

TM-0808

アブダクションと常識推論

井上克巳

September, 1989

©1989, ICOT

ICOT

Mita Kokusai Bldg. 21F
4-28 Mita 1-Chome
Minato-ku Tokyo 108 Japan

(03) 456-3191~5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

アブダクションと常識推論*

井上 克巳

ICOT 第5研究室

(財) 新世代コンピュータ技術開発機構

108 東京都港区三田 1-4-28 三田国際ビル 21F

inoue@icot.jp

1989年9月19日

概要

AIシステムの構築のためには、“論理+アルファ”が必要となる。特に、仮説推論の研究には論理を用いた理論的考察に加えて、工学的見地からのシステム設計が欠かせない。われわれはこの仮説推論について、論理の部分はモデル論を用いることにより従来の仮説推論システムよりも広いクラスの知識を扱えるような定式化を行い、アルファの部分は工学的応用との関係で必要となる拡張を研究してきた。ところで、仮説推論をより一般的なフォームとして定義するとアブダクション(仮説生成)となる。本稿では、これまでの両研究から得られた知見に基づいて、現在研究を進めているアブダクションの計算メカニズム、およびそれにプラスアルファを加えて構成される常識推論のフォーマルシステムに必要な要素技術を明らかにする。

1 はじめに —APRICOT 再考

問題解決の過程においては一般に、全ての必要となる知識が利用できることは稀であり、不完全な知識の基で結論を導かなければならないことが多い。ところが従来の古典論理に基づく演繹的な推論は、いかなる場合でも正しい結論を導くことが主目的であったために、不完全な知識の取り扱いが困難であった。不完全な知識を取り扱うための基盤技術としては、何らかの仮説を立てることにより不完全性を補って推論を行う仮説推論(hypothetical reasoning)がある。われわれはこの仮説推論について、論理的な考察としてモデル論を用いることにより従来の仮説推論システムよりも広いクラスの知識を扱えるような定式化を行った[15]。一方で、仮説推論を実際の問題解決へ応用するために必要となる技術的拡張についての研究[13, 14, 23]も行ってきた。本稿では、まず(a)と

*本論文は「ICOT 学習(LANRS)合宿(1989年3月22,23日;御殿場)」における資料“Abductionと常識推論(研究メモ)”に若干の訂正と加筆を施したものである。

れら2つの研究の関連付けを試み、次に(b)その考察に基づいて仮説推論を常識推論に適用するための課題とそれに対する部分的な解答を与える。

Inoue [14] は、工学的見地に立った仮説推論の研究として、仮説推論システム APRICOT のアーキテクチャを次のような観点から考察している。¹

1. 仮説生成(列挙)：領域固有の深い知識/常識(構造、機能、法則)を用いて、問題解決において意味のある可能な仮説集合を自動的に列挙する。
2. 仮説生成(高次推論による)：問題解決の途中で要請に応じて目標指向的に帰納・類推などのアルゴリズムを起動し、その結果を仮説の種²とする。
3. 仮説選択：複数の仮説世界³からより適切な環境を選択・評価する基準・戦略を与える。これには、システム側で調整選択できる場合と、外部から選択のための新しい情報の入力(観測測定)をシステムが要請する場合とがある。前者の場合、領域分野によって当然選択基準は変わる。
4. 仮説管理：データ自身とデータ間の依存関係(dependency)の管理を行うために内部表現はネットワーク形式となる。ネットワークのリンクは justification と呼ばれデータの結合方式を規定する。このネットワーク上で、仮説を利用操作しデータの一貫性を管理するアルゴリズムとしては、整合ラベリング+ DDB (dependency-directed backtracking) [4] や、ブール値伝播+ 最小セットカバー (nogood inference) [3] などがある。
5. 効率的探索：枝刈りのための知識(制約、ヒューリスティックス)を利用し、かつメタ的な推論制御を行う。後者では、仮説選択の効率化および探索空間の縮小を実現するために、依存関係に基づく探索戦略(dependency-directed search)を用いることで、冗長な推論や同じ失敗の繰り返しを行わせないことが必要となる[13]。これは、問題解決のタスクには設計におけるシミュレーションのように必要となるコストが大きいものが多いからである。
6. 高速化技術：以上の問題の多くは NP- 完全である。それでも、高速化するための実現技術として、de Kleer [3] はビットベクターやハッシュテーブルなどのデータ構造を提案して用いている。
7. 例(モデルに基づく診断)：構成要素と対象の構造・動作記述から故障箇所の同定を行う。仮説集合は構成要素が正常か異常かということで自動的に列挙できる。複数の解候補からより適切な解を選択する観測測定のための戦略としては、故障確率最大の仮説を選択する、或いは検証に要するコストの総和が最小となる測定を行うなどが考えられる。

以上の考察は工学的応用を考慮した仮説推論システムにとっては非常に重要である。特に仮説列挙、仮説選択、効率的探索、高速化技術の項目は工学的である。例えば、仮説列挙については小

¹APRICOT は概ね、仮説推論に係るモジュール(仮説生成/列挙・仮説選択・仮説検証/管理)、および問題領域に依存した問題解決器とから構成される。詳細は[14]を参照のこと。

²仮説の種には、全称束縛された変数が現れる一階述語論理式を含む。

³仮説の種から具体化された仮説の集合(仮説の組み合わせともいう)を仮説世界、あるいは環境と呼ぶ。

規模な電子回路の問題では直接適用でき、複雑な問題ではモデルを階層化することにより適用できる。ところが、人間の常識的判断にみられるように深い知識が不明あるいはモデルが明確でないような問題には適用できない。そのようなより一般的な問題に対してどれくらい上記の考察が役立つのであろうか？また、上記の考察は我々人間が実際に行う仮説推論を工学的問題解決の中でモデル化しているという点で、AI システムのアーキテクチャとしては必要性が認められるだろうが、現実の (AI 技術が適用できる範囲にある) 問題に対して ad hoc に対処したに過ぎず、個々の細かい技術に対する理論的背景や必然性が十分とは言えない。従って、仮説推論の理論的基盤を明確にする必要があり、論理ベースのフォーマルシステムにおいて上記の考察がどのような形で反映されるかを見極める必要がある。そのためにまず、論理が AI システムの何に貢献できるかを次章で考察し、それに続いて仮説推論における論理とそれ以外の役割分担を明確にする。また、後の章で常識推論へのアプローチについて述べる。

2 “論理 + アルファ” について

2.1 論理は AI システムの何に役立つか？

まず、本節では一般的な AI システムにおける論理の役割に関して、モデル論と証明論について各々考察する。

1. モデル論：数学的性質の美しさを利用した理論

- 極小モデルでは例外に対して特別な処理を必要としない。
- 与えられた知識から導出可能な解 (あるいは拡大解釈により得られる知識) に対して厳密な意味付けができる。
- より一般的にはモデル間の嗜好関係 (順序構造)[28] により非単調推論に対する組織的な意味付けが行える。
- さらに、モデル集合間の順序構造に基づいた意味付け (例えば、[5]) もあるが、これは証明論を焼き直したモデル論に過ぎない。しかしこのようにして与えられたモデル論からは一般的に massively parallelism などの上で直接推論に相当する計算を行わせることもできる。
- 問題は大規模な知識ベースに対して全面的にモデル理論の枠で捉えることは計算量的困難がつきまとうことである。

2. 証明論：統語論に基づいて (構成的に) 計算するための理論

- “構成的 (constructive)” であることがしばしば最も重要な概念となる。例えば、JTMS [4] では “currently proven” (現在は証明されているが今後は否定されることがある) という概念が重要であり、その判定は justification のシンタックスに基づいてなされる。一階述語論理に様相記号を導入して統語的に拡張した非単調論理では groundedness という概念がこれに相当する。

- Groundedness に非常に近いものでシンタックスに依存したモデル論もある。例えば、ホーンを越える論理プログラミングや層状 (stratified) データベースでは否定の取り扱いに関して、含意記号の左辺にある場合と右辺にある場合とで原始式の意味が変わる。
- このようなシンタックスが外部世界とのリンクにおいて、うまくマッチングが取れるかという知識表現の問題が大きいと思われる。ある種の意図や嗜好が与えられた枠組で容易に表現されるためにはその意味が明確になっていなければならない。
- 従って、セマンティックスが明確でなく純粋にシンタックスの問題となるような性質は捨てるべきである。代わりに、我々が意図や嗜好、ヒューリスティックスを表現できるための枠組を論理とは別に設けるべきであり、推論方式にはユーザにとって見通しの良い (結果や過程が説明できる) アルゴリズムを用いるべきである。

2.2 アルファの部分には何を考えるべきか？

前節での考察から論理としてはモデル論の数学的性質のみに期待することになると、AI システムに要請されるプラスアルファの部分としては次のものが挙げられる。

1. 知識の分割: エキスパートシステムの研究成果として、知識を分割することが大規模な知識ベースに対処する方法として認識されている。しかしながら、いかにして自動的に分割を行うかについてはほとんど手が付けられていない。他の問題点としては局所的モデルと大域的モデルとの間での整合性をいかに維持するかということもある。
2. 知識の階層化: 上記の知識の分割の中では比較的研究が進んでいる分野である。非単調推論では分類学的階層に関する研究が多い。一方、全体・部分関係の研究は少ない。
3. 知識間の優先関係: 知識の分割に関連して、知識間の順序付け・嗜好関係を表現・操作する枠組が必要である。これはメタ知識の表現・操作ではあるが、ある部分は論理の枠内でできるだろう。
4. 領域固有のヒューリスティックス: 実際に上記の優先関係を見出す、あるいは獲得するための枠組が必要である。ある分野の中でも一般的なヒューリスティックスがもし存在するならば、それをどのようにシステムに組み入れるか？
5. あいまい情報の取り扱い: 優先関係のうち論理では表現しきれない部分は数値的な取り扱いになるのか？そのときの論理的枠組との整合性は？
6. 得られた解の確からしさ: 解の“良さ”あるいは正当性はどのようにして評価あるいは保証するのか？また、ユーザに推論の結果を説明できることも重要である。
7. 効率的探索, アルゴリズム: 例えば定理証明でも、本質はアルゴリズムの問題に帰着される。導出にも戦略が効いており、導出の代わりにブール値の制約充足・制約伝播を用いてもアルゴリズムが重要である。

8. 領域固有の問題解決戦略: AI システムとしては領域毎に異なった戦略をたやすく組み込める切り口を利用者に提供できなければならない。

以上のプラスアルファの項目はすべて結局はメタ知識の表現と利用に関係したものである。そしてより厳密には、これらは (a) 計算効率の向上 (推論の制御, 探索空間の縮小), あるいは (b) より常識的な解の導出, のいずれかあるいは両方に関係している。

2.3 仮説推論における論理プラスアルファ

以上の議論を仮説推論について適用すると、論理とプラスアルファを次のように切り分けることができるだろう。

1. 仮説推論における論理

- 仮説推論では仮説集合 (環境) H を加えることによって既知の事実集合 F だけからは導くことができない結論 c を導く。この H は F と無矛盾であることが必要であるが、仮説自体は必ずしも真であることが保証されないため、知識が追加されたときに矛盾が生じる可能性がありその場合には H の再検討や修正が必要となる。このため、仮説推論は非単調性を持つ。ここで、 F と H をそれぞれ論理式集合 $\mathcal{L}$ の部分集合、 c を $\mathcal{L}$ に含まれる論理式とすると仮説推論は次の 2 式で表現される;

- (1) $F \cup H \models c$,
- (2) $F \cup H$ は無矛盾。

これまでに提案されている仮説推論システムとしては、与えられた c (観測) に対して上の (1),(2) を満たすような H (説明) を生成する Poole の Theorist [25] や、競合する知識があるときに各々を仮説として推論を進めコンテキスト毎に無矛盾性を維持する de Kleer の ATMS [3] などが代表的である。このうち前者はアブダクション (仮説生成) の推論形態を具現化したものである。⁴ また ATMS も後向きに考えれば、アブダクションを行っていることに他ならない。Inoue [15] は、この両アプローチに対してアブダクションと ATMS、デフォルト論理等をモデル論的に関連付けることによる統一的理解を示している。アブダクションの計算方法については 4.1 節を参照のこと。

- アブダクションは既知の正しい知識と真偽が不明の前提とを使ってある知識を説明すると言う意味で一種の逆演繹と言える。従って、推論に使う知識 (F, H) はあくまで一階述語論理を越えない。この意味でモデル論が明確である。
- 非単調推論の groundedness の概念はあくまでモデル論で組織づけできる範囲までをサポートする。例えば Inoue [15] は、否定の仮説は閉世界仮説 (CWA) の概念を用いることにより極小モデルで説明でき、またある論理式を仮説とするならばそれを真とするモデルで組織的に特徴付けることができることを示している。このような制限を加えても、

⁴大前提 " $P(x) \supset Q(x)$ " と結論 " $Q(A)$ " から小前提 " $P(A)$ " を仮定することを、1 ステップ・アブダクションと呼ぶ。ここでいうアブダクションでは F 全体から得られる全ての可能なステップ数でのものを対象とする。

Konolige [16] が autoepistemic logic で示した moderate groundedness に相当する概念をサポートすることができる。従って、よりシンタックスに依存する性質である strong groundedness はメタな部分でサポートする必要がある。

- アブダクションにおける説明の選択についても部分的に論理を用いた基準が幾つか存在する。詳しくは 5.3 節を参照のこと。

2. 仮説推論におけるプラスアルファ

- 推論制御に関しては、無駄なチェックや計算をできる限り行わないような効率的な説明生成のアルゴリズムが望まれる。アブダクションにおける説明の生成には、効率的な導出アルゴリズムが有効であると考えられる。また ATMS ではネットワーク表現上のグラフ探索アルゴリズムやブール値の伝播・制約充足が用いられる (詳細は 4.2 節を参照のこと)。また、ATMS とプロダクション・システムを融合させて問題解決を行う場合には、Rete アルゴリズムにブール値計算を組み込むことにより、命題が依存する仮説集合を効率的に計算する方法 [23] もある。
- 探索空間の縮小に関しては、大規模な知識ベースに対処するために知識を分割し、仮説の組み合わせを制限する方法が有効である。知識の分割と制御の局所性は並列化による高速性を期待するためにも重要である。全体・部分関係の研究の例としては、階層化された仮説世界 (例えば設計問題では設計対象物の構造を含む設計モデルを上位仮説とし、その下のパラメータを下位仮説とする階層関係) の表現とそれを用いた効率的な枝刈りアルゴリズムが Inoue [13, 14] により提案されている。
- 不完全な知識からより常識的に起こり得る結論を導くことに関するメタ知識 (例えば相反する二つの信念が同時に支持された時にどちらを優先させるかという知識) の取り扱いには論理の枠外とし、シンタックスによらない機構とする。このためには、説明の選択に際して 5.3 節の論理的な選択基準の他に、領域固有のヒューリスティックスや問題解決の状況をたやすく組み込める切り口が必要となる。詳しくは 5.4 節を参照のこと。

3 アブダクションとその応用

本章以下ではアブダクションにおける問題点と、そのアプローチについて述べる。

McDermott [21] は演繹推論を少し加工すれば非演繹推論になるということの反例ならびに殆ど解明が進んでいない推論の例としてアブダクションを挙げている。アブダクションが演繹推論と比べてメカニカルな点で本質的に難しいのは、グローバルな推論技法が必要とされ計算量の困難がつきまとうからである。さらに McDermott の議論では、問題はこのようにして多大な計算を逆演繹という形で行ったとしても、得られた結果が必要でも十分でもないという点にある [21]。この考察と 2.3 節の議論から次の 2 つの研究がアブダクションの解明・実用化にとって重要であるといえる。

- 少しでも局所性のある効率的な説明生成のアルゴリズム
- 人間の常識に合う最適な説明を選択するメカニズム

以下の章では、効率的な説明生成、常識的な説明選択の各々について詳細に考察を行うことにする。それらの議論の前にここで主張しておきたい点は、アブダクションはその可能な応用領域が広いということと、*defeasible inference* (結論を無効にできる推論) の一種の双対形であるため前2章で述べた“プラスアルファ”を加味することにより局所的なアルゴリズムや最適な説明への道が開かれているということである。逆に前節の“プラスアルファ”はアブダクションの研究テーマの中に自然に融合されるものも多い。すなわち、アブダクションの研究はAIにおける多くの推論を説明できる鍵でもある。

実際、アブダクションには以下のような多くの応用領域がある。

- デフォルト推論 (Poole [25]): *defeasible inference*
- 診断 (Cox & Pietrzykowski [2], Poole [24]): 背景知識と正常あるいは故障の仮説集合から観測事象を帰結する。
- 設計 (Finger [6]): 与えられた仕様を満足する設計 (仮説の組み合わせ) を設計に関するモデルの知識を使いながら、実現可能なコンポーネントの集合から選ぶことにより行う。
- 談話理解 (Hobbs *et. al* [11]): 聞き手が自分の知識にどのような知識を補えば話し手の文を正しいと認識できるかを推論する。
- Assumption-based truth maintenance (Reiter & de Kleer [27], Inoue [15])
- Closed-world reasoning, Circumscription (Ginsberg [8])
- Knowledge reduction (Reiter & de Kleer [27]): *prime implicates*
- その他、行動計画、帰納、類推など。

4 説明の生成メカニズム

4.1 導出による説明生成アルゴリズム

- Linear resolution
 - Reverse Skolemization (Cox & Pietrzykowski [2]): 証明の過程で導出が行えなくなった *dead-end* を説明とする。
 - Iterative consistency checking (Poole [25]): 証明の途中で導入する仮説についてその否定がすでに証明に使われた仮説集合を用いて証明されるかをチェックする。
- Ordered resolution
 - Ordered residue (Finger [6]): Prolog に類似した導出法。これに類似した方法として Stickel [11] は Horn 節に限定した線形導出で効率化を図っている。より一般的なものに *resolution residue* [6] がある。

- MILO-resolution (Przymusiński [26]): OL 導出 [1] における推論木の情報を用いた circumscription 証明器に用いる導出法.

Propositional inference with production fields (Siegel [29]): Subsumption チェックを行いながら無駄な導出を制限し、指定した “production field” に含まれるものだけを説明とする。これは MILO-resolution の一般化でもあり、効率化もなされている。これを用いたアブダクションおよび circumscription の計算方法が Helft & Inoue [10] により示されている。

- Set-of-support strategy (Finger [6], 井上 [12]): 導出の回数を更に制限する。
- Minimum-cost proof (Stickel [11]): 仮定のコストを述語単位で定め証明のステップ数が少なくなるような説明を選ぶ。

4.2 ATMS による方法

導出に囚われない方法としては、主として JTMS [4] や ATMS [3] で用いられているネットワーク表現上のグラフ探索アルゴリズムやブール値の伝播・制約充足がある。また、各命題が依存する環境を常に保持しておく方法 (compiled approach) と必要なときに計算する方法 (interpreted approach) がある。これらの利点としては incremental な知識の増加に対して局所的な変更を加えればよく、前に行った計算は再び繰り返さずに済むこと、ATMS のような “極小の説明” によれば導出における subsumption チェックのような処理が自動的に行われる⁵こと、および戦略が固定されている導出に比べてメタ的な制御が行いやすいことが挙げられている [8]。

現在最も有効であると考えられる方法は、JTMS のようにその支持が明確に示される方式で、かつ ATMS のように複数の競合する理論形成を認めるアプローチである。⁶ 支持を明確に示す理山は後述する説明の選択に用いるためである (詳細は 5.4 を参照のこと)。更に、論理の部分を明確に特徴付けるために、全ての追加された論理式に対して同様の操作を施せるアルゴリズムが重要であると考えられる。⁷

5 説明の選択

5.1 例題 — Reasoning about action

時間投影問題 (temporal projection) におけるフレーム問題 [18, D1]: これは Yale shooting 問題 [9] の変形問題であり、circumscription による述語の極小化を始めとする現存の非単調推論の定式化が直感に合わない解を導くことがあるという問題提起の一例である。ここでは、時間的表現を含む公理を situation calculus [20] により表し、フレーム問題には McCarthy の simple abnormality theory [19] を用いて (A1) の公理により対処する。

⁵ただし、導出を効率化すればこの点はカバーできる上に ATMS よりも更に効率化できる [10]。ATMS における環境の包含関係のテストが導出における subsumption テストと等価であることに注意せよ。

⁶ATMS が単なる JTMS の多重世界版ではないことに注意せよ。

⁷多くの TMS's では negative clauses の処理を他の論理式の処理に対して特別視しており、それが追加されたときに DDB アルゴリズムや nogood 処理を起動している。

- (A1) $Holds(p, s) \wedge \neg Ab(p, a, s) \supset Holds(p, Result(a, s))$ (law of inertia)
 (A2) $Holds(In_Hand(x), Result(Grasp(x), s))$
 (A3) $Holds(In_Hand(x), s) \supset Holds(On(x, y), Result(Move(x, y), s))$
 (A4) $Holds(\neg In_Hand(Block_A), S_0)$
 (A5) $Holds(\neg On(Block_A, Table), S_0)$

ここで以下の状況が起こったときに状態 S_3 での事実を予測する。

$$\begin{aligned}
 S_0, \\
 S_1 &= Result(Grasp(Block_A), S_0), \\
 S_2 &= Result(Wait, S_1), \\
 S_3 &= Result(Move(Block_A, Table), S_2).
 \end{aligned}$$

このとき Ab 述語を極小化する circumscription の結果から成立することが予想される答は、

$$Holds(On(Block_A, Table), S_3)$$

であるが、Hanks & McDermott [9] が示すように、 S_3 では

$$Holds(On(Block_A, Table), S_3) \vee Holds(\neg On(Block_A, Table), S_3)$$

が言えるだけである。この選言の後者を充足する極小モデルでは

$$Ab(In_Hand(Block_A), Wait, S_1)$$

が成立し、 $Wait$ の間に $Block_A$ が手から (落ちたりして) なくなっている。

5.2 信念システムによる解法例

1. JTMS による解法 (Morris [22])

Justification のシンタックスに依存して望みの解を出すことができるもので、nonnormal default を用いた default logic でも同様のことができる。JTMS では知識が更に加わったことにより矛盾する結論を生じたときに DDB により別の解を出すことができるのに対し、default logic では拡張が存在しなくなる。但し、JTMS のアルゴリズムでは justification を生成することにより、元の知識のモデルを選ばないことがあるため safety ではない。

2. Autoepistemic logic による解法 (Gelfond [7])

JTMS よりモデル論が明確ではあるが、やはり default logic の場合と同様に後で知識が加わったときに安定な拡張が存在しなくなることがある。

5.3 論理を用いた説明の選択

2.3節の(1),(2)式を満足する仮説集合が複数得られたとき、あるいは相反する結論に対する説明が得られたときに、論理を用いて適切な説明を選択する基準としては、以下のものが適宜組み合わせられて用いられる。

1. 指定した述語からなる説明を選択 (Finger [6], Inoue [15]): 仮説集合として、予め指定された假定可能な述語の集合 P から構成される論理式の集合 $\mathcal{L}_P$ に含まれるものを許容する。つまり、 $\mathcal{H}$ を (1),(2) を満たす全ての説明集合とすると、 $\mathcal{H} \cap \mathcal{L}_P$ が求める説明集合となる。ATMS [3], Theorist [25] ともこの制限を採用している。例えば、設計のように実現可能な事実が制限されており列挙できる場合にこれらを P に指定して用いる。
2. 最も弱い説明を選択 (Reiter & de Kleer [27], Hobbs *et. al* [11], Inoue [15]): $H_1, H_2 \in \mathcal{H}$ のとき、

$$(3) H_1 \preceq H_2 \iff H_2 \models H_1$$

という順序構造を定義すると、(1),(2) を満たす仮説集合の中から極小元を選択する。ATMS で、集合の包含関係の意味での極小な仮説集合を求めることはその一例である。この基準は説明の冗長性を省く意味で妥当である。応用では、主として recognition に有効な方式であるとされる。また Inoue [15] は (3) の他に、

$$(4) H_1 \preceq H_2 \iff F \cup H_2 \models H_1$$

という順序構造の基での極小元を与えており、これら2つの基準により求められる説明集合の論理的等価性を示している。(4)における極小元は circumscription の計算に関して、ある式が全ての極小モデルにより満たされるか否かをチェックするための規準として用いることができ、ATMS を用いて (3) における極小元を求めて使う Ginsberg の方法 [8] に比べて、より効率的であることが Helft & Inoue [10] により示されている。

3. 最も特殊な説明を選択: (4) の基準を逆に用いて、極大元を選択する。すなわち、仮説集合自身が $\mathcal{L}$ から他の仮説集合によっては説明されないものを許容する。この意味するところは対象領域により異なる。例えば、分類学的階層では最も下位の階層による説明 (Poole [24]) であり、診断では最も細部にまでわたる説明 (Cox & Pietrzykowski [2]) である。例題のような temporal projection では、最も慣性が時間的に遅くまで支配する (変化ができるだけ後で生じる) 説明が chronological ignorance [28] や pointwise circumscription [17] を用いることにより優先される。

5.4 ドメイン知識をたやすく組み込める切り口

5.3で述べた論理的な説明選択基準だけではドメインのヒューリスティックスが直接的に反映され難く flexibility がないという問題点がある。

そこで例題のような問題に対しては、“イベントの生起に伴う状態の変化 (law of change) による支持は慣性の法則 (law of inertia) による支持よりも優先する”といったような支持の強さが表現できる枠組が望ましいと思われる。⁸

5.5 知識の動的変更に伴う信念管理

5.4節のようにドメイン知識を直接的に反映させて justification の間に優先順序を導入すると、5.2節における JTMS による解法に比べて、groundedness のような特定のシンタックスに依存することを防げるためユーザにとってより見通しが良い。しかしながら、JTMS では知識が後で付け加わったときに矛盾を回避する能力がある。このような知識の動的変更に對して、優先関係も動的に変更されて適切な解を導く機構が必要である。

Doyle の JTMS [4] ではノードレベルでの状態の整合は行いが、justification レベルでの評価はできない。また、ノードの整合ラベリングは justification のシンタックスに依存する部分が大きく、DDB アルゴリズムも信念翻意のメカニズムが画一的でその欠点が指摘されている。従って、TMS's の動的な consistency maintenance の長所を活かし、メタレベルでの justification の評価が静的にも動的にも行える枠組が望まれる。

この枠組における信念の翻意では相対的により重要な信念を保持し、重要でない信念を捨てることが重要となる。重要性の認識は、信念そのものだけではなく、justification に対しても与えられる。すなわち、法則・事実・デフォルトなどが領域分野、問題解決における状況に応じて動的に優先関係が決定される。また、これらの信念の中で翻意されることなく justified された信念のみを保持すれば、resource-bounded reasoning の一種の方式にもなる。

6 おわりに — 常識推論の実現に向けて

非単調推論はそもそも常識的結論を速断するという人間の計算能力に対する直感を定式化することが目的であった。ところが、現状は数学的な定式化に研究の焦点が当てられていたため、常識推論とは隔たりが生じている。推論する主体が常識的判断を行うためには、その主体が置かれた状況やドメインの知識に基づく因果性の理解が不可欠である。また、結論の速断のためには非単調性導入による計算速度の向上が重要であり、常に正確で無矛盾な解を導く必要もない。さらに常識推論のもう一つの重要な性質である信念の翻意は主要な非単調推論の形式では直接取り扱われていなかったが、処理速度の向上と、より直感に合う解の導出のためには不可欠である。

本稿で提案したわれわれの常識推論へのアプローチは仮説推論を使うものである。アブダクションの枠組を用いて、モデル論が明確な論理の部分と、効率的な説明生成のアルゴリズム、さらにドメインのヒューリスティックスを取り入れた説明選択のメタ・ロジカルな部分を適宜組み合わせることにより、常識的な結論を導く。ここでの特徴は justification あるいは推論のパスに関する優先関係の導入ならびに決定のメカニズムである。⁹

⁸但し、この優先関係も状況によっては変化し得る。

⁹これは従来重要視されていたモデル論的手法とは趣を異にしている。Circumscription に代表される拡大解釈は確かに常識推論の一つの側面を表現しているがそれだけでは不十分である。モデルあるいはモデル集合間の優先順序よりも公理あるいは推論パス間の優先順序の方が人間にとっては呈示あるいは理解が容易であることが多い。

われわれは仮説推論が工学的応用のみならず、人間の常識的判断と関係する高次推論の一基盤技術になることを期待している。そのためには、本稿で述べた説明の生成・選択メカニズムを始め、知識の動的変更に伴う信念管理や問題解決での時間・状況の扱い等数多くの問題が解明されなければならない。

謝辞

本稿を作成するにあたり“論理+アルファ”の考察に関しては、昭和63年度ICOT知識システム・ソフトウェアアーキテクチャ・ワーキンググループ(KSA-WG)における議論、特に石塚満・主査ならびに中川裕志、原口誠、飛鳥井正道・各委員による意見を参考にさせて頂いた。

参考文献

- [1] Chang, C. and Lee, R. C., *Symbolic Logic and Mechanical Theorem Proving* (Academic Press, NY, 1973).
- [2] Cox, P. T. and Pietrzykowski, T., "Causes for Events: Their Computation and Applications", *Proc. 8th Conf. on Automatic Deduction*, Lecture Notes in Computer Science 230, Springer-Verlag (1986), pp.608-621.
- [3] de Kleer, J., "An Assumption-based TMS", *Artificial Intelligence* **28** (1986), pp.127-162.
- [4] Doyle, J., "A Truth Maintenance System", *Artificial Intelligence* **12** (1986), pp.231-272.
- [5] Etherington, D. W., "A Semantics for Default Logic", *Proc. IJCAI-87* (1987), pp.494-498.
- [6] Finger, J. J., *Exploiting Constraints in Design Synthesis*, Department of Computer Science, STAN-CS-88-1204, Stanford University, 1987.
- [7] Gelfond, M., "Autoepistemic Logic and Formalization of Commonsense Reasoning", *Proc. 2nd Int'l Workshop on Non-Monotonic Reasoning*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 346, Springer-Verlag (1989), pp.176-186.
- [8] Ginsberg, M. L., "A Circumscriptive Theorem Prover", *Artificial Intelligence* **39** (1989), pp.209-230.
- [9] Hanks, S. and McDermott, D., "Default Reasoning, Nonmonotonic Logics and the Frame Problem", *Proc. AAAI-86* (1986), pp.328-333.
- [10] Helft, N. and Inoue, K., *A Note on Proof Procedures for Nonmonotonic Reasoning Systems*, ICOT Technical Memorandum TM-788, ICOT, 1989.
- [11] Hobbs, J. R., Stickel, M., Martin, P. and Edwards, W., "Interpretation as Abduction", *Proc. 26th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, Buffalo, CA (1988), pp.95-103.

- [12] 井上 克巳, “導出を用いた仮説探索”, 情報処理学会第 35 回全国大会論文集 (1987 年 9 月), pp. 1567–1568.
- [13] Inoue, K., “Pruning Search Trees in Assumption-based Reasoning”, *Proc. 8th Int'l Workshop on Expert Systems & their Applications*, Avignon (1988), pp.133–151.
- [14] Inoue, K., “Problem Solving with Hypothetical Reasoning”, *Proc. 3rd Int'l Conf. on Fifth Generation Computer Systems*, Tokyo (1988), pp.1275–1281.
- [15] Inoue, K., *Generalizing the ATMS: A Model-based Approach (Preliminary Report)*, ICOT Technical Memorandum TM-621, ICOT, 1988; also, “モデル論的考察による ATMS の一般化”, 情報処理学会知識工学と人工知能研究会報告 (SIG AI 63-3, 1989 年 3 月), pp.21–28.
- [16] Konolige, K., “On the Relation between Default and Autoepistemic Logic”, *Artificial Intelligence* **35** (1988), pp.343–382.
- [17] Lifschitz, V., “Pointwise Circumscription: Preliminary Report”, *Proc. AAAI-86* (1986), pp.406–410.
- [18] Lifschitz, V., “Benchmark Problems for Formal Nonmonotonic Reasoning (Version 2.0)”, *Proc. 2nd Int'l Workshop on Non-Monotonic Reasoning*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 346, Springer Verlag (1989), pp.202–217.
- [19] McCarthy, J., “Applications of Circumscription to Formalizing Common-sense Knowledge”, *Artificial Intelligence* **28** (1986), pp.89–116.
- [20] McCarthy, J. and Hayes, P., “Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence”, in: B. Meltzer and D. Michie (Eds.), *Machine Intelligence* **4** (Edinburgh University Press, Edinburgh, 1969), pp.463–502.
- [21] McDermott, D., “A Critique of Pure Reason”, *Computational Intelligence* **3** (1987), pp.151–160.
- [22] Morris, P. H., “Curing Anomalous Extensions”, *Proc. AAAI-87* (1987), pp.437–442.
- [23] 太田 好彦, 井上 克巳, “仮説推論システム APRICOT/0 ユーザズ・マニュアル”, ICOT Technical Memorandum TM-676, ICOT, 1989.
- [24] Poole, D. L., “On the Comparison of Theories: Preferring the Most Specific Explanation”, *Proc. IJCAI-85* (1985), pp.144–147.
- [25] Poole, D., “A Logical Framework for Default Reasoning”, *Artificial Intelligence* **36** (1988), pp.27–47.

- [26] Przymusiński, T. C., "An Algorithm to Compute Circumscription", *Artificial Intelligence* **38** (1989), pp.49–73.
- [27] Reiter, R. and de Kleer, J., "Foundations of Assumption-based Truth Maintenance Systems: Preliminary Report", *Proc. AAAI-87* (1987), pp.183–188.
- [28] Shoham, Y., *Reasoning about Change: Time and Causation from the Standpoint of Artificial Intelligence* (The MIT Press, Cambridge, MA, 1988).
- [29] Siegel, P., *Représentation et Utilisation de la Connaissance en Calcul Propositionnel*, Thèse d'État, Faculté des Sciences des Lumminy, Université d'Aix-Marseille II, Marsseille, 1987.