

## 瞳孔位置追跡に基づく眼位異常検出システムの開発

藤 竜成<sup>a)</sup>・川上 真矢<sup>b)</sup>・高塚 佳代子<sup>c)</sup>・山場 久昭<sup>d)</sup>・油田 健太郎<sup>e)</sup>・岡崎 直宣<sup>f)</sup>

## Development of Eye Position Abnormality Detection System Based on Pupil Position Tracking

Ryusei FUJI, Masaya Kawakami, Kayoko TAKATUKA, Hisaaki YAMABA, Kentaro ABURADA,  
Naonobu OKAZAKI

## Abstract

It is generally said that early detection and early training are necessary as eye position abnormality causes stereoscopic vision failure and eye strain. Particularly, strabismus is also a risk factor causing amblyopia, and how to find strabismus at a low age and start treatment can be a major research theme in pediatric ophthalmology. However, the diagnosis of eye position abnormality is difficult, so inspection by qualified persons such as ophthalmologist or vision trainer is required, but this type of qualified person is chronically insufficient. Based on the above, this research aims to develop a simple inspection system that can detect ocular position abnormality such as strabismus and oblique position even in the absence of qualified person. In this study, we attempted a method to detect the presence / absence of inner / outer / upper / lower strabismus or oblique position by tracking the movement of the center position of the pupil, not the conventional method of seeing the movement of the entire eyeball. Here, in order to acquire eyeball information, we use an infrared camera that performs imaging by irradiating infrared light. For estimating the center position of the pupil, a pseudo center of the pupil is obtained by generating a binary image in which the pupil portion is black, using the RGB value, and then obtaining the center of gravity of the black area as the pupil portion. As a result of confirming the performance of this development system by verification experiments, the correct answer rate of the inspection result in this system was about 84%. As a cause of the judgment failure, it was clarified by the experiment that the infrared light reflected on the pupil and the lower eyelid covered with the pupil, and it became clear as a future research subject.

**Keywords:** strabismus, pupil, cover-test, eye position test, eye-tracking

## 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原因となるため、早期発見・早期訓練が必要であると言われている。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事は、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のような有資格者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>。よって、暫定的ではあっても有資格者不在で眼位検査を行える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冒頭で述べた通り大きい。

以上を踏まえ、本研究では、有資格者不在でも、斜視・斜位等の眼位異常を検出できるような簡易検査システムを開発することを目的としている。現在までに、眼位検査法として代表的なCover-testのデジタル化<sup>6)7)8)</sup>及び、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い、内/外斜視・斜位を検出することができた。しかし、上/下斜視・斜位については検出することができなかった。そこで本研究では、眼球全体の動きを見る従来の方法ではなく、瞳孔の中心位置の動きを追跡することによって、内/外/上/下斜視・斜位の有無を検出する方法を試みた。ここで、眼球情報の取得には、赤外光を照射して撮影を行う赤外線カメラを用いた。また、瞳

<sup>a)</sup>工学専攻機械・情報系コース大学院生

<sup>b)</sup>情報システム工学科学部生

<sup>c)</sup>教育研究支援技術センター技術専門職員

<sup>d)</sup>情報システム工学科助教

<sup>e)</sup>情報システム工学科准教授

<sup>f)</sup>情報システム工学科教授

孔の中心位置推定には、RGB 値を用い、瞳孔部分を黒とした 2 値画像を生成した後、瞳孔部分である黒領域の重心を求めることで、瞳孔の疑似的な中心を求める手法を考案し用いた。

具体的に、本研究で取り組んだ課題は以下の通りである。

- (1) 瞳孔中心位置を安定的に自動検出する機能の実装
- (2) 瞳孔中心位置の追跡データに基づき眼位異常の有無を識別できるようなルールの検討

## 2. 基本概念

### 2.1 斜視・斜位

斜視とは、片方の眼が目標とする方向からずれており、両眼視ができない状態をいう<sup>9)</sup>。眼のずれる方向によって、内斜視、外斜視、上斜視、下斜視にわけられる。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。

### 2.2 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(alternatingcover test)<sup>1)10)</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>11)</sup>。臨床的には、CUT、ACT の順に行われることが一般的である<sup>12)</sup>。

## 3. 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 1 に示す。同図は、システムの全体像であり、記録部と判定部の 2 部で構成されている。

記録部は、大きく以下の 3 つの装置で構成されている。

- (A) 遮蔽部 被験者が装着する 3D 用アクティブグラス (以降“3D グラス”)
  - (B) シャッター制御部 赤外光による信号を制御するマイコン Arduino
  - (C) 赤外線カメラによる撮影を行う PC
- 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

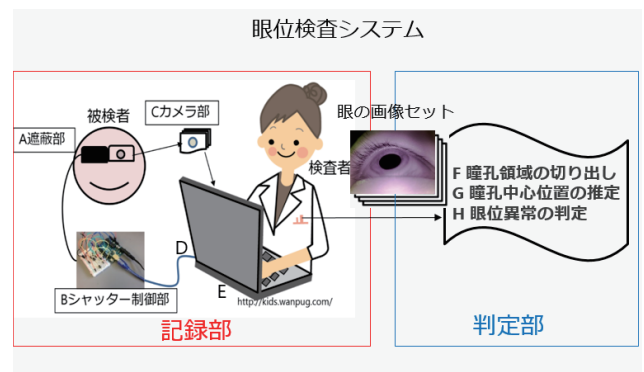


図 1. 眼位検査システムの構成

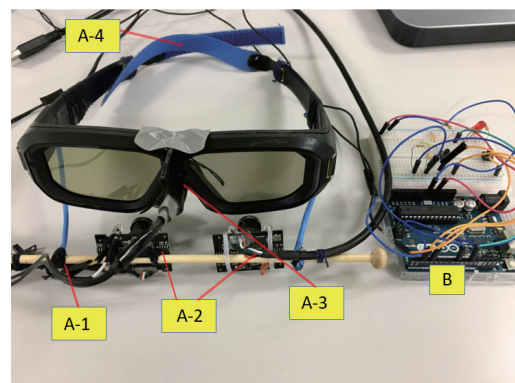


図 2. 遮蔽部とシャッター部の拡大図

プログラムを動作させる。図 2 は、図 1 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 グラスには赤外線カメラの設置部 (図 2A-1)、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赤外線カメラの設置部に、赤外線カメラを 1 台ずつ設置した (同図 A-2)。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-3)。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 グラスが滑り落ちないように、マジックテープで固定できるようにした (同図 A-4)。また、赤外線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 1E) 上に搭載している。

判定部は、F、G、H の 3 つの要素から成る。

- (F) 瞳孔領域の切り出し
- (G) 瞳孔中心位置の推定
- (H) 眼位異常の判定

記録部で取得した画像を元に F、G の処理を行い、扱いやすいデータに変換してから、H で眼位異常の判定を行う。

記録部、判定部のそれぞれの詳細については、4、5 章で説明する。

## 4. 記録部

### 4.1 Cover-test の自動化

3D グラスのシャッターの開閉をコントロールする赤外光シグナルをシミュレートできるようにするため、シグナルをマイコン Arduino に組み込み、望む機能を実現できるようにした。具体的には、3D グラスの赤外線パルスの仕様<sup>13)</sup>に基づき、右眼シャッター開・閉、左眼シャッター開・閉の都合 4

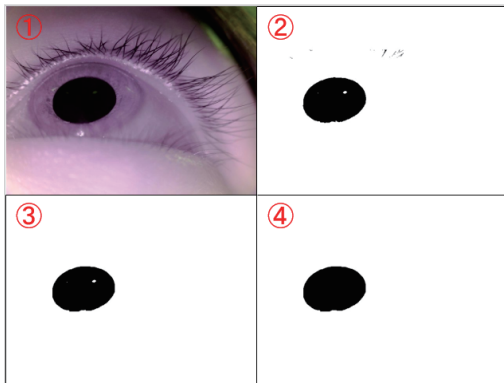


図 3. 瞳孔領域切り出しプロセス

種類の信号を実装した。また、Arduino の基盤上に 2 つのスイッチを設置し、これらのスイッチによりシャッター開・閉パターンの切り替えができるようにした。実装したシャッター制御パターンは以下の 4 種類である。

- (1) 右閉→右開→(1 秒)→左閉→左開
- (2) 右閉→右開
- (3) 左閉→左開
- (4) 右閉→右開および左閉→左開

カバーテストには CUT、ACT の 2 種類の検査方法があり、(1)~(3) は CUT、(4) は ACT の実現に必要な基本操作である。なお、すべてのパターンの初期状態は両目開である。本論文では、(4) の ACT の操作を 2 回連続して行った。

#### 4.2 Cover-test 時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、赤外線カメラを、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、検査中の約 13~14 秒間に 240 枚の画像を取得する機能を実装した。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、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. 判定部の開発

開発した判定部の眼位異常判定プロセスは、3 章で述べた通り、以下の (F)~(H) の 3 の要素から成る。

- (F) 瞳孔領域の切り出し
- (G) 瞳孔中心位置の推定
- (H) 眼位異常の判定

(F) では、瞳孔領域の切り出しを行う (図 3 参照)。具体的には、まず、前処理として、瞳孔内座標を用いて、切り出す領域を設定する。瞳孔内座標は、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。この処理を行う理由としては、判定に必要な、瞳孔以外の黒の領域を除去するためである。

次に、赤外線カメラで取得した画像を元に RGB 値が黒に近い領域を黒、それ以外の領域を白とする 2 値画像を生成する。瞳孔領域を切り出す際、RGB を用いる理由としては、瞳

孔領域は眼の構造上、光を反射しない性質を持っており、赤外線カメラで取得した画像も、黒に近い色を示すためである。

次に、生成した 2 値画像に Opening、Closing 処理を行う。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。Opening を行うことにより、まつ毛などのノイズを除去する。Closing とは、膨張→収縮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。Closing を行うことにより、瞳孔領域の欠けている部分の補正をする。

(G) では、(F) で生成した 2 値画像の黒領域の重心を求めることにより、疑似的な中心の座標を求める。求めた疑似的な中心座標のデータをそれぞれ  $x$  座標、 $y$  座標ごとに保存しておく。

(H) では、内/外斜視・斜位を判定したい場合は、瞳孔中心の  $x$  座標データ、上/下斜視・斜位を判定したい場合は、瞳孔中心の  $y$  座標データを、それぞれ用いて判定を行う。判定のための着目因子として、シャッター開閉後の絶対偏差、画像間での絶対距離、検査全体での分散の利用可能性を各々調べた。その結果、検査全体での分散に、斜視・斜位の人と正常人との間で有意な差が見られた。したがって、本研究では、判定の基準として瞳孔中心座標の分散を用いることとした。具体的には、瞳孔中心座標の分散が閾値を上回った場合、異常と判定することとした。なお、上記候補の中で分散が最も良い結果を示した理由は、斜視・斜位の方は、シャッター開閉後に、眼球の動きが見られるため、瞳孔の中心座標のばらつきも大きくなり、正常人と比べて、分散が大きくなるからではないかと考えられる。表 1 は、プリズムごとの分散の平均を示している。プリズム ( $\Delta$ ) とは、斜視・斜位の程度を表す単位である斜視角のことであり、この数値が大きいくほど、斜視・斜位の程度が大きいくことを意味する。ここで正位とは、斜視・斜位がないことを表すが、正位と斜視・斜位の間には分散の値に有意な差があることが表 1 よりわかる。また、斜視・斜位のプリズム数が大きくなるにつれて、分散の値も大きくなっていることがわかる。ただし、 $\Delta 1$  に関しては正位との分散の値の差があまり見られなかった。つまり、本検出方法での適用可能範囲は、 $\Delta 2$  異常とわかった。そこで、今回は、 $\Delta 2$  以上の斜視・斜位が検出できれば良いとし、 $\Delta 1$  以下の斜視は検出対象外とし、検証実験を行った。

表 1. プリズムごとの分散の平均 ( $y$  座標)

正位	上/下 $\Delta 1$	上/下 $\Delta 2$	上/下 $\Delta 3$	上/下 $\Delta 4$
1.7627	2.0670	4.6104	7.9158	11.3812

### 6. 検証実験

本検証実験では、被験者 19 名を対象とし、開発した眼位検査システムの性能評価を行った。具体的には、開発したシステムでの検査結果を“真の値”と比較し、検査結果の正答率を求め、性能評価を行った。ここでの“真の値”というのは 2 通りある。1 つは、真性の斜視・斜位の被験者に適用される“真の値”だが、これは精密検査機器 Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査 (以降、Maddox 検査と同義) で得られる。もう 1 つは真性ではない、つまり疑似の斜視・斜位の被験者に

適用される“真の値”だが、これは意図的に設定される値が真の値となる。上/下斜視・斜位の症状を示す人は多くないため、本研究では、被験者に対し、疑似的に上/下斜視同様の目の動きを実現してもらい、検査データの取得を行った。そして「意図的に設定」というのは次のようにして行った。基本的には通常検査と同様、5m先に配置した指標を見続けてもらうのだが、疑似斜視データを取る場合、その指標を2つ用意し、シャッター開閉のタイミングでそれらを交互に見てもらおうという方法で疑似斜視を実現してもらった。さらに斜視角の設定では、 $\Delta 1$ では5cm、 $\Delta 2$ では10cm、 $\Delta 3$ では15cm、 $\Delta 4$ では20cmの間隔を垂直方向にあけて視標を配置すればよいと分かっているので、それぞれの設定での疑似斜視を実現してもらうことで疑似斜視の検査データを取得した。ちなみに、被験者19名のうち、真性の斜視・斜位であり、残り17名は正位であったため、17名の被験者に対しては通常検査に加え、上/下疑似斜視を実現してもらい、上/下斜視データを取得した。結果的に、57通りの検査データを取得し、性能評価実験を行った。

### 6.1 実験結果

図4は、取得した57個の検査データに対する判定結果を示している。2列目は Maddox 検査値や疑似斜視データ取得の際の設定値で決まる「真の値」であり、3列目は開発したシステムでの判定結果である。「真の値」の見方は、Vが上/下斜視・斜位を表し、Hが内/外斜視・斜位を表している。後ろにつく数字は、プリズム数である。開発システムの判定結果は、検査データの瞳孔中心座標の  $x$  座標、 $y$  座標をそれぞれ求め、 $x$  座標の分散を用いて内/外斜視・斜位の判定結果を、 $y$  座標の分散を用いて上/下斜視・斜位の判定結果を求めた。その結果、本システムの判定結果の正答率は、43/57 (約 75%) となった。

### 6.2 実験の考察

開発したシステムによる判定結果が、「真の値」と異なっていた14個のデータについて考察する。まず、No.21、25の取得画像データを確認すると、目視でも眼球の動きがあまり見られなかった。これは、疑似斜視ということもあり、検査中、5m先の小さな視標間を交互に見ることができなかったこと、つまり疑似斜視実現の失敗と考えられ、判定システムの精度の問題外と考えられる。また、No.53、54、55の疑似上/下斜視のデータだが、これらはすべて同じ被験者のものである。取得画像データを確認すると、シャッター開閉後に斜めの動きがみられた。この被験者は通常検査で、正位と判定されたことから、上下に眼を動かそうとすると、斜めに動いてしまうケースの被験者であることが分かり、システムはその動きを検出することができた。従って、No.53、54、55の3個のデータを正しく判定できたとし、前述したNo.21、25の2個のデータを除いてシステムの正答率を再計算したところ、46/55 (約 84%) と修正された。次に、No.12、13、14、15の取得画像データを確認すると、シャッター開閉後に水平方向の比較的大きな動きが見られた。これは、Maddox 検査で $\Delta 1$ 以下の斜視(位)と判定されたことから、先に述べた「本システム適用外」のケースの可能性があると分かった。もしくは、左右の眼に視力の差があるなどの他の要因の可能性も考えられる。

真の値	本システム	真の値	本システム
1 正位	正位	30 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)
2 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)	31 V4(疑似)	斜視(位):縦(大)
3 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)	32 正位	正位
4 V4(疑似)	斜視(位):縦(大)	33 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)
5 正位	正位	34 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)
6 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)横(小)	35 V4(疑似)	斜視(位):縦(小)
7 正位	正位	36 正位	正位
8 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)	37 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)
9 正位	正位	38 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)
10 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)	39 V4(疑似)	斜視(位):縦(大)
11 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)	40 正位	正位
12 正位	斜視(位):横(小)	41 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)
13 V2(疑似)	斜視(位):縦(大)横(小)	42 V3(疑似)	斜視(位):縦(大)
14 正位	斜視(位):横(小)	43 V4(疑似)	斜視(位):縦(大)
15 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)横(小)	44 正位	斜視(位):縦(小)
16 正位	正位	45 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)
17 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)	46 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)
18 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)	47 V4(疑似)	斜視(位):縦(小)
19 正位	正位	48 正位	正位
20 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)	49 V2(疑似)	斜視(位):横(小)
21 V2(疑似)	正位	50 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)横(小)
22 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)	51 V4(疑似)	斜視(位):縦(小)横(小)
23 V4(疑似)	斜視(位):縦(小)	52 正位	斜視(位):縦(小)
24 正位	斜視(位):縦(小)	53 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)
25 V2(疑似)	正位	54 V3(疑似)	斜視(位):縦(小)
26 V3(疑似)	斜視(位):縦(大)	55 V4(疑似)	斜視(位):縦(大)
27 V4(疑似)	斜視(位):縦(大)	56 H6	斜視(位):縦(小)横(大)
28 正位	正位	57 V3H12	斜視(位):縦(大)横(大)
29 V2(疑似)	斜視(位):縦(小)		

図 4. 評価対象の検査結果

次に、No.6、24、44、52の取得画像データを確認すると、瞳孔上に赤外線ライトによる大きな反射光が見られた。この反射光により、瞳孔が欠けた状態で切り出されてしまい、瞳孔の中心位置推定の精度が下がり、誤判定に繋がったと考えられる。最後に、No.56の取得画像データを確認すると、下瞼が瞳孔と被っており、No.6、24、44、52と同様に瞳孔が欠けた状態で切り出されてしまい、誤判定に繋がったと考えられる。

## 7. まとめ

本論文では、瞳孔位置追跡に基づく眼位異常検出システムの開発を行った。具体的には、3Dグラスを用いてCover-testの自動化を行い、検査時に赤外線カメラで取得した画像の瞳孔位置を追跡する手法を用いて眼位異常の有無を判定するためのプロセスを開発し、実装した。本開発システムの性能を検証実験により確かめた結果、本システムでの検査結果の正解率は約84%となった。なお、判定失敗の原因としては、瞳孔上に赤外線ライトが反射してしまうことや、下瞼が瞳孔と被ってしまうことが、実験後の考察で明らかとなり、今後の研究課題として明らかになった。今後、このような課題を解決し、さらなる判定精度の向上を可能とし、実用的なシステム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 Vol.18 No.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 Vol.85 No.3, pp.296-300, 2014.
- 3) 臼井千恵: Hess 赤緑試験, 日本視能訓練士協会誌, Vol.28, pp.81-92, 2000.
- 4) 目の病気が加齢黄斑変性 (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 2019/1/30).
- 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 Vol.9 No.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 and 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) 日本眼科学会目の病気  
<http://www.nichigan.or.jp/public/disease.jsp>, (accessed 2019/1/30).
- 10) 内海 隆: 斜視の検査法, あたらしい眼科 Vol.19 No.12, pp.1553-1556, 2002.
- 11) 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.
- 12) 視能訓練士マニュアル  
<http://panda-ort.com>, (accessed 2019/1/30).
- 13) Andrew Woods and Jesse Helliwell: A Survey of 3D Sync IR protocols, CMST, 944, pp.1-16, 2011.