

仮説に基づく推論における目標概念の学習と矛盾の学習との融合

3J-7

矢澤 利弘 篠原 靖志 寺野 隆雄

(財)電力中央研究所

1. はじめに

仮説に基づく推論は、比較的頻繁に使用される推論形態であるが、適切な仮説を選択するための計算量は少なくない。推論の効率を向上させる方式として、知識コンパイルなどの他に演繹学習がある。学習コストと個々の問題を解くコストの総コストを抑える点からは、演繹学習、特に説明に基づく学習(EBL)[1]が注目される。これは、例題として与えられた問題と同様の問題解決過程(証明過程)を経る類題が多いという問題の偏りを仮定し、予め与えられた問題領域の基礎理論を用いた例題の解法から、類題にも適用できる効率的な解法を比較的低い計算コストで求める。

本研究では、仮説に基づく推論の方式として ATMS [2]を用い、EBLに基づく演繹学習を組込み推論効率の向上を図る[3]。

2. 仮説に基づく推論の効率化

仮説推論においては、論理の非単調性ゆえ、類題による新事実の追加により矛盾が生じ、例題の証明木で前提としていた仮説が棄却される可能性がある。従って、学習結果には操作性規範を満たす述語に加えて仮説も残す必要がある。このようにして学習された推論規則では、操作性規範を満たす述語の成立の判定はすぐに行えるが、操作性規範を満たさない仮説の成立の判定は推論を進めないと行えない。従って、仮説の成立の判定が速くならなければ、学習による解法の効率化にはならない。

仮説の成立(すなわち無矛盾性)の判定は、全探索的な問題である。このため、逆に矛盾の成立の判定を速くすることで、全体として矛盾の不成立の判定を高速化することにした。矛盾の成立の判定を速くすることは、学習された推論規則の適用に限らず、仮説を含む推論規則全体の効率を向上することになる。このように、仮説に基づく推論においては、目標概念自身の学習よりも、矛盾の学習の方がより本質的である。

3. 仮説に基づく推論における矛盾の学習

例題(訓練例)によって矛盾の成立についての学習を行わせることを考える。基本的には、矛盾(\perp)をEBLでの目標概念に相当するものとする。仮説に基づく推論における矛盾の学習のためのアルゴリズムを以下に示す。

領域理論 : A:仮説の集合、J:推論規則及び事実の集合

操作性規範 Op:観測可能な事実の集合などの学習結果の規則が即座に適用可能となるために必要な述語の条件。

訓練例 Tr:ある事例において正しい事実の集合(入力)

学習結果:新たな矛盾推論規則(出力)

アルゴリズム:ATMSでの推論において、矛盾推論規則

$\alpha_1, \dots, \alpha_n \rightarrow \perp \in J$ が、 $\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_n$ と共に適用されて、矛盾 \perp が導出された時に適用される。

[1] 各 $\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_n$ の根拠 $J(\hat{\alpha}_1), \dots, J(\hat{\alpha}_n)$ の情報をたどり、矛盾 \perp の証明木を(仮想的に)作成する。証明木の終端ノードは、 $A \cup J$ の要素である。

[2] 証明木の内、訓練例 Tr に依存した変数の結合を持つ終端ノードと仮説のみを残してチャンク化する。チャンク化によって得られた規則は、その左辺に操作性規範を満たす述語と仮説のみを含まなければならない。

得られる規則の一般形はつぎようになる。

$$A_1, \dots, A_m, \beta_1, \dots, \beta_n \rightarrow \perp \quad (A_i \in A, \beta_i \in Op)$$

4. 簡単な論理回路への適用例

図4.1に示す簡単な論理回路を想定する。この時、回路の入出力からスイッチの状態を推定することを考える。

素子の型	スイッチ :swt(素子ID) ANDゲート:andg(素子ID)、ORゲート:org(素子ID)
入 力	1 入力素子(スイッチ) : in(素子ID, 入力値) 2 入力素子(ANDゲート, ORゲート) : in1(素子ID, 入力値)、in2(素子ID, 入力値)
出 力	out(素子ID, 出力値)
観 測 値	素子出力の観測値 : obs_out(素子ID, 出力観測値)
仮 説	スイッチ : swt_on(素子ID)、swt_off(素子ID)

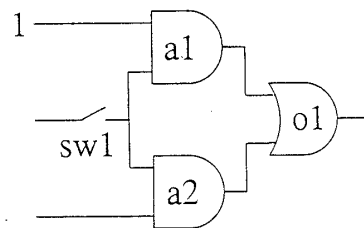


図4.1 論理回路の例

<領域理論> 回路についての推論規則や事実:

[素子のメカニズムを表す規則]:

$$swt(X), in(X, S), swt_on(X) \rightarrow out(X, S)$$

$$swt(X), swt_off(X) \rightarrow out(X, 0)$$

$$andg(X), in1(X, S1), in2(X, S2), and(S1, S2, S) \rightarrow out(X, S)$$

$$org(X), in1(X, S1), in2(X, S2), or(S1, S2, S) \rightarrow out(X, S)$$

[例題の回路の状況を示す規則]:

- 素子の型: $\text{andg}(a1), \text{andg}(a2), \text{org}(\text{or}1), \text{swt}(\text{sw}1).$
- 接続関係: $\text{in}1(a1, 1).$
 $\text{out}(\text{sw}1, S) \rightarrow \text{in}2(a1, S), \text{out}(\text{sw}1, S) \rightarrow \text{in}1(a2, S).$
 $\text{out}(a1, S) \rightarrow \text{in}1(o1, S), \text{out}(a2, S) \rightarrow \text{in}2(o1, S).$

[スイッチ状態の矛盾]: $\text{swt_on}(X), \text{swt_off}(X) \rightarrow \perp. \quad (C1)$

[観測値と理論値の不一致による矛盾]:

$$\text{obs_out}(X, S'), \text{out}(X, S), S \neq S' \rightarrow \perp. \quad (C2)$$

<仮説の集合> $A = \{\text{swt_on}(\text{sw}1), \text{swt_off}(\text{sw}1)\}$

<操作性規範>

利用者が知り得る値は、スイッチ $\text{sw}1$ の入力、論理積素子 $a2$ の下側の入力、及び、論理和素子 $o1$ の出力の測定結果である。

$\text{in}(\text{sw}1, S), \text{in}2(a2, S), \text{obs_out}(o1, S), \text{and}(X, Y, Z), \text{or}(X, Y, Z)$

<訓練例>

今、スイッチ ($\text{sw}1$)、論理積素子 ($a2$) のそれぞれの入力を 1 にした場合、論理和素子 ($o1$) の出力が 0 であった。すなわち、

$$\text{in}(\text{sw}1, 1), \text{in}2(a2, 1), \text{obs_out}(o1, 0).$$

この状況での矛盾の学習を考える。この訓練例においては、仮説 $\text{swt_off}(\text{sw}1)$ のみが訓練例を説明できるため、最終的に得られる解 context は次のようになる。

$$\text{swt_off}(\text{sw}1), \text{out}(\text{sw}1, 0), \text{in}2(a1, 0), \text{in}1(a2, 0), \text{out}(o1, 0).$$

この推論過程で、矛盾 \perp は 2 つの経路により結論される。

1 つは、(C1) によって直接 2 つの仮説 $\text{swt_on}(\text{sw}1), \text{swt_off}(\text{sw}1)$ が両立すると矛盾が生じることがいえる。この場合は、学習結果は (C1) そのものとなる。

もう 1 つは、(C2) によって、入力から計算される $o1$ の出力値と観測値との不一致により生じる。これを訓練例に依存しないように一般化すると、操作性規範による述語と仮説 $\text{swt_on}(\text{sw}1)$ によるマクロルール (L1) が得られる。

$$\text{obs_out}(o1, S'), \text{in}(\text{sw}1, SX), \text{swt_on}(\text{sw}1), \text{and}(1, S, Sa1), \text{in}(\text{sw}1, SY), \text{in}2(a2, S2), \text{and}(SY, S2, Sa2), \text{or}(Sa1, Sa2, So), S' \neq So \rightarrow \perp. \quad (L1)$$

ここで、書換規則

$$\begin{aligned} \text{and}(1, X, Y) &\Leftrightarrow X=Y \\ \text{in}(\text{sw}1, X), \text{in}(\text{sw}1, Y) &\Leftrightarrow \text{in}(\text{sw}1, X), X=Y \\ \text{and}(X, Y, Z), \text{or}(X, Z, W) &\Leftrightarrow \text{and}(X, Y, Z), X=W \end{aligned}$$

により、マクロルール (L1) を単純化すると、

$$\text{obs_out}(o1, S'), \text{in}(\text{sw}1, S), \text{swt_on}(\text{sw}1), S' \neq S, \text{in}2(a2, S2), \text{and}(S, S2, Sa2) \rightarrow \perp. \quad (L2)$$

すなわち、スイッチ $\text{sw}1$ の入力 S と論理和素子 $o1$ の出力の観測値 S' が異なる場合、スイッチ $\text{sw}1$ が ON である ($\text{swt_on}(\text{sw}1)$) と仮定してはいけないことが学習された。

5. 選言の導入による拡張

ATMS は、仮説の選言を主張することができるように拡張できる。このとき、'choose' オペレータ [2] が使用される。

$$\text{choose}\{C_1, \dots, C_n\} \Leftrightarrow C_1 \vee \dots \vee C_n$$

このような拡張が行われた場合、無矛盾性、完全性を確保するには、いくつかの hyper-resolution 推論方式が必要となる [2]。加えて、学習の効率化のために、次の推論方式を付加する。

$$\begin{aligned} \text{choose}\{A_1, \dots, A_n\} \\ \frac{A_i, \alpha_i \rightarrow \perp \quad \text{for all } i \neq n}{\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1} \rightarrow A_n} \dots \dots \dots (5.1) \end{aligned}$$

これらの推論方式は、仮説を含んだ矛盾推論規則を、仮説を含

まない正の推論規則に変換可能なことを示している。

仮説の設定を行う際、両立的仮説より、どれか 1 つが正しいという排他的な仮説集合を選択することが多い。従って、このような choose を含んだ体系での正の推論規則の学習は有効であると期待される。例えば、論理回路の例題においても、

$$\text{choose}\{\text{swt_on}(X), \text{swt_off}(X)\}$$

が成立している。従って、学習された矛盾推論規則 (L2) に対し、(5.1) を適用することで、正の推論規則 (L3) が得られる。

$$\text{obs_out}(o1, S'), S' \neq S, \text{in}(\text{sw}1, S), \text{and}(S, S2, Sa2), \text{in}2(a2, S2) \rightarrow \text{swt_off}(\text{sw}1). \quad (L3)$$

すなわち、「論理和素子 $o1$ の出力 S' と、スイッチ $\text{sw}1$ の入力 S が一致していない場合は、スイッチ $\text{sw}1$ は OFF である」という推論規則が学習される。

さらに、目標概念の学習と矛盾の学習とを融合させると、例えば、論理回路の例題において、同じ操作性規範、訓練例の下で、目標概念として $\text{in}2(a1, S)$ が与えられた場合を考える。

矛盾の学習を行わない際の学習結果は、

$$\text{swt_off}(\text{sw}1) \rightarrow \text{in}2(a1, 0)$$

となる。この推論規則は「スイッチ $\text{sw}1$ が OFF であるという仮説が成立すれば、論理積素子 $a1$ の出力は 0 である」ことを示している。この学習結果は仮説 $\text{swt_off}(\text{sw}1)$ の成立の判定を含み、推論の高速化には役立たない。しかし、矛盾の学習から得られた推論規則 (L3) と組合せることにより次の学習結果が得られる。

$$\text{obs_out}(o1, S'), S' \neq S, \text{in}(\text{sw}1, S), \text{and}(S, S2, Sa2), \text{in}2(a2, S2) \rightarrow \text{in}2(a1, 0). \quad (L4)$$

すなわち、「論理和素子 $o1$ の出力 S' と、スイッチ $\text{sw}1$ の入力 S が異なる時は、論理積素子 $a1$ の出力は、0 である」という正の推論規則が学習される。この学習結果は、仮説を含まず即座に適用可能な操作性規範を満たすものとなっている。

このように 'choose' による ATMS の拡張と推論規則 (5.1) の導入によって、仮説推論における目標概念と矛盾の学習とを融合させ、操作性規範を満たす規則の学習を行うことができる。

6. おわりに

仮説推論における機械学習では、目標概念の学習よりも、どの状況で矛盾が生じるかを学習することの方が本質的であることを示した。その際、操作性規範を満たす述語の他に仮説も学習結果の推論規則に現われることを許す必要があること、更に、選言の導入により、目標概念そのものの学習も行い得ることを示した。

さて、例題で示したように、ATMS における矛盾の学習では、1 つの訓練例から複数の学習結果 (矛盾導出規則) を得ることができるが、それらの間に冗長性を含む可能性が高い。ATMS は前向きの推論システムで、justification 情報を保持することで複数の証明木を同時に保持している。従って、この情報を利用して冗長性の少ない学習結果を得るための検討が必要である。

参考文献

- [1] Mitchell, T. M., Keller, R. M. and Kedar-Cabelli, S. T., "Explanation-Based Generalization: A Unifying View", Machine Learning 1, pp. 47-80, 1986.
- [2] de Kleer, J., "Extending the ATMS", Artificial Intelligence 28, pp. 163-196, 1986.
- [3] 矢澤, 篠原, "仮説に基づく推論における機械学習方式について", 電通学会 人工知能と知識処理研究会資料 88-28, 1988.