

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^{††}

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表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た。

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きわめて困難であり、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やさしすぎると解けないというような場合が起こり得た。

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。彼らは、本論文第2章で述べる定性的推論の基本的な手法をもとに、力学や電気回路などの簡単な物理系のふるまいの定性的予測とその解釈の方法を与え、また定性的推論の意義を明らかにした^{1)-3), 5), 6)}。定性的推論では、系の因果関係を拘束条件の局所的伝播によって捉える。このとき、フィードバックを含んだ系の解析の取り扱いが問題になるが、de Kleer と Brown は架空の因果性という概念に基づくヒューリスティックを用いた方法²⁾、Williams はフィードバック解析と呼ばれる手法を与えた³⁾。

しかしこれらの方式はまだ基本的なものであり、2.2 節で指摘するように、因果関係の表現と利用法、適用できる現象の範囲、解析の精度、などに解決すべ

き問題がある。

本論文では、従来の定性的推論法をもとに、因果関係の表現方法とそれを利用した効率的な解析アルゴリズム(因果関係流と呼ぶデータ構造の導入)適用範囲(変数の不連続変化の解析)、解析精度(定量的解析との融合)の面で改善した定性的推論の新しい方式を提案する(動的因果関係解析法)。

対象領域として、簡単な電子回路(主としてパルス回路)の動作解析の問題を取り上げた。電子回路解析の問題には多様な現象が含まれており、定性的推論の理論的展開と評価のための格好の領域である。一般に電子回路の解析のための理論はかなり確立されている一方で、そのようなまとまった理論体系を知識科学の視点から整理して計算機に移植する試みにはほとんど手がつけられていない。本研究を通じての我々のねらいは、対象系のふるまいの解析を基本原理(First Principles)のレベルの解析からの体系的な積み上げによって実現するという立場をとることにより、理論体系の知識科学的整理と計算機上への移植の手掛かりを得ることである。

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、

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

† Qualitative Analysis of Electronic Circuits Based on Dynamic Causal Stream Analysis by TOYOAKI NISHIDA, TADASHI KAWAMURA and SHUJI DOSHITA (Department of Information Science, Kyoto University).

†† 京都大学工学部情報工学教室

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) 定性計算. 上の定義から定性値の間にはたとえば, 次のような計算則が成り立つことがわかる。

$$[x]=+, [y]=0/+ \rightarrow [x]+[y]=+$$

いったん定性値に変換してしまうと情報が失われるので必ずしも $[x+y]$ と $[x]+[y]$ とは等しくならない。たとえば, $x=7, y=-6$ とすると, $[x+y]=[1]=+$ であるが, 定性計算では,

$$[x]=+, [y]=- \rightarrow [x]+[y]: \text{不明}$$

とせざるを得ない。しかし積に関しては,

$$[x \times y]=[x] \times [y]$$

が成り立つ。

(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 t_0 から別の時点 t_1 までの間 $\{t|t_0 < t < t_1\}$ 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. 対象系の各変数への値の割り当ての組み合わせを状態と呼ぶ。全変数の定性値の組み合わ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する。

(5) 瞬間的な状態の遷移. ある $i (i \geq 0)$ 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, $i < k < j \rightarrow [d^k x] = 0$ 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ので, たとえば $[x]=+, [dx]=-$ という状態から $[x]=-$ という状態への直接の遷移はなく, 必ずその前に $x=0$ となる瞬間を経過する。

(7) 定性的シミュレーションと挙動推定. 遷移可能性の解析をくりかえすことにより, 対象系が時間の経過とともにどのようなふるまいをし得るかを解析する。定性的シミュレーションでは, 特定のパラメータの組に対してのふるまいの推定を行う。挙動推定 (Envisionment) は系のパラメータのあらゆる可能性についての対象系の可能なふるまいの推定を行う。

(8) 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

上に述べた定性的推論の基本的な手法を用いて実際に簡単な電子回路を解析してみると次のような問題が生じる。

(1) あいまい性の問題. 定性的推論を用いると対象系に関する定量的な情報が得られないときでも, わかっている情報を論理的に組み合わせる解析を行うことができる。不足した情報は解析におけるあいまい性にふりかえられる。またこの性質を用いて対象系の論理的に可能なふるまいについて知ることができる。このようなあいまい性の利用は定性的推論の利点である。しかし, 一方で対象系に関する詳しい情報が得られているときはそれを最大限に活用して, あいまい性を減らせる能力も必要である。後者についてはこれまで積極的な方法が示されていない。

(2) 因果関係について. 従来の定性的推論の方式では, 対象系の因果関係の一般的な構造をデータ構造として静的に表現する方法が確立されていなかった。たとえば, de Kleer と Brown の方法では, 対象系の因果構造は拘束条件の伝播の痕跡として捉えられた^{2),3)}。しかしこれは個々の状態における対象系の特定のふるまいに対応するものであり, それが対象系のもつ一般的な因果関係を捉えたものであるという保障はない。Williams や Iwasaki-Simon は方向付グラフによって, 対象系の因果関係の構造を表す方法をとっているが, それだけでは対象系にフィードバックループがあるとき十分な解析を行えない。この問題を解決するために彼らが採用した方法はもはや静的なデータ構造を用いるものではなかった^{4),5)}。

(3) 連続性の仮定. 定性的推論を行う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行っており, 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。ところが, 電子回路, 特にパルス回路の通常モデルでは変数の不連続な変化を考慮する必要がある。徹視的にみると, 不連続な変化は速い連続的な変化として捉えることができるかもしれないが, 徹視的なモデルは必ずしも利用できず, また計算量も増える。

次章以下で新しく提案する方法は, 以上のような問題の解決を目指したものである。]

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、従来の方式を基礎としてさらに発展させた定性的推論の新しい方式として動的因果関係解析法を提案する。この方式の特徴は次のとおりである。

- (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解析法。
- (3) 定性的解析と定量的解析を組み合わせた不完全な情報の管理法。

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章で示す。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起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起こってある線形系から別の線形系への移行が起こる場合だけに限られる。第5章で前者について、第6章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。これを繰り返すことによって対象系の挙動推定

(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⁷⁾。

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章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。

(step 1) 初期状態の決定。初期状態は瞬間であるとする。

(step 2) 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行う。その結果を因果関係ネットワークと呼ぶ。

(step 3) 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。

(step 4) 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。

(step 5) 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。これは次のように、(step 4) よりやや複雑である。

(step 5-1) 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。

(step 5-2) 遷移可能性の順位付け。(step 5-1) 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。

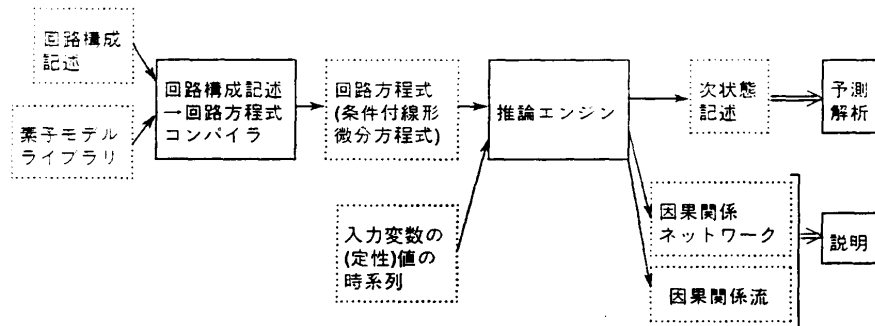


図1 動的因果関係解析法を用いた電子回路解析システムの構成
 Fig. 1 A configuration of an electronic circuit analysis system based on dynamic causal stream analysis.

(step 5-3) (step 4) へ。

このアルゴリズムから (step 3) を除いたものは Williams のアルゴリズム⁸⁾からフィードバック解析を除いたものとはほぼ同様である。Williams のフィードバック解析はネットワークの大域的解析を必要とし、またネットワークの構造が複雑なときの解析法が示されていない。我々が (step 3) で行う因果関係流解析は、情報を隣接するノードに次々と伝えてゆく局所的伝播によるものであり、必要十分な伝播しか行われないうので効率が良い。また、ネットワーク上のパターンマッチングを行わないので、ネットワーク構造の複雑さに対しても安定である。

この章の以下の部分では、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 ($\partial^0 x, \partial^1 x, \dots, \partial^n x$) として表し、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行う。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行う。

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行い、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行う。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。ノードは変数または拘束条件 (等式または不等式) を表し、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が付けられており、それを変数の値の決定される順序を表すものとする。

(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であるとする。

(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。

対象系を規定する拘束条件の集合が与えられたとき、まず方向のないリンクによるネットワーク構造を生成し、次にリンクへの方向付けを行う。リンクへの方向付けは規則 3, 4 などが適用できるところから開始する。ついで、規則 1 を用いて方向付けできるところに方向を与えてゆく。方向付けに行き詰まると、まず規則 2 を適用し、それでも行き詰まると適当な仮定をたてて、すべてのリンクが方向付けされるまで続行する。このように方向付けのアルゴリズムは非決定的に行われる。

このような方向付けに成功した対象系は、4.4 節で述べるようにある種の規則性をもっている。その場合、この規則によって複数個の方向付けが可能であっても、さらに次節で述べる因果関係流を用いた解析を行うと同一の結果を与える。

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、また、第 5 章で述べるように不連続変化の解析において連続的に変化する変数を同定するために、用いる。

例題 1 の場合、図 2 のような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。

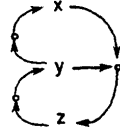


図 2 (例題 1) に対する因果関係ネットワーク
Fig. 2 A causal network for Example-1.

- (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ごと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とすると, 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), および, 二つ以上の因果関係流から合成されるもの (例題 1 では, $\partial^1 z$) 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ルター型の構造によって表す. 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 スロットにはその因果関係流に含まれる各層化変数への影響の起点となる層化変数, affects スロットには source スロットで規定された層化変数から影響を受け, それと比例して変化する層化変数のリストを格納する. affects スロットの各層化変数には起点との間の比例係数も対応付けられる. 図中では比例係数は各層化変数のあとの括弧内に示してある.

積分駆動型因果関係流の mother スロットは, 被積分変数の含まれている因果関係流を示す. たとえば, $\partial^0 x$ を起点とする積分型の因果関係流 stream-1 の mother スロットには積分の入力となる層化変数 $\partial^1 x$ を含んだ因果関係流 stream-2 へのポインタが格納される.

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: $\partial^1 x(1)$
stream-3:	type: synthesized source: $\partial^0 z$ causal-origins: < $\partial^0 x, \text{stream-1}, -1$ >, < $\partial^0 y, \text{stream-2}, -1$ > offset: 0 affects: $\partial^1 y(1), \partial^2 x(1)$
stream-4:	type: synthesized source: $\partial^1 z$ causal-origins: < $\partial^1 x, \text{stream-2}, -1$ >, < $\partial^1 y, \text{stream-3}, -1$ > offset: 0 affects: $\partial^2 y(1)$
stream-5:	type: synthesized source: $\partial^2 z$ causal-origins: < $\partial^2 x, \text{stream-3}, -1$ >, < $\partial^2 y, \text{stream-4}, -1$ > offset: 0 affects: nil

図 3 (例題 1) に対する因果関係流の集合
Fig. 3 A set of causal streams for Example-1.

合成型因果関係流の causal-origins スロットと offset スロットは, その因果関係流の起点 (source) となる層化変数の決定のされ方を記述する. ここで対象とする線形系では, 祖先となる因果関係流 A_i から合成型因果関係流の起点への (瞬時的な) 影響は, $\sum \alpha_i \cdot \partial^i x_i + \beta$ (α_i, β は定数) と表される. これに対応して, causal-origins スロットには, < $\partial^i x_i, \text{stream-}i, \alpha_i$ > という三つ組のリストを格納する. ここで, stream- i は層化変数 $\partial^i x_i$ が属する因果関係流である. また, offset スロットには定数 β を格納する. たとえば, stream-3 の causal-origins スロットと offset スロットの記述は, stream-3 の起点: source $\{A_i\}$ の値が,

source {stream-3} = $\partial^0 z = -1 \cdot \partial^0 x + (-1) \cdot \partial^0 y + 0$
 によって定まることを示している.

因果関係流を生成するためには, 因果関係ネットワークが得られた後, 主要原因から出発して隣接する変数を逐次スキャンしてゆき, 比例関係にある層化変数をまとめてゆけばよい. しかしこの作業は, 対象系に瞬時的なフィードバックが含まれるときは必ずしも自明ではない. この問題については 4.8 節で述べる.

4.5 因果関係ネットワークと因果関係流の性質

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, 入力がある

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起きても、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 ∂^0x ）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とも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。したがって、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を終わる。遷移解析の過程は、瞬間の解析と時区間の解析を交互に繰り返すことによって行う。

4.6 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行う必要はなく、各因果関係流の原因とされている層化変数について行えば十分である。

4.2 節に示したように、今、例題 1 において、

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

という瞬間的状态が与えられたとする。検討の対象は、

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

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

$x = (-, +, -), y = (+, -, -), z = (-, -, +)$
という状態になる。

4.7 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得るかどうかを解析する。

4.7.1 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。定性値の集合として $\{+, 0, -\}$ を用いるときは、全部の変数について調べなくても、因果関係流ごと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 $\partial^i\alpha$ ($\alpha = x, y, z$) で $\partial^{i+1}\alpha$ の符号が $\partial^i\alpha$ と異なるか、あるいは不明であるものを探すと、

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

であり、stream-3 以外の因果関係流はすべて候補となる。

4.7.2 遷移可能性の順位付け

遷移可能であると判断された因果関係流のうち、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、例題 1 において最初に状態遷移するのが stream-1 と stream-5 であるとしよう。すると、遷移の後の対象系の状態は、

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

にならなければならないが、

$$[\partial^2x] + [\partial^2y] + [\partial^2z] = - \neq 0$$

であるので、この値の組は状態方程式を満足しない。このことから、この遷移は起こり得ないと判断する。同様のチェックを行うと、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行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。

4.8 時間遅れのないフィードバックループの解析

4.4 節でも述べたように、対象系に時間遅れのないフィードバックループがあるとき、情報の局所的な伝播によって因果関係流を求める方法は、行き詰まりに陥る。また、そのようなループ内の変数の間の関係を正しく捉えられるかどうか問題になる。

本論文で採用した方法では、行き詰まりに陥った場合、仮の合成型の因果関係流を生成して伝播を続行さ

せる。そして後で、瞬時性フィードバックが検出されたとき、仮に生成された因果関係流との併合を行ってゆく。

これを図5の例を用いて説明する。図5(a)は回路図、(b)は回路方程式、(c)はこの系に対して可能な二つの因果関係ネットワークのうちの一つである。

この場合に対する、伝播による因果関係流生成の概要を図6に示す。主要原因を層化変数 $\partial^0 v_E$ であるとする。まず $\partial^0 v_E$ を含んだ因果関係流 stream-1 を例化して伝播を開始する(図6(a))。

回路方程式より、 $\partial^0 v_E = \partial^0 v$ であるので、 $\partial^0 v$ が $\partial^0 v_E$ に比例することがわかり、 $\partial^0 v$ も stream-1 に追加される。しかし、次に $v = v_1 + v_2$ に至ったとき、この式から参照される3個の変数のうち1個のものの値しかわからないので、ここで伝播は行き詰まる。

そこで、値の不明な変数のうちの一つを適当に選び(今の場合 $\partial^0 v_1$ とする)、それを含む新しい因果関係流として stream-2 を例化する(図6(b))。stream-2 が $\partial^0 v_1 = \partial^0 v - \partial^0 v_2$ によって導かれたという情報は、stream-2 の causal-origins スロットに、 $\langle \partial^0 v, \text{stream-1}, 1 \rangle$ 、 $\langle \partial^0 v_2, ?, -1 \rangle$ という形で記録される。

stream-2 が生成されると再び伝播の続行が可能で、 $\partial^0 v_1$ に比例する変数 $\partial^0 i$ 、 \dots は $\partial^0 v_1$ に対する比例定数: $1/R_1$ 、 \dots とともに次々に stream-2 のなかに組み込まれてゆく。

この伝播の過程はやがて $\partial^0 v_2$ に達する。 $\partial^0 v_2$ は伝播されている因果関係流 stream-2 の因果的起源として causal-origins スロットに含まれていることから、同時的なフィードバックがあることがわかる(一致の発生、図6(c))。そこで次のように、一致の生じた変数 $\partial^0 v_2$ を stream-2 の起源から取り除くことができる:

$$\begin{aligned} \partial^0 v_2 &= (R_2/R_1) \cdot (\partial^0 v - \partial^0 v_2) \\ \therefore \partial^0 v_2 &= (R_2/(R_1 + R_2)) \cdot \partial^0 v \\ \therefore \partial^0 v_1 &= \partial^0 v - \partial^0 v_2 = (R_1/(R_1 + R_2)) \cdot \partial^0 v \end{aligned}$$

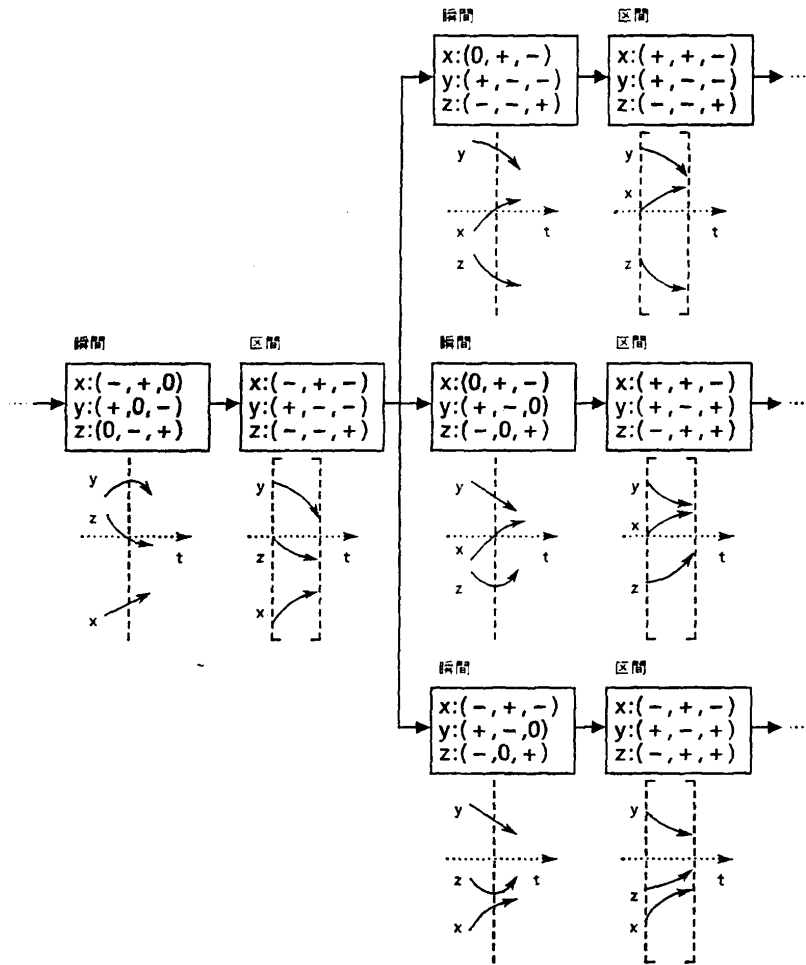


図4 (例題1)の予測解析結果の一部
Fig. 4 Part of the result of envisionment for Example-1.

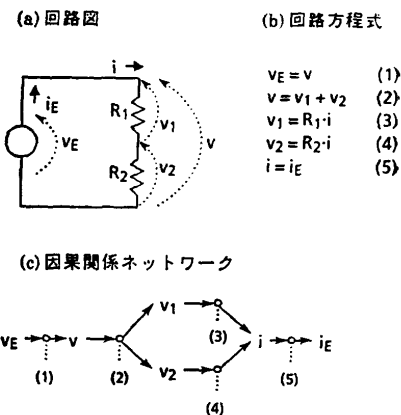


図5 抵抗が直列接続された回路
Fig. 5 A parallel resistor circuit.

(a) 伝播開始時点:

```
stream-1:
  type: input-driven
  source:  $\partial^0 v_E$ 
  affects: nil
```

(b) 行き詰まりのあと、新しい因果関係流が生成されたとき:

```
stream-1:
  type: input-driven
  source:  $\partial^0 v_E$ 
  affects:  $\partial^0 v_1(1)$ 

stream-2:
  type: synthesized
  source:  $\partial^0 v_1$ 
  causal-origins:
    <  $\partial^0 v_{stream-1,1}$ , 1 >
    <  $\partial^0 v_2, 7, -1$  >
  offset: 0
  affects: nil
```

(c) 新しい因果関係流が生成されたあと、一致が発生したとき:

```
stream-1:
  type: input-driven
  source:  $\partial^0 v_E$ 
  affects:  $\partial^0 v_1(1)$ 

stream-2:
  type: synthesized
  source:  $\partial^0 v_1$ 
  causal-origins:
    <  $\partial^0 v_{stream-1,1}$ , 1 >
    <  $\partial^0 v_2, 7, -1$  >
  offset: 0
  affects:  $\partial^0 i(1/R_1), \partial^0 v_2(R_2/R_1)$ 
```

(d) stream-2がstream-1に併合されたあとの状態:

```
stream-1:
  type: input-driven
  source:  $\partial^0 v_E$ 
  affects:  $\partial^0 v_1(1), \partial^0 v_1(R_1/(R_1 + R_2)), \partial^0 i(1/(R_1 + R_2)),$ 
            $\partial^0 v_2(R_2/(R_1 + R_2)), \partial^0 i(1/(R_1 + R_2))$ 

stream-2:  $\Rightarrow$  merged into stream-1
  type: synthesized
  source:  $\partial^0 v_1$ 
  causal-origins:
    <  $\partial^0 v_{stream-1, R_1/(R_1 + R_2)}$  >
  offset: 0
  affects:  $\partial^0 i(1/(R_1 + R_2)), \partial^0 v_2(R_2/(R_1 + R_2))$ 
```

図 6 因果関係流による図 5 の回路の解析過程
Fig. 6 Causal stream analysis of the circuit in Fig. 5.

ただし、この計算過程はあらかじめわかっているので実際の処理では、数式処理は行わず、算術演算のみを行う。以上の解析より、stream-2 に含まれる変数は stream-1 の変数 $\partial^0 v$ に比例することがわかるので、stream-2 は stream-1 に併合される (図 6 (d))。

この解析法は系のふるまいが (条件付き) 線形微分方程式によって規定される場合しか適用できないが、数式処理をしなくてもフィードバックの性質の予測と、必要ならば定量的な範囲で変動に対する応答を求めることができる。また、素子の並列・直列接続に対する回路の簡単化の手法の適用できないブリッジ回路なども、同様に解析できる。

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に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引き起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、対象系の状態がどのように変化するか判断のしかたである。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、4.5 節の (性質 1) を利用して解析を行う。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 7 (a) に示した微分回路については、以上に述べたことがどのように適用されるかを示す。図 7 (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 の直後の暖間 t_{0+} の初期条件として、

$$\partial^0 v_{IN} = v_0, \partial^i v_{IN} = 0 (i \geq 1),$$

$$\partial^0 v_C(t_{0+}) = \partial^0 v_C(t_0) = 0$$

を設定することができる。これらを用いて、 t_{0+} において状態方程式を解くと、たとえば変数 v_R について、

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

という解が得られる。

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 (step 4) を次のように拡張する。

(step 4) 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 (step 4-2) へ、不連続な変化が起これば、(step 4-1) のあと (step 4-2) へ。

(step 4-1) 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

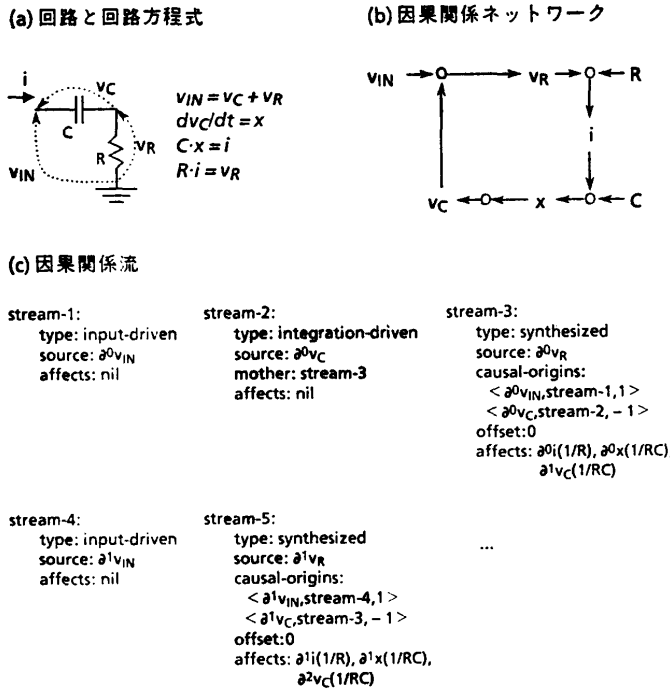


図 7 微分回路の因果関係解析
Fig. 7 A differential circuit and its causal analysis.

値だけを初期条件として、拘束条件を解く。

(step 4-2) 4.6 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. 動作領域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 8 (a) に示したように、ON, OFF という二つの動作領域の集まりとして記述する。動作領域間をつなぐリンクはどのような場合に動作領域間の遷移が起こるかを表す。たとえば、OFF から ON へのリンク上につけられた $v_D > 0$ というラベルは v_D が増加して、0 を通過するとき、動作領域が OFF から ON に遷移することを表している。図 8 (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動作領域遷移が

ラフとして、条件付線形方程式記述に組み込まれる。

6.2 動作領域の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領域に関する情報が含まれるようにする。さらに、(step 5) を拡張して次のようにする。

(step 5) 時区間の解析。

(step 5-1) 遷移可能性の検出。定性値が変化し得る、または、対象系に動作領域遷移を起こし得る、層化変数の集合を求める。

(step 5-2) 遷移可能性の順位付け。(step 5-1) で求めた可能な状態遷移の集合の各部分集合について、それが動作領域遷移を含むものでなければ、(step 5-a) を、動作領域遷移を含むものであれば、(step 5-b) を、実行する。これが終われば、(step 4) へ行く。

(step 5-a) 動作領域遷移がない場合。矛盾回避規則によるチェックを行う。その結果、矛盾した状態への遷移でないことがわかれば、次状態候補のリストに入れる。

(step 5-b) 動作領域遷移がある場合。遷移の結果、対象系に含まれる各条件付方程式がどの動作領域に移るかを求める。これに対応して、動作領域を規定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、(step 5-b) を終了する。矛盾が生じて解が得られなければ、矛盾を解消し得る動作領域遷移を探し、(step 5-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。図 9 (a) に示した回路に対して、入力 v_{IN} を 0 から上昇させた場合の系のふるまいについて解析してみよう。トランジスタのモデルとして図 8 (b) に示したものを採用する。まず、 $v_{IN} = 0$ として、初期状態を求める。この結果、トランジスタ TR1, TR2 の動作領域はそれぞれ、SATURATED-SPECIAL (飽和-特殊), OFF-NORMAL (遮断) であることがわかる。得られた因果関係流の一部は図 9 (b) のようになる。層化変数 $\partial^0 v_{R1-B}$ や $\partial^0 i_{TR1-B}$ は $\partial^0 v_{IN}$ と同時に変化するが、比例はしないので $\partial^0 v_{IN}$ の含まれている stream-1 とは異なる因果関係流に属する。異なる因果関係流にまたがって伝播される影響の比例係数部

の符号について注意されたい。たとえば、 $\partial^0 v_{IN}$ が $\partial^0 i_{TR1-B}$ に与える影響の比例係数部は、その経路上の比例係数：1 ($\partial^0 v_{TR1-E} : \partial^0 v_{IN}$), 1 ($\partial^0 v_{R1-\#1} : \partial^0 v_{TR1-E}$), -1 ($\partial^0 v_{R1-net} : \partial^0 v_{R1-\#1}$), $1/R_1$ ($\partial^0 i_{TR1-B} : \partial^0 v_{R1-net}$) の

積 ($= -1/R_1$) として与えられる。したがって、 $\partial^0 v_{IN}$ が上昇すると $\partial^0 i_{TR1-B}$ は減少する。

次に、 v_{IN} が上昇するときの系のふるまいについて考えてみよう。このとき、次の二つの可能性がある。

(可能性1) $\partial^0 v_{TR2-BE}$ が上昇する。この結果 TR2の動作領域が OFF-NORMAL であるための条件：

$$\partial^0 v_{TR2-BE} < v_{TR2-BE-STA}$$

(右辺は定数)

が満足されなくなる。

(可能性2) $\partial^0 i_{TR1-B}$ が減少する。この結果、TR1の動作領域が SATURATED-SPECIAL であるための条件：

$$\partial^0 i_{TR1-B} > 0$$

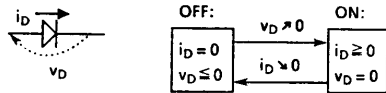
が満足されなくなる。

もし、十分な量的情報が与えられていると、第7章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行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) が先に起こることがわかる。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) が起こったとすると、次状態での TR2の動作領域は ON-NORMAL である。このとき、更新された状態方程式には $v_{IN} = v_{TR2-BE}$ という拘束条件が成り立つが、この式の右辺は定数 ($v_{TR2-BE-SAT}$) であるから、左辺をさらに増加させ続けよう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領域に依存するものを探す。すると、現在 $v_{TR1-CE} = 0$ という拘束条件が成り立っており、それが TR1 が SATURATED-NORMAL という動作領域にあることに依存していることがわかる。したがって、この拘束条件を取り除いて、 $\partial^0 v_{TR1-CE}$ 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動作領域遷移グラフ (図8 (b)参照) に与えられており、今の場合には TR1 を SATURATED-REVERSE に遷

(a) for an Ideal Diode



(b) for a Transistor

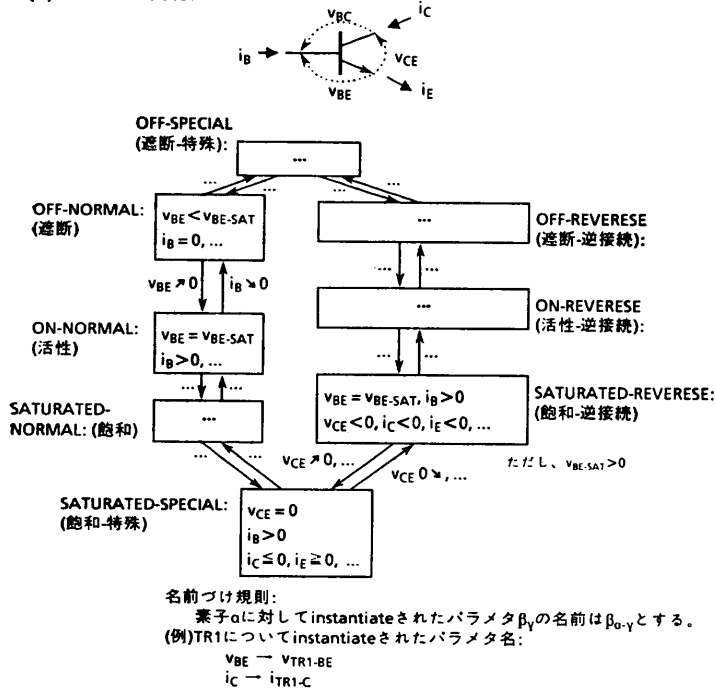
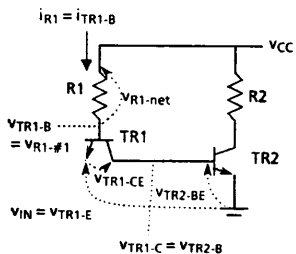


図8 動作領域遷移グラフによるダイオードとトランジスタのモデル
Fig. 8 Diode and transistor models by operating region transition graph.

(a) A basic TTL circuit



(b) Some of Causal Streams

- stream-1:
type: input-driven
source: $\partial^0 v_{IN}$
affects: $\partial^0 v_{TR1-E}(1)$, $\partial^0 v_{TR1-C}(1)$,
 $\partial^0 v_{TR2-B}(1)$, $\partial^0 v_{TR2-BE}(1)$
- stream-2:
type: synthesized
source: $\partial^0 v_{TR1-B}$
causal-origins: $\langle \partial^0 v_{TR1-E}, \text{stream-1}, 1 \rangle$
offset: $v_{TR1-BE-SAT}$
affects: $\partial^0 v_{R1-\#1}(1)$
- stream-3:
type: synthesized
source: $\partial^0 v_{R1-net}$
causal-origins: $\langle \partial^0 v_{R1-\#1}, \text{stream-1}, -1 \rangle$
offset: v_{CC}
affects: $\partial^0 i_{R1}(1/R_1)$, $\partial^0 i_{TR1-B}(1/R_1)$

図9 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

Fig. 9 A basic TTL circuit and causal streams when $v_{IN} = 0$.

移させればよいことが指示されている。この動作領域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 の動作領域がそれぞれ SATURATED-REVERSE, ON-NORMAL となる状態に遷移することがわかる。

7. 不完全な情報の取り扱い

従来の定性的推論の方式では、解のあいまい性の問題があった。この原因の一端は、量に関する情報を与えようとしても与えられないところにあった。我々は、量空間という概念を導入して、変数の値に関する量的情報が与えられた分だけ、それを利用してあいまい性を解消することを図った。この章ではその概要を示す。

第6章までには各層化変数の値の管理機構については触れなかったが、本論文の方式では、層化変数の値は、量空間のエントリへの単なるポインタであり、量空間の中で各エントリについての記述を行うという方式をとる。

量空間では各エントリに関する定量的情報を上限と下限を指定することによって与える。たとえば、量 q が正であるという定性的情報は下限として、0 (not-included) と記述することによって与える。状態方程式における変数の間の拘束条件は、(層化) 変数のもつ値の間の拘束条件として量空間にそのまま持ち込まれる。たとえば、 $x+y=z$ という方程式があれば、量空間において各層化変数 $\partial^i \alpha (\alpha = x, y, z)$ の値となる量 $v(\partial^i \alpha)$ について、 $v(\partial^i x) + v(\partial^i y) = v(\partial^i z)$ という宣言がされる。

量空間の管理機構は拘束条件の伝播によって行う。新しい宣言がなされたとき、それが量空間のエントリに関して新しい情報を与える(値の範囲を狭める)ものであれば、量的情報の詳細化が行われ、これは拘束条件を介して隣接するエントリに次々に伝播されてゆく。この伝播はそれ以上新しい情報が導かれなくなるまで続けられる。

たとえば、今白紙の状態の量空間に新情報として、

$$x+y=z \leq 1, x > 0, y > 0$$

(x, y, z は量であるとする)

がこの順に次々に与えられるとすると、量空間における各量に関する記述は次のように更新されてゆく。

$$(1) \quad x = (-\infty, +\infty), y = (-\infty, +\infty),$$

$$z = (-\infty, 1]$$

$$(2) \quad x = (0, +\infty), y = (-\infty, 1), z = (-\infty, 1]$$

$$(3) \quad x = (0, 1), y = (0, 1), z = (0, 1]$$

このような管理方式では値の伝播が停止しない場合について考慮する必要がある。たとえば、量に関する拘束条件の集合が $x > x+1$ という矛盾した拘束条件を直接的または間接的に含んでいるとしよう。このとき、新情報として $x > 0$ が与えられたとすると、1回の伝播で $x > 0+1=1$ が得られるが、これは $x > 0$ の詳細化になっているので、さらに伝播が行われ $x > 1+1=2$ が得られる。この過程は停止しない。

これを一般化すると、数値計算に誤差が含まれないとして、次の性質が成り立つことが予想される。

(性質) 一つの新情報が与えられたとき、拘束条件の伝播によって同一の量空間エントリに2回以上詳細化が起こるならば、与えられた拘束条件が矛盾している解が存在しないと結論できる。

現在のシステムでは、この性質が成り立つものと仮定し、矛盾検出に利用している。

また、+, 0, - のような定性値の間の記号的な演算は実際には行っていない。すべてこの章で述べた区間解析の方法を用いて計算を行い、符号に関する情報が要求されたとき、得られている区間値から定性値を算出する。

8. 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とおりである。

- (1) 不連続入力と動作領域の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, *Proc. AAAI-84*, pp. 86-91 (1984).
- 2) de Kleer, J. and Brown, J. S.: A Qualitative Physics Based on Confluences, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 7-83 (1984).
- 3) de Kleer, J.: How Circuits Work, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 205-280 (1984).
- 4) Iwasaki, Y. and Simon, H. A.: Causality in Device Behavior, *Artif. Intell.*, Vol. 29, No. 1, pp. 3-32 (1986).
- 5) 西田: 定性的推論, 数理科学, No. 279, pp. 48-54 (1986).

- 6) 西田：定性的推論—常識的思考法のモデル，人工知能学会誌，Vol. 2, No. 1 (1987) (掲載予定).
 7) 竹下，西田，堂下：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，第33回情報処理学会全国大会論文集，5J-5 (1986).
 8) Williams, B. C.: Qualitative Analysis of MOS Circuits, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 281-346 (1984).

(昭和61年4月7日受付)
 (昭和61年11月5日採録)



西田 豊明 (正会員)

昭和29年生。昭和52年京都大学工学部情報工学科卒業。昭和54年同大学院修士課程修了。昭和55年同大学院博士課程退学。同年より、京都大学工学部助手。人工知能、自然言語理解、機械翻訳などの研究に従事。京都大学工学博士。昭和59年から1年間Yale大学客員研究員。電子情報通信学会、認知科学会、人工知能学会、AAAI、ACL会員。ICOTWG (FAI, NLS) 委員。



川村 正 (正会員)

昭和36年生。昭和59年京都大学工学部情報工学科卒業。昭和61年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。現在、同社中央研究所に勤務。

在学中は、自然言語理解、人工知能基礎論の研究に従事。



堂下 修司 (正会員)

昭和33年京都大学工学部電子工学科卒業。昭和35年同大学院修士課程修了。昭和38年同博士課程中退。同年京都大学工学部助手。昭和43年東京工業大学助教授。昭和48年京都大学工学部教授。その間、音声の認識、オートマトンの構成、人工知能など情報処理の研究に従事。工学博士。昭和34年度稲田賞受賞。電子情報通信学会、音響学会各会員。