

3D テレビおよび 3D 端末の使用における快適な視環境（継続）

代表研究者 柴田 隆 史 東京福祉大学 教育学部 准教授
共同研究者 河合 隆 史 早稲田大学 基幹理工学部 教授

1 はじめに

3D 映画や 3D テレビ、3D 立体視ゲームなどの登場は、映像メディアを日常的に利用する現代の社会生活に大きな影響を与えると予想される。なぜならば、今までは映画館や博覧会へ行くなどといった特定の状況あるいは選択的な状況においてのみ、立体映像を見る機会があったのに対し、これからは日常生活における映像メディアとして立体映像が利用されようとしているからである。加えて、3D テレビや 3D 携帯ゲーム機の発売により、大人だけでなく子どもも立体映像を見る機会が増えたことも、大きな変化であると言えるだろう。

3D 端末の立体映像観察では、視距離が短いために輻湊と調節に対する要求量が大きいが、3D 映画や 3D テレビなどの視環境と大きく異なる点である。そのため、観察者それぞれの視覚特性が、観察による眼精疲労や見やすさ、快適性に影響を与えることが考えられる。また、一般に観察者の視覚特性や映像に対する好みなどはさまざまであるが、立体映像の呈示原理や技術的理由により、スクリーン（ディスプレイ）に映し出された同一の映像を全ての人が見ることになる。映画のような多人数で同一映像を見る場合と異なり、モバイル機器のように個人で視聴する場合には、ディスプレイにおける表示の仕方を観察者が見やすいように変えることができる。実際に一部の立体視ゲームには、映像の奥行き幅や位置を調整できるものがある。例えば、画面よりも奥に沈んで再生される立体映像を好むようであれば、再生される立体映像空間を全体的に奥方向へシフトさせることで快適な視聴を実現できる。

本研究では、近距離観察の影響が大きくなる 3D 端末に特に注目して、観察者の視覚特性と、眼精疲労や見やすさとの関係性について検討を行った。2011 年度は、5 分間の映像観察による効果を検討し、外斜位の程度が大きい観察者は、手前に飛び出す立体映像の観察で眼精疲労の訴えが強くなる傾向があり、内斜位あるいは外斜位の程度が小さい観察者は、映像が奥に再生される立体映像観察の方が眼精疲労の訴えが強くなる傾向にあることが分かった。そして、継続年度（2012 年度）は、観察時間の違いに注目して、観察による眼精疲労や快適性について検討を行った。

2 3D 端末による立体映像の観察

2-1 立体映像観察時の輻湊と調節

3D 映画をはじめとして 3D テレビや 3D 端末など、現在広く使われている立体ディスプレイシステムには、輻湊と調節の奥行き手がかりが一致しないという問題がある（図 1）。輻湊は再生される立体像の位置に働くのに対し、水晶体の調節は画像呈示面近傍に固定されるために、輻湊距離と調節距離に不整合が生じる。そのため、不適切な立体映像観察においては眼精疲労や頭痛が発生することが知られている[1-4]。

輻湊と調節の観点から考えた場合、視距離の違いによっても映像観察の快適性が異なり、3D 端末のような短い視距離では、立体像が画面よりも奥に再生される方が視覚負担は少ないと報告されている[5]。また、輻湊と調節の不整合が大きくなると、眼精疲労の程度も大きくなり[5]、調節などの生理反応も異なること[6]が報告されている。

立体映像観察により生じる眼精疲労の原因は、輻湊と調節の不整合だけではなく他にも多くの要因がある[3]。また、3D ディスプレイを利用する環境によって、視距離や画面サイズ、3D の観察方式、観察姿勢など様々な状況が変わるため、3D 技術が普及してきた昨今においては特に、実用場面に即した評価実験が必要とされる。そのため本研究では、輻湊と調節の不整合の違いから実験条件を設定し、近距離観察の影響が大きくなる 3D 端末を対象とした実験を行った。

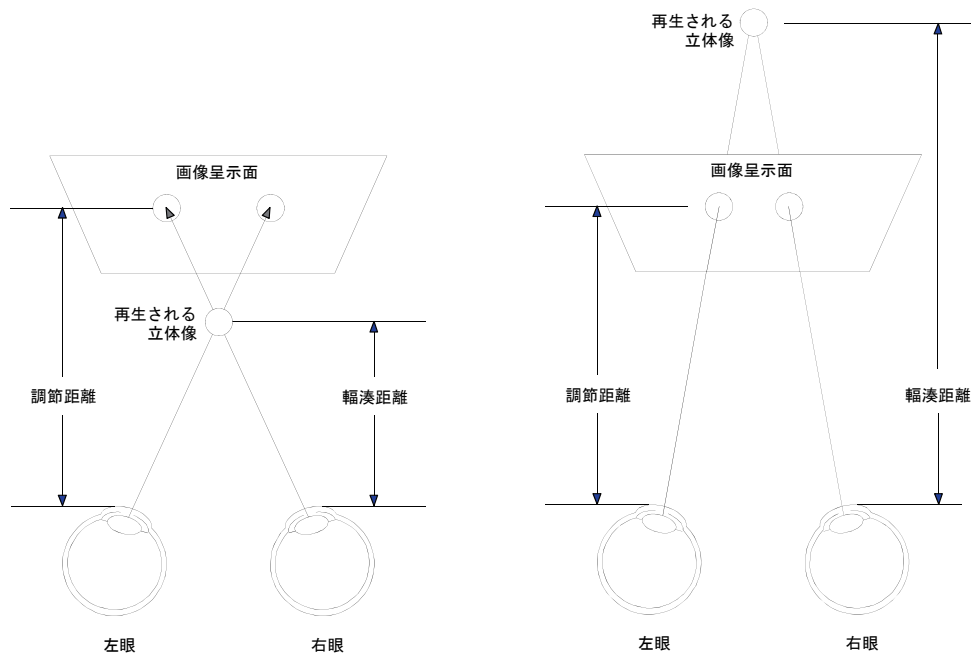


図1 立体映像観察時の輻湊と調節の不整合

(左：立体像が画像呈示面よりも手前に再生される場合、右：画像呈示面よりも奥に再生される場合)

2-2 立体映像観察と斜位

3D 端末での映像観察の大きな特徴は、他のディスプレイと比較して視距離が短いことであり、通常 30cm 程度である。視距離が短いことで近方視の維持を強いられ、映画やテレビなどの視聴と比べて眼精疲労が生じやすい視環境であると言える。本研究では、視覚特性の一つとして観察者の斜位に注目した。斜位とは融像を妨げた場合の眼球の偏位であり、一眼の視線が他眼の視線に対して外側に偏位していたら外斜位、内側に偏位していたら内斜位となる。偏位がない場合は正位となる (図 2)。近見では、一般に外斜位の傾向を示すことが知られているが[7]、外斜位の程度には個人差があり、内斜位を示す人もいる。

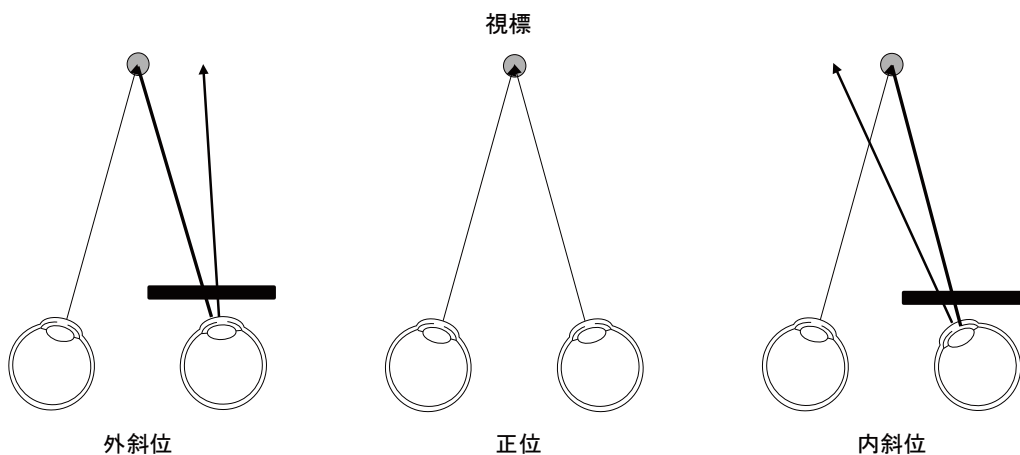


図2 内斜位と外斜位

3 観察時間の違いによる 3D 端末の快適性に関する実験

3-1 目的

テレビや映画での視聴と比較して、モバイル端末での視聴時間は一般に短いと思われる。しかし、近距離での映像観察であるため、短時間でも疲労が生じやすく、また、ごく短時間であったとしても、立体像の再

生位置や観察者の視覚特性により疲労が生じやすいことが考えられる。本研究の目的は、観察者の視覚特性と、眼精疲労や見やすさとの関係性について観察時間の違いから検討することで、3D 端末の快適な視環境を実現するための知見を得ることである。

3-2 方法

(1) 実験参加者

実験には、19～24 歳までの 31 名が参加した。ティトマス・ステレオテストにより、参加者全員の両眼立体視機能が正常であることを確認した。また、普段、眼鏡あるいはコンタクトを処方している人は、その状態で実験に参加した（裸眼 10 名、眼鏡 5 名、コンタクト 16 名）。

(2) 実験環境

3D 端末として、立体映像表示が可能なスマートフォン（SH-12C, SHARP）を用いた。ディスプレイサイズは 4.2 インチ、解像度は 960×540 ドットであり、画面が横長になるように 3D 端末の向きを設定した。実験は、実際の利用形態に即して、ディスプレイ本体が見えるように完全な暗室でなく薄暗い状態で行った。観察者の頭部をあご台により固定し、自然に視線が下向きになるようにした。視距離は 30cm であり、左右映像の分離が最も良くなるように映像観察ごとに調整した。

(3) 呈示刺激と実験条件

呈示刺激には、3D テレビ向けに制作された文化遺産をテーマとした 3D コンテンツを選定した。なお、映像は使用する 3D 端末の解像度に合わせた。実験での視環境に即して視差分析を行った結果、画面内の視差量は画面よりも手前に 0.5 度から奥に 0.3 度の範囲に分布していた。視差量とは、両眼視差の程度を平面映像との差により表したものであり、視差量の数値が大きいほど輻湊と調節の不整合が大きいことを示す。

実験条件は、観察時間 3 条件と映像再生位置 2 条件の組み合わせによる 6 条件を設定した。観察時間は、3 分間、9 分間、15 分間であった。時間経過に伴う心理的バイアスを避け、観察時間による差異を客観的に捉えるために、それぞれの観察時間による実験を独立させて、異なる日に実施した。

一方、映像再生位置の条件は、呈示刺激の左右映像を水平方向にシフトさせることで、輻湊と調節の不整合の違いによる二つを設定した。手前条件は立体映像が常に画面よりも手前に再生される条件であり（図 1 左）、奥条件では常に画面よりも奥に再生される（図 1 右）。手前条件、奥条件のいずれにおいても、実験の観察環境において視差量 1 度に相当する分をシフトさせた。元の映像の両眼視差は、交差・同側方向の両方で 1 度以内の範囲にあるため、手前条件では立体像が常に画面よりも手前に再生され、奥条件では常に画面よりも奥に再生された。図 3 に、手前条件と奥条件において映像が再生される範囲を示す。ただし、それは映像の観察時間において常にその範囲に立体映像が再生されていたことを表すのではなく、全映像を通しての立体像の再生範囲の幅を表している。立体映像の再生範囲は映像シーンにより異なっているため、時系列で変化する。

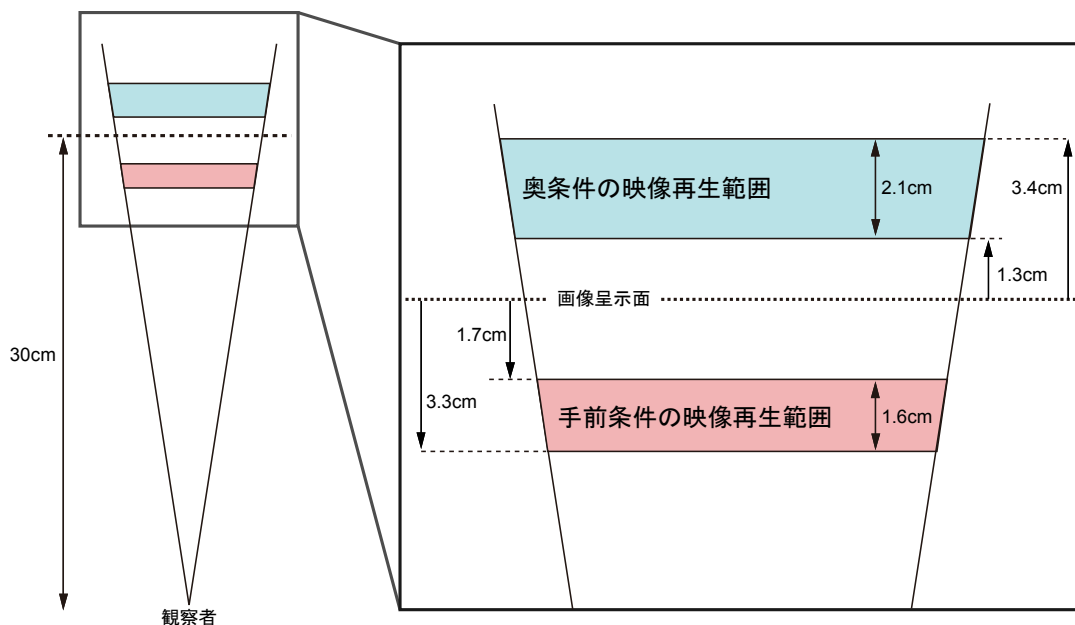


図 3 条件における立体映像の空間的再生範囲

(4) 手続き

実験参加者に対して実験内容や測定する項目、実験データの取り扱いなどの説明をして、実験に参加するインフォームドコンセントを確認した。そして、ティトマス・ステレオテストによる両眼立体視検査を行い、立体視機能に問題がないことを確認した。次に、視距離 30cm における斜位を modified Thorington method[8] を用いて 3 回測定し、その平均値を観察者の近見斜位とした。また、主観評価の質問項目について説明し、内容を理解させた。

次に、実験における映像観察について説明と確認を行った。その目的は二つあった。一つは、3D 端末による映像観察に慣れることであり、もう一つは、実験で用いる映像を一度見させることであった。それにより、参加者が最初の実験条件のときに初めてその映像を見るという状況を回避した。そのため、その観察練習では、実験で使用するのと同じ映像を見せたが、左右映像の視差シフトを行っていない映像を用いた。映像観察の練習中には、適切な位置で映像が正しく見えるため実験中は頭を動かさずに映像を見ることと、映像観察中は画面内を自由にみてよいことを説明した。また、参加者が立体映像を適切に見られていることを確認した。

実験の説明や準備が終わった後には休憩をとり、実験参加者に練習による疲れが残っていないことを確認したうえで、実験に移行した。観察時間および観察映像の順序はカウンターバランスを考慮した上で無作為に決められた。1 回目の映像観察後には、その観察時間の 2 倍の時間の休憩を入れ、その後に 2 回目の映像観察をさせた。1 回目と 2 回目のそれぞれの観察の直後には、“目が疲れている”という自覚症状に対して、その程度を 7 件法で回答させた。加えて、2 回の映像観察の終了後には、2 回の映像観察を比較する、以下の 5 つの質問に回答させた。

- 質問 1: どちらの映像観察の方が目が疲れませんか？
- 質問 2: どちらの映像の方が見やすかったですか？
- 質問 3: どちらの映像の方が空間的な広がりがありましたか？
- 質問 4: どちらの方が自然な立体映像に見えましたか？
- 質問 5: どちらの映像を好みますか？

質問 4 における“自然な”という言葉の定義はあえて事前に説明せずに、その解釈については実験参加者に判断させた。そして、実験の最後に行うインタビューにおいて、どのような根拠で自然さを判断したのかを質問した。実験の最後に行ったインタビュー項目は以下の 4 つであった。

- 項目 1: 目の疲れに関して何かあれば教えてください。
- 項目 2: 映像の奥行き感、立体感について何かあれば教えてください。
- 項目 3: 4 番目の質問において、“自然な立体映像”とはどのように考えましたか？ 自然な立体映像と考えた根拠を教えてください。
- 項目 4: 最後に、何か感想や意見などがあれば教えてください。

3-3 結果

(1) 観察直後の眼精疲労

それぞれの観察直後に回答した自覚症状“目が疲れている”の結果を図 4 に示す。図において、数値が大きいほど眼精疲労の程度が大きいことを表している。手前条件と奥条件のいずれも、観察時間が長くなるにしたがい、眼精疲労の程度が大きくなった。また、各観察時間に注目すると、3 分間の観察時間では条件間での差はみられなかったが、9 分間、15 分間と観察時間が長くなると、手前条件の方が眼精疲労の程度が顕著に大きくなった。

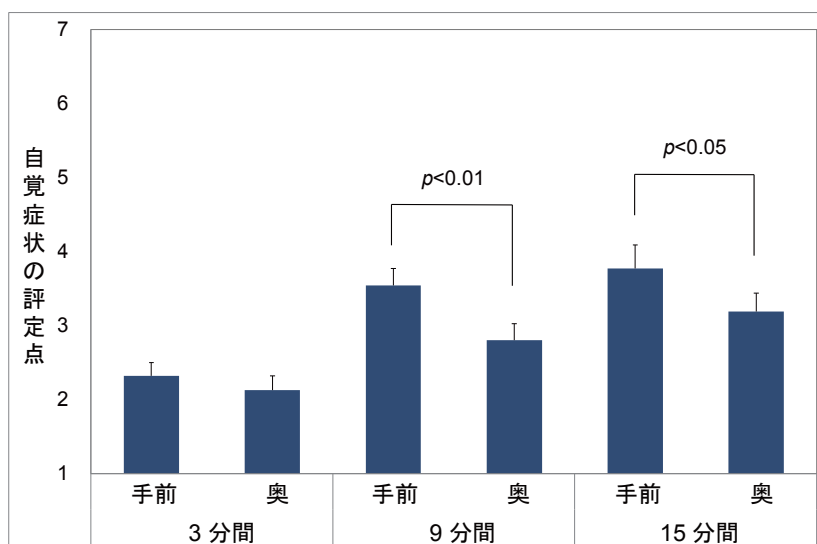


図4 観察直後の眼精疲労の結果

(2) 手前条件と奥条件を比較した評価

図5に、手前条件と奥条件の二つを観察した後に回答した、比較評価の結果を示す。縦軸において、0はいずれの条件も同程度であること、正の値は奥条件に当てはまること、そして、負の値は手前条件に当てはまることを示している。質問項目3の空間の広がりに関しては、観察時間が長くなっても、手前条件と奥条件に対する評価は同程度で変わらなかった。しかし、その他の項目においては、3分間の観察では条件間にあまり差異がみられなかったが、9分間と15分間の観察になると差が出てくる傾向がみられた。時間の延長に伴い、手前条件の方が眼精疲労を感じ、奥条件の方が見やすく好まれる傾向にあった。

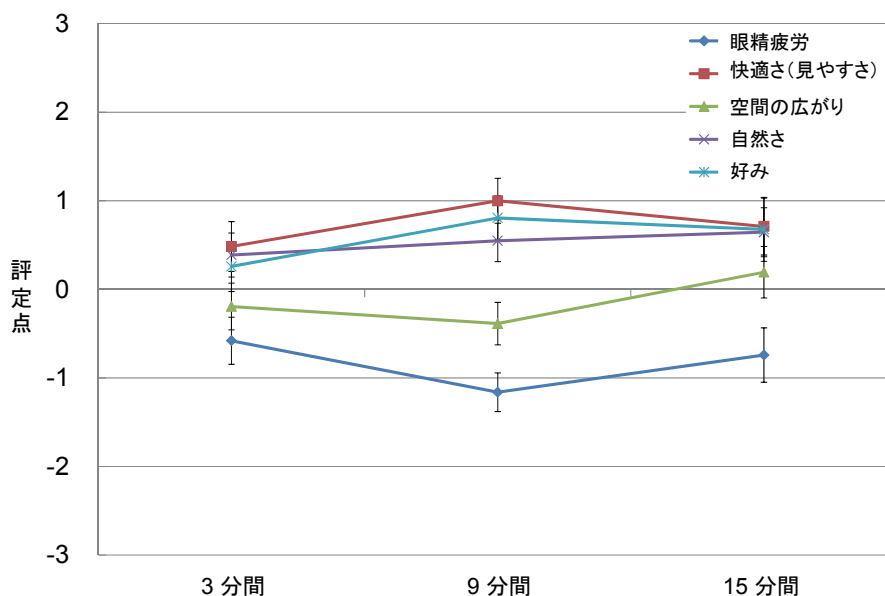


図5 手前条件と奥条件を比較した評価結果

(縦軸において、0は手前と奥の条件で同程度であること、正の値は奥条件に当てはまること、負の値は手前条件に当てはまることを示す。)

(3) 観察者の近見斜位と主観評価

図6に、観察者の斜位と質問5(好み)の回答との関係性をプロットした結果を示す。横軸は視距離30cmでの水平斜位であり、負の値は外斜位であることを表す。つまり、負の値が大きくなるほど外斜位の程度が大きくなることを示す。なお、参加者1名を除いた全員が外斜位であった。縦軸は質問5の回答であり、0

は2条件間で同程度であること、4より大きい値は奥条件の方が当てはまることを、逆に、4より小さい値は手前条件の方が当てはまることを表している。

3分間の観察においては、外斜位の程度が大きい観察者は、奥に再生される立体映像の観察を好む傾向であった。また、内斜位あるいは外斜位の程度が小さい観察者は、手前に飛び出す映像の観察を好む傾向であった。相関分析の結果、斜位と評定点との間に弱い相関傾向がみられた ($r=-0.35, p<0.10$)。一方、9分間と15分間の観察においては、そのような傾向はみられなかった。

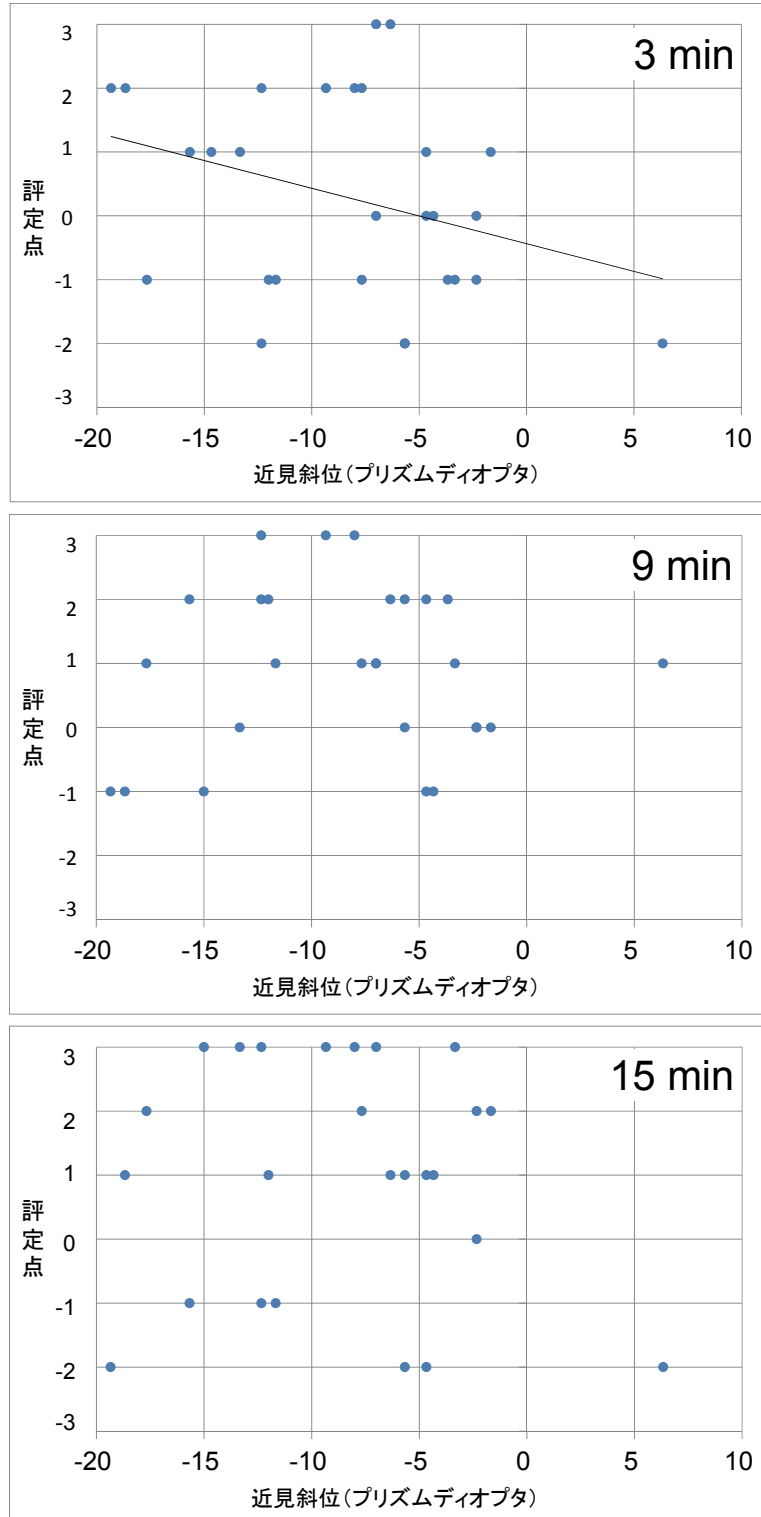


図6 観察者の斜位と質問5（映像の好み）の関係

(4) インタビュー

項目1の眼の疲れに関する回答では、「焦点を合わせるのが疲れる」、「集中する必要がある疲れ」などといった意見が回答されたが、3分間の観察では疲労感を訴える参加者は少なかった。また、手前条件の時に焦点を合わせづらいと回答する参加者もいれば、奥条件の時に焦点を合わせづらいと回答する参加者もあり、眼の疲れへの回答は人によって異なっていた。

項目2の奥行き感に関する回答で特徴的だったのは、手前条件と奥条件による奥行きや見やすさの違いを感じながらも、立体映像の再生位置が異なっていることが分からなかった参加者が複数いたことであった。

項目3の立体映像の自然さに関する回答からは、2011年度に行った実験と同様に、自然視の状態や見え方に近いものを“自然な立体映像”と判断していて、特に、映像観察における違和感や不鮮明さが、立体映像の自然さを低下させる要因となっていることが分かった。具体的には、書き割り現象（被写体の立体感が乏しく、板のように薄く感じられる現象）やクロストーク（左右映像の不適切な漏れであり、結果として二重像に見えてしまう）、映像の歪みなどにより、映像に違和感があり不自然だと感じたという回答があった。また、立体感がわざとらしくなく、適度な立体感であることが自然な3D映像とする意見や、奥に広がっている映像を自然であるとする意見もあった。

4 まとめ

本研究では、近距離での立体映像観察に注目して、観察者の斜位と快適性との関係について検討を行った。具体的には、立体映像が常に画面よりも手前に再生される条件と、逆に常に画面よりも奥に再生される二つの実験条件を設定して、観察時間の違いから、眼精疲労や見やすさについて主観評価を行った。そして、その結果と観察者の近見斜位との関係性を検討した。

実験の結果、観察直後に回答した眼精疲労の自覚症状からは、手前条件と奥条件のいずれも、観察時間が長くなるにしたがい、眼精疲労の程度が大きくなることが分かった。これは、容易に予想できる実験結果と言えるだろうが、本実験においては、1回の長い映像観察の途中で何度か評価する方法ではなく、各観察時間による実験を独立させることで、観察者の心理的バイアスを排除した。そのため、本実験の結果は、立体映像の観察時間が長くなると眼精疲労の程度も大きくなることを客観的に示していると考えられる。また、各観察時間に注目すると、3分間では手前条件と奥条件の間での差はみられなかったが、9分間、15分間と観察時間が長くなると、手前条件の方が眼精疲労の程度が顕著に大きくなることが分かった。手前条件の方が疲れやすいことはこれまでの研究と同様の結果であるが、本研究により、観察時間が長くなるとそうした傾向が出るということが分かった。

手前条件と奥条件を比較した評価の結果からは、一番短い3分間の観察においてのみ、外斜位の程度が大きい観察者が、奥に再生される立体映像の観察を好む傾向にあることが分かった。また、内斜位あるいは外斜位の程度が小さい観察者は、手前に飛び出す映像の観察を好む傾向であった。交差性視差の立体映像を観察する場合は、融像するために映像呈示面よりもさらに輻湊する必要があるため、外斜位の程度が大きい観察者はそれが見づらさに関与し、好みへの判断に影響したと考えられた。観察時間が長くなった場合には、観察自体による眼精疲労の程度が大きくなり、手前条件と奥条件を比較した際の差異が小さくなったと考えられる。

本研究により、観察時間と観察者の斜位の程度により、3D端末での立体映像視聴の安全性や快適性が異なることが示唆された。また実験の結果は、実用場面において、ユーザは自分の視覚特性に合わせて立体映像の再生範囲を調整することで、快適な立体映像視聴を実現できることが示唆している。3D端末を利用した立体視ゲームの中には、自分で奥行き位置を調整できるものもある。現状ではユーザが自分の好みや経験で調整をしているが、視覚特性やプレイ時間を考慮することでユーザごとに快適な視環境を提供することができるかもしれない。本研究でも示されたように、眼精疲労や見やすさは観察者により感じ方が異なり、そしてばらつきも大きいいため、近距離観察を要する3D端末の使用ではユーザごとの立体感調整が必要になるであろう。

【参考文献】

- [1] Hoffman, D. M., Girshick, A. R., Akeley, K., & Banks, M. S. (2008). Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 8(3):33, 1–30.
- [2] Lambooi, M., IJsselstein, W., Fortuin, M., & Heynderickx, I. (2009). Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: A review. *Journal of Imaging Science and Technology*, 53, 1–14.
- [3] Kooi, F. L., & Toet, A. (2004). Visual comfort of binocular and 3D displays. *Displays*, 25, 99–108.
- [4] Ukai, K., & Howarth, P. A. (2008). Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories, and observations. *Displays*, 29, 106–116.
- [5] Shibata, T., Kim, J., Hoffman, D. M., & Banks, M. S. (2011). The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *Journal of Vision*, 11(8):11, 1–29.
- [6] Inoue, T. & Ohzu H. (1997). Accommodative responses to stereoscopic three-dimensional display. *Applied Optics*, 36(19), 4509-4515.
- [7] Tait, E. F. (1951). Accommodative convergence. *American Journal of Ophthalmology*, 34, 1093–1107.
- [8] Rainey, B. B., Schroeder, T. L., Goss, D. A. & Grosvenor, T. P. (1998) Inter-examiner repeatability of heterophoria tests, *Optometry and vision science*, 75(10), 719-726.

〈発表資料〉

| 題 名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|---|------------|
| モバイル 3D ディスプレイにおけるユーザの眼位と快適性 | 日本人間工学会第 53 回大会講演集, 第 48 巻・特別号 | 2012 年 6 月 |
| モバイル機器における立体映像の快適性 | 映像情報メディア学会年次大会, 14-2 | 2012 年 8 月 |
| Comfortable stereo viewing on mobile devices | Electronic Imaging 2013, Proc. of SPIE 8648 | 2013 年 2 月 |
| Visual Comfort and Viewing Time of S3D Content on Mobile Devices | SID Symposium, SID 2013 DIGEST | 2013 年 5 月 |
| モバイル型 3D ディスプレイにおける立体映像の見やすさと好み | 日本人間工学会第 54 回大会講演集, 第 49 巻・特別号 | 2013 年 6 月 |