

## 眼位異常スクリーニングのための定性的な眼位検査システムの開発

平田 木乃美<sup>a)</sup>・日隈 光基<sup>a)</sup>・高塚 佳代子<sup>b)</sup>・山場 久昭<sup>c)</sup>・油田 健太郎<sup>d)</sup>・岡崎 直宣<sup>e)</sup>

### Development of the Automated Cover-uncover Test System for Ocular Malalignment Detection

Konomi HIRATA, Koki HINOKUMA, Kayoko TAKATSUKA, Hisaaki YAMABA,  
Kentaro ABURADA, Naonobu OKAZAKI

#### Abstract

The diagnosis of ocular malalignment is difficult and need examinations from ophthalmologists and orthoptists which are chronically insufficient. Part of the process of eye position check is systemized. With this check system, not only the symptom but also the angle and the extent of strabismus is detected. However, this method only useful for detecting one kind of strabismus which is divergent strabismus. The purpose of this study is to develop a simplified check system to screen at least the presence of strabismus apart from the type of strabismus or amount of ocular deviation. Therefore, digitalization of the check process was conducted. Specifically, "Cover-Uncover function" which is the elemental technology necessary for the automation of the typical "Cover Test" for eye position check was digitalized.

**Keywords:** cover-uncover test, 3d-glass, ocular malaligunment

#### 1. はじめに

斜視・斜位のような眼位異常は立体視不良や眼精疲労を引き起こす要因となる。特に斜視は弱視を引き起こす危険因子でもあり、斜視をいかに低年齢で発見し、治療を開始できるかということは、小児眼科学の大きな研究テーマである<sup>1)</sup>。しかし、眼位異常の診断は難しく、眼科医や視能訓練士による検査が必要であるが、この種の有資格者は慢性的に不足している。このことは、視覚視能の感受性期に行われる3歳児検診ですら、全国半数以上の検査会場では有資格者不在で行われている現状から見て取れる<sup>2)</sup>。以上のことから、暫定的ではあっても有資格者不在で眼位検査が行える簡易システムの開発には大きな意義がある。

眼位検査は、大きく分けて、定性検査と定量検査の2種類から成る。定性検査法として代表的な「カバーテスト」では、遮眼子で片目ずつカバー・アンカバーした時の眼球の動きにより、斜視・斜位が有るか無いか、どのような性質の斜視か(内斜視/外斜視/上斜視/下斜視等)の見極め、及び、融像と立体視に関わる両眼視能力の異常はないかのチェックが可能であり、検査結果は-/+ (陰性/陽性)で表される。一方、定量検査は、斜視・斜位の程度を測定する検査であり、結果は数値で表される。具体的には、正常な目の位置と斜視の目の位置との角度を表す“斜視角”で表される。

定量検査の一部がデジタル化されている<sup>3)</sup>。視線位置を測定する既存技術を利用し、眼球の偏位量を定量的に求めるシステムである。しかし、このシステムでは外斜視以外の斜視(内/上/下斜視)の偏位量の検出は困難であり、適用可能範囲は極めて限定される。その理由は、外斜視以外は測定中の眼位が定まりにくく、眼球偏位量を一意に特定することが難しいということである。ただし、眼位異常を知らせる「測定中の眼球の動き」自体が検出不能な程小さいわけではない。このため、眼球の動きの有無といった定性的な情報から斜視の有無のみ検出する眼位検査システムの実現可能性は十分あり得ると考えられる。なお、斜視の有無のスクリーニングだけでも自動化されることの意義は冒頭で述べた通り大きい。

以上を踏まえ、本研究では、斜視の種類に関わらず、全ての斜視の検出が網羅的に可能な定性的な眼位検査システムの開発を目指す。ここで、使用する検査手法はカバーテストの手法を参考にする。また、眼球の動きの有無を検出する方法は、従来の定量化された視線位置を利用する方法ではなく、“オプティカルフロー”の手法を活用した手法を独自に開発する。オプティカルフローとは、画像中の物体の動きを、定められた代表点の移動元と移動先に根元と先端が対応付けられる「ベクトル」で表す手法である。検査中の着目すべき期間における眼球の動きの向きと大きさを上述のようなベクトルの形式で連続的に検出し、それらベクトル全体に適切な演算を施し正規化することにより、動きの有無を示唆する指標的な数値が得られないかと考えている。

本卒業研究では、以下の研究課題に取り組んだ。

1. カバーテストの基本機能、即ち、任意のタイミングで片眼ずつ視線をカバー・アンカバーする機能の実装

<sup>a)</sup>工学専攻機械・情報系コース大学院生

<sup>b)</sup>教育研究支援技術センター技術専門職員

<sup>c)</sup>情報システム工学科助教

<sup>d)</sup>情報システム工学科准教授

<sup>e)</sup>情報システム工学科教授

2. オプティカルフローの可視化による眼球の動きの検出可能性の検討

2. 基本概念

2.1 斜視・斜位

斜視とは両眼の視線が一点に向かず、片方の眼は目標とする方向に正しく向いているが、もう片方の眼が目標とする方向からずれている、両眼視ができない状態を言う。眼のずれる方向によって内斜視、外斜視、上下斜視がある。先天性／後天性、或いは恒常的な斜視とそうでない斜視(間欠性斜視)などに分類され、原因は極端な屈折異常や、筋肉や神経の異常、外傷や脳の病気に因るものなど様々である。斜位も片方の眼のずれのある状態だが、ずれが小さく両眼視は可能であり、原因も筋肉の弱い異常に限定される。

2.2 カバーテスト

カバーテストとは、遠見(5m)、もしくは近見(30cm)に視標を提示し注視させ、片眼をカバー(遮蔽)した時に、遮蔽していない反対側の片眼が動くか動かないかを見て斜視かどうかを、また、遮蔽した方の片眼が遮蔽を取ったとき動くか動かないかを見て斜位かどうかをそれぞれ判断可能なテストである。一回の遮蔽時間は2~3秒程度である。テスト方式として、片眼ずつカバー・アンカバーを行うことで斜視/斜位/正位の鑑別が可能なCUT(cover-uncover test)と、両眼交互にカバー・アンカバーを繰り返し全偏位量(融像努力分の大きさ)の検出を行うACT(alternating cover test)とがある。着目すべき点として、斜視(斜位)を表す同じ眼球の動きであっても、CUTで検出される動きとACTの動きとはACTの方が大きいということがある。しかし、CUTからは、単に斜視・斜位の有無のみならず、融像能力等の両眼視能力の程度の鑑別も可能である。臨床的には、CUT、ACTの順に行われることが一般的である<sup>4)</sup>。

3. 提案するシステムの構成

前述したように、本研究ではカバーテストの手法に基づく検査システムを提案する。

図1は提案システムの構成である。同図(a)は、システムの全体像である。大きく3つの装置によって構成されており、それらは、被検者が装着するゴーグル型液晶ディスプレイ(以降“3Dグラス”)の遮蔽部A、赤外光による信号を制御するマイコンArduinoのシャッター制御部B、小型カメラによる撮影を行うPCのカメラ部Cである。シャッター制御部とカメラ部はUSBで接続されており(D)、シリアル通信を行うことで、PC上に実装したプログラムを動作させる。同図(b)は、同図(a)の遮蔽部とシャッター制御部を拡大したものである。3Dグラスには小型カメラの設置部(A-2)を取り付け、中心部にある赤外線受光部に赤外線LEDを設置した(A-3)。赤外線LEDには、太陽や室内灯などの影響を受けないようにカバーを装着させている。

以上の構成で、以下に示す1~3の項目を実現することが本研究の目的である。

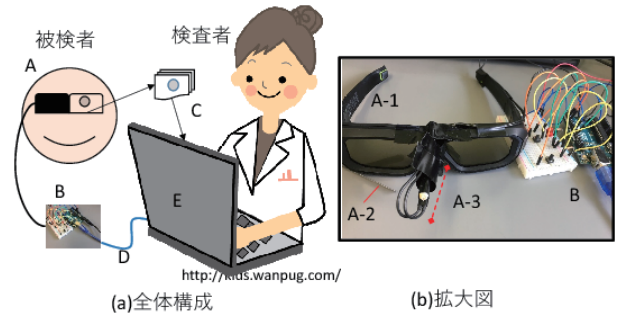
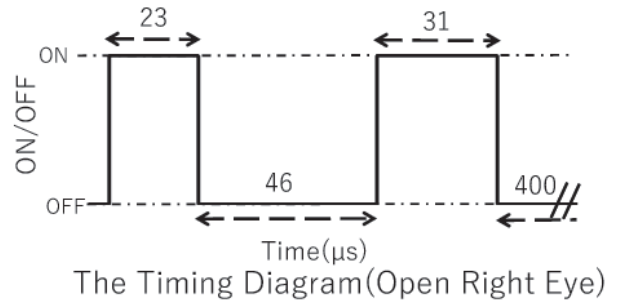


図1. 眼位検査システムの構成



The Timing Diagram(Open Right Eye)

図2. 右側のシャッターを開くパルスを表す波形

1. 遮眼子によるカバー・アンカバーの模倣の為、被検者は3Dグラス(A-1)を装着し、赤外光シグナルと組合せて、液晶シャッターの開閉を行う。
2. 検査中の眼球の動きの有無の検出の為、3Dグラスにアイカメラを設置し、撮影された検査中の連続画像を取得するシステムをPC(E)上に搭載する。
3. 取得した画像を用いて画像解析を行い、斜視の疑いの有無を判別する。

以下、4章では上記1の詳細を示し、5章では、上記3に関する検討事項を示す。

4. カバーテストの実現方法

既開発の眼球測定装置の適用可能範囲は、外斜視に関する診断に限定されるということは冒頭で述べたとおりであるが、視線追跡技術を用いる本装置にはコストの問題もある。従って、ほとんど普及していないのが現状である<sup>1)</sup>。本研究では、コストの問題を考慮し、近年の3Dテレビ需要の高まりに伴い、3D関連機器が身近になり、入手しやすくなった3Dグラス(Nvidia 3D Vision2)を用いてカバー・アンカバー機能(以降“遮蔽機能”と同義)の実装を行った。本節ではまず、3章で説明したシステムを開発するにあたり実装した2つの機能について示す。具体的には、任意に指定するタイミングで片眼ずつカバー・アンカバーする機能(4.1)と、眼球の動きの連続画像を撮影し取得する機能(4.2)である。次に、一連の検査手順を2つの機能を組み合わせて実現する方法を示す(4.3)。

4.1 遮蔽機能の実装

2章で説明したように、カバーテストを行うには、被検者が両眼で視標物を見ている状態から、片眼ずつを遮蔽する機能が必要である。今回使用する3Dグラスの液晶シャッター機能は、3D対応ディスプレイから発せられる赤外光によるシグナルを受けて左右のレンズが高速に自動開閉する方式である。

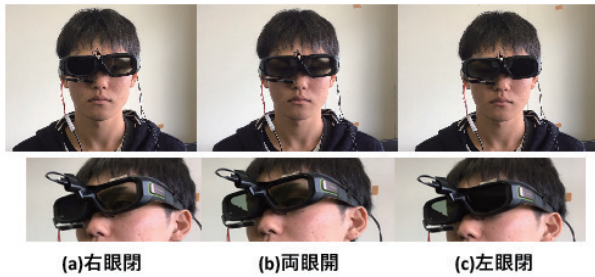


図 3. 赤外光シグナルによるシャッターの開閉

通常、このシグナルの ON/OFF はユーザからはコントロールできないため、そのままではシャッターの開閉を自在にコントロールする必要があるカバーテストの遮蔽機能としては使えない。そこで、本研究では、対応ディスプレイから発せられる赤外光パルスの仕様<sup>5)</sup>に基づき、4種類のシグナル（左右の開・閉）を実装し、これらをマイコン Arduino に組み込むことにより、3D グラスに送る赤外光シグナルをエミュレートできるように、3D グラスのシャッター開閉のコントロールを可能にした。

#### 4.1.1 4種類の信号（左右眼の開・閉）の実装

赤外光パルスの仕様<sup>5)</sup>を基に右眼シャッター開・閉、左眼シャッター開・閉の都合4種類の信号を実装した。図2は、実装した右眼シャッターを開く信号を波形グラフで表したものである。具体的には、赤外光の点灯を  $23 \mu s$ 、消灯を  $46 \mu s$ 、点灯を  $31 \mu s$ 、消灯を  $400 \mu s$  というパターンを、プログラム内で複数回繰り返している。他の3種類の信号も同様に、仕様に基づいて実装した。しかし、実際に実行してみると、与えられた信号に対して意図しない振る舞いをするケースがいくつか検出された。例えば、右眼シャッターを閉じる信号に対し、右シャッターはその通りの反応をしなかった。この問題に対する試行錯誤の結果、左シャッター開、右シャッター閉の信号をこの順序で送ることで「右シャッター閉」の動作は実現できることが分かった。

図3は、通常状態 (b) の3D グラスと3D グラスに送られた赤外光シグナルに液晶シャッターが反応し、それぞれ左右片方のみ開閉動作を行っている時のシャッターの状態である (右眼：(a)、左眼：(c))。

#### 4.1.2 4種の信号のコントロール

さらに、カバーテスト CUT を行うための一連の開閉動作の自動実行パターンを用意し、基板上のスイッチにより切換えを可能とした。基板上にはスイッチ1とスイッチ2が用意されており、スイッチ1を長押しすることにより、基板上に設置したライトが一定間隔で点滅を始め、長押しをやめた時点で止める。ライトの点灯した回数によってシャッターの開閉パターン1~4を決定することができる。その後、スイッチ2を押すことで、先に決めたパターンでのシャッターの開閉動作が開始する。

シャッター開閉のバリエーションは、表1に示す4種類である。すべてのパターンの動作は図3に示す通りであるが、どのパターンも図3で示す“(b) 両眼開”の状態が初期状態である。なお、開閉パターン1~3は、検査方法 CUT の実現上最低限必要な基本操作であり、開閉パターン4は検査方法 ACT の実現にとって最低限必要な基本操作である。

表 1. 液晶シャッター開閉のバリエーション

パターン	液晶シャッター開閉動作
1	右閉 ⇒ 右開 ⇒ (1秒) ⇒ 左閉 ⇒ 左開
2	右閉 ⇒ 右開
3	左閉 ⇒ 左開
4	右閉 ⇒ 右開/左閉 ⇒ 左開

## 4.2 検査中の眼球の動きの取得

斜視・斜位またはそうでないかを判定するには、検査の際に、眼が動いたかどうかを調べる必要がある。そこで、まず眼の動きの連続した画像を取得するため、小型カメラ (De-lock USB 2.0 Kameramodul 1, 92 Megapixel 55° Fixfokus, Art.-Nr.95950) を、3D グラスのレンズの内側に設置し、下から眼を撮影するようにした。また、約 63(ms) の間隔で連続して画像を取得する機能をプログラミング言語 C++ で実装した。取得する画像数は自由に決めることができるようにした。実際の検査で斜視・斜位の症状を表す動きが見られる時間はシャッターが閉じた (開いた) 直後の 1~2 秒である。従って、画像を取得するタイミングは 3D グラスのシャッターが閉まる (開く) タイミングとし、眼球の動きが安定するまでの時間を考慮し、CUT の時には約 6 秒間、画像数にして 100 枚の画像を連続して取得することとした。

## 4.3 一連の検査手順の実現方法

Arduino 上の 3D グラスの液晶シャッター開閉のプログラム (シャッター部) と PC 上の小型カメラで連続画像を取得するプログラム (撮影部) を一連の検査手順に沿って動かすためにシリアル通信による実装を行った。検査・操作手順を合わせて順番に説明する。

- (1) 被検者に 3D グラスをかけてもらい、遠見 (5 m) または近見 (30cm) の視標を見てもらうように指示する。
- (2) 撮影部を実行すると、シリアルポートを接続し、シャッター部からのデータの受信待ち状態にする。
- (3) 被検者が視標を見ていることを確認したら、スイッチ 1 でシャッターの動作パターンを決定する。
- (4) スイッチ 2 を押すことにより、シリアル通信によりシャッター部から撮影開始指示が送られ、撮影部のカメラによる撮影を開始する。画像取得後は、自動的に接続中のシリアルポートの切断が行われる。

取得した画像は指定したファイルに保存され、それらの画像を用いて眼球の動きの検討を行う。

## 5. 眼球の動きの検出可能性の検討

### 5.1 眼球の動きの検出方法

オプティカルフローとは、画像中の物体の動きを冒頭で述べたような「ベクトル」を使って表す手法である。この手法を、4.2 で述べた方法で取得した検査画像に適用することにより、眼球の動きの向きと大きさを検出し、斜視の有無を判定するために必要な情報が得られないかと考えている。今回は、一連の検査画像の中から「眼球の動き」の有無の検出に適した 2 枚を人が見て選び出し、その 2 枚の画像から動きの向き



と大きさを実際にオプティカルフローで検出できるかどうかを検討した。

オプティカルフローの計算は、先行関係のある2つの画像の間で、先行する画像の各画素が、後続の画像のどの画素に移動したのかを推定する。今回はOpenCVで実装方法が提供されているGunner Farneback法<sup>6)</sup>を用いた。

また、オプティカルフローは可視化することができ、移動方向に応じたオプティカルフローの可視化も可能である。本研究では、まず取得した画像から目視による斜視の判定をわかりやすいものにするために、移動する方向に応じて色相を変化させ、グラデーションでその方向を表示したヒートマップの作成を行うプログラムの実装を行った。OpenCVでは0~180で色相を表すため、0・180が赤、30が黄色、60が緑、90がシアン、120が青、150がマゼンタを表すおよその色相となる。なお、本研究においてノイズとなる小さな動きを無視したヒートマップの作成を行うために、ベクトルの長さが一定以上ものに対してのみ色をつけるようにした。

## 5.2 検証実験

考察した手法による斜視の検出可能性を調べた。検証用のデータとして、眼科医により内斜視と診断されている被験者一名のCUTの検査画像を用いた。

### 5.2.1 液晶シャッターの遮蔽機能の検証

液晶シャッターの開閉の動作については、実装した4種の信号(4.1.1)で左右眼の開閉のコントロールが自在にできることを確認した。また、検査に必要な基本開閉パターン(4.1.2)の動作確認も行った。更に、液晶シャッターは、従来カバーテストで視線を遮るために用いるもの(手のひらや黒色の厚紙もしくは半透明の用紙)よりも透明度が高く色が薄いため、遮蔽器具として有効かどうかの確認が必要であり、これに関する確認も視能訓練士により実施された。その結果、使用する3Dグラスの液晶シャッターは、斜視の検出にとって十分な遮蔽性能を持つことが確認できた。

### 5.2.2 眼球の動きの検出可能性に関する検証

シャッター開閉パターンや小型カメラの位置(右眼と左眼)を変えながら、4.3に沿ってCUTの検査手順を実行した。そして、取得した画像から選び取った2枚の画像の動きの描画を見て比較し、斜視を持つ人の眼の動きを検出できる可能性があることを目視で確認した。

実例を示す。開閉パターン3の下で、右眼の動きの検出し、検出可能性の検討を行った。この時、左眼のシャッターが閉まると同時にカメラで画像を取得し始めた。図4は、取得した画像の内、シャッターが動作し始めた直後(両眼開の時と同じ眼の位置)とシャッターが閉じてから約2秒後の30枚目の右眼の画像を5.1の手法で可視化したものである。図を見ると明らかに黒目の位置付近は、シアン・青・緑の色の割合が多いことがわかる。色相と値の対応した図を見ると、左閉後は耳側に移動していると考えられる。被検者は内斜視であるので、通常内側(鼻側)に向いている状態から、左眼側のシャッターが閉じたことにより、普段見ている方の眼の視線が遮蔽され、右眼が外側(耳側)に向かう動きは、通常の視能訓練士が行うカバーテストで見られる動きと同様である。また、図

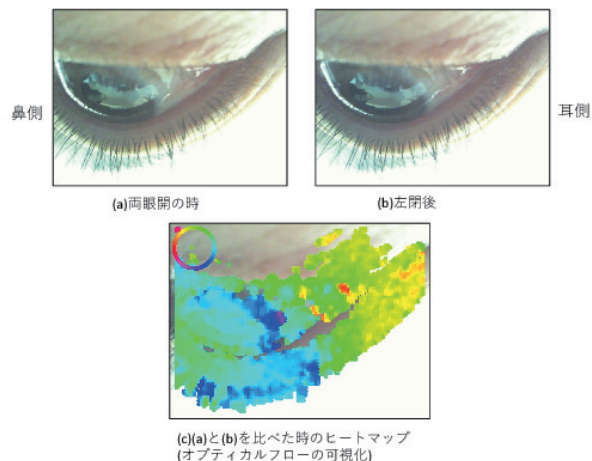


図4. 左閉直後と約2秒後の右眼の画像の比較

4において、耳側に黄色を中心とした、眼球の動きと反対方向のベクトルが見られる。これは瞼や目の周りの皺などによるものでありと考えられるので、提案する自動検査の実現に向けて、眼球の動きと混同しないように十分な対策が必要である。

また、オプティカルフローは物体の動きを表すベクトルであるので、線分による描画を行ったところ、黒目付近の線は、ある一定方向(図4の耳側)に向いている様子が見られた。今回はある一定の長さ以上のベクトルのみを表示させたが、それらの設定を小さい値にすることで、斜視だけでなくより小さい眼球の動きの斜位に関しての検出の可能性も窺える。

## 6. まとめ

本研究では、3DVision対応ワイヤレスメガネの赤外線に対応してシャッターの開閉を行う液晶シャッター機能を用いて、斜視の有無を暫定的に判定する眼位検査システムの考案を行った。3Dグラスの赤外線受光部に赤外線LEDを設置して、マイコンArduinoを使って赤外線の信号をプログラムしたところ、赤外線LEDを光らせることでシャッターの開閉を制御することに成功した。また、3Dグラスの遮蔽性能が検査器具として有用かどうかの確認を、視能訓練士の目視により行ったところ、求められるレベルの遮蔽性能を持つことがわかった。さらに、3Dグラスに小型カメラを設置し、撮影された検査中の連続画像にオプティカルフローの可視化を適用したところ、提案手法の妥当性を見出すことができた。なお、現在は、3Dグラスでの遮蔽動作と小型カメラによる検査中の眼球の連続画像の取得、及び、取得した画像からの眼球の動きの確認を、各々分けた実装になっている。今後は、画像解析の精度の向上及び、検査中の眼球の動きから斜視を判定する機能の実現は勿論のこと、検査情報取得から判定までの一連の処理を連続して行える検査システムの実現を目指したい。

## 参考文献

- 1) 長谷部聡：眼位検査の基礎と進歩，あたらしい眼科18(9)，1105-1110，2001。
- 2) 福田敏雅(公益社団法人日本眼科医会公衆衛生部)：三歳児眼科健康診査調査報告(V)，日本の眼科85-3，pp.296-300，2014。

- 3) 高橋由嗣他 : 視線解析装置を利用した 9pt 融像除去眼位測定における遮蔽時間の検討, 第 71 回日本弱視斜視学会眼科臨床紀要 9(3), pp.234-237, 2016.
- 4) 視能訓練士眼科マニュアル (2017/02/01 アクセス), <http://panda-ort.com> .
- 5) Andrew.Woods, Jesse.Helliwell : A Survey of 3D Sync IR protocols, CMST 944, pp.1-16, 2011.
- 6) Gunner.Fameback : Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion, 13th Scandinavian Conference, SCIA, pp.363-370, 2003.