を無視すると、圧力レギュレータのふいまいは図1(b)の定性方程式で記述できる。入力圧 $P_{IN,SMP}$ が上昇しているときの状態内解析は、弛緩法を用いて図2のように行なうことができる。ところがこの証明から生成される説明は図3のようになり、非常に不自然な感じがする。このような説明は物理的なメカニズムをよく表わしているとはいえない。これは、説明の論理構造が通常理解されるデバイスの因果

(8)	$\partial P_{IN,SMP} = [+]$	前提
(9)	$\partial X_{FP} = [+]$	仮定
(10)	$\partial P_{OUT,SMP} = [-]$	(6), (9)より
(11)	$\partial P_{IN,OUT} = [+]$	(1), (8), (10)より
(12)	$\partial Q_{\#1(VV)} = [+]$	(2), (9), (11)より
(13)	$\partial Q_{\#2(VV)} = [-]$	(4), (12)より
(14)	$\partial Q_{T2} = [+]$	(5), (13)より
(15)	$\partial Q_{T2} = [-]$	(7), (10)より
(16)	False	単一値, (14), (15)より
(17)	$\partial X_{FP} = [0]$	仮定
(18)	$\partial P_{OUT,SMP} = [0]$	(6), (17)より
(19)	$\partial P_{IN,OUT} = [+]$	(1), (8), (18)より
(20)	$\partial Q_{\#1(VV)} = [+]$	(2), (9), (19)より
(21)	$\partial Q_{\#2(VV)} = [-]$	(4), (20)より
(22)	$\partial Q_{T2} = [+]$	(5), (21)より
(23)	$\partial Q_{T2} = [0]$	(7), (18)より
(24)	False	単一値, (22), (23)より
(25)	$\partial Q_{T2} = [+]$	RAA 16, 24

RAA: Reductio ad Absurdum:
「矛盾による強制」

図2 弛緩法による圧力レギュレータのふるまいの解析

開口幅 (X_{FP}) が増加すると仮定してみよう。すると、センサーは出力圧の低下をセンサする。入力圧が上昇し出力圧が低下するので、バルブ圧は上昇する。バルブの開口幅が増加し、バルブ圧も上昇するから、入力側からの流量は増加する。流れの保存則により出力側から入力側への逆向きに見ると流れは減少することになる。出力結合でも再び流量は保存されるから出力から負荷への流量は増加する。一方、以前出力圧が低下することが示されていた。すると、出力から負荷への流量は減少するはずであり、これは上の結論と矛盾する。 X_{FP} が変化しないと仮定してみよう。…く略… 再び矛盾に陥る。そこで開口幅は減少するはずである。

図3 図2の弛緩法による証明から生成された説明

◆コンポーネントヒューリスティック：もしコンポーネントの一端の（共通参照点 (common reference) に関する）圧力が変化することかわかり、かつそれ以外の値の変化に関する情報が得られないとき、コンポーネントはあたかも未知の値の変化が無視できるかのように応答すると仮定する。

◆導管ヒューリスティック：あるコンポーネントが導管内の「物質」を導管のなかからひきずりだす／押し込むとき、その導管のなかの圧力はそれぞれ低下する／上昇する。

◆合流ヒューリスティック：もし（三つ以上の変数を持つ）コンポーネントに関する変数のいくつかへの値の変化がわかっているがそれが十分ではないときは、未知数の一つを除くすべての変数の値の変化が0であるかのように伝播せよ。

図4 一般化されたヒューリスティック²⁾

律と著しく異なるためであると考えられる。

2.5 ヒューリスティックを用いた解析法

de Kleer と Brown は上の問題と、弛緩法による組合せ爆発の問題を解決するため、図4のような一般化されたヒューリスティックを用いる方法を示している^{2),3)}。これらのヒューリスティックをむやみに使っていると、解析の誤りが生じやすくなるので、これらは制約伝播が行き詰まりに陥った時のみ適用されるようになっている。また、ヒューリスティックの適用は式の形だけによるのではなく、式や変数の物理的意味もチェックされる。

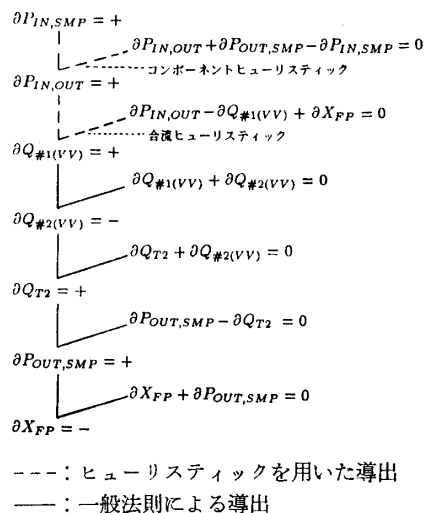


図5 ヒューリスティックを用いた圧力レギュレータのふるまいの解析

これらのヒューリスティックを用いると、圧力レギュレータのふるまいの解析は図5のように行なわれる。これは図6に示すような自然言語の説明とよく対応する。

これらのヒューリスティックは、多くの場合適切な予測を与える。しかし、これらはあくまでもヒューリスティックであり、常に正しいという保証はない。実際、インクリメンタルに負のインピーダンスを持つ素子（例えば、エサキダイオード）や回路の部分が存在し、そのようなとき、上のヒューリスティックを適用すると矛盾が生じる。このような場合には、後戻り処理や並行処理による非決定的な解析を行なう必要がある。

2.6 因果解析に基づく定性推論

西田と堂下は、電子回路（主としてパルス回路）のふるまいを定性的に解析するシステム QR-1 (Qualitative Reasoner One) の開発を進めている^{21), 23), 24)}。QR-1 は与えられた回路網の可能なふるまいを導出するとともに、その回路がなぜそのようなふるまいを示すかに関する因果的な説明を生成することができる。

QR-1 に関する研究では、動的因果ストリーム解析法と呼ぶ、因果解析に基づいて折線型線形方程式 (Piecewise Linear Equations) を効率的に定性推論する方法を開発した。この方法では同時的なループを1つのノードにマージしているのので、前の節で示した *de Kleer* らの方法のようにヒューリスティックを用いる必要はない。また、パルス回路の取り扱いに必要となる、変数の不連続な変化の解析法を示した。

(1) 動的因果ストリーム解析法

この解析法では、折線型線形方程式の各線形領域に

もし入力側の圧力が上昇すると、それにもなって出力側の圧力も上昇するが、この変動はパイプの上部に取り付けられた圧力センサによって検出される。この結果、入力を出力に伝える弁の開きが小さくなり、出力圧の上昇が緩和される。入力側の圧力が減少したときも同様に出力側の圧力の変動は緩和される。このように圧力レギュレータは負のフィードバックの概念が利用されている。

図6 圧力レギュレータのふるまいの因果的な説明

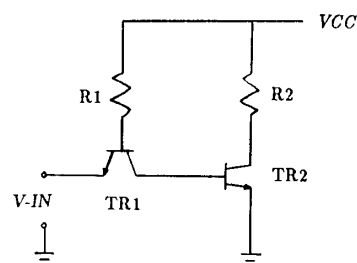


図7 簡単なトランジスタ回路

おける変数間の値の依存関係を解析し、それに基づいてふるまいの予測や説明の生成を行なう。

例えば、図7のような回路が与えられ、入力電圧 V-IN の上昇に対する回路の挙動を解析したいとしよう。簡単な解析によって、V-IN が低いとき2つのトランジスタ TR1, TR2 の動作領域はそれぞれ飽和、オフであることがわかる。QR-1 は入力が上昇した場合のふるまいを解析するために回路の変数間の値の依存関係を解析する。この結果、図8のように入力 V-IN の信号は

$$V\#1 \rightarrow TR1-V-E \rightarrow \dots$$

と回路の状態変数に次々と伝えられていくことがわかる。このうち系全体の動作状態に変化を起こし得るのは、トランジスタ TR1 のベース電流 TR1-IB への影響 (V-IN の上昇は TR1-IB を減少させ、トランジスタ TR1 をオフにする傾向にある) と、トランジスタ TR2 のベースエミッタ電圧 TR2-VBE への影響 (V-IN の上昇は TR2-VBE を上昇させ、トランジスタ TR2 をオンにする傾向にある) であることもわかる。さらに解析すると後者の方が先に起きることがわかるので、QR-1 は後者を選択する。

ところが、トランジスタ TR2 がオンになったとして再解析すると、図9のように、トランジスタ TR2 のベースエミッタ電圧 TR2-VBE が上昇するという予測と、TR2-VBE は一定であるという予測の両方が存在し、矛盾が生じる。この不整合はトランジスタ TR1 が飽和であると仮定したため生じたこと、そして、この矛盾はトランジスタ TR1 が逆接続状態で動作すると考えれば解消することが因果解析によってわかる。以上のようなプロセスによって、QR-1 は次状態

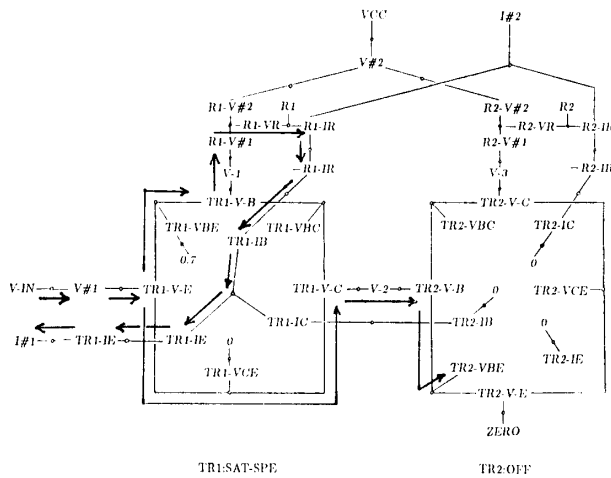


図8 図7の回路の信号伝達経路 (TR1 が飽和, TR2 がオフのとき)

をトランジスタ TR1: 逆接続, トランジスタ TR2: オンであると予測する。

QR-1 の特徴は上のような解析のプロセスをそのまま説明として生成できることである。とくに、イベントが生じた理由を説明できる。例えば、図10でユーザは WHY というコマンドを使ってイベントの生じた理由を尋ね、システムがそれに対する答えを生成している。

(2) 変数の不連続変化の解析

定性推論では通常、変数値は連続的に変化するものと仮定されている。ところが、パルス回路などを解析するためには、変数の不連続変化の解析アルゴリズムが必要である。折線近似モデルで不連続な変化が生じる場合は、次の3通りに整理できる。

- (1) 外部から不連続変化が与えられたとき。
- (2) 折線近似された素子の動作領域の遷移が生じたとき。
- (3) (モデル化されたレベルで) 時間遅れのない正のフィードバックが生じたとき。

不連続変化を解析するための基本的な考え方は、不連続変化の前後で値の持続する状態変数を同定し、それを手がかりに不連続変化後の対象系の状態を再計算することである。西田と堂下の解析法は、因果解析を用いて値の持続する状態変数を同定し、不連続変化の連鎖を追跡する方法である。この方法は、不連続変化が次状態予測における矛盾と対応するという性質を利用し、矛盾の検出・原因解析・矛盾を解消する状態遷移の探索によって次状態を予測する。

本来、不連続変化が予測されたモデルには十分な情報が含まれていないので、上の方法は完全ではない。

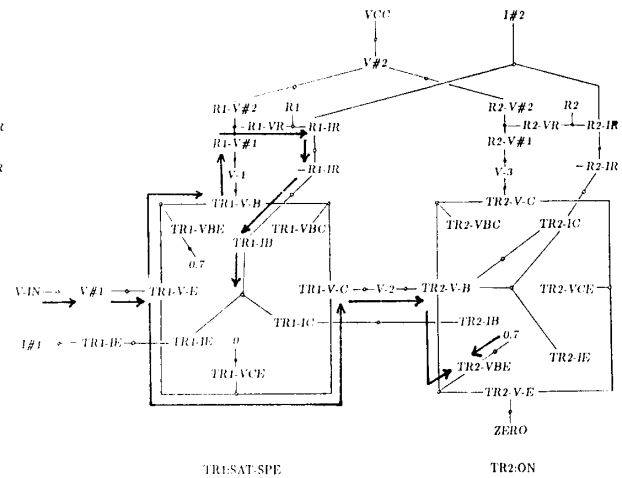


図9 トランジスタ TR2 がオンになったときの信号伝達経路

```

QR-1: EVENT-7: MODE TRANSITION, FROM TR2-OFF TO: TR2-ON
      (トランジスタTR2がOFFからONになった)
user: WHY EVENT-7
QR-1: BECAUSE,
      EVENT-8: TR2-TR-OFF-NORMAL-ANTE-1 IS VIOLATED
      (トランジスタTR2がOFFとなる条件に違反が生じた)
user: WHY EVENT-8
QR-1: BECAUSE,
      EVENT-9: TR2-VBE INCREASES TO 0.7000
      (トランジスタTR2のベース・エミッタ電圧TR2-VBEが
       上昇して0.7Vになった)
user: WHY EVENT-9
QR-1: BECAUSE,
      EVENT-10: TR2-V-B INCREASES TO 0.7000
      (トランジスタTR2のベース電位TR2-V-Bが上昇して
       0.7Vになった)
      :
QR-1: EVENT-14: V#1 INCREASES TO 0.7000
      (入力端子の電位V#1が上昇して0.7Vになった)
user: WHY EVENT-14
QR-1: EVENT-15: V-IN INCREASES TO 0.7000
      (入力電圧V-INが上昇して0.7Vになった)
  
```

図10 QR-1 による説明の例

しかし、この方法は多くの場合、不連続な変化に複雑な連鎖が含まれる場合でも的確な解析ができ、しかも因果的な説明が生成できるという利点がある。

2.7 プロセス中心型の定性推論

これまでに述べてきた手法は、デバイスを構成する部品に関して局所的に定義される制約を統合してデバイス全体の挙動を導出しようというデバイス中心型の解析法であると考えることができる。これに対して K. Forbus の提唱している定性プロセス理論⁸⁾ではプロセスという概念を中心に物理現象を記述する。

定性プロセス理論では、物理現象を個体ビューとプロセスビューによって記述する。個体ビュー (Indi-

vidual View) は、液体が容器に入っている場合の働き、物質が気体／液体／固体のそれぞれの場合の働き、弾性体が圧縮／伸張されているときの働きなど、系に含まれる対象が一定の状態にあるときにパラメータ間に生成される間接的な影響を記述するための記述デバイスである。

一方、プロセスビュー (Process View) は、系の中に存在するプロセスのタイプ、存在条件、各パラメータへの影響を記述するための記述デバイスである。図 11 にプロセスビューの例を示す。

heat-flow (熱流) というプロセスでは、熱源 (src) から目標 (dst) への熱伝導路 (path) が整備されていて、熱源の温度が目標の温度よりも高いとき活性化される。この結果、熱源と目標の温度差に定性的に比例した量 (flow-rate) の分だけ熱源の温度は降下し、目標の温度は上昇する。

一方、boiling (沸騰) というプロセスは、熱源というプロセス (hf) が活性であり、熱が目標の液体に伝達され、かつ液体の温度が沸点以上であるときに活性化される。このプロセスが活性になると液体の量が減少し、かわりに気体の量が増えること、そのときの増加の割合が hf の flow-rate に定性的に比例すること等が記述されている。

定性プロセス理論では、状態に含まれるプロセスビューの集合 (Process Structure) と個体ビューの集合 (Individual View) が時間とともにどのように変化してゆくかを調べることによって挙動推定を行なう。

2.8 挙動推定のあいまい性、完全性、実現可能性

定性推論を用いると、対象系に関する定量的な情報が得られないときでも、わかっている情報を論理的に組み合わせ、系のふるまいを推定できる。不足した情報は解析におけるあいまい性にふりかえられる。情報の精度が高ければ高いほどあいまい性は少ない。わざと詳細情報を与えないようにすれば、対象系の論理的に可能なふるまいについて知ることができる。

このようなあいまい性の内在する挙動推定では次の 2 つの性質が成り立つことが望ましい。

- ◆完全性：任意の系の定数の設定に対する系のふるまいがもれなく捉えられていること。
- ◆実現可能性：系の定数を適当に設定すれば、挙動推論によって求められたとおりのふるまいをすること。

残念ながら、通常の定性推論では完全性は満足されるが、実現可能性は達成されないことがわかっている¹⁴⁾。

る¹⁴⁾。

以上の基礎的手法の詳細については文献 22) を参照されたい。

3. 最近の研究動向

最近の研究では基礎的な枠組みに含まれていた種々の問題点の解決が図られた他、新しい手法の提案、ツールの開発、応用問題への適用などが試みられている。この節では、最近の研究の主なものを紹介する。

3.1 量の大きさの程度に関する推論

量の大きさの程度に関する推論 (Order of Magnitude Reasoning, OMR) では、量は大きさの程度 (Order of Magnitude, オーダ) によってクラス分けされ、量に関する演算はその量の属するクラス間の演算で近似される。OMR では、上位のオーダに属する量の間の演算を行なうとき下位のオーダに属する量を無視することによって計算を単純化する。

O. Raiman は次のような 3 つの関係を導入して、オーダの相対的な表現法と推論規則を示した²⁵⁾。

$x \ll y$ 量 x は量 y に対して無視できる。

$x \cong y$ x と y はオーダが等しく、かつ $x-y$ の大きさが x と y のオーダから見ると無視できる。

$x \sim y$ x と y のオーダは等しいが、 $x-y$ の大きさは x と y のオーダに対して無視できない。

(原論文では、 $x \ll y$, $x \cong y$, $x \sim y$ はそれぞれ $x \text{ Ne } y$, $x \text{ Vo } y$, $x \text{ Co } y$ と記述される。本稿のものは、文献 1) に基づいている。) これらの関係に関する推論規則を表 3 に示す。量は関係 \ll によって異なる階級に類別される。ここで類別される階級の数に制限はない。

例えば、質量 M 、速度 V_i の物体と質量 m 、速度 v_i の物体とが同一直線上を反対方向から運動してきて衝突し、その後の両物体の速度がそれぞれ V_f, v_f になったとしよう。このとき、変数間に次のような関係が成立する。

$$M \cdot V_i^2 + m \cdot v_i^2 = M \cdot V_f^2 + m \cdot v_f^2$$

$$M \cdot V_i + m \cdot v_i = M \cdot V_f + m \cdot v_f$$

ここでさらに、 $M \cong m$, $v_i \ll V_i$, $V_i > 0$, $v_i < 0$ という情報が与えられると、表 3 の推論規則を使って、 $V_f \ll V_i$, $v_f \cong V_i$, $v_f > 0$ などを推論することができる。

量に関する定量的な情報が与えられたとき、オーダに関するどの関係を設定すればよいかは、状況に依存する。例えばオーダが 10^5 程度の量を取り扱っているときには $2 \cong 3$ とすべきであろうし、オーダが 10^{-5} 程度の量を取り扱っているときには $2 \cong 3$ であるとは言

process heat-flow	process boiling
<p>Individuals:</p> <p>src an object, Has-Quantity(src, heat)</p> <p>dst an object, Has-Quantity(dst, heat)</p> <p>path a Heat-Path, Heat-Connection(path, src, dst)</p> <p>Preconditions:</p> <p>Heat-Aligned(path)</p> <p>QuantityConditions:</p> <p>A[temperature(src)] > A[temperature(dst)]</p> <p>Relations:</p> <p>Let flow-rate be a quantity</p> <p>A[flow-rate] > ZERO</p> <p>flow-rate \propto_{α} (temperature(src) - temperature(dst))</p> <p>Influences:</p> <p>I-(heat(src), A[flow-rate])</p> <p>I+(heat(dst), A[flow-rate])</p>	<p>Individuals:</p> <p>w a contained-liquid</p> <p>hf a process-instance, process(hf) = heat-flow</p> <p>\wedge dst(hf) = w</p> <p>QuantityConditions:</p> <p>Status(hf, Active)</p> <p>\neg A[temperature(w)] < A[l-boil(w)]</p> <p>Relations:</p> <p>There is g \in piece-of-stuff</p> <p>gas(g)</p> <p>substance(g) = substance(w)</p> <p>temperature(w) = temperature(g)</p> <p>Let generation-rate be a quantity</p> <p>A[generation-rate] > ZERO</p> <p>generation-rate \propto_{α} flow-rate(hf)</p> <p>Influences:</p> <p>I-(heat(w), A[flow-rate(hf)])</p> <p>; The above counteracts the heat flow's influence</p> <p>I-(amount-of(g), A[generation-rate])</p> <p>I+(amount-of(g), A[generation-rate])</p> <p>I-(heat(w), A[generation-rate])</p> <p>I+(heat(g), A[generation-rate])</p>

図 11 定性プロセス理論におけるプロセスの記述例⁸⁾表 3 量の大きさの程度に関する推論規則¹⁾

$A \cong A$
$A \cong B \rightarrow B \cong A$
$A \cong B, B \cong C \rightarrow A \cong C$
$A \cong B, [C] = [A] \rightarrow (A + C) \cong (B + C)$
$A \sim B \rightarrow B \sim A$
$A \sim B, B \sim C \rightarrow A \sim C$
$A \sim B \rightarrow [A] = [B]$
$A \cong B \rightarrow A \sim B$
$A \ll B, B \ll C \rightarrow A \ll C$
$A \ll B, B \sim C \rightarrow A \ll C$
$A \cong B \rightarrow (A - B) \ll B$
$A \ll B \rightarrow (B + A) \cong B$
$A \ll B \rightarrow \neg A \ll B$
$A \sim B, [A] \neq 0 \rightarrow \neg(A \ll B)$
$A \sim B \leftrightarrow A \sim B, \neg(A \cong B), [A - B] = +$
$A \sim B \leftrightarrow A \sim B, \neg(A \cong B), [A - B] = -$

えないであろう。残念ながら、この判断を行なう一般的な基準はなく、ユーザの経験的な判断に依存する。

3.2 時間のモデル

B. Williams は定性推論システムの既存のアプローチにおける時間に関する情報管理の方法における2つの問題を指摘している。(1) イベントに全順序関係を課すため、無関係なイベント間の無意味な順序付けが強いられる。(2) 時間的関係を直接表わせない。この問題を含めて、広いクラスの時間に関する情報管理の手法として、TCP (Temporal Constraint Propagator) を提案している³²⁾。

TCP では時間に関する情報を経歴 (history) を単位に管理する。経歴は各状態変数ごとに定義され、その変数の経時的なふるまいを連続的で重なりのない時間区間-値の対 (エピソードと呼ばれる) の系列から成る。値の等しい隣接したエピソードを、それ以上大きくできなくなるまでマージしたものを極大エピソードと呼ぶ。極大エピソードのみからなる経歴を簡潔な経歴 (concise history) と呼ぶ。時間に関する推論システムでは制約の伝播から得られる断片的なエピソードをいったんためておいて極大エピソードが得られたことを確認してから伝播を行なうことによって時間に関する推論を効率化することが期待できる。しかし、このままでは、系がフィードバックを持つ場合、変数の値は自分自身に依存するので極大エピソードの終了時点予測できず、値の伝播がいつまでも開始できないことがある。この問題を解決するために、TCP ではエピソードの端点を定数としてではなく記号的に表現し、記号間の制約を維持する方法が取られている。

3.3 あいまい性の解決

量に関する十分詳しい情報が得られているときで

も、定性的な解析結果で十分な場合には定性推論は有効な手段である。しかし、情報の不完全性のために解析結果の曖昧性が大きいとこの有効性は損なわれてしまう。B. Kuipers, C. Chiu, W.W. Lee らはこの問題を解決するための手法を提案している。1つのアプローチは、解析の詳細度を解析の進行とともに動的に変化させていくことによって、与えられたモデルで本来区別できる詳細度を越えた詳細度レベルの解析が行なわれないようにすることである (無意味な区別の無視)。もう1つのアプローチは、定性方程式のもとになる定量的な情報を含んだ方程式から、曖昧性を解決し得る高階の制約を導出して曖昧性解決に利用することである。Kuipers らが示した方式¹⁶⁾では、曖昧性が生じると系における HOD (Highest Order Derivative, 最高位の導関数) を記述した変数を求め、次に HOD を代数的に計算し曲率制約 (curvature constraint) として用いる。

W.W. Lee はこの研究をさらに発展させ、Kuipers 型の定性方程式のもとになった定量的な方程式からの情報を大域的な情報として利用することによって曖昧性をさらに制限できることを示した¹⁷⁾。Lee は Kuipers らの第2階の導関数を利用した曲率制約に加えて、次の2つの制約が曖昧性の解消に有効であることを示した。

(1) 極値制約 (extrema constraint). 対象系のエネルギーが減少すれば、振幅が減少する。

(2) システム特性制約 (system property constraint). いくつかの曖昧性は、対象系の定数の間の (先天的な) 関係に依存して発生する。例えば、減衰バネ振動ではおもりが減衰振動するかそれとも制動による単調な動きをするかは、与えられた特定の系の定

数（バネ定数，おもりの重さ，摩擦係数）がどのような関係にあるかによって定まり，両者が混在するふるまいはない．したがって，与えられた系に存在する先天的な曖昧性をあらかじめ同定しておくことによって大域的な曖昧性が局所的な曖昧性の積となって発生することを防ぐことができる．

3.4 速い系と遅い系

複雑な系では，通常，数マイクロ秒で終了する速い変化と終了まで何日もかかる遅い変化が混在することが多い．これらを一様に扱うのではなく，変化の速さに注目して系の記述を階層化することが考えられる．*Kuipers* や田中らはこのような点を考慮した生体系のモデル化とそれを用いた推論機構を提案している^{15), 27)}．*Kuipers* の方式では，系への入力の変化が与えられるとまず速い系が解析される．このとき遅い系の変数は速い系では定数とみなされる．次に速い系の解析結果が遅い系に返され，遅い系の解析が行なわれる．

3.5 集積

D. Weld の提案した集積（Aggregation）²⁸⁾ は繰り返し起きるふるまいを検出してまとめてゆく手法である．集積器（Aggregator）と呼ばれるプロセスへの入力，イベントの経歴（history），活性化されたプロセスの集まり，プロセスの定義，全順序づけされたパラメータである．集積器は，繰り返し生じるイベントを検出すると，それがサイクルを形成するかどうかを検査する．イベントの系列が実際にサイクルであることが判明すると，そのサイクルを1つの連続プロセスとしてまとめる．集積器はそれを結果として出力し，遷移解析に送り，サイクルが繰り返された結果到達する定性的に異なる状態が予測される．

遷移解析を行なうプログラムは定性推論を行なうプログラムの中心的なコンポーネントである．*Weld* は傾向（trend），厳密な傾向（meticulous trend）という概念を導入して従来の遷移解析のプログラムを連続的な入力以外も入力として取れるように拡張した．しかし，現在の集積の手法にはいくつかの課題も残されている．例えば，プロセス間の干渉のため検出されたサイクルが正しくないことや，部分的に発生するサイクルが検出できないことなどがある．

3.6 相空間解析

系の動態をより精密に捉えるためには相空間解析の手法を用いることが考えられる．

E. Sacks の提案した PLR（Piecewise Linear Reasoning）²⁶⁾ は，（1）与えられた非線形微分方程式の折線近似をつくり，（2）線形化された領域を作り，

（3）相空間を等質な領域に分割し，隣接領域間の遷移可能性を計算して局所的な状態遷移図（相図式）を作り出し（局所解析），（4）局所的な相図式をつなぎ合わせて大域的な相図式を作り出す（大域解析）方法である．

同じく MIT の *K. Yip* は動的システム理論の知識を利用して，あるクラスの非線形系の相空間ポートレイトを効率的に描出し，さらに計算幾何学とコンピュータビジョンの技法を使ってその解釈を行なう手法を提案している³⁴⁾．

いずれの研究においても，因果的な説明を直接生成することはできないが，数式処理や数値解析をうまく利用することによって，より精密な情報を導出している．

3.7 定性運動学

一般に，運動学（Kinematics）は形状の幾何学的記述として与えられる系の構造記述から「2つ以上の剛体が空間内の点を同時に内部点として持つことは許されない」という制約を利用してふるまいを導出する手法である．

空間内の対象の状態を記述した n 個のパラメータの張る n 次元空間を C-space（Configuration space）と呼ぶ．C-space 内の各点は対象のひとつの配置（Configuration）を表わす．C-space における対象の可能な配置に対応する点の集合を自由空間（Free space），不可能な配置に対応する点の集合を閉塞空間（Blocked Space）と呼ぶ．

ふつう，運動学では対象全体に対する多次元空間を直接解析するのではなく，直接相互作用する対象の対ごとに C-space を作る．このとき，各 C-space は対象をなす対象の状態を記述した2つのパラメータの張る2次元空間になる．*Forbus-Faltings-Nielsen* の定性運動学^{10), 7)}は C-space の自由空間をさらに有限個の疑似凸セグメントの集まり（空間語彙，place vocabulary）に分解する．空間語彙では，与えられたセグメントから直接遷移できるのは隣接するセグメントだけであるという性質がある．これにさらに力と運動量の向きを考慮に入れて，物体の可能なふるまいを導出する．

3.8 比較解析

NIT の *D. Weld* による比較解析（Comparative Analysis）²⁹⁾ は，系のパラメータを増減させたとき，系のふるまいがどのような影響を受けるかを定性的に推論し，その理由を説明する方法である．比較解析はパラメータの値を比較的小さな範囲で変化させる場合

を扱う定性差分解析 (Differential Qualitative Analysis, DQA) と, パラメータの値を極端に変化させたときのふるまいを解析する誇張解析 (Exaggeration) に分けられる. これまで DQA に関する成果が報告されている.

DQA は *Kuipers* の QSIM からの挙動推定の結果として得られる状態遷移図を入力とする. 解析法は, パラメータ値の変化が挙動の状態遷移図のトポロジーを変化させない場合をベースにし, これをトポロジーが変化する場合に拡張している.

比較解析を行なうためには, パラメータの値によって生じたふるまいの変化を比較する基準を与える軸を明確にする必要がある. そのような軸は視点 (Perspective) と呼ばれる.

DQA の下す結論は常に正しいという健全性は保証されるが, 必要な情報が曖昧性なく常に導けるという保証 (完全性) はない. *Weld* の報告では, 答えが得られない場合, 曖昧性が生じる場合, 視点を設定するためかなり発見的な推論が必要である場合の例が示されている.

3.9 定性推論研究用ツール

Kuipers の QSIM¹⁴⁾ は, *Waltz* のフィルターを使って高速に制約充足を行なうための工夫がされた挙動推定プログラムである. QSIM は Symbolics 上にインプリメントされ, 公開されている唯一の定性推論エンジンである. QSIM アルゴリズムは東京理科大学の溝口, 大和田らによって PSI 上にもインプリメントされ, 論理型プログラミング言語のための高速化のための工夫がされている¹⁹⁾. *K. Forbus* も定性プロセス理論用の推論エンジン QPE を開発しており⁹⁾, 近く公開する予定であるという.

定性推論では制約充足問題に帰着される問題が多く, 上に述べたものよりもう少し一般的なツールとして TMS (Truth Maintenance System)⁶⁾ や ATMS (Assumption-based TMS)⁴⁾ などがある. 実際, 定性推論のシステムはこれらの上に構築されたものも少なくないし, ATMS は定性推論の研究から生まれたといってもよい. また, 最近研究が進んできた制約プログラミングも定性推論と関わりが深い.

3.10 応用

定性推論はさまざまな応用問題に適用しようという試みもいくつか行なわれるようになってきた. 主なものを下に示す.

(1) 知的 CAI

定性推論を知的 CAI に応用すれば, 自発的学習

(学習者が自分の問題を知的 CAI システムに与え, その解決過程を観察することによって学習する) や, 因果解析によるわかりやすい説明の生成が可能になるという利点がある. 定性推論を知的 CAI に応用した研究がいくつか知られている^{33), 30), 18)}.

(2) 診断への応用

情報を定性的に記述することによって, これまで離散的なシステムに適用されてきた GDE (General Diagnostic Engine)⁵⁾ などの故障診断法を連続的な系の故障診断にも適用できるという利点がある. 故障診断への応用に関する研究もいくつか報告されている. 特に, IBM パリ研究所の *Dague* らは, 定性推論を用いた診断を現実レベルの問題に適用し, よい成果をあげた¹⁾. *Dague* の研究では量の大きさの程度に関する推論 (Order of Magnitude Reasoning, OMR) (第 3.1 節参照) が採用されている.

(3) 設計への応用

工学では解析論はよく体系化されているが, 設計論は必ずしもそうではない. 一般に, 一応の標準的な設計手順は分野ごとに用意されているが, それはあらゆる場合に対応できる完全なものではないことが多い. 従って, 設計段階はある種の試行錯誤を伴うことになる. IBM T. Watson 研究所の *S. Murthy* と *S. Addanki* らは, 標準的な設計手続きが失敗したとき, 定性推論の考え方を利用して問題の再解析と新しい部品の生成を自動的に行なう手法を提案している²⁰⁾.

(4) 知識獲得への応用

知識獲得では, 専門家から与えられた情報を一旦厳密な形式で表現することによって, 情報の整合性や欠けている情報をチェックしたり, 獲得された知識をシミュレートして人間にフィードバックするために, 定性推論を用いることが考えられる. とくに変数間の関係を定性的に記述しそのままシミュレートできたり, 結果を説明したりする機構は有用である. *Kuipers* らは, 医者の説明から病理の機構のモデルを生成する問題に定性推論を使った¹²⁾.

4. まとめ

定性推論の目標は, 人間の定性的な思考法をお手本にした動的システムの知的解析法を作ることである. いたずらに数式処理や数値処理をふりかざすのではなく, 人間が動的システムのふるまいをどのように理解しているのか振り返りつつ推論のコンピュータモデルを構築していくところに定性推論の研究のおもしろさがある. しかし, 定性推論が動的システムの解析法と

して有用であるかどうかは、複雑なシステムの解析が定性推論によって本当に簡単化されるかどうかにかかっている。この点に関してシミュレーションの分野の専門家の方々からご教示いただければ幸いである。

参考文献

- 1) P. Dague, O. Raiman and P. Deves : Troubleshooting : when modeling is the trouble, in Proc. AAAI-87, 600/605 (1987)
- 2) J. de Kleer and J.S. Brown : A Qualitative Physics based on Confluences, Artificial Intelligence, **24**, 7/83 (1984)
- 3) J. de Kleer : How Circuits Work, Artificial Intelligence, **24**, 205/280 (1984)
- 4) J. de Kleer : An Assumption-based TMS, Artificial Intelligence, **28**, 127/162 (1986)
- 5) J. de Kleer : Diagnosing Multiple Faults, Artificial Intelligence, **32**, 97/130 (1987)
- 6) J. Doyle : A Truth Maintenance System, Artificial Intelligence, **12**, 231/272 (1979)
- 7) Boi Faltings : Qualitative Kinematics in Mechanisms, Proc. IJCAI-87, 436/442 (1987)
- 8) K.D. Forbus : Qualitative Process Theory, Artificial Intelligence, **24**, 95/168 (1984)
- 9) K.D. Forbus : The Qualitative Process Engine : A Study in Assumption-based Truth Maintenance, Qualitative Physics Workshop Abstracts, Qualitative Reasoning Group, University of Illinois at Urbana-Champaign (1987)
- 10) K.D. Forbus, P. Nielsen and B. Faltings : Qualitative Kinematics : A Framework, in Proceedings IJCAI-87, 430/435 (1987)
- 11) Y. Iwasaki and H.A. Simon : Causality in Device Behavior Artificial Intelligence, **29**-1, 3/32 (1986)
- 12) B.J. Kuipers and J.P. Kaissirer : Causal Reasoning in Medicine : Analysis of a Protocol, Cognitive Science **8**, 363/385 (1984)
- 13) B. J. Kuipers : Commonsense Reasoning About Causality : Deriving Behavior from Structure, Artificial Intelligence, **24**, 169/203 (1984)
- 14) B. J. Kuipers : Qualitative Simulation, Artificial Intelligence, **29**, 289/338 (1986)
- 15) B. J. Kuipers : Abstraction by Time-Scale in Qualitative Simulation, Proc. AAAI-87, 621/625 (1987)
- 16) B. J. Kuipers and C. Chiu : Taming Intractable Branching in Qualitative Simulation, Proc. IJCAI-87, 1079/1085 (1987)
- 17) W.W. Lee, C. Chiu and B. J. Kuipers : Development Towards constraining Qualitative Simulation, AI-TR 87-44, University of Texas at Austin (1987)
- 18) 宮阪, 乾 : 物理シミュレーションモデルをベースにした知的訓練システムの開発, 情報処理学会, 知識工学と人工知能研究会, **56**-8 (1988)
- 19) F. Mizoguchi, H. Ohwada and K. Honda : Qualitative Simulation for Knowledge System by Constraint Programming, IFIP WC 10.1 (1987)
- 20) S. S. Murthy and S. Addanki : PROMPT : An Innovative Design Tool, Proc. AAAI-87, 637/642 (1987)
- 21) 西田, 川村, 堂下 : 動的因果関係解析法による電子回路の定性的解析, 情報処理学会論文誌, **28**-2, 177/188 (1987)
- 22) 西田 : 定性的推論——常識的思考法のモデル——, 人工知能学会誌, **2**-1, 30/43 (1987)
- 23) T. Nishida and S. Doshita : Reasoning about Discontinuous Change, Proc. AAAI-87, 643/648 (1987)
- 24) 西田, 堂下 : 簡単なパルス回路における不連続変化の定性的解析法, 人工知能学会誌, **2**-4, 501/510 (1987)
- 25) O. Raiman : Order of Magnitude Reasoning, Proc. AAAI-86, 100/104 (1986)
- 26) E. Sacks : Piecewise Linear Reasoning, Proc. AAAI-87, 655/659 (1987)
- 27) 津本, 田中 : 定性推論の階層化, 昭和62年度人工知能学会全国大会論文集, 53/56 (1987)
- 28) D. Weld : The Use of Aggregation in Causal Simulation, Artificial Intelligence, **30**, 1/34 (1986)
- 29) D. Weld : Comparative Analysis, Proc. IJCAI-87, 959/965 (1987)
- 30) B. Y. White and J. R. Frederiksen : Intelligent Tutoring Systems Based upon Qualitative Model Evolutions, Proc. AAAI-86, 313/319 (1986)
- 31) B.C. Williams : Qualitative Analysis of MOS Circuits, Artificial Intelligence, **24**, 281/346 (1984)
- 32) B.C. Williams : Doing Time : Putting Qualitative Reasoning on Firmer Ground, Proc. AAAI-86, 105/112 (1986)
- 33) D. Williams, D. Hollan and A.L. Stevens : Human Reasoning about a Simple Physical System, D. Gentner and L. Stevens (eds.) : Mental Models, Lawrence Erlbaum Associates, 131/153 (1983)
- 34) K.M. Yip : Extracting Qualitative Dynamics from Numerical Experiments, Proc. AAAI-87, 665/670 (1987)