

## 光学補正を用いた立体映像呈示による調節・輻湊問題の改善

河合 隆史

早稲田大学 大学院国際情報通信研究科  
〒367-0035 埼玉県本庄市西富田大久保山 101

### 1. はじめに

2眼式立体映像(以下, 立体映像)は, 次世代の映像情報メディアとして期待されてきたが, これまで普及してこなかった. その主な原因として, 多人数かつ裸眼での自由な観察が困難といったディスプレイ側の問題に加えて, コンテンツの不足や応用領域が不明瞭であること, そして観察者に与える負担が指摘されてきた.

さて, 立体映像が観察者に与える負担として, メガネなどの装着物に起因するものは, 近年, 裸眼方式が主流となることで大きく改善されつつあると考える. そのため, 現行の2眼式立体表示における主要な問題として, 視覚系(調節と輻湊)の不整合が関与するとされる視覚負担があげられる. この不整合とは, 両眼視差を利用した立体映像を観察する場合に, 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ているために生じる, 輻湊と調節との奥行き情報の矛盾である. なお, 自然視の状態では, 輻湊と調節の奥行き情報は一致している.

この不整合によって生起される眼精疲労の機序は明らかではないが, 不自然な視覚情報の入力の関与は否定できない. そのため筆者らは, 立体映像の観察あるいは呈示時に光学的な補正を行うことで, この不整合の軽減を試みている. 本稿では, これまでの筆者らの取り組みについて紹介する.

### 2. 単焦点レンズを用いた光学補正<sup>1)</sup>

#### 2.1 目的

通常のVDT (Visual Display Terminals) 作業

においては, 近方視の持続による毛様体筋の緊張が, 眼精疲労を生じるとされている. その解決策として, 視距離に応じてレンズの屈折力を調整した, VDT 作業用グラスの利用が推奨されている. 近距離観察向けに屈折力の補正を行うことで, 毛様体筋の過度な緊張を緩和させることが目的である. これと近似な考え方として, 立体映像の観察用グラスに補正レンズを付加することで, 輻湊と調節の不整合を改善する方式が検討されてきた. 例えば Bos は, 2重焦点レンズをグラスに付加する方式の理論的な検討を行った<sup>2)</sup>. これは, 視野の上半部を凸レンズ, 下半部を凹レンズとして, 立体像の浮き・沈みに対応させるという方式であった. また, 高嶋らは, 時分割方式の液晶シャッターグラスに単焦点レンズを付加する方式について, 作業効率の観点から実験的に検討した<sup>3)</sup>. その結果, 手元作業では効果的だが, 作業範囲の拡大により疲れやすくなることを報告している.

筆者らは, 立体視の安全性を向上させる簡易な補正手段の観点から, 偏光グラスへの単焦点レンズの付加に着目し, その最適呈示条件について実験的に検討を行った. 具体的には, 立体映像の再生にかかる基準位置, 奥行き方向の再生範囲, 補正レンズの屈折力をバランスよく設定するための知見を得ることを目的として, 3種類の実験を行った(図1). なお, 立体映像の呈示にはマイクロボールを用いた偏光方式を対象とし, トライアルフレームに偏光フィルタと補正レンズを付加して観察することとした. マイクロボールとは, ディスプレイの画素の1ライン毎に交互に直交するよう配置されている, 微細な偏光素子である(図2). これにより, 1

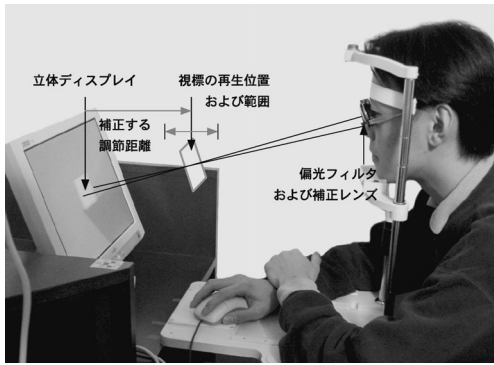


図1 単焦点レンズを用いた光学補正のイメージ。

表1 実験条件

	屈折力 (D)	距離 (m)	視差量 (度)
浮き (-)	0.12	0.47	0.42
	0.25	0.44	0.89
	0.50	0.40	1.80
沈み (+)	0.12	0.53	0.46
	0.25	0.57	0.93
	0.50	0.67	1.85

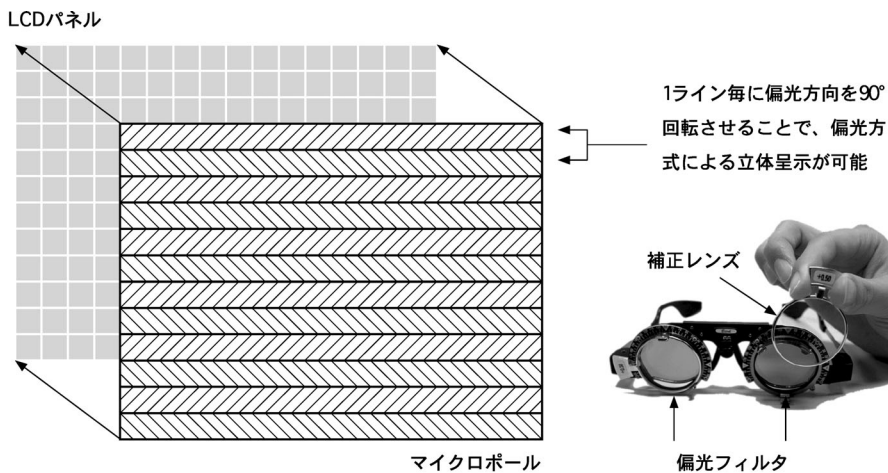


図2 マイクロポールを用いた立体呈示。

台の FPD (Flat Panel Display) やプロジェクタを用いて、偏光方式の立体呈示が可能となる<sup>4)</sup>。

## 2.2 補正レンズの屈折力と視覚負担

立体像の再生位置に対応した補正レンズの付加による視覚負担への影響を評価し、レンズの屈折力について検討を行った。補正レンズの屈折力は6種類を設定し、それらに対応する立体像の再生位置を、視距離 50 cm の条件で算出した(表 1)。立体映像の呈示には、マイクロポールの付加された 15 インチの液晶ディスプレイ (LCD) を用いた。刺激の呈示時間は 15 分間であり、画面中央に水平視角 4.5° の正方形、正円形、正三角形を 5 秒間隔でランダムに表示した。被験者の視覚負担を検討する指標として、刺激呈示前後の水晶体のステップ調節応答と眼精疲

勞の自覚症状を測定した。ステップ調節応答では、オプトメータの内部視標の移動に対して生じた調節応答が、安定するまでの所要時間(調節緊張時間と調節弛緩時間)について検討を行った。眼精疲労に関する自覚症状では、アンケート法により調査した<sup>5)</sup>。被験者は、正常な両眼立体視機能を有する正視眼の男性 9 例(20 才台前半)を選択し、個別に実験を行った。

ステップ調節応答の結果では、視差量の絶対値が小さい方が、観察後の調節緊張時間の変化が小さい傾向が見られた(図 3)。一方、調節弛緩時間では、緊張時間と同様の傾向にあるが、沈み方向に比べ浮き方向では延長が顕著であった。眼精疲労の自覚症状では、視差量の絶対値が小さく、沈み方向に再生される方が、評定点

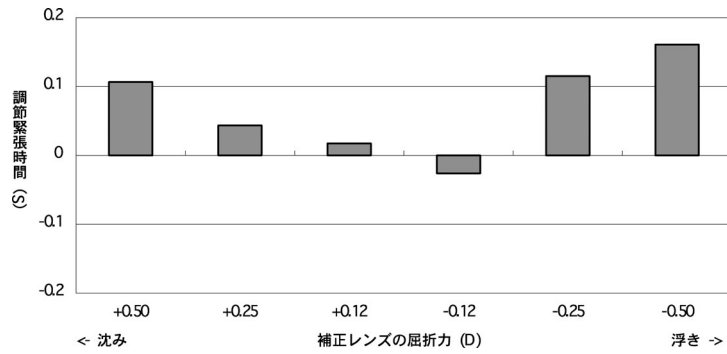


図3 観察前をベースラインとした調節緊張時間の変化量。

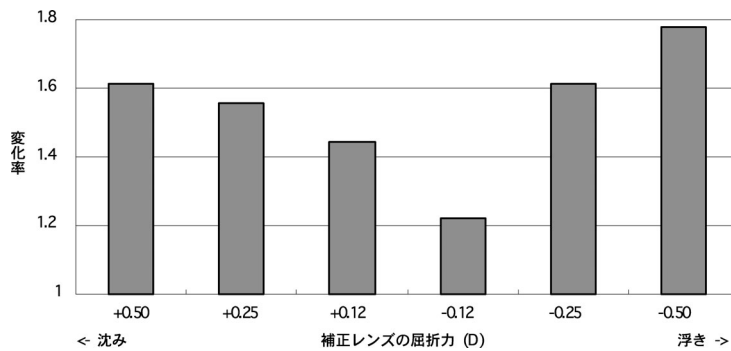


図4 観察前をベースラインとした自覚症状「目が疲れる」の変化率。

の上昇が少ないことが分かった (図4)。

### 2.3 補正レンズの影響と再生範囲

立体映像観察中の調節は画像呈示面に働き、輻湊は立体像に働くと考えられているが、輻湊性調節や主観的な遠近感によって、調節が変化することも知られている。そこで、奥行き方向に運動する立体像を呈示し、観察中の水晶体の屈折値を測定することで、補正レンズの影響と、効果的な立体像の再生範囲の検討を行った。

観察中の屈折値は、赤外線オプトメータによって測定した。視距離 50 cm とし、眼前 30 cm から 200 cm までの理論的な奥行き運動をする視標を、5 例の被験者に対して 5 分間呈示した (図5)。このときの補正レンズの屈折力は、視覚負担にかかる実験結果を踏まえ、沈み方向を基準として +0.5D とした。図6および7に、補正レンズの有無による測定結果の例を示した。これらの図から、観察中の顕著な屈折値の変化が見られ、さらに基準位置を考慮した補

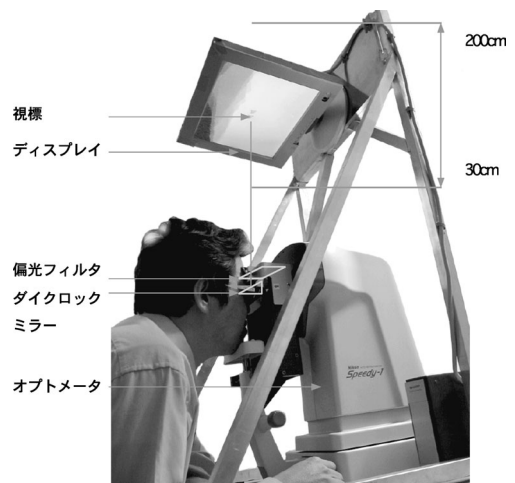


図5 実験で使用した呈示・測定系。

正レンズによって、視標の近傍へシフトされていることが分かる。なお、他の被験者においても、同様の傾向が認められた。

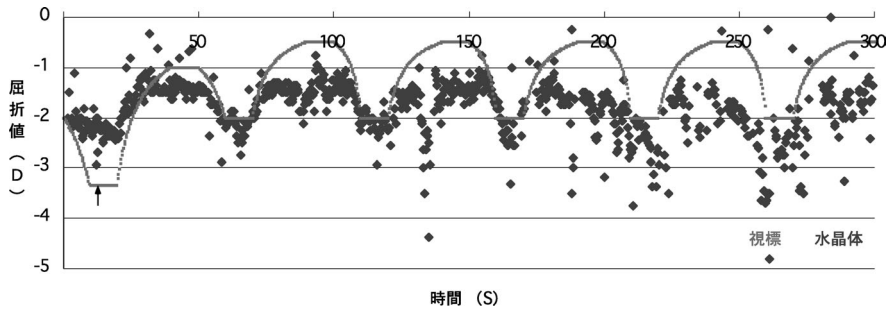


図6 補正レンズなしの条件での測定結果例.

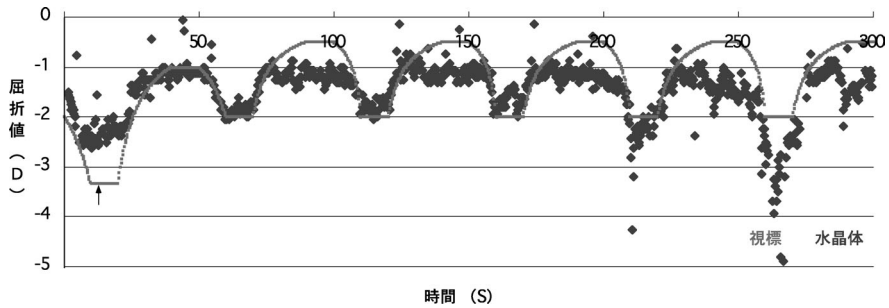


図7 補正レンズありの条件での測定結果例.

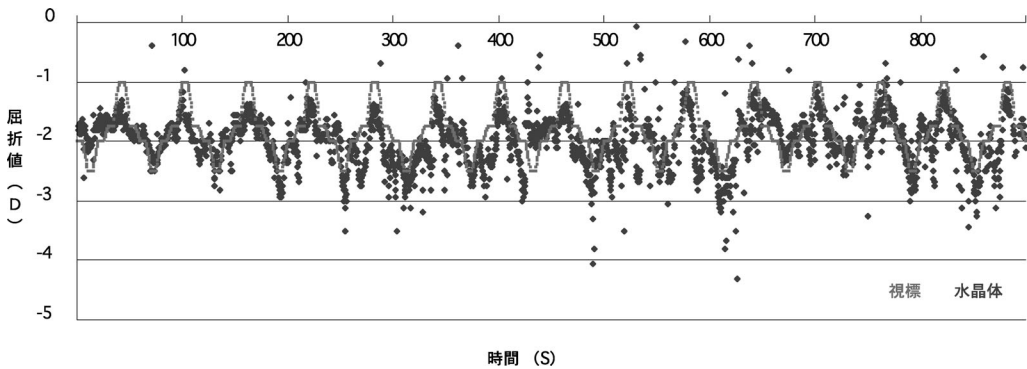


図8 補正レンズを付加して再生範囲を制御した条件での測定結果例.

#### 2.4 補正レンズと再生範囲による効果

上記の2つの実験結果を踏まえて、比較的小型のディスプレイを近距離で観察する際に効果的な条件を考察し、評価を行った。具体的には、15インチディスプレイの視距離50cmを基準として、浮き方向2.5Dから沈み方向に1.0Dの範囲を、視標である単純図形が繰り返し移動するよう設定した。被験者には視標の注視を15分間求め、観察中の屈折値、観察前後のステップ

調節応答および眼精疲労の自覚症状を測定した。

図8に示した観察中の屈折値の測定結果の例から、補正レンズと再生範囲の制御により、輻湊と調節の不整合が改善されていることが分かる。ステップ調節応答の測定では顕著な差は見られなかったが、眼精疲労の自覚症状では「眉間の痛み」などの項目において、補正レンズを付加した条件の観察後の上昇が少ない傾向が認

められた。

### 3. 可動 LCD を用いた動的光学補正

#### 3.1 目的

上述の単焦点レンズを用いた補正では、視覚系の不整合の改善は見られたが、立体像の再生範囲が制限される。これは、あらかじめ用途やコンテンツを決定しておくことで十分対処可能といえるが、映像表現の自由度という点では課題が残されている。そこで、調節を伴う立体像の再生範囲を拡大することを目的として、動的な光学補正の検討を行った。

具体的には、テレセントリック光学系と機構部が可動する LCD を組み合わせ、マイクロボールを用いて偏光方式により立体映像を呈示するシステムを試作した（図 9, 10）。本システムは、ディスプレイ本体部と、映像呈示と LCD の位置制御を行う専用ソフトウェアの実装されたパーソナルコンピュータ（PC）により構成されている。立体像の再生位置に同期して、画像呈示面を前後方向に移動することで調節距離を変化し、視覚系の不整合の解決を試みた。動的な

光学補正の先行事例としては、杉原らによる、焦点補償機能を組み込んだ立体ディスプレイの考案と、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）への実装があげられる<sup>6)</sup>。評価実験の結果から、杉原らは、調節を伴うことで正確な奥行き情報が呈示されたことを報告している。これに対して本システムでは、大型の光学系を通して1台の LCD を観察すること、および接眼部にテレセントリック光学系を用いて LCD の移動に伴う視野角の変化を除去することに特徴がある。本シ

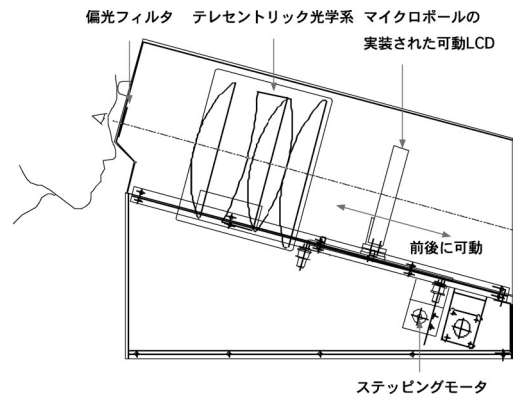


図 9 試作したシステムの概要。

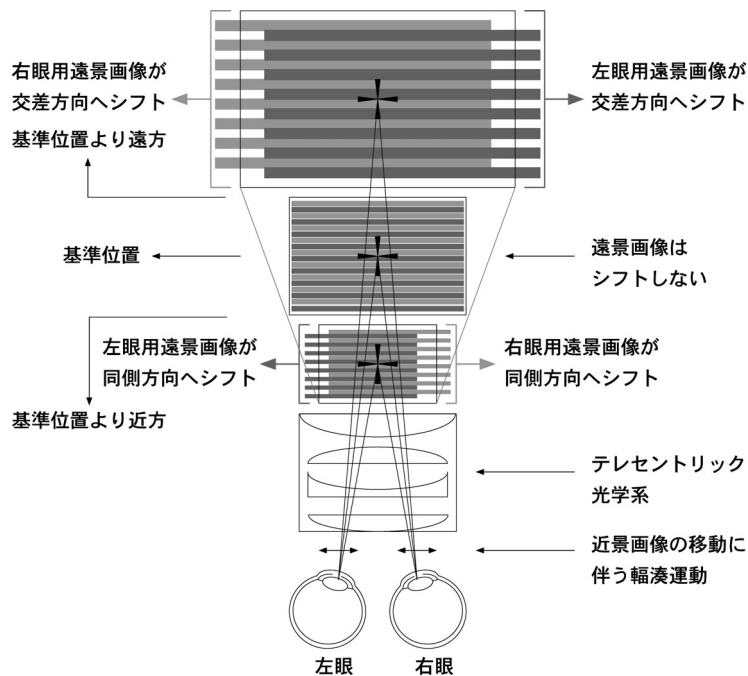


図 10 試作したシステムの呈示原理。

システムで補正される立体像の再生範囲は、2.5Dから0D（無限遠）までである。

### 3.2 動的光学補正の呈示原理

本システムでは、テレセントリック光学系の利用により、画面視野角を一定（水平視角で約34°）に維持して焦点距離を変化させると同時に、光学系の屈折の差異から輻湊を誘発している。4枚のレンズで構成される1つの大型光学系を左右眼で観察することにより、LCDの位置に応じて光学系の屈折に変化が生じ、結果として輻湊開散運動が生じることになる。光路計算によって、画面中央に配置された立体像を観察時の輻湊角と、実物体を観察した際の輻湊角が近似していることを確認した。

また、本システムでは、LCDの移動により調節・輻湊距離を変化させていることから、立体像が奥行き方向に変化しても、画像呈示面上を注視していることになる。そのため、従来の立体映像のように、注視の想定される対象に、画面上でのズレは生じない。さらに、背景となる

画像を水平方向にシフトすることで、視差量の変化をキャンセルしている。これは、従来の立体映像とは大きく異なるが、注視点の前後で視差が生じるという点で、自然視に近い表現方法と考えられる。

### 3.3 補正効果の評価

試作したシステムでの光学補正の効果を検証することを目的として、立体映像観察中の屈折値を測定した。実験条件は、光学補正の有無による2条件を設定し、被験者は、正常な両眼立体視機能を有する正視眼の男性2例（20才台前半）であった。被験者が注視する視標は、最初は眼前2Dに再生され、その後2.5Dから0.5Dの範囲で奥行き運動を3分間繰り返した。

屈折値の測定結果の例を図11および12に示した。光学補正を行っていない条件では、視標の動きに伴い屈折値が変動しているが、画像呈示面が位置する2D（50cm）近傍にとどまっていた。一方、光学補正を行った条件では、視標の移動に近似した、屈折値の変化が生じている

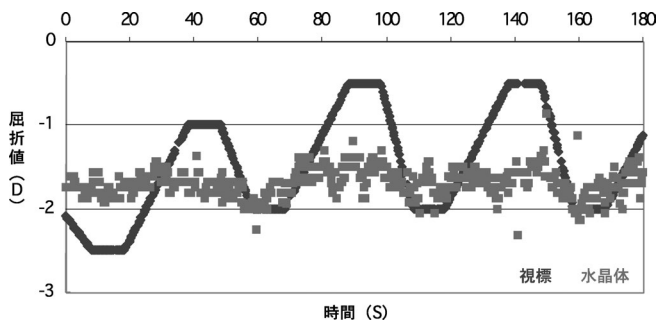


図11 光学補正なしの条件での測定結果例。

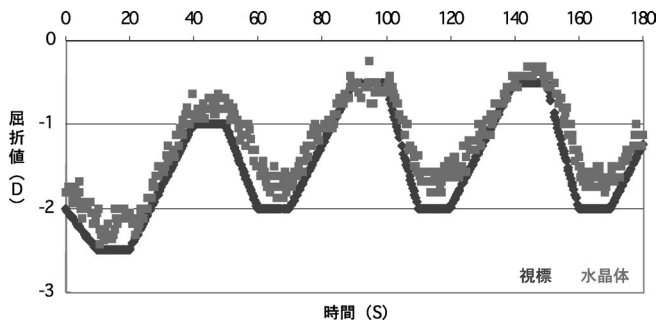


図12 光学補正ありの条件での測定結果例。

ことが分かった。

#### 4. おわりに

本稿では、立体映像観察中の視覚系の不整合の軽減を目的とした、筆者らの取り組みについて紹介した。具体的に、観察あるいは呈示時の光学的な補正として、単焦点レンズを用いた簡易な方式と、可動LCDを用いた動的な方式への取り組みについて述べた。評価結果から相応の効果が認められたことから、再生範囲や対象が制限されるという課題はあるが、調節を伴う立体映像の呈示によって、安全性や快適性を向上する可能性が示唆されたと考えている。一方で、実際の応用場面においては、すべての立体映像を光学的に補正して呈示する必要はないと考えている。例えば、両眼視差を利用した前後関係の弁別を必要とする短時間の視作業であれば、現行の呈示方式で十分といえる。したがって、調節を伴った立体視が必然的な、用途やコンテンツの検討も課題といえる。

さらに、立体映像の安全性という意味では、本稿で取り上げた調節・輻湊問題以外にも配慮すべき点が残されている。例えば、平面映像から立体映像を生成する2D→3D変換では、現在までに多くの取り組みがなされており、すでに事業化の例もある。しかしながら、完全な立体映像化、特にリアルタイムでの自動変換は困難であることから、観察者は常に不完全な立体情報を呈示されることになる。このような状態、つまり画面全体あるいは一部に不適切な立体情報が呈示されている状態においては、調節と輻湊の不整合に加えて、認知的な矛盾が生じており、ストレス等の原因となることが予想される。同様の状態は、テロップやCGの合成等の制作過程においても容易に生じる可能性がある。加えて、撮影条件や観察条件によっては、箱庭効果や書割効果といった、立体映像において特徴的な現象による違和感が生じる場合もある<sup>7)</sup>。これらも一種の認知的な矛盾としてとら

えることもできるが、その影響については十分に調査がなされていないのが現状である。このように、未だ普及していないメディアである立体映像においては、今後も予期し得ない影響や問題が生じる可能性があるが、ネガティブな側面だけでなく、ポジティブな効果や応用を併せ、両側面から検討していくことが重要と考えている。

#### Acknowledgement

本稿で紹介した研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による産業技術研究助成事業の研究開発テーマとして、(株)有沢製作所ならびに(株)ニコンとの連携により実施されたものである。

#### 文 献

- 1) 柴田隆史, 河合隆史, 太田啓路, 葎原義弘, 井上哲理, 岩崎常人, 寺島信義: 単焦点レンズを用いた立体映像観察による視覚系の不整合の改善. *人間工学*, **40**, 99-106, 2004.
- 2) K. J. Bos: Reducing the accommodation and convergence difference in stereoscopic three-dimensional display by using correction lenses. *Optical Engineering*, **37**, 1078-1080, 1998.
- 3) 高嶋 樹, 中西義孝, 日垣秀彦: 立体映像を介した作業による効率と疲労に関する研究. バイオエンジニアリング学術講演会・秋季セミナー講演論文集, **12**, 169-170, 2001.
- 4) 松廣憲治:  $\mu$ Pol (マイクロポール) システム, *コンバーテック*, **28** (8), 2-5, 2000.
- 5) 鈴木昭弘: 眼疲労. *眼科*, **23**, 799-804, 1981.
- 6) 杉原敏昭, 宮里 勉, 中津良平: 焦点調節補償機能を有するHMD: 3DDAC Mk. 4. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **4**, 261-268, 1999.
- 7) 山之上裕一, 湯山一郎: 立体映像における撮像条件と画面効果. *電子情報通信学会大会講演論文集*, 1993 (Shuki 6), 373-374, 1993.