

対象系の分割を用いた定性推論

7J-4

坂根 清和, 大木 優, 澤本 潤, 藤井 裕一
(財) 新世代コンピュータ技術開発機構

1. はじめに

従来の定性推論システムの多くは、対象系全体の挙動を同時にシミュレーションするため、大規模な対象系の定性的挙動を推論できない。この問題点を解決する目的で、局所的挙動の時間スケールの差に着目した階層化[1], [2]が報告されているが、この方法は構造情報を用いた大規模な系の挙動推論には有効でない。本報告では、構造や性質に関する経験的知識に基づいた定性推論の対象系の2つの分割法を提案し、これら2分割法の定性推論の計算量の減少効果を定式化し、適用条件について考察する。

2. 対象系の構造・性質の経験的知識に基づく分割法

定性推論では、対象系の局所的な構造知識を法則・原理レベルで記述して定性的モデルを構築し、許容される全ての挙動を推論する。しかし、大局的な制御知識が記述されないため、変数の変化順序などの曖昧さのため多くの状態を生成して、膨大な計算時間と作業領域が必要となり、大規模対象系の挙動推論が不可能となる。

一方、我々が多くの部品や部分から構成される大規模な系の挙動を考える場合には、系の構造・性質に関する経験的知識を用いて、系全体をモジュール化する。各々の分割された部分系の挙動を個別に推論し、それらを統合することにより系全体の挙動を求める。このような経験的知識に基づいた対象系の分割を定性推論に用いることにより、人間の常識的推論における推論制御の実現が可能になる。

上記の考察に基づき、2種類の定性推論の対象系の分割法を提案する。

2.1. 方法1-各構成要素の独立性に注目した変数の分割

独立性の強い(即ち、部品内部の構成要素相互間に密接な関連性があるが、他の部品との間の関連性は弱い)部分から構成される対象系を考える。このような対象系は、単一の部分系にのみ属する変数を、その部分系の内部変数として割り当て、複数の部分系間の入出力を共有変数とすることにより、疎な結合を持つ部分系に分割可能である。各部分系の入力値に対する挙動は独立に推論でき、推論結果は共有変数を通じて他の部分系に伝播される。

2.2. 方法2-各コンポーネントに適用可能な法則・原理等の範囲に注目した部分系への分割

各部品が異なる物理分野の法則・原理に基づいて設計され、動作する対象系を考える。この場合、適用すべき物理法則の領域の等しい部品同士を集めて部分系にまとめることにより、対象系は分割可能である。各対象物に適用可能な法則の範囲は限定されるので、各部分系に含まれる対象

物の種類も限定される。異なる領域の物理法則相互間には関連性が少ないので、対象系は互いに関連性の少ない部分系に分割されて、各部分系の挙動は独立に推論できる。

3. 分割による計算量減少効果

次にICOTで開発中の定性推論システムQupras[3]に分割法1を用いて挙動推論する際の計算量減少効果を、表1のW等分モデルを用いて定式化する。分割法2及び他の定性推論システムへの適用効果は[4]を参照されたい。

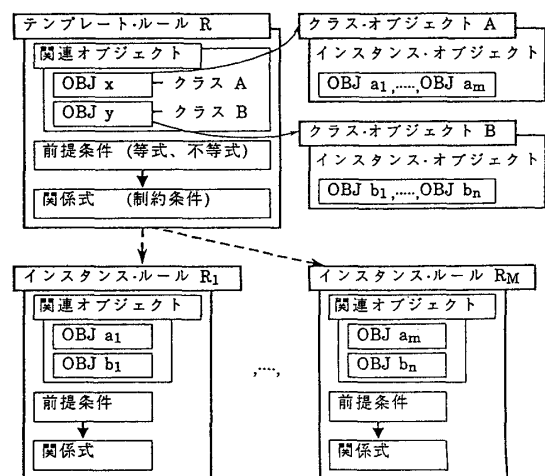
表1. Quprasの推論過程における分割モデル

	分割無し	分割法1 (W等分)
(各部分系毎に)		
テンプレート・ルールの個数	S	S
各クラス・オブジェクトに含まれるインスタンス・オブジェクトの個数	K	K/W+f
伝播解析過程の繰返し回数	R	R'
伝播解析過程で7タイプになるインスタンス・ルールの個数	F	F'/W
変化中の変数 z_i の個数	N_z	N_z/W

- r: 各テンプレート・ルールに含まれるオブジェクトの個数 (r=2)
- f: 複数の部分系に属するインスタンス・オブジェクトの個数
- c1: 伝播解析で1ルールの条件式の成立をチェックするリスト
- c2: 伝播解析で1ルールの関係式を解いて定性値を伝播させるリスト
- c3: 予測解析で1ルールの条件式から $\Gamma(z_i)$ を求めるリスト
- c4: 全変化中変数の $\Gamma(z_i)$ の1つの組合せの無矛盾性チェックのリスト
- Y: $\Gamma(z_i)$ に含まれる次状態の候補の個数の平均値

3.1. Quprasの知識表現とインスタンス・ルールの生成

QuprasはQPT[5]に類似した定性推論システムである。対象系は、定性的挙動の推論対象であるクラス・オブジェクトとオブジェクト間の制約関係を表すテンプレート・ルールで表現される。オブジェクトとルールは適用条件を持つ。



M: 生成されるインスタンス・ルールの個数 ; $M = m \times P_1 \times n \times P_1 = m \times n$

図1. Quprasの知識表現とインスタンス・ルールの生成

推論実行に先立って、各テンプレート・ルールに対して、インスタンス・ルールを生成する（図1参照）。生成されるインスタンス・ルールの個数は、

$$M = S \cdot (K/W + f)^2 / W \sim S \cdot K^2 / W \quad (1)$$

となり、分割によりほぼ $1/W$ に減少する。定性的挙動はインスタンス・ルールを用いて、伝播解析（既知変数値の未決定変数への伝播する）と予測解析（次の定性時刻における状態の予測）を交互に繰り返して推論される。

3.2. 伝播解析過程の計算量の減少効果

伝播解析過程では、全インスタンス・ルールの中で適用条件が成立つ（アクティブな）ルールを探し、その制約式を解いて定性値を伝播する。このサイクルを、新たにアクティブになるルールが無くなるまで繰り返す。

テンプレート・ルールは広範囲なオブジェクトに適用されるので、全インスタンス・ルールの中で伝播解析過程でアクティブになるルールは極めて少い。さらに式②、③を仮定すれば、伝播解析過程の計算量は④式に定式化される。

$$f \ll K/W \quad (2)$$

$$R' < R \quad (3)$$

$$C_p \sim c_1 \cdot S \cdot K^2 \cdot R/W + c_2 \cdot F \quad (4)$$

④式の第1項は適用条件が満足されるインスタンス・ルールを探索するコストである。生成されるインスタンス・ルールの個数が分割により減少するので、探索空間が縮小して、このコストも $1/W$ に減少する。第2項はアクティブなルールの制約式を解くコストである。分割によりアクティブになるルールの個数が変化しない限り減少しない。

3.3. 予測解析過程の計算量の減少効果

Quprasは各変数の境界値を定義する量空間を陽な形では持たないため、各変数の境界値はルールやオブジェクトの適用条件中の等式・不等式の形で表現される。予測解析過程では、変化中の各変数 z_i に対して、状態遷移規則を満たす次の時刻における変数 z_i の状態の候補 $\Gamma(z_i)$ を適用条件から求める。さらに、次状態の候補の全ての組み合わせに対して、無矛盾性をチェックする。予測解析過程の計算量は、不等式②を仮定すれば式⑤に定式化される。

$$C_d \sim N_z \cdot c_3 \cdot S \cdot K^2 / W + c_4 \cdot Y^{N_z} \quad (5)$$

⑤式の第1項は変化中の全変数の $\Gamma(z_i)$ を求めるコストである。第2項は無矛盾性チェックのコストであり、分割のみによっては減少しない。

4. 分割法が有効な条件

4.1. 伝播解析過程での分割法の適用条件

(1) 仮定②は各部分系の入出力変数の個数が内部変数の個数に比べて少ないことを示す。モジュール性の強い部品で構成される大規模系においては、通常成り立つ条件である。
(2) 伝播解析サイクルの繰返し回数が分割により増加しないことを示す仮定③は、分割された対象系のモデルが部分系間にフィードバック・ループを含まないという十分条件を導く。部分系間にフィードバックが存在すると、ループ内の部分系間の変数決定順序が直線的でなくなるため、同一の部分系内の伝播を複数回行う場合が生じ、繰返し回数が増加する。データフローが一方方向になるように設計された人工物においては、この条件は満足される。

(3) 分割で減少しない④式の第2項の影響を検討する。表1の W 等分モデルの各パラメータに適当な数値を代入して、分割数 W 及びアクティブになるルールの割合 $\alpha = F/S \cdot K^2$ をパラメータにした時の計算量の変化を図2に示す。図2より α が小さく、 K が大きいほど分割による計算量の減少は顕著である。この例では、 $\alpha < 0.1$ 、 $K > 30$ 程度であれば、計算量の減少はほぼ $1/W$ に比例する。従って、テンプレート・ルールの表現が汎用的でより広範囲のオブジェクトに適用可能であることが条件となる。

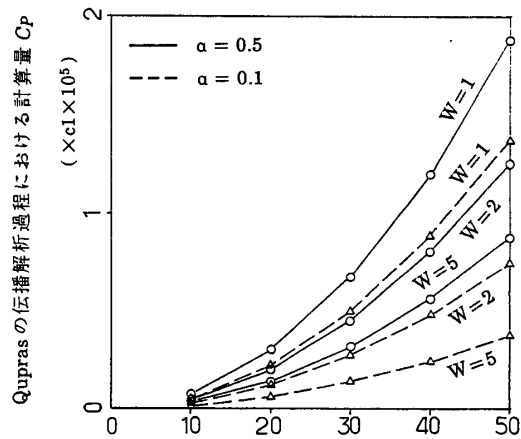
4.2. 予測解析過程での分割法の適用条件

⑤式に含まれる第2項は Y^{N_z} に比例するので、 N_z が増加すると組み合わせ爆発を起こす。従って、予測解析過程の計算効率を向上するには、次の時刻で変化する可能性のある変数を制限する必要がある。

対象系の分割はこの点でも利点を有する。全ての変化中の変数間の変化順序が与えられない場合でも、各部分系間の変数の変化順序は比較的容易に分かる場合が多い。（例えば部品Aは部品Bからの入力に追従可能な場合。）このとき、変化する変数の候補は、系の分割によりある部分系に属するごく少数に限定できる。

5. まとめ

本報告では構造や性質に関する経験的知識に基づいた定性推論の対象系の2つの分割法を提案し、この2分割法が独立性の強い部品から構成される、フィードバックを含まない大規模系の定性推論の計算効率の向上に有効であることを検証した。またこれらの分割は変数の変化順序の抽出にも有効であることを確認した。



各クラス・オブジェクトに含まれるインスタンスの個数 K
<方法1による W 等分分割モデルの各パラメータ値>
 $S=50, c_1=c_2, R'=1, K=10 \rightarrow 50, W=1 \rightarrow 5, \alpha=0.1 \rightarrow 0.5$

図2. Quprasの伝播解析過程における計算量

[参考文献]

- [1] B. Kuipers, Abstraction by Time-scale in Qualitative Simulation, Proceedings of AAAI-87 pp. 621-625 (1987)
- [2] H. Tanaka, Temporal-hierarchical Qualitative Reasoning and its Application to Medicine, Proceedings of Logic Programming Conference '88, pp. 11-17 (1988)
- [3] M. Ohki, Towards Qualitative Physics, ICOT-TR-221, (1988) (to appear)
- [4] K. Sakane, Methods for Partition of Target Systems in Qualitative Reasoning, ICOT-TR-392, (1988) (to appear)
- [5] K. D. Forbus, Qualitative Process Theory, Artificial Intelligence 24, pp. 85-168 (1984)