

令和5年度 修士論文

HMD を用いた眼位異常検査システムの
臨床データに基づく評価

宮崎大学 大学院 工学研究科 機械・情報系コース

学籍番号 T2203391

長友 耀希

指導教員 椋木 雅之 教授

令和6年1月23日

概要

本研究では、従来研究で著者らが開発した眼位異常検査システム（評価対象システム）に対して、臨床データに基づく評価を行なった。

評価対象システムでは、仮想現実（VR）で利用されている視線追跡機能付きHMDを用いて測定を行っている。代表的な検査であるCover-Testの原理を仮想環境上で再現し、テストを実施する。その際に、視線追跡機能から得られる眼球データを用いて片眼の偏位量を測定する。

著者が行った従来研究では、眼位異常を持つ被験者が少なく、また、Maddox小桿を用いた定量的眼位検査との比較を行っていた。しかし、臨床場面ではPrism-Cover-Testを用いた定量的眼位検査が行われることが多く、様々な被験者がいることや、比較手法の違いから、精度への影響が考えられた。そのため、評価対象システムの有効性を調べるために、視標の非注視、視標までの距離、遠近での偏位量の差の3つの観点から臨床データを用いて評価した。

視標への非注視に関しては、分散による検討を行った。すべての臨床データについて分散を求め、昇順に並べた結果、分散の急激な高まりがある部分が確認され、全体の1割程度は視標を正しく注視できていないという結果となった。

次に視標までの距離の影響に関しては、遠距離/近距離によるPrism-Cover-Testと評価対象システムとの比較を行った。その結果、遠距離の場合、正解率が86.0%と70.0%であることから、高い水準で測定できることが示されたが、近距離の場合、正解率が64.0%と56.0%であり、評価対象システムは遠距離での眼位異常偏位量を測ることに向いていることが示された。

また、遠近での偏位量の差に関しては、差が0△から4△と小さい場合に関しては、ACTでは正解率が90%を超え、CUTでも70%を超える結果であり、遠近の眼位異常偏位量の差が小さい場合に高い精度を出すことができることが示された。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	臨床的眼位検査	3
2.1	斜視・斜位	3
2.2	Cover-Test	5
2.3	ACT (Alternating-Cover Test)	5
2.4	CUT (Cover-Uncover Test)	6
2.5	Prism-Cover-Test	9
2.6	Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査	10
2.7	偏位量と偏位の程度	12
第3章	眼位異常検査システム	14
3.1	システム構成	14
3.1.1	ヘッドマウントディスプレイ (HMD)	14
3.1.2	仮想の検査環境	18
3.1.3	キャリブレーション	20
3.2	仮想環境での Cover-Test	22
3.3	偏位量の算出	24
3.3.1	外れ値の考慮	24
3.3.2	視線先の座標の計算	24
3.3.3	視線位置の計算	25
3.3.4	偏位量の計算	25

第4章 臨床データによる眼位異常検査システムの評価方法	28
4.1 臨床データの取得	28
4.2 臨床データによるシステム評価	29
4.2.1 視標への非注視の影響	29
4.2.2 視標までの距離の影響	29
4.2.3 遠近での偏位量の差による影響	30
第5章 臨床データに基づく眼位異常検査システムの評価結果	31
5.1 視標への非注視の影響の評価結果	31
5.2 視標までの距離の影響の評価結果	33
5.3 遠近での偏位量の差による影響の評価結果	37
5.4 考察	42
第6章 まとめ	44
謝辞	46
参考文献	47

第1章 はじめに

斜視や斜位などの眼位異常は早期発見と早期治療が必要で、放っておくと眼精疲労や弱視を引き起こす要因となる。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。視機能が発達する3歳程度で発症すると治しにくく、斜視や斜位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]。眼位異常の診断には眼科医や視能訓練士による検査が必要であるが、検査の難易度が高く、また時間がかかることから、有資格者が慢性的に不足しているという現状にある[2]。この現状を改善するためにも、有資格者が不在でも自動で眼位異常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。

著者は従来研究[3]において、仮想空間に検査環境を構築し、視線追跡機能付きヘッドマウントディスプレイ（HMD）を被験者が装着することで、自動で眼位データを計測し、眼位異常検査を行えるシステムを開発した。この研究では、Cover-Test[1]と呼ばれる検査法の中の ACT および CUT 検査法をもとに、5m 先に 10cm の視標を配置し、片眼を隠した時の偏位量を測定することで、そのずれから定量的に検査を行っていた。システムの評価としては、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ており、評価実験の結果から高い精度で検出が行えるとしていた。

本研究では、従来研究[3]の眼位異常検査システム（以下、評価対象システムと呼ぶ）について、Prism-Cover-Test [4]により得られた偏位量の臨床データに基づく評価を行う。

まず、指標への非注視の影響について評価する。評価対象システムは、HMD 上に視差のある画像を映し出し、立体視により奥行き感のある仮想空間を提示

している。これまでの実験で、HMD に不慣れなユーザでは立体感が得られにくく、偏位量を正しく計測できない場合があった。そのため、臨床データを使って、評価対象システムにおいてどの程度の割合の被験者で正しい計測が行えるか、また、計測が正しく行えない場合に得られたデータに何らかの特徴があるか評価する。

次に、視標までの距離の影響について評価する。従来研究[3]では、Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査を想定して、仮想空間上の 5m 離れた位置に視標を置いた検査室を作成していた。一方、臨床場面では、より簡便な Prism-Cover-Test [4]による定量的眼位検査が広く使われている。Prism-Cover-Test では、視標までの距離を 5m とした遠距離での検査と、30cm とした近距離での検査の 2 通りが行われている。評価対象システムが想定する距離と異なる距離での検査結果と比較することにより、視標までの距離の影響について評価する。

さらに、遠近での偏位量の差による影響について評価する。Prism-Cover-Test [4]で得られる遠近 2 通りの偏位量は、同一の被験者について同程度となることもあるが、大きく異なる場合もある。両者の差が大きい場合、遠距離または近距離での立体視に得意、不得意が生じている可能性がある。評価対象システムは、立体視の得意、不得意の影響を受けるため、遠近での偏位量の差と検査精度との関係について評価する。

以下、第 2 章では本研究で扱う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 章では評価対象システムの Cover-Test に基づく片眼偏位量の計測原理を示す。第 4 章では評価に使用する臨床データ、および臨床データを使った評価対象システムの評価項目について述べる。第 5 章では臨床データに基づく評価対象システムの評価結果と考察を述べる。最後に第 6 章でまとめとする。

第 2 章 臨床的眼位検査

2.1 斜視・斜位

眼位異常として挙げられる症状には、大きく分けて斜視や斜位[5]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[6]。これらの病態を区別するには視方向と呼ばれる、主観的な物体へ向けている眼の方向が重要となっている。正位では、左右眼ともに視方向が同一（図 2.1）となっており、一方斜視や斜位では、視界を遮閉した際に視方向のずれが生じる。そのずれの方向によって、内側であれば内斜視（位）、外側であれば外斜視（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 2.2）。こういった斜視や斜位の代表的な判別方法として、Cover-Test が挙げられる。

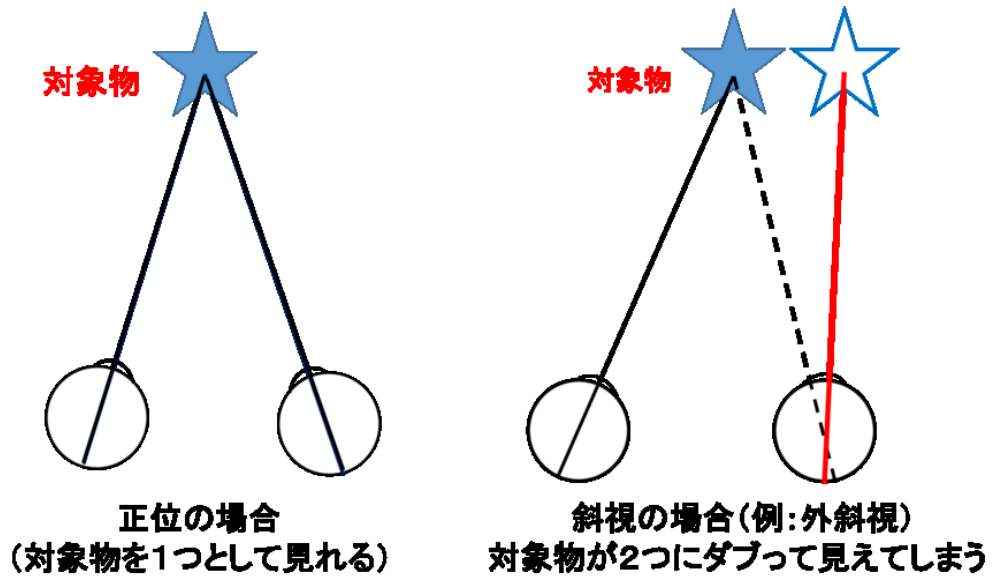


図 2.1 異常の有無でのそれぞれの見え方[6]

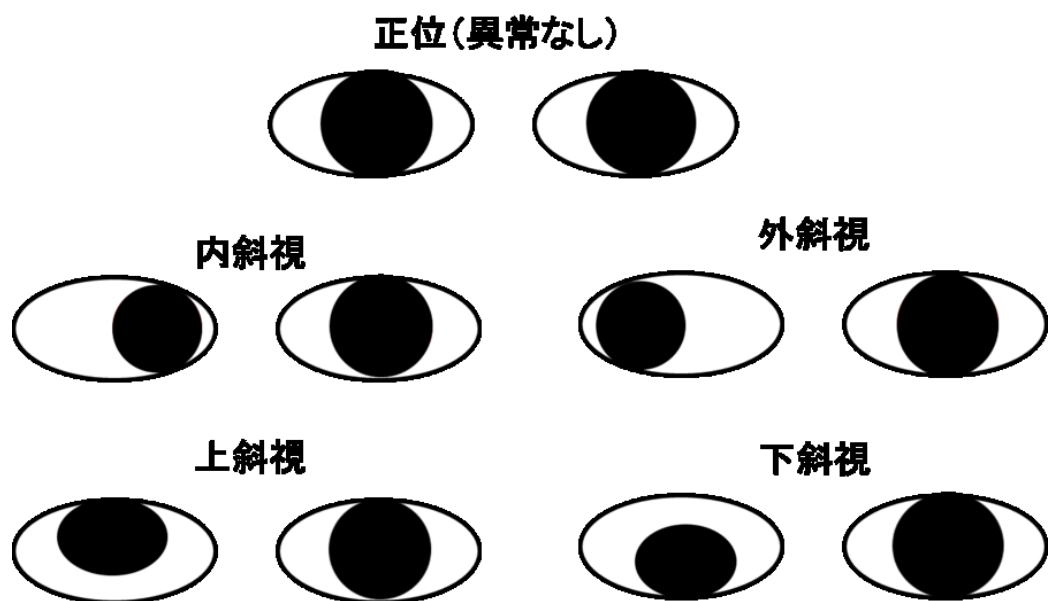


図 2.2 斜視の種類 (参考サイト:[8])

2.2 Cover-Test

Cover-Test[1]とは、片眼を遮閉した際の眼の動きから斜視と斜位を鑑別する検査方法である。片眼を遮閉したときに、遮閉されていないもう一方の眼が動けば斜視と判定され、遮閉した方の眼が遮閉開放時に動けば斜位であると判定される。検査方式としてACT (Alternating-Cover Test) と、CUT (Cover-Uncover Test) がある。ACT では片眼を交互に常時遮閉することによって、融像の機会を与えることなく顕性と潜在性を含めた全偏位量の検出を行う（斜視/斜位を区別する判定は行わない）。一方、CUT では、片眼を遮断したあと、一度遮閉を取ることによって融像を行い、その後もう片方の眼を遮閉、再度融像を行うといったように、左右の遮閉の間に、両目ともに開放し融像する機会を与える。そうすることで斜視/斜位/正位の判別を行う[1][9]。両者を比較した場合、CUT に比べACTの方が検出される動きが大きい（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。

2.3 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 2.3 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 2.3A)
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 2.3B)
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 2.3C)
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 2.3D)

この際に動く各眼の動きの総和が全偏位量(図 2.3 の赤の幅と緑の幅の和)である。

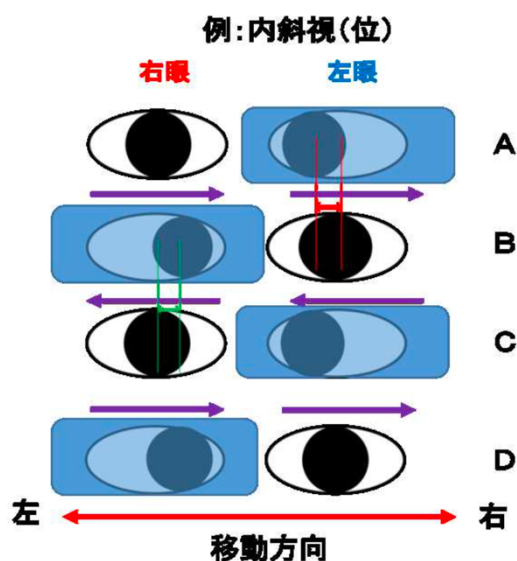


図 2.3 ACT での斜視の検査例(内斜視)

2.4 CUT (Cover-Uncover Test)

CUT (Cover-Uncover Test、遮閉-除去試験)とは、Cover-Test の一種で、片眼を遮閉し、次いで遮閉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。被験者には目標を注視してもらい、その間に検査を実施する。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、遮閉した眼は動かない。斜視であれば、視標を固視している方の眼を遮閉すると、他眼が視標を固視しようとして動く。図 2.4 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見られない (図 2.4A)
2. 一眼を遮閉することで融像が破れ、遮閉下では遮閉した眼が内斜偏位を示す (図 2.4B)。
3. 遮閉を除去すると、再度融像を行おうとして遮閉していた眼は元の位置に戻る (図 2.4C)。
4. 次にもう一方の眼を遮断する。すると、同様にして遮閉した眼が内斜偏位を示す (図 2.4D)。
5. 同様に遮閉を除去すると、再度融像を行おうとして遮閉していた眼は元の位置に戻る (図 2.4E)。

また、図 2.5 は、CUT での斜視の場合の眼の動きである。右眼内斜視(図 2.5A)の場合、

1. 右眼を遮閉すると、眼球のずれは見られない (図 2.5B)。
2. 遮閉を取り除いても、眼球は動かない (図 2.5C)。
3. 次に左眼を遮閉すると、右眼が左方向に眼球運動を起こし、左眼は内斜偏位する (図 2.5D)。
4. 遮閉を取り除くと、右眼は内斜偏位し、左眼が右向きの眼球運動を起こす (図 2.5E)。

以上のことをまとめると、片眼を遮断したときに、遮閉した眼が開放されたときに眼球運動が起こったら斜位、遮閉していない眼に眼球運動が見られたら斜視であることが判断できる。

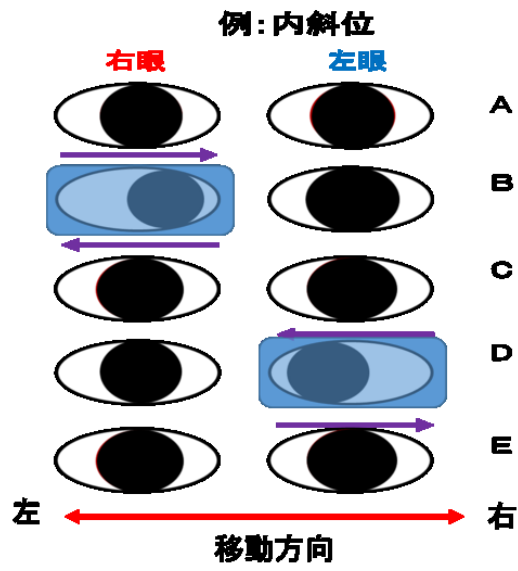


図 2.4 CUT での斜位の検査例（内斜位）

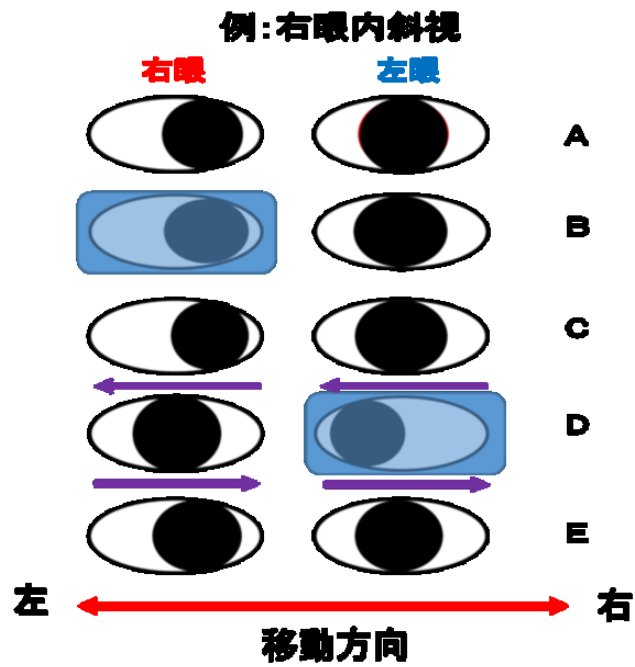


図 2.5 CUT での斜視の検査例（右眼内斜視）

2.5 Prism-Cover-Test

Prism-Cover-Test[4]とは、プリズム遮蔽試験とも呼ばれ、斜視や斜位の評価に使用される検査方法の一つである。この検査では、プリズム（光の屈折を利用した透明な三角柱状のレンズ）を使用して、眼の視線の偏位を修正することで、斜視や斜位の程度を評価する（図 2.6）。以下にその手順を述べる。

1. 患者が特定の視標を注視している状態で、両眼の位置を確認する。このとき、斜視や斜位がない正視の状態がベースラインとなる。
2. 片眼にプリズムを装着し、その影響を観察する。プリズムは光を透明な三角柱を通して屈折させ、視線の方向を変えることができる。これにより、視線の偏位が修正される。
3. この状態で通常通り Cover-Test を行う。プリズムの度数を変えていくことで、Cover-Test での開遮閉時に視線の移動がなくなり、斜視や斜位を修正できる最適なプリズムの度数を見つけることができる。

このプロセスを、遠距離と近距離の 2 パターンに分けて行う。遠距離では視標の距離を 5m とし、近距離では 30cm とする。近視/遠視での斜視や斜位の程度を定量的に評価し、その偏位量を総合的に判断して診断する。

プリズムの度数（光偏向力）はプリズムジオプトリー（ Δ ）という単位で表し、1m 先に対して 1cm の偏角を与えるものを 1 Δ という[8]。また、1 Δ は 4/7（約 0.57）度で表される[9]。

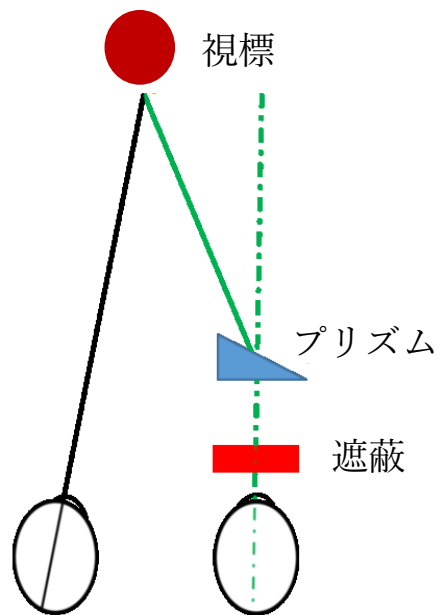


図 2.6 プリズムを用いた補正

2.6 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、斜位及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のことをいう[10]。被験者の左右どちらかの眼前に Maddox 小桿を装用させる(図 2.7)。半暗室にて 5m 先の目線の高さに光源を配置すると、装用した眼には赤い光の線が見える(図 2.8)。正位の場合、赤い光の線と、もう一方の眼で見えている光源の位置が一致する(図 2.8A)が、斜視・斜位の場合には一致しない(図 2.8B)。一致していない場合、Maddox 小桿と光源の間にプリズムを装用する。プリズムには度数が設定されており、弱い度数から強い度数まで一致するまで動かしていく。一致した時点で、その値が被験者の全偏位量となる。



図 2.7 Maddox 小桿による検査

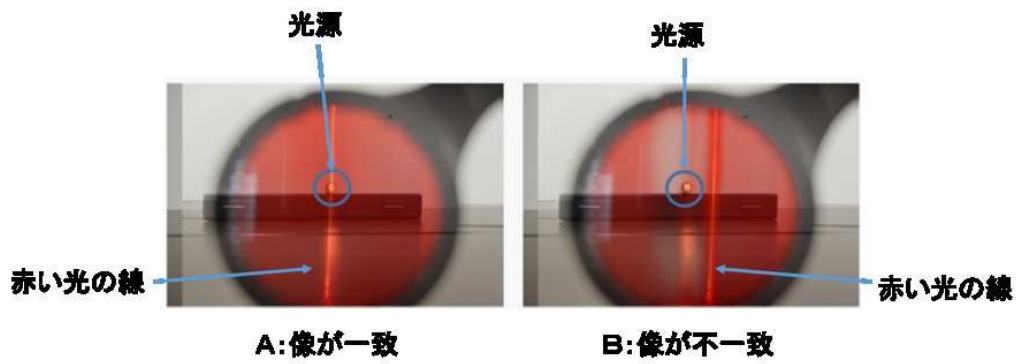


図 2.8 Maddox 小桿からみた光の見え方

2.7 偏位量と偏位の程度

2.5 節で述べた通り、偏位量はプリズムジオプトリー (Δ) で表現される。1 Δ は $4/7$ (約 0.57) 度で表されるが、これは非常に小さい値となっている。偏位量と偏位の見え方の例を図 2.9 に示す。

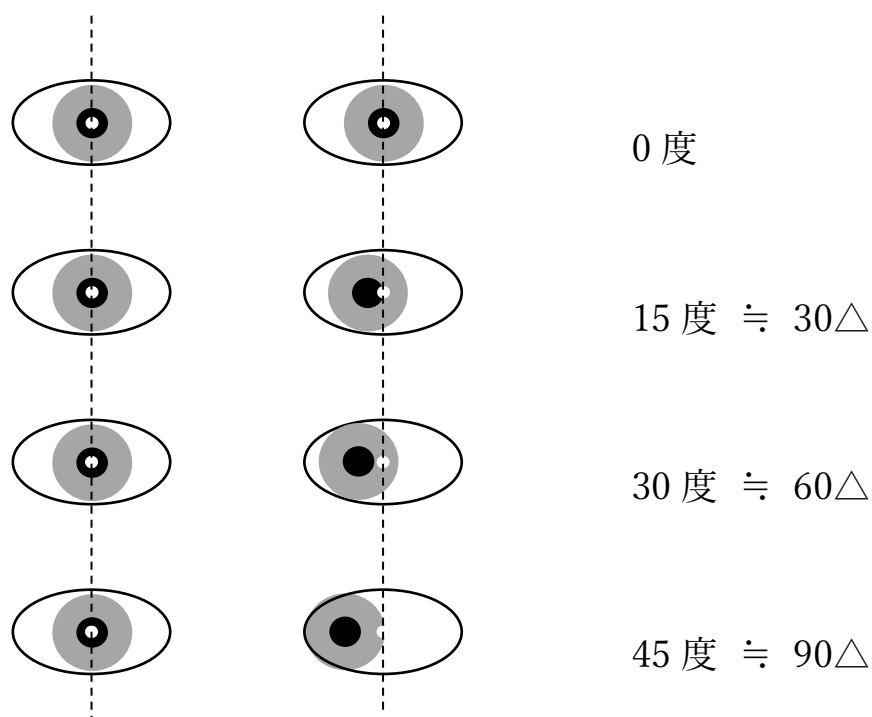


図 2.9 Hirschberg 法による角膜反射の目安

これは Hirschberg 法という偏位量の概算法に基づく図である。Hirschberg 法は、光源を注視した時に、角膜反射光と瞳孔中心からのずれの距離から偏位角をおおまかに測定する手法である。反射光とのずれが瞳孔の縁にある場合には、約 15 度、虹彩の間にある場合には約 30 度、虹彩の縁までずれている場合には約 45 度として計測する。1 度あたり約 2 Δ であることから、それぞれ約 30 Δ 、約 60 Δ 、約 90 Δ と表せる。

Prism-Cover-Test 等の検査では、検者間で 5△程度の誤差が生まれることがある。5△とは、眼球に対して小さい値であり、測定時にはその小さな動きを肉眼で確認しているため誤差が生じる。また、5△程度の眼位異常は、自覚症状がほとんどない大きさである。

第3章 眼位異常検査システム

3.1 システム構成

本研究で評価対象とする眼位異常検査システムは、視線追跡機能付きヘッドマウントディスプレイ（HMD）とPCによって構成される。仮想空間上に検査室を作成し、そこで Cover-Test を模した眼位異常の定量検査を行う。また、被験者ごとに正しく眼球データを取得するために、事前にキャリブレーションを行う。

各項目について以下で詳しく説明を行う。

3.1.1 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[11]」（図3.1）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：90Hz
- 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°
- 瞳孔間距離の調整機能（キャリブレーションによる、3.1.3節で説明）

また、眼球データとして取得できる情報には以下が含まれている。

- 視線の起点座標
- 視線方向ベクトル
- 眼の開き具合
- 瞳孔径
- 瞳孔座標

本研究で用いるシステムでは、視線の起点座標と視線方向ベクトルを測定に利用する。視線の起点座標は、角膜の中心座標となっており、“System Origin”を原点とした3次元座標である。また、視線方向ベクトルは、眼球がどの方向を向いているのか、つまりどこを見ているのかを表しており、視線の起点座標を原点とした、長さ1の3次元ベクトルである。図3.2に眼球とHMDの位置関係を示す。



図 3.1 視線追跡機能付き HMD 「VIVE Pro Eye」

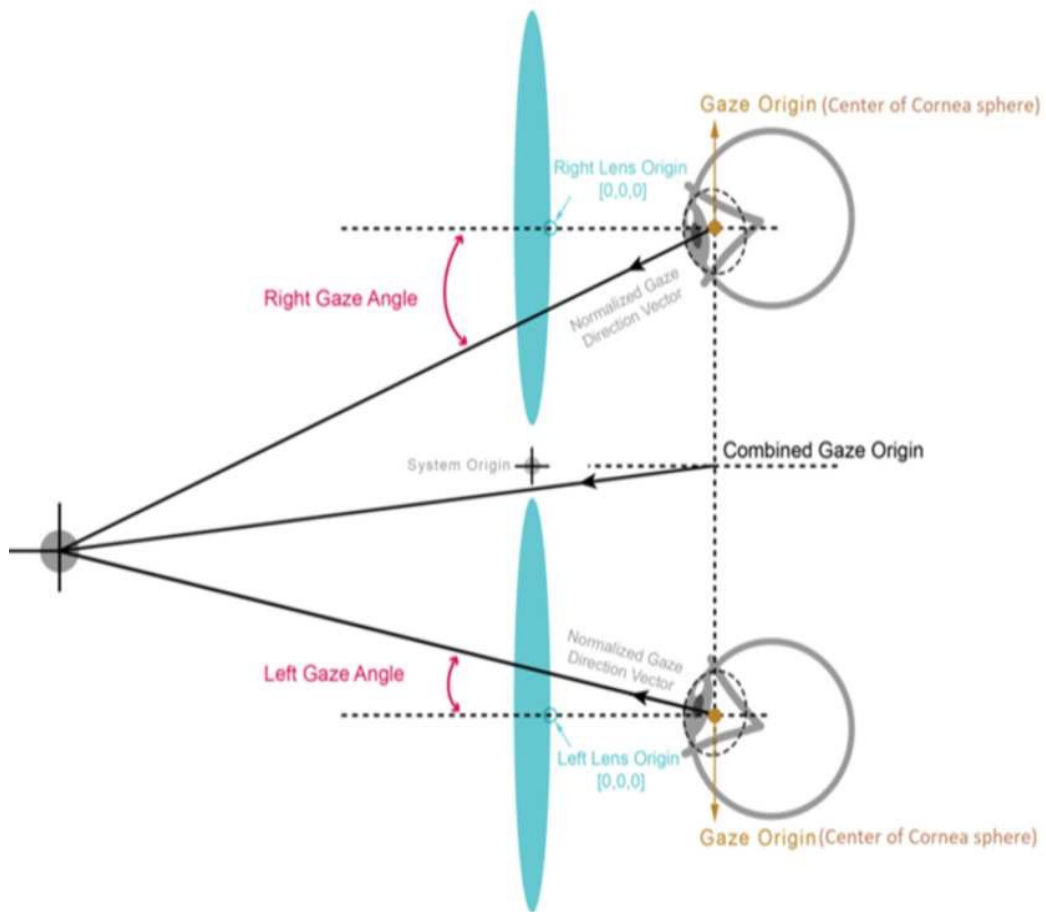


図 3.2 眼球と HMD の位置関係[12]

3.1.2 仮想の検査環境

計測には、Unity[13]により作成した仮想の検査環境を使用する。図 3.2 に作成した検査環境を示す。検査環境は、検査室、視標（図 3.3 の赤い点）、左右それぞれの目を塞ぐための遮閉物からなる。検査室は、幅と奥行きがそれぞれ 6m、高さ 3m として作成されている。この室内に、視標として直径 10cm の赤い球を被験者から 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。

プログラムを実行すると、HMD 上に図 3.3 のような画面が両眼立体視できる形で出力される。被験者には、この画面上の視標を注視してもらい、Cover-Test に基づいて開遮閉操作を行う。図 3.4 に、開遮閉操作時の検査画面の各眼での見え方を示す。まず、両眼無遮閉の状態を開始し、Cover-Test の手法に基づき、遮閉/開放を行う。開遮閉は、左右それぞれの目のすぐ前に置いた遮閉物を可視化/不可視化することにより実現する。その間も眼球データを取り続け、得られたデータから定量化を行う。

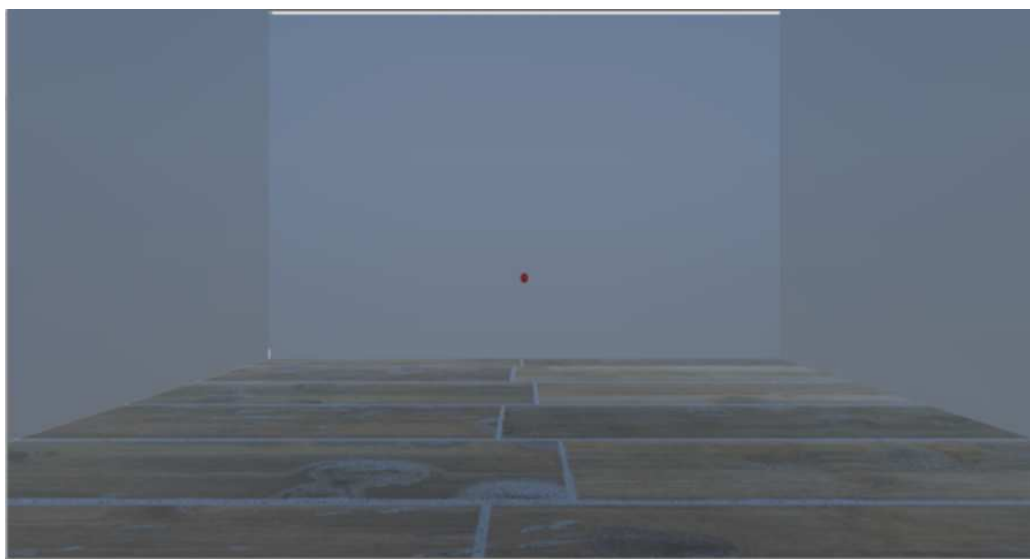


図 3.3 検査環境画面

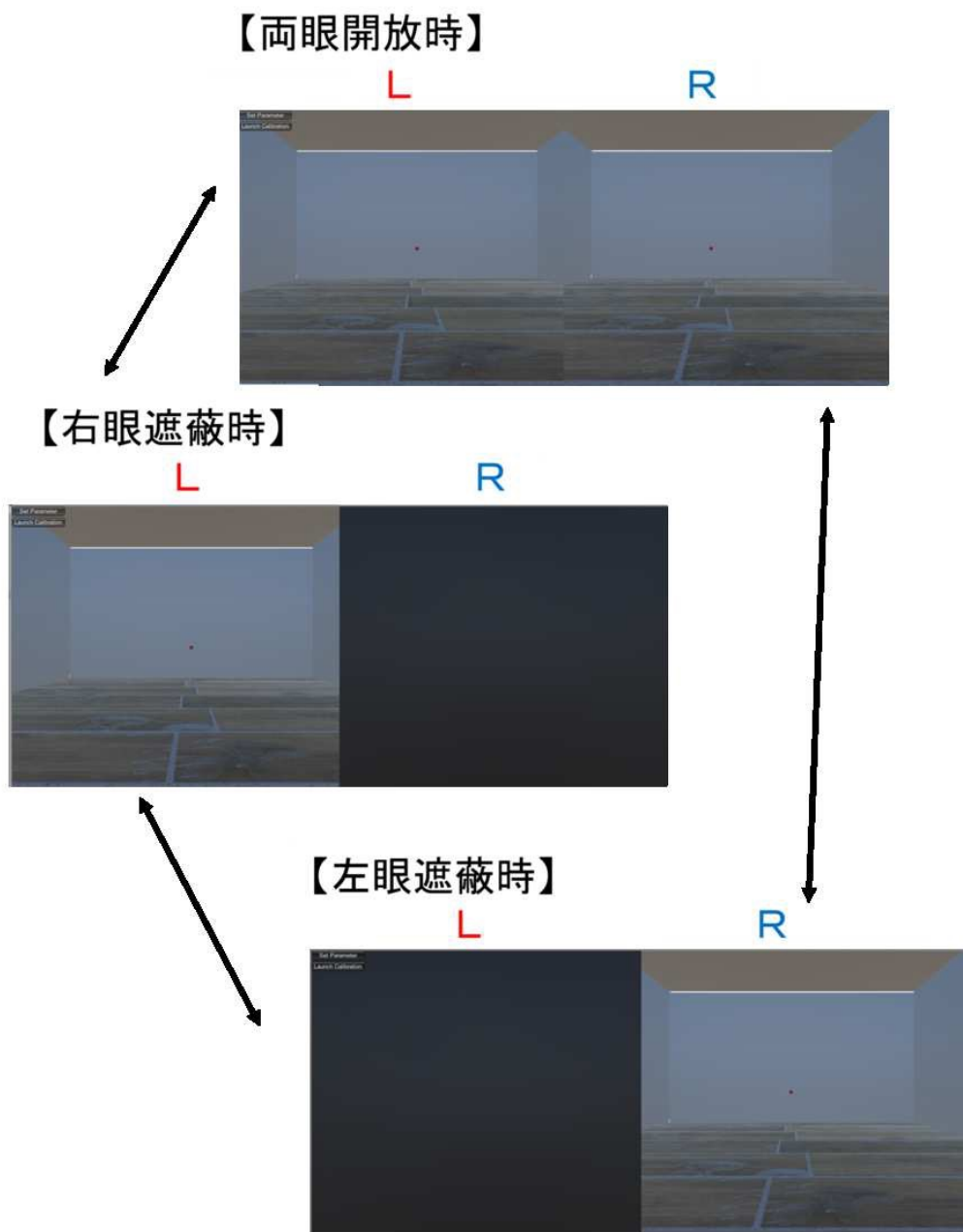


図 3.4 各眼における見え方と遮閉

3.1.3 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、SRanipal SDK 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[14]。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 を使用し、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。

- I. HMD の装着位置の調整
- II. 瞳孔間距離の調整
- III. 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。

I. HMD の装着位置の調整

視線追跡を正しく行うには、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、HMD の装着位置を調整する。図 3.5 は、実際の指示画面である。始めに、図 3.5A 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 3.5B のようになるように、HMD 本体を上下して調整してもらう。

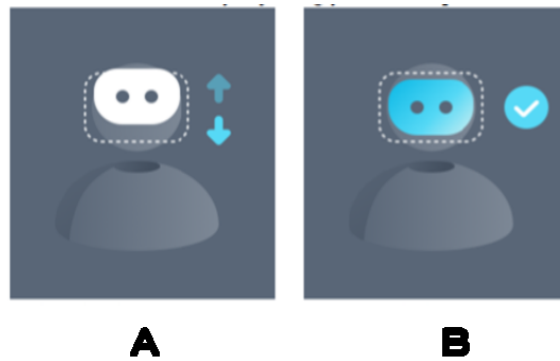


図 3.5 装着位置の調整画面

II. 瞳孔間距離の調整

対象物に関する正確な大きさとお行きを知覚するためには、提示映像が正しい大きさで再現される必要がある。そのためには、瞳孔間距離が被験者のものと合うようにする必要がある[15]。図 3.6 は、実際の指示画面である。始めに、図 3.6A 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 3.6B のようになるように、HMD にあるつまみを回し、調整してもらう。

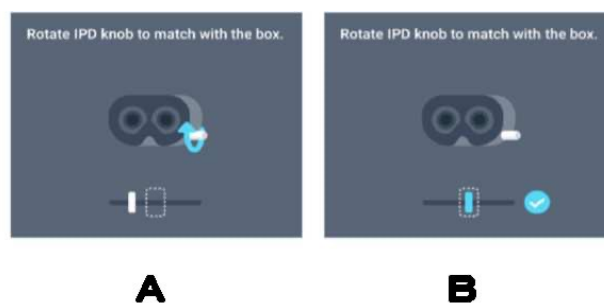


図 3.6 瞳孔間距離の調整画面

III. 視線情報の較正

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較正する。前ステップが終了すると、点を眼で追う旨の指示が表示され、その

後、図 3.7 のように点が画面中央→右上→左下→左上→右下の順に表示されるので、それを眼で追ってもらおう。

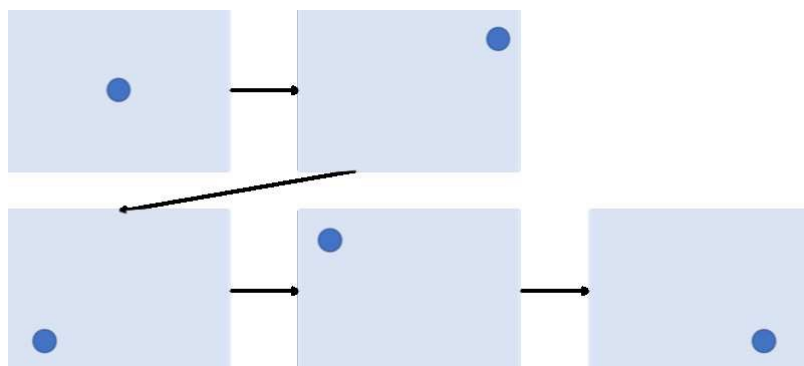


図 3.7 視線追跡の確認画面

3.2 仮想環境での Cover-Test

検査のために、評価対象システムを使って仮想環境で ACT および CUT による Cover-Test を行い、眼球データを取得する。

はじめに、被験者に HMD を装着してもらい、システムを起動する。システム起動後は、3.1.3 節で説明したキャリブレーションの処理が行われる。

次に、ACT での検査システムが起動する。3.1.2 節で述べた仮想空間内の検査環境で検査が行われ、左右両眼について、他眼遮閉（基準値取得）状態が交互に行えるよう、開遮閉が行われる（図 3.4）。被験者には、その画面内に現れる視標を注視してもらおう。本検査での開遮閉の操作と、その際の各眼の状態を表 3.1 に記す。検査は 3 つのフェーズのうち 2 から 3 を 3 回繰り返している。

使用する視線追跡機能付きヘッドマウントディスプレイ（HMD）の仕様として、レフレッシュレートが 90Hz であるため、フレームと呼ばれる 1 枚の静止画が 1 秒間に 90 回切り替わる。画面が現れてから 200 フレーム後に左眼のみ遮閉が開始する（フェーズ 2）。500 フレーム後に左眼が開放されると同時に、右眼の遮閉が開始する（フェーズ 3）。これが左右 300 フレームずつ 3 回繰り返され、その後、全ての遮閉を除去する（フェーズ 4）。この間両眼の眼球データを取得

し続ける。

表 3.1 ACT における段階毎の各眼の状態

フェーズ	左眼の状態	右目の状態
1	開放	開放
2	開放（基準値）	遮閉（偏位値）
3	遮閉（偏位値）	開放（基準値）
4	開放	開放

続けて、ACT と同様の環境で CUT のシステムが起動する。CUT による検査での開遮閉の操作と、その際の各眼の状態を表 3.2 に記す。検査は 5 つのフェーズからなり、ACT フェーズ 4 として図 3.2 が現れた状態から開始する（フェーズ 1）。CUT 検査に移行してから 200 フレーム後に左眼の遮閉が開始する（フェーズ 2）。500 フレーム後から両目ともに開放（フェーズ 3）し、同様に 800 フレーム後から右眼を遮閉する（フェーズ 4）。再度 1100 フレーム後から 300 フレームの間、全ての遮閉を除去する（フェーズ 5）。フェーズ 2 からフェーズ 5 まで ACT と同様に 3 回繰り返され、この間両眼の眼球データを取得し続ける。

表 3.2 CUT における段階毎の開遮閉操作と各眼の状態

フェーズ	開遮閉操作	左眼の状態	右目の状態
1	-	開放	開放
2	右眼遮閉	開放（基準値）	遮閉（偏位値）
3	右眼遮閉除去	開放	開放
4	左眼遮閉	遮閉（偏位値）	開放（基準値）
5	左眼遮閉除去	開放	開放

3.3 偏位量の算出

ACT、CUTにより取得した眼球データから、左右それぞれの方眼偏位量を△単位で算出する。

プリズム量の計算は、以下のステップから構成される。

1. 外れ値の考慮
2. 視線先の座標の計算
3. 視線先の座標の平均値の計算
4. 偏位量の計算

以下にそれぞれのステップについて説明する。

3.3.1 外れ値の考慮

HMD を用いて眼球データを取得している際、瞬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必ず数回は発生する。失敗すると、視線の起点座標が(0,0,0)となり、視線方向ベクトルについても正確なデータが取得できない。計測データとして平均値を利用しているため、このような外れ値をその変化の直前の値と同じ値にすることで、外れ値の除去を行う。

3.3.2 視線先の座標の計算

検査開始から終了するまでの間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」、「視線方向ベクトル」から視標がある 5m (5000mm) 先において、どの位置を見ているかを、視線の起点座標を (x_o, y_o, z_o) 、視線方向ベクトルを (x_v, y_v, z_v) 、視線先の座標を (x, y) として以下の式により計算する。

$$x = \frac{x_v(5000 - z_o)}{z_v} - x_o \quad (5.1)$$

$$y = \frac{y_v(5000 - z_o)}{z_v} - y_o \quad (5.2)$$

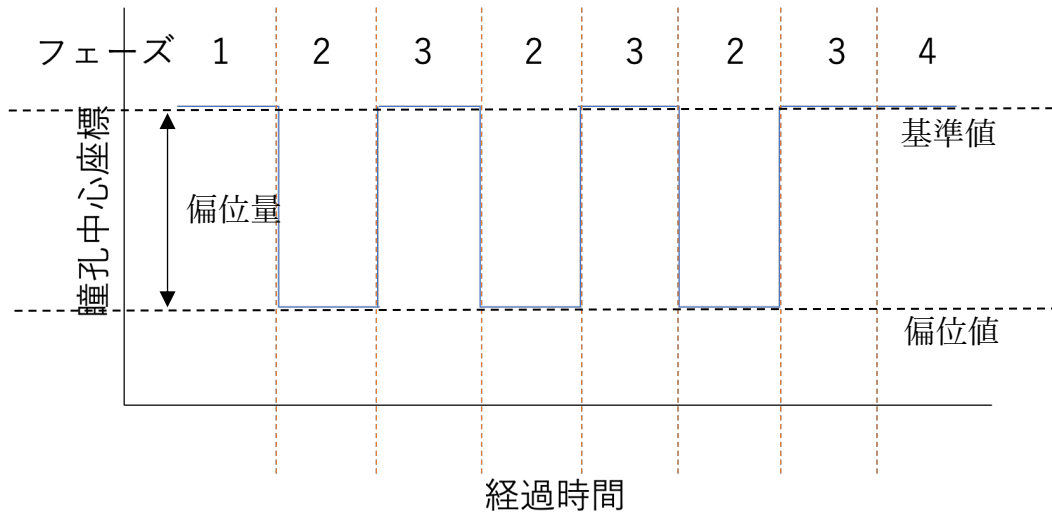
3.3.3 視線位置の計算

開遮閉による視線先の座標の移動量を求めるために、各フェーズで取得した視線先の座標の平均値を求める。求めた値を各フェーズの視線位置とよぶ。偏位始めは眼球が動いており、安定したデータが取得し難い。そのため、各フェーズの終わりから 100 フレームを、平均値を出す範囲として設定し、開遮閉によって偏位した後の眼が安定した部分のみ抽出することで移動時の影響が出ないようにする。

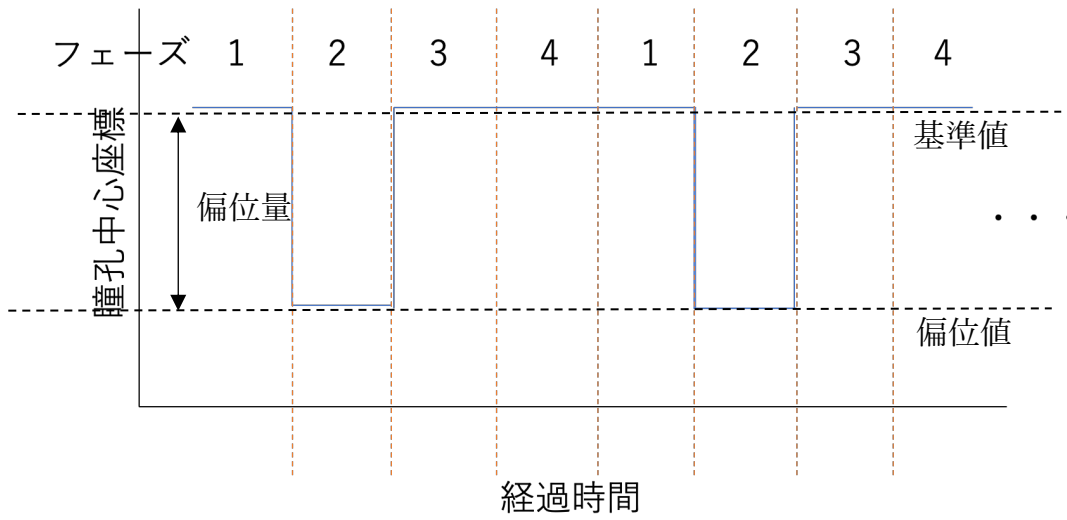
3.3.4 偏位量の計算

図 3.8 に評価対象システムによる検査中の、右眼の各フェーズの視線位置についての時系列グラフを示す。片眼を遮閉している際、遮閉していない方の眼は、斜視/斜位に関わらず視標を注視することができるため、片眼遮閉時の他眼の視線位置を基準値とする。図 3.8(a) は ACT を表し、右眼ではフェーズ 3、左眼ではフェーズ 2 の視線位置が基準値となる。また、片眼遮閉時の視線位置を偏位値とし、右眼ではフェーズ 2、左眼ではフェーズ 3 から偏位値を求める。図 3.8(b) は CUT を表し、右眼ではフェーズ 4、左眼ではフェーズ 2 の視線位置が基準値となる。また、片眼遮閉時の視線位置を偏位値とし、右眼ではフェーズ 2、左眼ではフェーズ 4 から偏位値を求める。基準値と偏位値の差を偏位量として片眼ずつ求める。

偏位量は、プリズムの度数（光偏向力）であるプリズムジオプトリー（ Δ ）という単位で表す。1m あたり 1cm の偏角を与えるものを 1 Δ という。提案手法では 5m 先に視標があるため、偏位量 5cm ごとに 1 Δ となるように算出する（図 3.9）。



(a)ACT



(b)CUT

図 3.8 偏位量の算出

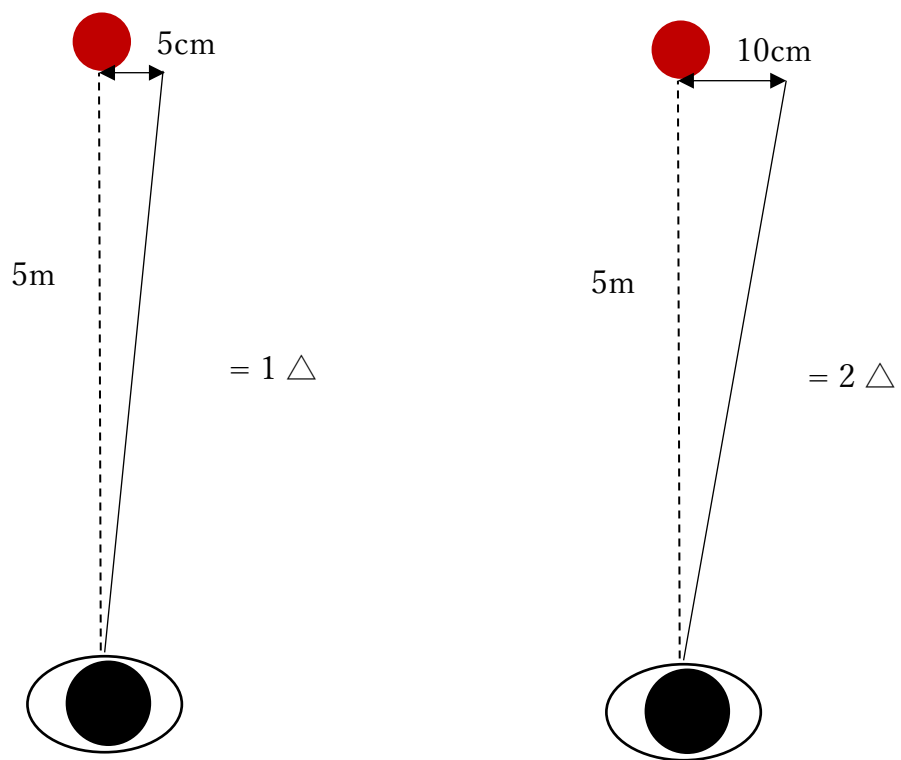


図 3.9 システムにおける偏位量の計算

第4章 臨床データによる眼位異常検査システムの評価方法

4.1 臨床データの取得

臨床データは、宮崎大学附属病院にて眼位異常を持つ患者の中から、左右両方の眼が同程度の Prism-Cover-Test による眼位異常の偏位量（以下、眼位異常偏位量と呼ぶ）を持つ共同性の斜視(斜位)を持ち、検査に関して同意をいただいた 63 名から取得した。63 名のうち、10 名は眼位異常を持たない、あるいは手術等の治療により眼位異常偏位量が小さい被験者であった。

臨床データの取得手順は以下の通りである。

1. 被験者への事前説明

被験者には、検査を実施する前に研究を行な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、被験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. Prism-Cover-Test

次に、眼科医による Prism-Cover-Test (2.5 節) を行い、得られた偏位量を「眼位異常偏位量」と呼び、評価対象システムとの比較を行う上での正解とする。

3. 評価対象システムによる検査

3章で述べた評価対象システムを用いて検査を行い、偏位量を取得する。

4.2 臨床データによるシステム評価

臨床データによるシステム評価を行う上で、以下の3点について評価する。

- ・ 視標への非注視の影響
- ・ 視標までの距離の影響
- ・ 遠近での偏位量の差による影響

それぞれについて以下で詳しく述べる。

4.2.1 視標への非注視の影響

評価対象システムは、HMD上に視差のある画像を映し出し、立体視により奥行き感のある仮想空間を提示している。従来研究[3]の評価実験では、眼位異常をもつ被験者が少なく、眼位異常偏位量が小さかった。一方、HMDに不慣れたユーザでは立体感が得られにくく、小さな偏位量を正しく計測できない場合があった。臨床検査を行う上で、視標を正しく注視していなければ、正確なデータを取得することができない。そのため、臨床データを使って、評価対象システムにおいてどの程度の割合の被験者で正しい計測が行えるか、また、計測が行えない場合に得られたデータに何らかの特徴があるか評価する。視標を注視している場合、検査中の瞳孔中心座標は開放時、遮閉時にそれぞれ安定していることが考えられる。そのため、本実験を行い、視標を注視しているデータと、注視していないデータでどのような違いがあるか、検討する。

4.2.2 視標までの距離の影響

従来研究では、Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査を想定して、システムの視標は仮想空間上の 5m 先に視標を置いていた。一方で臨床場面では、より簡便な Prism-Cover-Test を用いた定量的眼位検査が広く使われている。Prism-Cover-Test では、視標までの距離を 5m とする遠距離での検査方法と、視標までの距離を 30cm とする近距離での検査方法の 2 通りの検査が行われている。評価対象システムが想定している距離と異なる距離での検査となっているため、検査結果と臨床データを比較することにより、視標までの距離の影響について評価する。本研究では、それぞれの距離における臨床データと、評価対象システムとの正解率を比較し、その精度によって視標までの距離の影響を調査する。

4.2.3 遠近での偏位量の差による影響

Prism-Cover-Test で得られる遠距離と近距離での偏位量は、同一の被験者でも異なる場合がある。遠近による偏位量の差が大きい場合には、遠距離もしくは近距離での立体視に得意、不得意が生じている可能性がある。従来研究では、眼位異常のある被験者がほとんどいなかったため想定されていなかったが、評価対象システムでは、HMD 上に視差のある画像を映し出し、立体視により奥行き感のある仮想空間を提示している構造上、立体視の得意、不得意による影響を受けると考えられる。

そのため、Prism-Cover-Test で得られる遠距離と近距離での偏位量の差に着目し、両者の差の大きさ毎に評価対象システムと比較することで、遠近での偏位量が異なる被験者に対する評価システムの適用可能性について調査する。

第5章 臨床データに基づく眼位異常検査システムの評価結果

5.1 視標への非注視の影響の評価結果

視標を注視しているか確認を行うために、検査中の瞳孔中心の座標を時系列データとしてグラフにプロットした。視標を注視している場合、開遮閉の切り替え時に視線の移動が起きるものの、開遮閉中には視線が安定する。そのため、時系列データを見ると、開遮閉中それぞれ、一定の値の付近で視線が安定する。

図 5.1 に指標を注視できている場合の計測データの例を示す。図 5.1 は ACT による左眼の瞳孔中心座標の時系列データで、横軸がデータを取得したフレーム番号、縦軸が左眼瞳孔中心座標の水平方向の計測値である。表 3.1 に基づいて、フェーズごとにグラフを分割している。左眼は、フェーズ 2 では開放状態、フェーズ 3 では遮蔽状態になっている。図より、それぞれのフェーズにおいて、計測値が 32.75 および 31.75 付近で安定していることが確認できる。

図 5.2 に、指標を注視できていない場合の計測データの例を示す。図 5.2 は図 5.1 と同じ左眼瞳孔座標の時系列データで、被験者は、Prism-Cover-Test において、図 5.1 の被験者と同程度の眼位異常偏位量を持つ。

図 5.1 では、フェーズ 2、フェーズ 3 それぞれの区間では、計測値が安定して同じ値となっており、フェーズが切り替わる際の視線位置の変化が明確である。一方、図 5.2 では、フェーズ区間内での計測値が変動しており、フェーズの切り替わりでの視線位置の変化が明確でない。Prism-Cover-Test では図 5.2 の被験者でも眼位異常偏位量が得られていることから、この被験者は評価対象システムを使った場合には、指標を正しく注視できなかつたと考えられる。

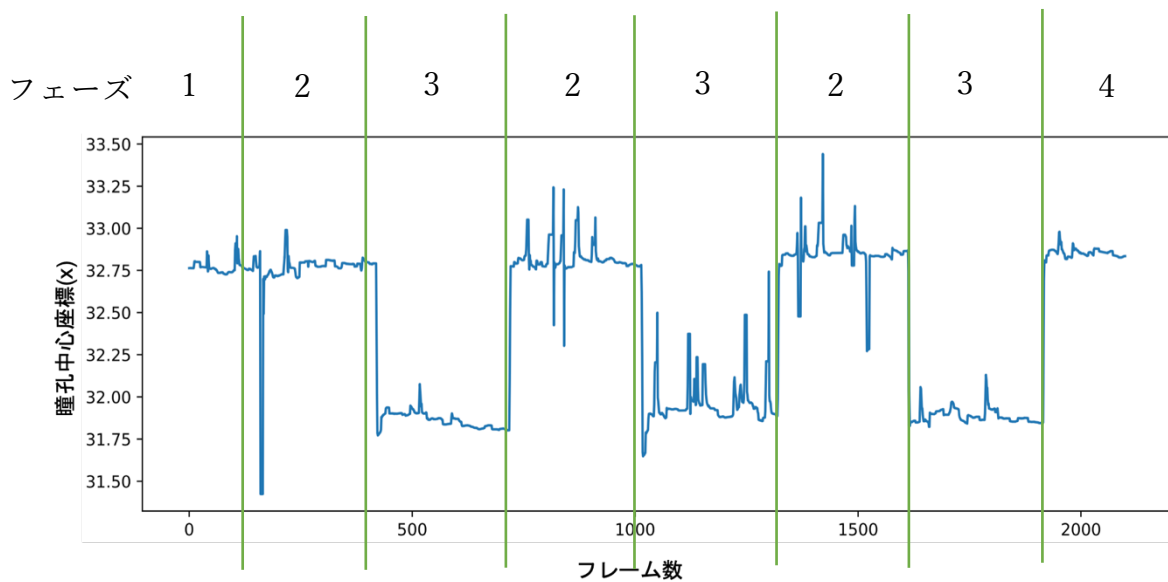


図 5.1 ACT での時系列データ(視標を注視できている例)

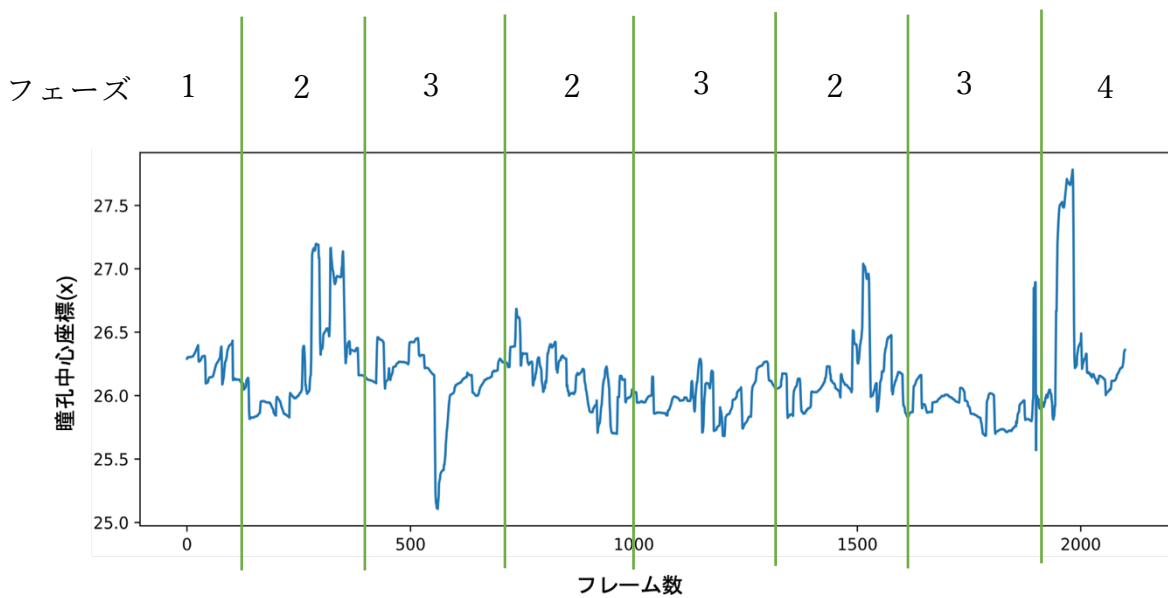


図 5.2 ACT での時系列データ(視標を注視できていない例)

視標を注視できていないデータを定量的に評価・判別できるか検討するために、取得した臨床データについて分散を取り、開閉中の分散を求めた。3.2節で述べたフェーズをもとに、それぞれ遮蔽中と開放中の300フレームのうち切り替え前100フレームについて足し合わせ、フェーズ毎に分散をとった後、両者の平均を取ることで分散を算出した。図5.1の被験者の分散は0.021であり、図5.2の被験者の分散は0.340であった。図5.3に、取得したすべての臨床データについて分散を昇順で並べたグラフを示す。

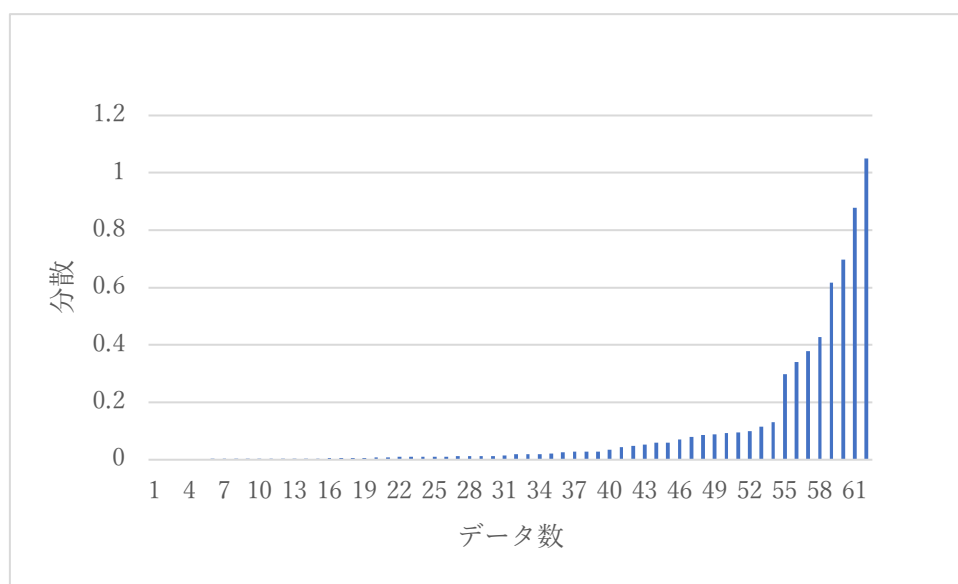


図 5.3 臨床データ毎の時系列データの分散

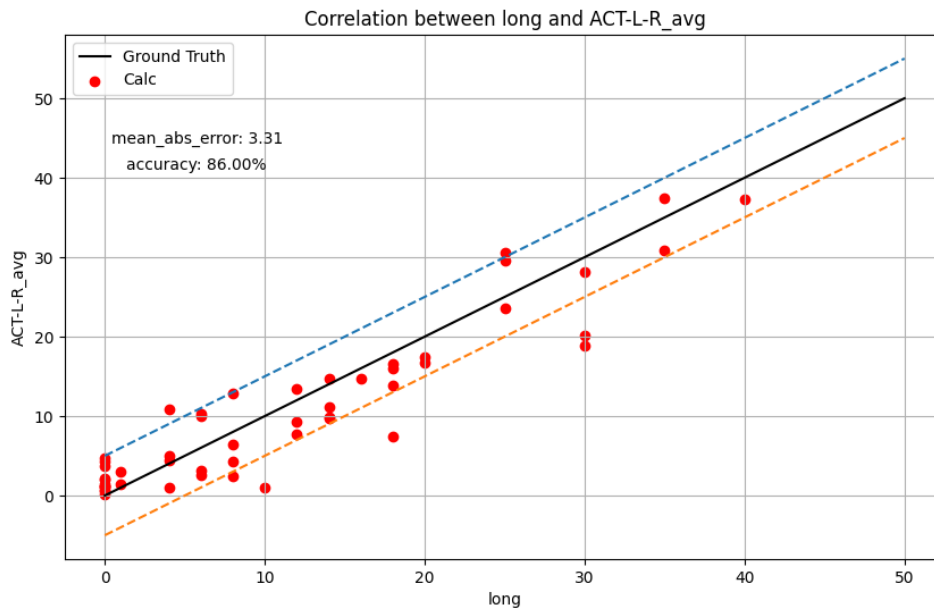
グラフからデータ 55 以降急激に分散が大きくなっていることが確認できる。全体のデータ数は 63 であり、分散の大きい 0.2 以降のデータ数は 8 となっている。このことから、全体の 1 割程度は視標を正しく注視できていない結果となった。

5.2 視標までの距離の影響の評価結果

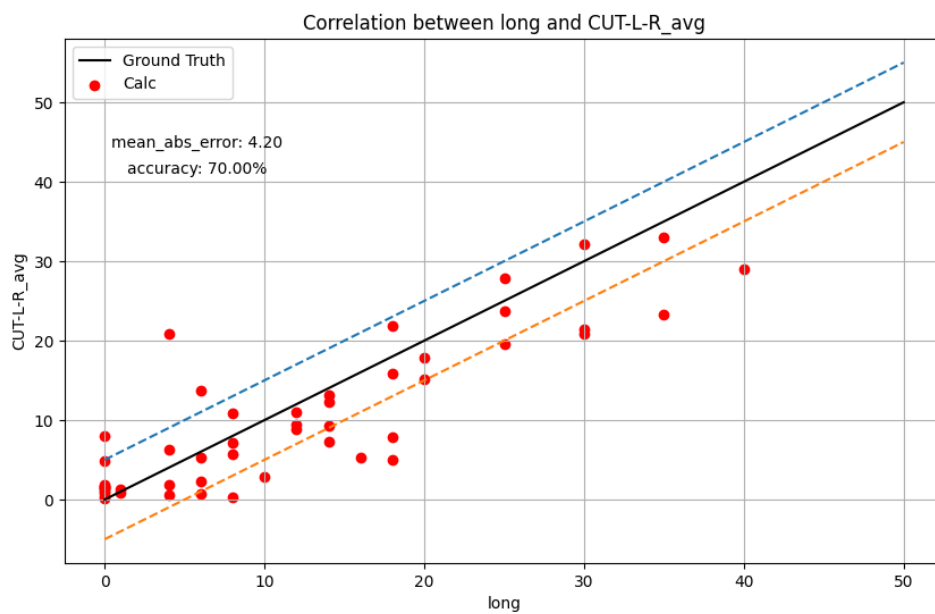
Prism-Cover-Test により得られた遠距離および近距離の偏位量と、評価対象システムにより得られた偏位量とを比較し、評価対象システムの検査精度

を調査した。Prism-Cover-Test においては、通常、 5Δ 程度の誤差は生じることから、評価対象システムによる偏位量が Prism-Cover-Test による眼位異常偏位量に対して、 $\pm 5\Delta$ 以内の値であれば正解として、正解率を求める。

図 5.4、図 5.5 に、Prism-Cover-Test と評価対象システムによる水平方向の偏位量の測定結果を示す。各点が各被験者の偏位量を表している。x 軸が Prism-Cover-Test、y 軸が評価対象システムによる測定結果で、単位はプリズムジオプトリー (Δ) である。評価対象システムについては、左右両眼の偏位量の平均を取っている。破線間は x 軸に対して $\pm 5\Delta$ を示しており、この範囲に入っている場合を正解として正解率を求める。各図において、(a) は評価対象システムで ACT により取得した計測結果との比較、(b)は評価対象システムで CUT により取得した計測結果との比較である。また、5.1 節に基づき、分散 0.2 以上のデータは非注視として除去した。

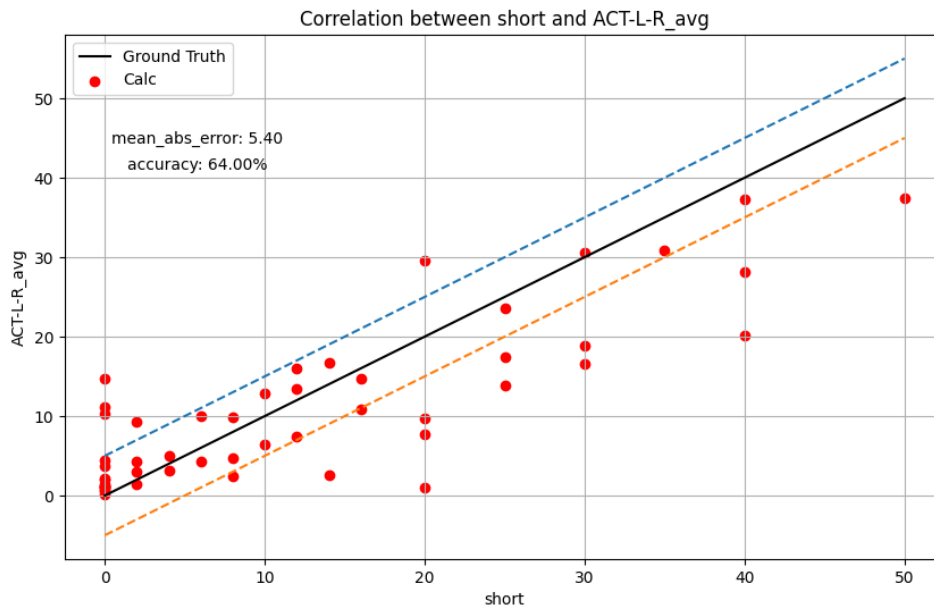


(a)ACT との比較

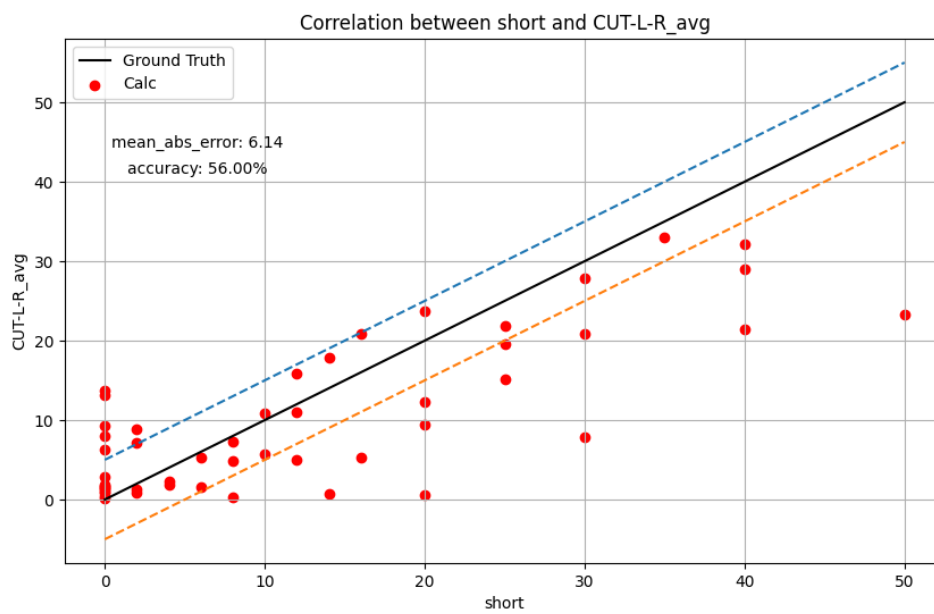


(b)CUT との比較

図 5.4 Prism-Cover-Test と評価対象システムによる測定結果(遠距離)



(a)ACT との比較



(b)CUT との比較

図 5.5 Prism-Cover-Test と評価対象システムによる測定結果(近距離)

表 5.1 に評価対象システムの精度評価の結果を示す。平均誤差は、Prism-Cover-Test による眼位異常偏位量と評価対象システムによる偏位量の誤差の絶対値の平均、正解率は、Prism-Cover-Test による眼位異常偏位量に対して評価対象システムによる眼位異常偏位量が $\pm 5\Delta$ 以内に入っているデータの割合である。図 5.4 は、Prism-Cover-Test の遠距離の偏位量との比較である。偏位量の誤差の絶対値の平均は ACT が 3.31Δ 、CUT が 4.20Δ であり、 5Δ 未満の結果であることから Prism-Cover-Test と近い値が得られた。正解率に関しては、ACT が 86.0%、CUT が 70.0%であった。これらのことから、評価対象システムにおける定量化の結果は、遠距離での Prism-Cover-Test に準じた値を算出できている。一方、図 5.5 は、Prism-Cover-Test の近距離の眼位異常偏位量との比較である。偏位量の誤差の絶対値の平均は ACT が 5.40Δ 、CUT が 6.14Δ であり、 5Δ 以上の結果であることから、遠距離に比べ精度が低いことが示される。正解率に関しては、ACT が 64.0%、CUT が 56.0%であり、こちらも遠距離に比べ低い。

これらの結果から、遠距離では高い精度で検出が可能であることが示された。実際の臨床検査で行われる距離と、評価対象システムでの仮想空間上の視標までの距離が同じであることから、結果は妥当であると考えられる。近距離では遠距離に比べ精度が落ちることが示された。評価対象のシステムとは視標までの距離が異なるため、今後距離による影響を定量的に調査する必要があると考える。

表 5.1 評価対象システムの精度評価

テスト	ACT		CUT	
	遠距離	近距離	遠距離	近距離
平均誤差(Δ)	3.31	5.40	4.20	6.14
正解率(%)	86.0	64.0	70.0	56.0

5.3 遠近での偏位量の差による影響の評価結果

同一被験者において、Prism-Cover-Test の遠距離と近距離での眼位異常偏位量が大きく異なる被験者に対して評価対象システムが適用可能か調査する。まず、遠距離の眼位異常偏位量と近距離の眼位異常偏位量の差を元に、被験者を差が小さい (0△から 4△)、中程度 (5△から 9△)、大きい (10△以上) の 3つのグループに分けた。グループ毎の被験者数を表 5.2 に示す。

表 5.2 眼位異常偏位量の差ごとの被験者数

偏位量の差	小さい	中程度	大きい
被験者数(人)	25	20	10

次に、グループ毎の正解率を求めた。図 5.6 に、グループ毎の正解率を比較したグラフを示す。図 5.6(a)が ACT での結果を表し、図 5.6(b)が CUT での結果を表す。青のグラフは近距離での Prism-Cover-Test との正解率、オレンジのグラフは遠距離での Prism-Cover-Test との正解率を示している。

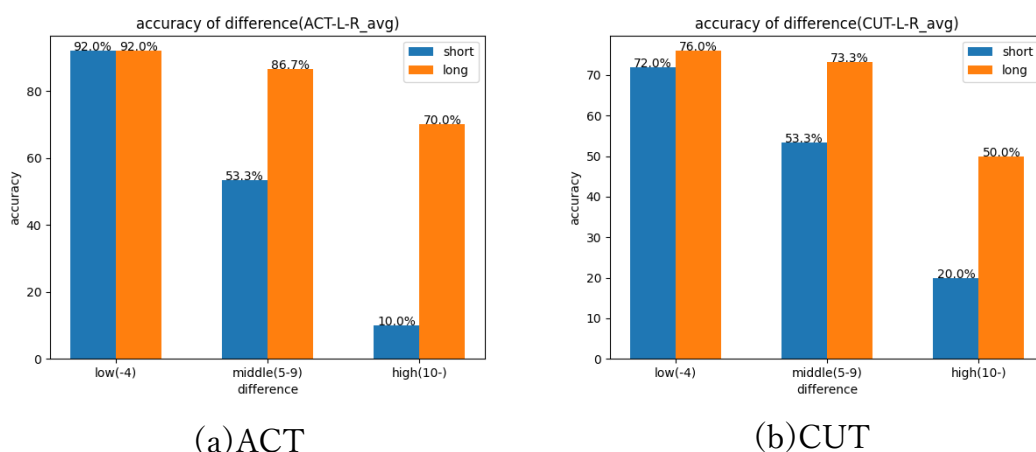
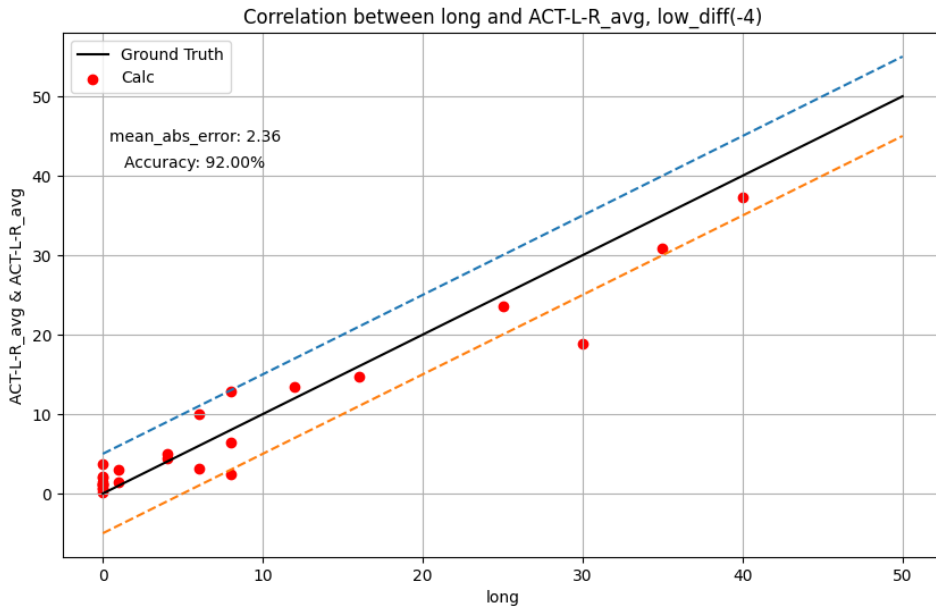


図 5.6 遠近による偏位量の差の程度に対する正解率の比較

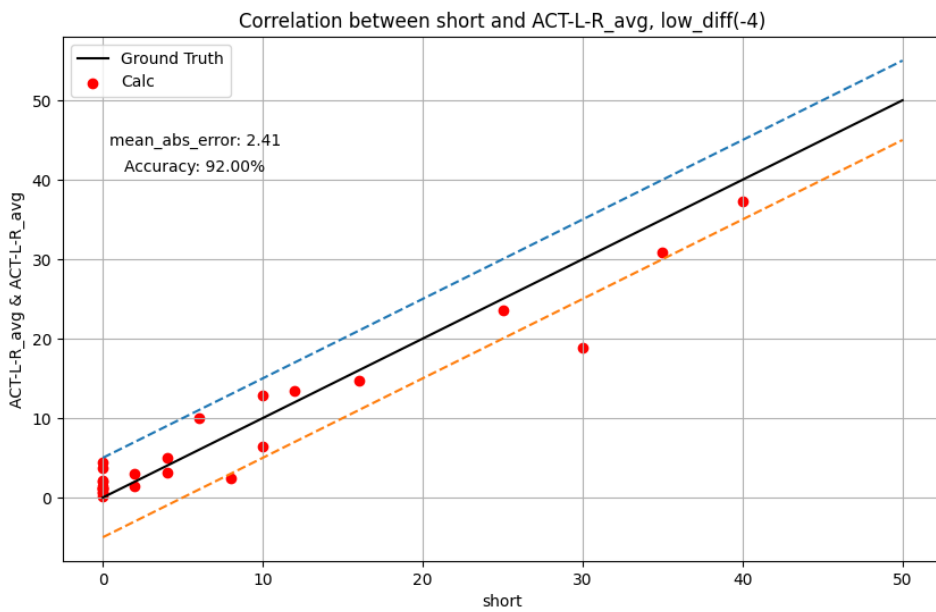
どちらのグラフにおいても、遠近差が大きくなるにつれ、正解率に減少傾向が見られた。図 5.6(a)より ACT において遠近差が小さい被験者グループでは、遠距離と近距離ともに正解率が 92%であり、非常に高い精度で測定できる

ことが示された。しかし、遠近差が大きい被験者グループでは、遠距離は70%、近距離は10%であり、遠近差が小さい場合に比べ精度が落ちている。また、図 5.6(b)より、CUT においても遠近差が小さい被験者グループでは、遠距離76%、近距離72%と、ACT に比べると精度は落ちているが、どちらもおおむね精度が出ていると言える。しかし、ACT の場合と同様に、遠近差が大きい被験者グループでは、遠距離は50%、近距離は20%であり、遠近差が小さい場合に比べ精度が落ちている。

図 5.7 に遠近差が小さい被験者グループ、図 5.8 に遠近差が大きい被験者グループに対して、測定結果を比較したグラフを示す。図 5.4 と同様に y 軸が評価対象システムの ACT の結果、x 軸が Prism-Cover-Test の結果となっており、単位はプリズムジオプトリー(Δ) である。

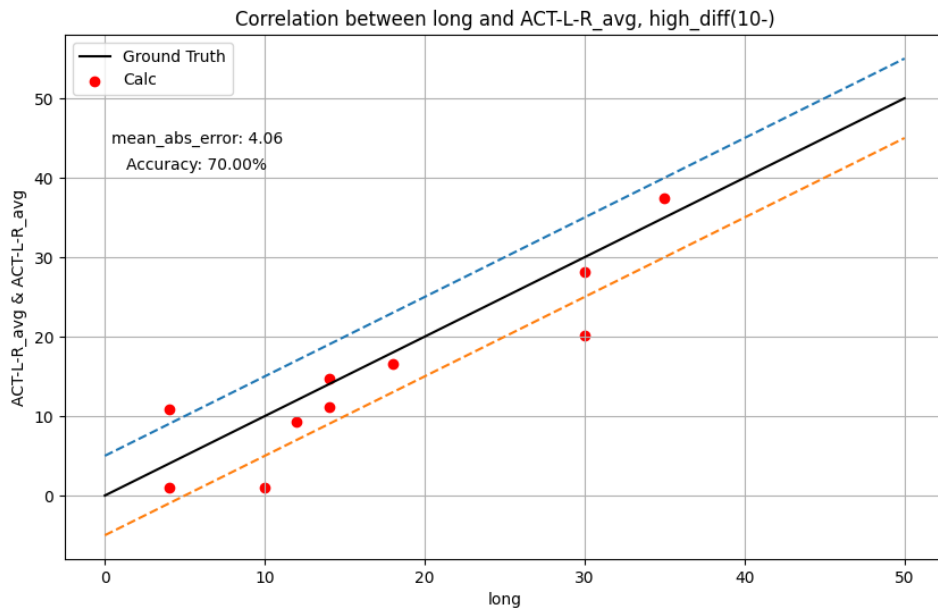


(a)遠距離との比較

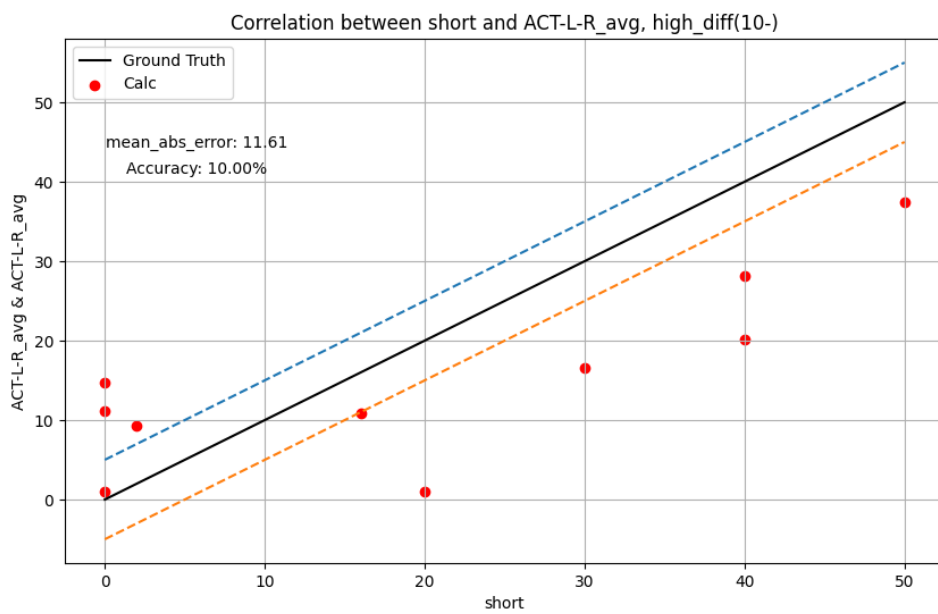


(b)近距離との比較

図 5.7 Prism-Cover-Test と評価対象システムによる測定結果の比較
(遠近による眼位異常偏位量の差が小さいグループ)



(a)遠距離との比較



(b)近距離との比較

図 5.8 Prism-Cover-Test と評価対象システムによる測定結果の比較
(遠近による眼位異常偏位量の差が大きいグループ)

表 5.3 に評価対象システムの遠近による偏位量の差に対する比較結果を示す。眼位異常偏位量の遠近差が小さいグループに対する遠距離での Prism-Cover-Test との比較では、偏位量の誤差の絶対値の平均は 2.36△であり、近距離では 2.41△であった。正解率はともに 92%であり、眼科医による Prism-Cover-Test と近い値が得られた。一方、眼位異常偏位量の遠近差が大きいグループに対する遠距離での Prism-Cover-Test との比較では、偏位量の誤差の絶対値の平均は 4.06△であり、近距離では 11.61△であった。正解率は、遠距離では 70%、近距離では 10%と、眼位異常偏位量の遠近差が小さい場合と比べて低くなっていることが示された。また、偏位量の自体が大きさに関わらず、遠近差のある被験者も存在することから、単純に偏位量が小さい場合のみでなく、偏位量が大きい場合でも、遠近差が小さいのであれば、高い水準で検査が可能であると言える。

表 5.3 遠近による眼位異常偏位量の差に対する比較

偏位差	遠近差(小)		遠近差(大)	
	遠距離	近距離	遠距離	近距離
平均誤差(△)	2.36	2.41	4.06	11.61
正解率(%)	92	92	70	10

5.4 考察

5.1 節の評価結果より、視標を注視しているか判別を行うために、分散を用いて分類できることが確認できた。今後データ数を集め、閾値の設定を行うことで、自動的に再テストを行うシステムへ改良することができる。

水平方向においては、遠近による眼位異常偏位量のずれが少ない場合には有効な結果が得られた。遠距離での Prism-Cover-Test が近距離に比べ高い精度であったのは、VR 上での視標が 5m 先にあることと一致している。HMD では、視差のある画像を映し出し、立体視により奥行き感のある仮想空間を提示して

いるため、近距離での物体の注視は、ピントが合わせづらいことや、融像が難しい。そのため、今後は距離を近づけることによって、どれだけ近距離での Prism-Cover-Test にあう距離を実現できるのか調べていく必要がある。

本研究では、眼位異常偏位量の計測として、水平方向(x)と垂直方向(y)が測定できるようになっている。同時に検査を行なった垂直方向(y)の検査では、水平方向に眼位異常を持つ被験者が 5 名程度しかおらず、十分なデータを集めることができなかった。

第6章 まとめ

本研究では、眼位異常検査システムの臨床データによる評価を行なった。臨床場面では、様々な被験者がいることや、比較手法の違いから、精度への影響が考えられた。そのため、評価対象システムの有効性を調べるために、視標の非注視、視標までの距離、遠近での偏位量の差の3つの観点から臨床データを用いて評価した。

まず初めに、視標への非注視に関しては、同程度の眼位異常偏位量を持つ2者について、検査時の瞳孔中心座標の時系列データをもとにその特性を検討した。開遮閉時の眼の動きが安定する範囲において、視標を注視できている場合は分散が0.021であり、視標を注視できていない場合は分散が0.340であったことから、分散による定量化ができると考えた。すべての臨床データについて分散を求め、昇順に並べた結果、分散の急激な高まりがある部分が確認され、全体の1割程度は視標を正しく注視できていないという結果となった。

次に視標までの距離の影響に関しては、遠距離/近距離による Prism-Cover-Test と評価対象システムとの比較を行った。その結果、遠距離の場合、誤差平均が ACT で 3.31Δ 、CUT で 4.20Δ とどちらも 5Δ 未満の結果であり、正解率が 86.0% と 70.0% であることから、高い水準で測定できることが示された。近距離の場合、誤差平均が ACT で 5.40Δ 、CUT で 6.14Δ とどちらも 5Δ 以上の結果であり、正解率が 64.0% と 56.0% であった。遠距離に比べ誤差平均、正解率ともに低く、評価対象システムは遠距離での眼位異常偏位量を測ることに向いていることが示された。

また、遠近での偏位量の差に関しては、差が大きくなるにつれて評価対象システムと Prism-Cover-Test との正解率が低下していくことが示された。差が 0Δ から 4Δ と小さい場合に関しては、ACT では正解率が 90% を超え、CUT でも 70% を超える結果であり、また眼位異常偏位量が大きいか場合でも、遠近の差自体

が小さい場合には問題がなかったことから、遠近の眼位異常偏位量の差が小さい場合に高い精度を出すことができることが示された。

今後の課題を以下に示す。

1つ目として、視標への非注視の閾値を調査することが挙げられる。固視微動等で視標の注視ができない場合の、眼位異常検査システムでの分散具合を調べ、閾値を設定することで、システム終了前に再テストが行えるようシステムを改良する必要がある。

2つ目として、近距離での検査精度の更なる向上が挙げられる。評価対象システムでは5m先の視標しか用意していない。実際の Prism-Cover-Test のように30cm先に視標を用意することは、融像の難しさや、ピントの調節問題等から難しいことか考えられるが、視標を一定間隔で設置し、それを比較することによって、近距離での Prism-Cover-Test の結果に近づける、もしくは推測できるようになると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻賜りました。初めての臨床実験での研究でうまくいかないことが多かった中で、最後まで支えてくださった椋木雅之教授に心からお礼申し上げます。また、実験に際し、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、ご指導をいただいた学校法人日本教育財団大阪医専の内田憲之講師や、データ取得にご協力いただいた宮崎大学医学部附属病院の副課長である中馬秀樹准教授、眼科医である樋渡先生にも深く感謝いたします。ゼミでの議論、実験に際しての知識等、様々な面でお手伝い頂いた高塚佳代子技術専門職員や、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にも厚く御礼申し上げ、感謝の意を表します。

なお、本研究は宮崎大学医学部医の倫理委員会（研究番号 O-1317、2023 年 3 月 14 日付け）の承認を受けて実施した。

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, “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] 長友耀希, “視線追跡機能付き HMD を用いた眼位異常検出”, 宮崎大学工学部情報システム工学科卒業論文, 2021.
- [4] 中村桂子, “遮閉試験”, 日本視能訓練士協会誌, vol.28, 2000
- [5] 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.
- [6] 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, p.203, 2008.
- [7] イワタメガネ プリズム加工 http://iwatamegane.com/?page_id=41517
- [8] 日本弱視斜視学会 斜視 <https://www.jasa-web.jp/general/medical-list/strabismus>
- [9] 内海隆, “斜視の検査法”, あたらしい眼科 19(12), pp.1553-1556, 2002.
- [10] 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/>
- [11] VIVE Pro eye 概要 , <https://www.vive.com/jp/product/vive-pro-eye/overview/>
- [12] 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/>
- [13] Unity, <https://unity.com/ja>
- [14] SRanipalSDK, <https://developer.vive.com/resources/vive-sense/sdk/vive->

[eye-tracking-sdk-sranipal/](#)

- [15] 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>