

3D テレビおよび 3D 端末の使用における快適な視環境

代表研究者 柴田 隆 史 早稲田大学 国際情報通信研究センター 招聘研究員

1 はじめに

近年、3D 映画や立体視ゲームが次々と登場し、立体映像（3D）が新しい映像メディアとして普及してきている。特に、3D テレビや、スマートフォンや携帯ゲーム機などの 3D 端末の登場は、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ることも、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多いことが、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。そこで本研究では、近距離観察の影響が大きくなる 3D 端末に注目して、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。

2 3D 端末における立体映像観察

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]。

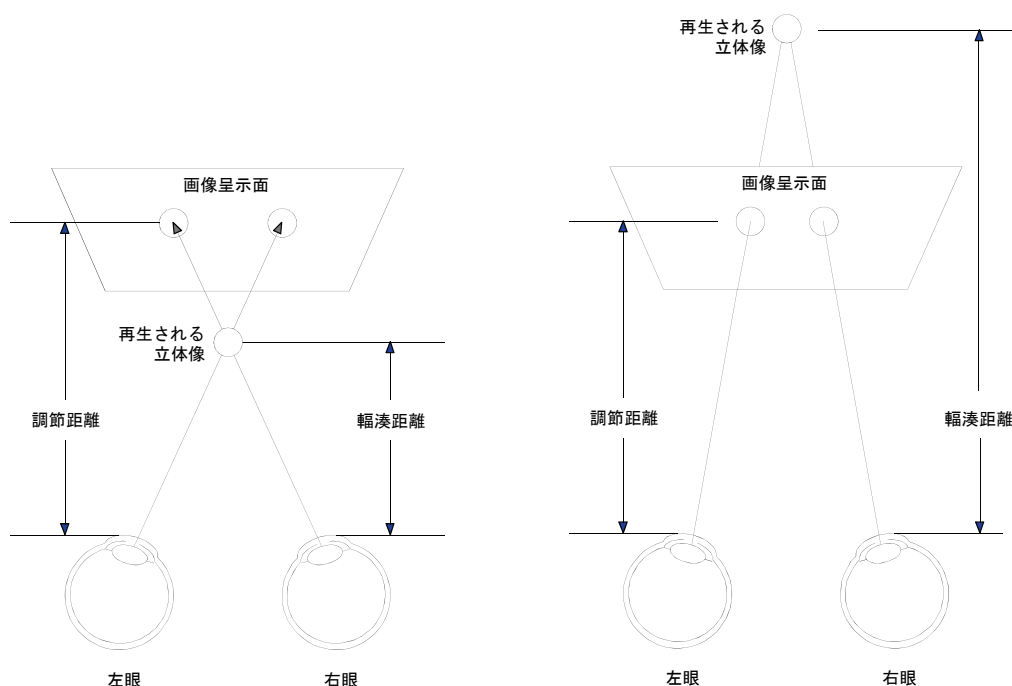


図 1 立体映像観察時の輻湊と調節の不整合

(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)

幅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、幅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、幅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。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、幅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。

2-2 3D 端末の動向

パララックスバリア方式を用いた裸眼 3D ディスプレイを備えた携帯電話 (SH251iS) が 2002 年に発売され、それ以降、立体映像を見られる 3D 端末が発売されている。特に 3D 映画や 3D テレビ番組が増えてきた 2010 年頃からは、スマートフォンの普及を背景として、高解像度 3D ディスプレイで 3D コンテンツを楽しむようになってきた。

表 1 にこれまで国内で発売された主な 3D 端末を示す。特徴として、年々、画面サイズが大きくなり、解像度も高くなってきていることが分かる。これは、一般の携帯電話やスマートフォンと同様の傾向であるが、3D 端末においては、その視環境の変化は快適性を変化させる要因となりうる。なぜならば、3D 端末は基本的に手で持って使うことが多く、画面サイズが変わっても視距離はあまり変化しないと思われるからである。立体像の再生位置は、視距離と画面上での左右映像のズレによって決まるため、視距離が同じであれば、画面サイズが大きくなることで、立体像は画面からより離れた位置に再生されることになる (図 1)。なお、裸眼 3D ディスプレイはその構造から適切な視距離が決定されるが、実際の視距離はユーザの判断により決定される。

表 1 3D 端末の画面サイズと解像度

機種名	発売年	画面サイズ	解像度 (ドット数)
SH251iS (シャープ)	2002	2.2 インチ	176×220
SH505i (シャープ)	2003	2.4 インチ	240×320
H001 (日立製作所)	2009	3.1 インチ	480×854
SH-03C (シャープ)	2010	3.8 インチ	480×800
SH-12C (シャープ)	2011	4.2 インチ	540×960
SH-06D (シャープ)	2012	4.5 インチ	720×1280

3 観察者の視覚特性と快適性に関する実験

3-1 目的

3D 端末の視環境は他のディスプレイと比較して異なる点が多いが、視距離が 30cm 程度と短いのが大きな特徴である。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、男性 35 名、女性 6 名の計 41 名が参加した。年齢の範囲は 18~24 歳であった。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 9 名、眼鏡 13 名、コンタクト 19 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。

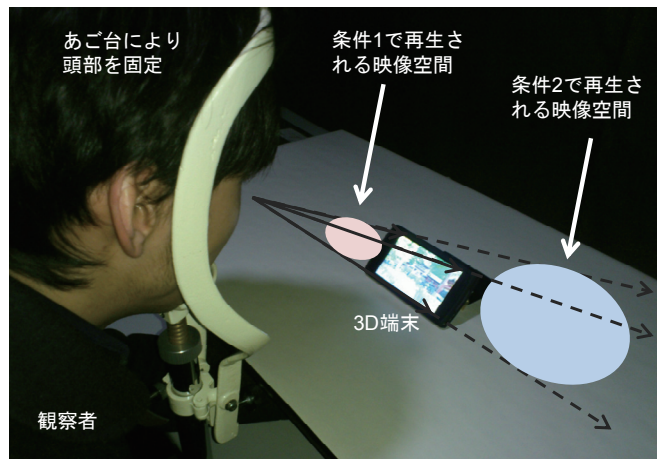


図2 実験環境と実験条件により再生される映像空間イメージ

(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、その中の5分間を用いた。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、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。条件1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)、条件2では常に画面よりも奥に再生される(図1右)。条件1、条件2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、条件1では立体像が常に画面よりも手前に再生され、条件2では常に画面よりも奥に再生された。図3に、条件1と2において映像が再生される範囲を示す。ただし、それは5分間の映像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、5分間の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。

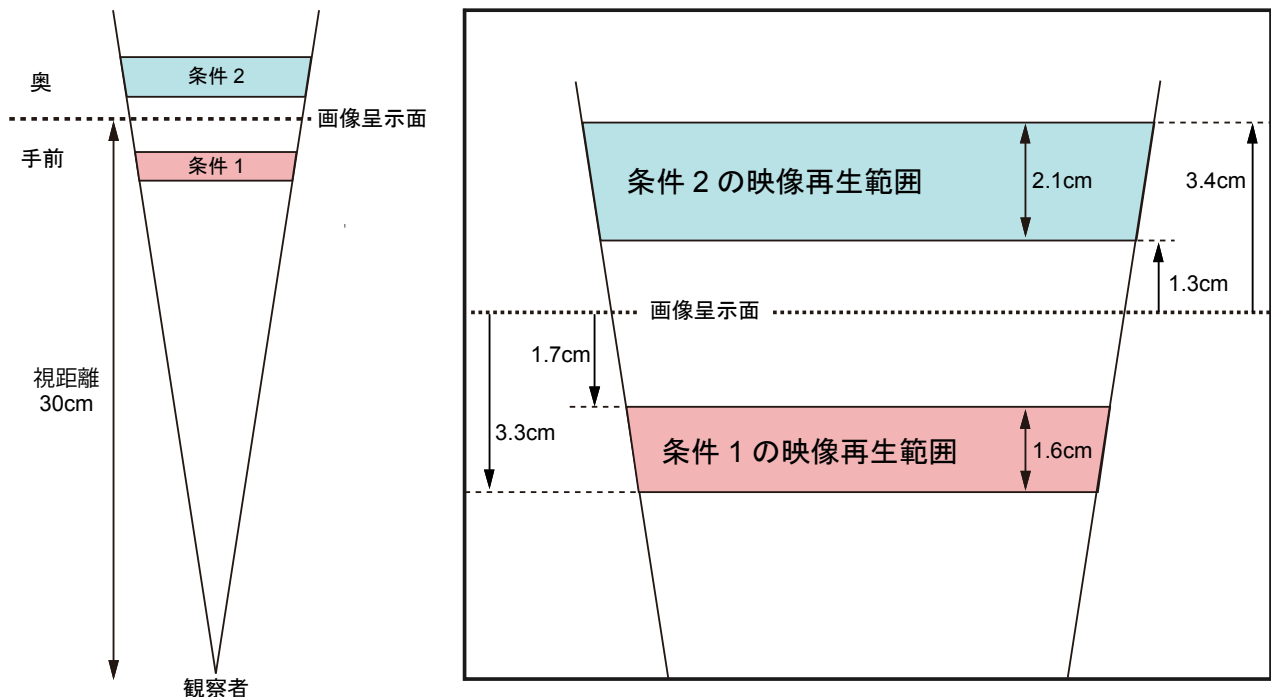


図3 条件における立体映像の空間的再生範囲

(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[7]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。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(exo)、内側に偏位していたら内斜位(eso)となる。もし偏位がない場合は正位(ortho)となる。近見では一般に外斜位になる傾向にあることが知られている[8]。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が、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。刺激呈示は 5 分間であり、観察する条件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 10 分間の休憩を入れ、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したか？
- 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下さい。
- 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 に示した。いずれの条件でも観察直後に目の疲れの自覚症状があったが、その程度は小さかった。また、条件間での差はみられなかった。

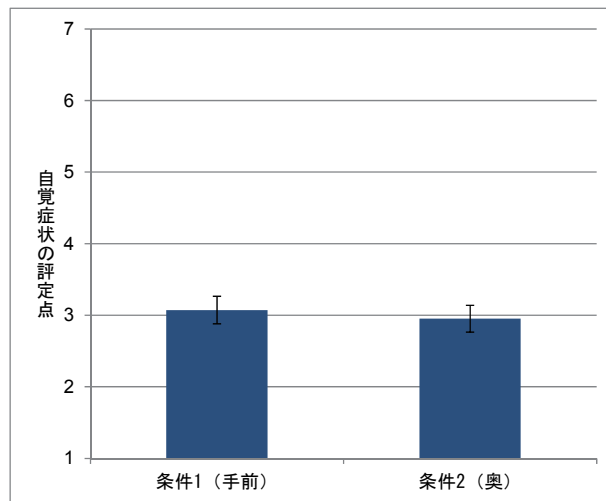


図4 観察直後の眼精疲労の結果

(2) 観察者の近見斜位と主観評価

図5に、観察者の斜位と質問1（眼精疲労）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1の回答であり、4の値は2条件間で同等であること、4より小さい値は条件1（手前）の方が当てはまること、逆に4より大きい値は条件2（奥）の方が当てはまることを表している。

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（条件1）で眼精疲労の訴えが強くなる傾向であった。また、内斜位あるいは外斜位の程度が小さい観察者は、映像が奥に再生される立体映像観察（条件2）の方が眼精疲労の訴えが強くなる傾向であった。相関分析の結果、斜位と評定点との間に弱い相関があった ($r=0.38, p<0.05$)。

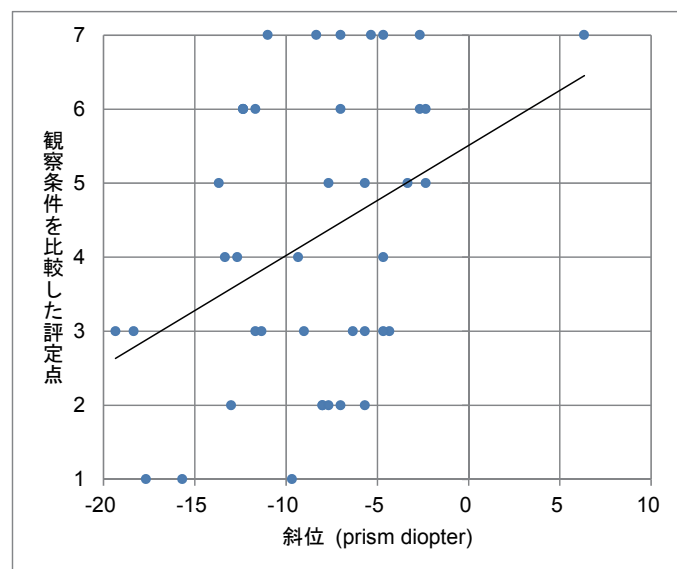


図5 観察者の斜位と質問1（眼精疲労）の関係

次に、観察者の斜位と質問2（見やすさ）の結果を図6に示す。横軸と縦軸は質問1と同様であり、4の値は2条件間で同等であること、4より小さい値は条件1（手前）の方が当てはまること、逆に4より大きい値は条件2（奥）の方が当てはまることを表している。外斜位の程度が大きい観察者は、映像が奥に再生される立体映像観察（条件2）の方が見やすいと感じる傾向であった。また、内斜位あるいは外斜位の程度が小さい観察者は、手前に飛び出す立体映像の観察（条件1）で見やすいと感じる傾向であった。相関分析の結果、斜位と評定点との間に弱い相関があった ($r=-0.34, p<0.05$)。

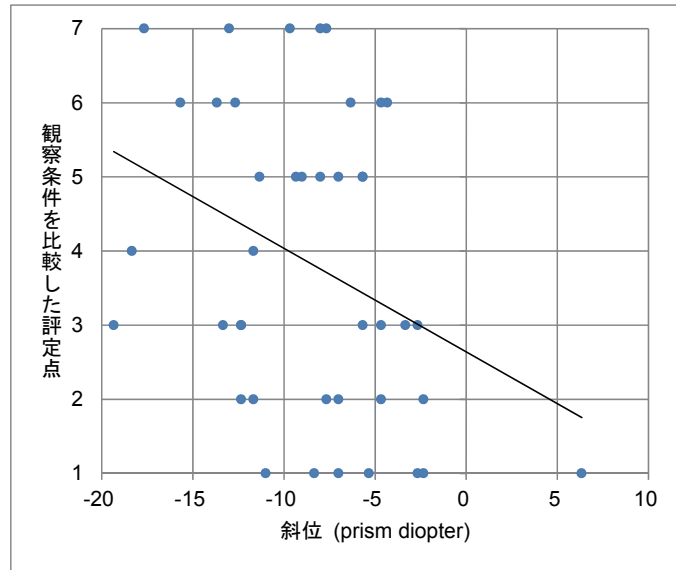


図6 観察者の斜位と質問2（見やすさ）の関係

観察者の斜位と質問3（空間の広がり）、質問4（自然さ）、質問5（好み）については、それぞれ相関はみられなかった（図7）。

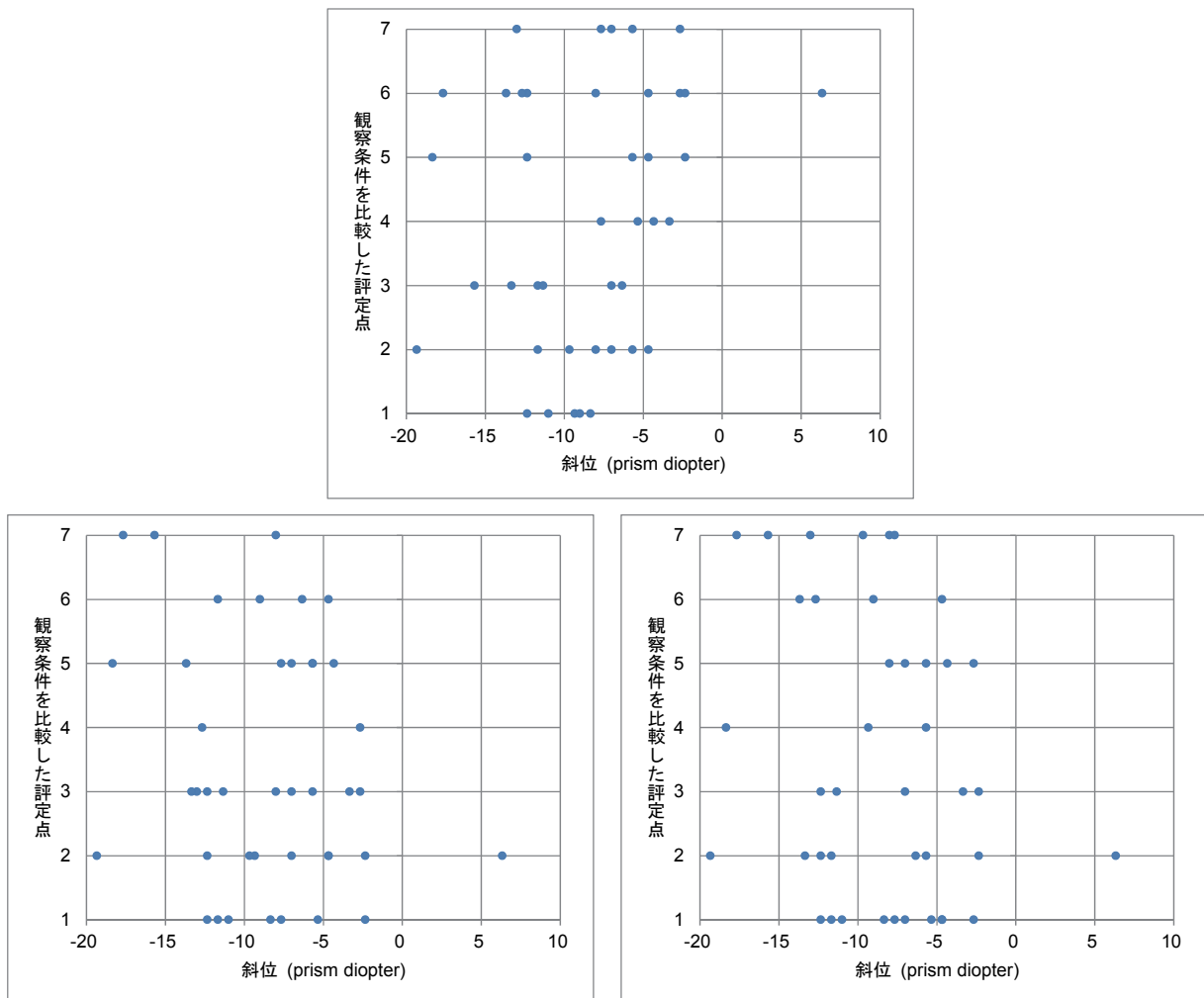


図7 観察者の斜位と質問項目との関係

上図：質問3（空間の広がり）、左下図：質問4（自然さ）、右下図：質問5（好み）

(3) インタビュー

項目 1 の目の疲れに関する回答では、「テレビよりも疲れる」、「長時間の視聴は辛そうだ」、「小さい画面に集中するので疲れた」などといった否定的な意見があった一方、「5分だったので疲れなかった」、「日頃から携帯型 3D ゲーム機を使っているので疲れていない」などといった意見もあったことが特徴であった。また、二つの観察条件を比較する主観評価の質問 1 に対応して、観察条件に対する目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、二つの観察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、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、“自然視に近い”という観点からは、実際に見る風景とどの程度近いかということを基準にしていた。映像の鮮明さに関しては、映像がくっきり見えたり、ぼやけずにきれいに見えていたりするかという映像品質が、自然さの基準となっていた。鮮明に見えることで映像が見やすくなり、それにより、自然に感じたという回答もあった。さらに、映像の立体感については、立体感が強いことが立体映像としては自然であるという意見と、立体感が少ない方が自然であるという両方の意見があった。また、前後関係の分かりやすさや距離感も、自然な立体映像と考える根拠としてあげられた。

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、5 分間の映像観察による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。

実験の結果から、外斜位の程度が大きい観察者は、映像が画面よりも手前に再生される、交差性視差の立体映像を見たときに眼精疲労の訴えが強く、見にくく感じていることがわかった。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眼精疲労や見づらさに関与したことが考えられた。また、内斜位あるいは外斜位の程度が小さい観察者は、逆に、映像が奥に再生される、非交差性視差の立体映像観察の方が眼精疲労の訴えが強く、見にくく感じていることがわかった。

本研究により、観察者の斜位により 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が自分の視覚特性に合わせて、快適な立体映像の再生範囲をあらかじめ調整できることを示唆している。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ばらつきが大きいいため、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。

今後の課題は、観察者の視覚特性と快適な立体映像再生範囲について詳細な検討を行うことである。近距離での立体映像観察の快適性は斜位の大きさだけで決まるものではないため、他の視覚特性や視環境の要因にも着目するなどして、実用場面で活用するための快適性の解明に取り組む。

【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] 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.
- [8] Tait, E. F. (1951). Accommodative convergence. *American Journal of Ophthalmology*, 34, 1093–1107.

〈 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