



# HMD 光学系の光線空間プロジェクタによる 収差補償の評価

The evaluation of aberration correction  
by light field projector for wide conversion mirror of HMD

犬飼悟<sup>1)</sup>, 木島竜吾<sup>1)</sup>

Satoru INUKAI, Ryugo KIJIMA

- 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, k18inukai@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, kijima@gifu-u.ac.jp)

**概要:** 光学シースルー HMD を単純な光学系で作る場合, 広視野を得るためにワイドコンバージョン鏡を使用すると収差のため十分な解像度が得られない. 3次元像を結像することができる光線空間プロジェクタを収差補償に用いれば, 解像度制約を解消できると考えるが理論的には未整備である. 本研究では, 観察像の解像度を光線追跡シミュレーションと実測値によって求め, 光線空間プロジェクタによる収差補償の効果を評価した.

**キーワード:** 光学シースルー HMD, 光線空間ディスプレイ, ワイドコンバージョンミラー, 収差

## 1. はじめに

光学シースルー HMD の構成の 1 つに頭部搭載プロジェクタというものがある. プロジェクタは投影瞳から収束光を発生し, 実像を結ぶ. この射出光を正確に反転させた時, プロジェクタの投影瞳の位置に目を置くことで, 実像の投影位置に虚像を観察することができる. 再帰性反射材で射出光を反転させ, ハーフミラーによって光線を折り返すことでユーザは投影された画像を歪みなく知覚することができる (PHMD, HMP, HMPD[4][5][6])(図 1).

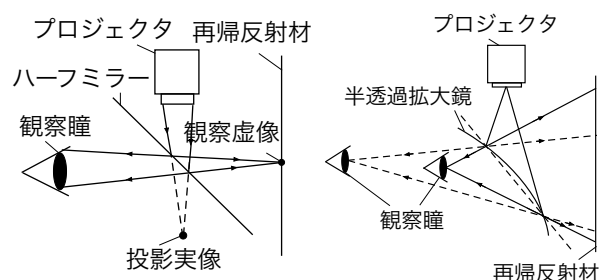


図 1: HMPD

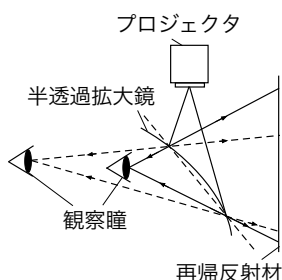


図 2: WCM 方式 HMD

### 1.1 WCM 方式 HMD の収差

この構成の HMD の視野角はプロジェクタの画角に依存しており, 画角が広がるにつれてハーフミラーは加速度的に大きくなる. また, 垂直画角は 90[deg] までに制約されてしまう. 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 HMPD の広視野化を行い (HHMPD[1]), また, 長原らは双曲面鏡を用いたプロジェクタの投影光を眼前の楕円鏡を介して観察する広視野な HMD を作成し

た [2]. このようにプロジェクタと拡大鏡を用いた HMD を WCM(WideConversionMirror) 方式 HMD と定義する (図 2).

WCM 方式で作られた像は拡大鏡による収差を持つという問題がある. プロジェクタで投影した収束光が拡大鏡によって 1 点に収束しなくなることや投影像が大きく湾曲してしまうことが起きてしまう. その結果観察像の注視点以外はボケてしまう. このボケはプロジェクタの表示素子の解像度が向上したとしても解消されるものではない. また, 複雑な光学系を用いて収差を補償してしまうと, シンプルな光学系で構成しているという利点を損ねてしまう. そのため, シンプルな光学系のまま拡大鏡の収差を補償する必要がある.

### 1.2 頭部搭載光線空間プロジェクタ

物体からの光線を再現する技術に光線空間ディスプレイ (LightFieldDisplay:LFD) がある. これはディスプレイとアレイレンズを組み合わせ, 光線の方向を制御することができ, 3次元立体像を裸眼で観察できるディスプレイである. 図 3 (上) に LFD の構成を示す. Douglas らは眼前に小型の LFD を置く Near-EyeLFD を提案し, 複数の実装例がある [3]. Near-EyeLFD はアイボックスに対して多数の光線を集中させて射出するものであり, ユーザはアイボックスに瞳を置くことで, 単眼での虚像を観察することができる.

一方で, LFD と同じハードウェア構成で, ディスプレイに表示するレンダリング画像を変えることで, アイボックスを通して任意の 3次元座標に実像を投影する光線空間プロジェクタ (LightFieldProjector:LFP) ができる. 図 3 (下)

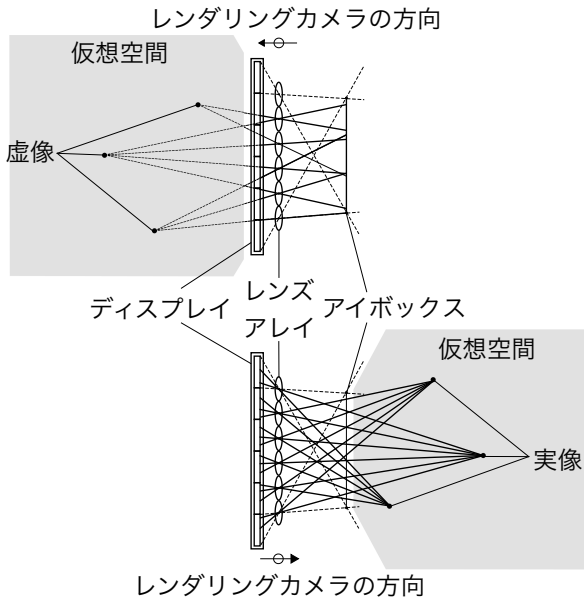


図 3: (上)LFD(下)LFP

に LFP の構成を示す。LFP は設計した光線を打ち出す能力を持っており、これを用いて収差の補償が可能である。

## 2. 収差補償理論

LFP を用いて光学系の収差を補償する理論を説明する。まず、ある LFP と同じ構成でディスプレイの代わりに同じ大きさで同じ画素数の CCD/CMOS と同一のアレイレンズを利用したカメラを考える。このカメラは光線空間を記録することができる光線空間カメラ (LightFieldCamera:LFC) である。この LFC で実空間を撮影すると、光線情報を記録しているタイル画像をえることができる。このタイル画像を撮影時の LFC と同じ位置に設置した LFP に入力すると、撮影した光線群をそのまま投影するため、LFC で撮影した時と同じ位置に像点が立つ。

次に、拡大鏡を含めた構成で考える (図 4)。ある像面からの光線群は拡大鏡で反射され、LFC によって撮影される。その時、出力されるタイル画像は収差の影響を含めた光線空間を記録している。このタイル画像を同条件の LFP で拡大鏡に投影すると、拡大鏡による反射は撮影時と逆変換となるため、収差が打ち消された像面が立つ。これによって WCM 方式の HMD の収差を補償することができる。

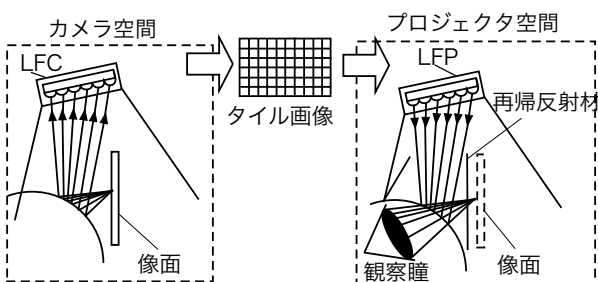


図 4: WCM 方式 HMD の収差補償理論

LFC と拡大鏡、像のモデルを計算機内部で作ることで、仮想物体が発した光線群も同様に交換され、実空間に同じ光線群が出現する。つまり、実空間に仮想物体が視覚的に出現する。

### 2.1 本研究の目的

前章で述べたように、LFP を用いれば、理論的には、広い視野を持つ WCM 方式 HMD の収差を補償し、画素サイズにより決まる解像度に近い像を提示できるはずである。本研究では、LFP を試作して拡大鏡と組み合わせ、実験により収差補償の効果を検証し、理論値との比較を行う。

## 3. LFP による解像性能への影響

### 3.1 LFP の解像度とボケの大きさ

無限に高い解像度の LFP を利用すれば光学系の収差を完全に取ることが可能である。虚像面 1 枚を作る通常の HMD の場合には画素の形がそのまま見え、画素の視角の大きさが解像度を直接決める。これに対し、LFP の場合には多くの画素の重なりが像を作るため、1 画素よりは大きな像の広がりが見られる。その様子を図 5 に示す。まず、ある目標像点を表示しようとする場合、像点から各レンズレット中心を通り、ディスプレイと交わる点に大きさのない輝点を作れば理想的であるが、実際に可能なのはこの理想表示点を含む画素を点灯させることである。すると、目標像点付近に画素の像が分散することとなる。この画素像の中心は像面上の画素サイズ  $W$  の矩形内部に確率的に分布する。簡単のため、一様分布を仮定し、画素像中心のばらつきを示す  $RMSE$  (Root Mean Squared Error) である  $RMSE_{center}$  を計算すると下のようになる。

$$RMSE_{center} = \sqrt{\int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \frac{x^2 + y^2}{W^2} dy dx} = \frac{W}{\sqrt{6}} \quad (1)$$

また、像面上での目標像点から  $(x, y)$  移動した点の相対輝度分布  $L_r(x, y)$ 、つまり LFP のある点の表示応答である PSF (Point Spread Function) と、その RMSE である  $RMSE_{psf}$  は以下のような。

$$L_r(x, y) = \frac{L(x, y)}{L(0, 0)} = \left(1 - \frac{|x|}{W}\right) \left(1 - \frac{|y|}{W}\right) \quad (2)$$

$$RMSE_{psf} = \sqrt{\int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \frac{x^2 + y^2}{W^2} dy dx} = \frac{W}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

この  $RMSE_{psf}$  は LFP 自体が持つ画素サイズを表現する量である。通常ディスプレイのフラットな輝度分布を持つ画素について同じ計算をし、比較すると、LFP の画素サイズは  $\sqrt{2}$  倍に相当する。これが LFP のもともとの解像度性能である。LFP による収差補償の効果を検討する場合、LFP の解像度性能を考慮しなければならない。

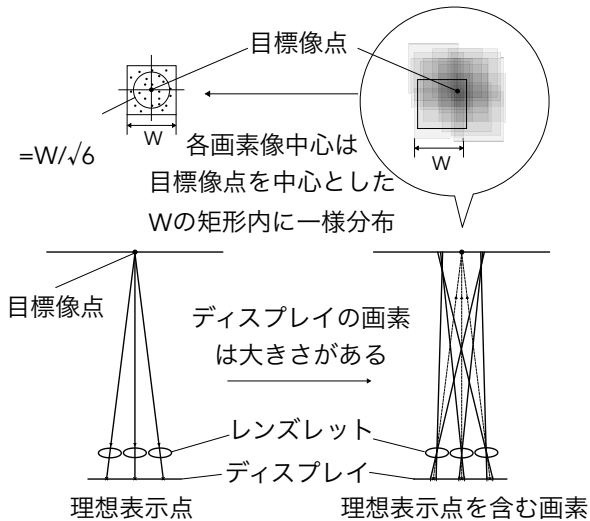


図 5: LFP の動作原理

### 3.2 ベースモジュレーションコントラスト

LFP はタイル画像の1つを1つのレンズレットで投影している。そのため、ある像面を投影するために関与しているレンズレット数の差異により、像面に周期的な輝度のうねりが生じてしまう (図 6)。具体的には像面に格子模様や縞模様の輝度の差が発生する (図 7)。この輝度の差をベースモジュレーションコントラスト (BaseModulationContrast:BMC) と定義する。将来的には BMC の輝度を補正するフィルタを表示画像にかけることで影響を小さくする手段が必要になる。

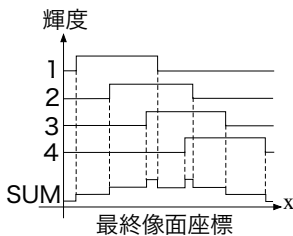


図 6: BMC の発生原理。像面上にディスプレイレット重ねることによって輝度の差ができる

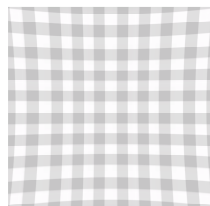


図 7: BMC の例

## 4. 収差補償量評価

### 4.1 計測条件

本稿で収差補償の効果測る LFP や拡大鏡の諸元を表 1 に示す。LFP には HP 社の WindowsMR を分解してディスプレイとして利用し、アレイレンズは Frenel Tech 社の Fly-Eye Lens No.730 #4887 (レンズ寸法 1.9[mm] 径, 焦点距離 10.0[mm], 六角配置) をディスプレイから 10.0[mm] 離して固定, アイボックスは 7.6[mm]×6.6[mm] とした。拡大鏡にはメガネ用度なしレンズ (カーブ 4) の球面鏡を用いた。球面鏡は大きな収差を持ち、ボケがひどいので通常の HMD には使用しにくかったが、一方で入手性がよく、安価

であるために採用した。

表 1: 計測条件諸元

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| ディスプレイサイズ | 51.91[mm]×51.91[mm]     |
| 画素数       | 1440[pixel]×1440[pixel] |
| 画素サイズ     | 0.036[mm]               |
| レンズサイズ    | 1.9[mm] 径               |
| 焦点距離      | 10.0[mm]                |
| アイボックスサイズ | 7.6[mm]×6.6[mm]         |
| 球面鏡曲率     | カーブ 4                   |

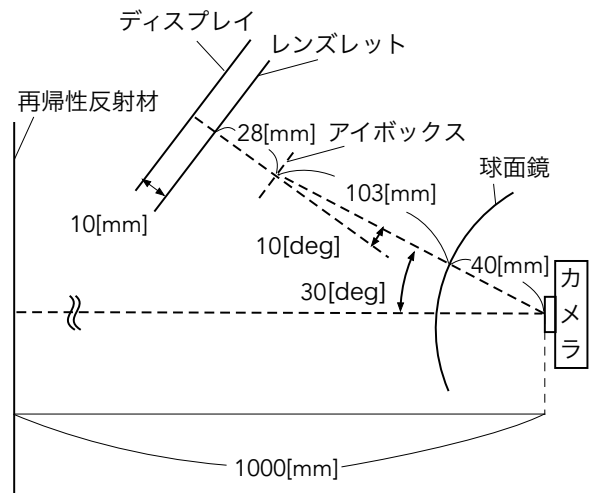


図 8: 実験環境

LFP と球面鏡, 瞳, 再帰性反射材の位置関係を図 8 に示す。瞳から前方 1000[mm] に再帰性反射材のスクリーンを、視線方向から 30[deg] 上方 40[mm] に球面鏡を設置した。ここからさらに 103[mm] の位置つまり、瞳から 143[mm] のところに LFP のアイボックスが来るように設置した。LFP の角度は瞳方向から 10[deg] 下方に傾けた。これらの構成は事前の計算によって最適化されている。想定する使用状態は LFP が額の前に来る配置であるが、実験はこの構成を横にしたものであり、図 8 を上面図として扱う。

### 4.2 理論解像度

収差補償ありの場合、解像度の理論値は、拡大鏡により大きくなった像面での画素サイズを 3.1 で求めた等価画素サイズに換算すれば求められる。なお、画素の拡大率は画素ごとに異なるが、計測実験に用いた観察像面中心付近の拡大率を用いる。ディスプレイ上では 0.036[mm] の画素は拡大鏡を経由することで、像面上では約 11[mm] となる。等価画素サイズは 15.6[mm]、その視角が 0.89[deg] であることから、カットオフ周波数は 0.56[cpd] となる。

## 5. 解像度計測実験

前記の実験環境を用いて、様々な周波数の正弦波濃淡画像を表示し、カメラと撮影し、コントラストの推移を求めることで変調伝達関数 (Modulation Transfer Function: MTF) を測定する。理論値との比較により、作成した LFP の精度を確認するとともに、収差補償の有無により性能が向上したかどうかを確認する (図 9)。観察像を撮影するカメラは一律に PL-B776F (Pixelink 社)、カメラレンズには M2514-MP (Computer 社) を使用した。

収差補償ありと収差補償なしでの MTF を図 10 に示す。収差補償無しの場合、コントラストが落ち始めるのは約 0.13 [cpd] からであるが、収差補償を行うことで低下を約 0.3 [cpd] まで防止できており、収差補償の効果が読み取れる。コントラスト 0.6 を限界利用周波数と仮定し比較すると、収差補償の効果によって、2.6 倍高い空間周波数まで利用可能となった。

高い周波数でもコントラストが約 0.4 を維持しているのは BMC の影響である。空間周波数 0.7 [cpd] でコントラストが再び高くなっていく部分が見られるのは、偽解像だと考えられる。筆者らはすでにシミュレーションにより MTF が跳ねることを確認している [7]。

理論値でのカットオフ周波数約 0.56 [cpd] に対し、収差補償ありの場合の実測値は約 0.3 [cpd] と、かなりの低下が見られた。また、より高い周波数領域でのコントラストの推移は、BMC の影響により確認できなかった。性能低下の原因は、LFP に使用されているレンズレットの収差や、収差補償計算と実際に配置した球面鏡の設置ずれなどであろうと考える。後者は実験配置ののちに収差を実測することで改善できるかもしれない。

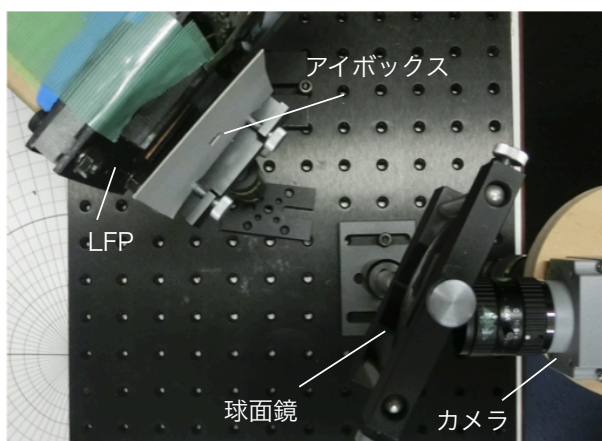


図 9: 実験環境

## 6. 結論

HMD に拡大鏡を加えて広視野を得ようとする、その収差によりボケが生じ解像度が大きく下がる。光学系が最大の解像度制約であれば、プロジェクタの解像度を上げても改善しない。今までに LFP を用いることで拡大鏡の収差を補償し、ボケの少ない像を提示することは理論的に示さ

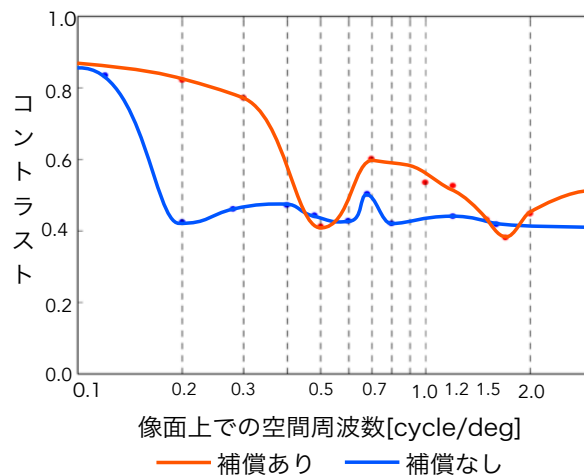


図 10: 計測結果からの MTF

れていたもので、本研究では、LFP による拡大鏡方式 HMD を試作し、この収差補償効果を実測値から定量的に評価した。現環境の LFP では収差補償なしよりも 2.6 倍高い空間周波数で同じコントラストを表示することができ、収差補償の効果が確認できた。

## 参考文献

- [1] Kiyokawa, K.: A Wide Field-of-view Head Mounted Projective Display using Hyperbolic Half-silvered Mirrors, Proc. of IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2007, pp.207-210, 2007.
- [2] Nagahara, H., Yagi, Y. and Yachida, M.: Super Wide Viewer using Catadioptric Optics, Proc. of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRSY) 2003, pp.169-175, 2003.
- [3] Douglas Lanman, David Luebke: Near-Eye Light Field Displays, ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 32 Issue 6, SIGGRAPH Asia, 2013.
- [4] Kijima, R., Hirose, M.: A Compound Virtual Environment Using the Projective Head Mounted Display, Proc. of ICAT/VRST '95, pp.111-121, ACM-SIGCHI, 1995.
- [5] Inami, M., Kawakami, N., Sekiguchi, D., Yanagida, Y., Maeda T., Tachi, S.: Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector, Proc. of IEEE Virtual Reality of Central Florida, 2003 (PhD).
- [6] Hua, H., Gao, C., Biocca, F., Rolland, J. P.: An Ultra-light and Compact Design and Implementation of Head-Mounted Projective Displays, Proc. of IEEE Virtual Reality 2001, pp.175-182, IEEE, 2001.
- [7] 犬飼悟, 松野裕生, 木島竜吾: ワイコン球面鏡を用いた光学シースルー HMD の収差補償の評価, 日本バーチャルリアリティ学会大会第 24 回大会論文集, 3C-07, VRSJ, 2019.