

模倣に基づく推論

島田 陽一, 堂下 修司

京都大学工学部情報工学教室

従来, 人工知能における形式的な推論に関する研究は, 記号論理学で確立された命題論理や述語論理およびその種々の拡張を基礎としている。これらの論理体系に基づく推論方式は, 記号を用いて明確に表現できる対象に対する明確で単純な環境のもとでの問題解決には有効であるが, 人間が日常的に直面する実際のさまざまな問題にはほとんど適用できない。

本稿では, 人間の思考形態について再考することによって, 命題を推論の単位とし演繹操作を基本とする従来の論理体系について再考し, 原理的には実際的な問題解決をも可能とするような「模倣」を基本操作とする推論方式について, その着想を紹介する。

Reasoning based on Imitation

Youichi SHIMADA and Shuji DOSHITA

Department of Information Science, Faculty of Engineering, Kyoto University
Yoshida-hommachi, Sakyo, Kyoto, 606 Japan

Common studies with respect to formal reasoning in AI are based on propositional logic, predicate logic or various extensions of them, which have been established in symbolic logic. Reasoning forms based on these logic systems are effective for problem solving with respect to objects which can be clearly described with symbols in clear and simple environment, however, we cannot almost apply it to practical problems which we usually face.

We look over the conventional deductive systems whose reasoning units are propositions by considering human thinking, and introduce an idea with respect to reasoning form with 'imitation' as a basic operation, which enables practical problem solving in principle.

1. はじめに

論理は古くはギリシア時代から、我々の行う論述の妥当性を測る基準として構築されてきた。近代では、記号による表現方法が数学の基礎で生じた諸問題を明確に論じるために重要視され、公理的な方法を基本とする数学基礎論とともに発展してきた。さらに、計算機の発明によって論理が機械による推論に適用できることが明らかとなり、それ以来、記号論理に基づいた推論システムの研究が進められている。

現在、人工知能における問題解決で推論を扱う場合、その多くは記号論理を基礎としているといえる。この記号論理には、命題の内容によらずその表現形式だけに依存する変形操作によって演繹的に推論結果が導かれるという特徴がある。これは、現実世界における個々の事象に関連するさまざまな要因を捨象し、すべてに共通する論理的な関係のみに注目しているという点で一般性があり有効であるが、個々の事象に特有な条件を切り捨ててしまっているという点では推論の能力が劣っているといえる。たとえば、ハノイの塔のような問題を純粋に論理的に表現して解決しようとする、計算が発散してしまっただけで解けなくなる。この場合、再帰性を利用する方法は記号論理の範囲外にある。

数学的な内容に関する命題であれば、問題を解くために必要な前提がすべて条件として与えられるためほとんど問題はない。しかし、我々が日常直面する問題を記号論理によって解決しようとする、まずどのようなモデルを設定し、どのような論理式で表現すればよいかというところに大きな難関が存在する。すなわち、その問題が系統的な解法の確立されたクラスに属さないかぎり機械的な推論によ

を導くことは難しい。従って、現在の記号論理を基礎とする問題解決では、適切なモデルがすでに設定されたクラスに対する専用の問題解決システムは構築できても、人間のようになんげの問題にも柔軟に対処するような汎用的な問題解決システムをめざすことは非常に困難である。

現在の状況では、計算機を用いて問題を解決しようとする場合、まず与えられた問題を人間が適当にモデル化し、さらにそれを扱うことのできる専用問題解決システムを用意して、問題の内容をそのシステムの仕様に合うような形に変えて入力しなければならない。

本稿では、従来の記号論理による方法に存在する諸問題について考察し、人間の行う柔軟な問題解決法に注目することによって、汎用問題解決システムを構築するための基礎となる推論方式について紹介する。

2. 記号論理の諸問題

記号論理は本来、現実世界での推論を形式的に取り扱えるようにするために考案されたものであるが、実際には現実と合わない点が多く存在する。本章では、それらの各々について考察することによって人間の行う推論の特徴を捉え、汎用問題解決システムにおける推論方式の満たすべき条件について考える。

2. 1 パラドクス

論理には、古くから有名な嘘つきのパラドクスというものが存在する。これはたとえば「この文は誤りである」のような真としても偽としても矛盾するような文で、論理ではこれ以上説明のしようがない。このような値の定まらない命題は記号論理においてどのよ

うに扱われているであろうか。

記号論理の体系では、命題の内容を捨象し、その真偽のみに注目する。従って、与えられた命題が命題論理あるいは述語論理の論理式に変換されると、その後の推論では論理式の変形操作のみとなり、もとの命題の内容とは無関係となる。そのため、命題に関する推論から論理式の変形操作への置き換えは、もとの命題の内容に関する性質で推論に必要なものを論理式の形で与えることによって完結する。たとえば、「ソクラテスは人間である」という命題に対する論理式 $\text{Man}(\text{Socrates})$ から「ソクラテスは動物である」という命題を対する論理式 $\text{Animal}(\text{Socrates})$ を導くには、「人間は動物である」という命題に対する論理式

$$\forall x(\text{Man}(x) \supset \text{Animal}(x))$$

を与えることによって完結する。

ところが、嘘つきのパラドクスの文はこのような論理式に変換することができない。一般に命題はその表現と独立な対象について言及しているのであるが、このパラドクスの文では「この文」という言葉がそれを含む文自身を指していて、対象レベルとメタレベルの交錯が生じるからである。

ただし、パラドクスの文を命題変数 p で表すことにすると、この文の満足する必要条件は論理式 $p \equiv \neg p$ と表現できる。ここで論理式 $p \equiv \neg p$ は常に偽であるから、 p は真としても偽としても矛盾することになる。このような p の妥当な値が存在しないという結果は記号論理の範囲内の推論で得られたのではないということに注意されたい。すなわち、記号論理では嘘つきパラドクスの満足する必要条件しか表すことができず、それが自己矛盾に陥るということを表現できないという点で記述能力が低いといえる。

ところで、一般に我々が真なる命題

を得ると、それをその後の推論の前提として用いることができる。すなわち、命題が真だと判明すると「この命題の内容は有効である」という情報が得られたことになる。逆に命題が偽だと判明した場合でも「この命題の内容は無効である」という情報が得られる。このように命題の真偽判定に情報の増加という価値を考えると、嘘つきのパラドクスのような文はその真偽が判明したところで情報の増加につながらないので無意味だといえる。このようにごく自然に捉えると、必ずしもすべての命題を真か偽かに判別する必要性はないことがわかる。

2. 2 矛盾

記号論理では2つの矛盾する論理式から任意の論理式を演繹することができる。すなわち、推論のよりどころとなる前提に矛盾が存在すれば、それらの矛盾する命題と内容的に全く無関係な命題まで導き出されることになる。しかし、我々の日常における常識的な推論によると、矛盾する命題を得た場合、そのいずれか一方あるいは両方が誤りであると判断することにとどまり、内容的に全く無関係な命題にまで推論が及ぶことはない。

数学のように環境が明確に規定されていれば一般に矛盾は生じないのであるが、日常的な問題ではそうとはかぎらない。たとえば、裁判で原告と被告が述べた矛盾する証言から妥当な結論を得ようとするような場合はその好例である。

記号論理においても知識に関する様相論理や非単調論理などのように矛盾する命題をうまく扱えるように工夫したものが考案されているのであるが、日常的な問題ではさまざまな対象が複雑に絡み合っていて、状況に応じた論

理体系の使い分けができないことは明らかである。従って、汎用問題解決システムにおいては、矛盾を柔軟に扱えるような推論方式を導入する必要がある。

2. 3 因果関係

記号論理には2つの命題 p と q に対して複合命題 $p \supset q$ (p ならば q) を構成する含意という演算 \supset がある。これは通常 $\neg p \vee q$ という命題と同値として扱われ、 p と q が内容的に全く無関係であっても真となり得る。これは「ならば」という言葉が前件と後件の因果関係を意味するので、非常に不自然な解釈である。そのため、様相論理における厳密含意など、このような不自然な含意が成立しないようにする試みもある^[1]が、本質的な原因が各命題 p 、 q の内容を無視してその真偽のみで複合命題 $p \supset q$ の真偽を決定しようとするところにあるという点に注意すべきである。

人間が命題の因果関係を考えるときにはその内容をも考慮している。従って、汎用問題解決システムでは、何らかの形で命題の内容を考慮する必要があると考えられる。

2. 4 ヒューリスティクス

一般に状態空間において解を探索する問題では、非決定的な手続きが必要となり、複雑な問題になると単純な探索法では計算量が膨大となり解けないことが多い。たとえば、第1階述語論理において、与えられた前提から結論が論理的に帰結できるということの導出法による証明は、空節の非決定的な探索問題となる。このような場合、何らかのヒューリスティクスを導入することが必須となるが、ヒューリステ

ィクスは問題の内容に強く依存することが多く、体系的に扱うことは非常に困難である。

ところが、人間は種々の問題に対して有効な手段を経験により獲得していて、適宜それを用いることができる。ここに、人間の用いる自然な論理と形式的な記号論理との大きな差異がある。人間はある問題を何らかの方法で解決した後に再び同じ問題が与えられると、前回の結果を利用して容易に答えることができる。すなわち、人間は問題解決を経験するとそのときに用いた方法を知識として蓄積し、再度同じような問題に出会ったときにそれを応用するという能力をもっている。このような過去の経験との比較およびその結果の応用は一種の推論といえる。一方、記号論理における推論の対象は対象レベルにある論理式のみであるため、このようなメタレベル以上の推論を取り扱うことはできない。

人間の推論には記号論理の体系のような対象レベル、メタレベルというようなレベルの明確な区別は存在しない。従って、汎用問題解決システムではレベルという概念を導入するべきではないと考えられる。

3. 模倣に基づく推論

前章で形式的な記号論理と人間のもつ自然な論理の比較を行った。これに基づき、汎用問題解決システムのための推論方式について考察する。

まず第一に、記号論理のように推論の単位を命題を表す論理式に限定する必要性がないということに注意する。我々が問題の解として求めたいものは必ずしも命題の形にはなっていない。たとえば、「『りんご』を英語でいうと何か?」という問いに対する答えは「apple」であり、これは1つの単語に

すぎない。また、「apple」に対して記号列による形式的な表現を割り当てる必要もない。このように推論の対象として文字、単語、文、文章など、あらゆる表現を扱えるようにする。また、記号論理においては論理式を解釈するためのモデルを設定するが、ここでは表現の意味を解釈するような特別なモデルを設定しない。表現に対して固定的な意味を与えると常にある意味を付随するようなものとしてしか機能できなくなり、その表現自身に言及するためにはメタレベルという概念を導入する必要が生じるからである。このように表現に解釈を定めないため、意味をなさないような任意の文字列や記号列、さらには表現をもたないような抽象的な概念さえも対象として扱うことができる。

そして、推論方式としては「模倣」を採用する。従来の問題解決は、図1のように同じ種類の問題に対して一般的に適用可能な解法を用意して、各々を一様・独立に解決するという方法によっているが、模倣を基礎とする問題解決は、図2のように第1の問題に対して外部から解を与えれば、それと同

種の問題はすでに解かれた問題と解の関係を模倣することによって解かれる。一般に、模倣は既知の関係(A, B)から新たな関係(A', B')を作り出すという操作であって類推に近い概念であるが、類推の対象が命題のみであるのに対し、模倣はあらゆるものを対象とすることができる。たとえば、関係(赤, 赤い花)から関係(白, 白い花)を得るのは模倣である。

模倣は「内的模倣」と「外的模倣」の2つに分けることができる。内的模倣とは自分が過去に経験した事柄を取り出して模倣するというものであり、このため過去の経験を何らかの形で蓄積しておく記憶装置が必要となり、システムは学習機能をもつことになる。また、外的模倣とは外部に存在する事柄を観察して模倣するというもので、これを外部から積極的に支援するものに「教育」がある。

さて、模倣という操作では既知の関係と似たようなものを作り出すということから、類似性についての判断基準が必要となる。人間の場合、類似性の判断をどのように行っているかということについて考えると明らかであるが、

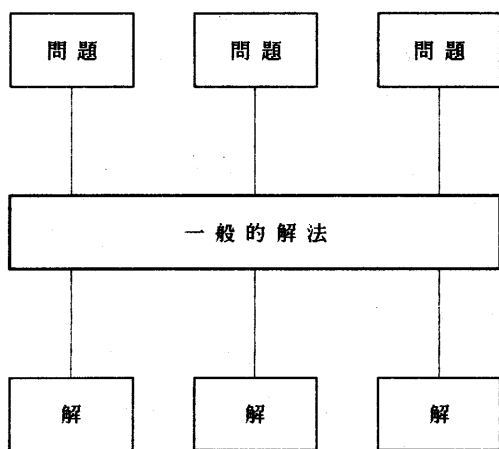


図1 一般的解法を利用した問題解決

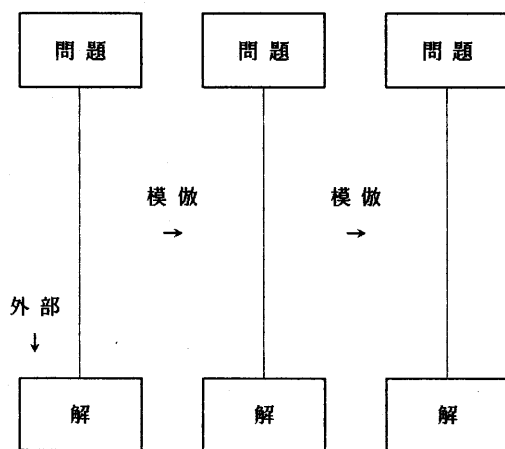


図2 「模倣」による問題解決

類似性というのは2つ以上の対象に対して絶対的に定まっている概念ではなく、ある問題を解決しようとしているときにそれらを同じように扱ってよいかどうかという相対的なものである。たとえば、「石」と「はさみ」は「何かおもりになるものが欲しい」という問題を解決するときには似ているものとして扱うことができる。このとき、過去にそれらを似ているとして扱って適切な結果が得られたという事実を模倣を適用することによって、今回も似ているとして扱ってよいであろうという結論が導かれるのであるが、この模倣の連鎖は $A = A'$ 、かつ $B = B'$ となって打ち切られることが多い。

以上のような推論方式を仮定すると全く経験のない状態からでは何も得られないことになってしまう。人間の場合は全く知識がなくても、外部の観察において繰り返し提示される事柄から「帰納」や「抽象化」などによって知識を形成することが可能である。このような人間の「本能」に相当する能力をシステムにあらかじめ与えておく必要がある。

さらに注意が必要なのは、この推論方式においては図1の方法も使用できるということである。あるクラスの問題について特定の一般的解法が有効であるという知識が存在すれば、新たにそのクラスの問題が与えられたとき、模倣によってその一般的解法を適用することができるのである。

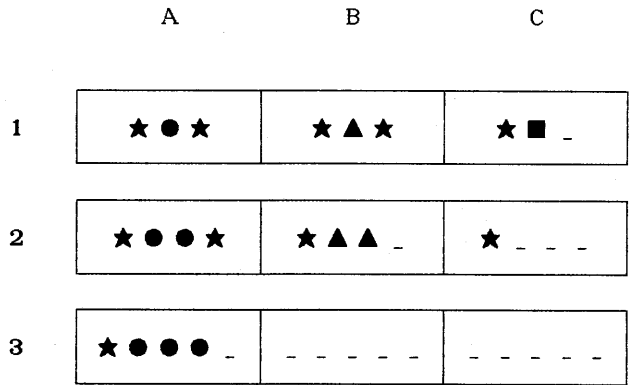
4. 模倣の適用例

以上の説明のみでは漠然としていて細部について理解し難いと思われるので、実例によって補足を行う。

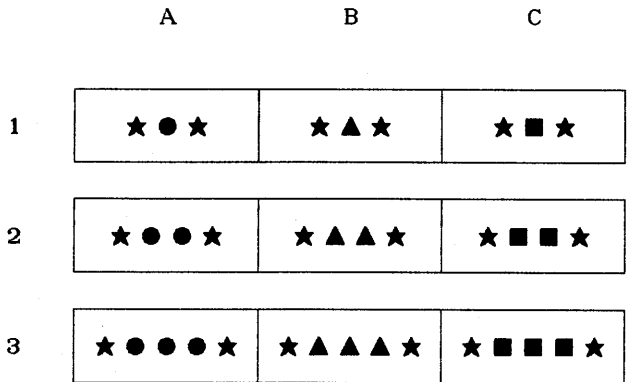
図3は記号に関するパズルを解く例である。(a)は「下線部に適当な記号を入れよ」という問題の提示である。

このような問題を解くためにはある程度の基本的な知識が必要であるが、それを適宜仮定して用いることにする。まず、((1-A, 右端が★), (1-B, 右端が★)) という関係を模倣することによって((1-B, 右端が★), (1-C, 右端が★)) という関係を導き、1-Cの下線部に★が入る。ただし、これは過去にこのような問題を解く経験している必要があり、経験がない場合には解けないので外部から正解を教える。2-Bについては種々の解き方があるが、最も単純には1-Aと1-Bの関係を2-Aと2-Bに模倣するか、あるいは1-Aと2-Aの関係を1-Bと2-Bに模倣することによって★を得ることができる。また、1の結果を観察して右端(あるいは両端)が★であるという知識を形成し、1を2に模倣して2-Bの解を得ることも可能である。また、3-Bについては、1-Aと1-Bにおける●→▲という関係が2-Aと2-Bにおいても成立するということを模倣して、3-Aと3-Bにも適用することができる。あるいは、自然数に関する知識があれば、1-Aと1-Bと1-Cにおいて●が1, 2, 3と増加しているということを模倣してもよい。その他の部分についても同様な推論によって(b)に示した解を導くことができる。

また、図4は自然言語を獲得する例である。A2において第1の質問が行われているが、過去にこの種の質問に回答した経験がなければその文の意味が理解できず答えることができない。そこで、外部から正解A3を教える。A4において再び同じ質問が行われているが、A2とA3の関係をA4とA5に模倣してよいかどうかを判断する知識がなければ答えられない。従って、再度A5を教える。そして、A6にお



(a)



(b)

図 3 記号に関するパズル

A1: X is 1.

A2: What is X?

A3: It is 1.

A4: What is X?

A5: It is 1.

A6: What is X?

A7: It is 1.

B1: Y is 2.

B2: What is Y?

B3: It is 2.

B4: What is Y?

B5: It is 2.

C1: Z is 3.

C2: What is Z?

C3: It is 3.

(下線部はシステムから応答)

図 4 自然言語獲得の例

いてもう1度同じ質問を繰り返した際、繰り返し提示される現象から“What is X?”に対して“it is 1.”と答えればよいことがわかれば、A7において答えることができる。ここで注意が必要なのは、A1の文を全く用いずに解を導いたということ、問題の意味がまだ完全には理解できていないことを示している。次にB2が与えられたときには、未経験の質問なので答えられないが、B4に対しては(A2, A3)と(A4, A5)の関係を(B2, B3)と(B4, B5)に模倣することがわかればB5において答えることができる。そして、C2に対しては、(A2, A3)と(B2, B3)の関係を(A2, A3)と(C2, C3)に模倣することによって、C3の“it is .”の部分を得ることができ、同様に(A1, A3)と(B1, B3)の関係を(A1, A3)と(C1, C3)に模倣すれば“3”が導かれる。その結果、この形式で与えられる質問に対して適切な応答ができるようになり、この文脈の意味が理解されたことになる。

以上のように、表現の意味はモデルを設定しなくても自然に形成されるということがわかる。この過程は、人間が幼児期に自然言語を獲得する際、正しい文脈が繰り返し提示されることによって、特に文法や意味を教えなくても言語を習得できるということにかなり類似しているといえる。

5. フィードバックによる学習

前章の例ではシステムがパズルや自然言語の問題に意欲的に答えることを仮定しているが、実際には問題に対して必ず答えを出すという保証はない。システムに必ず答えを出すように強制する方法もあるが、このようにすると何が問題であるのかを明確に規定する

必要が生じ、型の決まった問題しか解けなくなってしまう。たとえば、図4の例において?のついた疑問文には必ず答えるように強制すると、そのシステムは常にこの種の質問応答にしか使えなくなり、汎用性が失われてしまう。

人間の場合、必ずしも質問に答えるようには強制されていない。ネズミが迷路を通過して餌にたどりつく実験などにおいて、餌がなくては学習させることができないということからも明らかのように、ある反応をすることが自分の利益につながるならば、積極的に反応するという形が最も自然である。従って、システムが正しい応答を出せば正のフィードバックがかかるような操作を施し、逆に誤った応答を出せば負のフィードバックがかかるようにする。それと同時に、「よろしい」とか「まちがっている」等の言葉を入力し、条件づけによって言葉だけでもフィードバックがかかるようになれば最適であろう。

6. おわりに

本稿で紹介した推論方式は、扱う問題に制限がないという点で汎用性があるが、従来の専用問題解決システムよりはるかに効率が悪く、また実用的な段階にまで成長させるのに長い期間を要する。そして、人間の本能などのように未だに明らかでない部分も多く、このままの形で実現するのは不可能である。しかし、現在の専用システムを改良すれば汎用システムになるとは考えにくいので、このようなアプローチについて考察することも必要であると思われる。

参考文献

[1] 杉原丈夫：数学選書 非古典論理学，槇書店(1975)。