

# 眼球運動計測による人の視覚情報処理機構の研究

指導 山田 光穂 教授

東海大学総合理工学研究科  
総合理工学専攻

望月 信哉

# 目次

第1章 序論 .....	4
1.1 背景 .....	4
1.2 研究の目的 .....	11
1.3 本論文の構成 .....	12
1.4 参考文献 .....	13
第2章 立体視からオクルージョンの研究[1] .....	16
2.1 諸言 .....	16
2.2 実験方法 .....	18
2.3 実験結果と考察 .....	20
2.5 結言 .....	26
2.6 参考文献 .....	27
第3章 立体視からステレオアノマリーの研究[1] .....	30
3.1 諸言 .....	30
3.2 実験方法 1 .....	31
3.3 実験結果 1 .....	33
3.4 実験方法 2 .....	34
3.5 実験結果 2 .....	37
3.6 考察 .....	41
3.7 結言 .....	50
3.8 参考文献 .....	50
第4章 超高精細映像を近距離広視野で視聴した時の頭部眼球運動の分析[1] .....	53
4.1 諸言 .....	53
4.2 実験方法 .....	54
4.3 実験結果 .....	58
4.4. 考察 .....	63
4.5. 結言 .....	64
4.6 参考文献 .....	65
第5章 頭部測定からスポーツへの応用研究[1] .....	68
5.1 諸言 .....	68
5.2 実験方法 .....	68
5.3 実験結果 .....	70
5.4 考察 .....	74
5.5 結言 .....	74
5.6 参考文献 .....	75

第 6 章 結論.....	77
謝辞.....	80
研究業績 .....	81
論文.....	81
国際会議.....	81
研究会 .....	83
大会 .....	85
表彰.....	86

## 第1章 序論

### 1.1 背景

視覚の研究は古く古代ギリシャ時代のプラトン、ピタゴラス、エンペドクレスらから始まる。彼らは「我々の目から光のようなものが放たれてその光が再び目に戻るため、物が見えるようになる」という外送理論を唱えた。これに対して、デモクリトスらは「我々が物を見ることが出来るのは、対象からはがれた膜のようなものが目に入るからだ」という内送理論を唱えた[1]。のちにアラビアの物理学者アルハーゼンはなぜ物が見えるのかについて理論を発表し、さらにケプラーにより網膜像が発見された。17世紀に入りニュートンは白色光がスペクトルの混合色であることをプリズムを用いて初めて発見した。視覚の科学は19世紀に入り、ヤング、ヘリング、ヘルムホルツの登場により飛躍的に発展した。

図1は、視覚研究の分野について簡単に説明したもので、青は従来研究の流れ、赤は本研究の特徴を示す。視覚研究は大きく分けて眼球や視線の計測とそれらを用いた視覚心理研究に分けられる。眼球・視線計測の経路では、更に眼球運動と頭部運動にわかれる。眼球運動と一言で表してもその種類・計測法は多彩で、虹彩の中の平滑筋を動かし網膜に入る光の量を調節する虹彩運動や網様体筋によるピント調節の調節運動の計測、眼球のわずかな微動である固視微動や眼球の移動を計測する随従運動、跳躍運動、寄り目や離れ目といった奥行きを認識する輻輳開散運動の計測などが挙げられる。また、頭部運動は視線計測をするうえで重要な要素であり、視線は頭部運動と眼球運動の和であることは広く知られている。頭部運動の測定には三次元上の頭部の位置を取得する必要がある、この取得法として磁気センサを用いて位置を計測する方法や、超音波による距離計測を用いて三次元上の位置を測定する方法、ステレオカメラを用いて人間の目と同様の原理で対象の位置を計測する方法などが挙げられる。上述した頭部運動と眼球運動を同時に計測することで、頭部眼球協調運動を計測することができるようになる。計測機器には非接触型・接触型がある。これを踏まえて本論文では高比良らが開発した頭部運動と眼球運動を同時に計測する接触型装置[2]を改良し、それを装着させ実験を行った(目的3)。

視覚心理研究では上述した虹彩運動、固視微動、随従運動などを用いて、視対象の明るさ、色、動きなどの研究が行われている。これらは脳内の腹側視覚経路で処理される知覚と呼ばれる分野で様々な感覚の知覚に関わっている。また眼球がどこを見ているのかの研究である注視点の研究も行われてきた。視対象の研究は二次元を対象とした研究からピント調節や両眼視差、運動視差等を用いた三次元・立体視の研究へ技術や機器の発展と共に変化した。その中でも本論文では立体視におけるオクルージョン知覚(後述)を使い輝度・色度問題について研究を行った(目的1)。また、輻輳開散運動を用いた視対象のなめらかな奥行き移動において、ステレオアノマリー(後述)についての研究を行った(目的2)。同時に上述した視線における眼球運動と頭部運動の組み合わせではそれらの協調の究明が課題であり、これを解明することも本論文の着眼点である。これらについて、本論

文では、従来十分な検討の行われてこなかった近距離広視野視聴の頭部運動の実験的解明（目的 3）、スポーツ中の頭部眼球協調の実験的解明（目的 4）について検討を行おうとするものである。

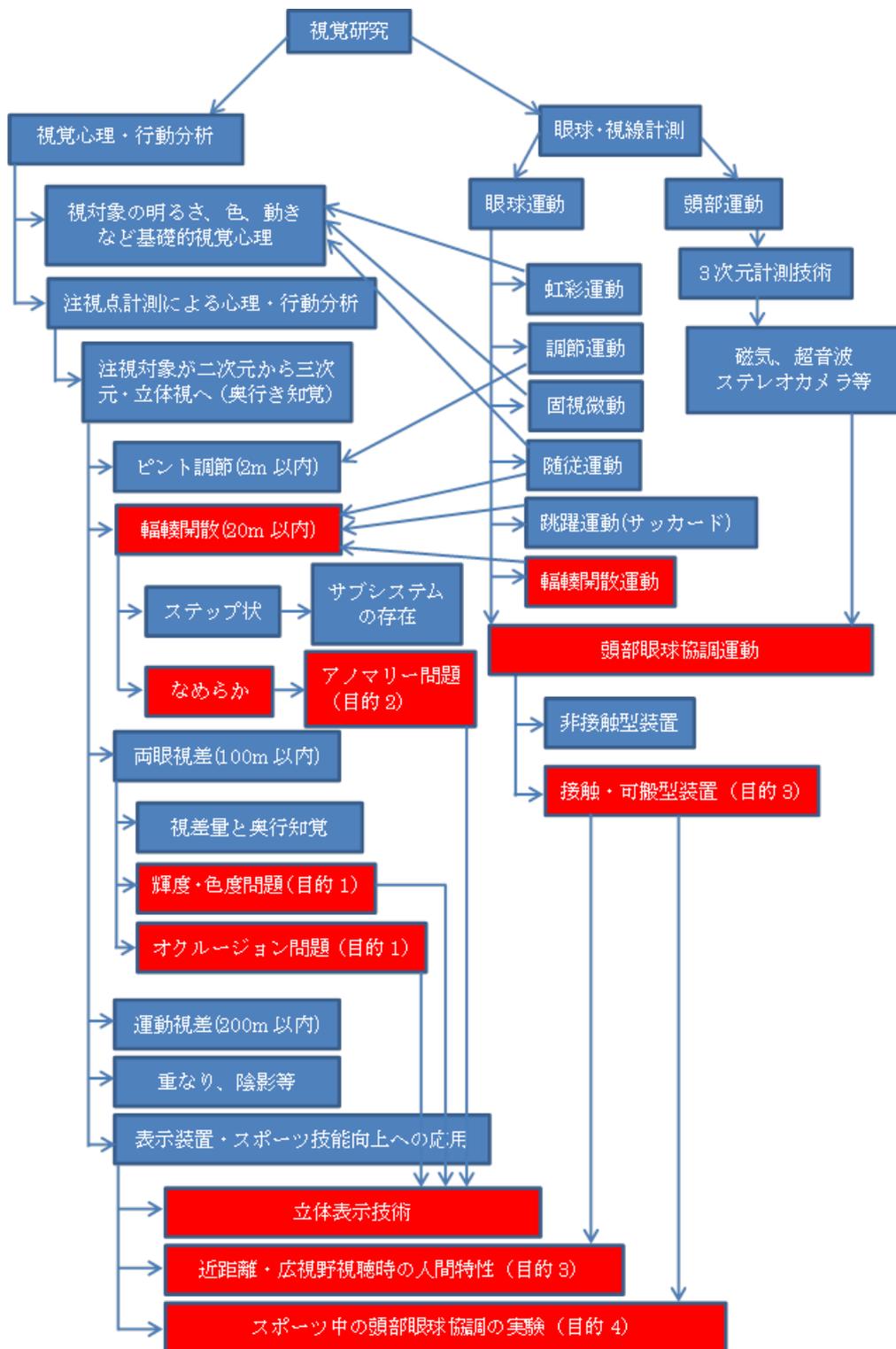


図 1：視覚研究の分類

本論文では、上述した視覚研究における 4 つの話題、すなわち立体視に関わるオクルージョンとステレオアノマリー、頭部眼球協調に関わる 4K 画像視聴時の頭部の向き、スポーツにおける頭部運動の役割について述べる。

そこで、立体視に関わる研究、その中でオクルージョンとステレオアノマリーの研究をなぜ行ったのか。その研究背景と課題、本研究の目的について述べる。

視線を用いて中心窩に結像した映像は視神経を通り脳後頭部の視床部の外側膝状体 (LGN) に入力される。その後、一次視覚野 (V1) へ伝達し、V1 で処理された情報は二次視覚野 (V2), 四次視覚野 (V4) を経て下部側皮質に伝えられる。これらの部位で、明るさ、色、動きなどから奥行き知覚まで処理が行われる。特にこの奥行き知覚は我々が動物から進化する過程で最後に変化した感覚機構である。側面にあった眼球が正面へと移動することにより両眼の網膜像に共通の像が写るエリアが増加する。そのため立体視の処理機構は脳の一か所だけでなくサブシステムと呼ばれる様々な部位で処理されていると言われており、まだ深く解明されてはいない。奥行き知覚は両眼でも単眼だけでも生じる。両眼では両眼の網膜像のずれを示す両眼視差、両眼の反対方向の眼球運動である輻輳開散運動により生じる。単眼ではピント調節、運動視差、像の重なり、オクルージョン (後述)、空気透視などによって生じる。立体視に関する研究は 3D 映像の普及を目指し、多くの研究が行われている。江本らは立体画像視聴時の疲労の要因のひとつとして考えられている輻輳眼球運動と調節応答の不一致が視覚疲労にどう関係するかを調べ、不一致量が大きいほど視覚疲労が引き起こされることを明らかにした[3]。窪田らは 3D テレビを視聴させ、視聴者に主観的な疲労を測定し、3D 映像の方が 2D 映像よりも有意に疲労することを明らかにした[4]。また、Richards は視機能に異常がない被験者でも輻輳方向、開散方向の奥行き知覚に立体視不調 (ステレオアノマリー) が見られると報告した[5]。また当研究室でも奥行き知覚を用いた立体視の実験を行ってきた。先行研究では奥行き方向に移動する視対象を注視させ、輻輳眼球運動、調節応答を測定し、表示媒体とフォントスタイルとサイズによって調節応答の変化が異なることを示した[6]。

ここで、本論文と密接にかかわる両眼視差について詳細に説明する。両眼視差は左目網膜像と右目網膜像に含まれる共通の網膜像の水平方向のずれのことである。このずれを抽出する手法として、網膜像の輝度成分の一致を検出する方法と色度成分の一致を検出する方法という脳内で二つのストラテジーの存在が考えられる。両眼視差は「オクルージョン」が生じると検出できない。オクルージョンは大きく分けて 3 種類が存在し、1.物体自身が自身の面を隠す現象、2.複数の物体が存在していて手前の物体が奥の物体を隠す現象、3.物体自身が曲面であるため、物体自身が自身の面を隠す現象である。工藤らは、両眼立体視は 3 次元空間内で物体を認知する重要な機構であるとしたうえで、両眼視差を妨げるオクルージョンが生じている時に脳内でどのような処理が行われているか眼球運動を用いて分析した。彼らは 3 番目の物体自身が曲面であるため、物体自身が自身の面を隠す現象 (リムオクルージョン) に着目し実験した。その結果、視対象のテクスチャーの有無によって円柱

のリムを注視した場合の注視点の位置が異なることを明らかにした[7]。工藤らの実験は円柱に実物体を用いているため円柱に貼るテクスチャー画像をリアルタイムで変更できない。そこで、本研究室では工藤らの結果をもとに 3DCG によりオクルージョンが再現できるか実験を行い、テクスチャーの有無によって左右網膜像に矛盾を感じ、オクルージョンを回避する工藤らと同様の結果が得られた[8,9]。工藤らの実験は、円柱にモノクロのテクスチャーを貼っており、主に輝度成分が左右網膜像の一致検出に関わっているかどうかについて分析していると考えられるが、等色度としているわけではなく、厳密には輝度成分と色度成分を区別はしていない。したがってこれらの成分それぞれが網膜像の一致、不一致検出にどのように関わっているのか明らかではない。すなわち、これが本論文の第 1 の課題である。そしてオクルージョンの検出には左右網膜像の一致検出が必要であるが、この一致検出を色度成分が担っているかどうかを明らかにすることが本論文の目的である。(目的 1) そこで、等輝度のテクスチャー画像を生成し、3DCG で作成した円筒画面にマッピングし、そのリム部を被験者に注視させることにより、工藤らの論文では触れられていない色度成分が網膜像の一致、不一致の検出に関わっているかどうかについて明らかにする。先に述べたように網膜に入った情報は視神経を経て外側膝状体 (LGN) に投影されるが、外側膝状体は大細胞 (Magnocellular cells)・小細胞 (Parvocellular cells)・顆粒細胞 (Koniocellular cells) の 3 種類の細胞からなる層構造で左右に異なる層を持つ。輝度情報や色度情報などそれぞれの情報は対応した細胞でのみ知覚されるとされ[10]、時間分解能が高く運動や両眼視差は大細胞が、空間解像度が高く色覚は小細胞が処理するとされている。しかし、最近の学説で大細胞を切除した場合でも立体視可能であり色覚が立体視において重要な役割を持つこと[11,12]が明らかになった。すなわち、本論文では、色覚を処理している外側膝状体の小細胞が左右網膜像の一致検出をしているか否かについて新たな知見を提供することができる。

さらに本論文では上述したオクルージョンの研究から立体視のサブシステムの研究に発展する。オクルージョンによる網膜像の一致を避けるために輻輳開散運動という両眼の眼球運動が生じるが、先に述べたように、ステレオアノマリーが存在し、輻輳開散運動の制御システムには様々なサブシステムが存在することが知られている[13-15]。両眼視差を再現した 3D 画像を用いて 3 件法により調べた結果、奥行き知覚には手前だけが分からない人、奥方向だけが分からない人、同一平面上が分からない人がいることが知られている[16]。輻輳開散運動について、手前方向の輻輳運動だけができない人、奥方向の開散運動だけができない人がいることが示されている[5,17,18]。さらに複雑なのは、手前方向が分からない人が必ずしも輻輳運動ができないわけではないということである[19]。すなわち輻輳運動ができるのに手前であることが分からない人が存在する。これらは立体視のサブシステムがこれだけ多く存在することを示唆している。しかし、従来の研究はステップ状に移動する視差に対する輻輳開散眼球運動を調べたものであり、滑らかに視差が移動する条件については明らかではなかった。これが本論文の第 2 の課題である。そこで、本論文では視差が

滑らかに移動する際の輻輳開散眼球運動に対してもステレオアノマリーが生じるかを明らかにすることを目的とする。(目的 2) そこで、新たに開発した輻輳開散運動と調節応答の測定装置を用いて行った実験結果を述べる。3D 立体視が幅広く普及していくには立体視に関わる様々な視覚システムを解明していく必要がある。そのためのステレオアノマリーについての新たな知見を提供することができる。

ここで述べたようにオクルージョンやステレオアノマリーは立体視に関わる重要な視覚現象である。立体視の普及を目指すためにも重要な課題と考え、本論文第二章、第三章ではオクルージョン、ステレオアノマリーのシステムを解明するために行った研究について述べる。

さらに、本論文では頭部運動と眼球運動を同時に測定できる視線の測定装置という新たに開発した測定装置を用いて、本論文のもう一つの柱である視線に関わる 4K 画像視聴時の頭部の向き、スポーツにおける頭部運動の役割について述べる。そこで、その研究背景と課題、本研究の目的について述べる。

まず、なぜ 4K 画像視聴時の頭部の向きに注目したのか研究背景を述べる。

4K や 8K といった超高精細映像に対しては、実際に立体映像でないにもかかわらず質感や奥行き感を感じてまるで立体映像であるような立体感を感じることがあるといわれている。田中らは高品位大画面映像で視聴者が感じる印象について評価するための感性評価手法を提案し、その感性評価手法に基づき 4K 映像と 2K 映像で視聴者が感じる印象について被験者を用いた実験で検証し、4K 解像度では 2K 解像度と比較し「質感のある」「きめ細かい」「はっきりとした」「なめらか」の項目において有意差が見られたと報告している[20]。当研究室でも超高精細映像を視聴した際にどのような生理的变化が見られるのかを検証することを目的とし、4K カメラで撮影した映像を解像度と絞り値をパラメータとして、輻輳眼球運動、調節応答、主観評価の同時測定を行っている。その結果、輻輳眼球運動、調節応答、主観評価について、解像度と絞り値をパラメータとした有意差は見られず、画像による有意差が見られている[21]。つまり、本来は立体映像でないため変化しないはずの輻輳眼球運動や調節応答が画像によっては変化することを示している。この原因の一つとして考えられることは、従来のフル HD では解像度が  $1920 \times 1080$  なのに対して 4K では  $3840 \times 2160$ 、8K では  $7680 \times 4320$  となり、よりきめ細やかで鮮明な映像が再現されたためであると考えられる。日本のテレビの歴史は 1926 年に高柳氏が「イ」を表示した事が最初とされており、当時は走査線 40 本の画像だったものが約 100 年で当時の 100 倍以上の 4320 本になっている。この走査線構造が視力 1.0 の人から見えない距離を標準観視距離と呼ぶ[22,23]、フルハイビジョンではテレビの高さの 3 倍である 3H だったものが、4K では 1.5 倍の 1.5H、8K では 0.75 倍の 0.75H とかなりの近距離視聴も可能となった。近距離視聴が可能になると水平視野角は大きくなる。フルハイビジョンでは水平約 30 度だった視野角が、4K では約 60 度、8K では約 100 度となる。水平視野角 60 度では 30 度といわれる有効視野を超え眼球運動のみで情報を得ることは困難になる[24]。再び、視線の動きについて図 1

を参照して説明する。従来の視線の動きの研究では、被験者に提示する視野角が小さく、主に眼球運動のみで画像内の情報を捉えることができるため、頭部をあご台で固定するという手法で視線＝眼球運動として、眼球運動のみの測定が行われてきた。ところが 4K、8K など視野角が大きくなると、眼球運動だけで画像内の情報を捉えることが困難となり頭部運動との併用が不可欠になってきた。しかし、一般的には視線＝眼球運動であり、頭部運動はなじみがない。そこで、ここで頭部運動について説明を行う。昆虫や鳥類など眼の可動範囲が小さい動物は頭部を対象に向ける傾向があり、人間のように眼が大きく動く動物は主に眼の動きを対象に向ける。さらに体の正面、すなわち正中線方向で見たいとき、眼の可動範囲を超えたとき、頭部運動が眼球運動に併用して用いられる。視線の向きという観点からは頭部運動と眼球運動は等価である。従って、視線とは頭部運動と眼球運動を合算したものである。例えば先述した中心窩で映像をとらえる際も無意識のうちに頭部と眼球を巧みに動かしている。

標準観視距離での水平視野角が有効視野の範囲 30 度を超える 4K、8K では眼球運動のみでなく、頭部運動の取得も必要不可欠である。しかし、一般家庭で、普段テレビを見るとき調査結果では、視聴者は頭部運動が必要な視聴条件でもテレビを見ていることが示唆されている。言い換えれば、テレビに対して真正面かつ標準観視距離ぴったりの位置から視聴している人はあまりいないということである。窪田らは各家庭 50 世帯におけるテレビの観視条件を研究し、観視距離は 66~730cm に分布し、平均 266cm となり、部屋の大きさおよび画面の大きさとの相関はほとんど見られない傾向だったことを示している。さらに観視角度は画面に向かって右側からの観視が 37%、中央からの観視が 3%であるのに対して、左からの観視は 60%を占める結果となったことを示している[25]。窪田らの結果からもわかるように普段視聴する環境では観視距離・視聴位置がテレビ正面かつ標準観視距離ぴったりとは限らない。このことは、視聴位置の違いがテレビの視聴行動にどのように影響を与えるのか調べる必要があることを示唆しており、これから述べる本論文の 3 項目目の研究背景となっている。

当研究室の高比良らは、観視位置をパラメータとして超高精細画像が視線に与える影響を調べた。観視距離 (0.75H、1.5H、3H)・視聴位置 (ディスプレイの中心、中心から 1/4 左、中心から 1/4 右) を変えて 3 種類の 4K 映像コンテンツを視聴させる実験を行っている[26]。平均注視位置は映像種類、観視距離、視聴位置によらず画面全体に広がるが、3 要因の分散分析の結果、平均注視位置について、画面中央に集まるものの、映像種類・観視距離・視聴位置の互いの関係についてはそれぞれの条件間で画面上の注視位置に有意な違いがえられる結果となったことを示している。この研究では、観視距離が近い画角が有効視野の 30 度を超え、頭部運動の同時測定も必要となったため、同じく高比良らが開発した頭部眼球同時計測装置を用いている[2]。高比良らの研究では、映像種類、観視距離、視聴位置と平均注視位置の関係について明らかにしているが、視線を構成する頭部運動の役割については今後の課題として、いまだに明らかとなっていない。すなわち視聴位置をパ

ラメータとして、頭部運動の役割を明らかにすることが本論文の第 3 の課題である。視線における頭部運動と眼球運動の役割は、当該分野の研究では頭部・眼球協調といわれている。近距離視聴での頭部運動は不可欠であり、頭部運動の役割を明らかとしないと、注視時の視線の動きが眼球で見ていたのか頭部を使い見ていたのか、あるいは眼球運動と頭部運動をどのように組み合わせたのかわからない。本論文では頭部・眼球協調の研究の中で、高比良らが課題とした映像種類、観視距離、視聴位置と頭部運動について、眼球運動と頭部運動を同時計測することで近距離視聴時の頭部運動特性を明らかにすることが目的である。(目的 3)

最後に本論文の 4 項目目の話題として、頭部運動と眼球運動分析を行った応用例としてスポーツ科学の分野に適用した例を述べる。

まず研究の背景について述べる。2020 年の東京オリンピック・パラリンピックに向けてトップアスリートの競技力を客観的に評価する手法として VR を用いたトレーニングや眼球運動の計測が行われている。石橋らはバスケットボール戦術下でのリバウンド行為中における熟練者の視覚探索活動を調べ、視線はシューターとマークマンの間に配置している割合が高い傾向を明らかとした。さらに被験者が移動している際は視線をある空間に固定することで行動を安定させ、身体が安定している局面では、能動的に視線を配置し、リバウンド動作を開始する手掛かりや状況を把握するための情報を獲得しようとしていることを明らかとした[27]。佐野らは VR 技術を用いて身体位置感覚の較正によるフォーム改善を目的として、ゴルフのバッティングに着目し研究を行い。身体位置感覚を較正することによってバッティングパフォーマンスを向上させるシステムを構築しその有効性を明らかとした[28]。しかし、従来のスポーツにおける実験には解決しなければならない課題がいくつかあった。一つ目がアスリートに測定装置を装着させる難しさである。アスリートが競技中に大きく動くため、視野カメラなどで測定した映像は大きくぶれてしまっていた。二つ目に実際の競技中に眼球運動や頭部運動などを測定するのが難しく、事前に競技中の映像を撮影し、撮影した映像を実験室等で流しながら実験を行い、測定をすることになる点である。これらの問題は、アスリートの頭部運動による視野映像のブレで解析時に影響が出てしまう点や競技中の測定でなく実験室での測定になるため実際の競技中のデータとは少し異なってしまうことにより生じる。本論文で開発した装置は、アスリートの頭部運動と眼球運動から視線の動きを取得できるため、アスリートの頭部に装着した視野カメラの映像ではなく、固定したカメラの映像に視線の動きを重畳できる。そのために頭部が大きく動いても視野画像は動かないため、測定が非常に容易となる。従って、この装置を使用して、従来のスポーツ選手の視線取得で生じていた問題を解決する手法を提案するのが本論文の 4 項目目の話題の目的である。(目的 4) 本論文は視覚の基礎分野の研究を対象としているが、この例のように基礎

研究にとどまらず新たな研究分野を拓くことのできる研究である。

以上に述べたように、本論文は、多くの検討課題を有する視覚の研究の中で、実験的ア

アプローチを含めた多方面からの研究を行い、立体視の研究と視線の動きの研究に新しい地平を切り開こうとするものである。

## 1.2 研究の目的

視覚の研究は、人の視聴特性を解明することが重要である。特に 4K や 8K といった高解像度、立体視ディスプレイ、VR 用の HMD など、表示機器や表示方法が変わってきている現在では、高解像度映像を視聴した際の特性や立体映像視聴時の特性を明らかにする必要があるが、これまでに行われている研究では、眼球運動のみの計測や特定の立体視時の計測のみの計測が行われているが、頭部眼球運動の協調特性やステレオアノマリーや立体視時の小細胞の情報処理といった点については未だ解明されていない。そこで本研究では、これからの新しい表示機器や表示方法の普及を見据えて、未だ解明されていない人の視聴特性を解明することを目的としている。この目的を達成するために、オクルージョンの研究、ステレオアノマリーの研究、頭部眼球協調の研究を行い、さらに1つの応用例について検討した。以下に 1.1 で述べた本論文の目的をまとめる

- ・目的 1 は、従来は明らかとなっていなかった色度成分が網膜像の一致、不一致の検出に関わっているかどうかについて解明し、外側膝状体の小細胞における情報処理の過程を明らかにすることであり、それらの先行研究と本研究の比較を表 1-1 に示す。目的 1 の詳しい内容は第二章で記述する。

- ・目的 2 は、新たに開発した輻輳眼球運動と調節応答の同時測定装置を用いて、視対象が滑らかに移動する際の輻輳開散眼球運動に対してもステレオアノマリーが生じるかを解明し、立体視不調者でも見やすい表示方式を提案することで立体視分野において貢献することであり、それらの先行研究と本研究の比較を表 1-2 に示す。目的 2 の詳しい内容は第三章で記述する。

- ・目的 3 は、先行研究[25]で明らかになっていない近距離広視野映像視聴時の頭部眼球協調について解明し、頭部の向きを超高精細映像視聴時の新たな評価指標とすることであり、それらの先行研究と本研究の比較を表 1-3 に示す。目的 3 の詳しい内容は第四章で記述する。

- ・目的 4 は、従来のスポーツ時の眼球運動測定の課題である視野映像の大きなブレや競技中の測定が難しい点を、開発した頭部運動と眼球運動の測定装置を用いて解決できるかどうか確かめることであり、それらの先行研究と本研究の比較を表 1-4 に示す。目的 4 の詳しい内容は第五章で記述する。

これらの結果は、これからの高解像度、多様な情報表示デバイスが普及する環境において、人にとってより良い情報表示、コンテンツ制作の指針を与えるものであり、今後の情報社会に対する貢献は大きいと考えることができる。

表 1-1：第二章の先行研究と本論文の比較

	実物体	3DCG	輝度成分一致検出	色度成分一致検出
工藤博章[7]	○		○	
中本隆秀[8]		○		
本論文		○	○	○

表 1-2：第三章の先行研究と本論文の比較

	ステレオアノマリ 一の報告	輻輳と調節 の不一致	なめらかな奥行き移動	ステップ状の変化
江本ら[3]		○		○
窪田ら[4]		○		○
Richards[5]	○			○
横山ら[6]			○	
本論文	○	○	○	

表 1-3：第四章の先行研究と本論文の比較

	画像	映像	4K 映像	眼球	頭部	主観
田中[20]		○	○			○
高比良[21]	○			○		
高比良[26]		○	○	○		
本論文		○	○	○	○	

表 1-4：第五章の先行研究と本論文の比較

	実際の競技	VR	眼球測定	視野映像
佐野[28]	○		○	乱れあり
石橋[27]	△	○		
本論文	△		○	乱れなし

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。第一章では序論とし、これまでの先行研究や背景などを挙げ、各分野における不足している部分を記述し、本論文の目的を明示した。

第二章、第三章は立体視に関わるもので、第二章では、円柱のリムを注視する際に生じるオクルージョン知覚を対象として、等輝度下で実験を行い両眼網膜像の不一致を外側膝状体（LGN）の小細胞が処理しているかどうかについてこれまで明らかになってこなかつ

た実験結果を示す。第三章は、新たに開発した輻輳開散運動と調節応答の測定装置とディスプレイ内の3D映像の動きとディスプレイが同期して移動する新たな3D表示手法について紹介し、滑らかに変化する視差に対して生じるステレオアノマリーについて新しい知見を述べる。

第四章、第五章は頭部運動、眼球運動の挙動についてである。第四章では超高精細映像を近距離広視野で視聴した時の頭部眼球運動の分析について述べる。これまで高精細映像の4K映像を用いて視聴位置（3条件）と観視距離（3条件）の合計9条件で映像を視聴させ頭部運動と眼球運動を取得した実験では、観視位置と平均注視位置の関係だけが明らかにされている。本章では、観視位置と頭部の向きの関係という新たな実験結果について述べる。第五章ではスポーツ選手の競技中の頭部運動と眼球運動の測定について述べる。本章では頭部運動と眼球運動の同時測定という基礎分野での研究がスポーツ科学という応用分野に発展できることを示すのが目的である。本章では、スポーツ中の選手の視線、頭部、眼球の動きを測定する新たな映像提示方式を提案し、野球のキャッチャーについて経験者と未経験者の違いを論じる。

最後に第六章では上記の人の視覚特性に関する研究をまとめ、各分野でどのように貢献できるかを記述する。

本実験全ては東海大学倫理委員会の「人を対象とした研究」の規定に基づいて行った。

#### 1.4 参考文献

- [1] 図解入門よくわかる最新レンズの基本と仕組み[第2版] (How-nual 図解入門 Visual Guide Book), 桑嶋 幹 (著), pp.70, 2013.
- [2] H. Takahira, K. Kikuchi and M. Yamada, "A System for Measuring Gaze Movement and Hand Movement Simultaneously for Hand-Held Devices," IEICE Trans. Commun, vol.E98-B, no.1, pp.51-61, Jan. 2015.
- [3] 江本正喜, 矢野澄男, "立体画像観視における両眼の輻輳と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係," 信学技報, vol.101, no.227, pp7-14, Jul. 2001.
- [4] 窪田 悟 et al. "3D テレビの視聴による視覚疲労と視聴者の視機能の関係," 映情学誌, Vol.67, no.7, pp262-269, Jun, 2013.
- [5] W. Richards, "Anomalous stereoscopic depth perception," J.Opt.Soc.Am., Vol.61, pp410-414, 1971.
- [6] Y. Yokoyama, H. Takahira, S. Mochiduki, and M. Yamada, "Dependence on the display methods for changes in accommodation and convergence when a target moves along the depth direction," ITE Journal, vol.69, no.10, pp.J298-J305, 2015.
- [7] H. Kudo, K. Uomori, M. Yamada, N. Ohnishi, and N. Sugie, "Shifts in Binocular Fixation Points Induced by Limb Occlusion," ITE Journal, vol.47, no.8, pp.1115-1122,

1993.

- [8] 中本隆秀、“オクルージョンのもたらす奥行き知覚の分析,” (2015).
- [9] 勝木伯昌、“輻輳眼球運動によるオクルージョン生起機構の分析,” (2016).
- [10] M. Livingstone, and D. Hubel, “Segregation of Form, Color, Movement, and Depth: Anatomy, Physiology, and Perception,” *Science*. Vol.240, pp.740-749, 1988.
- [11] F.A.A.Kingdom, D.R.Simmons, S.Rainville, "On the apparent collapse of stereopsis in random-dot stereograms at isoluminance," *Vision Research*, vol.39, pp.2127-2141, 1999.
- [12] K.Hamburger, T.Hansen, K.R.Gegenfurtner, "Geometric-optical illusions at isoluminance," *Vision Research*, vol.47, pp.3276-3285, 2007.
- [13] 吉田辰夫 et al, “眼球運動 調節作用の連携動作の解析,” *人間工学*, Vol.7, no.4, pp193-200, 1971.
- [14] 渡部 叡 “眼球運動の制御機構,” *NHK 技術研究*, Vol.18, no.2, pp.20-42, 1966.
- [15] 下野孝一 “輻輳運動と両眼ステレオブシス,” *光学*, Vol.23, no.1, pp17-22, 1994.
- [16] 下野孝一 et al. “両眼網膜視差に基づく奥行き弁別判断と輻輳反応,” *Journal of Psychology*, Vol.53, no.3, pp.136-143, 1982.
- [17] W. Richards, “Stereopsis and stereoblindness,” *Exp Brain Res.*, Vol.10, no.4, pp.380-388, 1970.
- [18] W. Richards, “Anomalous stereoscopic depth perception,” *J Opt Soc Am.*, Vol.61, no. 3, pp.410-414, 1971.
- [19] R. Jones, “Anomalies of disparity detection in the human visual system,” *J. Physiology*, vol.264, no.3, pp.621–640, 1977.
- [20] 田中 誠一 et al. “高品位大画面映像コンテンツの感性評価手法の提案,” *日本感性工学会論文誌*, Vol.14, no.2, pp.277-284, 2015.
- [21] H. Takahira, S. Mochiduki, Y. Yamazaki, M. Yamada, “Eye movement while viewing several resolution and diaphragm values images,” *IEICE technical report*, Vol. 114, No. 486, pp. 137-142, 2015. (in Japanese)
- [22] ITU-R Recommendation BT.710, “Subjective Assessment Methods for Image Quality in High-Definition Television,” Nov. 1998.
- [23] N. Narita, M. Kanazawa, F. Okano, “Optimum Screen Size and Viewing Distance for Viewing Ultra High-Definition and Wide-Screen Images,” *The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan*, vol.55, no.5, pp.773-780, May. 2001.
- [24] T. Hatada, H. Sakata, and H. Kusaka, “Psychophysical analysis of the 'sensation of reality' induced by a visual wide-field display,” *SMPTE J.*, vol.89, no.8 , pp.560-569, Aug.1980.
- [25] 窪田 悟 et al. “家庭におけるテレビの観視条件” *映像情報メディア学会誌*, Vol.60,

no.4, pp.597-603, 2006.

[26] H. Takahira, S. Mochiduki, M. Yamada, “Analysis of Gaze Movement When Changing Viewing Distance and Viewing Position,” The IEICE Transactions on Information and Systems(Japanese Edition), vol.J99-D, no.3, pp.293-306, Mar. 2016.

[27] 石橋 千征 et al. “バスケットボール戦術下でのリバウンド行為中における視覚探索活動,” スポーツ心理学研究, Vol.37, no.2, pp101-112, 2010.

[28] 佐野 高也 et al. “VR 技術を用いた身体位置感覚の較正によるパッティングトレーニングシステムに関する研究,” 日本機械学会論文集, Vol.83, no.848, pp.1-12, 2017.

## 第 2 章 立体視からオクルージョンの研究[1]<sup>1</sup>

### 2.1 諸言

立体視技術は、3D 映画から医療に至るまで、幅広い分野で応用されている。立体視は、両眼の対応する網膜画像間の水平距離に起因し、3D 映画だけでなく日常生活においても奥行き方向を知覚するために使用されている。しかし、両眼視差を常に使用することはできない。なぜなら、手前の物体が奥の物体を隠し、左右の網膜像に異なる画像が投影される「オクルージョン」という現象が発生するからである。ここでは、3 種類のオクルージョンを挙げる。第 1 に、複数の物体がある時、手前の物体が奥の物体を隠す現象。第 2 に、物体の表面が自身でその面を覆って隠している現象、第 3 に、図 2-1 に示すように、物体に曲面があり、自身の曲面によって面が隠されており、左目と右目で見える部分と見えない部分がある現象である。

工藤らは特に 3 番目のオクルージョンに注目し、円柱のリム部を注視させる研究を行ってきた[2]。円柱のリムで発生するオクルージョンを「リムオクルージョン」という。我々は、オクルージョンに起因する網膜画像間の不一致を避けるために眼球運動が起こったことを明らかにした[3]。そして、被験者が円柱のリムを注視したときに注視位置が変化することを明らかとした[4]。

本章の目的は、オクルージョン知覚を伴う心理学的実験によって、工藤らの論文では触れられていない色度成分が網膜像の不一致の検出に関わっているかどうかについて明らかにし、視覚野における小細胞の機能を解明することである。

ここでは、脳の知覚処理のメカニズムについて説明する。視覚情報は、網膜に結像し、外側膝状体(LGN)に送られる。LGN は、3 種類の細胞からなる 6 層構造である：大細胞、小細胞、および顆粒細胞である。大細胞は、情報処理に要する時間は短く、高速な処理ができるが、詳細な処理ができず、時間分解能が高く、輝度・動き・奥行きの情報を知覚し、運動知覚に優れているとされている[5]。小細胞は、情報処理に要する時間が長く、処理は低速だが詳細な処理が可能であり、空間分解能が高く、色相・彩度・明度を知覚し、形態知覚に優れているとされている[6][7]。生理学的には、色と輝度の信号が同じ小細胞で処理されることが確かめられている[8]。

Livingstone & Hubel は、小細胞は視差による奥行き知覚に関係しないと主張した[10]。Le & Fender は、等輝度を有するランダムドットステレオグラム (RDS) によって奥行き知覚が誘導されないとした[9]。しかし、この結果は、小細胞が完全に色システムであるという間違った仮説に基づいている。すなわち単に反対色システムではなく、高い空間周波

---

<sup>1</sup> 本論文は IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.6, pp.884-891, 2018. に掲載されている「Study on Incongruence between Binocular Images when Gazing at the Rim of a Column with Equiluminance Random Dots, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics[1]」より、電子情報通信学会の許可を得て、再利用している。Copyright(C) 2018 IEICE.

数に対しては輝度コントラストも処理する。実際に、V1等における大がかりなニューロンのオーバーラップによって色と形が同時に処理されているといういくつかの心理物理的な結果や生理学的な結果も報告されている[11]。等輝度 RDS の奥行き知覚が色差情報によって知覚されることは事実である。同様に、小細胞のみが等輝度下で刺激された場合、Livingstone & Hubel は、大細胞によって媒介される幾何学的錯視が誘導されないことを発見した[12]。しかし、近年では幾何学的錯視が等輝度で生じることすなわち等輝度で色情報のみで輪郭線が再現されることが報告されている[13-15]。これに関しては、参考文献[6-8]に記載されているように、小細胞が色信号および輝度信号を処理することができるためと考えられる。

顆粒細胞は、まだ多くの事が解明されていない。本章では、大細胞と小細胞に焦点を当て、赤色と緑色の等輝度を用いて特徴を明らかにする。

まず、図 2-1 のリムオクルージョンについて説明する。円柱などの曲面を持つ対象を注視すると、左右眼からの視線は、各目からの円柱に接する線で表される。図に示されているように、リムとの接触点は、接線の左右の視線で異なる。結果として、円柱の右の縁では右目だけに、左の縁では左目だけに見える領域が生じる。

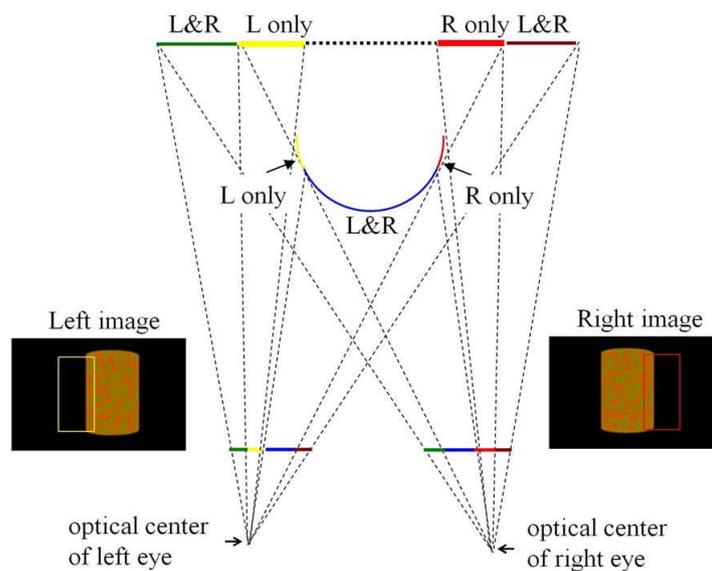


図 2-1 : オクルージョンの原理

この領域が円柱自身によって円柱の側面を遮蔽するリムオクルージョンであり左右網膜像の不一致が生じている。これまで小細胞において色と輝度が同じ細胞で処理され、等輝度でも RDS による奥行き知覚が可能なこと、幾何学的錯視が生じることを説明した。リムオクルージョンでは、奥行き知覚を切り離してリムを注視している時の左右網膜像の対応点の一致・不一致を処理しているかどうかだけを調べることができる。つまり小細胞が等

輝度下で左右網膜像の一致・不一致を扱っているかどうかを明らかにできると考えたからである。

そこで、本実験では等輝度ランダムドットのテクスチャーを貼った円柱のリムを注視させ、注視時の眼球運動から両眼網膜像の一致・不一致の検出が大細胞だけでなく、小細胞でも働いているかどうかを検討した。

## 2.2 実験方法

はじめに、被験者ごとに主観的な等輝度を決定する実験を行い、この等輝度を用いてリムを注視しながらそれぞれの眼球運動を分析した。実験 1 では、個々の被験者の等輝度を測定するために当研究室で開発したプログラムを使用して等輝度を測定した。実験条件を表 2-1 に示す。

表 2-1：実験条件

Personal computer to generate image	SONY PCG-81314N
3-D Display Panasonic (Sequential Shutter)	TH-P46VT2 (Plasma Display Panel)
Screen luminance	Max:147.4 cd/m <sup>2</sup> Min:1.93 cd/m <sup>2</sup>
Illuminance	27lx

等輝度の基準として主観的等輝度を用いた。被験者の上半身を黒い布で覆い、衣服の色がディスプレイ表面に映り込むのを防止した。参考文献[16]の説明を参照して、調整法を適用し、被験者に赤の輝度を上下に調整させ、赤と緑の境界線を見て等輝度を決定するようにした。

被験者が赤と緑の輝度の比較を繰り返して等輝度だと思う時の赤の輝度の変化を図 2-2 に示す。被験者 A の結果は、他の被験者と比較して速い等輝度への収束を見せた、被験者 C のものはより緩やかに収束した例である。被験者 B の結果は、残りの被験者と似たような結果だった。赤の輝度が図 2-2 のように連続してほぼ同じ輝度の値を示したところを、等輝度と判断した。その時の赤色輝度を測定し、この操作を 5 回繰り返した。測定された値の平均を各被験者について計算した。被験者は、通常の視覚機能を有する東海大学の 21-22 歳の学生であった。実験前に被験者に 3D 画像を観察することで全員が正常な立体視を有することを確認した。

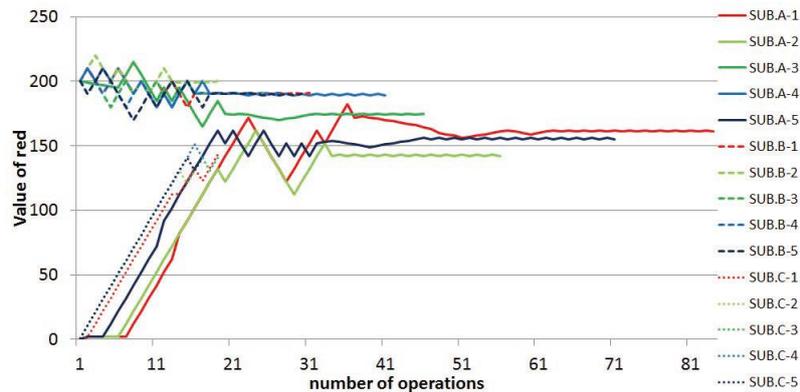


図 2-2：等輝度と判断した時の赤の値

等輝度の測定法として、ここで用いた主観的等輝度を求める方法以外にフリッカーを用いる方法が行われている。フリッカーを用いる測光法は、1900年代初めに Ives によって初めて報告されている。

光を点滅させ、色が認識できない状態で輝度を比較する [17,18]。この方法は、小細胞が高い時間周波数に対して純粋な輝度応答システムとして働くことを利用する。先行研究の1つとして、両方式を用いて等輝度における幾何学的錯視を測定した結果、両結果間に差異がないことが報告されている [11]。したがって、本実験では主観的等輝度のみを使用した。

実験 2 は、実験 1 と同じ被験者を用いて行った。図 2-3 に示すように 3dsMAX により 3 種類の円柱（白、等輝度、非等輝度）を生成した。規則的なパターンを避けるためランダムドットを用い、ランダムドットにはサイズが 0.3~5.2 (cpd) のドットを使用して、円柱にテクスチャーをマッピングした。また、色収差の影響を防ぐために、Adobe Photoshop に搭載されたガウシアンフィルタ（半径 1.0 ピクセル、視野角 0.08 度）で処理した [19,20]。しかし、等輝度の幾何学的錯視 [11] や等輝度の RDS [21] では、ガウシアンフィルタによる色収差を取り除いた場合、取り除かなかった場合で結果には差がないことが報告されている。しかしながら今回はデータを確実にするために、視野角 0.078 度に相当するガウシアンフィルタは、色収差の影響を低減できるという報告に基づいて、ガウシアンフィルタの値を選択した [22]。各被験者の等輝度を用いて、等輝度のランダムドットテクスチャーを予め準備した。Premier Pro を使用して実験画像を編集し、サイドバイサイドの 3Dムービーをレンダリングした。ディスプレイは時分割 120Hz 3D 表示が可能なプラズマディスプレイ Panasonic ; TH-P46VT2 を用いた。被験者は実験中に円柱の 3D 映像を見るために液晶シャッターの 3D 眼鏡をかけた。各被験者は、白円柱、等輝度円柱、および非等輝度円柱のリムを 10 回視聴させた。眼球運動は、EMR-9 (Nac Imaging Technology, Tokyo) を用いて検出し、視距離は 60cm で実験を行った。実験室の照度はディスプレイ表面で 27 ルクスであった。実験は本学スタジオで行った。図 2-4 に実験装置を示す。

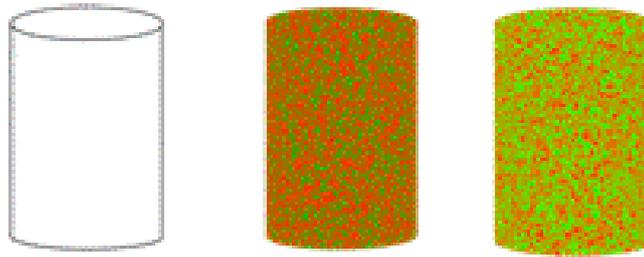


図 2-3：実験に用いた円柱（白円柱、等輝度円柱、非等輝度円柱）

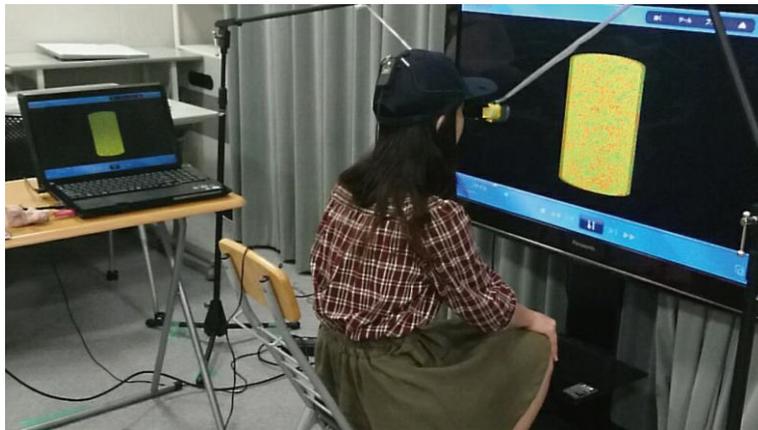


図 2-4：実験風景

表 2-2：等輝度実験の結果

	Red value subjects judged as equiluminance (0-255)	Luminance judged as equiluminance (cd/m <sup>2</sup> )
Subject A	171	15.26
Subject B	166	19.86
Subject C	110	8.25
Subject D	155.5	13.26
Subject E	148	11.53
Mean	150.1	13.632

### 2.3 実験結果と考察

表 2-2 に被験者が等輝度だと感じた値を示す。被験者間には多少のばらつきがあった。主観的等輝度は一定ではないと知られているが、特定の数値は報告されていない[11]。

色覚正常者を対象として測定した結果、網膜視細胞の S-cone（青錐体）は全錐体の 6%と個人差は小さいが、M-cone（緑錐体）、L-cone（赤錐体）は 8 人の男性の測定結果から 52.7%-94.3%まで分布すると報告されている[23,24]。したがって、ある程度のばらつきは

予想された通りだった。対して被験者内では安定した値が得られたので、各被験者の赤色等輝度データを使用して等輝度円柱を描画した。このようにしてマッピングされた円柱を用いて、実験 2 に参加した 10 名の被験者が、白円柱から等輝度円柱、白円柱から非等輝度円柱、等輝度円柱から非等輝度円柱のリムを注視したときの輻輳角の変化を測定した。

工藤ら[2]は視線の回避行動を眼球移動量で評価している。しかし、その回避行動は両眼視線を手前にそらす、もしくは後方にそらすことと等価で有り、ここでは、左右眼球運動量の差である輻輳角を用いる方が、より高い精度が得られると考えたからである。

図 2-5 は、輻輳角の変化を示す[2]。図 2-5 の大円の下部の 2 点は、左右眼の中心位置を示している。図 2-5 の青色と 2 つの赤色の円は、Vieth-Müller [25]、等分円 (Equi-vergence circle) [26]、またはアイソフォール (Isophores) [27]と呼ばれている。両眼の回転角は等しく、両眼がこの円周上に留まる限り、輻輳角は一定である。これは、輻輳角が大きくなる程、近接する点を注視し、輻輳角が小さいほど遠くに注視することを意味する。

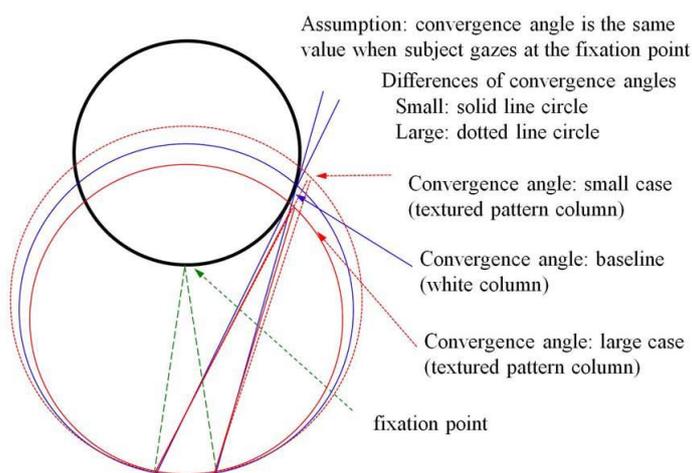
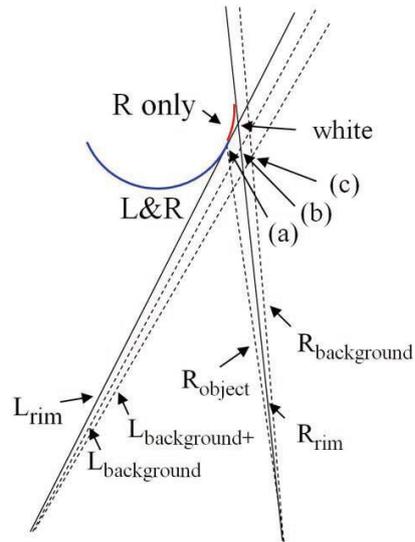


図 2-5 : リムオクルージョンにおける輻輳眼球運動の説明

被験者が白円柱のリムを注視したあと、テクスチャー付きの円柱のリムを注視した場合輻輳眼球運動が発生し、輻輳角が大きくなるまたは小さくなる事が予想される。図 2-6 は、より詳しくこの状態を示す。この図は、円柱の右側のリムを注視する場合を示している。実線は、白円柱の各リムを注視する視線を意味する。中央の赤い十字は注視位置を示す。次に、テクスチャー付きの円柱のリムを注視する場合について説明する。オクルージョン領域が存在するため、左右眼の網膜像には白円柱と違い左右で違う画像が入力される。簡単に説明するために、典型的な例を挙げる。

Case of fixation at right rim of column



Solid lines mean sightlines when subject gaze at each rim (white column), Black area is background

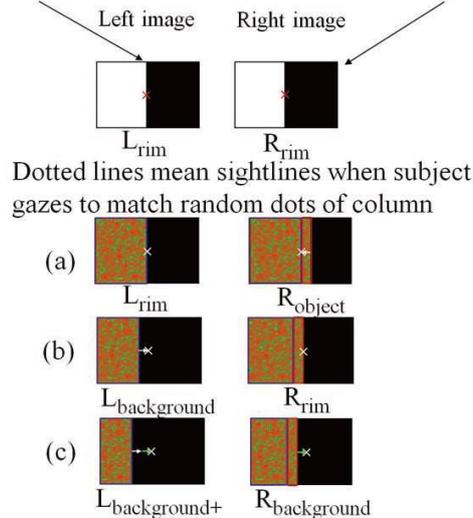


図 2-6 : リムオクルージョンにおける円柱付近の詳しい説明

ケース (a) は、左眼の視線が円柱のリムに位置する状況を示している。赤色で示された領域はオクルージョン領域であるため、この領域は左右網膜像に対応していないが、青色線で囲まれた領域の円柱前面は両眼の網膜像に対応している。この場合、図 2-6 下部 (a) の右眼の注視位置が左にずれているので、輻輳角が大きくなる。ケース (b) は左眼の注視点が左右の網膜像の不一致を回避するために背面に移動している。この場合、図 2-6 下部 (b) の左眼の注視位置が右にずれているので、輻輳角が大きくなる。ケース (c) は (b) の極端な場合を示している。ケース (b) と比較するとケース (c) は、両眼が同じ角度で同じ方向に動いてオクルージョンを回避している状況であり、同じ角度の視線がケース (b) の

ように、両眼の交点は Vieth-Müller 円に沿って移動し、ケース (c) の輻輳角はケース (b) と同様に大きくなる。さらに、背景方向に輻輳眼球運動が働き、輻輳角が小さくなる場合もあり得る。図 2-7 および図 2-8 は、代表例として被験者 B および C の輻輳角の平均変化をそれぞれ示している。縦軸は輻輳角 (deg.) の変化を示し、横軸は円柱の種類を示す。

被験者は画面中心の固視点を注視させることにより、輻輳角を 0 度にオフセットしたが、固視点を外して被験者がディスプレイを注視した場合、輻輳角が大きく変化することが多かった。したがって、被験者が白円柱のリムを注視したときの輻輳角は、各被験者で異なるため、図 2-7,2-8 の解析には輻輳角の変化に着目した。

図 2-7,2-8 は平均輻輳角を示し、被験者 B は正の値の変化を、被験者 C は負の値の変化を示している。しかし、これは全試行のデータを平均した値のため、各試行によっては正の方向、または負の方向へ輻輳眼球運動が働いた。

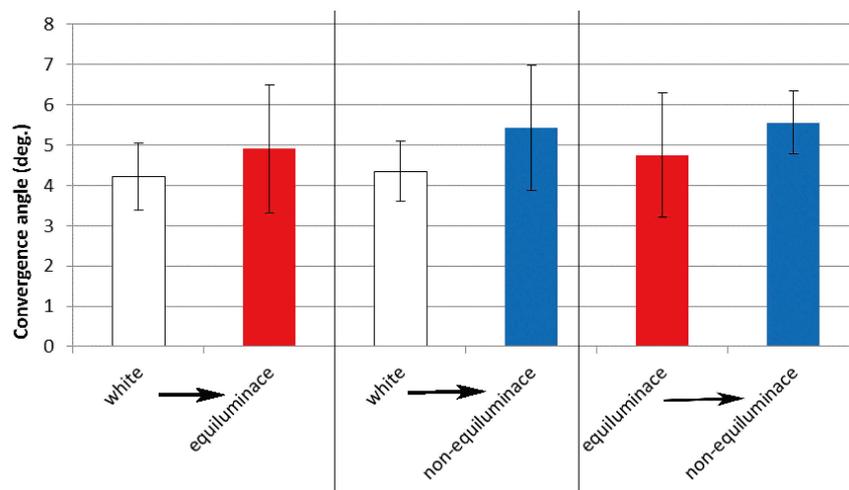


図 2-7 : 被験者 B の各円柱の輻輳角の変化 (白円柱から等輝度円柱、白円柱から非等輝度円柱、等輝度円柱から非等輝度円柱)

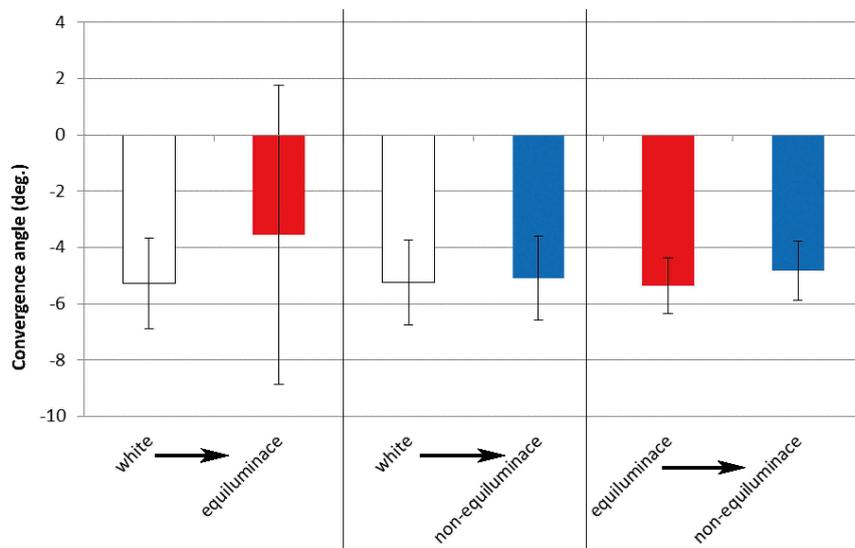


図 2-8：被験者 C の各円柱の輻輳角の変化（白円柱から等輝度円柱、白円柱から非等輝度円柱、等輝度円柱から非等輝度円柱）

平均値では、被験者 B と C の白円柱から等輝度円柱への輻輳角の変化は正の方向であった。この結果は、両方の被験者が、オクルージョンを回避するために、輻輳方向に輻輳眼球運動を行う傾向があったことを示している。

試行ごとに輻輳角の変化に正負の方向が混在しているため、輻輳角の変化の平均値は 0 に近い値を示した。そのため、今回は平均輻輳角の変化の絶対値を用いて計算した。全条件・全被験者の平均輻輳角の変化の絶対値を図 2-9 ～ 2-11 に示す。これらの図は、各被験者における輻輳の変化の量に差があることを示している。

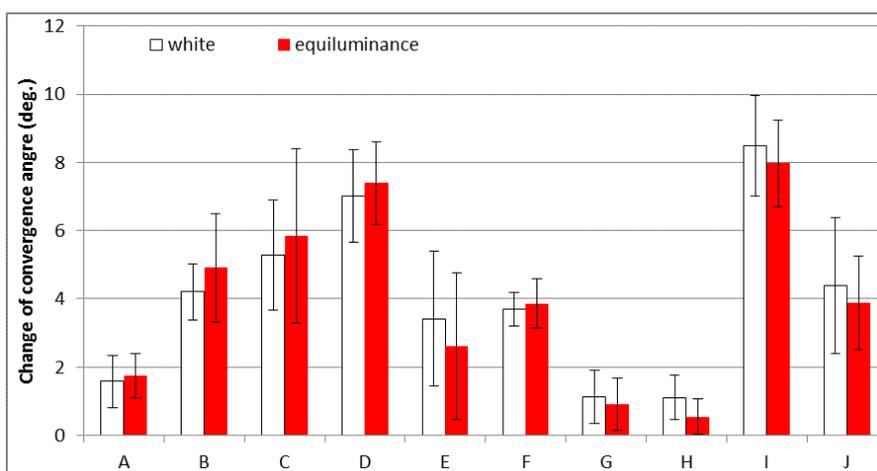


図 2-9：白円柱から等輝度円柱に変化した際の輻輳角の変化

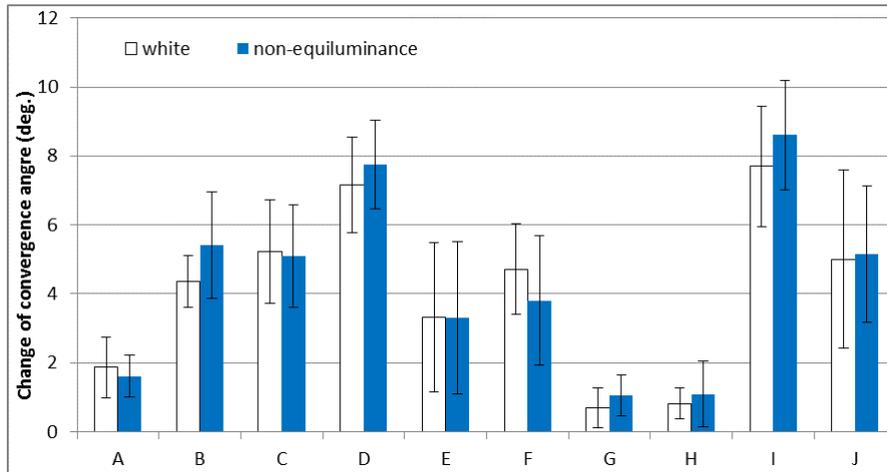


図 2-10：白円柱から非等輝度円柱に変化した際の輻輳角の変化

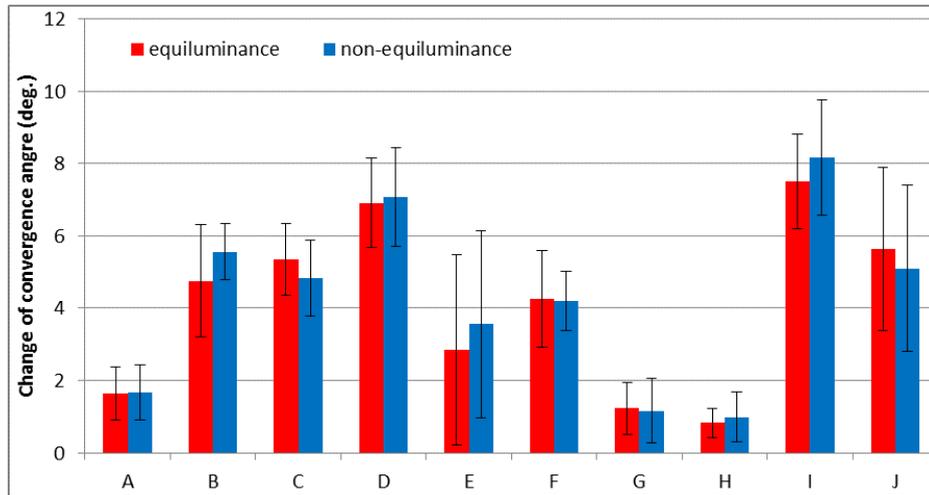


図 2-11：等輝度円柱から非等輝度円柱に変化した際の輻輳角の変化

#### 2.4 考察

実験結果より輻輳角に変化は見られたが、両眼とも固視微動があるため、輻輳角はリムを注視しているときでも一定の変化が見られた。これを考慮し、輻輳角の変化が 0.5 度以上になるときを輻輳角変化ありとして判断した。表 2-3 は、全条件 10 回の試行のうち輻輳角に変化が 0.5 度以上であった試行の割合を示す。

表 2-3 : 各条件で輻轉角が変化した割合

	White → Equi	White → Non	Equi → Non
Subject A	7/10	7/10	5/10
Subject B	7/10	9/10	7/10
Subject C	5/10	7/10	6/10
Subject D	6/10	8/10	9/10
Subject E	6/8	7/8	6/8
Subject F	4/5	5/5	2/5
Subject G	6/10	6/10	7/10
Subject H	5/9	6/9	6/9
Subject I	7/10	9/10	6/10
Subject J	8/10	8/10	8/10
Sum	61/92	72/92	62/92

表 2-4 は、すべての被験者の各条件による表 2-3 の結果からまとめた輻轉角の変化率を示す。

上記の結果 (61/92、72/92、62/92) とチャンスレベルを用いて、母集団の割合の仮説検定を行った。有意水準 1%で白円柱から等輝度円柱では  $p = 0.0018$ 、白円柱から非等輝度円柱では、 $p = 6.0 \times 10^{-8}$ 、等輝度円柱から非等輝度円柱では  $p = 0.00085$  となった。被験者 I の条件 2 と 3 の間に見られた有意差 ( $p = 0.031$ ) を除いて、有意水準 5%で条件間に有意差はなかった。白円柱から等輝度円柱の条件 1 と白円柱から非等輝度円柱の条件 2 の間に差異がなかったことを考慮して、これらの条件では輻轉角の変化はあまり変わらないと考えられる。つまり、逆説的に考えて条件 2 ではオクルージョンの回避が発生したため、条件 1 でもオクルージョンの回避が発生していると推測した。

表 2-4 : 全被験者の輻轉角の変化した割合

	White → Equi	White → Non	Equi → Non
Change	66%	78%	67%
No-Change	34%	22%	33%

## 2.5 結言

我々は、工藤らが行った先行研究のような明るさの変化（輝度信号）だけでなく、色の变化（色度信号）だけでも眼球運動によるオクルージョンの回避行動が生じるかどうかについて興味を持ち研究を行った。緑と赤の色度情報を処理する脳の LGN における小細胞が、左右の網膜画像の一致・不一致を検出するかどうかを明らかにする新しい心理実験を提案した。この目的のため、等輝度ランダムドットを用いてオクルージョンが発生する円柱の

リムを注視するときの輻輳眼球運動を測定した。両眼がオクルージョンにより網膜像の不一致を避けるために、眼球運動が手前方向に輻輳するまたは、奥行き方向に開散するという仮説を立てた。

主観的等輝度は被験者によって異なるため、各被験者に対応する等輝度ランダムドットパターンで実物体の円柱を作成することは困難であるため、3D ディスプレイ上に 3DCG を用いて円柱を提示する方法を提案した。各被験者の主観的等輝度に対応する等輝度ランダムドットパターンを円柱にマッピングするための、等輝度を各被験者で測定した。

ランダムドットのテクスチャーを貼った円柱を用いた実験では、被験者が円柱のリムを注視しているときに、オクルージョン知覚による両眼の動きが計測された。すなわち、赤と緑の等輝度でもオクルージョンを回避する行動が眼球運動で見られ、小細胞が両眼網膜像の不一致を検出していることを示すことができた。

## 2.6 参考文献

- [1] Shinya MOCHIDUKI, Reina WATANABE, Miyuki SUGANUMA, Hiroaki KUDO, Noboru OHNISHI, Mitsuho YAMADA, “Study on Incongruence between Binocular Images when Gazing at the Rim of a Column with Equiluminance Random Dots,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.6, pp.884-891, 2018.
- [2] H. Kudo, M. Yamada, and N. Ohnishi, “Analysis of Eye Movements while Observing Occlusion Regions to Improve Reality of 3D Images,” IEICE ESS Fundamentals Review, vol.10, no.3, pp.169-175, 2016.
- [3] H. Kudo, K. Uomori, M. Yamada, N. Ohnishi, and N. Sugie, “Shifts in Binocular Fixation Points Induced by Limb Occlusion,” ITE Journal, vol.47, no.8, pp.1115-1122, 1993.
- [4] H. Kudo, K. Uomori, M. Yamada, N. Ohnishi, and N. Sugie, “Saccade Mechanism Based on Processes for Depth Estimation and Incongruity Detection between Binocular Retinal Images –Analysis of Gazing Positions and Inter-saccade Intervals–,” ITE Journal, vol.50, no.4, pp.465-474, 1996.
- [5] I. P. Howard, and B. J. Rogers, “Physiology of disparity detection in Stereoscopic vision”, *Perceiving in depth*, vol.2, pp.29-1193, 2003.
- [6] C. R. Ingling, and E. Martinez-Uriegas, “The spatiotemporal properties of the r-gX-cell channel,” *Vision Research*, vol.30, pp.33-38, 1985.
- [7] C. R. Ingling, “Psychophysical correlates of parvo channel function In *From pigments to perception* (ed A Valberg, BB Lee),” Plenum, New York, pp.413-427, 1991.
- [8] R. L. De Valois and K. K. De Valois, “*Spatial vision*,” Oxford: Oxford University press, 1988.

- [9] C. Lu, and D. H. Fender, "The interaction of color and luminance in stereoscopic vision," *Invest Ophthal*, vol.11, no.6, pp.482-490, 1972.
- [10] M. Livingstone, and D. Hubel, "Segregation of Form, Color, Movement, and Depth: Anatomy, Physiology, and Perception," *Science*. vol.240, pp.740-749, 1988.
- [11] K. Hamburger, T. Hansen, K. R. Uda, N. Naito, K. Ichikawa, and A. Tamaoki, "Geometric-optical illusions at isoluminance," *Vision Research*, vol.40, pp.3276-3285, 2007.
- [12] M. S. Livingstone, and D. H. Hubel, "Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth," *The Journal of Neuroscience*, vol.7, no.11, pp.3416-3468, 1987.
- [13] P. Cavanagh, "Distinguishing early from late visual processes," *Bulletin of the Psychonomic Society*, Vol.6, no.291, 1986.
- [14] R. L. Gregory, "Vision with isoluminant colour contrast: 1.A projection technique and observations," *Perception*, vol.6, no.1, pp.113-119, 1977.
- [15] R. L. Gregory, and D. M. Mackay, "Stereo Vision and Isoluminance [and Discussion]," *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol.204, no.1157, pp.467-476, 1979.
- [16] B. W. Tansley, and R. M. Boynton, "Chromatic border perception: the role of red- and green-sensitive cones," *Vision Research*, vol.18, no.6, pp.683-697, 1978.
- [17] H. E. Lves, "Studies in the photometry of lights of different colours [electronic resource] / spectral luminosity curves obtained by the equality of brightness photometer and the flicker photometer under similar conditions," *Experimental Brain Research*, vol.10, pp.380-388, 1970. *Philosophical Magazine for September*, vol.6 no.24, pp.149-188, 1912.
- [18] R. M. Boynton, "History and current status of a physiologically based system of photometry and colorimetry," *Journal of Optical Society of America*, vol.13, no.8, pp.1609-1621, 1996.
- [19] D. I. Flitcroft, "The interactions between chromatic aberration, defocus and stimulus chromaticity: implications for visual physiology and colorimetry," *Vision Research*, vol.29, no.3, pp.349-360, 1989.
- [20] D. H. Marimont, and B. A. Wandell, "Linear models of surface and illuminant spectra," *Journal of the Optical Society of America A*, vol.9, no.11, pp.1905-1913, 1992.
- [21] F. A. A. Kingdom, D. R. Simmons, and S. Rainville "On the apparent collapse of stereopsis in random-dot-stereograms at isoluminance," *Vision Research*, vol.39, no.12, pp.2127-2141, 1999.
- [22] P. Cabanagh, and S. Anstis, "The contribution of color to motion in normal and

- color-deficient observers," *Vision Research*, vol.31, no.12, pp.2109-2148, 1991.
- [23] A. Roorda, D. R. Williams, "The arrangement of the three cone classes in the living human eye," *Nature*, vol.397, pp.520-522, 1999.
- [24] H. Hofer, J. Carroll, J. Neitz, M. Neitz, D. R. Williams, "Organization of the human trichromatic cone mosaic," *Neuroscience Journal*, vol.25, no.42, pp.9669-9679, 2005.
- [25] S. Saida, "Experimental psychology Chapter8 Eye movements in reading," The University of Nagoya Press, pp.167-197, 1993.
- [26] H. Collewijn, C. J. Erkelens, "Binocular eye movements and the perception of depth," *Reviews of Oculomotor Research*, vol.4, pp.213-261, 1990.
- [27] R. H. S Carpenter, "Movements of the eyes," 2nd ed., London, Pion, 1988.

## 第3章 立体視からステレオアノマリーの研究[1]<sup>2</sup>

### 3.1 諸言

タブレット端末や電子書籍は、バスや電車での通勤、通学中などで広く使用されるほど人気が高まっている。このような状況では、ユーザと端末との間の距離が頻繁に変化する。その結果、ディスプレイの注視位置とユーザの視線位置との間の奥行き方向に沿った距離の変化が、輻輳眼球運動および眼の調節応答に影響を及ぼす可能性がある。この仮説に基づいて、被験者が奥行き方向に動く媒体に表示されたキャラクターを注視したときの輻輳眼球運動、調節応答を測定することにより、表示媒体とフォントスタイルとサイズによって調節応答の変化が異なることを当研究室の横山らは先行研究で示した[2]。我々は、輻輳眼球運動と調節応答の同時測定のために Shiomi らに記載された装置をより使いやすい形で再現した。Shiomi らは、3D の映画を見ることによってもたらされる視覚疲労や頭痛の原因であると考えられる輻輳眼球運動と調節応答との間の不一致が[3-5]、若年者では観察されないことを示した[6]。序論にも述べたが、特定の奥行き知覚や輻輳もしくは開散眼球運動が不得意なステレオアノマリーと呼ばれる人の存在が知られている。これまでの研究と、Shiomi らの研究を踏まえ、3D 映像と同期させて奥行き方向に実空間上を移動する新しい表示方式の 3D ディスプレイを用いることにより、ステレオアノマリーの人にも自然な 3D 映像が表示できるのではと考えた。そこで、3D 映像に同期させ、奥行き方向に移動するディスプレイに動物のぬいぐるみを映し、被験者が視対象を注視しているときの輻輳眼球運動と調節応答を同時に測定した。我々は 3 つのパターンを比較した。パターン 1 では、予め 2D ビデオカメラで撮影したぬいぐるみをレールに沿って 60~40cm 移動させた。映像はタブレットに 2D で表示され、タブレット自体もムービーの動きに同期してレールに沿って 60~40cm 移動した。パターン 2 では、ぬいぐるみの 3D 映像をレールに沿って奥行き方向に 60~40cm 移動させ 3D ビデオカメラで 3D 映像を撮影した。この 3D 映像を 3D タブレット上に表示した。3D タブレットはレールの中央の 50cm に固定した。パターン 3 では、事前にレールに沿って奥行き方向に 55~45cm 移動するぬいぐるみを 3D ビデオカメラで撮影した。この映像の動きと同期してレールに沿って 55~45cm 移動する 3D タブレット上で 3D 映像を再生した。各パターンの合計の奥行き移動量はすべて 20cm である。我々が調査した限り、このような状況での輻輳眼球運動と調節応答を調べた報告はなかった。

本実験を行うには輻輳眼球運動と調節応答を同時に測定する必要がある。調節の測定には、測定用光線を眼軸に沿って入射する必要がある、眼球運動が生じ測定を行うことができない。この問題を解決するために、武田らはリレーレンズ系を用いて眼球運動、輻輳眼

---

<sup>2</sup>本論文は IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.2, pp488-498, 2018.に掲載されている「Measurement of Accommodation and Convergence Eye Movement when a Display and 3D Movie Move in the Depth Direction Simultaneously[1]」より、電子情報通信学会の許可を得て、再利用している。Copyright(C) 2018 IEICE.

球運動、瞳孔反応の同時測定を可能にする 3D オプトメーターを開発した[7]。奥山らは、赤外線視力系を用いる方法で、初めて両眼の眼球運動と調節応答を測定し、実際の LED ターゲットと 3D ディスプレイ上のターゲットを比較することで、被験者が 3D 画像を見たときに、輻輳眼球運動と調節応答の動きが密接に反応することを報告した[8]。さらに電子ホログラフィーによって再現した 3D 画像を観察したときの輻輳眼球運動と調節応答について photosciascopy (動的網膜検映法) を用いた PowerRef3 (Plusoptix、Inc.) により同時に測定している[9]。当研究室の横山らは、先に述べた Shiomi ら[6]の方法を用いて被験者が奥行き方向に動くタブレット端末を注視したときの調節応答と輻輳眼球運動を以前に報告した[2]。

本論文では、奥行き方向に移動する 3D タブレットの動きに同期して奥行き方向に移動する 3D 映像を 3D タブレット内に表示するという新しい表示手法を用いて、輻輳眼球運動と調節応答の両方を同時に測定した。しかし輻輳眼球運動と調節応答を同時に測定することは上述したように難しい。眼球運動測定装置も調節測定装置も検出に近赤外光を使用するが、各機器の照射する赤外光が干渉しないように機器の位置を微調整する必要があった。また、個人によっては最適な測定位置が見つからないことが多く、両方の測定値を取得することが不可能な被験者が多く見られた。そこで、眼球運動センサーを調節測定装置に組み込み、眼球運動センサーの位置を自由に調整できる装置を開発した。このシステムを用いて、3D 映像を見た場合輻輳眼球運動がほとんど変化しなかったステレオアノマリーの被験者に対して、3D 映像を表示したタブレットを 3D 映像内の動きと同期させて奥行き方向に移動させると、3D 映像の奥行きに対応した輻輳眼球運動が生じることを明らかにした。

### 3.2 実験方法 1

輻輳眼球運動と調節応答の同時測定装置は 7 Hz で連続的に調節応答を測定できる Auto Ref / Keratometer WAM-5500 (Shigiya Seiki Co.) に眼球運動測定装置 TalkEye Lite (竹井機器工業) を組み込んだ (図 3-1)。Shepperd と Davis は、WAM-5500 が  $-6.38 \sim 4.88D(15.7 \sim 22cm)$  の距離を測定するとき、 $-0.01D \sim 0.38D$  の精度を有することを報告している[10]。WAM-5500 は 950 nm の近赤外光を使用し、TalkEye Lite は 850 nm の近赤外光を使用しており、これらの波長は互いに干渉しないため、輻輳眼球運動と調節応答を同時に測定することを可能とした。

当初は、調節測定装置の顎あてに被験者の顎を置き、眼球運動測定用のゴーグルを装着してもらう必要があった。そのため調節応答測定装置の高さを調整すると、眼球運動測定用のゴーグルが調節応答測定装置に干渉し、眼球運動を正しく取得することができないことが被験者によっては生じていた。そこで以前の実験では、頭を顎あての上に固定しつつ、調節応答が測定できる良好な視力を有する被験者を探すことから実験を始めた。今回開発した装置では、角膜反射像を取得するカメラと TalkEyeLite の赤外光源をゴーグルから分離し、図 3-2 に示すように、WAM-5500 の顎置きに設置し、自由に高さを変更できるよう

にした。

今回同時測定するために使用した機器は各メーカーが精度を測定し市販しているが、輻輳眼球運動と調節応答を同時に測定することで精度が変わらないことを確認する必要があると考え、精密評価実験を行った。

2D (50cm)、3D(33cm)、4D(25cm)の位置に WAM-5500 にあらかじめ用意されているクロスターゲットを提示し (図 3-3)、被験者に 15 秒間注視させ眼球運動、調節応答、瞳孔を測定した。この D は調節力 (Dioper) の値を示し調節力は焦点距離の逆数で求められる。各ターゲットを 5 回注視し、各条件合計で 15 回測定を繰り返した。15 回の測定は連続して行い、予測の影響を除外するために、ターゲット提示の順序はランダムにした。オフセットは、視距離 2D で行った。被験者は、21-22 歳の東海大学の 3 人の学生であった。



図 3-1 : TalkEye Lite



図 3-2 : 眼球運動と調節応答の同時測定機器

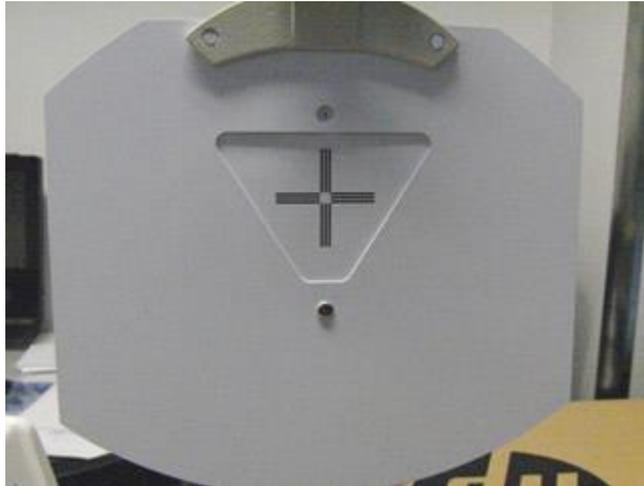


図 3-3：提示したクロスターゲット

### 3.3 実験結果 1

視標注視時の最初の 2.5 秒と最後の 2.5 秒はデータが不安定になる傾向があったため、中央部分の 10 秒を解析に使用した。表 3-1 は測定されたデータを被験者間で平均し、測定値と理論値との差を計算した結果である。表 3-2 は、比較のための TalkEyeLite のメーカー仕様を示す。測定された輻輳角は、TalkEyeLite のオフセット位置の輻輳角との差を示したもので、理論距離は 2D の視距離で 0 度であった。表 3-2 の値から、TalkEyeLite の検出誤差は 1 度未満であった。したがって、左右の眼の差である輻輳角の誤差も 2 度未満であると考えた。輻輳角の最大誤差は、4D で 0.795 度であり、2 度未満であった。装置の精度は、眼球運動計測装置のみで使用した場合と同等であると考えられる。次に、調節応答の結果を示す。Shepperd と Davis は、 $-6.38 \sim 4.88D$  の距離を測定すると  $-0.01D \sim 0.38D$  の精度を示したと報告している[10]。表 3-3 に示しているように、4D での調節の誤差は 0.681D であり、彼らの結果よりもわずかに大きかった。しかし、2D と 3D ではほぼ同じであったため、調節応答計測装置の精度は、眼球運動計測装置の影響を受けないときに得られた値と同等であると考えられる。

瞳孔径の測定は WAM-5500 と TalkEyeLite の両方で行うことができる。WAM-5500 によって測定された瞳孔径の結果を表 3-4 に示す。視標が近づくと瞳孔の近見反射によって予測される方向とは反対の方向に僅かに拡張した。

1000 ルクスの照度下で 5m から 30cm に近づいたときの近見反射は約 1mm と報告されている[11]。我々の実験では、奥行き方向の変化は 25cm であり、上記の結果よりもはるかに短い。さらに、標準偏差の量を考慮すると、瞳孔径は眼球運動測定装置の近赤外線によってほとんど変化しないと考えられることができる。そのため、開発した装置を用いて、調節応答、輻輳眼球運動、および瞳孔径を同時に測定することが可能であることを確認した。

表 3-1 : 輻輳角の理論値と実測値の比較

Viewing distance	2D	3D	4D
Measured value	-0.416 deg	3.598 deg	8.171 deg
Theoretical value	0 deg	3.811 deg	7.376 deg
Error	-0.416 deg	-0.213 deg	0.795 deg
Standard deviation	0.147	0.248	0.259

表 3-2 : TalkEyeLite のメーカー仕様

Range of Detection	Horizontal 5degrees, Vertical 20 degrees (Upward), 40 degrees (Downward)
Detection Power	0.1 degrees (less than 20 degrees), 0.5degrees (whole area)
Detection Error	Less than 1 degrees (less than 20 degrees), less than 2 degrees (less than 40 degrees), less than 3 degrees (whole area)

表 3-3 : 調節応答の理論値と実測値の比較

Viewing distance	2D	3D	4D
Measured value	-1.791D	-2.594 D	-3.319 D
Theoretical value	2D	3D	4D
Error	+0.246D	+0.406 D	+0.681 D
Standard deviation	0.209	0.469	0.286

表 3-4 : 測定された瞳孔径の結果

Viewing distance	2D	3D	4D
Measured value	3.760 mm	3.872 mm	3.935 mm
Standard deviation	0.55	0.587	0.517

### 3.4 実験方法 2

実験 1 で説明した同時測定装置を用いて、奥行き方向に移動する 3D ディスプレイを被験者に注視させながら、輻輳眼球運動と調節応答を測定した。この研究では、すでにクロスターゲットまたは文字を視標とした実験を行っているが、この研究の前にクロスターゲットや文字では 3D 映像の融像が難しく、奥行き知覚が困難になる被験者がいることを指摘している[12]。そこで本実験では立体視しやすいぬいぐるみをターゲットとして使用した。このぬいぐるみが、タブレットに表示されたときに奥行き知覚が容易なことをあらかじめ確

かめ、3D ディスプレイ内のぬいぐるみが 3D タブレットの奥行き方向の移動と同期して移動する間に、輻輳眼球運動と調節応答を同時に測定した。

X 軸リニアボールガイド KXL06200-N2-FA（駿河精機株式会社製）を用いてディスプレイを奥行き方向に移動させた。X 軸リニアボールガイドをコンピュータによって制御し、輻輳眼球運動と調節応答のデータを同時取得することができる[2]。

X 軸リニアボールガイドには、裸眼立体視用タブレット（T863-3D、Gadmei）を設置し、3D 映像を表示した。提示映像は 3D カメラ（HDR-TD10、Sony Corp）で撮影したものを用了。編集ソフトウェアである EDIUS で編集された 3D 映像は、サイドバイサイドを使用して出力した。タブレットを駆動レール上に設置し、図 3-4 に示すように奥行き移動を行った。



図 3-4：奥行き移動のシステム

タブレット上の映像は、ドライブレールの動きと同期して再生された。図 3-5 に提示映像のサンプルを示す。ディスプレイは奥行き方向に 40cm から 60cm の間で 2 回往復した。ディスプレイの移動速度は約 12mm 毎秒であった。視距離 50cm の場所で TalkEyeLite のオフセットを行った。

表 3-5 に提示する 3 種類のパターンを示す。各パターンは、奥行き移動量が合計 20cm になるように調整した。パターン 1 では、タブレット上に提示されたぬいぐるみが 40cm から 60cm の間で 2 回往復する。パターン 1 で提示した映像は 2D であったため、奥行き知覚は与えられなかった。パターン 2 では、タブレットは 50cm で固定され、レール上を移動しなかったが、3D 映像が 20cm 相当の視差（40cm から 60cm）で表示された。パターン 3 は、3D 映像とレール移動それぞれで 10cm の奥行き移動をして、合計 20cm の奥行き移動を有していた。被験者にはディスプレイが移動している間、映像内のぬいぐるみを注視するように指示した。表示輝度は平均で 66.94 (cd/m<sup>2</sup>) であり、照度は平均 1470 ルクスであった。

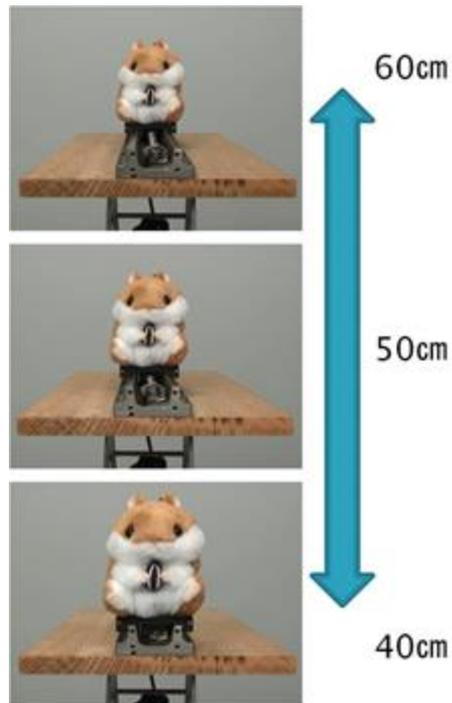


図 3-5：提示した映像

表 3-5：実験パターン

	Depth displacement Parallax in the image of the tablet
Pattern 1	60cm-40cm No parallax(2D movie)
Pattern 2	0(Fixed at 50 cm) Equivalent to 60cm-40cm(3D movie)
Pattern 3	55cm-45cm Equivalent to 55cm-45cm(3D movie)

被験者は 20 代の東海大学生 7 名であった。各被験者は、事前に 3D 静止画をタブレット上に表示することにより、3D 画像がはっきりと融像できることを確認した。7 人中 5 人の被験者のデータを分析した。残りの 2 人のデータはエラーが多くあり、解析が困難であったため除外した。各被験者の視力を表 3-6 に示す。

表 3-6：各被験者の視力

	Visual Acuity of Right Eye	Visual Acuity of left Eye
Subject A	1.5	1.5
Subject B	1	1.2
Subject C	1	1
Subject D	1.5	1.5
Subject E	0.4	0.7

### 3.5 実験結果 2

被験者 A、C、D および E は同様の結果を示したが、被験者 B のみがパターン 2 における輻輳眼球運動の結果が異なった。そこで、4 人の被験者を代表した被験者 A の結果と被験者 B の結果を示す。図 3-6 ~ 3-12 に被験者 A および B の輻輳眼球運動、調節応答および瞳孔径の例を示す。

図 3-6 は、パターン 1 の輻輳眼球運動の結果を示す。左の縦軸は、輻輳角がオフセット位置からどれだけ変化したかを示し、右の縦軸はディスプレイの距離を輻輳角の角度である Degrees に変換した位置を示し、横軸は時間を示す。ぬいぐるみの表示位置は青い線で示される。眼球運動のオフセットが 50cm の視距離にある場合、輻輳角は 0 度になった。負の値は、対象がオフセット位置の後ろを注視していることを示し、正の値は、対象がオフセット位置の前を注視していることを示す。被験者 A および B の両方が、被験者 A の最初の 10 秒間を除いて、輻輳眼球運動がぬいぐるみの動きに合わせて視標を追従するよう移動した。

図 3-7 は、パターン 1 の調節応答の結果を示す。左縦軸は調節 (D)、右の縦軸はディスプレイの距離を調節応答の単位である Diopter に変換した位置を示し、横軸は時間を示す。青い線は、ぬいぐるみの位置を示す。この図では、両方の被験者の調節応答が、ぬいぐるみの動きに従って動いているようことを示している。

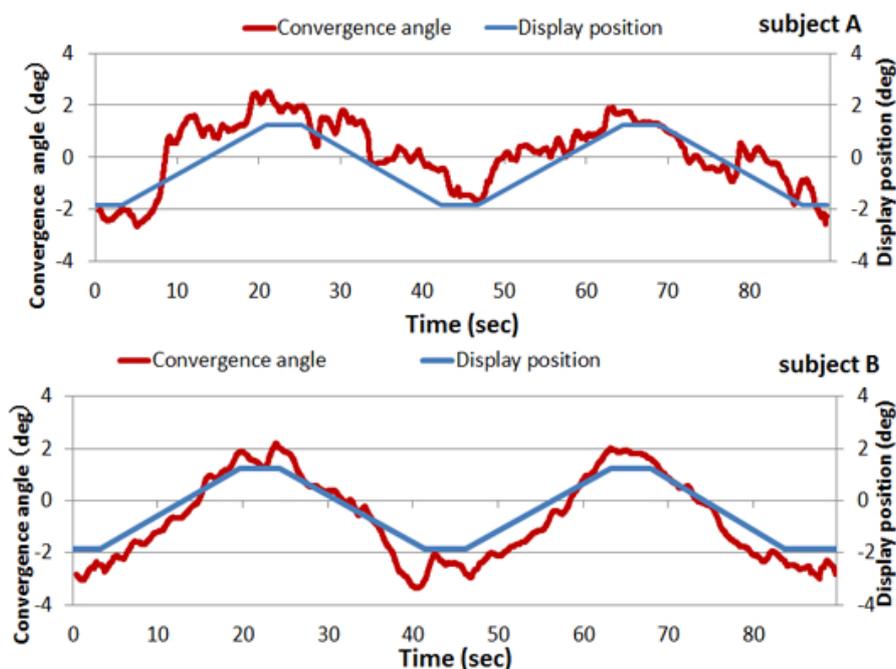


図 3-6 : パターン 1 の輻輳角の変化

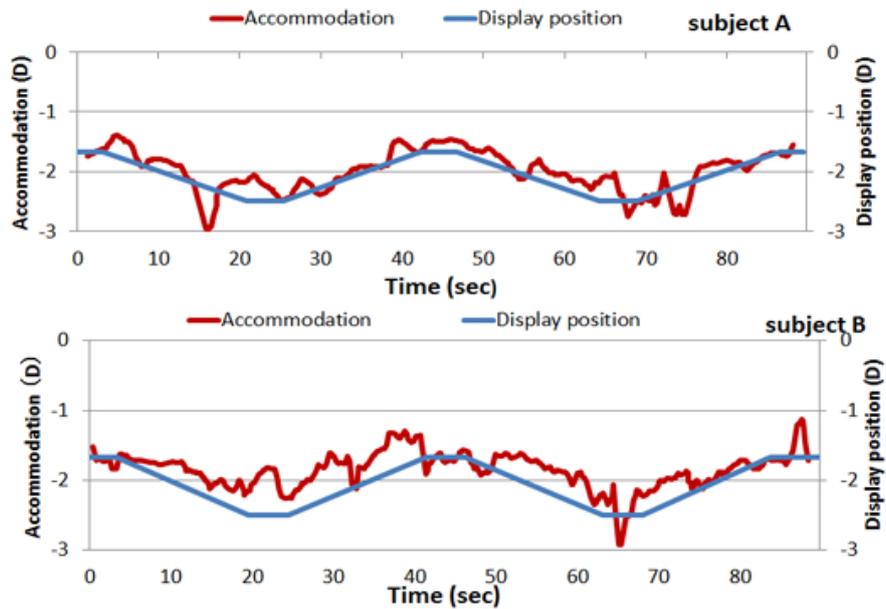


図 3-7：パターン 1 の調節の変化

パターン 2 の輻輳眼球運動の結果を図 3-8 に示す、輻輳角の変化は 40～50 秒では小さいが、被験者 A は 3D 映像の視差の変化に応じて反応している。被験者 B の輻輳眼球運動はほとんど変化が見られなかった。図 3-9 は、パターン 2 の調節応答の結果を示す。ぬいぐるみの 3D 移動に対応する調節応答は、破線の緑色の線として示されている。3D 映像の視差変化にもかかわらず、被験者 B の調節応答は、ディスプレイ付近のままであった。また、被験者 B の調節応答は最初の 20 秒間は測定出来ていなかったが、これは WAM-5500 の測定誤差のために発生したエラーである。一方、被験者 A の調節応答はディスプレイの周囲にもあったが、視差に応じて見られるわずかな変化が見られた。この結果から、3D 映像の視差の変化に応じて輻輳によって調節応答を誘導する輻輳性調節が発生し、小さな調節変化が生じたと考えられる。

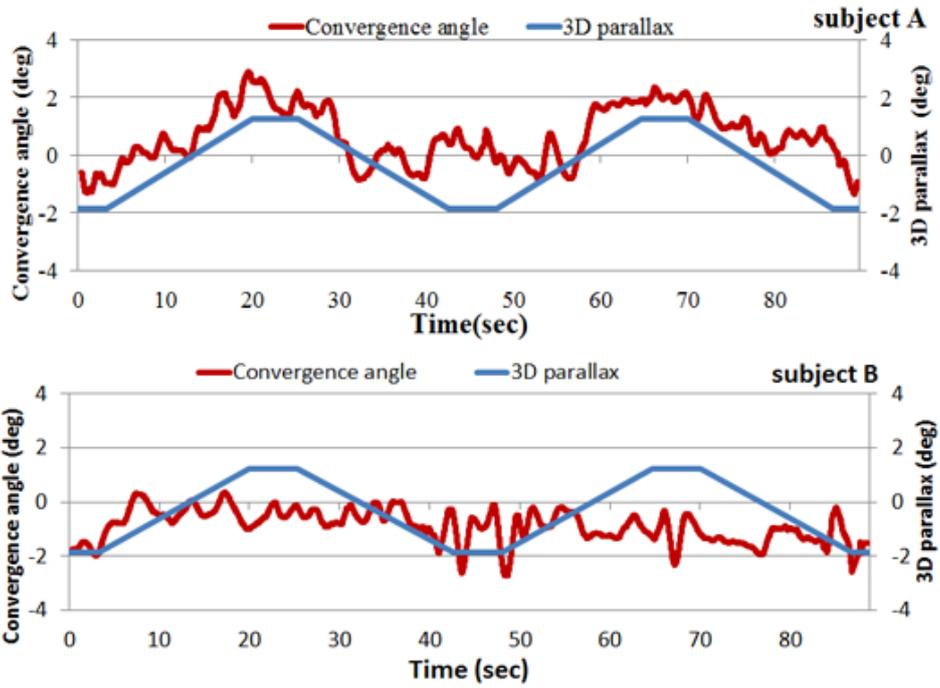


図 3-8 : パターン 2 の輻輳角の変化

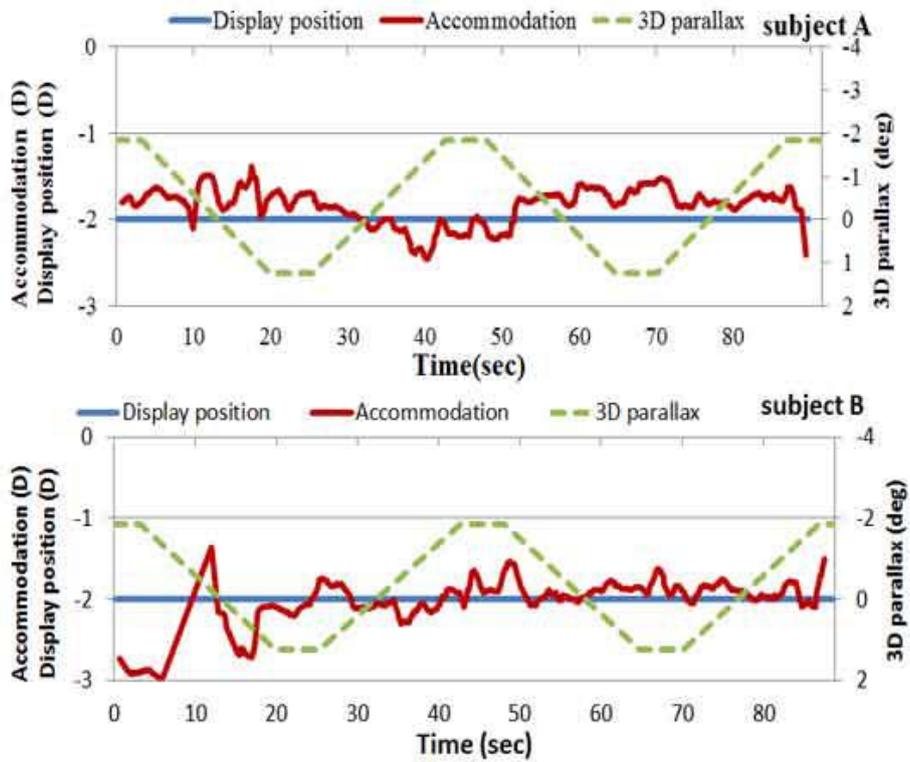


図 3-9 : パターン 2 の調節の変化

図 3-10 は、パターン 3 の輻輳眼球運動の結果を示す。青い線は、3D 視差とディスプレイの位置の輻輳角を加算した値を示す。結果、被験者 A と被験者 B の両方の輻輳眼球運動は 3D タブレットの奥行き移動と同期した 3D ディスプレイ内の映像にあわせて、ディスプレイの奥行き変化の視差とディスプレイ内の 3D 映像の奥行き移動の視差の合計変化量を追従するように反応することが示された。パターン 2 で輻輳眼球運動の変化量がわずかだった被験者 B においても同様の変化が見られた。

パターン 3 の調節応答の結果を図 3-11 に示す。被験者 A の調節応答は、ディスプレイに従う傾向と 3D 視差の変化が見られ、被験者 B の調節応答は弱い傾向が見られた。

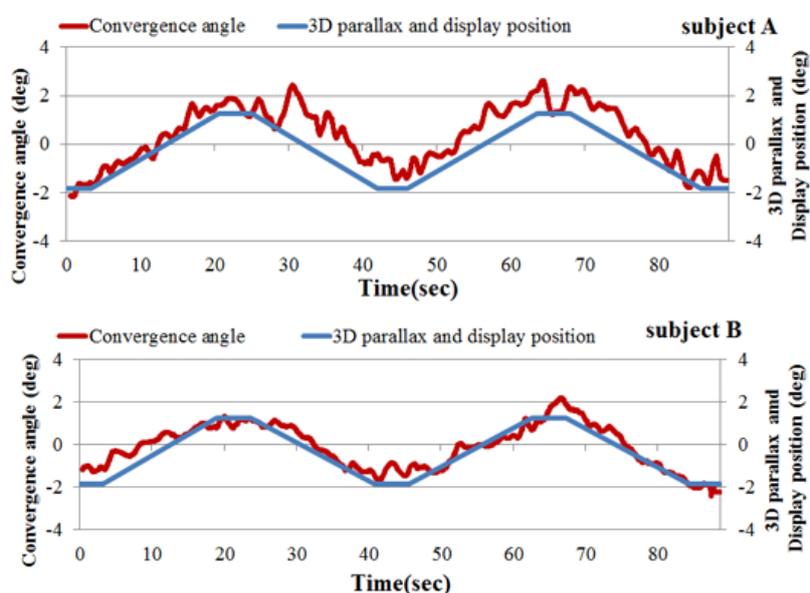


図 3-10 : パターン 3 の輻輳角の変化

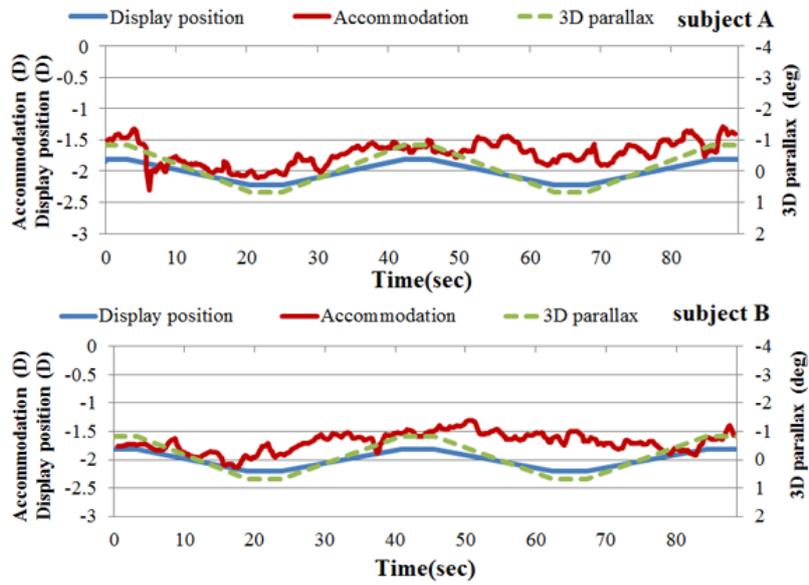


図 3-11 : パターン 3 の調節の変化

各パターンの瞳孔径測定結果をまとめて図 3-12 に示す。紫色の線は、視対象の視差の変化を示す。輻輳眼球運動、調節応答、瞳孔径は密接に関連しているため、近くの物体を注視すると輻輳角は増加し、屈折力は増加し、瞳孔は収縮するとされている[13]。実験結果は、各パターンに対して近見反応に対応する瞳孔径の傾向を示さなかった。

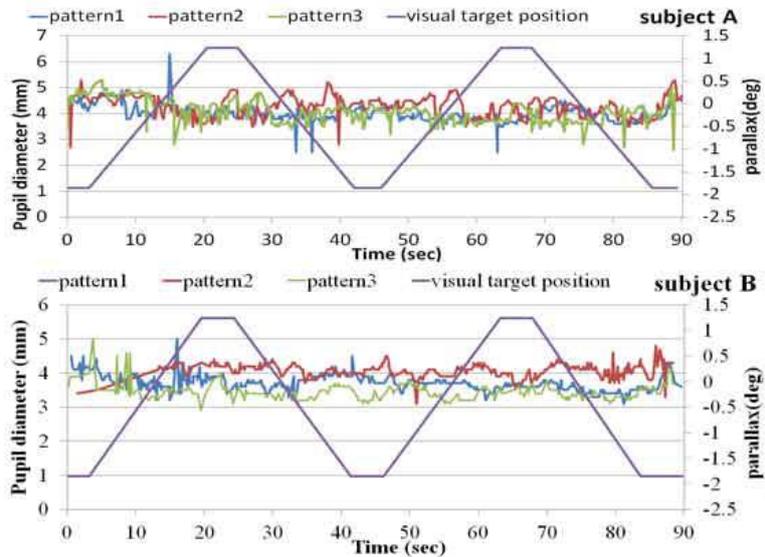


図 3-12 : 各パターンの瞳孔径の変化

### 3.6 考察

本結果から全体的な傾向を把握するため、視標の移動前後の値の変化に注目した。

輻輳眼球運動と調節応答の変化は、最大値と最小値の差によって計算した。輻輳眼球運動と調節応答の最大値と最小値を決定するために、固視微動の性質を考慮して、輻輳眼球運動の安定値を輻輳角で 0.5 度毎秒未満の変化として定義した[14]。調節応答は調節応答の変動の性質：調節微動を考慮して、0.2 度毎秒未満の変化として定義した[15]。図 3-13 に上記の定義を用いて最大および最小の輻輳眼球運動および調節応答の平均値の決め方を示す。4 人の被験者（被験者 A、被験者 C、被験者 D、被験者 E）の平均輻輳角の変化と調節応答をそれぞれ図 3-14 と図 3-15 に示す。被験者 B の平均輻輳角の変化と調節応答を図 3-16 および図 3-17 に示す。図に示されている赤色棒グラフは 3D 映像の理論的な変化量と、タブレットの動きに相当する視差を理論値として示している。エラーバーは標準偏差を示す。

図 3-14 と図 3-16 の輻輳角変化では、被験者 B のパターン 2 を除き、輻輳角の変化は理論値とほぼ同等であった。被験者 B の輻輳角はほとんど変化しなかったが、他の 4 名の被験者の平均輻輳角変化も理論値より少し小さかった。結果は、輻輳角は 3D 映像の視差変化に対応するが理論値の大きさまでは変化しないことを示唆した。

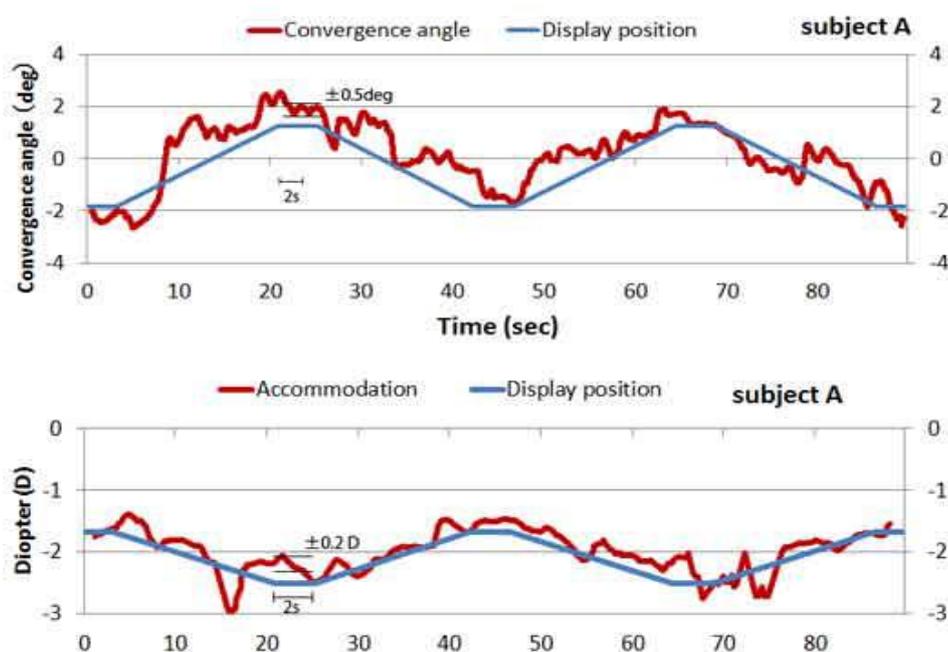


図 3-13：輻輳調節の安定点例

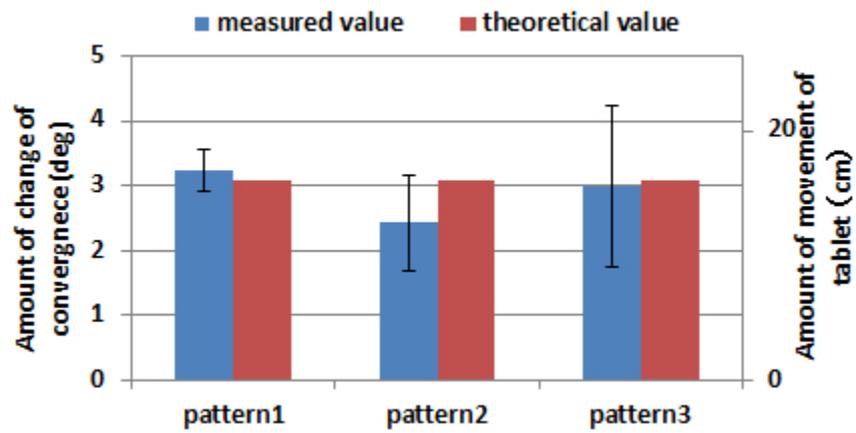


図 3-14 : 輻輳角の平均変化量と理論値

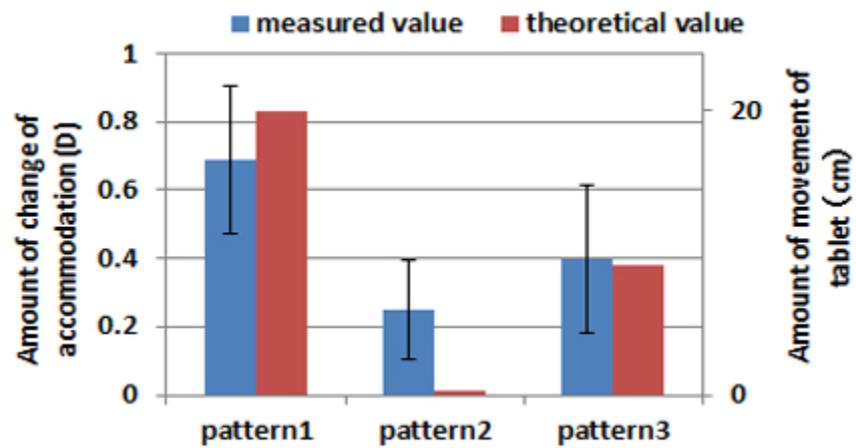


図 3-15 : 調節の変化量と理論値

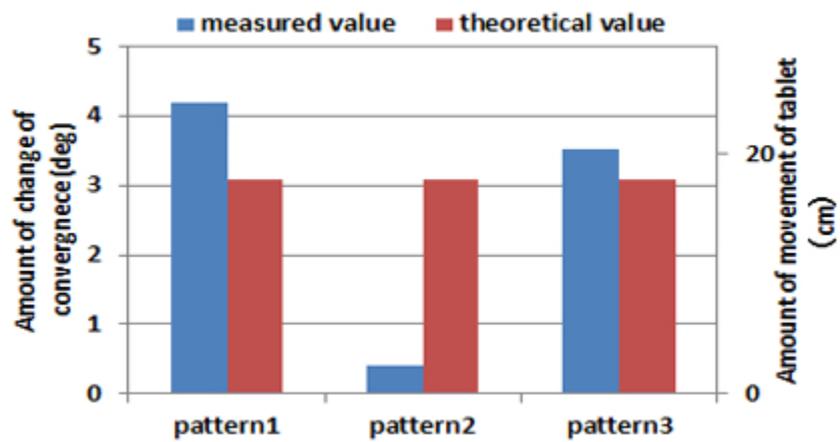


図 3-16 : 被験者 B の全パターンにおける輻輳角の変化量と理論値

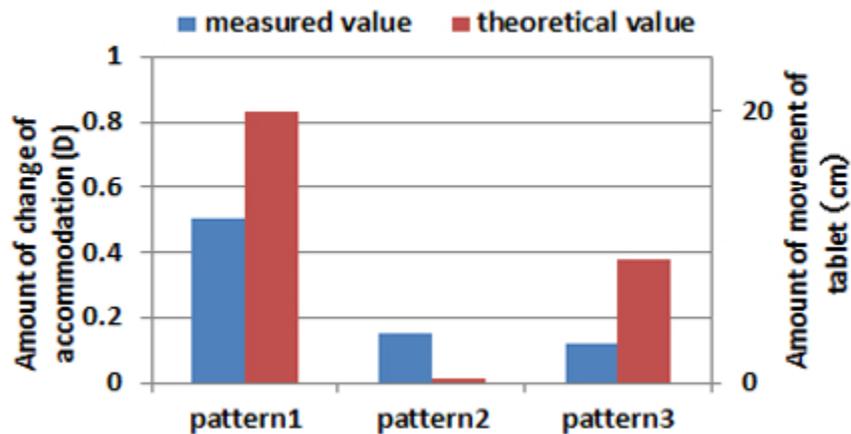


図 3-17：被験者 B の全パターンにおける調節の変化量と理論値

しかし、パターン 3 の被験者 B の輻輳眼球運動は視標の動きに追従した。3D 映像だけでは視差変化が感じにくい人でも、3D 映像の視差変化を実際の奥行き方向への動きと組み合わせることで輻輳眼球運動ができる可能性が示唆された。

事前実験では、被験者 B は立体視を観察することができたが、輻輳眼球運動は、3D 映像の奥行き移動に追従することができなかった。しかし、3D 映像を奥行き方向に移動させた場合、輻輳眼球運動の動きに追従することができた。そこで、3D 静止画をタブレットに表示したときに 3D 画像をはっきりと融合させることができる 20～21 歳の本学大学生の 73 人に対して追加実験を行った。被験者 B と同じ傾向の人がいるかどうかを調べたところ、73 人のうち 2 人 (3%) が同じ傾向が見られた。被験者 F と被験者 G として、輻輳角と調節応答の変化値を図 3-18 ～ 3-23 に示す。図 3-24 および図 3-25 は、これらの被験者における輻輳角および調節応答の平均変化を示す。

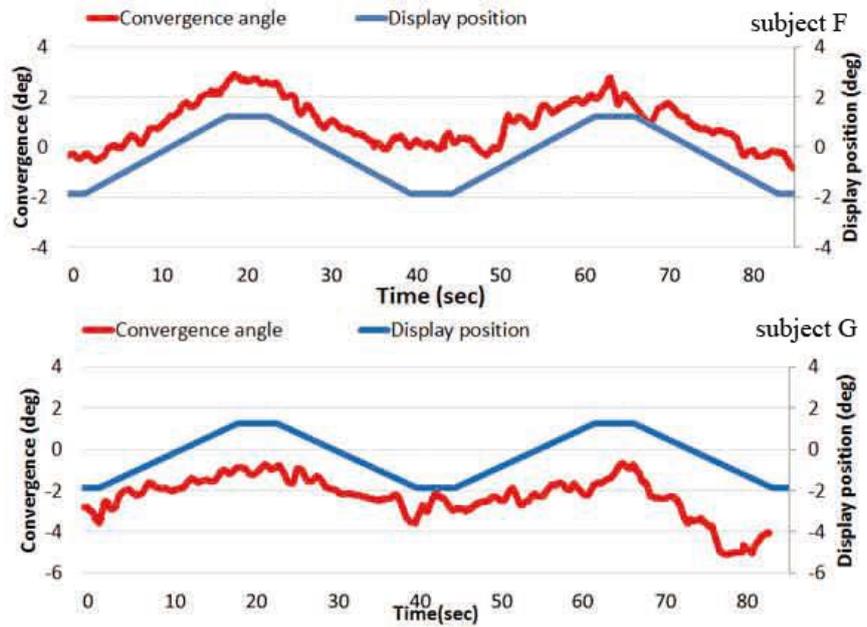


図 3-18 : ステレオアノマリーの被験者の輻輳角の変化量 (パターン 1)

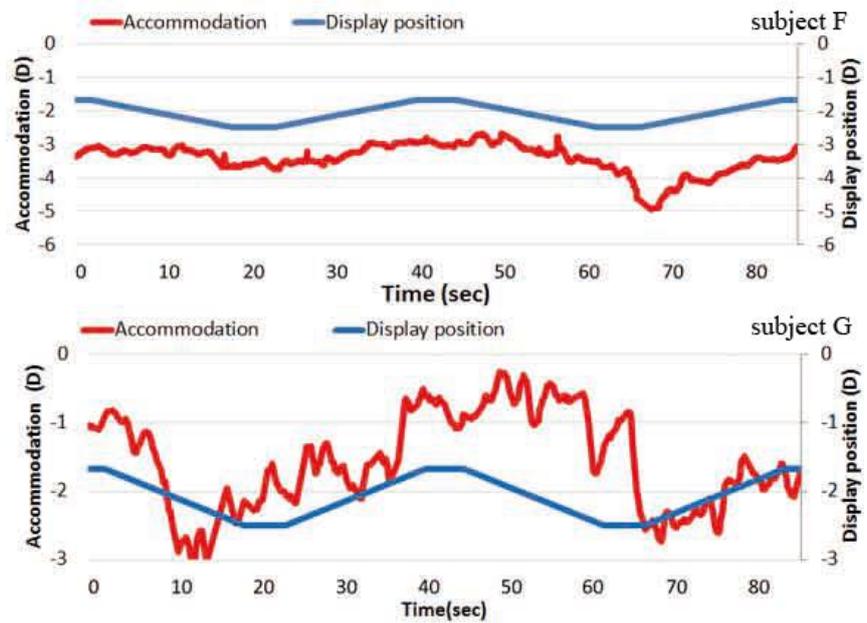


図 3-19 : ステレオアノマリーの被験者の調節の変化量 (パターン 1)

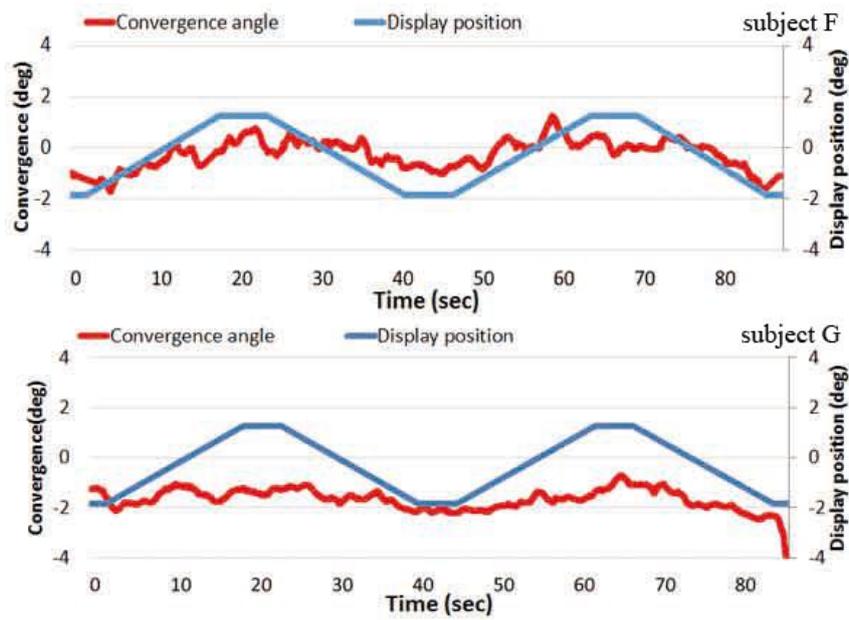


図 3-20 : ステレオアノマリーの被験者の輻輳角の変化量 (パターン 2)

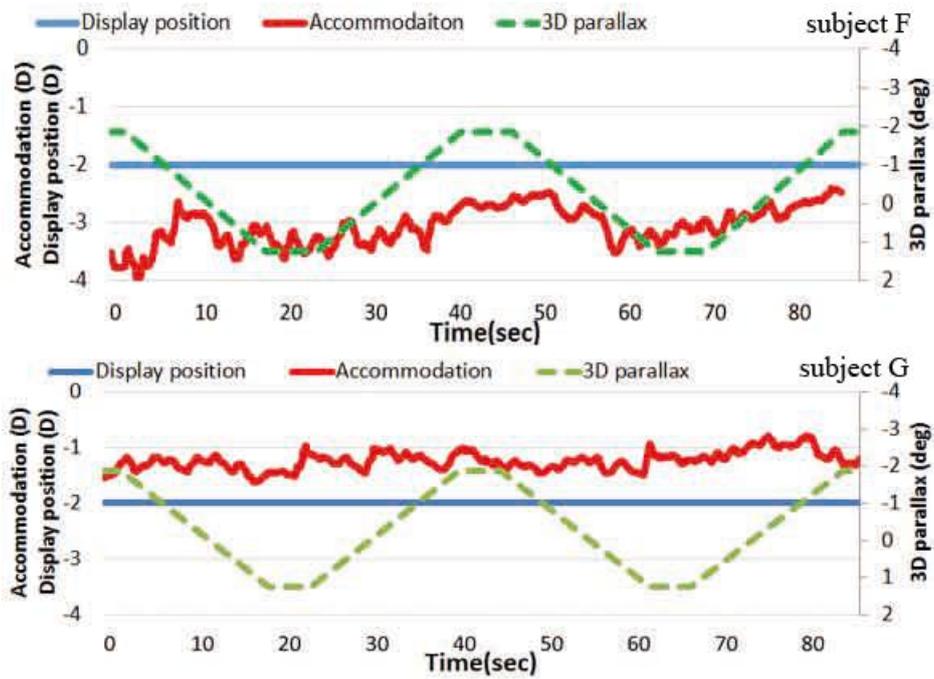


図 3-21 : ステレオアノマリーの被験者の調節の変化量 (パターン 2)

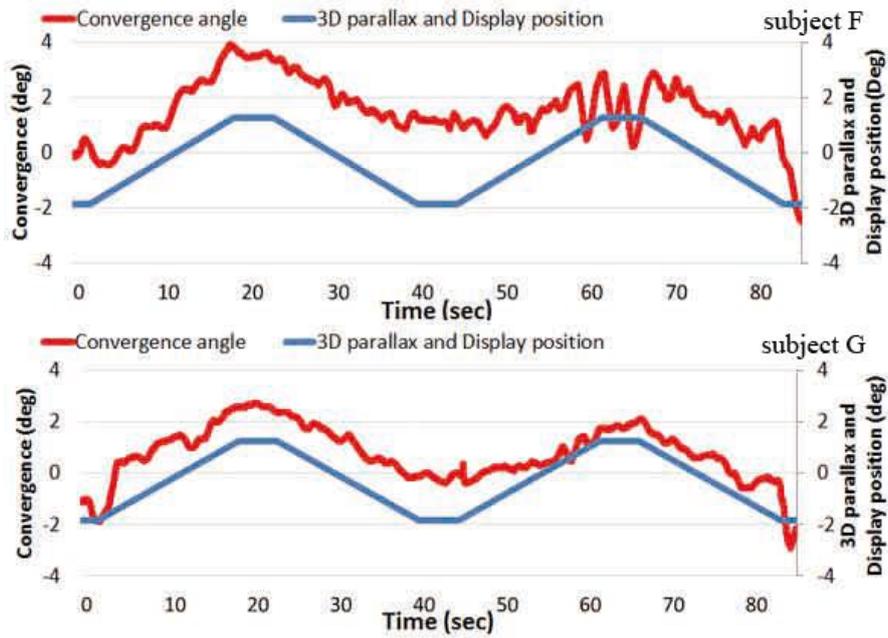


図 3-22 : ステレオアノマリーの被験者の輻輳角の変化量 (パターン 3)

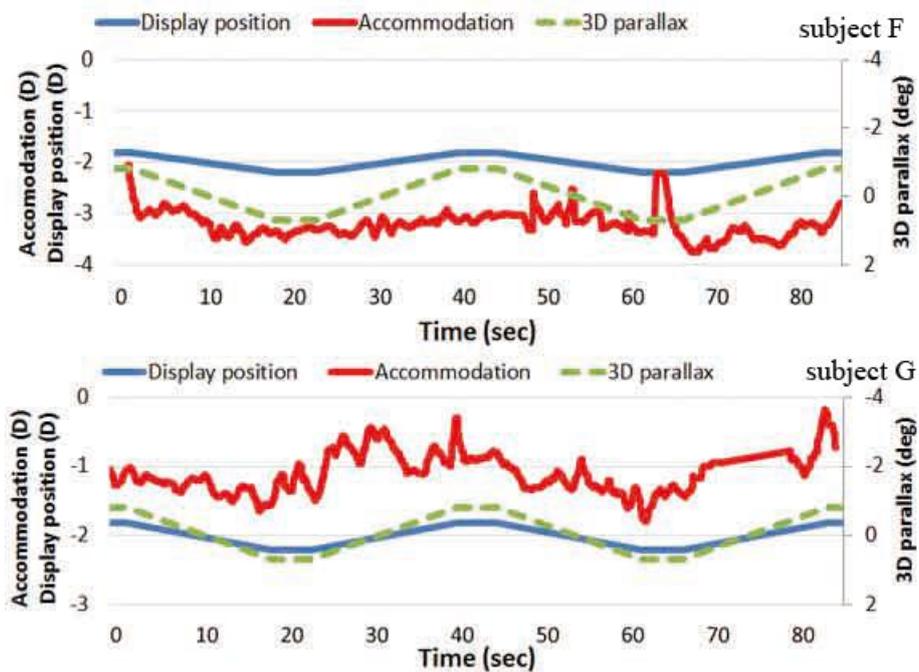


図 3-23 : ステレオアノマリーの被験者の調節の変化量 (パターン 3)

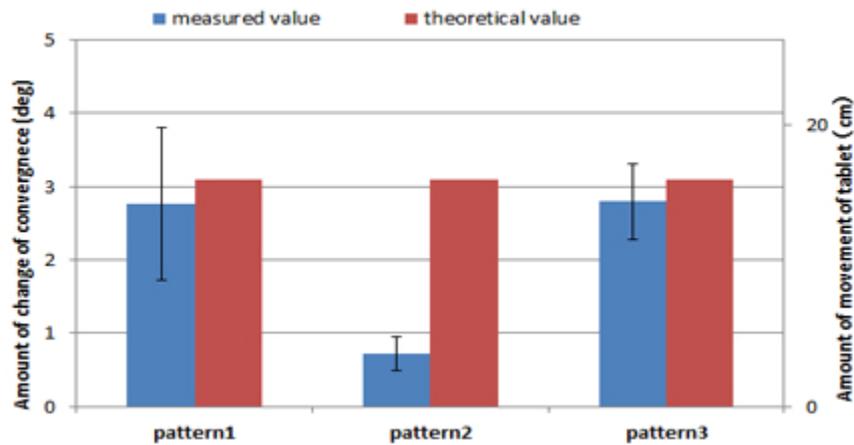


図 3-24：各パターンにおける輻輳角の平均変化量と理論値

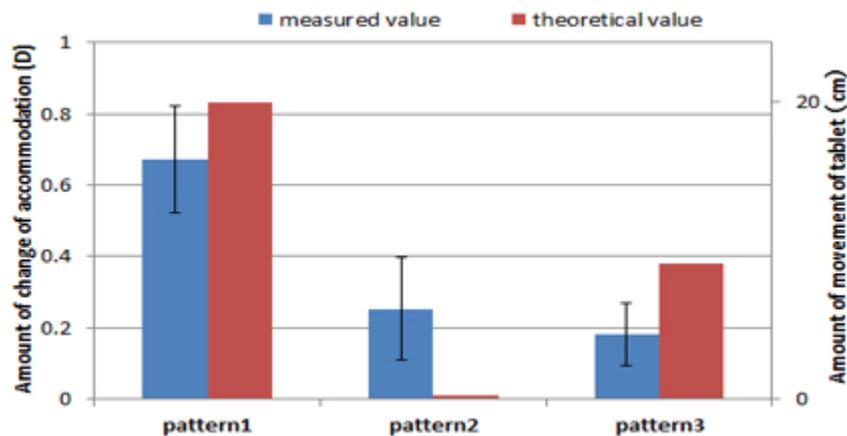


図 3-25：各パターンにおける調節の平均変化量と理論値

これらの結果は、被験者 B と同様に被験者 F,G は、固定された 3D タブレット上の 3D 映像の奥行き移動に追従することができなかったが、表示する 3D ディスプレイの奥行き方向の動きに同期させた 3D 映像を視聴させた際に視標を追従する傾向が見られた。

図 3-15 に見られるように、パターン 3 の被験者 A、C、D、および E の調節変化は、理論値に非常に近い値を示した。しかし、被験者 B、F、G のパターン 1,2,3 の調節変化は理論値から  $\pm 0.2D$  程度変化していた。この結果は約  $0.2D$  とされる調節微動の範囲内にあると考えられる[14]。さらに、Cambell は、 $2mm$  の瞳孔を有する被写界深度が  $0.43D$  であり、 $6mm$  の瞳孔を有する被写界深度が  $0.21D$  であることを見出した[16]。Ogle と Schwartz は、瞳孔径  $1mm$  あたり被写界深度が約  $0.12D$  増加したと報告している[17]。図 3-12 に示すように、ここでの瞳孔径は  $3.5\sim 4.5mm$  であったことから、先行研究によれば、焦点深度が約  $0.3D$  であったことを意味する。この範囲内の奥行き変化は、ぼけを検出できないため調節変化を引き起こさない。このことは、被験者 B、F、G においては 3D 映像の視差変化

ではなく、ディスプレイと被写体との距離に応じて調節応答が正確に変化したことを示唆している。

さらに、3D 映像の視差のみが変化したパターン 1 と、3D 映像の視差が視標の移動に応じて変化するパターン 3 の結果を比較すると、B、F、G はステレオアノマリーであると判断された。序論にも述べたが、ステレオアノマリーとは、網膜上の特定の視差に奥行きを感じることができない、または網膜上の視差に対応する奥行きを区別することができない人の状態をいう。網膜像上の交差視差のための輻輳眼球運動を行うことができない人々、網膜像上の交差していない視差のために輻輳眼球運動を行うことができない人々がいると言われている[18,19]。

Jones [18]はそのような立体視異常を「ステレオアノマリー」と呼んだ。B、F、G を含むすべての被験者は、3D 静止画をあらかじめ融合することができ、全員立体視正常者であった。Jones は 200ms の持続時間のステップ刺激として視差を与えたが、我々が提示した視標はスムーズに動く運動だった。立体視は二段階の過程であると言われており、Richards [20,21]は精細な視差に対する立体視は正常であるが、粗い視差に対する立体視は異常である人がいると報告している。粗い視差は大きな視差変化によって、または短い提示時間では各眼の異なる刺激によっても発生し、Richards の実験条件は Jones の研究条件と同等であった。

立体視標の持続時間が長くなると精細な視差に対する立体視が改善され、ステレオ視力は約 3 秒で最大となるとされている[22]。なめらかな視差の動きを直接的には説明していないが、我々の実験では立体視標の左右の画像は似ていて、奥行き方向に連続して表示されていた。したがって、立体視標の視差移動は、Jones のステップ状の視差とは異なる精細な視差に対する立体視の状態に近いと考えられる。さらに、ステップ視差では生じないが、ランプ視差に基づいて生じる輻輳眼球運動があるという報告も行われている[23]。

本実験は 3D 静止画をタブレット上ではっきりと融合できた被験者 B、F、G において、図 3-8 および図 3-20 に示すようなパターン 2 では、輻輳眼球運動が視標を追従するような変化は見られなかった。しかし図 3-10 および図 3-22 に示すようなパターン 3 では、3D 映像の視差とディスプレイの奥行き方向の動きに対応する視差の合計に相当する輻輳眼球運動が、ディスプレイを同時に動かすことによって生じた。

被験者 B、F、G の輻輳眼球運動が 3D 映像の視差変化に反応しなかった場合、輻輳角の変化はディスプレイの 10cm の変位に対応していたはずである。従って、全視差変化の半分になるはずである。実際は映像の変化、移動の変化の両方に反応し理論上の視差変化に対応する輻輳眼球運動が観察された。

この結果は、3D 画像の視差変化のみによって輻輳眼球運動が起こらない被験者であっても、ディスプレイの奥行き移動などの他の手がかりを加えることによって輻輳眼球運動が実行されることを示した。これらステレオアノマリーは 3%の被験者で見られた。将来の発展として、輻輳異常の種類を特定し、それに関わる実験を設計することにより、多様なス

テレオアノマリーを有する人が容易に見ることができる立体表示方法を提案できると考えられる。

### 3.7 結言

我々は、奥行き方向に動く様々なタブレットに表示された視標を注視する際の輻輳眼球運動と調節応答を測定することで、表示媒体やフォントの種類や大きさによって変化することを以前に示した[1]。本論文では 3D 映像の奥行きの動きと 3D ディスプレイの奥行きの動きを同期させた新しい 3D 表示方法を提案し、輻輳眼球運動と調節応答を測定した。以前、輻輳眼球運動と調節応答を測定するために使用した装置は、両装置の干渉の問題があり被験者によっては良好なデータがとりにくい問題があった。そこで、眼球運動測定カメラを調節測定装置の顎あての柱に設置することにより、測定装置を改良した。これにより、被験者ごとに眼の動きと調節を独立して調整することが可能になった。次に、輻輳眼球運動と調節応答を同時測定した結果が、別々に測定された結果と変わらないことを示した。

実験では 3D 映像を見ている被験者の輻輳眼球運動と調節応答を測定した。固視微動と調節微動の性質を考慮して考察した結果、輻輳角と調節応答の変化が理論値に近いことを示した。また、ステップ状に変化する奥行き対象を見た場合立体視ができた被験者が、滑らかに移動する視対象を見た場合輻輳眼球運動を行うことができない現象、つまりステレオアノマリーの被験者を確認することができた。また、ディスプレイが固定された 3D 映像を見るときに輻輳眼球運動が動かなかつたステレオアノマリーの被験者が、奥行き移動するディスプレイと同期した 3D 映像を視聴させることで、通常と同様の輻輳眼球運動が生じることを示した。この結果は、ステレオアノマリーの人にも立体視しやすい新たな 3D 提示法の提案に発展が期待できる成果だと考えている。

### 3.8 参考文献

- [1]Shinya MOCHIDUKI, Yuki YOKOYAMA, Keigo SUKEGAWA, Hiroki SATO, Miyuki SUGANUMA, Mitsuho YAMADA, “Measurement of Accommodation and Convergence Eye Movement when a Display and 3D Movie Move in the Depth Direction Simultaneously,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.2, pp488-498, 2018.
- [2] Y. Yokoyama, H. Takahira, S. Mochiduki, and M. Yamada, “Dependence on the display methods for changes in accommodation and convergence when a target moves along the depth direction,” ITE Journal, vol.69, no.10, pp.J298–J305, 2015.
- [3] H. Ujike, “Visually Induced Motion Sickness (Keywords you should know),” ITE Journal, vol.61, no.8, pp.1122–1124, 2007.
- [4] S. Saida, “Safety image for all; The evaluation method and international standard,” ITE Journal, vol.58, no.10, pp.1356–1359, 2004.

- [5] S. Yano, M. Emoto, and T. Mitsuhashi, "Two factors in visual fatigue caused from stereoscopic images," *ITE Journal*, vol.57, no.9, pp.1187–1193, 2003.
- [6] T. Shiomi, K. Uemoto, T. Kojima, S. Sano, H. Ishio, H. Takada, M. Omori, T. Watanabe, and M. Miyao, "Simultaneous measurement of lens accommodation and convergence in natural and artificial 3D vision," *J. SID*, vol.21, no.3, pp.120–128, 2013. DOI #10.1002/jsid.156
- [7] T. Takeda, Y. Fukui, K. Ikeda, and T. Iida, "Three-dimensional optometer," *Applied Optics*, vol.32, no.22, pp.4155–4168, 1993.
- [8] F. Okuyama, K. Yana, T. Ikeda, and K. Oyamada, "Accommodative response and vergence eye movement by stereoscopic image," *Technical Report of ITE*, vol.20, no.24, pp.13–18, 1996.
- [9] R. Oohara, T. Yoneyama, M. Kurita, Y. Sakamoto, and F. Okuyama, "Measurement of static convergence and accommodation response to reconstructed images of elector-holography for depth perception," *ITE Journal*, vol.68, no.4, pp.J144–J151, 2014.
- [10] A.L. Sheppard and L.N. Davies, "Clinical evaluation of the Grand Seiko Auto Ref/Keratometer WAM5500," *Ophthal. Physiol. Opt.*, vol.30, no.2, pp.143–151, 2010.
- [11] Y. Sakai, R. Horai, K. Uda, N. Naito, K. Ichikawa, and A. Tamaoki, "The study of near reflex with Iriscoder 1. The change of illuminance," *Japanese Orthoptic Journal*, vol.29, pp.147–151, 2001.
- [12] Y. Yokoyama, K. Kikuchi, H. Takahira, and M. Yamada, "Analysis of change of accommodation and convergence dependence on the display methods when a target moves along the depth direction," *Technical Report of IEICE, IMQ*, vol.113, no.468, pp.271–276, 2014.
- [13] R. Osaka, Y. Nakamizo, and K. Koga, "Experimental psychology of eye movement," *The University of Nagoya press*, article 1994.
- [14] R.H.S. Carpenter, "The stability of Gaze and its implications for vision by Eileen Kowler," *Vision and Visual Dysfunction*, vol.8, 1991.
- [15] W.N. Charman and G. Heron, "Fluctuations in accommodation: A review," *Ophthal. Physiol. Opt.*, vol.8, no.2, pp.153–164, 1988.
- [16] F.W. Cambell, "The depth of field of the human eye," *Optica Acta: International Journal of Optics*, vol.4, pp.157–164, 1957.
- [17] K.N. Ogle and J.T. Schwartz, "Depth of focus of the human eye," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.49, no.3, pp.273–280, 1959.
- [18] R. Jones, "Anomalies of disparity detection in the human visual system," *J. Physiology*, vol.264, no.3, pp.621–640, 1977.
- [19] K. Shimono, M.Kondo, K. Shibuta, and Y.Nakamizo, "Psychophysical and vergence

responses of normal and stereoanomalous observers to pulse-disparity stimulus,” *The Japanese Psychological Research*, vol.53, no.3, pp.136–143, 1982.

[20] W. Richards, “Stereopsis and stereoblindness,” *Experimental Brain Research*, vol.10, no.4, pp.380–388, 1970.

[21] W. Richards, “Anomalous stereoscopic depth perception,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol.61, no.3, pp.410–414, March 1970.

[22] K.N. Ogle and M.P. Weil, “Stereoscopic vision and the duration of the stimulus,” *AMA Arch Ophthalmol*, vol.59, no.1, pp.4–17, 1958.

[23] K. Shimono and Y. Nakamizo, “Two subsystems in stereopsis and in vergence,” *ITEJ Technical Report*, vol.13, no.13, pp.1–6, 1989.

## 第4章 超高精細映像を近距離広視野で視聴した時の頭部眼球運動の分析<sup>[1]</sup><sup>3</sup>

### 4.1 諸言

近年の映像技術、伝送技術の発展によって、従来のフル HD と比較して 4K や 8K などの超高精細映像が我々の周りに普及してきた[2-9]。2014 年 6 月には CS デジタルで 4K 解像度のテスト放送を行なわれ、2015 年 3 月に衛星放送で SKY PerfecTV が有料 4K 放送を開始した。また、2020 年の東京オリンピックに向けて、総務省は 2018 年 12 月 1 日に 4K と 8K の放送を開始すると発表している[10]。ここで、テレビを視聴する際の適切な距離について説明する。テレビの標準視聴距離は、視力 1.0 の人が走査線の構造を見ることができない距離として定義される[11,12]。525 本の走査線を使用した NTSC TV の場合、距離は 6H (ディスプレイの高さの 6 倍)だったが、現在の主流である HDTV の 1,125 走査線の場合、視距離は 3H (ディスプレイの高さの 3 倍) であるとしている。従って、4K、8K 映像では、走査線構造が見えない距離はディスプレイの高さの 1.5 倍、0.75 倍であると考えられる。フル HD の視野角が水平方向に約 30 度である場合、4K および 8K の視野角はそれぞれ約 60 度および 100 度であるといわれている[13]。

この走査線構造を変更することにより、画質評価実験における視距離はフルハイビジョンの場合は 3H[14]であったが、4K では 1.5H、8K では 0.75H[15,16]と変化した。他の研究では、表示サイズ、輝度、解像度、内容などのパラメータを使用して表示距離の効果を検証する実験が行われた [11,17-19]。しかし先行研究では、視聴者は画面に対して中心からディスプレイを見ており、視聴位置を変えたものではない。家庭内のテレビの視聴位置を調査した先行研究では、視聴位置がテレビ画面から約 45 度の範囲内に分布していることが報告されており[20]、視聴位置や観視距離が視聴行動に及ぼす影響を明らかにすることが重要と考えられている。次に有効視野について説明する。Hatada らによると、人間が目で見得る情報が得ることが出来る有効視野の範囲は約 30 度と言われている[21]。このことから、有効距離が 30 度を超えているため、1.5H (60 度) または 0.75H (100 度) の視距離で視覚情報を眼球運動だけで自然に取得することは不可能となる。したがって、頭の動きと目の動きを組み合わせることで広視野から情報を得ることが必要であるとされている。また、視線は頭と目の動きの合計であるという事実がある[22]。以前の研究より、視線を 30 度以上移動させたときの頭部運動の比率が 60-80%であることが分かっている[22-24]。

本研究室の高比良らは、三条件の視聴位置 (ディスプレイの中心、中心から 1/4 左、中心から 1/4 右) かつ三条件の観視距離 (0.75H、1.5H、3H) で、4K 解像度映像を視聴した際

---

<sup>3</sup>本論文は IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.6, pp.892-899, 2018.に掲載されている「Analysis of Head Movement During Gaze Movement with Varied Viewing Distances and Positions [1]」より、電子情報通信学会の許可を得て、再利用している。Copyright(C) 2018 IEICE.

の頭部運動、眼球運動から視線移動を分析し、画面中心付近に平均注視点が集まり、その注視点は映像内容、観視距離、および視聴位置に関わらず画面全体に分布していたこと、ANOVAを用いた分散分析の結果、平均注視位置には映像内容、観視距離、視聴位置で有意な差が見られたことを示した[25]。しかし、この実験では近距離視聴時に重要な役割を果たす頭部運動の分析までは行われていなかった。本論文では高比良らが課題として残した映像種類・観視距離・視聴位置に対する頭部運動の向きについて研究を行った。実験には三種類の映像を用いた。映像1は世界遺産の風景を流す映像、映像2は冤罪をきせられた父の汚名をすすぐため真犯人を探す時代劇、映像3は記憶を失い昏睡状態から目を覚ました男のヒューマンドラマであった。これらの映像は4Kで撮影され、2Kで放送されたものを再び4Kにアップコンバートしたものを使用した。本論文では高比良らと同じ9条件で頭部運動を解析し頭部運動の特徴を明らかとすべく実験を行った。

その結果、被験者は、視距離が減少するにつれて、頭を画面中心から前方に回転させる傾向を示した。風景映像であった映像1と、対話場面が多い劇的な映像2と3との間には、有意差が認められた。以下その実験方法と実験結果について詳細に述べる。

## 4.2 実験方法

実験は東海大学の実験室で行った。実験環境を一定にし、光が入射しないように、ディスプレイの後ろから被験者の横までブラックアウトカーテンを用いて覆い隠した。室内照度15.5Luxの条件下で、ディスプレイの輝度は最小0.25cd/m<sup>2</sup>、最大277cd/m<sup>2</sup>であった。

映像は、4K解像度の55インチ液晶ディスプレイ（東芝REGZA55X3）に提示した。以前開発した測定装置[26]を用いて、眼球運動、頭部運動、および視線の動きを測定した。眼球運動測定にはNac Image Technology社の角膜反射方式を用いたEMR-8Bを用い、頭部運動測定にはPolhemus社の磁気位置検出システムパトリオットを用いた。測定時は被験者の帽子にパトリオットとEMR-8Bを取り付けた。ソースコイルは被験者の右側に設置された木製の棒に固定した。磁気センサーであるパトリオットは磁気による妨害を受けるため、周囲に鉄製品などの干渉するものが置かれないように注意を払った。今回は被験者に映像を自由に見せたいため、頭部運動や眼球運動についての指示を与えず、自由に見るように教示した。表4-1に実験装置を記す。

表 4-1 : 実験装置

Display	REGZA55X3 Toshiba, Tokyo
Eye-movement measurements	EMR-8B Nac Image Technology, Tokyo
Head-movement measurements	Polhemus Colchester, VT
Measurable range	Horizontal: 120 degrees Vertical: 90 degrees
Accuracy	Horizontal: 5% within $\pm$ 60 degrees Vertical toward upper direction: 10% within $\pm$ 45 degrees Vertical toward lower direction: 20% within $\pm$ 45 degrees
Sampling rates	30Hz
Resolution	0.1 degrees

実験で使用した映像を表 4-2 に示す。本実験には 3 種類の映像を用いた。これらは 4K カメラで撮影され、4K で編集され、2K 解像度で放送されたものを同じ画質で録画し、再度 4K に変換して提示した。各被験者は 3 つの視聴位置と 3 つの観視距離で同じ映像を 9 回視聴した。各条件のために、9 条件の映像を約 5 分程度の長さになるように編集して切り出した。この時、会話が途中で途切れたりしないように映像の切り替わりのタイミングなどに合わせて編集を行った。

表 4-2 : 実験映像

Kinds	Time	Content
Image 1 世界遺産 THE WORLD HERITAGE BS-TBS 放送	5 分 × 9	イエローストーン国立公園や カナディアンロッキー、アブ・シンベルからフィラエまで ヌビア遺跡群の世界遺産を紹介する映像
Image 2 桜ほうさら NHK-BS Premium 放送	5 分 × 9	幕末を舞台に一人の 若侍が父親に汚名をかぶせた 犯人を捜す時代ミステリー
Image 3 チキンレース WOWOW 放送	5 分 × 9	交通事故で 45 年間意識を失っていた 男が青年看護師と失われた青春を 取り戻すヒューマンドラマ

本実験での視聴条件は視聴位置 3×観視距離 3 で合計 9 条件あった。被験者は、3 種類の観視距離 (0.75H [51cm]、1.5H [102cm] および 3H [204cm]) および 3 種類の視聴位置 (左 : ディスプレイの表示幅の 1/4 左に位置する、中央 : 画面中心に位置する、右 : ディスプレイの表示幅の 1/4 右に位置する) で視聴する。図 4-1 に実験での視聴条件の概略を示す。

我々は、実験開始時にディスプレイの中心を見るように被験者に指示した。本実験では被験者を 2 つの群に分けた。1 つ目の群は、視聴順序の影響を避けるために、左 0.75H の位置から視聴を始めさせ、2 つ目の群は、右 3 H の位置から視聴を始めさせた。被験者には、それぞれの視聴条件に設置された椅子に座って映像を自由に見るよう指示した。映像を約 5 分視聴させてのち、次の条件へ移動し次の映像を視聴させた。

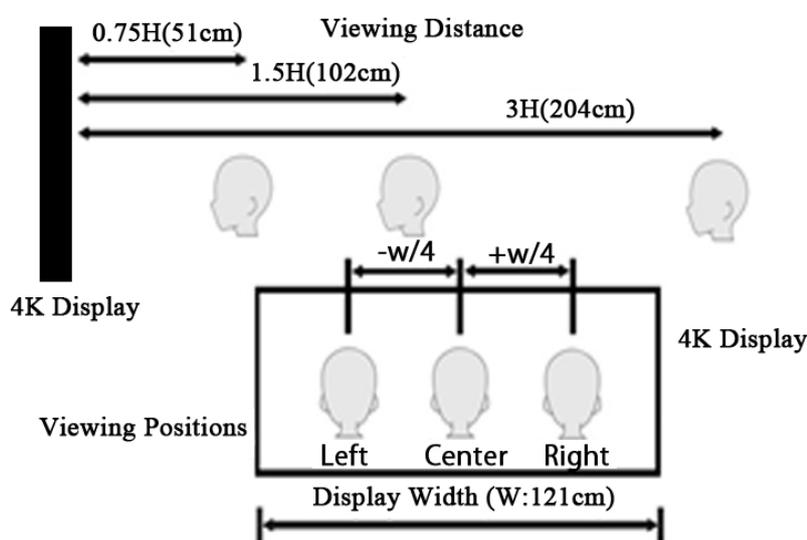


図 4-1 : 視聴条件

被験者は正常な視力を有し、頭部眼球運動が十分正確であった大学生 15 名 (男性 9 名、女性 6 名) であった。第 1 群は男性 4 名、女性 3 名、第 2 群、男性 5 名、女性 3 名であった。第 1 群は 0.75H から実験を開始し、3H で終了、第 2 群はその逆であった。今回は、眼球運動と頭部運動の良好な測定が得られた男性 3 人と女性 3 人 (第 1 群から 4 人、第 2 群から 2 人) の結果を分析した。今回 6 人だけのデータのみになったのは、60 度の広視野において全体で誤差なく眼球運動を取得することは非常に難しかったためである。誤差が少ない被験者においても、大きく視線移動した際の信頼性が損なわれることが考えられた。したがって、頭部運動および眼球運動を誤差なしに得ることができた被験者についてのみ限定し分析を行った。

視線の平均頭部回転角は、各視聴位置と観視距離から算出した。視線の動きについての計算方法は先行研究[26]に従った。視線について以下のように計算した。式 (1)、(2) で、眼球運動測定装置から得られた生データを、首の傾きの角度を用いて正しい水平および垂

直の眼球運動に変換した。次に式 (3)、(4) を用いて、頭部運動の移動量を観視距離  $D$  を用いて眼球運動相当量に換算した。最後に式 (5)、(6) から首の傾きを考慮した眼球運動と、頭部回転角、頭部の移動量を眼球運動に変換したものをを用いて視線とした。

この視線移動の  $G_x$  と  $G_y$  から注視点を抽出した。注視点の定義は、静止画を注視する際に閾値として 5 度/s の視線移動速度が用いられる[27]。しかし、本実験では映像を注視しているため、動画像に適していると言われている閾値として 10 度/s を採用した[28]。目の回転の中心は頭の回転の中心から約 10cm 異なるが、頭の回転角は、視距離が 10cm を超えるときの目の回転角にほぼ等しいとされている[22,29]。そこで頭部回転角と眼球回転角の和として視線移動を算出した。今回は首の傾きを伴う頭部の平行移動がほとんど起こらなかったため、回転角度は  $E_x = E_y = H = 0$  として分析した。被験者は、眼球運動の較正後にスクリーン中心を注視した。その時の値をオフセットとして(0, 0)に設定した。また、視聴位置が横方向に配置されているため、主に水平頭部回転角を分析した。

$$X_e = X'_e * \cos(H_\theta) + Y'_e * \sin(H_\theta) \quad (1)$$

$$Y_e = -X'_e * \sin(H_\theta) + Y'_e * \cos(H_\theta) \quad (2)$$

$$E_x = 180 / \pi * \tan^{-1}(H_x / (D + H_z)) \quad (3)$$

$$E_y = 180 / \pi * \tan^{-1}(H_y / (D + H_z)) \quad (4)$$

$$G_x = X_e + H_\phi + E_x \quad (5)$$

$$G_y = Y_e + H_\phi + E_y \quad (6)$$

$E_x$  : horizontal angle conversion of head translation movement into eye movement

$E_y$  : vertical angle conversion of head translation movement into eye movement

$H_x$  : horizontal translation of head movement

$H_y$  : vertical translation of head movement

$H_z$  : depth translation of head movement

$H_\theta$  : neck tilt angle

$D$  : viewing distance

$G_x$  : horizontal gaze

$G_y$  : vertical gaze

$H_\phi$  : horizontal head rotation angle

$H_\phi$  : vertical head rotation angle

$X'_e$  : raw data of horizontal eye movement

$X_e$  : horizontal eye movement after rotation  $H_\theta$

$Y'_e$  : raw data of vertical eye movement

$Y_e$  : vertical eye movement after rotation  $H_\theta$

### 4.3 実験結果

最初に回転角を求める方法[26]について説明する。図 4-2 は、実験中の視線移動の一例である。世界遺産の映像中の像 (A) から (B) に視線を移動させたときの視線の動きを例とする。

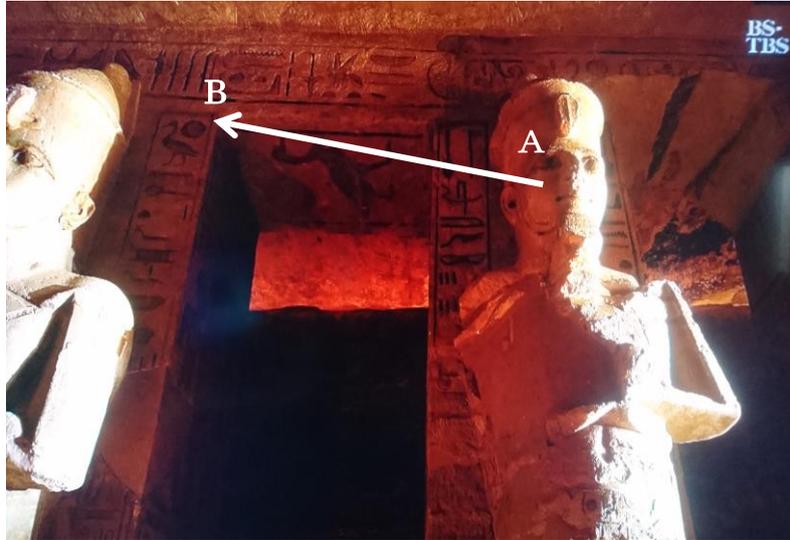


図 4-2 : 映像 1 視聴時の被験者の視線例

頭部の回転角を抽出する方法を説明するために、眼球運動、頭部運動、視線移動、視線の速度を図 4-3 に示す。縦軸は水平の角度と視線の速度を示し、横軸は時間を示す。赤線、緑線、青線、紫線はそれぞれ頭部運動、眼球運動、視線移動 (頭部運動+眼球運動)、視線の速度を示す。図 4-3 の A、B は、図 4-2 の A、B に相当し、黒線 (C) で示されている視線の速度が 10 度/s 未満になった区間を注視と判定した。注視点 A と注視点 B の頭部回転角の差から変化 D を算出した。

このようにして求めた各映像の平均頭部回転角を図 4-4 ~ 4-6 に示す。縦軸は回転方向を角度で示し 0 度は画面中心を示し、縦軸の正と負の値はそれぞれ右と左を示している。横軸は視聴位置を示している。青線または赤破線は、有意差の得られた組合せを示している。(\*は  $p < 0.05$  の有意差を示し、\*\*は  $p < 0.01$ 、\*\*\*は  $p < 0.005$ 、\*\*\*\*は  $p < 0.001$  のものを示す) これらのアスタリスクは後述する表 4-4 ~ 4-8 にも対応する。

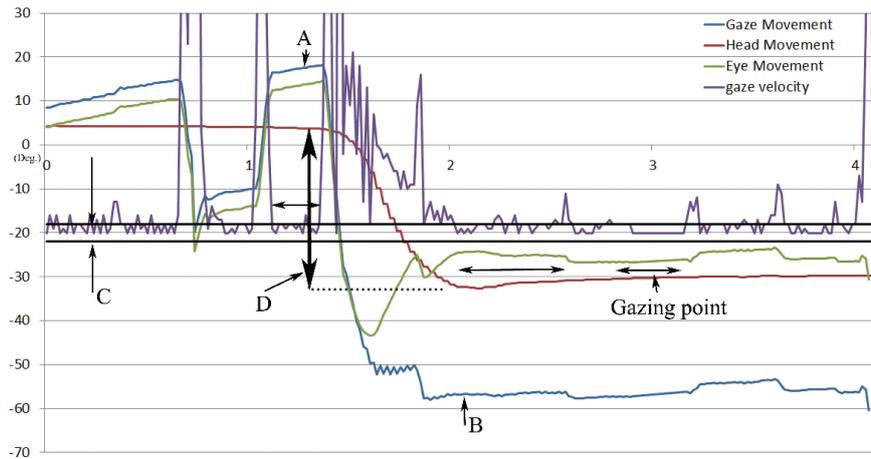


図 4-3 : 図 4-2 の視線移動時の注視点を判断し、頭部回転角を抽出する方法

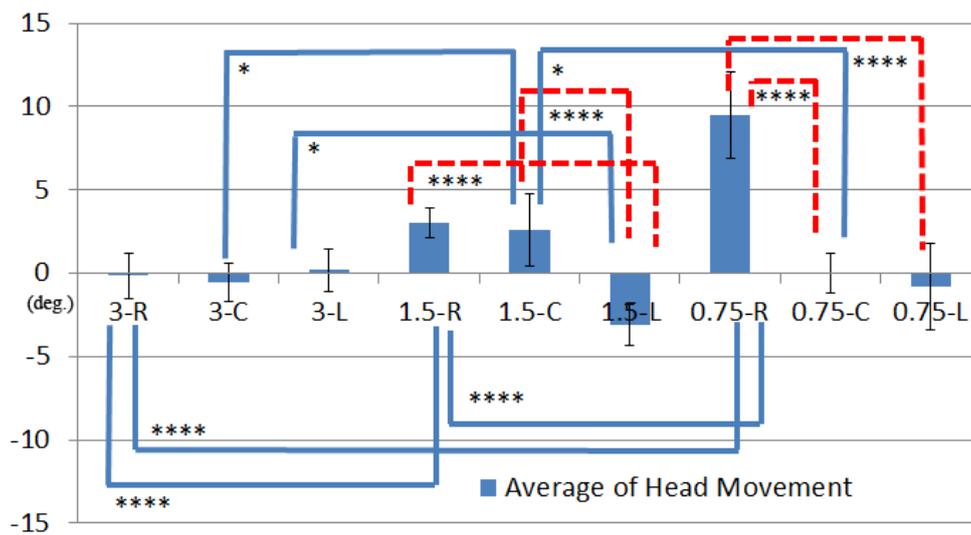


図 4-4 : 映像 1 の平均頭部回転角

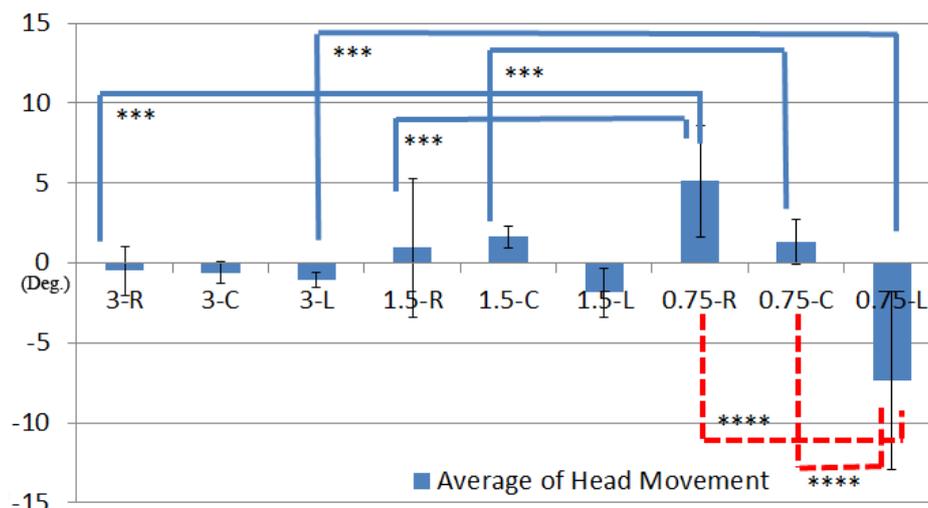


図 4-5：映像 2 の平均頭部回転角

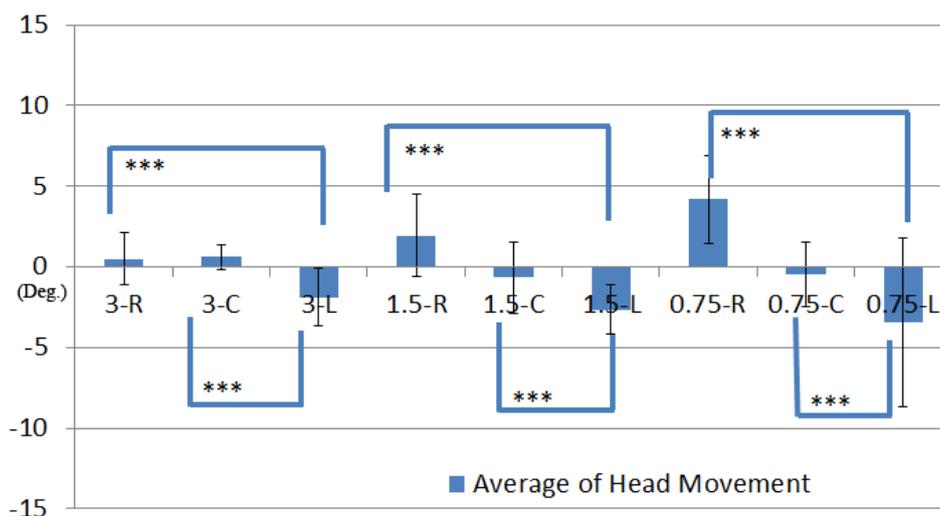


図 4-6：映像 3 の平均頭部回転角

図 4-4 に映像 1 の結果を示す。右位置 (R) では、観視距離が 3 H、1.5 H から 0.75 H に近づくと、頭部は中心から有意に右に回転した。左位置 (L) では 3 H と 1.5 H で有意に左に回転したが、1.5 H と 0.75 H の視距離では有意差は見られないものの、3 H と比較して中心より左方向に回転していた。中央位置 (C) では 3 H と比較して 1.5 H で中心から画面に向かって右に回転し、その差は有意であったが、0.75 H では再び画面中心を向いた。さらに、各視聴位置においては 1.5H と 0.75H で有意差が見られた。左位置は、頭部回転を中央より左に、そして右位置では右方向に回転させた。中央位置では一定の傾向は見られなかった。

図 4-5 に映像 2 の結果を示す。右位置 (R) では、視距離を 3 H、1.5 H、0.75 H の順に

変化させた場合、頭部は中心から右に回転し、頭部回転角度に有意差が見られた。同様に、左位置（L）では、視距離を 3 H、1.5 H、0.75 H の順に変化させたとき、頭部は中心から左に回転し、頭部回転角度に有意差が見られた。中央位置（C）では、観視距離に対応した頭部変化に一定の傾向はなかった。左位置では、頭部は中央から左に、そして右位置では反対に回転した。中央位置では、頭部回転の方向は、画面中心付近にあった。

図 4-6 に映像 3 の結果を示す。視聴位置左と右、中央と右に有意差があった。左位置では、中心から左に頭部を回転させ、右位置では逆に回転させていた。中央の位置では、頭部回転は、画面中心付近にあった。

表 4-3 は、各条件に対する 3 つの映像の回転角度を平均した平均頭部回転角を示す。水平頭部回転は、観視距離 0.75H では、左位置においてスクリーン中心から左に 3.9 度であり、中央位置においてほぼ中央であり、右位置においてスクリーン中心から右に 6.3 度であった。観視距離 1.5H では、左位置においてスクリーン中心から左に 2.5 度、中央位置においてスクリーン中心から右に 1.2 度、右位置においてスクリーン中心から右に 2.0 度であった。最後に、観視距離 3H では、左位置においてスクリーン中心から左に約 0.9 度であり、中央位置ではほぼ中心にあり、右位置でもほぼ中央にあった。

垂直方向の頭部回転に関しては、画面中心より上部を見た傾向は見られたが、値は小さくほぼスクリーン中心方向であった。

表 4-3：各視聴条件における 3 映像の平均頭部回転角

Viewing position	Mean horizontal head rotation direction (deg.)
0.75H-L	-3.9
0.75H-C	0.3
0.75H-R	6.3
1.5H-L	-2.5
1.5H-C	1.2
1.5H-R	2.0
3H-L	-0.9
3H-C	-0.2
3H-R	-0.1

映像 1 の観視距離と視聴位置の 2 要因の分散分析の結果を表 4-4 に示す。観視距離、視聴位置、観視距離×視聴位置の主効果に有意水準 5%で有意差が見られた。次に多重比較を行った。有意差が見られた組み合わせを表 4-5 の右欄に示す。観視距離については左位置で 3H と 1.5H に有意差が見られ、1.5H のほうが 3H よりも頭部を左に回転させていた。中央位置では 1.5H と 3H、および 1.5H と 0.75H との間に有意差があった。3 H および 0.75 H は、1.5 H よりも頭部を左に回転させていた。右位置では 0.75 H、1.5 H、3 H の間に有意

差が見られた。観視距離が近づくにつれて頭部は被験者の前方、すなわち画面中心よりも右側に回転した。視聴位置については観視距離 1.5H で右位置と左位置、中央位置と左位置で有意差があり、観視距離 0.75H では右位置と左位置、右位置と中央位置で有意差が見られた。

次に映像 2 の観視距離と視聴位置の 2 要因の分散分析の結果を表 4-6 に示す。視聴位置と視距離×視聴位置の主効果に有意水準 5%で有意差が見られた。次に多重比較を行った。有意差が見られた組み合わせを表 4-7 の右欄に示す。観視距離については左位置で 0.75H と 3H、0.75H と 1.5H との間に有意差があった。0.75H は 1.5H、3H よりも頭部を左に回転させていた。右位置で 0.75H と 3H、0.75H と 1.5H との間に有意差があった。0.75H は 1.5H、3H よりも頭部を右に回転させていた。視聴位置については観視距離 0.75H で左位置と右位置、中央位置と左位置との間に有意差が見られた。

最後に映像 3 の観視距離と視聴位置の 2 要因の分散分析の結果を表 4-8 に示す。視聴位置の主効果に有意水準 5%で有意差が見られたため、多重比較を行った。有意差が見られた組み合わせを表 4-9 の右欄に示す。左右の視聴位置、および中央位置と左位置との間に有意差が見られた。上記の結果から、右位置の頭部回転は、画面中央よりも右に回転し、左位置の頭部回転は、画面中央よりも左に回転する傾向があり、中央位置は一貫した傾向は見られず、画面中心からの左右の回転は小さくほぼ画面中央に向く傾向が見られた。

表 4-4：映像 1 の観視距離、視聴位置を要因とした二要因の分散分析の結果(\*\*\*:p<0.005, \*\*\*\*:p<0.001)

Factor	F Value
Viewing distance	F(2,44)=16.203***
Viewing position	F(2,44)=29.279****
Viewing distance × Viewing position	F(4,44)=17.353****

表 4-5：映像 1 の単純主効果の結果(\*:p<0.05, \*\*\*:p<0.005,\*\*\*\*:p<0.001)

Viewing position	F Value	Combinations with significant differences
Left	F(2,24)=4.878*	3H>1.5H
Middle	F(2,24)=4.754*	1.5H>3H, 1.5H>0.75H
Right	F(2,24)=41.542***	0.75H>1.5H>3H
3H	F(2,24)=0.189	None
1.5H	F(2,24)=17.007****	Right and Left, Middle and Left
0.75H	F(2,24)=48.042****	Right and Left, Right and Middle

表 4-6 : 映像 2 の観視距離、視聴位置を要因とした二要因の分散分析の結果(\*:p<0.05, \*\*\*:p<0.005)

Factor	F Value
Viewing distance	F(2,44)=0.660
Viewing position	F(2,44)=6.540*
Viewing distance × Viewing position	F(4,44)=7.188***

表 4-7 : 映像 2 の単純主効果の結果(\*\*:p<0.01, \*\*\*:p<0.005,\*\*\*\*:p<0.001)

Viewing position	F Value	Combinations with significant differences
Left	F(2,24)=8.863***	3H>0.75H, 1.5H>0.75H
Middle	F(2,24)=1.096	None
Right	F(2,24)=6.389**	0.75H>3H, 0.75H>1.5H
3H	F(2,24)=0.034	None
1.5H	F(2,24)=1.569	None
0.75H	F(2,24)=18.898****	Right and Left, Middle and Left

表 4-8 : 映像 3 の観視距離、視聴位置を要因とした二要因の分散分析の結果(\*\*\*:p<0.005)

Factor	F Value
Viewing distance	F(2,44)=0.192
Viewing position	F(2,44)=12.726***
Viewing distance × Viewing position	F(4,44)=1.072

表 4-9 : 映像 3 の単純主効果の結果

Pair	T Value	P Value	Significance
Left and Right	5.044	0.001	s.
Middle and Right	2.459	0.04	n.s.
Middle and Left	2.586	0.032	s.

#### 4.4. 考察

超高精細映像を標準視距離で視聴すると視野角が 4K では約 60 度、8K では約 100 度と広がるため、頭部運動と眼球運動の同時測定が必要不可欠であると考えた。そこで、超高精細映像を見る際の注視時の頭の回転方向を、視聴位置や観視距離を変化させながら解析した。その結果、右位置の頭部回転は、画面中央よりも右に回転し、左位置の頭部回転は、画面中央よりも左に回転する傾向があり、中央位置は一貫した傾向は見られず、画面中心からの左右の回転は小さくほぼ画面中央に向く傾向が見られた。観視距離 0.75H の頭部回

転の標準偏差は、近距離による広視野から頭部を激しく動かして映像を見ようとしたため、3Hよりも大きかったと考えられる。

図4-7は、各視聴位置および各観視距離における3映像の平均頭部回転方向を示す。画面の中心を(0,0)として、三角は3H、正方形1.5H、菱形は0.75Hを表し、左位置は青色、中央位置は赤色で、右位置は緑色で示した。頭部が画面中心から被験者の前方側に回転する傾向が見られた。実験開始時には被験者は頭を画面中央に向けていたが、近距離での視聴だったために、頭部を前方に回転させるようになったと考えられる。

また、観視距離が画面に近いほど頭を被験者自身の前方に回転させる傾向が見られたが、図4-4～4-6に示すように、映像1の方が映像2および3よりも有意差が見られた。映像1には、カナダのロッキー山脈やイエローストーン国立公園などの世界遺産の風景が主に含まれていたため、被験者は映像内を好きなように見ることが出来た。一方、映像2と3はドラマであり、主に演者同士の会話から成り立ち、頭部、眼球、視線は観視距離や視聴位置に関係なく出演者に向かっていった。

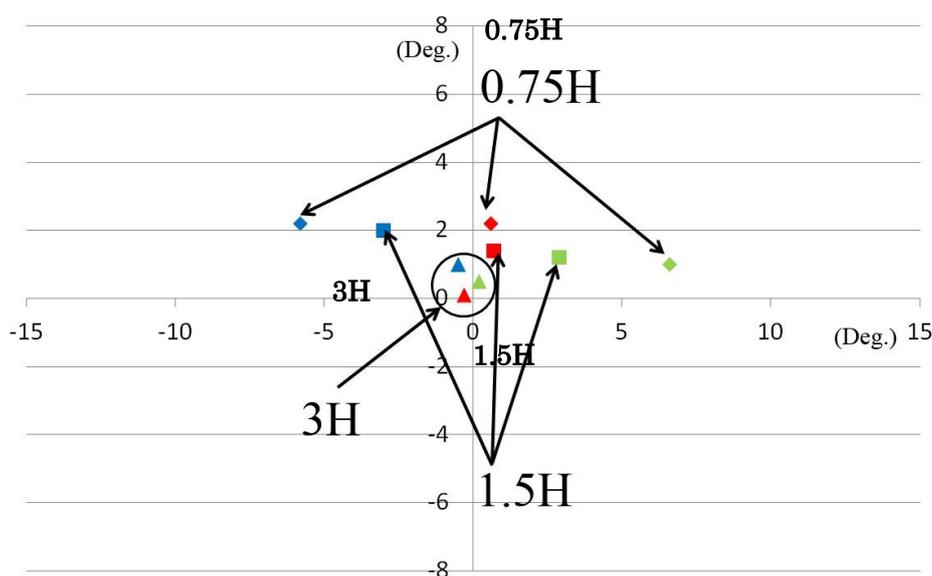


図4-7：各視聴条件における3映像の平均頭部回転方向

#### 4.5. 結言

近距離視聴が可能な超高精細映像を用いて、頭部運動に対する視聴条件の影響を解析した。解析には、3種類の距離(0.75H [51cm、視野角 100度]、1.5H [102cm、視野角 60度]、3H [204cm、視野角 30度]) 3種類の位置(左:ディスプレイの表示幅の1/4左、中央:画面中心、右:ディスプレイの表示幅の1/4右)の9条件を用いた。

右位置では画面中心から右方向に頭部が回転し、左位置では画面中心から左方向に頭部

が回転する傾向が見られたのに対し、中央位置の頭部回転は一定の傾向が見られなかった。つまり、超高精細テレビの近距離・広視野視聴では、視聴者は自分の正面方向に頭部を向けて見ることを明らかとした。また、観視距離を比較することにより、3H よりも画面に近い 0.75H では、頭部の回転角の標準偏差が大きく、近距離視聴において頭部を大きく動かすことにより広視野での視聴を可能としていることが示唆された。コンテンツの内容を比較すると自然などの風景映像が映されているコンテンツは、演者に対して目が向かいやすいドラマよりも、顕著に頭部回転が見られることが示された。

本実験により、従来の画像の主観評価では、複数の被験者がディスプレイの前に横並びになり画像を評価していたが、実験者側が視距離、位置、内容を考慮する必要があることが示され、超高精細映像の番組制作では、映像制作者が超高精細映像視聴時の特性としてコンテンツを制作する際の指針として貢献できた。

#### 4.6 参考文献

- [1] Shinya MOCHIDUKI, Reina WATANABE, Hideaki TAKAHIRA, Mitsuho YAMADA, "Analysis of Head Movement During Gaze Movement with Varied Viewing Distances and Positions," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.6, pp.892-899, 2018.
- [2] K. Wada, "Approximately 3% of the 4K TV ownership is willing to purchase majority - SKY PerfecTV! Surveyed 4K trends," Phileweb, <http://www.phileweb.com/news/d-av/201606/02/38923.html>, Jan. 2017 in Japanese.
- [3] K. Wada, "Japan's "4K conversion rate" exceeded 70% in 2020 - JEITA surveyed trend of world demand for AV & IT equipment," Phile-web, <http://www.phileweb.com/news/dav /201602/17/38280.html>, Jan. 2017 in Japanese.
- [4] M. Sugawara, M. Emoto, K. Masaoka, Y. Nishida, and Y. Shishikui, "SUPER Hi-VISION for the Next Generation Television," ITE Trans. on MTA, vol.1, no.1, pp.27-33, Jan. 2013.
- [5] M. Sugawara, M. Kanazawa, K. Mitani, H. Shimamoto, T. Yamashita and F. Okano, "Ultrahigh-Definition Video System with 4000 Scanning Lines," SMPTE J., vol.112, no.10-11, pp.339-346, Oct.-Nov. 2003.
- [6] M. Kanazawa, K. Mitani, K. Hamasaki, M. Sugawara, F. Okano, K. Doi, and M. Seino, "Ultrahigh-Definition Video System With 4000 Scanning Lines," Proc. IBC 2003, 321-329, 2003.
- [7] T. Yamashita, H. Masuda, K. Masaoka, K. Ohmura, M. Emoto, Y. Nishida and M. Sugawara, "'Super Hi-Vision' as Next-Generation Television and Its Video Parameters," SMPTE 2011 Annual Technical Conference & Exhibition, pp.25-27, Oct. 2011.
- [8] K. Masaoka, Y. Nishida, M. Sugawara, E. Nakasu and Y. Nojiri, "Sensation of

Realness from High-Resolution Images of Real Objects,” IEEE Transactions on Broadcasting, vol.59, no.1, pp.72-83, Mar. 2013.

[9] Next-generation broadcasting Promotion Forum, “Channel 4K,” <http://www.nextv-f.jp/information/>, September 2015.

[10] Information and Communications Bureau Broadcasting Technology Division, “Implementation of accreditation of 4 K and 8 K utility broadcasting services etc. by BS and 110 degrees east longitude CS digital broadcasting,” Ministry of Internal Affairs and Communications, [http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/snews/01ryutsu11\\_02000082.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/snews/01ryutsu11_02000082.html), Feb. 2017.

[11] ITU-R Recommendation BT.710, “Subjective Assessment Methods for Image Quality in High-Definition Television,” Nov. 1998.

[12] N. Narita, M. Kanazawa, F. Okano, “Optimum Screen Size and Viewing Distance for Viewing Ultra High-Definition and Wide-Screen Images,” The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan, vol.55, no.5, pp.773-780, May. 2001.

[13] K. Kawashima, J. Okamoto, “Quality evaluation technology of 4K video,” NTT Technical Review, vol.26, no.2, pp.68-71, Feb. 2014.

[14] Y. Shishikui, “Super Hi-Vision R&D,” NHK STRL R&D, no.137, pp.4-9, Jan. 2013.

[15] S. Tanaka, H. Mori, M. Kasuga, K. Shoji, “KANSEI Evaluation for High-definition Large-sized Images:- Comparison of Viewers’ Impressions between 4K and 2K Image -,” Transactions of Japan Society of Kansei Engineering, vol.14, no.2, pp.277-284, 2015.

[16] M. Kanazawa, Y. Kusakabe, “Picture Quality Assessment for Large-Screen Displays and Psychophysical Factors,” IEICE Fundamentals Review, vol.7, no.3, pp.242-248, Jan. 2014.

[17] M. Ardito, “Studies of the Influence of Display Size and Picture Brightness on the Preferred Viewing Distance for HDTV Programs,” SMPTE J., vol.103, no.8, pp.517-522, Aug. 1994.

[18] A. M. Lund, “The Influence of Video Image Size and Resolution on Viewing-Distance Preferences,” SMPTE J., vol.102, no.5, pp.406- 415, May. 1993.

[19] S. Kubota, K. Kishimoto, S. Goshi, S. Imai, Y. Igarashi, T. Matsumoto, S. Haga, T. Nakatsue, Y. Umano and Y. Kobayashi, “Preferred Viewing Distance for High Definition Television LCDs,” The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan, vol.65, no.8, pp.1215-1220, Aug. 2011.

[20] T. Matsumoto, S. Kubota, Y. Kubota, K. Imabayashi, K. Kishimoto, S. Goshi, S. Imai, Y. Igarashi, S. Haga and T. Nakatsue, “Survey of Actual Viewing Conditions at Home and Appropriate Luminance of LCD-TV Screens,” Journal of the Society for Information Display, vol.19, no.11, pp.813-820, Jun. 2011.

- [21] T. Hatada, H. Sakata, and H. Kusaka, "Psychophysical analysis of the 'sensation of reality' induced by a visual wide-field display," *SMPTE J.*, vol.89, no.8, pp.560-569, Aug.1980.
- [22] M. Yamada, "Head and Eye Coordination Analysis and a New Gaze Analyzer Developed for this Purpose, Visual and Oculomotor Functions," Eds;G.d Ydewalle and J. Van Rensbergen, Elsevier Science B. V., pp.423-434, 1994.
- [23] M.A Gresty, "Coordination of head and eye movements to fixate continuous and intermittent targets," *Vision Research*, vol.14, no.6, pp.395-403, 1974.
- [24] G.R Barns, "Vestibulo-ocular function during co-ordinated head and eye movements to acquire visual targets," *The Journal of Physiology*, vol.287, pp.121-147, 1979.
- [25] H. Takahira, S. Mochiduki, M. Yamada, "Analysis of Gaze Movement When Changing Viewing Distance and Viewing Position," *The IEICE Transactions on Information and Systems (Japanese Edition)*, vol.J99-D, no.3, pp.293-306, Mar. 2016.
- [26] H. Takahira, K. Kikuchi and M. Yamada, "A System for Measuring Gaze Movement and Hand Movement Simultaneously for Hand- Held Devices," *IEICE Trans. Commun*, vol.E98-B, no.1, pp.51-61, Jan. 2015.
- [27] M. Yamada, T. Fukuda, "Quantitative Evaluation of Eye Movements as Judged by Sight-Line Displacements," *SMPTE J.*, vol.95, no.12, pp.1230-1241, 1986.
- [28] R. Fukuda, M. Sakuma, E. Nakamura, T. Fukuda, "An experimental consideration on the definition of a fixation point," *The Japanese Journal of Ergonomics*, vol.32, no.4, pp.197-204, 1996.
- [29] RHS Carpenter, "Movements of the Eyes," 2nd Edition, Pion limited, pp.2-38, Jun. 1988.

## 第5章 頭部測定からスポーツへの応用研究[1]

### 5.1 諸言

2020年に東京オリンピック開催が決定し、トップアスリートの競技力を客観的に評価することにより、運動能力、競技能力の向上に役立てようという取り組みはますます本格化している。

また、熟練選手と未熟選手を対象としたスポーツ研究は多く研究されている[2,3]。アスリートのパフォーマンスを向上させるため要因の一つとして、目の動きは特に重要な領域とされている。熟練した選手の眼球運動は、特異な視覚探索によって重要な情報を得るとされ[4]、実際のアスリートを対象とした測定も行われている[5]。例えば、ボールを扱うスポーツではボールから目を離してはいけないと言われているが、ボールの速さが速すぎると、スムーズな追尾をすることができない。テニスプレイヤーを例に挙げると、テニスプレイヤーはテニスボールの着地点を予測し、その点にその目を動かすとされている[6]。一方、滑らかな追従眼球運動の精度を重視した実験では、一般大学生の場合、70度/秒で移動する目標を追う場合の位置誤差は、6～8度であったが、卓球選手である大学生は2度未満であるとの報告もされている[7]。

これまでのアスリートに対する眼球運動の主な手法としては実際の競技中に眼球運動測定装置を選手につけてもらう方法や、事前にスポーツ映像を撮影し、それらを被験者に顎台に頭部を固定して視聴させるなどがあった[6]。しかし、視線の動きは眼球運動だけで決められるわけではなく、頭部運動も関わってくる。眼球運動測定装置を選手が装着した状態で目の動きを計測すると、被験者（選手）の額または帽子などに取り付けられたカメラが大きく動き、実験後の映像の解析が困難になっていた。また、眼球運動の計測だけでは広視野から情報を得るため動く頭部運動まで測定はできない。そこで眼球運動と頭部運動を同時に計測できる装置を開発し、スポーツにおける頭部運動と眼球運動の協調解析のための新しい方法を提案した[8]。本論文では、この装置を用いて実際に選手に装着して競技中の視線を測定するのが目標であるが、その効果を確認するための基礎的な測定として4Kウェアラブルカメラで撮影した映像を、実験室で選手に視聴させた。本実験の対象としては野球を用いた、本学軟式野球部に練習試合をしてもらい、キャッチャー後方、一塁手、三塁手側方から撮影した画像を使用した。

### 5.2 実験方法

今回の実験対象として野球を用いた。キャッチャーの背後とランナーの背後にウェアラブルカメラ Panasonic HX-A500 [9]を固定し、映像を撮影した。4K映像を表示できる55インチディスプレイ（東芝 Regza55X3）を使用し、実験映像を提示した。キャッチャーと同等の視線、視距離を再現するために、ディスプレイと被験者との距離をスクリーンの高さの0.75倍の51cmに設定した。眼球運動測定には Nac Image Technology 社の EMR-8B

を使用し、頭部運動測定には Polhemus 社製のパトリオットを使用した。両装置を被験者の帽子に取り付け実験を行った。ソースコイルは被験者の右側に設置された木製の柱に固定した。磁気の妨げにならないように、被験者の周りに鉄などを置かないように注意した。眼球運動および頭部運動のデータは統一され、PC 上で視線に変換し出力した[8]。実験に用いた装置を表 5-1 に示す。

図 5-1 にシステム構成を示す。4K 映像は PC 上で再生し、4K ディスプレイに表示した。被験者が見た 4K 映像と視線の動きを ATEM Production Studio 4K Switcher [12] (Blackmagic Design、Fremont、CA、USA) を使用し出力した。4K 映像は HDMI 出力を介して ATEM スイッチャーに接続され、被験者の視線の動きを表すスーパーインポーズされた映像が実験者のディスプレイに表示され、非圧縮ビデオレコーダ (HyperDeck Shuttle ; Blackmagic Design、Fremont、CA、USA) で保存された。このように、頭部運動と眼球運動の組み合わせである被験者の視線を、被験者の背後から撮影しているカメラを用いて映像上にリアルタイムで重ねることに成功した。被験者は東海大学の 21~22 歳の男性 3 人、全員野球経験ありだった。うち 2 人はキャッチャーとしてプレーしており、1 人は外野手としてプレーしていた。

表 5-1 : 実験に使用した機器

image	4K Wearable camera Panasonic HXA500 [9]
Eye movement measurement	EMR-8B, Nac Image Technology, Tokyo, Japan [10]
Head movement measurement	Patriot magnetic position detecting system Polhemus, Colchester, VT, USA [11]

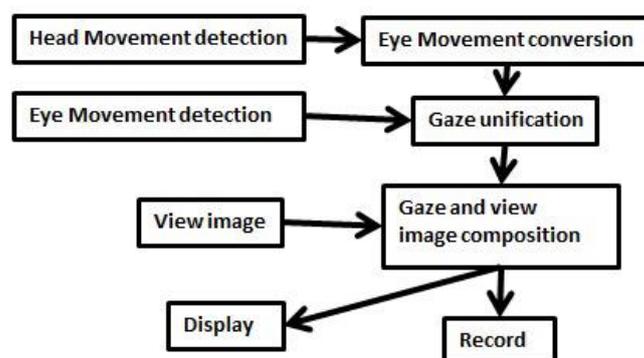


図 5-1 : システム構成図

本学の生徒で構成された硬式野球チームである「Highrings」の紅白戦の様子を撮影した。映像は、1 塁横、キャッチャーの後ろ、3 塁のそばの三カ所で撮影した。映像は約 5 分の長さに編集し、キャッチャーの背後から撮影されたシーン、一塁手の側から撮影されたシーン、三塁手の側から撮影されたシーンの 3 つのシーンに分類した。眼球運動が正しく測定できているかを確認するために、画面中央に固定点が提示されるシーンを挿入した。実験の前に教示として、「被験者はキャッチャーの背後から撮影したシーンをキャッチャーとして、1 塁と 3 塁の横のシーンではランナーとして、ゲームで実際にプレーしているかのように映像をみる」ように指示した。被験者は、頭部を固定せずに眼球運動および頭部運動センサーを装着した状態で映像を見ていた。

### 5.3 実験結果

図 5-2 は眼球運動測定装置の視野カメラで撮影された映像に眼球運動を重畳して表示した映像である。視野映像を解析に用いる場合、被験者の頭部の動きにより映像が大きく動き乱れることがあり解析が困難な場合もあった。図 5-3 に示す本提案手法では被験者の背後から撮影した映像に頭部運動と眼球運動を合算した視線を重畳して表示させた。従来の手法の視野映像に眼球運動を重畳して表示する場合と比較し、被験者の頭部運動により映像が大きく乱れることがないため解析や映像の確認の際に有用であり、頭部運動も同時測定しているため、実験後に視線に占める頭部運動と眼球運動の関係を容易に分析することができると考えられる。



図 5-2：従来の実験法による眼球運動の例



図 5-3：新たに提案する視線提示の方法例

はじめに、キャッチャーの背後から撮影された映像を見たときの結果について考察する。映像の内容は「ランナー1塁、ピッチャーが投げたボールがホームベース付近でバウンドして、キャッチャーが捕球し、1塁ランナーを警戒して見る」である。この映像ではピッチャーが投げたボールがホームベース付近でバウンドする為、キャッチャーが弾いたり、後ろにそらしたりする可能性があり、ランナーは次の塁を狙い走り出す可能性があるため、キャッチャーはピッチャーの投球がホームベース付近でバウンドしそうな場合は捕球もしくは体でボールを受け止めてランナーが次の塁に走っていないか確認する必要があるシーンとなっている。

図 5-4 は被験者 A、B、C 三名の視線の結果を示す。縦軸、横軸の角度はディスプレイの縁を示す。被験者 A と C はキャッチャー経験者であり、被験者 B はキャッチャー未経験者だった。キャッチャー経験者である被験者 A、C の視線は、ピッチャーが投げたボールがホームベース付近でバウンドしてから 1 塁ランナーを注視する動きが見られた。対して、キャッチャー未経験者である被験者 B の視線は常にボールを追従する動きがみられた。図 5-4 の青丸がキャッチャー未経験者である被験者 B 以外の視線が集まった 1 塁ランナー付近である。

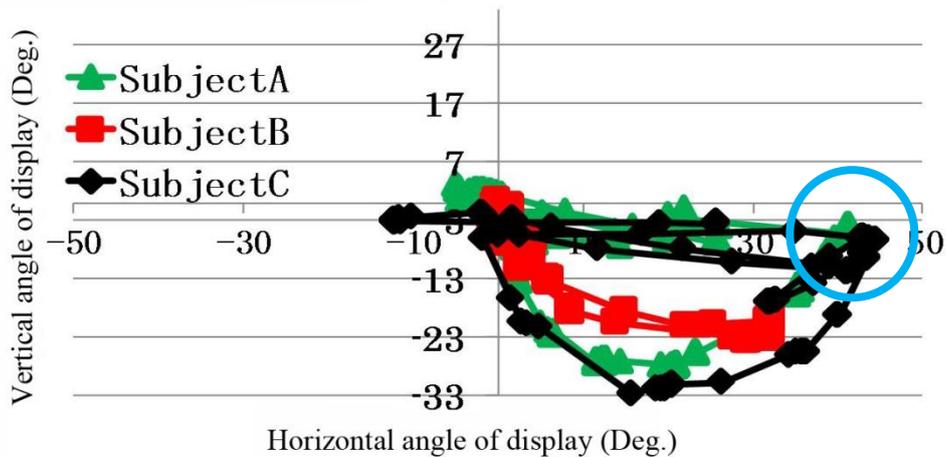


図 5-4：被験者 A、B、C 三名の視線の結果

次に、キャッチャー後方から撮影した「バッターが左方向に外野を越える長打を打ち、1 塁ランナー、2 塁ランナーは生還し、打ったバッターは 2 塁まで進む」映像を用いて実験を行った。図 5-5、5-6 はそれぞれ被験者 A、B の眼球運動に対応し、図 5-7 は両方の被験者の頭の動きの量を示し、図 5-8 は被験者 A と被験者 B の視線を組み合わせた結果を示す。キャッチャー経験者の被験者 A の視線は、ボールを追う動きが大部分を占めていたが、走ったバッターの動きを見る視線も見られた。対して、キャッチャー未経験者の被験者 B の結果は、主にボールを追うような眼球運動を示し、バッターに対しての動きはなかった。図 5-7 の頭部の動きの量を比較したとき、被験者 A は被験者 B よりも頭の動きが少ないことが見て取れる。被験者 A および B の視線の動きが同時に示されている図 5-8 の水色で囲んである部分は被験者 A が左方向に長打を打ったバッターが二塁ベース付近に到達した場所を見ているところを示している。

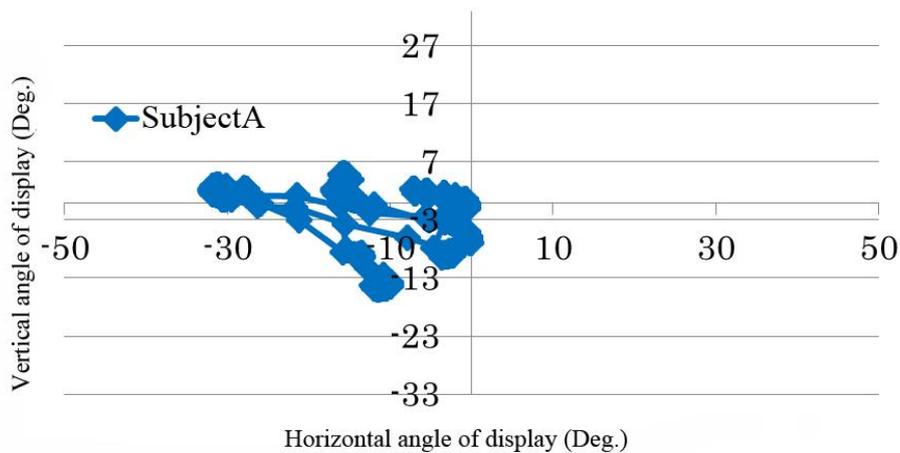


図 5-5：被験者 A の眼球運動

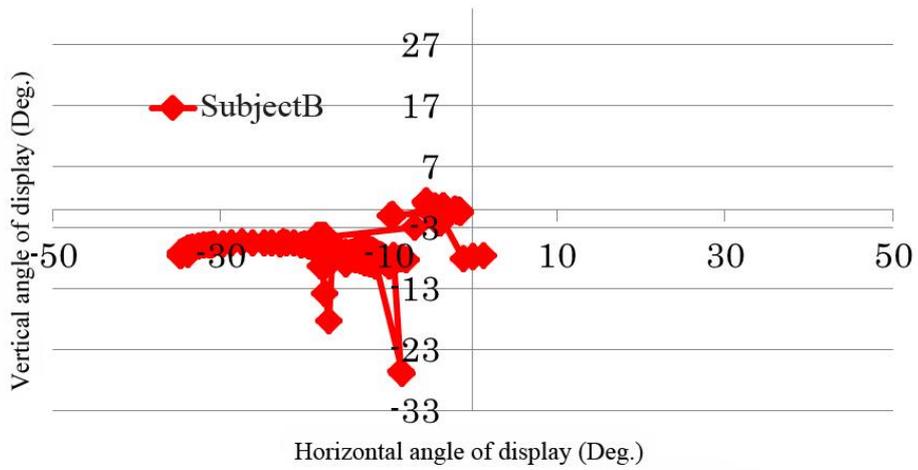


図 5-6：被験者 B の眼球運動

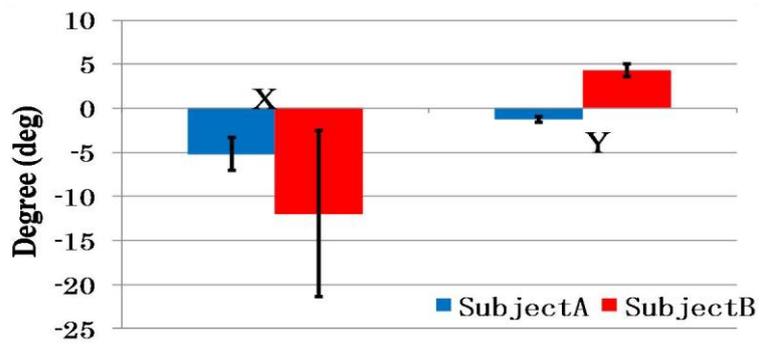


図 5-7：被験者二名の頭部回転量

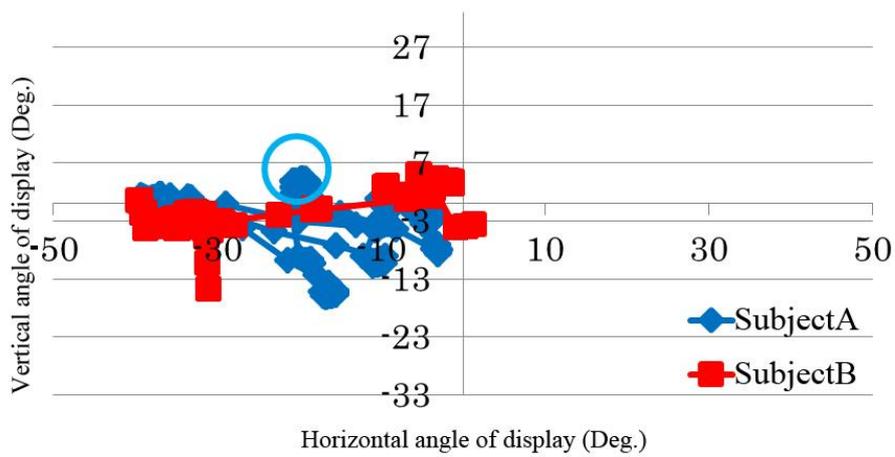


図 5-8：被験者二名の視線(頭部運動+眼球運動)の動き

## 5.4 考察

1、キャッチャー未被験者の視線移動は、キャッチャー経験者と比較して差が見られた。経験豊富なキャッチャーだった被験者は、キャッチャーとしての経験のない被験者が常にボールを追いかけている間に、走者にも気をつけるような傾向が見られた。守備ポジションによって試合の見方が違うことが、視線の動きから示唆された。

2、キャッチャー経験者は頭部をあまり動かさず眼球運動のみで広い視野を注視していることが示唆された。どのスポーツにおいても熟練者はよく頭を動かして視野を確保していると一般的に言われるが、例えば、マラソンなどで疲れている選手に対して「頭がぶれている」と言われるような表現もある。タイムが速い選手は頭がぶれず一定の様子で走っているのに対して、疲れ切っている選手は全身のブレが大きい。今回の実験からも熟練者は頭部を動かさずに眼球運動で広い視野を注視する傾向がみられた。これは相手の選手に対して次の挙動が予測されてしまわないようにしたとも考えられる。また、キャッチャー経験者は頭部運動が小さいが、眼球運動はサッカードにより未経験者より多く動いていることが示唆された。

次に過去の研究と本実験の結果を比較する。Gorman et al.および Land et al.は経験豊富な選手が予期せず次の注視点への視線を先読みすると報告している[13,14]。我々の実験結果では、経験豊富な選手がランナーの動きを予測し、視線を1 塁へ移動させた。また、キャッチャー未経験の選手が注意をボールに集中させたという結果は、Williams らの結果とも合致している[15]。これらの結果から、提案手法による過去の研究結果と今回の実験との間には差がないと考えた。

また、Urgesi らは、実際の選手が、2 つのグループに分かれてのバレーボールの学習をする実験において、映像を視聴するだけの群よりも実際にプレーしていた群の方が次の動きをよりよく予測することを報告している[16]。今回の実験結果では、キャッチャー経験者と未経験者の違いを見ることができた。これは常に実践を行いプレーしていた経験者が映像でのみキャッチャーの動きを見ていた未経験者よりもよい結果を出せたことと一致し、我々の結果を裏付けるものとしている。

## 5.5 結言

2020 年の東京オリンピック開催に向けてスポーツに対する科学的なアプローチが着目されている。日本では、選手のパフォーマンスを向上させる努力が、国立科学センターによって導入されている。そこで本論文ではアスリートの能力を客観的に評価し、運動能力を向上させるために、眼球運動と頭部運動を調べた。従来 of 眼球運動計測の問題点であったアスリートの頭部の動きに応じて視野が移動し大きく乱れる問題に対して、競技中の頭部の動きを記録して視線を解析する新しい方法を提案し、実験中に外部で記録した映像に視線を重ね合わせることで従来よりも分析をしやすくした。この実験の最終的な目標は競技中に選手に装置を取り付けて視線を測定することだが、本論文では提案手法の有効性を確

認するために 4K ウェアラブルカメラで撮影した映像を実験室内で選手に視聴させた。

事前に野球の試合をしている様子を映像として記録し、経験者と未経験者に対して映像を視聴させた。従来の眼球運動のみの記録では、選手の動きに合わせて視野カメラの映像が大きく動いていた。そこで、眼球運動と頭部運動を測定し、被験者の背後から撮影した映像上に新たに視線データとして重ねることにより、選手が大きく頭部を動かしても映像上には大きな乱れ無く観察することが出来るという提案方式の優位性を示した。本実験では、経験豊かな人と経験の浅い人、特にキャッチャーのポジションを経験した経験者と経験のない人で異なる見方が示された。この基礎研究を応用し、実際のアスリートを測定することで 2020 年の東京オリンピック・パラリンピックに向け、選手の強化、トレーニングに役立てていくことができる成果であり、新たな研究分野を拓くことのできる研究であると考えらる。

## 5.6 参考文献

- [1] Shinya Mochiduki, Miyuki Suganuma, Gaito shoji, Mitsuho Yamada, Development of a new lines of sight analyzer while playing sport, ASTES Journal (Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal), Vol.2, No.1, pp.167-171 ,2017.
- [2] S.Mori, T.Shimada, “Expert anticipation from deceptive action, Attention” Perception, & Psychophysics, May 2013, 75(4), 751–770, 2013.
- [3] S.Mori, “Spatiotemporal occlusion of biological motion reveals anticipatory processes of expert players” JSPS Grant Kickoff Workshop “Experimental study on perception-action systems in real complex environments”, 2009.
- [4] T. Kato, “Skill of the expert who looked from visual science, the latest sports psychology trace and prospects” Sport psychology, 163-174, 2004.
- [5] A.M.Williams, K.Davids, J.G.Williams. Visual perception and action in sport, E & FN Spon. 1999.
- [6] M. Yamada, T. Fukuda, “A New Sight-line Displacements Analyser and Its Application to TV Program Production SMPTE Journal” J SMPTE., 99(1), 16-26, 1990.
- [7] M. Saito, Y. Ogata, M. Yamada, “Development of eye-movement analysis equipment for clarifying the visual characteristics of moving images” The First International Workshop on Image Media Quality and its Application, 135-140, 2007.
- [8] H. Takahira, K. Kikuchi, M. Yamada, “A System for Measuring Gaze Movement and Hand Movement Simultaneously for Hand-Held Devices” IEICE Trans. Commun, 98(1), 51-61, 2015.
- [9] <http://panasonic.jp/wearable/a500/in> Japanese
- [10] <http://www.nacinc.com/datasheets/archive/EMR9-Data-Sheet-June-09.pdf>, latest version of EMR8-B

- [11] <http://polhemus.com/motion-tracking/all-trackers/patriot/>
- [12] <https://www.blackmagicdesign.com/jp/products/atem/techspecs/W-APS-04>
- [13] A. D. Gorman, B. Abernethy, D. Farrow, “, Investigating the anticipatory nature of pattern perception in sport.”, *Mem Cognit*, 39(5), 894-901, 2011.
- [14] M. F. Land, P. McLeod, “From eye movements to actions: how batsmen hit the ball” *Nature Neuroscience* 3, 1340 – 1345, 2000.
- [15] A. M. Williams, K. Davids, L. Burwitz, J. G. Williams, “Visual search strategies in experienced and inexperienced soccer players” *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 65(2), 127–135, 1994.
- [16] C. Urgesi, M. M. Savonitto, F. Fabbro, S. M. Aglioti, “Long- and short-term plastic modeling of action prediction abilities in volleyball” *Psychol Res.*, 76(4), 542-560, 2012.

## 第6章 結論

本論文では、眼球運動計測による人の視覚情報処理機構の研究として、立体視と視線の動き（頭部・眼球協調）という2分野の研究について、それぞれ2種類の研究を行った結果について述べた。

まず立体視の研究についてまとめる。

第二章のオクルージョン知覚の研究では、奥行き知覚に至る前の立体視の重要なステップである両眼網膜像の一致点を検出する脳内でのメカニズムについて検討した。左右の網膜像それぞれに含まれる対象物の共通のエッジやテクスチャーが左右眼それぞれに見えると、それを対応点として左右像のずれ、視差を検出できる。しかしオクルージョンと呼ばれ、対象の一部が前にある別の対象に隠され、対応点が見いだせない現象が生じる。人はこのオクルージョンも奥行き知覚の手がかりとして利用している。本論文ではオクルージョンの中でリムオクルージョンに注目した。リムオクルージョンは円柱の縁（リム）を見るときに生じる現象である。左右の目から円柱のリムに接線を描くと、それぞれの目で左右の目の水平ずれに対応して、別々の少しずれたリムを見ていることがわかる。円柱にテクスチャーがないと人はリムオクルージョンに気づかないが、テクスチャーがあるとリムオクルージョンに気づき、左右の網膜像が異なる網膜像を見るのを避けるために、どちらかの目、もしくは両方の目がリムから移動することが知られている。これまで、先行実験では白と黒のランダムドットのテクスチャーを用いて研究が行われてきたが、本論文では両眼網膜像の一致検出について、先行実験のような明るさの変化（輝度信号）だけでなく、色の変化（色度信号）だけでも行うことができるのか疑問を持ち研究を行った。網膜からの情報は外側膝状体（LGN）に入力される。輝度信号は外側膝状体の中の大細胞と呼ばれる細胞で処理され、緑と赤の色度情報は小細胞と呼ばれる細胞で処理される。立体視は当初大細胞のみで処理されると言われていたが、近年小細胞でも処理されることが知られている。立体視に至る前段階である両眼網膜像の一致、不一致の検出が大細胞だけでなく小細胞でも行われているのか本章では明らかにした。色の変化だけにするには、等輝度と呼ばれ、色の違う組み合わせ（例えば赤と緑）の明るさを合わせる必要がある。まず赤と緑を等輝度にする実験を行い、被験者ごとに数値は違うものの各被験者で安定した等輝度になることを示した。次に、そのランダムドットのテクスチャーを貼った円柱を作成して、リム部を注視させ、赤と緑の等輝度でもオクルージョンを回避する行動が眼球運動に見られることを示した。本研究によりオクルージョンを用いた新たな実験方法を提案することにより、外側膝状体内の小細胞の働きを調べることができることを示すことができた。

第三章ではステレオアノマリーについての実験結果を述べた。新たな臨場感をもたらす3D技術は非常に魅力的な技術ではあるが必ずしも普及が進んでいるとは言えない。その理由の一つとして誰もが快適に立体視できるわけではなく、疲れやすい人、立体視が困難な人が多く存在することがあげられる。その要因は進化の歴史からひも解くことができる。

立体視では両眼の網膜像の一致点を検出しそのずれ（両眼視差）から奥行き量を知覚する。外敵に襲われやすい動物の目は左右間の距離が離れ両眼網膜像の一致する割合は少なく、外敵に襲われにくく逆に相手を襲う動物の目は左右間の距離が小さく両眼網膜像の一致割合が多く立体視に好適になっている。人はそのようにして進化してきたため、進化の過程で手前の処理を行う部分、同一平面を処理する部分、奥行き方向にある部分を処理する部分等が別々に生まれ進化したため、立体視にかかわる機能が必ずしも揃っていない人が存在する。このような人たちはステレオアノマリーと呼ばれている。本章では、輻輳開散運動と調節応答の新たな測定装置を開発して、この装置を用いて3Dディスプレイ内の奥行移動と3Dディスプレイ自体が同期して奥行移動する新たな表示方法を用いて実験を行った結果について述べた。さらにステレオアノマリーに関するこれまでの文献を紹介し、この実験結果から、これらの文献にはまだ掲載されていない全く新しい知見、すなわちある奥行きからある奥行きにステップ的に（離散的に）変化する場合、輻輳眼球運動を行うことができるのに対して、滑らかに移動していくときには輻輳眼球運動を行うことができないステレオアノマリーの人がいることを明らかにした。脳内での立体視の成立について研究する上での重要な知見である。また、この結果は3D作品制作時に配慮すべき項目について重要な示唆を与えるものと考えている。

第四章、第五章は視線の動き（頭部・眼球協調）に関する実験結果について述べた。

第四章では、頭部運動と眼球運動を同時に測定できる新たな測定装置を用いて、超高精細映像の近距離視聴における観視位置と頭部の向きについて述べた。2018年12月には4K、8Kと呼ばれる超高精細テレビの放送が衛星放送を用いて日本国内で開始される。4Kテレビの画素数はハイビジョンの4倍、800万画素、8Kでは3200万画素である。画素が小さくなると近づいても画素が目立たずきれいに見えるため、視聴者はより近づいてみることができ、その結果、視聴者は近距離から広視野の画像を楽しむことが可能になる。このような広視野の画像では、従来の眼球運動だけでなく頭部を見たいものに向けて見る事が予想される。また、見る位置により正面の方向が変わり、見ている画像が視聴位置ごとに変わる可能性が考えられる。これまでの研究では視聴位置と平均注視位置の関係については明らかにされているが、頭部の向きについては調べられていない、そこで、視聴位置と視聴距離を変えて、頭部運動と眼球運動を測定して、超高精細テレビの近距離・広視野視聴では、視聴者は自分の正面方向に頭部を向けて見ることをはじめて明らかにした。映像制作者にとって極めて有用な知見であり、このことを考慮した番組制作を行うことにより超高精細テレビ普及促進に貢献できる研究成果である。

第五章ではこの頭部運動と眼球運動の研究をスポーツ科学での研究にも応用した例について紹介した。野球を対象として実験を行い、頭部運動を検出することにより、頭部運動と連動して移動する視野画像に煩わされることなく、視野全体を映した固定した映像上に視線を表示できるという提案方式の優位性を示した。次にキャッチャー経験者の典型的な視線の動きを明らかにした。これらは、スポーツ選手の強化やトレーニングに役立ててい

くことができる成果である。

以上の結果から、

- 1、眼球運動を用いて脳内の視覚情報処理の機構について、特に立体視についてオクルージョンとアノマリーの実験から有用な知見が得られることを示した。
- 2、超高精細テレビの本放送開始に備え、その近距離・広視野視聴が視聴者の視線、特に頭部運動に与える影響を明らかにした。
- 3、頭部運動と眼球運動の実験方法をスポーツ科学に適用し、2020年に東京オリンピック・パラリンピックを控え、選手の強化、トレーニングに役立てられる結果を示した。

このように、本論文の成果は、視覚の基礎研究の分野で新たな実験方法と知見を提案し、人の脳の視覚情報処理の仕組みを明らかにすることに貢献するだけでなく、より見やすい疲れにくい立体表示方法の提案、近距離大画面視聴に代表される超高精細テレビ時代にふさわしい表現方法の提案、スポーツ科学の発展に貢献できるものである。

# 謝辞

本論文の執筆にあたり、学部 4 年時から懇切丁寧に指導してくださいました、東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻山田光穂教授に厚く御礼を申し上げます。山田光穂教授には博士論文の執筆、修正だけでなく、私がこれまで執筆してきた国際会議・研究会の原稿、また口頭発表やポスター発表の練習など多くの時間を費やしていただきました。また、学会発表だけでなく、懇親会の際は他大学の教授方を紹介していただき、そのおかげで多くの分野の研究について知識を得ることが出来ました。山田光穂教授の熱心なご指導があつてこそ、本論文の完成にこぎつけたと痛感しております。また、論文の予備審査に当たり時間を割き、貴重なご意見をいただきました東海大学情報通信学部学部長濱本和彦教授、東海大学大学院情報通信学研究科研究科長石井啓之教授、東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻情報理工コース長高山佳久教授、東海大学情報通信学部情報メディア学科伴野明特任教授に深く感謝申し上げます。また、第二章のオクルージョンの研究において、研究を始めるときから多くのアドバイスをいただき、学会発表や論文執筆時にも適切な統計解析の仕方や先行研究時の資料などをいただきました、名古屋大学大学院情報科学研究科工藤博章准教授、大西昇名誉教授に感謝申し上げます。また、数多くの学会発表の機会を下さりました本学高輪教学科事務室の皆様にも御礼申し上げます。

当研究室卒業生の名古屋大学大学院情報科学研究科博士課程後期在学中高比良英朗様、株式会社コア横山優樹様、東日本旅客鉄道株式会社飯塚岳様には在学中に多くのご指導をいただきました。第三章のステレオアノマリーの研究では横山優樹様に、第四章の高精細映像に関する研究では高比良英朗様に多くの助言やお力添えを頂きました。お三方の助言やご配慮がなければここまで多くの事を学び、力にすることはできなかったと確信しております。ここに深く御礼申し上げます。

また、後輩として研究の実施や論文の執筆に協力していただいた大日本印刷株式会社菅沼美由起様、第五章のスポーツ研究においてチーム一同で実験に協力していただきました東海大学野球部ハイリングスの皆様、野球のルールに疎かった私に懇切丁寧にご教授してくださいました本研究室卒業生の庄司凱登様、さらに長期にわたり数多くの実験の被験者を積極的にご協力いただきました山田研究室所属の皆様、また卒業生の皆様に心より感謝を申し上げます。

末筆ではございますが多くの皆様のご助言、お力添えのおかげでここまで研究を進める事が出来ました事を深く御礼申し上げます。

## 研究業績

### 論文

1. Shinya Mochiduki, Miyuki Suganuma, Gaito shoji, Mitsuho Yamada, Development of a new lines of sight analyzer while playing sport, ASTES Journal (Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal), Vol.2, No.1,pp.167-171 ,2017.
2. Shinya MOCHIDUKI, Yuki YOKOYAMA, Keigo SUKEGAWA, Hiroki SATO, Miyuki SUGANUMA, Mitsuho YAMADA, Measurement of Accommodation and Convergence Eye Movement when a Display and 3D Movie Move in the Depth Direction Simultaneously, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.2, pp488-498, 2018.
3. Shinya MOCHIDUKI, Reina WATANABE, Miyuki SUGANUMA, Hiroaki KUDO, Noboru OHNISHI, Mitsuho YAMADA, Study on Incongruence between Binocular Images when Gazing at the Rim of a Column with Equiluminance Random Dots, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.6, pp.884-891, 2018.
4. Shinya MOCHIDUKI, Reina WATANABE, Hideaki TAKAHIRA, Mitsuho YAMADA, Analysis of Head Movement During Gaze Movement with Varied Viewing Distances and Positions, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.6, pp.892-899, 2018.
5. 横山優樹, 高比良英朗, 望月信哉, 山田光穂, “奥行き移動する視標に対する輻輳と調節応答の解析,” 映像情報メディア学会誌, vol.69, no.10, pp.J298-J305, 2015.
6. 高比良英朗, 望月信哉, 山田光穂, “観視距離と視聴位置を変化させたときの視線分析,” 信学論(D), vol.J99-D, no.3, pp.293-306, 2016.
7. 菅沼美由起, 黒澤勇樹, 望月信哉, 星野祐子, 山田光穂, “口唇動作と眼球運動を用いたパラランゲージによる疲労評価手法の検討,” Journal of the Japan Personal Computer Application Technology Society, Vol.12, No.1, pp7-19, 2018.

### 国際会議

1. S. Mochiduki, Y. Yokoyama, H. Takahira, M. Yamada, “Changes in accommodation and convergence for a real target, a 2D display and a 3D display when the target moves in the depth direction,” 21st International Display Workshops, pp.1033-1036, 2014.
2. S. Mochiduki, H. Takahira, M. Yamada, “Analysis of Gazing Points While Viewing Super-High-Definition Images at Various Viewing Positions,” International Conference on Computer Application Technologies, pp.54-57, 2015.
3. S. Mochiduki, H. Takahira, M. Yamada, “Analysis of Head Movement When Viewing A Wide-Viewing-Angle Display,” 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer

Electronics, pp.418-422, 2015.

4. S. Mochiduki, R. Watanabe, H. Takahira, M. Yamada, "Analysis of gazing point from different viewing distances and positions," The 8th International Workshop on Image Quality and its Applications, pp.44-51, 2016.

5. Shinya Mochiduki, Miyuki Suganuma, Gaito Shoji, Mitsuho Yamada Analysis of lines of sight while playing sport using a newly developed lines-of-sight analyzer, ICCSE2016 (The 11th International Conference on Computer Science & Education), pp.321-326, 2016.

6. Shinya Mochiduki, Aoi Tanaka, Mitsuho Yamada, Analysis of head movement and eye movement while gazing image from short distance, 24st International Display Workshops, pp1087-1090, 2017.

7. Shinya MOCHIDUKI, Reina WATANABE, Miyuki SUGANUMA, Hiroaki KUDO, Noboru OHNISHI, Mitsuho YAMADA, Study on Incongruence between Binocular Images when Gazing at the Rim of a Column with Equiluminance Random Dots, ICSSB-0048, 2018.

8. H. Takahira, S. Mochiduki, Y. Yokoyama, M. Yamada, "Analysis of Accommodation and Convergence while Viewing 4K Images," 21st International Display Workshops, pp.1041-1044, 2014.

9. Y. Yokoyama, S. Mochiduki, H. Takahira, M. Yamada, "Analysis of the dependence of accommodation and convergence on the display method when a target moves in the depth direction," 21st International Display Workshops, pp.1049-1052, 2014.

10. Y. Shiratori, M. Kitade, H. Takahira, S. Mochiduki, M. Yamada, "Analysis of Convergence and Accommodation While Viewing 3D Movies," 21st International Display Workshops, pp.1045-1048, 2014.

11. Y. Yokoyama, S. Mochiduki, H. Takahira, M. Yamada, "Dependence on The Display Methods of Change in Accommodation and Convergence When a Target Moves Along the Depth Direction," The 14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications, pp.410-413, 2015.

12. H. Takahira, S. Mochiduki, M. Yamada, "Development of an Empathy Measuring System While Watching Images," International Conference on Computer Application Technologies, pp.50-53, 2015, Competitive Paper Award 受賞.

13. Y. Yokoyama, S. Mochiduki, H. Takahira, M. Yamada, "Development of Measurement System of Changes in Accommodation and Convergence at the Same Time and Measurement of its Accuracy," International Conference on Computer Application Technologies, pp.58-61, 2015.

14. H. Takahira, S. Mochiduki, M. Yamada, "Measurement of an Empathy While

Watching Images,” 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics, pp.453-457, 2015.

15. Y. Yokoyama, S. Mochiduki, H. Takahira, M. Yamada, “Measurement System of Accommodation and Convergence at the Same Time,” 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics, pp.217-220, 2015.

16. H. Takahira, S. Mochiduki, M. Yamada, “Development of two people's gaze movement measuring system,” The 8th International Workshop on Image Quality and its Applications, pp.52-55, 2016.

17. Y. Yokoyama, K. Sukegawa, S. Mochiduki, H. Takahira, M. Yamada, “Measurement of Accommodation and Convergence when a Display and 3D Movie were Moved Along the Depth Direction Simultaneously,” The 8th International Workshop on Image Quality and its Applications, pp.82-86, 2016.

18. Miyuki Suganuma, Yuki Kurosawa, S. Mochiduki, Yuko Hoshino, Mitsuho Yamada, Fatigue Evaluation by Paralanguage Recognition and Gazing-Point Analysis, 24st International Display Workshops, pp1091-1094, 2017.

19. Tsuyoshi Kusima, Miyuki Suganuma, Shinya Mochiduki, Mitsuho Yamada, Development of Novel Accurate Analysis System Regarding Information Processing Within the Gaze Point, 24st International Display Workshops, pp1114-1117, 2017.

## 研究会

1. 望月信哉,横山優樹,高比良英朗,山田光穂, “奥行き移動する実物体と 2D・3D 視標に対する輻輳と調節の追従特性の比較,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.386, pp.49-52, 2014.

2. 望月信哉,三浦彩音,高比良英朗,山田光穂, “4K 画像近距離視聴時の注視位置と頭部方向の分析,” 電子情報通信学会技術研究報告, IE, 画像工学, vol.114, no.486, pp.133-136, 2015.

3. 望月信哉, 高比良英朗, 山田光穂, “広視野映像視聴時の視線に占める頭部の比率,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.115, no.133, pp.15-20, 2015.

4. 望月信哉, 渡邊怜奈, 高比良英朗, 山田光穂, “観視距離と視聴位置による視線と頭部の分析,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.115, no.335, pp.25-30, 2015.

5. 望月信哉, 横山優樹, 助川慧吾, 菅沼美由起, 高比良英朗, 山田光穂、画像観察時に観視距離と視聴位置を変化させたときの頭部運動の分析、FIT2016 (第 15 回情報科学技術フォーラム)、I-022,第 3 分冊、pp.178-182、2016

6. 望月信哉, 渡邊怜奈, 菅沼美由起, 工藤博章, 大西昇, 山田光穂、等輝度ランダムドット円柱のリム注視時に生じる両眼不一致についての考察, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.116, No.495, pp85-88, 2017.

7. 望月信哉, 佐藤宏樹, 助川慧吾, 菅沼美由起, 山田光穂, “3D ディスプレイと 3D 映像を運動させたときの輻輳眼球運動と調節の測定,” 信学技報, vol.117, no.35, pp.9-14, 2017.
8. 高比良英朗, 横山優樹, 望月信哉, 山田光穂, “4K 画像注視時の輻輳眼球運動と調節の解析,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.171, pp.19-24, 2014.
9. 白鳥雄太, 北出桃子, 高比良英朗, 望月信哉, 横山優樹, 山田光穂, “3D 映画視聴時の輻輳眼球運動と目の焦点調節の解析,” ヒューマンインタフェースシンポジウム 2014, pp.893-898, 2014.
10. 横山優樹, 望月信哉, 高比良英朗, 山田光穂, “奥行き方向に移動する視標に対する輻輳眼球運動と調節の解析,” ヒューマンインタフェースシンポジウム 2014, pp.899-904, 2014.
11. 白鳥雄太, 北出桃子, 高比良英朗, 望月信哉, 横山優樹, 山田光穂, “3D 映画視聴時の輻輳眼球運動と目の焦点調節の解析,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.275, pp.1-6, 2014.
12. 高比良英朗, 三浦彩音, 望月信哉, 山崎夢子, 山田光穂, “超高精細映像近距離視聴時の視線の解析,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.386, pp.45-48, 2014.
13. 高比良英朗, 望月信哉, 山崎夢子, 山田光穂, “複数の解像度・絞り値の画像注視時の眼球運動,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.486, pp.137-142, 2015.
14. 横山優樹, 高比良英朗, 望月信哉, 山田光穂, “奥行き移動する視標に対する輻輳と調節応答の解析,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.486, pp.173-178, 2015.
15. 菅沼美由起, 倉持亮太, 浦壁沙綾, 望月信哉, 星野祐子, 山田光穂, “注視時の眼球運動と口唇動作に注目した疲労の評価,” 信学技報, vol.116, no.496, pp.75-78, 2017.
16. 黒澤勇樹, 菅沼美由起, 望月信哉, 星野祐子, 山田光穂, “新たな口唇動作分析装置の開発と評価のパラメータの検討,” 信学技報, vol.117, no.229, pp.1-4, 2017.
17. 菅沼美由起, 黒澤勇樹, 望月信哉, 星野祐子, 山田光穂, “眼球運動と口唇動作に注目した疲労評価,” 信学技報, vol.117, no.229, pp.5-8, 2017.
18. 久島務嗣, 菅沼美由起, 望月信哉, 山田光穂, “注視点内で行われている情報処理を正確に分析できる装置の開発,” 信学技報, vol.117, no.229, pp.9-14, 2017.
19. 小林康祥, 望月信哉, 菅沼美由起, 山田光穂, “2 チャンネルステレオと 5.1 チャンネルサラウンドが視線の動きにもたらす効果,” 信学技報, vol.117, no.229, pp.15-20, 2017.
20. 小山玲子, 中川理子, 菅沼美由起, 望月信哉, 山田光穂, “同一画像を解像度と視聴位置を変えたときの視線の分析,” 信学技報, vol.117, no.229, pp.21-24, 2017.
21. 中川理子, 小山玲子, 菅沼美由起, 望月信哉, 山田光穂, “提示画角(画面の大きさ)と視線の関係についての分析,” 信学技報, vol.117, no.229, pp.25-28, 2017.
22. 黒澤勇樹, 菅沼美由起, 望月信哉, 星野祐子, 山田光穂, “新たな口唇動作分析装置の精度検証と応用方法の検討,” パーソナルコンピュータ利用技術学会全国大会講演論文集, vol.12, pp.26-29, 2017.

## 大会

1. 望月信哉, 横山優樹, 高比良英朗, 山田光穂, “奥行き方向に移動する実物体と 3D・2D 映像に対する調節と輻輳変化の比較,” 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp.128, 2014.
2. 望月信哉, 横山優樹, 高比良英朗, 山田光穂, “奥行き移動する 2D/3D 映像視聴時の輻輳眼球運動と調節応答の解析,” 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集 (2014), 11-15-1"-11-15-2", 2014.
3. 望月信哉, 庄司凱登, 菅沼美由起, 山田光穂, “新しく開発した視線分析装置を用いたスポーツ中の視線分析,” 第 11 回パーソナルコンピュータ利用技術学会全国大会,2016.
4. 横山優樹, 望月信哉, 高比良英朗, 山田光穂, “奥行き方向に移動する視対象に対する輻輳と調節変化の分析(その 2),” 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp.129, 2014.
5. 高比良英朗, 望月信哉, 横山優樹, 山田光穂, “4K 画像観察時の輻輳眼球運動と調節変化の解析,” 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp.131, 2014.
6. 高比良英朗, 伊城龍之介, 遠藤克, 菊池慧, 望月信哉, 山田光穂, “複数の視距離における視標指差し時の視線の動き,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, pp.294, 2015.
7. 川上隼輝, 望月信哉, 高比良英朗, 山田光穂, “2 名の観察者の視線間距離の測定,” 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp.157, 2015.
8. 矢吹有梨佳, 飯塚岳, 望月信哉, 高比良英朗, 山田光穂, “脳波による映像視聴時の共感の測定,” 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp.158, 2015.
9. 助川慧吾, 望月信哉, 横山優樹, 高比良英朗, 山田光穂, “ディスプレイと 3D 映像を連動させて奥行き移動させた際の輻輳眼球運動と焦点調節の測定,” 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp.159, 2015.
10. 庄司凱登, 飯塚岳, 望月信哉, 高比良英朗, 山田光穂, “新たなスポーツ中の視線分析法の提案,” 2015 年映像情報メディア学会冬季大会, 22C-2, 2015.
11. 加松瑞基, 飯塚岳, 望月信哉, 高比良英朗, 山田光穂, “顕著性を変化させたときの指さしと視線誘導効果の測定,” 2015 年映像情報メディア学会冬季大会, 22C-3, 2015.
12. 黒澤勇樹, 浦壁沙綾, 菅沼美由起, 望月信哉, 星野祐子, 山田光穂, “口唇動作分析装置に組み込む特徴量の検討,” 第 11 回パーソナルコンピュータ利用技術学会全国大会,2016
13. 小山玲子, 中川理子, 菅沼美由起, 望月信哉, 山田光穂, “高精細映像観察時における視聴位置の影響について,” 第 11 回パーソナルコンピュータ利用技術学会全国大会,2016.
14. 小林康祥,中井尊氏,倉持亮太,菅沼美由起,望月信哉,星野祐子,山田光穂, “注視中の眼球運動の変化に注目した体調評価について,” 第 11 回パーソナルコンピュータ利用技術学会全国大会,2016.
15. 久島務嗣, 菅沼美由起, 望月信哉, 山田光穂, “注視点内で行われている情報処理についてその分析手法の考察,” 第 11 回パーソナルコンピュータ利用技術学会全国大会,2016.
16. 鐘ヶ江ひかる, 菅沼美由起, 望月信哉, 山田光穂, “眼球運動による広告デザインの有

効性の評価,” 第 11 回パーソナルコンピュータ利用技術学会全国大会,2016.

17. 浦壁沙綾, 倉持亮太, 菅沼美由起, 望月信哉, 山田光穂, “口唇動作に注目した体調評価の検討,” 映像情報メディア学会冬季大会 2016.

18. 田中葵, 真塩武, 菅沼美由起, 望月信哉, 山田光穂, “高精細映像近距離視聴における頭部運動と眼球運動の解析,” 映像情報メディア学会冬季大会 2016.

#### 表彰

1. Competitive Paper Award, CCATS2015 International Conference on Computer Application Technologies より表彰 (上記 国際会議 2 に該当) 2015 年 8 月 31 日～9 月 2 日.

2. FIT2016 奨励賞 (上記 研究会 5 に該当) 2016 年 9 月 9 日.