生 物 工 学

東京大学工学部
応用物理学教室

南 雲 仁 一※

1. 生物工学

——新しい工学——

生物物理学会もいよいよ発足のはこびとなり、生物に関心をもつ工学者の一人として同慶にたえないが、生物関係の学問と工学との境界にも、やはり何か新しい領域が形成されつつあるようである。

この、生物に関係する工学、あるいは生物を扱う工学——仮に生物工学 (Biological Engineering) と呼んでおくが——において、現在どのようなことが行われており、また、将来どのようなことが考えられるか、ということ展望するのがこの小文の目的である。

しかしながら、生物工学という領域はもちろん固まったものではないから、どの辺までを生物工学と呼ぶかは人によってまちまちである。たとえば食品工業とか製薬工業には、広い意味での生物工学の対象となる問題が多いことは当然であろうが、ここでいう生物工学とは、もっとはるかに狭い意味のものである。すなわち、生物とはいっても、実は、ヒト (人間) が中心で、また大部分である。人間に関心が集中することは工学というものの性格から考えても、ある程度当然のなりゆきであろう。

さて、このような生物工学には、四つのおもな分野が考えられる。以下順を追って述べてみよう。

2. 医用電子工学

——病気の診断・治療から制御へ——

第2次大戦以後のエレクトロニクスの進歩にはめざましいものがあるが、発展がある段階に達し多少余裕を生じたためであろう、この技術を生体に適用しようとする動きが近年急に盛んになってきた。この分野は医用電子工学 (Medical Electronics) と呼ばれている。

医用電子工学は生体を相手にするので、このことに特有の問題点がみられる。そのうちで最も重要なものは、生体と電子装置との“つなぎめ”にある。生体は“かなもの”に比べて、電子装置を接続することによ

る乱れが著しいからである。

医用電子装置は、診断用の生体計測装置が主であって、この他、治療用の電子装置その他がある。前者はもちろん生理学の研究手段としても用いられる。

生体計測装置が測定する物理量としては、生体内の起電力の場合が多いが、その他の量の場合には適当な変換器 (transducer) を用いて電気量になおして測定する。たとえば、脳波計、心電計、筋電計、電気血圧計、心音計、眼圧計、血流量計、電気皮膚温度計、オキシメータなどがある。超音波診断器も診断用の電子装置といってよいであろう。

次に、治療用の電子装置としては、電気メス、ペースメーカー (心搏が停止したとき電氣的刺激により回復させる装置) などが知られている。

最近、諸量の検出を体内の小型電子装置で行い、無線で情報を体外に伝送するテレメータ方式が開発されつつあるが、この種の計測装置が完備すれば、総合的な生体計測が可能になろう。将来は更にこれらが医用計算機 (Medical Computer) ともいべき情報処理装置に接続されて、診断のオートメーションを可能にすることと思われる。

以上は生体の計測であったが、一步を進めて生体を制御するという問題は将来のテーマであろう。制御の手段としてはやはりエレクトロニクスということになる。

小児マヒの治療に電氣的な方法で神経を刺激したらどうか。心臓の弱い人には、あらかじめ心臓附近に小型発信器をうえこんでペースメーカーとして用いれば、心臓マヒによる死亡はかなり防げよう。脳波を利用した睡眠器は、等々。エレクトロニクスも“ケムトロニクス” (Chemical-electronics), “モレクトロニクス” (Molecular-electronics) と来たら、これはさしあたり“ビオトロニクス” (Bio-electronics) とでもいべきものであろうか。

※ Jin-ichi Nagumo, Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, University of Tokyo.

3. 人工内臓・人工組織

——臓器の代行から改造へ——

歯の悪い人が入歯をするように、具合の悪くなった臓器（組織）の機能を代行する装置は人工内臓（組織）と呼ばれる。現在のところ、入歯のように半永久的に体内で代用されるものは人工血管しかなく、他はいずれも外科的治療における体外の補助装置である。

人工内臓のうちで、最もよく知られているのは人工心肺であろう。これは心臓を開いて直視下に手術するために、手術期間中心臓と肺臓の機能を代行させる装置であり、かなり以前から研究されていたが、1953年に至ってはじめて臨的に成功した。

手術期間というような短時間ではなく、もっと長い一定期間、体外の人工内臓を働かせて治療に役立たせようとするものに、人工腎臓、人工肝臓、人工心臓などがある。

人工腎臓の原理は純物理的なもので、半透膜による透析作用であるが、肝臓となるとまだその機能の全貌が明らかでないので、健康な犬の肝臓の作用を利用する方法などがとられている。人工心臓は前述の人工心肺とは異なり、呼吸は肺で行わせて心臓の機能だけを代行するものである。また、食道ガンの手術により生じた長い欠損部を補う人工食道もあるが、まだ臨的な成功をみるまでには至っていない。

人工内臓の現状はまだ個々の臓器（組織）の機能を代行する段階にとどまっているが、将来はこれらを制御を含む情報網によって組織した総合的な人工内臓——生体の simulator——が作られることになる。これは人体という組織（system）の解明に役立つばかりでなく、ある種のモデル実験にも用いられよう。

最近、工学関係において、大規模で複雑な組織を対象とする“組織工学”（System Engineering）が注目されているが、人体はこれの好個の対象であり、特に自動化されたプロセス工業との類似性は示唆の多いものと思われる。

以上は人工内臓のいわば消極的な方向であったが、これに対して積極的な方向もある。もともと、工学は解析（analysis）よりも構成（synthesis）、あるいは設計（design）を目標とする。そこで、“ある目的に応じて最適に設計された人体”とはどんなものか、現存の人体を上の意味で理想的な人体に近づけるにはどう改造したらよいか、などの問題が考えられる。

人体改造という話はおおげさになるが、美容整形はその例であって、すでに行われている。また、胎児を体外で成長させる人工子宮の問題もある。アメリカで

は、最近、宇宙旅行に適するように設計された人体として、“サイborg”（cyborg=cybernetic organism）という言葉まで作られている。

4. 人間工学

——人間機械系——

いろいろな機械は、もともと、人間のもつ種々な機能の足りない部分を補うために考案されたものであった。したがって、どのような機械でも人間によって使われるということが前提条件になっている。最近のように機械の自動化が進んでも、やはり、どこかの部分が人間に接触しており、そしてこの接触点は自動化が進む程重要なポイントになる場合が多い。そのわけは自動化された巨大装置の大きなエネルギーが、この接触点だけで制御されるので、人間が機械に間違えた指令を与えたときそのエラーが著しく拡大されてしまうからである。

そこで、機械とこれを扱う人間とを切り離して考えないで人間と機械とを含めた“人間・機械系”（Man-Machine System）を考え、両者のバランスをとって全体としての性能を高めようというのが、人間工学（Human Engineering）の趣旨である。

人間工学は、第2次大戦中アメリカで、高速・大型航空機の操縦における人間的要因（Human Factors）に関する実験心理学者の研究に端を発している。それで人間工学というあまり適切でない名前で呼ばれることになったが、イギリスでは“エルゴノミクス”（Ergonomics）というほうが広く用いられているようである。エルゴノミクスとは、作業を意味するエルゴ（ergo）と、法則という意味のノモス（nomos）との合成語で、作業者が外部からの情報により反応する際の反応の仕方にみられる法則性をしらべ、これを機械の設計に適用しようとするものである。したがって、この分野は人間の生理学から更に心理学と密接な関連をもつことになる。

人間と機械との接触点は、現在のところ人間の外側にある。たとえば、人間が目で情報を得て手や足でアクションをとる場合、目の性能を高める機械（眼鏡）を目の前につけ、手や足のアクションを増巾する機械（オイルブレーキ）を足の後におくのが普通である。しかし、この接触点は、将来、人間の内部に移行するのではないと思われる。たとえば、筋電位を検出してブレーキを働かせることも考えられよう。更に、人間・機械系における人間の役割は“判断”にあるのだから、危険であると判断した瞬間にブレーキが掛かるような Brain-Machine System も考えられる。また、

下等な判断は計算機にまかせ、重要な判断だけを人間が行なう Brain-Computer System も考えられよう。

5. オートマトン

——自動機械から進化する機械へ——

A. オートマトンのいろいろ

生物に固有な種々の“機能”をそなえた機械を作りたいという夢は誰しも抱くものであろう。そして生物のなかでも最も高級と思われる“人間”が目標になるのも当然のことであろう。このような自動機械、あるいは自動人形はオートマトン (Automaton) と呼ばれ、古くからいろいろなものが作られている (A. Chapuis, E. Droz の ‘Automata’ (Bapsford 社刊) には古今東西のオートマトンが集められている)。

次に、比較的最近作られたオートマトンをいくつかあげてみよう。

(1) マシナ・ラビリンス (Machina labyrinthea, 迷路機械) ——小動物を迷路に入ると試行錯誤的に出口にたどりつく。一度この家路を発見すると、再度の試行に対して誤りが少なくなり、遂には誤ることなくまっすぐ出口に到るようになる。C. Shannon の作った“ネズミ”など。

(2) マシナ・ソボラ (Machina sopora, 眠り機械) ——炉辺の猫のように、妨害されたときだけ起き上って順序よく楽な姿勢をみつけ、また眠り込む。この機械は数回の試行と錯誤の後、外部から実験者が負荷しようとするどんな変化をも中性化しようとする機能を獲得する。W. R. Ashby の作った“ホメオスタット” (Homeostat)。

(3) マシナ・スペキュラトリクス (Machina speculatrix, 考える機械) ——ごく少数の部品から組立てられた電気機械的な“カメ”で、ふだんはたえず探索して動き廻っているが、中等度の強さの光を見せるとこれに向って運動する。しかし強い光には反撥する。小さい障害物ならば押しのけるが重い障害物は避けて廻り、また急傾斜を敬遠する。光に向って誘引されている途中で障害物に出会うと、その障害物にかかざっている間は光に無関心である。鏡の前で自己を認知して立ちどまり、ソワソワしたりガタガタしたりする。“カメ”の持っている電池の電圧が下がると、自分で充電小屋へ行って充電する (食事)。多数の“カメ”を一緒にすると、お互いに逃れることができないで一種の社会を作るが、もしもこの社会のすべての成員に外部から誘引が加えられると、めいめいが競走を始めて社会は分解してしまう。

(4) マシナ・ドシリス (Machina docilis, 教えられる

機械) ——上記の“カメ”を少し細工すると、マシナ・ドシリスになる。短い口笛を吹いてから光を見せることを数回繰返すと条件反射が形成されて、口笛を吹いただけで寄ってくるようになる。形成された条件反射は時々強化してやらないと消滅してしまう。また、“カメ”のみちを妨害して口笛を吹くことを数回繰返すと、口笛を吹いただけで何か障害物でもあるのかと思って引返し、別の途をたどろうとする。

B. オートマトンの理論

以上は“かなもの”オートマトンの話であったが、これに対してオートマトンの理論と呼ばれる分野が最近活発に論じられている。ここでは、問題とする生物の機能は、人間の脳の機能であり、したがってオートマトンとは“人工頭脳”を意味する。このような分野が発展した理由は、いうまでもないことだが、最近の電子工学の著しい進歩が大型高速電子計算機を作り出し、これがある場合には人工頭脳とも呼ばれ得る状態にまで到達したことにある。

さて、オートマトンの理論、すなわち、人工頭脳の理論といっても、その内容はもちろん定まったものではない。しかし出発点は脳の機能の抽象化にある。

まず、神経網の要素である神経細胞 (neuron) の機能を抽象して“抽象細胞”を考える。これには、普通次の6種類が考えられている。

- (i) OR 細胞, (ii) AND 細胞, (iii) NOT 細胞,
- (iv) 多数決細胞, (v) Sheffer-stroke, (vi) 遅延細胞。

何個かの抽象細胞がある条件で結合されている場合に、これを“抽象神経網”と呼ぶ。この抽象神経網のもつ種々な性質のうち、抽象神経網の「内部状態」、抽象神経網に外部から加えられる「入力」、および抽象神経網が外部へ放出する「出力」の間の関係に注目して、次のようにオートマトンを定義する。

オートマトンとは不連続な black box (暗箱) である。すなわち、時間は $1, 2, 3, \dots, t, \dots$ と不連続にぎざまれてあり、black box は各瞬間において有限個の内部状態 $q_1, q_2, \dots, q_m$ のうちのいずれかをとり、そして、各瞬間において、現在の内部状態 q_i だけできまる出力 $f(q_i)$ を放出する。また、各瞬間 t において、有限個の記号 $u_1, u_2, \dots, u_n$ のうちのいずれかが入力として投入される。次の瞬間 $t+1$ における black box の内部状態は、現在の入力 u_i と現在の内部状態 q_j との函数 $g(u_i, q_j)$ である。

したがって、オートマトンは二つの函数 $f(q_i)$ と $g(u_i, q_j)$ を与えれば、完全に定まると考えてよい。

このようにオートマトンを定義すれば、抽象神経網

は一つのオートマトンである。また、デジタル計算機は抽象細胞と同じ機能をもつ基本回路を組合せて作られるから、やはり一つのオートマトンである。

オートマトンに関しては多くの研究がなされているが、次にいくつかの例をあげてみよう。

(1)オートマトンの埋め込み (embedding) —— オートマトンの入力や出力は、すべて2進数に翻訳することができるから、始めからそれらは2進数であると考えておいてもかまわない。

二つのオートマトン A, B があるとき、B があらゆる入力の列に対して A と同じ出力を放出するならば、たとえ black box の中味は違っていても、B を A の代りとして用いることができる。この考えを精密化したものが“埋め込み”である。そして、どのようなオートマトンも、ある抽象神経網に (一般化された意味で) 埋め込むことができることが示される。しかもその際の抽象細胞としては、(i) と (iii), (ii) と (iii), (iv) と (iii), あるいは (v) と (vi) だけで充分である。この意味で、これらの組のおのおのを universal element という。

(2)事象の表現 (representation of events) —— オートマトンの用途はいろいろあるが、その一つは入力の列を選別することである。すなわちあらゆる可能な入力の列を M_1, M_2 の2組に分けたとき、 M_1 に属する列が来た場合には出力1を、 M_2 に属する列が来た場合には出力0を放出するようなオートマトンを作りたい場合がある。

一般に、あらゆる可能な入力の列を2組に分けた場合、それぞれの組を「事象」(event) という。また一つの事象 M を選別するオートマトンを作り得る場合、 M は「表現可能」であるといわれる。それでは、一体どのような事象が表現可能となるかということが問題になる。

この問題 (事象が表現可能であるための条件) はすでに解決されている。一般に、表現可能な事象は「正則」(regular) といわれるが、正則事象に対して、それを表現するオートマトンを具体的に求める方法も示される。

一方、いかなるオートマトンも、ある抽象神経網の中に埋め込むことができるのであったから、いかなる正則事象に対しても、そのメンバーを選別する抽象神経網を構成することができるわけである。

(3)信頼性 (reliability) と冗長度 (redundancy) —— これまで述べて来たことからわかるように、オートマトンを議論するには、抽象神経網を対象とすれば充

分である。ところが、いままではあらゆる抽象細胞が指定された機能を常に正確に行うものと考えてきた。

しかし、この仮定はあまり現実的なものではない。生きた神経細胞はもとより、機械的な、あるいは電気的な装置も、何らかの誤りをおかす確率をもっていると考えられる。

そこで、抽象細胞のおのおのが誤る確率をもっている、オートマトン全体としての性能 (信頼性) を上げることができないかという問題が考えられる。

結論をいえば、このようなことは可能である。その方法は、たとえば、情報を一つの抽象細胞で伝える代りに、充分多数個の抽象細胞の組でもって伝えるようにするのである。したがって、抽象細胞の数はかなり余分にいることになる (冗長度)。

1個1個は信頼性が低い部品でも、部品の数を増しうまく結合すれば、全体として信頼性の高い装置が作り得るということは、前に述べた組織工学における最も重要な問題の一つでもある。

(4)チューリングの計算機 (Turing Machine) —— オートマトンの入力はいずれから与えられるが、一般に外界の刺激を受け取ってこれを入力に変えるものを「受容器」(receptor) という。また、オートマトンの出力は外界に影響を与えることができるが、この際出力を外界に伝えるなかだちになるものを「効果器」(effector) という。一般に、受容器と効果器をそなえたオートマトンは「ロボット」(robot) といわれる。デジタル計算機、(抽象化された) 動物の個体などはすべてロボットである。

チューリングの計算機とは、ロボットの一種であって、ある意味であらゆるロボットの原型となるものという点で重要な意味をもっている。

チューリングの計算機の動作の詳細は省略するが、この計算機は、もともと、数学における“手続” (algorithm) とか、“形式的な計算” (formal calculation) とかの概念を抽象化して得られたものである。しかしひとたびこの抽象化が定まれば、逆に、ある特定の手続とか形式的な計算とかを定義することは、一つのチューリング計算機を定義することに等しいと考えることができる。つまり、チューリングの計算機に自動的に行わせることができるような操作だけを、手続ないし形式的な計算と呼ぶことにするのである。数学における、“これこれのことを確かめる手続があるか”とか、“この答を形式的な計算で出せるか”という種類の問題は、すべて、“チューリングの計算機の問題”という、極めて明確なものにおきかえられ

ることになるわけである。

(5)パターン認識, 学習——文字を読みとる場合のように, いろいろな変化(文字の例でいえば, 書体, 位置, 傾き, 汚点など)をもった一群の物理的な実在からある特徴を抽象して, 他のものと区別することが“パターン認識”(Pattern recognition)の問題であって, 文字の他に, 図形, 音声, 音楽, 文章の意味, 病気の診断などが対象になる。

数学の定理の証明を機械化しようとする場合, 公理として与えられた命題から出発して次々に新しい命題を作り, 証明すべき命題との間をつなげばよいわけであるが, その方法は無数にあるから, 片っ端から試みていたのではきりが無い。どうしても, 目的とする定理に照して, 試行に一定の方針をもたせることが必要である。すなわち, 途中の命題が目的に達する道程に乗っているかどうかを判断することが必要になる。この判断も一つのパターン認識である。

このように, 出発点と目的地とだけが与えられており, 途中の道程がわからない問題を計算機に解かせる場合には, 試しのプログラムをある程度ランダムに与え, そのプログラムを適当に変更し, 成功したか失敗したかを判断して, この経験を生かしてプログラムを次第に組織化してゆくことになる。

このような方法によって, 最初はプログラムを作った人の全く予想しなかったようなプログラムが機械のなかにできたとすれば, これこそ機械が本当に“考えた”ということができるであろう。そして“進化する機械”の可能性も生れてくるのである。

6. む す び

——生物工学と生物物理——

以上は, 生物に関係する工学——生物工学——につ

いてのごく大略の解説である。はじめにも述べたように, この領域はまだ固まったものではないから, 独断や偏見が多いことと思われるが, この点は御了承を乞いたい。

すでに述べたように, 現状は, 一応独立に発生した四つの分野が並列しているが, これらは近い将来, 当然再編成されるものと思われる。

N. Wiener がサイバネティクス (Cybernetics) を提唱したのは1948年であるが, これを契機として工学者, 特に通信と制御に関係する工学者は, 生体に強い関心をもつようになった。生体の機能, 特にその情報組織は, 将来の工学に貴重な示唆を与えることが多いと考えられるから, この傾向は今後もしよいよ盛んになるであろうと思われる。

また最近では, 生物学者, 生理学者, 生物物理学者の側で, 工学的知識を利用して生体の情報組織を解明しようとする試みも盛んになりつつあるようにみえる。特に, 生物学の目的を, “生命とは何か” から“人工生物を作ること”に切替えてはどうか, という生物学者の提案は, 工学者にとってもセンセーショナルなものであった。

生物工学は生物物理とは違うけれども, 生物物理の成果が生物工学の基礎になることは疑いのないところであって, 生物物理の発展はやがては生物工学の発展につながるものであり, この意味でも生物物理の発展を心から期待したい。

本文は「自然」の1961年5月号に掲載されたものの一部を書き改めたものであることを付記する。

連 絡 事 項

J. of Theoretical Biology では理論生物学の論文を募集しておりますが, Editorial Board から杉田さんへの手紙によりますと, 日本からの貢献をも期待しているとのことです。御希望の方は J. F. Danielli, Zoology Department King's College, London, W. C. 2 に御投稿下さい。