

リンバストラッカーによる眼球運動測定法：原理と実際

井上 哲 理

早稲田大学理工学部応用物理学科
〒169 東京都新宿区大久保3-4-1

1. 原 理

リンバス (limbus) とは、眼科では角膜輪部、つまり黒目 (角膜) と白目 (強膜) の境界部のことを指す。黒目と白目部分では光に対する反射率が異なるので、その境部分に光をあて反射光の強度変化を測定することで眼球運動を捕らえることが可能となる¹⁾ (図1)。水平方向、垂直方向のどちらの動きによっても反射光の強度は変化するので、一箇所からの反射光の測定では水平方向、上下方向の区別が難しい。

そこで実際に装置を作成する場合には、左右2方向から光をあてそれぞれの反射光を捕らえて差動増幅を行う^{2,3)} (図2)。これにより水平方向のみを感度良くとらえることが可能となる。また2方向からの信号の和の信号は上下方向の動きを意味するので、運動方向の分離も可能となる。さらにこの方法により測定光以外の光による影響 (ノイズ) を抑えることが可能で、増

幅率を上げることで一層感度をよくすることができる (測定光を振幅変調することでさらにノイズを減少できる)。

垂直方向の動きを捕らえることも原理的には可能である。上下2方向に測定部をおけばよく、また先の左右2方向に測定部を設定する場合は、その和信号をとればそれが上下方向の運動に対応する。しかし、実際にはまぶたがかぶさるなどの理由で安定した測定は難しい。

水平方向に関しては回転角が小さい範囲 (7~8度) では回転角と出力電圧値の間はかなりよい直線関係が期待できる。一方、回転角が大きくなると直線性はくずれてしまい、さらに原理からもわかるように測定光がすべて白目あるいは黒目部分にあたると眼球運動による反射光強度変化がなくなることになる。したがって、リンバストラッカーは大きな回転角の測定は出来ない。

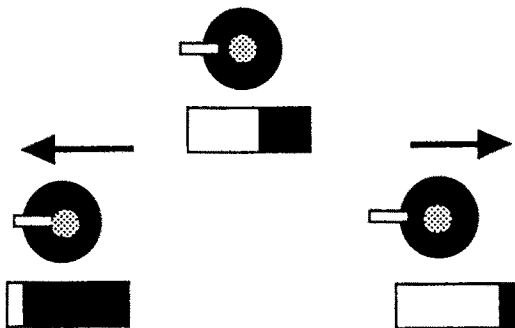


図1 リンバストラッカーの測定原理

白目 (強膜) と黒目 (角膜) の境界部からの反射光強度が眼球の回転により変化することを利用している。

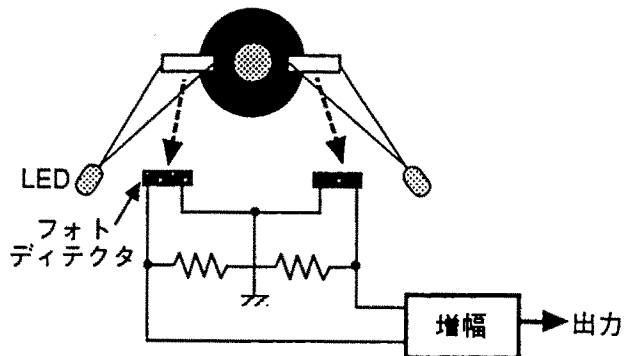


図2 測定装置の実際

2方向から反射光を捕らえて差動増幅を行い水平方向の感度を上げる。

以上、眼球運動測定装置としてのリンバストラッカーの特徴をまとめると

- ・装置が簡単であり、小型で安価なものが可能である。
 - ・水平方向の感度が良い。
 - ・ただし、回転角が大きくなるとだめ。
 - ・垂直方向の運動の測定には向かない。
- などが挙げられる。

2. 試作

我々が試作した装置は、左右方向の運動測定のみを考え、図2のような左右2方向から測定し、差動増幅を行うものである。測定用素子には、ホトリフレクタ（JRC新日本無線）と呼ばれるLEDと光電受光素子が一体となったものを用いて測定部を小さくした。また、検眼用フレームに取り付けることでレンズ、フィルターなどを装着した測定も可能にしている。

回転角と出力電圧値の関係を、一部を黒く塗ったピンポン玉を目にたとえて測定した（図3）。図に示された範囲ではたいへん直線関係のよいことがわかる。

原理図（図2）では、測定光の形状を長方形としているが、実際に我々が試作した装置の測定光の広がりやを調べたところ楕円形をしていて、

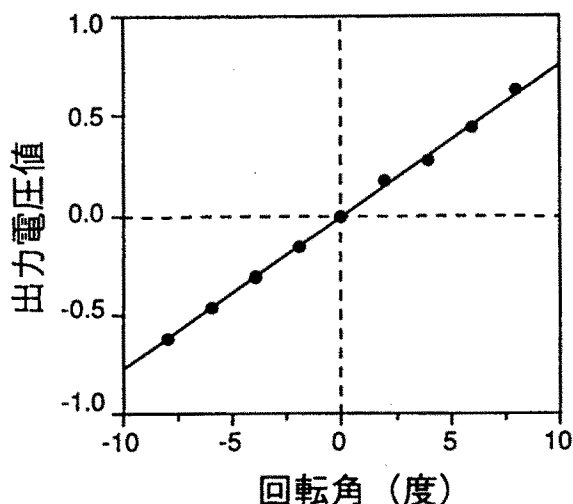


図3 回転角度と出力電圧値の関係
目の代わりにピンポン玉を使用して測定した。

また大きく広がり黒目部分をまたぎ左右両方の境界部を照らしていた。このような設定でもかなり良い直線性がでることから測定光にはあまり神経を使う必要はないことがわかる。

3. 実際

実際に作成し、使用する段階でさまざま問題があったが、そのなかで特に固定の問題とキョリプレーションの問題を取り上げ、実際のリンバストラッカーの特徴を検討したい。

3.1 固定の問題

リンバストラッカーの測定方法からわかるように眼球運動がなくても測定部が動くことにより出力値が変化する。通常、測定部は眼前1cmぐらいの極めて近いところに置かれる。従って、測定部のわずかな動きが出力値に大きな変化をもたらす（図4）。このため精度の良い測定をする際には測定部の頭部への固定が大きな問題となる。

我々が用いた検眼用フレームでもある程度の固定は可能であるが、被験者が頭部を動かすとフレームが大きく動くことがあったのでフレームにバンドを付け固定を行った。このような簡単なことでもかなり良い結果が得られることがわかった。試作ではこの他に水泳用ゴーグルも試したが、この場合は頭部運動にも強く、また少々さわるぐらいでは動かないのでたいへん安定した結果を得たが、一方で装着のわずらわしさがあり、簡便性が減った感じであった。

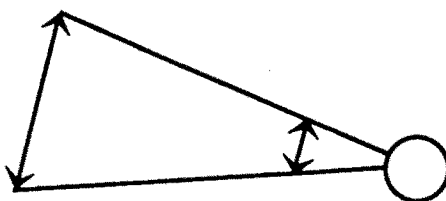


図4 眼球に近いほど僅かな移動が大きな回転角の変化を生じる。

もうひとつの固定の問題として頭部の固定の問題がある。リンバストラッカーでは眼球運動を捕らえることはできるが、被験者がどこを見ているのかは直接はわからない。つまり被験者が頭部運動により対象を追う場合、リンバストラッカーの出力変化は小さくなるのである。

頭部の固定は精度の良い測定が要求されるほど問題となってくる。特に次に述べるキャリブレーションでは重要な問題である。最近では頭部運動測定器と組み合わせた装置の開発も行われている。

3.2 キャリブレーションの問題

出力電圧値と眼球回転角の関係を知り、後の測定の際の修正用データを作成するのがキャリブレーションである。リンバストラッカーでは、回転角と出力電圧値の关系到個人差があり、また測定ごとに変化するため、回転角を測定する場合はもちろん運動の様子を比較する場合でも測定ごとにキャリブレーションを行う必要がある。キャリブレーションデータは後の測定値を決める重要なものであり、できるだけ精度良く行うことが要求される。

キャリブレーションは、例えば等間隔（視角で）に並べられたLEDを順番に点灯し、被験者にそれを注視してもらい、その時の出力値を記録することで行われる（図5）。

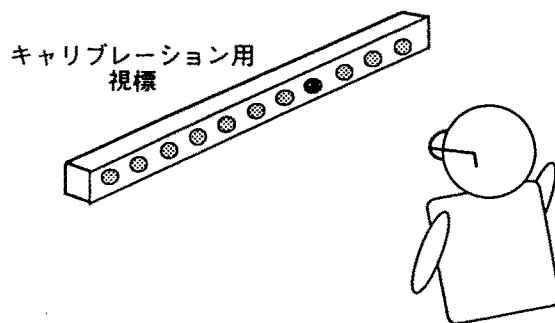


図5 キャリブレーション

等感覚にならんだ視標を被験者に順次注視してもらい、その時の出力値を較正用データとして記録する。

LEDを動かす速度を何通りか試し、また被験者が確認のボタンを押すことでLEDの位置を変える方法も試みた。これら方法の違いにより結果は異なった。また、我々が実際に行った際には、続けて行ったキャリブレーションでもその結果は異なっていた（図6）。

これらの原因としては、眼球運動の追従、注視、頭部の移動の問題などが考えられる。さらに、この方法では、被験者が自覚的に見ている点に、眼球の方向は向いているのかという視覚生理学の基本的な問題が絡んでくると思われる。

これらのことに深入りすると測定が進められなくなってしまうので、測定の目的に合わせて何らかの方法でキャリブレーションデータを作成することが必要であろう。我々は、3回の測定の平均値をとり、さらに直線関係から大きく外れたデータは左右のデータをもとに補完を行ったものを採用することで対処した。

4. 感想

眼球運動測定装置は、さまざまな方法が提案され実際に使用されている。

私自身は両眼立体視における輻輳と調節の关系到興味をもって、輻輳運動の測定にリンバストラッカーを使ってみようと考えた。実験

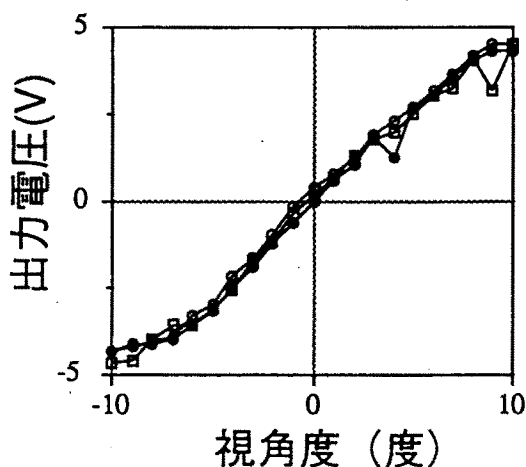


図6 キャリブレーションデータ
測定たびに値が異なる。

において必要だったことは、「水平方向のみであまり広い範囲の測定は必要ないが感度がよいこと、そして液晶シャッターを利用した立体眼鏡が装着できること」であった。リンバストラッカーはこれらの条件を満足し、ある程度の成果は挙げられた。

しかし、この時最も勉強になったことは、眼球運動測定が如何に大変であるかということである。特に、何度回転したか、という回転角を測定することの難しさを実感した。

眼球運動測定には大きく次の2つのタイプに分けられると思う。

(1) 眼球の動きを測定する

これは、眼球が何度回転したかという絶対的な値を問題にするのではなく、どのような運動をしたか、反応時間はどのくらいかなど眼球運動のだいたいの様子をするを目的したものである。従って、キャリブレーションが不要な場合もありうる。

(2) 眼球の回転角を測定する

眼球が何度回転したかを知ることが目的であり、また被験者がどこを見ているかを知ることでもある。ここでは出力値と回転角の関係を正確に知ることが必要となる。

眼球運動測定装置としては最終的には(2)の測定ができることが望ましいと思う。リンバストラッカーは、このどちらの測定にも対応できるが、正確な回転角を測定する場合はこれまでに述べたような多くの注意が必要となる。眼球運動は視覚系の基本機能であり、古くから多くの研究が行われが、眼球運動の運動形態や時間的な変化を扱った研究と比較して、運動角を問題にした研究が少ないのに気づく。この種の測定が意外に難しいことがわかる。

現状では、誰もがさまざまな目的に簡単に使うことのできる測定法がないといえる。各種測定法の長所、短所を理解し自分の目的にあった測定法を選ぶのが最適な方法であるといえる。リンバストラッカーは、簡便であるという大きな特徴を持っていて、その簡便さから様々な改良も可能であり、最近では頭部運動測定器と組み合わせで精度の良い測定法も提案されている。

リンバストラッカーを使用する者の工夫で優れた装置になることが期待できる。

文 献

- 1) W. M. Smith, and P. J. Water Jr: Eye movement and stimulus movement: New photoelectric electromechanical system for recording and measuring tracking motions of the eye. *Journal of the Optical Society of America*, **50**, 245-250, 1960.
- 2) 渡部 毅: 眼球運動の制御機構. NHK 技術研究, **18**, No.2, 94-116, 1966.
- 3) 池田光男: 眼の動き. 視覚の心理物理学, 森北出版, 1975, pp. 205-232.