

解説



定性推論の考え方と その知的問題解決への応用†

西田 豊明†

1. はじめに

われわれのまわりには、物理システム、生物システム、社会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 (dynamical systems) が存在する。動的システムの診断、設計、制御を自律的に行う能力をもつ知的問題解決システムの実現は、人工知能の魅力ある研究テーマの一つである。

一般に、動的システムに関わる問題解決の過程には、現象の分析とモデリング、問題解決のプランニング、適切なツールの選択、問題解決の実行、結果の分析および解釈とそれともなう問題解決過程のやり直し、問題解決の経験からの学習などが含まれる。われわれ自身を振り返ってみると、これらの思考過程では、数値計算をしたり、数式を解いたりするような定量的な思考よりも、ものごとのあらかたをみて総合的な判断を下す定性的な思考のほうが重要な役割を果たしているように思われる。このような定性的な思考過程の分析、モデリング、実現、および定量的な技術との統合を主要な研究テーマとして取り上げているのが定性推論 (Qualitative Reasoning) の分野である。

しかし、定性的な思考過程は少数の原理的法則から体系的に構成される一様なものではなく、ちょうど線形に対する非線形のように、比較的多くの異なるタイプの思考過程の寄せ集まったものであるように思われる。現在の段階では、少なくともそう考えておくほうが有益な知見が得られそうである。本稿では現在の定性推論の研究分野を次の8つの部門に分類した。

- 定性シミュレーション：与えられた動的システムの挙動を定性的な情報に基づいて予測する技術の研究。

- 相肖像解析：定性的な解析と定量的な解析を統合して、動的システムの相肖像を幾何学的に解析することによって挙動の概要を求める技術の研究。

- 比較解析：動的システムに含まれるパラメータを変化させたとき、系の挙動がどのように変化するかを解析し、説明するための技術の研究。

- 因果解析：系の内部構造を解析することによって、系の動作メカニズムを因果的に理解したり、それに基づいて挙動解析を行うための手法の研究。

- メンタルモデル：人間の直観や常識の表現とそれに基づく推論の定式化の研究。

- 自動モデリング：与えられた現象を記述するための適切なモデルを自動的に生成する技術の研究。

- 問題指向の定性推論：空間、確率的事象、波の伝播など、現象への依存性の高い定性モデリングとその解析法の研究。

- 問題解決アルゴリズムとのインタフェース：診断、設計など各種応用との間のインタフェースのアーキテクチャの研究

以下の章で、それぞれの手法の概要を述べる。

2. 定性シミュレーション

2.1 定性シミュレーションの枠組み

定性シミュレーションは、量に関する部分的な情報を用いて、与えられた動的システムの挙動を導出する技術である。

実数空間 R^n を区別するための視点を $V = \langle Q, M \rangle$ と表すことにしよう。ここで、 Q は有限集合または可算無限集合であり、求める挙動記述の詳

† Qualitative Reasoning and its Application to Intelligent Problem Solving by Toyooki NISHIDA (Department of Information Science, Kyoto University).

†† 京都大学工学部情報工学教室

細度に基づいて設定される。\$M\$ は \$\mathbb{R}^n\$ から \$Q\$ への写像である。

例

実数集合 \$\mathbb{R}\$ について、

$$V = \langle \{ [+], [0], [-] \}, \begin{cases} x \rightarrow [+]; x > 0 \\ x \rightarrow [0]; x = 0 \\ x \rightarrow [-]; x < 0 \end{cases} \rangle$$

なる \$V\$ は、実数の符号だけに着目することを意味する。\$V\$ を \$\mathbb{R}^n\$ に拡張するには直積によって上の定義を拡張すればよい。

定性シミュレーションでは、\$Q\$ で指定された粒度の挙動記述を得るために、\$\mathbb{R}^n\$ 上ではなく \$Q\$ 上でシミュレーションを行う。結果は、ふつう \$Q\$ 上の状態遷移図として表現される。アルゴリズムの詳細については文献 56) を参照されたい。定性シミュレーションのためのツールとして QSIM が公開されている。

定性シミュレーションの利点は

- 定性領域の解像度を区別できれば、不完全な情報からでもシミュレーションを実行できる。
- 定性化の区別は高々加算無限なので、適当なアルゴリズムによって原理的にはすべての可能な挙動が枚挙できる（可能性の集合の濃度が加算無限よりも大きければ、これは可能ではない）。
- 定性シミュレーションで得られた結論は、その定性化にあてはまる他のケースも含んでいるので、特定の挙動に関する情報よりも一般性のある情報が得られる。

一方、欠点としては、

- 情報が欠落するので次状態を一意に決定できず、曖昧性が発生する。
- 上に述べた定性シミュレーションの方式では、各状態記述において限定された定性化の粒度で各状態変数およびその導関数の可能な値割り当てが枚挙される。与えられた系がいくつかの独立に発生する部分システムに分解される場合は、そのすべての時間的发展のパターンが枚挙されることになり、計算量が著しく増加する。などの問題がある。区間計算を用いたとき生じる問題は文献 81) で議論されている。

第一の問題を解決するために、量情報の区別の仕方を階層化すること、つまり、何も区別しないという極と、定量的に異なるものはすべて区別するという極の間のさまざまな詳細度の定性化を考

察し、これらを組み合わせることが考えられる。このような観点からの研究には次のようなものがある。

- 量の大きさの程度に関する推論^{13), 63), 64), 73), 85)}とそれに基づく定性シミュレーション^{23), 92)}。
- 制約を用いた管理⁸⁰⁾。
- 異なる詳細度の情報の統合⁶⁵⁾。
- 定性代数。定性的な情報を扱うための代数⁹⁸⁾。

一方、第二の問題に関しては、極大ヒストリ⁹⁷⁾や動作系列¹⁰³⁾の概念を用いて、独立に発展する時系列ごとにだけ制約伝播による整合性維持が行われるようにする方式が提案されている。

曖昧性解決一般への取り組みとしては、大域的制約の利用^{54), 59), 60), 81)}、定量的情報の利用⁵³⁾などのアプローチが試みられている。

そのほかに、マイクロなレベルのシミュレーション結果を逐次まとめていってマクロな記述を生成する技術（集積 (Aggregation)⁸⁷⁾）や、曲線に関する定性的な推論方式¹¹⁴⁾が報告されている。

3. 相肖像解析

相肖像解析では、相空間における微分方程式の解曲線の集合（相肖像）の幾何学的特徴を解析することによって、

1. 系に定常解がいくつあるか
2. 定常解の性質（不動点、周期的、カオスのいずれか）
3. 定常解に近い解の挙動（定常解に漸近するか否か）
4. 挙動の大域的な姿

など、解の挙動の定性的な側面に関する情報を求める。このような定性的な解析は、その後の解析の焦点や方向を決定するための大きな手がかりとなる。定性シミュレーションと異なる点は、相肖像解析では定性的な性質を得るために種々の定量的手法を駆使することである。相肖像解析の理論的なベースは力学系の理論 (Dynamical System Theories)^{40), 102)}である。

3.1 相肖像解析の技術

以上の理論に示されている解析法を推論システムとして定式化するには、さまざまな角度からの取り組みが必要である。これまでのアプローチを大別すると、数値シミュレーションを中心とした

知的解析法を開発するアプローチと、解析的な方法により重点を置いたアプローチに大別される。

第一のアプローチでは、数値シミュレーションのプランニング、解析結果の解釈、解析結果に基づくプラン修正などが主要な関心事となる。連続系を対象にした Sacks の研究⁷⁶⁾、われわれの研究⁷⁰⁾、離散系を対象にした Yip の研究¹⁰⁰⁾などがある。いずれの研究でも、対象としているクラスの動的システムに関する知識に基づいて、数値シミュレーションのプランニングと結果の解釈を行う。Yip は、数値シミュレーションの結果の解釈に計算幾何学の技法が利用できることを示している。

第二のアプローチでは、2次元非線形微分方程式を対象とした PLR (Piecewise Linear Reasoning)⁷⁷⁾、PSX (Phase Space eXplorer)⁷¹⁾ などがあ

る。PLR では、次の手順で挙動解析が行われる。

- (1) 与えられた非線形微分方程式の区分線形近似を生成する。
- (2) 相空間をいくつかの領域に分割する。
- (3) 各領域について内部の挙動を解析することによって隣接領域への状態遷移の可能性を調べる (局所解析)。
- (4) 局所解析の結果を総合して、挙動記述として領域間の状態遷移グラフを生成する。

この方法では、状態遷移グラフの表現力の弱さのために、解の挙動を定性的に理解するとき重要な役割を果たす解の漸近的性質に関する情報が得られないという限界があった。この問題を、マルコフ連鎖上での状態遷移確率を計算することによって解決しようという提案²²⁾がある。

PSX では流れは2次元領域間の遷移ではなく、境界セグメント (1次元領域) 間の写像として表現される。1次元領域のほうがより制約が強く、また写像という概念のほうが遷移という概念より強い対応関係を課するので、挙動に関するより詳細な情報が得られる。たとえば、PLR はリミットサイクルやアトラクタなど挙動の漸近的性質を定性的に求めることはできないのに対して、PSX はそれが可能である。

相肖像解析の応用としては、力学系の理論のさまざまな成果を取り入れて微分方程式の挙動解析のエキスパートシステムを構築することが考えられる。そのようなシステムは、Abelson らが提唱

している高機能のエンジニア用ワークベンチ¹⁾や高機能シミュレータ³⁶⁾ばかりでなく、モデルベースのエキスパートシステム一般の基盤技術として重要な役割を果たすことが期待される。

4. 比較解析

比較解析 (Comparative Analysis) は、系のパラメータの増減が系の挙動にどのような影響を与えるかを定性的に推論し、その理由を説明する方法である。摂動法、感度解析、あるいは力学系の理論でいう分岐解析の定性版であると考えられる。

これまでの報告で実現されたものは、Weld による DQ 解析 (Differential Qualitative Analysis) と誇張解析 (Exaggeration) である。

4.1 D Q 解析

DQ 解析⁸⁸⁾による比較解析では、パラメータの値を十分に小さな範囲で変化させたとき、挙動がどのように変わるか解析する。DQ 解析では、パラメータの値が変化すると、挙動がどのような影響を受けるかが推論規則として与えられている。挙動を比較するための基準として視点 (perspective) という概念が用いられている。

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

4.2 誇張解析

誇張解析⁹⁰⁾は、比較解析の問題を、量の大きさの程度に関する代数の上の動的システムの挙動解析の問題に帰着させて解く方法である。誇張解析は変形、シミュレート、スケーリングの三つのフェーズからなる。たとえば、「パラメータ c の値を増加させれば挙動はどう変化するか」という比較解析の問題が与えられたとしよう。誇張解析では、まず変形フェーズで $c = \infty$ (∞ はすべての実数より大きな「無限大数」¹⁰⁴⁾を表す)と置いたシミュレーション問題を生成する。次に、シミュレーションフェーズでそれを HR-QSIM によってシミュレートし、最後にスケーリングフェーズでその結果を QSIM によるもとの問題のシミュレーション結果と比較して結論を生成する。

4.3 その他のアプローチ

積分方程式から結果を導く方法⁶⁾や制約を用いる方法¹⁷⁾が提案されている。積分方程式を用いる

方法は一般性があり、強力であるが複雑な数式処理を必要とするので実現には至っていない。制約を用いる方法は区間計算に基づくものであるが、有効性が評価されていない。

定常状態がパラメータの増減によってどのように影響されるかという問題に関しては、分野は限定されているが、待ち行列システムのボトルネック解消のための待ち行列診断の研究¹⁰⁷⁾で考察されている。

5. 因果解析

この章で取りあげる因果解析は人間の因果的理解、すなわち、ある出来事が別の出来事に及ぼす影響の機構の分析、モデル化、応用に関わる技術である*。

5.1 因果関係表現の枠組み

Rieger と Grinberg の提案した因果関係表現の枠組み⁷⁵⁾では、イベントを表すノードとイベント間の関係を表すリンクによるネットワークで物理的なメカニズムを因果的に表現する。イベントを表すノードとしては、状態 (state, S), 状態変化 (state change, SC), 傾向 (tendency, T), 動作 (action, A), の 4 種類が用意されている。一方、イベント間の関係を表すリンクには、連続的因果性 (continuous causal), 単発的因果性 (one-shot causal), 連続的可能化 (continuous enablement), 単発的可能化 (one-shot enablement), 連続的状態結合 (continuous state coupling), 単発的状態結合 (one-shot state coupling), 状態等価性 (state equivalence), 状態対立性 (state antagonism), 変化率の合流 (rate confluence), 閾値 (threshold), の 10 種類がある。

常識知識ベース構築のためには、さまざまな現象に関して上のような因果関係記述を収集、蓄積することが重要であると思われる。自然言語テキストなどから因果関係記述を自動生成するのは興味深い研究テーマであるが、まだ十分な研究は行

われていない。

因果関係の記述に関しては他にも提案 (たとえば、文献 23), 84)) があるが、個々の研究において定義されている因果関係の記述の意味や、それら相互間の関係は必ずしも明確ではない。

5.2 連立方程式で記述された対象モデルの因果解析

連立方程式で記述したモデルでは、対象システムの挙動は、複数の変数に関する複数の制約を同時に満足する値割り当てあるいは関数として規定される。通常の求解法を用いると、挙動がどのようなメカニズムで決まるのか、どのパラメータから影響を受けるのかといった情報は直接には得られない。しかし、診断や設計など多くの工学的問題解決の過程では、このような情報が必要である。

5.2.1 相互に依存した変数を一つのグループとみなす

一般に、 n 変数 n 方程式が与えられると、特殊な場合を除いてそこに含まれる変数の値は自律的に決まるので、そのような方程式の集合を自己完結 (self-contained) であると呼ぶことにする。方程式の集合 S の部分集合で、その中に自己完結な真の部分集合を含んでいないものを極小完全部分集合 (Minimal Complete Subset) と呼ぶ。 S に含まれるすべての極小完全部分集合の和集合 S_0 を、 0 階の極小完全部分集合の集まりと呼ぶ。 $S = \bigcup_{i=0}^n S_i (n \geq 0)$ において、 S_n に含まれる変数のすべての出現を定数とみなした方程式の集合の極小完全部分集合を $n+1$ 階の完全部分集合の集まりと呼び、 S_{n+1} と表記する。

因果的順序づけ (Causal Ordering) の手法⁴⁷⁾では、与えられた連立方程式に含まれる変数と方程式を $0, 1, 2, \dots$ 階の完全部分集合の集まりに分類していく。このアルゴリズムは行列演算操作として定義される。この方法は、連立微分方程式に拡張されている⁴⁶⁾。また、因果関係が明示化される情報表現方式と、それに基づくシステム外からの影響の構造 (外的駆動型因果性) の推論法¹²⁵⁾が提案されている。

5.2.2 相互に依存した変数を一つの変数にまとめる

因果ストリーム解析¹²³⁾では、一つにまとめられた変数群は一つの変数に置き換えられる*。この方式では、因果解析によって区分線形微分方程

* 物理学では因果性とは、ある時刻におけるシステムの状態が決まればそれより後の時刻におけるシステムの状態が一意に決定されることを意味する。たとえば、すべての物理現象がニュートン力学の法則に従い、世界にただ一つの質点しか存在せず、その質点に外から力が一切加わらないとすると、運動方程式 $f = m \cdot a$ と $f = 0$ から $x = at + b$ となり、なんらかの手段によって a と b が決定できるとすると、無限の過去から未来永劫にいたるまでその質点の位置や速度は完全に掌握できてしまう。われわれをとりまく世界がこのような因果性をもったものであるか否か (偶然性) に関しては論争がある¹¹⁾。

式の内部の変数値の依存関係を解析して、不連続変化の発生の予測、不連続変化の影響によって不連続的に変化しない変数の同定などを行う役割を果たしている。

5.3 物理的直感に基づくヒューリスティック

de Kleer と Brown が提案した架空の因果性 (mythical causality)¹⁴⁾ の理論は、連立方程式を大域的に解析するのではなく、物理的直感を反映した少数のヒューリスティックによって、物理デバイスの挙動の定性的記述を局所的な伝播だけで求める手法である。架空の因果性の理論は、挙動が圧力タイプの状態変数と流量タイプの状態変数によってモデル化できる系に適用される。

架空の因果性の理論は、デバイスの各部品の接続関係を表すデバイスポロジなどに含まれている因果関係の情報をヒューリスティックによって復元し利用することによって、人間に分かりやすい説明の生成や、挙動解析の効率向上などを目的としたものである。

6. メンタルモデル

われわれは、物体の動き、衝突、流れ、折り曲げ、加熱、冷却、伸延、圧縮、沸騰など、身の回りの物理現象に関して非常に豊かな知識と直観をもっている。このような常識的事象に関する人間の理解を適切な形式で表現することは、大規模知識ベース構築や、複雑な現象の近似的モデルなどの視点から重要である。これまで、述語論理を用いた常識的知識表現の試みや、独自のオントロジに基づく枠組みの提案が行われてきた。なかでも定性プロセス理論は広く用いられ、挙動推定のためのソフトウェア (QPE) も公開されていて有用である。

6.1 定性プロセス理論

定性プロセス理論 (Qualitative Process Theory)³²⁾ は、物理現象をプロセスという概念を中心に記述するための枠組みを与える。動的システムの状態は有限個の状態変数を用いて同定できるものとしよう。定性プロセス理論では、各状態変数の値を決定する機構は二つ用意されている。第一の場合は、状態変数の変化率をプロセスが決定する場合であり、その状態変数はそのプロセスから

直接影響 (direct influence) を受けると呼ばれる。状態変数が複数個のプロセスから直接影響を受けると、その状態変数の変化率は各プロセスから受ける影響の和となる。第二の場合は、状態変数 v_1 の値がなんらかのメカニズムによって別の状態変数 v_2 の値に定性的に比例する場合であり、 v_1 は v_2 から間接影響 (indirect influence) を受けると呼ばれる。直接影響と間接影響を表現するためには、個体ビュー (individual view) とプロセスビュー (process view) を用いる。

個体ビューは、次のようなスロットをもつフレーム形式の表記法である。

1. Individuals: そのビューに含まれる個体の集まりを表す。
2. Precondition: そのビューが存在するための前提条件を表す。ただし、定性プロセス理論の外部から決まる要因であり、推論が行われるときは参照されない。

3. Quantity Condition: プロセスが存在するための定性プロセス理論内の条件を表す。

4. Relation: プロセスが存在しているとき量の間に成立する関係を表す。量の間の間接的な影響を記述するために、次のような述語を用いる:

- $Q_1 \propto Q_2$: Q_2 が増加 (減少) すると Q_1 も増加 (減少) する。
- $Q_1 \propto -Q_2$: Q_2 が増加 (減少) すると Q_1 は減少 (増加) する。
- $Q_1 \propto Q_2$: Q_1 と Q_2 の間に対応関係があることしか分からない。

プロセスビュー (process view) は、個体ビューの4つのスロット以外に Influence スロットをもつ。Influence スロットでは、プロセスが量に対して与える直接影響を次のような形式で記述する:

- $I^+(Q, n)$: 量 Q は量 n の分だけ増加する。
- $I^-(Q, n)$: 量 Q は量 n の分だけ減少する。
- $I^\pm(Q, n)$: 量 Q は量 n の分だけ増加/減少の影響を受ける。

図-1 (a) のような自然言語テキストについて、定性プロセス理論の枠組みを用いて作ったモデル¹¹²⁾ の一部を図-1 (b) に示す。モデリングは比較的容易に行えたが、定性シミュレーションでは情報不足のためかなりの曖昧性が生じた。これまで定性プロセス理論で生じる曖昧性解決に関しては文献 10) などの研究があるが、今後はより詳

* 因果ストリーム解析を利用して、区分離形微分方程式で記述された系に不連続な変化が生じる場合の定性解析を行うためのアルゴリズムとシステムは文献 122) に報告されている。

アミノ酸:

タンパク質に合成される。タンパク質の量が多いと、分解され、ぶどう糖になる。この分解過程でアンモニアができる。アンモニアは体に有毒なので、解毒して尿素にする。(必要以上にタンパク質をとると肝臓の負担になる。)

(a) 自然言語テキスト

```
process タンパク質の分解
- Individuals
  q: an object, protein(q)
- Precondition
  in-liver(q)
- Quantity Condition
  A[protein(q)] > A[p-too-much]
- Relation
  p-rate  $\propto$  q, (protein(q)-p-too-much)
- Influences
  I-(protein(q), A[p-rate])
  I+(glucose(q), A[p-rate])
  I+(ammonia(q), A[p-rate])
  protein: タンパク質
  glucose: ぶどう糖
  ammonia: アンモニア
```

(b) 定性プロセス理論による表現 (テキスト下線部)

図-1 定性プロセス理論によるモデル例

細な情報を取り込むための表現の枠組みや、モデルの自動修正の研究が望まれる。

定性プロセス理論に基づくモデリングと定性シミュレーションのためのツールとして QPE³⁴⁾ が公表されている。QSIM へのコンパイラ³⁵⁾も発表されている。また、さまざまな拡張もなされている^{27), 35), 128)}。

定性プロセス理論の考え方は階層化しやすいので、大規模モデルの構築を目的とする場合に基本的な枠組みとして有用であると考えられる。我が国では、東大の富山らのグループで定性プロセス理論をベースにしたモデリングシステムの構築が進められている¹¹⁰⁾。

6.2 その他

素朴物理 (Naive Physics) は、人間のもつ物理的直観を1階述語論理などの枠組みを用いて包括的に記述する試みである。これまでの研究では、1階述語論理を用いて、液体の概念⁴²⁾、幾何学的概念⁴³⁾、空間概念¹²⁾などを公理の集まりとして表現する試みが行われた。また、形状に関する一般法則を文法として表現する試み^{44), 62)}もある。素朴物理の研究は認知科学だけでなく、長期的にみると大規模知識ベース構築などの応用的側面からも重要であり、今後一層の研究が望まれる。

7. 自動モデリング

自動モデリングは与えられた問題に関わる現象を説明し、まだ観測されていない事象を予測するモデルを自動的に生成する技術である。一般に、生成すべきモデルは、与えられた現象に対して何を仮定するか、どのような点を考慮に入れるかに依存する。たとえば、摩擦を考慮に入れる場合とそうでない場合では、生成される運動方程式が異なる。可能なモデルの中から目的に最も適したものをどのようにして選び出せばよいか、自動モデリングの主要な関心事である。このような問題意識は機械学習の理論形成の問題とも共通するところがある。

どのようなモデルが適切であるかは、そのモデルを使って解く問題のタイプと内容に依存する。モデルに対する条件としては正確さ、モデルの単純さ、予測力と信頼性、解析可能性などが考えられるが、これらは対立する側面も含んでおり、どれを重視するかは応用に依存する。

7.1 可能なモデルの空間

異なるモデルを生み出す要因として次のようなものが考えられる。

- 視点: どのような側面をモデル化するか。たとえば、周波数軸上の挙動か、時間軸上の挙動か。
- オントロジー: たとえば、水を分子の集まりとみるか、連続的な物質とみるか。
- 詳細度 (または粒度): たとえば、摩擦を無視するか否か。
- 時間の粒度: 速い変化と遅い変化の区別。
- 関連性: どの範囲までの現象をモデル化するか。

● 挙動のモード: たとえば、定常状態のモデルか、それとも過渡状態のモデルなのか。オントロジーについては文献 7), 時間の粒度に関しては文献 57), 118), 残りについては、文献 2), 27), 28) などで議論されている。

7.2 ヒューリスティックなモデリング

一般に、要求されているモデルをはじめから誤りなく求めることは困難であるから、適当初期モデルを選択または構築し、不都合が生じれば適宜修正するという、ヒューリスティックなアプローチが取られる。

このアプローチで考慮すべき点と、それに関する研究を整理すると次のようになる。

●初期モデルをどのようにして求めるか：これに関しては、類推を用いた初期モデルの生成²⁶⁾、与えられた質問からの動的なモデル生成²⁸⁾などが試みられている。

●モデルの不適切性をどのように検出するか：基本的には、モデルからの予測と観測の不一致を検出する。文献 2) ではこれを外的、内的、モデル間の三つのタイプに分類している。ほかに因果解析を用いる方法⁶⁹⁾が提案されている。

●モデルの修正や切り替えをどのように行うか：「デルタベクトル」と「パラメータ変化規則」を用いる方法²⁾、ヒューリスティックに基づく方法²⁴⁾、そのほかに文献 28), 91) などが報告されている。

●以上の推論をサポートするにはモデル空間をどう編成すればよいか：モデルグラフや⁶⁰⁾、モデル束⁶⁹⁾を用いる方法が提案されている。

また、モデルの単純化は重要である。これまで、独立な部分への分割⁷⁸⁾、タスク指向モデルの

生成⁸⁹⁾、問題用に要約された方程式の生成^{19), 20)}、浅いモデルの生成¹⁰⁸⁾、専門家への分かりやすさをねらった単純化⁹⁹⁾などが報告されている。

7.3 展 望

Zeeman の論文¹⁰¹⁾には、Zeeman 自身が心臓の鼓動のメカニズムをモデル化するためにたどった思考過程が記述されており、非常に興味深い。今後の研究では、このようなより高度の専門家の思考過程のモデル化の方向と、知識指向の方向が重要であると思われる。

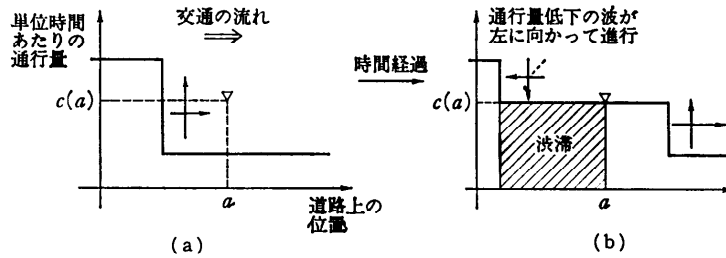
8. 問題指向の定性推論

8.1 定性運動学：形状と機構に関する定性推論

形状や機構に関する定性的な知識を記号的に推論規則として表現するアプローチ^{3), 12), 48)~50), 79)}と、パラメータへの制約を数値的に表した C-space (configuration space) の記号的表現とそれに基づく推論を行うアプローチ^{29), 37), 51), 67), 127)}がある。前者では、機構に関する抽象度の高い表現が用いられ、その間の推論規則が与えられる。後者で

表-1 定性推論と応用技術

分野	解決すべき問題・目的	手 法	具 体 例
動的システムの解析と理解	情報の不完全性・システムの複雑性 現象の理解 解析のプランニング、再プランニング、結果の解釈、タイプの異なる解析手法の統合	定性モデルと定性シミュレーション 因果モデル、因果解析 定性的な知識の表現	55), 105), コジェネレーションプラント ¹¹¹⁾ 経済現象 ¹¹⁴⁾ エンジニアのワークベンチ ^{11), 100)} や相肖像解析 ¹¹⁾
知的 CAI	ユーザへの説明の生成、理解の補助 教材生成	定性シミュレーション、因果解析、因果的説明の生成 定性シミュレーション	4), 95), 116) 電力系統操作員訓練システム ¹⁰⁶⁾
診 断	モデルベースの診断における予測器として故障シミュレーション、シミュレーションのリアルタイム化 原因探索と候補の絞り込み 故障シミュレーションによる診断規則生成(生成される診断規則集合の完全性保証)	定性シミュレーション 定性シミュレーション、階層的定性シミュレーション 因果解析 定性シミュレーション(全挙動予測)	GDE 型のシステム ⁹⁾ 41) 74) 72), 109), 124)
モニタリングと制御	計測データの解釈 故障シミュレーションによる診断規則生成 モデルが複雑すぎたり厳密解が得られない場合への対応	定性シミュレーションによる補間 定性シミュレーション 定性モデルと定性シミュレーション	18), 31), 33) 25), 45) 5), 113)
設 計	制約検査、仕様(挙動)の確認、必要な挙動が生じるための前提条件のチェック、意図しない挙動のチェック 行き詰まりの解消のための再解析 挙動から構造を導出する	定性シミュレーション 制御された定性推論、モデルグラフと修正オペレータを用いたモデルの多重表現 因果モデルと制約伝播	52), 110) 66) 50), 96)
デバッグとパラメータチューニング	数学モデルが複雑になりすぎる	定性的な知識表現	待ち行列 ¹¹¹⁾



(a) a のところは $c(a)$ の通行容量しかないものとする
 図-2 道路上の通行量変化の波の伝播**

提案されている定性運動学 (Qualitative Kinematics) 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持つことは許されない」という制約を利用して、挙動を導出する試みである。これに対してより定量的な視点からのモデリング³⁹⁾も提案されている。

8.2 空間に関する定性推論

空間の定性的扱いは重要であるにも関わらずあまり進んでいない。

基礎的な研究では、述語論理によるトポロジーの表現⁴³⁾、3次元形状に関する知識の述語論理による表現¹²⁾、運動の表現とそれに基づく推論³⁰⁾などがある。

一方、応用面からロボットのナビゲーションのために境界標を用いた空間の粗い表現とそれに基づく定性的な経路プランニングのアルゴリズムの提案⁶¹⁾、位相情報と距離情報の組合せによって測定誤差への耐性を高める研究⁵⁸⁾がある。

8.3 確率的事象に関する定性推論

これまで、人体への薬物の影響のように、その統計的性質に関する定性的情報に基づく意志決定の意味論の研究^{93), 94)}や、生起確率に関する知識がベイズネットワークで表された系における仮説の順序づけ⁸³⁾などの研究が行われている程度であるが、今後の発展が期待される。

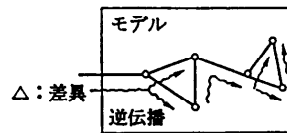
8.4 波の伝播のパターンに関する定性推論

高速道路における渋滞の発生、伝播、消滅のパターンを、道路に沿って伝播する通行状態の不連続な変化の波という概念に基づいて定式化し、計測データと比較するこ

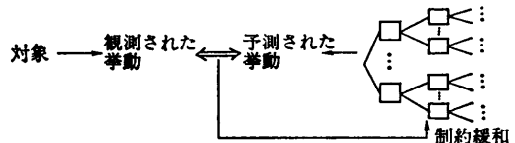
とによって、道路の通行状態を同定する試み⁶⁶⁾が報告されている。波の伝播は交通量の増加と減少を表す $\{\uparrow, \downarrow\}$ と、伝播の方向を表す $\{\leftarrow, \rightarrow\}$ の組合せで表される。たとえば、図-2(a)のように道路のある位置 a での通行容量 $c(a)$ を超えたトラフィックが生じると図-2(b)のように渋滞が生じ、渋滞の波が道路上を伝播する。

8.5 その他

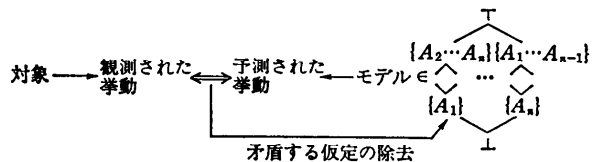
このほか、次元解析の手法を大規模系の解析に適用しようという提案⁶⁸⁾もある。今後、さらにい



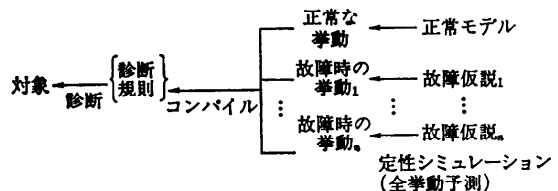
(a) モデルの因果解析に基づくもの



(b) 制約緩和型



(c) 汎用診断エンジン



(d) 全挙動予測からの診断規則生成

図-3 定性推論に基づく診断システムの主なアーキテクチャ

ろいろな領域における定性的な指向のモデリングの研究が望まれる。

9. 定性推論と応用技術のインタフェース

現在のところ二、三の例外を除いて定性推論の技術と応用とのインタフェースの仕方は手探りの段階である。各応用において、定性推論のどのような側面が利用されるかを整理してみたものを表-1 に示す。表から分かるように、定性シミュレーションと因果解析の技術はかなり普及し始めている。

これまで、比較的研究が進んでいるのは診断問題への応用である。これまでの研究で提案された定性推論を用いた診断システムのアーキテクチャは、次のようなタイプに整理できる。

- モデルの因果解析に基づくもの^{74), 84), 107)}: 認識された因果構造に従って、たとえば予測値と観測値のずれを制約として伝播させる (図-3(a))。

- 制約緩和型⁴¹⁾: 故障が検出されると、故障候補となる部品に対応する制約を取り除いてシミュレーションする。モデルから予測される挙動と観測されている現象が合致するまで繰り返す。探索範囲を狭めるため、階層型モデルなどが用いられる (図-3(b))。

- 汎用診断エンジン (General Diagnostic Engine) との結合^{15), 16), 39), 82)} との組合せ: モデルから予測される挙動が観測と矛盾しない、故障仮説の極小の組み合わせを計算する。定性シミュレータは、対象モデルと故障仮説の組み合わせから挙動を導出するために用いられる^{9), 21)} (図-3(c))。

- 故障シミュレーション (全挙動予測) に基づく診断規則の生成: 対象モデルにさまざまな故障仮説を加えた故障モデルの挙動を解析して、診断のための規則を自動的に生成する^{45), 72), 109), 115), 117), 124)} (図-3(d))。

10. まとめ

本稿では、定性推論の基本的な枠組みとその応用技術の関連について整理した。技術的な側面については、本特集のほかの解説、文献^{120), 121)}、人工知能学会誌特集 (Vol. 4, No. 5, 1989年9月号)、書籍¹¹⁹⁾なども参照されたい。

現在、定性推論の主な技術は定性シミュレーションと因果解析を中心としているが、これは今後

技術の進歩とともに変わっていく性質のものである。特に、これまでのように構造的な側面ばかりを扱うのではなく、ファジィな側面への取り組みとの統合も望まれる。

今後、自動モデリング、定量解析との統合、常識ベースの三つが重要な研究テーマになっていくと考えられる。

参考文献

- 1) Abelson, H., Eisenberg, M., Halfant, M., Katzenelson, J., Sacks, E., Sussman, G. J., Wisdom, J. and Yip, K.: Intelligence in Scientific Computing. *Communications of the ACM*, Vol. 32, pp. 546-562 (1989).
- 2) Addanki, S., Cremonini, R. and Penberthy, S. J.: Reasoning about Assumptions in Graphs of Models, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1432-1438 (1989).
- 3) Addanki, S. and Davis, E.: A Representation for Complex Physical Domains, In *Proceedings IJCAI-85*, pp. 443-446 (1985).
- 4) Brown, J. S., Burton, R. R. and de Kleer, J.: Pedagogical, Natural Language and Knowledge Engineering Techniques in SOPHIE I, II, and III, In Sleeman, D. and Brown, J. S. editors, *Intelligent Tutoring Systems*, pp. 227-282, Academic Press (1982).
- 5) Caloud, P.: Towards Continuous Process Supervision, In *Proceedings IJCAI-87*, pp. 1086-1089 (1987).
- 6) Chiu, C.: Intuitive Reasoning in Physics—from an Expert's Point of View, 人工知能学会誌, Vol. 4, No. 5, pp. 528-538 (1989).
- 7) Collins, J. W. and Forbus, K. D.: Reasoning about Fluids via Molecular Collections, In *Proceedings AAAI-87*, pp. 590-594 (1987).
- 8) Crawford, J., Farquhar, A. and Kuipers, B.: QPC: A Compiler from Physical Models into Qualitative Differential Equations, presented at 4th International Workshop on Qualitative Physics, Lugano, Switzerland (1990).
- 9) Dague, P., Raiman, O. and Deves, P.: Troubleshooting: When Modeling is the Trouble, In *Proceedings AAAI-87*, pp. 600-605 (1987).
- 10) D'Ambrosio, B.: Extending the Mathematics in Qualitative Process Theory, In *Proceedings AAAI-87*, pp. 595-599 (1987).
- 11) Bohm, D. (著) 村田 (訳): 現代物理学における因果性と偶然性, 東京図書 (1969).
- 12) Davis, E.: A Logical Framework for Commonsense Predictions of Solid Object Behavior: *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 125-140 (1988).
- 13) Davis, E.: Order of Magnitude Reasoning in Qualitative Differential Equations: In Weld, D. S. and de Kleer, J., editors, *Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems*, pp. 422-434,

- Morgan-Kaufmann (1989).
- 14) de Kleer, J. and Brown, J. S.: Qualitative Physics Based on Confluences, *Artificial Intelligence*, Vol. 24, pp. 7-83 (1984).
 - 15) de Kleer, J. and Williams, B. C.: Diagnosing Multiple Faults, *Artificial Intelligence*, Vol. 32, pp. 97-130 (1987).
 - 16) de Kleer, J. and Williams, B. C.: Diagnosis with Behavioral Modes, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1324-1330 (1989).
 - 17) De Mori, R. and Prager, R.: Perturbation Analysis with Qualitative Models, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1180-1186 (1989).
 - 18) DeCoste, D. M.: Dynamic Across-Time Measurement Interpretation: Maintaining Qualitative Understanding of Physical System Behavior, Technical Report UIUCDCS-R-90-1572, Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign (1990).
 - 19) Dormoy, J. L.: Controlling Qualitative Resolution, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 319-323, American Association for Artificial Intelligence (1988).
 - 20) Dormoy, J.-L. and Raiman, O.: Assembling a Device, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 330-335, American Association for Artificial Intelligence (1988).
 - 21) Downing, K. and Shrager, J.: Causes to Clauses: Managing Assumptions in Qualitative Medical Diagnosis, *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 192-199 (1988).
 - 22) Doyle, J. and Sacks, E.: Stochastic Analysis of Qualitative Dynamics, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1187-1192 (1989).
 - 23) Doyle, R. J.: Hypothesizing Device Mechanisms: Opening up the Black Box, Technical Report 1047, MIT Artificial Intelligence Laboratory (1988).
 - 24) Doyle, R. J.: Reasoning about Hidden Mechanisms, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1344-1349 (1989).
 - 25) Dvorak, D. and Kuipers, B.: Model-Based Monitoring of Dynamic Systems, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1238-1243 (1989).
 - 26) Falkenhainer, B.: Learning from Physical Analogies: A Study in Analogy and the Explanation Process, Technical Report UIUCDCS-R-88-1785, Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign (1988).
 - 27) Falkenhainer, B. and Forbus, K. D.: Setting Up Large-Scale Qualitative Models, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 301-306, American Association for Artificial Intelligence (1988).
 - 28) Falkenhainer, B. and Forbus, K. D.: Compositional Modeling of Physical Systems, presented at 4th International Workshop on Qualitative Physics, Lugano, Switzerland (1990).
 - 29) Faltings, B.: Qualitative Kinematics in Mechanisms, *Artificial Intelligence*, Vol. 44, pp. 89-119 (1990).
 - 30) Forbus, K. D.: Qualitative Reasoning about Physical Processes, In *Proceedings IJCAI-81* (1981).
 - 31) Forbus, K. D.: Measurement Interpretation in Qualitative Process Theory, In *Proceedings IJCAI-83* (1983).
 - 32) Forbus, K. D.: Qualitative Process Theory, *Artificial Intelligence*, Vol. 24, pp. 85-168 (1984).
 - 33) Forbus, K. D.: Interpreting Measurement of Physical Systems, In *Proceedings AAAI-86*, pp. 113-117, American Association for Artificial Intelligence (1986).
 - 34) Forbus, K. D.: QPE: Using Assumption-Based Truth Maintenance for Qualitative Simulation, *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 200-215 (1988).
 - 35) Forbus, K. D.: A Perspective on Qualitative Physics, *人工知能学会誌*, Vol. 4, No. 5, pp. 497-508 (1989).
 - 36) Forbus, K. D. and Falkenhainer, B.: Self-Explanatory Simulations: An Integration of Qualitative and Quantitative Knowledge, Presented at 4th International Workshop on Qualitative Physics, Lugano, Switzerland (1990).
 - 37) Forbus, K. D., Nielsen, P. and Faltings, B.: Qualitative Kinematics: A Framework, In *Proceedings IJCAI-87*, pp. 430-435 (1987).
 - 38) Gallanti, M., Roncato, M., Stefanini, A. and Torielli, G.: A Diagnostic Algorithm Based on Models at Different Level of Abstraction, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1350-1355 (1989).
 - 39) Gelsey, A.: Automated Physical Modeling, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1225-1230 (1989).
 - 40) Guckenheimer, J. and Holmes, P.: *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*. Springer-Verlag (1983).
 - 41) Hamilton, T. P.: HELIX: A Helicopter Diagnostic System Based on Qualitative Physics, *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 141-150 (1988).
 - 42) Hayes, P.: Naive Physics Manifesto I: Ontology for Liquids, In Hobbs, J. and Moore, R. C., editors, *Formal Theories of the Commonsense World*, pp. 71-107, Ablex (1985).
 - 43) Hayes, P.: The Second Naive Physics Manifesto, In Hobbs, J. and Moore, R. C., editors, *Formal Theories of the Commonsense World*, pp. 1-36 Ablex (1985).
 - 44) Hayes, P. J. and Leyton, M.: Process at Discontinuity, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1267-1272 (1989).
 - 45) Hogge, J. C.: Compiling Plan Operators from Domains Expressed in Qualitative Process Theory, In *Proceedings AAAI-87*, pp. 229-233, American Association for Artificial Intelligence (1987).
 - 46) Iwasaki, Y.: Causal Ordering in a Mixed Structure, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 313-318,

- American Association for Artificial Intelligence (1988).
- 47) Iwasaki, Y. and Simon, H. A.: Causality in Device Behavior, *Artificial Intelligence*, Vol. 29, No. 1, pp. 3-32 (1986).
 - 48) Joskowicz, L.: Shape and Function in Mechanical Devices, In *Proceedings AAAI-87*, pp. 611-615, American Association for Artificial Intelligence (1987).
 - 49) Joskowicz, L.: Simplification and Abstraction of Kinematic Behaviors, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1337-1342 (1989).
 - 50) Joskowicz, L. and Addanki, S.: From Kinematics to Shape: An Approach to Innovative Design, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 347-352, American Association for Artificial Intelligence (1988).
 - 51) Kim, H. K.: Qualitative Kinematics of Linkages, presented at 4th International Workshop on Qualitative Physics, Lugano, Switzerland (1990).
 - 52) Kiriya, T., Tomiyama, T. and Yoshikawa, H.: Qualitative Reasoning and Conceptual Design with Physical Features, presented at 4th International Workshop on Qualitative Physics, Lugano, Switzerland (1990).
 - 53) Kuipers, B. J. and Berleant, D.: Using Incomplete Quantitative Knowledge in Qualitative Reasoning, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 324-329 (1988).
 - 54) Kuipers, B. J. and Chiu, C.: Taming Intractable Branching in Qualitative Simulation, In *Proceedings IJCAI-87*, pp. 1079-1085 (1987).
 - 55) Kuipers, B. J. and Kaissirer, J. P.: Causal Reasoning in Medicine: Analysis of a Protocol, *Cognitive Science*, Vol. 8, pp. 363-385 (1984).
 - 56) Kuipers, B.: Causal Simulation, *Artificial Intelligence*, Vol. 26, pp. 289-338 (1986).
 - 57) Kuipers, B.: Abstraction by Time-Scale in Qualitative Simulation, In *Proceedings AAAI-87*, pp. 621-625, American Association for Artificial Intelligence (1987).
 - 58) Kuipers, B. J. and Byun, Y-T.: A Robust, Qualitative Method for Robot Learning, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 774-779 (1988).
 - 59) Lee, W. W., Chiu, C. and Kuipers, B. J.: Development towards Constraining Qualitative Simulation, Technical Report AI-TR87-44, University of Texas at Austin (1987).
 - 60) Lee, W. W. and Kuipers, B. J.: Non-Intersection of Trajectories in Qualitative Phase Space: A Global Constraint for Qualitative Simulation, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 286-290, American Association for Artificial Intelligence (1988).
 - 61) Levitt, T. S. and Lawton, D. T.: Qualitative Navigation for Mobile Robots, *Artificial Intelligence*, Vol. 44, No. 3, pp. 305-360 (1990).
 - 62) Leyton, M.: A Process-Grammar for Shape, *Artificial Intelligence*, Vol. 34, pp. 213-247 (1988).
 - 63) Mavrouniotis, M. and Stephanopoulos, G.: Reasoning with Orders of Magnitude and Approximate Retentions, In *Proceedings AAAI-87*, pp. 626-630, American Association for Artificial Intelligence (1987).
 - 64) Mavrouniotis, M. L. and Stephanopoulos, G.: Order-of-Magnitude Reasoning with O[M], *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 106-114 (1989).
 - 65) Murthy, S.: Qualitative Reasoning at Multiple Resolutions, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 296-300, American Association for Artificial Intelligence (1988).
 - 66) Murthy, S. and Addanki, S.: PROMPT: An Innovative Design Tool, In *Proceedings AAAI-87*, pp. 637-642, American Association for Artificial Intelligence (1987).
 - 67) Nielsen, P. E.: A Qualitative Approach to Mechanical Constraint, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 270-274, American Association for Artificial Intelligence (1988).
 - 68) Nigram, A. and Bhaskar, R.: Qualitative Reasoning about a Large System Using Dimensional Analysis, presented at 4th International Workshop on Qualitative Physics, Lugano, Switzerland (1990).
 - 69) Nishida, T. and Doshita, S.: Reasoning with Model Lattices, In Tokoro, M. Anzai, Y. and Yonezawa, A., editors, *Concepts and Characteristics of Knowledge-Based Systems*, pp. 325-347, Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland) (1989). Selected and Reviewed Papers from the IFIP TC 10/WG 10.1 Workshop Mount Fuji, Japan (Nov. 1987).
 - 70) Nishida, T. and Doshita, S.: Combining Qualitative and Quantitative Analysis for Understanding Two Dimensional Nonlinear Ordinary Differential Equations, in preparation (1991).
 - 71) Nishida, T., Fujiwara, H. and Doshita, S.: Abstracting Flow as Mapping, In *Proceedings of PRICAI '90*, pp. 384-389 (1990).
 - 72) Pearce, D. A.: The Induction of Fault Diagnosis Systems from Qualitative Models, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 353-357 (1988).
 - 73) Raiman, O.: Order of Magnitude Reasoning, In *Proceedings AAAI-86*, pp. 100-104, American Association for Artificial Intelligence (1986).
 - 74) Rajagopalan, R. M.: Qualitative Modeling in the Turbojet Engine Domain, Technical Report T-139 (Master Thesis), University of Illinois at Urbana-Champaign (1984).
 - 75) Rieger, C. and Grinberg, M.: Declarative Representation and Procedural Simulation of Causality in Physical Mechanisms, In *Proceedings IJCAI-77*, pp. 250-256 (1977).
 - 76) Sacks, E.: Qualitative Analysis of Continuous Dynamic Systems by Intelligent Numeric Experimentation, presented at Third Qualitative Physics Workshop, Stanford, August 9-11, 1989 (1989).

- 77) Sacks, E.: Automatic Qualitative Analysis of Dynamic Systems Using Piecewise Linear Approximations, *Artificial Intelligence*, Vol. 41, pp. 313-364 (1990).
- 78) Sakane, K., Ohki, M., Sawamoto, J. and Fujii, Y.: Methods for Partition of Target Systems in Qualitative Reasoning, In *Proceedings of the International Conference on Fifth Generation Computer Systems*, pp. 1201-1210 (1988).
- 79) Shoham, Y.: Naive Kinematics: One Aspect of Shape, In *Proceedings IJCAI-85*, pp. 436-442 (1985).
- 80) Simmons, R.: "Commonsense" Arithmetic Reasoning, In *Proceedings AAAI-86*, pp. 118-124, American Association for Artificial Intelligence (1986).
- 81) Struss, P.: Global Filters for Qualitative Behaviors, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 275-279, American Association for Artificial Intelligence (1988).
- 82) Struss, P. and Dressler, O.: "Physical Negation"—Integrating Fault Models into the General Diagnostic Engine, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1318-1323 (1989).
- 83) Sy, B.: Qualitative Reasoning of Bayesian Belief Using Meta-Knowledge, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1128-1133 (1989).
- 84) Torasso, P. and Console, L.: *Diagnostic Problem Solving*, North Oxford Academic (1989).
- 85) Travé-Massuyès, L. and Piera, N.: The Orders of Magnitude Models as Qualitative Algebra, In *Proceedings IJCAI-89*, pp. 1261-1266 (1989).
- 86) van Nypelsteer, P.: Qualitative Change Waves—the Automatic Detection of Traffic Accidents, presented at 3rd Qualitative Physics Workshop, Stanford (1989).
- 87) Weld, D.: The Use of Aggregation in Causal Simulation, *Artificial Intelligence*, Vol. 30, pp. 1-34 (1986).
- 88) Weld, D.: Comparative Analysis, In *Proceedings IJCAI-87*, pp. 959-965 (1987).
- 89) Weld, D. and Addanki, S.: Task-Driven Model Abstraction, presented at 4th International Workshop on Qualitative Physics, Lugano, Switzerland (1990).
- 90) Weld, D.S.: Exaggeration, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 291-295, American Association for Artificial Intelligence (1988).
- 91) Weld, D.S.: Approximation Reformulations, In *Proceedings AAAI-90*, American Association for Artificial Intelligence (1990).
- 92) Weld, D.S.: Exaggeration, *Artificial Intelligence*, Vol. 43, pp. 311-368 (1990).
- 93) Wellman, M.P.: Dominance and Subsumption in Constraint-Posting Planning, In *Proceedings IJCAI-87* (1987).
- 94) Wellman, M.P.: Fundamental Concepts of Qualitative Probabilistic Networks, *Artificial Intelligence*, Vol. 44, No. 3, pp. 257-303 (1990).
- 95) White, B. Y. and Frederiksen, J. R.: Intelligent Tutoring Systems Based upon Qualitative Model Evolutions, In *Proceedings AAAI-86*, pp. 313-319, American Association for Artificial Intelligence (1986).
- 96) Williams, B.C.: Visualizing Potential Interactions: Constructing Novel Devices from First Principles, presented at 4th International Workshop on Qualitative Physics, Lugano, Switzerland (1990).
- 97) Williams, B. C.: Doing Time: Putting Qualitative Reasoning on Firmer Ground, In *Proceedings AAAI-86*, pp. 105-112, American Association for Artificial Intelligence (1986).
- 98) Williams, B.C.: MINIMA, a Symbolic Approach to Qualitative Algebraic Reasoning, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 264-269, American Association for Artificial Intelligence (1988).
- 99) Williams, C. P.: Analytic Abduction from Qualitative Simulation, presented at 4th International Workshop on Qualitative Physics, Lugano, Switzerland (1990).
- 100) Yip, K. M.: Generating Global Behaviors Using Deep Knowledge of Local Dynamics, In *Proceedings AAAI-88*, pp. 280-285, American Association for Artificial Intelligence (1988).
- 101) Zeeman, E. C.: Differential Equations for the Heartbeat and Nerve Impulse, In Peixoto, M. M. editor, *Dynamical Systems*, pp. 683-741. Academic Press (1973).
- 102) ハーシュ, スメール(著), 田村, 水谷, 新井(訳): 力学系入門, 岩波書店 (1976).
- 103) 外山, 米沢: 動作系列解析法による定性的回路解析とその表現, 人工知能学会誌, Vol. 3, No. 1, pp. 69-77 (1988).
- 104) 竹内外史: 無限小解析と物理学, 遊星社 (1985).
- 105) 黒川 寛, 馬場口登, 手塚慶一: ネットワークの定性的挙動推定, 第41回全国大会講演論文集 1 K-5 (1990).
- 106) 宮坂, 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, 知識工学と人工知能研究会, 情報処理学会 56-8 (1988).
- 107) 伊藤 潔, 本位田真一, 沢村 淳, 志田圭介: 定性推論と定量推論を導入した待ち行列ネットワークのボトルネック診断と改善法, 人工知能学会誌, Vol. 5, No. 1, pp. 92-99 (1990).
- 108) 吉田健一, 元田 浩: 階層的定性推論のための浅い知識の合成法, 人工知能学会誌, Vol. 4, No. 4, pp. 447-455 (1989).
- 109) 石田好輝: 定性的推論を利用したプロセス診断知識獲得—定性的シミュレーションによる診断ルールの生成, 電子情報通信学会誌, Vol. 1-72-DII, No. 3 (1988).
- 110) 桐山孝司, 中田秀基, 富山哲男, 吉川弘之: 部分抽象化モデルを用いた定性推論, 1990年度人工知能学会全国大会(第4回)論文集, 人工知能学会 (1990).
- 111) 奥田浩二, 潮 俊光: ペトリネットによる階層的定性シミュレーション—コジェネレーションプラントへの応用—, 1990年度人工知能学会全国大会,

- pp. 223-226 (1990. 6-3).
- 112) 松本 史: 定性プロセス理論に基づく定性シミュレータの作成, 京都大学工学部情報工学教室, 情報工学実験及演習第一報告書 (1990).
- 113) 伊藤 修, 松林成彰: 定性推論を用いた学習制御 (第3報) 一定性的モデルの自己修正一, 1990年度人工知能学会全国大会, pp. 227-230 (1990).
- 114) 磯崎秀樹: 曲線に関する定性的演算規則, 人工知能学会誌, Vol. 5, No. 5, pp. 569-577 (1990).
- 115) 小高他: 知識コンパイラの構成とその応用, 知識工学と人工知能研究会資料, 情報処理学会, 48-2 (1986).
- 116) 秋吉政徳, 西田正吾: システム・ダイナミクスの因果理解における人間の思考を重視した支援システム—because—, 人工知能学会研究会資料 SIG-HICG-8904-2(2/2), 人工知能学会 (1989).
- 117) 黒崎泰充, 宮本裕一: 第2世代エキスパートシェル技術, システム/制御/情報, Vol. 33, No. 3, pp. 28-36 (1989).
- 118) 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, pp. 53-56, 人工知能学会 (1987).
- 119) 淵 一博 (監修), 溝口文雄, 古川康一, 安西祐一郎 (編): 定性推論, 共立出版 (1989).
- 120) 西田豊明: 定性推論に関する最近の研究動向 (1) 基礎技術の進歩, 情報処理, Vol. 29, No. 9, pp. 1009-1022 (1988).
- 121) 西田豊明: 定性推論に関する最近の研究動向 (2) 新しい研究分野・応用, 情報処理, Vol. 29, No. 11, pp. 1322-1333 (1988).
- 122) 西田豊明, 堂下修司: 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, Vol. 2, No. 4, pp. 501-510 (1987).
- 123) 西田豊明, 川村 正, 堂下修司: 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, Vol. 28, No. 2, pp. 177-188 (1987).
- 124) 大和田勇人, 溝口文雄, 北沢克明: 定性的シミュレーションに基づく診断システムの構築法, 人工知能学会誌, Vol. 3, No. 5, pp. 617-626 (1988).
- 125) 鷲尾 隆: 物理法則に基づく外的駆動型因果性の導出, 人工知能学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 482-491 (1990).
- 126) 左和隆光, 間遠伸一: 経済分析における定性推論の意味と意義, 人工知能学会誌, Vol. 4, No. 5, pp. 516-518 (1989).
- 127) 車谷浩一, 富山哲男, 吉川弘之: 多変数定性空間を用いた物体の平面運動の推論, 人工知能学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 449-461 (1990).
- 128) 大木 優, 藤井裕一, 古川康一: 物理法則に基づいた定性推論, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 7 (1988).

(平成2年9月3日受付)



西田 豊明 (正会員)

1954年生. 1977年京都大学工学部情報工学科卒業. 1979年同大学院修士課程修了. 1980年同大学院博士課程退学. 同年より, 京都大学工学部助手. 1988年6月助教授. 人工知能基礎, 特に定性推論と空間推論, 自然言語理解などの研究に従事. 京都大学工学博士. 1984年から1年間Yale大学客員研究員. 1988, 89年人工知能学会全国大会優秀論文賞, 1988年度人工知能学会論文賞, 情報処理学会30周年記念論文賞. 著書「自然言語処理入門」(オーム社)など. 人工知能学会, 認知科学会, 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, AAAI, ACL各会員. 人工知能学会編集委員など.