

# バイオニクスの一断面

大阪大学工学部 藤井 克彦

## 1. 生物工学 (Biological Engineering または Bionics) とは

人間のまねのできる機械を作ろうとしてロボットを作ったことが自動機械の開発をうながしたように、われわれはこれまで生物からいろいろな技術を学んでいる。けれども生物は、現在の技術ではとうてい実現できないような優秀な機能をまだまだ沢山持っている。たとえば、文字や図形を見分けるとか、音を聞き分ける能力を考えてみても、現在の機械は生物に比べて問題にならないくらい幼稚なことしかできない。また味覚とか嗅覚のように、今日の技術では全く実現できない機能もある。また筋肉のように柔軟性がある、しかも張力を自由に変えられるものもない。さらに脳の働きとか細胞の増殖機能に至っては、現在の技術はまったく無力であることを認めなければならない。

そこで最近工学の分野でも、生物の持っているすぐれた機能を工学的立場から再検討し、積極的に取り入れて、新しい技術を開発しようとする方向が注目されるようになった。生物工学 (Bionics) とはこのような分野のことを意味するもので、生物そのものを理解することから始めて、生物に比べて人間の作った技術が劣っている点を、生物のメカニズムすなわち自然の作りだした技術から学ぼうとする工学であるといえる。

生物から技術を学ぶには、まず生物の機能とその機能を実現している構造についての知識が必要である。生物そのものを研究する学問として、生物学、生理学、心理学等がある。また特に人体を対象として、解剖学、生化学、病理学等で他表される医学の分野に属するものがあげられる。これらと工学との相互関係を示すと図1のようになる。工学の分野で開発された技術を積極的に医療、診断の手段に使用しようとする研究が盛んに行なわれているが、これらは M.E. (Medical Electronics) と呼ばれ、主として工学技術の医学分野への貢献に重点がおかれている。これに対してここで取りあげている生物工学とは、図に示すように、生物学、心理学、医学等の分野と工学との境界領域に属するもので、われわれ工学の分野のものから見ると、むしろ生物に関する知識を積極的に工学の分野に持ち込もうとする立場の学問であるといえる。

学、病理学等で他表される医学の分野に属するものがあげられる。これらと工学との相互関係を示すと図1のようになる。工学の分野で開発された技術を積極的に医療、診断の手段に使用しようとする研究が盛んに行なわれているが、これらは M.E. (Medical Electronics) と呼ばれ、主として工学技術の医学分野への貢献に重点がおかれている。これに対してここで取りあげている生物工学とは、図に示すように、生物学、心理学、医学等の分野と工学との境界領域に属するもので、われわれ工学の分野のものから見ると、むしろ生物に関する知識を積極的に工学の分野に持ち込もうとする立場の学問であるといえる。

## 2. 生物の持つ機能の特徴

まず生物の持つ機能のうち、注目に値するものについて、三例をあげて検討してみることとする。

### 2.1 学習機能

近年非常に発達して、われわれの生活全般にわたって革命を起こしつつある計算機と人間の頭脳について比較を行なってみよう。なるほど計算機は実にすぐれた情報処理能力を持っていて、人間ではとうてい実行できないような膨大な量の計算を、数秒の時間で完了する。しかしある問題を解くに要する時間は、つぎに類似の問題を与えたときも同じであると考えねばならない。3度目も4度目も同じである。

人間の場合はある問題が与えられると、それが未経験の問題である場合には、試行錯誤的な過程を経て長時間の後に解答に到達する。その解の精度も悪い。しかし同じような問題がつぎにきたときは、前回より短時間でより精度の良い解答に到達することができる。さらに繰返し行なううちにいよいよ熟練して、ついに問題を見ただけで解答が直ちに得られるようになる。このような現象を学習機能と名づけるが、この機能の有無が計算機と頭脳との本質的な相違点である。

生物は自分の体験したことを記憶しておいて、その後と同じような状況が起こったときに過去の知識を活用することができる。その場合、ただ体験したことを正確に記憶しておくということだけでなく、環境に適応してい

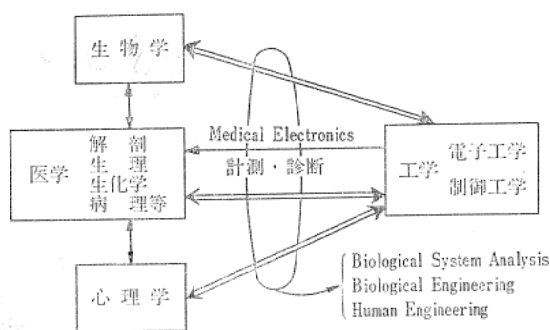


図1 生物工学の周辺

くために、体験によって得た知識をどのように活用するかが問題である。計算機の場合について考えれば、学習ということは記憶素子自体の問題ではなく、記憶素子を使って環境に適応するような制御を行なうプログラムの問題だと考えられる。生物の場合は、下等動物の単純な条件反射から人間の高級な学習までいろいろな段階が考えられるが、それを計算機を使った計算の場合と比較すると、記憶素子の性能の違いよりもむしろ記憶素子の使い方、すなわち回路の組み方、あるいはプログラムの作り方に相違があるように考えられている。したがって、現在の機械の性能が人間の脳におよばないのは、ただ脳細胞の数が計算機の記憶素子の数に比べて圧倒的に多いということだけでなく、記憶素子の使い方に相違があるのではないだろうか。

## 2.2 増殖および自己組織の機能

生物の持つ重要な機能として、増殖および自己組織の機能をあげることができる。細胞分裂のように自分自身と同じものを作り出す能力を増殖と呼び、神経系において神経細胞が伸びていって新しい回路が形成されるような場合は、これを自己組織化と呼ぶのが適当であろう。

自己増殖の機能はもしも人工的な機械で実現できるとすれば非常に興味あることに違いないが、現在の技術の段階では、それに夢のようなことである。けれども成長に類するような機能は、自分自身で新しい回路を形成していく機構として、ある程度具体的なものが作られている。しかし生物の機能に比べるとまったく幼稚なものであって、今後も当分の間は自己組織に関する研究は、生物から学ぶことを怠ることはできないだろう。

## 2.3 感覚機能

生物が外界から情報を得るための感覚器、外界に働きかけるための効果器について調べてみると、やはり生物特有の多くのすぐれた機能を見いだすことができる。生物の感覚器は扱う信号の種類が多いことにおいても、感度や信頼度の高いことにおいても人工の検出器よりもはるかに優秀なものが多い。目や耳の感覚のすぐれていることはいまでもないが、味覚や嗅覚については、化学分析ではとうてい検出できないような微量な物質でも容易に検出できるほどの高い感度を持っていて、現在の技術のレベルでは人工的に実現することはできない。

感覚の鋭さの点では、人間よりも下等動物の方がすぐれている傾向がある。たとえば、鱈やある種のくらげが振動に対して非常に敏感であることとか、はえの嗅覚の鋭いことなどが注目されている。人間でも特別に感覚の鋭い人が問題になる場合がある。手の感覚で色の違いを識別できる人がかなりいるという話があるし、通常では超自然現象と呼ばれてあいまいにかたづけられているよ

うな異常能力者の行ないも、もしそれが特殊な感覚によるものだとすると、それは将来の課題になるであろうと思われる。

## 2.4 判断機能

判断の機能もやはり生物に特有な性質として注目されるものである。人間の作り出した技術は将来ますます強力になり、人間のやってきた仕事の代りをつとめる機械がいついつに作られることは明らかである。そうした場合に機械がほんとうに人間にとって好ましいように働いてくれるという保証がなければ、仕事を機械にまかせることはできない。それでは、人間にとって好ましいというのはどういうことだろうか？それは容易に答えることのできないことである。けれども人間を含めた多くの生物は、たいていの場合はほとんど迷いもせずに自分にとって好ましいものをかなり適確に選択しているようにみえる。もちろん、生物の行なう判断が最適のものであるとはかぎらないが、それでは別の方法でもっとよい判断ができるだろうか。

いずれにしても、生物自身の判断の機能の研究が必要なことは明らかであり、生物の判断機能と等価なものを機械系に持ちこまなければならない公算はかなり大きいと考えられる。

## 2.5 認識機能

ふたたび計算機に話をもどすが、現在の電子計算機は情報処理の速度と精度において脳をはるかにしのいでいる。しかし計算機にも、得意な仕事と不得意な仕事がある。たとえば、計算機は決まった形式に従って準備したものが入力として与えられないかぎり、動作することはできない。また大変な速度で行なった計算結果は、特定のディスプレイ装置を使用しなければ表示することができない。現在の計算機を人間にたとえると、盲でつばでおしであるということになる。これに比して人間は、環境から与えられる種々雑多な情報（ノイズ）から、必要な情報（信号）だけを取り出すことができ、また環境に適した方法で外界に働きかけることができる。たとえば騒音の中から話者の声だけを聞きとることができ、汚れた紙面の文字を読み取ることもできる。また大きい文字も小さい文字も、楷書もくずした文字でも読み取ることができる。現在デジタル技術を応用して、これらのパタンをその大きさ、向き、位置、濃さ、形の歪みなどに関係なく認識できるパタン認識装置を開発しようと努力されているが、まだ満足できるものができていない。そこで人間がどのようにしてパタンを認識しているのか、その機構を明らかにすれば、これが認識の問題を解決するひとつの糸口になるように思われる。

以上生物の持つ機能の一端について述べたが、詳細に

観察するとまだまだ数えきれない程、われわれの興味をひくものがあることに気がつく。人間だけでなく、下等動物も含めた動物の世界に目を展ずると、いよいよ天然の技術の巧妙さに驚嘆させられることが多い。

以下、生体の機能について行なわれた研究の二、三の例について述べることにする。

### 3. 骨格筋の運動制御機構

生物のすぐれた機構の一例として、手足の運動機能があげられる。筋肉は材料的にみると粘弾性があり、しかも機能的には化学的エネルギーを効率よく機械的エネルギーに変換して、張力を発生する能動素子である。現在このような性質を持った人工の材料は開発されていない。筋は機能によって、骨格筋、心筋、内臓筋に大別することができるが、ここでは骨と骨との間に張られていて、四肢などの運動を行なう骨格筋に着目し、その機構の数字モデルを構成し、モデルの動作からその機能を解析した例について述べる。

#### 3.1 筋肉の収縮機構<sup>1)</sup>

まず筋肉自体の収縮機構について考察してみることにする。骨格筋（横紋筋ともいう）は長さ数 cm から数十 cm、直径 $50\mu\sim 100\mu$  程度の筋線維が束になってできており、筋線維の末端は腱を介して骨に付着している。1本の筋線維は図2に示すように、細胞の形質膜にあたる筋線維鞘と呼ばれる膜で包まれ、中にゾル状の筋形質とゲル状の筋原線維とが詰まっている。さらに筋原線維は、多数の細いフィラメントから成り立っている。フィラメントは多数の小ブロックがつながってできたもので、その1ブロックはアクチン (actin) と呼ばれる太さ  $40\mu$  程度の蛋白質と、ミオシン (myosin) と呼ばれる  $110\mu$  程度

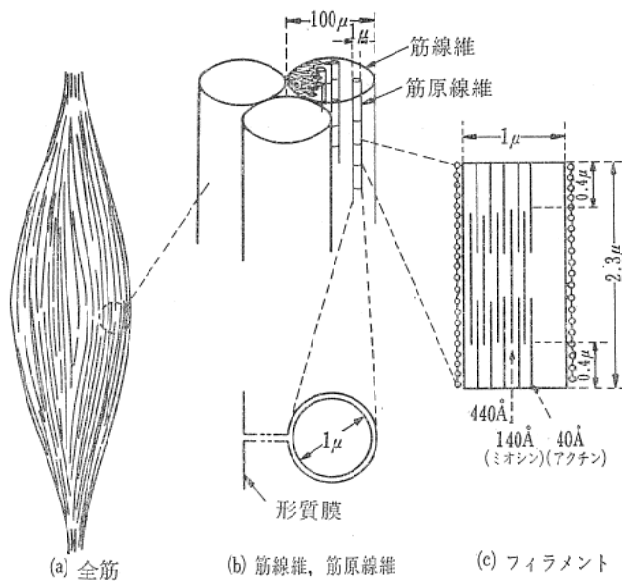


図2 骨格筋の微細構造

の蛋白質とが互い違いに配列してでき上がっている。

中枢からの遠心性神経は、神経終板と呼ばれる特殊構造を介して筋線維に接続していて、中枢からの命令は筋線維の中心部まで伝搬していくと考えられている。この活動電位によって  $Ca^{++}$  が放出され、これがトリガとなってつぎのようなプロセスで筋の収縮が起こる。すなわち筋原線維内には、筋収縮のエネルギー源となる物質 ATP (アデノシン三リン酸) が蓄積されているが、放出された  $Ca^{++}$  がミオシン中に含まれている ATP 分解酵素を活性化して ATP を分解する。このとき発生するエネルギーにより、アクチンがミオシン中に引き込まれて収縮すると考えられている。

この収縮機能を巨視的立場でモデル化すると、図3に示すように収縮力を発生する部分  $F_{iso}$  と、粘弾性によるダンピング力を発生する部分  $B(V)$  との並列な結合モデルで表現することができる<sup>2)</sup> 図4の破線は、1回の電気刺激による筋の収縮曲線 (単収縮曲線) を示す生理学実験<sup>3)</sup> である。この現象によく一致するように筋の伝達関数を決定すると

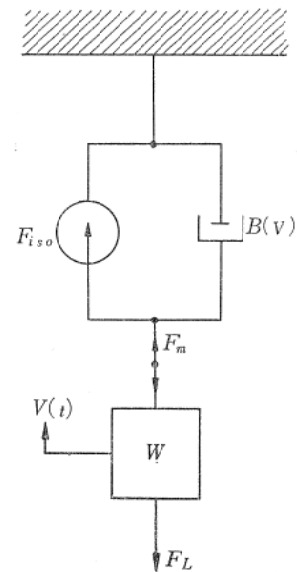


図3 筋収縮のモデル

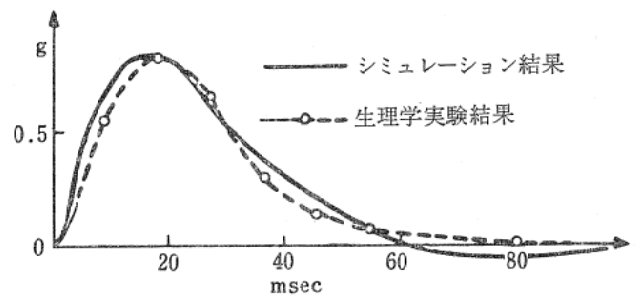


図4 筋の単収縮曲線

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

$$\omega_n = 70 \text{ rad/sec}, \zeta = 0.7$$

となる。図の実線はそのインパルス応答<sup>4)</sup>である。

また図5(a)は、 $\alpha$ 線維を7, 28, 100c/sでそれぞれ刺激したときの筋収縮曲線(強縮曲線)を示す。この現象を単収縮が刺激数だけ重なり合っただけと考え、重ね合わせて計算すると図5(b)のようになる。

### 3.2 骨格筋の制御機構

図6は骨格筋の神経支配を模式的に示したものである<sup>5)</sup>。上位中枢からの命令(神経パルス)が脊髄中の $\alpha$ 細胞から $\alpha$ 線維と呼ばれる遠心性神経線維を介して伝達され、筋を収縮させる。筋に発生した張力は、筋紡錘と腱紡錘と呼ばれる張力検出器で検出され、その張力に見合った電気的インパルス(紡錘発射)を求心性神経線維( $G I_a, G I I$  および  $G I_b$  線維)を介して $\alpha$ 細胞にフィードバックする。すなわち骨格筋は、 $\alpha$ 細胞— $\alpha$ 線維—筋—筋紡錘、腱紡錘—求心性神経— $\alpha$ 細胞からなる閉ループにより制御されている。さらに $\gamma$ 線維と呼ばれる細い遠心性神経が、骨格筋の制御機能に重要な働きをしている。筋紡錘は筋と並列にならんでいるため、筋が外部から引張られたときは筋紡錘にも張力がかかり、張力変化を検出しようが、筋が収縮したときは緊張性が失われ、張力の検出が不可能になる。このとき $\gamma$ 線維の活動により、筋紡錘自身を収縮させて、つねに緊張状態を保たせ、筋の張力変化の検出を可能にしている。

上に述べた生理学事実に基づいて作成した数学モデルを図7に示す。上位中枢からの命令は、 $\alpha$ 細胞で筋紡錘からフィードバックされる求心性インパルスと加え合わせられ、 $\alpha$ 線維を介して筋の収縮力となる。 $G_1(s)$ は $\alpha$ 線維の電気的活動を発生収縮力に変換する機構である。その収縮力と外力たとえば拮抗筋からの引張り力との差が、 $G_x(s)$ により筋の変位に変換される。また $f_0$ は筋の伸張および $\gamma$ 線維の活動のないときの紡錘発射を示す。

以下に生理学で測定された結果と、数学モデルの示す特性とを比較した結果を示す。図8の破線は、ネコのヒラメ筋の $\gamma$ 線維を刺激しながらヒラメ筋を4sec間等速度で引伸ばし、その後一定長に保持したときの紡錘発射の生理学実験の結果<sup>6)</sup>である。同図の実線は、アナログ計算機によるシミュレーション結果<sup>7)</sup>である。また図

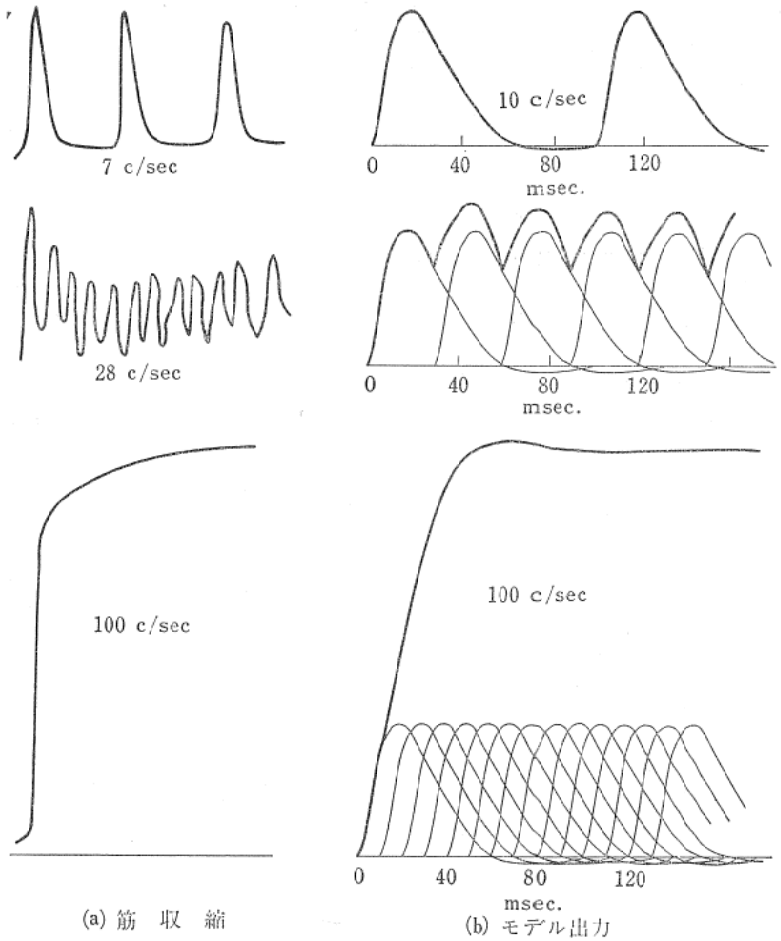


図5 筋の強縮曲線とシミュレーション結果

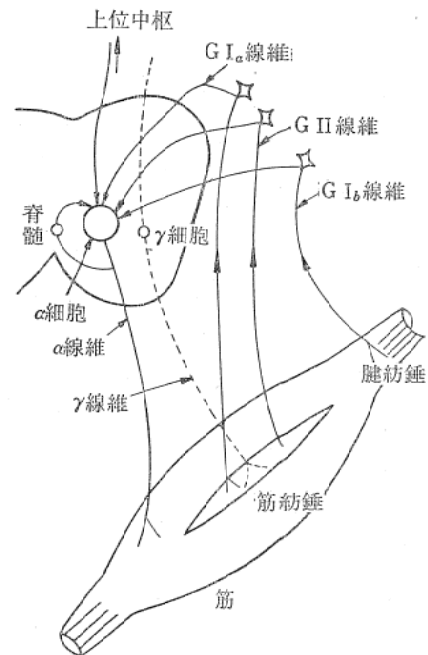


図6 骨格筋の神経支配

9は、筋にかかる張力を一定に保ち、 $\gamma$ 線維をステップ状に100c/sの割合で刺激したときの紡錘発射の生理学実験(破線)<sup>6)</sup> シミュレーション結果(実線)<sup>7)</sup>である。

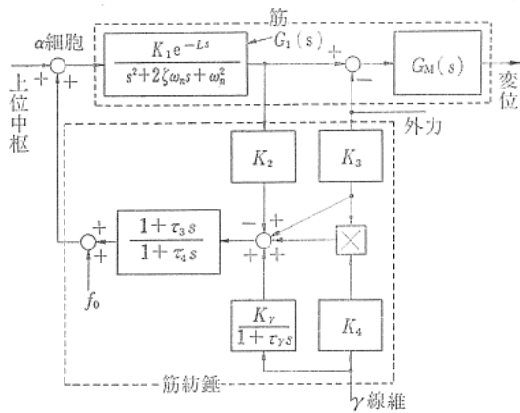


図7 骨格筋の制御機構のブロック線図

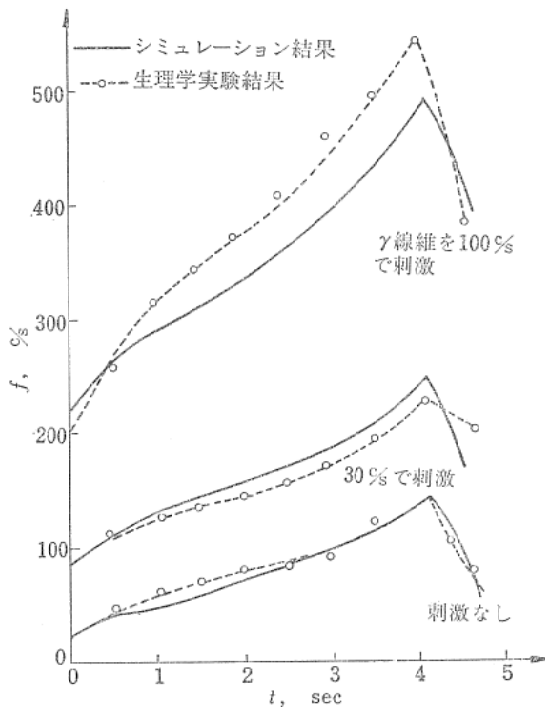


図8 ネコのヒラメ筋の等速伸張における紡錘発射におよぼす $\gamma$ 線維の働き

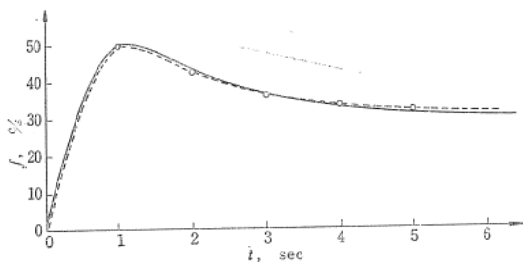


図9  $\gamma$ 線維をステップ状に刺激(100パルス/S)したときの紡錘発射

#### 4. 視覚系の機能

視覚は感覚器官のうちでもっとも重要で、かつもっともよく発達したものである。その目的はいうまでもなく物を見ることにあり、そのために

- (1) 対象の像を網膜の一番感度の良い中心窩に結ばせるための眼球運動機構
- (2) 感光膜である網膜に当たる光の量を調節する装置
- (3) 光のエネルギーを神経パルスに変換する装置
- (4) 自動焦点調節機能を持ったレンズ
- (5) 図形認識や色認識のためのある種の情報処理装置などを備えている。

##### 4.1 眼球運動制御機構<sup>9)~11)</sup>

眼球には6個の動眼筋があって、これにより眼球は3次元の運動をする。像(目標)が運動する場合、その像を認知するために、眼球と頭部が像の運動に追従する。この目標追従機構は生理学的に見ると図10のようになる。すなわち光刺激は網膜より視神経を通り、視覚領に入る。そこから動眼核、滑車核、外転核を経て眼筋に達し、眼球は水平、垂直、回転運動を独立して行なう。このほか視覚連合領などから運動神経を通り、頭部の回転運動が起こる。これを三半規管が検出して、内耳神経を通り、前庭核から動眼神経核に刺激を送り、そのためにも眼球運動が起こる。

これらの数学モデルはかなりよく調べられていて、図11のようなサンプル値制御系のモデルが提案されている。ここでおもしろいのは、目を動かす信号には2つの成分があり、

- (1) サンプル周期が200msのサンプル値制御系で、スムーズな運動を行ない $30^\circ/\text{sec}$ の速度まで追従するが、それ以上は切り離される機構( $G_1$ )
- (2) 急速に階段状の変化をして追従する saccadic

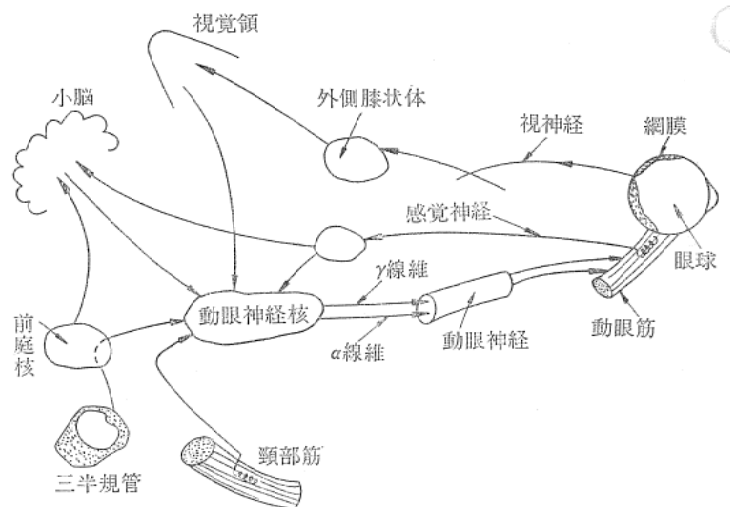


図10 視覚系の目標追従機構

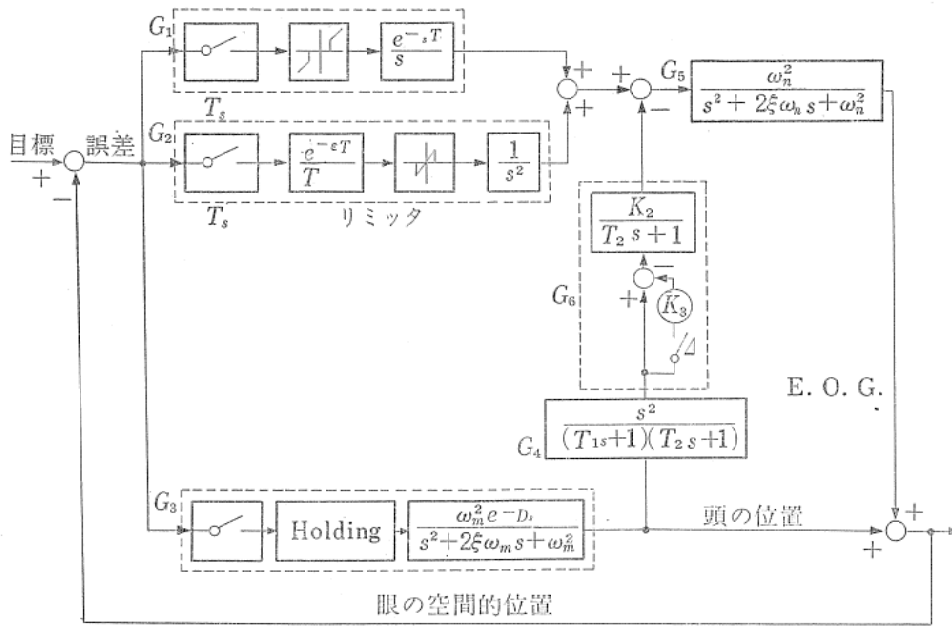


図11 視覚目標追従機構のモデル

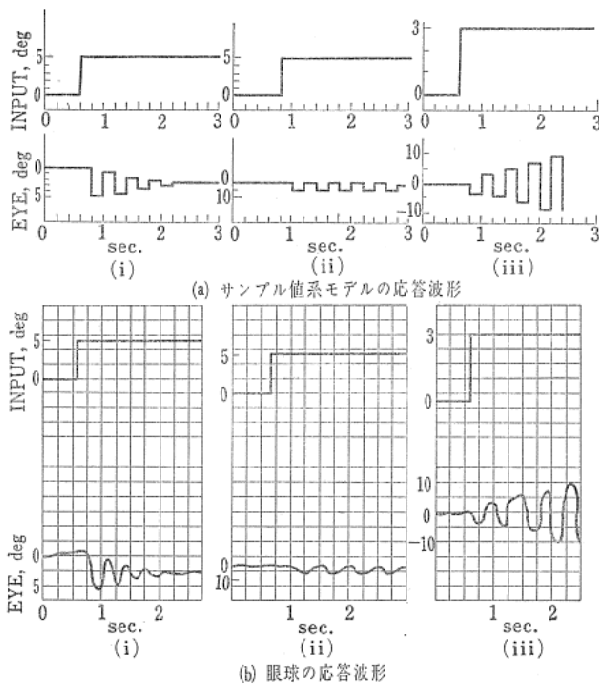


図12 視覚の目標追従特性とシミュレーション結果

な運動を行なう機構( $G_2$ )とが並列に結合されていることである。さらに  $G_3$  は頭部の回転運動に関するもの、 $G_4$  は三半規管、 $G_5$  は眼球筋、 $G_6$  は三半規管出力の位置補償に関するものである。図12は、眼球運動を特殊な検出装置を用いて測定した結果と、同様の入力に対するシミュレーションの結果を示したもので、非常に良く似た動作を工学モデルで実

現した例として有名である。

#### 4.2 光量の自動調整<sup>12,13)</sup>

瞳孔の面積を変化させて、入射光量を調節する機構が眼には備わっているが、図13は網膜に当たる光の量が瞳孔面積の制御に用いられる経路を示す。瞳孔面積は、相反する作用を1対の筋肉、瞳孔散大筋と瞳孔括約筋とにより、拡大あるいは縮小する。図14(a)は、定常状態での瞳孔の直径と光の強さとの関係を示す。また過渡特性を同図(b)に示す。

これを数学モデルによって解析すると、過渡応答は2つの成分を持っていることがわかる。光の強さを  $L(s)$ 、瞳孔の直径を  $D(s)$  とすると、第1成分は

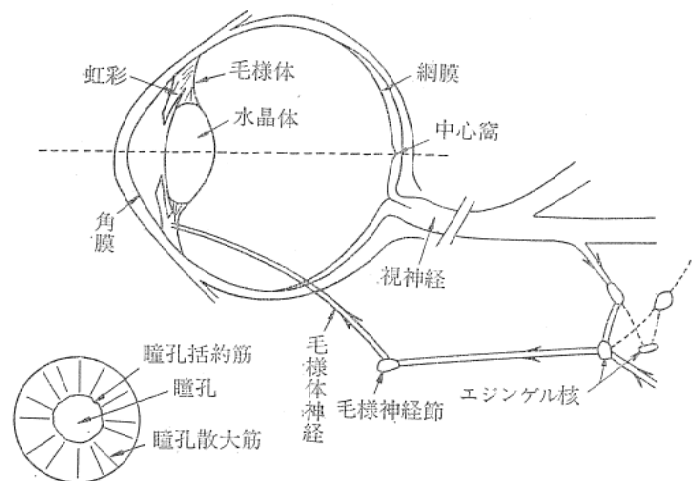


図13 瞳孔面積の制御機構

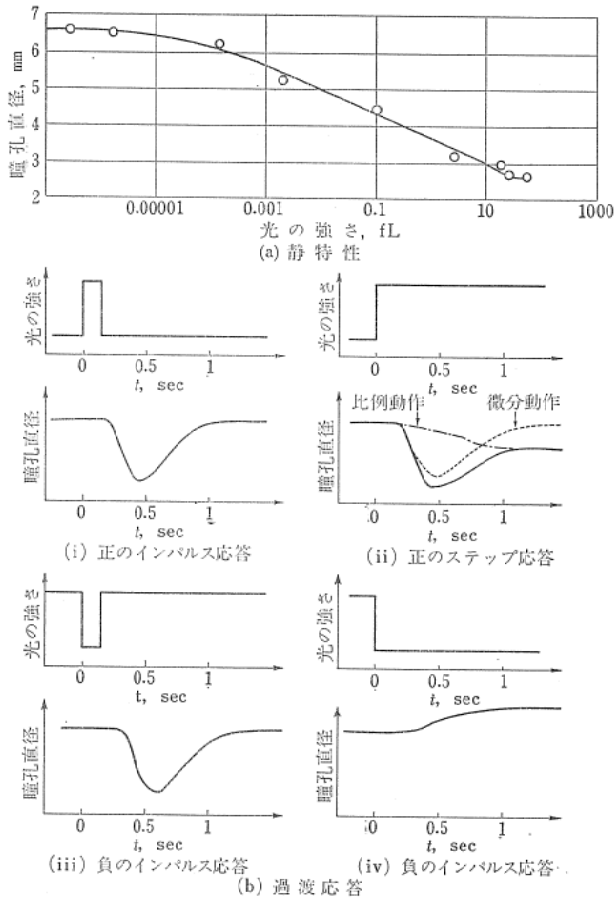


図14 瞳孔直径調節機構の特性

$$\left. \begin{aligned} \frac{D(s)}{L(s)} &= \frac{ase^{-T_3s}}{(1+T_1s)(1+T_2s)}, & \frac{dL}{dt} > 0 \\ &= 0, & \frac{dL}{dt} \leq 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

ただし、 $T_1 = T_2 = 0.25\text{sec}$ ,  $T_3 = 0.28\text{sec}$  となり、光の強さの変化の符号によって異なる。一方、第2成分は

$$\frac{D(s)}{L(s)} = \frac{-be^{-T_5s}}{1+T_4s} \quad (3)$$

ただし、 $T_4 = 0.4\text{sec}$ ,  $T_5 = 0.35\text{sec}$  となり、定常応答はこの成分だけで決まる。ここでおもしろいことは、第1成分が光の量が増加するときだけ働いて、瞳孔の面積を減らして網膜が露出過度になるのを防いでいることである。光の量の減るときには、このような安全装置は必要がないであろう。

### 4.3 視覚系のパタン認識機能の解析<sup>14)</sup>

感覚器官に与えられた情報は、大脳にある認識機構に伝わる間に、何か特殊な神経構造によってフィルタされていると考えられる。またこの神経構造では、パタン(信号)の特徴を抽出して認識過程を容易にしているように思われる。そこでパタン認識過程を解明する第1歩として、まずこの特徴抽出機構を明らかにしなければな

らない。

最近 Lateral inhibition と呼ばれる神経構造が、ネコの聴覚<sup>15)</sup>やカブトガニの側眼で発見され、上記のフィルタに相当することがわかってきた。カブトガニの側眼(複眼)<sup>16)</sup>では図15に示すように、視神経が側枝をからませて互いに活動を抑制し合っている。したがって、1つの個眼Aを刺激して発生する求心性インパルスの頻度は、他の個眼Bを刺激することによって減少する。すなわち、ある1つの個眼の刺激効果が、その個眼の視神経には促進的に、その周囲のある範囲の視神経には抑制的に働く。

視覚伝導経路では、網膜、外側膝状体、大脳視覚領において複雑な神経結合が行なわれているが、そのうち1種類の結合様式だけに注目すれば、本質的にカブトガニの側眼で見られた Lateral inhibition と類似の構造をしており、このような構造が積み重なって視覚伝導経路を構成していると考えられることができる。

網膜のように空間的に広がった神経構造を単純化すると図16のようになる。線分は神経線維、丸印は細胞体を表わし、促進入力は正、抑制的の入力は負として代数的に加え合わせる。図16(a)を Forward Inhibition 構造(F.I.)、

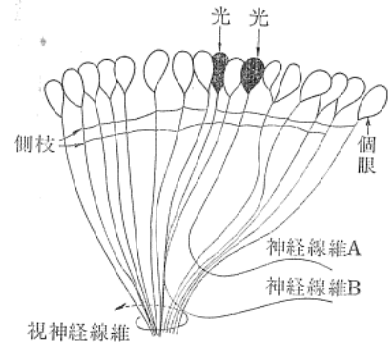


図15 カブトガニ側眼の神経構造

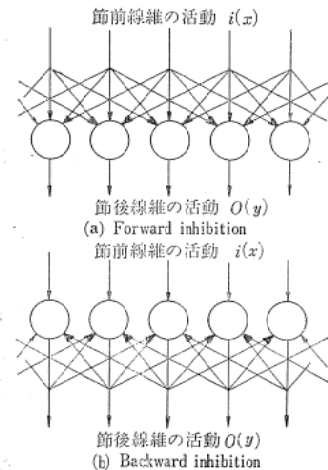


図16 Lateral inhibition の基本構造

(b)を Backward Inhibition 構造 (B.I.) と呼ぶ。神経細胞が十分に密に配列している場合についてこのモデルを数式化すると、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega(y-x) i(x) dx = O(y) \quad (4)$$

$$i(y) - \int_{-\infty}^{\infty} \omega(y-x) O(x) dx = O(y) \quad (5)$$

となる。ここで、 $i(x)$ ,  $O(x)$  は入力パターンと出力パターンを表わし、 $\omega(y-x)$  は節前線維と節後線維との相対位置  $(y-x)$  で決まる結合関数で、受容域の特性を決める。

(4), (5)式はさらにフーリエ変換によって(6), (7)式となる。

$$O(\omega) = W(\omega) I(\omega) \quad (6)$$

$$O(\omega) = \frac{1}{1+W(\omega)} I(\omega) \quad (7)$$

ここで  $W(\omega)$  は  $\omega(x)$  のフーリエ変換で、神経の結合状態を表わし、制御系における伝達関数に対応する。

図17(a)に示すように、受容域全体が促進性である場合に、 $\omega(x)$  を

$$\omega(x) = \frac{1}{2X} e^{-\frac{|x|}{X}} \quad (8)$$

$X$ : 受容域の大きさを表わすパラメータと近似すると、そのフーリエ変換は

$$W(\omega) = \frac{1}{1+X^2\omega^2} \quad (9)$$

となる。いま入力パターンとして矩形刺激(網膜のある範囲だけが一定の強さで刺激されるようなパターン)を用いると、低域フィルタ特性の網膜を通過した出力パターンは図18(a)のようになる。したがって、パタンの輪郭がちょうどスリガラスを通して見るようににめいりようになる。

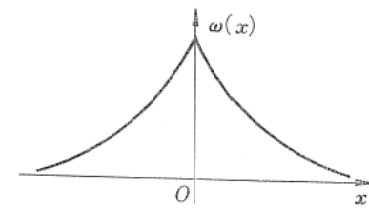
図17(a)のような結合様式が、抑制の強さ  $K$  で backward に接続している場合には、

$$\begin{aligned} W^*(\omega) &= \frac{1}{1+W(\omega)} \\ &= \frac{1+X^2\omega^2}{1+K+X^2\omega^2} \end{aligned} \quad (10)$$

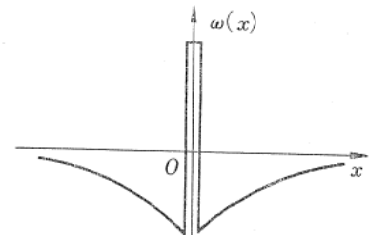
となる。図18(a)と同様に矩形パターンを与えたと仮定すると、出力パターンは同図(b)に示すように、輪郭部分がきわだつてめいりように見えることになり、心理学で知られている Mach 現象が説明できる。

つぎに、われわれが文字や図形を認識する過程を、Lateral inhibition が示す機能から類推するためには、網膜のように神経が2次元に配列しているモデルについて考えなければならない。しかし2次元モデルは、先の

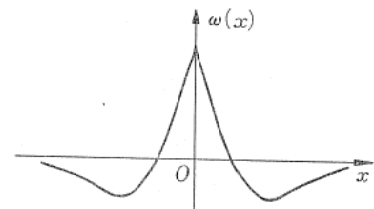
1次元モデルを拡張しただけであるから、これまでの考え方がそのまま使える。この解析結果から、心理学で認められている錯視現象の説明ができる<sup>17)</sup>。



(a) 低域フィルタ特性の受容域

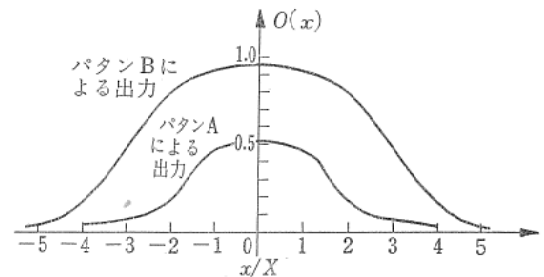
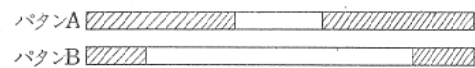


(a') 高域フィルタ特性の受容域

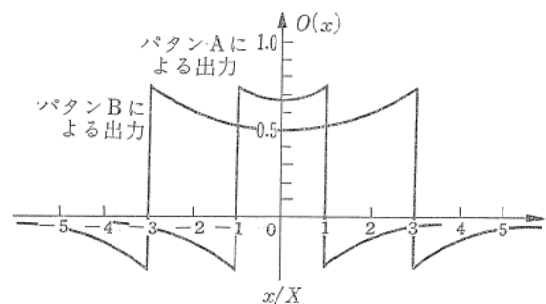


(b) 帯域フィルタ特性の受容域

図17 受容域の特性



(a) 低域フィルタ特性によるパタンのぼけ



(b) 高域フィルタ特性によるMach現象

図18 Lateral inhibition 構造を通過したパターン



## 5. むすび

生物工学の概念をはあくしていただくために、その断面のいくつかを紹介した。特に生物のすぐれている面を拾いあげて、いかにわれわれ技術者の生物に学ばなければならぬ点が多いかを指摘したつもりである。また生物工学研究の方法論として、シミュレーション技術が重要であることを示した。紙面の都合上、2、3の問題について記述しただけであるが、これら以外にも幾多の実に興味ある問題が山積している。

生物工学とは、医学、生物、心理等の各学問と工学との境界領域に属する分野であるが、筆者は境界領域とはそれぞれの学問の共通集合領域であると考え。したがって、生物工学の研究は、上記学問分野の人々の緊密な関係によって、はじめて大きな成果が期待できるのではないかと考える。興味を持たれた方々が、さらに進んでこの新しい分野の開拓者となられんことを期待して筆を止める。

## 参 考 文 献

- 1) 真島英信：筋肉の構造と収縮機構，医用電子と生体工学，Vol. 4, No. 1, pp.2~11 (1966)
- 2) H.T. MILHORN：The Application of Control Theory to Physiological Systems, p.286 (1966)
- 3) G. STEG：Efferent Muscle Innervation and Rigidity, Acta. Physiol Scandinarica, Vol. 61, suppl. 225 (1961)
- 4) 藤井，三宅：筋制御機構のシミュレーション，アナログ技術研究会資料，Vol. 7, No. 2, pp.25~36 (1967)
- 5) R. GRANIT：Receptors and Sensory Perception, Yale Univ. Press, p.238 (1956)
- 6) R.J. HARVEY, P.B.C. MATTHEWS：The Response of Deafferented Muscle Spindle Endings in the Cat's Soleus to Slow Extension of the Muscle, J. Physiology, Vol. 157, pp.370~392 (1961)
- 7) 藤井，三宅：骨格筋制御機構の解析，制御工学，Vol. 11(1967)
- 8) P.BESSOU, Y. LAPORTA：Responses from Primary and Secondary Endings of the same Neuromuscular Spindle of the Tenuissimus Muscle of the Cat, Symposium on Muscle Receptors, pp.105~119(1962)
- 9) H. DAVSON：Physiology of the Eye, J. & A. Churchill (1963)
- 10) L.R. YOUNG：A Sampled-data Model for Eye Target Tracking Movements, Automatic and Remote Control (2nd I.F.A.C.), p.454 (1963)
- 11) 若桑，杉江：視覚目標追従機構，アナログ技術研究会資料，Vol. 6, No. 4 (1966)
- 12) L. STARK：Stability, Oscillations and Noise in the Human Pupil Servomechanism, Proc. IRE, Vol. 47, No. 11 (1959)
- 13) M. CLYNES：Computer Dynamic Analysis of the Pupil Light Reflex, Proc. 3rd International Conference of Medical Electronics, London, pp.356~358 (1960)
- 14) 藤井，森田：生体のパタン認識過程における Lateral Inhibition の機能，通信学会誌，Vol. 49, No. 10 (昭41)
- 15) 勝木：聴覚，生物物理，Vol. 4, No. 3 (昭39)
- 16) F. RATIFF：Inhibitory Interaction and the Detection, and Enhancement of Contours, Sensory Communication, J. Wiley, p.183 (1961)
- 17) 藤井，松岡，森田：Lateral Inhibition による錯視現象の解析，医用電子と生体工学，Vol. 5, No. 2 (1967)