二分決定グラフを用いた仮説推論処理の一手法

1D－2　原 耕治　加藤 昇平　世木 博久　伊藤 英則
名古屋工業大学

1 はじめに

仮説推論は仮説という常に成り立つとは限らない知識を扱う高次推論の一形式であり，これまでさまざまな研究結果が報告されている [1]．しかし，その計算量が極めて大きいことから，いかにして効率よく推論を行なうかが重要な課題となっている．

一方で，二分決定グラフ (Binary Decision Diagram: BDD) は論理関数表現の一手法であり，論理演算を効率よく行なうことが知られている [2]．また，Zero-Suppressed BDD (ZBDD) は組合せ集合を効率よく表現するため提案されたものである [3]．

そこで，本研究では ZBDD の効率的な論理演算処理を用いた仮説推論処理方法を提案し，実験を行なう．その際，通常の BDD を用いた場合との比較を行ない，仮説推論において ZBDD を用いることの有効性を確認する．

2 コスト付き仮説推論

本研究では，命題論理ホーン節で表現された知識ベースを対象とし，それに含まれる各仮説に正の数の重み (コスト) が与えられた場合について考える．

定義 2.1 $\mathcal{F}$を命題論理ホーン節集合 (事実の知識ベース)，$\mathcal{O}$をアトムの連言 (観測)，$\mathcal{H}$を基底単位節の集合 (仮説集合) としたとき，以下の条件を満たす$\mathcal{H}$の部分集合 h を $\mathcal{O}$の $\mathcal{F} \cup \mathcal{O}$による説明と呼ぶ．

$\mathcal{F} \cup h \vdash \mathcal{O}$	($\mathcal{F} \cup h$ から $\mathcal{O}$が証明可能)
$\mathcal{F} \cup h \not\vdash false$	($\mathcal{F} \cup h$ が無矛盾)
h のコスト総和が最小	□

ここで，$\mathcal{F}$は常に成り立つ知識として扱われる．一方で，$\mathcal{H}$の部分集合は$\mathcal{F}$と矛盾する可能性がある．従って$\mathcal{H}$に対する無矛盾性制約として，例えば $false \leftarrow A_1, \cdots, A_k$(アトム $A_1, \cdots, A_k$が同時に真となるとき矛盾) の形をした節集合を用いて無矛盾性の検査を行う．

3 ZBDD

BDD は論理関数をコンパクトに表現する一手法である．主な特徴としては，多くの実用的な関数を比較的コンパクトに表現できること，論理演算がノードに比例する時間で実行できることなどがある．

ZBDD は変数集合が未定であっても組合せ集合が効率よく表現できる BDD として提案されたものである [3][4]．BDD が論理関数を表現するのに対し，ZBDD は (組合せ) 集合を表現する．

本研究では，ZBDD (組合せ集合) 間の演算に以下のものを使用する．ただし，EとCは組合せ集合である．

(1) 制限演算 (Restriction)

許容された組合せを求めるために使用するもので，以下のように定義される．

$F \triangle C \equiv \{\alpha \in F \mid \exists \beta \in C, \alpha \supseteq \beta\}$

(2) 除外演算 (Exclusion)

禁止された組合せを排除するために使用するもので，制限演算を用いて以下のように定義される．

$F \triangledown C \equiv F - (F \triangle C)$

4 ZBDD を用いた仮説推論処理

本研究で提案する仮説推論は，**4.1** ～ **4.3** の処理から構成される．ZBDD を用いた場合と通常の BDD を用いた場合で処理が異なるのは **4.2** のみである．

4.1 前処理：部分計算

一般に，知識ベースは観測に無関係な節も含んでいる．これらは推論を効率よく行なうために必要ないものであり，なんらかの方法で排除すべきである．そこで，本研究では部分計算によってこの処理を行なう．部分計算を用いて，複数の節からなる知識ベースを1つの論理式に簡単化する．その結果生成される論理式には，仮説以外の変数 (命題記号) や観測に無関係な仮説は含まれない．

例 4.1 以下に示す節集合 F_0とゴール節$\leftarrow a_1$が与えられた場合，a_1の F_0に対する部分計算後の論理式は，仮説アトムのみから成るゴール節 $[\leftarrow ((h_5, h_3, h_4, h_1) \vee h_2).]$ となる．

●節集合 F_0	●ゴール節
$a_1 \leftarrow a_2, h_1.$	$\leftarrow a_1.$
$a_1 \leftarrow h_2.$	
$a_2 \leftarrow a_3, h_3, h_4.$	
$a_3 \leftarrow h_5.$	

□

なお，この計算量は単純な代入計算であるため，実験結果が示すように全体の計算量と比較してほとんど無視できる．

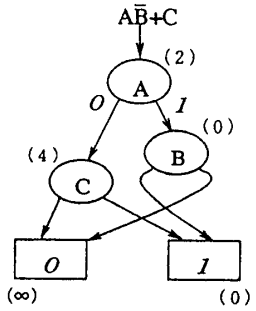
4.2 ZBDD の作成と最小コスト経路探索準備処理

ZBDD を用いた場合と BDD を用いた場合では処理が異なり，ZBDD を用いた場合は，除外

Solving cost-based abductive reasoning using Binary Decision Diagrams
Koji Hara, Shohei Kato, Hirohisa Seki and Hidenori Itoh.
Nagoya Institute of Technology.
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466, Japan

演算 (部分計算の結果に対応する ZBDD) ▽(制約式) を実行し，禁止された組合せを排除する．一方，BDD を用いた場合は，apply 演算 [2] を用いて (部分計算の結果に対応する BDD) ∧(制約式) を求める．

どちらの処理に対しても，**4.3** において解を効率よく求めるため，apply 演算および除外演算に最小コスト経路探索準備処理を組み込み，経路情報付き (Z)BDD を作成する．すなわち，作成される (Z)BDD の各ノードに経路情報として，「そこから 1 節点に至る経路の最小コスト」を記録する．図-1 に経路情報付き BDD の例を示す．



仮説	コスト
A	2
B	1
C	4

図-1: 経路情報付き BDD

手続き 4.2 最小コスト経路探索準備処理

この手続きは，$X0_{cost}$ と $X1_{cost}$ を入力として，X_{cost} を出力する．ここで，X_{cost} はノード X の経路情報を，$X0_{cost}(X1_{cost})$ はノード X の 0 枝 (1 枝) が指しているノードの経路情報を表す．また，以下の (2) において，$cost(X)$ はノード X (仮説) のコストを返す関数である．

(1) X が定数節点 (1 節点または，0 節点) である場合

1 節点であれば 0 を，0 節点であれば ∞ を出力する．ここで，∞ はそのノードから 1 節点に至る経路が存在しないことを示す．

(2) $X0_{cost} = \infty$ かつ $X1_{cost} = \infty$ である場合

ノード X から 0 枝，1 枝のどちらを選択しても 1 節点につながる経路が存在しないので，∞ を出力する．

(3) それ以外の場合

$X0_{cost}$ と $(X1_{cost} + cost(X))$ で小さい方の値を出力する．

□

4.3 最小コスト経路探索処理

手続き 4.2 による BDD 各ノードの経路情報に基づき根から 1 節点へ至る最小コスト経路を求める．つまり，あるノード X においては，「0 枝が指しているノードの経路情報」<「1 枝が指しているノードの経路情報 + X (仮説) のコスト」であれば 0 枝を，そうでなければ 1 枝を選択する．これを繰り返し，根から 1 節点へノードを下っていく．

求めた経路において，1 枝を選択したノード (仮説) の集合が解となる．

5 実験

本研究で提案した推論方式の有効性を確かめるため実験を行なった．なお，例題としては，**表-1** のような知識ベースをもつ全加算器論理回路の故障診断問題を用いた．

	節数	仮説数
例題 1	45	15
例題 2	89	30
例題 3	143	45

表-1: 知識ベースの規模

実験は計算機 SS5 (85MHz) 上で C 言語を用いた．また，同じ例題に対して「ZBDD」,「BDD」,「SLD 反駁による全解探索法」を用いた場合の推論時間を測定した．**表-2** に実験結果を示す．括弧内の数字は，部分計算に要した時間である．

	ZBDD (部分計算)	BDD (部分計算)	SLD 反駁による全解探索
例題 1	0.07 (0.04)	0.15 (0.04)	0.13
例題 2	0.61 (0.06)	1.96 (0.06)	8.22
例題 3	19.14 (0.08)	42.57 (0.08)	1087.67

(sec.)

表-2: 実験結果

ZBDD を用いることで通常の BDD の約半分の時間で処理を実行している．また，知識ベースの規模が大きくなるにつれ，ZBDD のノード数は BDD の 1/5〜1/10 程度になっている．つまり，ZBDD は BDD よりも探索空間をコンパクトに表現できている．

6 おわりに

本研究では，BDD の演算処理を用いたコスト付き仮説推論処理方法を提案し，実験によりその有効性を確認した．仮説推論においては BDD よりも ZBDD を用いることで，より効率的な処理が可能であると考えられる．

今後の課題としては，データ構造，変数順位，演算方法など仮説推論に向いた ZBDD について検討することが挙げられる．

参考文献

[1] 井上克巳, アブダクションの原理, 人工知能学会誌, Vol.7,No.1, pp.48-59, January, 1992.

[2] 湊真一, 計算機上での BDD の処理技法, 情報処理, Vol.34, No.5, 1993

[3] S.Minato, Zero-Suppressed BDDs for Set Manipulation in Combinatorial Problems, Proceedings of the 30th ACM/IEEE DAC, pp.272-277, 1993

[4] 奥乃博, 湊真一, 二分決定グラフによる制約充足問題の解法, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.8, 1995