

生物と機械

大阪大学基礎工学部 田村 博

生物は自然の生んだ最も高度の自動機械である。人はかつてしばしば生物を見ならって新しい機械や技術を開発した。人間の作り上げた機械が、生物と似ても似つかぬ機構を使っている場合でも、その機械を考えたきっかけは、生物から与えられたヒントによっている場合が多い。たとえば飛行機は、鳥や蝶とは、およそ似じかぬ原理によって作られているが、人間が空を飛ぶという着想も、その可能性についての確信は、明らかに空を飛ぶ生物から与えられたものである。

1 からくり人形からロボットへ

生物はその機能の複雑さと多様さのために、古代より神秘的なものに見なされて来た。今日でも生物ほど多くの謎を含んでいるものはない。しかし、近代技術の進歩の歴史は、人間あるいは生物だけにしか行えなかった機能を徐々に機械におき変える方向に進んでいる。そして新しい技術や工学の進歩は、絶えず新しい生命観、人間像の形成を供なうものであった。かつて、機械技術のれい明期において、時計時代と呼ばれる時代があった。その時代のシンボルが時計で、当時としてはなかなか精巧なからくりを持っていたというわけである。からくりとは、日本の江戸時代の言葉で、いわゆるメカニズムの意味なのであるが、このような観念が江戸時代にできあがり、そのメカニズムの一番象徴的なものが時計であった。日本でも和時計という時計がこしらえられる一方、そのからくりを作る職人は、時計ばかりでなく、仕掛け人形などを作っていたという。これは当時の機械論的な人間観を表わしたものに他ならない。機構というものが面白くなってくると、機構をひねって腕を動かす、腕が動けば次に指が動かせれば、というように空想して行くことになる。これに衣を着せ、色々の芸当をやらせれば自動人形ということになる。このような自動人形は外国においてもたくさん作られており、オートマトンと呼ばれていた。当時、オートマトンの考え方は、各方面でかなり用いられたようである。たとえば、生理学者シェリントンは、動物の反射のメカニズムを自動人形の考えで説明し、脳にはこれらの複雑な仕掛けがつめられていると考えたのである。

産業革命は、人力や畜力にたよっていた動力源を機械化するという形で始まり、動力技術の開花によって多様に動力化された機械が開発された。いわゆる機械化の時代は、人間労働を手作業で済ますことに目標がおかれた。手作業化された工場では、水や燃料の補給、燃焼状態の監視、粗材の位置決め、部品の取付け、などのように何らかの形で人間の識別力や調節機能が利用されることとなった。この変化はドレイ船の漕ぎ手であったドレイが、少なくとも舵取り程度には昇格したことはなるが、動力機械に従属した形で行われる単純作業は、必ずしも人間の特性を十分に生かした作業形態ではなかった。この時代に登場する概念がロボットである。ロボットは人間の指令に従ってほとんどあらゆる作業ができるのであるが、人間並の高度な機能はなく、いわゆる馬鹿力を発揮するというのが特徴で、場合によっては馬鹿力を持った非情な機械という側面をもっていた。

動力技術の進歩は、エネルギー学の進歩をうながした。エネルギーの考えは、あらゆる分野に広がり、カロリー栄養学に見られるように、生命現象がエネルギー代謝を中心に論議されるような側面を持っていた。

2 サイバネテックスと生物工学

その後における制御技術の発展は、人間の直接的参加なしに目的を達成する機械を作り出し、人間と機械の関係に望ましい調和を見出す可能性を広げ、さらに、遠隔操作によって遠くはなれた場所から機械を操作することが可能となった。

また、電子計算機に見られるような情報処理機械の登場は、人間にしかできないと考えられていた論理的思考や、科学計算さらにはある種の判断機能までが機械系で行ないうることを示した。

今日では個々な能力についていえば、制御技術にせよ、情報処理の技術にせよ、機械の方が人よりもすぐれている場合も決して少なくない。制御技術と情報処理技術が全面的に採用された完全自動オートメ工場を実現することは決して夢ではなくなった。このような技術的背景のもとに登場したのがサイバネテックスと呼ばれる学問であった。ウィーナはこれを生体と機械系における情報と

制御の学問であると定義したのであるが、これには20世紀に入って発達した情報と制御の考え方でもって生体の構造や機能を理解しようという機械論的な生物観と同時に、生体の機能を取り入れた新しい技術を開発するという面を含んでいた。前者の機械論的な生命観は時代的な限界にもかかわらず、生物科学の分野の研究に新しい視点を提供すると同時に工学においては、人間を一個の制御系の要素と考えると、その応答特性を求めたりする人間工学の登場をうながした。

一方サイバネティクスによって高まった生体の情報処理機や制御機構に関する研究は工学に新しい多くの知識を提供した。たとえば図形や文字を見分けたり、言葉を聞き分けたりするパターン認識は文字の自動読取り、敵のミサイルなどの発見装置、音声タイプライタなどの必要性のためにかなり以前から研究されて来たが、それにもかかわらず現在でもあまり性能のよいものは作られていない。それに比べると人間にかぎらずかなり下等な動物でも優秀なパターン認識の能力をもっているものが少なくない。たとえば蛙の目は図形を識別するための性質を立派にもっていることが証明されている。そこで性能の良いパターン認識装置を作るために、生物のパターン認識機能を調べ、そのすぐれた点を技術に取り入れようとする考え方が進められるようになって来た。このような立場の学問が生物工学とかバイオニクスと呼ばれている。バイオニクスは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出した技術から学んでいこうとはするが、工学的な必要性とそれに対応した生物の機能との統一があって始めて芽が出るものであって、ただ生物の機能をまねた機械を作るという模倣主義ではない。

工学的に興味ある生物の機能はパターン認識だけではない。生物の学習機能も興味ある問題である。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事情が起ったときに過去の知識を活用することができるが、このような働きは高度の自動制御系などでも必要になってくるものである。その場合学習という機能は、体験したことをただ正確に記憶しておくだけでなく、環境に適応して行くために体験によってえた知識をどのように活用すかが問題である。生物の場合で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の段階があるが、それを計算機を使った学習と比較すると、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にいっそう大きな違いがあると考えられている。

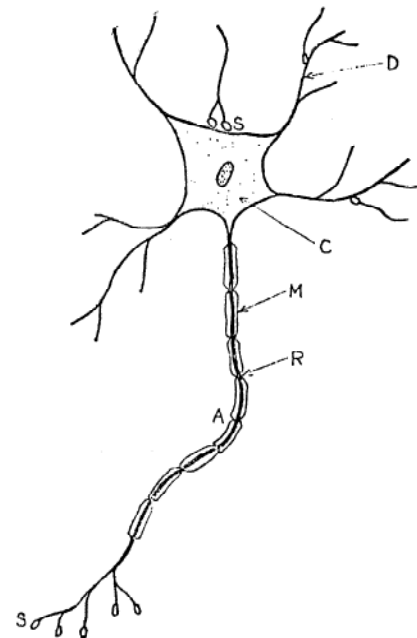
生物のもう一つの重要な機能として自己組織の機能をあげることができる。神経系において神経細胞が伸びて

いって新しい回路が形成されたりするような場合には、過飽和溶液から結晶が析出する場合とは異って、生体の環境への適応作用と関連した重要な謎がひそんでいると考えられている。また現在の技術の段階では夢のようなことであるが、素子を組み立てて自分と同じような機械を自動的に作るという自己増殖の機能も生物から学びたい知識の一つである。

さて、からくり人形とロボットの話が出たついでに、テレビでなじみあるアトムについてふれたい。アトムはかつてのロボットになかった人間的な判断力と人間との調和性をかねそなえた新しいロボットで、サイバネティクスあるいは生物工学の考えを取り入れた、まさに20世紀後半のロボットである。アトムでとり上げられている話題は単なる空想上の話というよりは、近い将来の自動機械のイメージを語り、そのような機械系と人間の関係についての問題を提起している点で興味深いものがある

3. 脳と神経細胞

さて、バイオニクスで、もっとも興味あるのは生体情報処理機構に関する問題である。生体の情報処理に直接あずかっているのは神経細胞（ニューロンとも呼ばれる）であると考えられている。人間の脳は 10^{10} 個程度の脳細胞で構成されており、そのうちの数%が神経細胞で



C: 細胞体	M: 髄鞘体
A: 軸索	R: ランビエ紋輪
D: 樹状突起	S: シナプス

図1 神経細胞の模式図

ある。神経細胞は活発に電気的なパルスを発生し相互に情報の交換を行っている。脳細胞の残りの大部分はグリア細胞と呼ばれるもので、神経構築の支持組織であるとともに、神経細胞の栄養を司る細胞とされており、神経細胞に対するエネルギー的な支配を通じて間接的に情報処理に関与しており、適応作用や記憶の形成といった高度な情報処理機能に関連しているもと考えられている。

神経細胞にはアクソンと呼ばれる一本の出力線維があり、神経系の通信はアクソンを通して電気的なパルスによって行なわれている。普通の通信線路は信号のエネルギーをもらって消費する、いわゆる受動線路であるのに対して、アクソンは線路にそって蓄積された静的なエネルギーを、動的な信号のエネルギーに変換する能動的な性質をもった線路である。この線路には閾値があり閾値以下の信号は全て減衰させてしまう。この性質はアクソン間の混信や雑音による信号の歪みを防ぐ上で重要な性質である。もう一つの特徴は信号パルスの波形成形作用で、信号波形が多少歪んだとしても、出力端子では完全なパルス波形に成形することができる。

パルスの信号が神経細胞の入力端子であるシナプスに伝えられると、そこにシナプス電位と呼ばれるアナログ的な電位を発生する。シナプスには興奮性と抑制性の2種類があり、興奮性および抑制性の数多くのシナプスで発生したシナプス電位を総合して、神経細胞は出力パルスを発生する。この際のアナログ的なシナプス電位からデジタル的なパルスに符号化する規約は必ずしも明らかでないが、いくつかの生理学的なデータは、神経細胞がパルス周波数変調を用いたアナログな要素としての機能を持っていることを示している。それによると、任意の神経細胞の出力パルス密度 v_i は

$$v_i = \sum_j A_j u_j - \theta$$

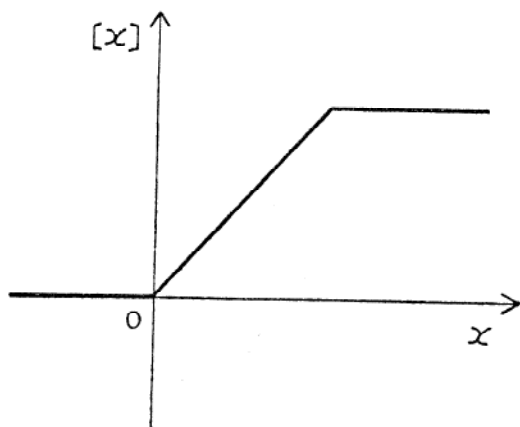


図2 神経細胞のアナログ的な入出力特性

の形で表わされる。ここに u_j は j 番目のシナプスに伝えられた信号のパルス周波数、 a_j は結合の強さを表わす荷重で、 $a_j > 0$ ならば興奮性、 $a_j < 0$ ならば抑制性のシナプスである。 θ は神経細胞の閾値である。また $[x]$ は図2のようなリミッタ特性の関数を表わすものとする。

さて生体の感覚器に与えられる信号は空間的な広がりを持っているのが常である。視覚に対する図形、聴覚における周波数の分布や皮膚における触覚などは信号の空間的な広がりをぬきにしては考えられない。したがって生体の情報処理系では刺激の空間的なパターンを検出することが重要であって、入力刺激の中から生体の情報処理に必要と思われる特徴を抽出するための神経回路網が広く存在している。その一つとして最もよく知られているラテラル抑制回路は工学的にも興味ある性質をもっている。

4. 神経系における特徴抽出

図3はラテラル抑制回路の模式図で、同図 a は forward, b は backward の抑制回路と呼ばれている。図

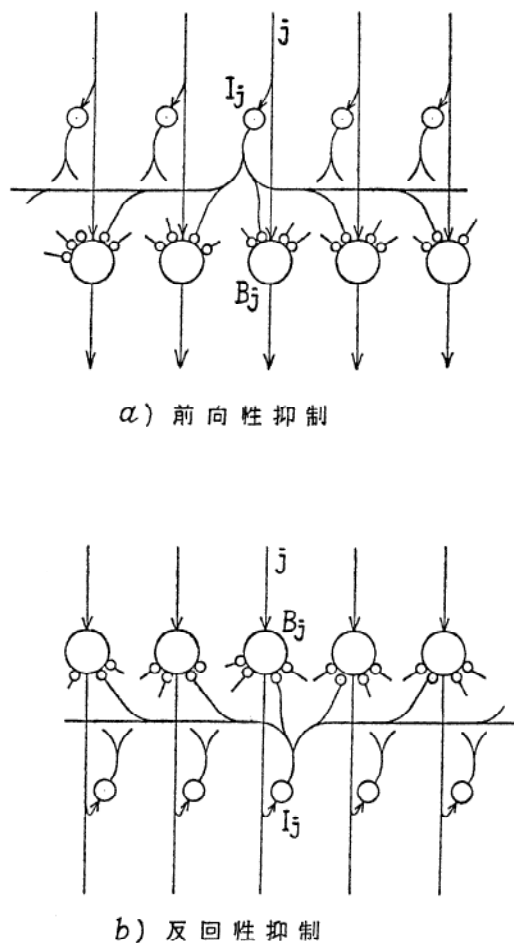


図3 ラテラル抑制回路

3 a の j 番目の線維の入力信号は j 番目の B_j と I_j を興奮させる。 B_j は双極細胞、 I_j は介在ニューロンと呼ばれる神経細胞である。 介在ニューロンは双極細胞に抑制的なシナプスを形成している。 図 3 b では双極細胞の出力 v_j が介在ニューロンを興奮させるようになっている。 この図で示すように一つの刺激入力、一方で興奮を引き起こすと同時に他方で抑制を引き起こす現象は、感覚器では広くみとめられ、そのような現象の説明にラテラル抑制回路がしばしば用いられている。

網膜などでは、このようなラテラル抑制回路が平面的に一様に分布していると考えられることができる。 この場合の入力信号の空間的な分布のパターンを $u(x, y)$ 、出力信号のパターン $v(x, y)$ 、双極細胞の閾値分布のパターンを $\theta_B(x, y)$ 、介在ニューロンの閾値分布のパターンを $\theta_I(x, y)$ とすれば、前向き抑制回路では、

$$v(x, y) = [u(x, y) - \theta_B(x, y) - \iint [u(\xi, \eta) - \theta_I(\xi, \eta)] \times g(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta]$$

反向き抑制回路では

$$v(x, y) = [u(x, y) - \theta_B(x, y) - \iint [v(\xi, \eta) - \theta_I(\xi, \eta)] \times g(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta]$$

のような平面的な連続方程式が近似的に成立する。 ただし $g(\xi, \eta)$ は抑制性シナプスの結合の強さを表わすもので一般に 2 点間の距離が大きくなるにしたがって結合は弱くなるものとされている。 平面の問題を簡単のために一次元的になおして考えることにすると、それぞれ

$$v(x) = [u(x) - \theta_B(x) - \int [U(\xi) - \theta_I(\xi)] g(x - \xi) d\xi]$$

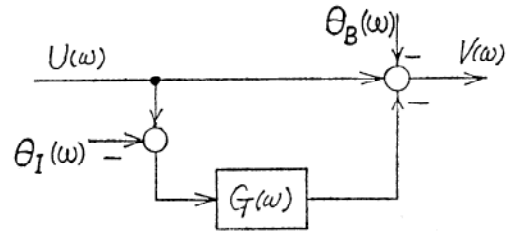
および

$$v(x) = U(x) + \theta_B(x) - \int [v(\xi) - \theta_I(\xi)] g(x - \xi) d\xi]$$

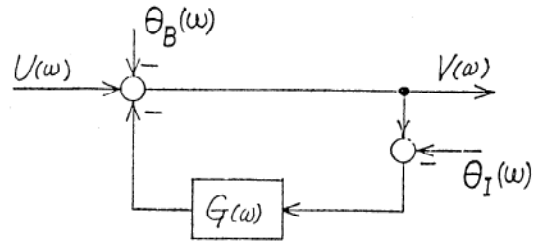
となる、上の積分方程式の簡単な解からラテラル抑制回路の空間フィルタのいくつかの性質を知ることができる。

5. 空間周波数伝達関数

まず、すべてのニューロンの動作が図 2 の関数の線形範囲におる場合には、フーリエ積分を用いた線形変換が適用され、工学系で親しく用いられている周波数解折法が用いられると同時にその特性をブロック線図で表わすことができる。 図 4 a, b はラテラル抑制回路の特性のブロック線図による表示を示している。 図 4 a は自動制御系における forward 補償回路、また図 4 b は feed-back 補償回路に類似している。 抑制性結合の強さの空間的分布は $g(\xi) = \text{evp}|- \xi|$ あるいは $g(\xi) = \exp(-\xi^2)$ のような形で近似されるので、図 3 に示すラテラル抑制回路の空間周波数特性は図 5 の曲線 a, b に示すような高域濾波特性を示す。 また図 3 の興奮性の結合にも若干の空間



a) 前向き抑制



b) 反向き抑制

図 4 連続的モデルによるラテラル抑制回路のブロック線図

的な広がりがあると、周波数伝達関数は図 5 の曲線 C のような帯域濾波特性を示すことになる。 工学的に用いられている線形回路は種々の時間周波数特性をもつ回路を組合せて構成されているのであるが、同じように種々の空間周波数特性をもつ回路を組合せて、いわば空間回路というものが考えられる。 生体において空間パターンの特徴抽出に用いられている神経回路網は、このような空間回路のきわめて高度のものである。 図 6 はラテラル抑制回路の入力パターンと出力パターンを種々の場合について比較して示したもので、図 6 a は幅のせまい刺激によってその両側が抑制されることを示しており、図 6 b は刺激の幅が広がると、その刺激の両端の部分に著しい興奮と抑制のコントラストが表われることを示している。 このような現象は視覚、聴覚、皮膚感覚などで知られて

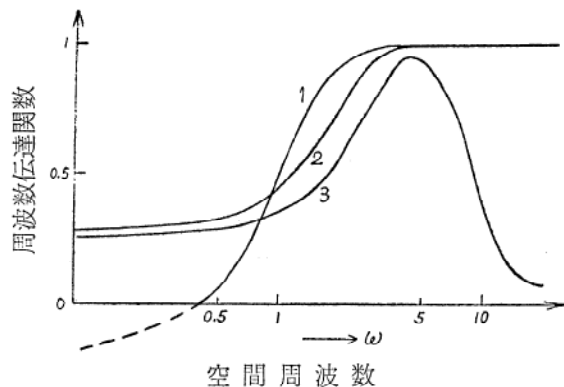


図 5 ラテラル抑制回路の空間周波数伝達関係

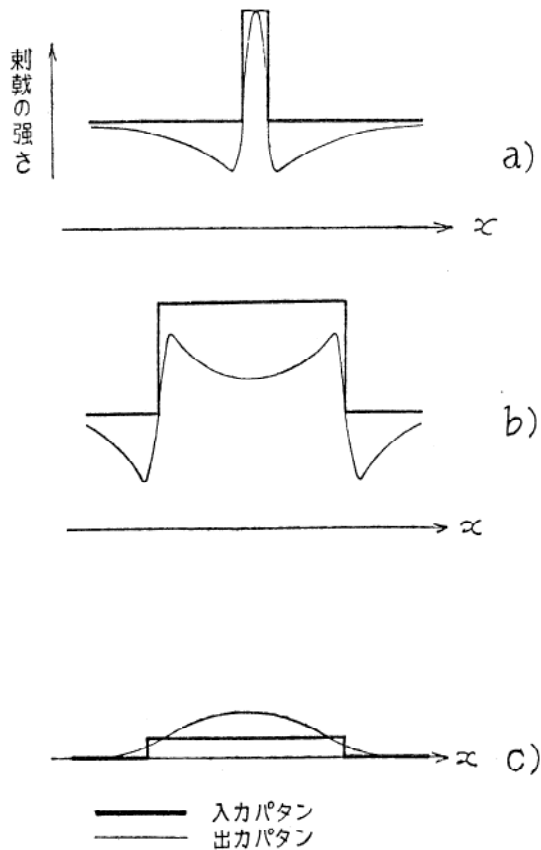


図6 ラテラル抑制回路による特徴抽出

おり、視覚の対比現象、聴覚の隠蔽効果などがそれである。

図6 a, b に示す性質はラテラル抑制回路の線形的な質によって説明されるものであるが、神経回路網の非線形的な特性の一つに図6 Cに示すような効果がある。これは図6 bのように強い刺激に対しては両端の部分が強調されるのに対して、弱い刺激では中心部分が強調されることを示している。

このようにラテラル抑制回路は刺激パターンの輪廓を明らかにし、ボケを修正する回路で、神経回路網の入口に最も近い部分に通常見られる回路である。そして感覚器から脳へいたる多くの段階ではさらに高度な特徴抽出が行なわれている。たとえば、蛙では眼から脳にいたる段階で、(1)端 (2)動く凸 (3)コントラストの変化(4)暗くなってくることの四つの信号を検出しており脳では、これをもとにしてパターンの判別を行なっている。そこで、これらの特徴を検出する回路を神経の特性をまねた工学的な回路で組み立てたという報告が寄せられている。