1F−2

定性推論におけるメタ制御方式

大平　栄二　　大木　優　　新庄　広　　阿部　正博

(株) 日立製作所中央研究所

1．はじめに

定性推論は，厳格な数値計算によるのではなく，定性的に表現された量に基づいて，回路などの系の挙動を因果関係的に解析する。このため，人間にとって理解しやすい結果が得られるが，定性的であるゆえに曖昧性が生じ，存在しえない無駄な挙動をも出力してしまう。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を導入することにより[1,2]，この曖昧性をあまり増加させることなく系の挙動を因果関係的に解析できる。しかし，こんどは逆に，定量的な解析を行うゆえに，定性的な記述ができなくなるという問題が生じる。本報告では，定性的な記述をも可能とする上記制約ソルバーを用いた定性推論におけるメタ制御法について述べる。

2．システムの概要

本システムでは，基本的には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，系の挙動の解析を行う。状態内解析は，与えられた制約の下で定性的状態の推論を行う。また，限界解析は，状態内解析で求められた定性的状態から，次に遷移可能な定性的状態を推定する。この限界解析における推定結果を制約として状態内解析を行うことにより，次に遷移する定性的状態が決定される。以上の処理は図1の挙動推論部によって実行される。

定性的状態の推論とは，具体的には，対象の系（回路）のモデルを表わす非線形連立不等式を構築することである。図1において，状態内解析では，構成要素（抵抗やダイオードなど）や要素間の接続関係を記述した対象の系（回路）の構造情報を入力として，非線形連立不等式でモデル化された知識（素子モデルや接続点の物理法則）を用いて系のモデルをワーキングメモリ上に構築する。制約ソルバーは，構築される非線形連立不等式を計算し，式の矛盾を調べたり，変数の値を計算し求める。式に矛盾が生じると現在構築中のモデルが存在不可能であることを挙動推論部に報告する。

状態内解析では，非線形連立不等式を登録する際に，並行してその微分式も生成し登録する。この結果，変数の値と共に，その微分値を求めることができる。すなわち，変数の変化の方向（増加，減少，一定）が求まることになる。限界解析は，求められた定性的状態の変数の値と変化の方向から，次に遷移する定性的状態において各変数がとりうる値の範囲を推定し，状態内解析に制約として送る。

さて，定性推論の特徴の1つは，人間にとって理解しやすい挙動の解析を行うことである。このため，知識として用いる素子モデルも理解しやすいモデルである必要がある。例えば，ダイオードの場合，一般的な指数関数を用いたモデルで

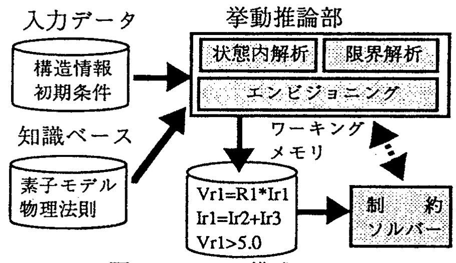

図1 システム構成

はなく，図2のようなONとOFFの2状態をとるモデルを用いる。そして，例えばON状態は定電圧源，OFF状態は高抵抗でモデル化する。しかし，図2のモデルにおいて，単に，非常に大きい値（inf）を∞（無限大），非常に小さい値（epsilon）を0とおいたのでは正しく値を求めることができない。さらに，状態遷移も正しく求めることができなくなる。例えば，定電圧源となるON状態では，ダイオード両端の電圧（v@D）の微分値は0となってしまい，この結果，1度ON状態になると永遠に状態変化できなくなる。

3．定性的記述に基づく推論のメタ制御

3.1　知識表現形式

本システムにおける知識表現の例を図2に示す。

```
object d:D
  parts_of
     t1;  t2;
  attributes
    roff-constant(inf);
    ron-constant(epsilon);
    v;    i;
  state on          (on状態)
     conditions
       v@D>=0.7;
     relations
       v@D=v@t1!D-v@t2!D;
       v@D=ron@D*i@D+0.7;
       i@D>0.0;
  state off         (off状態)
     conditions
       v@D<0.7;
     relations
       v@D=v@t1!D-v@t2!D;
       v@D=roff@D*i@D;
end.
```

図2　ダイオードの知識表現例

3.2　モデル構築処理

極限操作や変数の変化の方向（微分の定性値）を求めることを可能とするため，定性的状態を次のように求める。

（1）無限大と定義された変数は，変数のまま登録する。ただし，無限大と定義された変数が複数ある場合は，それらが互いに等しいという等式を生成し登録する。

（2）非常に小さいと定義された変数には0を代入する。

また，微分された式に対しては，次の操作を行う。

A Meta Control Method for Qualitative Reasoning

Eiji Oohira,Masaru Ohki,Hiroshi Shinjo,Masahiro Abe

Central Research Laboratory,Hitachi Ltd.

（３）微分された式において，無限大と定義された変数は，０を超える任意の値を代入する。

（４）微分された式において，非常に小さいと定義された変数は基本的には０を代入する。ただし，２つの微分された変数(X',Y')と非常に小さいと定義された変数(ε)からなる式（$X'=\varepsilon*Y'$）に限って，１を代入する。

（５）対象のモデル構築終了後，すなわち，すべての式の登録を完了した後，無限大と定義された変数が無限大であるという式を登録する。この処理により極限操作が実現できる。

３.３　限界解析における遷移の制約

限界解析では，いくつかの変数を対象として，その変数が次状態で取りうる値の範囲（変数の制約式）を推定する。本方式では，次の制約の下で値の範囲を推定する。

（１）対象とする変数は，知識の状態の変化に関係するものに限る。図２ではON/OFF状態を決めるv@D（Vd）である。

（２）ランドマークおよび推定される変数の制約式も，知識の状態の変化を決定する明示されたものに限る。例えば，ダイオードのON/OFF状態の成立条件が図２のように定義されているとき，ダイオードの両端電圧Vdの制約となりうるものは，通常の定性推論では次のように推定されるが，

$Vd<0.7 \leftrightarrow Vd=0.7 \leftrightarrow Vd>0.7$

本システムでは，以下の場合に制限される。ここで，Vd＝0.7は省略可能である。

$Vd<0.7 \leftrightarrow (Vd=0.7) \leftrightarrow Vd\geqq 0.7$

（３）対象の変数が，直接，非常に小さいと定義された変数の関数で，かつ，現在の値が瞬間値であり，さらに生成された変数の制約式により知識の状態が現在の状態から変化する場合，変数の制約としては，生成された変数の制約式になる場合と，現状態の制約にとどまる場合の２つの制約式を生成する。すなわち，状態変化する場合と，現状態にとどまる場合の両者についての推論を並行して行う。

３.４　終了条件

非常に小さいと定義された変数を導入することにより，実際には存在するわずかな量が無視され，変数が常に瞬間の値をとるように推論されることがある。変数が瞬間の値をとるのは瞬間の出来事と考えられるため，一般に，定性推論では区間値をとる変数より瞬間の値をとる変数を優先して変化させる。この結果，区間値をとる変数が変化できず，系は同じ振る舞いを繰り返すことになり，推論が途中で終了してしまう。このため，同じ振る舞いが検出されたとき，単に終了せず，次の処理を行う。

シミュレーション結果の履歴の中に同じ振る舞いが検出されたとき，その状態において，変化している区間値をとる変数が存在し，その変数のランドマークが存在する場合は，区間値をとる変数も状態遷移推定の対象とする。そして，そのような区間値をとる変数が存在しなかった場合は，シミュレーションを終了させる。

４．適用例

図３のDTLインバータ回路のシミュレーション結果を図4に示す。初期条件として入力電圧Inp=0Vとすると，ダイオードD1，D2，D3，およびトランジスタがそれぞれon_off_off_offになるときのみ存在可能であることが求まる。ここで以降説明を簡単にするためダイオードD2，D3は同じ状態を取るものとし，この場合on_off_offのように表現する。

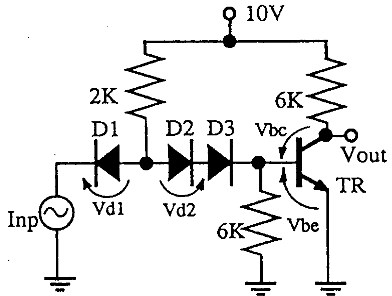

図３　DTLインバータ回路

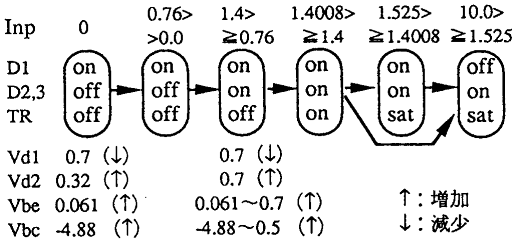

図４　シミュレーション結果

なお，トランジスタTRは，ベース・エミッタ間電圧Vbeとベース・コレクタ間電圧Vbcが，それぞれVbe≧0.7，Vbc≧0.5のとき飽和状態（sat），Vbe≧0.7，Vbc＜0.5のときon状態，Vbe＜0.7のときoff状態となる。

さて，この結果から限界解析はつぎの条件を生成する。

Inp>0,　Vd2,Vd3,Vbe<0.7，Vbc<0.5

Vd1=0.7 または　Vd1<0.7

ダイオードD1に対する予測Vd1=0.7（D1がon），Vd1<0.7（D1がoff）のうち後者は存在しえないもので，次の状態内解析で矛盾が生じ破棄される。

次に，状態on_on_offからは，Vd2が0.7の瞬間値をとるため，

Vd1=0.7 または　Vd1<0.7

0.7≦Vd2,Vd3,　Vbe<0.7，Vbc<0.5

が生成されるが，この制約条件下では状態on_on_offと全く同じ状態が構築される。このため，つぎの予測が生成されることになる。

Vd1=0.7 または　Vd1<0.7

0.7≦Vd2,Vd3,　Vbe＝0.7，Vbc<0.5

５．おわりに

知識（モデル）に定性的な量を含む場合にも，系の定量的な解析を可能とする定性推論の制御方式を提案した。なお，本研究は，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。

参考文献

[1] 大木，藤井，古川；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,pp694～702(1988-7)

[2] 大木他；定性推論に基づいた設計支援システムの構成，
第４３回全国大会講演集，4D-9