



技術解説

人間の目と機械の目

藤井克彦*

1. 生体の機能とロボット

産業用ロボットが、生産現場その他さまざまな場所で利用されようとしている。それに伴って、明日のロボットを開発しようとする研究も活発に進められている。ところでロボットとは人間の機能を代行し得る能力を持ち、われわれの作業分野を拡大する目的を持つ装置であると考えると、ロボット自身は必ずしも人間に似た形状、性能を備えたものである必要はない。むしろ、人間とは似て非なるものであって、人間より優れた機能、または異なった機能をもったものの方が優秀なロボットであると言えるであろう。したがって、ロボットの開発に当たって人間に似たものを作ろうとする努力は、一見不要であると思われる。しかし、人間を含む生物は、現在の技術ではとうてい実現できない優秀な機能をたくさんもっている。たとえば、文字や図形を見分け、音を聞き分ける能力を考えると、現在の機械は生物に比べて問題にならないほど幼稚な段階にある。また、味覚、嗅覚のように今日の技術では手も足も出ない機能もある。筋肉のように柔軟で、かつ張力を微妙に変え得るものもない。さらに脳の働きや、細胞の増殖機能に至っては、現在の技術は比較の対象にすらならない。そこで、生物のもっている優れた機能を工学の立場から再検討し、新しい技術を開発することが、ロボット開発につながる1つの道であるということができる。

2. 感覚機能（センサ）

表1は人体の持つ感覚器をまとめたものであるが、生物が外界から情報を得るための感覚器

*藤井克彦 (Katsuhiko FUJII), 大阪大学, 工学部, 電気工学科, 教授, 工学博士, 生体工学

表1 人間の五感

感覚	器官	刺激エネルギー	受容体
視覚	目	可視光 (波長4,000~ (7,600Åの電磁波)	網膜 (かん体細胞 錘体細胞)
聴覚	耳	音 (15~20,000Hz 空気疎密度)	コルチ器官 (聴細胞)
嗅覚	鼻	化学エネルギー	鼻粘膜, 鼻細胞
味覚	舌	化学エネルギー	味蕾, 味細胞
触覚	皮膚	機械エネルギー	触小体各種

には生物特有の多くの優れた機能を見出すことができる。これらの感覚器官は並列に外界からの情報を中枢に伝達している。

生物の感覚器は、取り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（センサ）よりも優秀なものが多い。

3. 視覚系の機能

感覚器の中で最も重要な役割を果たしているのは視覚系である。外部からの情報の大部分は、視覚系を通して受け入れられていると考えてよい。「目は脳の出先である」といわれている通り、目から入った視覚情報はただちに大脳の視覚中枢に送られて各種の認識判断などを行なっている。

ロボットにおける目としてはテレビカメラ、ビジコンなどが使われているが、いずれも光信号を電気信号に変換する要素であって、計算機によるデータ処理と組合わせて始めて、認識が可能になるのである。しかし、単純な図形認識にも非常に冗長なプログラムによるデータ処理が必要である。「見える」ということと、「見

る」ということは異なったことなのである。

視覚系の目的は言うまでもなく物を「見る」ということであるから

- (1) きわめて微弱な光、たとえば光量子1個にも感じる高感度光電変換素子である視細胞からなっている。
- (2) 対象の像を網膜の最も分解能の高い中心窩に結ばせるための眼球運動制御機構を備えている。
- (3) 網膜に入る光の量の調節は瞳孔が受けもっているが、同時に視細胞の感度調節作用が加わって日常生活に必要な明暗調節を行っている。
- (4) 頭が動いても対象が注視できるように前庭性動眼反射の機能があり、この特性は小脳の関与により生涯不変である。
- (5) 網膜上の像のボケを検出してピントを調節する自動焦点調節機能により見る物によって目のレンズ（水晶体）の焦点距離を変えることができる。
- (6) 図形や色を認識するために必要な信号処理を備えている。

などの特徴がある。

〈1〉 画像認識時の眼球運動

図1は視線運動を計測した例を示している。歩行中の少女の絵を見たわれわれの目は動きまわって図形を認識する。視線は直線運動、停留、直線運動……を繰り返している。しかも視線は決してランダムに動いているのではなくて、絵の最もよく特長を表している点を注視していることがわかる。

この例は、目と大脳とが連携して画像を認識している場合であるが、約40秒で認識を終了している。このようなことを計算機を使って行なうとするとどうなるだろう。画像認識のように膨大な情報を処理しなければならない場合は、人間の頭脳は優位に立っていることがわかる。一体どこからどのような指令で目はこのように忙しく動きまわって、認識することができるのであろうか。

〈2〉 光量の自動調節

瞳孔の面積を変化させて、入射光量を調節する機構が目には備わっている。図2は網膜に当

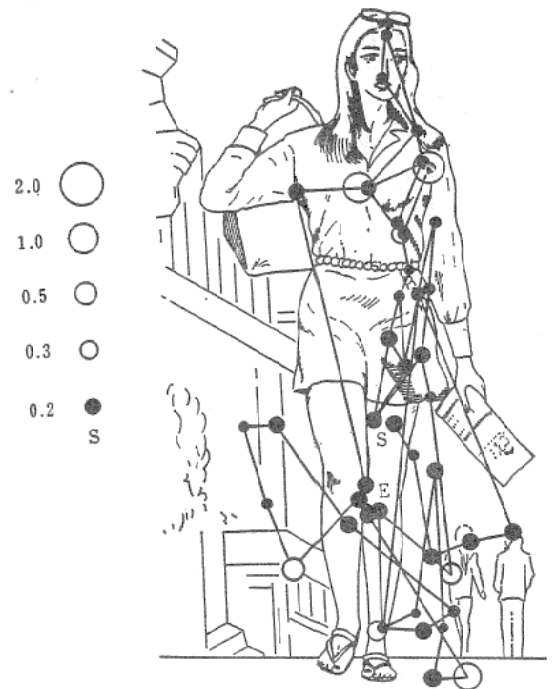


図1 画像認識のための視線移動

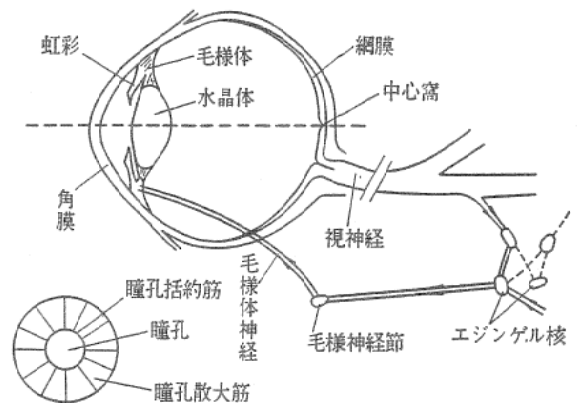


図2 瞳孔面積の制御機構

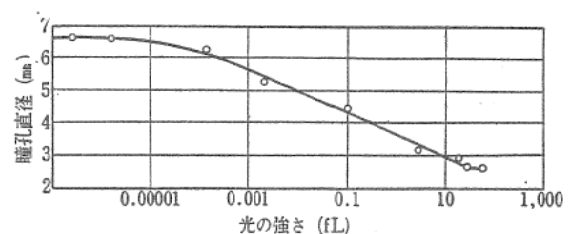


図3 瞳孔直径調節機構の定常特性 (Fogel)

たる光の量が瞳孔面積の制御に用いられる経路を示す。瞳孔は1対の筋肉（瞳孔散大筋と瞳孔括約筋）により拡大あるいは縮小する。図3は定常状態での瞳孔の直径と光の強さとの関係を示す。また過渡特性を図4に示す。

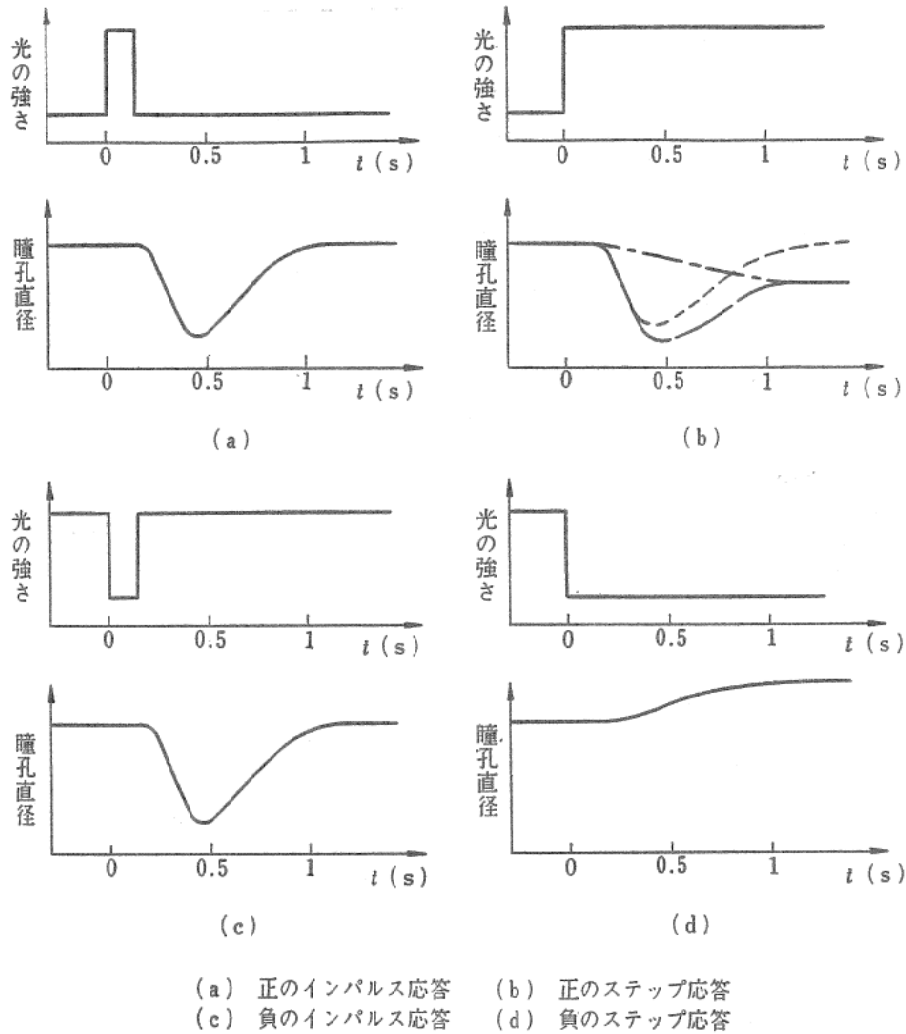


図4 瞳孔直径調節機構の過渡応答 (Clynes)

この特性を数学モデルによって表現すると、過渡応答は2つの成分をも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、第一成分は、

$$\frac{D(s)}{L(s)} = \frac{ase^{-T_3s}}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad \frac{dL}{dt} > 0$$

$$= 0 \quad \frac{dL}{dt} \leq 0$$

.....(1)

ただし、 $T_1 = T_2 = 0.25s$,
 $T_3 = 0.28s$

となり、光の強さの変化は正負によって異なる。一方第2成分は、

$$\frac{D(s)}{L(s)} = \frac{-be^{-T_5s}}{(1+T_4s)} \quad \text{.....(2)}$$

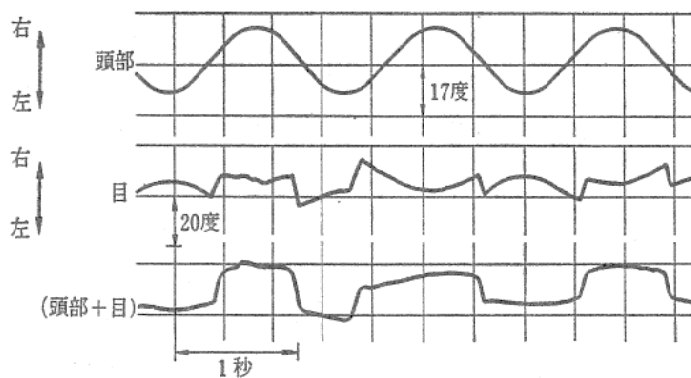
ただし、 $T_4 = 0.4s$, $T_5 = 0.35s$ となり定常応答はこの成分で決まる。ここでおもしろいこ

とは、第1成分が光の量が増加する場合のみ動作し、瞳孔の面積を急速に縮小して、網膜が露出過度になるのを防止していることである。光の量が減少するときは、このような安全装置は必要ないのであろう。

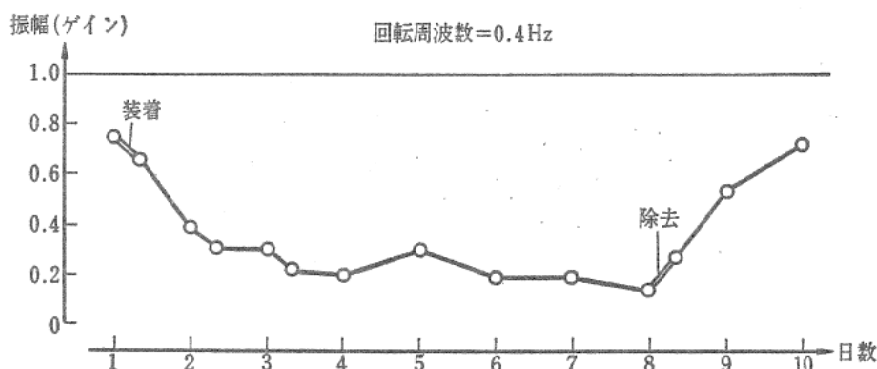
〈3〉 前庭性動眼反射とその適応性

眼球は頭部が運動したときその動きを打ち消す方向に移動して、頭部運動中も物を見ることができるようになっている（前庭性動眼反射）。この反射運動は、半規管、神経線維、動眼筋からなる反射弓（オープンループ）によって実現されている。

図5(a)は典型的な前庭性動眼反射特性を示したものである。上段波形のように回転椅子で左右に頭を回転させたとき（暗所開眼状態）、頭に対する目の動きは下段に示す波形となり大地



(a) 前庭性動眼反射特性



(b) 逆転眼鏡による前庭性動眼反射の適応

図5 前庭動眼特性とその適応性

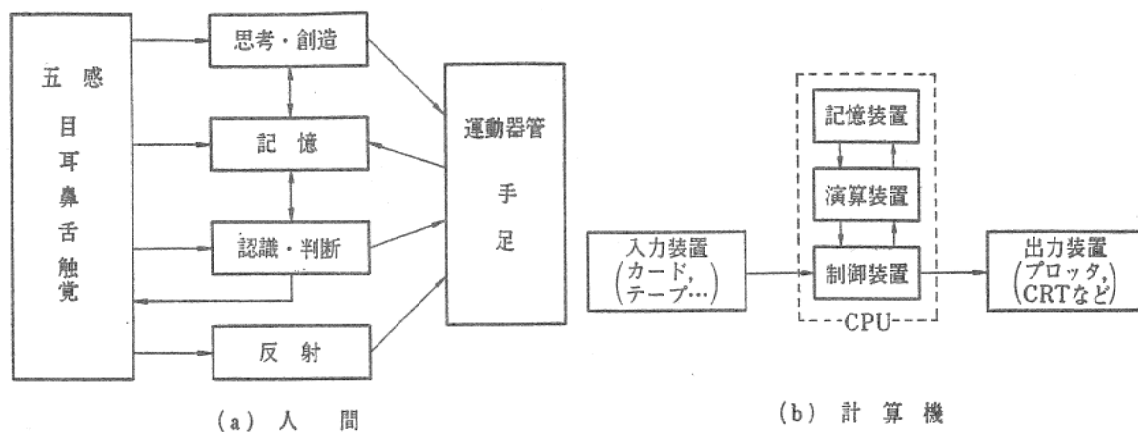


図6 人間と計算機の機能比較

に対して静止している区間があり、物を見ることができるとは異なる。

さて、この人に左右が逆転して見える眼鏡を装着させて数日間生活させてみる。すなわち、頭を右に5度回転すると普通見える景色は逆に左に5度回転したことになる。ところが、この逆転眼鏡を装着すると、頭部が右5度回転する

と、景色は右に10度回転して見える視覚環境となる。この眼鏡を装着した場合の前庭性動眼反射を計測すると、図6に示すように2日目、3日目と大きく特性が変化し、新しい視覚環境に適応しようとしていることが観測される。この適応は小脳からの指令によるものであり、小脳機能解明の1つの鍵となるであろう。

4. 機械の目

半導体技術の進歩により光センサは小型、高感度、高応答時間のものが開発され、実用に供されている。特に視感度領域外で高感度をもったものは、利用面で興味のあるものである。2次元画像用のイメージセンサも各種開発され、寸法的には人間の網膜に近いものになりつつある。自動焦点調節にもビジトロニックオートフォーカスモジュールなどさまざまな方法が考案され実用面での改良の段階にある。

しかし、上に述べた人間の視覚系の機能と比較すると、まだ大きな隔りがある。感度の点では人間の視細胞なみのものはあるが、日常生活に必要な 10^{10} という広いダイナミックレンジをもったものは存在しない。また、2次元画像の認識の場合にも、たとえば図1の程度の画を認識するためには、機械の目はどのような方法をとるだろうか。複雑な背景の中にある特定の物体を認識するためには、現在の画像認識の技術では不可能に近く、もしできるとしても、認識に要する時間は膨大なものとなるであろう。光電変換のハードウェアの進歩に比して、認識に関するソフトウェアには、今後の進歩に待つところが大きい。

人間はいかにして図形を認識しているかを知ることが、画像認識技術を確立する1つの鍵となるのではないだろうか。

5. 人間とコンピュータ(人工知能)

人間の頭脳とコンピュータとは、機能構成が異なっているため、比較することはできないがお互いに優劣がある。情報の入出力に関して、比較してみると図6のように描ける。人間では五感といわれる感覚器により、光、音、におい、味、温度、圧力、粗密、痛覚など、各種各様の情報が同時刻に並列に電気信号に変換され、神経線維を通して大量に中枢に送られ、中枢の各部位で処理されている。これに比してコンピュータでは時系列信号の形で順次CPUに送り込まれていて、時間当りの送り込まれる情報量は、人間に較べて格段に少ない。コンピュータの入出力装置が人間並になるためには、音声、図形の認識を含

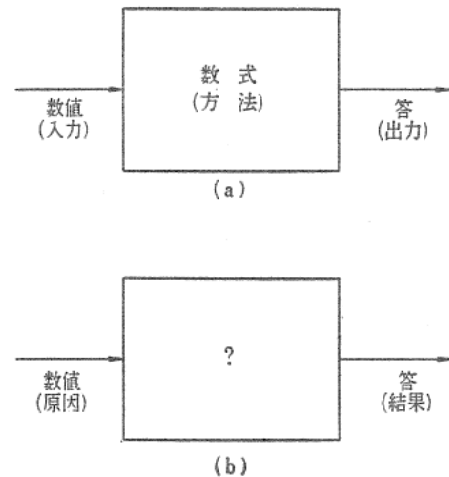


図7 アナリシとシンセシス

め、今後の開発に待つところが大きい。また、計算機をマイクロコンピュータなどの集合システムとして構成し、分散処理、階層化などを考えることにより、より人間に近い機能をもたせることも可能であろう。

出力装置に関しても、プリンタ、CRTディスプレイ、音声合成など着実な進歩を示しているが手足をもった人間には、比較にならないレベルである。また、記憶機能に関して人間とはかなり様子が異なる。一旦記憶すると決して忘れない点で計算機のメモリーは優れているといえるが、忘却機能をもった人間の記憶とは異質のものである。

ロボットに知能をもたせようとするところ計算機を使う以外にわれわれは手段をもたない。現在の計算機は情報処理の速度と精度において脳を遥かに凌ぐ能力をもっている。

しかし、ロボットの知能として計算機を使用する場合に、計算機にも得意な仕事と不得手な仕事がある。図7(a)に示すように計算機に数式を解くべき手順を与え、数値を入力してやると計算機はすばらしい速さで計算を行ない、正確な答を出すことができる。計算機はこのように使われるため設計された道具である。ところが、(b)図のように、原因と結果を与え、その因果関係を表わす関係(関数)を求める目的で計算機を使うとどうなるであろうか。恐るべき情報処理能力をもっているから繰り返し何度も正解が見つかるまで反復演算をすれば答に到達することもある。しかし、計算機にとってこのような

問題は不得手である。むしろ計算機は(b)図のような用途に使われるようには設計されていないのである。

ところが、ロボットに知能をもたせるとすれば(a)、(b)、両方の能力が要求されるであろう。決められた手順を指示して作業を進める場合は(a)であり、図形を認識したり、状況を判断して、行動を決定しなければならない場合は(b)に相当する。しかし、われわれは(b)のような問題を処理するためにも、現在は計算機しか持ち合わせていないのである。

これに比して人間は、環境から与えられた種々雑多な情報から必要な情報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、汚れた紙面の文字も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。そこで、人間は何故このようなことが可能であるか、どのようにしてパターン認識をしているか、その機能を明らかにすればこれらの問題を解決する1つの糸口を見出すことができるであろう。

しかし、人間の脳の中において行なわれている動作に関しては、まだ解明されていない部分が多く、今後の大脳生理学の研究の成果に待つところが多い。またロボット研究からのアプローチが大脳の仕組みを解く鍵になるかも知れない。

