

再帰性投影技術を用いた実空間重畳型 多視点立体ディスプレイ RePro3D の開発

RePro3D: Full-parallax 3D Display for Superimposing 3D Images
onto the Real World using Retro-reflective Projection Technology

吉田 匠[†], 家室 証[†], 南澤 孝太^{††},
新居 英明^{†††}, 館 暲^{††}

Takumi Yoshida[†], Sho Kamuro[†], Kouta Minamizawa^{††}, Hideaki Nii^{†††} and Susumu Tachi^{††}

Abstract We propose a novel full-parallax 3D display system, called RePro3D, that is suitable for interactive 3D applications. The approach is based on retro-reflective projection technology in which several images from a projector array are displayed on a retro-reflective screen. When viewers look at the screen through a half mirror, they see a 3D image superimposed on the real scene without having to wear glasses. RePro3D has a sensor function to recognize user input, so it can support some interactive features, such as manipulation of 3D objects. In this paper, we describe the optical system of the high-density projector array. Then, we develop a prototype of RePro3D. The prototype shows parallax images that were displayed on a real scene from 42 different viewpoints. The user can touch the 3D image with his/her hands.

キーワード：立体ディスプレイ，再帰性投影技術，プロジェクタアレイ

1. ま え が き

映像で映し出された物体が，実際にそこに存在するかのよう立体的に感じられ，実物に触れているのと同様に触れたり操作したりすることができる．SFの世界でしばしば描かれてきた光景が，立体ディスプレイ技術やユーザインタフェース技術の発展に伴い，現実のものになりつつある．

立体映像は，映画館やアミューズメントパークだけでなく，一般家庭でも楽しめるほどになった．しかし，現在普及しつつある立体ディスプレイは，ほとんどが左右の目に視差映像を提示する二眼式である．二眼式では，観察者が頭を動かしたときの運動視差や，複数の観察者に対して複数の視点からみた立体像を正しく提示することができない．運動視差は人間の立体形状知覚にとって重要な要素の一つ

として知られており，より自然な立体映像を複数人に提示するためには，裸眼で多視点に対応した立体ディスプレイが必要となる．また，立体的に映し出された映像が現実の物体と等価であると感じられるためには，現実の物体と同じ空間に存在すべきであると考えられる．すなわち，映像はディスプレイの中ではなく実空間へ重畳して提示されることが必要となる．

一方で，バーチャルな物体を触ったり操作したりといった，映像に対するインタラクション手法も盛んに研究されている．ユーザの手による入力を取得するマルチタッチやジェスチャ認識といった技術や，物体を触った時の力覚や物体のテクスチャを再現する触覚ディスプレイ技術を用いることで，映像との直感的なインタラクションを実現している．しかし，実際に物体に触っているような感覚での立体映像に対するインタラクションを再現するには至っていない．すなわち，操作するユーザの手の位置と，提示される物体の位置が一致しており，ユーザに触った感触が返ってくるような状況は立体映像においては十分に達成されていないと言える．この原因の一つとして，立体ディスプレイの形状の制約が挙げられる．ユーザの手に触覚フィードバックを返すためには，何らかの装置を触る対象に組込むか，あるいはユーザの手に装着する必要があると考えられる．前者の場合，触覚提示装置と映像提示面を共存させるのはディスプレイの構造上困難である．また，多くの立体

2010年9月9日受付，2011年10月10日再受付，2012年2月20日採録

[†] 東京大学 大学院情報理工学系研究科
(〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, TEL 03-5841-8602)

^{††} 慶應義塾大学 大学院メディアデザイン研究科
(〒223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, TEL 045-564-2499)

^{†††} National University of Singapore
(21 Lower Kent Ridge Road, Singapore 119077)

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo
(7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN)

^{††} Graduate School of Media Design, Keio University
(4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8526, Japan)

^{†††} National University of Singapore
(21 Lower Kent Ridge Road, Singapore 119077)

ディスプレイにおいて、映像の提示されるスクリーンは平面であるため、3次元的な動きを伴うインタフェースとの共存が難しい。

そこで本研究では、従来の立体ディスプレイにおける課題であった「裸眼で多視点の立体映像を提示」、「実空間に重畳提示」、「映像に直接接触してインタラクション」の三つを同時に実現する立体ディスプレイ手法を構築することを目的とする。これらの課題を解決するため、我々は再帰性反射材をスクリーンとして映像を投影する再帰性投影技術¹⁾に基づいた、再帰性投影型多視点立体ディスプレイ手法²⁾を提案する。本稿では本手法を用いた実空間への立体映像重畳システムを RePro3D と呼ぶ。「RePro」とは、再帰性投影 (Retro-reflective Projection) と復元・再現 (Reproduction) を意味している。本手法では、高密度プロジェクタアレイから再帰性反射スクリーンに視差画像を投影することで、上下左右方向の運動視差を提示する。投影方式は、映像をハーフミラーを介して実物体に投影する方式と、空中に結像する方式の2種類から選択することができ、いずれも実空間への重畳提示が可能である。また、実物体に投影する方式ではスクリーンを任意の形状にすることができ、内部に触覚を提示する機構を組込むことが容易である。空中に結像する場合は、ユーザの手に触覚インタフェースを装着することで、映像に直接接触した状態をバーチャルに再現することが可能となる。

本論文では、再帰性投影型多視点立体ディスプレイ RePro3D を提案し、その設計と実装について述べる。

2. 関連研究

裸眼で運動視差を有する立体ディスプレイを構成する手法はこれまで多く提案されている。レンチキュラーレンズや視差バリアを用いて、視差映像を提示する方式は実用化が進んでいる。また、立体映像を見る際の眼精疲労の原因と言われる輻輳調節矛盾を起こさない手法として、超多眼方式³⁾が提案されている。これらの手法では視差の方向が水平方向に限定されている。ディスプレイ面に表示された映像を見る際には問題とならないが、垂直方向にも視差のある実物体と同じ空間中に映像を提示すると、実物体と映像の視差の違いが違和感の原因となり得る。これに対し、上下左右の視差を有するフルパララクス立体ディスプレイとして、レンズアレイを用いたインテグラルフォトグラフィ方式⁴⁾が提案されている。インテグラルフォトグラフィ方式では、映像を出力するパネルの高精細化や、複数のプロジェクタを用いることによって視差数を増やすことができる一方、ある視点から見た提示映像の解像度は配置されたレンズの大きさで決まるため、映像の高解像度化が難しい。インテグラルフォトグラフィ方式が視差数を増やしやすかったのに対し、視差数を抑えて映像の解像度を優先した粗インテグラルイメージング表示方式⁵⁾が提案されている。粗インテグラルイメージング表示方式では、ユー

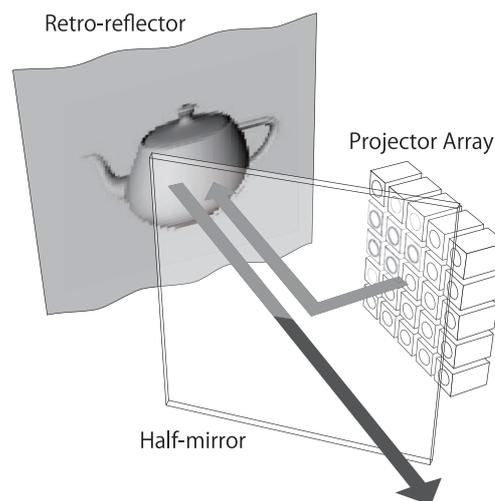


図1 プロジェクタアレイと再帰性反射材を用いた立体映像提示の基本原理
Basic principle of 3D display using a projector array and a retro-reflector.

ザの視点に応じて提示する映像が離散的に切り替わる。また、違う視点の映像がゴースト像として意図しない所に表示されてしまうといった問題がある。我々が提案する再帰性投影技術を用いた立体ディスプレイ手法は、粗インテグラルイメージング表示方式と同様に、離散的な視点位置に対して上下左右方向の視差映像を提示することができる。粗インテグラルイメージング表示方式では、視点間の映像が離散的に切り替わるが、本手法では再帰性反射材の特性により、視点間の映像は隣り合う視点の映像が重なった状態となり、視点と視点の間隔が適切な距離になるようにレンズを配置することで、視点間の映像を連続的に推移させることができる。さらに、投影される映像は再帰性反射材のスクリーン上にしか表示されないため、表示したい映像の大きさのスクリーンを用いればゴースト像は発生しない。

実空間への映像の重畳表示手法としては、多層空中像を用いた複合現実展示システム⁶⁾が提案されている。複数の平面ディスプレイの映像を実空間上に多層的に結像させ、奥行きを切り替えて表示することができる。しかし各層に表示される画像はあくまで平面的なものであり、両眼視差や運動視差は生じない。

本研究では、両眼視差・運動視差を有する自然な裸眼立体視が可能な立体映像を実空間上に重畳提示できるシステムの構築を目指す。

3. 再帰性投影型多視点立体ディスプレイの提案

3.1 高密度プロジェクタアレイの構成

図1は、再帰性投影を用いた立体映像提示の基本原則を示したものである。上下左右にアレイ上に並べられたプロジェクタから照射された光は、ハーフミラーで反射して再帰性反射材のスクリーンに投影される。投影された光は、再帰性反射特性によって入射方向に反射するため、ハーフミラーを通過してプロジェクタの投影レンズの共役点に集光

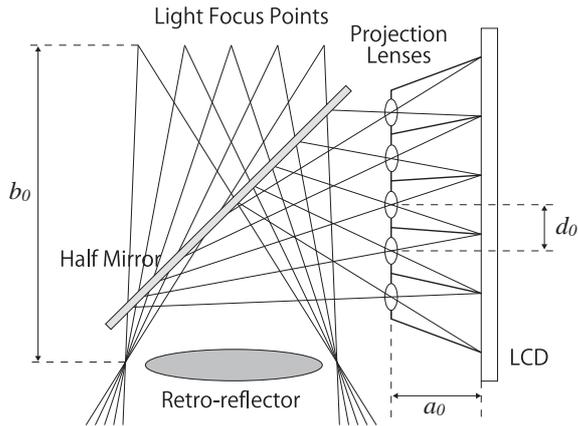


図2 高輝度LCDとレンズアレイによる高密度プロジェクタアレイ光学系
Optical system of the high-density projector array.

する．各集光点からは別々の映像が観察されるため，上下左右に視差のある3次元映像を提示することができる．

滑らかな運動視差を生じさせるためには，数多くのプロジェクタを非常に小さい間隔で配置する必要がある．しかし，現在市販されているプロジェクタを用いて，プロジェクタアレイを構成することは下記の理由により困難である．まず，個々のプロジェクタのサイズによって，配置できる間隔が制限されてしまう．また，プロジェクタを密に並べた場合排熱が難しくなる．さらに，映像出力の多さからシステムが大規模化するといった問題がある．そこで，高輝度LCD上に投影レンズをアレイ状に配置することによって，高密度プロジェクタアレイを構成する．図2に高密度プロジェクタアレイの光学系を示す．各視点の投影領域が等しくなるように，LCD上の画像に対して凸レンズを図のようにシフトして配置する．また，別の視点の映像がレンズに入射しないように遮蔽板を設置する必要がある．なお，図2は上下方向のプロジェクタアレイの模式図であるが，左右方向も同様の構成となる．

このようにプロジェクタアレイを構成することで，隣り合うプロジェクタの間隔は，最小でレンズの直径まで小さくすることができる．また，コンピュータからの映像出力は1系統で済むため，システムが大規模にならないという利点がある．提示画像の輝度はLCDの輝度と，投影画角，および再帰性反射材の性能に依存する．再帰性反射スクリーンに投影された画像の輝度は通常照明下では目視できないほど小さくても，集光点では観察可能である．一視点における提示映像の解像度はLCDの解像度に依存し，視点数は配置するレンズの個数に等しい．これは，光線の数にLCDの解像度に依存し，一視点の解像度がレンズの個数に等しくなるインテグラルフォトグラフィ方式とは逆の関係となる．本手法では，映像提示面に対して上下左右方向には視差映像を提示できるが，奥行き方向は提示面に対して一定の距離の位置から観察する必要がある．

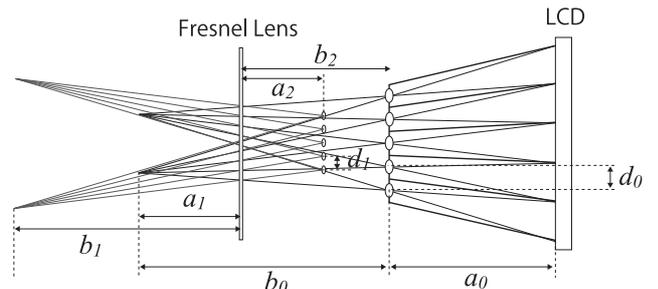


図3 凹フレネルレンズを用いた改良光学系
High resolution optical system using a Fresnel lens.

3.2 光学設計

ここで，図2で示されるプロジェクタアレイ光学系を基準光学系と呼ぶこととする．基準光学系では，LCD面と凸レンズ間の距離を a_0 ，実像の結像位置と凸レンズ間の距離を b_0 ，LCD上の一視点分の長さを l ，実像の大きさを h_0 ，凸レンズの焦点距離を f_0 ，隣り合う凸レンズの間隔を d_0 とすると以下の関係が成り立つ．

$$\frac{1}{a_0} + \frac{1}{b_0} = \frac{1}{f_0} \quad (1)$$

$$\frac{b_0}{a_0} = \frac{h_0}{l} \quad (2)$$

$$\frac{b_0}{a_0 + b_0} = \frac{d_0}{l} \quad (3)$$

これらの関係式より，使用すべきレンズの種類や配置が導かれる．隣り合うレンズの間隔 d_0 は，映像の視点間の連続性を決定する．視点数を増やすためには，レンズ間隔を可能な限り小さくすればよいが，レンズ間隔を近づけすぎると視点間のクロストークが問題となる．また，再帰性投影においては，観察者の視点が集光点から離れるほど映像の輝度は低下する．このため，レンズ間隔を遠ざけすぎるとユーザが視点を動かした場合，映像の輝度が離散的に切り替わり，不自然な印象を与えてしまう．すなわち，クロストークが少なく，映像の輝度が連続性が保たれる最適なレンズ間隔を求める必要がある．実像の結像位置と凸レンズ間の距離 b_0 と，実像の大きさ h_0 は本インタフェースの用途に依存するパラメータである． b_0 はユーザの視点から立体映像を投影するスクリーンまでの距離に相当し，ユーザの視点位置に対してどのくらいの距離にどのくらいの大きさの映像を投影したいかに応じて設計する必要がある．

3.3 フレネルレンズを用いた高解像度化

一般に，多視点の立体映像の光学系を総画素数が一定の表示デバイスで構成する場合，一視点における提示映像の解像度，すなわち単位視角あたりの画素数は視点数とのトレードオフの関係にある．本手法においてもその関係は成立するため，一視点における画素数は(総画素数)/(視点数)となることが望ましい．しかし，基準光学系では，一視点における提示映像の解像度を任意に設計することができない．設計可能なパラメータはインタフェースの用途に依存する

視点とスクリーンの距離 b_0 , スクリーン上の投影画像の大きさ h_0 , そして視点間の画像の連続性を決めるレンズ間隔 d_0 の三つである . これらの値を決めると , 式 (1)(2)(3) より , LCD 上の 1 視点分の領域の大きさ l が算出され , 一視点に割り当てられる画素数が決まる . このため , 一視点における画素数は (総画素数)/(視点数) よりも少なくなる場合がある .

この問題に対し , 凹フレネルレンズを導入することによって , 投影画角を保ちつつ解像度を向上させる光学系を提案する . この光学系を改良光学系と呼ぶ . 改良光学系では , 上記の設計可能なパラメータは一定のまま一視点における画素数を (総画素数)/(視点数) にすることが可能である .

図 3 に改良光学系の模式図を示す . 凸レンズアレイによって集められた LCD の像を , 凹フレネルレンズによりスクリーン位置に結像させる . 集光点の位置は , 凹レンズによる凸レンズの虚像の位置となり , レンズ間隔は光学的に縮小される . 改良光学系では , 凸レンズによる LCD の像位置と凹レンズ間の距離を a_1 , 凹レンズによって結像する LCD の像位置と凹レンズ間の距離を b_1 , 凸レンズと凹レンズ間の距離を a_2 , 凸レンズの虚像と凹レンズ間の距離を b_2 , 凹レンズの焦点距離を f_1 , LCD の像の大きさを h_1 , 凹レンズによって縮小される集光点間の距離を d_1 とすると以下が成り立つ .

$$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} = \frac{1}{f_1} \quad (4)$$

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{h_1}{h_0} \quad (5)$$

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{b_2} = \frac{1}{f_1} \quad (6)$$

$$\frac{b_2}{a_2} = \frac{d_1}{d_0} \quad (7)$$

$$a_1 + b_2 = b_0 \quad (8)$$

上式を満たすようにレンズを配置することで , 基準光学系の高解像度化を行う .

3.4 実空間に重畳する投影方式と入力インタフェース

本システムでは , 立体映像を実空間に重畳する手法として , 実物体に貼付した再帰性反射スクリーンに投影する方式 (図 4 上) と , 空中に結像する方式 (図 4 下) の 2 種類から選択することができる . これらの 2 種類の方式の変更は , LCD , レンズアレイ , ハーフミラーの光学配置を変えることなく , スクリーンとなる再帰性反射材の位置を変更するだけで容易に実現できる .

実物体に投影する方式では , スクリーン形状が任意となり , 曲面形状 , 柔らかいスクリーン , 自動的に動くスクリーンなどアプリケーションに応じて自由に選択でき , どんな形状に対しても補正なしに画像を投影することができる . スクリーンの裏側に装置を組込むことも容易となり , 立体映像との触覚を伴ったインタラクションが可能なユーザイ

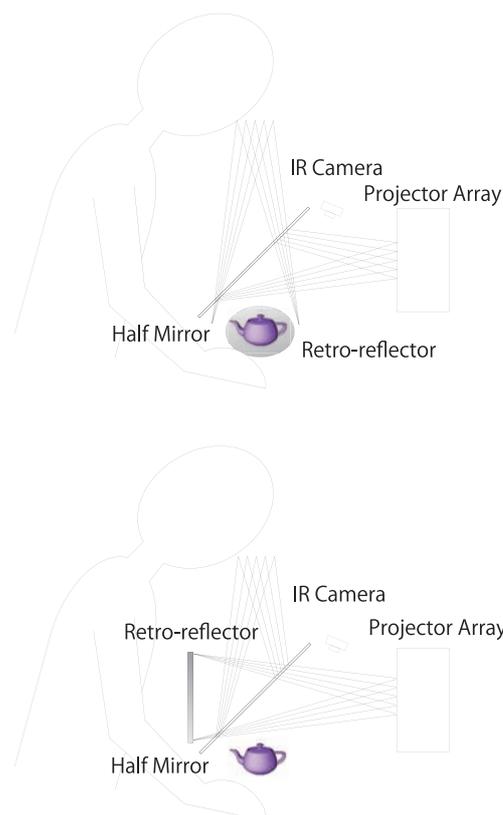


図 4 実空間に映像を重畳するための 2 種類の投影方式と赤外カメラによる入力インタフェース

Two types of projection method for superimposing 3D images onto real scene and input interface using an IR camera.

ンタフェースに適用できると期待される . また , スクリーン以外の部分に投影された映像は視認できないため , 立体映像を投影する物体の内部に存在するように提示することで , 遮蔽関係の正しい重畳提示が可能である .

空中に結像する方式では , 再帰性反射スクリーンを図 4 右のように配置し , ハーフミラーを介して見ることで立体映像が半透明な状態で空中に提示される . この方式は , 映像が自律的に , あるいは実物体と干渉して動きまわるようなアプリケーションに適している . さらに , 手に装着するタイプの触覚インタフェースと組み合わせることで , 空中に浮かんだ映像に触ったり動かしたりといった触覚インタラクションが可能になると考えられる .

本システムは , 赤外カメラを使用してユーザの手の動きを認識し , 立体映像とのインタラクションを行う直感的な入力インタフェースを備えている . 図 4 のように赤外カメラを配置し , ユーザの手の画像を取得する . 取得した画像において提示している物体との衝突判定を行うことによって , 手が物体に触れているか否かを検出する . 検出結果に基づき , 物体の提示位置を動かしたり , 回転や拡大縮小などの物体操作を行うことが可能となる .

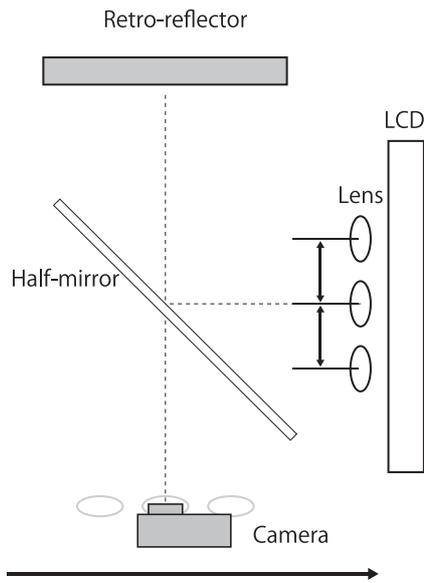


図 5 実験条件
Experimental condition.

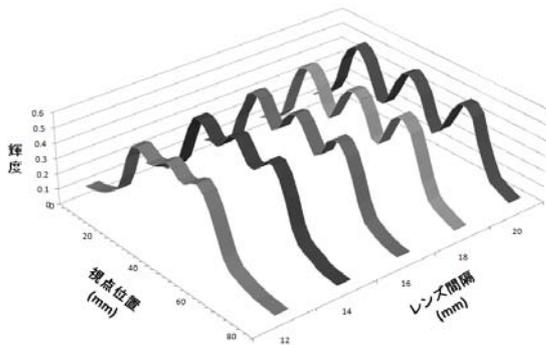


図 6 レンズ間隔と輝度値の関係

Brightness value in relation to spacing between projection lenses.

4. 結果

4.1 視点間の連続性を保つ最適なレンズ間隔の導出

3.2 節で述べたように、クロストークが少なく、映像の輝度が連続性が保たれる最適なレンズ間隔を求める必要がある。そこで、ユーザが視点を動かした際に、隣り合う視点の映像の輝度が連続的になるようなレンズ間隔を導出する実験を行った。図 5 のように LCD、ハーフミラー、再帰性反射スクリーン（Ref-lite 製、レフライト反射クロス 8301）、三つのレンズをそれぞれ配置した。視点とスクリーンの距離は 600mm、レンズは直径 12mm、焦点距離 48mm のものを使用し、LCD には 100mm×100mm の大きさに投影されるように白色の正方形を表示した。LCD は輝度が 400cd/m² のものを用いた。レンズアレイの共役点のある直線上でデジタルカメラを動かし、投影された白色正方形を撮影した。隣り合うレンズの間隔は 12mm から 20mm まで 2mm 刻みに変化させて撮影を行った。

撮影された画像に対して、投影された正方形領域の画素値の平均を求め、画素値の最大値で正規化した値をプロッ

トした結果を図 6 に示す。

レンズ間隔が大きくなるほど、視点を動かした時の輝度値の変化が大きくなり、レンズ間隔 12mm から 16mm の範囲では輝度の変化が 20%以内に抑えられることが示された。レンズ間隔を小さくすると、投影する LCD の領域が小さくなるため、解像度が低下する。よって、画像の連続性を保ちつつ、解像度を高くするためには 12mm から 16mm の範囲でできるだけレンズ間隔を大きくするのがよい。

4.2 光学系のシミュレーションと実装

改良光学系では、用途や映像の連続性に依存する要求仕様（投影距離、投影画角、レンズ間隔）を満たすようなそれぞれのレンズの焦点距離と配置の組合せを数式から求めることは困難である。また、入手可能なレンズ・LCD のサイズや解像度なども考慮に入れなければならない。そこで、最適な組合せを検討するための光学シミュレータを作成した。このシミュレータを用いて各種光学パラメータを表 1 のように決定した。

表 1 試作デバイスの光学パラメータ
Optical parameters of the prototype device.

f_0	125 mm
a_0	209 mm
b_0	310 mm
d_0	30 mm
f_1	-231 mm
a_1	128 mm
b_1	284 mm
a_2	182 mm
b_2	101 mm
d_1	16 mm

この結果をもとに図 7 に示すデバイスを実装した⁷⁾。レンズには直径 25mm、焦点距離 125mm の凸レンズを 42 個と、直径 370mm、焦点距離-231mm の凹フレネルレンズを用いた。LCD には輝度 1000cd/m²、解像度 1680×1050pixel の高輝度 LCD を用いた。投影方式は空中に結像する方式とし、スクリーンとして用いた再帰性反射材は前節の実験で用いたものと同様である。視点数は約 16mm 間隔で横 7 視点、縦 6 視点の合計 42 視点である。各視点における投影画像の解像度は 175×175pixel である。立体映像を投影可能な領域は、ユーザの視点から奥行き方向に約 400mm 離れた点に対して、上下左右方向に約 200mm、前後方向に約 300mm の空間である。本デバイスによって立体映像を提示し、複数の方向から撮影した画像を図 8 に示す。視点を変えると物体の位置関係が変わって見えることがわかる。この結果により、本手法によって運動視差を提示可能であることが確認できた。

4.3 3D 映像とのインタラクション

ユーザの手の動きを取得するため、立体映像投影領域の上方に赤外線透過フィルタを取り付けたカメラ（Point Grey Research 製、Firefly MV）と赤外 LED を配置した。カメラで取得した映像からユーザの手が存在する領域を検出し、

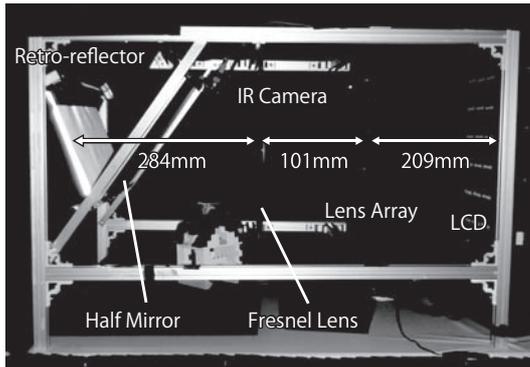
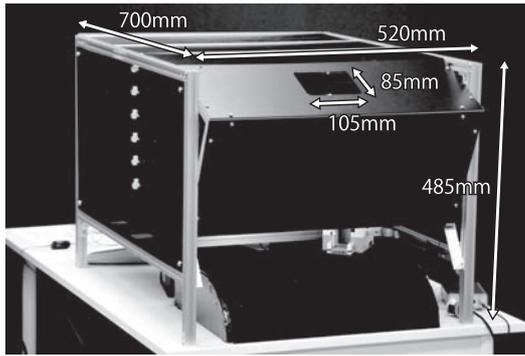


図 7 試作デバイス
Prototype device.

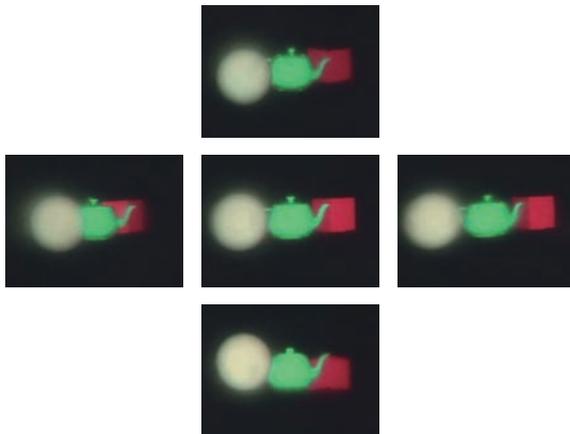


図 8 複数の視点からの提示映像
The 3D object that is projected onto the retro-reflective screen can be seen from a number of viewpoints.

提示している映像の座標と交差しているかを判定し、その結果に基づいて立体映像の移動や変形を行う。この機構を用いて、実空間上で空中に浮かんだキャラクタに手で直接触って操作できるアプリケーションを作成した⁸⁾⁹⁾。ユーザの手がキャラクタに触れると、キャラクタが手の動きに伴って移動し、音とアニメーションの変化によるインタラクションが楽しめるものとなっている。実際に体験している様子を図 9 に示す。

5. 考察

提案手法では、視域の範囲は狭いものの、実空間に重畳した映像に対して両眼視差、運動視差による立体感を提示



図 9 手と立体映像とのインタラクション
Interaction between user's hand and 3D image.

することができた。しかし、視点の位置によっては画像にボケが生じたり、複数の像が見えてしまったりといった、立体映像品質の劣化が見られた。

まず、ボケの原因について考察する。視点を上下左右に動かすと、視域の中央付近ではボケが生じず、鮮明な映像が見られる一方、視域の周辺部ではボケが生じる。この原因として、高解像度化のために配置した凹フレネルレンズに対する光線の入射角の影響が挙げられる。視点が中心から離れるほど、その視点に対応した LCD から発せられた光線の凹レンズに対する入射角が大きくなり、ボケてしまうと考えられる。映像のボケを軽減させるためには、より入射角の変化に対して結像性能が劣化しないレンズを使用する必要があるだろう。

次に、視点を前後に動かすと、複数の像が見えてしまう点が存在する。これは、再帰性反射の特性に依存する問題である。再帰性反射材は光を入射方向に強く反射するが、すべての光が入射方向に反射するわけではなく、拡散する成分も存在する。このため、集光点から遠ざかった視点、あるいは集光点よりもスクリーンに近づいた視点から提示映像を見ると、複数の視点からの光の成分が混合され、複数の像が重なって見えてしまうと考えられる。4.1 節において、上下左右方向に対して、画像の輝度の連続性を保つようにレンズ間隔の最適化を行った。今後、より自然な立体映像が観察可能な領域を増やすためには、前後方向に移動したときにクロストークが生じない領域が増えるような指標を与えて、レンズ間隔の設計や再帰性反射材の選択を行う必要があると考えられる。

続いて、ユーザの手と 3D 映像とのインタラクションを行った結果について考察する。空中に提示された立体映像とユーザの手が同じ空間内に存在する状況においても、立体視による奥行き感は保たれる。すなわち、本システムの

立体映像は実空間に違和感なく重畳されていると言える。しかし、提示された立体映像より手前に手をかざした場合には、映像は遮蔽されず半透明に表示されるため、違和感が生じる。今後、ユーザの手の3次元的な位置・形状を計測して遮蔽関係を正しく表示するなどの改良が必要だと思われる。

6. む す び

本稿では、再帰性投影技術を用いた実空間重畳型多視点立体ディスプレイ RePro3D を提案した。まず、LCD とレンズアレイを用いた高密度プロジェクタアレイの基準光学系を構築し、フレネルレンズを用いた高解像度化が可能な改良光学系の検討を行った。次に、滑らかな運動視差提示に重要である最適なレンズ間隔を実験的に導出した。続いて光学シミュレータを作成し、これを用いて改良光学系の設計を行った。これらの結果をもとに、上下左右方向に42視点分の視差画像を裸眼で実空間に重畳提示可能なディスプレイを実装した。さらに、ユーザの手と立体映像のインタラクションが可能な物体操作インタフェースを実装した。

今後は立体映像を観察できる視域を拡大し、複数人が同時に同じ空間で立体映像を共有できるようにするとともに、触覚インタフェースと組み合わせることで、実際に物体に触っているのと等価な状態を再現できるインタフェースを構築していく予定である。

本研究の一部は、JST-CREST「人間調和型情報技術」研究領域の支援によって行われた。また、本研究の一部は文部科学省科研費補助金（特別研究員奨励費 20・11087）によって行われた。

〔 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) 吉田匠, 南澤孝太, 新居英明, 川上直樹, 館暉: "再帰性反射を用いたプロジェクタアレイによる多視点立体ディスプレイの提案", 第14回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3A4-1 (2009.9)
- 3) Y. Kajiki, H. Yoshikawa, T. Honda, "Autostereoscopic 3-D video display using multiple light beams with scanning", IEEE Trans. Circuit and Systems for Video Technology, **10**, Issue 2, pp.254-260 (2002)
- 4) H. Liao, M. Iwahara, N. Hata, I. Sakuma, T. Dohi, T. Koike, Y. Momoi, T. Minakawa, M. Yamasaki, F. Tajima and H. Takeda: "High-resolution integral videography autostereoscopic display using multi projector", Proceedings of the Ninth International Display Workshops, IDW '02, pp.1229-1232 (2002)
- 5) H. Kakeya: "Formulation of coarse integral imaging and its applications", SPIE proceeding Volume 6803: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XV (2008)
- 6) 中島 統太郎, 和田 拓朗, 寛 康明, 杉田 馨, 山内 康晋, 苗村 健: "ExFloasion: 多層空中像を用いた複合現実展示システム", 信学技報, MVE2009-136, **109**, 466, pp. 35 - 40 (2010.3)
- 7) 吉田匠, 家室証, 南澤孝太, 新居英明, 館暉: "再帰性投影型多視点立体ディスプレイにおける高解像度化の検討", 3次元画像コンファレンス 2010 講演論文集, pp.47-50 (2010.7)
- 8) Takumi Yoshida, Sho Kamuro, Kouta Minamizawa, Hideaki Nii, Susumu Tachi: "RePro3D: Full-Parallax 3D Display Using Retro-Reflective Projection Technology", In ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies (Los Angeles, California, July 26 - 30, 2010)

- 9) 吉田匠, 家室証, 南澤孝太, 新居英明, 館暉: "再帰性投影型多視点立体ディスプレイのための物体操作インタフェース", 第15回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (2010.9)



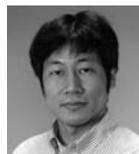
よしだ たくみ
吉田 匠 2006年, 東京大学工学部計数工学科卒業。2008年, 同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。同年, 同専攻博士課程進学。日本学術振興会特別研究員(DC1)。2009年, 慶應義塾大学メディアデザイン研究科訪問研究員兼任。拡張現実感, 立体ディスプレイの研究に従事。



かむら しゅう
家室 証 2008年, 東京大学工学部計数工学科卒業。2010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修了。同年, 同専攻博士課程進学。2010年, 慶應義塾大学メディアデザイン研究科リサーチアシスタント兼任。2009年度下期IPA未踏コースクリエータ。触覚インタフェースを用いたインタラクションシステムの研究に従事。



みなみざわ こうた
南澤 孝太 2005年東京大学工学部計数工学科卒業, 2010年同大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了, 博士(情報理工学)。現在, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科助教。同大環境情報学部非常勤講師。ハプティックインタフェース, テレグジスタンスシステムの研究に従事。



に い ひであき
新居 英明 1995年, 東京工業大学大学院理工学研究科博士前期課程制御工学専攻修了。同年, 株式会社トキメック入社。2003年, 同社退社。2003年~2006年まで, 電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻在籍。2007年, 東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助教。2009年, 慶應義塾大学慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科講師。情報投影技術を利用したヒューマンインタフェースの研究に従事。



たち すすむ
館 暉 1968年, 東京大学工学部計数工学科卒業。1973年, 同大学院博士課程修了。工学博士。同年, 同大助手。1975年, 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経て, 1989年, 東京大学先端科学技術センター助教授, 1992年, 同センター教授, 1994年, 同大工学部計数工学科教授, 2001年, 同大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻教授。2009年, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科教授。テレグジスタンス, 人工現実感の研究に従事。