

# 学習する機械

大阪府立大学工学部（講師） 田 中 栄 一

## 1. はじめに

十数年前から始まった学習機能を持つ機械の研究は、いまようやく、現在の立場あるいは水準での研究が、過去および近い将来を含めて、全体的にその可能性と限界を見通すことができるようになってきている。研究者の立場からは、遠からず必ず来る次の発展的変貌の様子を推察しておくことが必要であるし、また、その応用を目指す立場からは、いまその応用可能性を検討しておくことが望ましい。というのも、次に来る新しい展開がたとえ目覚ましいものであっても、ここ暫くは本質的に大きな飛躍につながりそうになく、また、たとえすばらしい可能性が開けたとしても、経済性や技術的条件などから考え、すぐ企業化できるかどうかはきわめて疑わしい。そして、近く学習機能を持つ機械が工業製品として登場するとすれば、明らかに現在の水準での研究が具体化されたものに違いないと思われるからである。

学習機械の研究は、計算機の入力装置としてその実現が強く望まれている文字認識装置や音声認識装置と強い関連を持って進められてきた。日本語の音声認識装置を作るためには、まず日本語の音声の物理的特徴を抽出しそれに基づいて日本語の音声を分類しなければならない。ところが、音声は、日頃私達がいかに容易に聞き分けられているにもかかわらず、発音された状況、性別、老若、地域差、個人差などさまざまな要因によって随分異なっている。したがって代表的な発音を調査するだけでは不十分であり、かといって、すべての場合を覆い尽くす調査は不可能である。そこで音声認識装置が実用に耐える程度の汎用性を持つためには、機械が未経験の発音に出会っても、それを的確に判断し、学習できるようにしなければならない。あるいは、たとえ一時的に誤った判断をしても、大局的には、最適な判断を下せるように作ることが望まれる。このような事情は、音声に限らず手書文字の機械認識や、また、X線像読影、心電図解読、病理組織所見の機械化（自動化）など、一般的なパターンの機械認識には避けることができないものである。

日本電子工業振興協会がまとめた「電子工業の長期展

望」によると、手書文字を読みとる計算機、音声を聞きとる計算機は1980年代には普及するであろうという。しかし、学習機械の研究に対する期待は単にパターン認識機械の製作に限らず、より広い視野の中でかけられている。たとえば現在の生産形態は、基本的には少品種大量生産であるが、これは将来、多種中小量生産へ移行するのは必至であると云われている。そのとき“個々の品種に対して専用の生産システムを設備することは設備費償却の点から不可能となり、将来、かなり汎用性を持った生産システムによってつぎつぎと変化する品種に対処しなければならぬことになる。したがって品種の変化を何らかの方法で簡単に生産システムに知らせることにより、システム自身が新しい作業内容を理解できる適応能力を持っていることが、将来の生産システムの一つの必要条件となるであろう”<sup>1)</sup>という。このようなオートメーション化された多機能万能生産システムでは、人工知能ロボットが必要であると云われているが、学習機械は人工知能実現と直接係りを持つものである以上、将来の生産システムと決して無縁ではない。

いま計算機は集積回路を用いた第三世代から大規模集積回路による第四世代への過渡期にある。これまでも、プロセッサを256個持つ ILLIAC IV やハイブリッド計算機など新しいシステムの試みもあり、第四世代の成熟期になるとソフトウェアが次第にハード化するなど、計算機が徐々に変貌して行く要因も見られるが、基本的には大容量、高速化への量的な発展過程をたどっているといつてよい。計算機は、よく知られているように、逐次的直列演算を本務としていることから、図形のように空間的な広がりを持つ対象の処理には適していないし、経験の蓄積を有効に利用して、それが持つソフトウェアを改良したり、機構を改善して行く自己組織能力を持っていない。このような要請を実現することは、まだ宇遠な目標に違いないが、将来の学習機械の目標であることは疑いない。

これまでも、学習機械に関する解説あるいは展望は幾つか書かれているが、専門的で予備知識を必要とした

り、また、書かれた時期が研究の発達途上であったため、必ずしもその全貌を見渡すのに都合がよいようには整理されていなかった。そこで、本文ではそれらの点を考慮して、現在までの成果を概観して“学習機械に何ができるか”に重点を置いて研究の輪郭を御紹介したい。そして、“いかにして機械が学習機能を持つようになるか”についてはそれぞれの参考文献に譲りたい。現在研究されている学習機械は、広義のパターンの学習に限られている。そこで、学習機械について述べる前に、まず、パターン認識の機械認識についての基本的な考え方を明らかにしておこう。

## 2. パターン認識

パターン認識理論によると、図形を2次元の関数  $f(x, y)$  で表わすとき、それは標準図形  $g(x, y)$  が一様拡大、一様収縮、移動、回転（以上の操作はアフィン変換と呼ばれる）およびボケ変換操作が組合わされてきたものであると考える。そこで、まず観測図形  $f(x, y)$  をアフィン変換およびボケ変換によって、正規図形  $g(x, y)$  に直す。次に正規図形  $g(x, y)$  を適当な関数系  $\varphi_i(x, y)$  で展開する。

$$g(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i \varphi_i(x, y)$$

このとき、 $g(x, y)$  は係数の張る空間（それを特徴空間という）の一点で表わされる。手書文字の癖は必ずしもアフィンのではないから、上記の正規化操作によって正規図形に正しく変換できず、それを関数展開したとき、その係数は標準図形のそれとは等しくならず、その近傍の値をとることが多い。それゆえ、1つのカテゴリーのパターンは特徴空間内である大きさの領域を占めることになる。このとき特徴空間内の異なったカテゴリーに属する領域を適当な判別関数で互に分離することを類別という。この判別関数が求まればパターン認識が可能になる。したがって、パターン認識は、原則として、正規化、特徴測定、および、類別の3つの過程を経て完了する。しかしこれ迄に製作された図形認識機械は、このような

原則とは余り関係なく、極めて技術的な立場から考えられているため、正規化と特徴抽出が截然と分かれていないし、特徴抽出も関数展開以外の方法によっている。このことは、認識理論の欠陥ではなく、むしろ技術的、経済的な理由によるものと思われる。

現存する光学的文字読取装置の能力を、工業製品となったものの側でみると、IBM が米国社会福祉局に納入したものは110種のフォントの英数字を毎秒1,200字の速度で読み、1,728字に1字以下の誤り率であるという。手書文字の例では、東芝が製作した郵便番号読取区分実験機は、ほぼ90%の正読率、0.2%は誤読、9.8%は読取不能であると報告されている。このように、文字の形に制限を設けると極めてよい識別率が得られるが、字形に制限を設けないと一字毎の認識でも、ある認識率を越えると人間の能力に近づくのが著しく困難になる。自由に続けて書かれた手書き文字を認識する機械などは近い将来に実現する見通しは少ない。

このような事態に対して、新しい可能性の探索が行なわれている。まず、パターンとはいかなるものかに関して、飯島氏等は云う。

“今まで自然界を鮮かに説明してきた物理学に現れる方程式は、特にその基本方程式は微分方程式で表示される場合が多かった。このことは、一口に云えば、局所的であるということであり、離れた場所に起ることや、過去又は未来のことは無関係だというわけではないが、結局それはある場所、ある時刻における関係に帰着させることができることを主張するものである。確かにこのことは、物理的現象の特質であるかも知れない。しかし一方このようなことになるのは、一つにはその物理学の態度にもよるのではないだろうか、要するに現象を素過程に分析する方法である。確かにこの単純化の態度は、少なくとも無生物界の記述には成功してきた。しかし根本的に構造が問題となる生物系については、このような分析的な態度がどこまで成功し得るであろうか。今世紀後半になって我々の対象とするものが、しだいに無生物系から生物系、そして人間へと移ってきた。人間を対象

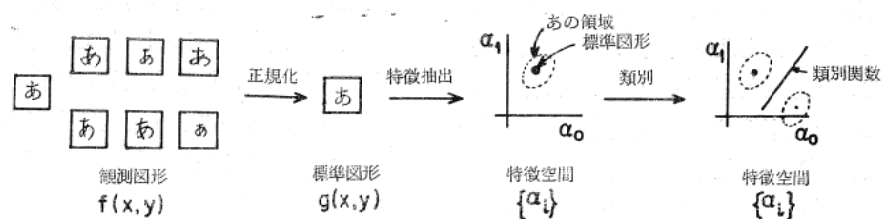


図1 図形認識のための処理手続

とする科学では、ゲシュタルト心現学がこの分析的な態度を鋭く批判し、全体的な構造的性ということを強く打ち出した。彼等は主張するのである、「部分はただそれが孤立して存在する時と、全体の場の中にあるのとは異なる」と。パターンはまさしく全体が部分を規定し、又その部分、部分が全体を構成してゆくというフィードバック・ループを形成している。云わば大域的であり相互に依存しているわけである。”

最近、このような考え方に基づいて、新しい型の光学的文字読取装置 ASPET/70 が試作された。

ところで、H. Fletcher の行なった音響心理実験によると、英語のシラブルの明瞭度が70%でも文章理解度はほぼ、100%に達するという。会話音声分析の研究でも、音素あるいは単音レベルでは、どうしても区別できない発音が多いことが知られている。そこで、音声や手書文字の認識の研究は、前後関係など言語情報を援用して認識率の向上を計る試みがなされている。これ迄のところ、N字組出現確率、語の出現確率、文字の出現確率、辞書などを利用する語の誤り訂正法が幾つか提案されているが、まだ決定的な方法は現われていない。しかし、言語情報を利用する方法は文字の認識率を飛躍的に向上させる最も具体的、かつ実現性のある方法だと思われる。

### 3. 学習する機械

学習機能を持つ機械は F. Rosenblatt が1950年代の後半にパーセプトロンと呼ばれる視覚系を模擬した図形認識機械を作ったのに始まり、その後、核物理実験の観測装置であるあわ箱写真の識別に応用された PAPA をはじめ数多くの新しい提案、改良がなされてきた。現在研究されている学習機械は広義のパターンの学習に限られている。しかも、正規化、特徴抽出、類別などのパターン認識過程のうち、主として類別機の逐次構成法として考えられてきた。

機械に図形が示されると、まず正規化し、次に特徴抽出を行なって、図形が特徴空間のどの位置にあるかを決定する。図形群が特徴空間内でどのような分布をしているかが予めわかっておれば、正しい類別関数を作ることができるが、多くの場合、特徴空間内でのパターンの分布を予め知ることは難かしく、ときには分布が時間とともに変動していることもある。このようなとき、入力データを分析して分布についての情報を得て、類別関数を逐次改良して行くことが望ましい。この逐次改良プログラム、すなわち学習規則を内蔵した機械を学習機械と云っている。

学習機械には、人が入力図形についての情報を機械に教えながら類別機を構成して行く形式のもの（図2(a)）

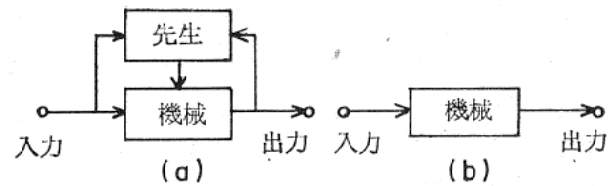


図2 学習機械の型

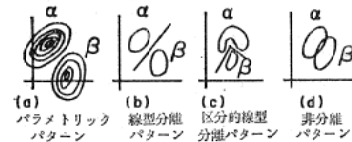


図3 特徴空間内のパターンの型

と、機械がひとりでの学習して行く形式のもの（図2(b)）が考えられている。また入力図形の情報に関して、図形集合の特徴空間での拡がりや何らかの分布関数で表わされる、いわゆるパラメトリック・パターン（図3(a)）の場合と、分布関数が明らかでない、いわゆるノンパラメトリック・パターンの場合に分けられ、それぞれ対処の仕方が異なっている。後者は線型分離（図3(b)）、区分的線型分離（図3(c)）、非分離（図3(d)）の3様に分かれて議論されてきた。さらに、パターンが静止しているか、変動しているかによっても取扱いが異なっている。

パラメトリック・パターンを対象とする学習機械の研究の発展過程をたどってみると、まず、正規雑音に乱された信号の識別機械を逐次的に構成する問題として、初めて N. Abramson と D. Braverman によって考察された。この場合、入力が信号であったか、雑音であったかを機械に教えながら学習が進行するが、常に人の助力を要するのは現実的ではなく、また、通信系の状態が全くわからない時は機械に情報を教えることもできない。そこで、機械が自動的に信号の識別閾値を決定する方法が考えられるようになった。この種の機械は、D. B. Cooper と P. W. Cooper, S. C. Patrick, H. J. Scudder など、かなり多くの研究者によって調べられている。ところで、現実には、通信路はフェージング現象などのために不安定になることが多く、信号の電界強度が時々刻々変動する。このとき、入力信号の変化状態から判断して、電界強度の変動を推定して行かなければならない。この問題に対して、系の変動や信号の発生がマルコフ過程であると仮定して解析する方法が提案されているが、最近では、信号の発生確率が予め知られておれば、週期18秒、フェージング比10 db、S/Nの最低値が15 db程度のフェージングのある通信路では、誤識別率が $10^{-3}$ 以下になる適応識別法が考えられている。しかし、通信路の変化がさらに急激であったり、非常に遠くの宇宙飛翔体から送られる信号のように、情報が極めて貴重なも

のであり、かつ S/N が相当悪いときには、受信側だけでの適応的・学習的識別では十分でない。そこで、送信信号の中に系の状態観測用の信号を入れて、系の変動を刻々測定しながら情報の伝送を確実にすることが考えられる。この方法の効果について検討している。

図形や文字の学習では、パターンがどのような形の分布をするかについて正確な調査をすることが困難である。そのため、分布関数のパラメータを学習するという形で考えることができない。このノンパラメトリック・パターンの学習法はパーセプトロンの収束定理を契機に研究されはじめた。現在では、先生に指導されながら学習する型の機械については、線型分離の場合はもちろん、区分的線型分離、非分離の場合でも最適な識別機械に収束する学習法が知られている。

これ迄の結果を要約すれば次のようになる。

- 1) 人が見てもどのような図形かわからないような、本質的にあいまいな図形がない限り、学習過程で学習の進行状態の良否を機械に教えることにすれば、正しい

識別機械に収束する学習機械は製作可能である。

- 2) 本質的にあいまいな図形があっても、図形発生確率分布の型が予めわかっておれば、学習過程で学習の進行状態の良否を機械に教えることにすれば、最適な識別機械に収束する学習機械は製作可能である。
  - 3) 線型分離の意味で本質的にあいまいな図形がない限り、正しい識別機械にひとりでの収束する学習機械は製作可能である。
  - 4) 本質的にあいまいな図形があっても、図形発生確率分布の型および(カテゴリーとしての)図形の発生確率がわかっておれば、確率的に最適な判別をする識別機械にひとりでの収束する学習機械は製作可能である。
  - 5) 本質的にあいまいな図形があっても、図形発生確率分布の型および図形の発生確率がわかっておれば、図形集合が時間とともに変動していても、その変動にひとりでの追従しながら良好な識別をする学習機械は製作可能である。
- 区分的線型分離パターンをひとりでの学習する機械が

表 1. 学習機械の分類

	先生を持つ学習機械		先生を持たない学習機械		
	定常	変動	定常	変動	
パラメトリック・パターン	I) Abramson and Braverman <sup>2)</sup> (2962) 他多数 Nilsson (1965)		II) Sprangins <sup>4)</sup> (1966) 展望 Patrick and Hancock <sup>5)</sup> (1966) Fralick (1965) <sup>6)</sup> Chien and Fu <sup>7)</sup> (1967)	III) Hilborn and Lainiotis <sup>9)</sup> (1968-69) 田村, 樋口, 田中 <sup>10)</sup> (1963) Chien and Fu <sup>11)</sup> (1969) 福永, 田中, 笠井 <sup>12)</sup> (1970)	
ノンパラメトリック・パターン	分	IV <sub>1</sub> ) Rosenblatt <sup>13)</sup> (1957) Gamba (1960~) Aizerman et. al. <sup>14)</sup> (1964) Pitt and Womack <sup>15)</sup> (1969) Specht <sup>16)</sup> (1969) Wolverton and Wagner <sup>17)</sup> (1969) Duda and Fossum <sup>18)</sup> (1969) Hoffman and Moe <sup>19)</sup> (1967) Nilsson (19685)	パーセプトロン PAPA ポテンシャル関数法 識別関数の決定 区分的線型パターン 解説	V <sub>1</sub> ) Dorofeyuk <sup>21)</sup> (1966) Braverman <sup>22)</sup> (1966)	VI) Ide and Tunis <sup>23)</sup> (1967)
	非分離	VI <sub>2</sub> ) Amari <sup>20)</sup> (1967)		V <sub>2</sub> )	

存在するかどうかは、現在未解決のまま残された問題の1つである。ところで、現在研究されている学習機械は1つ1つのパターンを独立に扱いながら学習する機械であった。この立場では、非分離パターンをひとりで学習する機械を作ることはできない。ところが、既に述べたように、音声パターンでは比較的特徴抽出の容易な母音ですら、必ずしも分離するとは限らない。このようなパターンを識別するためには、経済性や技術的煩雑さを問題として残しながらも、否応なしに言語情報を利用しなければならなくなる。かなり自由なバリエーションを許されたパターンの認識には、必然的に学習が伴うものであり、また非分離パターンの認識が現実的な意味を持っている以上、非分離パターンの学習は決して架空の問題ではありえない。この問題を1つの契機にして、従来の学習機械の研究が少しずつ変貌して行くに違いない。

現在の学習機械は広義のパターンの学習に限られてい。しかも、いかなる手順でデータを処理するかを定めた学習規則は人間によって与えられているから、人間の学習能力と比べると距離があまりにも大きい。では、ソフトウェアを自己学習機構によって改良し、学習方式そのものも新しい学習によって変更するなどのより高度な学習機械への突破口はどこにあるだろうか。1950年代の後半、N. Chomsky は数学的な言語理論である生成文法理論を提唱し、言語を有限状態言語、単純句構造言語、コンテキスト・センシティブ言語、リカーシブ集合の4つに大きく分類し、それぞれの言語を生成し、認識する機械がいかなるものであるかを非常に抽象的な表現で示して見せた。この言語理論は意味を考慮しないので形式言語と呼ばれている。計算機内部の言語は有限状態言語に、プログラム語のアルゴリズムはほぼ単純句構造言語に、自然言語はコンテキスト・センシティブ言語に対応するとされており、現在では、それらの言語の部分クラスに属する数多くの言語とそれらに対応する機械が定義され、各言語の性質、言語間の翻訳、相互関係、文法のおいまいさ、構文分析法などが研究されている。ところで文字、音声の学習機械が言語学習機械へと発展するのはごく自然であり、N. Chomsky もそのことに触れているが、まだまったく着手されていない。言語の機械による学習法を追求することは、やや困難な局面にさしかかっている自然言語認識系の構成に新しい視野を開く可能性を持っていること、さらに、文法という体系の学習法の探索を通じて、構造を持つ、あるいは体系をなす対象を学習するより高度な機械へ接近する糸口を把む可能性を持っていることなど、興味ある問題だと思われる。今のところ、私達は最も簡単な有限状態言語をモデルにして、文字や語を学習する手順、文法を決定できる文の

集合の大きさおよび文法の決定法を調べたに過ぎず、文法の機械による学習の基本的な在り方はまだ解明できていない。しかし、いずれにせよ、学習機械の発展の1つの方向になるのではないかと思う。学習規則を自ら改良して行く一般性のある機械の研究は、まだその時期が来ていないのではないだろうか。推論の過程を省略して云えば、まず、形式言語の表現力、特に論理をいかに表現するかが明らかにされることが先決だと思われる。

## 文 献

- 1) 江尻正員：ロボット工学と物体認識技術，日本機械学会誌，第73巻，第612号，p. 26~33 (1970)
- 2) N. Abramson and D. Braverman: Learning to recognize patterns in a random environment, IRE Trans., IT-8, p. 58 (Sept. 1962)
- 3) N. J. Nilsson: Learning machines, Mc Graw-Hill (1965)
- 4) J. Spragins: Learning without a teacher, IEEE Trans., vol. IT-12, No. 2, p. 223~230 (April 1966)
- 5) E. A. Patrick and J. C. Hancock: Nonsupervised sequential classification and recognition of patterns, IEEE Trans., vol. IT-12, No. 3 (July 1966)
- 6) S. C. Fralick: Learning to recognize Patterns a without teacher, IEEE Trns., vol. IT-13, No. 1, p. 57~64 (Jan. 1967)
- 7) Y. T. Chien and K. S. Fu: On Bayesian learning and stochastic approximation, IEEE Trans., vol. SSC-3, p. 28~38 (June 1967)
- 8) K. S. Fu: Sequential methods in pattern recognition and machine learning, Academic Press, (1968)
- 9) C. G. Hilborn, Jr. and D. G. Lainiotis: Unsupervised Learning minimum risk pattern classification for dependent hypotheses and dependent measurements, IEEE Trans., vol. SSC-5, No. 2, 109~115 (April 1969)
- 10) 田村，樋口，田中：時間的に変動するパターンの認識，昭和43年電気四学会連合大会
- 11) Y. T. Chien and K. S. Fu: Stochastic learning of time-varying parameters in random environment, IEEE Trans., vol. SSC-5, No. 3, p. 237~246 (July 1969)
- 12) 福永，田中，笠井：自己適応機能を有する信号識別系，電子通信会誌，vol. 53-C, No. 5 (掲載予定)
- 13) F. Rosenblatt: Principles of neurodynamics: Spartan Books (1961)
- 14) M. A. Aizerman, E. M. Braverman and L. I. Rozonoer: Theoretical foundations of the potential function method in pattern recognition learning. Avtomatika i Telemekhanika, vol. 25, No. 6 p. 917~936 (June 1964)
- 15) J. M. Pitt and B. F. Womack: Additional features of an adaptive, multibategory pattern classification system. IEEE Trans., vol. SSC-5 No. 3, p. 183~191. (July 1969)
- 16) D. S. Specht: Generation of polynomial discriminant functions for pattern recognition, IEEE Trans., vol. EC-16, No. 3, p. 308~319 (June 1967)
- 17) C. T. Wolverton and T. J. Wagner: Asymptotically optimal discriminant functions for pattern classification, IEEE Trans., vol. IT-15, No. 2 p. 258~265 (March 1969)
- 18) R. E. Duda and H. Fossum: Pattern classification by iteratively determined linear and piecewise linear discriminant functions, IEEE Trans., vol. EC-15, p. 220-232 (April 1966)

- 19) R. L. Hoffman and M. L. Moe: Sequential algorithm for the design of piecewise linear classifiers, IEEE Trans., vol. SSC-5, p. 166~168 (April 1969)
- 20) S. Amari: A theory of adaptive pattern classifiers, IEEE Trans., vol. EC-16, No. 3, p. 299-307 (June 1967)
- 21) A. A. Dorofeyuk: Teaching algorithms for a pattern-recognition machine without a teacher based on the method of potential functions, Avtomatika i Telemekhanika, vol. 27, No. 10, p. 78~87 (Oct. 1966)
- 22) E. M. Braverman: The method of potential functions in the problem of training machines to recognize patterns without a trainer, Avtomatika, i Telemekhanika vol. 27, No. 10, p. 100~121 (Oct. 1966)
- 23) E. R. Ide and C. J. Tunis: An experimental investigation of a nonsupervised adaptive algorithm, IEEE Trans., vol. EC-16, p. 860~864 (Dec. 1967)
- 24) Y. C. Ho and A. K. Agrawala: On pattern classification algorithms; Introduction and survey, Proc. IEEE, vol. 56, No. 12, p. 2101~2114 (Dec. 1968)
- 25) G. Nagy: State of the art in pattern recognition, Proc. IEEE, vol. 56, No. 5, p. 836~862 (May 1968)