

記憶の階層性の基づくバブルネットワークによる

5R-7

述語論理仮説推論の高速化

大澤幸生

石塚満

東京大学工学部電子情報工学科

1.はじめに

論理に基づく仮説推論は、システムの故障診断や設計のような問題に直接適用できる実用的枠組みであるが、その非単調性による推論速度の遅さが最大の課題である。我々は先に、ネットワーク化バブル伝播法(NBP法)と名付けた仮説推論の多項式時間近似解法を開発した。さらに、命題論理だけでなく述語論理の仮説推論の問題も0-1整数計画問題に帰着可能であることを指摘したが、これをNBPに適用するには知識ベースの再帰構造によるネットワークの膨張が新たな課題となる。ここではこの点を解消する概念として記憶の階層性をとりあげ、長期記憶と短期記憶の情報の交換により必要な部分のみバブルネットワークを拡張する手法を提案する。

2.多項式時間仮説推論を達成するバブル伝播ネットワーク

0-1整数計画問題の高速解法をネットワーク化したバブル伝播ネットワーク（NBP^[1]）により、命題論理仮説推論を多項式時間で近似的に実行できる。これはNP完全な仮説推論の準最適解を多項式時間($O(n^2)$)で求める手法で、掃き出し補数法^[2]において最も時間がかかる掃き出し操作を特に高速化した。具体的には、一つのホーン節にあたるノード□によってこのホーン節に現れる命題のノード○を結合したネットワークの上で実数真理値の伝播を行う。黒塗りのノードは真理値が0又は1に落ちていた状態を表すので、○が全て●となる時点を目標とする。

例えば図1でノードAの黒い色をノードCに伝播させると、仮説推論のルールと等価な0-1整数計画問題の不等式制約を満たしたまま命題ノードCの真理値を1.0とすることができます。NBPは、掃き出し補数法に知識構造の利用機能を併せ持つ仮説推論法である。

Predicate Logic Hypothetical Reasoning using Bubble Propagation Network based on the Hierarchy of Memory
Yukio Ohsawa University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

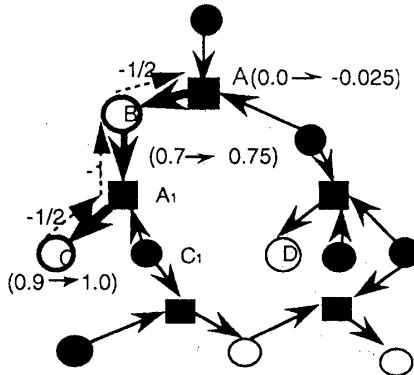


Fig.1. Truth value propagation of NBP.

3.述語論理仮説推論への拡張

数理計画法の延長では命題論理の仮説推論の枠を越えられないとされていた。これに対し我々は先に、述語論理の仮説推論についても0-1整数計画問題の形で問題を定式化できることを見いだした^[3]。従って、NBP法による命題論理同様の高速解法が得られる。

述語論理のホーン節は、変数間の関係に課された制約と見なすことができる。例えば例1のルール2では、前件のhとgのそれぞれ第2, 第1変数が等しい値(Z)をもつとき、X, Yが結論のgに代入実行される。

例1: Background (1&2&3): 1) g(X,X):- h1(X).

2) g(X,Y):-h2(X,Z),g(Z,Y) 3) h1(X):-h2(X,X).

Goal: g(a,X).

Hypotheses: h1(b), h1(c), h2(a,b).

知識ベースをRange restrictedとすればホーン節は、前件変数(X_1, X_2, \dots, X_n)の等号条件からバインディングの伝播を起こす「代入スイッチ」と等価となる。そのON/OFFをUの1/0と対応付けると、このスイッチは次の制約不等式と等価となる（Zは補助変数）。

$$n-1 \leq (n-1)U - \sum_{i=1}^n X_i + 2(n-1)Z \leq 2n-3. \quad (1)$$

代入スイッチは図2の形をとる。ビットベクトルで表した変数値の各ビット値とUのANDをヘッド部の変数値とすることでバインディングの伝播を行う。この基本単位を組み合わせて知識ベースを構成する。

ただし、結論が同一の述語記号を持つホーン節はまとめて一つの単位とする。例えば、例1のルール1&2をまとめた単位を図3の様に簡単に記述する。

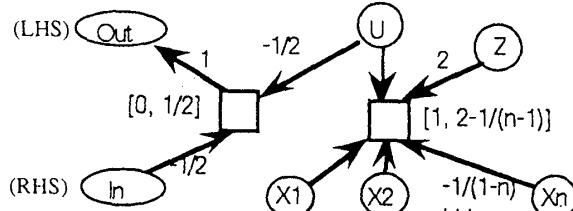


Fig.2. Instantiation switch

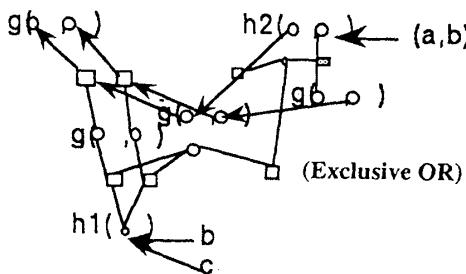


Fig.3. Equivalent bubble sub-network of each rule

4. 短期記憶と長期記憶からなるダイナミックなネットワーク化バブル伝播法

実際には単位の組み合わせ方がボトルネックとなっている。前件と結論に同じ述語記号を有する再入的(reentrant)な知識を単位の周期構造で表すと、知識ベースでは記述が短いルールも膨大なネットワークとなる。これを避けるために記憶の階層性の定式化、即ち長期記憶と短期記憶の連動が有効である。

長期記憶における各ホーン節の独立

長期記憶として蓄えられた知識ベースから、推論中に必要な単位のみ取り出して連結する。バブル伝播ネットワークの単位間の連結は容易であるので、推論に使用するネットワークが不必要に大きくなるのを防ぐ効果がある。

短期記憶の生成

長期記憶から取りだして結合したネットワークを短期記憶と呼ぶ。短期記憶はNBPが推論に失敗すると、その途中結果から必要と思われる新しい単位を長期記憶から受取る。従ってネットワークは一様に拡大するので、推論に後戻りの要素はない上にほぼ必要最小限の大きさにおさえられる。この様に推論において重視する部分を動的に変化させる手法としては^[4]などがあるが、メモリ縮小、計算速度向上の観

点からは短期記憶の情報からネットワーク拡大の効率を最適化する本稿の考え方方が有効となる。

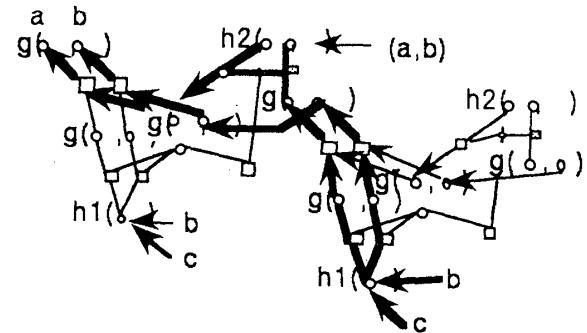


Fig.4. Extended network for Example 1.

現時点では、再帰構造を含む比較的小規模の述語論理知識ベースを対象とした実験を行っており、ここに述べた短期記憶の拡大により効率よく推論が行えるという結果を得ている。簡単な例として、例1の問題は図3だけでは推論に失敗し、図4のネットワークに拡大してはじめて解“h1(b)&h2(a,b)”を得る（太線部が推論の根拠）。ここで、ルール3にあたる単位は短期記憶が不要と見なすので付加されず、推論の根拠を含む最小限のネットワークを生成している。

5. 結論

ネットワーク化バブル伝播法を述語論理に適用する際、ネットワークが不必要に膨張しないために記憶の階層性に着目した手法を提案した。固定された知識ベースに内在する多様な意味を効率よく抽出する立場の知識リフォーメーションといえよう。

<参考文献>

- [1] Ohsawa, Y., Ishizuka, M.: NBP-Method as a Polynomial-time Hypothetical Reasoning for Computing Quasi-optimal solution, IEEE-TAI'93, pp.184-187
- [2] Balas, E. & Martin, C.: Pivot and Compliment -- A Heuristic for 0-1 Programming, Management Science, 26, pp.86-96 (1980)
- [3] 大沢幸生, 石塚満:述語論理に適用できるネットワーク化バブル伝播法による多項式時間仮説推論の達成, JSAI'93 pp.83-86 (1993)
- [4] Hasida, K.: Dynamics of Symbol Systems - An Integral Architecture of Cognition -, Proc. Int'l Conf. on FGCS, 2, pp.1141-1148 (1992)