知識工学と人工知能　48－7
（１９８６・９・１８）

動的因果関係解析法による電子回路の定性的解析

西田豊明、川村 正[†]、堂下修司

京都大学·工学部·情報工学教室

† 現在三菱電機(株)

本論文では、従来の方式を包含した新しい定性的推論の方式として動的因果関係解析法を提案する。この方式は従来の定性的推論法に対して、適用範囲、効率、説明能力の面で次のような点で改善がなされている：

(1) 因果関係を直接表すデータ構造(因果関係ネットワーク、因果関係流)を利用した解析。

(2) 変数の不連続変化の体系的な取り扱い。

(3) 不完全な情報の管理。

動的因果関係解析法自体は問題領域に独立であり、条件付線形微分方程式であらわされた系に内在する因果関係を解析し、そのふるまいを予測する。本論文では、対象として簡単な電子回路の動作解析の問題を取り上げる。

Qualitative Analysis of Electronic Circuits based on Dynamic Causal Stream Analysis

Toyoaki Nishida, Tadashi Kawakura and Shuji Doshita
Department of Information Science, Kyoto University
Sakyo-ku, Kyoto 606, Japan

This paper presents a new method of qualitative reasoning, called *Dynamic Causal Stream Analysis*. This method is more powerful than conventional algorithms with respect to applicability, efficiency, and explanability. This method features:

(1) the algorithm making use of explicit data structures, *causal networks* and *causal streams*, which capture causality underlying the system being analyzed,

(2) systematic treatment of discontinuous changes, and

(3) maintenance of partial information.

This paper describes basic ideas and an algorithm for analyzing discontinuous change. Electronic circuit analysis was chosen as a task domain.

1. まえがき

従来のエキスパートシステムでは知識ベースを経験則の集まりとして実現する方向で研究開発が行われてきた。この方式では知識ベースの完全性を保証することが極めて困難であり、与えられた問題が設計時に想定したクラスの問題であっても易し過ぎると解けないというような場合が起こ得りた。

これに対して定性的推論の方式は合成性（compositionality）や局所性（locality）の原則に基づいて対象モデルを体系的に構成し、最低限の推論可能性を保証しようというものである。de Kleerらによる定性的推論法は、平衡方程式の集合として表された対象系を解析して、そのふるまいを因果関係の観点から説明することを目的としている。[1][2][3][4][7]

本論文で提案する動的因果関係解析法は従来の定性的推論法を包含した新しい方式であり、適用範囲、効率、説明能力の面で改善がなされている。対象として、簡単な電子回路の動作解析の問題を取り上げる。

2. 定性的推論

2.1 基本的手法

定性的推論における基本的な概念について述べる。以下では定性的推論を行うシステムと解析の対象となるシステムを区別するため、後者を対象系と呼ぶ。

(1) （符号に関する）定性値。定性的推論では対象系の変数値そのものではなく、値がどの範囲にあるかを問題にする。変数xが範囲Iにあるときxの（符号に関する）定性値はIであると言い、[x]=Iと記述する。特に、Iの集合として、

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

が単純かつ有用であるので多くの研究で用いられている。

(2) 定性代数。定性値の間にはたとえば、次のような計算則が成り立つ。

[x]=+, [y]=0/+ ⟶ [x]+[y]=+

[x]=+, [y]=- ⟶ [x]+[y]:不確定

(3) 時間。時間は、時区間(interval)と瞬間(instant)を交互につないだ系列として記述する。時区間はある時点t0 から別の時点t1までの間{t|t0<t<t1}を指し、瞬間はひとつだけの時点から成る。

(4) 対象系の状態。対象系の全変数への値の割り当てを状態と呼ぶ。全変数の定性値の組み合せが同一である連続した時間を一つの時区間または瞬間とみなす。

(5) 瞬間的な状態の遷移。あるi（i≧0）に対して$d^i x/dt$（以後単に$d^i x$と記す）=0、かつiより大きいあるjに対して、$i<k<j \longrightarrow [d^k x]=0$かつ$[d^j x]=y \& y \neq 0$、という条件を満たす変数x を含む状態は瞬間的なものであり、直ちに$(d^k x)=y\ (i \leq k \leq j)$なる状態（時区間）に遷移するものとする。

(6) 遷移可能性。ある時区間で$d^i x\ (i \geq 0)$の符号と$d^{i+1} x$の符号が逆であれば、対象系の状態は$d^i x=0$という割り当てを含んだ状態（瞬間）へ直接遷移することが可能である。しかし、各変数および導関数の連続性を仮定しているので、例えば[x]=+、[dx]=-という状態から[x]=- という状態へ直接遷移することはなく、必ずその前にx=0となる瞬間を経過しなければならないと考える。

(7) 因果関係。定性的推論においては、対象系の因果関係は、各変数値が、入力として与えられた変数からどのような道筋で決定されるかを示した情報構造として捉えられる。

2.2 従来の定性的推論法の問題点

しかし、従来の定性的推論法では、次に述べるような問題点があった。

(1) あいまい性の問題。定性的推論では、量に関して縮退した情報を用いたので、解析結果が一つに絞れず、あいまい性が残ることが多かった。

(2) 因果関係について。従来の方法では、対象系の因果関係を直接表現する方法が確立されていなかった。

(3) 連続性の仮定。従来のシステムは対象系中の変数およびそのすべての導関数は連続的に変化するという仮定の下で解析をおこなっており、不連続な変化は解析できないかあるいは例外処理として扱われてきた。

3. 動的因果関係解析法の概要

3.1 動的因果関係解析法の特徴

本論文では、従来の方式を包含した新しい定性的推論の方式として動的因果関係解析法を提案する。この方式の長所は次の通りである。

(1) 因果関係を直接表わすデータ構造（因果関係ネットワーク、因果関係流）を利用した解析。

(2) 変数の不連続変化の体系的な取り扱い

(3) 不完全な情報の管理

本論文に示す手法は、線形系の解析を基本としている。これを第4節で示す。トランジスタやダイオードなどの非線形な素子の特性は、複数個の線形の動作領

域を条件式によって結合することによって記述する。このようなモデルにおいて各変数およびその導関数に不連続な変化がおこるのはステップ入力などの不連続な入力が与えられた場合と、トランジスタなどの動作領域に遷移がおこってある線形系から別の線形系への移行がおこる場合だけに限られる。 第5節で前者について、 第6節で後者について述べる。両者が複合する場合については、別の機会に述べる。

3. 2 動的因果関係解析法を用いた電子回路解析システム

動的因果関係解析法を用いた電子回路解析システムの構成の概要を図１に示す。システムの中心は動的因果関係解析法に基づいて対象系の動的ふるまいを解析するサブシステム（定性的推論エンジンと呼ぶ）であり、入力として条件付線形(piecewise linear)微分方程式の集合と入力系列をとり、与えられた対象系の状態が次にどの状態に遷移する（し得る）かを解析する。これをくりかえすことによって対象系の予測解析(envisionment)が得られる。 定性的推論エンジン自体はタスク独立である。フロントエンドとして回路の構成記述と素子のモデルから条件付線形方程式を生成するコンパイラがあり、また解析結果を日本語で出力する簡単なプログラムが作成されている。[6)]

4. 対象系の連続変化の解析

4.1 対象系の連続変化解析のアルゴリズム

まず、対象系が線形であり、かつ対象系のすべての変数およびその導関数が連続的に変化すると仮定した場合のアルゴリズムを示し、 第5節以下でこれを逐次拡張してゆく。まず、アルゴリズムの概要を示す。

(step1) 初期状態の決定。 初期状態は瞬間であるとする。

(step2) 因果関係ネットワークの生成。対象系を記述した方程式を変数間の拘束条件とみなして、拘束条件のネットワークを生成し、さらに各リンクに情報の依存関係を示す方向付けをおこなう。その結果を因果関係ネットワークと呼ぶ。

(step3) 因果関係流の生成。比例関係にある変数群を因果関係流としてグループ化する。

(step4) 瞬間の解析。 現在の瞬間の対象系の状態から直接遷移し得る、次の時区間の状態を求める。

(step5) 時区間の解析。 現在の時区間の対象系の状態から直接遷移し得る瞬間の状態を求める。これは

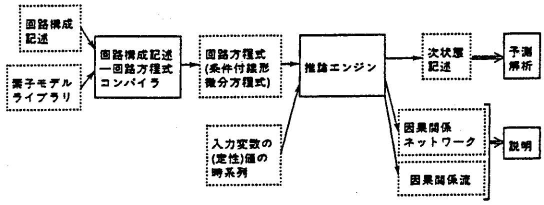


図1. 動的因果関係解析法を用いた電子回路解析システムの構成.

次のように、(step4)よりやや複雑である。

(step5-1) 遷移可能性の検出。定性値が変化し得る変数の集合を求める。

(step5-2) 遷移可能性の順位付け。(step5-1)で検出された変数の変化のうち、最初に変化し得る変数または変数群を求める。この結果に基づいて状態記述を更新する。

(step5-3) (step4)へ。

第4節の以下の部分では、例題として、

（例題１） $x+y+z=0$, $y=dx$, $z=dy$

によって特性付けられる対象系を用いて各ステップの詳細について説明する。

4.2 初期状態の決定

対象系に含まれる各変数の初期値は、入力変数に与えられる値と定数の値を拘束条件に従って伝播することによって求める。各変数xの値は時間に関するi階の微分値$\partial^i x$の組($\partial^0 x$, $\partial^1 x$, ... , $\partial^n x$)として表わし、伝播させる。 以下では$\partial^i x$のことを層化変数と呼ぶ。nの値は現在、 ユーザが与えることになっている。例題１の場合は$n=2$とした。

拘束条件の伝播は値の決定できるところから行なってゆく。例題１の場合は、外部からの入力もなく、一意的に値を決定できる層化変数はない。このような場合、不定積分の自由定数にあたり、しかも値の決まっていない層化変数があれば、それに符号を仮定して非決定的処理をおこなう。たとえば、$y=dx$という関係は変数yからxへの不定積分とみなすことができ、層化変数の間に$\partial^i y = \partial^{i+1} x$; ($i \geq 0$) という関係が成り立つ。ここで、$\partial^0 x$は不定積分の自由定数に相当するので、$\partial^0 x$の符号について+、0、−の場合を仮定してそれぞれについて解析する。同様に、$z=dy$という関係があるので、$\partial^0 y$の符号についても場合分けをおこなう。

最後にまだ値の決まっていない層化変数について符

号の場合分けをおこない、すべての層化変数について可能な符号の組み合わせをすべて求める。この結果、例題１の場合、45通りの組み合わせがある(n=2の場合；n=1とすると25通りの組み合わせ）。ただし、この最後のステップは解をみやすくするためのものであるので、必ずしも実行する必要はない。

以後の解析ではこのうちの一つを任意に選び、そこからの予測解析をおこなう。以下ではそれが、

$x=(-,+,0)$, $y=(+,0,-)$, $z=(0,-,+)$

であったとして、説明を続ける。

4.3 因果関係ネットワークの生成

因果関係ネットワークは対象系に含まれる各変数の値の依存関係をネットワークとして表したものである。因果関係ネットワークは次節で述べるように、因果関係流生成のための中間的データ構造として、および、第5節で述べるように不連続変化の解析において対象系のいくつかの変数が連続的に変化するかどうか判断するために、用いる。

因果関係ネットワークのノードは変数または拘束条件（等式または不等式）、リンクは拘束条件とそれに関わる変数の間につけられる。リンクには次の規則に基づいて方向付けがなされる。

（規則１）n変数に関する等式ではn-1個のリンクが入力方向で、1個のリンクのみ出力方向。

（規則２）拘束条件y=dxと変数x、yの間は入出力リンク各１本によってつながれる。ただし、yからxへ向かう方向付け（積分的因果関係）をもつペアを優先する。

（規則３）不等式ではすべてのリンクは入力方向。

（規則４）各変数については１本だけが入力方向で残りは出力方向。

リンクの方向は変数の値が決定される方向であるとみなされ、上の規則による方向付けが成功した対象系は、ある種の規則性をもっている。この問題については第4.4節の最後に述べる。

例題１の場合、図２のような因果関係ネットワーク

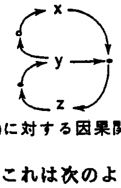


図2. (例題1)に対する因果関係ネットワーク.

が生成されるが、これは次のように解釈される。

(1) xとyが決まるとzが決まる。

(2) zから積分によってyが決まる。

(3) yから積分によってxが決まる。

この解釈は、説明生成のために用いられる。

4.4 因果関係流

因果関係流は因果関係ネットワークを層化変数毎に詳細化したものであり、互いに比例関係にあり、同時に変化する変数群をひとまとめにしている。例題１の場合、2階の導関数までを解析の対象すると、層化変数は次の五つのグループにまとめられる。

(1) $\partial^0 x$

(2) $\partial^0 y$, $\partial^1 x$

(3) $\partial^0 z$, $\partial^1 y$, $\partial^2 x$

(4) $\partial^1 z$, $\partial^2 y$

(5) $\partial^2 z$

各因果関係流に含まれる層化変数のうち、一つを原因として同定し、他はそこから導出されるものとみなす。原因となる層化変数は不定積分の自由定数に対応するもの（例題１では、$\partial^0 x$, $\partial^0 y$）、入力として与えられたもの（例題１にはない）、及び、二つ以上の因果関係流から合成されるもの（例題１では、$\partial^i z$）がある。これらのタイプの層化変数を原因とする因果関係流をそれぞれ、積分駆動型、入力駆動型、合成型と呼ぶ。

本論文では、因果関係流はスロットフィラー型の構造によって表わす。例題１に対する因果関係流の形式的な表現を図３に示す。sourceスロットには原因とし

stream-1:	type: integration-driven source: $\partial^0 x$ mother: stream-2 affects: *nil*
stream-2:	type: integration-driven source: $\partial^0 y$ mother: stream-3 affects: $\partial^1 x$
stream-3:	type: synthesized source: $\partial^0 z$ predecessors: stream-1,stream-2 affects: $\partial^1 y$, $\partial^2 x$
stream-4:	type: synthesized source: $\partial^1 z$ predecessors: stream-2,stream-3 affects: $\partial^2 y$
stream-5:	type: synthesized source: $\partial^2 z$ predecessors: stream-3,stream-4 affects: *nil*

図3. (例題1)に対する因果関係流の集合.

て同定された層化変数、affectsスロットにはその因果関係流に含まれる変数で、sourceスロットで指定された以外のものを格納する。積分駆動型因果関係流のmotherスロット、合成型因果関係流のpredecessorsスロットはその因果関係流が直接影響をうける因果関係流を示す。たとえば、因果関係流stream-1は積分型であるから、$\partial^0 x$の値は$\partial^1 x$を積分して得られるという考え方をする。そこで、stream-1のmotherスロットには層化変数$\partial^1 x$ を含んだ因果関係流stream-2（の名前）が格納されている。

対象系のふるまいを解析するとき、因果関係ネットワークと因果関係流の次のような性質を利用する。

（性質１）対象系に対して微分的因果関係（積分的因果関係と逆の向きに方向づけられたリンク）を含まない因果関係ネットワークが得られたとき、入力が有限の値の範囲内で変化する限り、たとえそこに不連続な変化がおきても、不定積分の自由変数にあたる層化変数（たとえば、 $y=dx$における$\partial^0 x$）は連続に変化する。換言すると、そのような場合、積分型因果関係流に含まれるすべての層化変数の値は不連続変化の前後で変化しないことになる。

（性質２）各因果関係流が活性であるか否か（そこに含まれる層化変数が時間と共に値を変えるか否か）という性質は、入力がなめらかである（すべての導関数が連続的に変化する）限り、変わらない。従って、入力がなめらかである限り、ある時点で値を変えている層化変数を含んだ因果関係流はその後も値を変え続け、逆にある時点で値が一定である層化変数はその後も一定である。

以上で、遷移解析のための準備は終わりである。後は、瞬間の解析と時区間の解析を交互に繰り返す。

4.5　瞬間の解析

瞬間の解析では与えられた瞬間における対象系の状態が次の時区間でどのような状態に遷移するかを解析する。2.1節(5)に示したように、変数の値が別の定性値に瞬間的に遷移するのは、値が定性領域間の境界にあって変化している場合（たとえば、$x=0$かつあるi: $i>0$に対して$\partial^i x\neq 0$である場合）だけである。 このような検査はすべての層化変数についておこなう必要はなく、各因果関係流の原因とされている層化変数についておこなえば十分である。

4.2節に示したように、今、例題１において、

$$x=(-,+,0),\quad y=(+,0,-),\quad z=(0,-,+)$$

という瞬間的状態が与えられたとする。検討の対象は、

$$\partial^0 x,\ \partial^0 y,\ \partial^0 z,\ \partial^1 z,\ \partial^2 z$$

である。これらのうち、瞬間的な定性値の遷移をおこしうるものは$\partial^0 z$のみであり、$[\partial^1 z]=-$だから次の時区間では$\partial^0 z$は$-$の定性値をとる。 $\partial^0 z$を含む因果関係流に含まれるその他の層化変数$\partial^1 y$、$\partial^2 x$もこれと同時に遷移し、結局対象系は次の時区間では、

$$x=(-,+,-),\quad y=(+,-,-),\quad z=(-,-,+)$$

という状態になる。

4.6　時区間の解析

与えられた時区間において対象系が少しずつ状態を変えた結果、定性的に異なる状態に遷移しうるかどうかを解析する。

4.6.1　遷移可能性の解析

まず、定性値を変え得る層化変数を検出する。このためには定性領域の境界に向かって変化している（可能性のある）層化変数を探せばよい。定性値の集合が{+、0、-}であるときは、因果関係流毎に調べれば十分である。各因果関係流の原因となっている層化変数$\partial^i p$ ($p=x$、y、 or z)で$\partial^{i+1} p$の符号が$\partial^i p$と異なるか、あるいは不明であるものを探すと、

$$\partial^0 x,\ \partial^0 y,\ \partial^1 z,\ \partial^2 z$$

であり、stream-3以外の因果関係流はすべて候補となる。

4.6.2　遷移可能性の順位付け

遷移をおこしうるとして検出された因果関係流の集合のうち、どれが最初に変化し得るかを決定する。いくつかの因果関係流における遷移が同時に起きる場合も考慮し、全く遷移が起きない場合を除外すると、今の例では、 2^4-1個の可能性があることになる。各組み合わせに対応する遷移が起きた場合の次状態の変数値を求め、それが状態方程式を満足しなければ、そのような状態遷移は起きないものと判断する。これは文献1) の矛盾回避(contradiction avoidance)規則に対応する。

たとえば、今の例において最初に状態遷移するのがstream-1とstream-5であるすると、その結果、対象系は、

$$x=(0,+,-),\quad y=(+,-,-),\quad z=(-,-,0)$$

となるはずであるが、これは、$[\partial^2 x]+[\partial^2 y]+[\partial^2 z]=-\neq 0$となって、状態方程式を満足しないのでこのような遷移

は起こり得ないと考える。同様にして、結局15個の可能性のうち無矛盾なものは3個しか残らない。 図4に、このような解析を繰り返しおこなった結果の一部を示す。 ただし、以前にも述べたように、図4に示したものは遷移の可能性であり、そのような遷移が実際に起きるかどうかは以上の解析からはわからない。

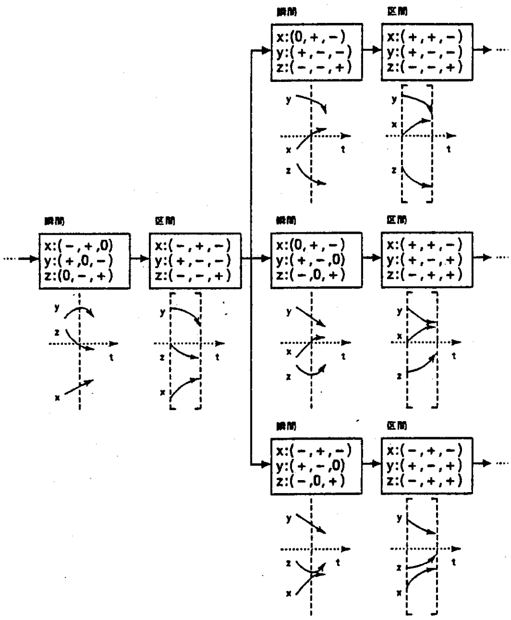


図4. (例題1)の予測解析結果の一部.

5. 不連続な入力による不連続変化の取り扱い

線形系にステップ関数のような不連続な入力が加えられる場合について説明する。まず、時間のモデルを拡張して、「瞬間」が並ぶことを許すようにする。これは、不連続な変化の直前、直後の瞬間における対象系の状態を把握することが必要になるからである。

不連続な入力によってひきおこされる対象系のふるまいを解析するとき問題になるのは、不連続な変化の後、対象系がどの状態に遷移するかどのようにして判断するかである。因果関係ネットワークに微分的因果関係が含まれない場合は、 4.4節の（性質２）を利用して解析をおこなう。すなわち、このような場合、不連続変化の前後では積分型因果関係流に含まれる層化変数が連続的に変化することが保証されているので、不連続変化直後の対象系の状態は、不連続変化直後の入力変数の値、および、不連続変化直前の積分型因果関係流に含まれる層化変数の値を初期条件として拘束条件を解き直すことによって求める。

微分的因果関係が含まれるような因果関係ネットワークしか作れないときは、初期条件として入力変数の値しか用いることができず、あいまい性がふえることになる。

図５(a)に示した微分回路について、 以上に述べたことがどのように適用されるかを示す。 図５(b)に示したように、この回路に対して微分的因果関係を含まないように、因果関係ネットワークと因果関係流を構成することができる。 今、時刻t_0までは入力v_{IN}およびすべての変数の値が0であり、時刻t_0において、v_{IN}がステップ状にv_0(>0)まで立ち上がるとすると、t_0の直後の瞬間t_0+の初期条件として、

$$\partial^0 v_{IN}=v_0,\ \partial^i v_{IN}=0\,(i\geqq 1),\ \partial^0 v_C(t_0+)=\partial^0 v_C=0$$

を設定することができる。これらを用いて、状態方程式を解くと、たとえば、変数v_Rについて、

$$[\partial^0 v_R]=[v_0]=+,\ [\partial^1 v_R]=-,\ [\partial^2 v_R]=+,\ \ldots$$

という解が得られる。

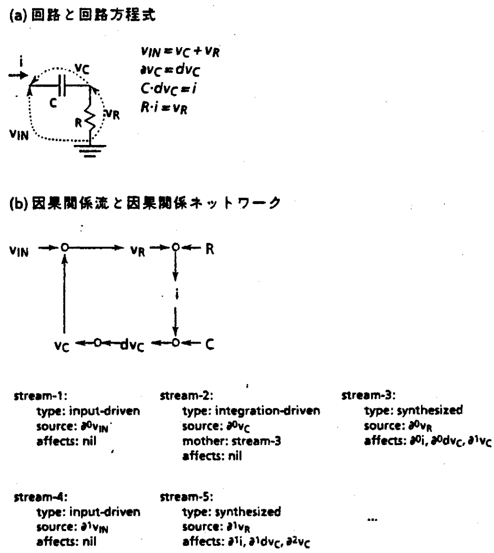


図5. 微分回路の因果関係解析.

以上に述べたことに対応して、 4.1節に示したアルゴリズムの(step4)を次のように拡張する。

(step4)　瞬間の解析。 現在の瞬間に不連続な変化が起こらなければ、 直ちに(step4-2)へ、不連続な変化が起これば、(step4-1)のあと(step4-2)へ。

(step4-1)　因果関係ネットワークに微分的因果関

係が含まれていなければ、不連続変化直後の入力変数の値、および、不連続変化直前の積分型因果関係流に含まれる層化変数の値を初期条件として、微分的因果関係が含まれていれば、不連続変化直後の入力変数の値だけを初期条件として、拘束条件を解く。

(step4-2)　4.4節の方法によって、次の時区間における対象系の状態を求める。

6.　動作状態の遷移に伴う不連続変化の取り扱い

6.1　条件付線形方程式による非線形素子の動作特性の記述

本論文の範囲内では、トランジスタやダイオードなどの非線形素子の動作特性は、複数個の線形の動作領域を条件式を用いて結合することによって記述する。

たとえば、理想ダイオードは図6(a)に示したように、ON、OFFという二つの動作領域（以後、動作モードと呼ぶ）を結合して記述する。動作モード間をつなぐリンクはどのような場合に動作モードの遷移が起こるかを表わす。たとえば、OFFからONへのリンク上につけられた$v_D \nearrow 0$というラベルはv_Dが増加して、0を通過するとき、OFFからONへのモード遷移が起こることを表わしている。図6(b)には本論文で用いたトランジスタのモデルを示す。ただし、動的因果関係解析法自体はこのような素子のモデルには独立であり、ユーザは条件付線形方程式の範囲内で自由に素子モデルを与えることができる。また、これらの素子モデルはモード遷移グラフとして、条件付線形方程式記述に組み込まれる。

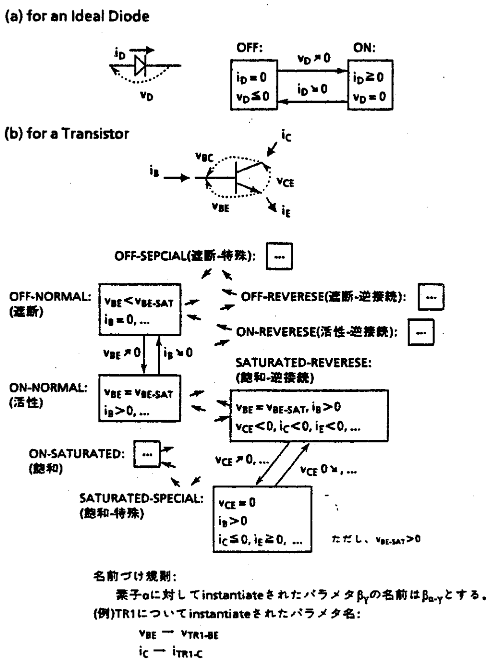


図6. モード遷移グラフによるダイオードとトランジスタのモデル.

6.2　動作モード遷移による不連続変化解析のためのアルゴリズム

4.1節に示したアルゴリズムを拡張して、対象系の状態記述のなかに動作モードに関する情報が含まれるようにする。さらに、(step5)を拡張して次のようにする。

(step5)　時区間の解析。

(step5-1)　遷移可能性の検出。定性値が変化し得る、または、対象系にモード遷移を起こし得る、層化変数の集合を求める。

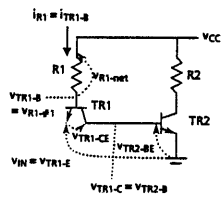
(step5-2)　遷移可能性の順位付け。(step5-1)で求めた可能な状態遷移の集合の各部分集合について、それがモード遷移を含むものでなければ、(step5-a)を、モード遷移を含むものであれば、(step5-b)を、実行する。これが終われば、(step4)へ行く。

(step5-a)　モード遷移がない場合。矛盾回避規則によるチェックをおこなう。その結果、矛盾した状態への遷移でないとわかれば、次状態候補のリストに入れる。

(step5-b)　モード遷移がある場合。モード遷移の結果、対象系に含まれる各条件付方程式がどのモードに移るかを求める。これに対応して、動作状態を説明する線形方程式の集合を更新する。この状態方程式を入力を初期条件として解く。この結果、解が得られれば、次状態候補のリストに入れ、(step5-b)を終了する。矛盾が生じて解が得られなければ、矛盾を解消し得るモード遷移を探し、(step5-b)をはじめから繰り返す。

以上の拡張部のアルゴリズムを例を用いて説明する。今、図7(a)に示した回路に対して、入力vINを0から増やしていった場合、系のふるまいがどうなるかについて解析するものとしよう。トランジスタのモデルとして図6(b)に示したものを用いるものとする。まず、vIN=0として、初期状態を求める。この結果、トランジスタTR1、TR2の状態はそれぞれ、SATURATED-SPECIAL（飽和-特殊）、OFF-NORMAL（遮断）であることがわかり、図7(b)のような因果関係流が得られる。各層化変数の後ろに付けられた矢印は、v_{IN}の上昇にとも

(a) A basic TTL circuit



(b) Some of Causal Streams

stream-1:
  type: input-driven
  source: v_{IN}
  affects: $v_{TR1\text{-}E}(\nearrow)$, $v_{TR1\text{-}C}(\nearrow)$, $v_{TR2\text{-}B}(\nearrow)$, $v_{TR2\text{-}BE}(\nearrow)$
stream-2:
  type: synthesized
  originated-at: stream-1
  offset: " $v_{TR1\text{-}BE\text{-}SAT}$ "
  factor: "1"
  source: $v_{TR1\text{-}B}$
  affects: $v_{R1\text{-}\#1}(\nearrow)$
stream-3:
  type: synthesized
  stems-from: stream-2
  originated-at: stream-1
  offset: " $v_{CC} - v_{TR1\text{-}BE\text{-}SAT}$ "
  factor: " − 1"
  source: $v_{R1\text{-}net}$
  affects: $i_{R1}(\searrow)$, $i_{TR1\text{-}B}(\searrow)$

図7. 簡単なTTL回路とv_{IN}(入力電圧)=0のときの因果関係流の一部.

なって、その層化変数が上昇するか(↗)、減少するか(↘)、のいづれであるかを示している。

次に、v_{IN}が上昇していった場合について考えてみると、次の二つの可能性があることがわかる。

（可能性１）$v_{TR2\text{-}BE}$が上昇していってTR2がOFF-NORMALであるための条件：

$$v_{TR2\text{-}BE} < v_{TR2\text{-}BE\text{-}SAT}$$

を満足しなくなることによってモード遷移がひきおこされる。

（可能性２）$i_{TR1\text{-}B}$が減少していってTR1がSATURATED-SPECIALであるための条件：

$$i_{TR1\text{-}B} \geq 0$$

を満足しなくなることによって別のモード遷移がひきおこされる。

もし、十分な量的情報が与えられていると、別稿[5]に述べる量空間管理機構によって、二つの遷移可能性の順位付けをおこなうことが可能であり、通常のパラメータ値が設定されている場合、（可能性１）のモード遷移が先におこることがわかる。量的情報が不足している場合は、3(=2^2 -1)通りのあいまい性が生じる。

（可能性１）のモード遷移がおこったとすると、次状態でのTR2のモードはON-NORMALである。このとき、更新された状態方程式には$v_{IN}=v_{TR2\text{-}BE}$という拘束条件が成り立つが、この式の右辺は定数($v_{TR2\text{-}BE\text{-}SAT}$)であるから、左辺をさらに増加させ続けようとすると矛盾が生じる。

この矛盾を解消するため、矛盾に関係する拘束条件のうち動作モードに依存するものを探すと、$v_{TR1\text{-}CE}$ = 0という拘束条件があり、それがTR1がSATURATED-NORMALという動作モードにあることに依存していることがわかる。従って、この拘束条件を取り除いて、$v_{TR1\text{-}CE}$が0から減少することを許すような拘束条件に置き換えるようなモード遷移があれば、矛盾は解消する。このことに関する情報は、トランジスタの素子モデルに対応するモード遷移グラフ（図６(b)参照）に与えられており、今の場合はTR1をSATURATED-REVERSEに遷移させればよいことが指示されている。このモード遷移によって入力と矛盾しない状態記述が得られ、結局、対象系はTR1、2のモードがそれぞれSATURATED-REVERSE、ON-NORMALとなる状態に遷移することがわかる。

7. むすび

動的因果関係解析法を用いた電子回路解析システムをLispによって作成し（プログラム行数約7,000行）、本論文で述べた例題を含むいくつかの簡単な回路について動作を確認している。現在残されている課題のうち主なものは次の通りである。

(1) 不連続入力とモード遷移が複合する場合の解析
(2) 対象系のグローバルなふるまいの解析

参考文献

1) de Kleer, J. and Bobrow, D. G., Qualitative Reasoning with Higher-Order Derivatives, in Proc. AAAI-84, 86-91, 1984.
2) de Kleer, J. and Brown, J. S., A Qualitative Physics based on Confluences, AI 24, 7-83, 1984.
3) de Kleer, J., How Circuits Work, AI 24, 205-280, 1984.
4) 西田、定性的推論、数理科学 No.279、1986-9（予定）
5) 西田、堂下、電子回路を対象とした定性的推論システムＱＲ－１、情報処理学会第３３回全国大会、７Ｍ－５、１９８６（予定）
6) 竹下敦，電子回路定性解析システムのための説明文生成システム，京都大学特別研究報告書、1986.
7) Williams, B. C., Qualitative Analysis of MOS Circuits, AI 24, 281-346.

本研究の一部は 文部省科学研究費
・特定研究(1) 61102003
・奨励研究(A) 61780039
によって行なわれた.