

解説

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†



西 田 豊 明†

1. はじめに

定性推論の目的は動的なシステムの挙動の定性的な性質を定性的に解析する方法を開発することである。前稿³¹⁾では定性推論に関する最近の研究動向のうち基礎技術の進歩について紹介した。本稿では、定性推論の新しい研究分野と応用技術について紹介する。

2. 定性推論の新しい分野

2.1 相空間解析

系のパラメータの張る多次元空間を相空間 (phase space) という。相空間の各点はある時刻における系の状態を与える。系の経時的なふるまいは、相空間における点の動きとして捉えられ、系全体のふるまいは相空間における軌道の集まりとして捉えられる。このように相空間という概念は変数群によって規定される系の動態を幾何学的な視点から定性的に把握するための有力な手段である。

MIT の E. Sacks は、非線形系から生成された折線近似 (piecewise linear approximation) の相空間を定性的に解析するシステム PLR を提案している³⁸⁾。また、同じく MIT の K. Yip は、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う手法を提案している⁴⁴⁾。

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、これまでの定性推論より精密な情報を導出している。

2.1.1 折線近似推論

E. Sacks の PLR (Piecewise Linear Reasoning)³⁸⁾ は与えられた非線形微分方程式を次のような手順で

解析する。

(1) 与えられた非線形微分方程式の非線形部分を折線近似する。

(2) その結果得られた線形方程式に対する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) を作り出す (局所解析)。

(3) 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)。

この過程で、領域から二つ以上の領域に遷移する可能性が検出されると、その領域をさらに分割していった、領域からの出リンクが1本、すなわち状態遷移の可能性が唯一に決まるようにする。

たとえば、Van der Pol 方程式

$$I'' + K/L \cdot (3I^2 - 1)I' + I/LC = 0$$

(I は時間の関数) (1)

が与えられたとしよう。PLR は、 $3I^2 - 1$ という項を、 $|I| \leq 1/\sqrt{3}$ で $-2/3$, $1/\sqrt{3} < |I|$ で $(\sqrt{3}+1)/3$ という定数項で近似した折線近似^{*}：

$$\begin{cases} |I| \leq \frac{1}{\sqrt{3}} : I'' - \frac{2K}{3L} I' + \frac{1}{LC} I = 0 & (2) \\ |I| > \frac{1}{\sqrt{3}} : I'' + \frac{\sqrt{3}+1}{3} \frac{K}{L} I' + \frac{1}{LC} I = 0 & (3) \end{cases}$$

を生成し、それぞれについて相空間解析を行う。するとそれぞれについて図-1(a)(b)のような軌道が存在

* Van der Pol の方程式は、 $V = K(I^3 - I)$ という非線形特性をもつ素子、インダクタンス L 、キャパシタンス C を直列にループ状に接続した回路の方程式。

$V = k(I^3 - I)$ (K は正の定数) (4)

$dV/dt + I/C + L \cdot d^2I/dt^2 = 0$ (5)

(ただし、 V, I は非線形項の電圧と電流を表す)

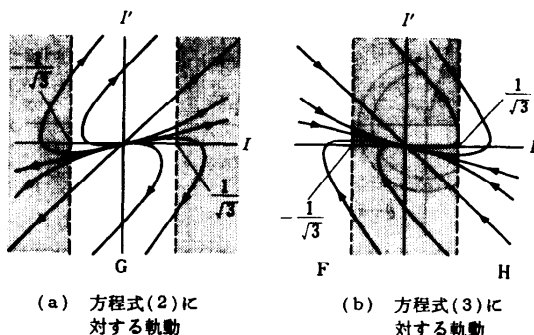
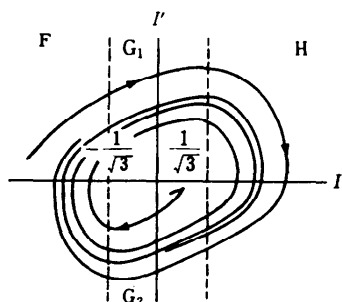
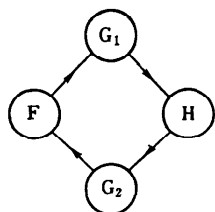
を簡約化すると生じる。本文中の近似(2)、(3)は非線形項を作り出す(4)の右辺の $(I^3 - I)$ という項を三つの線形項

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}+1}{3} I (I+1) & (I < -\frac{1}{\sqrt{3}} \text{ のとき}) \\ -\frac{2}{3} I & (-\frac{1}{\sqrt{3}} \leq I \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ のとき}) \\ \frac{\sqrt{3}+1}{3} I (I-1) & (\frac{1}{\sqrt{3}} < I \text{ のとき}) \end{cases}$$

で近似したものと考えてよい。

† Recent Trend of Studies with Respect to Qualitative Reasoning (Ⅱ) New Research Area and Application by Toyoaki NISHIDA (Department of Information Science, Faculty of Engineering, Kyoto University).

† 京都大学工学部情報工學教室

図-1 方程式(2)(3)の相空間解析²⁰⁾図-2 図-1(a)(b)の軌道をつないだ結果²⁰⁾図-3 図-2の領域間の状態遷移図²⁰⁾

することが認識される。

PLR はこれらの部分的な解析結果をつなぎ合わせることで、折線近似された方程式には全体として図-2のような軌道が存在することを認識する。ここで領域 G からは領域 F にも H にも遷移が起こるので、PLR は領域 G をさらに G_1 と G_2 に分割する。最後に PLR はこれらの領域間の状態遷移図を生成する (図-3)。

残念ながら PLR は折線近似の組合せによって発生する全ての線形領域について解析を行わなければならない。

2.1.2 計算幾何学の手法を用いた相空間の動態の把握

一方、動的システムの動態は相空間の幾何学的特徴

を把握することによって把握できる。一般に、与えられた系の相空間は数値計算によって近似的に描くことができる。しかし、単純なメッシュ分解によって近似しようとする膨大な計算が必要になり、また、量子レベル以下の現象が見失われる恐れがある。Yip は、与えられた動的システムのクラスが分かっているとき、そのクラスのシステムの相空間における強い制約を利用して、数値実験のはじめ方、次に行う実験の決定、実験の終了判断を知的に行う方法について研究を行っている⁴⁴⁾。

このようにして得られた相空間ポートレートはさらに計算幾何学・コンピュータビジョンの手法を利用して解析され、軌道のタイプ、領域のクラス、存在する領域とその重心・形状、などが認識される。これによって与えられた系の動態が把握される。

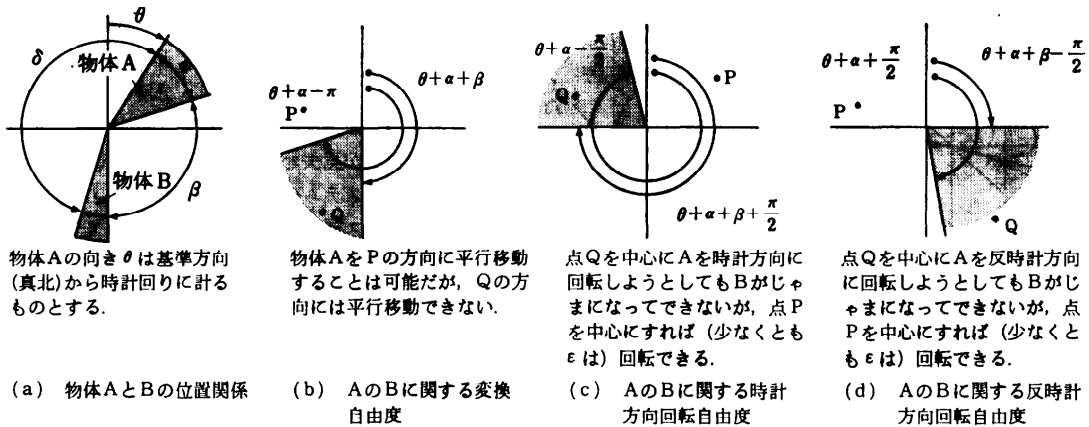
2.2 定性運動学

定性運動学は与えられた対象の形状の幾何学的記述から、「二つ以上の剛体が空間内の点を同時に内部点としても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。

Joskowicz はギヤ、ロッド、ナットなどの高レベルの述語とその論理結合による系の構造記述からふるまいを導出する手法²²⁾を示している。解析は、相互作用する部品のごとに制約を導出する局所的な相互作用の解析と、動態を示す述語のパラメータ間の依存関係を伝播して系全体のふるまいを導出する大域的な相互作用の解析から成る。この方法は、限られた場合には有用であるが、運動自由度が高い場合や対象の形状がギヤ、ナットなどの高レベルの述語の組合せとして表せない場合には適用できない。一般に、形状をはじめとする空間概念を原始的なシンボルの論理的な組合せとして表現することは非常に困難であると考えられる ((定性的語彙に関する) 貧困性仮説, Poverty Conjecture¹⁷⁾)。

したがって、他の定性運動学のアプローチでは、固定された定性的表現や記号的表現を用いるのではなく、距離図式 (metric diagram)、局所的な曲率などの定量的な尺度から定性的な表現を問題ごとに動的に構成するという方法が用いられている。

Y. Shoham は空間における自由度の概念の定式化を試みた²³⁾。物体 A の物体 B に関する自由度は B を固定したとき A をどれだけ動かせるかという概念である。A の B に関する変換自由度は、B を固定したとき A をどちらの方向に平行移動できるかを示す。A の B



注) 上の式は $\alpha, \beta, \dots$ などの諸パラメータの値がある条件 ($\alpha + \theta \geq \pi$, $\alpha + \beta < \pi$) を満足するときのみ成立する。それ以外のときは異なる式になる。また、角度は時計回りに測るものとする。

図-4 空間における物体の自由度¹¹⁾

に関する (時計方向/反時計方向の) 回転自由度は、Bを固定したとき与えられた位置でAを (時計方向/反時計方向に) 回転できるか否かを示す (図-4)。

自由度の概念は物体の微小な部分の微小移動に関する局所的な概念であることに注意されたい。物体全体としての自由度は他の物体と接している部分で定義される自由度の共通集合をとればよい。

Shoham はこのような定式化のうえで次のようないくつかの基本的性質を示している。

〔2点定理〕 対象の変換自由度を奪うためには、少なくとも二つの接点を必要とする。

〔3点定理〕 凸の物体の変換自由度を凸の障害物によって奪うためには少なくとも三つの接点が必要である。

変換と回転という二つの概念は物体の運動を二つのパラメータによって捉えたものであると考えられる。より一般的に考えて物体の運動を n 個のパラメータによって特徴づけたとしよう。 n 個のパラメータの張る n 次元空間は C-space (Configuration space) と呼ばれる。C-space 内の各点は対象の一つの配置 (configuration) を表す。C-space は本来コンピュータビジョンで導入された概念である (Lozano-Pérez)。C-space の各点に対応する配置は物理的に可能であったり不可能であったりする。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。

多次元空間を扱うのは大変であるから、(定性) 運動学ではふつう直接相互作用する対象の対ごとに

C-space を作る。通常、各対象の状態は1変数で記述できることが多い (たとえばギヤの状態は基準方向からの回転角で記述できる) ので、以下ではこの場合のみについて考える。このとき C-space は対になっている対象の状態を記述した二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^{12), 17)} は C-space の自由空間をさらに有限個の疑似的に凸のセグメント (疑似凸面体と呼ぶ) の集まり (空間語彙, place vocabulary) に分解する。一般に、自由空間を囲む境界には凹のセグメントもありうるので、自由空間を完全な凸面体に分割することはできない。このため分割されたセグメントには一部凸でない部分が含まれていてもよいものとする。

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。

図-5 のラチェットの挙動解析のもとになる空間語

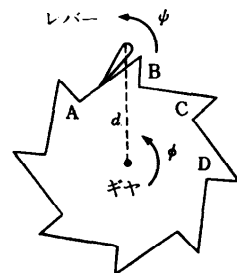


図-5 ラチェットの構造

彙を形成してみよう。

ラチェットはギヤとレバーと呼ばれる二つの部品から成る。それぞれの基準方向からの回転角をそれぞれ ϕ , ψ とすると、このデバイスの状態は ϕ - ψ による

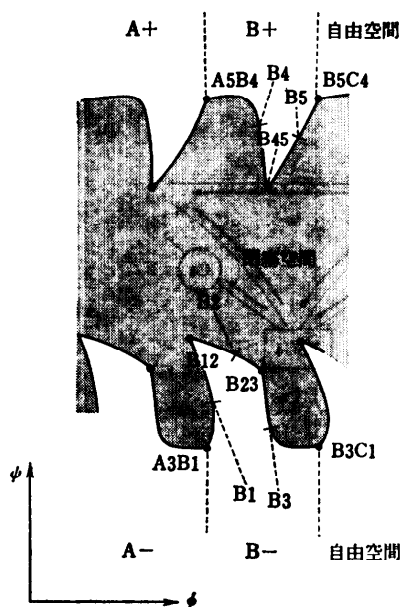


図-6 ラチェットの C-space

C-space 平面内の点として表される。C-space の様相はギヤとレバーの距離 d に依存する。図-6 に標準的な場合についての C-space の様子を示す。

トーンをつけたところが閉塞空間、白いところが自由空間である。さらに、自由空間を疑似凸面体で分割することによって図-7 のような空間語彙が得られる。

各疑似凸面体から直接に遷移できるのは隣接する凸面体に限られる。さらに制約が加えられて、たとえばギヤが左回りしかできないとすると、図-8 のような遷移しか許されなくなる。

空間の定性的な解析に関しては、このほか自律ロボットのカメラから連続的に入力される複雑で動的なシーンの解析においても定性的な情報の利用が効果的であるという報告³⁾がある。

2.3 比較解析

MIT の D. Weld による比較解析 (Comparative Analysis)⁴⁰⁾ 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。

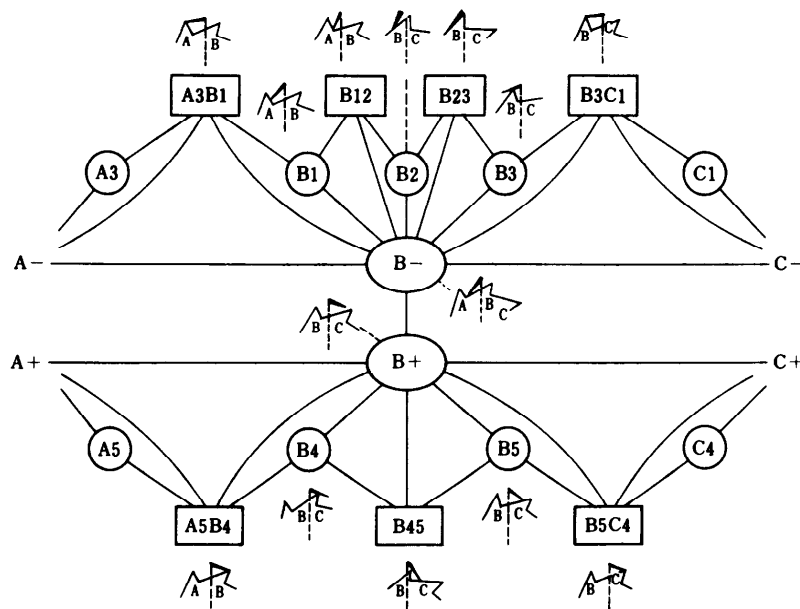


図-7 ラチェットに対する空間語彙の一部¹⁾

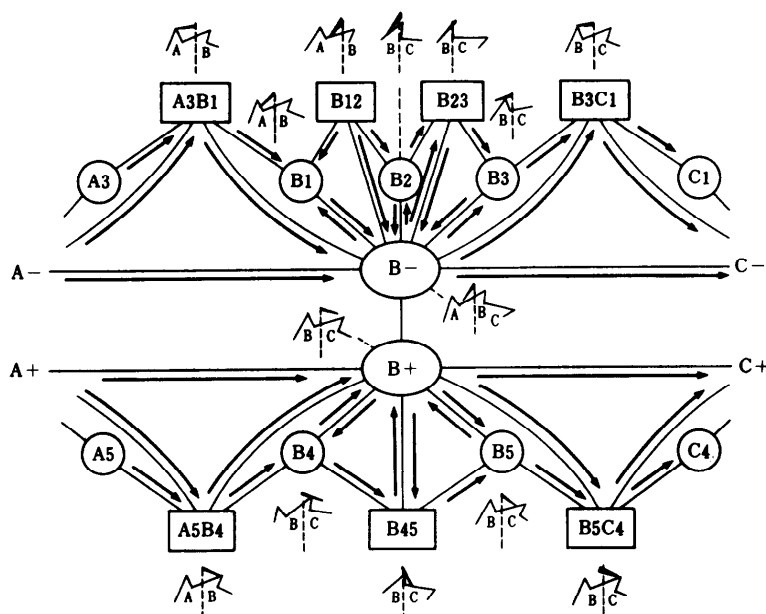


図-8 ギヤが左回りしかできないという条件下での状態遷移可能性¹⁴⁾

この図では力学は考慮していない。もし、さらに「レバーの重みのためにレバーは下から支えられていないかぎり下向き ($\psi=\pi$ の方向) になろうとする」という条件を加えると、B12 から B1 への遷移、B- から B1 への遷移などの可能性がなくなる。

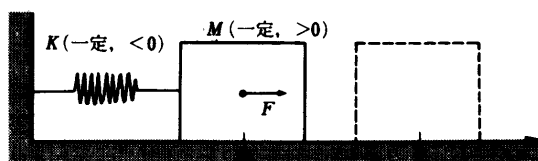


図-9 摩擦のない平面上に置かれ、壁とばねでつながれたブロック

$$A = \frac{dV}{dt}, V = \frac{dX}{dt}, F = M \cdot A, F = K \cdot X$$

DQA は定性シミュレータ QSIM²⁴⁾ 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を変化させない場合をベースにし、これをトポロジが変化する場合に拡張している。

比較解析を行うためには、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。

たとえば、図-9 のように摩擦のない平面上に質量 M の物体が置かれ、壁とばね定数 $K (<0)$ のばねでつながれている状況について考えてみよう。

ばねが自然長のときの物体の位置 X は 0 であるとする。いま、初期状態では物体の位置 X は $X=x_0 < 0$ であり、速度 V は 0 であるとする。するとこの物体

は右方向に動き始め、やがて $X=0$ の位置に到達する。ここで質量 M を大きくすると、物体が動き始めてから位置 $X=0$ に到達するまでの時間がどのように変化するかを求めたいという。

物体を放したというイベントを e_0 、物体が位置 $X=0$ に到達したというイベントを e_1 と呼ぼう。 e_0 から e_1 までの時区間に関する比較解析のための視点として使用できる変数は、 e_0 、 e_1 における値がパラメータ変更前後で等しく、かつ e_0 から e_1 まで単調に変化するものでなければならない。ここでは、変数 X を視点として利用できる。DQA による比較解析の過程を図-10 に示す。

DQA は健全ではあるが、完全ではない。すなわち、DQA によって得られた命題は正しいが、系の任意の性質が常に導けるという保証はない。

3. 定性推論研究用ツール

Kuipers の QSIM²⁴⁾ は、Waltz のフィルタを使って高速に制約充足を行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の溝口、大和田らによって PSI 上にもインプリメントされ³³⁾、

- | | | | |
|----------------------------------|------|------------------------|-------------|
| (1) $V(e_0)=0$ | } 制約 | (8) $M \uparrow e_0$ | } 問題の
条件 |
| (2) $x_0 < 0$ | | (9) $K \parallel e_0$ | |
| (3) $A = \frac{dV}{dt}$ | | (10) $V \parallel e_0$ | |
| (4) $V = \frac{dX}{dt}$ | | (11) $X \parallel e_0$ | |
| (5) $F = M \cdot A$ | | | |
| (6) $F = K \cdot X$ | | | |
| (7) M, K は定数
$K < 0, M > 0$ | | | |
- (12) 区間 (e_0, e_1) で $V > 0$ (1) (2) (3) (5) (6) (7)
- (13) $K \parallel \tilde{x}_{e_0, e_1}$ (7)
- (14) $F \parallel \tilde{x}_{e_0, e_1}$ (13) (6)
- (15) $A \downarrow \tilde{x}_{e_0, e_1}$ (14) (7) (8) (5)
- (16) $V \downarrow \tilde{x}_{e_0, e_1}$ (15) (3) (4) (10) (12)
- (17) イベント e_0, e_1 間の時間が長くなる (16) (4) (11)
- e_0 : ブロックの位置 $X = x_0$
 e_1 : ブロックの位置 $X = 0$
 $a \uparrow \frac{d}{dt}$: 時区間 d のすべての時点において、パラメータ変更後の動作系列における変数 a の値は、視点 ϕ によって対応づけられた時点における、パラメータ変更前の値よりも大きい。
 $a \parallel \frac{d}{dt}, a \downarrow \frac{d}{dt}$ の定義は上の下線部「よりも大きい」を「に等しい」、「よりも小さい」におきかえたもの。

図-10 DQA⁽⁴⁰⁾ による比較解析

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。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¹⁶⁾、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 TMS¹⁰⁾ や ATMS⁹⁾ 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。東京理科大の溝口らは制約プログラミングを使った定性推論システムについて報告している²⁰⁾。

4. 応 用

動的システムのふるまいを構造から導出し、その仕組みを説明できるという定性推論の特色がただちに活用できるのは知的教示システム (intelligent tutoring system) における問題解決と説明生成である。このような視点からの研究はかなり以前から取り組まれている。

観点を変えると、定性推論の過程で生成される説明は、対象の挙動のどの部分が構造のどの部分に依存し

ているかを示したものであり、この側面は診断や設計など工学的問題解決の局面においても有用であると考えられる。

定性推論のもたらす他のメリットとして、定量的な定式化が行われていない現象でも定性的なモデルが存在すれば推論が可能になる点があげられる。この点は特に医学のような分野に適していると考えられる。定量的なモデルが存在する場合でも、現象をまず定性的に捉えることによって現象の全体像を把握し、挙動の顕著な特性に注目して詳細な問題解決の指針を決定することができる。

以上のような点から、定性推論は対象モデルに基づいて問題解決を行う次世代知識ベースシステムのための要素技術の一つとして注目されている。

4.1 知的教示システムへの応用

定性推論と知的教示システムとの間の関わりは深い。知的教示システムで問題解決の手順や対象のふるまいの因果的な説明を生成したいとき、定性推論を適用することができる²⁵⁾。定性推論を適用することによって生徒が自分の問題を教示システムに与えて解決の過程を観察することによって学習する、生徒主導型の自発学習が可能になる。

定性推論の提唱者である、J. S. Brown と J. de Kleer らは SOPHIE I ~ III という電気回路教示システムを作成している²⁾。SOPHIE は大きく三つのバージョンに分かれる。はじめは、電気回路のシミュレータ (SPICE) を知的 CAI システムから呼び出して計算を行わせる方式が取られた。この方式は、生徒が自分の問題を CAI システムに示してその解を観察できるという生徒主導型学習が可能であるという利点があるが、回路の動きを説明することがかなり困難であるという欠点があった。このため、後のバージョンでは知的 CAI システム自体が回路のふるまいについて推論し、その過程を説明として提示するという方式が取られた。

SOPHIE では定性推論自体は用いられていないが、BBN を中心に⁴³⁾、その後何人かの研究者が知的 CAI への定性推論の応用に取り組んでいる。

B. White らは簡単な電気回路を対象とした物理システムの教示システムをとりあげた⁴¹⁾。彼女らは物理システムの教示は 0 次モデル (導関数を含まない定性推論のレベル)、1 次モデル (1 階の導関数を含んだモデル、系に含まれる定数がふるまいに与える影響に関する推論を含む)、定量化モデル、の順で行うべきで

あると主張している。とくに、電圧や電流などの電気回路の基本概念をもたない生徒に対しては0次モデルが有効であることを指摘し、0次の回路モデルのシミュレーションに基づく知的教示システムとそれを用いた実験について報告している。

国内では大阪ガスの宮阪・乾が Vanderbilt 大学と協力して、電力系統切り替え訓練システムへの応用を試みている³⁷⁾。

4.2 診断への応用

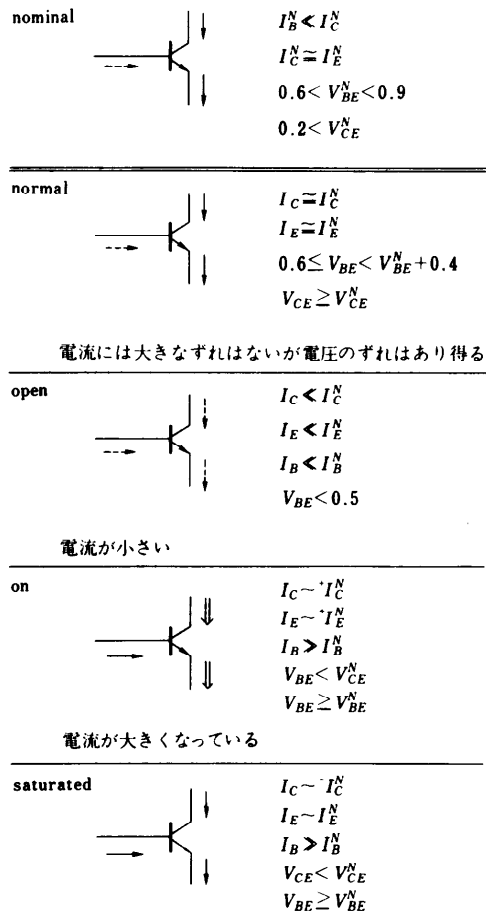
一般に、診断では定性的な情報ばかりでなく定量的な情報がかなり重要であるが、情報を定性的に記述することによって診断規則が明確化できるという利点がある。また対象のモデル(故障モデルを含む)から挙動を予測する定性推論の機能を利用して、診断規則を対象モデルから(半)自動的に体系的に生成することが考えられる。定性推論を診断に応用した初期の研究は、物理デバイス一般の診断に関する Pan の研究³⁸⁾、ターボジェットエンジンを対象とした R. Rajagopalan の研究³⁷⁾などがある。

我が国では、東京理科大学の溝口・大和田らによる医療診断への応用³⁹⁾、京都大学の石田によるプロセス診断への応用²¹⁾、大阪大学の溝口・山口ら¹⁹⁾および富士通の吉田・泉ら⁴⁵⁾によるデバイスの故障診断への応用、などの研究が行われている。

IBM パリ研究所の Dague らの研究⁷⁾は、定性推論を用いた診断を現実レベルの問題に適用し、成果をあげた最初の例である。アナログ回路の診断の問題を取り上げ、工場レベルで試験して成果を確認している。この方法の特色は、各部件の正常な動作モデル以外に、故障パターンをあらかじめ与えておく必要がないことである。

彼らがモデルベースの診断の一般理論として用いたのは、GDE (General Diagnostic Engine)⁹⁾である。GDE はモデルを用いた予測、仮説の管理、計測計画の立案を中心としたものである。

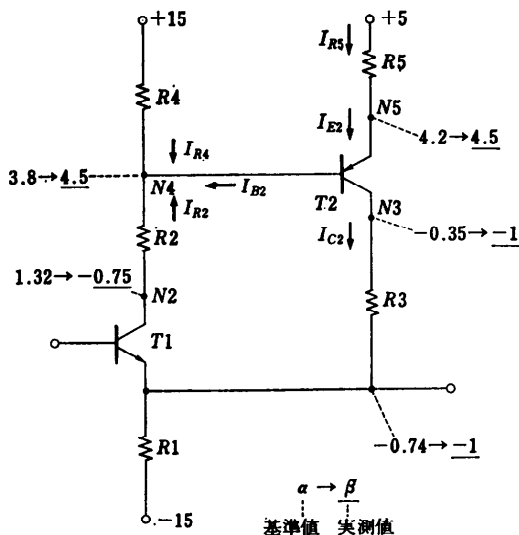
アナログ回路の診断にこの方法論を適用するときの問題は、設計されたデバイスの正常なふるまいの記述の難しさである。すなわち、デバイスの中に故障している部品があると、ある部品に関する計測値が設計値と大きく食い違っているにもかかわらず、その部品は故障でないことがある。このような側面は単なる誤差という概念では捉えきれない。また、重要なパラメータの計測が困難である(たとえば、プリント配線における電流)という問題もある。アナログ回路に関する



コレクタ電流が大きくないことを除いて on 状態と同様
図-11 OMR によるトランジスタの動作パターンの記述⁷⁾

数学モデルは当然存在するが、計算が複雑すぎて利用しにくいという点が指摘されている。

Dague らはこの問題を解決するために O. Raiman らの量の大きさの程度に関する推論 (Order of Magnitude Reasoning, OMR)³⁶⁾を採用した。OMR の記述法を使うと、図-11 のように、さまざまなモードで動作するトランジスタの正常なふるまいのパターンを、ある標準的なふるまいのパターンを基準にして記述することができる。故障診断は、回路のパラメータ値を測定して、これをあらかじめ計算してある標準値と比較することによって、両者のずれの程度を OMR の記法を用いて記号的に表す。次に、OMR の推論によって回路中の各節点の周辺で、故障がないと仮定したとき回路方程式が満足されているかどうかを調べる。もし満足されていないところが見つければ、回路

図-12 診断対象の回路と各節点の電圧の測定値^{*)}

方程式がすべて成立しているという仮定が成立しないことになり、回路に故障があると判断される。その場合、極小衝突集合 (minimal conflict set) を求め、故障に関与している可能性のある部分の組合せをすべて求める。Dague らはこの手法を用いて電子回路の故障診断システム DEDALE を実現した。

図-12 のような回路と測定結果を例にとって DEDALE の動作を説明しよう。DEDALE は測定値に基づいて各節点とその回りの部品 (ブロックと呼ばれる) について、各部品が正常に動作しているという条件に矛盾が生じないかどうかを調べていく。たとえば、ノード N4 を中心とするブロック B4=[N4, T2, R2, R4] について調べてみよう。ブロック B4 の全ての部品の動作が正常だと仮定すると、

- (1) $I_{B2} \ll I_{N2}$
- (2) $I_{N5} \sim I_{N4}$
- (3) $I_{N5} \equiv I_{N2}$
- (4) $I_{N2} \ll I_{N4}$ (1)(2)(3)
- (5) $I_{N2} \equiv -I_{N4}$ (4), キルヒホフの法則
- (6) $I_{B2} \ll I_{N2}$ (4)(5)

が成り立つはずである。ここで、

$x \ll y$: 量 x は量 y に対して無視できる。

$x \equiv y$: x と y のオーダが等しく、かつ x と y の差は x と y に対して無視できる。

$x \sim y$: x と y のオーダは等しいが、 x と y の差は x と y に対して無視できるとはいえない。

$x \sim^+ y$: $x \sim y$ でありかつ $x \equiv y$ でなくかつ $x > y$

(x は y とオーダは等しいが、 y よりはつきりと大きい)。

$x \sim^- y$: $x \sim y$ でありかつ $x \equiv y$ でなくかつ $x < y$ 。これらの関係の間には

$$x \equiv y, y \equiv z \text{ ならば } x \equiv z$$

$$x \ll y \text{ ならば } x + y \equiv y$$

などの関係が成り立つ。詳細については文献^{7), 31), 36)}を参照されたい。

一方、測定値を調べると、抵抗 R3 の両端の電位差が 0 であるから、この抵抗にはほとんど電流が流れていないことが分かる。したがってトランジスタ T2 のコレクタ電流 I_{C2} はほとんど 0 である。したがって T2 の状態は open (図-11 参照) であると考えられる。すると T2 のベース電流 I_{B2} は基準値 I_{N2} よりもきわめて小さいはずである。すなわち、

$$(7) \quad I_{B2} \ll I_{N2}$$

また、ノードの電位とオームの法則から、抵抗 R2, R4 を通ってノード N4 に流入する電流 I_{R2} , I_{R4} を求め、それぞれの基準値 I_{N2} , I_{N4} と比較すると、

$$(8) \quad I_{R2} \sim^+ I_{N2}$$

$$(9) \quad I_{R4} \equiv I_{N4}$$

と評価される^{*}。

さらにノード N4 に関するキルヒホフの電流則から

$$(10) \quad I_{R2} + I_{B2} \equiv -I_{R4}$$

が成り立つ。

これらの条件をすべてあわせると次に示すように矛盾が生じる。

$$(11) \quad I_{N2} \ll I_{R2} \quad \dots (6)(8)$$

$$(12) \quad I_{R2} \sim^+ -I_{R4} \quad \dots (5)(8)(9)$$

$$(13) \quad I_{B2} \ll I_{R2} \quad \dots (7)(11)$$

$$(14) \quad I_{R2} \equiv -I_{R4} \quad \dots (10)(13)$$

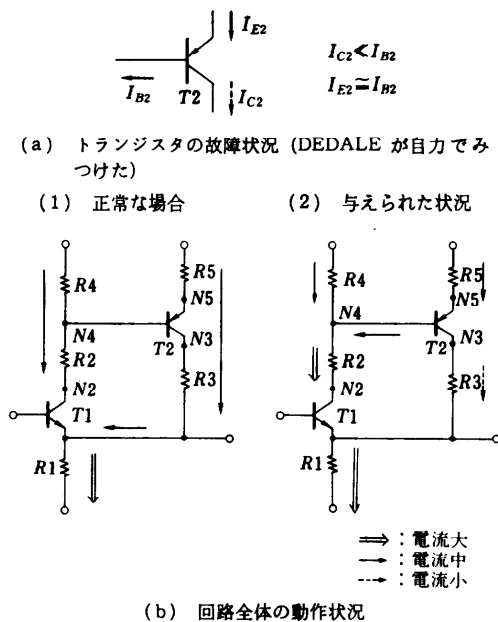
$$(15) \quad \text{矛盾} \quad \dots (12)(14)$$

この矛盾の生じたのは B4 に含まれる部品がすべて正常だと仮定したためである。したがって、B4 を構成する部品 N4, T2, R2, R4 のうちの少なくとも一つは故障していると考えられる。他のブロックについても同様に調べると、次のような結果が得られる。

B2: [N2, T1, R2] → 無矛盾

B3: [N3, T2, R3] → 無矛盾

^{*} R4 にかかる電圧は基準値 11.2V、測定値 10.5V であり、ずれは約 6% であるので、R4 を流れる電流に大して変動はないと考えられる。一方、R2 にかかる電圧は 5.25V (=4.5 - (-0.75)) であり、基準値の 2.48V (=3.8 - 1.32) とオーダは同じでもそこから著しくずれていると考えられる。ただし、測定値の具体的な評価方法は原論文⁷⁾で触れられていない。おそらく経験則が用いられると思われる。

図-13 故障のある回路の挙動の説明³⁾

B5: [N5, T2, R5] → 矛盾

N4 や N5 のような節点は正常であると仮定すると、B4, B5 に矛盾を生じさせるいかなる故障集合も [T2], [R2, R5], [R4, R5] のいずれかを必ず含んでいなければならないことが分かり、これらが故障箇所の候補となる。

故障は単一であると仮定するのが最も確からしいから [T2] が最有力候補となる。そして、以上の解析過程で得られた情報を使うと、トランジスタ T2 は図-13(a) のような誤動作パターンをしており、回路全体として図-13(b) のようなふるまいをしていたこともわかる。

Dague らによれば、回路製造を行っている工場で DEDALE の評価を行ったところ、故障によって回路のふるまいに顕著な変化が生じている場合 (すべての故障のうちの 75% にあたる)、DEDALE はそのすべてを検出できたという。

このほか定性的な診断規則を用いて電気回路の故障診断を行う試みも報告されている⁶⁾。

4.3 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。したがって、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、定性推論の手法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う手法を提案している。

また、一般の設計では概要設計の段階 (たとえば、電気回路では回路トポロジを決定する段階) は詳細設計の段階 (電気回路では、回路パラメータの決定に相当する) に比べて確立された方法が少ないため、人間の勘と経験に依存する傾向が強いが、定性推論をこの段階に適用することも考えられる。

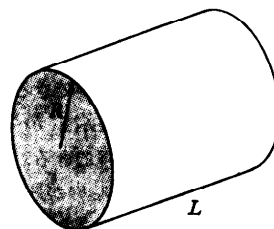
4.3.1 Murthy と Addanki の PROMPT

典型的な設計技法である段階の詳細化法は、与えられた抽象的な目標を原始部品によって直接実現できるレベルまで繰り返し詳細化していく方法である。詳細化の過程では、与えられた目標からより詳細なレベルの目標が生成されるとき、詳細レベルの設計が満足すべき制約も同時に課せられる。このため、設計が最終段階まで進んだとき、課せられた制約を満足する部品がまったくなくなってしまうことがありうる。

そのようなとき原理的知識を使って失敗の原因を同定し、構造と挙動の関係を再解析することによって、必要な部品を合成することが考えられる。構造から挙動を導出するために定性推論の手法を用いることが考えられるが、既存の方法を用いると対象の複雑度が高いとき計算コストが膨大になるという問題が生じる。

Murthy と Addanki は、中間的なアプローチとして、修正オペレータ (modification operator) とモデルグラフ (graph of model) という手法を使って、部品の構造と挙動の関係を再解析し、目的にあった規格外の部品を創出するという方法を提案している³⁰⁾。修正オペレータは、プロトタイプに対してあらかじめ考えられる修正の方法とそれに必要なヒューリスティックをまとめたものである。モデルグラフは各部品に関して異なる仮定のもとで作られたモデルの間の関係づけを行う。

たとえば、用意された機械部品 (ビーム、図-14) の

図-14 ビーム³⁰⁾

ライブラリ中に与えられた耐撓性と軽量性を同時に満足するものがなかったとしよう。

Prompt は要求と失敗のタイプを解析して強度と重量の間で問題が生じたことを見だし、修正オペレータのパッケージの中から、MRO (Mass Redistribution Operator) を選択する。MRO は負荷の小さなところから質量を取り除いて、負荷の大きなところへ移動させる修正に関するものである。MRO はまず応力分布を求め、それに基づいて修正を施す。Prompt は MRO に対応づけられた解析規則によって部品のモデルを解析し、応力の分布がビームの中心軸の回りに対称であること、応力は半径とともに増加すること、つまり

$$dM = r \cdot df$$

r : 領域 dA の中心からの距離

df : 領域 dA に加わる力

dM : 領域 dA に加わるトルク

を導く。応力分布を図-15 に示す。

これより、MRO はビームの中心から半径 R_i の円筒形をくり抜く方向で修正を検討する。そして、応力の小さなビームの中心部から質量を取り除いてみて条件が満足されるかどうかを調べる試行錯誤を何回か行い、図-16 のような部品を合成する。

この方法は狭い意味では定性推論によるものであるとは言えないかもしれないが、

(1) デバイスの構造記述から原理的知識に基づいて挙動に関する定性的性質を導出するコンポーネントを含んでいる、

(2) 処理の重点は定性的な情報を利用して設計プロセスの誘導を行うところにある(上の例では、ビー

ムの中心にいくほど応力が小さくなるので、その質量を減らすという方針を採用することにあたる)、などの点で広い意味での定性推論の範疇にはいると考えられる。

4.3.2 Williams の原理型設計論

一方、B. Williams が提唱している原理型設計論 (Principled Design)⁴²⁾ は、同一知識に基づいて設計・解析・デバッグができることを示唆したものである。とくに設計に関しては定性的設計フェーズ(たとえば、アナログ回路設計では回路トポロジの決定に相当する)と定量的設計フェーズ(回路定数の決定に相当する)の2段階からなる設計法を提唱している。設計フェーズを2段階に分割する理由は、設計における探索空間を削減するためである。はじめに定性的なレベルで概要設計を行い、そこで十分探索範囲を限定してから定量的解析を含んだ詳細設計を行う。

4.4 知識獲得

人間の専門家が対象に関してもっている知識は医学のような分野ではかなり定性的な傾向が強く定性的にしか特性化できないことが多い。したがって、そのような知識をコンピュータに移植するためには知識表現形式そのものが動的なプロセスの定性的な表現とその上での推論を許すことが望ましい。

Kuipers と Kaissirer は、熟練医ではないが一人前の医者 (journeyman) へのインタビューで得られた口述筆記を解析して含まれている対象、イベント、イベント間の因果関係を抽出して定性モデルをつくり、定性シミュレータでシミュレートすることによりモデル内の不整合性をチェックする試みについて報告している²³⁾。この方法は領域に関する教科書的な知識、人間とエキスパートの間での質問応答例の解析、シミュレーションがうまく実行されるための計算論的な制約を結合した知識獲得の有効な手法であると考えられる。このような手法は適用範囲が広く、知識獲得への応用はこれからますます試みられることになると考えられる。

さらに発展的な研究として、量に関する定性的な情報と定量的な情報を結合して科学的事実の再発見をシミュレーションするプログラムへの応用 (Nordhausen-Langley)³²⁾、類推的推論を用いた領域理論の学習プログラム (Forbus, Gentner, Falkenhainer)^{11), 15)}、などが報告されている。

4.5 その他の応用

Schlumberger Palo Alto 研究所の J. Mohammed



図-15 ねじり負荷の下での負荷図 (loading diagram)³⁰⁾

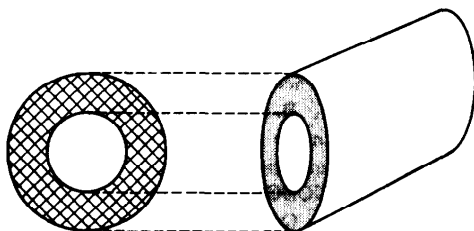


図-16 質量とねじれ強さの拘束条件適合するためのプロトタイプの修正³¹⁾

らは半導体製造過程用の支援ツール作成のための基礎として、半導体製造過程においてウェーハに加えられた操作の定性的なモデルとそのシミュレータを作成した²⁹⁾。このシステムはウェーハへの操作の経歴 (history) を操作間の依存関係 (たとえば、どの操作がウェーハのどの属性に影響を与えたか、属性は操作のどのパラメータに影響されたか、など) とともに記録する。この記録は新しい製造法の作成、故障診断、定量解析への補助 (感度解析のための記号表現の作成や導関数を記号的に計算するための機能の提供など) に使われる。

このほかに、計測データの解釈問題への適用 (Forbus)^{13), 14)}、経済現象のモデル化 (Apte-Hong¹⁾、Hart¹⁶⁾), 異なる存在論の間でのモデル間の変換 (Collins)⁵⁾、対象世界モデルからのプランニングオペレータの抽出とプランニング (J. Hogge)²⁰⁾、連続プロセスの管理・プロセス制御への応用 (Caloud⁴⁾、Lepetit²⁶⁾), などが報告されている。

5. ま と め

これまで2回にわたって定性推論における最近の研究動向について紹介してきた。定性推論を含む人工知能の分野ではこれまで離散系・記号系に関する推論の研究が主体であった。そのため世の中に一般的に存在する連続系を解析するには人間が連続系の事態を記号的記述に変換する必要があった。このような知覚機構を伴わない推論系は大きく能力が制限される。定性推論の特色は一口で言うと人工知能で従来展開されてきた記号推論の枠組みによって連続系の挙動を解析するところにある。工学的問題解決のための要素技術の一つとして定性推論は次のような局面で有効性を発揮する。

- (1) 系の挙動の定性的な性質が知りたい。
 - (2) 系の挙動の仕組みが知りたい。
 - (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う前に粗い解析を行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。
- 一方、現在の定性推論にはまだ多くの技術的課題が残されている。とくに重要なものとして、
- (1) 定量的な推論技法との融合 (ただし、このことはすでに一部のシステムでは試みられている)
 - (2) 分布定数系の解析法の開発

(3) 大規模システムを解析するための手法 (とくにサブシステムへの分割、大域的性質の導出、適切な表現手法の生成) などがあげられる。

定性推論の根底には、人間が高次元の連続領域上の現象を理解するためにはどのような概念が必要なのか、そのような概念をどのように表現すればよいか、その表現の上での操作系としてどのようなものが必要なのか、明らかにしたいという問題意識がある。これらは難問ばかりであるが、人工知能の基礎に関わる重要な問題である。今後の研究が期待される。

査読者から有益なコメントをいくつかいただいた。末筆ながら感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Apte, C. and Hong, S.-J.: Using Qualitative Reasoning to Understand Financial Arithmetic, Proc. AAAI-86, pp. 942-949 (1986).
- 2) Brown, J. S., Burton, R. R. and de Kleer, J.: Pedagogical, Natural Language and Knowledge Engineering Techniques in SOPHIE I, II, III, in Sleeman, D. and Brown, J. S. (eds.), Intelligent Tutoring Systems. Academic Press, pp. 227-282 (1982).
- 3) Burger, W. and Bhanu, B.: Qualitative Motion Understanding, Proc. IJCAI-87, pp. 819-821 (1987).
- 4) Caloud, P.: Towards Continuous Process Supervision, Proc. IJCAI-87, pp. 1086-1089 (1987).
- 5) Collins, J. W. and Forbus, K. D.: Reasoning about Fluids via Molecular Collections, Proc. AAAI-87, pp. 590-594 (1987).
- 6) Cunningham, P. and Brady, M.: Qualitative Reasoning in Electronic Fault Diagnosis, Proc. IJCAI-87, pp. 443-445 (1987).
- 7) Dague, P., Raiman, O. and Deves, P.: Troubleshooting: when modeling is the trouble, Proc. AAAI-87, pp. 600-605 (1987).
- 8) de Kleer, J.: An Assumption-based TMS, Artificial Intelligence, Vol. 28, pp. 127-162 (1986).
- 9) de Kleer, J.: Diagnosing Multiple Faults, Artificial Intelligence, Vol. 32, pp. 97-130 (1987).
- 10) Doyle, J.: A Truth Maintenance System, Artificial Intelligence, Vol. 12, pp. 231-272 (1979).
- 11) Falkenhainer, B.: An Examination of the Third Stage in the Analogy Process: Verification-based Analogical Learning, UIUC-ENG-86-1763 (UIUCDCS-R-86-1302), Oct. (1986).
- 12) Faltings, B.: Qualitative Kinematics in Mechanisms, Proc. IJCAI-87, pp. 436-442 (1987).
- 13) Forbus, K. D.: Measurement Interpretation in

- Qualitative Process Theory, Proc. IJCAI-83 (1983).
- 14) Forbus, K. D.: Interpreting Measurement of Physical Systems, Proc. AAAI-86, pp. 113-117 (1986).
- 15) Forbus, K. D. and Genter, D.: 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, pp. 311-348, Morgan-Kaufmann (1986).
- 16) Forbus, K. D.: 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).
- 17) Forbus, K. D., Nielsen, P. and Faltings, B.: Qualitative Kinematics: A Framework, Proc. IJCAI-87, pp. 430-435 (1987).
- 18) Hart, P. E., Barzilay, A. and Duda, R. O.: Qualitative Reasoning for Financial Assessments: A Prospectus, The AI Magazine, Vol. 7, No. 1, pp. 62-68 (1986).
- 19) 林, 山口, 溝口, 角所: 定性的推論におけるメンタルモデルからの制約条件に関する考察, 昭和62年度人工知能学会全国大会論文集, pp. 61-64 (1987).
- 20) Hogge, J. C.: TPLAN: A Temporal Interval-based Planner with Novel Extensions, UILU-ENG-87-1759, University of Illinois at Urbana-Champaign (1987).
- 21) 石田: 定性的推論を利用したプロセス診断知識獲得, 日本ソフトウェア学会第4回大会論文集, D-4-1 (1987).
- 22) Joskowicz, L.: Shape and Function in Mechanical Devices, Proc. AAAI-87, pp. 611-615 (1987).
- 23) Kuipers, B. J. and Kaissirer, J. P.: Causal Reasoning in Medicine: Analysis of a Protocol, Cognitive Science, Vol. 8, pp. 363-385 (1984).
- 24) Kuipers, B. J.: Qualitative Simulation, Artificial Intelligence, Vol. 29, pp. 289-338 (1986).
- 25) Laughton, S.: Explanation of Mechanical Systems through Qualitative Simulation, AI-TR 85-19, University of Texas at Austin, December (1985).
- 26) Lepetit, M. and Vernet, D.: Qualitative Physics Applied to a Depropanizer in Process Control, in Qualitative Physics Workshop Abstracts, Qualitative Reasoning Group, University of Illinois at Urbana-Champaign (1987).
- 27) 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).
- 28) Mizoguchi, F., Ohwada, H. and Honda, K.: Qualitative Simulation for Knowledge System by Constraint Programming, IFIP WG 10.1 (1987).
- 29) Mohammed, J. and Simmons, R.: Qualitative Simulation of Semiconductor Fabrication, Proc. AAAI-86, pp. 794-799 (1986).
- 30) Murthy, S. S. and Addanki, S.: PROMPT: An Innovative Design Tool, Proc. AAAI-87 pp. 637-642 (1987).
- 31) 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, Vol. 29, No. 9, pp. 1009-1022 (1988).
- 32) Nordhausen, B. and Langley, P.: An Integrated Discovery System, in Qualitative Physics Workshop Abstracts, Qualitative Reasoning Group, University of Illinois at Urbana-Champaign (1987).
- 33) 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, ソフトウェア学会大会 (1986).
- 34) 大和田, 溝口: PSI におけるエキスパートシステム (4) 一定性的推論へのアプローチ, 情報処理学会第34回全国大会論文集, 3J-4 (1987).
- 35) Pan, Y.-C.: Qualitative Reasoning with Deep-Level Mechanism Models for Diagnoses of Dependent Failures, PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign (1984).
- 36) Raiman, O.: Order of Magnitude Reasoning, Proc. AAAI-86, pp. 100-104 (1986).
- 37) Rajagopalan, R. M.: Qualitative Modeling in the Turbojet Engine Domain, Report T-139 (Master Thesis), University of Illinois at Urbana-Champaign, March (1984).
- 38) Sacks, E.: Piecewise Linear Reasoning, Proc. AAAI-87, pp. 655-659 (1987).
- 39) Shoham, Y.: Naive Kinematics: one aspect of shape, Proc. IJCAI-85, pp. 436-442 (1985).
- 40) Weld, D.: Comparative Analysis, Proc. IJCAI-87, pp. 959-965 (1987).
- 41) White, B. Y. and Frederiksen, J. R.: Intelligent Tutoring Systems Based upon Qualitative Model Evolutions, Proc. AAAI-86, pp. 313-319 (1986).
- 42) Williams, B. C.: Principled Design Based on Qualitative Behavioral Descriptions, personal communication (1985).
- 43) Williams, M. D., Hollan, J. D. and Stevens, A. L.: Human Reasoning about a Simple Physical System, in Gentner, D. and Stevens, A. L. (eds.), Mental Models, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 131-153 (1983).
- 44) Yip, K. M.: Extracting Qualitative Dynamics from Numerical Experiments, Proc. AAAI-87, pp. 665-670 (1987).
- 45) 吉田, 泉, 成田, 飯島: 深い知識に基づくエキスパートシステム, 情報処理学会「人工知能システムの枠組み」シンポジウム論文集, pp. 65-74 (1987).

(昭和63年4月27日受付)