

立体映像の視機能への
影響に関する人間工学的研究

塩見 友樹

背表紙

立体映像の視機能への影響に関する人間工学的研究

塩見
友樹

立体映像の視機能への
影響に関する人間工学的研究

塩見 友樹

目次

第1章 序論	4
1. はじめに	
2. 立体映像の歴史	
3. 研究の背景と目的	
4. 本研究の手法	
5. 論文の構成	
参考文献	
第2章 水晶体調節，輻輳運動の同時計測法の確立	13
1. はじめに	
2. 実験方法	
2-1. 計測機器	
2-2. 水晶体調節と輻輳運動	
2-2-1. 水晶体調節	
2-2-2. 輻輳運動	
3. 実験結果	
4. 考察	
5. まとめ	
参考文献	
第3章 2D 映像，3D 映像における水晶体調節，輻輳運動の同時計測	27
1. はじめに	
2. 立体視の原理と特性，空間情報要因	
2-1. 立体視の原理	
2-1-1. 両眼視差	
2-1-2. 単眼運動視差	
2-1-3. 物の大小	
2-1-4. 遠近法	
2-1-5. 物の重なり	
2-1-6. テクスチャー勾配	
2-1-7. 陰影	
2-2. 対象空間の特性と空間情報要因	
2-3. 液晶シャッター方式	

2-3-1. 液晶シャッターメガネ方式

2-3-2. アナグリフ方式

2-3-3. 偏光メガネ方式

2-3-4. HMD 方式

3. 若年者を対象とした立体映像視聴時の調節，輻輳の同時計測

3-1. 実験方法

3-2. 実験結果

3-3. 考察

4. 中高齢者を対象とした立体映像視聴時の調節，輻輳の同時計測

4-1. 実験方法

4-2. 実験結果

4-3. 考察

5. まとめ

参考文献

第4章 水晶体調節および輻輳運動の同時測定による 50

自然視時と立体映像視聴時の視機能比較

1. はじめに

2. 幅広い年齢層に対する移動視標を使用した水晶体調節応答の測定

2-1. 実験方法

2-2. 実験結果

2-3. 考察

3. 実物体注視時及び立体映像視聴時の

水晶体調節・輻輳運動の同時計測による比較

3-1. 実験方法

3-2. 実験結果

3-3. 考察

4. まとめ

参考文献

第5章 モバイル端末における立体映像の視認性評価 74

1. はじめに

2. パララックスバリア方式

3. モバイル端末における立体認知と飛び出し距離の関係

3-1. 実験方法

3-2. 実験結果

3-3. 考察	
4. 立体文字の認知と可読性	
4-1. 実験方法	
4-2. 実験結果	
4-3. 考察	
5. 角度変化の立体文字の認知と可読性へ与える影響	
5-1. 実験方法	
5-2. 実験結果	
5-3. 考察	
6. まとめ	
参考文献	

第6章 結語	94
1. 研究のまとめ		
2. 今後の課題		
謝辞	96
発表実績と関連する章	97

第1章 序論

1. はじめに

近年、立体映像技術の発展と普及はめざましい。その背景としてはフラットパネルディスプレイの高精細、高画素数化が進み、デジタル通信や放送、ブロードバンド等の技術的な発展、普及が進んできたため、その先のニーズとして、より現場での視聴に近い環境の実現が求められていることが挙げられる。そのような IT およびデジタル機器の著しい進歩によるデジタルコンテンツの多様化、高度化に伴い、格段にリアリティの高い、立体映像への取り組みは進められており、IT 関連のみならず様々な分野において応用がなされている（図 1-1、出典[2]）[1-3]。具体例を挙げると、医療であれば MRI 等の医療画像を医師及び患者に立体画像で示すことで、より病態の理解が深まり、車のような工業製品でも、モックアップの代替として立体映像技術が期待されている。そのほかにも、立体映像技術はテレビや映画のように日常生活に深くかかわるものから、モバイル情報端末での使用、前述のような医療や工業での応用まで様々な用途が考えられる。

しかし、その普及により、様々な応用が期待される一方で、依然として眼精疲労や 3D 酔い等の症状に苦しむ視聴者が存在する[4]。なぜこのような悪影響が出るのかということだが、動揺病と共通事項が多いことから感覚の不一致説、またほかにもこのような悪影響の原因として、姿勢不安定説が原因ではないかといわれるが、現時点でははっきりとは解明されていない[5-7]。

このような悪影響が存在することもあり、3D コンソーシアムによって、人にやさしい 3D 普及のための安全ガイドライン[8]が策定されているが、立体映像に関する技術は目まぐるしく変化するため、頻繁に改定されている。そのため、いまだ明確な作成基準や評価方法、周波数別の映像のあり方といったものは確立されていないのが現状である。このように立体映像技術はその応用により、大きな社会的な貢献が期待される一方で、解決すべき課題も数多いのが現状である。

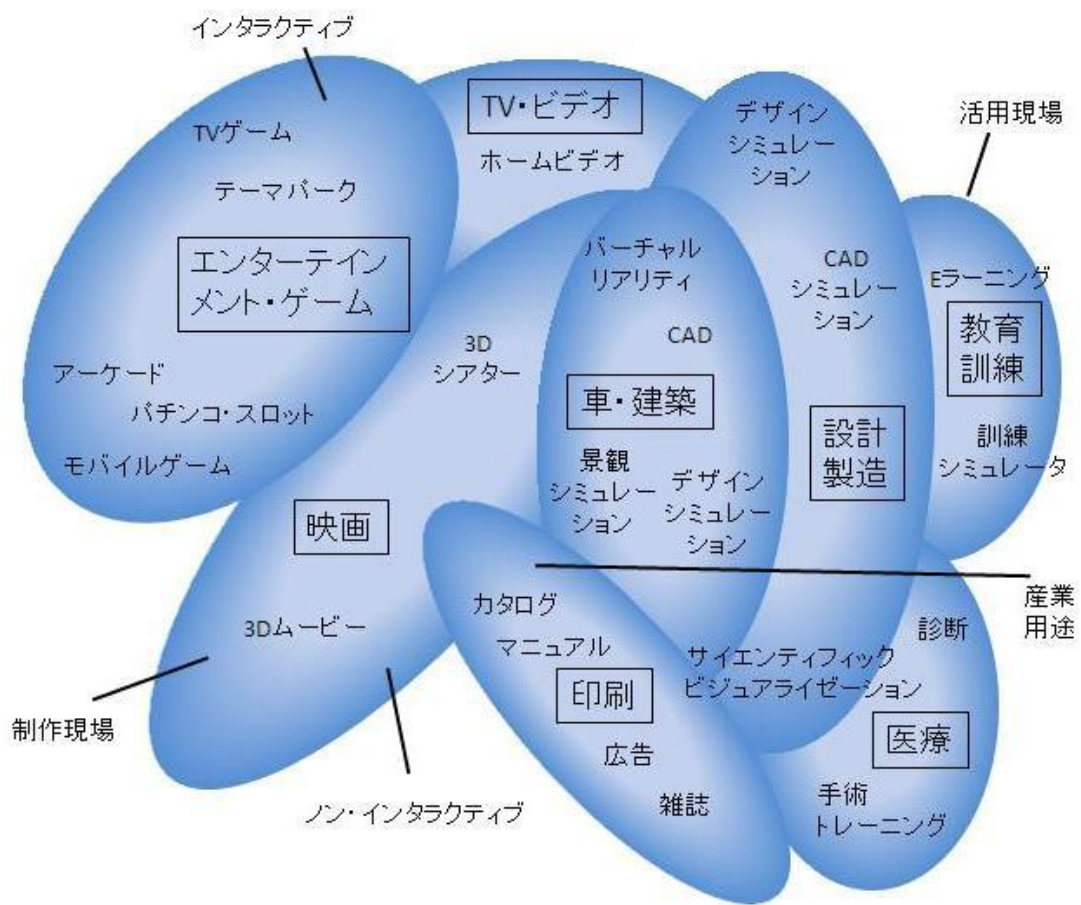


図 1-1 立体映像技術の応用分野 (出典[2])

2. 立体映像技術の歴史

2010年は「3D元年」と言われるように、「アバター」を中心に数多くの3D映画が大ヒットし、立体映像技術が一般から強く関心を集めた年である。このような「3Dブーム」はほぼ一世紀前から何度か起きており、その始まりは1900年のパリ万国博覧会である。このとき世界で初めてアナグリフ（anaglyph）方式で見る立体映像が公開され大きな衝撃を与えることとなった[9]。その後、1922年から1925年までの間アナグリフ方式の映画が流行したが、サウンドの開発も盛んだったため、そちらの方へ取って代わられることとなってしまった。その後、1937年には偏光フィルター（polarized filter）方式の誕生により、にわかには活気づいたが、第二次世界大戦の激化により、再び忘れられることとなった。

1940年代にはソ連のS.P.イワノフにより、眼鏡を必要としない、レンチキュラー（lenticular）方式のシステムが開発されたが、これも観賞位置がわずかでもずれると立体視ができなくなるという脆弱さを抱えていた。戦後になり、1950年ごろにはアメリカでテレビの急速な普及による、映画館での入場者の減少が見られるようになった。その対策の一つとして立体映像が選ばれ、1953年には立体映像ブームが全米で起こった。これが第一次立体映像ブームである。しかしながらこのブームは年内の末には早くも翳りが見え、急速に縮小していった。その原因としては長時間の立体視が疲労をもたらすこと、視聴での眼鏡が煩わしいということが原因ではないかと考察されている[1]。

1980年代に入り、米国の家庭にケーブルテレビが普及し始める。このとき急速に増えた放送時間とチャンネルを埋めるために古い映画が多く放送された。そのひとつで立体映像を放送したことを皮切りに第二次立体映像ブームが生じたが、このブームも実際に作成された映画などが、低予算でコンテンツの内容の薄かったこと等が原因でやはり長くは続かなかつた。その後も1980年代後半には液晶シャッター方式の流行、1980年代後半から1990年代にはバブル経済と重なったことによる、日本での国際博覧会や地方博覧会における流行などがあつた。

このように、立体映像技術は成功と失敗を繰り返し、現在まで発展してきており、2005年以降には十分な予算と計画を練り、立体映像での映画が作成され、「チキン・リトル」や「アバター」のような映画をきっかけに第三次立体映像ブームが始まり、広く一般にも知られるようになった。現在、立体映像技術は映画のような娯楽にとどまらず、医療、工業、建築、教育など様々な産業において応用が期待され、導入が進められている。

3. 研究の背景と目的

1 節でも述べたように、立体映像技術を取り巻く課題は数多い。安全、快適な立体映像技術のための原則や運用のガイドラインの確立のためには、立体映像の視聴により生じる悪影響の解明は大きな課題の一つである。そのような悪影響の原因ではないかとされているものの一つに、「水晶体調節と輻輳運動の不整合」または「視覚系の不整合」と呼ばれる説がある。これは、人間の視機能のピント合わせの働きを持つ水晶体調節と輻輳運動が立体映像を視聴しているときには、調節は映像の表示位置であるディスプレイ面に固定されるが、輻輳は映像の視差により焦点位置が変化するため、現実の環境でものを見る状態とは異なる環境を作り出してしまうため、悪影響につながる、という説である。この説は多くの文献で取り上げられており[10-12]、また 3D コンソーシアムの安全ガイドラインにも記載されているように、半ば定説であるかのように扱われている。このため、安全ガイドラインには不整合を最小限に抑えるために、映像や画像間の左右像の差は 1° 以内に収めるべきであるとまで記載されている。しかしながら、実際には立体映像視聴時に調節と輻輳を同時に計測することは既存の機器では不可能であったため、立証されていない。

この説に対して、宮尾らは、立体映像を注視している際には、立体像に追従して水晶体調節が行われるということを示しており[13-16]、「調節と輻輳の不整合」は存在しないということを実証している。しかし、これらの研究においても、測定機器の制約により水晶体調節のみの測定しか行うことができず、輻輳運動が映像の動きに合わせて焦点が変化しているということを確認していない。このため「調節と輻輳の不整合」が存在しないという立証には不十分であった。このような背景もあり、「調節と輻輳の不整合」の存在の有無を立証することは、立体映像視聴に伴う悪影響の原因の解明のため非常に有意義であることは明白であろう。

本研究は、安全、快適な立体映像技術のための原則や運用のガイドラインの確立を狙いに据え、その基礎資料となるべく、立体映像視聴時に生じる悪影響の原因の解明を目指した。そのために、悪影響の原因として有力とされている、「調節と輻輳の不整合」に焦点を当て、その存在の有無について調査、検討を行った。

立体映像技術が応用されている事例についての研究もまた、悪影響の原因の解明と並ぶ重要な事項の一つである。そこで、テレビなどとは異なる使用が想定される、モバイル端末に注目し、その視認性と可読性の評価も行った。これは、立体映像技術を使用した応用事例の研究として、既存の研究がほとんど行われていない、モバイル端末における立体表示のユーザビリティへの影響について調査するためである。

4. 本研究の手法

「水晶体調節と輻輳運動の不整合」という説に対して，立体映像視聴時の水晶体調節と輻輳運動の変化を直接調査することは，非常に簡潔かつ有効なアプローチである．本研究では，この説に対して，これら二つの視機能の同時計測という人間工学的アプローチにより，研究を進めている．調節と輻輳は，既存の機器では同時に測定を行うことができなかったが，本研究では従来の機器を使用した計測を行うのではなく，新たな計測方法を考案することで，その同時計測を可能としている．

人間工学とは「人間の形態的，心理的，生理的特性を考慮して，人間・機械系として捉えられたトータルなシステムにおいて，人間と機械の適合を図りながら人間にとって最適な作業形態・職務・機械・道具等を設計していく学問」[17]であり，さまざまな学問分野や領域との関連性の強い学際的なものであり広範囲の学問体系を包括している（図 1-2，出典 [9]）．情報技術の進歩と普及は目覚ましく，ともすると技術的發展に重きをおきすぎるあまりに，人間との関係を見失った機械などの設計が行われることで，人間が機械のほうに適合できず，かえって効率，使いやすさ，安全性の低下がもたらされることが考えられる．これに対して生理反応計測を行って原因の追究を行う，ユーザビリティ評価を行って問題点を把握するといった，人間工学的なアプローチでは，人間要素を中心に人間と機械の特性を明らかにして，最適なヒューマンインターフェースを作り出すことに主眼が置かれており，モバイル機器の可読性や入力特性，高齢者におけるタッチパネルのユーザビリティ調査など，様々な研究が行われてきた[18-21]．本研究の視機能測定もそのような人間工学的アプローチに含まれる．

なお，人間工学 (Ergonomics) という言葉は，ギリシャ語の *ergon* (仕事や労働) と *nomos* (自然の法則) に由来しており，1857 年にポーランドの学者 *Wolciech Jastrzebowski* により造語されたとされている．ヨーロッパを中心に，特に労働衛生的な観点で研究がなされた．一方，第二次世界大戦以降の米国を中心として，人間工学 (Human factors) という名称にて，主にヒューマンエラー研究を中心に，人間の認知特性を考慮したヒューマンインターフェースの実現を目指した研究がなされた．日本の人間工学は，ヨーロッパを中心とした人間工学 (Ergonomics) とアメリカを中心とした人間工学 (Human factors) のそれぞれの影響を受けている．人間工学 (Ergonomics) と人間工学 (Human factors) の間には厳密な区分は存在しない[22]．

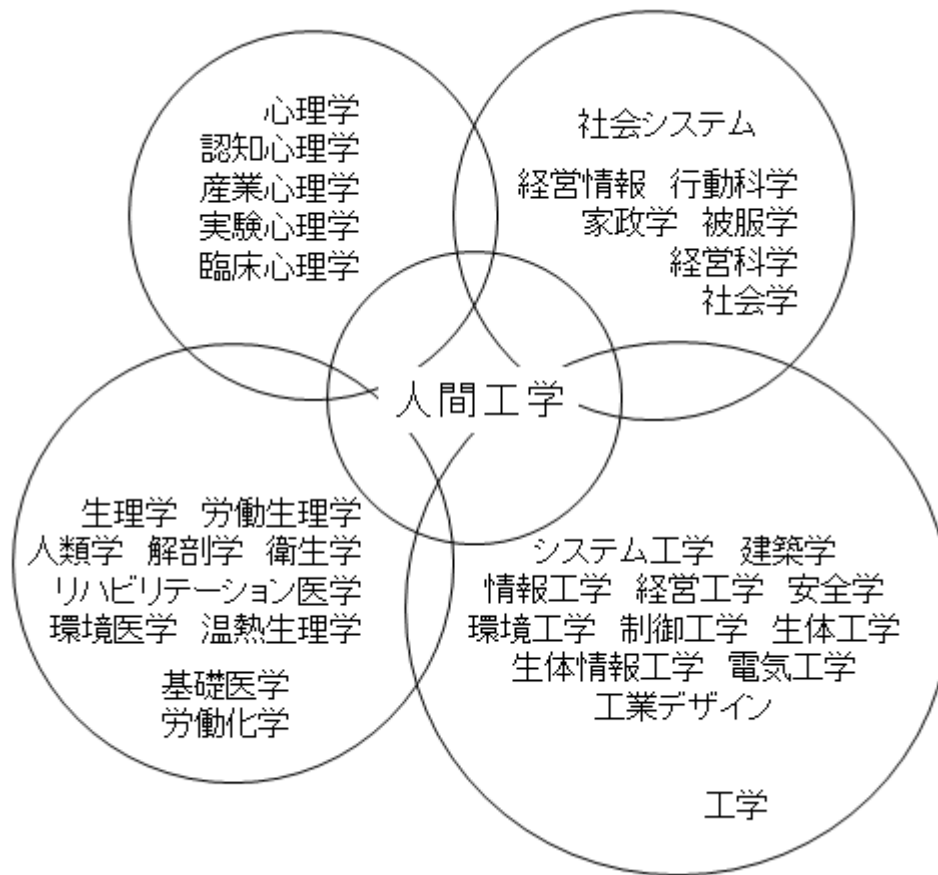


図 2-2 人間工学の関連分野 (出典[9])

5. 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章（水晶体調節，輻輳運動の同時計測法の確立）では，まず立体映像を視聴する際に重要な役割を果たす水晶体調節と輻輳運動を同時に計測する新しい方法の提案をする．正常な視機能を持つ若年者のみを対象に，現実の移動視標を注視している際の，被験者の水晶体調節と輻輳運動の同時計測を行う．正確に計測を行うことができるならば，調節，輻輳ともに焦点距離が対象物までの距離と一致するはずである．

第 3 章（2D 映像，3D 映像における水晶体調節，輻輳運動の同時計測）では第 2 章で提案した計測方法を用いて，実際に立体映像を視聴している被験者の調節，輻輳の同時測定を行う．このとき比較対象として，我々が普段テレビで目にしているような 2D 映像の計測も行う．そして本章では正常な視機能を持つ若年者を対象にするだけでなく，中高齢者も

対象として計測を行い，若年者と比較を行うことで，調節，輻輳という観点から加齢の影響についても検討する。

第 4 章（水晶体調節および輻輳運動の同時測定による自然視時と立体映像視聴時の視機能比較）では，立体映像特有の諸症状に対して，調節，輻輳という観点から，我々が普段ものを見ている状態との差異が存在するのか，すなわち「調節と輻輳の不整合」は存在するのかという問題に対して，第 3 章よりもさらに詳細な調査する．具体的には，実際に被験者の自然視状態（実在する物体を見ること）と，それを基に作成した立体映像を視聴している状態をそれぞれ計測し，比較・検討を行う．まず高齢者を含む多数の被験者を対象として移動視標を注視している被験者の調節応答を計測することでその特性について調べる．そしてその後，移動視標と，それを基に作成した立体映像を使用して，それらを観察している被験者の水晶体調節と輻輳運動を測定することで，立体映像を視聴している際の被験者の視機能の状態について，より詳細な検討を行う．これは第 3 章をもとにした実験であるが，その結果をより明確化するため，立体視方式を変更して行っている。

第 5 章（モバイル端末における立体映像の視認性の評価）では，立体映像技術が使用されているモバイル情報端末に注目し，その視認性，可読性の評価を行う．これは，第 4 章までの，テレビ型のモニターで行われる，立体映像特有の悪影響に対する研究とは異なる．本章は現状では十分な評価がなされていない，モバイル端末における，ユーザビリティを評価するという，立体映像技術の応用事例を取り上げた研究である．裸眼で立体視を行うことが可能であるパララックスバリア方式を採用しているモバイル情報端末である，スマートフォン・LYNX 3D SH-03C を使用して，立体視の可否や立体認知の潜時，立体表示の文字探索に要する時間などの視認性について評価している．また本章では合わせて，テレビのような場合にはあまり想定されないような，モバイル情報端末の使用下で想定される問題として，ディスプレイの様々な角度変化が立体視に与える影響についても調査している。

最終章（第 6 章 結語）では，本論文全体の総括と今後の課題について述べる。

参考文献

- [1] (財) デジタルコンテンツ協会, 平成 17 年度 3D コンテンツに関する調査研究報告書, 2006.
- [2] (財) デジタルコンテンツ協会, 平成 18 年度 3D コンテンツに関する調査研究報告書, 2007.
- [3] (財) デジタルコンテンツ協会, 平成 19 年度 3D コンテンツに関する調査研究報告書, 2008.
- [4] M. Lambooi, W. IJsselsteijn, M. Fortuin, and I. Heynderickx: Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review, *J. Imaging Sci. Technol.*, Vol. 53, 03, 2009.
- [5] 氏家 弘裕: 知っておきたいキーワード, 映像酔い, 映像情報メディア学会誌, Vol.61, No.8, pp.1122-1124, 2007.
- [6] 斎田真也: 人にやさしい映像～その評価と国際基準～, 映像情報メディア学会誌, Vol.58, No.10, pp.1356-1359, 2004.
- [7] 矢野澄男, 江本正喜, 三橋哲雄: 両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因, 映像メディア学会誌, Vol.57, No.9, pp.1187-1193, 2003.
- [8] 3D コンソーシアム安全ガイドライン部会編, 「人にやさしい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン」, 2010.
- [9] 苗村健, 畑田豊彦, 佐藤隆夫, 他, 「立体視テクノロジー-次世代立体表示技術の最前線-」, エヌ・ティー・エス, 2008.
- [10] 氏家 弘裕: 知っておきたいキーワード, 映像酔い, 映像情報メディア学会誌, Vol.61, No.8, pp.1122-1124, 2007.
- [11] 斎田真也: 人にやさしい映像～その評価と国際基準～, 映像情報メディア学会誌, Vol.58, No.10, pp.1356-1359, 2004.
- [12] 矢野澄男, 江本正喜, 三橋哲雄: 両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因, 映像メディア学会誌, Vol.57, No. 9, pp.1187-1193, 2003.
- [13] M. Miyao, S. Ishihara, S. Saito, T. Kondo, H. Sakakibara and H. Toyoshima: Visual accommodation and subject performance during a stereographic object task using liquid crystal shutters, *Ergonomics*, Vol.39, Iss.11, pp.1294-1309, 1996.
- [14] M. Miyao, Y. Otake and S. Ishihara: A newly developed device to measure objective amplitude of accommodation and papillary response in both binocular and natural viewing conditions, *Jpn. J. Ind. Health*, Vol.34, pp.148-149, 1992.

- [15] M. Omori, S. Hasegawa, H. Ishigaki, T. Watanabe, M. Miyao and H. Tahara: Accommodative load for stereoscopic displays, Proc. SPIE, Vol.5664, pp.64, 2005.
- [16] M. Omori, S. Hasegawa, T. Watanabe, K. Fujikake and M. Miyao: Comparison of measurement of accommodation between LCD and CRT at the stereoscopic vision gaze, LNCS, Vol.5622, pp.90-96, 2009.
- [17] 村田厚生, 「人間工学概論」, 泉文堂, 1992.
- [18] 長谷川旭, 長谷川聡, 宮尾克: タブレット端末のソフトウェアキーボードによる入力特性~加齢効果および利き手, 非利き手による違い~, モバイル学会論文誌, Vol.2, No.1, pp.23-28, 2012.
- [19] A. Murata, and H. Iwase: Usability of Touch-Panel Interfaces for Older Adults, Human Factors, Vol.47, No.4, pp.767-776, 2005.
- [20] エティヌ グランジャン著, 西山勝夫, 中迫勝 訳, 「コンピュータ化オフィスの人間工学」, 啓学出版, 1989.
- [21] 大石巖, 畑田豊彦, 田村徹, 「ディスプレイの基礎」, 共立出版, 2001.
- [22] 正田亘, 「人間工学」, 恒星社厚生閣, 1997.

第2章

水晶体調節，輻輳運動の同時計測法の確立

1. はじめに

立体映像の視聴には、眼精疲労や3D酔いのような悪影響が伴い、その原因がまだ解明されていないということは前章でも述べた[1-3]。多くの文献において、その原因であろうとよく挙げられるものには「水晶体調節と輻輳運動の不整合」、または「視覚系の不整合」と呼ばれるものがある[4-6]。立体映像の表示方式にはレンチキュラー方式、パララックスバリア (parallax-barrier) 方式、液晶シャッター(liquid-crystal-shutter)方式など様々な方式が存在する[7-9]。現在、主流になっているものは、両眼視 (binocular vision) の、両目の視線の交叉である輻輳運動(convergence)を利用した二眼立体表示映像であることに起因するもので、不整合とは、立体映像視聴時には輻輳運動の焦点は立体像に合わせられるが、水晶体調節 (lens accommodation) の焦点はディスプレイの画面位置に固定され、両者が一致していないというものである。

1章でも述べたように、宮尾らは立体映像を注視している際には、立体像に追従して水晶体調節が行われるということを示しており[10-13]、これにより「調節と輻輳の不整合」は存在しないということを主張している。しかしながら、その水晶体調節のみの計測では、「調節と輻輳の不整合」が存在しないという立証には不十分であった。

そこで本章では、既存の方法では水晶体調節と輻輳運動の同時計測が不可能であった点を解決するために、新たな機器を組み合わせることで同時計測を可能とすることを目的とした。そして、この新たな計測法の信頼性を確認するため、現実の移動視標を注視している若年の被験者の水晶体調節と輻輳運動の同時計測を行った。

2. 実験方法

被験者には事前に十分にインフォームドコンセントを行い、名古屋大学情報科学研究科の倫理審査委員会の承認を得ている。

被験者はすべて正視の状態で行うため、矯正が必要な場合にはソフトコンタクトレンズを装着させ、調節遠点での屈折率を ± 0.25 dioptr 以内になるように矯正した。

「diopter」とは、レンズの屈折力をレンズの焦点距離の逆数としたものであり、つまり調節力の指標である。焦点までのメートルの逆数によって表され、単位としては D が使われる。0 D は無限遠、0.25D は 4m、0.5D は 2m、1D は 1m、1.5D は 67cm、2D は 50cm である。本研究で使用した測定機器は、グランド精工社製のオートレフ/ケラトメーター WAM-5500 (図 2-1) と、ナックイメージテクノロジー社製のアイマークレコーダー EMR-9 (図 2-2) である。

実験は 20 代から 30 代の 6 名の若年被験者(裸眼 1 名、ソフトコンタクトレンズ装用 5 名)を対象に矯正後の正視の状態で行った。計測は以下の手順で行った。被験者が注視するための実物体として直径 6.6cm のテニスボールを被験者の眼前に提示し、提示距離 50cm~1m の範囲で、10 秒周期で往復するものを 40 秒間、両眼視させ測定を行った(図 2-3)。これを一回の計測として、一人につき計 4 回行った。計測時には周辺の背景による影響を極力減少させるため、被験者には常に対象物を注視するよう指示した。なお、実験環境の照度は、眼球に入射する地面に対して垂直な照度は約 103lx、地面に対して水平な照度は 683lx、提示した視標の輝度は 46.9cd/m²であった。この照度は JIS や ISO で規格化されたもの[14-16]を参考としており、通常の視作業を行うための十分な照度基準を満たしている。

2-1. 測定機器

オートレフ/ケラトメーター WAM-5500 (図 2-1) :

スタティックモードとダイナミックモードの 2 種類のモードがあり、本研究ではダイナミックモードを使用して計測を行った。赤外線の波長は 950nm であり、ダイナミックモードでは毎秒 5 回、水晶体の屈折力 (1/焦点距離) の連続測定を行う。計測結果はデータが csv 形式で保存され、各時間での屈折力の他、瞳孔径も計測することができる。また両眼開放式であり、従来までの測定機器が正面を固視した状態でなければ計測を行うことができなかったことに対して、ある程度視線が周辺にずれることがあっても計測を行うことができ、被験者にとって、より自然な状態での計測が可能となっている[17]。

立体映像の視聴時には、当然ではあるが、被験者に前方を注視させつつ、計測を行う必要がある。ゆえにそれが可能な両眼開放式である、WAM-5500 を測定機器として採用した。

アイマークレコーダー EMR-9 (図 2-2) :

二つのアイカメラを、被験者の両目のやや下方に設置し、赤外光を使用して被験者の目の動きを瞳孔角膜反射法 (pupillary corneal reflex method) により検出している。赤外線の波長は 850nm である[18,19]。また頭部前方にもカメラが設置されており、被験者の視野を撮影するためのカメラとなっている。その測定範囲は水平が 40°、垂直が 20°となって

おり,またその検出レートは 60Hz である.これにより被験者の注視している点を求めるが,その注視点は注視時間が 0.1 秒を超えることで定義される.そして二つのアイカメラと額のカメラで撮影した三つの映像を 0.01 秒単位で重ね合わせ記録する.これにより被験者の注視点の座標が得られる.得られた座標値より,輻輳運動の焦点距離を求めた.

この機械の利点は,従来の視線追跡装置に比べ小型化がされており,歩きながら使用ができる,また,本実験のように他の機器と組み合わせての使用が可能であるという点がある.そのため,EMR-9 を同時計測法の機器として採用した.

図 2-3 のようにこれら二つの装置を組み合わせ,被験者の顔を顎台により固定し,被験者が実物体を注視している際の水晶体調節と輻輳運動の焦点距離を同時に測定した.図 2-4 はその模式図である.

なおこの二つの装置はともに近赤外光を用いる測定機器であるが,その波長は WAM-5500 が 950nm, EMR-9 が 850nm と異なるため,互いに干渉しない.また本実験で適切な実験結果を得るためには測定機器に関して注意点がある. WAM-5500 は被験者の瞳孔径があまりに小さい場合には測定が不可能なため,その場合には実験環境の照度を落として瞳孔径を確保する必要がある.



図 2-1 WAM-5500



図 2-2 EMR-9

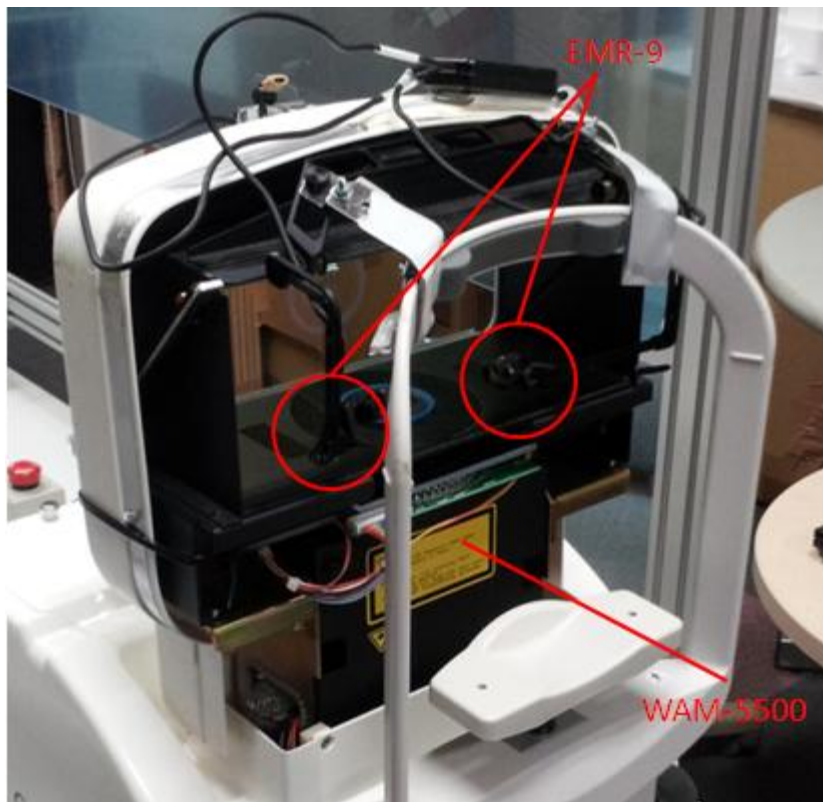


図 2-3 調節・輻輳同時計測装置

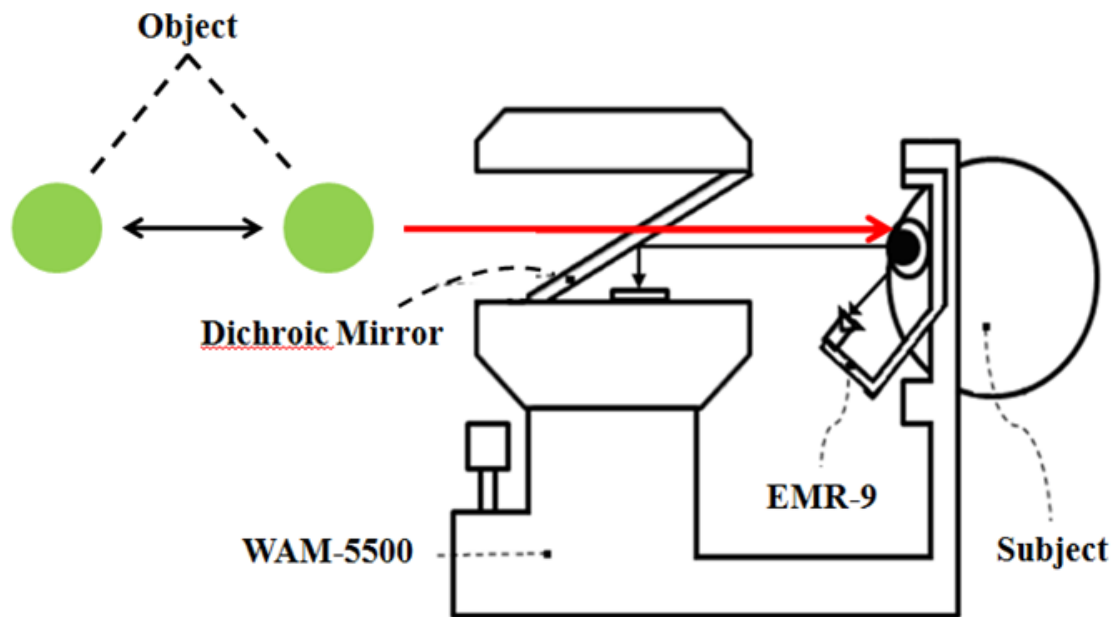


図 2—4 実験の模式図

2—2. 水晶体調節と輻輳運動

2—2—1. 水晶体調節 (lens accommodation)

目から遠方にある物体と近方にある物体は同時に網膜像に明瞭な像を作ることができない。これを補う機能がピント合わせであり、眼球光学系では水晶体調節 (lens accommodation) と呼ぶ。一般の光学系でピント合わせを行うには、レンズ位置を前後に動かす、スクリーン位置を前後に動かす、レンズ系の屈折力 ($1/\text{焦点距離}$) を変えるという 3 種類の方法が考えられる。生体でも動物の種によってこれらの方法が使用されており、ヒトの場合は水晶体の厚みと曲率を変化させることによって調節を行っている (図 2—5)。

水晶体 (crystalline lens) の変形の機構は、近方の対象物を見る際には毛様体 (ciliary body) にある毛様筋 (ciliary muscle) が収縮し、チン小体 (Zinn's zonule) が弛緩することでレンズを厚くし、遠方の対象物を見る時は逆の動作を行い、レンズを薄くしている。

水晶体は加齢により硬化し、黄濁する。水晶体に溶けているタンパクの分子が加齢に伴い徐々に大きくなり、これにより分子が巨大になり析出し始めると、液自体の屈

折率が低下し、析出した分子は濁りになる。軽度であれば透過光の散乱の増加を招く、重度になれば結像を妨げることになる。これを白内障という。

ピントを合わせることができる範囲には限界があり、個人差が大きく、前述のように加齢変化も大きい。調節が可能な近い方の限界を調節近点(near point of accommodation)、遠い方の限界を調節遠点(far point of accommodation)という。この両者の幅が調節の能力であり測定できる限りでは、若年であるほど大きい。加齢による変化は主として調節近点が遠方へ移っていく。実際には20歳と30歳の間でも大きく差はあるが、機能に余裕があるため、あまり実感はない。しかしながら40歳を過ぎたところから、日常生活で不便を感じ始める。これを老視(presbyopia)という[20]。

2-2-2. 輻輳運動 (convergence)

対象物体を両眼網膜の中心窩(central fovea)でとらえるために生じる両眼の回転運動を輻輳運動(vergence)と呼び、眼球が内側(鼻)方向に回転する動きを輻輳(convergence)(図2-6)、外側(耳)方向に回転する動きを開散(divergence)と呼ぶ。また対象物を見ているときの両眼の視軸がなす角を輻輳角(convergence angle)と呼び、視軸が交差している位置までの距離を輻輳距離(convergence distance)と呼ぶ。輻輳角を知ることができれば、三角測量の原理で対象物までの距離を知ることが可能である。

また、輻輳運動は両眼の網膜像のズレ(視差, binocular disparity)に代表される奥行方向への手がかりに呼応して生じるものであり、外界の視覚刺激が動いているときに刺激を網膜上に固定するために起こる視運動性眼振(OKN: optokinetic nystagmus)や、体が動いても網膜上の映像の安定化を維持、改善する機構である前庭動眼反射(VOR: vestibule-ocular reflex)のような両眼の共役的な眼球運動ではなく、3次元空間内における奥行方向の「見え」を可能とするために水晶体の調節とほぼ同期して起きる眼球運動であると言われている[20]。

現在の主流となっている二眼式立体映像は、この輻輳運動と両眼視差を利用して、映像が画面上ではなく、より奥側、または手前側にあると知覚させることにより、映像を立体的に見せている(図2-7)。

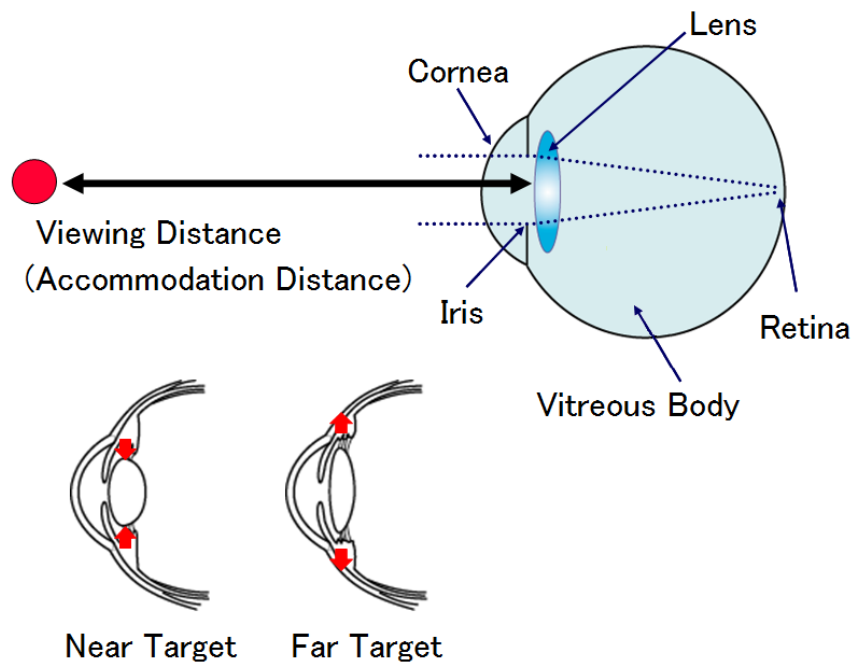


图 2-5 水晶体調節反応

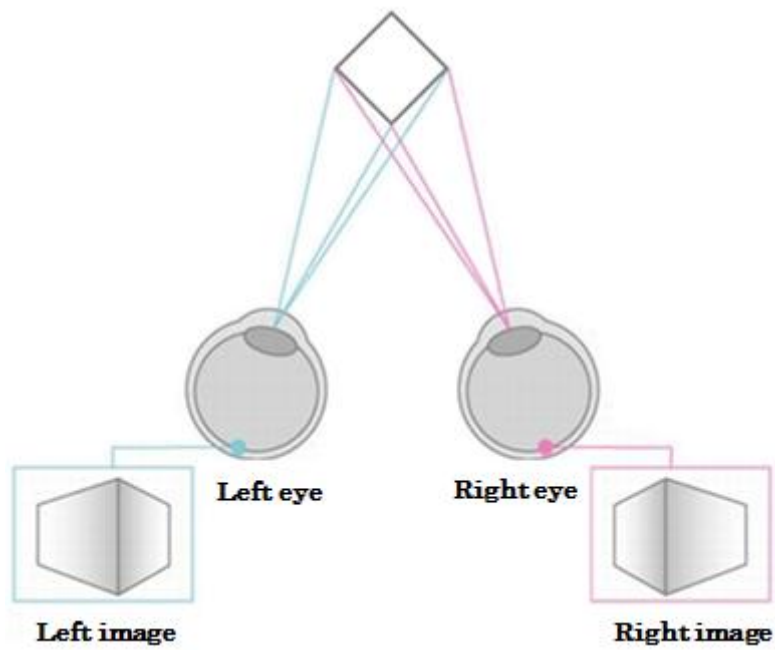


图 2-6 輻輳運動

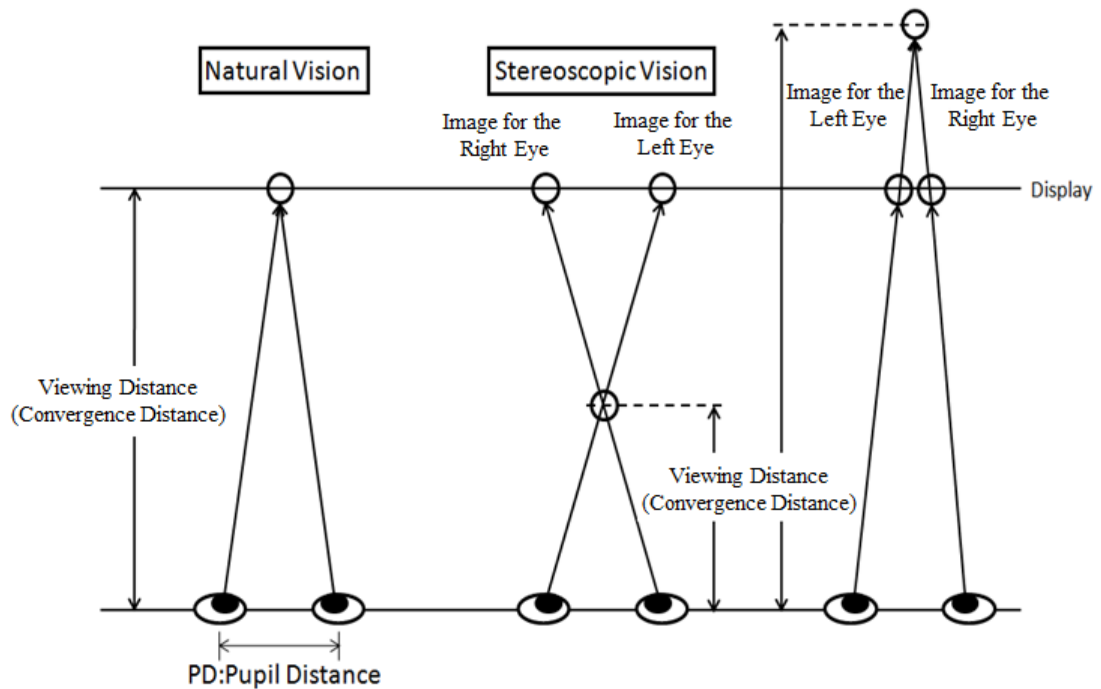


図 2-7 両眼視 (binocular vision) による立体視 (stereoscopic vision) の原理

3. 実験結果

本実験の対象者 6 名は概ね同様の傾向を示した。図 2-8, 2-9 にある被験者二人の実験結果を典型例として、また図 2-10 に被験者全員の調節、輻輳の焦点距離の値を 1.25 秒刻みで区分し、同じ時間帯に含まれる値の平均値を取り、経過時間でプロットしたものを示す。

図 2-8, 2-9 における accommodation とは、水晶体調節のピントの焦点距離である。convergence とは、寄り眼による輻輳運動の焦点距離である。そして sphere は、注視物体であるテニスボール(実物体)までの被験者からの距離を表している。また、図 2-10 における ac_ave は調節の、con_ave は輻輳の、被験者全員分の平均値を示している。またグラフの横軸は被験者が対象物を注視しているときの経過時間を、縦軸の右側は被験者から対象物までの距離を、左側はその逆数である diopter を表している。

すべての図において、被験者の調節と輻輳の値はテニスボールの運動に同調して、10 秒周期で増減を繰り返していた。図 2-8 (22 歳, 男性) において diopter の値は、accommodation, convergence とともに、最小で 1D 程度 (100cm), 最大で 2D 程度 (50cm) となっており、被験者から実物体までの距離である sphere の値と良く一致していた。

図 2-9 (24 歳, 男性) では convergence の diopter 値は図 2-7 と同様、sphere の値と

非常によく一致していたが、accommodation の値は sphere に比べ、常に若干下回って遷移していた。

図 2-10 では ac_ave, con_ave はともに最大で 1.7D 程度(59cm)となっており、両者の値はほぼ一致していた。

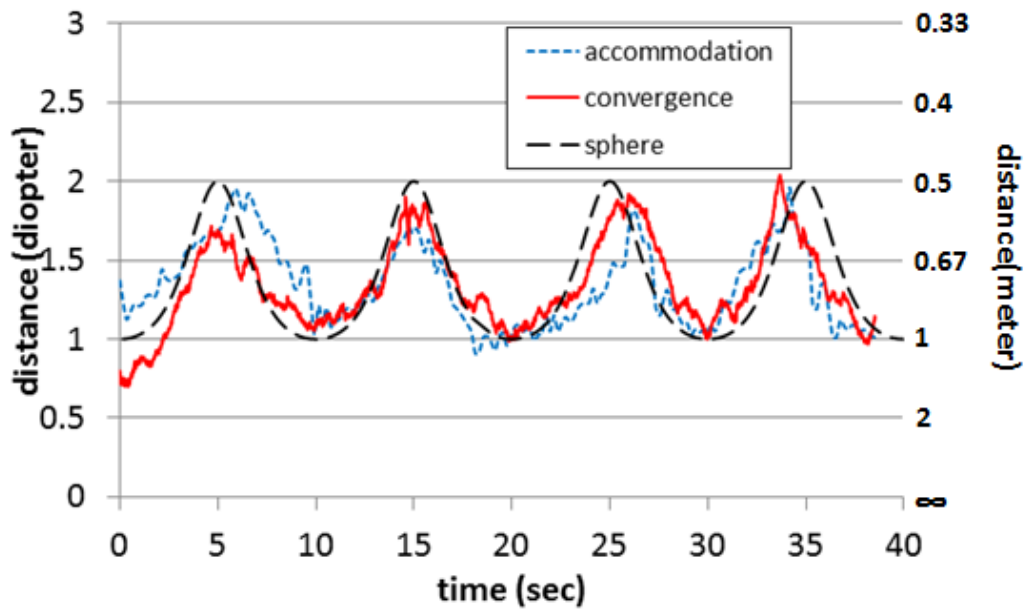


図 2-8 水晶体調節，輻輳運動の同時測定結果（22 歳，男性）

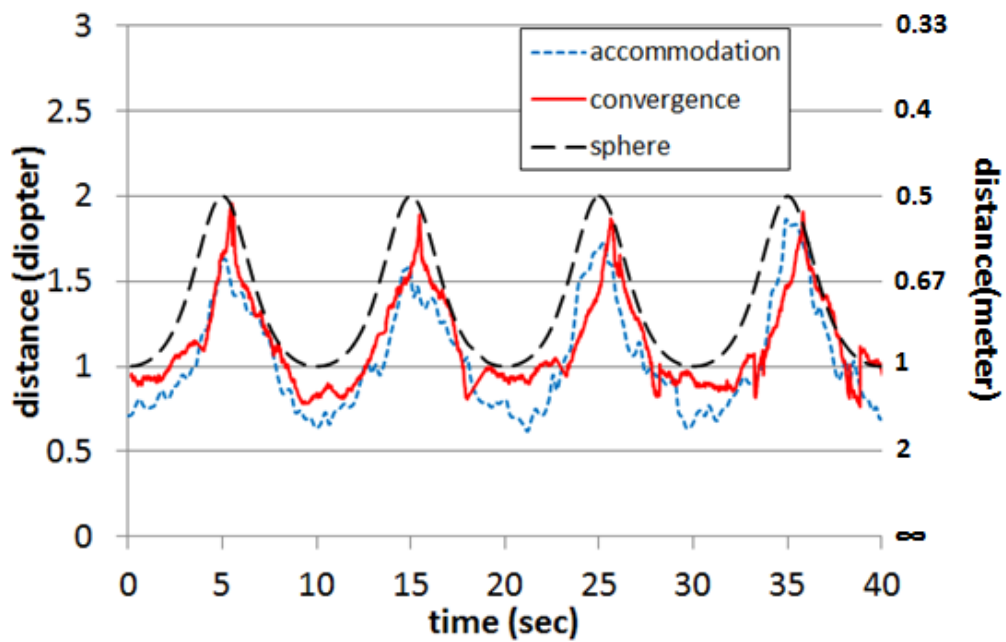


図 2-9 水晶体調節，輻輳運動の同時測定結果（22 歳，男性）

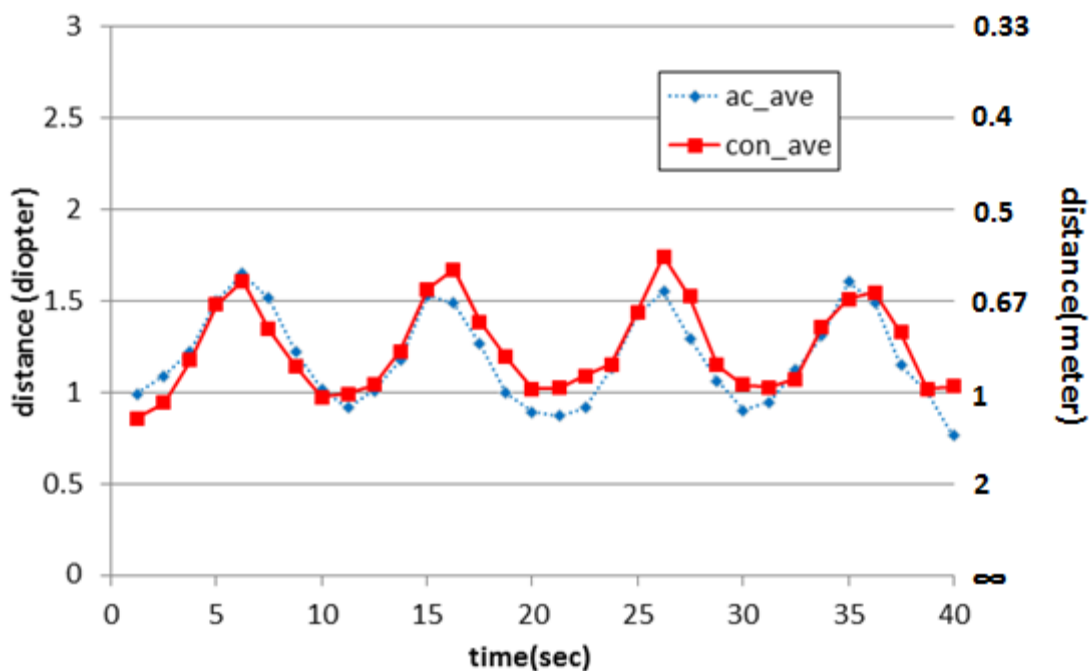


図 2-10 被験者の調節，輻輳の位相ごとの平均値

4. 考察

Win-Hall ら[21]は我々が今回導入した WAM-5500 のメーカーである，グランド精工社製の WR-5100K を使い調節を測定し，簡易に眼球の調節力を測る手法である push-up テストと比較することで信頼性とその評価を行っている．push-up テストの手順はまず片側の眼を閉じた状態で，開眼状態の方の眼である程度の距離にある視標を見つめる．Win-Hall らは最初この距離を 40cm としていた．そしてその状態から視標を被験者に近づけていき，視標がぼやけた位置での被験者からの距離を取り，調節力とする方法である．Win-Hall らは 21 歳から 30 歳の 22 人の被験者を対象に実験を行っており，5D の位置にある視標を見ているときに，push-up テストが $7.74D \pm 0.36D$ という結果だったことに対し，WAM-5500 の測定結果では $4.68D \pm 0.10D$ という結果を得ており，WAM-5500 を使用することで，より精度の高い調節測定実験を行っている．また我々と同じ WAM-5500 を使用して，Shepperd & Davies[17]は-6.38 から+4.88D の範囲であれば， $-0.01D \pm 0.38D$ の精度で計測が可能であるという結果を得ている．

水晶体調節反応の測定を行った先行研究は数多い．しかしながら，同時に輻輳を測定したという研究は非常に少ない．阿部ら[22]は両眼の眼球運動を測定する装置と，アコモドメータを PC により時分割し機器を切り替えることにより同時測定を試みているが，切り替

えの際にディレイが生じる，またそのためサンプリングの周期が 190ms であるのに対し，サンプリング時間が 5ms と非常に短く，そのほかにも計測が成功しない場合があったなど問題点があったということを述べている．また Bruce ら[23]はハーフミラーを用いることにより，調節と輻輳を同時に計測し，年齢による変化を調べている．しかし，この計測ではある特定の瞬間の値しか測定することができず，時間変化による値の変化を計測することができなかった．また実験装置の構造上，注視点が変わると計測が行えないため，静止した提示物や画像を注視している状態でしか測定を行うことができなかった．

それに対し，今回我々が開発した手法は，調節と輻輳を常に同時に測定することができ，立体映像のように，変化する提示物を注視していても，同時計測を行うことができる．また今回の対象物の移動範囲が 2D から 1D であることから，調節の測定は Shepperd & Davies[17]をもとにすると，かなり良い精度が期待できる．輻輳についても EMR-9 は毎秒約 60 回のサンプリングが可能であり，WAM-5500 に比べ，非常に高速での連続測定が可能である．図 2-8, 9, 10 の実物体を注視している際の結果をみると，調節と輻輳は対象物の動きに同調して変化しており，各時間の diopter 値も被験者から実物体までの距離のそれと非常に近い．このことから被験者はテニスボールを注視し続けており，かつそれが正確に計測できていることが推測される．図 2-9 と図 2-10 では調節が対象物よりもやや遠方に合わせられている場合があるが，調節は対象に正確に焦点を合わせる反応ではなく，ある程度ずれがあるもので，また個人差も存在することが分かっている[24]．

長谷川ら [7, 25, 26]は，十分な照度があるときには，調節は対象物よりも約 0.4D 遠方に合わせられるということを報告している．これに照らし合わせると，今回の実験における水晶体調節の，実物体からのずれは十分に許容範囲であると言え，これより新たに開発した我々の同時測定法は，水晶体調節と輻輳運動を同時に計測する方法として，十分に有効な方法であると言える．

5. まとめ

本実験では、WAM-5500 という調節力測定装置と、EMR-9 という視線位置追跡装置を使用することで、水晶体調節と輻輳運動の同時計測を行う方法を新たに考案した。そしてこの方法を使用して、実物体を注視している被験者の調節、輻輳を測定した結果、十分に正しい計測結果を得た。これにより立体映像を視聴している際の同時計測も正確に行うことができる可能性が得られたため、次章において立体映像視聴時の水晶体調節、輻輳運動の同時計測を行う。

参考文献

- [1] 氏家 弘裕：知っておきたいキーワード，映像酔い，映像情報メディア学会誌，Vol.61, No.8, pp.1122-1124，2007.
- [2] 斎田真也：人にやさしい映像～その評価と国際基準～，映像情報メディア学会誌，Vol.58, No.10, pp.1356-1359，2004.
- [3] 矢野澄男，江本正喜，三橋哲雄：両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因，映像メディア学会誌，Vol.57, No. 9, pp.1187-1193, 2003.
- [4] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks：Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue, *Journal of Vision*, Vol.8, No.3, 33, pp1-30, 2008.
- [5] K. Ukai and P. A. Howarth：Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories, and observation, *Displays*, Vol.29, 2, pp106-116, 2008.
- [6] 柴田隆史，河合隆史，岩崎常人：焦点調節と被写界深度を反映した立体映像表現，*日本人間工学会大会講演集*，Vol.43, pp.416-417, 2007.
- [7] 長谷川聡，大森正子，渡辺智之，高田宗樹，藤掛和広，市川哲哉，田原博史，小室貴弘，小阪将也，宮尾克：ヘッドマウントディスプレイ上への水晶体調節，*シンポジウムモバイル 08*，pp.192-196, 2008.
- [8] 河合隆史，田中見和：次世代メディアクリエイター入門 1 立体表現，*カットシステム*，2003.
- [9] 苗村健，畑田豊彦，佐藤隆夫，他，「立体視テクノロジー-次世代立体表示技術の最前線-」，*エヌ・ティー・エス*，2008.
- [10] M. Miyao, S. Ishihara, S. Saito, T. Kondo, H. Sakakibara and H. Toyoshima: Visual accommodation and subject performance during a stereographic object task using liquid crystal shutters, *Ergonomics*, Vol.39, Iss.11, pp.1294-1309, 1996.
- [11] M. Miyao, Y. Otake and S. Ishihara: A newly developed device to measure objective amplitude of accommodation and papillary response in both binocular and natural viewing conditions, *Jpn. J. Ind. Health*, Vol.34, pp.148-149, 1992.
- [12] M. Omori, S. Hasegawa, H. Ishigaki, T. Watanabe, M. Miyao and H. Tahara: Accommodative load for stereoscopic displays, *Proc. SPIE*, Vol.5664, pp.64, 2005.

- [13] M. Omori, S. Hasegawa, T. Watanabe, K. Fujikake and M. Miyao: Comparison of measurement of accommodation between LCD and CRT at the stereoscopic vision gaze, LNCS, Vol.5622, pp.90-96, 2009.
- [14] 日本工業規格 (JIS), JIS Z9110 照明基準総則, 2010.
- [15] 日本工業規格 (JIS), JIS Z9125 屋内作業場の照明基準, 2007.
- [16] ISO, ISO 8995, Lightning of Indoor work places, 2002.
- [17] A. L. Sheppard and L. N. Davies: Clinical evaluation of the Grand Seiko Auto Ref/Keratometer WAM-5500, *Ophthal. Physiol. Opt*, Vol.30, pp.143-151, 2010.
- [18] T. Sakaki: Estimation of Intention of User Arm Motion for the Proactive Motion of Upper Extramity Supporting Robot, IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics, Kyoto International Conference Center, Japan, pp.23-26, 2009.
- [19] C. Egami, K. Morita, T. Ohya, Y. Ishii, Y. Yamashita and T. Matsuishi: Developmental characteristics of visual cognitive function during childhood according to exploratory eye movements, *Brain & Development*, Vol.31, pp.750-757, 2008.
- [20] 内川恵二, 篠森敬三編, 「視覚 I -四角形の構造と初期機能-」, 朝倉書店, 2007.
- [20] D. M. Win-Hall, L. A. Ostrin, S. Kasthurirangan and A. Glasser: Objective Accommodation Measurement with the Grand Seiko and Hartinger Coincidence Refractometer, *Optometry & Vision Science*, Vol.84, NO.9, pp.879-887, 2007.
- [21] 阿部真也, 本田捷夫ら: 超多眼立体画像に対する輻輳, 調節反応の検討, 映像メディア情報学会誌, Vol.24, NO.26, pp.19-24, 2000.
- [22] A. S. Bruce, D.A. Atchison and H. Bhoola: Accommodation-Convergence Relationships and Age, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, VOL.36, No.2, pp.406-413, 1995.
- [23] 泉武博, 「3次元映像の基礎」, オーム社, pp.67-90, 1995.
- [24] 大森正子, 長谷川聡, 石原伸哉, 石垣尚男, 田原博史, 宮尾克: 立体映像に対する水晶体調節の測定, 日本視覚学会 2004年夏季, *VISION*, Vol.16, No.4, pp.223-226, 2004.
- [25] 藤掛和広, 長谷川聡, 大森正子, 田原博史, 宮尾克: 立体映像認知時における水晶体調節の評価, 電子情報通信学会技術研究報告, ヒューマン情報処理, Vol.105, No.165, pp.39-42, 2005.

第3章

2D 映像，3D 映像における水晶体調節， 輻輳運動の同時計測

1. はじめに

立体映像の視聴による眼精疲労や3D酔い等の悪影響の原因として、立体映像視聴時には「水晶体調節と輻輳運動の不整合」が起きていると言われる[1-3]。その説によると、立体映像視聴時には水晶体調節は表示ディスプレイの画面上に固定されているが、輻輳運動は映像の動きに合わせて、焦点が変化するため、現実の環境でものを見る状態とは異なり、それが悪影響の原因となる。この説に対して、我々は懐疑的な立場をとっていたものの、これまでの研究においては、立体映像を視聴しながら、これらの視機能を同時に測定することが不可能だったため、その説が誤りであるという立証は不十分であった[1-3]。

しかしながら、前章において、新たに考案した水晶体調節、輻輳運動の同時計測法が十分に有効な計測法であることが確認されたことで、立体映像視聴時の、水晶体調節と輻輳運動の同時計測が可能となった。

本研究では、2つの実験を行った。一つはこの新たな同時計測法を使用して、立体映像の視聴時と、その比較対象として、通常の2D表示の映像を視聴しているときの若年被験者の水晶体調節と輻輳運動の同時測定を行い、水晶体調節と輻輳運動の焦点位置がどのような変化をしているのかということに注目し、検証した。もう一つの実験として、若年者ではない、中高齢者を対象に立体映像を視聴させ、若年者の場合と同様、水晶体調節、輻輳運動、そして瞳孔径を測定し、若年者の測定結果と、どのように異なるのかということ进行调查し、その原因について考察した。

2. 立体視 (stereoscopic vision) の原理と特性, 空間情報要因

2-1. 立体視の原理

本研究では立体視に関する視機能として, 水晶体調節 (lens accommodation) および輻輳運動 (convergence) を主に取り上げており, 両眼視差 (binocular disparity, binocular parallax) を利用した二眼式立体映像を対象に研究をしているが, それ以外にも数多くの奥行方向への手掛かり (depth cue) によって立体視は支えられている (表 3-1). 水晶体調節と輻輳運動については前章で既に取り上げているため割愛するが, 本節ではそれ以外の要因について取り上げ, 立体視を論ずる.

表 3-1 奥行方向への手掛かり

眼球の手掛かり	水晶体調節
	両眼輻輳運動
「ずれ」の検出による手掛かり	両眼視差
	単眼運動視差
画像性の手掛かり	物の大小
	遠近法
	物の重なり
	テクスチャー勾配
	陰影

2-1-1. 両眼視差 (binocular disparity, binocular parallax)

右目と左目で捉える画像はほぼ同一であるが, 水平方向にわずかにずれが存在しており, このずれを両眼視差という. この両眼視差は観察者から物体までの距離に応じて変化をするため, 奥行方向の情報が含まれており, 実際に視覚系の内部で視差を検出し, 奥行きを知覚している. この立体視を両眼立体視 (binocular stereoscopic vision) という.

三次元空間内の対象を中心視し, 輻輳を固定した状態で注視するとき, 左右眼像間に両眼視差があっても, パナムの融合領域 (Panum's area : 中心窩で約 30 視角秒) と呼ばれる範囲で左右眼像を単一視し, 立体視することができる (図 3-1) [4].

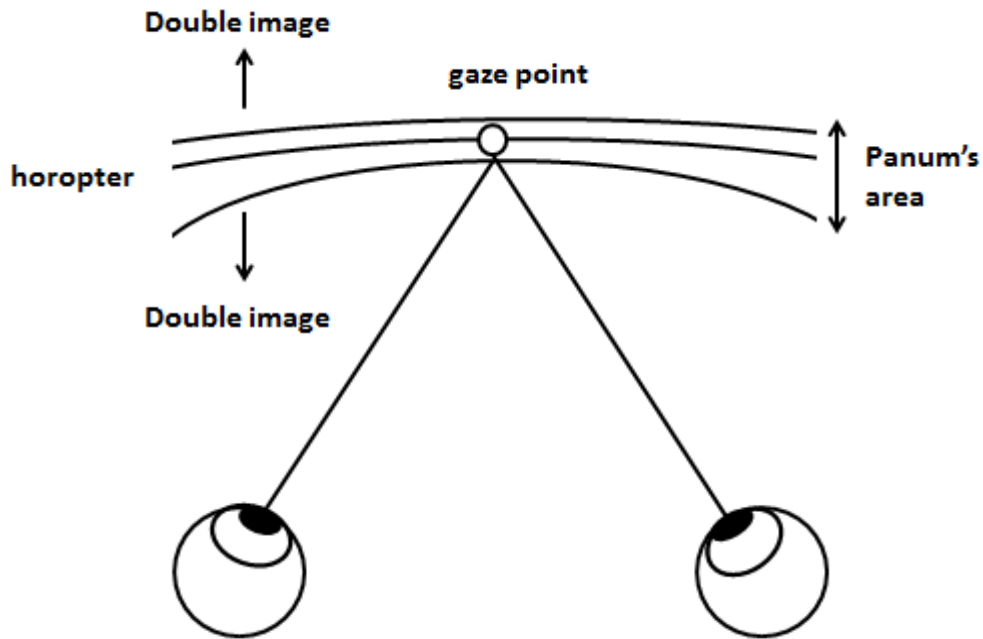


図 3-1 パナム領域とホロプター

2-1-2. 単眼運動視差 (motion parallax)

両眼立体視と同様に、ずれによる立体視は単眼視でも成立する。これは観察者の運動によるものと、対象の運動によるものがある。前者の例をあげると、ある点を注視し、目の前に指を立てて頭を動かすと、指の位置は注視点に対して相対的に移動する。このとき、両眼立体視における右眼、左眼の網膜像が一方の目の網膜に継時的に映し出される。このような、ある時点と、次のある時点における二つの網膜像間のずれを運動視差と呼ぶ(図 3-2) [5,6]。この運動視差に基づく立体視は、原理的には両眼立体視と同一であり、より現実に沿った具体的な例を挙げると、電車の窓から見える景色、遠くの山、近くの家との相対的な位置は電車の移動に伴って激しく変化する。こうしたものも運動視差の一種であり、景色の移動速度の差で外界の立体構造を知覚することができる。

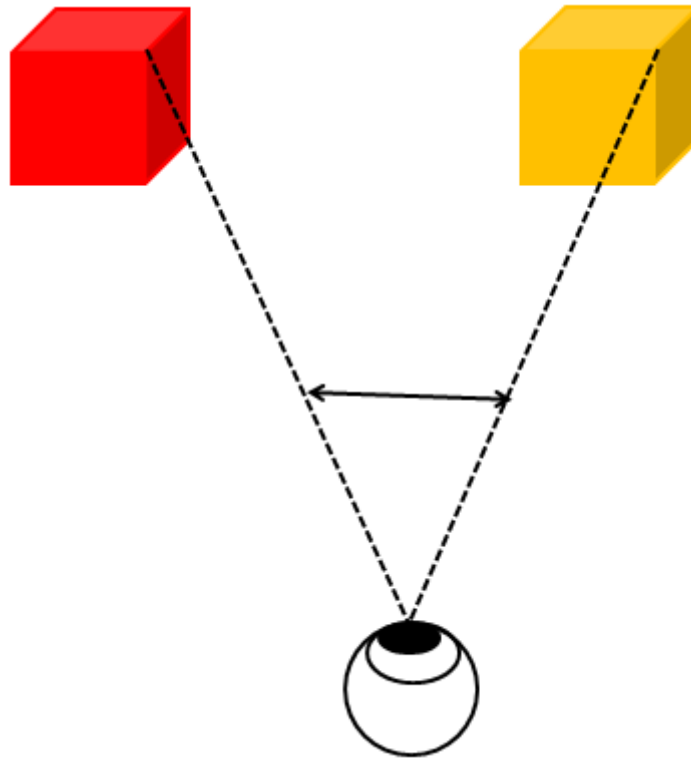


図 3-2 運動視差

2-1-3. 物の大小

近くのは網膜上に大きく、遠くのは小さく結像されるという光学的な事実と対応してヒトは物の相対的な距離を知ることができる。つまり対象の大きさが既知であるもの、または絶対値は未知であっても、同一のものであり、同じ大きさであるということが既知であるもの同士の間における相対的な距離は、網膜像の大きさに基づいて判断することができる。また、対象の大きさの絶対値が既知であり、それと網膜像の大きさの絶対値の比較が可能ならば、対象物までの絶対的な距離を知ることが可能となる。しかしながら、前提を覆すような関係同士のものとの比較をする場合は、この手掛かりは役には立たない（例：図 3-3）。図 3-3 に描かれている 3 人は平面上では同じ高さであるが、見た目には遠くに見える人ほど背が高く見える[7]。

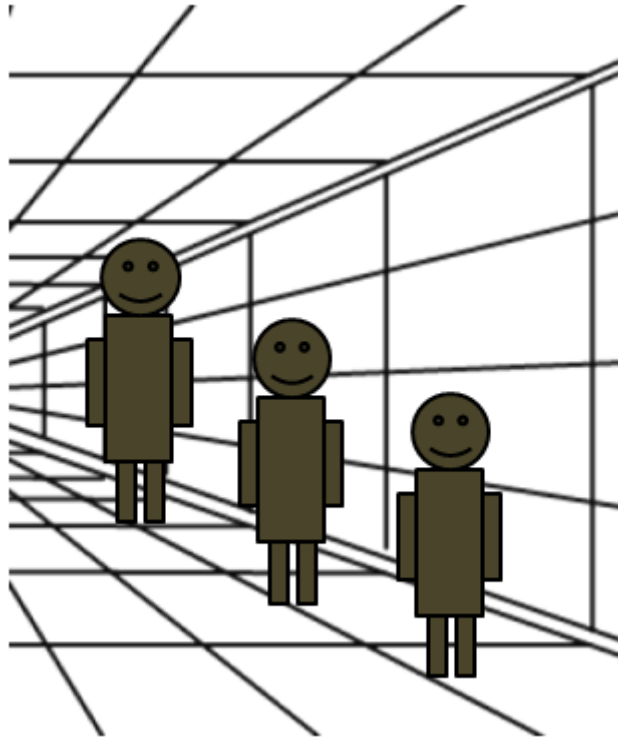


図 3-3 物の大小

2-1-4. 遠近法 (perspective)

遠近法の手掛かりは物の大小手掛かりと似た原理であり、ほぼ等価である。しかしながら、遠近法にはほかの手掛かりも併せ持ち、例えば道路や線路のように平行な成分で成り立っているものや道路に沿った家並みなどを結ぶ仮想の直線は視野内の一点である消失点 (vanishing point) に収束し、これも奥行手掛かりとして認知する (図 3-4)。これを特に線遠近法 (linear perspective) と呼ぶ[7]。また、遠近法には空気遠近法 (aerial perspective) と呼ばれるもう一つの手掛かりもあり、これは例えば、高いところから景色を眺めると、近くの山は鮮やかな緑に見え、木々も一本ずつ見分けることができるが、遠くの山は緑ではなく紫がかった色に変化し、木々を一本ずつ見分けることができない (図 3-5)。これは対象からの光線が途中の空気や水蒸気などの様々な微粒子によって攪乱の影響を受けるからである[8]。



图 3-4 線遠近法 (出典[6])



图 3-5 空氣遠近法

2-1-5. 物の重なり

二つの対象が重なり合えば、より近いところにあるものが、遠くにあるものを覆い隠す。したがって、覆い隠されているものは、覆い隠しているものより遠くにあることになる(図3-6)。しかしながら図3-6では、奥の長方形が他の図形に覆い隠されているのではなく、それらの図形の形にくり抜かれているようにも見て取れる。しかし我々は経験と知識に基づいて、長方形が後方にあると知覚する[7]。



図3-6 物の重なり合い

2-1-6. テクスチャー勾配 (texture gradient)

石畳の道や砂利道、草むらを見ると、個々の構成要素(石や砂利、草の大きさ)が距離に応じて連続的に変化する。これをテクスチャー勾配と呼ぶ(図3-7)。この手掛かりも物の大小手掛かりと関連深く、距離知覚の基となる。

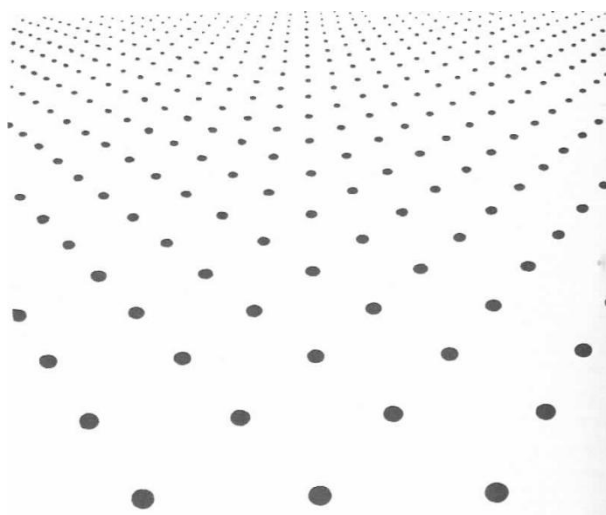


図3-7 テクスチャー勾配

2-1-7. 陰影

物体に移る明るさの分布から、対象の立体構造を知覚することができる。図3-8は、両方とも同じ形状を表現しているが、陰影のある左の丸のほうがより立体感を強く知覚する。この明るさの分布は、光源からの光の入射角に対する個々の部分的な表面のなす角に依存する。入射角が法線に近ければ明るく、角度が浅くなるにつれて暗くなる。



図3-8 陰影手がかかり

2-2. 対象空間の特性と空間情報要因

人は立体視をする際に、前節2-1で示したような様々な奥行方向への手掛かりを用いて対象空間を立体認知している。しかしながら、対象空間ごとに必要な空間知覚上成分が異なり、表3-2はその対象空間の特性と空間情報要因を示している[9]。本研究で扱う立体映像の視聴は比較的、近距離の視聴を想定しており、その視聴距離が2m以内であるため、表にも示されているように、本研究では、奥行き手掛かりの中でも特に水晶体調節、輻輳運動に焦点を当てて研究を行っている。

表3-2 対象空間特性

対象空間	空間距離	特徴	必要な空間知覚情報成分
手作業空間	2m 以内	物体までの絶対距離や物体相互の位置関係が正確に識別・再現でき、対象への直接操作が可能な空間	水晶体調節，輻輳運動，両眼視差
歩行空間	10m 以内	歩行移動により，対象への働きかけが可能な距離範囲にあるが，遠隔操作などによる空間作業が行え，物体間の相対距離がかなりの精度で識別できる空間	両眼視差，運動視差，輻輳運動，網膜上の像状態 (像の大きさ，コントラスト，色，陰影など)
観察空間	10m 以上	対象への積極的な働きかけはできないが，空間的な広がり感や再現空間への参入感が期待される空間	運動視差，視野，網膜上の像状態

2-3. 液晶シャッター方式

立体映像の表示方式には表 3-4 に示すように様々な方式が採用されている。二眼式の立体表示方式が両眼視差を利用していることはすでに述べたが、液晶シャッターメガネ方式はその中の、眼鏡式二眼立体表示方式に当たる。ここでは液晶シャッター方式を含む、代表的な眼鏡式二眼立体表示方式について説明する。

表 3-4 3D ディスプレイの表示方式

眼鏡式二眼立体表示方式	アナグリフ方式
	偏光メガネ方式
	液晶シャッターメガネ方式
	濃度差メガネ方式
	HMD (Head Mounted Display) 方式
	分光方式
裸眼式二眼立体表示方式	パララックスバリア方式
	レンチキュラー方式
	光源分割方式
多眼情報提示方式	多視点方式
	超多眼方式
	インテグラルフォトグラフィ方式
	指向性画像表示方式
奥行き情報提示方式	DFD (Depth-fused 3D) 方式
	堆積型方式
波面再生方式	ホログラフィ方式
空間映像表示方式	空間結像方式
	スクリーン回転方式
	ホログラフィックスクリーン方式
	フォグスクリーン方式

2-3-1. 液晶シャッターメガネ (liquid crystal shutter) 方式

左右の異なる角度から撮影した映像を交互に再生し、左右の視界が交互に遮断される液晶シャッターを備えた眼鏡で見る方式。メガネのシャッターが二つの映像と完全に同期し

て開閉することで、左右眼に別々の映像が提示される。フレームシーケンシャル (frame sequential) 方式とも呼ばれる。

液晶シャッターメガネ方式はそれぞれの装置が高価であり、標準化も進んでいないため規格同士でメガネが異なる問題がある。また、フレームレートが低いと、フリッカー (flicker) によるクロストークが生じるため、これを回避するためにフレームレートを高める必要がある。液晶ディスプレイでは 240Hz ほどのフレッシュレートが好ましいが、最低でも、60Hz 以上ないとクロストークが生じてしまう。さらに、液晶ディスプレイをほぼ表示時間と同じ時間、左右の視界を遮る必要があるため、輝度 (luminance) が半減してしまう問題もある。

2-3-2. アナグリフ (anaglyph) 方式

左右の異なる角度から撮影した映像を、赤と青の光で重ねて再生し、左右に赤と青のカラフィルタのついた眼鏡で見るものである。従来はモノクロ映像に限られていたが、色彩情報を左右に振り分けることでカラーでの映像制作が可能となった。しかしながら、対象物の見える角度の違いによって色味が変化してしまうため、現在はあまり使われていない。

2-3-3. 偏光メガネ (polarized filter) 方式

左右の映像に直行する直線偏光 (linear polarized light) をかけて重ねて投影し、これを偏光フィルタのついた眼鏡で分離して提示する。直線偏光の代わりに円偏光 (circular polarized light) を用いたものもあり、円偏光は観測者が顔を傾けても左右像のクロストーク (cross talk) が小さく維持されるという利点がある[10]。

3D 映画には偏光メガネ方式が多く採用されているが、これは、液晶シャッターメガネに比べて軽く、安価に作れることが理由に挙げられる。

2-3-4. HMD (Head Mounted Display) 方式

HMD (ヘッドマウントディスプレイ) 方式はメガネ式と似ているが、表示画像を映し出す機構全体が観測者の頭部に装着される形式であり、左右の異なる視点で撮影された映像が、左右の眼でそれぞれ自然な距離間で視線が保たれるように光学的に調整されて顔面間近や眼底部に直接投影される。投影面を眼鏡のように透過することで、拡張現実 (augmented reality: AR) のための表示インターフェース機器として用いられることもある[11]。

3. 若年者を対象とした立体映像視聴時の調節，輻輳の同時計測

3-1. 実験方法

前章での実験と同じく，被験者には事前に十分にインフォームドコンセントを行い，名古屋大学情報科学研究科の倫理審査委員会の承認を得ている。

被験者はすべて正視状態で計測を行うため，矯正が必要な場合にはソフトコンタクトレンズを装着させ，無限遠での屈折率を ± 0.25 diopter 以内になるように矯正した。

実験は 20 代から 30 代の 6 名の若年被験者(裸眼 2 名，ソフトコンタクトレンズ装用 4 名)を対象に矯正後の正視の状態で行った。本実験で使用している立体映像の方式は液晶シャッター方式 (liquid crystal shutter system) であり，提示した映像は 2D 映像，3D 映像ともに球体が 10 秒周期で前後運動し，それを 4 サイクル繰り返す計 40 秒の映像を使用した (図 3-9)。この立体映像はオリンパスメモリーワークス(株)独自の立体画像作成技術である OLYMPUS POWER3D(商標) を用いて作成された CG 立体映像であり，自然視での望遠と近見の目の動きを取り入れて作られた複数の映像を組み合わせており，長谷川ら[12]においてこの 3D 映像を見ている際には，水晶体調節反応が従来の 3D 映像に比べ，より実物体を注視している際の反応に近い反応を示すことが分かっている。これより OLYMPUS POWER3D による 3D 映像は従来の立体映像に比べて，極めて自然視に近い映像とも言える。

計測は以下の手順で行った。被験者の顔を，WAM-5500 と EMR-9 を組み合わせた測定機器の顎台により固定し，その眼前 1m の位置に 2D 映像および 3D 映像を提示するためのディスプレイ (FlexScanS1911 (19 インチ)) (表 3-3) を設置した。映像が提示されている間，被験者には映像を注視するように教示し，水晶体調節と輻輳運動を同時計測した。

立体映像は全ての被験者で同一のものを使用しており，被験者の瞳孔間距離 (pupil distance) の違いにより，輻輳角 (convergence angle)，輻輳運動の焦点距離が変化する。そのため，最接近時の距離は約 40cm(2.5D)であるが，各被験者により，わずかに異なる。また周辺の背景映像による影響を極力減少させるため，2D 映像，3D 映像ともに，被験者には常に移動する球体を注視するよう指示した。実験環境の照度は眼球に入射する地面に対して垂直な照度は約 103lx，地面と水平な照度は 683lx，提示した映像の球体の輝度は，近方時は 3.0cd/m²，遠方時は 3.6cd/m²であり，なお球体の輝度は液晶シャッター越しの測定である。

この照度は前章における実物での計測と同じ実験環境であり，JIS や ISO で規格化されたもの[13-15]に準拠しており，通常の視作業を行うための十分な照度基準を満たしている[16]。

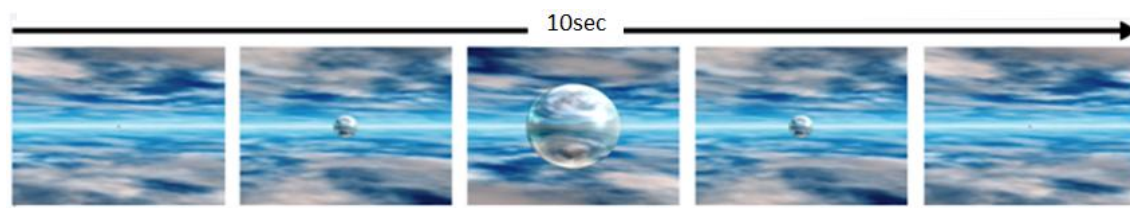


図 3-9 立体映像の動き

表 3-3 ディスプレイの性能

Characteristics	Value
Screen resolution	1280×1024
Color usage	16,190,000
Size	19inch
Pixel pitch	0.294×0.294mm
Contrast	700:1
Height	33.4cm
Width	40.5cm

3-2. 実験結果

本実験の対象者である 6 名の被験者は 2D 映像，3D 映像ともに，概ね同様の傾向を示した。図 3-10 は 2D 映像の，図 3-11，3-12 は 3D 映像における測定結果の典型例を表している。この二つの結果の被験者は異なる被験者である。水晶体調節の値は 5Hz，輻輳運動は 60Hz で計測を行った。その値を計測時間 1.25 秒刻みで区分し，同じ時間帯に含まれる値をすべてに被験者に対して平均値をとり，経過時間に対してプロットしたものを図 3-13 に示す。

図 3-10 から 3-12 における accommodation とは，水晶体調節のピントの焦点距離である。convergence とは，寄り眼による輻輳運動の焦点距離である。そして sphere は，被験者からの，立体映像の仮想的な位置までの距離を表している。また図 3-13 における ac_ave は調節の，con_ave は輻輳の被験者全員の平均値を表している。また全てのグラフの横軸は被験者が対象物を注視しているときの経過時間を，縦軸の右側は被験者から対象物までの距離を，左側はその逆数である diopter を表している。

図 3-10 の 2D 映像における測定結果では，accommodation は約 1.3D(77cm)，convergence は約 1.1D(91cm)を示し，球体の遠近に合わせて調節と輻輳が，その動きに同

調して変化するような動きは見られなかった。

3D 映像での測定結果では、図 3-11 の被験者では、accommodation は被験者に最接近で 2.5D(40cm)、最も遠い位置にあるとき 1.0D(100cm)となっている。convergence は 2.7D(37cm)から 1.0D(100cm)の間で球体の遠近に合わせて変化しており、両者は周期、振幅ともに良く一致している。また、図 3-12 の結果は、accommodation は最接近時には 2.7D(37cm)、最も遠い位置にあるときは 0.8D(125cm)となっていた。convergence は最接近時には 2D(50cm)、最も遠い位置にあるときは 0.8D(125cm)となっていた。

図 3-13 においても ac_ave と con_ave は周期、振幅が良く一致しており、その値は最小で 1D(100cm)程度、最大で 2.3D(43cm)程度となっている。

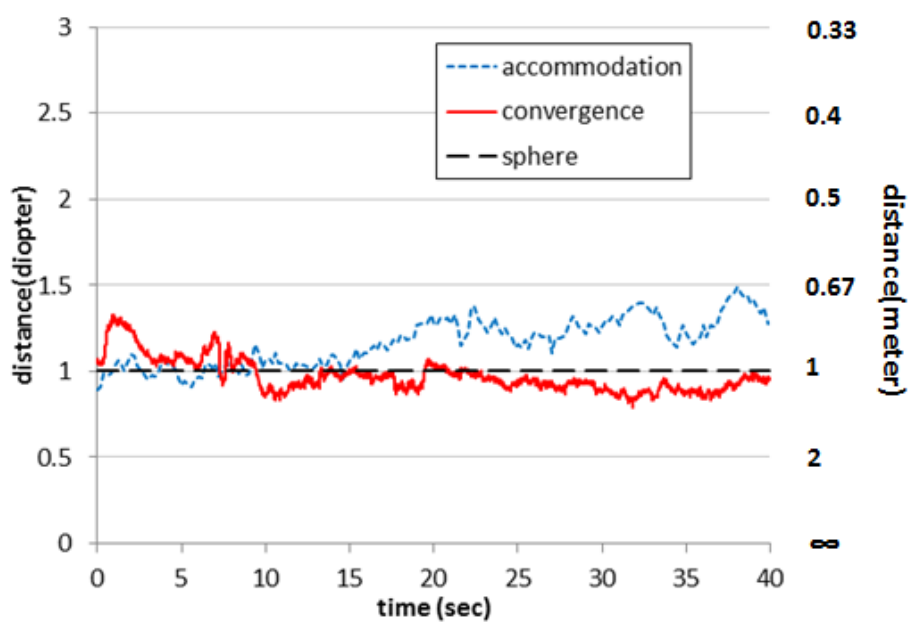


図 3-10 2D 映像の水晶体調節，輻輳運動の同時測定結果（21 歳，男性）

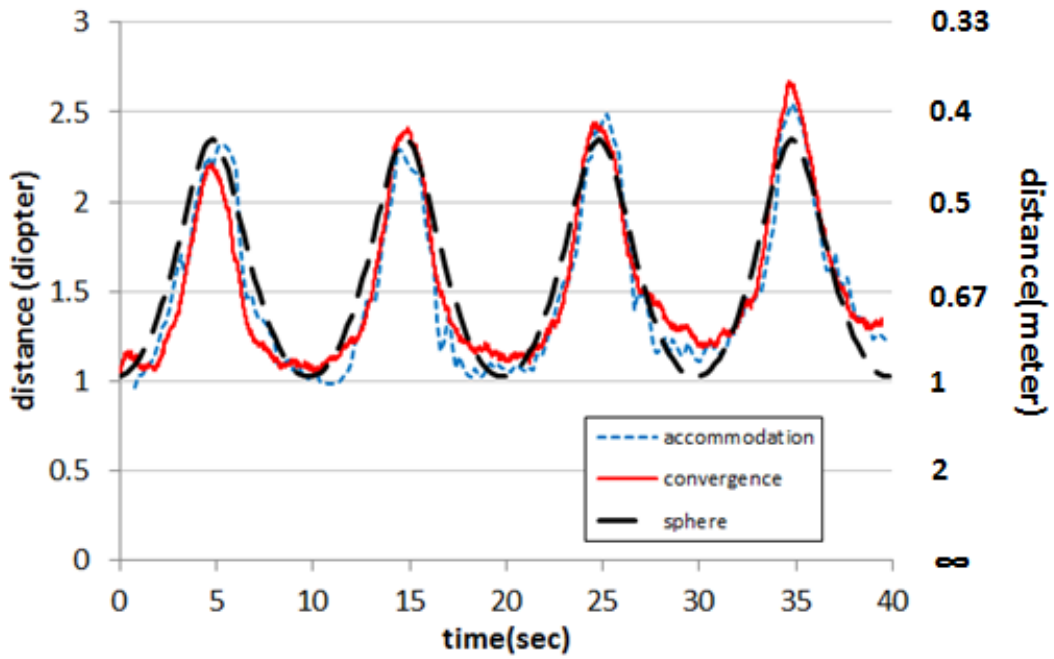


図 3-11 3D 映像の水晶体調節，輻輳運動の同時測定結果（21 歳，男性）

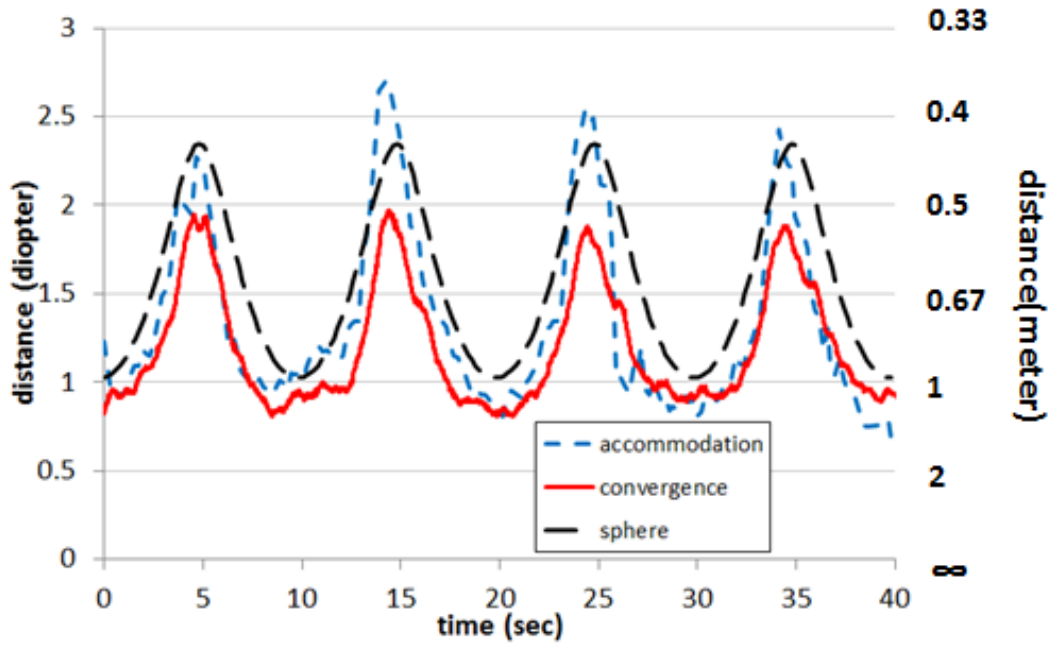


図 3-12 3D 映像の水晶体調節，輻輳運動の同時測定結果（25 歳，男性）

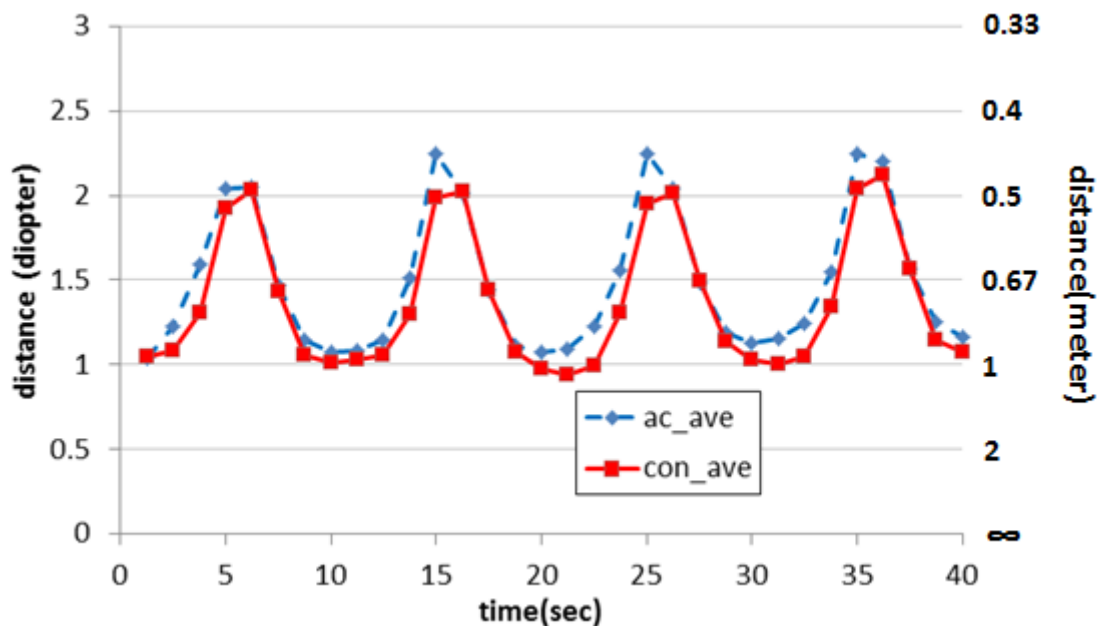


図 3-13 被験者の調節，輻輳の位相ごとの平均値

3-3. 考察

本研究では視差のない通常の 2D 映像と 3D 映像で計測を行った結果，図 3-10 の 2D 映像での同時計測では，映像の球体の動きと，水晶体調節，輻輳運動の動きに関連性はなく，調節，輻輳ともにほぼスクリーンの位置である 1m と合致しており，この結果からも前章と同じく，正確な計測が行われていると言える。

河合や，鶴飼ら，Hoffman ら[17-19]は立体映像を見ている際には調節と輻輳が矛盾を起こし，それが諸々の悪影響の一因であるということを前提に，立体映像視聴時の疲労や立体映像表現のあり方について述べているが，実際に調節と輻輳がどのように変化をしているのかを実際に計測を行ったという研究は見当たらなかった。

今回，我々が立体映像を注視している際の計測を行った結果（図 3-11，3-12），若年齢層（20 歳代）の被験者の輻輳運動の焦点距離が立体映像の仮想的な位置までの距離によく一致するだけでなく，水晶体調節の焦点距離もほぼ，映像に追従しているということが明らかになった。最接近時に輻輳距離と映像の仮想距離にややズレがあるのは，あらかじめ映像を注視するよう指示しているものの，動画を被験者が注視するという実験のため，瞬目などにより被験者が一瞬でも映像を捕らえることができなかつた場面があると，仮想的な

距離とのずれが生じるということ、またメートルの逆数である **diopter** 値を計測しているため、近づけば近づくほど、そのわずかな距離の変化が大きな誤差になるという要因が考えられる。

以上の結果より、少なくとも、本実験の対象者である、若年齢層の被験者の場合では、水晶体調節と輻輳運動の不整合という反応は見られず、我々の先行研究の結果に一致すると言える。

また本実験のような結果が得られた理由のひとつとして、実験で提示した画像が従来の手法で作られた 3D 映像ではなく、極めて自然視に近い 3D 映像 OLYMPUS POWER3D (オリンパスメモリーワークス(株)製) を使用したことが考えられる。このことは、若年齢層の場合、適切な手法で作られた 3D 映像ならば、大きな飛び出しに対しても、調節、輻輳はほぼ一致し、無理なく視聴することが可能であると考えられる。

4. 中高年齢者を対象とした立体映像視聴時の調節，輻輳の同時計測

4-1. 実験方法

実験は4名の40代から60代の中高年齢被験者と、比較対象の25歳の若年正視の健常者6名を対象に行った。この若年被験者とは前節での計測実験と同様の被験者である。実験は、若年者はソフトコンタクトレンズにより正視に矯正した状態で、中高年齢者は正視に矯正した場合と、+1D(老眼に対する近用矯正の状態)に矯正を行った状態の両方の状態で測定を行った。計測では、ディスプレイ(FlexScanS1911(19インチ))の位置は被験者の眼前から60cmの位置に設置し、最接近時で被験者の眼前約20cmの位置まで仮想的に飛び出すように設定した。提示時間は、10秒を一周期として、40秒間、つまり4周期を両眼視させ、このときの調節と輻輳の焦点距離、そして瞳孔径を同時測定した。これを一回の計測として、一人につき計4回行った。

また若年者を対象とした実験と同じく、立体映像は全ての被験者で同一のものを使用しており、被験者の瞳孔間距離の違いにより、最接近時の距離がわずかに異なる。また周辺の背景映像による影響を極力減少させるため、被験者には常に移動する球体を注視するよう指示した。

前節での若年者に対する実験と同じく、実験環境の照度は眼球に入射する、地面に対して垂直な照度は約103lx、地面に対して水平な照度は683lx、提示した映像の球体の輝度は、近方時は3.0cd/m²、遠方時は3.6cd/m²であり、なお球体の輝度は液晶シャッター越しの測定である。

4-2. 実験結果

グラフのaccommodationとconvergence, sphereは前節と同じく、それぞれ被験者の水晶体調節と輻輳運動の焦点距離と、被験者から立体映像の仮想位置までの距離を表す。またpupil diameterは被験者の瞳孔径の値を表している。またグラフの横軸は被験者が対象物を注視しているときの経過時間を、縦軸の左側は被験者から対象物までの距離をdiopterで表しており、右側は瞳孔径の値を表している。

図 3-14 は若年の被験者の計測結果, 図 3-15, 3-16 はそれぞれ中高齢者の正視に矯正, +1D に矯正した場合の計測結果を示している.

図 3-14 の若年被験者を対象とした測定結果の典型例では, 時間変化による pupil diameter の変化は見られず, accommodation と convergence は sphere の値の変化に同調して大きく変化していた. 一方, 図 3-15, 3-16 の中高齢者の結果では, convergence に比べ accommodation はほとんど変化が見られず, また pupil diameter の値も convergence に同調して変化していた. また図 3-16 では図 3-15 に比べ, accommodation の値が若干上昇しており, pupil diameter の値も, 平均値をとったとき, 図 3-15 では 3.6mm であったのに対して, 図 3-16 では 4.0mm と瞳孔径の若干の拡大がみられた.

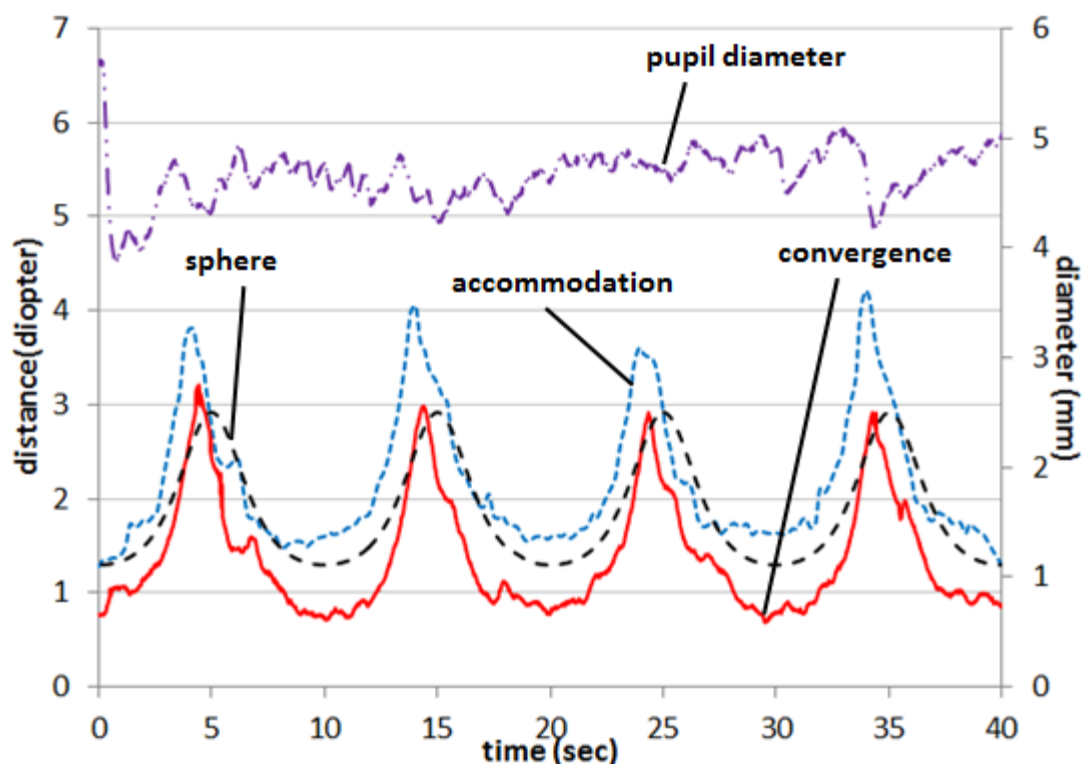


図 3-14 若年者の水晶体調節, 輻輳運動の同時測定結果 (25 歳, 男性)
瞳孔径のみ右目盛り

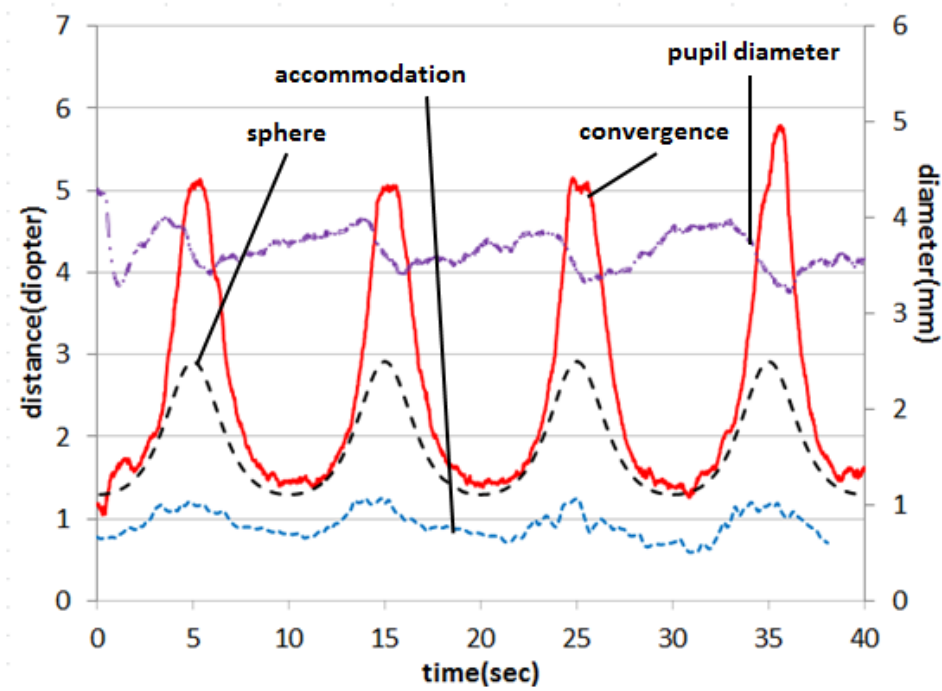


図 3-15 中高齢者の水晶体調節，輻輳運動の同時測定結果（45 歳，男性，正視）
瞳孔径のみ右目盛り

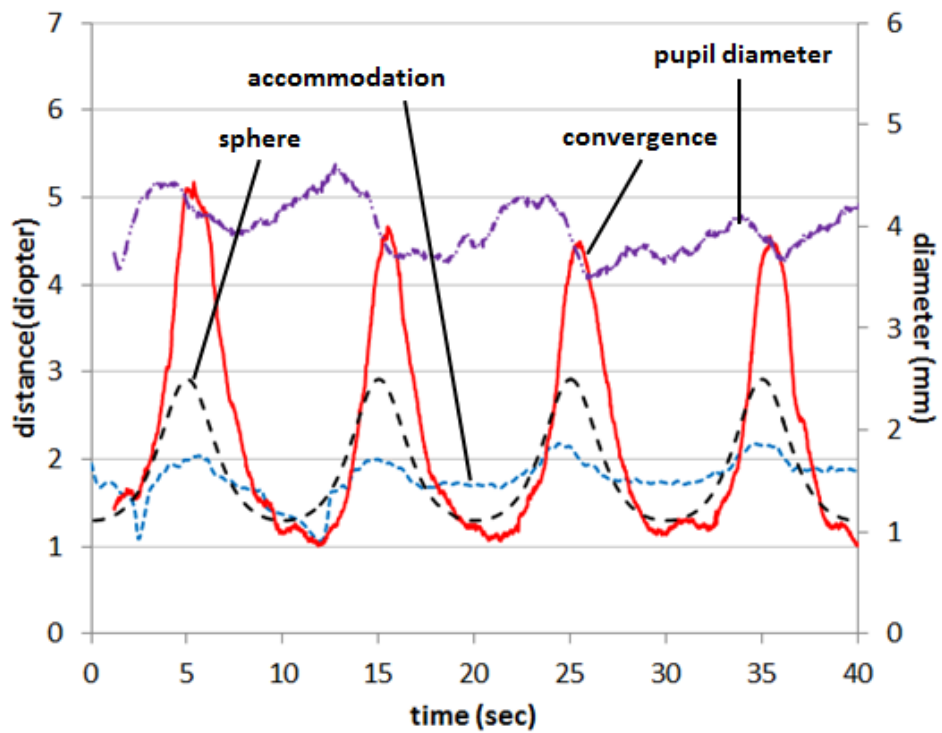


図 3-16 中高齢者の水晶体調節，輻輳運動の同時測定結果（45 歳，男性，+1D 矯正）
瞳孔径のみ右目盛り

4-3. 考察

本実験は、若年者が立体視を行う際に行っている水晶体調節、輻輳運動、瞳孔径の反応と、40代以上の中高年齢者のそれらがどのように異なるのかを比較、検討するための実験である。なお本実験の測定は、瞳孔面積の日内変動を考慮して11時から16時に行っている。この時刻帯は内海ら[20]が、瞳孔面積が比較的安定していると述べている時刻帯である。

その結果を見ると、図3-14の若年被験者の測定結果では、輻輳運動だけでなく、水晶体調節の焦点距離もほぼ映像に同調して変化をしており、「調節と輻輳の不整合」は前節での実験と同じく見られなかった。それに対して、図3-15、3-16の中高齢者における測定結果では、立体映像を見ている際に輻輳運動の焦点距離は映像の運動に追従して変動しているが、水晶体調節のそれはほとんど変化していなかった。

Vrensen[21]や比留間ら[22]は加齢により人の水晶体はその弾性を失っていくということを述べているが、中高年齢者の実験結果にはそれが表れていることが推測される。水晶体の弾性の消失は、図3-15、3-16の中高齢者の結果において、図3-14の若年者の結果ほど水晶体調節が働いていないことから推察できる。

また、本実験の実験結果では、中高年齢層では瞳孔径が対象物の運動に同調して変化をしており、近見時には瞳孔が縮瞳していることが分かる。図3-14を見ればわかるように、これは若年齢の被験者には見られない現象である。一般に、瞳孔が収縮するとピンホール効果により被写界深度が深くなる。Mosses[23]は瞳孔の大きさによる被写界深度の変化に関して幾何学的な検討を行っており、実際の調節が1m(1D)であり、瞳孔径が2mmの場合であれば視標は0.94から1.06mの範囲にあれば鮮明に見える筈であり、瞳孔径が4mmの場合には、視標は0.97から1.03mの範囲になれば鮮明には見えないということを明らかにしている。輻輳と調節が大きく乖離していたにもかかわらず、中高年齢者では、この瞳孔の収縮により調節不足を補っており、視差のある左右像を比較的鮮明に認知できていたため、立体視が可能になっていたのではないかと推測される。若年者で瞳孔の変化が見られないのは調節と輻輳のみでも十分に立体視が可能であり、瞳孔を変化させる必要がないためと考えられる。

このように中高年齢者と若年者では立体視する際の機構が異なるのではないかと推測される。これは比留間ら[22]も述べているが、今回、我々は加齢による調節力の低下に注目し、被験者に老視用の近用矯正を行い、測定を行った。その結果、矯正前の図3-15と、矯正後の図3-16の両者を比較すると、前者に比べ、後者の場合、accommodationの値が上昇しているため、水晶体調節と輻輳運動の焦点距離の差が減少しており、瞳孔径も拡張が認められた。このことから、中高年齢者が立体映像を視聴する際に、弾性の低下した水晶体を駆動させる負担、瞳孔を縮瞳させる負担等を、プラスのレンズによる矯正により減少させることができ、高齢者がより楽に立体視を行うことができるのではないかと推測される。この可能性を得ることができた。

5. まとめ

本研究では新たに考案した水晶体調節と輻輳運動の同時計測法を用いて、立体映像視聴時の調節と輻輳の同時測定を行った。その結果、水晶体調節は立体映像を見ている際には立体像の運動に同調して変化していることが明らかとなった。このことから、立体映像視聴時に生じる眼精疲労や3D酔いといった悪影響の原因として考えられている「水晶体調節と輻輳運動の不整合」は生じていないということが考えられる。

また、中高齢者を対象とした測定では、中高齢者の立体視は若年齢層とは異なる機構で行われている可能性が示唆され、老視用の近用プラスレンズにより矯正を行うことによって、視聴者にとって、より負担が少ない立体視が可能になるのではないかとということが示唆された。しかしながら、中高齢者を対象とした実験においては、調節と輻輳の乖離がみられた。これについては加齢による水晶体の弾性消失が原因としては考えられるが、より詳細な分析が必要である。それについては、次章である第4章において報告する。

参考文献

- [1] M. Miyao, Y. Otake and S. Ishihara: A newly developed device to measure objective amplitude of accommodation and papillary response in both binocular and natural viewing conditions, *Jpn. J. Ind. Health*, Vol.34, pp.148-149, 1992.
- [2] M. Omori, S. Hasegawa, H. Ishigaki, T. Watanabe, M. Miyao and H. Tahara: Accommodative load for stereoscopic displays, *Proc. SPIE*, Vol.5664, pp.64, 2005.
- [3] M. Omori, S. Hasegawa, T. Watanabe, K. Fujikake and M. Miyao: Comparison of measurement of accommodation between LCD and CRT at the stereoscopic vision gaze, *LNCS*, Vol.5622, pp.90-96, 2009.
- [4] 内川恵二, 篠森敬三編, 「視覚 I -四角形の構造と初期機能-」, 朝倉書店, 2007.
- [5] 苧坂良二, 中溝幸雄夫, 古賀一男編, 「眼球運動の実験心理学」, 名古屋大学出版会, 1993.
- [6] 阿部公正, 阿部年晴, 古賀唯夫, 寿美田与市, 知久篤, 吉川弘之, 吉田夏彦, 「人間工学-工業デザイン全集 6 巻-」, 日本出版サービス, 1991.
- [7] Schiffman and Harvey Richard: *Sensation and perception*, Oxford, England, John Wiley & Sons, 1990.
- [8] K. T. スペアー, S. W. レムクール著, 苧坂直行訳, 「視覚の情報処理<見ること>のソフトウェア」, サイエンス社, 1986.
- [9] 畑田豊彦, 「3D ディスプレイに要求されるもの」, 2010.
- [10] 谷田貝豊彦, 「例題で学ぶ光学入門」, 森北出版株式会社, 2010.
- [11] 長谷川聡, 大森正子, 渡辺智之, 高田宗樹, 藤掛和広, 市川哲哉, 田原博史, 小室貴弘, 小阪将也, 宮尾克: ヘッドマウントディスプレイ上への水晶体調節, シンポジウムモバイル 08, pp.192-196, 2008.
- [12] 長谷川聡, 大森正子, 渡辺智之, 高田宗樹, 藤掛和広, 市川哲哉, 田原博史, 小室貴弘, 小阪将也, 宮尾克: ヘッドマウントディスプレイ上の立体像への水晶体調節反応, シンポジウム「モバイル' 10」, pp.121-124, 2010.
- [13] 日本工業規格 (JIS), JIS Z9110 照明基準総則, 2010.
- [14] 日本工業規格 (JIS), JIS Z9125 屋内作業場の証明基準, 2007.
- [15] ISO, ISO 8995, *Lightning of Indoor work places*, 2002.
- [16] 小原俊平, 古澤隆彦, 管眞一郎, 安藤啓, 藤田茂明, 「快適な室内環境の作り方」, オーム社, 1994.
- [17] K. Ukai and P. A. Howarth: Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories, and observations, *Displays*, Vol.29,

- pp.106–116, 2008.
- [18] 柴田隆史, 河合隆史ら : 焦点調節と被写界深度を反映した立体映像表現,
日本人間工学会大会講演集, Vol.43, pp.416-417, 2007.
- [19] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks:
Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual
Fatigue, *Journal of Vision*, Vol.8, No.3, 33, pp.1-30, 2008
- [20] 内海隆: Open-loop 赤外電子瞳孔径による瞳孔反応の日内変動について, *神経進歩*,
Vol.22, No.3, pp.615-623, 1978.
- [21] M. Dubbelmana, Van der G. L. Heijde, H. A. Weeber, G. F. Vrensen: Changes in
the internal structure of the human crystalline lens with age and
accommodation, *Vision research*, Vol.43, No.22, pp.2363-2375, 2003.
- [22] 原浩生, 比留間伸行 : 両眼融合式立体画像に対する高齢者の眼の焦点調節,
映像メディア情報学会誌, Vol.24, No.26, pp.13-18, 2000.
- [23] R. A. Mosses: accommodation. *Adler's Psychology of the eye*, Saint Louis, The
C. V. Mosby Company, pp.298-319, 1975.

第4章

水晶体調節および輻輳運動の同時測定による 自然視時と立体映像視聴時の視機能比較

1. はじめに

第3章では、立体映像視聴時の水晶体調節と輻輳運動を同時計測し、その結果、若年者を対象とした立体映像視聴実験では、立体映像視聴の悪影響の原因といわれる「水晶体調節と輻輳運動の不整合」は確認できなかった。しかしながら、中高齢者を対象とした同時測定実験では、輻輳運動の変化に比べ、水晶体調節はあまり映像の動きに追従しないという結果であった。これは加齢による水晶体の弾性消失[1,2]が原因として考えられるが、その立証のためには、より詳細な検討が課題として残っていた。本章では、その事実について、より詳細な検討を行うことで、「調節と輻輳の不整合」は存在しないということを、より確実に立証することを目的とした。

本章ではまず、若年者から高齢者まで幅広い年齢層を含む多人数の被験者を用いて、実物体の移動視標を観察している際の水晶体調節を測定して、水晶体調節の特性を明らかにした。

次に我々が普段、外界にあるものを見ている状態である自然視の状態と、立体映像を視聴している状態の条件を実物体と、それを基に作成した立体映像を使用して、被験者の水晶体調節と輻輳運動の同時計測を行い、差異があるのかを調べるため、比較、検討した。

2. 幅広い年齢層に対する移動視標を使用した水晶体調節応答の測定

2-1. 実験方法

本研究では、10代から80代までの幅広い年齢層の被験者135名を使用して実験を行った。また事前に被験者に対して十分にインフォームドコンセントを行っており、名古屋大学情報科学研究科の倫理審査委員会の承認を得ている。

測定に使用した機器はランド精工社製のオートレフ/ケラトメーターWAM-5500であ

る。また、本実験では被験者が注視する視標としてルービックキューブ (rubik's cube) を用いた。そして視標を移動させる装置としてグラント精工社製の視標移動ロボット WMT-1 (図 4-1) を用いた。

WMT-1 はパソコンにより視標の移動方法や移動速度、動作の反復回数などを制御が可能な装置であり、その動作の方法は、視標の提示位置を縦軸にとり、経過時間を横軸にとったとき、その提示位置をメートル単位で変化させるサインカーブの動き、diopiter 単位 (メートルの逆数) で変化させるサインカーブの動き、三角波で変位させる動き、設定した位置で静止することのできるステップ運動が可能である。また WAM-5500 と同期をとることが可能となっており、WAM-5500 の測定開始の瞬間と、WMT-1 の動作開始時を完全に合わせることが可能となっている。

本実験においては、視標であるルービックキューブに 3 種類の動作をさせた。1 番目の動作は diopiter 単位で変位するサインカーブの動きである。動作を始める前の初期位置を被験者の眼前 1.5D (67cm) とし、そこから眼前 2D (50cm) の位置にまで近づき、次に眼前 1D (1m) の位置にまで遠ざかるよう設定した。この動作の周期は 10 秒であり、1 回の計測につき 3 周期、計 30 秒の動作だった。

2 番目の動作は、1 番目と同じく diopiter 単位で変位するサインカーブの動きであるが、その周期を 2.5 秒に、そして 4 周期を被験者には提示した。なお、この動作の被験者から視標までの距離は 1 番目の動作と同じく、1.5D の位置から開始し、2D と 1D の間で変位するようになっていた。

そして 3 番目の動作として、ステップ運動を使用した。これは、動作の初期位置は被験者の眼前 1D の位置から開始し、次に 1.5D、最後に 2D の位置で、それぞれ 5 秒ずつ停止するという動きだった。

これらの動作をする視標のルービックキューブを用いて、被験者に対してキューブの角を注視するよう教示し、その時の水晶体調節の応答および瞳孔径の変化を測定した (図 4-2)。なお、これらの計測は 3 種類ともすべて、一人の被験者につき、2 回ずつ行った。実験環境の照度は 401 lx であり、視作業を行うには十分な照度環境だった [3-5]。

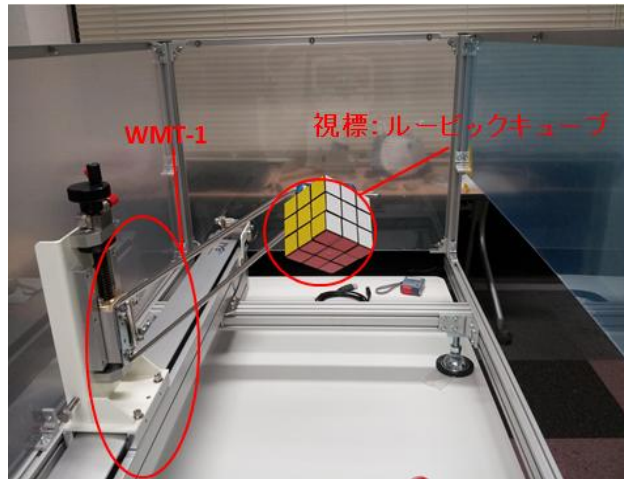


図 4-1 視標 (ルービックキューブ) と WMT-1

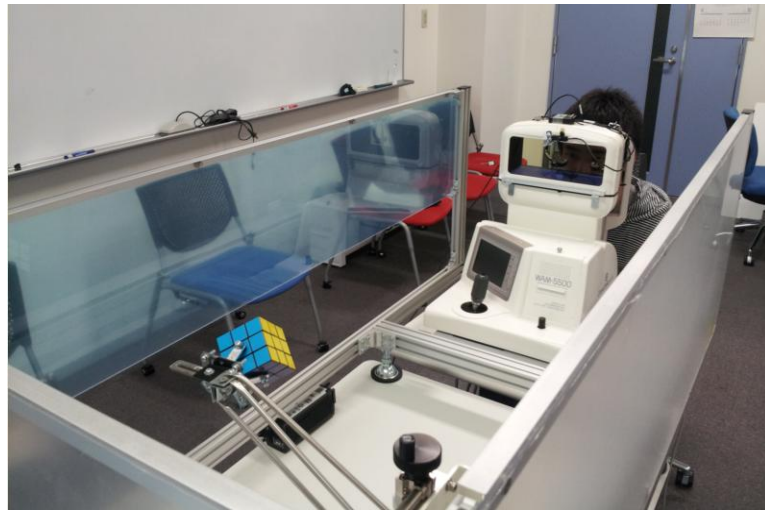


図 4-2 実験の様子

2-2. 実験結果

本実験では被験者を年齢層ごとに区分して、結果を分析している。ここでの区分とは年齢が 44 歳以下の被験者を若年層、45 歳から 64 歳までを中年層、65 歳以上を高年層としている。

最初に周期が 10 秒であるサインカーブの動作、前節において 1 番目の動作として挙げたものの測定結果を示す。各年齢層の典型例として、若年層の測定結果を図 4-3 に、中年層の結果を図 4-4 に、高年層の結果を図 4-5 に示す。各グラフの accommodation は被験者の水晶体調節の焦点距離を、cube は被験者からルービックキューブまでの距離を、pupil diameter は瞳孔径を表している。また、グラフの横軸は被験者がキューブを見ているときの経過時間を、縦軸の左側は被験者から対象物までの距離を diopter で表しており、右側の

縦軸は瞳孔径 (mm) を表している。

これらの結果を見ると、accommodation に関しては、若年者の測定結果である図 4-3 では視標の動きに水晶体調節がほぼ追従する結果となった。しかしながら、図 4-4 の中年者のグラフを見ると、視標が遠方、すなわち 1D (1m) 付近に位置しているときは水晶体調節がよく一致しているが、視標が被験者へ近づいてくると、追従しきれていないことがわかる。次に図 4-5 の高年者の測定結果を見ると、中年者に比べ、水晶体調節はさらに追従できていないという結果となった。

また pupil diameter に関しては、若年者が 3.5mm、中年者が 2.9mm 程度の値でほぼ一定であり、視標の動きに対してあまり変化していないが、高年者の測定結果では視標が被験者へ近づいてきたとき、値が小さくなっており、最大で 3.9mm、最小で 2.9mm 程度の値をとっていた。

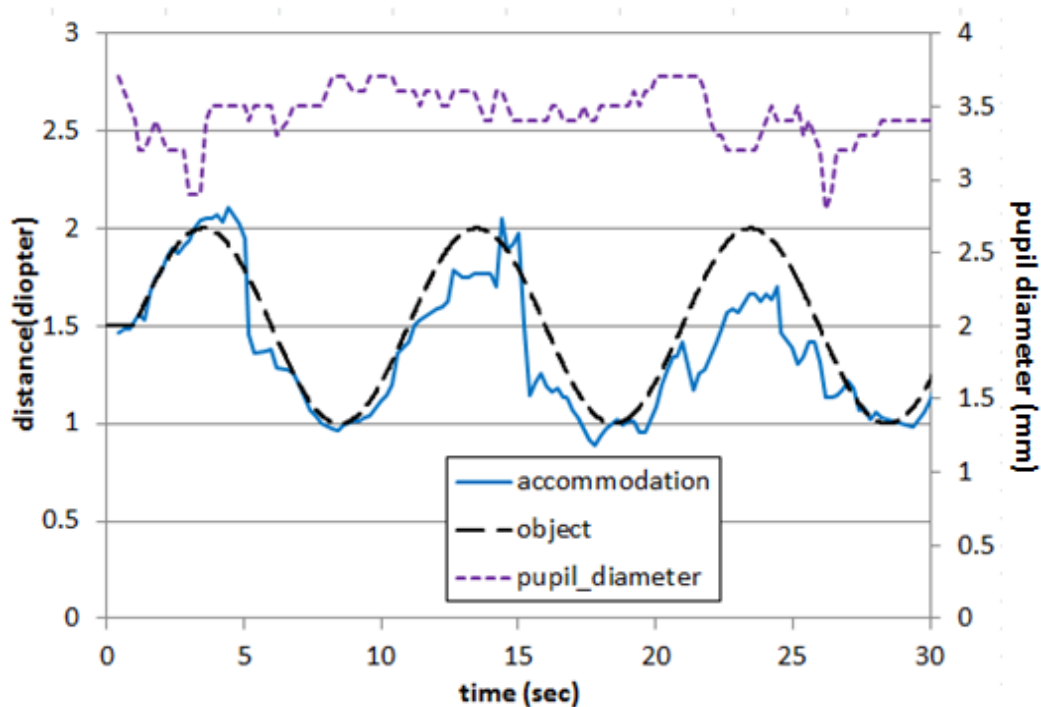


図 4-3 若年者における測定結果・10 秒周期 (23 歳, 男性)
瞳孔径のみ右目盛り

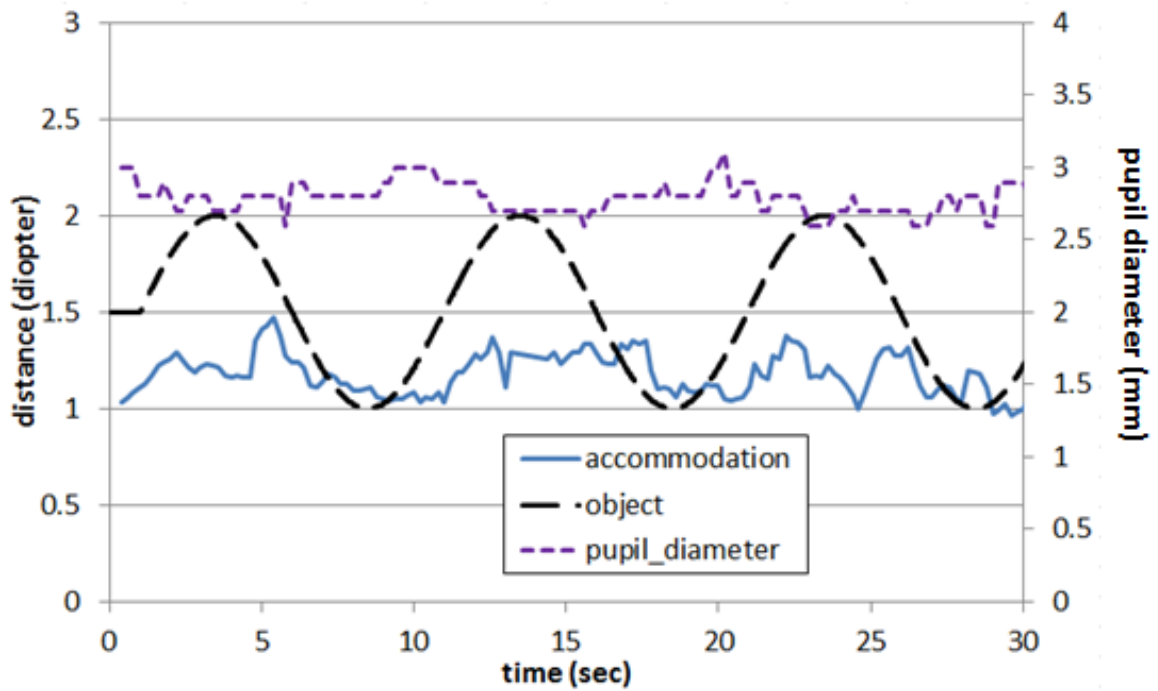


図 4-4 中年者を対象とした測定結果・10 秒周期 (53 歳, 男性)
瞳孔径のみ右目盛り

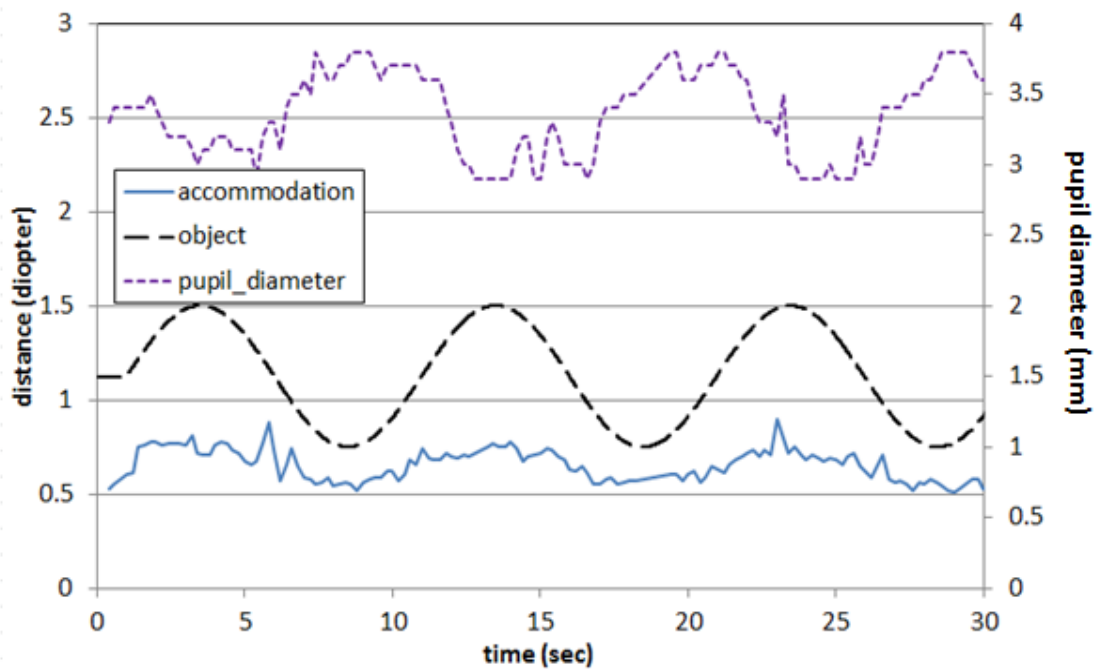


図 4-5 高年者を対象とした測定結果・10 秒周期 (72 歳, 男性)
瞳孔径のみ右目盛り

次に周期が 2.5 秒のサインカーブの動作における測定結果を示す。各年齢層の典型例として、若年者の測定結果を図 4-6 に、中年者の結果を図 4-7 に、高年者の結果を図 4-8 に示す。

図 4-6 の計測結果を見ると、accommodation の値は 1D から 2D の間で変位しているが、10 秒周期の場合と比べると若干、視標の位置に対して遅れが生じている。また本被験者では 2 周期目と 3 周期目に遠方に焦点を合わせきれていない。このように焦点を近点、または遠点に合わせられず視標の動きに追従しきれないということが、他の被験者でもしばしば見られた。中年者の測定結果である図 4-7 を見てもやはり同様に、視標の動きに対して遅れがみられる。またこのグラフでは accommodation の値は、最小は 1D 程度で視標が遠方にある場合、正しく焦点を合わせることができているが、最大の値は 1.5D (67cm) 程度であった。図 4-8 の高年者の測定結果では、水晶体調節はほとんど変化しておらず、0.7D 程度で一定であった。また 10 秒周期での計測結果と同様、若中年者の結果と比較して、pupil diameter の変化が顕著で、3.9mm から 2.9mm の間を変動していた。

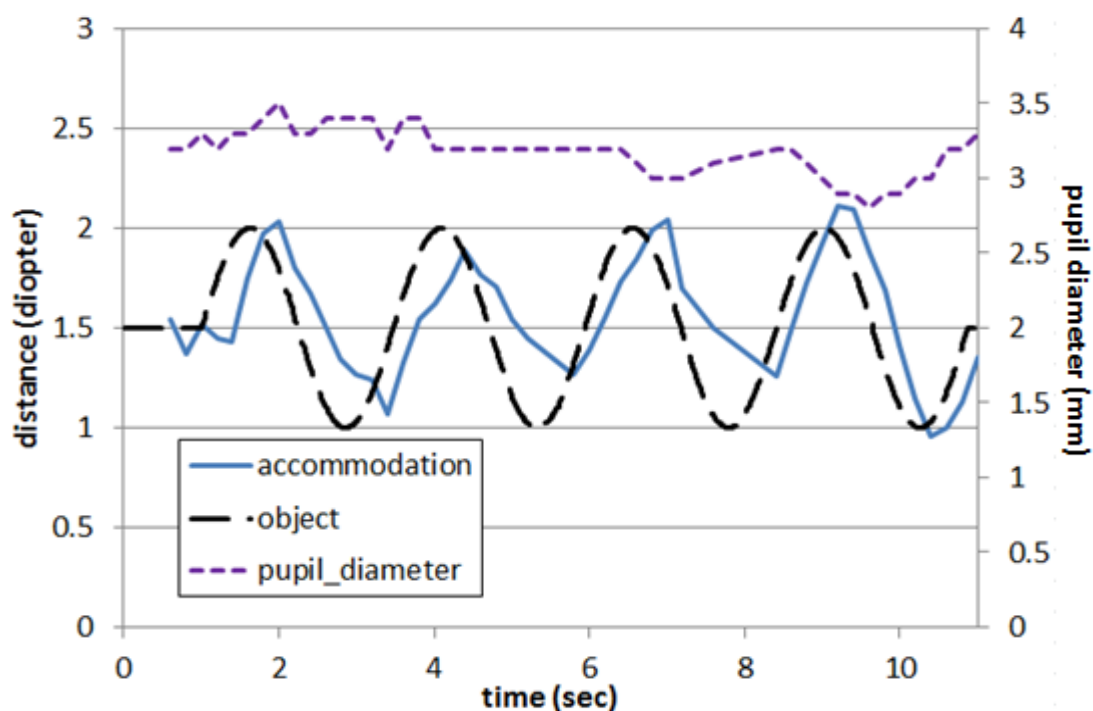


図 4-6 若年者を対象とした測定結果・2.5 秒周期 (28 歳, 男性)
瞳孔径のみ右目盛り

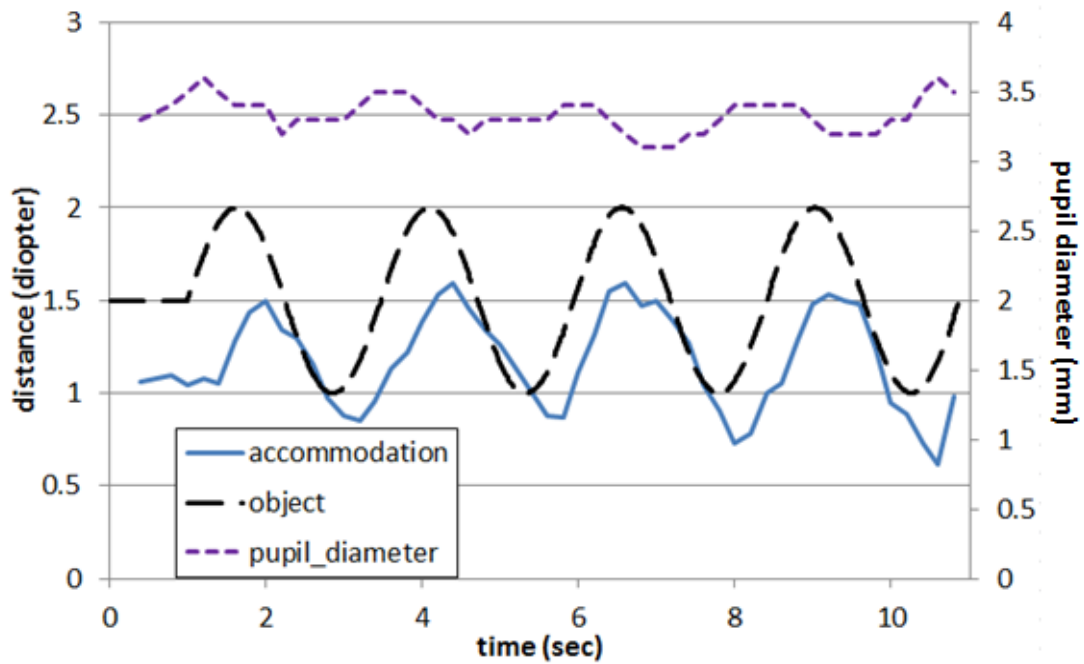


図 4-7 中年者を対象とした測定結果・2.5 秒周期 (48 歳, 男性)
瞳孔径のみ右目盛り

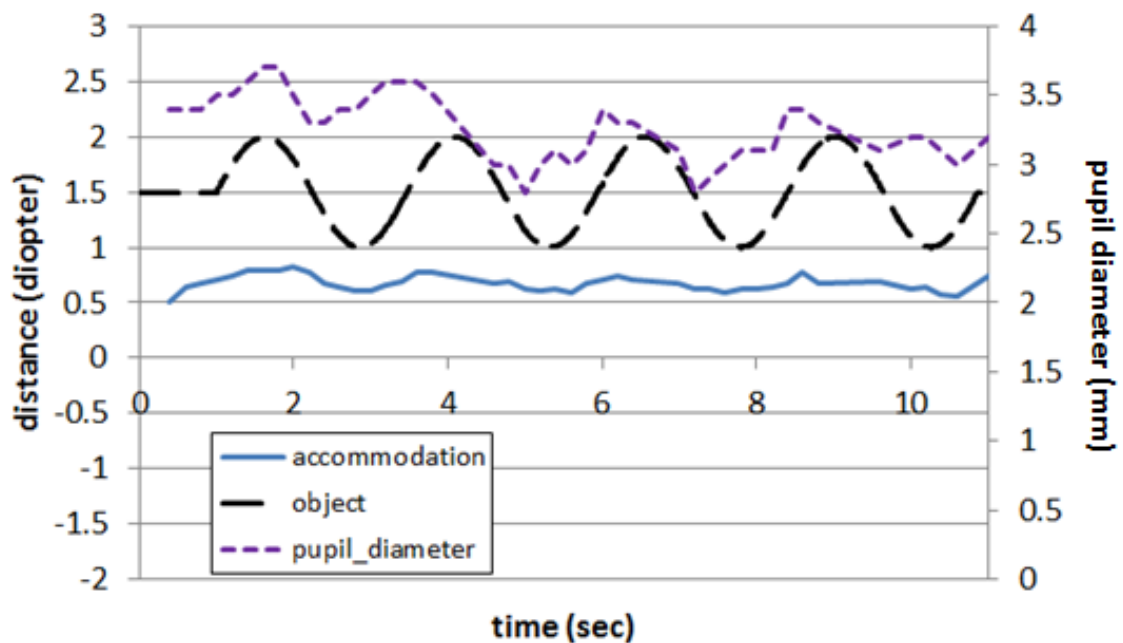


図 4-8 高年者を対象とした測定結果・2.5 秒周期 (72 歳, 男性)
瞳孔径のみ右目盛り

1D (1m), 1.5D (67cm), 2D (50cm) の位置で 5 秒ずつ停止をする, ステップ運動の, 3 番目の動作の結果を図 4-9, 4-10, 4-11 に示す.

図 4-9 は若年の被験者の計測結果を示しており, 水晶体調節が物体の動きに対して追従していることがわかる. また, pupil diameter の値は 3.3mm 程度となっていた. 中年の被験者の計測結果である図 4-10 では, accommodation の値は視標が 1D (1m) の位置にあるときは, 一致しているが, 視標が 1.5D (67cm) の位置に移動したとき, 若干上昇したものの, その後はほぼ 1.5D を下回る 1.3D 程度の値で一定であり, 最後にわずかに 1.5D を上回るという結果となった. また pupil diameter の値は 2.6mm 程度で視標位置に関係なく, ほぼ一定の値をとっていた. 図 4-11 は高年の被験者の計測結果を表しており, accommodation の値は視標の位置によらず, 0.7D (1.4m) 程度で一定の値をとっており, 実際の視標の位置よりもかなり後方に焦点が合わせられていた. また pupil diameter の値の変化を見ると, 視標が被験者のほうへ近づくたびに, 値が下がっており, 視標が 1D の位置のときは約 3.9mm, 1.5D のときは約 3.5mm, 1D のときは 3.3mm 程度となっていた.

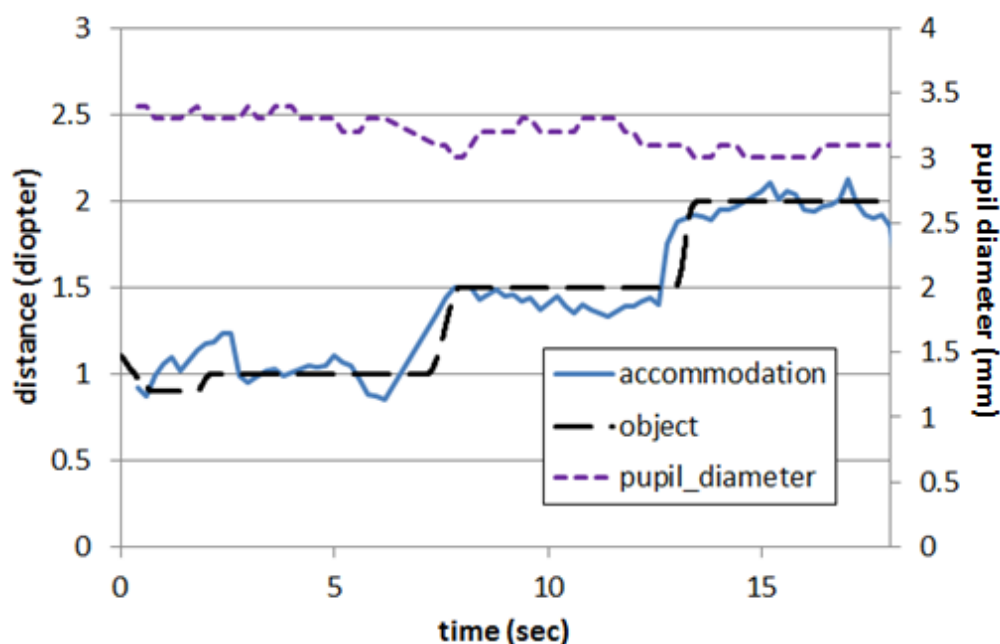


図 4-9 若年者を対象とした測定結果・ステップ (32 歳, 女性)
瞳孔径のみ右目盛り

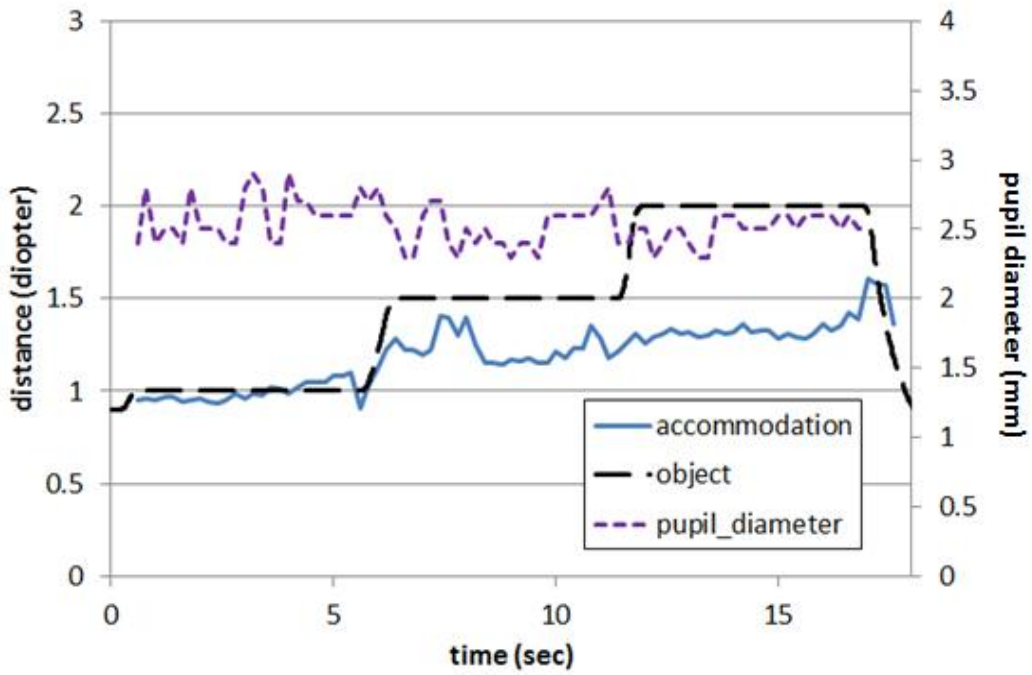


図 4-10 中年者を対象とした測定結果・ステップ (46 歳, 男性)
瞳孔径のみ右目盛り

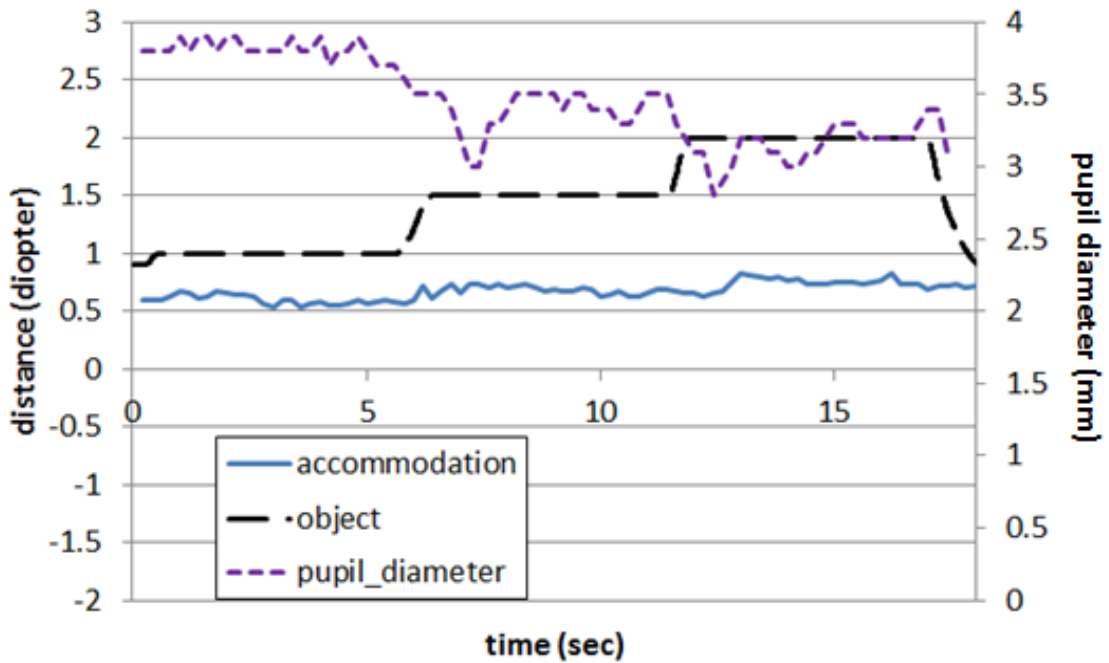


図 4-11 高年者を対象とした測定結果・ステップ (65 歳, 男性)
瞳孔径のみ右目盛り

さらに、サインカーブの動作の計測結果について、計測に成功した被験者の、水晶体調節の計測結果を、平均値をとったものを以下に示す。グラフの横軸は経過時間を、縦軸の左側は被験者から視標までの距離を diopter で表しており、右側はメートルで表している。

平均値は年齢層ごとに算出しており、10 秒周期、2.5 秒周期ともに 2 サイクル以上計測が成功している被験者を計測に成功した被験者として定義し、その平均値を算出した。

図 4-12 は 10 秒周期のサインカーブのデータで、45 歳未満の若年層の平均値をとっている。この条件で計測に成功していた被験者は 64 名中 31 名であった。典型例と同じく、水晶体調節の焦点は視標の動きに同調し変化しており、近方には、最大で 1.75D (57cm) まで近づいていた。

図 4-13 の 45 歳から 64 歳までの中年層の結果において、10 秒周期のサインカーブの計測結果の平均値をとったグラフでは、図 4-12 と同じく、視標の動きに合わせて調節応答も変動しているが、視標が 2D (50cm) の位置にあるとき、最大でも 1.4D 程度と、若年者の平均値よりも値が低下していた。なお計測に成功していた被験者は、37 名中、13 名であった。

図 4-14 は 65 歳以上の高年層に対して 10 秒周期のサインカーブの計測結果の平均値をとったものである。計測に成功していた被験者は 34 名中 3 名である。図 4-12 の若年層の平均値、図 4-13 の中年層の平均値に比べ、accommodation の値の変動が少なく、あまり視標の動きには追従できていなかった。

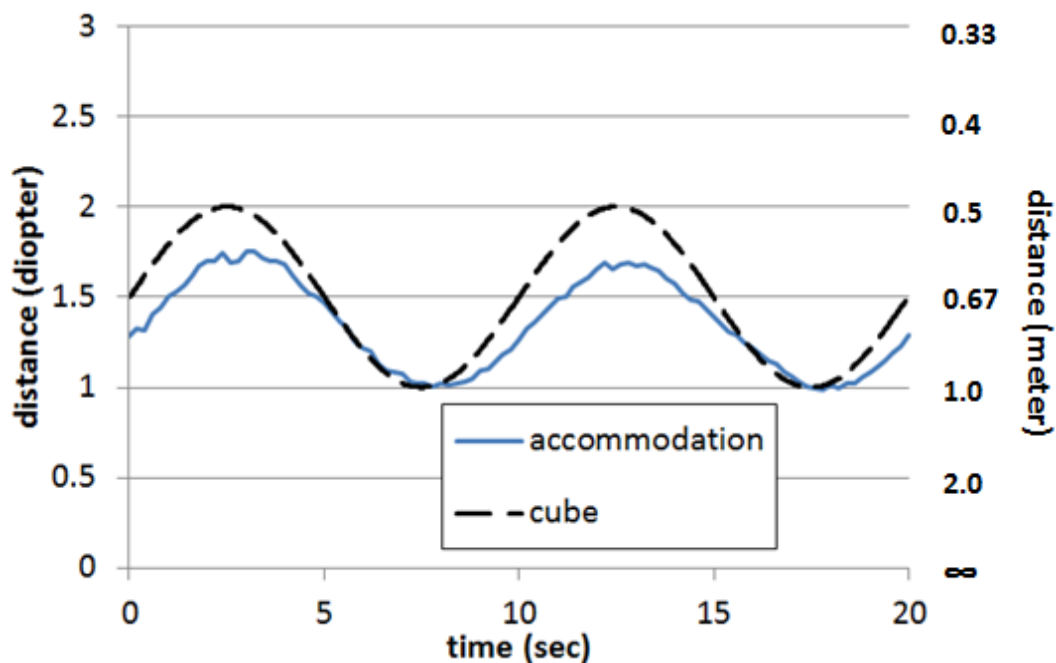


図 4-12 若年者の水晶体調節応答の平均値・10 秒周期

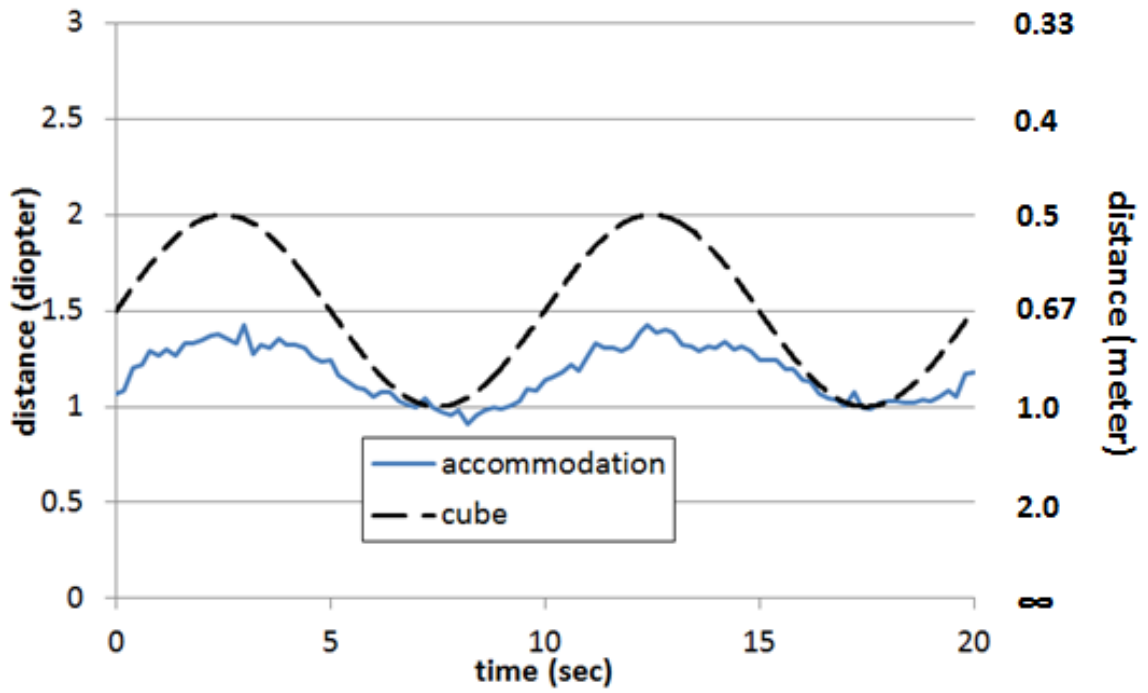


図 4-13 中年者の水晶体調節応答の平均値・10 秒周期

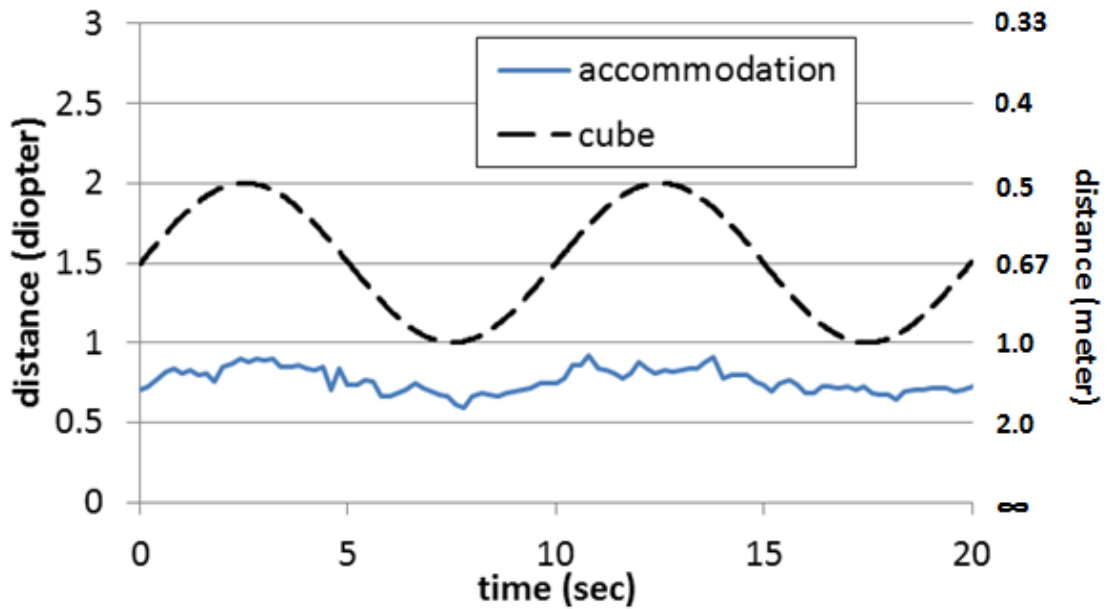


図 4-14 高年者の水晶体調節応答の平均値・10 秒周期

次に 2.5 秒周期のサインカーブの計測結果の平均値をとったものを示す。図 4-15, 4-16, 4-17 はそれぞれ 45 歳未満の若年層, 45 歳から 64 歳までの中年層, 65 歳以上の高年層の平均値のグラフである。10 秒周期のものと同じく, 横軸には経過時間を, 縦軸には被験者から視標までの距離を表している。

図 4-15 の若年層の計測結果では, 10 秒周期と同じく視標の動きに応じて, 水晶体調節がよく変動していることがわかる。accommodation の値は最大で 1.8D (56cm) 程度であった。なお, この計測が成功していた被験者は 64 名中 25 名であった。

図 4-16 は中年層の計測結果である。計測に成功した被験者は 37 名中 12 名であった。これも 10 秒周期のものと同じく, 視標の動きに応じて水晶体調節の焦点位置が変動しているものの, 若年層ほど近方に焦点を合わせておらず, 最大で約 1.4D (71cm) であった。

図 4-17 は高年層の結果を表している。計測に成功した被験者は 34 名中 6 名だった。このグラフを見ると accommodation の値は約 0.9D(1.1m)からほとんど変化しておらず, また視標よりも遠方に焦点を合わせる傾向にあった。

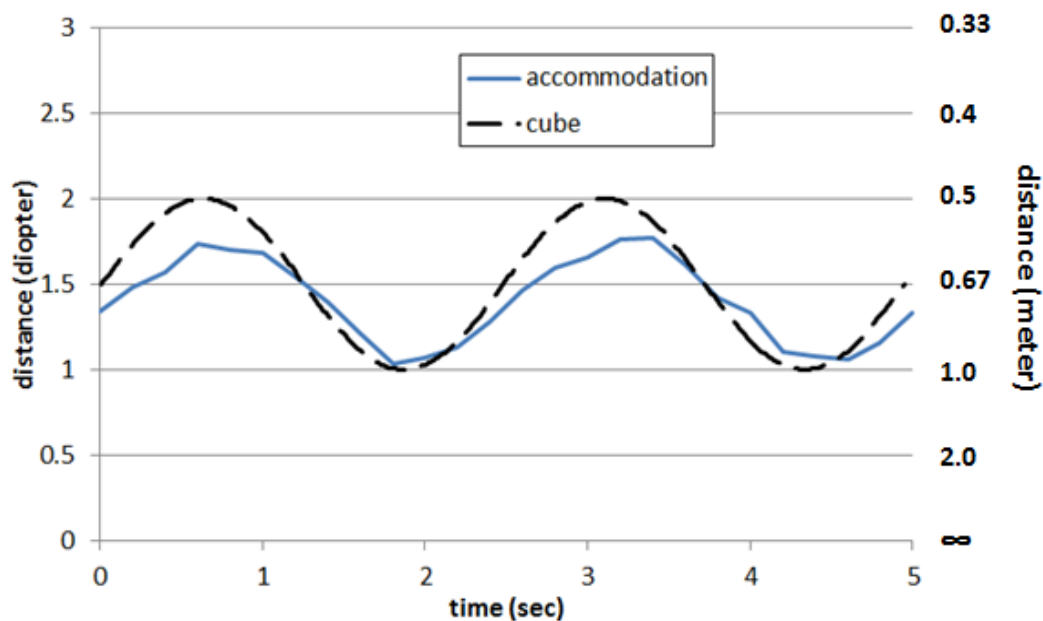


図 4-15 若年者の水晶体調節応答の平均値・2.5 秒周期

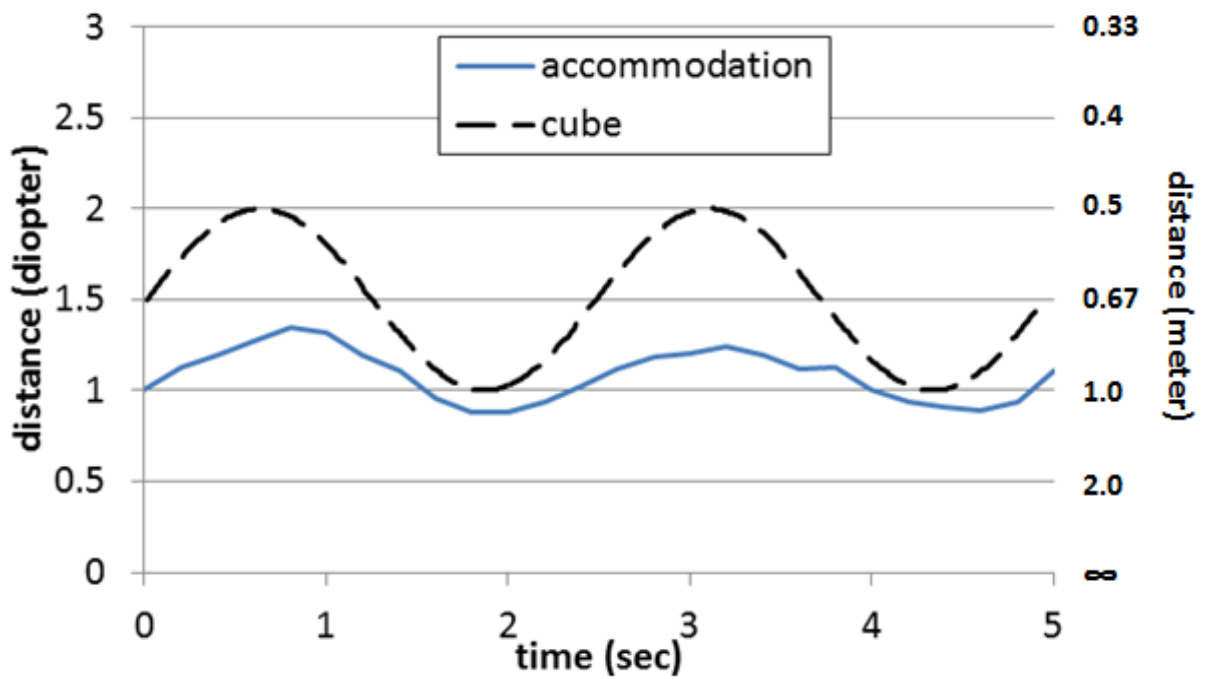


図 4-16 中年者の水晶体調節応答の平均値・2.5 秒周期

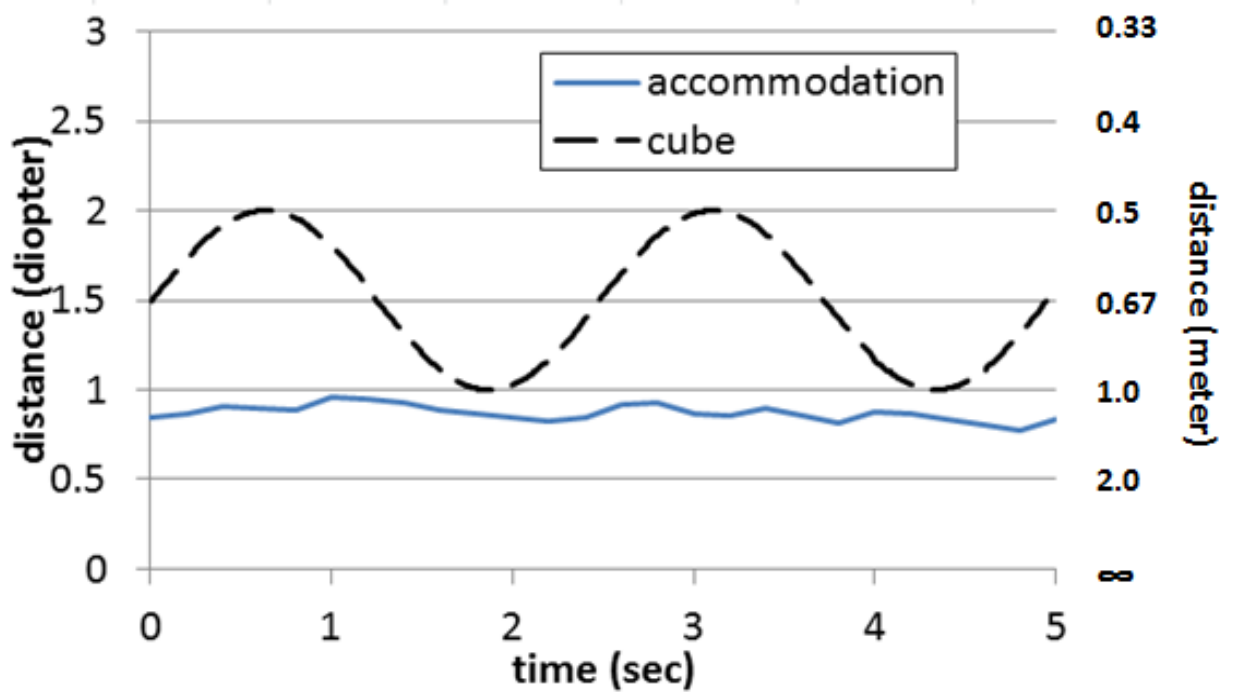


図 4-17 高年者の水晶体調節応答の平均値・2.5 秒周期

2—3. 考察

本実験では幅広い年齢層の被験者の、様々な動きをする視標を注視している際の水晶体調節の応答を測定した。その結果、若年者では水晶体調節は視標にほぼ追従しており、高齢の被験者ではほとんど追従しないという結果となった。また中年の層はその中間程度の変化を示し、視標が遠方 ($1D=1m$) の位置にあるときは調節の焦点を合わせることができているが、近方 ($2D=50cm$) に近付いてきたときは追従しきれていないことが多かった。これは図 4-12 から 4-17 の被験者の計測結果を年齢層ごとに平均値を取った場合でも同様であった。これに関して、水晶体の加齢現象が影響を与えていることは明らかであり、それに関する研究は古くからおこなわれてきた。

Dubbelman と Ramsdale は加齢による近点の調節力の変化を調べており、それによると、20 代の若年者では近点は最大で $16D(6.3cm)$ 程度まで近方に焦点を合わせることができているが、50 歳を超えると、近点は $2D(50cm)$ 程度にまで遠方になるということを報告している[1, 2, 6]。

また、水晶体内ではたんぱく質の合成・分解が行われているが、加齢とともに重合が加わり、不溶性のタンパク質が生じる。これにより水晶体内の散乱光が増加し、水晶体が白く濁って見える。これを白内障と呼ぶが、このような老人性白内障は 80 歳以上の老人では、ほとんどの老人に見られる[7, 8]。本実験の被験者にも 80 代の被験者が存在し、80 代でなくても、それに近い被験者が高年齢に区分した被験者ではほとんどであった。そのため、この老人性白内障が生じている被験者は少なくなかったであろうことが考えられる。

そして高年齢層の実験結果にのみ見られた傾向として、視標が近方に移動してきたとき、瞳孔径が縮瞳する現象がみられた。これは第 3 章における計測でもみられた傾向であり、瞳孔径の収縮により焦点を合わせた位置から前後に鮮明に見ることのできる範囲である被写界深度を広くする[9]ことにより、被験者は調節力不足を補っていたのではないかと考えられる。

3. 実物注視時および立体映像視聴時の水晶体調節・輻輳運動の同時計測による比較

3-1. 実験方法

本研究では、20代の若年被験者7名を使用して実験を行った。また事前に被験者に対して十分にインフォームドコンセントを行っており、名古屋大学情報科学研究科の倫理審査委員会の承認を得ている。

被験者はすべて正視状態で計測を行うため、矯正が必要な場合にはソフトコンタクトレンズを装着させ、調節遠点での屈折率を ± 0.25 diopter 以内になるように矯正した。本実験では円偏光 (circular polarized filter) フィルターを使用して立体視を行う方法を採用した。

測定にはグラント精工社製のオートレフ/ケラトメーターWAM-5500 とナックイメージテクノロジー社製のアイマークレコーダーEMR-9を使用した。また、本実験では被験者が注視する視標としてルービックキューブ (rubik's cube) を用いた。そして視標を移動させる装置としてグラント精工社製の視標移動ロボット WMT-1 を用いた。

本実験においては、視標であるルービックキューブに3種類の動作をさせた (図 4-18)。1番目の動作は diopter 単位で変位するサインカーブの動きである。動作を始める前の初期位置を被験者の眼前 1.5D (67cm) とし、そこから眼前 2D (50cm) の位置にまで近づき、次に眼前 1D (1m) の位置にまで遠ざかるよう設定した。この動作の周期は 10 秒であり、1回の計測につき4周期、計40秒の動作だった。

2番目の動作は、1番目と同じく diopter 単位で変位するサインカーブの動きであるが、その周期を 2.5 秒に変更して、計 10 秒、被験者には提示した。なお、この動作の被験者から視標までの距離は1番目の動作と同じく、1.5D の位置から開始し、2D と 1D の間で変位するようになっていた。

そして3番目の動作として、ステップ運動を使用した。これは、動作の初期位置は被験者の眼前 1D の位置から開始し、次に 1.5D、最後に 2D の位置で、それぞれ 10 秒ずつ停止するという動きだった。

これらの動作をする視標のルービックキューブを用いて、被験者に対してキューブの角を注視するよう教示し、その時の水晶体調節および輻輳運動を同時計測した。そして、このルービックキューブと全く同じ動きをする立体映像を用意し、ディスプレイ (MITSUBISHI Diamond crystal RDT233WX-3D, 23 インチ) を被験者の眼前 1m の位置に置き、それを視聴している際の水晶体調節と輻輳運動も測定した。なお、これらの計測は実物体、立体映像それぞれの3種類ともすべて、一人の被験者につき、3回ずつ行った。なお実験環境の照度は JIS や ISO で規格化されたものを参考にしており [3-5]、眼球に入射する地面に対して垂直な照度は約 103lx、地面に対して水平な照度は 683lx だった。

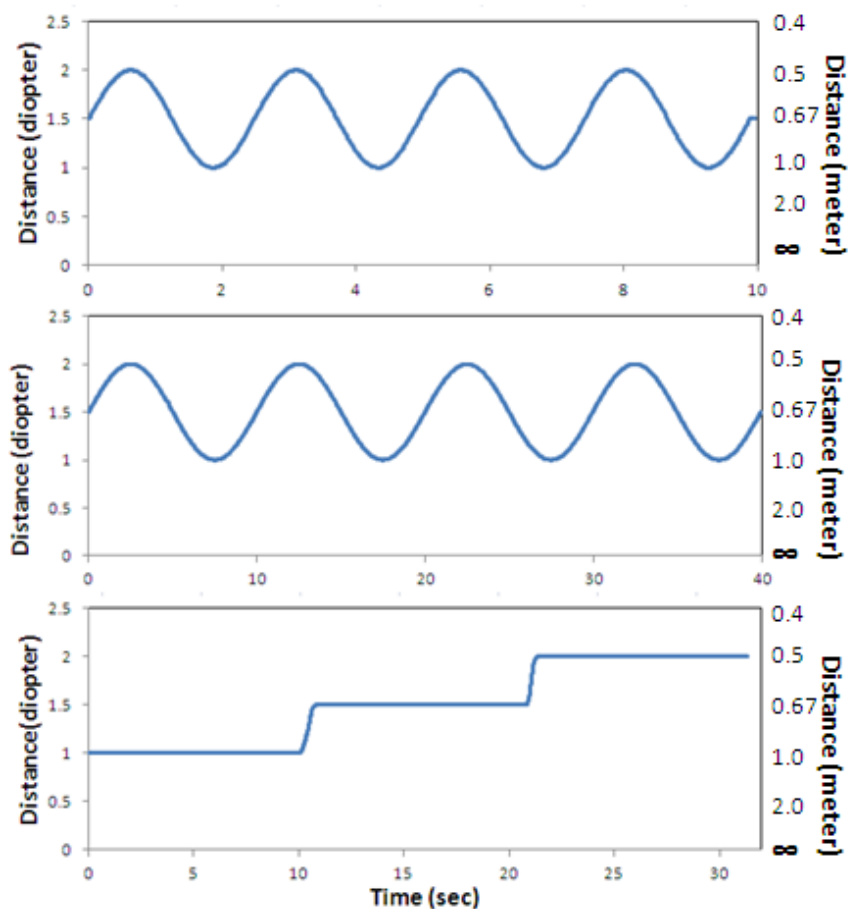


図 4-18 実物体および立体映像の動作

3-2. 実験結果

本実験ではすべての被験者が概ね同様の結果を示した。典型例として図 4-19 から図 4-24 に示す。図 4-19 と 4-20 は 10 秒周期の動きのそれぞれルービックキューブと立体映像の測定結果を表しており、図 4-21 と 4-22 は 2.5 秒周期の、図 4-23 と 4-24 はステップ運動の、実物体の移動視標であるルービックキューブとそれと同じ動きをする立体映像での測定結果を表している。

グラフの accommodation とは、水晶体調節のピントの焦点距離を表しており、convergence は、寄り眼による輻輳運動の焦点距離を、そして object は、被験者からの、ルービックキューブまでの距離、または立体映像の仮想的な位置までの距離を表している。

図 4-19 のキューブを使用した 10 秒周期のサインカーブの測定結果では、近方にキューブが来た際に若干、輻輳が一致していない部分があるものの、水晶体調節と輻輳運動はほ

ば、キューブの位置に焦点を合わせていた。

図 4-20 の立体映像を使用した 10 秒周期のサインカーブの測定結果においても、調節と輻輳は映像の動きに同調して変化しており、輻輳はほぼ正確に映像の仮想位置に焦点が合わせられており、accommodation の値も最大で約 1.7D ほどまで変化していた。

図 4-21 のキューブが 2.5 秒周期で往復する動作を被験者に注視させた結果では、調節、輻輳ともにキューブの位置によく焦点があっていた。しかし、10 秒周期のものと比較すると、若干キューブの位置の変化に対して、遅れて変位しているように見えた。

図 4-22 の立体映像を 2.5 秒周期で往復させた映像における測定結果でも、キューブの場合と同じく、調節輻輳は映像と同調して変化しているが、映像の仮想位置に比べ、やや遅れて変化していた。

図 4-23 はキューブをステップ運動で動かした時の測定結果である。この結果をみると、調節が計測時間全体にわたって、キューブよりも 0.3D ほど、やや遠方に焦点を合わせているものの、キューブの動きに同調して値が変化していた。

図 4-24 はステップ状に動く立体映像を視聴させたときの測定結果である。この結果では調節、輻輳ともに映像の仮想位置よりも 0.4D ほど遠方に焦点を合わせているが、映像の動きに同調して、値が変化をしていた。

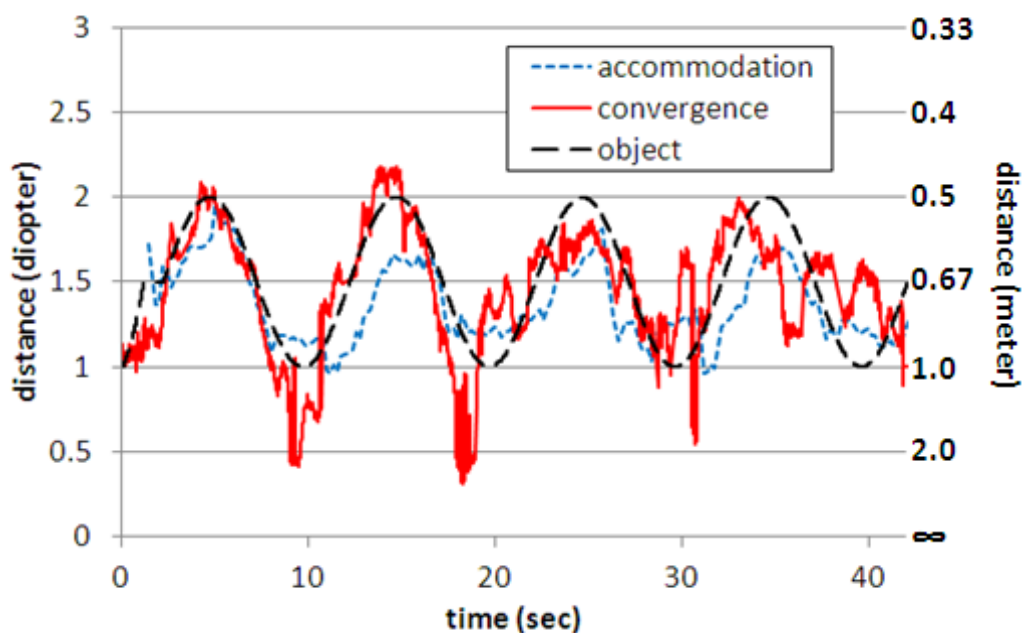


図 4-19 実物体・10 秒周期サインカーブ (24 歳, 男性)

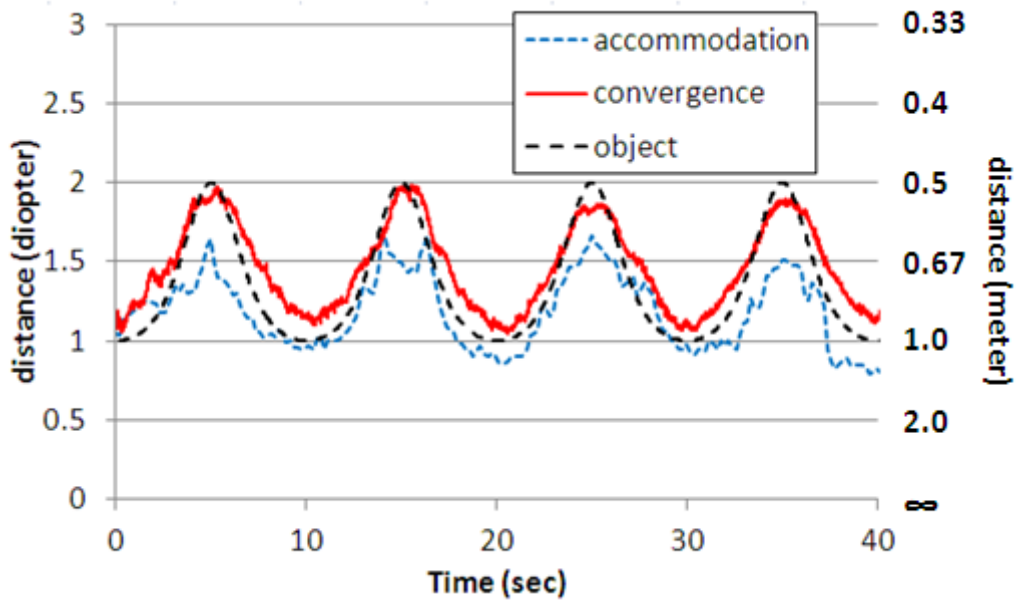


図 4-20 立体映像・10秒周期サインカーブ (23歳, 男性)

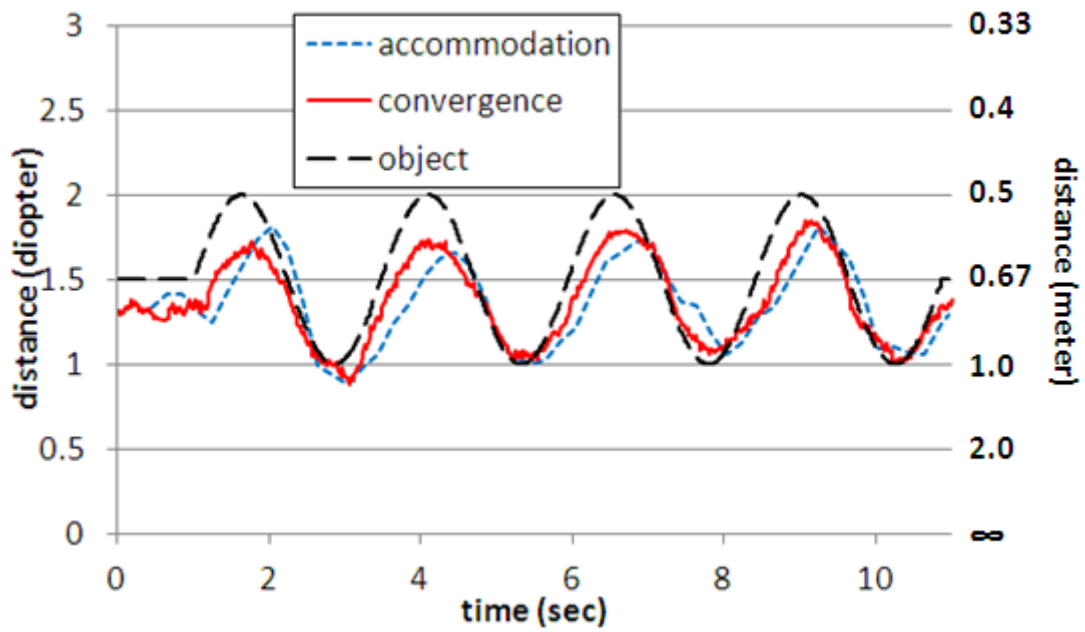


図 4-21 実物体・2.5秒周期サインカーブ (24歳, 男性)

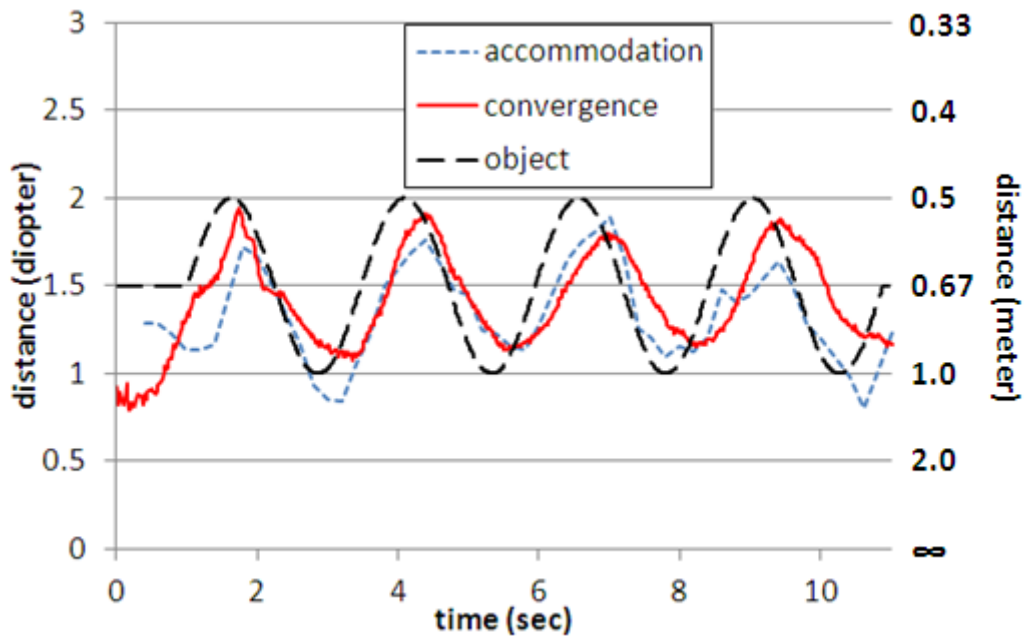


図 4-22 立体映像・2.5 秒周期サインカーブ (24 歳, 男性)

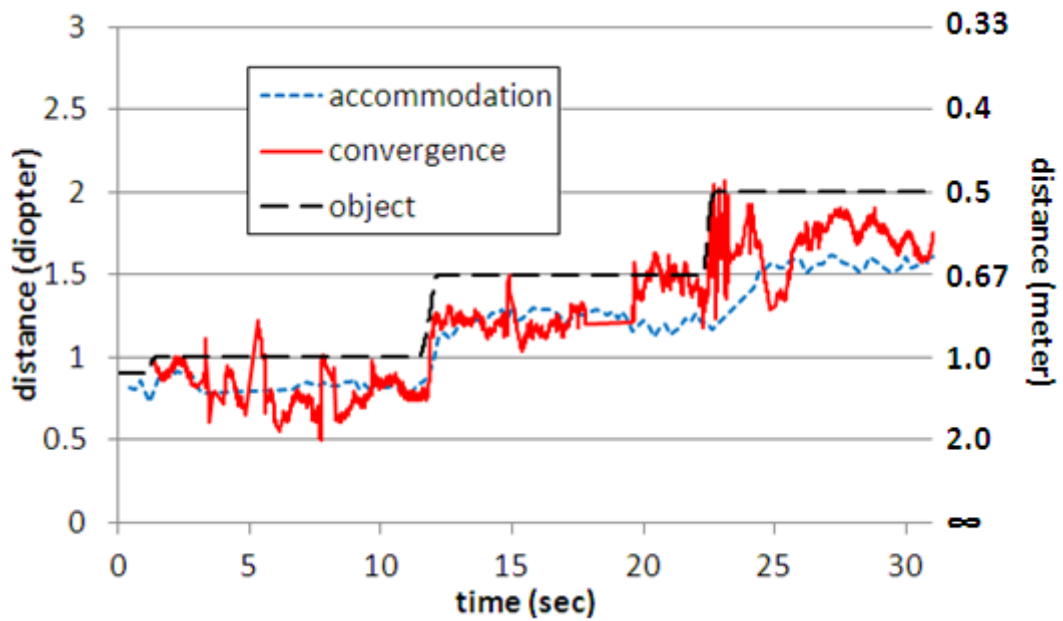


図 4-23 実物体・ステップ (23 歳, 男性)

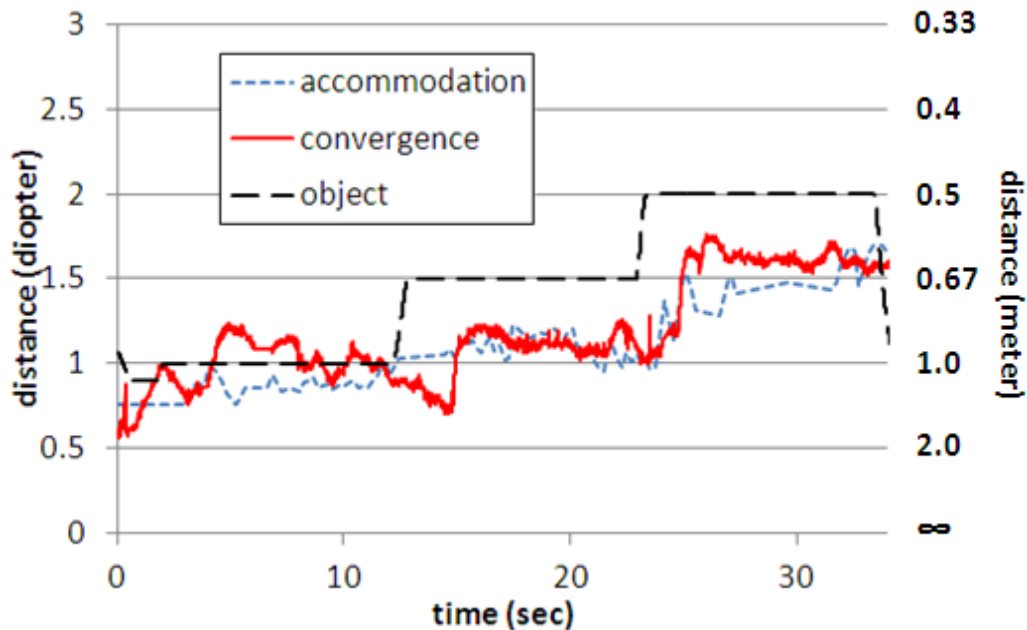


図 4-24 立体映像・ステップ (24 才, 男性)

3-3. 考察

本実験では移動視標を注視しているとき、それと同じ動きをする立体映像を視聴しているときの水晶体調節と輻輳運動の焦点距離を同時計測し、その結果、移動視標を使用した 10 秒周期のサインカーブの計測結果やステップ運動をする立体映像の計測結果などにおいて、全体的に視標の位置、または映像の仮想位置よりも水晶体調節が遠方に焦点が合わせられていた場合が存在するものの、ほぼ移動視標の位置、または立体映像の仮想距離に一致するという結果を得た。

立体映像を視聴しているときには、水晶体調節が画面上に固定されており、輻輳運動は映像の仮想位置に合わせてられるため、これらに乖離が生じるという「調節と輻輳の不整合」が起きているということがしばしば言われることがあるが[10-15]、本実験の結果では水晶体調節は映像の動きに合わせて変動していたので、これが生じているとは考えられない。

図 4-19, 4-21, 4-23 の移動視標を使用した計測結果を見るとわかるが、自然視の状態においても、対象物に正確に調節を行っていない場合が存在する。Miyao らは十分な照度環境下においては、常に対象物に正確に水晶体調節を行うわけではなく、0.4D ほど後方へ焦点を合わせられることがあるということを報告している[16, 17]が、本実験の結果は図 4-20 の立体映像の 10 秒周期の 35 秒付近の映像の仮想位置が 2D に来た時、ならびに図 4-24 の映像が 2D に近づいた直後以外の場合では、その範囲に十分おさまるものであるといえるだ

ろう。

この二つの場合の水晶体調節のずれについてだが、前節でも触れた被写界深度がかかわっている可能性が考えられる。被写界深度とは、ある一点に焦点を合わせたとき、その状態のまま、個々の物体や境界線をはっきりと識別できる前後の範囲のことで、古くから現在に至るまで、さまざまな研究がなされている[18-23]。

Patterson は「調節と輻輳の不整合」は存在するものの、それは近見時のみでの問題であり、被写界深度のため、ほとんどの視聴環境では生じないとしている[18]。そして被写界深度にかかわる要因として瞳孔径の大きさと解像度があるとしている。瞳孔径は輝度と線形の関係があり、輝度が 0.03cd/m^2 のかなり薄暗い場合には瞳孔径は大体 6mm を超える大きさとなり、輝度レベルが 300cd/m^2 ほどになると、瞳孔径は 2mm 近くまで縮瞳するといわれている[24, 25]。そして Campell や Ogle によれば、瞳孔径が 1mm 縮瞳すると、被写界深度はおよそ 0.12D 増加するといわれている[19, 20]。また Ogle は視角が 0.25arcmin 増加すると、被写界深度は 0.35D 増加するということも述べている。

Wang らと Patterson は、被写界深度の範囲は 1D ほどであり、焦点位置から前後に 0.5D あるとしている[18, 21]。具体例を挙げると、 1D (1m) の位置に焦点を合わせているときであれば、 0.5D (2m) から 1.5D (67cm) まで、 2D (50cm) の位置に焦点を合わせているときには 1.5D (67cm) から 2.5D (40cm) までが見えているということになる。

このように被写界深度が焦点位置から前後に 0.5D ずつの範囲を持つということ、さらに周囲の照明環境で瞳孔径が変動し、それがさらに被写界深度に影響を及ぼすことを考慮すると、本実験で得た結果が、移動視標、または立体映像よりも 0.4D を多少超える範囲で遠方に焦点を合わせているということも十分に考えられることである。

また、Patterson と Silzars は立体映像の悪影響の原因として、クロストークや左右像のコントラストの差異などと合わせて「調節と輻輳の不整合」があるということ述べているが、これらよりもむしろ、より深刻に影響する要因は運動視差の欠如であるということ述べている[18, 26]。立体視を行っているときには、両眼視差の変化を知覚しているにもかかわらず、このとき運動視差を感じないため、被験者がそれらの情報を処理する際に齟齬を起こすというものである。

4. まとめ

本研究では多人数の被験者を使用して、その調節応答を調べることで水晶体調節の特性について明らかにした。その結果、加齢による水晶体の弾性消失により、年齢の高い被験者では、実物の移動視標を観察しているときであっても対象物に水晶体調節を追従させることはできないということがわかった。このことから、前章である第 3 章において、中高年齢者の立体映像を使用した計測において、調節と輻輳が一致しない結果を得ていたが、こ

これは、実物を見ている自然視の状況であってもありうる、特別な状態ではないことがわかった。そして年齢の高い被験者で、対象にピントを合わせることが難しい被験者では、瞳孔径の大きさが移動視標に合わせて変化しており、この調節不足を補っている可能性があった。瞳孔径を縮瞳させることで被写界深度を広げていることが考えられ、これは後半の実物と立体映像での、それぞれの計測結果の比較実験でも表れている。

様々な動作を行う移動視標を注視している状態である自然視の状態と、同様の動作を行う立体映像を視聴している状態において水晶体調節と輻輳運動を計測し、その結果を比較したとき、これらの間にはほぼ違いは存在しなかった。この結果からも、これまでの章で述べてきた「調節と輻輳の不整合」は存在せず、立体映像の悪影響の原因は別の要因が考えられることがわかった。

悪影響の要因として、別の要因を挙げると運動視差の欠如といったことが考えられるが、水晶体調節と輻輳運動だけでなく、合わせて瞳孔径の変化も調査する、映像の方式間の違いなどについて調べるなどして、さらに詳細な検討を行うことを今後の課題としたい。

参考文献

- [1] M.Dubbelmana, Van der G. L. Heijde, H. A. Weeber, G. F. Vrensen: Changes in the internal structure of the human crystalline lens with age and accommodation, *Vision Research*, Vol.43, No.22, pp.2363-2375, 2003.
- [2] 原浩生, 比留間伸行: 両眼融合式立体画像に対する高齢者の眼の焦点調節, *映像メディア情報学会誌*, Vol.24, No.26, pp.13-18, 2000.
- [3] 日本工業規格 (JIS), JIS Z9110 照明基準総則, 2010.
- [4] 日本工業規格 (JIS), JIS Z9125 屋内作業場の証明基準, 2007.
- [5] ISO, ISO 8995, *Lightning of Indoor work places*, 2002.
- [6] C. Ramsdale and W.N. Charman: A longitudinal study of the changes in the static accommodation response, *Ophthalmic and Physiological Optics*, Vol.9, No.3, pp.255-263, 1989.
- [7] 松井瑞夫, 「目の疾患-正常な視力を守る-」, 法研, 1996.
- [8] 仁田正雄, 「眼科学」, 文光堂, 1976.
- [9] R. A. Mosses: Accommodation. *Adler's Psychology of the Eye*, Saint Louis, The C. V. Mosby Company, pp.298-319, 1975.
- [10] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks: Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue, *Journal of Vision*, Vol.8, No.3, 33, pp.1-30, 2008.
- [11] K. Ukai and P. A. Howarth: Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories, and observation, *Displays*, Vol.29, No.2, pp.106-116, 2008.
- [12] F. M. Toates: Accommodation function of the human eye, *Physiol. Rev.* 52, pp.828-863, 1972.
- [13] F. M. Toates : Vergence eye movements, *Doc. Ophthalmol.* 37, pp.153-214, 1974.
- [14] R. Patterson, M. D. Winterbottom, And B. J. Pierce: Perceptual issues in the use of head-mounted visual displays, *Human Factors* 48, pp.555, 2006.
- [15] M. Velger: *Helmet-Mounted Displays and Sights*, Artech House, Boston, 1998.
- [16] M. Miyao, S. Ishihara, S. Saito, et al.: Visual accommodation and subject performance during a stereographic object task using liquid crystal shutters, *Ergonomics*, Vol.39, No.11, pp.1294-1309, 1996.
- [17] Y. Otake, M. Miyao, S. Ishihara et al.: An experimental study on the objective

- measurement of accommodative amplitude under binocular and natural viewing conditions, *Tohoku J. Exp. Med.*, 170, pp.93-102, 1993.
- [18] R. Patterson: Human factors of stereo displays: An Update, *Journal of SID*, Vol.17, No.12, pp.987-996, 2009.
- [19] F. W. Campbell: The Depth of Field of the Human Eye, *International Journal of Optics*, Vol.4, No.4, pp.157-164, 1957.
- [20] K. N. Ogle and J. T. Schwartz: Depth of focus of the human eye, *J. Opt. Soc. Am.* 49, pp.273–280, 1959.
- [21] B. Wang and K. J. Ciuffreda: Depth of focus of the human eye: Theory and clinical applications, *Surv. Ophthalmol.* 51, 75, 2006.
- [22] W. N. Charmana and H. Whitefoota: Pupil Diameter and the Depth-of-field of the Human Eye as Measured by Laser Speckle” *International Journal of Optics*, Vol.24, No.12, pp.1211-1216, 1977.
- [23] S. Marcosa, E. Morenob, and R. Navarrob: The depth-of-field of the human eye from objective and subjective measurements, *Vision Research*, Vol.39, No.12, pp.2039–2049, 1999.
- [24] I. E. Loewenfeld: *The Pupil: Anatomy, Physiology and Clinical Applications*, Iowa State University Press, Ames, 1993.
- [25] P. Reeves: The response of the average pupil to various intensities of light, *J. Opt. Soc.* 42, pp.35–43, 1920.
- [27] R. Patterson, and A Silzars: Immersive stereo displays, intuitive reasoning, and cognitive engineering, *Journal of SID*, Vol.17, No.5, pp.443-448, 2009.

第5章

モバイル端末における立体映像の 視認性の評価

1. はじめに

第1章にて、立体映像が社会へ急速に普及してきているということが述べられており、「チキン・リトル」や「アバター」といった娯楽映画や、第3章、第4章で扱ったような家庭でも使用されるテレビにも立体映像技術の導入が進んでいる。それは携帯電話やスマートフォンのようなモバイル情報端末においても同様で、任天堂が販売しているニンテンドー3DS（図5-1）にも立体映像技術が導入されていることは記憶に新しい。

従来までのモバイル情報端末においては、その視認性や可読性の調査や評価は既に数多く行われている[1-6]。しかしながら、立体表示をした場合のモバイル情報端末のテキストについては、指標が存在しないため、その視認性、可読性を調べることは非常に有用である。

本研究では、SHARPより発売されているLYNX 3D SH-03Cの試作機を使用して、まず立体映像を提示し、その飛び出し距離を計測することで、テレビよりも小型のディスプレイであるモバイル情報端末においても、正しく立体が認知できているか、また多数の被験者群を使用して実験を行うことで、立体認知の不可能な被験者がどの程度の割合で存在するのか検証した。その後、立体のテキストを表示し、それらに対する立体認知までの時間や、文字列の探索から、その可読性の評価を行った。まずそれらの評価結果を被験者の年齢との関係も考察しつつ報告する。

そして次に、ディスプレイの角度を変化させたときの立体表示の文字列の認知実験を行い、このときの視認性の評価についても報告する。この研究を行う背景には、実際の携帯電話の使用状況の想定がある。SHARPのLYNX 3D SH-03Cで採用されているパララックスバリア方式は、第3章で使用した液晶シャッター方式や第4章で使用した偏光フィルター方式とは異なり、ディスプレイ上の遮光バリアを用いて、裸眼での立体視を可能としている。しかしながら、そのために有効視点位置が限られてしまうということが分かっている[7, 8]。モバイル情報端末においては、使用状況や姿勢によってディスプレイの角度が変化することは多々あるが、このようなパララックスバリア方式の特性が視認性にどのような影響を与えるかは明らかにされていないためである。



図 5-1 ニンテンドー3DS

2. パララックスバリア(parallax-barrier)方式

パララックスバリア方式は第 3 章にもあるように、裸眼での観察が可能な二眼立体表示方式である。この方式では等しい幅のスリット（光を通す縦長の部分）と遮光部（光を通さない縦長の部分）が対になって等間隔に並んだ縦格子状マスク（これを「パララックスバリア」と呼ぶ）を用いて、左眼画像と右眼画像を分離して観察し、立体感を得る方式である（図 5-2）[9-12]。その起源は非常に古く、アナグリフ方式が初めて世に出た 1900 年からわずか 3 年後のことで、1903 年に Ives によって提案された[10]。しかしながら、立体視の方式として注目を集めるようになったのは比較的最近のことであり、液晶ディスプレイが開発されてからのことである。

図 5-2 に示されているように、画像表示面には列ごとに交互に左眼用画像、右眼用画像の画素列が表示され、その前にパララックスバリアが置かれている。パララックスバリアを通して画像表示面を見ると、遮光部のために、左眼用画像は右眼では見えず、右目用画像は左眼では見えない。したがって、左眼では左眼用画像のみを、右眼では右目用画像のみを見ることになり、立体感が得られる。

この方式の利点は、構成が簡単であるということ、そしてメガネを用いず、裸眼のまま立体視が可能であるということである。しかしながら、立体像を観察できる目の位置が幾何学的に決まってしまう、目の位置の自由度が理論的には全くなく、観察位置が最適位置から外れると、クロストーク (cross talk) や画素欠けが生じてしまうという欠点がある。

ただ、目の位置が最適位置からずれても十分に立体像を観察できる領域（観察領域）を広げるための検討もさまざまに行われている[10, 13]。この方式は液晶ディスプレイとの相性も良く、また大画面ディスプレイにも対応しやすいため、今後も様々な場面で使用され

ることが期待されている。

またパララックスバリア方式以外の裸眼式二眼立体表示方式としては、表示画素の手前にかまぼこ型のレンズ (cylindrical lens) を置くことで、視線の届く位置を変化させるプリズムとして動作させ、両眼にそれぞれ異なる画像を観察させるレンチキュラー (lenticular) 方式 (図 5-3) [14, 15], 液晶ディスプレイのバックライトと光学シート (プリズム) を利用してバックライトを左右交互に高速に点灯させることで、左右眼に別々の光線が入射するように振り分ける光源分割方式などがある (図 5-4)。

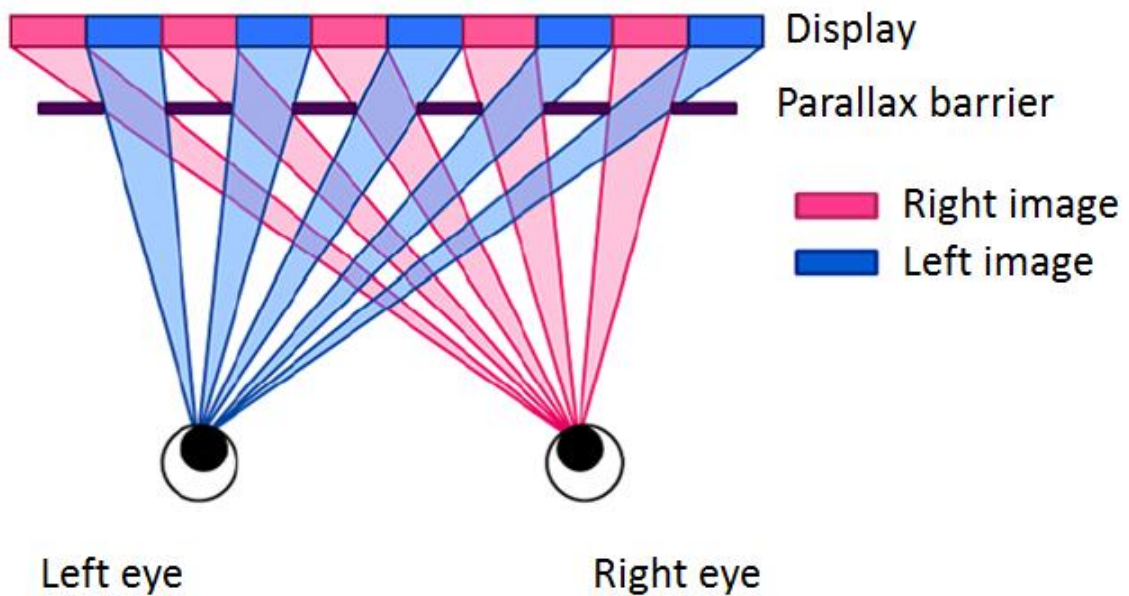


図 5-2 パララックスバリア (parallax-barrier) 方式

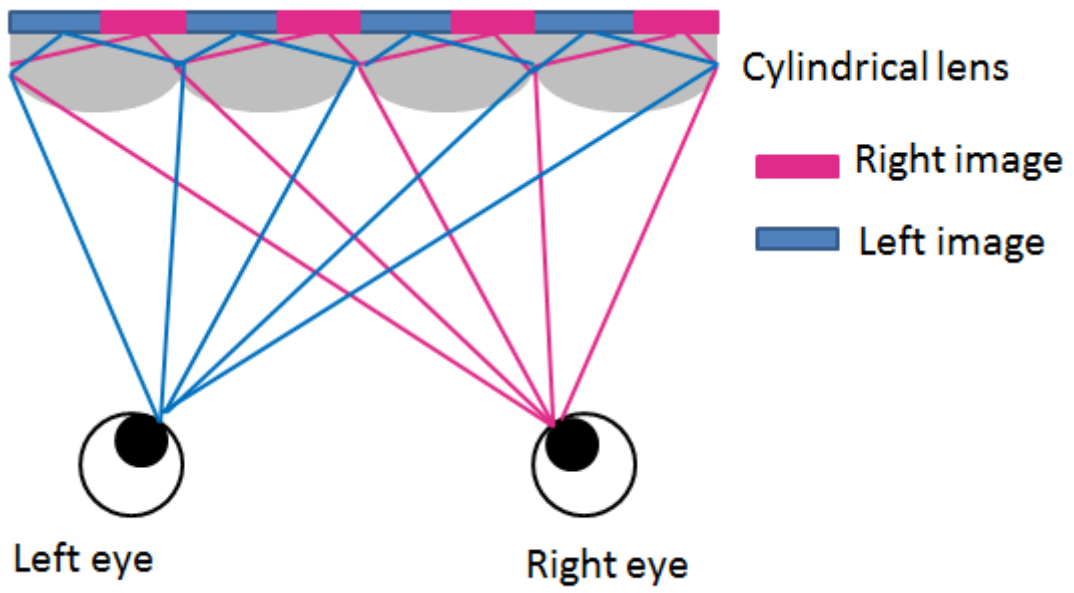


図 5-3 レンチキュラー (lenticular) 方式

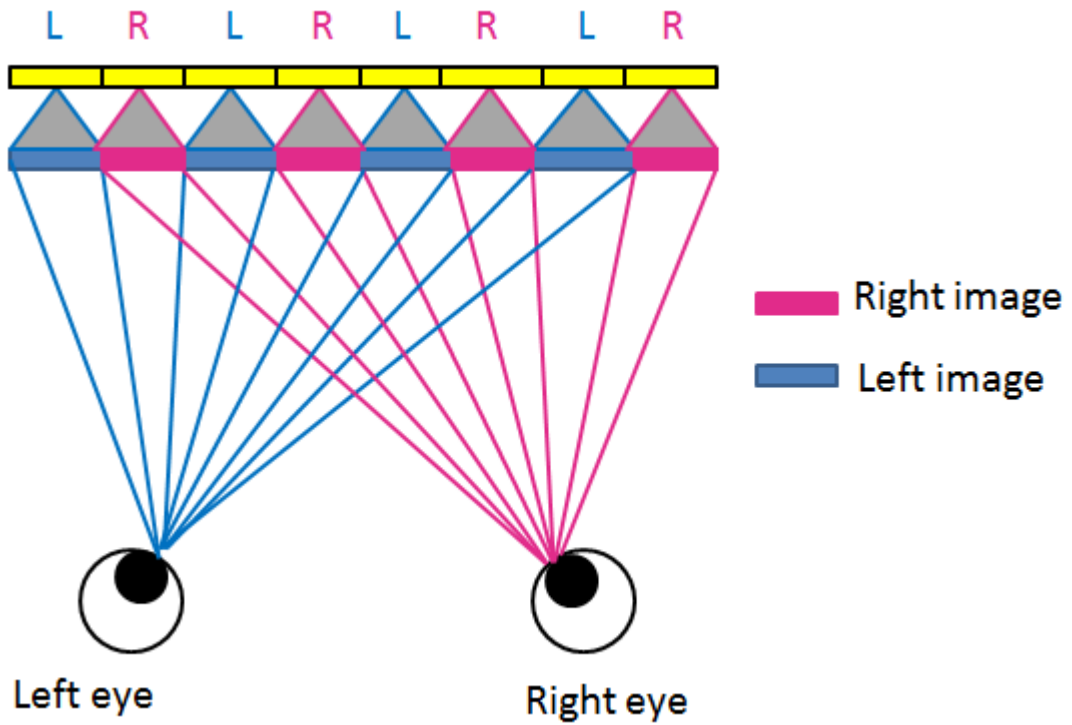


図 5-4 光源分割方式

3. モバイル端末における立体認知と飛び出し距離の関係

3-1. 実験方法

実験は事前に被験者に対して十分にインフォームドコンセントを行っており、名古屋大学情報科学研究科の倫理審査委員会の承認を得ている。また実験に使用したスマートフォン・LYNX 3D SH-03C (NTT Docomo より 2010 年 12 月 3 日発売) (図 5-5) の試作機の輝度は正面から測定を行った場合、白い背景部分の輝度は 94.7cd/m^2 、黒い文字の部分は約 2.1cd/m^2 であった。

20 歳から 78 歳の男女 109 名を被験者として、最初に被験者の瞳孔間距離の測定を行った。そして被験者の眼前から 40cm の位置に LYNX 3D SH-03C の試作機 (解像度: 800×480 , 画面サイズ: 3.8 インチ) を置き、球体が徐々に手前へ浮き上がる立体映像 (図 5-6) を提示し、最も大きく飛び出したと被験者が認知した場所を被験者自身の指を使い、直接示させた (図 5-7)。そして被験者が示した位置からディスプレイまでの距離を計測することで、提示した映像を立体として認知できるかどうか、そして立体として認知できた被験者が、提示した立体映像の飛び出し距離がどの程度であると認知したのかを計測した (図 5-8)。なお、このときの実験環境の照度は約 500lx であった。



図 5-5 LYNCS 3D SH-03C

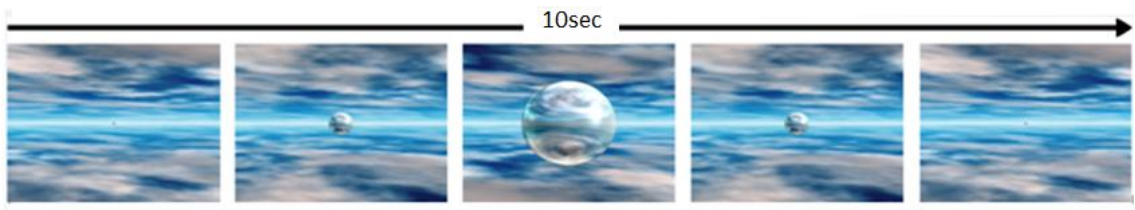


図 5-6 提示した立体映像



図 5-7 飛び出し距離認知実験の様子

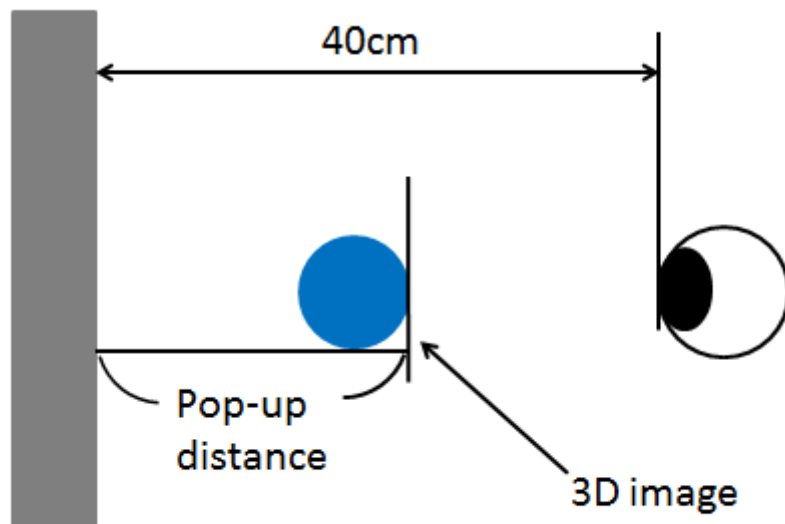


図 5-8 実験の模式図

3-2. 実験結果

本実験の結果を図 5-9, 5-10 に示す.

図 5-9 は年齢層別の立体認知の可否を表したグラフである. 横軸は被験者の年齢層を, 縦軸は立体認知が可能であった, または不可能であった被験者の人数を表しており, **perceived** は知覚した人数を, **not perceived** は知覚できなかった人数を示している. 立体認知が可能であった被験者は全体の 87.2%であり, 12.8%の被験者が立体映像を立体として認知できなかった. また立体認知ができなかった被験者はすべての年齢層において存在した.

図 5-10 は立体認知が可能であった被験者の知覚した, 画面からの飛び出し距離と被験者の瞳孔間距離の関係を表したグラフである. 横軸には被験者の瞳孔間距離を, 縦軸は被験者の知覚した立体映像の飛び出し距離を表しており, **measurements** は被験者が示した飛び出し距離を表している. また被験者の瞳孔間距離と画面までの距離がわかっており, 最も飛び出している際の視差も固定であるので, これらと三角形の相似の関係より各被験者が知覚する飛び出し距離を求めることができる. 理論値として, その値を **calculations** として図 5-10 に記載する. 結果より, この理論値と実測して得た値はよく一致していることが分かる.

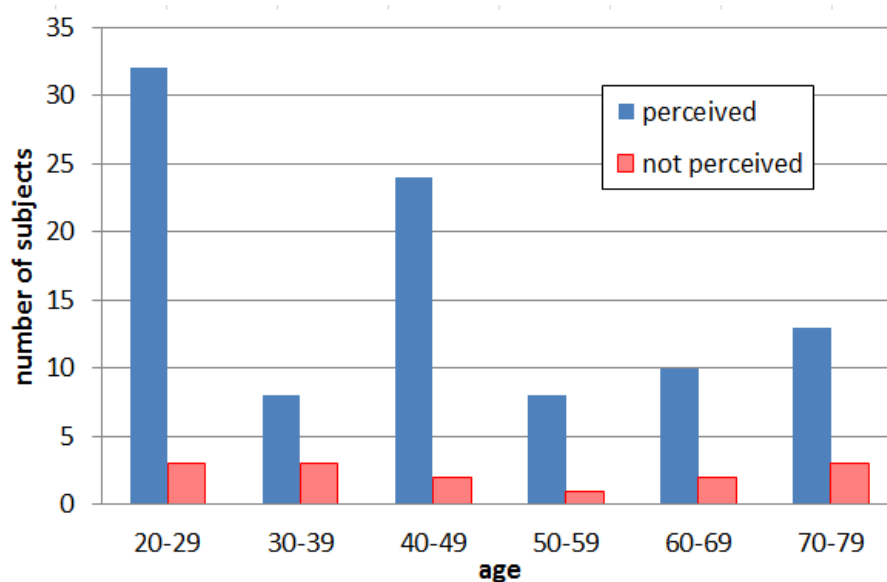


図 5-9 立体認知の可否と年齢の関係

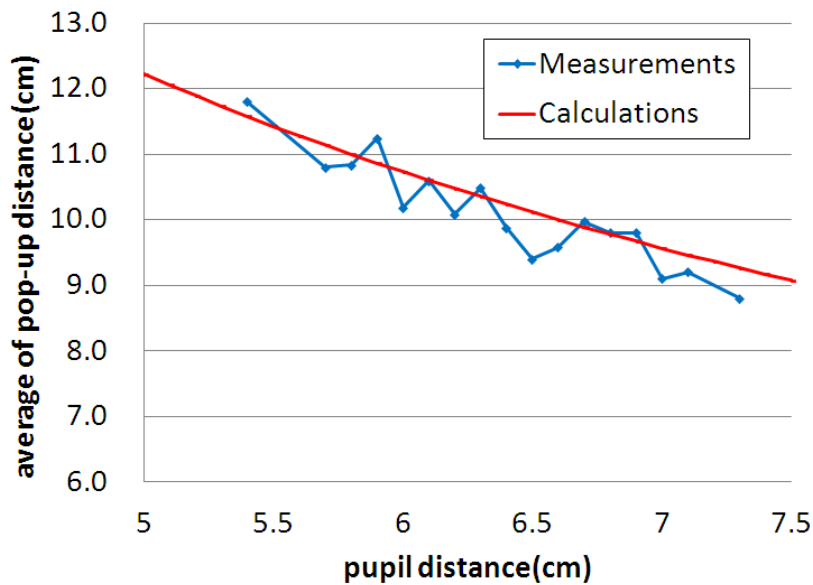


図 5-10 立体映像の飛び出しの平均距離と瞳孔間距離の関係

3-3. 考察

本実験では年齢層別の立体認知の可否を調べている。立体認知の可否を年齢別に調べた図 5-9 によると、どの年齢層においても一定の割合で立体視ができない被験者が存在しており、全体で平均して 12.8% の人間が立体視をできなかった。一般に約 12% の人が、立体視ができないという報告がされているが[9]、実際に計測を行って得た、この実験結果はその報告にほぼ沿う形になったと言ってよいだろう。また江本、矢野ら[16]は、両眼立体視の機能を 5 段階に階層的に捕らえ、12 の項目を調べることで正常な機能を持っているかを調べることができると報告している。それにより、個人々々の立体視が不可能な原因をより詳細に検討できる可能性があり、それにより今回立体視が不可能であった被験者も、ある程度立体視が可能となるように、改善が可能なのではないかということが考えられる。

図 5-10 の立体映像の飛び出し距離と被験者の瞳孔間距離の関係を表したグラフでは、映像の視差と瞳孔間距離から求めた飛び出し距離の理論値に実測値がかなり合致する結果となり、このスマートフォン・LYNX 3D SH-03C において、被験者が正しく立体認知ができているということが分かり、このことから、テレビなどに比べ、画面の小さいモバイル情報端末においても立体映像の視聴は十分に可能であることがわかる。

4. 立体文字の認知と可読性

4-1. 実験方法

被験者は前節の実験と同じく、20歳から78歳の男女109名を被験者として、計測を行った。

実験の手順を以下に記す。最初に LYNX 3D SH-03C の試作機を何も表示をしていない状態で提示し、そして験者の合図とともに立体の、アルファベットと数字の混同した無意味文字列 (図 5-11) を表示した。このとき、被験者自身に立体を認知できた瞬間を申告させ、無意味文字列の表示からその申告までの時間を、その画像を立体として認知できるまでの潜時として測定した (図 5-12)。提示した文字のサイズは大小 2 種類で、それぞれ、文字サイズ大は縦 5.0mm×横 1.3mm、文字サイズ小は縦 2.5mm×横 0.63mm であった。

そして次に、立体の認知が可能であった 20歳から78歳の男女49名を対象に、立体に表示した文字列の中から”A”を探索する作業を行わせ、その探索時間を計測した。なお探索は図 5-11 右のように左から右へ、上から下へ探索するように教示した。表示する文字のサイズは先ほどと同じく大小の 2 種類である。また、立体文字における測定結果の比較対象として、同じ文字のサイズの 2D 表示(立体ではない通常の文字表示)においても、立体認知の潜時測定を除いて、同一の手順により、文字を探索する時間を計測した。

なお、この文字列探索は一人の被験者に対して、文字の大小、2D と 3D の組み合わせで、合計 4 回行うが、全て違う文字列を提示し、被験者ごとによっても提示する順番をランダム化した。また実験環境の照度は約 520 lx であった。

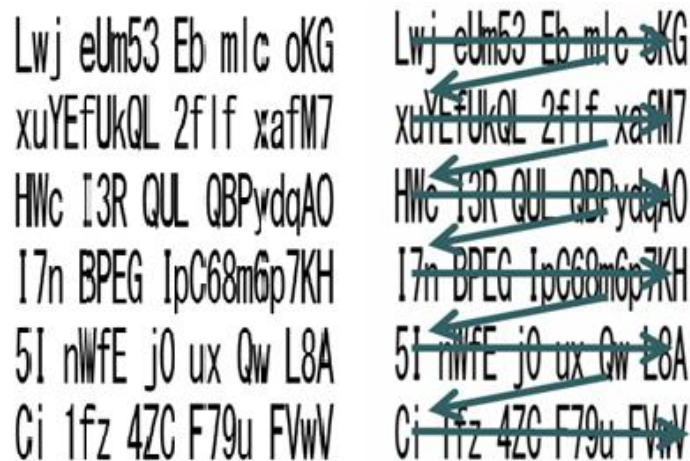


図 5-11 立体表示の文字列の例



図 5-12 立体文字認知実験の様子

4-2. 実験結果

図 5-13 に文字サイズごとの立体認知の潜時を年齢別に求めたものを示す。large character は文字サイズが大きいものの、small character は文字のサイズが小さいものの立体認知までの潜時を表している。文字のサイズが小さい場合は 60 歳以上の被験者において立体認知の潜時がほかの年齢層に比べ時間を要する傾向にあり、一元配置分散分析を行ったところ、有意水準 $p < 0.05$ で有意に差がある結果となった。また、70 歳以上の年齢層において文字サイズの大小のペアに対して t 検定を行ったところ、 $p < 0.01$ で有意な差が

あるという結果となった。なお、立体の文字の認知が可能であった被験者は、文字サイズが大の時は全体の 78.3%で、文字サイズが小の時は 77.4%であり、立体認知の可否に有意な差は見られなかった。

図 5-14 に 3D 表示、2D 表示の、文字サイズがそれぞれ大と小の物における文字列探索終了までの時間を示す。large 3D は文字サイズ大の 3D 表示を、small 3D は文字サイズ小の 3D 表示を、large 2D は文字サイズ大の 2D 表示を、small 2D は文字サイズ小の 2D 表示を表している。3D 表示の文字探索の所要時間は、立体認知が完了するまでの時間を除いた、立体認知後から文字列探索終了までの所要時間を示したものである。50 歳までの年齢層では文字の表示形式やサイズによらず、その所要時間にはほとんど差異は見られなかった。しかし 50 歳以降の年齢では、文字の表示形式や文字のサイズの違いにより、所要時間はかなり異なる値をとっており、3D 表示の文字において、50 歳以上の年齢層において、文字サイズの違いによる所要時間を対象に t 検定を行うと、 $p < 0.01$ で有意差が認められ、文字サイズが大きいと探索時間が短かった。また表示する文字が小さい場合では 40 歳未満では差が見られなかったが、60 歳以上で 2D 表示よりも 3D 表示の文字のほうが読む時間が長くなる傾向が見られた。なお全ての被験者を対象に 3D 表示と 2D 表示のペアで、文字サイズが大と小のものの所要時間を対象に t 検定を行ったところ、文字サイズ小では全体として $p < 0.05$ で有意な差があったことに対して、文字サイズ大では 70 歳以上では若干、差があるように見えるが、全体としては、統計的に有意差は見られなかった。

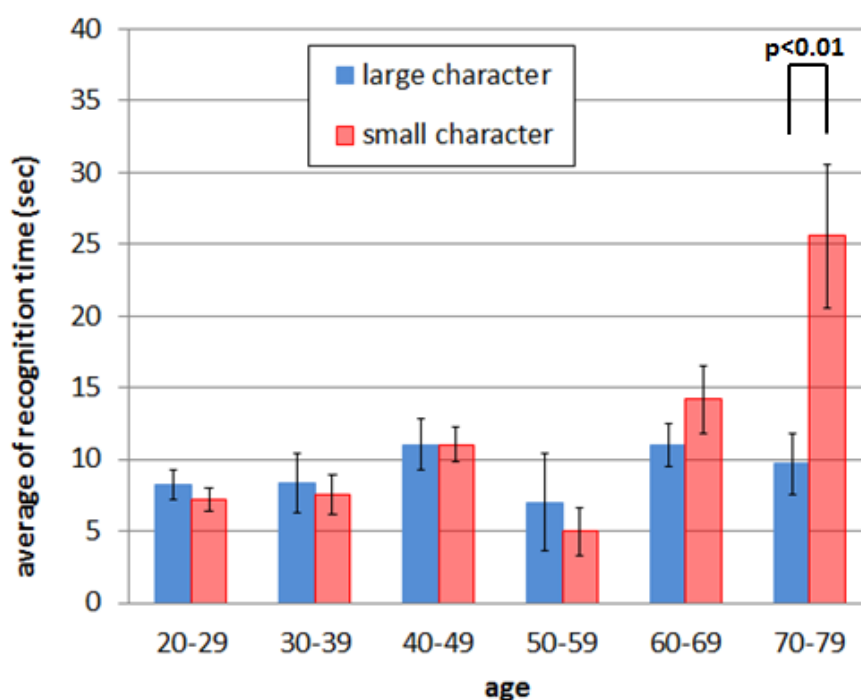


図 5-13 年齢別の立体認知の潜時

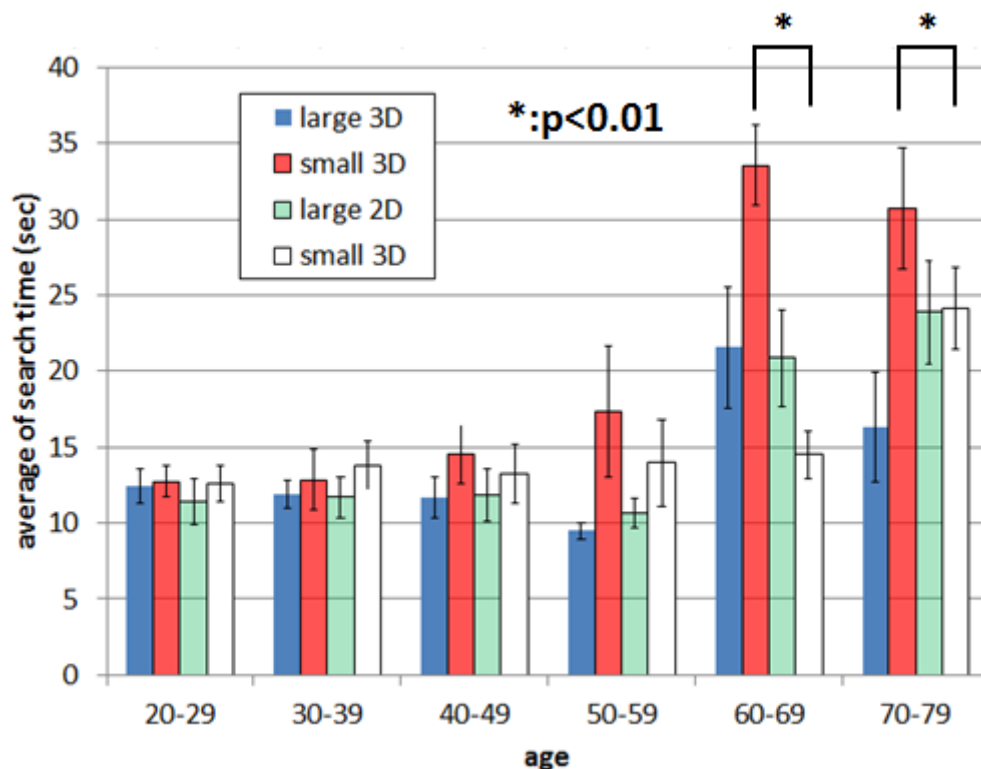


図 5-14 文字列探索時間

4-3. 考察

図 5-13 は年齢別の立体認知の潜時を表しているが、年齢層が若い層では文字の大小により、認知の潜時に影響は見られない。しかしながら、特に 70 歳以上の層で顕著であったが、高年齢層では文字が小さいと認知に時間がかかる傾向がみられた。これは Vrensen ら[17]、比留間ら[18]も言っているように年齢の増加に伴う調節力低下の影響ではないかとみられる。

Vrensen, 比留間らが調節力低下について述べる中で、加齢に伴い眼球の水晶体が弾性を失っていく、ということの特言に言及しており、これにより、高年齢層では若年齢層と比較して、適切な視距離の確保により時間がかかってしまい、特に小さな文字サイズの場合、大きな文字サイズに比べ、視角も小さいため、立体認知の潜時が増加してしまったのではないかと考えられる。これより立体で提示されたものを認知する際には、提示物を適切なサイズで表示することが重要であると言えるだろう。

図 5-14 より、文字のサイズが大きい場合、文字の探索時間は 2D 表示と 3D 表示に有意な差はなかった。このことから適切な文字サイズで提示を行えば、表示方法が可読性に影響を与えることはないのではないかと考えられ、ここでも適切な文字サイズでの提示の重要

性が示唆される。

また前節の飛び出し距離の計測実験に比べ、実験開始前の立体視の可否を確かめる試行時に、立体視が困難という意見が多かった。このことから、提示開始時から視差がある映像よりも、初めは視差がなく画面上に輻輳焦点があり、そこから徐々に視差を付けていく方が、認知が容易になるのではないかということ可能性が得られたので、今後の検討すべき課題としたい。

5. 角度変化の立体文字の認知と可読性へ与える影響

5-1. 実験方法

被験者は 20 代から 40 代までの健常者 16 名である。LYNX 3D SH-03C の試作機を被験者の眼前から 40cm の位置に置き、立体文字の実験と同じく、何も表示していない状態から、合図とともに立体の文字を提示して、その立体認知の可否を調べた。各角度ともに、認知できたか否かを正確に把握するため、十分に注視時間はとられていた。このとき正面、つまり角度 0 度だけでなくディスプレイの仰角 (elevation angle)、偏角(deflection angle)、回転角(turning angle) (図 5-15) をそれぞれ変化させ、立体認知の可否の測定を行った。

仰角は上に向ける方向を+として、-70 度から+70 度まで、回転角はディスプレイが時計回りに回転する方向を+とし、-50 度から+50 度まで、どちらも 10 度刻みで測定を行った。偏角はディスプレイを利き目に対して近づける方向を+として、-12 度から+12 度まで角度を 3 度刻みで変化させつつ計測を行った。

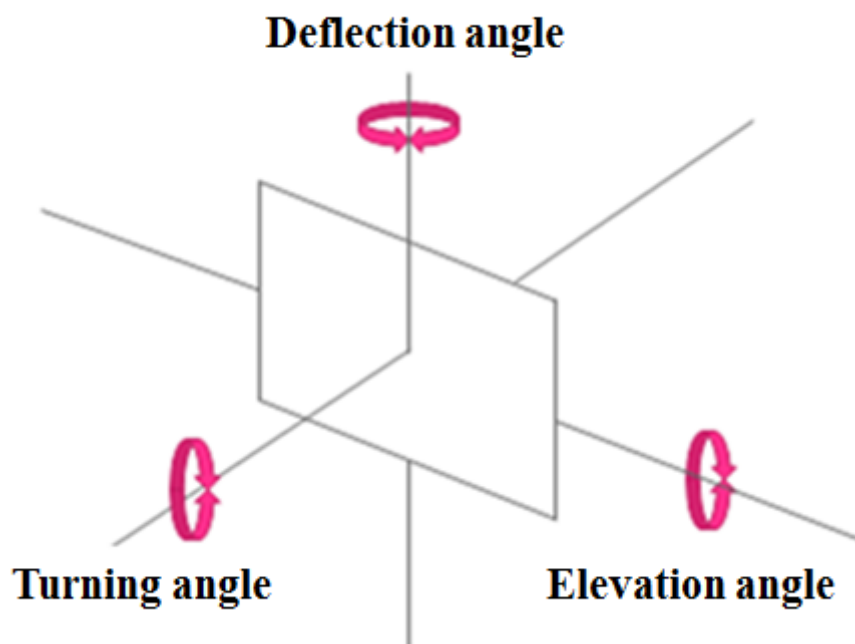


図 5-15 実験対象とした角度

5-2. 実験結果

図 5-16 に仰角の, 図 5-17 に偏角の, 図 5-18 に回転角の実験結果を示す. それぞれ縦軸が立体認知のできた人数, 横軸が被験者から見たディスプレイの角度を表している.

図 5-16 の仰角における実験結果では, 全く立体視ができなかった被験者は 3 名であった. また被験者が立体視できたのは-70 度から+40 度の範囲であった. 立体視が可能であった被験者全員が立体と認知できた角度は-30 度から+10 度であった. また角度が大きくなるにつれ立体視ができなくなる被験者は多くなった.

図 5-17 の偏角における実験結果では, 全く立体視ができなかった被験者は一人もおらず, 角度 0 度, つまり正面から見た場合では全員が, 立体視ができたと述べている. また±3 度では 5 人の被験者が, 立体視が可能であり, ±6 度では誰も立体視できなかった. 図の pop-up は飛び出しで, pop-away は引っ込みで認識した被験者の数を表しているが, ±9, 12 度では立体文字が飛び出しではなく引っこみで見た被験者が-9 度では 1 名, +9 度では 2 名, -12 度では 7 名, +12 度では 4 名存在した.

図 5-18 の回転角における実験結果では, 全く立体視ができない被験者が 1 名存在した. 立体視ができたのは-50 度から+30 度の範囲であり, 全員が立体視できたのは角度 0 度のみであった.

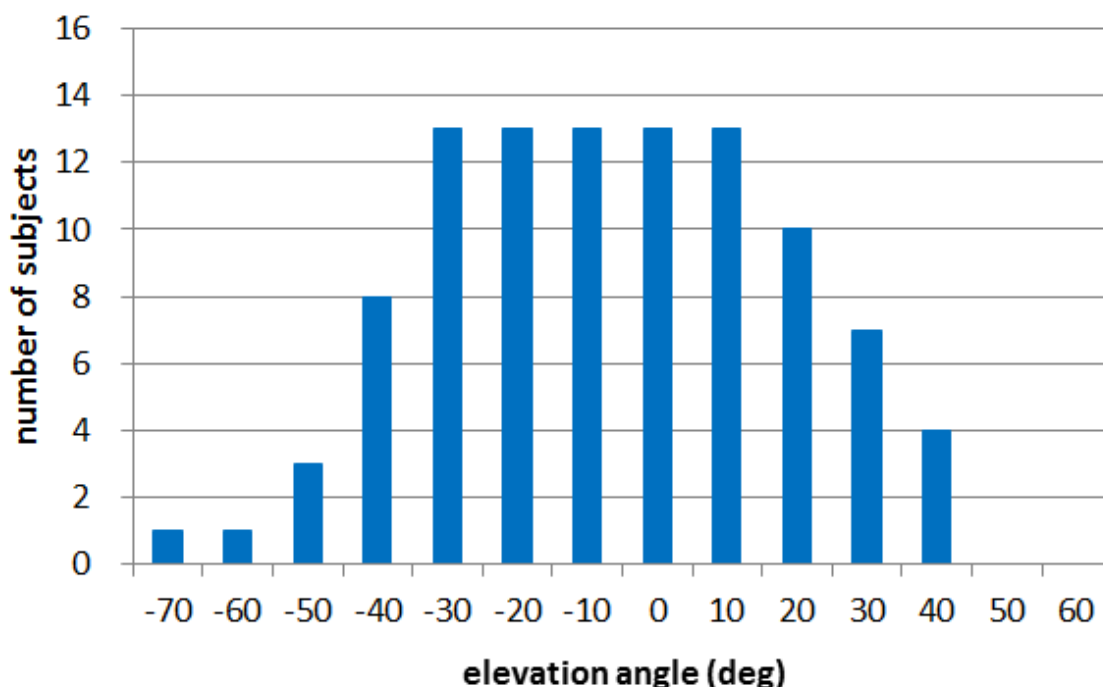


図 5-16 仰角(elevation angle)変化による立体認知の可否

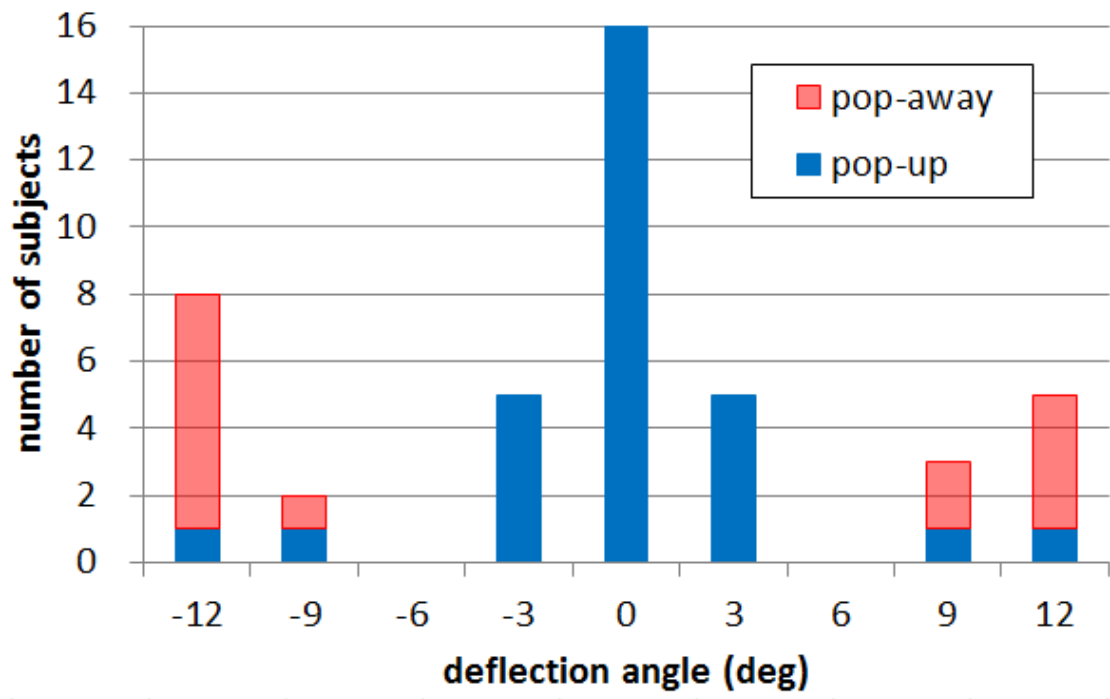


図 5-17 偏角(deflection angle)変化による立体認知の可否

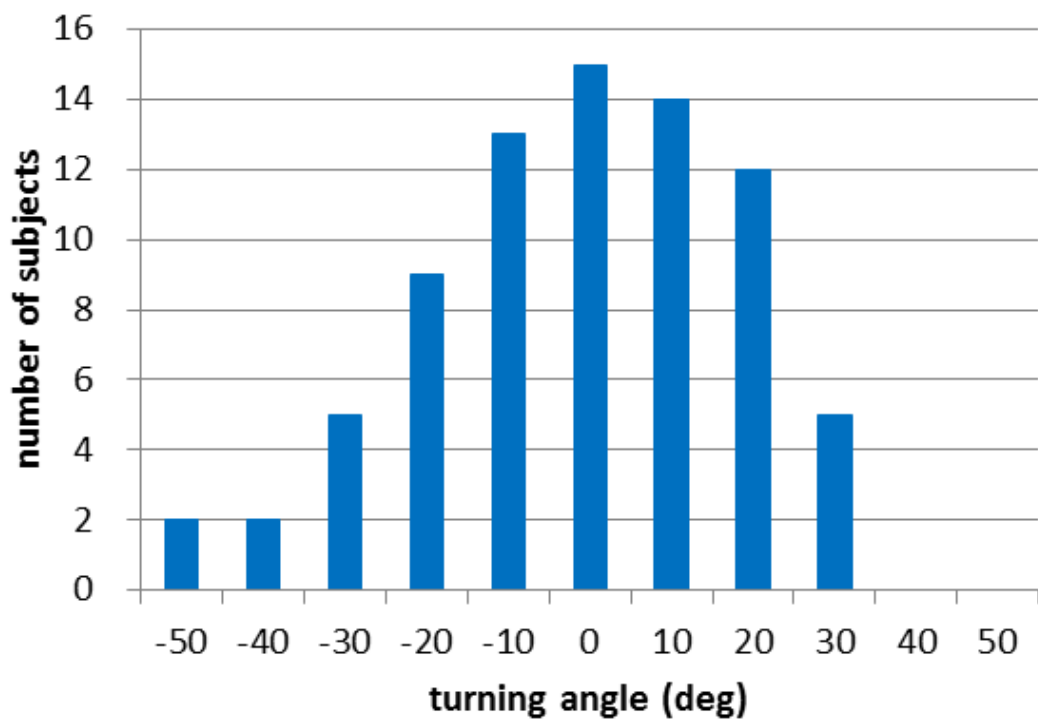


図 5-18 回転角 (turning angle) 変化による立体認知の可否

5-3. 考察

図 5-16 は仰角の変化について表したグラフである。被験者 16 人のうち 3 人は全く立体視のできず、実験に参加することができなかったが、それ以外の、実験に参加した被験者では、他の角度を変化させた際と比較すると、立体視可能であった範囲が大きく、その頑健性が認められる。それはパララックスバリア方式のディスプレイはディスプレイ上に遮光バリアを置き、両眼に入る映像をそれぞれ分離しているのだが、その遮光バリアはディスプレイの縦方向に縞状になって配置されている[12, 13]ことが理由として考えられる。つまり仰角を変化させた場合、被験者に対する遮光バリアの配置が変わるわけではないので、被験者は水平方向の有効視点位置から外れないため、ある程度の頑健性がみられるのではないかと考えられる。それでも仰角が-50 度や+40 度よりも範囲が大きくなった場合は被験者の半数以上が、立体視が不可能となることを述べているが、これはパララックスバリア方式の性質上[9, 12, 13]、ディスプレイ輝度が通常のディスプレイに比べ低いことに加え、本実験の環境では天井側に照明を配置してしまったため、仰角を変化させることでディスプレイ面における照度が著しく増加、または減少してしまい被験者が許容できる範囲を超えてしまったことが考えられる。さらに表示されている文字に関しても、正面からではなく上下方向からの注視する形となり、文字がつぶれて見えなくなってしまったのではないかとということが考えられる。

図 5-17 では、偏角の変化について表しているが、これはほかの二つの角度変化に比べ、立体視の可否への影響が非常に大きく、わずかな角度の変化でも立体視が困難になるという結果となった。これは偏角の変化によりディスプレイ上の遮光バリアが左右像の分離をうまく行えなくなることが原因と考えられる。また±6 度では立体視が行えた被験者が存在しないことに対し、±9 度、12 度では立体視が可能であった被験者が存在した。このことから水平方向の有効視点位置は不連続であるのではないかとということが示唆される。

図 5-18 は回転角の変化について表したグラフである。このグラフをみると±20 度の範囲では半数以上の被験者が、立体視が可能であった。矢野[19]は両眼視の左右像の融像には、融合可能な範囲があるということを述べており、今回の実験結果で回転角が変化していても立体視が可能であった被験者は、回転角の変化による左右像のずれが左右像の融合可能領域に収まっていたためであることが考えられる。回転角の変化が大きくなるにつれ、立体視が困難になる被験者が段階的に増えているのは、被験者により融合可能領域に個人差があるためであろう。

これら角度変化に関する測定では、パララックスバリア方式の原理上、目と画面の距離、被験者の瞳孔間距離、またパララックスバリア間の距離やディスプレイを注視する角度など、物理的な側面も十分に考慮した、さらに詳細な検討を行っていく必要があるだろう。

6. まとめ

本研究では裸眼で立体映像の視聴が可能なモバイル情報端末として、スマートフォン・LYNX 3D SH-03C を使用して、その視認性の評価を行った。その結果、ある一定の割合の人間が立体視できないという従来までの課題はいまだ残っているものの、正常な立体視機能を持つ人についてはこのモバイル端末での立体認知は十分に可能であることがわかった。また適切なサイズで文字を表示すれば、若年者であれば、2D 表示と 3D 表示における違いの可読性への影響はなく、立体認知の潜時における実験においても、十分な大きさのある文字では潜時が短くなり、適切なサイズでの表示の重要性が示唆された。また正面からだけでなく、様々な角度からの視認性の評価を行った実験では、仰角の変化に関しては、立体認知はある程度の頑健性が認められたが、偏角、回転角の変化に関してはわずかな変化でも容易に立体認知困難を惹起することが示された。

今後の課題として、提示する瞬間から視差がある映像よりも、視差を徐々につけた方が、立体認知が容易となるのかといったような立体視の手がかりの提示方法について考えたい。また被験者の注視する角度の変化に関しても、左右眼の視力の違いにより影響がどの程度であるのか、また個人の利き目の違いなどとも関連があるのかということと同時に、パララックスバリア方式の物理的な構造を考慮したさらに詳細な検討していきたい。

参考文献

- [1] 長谷川旭, 神田哲也, 長谷川聡, 宮尾克, 高柳泰世: 弱視児童のためのデジタル教科書利用, モバイル学会報告書, Vol.6, No.2, pp.6-9, 2010.
- [2] S. Hasegawa, K. Fujikake, M. Omori and M. Miyao: Readability of Characters on Mobile Phone Liquid Crystal Displays, Int. J. of Occup. Safety and Ergo. (JOSE), Vol.14, No.3, pp.293-304, 2008.
- [3] S. Hasegawa, S. Matsunuma, M. Omori and M. Miyao: Aging effects on the visibility of graphic text on mobile phones, Gerontechnology, Vol.4, No.4, pp.200-208, 2006.
- [4] 長谷川聡, 宮尾克: 画像文字による携帯電話 LCD 上の文字フォントの視認性評価, MATERIAL STAGE, Vol.6, No.8, pp.41-45, 2006.
- [5] 松沼正平, 長谷川聡, 大森正子, 宮尾克: ケータイ画面上の文字の視認性評価方法及びその実践, モバイル 2007, pp.59-64, 2007.
- [6] S. Hasegawa, M. Miyao, S. Matsunuma, K. Fujikake and M. Omori: Effects of Aging and Display Contrast on the Legibility of Characters on Mobile Phone Screens, INT. J. of Interactive Mobile Technol. (iJIM), Vol.2, No.4, pp.7-12, 2008.
- [7] K. Sakamoto and R. Kimura: Elimination of Pseudoscopic Region of Parallax Barrier 3D Display, Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, Vol.58, No.11, pp.1669-1671, 2004.
- [8] J. Y. Son, S. V. Vladmir, J. S. Kim and J. Bahram: Viewing zones in three-dimensional imaging systems based on lenticular, parallax-barrier, and microlens-array plates, Optical Society of America, Vol. 43, No. 26, pp.4985-4992, 2004.
- [9] 苗村健, 畑田豊彦, 佐藤隆夫, 他, 「立体視テクノロジー-次世代立体表示技術の最前線-」, エヌ・ティー・エス, 2008.
- [10] 増田千尋, 「3次元ディスプレイ」, 産業図書, 1990.
- [11] 谷口実: 3D 市場の創出と拡大に向けた取り組み, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.105, No.392, pp.1-2, 2005.
- [12] 包躍, 服部晋也: パララックスバリアを用いた複数観察者トラッキング型立体ディスプレイ, 画像電子学会誌, Vol.32, No.5, pp.667-673, 2003.
- [13] H. Nishimura, H. Yamamoto and Y. Hayasaki: Design of Parallax Barrier for Large Stereoscopic Display by Use of a Fine-pitch LED Panel, Proc. IDW'07 (International Display Workshops), Vol.3, pp.2267-2268, 2007.

- [14] 山田千彦: レンチキュラー板による立体像表示方法, 日本印刷学会誌, Vol.31, No.1, 1994.
- [15] 大越孝敬, 「3次元画像工学」, 産業図書, 1972.
- [16] 江本正喜, 山之上裕一, 奥井誠人, 矢野澄男: 立体映像標準チャートの制作・視機能検査チャート-, 映像メディア情報学会年次大会, pp.218-219, 1998.
- [17] M.Dubbelmana, Van der G. L. Heijde, H. A. Weeber, G. F. Vrensen: Changes in the internal structure of the human crystalline lens with age and accommodation, Vision research, Vol.43, No.22, pp.2363-2375, 2003.
- [18] 原浩生, 比留間伸行: 両眼融合式立体画像に対する高齢者の眼の焦点調節, 映像メディア情報学会誌, Vol.24, No.26, pp.13-18, 2000.
- [19] 矢野澄男: 両眼融合可能な視差の範囲-指標の大きさと空間周波数の変化に対する検討-, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75-D-II, pp.1720-1728, 1992.

第6章 結語

1. 研究のまとめ

まず本論文の各章を振り返る。

第2章では従来、不可能であった水晶体調節と輻輳運動を同時に測定、さらに立体映像を視聴しながら測定することのできる同時計測法を考案した。この方法では両眼開放式の調節力測定装置 WAM-5500 と、小型で他のデバイスと組み合わせることが可能な視線追跡装置である EMR-9 を使用して同時計測を試みた。その結果、移動する実物体を注視している被験者の水晶体調節と輻輳運動を同時に正しく計測することが可能となった。

つづく第3章では、実際に立体映像を視聴しているときの調節と輻輳を、若年者と中高齢者を対象に同時測定した。このとき合わせて通常の2D表示での計測も行ったが、その結果、若年者において2D表示では画面位置から調節と輻輳の焦点位置は変化しなかったが、立体映像を視聴しているときには映像の動きに同調して、調節と輻輳の焦点位置が変化していた。このことから、立体映像視聴時の悪影響の原因としてよく挙げられる「水晶体調節と輻輳運動の不整合」は存在しないだろうという結果を得た。そして中高齢者の実験結果では輻輳運動は映像に追従していたものの、水晶体調節があまり変化せず、映像の仮想位置が被験者に近づいた時、代わりに瞳孔径の縮瞳が見られた。これは、加齢による水晶体調節の構造変化による調節不足とそれを補うための縮瞳が表れたものと思われる。

さらに、第4章では幅広い年齢層における調節応答の特性と、立体映像視聴時の視機能についてより詳細な検討を行うため、多人数を使用した水晶体調節応答の測定実験と、実物体の移動視標、およびそれと全く同じ動きをする立体映像を使用して調節と輻輳の同時測定を行った。その結果、水晶体調節が加齢により近方へは焦点を合わせられなくなるということ、それを補うため瞳孔径が縮瞳を起こすという機構は、立体映像の時のみならず、実物体でも起きていた。これは前章である第3章の実験結果と矛盾せず、すなわち立体映像視聴時に水晶体調節と輻輳運動の間に矛盾は存在しないという結論を得た。そして実物体と、それと同じ動きをする立体映像を使用した実験では水晶体調節は実物注視時でも正確に焦点を対象物に合わせられるわけではなく、立体映像でもそれは同様であり、その原因として、被写界深度が深くかかっているのではないかということが示唆された。

そして、第5章では、立体映像技術を使用した応用事例の研究として、通常のテレビやモニターを使用する立体映像だけでなく、持ち運びが容易かつ裸眼で立体視が可能な、モ

モバイル情報端末を使用して、それに立体映像や立体表示の文字を表示したときの視認性と可読性の評価を行った。その結果、裸眼で視聴し、なおかつ画面がテレビなどに比較して小型のものであっても、従来までのものと変わらず、十分に立体映像の視聴は可能であるということがわかり、また立体文字の実験においては従来の 2D 表示のものとは変わらない可読性が期待できるという結果を得た。モバイル情報端末は使用時にその角度が頻繁に変化することが想定される。その状況を想定しディスプレイの角度を変化させた時の立体視の可否と視認性を評価したところ、仰角の変化に対しては比較的立体視が可能な範囲は広く、頑健性が見られたものの、偏角、回転角が変化したときは立体視困難を容易に惹起し、これらの角度の変化の影響が大きいことを明らかにした。

本研究では、安全、快適な立体映像技術のための原則や運用のガイドラインの確立のため、立体映像による悪影響の原因の解明に主眼を置いて研究を進めてきた。その結果、悪影響の原因としてよく取り上げられる「水晶体調節と輻輳運動の不整合」が存在しないということを明らかにすることができた。悪影響の原因の解明には至っていないが、「調節と輻輳の不整合」のため、映像や画像間の左右像の視差は 1° 以内に収めるべきである、という 3D コンソーシアムの安全ガイドラインの記載は、本論文で明らかになった事実によるならば、考慮する必要のないものとなる。これは、立体映像コンテンツの魅力という観点から考えたとき、映像の飛び出し量を増加させても問題はないといったように、その作成基準に大きく影響することとなるだろう。

2. 今後の課題

本研究により、立体映像視聴時に「調節と輻輳の不整合」は存在しないだろうということが判明した。立体映像視聴による悪影響の原因の、そのほかの原因として考えられているものに、映像のクロストークや左右像のコントラスト差などがあるが、近年、要因として影響が大きいと言われるものに、遠近感の消失や運動視差の欠如が挙げられるようになった。それらの要因についてはまだ十分な研究も行われていないのが現状であるので、本研究の軸であった調節と輻輳に瞳孔径を加えたさらなる分析を進めるとともに、そのような要因についても十分に考慮し、立体映像による悪影響の原因の解明、引いては開発や運用のガイドラインといったものの正しい構築へ貢献していきたい。

謝辞

本研究にあたってご指導いただいた，指導教授である宮尾克先生に感謝の意を表します。また，副指導教員としてご指導頂いた石井克哉先生，並びに，ご指導頂いた外山勝彦先生に深く感謝致します。

また，実験の構築や論文誌の執筆にあたって，多くの的確なご助言をしていただいた名古屋産業科学研究所の松沼正平氏，名古屋文理大学の長谷川聡教授，福井大学の高田宗樹准教授，神戸女子大学の森雅子准教授に心よりお礼申し上げます。

この度の論文を執筆するに当たり，名古屋文理大学の長谷川旭氏には多々ご助言していただきました。心より厚くお礼を申し上げます。

研究室の秘書である長谷川順子さん，細野敦子さんには，海外出張や研究資料の購入などの経費の管理などでひとかたならぬお世話になりました。ありがとうございます。

そして，本研究は実験に被験者として御協力くださった多くの関係者の皆様には，感謝の念に堪えません。

何より，共に実験をしたり，ゼミでの討論など，多くの支えをくれた同じ研究室の学生並びに院生の皆様に，ここへ記載して感謝の意を表します。

発表実績と関連する章

1. 学術論文

- 1) Tomoki Shiomi, Hiroki Hori, Satoshi Hasegawa, Hiroki Takada, Masako Omori, Yasuyuki Matsuura, Hiromu Ishio, Akira Hasegawa, Tetsuya Kanda, and Masaru Miyao
Simultaneous Measurement of Lens Accommodation and Convergence to Real Objects,
FORMA Special Issue 2013 (in press) 第2章
- 2) 塩見友樹, 堀弘樹, 長谷川聡, 高田宗樹, 大森正子, 松浦康之, 石尾広武, 長谷川旭, 神田哲也, 宮尾克
実物体と2D映像, 3D映像を用いた水晶体調節と輻輳運動の長時間同時測定
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.2, pp.139-148, 2011. 第3章
- 3) 塩見友樹, 堀弘樹, 佐野峻太, 丹羽南, 宮尾克
モバイル端末における視認性評価 - 裸眼方式の立体映像の認知と立体文字の可読性 -
モバイル学会誌, Vol.1, No.2, pp.93 - 99, 2012. 第5章

2. 国際会議 (査読つき)

- 1) Tomoki Shiomi, Hiromu Ishio, Hiroki Hori, Hiroki Takada, Masako Omori, Satoshi Hasegawa, Shohei Matsunuma, Akira Hasegawa, Tetsuya Kanda, and Masaru Miyao
Simultaneous Measurement of Lens Accommodation and Convergence to Real Objects,
HCII2012, Orlando, USA, pp.306-314, 2011/7/11 第2章
- 2) Tomoki Shiomi, Hiroki Hori, Keita Uemoto, and Masaru Miyao
Simultaneous Measurement of Lens Accommodation and Convergence -Real objects, 2D vision and 3D vision-
VIMS2012, Las Vegas, USA, 2011/9/22 第3章

- 3) Tomoki Shiomi, Hiroki Hori, Keita Uemoto, Akira Hasegawa, and Masaru Miyao
 Visibility Evaluation of 3D Mobile Devices
 -perception of Eyeglass-free Stereoscopic
 Vision and Readability of 3D Characters-
 IMQA2011, Kyoto, Japan, pp.63-68, 2011/10/5 第 5 章
- 4) Tomoki Shiomi, Masaru Miyao, Hiroki Hori, Keita UEMOTO, Akira Hasegawa, Masako Omori, Satoshi Hasegawa, Hiromu Ishio, and Hiroki Takada
 For 3D Displays, Lens Accommodation is Variable
 and it is Consistent with Convergence
 IVAPP2012, Roma, Italy, pp.126-129, 2012/2/26 第 3 章
- 5) Tomoki Shiomi, Hiroki Hori, Keita Uemoto, Masaru Miyao, Hiroki Takada, Satoshi Hasegawa, Masako Omori, Tomoyuki Watanabe, and Hiromu ishio
 Comparison of simultaneous measurement of lens
 accommodation and convergence in natural vision and 3D vision
 SID2012, Boston, USA, pp.1178-1181, 2012/6/7 第 4 章
- 6) Tomoki Shiomi, Masaru Miyao, Takumi Ohashi, Satoshi Hasegawa, Masako Omori, Hiromu Ishio, and Hiroki Takada
 Lens Accommodation for 3D Display is not
 Consistent with Display and Synchronize to Convergence
 3DSA2012, Shinchu, Taiwan, pp.466-470, 2012/6/27 第 3 章
- 7) Tomoki Shiomi, Keita Uemoto, Takehito Kojima, Satoshi Hasegawa, Masako Omori, Hiromu Ishio, Hiroki Takada, and Masaru Miyao
 Comparison of Simultaneous Measurement While
 Viewing Real Objects and 3D Video Clips
 IVAPP2013, Barcelona, Spain, 2013/2/24 (発表予定) 第 4 章
- 8) Tomoki Shiomi, Keita Uemoto, Takehito Kojima, and Masaru Miyao
 Comparison of Simultaneous Measurement of
 Lens Accommodation and Convergence in Viewing
 Natural and Stereoscopic Visual Target
 ACHI2013, Nice, France, 2013/2/28(発表予定) 第 4 章