

3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度についての考察

鍛冶俊平^{†1} 渡辺弥寿夫^{†1}

近年、立体（3D）映像の研究が盛んに行われ様々な 3D コンテンツが徐々に増加している。しかし、3D 映像を見続けると疲労感を覚えることや、子供へ悪影響があるなど問題点がある。3D 映像は、2D 映像と比較して高い臨場感を得られ、人に対して負担の少ない 3D 映像を作成することが可能であれば、様々な用途に利用されることが期待される。3D 映像が人に対して負担になる原因として、実物体を見る場合と 3D 映像を見る場合で目の動きが異なることが挙げられる。実物体を見る場合、目のピント調節と目の動きを連動させるが、3D 映像を見る場合、目の動きは実物体を見る場合と同様だが、目のピントは表示された画面上付近に目の水晶体を操作して調節する必要がある。この差異によって疲労感を覚えさせていると考えられ、対策を講じる必要がある。対策の指針として、3D コンソーシアムにて「人に優しい 3D 普及のための 3D 安全ガイドライン」が 2010 年に改訂され公開されている。このガイドラインに沿って 3D 映像を作成することにより、人に優しい 3D コンテンツを作成することが可能となった。主な内容として、視差を制限し快適に閲覧することができる快適視差範囲を設定したことが挙げられる。3D 映像表示画面の横の幅に対して、視差の範囲を前後 2% に設定することで、過大な視差による目への負担を防ぎ快適な閲覧環境を提供する。しかし、快適視差範囲により視差を制限することで、奥行きを感じにくくなる場合がある。本稿では、奥行感度に着目し 3D 映像表示画面上の両眼視差による奥行感度について考察し、快適視差範囲内で奥行感を損なわず閲覧できる視差の設定法を提案し、実験を行い検証した。

Consideration about Depth Sensitivity for Binocular Parallax on 3D Videos View Screen

Shunpei Kaji^{†1} and Yasuo Watanabe^{†1}

Recently, three-dimensional (3D) contents gradually increase thereby 3D videos is researched. However, there are many problems such as that we are fatigued with viewing 3D videos if we view 3D videos continuously, additionally children have bad influence. 3D videos provide higher presence than 2D videos, moreover 3D videos are expected to use a lot if low burden of viewing 3D videos are made for human. One of reasons for burden is that viewing 3D videos is different from seeing real objects. When we see real objects, we synchronize oculomotor actions and focus of eyes. However, when we view 3D videos, oculomotor actions is same though we need to adjust focus using crystalline of eyes to around screen. We appear that this difference fatigue us with viewing 3D videos, thus we need to take a measures. The indicator of measures is revised, additionally this published in 3D consortium on 2010, which name is “3DC Safety Guidelines for Dissemination of Human-friendly 3D”. According to this guideline, we are able to make human-friendly 3D contents. The main content is setting the range of comfortable display to see comfortable by limiting parallax. Assuming range of display is set approximately 2% of 3D videos view screen’s width, our eyes are preserved from burden of viewing 3D videos by a lot of parallax, moreover we are offered comfortable view environments. However, we become difficult to feel depth in consequence limiting parallax using range of comfortable display. This paper considers to depth sensitivity by binocular parallax on 3D videos view screen to focus on “Depth Sensitivity”, additionally that propose settings parallax viewing without impairing depth feel in range of comfortable display, we experimented, moreover we inspected.

1. はじめに

近年、立体（3D）映像の研究が盛んに行われ様々な 3D コンテンツが徐々に増加している。しかし、3D 映像を見続けると疲労感を覚えることや、子供へ悪影響があること、さらに光の屈折状態や不同視、融像力、ピント調節力、眼位のずれなどの個人差によって 3D 映像の利点を時に得られないなど問題点がある。3D 映像は、2D 映像と比較して奥行きを感じることで高い臨場感や没入感を得られるという利点があり、個人差を可能な限り抑え、そして人に対して負担の少ない 3D 映像を作成することが可能であれば、様々な用途に利用されることが期待される。3D 映像が人に対して疲労感を覚えさせてしまう原因として、目を回転運動と目のピント調節の差異が挙げられる。3D 映像を閲覧す

る際、3D 映像が表示された画面上付近に眼球の水晶体を操作して調節する必要があるため、違和感が生じてしまう。この違和感を少しでも抑えるための対策の指針として、3D コンソーシアムにて「人に優しい 3D 普及のための 3D 安全ガイドライン」が 2010 年に改訂され公開されている[1]。記述されている項目の内容を以下に示す。

- 視聴者が行うべき確認事項
 - (1) 立体視の成立の確認
 - (2) 逆視防止のための確認
 - (3) 視聴姿勢や位置、時間
 - (4) 低年齢層への配慮
 - (5) 視聴中の注意喚起
- コンテンツ制作者が行う事項
 - (1) 開散方向の視差制限と融合限界の考慮
 - (2) 快適視差範囲の設定
 - (3) ディスプレイサイズと視差

^{†1} 金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology

(4) 2 視点のカメラ間の同一な設定および同期動作

コンテンツ制作者が行う事項(2)において、両眼の2視点における輻輳角の差である視差の範囲を制限し、快適に閲覧することができる快適視差範囲が設定された。3D映像表示画面の横の幅に対して、視差の範囲をおよそ2[%]に設定することで、過大な視差による目への負担を防ぎ快適な閲覧環境を提供する。しかし、この快適視差範囲は、3D映像の奥行き感について考慮されていない。3D映像の奥行き感、臨場感や没入感に深く関わっており、奥行き感について評価を行うことはとても重要である。そこで、奥行き知覚要因の効果の評価尺度として、式(1)で定義された奥行き感度を用いる[2]。ある視距離での奥行き感度は、その距離における最小の刺激差である奥行弁別閾との比で表される。

$$\text{奥行き感度} = \text{視距離} (D) / \text{奥行弁別閾} (\Delta D). \quad (1)$$

人が3D映像を閲覧する時、3D映像表示画面を通して観測する。そのため、3D映像表示画面における奥行き感を求める必要がある。この3D映像表示画面における奥行き感度は、撮影環境および閲覧環境、3Dコンテンツにおける奥行き感の評価に繋がるため、3D映像表示画面における奥行き感度を導出し、考察を行った。

2. 3D映像表示画面上の両眼視差における奥行き感度

両眼視差における奥行き感度は、瞳孔間隔 a と相対的な視差から得られ、式(2)を変換した式(3)で与えられる。図1では、横座標 x_A 、視距離 D の注視点 A と横座標 x_B 、視距離 $D + \Delta D$ の点 B との左右眼網膜上におけるズレ（輻輳角 θ_D と $\theta_{D+\Delta D}$ の差=角度 γ_R と γ_L の差）から得られる角度差、いわゆる視差 $\Delta \theta$ を示している。

$$\Delta \theta = \theta_D - \theta_{D+\Delta D} = \gamma_R - \gamma_L = \frac{a \cdot \Delta D}{D^2 + D \cdot \Delta D}. \quad (2)$$

$$\frac{D}{\Delta D} = \frac{a}{\Delta \theta \cdot D} - 1. \quad (3)$$

式(3)で表される奥行き感度は、実空間における奥行き感度であるため、3D映像を撮影・表示する環境を考慮していない。3D映像を撮影する際、平行に配置した2視点のカメラや3Dデジタルカメラなどを用い、3D映像を表示する際には3Dテレビや3Dディスプレイなどを用いる。特に、3D映像表示画面については、人が直接閲覧するためその特性が奥行き感度に多大な影響を及ぼす。そこで、図2、図3に示すような画面に対して奥方向および手前方向での3D映像表示における2つの場合について考える。図2、図3において、3D映像表示画面は距離 D に配置されている。3D映像撮影時の2視点のカメラの光軸が交わる3D映像における基準点（コンバージェンスポイント）と被写体との位置関係により、3D映像表示画面における飛び出し効果と引

込み効果が決定される。図2では引込み効果が、図3では飛び出し効果が得られる。

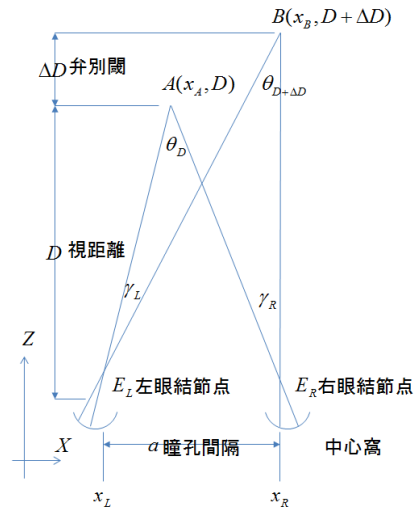


図1 両眼視差の奥行き感度の説明図

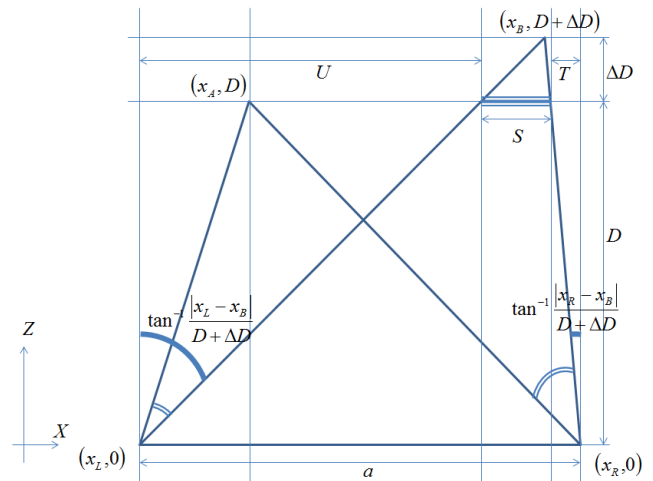


図2 画面に対して奥方向での3D映像表示について

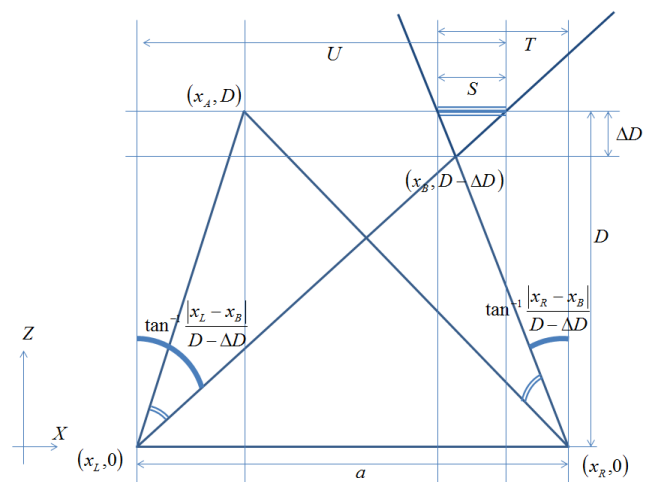


図3 画面に対して手前方向での3D映像表示について

実空間での視差は両眼の2点における輻輳角の差で表される。3D映像表示画面上での視差は、実空間上の同一点を表示する際の右目用の画像と左目用の画像における位置差であり、図中では S で表される。図2の視差 S を式(4)に、図3の視差 S を式(5)に示す。

$$S = a - T - U = a - \left(\frac{a}{1 + \frac{\Delta D}{D}} \right) \quad (4)$$

$$S = T + U - a = \left(\frac{a}{1 - \frac{\Delta D}{D}} \right) - a \quad (5)$$

この視差 S を用いて、両眼視差における奥行感度を再定義すると、3D映像表示画面上の両眼視差における奥方向の奥行感度は式(6)となり、手前方向の奥行感度は式(7)となる。

$$\frac{D}{\Delta D} = \frac{a}{S} - 1 \quad (6)$$

$$\frac{D}{\Delta D} = \frac{a}{S} + 1 \quad (7)$$

3. 3D映像表示画面上の両眼視差における奥行感度の実験

前項にて導出した奥方向および手前方向の3D映像表示画面上の両眼視差における奥行感度について、実験を行い確認する。使用した機材にパナソニック製3D撮影デジタルビデオカメラHDC-Z10000(3Dカメラ)とLG製23インチ型3D表示ディスプレイFLATRON D2343P-PNおよびLG製55インチ型3D表示テレビ55LW6500(3Dディスプレイ)を用いて、長田らの実験[2]を参考に行った。実験環境を図4に示す。実空間での両眼視差による奥行感度の実験と同様に白い背景の前に横に並べた2本の黒い棒を配置する。次に、コンバージェンスポイントを距離 D に設定した後3Dカメラで撮影する。その撮影した3D映像を3Dディスプレイに表示し明視状態で横長のスリットを通し両眼で観測する。この環境で、距離 D を3, 6, 9[m]と変化させた。2本の黒い棒を観測する際、距離 D より近くから奥へまたは遠くから手前へ移動させ、“初めて乗り越えたと感じる位置”と“2本を比較して近くには感じられない位置”を複数回取得し平均値を求める(極限法)。求めた平均値と距離 D との差が奥行弁別閾である。

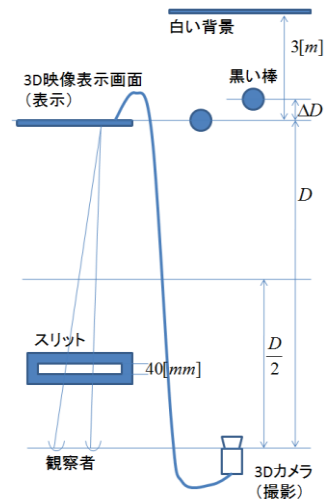


図4 3D映像表示画面上の両眼視差における奥行感度の確認するための撮影および閲覧する実験環境

観察者は、O(21才、男性、右眼視力1.2、左眼視力1.5)、S(33才、男性、右眼視力0.6、左眼視力1.6)、K(21才、男性、右眼視力1.0、左眼視力1.0)の3人である。表1に奥行弁別閾 ΔD の実測値の一部を示す。式(3)と式(6)または式(7)に当てはめて求めた両眼視差奥行弁別閾 $\Delta \theta$ を図5に示す。両眼視差奥行弁別閾の視角秒が、 $10[^\circ]$ から $60[^\circ]$ に分布し、視距離が伸びるにつれて増加傾向を示している。長田らの実験の今回設定した視距離付近の結果を図6に示す。長田らの実験とほぼ同じように行ったため、得られた視距離特性の傾向が似通っている。よって、近距離での弁別閾の変化は輻輳の位置安定度の低下によると考えられ、きわめて近距離を除いて両眼視差の弁別閾は視距離によらず一定となる。

表1 両眼視の手前方向の奥行弁別閾[mm]

視距離[mm]	3000	6000	9000
O	8.1	85.8	339.4
S	12.8	93.7	327.2
K	23.0	86.8	307.6

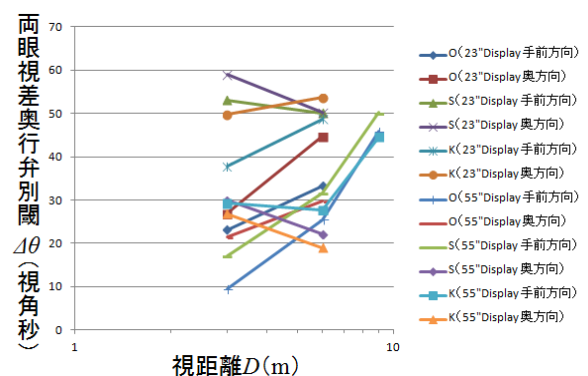


図5 両眼視差奥行弁別閾の視距離特性

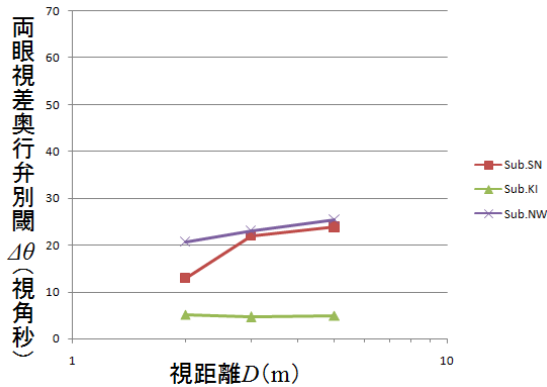


図 6 長田らの実験による視距離特性

視距離 9[m]以上の実測値は、奥行感を得られなかったため測定できなかった。3D 映像表示画面からの視距離 D が離れすぎてしまい、3D 映像表示画面における最適視聴距離を大きく超えてしまったため奥行感を得られなかったと考えられる。最適視聴距離とは、ドット (ピクセル) を判別可能な状態から判別不可能な状態になる境界の距離である。図 5 から 23 インチと 55 インチの 3D 映像表示画面の弁別閾を比較すると、23 インチの 3D 映像表示画面の弁別閾のほうが高くまとまっている。よって、3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度において、3D 映像表示画面のサイズと最適視聴距離を考慮する必要がある。

4. 3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度の改良

前項の 3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度の実験による確認の際、3D 映像表示画面のサイズと最適視聴距離を考慮する必要があることが分かった。

まず 3D 映像表示画面のサイズから 3D 映像表示画面の画素密度 (pixel per inch, 以下 ppi) p を求める。3D 映像表示画面の水平方向の画素数を w 、垂直方向の画素数を h 、インチ数を i とすると、 p は式(8)で与えられる。

$$p = \frac{\sqrt{w^2 + h^2}}{i} \quad (8)$$

3D 映像表示画面で 3D 映像を表示した時の画素数による視差を S_{pixel} とすると、視差 S は式(9)となる。ppi p は、インチから求められているため、定数 q ($=25.4$) をかけミリメートルに変換する。

$$S = S_{pixel} \cdot \frac{i \cdot q}{\sqrt{w^2 + h^2}} [mm] \quad (9)$$

式(6)および式(7)に式(9)を当てはめると、式(10)および式(11)が導出され、3D 映像表示画面のサイズを考慮した 3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度に改良された。

$$\frac{D}{\Delta D} = \frac{a \cdot \sqrt{w^2 + h^2}}{S_{pixel} \cdot i \cdot q} - 1 = \frac{a}{S_{pixel}} \cdot \frac{p}{q} - 1 \quad (10)$$

$$\frac{D}{\Delta D} = \frac{a \cdot \sqrt{w^2 + h^2}}{S_{pixel} \cdot i \cdot q} + 1 = \frac{a}{S_{pixel}} \cdot \frac{p}{q} + 1 \quad (11)$$

4.1 実験

次に、前項にて改良した 3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度について、実験を行い確認する。実験環境は、2.にて行った環境と同様である。

最適視聴距離 l は、観察者の視力 e と ppi p から求められ、式(12)となる。視力 e は、ランドルト環を用いて検査され、視角[分]の逆数で表される。ここで、単位[分]は、 1° の $1/60$ である。

$$l = \frac{p \cdot q}{\tan\left(\frac{1}{e} \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{1}{60}\right)} [mm] \quad (12)$$

各 3D 映像表示画面でのドットを判別できなくなる境界の最適視聴距離において観察し、ppi に対しての奥行感度を取得するために実験を行う。観察者 S の実験結果を表 2 および表 3 に示す。この実験結果から式(10)および式(11)におおよそ当てはまっていることが確認され、ppi の変化 (画面のサイズ) によって弁別閾に変化があることが得られた。

表 2 23"Display ($D=1002.8$ [mm]) での奥行感度

	ΔD (平均) [mm]	$D/\Delta D$
手前方向	2.3	436.0
奥方向	2.4	417.9

表 3 55"Display ($D=2398.1$ [mm]) での奥行感度

	ΔD (平均) [mm]	$D/\Delta D$
手前方向	9.3	257.9
奥方向	13.0	184.5

以上のことから、3D 映像表示画面のサイズおよび最適視聴距離、3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度は密接に関係していることが得られた。

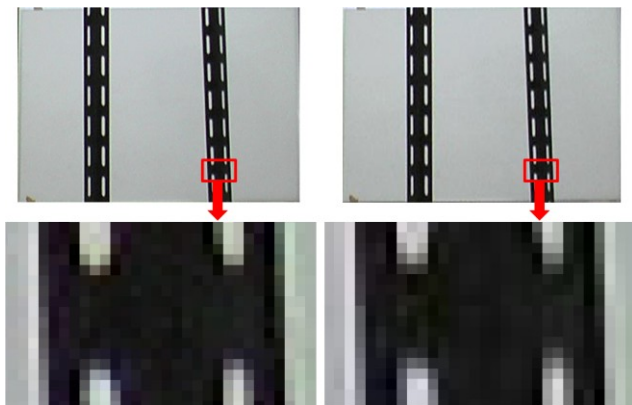
4.2 考察

ここで、ガイドラインに記載されているコンテンツ制作者が行う事項に対して 3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度を用いて考察する。開散方向の視差制限において、奥方向の視差限界値が瞳孔間隔 (子供に合わせると実寸 50[mm]) を超えないように定められている。式(10)および式(11)において、瞳孔間隔を超えた場合、奥行感度がマイナスとなり明示的に示すことができる。快適視差範囲

において、3D 映像表示画面の横の幅に対しておよそ 2[%]の範囲が手前方向および奥方向に定められている。式(10)および式(11)での視差はピクセル単位のため、簡単に計算することが可能である。さらに、3D 映像表示画面の特性(画面サイズ、最適視聴距離、ppi)については、式(10)および式(11)、式(12)を通して関係性を得ることができた。

5. 改良した 3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度に着目した奥行感の増加および評価

改良した 3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度を用いて、最適視聴距離を超えた位置で閲覧される映像に対して奥行感を増加させる処理を施し、評価を行う。3D 映像を最適視聴距離より近くで閲覧した場合、視差においてダウンサンプリングによるエイリアシングが起きてしまうため、奥行感度が減少してしまう。そこで、式(10)および式(11)から ppi が増加すると奥行感度が上昇することから、最適視聴距離から近づいた距離に応じた強度でボケを追加し、疑似的に ppi を増加させる処理を行う。そして、視差の大きさと奥行きが変化するため、視差の大きさに応じて追加するボケの大きさを調整する。ボケを追加した 3D 映像の一例を図に示す。



元の映像 ボケを追加した映像
図 7 ボケを追加した様子

奥行感が消失した奥行弁別閾以下で撮影された 3D 映像を 55 インチの画面に表示し観察者(視力 1.0、最適視聴距離 2.2[m])によって奥行感度を計測した結果、奥行感を得ることができた。さらに、この状態で奥行感が消失する視距離は、およそ 5[m]であった。奥行弁別閾は 視距離によらず一定のため、奥行感度が上昇している。よって、ボケを追加することにより奥行感が増加したことが確認された。

6. まとめ

3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度を用い、

閲覧環境および 3D コンテンツにおける奥行感の評価を行うことが可能となった。しかし、撮影環境における評価でズームを考慮していないことや、ガイドラインに記載されているカメラ撮影の事項(カメラの特性や光軸、撮影された 3D 映像の大きさのズレ検出)とカメラの同期の事項について考慮していない。そして、閲覧環境における評価で明るさやコントラストの変化について考慮していない。さらに、3D コンテンツにおける評価でディスプレイと視差の事項(融合限界)などについて考慮していないため、さらなる改良が必要である。今回使用したすべての 3D 映像は、レンズによるズーム機能を使用して撮影されていない。ズームし拡大表示させる場合、拡大するに従ってコンバージェンスポイントを移動させる必要がある。「立体映像におけるズーム時のコンバージェンスポイント調整に関する研究」[3]によると、4つのコンバージェンスポイントの調整技法があり、ズーム使用時発生する視覚的不具合と空間歪みについて考慮する必要がある。視覚的不具合とは、コンバージェンスポイントが固定しズーム機能を使用する場合、過度の両眼視差が生じてしまい快適視差範囲(この研究では画面幅に対して 3%以内)を超過するため発生する現象である。空間歪みとは、ズームとコンバージェンスポイントの移動によって飛び出し効果と引っ込み効果に変化し、立体的な奥行感が変化してしまう現象である。快適視差範囲は 3D 映像表示画面上の両眼視差における奥行感度によって評価が可能だが、空間歪みについては考慮されていないため評価することができない。空間歪みの評価が可能になると、実空間を撮影した 3D 映像の奥行感と 3D 映像表示画面から得られる奥行感を一致させることが可能になる。

このような課題を解決することで、撮影環境および閲覧環境を考慮した 3D コンテンツにおける奥行感の評価が可能になる。

謝辞 本稿において実験にご協力頂いた金沢工業大学の皆様に、謹んで感謝の意を表す。また、本研究の一部は、科学研究費補助金基盤(B)25280102の補助を受けている。

参考文献

- 1) 3D コンソーシアム安全ガイドライン部会: 人に優しい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン(2010).
- 2) 長田昌次郎: 視覚の奥行距離情報とその奥行感度, テレビ誌, vol.31, no.8, pp.649-655(1977).
- 3) 河宗秀, 金大雄, 石井達郎: 立体映像におけるズーム時のコンバージェンスポイント調整に関する研究, 芸術工学会誌, 第 63 号, pp.91-98(2013).