Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

バイオメカニズム学会誌, VOL. 7, №1 (1983)

解　説

人間の目と機械の目

笠井　健*

1. まえがき

10年余り前には“機械の目”という言葉は人間の夢を込めた言葉であって現実的なイメージは乏しかった。ところが今では機械の目といえば具体的にいくつかの視覚システムの例を生産ラインやMEなどの分野で思いうかべられるまでになった。それでは機械の目はいささかでも人間の目に近づいたかというと、とてもそうは思えない。確かに画像処理の技術は進歩したが、視覚の背後にある知能の機械化という問題には手がつけられていないからである。

一方ロボットの制御技術は近年急速な進歩を見せはじめた。動きながら見る目あるいは運動制御のための目の開発が近い将来強く要望されることは必至である。本稿では視覚と運動を結びつける技術がより人間に近い目への1つのブレイク・スルーになるとの考えからそれに関連したいくつかの目の機能について述べて見たい。

2. 目の機能

見る働きには実に様々なものがある。たとえば

(1) 2つの物を見比べ、違いを見出す
(2) 図形や文字、物体などの形状、色、つや、テクスチャ（織物の柄のようなパターン構造の統計的な性質）等の特徴や構造を記述する
(3) 共通の特徴をもつものを同じクラスに分類する
(4) 3次元的な動き（回転・直線運動）を理解する
(5) 物体の変形（人間や動物の手足の動作など）がわかる
(6) 広い視野の中で様々な物体の3次元的な配置がわかる
(7) 写真や映画のような2次元シーンから3次元的な実体がわかる

など。

これらは人間や機械の目が抽出している情報に着目して数えあげたものであるが勿論これですべてではない。人間よりはむしろ機械の目が得意なものとして

(8) 形状、面積、速度の計測、個数の計数

などもある。

また人間の目にしか出来ない事として頭や目が動きながら周囲を静止した世界としてとらえること、その中で動いている物は動くものとしてとらえられることもあげられる。

見る機械の開発には大きくわけて2つの方向がある。1つは高速かつ大量に文字や画像を処理する、長時間監視を続け異常の発生をモニタする、あるいは定量的な計測、正確な計数をするなど機械の特性を生かした分野である。この場合目はひたすら働くことを求められるかわりに見る対象物の種類や性質、見せ方などをせまく限定しておくことができる。プリント基板のキズの検査、[1] ICのボンディング装置の位置ぎめ、[2] 組み立て工程の機械部品の識別[3]など生産ラインに導入されている視覚システムは殆んどこの種のものである。対象物の種類と抽出すべき情報を限定し、最も見やすい照明条件を工夫するなどして処理時間を短縮し、処理方法や装置の簡単化をはかることができる。

もう1つは原子炉の修理や宇宙・深海の探査など人間の行けない環境で情報収集・作業をするロボットの目の開発である。身障者の介添をするロボットの視覚システムもこれに類すると思われるが、この種の目では見る対象物の範囲をせまく限ったり、見せる方向を限定したりすることは望ましくない。見えにくければ見る位置を変えるぐらいに融通性に富んだ、かつ対象物についてできるだけ多くのことを語れる目であることが望まれる。そして目自身の動きと対象物の動きが区別できること、視覚情報を用いて動きまわったり、精密な

* 大阪大学健康体育部
〒560 豊中市待兼山1−1
電話 06−844−1151内線 5356

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

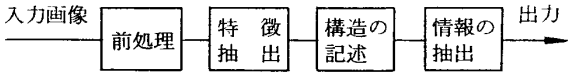


図1　機械の目の情報処理の手順

手作業に必要な3次元データを収集する能力なども要求されよう。

以下にはこのようなより人間に近い目の開発に必要な機能として、モデルを用いた信頼性の高い画像処理、奥行き・距離の認識、眼球運動及び空間認識の機能をとりあげて述べる。

3. 信頼性の高い視覚システム

図1は機械の目が情報処理を行う基本的な手順である。多面体の認識[4]を例にとって説明すると、まず原画像に輪郭の強調、ノイズの消去など前処理を施して見やすい画像にする。次に色々な方向の線素や稜線などの特徴を抽出し線画を作成する。そして稜線のつながり具合、面の位置・向きといった構造を記述する。最後にその物体が何面体でどちら向きに置かれているかなどの答を出す。

この手順だけで目的を達することは物体の種類、複雑さが少し増えるだけでまず不可能となる。特徴の一部が欠落しても構造の記述ができなくなるからである。人間は少しぐらい見えにくいところがあっても平気なのは1つには輪郭線だけでなく、色・つや・表面の荒さ（テクスチャ）、奥行き情報など実に様々な特徴を並列的に抽出しているからである。これによって一部の特徴の欠落が致命的となるのを避けられる上、高次の判断に際して対象について多くの情報を提供できる。

また脳には大抵の物体の基本的な構造のモデルがあると考えられ、入力情報の欠落をモデルで補うことができる。また複雑な構造はより単純な形の要素に分割し要素間の関係で記述するのが人間も機械も採っている有効な方法であるが、適切なモデルを持つことにより分割を誤りなく行なえる[5]。

図2の例は複雑な20種以上のエンジンの部品を識別できる視覚システムとして研究用に開発されたものである[6]。識別機能を高めるためにモデルの参照を有効に行っている。前処理をして部品の外形（図3（b））を得た後、同じ特徴のある外形

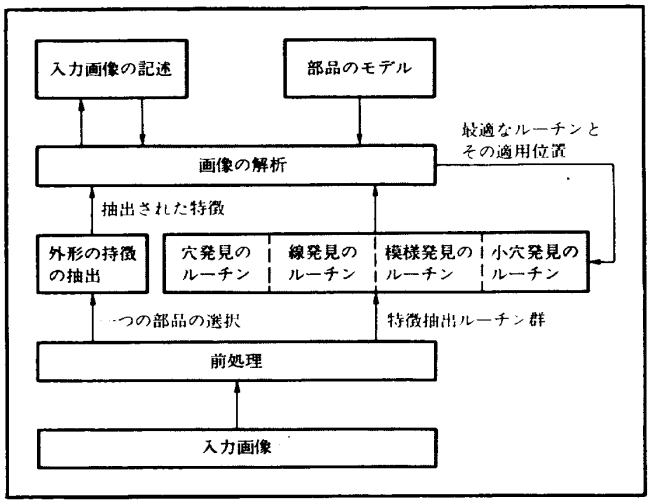


図2　モデルを用いた視覚システムの例

をもついくつかの部品のモデル（図3（c）～（f））を参照する。図2の画像解析部はこれら候補のモデルの数ある特徴の中から最も能率よく未知部品を決定できる特徴を求める。そして該当する特徴が対象物体に見出せるかどうかを色々の特徴抽出ルーチンを用いてチェックする。このやり方は調べるべき特徴の位置とその性質がモデルから与えられるので不明瞭な特徴でも信頼性よく抽出できる。

この他対象物体の3次元構造に関する予備知識を用いて推論を行うとか、対象物に関する意味的な予備知識を与えるなどの方法も目の信頼性を高める有効な方法である。

4. 奥行き・距離の認識

3次元物体の認識あるいは3次元的な動きの認識は1つのカメラを用いても行えるが、物体とカメラの相互的な位置関係や物体の構造に関する知識を予め与えておかなければならない。両眼視差を用いれば予備知識がなくても奥行きの認識が可能であることは、明確な特徴をもたないランダムドットパターンに対しても奥行き知覚が生れる[7]ことから明らかである。

サルの第1視覚野（網膜からの画像を受けとる大脳視覚領の入口に当る領域）では右眼から情報を受けとる細胞と左眼から情報を受けとる細胞が交互にコラム状に配列されている[8]。いわば両眼の

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

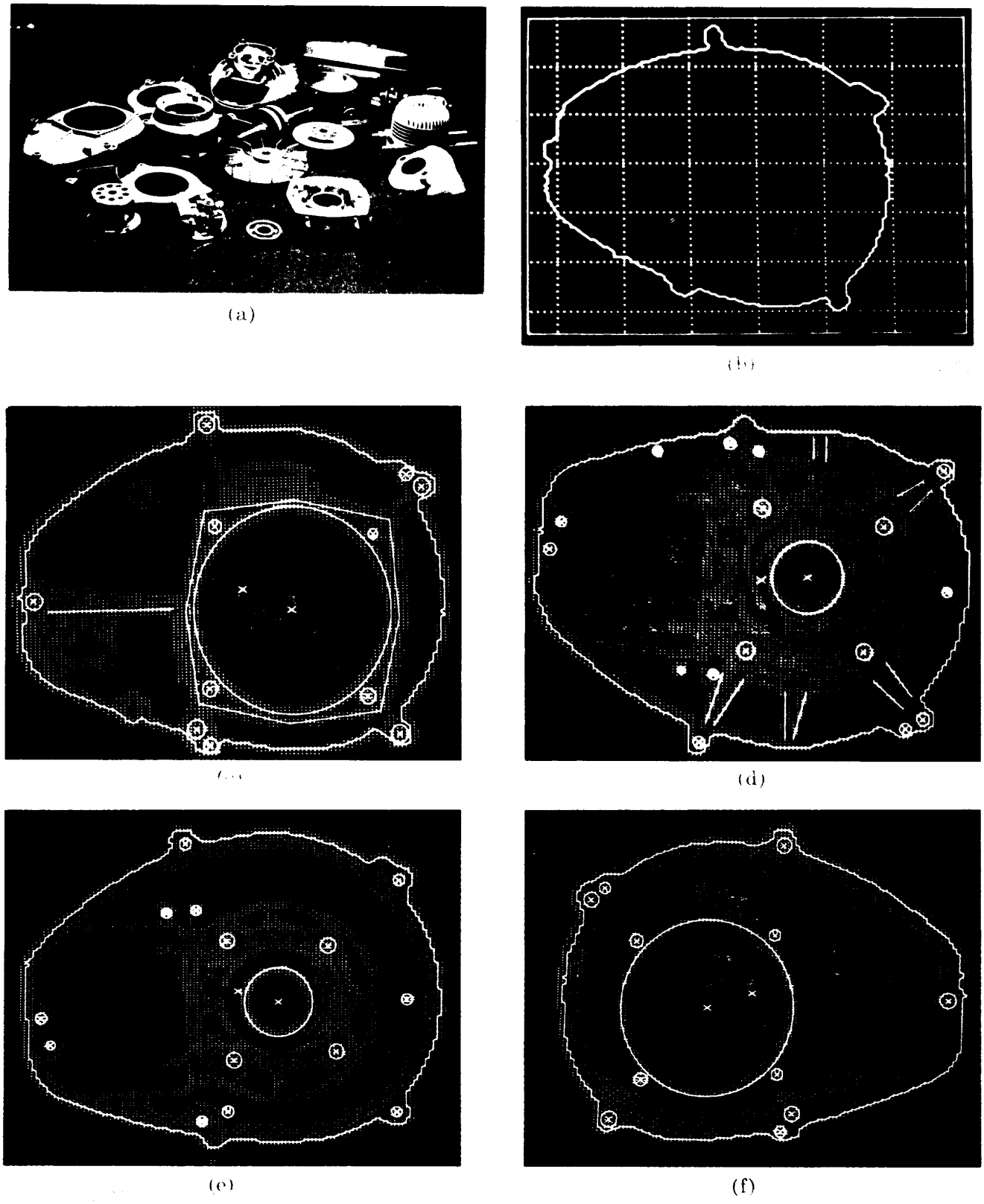


図3　機械部品とそのモデル

(a) 部品の集まり，(b) 1つの部品の外形，　(c)～(f) モデル

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

網膜像が細密なモザイクのように入り組んでミックスされている。そして次の段階では左右の網膜像のほぼ対応する座標点から情報を受ける両眼性の細胞があり、両眼の像の互いに対応する場所に同じ特徴(線素の方向など)があるかどうかを調べている。これら両眼性の細胞は正確には左右同じ座標点(視差ゼロ)からの情報を受けとるものばかりではない。視角にして約1°の範囲で左右にいろいろずれた座標点からの情報を受けている細胞が多く存在し種々の大きさの視差を検出している。

このことが奥行きを知るのに非常に重要である。たとえば1mの距離から奥行き30cmの立方体を両眼で見た場合手前の稜線が両眼の正確に対応する位置に結像したとすると遠方の稜線は両眼で相互に約0.6°ずれたところに結像する。したがって図4に示すように0°あるいは0.6°の視差を検出する細胞の集団はそれぞれ視野のどの位置に立方体のエッジが見つかったかを別々に認識の中枢に伝えることができる。

このように視差のある画像の対応点を検出して奥行きを識別する方法はあまり大きな視差に対しては有効ではない。大きな視差によって左右の網膜像が著るしく変ると、左右の目に映った異なるエッジを誤って対応するエッジと解釈してしまうことが起り得るからである。

我々がもっと広い範囲で奥行きを知覚でき、奥行き方向の絶対距離をも知ることができるのは輻輳と呼ばれる眼球運動を利用しているからである。[9] 輻輳というのは近い物を見るとき両眼が内転する運動でこのとき両眼の視線の交叉角(輻輳角)が大きくなる。両眼の回転中心間の距離(6～7cm)は不変であるから脳は両眼の輻輳角(近似的に対象までの距離に逆比例)から物体までの距離を知ることができる。

脳が輻輳角から距離の知覚を得ていることは図5のように等間隔の格子パターンを両眼に別々に見せる実験から容易に示される。各眼の前に置いた鏡の位置と向きを変えると種々の輻輳角で格子(A′,A″)を融像させて見ることができる。図5のAのように2つの格子の虚像が中央で重なるよ

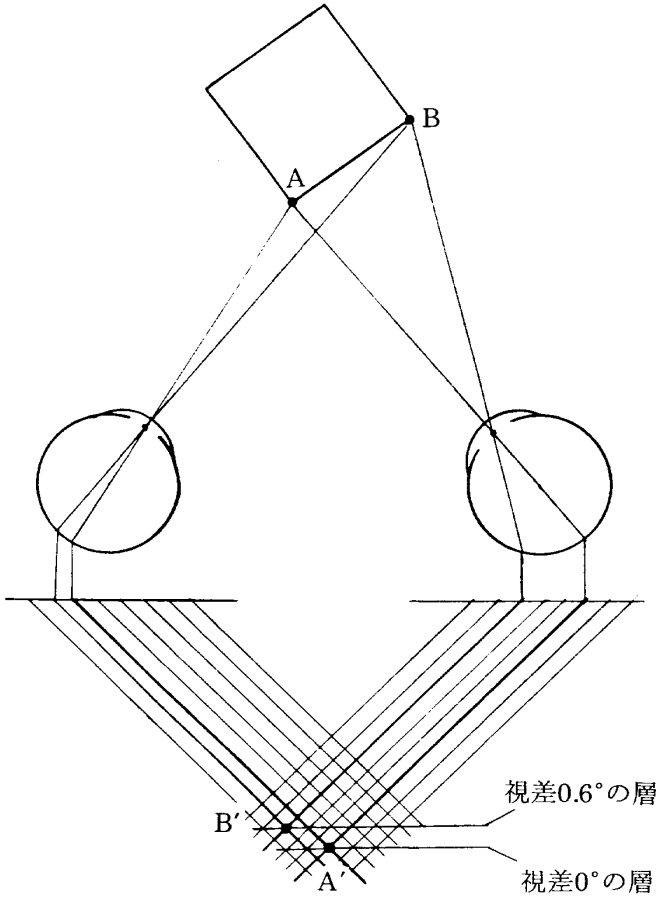


図4　視差を用いた奥行きの検出

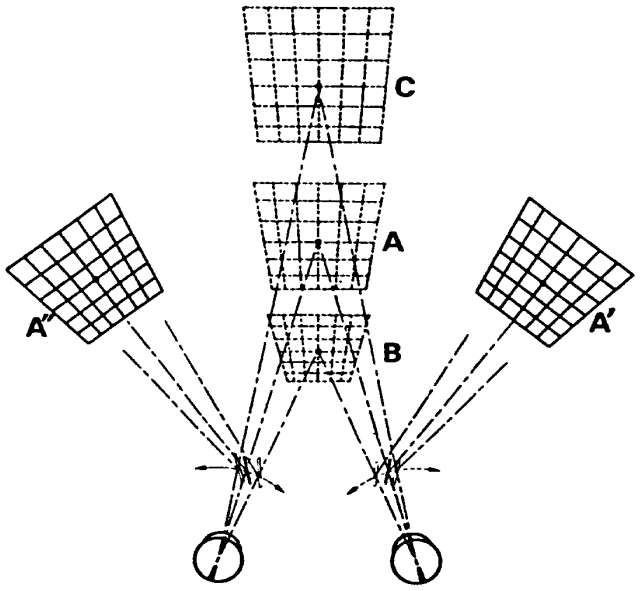


図5　輻輳角に対応した距離・大きさの知覚
A:正常 B:近く小さく知覚される
C:遠く大きく知覚される

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

うに鏡を調整すると現実に等しい距離感が生まれ格子はAの位置にあるように見える。輻輳角をこの正常な値より大きくとるとBのように格子が実際より近くにあるように感じられ、小さくとるとCのように遠くに感じられる。知覚される距離は両眼視線の交点にほゞ相当し輻輳角と密接な関係にある。

輻輳角が変ると距離感が変るだけでなく大きさの感覚も変る。すなわち図5のBの状況では格子の目は実際より縮小して、Cの状況では拡大して感じられる。網膜像の大きさは物体までの距離に逆比例する。脳が網膜像から物体の大きさを知るためには距離の因子を掛ける必要があるので輻輳角の信号が用いられているものと考えられる。

人間の目はこのように奥行き・距離の知覚に視差及びカメラ角を有効に利用しており、3次元世界を定量的に把握する機械の目には大いに参考になる技術である。

5. 視覚の安定化

我々は激しい運動をしているときでもまわりの世界を比較的安定に見ることができる。視覚のフィードバックを用いればできるのは当り前のように思えるが実はそうではない。画像処理をして像の速度を算出するのは機械と同様人間の目でも時間のかかる仕事である。人間の目がスムーズ・パシュートと呼ばれる視覚のフィードバックにより追跡できるのは高々数10°/sec の速さの動きに限られる。[10] 一方日常動作で頭の回転速度は200°/secを超えることも少くない。また壁のポスタを歩きながら見るとき100°/sec以上の眼球運動が必要となることもしばしばある。このような場合でもいわゆる“カメラぶれ”に相当するものを知覚しないのは、脳が頭の動きを検出しこれと逆方向に目を動かす開ループ制御を行って視線の方向又は注視点の位置を空間的に一定に保持しているからである[11] (図6)。

頭の回転速度($\dot{H}$)は内耳の三半規管により検出される。これを用いて眼の回転の速度指令が作られ$\dot{E}=-\dot{H}$の速度で眼が頭に対して回転する。結果として静止空間に対する視線の速度$\dot{G}$ ($=\dot{E}+\dot{H}$)は0に保たれる。[12] 図7 (a)は暗闇の中で頭を回転したときの目、頭及び視線の動きを記録したものである。視線の方向は階段状に切替る以外の時間には急速な頭の回転にも拘わらず一定方向に保持されていることがはっきり示されている。

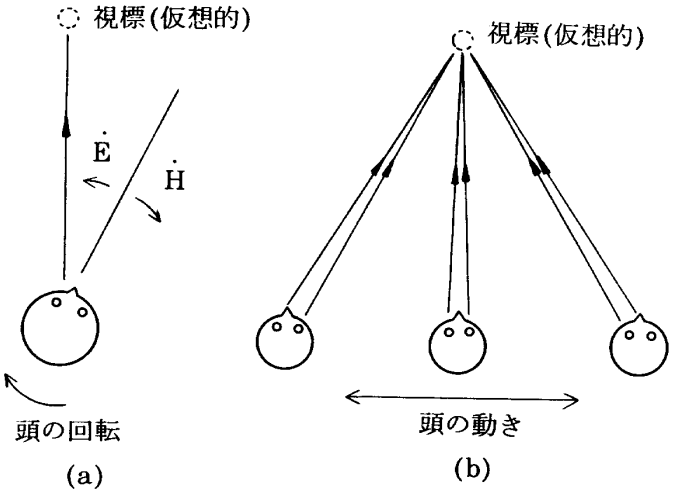


図6 頭の動きを補償する眼球運動
(a) 回転運動に対して
視線の方向を一定に保つ
(b) 直線運動に対して
注視点の位置を一定に保つ

頭が左右に直線運動している時目の前にある壁の一点を注視しようとすると図6 (b)のように両眼の視線の交点を目標上に保持する制御が必要である。図7 (b)は目の前20cmのLEDを注視した時の頭及び視線の動きを記録したものであるが、途中で一時的にLEDが消滅しても眼球運動は継続している。頭の直線運動は内耳の耳石器で検出され、これと視標までの距離知覚の脳内信号を用いて必要な速度の眼球運動が作り出されると推定されている。[13]

このような開ループ制御は目と対象物の相対速度(網膜像の速度)を低減させ視覚のフィードバックによる追跡を可能にする働きや、うす暗いところでも安定な視覚を保つ働きをしている。動くロボットの目の情報処理を容易にする手段として不可欠の機能である。

6. 空間の認識

網膜の分解能の高い部分は中心部の高々直径1°

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

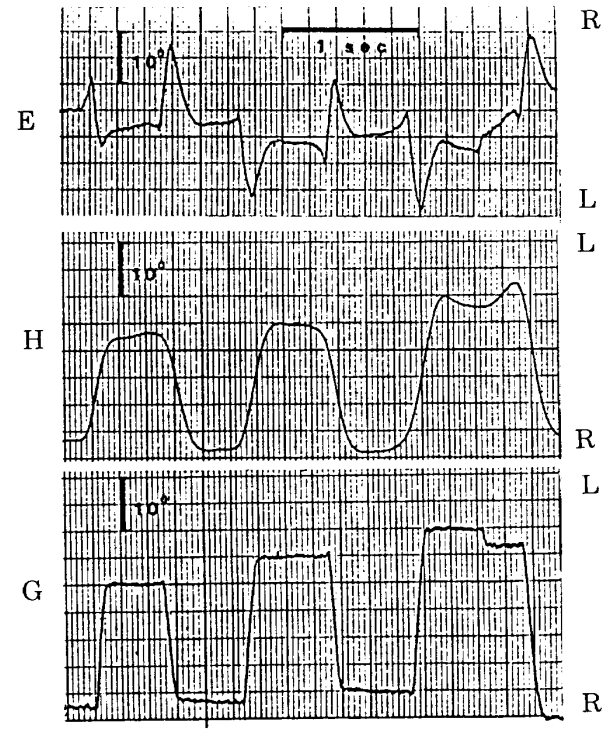


図7 (a)　頭を回転(左右)させたときの補償性眼球運動
E:眼　H:頭　G:視線

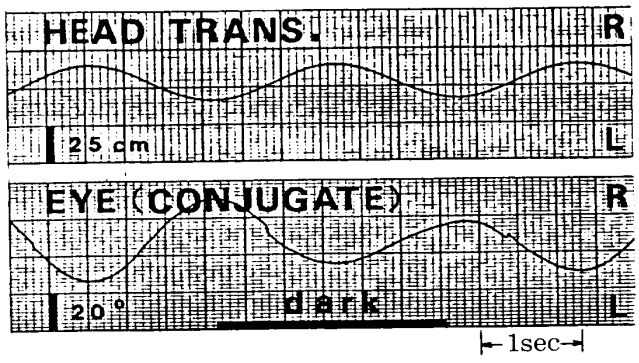


図7 (b)　頭を直線運動(左右)させたときの補償性眼球運動

の領域に限られている。これはTV カメラの視野が約40°あるのに比べて極端にせまい。にも拘わらず我々はまわりの広い視野を1つの連続した世界としてとらえることができるのはいうまでもなく目と頭を自由に動かせるからである。しかしTVカメラを動かして広い視野を次々とモニタテレビに映したとき、カメラの動き方を知らなければ対象物の空間的な配置は勿論、対象とカメラのどちらが動いたのかすら判然としないことはよく経験される。目や頭が動いているとき網膜から画像を受けとった脳も全く同じ問題に直面する筈である。

もし脳が自分の頭と目の動きを知っていれば静止空間に対する視線の方向を計算することができ、断片的な網膜像をはりあわせて脳の中に空間の3次元的な地図を描くことができるであろう。人間は短時間なら目を閉じていてもまわりの空間に対して正しい運動を継続できる。また視覚のフィードバックを用いず開ループ的に敏捷な手動作を正しく行えることなどを考えると脳の中にはかなり幾何学的に正確な3次元世界が構成され、これを用いて運動指令が発生されているように思われる。

脳は自分の眼の動眼機構の力学的な性質をよく知っており、頭に対する目の時々刻々の角度及び角速度を推定するモデルを眼球運動の中枢に構築しているという考え方がある。[14][15] そしてこの信号を用いて自分を中心とした周囲空間の把握をしていると考えられている。このことは眼球自体に外力を加え脳の意志とは異なる方向に向かせようとするとその角度だけ世の中の向きが変ったように知覚される現象[16]や、薬剤により動眼神経から外眼筋への信号伝達をブロックすると目を動かそうと試みる度にまわりの世界がその方向にジャンプするように知覚される現象[17]などから推定されている。図8はそのような実験の一例である。[16]

被験者の左眼は遮蔽し右眼に吸着力の強いコンタクトレンズを装着する。コンタクトレンズ表面につけたマッチ棒状の突起の先端から糸を張って他端に錘を吊下げる。被験者はこのようにして加えられた外力に逆らって正面の視標を注視し視線の向きを一定に保つ。図8 (b) はこの状況で錘の重さを種々に変え、注視視標が自分の正面からどれだけずれた方向に知覚されるかを指示させた結果である。実際の眼球の向きは一定でも脳が推定した眼球の向きが変ると知覚される世界の向きもそれに応じて変ることが示されている。

脳はまた静止空間に対する視線の速度を常にモニタしている。眼球の速度制御に重要な役割を果す前庭小脳には頭の回転速度の信号と眼球の頭に対する速度の信号を1：1の比で加算し、空間に対する視線の速度の信号を担った細胞が見出され

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

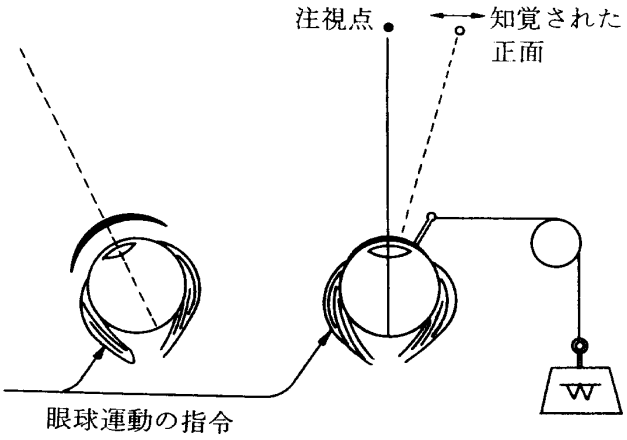


図8 (a)　眼球に加えた外力による空間の回転

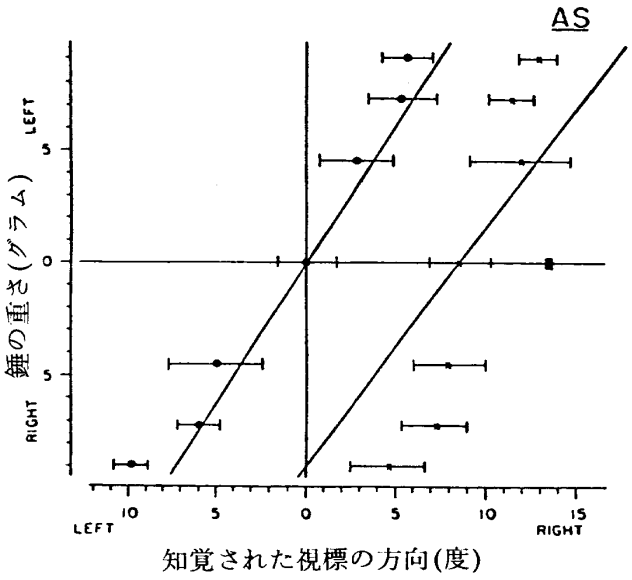


図8 (b)　知覚された空間の方向と外力の関係

ている。[18] さらに視線の速度と網膜上での像のスリップの速度の和から視覚対象物の静止空間に対する速度を知ることができる。[19] このようにして人間の目は自分の動きと対象物の動きの識別、さらには対象物の絶対速度の知覚ができる。

眼の動きの推定信号は頭頂連合野と呼ばれる領域に送られ大脳知覚領からの情報とミックスされている。この領域では自分の頭を座標原点とする3次元空間内の特定領域の対象物を注視したときのみ反応する細胞や、空間の中を特定方向に動く対象物を眼で追跡したときのみ反応する細胞など空間知覚に関連した働きをする細胞が多数見られる。[20][21] また空間内の特定領域に注意を集中するだけで反応する細胞もある。[22] これなどは脳に描かれた空間の地図の特定部分から情報を読み出す操作(想起)に相当すると思われ、ロボットの目においても必ず必要となる機能である。

この領域には視覚に関する情報だけでなく手足の動き、皮膚感覚など他の感覚器からの位置に関する情報が集中している。[21] 我々は手に触れた物体の形状を眼で見た形状と矛盾しない形で理解することができる。頭頂連合野はいろいろな感覚器から異なる種類の情報をまとめて互いに矛盾しない1つの空間の地図を構成する役割を果していると思われる。将来視覚だけでなく種々の感覚装置を搭載したロボットの開発においてはこのような頭脳が不可欠となるのではないだろうか。

7. むすび

以上視覚と運動の結びつきに関連していくつかの目の機能を述べた。3次元世界の脳内表現にはイメージとしての直接的な表現と、地図情報が抽象化された記述的な表現とが併用されているように思われる。そして2つの異なる表現が互いに連続的に接続され情報の出し入れがいともスムーズに行なえるように見える。また頭の中に描いた地図を用いて色々な向きの運動をプログラムする、あるいは頭の中の地図を回転させて考えるということが出来るからには3次元の座標の回転が容易にすばやく行なえるしくみももっていそうである。

本稿の話はどちらかというとハードウェアよりであったが、このようなソフトウェア側の問題もこれから大いに議論されなければならないと考える。

参考文献

(1) *Ejiri. M., Uno, T., Mese, M. and Ikeda, S., "A process for detecting defects in complicated patterns", Computer Graphics and Image Processing, vol. 2, pp. 326339 (1973)*

(2) *Naruse, M, Miyazaki, S., Yamada, T. and Igarashi, K., "Fully automated integrated wire bonding system", Proc. of International Symposium on Industrial Robots, pp. 87−97 (1979)*

(3) *Agin, G. J. and Duda. R. O., "SRI vision research for advanced industrial automation",*

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

Proc. 2nd USA−Japan Computer Conference, pp. 113−117 (1975)

(4) 谷内田正彦、"多面体の線画抽出"ロボット、白井良明編、共立出版、*(1976)*

(5) 白井良明, "画像理解", 情報処理, *vol.21, pp. 626−632 (1980)*

(6) *Yachida, M. and Tsuji, S., "A versatile machine vision system for complex industrial parts", IEEE Trans., C−26, pp. 882−894 (1977)*

(7) *Julesz, B., Foundation of cyclopean percecption, Chicago Press (1971)*

(8) *Hubel, D. H. and Wiesel, T. N., "Brain mechanisms of vision", Scientific American, vol. 241, pp. 130−144 (1979)*

(9) *Hofsten, C., "The role of convergence in visual space perception", Vision Research, vol. 16, pp. 193−198 (1976)*

(10) *Robinson, D. A., "The mechanics of human smooth pursuit eye movements", J. Physiology. vol. 180, pp. 569−591 (1965)*

(11) 笠井 健他、"頭部直線運動時の補償性眼球運動の解析", 電子通信学会技術研究報告, *vol, 81, MBE 81−12 (1981)*

(12) *Barr. C. C., Schultheis, W. and Robinson, D. A., "Voluntary nonvisual control of the human vestibulo ocular reflex", Acta Otolaryngologica, vol. 81, pp. 365−375 (1976)*

(13) 笠井 健、"眼球運動計測による人間の空間知覚の解析", 科研費研究成果報告書*(1982)*

(14) *Zee, D. S., Optican, L. M., Cook, J. D., Robinson, D. A. and Engel, W. K., "Slow saccade in spino-cerebellar degeneration," Archives of Neurology, vol. 33, pp. 243−251 (1976)*

(15) *Robinson, D. A., "Oculomotor control signals", Basic mechanisms of ocular motility and their clinical implications, Ed. by Lennerstrand and Bach−y−Rita, Pergamon Press (1975)*

(16) *Skavenski A. A., "Inflow as a source of extraretinal eye position", Vision Research, vol. 12, p. 221 (1972)*

(17) *Stevens, J. K. et al., "Paralysis of the awake human : visual perceptions", Vision Research, vol. 16, pp. 93−98 (1976)*

(18) *Lisberger, S. G. and Fuchs, A. F., "Role of primate flocculus during rapid behavioral modification of vestibulo ocular reflex I. Purkinje cell activity during visually guided horizontal smooth pursuit eye movements and passive head rotation, J. Neurophysiology, vol. 41, pp. 733−763 (1978)*

(19) *Robinson, D. A., "Is the cerebellum too old to learn ?", Eye movements, ed. by Brooks and Bajandas., Plenum Press (1977)*

(20) *Sakata, H., Shibutani, H. and Kawano, K., "Spatial properties of visual fixation neurons in posterior parietal association cortex of the monkey", J. Neurophysiology, vol. 43. pp. 1654−1672 (1980)*

(21) 酒田英夫他, "頭頂連合野の情報処理",神経の進歩, *vol. 21, pp. 1155−1167 (1977)*

(22) *Wurtz, R. H., Goldberg, M. E. and Robinson D. L., "Brain mechanisms of visual attention", Scientific American, vol. 246, pp. 100−107 (1982)*

NII-Electronic Library Service