

# X'tal Visor : 頭部搭載型小型プロジェクタの設計と評価

山崎 潤<sup>\*1</sup>, 園田 哲理<sup>\*2</sup>, 吉田 匠<sup>\*1</sup>, 川上 直樹<sup>\*1</sup>, 館 暲<sup>\*1</sup>

X'tal Visor: Design and Evaluation of a Compact Head-Mounted Projector

Jun Yamazaki<sup>\*1</sup>, Tetsuri Sonoda<sup>\*2</sup>, Takumi Yoshida<sup>\*1</sup>, Naoki Kawakami<sup>\*1</sup> and Susumu Tachi<sup>\*1</sup>

**Abstract** – In this paper, we propose the system replacing half-mirror in the RPT (Retro-reflective Projection Technology) system by micro full-reflection mirror. This system enables to project wide-field image without covering user's eyes. Conventionally, several Head-Mounted Displays are developed as AR (Augmented Reality) display. However, most of these displays cover an user's eyes, and consequently generate low realistic sensation. We present novel head-mounted projector "X'tal Visor" based on this system, and conduct series of performance evaluation tests.

**Keywords** : Head-Mounted Projector, Retro-reflective Projection Technology, Augmented Reality

## 1 はじめに

バーチャル空間と実空間とをシームレスに融合するAR (Augmented Reality) の分野において用いられる視覚ディスプレイでは、実空間に提示画像を自然に重畳することが重要な課題となる。違和感のない重畳を実現するためには、実物体との遮蔽関係の維持、輝度、コントラストの一致、焦点深度の一致等が要求される。

バーチャル空間を提示する視覚ディスプレイとしては、IPT (Immersive Projection Technology) [1][2] とHMD (Head-Mounted Display) [3][4] の2分野において主に開発が進んでいる。ARディスプレイとしては、光学透過型HMD、ビデオシースルーHMD[5]が開発されているが、遮蔽関係、画質等について問題がある。

そこで、上記の要求を満たすARディスプレイとして、再帰性投影技術 (Retro-reflective Projection Technology:RPT) を利用した頭部搭載型プロジェクタが開発されてきた [6][7][8]。これらのプロジェクタは、指向性の高い反射特性を持つ再帰性反射材をスクリーンとして用いることで、実物体との遮蔽関係を維持しながら、高輝度・高コントラストの映像を提示することができる。また、絞りを設けることにより、焦点深度を深くし、スクリーンの位置によらず鮮明な映像を提示することができる。

しかし、これらのプロジェクタは、投影画角がハー

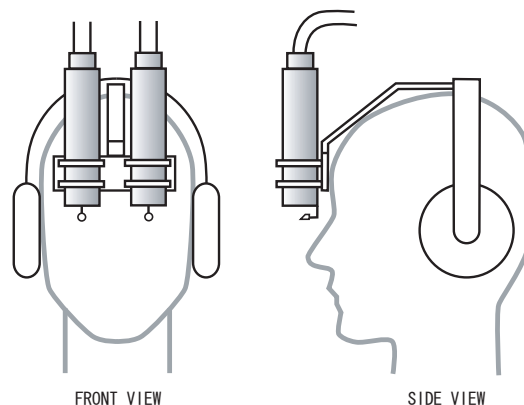


図1 X'tal Visorの全体図  
Fig.1 Overall view of X'tal Visor

フミラーの範囲に制限され、さらに、ハーフミラーを視界前方に配置する必要があるため、観察者の顔が大きく覆われ、開放感が損なわれる。また、ハーフミラーを用いることによる輝度の低下、映り込みによる画質の低下といった問題も生じている。以上の問題は、AR環境内における作業者の臨場感を低下させる原因となり得る。

Huaら [9] は、再帰性投影技術を利用した頭部搭載プロジェクタに偏光ビームスプリッター (PBS) と1/4波長板を導入することによる高輝度化を提案しているが、それ以外の問題は解決されていない。

そこで、我々は本研究において、再帰性投影技術を利用した新たな光学系を提案し、その光学系に基づき、頭部搭載型プロジェクタ "X'tal Visor" (図1) を作成した。X'tal Visorでは、これまでの頭部搭載型プロジェクタにおいて用いられていたハーフミラーを小

<sup>\*1</sup>東京大学大学院 情報理工学系研究科

<sup>\*2</sup>(株) キヤノン

<sup>\*1</sup>Graduate School of Information Science and Technology, Univ. of Tokyo

<sup>\*2</sup>Canon Inc.

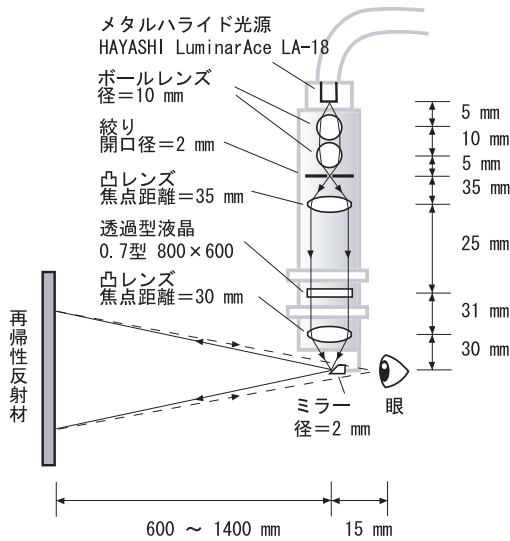


図2 X'tal Visor の光学系  
Fig.2 Optical system of X'tal Visor

型の全反射ミラーに置き換えることにより、眼前を大きなハーフミラーで覆われることなく、開放感を保ちながら広視野角を達成することが可能となる。また、ハーフミラーを用いることによる輝度の低下、映り込みによる画質の低下も生じないため、鮮明な画像を提示できると考えられる。

このような特徴を持つ再帰性投影技術の利用が考えられる分野として、遠隔作業において、複雑化・巨大化したマニピュレータ等、視覚的に作業の邪魔となる部分に再帰性反射材を塗布し、映像を投影することにより、より臨場感のある効率的な作業を行うことが考えられる。この場合、スクリーンの位置・形状によらない画像提示が可能だという特徴により、複雑な機構の位置姿勢の計算等の煩雑な情報処理が不要となる。また、本提案手法による頭部搭載型プロジェクタは眼の周囲を覆わないため、表情を伴うコミュニケーションの可能性も広がると考えられる。この場合、眼が他者からはっきり見ることがコミュニケーションにおいて重要であると考えられるため、ミラーの位置を眼の中心からずらし、装着者の眼が光点に見えないようにする工夫が設計の際に必要となる。

本論文では、従来のRPT光学系の代わりに提案光学系を用いることで、輝度、コントラスト、解像度が向上し、クロストークは立体視を可能にする程度に小さいことを性能評価実験により明らかにし、従来のRPT光学系に対する提案光学系の優位性を実証する。

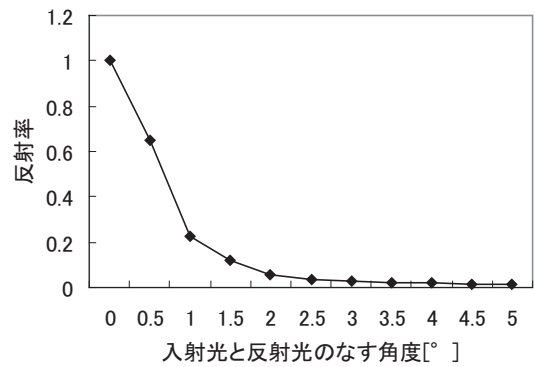


図3 再帰性反射材の反射特性  
Fig.3 Reflective characteristics of retroreflector

## 2 X'tal Visor の光学系

### 2.1 提案光学系

再帰性投影技術 (RPT) を用いた従来の光学系を、頭部搭載型ディスプレイに応用したとき問題となるのは、ハーフミラーの存在である。

RPT 光学系において、投影機構の絞りと観察点を共役な位置に配置することで高輝度・高コントラストの映像提示が可能となる。投影機構と観察点を物理的に同一の位置に配置することは不可能であるため、従来のRPT光学系では、ハーフミラーを用いて光線の変える必要があった。しかし、ハーフミラーにおける、光線の変える反射とスクリーンから観察点に達するときの通過により投影画像の輝度は25[%]に低下すると考えられる。また、視野中心付近の現実画像の輝度も、ハーフミラーを通過することにより50[%]に低下することになり、画像の鮮明さが失われることとなる。また、眼の周りを覆われるため、開放感が損なわれる。その問題を解決するため、ハーフミラーを小型化すると、投影画角が狭められるという、更なる問題が発生した。

これらの問題は投影画角の大きさが、ハーフミラーの大きさに制限されることによる。そこで、従来のRPT光学系におけるハーフミラーの代わりに、小型の全反射ミラーを用いた図2の光学系を提案する。提示画像を一点に集束させることにより、大きなミラーを用いずに、広視野角を実現することが可能となる。

ミラーが観察の邪魔になるのではないかとこの点について、以下に述べる。小型の全反射ミラーを観察点のごく近くに配置することにより、観察者はこのミラーに焦点を合わせることができない。また、X'tal Visorを使用する場合は両眼による観察を想定しているため、片眼からある対象物を見たときに位置がミラーと

重なって見えたとしても、もう片方の眼からは問題なく観察することができる。以上の点と合わせ、眼鏡装着者がこの全反射ミラーとほぼ同サイズの眼鏡のふちを日常生活において意識しないことから考えると、ミラーをある程度視野の中心からずれた位置に配置すれば、画像の観察に支障は生じないと考えられる。

この光学系の詳細は以下の通りである。メタルハライド光源 (HAYASHI LuminarAce LA-18) から光ファイバで導かれた光束は2つのボールレンズ (径 10[mm]) により集約され、絞り (開口径 [2mm]) を経ることにより、点光源となる。点光源を出た光束はコリメータレンズ (径 25[mm], 焦点距離 35[mm]) で平行化され、透過型液晶 (0.7 型 800 × 600 ドット) に入射する。液晶を通った光は投影レンズ (径 25[mm], 焦点距離 30[mm]) で一点に集束し、集束点に置かれた小型の全反射ミラー (45° ロッドミラー 外径 2[mm]) によって向きが変えられ、再帰性反射材のスクリーン (レフライト # 9000) に投射される。投射された光はスクリーン上で再帰性反射し、大部分が観察者の眼に到達する。

このとき、再帰性反射した光が集まる点はミラー上に存在するので、観察者の視点位置との多少のずれが生じる。図3は今回スクリーンとして用いた再帰性反射材の反射特性を、入射光と反射光のなす角度が  $0[^\circ]$  のときの反射率を1に正規化して表したグラフである。このグラフより、実際に用いる再帰性反射材は、光の入射方向とわずかにずれた方向にも光を反射すると考えられるため、十分な輝度を持つ画像を観察できると予想される。

## 2.2 X'tal Visor の実装

前項で提案した光学系に基づき、頭部搭載型プロジェクタ “X'tal Visor” を実装した (図4)。図における径とは全て直径を表す。装着すると、再帰性反射スクリーンに図5のように画像が提示される。中央上寄りに見える影は小型ミラーのものである。小型ミラーは眼の近傍に配置されるため、小型ミラーに焦点が合うことはなく、実際に投影画像を注視している場合に邪魔となることはほとんどない。

X'tal Visor は、提案光学系を2つ並列して設置したものであり、左右眼に対する投影機構を分離することなく、左右別々の映像を投影し観察することが可能となる。これは、理想的な再帰性反射特性を持つスクリーンを用いれば、片方の眼の側から投影された光線がもう片方の眼に到達することがないからである。

透過型液晶は、点光源と凸レンズにより理想的な平行光線が生じるのならば、理論的には2つの凸レンズ間の任意の位置に配置できる。実際は平行光線以外の光線も液晶を透過すると考えられるため、スクリー

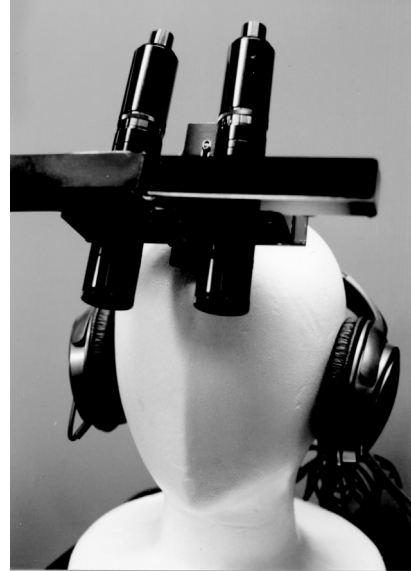


図4 実装した X'tal Visor  
Fig.4 Implemented X'tal Visor

ンまでの距離を 1000[mm] とし、そこでピントが合うように、投影レンズから 31[mm] の位置に液晶を配置した。

このとき、ミラーの径、または点光源を作る絞りの径の小さい方を  $\phi$ [mm] とし、距離  $w$ [mm] の位置にある再帰性反射スクリーンに対し、半径  $e$ [mm] の許容錯乱円の鮮明さで画像を投影する場合、焦点深度  $d$  は

$$d = \frac{2ew}{\phi} \quad (1)$$

で表される。スクリーンを  $w=1000$ [mm] 離れたところに設置した場合、液晶の解像度 (800 × 600) を維持する許容錯乱円の半径は  $e=0.5926$ [mm] となり、焦点深度は  $d=592.6$ [mm] となる。

また、実装した X'tal Visor において、片眼の投影画角は水平 26[deg], 垂直 21[deg], 対角 32[deg] である。

次章において、従来の RPT 光学系と比べて、優れた性能を持つことを示すため、性能評価実験を行う。

## 3 性能評価実験

AR の分野において用いられるディスプレイには、装着したときに十分な臨場感を体験させることが求められる。そのために、特に視覚ディスプレイにおいては、提示画像の鮮明さ、現実空間と提示画像の自然な重畳、立体視の実現等が重要な課題となる。



図5 投影画像の様子  
Fig.5 Projected image

そこで、本章では X'tal Visor の性能評価のため、提示画像について、輝度、コントラスト、解像度、左右画像のクロストークの4項目に関する評価実験を行い、従来のハーフミラーを用いた RPT 光学系に対して性能が優れていることを実証する。

本実験では、図6左に示す小型全反射ミラーを用いた提案光学系と、図6右のように小型全反射ミラーを取り外し、ハーフミラーを配置したものを性能評価実験により比較する。このようにミラー部分以外の光学系には同等の構造を用いることにより、提案手法で小型全反射ミラーを使用したことによる効果を示すことができると考えられる。床部からの反射光の影響を減らすため、ミラー直下の床部には黒フェルトを貼り付けた。

### 3.1 輝度

ハーフミラーを用いた従来の RPT 光学系において、光源を出て液晶を透過した光線は、ハーフミラーで方向が変わるときに輝度が  $1/2$  に低下し、スクリーンで反射して観察点に到達するときハーフミラーを通過し、さらに輝度が  $1/2$  に低下する。つまり、光線がハーフミラーを通過する必要のない提案光学系と比べると、輝度は  $1/4$  に低下していると予想される。

この予想を確かめるため、両光学系において、スクリーンとの距離を変えて全白画像を投影し、画面中心部の輝度を測定した。

実験は、X'tal Visor、スクリーン（レフライト # 9000）、輝度計（TOPCON BM-8、測定角  $1[^\circ]$ ）を用いる。

輝度計は、ミラーから  $15[\text{mm}]$  離れた位置に設置した。この位置が、X'tal Visor を装着したときの観察点（眼の位置）に相当する。

また、他の光源の影響を可能な限り少なくするため、実験は暗室で行った。これは、他の実験についても同様である。

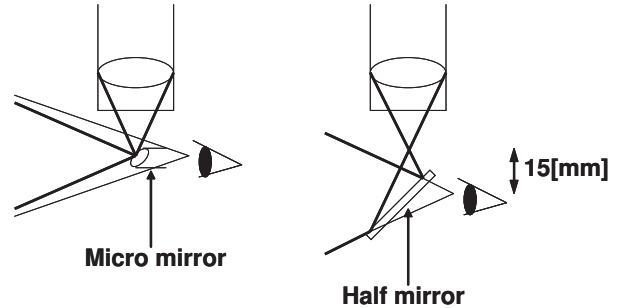


図6 実験装置：(左) 小型ミラーを用いた提案光学系、(右) ハーフミラーを用いた従来の RPT 光学系

Fig.6 The experimental setup:(left)The proposed optical system with a micro mirror,(right)The conventional optical system with a half mirror

結果は図7のようになり、ほぼ予想を裏付ける結果となった。

ここで、X'tal Visor を装着すると、図8のように、投影画像の中心部が明るく、周辺になるにつれて暗くなって見える。

この理由は以下のように考えられる。画面周辺部を見る場合、小型ミラーからスクリーンに向かう光線とスクリーンから観察点に向かう光線のなす角度  $\theta$  が大きくなる。これは小型ミラーの位置と共役点の位置の間にずれがあることに起因する。

図3のグラフに示されるように、入射光と反射光のなす角度が大きくなるほど、反射率は低下し、輝度が低下する。これにより、画面周辺部の輝度が低下すると考えられる。

また、スクリーン位置が遠くなるにつれて輝度ムラが減少する傾向が見られた。これもスクリーン位置が遠くなるにつれて、上記の角度  $\theta$  が小さくなるためだと考えられる。

以上のような輝度ムラにより、画面周辺部で輝度が低下するだけでなく、コントラストや解像度も低下し、画質低下を引き起こすことが考えられる。これを解決するためには、小型ミラーをさらに観察点に近づけることが有効である。こうすることにより、上記の角度  $\theta$  を常に小さい値にすることができ、再帰性反射材の反射特性による輝度の低下を抑えることができる。今回の実装では、小型ミラーを固定するため L 字型の金具を用いているが、透明な板に穴を開けて取り付ける等の工夫をすれば、小型ミラーと観察点の間の距離を現状の  $15\text{mm}$  からさらに短くすることが可能であろう。

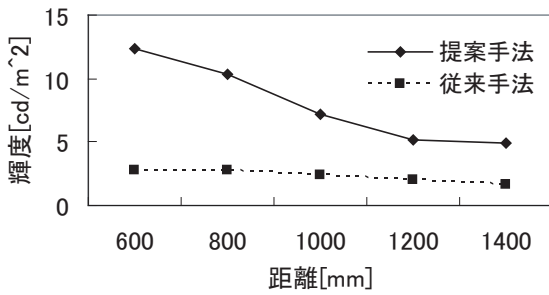


図7 輝度とスクリーンの距離との関係  
Fig.7 Relationship between luminance and distance from the screen

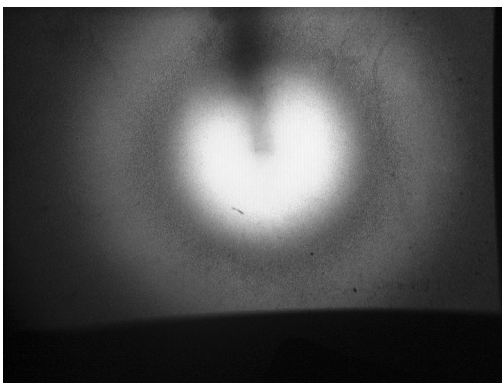


図8 全白画像投影時の様子  
Fig.8 Projected white image

### 3.2 コントラスト

全白画像と全黒画像を投影したときの画面中央部と画面周辺部の輝度をそれぞれ計測し、比を求めた。スクリーンと小型ミラー間の距離を変えて計測を行い、結果は図9のようになった。

結果より、スクリーンの距離によらず、提案手法のコントラスト比が従来手法の2倍程度であることが分かる。従来手法のRPT光学系では、輝度の項で述べたハーフミラーを通過・反射する際の輝度低下だけでなく、ハーフミラー表面の細かな傷・汚れ等により、透過する光線の一部が散乱し、コントラストが低下していると考えられる。

以上より、提示画像のコントラストについて提案手法が優れていることが示された。

### 3.3 解像度

本実験ではアナログ画像の評価にも用いられる、限界解像度を用いて解像度を評価することとする ([10])。これは映像画面上において、肉眼で検知しうる縞模様の細かさの限界値で解像度を表すものである。縞の本数(空間周波数)を変えて白黒縞模様の画像を投影し、どのような画像が観察されるか、スクリーンとの距離

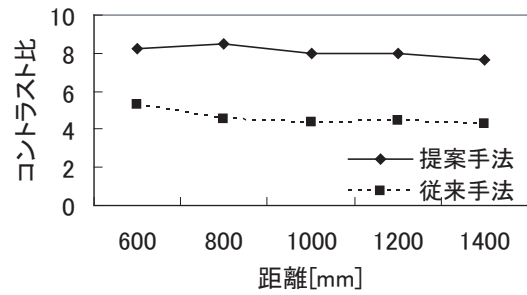


図9 コントラスト比とスクリーンの距離との関係  
Fig.9 Relationship between contrast ratio and distance from the screen

を変えて観察点にカメラを置き、画面中心付近を撮影した。

ここで、空間周波数は  $c/d$  (cycle per degrees) で表す。結果は図10, 図11のようになった。

提案手法の場合、投影画像を実際に眼で見た場合、空間周波数  $7.69 [c/d]$  (縞の幅が  $1 [pixel]$ ) の場合でもスクリーンの位置によらず、縞模様が目視で確認された。よって、 $800 \times 600$  の解像度まで提示可能であるといえる。これは、視力に換算すると  $0.25$  相当となる。

一方従来手法の場合は、図11の写真ではつぶれてしまっで見辛いが、目視でも縞模様が細かい場合は黒色部と白色部を見分けることができず、空間周波数  $0.96 [c/d]$  (縞の幅が  $8 [pixel]$ ) でやっと縞模様を認識することができる。これは輝度が低いことにより、細かい縞模様が見えにくくなるためであると考えられる。

以上より、解像度について、提案手法が従来手法より優れていると示され、スクリーンの位置によらずほぼ一定の解像度が保たれることが示された。

### 3.4 クロストーク

前述の通り、X'tal Visor は左眼用投影系と右眼用投影系を並べて配置したものであり、左右眼に対する投影機構を分離することなく、左右別々の映像を投影し、観察することが可能である。

しかし、実際のスクリーンは完全な再帰性反射を実現することはないため、入射方向からずれた方向にも反射光が存在し、これが左右画像のクロストークを引き起こすと考えられる。

そこで左右画像のクロストークについて、以下の評価実験を行った。

眼間距離に相当する  $70 [mm]$  の距離において、提案光学系を2つ平行に配置した。この実験装置の右眼側の観測点に輝度計を設置し、左眼側から全白画像、全黒画像を投影したときの輝度差と、右眼側から全白画像、全黒画像を投影したときの輝度差の比を取る。こ

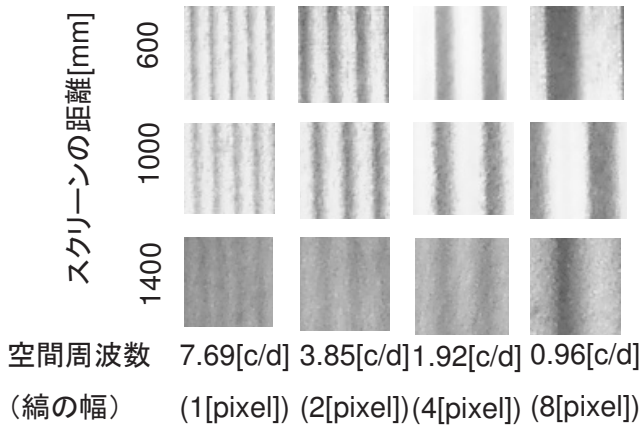


図 10 提案手法により投影された縞画像の様子  
Fig.10 Projected stripe pattern using a micro mirror

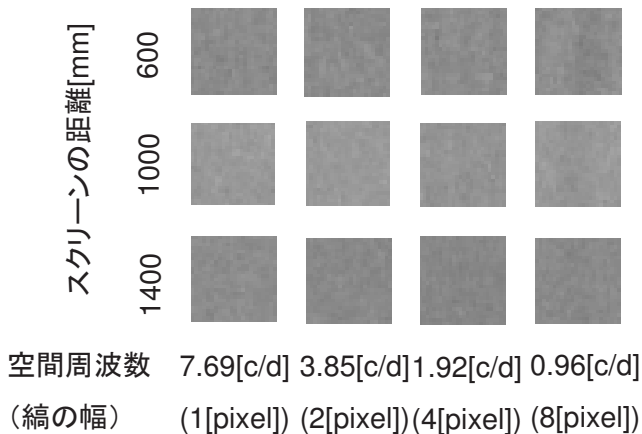


図 11 従来手法により投影された縞画像の様子  
Fig.11 Projected stripe pattern using a half mirror

の値が小さいほど、片方の眼の側から画像を投影したときの、もう片方の眼への影響が大きいことになり、すなわち、クロストークが大きいことになる。

左眼位置からスクリーンに投射され、右眼位置に達する光線を考える。スクリーンへの入射光と反射光のなす角度  $\theta_{lr}$  [°] は、眼間距離 70[mm] とスクリーンへの距離 L[mm] を用いて、

$$\theta_{lr} = \arctan\left(\frac{70}{L}\right) \quad (2)$$

と近似できる。この  $\theta_{lr}$  と図 3 のグラフから、クロストークの近似値を求めることができる。この近似値と実測値を縦軸に、スクリーンとの距離を横軸にとったグラフを図 12 に示す。これより、実測値は近似値と比較してほぼ妥当な値をとっていることが分かる。

明るさの弁別閾を表すウェーバー比は約 0.79 (約 22[dB]) といわれる ([11])。実験結果の dB 値は、スクリーンの距離によらず常にこのウェーバー比を超え

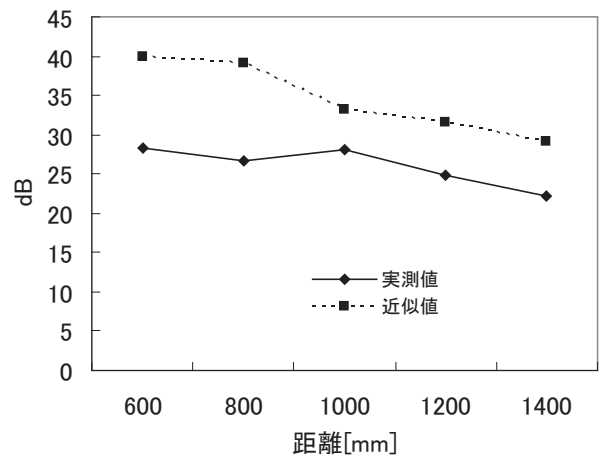


図 12 クロストークとスクリーンの距離の関係  
Fig.12 Relationship between crosstalk and distance from the screen

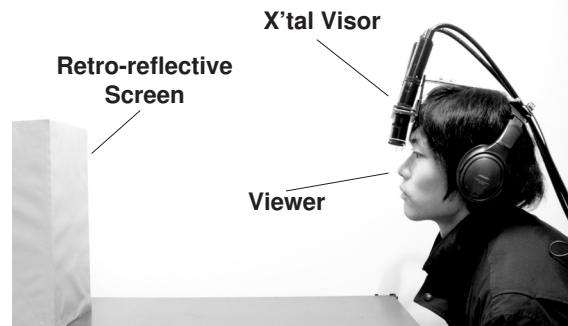


図 13 X'tal Visor を使用している様子  
Fig.13 Viewer with X'tal Visor

ているため、クロストークは人間には認識できない程度であるといえる。

#### 4 まとめ

本論文では、視界が遮られる等の問題点を持つ従来の RPT 光学系に対し、小型ミラーを用いた新しい RPT 光学系を提案した。提案光学系に基づいて、観察者の視界を覆わない頭部搭載型プロジェクタ “X'tal Visor” を実装し、実験により輝度、コントラスト、解像度、クロストークの性能評価を行った。

実験結果から、提案手法は輝度、コントラスト、解像度については、従来の RPT 光学系に勝る性能を示し、クロストークは立体視を実現するに十分な性能を持つことが示された。

図 13 は、実際に X'tal Visor を使用している様子である。X'tal Visor を用いたアプリケーションとしては、現在テレグジスタンス [12] や、マスタースレーブロボットのコクピット [13] への応用が提案されて

いる。

今後は、今回の評価実験をもとに得られた知見を元に、用途に適したスペックをもつ頭部搭載型プロジェクタを設計、製作していく予定である。

### 参考文献

- [1] C. Cruz-Neira, D. Sandin, and T. DeFanti: "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE," ACM Computer Graphics, Vol.27, No.2, pp.135-142, 1993.
- [2] 廣瀬通孝, 小木哲郎, 石綿昌平, 山田俊郎: "没入型多面ディスプレイ (CABIN) の開発", 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, pp. 137-140, 1997.
- [3] I.Sutherland: "A head-mounted three dimensional display", Fall Joint Computer Conference, AFIPS Conference Proceedings, 33, pp. 757-764, 1968.
- [4] H. Nagahara, Y. Yagi, and M. Yachida: "Super Wide Field of View Head Mounted Display Using Catadioptrical Optics", Presence, Teleoperators and Virtual Environments, Vol.15, Issue 5, pp. 588-598, 2006.
- [5] A. Takagi, S. Yamazaki, Y. Saito, and N. Taniguchi: "Development of a stereo video see-through HMD for AR systems", Proc. ISAR2000, pp. 68-77, 2000.
- [6] S. Tachi, N. Kawakami, M. Inami, and Y. Zaitzu: "MUTUAL TELEXISTENCE SYSTEM USING RETRO-REFLECTIVE PROJECTION TECHNOLOGY", International Journal of Humanoid Robotics, Vol.1, No.1, pp. 45-64, 2004.
- [7] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda, and S. Tachi: "Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector", Proceedings of IEEE Virtual Reality, pp. 233-240, 2000.
- [8] R. Kijima, K. Haza, Y. Tada, and T. Ojika: "Distributed Display Approach using PHMD with Infrared Camera", Proceedings of IEEE Virtual Reality, pp. 33-40, 2002.
- [9] H. Hua, and C. Gao: "A Polarized Head-Mounted Projective Display", ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 32-35, 2005.
- [10] 大石巖, 畑田豊彦, 田村徹: "ディスプレイの基礎", 共立出版株式会社, p.193, 2001.
- [11] 松田隆夫: "視知覚", 培風館, p.10, 1995.
- [12] T. Sonoda, T. Endo, Y. Suzuki, N. Kawakami, and S. Tachi: "X'tal Visor", ACM SIGGRAPH 2005 (Emerging Technologies), 2005.
- [13] K. Minamizawa, M. Shinmeimae, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi: "Study on Telexistence (XLVI) - Optical System for Mutual Telexistence Using Retro-reflective Projection Technology", Journal of Asia Society of Art Science, Vol.2, No.1, pp. 31-36, 2006.6

(2006年12月25日受付)

### 山崎 潤 (学生会員)



2006年、東京大学工学部計数工学科卒業。同年同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程進学、現在に至る。拡張現実感のための視覚提示システムに関する研究に従事。

### 園田 哲理 (正会員)



2001年、東京工業大学工学部卒業。2003年、同大学大学院理工学研究科修士課程終了。2006年東京大学大学院工学系研究科博士課程単位取得中退。同年、キヤノン株式会社入社。MixedRealityの研究に従事。

### 吉田 匠 (学生会員)



2006年、東京大学工学部計数工学科卒業。同年同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程進学、現在に至る。拡張現実感のための視覚提示システムに関する研究に従事。

### 川上 直樹 (正会員)



平8東工大・理工・電気電子修士課程終了。平11東大・工・先端学際工学博士課程終了。工博。同年同大学院・工・計数工助手。平14同大学院・工・計数工講師。バーチャルリアリティの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会会員。

### 館 暁 (正会員)



昭43東大・工・計数卒。昭48同大学院博士課程了。工博。同年同大助手。昭50通産省工技院機械技研研究員、マサチューセッツ工科大学客員研究員を減て平1東大先端科学技術センター助教授、平4同センター教授。平6同大学院・情報理工・システム情学先行教授。テレビジョンシステム、人工現実感の研究に従事。IEEE/EMBS学会賞、通産大臣賞、国際計測連合(IMECO)特別勲功賞など受賞。IMEKOロボティクス会議議長、SICEフェロー、日本バーチャルリアリティ学会初代会長。