定性推論

——動的システムの挙動理解を目指して——

西 田 豊 明 (京都大学 工学部 情報工学教室)

特 集

解 説

1. はじめに

定性推論の目的は、時々刻々と変化する動的なシステム (dynamical systems) の挙動の概要とメカニズムを、対象の構造記述 (例えば、回路図) あるいは対象モデル (例えば、回路方程式) から自動的に導き出す技術とその応用技術を確立することである。本解説では、定性推論の背景、基本的な考え方、最近の研究動向を紹介する。

2. 背 景

かつて、知識情報処理の中心的な関心は専門家の経験的知識をうまく利用して高度の問題解決システムを実現することであった。しかし、経験的知識という知識の皮相的なところだけをとりえ、うまく利用しようというアプローチには自ずと限界があり、人間の知識を計算機に移植する過程 (計算機の知識獲得) や集積された知識の妥当性を検証しようとする過程が隘路になる。この隘路は、経験的知識という思考過程の結果の「おいしい」ところだけしか知識としてもっていなかったから生じると考えられる。

知識情報処理を生み出す母体となった人工知能の分野では、このような隘路を解消するために、経験的知識を理解するもとなる原理的・常識的な知識と、それに基づいて推論し結論を得る能力をもつ次世代知識処理システムを構築する試みが活発化している。次世代の知識処理システムを実現するためには、専門家の問題解決の過程をたどったり、未知の問題に対して原理から推論したり、モデリングの仕方を変えてみたりする能力を計算機にもたせる必要がある。このための鍵となるのは、システム解析技術である。すなわち、

図 1 システム解析のプロセス

与えられたシステムがどのような振舞をするか、挙動の特性がどのパラメータにどのように依存するか、自動的に解析できるようにしなければならない。

システム解析のツールとしては、数値計算・シミュレーション・数式処理技術が相当進歩したが、人間の行うシステム解析の過程全体からみれば、これらはその一部分に過ぎない。図 1 に示すように、数値計算やシミュレーションを利用してシステム解析をするとき、専門家自身もかなりシステム解析に貢献している。すなわち、シミュレーション技術を利用する前後において人間が次のような知的活動を行っている。

- (1) 対象のモデル化 システムを特徴づける量の認定、システムの分析、方程式の生成
- (2) 結果の解釈 得られた結果の意味の解釈
- (3) 結果が予想に反していたときの対応 そうなった原因を分析し、必要ならばモデルを修正する。

高度の知識情報処理システムを実現するためには、このような知的作業のプロセスも自動化しなければならない。

定性推論では、このような知的活動を行うときの思考過程がかなり定性的に行われることに着目し、その思考過程のモデル化とそれを利用した推論システムの実現を目指す。開発の経過などは文献(13)を参照されたい。

3. 定性推論の基本的な考え方

これまでの定性推論では、時間と共に変化する有限個の変数とその導関数のベクトル

$$s(t) = (\dots, x_i(t), \dots; \dots, dx_i/dt(t), \dots)$$

Qualitative Reasoning—Towards Automated Understanding of Behaviors of Dynamical Systems. By Toyooki Nishida, Non-member (Department of Information Science, Kyoto University).

図2 定性推論のアプローチ

によってシステムの状態が記述できる、有限次元の動的システム（Dynamical Systems）を研究対象としてきた^{*1}。

通常の定量的な手法では、状態変数 x の値域は実数領域であり、 $s(t)$ が異なる実数ベクトルであればシステムの状態は異なるものとして区別される。これに対して定性推論ではこのような細かな区別をしないで、あらかじめ挙動の様子を把握しようとする。

実数 x の値をある有限集合 Q の要素に写す写像 $[x]: R \rightarrow Q$ を考え、 $[x]$ を x の定性値と呼ぼう。そして、この写像を定性化と呼ぼう。定性推論では、 S について R^{2n} 上で精密な推論を行う代わりに、定性化によって Q^{2n} の中に映し出された S の姿（ S の定性化と呼ぶ）について推論を行う。この推論には、定性化によって Q 上に写像された R 上の演算を用いる。

定性推論のアプローチを図式化すると図2のようになる。綿密な計算をする代わりに、定性化された領域で粗い計算を行うことによって与えられたシステムの挙動を手早く把握しようとするわけである。

このようなアプローチの利点は次の3点である。

- (1) 計算量が小さい。
- (2) 求めたい情報が定性化された範囲内で得られるときは、それ以上解析を行わなくても結論が得られる。
- (3) 定量的な情報が観測できないとき自然なモデル化となる。

第二の点に関しては、求めている情報が定性化された領域の範囲内で得られる場合が少なければ定性推論の有効性は小さいということになろう。しかし、これまでの研究で様々な問題に定性推論が適用できることがわかっている。例えば、設計や診断などの工学的問題解決の初期の段階では、挙動のメカニズムに関する推論が大きな役割を果たすが、与えられたシステムの動作メカニズムを知ることが目的のときは定性推論で

^{*1}: 次元数が無限になった場合、すなわち偏微分方程式の世界についてはまだ取扱われていない。

図3 知識情報処理システムにおける定性推論と定量計算の統合

ほぼ十分であることがわかっている。

もちろん、定性推論のアプローチは定量的なアプローチと矛盾するわけではない。ちょうど人間があらかたを定性的な思考によって把握してから詳細な分析を行うように、知識情報処理システムでもそのような問題解決の枠組みを採用することが考えられる（図3）。ここでは、問題分析の過程では定性的な推論過程が中心になり、数値的な計算、シミュレーションは、より詳細な解析を行いたいときや、まるで手がかりが得られないときヒントを得るために利用される。

次の第4章、第5章では、定性推論の基本技術である定性計算と因果解析について述べる。

4. 定性計算

4.1 値域の定性化

定性化の仕方にはいろいろなものがある。これまで一番詳しく研究されたのは、次のような区間被覆による定性化である。以下では、区間被覆による定性化に中心に述べる。

- (1) 実数領域 R の区間被覆：

$$\begin{aligned} R &= \text{INTERVAL} \cup \text{LANDMARK} \\ \text{INTERVAL} &= \cup \text{INTERVAL}_i \\ \text{LANDMARK} &= \cup \text{LANDMARK}_j \\ \text{INTERVAL}_i \cap \text{LANDMARK}_j &= \phi \end{aligned}$$

ここで、 INTERVAL_i ：開区間 (s_i, e_i) ： $\{x | s_i < x < e_i\}$ 、 LANDMARK_j ：1個の実数を含む閉区間 $[l_i, l_i]$ ： $\{x | x = l_i\}$ 。

- (2) 区間被覆による定性化：次のような写像による定性化 $X \rightarrow [X]: [X]: X$ が属する区間 INTERVAL_i または境界標 LANDMARK_j 。

- (3) 符号による定性化 区間被覆の中で最も単純かつ有用性の高いのは次のような符号による定性化である。

$$\text{INTERVAL} = \{+, -\} : + : \{x | 0 < x\},$$

$$- : \{x|x < 0\}$$

$$\text{LANDMARK} = \{0 : 0 : \{x|x = 0\}\}$$

まぎらわしいときは, $+$, 0 , $-$ の代わりに $[+]$, $[0]$, $[-]$ とも書く。

(4) 定性計算 (定性化された領域での計算)

実数領域での演算に対応する演算を定性化された領域でも定義できる。定性領域での計算は定性化された値に対して適用されるが、定性化の段階で情報が欠落するので、一般に定性領域での計算は部分的にしか定義できない。

例えば、符号による定性化によって生じた領域では乗算は完全に定義できるが、加算については未定義の場合が生じる。すなわち、 $x > 0$, $y \geq 0$ ならば $x + y > 0$ であるので $[+] + [+] = [+]$, $[+] + [0] = [+]$ などの規則が定義できるが、 $x > 0$, $y < 0$ という情報だけからでは $x + y$ の符号は決められないので、 $[+] + [-]$ は未定義となってしまう。一般に、実数領域の計算を準同型に保存する単純で有効な定性化は知られていない。

ただし、逆に以上の性質を利用すると、精密な定量的性質を測定することが困難な関係 (例えば、ガスコンロで鍋を加熱しているときのガス栓の開き具合と鍋に伝わる時間あたり熱量の関係) を定性領域で自然に表現することができる。この性質は生体現象などのように定量的なモデル化が困難な領域で有効である。

4.2 時間軸の定性化

時間軸の定性化は値域の定性化に基づいて行われる。時刻 t におけるシステムの状態のベクトル表示を $s(t) = (\dots, x_i(t), \dots; \dots, dx_i/dt(t), \dots)$ とし、 $[s(t)] = (\dots, [x_i(t)], \dots; \dots, [dx_i/dt(t)], \dots)$ としよう。与えられた時刻 $t \in R$ に対して、次のような (連続した) 区間 $f_i : \langle f_s, f_e \rangle$ を考えよう (f_s, f_e はこの区間に含まれていてもいなくてもよい)。

$$\forall t' \in f_i \quad [s(t)] = [s(t')]$$

このような f_i のうち最大のものを $[t]$ と表し、時刻 t を含む (与えられた値域の定性化に関して、与えられたシステム S の状態が) 定性的に一樣な時区間と呼ぶ。

定性化が区間による被覆によって行われ、かつ各 $x_i(t)$ が C^∞ すると定性的に一樣な時区間 f の集合 F は時間軸に関する区間による被覆となり、更に Q の LANDMARK 集合は F の LANDMARK 集合に、 Q の INTERVAL 集合は F の INTERVAL 集合に対応する。 F の要素は上付添字 F によって表示する。

更に、 F はたかだか加算無限集合となり、 F の要

素 f について f の次にくる定性的に一樣な時区間が一意に定義できる。これを $\text{successor}(f)$ と表す。

このように、 F の要素 f_i は 1 列に順序づけられる。この順序に従って、 f_i に対応づけられた $[s(t)](t \in f_i)$ を順序づけた列を $\{[s(t)]_i(t \in f_i)\}$ をシステム S の (特定の初期条件に依存した) 挙動の定性化と呼ぶ。初期条件を変化させたとき与えられたシステムが取り得るすべての挙動の定性化の集合を全挙動の定性化という。

与えられたシステムに対して全挙動の定性化を求めることができれば、その動的特性の全容を把握できることになる。

4.3 挙動推定

定性化された領域にある情報だけを使って、与えられたシステムの全挙動の定性化を求めることは可能であろうか?

以下に述べるように、少なくとも符号による定性化に基づく方法では解答は一般に否定的である。与えられた時刻 t について $[s(t)]$ がわかっている、定性化された領域に存在する情報だけから $t^* \in \text{successor}([t])$ におけるシステム状態の定性的な記述 $[s(t^*)]$ を一意に決定することはできないからである。Forbus らは、一般的な場合についても悲観的な観測をしている (poverty conjecture)⁽⁹⁾。

そこで定性推論では、近似解として全挙動の定性化を部分集合として含むものを求めるか、ヒューリスティックや定量的な情報を用いて可能性の絞り込みを行うアプローチが取られる。このための技術を挙動推定と呼ぶ。一般に全挙動の定性化は無限集合になり得るので、計算機で挙動推定のアルゴリズムを実現するときは、これを有限長の記述で表現する必要がある。このためには普通、状態遷移図が用いられる。

以下では、簡単のため符号による被覆を例に取り、挙動推定の基本的な手法を示そう。このアルゴリズムでは、状態の定性化 $[s(t)]$ が与えられたとき、次のような制約を用いて $[s(t^*)](t^* \in \text{successor}([t]))$ の範囲を求める。

$$(1) \quad t \in \text{INTERVAL}_F^f, \quad t^* \in \text{LANDMARK}_F^f, \\ [t^*] \in \text{successor}([t]) \text{ のとき}$$

$$(a) \quad [s(t)] \neq [s(t^*)]$$

$$(b) \quad [x(t)] \text{ と } [dx/dt(t)] \text{ が同符号または後者が } [0] \text{ であれば, } [x(t^*)] = [x(t)]$$

$$(c) \quad [x(t)] = [+], \quad [dx/dt(t)] = [-] \text{ または } [x(t)] = [-], \quad [dx/dt(t)] = [+] \text{ ならば, } [x(t^*)] = [x(t)] \text{ または } [0]$$

$$(d) \quad [dx/dt(t)] = [0] \text{ ならば } [dx/dt(t^*)] = [0]$$

(2) $t^- \in \text{INTERVAL}_k^f$, $t \in \text{LANDMARK}_k^f$, $t^+ \in \text{INTERVAL}_k^f$, $t \in \text{successor}([t^-])$, $t^+ \in \text{successor}([t^+])$ のとき

- (a) $[s(t)] \neq [s(t^+)]$
- (b) $[dx/dt(t)] = [0]$ のとき
 - (b-1) $[dx/dt(t^-)] = [0]$ ならば, $[x(t^+)] = [x(t)] (= [x(t^-)])$, $[dx/dt] = [0]$
 - (b-2) $[dx/dt(t^-)] \neq [0]$ ならば, $[dx/dt(t^+)] \neq [0]$
 - (b-2-1) $[x(t)] = [0]$ ならば, $[x(t^+)] = [x(t)]$
 - (b-2-2) $[x(t)] = [0]$ ならば, $[x(t^+)] \neq [0]$.
- (c) $[dx/dt(t)] \neq [0]$ のとき,
 - (c-1) $[x(t)] = [0]$ のとき, $[x(t^+)] = [dx/dt(t^+)] = [dx/dt(t)]$
 - (c-2) $[x(t)] \neq [0]$ のとき, $[x(t^+)] = [x(t)]$, $[dx/dt(t^+)] = [dx/dt(t)]$

定性値の集合 Q が有限集合であるから, $[s(t^+)]$ の可能性は有限 ($|Q|^{2n}$; ただし, $\dim(s(t)) = 2n$) とおりしかないと注意されたい。この中から, 微分方程式で与えられた制約と, 上に与えられた制約を満足するものだけを選びだすことによって $[s(t^+)]$ の候補を求める。これは生成-テスト (generate and test) 法というタイプの手法が適用できる。実際のプログラミングには, 制約の伝搬 (constraint propagation) という手法⁽¹⁰⁾や ATMS に基づく仮説推論⁽⁸⁾などの技法が用いられる。ただし, このように $[s(t^+)]$ を完全に記述しようとする, 定性値の範囲でも $s(t^+)$ に関する不必要な区別が行われることがあるので, これを避けようとする試み⁽²⁵⁾もある。

5. 因果解析

挙動がどのようなメカニズムで起きるか知りたいとき, 前章のような定性計算だけでは不十分である。因果解析は, システムの状態変数の値の決定のされ方を解析することによって, 挙動のメカニズムを推定する技術である。例えば, $x = y + z$ という方程式が与えられているとしよう。ここで, x と y の値が別の原因で決められているとすれば, この方程式は z の値を決める動きをする。すなわち, このシステムの中で情報は変数 x と y から z に伝達されていると考えられる。このような情報伝達の構造を調べれば, 与えられたシステムの挙動のメカニズムを理解することができる。

因果解析には幾つかの方法⁽¹⁵⁾があるが, ここでは

我々のもの⁽¹⁴⁾を紹介しよう。この方法は区分線形方程式を対象にしている。因果解析は区分線形モデルを構成する線形領域ごとに行う。

5.1 方程式のグラフ表現

まず, 与えられた方程式を制約ネットワークと呼ぶ2部グラフの一種を用いて表現しよう。ノードには, 変数を表す変数ノードと方程式を表す方程式ノードの2種類があり, アークは両者の間のみに張られる。方程式ノード e と変数ノード v の間にアークが張られるための必要十分条件は, v の表す変数が e の表す方程式から直接参照されているときである。 $y = dx/dt$ のような方程式に対しては, y と x の導関数 dx/dt の間と dx/dt と x の間にアークを張る。ただし, 後者については通常の算術的關係とは異なるので別の種類のアークを張る。

各アークには次のような規則に基づいて方向を与える。

- (1) 外部からの入力を表す変数に対応する変数ノードを一端にもつアークは変数ノードから方程式ノードに方向付ける。
- (2) 外部への出力を表す変数に対応する変数ノードを端にもつアークは方程式ノードから変数ノードへ方向付ける。
- (3) 上以外の変数 x に対応する変数ノードを端にもつアークが m 個あるとき, 1 個だけのアークが変数ノードから方程式ノードに方向付けられ, 残りのアークはその逆の方向に方向付けられる。
- (4) n 変数に関する方程式については, 対応する方程式ノードにつながれたアークのうちの一つだけが, 方程式ノードから変数ノードに方向付けられ, 残りの $n-1$ 個のアークは変数ノードから方程式ノードに方向付けられる。また, 変数とその導関数の間に張られるタイプのアークについては, 導関数からその不定積分 (変数) への方向付け (積分的因果関係) を優先する。

図 4 簡単なパルス回路

*2: 回路方程式をたてたときのトランジスタのモデルは簡単なものを用いた。

(a) TTL〔図4(a)〕でTR1が飽和、TR2がオフのときの因果解析結果(一部)

- 記法 ① ○は方程式ノード、変数名は対応する変数ノードを表す。
 ② →と---は情報伝達経路を表す。前者は値の変化を引き起こすもの、後者は値の変化を引き起こさないもの。

(b) 無安定マルチバイブレータ〔図4(b)〕でTR1がオン、TR2がオフのときの因果解析結果

図5 図4の回路の因果解析結果

この方式によって、図4(a)、(b)の回路のある動作モードにおける線形方程式^{*2}の因果解析を行った結果をそれぞれ図5(a)、(b)に示す。

図5(a)では、この回路において入力電圧 $V-IN$

の情報が $V\#1 \rightarrow TR1-V-E \rightarrow \dots$ という経路で各変数に伝達されることを示している。一方、(b)図はコンデンサ $C1$ に流れ込む電流 $C1-IC$ の積分によって決まる電圧 $C1-VC$ が情報源となる。ここからの信号

伝達経路は、 $R2-V\#1 \rightarrow R2-VR \rightarrow C1-IC$ という経路と、 $TR2-V-B \rightarrow TR2-VBE$ という経路の二つがある。

因果解析で得られる情報は挙動推定でも、与えられた状態において次に起きる定性的な変化とその結果を予測するために活用できる。

例えば、図 5(a)では $V-IN$ を上昇させると、(1)トランジスタ $TR1$ のベース電流 $TR1-IB$ が減少し、やがてトランジスタ $TR1$ がオフになるか、(2)トランジスタ $TR2$ のベースエミッタ電圧 $TR2-VBE$ が上昇し、やがてトランジスタ $TR2$ がオンになるか、のいずれかが起こり得ることがわかる。更に、定量的な情報を用いて両者を比較すると後者のほうが先に起きることがわかる。

一方、図 5(b)については、この状態で回路の挙動に定性的な変化をもたらす得る変数の値の動きは次のようなものである。(1) $TR2-VBE$ (トランジスタ $TR2$ のベース電圧)が上昇しつつあり、やがて $TR2$ がオンになるか、(2) $TR1-IB$ ($TR1$ のベース電流)が減少しつつあり、やがてこの電流が 0 になり、 $TR2$ がオンになるか、(3) $C2-IC$ ($C2$ への流入電流)が減少しつつあり、やがてこの電流が 0 になるかのいずれかが起こり得ることがわかる。更に解析すると(2)より(3)のほうが先に起き、更に(3)より(1)のほうが先に起きることがわかり、結局次の変化は(1)であると予測される。

```
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)
QR-1: 定性推論システム(16), user: ユーザ
```

図 6 因果解析を利用した挙動説明の生成例

以上のような推論機構およびこれを利用して回路の定性解析を行う機構が、我々の作成したプログラム $QR-1$ ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ に組込まれている。また、 $QR-1$ では因果解析を利用して図 6 のように質問に答えたり、動作のメカニズムを説明したりできる。

この章で述べた因果解析の手法のほかにヒューリスティックを用いた手法⁽²⁾⁽³⁾も知られている。

6. 最近の研究動向

上述した基本的な枠組みには幾つかの問題があり、その解決法について研究が行われつつある。また、新しい試みも幾つかは始められている。そのうちの幾つかを示そう。

(1) あいまい性の解決 量に関する情報を用いなければ不確定性が大きくなり、挙動が一意に予測できなくなる。これを解決するための方向としては、(i) 定量的なモデルから得られる制約を追加する⁽¹²⁾、(ii) 量の大きさの程度 (order of magnitude) に関する推論⁽²²⁾など、新しい定性化の方向を探るアプローチがある。また、同時に計算過程であいまい性を引き起こす区別を行うことをなるべく遅延させようとする試み⁽²⁵⁾もある。

(2) 階層的定性推論 大規模なシステムを取扱うためには推論の階層化が必要である。階層化の観点として、速い変化と遅い変化の区別⁽¹¹⁾、異なる記述の抽象度 (または近似度) の区別⁽⁴⁾⁽²¹⁾⁽²⁶⁾などがある。また、プロセス中心のアプローチ⁽⁶⁾も階層化には有効であると考えられる。

(3) 幾何学的アプローチ 定性相空間解析⁽²³⁾や定性運動学⁽⁵⁾⁽⁹⁾では、定性化の領域は代数的領域ではなく、幾何学的領域である。これらの方式は理論的ベース (力学系) もしっかりしており、今後この視点からの研究が活発化すると考えられる。

(4) 比較解析 (comparative analysis)⁽²⁴⁾ 与えられたシステムのパラメータを変化させたときの挙動の定性的な変化の解析

(5) 応用 定性推論を診断⁽¹⁾や設計など、より広い枠組みのなかに統合する試みも活発化してきている⁽¹⁸⁾。また人工知能の基礎的な部門では、特に機械学習 (machine learning) の研究で帰納や類推を検証するための領域理論 (domain theory) として注目されている⁽⁷⁾。これらの詳細については文献(19)、(20)を参照されたい。

現在、定性推論の分野における最大の未解決問題は次の二つである。

(1) あらかじめ与えた範囲でしか答えが求められ

ない（ボトムアップ性）。

(2) 分布定数系に対する有効な定性化の手法が見つかっていない。

これらの解決がこの分野の今後の発展の鍵となっている。

7. 終りに

定性推論は、今後の知識情報処理における重要な要素技術の一つとして研究が活発化している分野である。本解説では、基本的な考え方について説明し、現在の研究動向を簡単に紹介した。

(平成元年5月31日受付)

文 献

- (1) P. Dague, O. Raiman & P. Deves: "Troubleshooting: when modeling is the trouble", in Proc. AAAI-87, p. 600 (1987)
- (2) J. de Kleer & J. S. Brown: "A Qualitative Physics based on Confluences", *Artif. Intell.*, **24**, 7 (1984)
- (3) J. de Kleer: "How Circuits Work", *ibid.*, **24**, 205 (1984)
- (4) R. J. Doyle: "Constructing and Refining Causal Explanations from an Inconsistent Domain Theory", in Proc. AAAI-86, p. 538 (1986)
- (5) B. Faltings: "Qualitative Place Vocabularies for Mechanisms in Configuration Space", PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign (1987)
- (6) K. D. Forbus: "Qualitative Process Theory", *Artif. Intell.*, **24**, 95 (1984)
- (7) K. D. Forbus & D. Gentner: "Learning Physical Domains: Toward a Theoretical Framework", in: Michalski, R. S., Carbonell, J. G., and Mitchell, T. M. (eds.): *Machine Learning--An Artificial Intelligence Approach*, Vol. 2, Morgan-Kaufmann, p. 311 (1986)
- (8) K. D. Forbus: "The Qualitative Process Engine: A Study in Assumption-based Truth Maintenance", in *Qualitative Physics Workshop Abstracts, Qualitative Reasoning Group, University of Illinois at Urbana-Champaign* (1987)
- (9) K. D. Forbus, P. Nielsen & B. Faltings: "Qualitative Kinematics: A Framework", in *Proceedings IJCAI-87*, p. 430 (1987)
- (10) B. J. Kuipers: "Qualitative Simulation", *Artif. Intell.*, **29**, 289 (1986)
- (11) B. J. Kuipers: "Abstraction by Time-Scale in Qualitative Simulation", in Proc. AAAI-87, p. 621 (1987)
- (12) B. J. Kuipers & C. Chiu: "Taming Intractable Branching in Qualitative Simulation", in: Proc. IJCAI-87, p. 1079 (1987)
- (13) 溝口・古川・安西(編): 定性推論(平元) 共立出版
- (14) 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」, 情報処理学論, **28**, 177 (昭62-2)
- (15) 西田: 「定性的推論—常識的思考法のモデル—」, 人工知能学誌, **2**, 30 (昭62-1)
- (16) T. Nishida & S. Doshita: "Reasoning about Discontinuous Change", Proc. AAAI-87, p. 643 (1987)
- (17) 西田・堂下: 「簡単なバルス回路における不連続変化の定性的解析法」, 人工知能学誌, **2**, 501 (昭62-4)
- (18) 西田: 本格的な応用期が近づく定性推論, 日経 AI 別冊: エキスパートシステム最前線—統合化への加速, p. 190 (昭63) 日経 BP 社
- (19) 西田: 「定性推論に関する最近の研究動向(I) 基礎技術の進歩」, 情報処理学誌, **29**, 1009 (昭63-9)
- (20) 西田: 「定性推論に関する最近の研究動向(II) 新しい研究分野・応用」, 同上, **29**, 1322 (昭63-11)
- (21) T. Nishida, A. Takeshita & S. Doshita: "A Heuristic Method of Guiding Model Inference", in Proc. International Computer Science Conference '88, Hong Kong, p. 104 (1988)
- (22) O. Raiman: "Order of Magnitude Reasoning", in Proc. AAAI-86, p. 100 (1986)
- (23) E. Sacks: "Piecewise Linear Reasoning", in Proc. AAAI-87, p. 665 (1987)
- (24) D. S. Weld: "Comparative Analysis", *Artif. Intell.*, **36**, 333 (1988)
- (25) B. C. Williams: "Doing Time: Putting Qualitative Reasoning on Firmer Ground", in Proc. AAAI-86, p. 105 (1986)
- (26) 吉田・元田: 「階層的定性推論のための浅い知識の合成法」, 人工知能学誌, **4**, 447 (平元-4)