

定性的推論における変数の不連続変化の取り扱い

西田豊明, 堂下修司

京都大学・工学部・情報工学教室

これまでの定性的推論システムは主として変数及びその全ての導関数が連続して変化する「なめらか」な系の解析が中心であった。これらの研究は、すべての物理システムは連続的に変化するという世界観に基づくものであり、不連続な変化の解析はかなり例外的で不適切な取り扱いを受けてきた。

本論文では不連続変化の解析法について、滑らかな関数によって近似し、極限を取る方法と、ヒューリスティックを用いた解析法の2通りの方法を示して、比較検討を行う。本論文では後者を採用する。この方法は、不連続な変化が生じているときの系のふるまいを効率的に計算でき、また不足している情報を「不連続な変化は連続変化の素早いものである」というオートロジーによって補った標準的な説明を生成できる。

Dealing with Discontinuity in Qualitative Reasoning

Toyoaki Nishida and Shuji Doshita

Department of Information Science
Kyoto University
Sakyo-ku, Kyoto 606, Japan

Qualitative reasoning algorithms proposed so far depend on the "continuity" hypothesis that requires all system parameters to change continuously. Even though quantities might not change discontinuously in the physical world, most abstract models we usually use to reason about the physical world do not follow this hypothesis. Discontinuity is not so artificial in our commonsense world, either. We hardly use Maxwell's model to analyze TTL or MOS circuits; we are happy with ordinary model involving discontinuity.

In this paper, we explore a method of causal analysis of discontinuous change in the context of qualitative reasoning. We compare two methods that are based on the ontology that discontinuous change is very fast continuous change. One alternative is to approximate discontinuous change by continuous one and then calculate limit, while the other is to use a number of heuristic methods to directly identify intermediate stages that are considered to exist during discontinuous change. The latter is employed and the algorithm is presented in detail.

1. はじめに

これまでの定性的推論システムは主として変数及びその全ての導関数が連続して変化する「なめらか」な系の解析が中心であった。これらの研究は、すべての物理システムは連続的に変化するという世界観に基づくものであり、不連続な変化の解析はかなり例外的で不適切な取り扱いを受けてきた。

しかし、不連続な変化は至るところにある。第一に、カストロフの理論でも示されているように、連続な系に連続な変化を加え続けていったとき突然、系の性質が不連続に変化することがある。第二に、日常的な視点でみると、我々のまわりには不連続な変化をする物理システムは至るところにある。スイッチのオンオフや、ものの切断、光の反射（導関数レベルでの不連続）、物の境界、水が空になったりあふれたりすること、しゃぼん玉の膜が分かれたり壊れたりすることなどである。第三に、一般的な物理システムの理論では物理現象の理想化が行われるが、理想化の結果捨象された系の微視的なレベルでの「素早い」変化は、モデルにおける不連続な変化として取り扱われる。例えば、電気回路理論では、回路の電磁波レベルのふるまいを捨象したレベルで理論が構成されているが、そこには不連続性が含まれ、過渡現象解析やパルス回路解析の対象となる。したがって、定性的推論においても、不連続な変化の適切な取り扱い方法を取り込む必要がある。

不連続な変化の解析の難しさは、不連続な変化が生じたあとの系の状態を推定するための手がかりが少ない(Underconstrained)ことにある。連続的な変化を取り扱う場合には、変化の前後で系の因果構造が変化しないので、変化後の系の状態は変化前の系の因果構造を用いて容易に求めることができた。しかし、不連続な変化の前後では系の因果構造は大きく変化し得るので、変化前の系の因果構造は、変化後の系の状態を知る直接の手がかりにはならない。

このような問題を解決するための一つの方法は、捨象されていた詳細レベルのモデルを呼び出すことである。抽象化されたレベルのモデルにおける不連続変化は詳細レベルでの連続的な変化によって説明される可能性があり、連続的な変化の解析アルゴリズムが適用できるかも知れない。しかし、このような詳細度を上げる(Push-a-level)手法を用いるとより多くの曖昧性が発生する可能性があり、必ずしも効果は期待できない。また、そのような詳細モデルが得られなかったり、詳細モデルを用いると計算量が膨大になったりする。

de Kleerらは、抽象的なレベルのモデルにおける曖昧性や決定不能性を解決するために、詳細なレベルでの系のふるまいを反映したヒューリスティック規則を用いた連続的な変化の解析法を示した^[10, Kleeer 84]。本論文も同様の思想に基づき、不連続変化は連続変化の極限であるという存在論に基づくヒューリスティック規則を用いて不連続変化を解析する方法を中心に検討する。

本論文の以下の部分では、はじめに定性的推論において取り扱うべき不連続変化の性質を明らかにする。不連続な変化を解析するための自然な考え方は、不連続な変化を連続的な変化の極限として捉えることである。このために、まず不連続な変化を(疑似的に)連続的な変化によって近似し、次に極限を取る方法について検討する。次に、ヒューリスティックを用いた解析法を示す。この方法は、不連続な変化は連続的な変化の極限であるという立場はとるが、実際に極限操作は行わず、ヒューリスティック規則を用いて不連続変化の途中に存在すると考えられる仮想的なステップを逐次予測してゆく。これは我々が以前に示した方法^[Nishida 86]を改良・一般化したものである。

2 不連続変化の性質

2.1 不連続変化の生じる原因

本論文では条件付き線形微分(Piecewise Linear)方程式による電子回路モデルにおいて生じる不連続変化について考察する。以下では、「回路」や「素子」というとき、回路や素子の物理的な実体ではなく、このモデルによってモデル化された回路や素子を意味することにする。

このモデルでは、トランジスタやダイオード等非線形な特性をもつ素子の動作はいくつかの線形の動作領域にわけて記述される。例えば、理想ダイオードの特性は、

$$\text{(OFF)} \quad v_D < 0 \rightarrow i_D = 0$$

$$\text{(ON)} \quad v_D = 0 \rightarrow i_D \geq 0$$

と記述される。このようにモデル化された素子を多モード素子と呼ぶ。

このようなモデル化を行ったとき、変数またはその導関数に不連続な変化が生じるのは次のような場合である。

(場合1) 不連続な入力を与えられたとき、

(場合2) 多モード素子の動作領域の遷移が生じたとき

(場合3) 正のフィードバックが存在するとき

以下、それぞれの場合について述べる。

2.1.1 不連続な入力を与えられたとき

一般に、系にパルスやステップ入力などの不連続な入力を与えられると、それは系の各部に伝播されてゆく。図1にこの典型例として、微分回路にステップ入力に加えられた場合を示す。

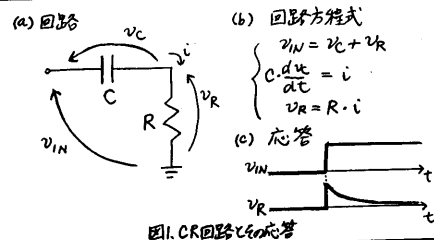


図1. CR回路の応答

2.1.2 動作領域間の遷移が生じたとき

多モード素子の動作領域の遷移がおこると不連続変化が生じることがある。例えば、図2のような理想ダイオードと抵抗からなる回路の入力電圧が負から正に変化するとき、電圧が0に達すると回路の出力側の抵抗に突然電流が流れはじめ、その導関数が不連続的に変化する。

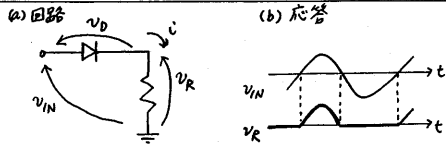


図2. 簡単な整流回路とその応答

2.1.3 正のフィードバックが存在するとき

系に時間遅れのない正のフィードバックが存在すると、変数の値の微小な変化が拡大されて不連続な変化が生じる。例えば、エサキダイオードは本来図3のようなめらかな特性関数を持つ素子であるが、途中で負性抵抗をもつ区間があるために、変数値に不連続な変化を引き起こすことがある。

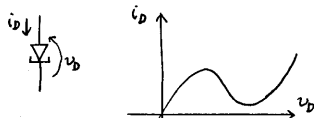


図3. エサキダイオードの特性

図4のような回路において入力電圧 v_{IN} を上昇させていった場合について考えてみよう。

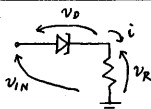


図4. エサキダイオードを用いた回路例

v_{IN} がなおも上昇を続けて、ある値を越えると、回路は次のようなふるまいを示す：

エサキダイオードを流れる電流 (i) は減少しはじめる。 i は抵抗を流れる電流でもあるからこの結果、抵抗による電圧降下 (v_R) は小さくなる。すると、エサキダイオードにかかる電圧 (v_D) は上昇し、 i はますます減少する (正のフィードバック)。しかし、 v_D がある値に達すると、 i は増加しはじめ、それにともない、 v_R も上昇する。すると、 v_D の上昇も小さくなり (負のフィードバック)、やがて回路は平衡状態に達する。

このモデルでは、以上の変化が一瞬にして起きることに注意されたい。従って、回路内のいくつかの電圧・電流は一瞬にして、異なる値に「ジャンプ」する。

2.2 不連続変化と連続的な変化のちがい

不連続な変化と連続的な変化との違いが解析アルゴリズムに与える影響は二つある。第一に、不連続変化の前後では系の因果構造が変化し得る。このため、不連続変化の解析においては、次状態の因果構造を予測する必要がある。第二に、不連続変化の瞬時的な連鎖と複合が生じ得る。例えば、不連続な入力を与えられたとき、ある素子の動作領域の遷移を引き起こし、それがさらに別の素子の動作領域の遷移を引き起こすことがあり得る。解析アルゴリズムはこの過程を正しく追跡できなければならない。以下この節では各々の点について述べる。

2.2.1 因果構造の変化

本論文では、系の因果関係は系の変数の値の決まる半順序関係 (値の依存関係) であると考えている。例えば、図1の微分回路の各変数は図5に示された順序に従って決定されると考える。

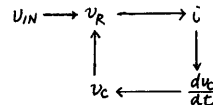


図5. CR回路(図1)の変数の間の値の依存関係

このような受動的な素子ばかりからなる回路に不連続な入力に加えられても系の因果構造は基本的には変化しない。

しかし、多モード素子が含まれていると、その素子がどの動作領域にあるかによって系の因果関係が全く異なる。例えば、図2の回路でダイオードがOFF・ONのときの因果構造を表すネットワークをそれぞれ図6(a)(b)に示す。抵抗 R にかかる電圧はダイオードがOFFのとき、回路の電流が0であることから決まるが、ダイオードがONであるときは、回路の入力電圧とダイオードの電圧降下の差から決まる。

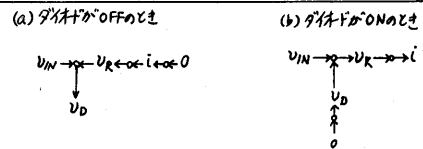


図6. 簡単な整流回路(図2)の因果構造

2.2.2 不連続変化の連鎖と複合

不連続変化の連鎖が起こる典型的な例は、図7のように、トランジスタが直接結合された場合である。パラメータが適切に調節されていれば、先頭のトランジスタに動作領域の遷移が起きると、次段以下のトランジスタの動作領域が連鎖的に変わってゆく。トランジスタのスイッチングにおける時間遅れがないと仮定すると、この変化は瞬時的に起こるが、論理的には図8のような中間段階を考えることができる。

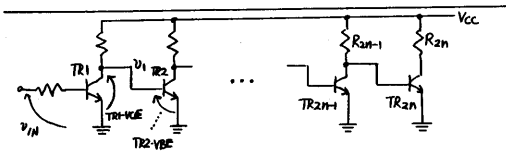


図7. トランジスタを直列結合した回路。

段階0 (状態遷移が開始する直前):

TR1:OFF, TR2:ON, ..., TR2n-1:OFF, TR2n:ON, ...

段階1:

TR1:ON, TR2:ON, ..., TR2n-1:OFF, TR2n:ON, ...

段階2:

TR1:ON, TR2:OFF, ..., TR2n-1:OFF, TR2n:ON, ...

...

段階2n-1:

TR1:ON, TR2:OFF, ..., TR2n-1:ON, TR2n:ON, ...

段階2n:

TR1:ON, TR2:OFF, ..., TR2n-1:ON, TR2n:OFF, ...

図8. v_{IN} が上昇して図の回路の修正したトランジスタがONになったとき。

実際の回路解析では、図7のような多モード素子を含んだ回路にステップ入力を与えられる場合や、回路に多モード素子と時間遅れのある素子の両方が含まれている場合など、上に述べた種々のタイプの不連続変化が複合する場合について考慮する必要がある。

3. 不連続変化の解析に関するこれまでの研究

J. de KleerとB. Williamsは、それぞれ、動作領域の遷移によって系の因果構造が変化する場合の解析アルゴリズムを示している。しかし、de Kleerの解析法では、動作領域の遷移において不連続変化がないと仮定されている [de Kleer 84b]。一方、Williamsの解析法 [Williams 84] では、不連続変化は多モード素子のモデルに動作領域の遷移において不連続変化があると明記されたときのみ、不連続変化が許されている。いずれの場合も、2.1節で示した不連続変化の起きる(場合1)と(場合3)、および2.2.2節で示した不連続変化の連鎖と複合については考慮されていない。

K. Forbusのプロセス中心型の定性的推論のモデル [Forbus 84] では、系のふるまいを支配するプロセスが切り替わる時点で変数に不連続な変化が起こり得る場合(例えば、衝突)も考慮されている。Forbusの方法は、系に関係するプロセスがあらかじめ同定されている場合に適用されるものであるが、我々は、対象とする回路に連続・不連続変化が生じるときにそもそもどのようなプロセスが存在するかを知りたいのであるから、Forbusの方法は直接参考にはならない。

我々の以前の論文では、2.1節で述べた(場合1)と(場合2)が単独に生じる場合について考察を行ったが、両

者が複合する場合、および(場合3)については考慮しなかった。本論文では、これらの場合を含んだ一般的な場合について解を示す。

4. 不連続な変化を滑らかな変化で近似してから極限を求める方法

不連続な変化を解析するための自然な考え方は、不連続な変化を非常に素早い連続的な変化として捉えることである。このオントロジーを反映した解析法として、まず不連続な変化を(疑似的に)連続的な変化によって近似し、次に極限を取る方法が考えられる。

4.1 基本的なアルゴリズム

この節では図1のCR回路を例にとって基本的なアルゴリズムについて説明する。このアルゴリズムは2段階からなる。

第1段階では、入力を「滑らかな」関数で近似する。通常いくつかの近似法が考えられるが [Ozawa 88]、定性的推論の範囲内では考慮している精度 (n階導関数まで) で、各導関数の正・負を示せばよい。ステップ関数を0~3階導関数まで、滑らかな関数で近似したものを図9に示す。

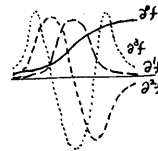


図9. ステップ関数の滑らかな関数による近似。

入力がいくつかの不連続性の複合したものであれば、取り扱いはやや複雑になるが、基本的な考え方は変わらない。

第2段階では、この滑らかな変化が起きる時間を短くしていったときの極限を求める。極限を求める操作を本格的に扱うためには数式処理が必要になる。しかし、極限操作は本来論理的なプロセスである。いくつかの場合は単純な論理操作で求めることができる [Nishida 85]。O. Raimanは最近より精巧な方法を示している [Raiman 86]。

この節で示す例の取り扱いには、(Nishida 85)を少し修正した方法を用いることにする。量の大きさを表す記号の集合として、 $\{0, \epsilon$ (微小量), M (中庸), ∞ (非常に大きな量; $1/\epsilon$) $\}$ を考える。これらの間には、 $\epsilon + \epsilon = \epsilon$, $\epsilon + M = M$, などの計算規則を定義することができる。量 α の取り得る値の範囲 $[\alpha]$ は区間表現を用いて表示する (例: $(-\epsilon, M)$: 負の微小量から正の中庸値まで)。ただし、 (α, α) は単に α と書く。また、時間に関する積分について次のような規則を用いる:

区間 $I: [t_0, t_1]$ と関数 $f(t)$ が与えられたとき、 $f(t_1)$ の取り得る範囲は

$[f(t_0)] + [\text{length}(I)] \cdot [\text{range}_1(\partial f)]$
で拘束される。

実際の計算はまず量の大きさに関する情報を用い
ないで挙動推定(Envisionment)を行い、次に極限状態
でのふるまいを求めることも考えられるが、この方法
では途中で多くの曖昧性が生じて効率が悪い。そこで挙
動推定で量の大きさの情報を用いて逐次次状態を求め
てゆく。図10の回路に対する計算過程を図10に示す。

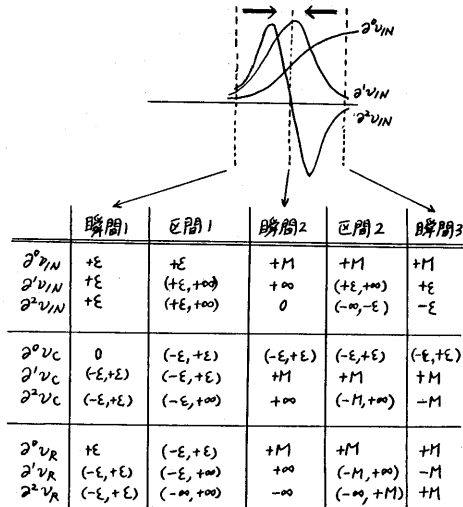


図10. 滑らかな関数に近似してから極限をとる方法を用いた回路の解析

例えば、瞬間2における $\partial^0 v_C$ の値は

$$\partial^0 v_C (\text{瞬間1}) + \text{integral}(\text{区間1}) \partial^1 v_C$$

$$= 0 - (-\epsilon, +\epsilon) = (-\epsilon, +\epsilon)$$

の範囲に拘束されることがわかる。一方、瞬間2にお
ける $\partial^0 v_R$ に同様の積分規則を適用すると、瞬間2にお
ける $\partial^0 v_R$ の値は、

$$\epsilon + \epsilon \cdot (-\epsilon, \infty) = (-\epsilon, \infty)$$

であることしかわからないが、拘束条件

$$\partial^0 v_R = \partial^0 v_N - \partial^0 v_C$$

を用いると、 $\partial^0 v_R$ は

$$M - (-\epsilon, +\epsilon) = M$$

に拘束されることがわかるので、こちらを採用する。

回路にトランジスタ以外の多モード素子が含まれて
いる場合も同様に解析する。

4.2 系の内部で不連続な変化が生じたとき

この方法は、不連続変化が外部から与えられたとき
については直接適用できるが、動作領域の遷移や正の
フィードバックがある場合などによって系の内部で新
しく不連続な変化が生じる場合が考慮されていない。
この章の方法を適用するにはそれを再び連続的な変
化で近似して系の残りの部分に伝播し、極限をとる必
要がある。このため、不連続変化が生じたところで系
を、不連続変化を引き起こした部分(入力側)と不連
続変化が生じた変数に依存する部分(出力側)に二分
し、出力側のサブシステムにこの章の方法を再帰的に
適用する。

4.3 問題点

この方法の問題点として次の2点が考えられる。第一
に、系の内部に存在する正のフィードバックによって
不連続変化が生じること自体を発見できないことであ
る。第二に、この方法は必要の有無に拘らず不連続変
化を連続変化で近似し、極限をとるので、不必要な計
算が多く行われてしまう。4.1節の例においても、連続
変化への展開操作は不連続変化後の次状態の同定には
ほとんど寄与していない。そこで我々はこの解決法を
採用せず、5章のアルゴリズムを用いる。

5. ヒューリスティックを用いた不連続変化の解析

この章で示すアルゴリズムは、不連続変化の途中の
定性的に異なる中間段階だけを逐次予測するものであ
り、4章のアルゴリズムのように不必要な計算が多く行
われることはない。この方法で生成される中間状態は
回路方程式を満足しないので、回路方程式で捉えられ
るレベルのモデルには実在しない、仮想的なものであ
るが、そこから生成される説明は有意義である。

一般に、仮想的な中間状態を仮定した解析法を用い
ると、一つの現象に対して複数個の説明が存在する可
能性がある。我々は、ヒューリスティック規則によっ
て、そのうちの一つを標準的なものとみなす。

はじめに、次の節で不連続変化の取り扱いにともな
う時間概念の拡張について述べる。

5.1 時間のモデルの拡張

連続的な変化の取り扱いにおいては、時間は瞬間と
時区間の交互の繰り返しとしてモデル化されてきた。
不連続変化は連続的な変化が高速に起きるものでは
ないというオントロジーに基づけば、瞬間と瞬間の間には
さまれる時区間は限りなく短くなり、ついには見えな
くなってしまふことになる。すなわち、不連続変化の
解析では図11のように瞬間と瞬間の並びが許されるこ
とになる。

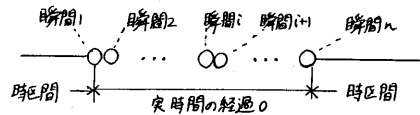


図11. 不連続変化の解析のための時間モデル

5.2 ヒューリスティック規則

不連続変化は連続的な変化の素早いものであるとい
うオントロジーから導かれる、次のような一般的な規
則をもとに基本アルゴリズムを設計した。

[不連続変化の連続性]

変数xの値がaからb (b ≠ a) に変化するとき、aとbの中
間にある任意の値cに対してaからcへの変化の方が先に
起こる。

[局所的な予測可能性] 素子が動作領域にあるため

の条件が満足されなくなると、そのときの変数値の変化の方向から、素子は次の状態を局所的に予測できる。

【情報の伝達】素子が自分の動作領域を局所的に決定することが可能であるためには、素子の間に決定に必要な情報が伝達されなければならない。

【動作領域の遷移の隣接性】素子によって局所的に予測された次の動作領域は、現在の動作領域に隣接したものでなければならない。

5.3 基本アルゴリズム

アルゴリズムの詳細は付録で示し、この節では基本的な考え方を中心に述べる。(Nishida 86)で示したように、不連続変化の解析の基礎になるのは、不連続な変化が与えられたときの値の変化しない変数の同定と、動作領域の遷移の追跡である。前者は、比較的簡単に、連続的なふるまいの因果解析から、積分の出力となっている変数であることが分かっている。一方、後者に対しては矛盾の検出とその伝播という考え方をを用いる。すなわち、動作領域の遷移の連鎖を次のように説明する：

変数値の組合せが、回路方程式の集合を満足しない事態(矛盾)が生じると、その事態を解消しようとして矛盾に関与した多モード素子が動作領域の遷移を引き起こす。その副作用として新たに矛盾が生じることが有り得るが、そのような矛盾は解消されるまで、隣接する素子に次々と伝えられてゆく。

変更し得る拘束条件が複数個あれば、「局所的な予測可能性」規則と「動作領域の遷移の隣接性」規則によってそのうちのひとつを標準的な説明として選択する(説明の標準化)。

各話題について例を用いて詳しく説明する。

(例1) 図2に示した簡単な整流回路で入力 v_{IN} が負の値から上昇して0に達したときについて考えてみよう。 v_{IN} が負のときは理想ダイオードの動作領域は遮断である。しかし、 v_{IN} が0に達すると、理想ダイオードの動作領域が遮断状態であるという仮定に基づいて解析すると矛盾が生じる。この矛盾に関与する拘束条件のなかには次のものが含まれる：

- (a) $v_{IN}=0$, (b) $v_R=0$, (c) $i_R=0$,
- (d) $i_D=0$, (e) $v_D < 0$

これらのうち、(a)は主要原因、(b), (c)は多モード素子の動作領域に依存しない。(d)と(e)がダイオードが遮断状態であるという仮定に依存する。理想ダイオードが条件(d)に対する違反のために状態遷移を起こすとすれば、局所的にいつその違反が生じたかが判断できなければならないが、これは不可能である。一方、理想ダイオードの状態遷移が条件(e)によって引き起こされるためには、 v_D が上昇して条件(e)に違反したために、ダイオードの動作領域の遷移が起きるとすれば、「局所的な予測可能性」規則は満足される。そこで、条件(e)に対する違反による状態遷移の説明を標準的なものとする。

一般に、矛盾に関与する拘束条件のために、特定の素子の動作領域に依存するものが二つ以上あるとき、等式よりも不等式を優先的に原因とみなして、その矛盾を解消する方向への操作領域遷移を探索する。

(例2) ベース電流 i_B の大きさに依存して、遮断($i_B=0$)、活性($0 < i_B < C$)、飽和状態($C < i_B$)の3状態からなるトランジスタの簡単なモデルを考えてみよう。 i_B が0から正のある値 $D(D > C)$ に不連続に変化すれば、トランジスタの動作領域は遮断から飽和に瞬時に遷移する(今のモデルでは遷移にともなう時間遅れはないものとする)。このような場合は、「動作領域の遷移の隣接性」規則から、途中にトランジスタが活性状態を瞬時的に通過するという説明を標準的なものとする。

(例3) 図7の直接結合されたトランジスタの動作領域の連鎖の解析法を示そう。回路の入力 v_{IN} が上昇して、1段目のトランジスタが遮断であるための条件に違反が起きたとする。この結果1段目のトランジスタが導通(活性または飽和)になったとする。すると、1段目のトランジスタと2段目のトランジスタの間で矛盾が生じる($v_1=v_{TR1-CE}="low" \neq v_{TR2-BE}="high"$)。この矛盾を解消しようとするとき、どの方程式を修正するかが問題になる。 $v_1=v_{CE}="low"$ は入力の変化に根拠を持つ。一方、 $v_{TR2-BE}="high"$ はTR2が導通であることに依存するが、これはそれ以上根拠を持たない。そこで後者の仮定が撤回されることになる。こうして、 v_{TR2-BE} は"low"から"high"になり、TR2が遮断から導通に遷移することが導かれる。

このような矛盾の発生-解消の連鎖によって直接結合されたトランジスタ回路やTTL回路における不連続変化における仮想的な連鎖が説明される。

5.4 系に(時間遅れのない)正のフィードバックが含まれる場合について

以上に述べたアルゴリズムを単純に適用すると解析器は、ループに陥って次状態を求めることができなくなることが起きる。次のような例について考えてみよう。

いま、エサキダイオードの電圧-電流特性を図12のように、三つの動作領域によってモデル化するものとする。

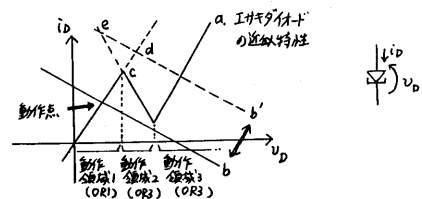


図12. エサキダイオードの近似的特性と、グラフによる図4の回路の動作の分析。

この図を用いると、図4の回路の動作点は、折れ線aと直線bの交点として捉えられる。 v_{IN} を上げてゆくことは、直線bを上から下へゆくことに相当する。bを上から下へゆると、それが点cを越えてさらに上昇

を続けようとする、予測される動作点の位置は回路方程式を満足しない点 (d) に移り、矛盾が生じる。この矛盾はエサキダイオードにかかる電圧 (v_D) が大きくなり過ぎて、エサキダイオードが動作領域OR1にあるべき条件を満足しなくなった (v_D too big) ために生じたと考えられる。この矛盾を解消するためにはエサキダイオードの動作領域がOR2に遷移すればよいと考えられる。ところが、そのような遷移によって予測される動作点の位置 (e) はまだ回路方程式を満足しないから、再び矛盾が生じる。その原因を調べると今度はエサキダイオードがOR2であるためには、 v_D が小さ過ぎたことがわかる。これを解決しようとして、エサキダイオードの動作領域は再びOR1に戻される。このように、基本アルゴリズムは、d点とe点の間で交互に次状態の予測を続け、次状態を正しく求められない。

この問題を解決するための一つの方法は、動作領域の遷移の隣接性の規則を緩和して隣接する動作領域以外にも遷移を許すことであるが、そこから得られる説明は直観的ではない。ここで生じた問題の原因は時間遅れのない正のフィードバックを適切に認識していなかったために生じたものであるから、フィードバックのタイプの違いに関する情報を解析で用いるようにするのが適切な解法であると考えられる。

5.5 時間遅れのない正のフィードバックの解析法

系に時間遅れのない正のフィードバックが含まれるかどうかの認識は、自分自身に時間遅れのない、正の影響を与える変数があるかどうかを調べればよいだけであり、困難はない。例えば、我々の因果関係流解析を少し修正すればよい。

系に時間遅れのない正のフィードバックが含まれていると判明したとき、その結果生じる値の変化を求めるのも容易である。正のフィードバックのある変数に加えられる変化の方向に値のジャンプが起きる。どこまでジャンプするかは、動作領域がその変数に依存する多モード素子があるかどうかによって依存する。もしそのような素子が存在すれば、変数値がその素子が現在の動作領域にあるための条件に違反したところで解析は中断する。そのような条件への違反がなければ、理論上はその変数値は無限大または無限小になる。

6. 検討

ここでは、5章で与えた方法を検討する。

(a) この方法は4章の方法に比べてむだが少ない。なぜならば、5章の方法は不連続変化の中間での系の状態を計算するのは、矛盾が生じて動作領域の遷移を解析する必要が生じたときだけである。

(b) この方法が、4章の方法によって予測される (実際起こり得る) 次状態を全て予測できるかどうかは今後の課題である。現在までのところ反例は見つかっておらず、5章の方法は完全であることが予想される。

5章の方法がうまくいくかどうか自明でないのは、入力変数のジャンプの途中で状態遷移が次々と起きるよ

うな場合であろう。例えば、図13の回路に十分な大きさのステップ入力を与えられる場合について考えてみよう。

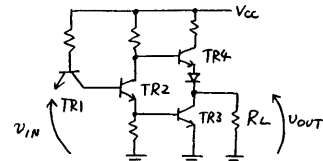


図13. TTL回路.

トランジスタのスイッチングに時間遅れがないとすれば、この回路は入力電圧の上昇がゆっくりおきる場合、この回路のふるまいは図14のようである。

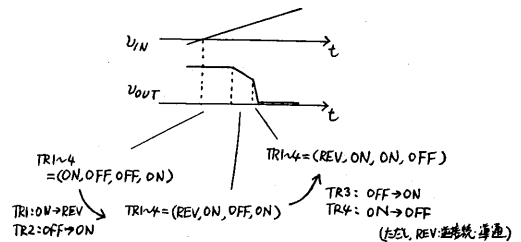


図14. v_{IN} が 0 から上昇するときの図13の回路のふるまい

入力電圧の上昇がステップ状であっても、ジャンプ後の矛盾チェック (付録のアルゴリズムのステップ (4-b) → (3)) によって動作領域の遷移が検出される。ジャンプの途中経過は、「不連続変化の連続性」規則 (5.2節) によって順序づけられる。

論理的には、ジャンプ後の系の状態に矛盾はないが、ジャンプの途中で回路方程式に違反が起きるといふ、病的な場合も考えられるが、これは付録のアルゴリズムのステップ (3) の「ジャンプ途中の状態の事後検査」によって検出される。

(c) このアルゴリズムは、電子回路の教科書に書かれている説明に類似した、因果的な説明を与える。このような説明の意義の解明は今後の課題である。

7. まとめ

本論文では不連続変化の解析法について、滑らかな関数によって近似し、極限を取る方法と、ヒューリスティックを用いた解析法の2通りの方法を示して、比較検討を行った。後者は、不連続な変化が生じているときの系のふるまいを効率的に計算でき、また不足している情報を「不連続な変化は連続変化の素早いものである」というオントロジーによって補った標準的な説明を生成できる。我々は本論文の方法にしたがって、電子回路を対象とした定性的推論システムQR-1のアルゴリズムを改良中である。

参考文献

- (de Kleer 84a) de Kleer, J. and Bobrow, D. G., Qualitative Reasoning with Higher-Order Derivatives, in Proc. AAAI-84, 86-91, 1984.
- (de Kleer 84b) de Kleer, J., How Circuits Work, AI 24, 205-280, 1984.
- (Forbus 84) Forbus, K. D., Qualitative Process Theory, AI 24, 95-168, 1984.
- (Nishida 85) 西田、川村、堂下、定性的推論におけるあいまい性と不連続性の取り扱いについて、情報処理学会、知識情報処理シンポジウム論文集、1985.
- (Nishida 86) 西田、川村、堂下、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、知識工学と人工知能研究会48-7, 1986.
- (Ozawa 80) 小澤孝夫、電気回路II(過渡現象・伝送回路編)、昭晃堂、1980.
- (Raiman 86) Raiman, O., Order of Magnitude Reasoning, in Proc. AAAI-86, 100-104, 1986.
- (Williams 86) Williams, B. C., Doing Time: Putting Qualitative Reasoning on Firmer Ground, in Proc. AAAI-86, 105-112, 1986.

付録：矛盾の検出と伝播による連続・不連続変化解析アルゴリズム (区間-瞬間-区間の解析)

〔前提〕

- (a) 現在の状態について各変数値と変化の方向が求められている。
- (b) 同時に変化する変数がグループ化されている。
- (c) 必要に応じてこれらを計算するアルゴリズムが存在すること。

〔仕様〕

上の前提が満たされるとき、本アルゴリズムは現在の時区間に対する系の状態記述から、次の時区間に系が取り得る状態記述 S_i の集合 $\{S_i\}$ を求める。

〔処理ステップ〕

- (1) 系の状態を変えうる(criticalな)変化の検出
- (a) 変数の定性値が変わるもの。
- (b) 現在の動作領域に関する拘束条件に違反が生じるもの。次の動作領域に関する示唆を素子の記述から求める。
- (c) 値のジャンプ。
- (2) 最初に起きる変化を求める
- (2-1) 因果関係流内の比較
- (2-2) 因果関係流間の比較
- ・ 入力の変化は入力駆動の因果関係流に対応づける
 - ・ 得られた候補の部分集合の集合 $C \triangleq \{C_i\}$ をつくる
- (3) C の各々の要素 C_i (可能な変化の集合)に対して次の処理を行う。

(3-1) C_i の各要素 $c_{i,j}$ の指示によって次状態の部分記述を得る。 $(c_{i,j})$ がまだ処理されていない値のジャンプであるときは、ジャンプ直前の値を用いる、ただしジャンプがあることと、ジャンプ直後の変数の値を次状態記述にノートとして対応づけておく)

(3-2) 次のいずれかの処理を行う：

(a) $\{c_{i,j}\}$ の中に動作領域の遷移を示唆するものがない場合、現在得られている系の因果関係の情報をもとに、次の瞬間における系の状態を再計算する(T_i)。この結果、矛盾が起きれば、矛盾回避(Contradiction Avoidance)の原則^[de Kleer 84a]により、 T_i への遷移は起こり得ないと結論する。矛盾が起きなければ、 T_i を次に可能な瞬間における系の状態のリスト L に追加して、(4)へ。

(b) $\{c_{i,j}\}$ の中に動作領域の遷移を示唆するものがある場合、部分記述を初期値として、系の状態 T_i と因果関係を再計算する。因果解析の結果、次状態に正のフィードバックが含まれることが分かれば(3-3)へ。次状態に正のフィードバックは含まれないが、状態解析の結果、矛盾が起きれば、(3-4)へ、起きなければ T_i を L に追加して、(4)へ。

上の(a)(b)で、現在の状態がジャンプによって得られたものであれば、ジャンプにおける各変数の変化を調べ、途中で矛盾した状態が生じていないかどうかをチェックする。もしあれば矛盾が生じたものとみなす。

(3-3) 正のフィードバックによって引き起こされる遷移を推定し、それを C と置いて、(3)へ。

(3-4) 矛盾回避のための情報の伝播を行う。矛盾回避に貢献し得る全ての動作領域の遷移 T_i を求め、

$C = \{\dots(T_i)\dots\}$ と置いて(3)へ。

(4) 上の解析で求められた L の各々の可能な瞬間 T_i について、次のいずれかの処理を行う：

(a) T_i にジャンプの起きることがノートされていないとき： T_i に続く時区間 S_i を求め、 S_i を次の時区間で可能な系の状態の集合 M に加えて処理を終了する。

(b) S_i にジャンプの起きることがノートされているとき：ジャンプが複数個あれば、「不連続変化の連続性」(5.2節)を用いて、最も早く起きるものを選び出す。次に、ジャンプを起こす変数のジャンプ直後の値と、積分型因果関係において積分側出力となっている変数の値と、各素子の現在得られている動作領域からステップ(2-2)で生成する集合 C と同じ形式の集合を作り、(3)へ。