特別寄稿

《 神経回路学会誌発刊に寄せて 》

これからのパターン認識研究^{*1}

福 島 邦 彦

大阪大学基礎工学部^{*2}

Pattern Recognition Research for the Future

Kunihiko Fukushima

(Department of Biophysical Engineering, Osaka University)

1. は じ め に

編集委員から、パターンの認識や処理の研究の今後の展開について書くように依頼された。この分野の研究の発展のためにわれわれが取り組むべきテーマに関して、筆者が日頃考えていることや感じていることを、思いつくままに列挙してみたいと思う。

2. 学 習 と 汎 化

人工神経回路が最近これだけ多くの人々を引きつけたのは、その高い学習能力に対する魅力からであろう。神経細胞のような働きをする素子をつなぎ合わせた回路を作っておけば、あとは回路が自分で学習して、どのような仕事でもするようになっていくと期待されているのである。

ところで、このような学習（あるいは自己組織化）において重要なのは、“汎化”の能力、すなわち「一を聞いて十を知る」能力である。例えば学習能力を持つ視覚パターン認識システムを作り、そのシステムに手書き文字を教える場合を考えてみよう。もしそのシステムが汎化の能力を持っていなければ、システムは学習時にあらかじめ教えられたパターンだけしか正しく認識することができない。少しでも変形したパターンが与えられると、システムがそれを正しく認識するという保証は全くない。しかし手書きの文字は、書く人によっても、あるいは同じ人でも書くたびごとに異なった形となる。将来現われる可能性のある変形パターンの数はほとんど無限に近いので、それらのすべてをあらかじめ教えておくな

どということはほとんど不可能である。

しかしシステムに汎化能力があれば、未学習のパターンが与えられても、それが過去に学習したパターンと似ていさえすれば正しく認識できる。また、行なうべき処理の手順を逐一指示されなくても、あいまいな指示に対しても相手の意志を汲んで正しく処理していくことができ、人間のように融通性のある柔軟な情報処理が可能になる。

しかし残念ながら、最近人工神経回路と称して多くの研究が進められているのは、ホップフィールド型回路や、バックプロパゲーションで学習したパーセプトロン型の多層回路である。これらの回路は、回路構造にほとんど何も制約をおかずに設計されている。構造に制約のない回路の魅力は、何を学習させる場合にも同じ回路が使えるということである。回路構造に制約を加えていないために、学習パターンをただ繰り返し表示してやるだけで、どのようなことでも一応は覚えてくれる。これが現在の人工神経回路の大きな魅力になっているのであるが、それが同時に大きな弱点にもなっている。何でも覚えるといっても、それは単なる丸暗記にすぎず、汎化能力を伴っていないのである。

人工神経回路に生物の脳と同じような汎化能力を持たせ、柔軟な情報処理を行なわせるためには、脳が生まれながらにして（遺伝的に）持っているのと同じ構造上の制約を、人工神経回路にもあらかじめ持たせておくことが必要である。もっともこのことは、人間とは異なった能力を人工神経回路に期待する場合には必ずしも成り立たない。例えば航空写真からカモフラージュされた敵のミサイルを見つけたぞという場合には、人の視覚系をまねしても何も役に立たないであろう。敵は視覚系を

^{*1} 1994年4月18日受付

^{*2} 〒560 豊中市待兼山町 1-3

まかそうとして一所懸命工夫しているのであるから、むしろ生物の視覚系とは全く異なった方式でパターン認識を試みる必要がある。しかし手書き文字を認識するような場合には、形の類似性に関して、人工システムも人間と同じ判断基準を持っていることが要求される。文字を書いた本人の視覚系が判読できないようならば、もう一度書き直しているはずだからである。

したがって、もし人工システムに人間と同様の判断能力や汎化能力を要求するならば、まず生物の脳に課せられている構造上の制約を解明し、同じ制約を人工神経回路にも導入することが不可欠である。

脳を知るためには、生理学や心理学などの実験的研究が大切であることは言うまでもない。しかし、それだけでは不十分である。メカニズムがほとんど分かっていない高次中枢での情報処理機構の解明のためには、実験的研究と並行して神経回路モデル（“仮説”と言い換えてもよい）の構成を進めていくことが、脳研究の有力な武器になる。生物系から遊離したモデルではなく、実際の生物の脳にもっと密着した神経回路モデルの研究に真剣に取り組む必要がある。これができなければ人工神経回路の研究も遠からず衰退してしまうであろう。

3. 能動的パターン認識

3.1 フィードフォワード信号とフィードバック信号

われわれが物を見る場合、視覚神経系は外界のイメージを単に受動的に受け入れて処理しているのではない。もっと積極的に自分が必要とする情報を取り入れている。関心のある箇所に眼球を動かしたり注意を集中したりして、その部分からの情報を選択的に取り込んで処理しているのである。

このような情報処理に必要なのは、神経系の中を流れるフィードフォワード信号とフィードバック信号との相互作用である。最近生理学実験でも、動物が何に注意を向けているかによって反応特性が変化する細胞が、何例か報告されるようになってきた。このような機構を取り入れた神経回路モデルとしては、筆者が提唱した選択的注意のモデル¹⁾や、Grossberg らの ART²⁾ などがあ。選択的注意のモデルの考え方をを用いると、英文筆記体の続け文字を読みとるシステム^{3,4)}、を作ることもできる（図1）。また、漢字を偏や旁に分けて認識したり⁵⁾、顔のパターンから目や鼻などを分離して切り出す目的にも役立ちそうである⁶⁾。

脳の中では、フィードフォワード信号とフィードバック信号との相互作用は、決して1重のループだけでは行なわれているのではなく、多重構造をなしている。これ

は、意味情報を取り入れたパターン認識などには欠かせない構造である。しかし多重ループをもち、しかもそれが有効に機能しているようなモデルはまだあまりみられない。これからの重要なテーマの一つである。また、フィードフォワード信号とフィードバック信号の相互作用に関して、選択的注意という観点からだけでなく、記憶の読み出しとか、思考過程のモデル化、知識情報処理との関係というような観点からもモデル化を考えていく必要がある。

3.2 眼球運動

能動的パターン認識においても一つ重要なのが眼球運動である。ヒトの網膜は中心窩の部分は高い解像力を持っているが、少しでも中心窩をはずれると視力は急激に減少する。われわれが物を細かく識別できるのは網膜内でも中心窩付近に限られている。このために眼球を絶えず上下左右に動かし、見ようとする物体の像を中心窩付近にもってくる必要がある。

人間の被験者に静止した文字や図形を呈示して、眼球の動きを測定すると、図形の角や、白と黒の境界の部分などに注視点が集中する。注視点のこのような分布を説明しようとするモデルはこれまでにいくつか存在する。その多くは、網膜の不均一性を考慮したモデルであって、オン中心型やオフ中心型の受容野をもつ網膜神経節細胞の受容野の直径が、中心窩から離れるにつれて大きくなるようにつくられている。このようなモデルに図形パターンを与えたときの反応は図形の角の部分で大きくなり、これが注視点の行きやすい場所と一致していると報告されている。

ところで受容野のサイズの不均一性は、網膜だけでなく大脳の視覚野でも見られる現象である。しかし網膜だけでなく、大脳の視覚野の細胞の受容野の不均一性や網膜皮質間の投射の不均一性までも考慮したモデル^{7,8)}は、まだ数が少ない。また、このような眼球運動によって取り込まれた情報をつなぎ合わせて一つのまとまった外界のイメージを作り上げるメカニズムは何かを調べることも重要になってくる。図2に、筆者らが研究を進めているモデル⁷⁾の概略と、モデルの反応例を示す。

網膜皮質間の不均一な投射は、回路を構成する素子数の節約にしか役立っていないのか、それ以上にパターン情報処理にとって本質的な役割を担っているのかについては、議論の分かれるところである。しかしネオコグニトロンにおいて、パターンにボケを与える操作が変形に強いパターン認識を行なう上に重要な役割を果たしていることなどを考えあわせると、網膜皮質間投射の不均一性も、単に素子数の節約だけでなく、パターン情報処理

(A) 回路の構造⁴⁾ (B) 続け文字認識のコンピュータシミュレーション³⁾

(a) 学習パターン.

(b) 種々のテストパターンに対する認識結果. 下に何も記されていない単語は、すべての文字が正しく認識され切り出された。誤認識された文字は、誤認識の結果をその下に示してある。1文字を、誤って2文字と解釈してしまった場合には、その2文字を括弧で囲んで示してある。

図1 筆記体続け文字を読みとる選択的注意のモデル

(A) モデルの概要

(B) 特徴抽出細胞層の反応例。大脳皮質では注視点(米印で示す左目の付近)の近くが拡大され、網膜の周辺部は圧縮されている。

(C) モデルに文字パターンを呈示した場合に注視点(米印)がどのように移動したかを示す。

図2 不均一な皮質投射をもつ視覚系による特徴抽出と眼球運動のモデル⁷⁾

に対してもっと積極的な役割を果たしているように筆者は感じる。

4. 複数の系の相互作用

視覚系は決して単一の階層をもつ回路ではない。機能の異なる多数の領野から成り、これらの領野の中で、形、色、奥行き、動きなどの情報がそれぞれ別の経路をたどって並列的に処理されている。しかもこれらのチャンネルが互いに独立に働いているのではなく、相互に作用しあいながら処理を行なっていると考えられる。しかしこのような多チャンネルでの情報処理機構を考え、しかもその間の相互作用を考慮したモデルはまだほとんど発表されていない。3次元物体の認識なども、このような枠組みの中で考えていくことが大切であろう。

5. 時空間パターンの認識

時空間パターンの認識機構の解明は重要な問題であるにもかかわらず、モデル構成のヒントになるような生理学実験は非常に少ない。

音声認識を考えてみよう。鼓膜の振動は蝸牛内の基底膜によって周波数分析され、有毛細胞で神経信号(時空間パターン)に変換される。神経系はこの時空間パターンを処理して特徴を抽出し、音声を認識している。しかし聴覚系の生理学的な研究は、視覚系に比べてかなり遅れているように感じられる。その原因の一つは、聴覚パターンに含まれる基本的特徴が何であるかが、いまだにはっきりわかっていないためであろう。視覚系では、特定の傾きをもった直線パターンが重要な基本特徴であることを Hubel & Wiesel が見いだしたことによって研究が急速に進歩した。しかし聴覚系では、直線に相当する基本的な特徴がなにかもまだ分かっていない。モデル研究者の大胆な仮説の提唱が強く望まれる。

早口でしゃべった場合とゆっくりしゃべった場合とでは、時間軸が伸縮するが、われわれ人間はその影響をほとんど受けずに音声を正しく認識することができる。早口でしゃべった場合の長音の持続時間が、ゆっくりしゃべった場合の短音の持続時間よりも長くても、話す速度に関係なく長音は長音として、短音は短音として知覚することができる。つまりわれわれ人間は、各音韻の相対的な持続時間の情報を正しく抽出しているのである。そのメカニズムの解明にもっと多くの研究者が参入してほしい。筆者らは可変速度の遅延線によって速度変化を吸収するモデルを提唱したが⁹⁾、脳の中に本当にそのような機構があるのかどうかを調べ、モデルをもっと神経回路に近い構造に置き換えていくことが今後に残された

問題である。

視覚パターンの動きを検出する神経回路モデルの構成も今後の重要な問題である。特定方向への動きを検出する神経細胞のモデルは多くの研究者によって提案されているが、その情報を統合してさらに高次の情報処理を行なう機構に関する神経回路モデルはあまり多くない。計算論的な処理の試みはいくつかみられるが、神経回路という立場でモデル化するためにはまだ解決しなければならない問題が数多く残されているように感じるのは筆者だけであろうか。

6. 記憶機構のモデル

脳研究の究極のゴールは、記憶のメカニズムの解明であろう。視覚や聴覚パターンの認識にしても、記憶を抜きにしては論じることができない。

脳における記憶は一種類ではなく、複数の記憶システムがあると考えられるようになってきた。例えば、Tulving は記憶を、手続き記憶、知覚的プライミング、短期記憶（一時記憶）、意味記憶、エピソード記憶に分類している。しかしこれら各種の記憶機構を説明できる神経回路モデルはまだ作られていない。人工神経回路に通常取り入れられている記憶機構も、ある種の記憶のモデルにはなっていると思われるが、脳における記憶のほんの一つの側面をモデル化したにすぎない。

最近海馬の研究が進み、長期増強や長期抑圧のメカニズムが次第に解明されてきたが、大脳皮質と海馬との相互作用を考えた記憶のモデルは、残念ながらまだ見あたらない。海馬に蓄えられた短期記憶が長期記憶（エピソード記憶や意味記憶）として皮質に移されていく過程を説明できるようなモデルの構成が望まれる。

参 考 文 献

- 1) Fukushima, K. (1987) : Neural network model for selective attention in visual pattern recognition and associative recall, *Applied Optics*, Vol. 26, No. 23, pp. 4985-4992
- 2) Carpenter, G. A., Grossberg, S. (1987) : ART 2: self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns, *Applied Optics*, Vol. 26, No. 23, pp. 4919-4930
- 3) 庄野 逸, 福島邦彦 (1994) : 折れ点処理回路を用いた選択的注意機構による英字筆記体連結文字列認識, *信学論誌*, Vol. J 77-D-II, No. 5, pp. 940-950
- 4) Fukushima, K., Shouno, H. (1994) : Visual pattern recognition with selective attention, *WCNN '94 San Diego*, Vol. 1, pp. 575-580
- 5) 芦田英一, 福島邦彦 (1991) : 選択的注意機構のモデルによる漢字認識, *信学技報*, No. NC 90-138
- 6) 手塚 大, 福島邦彦 (1994) : 解像度の異なる二つの神経回路を用いた顔の特徴抽出, *信学技報*, No. NC 93-80
- 7) 青西 亨, 福島邦彦 (1994) : 網膜の不均一性と皮質での特徴抽出機構を考慮した注視点移動モデル, *信学技報*, No. NC 93-107
- 8) 山本裕之, Yeshurum, Y., Levine, M. D. (1994) : 中心窩視覚センサを用いた視覚システム, *信学論誌*, Vol. J 77-D-II, No. 1, pp. 119-130
- 9) Yamauchi, K., Fukuda, M., Fukushima, K. (1993) : A speech recognition system consisting of auditory feature extraction cells and velocity-controlled delay-lines—Part II. Recognition module, *IJCNN '93 Nagoya*, Vol. 1, pp. 259-262