

令和2年度 修士学位論文

視線追跡機能付き HMD を用いた眼位異常検出

宮崎大学 大学院 工学研究科 工学専攻  
機械・情報系コース 情報システム工学分野

学籍番号 T1903029

池田 拓矢

指導教員 椋木 雅之 教授

令和3年1月25日

# 概要

本研究では、眼位異常のスクリーニングを助ける検査サポートシステムの開発を行った。眼位異常（視線のずれ）である斜視・斜位は、後に過度の立体視不良や眼精疲労を引き起こしてしまうため、早期発見・早期訓練が必要だが、検査には時間と手間がかかり、検査を行う眼科医と視能訓練士の数は慢性的に不足している。提案システムは、狭い部屋で検査を実施でき、操作が非常にシンプルである。提案システムにより、有資格者がいなくても簡易に検査が行えるため、検査機会の増加、眼位異常の早期発見に寄与できる。

提案システムでは、検査の自動化のために、仮想現実 (VR) で利用されている視線追跡機能付き HMD「VIVE Pro Eye」を用いた。仮想的な検査環境を作成し、その中で眼位検査法として代表的な検査「Cover-Test」を実施し、視線追跡機能から得られる眼球データを用いて眼位異常の定量化を行うシステムを開発した。Cover-Testとして、常に片眼を遮蔽して融像を妨げた状態で検査する ACT (Alternating-Cover Test) と、片眼を遮蔽、両眼を開放、他眼を遮蔽する手順を繰り返しながら検査する CUT (Cover-Uncover Test) の2つを実装した。

検証実験で、Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査による結果との整合性を調べ、提案システムの評価を行った。水平 ( $x$ ) 方向については、ACT では、平均誤差  $0.61 \Delta$  (プリズムジオプトリー)、相関係数  $0.956$  であった。CUT では、誤差平均  $1.50 \Delta$ 、相関係数は  $0.810$  であり、どちらも定量結果について Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査との強い相関が得られ、有用性を示すことができた。

# 目次

第1章	はじめに	4
第2章	臨床的眼位検査	5
2.1	斜視・斜位	5
2.2	Cover-Test	7
2.2.1	ACT(Alternating-Cover Test)	7
2.2.2	CUT(Cover-Uncover Test)	9
2.3	Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査	12
2.4	眼位検査の現状	14
第3章	視線追跡機能付き HMD による眼位検査の自動化	15
3.1	従来研究	15
3.2	HMD による自動化	15
3.3	ヘッドマウントディスプレイ (HMD)	16
3.4	視線追跡機能	18
第4章	眼位異常検出システムの構成	21
4.1	システム構成	21
4.2	仮想の検査環境の作成	24
4.3	キャリブレーション	25
4.4	ACT における検査の手順	27
4.5	CUT における検査の手順	27
4.6	ACT におけるプリズム量の算出	28
4.6.1	眼球データの取得	28
4.6.2	無効フレームの除去	29
4.6.3	潜時の影響の補正	30
4.6.4	データ数の正規化	32
4.6.5	眼の位置の平均値の計算	32
4.6.6	眼の移動量の計算	32
4.6.7	プリズム量の計算	32
4.6.8	ずれの方向の判定	33
4.7	CUT におけるプリズム量の算出	34
4.7.1	潜時の影響の補正	35
4.7.2	眼の位置の代表値の計算	37
4.7.3	移動量の計算	38

4.7.4	斜視量・斜位量の計算 . . . . .	38
4.7.5	ずれの方向の判定 . . . . .	40
4.7.6	斜視・斜位の判定 . . . . .	40
<b>第5章</b>	<b>実験</b>	<b>41</b>
5.1	実験の目的 . . . . .	41
5.2	実験内容 . . . . .	41
5.3	システムの有効性評価 . . . . .	42
5.3.1	ACT . . . . .	42
5.3.2	CUT . . . . .	47
<b>第6章</b>	<b>まとめ</b>	<b>50</b>
	<b>謝辞</b>	<b>51</b>
	<b>参考文献</b>	<b>52</b>
<b>付録A</b>	<b>検査データの例</b>	<b>54</b>
A.1	ACT . . . . .	55
A.2	CUT . . . . .	58
<b>付録B</b>	<b>外れ値の除去方法の比較</b>	<b>61</b>
B.1	ACT . . . . .	65
B.2	CUT . . . . .	67

# 第1章 はじめに

一般に、眼疾患に関する眼（見え方）の異常には、早期発見と早期治療が必要である。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、早期発見と早期治療が必要である。斜視とは、両眼視した際に片眼は目標のほうに正しく向いているが、もう一方の眼の視線が逸れている状態の事である。また、斜位は両眼視した際には異常はみられないが、片眼が塞がれた際に視線が逸れる状態である。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]。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、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。

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]。数少ないデジタル化の例として [4] があるが、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、眼位異常を示す「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・斜位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、眼位検査を自動化し、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。眼位検査としては、主に斜視・斜位の鑑別を行う定性検査の代表的な検査方法である「Cover-Test [1]」を利用する。また、開発したシステムでは、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) に更に視線追跡を追加した機器である「VIVE Pro Eye[5]」を利用する。仮想現実下で検査環境を作成し、その中で Cover-Test を実施する。同時に視線追跡により取得した眼球データを用いて、眼位異常の定量化を行う。このシステムは、狭い部屋で検査を実施でき、操作が非常にシンプルである。そのため、有資格者でなくとも簡単に検査が実施でき、検査機会の増加や眼位異常の早期発見に寄与できる。

以下、第2章で本研究において検出したい眼位異常である斜視・斜位とそれらの検査方法について述べる。第3章では、視線追跡機能付き HMD を用いた Cover-Test のデジタル化について述べる。第4章では、デジタル化した Cover-Test と HMD の視線追跡機能を用いて眼位異常検出をするためのプロセスを示し、第5章で実装したシステムの検証実験及びその評価と考察を述べる。最後に第6章でまとめとする。

## 第2章 臨床的眼位検査

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種類がある。定性検査として代表的な「Cover-Test」では、被検者が遮眼子で片目ずつ遮閉-非遮閉した時の眼球の動きにより、斜視・斜位であるかないか、また、どのような性質の斜視かを見極める。その結果から、融像や立体視など両眼視機能異常の有無が推測可能である。一方、定量検査は、斜視・斜位の程度を測定する検査であり、結果は数値で表される。具体的には、異常とされる眼の視線、斜視眼回旋点、固視点を結ぶ線がなす角(斜視角、図2.1)を数値で求める[6]。検査方法は、他覚的検査法と自覚的検査法があるが、他覚的検査法では、検査を実施する眼科医や視能訓練士の経験年数や技量に結果が左右されるといった問題点がある。また、自覚的検査法では、検査に対する患者の協力性(指標をきちんと注視してくれるか)などが大きく影響するといった問題点がある。以下に、基本概念として、斜視・斜位の他覚的定性検査方法である Cover-Test、自覚的定量検査方法としての Maddox 小桿を用いた眼位検査、及び、今回提案するシステムの必要性について述べる。

### 2.1 斜視・斜位

眼位異常としては斜視と斜位[6]がある。斜視とは、恒常性の眼球偏位(偏り)があり、これに両眼視の異常や弱視を伴う症候群である。一方斜位とは、両眼でとらえた二つの像を一つにするための機能である融像が妨げられたときにはじめて眼球偏位が現れる眼位異常である。これに対し、片眼遮閉して(融像除去眼位)も常に固視点に視線を向け続けるものを正位(Orthophoria)と呼ぶ[7]。これらの病態を区別するには視方向が同じであるかどうか重要である。視方向とは、主観的な物体へ向けている眼の方向のことであり、正位では、この視方向が左右眼とも同一である(図2.2)。しかし、斜視や斜位では、遮蔽によってその視方向にズレが生じる。そのズレる方向によって、内側であれば内斜視(位)、外であれば外斜視(位)、上を向けば上斜視(位)、下を向けば下斜視(位)に分けられる(図2.3)。斜視や斜位が生じ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。これらの斜視や斜位の鑑別には、Cover-Test が使用される。

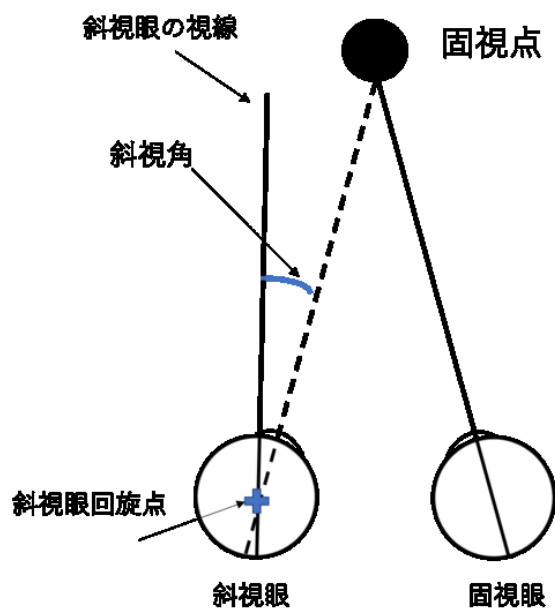


図 2.1 斜視角の定義

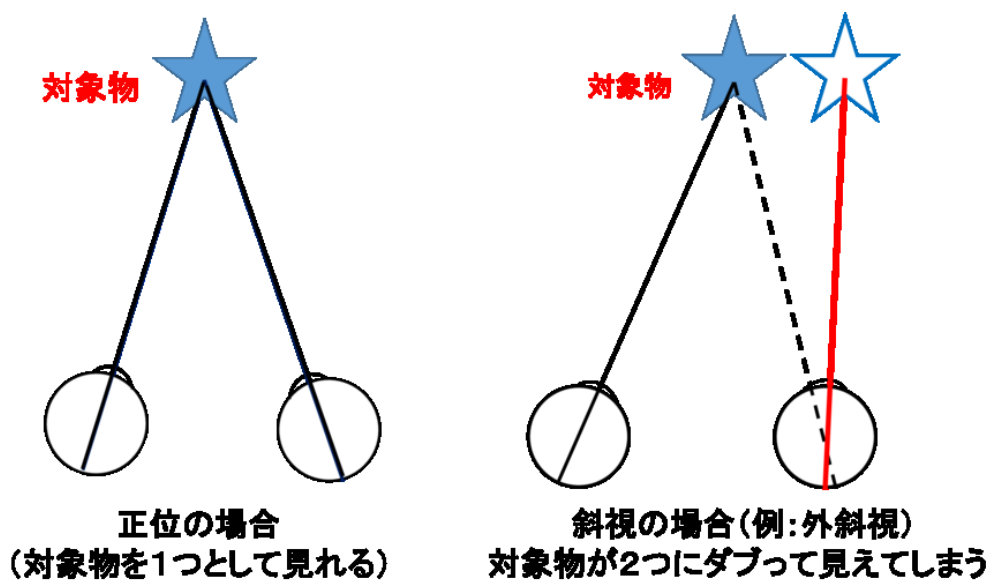


図 2.2 異常の有無でのそれぞれの見え方 (参考サイト:[8])

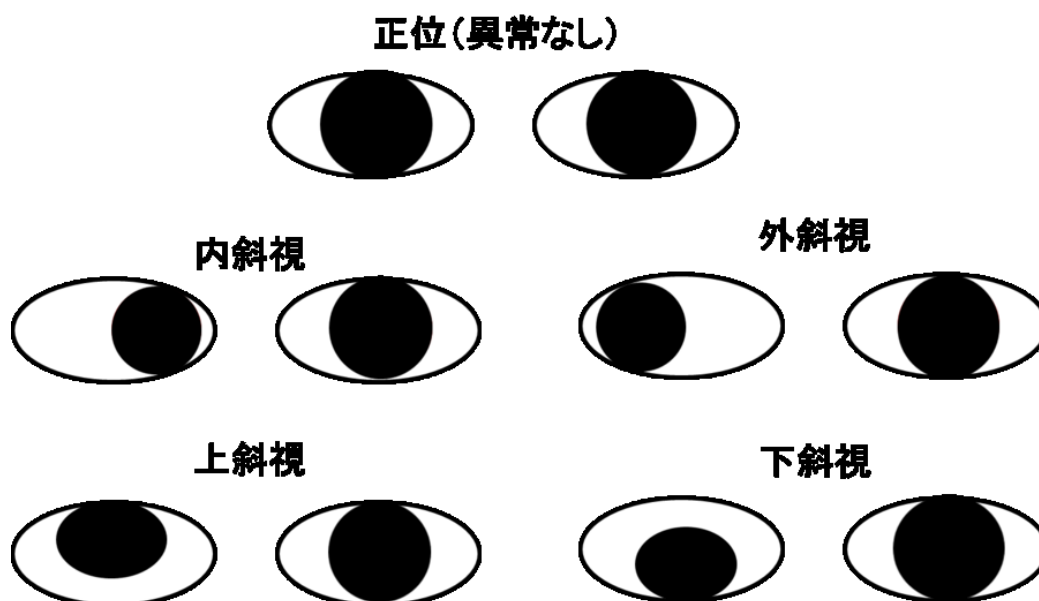


図 2.3 斜視の種類 (参考サイト:[9])

## 2.2 Cover-Test

Cover-Test[1]とは、片眼を遮蔽したときの眼の動きで斜視と斜位を鑑別する検査手法である。片眼を遮蔽した時に、遮蔽していない反対側の片眼が動けば斜視、また、遮蔽した方の片眼が遮蔽を取ったとき動けば斜位と判定される。一回の遮蔽時間は2~3秒程度である。試験方式としては、ACT(Alternating-Cover Test)と、CUT(Cover-Uncover Test)の2種類がある。ACTでは、片眼を常に遮蔽することによって融像の機会を与えないことにより顕性と潜伏性を含めた全偏位量の検出を行う(斜視/斜位の鑑別は行わない)。CUTでは、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/正位の鑑別を行う[1][10]。両者の違いとしては、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(潜在性を含めた全偏位量を検出する)ことが示されている。また、CUTからは、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ことが示されている。以下に、ACT及びCUTについて述べる。

### 2.2.1 ACT(Alternating-Cover Test)

ACT(Alternating-Cover Test, 交代遮蔽試験)とは、常に片眼を交互に遮蔽する試験のことである。常に片眼を遮閉して融像を妨害することにより、斜視または潜伏性の眼位ずれ(斜位)の総和(全偏位量)を求める。

被検者には、固視目標を注視するよう指示し、まず、一眼を2~3秒間遮閉する。ついで遮閉を他眼へ移し、2~3秒間遮閉した後、再び遮閉を他眼に移す。この操作を繰り返し、遮閉を除去されたほうの眼の動きを観察する。遮閉を除去された眼が動けば



斜視または斜位が存在する。遮閉除去した眼が動かなければ正位である。図 2.4 は、検査の一例である。例えば、内斜視または内斜位の場合、いずれの場合も、

1. 左眼遮閉で左眼は内側を向いている (図 2.4A)
2. 遮閉を左眼から右眼へ移すと、左眼が視標を捉えるために右に動き、それに連動して右眼も右に動く (図 2.4B)
3. 遮閉を右眼から左眼へ戻すと、右眼が視標を捉えるために左に動き、それに連動して左眼も左に動く (図 2.4C)
4. 再び遮閉を右眼に戻せば、左眼が視標を捉えるために右に動き、それに連動して右眼も右に動く (図 2.4D)

この際に動く各眼の目の動きの総和が全偏位量 (図 2.4 の赤の幅と緑の幅の和) である。全偏位量は、角度で表す場合もある (図 2.5)。例えば、内斜視 (位) の場合において、左眼を遮蔽したとする。このとき、本来の視方向と現在向いている方向のなす角は図 2.5 中の  $\alpha$  である。同様に右眼を遮蔽したとすると、本来の視方向と現在向いている方向のなす角は図 2.5 中の  $\beta$  である。このとき、全偏位量を角度で表すと、 $\alpha + \beta$  である。実際には、この角度はプリズム量 (2.3 節で説明) として定量化される。これを行う試験を、APCT (Alternate-Prism Cover Test、交代プリズム遮蔽試験) と呼ぶ。

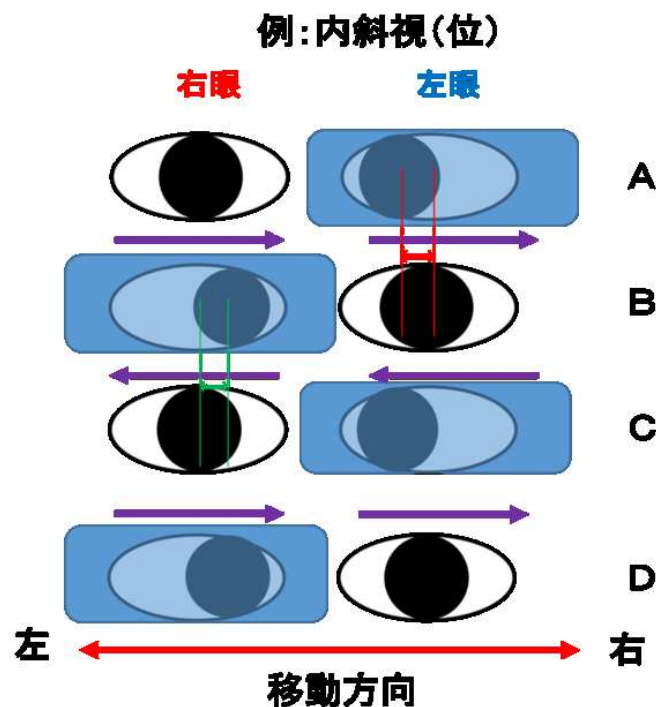


図 2.4 ACT での検査例 (内斜視または内斜位)

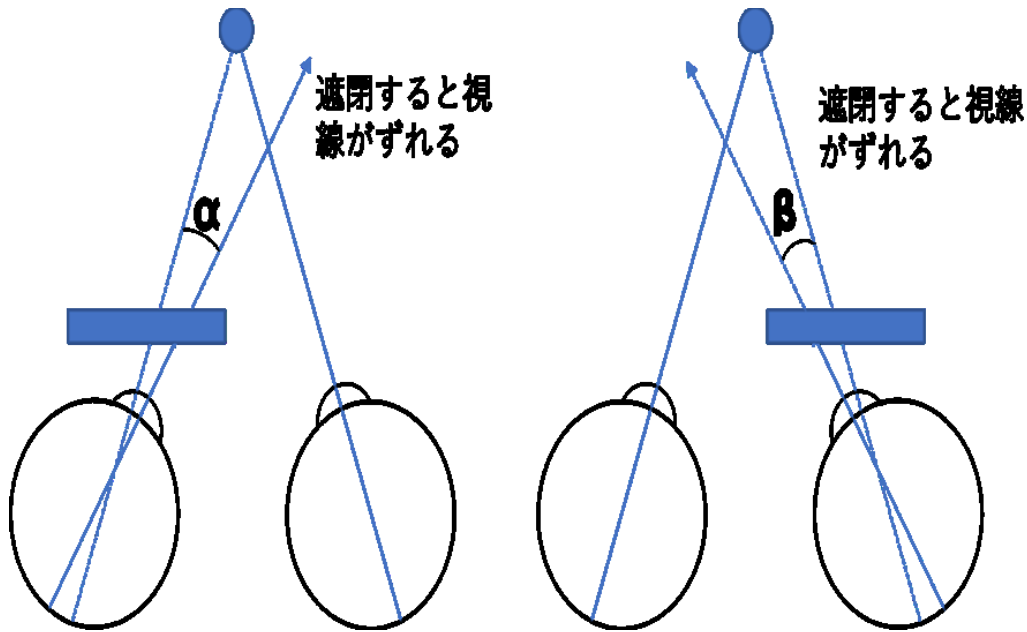


図 2.5 全偏位量 (角度)

## 2.2.2 CUT(Cover-Uncover Test)

CUT(Cover-Uncover Test, 遮蔽-除去試験)とは、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により、斜視/斜位/正位の鑑別を行う試験である。固視目標を注視するよう指示し、一眼を遮閉し、このときの他眼の動きを観察する。正位または斜位の場合には、左右どちらの眼を遮閉しても、遮蔽した眼は動かない。斜視があれば、視標を固視しているほうの眼を遮閉すると、他眼が視標を固視しようとして動く。図 2.6 は、CUT での斜位の場合の眼の動きである。内斜位の場合、

1. 両眼開放下では眼位ずれはみられない (図 2.6A)
2. 一眼を遮閉することで融像が破れ、遮閉下では遮蔽した眼が内斜偏位を示す (図 2.6B)
3. 遮閉を除去すれば、再び融像力が作用するので、右眼は元の位置に戻る (図 2.6C)
4. 次に、もう一方の眼を遮閉することで、同様に遮蔽した眼が内斜偏位を示す (図 2.6D)
5. 遮閉を除去すれば、再び融像力が作用するので、左眼は元の位置に戻る (図 2.6E)

また、図 2.7 は、CUT における斜視の場合の眼の動きである。右眼内斜視 (図 2.7A) の場合、

1. 右眼を遮閉すると、右眼は内側を向いたままである (図 2.7B)
2. 遮閉を取り除いても、右眼は内側を向いたままである (図 2.7C)

3. 次に、左眼を遮閉すると、右眼に左向きの眼球運動が起こり、左眼は内斜偏位する(図 2.7D)

4. 遮閉を取り除くと、右眼は内斜偏位し、左眼に右向きの眼球運動が起こる(図 2.7E)

つまり、片眼を遮蔽した時に、遮蔽した方の片眼が遮蔽を取ったとき動けば斜位、遮蔽していない反対側の片眼が動けば斜視である。そのため、片眼を遮蔽した際のもう片眼の様子を観察する必要がある。CUTで視線を遮ったときの左右の眼の動きをプリズム量(2.3節で説明)として定量化する試験を、SPCT(単眼プリズム遮蔽試験,Single Prism-Cover Test)という。

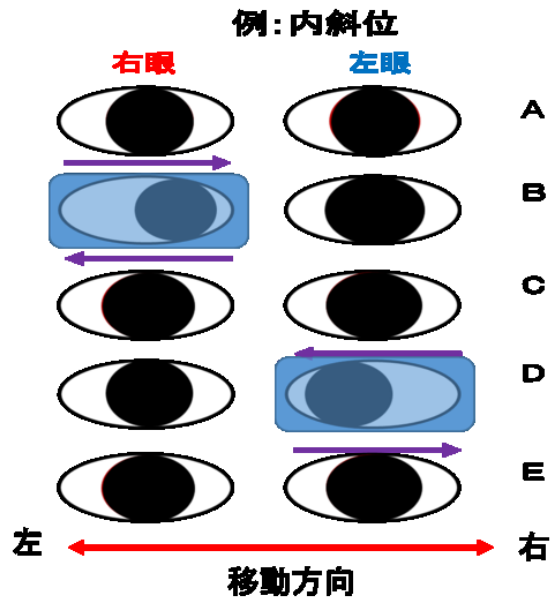


図 2.6 CUT での斜位の検査例 (内斜位)

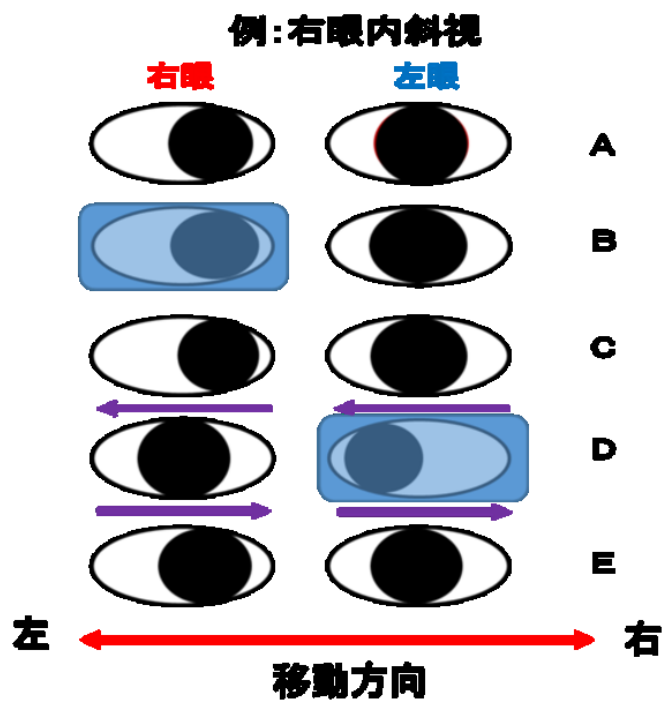


図 2.7 CUT での斜視の検査例 (内斜視)

## 2.3 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、斜位および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全偏位量の測定方法である [11]。検査方法としては、被験者の左右どちらかの眼前に Maddox 小桿を装用させる (図 2.8)。その状態で、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 小桿を装用させた眼には、赤い光の線が見える (図 2.9)。正位の場合、Maddox 小桿を装用させた方の眼で見ている赤い光の線と Maddox 小桿を装用していない逆の眼で見えている光源の像が一致する (図 2.9A)。対して、斜視・斜位の場合、Maddox 小桿を装用させた方の眼で見ている赤い光の線と、Maddox 小桿を装用していない、逆の眼で見えている光源の像が一致しない (図 2.9B)。光源の像と赤い光の線が一致しない場合、Maddox 小桿を装用している眼上に、プリズムを装用する (図 2.10)。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、光源の像と赤い光の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、被験者の自覚的な全偏位量となる。プリズムの度数 (光偏向力) はプリズムジオプトリー ( $\Delta$ ) という単位で表し、1m あたり 1cm の偏角を与えるものを 1  $\Delta$  という [9]。また、1  $\Delta=4/7$ (約 0.57) 度で表される [10]。



図 2.8 Maddox 小桿による検査

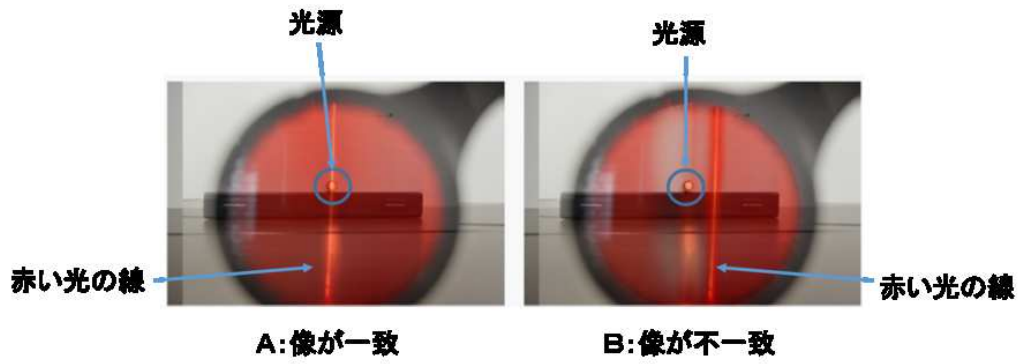


図 2.9 Maddox 小桿からみた光の見え方

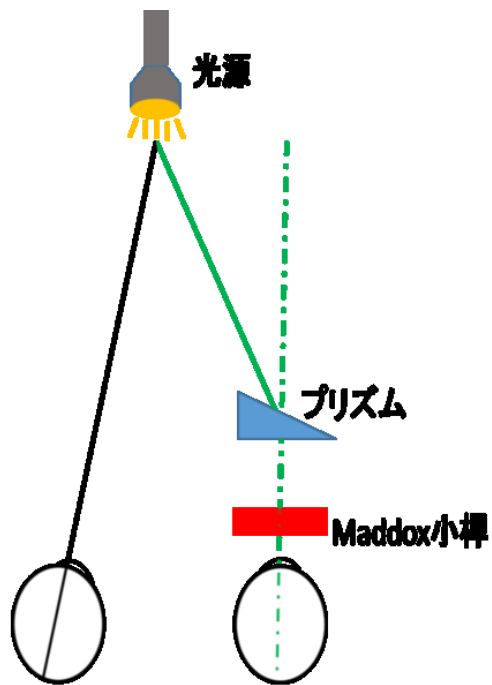


図 2.10 プリズムを用いた補正

## 2.4 眼位検査の現状

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。そのため、視覚視能の感受性期に行われる三歳児健診ですら、全国半数以上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ったり、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、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。

# 第3章 視線追跡機能付きHMDによる 眼位検査の自動化

## 3.1 従来研究

眼位検査の数少ないデジタル化の例として、[4][12]がある。[4]では、屈折異常以外に眼疾患のない成人に対し33cm及び5mの距離に視標を置き注視させ、片眼を近赤外光の透過する板で遮蔽した際に得た両眼の眼球データを視線解析装置により取得している。この眼球データから偏位量を計算し、SCPTの眼位との比較を行っており、外斜視に対して有用性を示している。

[12]では、シャッターメガネ(NVIDIA 3D Vision2)に小型カメラを設置した装置を開発し、眼の開遮蔽を自動制御している。この装置で実際にCover-Testを実施し、検査中の眼球の動きを連続画像として取得し、その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している。

しかし、これらの研究には、広い部屋を必要とすることや、装着した際の違和感や負担が大きいことが問題として挙げられる。省スペースで実施でき、かつ、被験者への負担が少ない手法で眼位検査を実施できることが望まれている。

## 3.2 HMDによる自動化

近年、仮想現実(VR)を用いたゲームをはじめとしたコンテンツの増加から、HMDが普及しつつあり、同時に視線追跡を行うものも登場している。本研究では、視線追跡機能付きのヘッドマウントディスプレイ(HMD)により仮想環境で眼位異常検査を実施することを提案する。

人間の眼には、両眼を使って対象を見ることで起こる、左右の眼で見える網膜像の差異である両眼視差がある。両眼視差に応じた映像をそれぞれ生成し、これらの映像を人間の両眼に対して正しい位置に提示することで、あたかも映像に奥行きがあるように見せることができる(図3.1)。VRでは、この原理を利用した映像を提示することで、奥行きのある環境を提示することができる。

本研究では、VRを用いて検査室を作成し、その中で視標提示を行い、開遮蔽の操作を行いながら眼位を取得する。仮想環境を利用することで現実世界で広い部屋を用意する必要がなくなり、省スペースで実施することができる。また、利用するHMDは装着の違和感が少なく、被験者への負担が少ない。さらにVR上にシステムを構築することでHMDの装着、視標提示、眼の開遮蔽、眼位の取得、解析などをシステム側のプログラムで完全に制御可能なため、検査の自動化と省力化が行いやすい。



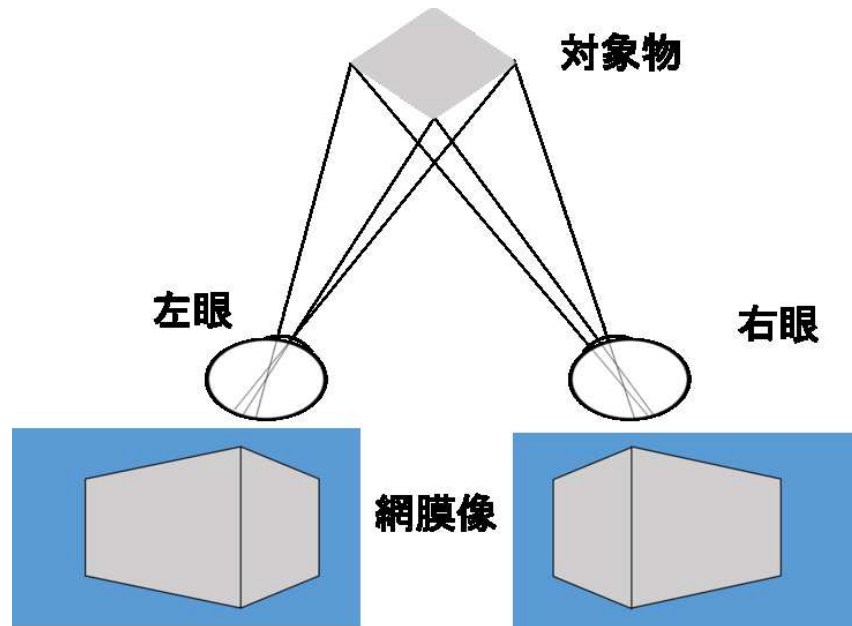


図 3.1 両眼視差と輻輳

### 3.3 ヘッドマウントディスプレイ (HMD)

視線追跡機能付きのヘッドマウントディスプレイ (HMD) として、HTC 社製の HMD 「VIVE Pro Eye[5]」を用いる。HMD に内蔵されているカメラと赤外線センサーにより眼の動きを「眼球データ」として取得することができる。

VIVE Pro Eye の仕様は以下の通りである。

- 眼球データ取得レート:120Hz(両眼の情報を融合した場合。単眼情報については、約 90Hz であった)
- 視線追跡精度:0.5° ~ 1.1° (20° までの視野角に対する精度)
- 視線追跡可能な視野角の限界:110°
- 瞳孔間距離の調節機能 (キャリブレーションによる,4.3 節で説明)



図 3.2 視線追跡機能付き HMD 「VIVE Pro Eye」

### 3.4 視線追跡機能

VIVE Pro Eye は、HMD に内蔵されているカメラ (図 3.3 赤丸) による眼球の画像と赤外線センサー (図 3.3 緑丸) による位置の補正により眼球データを取得する (ただし、眼球の画像自体は取得できない[14])。また、これを利用するために、ソフトウェア開発キット「SRanipalSDK[15]」が提供されている。



図 3.3 VIVE Pro Eye のレンズ面

取得した眼球データには、以下の情報が含まれる。

- 視線の起点座標
- 眼の開き具合
- 瞳孔の位置
- 視線の方向ベクトル
- 輻輳距離

本研究では、そのうち、「視線の起点座標 (角膜の頂点の位置に対応)」を眼の位置として用いて眼位異常検査のプロセスを構築する。図 3.4 は、[16] より引用した、HMD と眼球の位置関係を示した図である。SRanipalSDK により得られる視線の起点座標は、図 3.4 中の “System Origin” を原点とした、眼球の角膜の頂点の位置の三次元座標で、単位は mm である。“System Origin” の実際の HMD 上の位置は、図 3.5 の黄色い点の位置であり、そこを原点として水平方向が  $x$  軸、鉛直上向き方向が  $y$  軸、視線の向いている方向が  $z$  軸の右手座標系 (左変位で  $x$  座標の値が増加、右変位で  $x$  座標の値が減少) となっている。そのため、眼の位置の座標は、式 3.1 により、左手座標に修正している。

$$(x', y', z') = (x, y, z) \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (-x, y, z) \quad (3.1)$$

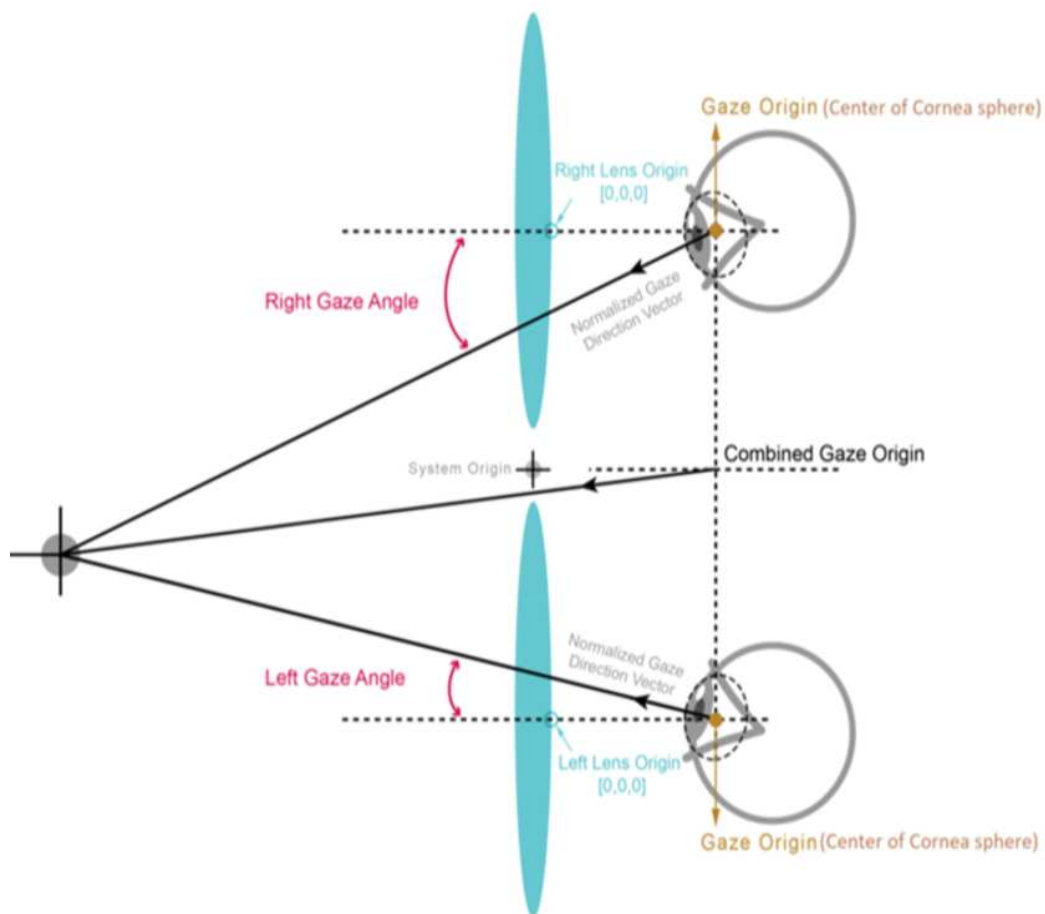


図 3.4 眼球と HMD の位置関係 [16]

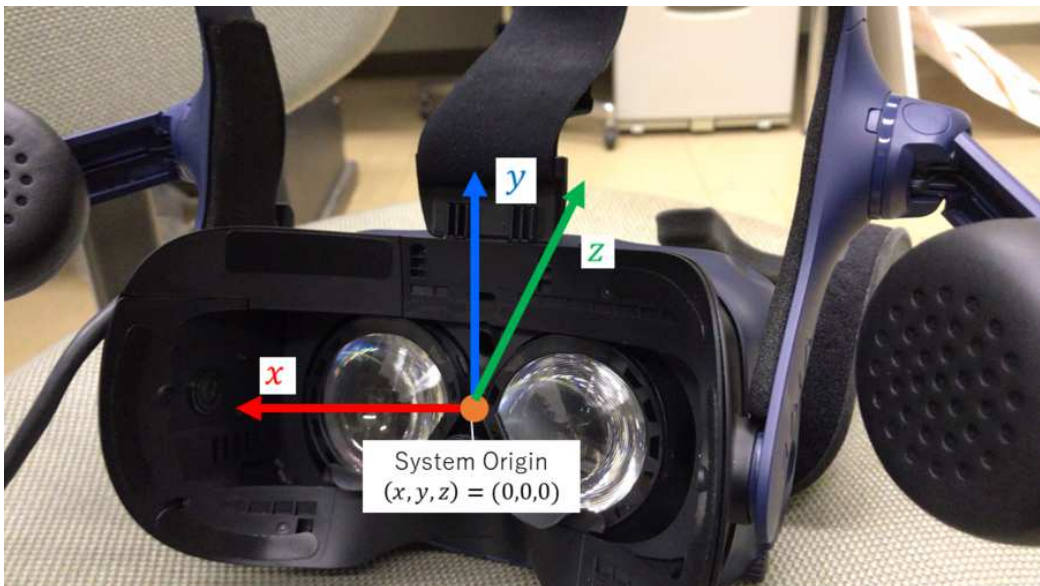


図 3.5 System Origin の位置と座標関係

## 第4章 眼位異常検出システムの構成

### 4.1 システム構成

前述したように、本研究では Cover-Test の手法に基づく定量的な眼位検査システムを提案する。提案システムのハードウェア構成を、図 4.1 に示す。システムは、大きく分けて4つから構成されている。

- A:HMD 被験者が装着する HMD(VIVE Pro Eye)
- B:リンクボックス HMD と PC 間のデータのやりとりに使用
- C:PC 検査環境の構築及び眼球データの記録、HMD の出力状態の確認
- D:ベースステーション 検査室において HMD をトラッキングする

HMD とリンクボックスが E のヘッドセットケーブルで、リンクボックスと PC が F の Mini Display Port 及び USB3.0 でそれぞれ接続されている。

本研究におけるプログラムの実装及び、使用した PC 環境は以下の通りである。

- CPU:Intel (R) Core i7 8700K
- GPU:NVIDIA GeForce RTX2080
- HMD 開発キット:SRanipal SDK Ver 1.1.0.1
- 3DCG 開発キット:Unity 2019 3.0f5
- OS:Windows10
- 実装言語:C#

Unity を使い、仮想の検査環境を作成した。図 4.2 に作成した検査環境を示す。検査環境は、検査室、視標 (図 4.2 の赤い点)、左右それぞれの眼を塞ぐための遮蔽物からなる。実装したプログラムを実行すると、HMD 上に図 4.2 のような画面が両眼立体視でできる形で出力される。

被検者には、この画面上の視標を注視してもらい、ACT および CUT に基づいて開遮蔽操作を行う。図 4.3 に、開遮蔽操作時の検査画面の各眼での見え方を示す。まず、両眼無遮蔽の状態を開始し、ACT 及び CUT の手法に基づき、遮蔽/除去を行う。開遮蔽は、左右それぞれの眼のすぐ前に置いた遮蔽物を可視化/不可視化することにより実現する。その間、眼球データを取り続け、得られた眼の動きの大きさから、斜視の程度を定量化する。ACT では両眼の全偏位量を、CUT では斜視としての偏位量 (斜視量)、斜位としての偏位量 (斜位量) を算出し、同時に斜視と斜位の判定を行う。

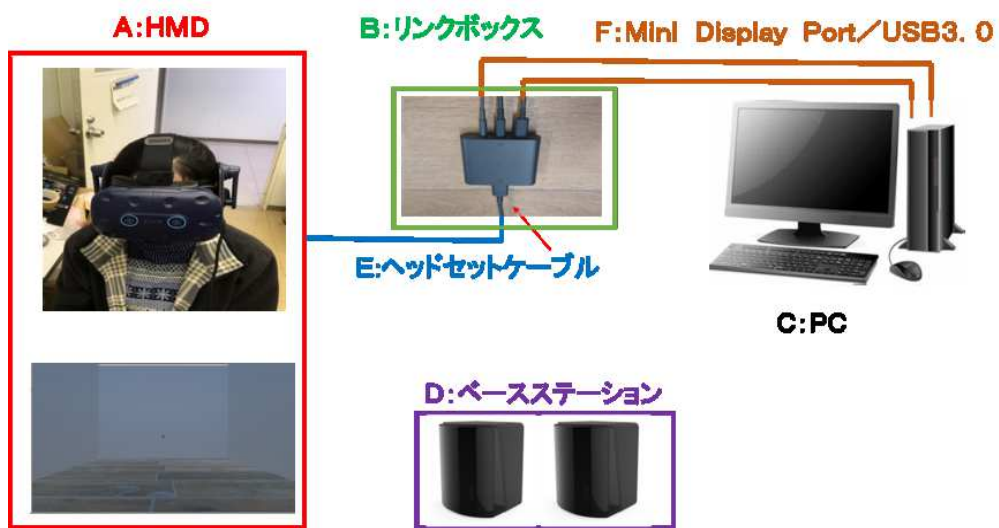


図 4.1 システムの構成

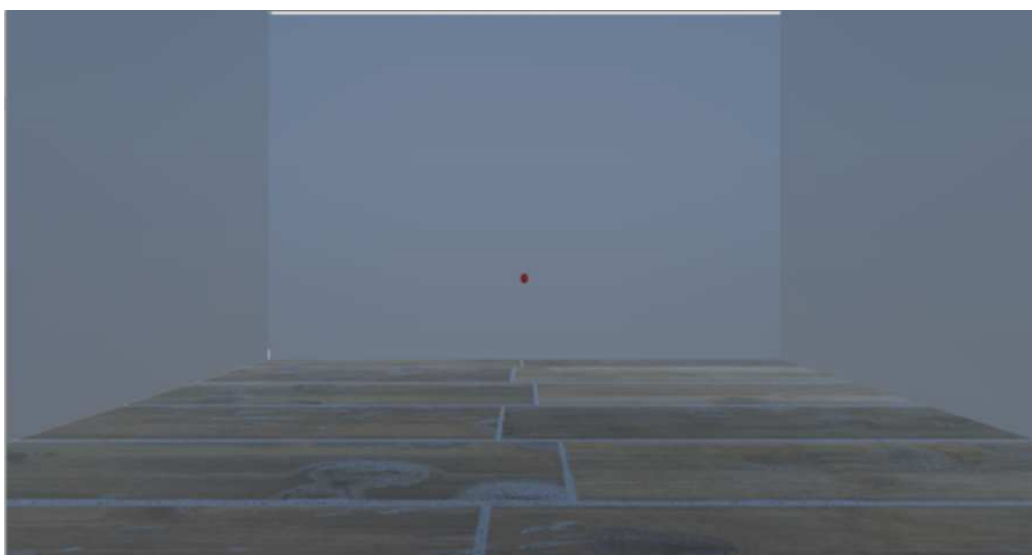


図 4.2 検査環境画面

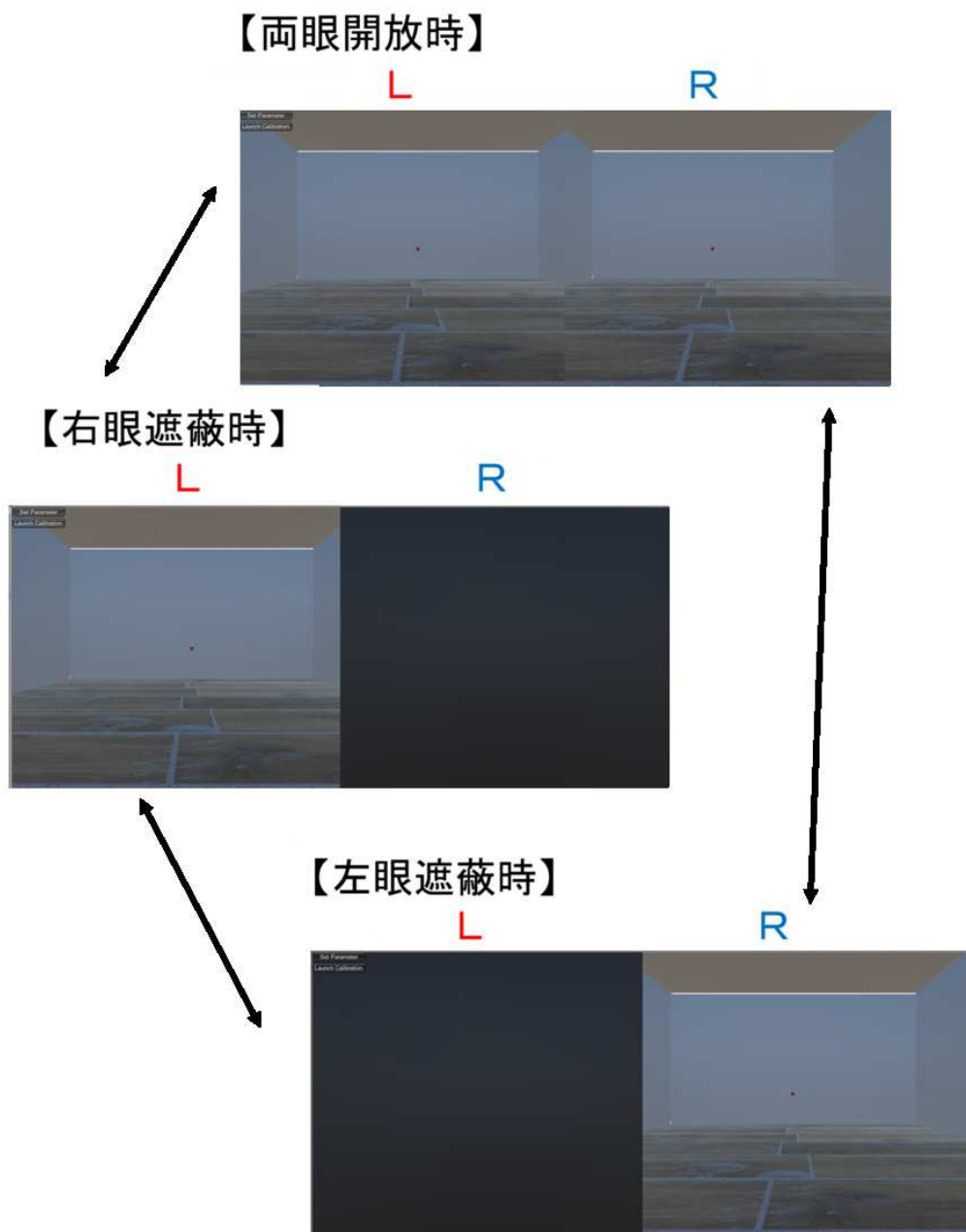


図 4.3 各眼における見え方と遮蔽



## 4.2 仮想の検査環境の作成

検査環境を作成するにあたり、Unity[18]を用いた。Unityは、ゲームやツールを作るための統合開発環境である。これを用いて物体を適切に配置することにより、3D映像を作成することができる。本研究では、これを用いて検査環境を作成した(図4.4)。

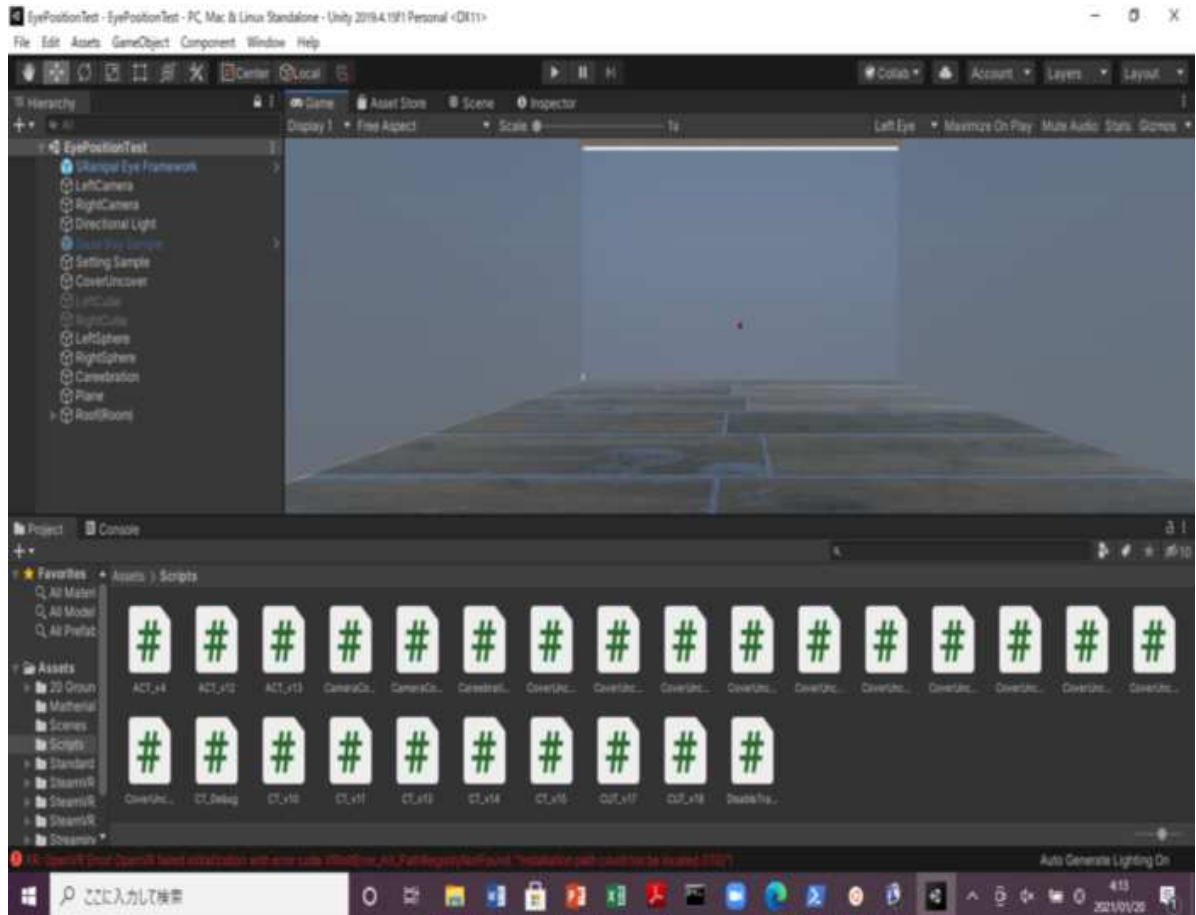


図 4.4 Unity の開発画面

検査環境は、検査室、視標、遮蔽物の3つからなる。検査室(図4.2)は、幅と奥行きがそれぞれ6m、高さ3mとして作成している。この室内に、視標として直径10cmの赤い球を被検者から5mの位置に配置している。Unity上での座標は、1単位が現実世界の1mに相当している。このことを利用し、それぞれの大きさを設定した。

また、Cover-Testにおいて重要な要素である開遮蔽の機能については、画面の目前にどちらかの視界を完全に塞ぐことのできる黒い遮蔽物を置き、その可視/不可視を切り替えることにより行っている。検査画面を出力する際、遮蔽時に該当する眼の画面だけ出力しないという方法は、その眼の眼球データを取得できない可能性があるため、このような方法を採用した。

### 4.3 キャリブレーション

検査を行うにあたり、正しく眼球データを取得するには、HMD が正しく装着できている必要がある。そのため、HMD を装着したあと、キャリブレーションを実施する。キャリブレーション機能は、SRanipalSDK が提供するものであり、カスタマイズすることはできない[19]。また、制御している PC 上でキャリブレーションを操作することはできないため、被験者には HMD で自身で実施してもらう必要がある。キャリブレーションは、以下の3ステップからなる。

- (1) HMD の装着位置の調整
- (2) 瞳孔間距離の調整
- (3) 視線情報の較正

以下に、キャリブレーションの各ステップの説明を行う。

- (1) HMD の装着位置の調整

視線追跡を正しく行うには、図 3.3 のカメラ及び赤外線センサーで正常に眼が検出できている必要がある。そのため、正常に検出できるように、HMD の装着位置を調整する。図 4.5 は、実際の指示画面である。はじめに、図 4.5A の画面が表示されるので、HMD の位置を同図の HMD マークが点線内に収まり、図 4.5B のようになるように、HMD 本体を上下してもらう。

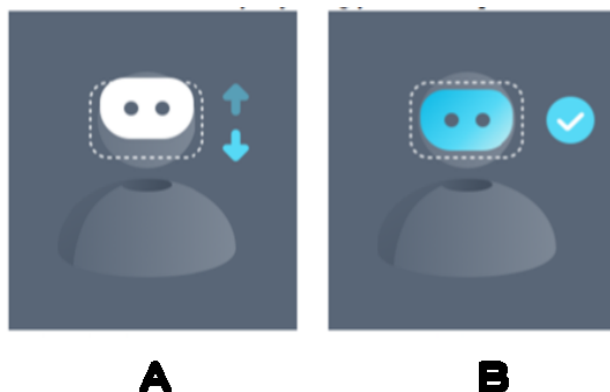


図 4.5 装着位置の調整画面

- (2) 瞳孔間距離の調整

対象物に関する正確な大きさや奥行きを知覚するためには、提示映像が正しい大きさと奥行きで再現される必要がある。そのため、瞳孔間距離が被験者のものと合うように調整する必要がある[13]。図 4.6 は、実際の指示画面である。はじめに、図 4.6A の画面が表示されるので、同図下の白い棒が点線内に収まり、図 4.6B のようになるように、HMD を操作してもらう。

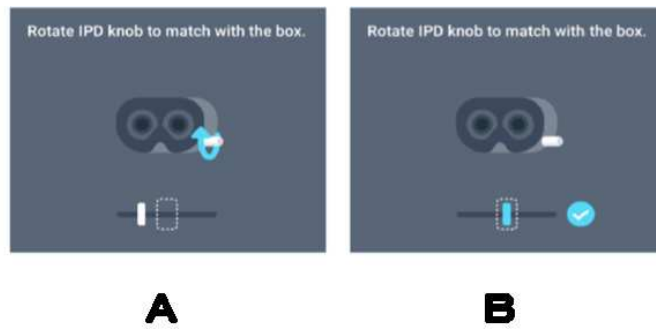


図 4.6 瞳孔間距離の調整画面

### (3) 視線情報の校正

本ステップでは、視標を次々と提示し、既知の視標の位置と検出される視線方向の対応関係を見て、算出する視線の方向ベクトルなどの視線情報を校正する。前ステップが終了すると、点で眼を追う旨の指示が表示され、その後、図4.7のように点が画面中央→右上→左下→右上→右下の順に表示されるので、それを目で追ってもらおう。

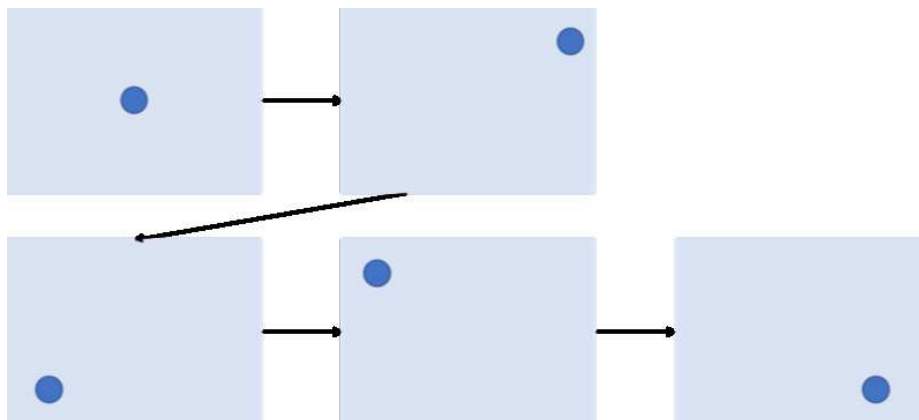


図 4.7 視線追跡の確認画面

## 4.4 ACTにおける検査の手順

被検者にHMDを被ってもらった状態でACT検査用プログラムを実行すると、図4.2が現れる。被験者には、その画面内に現れる視標を注視してもらう。画面が現れた3秒後に開遮蔽が開始する。各開遮蔽動作は3秒ごとに行い、開遮蔽動作の間の区間を、早い順からPhase0,1,...,9と名付ける。本検査での開遮蔽の操作とその際の各眼の状態を表4.1に記す。

表 4.1 ACTにおける各 Phase の開遮蔽操作と各眼の状態

Phase	開遮蔽操作	左眼の状態	右眼の状態
0	-	開放	開放
1	右眼遮蔽	開放	遮蔽
2	左眼遮蔽/右眼除去	遮蔽	開放
3	左眼除去/右眼遮蔽	開放	遮蔽
4	左眼遮蔽/右眼除去	遮蔽	開放
5	左眼除去/右眼遮蔽	開放	遮蔽
6	左眼遮蔽/右眼除去	遮蔽	開放
7	左眼除去/右眼遮蔽	開放	遮蔽
8	左眼遮蔽/右眼除去	遮蔽	開放
9	左眼除去	開放	開放

## 4.5 CUTにおける検査の手順

被検者にHMDを被ってもらった状態でCUT検査用プログラムを実行すると、ACTの際と同様に図4.2が現れる。被験者には、その画面内に現れる視標を注視してもらう。画面が現れた3秒後に開遮蔽が開始する。各開遮蔽動作は3秒ごとに行い、開遮蔽動作の間の区間を、早い順からPhase0,1,...,12と名付ける。開遮蔽の動作は、右眼遮蔽(Phase1,5,9)→右眼除去(Phase2,6,10)→左眼遮蔽(Phase3,7,11)→左眼除去(Phase4,8,12)を1セットとして、3セット実施している。本検査での開遮蔽の操作とその際の各眼の状態を表4.2に記す。

表 4.2 CUTにおける各 Phase の開遮蔽操作と各眼の状態

Phase	開遮蔽操作	左眼の状態	右眼の状態
0	-	開放	開放
1	右眼遮蔽	開放	遮蔽
2	右眼除去	開放	開放
3	左眼遮蔽	遮蔽	開放
4	左眼除去	開放	開放
5	右眼遮蔽	開放	遮蔽
6	右眼除去	開放	開放
7	左眼遮蔽	遮蔽	開放
8	左眼除去	開放	開放
9	右眼遮蔽	開放	遮蔽
10	右眼除去	開放	開放
11	左眼遮蔽	遮蔽	開放
12	左眼除去	開放	開放

## 4.6 ACTにおけるプリズム量の算出

ACTにおいて取得したいプリズム量は全偏位量(図 2.4 の眼の動きの総和)である。ACTにおけるプリズム量の計算は、以下の8ステップから構成される。

- (1) 眼球データの取得
- (2) 無効フレームの除去
- (3) 潜時の影響の補正
- (4) データ数の正規化
- (5) 眼の位置の平均値の計算
- (6) 移動量の計算
- (7) プリズム量の計算
- (8) ずれの方向の判定

以下にそれぞれのステップについて説明する。

### 4.6.1 眼球データの取得

検査開始から終了するまでの間、毎秒約 90 回眼球データを取り続ける。眼球データに含まれる「視線の起点座標」を眼の位置データとして用いる。視線の起点座標は  $(x, y, z)$  の 3次元座標で取得される(3.4 節で説明)。眼の動きはほぼ平面上の動きとみなせるので、 $z$  座標は判定に用いず、眼の位置データは  $(x, y)$  により表す。

## 4.6.2 無効フレームの除去

HMDを用いて眼球データを取得している際、まばたきをはじめとした理由により、データの取得に失敗することがほぼ必ず数回は発生する。このようなデータを無効フレームとよぶ。無効フレームでも眼球データ自体はHMDからPCに送信されるが、無効フレームでは、視線の起点座標の値が $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ となる。無効フレームは、以降の計算から除外する。図4.8は、無効フレームを除外した例である。

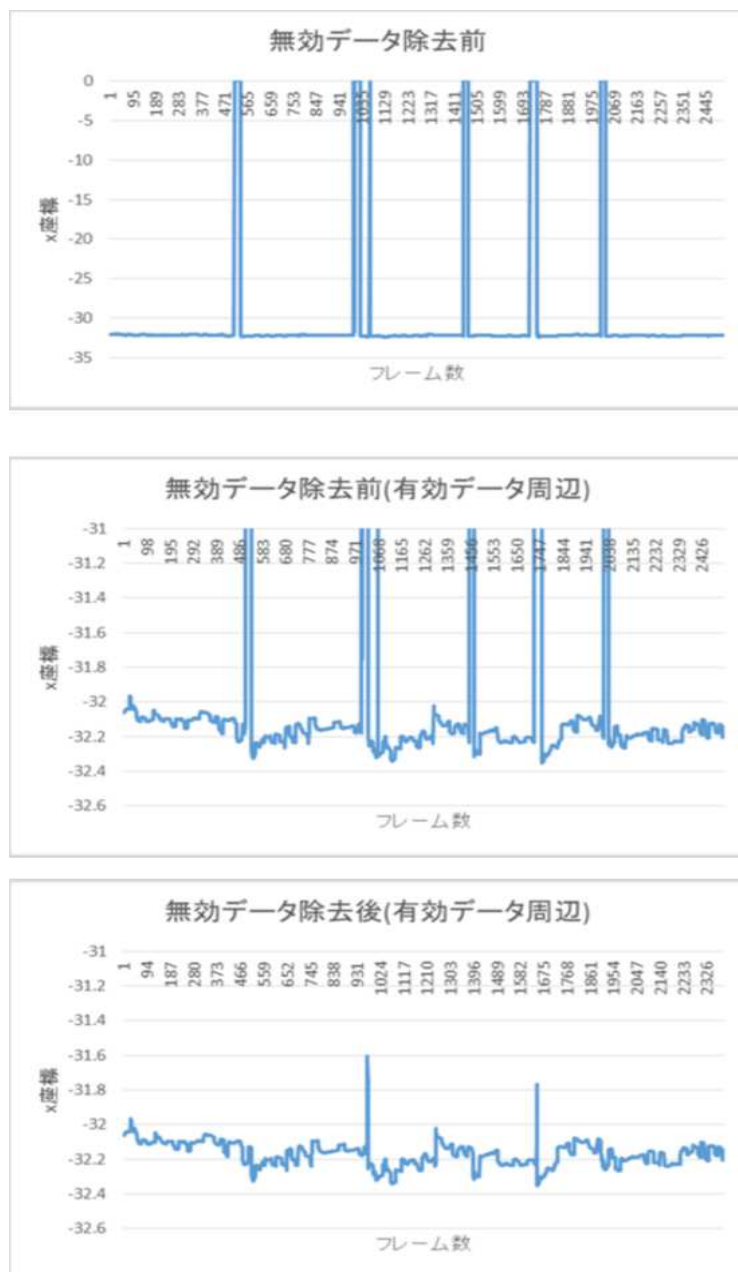


図 4.8 無効フレームの除去例

### 4.6.3 潜時の影響の補正

人間の眼は、刺激を与えられてから眼が実際に反応するまでには、少なからず遅れが生じる。この遅れの時間のことを潜時と呼ぶ。本システムでは、開遮蔽のタイミング(図 4.9 の  $T_0$ ) から実際に目が動き出すまでの間(図 4.9 の黒い点線)に遅れ(潜時)が存在する。開遮蔽から眼が動き出すまでの眼の位置データをそのままプリズム量の計算に用いると、結果に悪影響が及ぶ可能性がある。そこで、開遮蔽のタイミング( $T_0$ ) から一定時間  $D_{max}$  の中で眼の動きが最大になるまでの時間を潜時と判定した。[20][21]によると、潜時は概ね 20 才が 200ms、40 才では 210ms、50 才では 230ms、65~70 才では 290ms 程度であることから、 $D_{max}=400ms$  とする。第  $i$  フレームの眼の動きの大きさ  $d_i$  は、第  $i$  フレームでの眼の位置データをそれぞれ  $x_i, y_i$  とし、式 4.1 により計算した。

$$d_i = |x_{i+1} - x_i| + |y_{i+1} - y_i| \quad (4.1)$$

正位の場合、眼の動きがほとんどないため、算出される潜時は正確ではないが、判定する上での影響はほとんどない。

各 Phase において、Phase 開始から潜時までのフレームのデータは除外し、Phase 終了から次の潜時までのフレームのデータを追加する。図 4.10 は、実際に補正した例である。

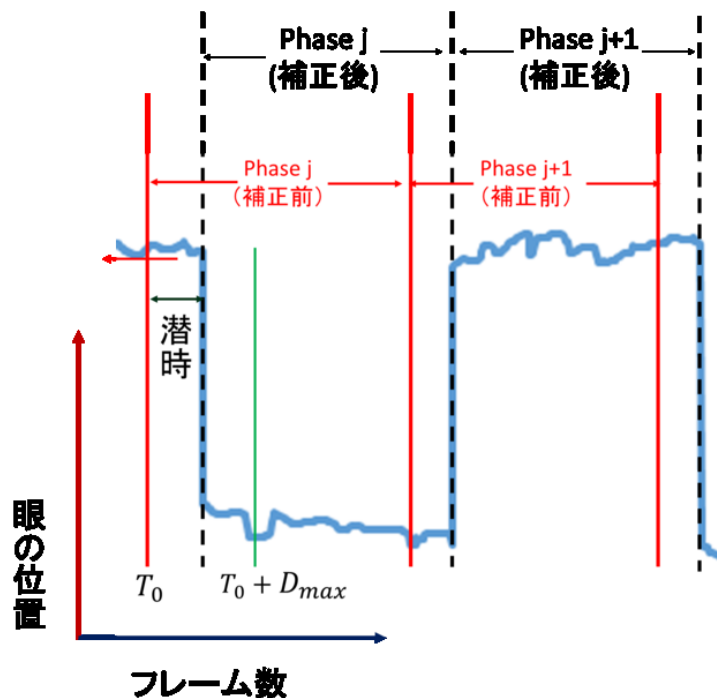


図 4.9 開遮蔽のタイミングと実際の眼の動き

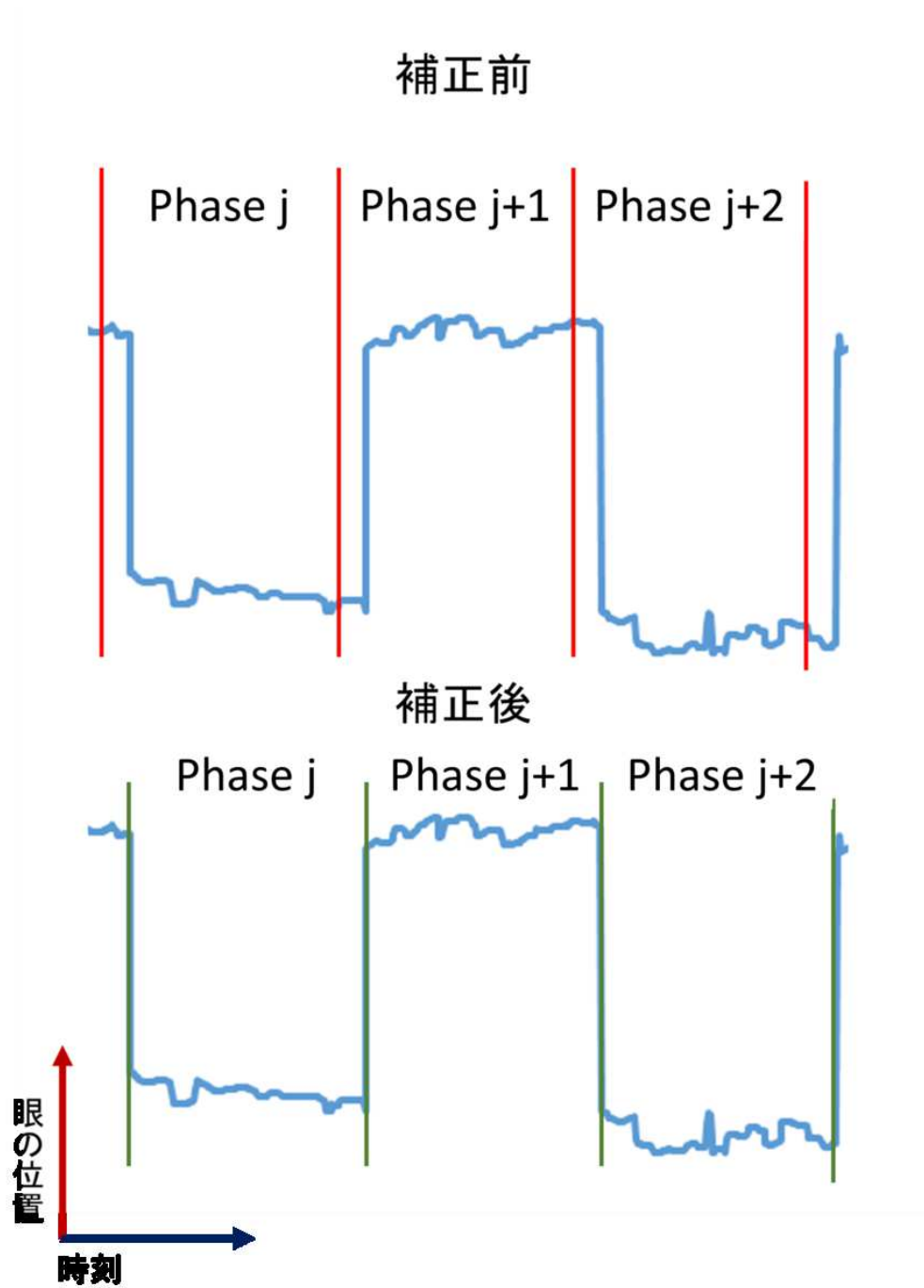


図 4.10 潜時による Phase の補正例



#### 4.6.4 データ数の正規化

各 Phase はそれぞれ 3 秒間であり、眼の位置データは、1 秒あたり約 90 個得られる。しかし、処理遅れの影響や、前 2 ステップの処理により各 Phase のデータ数は一定にならないため、判定の際に煩雑である。そのため、判定に用いるデータ数を補間により一定数に揃える。各 Phase を  $N$  等分し、各時点のデータをその前後に実際に取得したデータの内分により求める。本研究では、 $N=200$  個に揃える。

#### 4.6.5 眼の位置の平均値の計算

開遮蔽による眼の移動量を求めるために、各 Phase の眼の位置データの平均値を求める。Phase  $j$  の眼の位置の平均値  $(\bar{x}_j, \bar{y}_j)$  は、Phase  $j$  に含まれるフレーム  $i$  の眼の位置データを用いて次式で求める。

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i \in \text{Phase } j} x_i \quad (4.2)$$

$$\bar{y}_j = \frac{1}{N} \sum_{i \in \text{Phase } j} y_i \quad (4.3)$$

#### 4.6.6 眼の移動量の計算

Phase  $j$  での眼の移動量  $m_j$  は、4.6.5 節で求めた Phase  $j$  と Phase  $j+1$  の眼の位置の平均値の間の差とする。

$$m_j^x = \bar{x}_{j+1} - \bar{x}_j \quad (4.4)$$

$$m_j^y = \bar{y}_{j+1} - \bar{y}_j \quad (4.5)$$

#### 4.6.7 プリズム量の計算

開遮蔽により眼球が図 4.11 の点 a から点 b へと動いたとする。このとき、移動量  $m_j$  が得られている。眼は、眼球回旋点を中心とした回転運動をしているとみなせる。眼球回旋点と角膜の頂点(視線の起点座標)との距離は、人間では、年齢性別関係なくほぼ 13mm である [22]。ズレの角度を  $\theta_j$ (deg) とすると、プリズム量の単位は  $1 \Delta \doteq 0.57(\text{deg})$  であることから、プリズム量  $P_j$  は、次式で求める。

$$\theta_j = \tan^{-1} \left( \frac{|m_j|}{13} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (4.6)$$

$$P_j = \frac{\theta_j}{0.57} \quad (4.7)$$

これは片眼のプリズム量である。右眼のプリズム量を  $P_{Rj}$ 、左目のプリズム量を  $P_{Lj}$  とすると、全偏位量  $P_{all}$  は、計測値が安定している Phase 3~6 の値のみを使用し、次

式により算出する。

$$P_{all} = \frac{P_{L3} + P_{L5}}{2} + \frac{P_{R4} + P_{R6}}{2} \quad (4.8)$$

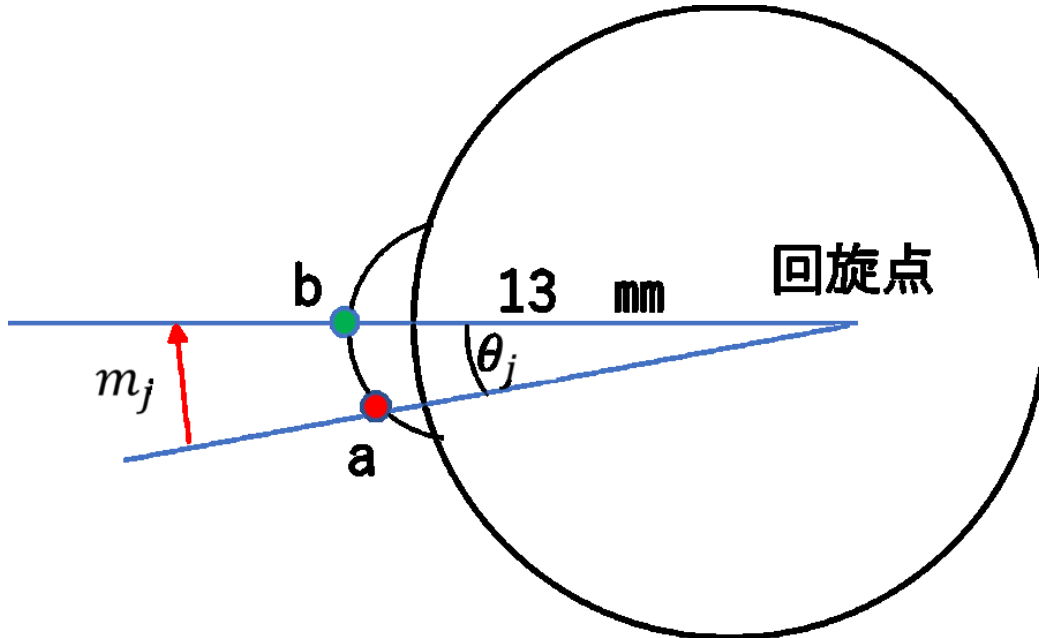


図 4.11 眼の動きと回旋点

#### 4.6.8 ずれの方向の判定

斜視のずれの方向の判定については、左眼を基準とし、左眼遮蔽時の左眼の移動量 ( $m_{Lj}$ ) の平均値 ( $\bar{m}_L$ ) を求め、その値の符号を基に判定する。なお、Phase 9 の値は、両眼開放状態であり、ACT で用いる値としては不適切なので、使用していない。 $\bar{m}_L$  は、次式により求める。

$$\bar{m}_L = \frac{m_{L1} + m_{L3} + m_{L5} + m_{L7}}{4} \quad (4.9)$$

水平方向については、 $\bar{m}_L$  の値が負となったとき外斜視 (位)、正となった際に内斜視 (位) と判定する。また、垂直方向については、 $\bar{m}_L$  の値が負となったとき下斜視 (位)、正となった際に上斜視 (位) と判定する。

## 4.7 CUTにおけるプリズム量の算出

CUTのプリズム量の計算は、以下の10ステップから構成される。

- (1) 眼球データの取得
- (2) 無効フレームの除去
- (3) 潜時の影響の補正
- (4) データ数の正規化
- (5) 眼の位置の代表値の計算
- (6) 移動量の計算
- (7) プリズム量の計算
- (8) 斜視量・斜位量の計算
- (9) ずれの方向の判定
- (10) 斜視・斜位の判定

このうち、(1),(2),(4),(7)に関しては、ACTのものと全く同じであるため、この節では説明しない。

#### 4.7.1 潜時の影響の補正

4.6.2節でも述べたが、刺激を与えられてから眼が実際に反応するまでには潜時がある。ACT 同様これをそのまま計算に利用すると、結果に悪影響が及ぶ可能性がある。そこで、ACT と同様に開遮蔽のタイミング ( $T_0$ ) から一定時間  $D_{max}$  の中で眼の動きが最大になるまでの時間を潜時と判定した (図 4.12)。ただし、CUT の場合は両眼が開放される機会があり、融像力が働くことから、眼位の移動は ACT に比べて緩やかである。そこで、 $D_{max}=1000\text{ms}$  として、式 4.1 により眼の動きの大きさを計算し、最大となった点を潜時とした。更に、ACT と同様、各 Phase において、Phase 開始から潜時までのフレームのデータは除外し、フレーム終了から次の潜時までのフレームのデータを追加する。図 4.13 は、実際の補正例である。

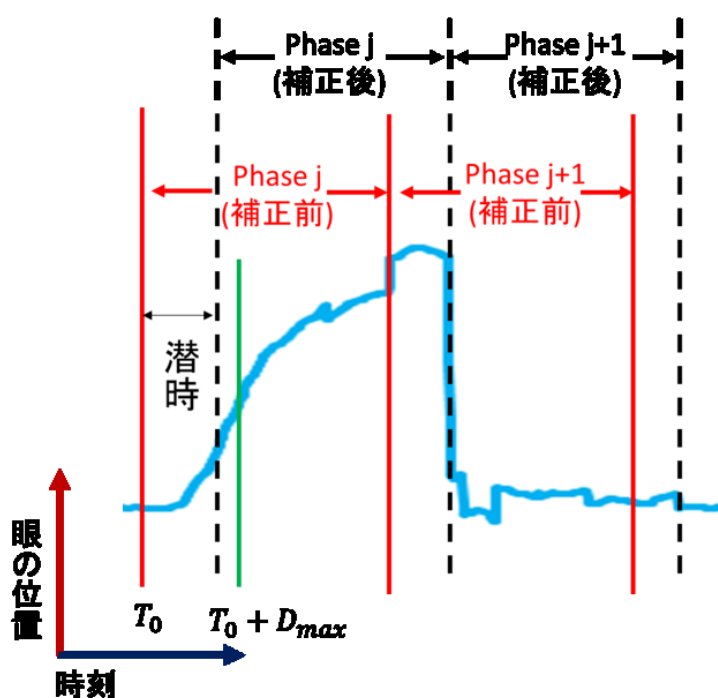
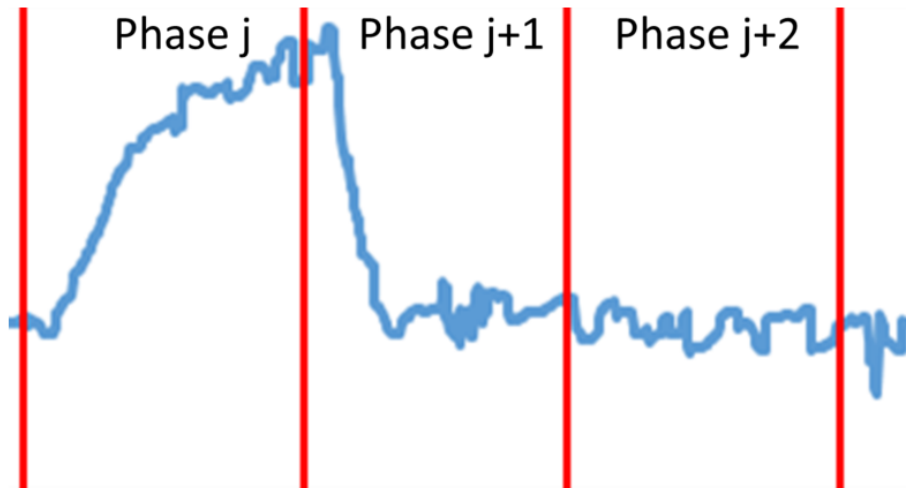


図 4.12 CUT における開遮蔽のタイミングと実際の眼の動き

## 補正前



## 補正後

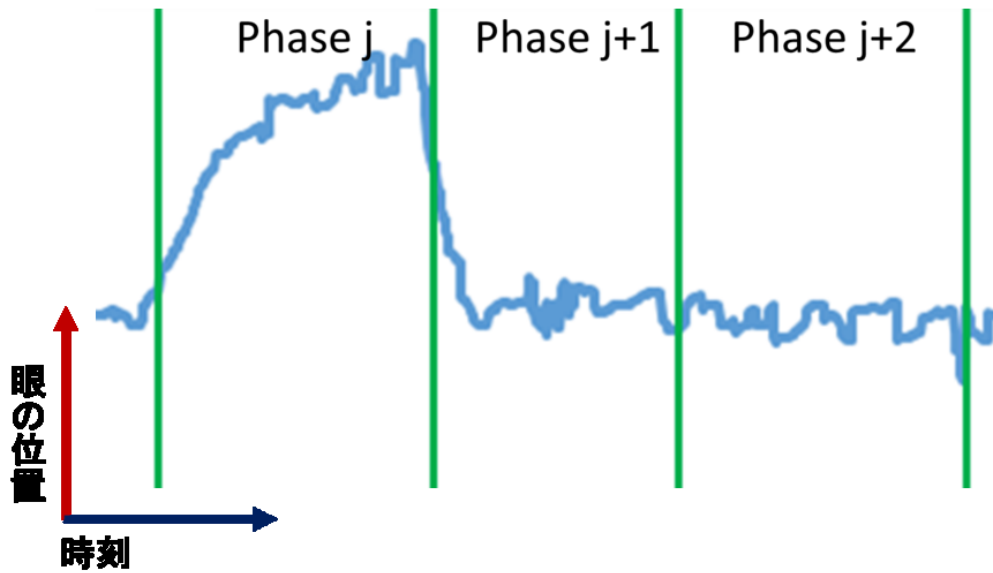


図 4.13 CUT における補正例

## 4.7.2 眼の位置の代表値の計算

眼の移動量を求めるために、各 Phase の眼の位置の代表値を求める。CUT の場合は ACT の場合と比べ、動きが緩やかである。そこで、ピーク時の眼の位置を代表値とすることとした。具体的には、補正した Phase の末尾の潜時に相当する区間 (図 4.12 の潜時の区間) の平均値を求めた。眼の位置の代表値  $\bar{v}_j^x$ 、 $\bar{v}_j^y$  は、以下の式で求める。

$$\bar{v}_j^x = \frac{1}{Q_j} \sum_{k=1}^{Q_j} x_k \quad (4.10)$$

$$\bar{v}_j^y = \frac{1}{Q_j} \sum_{k=1}^{Q_j} y_k \quad (4.11)$$

ここで、 $Q_j$  は、潜時に相当する区間のデータ数である (図 4.14)。

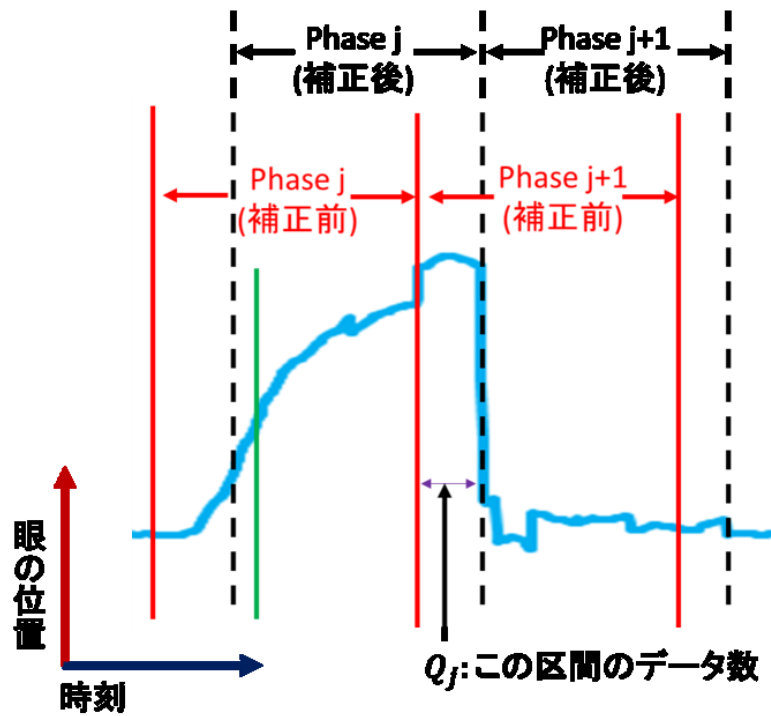


図 4.14 潜時のデータの個数

### 4.7.3 移動量の計算

Phase  $j$  の水平/垂直方向の眼の移動量  $m_j^x, m_j^y$  は、Phase  $j+1$  全体の平均値  $(x_{j+1}^-, y_{j+1}^-)$  と Phase  $j$  での眼の位置の代表値  $(\bar{v}_j^x, \bar{v}_j^y)$  を用いて次式で求める。

$$m_j^x = x_{j+1}^- - \bar{v}_j^x \quad (4.12)$$

$$m_j^y = y_{j+1}^- - \bar{v}_j^y \quad (4.13)$$

### 4.7.4 斜視量・斜位量の計算

CUT では、片眼を遮蔽した時に、遮蔽していない反対側の片眼が動けば斜視、また、遮蔽した方の片眼が遮蔽を取ったとき動けば斜位である。前節で算出した移動量から、プリズム量を求める。計算方法は 4.6.7 節の ACT のものと同じである。CUT では、斜視量と斜位量をそれぞれ計算する。各眼の斜視量は、他眼遮蔽時の自眼のプリズム量の平均、各眼の斜位量は、自眼が遮蔽から開放に変わった Phase のプリズム量の平均を用いる。表 4.3 に、それぞれの計算に用いたプリズム量の Phase を示す。また、その対応関係を図 4.15、図 4.16 に示す (右眼は緑色の矢印の向き、左眼は赤色の矢印の向きの動きを比較)。こうして、左眼と右眼の斜視量及び斜位量を求め、両眼の合計を両眼の斜視量及び斜位量とする。

表 4.3 計算に用いたプリズム量の Phase

	斜視	斜位
右眼	2,6	5,9
左眼	4,8	3,7

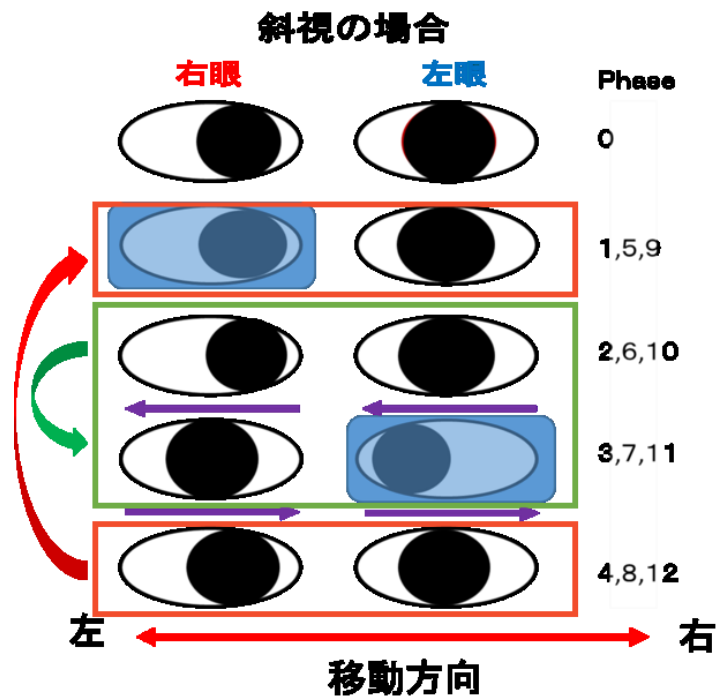


図 4.15 動きを見る Phase の対応関係 (斜視)

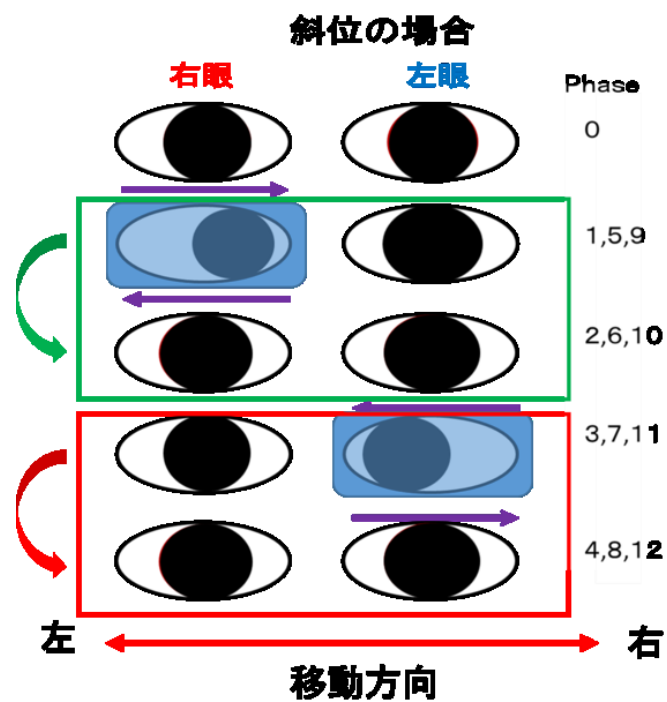


図 4.16 動きを見る Phase の対応関係 (斜位)



#### 4.7.5 ずれの方向の判定

ずれの方向は、左眼を基準とする。前節で求めた斜視量及び斜位量の大きさにより、方向の判定に使用する値  $DIR_x, DIR_y$  を、以下のように定めた。

(1) 斜視量の方が大きい場合

$$DIR_x = \frac{m_4^x + m_8^x}{2} \quad (4.14)$$

$$DIR_y = \frac{m_4^y + m_8^y}{2} \quad (4.15)$$

(2) 斜位量の方が大きい場合

$$DIR_x = \frac{m_3^x + m_7^x}{2} \quad (4.16)$$

$$DIR_y = \frac{m_3^y + m_7^y}{2} \quad (4.17)$$

いずれの場合についても、水平方向については、 $DIR_x$  の値が負の場合は、外斜視(位)、正の場合は内斜視(位)と判定する。垂直方向については、 $DIR_y$  の値が正の場合は、上斜視(位)、負の場合は下斜視(位)と判定する。

#### 4.7.6 斜視・斜位の判定

CUT とは、そもそも斜視又は斜位を鑑別する試験である。そこで、前節で算出した斜視量と斜位量をもとに、斜視量が  $1 \Delta$  以上の場合斜視、斜視量が  $1 \Delta$  未満かつ斜位量が  $1 \Delta$  以上の場合に斜位と判定する。

# 第5章 実験

## 5.1 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、提案システムによる検査と Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査 (以後、Maddox 検査と略記) でそれぞれ定量化した検査結果を比較する。

## 5.2 実験内容

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、宮崎大学工学部の学生及び職員合計 16 人を被検者とした。

実験手順は以下の通りである。

### (1) 被験者への事前説明

被験者へは、検査を実施する前に研究を行っている理由と意義、使用する機械の安全性について説明した。眼球データは個人情報であるため、個人が特定できない形で公表すること、被検者の申し出によりいつでもデータを破棄することができること等を条件とし、同意を得て取得した。

### (2) Maddox 検査

次に、Maddox 検査 (2.3 節で説明) を行い、得られた全偏位量を提案システムとの比較を行う上での真値とみなした。

### (3) 提案システムによる ACT 検査

次に、提案システムで ACT 検査を行い、全偏位量の定量化を行った。

### (4) 提案システムによる CUT 検査

最後に、提案システムで CUT 検査を行い、斜視量と斜位量の定量化を行った。

提案システムで得られた結果を、Maddox 検査で得られた値と比較した。CUT では、斜視量と斜位量の和を全偏位量とした。

## 5.3 システムの有効性評価

### 5.3.1 ACT

表 5.1 に、Maddox 検査と提案システムによる ACT での水平 ( $x$ ) 方向の全偏位量を示す。単位はすべてプリズムジオプトリー ( $\Delta$ ) である。外斜視 (位) は XT/XP、内斜視 (位) は ET/EP と表記する。提案システムにおける定量化の結果は、小数第 3 位を四捨五入した値である。表中では、1  $\Delta$  以上の外斜視 (位) と定量された (異常ありとみなす) ものを青字、1  $\Delta$  以上の内斜視 (位) と定量されたものを赤字で示している。

表 5.1 Maddox と提案システムによる定量化 (水平方向)

被検者	Maddox	提案システム
A	0-1ET/EP	0.88ET/EP
B	0	0.52XT/XP
C	0	0.36ET/EP
D	1XT/XP	1.44XT/XP
E	0	0.52XT/XP
F	4XT/XP	3.22XT/XP
G	0	1.06ET/EP
H	1XT/XP	0.88XT/XP
I	1-2ET/EP	2.27ET/EP
J	0	0.50XT/XP
K	0	0.64ET/EP
L	8ET/EP	9.51ET/EP
M	1XT/XP	0.57XT/XP
N	10-12XT/XP	12.10XT/XP
O	1XT/XP	1.49XT/XP
P	8ET/EP	7.91ET/EP

提案システムの有効性を評価するために、Maddox 検査の全偏位量と提案システムの全偏位量の平均誤差、相関係数、有意差の 3 つの要素で評価を行った (表 5.2)。

誤差は、単純に真値とどれだけ近い値で定量化できたかを評価する。相関係数は、Maddox 検査と提案システムでは全偏位量の算出方法が異なることから、提案システムでの手法で定量化を行って問題がなかったかを評価する。正規分布とは考えにくいことから、相関係数にはスピアマンの順位相関係数を用いた。最後に、有意差を調べ、相関が正しいといえるかを評価する。

Maddox 検査の全偏位量と提案システムの全偏位量の平均誤差は、0.61  $\Delta$  と、1  $\Delta$  未満の結果が得られ、正解と近い値を得られた。また、Maddox 検査と提案システムの結果の間でスピアマンの順位相関係数を求めると、0.956 と非常に強い相関が得られた (散布図: 図 5.1)。更に、「帰無仮説  $H_0$ : Maddox 検査による定量化結果の値は提案システムによる定量化結果との相関が無い」

「対立仮説  $H_1$ : Maddox 検査による定量化結果の値は提案システムによる定量化結果との相関がある」

とし、p 値を求め、有意差を調べた。その結果、p 値は  $2.11 \times 10^{-4} (< 0.01)$  と、Maddox で定量化したプリズム量と本システムで定量化したプリズム量は、有意差がなかったため、本提案システムにおける ACT での水平 ( $x$ ) 方向に対する定量化の結果は、実際の臨床的検査である Maddox 検査との強い相関がある。これらのことから、水平 ( $x$ ) 方向に対する提案システムでの ACT での定量化については、有用性が示せたと考える。

表 5.2 提案システム-Maddox 間の検定

平均誤差 ( $\Delta$ )	0.61
相関係数	0.956
p 値 (両側確率)	$2.11 \times 10^{-4}$

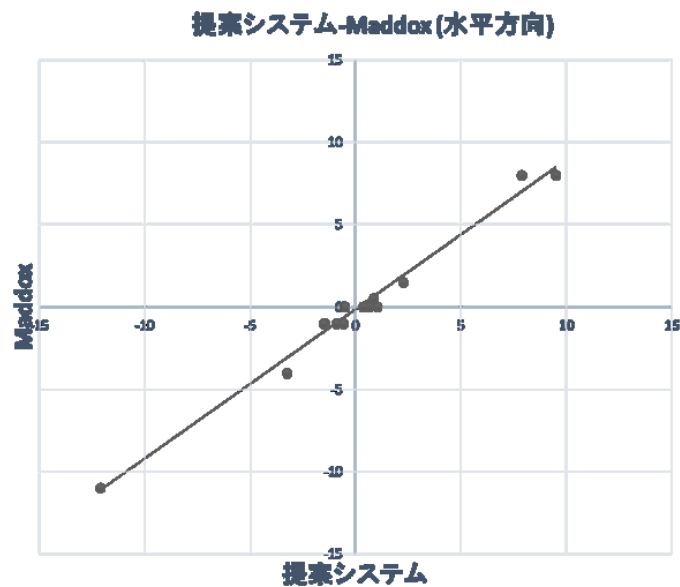


図 5.1 提案システム-Maddox 間の散布図 (水平方向)

表 5.1 で被験者 G は、Maddox 検査で正位 (0  $\Delta$ ) と判定されたが、提案システムでは 1  $\Delta$  以上の値が得られ、「異常がみられる」判断した。図 5.2 に被験者 G の眼の位置データを示す。斜視又は斜位としての規則的な動きはないものの、時間が経つにつれて眼の位置が右に変位している。時間が経つにつれて、被験者が視標以外の場所を注視してしまったことが原因と考えられる。そのため、このような斜視・斜位以外の動きを補正する、又は斜視・斜位以外の動きを検出して再検査を実施するような仕組みを考える必要がある。

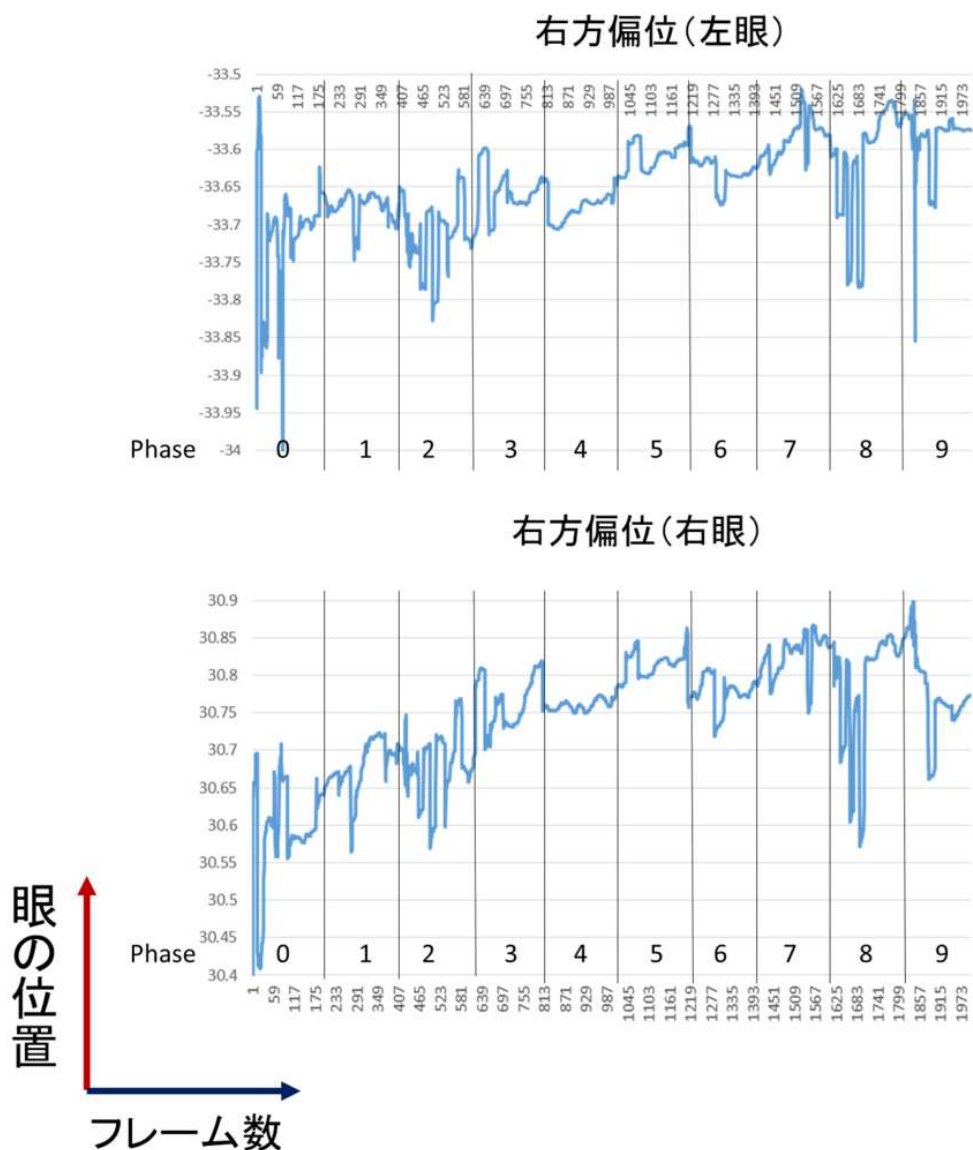


図 5.2 被験者 G の眼の動き

表 5.3 に、垂直 ( $y$ ) 方向の結果を示す。上斜視 (位) を H、下斜視 (位) を L と表記する。1  $\Delta$  以上の上斜視 (位) と定量されたものを赤字、1  $\Delta$  以上の下斜視 (位) と定量された (異常ありとみなす) ものを青字で示す。

表 5.3 Maddox と提案システムによる定量化 (垂直方向)

被検者	Maddox	提案システム
A	0	0.98H
B	0	0.80L
C	0	1.65H
D	0	1.50H
E	0	0.80L
F	0	1.61L
G	0	1.32H
H	0	0.82H
I	0	4.95H
J	0	0.63H
K	0	1.28H
L	0	4.85H
M	0	1.16H
N	0	4.70H
O	0	0.44L
P	0	3.21L

全員 Maddox 検査の結果が正位 (0  $\Delta$ ) であったため、相関係数を求めることが不可能であった。図 5.3 に散布図を示す。

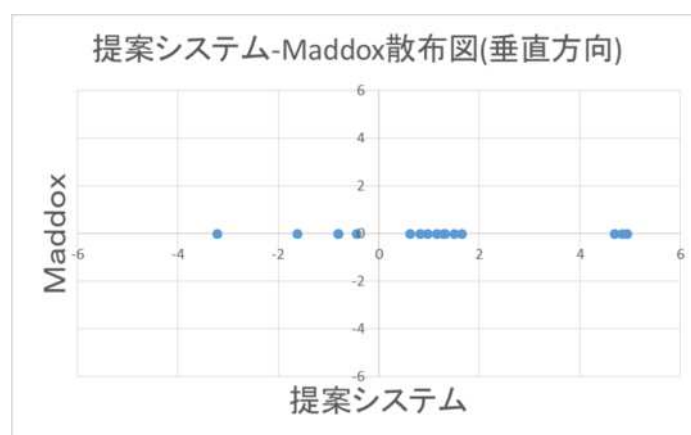


図 5.3 提案システム-Maddox 間の散布図 (垂直方向)

全体として、異常が無いにも関わらず異常があると判定してしまった例が大半であった (16 人中 10 人、平均誤差 1.92  $\Delta$ )。水平方向の動きが垂直方向に加算されてしまったことが原因の 1 つと考えられる。図 5.4 は、被検者 N の片眼の垂直方向と水平方向の眼

の位置データである。この例では、眼が水平方向に大きく動いた際に、垂直方向にも大きく動いている。HMDの水平垂直方向の座標系と人間の眼の垂直方向の動きがずれている可能性があることから、水平垂直方向の動きの相関から軸のずれを補正するなどの対策が必要と考えられる。

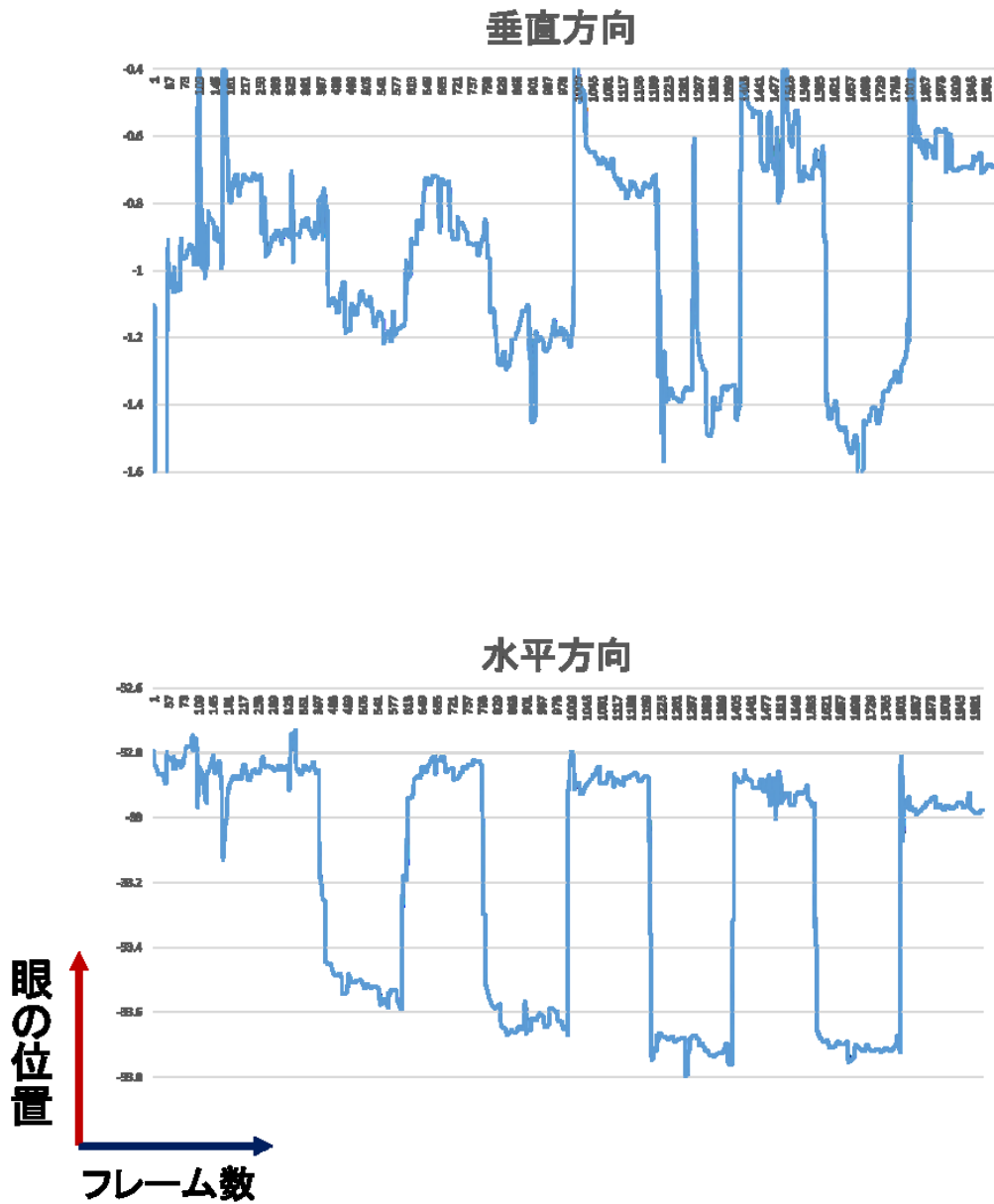


図 5.4 被験者 N の眼の動き

### 5.3.2 CUT

表 5.4 に、Maddox 検査での全偏位量と、提案システムによる CUT での水平 ( $x$ ) 方向の斜視量、斜位量及び全偏位量を示す。CUT では、斜視量と斜位量の総和を全偏位量とする。全偏位量は、斜視量+斜位量となることが理想(斜視量+斜位量=Maddox 検査の結果)だが、融像の有無などによりそうなることは少ない。そこで、Maddox と斜視量+斜位量の相関を求めることにより、提案システムでの CUT の評価をした。

表 5.4 Maddox と提案システム (CUT) による定量化 (水平方向)

被検者	Maddox	提案システム		
		斜視量	斜位量	全偏位量
A	0-1ET/EP	0.56ET	0.35EP	0.91ET/EP
B	0	1.29XT	0.37XP	1.66XT/XP
C	0	0.47XT	0.58XP	1.05XT/XP
D	1XT/XP	1.09XT	0.98XP	2.07XT/XP
E	0	0.80XT	1.43XP	2.23XT/XP
F	4XT/XP	0.41XT	1.09XP	1.50XT/XP
G	0	0.30ET	0.45EP	0.75ET/EP
H	1XT/XP	0.48XT	0.20XP	0.68XT/XP
I	1-2ET/EP	0.62ET	0.62EP	1.24ET/EP
J	0	0.36XT	1.50XP	1.86XT/XP
K	0	1.38ET	0.93EP	2.31ET/EP
L	8ET/EP	0.48ET	3.43EP	3.91ET/EP
M	1XT/XP	0.87XT	1.12XP	1.99XT/XP
N	10-12XT/XP	0.51XT	9.46XP	9.97XT/XP
O	1XT/XP	0.72XT	1.68XP	2.42XT/XP
P	8ET/EP	9.26ET	0.42EP	9.68ET/EP

表 5.5 は、表 5.4 を基にスピアマン順位相関係数検定を用いて Maddox 検査の結果と提案システムの結果の間の検定を行った結果である。全偏位量の誤差の絶対値の平均は、1.50  $\Delta$  であった。また、相関係数は 0.810 であり p 値は  $1.71 \times 10^{-3}$  ( $< 0.01$ ) と、有意差がなかったため、強い相関があるといえる (図 5.5)。提案システムにおける CUT での水平 ( $x$ ) 方向に対する定量化の結果は、実際の臨床的検査である Maddox 検査と誤差は大きいものの、大きいものはきちんと大きく定量できているものと考えられる。しかし、精度 (誤差) としては、問題が残る結果であった。

表 5.5 提案システム-Maddox 間の検定

平均誤差 ( $\Delta$ )	1.50
相関係数	0.810
p 値 (両側確率)	$1.71 \times 10^{-3}$



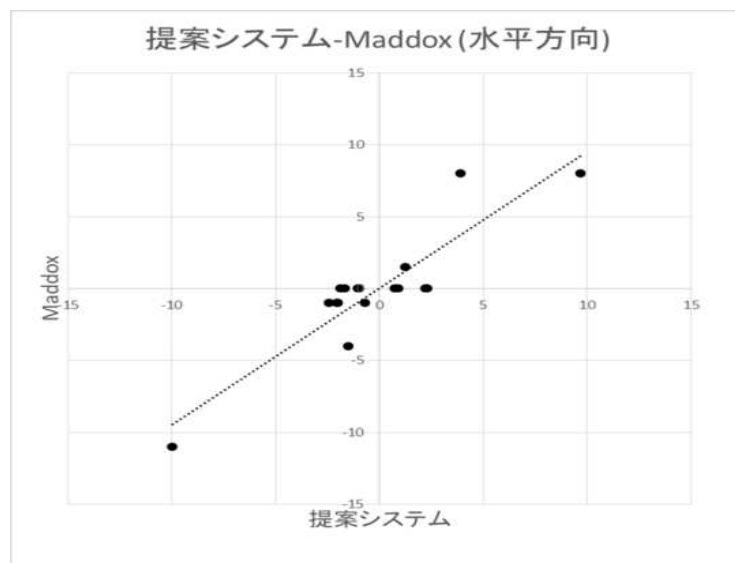


図 5.5 提案システム-Maddox 間の散布図 (水平方向)

表 5.6 に、Maddox 検査での全偏位量と、提案システムによる CUT での垂直 (y) 方向の斜視量、斜位量及び全偏位量を示す。

表 5.6 Maddox と提案システム (CUT) による定量化 (垂直方向)

被検者	Maddox	提案システム		
		斜視量	斜位量	全偏位量
A	0	1.61H	2.89H	4.50H
B	0	0.70L	2.33L	3.03L
C	0	1.32H	1.37H	2.69H
D	0	0.81H	0.71H	1.52H
E	0	0.78L	2.33L	3.11L
F	0	1.54L	1.84L	3.38L
G	0	1.40H	0.65H	2.05H
H	0	0.59H	0.66H	1.25H
I	0	0.46H	3.85H	4.31H
J	0	0.57H	0.39H	0.96H
K	0	0.47H	0.66H	1.23H
L	0	1.61H	2.93H	4.54H
M	0	0.32H	3.59H	3.91H
N	0	1.34H	3.20H	4.54H
O	0	0.38L	1.83L	2.21L
P	0	2.17L	2.29L	4.46L

全員 Maddox 検査の結果が 0(正位)であったため、相関係数を求めることが不可能であった。提案システムでは、ほぼ全員に対して異常あり (16 人中 15 人) という結果であった。誤差についても、2.98 Δ と非常に大きな誤差であった。この場合についても、HMD の水平垂直方向の座標系と人間の眼の垂直方向の動きがずれている可能性が高いことから、補正の検討が必要と考えられる。

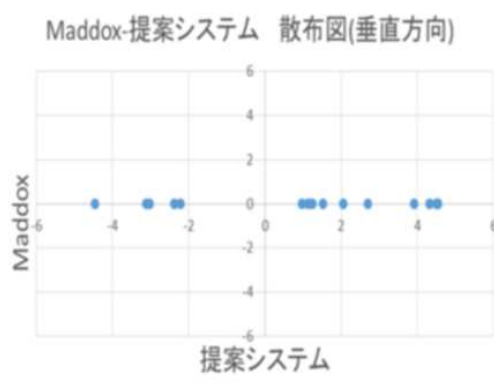


図 5.6 提案システム-Maddox 間の散布図 (垂直方向)

## 第6章 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。

提案システムでは、VRを用いて検査室を作成し、その中で視標提示を行い、開遮蔽の操作を行いながら眼位を取得した。仮想環境を利用することで現実世界で広い部屋を用意する必要がなくなり、省スペースで検査を実施することを可能とした。また、利用するHMDは装着の違和感が少なく、被験者への負担が少ない。さらにVR上にシステムを構築することでHMDの装着、視標提示、眼の開遮蔽、眼位の取得、解析などをシステム側のプログラムで完全に制御可能なため、検査の自動化と省力化が行いやすいという利点がある。

提案システムと Maddox 検査との整合性を調べ、提案システムの評価を行った。その結果、水平( $x$ )方向については、ACTでは、平均誤差 $0.61\Delta$ (プリズムジオプトリー)、相関係数 $0.956$ であった。CUTでは、平均誤差 $1.50\Delta$ 、相関係数は $0.810$ であり、どちらも定量結果について強い相関が得られ、有用性を示すことができた。しかし、CUTについては誤差が大きく、更なる精度向上が必要と考えられる。

今後の課題として以下の3つが挙げられる。

1つ目は、正位もしくは微小の異常に対する細かい判定である。人間の眼は、異常がなくとも極僅かな動き(固視微動)が存在する。そのため、それを検出して除去することや、被験者の注視点を評価して補正を行うことが必要と考えられる。

2つ目は、現時点での提案システムは、内外斜視・斜位の検出精度は比較的高いが、上下斜視・斜位に対して正しく検出できていない点である。HMDの垂直方向の座標系と人間の眼の垂直方向の動きがずれている可能性があることから、水平垂直方向の眼の動きの相関から軸のずれを補正するなどの対策が必要と考えられる。

3つ目に、CUTにおけるカバーテストとの整合性である。本研究では、提案システムで求めた斜視量と斜位量を合計して全偏位量とみなし Maddox 検査との整合性を確認したが、誤差が大きい傾向にあった。しかし、検査結果には強い相関があった。CUTは本来斜視と斜位の鑑別を行う試験であることから、斜視量と斜位量を分離して考えた際に、斜視量を求める SCPT との一致性を検証し、精度評価することが必要と考えられる。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の椋木雅之教授にはゼミはもちろんのこと、遅い時間まで相談に乗っていただき、私の支離滅裂な説明により何度も困惑させてしまったことが多々ありましたが、それでも熱心にご助言を頂いたおかげで、ここまで研究成果を上げることができました。心から御礼申し上げます。実験の実施において、資料の提供や助言、Maddox 小桿を用いた定量検査における器具の操作方法等のご指導をいただいた九州保健福祉大学保健科学部視機能療法学科の内田憲之助教に深く感謝を表します。また、ゼミでの議論のほか被検者の斡旋等、様々な面でお手伝い頂いた高塚佳代子技術専門職員、そのほか、副査を務めて下さった山森一人教授、山場久昭助教、本研究に協力してくれた高津菜弥さん、実験データの取得に協力して頂きました、宮崎大学の工学部の学生の皆様、九州保健福祉大学保健科学部視機能療法学科の皆様、学部時代より気が沈みがちな私のカウンセリングに携わっていただきました安全衛生保健センターの楠元和美准教授や宮野秀市臨床心理士、日常色々な面でお世話になった椋木研究室の皆様、そして、今まで支えて下さった父母をはじめとする家族に深く感謝します。

## 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] 臼井千恵, “Hess 赤緑試験,” 日本視能訓練士協会誌, 28 巻, pp.81-92, 2000.
- [4] 四之宮佑馬, 高橋由嗣, 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.231-233, 2016.
- [5] <https://www.vive.com/jp/product/vive-pro-eye/overview/>(2020年12月27日閲覧).
- [6] 丸尾敏夫, 栗屋忍, 加藤和男, “視能矯正学用語集”, pp.405-415, 金原出版, 2000.
- [7] 丸尾敏夫 栗屋忍 “丸尾敏夫. 斜視総論 斜視の定義” 視能矯正学 第2版, pp.203, 2008.
- [8] イワタメガネ プリズム加工 [http://iwatamegane.com/?page\\_id=41517](http://iwatamegane.com/?page_id=41517), (2021年1月15日閲覧).
- [9] 日本弱視斜視学会 斜視 <https://www.jasa-web.jp/general/medical-list/strabismus>, (2020年5月13日閲覧).
- [10] 内海隆, “斜視の検査法,” あたらしい眼科 19(12), pp.1553-1556, 2002.
- [11] 視能訓練士マニュアル, “定量的眼位検査 自覚的斜視角査 (赤ガラス又は [Maddox 小桿] を使用する方法)”, <https://slideshowjp.com/doc/956816/>, (2021年1月20日閲覧).
- [12] 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.
- [13] 小木哲朗, 慶応大学 没入型VRプログラミング 講義資料 “立体視の原理” <http://lab.sdm.keio.ac.jp/ogi/vr/step7.html>

- [14] VIVE Community Forums Developer Forums, “Get an image of an eye”  
<https://forum.vive.com/topic/6726-get-an-image-of-an-eye/>(2020年5月24日閲覧).
- [15] SRanipalSDK <https://developer.vive.com/resources/vive-sense/sdk/vive-eye-tracking-sdk-sranipal/>(2019年9月28日閲覧).
- [16] Yu Imaoka, Andri Flury ,Eling D. de Bruin, “ Assessing Saccadic Eye Movements With Head-Mounted Display Virtual Reality Technology” ,Frontiers in Psychiatry 11, pp.1-19, 2020.
- [17] VIVE Community Forums Developer Forums,  
“ Vive Pro Eye:Finding a single eye origin in world space? ” ,  
<https://forum.vive.com/topic/5888-vive-pro-eye-finding-a-single-eye-origin-in-world-space/?tab=comments#comment-5895&ct=1565236211>  
,(2020年2月18日閲覧).
- [18] Unity <https://unity.com/ja>,(2019年10月1日閲覧).
- [19] VIVE Community Forums Developer Forums,  
“ Is it possible to adjust calibration settings? ” ,  
<https://forum.vive.com/topic/6715-is-it-possible-to-adjust-calibration-settings/>.(2020年8月1日閲覧).
- [20] 橋本邦衛, 白石信尚 他, “生体機能の年令変化”, (2) 単一反応時値と複雑反応時値, 産業医学, 3:1 84,1961.
- [21] Ulrich Schiefer , Hans Strasburger , Stephan T. Becker , Reinhard Vonthein, Jan Schiller , Traugott J. Dietrich, William Hart , “ Reaction time in automated kinetic perimetry: effects of stimulus luminance, eccentricity, and movement direction” ,Vision Research Volume 41, Issue 16,pp2157-2164, 2001.
- [22] 西信元嗣,“眼光学の基礎”, 金原出版,1995.

## 付録A 検査データの例

次ページ以降に5章の実験結果得られたデータのうち、ACTでは、正位と判断したものと内斜視(位)、外斜視(位)と判断したものを各1例ずつ、CUTでは正位と判断したものと斜位と判断したもの、斜視と判断したものを各1例ずつ示す。なお、垂直( $y$ )方向についてはは正しく検出できていないため、水平( $x$ )方向のみを掲載する。

## A.1 ACT

図 A.1:正位の例 (被験者 J Maddox 検査:0  $\Delta$  (正位) 提案システム (ACT):0.50  $\Delta$  XT/XP)



図 A.1 正位 (被験者 J) の ACT における眼の動き



図 A.2:内斜視 (位) の例 (被験者 J Maddox 検査:8 △ ET/EP 提案システム (ACT):9.51 △ ET/XP)

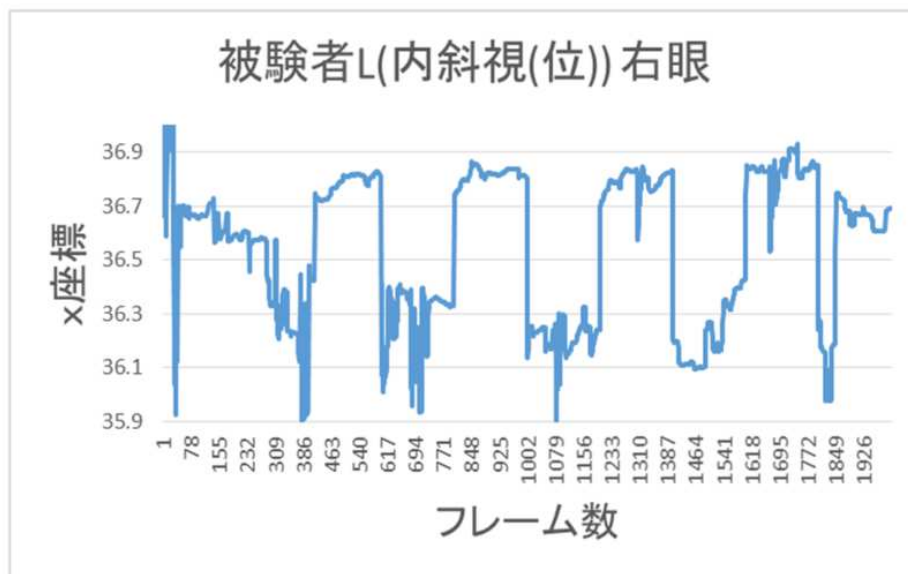
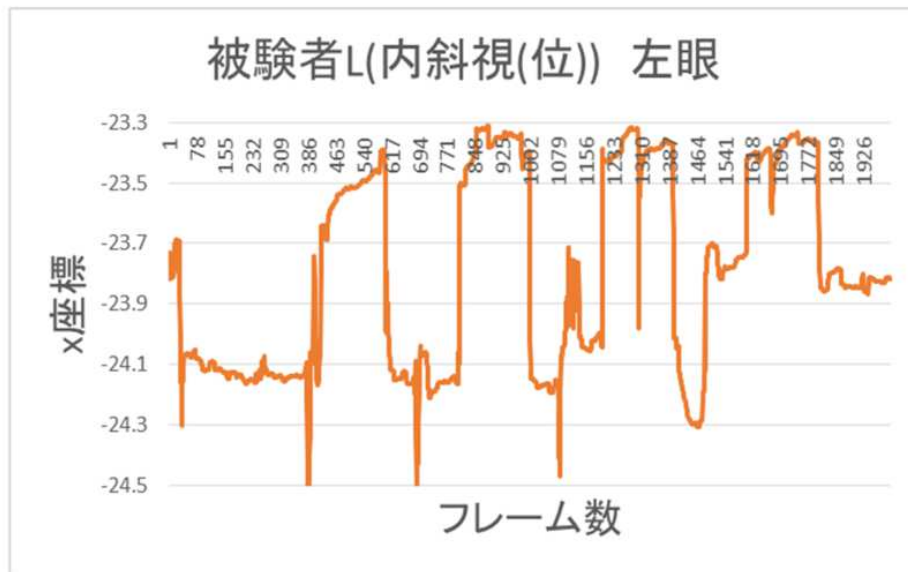


図 A.2 内斜視 (位)(被験者 L) の ACT における眼の動き

図 A.3:外斜視 (位) の例 (被験者 J Maddox 検査:10-12 △ XT/XP 提案システム (ACT):12.10 △ XT/XP)

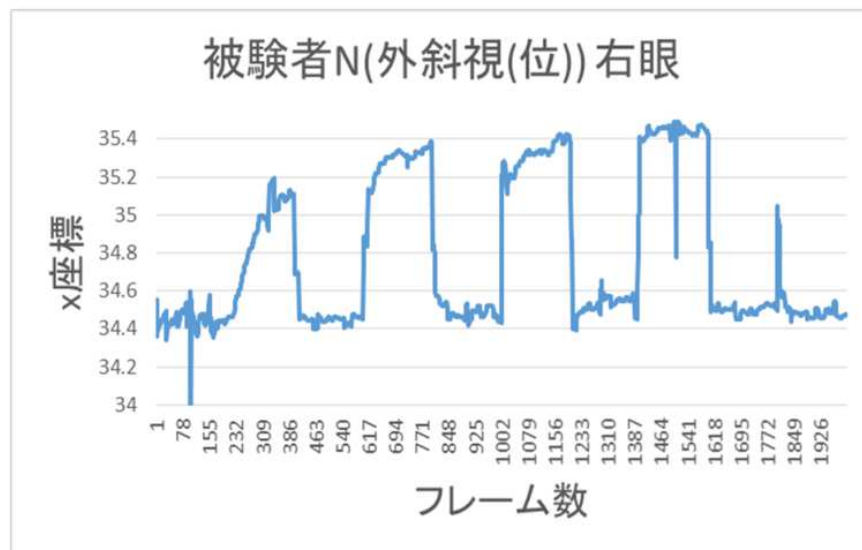
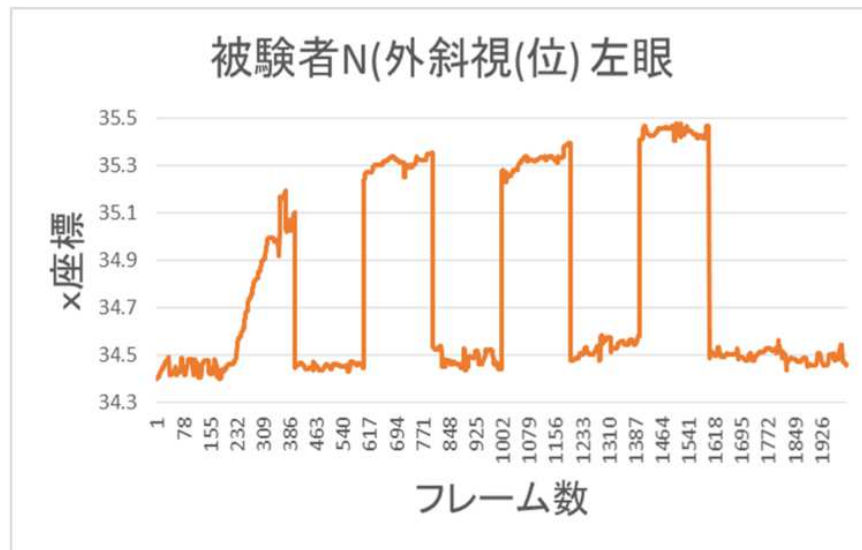


図 A.3 外斜視 (位)(被験者 N) の ACT における眼の動き

## A.2 CUT

図 A.4:正位の例 (被験者 J Maddox 検査:0-1ET/EP  $\Delta$  (正位と見做せる数値である)  
提案システム (CUT) 斜視量:0.56  $\Delta$  ET 斜位量:0.35  $\Delta$  EP 全偏位量 0.93  $\Delta$  ET/EP)



図 A.4 正位 (被験者 A) の CUT における眼の動き

図 A.5:斜視の例 (被験者 P Maddox 検査:8ET/EP 提案システム (CUT) 斜視量:9.26  
 $\Delta$  ET 斜位量 : 0.42  $\Delta$  EP 全偏位量 9.68  $\Delta$  ET/EP)



図 A.5 斜視 (被験者 P) の CUT における眼の動き

図 A.6:斜位例 (被験者 N Maddox 検査:10-12XT/XP 提案システム (CUT) 斜視量:0.51  $\Delta$  XT 斜位量 : 9.46  $\Delta$  XP 全偏位量 9.97  $\Delta$  XT/XP)

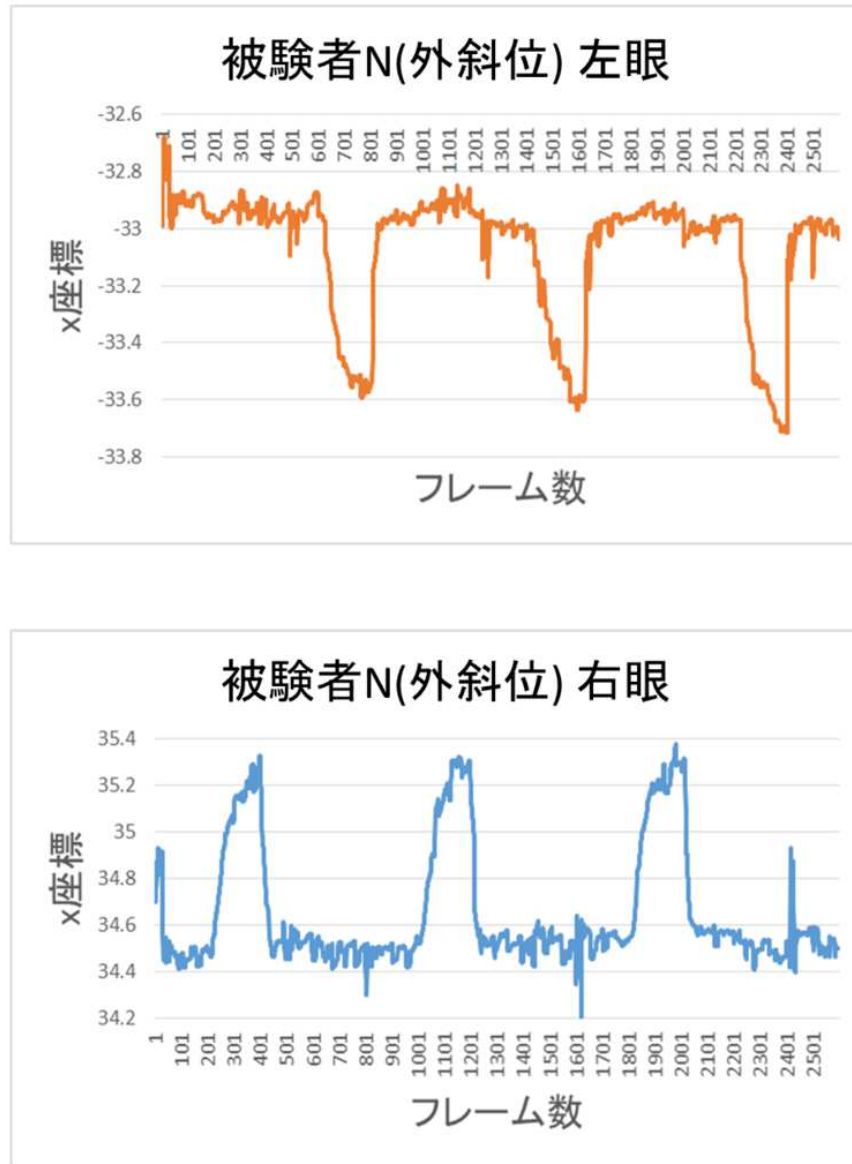


図 A.6 斜位 (被験者 N) の CUT における眼の動き

## 付 録 B 外れ値の除去方法の比較

眼球データには、まばたきをはじめとした理由で外れ値(大きなノイズ)が含まれる。無効フレーム(4.6.2節で説明)を除去したものの、その付近のフレームには大きな外れ値が残っている(図 B.1 上)。この外れ値の影響を検討するために、下記(a)~(c)の3つの外れ値処理方法を導入して再計算し、元の場合と比較した。(a),(b)については、ACT及びCUTのプリズム量計算を行うステップの無効データの除去、データの正規化の前に実施した。(c)については、ACTのみ実施し、4.6.5節の眼の位置の平均値の計算を中央値に置き換え計算した。

- (a) 各 Phase の上位下位 10%除去
- (b) 各 Phase の四分位範囲に基づく除去
- (c) 眼の位置の平均値を中央値に置き換え

以下に、それぞれの手法について説明する。

(a) 各 Phase の上位下位 10% 除去

各 Phase の眼の位置の値を降順に並び替えたとき、上位の 10% 及び下位の 10% を除去する。この方法では、値にかかわらず一定の範囲を必ず除去することができる。図 B.1 は除去結果の一例である。

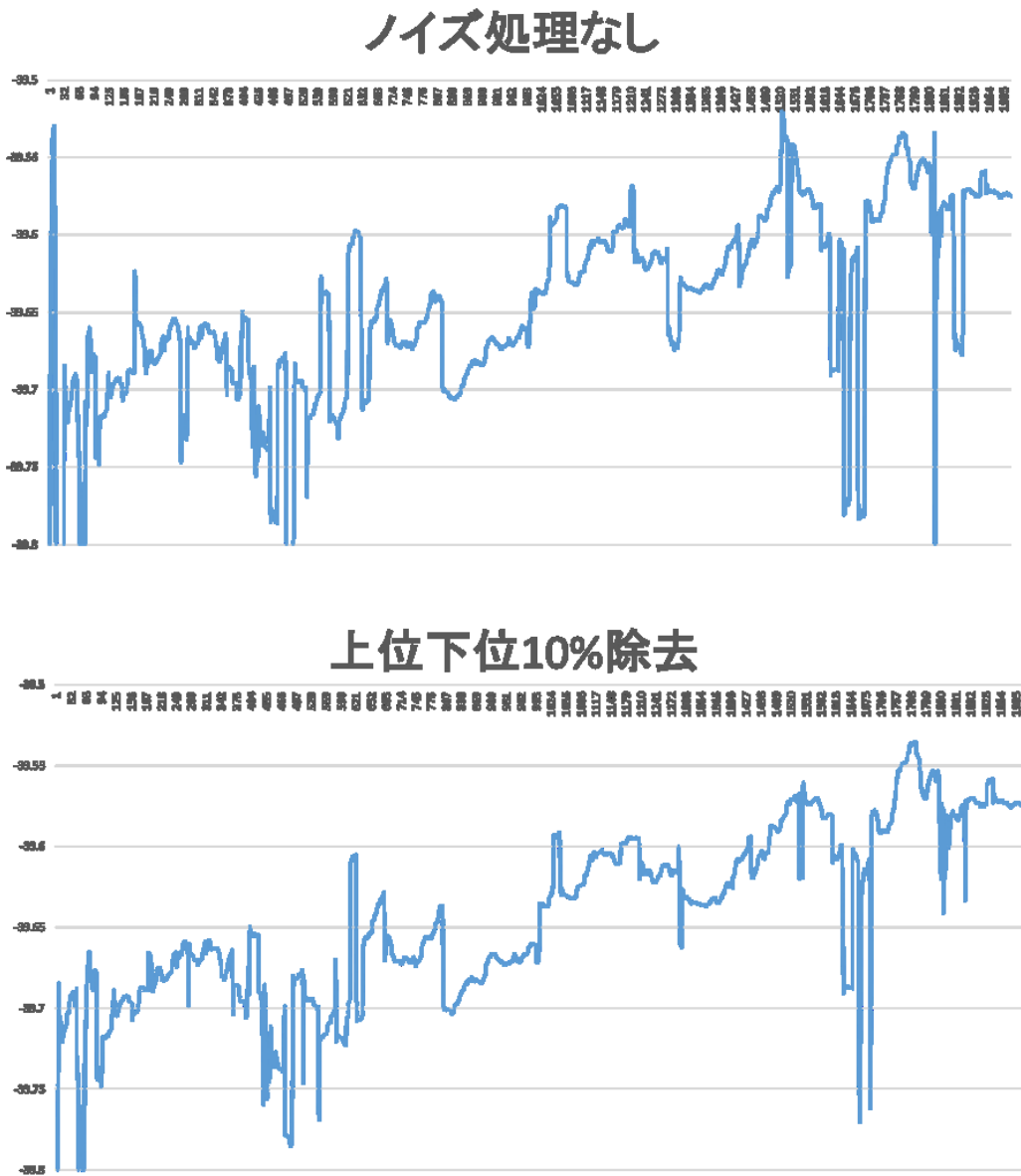


図 B.1 各 Phase の上位下位 10% 除去による値の違い

(b) 各 Phase の四分位範囲に基づく除去

この方法では、各 Phase の眼の位置値の第一四分位数を  $Q_1$ 、第三四分位数を  $Q_3$ 、四分位範囲を  $IQR$  としたとき、座標値を  $P$  として、式 5.2 の範囲外の値を外れ値とし、除去する。この方法では、値の固まり具合によっては、上位下位 10% を除去するよりさらに除去できる可能性がある。図 B.2 は除去結果の一例である。

$$IQR = Q_3 - Q_1 \tag{B.1}$$

$$Q_1 - \frac{IQR}{2} \leq P \leq Q_3 + \frac{IQR}{2} \tag{B.2}$$



図 B.2 第一四分位数・第三四分位数を用いた方法による値の違い



(c) 眼の位置の代表値を中央値に置き換え

この方法では、計算の際眼の代表値の位置の計算の際、式 4.2,4.3 で平均値を求める代わりに、平均を求めるのと同じ区間のデータの中央値に置き換える。中央値は、ロバスト推定にも用いられるので、外れ値があったとしても適切な位置を代表値とできる可能性が高い。

## B.1 ACT

表 B.1 は、外れ値処理 (a),(b),(c) を適用した状態で全偏位量 (水平 (x) 方向) を求めた結果である。また、表 B.2 が、その検定結果である。

表 B.1 Maddox と提案システムによる定量化 (水平方向・外れ値処理込み)

被検者	Maddox	提案システム		
		(a)	(b)	(c)
A	0-1ET/EP	0.87ET/EP	0.88ET/EP	0.89ET/EP
B	0	0.54XT/XP	0.55XT/XP	0.54XT/XP
C	0	0.44ET/EP	0.40ET/EP	0.41ET/EP
D	1XT/XP	1.30XT/XP	1.50XT/XP	1.35XT/XP
E	0	0.54XT/XP	0.55XT/XP	0.56XT/XP
F	4XT/XP	3.96XT/XP	4.14XT/XP	3.98XT/XP
G	0	1.07ET/EP	1.09ET/EP	1.08ET/EP
H	1XT/XP	0.98XT/XP	1.02XT/XP	0.98XT/XP
I	1-2ET/EP	2.37ET/EP	2.57ET/EP	2.38ET/EP
J	0	0.46XT/XP	0.37XT/XP	0.47XT/XP
K	0	0.29ET/EP	0.30ET/EP	0.32ET/EP
L	8ET/EP	9.25ET/EP	9.37ET/EP	9.27ET/EP
M	1XT/XP	0.64XT/XP	0.55XT/XP	0.65XT/XP
N	10-12XT/XP	12.55XT/XP	12.53XT/XP	12.52XT/XP
O	1XT/XP	1.49XT/XP	1.67XT/XP	1.71XT/XP
P	8ET/EP	7.95ET/EP	8.02ET/EP	9.71ET/EP

表 B.2 提案システム-Maddox 間の検定

	外れ値処理なし	(a)	(b)	(c)
平均誤差 ( $\Delta$ )	0.61	0.55	0.59	0.66
相関係数	0.956	0.957	0.956	0.944
p 値 (両側確率)	$2.11 \times 10^{-4}$	$2.15 \times 10^{-4}$	$2.56 \times 10^{-4}$	$2.14 \times 10^{-4}$

いずれの場合でも相関係数にほとんど変化はなく、Maddox 検査との有意差がなかった。また、定量結果の平均誤差には大きな変化が見られなかった。このことから、外れ値処理を行っても大きな精度向上にはつながらなかった。

表 B.3 は、外れ値処理 (a),(b),(c) を適用した状態で全偏位量 (垂直 ( $y$ ) 方向) を求めた結果である。

表 B.3 Maddox と提案システムによる定量化 (垂直方向・外れ値処理込み)

被検者	Maddox	提案システム		
		(a)	(b)	(c)
A	0	0.95H	0.97H	0.98H
B	0	0.76L	0.79L	0.80L
C	0	1.62H	1.54H	1.65H
D	0	1.46H	1.55H	1.50H
E	0	0.76H	0.79H	0.80H
F	0	1.69L	1.71L	1.61L
G	0	1.30H	1.30H	1.32H
H	0	0.83H	0.73H	0.82H
I	0	4.90H	4.98H	4.95H
J	0	0.63H	0.64H	0.63H
K	0	1.27H	1.26H	1.28H
L	0	4.84H	4.78H	4.85H
M	0	1.18H	1.25H	1.16H
N	0	4.67H	4.69H	4.70H
O	0	0.41L	0.45L	0.44L
P	0	3.51L	3.53L	3.51L

全員 Maddox 検査の結果が  $0 \Delta$  (正位) であったことから、誤差のみを確認した。定量結果の誤差は、(a) で  $1.92 \Delta$ 、(b)  $1.93 \Delta$ 、(c)  $1.94 \Delta$  であり、で大きな変化が見られなかった。このことから、外れ値処理を行っても大きな精度向上にはつながらなかった。

## B.2 CUT

表 B.4 は、外れ値処理 (a),(b) を適用した状態で斜視量・斜位量・全偏位量 (水平 ( $x$ ) 方向) を求めた結果である。また、表 B.5 が、その検定結果である。

表 B.4 Maddox と提案システム (CUT) による定量化 (水平方向・外れ値処理込み)

被検者	Maddox	提案システム					
		斜視量 (a)	斜位量 (a)	全偏位量 (a)	斜視量 (b)	斜位量 (b)	全偏位量 (b)
A	0	0.11ET	0.70EP	0.81ET/EP	0.21ET	0.60EP	0.81ET/EP
B	0	0.41XT	0.40XP	0.81XT/XP	0.30XT	0.56XP	0.86XT/XP
C	0	0.60XT	0.70XP	1.30XT/XP	0.60XT	0.79XP	1.39XT/XP
D	1XT/XP	0.54XT	0.97XP	1.51XT/XP	0.56XT	0.94XP	1.50XT/XP
E	0	0.41XT	0.43XP	0.84XT/XP	0.30XT	0.55XP	0.85XT/XP
F	4XT/XP	0.75XT	1.71XP	2.46XT/XP	0.79XT	1.71XP	2.50XT/XP
G	0	0.19ET	1.14EP	1.33ET/EP	0.14ET	1.10EP	1.24ET/EP
H	1XT/XP	0.23XT	0.65XP	0.88XT/XP	0.25XT	0.67XP	0.92XT/XP
I	1-2ET/EP	0.43ET	1.24EP	1.67ET/EP	0.55ET	1.24EP	1.79ET/EP
J	0	0.20XT	0.93XP	1.13XT/XP	0.11XT	1.01XP	1.12XT/XP
K	0	0.28ET	0.25EP	0.53ET/EP	0.19ET	0.35EP	0.54ET/EP
L	8ET/EP	0.72ET	4.72EP	5.44ET/EP	0.74ET	4.62EP	5.36ET/EP
M	1XT/XP	0.91XT	1.13XP	2.04XT/XP	0.97XT	1.16XP	2.13XT/XP
N	10-12XT/XP	0.62XT	11.08XP	11.70XP	0.58XT	11.04XP	11.62XT/XP
O	1XT/XP	1.10XT	1.50XP	2.60XT/XP	0.73XT	1.75XP	2.60XT/XP
P	8ET/EP	9.19ET	9.52EP	18.71ET/EP	9.17ET	9.52EP	18.69ET/EP

表 B.5 は、表 B.4 を基にスピアマン順位相関係数検定を用いて Maddox 検査による定量化の結果と提案システムの斜視量+斜位量=全偏位量とした値の間の検定を行った結果である。プリズム量の誤差の絶対値の平均は、(a)1.53  $\Delta$ 、(b)1.58  $\Delta$  であり、外れ値処理を行わない場合に比べて誤差が僅かに大きくなった。また、共に相関係数の上昇がみられ、有意差がないことから、さらに強い相関が得られた。しかし、改善はわずかにとどまった。

表 B.5 提案システム-Maddox 間の統計

	外れ値処理なし	(a)	(b)
誤差 ( $\Delta$ )	1.50	1.53	1.58
相関係数	0.810	0.924	0.926
p 値 (両側確率)	$1.71 \times 10^{-3}$	$3.33 \times 10^{-4}$	$3.33 \times 10^{-4}$

表 B.6 は、外れ値処理 (a),(b) を適用した状態で斜視量・斜位量・全偏位量 (垂直 (y) 方向) を求めた結果である。

表 B.6 Maddox と提案システム (CUT) による定量化 (垂直方向・外れ値処理込み)

被検者	Maddox	斜視量 (a)	斜位量 (a)	全偏位量 (a)	斜視量 (b)	斜位量 (b)	全偏位量 (b)
A	0	1.50H	2.78H	4.28H	1.60H	2.88H	4.48H
B	0	0.78L	2.33L	3.11L	0.64L	2.33L	2.97L
C	0	1.37H	1.33H	2.70H	1.11H	1.58H	2.69H
D	0	0.82H	0.80H	1.62H	0.85H	0.83H	1.68H
E	0	0.71L	2.33L	3.04L	0.64L	2.33L	2.97L
F	0	0.90L	1.93L	2.83L	0.56L	1.87L	2.43L
G	0	1.37H	0.67H	2.04H	1.41H	0.63H	1.94H
H	0	0.55H	0.64H	1.19H	0.56H	0.53H	1.09H
I	0	0.45H	3.92H	4.36H	0.44H	3.99H	4.33H
J	0	0.56H	0.39H	0.95H	0.55H	0.40H	0.95H
K	0	0.53H	0.72H	1.25H	0.59H	0.79H	1.38H
L	0	1.45H	2.78H	4.33H	0.83H	2.67H	3.50H
M	0	0.25H	3.51H	3.67H	0.15H	3.76H	3.91H
N	0	1.37H	3.23H	4.60H	1.32H	3.18H	4.50H
O	0	0.53L	3.37L	3.90L	0.50L	3.41L	3.91L
P	0	2.15L	2.24L	4.39L	2.09L	2.19L	4.28L

全員 Maddox 検査の結果が 0 Δ (正位) であったことから、誤差のみを確認した。定量結果の誤差は、(a) で 3.02 Δ、(b) で 2.83 Δであり、大きな変化が見られなかった。水平方向の動きが垂直方向に加算されてしまう問題があるものの、外れ値処理を行っても精度向上にはつながらなかった。