

視覚情報処理と神経系

福島邦彦 (NHK放送科学基礎研究所)

1. まえがき

生物の脳は、コンピュータを始めとする現在の情報処理装置にはない高度の情報処理能力をもっている。このような情報処理能力がいったいどのようなメカニズムに起因しているかを知ることが、生理学や心理学の研究者だけでなく、工学者にとっても大きな関心事である。生物の脳の中で行われている情報処理のメカニズムを知ることができるならば、それは直ちに、新しい情報処理装置の設計原理の開発につながるからである。

とはいっても、脳は膨大な数の神経細胞がつながり合った大きな回路網であり、その中には、人間の場合には百億個以上もの神経細胞が含まれているといわれている。従って微小電極を用いて単一神経細胞の反応を分析している現在の神経生理学的手法だけでは、比較的末梢部分に関する断片的な知識は得られても、脳の神経回路の全容を知ることがほとんど不可能に近い。

そこで、数学的あるいは工学的立場からの理論的研究、すなわちバイオサイバネティクス(神経情報科学)的研究の重要性が注目されるようになってきた。バイオサイバネティクス研究においては、調べようとする機能に関して脳と同じ反応を示す神経回路モデルを構成することから始める。モデルの構成に際しては、生理学や心理学の実験によって解明されている事実ができるだけ忠実に取り入れるが、まだ解明されていない部分に関しては大胆な仮説を導入する。このようにして構成したモデルの性質を計算機シミュレーションや数学的解析によって調べる。もし

そのモデルが脳と違う反応を示した場合には、採用した仮説に誤りがあると考えて、仮説を修正していく。このような手順を何回も繰り返すことによって脳における情報処理の基本原理を探求していく。一旦このようなモデルができ上がれば、脳における情報処理にとって本質的な役割りを果たしている要因が何であるかを容易に見極めることができ、脳研究の発展に役立つのみならず、それはそのまま、神経系の長所を取り入れた情報処理装置の設計原理の開発につながる。

ここでは、上記のような立場で作られた神経回路モデルの中から、コンピュータビジョンの研究にとって参考になりそうなものをいくつか選んで紹介する。

2. 網膜のモデル

ネコやサルでは、網膜からの信号を外に送り出す神経節細胞に、オン中心型やオフ中心型の円心円状受容野をもつものがあることがかなり以前から知られており、これを線形あるいは非線形の空間回路でモデル化しようとする試みも数多く見られる。その代表的なものに2層の神経回路モデルがある。つまり2層の神経回路を考え、第1層を視細胞の層に、第2層を神経節細胞の層に対応させ、両者の間の入出力関係だけに注目したモデルである。オン中心型受容野の場合には、各神経節細胞は、その受容野の中心部のオン領域に存在する視細胞からは正極性(興奮性)の信号を受け、受容野の周辺部の円環状のオフ領域(あるいはオン領域も含めた受容野全域に一致する円板状領域)からは負極性(抑制性)の信号を受けていると考えた線型モデルや、

その出力側にアナログしきい特性をもたせたモデルがこれまでも数多く発表され、計算機シミュレーションも各所で行われている^{(1),(3)}。そしてこのような回路が、コントラスト検出能力や図形のエッジ強調の効果などを示すことが確かめられている⁽⁵⁾。

上記のモデルでは網膜を均質なものと仮定しているが、実際には網膜は決して均質ではない。Bežkov らのモデル⁽⁶⁾は同心円状の受容野を対象としたモデルではあるが、網膜上の場所によって受容野の大きさが異なっていることを考慮しており、中心窩の付近では受容野が小さく、網膜の周辺部になるほど受容野が大きくなるように作られている。これは不均一な網膜モデルなので、このモデルに、ある刺激パターンが呈示されたときに神経節細胞層に現れる反応出力は、注視点の位置が変われば当然異なったものになる。彼らは、注視点刺激パターン上の種々の場所にきた場合の反応出力を計算機シミュレーションによって求めた。そして人間の被験者にその刺激パターンを見せた場合に注視点集中する場所と、モデルで大出力が現れる場所とが対応していることを示している⁽⁷⁾。眼球運動をする装置を製作する場合には、このように不均一な網膜を考えることは、経済的設計という立場からも有効であろう。一方、眼球の注視点を視野の中のどこに動かすかについては、このほかにも二三のモデルが報告されているが、いずれも末梢系での制御だけを考慮しており、中枢からの信号による制御まで考慮したモデルはまだ見られない。

Röhler⁽⁸⁾は眼球の微振動(ある点を注視したときに生ずる固視微動)が、個々の視細胞の感度むらを打ち消すのに役立っていることを数学的な検討によって示している。まだ具体的なモデルの提唱はないが、光受容器を微振動

させることによって素子の特性のばらつきの影響を逃げる手法はコンピュータビジョンにとっても有効であろう。

ところで網膜神経節細胞の上記のような受容野は、いったい網膜内のどのような神経回路によって生じたものであるか。最近になって網膜の細胞内に直接電極を刺し込んで単一細胞の反応が記録できるようになり、各細胞の相互結合の状態や機能などが次第に明らかになってきた。そこで、網膜内の特定の細胞の反応状態のモデル化や、網膜内神経回路のモデル化などが行われるようになってきた。^{(1),(3)}

脊椎動物の網膜は $10^{10} : 1$ にも及ぶ入力光の輝度変化に対して動作しうるだけの広いダイナミックレンジをもつ一方、わずか1%程度の輝度変化をも検出しうる能力を備えている。網膜は、このように広いダイナミックレンジと高い輝度弁別能力という互いに矛盾する要求を、刺激光の強度に応じて各細胞の動作レンジをシフトすることによって実現している。このような感度調節には瞳孔径の調節もある程度は寄与しているが、大部分は網膜内の神経回路で何段階にも分けて行われており、その機構に関するモデルもいくつか発表されている^{(1),(3)}。

3. 大脳視覚野のモデル

Hubel と Wiesel は大脳視覚野の神経細胞を、その受容野の性質に従って、単純型細胞、複雑型細胞、超複雑型細胞などに分類し、これら細胞相互間のシナプス結合関係を推定した⁽¹⁾。彼らの考えによると、単純型細胞は外側膝状体の細胞の出力を受け、複雑型細胞は単純型細胞の出力を受け、超複雑型細胞は複雑型細胞の出力を受けて、その受容野を形成している。つまり、網膜→外側膝状体→単純型細胞→複雑型細胞→超複雑型細胞 という階層的な

構造が存在するという考えである。このような考えに基づいた神経回路モデルはすでに以前からいくつか発表されている^{(5), (9)}。

これらのモデルは、視覚野内における情報の流れを巨視的に眺めたモデルである。これに対して、視覚野内の個々の細胞の働きとそれらの結合状態までを微視的に眺めて正確な神経回路モデルを構成しようとする試みも各所で行なわれているが^{(1), (3)}、まだいずれも作業仮説の段階であり、多くの研究者が一致して認めるようなモデルの発表はまだみられない。

変わったモデルとしては、網膜から視覚野(17野)への投射における場所的対応関係を、複素対数関数による等角写像によって説明しようとする試みがSchwartz⁽¹⁰⁾によって提案されている。つまり、網膜上の位置と、そこからの信号を処理する大脳視覚野内の場所との間にはトポロジカルな連続的対応関係がみられるのであるが、解像度の高い網膜の中心部は、網膜上では小さな面積しか占めていないが大脳視覚野では大面積を占めている。この関係を対数関数による写像で近似しようというのである。Bracciniら⁽¹¹⁾はこの考えと不均一網膜とを組み合わせたモデルを提唱している。このようなモデルでは、入力パターンのサイズを増しても、注視点を中心に回転しても、大脳皮質に投射された像は単に位置が並行移動するだけである。

4. 両眼視機構のモデル

ネコやサルの大脳視覚野の細胞の多くは、左右両眼いずれからの刺激に対しても反応する両眼性細胞である。両眼性細胞の左右網膜上の受容野の位置は、視野上に投影して表示するとほぼ重なり合うが、厳密に見ると全く同じ位置に一致しているわけではなく、細

胞ごとにわずかずつずれている。このような受容野の不一致は、両眼視差の抽出、すなわち両眼視による奥行き(距離)の検出に役立っていると考えられている。このような両眼性細胞の中には、両眼に与えられた刺激の位置ずれの量が適当な値になったときのみ出力を出す細胞がある。このような細胞は、光刺激が左右両眼に特定の視差をもって呈示されたとき、すなわち3次元空間内で動物から特定の距離だけ離れた場所に刺激が置かれた場合にだけ強い反応を示すことになるので、両眼性奥行検出細胞と呼ばれている。このような両眼性奥行検出細胞を構成する神経回路モデルは平井と福島⁽¹²⁾などによって提唱されている。

ところで、このようなモデルに例えば3次元空間内に何本もの縦棒が並んだパターンを呈示すると、棒の間隔がある程度以上に広い場合には、左右網膜像に対してそれぞれ正しく対応する棒の対を見いだし、その視差を抽出することができるが、棒の間隔が狭くなってくると必ずしも左右像の1対1の対応がとれず、本来ならば対応しないはずの棒に対しても視差抽出機構が働いてしまい、望ましくない出力が現れる可能性がある。しかしわれわれがこのようなパターンを眺めた場合には、通常は左右像の正しい対応をほとんど無意識的に見いだししている。このように左右網膜像の正しい対応を見い出す機構がどのようなものであるかは生理学的にはまったく不明であるが、いくつかのモデルが提唱されている^{(1), (3)}。

5. 学習・認識機構のモデル

脳におけるパターン認識の問題を扱う場合には当然のことながら、記憶や学習、あるいは神経回路の自己組織化の問題が関係してくる。脳における記憶がいったいどのようなメカニズムに

よって生じているのかについては生理学的にもまだあまり解明されていない。外部から与えられた刺激の作用により、神経細胞間に新しいシナプス結合が形成されたり、すでに形成されているシナプス結合の強度が変化したりすることによって記憶（長期記憶）が神経回路の構造の変化として蓄えられていくという考え方が有力であるが、このような構造変化のアルゴリズムについてはまだ確立した仮説はない。しかし仮説の提唱は少なくなく、そのような仮説に基づいたモデルもいくつか発表されている。ここでは、このような学習や自己組織化能力をもつパターン認識機構のモデルをいくつか紹介しよう^{(2),(4)}。

このようなモデルの一つにパーセプトロンがあるが、これに関しては周知のことと思われるので、ここでは比較的新しいモデルを取り上げる。

5.1 コグニトロン

福島が提唱したコグニトロン⁽³⁾は自己組織化能力をもつ多層の神経回路モデルで、学習段階において頻繁に呈示されたパターンに選択的に反応する細胞が、教師なし学習によって回路内に形成されていく。コグニトロンは、同一構造の細胞層を何段も縦続的に結合した構造をもっている。可塑的な入力シナプス結合をもつ回路内の細胞は、「自分の周りに自分よりも大きい出力を出している細胞がない場合（つまり自分を含む小領域内で自分が最大出力を出している場合）に限り、その入力シナプスのうちで0でない信号が送り込まれたものだけが、入力信号の強さに比例した強化を受ける」という“最大値検出型仮説”に従って強化される。この法則は、興奮性の可塑シナプスだけでなく、抑制性可塑シナプスに対しても成立するものと仮定している。抑制性シナプスも興奮性シナプスと同時に強化することは、その細胞が特定の一

つの特徴だけに選択的に反応するという能力、つまりパターン分離能力の向上に重要な役割を果たしている。

一方、最大出力を出した細胞だけが入力シナプスの強化を受けるという法則は、自己組織化に際して冗長な回路形成の防止に役立っている。つまり、ある刺激パターンが与えられたとき、そのパターン（あるいはそのパターンの部分的な特徴）に最も強く反応した細胞だけが選ばれて、そのパターンに選択的に反応する細胞として成長していく。最大出力細胞だけが選び出されて強化されるので、同じパターンや特徴に反応する細胞が重複して成長することがなく、冗長な回路が形成されることがない。従って“教師なし”でも効率的に回路を自己組織化させることができる。

このような仮説に従ってシナプス結合が変化していくとすると、ある細胞が損傷を受けても、他の神経細胞がその代役をするという自己修復作用が生じる。つまり、ある刺激に対して強く反応していた細胞が、なんらかの損傷を受けて反応しなくなってしまった場合には、それまで入力シナプスの強化を抑えられていた近傍の細胞のうちで、その刺激に対してたまたま他の神経細胞よりも強く反応した細胞が、損傷を受けた細胞の代役を務めるように成長していく。

5.2 Hebbシナプスと側抑制

Hebb⁽¹⁰⁾は、パプロフの古典的条件反射を説明するための仮説として、次のような可塑シナプスの存在を仮定した。すなわち、可塑シナプスの前側の細胞（そのシナプスに信号を送り込んでいる細胞）と、後シナプス側の細胞（そのシナプスを介して入力を受け取っている細胞）の両者が、ほぼ同時に出力を出した場合にのみ、その可塑シナプスが強化されるという仮説である。

Hebb シナプスは、シナプス強化の条件が比較的単純なので、この仮説を採用した神経回路モデルがいろいろ提唱されている。4層パーセプトロン¹⁰⁾もHebbシナプスを使用していたが、その情報処理能力はそれほど高いものではなかった。しかしNassとCooper¹¹⁾や、CsernaiとZimányi¹²⁾は、Hebbシナプスを採用しても、後シナプス側の細胞間に強い逆行性の側抑制機構がある場合には、最大検出型仮説を採用したコグニトロンと同じような自己組織化が可能なることを示した。

ところで、Hebbシナプスをもつ神経回路において、1個の細胞が発火したときに、その近傍の細胞には興奮が、それよりも遠方の細胞には抑制が伝わるようにしておくと、互いに類似した特徴を抽出する細胞どうしが近くに集まって形成される傾向を示す。このような回路を用いて von der Malsburg¹³⁾は、大脳視覚野において、同一の最適方位をもつ細胞どうしが近くに集まって形成されていく機構の説明を試みた。またKohonen¹⁴⁾は、学習刺激として与えられる個々の特徴パターンが、2次元平面状に並んだ細胞に1対1の対応関係をもって投射される際に、特徴相互間の類似性の大きいものほど互いに近くの細胞に投射されるという条件を保ちながら、トポロジカルにも正しい投射関係が得られるようなモデルを提唱している。

5.3 ネオコグニトロン

前記のコグニトロンは、何種類もの刺激パターンを繰り返して呈示されているだけで、回路内には特定の刺激パターンにだけ選択的に反応する細胞が形成され、刺激パターンを認識する能力を身につけていった。しかしコグニトロンは、すでに学習したパターンであっても、そのパターンが学習時とは別の位置に呈示されたり、そのパター

ンの大きさや形が変わったりすると、全く別のパターンが呈示されたものと判断してしまふ。福島はこのような欠点を除去した神経回路モデル、ネオコグニトロン^{15)~17)}を提唱した。ネオコグニトロンは、刺激パターンの呈示位置のずれや多少の変形には影響されずに、形の類似性だけに基づいて正しくパターンを認識する能力をもっている。

ネオコグニトロンは図1のような構造をもつ多層の神経回路である。U₀は光受容器が平面状に並んだ入力層である。U_sはS細胞と名付けた細胞の層で、U_cはC細胞と名付けた細胞の層である。図1には数個の細胞しか描いてないが、実際には回路内には多数の細胞があり、各S細胞およびC細胞はいずれも自分より一つ前の層の細胞のうちで、ある小領域(結合領域)に含まれる細胞だけから入力結合を受けとっている。

S細胞は、その結合領域内の細胞から可塑的なシナプス結合を受けとっている。これらのシナプス結合は、コグニトロンの場合と同様に学習によって変化し、そのうちの特定のものだけが強化される。学習が完了した後は、S細胞は、その結合領域内の一群の細胞の反応の空間パターンが、ある特定のパターンを示した場合のみみ出力を出すようになる。つまりS細胞は、入

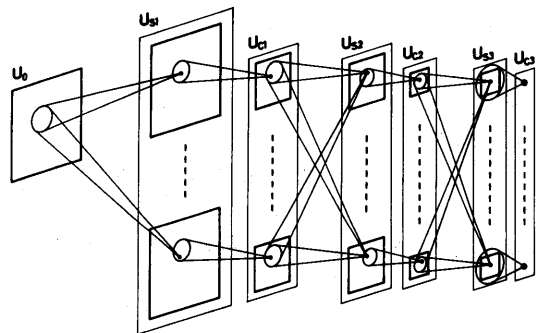


図1 ネオコグニトロンの構造

力パターンの局所的な特徴の一つに選択的な反応を示す。

ところで一つの層内では、後述するように、同一の特徴を抽出するS細胞は2次元平面状に集まって形成される。このような細胞の集合を細胞面と呼ぶことにする。図1において太線で囲んだ四角形が個々の細胞面を表わしている。同一細胞面内のS細胞はすべて同一形状の受容野をもつが、その受容野の位置は細胞ごとに少しずつ異なっている。つまり同一細胞面内の細胞は、いずれも同一の特徴に反応するが、その特徴を抽出してくる入力層上の位置は細胞ごとに異なっている。一つの細胞層内にはこのような細胞面が多数存在する。

一方、C細胞は、特定の一つの細胞面内のある一群のS細胞から興奮性シナプス結合を受けとって、その結合領域内にあるS細胞が1個でも出力を出せばC細胞も出力を出すようになっている。ところで、1個のC細胞の結合領域内にあるS細胞の受容野は、いずれも同一の性質をもつが、その位置は互いに少しずつ異なっている。従ってC細胞は、その結合領域内のS細胞と同じ特徴に反応を示すが、S細胞に比して特徴の呈示位置のずれにあまり影響を受けなくなっている。

各層の細胞間の結合は図1のように縦続的に行われているので、個々の細胞の受容野はその細胞が後段の細胞であればあるほど大きくなっており、最終段のC層の細胞の受容野は入力層全面を覆うようになっている。各細胞面内の細胞の密度は、細胞の受容野が大きくなるにつれて減らしていき、最終層では各細胞面内の細胞数が1個ずつになるように定めてある。

ネオコグニトロンの学習は、コグニトロンの場合と同様に教師なし学習の手法を用いて進めることも、あるいは

教師あり学習の手法を用いることもできる。教師なし学習を採用した場合には、学習パターンが呈示されるたびに、回路内の各層の細胞の中から、その刺激に対して自分のまわりの細胞よりも大出力で反応した細胞がいくつか選び出される。選び出された細胞の入力シナプス結合は、コグニトロンの場合と同様の強化を受け、その刺激パターンにより強く、かつ選択的に反応するようになる。大出力で反応し入力シナプスの強化を受けたこれらの細胞は、さらに、あたかも結晶成長における核のような働きをして、自分のまわりにあるほかの細胞の入力シナプス結合の成長にも影響を与える。その結果、大出力で反応した細胞と同一の細胞面に存在するほかの細胞の入力結合も、大出力で反応した細胞の入力結合と同一空間分布をもつように成長していく。このようにして各細胞面の全細胞が、すべて同一の受容野をもち、学習パターンに含まれている特徴の一つを抽出するようになっていく。

学習を終ったネオコグニトロンに入力パターンが与えられると、入力層に近い層のS細胞はそれぞれ自分の受持ちの小さい受容野で入力パターンを観測し、入力パターンに含まれる局所的な特徴を抽出する。その次の段のS細胞は、自分の一段前のS細胞が抽出した特徴を、もう少し広い視野で観測し、いくつかの特徴を組み合わせた、より大局的な特徴を抽出する。このような操作を繰り返すことによって最終層の各細胞は入力パターン全体の情報を統合して観測し、特定の入力パターンに対してだけ反応出力を出す。ここまでは従来のコグニトロンとほぼ同じであるが、ネオコグニトロンがコグニトロンと異なっているのは、S細胞層の後ろにC細胞層を追加することによって、多層回路各段での特徴抽出と統合の過

程で、特徴相互間の位置ずれを少しづつ許容するようにしている点である。このように、位置ずれを少しづつ許容しながら最終的には大きな位置ずれに対処するという操作が、入力パターンの位置ずれだけでなく、変形に対しても強いパターン認識を行ううえに大きく役立っているのである。

ネオコグニトロンの反応特性は、教師なし学習と教師あり学習の両者に対して種々の条件のもとに計算機シミュレーションによって調べられている。図2は教師あり学習によって数字パターンを覚えさせたネオコグニロンがどの程度変形したパターンまで正しく認識するかを調べた結果の一例で、この図に示す程度の変形ならば誤りなく認識した。

5.4 フィードバック結合をもつ回路

脳の中での情報処理過程を考えると、必ずしも末端から中枢に向かって一方方向性に情報が流れていくだけではない。はっきりしないあいまいなパターンを見た場合などには、まず最初に、それがどういうパターンらしいかという直感が働き、その後最初の直感があたっていたかどうかの確認をしていくという手続きがとられるであろう。また、ある一つのパターンが与えられると、それがもとになって別のパターンが次々と連想されてくるというような状態も我々がよく経験することがある。脳

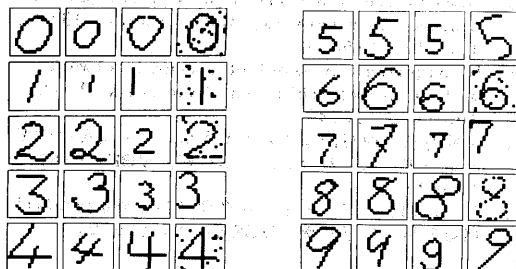


図2 ネオコグニロンが正しく認識した数字パターンの例

の中でのこのような現象に注目する場合には、階層的な情報の流れだけでなく、フィードバック的な情報の流れや、あるいは同一階層の細胞間に生ずる反応の連鎖などを考慮したモデルを考えなければならない。

連想記憶のモデルとしては相関マトリクスを始め多くのモデルが考えられているが^{(2),(4)}、例えば相関マトリクス型連想記憶のモデルに対して、想起出力を再び入力側にフィードバックするような経路を付加してみよう。このような回路では、ある刺激によって想起された出力が、次の時点の入力刺激として働くことになる。従って、いったん一つの刺激が与えられると、その後入力刺激が打ち切られても、神経回路の反応はいつまでも持続する。このとき、反応パターンすなわち想起出力は時間とともにしだいに変化していく。

フィードバックを付加する以前の回路が自己想起型の場合には、フィードバック経路を付加することによって、入力刺激に含まれるノイズを除去したり、あるいは、二つのパターンが重なったようなあいまいな刺激パターンが与えられたときにそのうちのいずれか一方のパターンだけを選び出すような機能をもった回路を実現できる^{(2),(4)}。福島と三宅⁽³⁾は、前述のコグニロン型の回路にフィードバックを付加したフィードバック型コグニロンを提案し、計算機シミュレーションによって種々の連想実験を行っている。

我々は、過去に聞いたことのあるメロディーの一節を聞いただけで、それに続くメロディーを思い浮かべることができる。福島⁽⁴⁾は相関マトリクス型の相互想起型連想記憶回路に時間遅れを伴うフィードバック経路を付加して、時間とともに変化するパターンの系列を連想する回路を実現した。その後、Willwacher⁽⁵⁾もこれに似たモデルを提

案している。

Wigström²⁰⁾や平井²¹⁾もフィードバック結合をもつ連想記憶モデルを提案しているが、上記の諸モデルとは少し違って、フィードバック結合をしているのは抑制性の結合である。従って彼らのモデルでは、フィードバック結合は新しい連想を引き起こすための信号を伝えるのではなく、最初に想起されたパターンと矛盾するような反応が回路内に発生するのを阻止する働きをしている。つまり、刺激パターンに対する選択性を高めるのに役立っており、複数個の刺激パターンが同時に呈示されても、特定の一つのパターンに対する想起出力だけが選択的に現われる。

福島と三宅²²⁾は、コグニロン型の回路に対して、各層の細胞から1段前の層の興奮性細胞に向かうフィードバック的な抑制性可塑シナプス結合を追加することによって、図形の局所の特徴を効率よく大局的特徴にまとめ上げていく能力をもつ回路を実現した。この回路では、高次の特徴としてまとめられてしまった低次の特徴は、それ以降の情報処理には必要ないとして、その低次の特徴に対応する反応をフィードバック型抑制によって順次消していくという操作が進行する。その結果、刺激パターンに対する選択性が高まると同時に、回路の自己組織化の速度が向上した。

文 献

全般的解説

- (1) 福島邦彦：視覚の生理とバイオニクス，電子通信学会編（1976）。
- (2) 福島邦彦：神経回路と自己組織化，情報科学講座，共立出版（1979）。
- (3) 福島邦彦，大串健吾：視覚覚系のモデルによる研究，計測と制御，18[1]，22-29（1979）。
- (4) 福島邦彦：学習のモデル，医用電子と生体工学（日本M E学会誌），19[5]，319-330（1981）。

引用文献

- (5) 福島邦彦：図形パターンの特徴抽出回路，NHK技術研，23[5]，351-367（1971）。
- (6) V. Bežkov, T. Radil-Weiss：Information processing in the retina, Kybernetika, 13[1], 63-77（1977）。

- (7) V. Bežkov, Z. Bohdanecky, T. Radil-Weiss：Target point selection during scanning eye movement, Biol. Cybern., 27[4], 215-220（1977）。
- (8) R. Röhler：Sensitivity variations in the visual system, contrast resolution and eye movements, Biol. Cybern., 32[2], 101-106（1979）。
- (9) H. Marko：A biological approach to pattern recognition, IEEE Trans., SMC-4[1], 34-39（1974）。
- (10) E. L. Schwartz：Spatial mapping in the primate sensory projection, Biol. Cybern., 25[4], 181-194（1977）。
- (11) C. Braccini, et al.：A model of the early stages of the human visual system, Biol. Cybern., 44[1], 47-58（1982）。
- (12) 平井，福島：両眼視差抽出機構の神経回路網モデル，信学論誌D，56-D[8]，465-472（1973）。
- (13) 福島邦彦：自己組織機能を持つ多層回路，信学論誌D，58-D[9]，530-537（1975）。
- (14) D. O. Hebb：Organization of Behavior, John Wiley & Sons（1949）。
- (15) H. D. Block, et al.：Analysis of a four-layer series-coupled perceptron. II, Rev. Modern Physics, 34[1], 135-142（1962）。
- (16) M. M. Nass, L. N. Cooper：A theory for the development of feature detecting cells in visual cortex, Biol. Cybern., 19[1], 1-18（1975）。
- (17) L. P. Csernai, J. Zimányi：Mathematical model for the self-organization of neural networks, Biol. Cybern., 34[1], 43-48（1979）。
- (18) C. von der Malsburg：Self-organization of orientation sensitive cells in the striate cortex, Kybernetik, 14[2], 85-100（1973）。
- (19) T. Kohonen：Self-organized formation of topologically correct feature maps, Biol. Cybern. 43[1], 59-69（1982）。
- (20) 福島邦彦：位置ずれに影響されないパターン認識機構の神経回路モデル—ネオコグニロン，信学論誌A，62-A[10]，658-665（1979）。
- (21) K. Fukushima, S. Miyake：Neocognitron：a new algorithm for pattern recognition tolerant of deformations and shifts in position, Pattern Recognition, 15[6], 455-469（1982）。
- (22) 福島，三宅，伊藤：ネオコグニロンの原理を用いた数字パターン認識，信学論誌D，J66-A[2]，206-213（1983）。
- (23) 福島，三宅：連想記憶能力をもつ自己組織回路，信学論誌D，60-D[2]，143-150（1977）。
- (24) 福島邦彦：時空間パターンの連想形記憶，信学論誌D，56-D[7]，401-407（1973）。
- (25) G. Willwacher：Storage of a temporal pattern sequence in a network, Biol. Cybern., 43[2], 115-126（1982）。
- (26) H. Wigström：A model of a neural network with recurrent inhibition, Kybernetik, 16[2], 103-112（1974）。
- (27) 平井有三：連想記憶における多重マッチ状況の学習回路モデルによる分析，信学技報，MBE 81-87（1982）。
- (28) 三宅，福島：フィードバック型抑制結合を持つ自己組織回路，信学技報，MBE 81-85（1982）。