

# 眼位異常のスクリーニングのための定性的な眼位検査システムに関する研究

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>

## Research on the Qualitative Automated Cover-uncover Test System for the 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. Digitalization of the check process and the diagnostic process was conducted. Specifically, the digitalization of element technology, "Cover-uncover function", was conducted necessary for the automation of the typical "Cover Test" for eye position check. And we also implemented function to detect movement indicating an ocular malalignment from eyeball videos during Cover test.

**Keywords:** cover-uncover test, ocular malalignment, eyeball video

### 1. はじめに

一般に、眼疾患に関する目(見え方)の異常には、早期発見と早期訓練が必要であると言われている。中でも、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<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、大きく定性検査と定量検査の2種類からなる。定性検査の代表的な検査方法として「Cover-test<sup>1)</sup>」がある。この検査方法は、主に斜視・斜位の有無を調べる検査方法である。一方、定量検査は、斜視・斜位の程度を測定する検査である。現在の眼位検査を含む視覚機能検査では、デジタル化・システム化がほとんど行われていない<sup>1)3)4)</sup>。定量検査の一部がデジタル化されているが<sup>5)</sup>、この研究で用いられている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ている。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からである。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、斜視の有無のスクリーニングだけでもデジタル化・システム化を行い、自動化することの意義は大きい。そこで、本研究では、眼位異常のスクリーニングを助ける簡易な検査サポートシステムを開発することを目的としている。そのために、まず、眼位検査法として代表的な Cover-test のデジタル化を行った<sup>6)7)8)</sup>。次に、異常の有無を判別するための診断プロセスのシステム化を行った。

Cover-test のデジタル化に必要なカバー・アンカバーの機能を持つ研究開発用の視覚遮断/遮へい装置がある<sup>9)10)</sup>。しかし、この既存の装置を使用するにはコストの問題がある。また、眼球の動きの検出において既開発の視線追跡技術<sup>1)</sup>を用いるには、本研究目的にとって望ましい使用環境を整えることが難しいといった問題があった。本研究では微小な眼の動きを検出する必要があり、このような検出を既存の視線追跡技術を使って行うためには、検出を行う場所や照明に関する多様で詳細な条件が整わないと難しいということであった。

そこで、本研究では、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<sup>11)</sup>)を用いてカバー・アンカバー機能の実装を行った。また、眼球の動きの検出は、検査中の眼球画像を連続的に撮影し、その画像データから眼位異常を示す動きの検出を行うというオーソドックスな方法を取ることにした。

診断プロセスのシステム化として、画像処理技術を活用し、さまざまな撮影画像を診断目的や症例内容に応じて最適化することで、X 線や MRI の画像診断をサポートする医用画像シ

<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

システムの開発が行われている。現在の医用画像システム開発では、膨大な検査画像データを学習データとし、統計的な手法で異常の有無を判別させる判別機能を設計することが一般的である<sup>12)13)14)</sup>。しかし、眼位検査では、画像から異常の有無を客観的に読み取る診断方式は取られてこなかった。専ら、検査者の目視や、被験者の自覚と申告による他覚的・自覚的検査方式がとられていた。そのため、診断プロセスのシステム化を助ける画像データは全く存在しない。

本研究では、データが少なく統計的手法が使えないケースに有効な手法であるオプティカルフローを用いることとした。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<sup>15)16)17)</sup>。診断プロセスのシステム化を行うにあたり、異常検出時の着目領域設定の一候補として黒目輪郭内部の妥当性を検討した。理由は、視線追跡技術の要素技術として多数研究されているため<sup>18)19)20)</sup>、そのまま流用できる可能性を考えたためである。しかし、まぶたの形状は個人差が大きく、安定した輪郭形状検出には未だ至っていないのが現状である<sup>21)</sup>。視線追跡手法の場合、視線位置を算出するプロセスとして、黒目輪郭切り出しは必須であるのに対し、本研究の目的(黒目の動きの有無の検出)では、輪郭切り出しは必ずしも必要なプロセスではない。以上を考慮し、本研究では、目的達成にとってもっと合理的かつ確実に検出できるよう着目領域形状について検討することとした。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、有資格者不在で眼位異常のスクリーニングが暫定的に行える、簡易で安価な眼位検査サポートシステムを開発することである。具体的な研究課題は次の通りである。

- 眼位の定性検査法として代表的な Cover-test のデジタル化を行うこと
- 検査中の眼球動画から眼位異常を示す動きを検出し、眼位異常の有無を判定するまでの一連の診断プロセスを開発し、自動化すること

## 3. 眼位検査の現状

眼の疾患の中で、早期発見や早期治療が求められているものに、斜視や斜位などの眼位異常(もしくは眼球運動障害)がある。これらの眼位異常を調べる眼位検査には、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「Cover-test」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・斜位であるかないか、どのような性質の斜視かの見極め、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、検査の結果は、斜視 - / + (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、正常な眼の位置と斜視の眼の位置との角度を表す「斜視角」で表される。

以下に、基本概念として、斜視・斜位、検査方法である Cover-test、Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査、及び、今回提案するシステムの必要性について説明する。

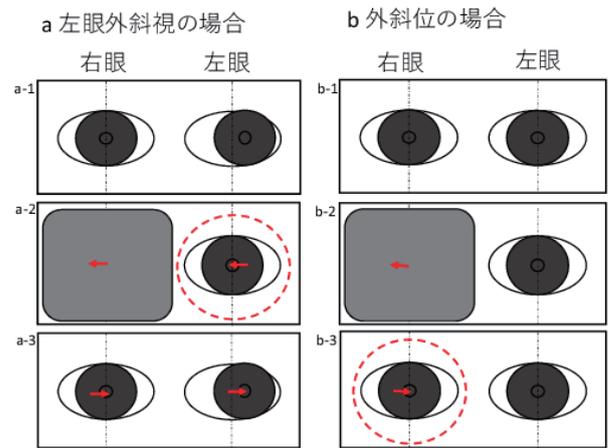


図 1. CUT による斜視・斜位の判定例

### 3.1 斜視・斜位

斜視とは、両眼の視線が一点に向かわず、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いう<sup>22)</sup>。眼のずれる方向によって、内側に向いている内斜視、外を向いている外斜視、上を向いている上斜視、下を向いている下斜視、にわけられる。また、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)などに分類される。原因には様々なものがあり、極端な屈折異常や、眼球を動かす筋肉や神経の異常、外相や脳の病気によるもの、視力不良があげられる。

斜位も、片方の眼のずれがある状態だが、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。普段両眼で同じ目標を見ているが、片方の眼を遮蔽すると、遮蔽した方の眼が斜視のようにずれるといった症状がある。

### 3.2 Cover-test

Cover-test 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、片眼を遮蔽し、次いで遮蔽を除去したときの眼の動き、およびもう片眼の動きを観察することで斜視/斜位/正位の鑑別が可能な CUT(cover-uncover test) と、両眼を開放せずに交互に遮蔽することによって確実な除去を行い、顕性と潜伏性を含めた全偏位量を(融像努力分の大きさ)の検出を行う ACT(alternating cover test)<sup>1)23)</sup> 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 の動きとでは ACT の方が大きい(潜在性を含めたすべての眼位のずれを検出する)ということが示されている<sup>24)</sup>。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>25)</sup>。

今回実験で用いた CUT の検査方法について図を用いて説明する。図 1 は参考サイト<sup>25)</sup> を基に作成した図である。

図 1 の a は、左目が外に向いている外斜視の場合である。



図 2. Maddox 小桿から見た光の見え方

まず、遠見または近見に視標を置き被検者に視標を注視するように促す (a-1)。通常、斜視の場合この時点でわかる場合が多く、検査者は次の操作で視線がずれていない右眼を遮蔽する。この際、遮蔽しなかった方の左眼が意識的に視標を見ようとするので、外に向いていた眼が内側に動く。この動きを見て、検査者は外斜視であると判定する (a-2)。a-3 は、遮蔽するのをやめた後の眼の動きで、元の状態に戻る様子がわかる。

図 1 の b は、外斜位の例である。斜視と違い、注視を促した時には、視線のずれはわからない (b-1)。右眼を遮蔽した際、両眼で視標物を集中して見るという働きができないため、遮蔽した方の眼は外側にずれる (b-2)。次に、遮蔽をやめると再び右眼の視線は視標物に向く動きがあるため (b-3)、検査者は右眼が右にずれた動きを見て、被検者は斜位であると判定する。

### 3.3 Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査

Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査とは、斜位・周辺融像のある微小角斜視や間歇性斜視など両眼視がある場合の自覚的な斜視角の測定方法である<sup>25)</sup>。事前に Cover-test(3.2)により、斜位であることを確認し、被験者の左右どちらかの眼前に Maddox 小桿を装着させる。眼前に Maddox 小桿を装着させた状態で、半暗室にて 5m の距離にて明るい光源を眼の高さで見せると、Maddox 小桿を装着させた眼には、赤い光 (線) が見える (図 2)。正位の場合、Maddox 小桿を装着させた方の眼で見ている赤い光 (線) と、Maddox 小桿を装着していない、逆の眼で見えている電球 (光源) の像が一致する (同図 A)。対して、斜視・斜位の場合、Maddox 小桿を装着させた方の眼で見ている赤い光 (線) と、Maddox 小桿を装着していない、逆の眼で見えている電球 (光源) の像が一致しない (同図 B)。

電球 (光源) の像と赤い光 (線) が一致しない場合、Maddox 小桿を装着している眼上に、プリズムを装着する (図 3)。図 3 は参考サイト<sup>26)</sup>を元に作成した図である。プリズムは弱い度数から強い度数に徐々に変更していき、電球 (光源) の像と赤い光 (線) が一致したら、被験者に答えてもらう。一致した時点のプリズムの度数が、被験者の自覚的な斜視・斜位量となる。

プリズムに関して、プリズムの光偏向力はプリズムジオプリー  $\Delta$  で表し、1m あたり 1cm の偏角を与えるものを 1 プリズムジオプリーという<sup>26)</sup>。また、 $1\Delta=4/7$  度約 (0.57 度) で表される<sup>27)</sup>。

### 3.4 三歳児健診における専門家の関与

Cover-test による検査方法は、一見簡単そうだが、カバー・アンカバーの動作や検査中の眼の速い動きの見極めには、検査者の技量が問われる。この検査は、眼科医や視能訓練士など

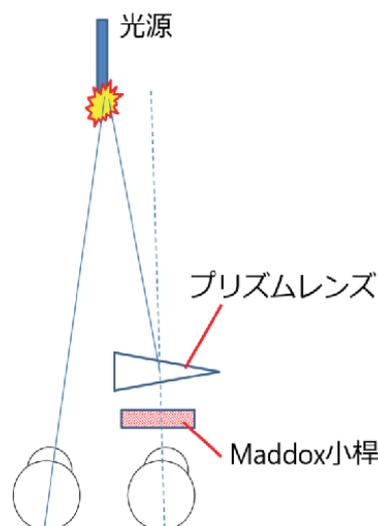


図 3. プリズムを用いた補正

の医療技術者によって行われる。しかし、このような国家資格を持った医療技術者は慢性的に不足している。さらに、視覚視能の感受性期に行われる三歳児健診ですら、全国半数異常の検査会場では有資格者不在で行われているという現状である<sup>2)</sup>。

通常、斜視の疑いがある患者の多くは、この幼い子供のうちに症状があらわれ、家族などの周囲の人に連れられ眼科医のもとを訪れるが、周りが眼の異常に気付かなかつたり、あまり大したことではないと考え、眼科医への受診または検査を行わないままになっている患者も存在する。

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。

### 3.5 関連研究

現在、定量検査の一部のデジタル化が行われている<sup>5)</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 (内斜視/上斜視/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は難しいからである。ただし、眼位異常を知らせる「測定中の眼球の動き」自体が検出可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。また、既存研究における、視線解析装置を使った眼位検査に関する研究<sup>28)</sup>では、遮蔽動作を人の手によって行われているので、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大きい。

以上のことを踏まえ、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。ここでは、Cover-test の手法を参考に行う。

## 4. 提案する眼位検査システムの構成

前述したように、本研究では Cover-test の手法に基づく眼位検査システムを提案する。提案システムの全体構成を、図 4 に示す。同図は、システムの全体像であり、検査部 (Cover-test

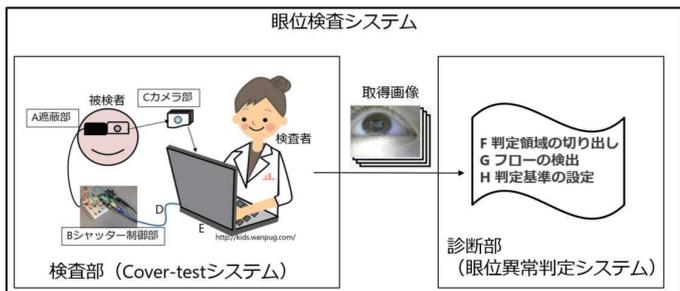


図4. 眼位検査システムの構成

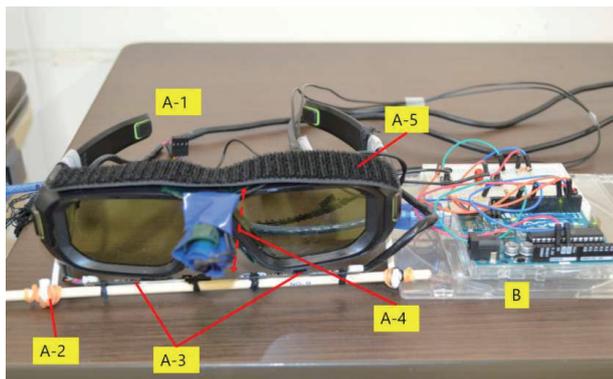


図5. 遮蔽部とシャッター部の拡大図

システム)と診断部(眼位異常判定システム)の2部で構成されている。

#### [検査部 (Cover-test システム) ]

検査部 (Cover-test システム) は、大きく A 遮蔽部、B シャッター制御部、C カメラ部の3つの装置によって構成されている。それぞれの機能について説明する。A 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)、B は赤外光による信号を制御するマイコン Arduino、C は小型カメラによる撮影を行う PC である。

図5は、図4の遮蔽部Aとシャッター制御部B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 (図5A-2)、を取り付け、3D グラスの左右のレンズの下部にあたる位置の小型カメラの設置部に、小型カメラを1台ずつ設置した (同図A-3)。小型カメラには、「USB フラット WEB カメラ (型番: KP-CAM32<sup>29</sup>)」を使用した。中心部にある赤外線受光部に赤外線 LED を設置した (同図A-4)。赤外線 LED には、太陽や室内灯の外部の影響を受けないようにビニールテープのカバーを装着させている。3D グラスの上部には、上部からの光を遮光する黒い布を接着するためのマジックテープ (同図A-5) を取り付けている。また、小型カメラによって撮影された検査中の連続画像を取得するシステムを PC (図4E) 上に搭載している。

#### [診断部 (眼位異常判定システム) ]

診断部 (眼位異常判定システム) は、F (判定領域の切り出し)、G (フローの検出)、H (設定された判定基準に基づく判定) の3つの要素から成る。

まずFの目的は、眼位異常を表す黒目の動きの検出を合理的に行えるようにすることである。そのための判定領域として、眉毛や眼瞼痙攣のような眼球以外の動きを極力除去しながら、着目すべき眼球の縁を十分に含む領域切り出しが、シ

ステマティックな手順でできるような領域を独自に見出した (6.1)。

G は、連続画像の1フレーム目と2フレーム目、2フレーム目と3フレーム目のように、隣り合う画像のペア全てに対し、先行画像から後続画像への各画素のフローベクトルを求めることとした。

H は、眼球の動きが水平方向となる眼位異常 (内/外斜視、斜位) の判定をする場合の判定基準を設定した。具体的には、水平方向のフローベクトルのスカラー量が全ペアの平均を超えるかどうかで、判定するというのが基本的な考え方である。しかし、この基準だけでは異常の有無を正しく判定できないケースが複数存在した。そこで、この基本的判定基準を補う別な判定基準も導入し、併せて使用することにより、正しい判定ができるようにした (6.1)。

以下、5. 節では検査部 (Cover-test システム) の詳細を示す。さらに6. 節では、診断部 (眼位異常判定システム) の詳細を示す。

## 5. Cover-test の自動化

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3.5節において述べた通りであるが、視線追跡技術を用いる本装置<sup>9)10)</sup>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<sup>11)</sup>) 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、4. 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 (5.1 節) と、眼球の動きの連続画像を撮影し取得する機能 (5.2 節) 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 (5.3 節)。また、5.4 節では、取得した連続画像から眼球の動きを検出する方法について示し、5.5 節では、3D グラスの性能確認のための検証実験を行った結果を示す。

### 5.1 遮蔽機能の実装

3.2 節で説明したように、Cover-test を行うには、被検者が両目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。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Cover-test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<sup>30)</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し、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。

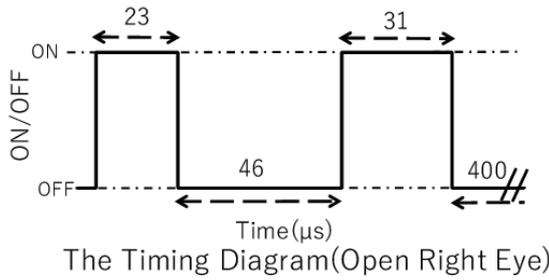


図 6. 右側のシャッターを開くパルスを表す波形

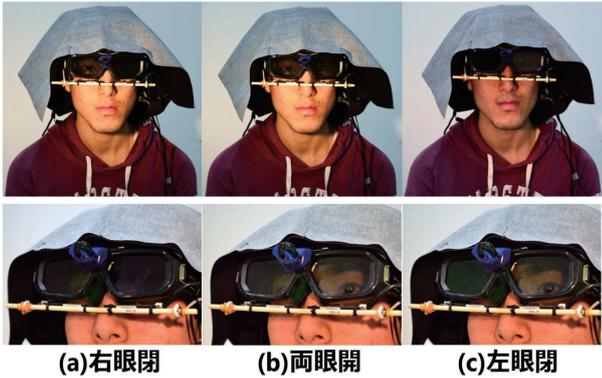


図 7. 赤外光シグナルによるシャッターの開閉

5.1.1 4 種の信号（左右眼の開・閉）の実装

赤外光パルスの仕様<sup>30)</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 6 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 7 は、通常状態 (b) の 3D グラスの様子と、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))。同図により、左右眼の開閉のコントロールが自在にできることが確認できた。

5.1.2 4 種の信号のコントロール

さらに、Cover-test 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、基板上的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を開始する。

シャッター開閉のバリエーションは、図 8 内の表に示す 4

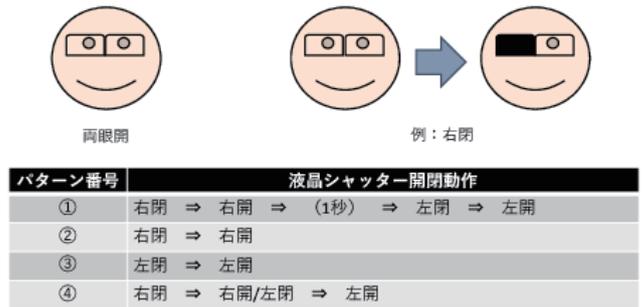


図 8. 液晶シャッター開閉のバリエーション

種類である。すべてのパターンの動作は図 7 に示す通りであるが、どのパターンも図 8 で示す「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。

また、本提案システムでは検査を行う際、図 8 で示す開閉パターンをそれぞれ 2 回繰り返している。理由は、従来の Cover-test でも同図の開閉パターンを複数回繰り返し、眼位の異常を見つけるためである。

5.2 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、USB フラット WEB カメラ (型番：KP-CAM32<sup>29)</sup>) 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 0.2(s) 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) 直後の約 1 秒間である。従って、本提案システムで斜視・斜位の症状を表す動きの画像を取得する場合は、3D グラスのシャッターのカバー/アンカバー後の 4 フレームとなる。ACT の時には約 8 秒間、画像数にして 40 枚の画像を連続して取得することとした。画像を取り始めるタイミングは、はじめ 3D グラスのシャッターが両眼開の状態から、右シャッターが閉じたすぐ後からである。理由は、ACT の場合だと、前述したタイミングからは、右眼、左眼と斜視、斜位の組み合わせ 4 通り全てで、斜視・斜位の症状を表す動きが見られるためである。

5.3 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 3 D 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、シリアルポートに接続し、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出を行う。

#### 5.4 眼球の動きの検出方法

本研究では、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<sup>15)16)</sup>”を活用した手法を独自に開発した。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」で表す手法であり、データが少なく統計的手法が使えないケースに有効な手法である<sup>17)</sup>。

この手法を、5.2 節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を取得する。

OpenCV<sup>31)</sup> ではオプティカルフローのためのいくつかのアルゴリズムが実装されている。今回は一般に実装方法が提供されている Gunner Farneback 法<sup>32)</sup> を用いた。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。

推定する手法には大きく分けて 2 つ存在し、それは特徴点ベースの sparse 型の手法と変分法ベースの dense 型の手法である。特徴点ベースの手法では、各画素とその周辺領域の輝度値の対応スコアを計算し、その対応度が最も高い画素を移動先として移動ベクトルを計算する。一方、変分法ベースの手法では、画像全体の各画素の移動ベクトルを推定する。今回使用した手法は、画素全体の動きを解析する変分法ベースの手法である。

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。図 9 は、OpenCV での色相と値の対応を示したものである<sup>33)</sup>。

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。

#### 5.5 3D グラスの性能確認のための検証実験

本検証実験の目的は、実装した検査部 (Cover-test システム) が、Cover-test で要求される機能を実現可能かどうかを確認することである。5.5.1 節では、液晶シャッターの遮蔽性能の確認を行っており、5.5.2 節では、取得画像から眼位異常の有無の検出が可能かの確認を行っている。

本節では、考察した手法による斜視・斜位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

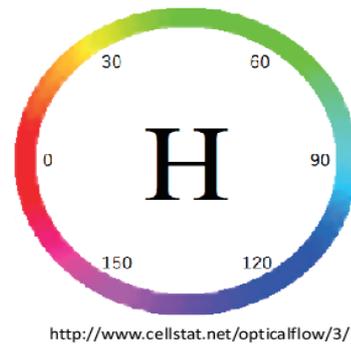


図 9. 色相と値の対応図

されている被験者一名の CUT の検査画像を用いた。

##### 5.5.1 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 (5.1.1 節) 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 (5.1.2 節) の動作確認も行った。更に、液晶シャッターは、従来 Cover-test 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。

##### 5.5.2 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、5.3 節に沿って 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。

事例を示す。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 10 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 フレーム目の右眼の画像を 5.4 節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 (図 9) を見ると、左閉後は耳側に移動していると考えられる。被験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 Cover-test で見られる動きと同様である。また、図 10 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ると考えられるので、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。

#### 6. 眼位異常判定システムの開発

本節では、6.1 項で、検出した眼球の動きを用いて斜視・斜位を判定する方法を示し、6.2 項で、眼位異常判定システムの

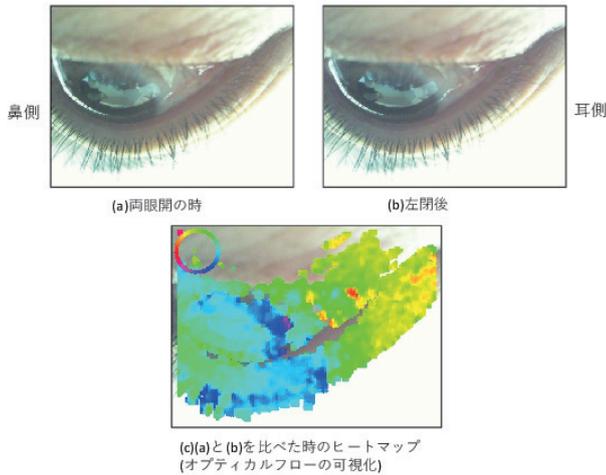


図 10. 左閉直後と約 2 秒後の右眼の画像の比較

実装事項について示す。

### 6.1 斜視・斜位の判定方法

開発した眼位異常判定プロセスは以下の (1)~(3) の 3 つの要素から成る。

- (1) 判定領域の切り出し
- (2) フローの検出
- (3) 設定した判定基準に基づく異常判定

(1) の目的は、眼位異常を表す黒目の動きの検出を合理的に行えるようにすることであり、そのための判定領域として (図 11) のような三角形領域を設定した。具体的な設定方法は次の通りである。

まず、前処理として黒目内に映る、蛍光灯等の白色の映り込み（「ハイライト」と同義）を除去する。ハイライトの除去には、Opening と呼ばれる処理を用いた。Opening とは、収縮→膨張の順に処理を複数回、同じ回数分だけ繰り返すことである。膨張・収縮処理は、一般的に二値化処理を行った白黒画像に対して用いられるが、本手法では、二値化処理をする前の RGB のカラー画像に対して膨張・収縮処理を行っている。RGB のカラー画像に対して膨張・収縮処理を行う理由は、判定領域の切り出しは RGB のカラー画像に対して行うため、RGB のカラー画像の状態で、ハイライトを除去したかったためである。

次に、黒目の中心座標を用いて、三角形領域を設定する。黒目の中心座標は、本提案システムを用いて検査を行う際、システムを操作する人間が、PC 画面に表示された小型カメラの映像を見ながら、入力を行う仕様にしている。中心座標  $(x_0, y_0)$  の上下左右に画素の色が大きく変化する 4 点を見出す。そして、眼球中心  $(x_0, y_0)$  の上の点  $(x_0, y_0 - a)$  を頂点とし、下の点  $(x_0, y_0 + c)$  を通る x 軸に平行な直線を底辺とし、頂点から左右の点  $(x_0 - d, y_0)$ 、 $(x_0 + b, y_0)$  を通る直線を底辺に向かって引く。以上の方法で判定領域は得られる。なお、図 11 のような三角形領域を判定領域として設定した理由は、眉毛や眼瞼痙攣のような眼球以外の動きを極力除去しながら、着目すべき眼球の縁を十分に含む領域切り出しがシステムティックな手順でできるということである。

次に (2) は、連続画像の 1 フレーム目と 2 フレーム目、2 フレーム目と 3 フレーム目のように、隣り合う画像のペア全て

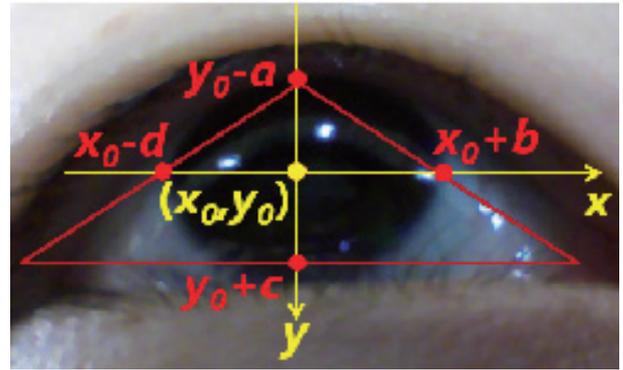


図 11. 判定領域の切り出し

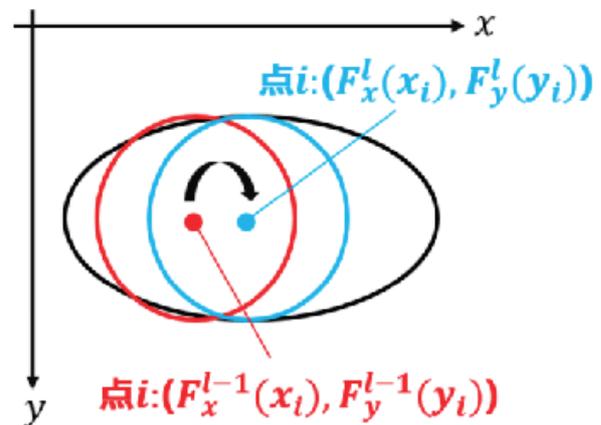


図 12. 同一座標系での任意の点  $i$  の対応

に対し、先行画像から後続画像への各画素のフローベクトルを求めることとした。フローベクトルを求めるにあたり、前提条件として、フレーム間の座標系は、同じ座標系上で考えたとする (図 12)。画像中の判定領域内の任意の 1 点は以下の数式によって求められる。

$$(x_i, y_i) \xrightarrow{f^1} (f_x^1(x_i), f_y^1(y_i)) \xrightarrow{f^2} (f_x^2(f_x^1(x_i)), f_y^2(f_y^1(y_i))) \cdots \xrightarrow{f^l} (f_x^l \cdot f_x^{l-1} \cdots f_x^1(x_i), f_y^l \cdot f_y^{l-1} \cdots f_y^1(y_i)) \quad (1)$$

式 (1) の  $(x_i, y_i)$  は、画像中の任意の点  $i$  の座標を表す。また、 $l$  は何番目のフレームかを表す。また、式 (1) より  $(F_x^l(x_i), F_y^l(y_i)) = (f_x^l \cdot f_x^{l-1} \cdots f_x^1(x_i), f_y^l \cdot f_y^{l-1} \cdots f_y^1(y_i))$  とおくと、 $(F_x^{l-1}(x_i), F_y^{l-1}(y_i))$  から  $(F_x^l(x_i), F_y^l(y_i))$  へのフローベクトル  $\vec{b}_i^l$  は式 (2) のように表せる。

$$\vec{b}_i^l = (F_x^l(x_i) - F_x^{l-1}(x_i), F_y^l(y_i) - F_y^{l-1}(y_i)) \quad (2)$$

そして (3) は、眼球の動きが水平方向となる眼位異常 (内/外斜視、斜位) の判定をする場合として次のように設定した。即ち、水平方向のフローベクトルのスカラー量が全ペアの平均を超えることが、カバー/アンカバー後の 4 フレーム目 (画像ペアの 3 組目) までに一度でも起こるか否かで判定することとした。ただし、上記条件を満たす場合でも、逆方向のフローベクトルのスカラー量も同時に平均を超える場合、つまり互いに逆向きのフローベクトルの大きさが共に平均を超す場合、眼位異常とは見なさないこととした。この場合の動きは、眼

位異常以外の原因に因る動きである可能性が否定できないためである。

フローベクトルのスカラー量および平均を求める数式を以下に示す。式 (2) より、 $(e_{ix}^l, e_{iy}^l) = (F_x^l(x_i) - F_x^{l-1}(x_i), F_y^l(y_i) - F_y^{l-1}(y_i))$  とおくと、フローベクトルのスカラー量  $b_i^l$  は式 (3) のように表せる。

$$b_i^l = \sqrt{(e_{ix}^l)^2 + (e_{iy}^l)^2} \tag{3}$$

式 (3) より、三角形領域上の全ての座標のフローベクトルのスカラー量の和は式 (4) のように表せる。

$$\sum_{(x, y)} D b_i^l \tag{4}$$

ただし、 $D = \{(x, y) | (x, y) \text{ は三角形領域上の任意の点}\}$

式 (4) より、全画像セットの三角形領域上の全ての座標のフローベクトルのスカラー量の和の平均は式 (5) のように表せる。

$$\left( \sum_{l=1}^N \sum_{(x, y)} D b_i^l \right) / N \tag{5}$$

式 (5) の  $N$  は全フレーム数を表す。

また、フローベクトルの角度について示す。フローベクトルの角度は、HSV 色空間の色相値を 2 倍した値を使用している。OpenCV では HSV 色空間の色相値を 0~180 で表す (図 9)。HSV 色空間の色相値  $d_i^l$  を求める式を以下に示す。

$$d_i^l = \frac{\text{atan2}(e_{iy}^l, e_{ix}^l) + \pi}{360\pi} \tag{6}$$

$(0 \leq d_i^l \leq 180)$

式 (6) の  $\text{atan2}()$  関数は、 $y/x$  の逆正接を  $[-\pi, \pi]$  の範囲で返す関数である (単位はラジアン)。

具体的な判定基準の設定について以下に示す。まず、水平方向とみなす角度の範囲 (図 13 の青色、赤色の領域) を設定し、22.5 度ごとに角度を 4 分割する。次に、分割したそれぞれの角度帯に属するフローベクトルのスカラー量  $b_i^l$  (式 3) を足して平均を出す。三角形領域上の全ての座標のフローベクトルのスカラー量の和 (式 4) の平均を超える角度帯の数で眼位異常の判定を行う。同図の青色、赤色の領域のどちらか一方で、平均を超える角度帯の数が [青色、赤色]=[4, 0] か [青色、赤色]=[0, 4] のとき、内/外斜視・斜位と判定をする。同図の青色、赤色の領域のどちらか一方で、平均を超える角度帯の数が [青色、赤色]=[0~3, 0] や [青色、赤色]=[0~3, 4] のとき、眼位異常とは見なさないこととした。この場合の動きは、前述した通り、眼位異常以外の原因に因る動きである可能性が否定できないためである。

### 6.2 眼位異常判定システムの実装

本節では、6.1 節で提案した眼位異常判定プロセスについて、提案手法の評価を行うために実装した眼位異常判定システムについて説明する。

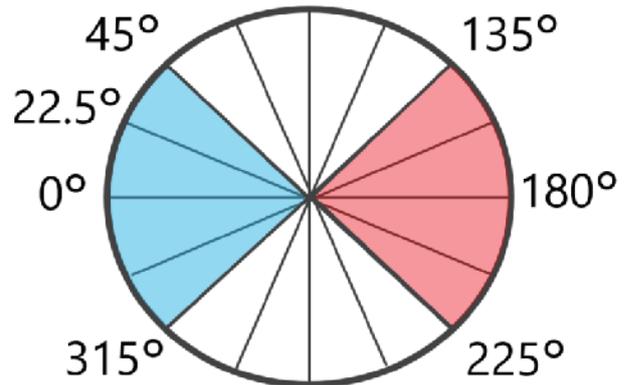


図 13. 判定基準の設定に用いる角度領域

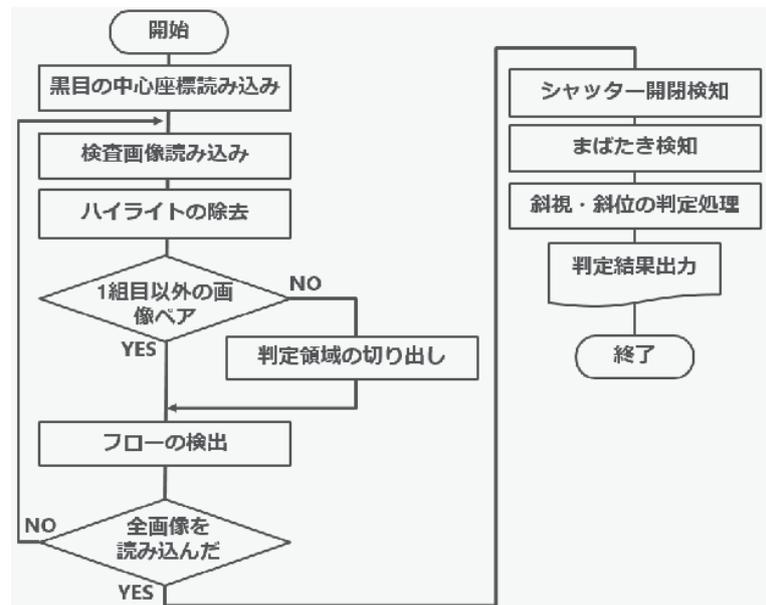


図 14. 眼位異常判定システムのフローチャート

#### 6.2.1 開発環境

開発言語は C++ を、画像処理ライブラリは Open CV を使い、マイクロソフトが提供する、統合開発環境の Microsoft Visual Studio 2015 にて眼位異常判定システムの実装を行った。

#### 6.2.2 眼位異常判定システムにおける実装事項

本節では、眼位異常判定システムの実装事項について説明する。フローチャートを図 14 に示す。

- (1) 黒目の中心座標読み込み：5.2 節で画像を取得する際に取得した黒目の中心座標を読み込む。黒目の中心座標は、本提案システムを用いて検査を行う際、システムを操作する人間が、PC 画面に表示された小型カメラの映像を見ながら、入力を行う仕様になっている。黒目の中心座標は、後の「(4) 判定領域の切り出し」にて使用する。
- (2) 検査画像読み込み：画像を 2 枚読み込む。読み込む画像は、5.2 節で取得した連続画像の、1 フレーム目と 2 フレーム目、2 フレーム目と 3 フレーム目のように、隣り合う画像のペアの画像を読み込む。
- (3) ハイライトの除去：6.1 節で述べた通り、Opening を使用して、黒目内に映る、蛍光灯等の白色の映り込みを除去する。Opening の回数を増やせば増やすほど、画

像が荒くなってしまうため、Opening の回数は、後の「(5) フローの検出」で影響が出ないこと確認できた 7 回としている。

- (4) 判定領域の切り出し：6.1 節で述べた通り、(1) の黒目の中心座標を用いて、三角形の判定領域を設定する。この処理は、フローチャート (図 14) に示してある通り、本提案システムを開始して、最初の 1 組目の画像ペアでのみ行う。また、判定領域の切り出しには、1 組目の画像ペアの右眼の 1 フレーム目の先行画像を用いる。判定領域の切り出しに使用する画像は、黒目内の映り込みが少ないものが望ましいため、3D グラスのシャッターが閉じている状態の右眼の先行画像を使用した。3D グラスのシャッターが閉じている状態の画像ならば他の画像でも問題ないが、5.2 節で述べた通り、画像を取り始めるタイミングの右シャッターは閉じている状態のため、1 組目の画像ペアの右眼の先行画像は、必ず右シャッターが閉じている画像になっている。
- (5) フローの検出：オプティカルフローを用いて、2 枚 1 組の画像ペアから、フローを検出する。5.4 節で述べた通り、Gunner Farneback 法<sup>32)</sup>を用いた。Gunner Farneback 法は、画像間の明るさの変化に強い特徴がある。そのため、この手法を選択した。
- (6) シャッター開閉検知：画像間の黒目内の輝度値の変化によって、シャッター開閉を検知する。具体的には、画像ペアごとの黒目内の輝度値の差が平均を超えている場合に、シャッターの開閉があったと判定している。これは、シャッター開閉時に、黒目内の輝度値が大きく変化するのを利用している。斜視・斜位による動きは、シャッター開閉後に見られるため、シャッター開閉を検知することで、斜視・斜位の動きがみられる画像を 40 枚の連続画像の中から絞ることができる。
- (7) まばたき検知：(6) のシャッター開閉検知の回数によって、暫定的なまばたき検知を行う。まばたきが起こった後は、黒目が動くことがある。これは、一瞬見失った視標を再度探すためだと考えられる。また、まばたき時のフローが、斜視・斜位の動きと似てしまうケースも確認している。したがって、まばたきによる動きや、まばたき後の黒目の動きを斜視・斜位の動きと誤検知しないために、まばたきの検知は必要である。まばたきが発生すると、画像間の輝度値の変化が大きくなり、シャッターが開閉した時と同じような輝度値の変化が起きる。これを利用する。本提案システムの ACT の検査中の 3D グラスのシャッター開閉の回数は、図 8 の開閉パターンを 2 回繰り返すため、4 回である。そのうち、画像を 40 枚取得する間の右シャッター開閉の回数は 3 回である。そのため、シャッター開閉検知の回数が 4 回以上になると、まばたきが発生していると判定できる。しかし、このまばたき判定には欠点があり、シャッター開閉のタイミングと同じタイミングでまばたきが起こると、まばたきが発生したことを検知することができない。現在は、この方法以外の代案を見つけていくことができていないため、この方法でまばたき検

知を行っている。まばたきを検知した場合には、検査のやり直しを要求する文言を出力するような仕様になっている。

- (8) 斜視・斜位の判定処理：6.1 節で述べた通りである。本提案システムでは、眼球の動きが水平方向となる眼位異常 (内/外斜視、斜位) の判定ができるような設計をしている。内/外の区別は、画像の取得を始めて最初のシャッター開閉後の眼球の動きで判別している。例を示すと、右眼の内斜視 (斜位) の場合は、被験者の眼を正面から見て左方向に動く。対して、右眼の外斜視 (斜位) の場合は、被験者の眼を正面から見て右方向に動く。このようにして、内/外の区別を行っている。
- (9) 判定結果出力：判定結果を CSV ファイルに出力する。判定結果は、以下に示す情報を出力する。眼位異常の有無 (内/外斜視・斜位、正位)、眼位異常の判定回数、まばたきの有無の 3 種類である。

## 7. 検証実験

本節では、実装した眼位検査システムを用いて検証実験を行った結果を示し、得られた判定結果の評価を行う。7.1 節で、本実験の目的について説明し、7.2 節で、実験環境について示す。7.2.1 節で、環境設定の違いによる性能比較を行うための評価実験を行い実験結果を評価し、7.3 節で、提案システムと従来の Cover-test との性能比較を行うための評価実験を行い実験結果を評価した。

### 7.1 実験の目的

本検証実験の目的は、実装した眼位検査システムの性能確認をすることである。検証実験では、検査時の条件・環境設定の違いによる性能比較と、眼位検査システムと従来の人による Cover-test との性能の比較を行う。

### 7.2 実験環境

検証実験は、提案手法を実装した眼位検査システムを用い、照度の閾値を 2 種類設定し、24 人の被験者に対し評価実験を行った。また、24 人の被験者には、本検査システムとは別に、従来の Cover-test による検査と、精密検査機器 Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査 (以降、Maddox 検査と同義) を行い、判定結果を記録した。なお、Cover-test と、Maddox 検査は、視能訓練士により実施された。

本節では、実験に参加してもらった、24 人の被験者のうち、ある 3 名の検査データを除いた 21 名分のデータを評価に用いている。3 名の検査データを除いた理由を以下に示す。一人目 (被検者 O) は、従来の Cover-test をしておらず、データ不足によるものである。二人目 (被検者 W) は、検査中にまばたきがあったためである。三人目 (被検者 S) は、Cover-test で検出できない (カバー・アンカバーで眼球の動きを検出できない) タイプの斜位であることが視能訓練士により判定された。従って、Cover-test ベースの開発システムでの評価の対象外であることから、除外した。具体的には、Cover-test では陰性、Maddox 検査では陽性 (10 $\Delta$  相当の内斜位)、取得した画像中の動きは僅かに見られる (10 $\Delta$  相当の動きは見られない) という結果を示した。この被検者 S の所見とし、視能訓練士

は以下のように述べている。「被験者 S は Cover-test では陰性、Maddox 検査では陽性で、症状として立体視が出来ていないが、視方向は正常のため、眼球の運動的要素に異常は無く、感覚的要素に問題がある可能性がある。」

画像データの取得環境について示す。照度の閾値を2種類ずつ設定した2部屋にて、画像データの収集を行った。部屋の照度はそれぞれ、約 663[lx] と約 896[lx] である。また、部屋に外光が入らないように、窓は黒いブラインドを用いて遮光している。

### 7.2.1 実験1 (環境設定の違いによる性能比較)

本節では、環境設定の違いによる性能比較を行い評価することを目的とする。

#### [3D グラス上部の黒い布による遮光の有無]

3D グラス上部の黒い布による遮光の有無により、検査部で取得する画像にどのような違いが出るか確かめた。3D グラス上部を遮光する黒い布は、5.1.1 節の図 7 に映っているものを使用している。

3D グラス上部を遮光した場合、遮光しない場合と比べて、シャッター開閉時の、取得画像間の黒目内の輝度値の差が大きくなった。また、3D グラスの上部からの光が入ってこないため、3D グラスのシャッターが閉じているときの黒目内への映り込みが少ないことを確認した。

#### [検査を行う部屋 (照度) の違い]

検査を行う部屋を変えて、部屋の照度が変わった場合の提案システムの判定結果に違いが出るか確かめた。ここでの提案システムの判定結果とは、取得した画像から斜視・斜位による動きをどの程度判定できているかを指す。調査した結果を以下に示す。

取得した画像中に、実際に斜視・斜位による動きがあるかどうかは、人間の眼によって判定した。提案システムの混同行列を表 1 に示し、評価指標を用いた提案システムの評価を表 2 に示す。

表 1 の混同行列の要素を以下に示す。

- TP(True Positive) : 斜視・斜位による動きがある画像を、提案システムでは斜視・斜位と判定した回数。
- TN(True Negative) : 斜視・斜位による動きが無い画像を、提案システムでは正位と判定した回数。
- FP(False Positive) : 斜視・斜位による動きが無い画像を、提案システムでは斜視・斜位と判定した回数 (誤判定)。
- FN(False Negative) : 斜視・斜位による動きがある画像を、提案システムでは正位と判定した回数 (判定漏れ)。

表 1 より、照度が 663[lx] の部屋では、21 件中 FN (判定漏れ) は 0 件で、FP(誤判定) は 1 件となっており、高い精度で判定が出来る。一方、照度が 896[lx] の部屋では、21 件中 FN (判定漏れ) は 3 件で、FP(誤判定) は 0 件となっており、FN (判定漏れ) の件数が増加している。

表 2 より、照度が 663[lx] の部屋では、正解率 (Accuracy) は 98% と高く、斜視・斜位の動きの判定精度に関する評価指

表 1. 提案システムの混同行列

照度	TP	TN	FP	FN
663[lx]	21/21	20/21	1/21	0/21
896[lx]	18/21	21/21	0/21	3/21

表 2. 評価指標を用いた提案システムの評価

照度	Accuracy	Precision	TPR	TNR
663[lx]	98%	95%	100%	95%
896[lx]	93%	100%	86%	100%

表 3. 提案システムと従来の検査手法との比較

照度	663[lx]	896[lx]
正位 (SY/CT)	4/13 <sup>*1</sup>	6/13
SY の真の失敗率	1/13 <sup>*2</sup>	1/13
斜視・斜位 (SY/CT)	7/8	7/8
SY の真の失敗率	0/8	0/8
SY の失敗率 (total)	1/21	1/21

SY:提案システム、CT:Cover-test

標を見ると、斜視・斜位と判定したものの中で、実際に斜視・斜位だった割合 (Precision) が 95%、斜視・斜位と判定すべきものの中で、実際に斜視・斜位と判定された割合 (TPR: True positive rate) が 100% となっており、斜視・斜位の動きに関しては、高い検出率を示している。また、正位と判定すべきものの中で、実際に正位と判定された割合 (TNR: True negative rate) は 95% となっている。照度が 896[lx] の部屋では、663[lx] の部屋と比べて、Precision と TNR が増加し、Accuracy と TPR 減少している。特に、TPR は 14 ポイントも減少しており、判定漏れの件数が増加している。

### 7.3 実験2 (従来の Cover-test との性能比較)

本項では、提案システムの判定結果が従来の Cover-test による判定結果と、どの程度一致するのか評価することを目的とする。

表 3 より、例えば <sup>\*1</sup> は「従来の Cover-test により正位と判定された 13 件のうち本提案システムでも正位と判定された件数は 4 件」ということを意味する。ここで Cover-test による判定と結果が食い違った 9 件について Maddox 検査 (3.3 項) で更に確かめたところ、この 9 件のうち 1 件以外からは軽微な斜視・斜位の存在が確認された。このことはシステムの真の判定失敗は 13 件中 1 件のみということを示している (表 3-<sup>\*2</sup>)。今回の評価実験では本提案システムは従来の人による Cover-test より高い検出能力を示した。

## 8. 実験の考察

7.3 項の実験 2 (従来の Cover-test との性能比較) では、本提案システムは従来の人による Cover-test より高い検出能力を示した。これは、従来の人による Cover-test では見つけることが出来ない、微小な眼球の動きを検出することが出来たことを示している。ここで検出できなかった 1 件は、照度が 663[lx]、896[lx] の部屋共に、同じ被験者だった。この被験者

は、Cover-test と Maddox 検査で陰性の結果が出ているが、取得した画像は実際に水平方向の眼球の動きがあり、提案システムは陽性の結果を出していた。原因は3通り考えられる。従来の検査手法の結果と、取得した画像の動きに差異があることから、取得した画像の動きが、斜視・斜位による動きではなく、シャッターが開閉したタイミングで偶然に眼球が左右に動いた場合が1つ目。2つ目は、従来の検査手法の結果が間違っている場合である。3つ目は、画像の動きが0~1△相当の微小な動きだった場合である。原因が1つ目にある場合、現在の判定ロジックでは、区別することが出来ないため、区別するには別の判定方法を考える必要がある。代案として、複数回検査を行うことが挙げられる。複数回検査を行うことで、偶然に眼球が左右に動いていた場合には、動いたのは偶然だったと確認できるだろう。原因が2つ目にある場合、これも時間や日を改めて検査を複数回行うことで改善できる可能性はある。3つ目の、0~1△相当の微小な動きが原因だった場合、Maddox 検査でも検出できない1△より小さい微小な動きを、提案システムが検出できる可能性があることを示している。誤判定の原因は特定できていないため、今後被験者数が増えた時に同様のエラーが起きた場合は対策を考える必要がある。

7.2.1 項の実験1（環境設定の違いによる性能比較）では、「3D グラス上部の黒い布による遮光の有無」と「検査を行う部屋（照度）の違い」について性能比較を行った。「3D グラス上部の黒い布による遮光の有無」では、3D グラス上部を遮光した場合、遮光しない場合と比べて、シャッター開閉時の、取得画像間の黒目内の輝度値の差が大きくなったことを確認した。この黒目内の輝度値の差を利用することで、シャッター開閉の検知ができるようになった(6.2.2 項)。斜視・斜位による動きは、シャッター開閉後に見られるため、シャッター開閉を検知することで、斜視・斜位の動きがみられる画像を全取得画像の中から絞ることができるようになった。3D グラス上部を遮光しない場合だと、環境によって、シャッター開閉時の取得画像間の黒目内の輝度値の差が小さいこともあり、シャッター開閉を安定して検知できなくなってしまう。シャッター開閉の検知ができないと、全取得画像が斜視・斜位判定の候補になる。その際、オプティカルフローが苦手とする、画像間に輝度値の差があるシャッター開閉時の画像ペアも斜視・斜位判定の候補となり、誤判定が増える原因になってしまう。

「検査を行う部屋（照度）の違い」では、照度が 663[lx]、896[lx] の部屋共に、Accuracy 93%以上の高い判定精度を示した(表 2)。表 1 より、照度が 663[lx] の部屋では誤判定 (FP) が 1 件あり、照度が 896[lx] の部屋では、判定漏れ (FN) が 3 件ある。照度が 663[lx] の部屋の誤判定 (FP) が 1 件は、前述した提案システムと従来の検査手法の比較の評価で検出できなかった 1 件と同様の被験者であるため、説明は省く。照度が 896[lx] の部屋の、判定漏れ (FN) の 3 件は、3 件とも Maddox 検査の結果が 2△ 以下の外斜位であった。2△ 以下の眼球の動きは、画像で確認してもかなり小さいが、オプティカルフローにより眼球の動きは検出できている(図 15)。図 15 は、判定漏れした 3 件の取得画像のヒートマップである。動きがあった座標付近には、HSV 色空間の色相値に対応した色がついている。眼球の動きは検出できているのに、判定漏れをしてい

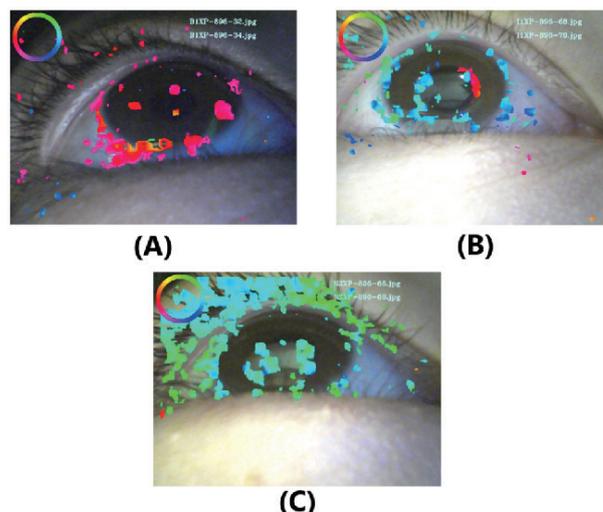


図 15. 判定漏れした取得画像のヒートマップ

る原因は、眼位異常の判定基準の設定時の閾値の設定にある。6.1 節の判定基準の設定で述べた通り、図 13 の青色、赤色の領域のどちらか一方で、平均を超える角度帯の数が [青色, 赤色]=[4, 0] か [青色, 赤色]=[0, 4] のとき、内/外斜視・斜位と判定をしており、それ以外の場合は眼位異常と見なさないようにしている。この閾値を満たしていないため判定漏れが起きている。図 15 の (A) は、[青色, 赤色]=[0, 3] で判定漏れしており、同図 (B) は、[青色, 赤色]=[3, 1]、同図 (C) は、[青色, 赤色]=[4, 1] で判定漏れしている。判定漏れした青色、赤色の領域の数を許容した閾値設定をした場合、誤判定 (FP) が増加することを確認している。そのため、安易な閾値の変更だけでは解決できない問題である。この問題を解決するには、別の判定基準の設定を設ける等、対策が必要である。また、照度が 896[lx] の部屋で判定漏れが増えた原因として、シャッターが開いている場合画像が明るくなり、瞳孔が見えるようになることが挙げられる。この瞳孔の動きをオプティカルフローが検出してしまうことで、逆方向の動きが大きくなり判定漏れの原因となっている。同図 (B) を見ると、瞳孔の右側だけ赤く色がついていることがわかる。

## 9. まとめ

本論文では、眼位異常のスクリーニングを助ける簡易な検査サポートシステムの提案を行った。赤外光に反応してシャッターの開閉を行う 3DVision 対応ワイヤレスメガネのシャッター機能を利用して、これまで検査者の手によって行われてきた Cover-test の自動化を行った。また、そこで取得した画像を用いて眼球の動きを検出するために、オプティカルフローを用いた判定手法を考案した。その際判定領域を切り出し、判定基準を設定することで、まばたき等の検査に不要な動きを除去することを可能にした。さらに検証実験により、異なる環境の中で提案手法の有効性を確認した。今後は、あらゆる種類の斜視・斜位の判定の実現、定量的な検査の実現とさらなる判定制度の向上を目指していきたい。

## 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),pp.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) 白井千恵：Hess 赤緑試験，日本視能訓練士協会誌,28巻,pp.81-92,2000.
- 4) 目の病気 加齢黄斑変性 (日本眼科学会)  
[http://www.nichigan.or.jp/public/disease/momaku\\_karei.jsp](http://www.nichigan.or.jp/public/disease/momaku_karei.jsp) ,(accessed 2018-1-21).
- 5) 高橋由嗣，四之宮佑馬，野上豪志，新井田孝裕：視線解析装置を利用した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.
- 6) 内田憲之，高塚佳代子，日隈光基，平田木乃美，中澤篤志，岡崎直宣：3D グラスを用いた簡易な眼位検査システムの開発に向けて，IEICE 総合大会論文集 H4-3,p.269, 2017.
- 7) Noriyuki Uchida, Kayoko Takatuka, Kouki Hinokuma, Konomi Hirata, Hisaaki Yamaba, Naonobu Okazaki: Automated cover-uncover test system using active LCD shutter glasses, 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics(AROB), 2018.
- 8) 平田木乃美，内田憲之，日隈光基，高塚佳代子，椋木雅之，岡崎直宣：眼位検査中の眼球動画像に基づく眼位異常判定プロセスの開発，電子情報通信学会 総合大会,2018.
- 9) PLATO 液晶シャッターゴーグル  
<http://www.namoto.com/vision/PLATO.htm> ,(accessed 2018-1-25).
- 10) Translucent Technologies  
<http://www.translucent.ca/> ,(accessed 2018-1-25).
- 11) NVIDIA Nvidia 3D Vision 2 概要  
<http://www.nvidia.co.jp/object/product-geforce-3d-vision2-wireless-glasses-kit-jp.html> ,(accessed 2018-1-25).
- 12) 藤田広志，木戸尚治，原武史，周向榮，松村千左子：CAD システムの最新動向 AI の動向も含めて，エキスパートによる RSNA 2015 ベストリポート 9,pp.32-35,2016.
- 13) 鈴木真太郎，張曉勇，高根侑美，川住祐介，石橋忠司，本間経康，吉澤誠：乳がん病変検出のための深層学習を用いた計算機支援画像診断システム，計測自動制御学会システム情報部門学術講演会,pp.804-809,2017.
- 14) 齊藤望，市地慶，張曉勇，本間経康，新藤雅大，井良尋，吉澤誠：肺がん放射線治療のための X 線動画像中の標的腫瘍のアフィン変換に基づく追跡法計測自動制御学会システム情報部門学術講演会,pp.798-803,2017.
- 15) OpenCV 画像解析入門 オプティカルフローの可視化  
<http://www.cellstat.net/opticalflow/> ,(accessed 2018-1-21).
- 16) 画像処理アルゴリズム オプティカルフロー推定の原理  
<http://opencv.blog.jp/algorithm/opticalflow> ,(accessed 2018-1-21).
- 17) 山内悠嗣，山下隆義，藤吉弘亘：画像からの統計的学習手法に基づく人検出，電子情報通信学会論文誌,Vol.J96-D,No.9,pp.2017-2040,2013.
- 18) 北川洋介，加藤丈和，呉 海元，和田俊和：アイモデルを用いた ConDensation による視線推定，情報処理学会研究報告,Vol.2005-CVIM-150,No.88,pp.17-24,2005.
- 19) Christian Nitschke, Atsushi Nakazawa, Haruo Takemura: Display-camera calibration using eye reflections and geometry constraints, Computer Vision and Image Understanding, Vol.115, pp.835-853, 2011.
- 20) Atsushi Nakazawa,Christian Nitschke: Point of Gaze Estimation through Corneal Surface Reflection in an Active Illumination Environment, European Conference on Computer Vision, European Conference on Computer Vision - ECCV 2012, pp.159-172, 2012.
- 21) 柴田 論，呉 志強，山本智規：パーティクルフィルタとニューラルネットワークを用いた視線方向推定に関する一構成法，産業応用工学会論文誌,Vol.5,No.1,pp.25-33,2017.
- 22) 日本眼科学会 目の病気  
<http://www.nichigan.or.jp/public/disease.jsp> ,(accessed 2018-1-25).
- 23) 内海 隆：斜視の検査法，あたらしい眼科 19(12),pp.1553-1556,2002.
- 24) 丸尾敏夫，久保田伸枝，深井小久子：視能訓練学，視能学第 2 版,pp.322-324.
- 25) 視能訓練士マニュアル  
<http://panda-ort.com> ,(accessed 2018-1-25).
- 26) わかりやすい臨床眼光学 (WEB 版)  
<http://www.sado-ec.com/images/pdf/gankougaku01.pdf> ,(accessed 2018-1-21).
- 27) プリズムとは  
<http://www.megane-issindo.jp/prism/prism.html> ,(accessed 2018-1-21).
- 28) 四之宮佑馬，高橋由嗣，野上豪志，新井田孝裕：視線解析装置による遠見・近見での片眼遮蔽時の眼位測定と交代プリズム遮蔽試験での眼位比較，眼科臨床紀要 9(3),pp.230-233,2016.
- 29) 共立プロダクツ USB フラット WEB カメラ (型番：KP-CAM32)  
<http://prod.kyohritsu.com/KP-CAM32.html> ,(accessed 2018-1-21).
- 30) Andrew Woods, Jesse Helliwell, A Survey of 3D Sync IR protocols, CMST 944, pp.1-16, 2011.
- 31) Open CV:OpenCV.jp  
<http://opencv.jp/> ,(accessed 2018-1-21).

- 32) Gunner.Fameback, Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion, Scandinavian Conference on Image Analysis, Image Analysis, pp.363-370, 2003.
- 33) OpenCV 画像解析入門 移動方向に応じたオプティカルフローの可視化  
<http://www.cellstat.net/opticalflow/3/> ,(accessed 2018-1-21).