

Circumscriptionを用いた 概念学習

森 辰則 中川 裕志

横浜国立大学・工学部・電子情報工学科

内容梗概

J. McCarthyの提唱したCircumscriptionは例外事象を求め、知識の中に取り入れるという点で、学習の一方法と言える。Circumscriptionは一階述語論理を対象としているので、知識表現のための特別な論理体系を用意する必要がないという特徴を持つが、その反面、フレームなどのように構造化された知識を直接取り扱えない。本稿では、Circumscriptionの対象としてUranusの多重世界機構を用いて表現された階層構造を持つ知識を扱う方法について考察し、Circumscriptionを概念学習に応用する方法について考察する。多重世界による知識の階層化が例外事象を表すabnormal述語の最小化の優先順位の決定に利用できることが解った。また、この方法によれば各世界内の知識と世界の階層構造をCircumscriptionという統一した方法で学習することができる。

Conceptual Learning with Circumscription

Tatsunori MORI and Hiroshi NAKAGAWA

Department of Electrical and Computer Engineering

Yokohama National University

Tokiwadai 156, Hodogaya-ku, Yokohama, 240, Japan

Abstract

Circumscription, proposed by J. McCarthy, can be used for learning, because it unifies exceptions and a present knowledge base. However, Circumscription cannot handle a structured knowledge like the frame easily, since Circumscription was formulated to first order formulas.

In this paper, we propose an application of Circumscription to conceptual learning. We study how to do prioritized circumscription in an is-a hierarchy which represented with the multiple world mechanism of Uranus. We found that the hierarchical structure of a knowledge base is useful to determine an order of minimization of abnormal-predicates' extension. With this scheme, both intra-frame knowledge and inter-frame knowledge like a is-a hierarchy can be processed in a uniform way.

1. はじめに

不完全な知識を非単調な論理により取り扱うシステムは多少なりとも学習としての側面を持っているが、その中でもCircumscription¹⁾²⁾は対象を一階述語論理とした推論規則であるために知識を記述するための特別な論理体系を必要としないという特徴を持つ。しかし、Circumscriptionの対象となる一階述語論理では公理の存在する空間が単一であって知識表現で重要視される「知識の構造化」を効率良く実現できないという欠点がある。このような欠点を解消した知識表現を実現したものとしてはPrologの定義空間を多重化した電総研中島氏によるProlog/KR、Uranusがある。

本稿では、このUranusの多重世界機構を用いて表現された階層構造を持つ知識に対するCircumscriptionを考え、Circumscriptionを概念学習に応用する方法について考察する。多重世界による知識の階層化がMcCarthyが課題として残したabnormal述語の優先順位の決定に関する問題に対して一つの回答を与えることが解った。すなわち概念階層の上下関係から優先順位を決定できるのである。また、この方法によれば各世界内の知識と世界の階層構造をCircumscriptionという統一した方法で学習することができる。

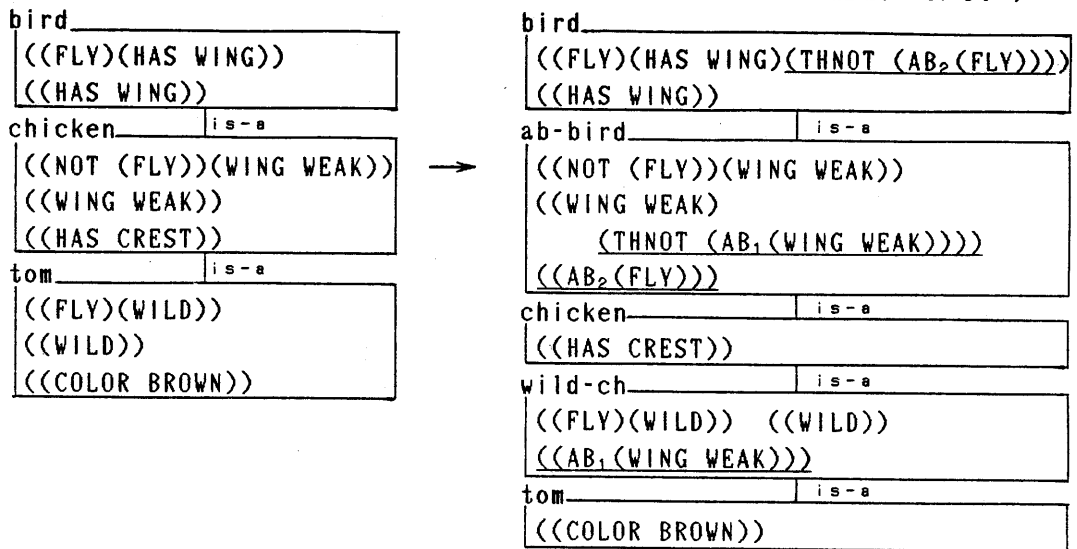
2. 矛盾の発見によるabnormal述語の導入

否定的な知識を表現するために本システムでは明示的、論理的否定NOTをnegation as failure すなわち証明論的否定THNOTの他に導入している³⁾。そのため、ある知識に関する肯定と否定が証明される、すなわち矛盾が発生することがある。一般に論理型言語にnegation as failureでない論理的否定を導入し矛盾の発生を監視するメカニズムを組み込むと効率上問題があることが知られている。しかし、矛盾の発見は新しい知識獲得の契機として位置づけられ、推論上重要な役割を果たしているので、論理的否定を導入することは不可欠であると考えられる。

後ろ向き推論を行なうUranusのような論理型言語では、否定を明示的に表現した場合、矛盾を発見するために、世界の階層が決定された上で、まずそのgoal自体を実行し、それが証明された後にそのgoalの否定が証明されるかどうかチェックするという方法を用いる。しかし、これをすべての述語について行なうと多大なメモリ空間と時間を要し、組み合わせの爆発を起こす。これを避けるために、我々は、Uranusにconsistency checkを行なうgoalをユーザが選択的に指定できるように、チェック述語Cを付加した³⁾。この述語に引数としてconsistency checkを行いたいgoalを与えて呼び出せばよい。もし、Cの引数であるgoalに矛盾が生じたときには、そのgoalの証明過程の情報をもってDependency Directed Backtracking (DDB)に入りその矛盾を解消する。それ以外は、通常のPrologの実行とかわりない。

ここで、矛盾の解消のプロセスを考えてみよう。まず証明された肯定・否定の知識のうちどちらが(矛盾の発生した世界で)誤りなのかを教師でもあるユーザに選択してもらう。選択された知識はこの世界にとっては例外的なものであると言える。次に矛盾の原因を探るために誤った知識を導出する過程で用いられた知識をユーザとの対話により調べる。その中の一つは必ず矛盾の発生した世界にとって例外的な知識となっている。矛盾の解消のためには、この原因となる知識がその世界では例外であることを示し、その知識がこの世界では成立しないようにすればよい。これを実現するためにMcCarthyの用いた例外情報を表すabnormal述

語を導入する。例えば次のように用いる。(但し、Uranusの記法による。)



(a) tom及びchickenで
述語FLYが矛盾

(b) 矛盾解消後

図1 abnormal述語による矛盾解消

図1(a)では世界tomと世界chickenにおいて述語FLYが矛盾しているので、次のようにconsistency checkを行うとDDBが起動され 先に述べたプロセスにより矛盾が解消される。(述語WITH-WORLDは属性継承を行った状態で第1引数に示された世界で第2引数の述語呼び出しを行う。)

(WITH-WORLD tom (C (FLY))) (2-1)

(WITH-WORLD chicken (C (NOT (FLY)))) (2-2)

例えば(a)で(2-1)を実行すると世界tomで (FLY)と(NOT (FLY))が共に証明されるのでDDBが起動される。世界tomでは(NOT(FLY))が例外であるとユーザにより選択されると、その証明過程である((NOT (FLY))(WING WEAK))あるいは((WING WEAK))に原因があるはずである。矛盾の原因として((WING WEAK))がユーザにより選択されたとすると (b)のように例外情報を与えることにより矛盾を解消する。

すなわち((WING WEAK))のように矛盾原因として選択されたclauseのbodyにgoal (THNOT (AB clauseのhead)) [ここでは (THNOT (AB₁(WING WEAK)))]

を加える。次に、その矛盾が証明される最も上位の世界にfact型の知識として

((AB 例外であるとしたgoal)) [ここでは ((AB₁(WING WEAK)))]

を与える。なお、世界ab-bird及びwild-chはDDBがユーザとの対話により生成した新世界である。世界ab-bird等にassertされるabnormal述語がfactとなっているのは後向き推論に基づく矛盾のチェックでは一回の実行につき一つの矛盾点だけが発見されるため、この矛盾のみを解消する。

3. 属性の継承のある階層的な知識表現におけるCircumscription

矛盾の発見を契機に例外情報を知識に取り込むという方法を第2章で提案した。しかし、人間の推論はそこでとどまらず、さらに一歩進んで例外の発見と同時にそれが何であることを認識している。Circumscriptionは正に、この過程をシミュ

レートしているのである。Circumscriptionは述語のextensionを最小化して求める方法を定式化しているので、この述語にabnormal述語を対応させて考える。

本章では階層構造を持つ知識表現において Circumscriptionを行う方法について述べる。まず、3.1節で 多重世界に記述されている知識を単一世界で表現する方法について述べる。3.2節ではCircumscription時に必要となる情報の抽出について考える。3.3節ではCircumscriptionの結果に基づいて概念世界を再構成する手法について述べる。

3.1 世界に関する情報の導入

Circumscriptionは 単一世界に定義された一階述語論理式に対する推論規則である。このため多重世界機構を用いて表現された知識において、ある述語をcircumscribeする場合には、一度、単一な世界の知識に表現しなおす必要がある。

そこで、ある概念世界に知識がassertされているとはどのように解釈できるか、その意味を考えてみる。例えば図1のように世界birdに((FLY)...)という知識がassertされている場合、((FLY)...)は世界birdとその下位の世界ab-bird... において成立する。このことは((FLY)...) が「birdに存在する」という事実を前提に持つことを示している。また、属性の継承については世界の階層の上下関係を含意関係と考えることができるので次のようなclauseが成立するものと考えればよい。

$$\text{ab-bird} \leq \text{bird} \quad , \quad \text{chicken} \leq \text{ab-bird} \quad \text{etc.} \quad (3-1)$$

なお、記号 $\leq$ は含意と同じ意味を持つ。

以上の考察のにより、多重世界にassertされた知識を次のようにして単一の世界の知識へと変換する。

- ① すべてのclauseについてそのclauseの定義されている世界名を前提としてbodyに加え、単一の知識ベースとする。このclauseの意味は「すべての前提(body)が成立し、かつ示された世界に存在する時に帰結(head)が成立する。」である。

- ② 世界の階層構造を(3-1)のように含意で表現し、知識ベースに加える。

例えば、図1の知識構造は次の知識ベースと等価だと見なせる。(一部省略)

$$(\text{HAS WING}) \wedge (\text{THNOT}(\text{AB}_2(\text{FLY}))) \wedge \text{bird} \leq (\text{FLY}) \quad (3-2)$$

$$\text{bird} \leq (\text{HAS WING}) \quad (3-3)$$

$$(\text{WING WEAK}) \wedge \text{ab-bird} \leq (\text{NOT}(\text{FLY})) \quad (3-4)$$

$$(\text{THNOT}(\text{AB}_1(\text{WING WEAK}))) \wedge \text{ab-bird} \leq (\text{WING WEAK}) \quad (3-5)$$

$$(\text{WILD}) \wedge \text{wild-ch} \leq (\text{FLY}) \quad (3-6)$$

$$\text{ab-bird} \leq \text{bird} \quad \text{chicken} \leq \text{ab-bird} \quad \text{wild-ch} \leq \text{chicken} \quad \text{etc.}$$

図2 多重世界による知識から単一世界の知識への変換

3.2 Circumscriptionに必要な情報の抽出

前節で述べた方法で単一世界へと変換した知識をcircumscribeするためにはclauseに付加する世界の情報の他に次のものが必要である²⁾⁴⁾。

- ① circumscribeするべきabnormal述語の名前
- ② abnormal述語を最小化する際の優先順位
- ③ Circumscriptionの過程で変化を許す述語の名前
- ④ に関しては矛盾の解消時にabnormal述語を導入するのでチェックするのは簡

単であるが他の二つはヒューリスティックな情報を利用しなければならない。

3.2.1 abnormal述語の最小化の優先順位

abnormal述語の最小化の優先順位はcircumscribe後のabnormal述語の定義に影響を与える重要な情報である。この優先順位としてfact型のabnormal述語の概念階層上の位置を考えることができる。すなわち、下位の世界にfact型abnormal述語がassertされているabnormal述語ほど最小化の優先順位が高いとする。fact型のabnormal述語が、関係する矛盾の発生した最も上位の世界を表しているのはabnormal述語導入の動機が矛盾解消にあることから明らかであろう。このためfact型のabnormal述語がより下位の世界にassertされているabnormalityほどその効力の及ぶ範囲に属する概念が少ないことになるので、より最小化されるべきであるとするのは自然であろう。例えば、図1の例では述語AB₁をAB₂よりも優先して最小化する。

3.2.2 Circumscription時に変化を許す述語の選択

Circumscription時に変化を許す述語にはCircumscriptionにより特徴づけたい述語を選択するが、ここではCircumscriptionの矛盾解消作用を重視する。Circumscriptionの矛盾解消機構を用いるためには、まず

①矛盾の発生した述語（直接矛盾を引き起こしたclauseの述語）

を変化を許す述語に加えなければならない。例えば、図1では述語FLYが①に相当する。またabnormal述語が直接矛盾を起こしたclauseではなく、矛盾の証明過程に現れる他のclauseに付加されている場合には

②abnormal述語が付加されたclauseから直接矛盾を起こしたclauseまでの証明過程に現れる述語

も変化を許す述語に加える必要がある。述語の消去による矛盾解消効果をabnormal述語の定義の決定に反映させるためにはabnormal述語を求める時に見かけ上、矛盾の直接の原因となったclauseにabnormal述語が現れるようにしなければならない。そのためには矛盾の直接の原因となったclauseのsubgoalをunfoldにより部分評価してやるという操作を繰り返してsubgoalにabnormal述語が現れるようにすればよい。この効果を得るために変化を許す述語を②のように設定する。これは変化を許す述語を消去する過程はunfoldと等価であるからである⁴⁾。例えば図1の世界ab-birdにおいてはabnormal述語を矛盾の発生した述語FLYではなく、その矛盾の証明過程に存在する述語WINGに付加している。この場合、図3のように述語WINGをunfoldすることにより見かけ上、述語FLYのbodyにabnormal述語が現れるので矛盾を起こした述語FLYを消去する際に、その効果をabnormal述語の定義に反映させることができる。

$$\frac{(WING\ WEAK) \wedge ab\text{-}bird \leq (NOT\ (FLY))}{\wedge\ unfold\ \neg} \quad (3-4)$$

$$(THNOT\ (AB_1 \dots)) \wedge ab\text{-}bird \leq (WING\ WEAK) \quad (3-5)$$

↓

$$(THNOT\ (AB_1 \dots)) \wedge ab\text{-}bird \leq (NOT\ (FLY))$$

図3 abnormal述語が矛盾の証明過程の途中に付加されている場合

よって、図1の例の場合にはCircumscriptionの過程で変化を許す述語としてFLYの他に述語WINGを選択する。

3.3 Circumscriptionの結果に基づく世界の再構成

世界名を含めたclauseにおいてabnormal述語をcircumscribeする時には世界名を通常の述語と同様に扱う。図2のhorn節の連言を論理式Aとすると図1の世界構造をcircumscribeすることは、次式と等価である。

$$\text{Circum}[A; AB_1 > AB_2; \text{FLY}, \text{WING}] \quad (3-7)$$

すなわち、述語 AB_1, AB_2 を論理式Aの下でcircumscribeする。この時、 AB_1 を優先して最小化し、その過程で述語FLY及びWINGの変化を許す。述語 AB_1, AB_2 の定義を求め、これらを消去すると、(3-2)(3-5)は次式のようなHorn節の連言になる。

$$(3-2) \rightarrow (\text{HAS WING}) \wedge (\text{WILD}) \wedge \text{wild-ch} \leq (\text{FLY}) \quad (3-8)$$

$$(\text{HAS WING}) \wedge \text{bird} \wedge (\text{THNOT ab-bird}) \leq (\text{FLY}) \quad (3-9)$$

$$(3-5) \rightarrow (\text{THNOT (WILD)}) \wedge \text{ab-bird} \leq (\text{WING WEAK}) \quad (3-10)$$

$$(\text{THNOT wild-ch}) \wedge \text{ab-bird} \leq (\text{WING WEAK}) \quad (3-11)$$

さて、上記の結果をみると (THNOT 世界名) というsubgoalが出現している。世界名を導入する際に規定した定義より世界名によるsubgoalを、それが含まれるclauseがその世界に存在する場合に真となる述語と考えると (THNOT 世界名) は示された世界にそれをbodyに含むclauseが存在することが証明できなければ真と解釈できる。すなわち示された世界にそのclauseがあってはならないことを示しているのである。さらに世界名で示されたgoalには概念世界間の継承を表現するclauseが適用されることに注意して欲しい。(THNOT 世界名) は示された世界を含む、それよりも下位の概念世界で偽となるのである。すなわち THNOTを伴う世界名はそれをbodyに含むclauseの示す知識の継承を示された世界で断ち切らなければならないことを表しているのである。以上の考察によりcircumscribe後の世界名subgoalの解釈は次のようになる。

通常の世界名 …そのclauseが新たにassertされるべき世界を表す。

THNOTを伴う世界名…そのclauseの継承を打ち切るべき世界を表す。

Circumscriptionを行った後のclauseに (THNOT 世界名) が現れた時、それによって示された世界が、通常のgoalとして示された世界の下位に位置している場合には (THNOT 世界名) で示された世界でそのclauseの継承を打ち切らなければならない。具体的には示された世界で上位概念からの属性継承ルートであるis-aリンクを切断、階層を分割しそのclauseの存在する世界と並列な世界としてしまう。

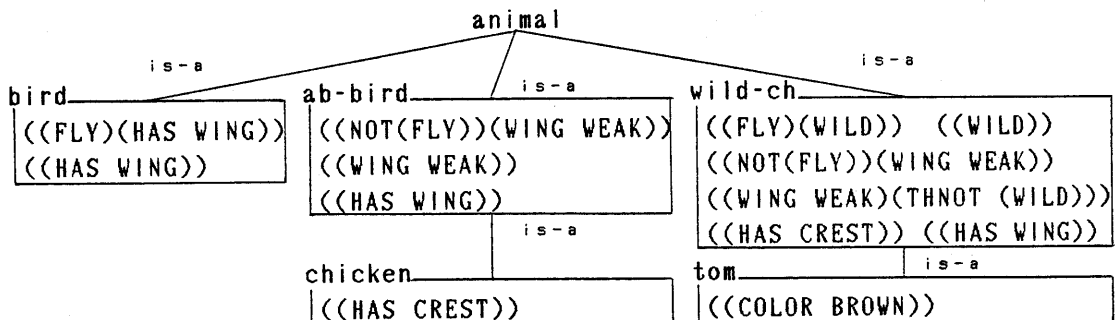


図4 Circumscription後の世界の構造

4. 世界の分割の制御

clause中にTHNOTを伴って現れる世界が そのclauseの継承を断ち切るべき世界

を示しているという解釈を与えた。しかしTHNOTを伴って現れる世界 すべてについて知識の継承を断ち切るために示された世界で概念階層の分割を行うと場合によっては分割をしすぎてしまう恐れがある。人間の学習を考えた場合でも、概念階層の変更は、できるだけ少なくしているようである。そこで概念階層の分割を最小限に抑える方法について考えてみる。例えば先ほどの(3-10)(3-11)を考えてみる。

$$(THNOT (WILD)) \wedge ab-bird \leq (WING WEAK) \quad (3-10)$$

$$(THNOT wild-ch) \wedge ab-bird \leq (WING WEAK) \quad (3-11)$$

これらはいずれもbodyにab-birdを持っているので世界ab-birdにおける述語WINGの定義を与えている。ところが(3-10)が世界ab-birdから属性を継承する世界にも共通して成立するのに対して、(3-11)は世界wild-chを含む それより下位の世界では成立しない。図1のような世界の階層では世界wild-chにおいては(3-10)の定義を採らざるをえないが、世界ab-birdでは その他に世界間の構造に影響を与える(3-11)も採用される。(3-11)を含めて、世界wild-chでの述語FLYの定義はbodyの世界名を取り去ったUranusのprogram

$$((WING WEAK)(THNOT (WILD))) \quad (4-1)$$

$$((WING WEAK)) \quad (4-2)$$

となるが(4-1)は冗長なので結局は(4-2)のみとなる。このとき(3-11)のbodyにある(THNOT wild-ch)の解釈により図3の世界の階層構造となる。

しかし、次のように考えることもできる。Circumscriptionの結果として得られる述語WINGに関するabnormal述語AB₁の定義は

$$(AB_1) \equiv (WILD) \wedge wild-ch$$

となるが、述語WILDが世界wild-chにassertされているので

$$(WILD) \text{の成立} \equiv wild-ch \text{ より}$$

$$(AB_1) \equiv (WILD) \text{ or } (AB_1) \equiv wild-ch$$

$$(4-3)$$

$$(4-4)$$

のいずれかとなる。図4の場合は(4-4)を選択した結果と言える。ここで(4-3)を選択すると(3-5)からabnormal述語AB₁を消去して得られる式は(3-10) [(4-1)]のみとなる。この場合は(3-11)の goal(THNOT wild-ch)の影響がないので世界の構造の分割を最小に抑えることができる。

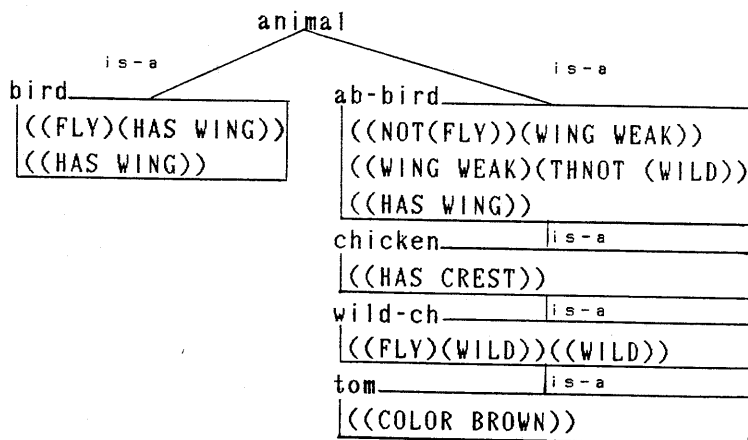


図5 世界の構造の分割を最小に抑える

これは述語WINGのabnormalityを そのclauseのなかに取り込んだ表現となっている。世界wild-chの存在による例外は世界ab-bird内で表現されている。学習という点から見ると図4は新しい知識構造を世界wild-chにもたらし、図5は世界ab-birdに対しての新しいruleの学習となっている。

一般に、Circumscriptionの結果、得られるabnormal述語の定義が

$$(AB *) \equiv (P_1 *) \wedge \cdots \wedge (P_n *) \wedge world$$

となる場合、世界worldの直上の世界world₁において 質問 $(P_1 *) \wedge \cdots \wedge (P_n *)$ がfailするならば

$$(AB *) \equiv (P_1 *) \wedge \cdots \wedge (P_n *) \quad (4-5)$$

が成立する。なぜならば、質問 $(P_1 *) \wedge \cdots \wedge (P_n *)$ の成功する世界world₂は世界worldと等しいかそれより下位の世界なので

質問 $(P_1 *) \wedge \cdots \wedge (P_n *)$ の成功 $\supset$ world₂ $\supset$ world
が成り立つからである。abnormal述語の定義が(4-5)のようになるときには 世界の構造の分割を抑えることができる。

人間は図4、図5のような二つの方法を適宜使い分けているので推論が速く、かつ効率的な記憶が行われていると思われる。

第6章 むすび

本稿では人間の“常識”による考え方を推論規則に定式化したCircumscriptionを概念学習に応用する手法について述べてきた。特に、多重世界環境におけるCircumscriptionを考えることにより多重世界に記述された知識のみならず多重世界間の構造も学習することができることがわかった。知識とそれらが定義されている概念の構造を同時に学習することができるこの方法は、人間の学習に近いものがあるのではないと思われる。また、概念の構造に重きを置いた学習と概念世界の内部に記述された知識に重きをおいた学習を設定によって区別することは人間の学習形態をシミュレートする手段としては有効なものであろう。

しかし、矛盾のチェック述語C、Circumscriptionシステム、Circumscriptionの世界の分割に関するモード設定、と学習のための個々の機能単位については論じてきたがこれらを有機的に結び付ける方法を考察するには至らなかった。チェック述語CやCircumscriptionシステムは それを適用する箇所を指定してやらなければならないがその指定を自動的に行うには適用が有効となるようなタイミグ・場所を何らかのヒューリスティックにより決定することを考えなければならない。この部分は人間の学習の本質に関わる重要な問題なので今後の大きな課題と言える。

【参考文献】

- (1) McCarthy, J.: "Applications of Circumscription to Formalizing Commonsense Knowledge", AAAI Workshop on Non-Monotonic Reasoning (1984).
- (2) Lifschitz, V.: "Computing circumscription", in Proceedings Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (1985).
- (3) 岸川、中川: 「多重世界機構を用いた非単調論理」
第14回ソフトウェア基礎論研究会資料(1985)
- (4) 森、中川: 「論理型言語におけるCircumscription」
第46回知識工学と人工知能研究会資料(1986)