

角膜反射による眼球運動の測定

奥 山 文 雄

東京医科歯科大学眼科
〒113 東京都文京区湯島1-5-45

1. はじめに¹⁾²⁾

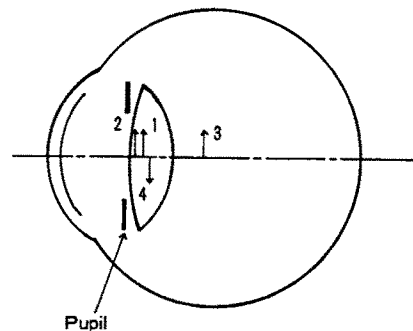
女性のポートレート写真で目に Eye Catch を入れることは、基本的なテクニックの1つであるが、これは角膜表面が凸面鏡の役目をして虚像をつくるためにできるものである。この虚像が眼球の回転により移動することを利用して、眼球運動を測定する方法が角膜反射法である。この方法は、視線の検出や眼球運動の測定に広く利用されている。角膜反射法による装置は視線検出と眼球運動の動的解析などの目的、測定する眼球運動の種類でも、その性能や構成は異なる。Saccade (衝動性眼球運動) や nystagmus (眼振) の quick phase などの高速眼球運動は最大 $600^{\circ}/\text{sec}$ 以上の速度をもち、この測定には高速性が要求される。一方、smooth pursuit (追従性眼球運動)、vergence (輻湊) は最大速度が $30^{\circ}/\text{sec}$ 程度であるから、高速性は要求されない。また、フリック (flick)、トレモア (tremor) などの固視微動は振幅が $1 \sim 20'$ (0.3°) であるから、高い検出感度が要求される。

角膜反射法の実用上の欠点は、頭の動きと眼球運動が区別しにくいことであるが、頭の動きをキャンセルする方法も提案されている。それらの方法には水晶体後面からの反射を利用するものや瞳孔を利用するものなどがある。ここでは角膜反射による眼球運動の基本的な測定原理と装置について述べる。

2. 基本原理

原理を説明する上では眼球を角膜、前房水、水晶体、硝子体の光学要素からなる光学系と考

えることができる。眼球に光を照射した場合、光は角膜前面、角膜後面、水晶体前面、水晶体後面の各屈折面で反射される。図1に示すように、これらの屈折面からの反射像を各々、第1、2、3、4プルキンエ像 (Purkinje) と言う。これらの中で、角膜前面の反射率は約2.4%と言われ、角膜反射像 (第1プルキンエ像) は最も明るい反射像である³⁾。これらの反射以外に各屈折面での多重反射もあるが、明るさがこれらと比べ極めて暗いため、測定では無視できる。角膜後面からの反射はその位置が角膜前面に近いから、角膜前面の反射像を捉える際には障害となる。また、水晶体前面は調節時に移動するため、調節測定に利用されるが、水晶体後面は調節時にもあまり移動しないため、眼球運動の測定に利用される³⁾。



Purkinje image	Reflected surface
1st	Anterior surface of the cornea
2nd	Posterior surface of the cornea
3rd	Anterior surface of the lens
4th	Posterior surface of the lens

Purkinje images of the unaccommodated eye

図1 眼球の各屈折面からの反射像

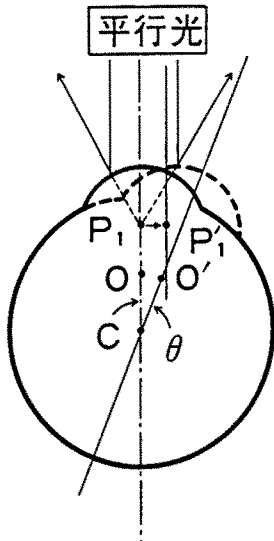


図2 眼球の回転と角膜反射像
(第1プルキンエ像)の移動

説明を簡単にするため角膜前面の反射だけを考える。図2のように眼球に正面から平行光を照射した場合、眼球の回転に伴う角膜反射像の移動を示す。角膜表面を滑らかな球面と近似すると、正視眼(近視、遠視や乱視でない眼)では日本人の角膜曲率半径は、7.4~7.5mmと言われている。角膜は凸面鏡と同じ役目を果たし、曲率半径の半分3.6~3.8mmの位置に平行光の虚像 P_1 ができる。角膜の曲率中心は角膜から7.4~7.5mmの位置にあるが、眼球が回転する中心(眼回旋点)Cは、近似的に角膜から網膜側に約13mmの位置にあると言われている。眼球が角度 θ だけ回転すると、角膜の曲率中心と眼球回旋点の位置が違うため、角膜中心はOからO'へ移る。このとき、角膜反射像 P_1 は

P_1' に移動する。眼の正面から見た $P_1 \rightarrow P_1'$ の移動距離 ΔD は、

$$\Delta D = OC \sin \theta$$

である。回旋点距離と角膜曲率半径の差OCは大体6mmであるから、表1のように角膜反射像の移動量は眼球の回転角度1度で約0.1mmになる。視線検出や眼球運動測定には、前眼部をTVカメラや2次元センサー撮影し、その中から角膜反射像を電気的に抽出する方法がとられる。図3に装置の概略を示す。光源は被験者の視野を妨害しないため、やや斜め方向に置かれ、TVカメラもやや斜めに置かれる。前眼部を撮影したビデオ信号から電気回路または画像処理装置で、角膜反射像の位置が連続的に抽出され、アナログ量で出力される。

この方法の欠点は先に述べたように頭の動きと眼球の動きが区別できない点である。眼球が動かずに頭が0.1mm動いた場合でも、角膜反射像は0.1mm移動する。そこで、高い精度で測定したい場合には頭の固定という拘束が必要となる。この欠点を除くためには、頭の動きを同時に測定して角膜反射像の動きから引けば、真の眼球の動きが求められる。この方法には後に述べる第4プルキンエ像を利用する方法、瞳孔を利用する方法などがある。

さらに、測定精度を向上させるためには、角膜反射像は点像ではなく光強度分布をもっているから光分布の中心を検出することや、反射光量が回転角度とともに変化することを考慮しなければならない。

表1 眼球の回転角度と角膜反射像の移動距離

回転角	横方向移動		誤差	前後方向移動
θ	$6 \sin \theta$ (mm)	6θ (mm)	$6 \sin \theta / 6 \theta$	$6(1 - \cos \theta)$ (mm)
10°	1.042	1.047	0.5%	0.09
20°	2.052	2.094	1.9%	0.36
30°	3.000	3.141	4.5%	0.80

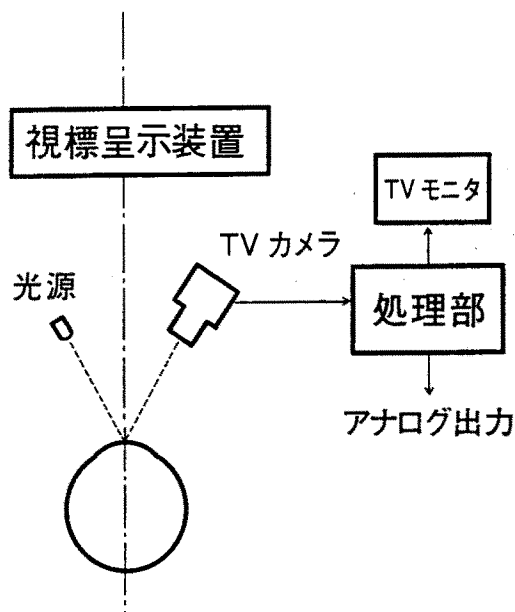


図3 TVカメラによる眼球運動の測定

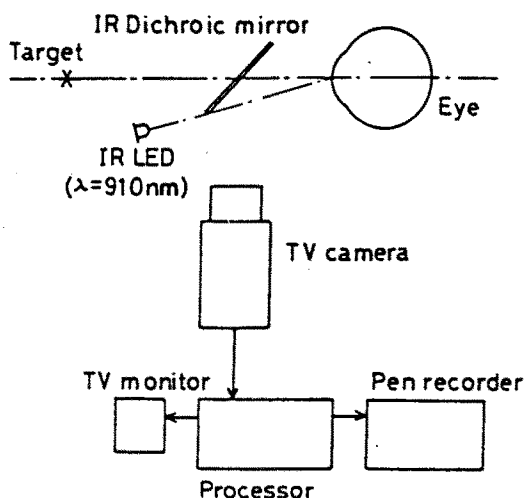


図4 眼球運動測定装置の
ブロックダイアグラム

3. TVカメラによる眼球運動測定⁴⁾

単眼の眼球運動を測定する眼球運動測定装置の実例を示す。図4にこの装置のブロックダイアグラムを示したが、光源には被験者の眩しさをなくすため発光波長910nmのLED、TVカメラには赤外線用CMOS固体撮像素子（日立HE97211）を用いた。被験者の視野を妨げないように、眼前には可視光透過、赤外線反射の赤外線ダイクロミックミラーを置き、赤外線による角膜反射像をミラーで反射させカメラで捉えている。実際の測定では目じりからの反射光を角膜反射像から区別するため、図5上に示すように長方形の測定範囲を設定し、この中だけで計測する。このときのビデオ信号は図5下に示すように、角膜反射像部分は高い電圧に瞳孔部分は低い電圧となる。

図6に電気回路図を示すが、この回路の主な機能は角膜反射像の位置を抽出することにある。すなわち、図5下のように角膜反射の部分はhigh level、その他の部分はlow levelのビデオ信号を得ることができるから、ビデオ信号を一定電圧と比較して2値化し、角膜反射像の位置を抽出する。ビデオ信号の各フィールド毎に水

平同期信号を基準に水平カウンターを動作させ、角膜反射像までの時間を計測し、カウンターの値をD/Aコンバーターで変換して水平方向の眼球位置に相当する電圧を出力する。同様に、垂直方向も垂直同期信号を基準にして垂直方向の眼球位置を出力する。この装置では、眼球がある方向を向いた位置を基準角度（0度）にするため、レジスターにある方向を向いた時の値を記録する機能がある。この装置により、水平と垂直眼球運動を同時にサンプリング周波数60Hz、遅れ時間16.7msec、検出感度0.4度で測定することができる。

TVカメラによる測定は、各フィールド毎に画像を取り込むため、測定のサンプリング周波数は60Hzで1フィールド分の遅れ時間16.7msecが生じるが、比較的、安いコストで装置ができる長所がある。この装置で、視線検出やsmooth pursuit（追従性眼球運動）、vergence（輻湊）など眼球運動の測定はできるが、saccadeの正確な測定にはサンプリング周波数が低くすぎて適さない。測定範囲、角度の検出精度は主に光学系の倍率、センサーの分解能や電気ノイズによって決まる。

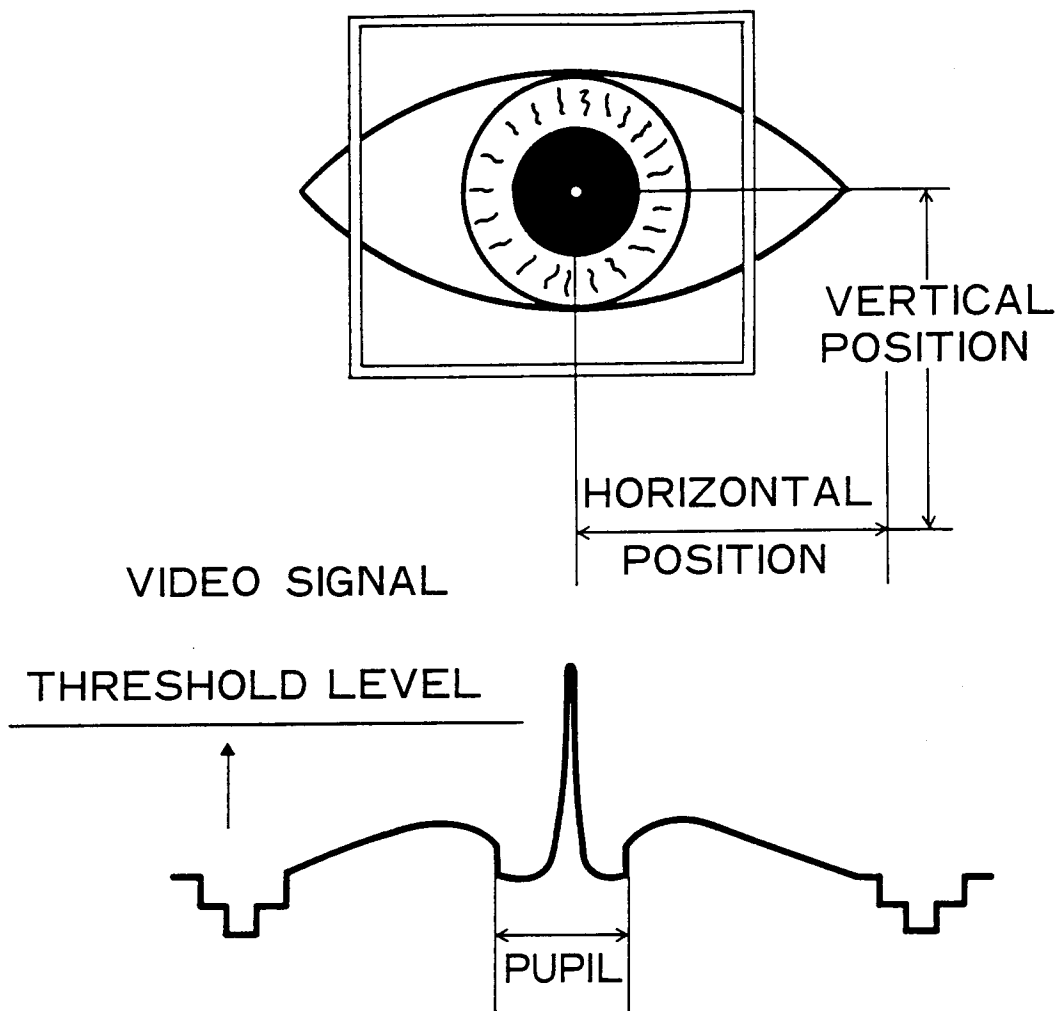


図5 テレビモニター画面とビデオ信号

4. 高速眼球運動測定

角膜反射を検出する方法にセンサーを利用すると、測定範囲、検出感度、時間分解能は主にセンサーの画素数、分解能、サンプリング周波数で限定される。ここでは、サンプリング周波数を上げて時間分解能を上げた例を2つ示す。

4.1 ライン・イメージ・センサーの眼球運動測定装置⁵⁾

この装置は衝動性眼球運動などの高速眼球運

動を測定するため、TVカメラの代わりに水平眼球運動だけをサンプリング周波数500Hzの1次元センサー（レチコン社、RL-512C、画素数512）で測定する装置である。装置の光学系を図7に示す。この装置は、前眼部をモニターしながら角膜反射像のピント合わせと位置合わせをするためにTVカメラの眼球運動装置も備えている。図7の円柱レンズは角膜反射像（第1プルキンエ像）を垂直方向だけ拡大し、その焦

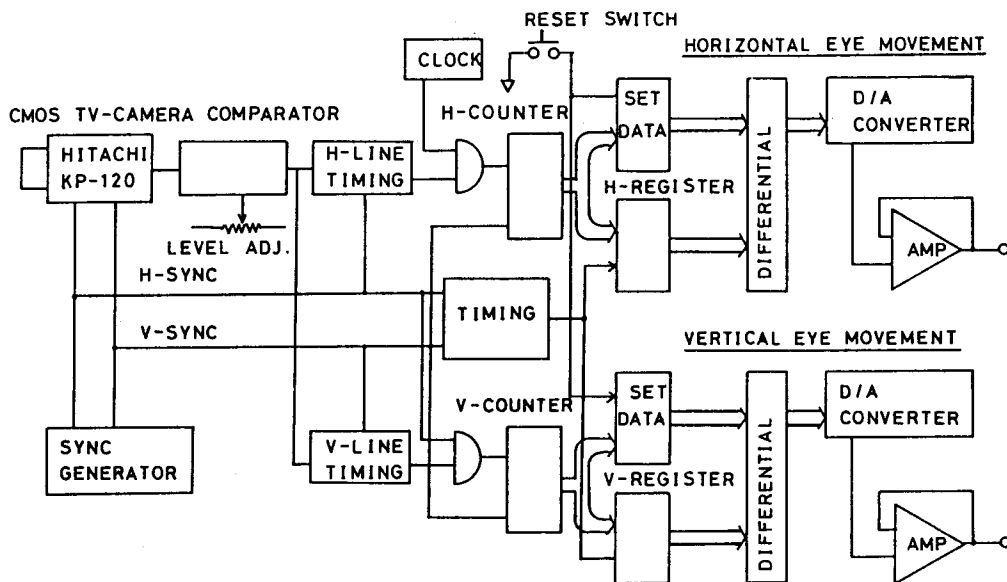


図6 処理装置の電気回路のブロックダイアグラム

線はライン・イメージ・センサーの長軸を垂直に横切る。これにより、像の焦点位置がライン・イメージ・センサーから垂直方向に少々外れても、測定できる。電気的な処理ではTVカメラの場合と同様に画像信号を2値化して、角膜反射像の位置を同期信号を基準に計測する。この装置の測定範囲は水平方向のみで左25度、右25度で検出感度は約0.4度である。図8に振幅20度のsaccadeをTVカメラとライン・イメージ・センサーで同時に測定記録した例を示す。TVカメラでははっきり記録されないsaccadeの始まりが、ライン・イメージ・センサーでは記録されている。

4.2 スリット・スキャン・カメラの眼球運動測定装置⁶⁾

スリット・スキャン・カメラは一般のTVのNTSC同期方式で、走査部分を上下方向のみ狭くしてフィールド周波数を向上させたカメラである⁷⁾。このカメラの原理は図9に示すように、撮像管の垂直方向の走査範囲を狭くして、1本の走査線の走査時間は同じでも垂直走査時間が短くなることを利用してフレーム・レートを向上させている。このカメラを利用した眼球運動測定装置は、最大サンプリング周波数は360Hz

で、測定範囲は左右各20度、上5度、下15度、検出精度は±0.1度である。また、この装置は頭部に付けたLEDの位置を半導体位置検出素子で検出する機能も持っているため、頭の動きのキャンセルも可能である。

5. 頭部運動をキャンセルする眼球運動測定

角膜反射像(第1プルキンエ像)の方法に頭の動きが混入する欠点を改良した眼球運動の測定装置について述べる。

5.1 第1プルキンエ像と第4プルキンエ像を利用したアイ・トラッカー⁸⁾

先に述べたように、角膜前面と水晶体後面の反射から第1から第4プルキンエ像ができるが、この第1像 P_1 (虚像)と第4像 P_4 (実像)を利用して、頭の動きをキャンセルする方法がある。図10のように P_1 と P_4 は、頭だけが動いた場合、つまり、眼球が平行運動をした場合には同一方向に同一量だけ動くが、眼球の回転のみの場合はお互いに反対方向に動く。また、 P_1 と P_4 は、ほぼ同一面にできることと調節による位置変化が少ないことから測定がしやすい。そこで、 P_1 、 P_4 を同時に測定して相対運動だけを捉えれば、眼球の回転だけを捉え、頭の動きをキャ

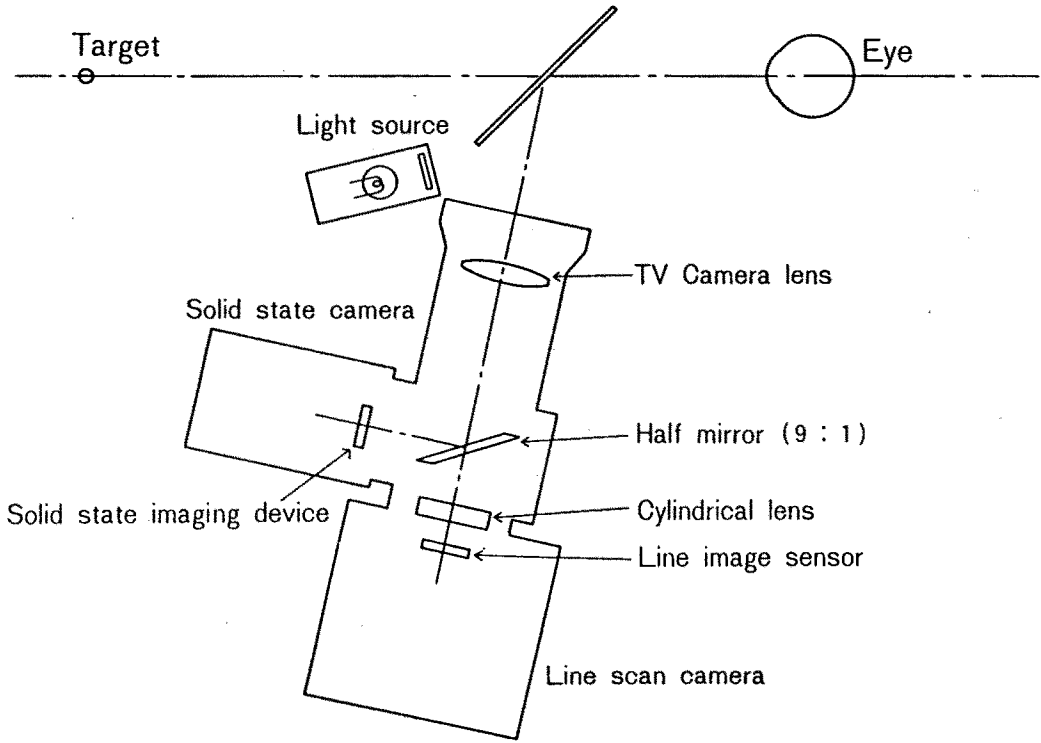


図7 ライン・イメージ・センサーによる眼球運動測定装置の光学系

Saccade

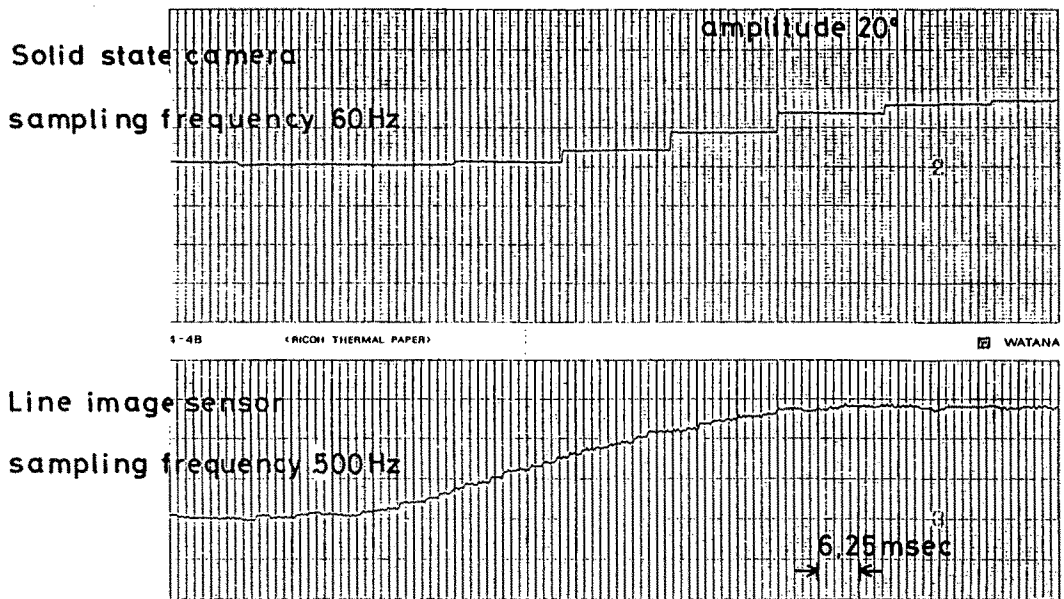


図8 ライン・イメージ・センサーによる Saccade の記録

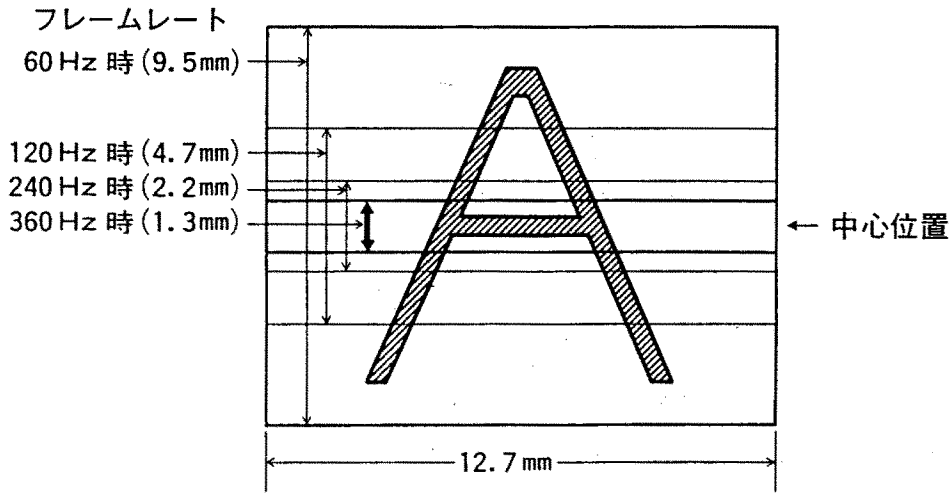


図9 スリット・スキャン・カメラの原理

ンセルすることができる。これを実現した装置が、SRI (Stanford Research Institute) で製作されている2次元アイ・トラッカーである。この装置に調節を測定する Cornsweet 型赤外線オプトメータを取り付けた3次元 Eye Tracker も報告され、SRI で製作されている⁹⁾。この装置の特徴は第1プルキンエ像と第4プルキンエ像を分離検出して、サーボ系を巧みに利用して頭の動きをキャンセルできる点にあるが、測定範囲が瞳孔径で制限される欠点もある。測定範囲は視角で直径20度、測定精度は0.5度から1度である。

5.2 画像処理を利用した視線検出法¹⁰⁾

この方法は、実時間画像処理技術を利用して非接触で視線を検出する方法である。図11のよ

うに光源の位置を既知として、眼球の形状が変形しないとすると、角膜反射像は眼球の回旋点位置と瞳孔位置により一意に決まる。したがって、回旋中心位置は角膜反射像と瞳孔中心位置から求めることができる。視線を回旋中心点と瞳孔中心を結ぶ直線と仮定すれば、視線は角膜反射像心と瞳孔位置の計測から求められる。ここで紹介する方法は2つの波長の光源と偏光を用いることで、瞳孔と角膜反射像の位置を実時間画像処理で求め、計算で視線を求めている。この方法の特徴は、画像処理を利用して実時間で角膜反射と瞳孔を検出している点にあり、広い範囲の頭の動きを非接触でキャンセルすることができる。

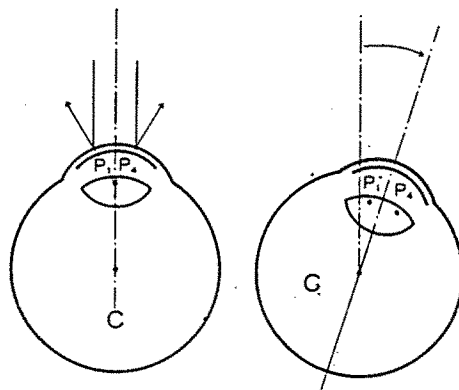


図10 眼球運動に伴う第1プルキンエ像と第4プルキンエ像の移動

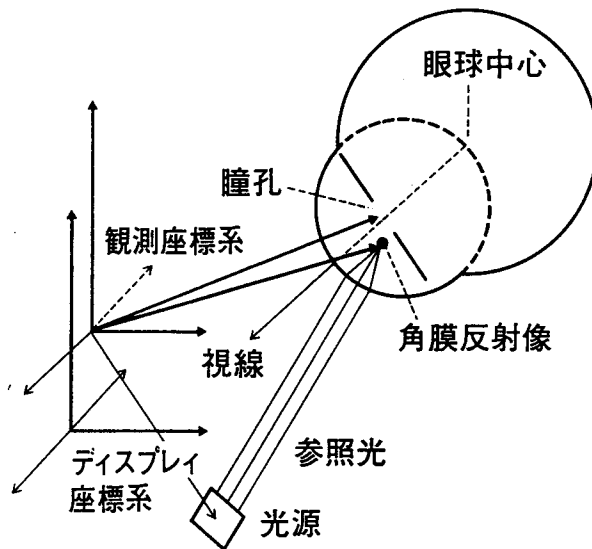


図11 瞳孔と角膜反射像の組合せ¹⁰⁾

6. 問題点と今後の課題

角膜反射法による測定の原理的な制約は、角膜の反射光を利用しているため、閉眼時の測定が不可能であることと明るい環境では周辺光の影響を受けやすいことがある。周辺光の影響は画像処理技術の応用などによって解決し、測定環境を制限しない測定方法が期待される。

また、この方法の応用範囲を広げるためには快適性の向上のため被験者への負担を少なくし、行動の自由度を高めることも今後の課題と思われる。このためには、非接触で遠隔から測定する方法の開発が望まれる。さらに、被験者を限定しないためには、眼鏡やコンタクトレンズ装着時でも測定できる方法の開発も望まれる。

文 献

- 1) 石川 哲, 鶴飼一彦: 第6章 眼球運動記録法. 新臨床眼科全書 第4巻B 神経眼科 (植村恭夫編), 金原出版, 1984, pp29-46.
- 2) L. Young: Methods and designs: Survey of eye movement recording methods. *Behavior Research Methods and Instrumentation*, **7**, 397-429, 1975.
- 3) A. G. Bennett and J. L. Francis: The eye as an optical system. *The Eye* (H. Davson ed)

vol.4, Academic Press, 1962.

- 4) 奥山文雄: 固体撮像素子による眼球運動の測定. 日本眼光学学会誌, **4**, 67-72, 1983.
- 5) 奥山文雄, 所 敬: 眼球運動および輻輳記録装置の試作. 日本眼光学学会誌, **5**, 18-23, 1984.
- 6) 斎田真也氏 (製品科学研究所) による.
- 7) 浜松ホトニクス社: カタログ. 1989.
- 8) T. N. Cornsweet and H. D. Crane: Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkinje images. *Journal of the Optical Society of America*, **63**, 921-928, 1973.
- 9) H. D. Crane and C. M. Steele: An accurate three-dimensional eye tracker. *Applied Optics*, **17**, 691-705, 1978.
- 10) 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. 電子通信学会技術報告, PRU88-73, 1988.