

Fig. 2 X'talVisor 光学系

る観察者の目の中に入り、網膜上で結像する。この時、全てのレンズが理想的に働き、液晶を通過した光が平行を維持していると仮定した場合には、投影光はミラーの上に光源像と同じ大きさで収束する。ミラーもしくは光源像の小さい方の径を ϕ [mm] として、距離 w [mm] の位置にある再帰性反射スクリーンに対し、許容錯乱円の半径 e [mm] の鮮明さで画像を投影することを考えた場合、焦点深度 d [mm] は以下の式で表される

$$d = \frac{2ew}{\phi}$$

X'talVisor で、1000mm 離れた位置にあるスクリーンへ画像を投影したとき、解像度を維持する許容錯乱円半径 e は 0.5926mm となる。このときの焦点深度は $d = 592.6\text{mm}$ となり、通常の投影型ディスプレイと比較して、広い範囲でピントの合った画像の投影が可能となっている。

以上の仮定は、投影光がミラー上の一点に収束することが前提となっているが、実際には収束するはずの点に規則的なパターンが投影されて、収束しない (Fig. 3)。これは、使用している小型・高密度な液晶の格子による回折光の影響であると考えられる。



Fig. 3 焦点で収束しない投影光

3. 回折光の検証

投影光が収束しない原因が、回折光の影響であることを検証するため、投影レンズの焦点上に現れた格子状の像の間隔を測定し、液晶の格子間隔によって理論的に発生する回折光の間隔と比較を行った。

波長 λ [nm] の平行光を、格子間隔 z の回折格子へ入射さ

せ、焦点 f [mm] の投影レンズによって一点に集中させたとき、干渉によって強い光が現れる間隔 Δx は

$$\Delta x = \frac{f\lambda}{z}$$

で表される。投影レンズの焦点から $f=30\text{mm}$ 、液晶のドットピッチから $z=1.778 \times 10^{-2}\text{mm}$ で、光源の白色光を赤の $7.000 \times 10^{-4}\text{mm}$ から青の $4.358 \times 10^{-4}\text{mm}$ の波長域を含む光と考えた場合、 $\Delta x = 0.735 \sim 1.181\text{mm}$ となる。実際に計測した模様の間隔は約 1.0mm であり、よく一致している。微小ミラーの中心に集中する 0 次の回折光によって投影像が結像する場合、周辺の 1 次以降の回折光はスクリーンがどの距離にあっても 0 次回折光と一点に像を結ばないため、結像性能に悪影響を及ぼすと考えられる。実際に、1000mm 先のスクリーンへミラーの径を変えて投影した画像を Fig. 4a, b, c に示す。a が投影した元画像、b が $\phi 2\text{mm}$ 、c が $\phi 25\text{mm}$ の場合で、ミラー径の拡大によって 1 次以降の回折光が投影され、鮮明さが低下している。以上から、鮮明な画像等の投影を行うには、微小ミラーの径は 0 次回折光のみを反射するように $2\Delta x$ 以内であることが望ましいと考えられる。

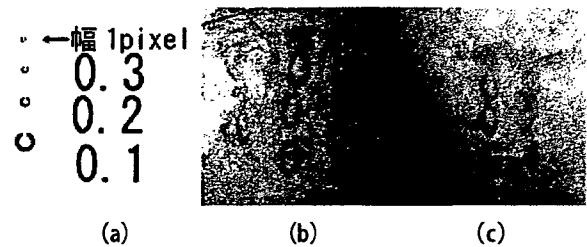


Fig. 4 ミラーを変えたときの投影像

4. まとめ

「X'talVisor」では、微小ミラーの径によって焦点深度が変化するだけでなく、液晶の格子によって生じる回折光が、結像性能に影響を及ぼしている。本稿では、回折光を考慮した際的设计指針を示した。今後は、ミラー径による輝度の変化も含めた詳細な検討を行い、X'talVisor の更なる改良を行う予定である。

5. 参考文献

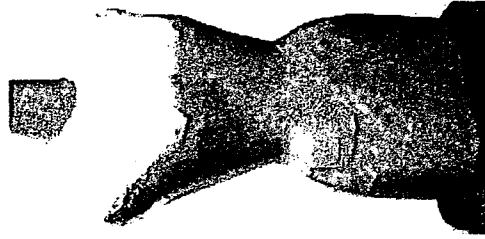
- [1] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda, K. Mabuchi and S. Tachi, Head-Mounted Projector, ACM SIGGRAPH '99 Conference Abstracts and Applications, p.179(Emerging Technologies), 1999.
- [2] T. Sonoda, T. Endo, Y. Suzuki, N. Kawakami and S. Tachi, "X'talVisor", ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies, 2005.

患者・医療情報統合システム

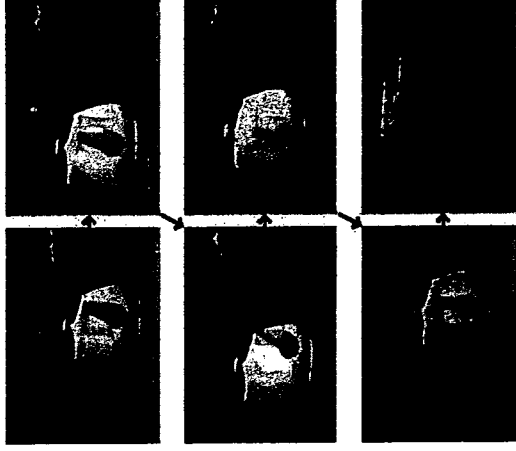
東京大学 館障

研究要旨：

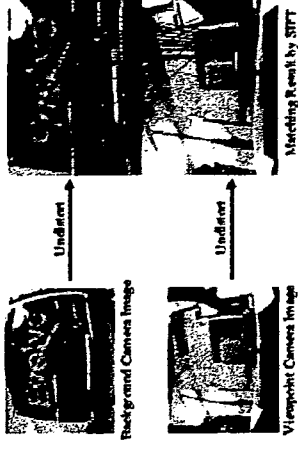
医療情報を患者に対し効果的に提示する手法としてAR(Augmented Reality：拡張現実感)技術を利用した「患者・医療情報統合システムの構築」を目指す。インフォームド・コンセントなどの際に患者に対して可視化する実世界指向型ディスプレイシステムの提案・実装を行った。



骨格モデルの実体型ディスプレイへの投影

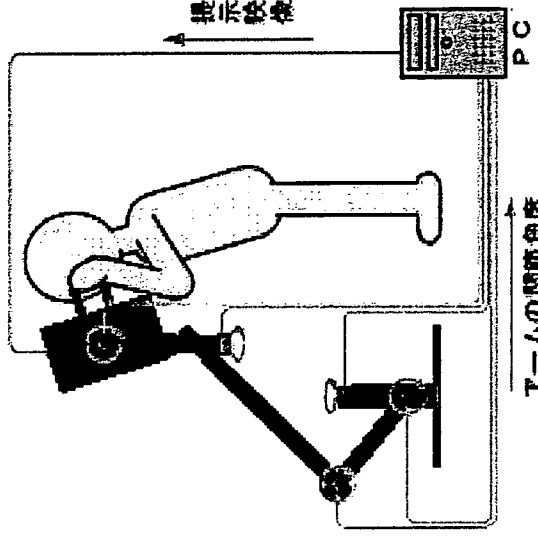


任意視点からの立体画像提示

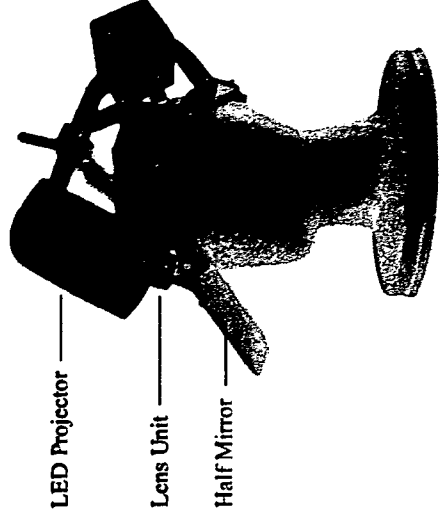


Find Homography Matrix by RANSAC

視野外情報提示技術の開発



アームの関節角度 X'tal Scopeシステム



LED Projector

Lens Unit

Half Mirror

X'tal Visorシステム

5 自由度両眼 RPT ディスプレイの研究

5DOF Binocular RPT Display

吉田匠¹⁾, 山崎潤¹⁾, 梶本裕之¹⁾, 川上直樹¹⁾, 館暉¹⁾

Takumi YOSHIDA, Jun YAMAZAKI,

Hiroyuki KAJIMOTO, Naoki KAWAKAMI and Susumu TACHI

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科

(〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {Takumi_Yoshida, Jun_Yamazaki}@ipc.i.u-tokyo.ac.jp,

{kaji, kawakami, tachi}@star.t.u-tokyo.ac.jp)

Abstract : RPT that projects a virtual object to the retroreflective screen has been proposed as a technology that unites the VR world and the real world. We developed a 5DOF Binocular type RPT Display (X'tal Scope) that enabled the presentation of 3D image. As a result, the VR world in the real world was observed from arbitrary viewpoint.

Key Words: Retroreflective Projection Technology, 3D Display

1. 序論

VR 世界と現実世界を視覚的に融合させる技術として、再帰性反射材のスクリーンにバーチャルな物体を投影する再帰性投影技術 (RPT: Retroreflective Projection Technology) が提案されている。我々は、各関節にエンコーダを配置した 5 自由度のアームにプロジェクタを 2 台設置することで、観察者の視点の三次元位置及び視線方向に応じた両眼立体映像の提示を可能にするシステム, X'tal Scope を開発した。これにより、任意視点から現実世界に重畳された VR 世界を観察することができる。本稿ではシステムの試作について述べる。

2. 従来研究

これまで RPT の提示デバイスとして、頭部位置を計測してそれに応じた映像を提示する “HMP (Head-Mounted Projector)” [1] や、目を覆わない形で映像の提示を可能にする “X'tal Visor” [2] などが開発されてきた。だがこれらは頭部搭載型であり、頭部への違和感無く装着できるような小型化は未だ達成されているとは言えない。また、頭部搭載型の視覚提示デバイスは頭部の位置計測に磁気センサを使用しているため、計測誤差や時間遅れといった解決すべき問題が残っている。

これに対し、NASA のエイムズ研究センターの「仮想風洞プロジェクト」[3] にて用いられたシステム “Boom” のように、多自由度のアームの先端に小型 CRT を取り付け付けたディスプレイ方式がある。この方式の利点は、第

一にリンク保持のため重量の大きなディスプレイが使用できるという点、第二に、ディスプレイ位置がアームの関節のエンコーダ値によって測定できるという点である。これにより、磁気センサを用いた場合に比して高速かつ正確にディスプレイ位置を測定することができる。

X'tal Scope は “Boom” の方式を RPT システムに応用したものであると言える。

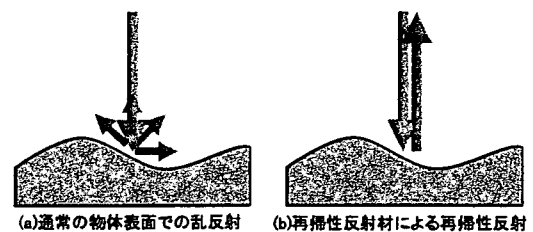


図 1: 再帰性反射材の反射特性。

3. 原理

本節では、X'tal Scope の動作原理について述べる。

3.1 RPT システムの原理

まず、RPT システムの基本原則について述べる。RPT ではスクリーンとして再帰性反射材を用いる。図 1 に示すように、通常の物体表面に入射してきた光は (a) のように乱反射するが、再帰性反射材は (b) のように光が入射した方向に反射 (再帰性反射) する特性を持つ素材である。そして図 2 のようにハーフミラー等を介し

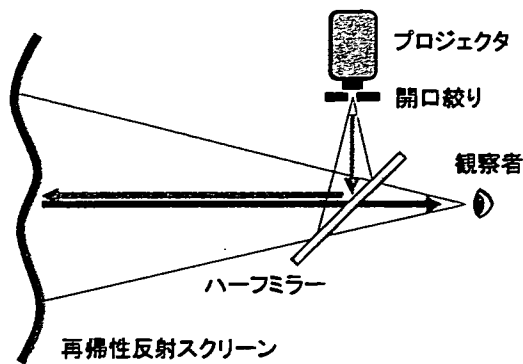


図 2: RPT システムの基本原理.

て観察者の目と光学的に共役な位置から映像を投影することで、観察者に映像を提示する。さらに、プロジェクタに開口径に絞りを設け、可能な限り絞りを小さくすることによって深い焦点深度を得ることができる。再帰性反射材の持つ高い指向性反射特性により左右の目に別々の映像を提示することができ、これによって両眼立体視が可能となる。

3.2 X'tal Scope のシステム構成

X'tal Scope のシステム構成は図 3 のようになっている。X'tal Scope 本体は 5 自由度のアームと、頭部に設置された 2 台のプロジェクタから成る。アームの自由度配置を図 4 に示す。アームの各関節に配置されたエンコーダの値から観察者の視点位置及び視線方向を計算し、それに応じた映像を、観察者の視点と光学的に共役な位置に置かれた 2 台のプロジェクタによって再帰性反射材のスクリーンへ投影する。これによってパースペクティブな物体があたかもスクリーン位置に存在するように、立体感を持って提示することができる。

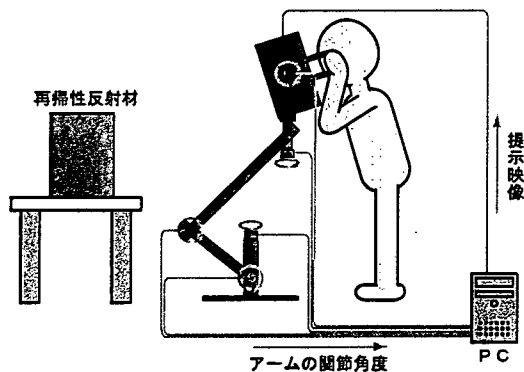


図 3: X'tal Scope のシステム構成.

4. 実装

X'tal Scope を設計、作製した。全体像及び頭部を裏側から見た写真を図 5 に、スペックを表 1 に示す。

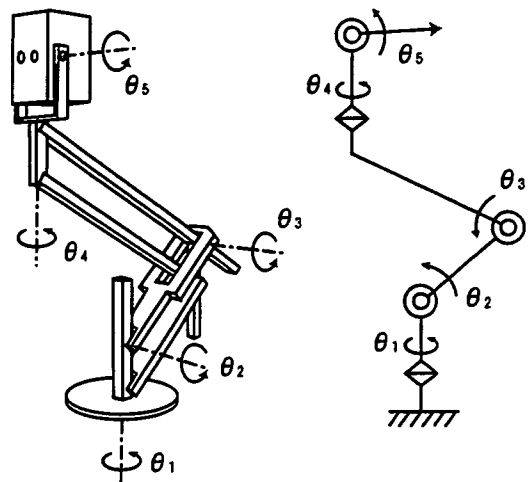


図 4: 自由度配置.



図 5: 左: 全体像, 右: 頭部 (裏側).

表 1: スペック

頭部稼動範囲	140×140×45[cm]
頭部ピッチ角	上方向 60[deg], 下方向 90[deg]
水平画角	30[deg]
垂直画角	22[deg]

4.1 プロジェクタとハーフミラーの配置

2 台のプロジェクタの投影部間の水平方向の距離は、人間の平均的な眼間距離である 65mm としなければならない。また、人間の視野は水平方向に広い横長の形であるため、投影する映像も同様に横長であることが望ましい。本試作機で用いたプロジェクタ (東芝 TDP-FF1A) の場合、左右に横向きに並べる配置では投影部間の水平方向の距離が眼間距離より大きくなってしまい、縦向きに並べる配置では投影映像が縦長になってしまう (図 6)。

そこで図 7 に示されるように 2 台のプロジェクタを上下に配置し、ハーフミラーを交差させて置くことで上記の問題を解決した。

プロジェクタを上下に配置する場合、プロジェクタ間

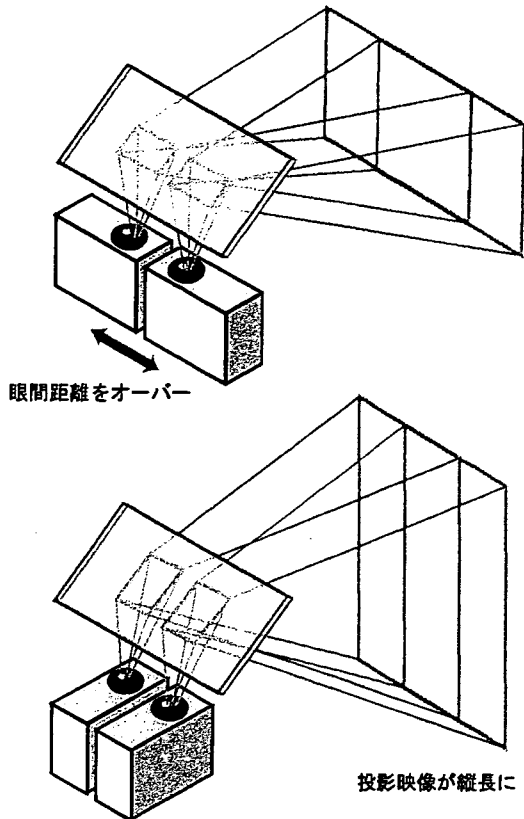


図6: プロジェクタの配置案。

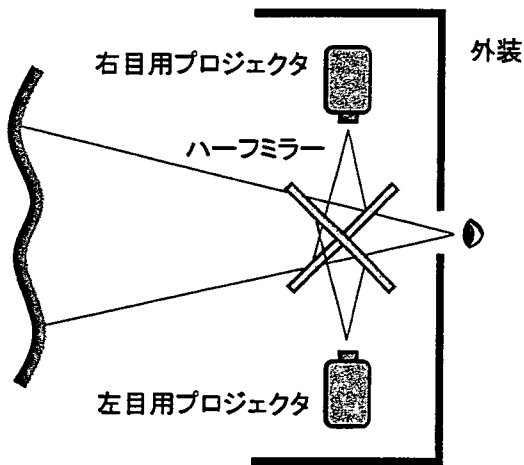


図7: X'tal Scope 頭部のプロジェクタとハーフミラーの配置。

の上下方向の距離が問題となる。上下間の距離が近いほど、要求されるハーフミラーのサイズは小さくなり、装置をコンパクトにすることができる反面、ハーフミラーを透過した光がもう一方のプロジェクタに当たった反射光の影響が大きくなる。よって、反射光の影響という観点からは上下間の距離は装置の大きさの許す限り離して配置するのが望ましい。

しかし、左右のハーフミラーを交差させた配置であるため、左右それぞれのハーフミラーにプロジェクタか

ら映像を投影できる範囲は限られている。上下間の距離が遠ければ、投影映像がもう一方のハーフミラーの領域に入り、その結果画像が途切れることになるため、上下間の距離には上限がある。この上限はプロジェクタの水平面角によって求めることができる。

X'tal Scope の頭部では以上の点を考慮し、画像の途切れない範囲でできるだけ離れた位置に上下のプロジェクタを配置している。

また、反射光の影響は吸光材として黒色のフェルトを反射部に貼ることによって多少軽減が可能である。

4.2 ハーフミラーの選択

ハーフミラーは従来手法では輝度の最も高くなる透過率 50%の物が使われていた。しかし透過率 50%の物は提示映像の輝度は高くなるものの、周囲の環境の明るさも 50%になってしまうという欠点がある。屋外のように周囲が十分な明るさの場所ならば問題は無いが、室内では周囲の暗さが目立ち、VR 世界の現実世界への自然な重畳が成り立たない場合がある。そのため、環境に合った適切な透過率のハーフミラーを用いることが必要である。

そこで、VR 世界と現実世界の明るさが十分に得られる最適なハーフミラーを選択するため、いくつかの透過率の異なるハーフミラーの比較を行った。図 8 にその結果を示す。A は透過率の低いアクリル製ハーフミラー、B は透過率 60%のガラス製ハーフミラー、C は透過率 70%のガラス製ハーフミラー、D は透過率の高い透明アクリル板を用いた場合である。D の透明アクリル板を用いた場合が最も周囲が明るく、かつ提示映像の輝度も十分に得られていることがわかる。

この結果から、X'tal Scope では室内で十分な輝度を得られ、かつ周囲の環境の光量も阻害しないように透明アクリル板を使用することとした。

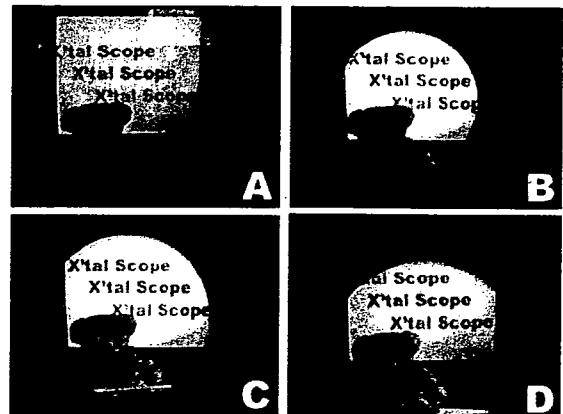


図8: ハーフミラーの違いによる輝度の比較。

5. 評価

本手法の最大の特徴は両眼立体視ができる点である。両眼立体視においてクロストーク（左目に右目用の画像が入り、右目に左目用の画像が入る現象）の有無は自然な立体視に大きな影響を及ぼす。そこでクロストークが生じていないかどうかの評価を行った。

左右の目にそれぞれ“L”、“R”の文字を提示した写真を図9に示す。左目には“L”、右目には“R”の文字しか見えておらず、クロストークがほとんど生じていないことが確認できる。これによって、本手法を用いて自然な立体視が可能であることが示された。



図9: クロストークの評価。

6. アプリケーション

本システムは医療や建築など、様々な分野での応用が考えられる。例えば、患者の人体にMRI等の技術によって得られた人体内部の3次元画像を投影したり、設計・開発段階の建造物や製品のCGを投影し、プレゼンテーションを行うなどが考えられる。

我々はシステムの一例として、車・住宅・人骨のCGを表示するアプリケーションを作製した。図10-12にそれぞれ実際に投影した様子を示す。視点の位置に応じた適切な画像が表示されていることがわかる。

7. 結論

覗き込む方式で現実世界にVR世界を重畳する立体視可能な5自由度両眼RPTディスプレイを提案し、実機の試作を行った。その結果、任意視点に応じた自然な立体視ができることが確認された。

今後は、装置とVR空間の座標のキャリブレーションをより正確にする、より視野角の大きい光学系を設計するなどの課題が考えられる。



図10: アプリケーションの例(車)。

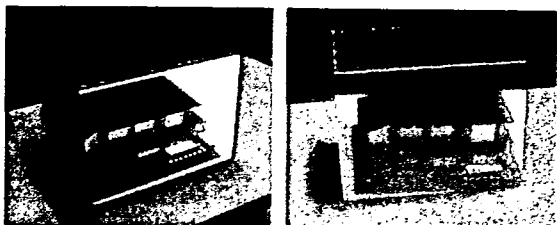


図11: アプリケーションの例(住宅)。



図12: アプリケーションの例(人骨)。

参考文献

- [1] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, and S. Tachi: "Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector", in Proc. of IEEE Virtual Reality 2000, pp. 233-240, 2000.
- [2] T. Sonoda, T. Endo, Y. Suzuki, N. Kawakami, and S. Tachi: "X'tal Visor", ACM SIGGRAPH 2005 (Emerging Technologies), 2005.8
- [3] S. Bryson and C. Levit: "A Virtual Environment for the Exploration of Three Dimensional Steady Flows", Proc. of Intl. Conf. on Artificial Reality and Tele-Existence, pp.15-23, 1991

トレイグジスタンスの研究(第54報) -再帰性投影技術を用いた両眼立体視システムにおける 手元への視覚提示の効果-

Study on Telexistence (LIV)
-The effect of image projection at hand with RPT Binocular Stereoscopic Display System-

山崎潤, 新居英明, 川上直樹, 館暉
Jun YAMAZAKI, Hideaki NII, Naoki KAWAKAMI and Susumu TACH

東京大学 大学院情報理工学系研究科
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {Jun_Yamazaki, hideaki_nii}@ipc.i.u-tokyo.ac.jp,
{kawakami, tachi}@star.t.u-tokyo.ac.jp)

Abstract: When an operator manipulates objects in a remote environment with Telexistence Master-Slave system, it is important how to show the visual information of a remote environment. In this paper, we present RPT(Retro-reflective Projection System) Binocular Stereoscopic Display system as an optical system on the master cockpit. The system includes both the cylinder-like screen which radius is about one meter, and the screen attached on the master arm. Because it can occur that each parallax image is projected discrete screen, we research the extent that one can view the object stereoscopically with this system.

Key Words: Telexistence, Master-Slave Robot, Retro-reflective Projection Technology, Binocular Stereoscopic Display

1.はじめに

近年, あたかも自分が遠隔地に存在しているかのような感覚を与える技術, "トレイグジスタンス(Telexistence)"[1]に関する研究が行われている. 我々の研究室では, テレイグジスタンスを実現する1手法として, 相互トレイグジスタンスマスタスレーブロボット"TELESAR II"[2]を開発している(図1). このようなマスタスレーブシステムでは, マスタアームに連動したスレーブアームによって遠隔地の環境に対して操作を行うことができる. このとき, 操作者があたかもスレーブロボットの位置にいて操作を行っているような直感的な操作を実現するためには, 遠隔地における視覚情報がマスタコックピット内の操作者に提示されることが重要である. そのため, 操作を行うスレーブアームや操作対象の物体を操作者に視覚的に提示し, 操作者が遠隔地の環境に対し正確な空間認知を行うため立体視を行うことが求められる. また, 操作者の腕の位置姿勢計測や触覚・力覚提示のために操作者が装着する機器は, 互いに干渉を起こすことが考えられるため, その機器を確認しながら作業することも円滑な操作のために必要となる. 以上の要求を満たすものとして, 再帰性投影技術[3]を用いたマスタコックピットへの視覚提示システム[4]が考えられる.

再帰性投影技術とは図2に示す光学系を用いる映像提示手法で, 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任意の形状のスクリーン上に提示することができる. また, 絞りを設けることにより, 焦点深度を深くすることができる. マスタコックピット内において, 操作者はこの光学系を左右眼用に2つ搭載した頭部搭載型プロジェクタを装着する. マスタコックピットには, 必要な視野のほぼ全体を覆う円筒状のスクリーンとマスタアーム表面を覆うスクリーンが設置される. 遠隔地の視覚情報を提示したい部分のみにスクリーンを配置することにより, マスタアームのある位置にも遠隔地の視覚情報



図1 相互トレイグジスタンスマスタスレーブロボット
"TELESAR II"
(左)スレーブロボット(右)マスタコックピット

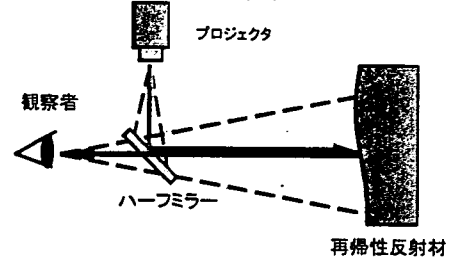


図2 再帰性投影技術の原理

を表示することができる.

本提案システムには固定スクリーンとマスタアームに伴い移動するスクリーンが存在し, ここに映像を投影することで実際に遠隔地にいるかのような立体視, 空間知覚を実現することを目的とする.

2. マスタコックピットへの視覚提示

2.1 従来の立体映像提示手法

従来広く研究されてきた立体映像提示手法として, HMD(Head-Mounted Display)を用いる手法と IPT(Immersive

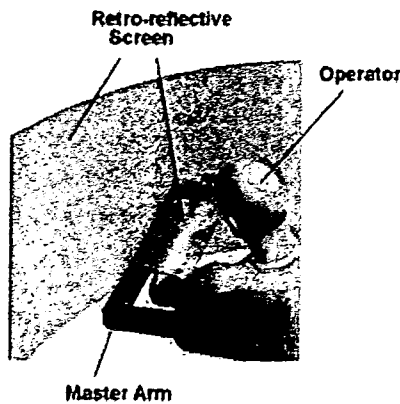


図3 提案システム

Projection Technology) を用いる手法が挙げられる。

HMD を用いる場合、実環境の映像は完全に遮断され、遠隔地における視覚情報を得ることができる。実環境の視覚情報を提示する場合には、マスタアームや操作者の腕等をモデル化し、CG で HMD 上に表示された遠隔環境の映像に重畳する手法が考えられる。しかし、CG を利用した情報提示は計算量が増加し、リアルタイム性を損なうおそれがある。

IPT を用いる場合、操作者は実環境におけるマスタアームや操作者の腕は直接見ることができる。しかし、スレーブアームを表示した場合、マスタアームにより大部分が遮蔽されてしまい見ることができない。

他にレンチキュラレンズ等を用いた裸眼立体ディスプレイを用いることも考えられる。しかし、腕より遠い位置にディスプレイを配置した場合には IPT の場合と同じく、スレーブアームを見ることが困難となる。一方、腕より近い位置にディスプレイを配置した場合は、HMD の場合と同じく、マスタアームと腕のモデル化や位置姿勢の計算等の手間がかかり、リアルタイム性を損なうおそれがある。

2.2 提案法

以上のような手法に対し、以下の図3のような再帰性投影技術を用いた視覚提示システムを提案する。スレーブロボットは、マスタアームにおいて HMP(Head-Mounted Projector) [3] を装着する。マスタアーム内には距離の異なる2つの再帰性投影材のスクリーンが配置される。一つは、操作者の視野全体を覆うスクリーンで、操作者の位置を中心とした直径1[m]程度の円筒状に配置される。もう一つは、マスタアームに固定される小型のスクリーンである。再帰性投影技術の特徴より、この小型スクリーンの形状は任意であり、遠隔地の視覚情報を提示したい部分のみにスクリーンを配置し、実環境の視覚情報を提示したい部分には配置しないことで、簡単に遠隔地が見える部分と実環境が見える部分を分けることができる。また、スクリーンの形状によらず、スレーブロボット頭部のカメラで取得された映像をそのまま投影することでスレーブロボットの視野情報を提示することが可能となる。

次節では提案システムのように距離の異なる複数のスクリーンに映像を投影した場合でも、左右眼に提示された視差画像を融合させ、一つの物体として認識するために必要な提示物体の位置を実験により求め、本提案手法が遠隔地に対して操作を行うために十分な立体視が実現できることを示す。

3. 実験

距離の異なるスクリーンに両眼視差画像を提示した場

合の融像可能範囲を定量的に評価するため実験を行った。融像可能範囲は、視差画像により生じる両眼の輻輳位置により表す。

光学系に用いたプロジェクタは V-1100Z(PLUS Vision 社製)であり、片眼の投影画角を横 49[deg]、縦 35[deg]とした。投影画像のピントは 1[m]の位置で固定した。

3.1 実験1：単一スクリーンへの提示

まず、予備実験として単一のスクリーンに視差画像を投影した場合の融像可能な範囲を求めた。スクリーン位置が 30[cm]、1[m]の2箇所において、それぞれ実験を行った。

その結果、スクリーン位置が 30[cm]の場合は融像可能範囲が 15[cm]から 110[cm]、スクリーン位置が 1[m]の場合は融像可能範囲が 20[cm]から無限遠となった。

先行研究の結果[6]と比較すると、スクリーン位置が 30[cm]の場合に融像可能範囲が広がっている。これは、再帰性投影技術を用いたことにより焦点深度が深くなったためと考えられる。

3.2 実験2：距離の異なるスクリーンへの提示

次にスクリーンを 30[cm]と 1[m]の位置に置いたときの融像可能範囲を求める。30[cm]の位置のスクリーンの端が被験者の顔の正面に見えるよう、スクリーンを設置した。

その結果、25[cm]から 95[cm]の範囲で融像が可能であった。

以上の結果から、操作者の腕の稼動範囲内においては立体視が可能であることが示された。

4. おわりに

本稿では、再帰性投影技術を用いたマスタアームへの視覚提示システムを提案し、距離の異なるスクリーンに投影される融像可能な提示物体の位置の範囲について実験を行った。その結果、操作者の腕の稼動範囲内においては立体視が可能であり、操作を行う対象物の遠隔空間内での位置を把握するという点に関して、本提案システムが有用であることが示された。

今後は操作者の頭部の動きに伴う運動視差やマスタアームが動く際のスクリーンの動きによる立体視への影響について研究を進める予定である。

参考文献

- [1] S. Tachi: 'Toward the telexistence next generation', in Proc. 11th Int. Conf. Artificial Reality and Telexistence (ICAT2001), pp. 1-8, 2001.
- [2] S. Tachi, 'Two Ways of Mutual Telexistence: TELESAR and TWISTER', in Telecommunication, 'Teleimmersion and Telexistence (S. Tachi ed.)', pp. 3-24, IOS Press, 2003.
- [3] H. McDermott, M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, and S. Tachi: 'Head-Mounted Projector', ACM SIGGRAPH '99 Conference Abstracts and Applications, p. 179 (Emerging Technologies), 1999.
- [4] K. Minamizawa, M. Sinmeimae, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi: 'Study on Telexistence (XLVI) - Optical System for Mutual Telexistence Using Retro-reflective Projection Technology'.
- [5] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. Defanti: 'Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE', in Proc. of SIGGRAPH '98, pp. 179-188, 1998.
- [6] 畑田豊彦, '両眼立体視機能と眼鏡', 眼鏡の科学, Vol. 1, No. 1, pp. 27-65, 1977.

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*¹, 園田 哲理*², 吉田 匠*¹, 川上 直樹*¹, 館 暉*¹

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

Jun Yamazaki*¹, Tetsuri Sonoda*², Takumi Yoshida*¹, Naoki Kawakami*¹ and Susumu Tachi*¹

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

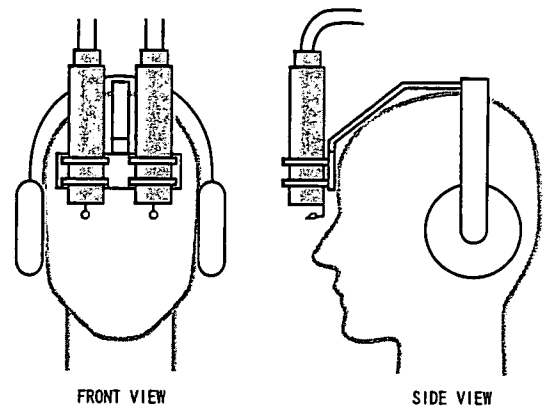


図1 X'tal Visorの全体図
Fig.1 Overall view of X'tal Visor

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

*¹東京大学大学院 情報理工学系研究科

*²(株) キヤノン

*¹Graduate School of Information Science and Technology, Univ. of Tokyo

*²Canon Inc.

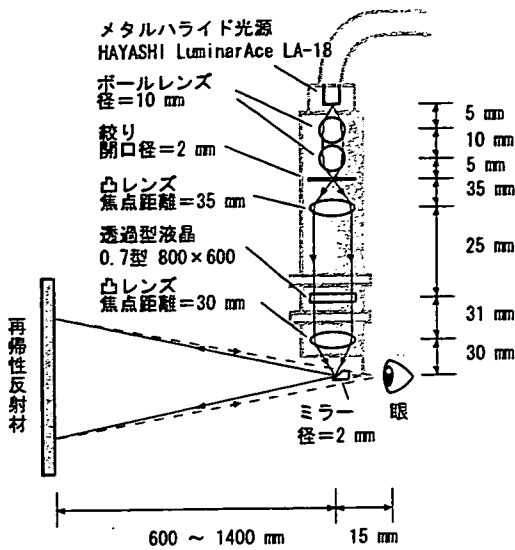


図2 X'tal Visor の光学系
Fig. 2 Optical system of X'tal Visor

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必要となる。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。

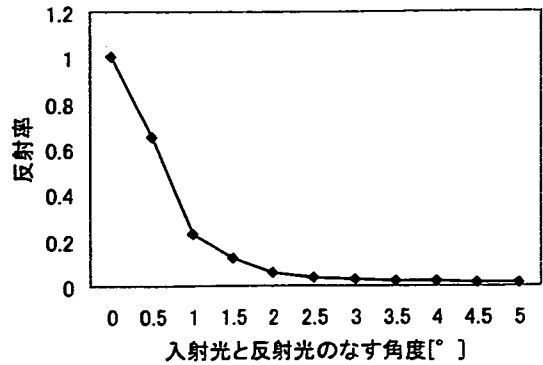


図3 再帰性反射材の反射特性
Fig. 3 Reflective characteristics of retroreflector

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 Luminar Ace 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 2[mm]) 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°] 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

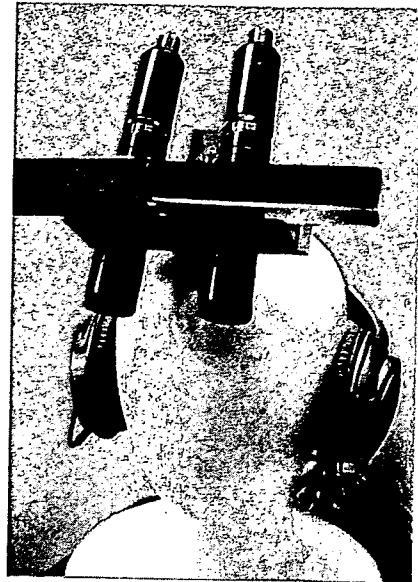


図4 実装した X'tal Visor
Fig. 4 Implemented X'tal Visor

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 ϕ [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。

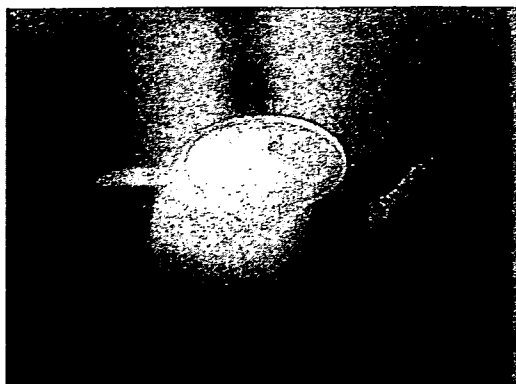


図5 投影画像の様子
Fig.5 Projected image

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に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° ）を用いる。

輝度計は、ミラーから 15[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。

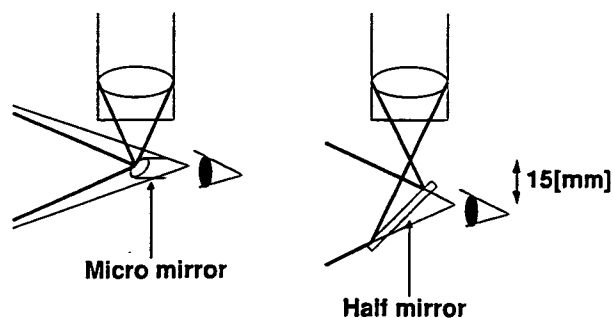


図6 実験装置：(左) 小型ミラーを用いた提案光学系、(右) ハーフミラーを用いた従来の RPT 光学系

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 θ 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 θ 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 θ 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 15mm からさらに短くすることが可能であろう。

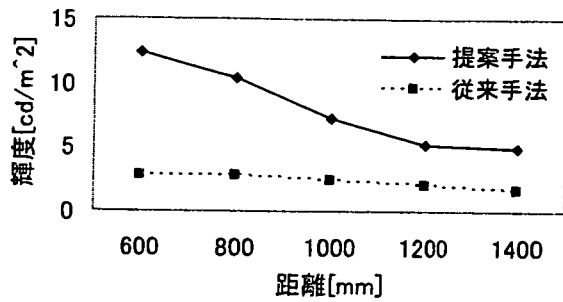


図7 輝度とスクリーンの距離との関係
Fig.7 Relationship between luminance and distance from the screen

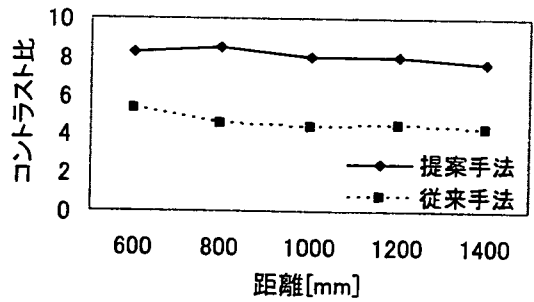


図9 コントラスト比とスクリーンの距離との関係
Fig.9 Relationship between contrast ratio and distance from the screen



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

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 $1[\text{pixel}]$) 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、 800×600 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ていて見辛いですが、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 $8[\text{pixel}]$) 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 $70[\text{mm}]$ 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

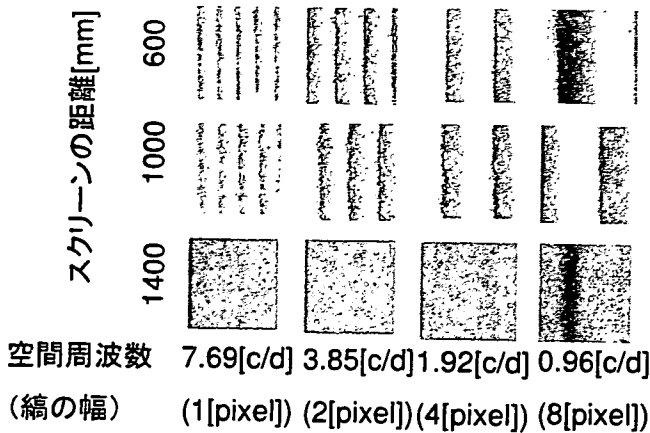


図 10 提案手法により投影された縞画像の様子
Fig.10 Projected stripe pattern using a micro mirror

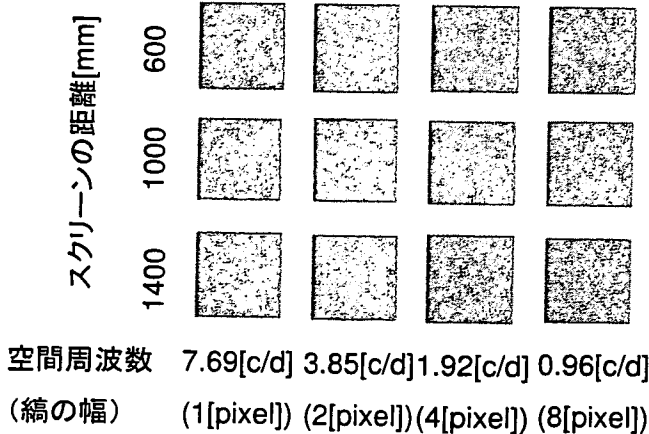


図 11 従来手法により投影された縞画像の様子
Fig.11 Projected stripe pattern using a half mirror

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 θ_{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 θ_{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

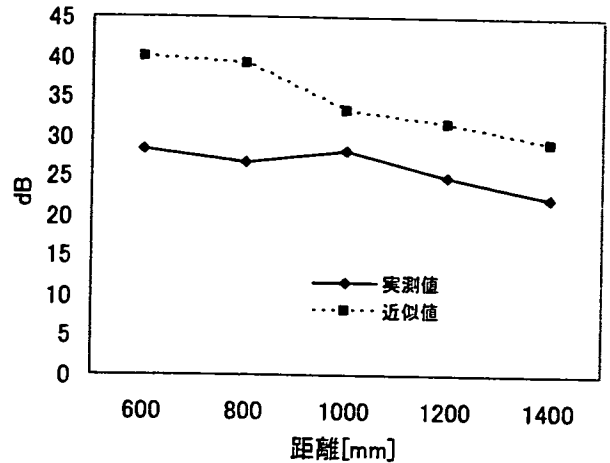


図 12 クロストークとスクリーンの距離の関係
Fig.12 Relationship between crosstalk and distance from the screen

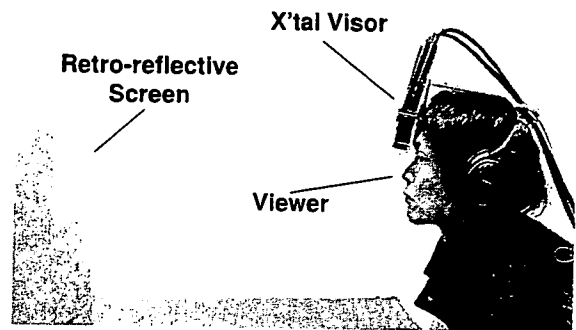


図 13 X'tal Visor を使用している様子
Fig.13 Viewer with X'tal Visor

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 暉 (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・システム情報学先行教授。レイグジスタンス、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。

光学迷彩のための 撮影対象物体の距離情報に応じた画像補正

Instructions for Preparation of Camera-ready Manuscripts
for Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan

城堅誠¹⁾, 菊田恭平²⁾, 吉田匠¹⁾, 新居英明¹⁾, 川上直樹¹⁾, 館暲¹⁾

Kensei Jo, Kyohei Kikuta, Takumi Yoshida, Hideaki Nii, Naoki Kawakami and Susumu Tachi

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科

2) 東京大学工学部 計数工学科

(〒113 東京都文京区本郷 7-3-1, Kensei_Jo@ipc.i.u-tokyo.ac.jp)

Abstract : Using the Optical Camouflage, it is necessary to know the distance of the captured object to the camera. This leads to difficulties availing it for moving objects. System in this approach, stereo matching is applied to measure the distance. In addition, the difference between the real view and the projected picture is corrected.

Key Words: *Optical Camouflage, augmented reality, RPT, stereo matching*

1. はじめに

近年、再帰性投影技術 [1][2] (Retro-reflective Projection Technology:RPT) を用いた様々なアプリケーションが研究されている。その中でも、光学迷彩 [3] では、本来ならば死角の位置にある映像を再帰性反射材に投影することで、あたかも物体が透けているかのような錯覚を起こさせる。

ところが、この光学迷彩は被写体からカメラまでの距離 (図1の Object Distance) が予めわかっている場合に限られ、自由に動く被写体を撮影する際には、この距離が異なることによるずれが生じることがあった。また、カメラを複数台用いる方式はこれまでに行われていない。

そこで本研究では、カメラを複数台用いることで、ステレオカメラの原理により被写体の位置を動的に計測し、距離ずれを解消する手法を提案する。

1.1 RPTによる光学迷彩の原理

光学迷彩とは図1(a)のように観測者からは死角の位置にある被写体を外部に配置したカメラで撮影し、その映像をプロジェクタを用いて再帰性反射材に投影することによって、あたかも死角にある映像が透けて見えるような視覚効果を与える技術のことである。

その際、観測者から見えている実映像と再帰性反射材に投影した映像の境界を自然に接続させるためには、死角にある被写体と観測者の位置関係の情報が必要である。そのため被写体と同位置 (カメラから Object Distance の地点) にスクリーン (図1(b)中の Virtual Screen) があると仮定し、カメラ映像を Virtual Screen に投影する。さらに Virtual

Screen を観測者の地点から観測したときに得られるはずの映像を、外部から遮っている壁に貼り付けた再帰性反射材に投影することで、観測者は外部の映像を得ることが可能になる。

2. 手法の提案

本研究では、複数台のカメラを用いてステレオマッチングを行う事で、被写体の三次元位置を計測し、映像を投影する手法を提案する。

光学迷彩においては必要な距離情報は、被写体までの平均の奥行き距離である Virtual Screen 位置であり、撮影対象の詳細な三次元形状はそれほど重要ではない。むしろ高速に距離を取得し、常に Virtual Screen が被写体とほぼ同じ奥行き距離に配置されることが大切である。

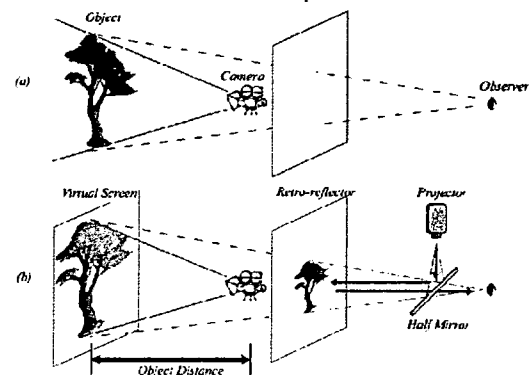


図1: 光学迷彩の原理

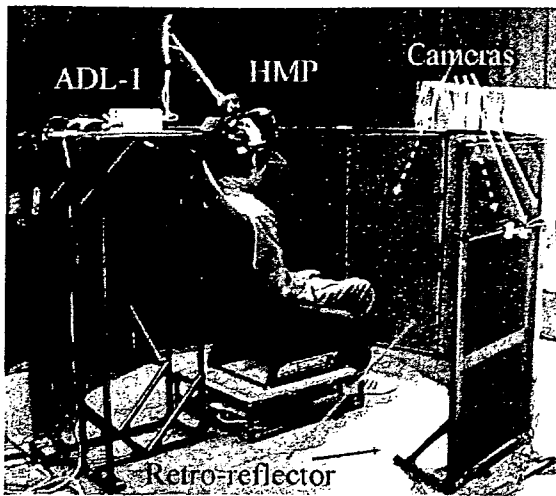


図 2: 装置の全体図

そこで概算の距離情報を高速に求めるため、元画像を縮小し、ノイズ除去のためガウシアンフィルタをかけ、さらにエッジ検出線を用いることでマッチングの高速化を図った。また画像全体の三次元座標を求めることは行わず、特徴的な点を初めに求め、その点の三次元座標を求めた。

1. カメラ A 中の特徴点を求める。
2. カメラ B とステレオマッチングを行い、特徴点の三次元位置を求める。
3. それらの特徴点の距離から、Virtual Screen の配置するべき奥行き距離を求める。

3. 装置

カメラは Point Grey Research 社製 FireflyMV(640×480) を用い、Head-Mounted Projector(HMP) は東芝 TDP-FF1A を元に自作した。カメラや再帰性反射材の配置は図 2 のようにし、ある物体が隣接する二つのカメラに同時に投影されるようにし、ほぼすべての領域でステレオマッチングによる距離を測定が可能となるようにした。

頭部には HMP と、位置計測装置 (Shooting Star Technology 社製 ADL-1) を取り付け、頭部の動きに合わせて HMP から映像を投影した。

4. 試作結果

実装したシステムを使用した結果、被写体の奥行き距離が取得できていることが確認できた。図 3 は実際に装置を用いて投影したときの映像を表しており、頭部の映像が観測位置から撮影した実映像、胸以下の部位については、外部カメラから取得した映像を再帰性反射材に投影した投影映像を表している。図 3 左の補正無しの状態では、Virtual Screen の奥行き距離が実際の被写体の奥行き距離とずれているため、実映像と投影映像の間のスケールがあっていない。しかし距離による補正をかけることで、図 3 右のように現実の映像と投影される映像が自然に接続されることが確認できた。

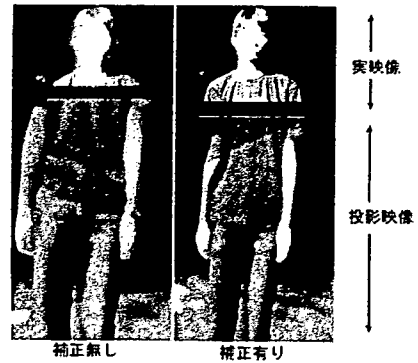


図 3: 未補正時に観測者が得られる映像 (左) と、補正をかけたときの映像 (右)

ただし、常に正しく補正されるわけではなく、補正をかけても画像にずれが生じる場合があることも判明した。

5. 考察

主にずれの原因となった要因は、ステレオマッチングの対応点の誤り、およびキャリブレーションの誤差があると推測される。

広い視野を得るために、カメラを離れて配置したため、二つのカメラで見える画像に差が大きく、マッチングが難しい。また、カメラの位置姿勢は手作業で合わせており、誤差を含んでいる。以上のような理由で、算出された距離にも誤差が含まれていたと推測される。

ステレオマッチングの対応点が正しい場合には、対象物体のほぼ同一の奥行き距離に Virtual Screen が配置され、実映像と投影映像の境界も自然に接続された。このような条件において、本手法は光学迷彩に於ける画像補正手法として有効に機能していることを示すことができた。

6. おわりに

提案した手法より、光学迷彩においてカメラを複数台用いて被写体の奥行き距離を動的に取得することで、被写体の動きにあわせた画像補正の可能性が示された。

今後は、今回課題となったステレオマッチングの精度向上や、カメラのキャリブレーションの問題などを解決し、システムの改良を進めていきたい。

参考文献

- [1] 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 2000, pp.233-240, Mar.2000
- [2] S. Tachi: "Augmented Telexistence", Mixed Reality-Merging Real and Virtual Worlds, pp.251-260, 1999
- [3] M. Inami, N. Kawakami and S. Tachi: "Optical Camouflage Using Retro-reflective Projection Technology", Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '03), 2003

A new concept of three-dimensional endoscope for endoscopic surgery

Y. Muragaki,^{1,2} M. Hashizume,³ D. Hashimoto,⁴ H. Iseki,¹ K. Takakura¹

¹ Faculty of Advanced Technosurgery, Institute of Advanced Biomedical Engineering and Science, Graduate School of Medicine, Tokyo Women's Medical University, 8-1 Kawada-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8666, Japan

² Department of Surgery and Science, Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University, 3-1-1 Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8582, Japan

³ Department of Disaster and Emergency Medicine, Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University, 3-1-1 Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8582, Japan

⁴ Department of Surgery, Saitama Medical Center, Saitama Medical School, 1981 Tsujido-machi, KamodaKawagoe-shi, Saitama 350-8550, Japan

Received: 15 April 2003/Accepted: 15 August 2003/Online publication: 13 October 2003

In 1993, Becker et al. [1] and Bladen et al. [2] first described three-dimensional (3D) endoscopes for improving surgical view. Three-dimensional endoscope systems have not been widely used because previous 3D endoscope systems had poor resolution and brightness, and they imposed a strain on surgeons because of their large size, heavy weight, and flickering screen.

We developed a practical endoscope system (LS-111SD, Shinko Optical Co. Ltd., Tokyo, Japan), a 3D endoscope, a light source, a camera control unit, a 3D converter, polarized glasses, and a monitor with an active screen (Fig. 1). The endoscope, made of aluminum, is 11 mm in diameter and 385 mm in length (Fig. 2). Two 1/6-in. micro CCD cameras (410,000 pixels) are mounted in the tip of the endoscope (Fig. 2). The conversion angle of the bilateral lenses in our system is half (3°) that of previous scopes (6°). The 3D converter processes the pictures from the bilateral cameras alternately with a frequency of 120 Hz by the noninterlace method.

The endoscope weighs only 250 g. The lens with its long focus depth contributes to a wider range of focus (2–50 cm) than that of conventional lenses. Surgeons do not need to adjust the focus during surgery. The halved conversion angle of the endoscope contributes to a lower incidence of near focal double vision. The noninterlace method and the high frequency of the 3D converter reduces eyestrain because there is less flickering of the screen and a shorter interval between bilateral images. The new lens and the digital method of the 3D

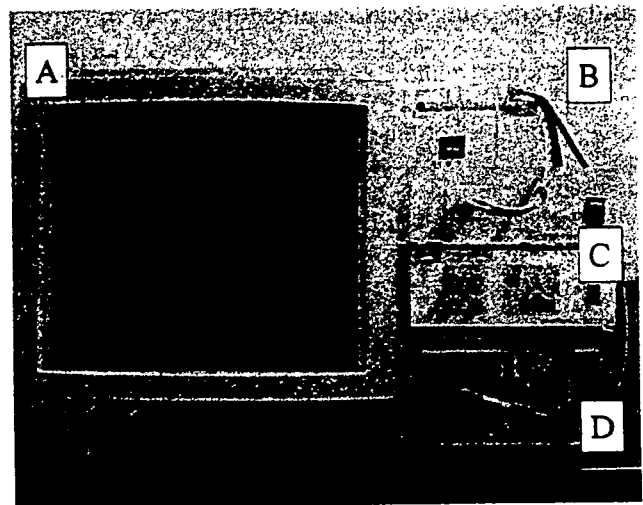


Fig. 1. The three-dimensional (3D) viewing system consisting of an active screen A, polarized glass, endoscope B, 3D camera control unit and 3D converter C, and light source D.

converter improves brightness, resolution, and true color reproduction.

The new endoscope offers the following improvements over the conventional endoscope: better image resolution and a higher-quality 3D view, reduced weight of the endoscope and 3D glasses, easier setting, and less eyestrain. It is expected that this system will provide

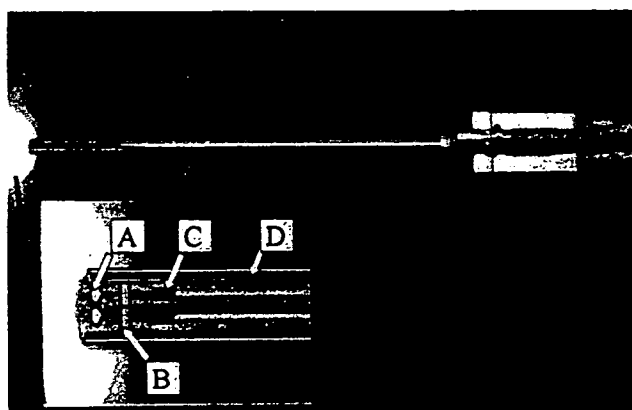


Fig. 2. The new three-dimensional endoscope (diameter, 11 mm; entire length, 135 mm; weight, 250 g). *Insert:* Perspective diagram showing a 3D endoscope of the two-channel system. Note that two lenses A and two micro CCD cameras B are integrated in a compact and light body. C Preamplifier. D Light guide.

increased benefit to patients by improving the safety and feasibility of endoscopic surgery.

Acknowledgments. We thank Mrs. Tsuneo Fukuyo from Shinko Optical, Ltd., Inc., and Kunio Andoh from Ai Systems, Ltd., for their technical assistance during this study. *Note:* To suggest a technology dialogue or ask new technology questions, please contact the New Technology editor, George Berci, at bercig@cshs.org (e-mail), 310-423-016 (telephone), or 310-423-2425 (fax). Submission also can be sent to the North American Editorial Office as noted in the Instructions for Authors.

References

1. Becker H, Melzer A, Schurr MO, Buess G (1993) 3D video techniques in endoscopic surgery. *Endosc Surg Allied Technol* 1: 40-46
2. Bladen JS, Anderson AP, Bell GD, Rameh B, Evans B, Heatley DJ (1993) Nonradiological technique for three-dimensional imaging of endoscopes. *Lancet* 341: 719-722

内視鏡把持装置 Naviot™ 58 臨床適用例の検討

○安永 武史^{a,b}, 橋爪 誠^a, 奥山 稔朗^f, 起田 桂志^f, 小林 英津子^d, 小西 晃造^o,
土肥 健純^c, 佐久間 一郎^d, 島田 光生^o, 前原 喜彦^o, 宮本 潮^b

^a九州大学大学院災害・救急医学, ^b日立製作所医療事業推進センタ, ^c東京大学大学院情報理工学系研究科, ^d東京大学大学院新領域創成科学研究科, ^e九州大学大学院消化器・総合外科(第二外科), ^f貝塚病院

Remote-controlled endoscope positioning system, Naviot, for endoscopic surgery

T.Yasunaga^{a,b}, M.Hashizume^a, T.Okuyama^f, K.Okita^f, E.Kobayashi^d, K.Konishi^a, Y.Dohi^e, I.Sakuma^d, M.Shimada^e, Y.Maehara^e, S.Miyamoto^b

^aDepartment of Disaster and Emergency Medicine, and ^eDepartment of Surgery and Science, Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University, ^cGraduate school of Information Science and Technology, and ^dFrontier Sciences, The Univ. of Tokyo, ^bMedical System Div., Hitachi, Ltd. ^fKaizuka Hospital

Abstract: A remote-controlled endoscope positioning system, Naviot™ (Hitachi Ltd.), was newly developed and applied to an endoscopic surgery on 58 patients; laparoscopic cholecystectomy, splenectomy, inguinal herniorrhaphy, appendectomy, colectomy, Nissen fundplication, prostatectomy, sympathectomy, extirpation of mediastinal tumor, lobectomy, oophorectomy, hysterectomy. A surgeon could easily control the zoom and the 8 directions of the laparoscopic movement. Naviot™ replaced the surgeon who holds the camera, and enabled surgeons to perform "solo surgery" on laparoscopic inguinal herniorrhaphy and appendectomy.

Key words: Remote-controlled endoscope positioning system, Laparoscopic inguinal herniorrhaphy, Solo surgery

1. はじめに

1987年に本邦で初めて腹腔鏡下胆嚢摘出術が施行されてから15年を経て、内視鏡下外科手術の適応はあらゆる外科領域へ拡大してきた。現在では、国内医療施設の26%にあたる2115施設(平成11年度厚生労働省統計)が内視鏡下外科手術を施行しており、優れた内視鏡下手術機器の開発と患者のニーズのため、今後も手術件数は増大していくものと考えられる。一方で、内視鏡下外科手術は、術者はもちろん内視鏡を操作する助手も内視鏡下外科手術に精通していることが望ましいが、これらの外科医を確保するのが難しい環境では、それを支援する機器への要望が近年高まりつつある。

2. 内視鏡把持装置 Naviot™

Naviot™ は内視鏡下外科手術、主に腹腔鏡下手術において、助手に変わって内視鏡を把持する装置で、5節式リンク、駆動部、ホルダーアーム、駆動装置、コントロールスイッチ、制御装置からなる。その操作は鉗子のハンドル部に取り付け可能な小さなコントロールスイッチにより術者自身が行うことができるため、従来手術における人員の削減が可能である。また、ズーム式内視鏡に

対応したことで、鉗子と内視鏡の干渉がなくなり、スムーズな手術が可能である。Naviot™ は東京大学と九州大学によって開発され、株式会社日立製作所により製品化された。2002年4月には厚生労働省より医療用具の認定を受け(医療用具製造承認番号



Fig.1 Naviot™

21400BZZ00150000)、国内初の手術支援ロボットとなった。

3. 経験症例

2001年10月～2003年9月までに全国17医療施設で58症例に臨床応用された。詳細をTable.1に示す。その内訳は腹腔鏡下胆嚢摘出術が36%と最も多く、消化器領域への適応が約80%を占めた。他に、胸部領域5%、泌尿器科領域2%、婦人科領域14%であった。