

# 人工知能における推論と分枝限定法

赤間 清

## 1. おばけは死なない

人工知能における最も典型的なシステムは、いろいろな知識をあらかじめ蓄えておいて、新しい問題が与えられるたびに、その知識のいくつかをうまく組み合わせて、その問題を解くシステムである。

ここでは次のような知識を考えることにしよう。

「おばけは死なない。不老不死の薬を飲むと死なない。鬼太郎は妖怪だ。妖怪はおばけだ。妖怪に似ているものもおばけだ。名前の読みが同じものは似ている。喜太郎は長寿酒を持っている。長寿酒は不老不死の薬である。不老不死の薬を持っている人はそれを飲む。鬼太郎はきたろうと読める。喜太郎もきたろうと読める」

このもとの、次の問題に答えるにはどうすればよいだろうか。

- (1) 死なないものは何ですか？
- (2) 鬼太郎が死なないのは、なぜですか？
- (3) 喜太郎が死なないとすれば、なぜですか？

あかま きよし 北海道大学 文学部 行動科学科  
〒060 札幌市北区北10条西7丁目

## 2. Prolog の枠組みで表現する

このような知識処理を実現するために、演繹推論の枠組みを利用することができる。Prolog はそのなかでも最も手軽な道具（プログラム言語）である。上記のおばけの話は、Prolog で書くと、たとえば図1のようになるだろう。

このプログラムの第1式：

死なない(\*x) ← おばけ(\*x).

は、「\*xがおばけならば、\*xは死なない」と読む。同様に第2式：

死なない(\*x) ← 飲む(\*x, \*y),  
不老不死薬(\*y).

は、「\*xが\*yを飲み、\*yが不老不死薬ならば、\*xは死なない」という意味になる。←の右に並ぶ原子論理式は論理積 (and) で結ばれて条件部となる。それがまったくないとき、←も省略して、

持つ(喜太郎, 長寿酒).

などを書く。これは、「(無条件で) 喜太郎は長寿酒を持つ(が成立つ)」と読める。これで図1は、ほぼ理解されよう。

```

- 2   死なない(*x) ← おばけ(*x).
- 1   死なない(*x) ← 飲む(*x, *y), 不老不死薬(*y).
- 2   妖怪(鬼太郎).
-14  おばけ(*x) ← 妖怪(*x).
-50  おばけ(*x) ← 似ている(*x, *y), 妖怪(*y).
-70  似ている(*x, *y) ← 読み(*x, *n), 読み(*y, *n), noi(*x = *y).
- 2   持つ(喜太郎, 長寿酒).
-13  不老不死薬(長寿酒).
-12  飲む(*x, *y) ← 持つ(*x, *y), 不老不死薬(*y).
- 1   読み(鬼太郎, きたろう).
- 1   読み(喜太郎, きたろう).
    
```

図1 おばけの話を記述するプログラム

### 3. Prolog で問題を解く

さて、このプログラムを利用して、第1の問題、「死なないものは何ですか?」を解いてみよう。それには Prolog システムに、

死なない(\*x)

を質問として与えればよい。その正確な意味は、「死なない(\*x)を成立させるような \*x があれば、それを求めよ」という意味である。次の解を要求する度に Prolog は 1つずつ解を出力する。この場合それは次のようになる。

- (1) 死なない(鬼太郎)
- (2) 死なない(喜太郎)
- (3) 死なない(喜太郎)
- (4) 解はもうない

Prolog がこのとき何をやっているかという、

死なない(\*x)

という形の結論が出るような証明を、図1の知識をもとにして作っているのである。Prolog は、1つの証明を作るたびに、1つの解を与える。

上記の(1)の「鬼太郎が死なない」に対する証明は、もちろん、「鬼太郎が妖怪で、妖怪はおばけで、おばけは死なない」というものである。また、(2)と(3)はともに喜太郎を答えているが、これは「喜太郎が死なない」を証明するために2つのやり方があるためである。(2)の証明は、「喜太郎が妖怪の鬼太郎と似ているので、喜太郎はおばけであること、おばけは死なないこと」などからなる。(3)の証明は、「喜太郎は不老不死の薬である長寿酒を持ち、それを飲んだので死なない」という内容である。

以上より Prolog は、

- (1) 死なないものは何ですか?

という質問に答える過程で、

- (2) 鬼太郎が死なないのは、なぜですか?

- (3) 喜太郎が死なないとすれば、なぜですか?

などにも答えるだけの処理を行なっていることがわかる。つまり、演繹論理や Prolog の枠組みは、基礎知識(公理)から結論を導いたり、ある性質を満たす対象を求めるだけでなく、何かの理由を発見するためにも使える可能性を持っている。

### 4. 不確実な知識も扱いたい

しかしおばけの話を図1のように扱うやり方には疑問点がある。おばけの話では、「妖怪に似ているものはおばけだ」や、「不老不死の薬を持っている人はそれを飲

む」など、いつも成り立つとは限らないような知識がたくさん出てくる。不老不死の薬を持っている人は、それを自分で飲まずに、高貴な人に献上して自分の栄達をはかるかも知れない。それなのに、図1ではすべて、常に成立つ知識として扱われている。Prolog では常に成立つ知識しか許されないのだ。

この困難を緩和する方法の1つは、各知識の断片に確実度のようなものを付けることである。それを可能にするのは、BFS-Prolog[1]の枠組みである。BFS-Prolog では、知識(公理)の1つ1つに確信度が付与される。そして、証明の結果得られる結論には、証明に利用されたすべての公理の確信度に依存した確信度が与えられる。

### 5. BFS-Prolog の動作

図1のプログラムの中のおおの知識に確信度を付けよう。実は図1の左にある数値が、それぞれの知識に付けた確信度のつもりである。普通の Prolog プログラムと BFS-Prolog のプログラムはそこだけがちがう。

確信度は certainty factor の訳語であり、普通は0から1までの間の実数で表わされることが多い。しかしここでは-100から0までの整数を用いることにする。それは大きいほど確信度が高いことを示すものとする。数値は厳密には考えない。各知識の確実性の度合いの相対的な差をなんとなく表現できればよい。

BFS-Prolog の枠組みでは、

「死なないのは何ですか」

という質問に対して次の順に3つの解を答える。

- (1) -18 死なない(鬼太郎)
- (2) -41 死なない(喜太郎)
- (3) -126 死なない(喜太郎)
- (4) 解はもうない

それぞれの先頭に書いてあるのが結論の確信度である。たとえば、(1)死なない(鬼太郎)の確信度は-18で、それは証明に利用された知識:

-2 死なない(\*x)←おばけ(\*x)。

-14 おばけ(\*x)←妖怪(\*x)。

-2 妖怪(鬼太郎)。

の確信度の和として、

$$-18 = (-2) + (-14) + (-2)$$

によって算出されたものである。

同様に、第2の解は、次のような知識が証明に使われている。

- 1 死なない(\*x)←飲む(\*x, \*y),  
不老不死薬(\*y)。

-12 飲む(\*x, \*y)←持つ(\*x, \*y),  
不老不死薬(\*y).

-2 持つ(喜太郎, 長寿酒).

-13 不老不死薬(長寿酒).

-13 不老不死薬(長寿酒).

結論の確信度の計算は、次のとおり.

$$-41 = (-1) + (-12) + (-2) + (-13) + (-13)$$

第3の解も念のため、書いておこう.

-2 死なない(\*x)←おばけ(\*x).

-50 おばけ(\*x)←似ている(\*x, \*y),  
妖怪(\*y).

-70 似ている(\*x, \*y)←読み(\*x, \*n),  
読み(\*y, \*n),  
not(\*x=\*y).

-1 読み(鬼太郎, きたろう).

-1 読み(喜太郎, きたろう).

-2 妖怪(鬼太郎).

結論の確信度の計算は、次のとおり.

$$-126 = (-2) + (-50) + (-70) + (-1) + (-1) + (-2)$$

## 6. より良い理由づけが必要

Prolog と BFS-Prolog では、解(証明)の数は同じでも、解(証明)の順序が異なることに注意したい。BFS-Prolog では、「おそらく不老不死の薬を飲んだらうから喜太郎は死なない」という証明を第2番目に探し出す。

これは重要である。われわれはより良い証明が欲しいからだ。より良い証明は、より良い理由づけを導くことができる。Prolog では最適な解を求めるためには、すべての解を求めて比較する必要がある。これは明らかに無駄である。BFS-Prolog は、最小限の探索によって、必要な個数の解を、より良い解から順に求めることができる。その探索は分枝限定法によって証明できる。

## 7. 分枝限定法で、より良い解を見つける

BFS-Prolog で、より良い解をどのようにして見つけるかを見てみよう。与えられた問題は、

Q1=[死なない(\*x)]

である。これをなるべく高い確信度で満足する \*x を求めなければならない。これを解決する可能性のある知識は、

-2 死なない(\*x)←おばけ(\*x).

-1 死なない(\*x)←飲む(\*x, \*y),  
不老不死薬(\*y).

の2つである。もし

Q2=[おばけ(\*x)]

が解決すれば、前者の知識を使って Q1 は解決する。また、もし

Q3=[飲む(\*x, \*y), 不老不死薬(\*y)]

が解決すれば、後者の知識を使って Q1 が解決する。2つの知識の確信度は、-2 と -1 である。利用する知識の増加とともに、結論の確信度は単調に減少する。したがって前者の知識を使った場合、最終的に得られる確信度は -2 以下になる。同様に後者の場合は -1 以下となる。

{Q2: -2 以下, Q3: -1 以下}

したがって次に取り上げるべき問題は Q3 である。Q3 を解くために、

Q4=[飲む(\*x, \*y)]

をまず解こうとする。and で結ばれた問題を前から順に解こうとするのは、Prolog の普通の戦略である。Q4 を解く可能性のある知識は、

-12 飲む(\*x, \*y)←持つ(\*x, \*y),  
不老不死薬(\*y).

だけである。この結果 Q3 の残された問題は、

Q5=[持つ(\*x, \*y),  
不老不死薬(\*y),  
不老不死薬(\*y)]

となる。これは Q3 の中の飲む(\*x, \*y)が、

持つ(\*x, \*y), 不老不死薬(\*y)

に置き換えられた結果得られる。こうして解決の可能性は、次の2つになった。

{Q2: -2 以下, Q5: -13 以下}

こんどは、Q2 を取り上げるべきである。

-14 おばけ(\*x)←妖怪(\*x).  
-50 おばけ(\*x)←似ている(\*x, \*y),  
妖怪(\*y).

Q2 を解く可能性のある知識は、これら2つで、それらはそれぞれ、Q6 と Q7 をつくる。

Q6=[妖怪(\*x)]  
Q7=[似ている(\*x, \*y), 妖怪(\*y)]

いま可能性のある解決方法は次の3つになった。

{Q6: -16 以下,  
Q7: -52 以下,  
Q5: -13 以下}

```

- 2   死なない(*x) ← おばけ(*x).
- 1   死なない(*x) ← 飲む(*x, *y), 不老不死薬(*y).
- 2   おばけ(鬼太郎).
-50  おばけ(*x) ← 似ている(*x, *y), おばけ(*y).
-70  似ている(*x, *y) ← 読み(*x, *n), 読み(*y, *n), not(*x = *y).
- 2   持つ(喜太郎, 長寿酒).
-13  不老不死薬(長寿酒).
-12  飲む(*x, *y) ← 持つ(*x, *y), 不老不死薬(*y).
- 1   読み(鬼太郎, きたろう).
- 1   読み(喜太郎, きたろう).

```

図 2 妖怪ぬきのプログラム

次は Q5 が選ばれ, Q8 が作られる.

Q8=[持つ(\*x, \*y)]

これは

-2 持つ(喜太郎, 長寿酒)

で解決され, 事態は次のようになる.

Q9=[不老不死薬(長寿酒),  
不老不死薬(長寿酒)]

{Q6: -16 以下,

Q7: -52 以下,

Q9: -15 以下}

Q9 は知識:

-13 不老不死薬(長寿酒).

により, Q10 となる.

Q10=[不老不死薬(長寿酒)]

{Q6: -16 以下,

Q7: -52 以下

Q10: -28 以下}

ついに Q6 の番が回ってきた. 使える知識は

-2 妖怪(鬼太郎).

である. \*x=鬼太郎としてこの知識が適用され, Q11 が作られる.

Q11=[ ]

新しい問題のリストは,

{Q11: -18 以下,

Q7: -52 以下,

Q10: -28 以下}

であり, 次に選ばれる問題は Q11 である. これはすでに解決している. こうして最も良い解が,

Q1→Q2→Q6→Q11

という系列から得られる. 確信度は -18 となる.

次に良い解は, 上記の問題リストから Q11 を取り去って得られるリスト:

{Q7: -52 以下, Q10: -28 以下}

から同じことを続行することによって得られる. それ以下の解も同様にして求まる.

## 8. 妖怪=おばけ?

ところで, 妖怪とおばけとはどう違うのだろうか. 実は鬼太郎は妖怪であって, おばけではないという人もいる. しかし「おばけは死なない」などと歌われており歌詞ではおばけにされている. そんなわけだから, おばけの話を知識として書くとき, 妖怪ぬきで, おばけだけで書いてしまうことも十分ありうる.

妖怪をぬきにした図 2 のプログラムを考える. これを普通の Prolog で動かしてみよう. 前と同じように, 「死なないのは何か」を聞いてみる. 最初の答えは,

死なない(鬼太郎)

である. しかしもう 1 つの解を要求すると, また

死なない(鬼太郎)

と答える. このように解を要求するたびに, Prolog は何度でも, 同じ答えだけを答える.

ここでなにが起ったのだろうか. Prolog はどんどん別な証明を作り続けているのである. 原因は, 鬼太郎がおばけだということの証明を, 喜太郎を経由してまた鬼太郎がおばけだという証明に帰着できるところにある. このループを何回かまわるかだけがちがう証明が, 無限に作られてしまう. したがって,

死なない(喜太郎)

という答えは永久に得られない.

これは知識を扱う場合に大変困った問題である. しかし BFS-Prolog ならば, 新しいプログラムでもうまくやることができる. それは, おおよそ次のように答える.

(1) -4 死なない(鬼太郎)

なぜなら, 鬼太郎はおばけで, おばけは死なないから.

(2) -41 死なない(喜太郎)

なぜなら、長寿酒は不老不死薬であり、それを持つ喜太郎はきっとそれを飲み、不老不死薬を飲んだら死なないから。

(3) -126 死なない(喜太郎)

なぜなら、鬼太郎はおばけで、鬼太郎に似ている喜太郎はたぶんおばけであり、おばけは死なないから。

(4) -248 死なない(鬼太郎)

なぜなら、鬼太郎はおばけで、鬼太郎に似ている喜太郎はたぶんおばけであり、喜太郎に似ている鬼太郎はたぶんおばけであり、おばけは死なないから。

あとの繰り返しは省略する。BFS-Prolog でも要求を続ける限り、無限に解がでるのは同じだが、良い解から出してくれるので、知識処理はうまくできる。

### 9. むすび

逐次的に学習を進めてゆくシステム [3] は、不完全な知識をたくさん扱うことになる。BFS-Prolog の最良優先探索は、獲得された中でよりよい組合せの知識を的確に利用することを保証する。

日常の人間の行動などに関する知識には、ある場合にだけ成り立つ可能性のあるような知識が多い。BFS-Prolog の枠組みは、そのような雑多な知識を、小さな確信度を与えて気楽に書き進めることを可能にする。小さな確信度を持つ知識が大量にあっても、実際の推論の速度をいちじるしく悪化させることはない。

現在、知識処理に重要ないくつかの機能を統合した知識表現言語の構築が進行中である。それは、BFS-Prolog や継承階層 Prolog [2] などを含むものであり、自然言語の意味処理などで大きな成果をあげつつある。

### 文 献

- [1] 赤間清：確信度付き論理プログラムの最良優先探索アルゴリズム，人工知能学会誌，Vol.2, No.1, pp.85-91(1987)
- [2] 赤間清：PAL：継承階層を扱う拡張 PROLOG，情報処理学会論文誌，Vol.28, No.4, pp.27-34(1987)
- [3] 赤間清：帰納的学習システム LS/1 による翻訳の学習，人工知能学会誌，Vol.2, No.3, pp.341-349(1987)

報文集 T-86-1

## 南北協力の新しい戦略

——マイクロ電子技術を起爆として——

頒価会員3,500円  
英文別刷1,000円

現在の世界は、人口の1/4を占める先進国が富の約8割を占め、先進国と発展途上国との貧富の格差はますます増大しつつある。先進国で余ったカネは中進国に貸付けられて、債務は危機的状況にまで膨らんでいる。世界経済の崩壊が懸念される今日、世界規模での新マーシャル計画が主張されている。単なる金銭援助ではなく、第三世界の自立発展を促す方向での技術移転をともなった援助計画が必要であろう。このような意識に基づき、OR研究者の目で見ても何らかの寄与ができるのではないかと願望をもって、森口繁一本学会元会長を主査とする研究部会が組織されたのは1982年4月であった。

爾来4年余、同主査を中心に続けられた活動の成果をまとめたのが、本報文集である。1985年1月号の本誌には「第三世界とマイコン」というテーマの特集を組み、それまでの研究の一応の総括を行なっている。この内容のうちの若干を英文にした第I部、主として1985年の活動で得られた知見を中心にまと

めた第II部、それにいくつかの記録を集めた付録から成っている。

第II部冒頭の「虚の世界と実の世界」では人類の生活向上のために、実際に富を生産し活用する「実の世界」と、本来はその運用を援けるための貨幣経済が築く「虚の世界」を意識的に分けてみる視座を提唱し、そして現在の「世界の難問」、すなわち全世界が「虚の世界」に振り回されている危機的状況を回避する方策を、西側先進国、特にわが国に対して提案する。

以下「マイクロ電子技術と国際経済の活性化」「エネルギー有効利用と産業構造の関係からみた技術移転問題」「資本の国際移動と国際分業の便益」「軟らかい産業基盤のためのマイコンの所要台数」「体験的技術協力論」「第三世界におけるパソコン用エキスパート・システムの役割」「東南アジアの中小企業育成と日本の協力」「マレーシアの産業事情」等が収められている。