

人工知能プログラミング

2003年12月
スーパーサイエンスハイスクール
予備テキスト

犬塚信博（名古屋工業大学）

も く じ

1. コンピュータとプログラム
2. 人工知能
3. 論理と推論
4. 命題論理
5. 正しい推論
6. 公理と理論
7. 述語論理
8. 論理プログラム
9. おわりに

1. コンピュータとプログラム

コンピュータは電子レンジや冷蔵庫、自動車などと同じように人間が作った道具ですが、他の道具と大きく異なった特色があります。それは、使い方が予め限定されていないことです。コンピュータを使うには、ソフトウェア(software)をコンピュータにセットします。ソフトウェアを入れ替えば、ワープロにも、帳簿管理機や発電所の制御機械にも、そして、ゲームマシンにもなります。もちろん、コンピュータで目玉焼きは焼けませんし、高速道路を走ることはできません。しかし、「計算」であればどんな「計算」でもすることができていることがわかっています。こうした性質を汎用性(universality)¹といいます。

¹ 「計算」なら何でもできる、という結論を出すには、「計算」とは何であるか、に答えておく必要があります。これは初期の計算機科学の大問題でしたが、チューリングという学者が考えた理想的な計算機（チューリング機械）で可

一般に、道具には皆、道具そのものとその使い方とのノウハウがあります。フライパンのノウハウは、たとえば、よく暖めてから具材を入れましょう、とかいうことです。

コンピュータの場合は、ノウハウをソフトウェアとして、機械の内部に取り込むことができ、それによって働きが変えられるという大きな特徴があるのです²。道具そのものはハードウェア(hardware)といいます。

ソフトウェアの中身は、大きく分けてプログラムと呼ばれる命令手順書とデータからなっています。コンピュータは、二つの数を足して記憶せよというような、簡単な動作（命令）を色々とする機能があります。どんな命令があるかは、コンピュータによって異なります。命令をどんな手順であるかを、予め書いておいたものがプログラム(program)です。データにはコンピュータの動作に必要な文章、数、画像、音楽などが含まれます。

問題 プログラムについてよく知らない人は、プログラムとその例について調べなさい。

2. 人工知能

現在の形のコンピュータ（電子計算機）が発明されたのは、1940年代の後半です。できた当初から、コンピュータへの期待は大きく、人間の能力を超え、何でもできるように思われました。つまり、人工頭脳(artificial brain)ができるだろうというわけです。実際には人間が簡単にやっていること程、機械にやらせるのは難しく、今も人工頭脳と呼べるものはありません。

能なことが「計算」のすべてである、ということで了解されています。他の学者も、他の計算方式を考えましたが、結局、できることが同じだったからです。現在までに、考えられたどんな計算機もチューリング機械と同じ能力を持っています。

² ソフトウェア（プログラム）を、コンピュータに取り込んで、それによってコンピュータの機能を変えてやるという考えをプログラム内蔵方式(stored program)といいます。フォン・ノイマンという大学者が発明しました。

しかし、そうした発想から人工知能 (AI: artificial intelligence) の研究が進みました。人間の能力に含まれる知的な働き、たとえば、話す、議論をする、計画を立てる、学習する、推測するなどを、コンピュータで実現するための研究です。

人工知能研究は、計算機科学 (コンピュータや計算について数学的に研究する学問分野) の一分野ですが、色々な科学と関連があります。たとえば、これまで人の脳の機能 (つまり心) について考えてきたのは心理学ですし、その生物学的なしくみについては神経科学などが関連します。また、事実を積み上げて議論し、そして新しい結論を生み出すしくみは論理学がもっぱら研究してきましたが、これは哲学の一分野でした。言葉については言語学が研究対象としてきたものです。

コンピュータはもともと機械ですから、機械的な仕掛けで知能を作り出す方法を研究しなければなりません。知識をブロックのように組み上げて結論を出す、論理学の研究が人工知能の研究を牽引する一つになりました。

通常、コンピュータのプログラムは小さな命令があつまった命令手順書です。それに対し、人工知能としてのコンピュータは、知識を詰め込んでおけば、後は自分で考え、判断し、処理してくれるというのが、基本的な発想です。

たとえば、日英翻訳のための命令手順書を書くには、どうやって翻訳するのかを知らないといけません。まず、構文解析して次に単語を辞書で引き、といった具合です。こうした知識を「how の知識」といいます。それに対し、もし人工知能があれば、日本語と英語の文法や辞書など、十分な知識を与えておけば、後は人工知能が自分で考えて翻訳してくれるでしょう。このために必要な知識は、それが何であるか、つまり「what の知識」です。

What の知識を使って、推論や計画をする人工知

能を作ろうというのが、人工知能研究です。そのため、どうやって what の知識を与えたらいいだろうか? たとえば、百科事典をそのまま、CD-ROM で与えても、コンピュータにはあまり役立ちそうにないですね。与えられた知識を使って推論するしくみはどうしたらよいのだろうか? そんな、議論を研究者はしているのです。

3. 論理と推論

論理学は、われわれの思考の形式を考える学問です。われわれは、色々なことを知っています。太陽は朝東から昇る、私は人間である、などです。知っていることに基づいて、色々な議論をし、新しい知識を生み出します。これを推論といいます。

どんな推論が正しい推論であるか、ということを考えるのが論理学です。たとえば、つぎの二つは事実ですね。

- (1) 小泉首相は男性あるいは女性のどちらかである。
- (2) 小泉首相は女性ではない。

このように、正しいか否かが明確に答えられる文を命題 (proposition) といいます。正しいとき「真 (true)」、誤っているとき「偽 (false)」といいます。

上の二つの命題から、つぎの三つ目の命題の正しさを断定できますか?

- (3) 小泉首相は男性である。

できそうですね。

つまり、(1) と (2) の命題から (3) の命題を導くことができるようです。このように、わかっている命題から、新しい命題の真偽を断定することを推論といいます。

上の推論は、つぎの形式をしていることがわかります。

- (1) P または Q
- (2) Q でない
- (3) P

三つの命題のうち、推論の元になった命題と、そこから導かれた命題の間に、横線を引き区別します。横線の上の命題を仮定、下の命題を結論といいます。

では、つぎの推論は正しいでしょうか？

- (4) エンジンがかかるならば、
燃料が入っている
- (5) エンジンがかからない
- (6) 燃料が入っていない

この推論では、仮定となっている最初の命題 (4) は真ですね。今、自動車のキーを回してみてもエンジンがかからなかったとすれば、(5) も正しいこと (真) になります。そのとき、上のように考えて燃料タンクを調べてみたら、案の定、燃料が空であったとしましょう。つまり (6) も真であるわけです。だから、この推論は正しい、といってよいのでしょうか？

この推論は、つぎの形式を持っています。

- (4) P ならば Q
- (5) P でない
- (6) Q でない

二つの命題 (4) と (5) が正しい場合、この形式をした推論で現れた結論 (6) は常に正しいと言い切れませんか？ そうとは言えません。実際、今日は燃料が入っていませんでしたが、明日、同じ状況でもバッテリーが上がっているかもしれません。

推論が正しいというのは、推論によって導かれた結論が正しいかどうかでは決まりません。推論の形式が正しい場合にのみ正しい推論であるということが出来ます。(4) ~ (6) の推論は誤

りです。結論はたまたま正しかったのです。それに対し、(1) ~ (3) は正しい推論です。この形式に従えば、真の仮定からいつも真の結論を導けます。

では、どのような推論が正しい推論といえるのでしょうか？ このことは第 5 節で説明します。

4 . 命題論理

これまでに述べたように論理学では、真偽の明らかになっている命題から推論を重ねて別の命題の真偽を次々に明らかにしてゆき、何らかの結論に導いてゆきます。こういったことは、通常は「議論」とか、「証明」といいます。

つまり、われわれが通常、議論したりあるいはもう少し厳密に数学で証明を行ったりする場合に行う手順を、明確にしようということが目的です。これが明確になり、コンピュータにこの手順を機械的に行う仕掛けを埋め込めば、自分で議論を組み立てて正しい結論を導いてくれるでしょう。これが、人工知能の一つの原理です。

論理 (logic) は、われわれが行う推論の形式一般のことですが、その中から基本的な形式を抜き出して、数学のように式で表したものを形式論理 (formal logic) といいます。数にも和と積を使える自然数 (差、商は完全には定義できません) や和差積商が使える有理数などるように、形式論理にもそこで扱うことのできる、議論によって色々あります。

もっとも簡単な (扱える議論の少ない) 論理を命題論理 (propositional logic) といいます。命題論理は、命題を「...でない」、「...かつ...」、「...または...」、「...ならば...」の四つの接続詞³でつないでできる命題の間の議論のみを扱うことができます。次の表は、P と Q がある命題であるとき、それをこの接続詞でつないでできる命

³ 「...でない」は国語では接続詞ではありませんが、ここでは一括して接続詞と呼ぶことにします。

題を示します。右にはそれを表す記号を挙げます。

| 命題 | 記号 |
|-------|-------------------|
| Pでない | $\neg P$ |
| PかつQ | $P \wedge Q$ |
| PまたはQ | $P \vee Q$ |
| PならばQ | $P \rightarrow Q$ |

たとえば、P, Q, Rを次のような意味を表す命題とします。

P = エンジンがかかる

Q = 燃料がはいっている

R = バッテリーは充電されている

すると、

エンジンがかからないならば、燃料が入っていないかあるいはバッテリーがあがっている

は、

$(\neg P) \vee ((\neg Q) \vee (\neg R))$

と表すことができます。 \neg 、 \vee 、 \wedge の順に優先順位があるとすれば、カッコを付けずに、

$\neg P \vee \neg Q \vee \neg R$

としても構いません。

PとQの真偽が定まっているとき、これらから作られた命題の真偽は、自然に決まります。たとえば、 $P \wedge Q$ は、PとQのどちらか少なくとも一方が真であれば、真となりますね。これを表で書けば次のようになります。

| P | Q | $P \wedge Q$ | $P \vee Q$ | $P \rightarrow Q$ |
|---|---|--------------|------------|-------------------|
| 真 | 真 | 真 | 真 | 真 |
| 真 | 偽 | 偽 | 真 | 偽 |
| 偽 | 真 | 偽 | 真 | 真 |
| 偽 | 偽 | 偽 | 偽 | 真 |

この表を真理値表 (truth table) といいます。

$P \wedge Q$ の部分は少し説明が必要かもしれません。Pが真であるとき、Qの真偽で $P \wedge Q$ の真偽が決まることはわかると思います。Pが偽のときは、 $P \wedge Q$ の「...ならば」の条件自身が成立しないわけですから、Qに関わらず $P \wedge Q$ が間違っていることにはならないと考えられます。

この真理値表は、PとQの真偽の組合せをすべて尽くしています。つまり、どんな場合もすべてこの表の四行のどれかに当てはまるわけです。

これを組み合わせれば $\neg P \vee \neg Q \vee \neg R$ の真偽についても表を作ることができます。

| P | Q | R | $\neg P$ | $\neg Q$ | $\neg R$ | $\neg P \vee \neg Q \vee \neg R$ |
|---|---|---|----------|----------|----------|----------------------------------|
| 真 | 真 | 真 | 偽 | 偽 | 偽 | 真 |
| 真 | 真 | 偽 | 偽 | 偽 | 真 | 真 |
| 真 | 偽 | 真 | 偽 | 真 | 偽 | 真 |
| 真 | 偽 | 偽 | 偽 | 真 | 真 | 真 |
| 偽 | 真 | 真 | 真 | 偽 | 偽 | 偽 |
| 偽 | 真 | 偽 | 真 | 偽 | 真 | 真 |
| 偽 | 偽 | 真 | 真 | 真 | 偽 | 真 |
| 偽 | 偽 | 偽 | 真 | 真 | 真 | 真 |

5. 正しい推論

では、つぎに第3節の疑問点、正しい推論について考えましょう。もう一度(1)~(3)の推論を考えます。これを記号で書くと次のようになります。

- (1) (小泉首相は男性である) (小泉首相は男性である)
- (2) \neg (小泉首相は女性である)
- (3) 小泉首相は男性である。

このように書くと、これがつぎの形式の推論の例であることがよくわかります。

- (1) $P \rightarrow Q$
- (2) $\neg Q$
- (3) $\neg P$

推論正しいかどうかは、やはり真理値表で調べられます。(1)~(3)の推論に現れる三つの命題を真理値表に書いてみます。

| P | Q | (1) $P \rightarrow Q$ | (2) $\neg Q$ | (3) $\neg P$ |
|---|---|-----------------------|--------------|--------------|
| 真 | 真 | 真 | 偽 | 真 |
| 真 | 偽 | 真 | 真 | 真 |
| 偽 | 真 | 真 | 偽 | 偽 |
| 偽 | 偽 | 偽 | 真 | 偽 |

推論は仮定から結論を導くためのものですから、この表の各行について、仮定(1)と(2)

が真のときは、結論(3)も真となっていればこの推論は正しいと結論付けてもよさそうですね。なぜなら、この四行以外の真偽のあり方はないのですから。実際、(1)と(2)がともに真であるのは、 $P = \text{真}$ と $Q = \text{偽}$ の行だけです。そしてこのとき(3)は真となっていますから、この推論は正しいと言ってよさそうです。

問題：推論(4)~(6)について、真理値表を書き、正しい推論でないことを確認しなさい。

これでどんな推論が正しい推論であるかがわかりましたから、国会の論争や、数学の証明で正しく話が進んでいるかどうか、確認できそうです。実は、命題論理では \neg 、 \wedge 、 \vee のような単純な仕方ではしか命題を組み合わせられませんので、どんな議論でもこれで確かめられるほど、強力ではありません。これは、自然数では5 - 8が計算できないのと同じようなことです。

しかし、命題論理の範囲での議論ならば確かめられそうです。では、議論の正しさを確かめるのではなく、自分で正しい議論をするにはどうしたらよいでしょう？ そのためには、使うことのできる正しい推論の形式をすべて知っていてそれを組み合わせないといけません。

論理学の研究の目的のもう一つは、正しい議論をするために必要な推論形式をすべて列挙することです。たとえば、(1)~(3)の形式の推論は正しいですが、この形式だけでいつも議論できるわけではないわけです。どれだけの推論形式があればそれで足りるのだろうか？ これは気になることです。

6. 公理と理論

論理学では、正しい議論ならばどんな議論でもできるように必要なすべての推論の形式を数え上げる研究がされてきました。議論をする皆で合意した前提となる命題から始めて、こうした推論

を用いて議論してゆけば、間違った結論には達しないというわけです。論理学ではこの前提を公理(axiom)と呼んでいます。たとえば、 $P \rightarrow P$ という命題はいつも正しいですね。 $P \rightarrow \neg P$ もそうです。こうした命題は、だれもが正しいと納得できるので公理に採用しましょうというわけです。公理と推論の形式をすべて数え上げておけば、それらから正しいと判定できる結論だけが正しい命題になります。そのような公理と推論をすべて数え上げたものを公理系といいます。

世の中では、いつも正しい公理以外に、現実の世界で正しいことがたくさんありますね。たとえば、今日は木曜日であるとか、うちの犬はオスであるとかです。こうしたことはたまたまこの世の中で正しい事柄ですが、これを正しいとすればそこから推論で導けることが色々出てきます。

このように実際に正しいので、そうした命題を正しいとして集めたものを理論(theory)といいます。たとえば、ニュートンの物理学では力学に関する理論を与えています⁵。この理論と推論を使えば、力学について正しいことが次々と出てくるわけです。つまり、理論は推論とあわせることで、正しいことと正しくないことを分けることができるのです。

問題 論理と理論は言葉は似ていますが、異なった意味を持つことがわかったと思います。もう一度整理してください。

7. 述語論理

上では命題論理という最も簡単な論理を勉強しました。しかし、これはあまりにも貧弱ですので、人工知能ではもう少し強力な述語論理という論理を使います。

⁴実は $P \rightarrow \neg P$ は認めないという人もいます。ある命題について正しい(P)か、正しくないか($\neg P$)は、証明が完成するまでわからないというわけです。でも、神様は知っているでしょ、と普通の人は考えています。

⁵ ニュートンは論理学者ではありませんので、論理式で与えているわけではありません。

命題論理では「小泉首相は女性である」を単に、Pなどと記号で表わしましたが、述語論理ではこれを主語と述語に分けます。小泉首相をK、女性であるFemaleと書くことにすれば、この命題は述語論理では、Female(K)と書くことができます。

また、述語論理は変数を使うことができます。F(K)のKは小泉首相を表わす定数でしたが、その代わりに変数xをいれても構いません。変数を使う場合は（全称記号）と（存在記号）という二種類の記号と併せて用います。

| 命題 | 記号 |
|--------------------|-----------|
| どんなxについてもF(x)が真となる | $x. F(x)$ |
| F(x)が真となるxがある | $x. F(x)$ |

$x.F(x)$ は、F(x)の変数xにどんな定数を代入しても、できあがる命題が真であるときに、真となる命題を表わします⁶。 $x.F(x)$ は命題F(x)が真であるように、xに代入する定数を見つけることができるとき真となる命題を表わします⁷。一つ目の書き方を使うと、「人間はだれでも死ぬ」という命題は次のように書けます。

$$x. (\text{Human}(x) \quad \text{Mortal}(x))$$

Humanは人間である、Mortalは死ぬを表わす述語としました。

たとえば、「どんな人にも母親はいる」という命題を記述してみましょう。xは人である、yはxの母親であることを、それぞれHuman(x), Mother(x, y)と書くことにすれば、次のように書けます。

$$x. (\text{Human}(x) \quad y. \text{Mother}(x, y))$$

このような記法を使うと次のような推論も書

⁶ はすべての定数で、という意味でallのAを逆にしたものです。

⁷ は真となる定数が存在する、という意味でexistのEを逆にしたものです。

くことができます。

(7) 人間はだれでも死ぬ。

(8) ソクラテスは人間である。

(9) ソクラテスは死ぬ。

この推論は正しそうです。これは次の形式を持っています。

(7) $x. (\text{Human}(x) \quad \text{Mortal}(x))$

(8) Human(S)

(9) Mortal(S)

(7)はxがついていますからxに何を代入しても真となる命題です。ソクラテスを表わす記号Sを代入すると(8)式の左辺には(8)式が現れるわけですから、その右辺の(9)式が真となるのは納得できそうです。確かにこの形式の推論は正しい推論です。しかし、命題論理のときのように真理値表は書けません。これについては、残念ながら簡単には説明できません。このソクラテスの例は2000年前のアリストテレスの時代から使われてきたものです。

問題 命題「誰からも好かれるような人はいない」を、式で表わしてください。xは人である、xはyを好むを、それぞれHuman(x), Like(x, y)とします。

述語論理にも、公理系がわかっています。つまり、誰もが認める公理と正しい推論を導くことのできる推論が見つかっています。

述語論理は実は大変強力です。数学の議論をするには十分です。また、広い範囲の自然科学の議論にも使えます。しかし、どんな命題も扱うことができるわけではありません。たとえば、歴史的な事実は時間が重要です。Pはあるとき正しかったけれど、今は正しくないなどの議論ができなければなりません。こうした議論には時間を扱うことのできる論理(時制論理、時相論理)が必要です。また、法律的な議論では、「...しなければならない」、「...してもよい」などの義務と権利につい

での命題を議論する必要があります。これには様相論理という論理を用います。文学や芸術について議論するにはどんな論理が必要であるか、想像もつきません。このように論理は我々が真理を議論するための道具ですが、万能なものは見つかっていないのです。

8 . 論理プログラム

話をコンピュータに戻します。論理は正しい議論を使って正しい結論を作り出す力があることがわかったと思います。このしくみをコンピュータに入れることで、人工知能の目的の一つである推論を実現することができます。

計算機科学と論理学の研究で、述語論理に少し制限を付けたものをコンピュータに埋め込むことができることが分かりました。つまり、述語論理で書かれた理論をコンピュータに与えると、色々な命題の真偽を判定してくれるわけです。真偽を判断するだけでなく、正しい命題をコンピュータが自ら作ることも、一部可能となりました。

つまり、たとえば物理学の理論を埋め込めば、物理的に正しいことがわかるわけです。また、たとえば帳簿のつけ方について、正しいこと（理論 = 知識）をすべて教えておけば、間違っただけの箇所を教えてください、また、自分で帳簿を付けることもできるようになりました。

これは、もともとプログラムを作ってコンピュータにさせてきたことと同じです。この場合は、与える理論がプログラムの働きをしているわけです。そこで、このように論理の考えに従ってコンピュータに仕事をさせるしくみを論理プログラムと呼びます。論理プログラムをするには、コンピュータが推論の形式を知っていて、それにしたがってわかっていることから未知の命題について推論を重ねて証明（議論）を組み立ててくれる必要があります。このしくみについて研究されたわけです。

論理プログラムを実現するコンピュータのプログラムに Prolog（プロログ; PROgramming in LOGic）と呼ぶものがあります。Prolog を埋め込まれたコンピュータは、一定の形式で書かれた理論を受け取ることができます。そして、命題をシステムに与えると、その命題が正しい、つまり証明することができるならば yes、誤っている、あるいは証明できないならば no と答えてくれます。

9 . おわりに

このテキストでは論理の基礎的なことについて説明し、論理が人工知能の研究で重要であることを述べました。しかし、ここで述べたのは論理と推論に関わることだけです。人工知能の研究は、最初に述べたように推論以外にも、学習、計画する、話すなど色々あります。人間のようにものを見たり、多少間違ってもいいけれど常識的な判断をしたりなど、他にもいろいろなことをさせようと研究されています。

スーパーサイエンスハイスクールでは、Prolog を使って、論理を使ってどのようにプログラムをすることができるのかを体験してもらいます。人工知能のための基礎に興味を持ってもらえればよいと思います。スーパーサイエンスハイスクールの当日までに、このテキストと問題を手がかりに、論理について考えておいてください。

質問はメールでどうぞ
inuzuka@ni tech.ac.jp