

ヘッドマウントディスプレイと Web カメラを用いた眼位検査システムの開発

平田 木乃美^{a)}・高塚 佳代子^{b)}・山場 久昭^{c)}・油田 健太郎^{d)}・岡崎 直宣^{e)}

Development of the Automated Cover-uncover Test System for the Ocular Malalignment Detection with Head Mounted Display and Compact Camera

Konomi HIRATA, 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. That is, we devised the detection method by estimating center position of pupil.

Keywords: cover-uncover test, ocular malalignment, eyeball video, center of pupil

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、代表的な斜視・斜位などの眼位異常は、後に立体視不良や眼精疲労を引き起こす要因となるため、早期発見と早期訓練が必要である。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¹⁾。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²⁾。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-test¹⁾」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¹⁾³⁾⁴⁾。定量検査

の一部がデジタル化されているが³⁾、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ためである。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⁶⁾⁷⁾⁹⁾¹⁰⁾。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蔽/遮へい装置が存在する¹¹⁾¹²⁾。しかし、これにはコストの問題があり、未だ普及しておらず入手しづらい。また、眼球の動きの検出において既開発の視線追跡技術¹⁾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、入手し易くなった 3D グラス (Nvidia 3D Vision2¹³⁾) を用いてカバー・アンカバー機能の

^{a)}工学専攻機械・情報系コース大学院生

^{b)}教育研究支援技術センター技術専門職員

^{c)}情報システム工学科助教

^{d)}情報システム工学科准教授

^{e)}情報システム工学科教授

実装を行った。また、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眼球の動きの有無を判定する手法を考案した。

現在、眼科以外でも、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¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。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ず、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。

そのため、本研究室では先行して、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たシステムを提案した。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¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾。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²⁰⁾²¹⁾²²⁾、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²³⁾。先行研究¹⁰⁾では、それまで視線追跡手法の視線位置を算出するプロセスとして、黒目輪郭切り出しが必須であるのに対し、輪郭切り出しを必要としない手法を考案した。その結果、検証実験により、水平方向の斜視と斜位については、高い検出能力を示した。

しかし、臨床的には垂直方向や斜め方向の斜視・斜位も存在する。これらは水平方向と比べて症例数は少ないが、麻痺性斜視が疑われるケースであるため、検出の意義は非常に大きいというのが専門医の見解である。新しい手法の考案に先立って、オプティカルフローの利用を検討したところ、同手法は垂直方向の異常検出には適さなかった。問題点としては、システムの構成上、黒目と瞼や睫毛との重なりや黒目の撮影される角度がオプティカルフローの検出に影響を与えてしまうことがあげられた。そのため、本研究では、小型の赤外線カメラを撮影に使用することで、瞳孔のみを抽出し、瞼や睫毛による影響を軽減させ、瞳孔収縮等にも対処できるような瞳孔の動きを抽出する手法について検討することとした。

本論文は、第2章で本研究の目的について説明する。第3章で斜視・斜位について、またそれらの検査方法について説明し、第4章では、本提案システムの構成について示す。第5章では、本研究室の先行研究⁸⁾で開発された眼位異常検査システムの説明及び改良案について記す。第6章では、改善案で記した瞳孔の中心座標追跡に基づく異常検出プロセスについて説明する。第7章では、実装した眼位検査システムの検証実験と実験の考察を行い、第8章でまとめとする。

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。主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
- 取得画像に基づく眼位異常判定プロセスの開発

本論文では、本研究室で開発したシステム⁶⁾を用いて前者を実現させ、得られた取得画像に適切な画像処理を施すことで、垂直方向及び水平方向の斜視・斜位の判定を行う眼位異常判定プロセスの開発について説明する。

3. 眼位検査の現状

眼の疾患の中で、早期発見や早期訓練が求められている代表的なものに、斜視や斜位などの眼位異常（もしくは眼球運動障害）があげられる。これらの眼位異常を調べる眼位検査には、大きく、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-test¹⁾」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、「斜視角」と呼ばれる、正常な眼の位置と斜視の眼の位置との角度を表す視標が用いられる。

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。

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²⁴⁾。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分けられる。また、黒目の中心を支点に外方・内方にまわしずれが見られる回旋斜視も存在する（図1：参考²⁵⁾。）上下の斜視は一般に、回旋斜視や内・外斜視等の水平斜視に合併することが多いことがわかっている。さらに、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、眼球を動かす筋肉や脳の神経、眼球の周りの骨の異常、視力の異常、両眼視機能の異常で起こる。

斜位も、斜視と同様、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。

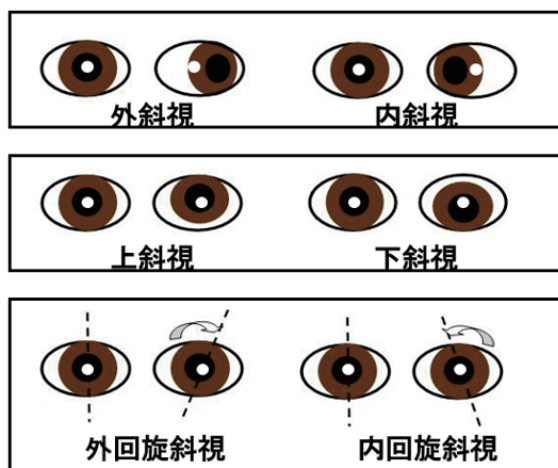


図 1. ずれる方向により分類される斜視の種類

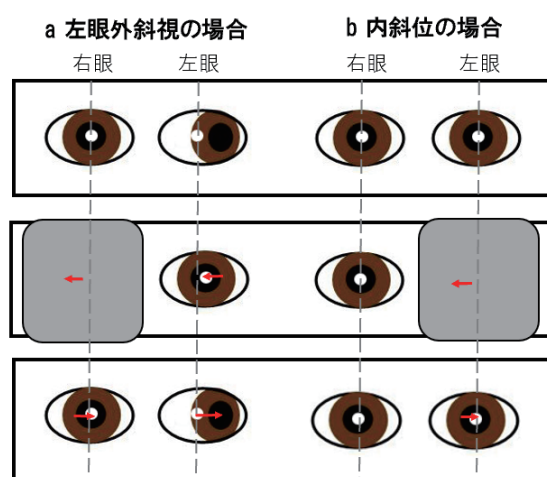


図 2. CUT による斜視・斜位の判定例

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)¹⁾²⁶⁾ 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²⁷⁾。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。臨症的には、CUT、ACT の順に行われることが一般的である²⁸⁾。

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 2 は参考サイト²⁸⁾ を基に作成した図である。図 2 の a は、左目が外に向いている外斜視の場合である。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 2 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。

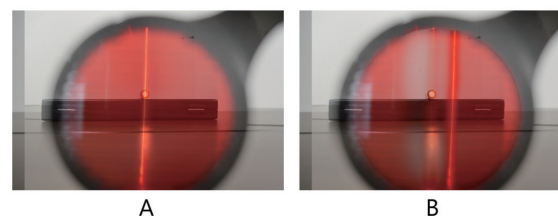


図 3. Maddox 小桿から見た光の見え方

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²⁸⁾。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 3)。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 4)。図 4 は参考サイト²⁹⁾ を元で作成した図である。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。図 5 は、実際に器具をあてて検査をしている様子である。

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 Δ 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²⁹⁾。また、1Δ=4/7 度約 (0.57 度) で表される³⁰⁾。

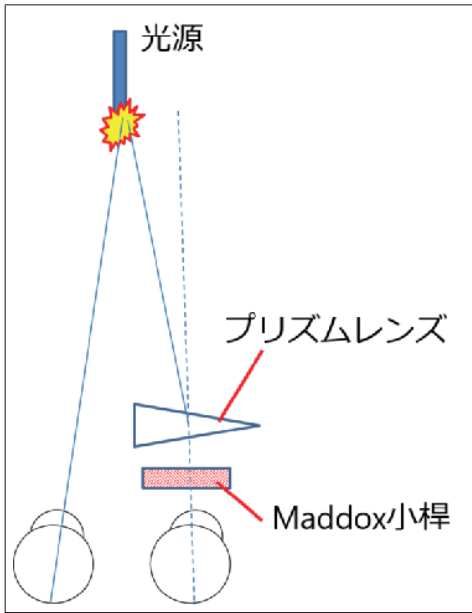


図 4. プリズムを用いた補正



図 5. Maddox による検査の様子

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²⁾。

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⁵⁾。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

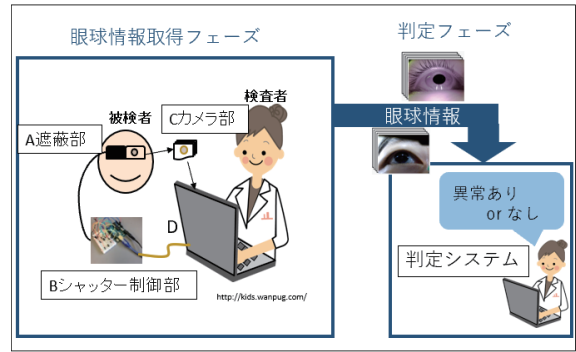


図 6. 眼位検査システムの構成

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³¹⁾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 の手法をベースに行う。

4. 提案システムの構成

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している。提案システムの全体構成を、図 6 に示す。同図は、システムの全体像であり、眼球情報取得フェーズ（Cover-test システムによる動作）と判定フェーズ（眼位異常判定システムによる動作）の 2 つのフェーズで構成されている。

眼球情報取得フェーズのシステム（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 は被験者が装着するゴーグル型液晶ディスプレイ（以降、3D グラズ、 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。シャッター制御部 B とカメラ部 C は USB で接続されており（同図 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。

図 7 は、図 6 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。また、図 8 は、後に示す物理的システムの変更後の図 6 の遮蔽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（図 7A-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（図 6A-3 及び図 8A'-3）。2 つのシステムの違いは小型カメラの種類である。図 6A-3 に

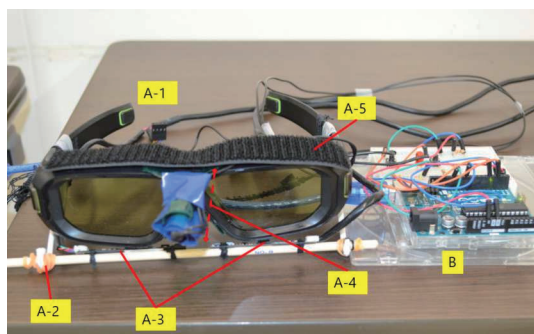


図 7. 遮蔽部とシャッター部の拡大図



図 8. システム変更後の遮蔽部の拡大図

は、「USB フラット WEB カメラ (型番: KP-CAM32³²⁾) (以降、フラットカメラ)」、図 8A'3 には、「USB ナイトビジョンカメラモジュール³³⁾ (以降、赤外線カメラ)」をそれぞれ取り付けている。また、中心部にある赤外線受光部に赤外線 LED を設置した (図 6A-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 (図 6A-5) を取り付けている。また、赤外線カメラの重さによる被検者の負担を軽減させるために、頭部と 3D グラスを固定させるマジックテープ (図 8A-6) を取り付けている。さらに、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 6E) 上に搭載している。判定フェーズは、眼球情報取得フェーズで取得した眼球情報 (目の連続画像) を基に、異常があるかを判定する機能が搭載されている。

以降、本研究で提案する眼位検査システムの開発について説明する。第 5.1 節では、本研究で実装された Cover-test のデジタル化の実現方法⁶⁾ 及び本章の眼球情報取得フェーズについて説明する。

さらに 5.2 節と 5.3 節、5.4 節では、本節の判定フェーズについて説明する。具体的には、5.2 節と 5.3 節では、本研究で実装されたオプティカルフローを用いた眼位異常判定方法¹⁰⁾ について示し、さらに、同じく 5.4 節では、5.1 節で説明するシステムの物理的変更を行い、新たな判定フェーズについて提案を行う。

5. 眼位検査システムの開発

本章では、本研究で提案するシステムの詳細について説明する。5.1 節と 5.2 節では、過去に本研究室で開発した Cover-test のデジタル化とオプティカルフローを用いた水平方向の眼位異常判定システムについて説明し、5.3 節ではそのシステムの

性能の確認実験を行う。5.4 節では、本論文で提案する垂直方向の斜視にも対応した眼位異常判定システムの開発について説明する。

5.1 Cover-test のデジタル化

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¹¹⁾¹²⁾ 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¹⁾。

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 Vision2¹³⁾) 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、第 4 節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 (5.1.1 節) と、眼球の動きの連続画像を撮影し取得する機能 (5.1.3 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 (5.1.4 節)。

5.1.1 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の仕様³⁴⁾ 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。

5.1.2 4 種の信号の実装とコントロール

赤外光パルスの仕様³⁴⁾ 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 9 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 $23\mu\text{s}$ 、消灯を $46\mu\text{s}$ 、点灯を $31\mu\text{s}$ 、消灯を $400\mu\text{s}$ 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 10 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

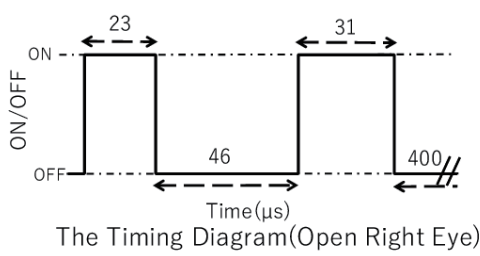


図 9. 右側のシャッターを開くパルスを表す波形

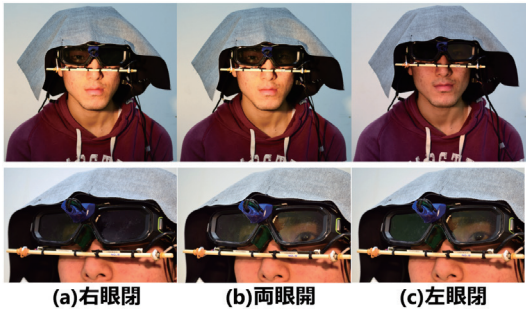


図 10. 赤外光シグナルによるシャッターの開閉

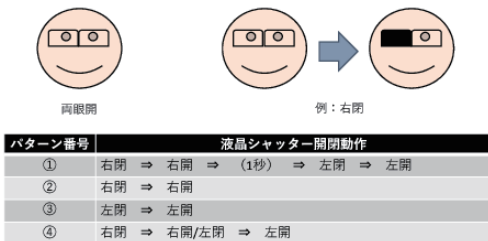


図 11. 液晶シャッター開閉のバリエーション

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。

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を開始する。

シャッター開閉のバリエーションは、図11内の表に示す4種類である。すべてのパターンの動作は図10に示す通りであるが、どのパターンも図11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11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。

5.1.3 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-CAM32³²⁾)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。

5.1.4 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(5m)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討を行う。

5.2 斜視・斜位の判定方法

5.2.1 オプティカルフロー

先行研究では、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¹⁷⁾¹⁸⁾”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¹⁹⁾。

この手法を、5.1.3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。

OpenCV³⁵⁾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おり、一般に実装方法が提供されているGunner Farneback法³⁶⁾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

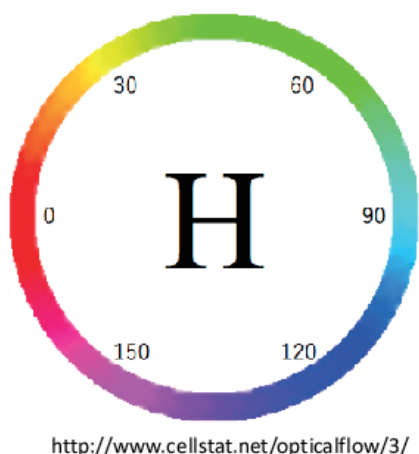


図 12. 色相と値の対応図

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。先行研究で使用した手法は、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。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 12 は、OpenCV での色相と値の対応を示したものである³⁷⁾。

なお、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。

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 13 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前述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 12）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 Cover-test で見られる動きと同様である。また、図 13 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

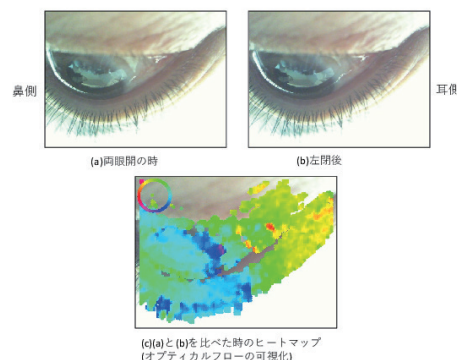


図 13. 左閉直後と約 2 秒後の右眼の画像の比較

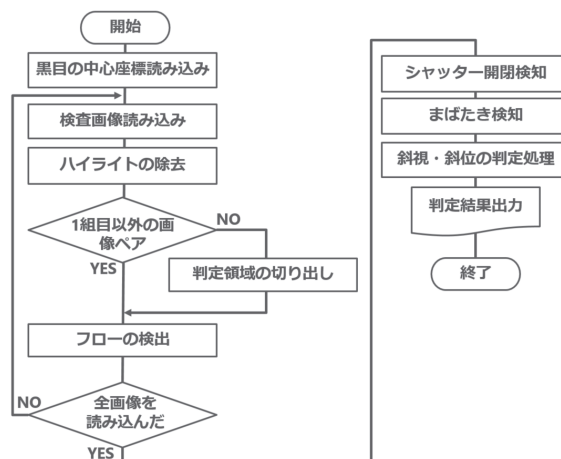


図 14. 眼位異常判定システムのフローチャート

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。

5.2.2 眼位異常判定プロセス

先行研究により開発した眼位異常判定プロセス全体（判定システムと呼ぶ）の流れは図 14 のとおりである。

ここでは主要な (1)~(3) の 3 つの要素について説明する。

- (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

まず、(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 15）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。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、入力を行う仕様になっている。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

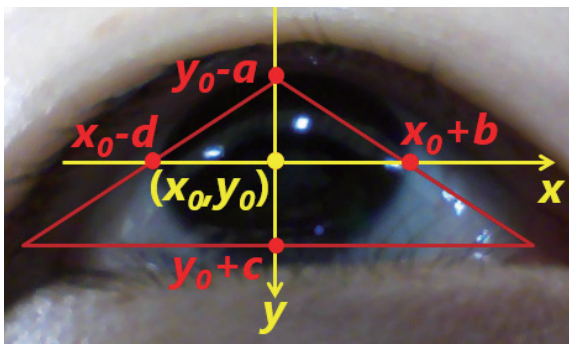
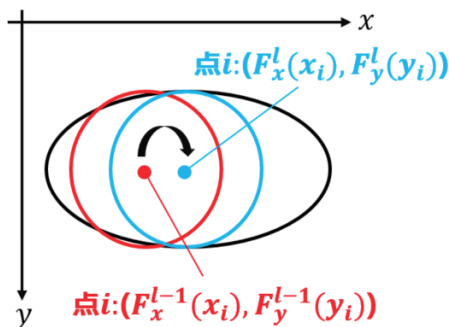


図 15. 判定領域の切り出し

図 16. 同一座標系での任意の点 i の対応

お、図 15 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マ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 枚目と 2 枚目、2 枚目と 3 枚目のように、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。

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るとする (図 16)。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。

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

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える場合、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。

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

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。

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

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。

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

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 12)。HSV 色空間の色相値 d_i^l を求める式を以下に示す。

$$d_i^l = \frac{\text{atan2}(e_{iy}^l, e_{ix}^l) + \pi}{360\pi} \quad (6) \\ (0 \leq d_i^l \leq 180)$$

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 17 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。

5.3 検証実験

本節では、実装した上記の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った。

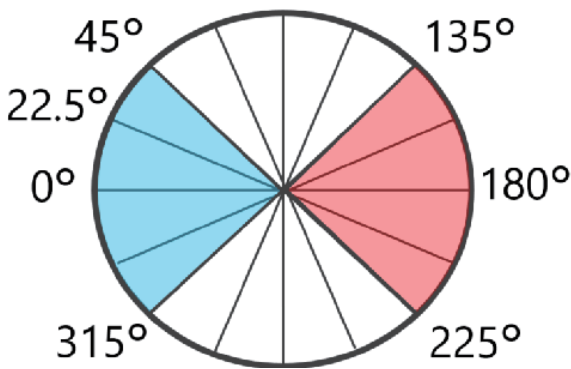


図 17. 判定基準の設定に用いる角度領域

図 18. 実験結果

	Cover-test	本システム	Maddox				
1	斜位	異常あり	2XP	15	正位	正位	0-1XP
2	正位	異常あり	1XP	16	正位	異常あり	1XP
3	正位	異常あり	0	17	正位	異常あり	2XP
4	正位	正位	0	18	正位	正位	10EP
5	正位	異常あり	2XP	19	斜位	異常あり	8XP/XT
6	斜視	異常あり	8XP/XT	20	斜視	異常あり	18XP/XT
7	正位	正位	2XP	21	正位	異常あり	2XP
8	斜位	正位	0	22	斜位	異常あり	4XP
9	斜位	異常あり	1XP	23	正位	異常あり	2XP
10	正位	異常あり	1XP	24	正位	異常あり	1XP
11	正位	正位	1-2XP	25	正位	正位	0-1XP
12	正位	異常あり	1XP	26	正位	正位	0
13	斜位	異常あり	2-4XP	27	斜位	正位	1XP
14	正位	異常あり	2XP	28	正位	正位	0

5.3.1 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を確認することである。開発システムは、Cover-test の自動化をベースとしたため、眼位検査システムと従来の人による Cover-test との性能比較を行う。

5.3.2 実験内容

被検者 28 名を対象とし、開発した判定システムの性能評価を行った。被検者は検査システム (3D グラス) を装着し、5m 先の視標を注視する。情報取得フェーズで得られた取得画像から、判定を行った。まず、Cover-test による検査結果と比較し、次いで Maddox による定量的検査を行った。

表 18 は、全被検者に対する Cover-test による検査結果 (1 列目)、開発したシステムでの検査結果 (2 列目)、及び Maddox による検査結果 (3 列目) を示す表である。Maddox の検査結果の見方は、XP は外斜位、XT は外斜視、EP は内斜位、XT は内斜視を表し、頭に付く数値は程度を表す。

実験結果について説明する。まず、表 1 の 1,2 列目より、本システムと Cover-test の結果の不一致率は 13/28 である。これに対し、表 1 の 2,3 列目より、本システムと Maddox の結果との不一致率は 5/28 とわかり、これが本システムの実質上の性能とみなせる。これに対し、従来 Cover-test の Maddox に対する不一致率は 14/28 であることから、今回の評価実験では、先行段階と同様に、本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と言える。これは、人の手による Cover-test ではわからないほど軽微な眼球の動きを、本システムが捉えられたことによる結果が大きい。

5.3.3 実験の考察

開発したシステムによる結果が Maddox による真の結果と異なっていた 4 つのケース C,G,K,S について考察する。まず、システムでは異常なし (“正位”と呼ぶ) と判定され Maddox では斜位と判定された No.7,11 をみると、異常の程度を表す数値が 1~2 であり、これは非常に小さい斜視/斜位であることを表している。このことは、No.7,11 が従来 Cover-test でも正位と判定されていることから明らかである。

次に、No.3 について考察する。これは Maddox、従来 Cover-test で共に正位と判定されているが本システムでは異常ありと判定されている。解析の結果、これは本システムの問題による誤判定とわかった。本システムでは、液晶シャッター開閉とまばたき発生タイミングを区別できない。共に輝度値の変化で検知しているためである。No.3 の誤判定はこの問題に因る誤判定であることがわかった。更に、Maddox のみ異常と判定するケース No.18 に関しては、本システムの適用外であることがわかった。つまり、従来カバーテストの原理では検出されないタイプの斜視/斜位が存在し、被験者 S はそれにあたることで視能訓練士による問題分析の結果分かった。最後に、No.27 に関しては、Cover-test と Maddox では異常ありと判定されたが、本システムでは正位と判定された。そのため誤判定を疑ったが、この被検者の検査画像を確認してみると、他の異常あり判定されたケースのような眼球の動きは見られなかった。専門家 (視能訓練士) によると、これは人の生理的な反応が影響しているとの見解であった。具体的には次のような見解である。即ち、人が視対象の際に行う行動は、眼球を主に移動させる eye mover と、頭部を主に回転させる head mover の 2 種類あるが、eye mover と head mover が同時に起こる場合、眼球フローを画像で捉えることが困難な状況になるということであった。従って、No.27 に関しても本システムの適用外であるとわかった。

以上のことから、より小さな斜視/斜位について判定可能にするシステムの必要性和、物理的変更が要検討であるということがわかった。

5.4 垂直方向の異常の検出

5.2 節の検証実験により、フラットカメラを利用して眼球画像を撮影し、オプティカルフローを活用した手法は、水平方向の眼位異常の検出には高い性能を示した。先行段階で眼位異常の検出を水平方向の斜視・斜位にのみ限定した理由は、眼球を動かす筋肉の構造により、一般的に、垂直方向の斜視・斜位は水平方向の斜視と併発して見られることが多く、スクリーニングを目的とする本研究の一段階として水平方向の眼位異常の検出に取り組んだ。しかし、垂直方向の異常の中には、麻痺性斜視等の異常が疑われるため、検出が求められている。しかし、同手法は、垂直方向の斜視・斜位の検出には不向きであるという欠点がある。

同手法で、垂直方向の斜視・斜位の検出を試みたところ、システムの構造上、撮影された黒目は横長の楕円に写り、水平方向の斜視・斜位では黒目と白目の両端の境界が動くことで顕著な動きを取得しやすかったのに対し、上下の境界部分は顔で隠れてしまっていることが原因で、垂直方向の眼球の動きを取得することは困難であった。

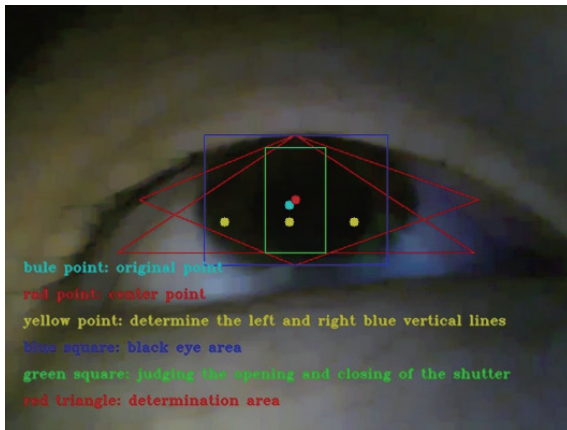


図 19. 判定領域の変更

図 5.4 は、図 15 で求めた三角形の領域だけでなく、より境界部分の動きを採取できるようにひし形の領域を検討した結果である。いずれの形状も、瞼や睫毛の動きを排除しようとすると、上下の動きはとらえづらひことがわかる。

そこで、フラットカメラの代わりに赤外線カメラ (図 8) を利用して、黒目内部の瞳孔を抽出し、その中心を連続的に算出して軌跡を追跡することにより、垂直方向の眼球の動きの有無も判定する手法を考案した。この手法の利点は、5.4 節で示した、黒目の上下の境界部分と瞼の重なりに関する問題を解消できることにある。

今回使用する赤外線カメラは、「USB ナイトビジョンカメラモジュール³³⁾」である。図 8A'-3 の赤外線カメラの装置は、カメラ本体に設置されている 6 つの赤外線 LED を物体に照射し、反射した赤外線だけを可視化することができる。図 6A-3 のフラットカメラに比べて、撮影速度が速いためより軽微な動きがとらえられると考える。今回は、検査に図 11 中パターン 4 を 2 回繰り返す動作を行った。従来の Cover-test でも同様に、同じ動作を複数回繰り返すことで眼位異常を見つけるためである。撮影を開始するタイミングは、遮蔽動作の中で、最初に右眼側の液晶シャッターが閉じている最中からで、約 10 秒間、240 枚の画像を取得した。判定に用いる画像は前半の 200 枚である。

以上のようなシステムの変更を行い、5.1.4 節で説明した手順と同様に、眼球情報取得フェーズを実現した。

第 6 節では、上記の眼球情報取得フェーズで得た赤外線カメラによる検査画像を用いて斜視・斜位の検出を行う、眼位異常検出プロセスの詳細を説明する。赤外線カメラで撮影した画像では、瞳孔の収縮が行われている様子が明確に分かるため、オプティカルフローではなく、瞳孔の中心座標を追跡する方法を考案した。

6. 瞳孔の中心座標追跡に基づく異常検出プロセス

フラットカメラの代わりに赤外線カメラ (図 8) を利用して、黒目内部の瞳孔を抽出し、その中心を連続的に算出して軌跡を追跡することにより、垂直方向の眼球の動きの有無も判定する手法を考案した。本章では、その提案手法について説明する。

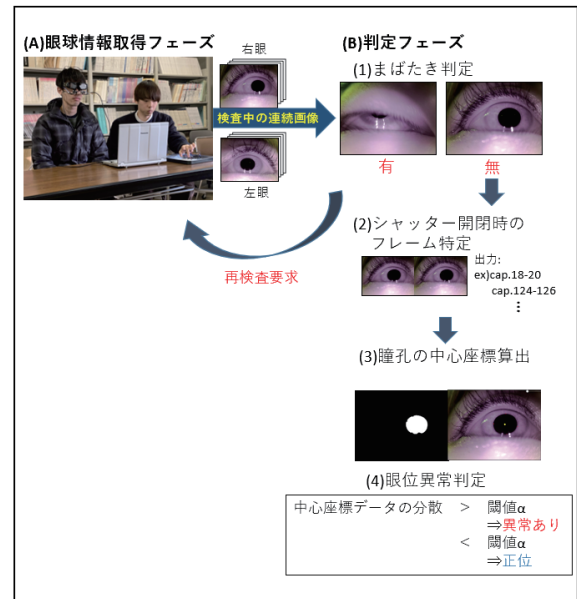


図 20. 提案する眼位異常判定プロセス

6.1 概要

開発した眼位異常判定プロセス全体の流れは図 20 のとおりである。

眼球情報取得フェーズではフラットカメラの代わりに赤外線カメラを使用し、約 0.05(s) の間隔で連続して画像を取得する。赤外線カメラは、カメラ本体に設置されている赤外線 LED を物体に照射し、反射した赤外線だけを可視化することができる。瞳孔は、全波長の光を反射しない性質があるため、画像上では、虹彩や他の部位と違って黒く鮮明に見える。この画像に対して、判定フェーズでは、色の表現方法の一種である RGB カラーモデルを使って、色彩の黒を表す部分だけ抽出を行い瞳孔部分とする。瞳孔部分の塊の上下左右の端の座標を用いて中心となる点を算出し、これを全画像に連続的に行うことで、瞳孔の中心座標の軌跡の追跡を可能にした。中心座標を連続的に算出することで、眼球の動きの追跡に、瞳孔収縮等の影響も受けない。

以下、眼球情報取得フェーズと判定フェーズの各要素技術 (図 20 中 (1) ~ (4)) について説明する。第 6.2 節で、瞳孔の中心座標算出方法について説明する (図 20-(3))。第 6.4 節で、まばたきをしたかそうでないかの判定機能について説明する (図 20-(1))。第 6.5 節で、眼球が検査の遮蔽動作によって動いたかそうでないかを判定するために、シャッター閉時のフレームを特定する手法 (6.5) について説明する (図 20-(2))。最後に、第 6.6 節で、眼位異常判定基準について説明する (図 20-(4))。

6.2 瞳孔の中心座標算出

図 21 は、赤外線カメラで撮影した眼球画像の一部である。フラットカメラで撮影した画像と比較すると外界の光等の影響が少ないことが分かり、虹彩の模様と瞳孔が鮮明に映し出されており、先行研究問題であった瞼と黒目の重なりを解消した。ここで瞳孔部分のみを抽出し、全画像に対して中心座標を算出する。後にこの値を利用し、初期位置との差を求めることで眼位異常の判定を行う。

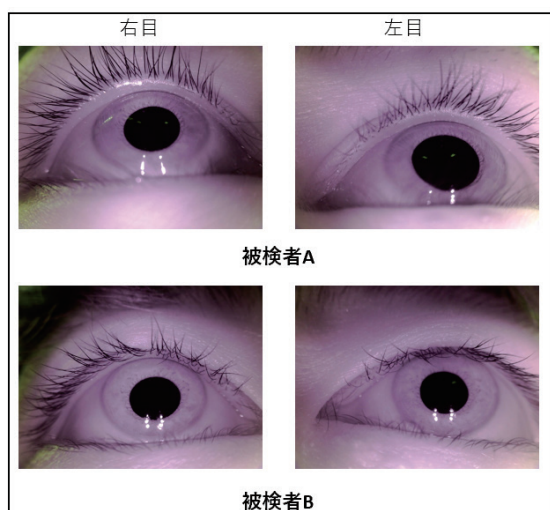


図 21. 赤外線カメラで撮影した眼球画像

本節では、瞳孔部分の抽出を行い、中心座標を算出する方法について説明する。

6.2.1 瞳孔部分の抽出手法

瞳孔の抽出には、RGB カラーモデル（以下、RGB 値）を使用する。RGB は、色の表現方法の一種で、赤 (R)・緑 (G)・青 (B) の光の 3 原色を組み合わせることで様々な色を表現する。それぞれを 8 ビットで表現し、それを 3 色組み合わせるため、 $256 \times 256 \times 256$ (約 1670 万) 色で表すことができる。黒は (0,0,0)、白は (255,255,255) で表される。この中から、境界部分の幅をもたせて黒を表す範囲 $\text{black}\{(0,0,0) \sim (15,15,15)\}$ の色を抽出する。瞳孔以外にも、睫毛、影、虹彩の一部が black の範囲内であるため、周囲のノイズを除去する処理を行う。

6.3 ノイズの除去方法

処理手順と結果の例について図 22 に示す。図 22-A は、抽出後の画像で、範囲 black で表される画素を白色 (255,255,255)、そのほかの画素を黒色 (0,0,0) の 2 色で表示している。まず周囲の白色のノイズを除去するために、オープニング処理を行った (図 22-B)。オープニング処理とは、収縮処理を複数回実施した後に、膨張処理を同じ回数実施する処理のことをいう。次に、蛍光灯が液晶シャッターに反射して、瞳孔付近に写る光のノイズを除去するために、クロージング処理を行った (図 22-C)。クロージング処理とは、膨張処理を複数回実施した後に、収縮処理を同じ回数実施する処理のことである。今回は、様々な画像に対して回数を検討した結果、どちらも膨張収縮をそれぞれ 5 回ずつとした。ノイズ処理後の画像の中で、中央（ここでは、眼球情報取得フェーズで手入力して得た座標）付近に位置する塊を瞳孔として採用する。画像セットによっては、3D グラスの影響で画像の角に大きなノイズが存在するため、中央付近に限定する。

6.3.1 瞳孔の中心座標の算出

次に、瞳孔の中心座標の算出について説明する (23)。まず、前段階で採用した瞳孔部分の y 座標の最も上に位置する座標を $A(a_x, a_y)$ とし、それから最も右に位置する座標、最も下に位置する座標及び最も左に位置する座標をそれぞれ $B(b_x, b_y)$ 、 $C(c_x, c_y)$ 、 $D(d_x, d_y)$ とする。A,B,C,D を用いて瞳孔の中心座

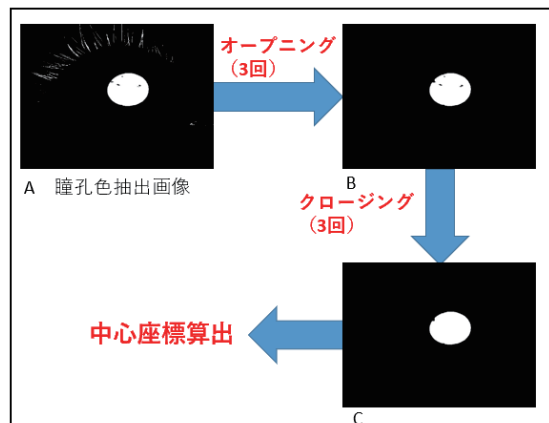


図 22. ノイズ処理の流れ

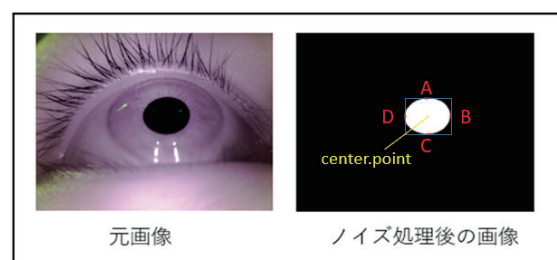


図 23. ノイズ処理前後の画像

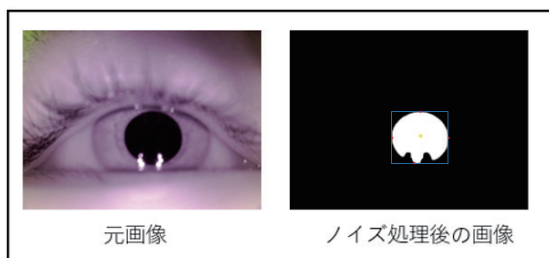


図 24. 赤外線 LED の光と瞳孔部分が大きく重なって写っている時

標 $\text{center.point}(d_x + \frac{b_x - d_x}{2}, a_x + \frac{c_x - a_x}{2})$ を求めた。取得画像の中には、図 24 のように、照射している赤外光の 6 つの光が瞳孔と重なり、綺麗な楕円が描かれない場合もあるため、瞳孔の塊のそれぞれ最も端に位置する点を採用した。同じ検査中による撮影画像では撮影位置は変わらないことを踏まえ、楕円の向きについては考慮しないため、ベクトルの要素ではなく、上下の座標の y 座標、左右の x 座標だけを計算に用いている。これらを取得画像すべてに行った。

6.4 まばたき判定

人が検査中にまばたきをした時には、眼球が動くことがある。これは、一瞬見失った視標を再度探すためだと考えられ、正確な検査結果を得ることはできない。そのため、まばたき後の眼球の動きを斜視・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。本提案手法では、抽出した瞳孔の面積（瞳孔を表す画素の数）が急激に減少した時と、楕円の長径と短径の変化の割合を見て判定を行う。まばたきが行われた時の取得画像 25 を見ると、1~2 枚連続して瞳孔と瞼の

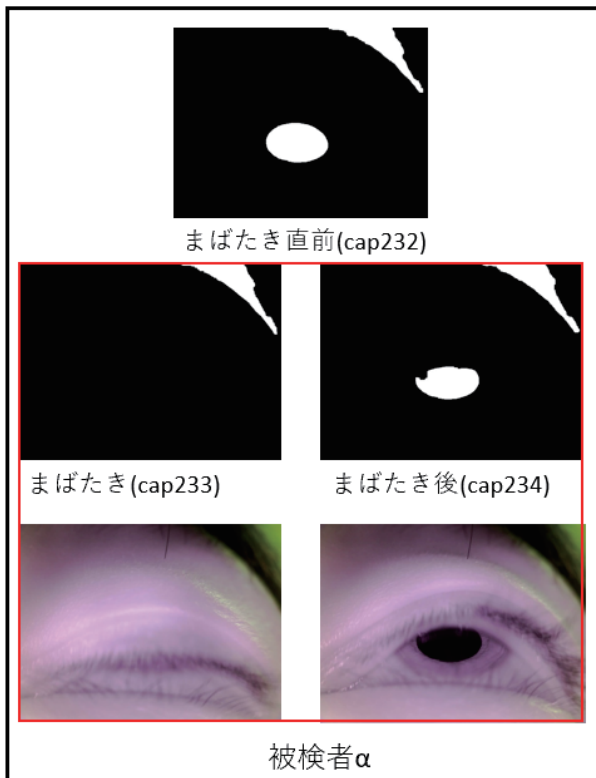


図 25. まばたき時の取得画像（ノイズ除去後）

重なりが発生することが確認済である。その時抽出した瞳孔の面積は減少し、横長の楕円の短径は短くなるため、これを利用する。瞳孔の収縮が行われるときの最も大きな径を持つ瞳孔（瞳孔が開いている時）の面積と最も小さな径を持つ瞳孔（瞳孔が収縮している時）の面積比の平均は 0.631 であった。まばたき時はそれに比べて、より小さい値を見せる。また、瞳孔収縮は短径・長径共に大きく変化するのに対し、まばたきの際には、長径はほとんど変化せず短径のみに変化が見られるため、このどちらの条件も満たしたときに、まばたきが行われたと判定する。

6.4.1 まばたき判定の手順

具体的な手順について説明する。まず、第 6.3 で採用した瞳孔部分以外に黒色 (0,0,0) のマスクをかける。次に輪郭検出を行い、その内部を瞳孔領域としを面積（領域の画素数）を求めた。これらの処理を全画像について行う。1 画像セットの内、最も大きい面積を $MaxPupilararea$ とし、 $MaxPupilararea$ に対して n 枚目の画像の面積 $Pupilararea_n$ との比が、0.6 を上回っていた場合は、まばたきをしていないと判定し、眼位異常判定に用いる。0.6 を下回っていた場合には、さらに上下左右の端の座標（点 A,B,C,D）を用いて、瞳孔の短径・長径を求める。この時の短径 $Minoraxis$ が $Axisy$ 減少したのに対し、長径 $Majoraxis$ が $1.4Axisy$ 以上減少した場合には、瞳孔収縮による面積の減少と考え、眼位異常判定に用いる。それ以外を、まばたきをしたと判定し、再検査の要求する文言を出力している。

6.4.1 の手法を実装したシステムを用いて、実際にまばたきを行った 3 つの画像セットとその他の 3 つの画像セットを対象に検証を行った結果、すべての画像セットに対して正確な

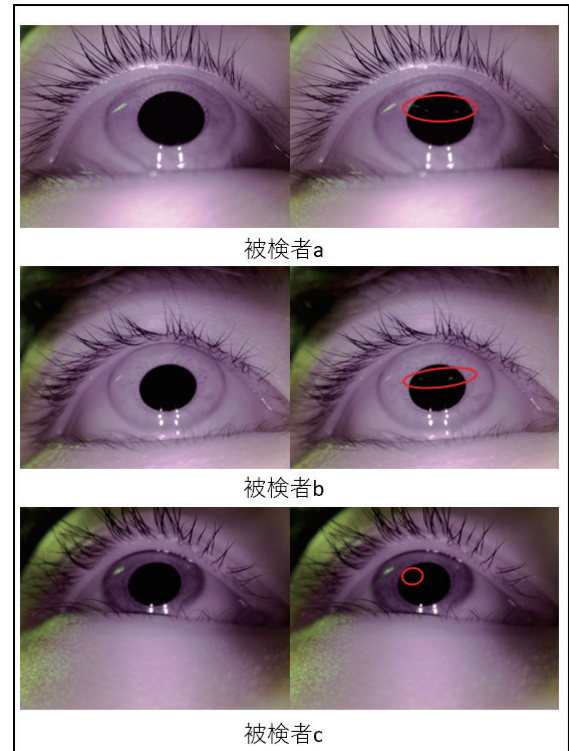


図 26. シャッターが開く前後の取得画像

判定結果を示したため、まばたき判定には上記手法を用いる。

6.5 シャッター開閉時のフレーム特定

本提案システムには、検査の遮蔽動作により眼球の動きが見られたことを確かめるために、シャッター開閉時のフレームを特定する必要がある。理由は、通常斜視・斜位の症状がある人の場合、眼球はシャッター開閉後の 1~2 秒の間に見られるため、その他のタイミングで見られた動きを斜視・斜位の動きと混同させたくないためである。先行研究¹⁰⁾では、黒目内の輝度値の急激な差を利用してフレームを特定していた。具体的には、黒目内にある領域を設け、画像ペアごとの設定領域内の輝度値の差が全ペアの平均を超えた時にシャッターが開いたもしくは閉じたと判定した。

しかし、赤外線カメラを用いたシステムには同手法は適用不可であるため、別手法として、液晶シャッターに反射して瞳孔内に写りこんだ検査部屋の蛍光灯の写りこみ（図 6.5）を利用した。蛍光灯の写りこみがある時は液晶シャッターは開いており、写りこみが見られないときは液晶シャッターは閉じている。

以下の小節で手法と手順について説明する。

6.5.1 蛍光灯の写り込みの検出

蛍光灯の写り込みを検出するために、画像に写っている緑色の画素を抽出する、瞳孔と同じく色を指定するが、黒と白以外の色の指定は、RGB 値では明るさの影響を受けるため不向きであるので、HSV カラーモデル（以下、HSV 値）を利用した。HSV は、色相 (Hue)、彩度 (Saturation)、明度 (Value・Brightness) の 3 要素で色を表現する。OpenCV による色相と値の対応図は、図 12 に示している。一般的には色相は 0~360 の範囲で考えるが、OpenCV では 0~180 で表すため、60

の値が緑色を表す。また、取得画像に写った蛍光灯の緑色は、彩度と明度が低いことから、彩度と明度に低い値を設けることで、抽出の精度の向上を試みた。

1 画像セット中の全画素に対して、指定した緑色の集団を検出した際に変数フラグに 1 を入力し、検出しない場合は 0 を入力する。1 つ前の画像の変数フラグの値と比べて異なっていた場合に、その画像 No. をシャッター開閉時のフレームとして記録し、シャッター開閉の回数に加算する。

6.5.2 シャッター開閉時のフレーム特定手法の妥当性検証

実際の 20 個の画像セットに対してシャッター開閉時のフレームが正しく特定できているかどうかを確認するための検証を行った。現在設定している遮蔽動作のパターンでは、右眼に 3 回、左眼に 2 回シャッター開閉が起こるので、がそれぞれの回数でなかった場合は、特定失敗とした。正しいシャッター開閉時のフレームは、人間の目で見て確認した。検証の結果、19/20 データで正しいシャッター開閉時のフレームの特定をでき、1 つの画像セットのみ特定失敗であった。その理由として、写り込みの検出をできずシャッター開閉の回数をカウントしなかったことがある。写り込んだ蛍光灯の彩度が極端に低かったことが原因である。本手法では前提条件として、眼球情報取得フェーズでカメラ位置を調整する際に、瞳孔付近に蛍光灯の映り込みを確認した後、遮蔽動作と画像取得を開始している。これは現在の検査環境（検査部屋）に依存しているため、今後システムの物理的変更を行うことを検討している。具体的には、スマートフォンのライトおよび白色 LED を被検者の頭上で点灯させると取得画像内に同系色の色相を確認できたため、今後は検査環境に依らず、安定した結果を得られるように白色 LED ライトの設置を検討している。

本節では、本節の手法で得たシャッター開閉時のフレーム No. を利用した眼位判定プロセスについて説明する。

遮蔽動作による眼球の動きは、シャッター開閉後の 4~15 フレーム目であるので、その範囲内に動きが見られれば、斜視もしくは斜位と判定できる。

6.6 眼位異常判定プロセス

本節では、算出した中心座標からどのように眼位異常の判定を行うかを説明する。具体的には、参考データ取得プログラムを実装し、データの分析を行い、判定のための閾値の設定を行った。第 6.2 節で説明した瞳孔中心座標を用いて、対象データが基準値を超え、第 6.5 節で説明した手法で得られたシャッター開閉後の間において中心座標の動きが見られると異常ありとみなすという手順を見出した。

まず、参考データの取得を行い、データの分析を行った。以下、第 6.6.1 小節で、今回データ分析や実験に使用したデータについて説明し、第 6.6.2 小節で、得たデータの分析結果を説明した。最後に、第 6.6.3 小節で、本システムの実装事項について説明する。

6.6.1 参考データについて

宮崎大学の学生 20 名に協力してもらい、通常の検査動作に加え、疑似斜視によるデータ取得を行い、都合 130 の画像セットを得た。1 セットは、検査 11 秒間に取得した右眼と左眼の

連続画像 480 枚の集合である。垂直方向の斜視・斜位は、水平方向の斜視・斜位と比べて比較的症例が少ないため、今回は垂直方向の眼球の動きをとらえるための可能性を見出す参考データとして疑似斜視データを用意した。眼科学会では、斜視の程度を示すものとして、斜視角があり、プリズムという単位が用いられる。プリズムは、通常、光を屈折・分散させるガラスなど透明体の三角柱のことで、光をあてると「1 m 先で 1 cm のずれ」を作る。このことから「一般的な検査距離である 5 m 先の視標で 5 cm のずれが生じて見えるものを 1 プリズムという斜視角で表す」こととし、シャッター開閉の瞬間に被検者に意図的に視線を動かすよう要求した。このデータを疑似斜視データと呼ぶことにし、参考データとして使用する。

以下のような方法でデータの取得を行う。まず 5 m 先に、2 つの視標を縦もしくは横に並べて用意する。被検者が力を抜いた姿勢で座り、正面を向いた位置にその視標を設置した。プリズムの大きさは 1 プリズム、2 プリズム、3 プリズム、4 プリズムの斜視角を持つ 4 パターンの被検者がいる場合を想定し、それぞれ 2 つの視標の幅を、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm に設定した。3D グラスの液晶シャッターは、「右閉→右開/左閉→左開/右閉→両眼開」の開閉パターンで開閉するように設定しており、検査中に 3D グラスの液晶シャッターが開閉するタイミングに合わせて、2 つの視標を交互に見るよう指示する。視標を縦に並べて得たデータを垂直方向の疑似斜視データ、視標を横に並べて得たデータを水平方向の疑似斜視データと呼ぶことにした。また、視標を 2 つ用いず、1 つの視標を見続けてもらう時に得たデータを通常検査データと呼ぶ。

また、前提として、疑似斜視データを取得する被検者には、あらかじめ定量検査 Maddox 検査において垂直・水平方向ともずれがない（斜視角で 1 プリズム未満である）ことを確認してから行っている。斜視角で 1 プリズム以上の斜視・斜位を持つ被検者においては、通常検査データのみ採取した。中には 8 プリズムの水平方向の異常を持つ被検者のデータも存在する。

6.6.2 データの分析

取得画像から中心座標を算出する方法については、第 6.2 節で説明した。「斜視・斜位でない（以降、正位と呼ぶ）人の場合、遮蔽動作が行われても眼球は動かない」という原理を基に、1 枚目の画像の中心座標を初期位置として、 n ($n = 2 \sim 240$) 枚目の座標との差 $CenterPointD_n(x_n, y_n)$ を垂直方向と水平方向を分けて記録した。図 A3 は、ある被検者 A の通常検査データセットの CenterPointD を表したグラフである。被検者 A は、12 プリズムの水平方向の異常を持ち、垂直方向には 3 プリズムの異常を持つ被検者である。赤で囲まれている CapNo. は、シャッター開閉時のフレームである。同図を見ると、シャッター開閉後に中心位置が変わり、次のシャッター開閉が行われるまで、おおよそその一定位置にとどまることがわかる。

本手法では、主に全画像の CenterPointD の分散を判定の基準にする。分散に関して、平均から遠く離れたデータが多いほど散らばりが大きく分散が大きくなり、平均に近いデータが多いほど散らばりは小さく分散も小さいことが言える。通常検査において、斜視や斜位の症状を持たない人は、遮蔽動

表 1. 垂直方向の疑似斜視の分散データ

斜視角 (プリズム)	分散の被験者の平均
1	1.90
2	4.02
3	9.66
4	16.73

表 2. 水平方向の疑似斜視の分散データ

斜視角 (プリズム)	分散の被験者の平均
1	2.56
2	5.63
3	11.60
4	21.10

作を行っても眼球の動きは見られない。そのため、各中心座標のデータが初期位置とほとんど同じ値を見せる (=分散の値が小さい) のであれば、正位であると判定できる。さらに、分散の値が大きければ大きいほど、各中心座標のデータが初期位置から離れた場所にある場合が存在するため、より大きな斜視を持つことが考えられる。今回、基準として単純な移動距離を採用していない理由は、被検者によっては、撮影するカメラ位置と目の位置が近い/遠い等の影響で、同じ斜視角の程度でも、異なる値を見せる可能性があるためである。

表 6.6.2 と表 2 は、取得画像から中心座標を算出し、1 枚目の初期座標からの移動距離を求め、そのデータの分散をプリズムの大きさ別の平均の値である。垂直方向の疑似斜視は 13 人分のデータで、水平方向は、1 及び 2 プリズムは 15 人分のデータ、参考データとして記載する 3 及び 4 プリズムは 3 人分のデータである。

Maddox 検査により正位と判定された 8 人の通常検査 (視標 1 つを注視する動作だけ) データ中の右眼の分散の平均は、垂直方向では 1.43、水平方向では 2.10 であった。

上記結果を見ると、斜視角が大きいほど、分散では大きな値を示した。しかし、1 プリズムの疑似斜視データでは、正位データの分散の平均と大きな違いは見られなかった。この理由として、疑似斜視は、被検者に対して意図的に 2 つの視標を交互に見てもらおうのだが、5m 先の視標では、5cm の幅は非常に狭く感じ、明確に見分けることが容易ではないことがあげられる。

眼科医および視能訓練士によると、一般的に、2 プリズム以上の斜視や斜位を持つ人が、ものが 2 つに見えたり (複視)、斜位の人の場合、見えるのが眼精疲労を感じるという。本分析では、実際の斜視・斜位データの取得前段階であるので、上記結果より、分散の値で 4 より大きい時、斜視角で 2 プリズム以上の斜視の可能性があるとして判断することにし、判定結果とする。

また、垂直方向で、分散が 8 より大きく 15 以下で 3 プリズム、15 より大きく 18 以下で 4 プリズムと判定し、水平方向で、分散が 10 より大きく 19 以下で 3 プリズム、20 より大きく 22 以下で 4 プリズムと判定を行うことにする。さらに、小さい斜視・斜位の見逃しを防ぐために、分散が 2~4 の範囲

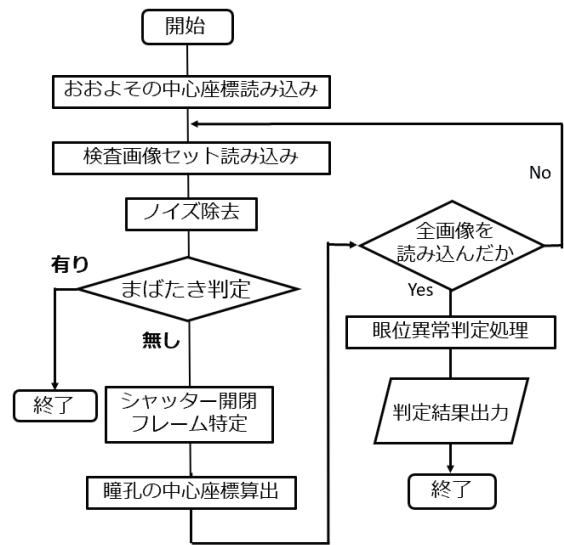


図 27. 提案した眼位異常判定プロセスのフローチャート

かつシャッター開閉後に動きが確認できた場合は、1 プリズムの斜視・斜位の可能性があるという文言を表示する。厳密に言えば、疑似斜視のデータでは、異常を持つ被検者の通常検査データに比べて、動きだすタイミングに遅れが生じるため、同じプリズムの動きでも、分散に違いが見られることが予想されるのだが、今回得られたデータからは暫定的に、上記の方法で振り分けを行う。

6.6.3 眼位異常判定システムの実装

本小節では、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の流れについて説明する。

[開発環境] 開発言語は C++ を、画像処理ライブラリは OpenCV 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。

[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 27 に示す。

眼位異常判定システム：フロー

- (1) おおよその中心座標読み込み：5.1.3 節で画像を取得する際に取得した黒目の中心座標と同様に、瞳孔のおおよその中心座標を読み込む。おおよその中心座標は、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 画面に表示された赤外線カメラの映像を見ながら、入力を行う仕様になっている。おおよその中心座標は、後の (3) にて使用する。
- (2) 検査画像読み込み：1 つの検査で取得する画像 240 枚のうち、1~200 枚目までの画像を検査対象として、順番に画像を 1 枚ずつ読み込む。
- (3) ノイズ除去：読み込んだ画像から、黒色の画素のみを表示させた画像に対して、6.3 節で述べた通り、オープニング処理で、睫毛などの瞳孔以外のノイズを除去する。さらに、クロージング処理を行うことで、瞳孔内

の光の写り込みのノイズを除去する。また、ノイズ除去後の画像の中で (1) で取得したおおよその中心座標を基に、その付近にある集合を瞳孔として採用する。

- (4) まばたき判定：6.4 節で述べた通り、瞳孔部分以外に黒色のマスクをかけ、瞳孔部分のみの面積を求める。面積が急激に減った時にまばたきを疑い、さらに短径・長径の減少した割合を比べ、短径が短くなった割合に対して、1.4 倍以上短くなっていない場合には、まばたきと判定し、その画像セットは検査に用いない。その理由として、まばたきが行われた時に、視標を見失い再び視標を探す動きを眼位異常の動きと混同しないためである。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。
- (5) シャッター開閉フレーム特定：瞳孔付近に写る蛍光灯が 3D グラスに反射して写り込んだ光を用いて検知する。検査の遮蔽動作によって、眼球が動いたことを確認するために、シャッター開閉が行われたフレームの No. を記録しておき、(7) で使用する。
- (6) 瞳孔の中心座標算出：(3) で採用した瞳孔の上下左右の端の座標を計算する。(2)~(6) を 1 画像セット中の全画像 (200 枚) に対して実施する。
- (7) 眼位異常判定処理：(6) で算出した中心座標の中で、1 枚目の中心座標を初期位置としてその他の画像の中心座標との差を垂直方向と水平方向に分けて求める。第 6.6.2 節で得た数値から、1 画像セットの差の分散が 4 以上の画像セットを後に重度化が予想される 2 プリズム以上の眼位異常の可能性があると絞り込み、さらに、(5) で記録した液晶シャッター開閉後から 4~15 枚の画像中で、それまでとは逆方向に 3 枚連続して移動距離がみられた際に、それらは検査の遮蔽動作によって見られた動きであると判定する。中でも、垂直方向では分散が 8 より大きい時、水平方向では 10 より大きい時を程度の大きい斜視であると判定する。
- (8) 判定結果出力：判定結果をプログラム実行後のウィンドウと CSV ファイルに出力する。判定結果は、ウィンドウには垂直方向と水平方向にそれぞれの程度 (程度：大もしくは小) の斜視・斜位であることを出力する。CSV ファイルには斜視角も出力する。

7. 検証実験

本章では、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 で、本実験の目的について説明し、7.2 で、実験環境と実験データについて説明する。7.4 では、実験結果と考察を記す。

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評価を行うことである。検証実験では、提案システムと定量検査 Maddox で得た検査結果との比較と、疑似斜視データで想定したデータとの比較を行う。

7.2 実験環境・実験データ

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、合計 20 人の右眼の検査データに対して評価実験を行った。第 6.6.2 節で説明したように、垂直方向の斜視・斜位を持つ症例は少ない。そのため、検証実験では、疑似斜視データを含む以下の 2 つのデータ集合を使用し、評価を行う。

7.2.1 テストデータ (T1・T2)

T1 通常検査データ：20 名の被検者を対象に、1 回ずつ通常検査データを取得し、20 個の画像セットを得る。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、判定結果を記録する。提案した眼位検査システムによる判定結果と比較を行う。Maddox 検査で斜視・斜位の眼位異常でない (以降、正位と同義) 被検者をシステムで正位と判定し、2 プリズム以上の斜視・斜位の疑いがある被検者をシステムで異常ありと判定可能であるかに注目する。異常ありと判定された場合には、斜視・斜位であると判定した方向も特定し比較する。

T2 疑似斜視データ：ここでは、15 名の疑似斜視データの中から、斜視角の大きさに関わらず、無作為に 20 個の画像セットを選び、想定した種類の斜視・斜位とシステムで判定した斜視・斜位の方向と大きさを比較する。

テストデータを 2 つに分けて実験する理由は、第 6.6.2 で、検出の可能性として疑似斜視データを用いているが、実際に垂直・水平方向の斜視を持つことを確認している被検者のデータと比べると、シャッター開閉に反応して眼球が動くまでに画像で 2~5 枚の時間差が存在することがわかり、シャッター開閉後に遮蔽によって眼球の動きがみられたことの判定仕様を変更する必要があるためである。

通常検査データでは、シャッター開閉後の 4~15 枚を対象範囲とするのに対して、疑似斜視データでは、シャッター開閉後の 5~20 枚を対象範囲に設定して実験を行う。また、今回はプリズムの設定をする参考データとして、疑似斜視データを用いているため、通常検査データで得られる分散のデータとは必ずしも一致しないと考える。

7.3 実験内容

本実験では、5.4 節で説明した眼球情報取得フェーズの手順で検査を行い得られたという設定で、上記 2 つのデータセットを 6.6.3 節で説明した判定フェーズのシステムに適用する。そこで得られた結果について、評価と考察を行う。

7.4 実験結果

本節では、7.2 で示した 2 つのテストデータに対し、提案システムによって眼位異常の検査を行った結果と評価を示す。

7.4.1 実験結果

まず、テストデータ T1 の結果を表 3 に示す。2 列目は Maddox 検査による結果、3 列目は被検者に対して表示する結果内容を示している、さらに 4 列目では今回の分析データから設定した閾値を基に斜視・斜位のプリズムの大きさを示している。垂直方向を V、水平方向を H と表し、それぞれの方向の斜視角と共に組み合わせて記す。(例。垂直方向に 1 プリ

表 3. テストデータ T1 の検査結果

被検者	Maddox	提案システム	詳細
A	正位	正位	V0H0
B	V0H6	異常あり (大)	V3H5-
C	正位	正位	V0H0
D	正位	正位	V0H0
E	正位	正位	V0H0
F	正位	正位	V0H0
G	V0H0-1	正位	V0H0
H	正位	正位	V0H0
I	正位	正位	V0H0
J	V0H1	正位	V0H0
K	正位	正位	V0H0
L	正位	正位	V0H0
M	V0-1H1	正位	V0H1
N	正位	正位	V0H0
O	正位	正位	V0H0
P	V0H5	H 異常あり (大)	V0H5-
Q	正位	正位	V0H0
R	V3H12	VH 異常あり (大)	V4H5-
S	正位	正位	V0H0
T	正位	正位	V0H0

表 4. テストデータ T2 の検査結果

被検者	Maddox	提案システム	詳細
A'	V4	V 異常あり (大)	V4H0
B'	V2	V 異常あり (小)	V2H0
C'	H2	H 異常あり (小)	V0H2
D'	H2	VH 異常あり (小)	V1H2
E'	V3	V 異常あり (大)	V3H0
F'	V3	V 異常あり (大)	V3H0
G'	V2	V 異常あり (小)	V1
H'	H1	H 疑いあり	V0H1
I'	V1	V 異常あり (小)	V1H0
J'	H2	VH 異常あり (小)	V1H2
K'	V4	V 異常あり (大)	V4H0
L'	H1	H 疑いあり	V0H1
M'	V1	正位	V0H0
N'	H2	H 異常あり (小)	V0H2
O'	V3	V 異常あり (大)	V3H0
P'	V1	V 疑いあり	V1H0
Q'	H1	H 疑いあり	V0H1
R'	V1	V 疑いあり	V1H0
S'	V2	V 異常あり (小)	V2H0
T'	V2	VH 異常あり (小)	V2H1

ズム・水平方向に 2 プリズムの場合、V1H2) また、どちらも異常が見られない場合は正位と表し、提案システムにおいて、1 プリズム未満の場合は 0、4 プリズムより大きい場合は 5- で表す。

次に、テストデータ T2 の結果を表 4 に示す。上記で示した A~T の被検者と A'~T' は対応していない。

上記結果より、テストデータ T1 の中で、Maddox 検査の検査結果と提案システムによる検査結果が一致していた個数は 15/20 個であった。また、テストデータ T2 の中で、想定した斜視角と提案システムによる検査結果が一致していた個数は 15/20 であった。判定結果不一致の理由について、7.4.2 で説明する。

7.4.2 考察

実験結果より、判定結果の不一致の理由について考察を行う。まず、3-B の結果について、Maddox 検査では、水平方向にのみ異常が見られたのに対して、水平方向に異常があることは正確に判定できていたが、垂直方向にも異常ありという結果であった。この判定不一致の理由として、検査画像 (28) を確認すると、撮影時の下瞼と瞳孔の重なり部分が大きいことがあげられる。シャッター開閉後に起きる瞳孔収縮により、瞳孔の短径が短くなり、中心位置のずれが発生してしまった。瞳孔領域の面積は小さくなるものの、短径と同時に長径も小さくなっているため、まばたき判定もされなかった。より瞼の重なりの影響を受けない物理的システムの変更が必要であると考えられる。3-G と 3-M では、Maddox 検査では、1 プリズム未満の非常に小さい斜視・斜位であると判定された。提案システムにおいても 1 プリズム未満の動きであったため、正位と判定している。非常に小さい斜視・斜位は日常生活にお

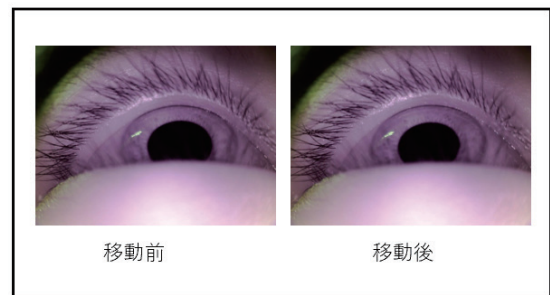


図 28. 下瞼と瞳孔の重なり

いて大きな影響は見られないが、今後視力の低下などにより、程度が大きくなる可能性も考えられるので、今後は、より小さい斜視・斜位についても判定を行うシステムの開発も視野に入れる必要がある。3-R は、非常に大きな斜視・斜位を持つ被検者で、垂直方向・水平方向共に大きな斜視角であるという結果であった。垂直方向に程度の差があったものの、これは本提案システムが取得画像の垂直・水平方向と同じ向きに移動距離を算出していることが原因としてあげられる。本システムで得られる瞳孔の楕円は、赤外線カメラの撮影角度により、画像に対して平行に位置しているとは限らないため、水平方向に動きが見られた場合に、斜め方向に動いたようにとらえ垂直方向の移動距離に加算されてしまうことがある。しかし、このケースに関しては、垂直方向・水平方向共に大きな異常を検出しているため、眼位異常のスクリーニングを目的とする本システムでは、大きな問題ではないと考えた。

次に、4-D' の結果については、上記 3-R の理由と同様に、赤外線カメラの撮影角度による問題 (29) と考えられ、水平

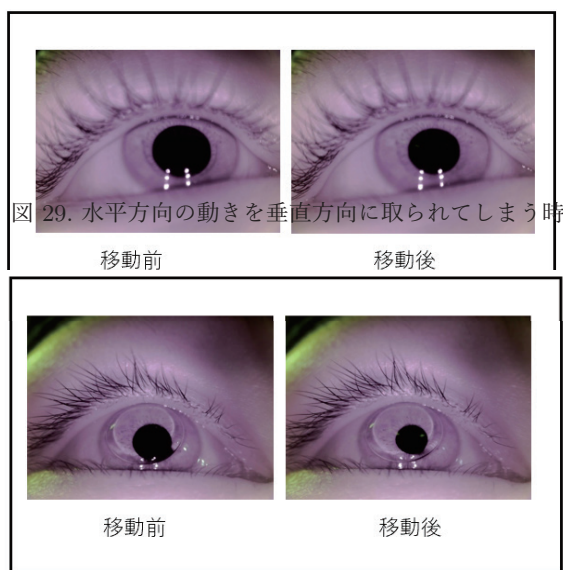


図 29. 水平方向の動きを垂直方向に取られてしまう時

図 30. ハードコンタクト装着時の取得画像

方向の動きが垂直方向に加算されてしまったことで、結果が一致しなかった。4-G' と 4-M' に関しては、検査データが疑似斜視データであることが原因であった。疑似斜視データでは、被検者に対して、2つの視標をシャッター開閉時に交互に見るように指示して得られたデータである。取得画像を確認すると、全てのシャッター開閉時においても、眼球の動きは見られず、中心座標の移動距離も大きな値は見せなかったため、疑似斜視データによる小さな視線の動作の困難さが原因であったと考える。4-T' の結果が、不一致であった理由は、被検者 T' が元より水平方向に 1 プリズム未満の小さい斜視・斜位を持っていたことが原因だと考えられる。疑似斜視データは、Maddox 検査による判定が垂直方向・水平方向ともに 1 プリズム未満の被検者に対して、要求を行っている。特に被検者 T' は非常に小さい斜位を持つ被検者であり、また、今回行っている検査の遮蔽動作が、「右閉→右開/左閉→左開/右閉→両眼開」のパターンに設定しているため、本来垂直方向のみの斜視・斜位を想定している検査において、シャッター開閉のタイミングで 4 回の小さな水平方向の動きを見せたため、分散が大きくなり、水平方向の斜視・斜位も判定した。以上が、想定していた結果との不一致理由である。

最後に、本検証実験では使用していないデータについて考察する。30 は、ハードコンタクト着用時の取得画像である。ハードコンタクト着用時には、瞳孔の輪郭に大きなゆがみが発生するため、本手法で考案している 6.2 の中心座標の算出に大きな影響を与えるため、今後解決策を考案する必要がある。

8. 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。

第 2 章では、本研究の目的について説明した。

第 3 章では、眼位検査に関する背景として、全国の三歳児健診における専門家の関与が半数に満たないことを述べ、基本概念として、眼球運動障害の一つである斜視・斜位と Cover-test、

Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査について説明した。斜視・斜位には、視線のずれる方向や動きによって、様々な種類に分けられる。Cover-test は、斜視・斜位の有無の検査を行う眼位検査方法である。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。なお、一般的な眼位検査では、まず Cover-test が行われる。その理由は、Cover-test に拠ると斜視・斜位以外の眼位の問題に関しても、その有・無や程度や掌握できるということである。Maddox 小桿は斜視・斜位の疑いがあった場合に行われる精密検査機器に相当する。

第 4 章では、本論文で提案している眼位検査システムの構成について説明した。眼位検査システムは眼球情報取得フェーズ (Cover-test システム) と判定フェーズ (眼位異常判定システム) の 2 部で構成されている。眼球動作取得フェーズでは、通常の検査の遮眼子によるカバー・アンカバーの模倣のため、ゴーグル型液晶ディスプレイ (3D グラス) を用いた。また、小型カメラを 3D グラスに設置することで、検査中の眼球の動きを連続画像として取得することを説明した。判定フェーズでは、検査部で取得した連続画像を用いて画像解析を行い、斜視・斜位の疑いの有無を判別することを説明した。

第 5 章では、第 4 章で述べたシステムの全体像において、本研究の先行研究で開発・実装されたシステムの機能と眼位異常を判定するプロセスについて説明した。Cover-test の基本機能として、まず 3D グラスの遮蔽機能は、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、赤外線 LED を光らせることでシャッターの開け閉めを制御することを説明した次に、検査手順に沿ったシステム動作の実装として、シリアル通信を利用して、シャッター開閉と小型カメラによる撮影のプログラムを連動させた。

また、眼位異常を判定するプロセスと、眼位異常判定システムの実装事項について説明した。眼位異常を判定するプロセスとして、Cover-test 中の眼球の連続画像の中から異常検出に適した画像を選択し、画像間のフローを検出し、異常の有無を判定するといった一連の流れの具体的手順を示した。検証実験により、水平方向の斜視・斜位に関して、高い検出能力を持つことがわかった。

第 6 章では、先行研究では検出しきれなかった垂直方向の斜視・斜位も同時に判定する手法について提案を行った。具体的には、瞳孔の中心座標を連続的に求め、その軌跡を上下・左右方向に分けて追跡を行う。赤外線カメラを利用することで、瞳孔と虹彩を含む角膜部分 (一般的に黒目と呼ぶ部分) ではなく、瞳孔位置が判別でき、それまで問題であった瞼や睫毛の影響をよりうけにくくなる。取得画像に対して、RGB カラーモデルを利用して、瞳孔色を抽出し、ノイズ処理を行うことで瞳孔のみの抽出を行った。また、シャッター開閉時のフレームの特定や、まばたき判定の機能について説明した。さらに、眼位異常の判定プロセスのためのデータの取得と分析を行い、判定基準について説明をした。

第 7 章では、提案したシステムの性能評価のための検証実験を行った。高確率で正位と異常ありの判定は可能であったが、斜視・斜位の程度の細かい判定において失敗が見られた。

より多くのデータを採取してより綿密な閾値の設定が重要であることがわかった。しかし、これまで検出不可能であった垂直方向の斜視・斜位について、動きを捉えることができるシステムであることがわかった。

今後の課題として、以下のことが挙げられる。まず、斜視・斜位の程度より細やかな閾値の設定が求められる。今回は、取得画像1枚目の初期座標からの移動距離を求め、そのデータの散らばり具合（分散）を見ることで、異常の判定を行った。その値が大きいほど、斜視・斜位の程度も大きい。斜視・斜位は、定量検査においてプリズムという単位を用いて斜視角が測定される。また、今回は判定可能性を見出すために、疑似斜視データという、被検者に意図的に視線を動かしてもらい採取したデータを用いたが、1プリズムの斜視・斜位に関しては、明確な閾値となるデータが得られなかったため、検証実験では非常に小さい斜視・斜位に関しては判定もれが起きてしまった。今回、右眼の画像のみを検査に用いたが、斜視を持つ目（右眼/左眼）の違いによっては、今回設定した分散の値とは違う値を見せることもあるため、左眼の画像も同時に使用するシステムを考案するべきである。今後は、実際に垂直方向及び水平方向の斜視・斜位を持つ人のデータを取得した後に、細やかな分析を行い、斜視を持つ目（どのタイミングで右眼左眼が動いているか）、種類と程度についての判定をシステムを考案したい。さらに、垂直方向・水平方向の斜視・斜位以外にも、回旋斜視も存在するため、それらの斜視・斜位判定を行えるシステムの開発を行う。具体的には、瞳孔周辺の虹彩のエッジを画像処理を用いて鮮明にすることで解決する方法等が考えられる。

A ある被検者の分析データ一式

以下に7章の実験結果で一名から得られるデータの揃えを示す。実施した検査動作は通常検査で、被検者は、垂直方向に3プリズムの上斜位、水平方向に12プリズムの外斜位を持つ。1回の検査で得られた240枚の画像のうち、1~200枚目までの画像を検査対象としている。

A1 眼球の動き

まず、図31は、動きが検出された時の取得画像を示す。同図のaは、動きが見られる前で、3Dグラスの液晶シャッターが開いている状態の時である（cap1とする）。同図のbは、液晶シャッターが閉じ、蛍光灯の光が消えた直後である（cap2とする）。同図のcは、液晶シャッターが閉じた7枚後で、動きが見られ始めた瞬間である（cap7とする）。同図のd,e,fは、それぞれcから1枚後、2枚後、3枚後である（cap8,cap9,cap10）。

A2 ノイズ処理

図32は、図31のcap1とcap7のノイズ処理の様子である。上から、瞳孔色の抽出（白色で表している部分）、睫毛等のノイズ除去（オープニング処理）、瞳孔内のノイズ除去（クローズング処理）である。

A3 中心座標の算出

33は、6.2で説明した中心座標の算出を行う。1枚目の座標を初期座標として、求めた中心座標と初期座標の距離の差を垂直方向と水平方向に分け計算した時のグラフである。横軸

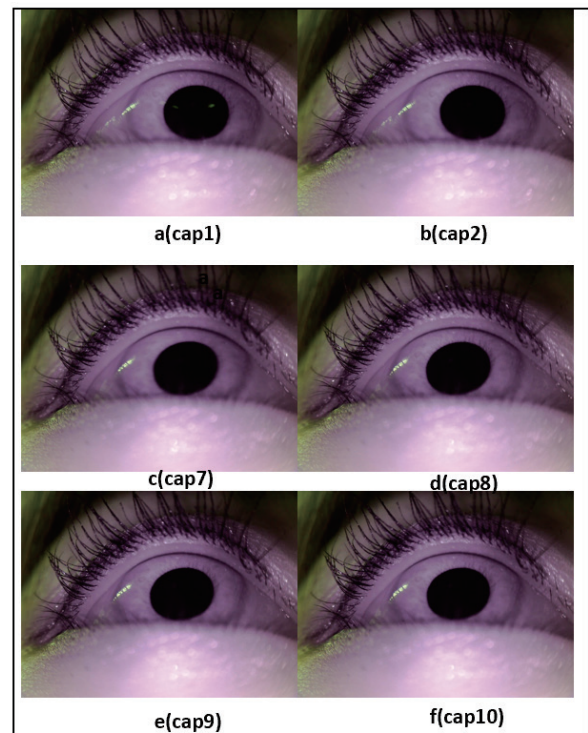


図 31. シャッター開閉前後の眼球の動き

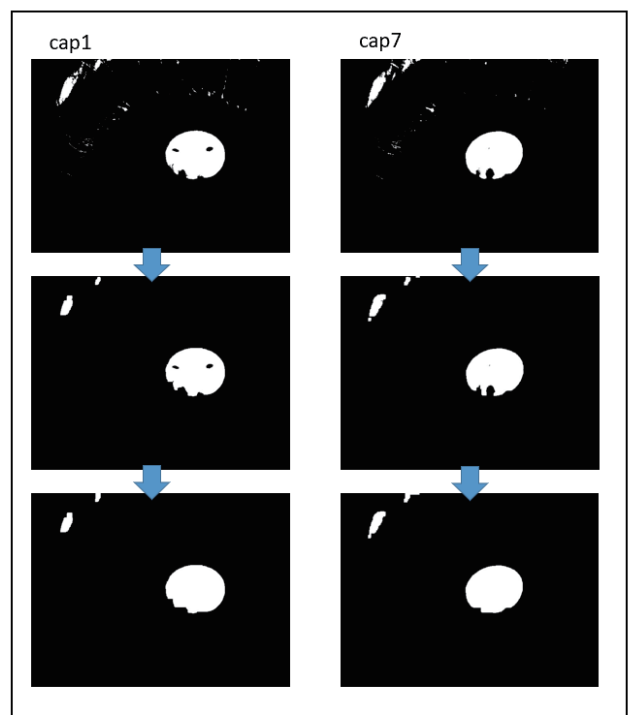


図 32. ノイズ処理の流れ

がn枚目（ $n=1\sim 200$ ）で、縦軸は、初期座標であった（287.5, 178）を（0,0）とした時の距離の差を表しており、それぞれ初期位置より低い時にはマイナス、高い時はプラスで表す。

赤色で記入されている横軸の数値は、液晶シャッター開閉が行われた直後（図31で示すとcap2）の画像である。Opを液晶シャッターが開いた時とし、Clを閉じた時とする。

初期座標からの距離において、垂直方向の全画像の分散は 27.73 で、水平方向の全画像の分散は、312.57 であった。

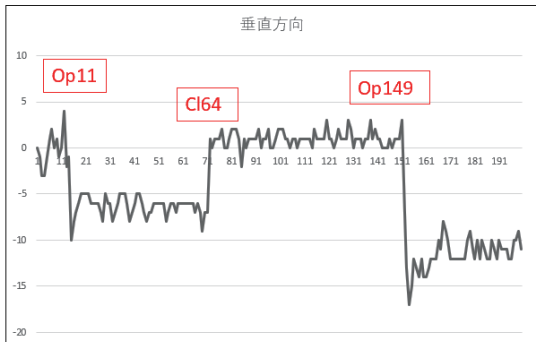


図 33. 垂直方向の移動距離 (初期位置との差)

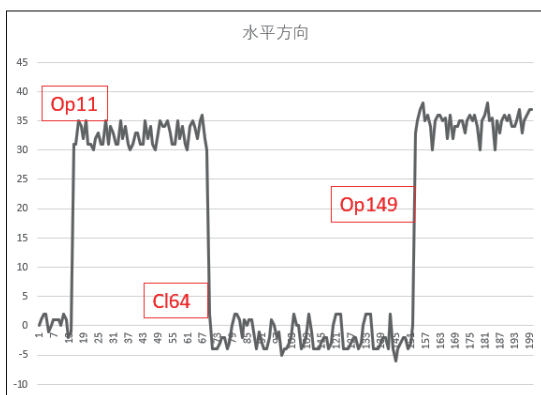


図 34. 水平方向の移動距離 (初期位置との差)

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 ,(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，日隈光基，高塚佳代子，山場久昭，油田健太郎，岡崎直宣：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，宮崎大学工学部紀要 (47)pp.291-303,Jul.2018.
- 9) 平田木乃美，内田憲之，日隈光基，高塚佳代子，棕木雅之，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.
- 10) 平田木乃美，内田憲之，松本亜沙美，川上真矢，高塚佳代子，棕木雅之，岡崎直宣：眼位異常判定プロセスの判定基準について，電子情報通信学会技術研究報告 福祉情報工学 (WIT) 信学技法 (IEICE Technical Report) Vol.118, No.270, pp.67-72, 2018.
- 11) PLATO 液晶シャッターゴーグル
<http://www.namoto.com/vision/PLATO.htm> ,(accessed 2018-1-25).
- 12) Translucent Technologies
<http://www.translucent.ca/> ,(accessed 2018-1-25).
- 13) 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).
- 14) 藤田広志，木戸尚治，原 武史，周 向栄，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.
- 15) 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.
- 16) 齊藤 望，市地 慶，張 曉勇，本間 経康，新藤 雅大，高井 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.
- 17) 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).
- 18) 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).
- 19) 山内 悠嗣，山下 隆義，藤吉 弘巨：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.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 日本眼科学会 目の病気
<http://www.nichigan.or.jp/public/disease.jsp>, (accessed 2019-1-10).
- 25) 日本弱視斜視学会 斜視
<https://www.jasa-web.jp/general/medical-list/strabismus>, (accessed 2019-1-14).
- 26) 内海隆 : 斜視の検査法, あたらしい眼科 19(12), pp.1553-1556, 2002.
- 27) 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.
- 28) 視能訓練士マニュアル
<http://panda-ort.com>, (accessed 2018-1-25).
- 29) わかりやすい臨床眼光学 (WEB 版)
<http://www.sado-ec.com/images/pdf/gankougaku01.pdf>, (accessed 2019-1-14).
- 30) プリズムとは
<http://www.megane-issshindo.jp/prism/prism.html>, (accessed 2019-1-14).
- 31) 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.
- 32) 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).
- 33) Csun USB ナイトビジョンカメラモジュール <http://www.csun.co.jp/SHOP/2017010501.html>, (accessed 2019-1-14).
- 34) Andrew Woods, Jesse Helliwell : A Survey of 3D Sync IR protocols, CMST944, pp.1-16, 2011.
- 35) OpemCV:OpenCV.jp
<http://opencv.jp/>, (accessed 2018-1-21).
- 36) Gunner.Fameback : Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion, Scandinavian Conference on Image Analysis, Image Analysis, pp.363-370, 2003.
- 37) OpenCV 画像解析入門 移動方向に応じたオブティカルフローの可視化
<http://www.cellstat.net/opticalflow/3/>, (accessed 2018-1-21).