2D−1

ネットワーク化バブル伝播アルゴリズムを用いた多項式時間仮説推論の達成

大沢　幸生　　石塚　満

1.はじめに

仮説推論は，不完全な知識を仮説として扱う非単調推論系の一つで，診断や設計問題に適用できる，実用性においても重要な枠組みである。しかし，その最大の課題は低い推論速度である。ここでは，要素仮説に重みを付し，与えられたゴールを証明するために必要な要素仮説の重みの和（線形コスト）最小になるような解仮説を求める仮説推論について考える。これを0-1整数計画法に帰着すると，近似解法によって多項式時間で準最適解を求められる[5]。我々は，この方法を新しいネットワークとして再構成したアルゴリズムを示したが[6]、これによりさらに高速な仮説推論手法が得られることを示す理論、実験結果について述べる。

2.仮説推論

紙面の都合から仮説推論の説明は他[1,2]にゆずることにし，詳細は記述しない。簡単に枠組みを要約すると，推論木（ネットワークを含む）の葉ノードとして仮説を与え，ルートのゴール節を真とする仮説の組み合わせのうちコストの最小のものを求める問題がここでの議論の対象である。ここで，矛盾する仮説は同時に解としてとることが出来ない。以下は[3]の簡単化を施した後の高速推論手法について述べるが，その計算複雑さはNP完全またはNP困難な問題に属する。

3.掃き出し補数法を用いた高速解法

ここで扱う仮説推論を0-1計画問題に帰着することによって、0-1計画問題の高速解法との対応が得られる。

3.1.仮説推論から0-1計画問題への帰着

ここでは，与えられた仮説推論の問題を空間探索に置き換える変換の記述法を述べる。ホーン節で与えられるルールと論理和を用いたその合成について変換結果を示す[6]。

$$Y \leftarrow X_1 \wedge X_2 \wedge \cdots \wedge X_{n-1} \wedge X_n \quad (1)$$

$$Y \leftarrow X_1 \vee X_2 \vee \cdots \vee X_{n-1} \vee X_n \quad (2)$$

$$\frac{x_1+x_2+\cdots+x_{n-1}+x_n-n+1}{n} \leq y \leq \frac{x_1+x_2+\cdots+x_{n-1}+x_n}{n} \quad (3)$$

$$\frac{x_1+x_2+\cdots+x_{n-1}+x_n}{n} \leq y \leq \frac{x_1+x_2+\cdots+x_{n-1}+x_n+n-1}{n} \quad (4)$$

(1),(2)がそれぞれ(3),(4)に置き換えられる。
（両辺の係数を1/nと等しくした点に意義がある。4節参照）
更に，XとYが矛盾する場合は，(3)でy=0とする。

以上のような不等式を満足する0-1真理値の変数集合が(5)式で表される評価関数を最小にする0-1整数計画問題にもとの問題が帰着される。

$$cost = c_1x_1+c_2x_2+\cdots+c_{n-1}x_{n-1}+c_nx_n \quad (5)$$

3.2.整数線形計画法の高速解法（掃き出し補数法）

NP完全問題に対して指数オーダの時間の壁を破るには近似解法が必要となる。掃き出し補数法では，多項式オーダ(n^4)の時間で最適に近い準最適解を高い確率で導くことに成功している[4]。　基本的には実数最適解を多項式時間で求め，これを探索の初期点として多様体の縁伝いに掃き出しによって*SEARCH PHASE*を実行する。これに加えて*SEARCH PHASE*の後半と*IMPROVEMENT PHASE*において整数の変数値の補数（0／1の反転）を3つまでとって改良を行う。我々はこの方法を適用した仮説推論の高速解法[5]によって多項式時間で準最適解をを得ている。

4.ネットワーク化バブル伝播法

上記の掃き出し補数法をネットワーク上で実現し，しかもさらに計算時間が短縮できるネットワーク化バブル伝播法（NBP）について述べる。

<NBPのメカニズム>

NBPの基本的な概念を示す。黒く塗りつぶされたノードが不等式における境界値（等式成立），又は0あるいは1の真理値をとる命題に対応するノードである。

NBPでは真理値を連続な実数の範囲で変化させることにより推論を行う。この操作は，ネットワーク上で「黒」を「白」と交換させることによって伝播させ，最終的には全ての○を●としたあと評価関数の改良を行う。

定義（ツリー構造の場合）

○ノード□ノード　○は各命題ノード、□はANDまたはORノード（色が変化しても同じ）を表す。

指数深さ　ゴールからあるノードまでの分枝数の積。

影響度　当該ノードの変域の上限又は下限と現在の値との差を指数深さで割った比。ノードの値の変化は影響度に比例した大きさで伝播する。

有向リンク　次の規則に従った操作を繰り返し全てのリンクの依存関係向きを決定する。

● 接する全てのリンクを外向きにする。

□ 接する全てのリンクを内向きにする。

○ 接する一つが内向きになると，これを除く全てのリンクを外向きにする。

■ 一つを除く全てのリンクが内向きになると、残りを外向きにする。

伝播パス　当該■ノードから有向リンクにそって至る全てのノードとその有向リンクの集合。

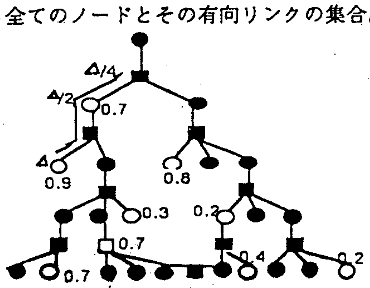


図1.NBPの構造とメカニズム

Polynomial Time Hypothetical Reasoning using Networked Bubble Propagation Algorithm
Yukio OHSAWA and Mitsuru ISHIZUKA
University of Tokyo

次に大まかにNBPのメカニズムを述べる。
各黒ノードを含む伝播パス上の全ての白ノードの指数深さ，影響度を計算し，影響度最小のものと交換を行う。このうち，最良のの交換を選択する。これらの交換によって●ノードが増えずかつ非整数度3）が減らない場合，まるめを行い，実行可能解を見いだせなければ○ノードで影響度最小のものと交換を行う。最後に、全ての○が●となれば3つまでの補数により改良する。
単結合の場合、○ノードの選択が容易に行われるので探索時間が掃き出し補数法より大幅に短縮される。ネットワークが閉グラフを含み複雑になると、伝播パスが一意に決定できず，実行不可能に陥う。

5.ネットワークが閉グラフを含む場合への拡張

上記のループ生成による推論速度の低下を防止する為に考案したネットワークの２段簡略化について述べる。一例を図2に示す。前節での手続きだけでは太線の矢印に含まれるリンクに伝播パスを張ることが不可能である。

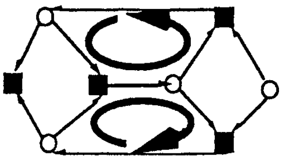
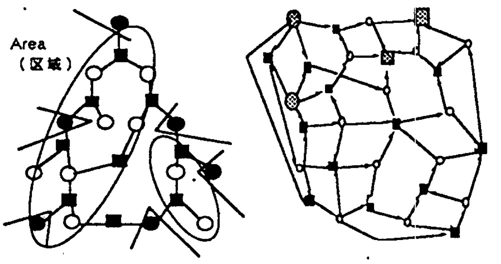


図２．伝播パスを一意に決定できない場合

5.4.ネットワークのエリア分割

図3で，楕円形で囲まれた部分をエリアとよぶ。一つの○エリアは，○と，隣接する○が２つのみである■を含み、一つの■エリアは，■と，隣接する■が２つのみである○を含む。この分割がそれ以上不可能となるまで繰り返す。各エリアでループが存在しない。作為的な大規模なユニットに対してこれを行うと，ネットワークの大きさは最終的にもとの約14.4分の１に縮小される。



第１段階の簡略化　　第２段階の簡略化
（エリア分割）　　（グループ分割）
図3．ネットワークの簡略化

5.5.ネットワークのグループ分割

次に，第２段階の簡略化を行う。ここでは，複数の○を仮に始点としL個の有向リンクを張り，グラフ全体を覆うまでこれを繰り返す。L行L＋１列の行列演算によって，全ての反転した■の変化量を０とするように，全ての○の変化量の比を求める。これが影響度に当たる。ユニットの大きさを考慮すると，ここでも所要時間は定数と考えてよい。

5.6.NBPの計算時間

掃き出し補数法を用いた結果が問題の規模の４乗程度の計算時間を得たのに対し，NBPではこれが２乗程度になり大規模な仮説推論に適した解法であると考えられる。このことから、現時点までに得られている結果は一般的なＣＳＰにもあてはまるものであると予想される。即ち、

（基底にすべき非基底スラック変数の個数）
＊（一つの非基底スラック変数に対する基底構造変数の比較数～定数
＋最良の基底構造変数への入れ替えにおける評価関数の変化～定数）
＊非基底スラック変数間の評価関数変化の比較　(6)

で与えられる計算時間のうち、定数項として部分ネットワークをとりいれたが、これは仮説推論に限定されるものではない。

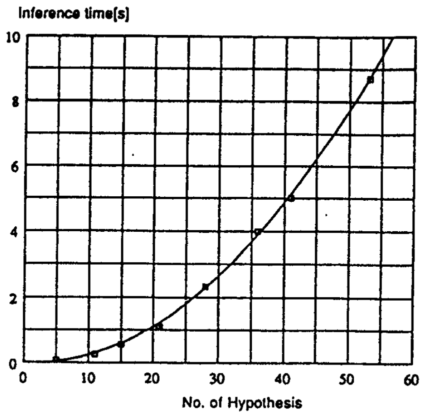


図４．NBPによる仮説推論時間

5 結論

仮説推論の計算速度を向上させることを目的とし，ネットワーク上の実数真理値伝播を行う新しい手法を提案した。これは多項式時間の推論が保証される近似解法で，その理論上の実行時間の最悪値は掃き出し補数法による仮説推論の実行時間を上回る。

参考文献

[1]石塚：次世代エキスパートシステムへ向けて，エキスパ　ートシステム（石塚,小林（編著））,丸善,第７章(1991)
[2]石塚：仮説推論,日本ファジイ学会誌,Vol.4, N0.4, pp.620-　630 (1992)
[3]伊藤，石塚：推論パスネットワークによる高速仮説推論　システム　V01.6,No.4,pp.501-509(1991)
[4]E.Balas & C.Martin:Manag.Sci,26,pp.86(1980)
[5]岡本, 石塚　情処研究会資料AI-81-7(1992,3)
[6]大沢，石塚　情処研究会資料AI-85-4(1992,11)