

TM-1175

定性推論を用いた設計支援システムにおける
不連続変化を伴う回路のための
推論方法の検討

大平 栄二、大木 優、新庄 広、
阿部 正博 (日立)

April, 1992

© 1992, ICOT

ICOT

Mita Kokusai Bldg. 21F
4-28 Mita 1-Chome
Minato-ku Tokyo 108 Japan

(03)3456-3191 ~ 5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

定性推論を用いた設計支援システムにおける不連続変化を伴う回路のための推論方法の検討

正員 大平 栄二 非会員 大木 優 非会員 新庄 広 正員 阿部 正博

A Reasoning Method for Computer-aided Circuit Design using Qualitative Reasoning for Circuits involving Discontinuous Changes

Eiji OHIRA ,Member, Masaru OHKI,Nonmember,Hiroshi SHINJO,Nonmember,
and Masahiro ABE ,Member

(株)日立製作所中央研究所, 国分寺市

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Kokubunji-shi, 185 Japan

謝 辞: あり なし

著者分冊指定: A B-I C-I D-I
B-II C-II D-II

連絡先: 大平 栄二 (株)日立製作所中央研究所 第6部
〒185 東京都国分寺市東恋ヶ窪1-280
tel 0423-23-1111 内線3608

あらまし 電子回路などの設計を支援する定性推論を用いた設計支援システムを提案する。本システムは、定性推論に非線形連立不等式を解くことができる制約ソルバーを組み合わせたシステムである。本システムは、対象の回路の構造と動作させたい入出力特性を与えることにより、設計したい素子がとりうる有効な値の範囲を求めることができる。また、同時に、利用者が、回路の挙動や、設計対象の素子が入出力特性にどのような影響を与えるかを理解するのを支援することもできる。本論文では、特に不連続変化を伴う回路の設計支援を可能とするためのシステムの推論法について述べる。このような回路の設計を支援する場合、従来の定性推論の推論法では、処理が途中で失敗し最後まで実行できなかったり、時間の曖昧さが増加するという問題が生じる。ここでは、従来の定性推論の推論法に、不連続変化の性質に基づいた制約の伝搬の制御法や推論の枝刈り法を導入することにより、この問題を解決する。そして、シュミットトリガ回路の設計を例題として、その有効性を確認した。

キーワード：電子回路，設計支援，定性推論

1. まえがき

電子回路などの設計において、全く新規に設計が必要な場合もあるが、既に設計済みの回路を再利用することにより、要求仕様を満たす設計が可能な場合も多い。たとえば、特性は少し異なるが、設計したい回路とトポロジが同じである設計済みの回路が存在する場合である。この場合、設計済みの回路の一部の素子の値のみを変更することにより、要求仕様を満たす回路を設計することができる。設計のエキスパートにとって、このような回路の設計は、エキスパート以外の人任せに、彼ら自身は新規の設計に没頭したいという要望がある。しかし、このためには、次のような問題がある。

上記のような設計では、通常、設計者は回路（数値）シミュレータを用いて、設計対象の素子値を振りながら、回路が所望の特性を示す値を求め設計を行う。ここで、数値シミュレーションでは、全ての素子に具体的なパラメータ（値）を設定する必要があるが、設計に熟練していない人にはどの程度の値を設定して良いのか見当すらつかない場合が多い。この結果、所望の特性を得るために非常に多くの試行錯誤を繰り返すことになる。また、回路シミュレータのような支援ツールによる解析結果は、エキスパートにとっては有益な情報となることが多いが、回路などに対する知識の少ない利用者にとって、この解析結果から得られる情報は少ない。したがって、設計が単純作業となりがちで、最適な設計ができない。このため、回路の構造と設計の外部仕様である入出力特性のみから、素子の値を求めることができる設計支援システムが必要である。そして、同時に、回路の振る舞いや各パラメータと特性との関係のような情報の提供が可能な支援が必要である。

さて、AI技術における定性推論⁽¹⁾は、原理、原則に近い知識（これを深い知識と呼ぶ）に基づいて問題解決を行うタスク依存性の少ない推論機構を提供するものである。従来、定性推論は、人間が理解しやすい推論結果が得られる、装置などの起こりうる全ての挙動を洗いだせるという特長を持つため、主に装置の診断システムに利用され研究されてきた。定性推論を基礎におく定性シミュレーション^(2,3)は、時間経過に伴う系の振る舞いを定性的に導出するものである。従来の数値シミュレーションでは、一定時間間隔を基準とした定量的な解析を行うのに対して、この定性的解析では、状態変化を基準とした解析を行う。すなわち、系の挙動を状態の遷移過程として捉える推論方式である。このため、数値シミュレーションとは異なり、数値的な詳細が分からない場合や、情報が不足している場合においても、シミュレーションが可能である。この機能は、設計の観点から見ると、設計対象の素子値を具体的に設定することなく、回路のシミュレーションが可能なことを意味することから、定性シミュレーションが上記の回路の設計支援に有効ではないかと考えた。

筆者らは、先に、定性推論を用いた設計支援システムを提案し、電子回路の設計支援を例題として、その有効性を示した^(4,5)。しかし、ここで対象とした設計は、時間変化を考慮にいない静的な場合の設計に限っていた。本論文では、さらに、時間変化の解析が必要となる不連続な変化を伴う回路にも適用可能な設計支援システムを提案する。ただし、本論文では、キャパシタンスやインダクタンスに関する時間変化は対象としていない。

従来の定性シミュレーションの推論法^(6,7)でこのような不連続な変化を伴う回路の設計支援を行おうとすると、処理が途中で失敗し最後まで実行できなかったり、時間の曖昧さが増加するという問題が生じる。本論文では、この問題に対して、不連続変化の性質に基づいた解決策を提案する。具体的には、従来の推論方式に、不連続変化の性質に基づいた制約の伝搬の制御法や推論の枝刈り法を導入することにより、この問題を解決する。そして、不連続変化する回路の例として、シュミットトリガ回路を取り上げ、システムの有効性を検証する。

2. 定性推論に基づく設計支援システム

2.1 設計支援システムの概要

(1) システム構成とモデル構築

本設計支援システムは、一般的な定性推論システムに不完全ではあるが非線形連立不等式を解くことができる制約ソルバー^(6,7,8)を組み合わせたシステムである。このため、定性推論の特長である、状態変化を基準とした離散的なシミュレーションやシミュレーションの対象物の全ての挙動を枚挙する能力を有し、

かつ、一般的な定性推論ではできなかった定量的な解析が可能である。本システムの構成を図1に示す。

図1に示すように、本システムは、回路の構成部品（素子名）とその部品間の結合関係を記述した構造情報および処理の初期条件を入力とする。また、知識ベースには、詳細は後述するが、非線形連立不等式でモデル化された部品（オブジェクト）や物理法則に関する知識が格納されている。挙動推論部は、この知識を使って、構造情報に記述された系（回路）のモデルをワーキングメモリ上に自動構築する。すなわち、系のモデルの構築とは、具体的には、ワーキングメモリ上に対象の系のモデルを表す非線形連立不等式を構築することである。このモデル構築において、挙動推論部は、系の全ての式を一括してワーキングメモリに登録するのではなく、一式ずつ制約ソルバーに問い合わせを行いながら登録する。

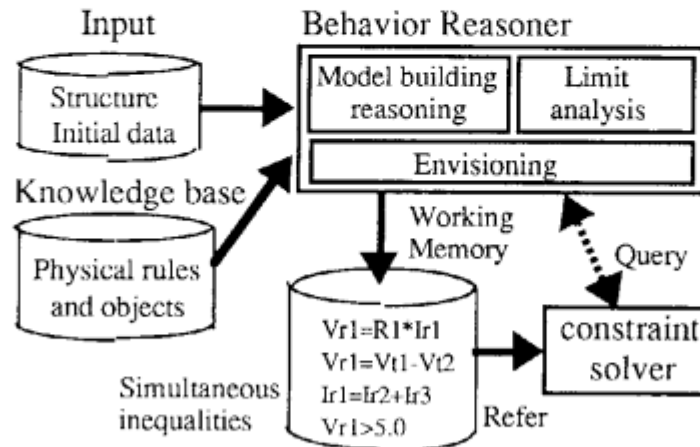


図1 システム構成
Fig.1 System Organization

(2) 挙動推論部と制約ソルバーとのインタフェース

挙動推論部と制約ソルバーとのインタフェースは、基本的には、次の3つのタイプのコマンドにより行われる。制約ソルバーは、挙動推論部からの要求に基づいて、ワーキングメモリ上の非線形連立不等式の計算を行い、結果を挙動推論部に返す。

(a) 式の登録

enter_relation (式, 応答) 応答: 成功or失敗

式を1つ登録する。その式を追加することによりワーキングメモリ上の非線形連立不等式に矛盾が生じると、制約ソルバーは「失敗」を返す。

(b) 関係式の問い合わせ

evaluate (関係式, 応答)

応答: 成功or失敗or不定

変数の関係の問い合わせを行う。例えば、関係式 $a > b$ の問い合わせに対し、制約ソルバーは次の応答を返す。

成功: ワーキングメモリ上で $a > b$ の関係が成立

失敗: ワーキングメモリ上で $a \leq b$ の関係が成立

不定: $a > b$, $a \leq b$ のどちらの関係も成立。a, bのいずれか一方、あるいは両方の値が未定のときである。

(c) 変数値の取り出し

get_value (変数名, 値)

変数値は、区間値で求められる。

ここで、各変数の値は、最初 $(-\infty \sim \infty)$ の区間値をとる。そして、一般に式が登録されるにしたがって制約が強くなり、変数値の区間が縮まる。さて、上述したように、ここで用いる制約ソルバーは非線形連立不等式を完全に解くことができない。例えば、ある非線形連立不等式の制約の下では、もっと縮まる

はずの変数の区間値が、ある値以上縮まらないことが起こる。この結果、非線形連立不等式の矛盾を完全には検出できない。しかし、無矛盾な非線形連立不等式を間違えて矛盾とすることはない。なお、非線形連立方程式⁽⁶⁾、線形連立不等式⁽⁷⁾は完全に解くことが可能である。

(3) 状態遷移の推定

さて、システムは次のような手順で系の状態や状態変化を求める。挙動推論部は、まず入力である初期条件をワーキングメモリに登録し、その条件下で上記に示したモデル構築を行う。これにより、初期条件の環境下で系がとりうる状態を求めることができる。このモデル構築処理を状態内解析とも呼ぶ。次に、求められた状態から次に遷移する状態を推定し（この処理を限界解析と呼ぶ）、その推定結果に基づいて遷移する次の状態を求める（状態内解析）。システムは、この状態内解析と限界解析の処理を交互に繰り返すことにより、系の取りうる状態とその状態遷移を推定する。

ここで、次に遷移する状態を推定する限界解析は次のように行われる。モデル構築では、式をワーキングメモリに登録する際、その微分された式を生成し、同時に登録する。この結果、制約ソルバーは変数の微分値をも計算し求める。すなわち、各変数の変化の方向が求められる。限界解析では、この状態内解析で求められた各変数の値と変化の方向から、各変数が次の状態を取りうる値を推定する。この推定値を制約としてモデル構築を行うことにより、次に遷移する状態を求めることができる。

システムは以上のような推論を行うが、制約ソルバーの性能の限界や時間の曖昧さなどに起因する情報の不足が原因で、状態内解析や限界解析において、状態や次の遷移状態が求められない場合が生じる。例えば、制約ソルバーが完全であれば、微分値が正であると計算できるのに、不完全であるため微分値を $(-\infty \sim \infty)$ のまま縮めることができない場合がある。このような場合、その変数の変化の方向（増加、減少、一定）が決まらないため、変数の次に取りうる値を求めることができない。また、変化する変数が複数あった場合は、次に取りうる値が求められたとしても、変化する全ての変数が同時に求められた値になるとは限らないため、時間の曖昧さが生じることになる。図1のエンビジョニング機能は、このような情報の不足による曖昧性が生じたとき、曖昧の原因となるパラメータを取りうる値の有限の領域を自動的に生成し、それぞれの場合を仮定して場合分けを行いながら推論を進めていく。この挙動の枚挙処理により、情報が不足している場合でも、シミュレーションを続行することが可能となる。

(4) 知識表現

知識ベースには、具体的には知識のクラスが格納されている。このため、モデル構築では、この知識から構造情報に書かれている各素子や結合関係のインスタンスを作成し、それをワーキングメモリに登録する。本システムを電子回路に应用する場合、知識ベースに格納される物理法則としては、結合点におけるキルヒホッフの法則が、部品としては、回路素子のモデルが格納される。例えば、抵抗の素子のモデルにはオームの法則が記述される。また、トランジスタやダイオードなどの非線形な特性を持つ素子は、いくつかの線形の動作領域にわけて記述する。このような複数の線形領域によりモデル化される素子は多モード素子⁽¹⁰⁾とよばれ、動作領域毎に、その動作領域を取りうる条件とその動作領域における線形モデルをIF-THENの形式で記述する。図2に、トランジスタの記述例を示す。この記述の概要を以下に説明する。

まず、クラス全体の共通の構造として、コレクタc、ベースb、エミッタeの各端子を持ち、属性として、ベース抵抗 r_b (100Ω)、エミッタ抵抗 r_e 、ベース・エミッタ間電圧 v_{be} などを持つことが定義される。次に、このトランジスタは、ONとOFFの2つの状態をとり、各状態の動作領域はstate文以下で定義される。各状態においてconditions文以下にその動作領域を取りうる条件（IF部）が、relations文以下にその動作領域における線形モデル（THEN部）が定義されている。図では、ベース・エミッタ間電圧 v_{be} が $v_{be} > 0.7V$ のときON、 $v_{be} \leq 0.7V$ のときOFFの状態になる。モデル構築において、ワーキングメモリにはこのTHEN部で定義された式のみが登録される。また、各動作領域の定義において、属性は変数でもあり、 $v_{be}@Tr$ のように記述する。このクラスのインスタンスが作成されると、Trに具体的なインスタンス名が付けられ、変数名が確定する。また、部品の属性、例えばベース端子の電圧は $v@b!Tr$ と表現する。部品である端子のクラスは、図では省略したが電圧 v と電流 i の属性を持つ。このトランジスタの登録において、挙動推論部は、上述したevaluateコマンドでONとOFF状態の条件（conditions文における式）を制約ソルバーに問い合わせ、条件が成立する状態のモデルの式をenter_relationコマンドで登録する。このコマンドに対して、制約ソルバーから登録の失敗が返されると、トランジスタの登録全体が失敗する。

```

object tr:Tr
  parts_of
    c-terminal; b-terminal; e-terminal;
  attributes
    rb-constant(100.0);
    re-constant;
    alpha-constant(0.99);
    beta-constant(100.0);
    ic0-constant(0.0);
    vbe;
  state on
    conditions
      vbe@Tr > 0.7;
    relations
      vbe@Tr=v@b!Tr-v@e!Tr;
      i@c!Tr=alpha@Tr*i@e!Tr;
      i@e!Tr=beta@Tr*i@b!Tr;
      v@b!Tr=rb@Tr*i@b!Tr+v@e!Tr+0.7;
      i@b!Tr > 0.0;
  state off
    conditions
      vbe@Tr <= 0.7;
    relations
      re@Tr= 100000.0;
      vbe@Tr=v@b!Tr-v@e!Tr;
      i@c!Tr=ic0@Tr;
      i@e!Tr=i@c!Tr+i@b!Tr;
      v@b!Tr=rb@Tr*i@b!Tr+v@e!Tr+
        re@Tr*i@e!Tr;
end.

```

図 2 トランジスタの知識表現
Fig.2 Description of transistor

このようにして、回路は非線形連立不等式でモデル化される。このため、回路のあるパラメータの値を未定義にした場合、他のパラメータの値が決まっていれば、その制約から、制約ソルバーは未定義パラメータの値の範囲を計算することができる^(4,5)。

2.2 シミュレーションによる設計支援

前節で述べたように、状態内解析により1つの状態のモデルが構築されると、その状態の制約を満足する未定義パラメータの値の範囲を計算することができる。このため、さらに設計仕様として与えられた入出力特性通りに回路を動作させれば、仕様を満たすパラメータの値を得ることができると考えられる。すなわち、その動作において回路がとりうる一連の状態で、矛盾の生じない設計対象の素子値を逆に求めることができる。

ここで、従来の数値シミュレーションでは、一定時間間隔を基準として、定量的に解析を行う。このため、事前に全てのパラメータの値が決まっている必要があり、値を未定義にした状態ではシミュレーションできない。これに対して、本システムで用いている定性的解析では、状態変化を基準とした解析を行う。この定性的状態には、瞬間的状态と持続的状态があり、系の振る舞いは瞬間的状态と持続的状态を交互に繰り返すものとして特性化する。瞬間的状态とは、変数がある一点の値をとる時の状態である。そして、変数がある瞬間的状态における値と次の瞬間的状态における値との間の値をとる時の状態が持続的状态である。瞬間的状态における変数値を境界標あるいはランドマーク (landmark) と呼ぶ。ここで、

持続的状態において、変数は区間値をとることができる。これは回路のシミュレーションにおいて、同じ（一連の）式で表現できる領域は、1つの定性的状態で表せることを意味する。言い換えると、上記の多モード素子の1つの動作領域全体を1つの状態に構築できる。このため、このシミュレーション機能と前節で述べた挙動の枚挙処理により、値を未定義にした状態でもシミュレーションが可能である。

このように、設計支援は、設計対象の素子値を具体的に設定していない回路の構造情報と、得たい入出力特性を制約条件として与えて回路のシミュレーションを行うことにより実現する。しかし、このような回路のシミュレーションを行わせようとする、次のような問題が生じる。

(1) 正帰還状態のような変数の不連続変化が生じる状態を持つ回路（例えばシュミットトリガ回路）を、従来の推論法^(4, 5, 9)によりシミュレーションしようとしても、処理が途中で失敗してしまう。

(2) 素子値を設定しないため、構築される回路のモデルが非線形連立不等式となる。制約ソルバーは、この非線形連立不等式を完全には解けないため、各変数の変化の方向が求まらない場合がある。特に、シュミットトリガのような内部状態を持つ回路を扱う場合、状態遷移の曖昧性が増え、この結果、処理量が増大し、かつ推論結果が分かりにくいものになってしまう。この問題点の詳細とその解決策について、

(1) については3章で、(2) については4章で述べる。そして、これにより得られる設計支援の例を5章において示す。

3. 正帰還を含んだ回路の設計のための推論法

3.1 正帰還における問題点

定性推論は、人間にとって分かりやすい推論を行うことが特徴の1つとして挙げられる。このため、用いる知識としての回路モデルも、人間が理解しやすいものである必要がある。例えば、図2に示すトランジスタ回路は、恐らく詳細度の高いモデルでは1つの状態で表現でき、各変数は連続的な変化として捉えることが可能であろう。しかし、通常、トランジスタはONとOFFの2状態をとると考えたほうが理解しやすい。このため、図2のようなモデルの利用が考えられるが、このような詳細度の低いモデルを用いると以下のような問題が生じる。

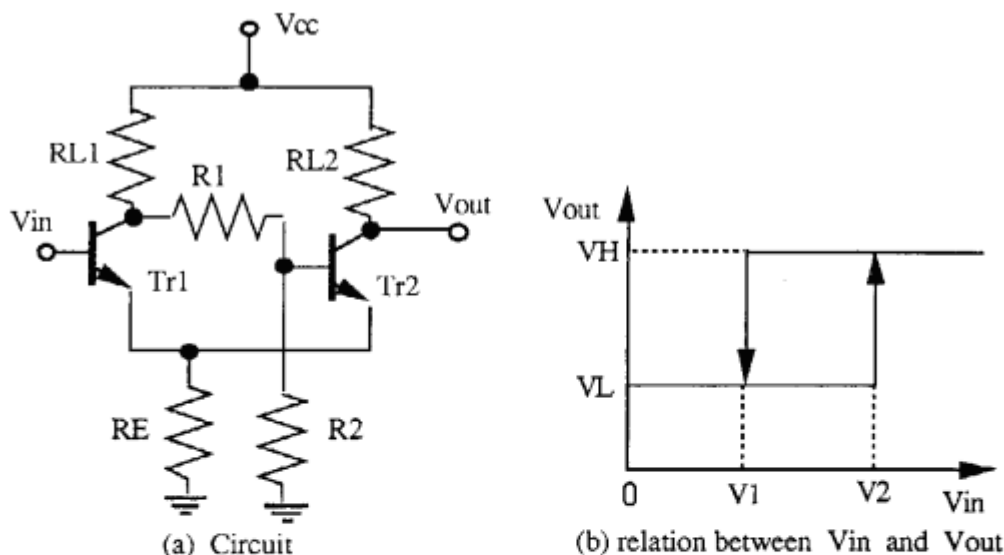


図3 シュミットトリガ回路
Fig.3 schmitt trigger circuit

図3にシュミットトリガ回路⁽¹¹⁾と、その入出力特性の例を示す。図において、入力電圧が $V1$ と $V2$ のときには、正の帰還が生じて、トランジスタはONからOFF、あるいはOFFからONに瞬時に切り替わる。こ

ここで、図のシュミットトリガ回路の2つのトランジスタTr1, Tr2のON/OFFというイベントに着目して、イベントの因果的な連鎖を考えると、両者のベース・エミッタ間電圧Vbeの変化方向からTr1, Tr2がそれぞれOFF・ON状態 ($V_{out}=V_L$) から、ON・ON状態 (正帰還) を経由して、ON・OFF状態 ($V_{out}=V_H$) に推移すると理解できる。しかし、正帰還を伴う回路では次の2つの問題が生じ、このような挙動の解析が行えなくなる。すなわち、シミュレーションが失敗してしまう。

(1) 正帰還では正しい解が求められないため、安定状態 (OFF・ON状態) から正帰還の状態 (ON・ON状態) へ遷移できない。

この問題は、正帰還の状態では、実際に起こる現象とは違った解が求められることにより生じる。すなわち、遷移前の安定状態から次状態を求めるために予測され、送られてくる制約と矛盾する結果が求められることがあるため、その制約のもとでは、ON・ON状態を構築できないことになる。

この正しい解が求められない問題は、利用する回路モデルが、時間 (遅れ) を無視した詳細度の低いモデルになっていることが原因で起こる。このようなモデルを用いることにより、実際に起こる挙動とは違った解を求めてしまう場合を、簡単な例で説明しておく。例えば、次のような外部からの入力xに、出力yからの帰還 ($c=x+y$) がかかる正帰還の系を考える。

$$c=x+y, y=6^*c$$

このような正帰還の系は、実際には時間遅れがあるため、例えば、 $x=1$ とおくと、変数yは限りなく増え続ける系である。しかし、上記のモデルでは時間遅れが無視されているため、制約ソルバーの数式処理により、($y=-1.2$) と一意に値が決定されてしまう。シュミットトリガ回路のON・ON状態でも詳細度の低いモデルを用いているため、これと同様の現象が起こり、これが原因でシミュレーションができなくなることがある。ここで、以降、正帰還の状態のように、変数が有限の値を持たない状態 (例えば、変数yは限りなく増え続ける) を不安定な状態と呼ぶ。

(2) 正帰還では、さらに、いくつかの変数の値が不連続に変化するため、正帰還の状態から安定状態 (ON・OFF状態) への遷移が行われない。

正帰還の状態から安定状態への遷移が行われない問題は、正帰還状態において生じる次の2つの事象が原因で生じる。1つは、最初の問題と同様、ON・ON状態で正しい解が得られないため、次の状態が正しく推定できない。もう1つは、正帰還では、変数値が不連続に変化するために生じるものである。この、後者について以下に詳しく説明する。

ここで、トランジスタは図2で定義したように、ベース・エミッタ間電圧Vbeが $V_{be}>0.7V$ のときON、 $V_{be}\leq 0.7V$ のときOFFになる。このため、入力電圧=V2における正帰還の状態では、両トランジスタTr1, Tr2のベース・エミッタ間電圧Vbeは共に $V_{be}>0.7V$ 、すなわちON・ON状態である。また、この時のTr1のVbeは上昇、Tr2のVbeは下降である。さて、この状態から、次の状態の各変数の値を推定する場合、イベントを変化させることのみに注目するのならば、次に送る制約としては、それぞれ入力電圧=V2, Tr1の $V_{be}>0.7V$, Tr2の $V_{be}\leq 0.7V$ で良い。しかし、前章で述べたように、定性推論では、瞬間的状态と持続的状态を交互に推論する。すなわち、Tr2の $V_{be}=0.7V$ の瞬間的状态を一旦経由してTr2の $V_{be}<0.7V$ の状态に移行する推論を行う。このため、限界解析では、入力電圧=V2, Tr1の $V_{be}>0.7V$, Tr2の $V_{be}=0.7V$ が次状態の制約として生成される。

状態内解析は、この制約下でモデル構築を行うが、このモデル構築は全て失敗する。この結果、以降の状态遷移は起こりえないと判断され、以降のシミュレーションを行うことができなくなる。このモデル構築の失敗は、限界解析で生成される入力電圧=V2, Tr1の $V_{be}>0.7V$, Tr2の $V_{be}=0.7V$ の制約が互いに矛盾するためである。なぜなら、Tr1, Tr2のベース・エミッタ間電圧Vbeの制約により両トランジスタはON・OFF状態になるが、このON・OFF状態においてTr2のVbeを $V_{be}=0.7V$ とすると、入力電圧はV2でなく、V1となる。ON・OFF状態において入力電圧=V2にするには、Tr2のVbeが約-1.3Vである必要がある。すなわち、Tr2のVbeは、0.7Vを超える状態から、0.7Vを経由せずに、一気に約-1.3Vまで不連続変化するものとして捉える必要がある。

3.2 従来の解析法

このような問題に対して、論文(10)ではイベントの切り替わる境界に、架空の瞬間と呼ばれる瞬間的状态を設け、この架空の状态を常に経由させることにより問題の解決を図っている。架空の瞬間的状态では

次に起こるイベントを予測させ、その状態に遷移させる。このようにイベントに注目した遷移は、イベントの切り替えに関連した変数のみの因果的な連鎖を考えれば良いため、上記の問題を回避できる。すなわち、詳細度の低いモデルに基づいた回路の挙動の解析が可能となる。しかし、この方式は次のような問題がある。

まず、系のモデルが一意に構築されることが仮定されていることである。例えば、シュミットトリガ回路の2つのトランジスタの状態はモデル構築開始時には決まっている必要がある。トランジスタのような多モード素子の各動作領域における関係式のように、同時には成立できない関係式が1つのモデル内に分かれて記述されている場合は、事前に評価可能なため、矛盾の生じないモデルの構築が比較的容易に実現可能であろう。しかし、本システムは、より柔軟な記述を可能とするため、同時に成立しえない関係式を、プロダクションルールのように、互いに排他的な条件の基で、個別に記述できる。このような記述を許すと、ルールの起動条件の真偽が、構築される関係式を解かなければ決まらない場合は、挙動の枚挙処理を行う必要が生じ、この結果、評価すべき定性的状態が増大してしまう問題が生じる。本システムは、部品や物理法則を登録する際に、既にその時点までにワーキングメモリに登録されている関係式と、現在登録しようとしている部品や物理法則の条件とが矛盾しないかどうかを計算する。そして、矛盾の判定ができない時には、登録を後回しにする。すなわち、まだ評価していない部品や物理法則の登録終了後、再度登録処理を行う。これにより、上記のような問題を押さえることができるが、逆に、従来の方式を導入することができない。また、実在しない架空の状態を設けることは挙動を理解するうえで多少不自然となると考えられる。さらに、架空の状態とその他の状態では、状態遷移に対する考え方が変化するため、解釈に不連続性が生じる。

このため、架空の状態を設けることなく、一貫して変数の値と変化の方向に基づいて系の挙動を捉える方式について検討した。具体的には、限界解析において、次の状態を求めるために伝搬される制約を、その時点の状態に応じて制限することにより実現する。以下に、その解決策を示す。

3.3 正帰還に起因する問題の解決策

本方式では、図4に示すように、構築された系の状態が正帰還状態か否かによって、限界解析における処理を切り替える。

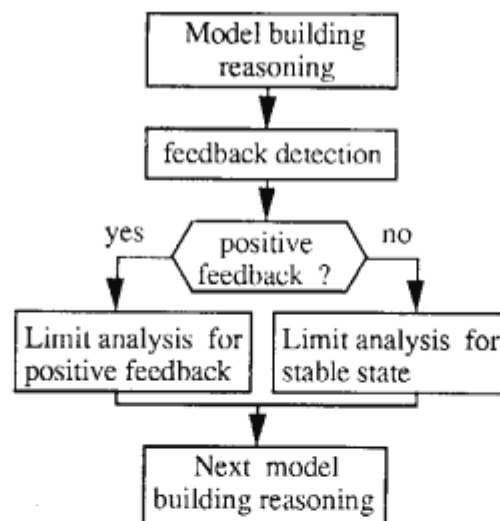


図4 帰還回路に対する推論手順

Fig.4 Flow diagram for a feedback system

(1) 安定状態からの遷移

素子を線形特性でモデル化した場合、設計したい素子値は1つの状態内においては一意に決定される。これは、1つの状態内は、同じ非線形連立不等式で表現できるためである。このため、我々の関心はどの

ような状態が成立し、そして、その状態間をどのように遷移するかということにある。すなわち、1つの状態内を刻むランドマークはシミュレーションと異なりあまり意味をもたない。

したがって、この問題の解決策として、限界解析で処理対象とする変数は、入力電圧のように連続な変化が保証されている変数と、イベントを変化させる変数に限定する。イベントを変化させる変数とは、例えば、図2のトランジスタの記述において、トランジスタのON/OFF状態を決定するため、その条件部に書かれるベース・エミッタ間電圧 V_{be} である。そして、ランドマークとしては、明示的に記述されているものを対象にする。例えば、ベース・エミッタ間電圧 V_{be} の場合、条件部に書かれたON、OFFの状態を決める0.7Vはランドマークとして用いるが、他の変数の制約から計算の結果求まる値は用いない。これは、例えば、3.1節で示した-1.3Vのような値である。すなわち、イベントを変化させるのに必要な情報のみを制約とする。これは、架空の瞬間の状態¹⁰⁾で行っている遷移をシステム全体で行うことに相当する。これにより、モデルが荒くモデル間で多少の変数値の不連続性がある場合でも停止することなくシミュレーション可能である。

(2) 正帰還の状態からの遷移

3.1節の(1)において示したように、使用するモデルの詳細度が低いため、正帰還状態では正しい解が得られない。このため、正帰還状態では制約ソルバーが解いた解を用いないようにする。この正帰還状態では各変数の値は有限の範囲をとらないため、値は求めることができない。しかし、各変数の変化する方向(微分値)は構築された方程式の因果関係に基づいて計算することが可能である。したがって、後述する方法で、各変数の変化の方向のみを求め用いる。

次に、 V_{be} のようなイベントを変化させる変数が不連続変化するために生じる問題は、状態遷移の推論において、状態の境界の明示されていない瞬間の状態を生成し、この状態を経由させることが原因で生じるものであった。このため、もし、現在の状態が正帰還であれば、イベントの変化のみに着目した推論を行う。すなわち、上記の瞬間の状態を生成、経由しないようにする。

このように、構築された状態が正帰還状態か否かを判定し、正帰還状態であれば各変数の変化の方向を求める必要がある。ここでは、基本的に論文(12)の手法によりこれを実現する。すなわち、構築された回路の連立不等式から、まず外部入力変数である入力電圧を起点として帰還のループを求める。そして、帰還ループが検出されたならば、その開ループ伝達関数を計算する。開ループ伝達関数が1以上の正の帰還ループが存在する場合、その回路は正帰還である。それ以外の帰還の場合、解は収束する。すなわち、制約ソルバーで正しく解ける。また、帰還ループの検出において、正帰還に関係する変数およびその変数間の因果関係も同時に求めることができる。したがって、この情報から変数の変化の方向を求めることができる。ここで、論文(12)では、帰還や開ループ伝達関数などを因果ストリームにより解析的に求めているのに対して、本システムは、制約ソルバーなどを使った数式処理が可能であるため、これらを数式処理により求めている。

4. 設計支援における時間の曖昧さへの対応

4.1 状態遷移における曖昧性

上述したように、本設計支援システムでは、正帰還状態や内部状態を持つ回路をも対象とし、また実行に当たっては設計対象の素子値を未知としてシミュレーションを行う。このことが原因で、従来のシミュレーションでは起こらなかった挙動や時間の曖昧さが生じ、無駄な処理を行ってしまう。また、逆に遷移すべき状態が生成されない問題も生じる。

例えば、図3のシュミットトリガ回路のシミュレーションにおいて、入力電圧を0Vから増加していく場合、実際に起こる正しい状態の遷移は、図5の実線の矢印で示すようになる。しかし、値が未知の素子値を扱うため、変数の変化の方向が求まらず、その結果、限界解析において各変数が次に取りうる値を推定できなくなる。なぜなら、各変数の値が、現状の値のまま保持される場合、その値以上になる場合、あるいはその値以下になる場合の全ての可能性があるためである。このため、図の入力電圧が $V1 \leq$ 入力電圧 $< V2$ の状態のように、その状態において矛盾しない回路の全ての状態を生成することになる。すなわち、実際に遷移するOFF-ON状態(出力が V_L)の他に、実在しない正帰還の状態(ON-ON状態)や実際には遷移することのないON-OFF状態(出力が V_H)へも遷移するとして生成される。このON-OFF状態は回路が

ヒステリシス特性を持つため、入力電圧の制約のみでは矛盾なく生成される。この結果、 $V1 \leq$ 入力電圧 $< V2$ の ON-ON 状態から ON-OFF 状態を介して入力電圧 $= V2$ の ON-OFF 状態へ遷移するような、存在しえない遷移も現われてしまう。

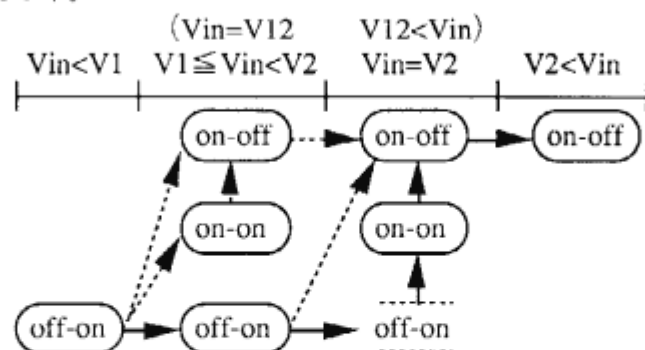


図5 シュミットトリガ回路の状態遷移とそのシミュレーション結果

Fig.5 State transition of schmitt trigger and simulation result

また、入力電圧 $= V2$ においては、図のように実際には正帰還が生じ、入力電圧が一定であるにもかかわらず、回路は状態変化する。ここで、5章において例を示すが、設計対象のパラメータが、正帰還が生じる入力電圧 $V2$ にあまり関係しないものである場合、すなわち、値の分かっている他のパラメータにより入力電圧 $V2$ が決まってしまう回路の場合、正しいシミュレーションができなくなる。例えば、図5の特性を示す回路において、正帰還が生じる入力電圧の仕様を $V12$ ($V1 < V12 < V2$) と与えたとする。図の括弧で示した入力電圧は、この場合の入力電圧と状態との関係を示したものであるが、入力電圧 $= V12$ において $V1 \leq$ 入力電圧 $< V2$ の場合と同じ推論が行われ、さらに、入力電圧 $= V12$ の OFF-ON 状態から直接、入力電圧 $> V12$ の ON-OFF 状態への遷移が推論されてしまう。しかし、このような遷移は現実には存在できないため、このような仕様の下では推論は失敗する必要がある。すなわち、利用者にこの仕様を満たす設計は不可能であることを示す必要がある。また、入力電圧の仕様を、 $V2$ のような瞬間値ではなく、ある一定の範囲で与えることが考えられるが、この場合には、図5の点線で示した OFF-ON 状態（トランジスタ $Tr1$ のベース・エミッタ間電圧 V_{be1} が $V_{be1} = 0.7V$ の瞬間の状態となる）が生成されないため、システムは状態変化を起こす入力電圧 $V2$ を求められない問題が生じる。

以上において説明した（1）存在しえない状態が生成される問題、および逆に（2）存在する状態が生成できない問題に対して、本章では、正帰還の特性を利用した解決策を示す。

4.2 正帰還の特性に基づいた時間の曖昧さの解消

4.2.1 解決策1

正帰還の状態においては、正帰還のループに関連する変数は瞬時に変化する。このため、系が正帰還であると判定されたなら、正帰還に関係する変数のみを最優先で変化させ、正帰還に関係しない変数の変化は禁止する。これにより、ON・ON状態からON・OFF状態への推移を一意に推定することができる。しかし、OFF・ON状態からON・ON状態への遷移は、OFF・ON状態において次の状態が正帰還であること、および、正帰還に関係する変数を知ることができないため、この方法のみでは実現できない。

4.2.2 解決策2

正帰還のような不安定な状態（ON-ON状態）は、単独で存在するか、あるいは、安定な2状態（OFF-ON状態やON-OFF状態）の間にのみ存在するかのどちらかである。この正帰還の特性を利用して時間の曖昧性を削減する。すなわち、同じ入力電圧の条件下において、正帰還のような不安定な状態を含む複数の状態が生成されたなら、その中だけで、上記の条件に基づいて、正帰還に伴う遷移の可能性を調べる。上記の条件を満たさない不安定な状態があれば、それは実在しない不安定な状態であるため、削除することができる。ただし、4.1節で示したように、本来存在するはずの瞬間の状態が生成されない場合が

ある。このため、正帰還に伴う遷移の評価においては、状態間における瞬間の状態の存在の有無を調べる必要がある。本処理を以下に示す。

(1) 同じ入力電圧の条件下において得られた状態のなかに、正帰還のような不安定な状態のみが存在する場合に限ってこの不安定な状態の推論を継続する。

(2) 正帰還のような不安定な状態と安定な状態が共に存在する場合は、安定な状態のうち、不安定な状態から遷移可能な状態、逆に不安定な状態への遷移が可能な状態が存在するかどうかを調べ、

(a) 遷移可能な安定な状態がない場合は、不安定な状態を以降の処理の対象から単に外す。

(b) 遷移可能な安定な状態は、以下のように評価する。安定状態から不安定状態への遷移においては、生成されていない瞬間の状態の存在の有無を調べ、瞬間の状態が存在すればその状態内解析を行う。なお、3.1節(2)で述べたように不安定状態から次の安定状態への遷移においては、変数の不連続な変化が生じるため、その間の瞬間の状態は調べない。その遷移の評価は3.3節(2)で生成される制約に基づいて行う。

(i) 検出された瞬間の状態の状態内解析が失敗する場合は、その瞬間の状態を経由した状態遷移はありえないことを意味する。すなわち、その瞬間の状態に接する不安定状態への遷移、ならびにその不安定状態からの遷移が可能な状態への遷移は存在しえない。このため、それらの状態はすべて削除する。

(ii) 検出された状態間における瞬間の状態が成立するなら、その瞬間の状態に接する不安定状態への遷移、ならびにその不安定状態からの遷移が可能な状態への遷移が正帰還に伴う状態変化となる。このように、状態の遷移は全て決まるため、以降はその遷移の最後の状態のみを処理対象とする。

(c) 正帰還を介した状態遷移が検出されたなら、各状態で求められた設計対象の素子値の範囲を全て満たす値の範囲を遷移最終状態の値の範囲とする。

ここで、安定な状態において変数の変化の状態が求まらない場合でも、不安定な状態から遷移可能な安定な状態、および、不安定な状態への遷移が可能な安定な状態は、どちらも不安定な状態における各変数の変化の方向に基づいて調べることができる。不安定な状態における各変数の変化の方向は、前述した正帰還における処理において求めることができる。

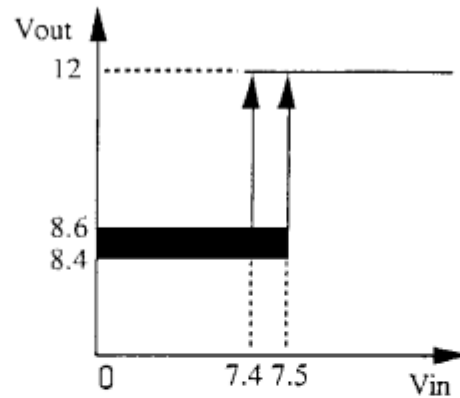
詳細は次章において示すが、上記の2-bの処理により、図5の $V1 \leq \text{入力電圧} < V2$ における実在しない状態(ON-OFF状態とON-ON状態)の削除、および入力電圧 $= V2$ におけるOFF-ON状態の生成が可能となる。

5. 設計支援例

設計支援システムを図3のシュミットトリガ回路のエミッタ抵抗REの設計に適用した例について以下に述べる。本設計支援は、設計仕様を制約条件として与えて、回路を設計仕様通りに動作させることにより達成される。入力電圧を0Vから12Vに増加させていく場合の設計仕様(入出力特性)に基づく制約条件を図6に、そして、そのシミュレーション結果を図7に示す。図6において、 $7.5V \geq \text{入力電圧} \geq 7.4V$ の範囲では、出力電圧は上昇するのみであるため、その微分値にも制約を設けている。また、図7において、楕円のなかは状態のID番号と、2つのトランジスタのON/OFF状態を表し、楕円の下にその状態において求めた抵抗REの値を示す。ただし、各状態において求めた抵抗REの値は、遷移する状態に伝搬される。このため、値は制限される方向にのみ求まる。なお、抵抗RE以外は、それぞれRL1とRL2は1K Ω 、R1は2K Ω 、R2は5K Ω である。

まず、図7のシミュレーション結果から、与えられた設計仕様を満たすためには抵抗REを約1885 Ω ～1999 Ω の範囲に設定する必要があることが求まる。また、抵抗REは、入力電圧 $= 0V$ の時点で決定され、以降遷移するどの状態においてもこの値の範囲を縮めないことが分かる。実際、図7とは逆に入力を12Vから0Vに減少させた場合には、抵抗REは状態13で933.6 Ω ～ ∞ 、状態3で約1854 Ω ～1999 Ω となる。このため、抵抗REは、入力電圧 $= 0V$ に関係する仕様である出力電圧値(8.4V～8.6V)を決定するために大きな役割を果たす抵抗であることが読み取れる。また、逆にこの抵抗は、他の設計仕様にはほとんど影響をおよぼしていないことが分かる。

このように、本設計支援システムは、パラメータの値を求めるという機能のみならず、利用者が、回路の挙動や、設計パラメータと設計仕様との関係を理解するのを支援することができる。



(a) relation between V_{in} and V_{out}

IF $V_{in} < 7.4$
 $8.4 \leq V_{out} \leq 8.6$
 IF $7.4 \leq V_{in} \leq 7.5$
 $8.4 \leq V_{out} \leq 12$
 $d(V_{out})/dt > 0$
 IF $7.5 < V_{in}$
 $V_{out} = 12$

(b) Description

図6 設計仕様
 Fig.6 specification

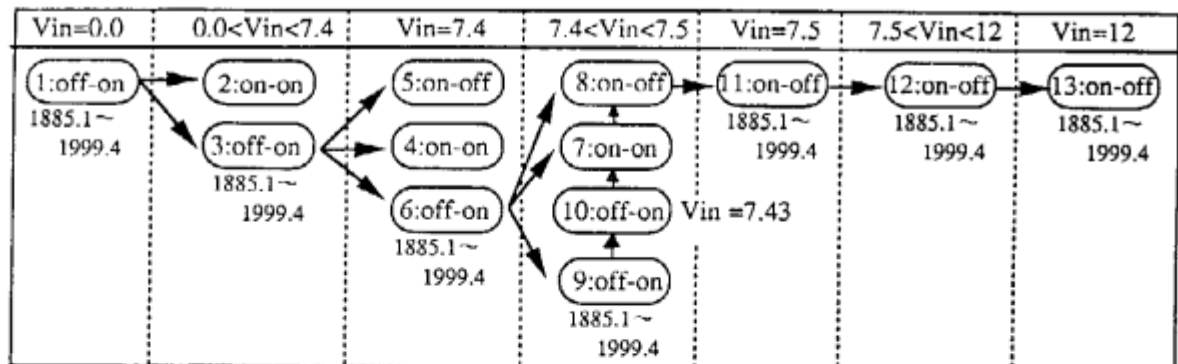


図7 シュミットトリガ回路のシミュレーション結果
 Fig.7 Simulation results of schmitt trigger circuit

次に、シミュレーションでは、 $7.4V > \text{入力電圧} > 0V$ 、入力電圧 $=7.4V$ および $7.5V > \text{入力電圧} > 7.4V$ の3つの時点で、変数の変化の方向が求まらないことなどが原因で、複数の状態への遷移が推定されている。4章で示した時間の曖昧さの解決策2により、このうち、 $7.4V > \text{入力電圧} > 0V$ 、入力電圧 $=7.4V$ の時点では正しく枝刈りが行われ、状態3と6のOFF-ON状態の推論のみが行われている。また、 $7.5V > \text{入力電圧} > 7.4V$ の時点では、挙動の枚挙処理により生成された状態間の遷移が確認され、さらに、その遷移が入力

電圧が約7.43Vのとき起こることが推論されている。このように、時間の曖昧さを生じることなくシミュレーションが可能である。ここで、上記の7.4V>入力電圧>0Vの時点における枝刈りの詳細について説明しておく。

状態2のON-ON状態は、正帰還状態なので状態3のOFF-ON状態の間に遷移が可能かどうかを調べる。まず、ON-ON状態では、3.3節の正帰還状態の処理により、2つのトランジスタのベース・エミッタ間電圧（以下Vbe1, Vbe2と略す）は、どちらも0.7Vを超え、その変化の方向はVbe1は上昇、Vbe2は下降であることが求まる。一方、この状態3のOFF-ON状態は安定状態であり、そのVbe1は約-6.7V、Vbe2は約0.7Vであることが求められる。このため、この状態3のOFF-ON状態から状態2のON-ON状態への遷移が可能と推定されるが、このためには、両者の間にVbe1=0.7Vの瞬間の状態が存在する必要がある。しかし、この瞬間の状態の状態内解析は矛盾が生じて失敗する。すなわち、存在できない。これは、OFF-ON状態でVbe1=0.7Vが成立するのは、入力電圧が約7.43Vの時であるためである。この結果、ここで推定されたON-ON状態およびVbe1=0.7VのOFF-ON状態は存在できないものとして捨てられる。入力電圧=7.4Vでも同じ理由により枝刈りされる。

以上は状態変化の曖昧さを、解決策2に基づいて解消したものである。これと同じ結果は、代わりに解決策1を採り、かつ、シミュレーション全体を通じて、出力電圧の微分値が正であるという制約を設けることによって得られる。この場合は、7.5V>入力電圧>7.4Vの時点で、3章で示した挙動の推定法が機能し、架空の瞬間のような状態をとることなく図7の遷移が推定できる。ただし、前者と比べ状態変化の曖昧さが倍増し、処理量が増えてしまう。例えば、状態1から状態2への遷移は、状態2からの遷移が予想される全ての状態のモデル構築が失敗することにより、始めてありえない遷移であることが確認される。

6. むすび

定性推論を用いた設計支援システムを提案し、シュミットトリガ回路の設計支援を例題として、不連続な変化を伴う回路の設計にも適用可能であることを示した。本システムは、単に回路のパラメータ値の設計を支援するのみでなく、利用者が回路の挙動や、設計対象のパラメータと設計仕様との関係を理解するのに支援することができる。

本システムにおける回路素子は、全て簡単な線形特性によりモデル化している。これは、性能的に、制約ソルバーで解けるものにするという理由もあるが、本システムは、利用者として回路設計のエキスパートではない人を想定しているためでもある。すなわち、利用者が回路構成や挙動を理解しやすいためである。そして、パラメータ値の設計に関しても、最終の設計値として使える精度のよい値を求めるのではなく、他の見当すらつかない利用者に、どの程度の値を設定すればよいかというガイドラインを与えるのを支援する。

本システムの問題点として、まだ処理に多くの時間がかかってしまうこと、設計できる範囲がまだ限られていることが挙げられる。この解決が課題であり、このためには、モデルの簡約化⁽¹³⁾や制約ソルバーの性能の向上を図る必要がある。

謝辞 本研究は、第五世代コンピュータプロジェクトの一環として、新世代コンピュータ技術開発機構ICOTからの委託により行ったものである。ご支援頂いた新田克巳第7研究室長、市吉伸行室長代理、第4研究相場亮室長代理、坂井公主任研究員、寺崎智研究員、川岸太郎研究員、毛受哲研究員に感謝致します。また、本研究に有益な指導・議論をしていただいた京都大学西田豊明助教授、ならびにシステムの試作にご協力いただいた（株）日立情報システムズの川口俊治さん、土岐尚子さん、磯川澄江さんに感謝致します。

文 献

- (1) 淵一博監修：“定性推論”，知識情報処理シリーズ別巻1，共立出版(1989-2)
- (2) Kuipers,B.J.：“Qualitative Simulation”，Artificial Intelligence 29(1989),pp.289-338.
- (3) 溝口文雄，本多一賀：“定性的シミュレーション・システムのインプリメンテーション”，定性推論，第4章，知識情報処理シリーズ別巻1，共立出版(1989-2)
- (4) 大木優，大平栄二，新庄広，阿部正博：“定性推論に基づいた設計支援システム”，第43回情報処理学会全国大会講演集，4D-9(1991).
- (5) 大平栄二，大木優，新庄広，阿部正博：“定性推論に基づいた設計支援システムの電子回路への適用”，第43回情報処理学会全国大会講演集，4D-10(1991).
- (6) 坂井公，相場亮：“CAL：制約論理プログラミングの理論と実例”，電子情報通信学会，SS87-28，(1988)
- (7) 網谷勝俊，西田豊明，堂下修司：“量に関する不十分な情報に基づく推論”，知識工学と人工知能 52-5 (1987-5)
- (8) 今野浩：“線形計画法”，日科技連 (1987).
- (9) 大木優，藤井裕一，古川康一：“物理法則に基づいた定性推論”，情処学論，vol.29 no.7,pp694-702 (1988-6)
- (10) 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”，人工知能学会誌，vol.2 no.4,pp501-510 (1987-12)
- (11) 安藤和昭：“パルス・デジタル回路”，昭晃堂，pp130-132,(1986-4)
- (12) 西田豊明，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”，情処学論，vol.28 no.2,pp177-188 (1987-2)
- (13) 吉田健一，元田浩：“「近似」に基づく階層的知識表現”，人工知能学会全国大会（第4回）論文集，2-2 (1990)