



頭部搭載光線空間プロジェクタ

Head Mounted Light Field Projector

道下幹也¹⁾, 犬飼悟²⁾, 木島竜吾³⁾

- 1) 岐阜大学 自然科学技術研究科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, k16michihsita@kzm.info.gifu-u.ac.jp)
 2) 岐阜大学 工学部 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, k18inukai@kzm.info.gifu-u.ac.jp)
 3) 岐阜大学 工学部 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kijima@gifu-u.ac.jp)

概要: 筆者らは、再帰性反射, 再帰性透過という光学的性質で実像を虚像に転換することで, プロジェクタからの投影実像を虚像として観察するディスプレイを逆プロジェクタと呼んでいる. 光線空間プロジェクタは多数のレンズからの光線で任意位置に実像を結ぶのであるから, 通常のプロジェクタの代わりに用いて逆プロジェクタを作れる. 本稿では, 頭部搭載光線空間プロジェクタを試作し, 動作を確認する.

キーワード: 再帰性透過, 逆プロジェクタ, 光線空間プロジェクタ

1. はじめに

1.1 再帰性と逆プロジェクタの原理

プロジェクタは投影瞳から収束光線を発し, どこかに実像を結ぶ. この射出光線を正確に反転させたものを逆プロジェクタと呼び (図 1), 投影瞳位置に目を置けば, 元々の実像位置に虚像が見える. これを実現するには再帰性反射材や再帰性透過材を用いればよい (図 2). これらの精度が高ければ理想的には実像位置とは関係ない場所に再帰性光学材を置いても元の実像位置に像が見える (図 3).

再帰性反射材を用いる場合, 目を元々のプロジェクタ位置には置けないためハーフミラーを用いてプロジェクタと面対象な位置に移動する (図 4(左)). これにより HMD (Head Mounted Display) は光学シースルーになるが, この鏡が垂直面角を $90[\text{deg}]$ に制約する.

1.2 光学シースルー HMD の広視野化

清川らは眼前の光学系を回転双曲面形状の半透過鏡にすることで光学シースルー頭部搭載プロジェクタの広視野化に成功した (HHMPD [2]). しかしこの手法によってできる像面は大きく湾曲する問題がある. プロジェクタから回転双

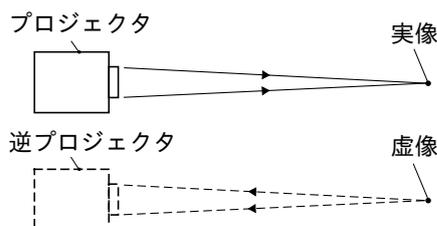


図 1: (上) プロジェクタ (下) 逆プロジェクタ

Mikiya MICHISHITA, Satoru INUKAI, and Ryugo KIJIMA

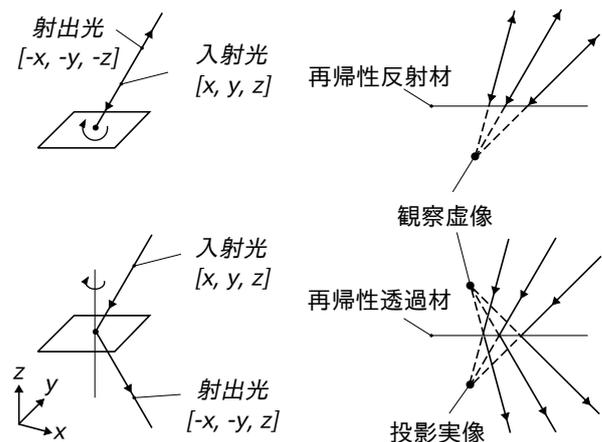


図 2: (上) 再帰性反射 (下) 再帰性透過

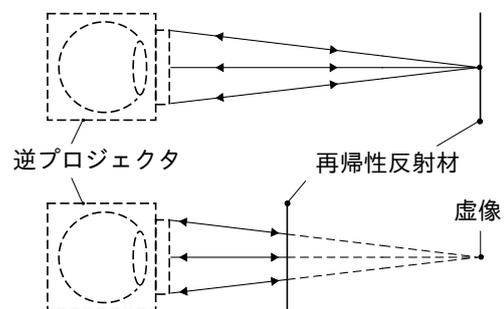


図 3: 再帰性光学材の位置と像位置

曲面に向けて投影し, 反射した像面がどのようなかをシミュレーションした結果を図 5 に示す. 瞳とプロジェクタは回転双曲面のそれぞれの焦点に位置しており, プロジェクタから瞳側に投影したものが瞳の前の回転双曲面で反射し, 籠状の像面 (湾曲像面) ができていることが分かる. 湾曲像面

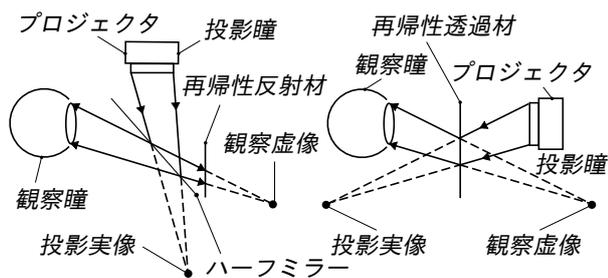


図 4: 逆プロジェクタの構成: (左) 再帰性反射材を用いた場合 (右) 再帰性透過材を用いた場合

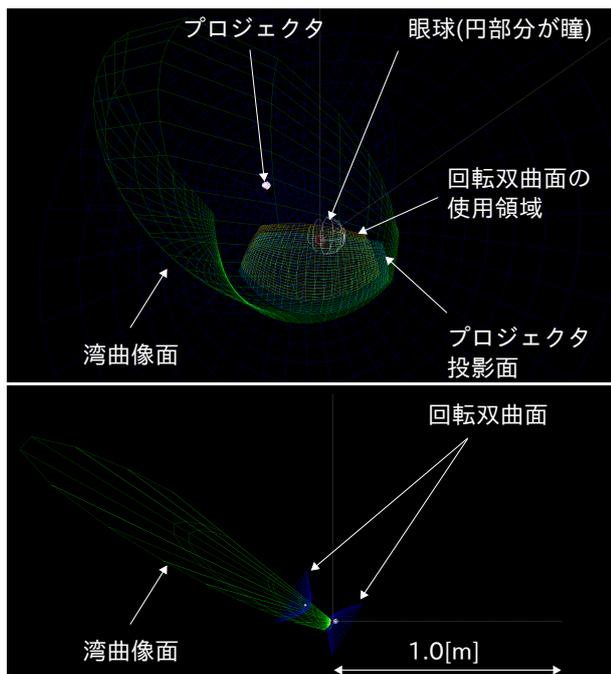


図 5: HHMPD による像面湾曲の様子: (上) 瞳の斜め前から見た図 (下) 瞳の真横から見た図

の中央付近は瞳からおよそ 1.0[m] 程度の位置に立っているが、周辺になると瞳のごく近傍に立っており、これは周辺視の視力や焦点調節機能などを考慮しても問題である。またこれを回避するため、像全体を遠くにするようにプロジェクタの投影像の位置を変更すると、正面の像位置がすぐに無限遠を超えてしまい、像位置や姿勢を工夫しても解決できない。我々は以降、回転双曲面鏡によって起きる像面湾曲問題を解決する方法の提案と、その具体的な実現案を示していく。

2. 頭部搭載光線空間プロジェクタ

2.1 LFD と LFP

光線空間ディスプレイ (Light Field Display, LFD) は物体の放つ光線を再現する手法であり、その実装の一つに、ディスプレイとレンズアレイを用いたレンズアレイ方式がある。Douglas らは、この方式を利用した Near-Eye LFD により、小型で軽量の頭部搭載型ディスプレイを作成した [3]。仮想空間はディスプレイの後方に置き、カメラモデルはディスプレイ背後に向ける (図 6(上))。アイボックスに観察瞳を置く

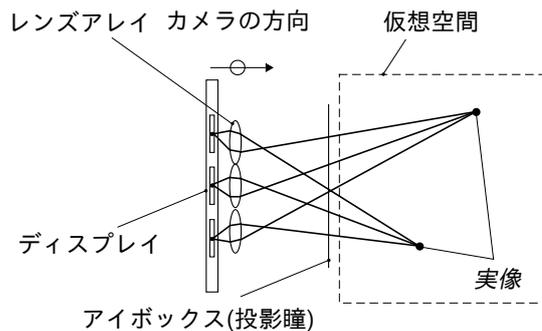
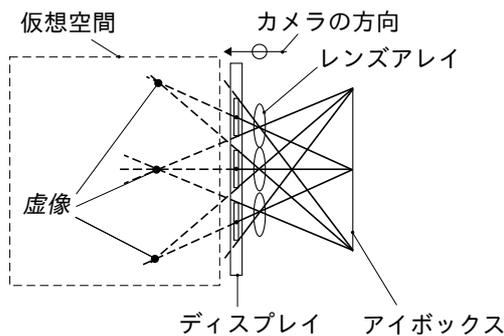


図 6: (上) LFD (下) LFP

と、ディスプレイ越しに虚像が見える。

この、LFD の構成はそのままディスプレイの手前に実像をつくる場合を光線空間プロジェクタ (Light Field Projector, LFP) と定義する。仮想空間はディスプレイの手前に置き、カメラモデルはレンズアレイの位置から手前の仮想空間を見ている。各レンズアレイとディスプレイアレイを一つのプロジェクタと捉えると、これは仮想空間を投影するプロジェクタ群であり、それらは実像を結ぶ。また、LFP における投影瞳はアイボックスである (図 6)。

2.2 逆プロジェクタ議論の拡張

プロジェクタとして LFP を用いた場合の逆プロジェクタを考えてみる。LFP が通常のプロジェクタと異なるのは、ある投影結像面に向けて光線を打つのではなく、空間上のあらゆる位置に光線を打つことである。しかし、理想的な再帰性光学材により正確な光軸変換が起こると奥行き方向の情報は保存される (図 7)。そのため、LFP の投影瞳、すなわちアイボックスと光学共役な位置に瞳を置くことで、奥行き方向の情報も正しく有した映像を確認することができ、LFP を用いても逆プロジェクタとして機能する。

3. 確認実験

3.1 確認対象と実験環境

実際に LFD とそれを用いた逆プロジェクタの構成を試作する。本稿で確認する範囲は、試作した LFD で正しく画像が確認できるか、LFP を用いた逆プロジェクタの議論が本当に正しく、画像が想定したとおりに見えるかどうか、及びその両方で焦点を調節することで奥行きが違うオブジェクトに対してピントを合わせることができるかである。LFD の実験構成図を図 8(上) に、LFP の実験構成図を図 8(下) に

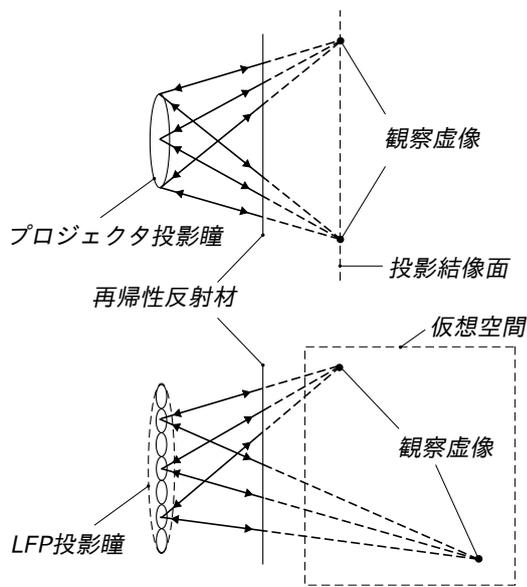


図 7: 再帰性反射材による逆プロジェクタの構成比較: (上) 通常のプロジェクタ (下) LFP

示す。LFD の構成としては [3] とほぼ同じである。SONY 社の HMZ-T1 を分解してディスプレイとして利用し、レンズアレイは Fresnel Tech 社の Fly-Eye Lens No.630 #4886 (レンズピッチ 1.0[mm], 焦点距離 3.3[mm]) をディスプレイから 3.3[mm] 離して固定、アイボックスは 7.4[mm] とした。ディスプレイに表示する映像は Unity 上で作成し、奥行方向に 12[cm] の位置に赤色、1.0[m] の位置に黄色のランドルト環を配置したものを表示した。撮影カメラは一律に Pixelink 社の PL-B776F、カメラレンズには Computer 社の M2514-MP を使用し焦点の調節を行った。LFD の場合、アイボックス位置にカメラを設置し、焦点を 12[cm] と 1.0[m] に調節して撮影した (図 8(上))。LFP の場合、逆プロジェクタを構成する際の再帰性素材には再帰性透過材であるアスカネット社の Aerial Imaging Plate(AIP)[4] を利用し、LFP から 8.5[cm] の位置に 45[deg] で配置、LFP のアイボックスと光学共役の位置に撮影カメラを配置し同様に焦点を調節して撮影した (図 8(下))。

3.2 撮影結果

撮影結果を図 9 に示す。LFD の結果を視るとかなりボケているものの焦点調節によりピントが合うランドルト環が変わっているため奥行方向の情報があることがわかり、LFD としては正しく動作していることが分かる。また、LFP の結果は AIP を挟むため LFD より更にボケることになるが、こちらも焦点調節ができていたことが分かり、2.2 節の議論が正しいことが確認できた。

4. 像面湾曲問題の解決

4.1 回転双曲面鏡による像面湾曲の解決

まず空間中に最終的に像をおきたい平面を設定する。その面上にある点に物体があれば、そこから拡散光が出て曲面鏡で反射するので、外から見ると曲面鏡の内側にこの点の虚

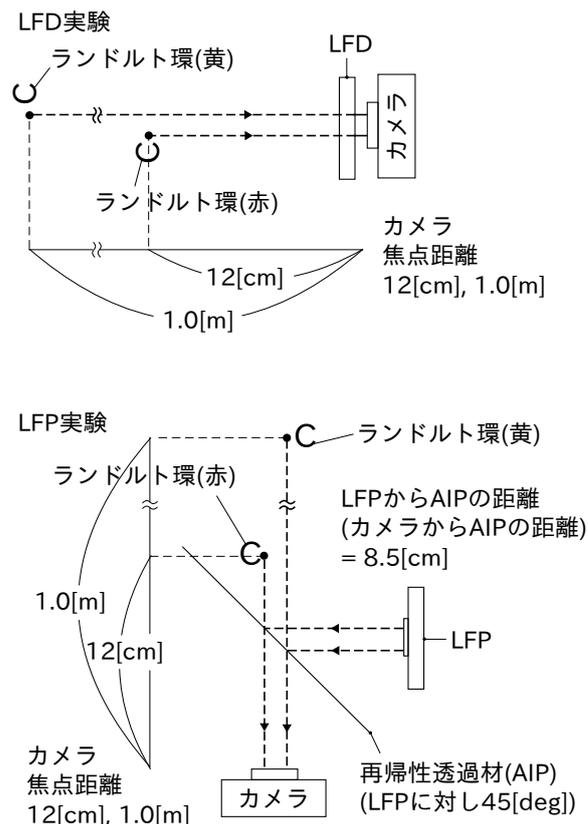


図 8: 実験環境: (上) LFD 実験環境 (下) LFP 実験環境

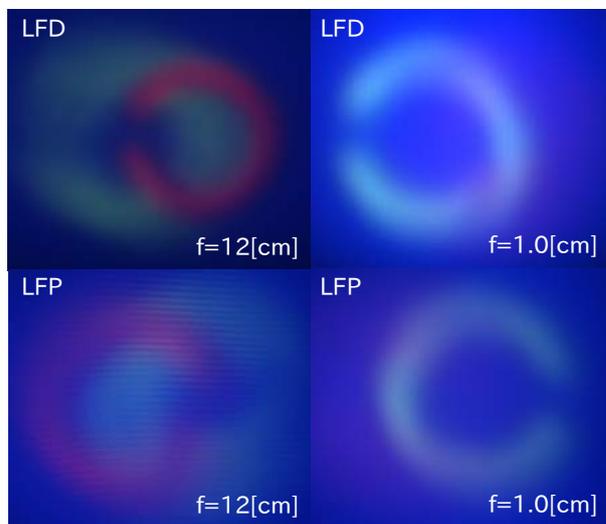


図 9: 実験結果: (上) LFD (下) LFP

像が見える。このようにして出来た最終像面の像は曲面鏡内部の湾曲面となる。逆に、この虚像を作っている反射光をプロジェクタから出すことができれば、上記の光路を逆に辿る反射光により元々の物点や最終像面に実像ができる (図 10)。従って、外から見えている最終像面の虚像形状が、プロジェクタが最初に投影すべき像面の形状である。上記議論のシミュレーションの結果を図 11 に示す。プロジェクタから湾曲した初期投影像面が打てれば、最終像が平面になることが分かる。

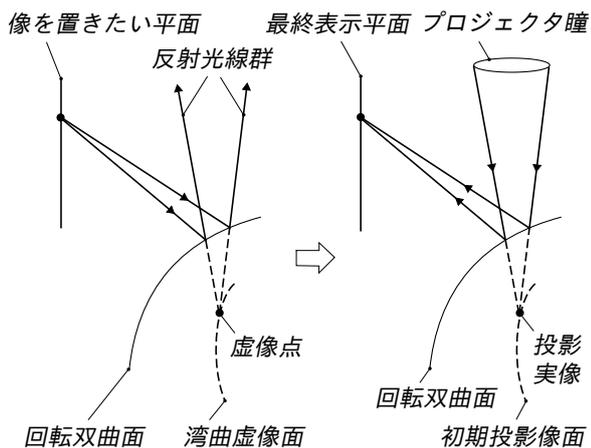


図 10: 回転双曲面による像面湾曲問題の解決案

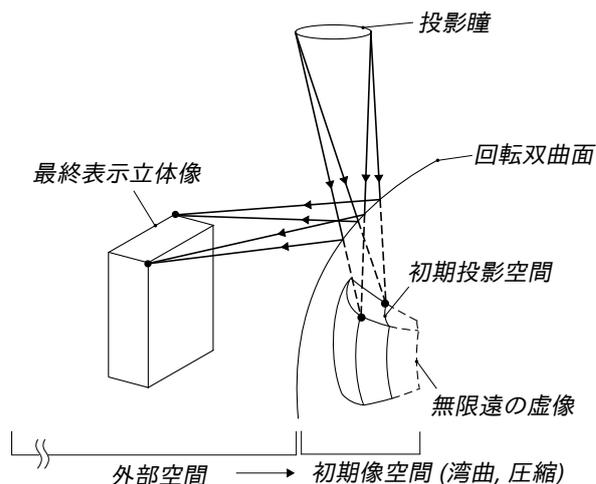


図 12: 立体像への拡張

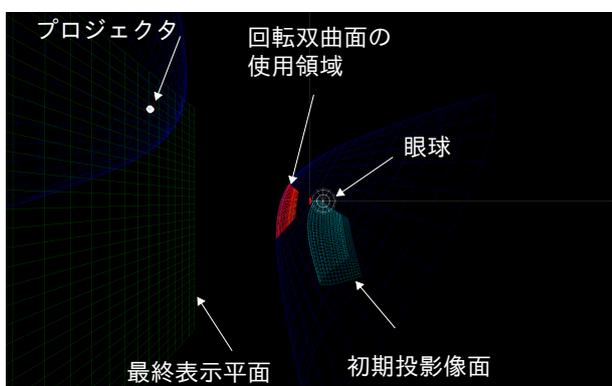


図 11: シミュレーションによる結果

4.2 立体像への拡張

前節では最終表示平面と初期投影像面の対応付けを示したが、これは平面に限ったことではなく、外部の3次元世界を曲面鏡に写せば、その内部に湾曲し縮小した3次元の小さな虚像世界が見える。外部の実世界上の点と内部の虚像上の点は1対1対応しているため、原理的にはLFPを用いて歪んだ内部世界を投影することで、外部の実像世界を作ることができるはずである。

5. 議論

HHMPDへのLFPの導入にはその他の潜在的なメリットがある。

5.1 収差によるボケの改善

理想像面上の一点に正確に実像を作ることが出来たとしても、実際にはその反射光は反射面の収差のために一点には集まらずボケが生じる。逆に空間中の一点を鏡に写してできる虚像も実はボケている。この虚像からの乱れた光線、つまり実物点からの光の反射光をLFPで正確に作ることができれば最終像のボケは解消される。回転双曲面の場合のボケは小さいが、入手しやすく安価な球面鏡等を用いる場合にはこの方法に利点があるかもしれない。

5.2 収差による瞳の不一致、画像欠損の改善

特に球面鏡を用いる場合、周辺視野を作る光線は球面収差のために、観察瞳の前方を通り過ぎてしまうので、像が見えず視野が狭くなる。LFPはレンダリングによりアイボックスを前後に動かすことができるので、必要な視野部分にあわせて画像を提示できる可能性がある。

6. 結論

再帰性光学材料を用いて投影光を反転させて観察するディスプレイを逆プロジェクタと定義した。プロジェクタをLFPに変えても逆プロジェクタとして動作することを説明し、試作と実験により証明した。HHMPDは逆プロジェクタの一種であり、光学シースルーHMDとしては広角であるという利点がある。しかしその像面は極端に曲がった籠状であるという欠点もあることを指摘した。LFPを用いて初期投影像を平面からある理想曲面形状の像を作ることにより、この問題を解消する方法を提案し、シミュレーションにより最終像を平面にできることを示した。

参考文献

- [1] 木島竜吾, 渡邊純也, 近藤大佑, 再帰透過性素材を用いた虚像投影式頭部搭載型プロジェクタ, ヒューマンインターフェース学会研究報告集, vol.10, no.2, pp.7-12, ヒューマンインターフェース学会, 2008.
- [2] 清川清, 双曲面ハーフミラーを用いて超広視野頭部搭載型プロジェクタの設計, 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会論文集, 192.pdf, VRSJ, 2007
- [3] Douglas Lanman, David Luebke, Near-Eye Light Field Display, in Proc. ACM SIGGRAPH, 2013.
- [4] 藤島智彦, 大坪誠 (アスカネット), 光学結像装置に使用する光制御パネルの製造方法, 特許公開 2011-175297, 2011