

視覚系における情報処理[†]

渡 部 勲^{††}

1. はしがき

照明工学、人間工学などの分野では視覚系の心理学的な性質を把握することが重要である。画像工学においては、心理学的な性質を知ることが重要であるが、視覚系を画像情報伝送系の終端要素として全体のシステムに含めて考える必要があり、このため視覚系の性質を何らかの工学的手法によって記述しようとする努力が行なわれている。この場合には視覚系における情報処理の仕組みを知ることがある程度必要になる。しかし、情報技術においては、この問題がさらに重要視される。すなわち、文字読取り装置やロボットなど、人間の視覚に近い機能の眼を持つ機械を実現しようとする目的のためには、生体の視覚系における情報処理機能からヒントを得ることが一つの有力な手段となり得るからである。

生体の眼をまねることが可能かどうかについてはここで論ずるつもりはない。この問題についてはデカルトの精神・物質二元論に始まり、生物はどこまで機械で置きかえられるか、コンピュータは人工頭脳たり得るかなど、種々の形で長い間議論がくり返され、現在もなお肯定論者、否定論者が対立している。筆者は両者の対立は今後も続くであろうし、また対立のある限り、生体に学ぶというバイオニクス研究も続くであろうと考える。

このような状況の中で、視覚系における情報処理の仕組みを明確に説明することはもちろん不可能である。したがって、ここでは視覚系の入出力関係の観察から見た性質や神経生理学的なミクロな知見、あるいは工学的研究の例を述べて問題提起をし、今後の研究の参考に供することとしたい。

2. 物理空間と心理空間との対応

視覚系は、外界の像を水晶体を通して2次元構造の網膜に投影するが、それをそのまま脳に伝えて知覚反

応を生ずるといような単純な働きをしているものではなく、その間には非常にこみ入ったプロセスの存在することはいうまでもない。

いま、視覚系を画像情報伝送系として考えると、図1のようなブロック図で概要を表わすことができるであろう¹⁾。

視覚神経系は多数のチャンネルの並列構造を持ち、空間的な情報を並列同時方式で処理しているのが特徴である。しかし、網膜上の視細胞の数が1億余りあるのに対し、眼球から外に出る神経節細胞の線維の数は約100万であり、この間ですでに功妙な機構による情報処理が行なわれているものと推察される。それをうらづける観測事実として、網膜上の視力は中心くぼみ(central fovea)において極端にすぐれ、周辺部では

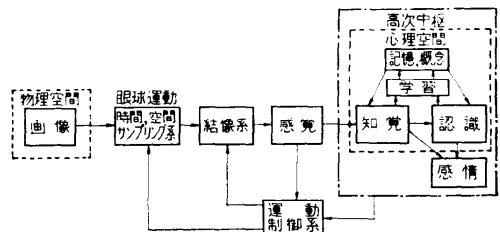


図1 視覚伝送係ブロック図

ひどく劣る。また、色の識別能力も網膜の中心部にはあるが周辺部にはない。しかし、われわれは、眼球を動かすことによって網膜の機能を効率よく働かせるので日常生活に不自由を感じない。

眼球運動は、物理空間に存在する情報を空間的、時間的にサンプリングするという働きを持つことになるが²⁾、時間的サンプリングは神経系の時間的性質に密接な関係を持つと考えられる。すなわち、神経系は定常的な刺激に対しては応答しにくく、時間的に変化する刺激に敏感である。このような神経系の性質から見て、眼球運動による時間的サンプリングは視覚系にとって重要な効果をもたらすことになる。

図1の結像系は、瞳孔、水晶体を含む眼光学系を意味する。

[†] 第13回情報処理学会大会招待講演(昭和47年12月5日)
^{††} NHK 放送科学基礎研究所

感覚と知覚、知覚と認識とはそれぞれ明確に分類することは困難であるが、ここでは便宜的につぎのような考えに従って分けて扱う。

感覚 (sensation) は外部刺激によって直接的に生ずる要素的な意識内容で、光の有無、色や明暗の違いのような反応を指す。

刺激を時間的関数、空間的関数あるいは両者の組合わせとして感ずる反応は知覚 (perception) であるとする。知覚現象には、恐らく生得的な神経機構によって生ずると考えられる現象と、程度の差はあっても学習によって形成された記憶や概念が関与して生ずる現象とがあり、これらを明確に分けることはむずかしい。

認識 (recognition) は、知覚よりもさらに高度の精神活動を伴って生ずる意識内容を指し、知覚された図形が、ある概念と結びついて判断が行なわれる場合、たとえば白い球を知覚したとき、それがボールであるか卵であるかを判断するとか、字や文章を読んだり理解するような活動を意味する。

感情 (emotion) は知覚あるいは認識を経て生ずる情緒であり、ここでは心理空間から一応切り離して考えることとする。

視覚情報はこのような系を通して心理空間に投影されるものであり、その間に介在する視覚伝送系の複雑な性質によって、物理空間で定義される像の性質は、心理空間ではかなり異なったものとなることは容易に想像される。錯視の現象、あるいは2次元で描かれた画像から奥行を知覚するなどはその典型的な例である。

このような視覚系の入出力対応関係については心理学の分野で詳しく観測が行なわれ、その間の法則性が見出されている。そして、視覚系の神経機構については生理学の分野で微小電極法によって追究が行なわれているが、この方法ではミクロな構造については明らかにすることができても神経系のシステムとしての構造についての追究には困難がある。

現在の段階では、心理学的なマクロな観測と、生理学的なミクロな観測との間には大きなギャップが存在するが、このギャップを埋めるために工学的研究が必要であると考えられる。そのための研究方法として、一つはバイオニクス研究があげられる。

バイオニクス研究はもともと生体の機能を工学的応用に利用することを目的としているが、視覚系に関しては上記のように非常にむずかしい問題が存在しており、工学的応用の前に、モデル構成の手法を適用し

て、まず視覚系の情報処理機構を明らかにする研究が必要と考えられる。

さらに、バイオニクスにおける構成の手法は生理学的な観測事実がその基本要素として必要と考えられるから、主として生得的な神経機構に依存するような機能については適用が可能であるが、生理学的にも未開拓である中枢の高度の機能については心理学的な観測事実にもとづいた理論的な推論を行なう以外に研究方法がないと考えられる。

つぎに、具体的な例として視覚系における特徴的な現象をあげ、これに関する工学的な研究の例および問題点を論ずる。

3. 視覚系における特徴的現象と工学的研究

3.1 コントラストの知覚と受容野

図3の左上のようなパターンを見ると、同図(a)のように明暗の境界部においてコントラストが強調されるマッハ現象とよばれる現象が生ずる。この現象は神経系の側抑制 (lateral inhibition) の働きによって生ずるものと考えられる。

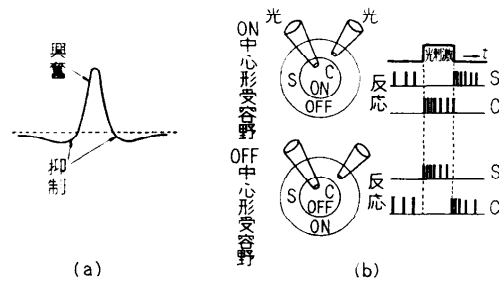


図2 神経系の興奮、抑制性結合 (a) と受容野 (b) の説明図

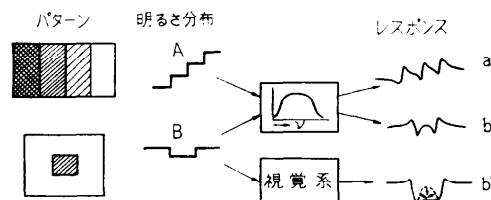


図3 同時対比現象発生機構の説明図
λ: 空間周波数

視細胞から大脳皮質視覚領に到る神経系路は、主経路として4層の神経細胞層があり、各層間には単に縦方向の結合だけがあるのではなく、横方向にも分布した結合のあることが知られている。そして、その結合

には興奮性と抑制性の2種類があり、前者は後段の神経細胞を興奮させ、後者は興奮をおさえる。

後段の神経層の1個に着目して、前段神経層からの結合の強さの空間的分布を1次元で表わすと図2の(a)のような形になる。

図3の左上のパターンを見た場合に、神経系の後段の方の層に生ずる反応の分布は、図2の(a)の波形でこのパターンを畳み込み積分した形に近くなることは容易に想像され、しかも抑制性結合のために図3の(a)のようにステップの部分に対して過渡ひずみの生ずることも直ちに推定できる。

図2(a)の波形は電気信号伝送系におけるインパルス応答に相当するものと考えられるから、時間次元を空間次元に置きかえさえすれば、神経系をフィルターと見なし、その空間的な周波数特性を求めることも可能である。(ただし非線形性を無視した場合。)

画像工学分野では視覚のコントラスト感度特性を周波数特性の概念で扱うことが実用的な意味で都合がよいため、多くの人々によって視覚の空間周波数特性が測定されている³⁾。その特性は図2(a)の波形から推定すれば当然帯域通過形となるはずであり、測定結果も一致する。

視覚系の総合特性としての空間周波数特性は、主観判断実験によって測定されるが、その結果には種々の要因が関係するものであり、筆者は図1のブロック図と対応させ、空間周波数フィルターとしての視覚系を図4のような構成として考えている²⁾。

同図において、注視点移動は比較的大振幅の眼球運動を指す。荒い模様の図形に対しては、注視点移動は各部をサンプリングすることによってコントラスト感度を高める効果を生じる。この効果は注視点移動を実効的に止めた状態で測定した視覚の空間周波数特性のデータから明らかである。

また、固視微動は視線を一点に止めた状態で観察される不随意的な微小眼球運動であるが、この運動まで止めてしまうと完全な像消失現象が起る。しかし低周

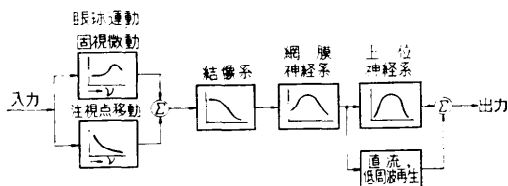


図4 視覚系の空間周波数フィルター表示
 〇: 空間周波数

波の利得に対しては何ら効果を持たず、高周波域での信号を維持し続ける役目を果たすと考えられる。

結像系ではぼけを生ずるので低域フィルターとして考えられる。網膜構造は神経のディスクリートの空間分布構造による低域フィルター特性と、神経系の側抑制によって空間的な直流分および低周波成分が抑圧されるために生ずる高域フィルター特性との結合、すなわち帯域通過型フィルターと考えることができる。

中枢神経系も同様に帯域通過フィルターと考えられる。

総合的には一種の帯域通過型フィルターとなり、直流分と低周波成分は主経路ではほとんど伝送されないことになる。

マッハ現象はこのような空間周波数特性を持つ伝送系の出力として当然類推される現象である。しかし、一方では補助的機能として直流分あるいは低周波成分の再生機能が存在すると考えられる。一例として、明るさに対する眼の感度は広い視野の各部に対して一様であるとは考えにくい。にもかかわらず、物理的に一様な明るさを見ればやはりわれわれは大体一様であると判断するし、また、その明るさの絶対値は生活経験によって得た記憶と照合することによってある程度の判断がつく。このような性質は直流分の再生機能と考えると理解しやすい。

低周波分の再生については明るさの同時対比現象がその例となる。同時対比現象は、マッハ現象のように明暗の境界部のみに生ずる現象ではなく、さらに大きな面積に対して生ずるコントラスト強調現象である。

図3のBのように、明るい背景でかこまれた暗い図形を見ると、図形の面積がかなり大ききとも、その図形全体に渡って暗さが強調されて見える現象をいう。この場合、視覚系が低周波成分を伝送しなければマッハ現象と同様に、図形の輪かく部だけについて強調が生じ、bのようなレスポンスになるはずであるが、実際にはb'の実線のように図形全体の暗さが強調される。この現象の発生機構はまだ明らかでないが、まず、マッハ現象が輪かく部に生じ、その反応が中枢神経系において図形内部に波及するために起こるとする説がある⁴⁾。すなわち、局部的に低周波成分を再生する機能が中枢に存在すると考えることができるであろう。

神経系の側抑制については、これを取り入れた神経回路のモデル構成研究が数多く行なわれているが、これらは周知であるので省略する。

つぎに、神経系には側抑制にもとづいて構成された受容野 (receptive field) とよばれる機構が存在することが確かめられているので、これについてのべる。

神経層間には空間的な広がりを持った結合があることはすでに述べた。この結合の広がり の結果として、後段の神経1個の反応は、当然、前段のある範囲に与えられた刺激によって生ずることになる。たとえば、眼球から外に出て行く神経節細胞 (ganglion cell) の線維の1本をしらべると、網膜上のある有限の範囲に光のスポットを当てた時に反応を生ずることがわかる。この範囲をその神経細胞の受容野と称している。

猫などの神経節細胞の受容野はほぼ円形で、その反応の仕方に2種類あることが確かめられている。円形の大きさは一般に数 mm 程度であり、網膜中心部では小さく、周辺部では大きい。

2種類の反応は図2の(b)に示したようなものであり、一つは受容野の中心部に光を当てると神経細胞のパルス頻度を増し、周辺部に当てた場合には減少する。他の一つでは、中心部と周辺部との関係が逆になっている。前者は on 中心形受容野 (on-center field)、後者は off 中心形受容野 (off-center field) とよばれている。図2の(a)は、on 中心形受容野の性質を表わしているものと見ることができ、

このような受容野は、興奮と抑制の結合の分布状態およびそれぞれの時間的性質を考慮に入れば、そのメカニズムを説明することは可能であり、Rodieck⁵⁾ や安田⁶⁾ はすでにモデル構成を行なっている。しかし、これらのモデルでは受容野の性質やマッハ現象、あるいは Broca-Sulzer 現象 (明るさ知覚における時間的な過渡現象) の説明は可能であるが、前述の対比現象についてはまだ十分な説明が行なえない。

3.2 図形知覚と受容野

心理空間に投影される像は物理空間のそれとは異なることの例として錯視の問題があることをさきに述べた。

錯視には各種の例があるが、たとえば図5の左側の Poggendorf の錯視図形について藤井⁷⁾らは図2(a)のような神経系の性質を適用すると、神経系の出力空間には図5の右側のような反応の分布が現われ、斜線のくいちがいを感ずるといふ心理現象によく一致することを報告している。

一方、神経生理学における動物の大脳皮質視覚領の受容野の観測結果では、その性質が神経節細胞のものとかかなり異なっていることが確かめられている。すなわ

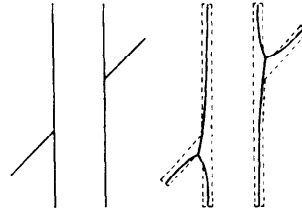


図5 Poggendorf の錯視図形と(左)と、これに対する神経系の応答の空間分布(右の実線)(藤井他)

ち、視覚領においては受容野の形は一般に円形ではなく長方形に近い。そして、受容野の中心部に一定の角度の直線状あるいはエッジの光刺激が当たった時に反応を生ずる細胞(単純形)、直線の角度が一定であればその受容野内の位置にかかわらず反応する細胞(複雑形)、特定の角度、長さの線分、図形の角に反応する細胞(超複雑形)などのタイプが存在することがわかっている。

これらの受容野の性質はやはり神経系の興奮と抑制の結合分布の形を選定すれば説明することが可能であり、福島⁸⁾は6層の神経層モデルをコンピュータシミュレーションで構成し、そのモデルに直線、点、曲線の曲率など図形の特徴要素と考えられるものを抽出する機能を持たせることに成功している。

これらのモデルは生得的な神経の機構によると考えられる機能をよく説明しており、将来人工の眼を作る場合に有効な基礎資料を与えるものと思われる。

3.3 図形知覚と網膜誘導場

網膜に光刺激を与えると、ある種のフィールドが発生し、刺激点の周囲に広く分布することが知られている。本川⁹⁾は、このフィールドが網膜の段階ですでに観測されるところから、網膜誘導場と名づけている。

網膜誘導場は、その伝播が波動の性質を示し、速度は数 mm/秒程度(刺激の強さで異なる)であり、単なる神経層の横方向結合では発生メカニズムを説明できない。

本川はく法と称する、電気刺激を眼の付近の皮膚に与えてその感電性を測定する方法によって、種々の図形を見た時の誘導場を観測している。その一例によると、図6のような2種類の図形を見たとき、それによって生ずる誘導場の強さは各図形の○で示した位置において図中の数字で示したような値となり、(a)と(b)ではその様子が全く異なるという。すなわち(a)の図形では奥行知覚を生じ、遠方に存在するよ

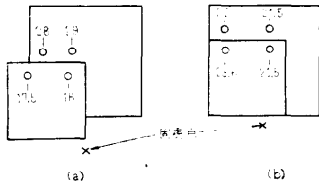


図6 遠近知覚と網膜誘導場の強さとの関係(本川)
数字は各測定点における場の強さを示す。

うに知覚される部分の誘導場の強さは手前のそれより強くなっている。これに比して(b)ではそのような差異が認められない。

このように、高度の知覚機能に関しても客観的な測定データでその側面を示せることは非常に興味深い。

人間の図形知覚には、なお複雑な要因が関与するものであり、そのメカニズムの解明には困難な問題が多い。たとえばアフリカのゾール族とよばれる人種は日常円形文化の中に生活しているが、彼らは直線で構成した図形についてわれわれが知覚するような錯視現象を生じないという報告がある。この例は図形知覚には学習がかなりの程度関与していることを物語っているように思われる。また、ゲシュタルト心理学でいう図形のまとまりの法則では、人間の視覚には、対称になる部分同志はまとまりとして知覚される、部分図形が相互に秩序ある関係にあるときはまとまりとして知覚されるなどの強力な法則性のあることを提唱している¹⁰⁾。これらの観測事実から考えると人間が図形を分節する場合に果して直線、点などの要素を特徴要素としてとらえているかどうかは甚だ疑問になる。人間がどのような仕組によって図形の特徴要素を抽出し、認識を行なっているかはむずかしいが工学的にも極めて重要な問題である。これを解明するには、まず心理学分野で観測されている法則性を論理的に記述する方法を見つけることが第一段階の問題ではないであろうか。

4. 学習、記憶、認識

人間の行なう認識のメカニズムについてはほとんどわかっていないといってよいであろう。しかし、認識と密接な関係を持つ記憶の問題については工学分野でも最近新しい研究が行なわれている。

神経系が並列形の情報処理を行なっているということは、入力情報を多数のチャンネルに分散して処理を行なっているということであり、ホログラフィーのように、情報の位相的な性質を保ちながらノイズに対して

は強いという特徴を持つことになる。

記憶のメカニズムもこのような分散形になっているであろうという着想から、中野¹¹⁾はアソシアトロンと称する分散形の構造を持つ連想記憶のモデルを提案している。また、福島¹²⁾はこのモデルに時系列で記憶を行なう機能を持たせるように発展させている。

これらのモデルでは、複数の入力情報を多数のメモリー素子に分散した形で重複して記憶させることにより、その一部が欠けた場合、あるいは読み出し時の入力情報が不完全な場合でもほとんど完全な記憶を読み出すことができる。また、ある情報に関係した他の情報も読み出す機能を備えている。これらの機能はかなり人間の記憶に近い側面を持っていると考えられる。

学習については、哲学、心理学の分野で古くから、経験に依存するという説と、生得的な機能に依存するという説が対立していることは周知である。工学分野におけるパーセプトロンなどは経験説に相当する典型的な例であるといえよう。上坂¹³⁾らが、最近、生得的機構を無視することはできないという立場から工学分野での学習理論の展開を試みているのは興味深い。今後の発展を期待したい。

5. むすび

視覚系における情報処理について二、三の例を上げて問題提起をし、工学分野での研究の必要性をのべた。視覚系についてはここにあげた例以外に興味深い問題が山積している。同好の志が増え、今後ますます研究の盛になることを期待したい。

参考文献

- 1) 樋渡：視覚情報と画像工学，電通学会画像工学研究委資料，1972年4月10日。
- 2) 渡部：コントラスト弁別における眼球運動の役割，テレビ誌，21，614(1967)。
- 3) たとえば，A. Watanabe et al.: Spatial Sine-Wave Responses of the Human Visual System, Vis. Res., 8, 1245 (1968)。
- 4) H. J. M. Gerrits et al.: Simultaneous Contrast Filling in Process and Information Processing in Man's Visual System, Exp. Brain Res., 11, 411 (1970)。
- 5) R. W. Rodieck: Quantitative Analysis of Cat Retinal Ganglion Cell Response to Visual Stimuli, Vis. Res., 5, 583 (1965)。
- 6) 安田他：網膜における時空間的情報処理過程のモデル，電通学会論文誌，53-C, 11, 823 (1970)。
- 7) 藤井他：Lateral Inhibition による錯視現象の

- 解析, 医用電子と生体工学, 5, 117 (1967).
- 8) 福島: 図形パターンの特徴抽出回路. NHK 技術研究, 23, 351 (1971).
- 9) 本川: 大脳生理学, 中山書店 (昭 39).
- 10) W. Metzger: 視覚の法則, 盛永訳, 岩波 (1953).
- 11) 中野: アンシアトロンとその応用, 電通学会インホームーション理論研究会資料, IT 69-27 (1969-09).
- 12) 福島: Associative Memory for Spatio-Temporal patterns, First USA-JAPAN Computer Conference (1972).
- 13) 上坂他: 学習可能性の理論, 電通学会オートマトンと言語, パターン認識と学習研究会資料, AL, PRL 72-62 (1972-10).
-