

令和3年度 修士論文

HMD を用いた Parks 3 Step 法による眼位異常検査

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 T2003351

高津 茉弥

指導教員 椋木 雅之 教授

令和4年1月24日

概要

本研究では、視線追跡付きヘッドマウントディスプレイ（HMD）を用いて、外眼筋の中から眼位異常の原因となっている麻痺筋を特定する検査法である Parks 3 step 法での検査を支援するシステムを作成した。

眼位異常（眼の位置のずれ）である斜視・斜位は、後に眼精疲労や立体視不良を引き起こし、本人の日常の快適さを損なう要因になる為、早期発見が重要である。しかし、検査を行うには検査室の広さ等の条件や、眼科医や視能訓練士の数が慢性的に不足しているという問題がある。従来研究として、HMDを用いて、眼位異常の有無とその程度を検査する Covertest という検査を支援するシステムが開発されている。このシステムでは、水平方向の眼位異常（内・外斜視/斜位）は概ね検出できたが、上下方向の眼位異常（上・下斜視/斜位）の検出は困難であった。また、眼位異常の原因となっている麻痺筋の特定は対象としていなかった。

提案システムは、上下方向の眼位異常を対象とした検査法である Parks 3 step 法での検査を支援する。Parks 3 step 法は、正面時、左右視時、正面視時の左右頭部傾斜の眼位を測定する必要がある。システムでは、同様の検査が行えるよう仮想空間に視標を配置する。HMDを被った被験者は、提示された視標にしたがって検査を行う。システムはこの間、被験者の眼の位置を計測し続ける。検査後、計測した眼の位置データを元に、Parks 3 step 法での判定に必要な眼の位置を定量化する。

実験では、Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査の結果と、本システムで得られた眼の位置の定量化結果の比較を行った。その結果、Maddox 検査の結果と本システムでの定量化結果は、必ずしも一致しなかった。しかし、システムで計測した眼の位置の測定値と定量化結果の比較から、計測結果を正しく定量化できていることを確認した。次に、定量化結果から異常筋の推測を行った。その結果、上下偏位を確認された被験者 3 人のうち 2 人については、Maddox 検査と矛盾しない推測結果が得られた。

目次

概要	1
第1章 はじめに	3
第2章 臨床的眼位異常検査	4
2.1 斜視・斜位	4
2.2 眼位検査 (Cover-Test)	6
2.2.1 ACT (Alternating-Cover Test)	6
2.2.2 CUT (Cover-Uncover Test)	8
2.3 眼球運動検査	10
2.3.1 外眼筋と各筋肉の作用	10
2.3.2 9方向眼位検査	12
2.3.3 Bielschowsky 頭部傾斜試験	14
2.3.4 Parks 3 step 法	16
2.3.5 Maddox 小桿を用いた定量的眼位検査	18
第3章 Parks 3 step 法に基づく眼位異常検査システムの構成	20
3.1 システムの構成	20
3.2 仮想の検査環境の作成	22
3.3.1 固視点の測定時	22
3.3.2 正面 (step1) と左右視時 (step2)	23
3.3.3 正面 (step1) と左右へ頭部傾斜時 (step3)	25
3.3 取得データの処理手順	27
3.3.1 高さの補正值の算出	27
3.3.2 正面 (step1) と左右視時 (step2) のデータ処理	29
3.3.3 正面 (step1) と左右へ頭部傾斜時 (step3) のデータ処理	30
第4章 実験	31
4.1 実験目的	31
4.2 実験方法	31
4.3 実験結果と考察	32
4.3.1 定量化結果	32
4.3.2 Maddox 検査で値が出た被験者	35
第5章 まとめ	37
謝辞	38
参考文献	39

第1章 はじめに

人間は、物を見る際に両眼で対象に視線を合わせることによって、立体的に視覚情報を得ている。しかし、視線が一致しない目の状態であるとき、像が二重に見え（複視）立体的に感じる事が難しくなる。その目の状態を眼位異常と呼ぶ。眼位異常の代表的な原因に斜視・斜位がある。斜視は、片眼は見る対象に向いているが、もう片方の視線は別の方向を向く状態を指す。斜位とは、両眼で捉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。特に斜視は、眼精疲労や弱視の原因となるため、低年齢で発見し治療を開始することが、小児眼科学の大きな研究テーマとなっている[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不足している[2]。以上のことから、有資格者が不在でも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]。数少ないシステム化の例として池田の研究[4]がある。池田[4]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システムを開発した。検査方法としては、斜視・斜位の鑑別を行う定性検査の代表的な方法であるCover-Test [1]を利用している。このシステムでは、視線追跡機能付きHMDを被験者が装着し、視線追跡で得られた眼球データから眼位異常の有無を判定する。また、定性だけでなく、定量化（斜視・斜位の程度を測定し、結果は数値で表される）も行う。実験結果では水平方向の異常を概ね検出できた。

麻痺筋を特定する方法の一つとして、Parks 3 step法がある。Parks 3 step法では5状態（正面視時(step1)、左方視時と右方視時(step2)、正面視とともに左への頭部傾斜時と正面視とともに右への頭部傾斜時(step3)）の眼位が必要である。stepごとに異常と思われる筋を限定し、全てのstepに当てはまる筋を麻痺筋と特定する。

本研究では、視線追跡機能付きHMDを用いて、Parks 3 step法での検査を支援するシステムを作成する。まず、仮想空間（VR）上にParks 3 step法に基づいた検査環境を作成し、検査を実施する。同時にHMDを用いて被験者の眼の位置を取得する。得られたデータから、各stepごとに眼の位置を定量化する。最後にParksでの手法でどこまで異常筋が推測できるか考察を行う。

以下、第2章で斜視・斜位とそれらを検査する Cover-Test、斜視であった場合の原因筋を判断する眼球運動検査について述べる。第3章では Parks 3 step 法に基づく検査システムの構成について述べる。第4章でシステムの実験結果と考察、最後に第5章でまとめとする。

第2章 臨床的眼位異常検査

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、異常の有無を判定する定性検査がある。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。検査方法は、他覚的検査法と自覚的検査法がある。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、斜視があった場合に原因となる筋を特定する眼球運動検査、自覚的定量検査方法としてのMaddox 小桿を用いた眼位検査について述べる。

2.1 斜視・斜位

眼位異常としては斜視と斜位[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、両眼で捉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、片眼遮蔽して(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1)。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)。本研究では下斜視(位)を上斜視(位)に統一する。左右の眼について上下方向の斜視(位)がある場合、相対的に上になる方の眼の上斜視(位)として扱う。例えば、図2の下斜視の図は左眼下斜視であるが、本研究では右眼上斜視として扱う。

斜視や斜位が生じる原因には、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、両眼視機能の異常など様々なものがある。これらの斜視や斜位の鑑別には、Cover-Test が使用される。

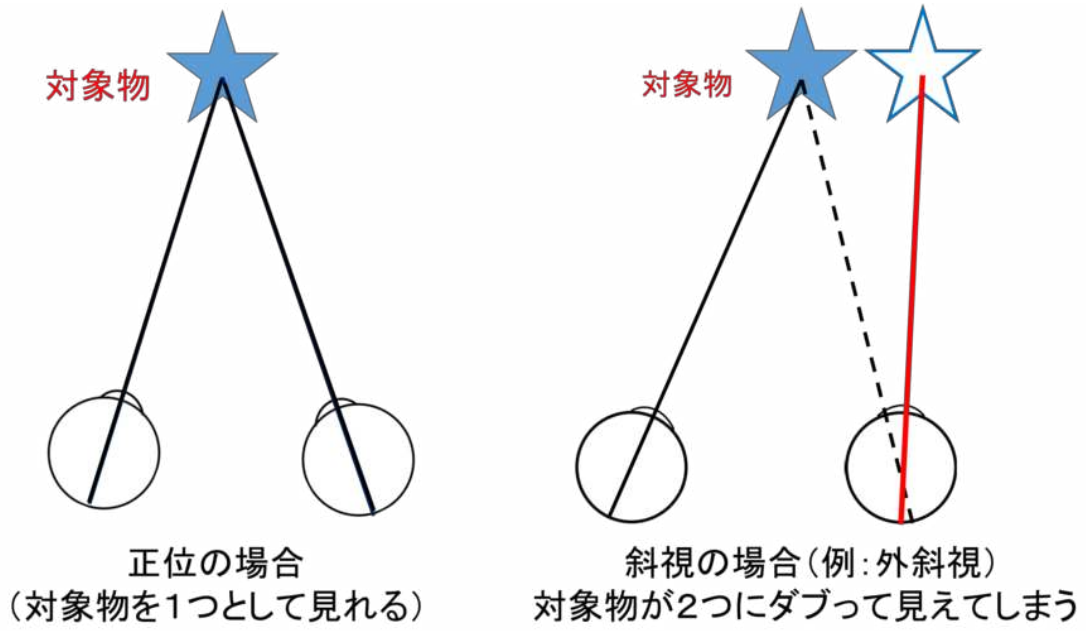


図 1 異常の有無での見え方 ([7]より引用)

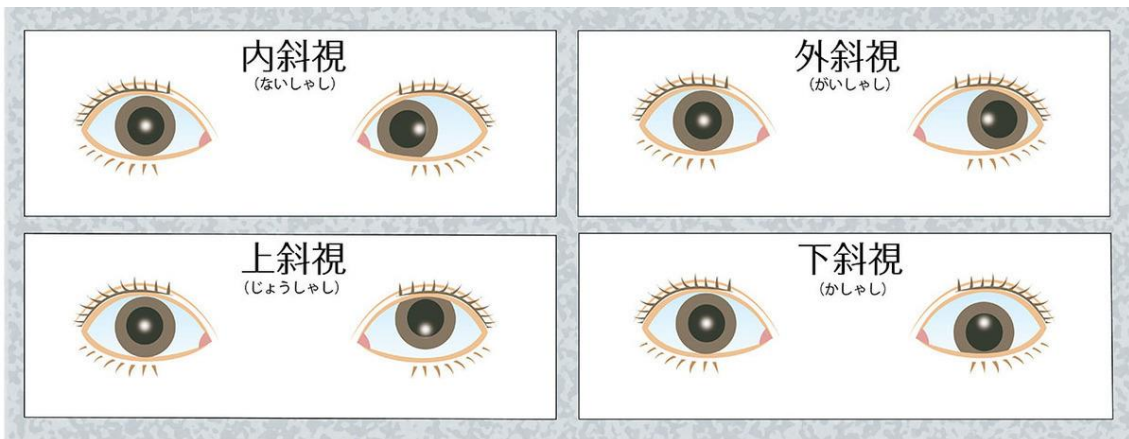


図 2 斜視の種類 ([8]より引用)

2.2 眼位検査 (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][9]。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て、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3C)

- 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3D)

この際に動く各眼の目の動きの総和が全偏位量(図3の赤の幅と緑の幅の和)である。

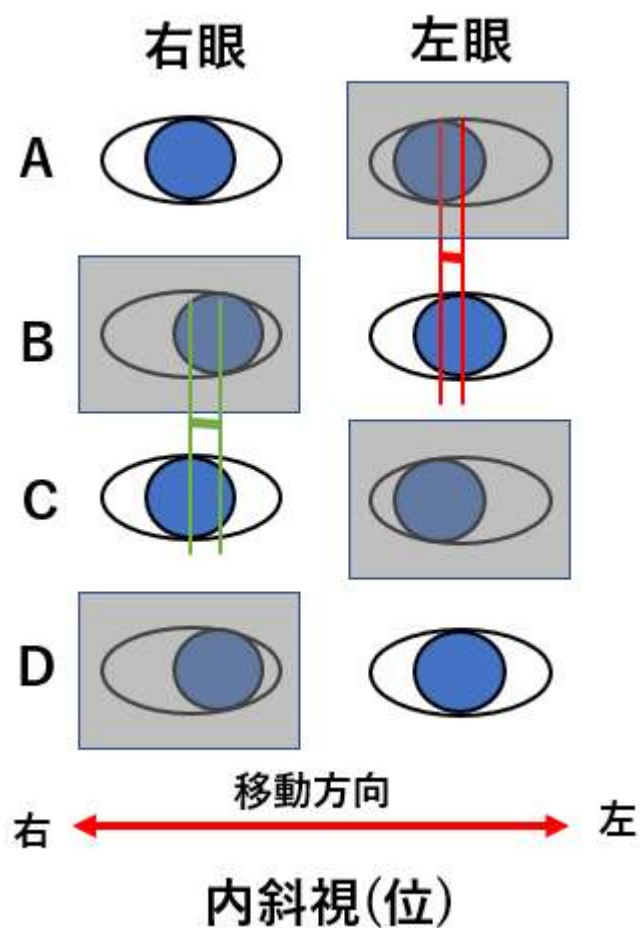


図3 ACTでの内斜視(位)例

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4は、CUTでの斜位の場合の眼の動きである。右眼内斜視(図4)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4B)
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4C)
3. 次に、左眼を遮閉すると、右眼に右向きの眼球運動が起こり、左眼は内斜偏位する(図4D)
4. 遮閉を取り除くと、右眼は内斜偏位し、左眼に左向きの眼球運動が起こる(図4E)

また、内斜位の場合(図5)、

1. 両眼開放下では眼位ずれはみられない(図5A)
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5B)
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5C)
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5D)
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5E)

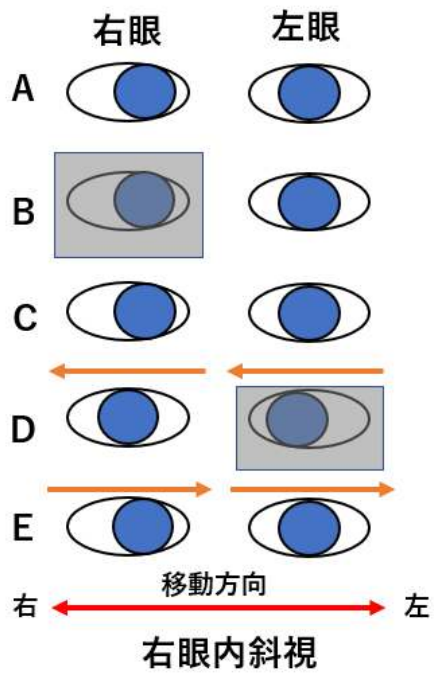


図 4 CUT での斜視の検査例 (内斜視)

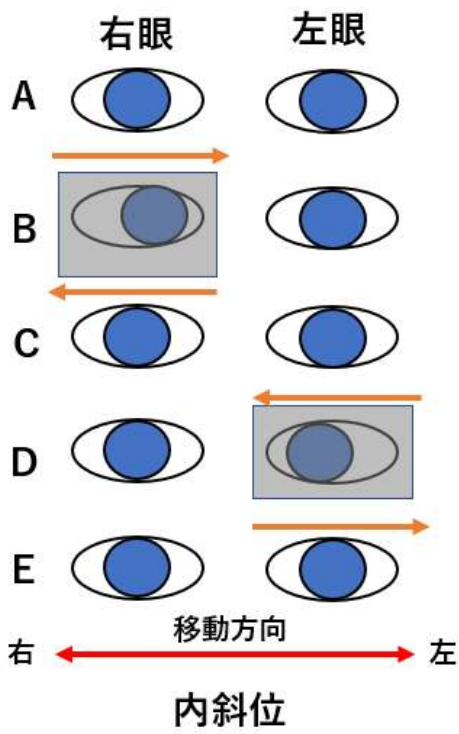


図 5 CUT での斜位の検査例 (内斜位)

2.3 眼球運動検査

眼球運動検査とは、被験者の目の動きから斜視となる原因筋を探す検査法である。Cover-Test で斜視と判断された場合に行われる。以下に、外眼筋の各筋肉が眼球を動かすために力がどのように働くか、及び斜視があった場合にどの外眼筋に異常があるか特定する 4 つの検査法について述べる。

2.3.1 外眼筋と各筋肉の作用

外眼筋とは眼球を動かす為の筋肉であり、片眼に 6 本ずつ筋肉が付いている。図 6 に両眼の外眼筋を示す。視線を動かす際には、筋を収縮/弛緩することで眼球を動かしている。例えば、外側に眼を向ける場合、外直筋が収縮すると同時に内直筋が弛緩する。

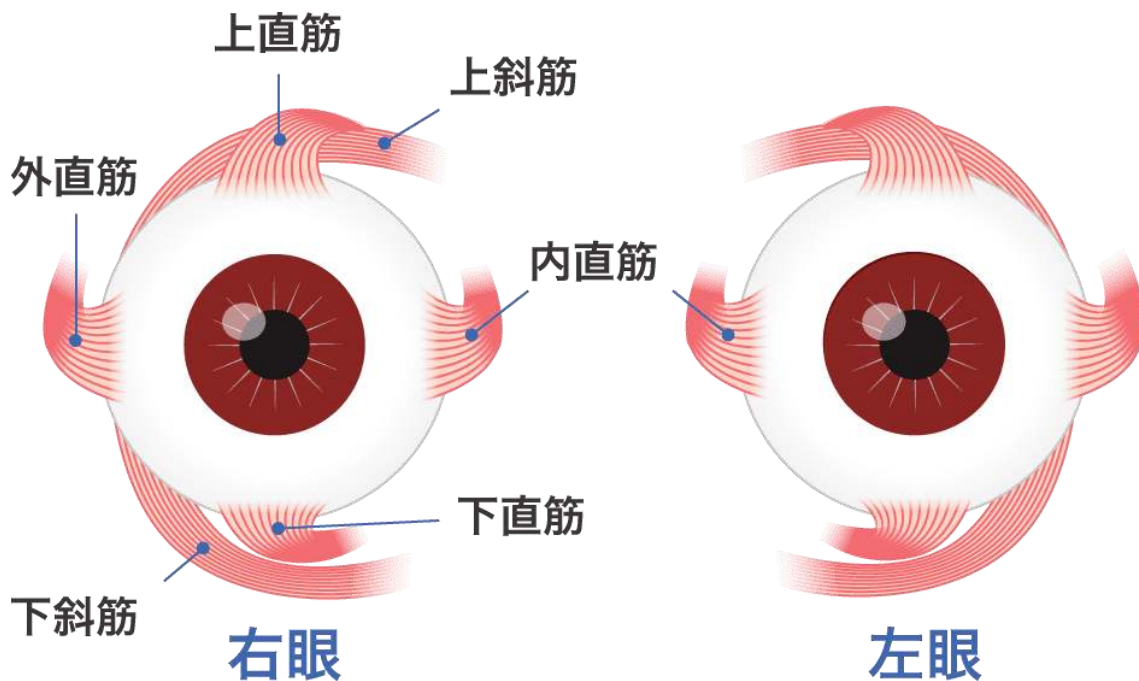


図 6 外眼筋 ([10]より引用)

図7に外眼筋の力の作用を示す。内転は内側、外転は外側、上転は上側、下転は下側へ視線を向ける力を指す。また、外旋は外側へ、内旋は内側へ眼球を回転させる力を指す。

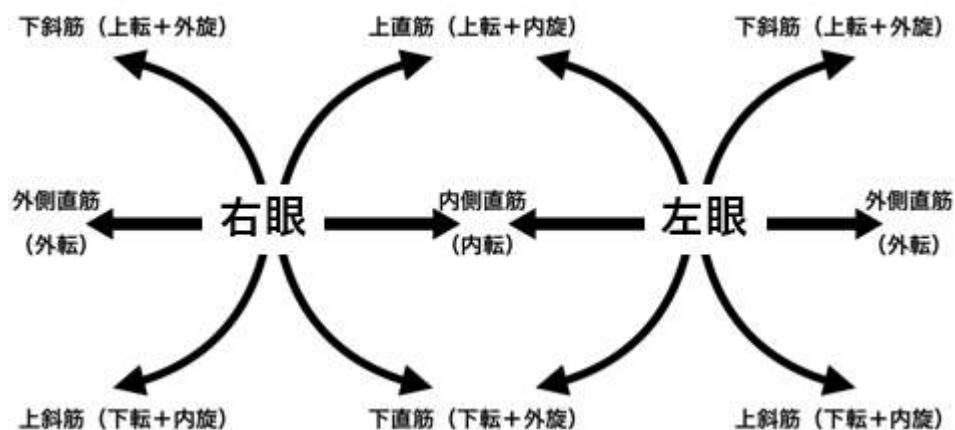


図7 外眼筋の力の作用 ([11]より引用)

図7より、以下に各筋の作用をまとめる。

- 外直筋：外転
- 内直筋：内転
- 上斜筋：下転、外転、内旋
- 下斜筋：上転、外転、外旋
- 上直筋：上転、内転、内旋
- 下直筋：下転、内転、外旋

図8に左眼で外斜視(位)の場合で考えられる麻痺筋の例を示す。図8の正位のように正面を向く時、全ての筋に同じ収縮の力がかかりバランスを保っている状態である。しかし、外斜視の場合、外直筋が強く働きすぎている(過動)、もしくは内直筋の力が弱く麻痺している(遅動)と考えられる。

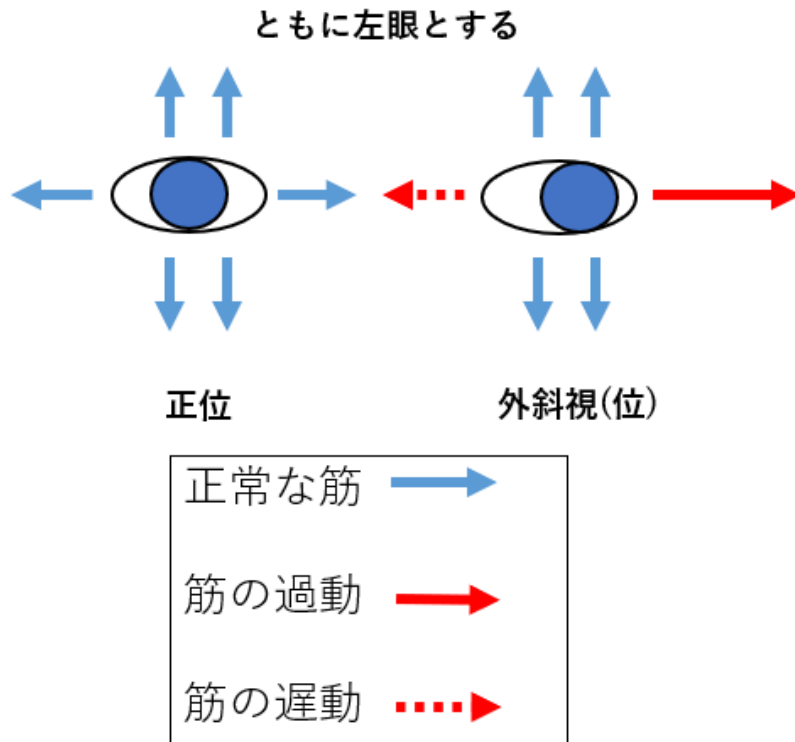


図 8 麻痺筋の例 (外斜視(位))

2.3.2 9 方向眼位検査

9 方向眼位検査は、正面、上方視、下方視、右上方視、右方視、右下方視、左上方視、左方視、左下方視の眼の動きから斜視の原因筋を推測する検査である。図 9 に注視の方向による主たる外眼筋の作用を示す。矢印は各注視の方向で最も使う筋を表す。検査では、被験者に 9 パターンで視線を動かしてもらい、各注視の方向でどちらの眼が上転しているかによって、どの筋が過動または遅動しているかの傾向を判断する。

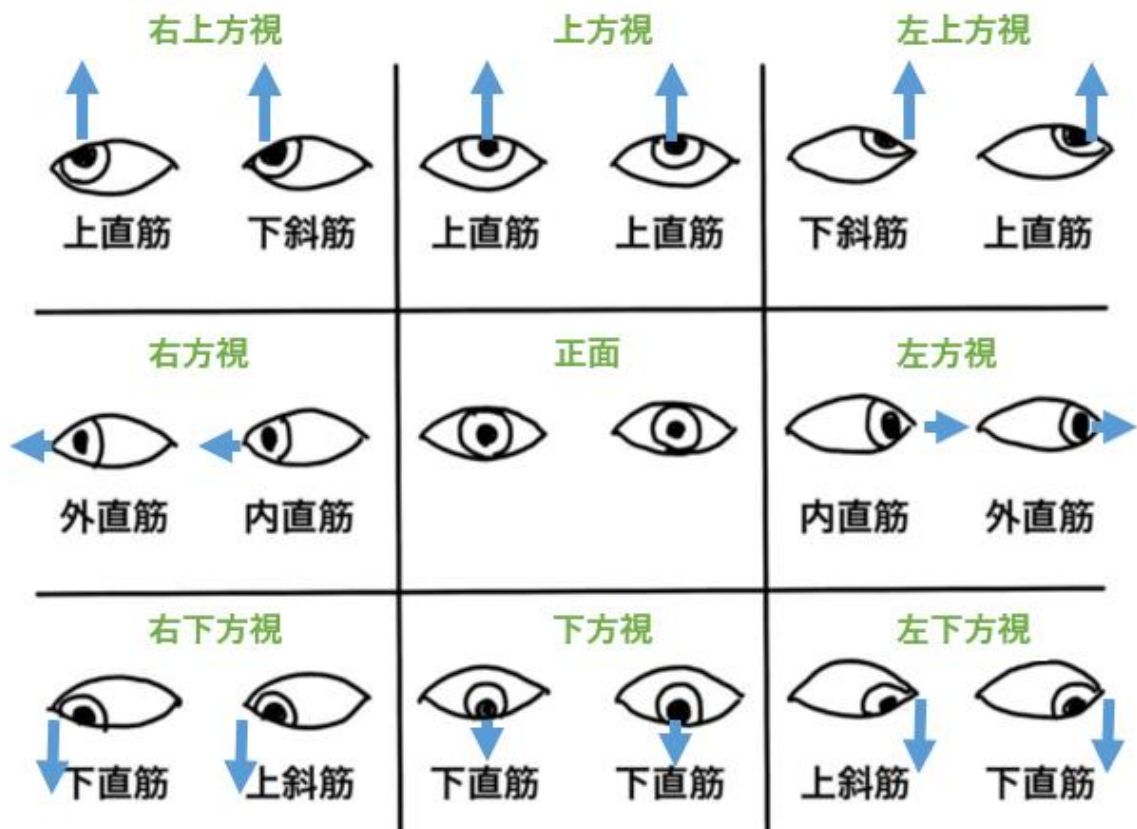


図 9 注視の方向による主たる外眼筋の作用 ([12]より引用)

図 10 に左上方視（左眼上斜視）の異常例を示す。正常ならば、両眼ともに左上を向くことができる。しかし、眼の高さが揃っていない場合、左眼上斜視では、A または B のパターンが考えられる。A と B いずれも左眼が上がっている状態だが、A では左眼は正常だが右眼の下斜筋運動によって右眼が下がり、B では右眼は正常だが左眼の上直筋過動によって左眼が上がることとなる。この例では、右眼の下斜筋もしくは左眼の上直筋に異常の傾向があると判断できる。他の注視の方向でも同様に、眼の高さの違いによって異常筋の傾向の推測ができる。

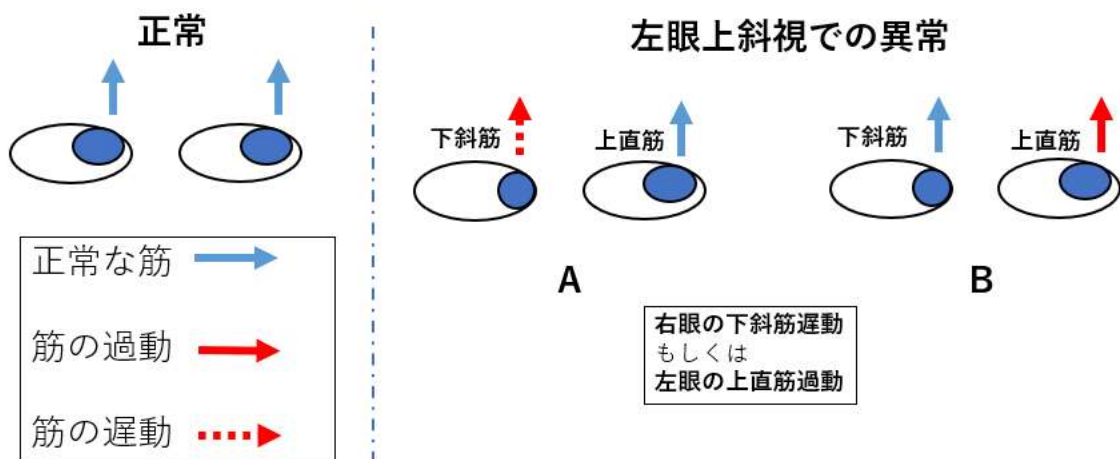


図 10 左上方視（左眼上斜視）での異常例

2.3.3 Bielschowsky 頭部傾斜試験

Bielschowsky 頭部傾斜試験 (Bielschowsky head tilt test、以下、BH TT と表記する) は、眼球の反対回旋を利用した上下回旋筋の麻痺筋を診断する検査法である[13]。検査時は、視線を正面に向けたまま頭部を右、左へ傾斜する。図 11 に右へ頭部傾斜した例を示す。頭部を傾斜すると耳石器からの刺激を受け、眼は水平を保とうと反対側へ回旋を起こす。このとき、外旋では外旋作用を持つ下直筋と下斜筋、内旋では内旋作用を持つ上直筋と上斜筋が収縮する。右へ頭部傾斜したとき、右眼は内旋し赤矢印で示した筋が、左眼は外旋し青矢印で示した筋が収縮する。このとき筋に異常がなければ正面を向くことができる (両眼ともに高さが同一となる)。

図 12 で右へ頭部傾斜した際の異常例を示す。異常は左眼上斜視と右眼上斜視が考えられる。全ての例にいえることは、眼が向く方向に過動、眼が向く反対方向に運動するということである。例えば、右眼上斜視のとき、右眼が上転するならば上直筋の過動もしくは上斜筋の運動が考えられる。また、左眼が下転するならば下直筋の過動もしくは下斜筋の運動が考えられる。左眼上斜視も同様である。

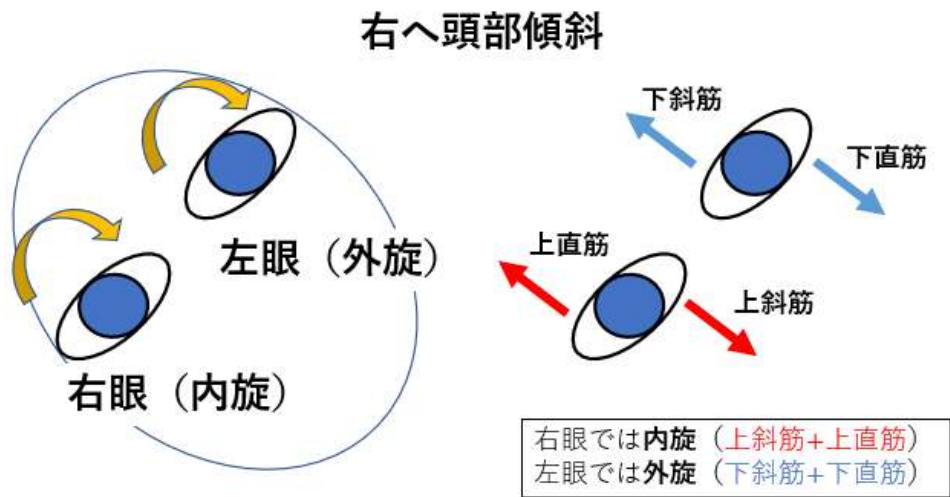


図 11 右へ頭部傾斜した例

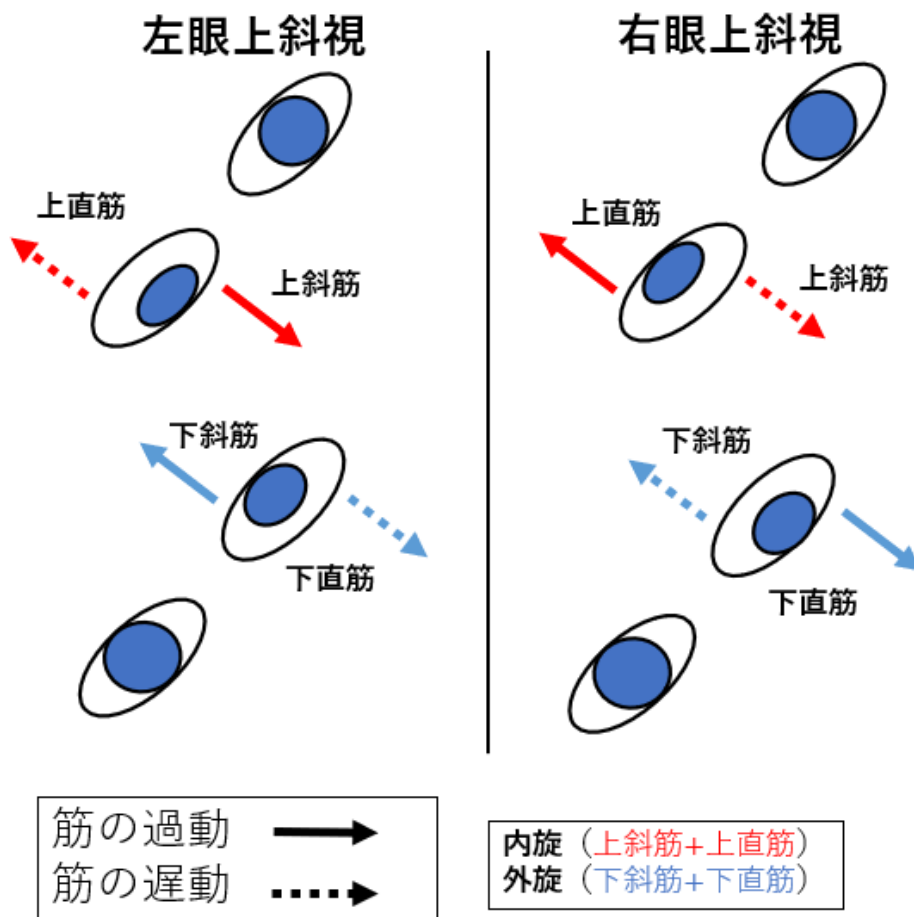


図 12 右へ頭部傾斜した際の異常例

2.3.4 Parks 3 step 法

Parks 3 step 法（以下、Parks と表記する）は、9 方向眼位と BHTT を組み合わせた検査法である。9 方向眼位での左右視時の上下ずれと BHTT の回旋筋の上下ずれを検査することで、上下方向斜視の原因となる両眼の上直筋、下直筋、下斜筋、上斜筋の 8 本中から 1 本の麻痺筋を特定できる。検査には正面視時（step1）、左右方向視時（step2）、正面に視線を合わせたまま頭部を左右に傾斜したとき（step3）の 3 つの眼の状態が必要である。

図 13 に Parks の異常筋の全パターン例を示す。まず、step1 でどちらの眼が上かで斜視を判断する。もし、右眼が上ならば右眼上斜視であり、R/L と表記する。R/L では右眼を下転する力が弱く、右眼の下直筋と上斜筋の麻痺が考えられる。このとき、正面を向くのは左眼であり右眼は正面より上転している状態である。右眼を正面へ向けたとき、ヘリングの法則により（片眼がとある方向へ向けば、もう片方も同じ方向に同じ移動量で向く）左眼は下転する。その場合は、左眼の上直筋と下斜筋の麻痺が考えられる（L/R でも同様のことがいえる）。よって、step1 では 4 つの筋に絞ることができる。次に、step1 と step2 で同様の傾向（R/L 同士または L/R 同士）で差が増大する方向、step1 と step3 で同様の傾向（R/L 同士または L/R 同士）で差が増大する方向に注目する。step2 の左右いずれかの方向で差が増大したとき、step1 と同様に上転した眼では下転方向の筋が、下転した眼では上転方向の筋が麻痺していると考えられる。ここで、step1 の結果と合わせると 2 つの筋に絞ることができる。step3 でも同様に左右いずれかの方向へ頭部を傾斜したとき差が増大すれば、上転した眼では下転方向の筋が、下転した眼では上転方向の筋が麻痺していると考えられる。最後に step3 で麻痺と思われる筋を step1、step2 の結果と照らし合わせ、全ての条件に当てはまった筋が麻痺筋である。



図 13 Parks の異常筋の全パターン ([14]より引用)

図 14 に実際の症例(左上斜筋麻痺)を示す。図 14 より、step1 では L/R、step2 では右方視時に L/R 傾向で差の増大、step3 では左方へ頭部傾斜時に L/R 傾向で差の増大が確認できる。図 15 に図 14 で Parks を用いた結果を示す。図 15 より、青枠は step1 で麻痺と思われる筋、緑枠は step2 で麻痺と思われる筋、黄色の枠は step3 で麻痺と思われる筋を表す。この例では全ての条件を満たすのは、左眼の上斜筋となる。

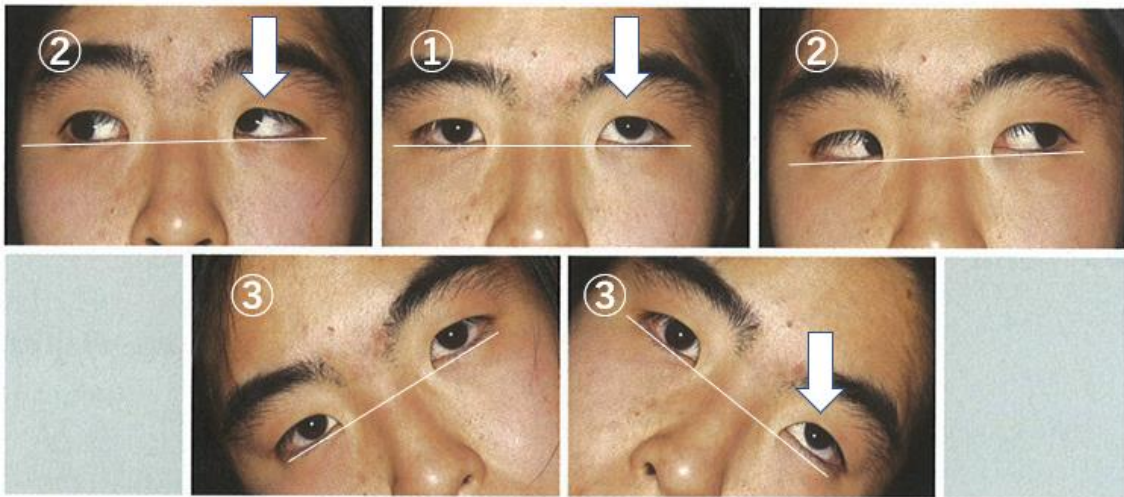


図 14 Parks での症例(左上斜筋麻痺) ([15]より引用)

1. 左目の上斜筋・下直筋、または右目の上直筋・下斜筋
2. 右目の上直筋・下直筋、または左目の上斜筋・下斜筋
3. 右目の下直筋・下斜筋、または左目の上直筋・上斜筋

↓

- ▶ 全ての条件が当てはまっているのは
- ▶ 左目の上斜筋

図 15 Parks を用いて麻痺筋を特定した結果

2.3.5 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[16]。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16)。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17)。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17A)。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17B)。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18)。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(Δ)という単位で表し、1mあたり1cmの偏角を与えるものを1 Δ という[17]。また、1 $\Delta=4/7$ (約0.57) 度で表される[9]。



図 16 Maddox 小桿による検査

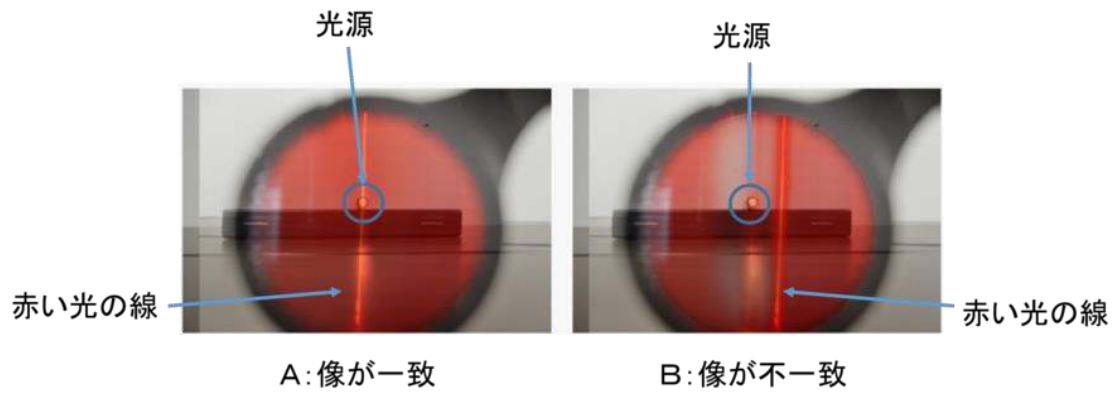


図 17 Maddox 小桿からみた光の見え方

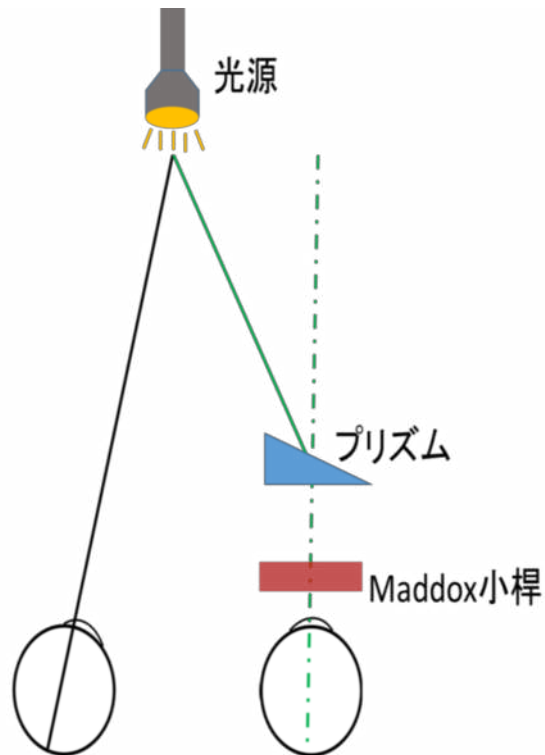


図 18 プリズムを用いた補正

第3章 Parks 3 step 法に基づく眼位異常検査システムの構成

本研究では、Parks 3 test 法に基づく眼位異常検査システムを作成した。以下に、システムの構成、VR 上での検査環境、取得したデータの処理手順について述べる。

3.1 システムの構成

作成したシステムのハードウェア構成を、図19 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。



図 19 システムの構成

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#

なお、取得するデータは、角膜の頂点の位置（眼の位置）とする。HMDより得られる視線の起点座標は、図20 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 軸である。

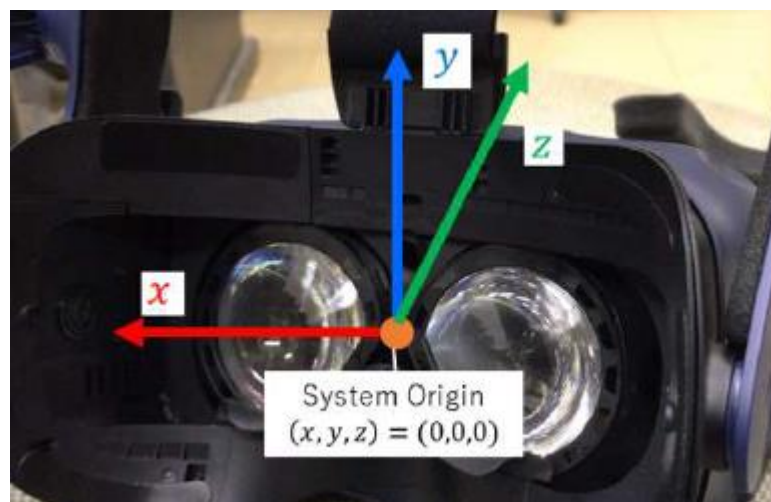


図 20 System Origin の位置と座標関係

3.2 仮想の検査環境の作成

本研究では、Parks に基づく眼位異常検査システムを仮想空間上に作成した。検査環境の作成には Unity[18]を用いた。Unity は、ゲームやツールを作る為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。

Unity を用いて 3 つの環境を作成した。(1)固視点の測定時、(2)正面と左右視時 (Parks の step1 と setp2)、(3)正面と左右へ頭部傾斜時 (Parks の step1 と setp3) の環境である。

検査は、(1)、(2)、(3)の順に行う。(1)では、視標を表示しながら、左眼の遮閉、右眼の遮閉を行った。これにより、被験者の正面の眼の位置 (固視点) を測定することができる。この検査は、HMD の傾きの上下ずれを後のデータ処理時に補正するために行う。(2)では、視標 (黒い球) を提示し、正面、右、正面、左に移動させる。同時にデータの取得を行う。(3)では、HMD の傾きを角度で表示させ、左右それぞれの傾斜時 30° 付近でデータを取得する。

以下に、検査環境について、(1)、(2)、(3)の順に述べる。

3.3.1 固視点の測定時

図 21 に固視点の測定時の検査画面を示す。検査環境は、文字、視標 (黒い球)、壁 (文字と視標を見やすくするため) からなる。視標として直径 20cm の黒い球を被験者から 10m の位置に配置した。HMD を装着すると両眼立体視できる状態で出力される。



図 21 固視点の測定時の検査画面

図 22 に固視点の測定時の見え方を示す。検査を実行すると、左眼遮閉（4 秒間）、右眼遮閉（4 秒間）を行い、同時に眼の位置のデータを取得する。片眼を遮閉することで、斜視の有無に関わらず、視標に必ず視線を向けさせることができる。取得したデータは CSV で出力できるようにした。

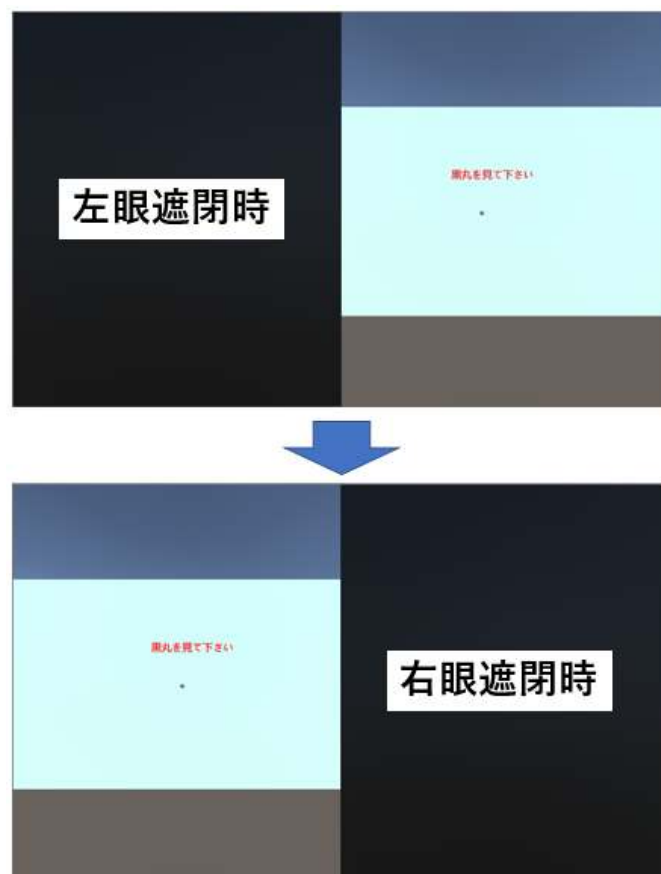


図 22 固視点の測定時の見え方

3.3.2 正面（step1）と左右視時（step2）

図 23 に視標と被験者の位置関係、図 24 に正面と左右視時の検査画面を示す。図 23 より、視標として直径 30cm の黒い球を、被験者から奥行き 10m の位置に配置した。A~D は視標の停止位置であり、A(正面)、B(右方視時)、C(正面)、D(左方視時)を表す。また、B と D は、視標が正面時にある時とのなす角度が 30° の位置である。図 23 と図 24 の A~D は

それぞれ対応している。視標の動きは、以下の7つのフェーズからなる。

- 1 Aで停止（約3秒間）
- 2 Bへ移動
- 3 Bで停止（約3秒間）
- 4 Cへ移動
- 5 Cで停止（約1秒間）
- 6 Dへ移動
- 7 Dで停止（約3秒間）

視標を動かすと同時に眼の位置のデータを取得する。また、上記のフェーズ毎にフラグを付けてデータを出力した。取得したデータはCSVで出力できるようにした。

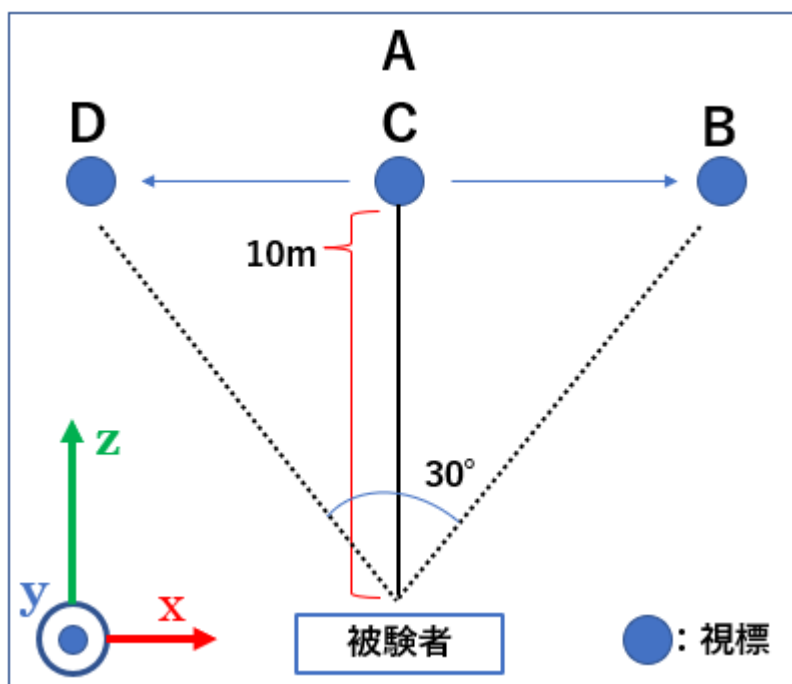


図 23 視標と被験者の位置関係（上から見た図）

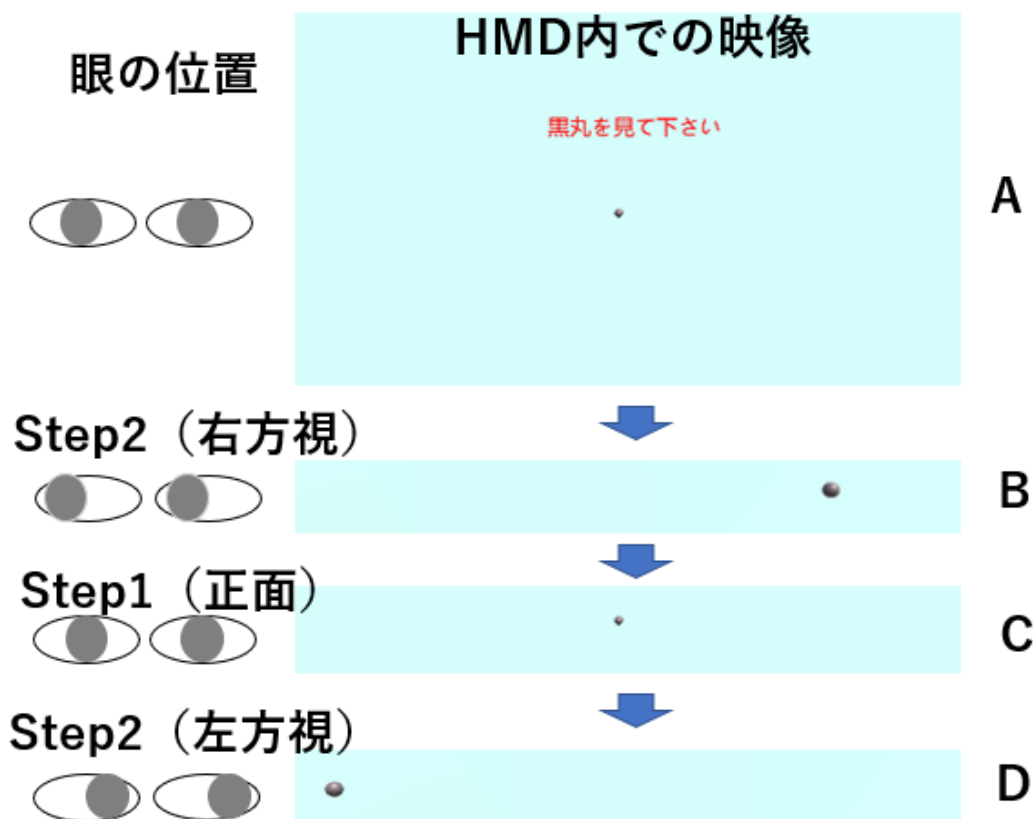


図 24 正面と左右視時の検査画面

3.3.3 正面 (step1) と左右へ頭部傾斜時 (step3)

図 25 に頭部傾斜時のイメージ図、図 26 に頭部傾斜時の検査画面例を示す。頭部傾斜時は、z 軸まわりの回転角度を仮想空間上に表示する (図 25 下段)。z 軸が 0° のとき黒字、右へ傾斜したとき赤字、左へ傾斜したとき青字で表示する。右へ傾斜したとき、 0° ~ の表示にするため、 360° から右へ傾斜した分の角度の差分をとり絶対値に変換している。検査時は、表示される傾きの角度を注視しながら、右 (図 25R)、正面 (図 25C)、左 (図 25L) へ頭部傾斜する。右 ($29^\circ \sim 31^\circ$ の範囲) は約 3 秒間停止、正面 ($0^\circ \pm 2^\circ$ の範囲) は約 1~2 秒間停止、左 ($29^\circ \sim 31^\circ$ の範囲) は約 3 秒間停止し、同時に眼の位置のデータを取得する。また、R、C、L それぞれの範囲内であるとき、フラグを変化させ、どのタイミングで傾斜したか分かるようにした。取得したデータは CSV で出力できるようにした。

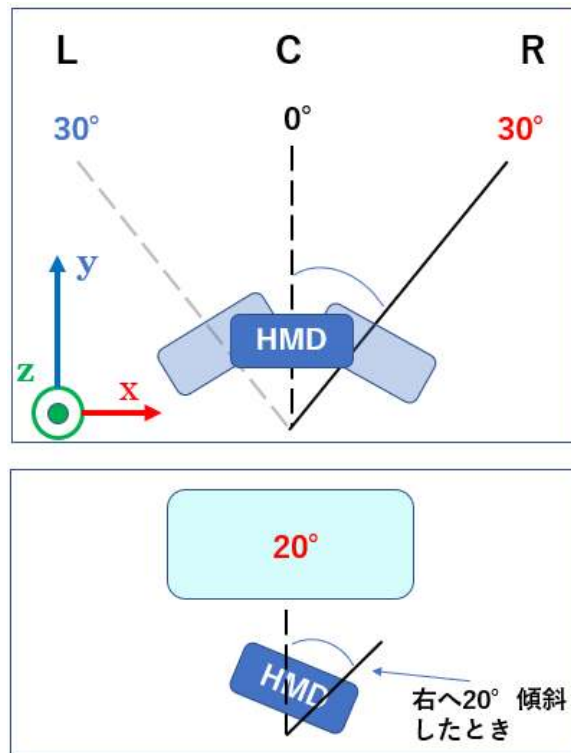


図 25 頭部傾斜時のイメージ図

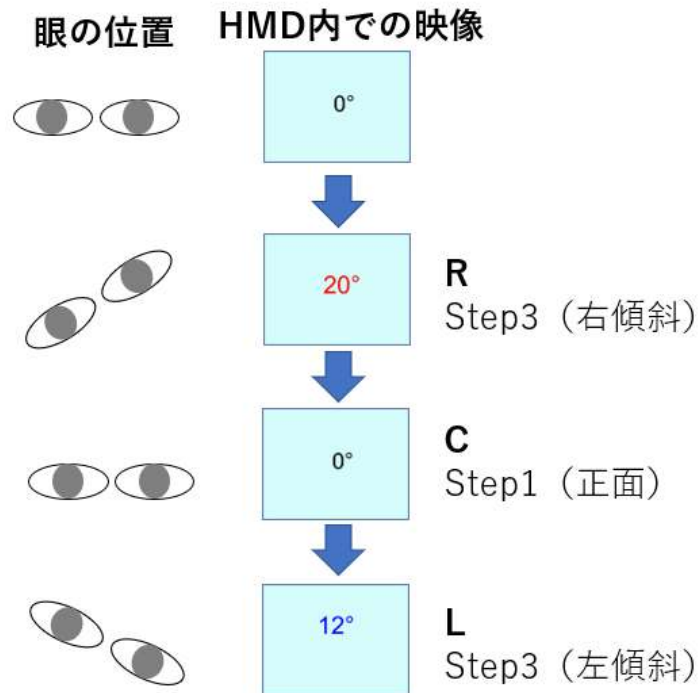


図 26 頭部傾斜時の検査画面例

3.3 取得データの処理手順

取得したデータを、以下の手順で処理する。この処理によって、眼の位置の定量化を行う。

1. 高さの補正值の算出
2. 正面 (step1) と左右視時 (step2) のデータ処理
3. 正面 (step1) と左右へ頭部傾斜時 (step3) のデータ処理

また、正面を step1、左右視時を step2、左右へ頭部傾斜時を step3 と以後表記する。

3.3.1 高さの補正值の算出

固視点は、視線を正面に固定したときの眼の位置である。本システムでは上下方向の斜視のみを扱うので、眼の位置の y 座標のみを利用する。HMD を装着したとき、必ずしも傾かずに装着できるとは限らない。HMD の装着時の傾きによって、上下のずれができてしまう。これでは元々の異常であるか、HMD の傾きであるか判断できない。例えば、図 27 の A では、眼位に異常がなく HMD が傾いている状態、B は傾かず装着できているが異常がある場合とする。A は異常がないにも関わらず、B より高低差が大きく発生している。データ処理時にこのような上下のずれを除外するため、両眼の固視点の高さの差を補正值とし両眼の高さを合わせる (図 28)。

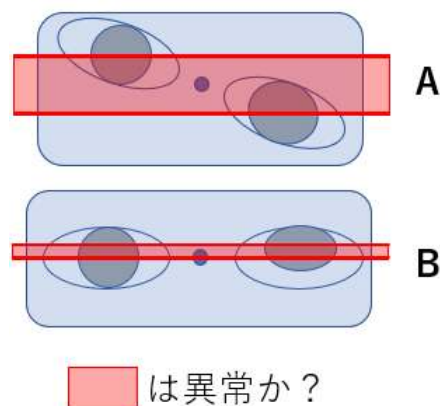


図 27 HMD による上下ずれの例

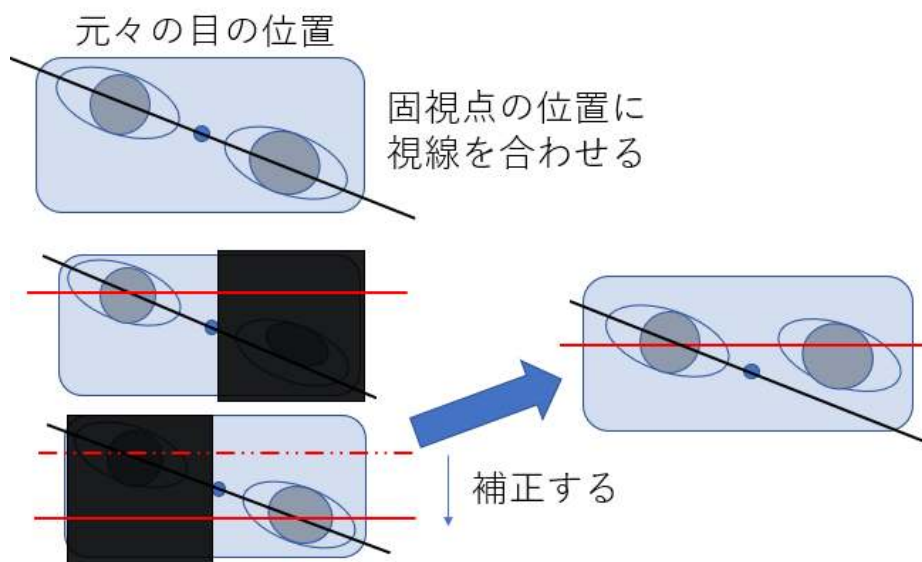


図 28 補正した例

出力した CSV から、固視点を決定し、補正值をもとめる。片眼遮蔽はそれぞれ 4 秒ずつ行っており、左眼遮蔽時は右眼、右眼遮蔽時は左眼のデータに注目する。片眼を遮蔽した時、開放されている方の眼は斜視の有無に関わらず、正面の視標の方を向く。そのため固視点の座標が得られている。注目したデータで、1 秒ごとに眼の位置の平均値と、標準偏差を算出する。標準偏差が最も小さい平均値をその被験者の固視点とする。また、右眼の固視点から左眼の固視点を引いた値を補正值とする。

3.3.2 正面（step1）と左右視時（step2）のデータ処理

step1 と step2 のデータ処理について述べる。この処理では、得られた眼の位置のデータから Parks の step1 と step2 に相当する範囲での眼の位置を定量化する。出力した CSV から眼の位置をグラフ化したものを図 29 に示す。はじめに 3.3.1 節で求めた補正値を右眼の眼の位置から引いて、両眼の高さを揃える。次に、指定したフラグごとに範囲を区切った。図 29 の数字は、3.2.2 節の各フェーズ番号と対応している。



図 29 step1 と step2 でフラグ毎に範囲を指定した例

使用するデータはフェーズ 3（step2 の右方視）、フェーズ 5（step1）、フェーズ 7（step2 の左方視）とした。それぞれのフェーズにおいて、眼の位置の平均値を、右眼と左眼で求めた。この際、視線がなるべく安定する部分を使用するため、各フェーズの先頭と末尾 50 フレームを除外した。次に、それぞれの範囲で、右眼の平均値から左眼の平均値を減算し、結果が正か負かで上斜視の眼を決定した。ここで、値が正ならば、右眼上斜視とした。

3.3.3 正面（step1）と左右へ頭部傾斜時（step3）のデータ処理

step1 と step3 のデータ処理について述べる。この処理では、得られた眼の位置のデータから Parks の step1 と step3 に相当する範囲での眼の位置を定量化する。3.3.2 節と同様にデータをグラフ化したものを図 30 に示す。はじめに 3.3.1 節で求めた補正値を右眼の眼の位置から引いて、両眼の高さを揃える。次に、指定したフラグごとに範囲を区切った。頭部傾斜のデータの範囲は、R（右傾斜）、C（正面）、L（左傾斜）とする。

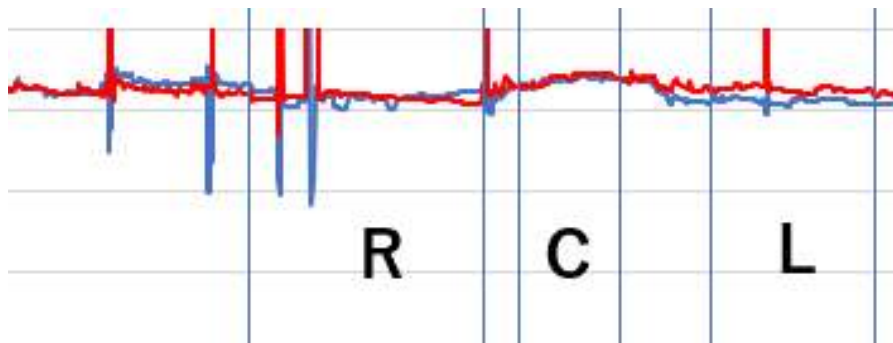


図 30 step1 と step3 でフラグ毎に範囲を指定した例

R、C、L について、眼の位置の平均値を、右眼と左眼で求めた。この際、3.3.2 節と同様に R、C、L の区間内の先頭と末尾 50 フレームを除外した。次に、それぞれの範囲で、右眼の平均値から左眼の平均値を減算し、結果が正か負かで上斜視の眼を決定した。ここで、値が正ならば、右眼上斜視とした。

第4章 実験

4.1 実験目的

本実験の目的は、作成した眼位異常検査システムで眼の位置データを取得し、Parksの各stepで眼の位置を定量化することである。検証実験では、システムによる検査で得られた眼の位置のデータを処理し、その結果とMaddox 小桿を用いた定量的眼位検査(以後、Maddox検査と表記)を比較した。さらに、Maddox検査で 0.5Δ 以上の値が出た被験者に対して、Parksの手法を適用し、どこまで異常筋を推測できるかを考察した。

4.2 実験方法

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12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、使用する機器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 検査を行い、得られた全偏位量の傾向（どちらが上斜視か、全偏位量が増大するのは各stepでどの方向か）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) Parksに基づいたシステムによる 眼位検査

次に、提案システムで Parks 3 step 検査を行い、眼の位置のデータを取得した。

提案システムで得られた結果を、処理手順に則り定量化した。その結果を、Maddox 検査で得られた値と比較した。

4.3 実験結果と考察

4.3.1 定量化結果

12 人の被験者で、作成したシステムの各フェーズと、Maddox 検査での各フェーズでの結果を表 1 にまとめる。単位は全てプリズム (△) である。

システムの各フェーズは以下とする。

- 3 (右方視)
- 5 (正面 (左右方視))
- 7 (左方視)
- R (右傾斜)
- C (正面 (傾斜時))
- L (左傾斜)

Maddox 検査の各フェーズは以下とする。

- I (正面)
- II (右方視)
- III (左方視)
- IV (右傾斜)
- V (左傾斜)

表 1 システムと Maddox による定量化

被験者	作成したシステム (変更後)						Maddox 検査				
	3(右方視)	5(正面)	7(左方視)	R(右傾斜)	C(正面)	L(左傾斜)	I(正面)	II(右方視)	III(左方視)	IV(右傾斜)	V(左傾斜)
D	0.48	2.02	3.08	2.57	1.27	0.13	0	0	0	0	0
Z	7.26	3.2	8.55	6.68	6.76	3.96	0	0	0	0	0
X	2.45	0.07	-6.94	-11.79	-5.51	-0.06	0	0	0	0	0
U	3.2	2.18	1.06	6.21	2.3	0.81	0	0	0	0	0
C	-0.23	-2.67	-4.39	-5.35	-1.92	4.04	0	0	0	0	0
S	3.54	4.53	-2.89	-1.47	2.84	6.69	0	0	0	0	0
R	1.2	1.42	4.9	-7.08	-1.78	7.47	0	0	0	0	0
Q	0.32	-6.36	2.02	3.14	0.54	3.01	0	0	0	0	0
F	2.8	1.57	1.15	1.87	1.14	2.04	0	0	0	0	0
AA	3.12	0.2	-3.77	-4.55	1.24	6.75	0	0	1L/R	1L/R	1R/L
E	-0.84	-2.9	-4.77	-4.66	-4.28	-0.95	0.5R/L	1L/R	0.5R/L	1R/L	0
V	0.75	1.85	4.79	0.71	3.51	4.39	1R/L	0	1R/L	0-1R/L	2L/R

表 1 より、作成したシステムでの正の値は R/L (右眼上斜視) を表し、負の値は L/R を表す。黄色で示す部分は、 0.5Δ 以上の異常がある場合を示す。Maddox 検査時の値と比べて、システムでは全体的に大きな値が出ている結果となり、垂直差での Maddox 検査との一致は確認できなかった。

図 31 と図 32 に被験者 X の各フェーズでの平均値を示す。赤いグラフは右眼、青いグラフは左眼、緑の横線は両眼の各フェーズにおける平均値を表す。図 31 より、フェーズ 5、3、7 の順に垂直差が出ており、表 1 と差が増大する傾向の一致が見られる。図 32 より、フェーズ L、C、R の順に垂直差が出ており、表 1 と差が増大する傾向の一致が見られる。また、図 31 と図 32 より、各フェーズ区間で平均値がグラフと重なっていることから、データ処理は正しく行えているとわかる。

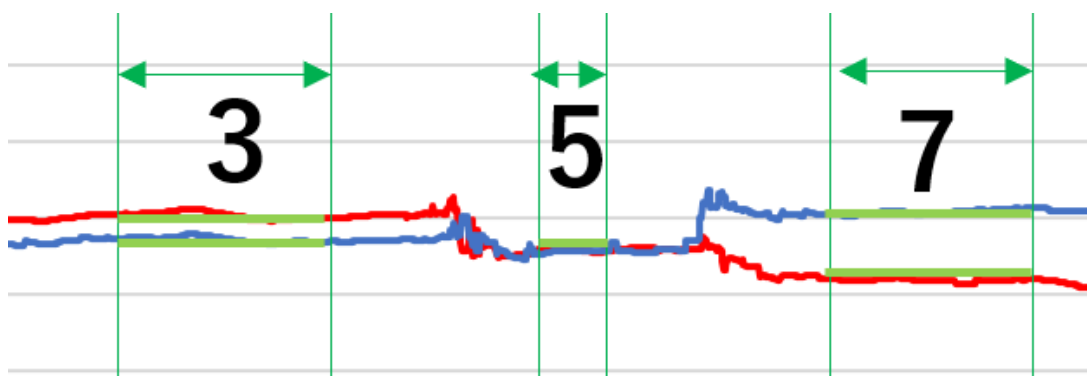


図 31 各フェーズ間での平均値 (被験者 X (step1 と step2))

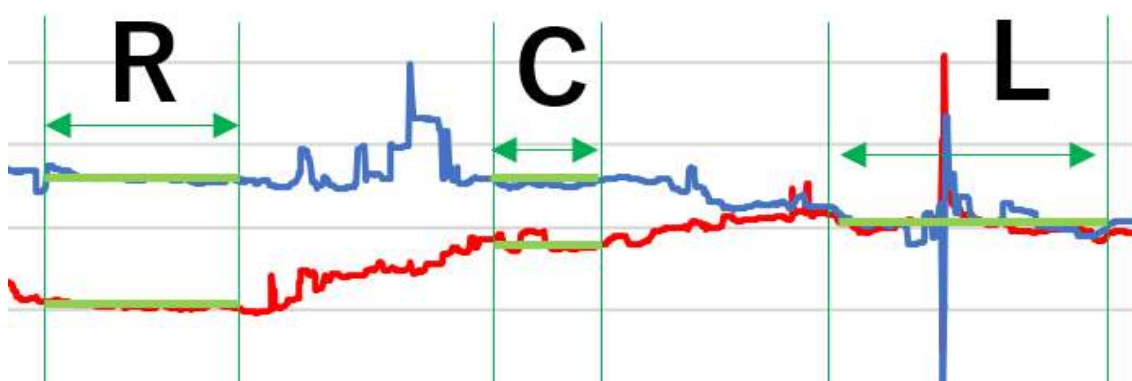


図 32 各フェーズ間での平均値 (被験者 X (step1 と step3))

図 33 に被験者 C のフェーズ 5 のグラフを示す。眼の位置データが大きく変動している。他の被験者でも、このような傾向がみられた。また、表 1 において、フェーズ 5 と C で眼の位置は同じ正面であるにも関わらず、異なる値が得られている。フェーズ 5 や C では、

視標の停止が 1 秒と短いため、視線が安定する前に視標が動いていることが考えられる。よって、視標の停止時間を延ばすなど、視線を安定して取得できるようなシステムの変更が必要と思われる。

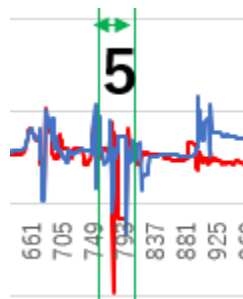


図 33 フェーズ 5 のグラフ

図 34 に被験者 Z の固視点の測定時のグラフを示す。右眼のグラフに注目すると、右眼遮閉時に高さが変化していることが確認できる。正常であれば高さは変化しないはずなので、システム上では Maddox 検査で検出できない異常（斜視・斜位）や軽微な動きを捉えていると推測できる。Maddox 検査は必ずしも異常を検出できるとは限らないと考えられる。

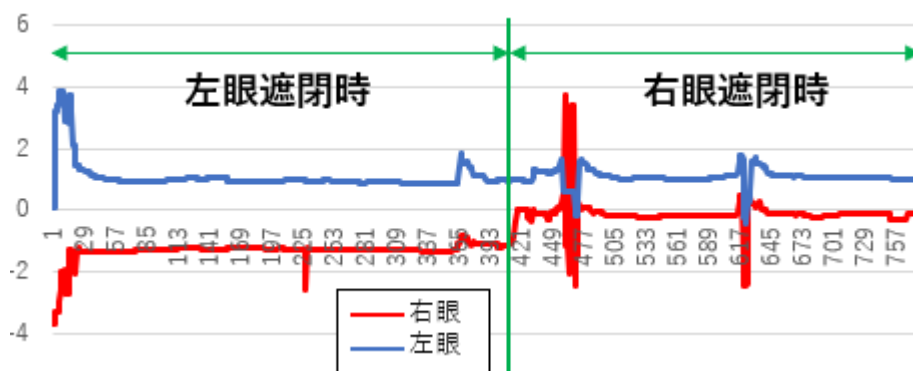


図 34 被験者 Z の固視点の測定時

4.3.2 Maddox 検査で値が出た被験者

Maddox 検査で 0.5Δ 以上の値が出た被験者は、12 人中 3 人であった。この 3 人の被験者で、Parks の手法を適用し、異常筋がどこまで推測できるか考察する。なお、外眼筋を以下の通りに略記する。

- 上斜筋：SO
- 下斜筋：IO
- 上直筋：SR
- 下直筋：IR

以下に、被験者 AA、E、V（Maddox 検査で上下偏位があった被験者）について述べる。表 2 は、システムで得られた眼の位置データから異常筋を推測した結果を示す。異常筋の推測について、垂直差の増減の傾向から考察を行った。表中の符号と大の表記は、正面時の値と比較して同じ符号同士かつ差が増大する方向に表記する。また、+は右眼上斜視、-は左眼上斜視とする。AA については、step1 での眼の位置が 0.2Δ であり、測定誤差を考慮して、正面において+の場合と-の場合を併記した。表中の筋は、符号と増大の方向から、運動と推測される筋の一覧を示す。step を経るにつれて絞り込むものとする。表 2 より、ほぼ一つの筋に絞り込むことができた。

表 2 提案システムでの眼の位置データから推測される異常筋

作成したシステム						
被験者	step1	step2		step3		異常と思われる筋
	正面	右方視	左方視	右傾斜	左傾斜	
AA	+	大/+	-	-	大/+	運動筋:右眼のIR もしくは 運動筋:左眼のIR
	右眼:IR,SO運動 左眼:IO,SR運動	右眼:IR運動 左眼:IO運動			右眼:IR運動	
	-	-	大/-	大/-	-	
	右眼:SR,IO運動 左眼:IR,SO運動		右眼:IO運動 左眼:IR運動	左眼:IR運動		
E	-	-	大/-	大/-	-	運動筋:左眼のIR
	右眼:SR,IO運動 左眼:IR,SO運動		右眼:IO運動 左眼:IR運動	左眼:IR運動		
V	+	+	大/+	+	大/+	運動筋:左眼のSR
	右眼:IR,SO運動 左眼:IO,SR運動		右眼:SO運動 左眼:SR運動		左眼:SR運動	

表3は、Maddox 検査で得られた結果から推測した異常筋の一覧を示す。表2と同様に異常筋の推測は、垂直差の増減の傾向から考察を行った。表中の異常と思われる筋で、複数の結果がある場合は、その中のいずれかが異常筋であることを示す。眼科の検査技師の方の所見から、今回の実験では筋の麻痺が認められる被験者はいなかった。よって、従来の Parks のように必ずしも一つの筋に絞り込めた訳ではなかったが、おおまかな異常筋の予測をつけることができた。

表 3 Maddox 検査の結果から推測される異常筋

Maddox検査						
	step1	step2		step3		異常と思われる筋
	正面	右方視	左方視	右傾斜	左傾斜	
AA	0	0	大/-	大/-	大/+	運動筋:右眼のIO,SO 運動筋:左眼のIR,SR のいずれか
			右眼:IO,SO運動 左眼:IR,SR運動	右眼:SO運動 左眼:IR運動	右眼:IO運動 左眼:SR運動	
E	+	-	大/+	大/+	0	運動筋:右眼のSO
	右眼:IR,SO運動 左眼:IO,SR運動		右眼:SO運動 左眼:SR運動	右眼:SO運動		
V	+	0	大/+	+	-	運動筋:右眼のSO 運動筋:左眼のSR のいずれか
	右眼:IR,SO運動 左眼:IO,SR運動		右眼:SO運動 左眼:SR運動			

表2、表3より、被験者AAとVでは、推測を行った結果で一部の一致が見られた。しかし、被験者Eについては、提案システムではstep2、3で-方向に増大する傾向が見られたのに対して、Maddox 検査では+方向に増大する逆の傾向が見られた。この原因については、今後の課題として検討する必要がある。

第5章 まとめ

本研究では、外眼筋から麻痺筋を特定する Parks 3 step 法に基づいて、仮想空間上に検査環境を作成し、実験で眼の位置のデータを取得した。取得した眼の位置データを、各 step のフェーズごとに定量化し、Maddox 検査の結果と比較した。最後に Maddox 検査で 0.5Δ 以上の値が出た被験者に対し、Parks を適用して異常筋の推測を行った。

実験結果では、作成したシステムとの比較では垂直差が大きく出た結果となり、全偏位量の一致は見られなかった。一方で、測定結果のグラフを確認すると、明らかに測定値の変化があり、提案システムが測定結果を正しく定量化できていた。また、得られた結果から異常筋の推測を行い、上下偏位を確認された被験者の 3 人のうち 2 人は推測した異常筋の一致を確認できた。しかし、被験者の 1 人は推測した異常筋の一致が見られなかったことから、更なるシステムの改善を重ねる必要がある。今後の課題として、3 つ挙げられる。

1 つ目は、Maddox 検査の結果との一致である。実験結果より、システム上で Maddox 検査では検出できていない眼の動きが見られた。よって、Maddox 検査での誤差の範囲を検討する必要がある。

2 つ目は、正面時の視線の測定である。取得したデータから、左右視時の正面時はデータの変動が大きかった。よって、視標の停止時間を延長させるか、眼の位置を一度リセットさせるような改善が必要と思われる。

3 つ目は、異常筋が複数ある場合である。本研究で用いた Parks 3 step 法は外眼筋 8 本のうちから 1 本の異常筋を特定する手法である。もし、異常筋が複数ある場合は Parks のみでは特定はできない。他の検査手法との組み合わせを考える必要がある。

システムを改善するにあたり、以上の点を考慮する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のお力添えを頂きました。主指導教員である棕木雅之教授に心より感謝申し上げます。ご多忙の中、研究や論文の執筆等多くのご指導頂きました。色々な形でご迷惑をおかけしましたが、そんな中でも貴重なお時間割いて頂き、ご指導下さり誠にありがとうございました。実験機材や眼科医療に関する様々なご指導を下さった内田憲之先生に感謝申し上げます。先生と同じ研究グループとして所属し、検査法や眼の動きに関するご指導を頂いたことで、医療分野に関わるという貴重な体験をすることができました。何かと至らない私の為に研究のご指南や色々なところで動いて下さり、ミーティング等でいつもお言葉を添えて下さった高塚佳代子先生、お仕事でお忙しい中、システムの相談に乗って下さった池田拓矢先輩、実験時ともに協力して下さった長友耀希さんに感謝申し上げます。精神的に不安定な際にいつも助けて下さった安全衛生保健センターの本佳子先生、武田龍一郎先生、楠元和美先生、辛島育代先生、最後までご迷惑お掛けしましたが本当にありがとうございました。研究の為に実験にご協力くださった方々、宮崎大学に来たことで関わらせて頂いた皆様にこの場をお借りして感謝を述べさせていただきます。

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] 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] 池田拓矢, “ 視線追跡機能付き HMD を用いた眼位異常検査, ”, 令和 2 年度 宮崎大学大学院工学研究科修士学位論文 2021.
- [5] 丸尾敏夫, 粟屋忍, 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, 粟屋忍, “斜視総論斜視の定義”, 視能矯正学第2 版, pp.203, 2008.
- [7] イワタメガネプリズム加工 http://iwatamegane.com/?page_id=41517, (最終閲覧日 2022/01/19)
- [8] 視力ケアセンター <https://www.shiryoku15.jp/strabismus> (最終閲覧日 2022/01/19)
- [9] 内海隆, “ 斜視の検査法, ” あたらしい眼科 19(12), pp.1553-1556, 2002.
- [10] 医療法人 社団同潤会 眼科杉田病院 <https://www.sugita.or.jp/operation/squint.html> (最終閲覧日 2022/01/19)
- [11] 眼球運動 https://plaza.umin.ac.jp/jikei-np/symptoms/01_01_13.html (最終閲覧日 2022/01/18)
- [12] 眼科医ぐちょぼいのオンライン勉強会 眼球運動の診かた、考えかた <https://guchopoi.com/eyemovement/> (最終閲覧日 2022/01/19)
- [13] 公益社団法人 日本視能訓練士協会, “視能学エキスパート 視能訓練学”, 医学書院, 2018.

[14] 外 眼 筋 の は た ら き https://www.osaka-med.ac.jp/deps/opt/oldweb/staffonly/pdf/shiken_04.pdf (最終閲覧日 2022/01/20)

[15] 丸尾敏夫, “視能学第2版”, 文光堂, pp.348, 2011.

[16] 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/>, (最終閲覧日2022/01/21).

[17] 日本弱視斜視学会斜視 斜視 <https://www.jasa-web.jp/general/medical-list>, (最終閲覧日2022/01/21).

[18] Unity <https://unity.com/ja> (最終閲覧日 2022/01/23).