

解 説

眼球運動の種類とその測定

鶴 飼 一 彦

北里大学医学部眼科 〒227 相模原市北里 1-15-1

(1993年10月8日受理)

Eye Movement: Characteristics and Method of Measurement

Kazuhiko UKAI

Department of Ophthalmology, School of Medicine, Kitasato University,
1-15-1, Kitasato, Sagamihara 227

1. はじめに

眼は動く。他人の眼を見ていれば良くわかる。自分の眼が動いているのは普段意識しない。眼はなぜ動くのか。人の視覚において、視力がよいのは網膜のごく一部のみ（いわゆる視線の方向）であり、視対象をはっきりと見るために眼か頭か身体全体を動かさざるを得ない。小さい部品の方が、速く効率よく動かせそうである。なお、網膜の周辺部では見えないわけではない。視野を狭めてみれば歩行も困難であろう。網膜の中心部と周辺部は異なる機能を果たしていると考えられる。

本号では、眼球運動に関する最新のトピックスが特集されている。ここでは、そのような最新の話題で何が問題になっているか、を理解するための基礎をできるだけわかりやすく解説したい。光学一般の分野の読者にとって視覚関係の論文は取っ付きにくいという話をよく聞く。それについては、視覚分野独特の言い回しや用語が原因になっていることもある。また、原著論文や最新の解説記事では、導入部が誌面の都合等で簡略化されていることもある。そういう点に留意しながら以下述べていきたい。本特集の解説論文を読む際の参考になれば幸いである。

普段、物を見ている際には、眼は決して滑らかな動きを示さない。非常に速く動いて、そこで静止し、また、非常に速く動き静止するという繰り返しがある。例外はいくつもある。まず、ゆっくりと動いている物体を眼で追っかける場合である。この時の眼球運動を明瞭に見せるデモが知られている。図1のように、自分の指をつい

たて（紙でもノートでも何でもよい）の上に見えるようにしてゆっくりと動かす。このとき眼は滑らかな動きをする。しかし、指の位置を少し下げて見えない位置にし、指の動きを眼で追おうすると今度は眼の追い方はピョンピョンという動きになる。指の位置は、指を動かす筋肉からのフィードバックでわかっているはずなのに、両者の違いは、見る目標の位置がわかっているかどうかではなく、実際に見えているかどうかである。視覚入力がないと滑らかな追い方はできないのである。また、どこか一点を見つめながら頭を左右に振ると、眼はその一点を見つめ続けられる。これは頭に対しては眼が動いていることになる。頭の運動を補償するような眼の動きが存在する。このように、眼球運動を見ていると、場合に応じていくつかの種類に分類できることがわかる。

このような眼球運動を記録する方法に関しては後に詳しく述べる。しかしながら記録はできなくとも、ここで示したデモのように肉眼での観察で多くのことがわかる。ただし、残念ながら、自分の眼球運動は見えない。誰か協力者を見つけて実際に観察しながら読んでいただきたい。

なお、文中、分・秒は角度の表示に使用し、sは時間の秒に対して使用した。

2. 眼球運動の生じる状況の分類

眼球運動はそれが生じる状況により以下のように大別される。本節では、サッケード、SPM、前庭動眼反射、頸部眼反射、輻輳・開散などの用語が説明抜きで出てくる

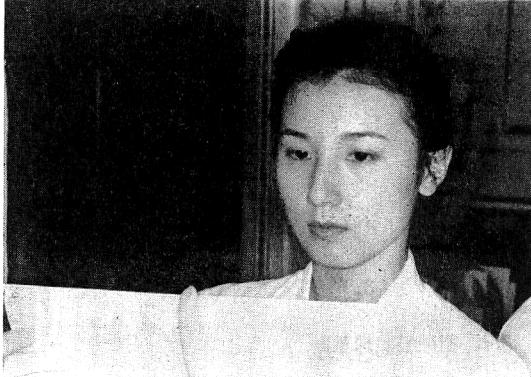


図 1 動きを追従する眼の動き。次には指を少し下にして隠れて見えなくなるようにしてやってみてください。

るが、それらについては後述する。

2.1 自由視眼球運動

通常の生活場面での眼球運動である。この状況は、次のようなサブカテゴリーに分類可能である。字をよむ、などの積極的に視覚を使う場面、車を運転しているときなど特定のものを捜してはいないがいわば未知のものに對して警戒中といった場面、また、何か考え事をしていて眼はあいているが何も見ていないような場面である。これらの場面での眼球運動は、けっして滑らかなゆっくりとした動きをしない。眼球はある点の方向に向いてしばらく静止していたかと思うと、次の瞬間には別の方向に向いて静止している、という高速の眼球運動の断続からなるのが基本である。このときの高速運動をサッケードと呼ぶ。自由視時の眼球運動では、どの方向を向いて眼球は止るか（停留点という）、という点が重要になる。また、動きの頻度、停留点と停留点の間隔なども眼球運動から視覚の働きや脳の活動を調べようとするときには重要な指標である。動きの速度などは後述するようにサッケードの性質として決まっている。

読書時の眼球運動¹⁾は、文章の何行かをまとめてみることはしない。一行ずつ読む。各行の中では、数文字ずつ跳ばしながら眼を動かす。一文字ずつ読むわけではない。読者のレベルにもよるが、例えば、本誌の文章だと一行に5箇所くらいの停留点をもつものが普通である。行の終わりまでいくと、今度は一回の動きで次の行頭に跳ぶ。絵や風景や顔などのパターンを見ているときは、対象全体をスキャンするように見ることはまずなく、パターンの中の注意を引くところ、顔であれば眼の付近、また図としての特徴点、などを集中的に繰り返し見る（図1をご覧になったとき、指の先と人物の顔を見たで

しょう）。人工的なパターン認識を行う際に主に解析される部分との類似から、眼球運動停留点の分布が被験者のパターン処理過程や思考過程までを反映していると考えることもできる。デザインの評価²⁾や画像の評価³⁾に眼球運動を利用しようという試みは、このような考え方の延長線上にある。周辺視野のどこかに何か注意を引くものが見えると眼はそちらに動く。現在見ている方向がすでに十分注意を引いている場合には周辺視野に現れた新たな注意を引くものに気づかないかも知れない。眼球運動を測定すれば現在どの位注意を払っているかを測定できよう⁴⁾。運転の安全にとって重要な研究である。

なお、注視点が奥行き方向に分布するときは幅轍・開散眼球運動を伴う。また、頭が動いているときには、頭部と眼との協調運動が起こる。

2.2 追従眼球運動

これは動いている物体を視力のよい中心窓で捉えるための運動であり、物体が滑らかに動き、その速度が約30度/s以内であれば眼球も滑らかに動く。これを滑動性追従眼球運動と言う。物体の速度が約30度/sを越えるとなめらかな動きだけでは追いきれなくなり、時々サッケードが混入して追従誤差を補正するが約60度/sまで滑動性の追従が可能である。

このほか列車の窓から外を見ているときのように、移動物体が大きな視野を占め、つぎつぎに新しい物体が出現するときは、追従運動は高速に可能となり、眼球がある程度追従すると急速な戻しのサッケードが出現する。この繰り返しを視運動性眼振（OKN: opto-kinetic nystagmus）という。横軸に時間、縦軸に眼球の向きをとって記録すると鋸歯状波となる。一般に鉄道眼振と呼ばれることがある。この運動は、不随意の反射運動であり、止めたくとも止らない。高速追従性、不随意性、必要な運動視野の大きさ、など滑動性追従眼球運動とは異なった運動である。

物体の運動が観測者に対して前後方向の成分をもつ場合に物体を注視すると幅轍・解散運動が生じる。視軸に直交する面における物体の面内回転（たとえば縞模様がくるくる回転している）に対しては回旋眼球運動が誘発される。

実際には物体の動きに対応して頭も動く場合が多い。この場合には前庭動眼反射も生じている。

2.3 固視時不随意微小眼球運動（固視微動）

一点を固視しているときには眼は動かないよう見える。しかし、装置により測定してみると、眼球は静止しないで、非常に小さな動きを示す。この小さな不随意の

眼の動きを固視微動という。動きが小さいので測定は難しい。固視微動は速度、頻度、大きさなどからトレモア、ドリフト、フリックの3種に分類される。このうちドリフトは1~30秒/sのゆっくりとした運動である。フリックは、その振幅-最高速度の関係からサッケードと同一性質の運動であると考えられ、マイクロサッケードともよばれる。振幅が1~25分程度のものが多い。頻度は条件により異なるが1~3回/s程度である。一部はドリフトで中心窓から外れた視対象に戻す動きであるが、それのみではない。両眼共同運動であるがときに両眼での大きさが異なる。トレモアは高頻度(50~100Hz)で非常に小さな動き(振幅5~15秒)でよほど精密な装置を用いないと観測できない。

この動きは何のためにあるのだろうか? わからない。わからないが、ある細工をしてこの動きを無効にしてしまうと視覚は完全にフェイドアウトしてしまう(静止網膜像)。自分の網膜上の血管が見えないのは血管は眼が動いても常に網膜上で同じ位置にあるためである。光の受容器が光ではなく光の変化をとらえているのだとすれば説明が付きそうに思われる。実際は、動きを無効にする細工が不完全のとき視覚が一部回復するのであるが、このときの回復の仕方が、パターンとして一まとまりになったものが見えてくるという現象があるため、高次の中枢の機能であろうと考えられている。先に固視微動は不随意と書いたが、どこか一点を一所懸命に眼を動かさないように頑張って見つめると、ドリフトはある程度減らすことができる(フリックの一部も結果的に減少する)。したがって不完全ながら静止網膜像のデモが可能である。図2の中心を頑張って見ていただきたい。見えがどのように変化するであろうか?(この現象の説明は

実際にはここで書いたほど単純ではない。)

2.4 視覚非関連眼球運動

目をつむっていても起きる種類の眼球運動のことをいう。からだの姿勢などの関連で起こる眼球運動として前庭動眼反射、頸部眼反射などがある。これらの運動時には回旋運動も多く含まれる。このほか睡眠時のREMもよく知られている。

3. 眼球運動の分類

3.1 衝動性眼球運動

サッケード(saccadic eye movement, saccade)とも呼ばれる。速い運動で、最大速度は振幅が大きくなるに連れて速くなる(振幅0.5~40度で最大速度30~700度/s)。1秒間に2回転してしまうほどの速さであるが、もちろん1秒間は続かない。TVカメラで眼を拡大撮影しビデオに記録し、コマ送り再生してみると、しばらく同じ位置、突然流れた像が1~2フレーム、次からはまた静止(先ほどとは異なった位置)となってしまう程度の継続時間である(もちろん最近の電子シャッター付きのTVカメラでは流れた像の代わりに移動中の眼が静止して写る)。振幅と最大速度の関係はグラフ上で直線となる。自由視眼球運動の大部分、OKNなどの眼振の戻りの動き、固視微動内のフリックはいずれもサッケードである。したがって、このグラフ上で同一直線にする。この運動中は視覚によるフィードバックが行われず、運動終了までの軌跡は運動の大きさのみにより決められ、すべては運動前に決定される(プレプログラムされている)。サッケード後の眼球位置が目標点とずれていることもありうるわけで、その場合には補正サッケード(通常は小さい)が生じる。サッケードは連続して生じる場合でもインターバルが少なくとも200ms必要である。

眼球運動中は網膜の像がぶれる。ぶれた像を情報として取り込まないような仕組みが視覚系にある。これをサッカディックサプレッションという。また、サッケードの前後では網膜の像がずれている。しかしわれわれは網膜像の位置が視野全体でずれたからといって、世界が揺れたという印象は持たない。世界は静止して見える。このためには、像がずれてもそれは眼球運動のせいですよという補正が必要である。この補正の仕組みについての研究は推理小説を読むように面白い^⑤。詳細はここでは触れないが、図3のように眼を外から指で押してみていただきたい。世界が揺れてみえませんか? このことから像の補正には眼を動かそうという信号が必要である。

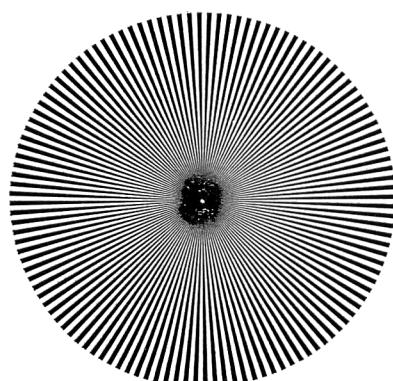


図2 中心をがんばって固視してください。
眼を動かさないように。

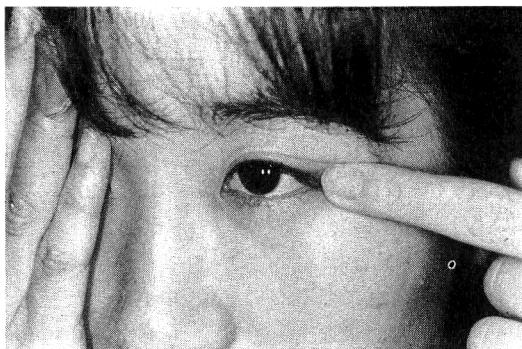


図 3 眼を押してみてください。（角膜反射が二つあるのは光源が2灯あるため）

と考えられている。

3.2 滑動性追従眼球運動

滑動性追従眼球運動 (SPM: smooth pursuit eye movement) は、視標を中心窓で捉えて追う、スムーズで緩やかな両眼共同運動である。その潜時は約 125 ms である。SPM は生後 3 カ月くらいになると出現し、約 1 年後には十分発達する。この系は視覚入力が不可欠なクローズドループ制御である（図 1 参照）。実際には、位置の誤差を制御信号に使うよりは速度の誤差を信号とした方が制御が容易であり、そのようなシステムを構成しているようである。その場合の位置補正是サッケードが担う。

3.3 幅輶・開散運動

近くの物を見るときに引き起こされるのが幅輶 (convergence) であり、反射的および随意的な運動である。その潜時は 160 ms、最大速度は 20 度/s と遅い。近くから遠くへ注視点を移すのが開散 (divergence) である。当然、他の眼球運動とは異なり、両眼の動きは反対方向の成分をもつ。近くの物体と遠くの物体では両眼で視差をもつ。このとき、注視点の網膜ずれをなくそうとするのが融像性の幅輶眼球運動で、注視点以外での網膜のずれ（視差）を一つに融合して見えるようにするメカニズムが脳の働きとして別にある。一般的には後者の働きが立体視の大きな要因となっており、幅輶自体はあまり奥行き知覚に関与していない⁶⁾。ただし、大きさの恒常性という、ここでは触れないが別の重要な視覚機能と密接な関係がある。

長く近方視をした後などでは、暗所での幅輶状態である幅輶トーヌスが変化してしまう。これを幅輶順応といいう⁷⁾。作業による疲労などの関係が今後注目される。

図 4 に幅輶した状態の眼を示す。



図 4 幅輶した状態。両眼のプルキンエ像がどのようにずれているか見てください。

3.4 前庭動眼反射

前庭動眼反射 (VOR: vestibulo-ocular reflex) は頭を傾けないで回転させたときに視線方向が変化するのを自動的に補おうとする眼の動きである。物を見ている場合には、非常に正確であり、視線の空間的な変化がない。頭の運動と眼の運動がちょうど打ち消されている。目をつむっている場合にも起きる（やってみてください）が、眼の運動量は小さくなる。頭を左右に傾けたときには回旋眼球運動となる。主として、耳にある半規管と呼ばれる頭の動きのセンサーから前庭と呼ばれる平衡感覚をつかさどる神経経路により制御される。また首などの筋肉の伸び具合を検出するセンサーからの信号も眼球運動に影響を及ぼす（頸部眼反射。VOR とは区別して考える）。首を支える筋肉などが無重力状態では地上とは全く異なることを考えて、宇宙空間での眼球運動実験が行われた⁸⁾。

3.5 回旋眼球運動

視線を軸として回転するような眼の動きである。眼を動かす筋肉は水平・垂直方向の一眼につき 4 本あれば原理的には足りるはずであるが、現実には 6 本ついている。6 本の筋肉の協調が完全ではないと眼を動かしたときに回旋運動が生じてしまう。また首を傾けるとこの回旋が反射的に引き起こされる。追従性回旋（像が回転したとき）なども存在している。

4. 眼球運動測定法

4.1 総 論

眼球運動を他覚的に記録しようというこころみはすでに 1890 年代からあったという（詳細な眼球運動測定法の歴史については、苧阪⁹⁾や吉賀¹⁰⁾を参照していただきたい）。そのころ用いられた方法は、一種のコンタクトレンズを眼球に嵌め込み、そこから眼の動きをメカニカルリンクを介して記録するという原理による。このような測定法は、眼に異物が接触する必要があり、できれば避けたい。しかしながら、眼の動きを直接測定するということは研究者にとっていつの時代でも魅力的であることも確かである。装置の一部が眼と一緒に動いている以上は誤差が小さいであろうという安心感が得られるし、また目をつむっているときにも動きを捉えることができる。最近でもサーチコイル法とよばれる方法が主として生理学者の間で好んで用いられている。これに対し非接触測定といえば光学的測定が考えられる。現在、3種類ほどの光学的測定（角膜反射像位置、各強膜反射率差、画像解析）が眼球運動測定に使われている。また、臨床医学の分野では、眼球に常在している電位を周囲の皮膚から拾うという EOG 法がいまでもよく使われている。データの精度よりも簡便さが重視されるということも往々にしてありうることで、そういう場合の選択肢として省くわけにはいかない。スペースシャトルという狭い空間で専任の験者なしでセッティングできる方法は他にないのである⁸⁾。

これら 5 種類の眼球運動測定法は一長一短があり、場合により使い分ける必要がある。それぞれの方法の特徴と比較については文献¹¹⁻¹³⁾を参照していただきたい。以下、各方法の原理のみを簡単にまとめる。

4.2 サーチコイル法

変動する磁場中におかれたコイルはコイルと磁場のなす角により強さが変化する電位を生じる。強膜コンタクトレンズ（普通に使うコンタクトよりも大きい）の内部にコイルを巻き込み被験者に装用させ、被験者を磁場中における眼球運動（実際には視線の運動）が測定されることになる。この方法はサーチコイル法と呼ばれ¹⁴⁾、Robinson¹⁵⁾により最初に開発された。通常は被験者の頭から見て、左右方向と上下方向に 2 種の変動磁場を与える。このようにすると眼球が正面を見ているかぎり電位は発生しない。視線が正面からずれると電位が発生する。左右方向と上下方向は、印加磁場の周波数や位相により分離する。特殊なコイルの巻き方で回旋眼球運動を

測定することもできる。眼球とコンタクトの間でスリップがなければ、精度、測定範囲（位置、速度）、安定性（時間的、個人差、較正容易さ）にすぐれ、理想的である。眼をつむっていても測定できる。しかし、スリップしないようにするにはコンタクトと角膜が密着しなければならない。浸襲を与える可能性がある。コイルからでているリード線が刺激となり痛みもある。角膜への影響を考えると長時間、長期間の実験はできない（1 回 30 分、週に 2 回まで）。医師の立ち会いが必要であろう。リード線の問題は最近改良された。コンタクトのコイルに生じた電位を眼の近くにおいた別のコイルに誘導する方法である¹⁶⁾。

4.3 角膜反射法

ポートレイト写真を注意してみると、眼の部分に外の景色が小さく映っている。特に、屋外では太陽の、屋内では照明光源の反射像が明瞭に見られる（図 4 参照）。これは角膜表面が小さな凸鏡面の役をするためである。頭と光源が動かなければ、眼の動きにより光源の反射像は動く。したがって、この反射像（第 1 プルキンエ像という）の位置を測定すれば眼球運動は測定可能である。これを角膜反射法といいう^{17,18)}。非接触で水平・垂直に対し同一精度で広範囲に測定できる。しかしながら、1 mm の反射像の動きが 10 度の眼球運動に相当するため、測定中に頭が 1 mm 平行に動いてしまうと 10 度という大きな誤差を生じる（「平行に」とは回転しないでという意味）。通常は被験者が歯型を噛むことが不可欠である。あるいは装置全体をヘルメットに載せればヘルメットが動かないかぎり眼球運動が正確に記録される。頭の動きの影響をキャンセルする別の方法として水晶体の後面からの反射像を同時に利用する方法がある。水晶体後面は凹面鏡として働く。したがって、眼球運動による眼の回転では角膜表面からの反射像と水晶体後面からの反射像（第 4 プルキンエ像という）は反対方向に動くが、頭の平行移動では両者は同様に動く。この現象をうまく利用すればよい¹⁹⁾。本法の時間的空間的分解能は使用するポジションセンサーの能力に依存する。TV 系を位置測定に使用すればサッケード中の時間経過を追うことは不可能である。

プルキンエ像を頭に取り付けた TV カメラで写し、やはり頭に付けた別の TV カメラで被験者の前方を写した像と合成すると、前方の景色の中でどの点を被験者が注視しているかを映像として記録することができる。これをアイカメラといい、Mackworth and Mackworth²⁰⁾により最初に開発された。心理実験や行動実験などで応

用が行われ、装置も市販のものが手にはいる。自動車の安全運転の教材として、運動中の注視点の動きをご覧になった方も多いであろう。

4.4 リンバストラッキング法

しろめ（強膜）とくろめ（角膜）の境界付近をやや広く照明し、その反射光量を測定すると、くろめが照明範囲に近づくと反射光量は低下し、離れると増加する。このように角・強膜反射率差を利用して眼球運動を測定する方法である²¹⁾。リンバス（limbus）とは角膜と強膜の境界のことである。通常はくろめの中心よりやや下方で両側の反射光を二つの素子で計測し、その差をとる。こうすることによって眼球の上下方向の動きによる反射光量の変化をキャансセルすることができる。したがって、水平方向の眼球運動を主対象とする。受光素子の配置を変えても、眼瞼（まぶた）により垂直方向の測定は困難である。左右二つの素子の和を垂直方向の眼球運動の信号とする場合もあるが、精度は水平方向に比べて一桁落ちる。照明光源として赤外光を使用すれば被験者の視覚を妨げない。

測定範囲は中心から左右それぞれ 20 度くらいまで、線形性が良いのはせいぜい 10 度くらいまであまり広くない。しかしながら、発光・受光素子は小型の LED やフォトトランジスターが利用できるため眼鏡枠に簡単に取り付けられ、頭の動きの影響はない。電気回路も差動増幅とオフセット・ゲイン調整のみで製作できるため、工学分野では好んで使われる。フリックのような小さな動きも精度良く測定できる。われわれの経験では角度の数分程度の動きはさして調整することもなく測定可能である。ただし、ちょっとした涙の動きや乾き具合によって信号の変動があるため、ドリフト様の動きの計測はあまり得意ではない。キャリブレーションは頻繁に行う必要がある。なお、本法によってもアイカメラが作製可能である。眼球運動を利用して画像評価を行おうという試み³⁾ もこの方法を使用する。

4.5 画像解析法

近年、画像解析装置の能力／価格が向上してきた。眼を TV カメラで映し、その像をコンピュータで（場合によっては人間の眼と手で）解析することにより眼球運動を測定する方法である。通常の TV レートではサッケードの精密な測定は無理である。簡便には瞳孔の中心位置を用いる。これならリアルタイム測定も容易である（瞳孔部分は暗い。閾値処理による二値化と重心座標の計算でよい）。瞳孔中心と角膜反射像を同時に解析すれば頭の動きのキャансセルも可能である。この方法は離れたと

ころから視線の方向を検出できる可能性がある²²⁾。両眼の視線の差から輻輳状態を測定することも可能である。輻輳眼球運動と関係の深い調節・瞳孔面積を静的ながら同時測定した例もある²³⁾。虹彩（アイリス、瞳孔の周りの絞りに相当する部分。瞳孔は「あな」で何もない）の模様（紋理という）を解析すれば回旋眼球運動も測定できる²⁴⁾。また、眼底の血管パターンからも回旋を含む眼球運動が解析できる^{25,26)}。このような解析では、能力が上昇したといってでもリアルタイムでの画像解析はやはり高価で、VTR 等の利用が普通である。

4.6 E O G

EOG (electro-oculogram) は前述のように眼球に常在している電位を周囲の皮膚から拾うという方法である。電位自体は網膜にその発生源をもち 1 mV 程度である。簡便で良さそうに見えるが、電位自体一定ではないし、眼球と測定する皮膚の間の抵抗や皮膚と電極との接触抵抗が日々刻々と変化していく。また、両眼の動きを分離して捉えることは不可能で、極端な話、一眼のみが動いたときにも、静止しているはずの他眼にも大きな動きが記録されてしまう。データの精度よりも簡便さが重視されるときに使用される。

4.7 今後の発展

眼球運動測定法は 100 年の歴史をもつ。その間、測定法が発展するたびに視覚に関する新しい知見をもたらしてきた。しかし、上に見てきたように、どのような研究対象にも使えるという万能の方法はいまだない。目的に応じて方法を使い分け、さらに自分の興味にあわせて各方法に工夫を加えて使用しているのが現状であり、当分はそのような状況が続くであろう。基本的に新しい原理はなかなかでないであろうが、研究目的（需要）によっては既存の方法にも新しい工夫が必要となる。一例を次にあげる。

われわれは他人の視線を感じ取ることができる。誰か目の前にいる人が自分の方を見ているのか、あるいは自分の後ろを見ているのか、たまたま、無関係の方向を見ているのか、相手の眼を見ればわかる。相手が無意識のうちに眼を動かすことから感情を読み取ることさえ可能である。これは人と人のコミュニケーションにとって重要な。一方、情報機器と操作者の間のコミュニケーションともいべきヒューマンインターフェースを高度化することは人に優しい機器を作るうえで重視されている。したがって、人の視線を画像解析により遠方から解析する装置が実現されることが期待される。人間にわかることだから機械にもわかるようにしたいという技

術者として挑戦すべきテーマと考える人達も多い。また、たとえば、視聴率として何台のTVがそのチャンネルを映しているかではなく実際に何人の人がどのくらい興味をもってそのTVを見ているか、を調べるなどの具体的応用のニーズもある。試みがすでになされている²²⁾。これに対し本号で取り上げられている視線入力カメラ²³⁾は操作者の無意識のうちの視線移動を利用しているわけではなく、また検出対象となっている眼の位置も制限されている上に操作者が積極的に視線を移動させる必要があるが、研究段階ではなく一般市販品に組み込んだという点では画期的なことであり、今後の発展が大きく期待される。

5. む　す　び

眼球運動は面白い。眼球運動にはいろいろな種類がある。個々の運動の制御も生理学的に興味深い。実験室的に眼球運動の制御系を視覚と関連させて考えるときは眼球運動のみを考えればよい。しかし、自然な状況で視覚のもつ情報収集機能を考えるときは視線の動き、すなわち頭（身体）の動き+眼球運動として考えねばならない。いずれにしても、視覚を考えるときには眼が動くということを無視することはできない。眼が自由に動かせるときとどこか一点を見つめているときでは実験結果が変わってしまうことが多い。眼球運動の研究では測定法の議論も重要である。本稿では最新の知見を取り上げるよりもわかりやすさを優先した。したがって引用した文献はオリジナルのものが少なく解説が多くなってしまった。ご容赦願うとともに興味をもたれた方はぜひこれらの解説をお読みいただき、そこで引用されている原著論文まで進んでいただきたい。

文　献

- 1) 斎田真也：“読みと眼球運動”，眼球運動の実験心理学，宇阪良二，中溝幸夫，古賀一男編（名古屋大学出版会，1993）pp. 167-197.
- 2) 三浦利章：“運転場面における視覚的行動：眼球運動の測定による接近”，大阪人間科学部紀要，5 (1979) 253-289.
- 3) 山田光穂：“複数の観察者の眼球運動の同時分析”，光学，23 (1994) 23-24.
- 4) 吉本照子：“アイカメラ：デザイン評価に対する応用”，Vision, 3 (1991) 89-94.
- 5) 石田泰一郎：“跳躍眼球運動時の視野の安定”，光学，23 (1994) 9-16.
- 6) 下野孝一：“輻輳運動と両眼ステレオプロシス”，光学，23 (1994) 17-22.
- 7) 鵜飼一彦：“輻輳と調節における順応”，眼球運動の実験心理学，宇阪良二，中溝幸夫，古賀一男編（名古屋大学出版会，1993）pp. 79-99.
- 8) 古賀一男：“宇宙実験に随伴する困難な技術的問題”，光学，23 (1994) 27-28.
- 9) 宇阪良二：“眼球運動研究史”，眼球運動の実験心理学，宇阪良二，中溝幸夫，古賀一男編（名古屋大学出版会，1993）pp. 3-31.
- 10) 古賀一男：“眼球運動測定法”，眼球運動の実験心理学，宇阪良二，中溝幸夫，古賀一男編（名古屋大学出版会，1993）pp. 33-57.
- 11) L. Young: “Methods and designs: Survey of eye movement recording methods,” Behav. Res. Meth. Instrum., 7 (1975) 397-429.
- 12) 斎田真也：“各種眼球運動測定方式の比較”，Vision, 3 (1991) 95-100.
- 13) 鵜飼一彦：“眼球運動測定法雑感”，Vision, 3 (1991) 101-104.
- 14) 高木峰夫：“サーチコイル法による眼球運動測定”，Vision, 3 (1991) 67-72.
- 15) D. A. Robinson: “A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field,” IEEE Trans. BME, 10 (1963) 137-145.
- 16) J. Allik, M. Rauk and A. Luuk: “Control and sense of eye movement behind closed eyelids,” Perception, 10 (1981) 39-51.
- 17) 奥山文雄：“角膜反射による眼球運動の解析”，Vision, 3 (1991) 81-88.
- 18) 斎田真也，池田光男：“眼球運動測定装置の一方法”，光学，4 (1975) 286-288.
- 19) T. N. Cornsweet and H. D. Crane: “Accurate two-dimensional eye tracker using first and forth Purkinje image,” J. Opt. Soc. Am., 63 (1973) 921-928.
- 20) J. F. Mackworth and N. H. Mackworth: “Eye fixation recorded on changing visual scenes by the television eye marker,” J. Opt. Soc. Am., 48 (1958) 439-445.
- 21) 井上哲理：“リンバストラッカーによる眼球運動測定法：原理と実際”，Vision, 3 (1991) 77-80.
- 22) 伴野 明，飯田宗夫，小林幸雄：“非接触視線検出のための特徴点抽出法”，信学報，PRU 88-73 (1988) 17-24.
- 23) 香取順子，小町祐子，鵜飼一彦，石川 哲：“ビデオレフラクション法による両眼調節静特性の測定”，眼臨，86 (1992) 1473-1477.
- 24) M. Hatamian and D. J. Anderson: “Design considerations for a real-time ocular counterrole instrument,” IEEE Trans. BME, 30 (1983) 278-288.
- 25) 鵜飼一彦，石川 哲：“赤外線テレビ眼底カメラによる眼球運動の測定”，光学，10 (1981) 253-259.
- 26) 小島ともゑ，佐藤友哉，可児一孝：“Fundus Haploscopeによる眼球運動の測定”，Vision, 3 (1991) 73-76.
- 27) 鈴木謙二：“カメラの視線入力AF技術”，光学，23 (1994) 25-26.