

定性推論による生体動態解析

田中 博

東京大学医学部医用電子研究施設

従来の定性推論では、定性微分方程式と初期条件を与えて全変量を一括して挙動推論 (Envisionment) する方法が用いられてきた。しかし、この一括型の定性推論では、(1) 挙動推論する変量群に対して詳細度のレベルを制御出来ない、(2) 大局的な拘束条件を導入するのが困難である、(3) 挙動推論していく変量の順序を因果性の順序に合わせて指定できない、などの問題点があった。本研究では、動態推論を可制御にするために、連続微分可能な変量に対する動態を変量逐次増加型の状態遷移図生成法 (セル分割法) で推論する単純定性推論部と、これをメタレベルから制御し、接続解析、動態の近似、詳細化、統合化を行う上位系よりなる定性推論システム Aslan を構築し、動的機序の速度の違いを考慮した挙動推論制御「速度適応」について生体系への応用を述べた。

A QUALITATIVE REASONING METHOD BASED ON DYNAMICS STRUCTURE ANALYSIS AND ITS APPLICATION TO BIOLOGICAL SYSTEM

Hiroshi TANAKA

Institute of Medical Electronics, Faculty of Medicine, University of Tokyo
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan 113

Most of the previous qualitative reasoning methods have common shortcoming in lack of controllability of envisionment process on account of their algorithm to infer the temporal change of all the system variables directly from system structure description. This shortcoming is essential in obtaining the higher cognition of the system behavior than simple bottom-up envisionment, such as to consider the global constraints, to abstract or approximate the system behavior, or to get more detailed envisionment about substructures of the system. In this study, we developed a new envisionment algorithm, called cell division method, from the graph-theoretic approach to the state transition diagram. This method has the controllability of its reasoning process from meta-level knowledge and we illustrated rate-adapted qualitative reasoning applied to body fluid dynamics.

1. 定性推論と医学診断システム

従来の医療エキスパートシステムで用いられていた知識表現はif-then型のプロダクションシステムのように観測された症状から仮説を直接駆動させる、いわゆる症候論的知識によって構成されていた。その意味では連関的 (associational) な知識が主であったといえる。

しかし、限定された症候の集合に対する診断という目的のためには、このような知識形式で充分であるが、さらに広汎な知的支援、たとえば助言した治療によって患者の病態がどう変わるかの予後予測や、あるいは格納された症候論的知識以外の症状が現れたときの対応策などを提示するためには、システム自身が、限定された目的のために必要な知識だけでなく、コンサルテーションの対象そのものの機構、医療エキスパートシステムでは対象疾患領域の生理および病態生理について知っている必要がある。たとえば、著者らの研究室では、脱水症を始めとする水電解質平衡失調を診断し、適切な輸液処方を助言する医療エキスパートシステムFLUIDEXの開発に長年携わってきた[1]。FLUIDEXは当初、典型的なプロダクションシステムすなわち観測された症状から体液状態に対する仮説を直接駆動させる、いわゆる症候論的知識によって構成されたが、輸液診断という目的のためにはこのような知識ベースで充分であっても、決定した輸液量が生体の今後の体液平衡をどう変化させ、それぞれの電解質濃度は安全限界の中にあるかを提示するためには、何等かの意味でシステム自身が、生体の体液平衡系の制御動作についてモデルを持っている必要がある事が判明した。このような知識は対象のモデルとか深い知識とか呼ばれ、いわゆる症候論的知識とは異なるものである。

しかし問題は深い知識すなわちこのような体液調節系の生理に対する知識をどの様な形で表すかである。著者らは、始め体液調節系の数理モデルをエキスパートシステム内に装備させ、これを深い知識として利用する方法を試みた。すなわち、症候論的知識では明確な結論が得られないとき、診断を体液状態の推定の逆問題と見なし、微分方程式をはじめとする数理モデルを用いて観測値から内部状態を求め、また安全問題に関してはこの数理モデルをシミュレータとして使用できることを試みた。

しかしこの試みは臨床的には殆ど不可能である。その理由は、体液平衡の数理モデルを駆動出来るだけの情報量を日常の臨床データは含んでいない。すなわち数理モデルのパラメータを臨床的可観測量からでは決定できない点にあった。つまり、数理モデルの状態記述能力は簡潔かつ厳密であるが、データの質やその適用に関して厳格な拘束条件があり、定性的で曖昧性の高い臨床データを処理し切れない。これに対して医師がこのような不完全な臨床データから診断を行っているのも事実である。ここで医師が用いている方法論は生理的・病態生理的機序の因果的变化に対する定性的な知識に基づく推論で、いわば生体機構に対する定性的なモデルによる思考シミュレーションが利用されている。定性的表現による状態記述は一般に曖昧かつ冗長であるが、適用する機序およびデータの質について拘束条件が弱いので、このモデルは生体のように因果的にはある程度明確に分かっても数値的に再現性のない機構に関する推論や臨床的観測のような不完全なデータの処理には適している。

著者らは以上の見地から、近年注目を集めているde Kleerあるいは Kuipersら[2]の定性推論法のパラダイムに基づいて医師の生理・病態生理機構に対する動的推論をモデル化する事を試みた。しかし定性推論法は現在いまだ発展しつつある理論であり、開発者によって細部が異なり、また必ずしも生体の動的機序の表現に充分でない。そこで著者らは主にde Kleer-Kuipers型の定性推論のパラダイムに準拠しつつも、システムの挙動を従来の挙動推論 (envisionment) より高い立場すなわち状態遷移表現に対する動態構造論的な立場から検討する方法論を開発した。この方法は系の構造記述から任意の抽象レベルの状態遷移図を生成することが可能で、また動態推論がメタレベルから制御可能となるため階層的な構造を持った定性推論システムを構成する事ができる。したがって、定性推論の基本的問題点である因果理解による挙動推論および大規模システムの近似定性推論などに対して統一的な取扱が可能である。本研究では、これを体液・循環調節系の部分システムの定性的シミュレーションに適用し、とくに系の時定数の違いをメタレベルで考慮した階層的推論への有効性を確かめた。

2. 構造可制御型定性推論システムAslanの原理

著者らの定性推論システムは基本的にはde Kleer-Kuipers型の定性推論のパラダイムのうえに立ちつつも動態構造論的な立場から挙動推論を捉え直し、これに構造制御可能性を持たせたものである。著者らの定性推論システムAslan (A States diagram generation system based on the Logical Analysis; Dec 10 Prologで約3000行のシステム) は、このような構造可制御性をもった定性推論の基本部分 (SQR: Simple Qualitative Reasoning Unit) と、さらに生体動態への適合性を増すために動態に対するメタ知識に基づいてより高い立場からSQRを制御するシステム (CQR: Complex Qualitative Reasoning) によって構成される。SQRにおける系の構造表現や動態推論時にお

る規範的原理は基本的には de Kleer- Kuipers型の定性推論と同等であるが、構造可制御性を持たせるため挙動推論の方法が全く異なっている。そこでまず従来の定性推論と基本的に共通な部分を述べた後、著者らの定性推論に対する動態構造論的な立場から従来の定性推論を批判し、セル分割法による挙動推論の原理を述べる。

2. 1 単純定性推論の基礎概念

単純定性推論 (SQR) では、時間に関して解析的な変数 x に関する動態を定性的に推論する。SQR では変数 x は自律系に従うと限定する。すなわち、本来は微分方程式

$$d x / d t = f (x) \cdots \cdots (A)$$

に従うが、系に対する定量的情報が不完全なためその動態を系に対する定性的情報から推定するものとする。従来の定性推論では初期条件を与えて動態推論を開始するが、著者らのシステムでは、まず定性微分方程式から生成可能な定性状態の遷移構造を全てもとめる。したがって初期条件からの遷移に関しては、これと無矛盾な遷移構造内の定性状態を探索し、その状態からの遷移を追跡する。このため初期条件は不完全でもよく初期時点の定性値の部分集合あるいは全く与えなくてもよい。また以下で定性微分方程式をマルコフ型表現 (A) の左辺のみに一階の微係数が現れる) に限ったのは、定性値の伝播方向を微分関係の方向にとって系の因果方向に一致させ、backtrackをさせないためである。

(1) 定性状態の定義

定性状態は、系の全変量の定性値と定性微分値によって定義される。

1. **定性値**： 定性値は記号的に定義された landmark (特性値) との大小関係で定義される。量の表現としては、Kuipersでは landmark 値 あるいは区間で示されたが、Aslanでは個々の landmark との大小関係でこれを示した。したがって変数 P の定性値は全 landmark l_i に対する大小関係より、
[量の名前, [l_1 , 差の符号], [l_2 , 差の符号],]

で表現される。ここで差の符号変数は、変数 P が l_i 上にある時には

$$[p, [l_i, s ("00")]]$$

のように表し、 l_i より大のときは "0<" で、小のときは "<0" で記述する。以下の説明では、表記の簡便上 x の a に対する符号変数を [x]。という形式で記述する。添字がない場合 $a=0$ である。

2. **定性微分値**： 変量が増加しているか、定常であるか、減少しているかをあらわす。これも Aslan では符号変数を含んだリストであらわす。たとえば

$$[量の名前, [deriv (s (符号))]]$$

である。論文中では ∂x としてこの符号変数を表す。

3. **定性状態のモード**： 定性状態は状態遷移の特性によって2つのモードに分けることができる。すなわちその定性状態が、瞬間としてしか保持できないか、一定の時間区間持続できるかである。ここではこれを

point (瞬間) と interval (区間)

に分類する。point (瞬間) とは、定性値が landmark 上にある変量が少なくとも1つある系の状態をいう。

4. **定性状態**： 定性状態は系の全変量の定性値と定性微分値の組みで表される。また、定性状態は次のような状態リストの符号変数の組みで表現される。

$$[[量1, [deriv (s (符号))], [基準値1, s (符号)], \dots]$$

$$[量2, [deriv (s (符号))], [基準値1', s (符号)], \dots]$$

.....

$$[量n, [deriv (s (符号))], [基準値1'', s (符号)], \dots]$$

6. **高階の定性微分値**： Aslan では変量の導関数を定性変量として登録することができる。したがって、たとえば x' を定性変量とすると2次微分値 x'' まで考慮した動態推論が可能になる。同様に x'' , を定性変量として採用するとさらに高階の微係数を考慮した状態区分を行うことができる。

7. **未知 landmark の創出**： 例えば y' を定性変量とすると、 $y' = 0$ ($\partial y = 0$) は定性変量 y' の定性値としての landmark で、このとき系の定性状態は瞬間モードとなる。この場合 y の定性値は特定化されていないから、対応する y の値を適当に定義すれば Kuipers の言う新しい landmark の創出に当たる。

(2) 定性推論の構造記述

単純定性推論は、2つの部分すなわち構造記述部と動態推論部よりなる。構造記述は、さらに2つの部分よりなる。1つは量空間の定義である。具体的には定性変量の宣言および landmark の宣言に関係する定数宣言の部分である。他は、系の定性的記述すなわち定性微分方程式である。

<量空間の定義>

landmark は単に変数の値域の一点を指す名前として扱われるので、landmark間の情報すなわちその順序関係や演算関係も登録しておく必要がある。ただし、“0”と“1”は四則演算の単位元なので、特別扱いされる。

<定性微分方程式>

定性変数間の相互関係を記述するもので、拘束条件として四則演算、微分関係、単調関係、特徴的非線形性がある。

a)四則演算：変数間の四則演算（+、-、×、÷）である。しかし、演算の意味はlandmarkに対する大小関係の拘束である。例えば $x + y = z$ は、この拘束条件を満たすlandmarkの組を $x_0 + y_0 = z_0$ とするなら、 $[x] x_0 = +$ 、 $[y] y_0 = +$ のとき $[z] z_0 = +$ などの関係がある。

b)単調関係：原点を通る狭義の単調増加関数 $M^+(x)$ および単調減少関数 $M^-(x)$ を定義することができる。Aslan では $M^+(x)$ は inc_mono（関数名、独立変量、従属変量）で、 $M^-(x)$ は dec_mono（関数名、独立変量、従属変量）で記述される。

c)特徴的非線形関数：2次関数 $U^+(x, u)$ や $U^-(x, u)$ （ u は極値）、3次関数なども必要なら利用することができる。Aslan ではたとえば $U^+(x, u)$ は u_plus（関数名、独立変量、従属変量、独立変量極値、従属変量極値）で記述される。

d)微分関係：定性的な微分関係は次の形で与える。

$$dx = y; \quad [y] = + \quad \text{なら} \quad \exists x = +, \text{ など。}$$

定性微分値が拘束条件で記述されている変量は定性値の因果解析で中心的な役割を果たす。著者らの初期システム Q U A R K [3] では定性微分値はこの変量から伝播解析を始めた。さらに Aslan では、陽に微分関係式で与えられる関係だけでなく、 $x + y = z$ などの加減拘束条件も1階微分を取り、 $dx + dy = dz$ という拘束条件として利用している。

d) その他の拘束関係：定数との不等号関係など。

<初期条件に対するコメント>

Aslan では後述するように状態遷移図を生成することで挙動推論を行う。それゆえ初期条件は挙動推論に必要ではないが、状態遷移図上を辿る軌跡のhistoryを決定する時、出発点を与える。基本的には接続解析の一種であり、初期条件と無矛盾な定性状態が出発点として採用される。

(3) 動態推論の基本規範

定性状態間の遷移可能性を限定するのは次の規範である。

<定性積分あるいは定性的平均値の定理>

t を現状態、 t' を次状態の瞬間または区間とすると符号変数記法では

$$[X(t')] = [X(t)] + \exists X(t) \cdot \dots \cdot (B)$$

である。たとえばある定性状態 0 を特徴値として $[X(t)] = +$ であり、定性微分値 $\exists X(t)$ が増加すなわち $+$ ならば次状態は $+$ であるということを表している。

<連続性・解析性の仮定>

定性的変量は量空間の隣接した定性値（区間またはlandmark）にしか移行しないという規範を与えることができる。これは実連続関数の変化の連続性に対応してするもので、たとえば 0 が特徴値ならば定性値が $+$ から $-$ に移行する事はなく必ず 0 を次の状態としてとる。従って定性状態間の遷移可能性による結合は局所的である。

<状態変化の先決性の順位に関する定理>

系の変量が次状態へ変化する時の到達順序に関する性質がモードによって異なる。これは符号変数の次状態の変化に対する拘束条件になる。

瞬間モードにある場合：このモードで現在landmark上にある変量は、次の瞬間にはlandmarkを離れ区間領域に移行している。この時、瞬間モードで区間領域にあった他の変量は瞬間的に移行した次状態ではまだ前の定性状態に留まっている。

区間モードにある場合：系の全変量が区間領域にあるため、変量により次状態では次の特徴値に移行する、区間領域に留まる、などの場合が考えられる。しかし、少なくとも1つは次状態で特徴値上に移る。

すなわち、系は不連続変化が外部入力によって強制されないかぎり、系の定性状態は「区間モード」

と「瞬間モード」を交互に取る。ここでは、これをPI遷移（瞬間→区間）、IP遷移（区間→瞬間）と呼ぶ。

<拘束条件—定性微分方程式の利用>

定性積分、連続性の公理、区間—瞬間遷移則で現在の定性状態から遷移可能な定性状態の候補が決定される。定性微分方程式は、それを構成する演算要素ごとにみれば、2項あるいは3項関係の拘束条件で、取り得ることが可能な入出力変量の定性状態の組合せがある。移行する定性状態の候補の中からこの拘束条件に合うものが選択される。

<共時変量の特徴値同時到達性>

変量の間には関数関係たとえば、 $y = M^+(x)$ [M^+ は単調増加関数]のように1方の変量がある特徴値 1_x に到達したら他の変量も 1_y に到達するという関係にある変量の組がある[ただし $1_y = M^+(1_x)$]。この関係を満たさない次状態は採用されない。Aslanでは挙動推論を始める前に状態変数リストを構成するが、この時、四則演算拘束条件、単調関数拘束条件、微分拘束条件のすべてにわたって共時的関係にある符号変数を調べ、同一符号変数あるいは反転符号変数としてユニファイしておく。

2.2 従来の挙動推論の問題点と動態構造論による定性推論

(1) 従来の挙動推論の問題点

従来の定性推論では上に述べた構造記述表現と動態推論の規範的原理および初期条件から一括して将来の定性状態のhistoryを生成する方法が取られている。de Kleer-Kuipersのアルゴリズムでは、この過程は(1)状態内解析あるいは伝播解析および(2)状態間解析あるいは予測解析とよばれ、全変量の現在の定性状態を構成したあと、全変量の次状態を構成する方法が取られている。KuipersのQSIMのようにgenerate and testでこれを一段階で済ませているのもあるが全変量を一括して逐次次状態を生成して行くことには変わらない。このような一括simulator方式は幾つかの問題点を持つ。基本的な問題点は動態推論の過程で推論制御が出来ないことである。このことは次の点で定性推論の発展を妨げる。

1) 定性推論は実在のontologyから挙動推論を組み立てる。このため推論方式は基本的には、de Kleerのno-function-in-structure (機能非前提型構造記述)原理や局所性の原理に従い、bottom upに個々の拘束条件から合成的に系全体の動態を生成する。しかし系に対する知識は局所的な条件に限らない。たとえばエネルギー保存則のような大局的な拘束条件は動態推論の曖昧性を減じるのに役立つ。従って、これらの条件をメタレベルから導入可能な形に動態推論を構成する必要がある。

2) 定性推論で扱う系の拘束条件には詳細度に関して階層が存在する。従って系のある部分構造は統合して一つの拘束条件とし、他の部分構造はそこに注目してその部分の動態推論を詳細に展開したい場合が多い。de Kleerではこれをpush a levelと呼んで状態の概念を細分割する方法を提示しているが、彼の方法ではその度毎にモデル(confluence)を立てる必要がある。最初にモデルを記述すれば、系の任意のlevelで定性推論を展開する、すなわち「注視の制御」の機能をもった定性推論の必要性は高い。これに対し、一括型の定性推論では動態推論が平面的である。

3) 定性推論では拘束条件を取り込む順序を人間の因果理解の方向に近付けようとする。その意味では、系に対する構造分析から因果の序列を決定したあと、この因果の経路に従って動態推論を行う必要がある。また演算を効率化するために順序を制御する必要性も高い。このため拘束条件を取り入れる順序をメタ知識から制御できる構造の必要である。

著者らは動態構造論的立場から以上の必要条件を満たす挙動推論のアルゴリズムを構築した。

(2) 挙動推論に対する動態構造論的アプローチ

著者らの挙動推論アルゴリズムの基本的立場は、推論された系の動態が状態遷移図の構造と等価であるという見方にある。したがって、

「動態推論とは、記述された系の拘束条件の構造(System Structure Topology)

を状態遷移図というグラフ構造(Dynamics Structure)に変換させる構造間写像である。」
と考える。動態推論を与えられた系の構造から状態遷移図の構造への写像と考えることで、動態に対するメタ制御は状態遷移図の生成レベルでの操作に帰着される。状態遷移図は区間状態と瞬間状態よりなる有限有向2部グラフであり、動態推論に対する高い立場からの制御は、状態遷移図のグラフ構造論的性質に対する演算となる。また「動態の同型性」などの概念は、この有限有向2部グラフの構造論的性質から定義でき、動態の近似、詳細化、分割はすべてそれぞれに対応するグラフ論的操作に変換できる。この立場でここでは定性推論の動態構造論的立場とよぶことにしよう。この立場に立つと、挙動推論とはグラフとしての状態遷移図の逐次的な展開操作と定義できる。この立場を具体的に実現したのがセル分割法による挙動推論である。

(3) セル分割法(CDM; Cell Division Method)による状態遷移図の生成

セル分割法は状態遷移図の逐次次元増加型の生成アルゴリズムである。その基本は、系の全変量ではなく部分変量の定性状態のみで状態遷移図を構成するという点にある。Aslanでは全変量の定性状態を状態リストでもっているが、部分状態表示では取り入れられない変量はその符号変数がバインドされていないままで用いられる。セル分割法とはこのような部分状態遷移図構造に新たな変量を逐次取り込むことによって状態遷移図を拡張して行く方法である。また展開した状態遷移図の部分

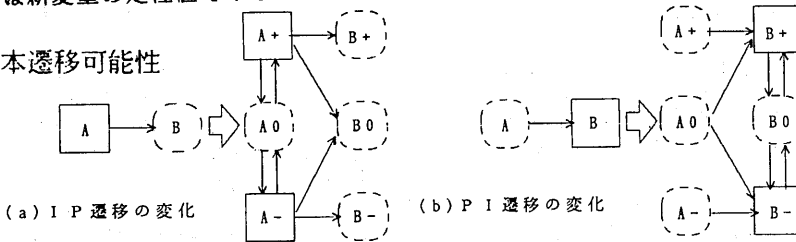
統合してより簡約的な状態遷移図を生成することもできる。拡張して行く過程を展開 (refinement)、統合する過程を縮退 (coarsening) と呼ぶ。本方法は、

- 1) 任意の詳細度で状態遷移図を生成できる。
 - 2) 低次元の変量で可能な遷移を調べて置けば後で次元を増やした時、低次元で不可能な遷移は調べなくてもよいという効率性を持つ。
 - 3) 次に取り込む変量を指定でき、各段階で拘束条件を取り込む順序が任意に指定できる。
- などの利点を持ち、挙動推論の過程を外部から制御可能なアルゴリズムである。

アルゴリズム

- ①最初の状態遷移図は「完全不定状態」という一状態よりなる。
- ②これにあらたにその動態を推論する変量を加えると、定性値の値の数だけ分裂する。この時定性推論の区間・瞬間モードの区別を導入する。
- ③この部分状態遷移図に新たな変量を取り入れる時の状態遷移図の分裂に関しては、2つの段階を踏む
 - (1)定性推論モードによる規則：新しい状態は、導入された変量とこれまでの変量の定性状態間の直積としてもとまる。しかし、定性状態のモードによって、新状態間の遷移可能性が異なる。これを展開における最初の拘束条件とする。これは定性状態をA, BとするとIP遷移、PI遷移で基本的には図1の様になる。ここで点線で囲んだ状態は瞬間、実践で囲んだ状態は区間である。+、-で表されているのは新変量の定性値である。

図1 基本遷移可能性



(2)定性微分方程式による規則：セルが分割後の遷移可能性を制約する条件には新定性状態に関する動態推論の拘束条件(2.1.(3)節参照)を利用する。とくに定性積分の定理と定性微分方程式の拘束条件が基本制約条件として用いられる。

④以上の過程で遷移可能性の制約がすべて満たされたら、次の変量を取り込むか(①へ)あるいはこれまで展開した状態遷移図を縮退させる。この場合は展開過程で遷移可能性が詳細なレベルで限定してきているので、これを縮退させてもこれまでの展開過程の途中で得られた状態遷移図より遷移可能性が制約されている。

変数の選択順序に関しては、通常の連立方程式の解法で用いられる方程式と変数の2部グラフに関するDulmage-Mendelsohn分解が利用できる。フィードバックに関してde KleerのMythical Causalityと同じような順序で行うためには、帰還点をいったん切って伝播した後に帰還点の値の一致させればよい。

以上が、セル分割法による挙動推論の基本アルゴリズムである。このような基本アルゴリズムを組み合わせて定性推論の近似、詳細化、分割などの推論制御が可能になる。たとえば、もし系が階層構造や部分構造を持つ場合は、セル分割の最初を複数個の始原状態から出発し、それぞれの階層や部分の動態をあらわすように出来る。その後の過程は、それぞれで②から④まで同じである。このような利用法についてはCQRとの関係で詳しく述べる。このセル分割法は次のような場合は一括型の挙動推論に比べ、推論の高速度化、効率化をもたらす。すなわち、

- (1) 定性微分値が定性値の組み合わせで定性微分方程式より一意に決まる、
- (2) 定性微分と区間-瞬間遷移則が組み合わせさって一意遷移性をもつ、
- (3) 最小完全集合 (minimum complete set [4]) を持つとき

一括型に比べ効率が高くなる。結局ほとんどの場合で効率化が行われることになる。

例題

微分方程式 $x'' + ax' + bx = 0$ ($a, b \geq 0$) は、パラメタ a, b の関係によって減衰振動、単振動、指数的減衰の挙動を示す。これはマルコフ型の連立定性微分方程式

$$x' = y - ax \dots \textcircled{1}, \quad y' = -bx \dots \textcircled{2}$$

に変形でき、ここではこれに動態推論にCDMを適用する。この場合 landmark は0のみである。CDMの過程は図2のようになる。(a)は x のみを考えた場合、(b)は y も考えた場合である。ここまでは何の制約もないが、(c) y' を考えると②の拘束条件から y' の値が一意に決まり(上記(1)の条件)、状態分割は行われない。また y' の値が決まるので、定性積分の定理(B)により y の増減の方向が決まり前段階までの遷移不定性も減る。次に x' を考慮して分割する。①より x' の符号が一意に決定

される(c)の定性状態たとえば $(x, y, y') = (-, 0, +)$ は分割しない。結局 $(-, -, +)$, $(+, +, -)$ のみが分割して13状態となる(d)。この間の遷移可能性はIP遷移、PI遷移規則により制約可能である。また x' の定性値が決定するので定性積分の定理によって x の遷移方向を限定できる。(d)まで展開したあと (x, y) レベルまで縮退させると(d)でメッシュで囲んだ部分が1状態となり、典型的な2次系の状態遷移図ができる。

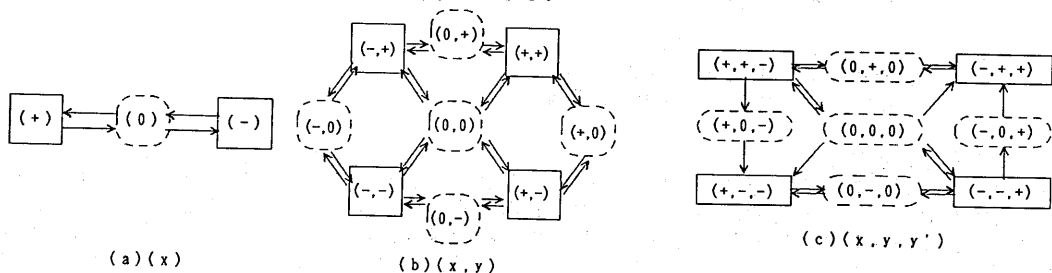
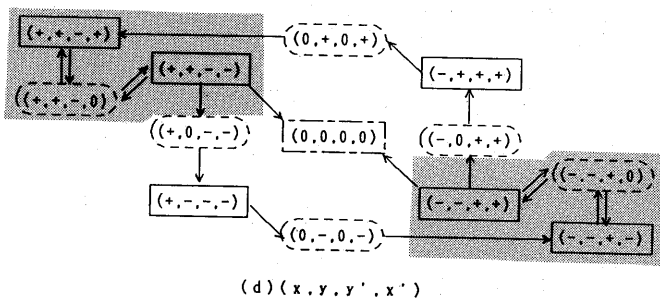


図2 セル分割法の例題



(4) 複合定性推論CQRとの統合

我々はSQRの動態推論を逐次制御可能な形式に構成した。これを制御する上位系は複合定性推論部として構成される。AslanではSQR単体でも実行は可能であり、この場合は、ユーザがCRT上に現れた部分状態遷移図をみて次ぎに取り込む変量を指定すると一段階詳細化した部分状態遷移図が表示される。ユーザはこれを見ながらその他の操作を指定できる。さて、SQRでは時間に関して解析的な変数の変化のみを扱った。したがってCQRで必要になる機能は、

- (1) 定性微分方程式が不連続になる境界条件の処理
- (2) Step入力などの外部入力の強制的な不連続性の処理である。

である。(1)の場合は定性変数の定義域によって定性微分方程式が構造変化する場合で、この時は、その境界を越えて移行した場合の接続条件が問題となる。CQRは各領域につき1つずつ完全不定状態を与えて状態遷移図を展開させるので、両者の状態遷移図が境界で接する時での接続可能性についてメタ知識が必要とされる。これには他の変数の連続性に関する知識が必要であり、この接続条件を満たした定性状態が遷移可能として境界を越えて接続される。このCQRの結果の状態遷移図はハイブリッドオートマトンになっている。(2)の場合は入力に同時に変動する変数とこれに積分関係を介してつながる変数を区別して初期状態を別に与える必要がある。この2つの初期状態から発した状態遷移を次状態で接続解析によって連結する。しかし、CQRの役割は本来、推論制御の機能にある。

(3) 動態の近似、部分展開、分割

が主である。以下では、複雑なSQRを近似して2つの部分に分割して、解を後で接続して近似する例として、「速度適応」型の近似すなわち系を速い部分と遅い部分に分け、これをCQRとして統合する例を示す。

3. 体液調節系への適用と「速度適応」

CQRの単純な例として生体系の簡単な系のシミュレーションを行う。例として体液調節系を考える。問題点の指摘と解決策の提案はこの例にそって行い、説明する。

以下の g_i 等の関数は全て原点を通る狭義の単調増加関数である。

体液調節系は極めて複雑であるが、基本的には次のような仕組みになっている。水分の量の変動がアルドステロンを通してナトリウムイオンの排出再吸収に影響する。また、ナトリウムの濃度の変動はADHを通して尿の量の調節により、補償される。以上の知識を定式化すれば、次のように表せる。

$$dn/dt = g_1(w_0 - w)$$

; n: ナトリウムイオンの量
 ; w: 体液量
 ; 腎機能: アルドステロンによるナトリウムイオンの再吸収
 ; w₀: 体液量の平衡値

$$dw/dt = g_2(n/w - c_0)$$

; 腎機能: ADHによる尿量の調節
 ; c₀: ナトリウムイオン濃度の平衡値

応答速度を考慮した近似解

上の表現では、両者の応答の速さを方程式の中に取り込むことができていない。従ってこのままでは、非現実的な解を生成する可能性がある。事実応答速度を考慮せず、方程式をまともに解いた場合、水ナトリウム負荷の初期条件に対し、25状態からなる状態遷移図が得られた(図3(a))。この状態遷移図は著者らの初期システムQUARKでも得られている。図3(a)にはナトリウムイオンを含む水を生体に負荷したとき、すなわち $n > n_0$, $w > w_0$ の初期条件に対する接続解析の結果が書かれている。しかし、ここには非現実的な振動解が現れている。これは、最初の定性微分方程式では系に対する知識が不十分であるからである。生体系に共通して言えることは、各機能の速度が大幅に違うことである。前述の系以外にも、血糖値制御系や血圧制御系等、生体内の制御はほとんどがこうした性質をもっている。こうした情報が与えられれば、このような系では、短期間には変化の遅い反応の変数を定数で、長期間では収束の速い変数を遅い反応の単なる関数で近似してより現実的な挙動が推論可能である。

応答速度を考慮してCQRに速い変数群(w)と遅い変数群(n)を指定すると、CQRは記述された系を変換して速い方程式と遅い方程式を作る。速い系では遅い変数は、定数として扱う。遅い系では速い変数は平衡方程式で拘束される。

従って、速い系の定性微分方程式は、

$$n = \text{const.}$$

$$dw/dt = g_2(n/w - c_0)$$

$$c = n/w$$

遅い系は定性微分方程式は、

$$dn/dt = g_1(w_0 - w)$$

$$n/w - c_0 = 0; \text{平衡方程式}$$

となる。

速度適応におけるCQRの推論制御

CQRではこの2つの方程式を別々に挙動推論し後で遷移可能性に関して接続解析する。速度適応で、主方程式系となるのは遅い系の方である。その理由は、時間スケールが大きい方の動態が系の大局的構造を決定するからである。それゆえ遅い系の方が動態推論に対して抽象度の高い階層にある。これに対して速い系は、いわば大局的構造に「注視の制御」を行って部分を詳細化した時の動態推論である。時間領域的な見方から言うならば初期条件から遅い系の応答へ移行するまで不連続性の瞬間を拡大した時の動態である。従ってCQRの働きは、まず遅い系の状態遷移生成から始まる。

(1)遅い系では速い変数cが既に平衡に達した状態が拘束条件として登録されている。c(=n/w)はナトリウム濃度を表し、これは実際の生体では浸透圧にほぼ等しい。従ってcが平衡値c₀にあるという拘束条件は、等浸透圧を保ちつつ「準静的」にn/w=c₀の関係で、nとwが変化することをあきらめず。このためwとnはここでは共時変量となり、定性微分値の符号は、互いに反転してバインドされる。従ってセル分割法でnにwを加えても系の状態は増加しない。遅い系の∂n、∂wは定性微分方程式によって定性値より一意に決まるので状態の分割をもたらしさないが、遷移可能性を限定する。平衡値はw=w₀すなわちn=n₀で、n>n₀、n<n₀の各状態からこの平衡値へ移行する。

(2)速い系では遅い変数は定数となる。nの各状態内で変数wとcが変化する。両者は、nが一定の速い方程式系では逆数関係にあり互いに共時変量で、やはり両者の定性微分値の符号は反転してバインドされる。従って速い系のセル分割ではcにwを加えても次元は増えない。また速い定性的微分方程式の制約によりc'やw'の方向が決まりc=c₀への遷移のみが残される。

(3)nの各状態に対する速い系を接続して近似状態遷移図が出来上がる。図3(b)には(a)と同じ初期条件(n>n₀, w>w₀)のときの遷移の流れおよび(c)に一階微分まで考慮した時の時間応答を示す。となる。CQRではこの2つの方程式を別々に挙動推論し後で遷移可能性に関して接続解析する。この場合は速い系の平衡値から遅い系の各状態への接続解析が可能である(図3(b))。図3(a)と同じ初期条件に対して得られた状態遷移図は図の通り5状態しかなく、解の可能性が大幅に削減された。

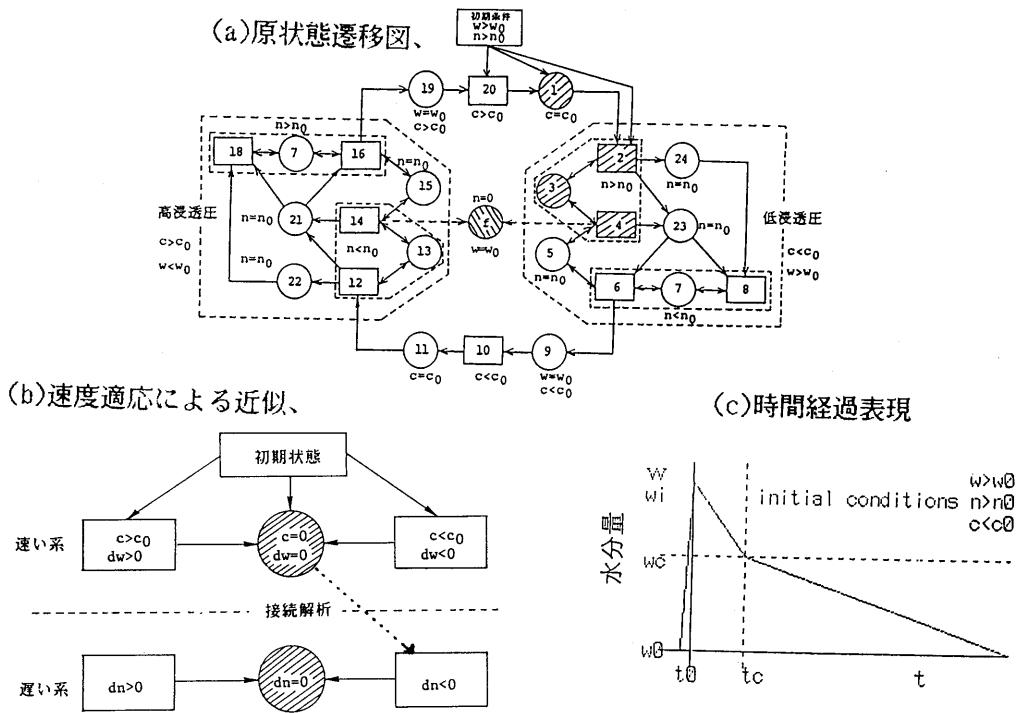


図3 体液調節系の定性推論

まとめ

状態遷移図生成に対するセル分割法を考案し、接続解析を行う上位定性推論系のもとに挙動推論の近似、詳細化、統合化を制御できる定性推論システムAslanの構造と生体系への応用を述べた。ここで例示した「速度適用」は、de KleerのMytical Causality (架空因果性)の概念やKuipersのHierarchical Qualitative Reasoningと同様な指向を持つものである。すなわち遅い系のレベルから見れば速い系は「見えない」すなわちgrain levelの時間が経過しないわけであり、de Kleerの状態内挙動あるいはMytical Time (架空時間)の経過と同様の概念を表す。またKuipersが大規模系を挙動の時間スケールでabstractionし、それぞれのレベルでの挙動を階層的にsimulationしている方法は速度適応と同一の方向を目指すものである。しかし、彼らの定性推論はあくまでも時間領域でのsimulationを基本としており、一括型で挙動推論が平面的なため、挙動推論をメタレベルから制御する推論系の構築法に対するformalismが明確ではなく、またそのような系も構築されなかった。著者らは、挙動推論を直接、状態遷移図の生成過程として捉え挙動推論への制御は、状態遷移図の構造への操作であると考えることによって、simulation型でない挙動推論のアルゴリズムを構成することによって、メタレベルからの動態推論制御を可能にする自然なformalismを構成しえた。さらにこの立場は、状態遷移図をそのグラフ論的構造から捉える観点を可能にし、これによって推論された動態をさらに高い立場から類別する視点を与えるもので、動態の構造に対するアナロジー理論などの発展に寄与するものと思われる。

— 参考文献 —

- [1]S.Hara,H.Tanaka and T.Furukawa, "Fluid Therapy Consultation System(FLUIDEX)", Autome dica, vol .7, 1/17(1986)
- [2] Artificial Intelligence, Special Issue on Qualitative Reasoning about Physical Systems,vol 24(1984)
- [3]田中博: 定性推論とその応用、SICE知識工学研究会資料KE-2、1/6(1986)
- [4]Y.Iwasaki and H.A.Simon, " Causality in Device Behavior ", Artificial Intelligence, vol 29, 3/32,(1986)