エキスパートシステム構築のためのツール*

菅原 俊治**

Tools for Expert Systems / Toshiharu SUGAWARA

Key words: artificial intelligence, expert systems, knowledge representation, knowledge engineering, knowledge base, knowledge base system

1. はじめに

エキスパートシステムは推論規則や事実（以下規則や事実の集まりを知識ベースと呼ぶ）を使って、計算機が高度かつ複雑な問題を解き、人間の専門家（エキスパート）の補助や代役を果たすシステムである。必然的に、必要とする知識ベースは複雑な構造を持ち、エキスパートシステムの作成には、知識ベースを構築するための良好なインタフェースと高度な推論を可能とする推論メカニズムを兼ね備えたエキスパートシステム構築用ツールが不可欠である。現在、いくつかのツールが商用化されているが、ツールの選択は、これからエキスパートシステムを作ろうとする者には大切な問題である。

初めにエキスパートシステムを構築するときの問題点を考えてみよう。第一の問題は知識表現、つまり知識を計算機で表現する方法である。単に事実を書き並べるだけでは、推論を行うための探索に時間がかかり、実用的ではない。人間の場合にはある問題を解こうとするとき、自然とそれに関係のありそうな部分だけを考える。このために知識の分類や推論の制御が必要で、それに適した知識表現方法をとるべきである。知識表現はその専門分野や、どの程度の複雑な推論を行うかでも異なってくる。

第二の問題点は推論方法である。これは計算機内の事実や規則をいかに適用/制御するかという問題である。推論方法は知識の表現方法や解かせるべき問題の性質を十分に考慮する必要がある。

第三はマン・マシンインタフェースの問題である。

素晴らしい知識表現方法であっても、知識投入に多大な時間を費やすのでは意味がない。

我々がツールを選択するには、通常のパログラムと同様に速度や安定性も重要だが、同時に上記の点を考慮すべきである。優れたインプリメンテーションでも、不適切な知識表現や推論方法であれば十分な性能を得られない。従って、最適のツールを選択するには、知識表現/推論方式等の基本動作を理解すべきである。

本稿では、この3つの問題点に立脚し、第一に通常のパログラム構築用ツールにおける知識表現/推論の基本的な説明を行い、各ツールにおいて知識をいかに表現し、いかに推論が行われるかを示す。次に知識表現/推論方式に基づいてツールの紹介を行う。マン・マシンインタフェースについては、紙面の制約からあまり触れないが、たとえば文献1)が詳しい。

2. プロダクションシステム

2.1 知識表現と推論方式

プロダクションシステムは、プロダクションルールと呼ばれる if ~ then 形式の規則で知識を構成する。if ~ then 形式が規則の表現方法として自然で親しみやすく、計算機の専門家以外でも比較的容易に知識ベースを構築できるので、プロダクションシステムは現在最も多く利用されている。表現方法が if ~ then 形式に統一されているために、推論エンジンも比較的シンプルで分かりやすい。プロダクションルールに確信度や優先度といった数値を付与する場合もある。

プロダクションシステムの構成は図1に示すように、if ~ then 形式の知識の集まりであるプロダク

* 原稿受付 昭和63年5月26日

** 日本電信電話(株) (武蔵野市緑町3-9-11)

図1 プロダクションシステム構成図

- (1) If CHAIR is at-corner, MONKEY is on-floor
Then CHAIR becomes at-center
- (2) If CHAIR is at-center, MONKEY is on-chair
Then THE-THING-MONKEY-HAS becomes banana
- (3) If MONKEY is on-floor,
Then MONKEY becomes on-chair
- (4) If THE-THING-MONKEY-HAS is banana
Then stop
- プロダクションメモリー
- CHAIR=at-corner, MONKEY=on-floor
THE-THING-MONKEY-HAS=nothing
ワーキングメモリーの初期状態

図2 プロダクションルールの例 (その1)

ジョンメモリー (PM) と、観測されたデータや事実の集まりであるワーキングメモリー (WM), これらを解釈実行する推論エンジンからなる。推論エンジンの方式には大別して前向き、後向き二通りの方法がある。

前向き推論：データ駆動型推論ともいう。推論エンジンはPMとWMを参照し、IF部の条件を満たすルールをすべて求める。求められたルールの集合を競合集合 (conflict set) という。競合集合の中から指定された選択方法ののっとりルールを選択し、実行する。このときWMの内容が書き変わる。以上のサイクルを繰り返して推論を進める。

後向き推論：はじめに目的とする事実が与えられていて、それを証明するために、ルールを後向きにたどる方式である。

2.2 推論の仕組み

簡単な例題を通して、推論の仕組みを説明する。図2に猿が椅子を用意して部屋の中央にぶら下がっているバナナを取る問題を考える。

図2で、大文字で書かれた語は変数である。たとえば、(1)のルールは椅子に猿が乗っていないければ、椅子を部屋の中央に運べることを表す。前向き推論の場合を考えよう。WMの初期状態から条件部の成立するルールは(1),(3)であり、競合集合は{(1),(3)}である。仮に(1)が選択されると、WMが書き変わり、CHAIR=at-centerとなる。次のサイクルの競合集合は{(3)}であるから、MONKEY=on-chairとなる。次のサイクルで(2)が適用され、THE-THING-

```

    PM: If A=+ and B=+ Then C=-
        If B=+ and C=+ Then A=-
        If C=+ and A=+ Then B=-
        If A=- and B=- and C=-
        Then goal
    WM: A=+ B=+ C=+
  
```

図3 プロダクションルールの例 (その2)

MONKEY-HAS=bananaとなり、推論サイクルは次で停止する。

この例から分かるように前向き推論で重要な点は競合集合から適切なルールを選択する方法である。通常は以下の選択方法が取られることが多い。

- (1) 条件部が最も詳細なルールを優先する。
- (2) 最も最近に競合集合に入ったルールを優先する。
- (3) 最も最近に選択されたルールを優先する。
- (4) あらかじめルールに優先順位を数値で表現しておき、それに基づいて選択する。
- (5) 競合集合に属しているルールをすべて実行する。

上記の例題では(1)を選択方法とすればよい。しかし通常は、一つの選択方法で推論が成功することではなく、うまく混ぜ合わせて推論の戦略を決める。これが前向き推論の難しいところの一つである。

次に後向き推論を説明する。はじめに推論が成功すること、つまりルール(4)が成立することを目的として宣言する。そのためにTHE-THING-MONKEY-HAS=bananaとなればよい。WMを調べてもこの条件は成立しない。従ってPMを参照し、これが成立するにはルール(2)が成立すればよく、(2)が成立するには(1),(3)が成立すればよい。最終的に初期の状態 (ここではWMのデータ) まで遡れば推論は成功したことになる。

後向き推論では、前向き推論のような推論の戦略の選択はしにくく、基本的に全数探索になる。また図3の例題では後向き推論の場合一見矛盾するgoalにも達するが、前向き推論では(5)の戦略を選択しなければ到達しない。ルールの意味を考慮して、前向き推論と後向き推論から適切な方法を選ぶことが大切である。

3. フ レーム

3.1 知識表現方式

フレームは人間の記憶構成や推論方式を理解するためにMinskyによって提案されたモデルである²⁾。人間はある場面に遭遇するとフレームと呼ばれる記憶の

図4 フレームの例

一部を選び出す。たとえば、研究室に入るという場面では、研究室に関するフレームが呼ばれ、そこには机や本棚がどこにあるか、広さや位置等、また次に起こると期待できること、なすべき行動等も描かれている。仮に机に着目すれば、研究室の机に関するフレームが開かれ、木製かスチール製か、引出しには何が入っているか等が記憶に蘇る。研究室のフレームと研究室の机のフレームには、研究室の“一部”であるという関係があり、結ばれている。一般にフレームはこのような関係で結ばれ、人間の知識を構成している。

知識ベースを構成するフレームは図4に示すように、属性を表すスロットと属性値であるスロット値を持つ。たとえば机を表すフレームは、「引出しの数」「脚の数」といったスロットを持ち、それぞれ5,4というスロット値を持つ。スロットはほかにフレーム間の関係も表し、PART-OF というスロットには「研究室」という値が格納され、フレーム間の関係(研究室の中にあること)を示している。本解説では、フレーム表現をサポートするツールをフレームシステムと呼ぶ。

3.2 フレームの特徴

フレームシステムで提供されている知識表現の特徴の主なものを以下に示す。

- (1) 知識を階層的に表現できる。
- (2) 値の共有化(継承 inheritance)が可能である。

フレームは幾つかの関係で結ばれているが、特にフレームの上位・下位を表す AKO 関係 (IS - A 関係ともいう)に着目する。図5のように、動物の一つが哺乳類・鳥類・爬虫類…であり、哺乳類の一つが犬・猫・キリン…である、等の分類を表現できる。Dog is A kind of mammal と書けるのでこの名がついている。上位・下位の関係に基づく知識の階層的表現により、知識ベースが整理され、分かりやすく、推論の制御にも効果的である。これが(1)の特徴である。

(2)はAKO関係を通じて値の継承があることを示す。図5のように動物は通常4本足であれば、動物のフレームに4本足であることを登録する。たとえ犬のフレームに4本足という属性が書かれていなくても、

図5 フレームの階層図

動物のフレームからの継承で、直接書かれているように見える。鳥類のような例外には図5のように登録すればその下位のフレームにも2本足という属性が継承する。

基本的に、継承にいかなる意味を持たせるかは知識ベース作成者の采配だが、属性の共用のほか、常識的な推論を行うための default 値の意味を持たせられる。新たなデータが観測され、その属性が分からないとき、典型的な知識を使い推測する。この例では、新たな哺乳類に関するデータが入力され(つまりフレームが作られ)、その他の情報が分からなくても、4本足であることが継承される。通常動物は4本足だから、この動物も4本足だろうと推論する。これは一種の簡単なルールを表現したことに相当する。

3.3 フレームにおける推論

フレームシステムにおける推論は、通常、以下の方法で行われる。

- (1) 階層構造に基づいた継承
- (2) 付加手続き (attached procedures)
- (3) daemon

継承機構は限定されてはいるが一種のルールを表現することは前に述べた。

3.2節で説明したスロット値が静的な宣言的知識であるのに対し、付加手続きは、スロットに格納された手続的知識である。手続的知識はフレームに対する操作や計算のためのプログラムである。

付加手続きは、格納されているスロットにメッセージを送ることで起動される。付加手続きには、フレームの操作のほかに、他の付加手続きへのメッセージ送信が盛り込まれていて、別の手続的知識を起動できる。フレームでは、プロダクションシステムと異なり、具体的な推論の手順はプログラムとして書き、その意味で推論のための特別なメカニズムは持っていない。

(3) の daemon とは、特定のスロットの値が参照/変更されたときにあらかじめ指定した手続きが自動的に動くメカニズムを指す。

フレームシステムにおける問題解決は、必要なフレームを作成し、そのスロットに値を埋め込むことで実現される。その際に上記の3つの推論方法が適宜選択され、推論が進む。

4. その他の知識表現方法

思考過程の表現方法として、述語論理が着目されている。述語論理は学問的にも基盤が確立され、意味が明確で統一的な表現である。推論は三段論法に基づく。近年、述語論理に基づいた言語 PROLOG³⁾ が脚光を浴び、ICOT を中心に研究が行われている。しかし、論理的な側面に偏りすぎ、複雑な実世界を表現するために必要な柔軟な拡張を妨げているように思える。今後の研究に期待したい。

黒板モデル⁴⁾も、エキスパートシステムで使われる知識表現として紹介すべきであろう。ルールで表現された知識を項目ごとにまとめ、モジュール化する。モジュール化された各知識を知識源と呼ぶ。推論は以下のようなサイクルを繰り返して進められる。

- (1) 黒板と呼ばれる共通のデータが記録された領域があり、それを知識源が参照する。
- (2) 必要であれば知識源は推論を行い、処理結果や考えられる仮説を黒板に書き込む。
- (3) それを再び知識源が参照して処理を行う。

黒板はプロダクションシステムの WM と似た役割を持つが、黒板を介して知識源の結果フィードバックや、知識源間の通信が行われる。

5. エキスパートシステム構築用ツール

5.1 プロダクションシステム

EMYCIN⁵⁾ は、スタンフォード大学で開発された血液感染症の診断を行うエキスパートシステム MYCIN を基に、他の専門領域へも適用可能とするために作られたツールである。ルールには確信度 (certainty factor) が付与され、それに基づいて導かれた結果の信頼性も提示する。EMYCIN は後向き推論をサポートし、また結果を導いた根拠を示す説明機能、ルールを自然言語風に表現する機能などを持っている。

前向き推論で現在よく使われているツールはカーネギーメロン大学で開発された OPS5⁶⁾ である。OPS5 は、Rete アルゴリズム⁷⁾⁸⁾ を用いて高速な推論を実現している。電話回線の保守システム ACE、計算機シ

ステムの設計のためのエキスパートシステム R1/XCON 等で使われ、実用化に成功している。しかし、構築のための環境、マン・マシンインタフェースは整っていない。OPS5 に続く OPS83 では、通常のプログラム言語の一部としてプロダクションシステムを位置づけ、実用的なツールとして注目されている。

5.2 フレームシステム

MIT で開発された FRL¹⁰⁾ (Frame Representation Language) は、フレームの生成/消去/表示 (印刷) を行う LISP 関数からなる。各スロットにはファセットという領域が設けられ、スロット値のほか、以下のような指定が可能である。

- (i) デフォルト値
- (ii) daemon の指定
- (iii) スロット値の制約条件

FRL は、会議計画作成システム NUDGE で使用された。FRL でも継承機能は用意されているが、詳細な継承の指定を行ったのはスタンフォード大学の UNITS¹¹⁾ である。UNITS ではファセットをフィールドと呼び、上記のほかにデータタイプの指定、特徴継承の指定等、多くの概念を提供し、現在のフレームシステムの原型となっている。UNITS は分子導伝学の実験計画支援システム MOLGEN で使用された。

UNITS を受け継いだフレームシステムの一つが KEE¹²⁾ (Knowledge Engineering Environment) である。KEE は良好なユーザインタフェースを持ち合わせている。

5.3 ハイブリッド型ツール

フレームやプロダクションルールなど複雑な知識表現/推論方式を持つツールをハイブリッド型ツールと呼び、応用問題に応じて適切な表現/推論を選ぶことができる。最近のツールの多くがこの型に属す。

LOOPS¹³⁾ は、知識表現方式として、知識の階層的表現と継承を特徴とするオブジェクト指向、フレームの daemon に対応するアクセス指向、if ~ then 形式のルール指向、プログラムに対応する手続き指向の4つのパラダイムを持つ。

前出の KEE もプロダクションルールの表現が追加され、ハイブリッド型と言える。ART¹⁴⁾ や KBMS¹⁵⁾ は、フレーム表現のほかに、プロダクションルールも表現でき、RETE アルゴリズムにより、高速な前向き推論を可能としている。ART には View point 機能があり、複数世界の比較や、仮説管理が可能である。近年は、ATMS¹⁶⁾ と呼ばれる仮説管理システムが着目され、多くのシステムでインプリメントされつつある。

KRINE¹⁷⁾ (Knowledge Representation and Inference Environment) は、Frame と LISP による付加手続きに PROLOG 風の論理的な表現を融合している。If ~ then 形式の表現も可能であり、内部で同等な論理的表現に変換される。

ここに述べたツールで実際に商用化されているのは OPS 5, OPS 83, KEE, KBMS, ART である。KEE, ART は Bit map display とマウスに対応した良好なインタフェースを持ち、KBMS はパソコンのグラフィック機能を活かしたインタフェースを提供している。OPS 5 (OPS 83) は多くの実績があることを評価すべきである。

6. お わ り に

本稿では、エキスパートシステム構築用ツールについて述べた。特に、ツール内で実際に行われる知識表現や推論方式を説明し、それに基づいてツールの紹介を行った。本稿で紹介できなかった多くのツールもあるが、紙面の制約から割愛させていただいた。残念ながら現在のところ知識表現や推論方式でこれといった定石のようなものはなく、問題の特徴や作成者の意図に応じて選択するほかない。人工知能研究が発展し、エキスパートシステムの作成が必ずしも計算機の専門家でなくともできるように期待したい。

参 考 文 献

- 1) 人工知能学会誌「AI ツールのユーザインタフェース」特集, 2, 2 (1987).

- 2) M. Minsky: A Framework for Representing Knowledge, in *The Psychology of Computer Vision*, ed. by P. H. Winston, McGraw-Hill, New York, N. Y., (1975) 211-277.
- 3) 後藤滋樹: PROLOG 入門, サイエンス社 (1984).
- 4) L. D. Erman and V. R. Lesser: A Multi-Level Organization for Problem Solving using Many, Diverse, Cooperating Sources of Knowledge, Proc. 4th IJCAI, (1977).
- 5) W. van Melle: A Domain Independent System that Aids in Constructing Consultation Programs, Doctoral Dissertation, Dept. of Computer Science, Stanford Univ., (1980).
- 6) C. L. Forgy: OPS 5 User's Manual, Dept. of Computer Science, Carnegie Mellon Univ., (1981).
- 7) C. L. Forgy: Rete: A Fast Algorithm for the Many Pattern/Many Object Pattern Match Problem, *Artif. Intell.*, 19, (1982) 17.
- 8) 石田 享, 桑原和宏: プロダクションシステムの高速度化技術, *情報処理*, 29 (1988) 467.
- 9) C. L. Forgy: OPS 83 User's Manual, Dept. of Computer Science, Carnegie Mellon Univ., (1985).
- 10) R. B. Roberts and I. P. Goldstein: The FRL Primer, MIT AI Memo 408, (1977).
- 11) M. Stefik: An Examination of a Frame-Structured Representation System, Proc. 6th IJCAI, (1979) 845.
- 12) J. C. Kunz et al.: Application Development Using a Hybrid AI Development System, *AI Mag.*, 5, 3, (1984).
- 13) M. Stefik et al.: Knowledge Programming in LOOPS: Report on an Experimental Course, *AI Mag.*, 4, 3, (1983).
- 14) ART Version 3.0 Reference Manual, Inference Corp., (1987).
- 15) 服部文夫ほか: 知識ベース管理システム KBMS, *情報処理学会研究会*, 41, 6 (1985).
- 16) J. de Kleer: An Assumption-based TMS, *Artif. Intell.*, 28, (1986) 127.
- 17) Y. Ogawa et al.: Knowledge Representation and Inference Environment - KRINE, Proc. ICFGCS, (1984) 643.

FA の標準化推進

日本工業標準調査会 FA 部会 (部会長・吉川弘之氏=東京大学教授) は、このほど、FA (ファクトリオートメーション) の重点標準化項目、標準化のスケジュールなどを示した FA 標準化推進 5 年計画を策定、発表した。

それによると、規格を制定するのは、① 基本事項、② FA システム、③ 相互接続、④ CAD/CAM、⑤ PC

(プログラマブルコントローラ)、⑥ 工作機械、⑦ 鑄造機械及び鍛圧機械、⑧ ビーム加工機、⑨ 産業用ロボット、⑩ 自動倉庫及び自動搬送、⑪ 測定・検査、⑫ FA 用油圧機器——の 12 分野である。また、改正するのは、① 基本事項、② 工作機械、③ 鑄造機械及び鍛圧機械、④ 産業用ロボット——の 4 分野である。

(服部 敏夫)