

フレーム問題について

On the Frame Problem

松原 仁* 山本 和彦*
Hitoshi Matsubara Kazuhiko Yamamoto

* 電子技術総合研究所パターン情報部
Information Sciences Division, Electrotechnical Laboratory.

1987年6月1日 受理

Keywords: frame problem, knowledge representation, reasoning, description, formal logic.

1. はじめに

状態の記述方法および状態に適用可能な作用素の記述方法が、あらかじめ定義されているものと仮定する。ある状態Aにある作用素を適用して、他の状態Bに遷移した際に、AとBの間で何が変化して何が変化しないかをどのように記述するかという問題のことを、一般にフレーム問題 (frame problem) ⁽¹⁾⁻⁽³⁾ と呼ぶ (付録にフレーム問題のいくつかの定義を示す)。作用素の適用が影響を及ぼす範囲をどのように限定するかという問題である、と言い換えることもできる (図1参照)。1969年に McCarthy と Hayes が初めて提唱して以来 ⁽¹⁾、知識の表現と利用にまつわる重要な概念として、人工知能における議論の対象にしばしば取り上げられている。

しかし、これまでの議論では論点がやや不明確であったため、フレーム問題の解決という言い方をしたときに、それが何を意味しているのかについて、統一的な定義が得られていなかった。すなわち、何が解決すべき真の問題点であるのかが、はっきりしていなかったのである。人工知能にとって重要な概念であるからこそ、議論をする以前に、そもそも解決すべき問題が何であるのかをまず明らかにしておく必要があると思われる。

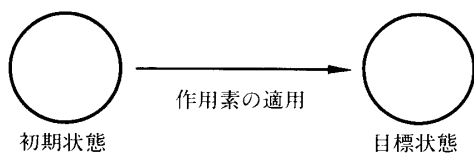


図1 フレーム問題の設定

この解説では、フレーム問題の意味を整理することを目指して、いくつかの思弁的な考察を行う。フレーム問題における解決すべき真の問題点を明らかにすることのみがこの解説の目的であり、その問題点を解決するにはどうすればよいかについては、将来の大きな課題として残しておくものとする。ここでの主張の内容をまとめると次のようになる。

- ① フレーム問題は、一般的には決して解決できない。
- ② したがって、解決を目指すことに意味がない。
- ③ フレーム問題は、知識表現の枠組みだけではなく、表現されている知識の内容にも関係する概念である。
- ④ 人間もフレーム問題を一般的には決して解決してはいない。
- ⑤ 人間が、あたかもフレーム問題を解決しているかのように見えるのはなぜか、を解明することこそが、未解決の興味深い問題である。

以下では、まずフレーム問題に関するこれまでの議論を簡単に振り返ってから、上記の各項目について検討を加えることにしよう。

2. フレーム問題の発端

ここでは、行動計画の自動生成 (automatic plan generation) の領域でフレーム問題が取り上げられた発端について説明する。人工知能には、初期から定理の自動証明 (automatic theorem proving) という研究領域が存在し、行動計画の自動生成は、その応用として研究が始められた。行動を計画することを、公理から定理を証明する過程としてとらえたのである。定理の自動証明は、数学を対象としているために、知識

表現の枠組みには自然と形式論理が使われることが多かった。そのような経緯において、当初のフレーム問題は、形式論理という枠組みに固有の問題として議論されたのである。

積み木Aが積み木Bの上に乗っているという命題を、(on A B)と表現することにする。古典的な形式論理には状態の変化の概念がない。(on A B)は、公理ないしは定理として扱われるので、ひとたび成立すると永久に成立していることになる。行動計画の自動生成は、現在の状態から目標の状態に変化させるための手順を求めることが目的なので、状態が変化しなくては意味をなさない。そこで、状態の概念を陽に引数に持ち込んで、状態SでAがBの上に乗っていることを(on A B S)として表現することがまず考えられた。しかし、この方法では、各状態・各作用素に対して、ある状態にある作用素を適用するとどうなるのかを、変化するしないにかかわらず全ての場合について記述することになる。状態数 m ・作用素数 n に対し、 $m \cdot n$ 個の規則を記述しなければならない。

一般に、ある作用素の適用によって変化するのは状態の記述の中のごく一部である。たとえば、電灯のついている部屋の中でコップを持ち上げても、電灯はふつついたままである。上記の記述方法を用いると、「コップを持ち上げても電灯はついたままである」、「コップを置いても電灯はついたままである」、「コップから水を飲んでも電灯はついたままである」、などという規則を1つ1つ記述しておかねばならない。

もしも状態の記述の量を減らしたいのであれば、命題は、それが初めて成立する状態でのみ記述することに決めて、その状態以降は、その命題が陽に否定されるまではずっと成立しているとみなす、という方法も存在する(この方法については後で詳しく述べる)。この方法を用いれば、確かに状態の記述の量を減らすことはできるけれども、新たに、ある状態である命題が成立しているかどうかを知るために、その命題に関する最も近い記述を求めて、以前の状態にさかのぼった推論を行う必要が生じる。

フレーム問題は、このように記述の量とともに推論の量にも関連する概念である。別の言い方をすれば、フレーム問題は、知識を表現してそれを利用する際に必要な空間の量と時間の量との両方に関係する。また、フレーム問題は、単にコンピュータ上の効率だけの問題ではない。人間がどのように対処しているかという点で哲学や心理学にも深い関係がある⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。すなわち、認知科学全般に共通のきわめて重要な問題なのである。

3. フレーム問題の解決の試み

フレーム問題の解決策としてまず考えられたのが、形式論理に対する副作用の導入である。STRIPS⁽⁶⁾という行動計画の自動生成システムで採用された。1つ1つの作用素に対し、その作用素を適用するための条件(precondition)、その作用素の適用によって状態に新たに加わる命題リスト(add-list)、逆に状態から取り除かれる命題リスト(delete-list)、をそれぞれ定義しておく(図2参照)。作用素を適用するたびに、この定義に従って公理ないしは定理を実際に書き換えることにすれば、過去にさかのぼった推論を行う必要はない。したがって、推論の量の点では一応の改善になっている。

operator	Pickup (x)
precondition	(ontable x) (clear x) (handempty x)
add-list	(holding x)
delete-list	(ontable x) (clear x) (handempty x)

図2 STRIPSにおける定式化

しかし、STRIPSにおいては、作用素をその作用対象と切り離して表現しているため、作用の副作用が作用対象によって異なる場合には機能しないという限界がある。たとえば、カップが受け皿の上に乗っている状態を考えてみよう⁽⁷⁾。下の受け皿を移動すると上のカップも付いて移動するが、上のカップを移動しても下の受け皿は付いて移動しない。この差は「移動」という作用素だけでは表現できない。もちろん、この限界を解消すること自体は簡単である。個々の物体に対しその物体に適用できる動作をもれなく記述しておくという方法がある。また、動作記述子の引数に物体名も陽に書いて、個々の物体ごとに異なる副作用を記述するという方法もある。けれども、どちらの方法も基本的には物体ごとの記述を必要とするので、元のフレーム問題の発端に話が戻ってしまうことになる。フレーム問題に対する解決策とはなり得ない。

高階の述語を導入することによって、カップと受け皿の例は取り扱えるようになる。Sandewallは、UN-

LESS という高階の述語を導入している⁽²⁾。“IS (obj, prop, sit)”は obj という物体が sit という状態で prop という性質を持つことを表す述語であるとする。同様に，“ENDS (obj, prop, sit)”は、obj という物体が、sit という状態で prop という性質をもはや持たないことを表す述語であるとする。さらに，“succ (sit, act)”は、sit という状態で act という動作を行った後の状態を値とする関数であるとする。

IS (obj, prop, sit)

UNLESS (ENDS (obj, prop, succ (sit, act)))

IS (obj, prop, succ (sit, act))

という推論規則は，“IS (obj, prop, sit)”が定理であり，“ENDS (obj, prop, succ (sit, act))”が定理でない（証明できない）ならば，“IS (obj, prop, succ (sit, act))”は定理と見なす、という意味を持っている。物体の種類によって ENDS の記述を変更することにすれば、カップと受け皿の例は取り扱い可能である。

UNLESS オペレータを用いれば、全ての場合を漏れなく記述する必要はなく、例外に相当する場合だけを記述すればよい。しかし、ある状態である定理が成り立っているかどうかを調べるには、過去の状態にさかのぼって推論を行う必要があるため、推論の量の点でフレーム問題が解決できていないことになる。実は、記述の量の問題を推論の量の問題に転嫁しているに過ぎない。

McDermott らの非単調論理 (non-monotonic logic)⁽⁸⁾は、高階の様相記述 (M で表現する) を用いることによって定理の数の非単調な変化に対応を図っている。これは、Sandewall の UNLESS オペレータの一般化と見ることができる⁽⁹⁾。“M (電灯がついている)”は、その状態における他の記述と「電灯はついている」の命題が矛盾しない限り、すなわち「電灯はついている」の命題が陽に否定されていない限り、「電灯はついている」と見なしてよい、という様相命題である。この記述が存在すると、もしも「電灯はついている」ことが偽であると判明していなければ、「電灯はついている」が真と仮定して推論を進める。後で「電灯はついている」ことが偽と判明したならば、この命題を真と仮定したことによって得られた定理は全て消去することになる（これが非単調の所以である）。人間の常識推論を表現するために考え出された枠組みである。

非単調論理におけるフレーム問題の取り扱いとは、当然ながら UNLESS オペレータにおける取り扱いと非常によく似ている。例外だけを記述すればよいので記述の量の点については改善されているが、ある命題がある状態で真か偽かを決定するためには、過去にさか

のぼって推論を行う必要があるため、推論の量の点では解決になっていない。非単調論理と同様に形式論理の範囲の中で、常識推論の実現を目指す枠組みとして、McCarthy の circumscription⁽¹⁰⁾ や Reiter の default logic⁽¹¹⁾ などが知られている⁽⁹⁾⁽¹²⁾が、どれもがフレーム問題に関しては（非単調論理と同じ意味で）解決になっていない。表面上フレーム問題を取りつくりつくりのように見えてはいても、問題のある場所から他の場所へ移動しているだけに過ぎないのである⁽¹³⁾。

ここまでは、形式論理の枠内におけるフレーム問題の取り扱いについて述べてきたが、その枠外での取り扱いにもふれておくことにする。

Minsky の提案したフレーム理論⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾（この概念は、フレーム問題とは無関係であることに注意された）は、階層性・性質の継承・デフォルトなどの特徴を有した人間の常識推論のモデルである。たとえば、「鳥」のフレームには、デフォルトとして「飛べる」と記述してある。その下位フレームである「つばめ」には、飛べる飛べないに関する記述はない。この場合は、上位フレームの性質が継承されるので、「つばめ」は「飛べる」ことがわかる。「鳥」の下位フレームである「ペンギン」には、陽に「飛べない」ことが例外として記述してある。この理論ではフレーム間の制御の移動が推論に対応する。

フレーム理論も、形式論理における高階述語の導入と同じ意味において、フレーム問題の解決にはなっていない。例外だけを記述すればよいという意味で記述の量の点では改善されているが、例外でない、常識的な知識を取り出す際には、上位のフレームを順々にたどっていく必要があるため、推論の量の点では解決になっていないのである。このことは、特に階層が深い場合や多重の性質継承が存在する場合などに表面化しやすい。フレーム理論を説明する際に、そのような例を用いることはまれであるために、フレーム問題が、フレーム理論における「問題」として取り上げられることもあまりなかったのであろうと考えられる。

代表的な知識表現の枠組みとして、ほかにプロダクション・システムとセマンティック・ネットワークの2つが存在するが、フレーム問題との関係においては、プロダクション・システムは形式論理と、セマンティック・ネットワークはフレーム理論と、それぞれ同一視することができる。すなわち、どちらの枠組みでもフレーム問題は解決されていない。

手続き的に知識を表現する⁽¹⁶⁾と、宣言的に表現する場合とは異なり、知識や推論がプログラムの中に完全に埋め込まれるので、フレーム問題があたかも出現

しないかのように見える。しかし、これは表面化していないだけであって、決して解決されてはいないのである。完全に手続き的な表現を用いると、知識や推論をつかさどる主体が、コンピュータではなく人間になってしまうので、知識表現の枠組みは何らかの意味で宣言的である必要があると考える⁽¹⁷⁾。したがって、手続き的な知識表現におけるフレーム問題の取り扱いについては深く追求することはしない。

なお、中島の Prolog/KR⁽¹⁸⁾ やわれわれの RAPS⁽¹⁹⁾ においては、フレーム問題の「解決」という言葉を、コンピュータ・システムが知識の書き換えを(バックトラックなどを含めて)自動的に行うために、ユーザである人間はフレーム問題を考慮する必要がない、という意味で使用しているので、ここでの議論からは除外する。

4. 考 察

4.1 フレーム問題とは

3節でフレーム問題に対する解決の試みを振り返ったが、どれも本質的な解決にはなっていなかった。フレーム問題を解決するには、記述の量と推論の量の両方を解決しなければならないが、解決策は、みなどちらか一方を犠牲にして、もう一方の解決を図ったに過ぎなかった。特に、図3に示すように推論の量を犠牲にして記述の量を減らそうとした試みが多かった。

そもそもフレーム問題というのは、すでに問題を設定した段階において、一般的には決して解決できないと考えるのが妥当であろう。すなわち、状態の記述方法と状態に作用する作用素の記述方法が、問題の設定条件として固定されている限り、コンピュータは決してフレーム問題を解決できないのである。

より宣言的に知識を表現しようとするほどフレーム

問題が表面化しやすいので、形式論理においてフレーム問題が最も顕著なのは理解できる。しかし、形式論理を知識表現の枠組みと見なした場合の短所に、フレーム問題を取り上げるのは大きな誤りである。セマンティック・ネットワーク、プロダクション・システム、フレーム理論などのいかなる枠組みを持ってきたとしても、フレーム問題は決して解決されない。どのような新しい枠組みを設計したとしてもその点は同じである。たとえ手続き的に知識を表現したとしても解決にはならない。解決の可能性の有無を枠組みの性質に帰すべき問題ではないのである。

フレーム問題を例外の取り扱いに即して説明するならば、記述の量も推論の量もふやすことなく例外を取り扱うにはどうすればよいか、という問題に帰着される。例外を取り扱うためには、あらかじめ例外だけをもれなく記述しておくか、知識が必要になった時点で例外かどうかを判定するための推論を行うか、記述と推論とを適当に組み合わせて併用するか、いずれにする、結局はどれが例外であってどれが例外でないかの情報を保持しておかなければならない。したがって、記述の量も推論の量もふやさずに例外を取り扱うことは原理的に不可能なはずである。

4.2 記述の量と推論の量

フレーム問題は、一般的には解決できないので、当然ながら一般的な解決を目指すことには意味がない。新しい知識表現の枠組みの設計は、フレーム問題の解決を目指してではなく、フレーム問題の制限を受ける範囲内での常識推論の実現を目指して行われるべきである⁽⁹⁾⁽¹²⁾。しかし、特定の知識表現の枠組みにおける記述の量と推論の量との間のトレードオフについて考慮することは非常に重要である。記述の量を犠牲にして推論の量を減らそうとするのか、逆に推論の量を

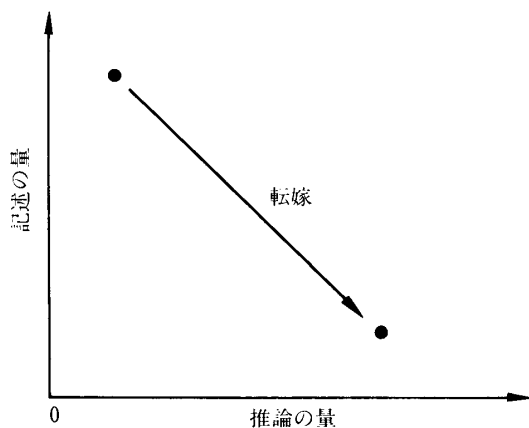


図3 記述の量から推論の量への転嫁

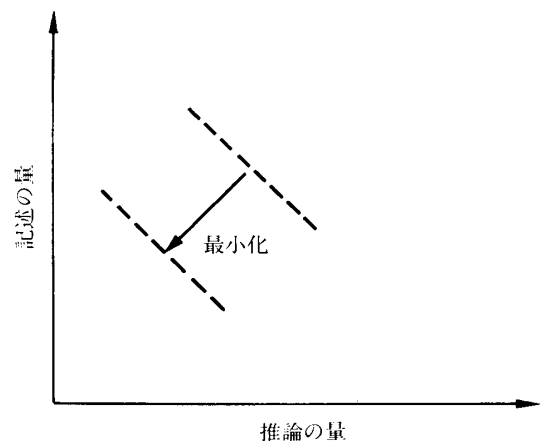


図4 2つの量の和の最小化

犠牲にして記述の量を減らそうとするのか、の決定は知識表現の本質的な分岐点になるからである。

記述の量は、空間的な概念なのに対し、推論の量は、時間的な概念なので、両者をそのまま比較することは不可能である。もしも何らかの共通の尺度を準備して両者の「加算」（ないしは「乗算」）を定義することにすれば、両者間のトレードオフを定量的に評価できるようになるはずである。Levesque と Brachman が、知識表現の計算量について行った議論⁽²⁰⁾と似たような議論も可能になるであろう。個々の知識表現を対象として記述の量と推論の量の「和」の最小化を目指すことには大きな意味がある（図4参照）。けれども、この問題のことをフレーム問題と呼ぶのはもはや適当ではないと考える。

4・3 フレーム問題と時・空的効率

従来のフレーム問題に関する議論では、もっぱら知識表現の枠組みだけが考慮の対象となっていた。しかし、実際にどのような知識が表現されているのか、あるいは、その知識がどのように利用されるのかも、フレーム問題と決して無関係ではあり得ないのである。前述したようにフレーム問題は、知識の表現と利用における空間的・時間的な効率に密接な関係がある。具体的な知識の内容と無関係にそれらの効率が決定されるはずはない。むしろ、知識の内容のほうが決定的な要因であるのかもしれない。

ある例題をある枠組みで効率よく表現できたとしても、他の例題もその枠組みで同様に効率よく表現できるとは必ずしも限らない。もし、ある例題をある枠組みで表現することによって、記述の量の問題を解決できたとするならば、それはその例題についてのみ解決したと考えるべきであって、その枠組みについて解決したと考えてはならないのである。記述や推論の単位にどれだけの情報が含まれているかによって、ある情報処理を実行するのにその単位をいくつ組み合わせなければならないかが変わる。すなわち、その処理に必要となる記述の量と推論の量が変化する。フレーム問題を論じる際にその変化の影響を無視しては、そもそも何を問題にしているのかがわからなくなってしまう。

4・4 フレーム問題と人間

視点を変えて、人間はどのようにフレーム問題を取り扱っているのかについて考えてみよう。「人間はフレーム問題を解決できるのにコンピュータはできない。この違いが、コンピュータは人間並みの知能を持ってない理由なのである」という主張も存在する。はたして、

人間は本当にフレーム問題を解決しているのであろうか。人間も決してフレーム問題を一般的には解決していないと考えるのが妥当である。状態の記述方法と状態に作用する作用素の記述方法が固定されている限り、コンピュータに解決できないのと同様に人間にも解決できない。記述の量と推論の量の両方を減らすことは、人間にとっても絶対に不可能なはずである。ゲーデルの不完全性定理によって、人間とコンピュータの間に本質的な差が存在することを証明しようという試みが、完全な失敗に終わったように、フレーム問題によっても人間とコンピュータの間の差は説明できない。

人間もフレーム問題に直面していると感じることがある。開いた系だけでなく、閉じた系においてもフレーム問題は発生する。未知の対象の問題解決を行う際に、既知の対象との類推をうまくとることができなければ、一般に人間もフレーム問題に直面するのである。類推がとれない未知のゲームをマスターする場合を考えてみよう。この場合には、そのゲームにおける状態の記述方法と状態に対する作用素の記述方法を、最初から記憶しなければならない。ゲームを完全にマスターするまでは、ある状態で、ある命題が成立しているかどうかを判定するために、かなりの記述の量もしくは推論の量を必要とすることが実感される。たとえば、詰め将棋を解く際に実際に駒を盤の上で動かす人（ちなみに本来は頭の中だけで解かなくてはいけない）は、詰め将棋におけるフレーム問題に直面して解決ができなくなっているのである。言い換えれば、人間の処理能力を越えた量の処理が必要になっていることを意味する。

4・5 解決すべき真の問題点

人間においては、多くの場合フレーム問題が「問題」にすらならない。人間もフレーム問題を解決していないとすれば、人間があたかもフレーム問題を解決しているかのように見えるのはなぜであろうか。この間に対する答はまだ出ていない。この謎の解明を目指すことこそが興味深い問題であると思う。すなわち、フレーム問題における解決すべき真の問題点である。

詰め将棋をマスターすると、頭の中だけで局面を自由に操作することが可能になる。数十手先の局面も直感的にほぼ誤りなく思い浮かぶようになる。記述の量も推論の量も問題にならなくなるのである。フレーム問題を解決できないとすれば、何が起こったのだろうか。フレーム問題に直面しなくなったと考えざるを得ない。初心者には、フレーム問題に直面して解決ができないのに対し、熟練者は、そもそもフレーム問題に直面しない。熟練者は、もはや初心者と同じような定式

化はしていないのであろう。人間が、フレーム問題に直面しなくなる過程において、定式化の変化が本質的な役割を担っているものと考えられる。

5. おわりに

この解説では、フレーム問題に対する基本的な考え方について述べた。フレーム問題は、人間にもコンピュータにも一般的には決して解決できないのに、人間はあたかも解決しているかのように見えるのはなぜか、が解決すべき真の問題点であると考えられる。とはいえ、決してフレーム問題を考えること自体に意味がないと主張しているのではない。ある知識をある枠組みで表現しようと試みる際に、フレーム問題がどのような場所に、どのような形で出現するのかを明らかにしておくのは重要である。フレーム問題をどのように取り扱っているかは、その知識表現の特徴を示すよい指標になり得るからである。

この解説は、いわばフレーム問題についての現状認

識を濟ませた段階に過ぎない。ここで主張した考え方に基づいて、真の問題点を解決するためにはどうすればよいか、という考察を現在進めている最中である。もっとも、きわめて難しい問題であるので、ただちに解決されるなどということは到底期待できない。ともあれ、フレーム問題についての論点の定まった議論が盛んになることを強く期待したい。この解説がそのきっかけになれば幸いである。本稿の執筆後に、本年 U. S. A. で開催されたフレーム問題に関するワークショップの会議録⁽²⁴⁾を入手した。

謝 辞

東京大学工学部機械工学科の井上博允教授および井上・稲葉研究室の皆さま、電子技術総合研究所の中島隆之パターン情報部長および画像処理研究室の皆さまに感謝します。また、フレーム問題についての議論に応じていただいた人工知能輪講グループ AIUEO や認知哲学研究会寺子屋のメンバーをはじめとする多くの方々に感謝します。

◇ 付 録 ◇

《フレーム問題の定義》

- (1) 関係のあるもの同士は少数であるのに、多数の無関係さを記述しなければならないという問題⁽¹⁸⁾。
- (2) 新たに規定された利用可能な情報に照らして、修正される必要があるかもしれない信念の集合を、「枠」で囲む問題⁽⁴⁾。
- (3) 命題の集合として理解できる知識が、新しい情報の獲得に伴って組みかえられるときに、知識が全体の改編（これを始めると膨大な量の無駄な計算が必要になり、場合によれば、その計算は永久に終わらないかもしれない）に至ることのないようにするための妥当な方策を考案するという課題⁽⁵⁾。
- (4) あるものを除いた「残り全部」を記述することの困難さ⁽⁹⁾。
- (5) 状態記述中のどの論理式が変化し、どれが変化しないかを指定する問題⁽²¹⁾。
- (6) オペレータを作用させた場合に、何が変化するかという問題⁽²²⁾。
- (7) 世界の中でとられる行動について、これに対応して世界の状態を表すデータベース内で修正を行うことにより、この行動の副次効果 (side effect) をモデル化することで不可能であるということ⁽²³⁾。

◇ 参 考 文 献 ◇

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> (1) McCarthy, J. and Hayes, P. J.: Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence, <i>Machine Intelligence</i>, Vol. 4, pp. 463-502 (1969). (2) Sandewall, E.: An approach to the frame problem and its implementation, <i>Machine Intelligence</i>, Vol. 7, pp. 195-204 (1972). (3) Pylyshyn, Z. W. (ed.): <i>The robot's dilemma; the frame problem in artificial intelligence</i>, Ablex Publishing Corp. (1987) (4) Fodor, J. A.: <i>The modularity of mind</i>, MIT Press | <ol style="list-style-type: none"> (5) 土屋 俊: 心の科学は可能か, 東京大学出版会 (1986). (6) Fikes, R. E. and Nilsson, N. J.: STRIPS; A new approach to the application of theorem proving to problem solving, <i>Artif. Intell.</i>, Vol. 2, pp. 189-208 (1971). (7) Hayes, P. J.: A logic of actions, <i>Machine Intelligence</i>, Vol. 6, pp. 495-520 (1971). (8) McDermott, D. and Doyle, J.: Non-monotonic logic I, <i>Artif. Intell.</i>, Vol. 13, pp. 41-72 (1980). (9) 相田 仁: デフォルトを用いた推論と非単調論理, 人工知 |
|---|--|

- 能学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 6-13 (1987).
- (10) McCarthy, J.: Circumscription; A form of non-monotonic reasoning, *Artif. Intell.*, Vol. 13, pp. 27-39 (1980).
- (11) Reiter, R.: A logic for default reasoning, *Artif. Intell.*, Vol. 13, pp. 81-132 (1980).
- (12) 中川裕志: 論理+サーカムスクリプション=常識推論, *人工知能学会誌*, Vol. 2, No. 1, pp. 14-21 (1987).
- (13) Hanks, S. and McDermott, D.: Default reasoning, non-monotonic logic, and the frame problem, *Proc. of AAAI-86*, pp. 328-333 (1986).
- (14) Minsky, M.: A framework for representing knowledge, in Winston, P. (ed.), *The psychology of computer vision*, McGraw-Hill (1975).
- (15) Hayes, P. J.: The logic of frames, in Metzger, D. (ed.), *Frame conceptions and text understanding*, Walter de Gruyter and Co. (1979).
- (16) Winograd, T.: Frame representations and the declarative/procedural controversy, in Bobrow, D. G. and Collins, A. (eds.), *Representation and understanding*, Academic Press (1975).
- (17) 大須賀節雄: 知識表現に関する一考察, *人工知能学会誌*, Vol. 1, No. 1, pp. 20-29 (1986).
- (18) 中島秀之: 知識表現と Prolog/KR, *産業図書* (1985).
- (19) 松原 仁, 井上博允: プロダクション・システムによるロボットの行動計画の自動生成, *情報処理学会知識工学と人工知能研究会*, 41-8 (1985).
- (20) Levesque, H. J. and Brachman, R. J.: A fundamental tradeoff in knowledge representation and reasoning (revised version), in Brachman, R. J. and Levesque, H. J. (eds.), *Readings in knowledge representation*, Morgan Kaufmann (1985).
- (21) Nilsson, N. J.: *The principles of artificial intelligence*, Tioga (1980).
- (22) 白井良明, 辻井潤一: *人工知能*, 岩波書店 (1982).
- (23) Barr, A. and Feigenbaum, E. A. (eds.): *The handbook of artificial intelligence Vol. 1*, William Kaufmann (1981).
- (24) Brown, F. M. (ed.): *The frame problem in artificial intelligence Proceedings of the 1987 Workshop*, Morgan Kaufmann (1987).

著 者 紹 介



松原 仁 (正会員)

昭和 56 年東京大学理学部情報科学科卒業。昭和 61 年同大学院工学系研究科情報工学博士課程修了。昭和 61 年電子技術総合研究所入所。工学博士。専門は人工知能で特に知識表現に興味を持つ。AIUEO, 情報処理学会, 日本ロボット学会, 日本認知科学会各会員。



山本 和彦

昭和 44 年東京電機大学工学部電気通信学科卒業。昭和 46 年同大学院修士課程修了。工学博士。同年電子技術総合研究所入所。昭和 54~55 年メリーランド大学でコンピュータビジョンの研究。現在、電子技術総合研究所パターン情報部画像処理研究室室長。人工知能, パターン認識, 特に図形の柔軟な対応づけの研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE, ACM, AAAI 各会員。