



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

The Evaluation of Aberration Correction for Optical See-Through HMD with Wide Conversion Mirror

犬飼悟¹⁾, 松野裕生²⁾, 木島竜吾³⁾

Satoru INUKAI, Yusei MATSUNO, and 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, k19matuno@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: 広視野の光学シースルー HMD の構成の一つとして, 拡大鏡を用いて広視野を実現した拡大鏡式 HMD がある. しかし, 出来上がる像は拡大鏡が持つ収差の影響でボケてしまう. 我々は光線空間プロジェクタを用いていかなる収差も補償が可能な理論の提示を行い, 拡大鏡として球面鏡を用いた拡大鏡式 HMD の収差補償のシミュレーションを行った.

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

1. はじめに

1.1 WCM 方式 HMD と収差

プロジェクタは投影瞳から収束光線を発し, 実像を結ぶ. この射出光線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, 元々の実像位置に虚像を観察することができる. 再帰性反射材を用いる場合, 目をプロジェクタの投影瞳の位置に置くことができないため, ハーフミラーにより, ユーザは投影部位に実像をみることになる, 投影された画面をゆがみなく知覚できる (PHMD[6]). スクリーンに再帰反射材を用いると高い反射ゲインにより小型のプロジェクタを使える (HMP, HMPD[7][8])(図 1).

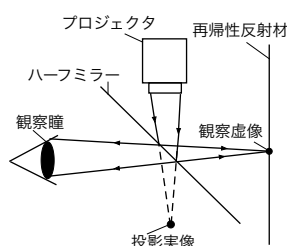


図 1: HMPD

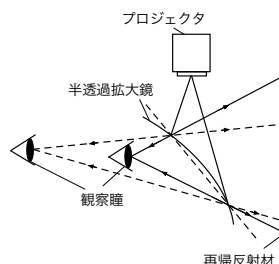


図 2: WCM 方式 HMD

この構成では, 画角を大きくするとハーフミラーは加速度的に大きくなり, また, 垂直画角は 90[deg] までに制約される. 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]. この様に, プロジェクタと拡大鏡を組み合わせた HMD を

WCM(WideConversionMirror) 方式 HMD と定義する (図 2).

WCM 方式 HMD 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. 例えば HHMPD では, 像面上のボケは十分に小さいものの, 像面自体が大きく湾曲する. これではユーザは頻繁な視焦点調節を強いられるとともに, 注視点以外の観察像にはボケが生じる. 今後プロジェクタ表示素子の解像度が向上しても, 拡大鏡の収差が解消できないと全体の性能は上がらない.

1.2 本研究の目的

光学系の収差は, 一般的にはレンズや鏡を追加して補償する. これは小型・軽量性が必要な HMD には向かない方法である. 本研究の目的は, WCM を用いて視野を拡大すると共に, 光学系の追加ではなく, 光線空間プロジェクタを用いて収差を除去する手法の提案と, シミュレーションによる検証である. 筆者らはすでに, 回転双曲面鏡を用いた場合について効果を確認している [5]. 本稿では, 収差が大きく WCM としては使いづらかった球面鏡に焦点をあてる.

2. 頭部搭載光線空間プロジェクタ

2.1 LFD と LFP

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 (LightFiledDisplay:LFD) がある. これはディスプレイとレンズアレイを組み合わせることによって光線の方向を制御するもので, 3次元立体像を裸眼で観察できるディスプレイとして知られている. 眼前に小型の LFD を置く Near-Eye LFD は, Douglas により提案され, その後もいくつもの実装例がある [3]. これは, アイボックス内部に多数の光線を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、単眼でも焦点調節によりボケという距離の手がかりを含んだ像を見ることができる。図 3(上) に LFD の構成を示す。

一方で、ハードウェアの構成はそのまま、レンダリングないし、表示空間を逆側に移したものを、光線空間プロジェクタ (LightFieldDisplay:LFP) と呼ぶことにする。図 3(下) に LFP の構成を示す。

物体からの光線を再現する技術であった LFD に対し、LFP は設計した光線を打ち出す能力を持っている。LFD から LFP はディスプレイに表示する画像の変更のみで切り替えが可能である。

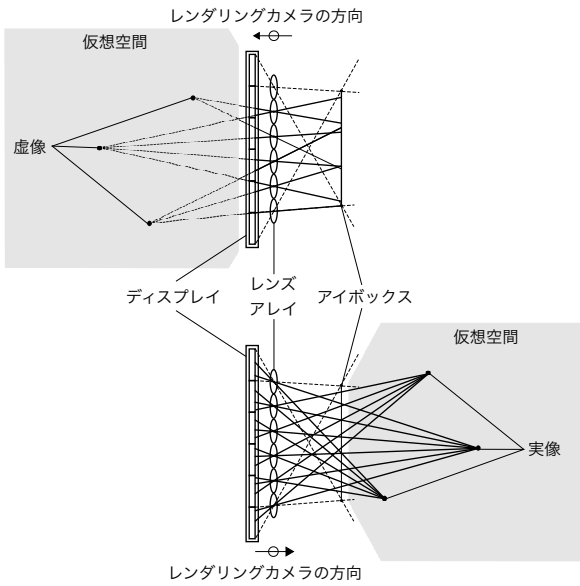


図 3: (上)LFD(下)LFP

3. LFP を利用した収差の補償と動作原理

3.1 収差補償理論

LFP を用いて光学系に収差を補償する原理を説明する (図 4)。まず、LFP と完全に対称となる光線空間カメラ (Light-Field-Camera:LFC) を考える。LFC は光線空間を記録することが可能で、LFP と同じ構成であるが、表示素子 (ディスプレイ) と対称となる撮像素子、つまり、ディスプレイと同じ大きさで同じ画素数の CCD/CMOS と同一のレンズレットを利用したカメラである。この LFC で実空間を撮影することで (C)、各レンズレットが担当する画像がタイル状に並んでいるタイル画像 t を得る。このタイル画像はカメラ空間上の光線のうち LFC が捉えたものを保存していることになる。このタイル画像を撮影時の LFC と同じ位置にある完全に対称な LFP の入力として用いることで、撮影した光線群をそのまま投影することになるため、プロジェクタ空間上には撮影したときと同じ位置に同じ像点が立つ。

このカメラのモデルを計算機内部に作れば、仮想物体から発した光線群も全く同様に变换され、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

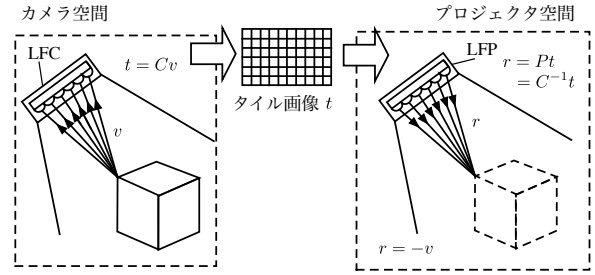


図 4: 基本モデル概念

する。以降、特に断りのない限りカメラ空間は計算機内部に作るものとして話を進める。

次に、カメラ、プロジェクタの両空間に視野拡大のための曲面鏡 S を追加した場合を考える (図 5)。仮想空間では光線群は S で反射され LFC によって撮影される (C)。この撮影光線群は言わば収差の影響を含んだ光線群である。プロジェクタ空間では LFP による投影光線群は S で反射され最終光線群となるが、この S による反射は撮影時とは逆の変換であるため収差が打ち消される。結果としてプロジェクタ空間上には曲面鏡によって視野は拡大されるものの収差の影響を受けていない像、つまりカメラ側の空間に設定した像と全く同じ像が出現する。

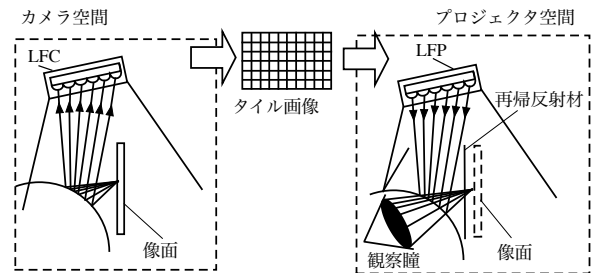


図 5: WCM 方式 HMD の収差補償理論

3.2 LFP の解像度とボケの大きさ

LFP による収差補償を行うと、収差によるボケはなくなるが、LFP のディスプレイピクセルがサイズを持つことによるボケが生じる (図 6)。LFP がある目標像点を表示する場合、目標像点から各レンズレット中心に直線を引き、それとディスプレイ面が交わった点が理想表示点である。この理想表示点を点灯することで目標像点が表示される。ただし、ディスプレイは画素という表示限界があるため実際にはその理想表示点を含む画素を点灯することとなり、像面には目標像点を含む画素像が現れることになる。画素像中心は目標像点を中心とした像面上の画素サイズ W の矩形領域内部に一様分布する。レンズレットの数が十分に多ければ画素像中心のばらつきを示す RMSE(Root Mean Square Error) である $RMSE_{center}$ は下ようになる。

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

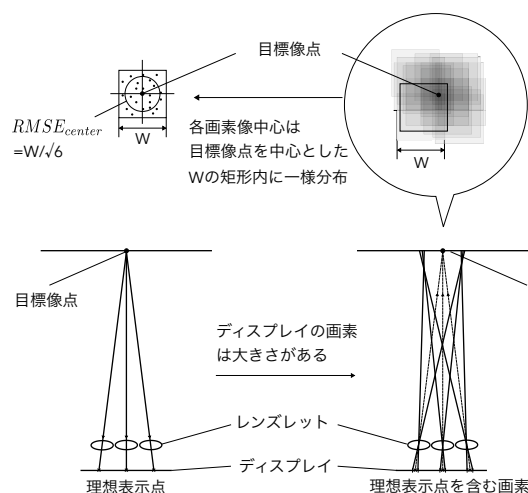


図 6: LFP の動作原理

また、像面上での目標像点から (x, y) だけオフセットした点の相対輝度分布 $L_r(x, y)$, LFP に目標像点を与えた時の表示応答、つまり PSF(Point Spread Function) を考慮した $RMSE_{psf}$ は以下ようになる。

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

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

この $RMSE_{psf}$ をボケサイズを代表する量として中心的に扱うこととする。つまり、LFP を利用し収差を補償することで、収差が原因となる解像度の低下は解消するものの、LFP 自体の性能による像面上のボケは $RMSE_{psf}$ という形で表れる。

つまり、LFP の場合、画素の重なりにより輝度の広がりがあり、画素サイズが同じプロジェクタに比べ、 $\sqrt{2}$ の等価画素サイズを持つといえる。

4. 収差補償評価

4.1 シミュレーション

本章では光線追跡シミュレーションにより、3.1 で述べた収差補償の原理が正しいのかどうかを確認する。また、3.2 で述べた画像のボケについても、理論値と数値実験結果を比較もする。シミュレーションを用いたのは、現在入手可能なディスプレイの画素数では補償効果の確認が行えないからである。WCM には球面鏡を用いた、これは収差が大きく使いにくかったのだが、本手法を適用することで利用可能な性能となれば、入賞性もよく、将来の試作に使うことができるからである。

シミュレータの諸元を表 1 に示す。LFP モデルに関する諸元は [3] で示された設計をそのまま借用する。異なるのは

垂直方向の投影視野を確保するために、ディスプレイサイズと画素数を水平方向と同じまで広げたことだけである。

球面鏡とプロジェクタと瞳の位置は、球面鏡によってプロジェクタと瞳が光学共役となる場所に設置した。

表 1: シミュレータ LFP 諸元

ディスプレイサイズ	15.36[mm] × 15.36[mm]
画素数	1280[pixel] × 1280[pixel]
画素サイズ	0.012[mm]
画素像サイズ (像深さで正規化)	4.0E-3
画素像サイズ (視野中央での視覚)	13.75[arcmin]
アイボックスサイズ	7.6[mm] × 7.6[mm]
レンズ焦点距離	3.0[mm]
レンズレットピッチ	1.0[mm]

4.2 収差補償の評価

まず、視野内に格子点を表示させるシミュレーションを行う。収差補償をしないで LFP から目標像点へ光線を投影した結果を図 7 に、収差補償をして LFP から目標像点へ光線を投影した結果を図 8 に示す。収差補償なしの結果では点を投影したのにもかかわらず球面鏡によって引き伸ばされて歪んでいるのに対し、収差補償ありの結果では球面鏡による歪みを抑えて投影をしていることが確認できる。

次に、LFP による画素のボケを考慮し、像面上で投影画像を重ね合わせ、PSF を求めたものを図 9 に示す。図 10 はこの PSF の何点かを取り上げ、フーリエ変換して MTF(Modulation Transfer Function) を求めたものである。視野内の場所は異なるものの、通常のプロジェクタと比べて約 1.1~3.4[cpd:cycle per degree] の解像度を実現している。視力換算値では 0.11~0.035[arcmin⁻¹] に相当する。

図 11 は原画像に位置に応じて PSF 画像を畳み込んで観察画像を求め、中央部分の 25×25[deg] の視野を切り出したものである。球面鏡によるボケのみを考慮しているが大きく改善されている。

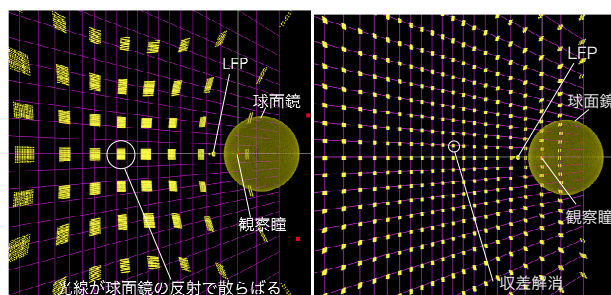


図 7: LFP による収差補償なしの格子点の投影結果 図 8: LFP による収差補償ありの格子点の投影結果

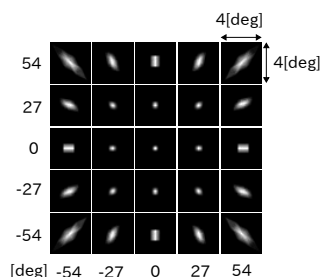


図 9: 収差補償を行った場合の視野内各位置における PSF 例

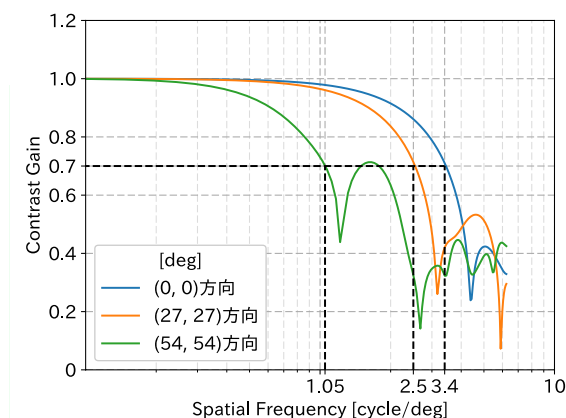


図 10: PSF 画像からフーリエ変換により求めた MTF の例

5. 議論

これまで議論してきた球面鏡と LFP を利用した、WCM 方式の HMD の具体的な設計例について述べる。優先目標は、視野の広さである。LFP 諸元は表 1 のものとし、球面鏡は度なしメガネレンズから、カーブ 8(半径 65.4[mm])のものを選定した。この場合、視野角は $113.1\text{H} \times 54.3\text{V}[\text{deg}]$ が得られる。投影像の平均ボケサイズは約 $38.3[\text{arcmin}]$ であり、単純仮想視力 [4] は $0.05[\text{arcmin}^{-1}]$ であった。本稿執筆時点での市販の HMD の標準的な単純仮想視力は約 $0.17[\text{arcmin}^{-1}]$ であり、本設計のまま画素サイズが $1/8$ となれば同様の解像度が得られる。



図 11: 収差補償の効果 (左: 補償なし, 右: 補償あり). 観察画像は元画像と PSF 画像の畳み込みによる

6. 結論

HMD に WCM 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。このボケはプロジェクタの解像度を上げて大きく改善しない。本研究では、補償光学系を追加するのではなく、LFP を用いることで収差を計算により補償する理論を示し、シミュレーションによりその効果を確認した。

LFP では多数の画素の重なりにより点を表示し、通常のプロジェクタに比べ $\sqrt{2}$ 倍の等価画素サイズとなる。一方で収差によるボケは発生しないので、WCM がこの等価画素サイズを超えるボケを生むのであれば、本手法を適用する価値がある。シミュレーション結果はボケ量の大きな改善を示した。

参考文献

- [1] Kiyokawa, K.: A Wide Field-of-view Head Mounted Projective Display using Hyperbolic Half-silvered Mirrors, Procs. 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, Procs 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] 木島竜吾: 仮想空間における視力, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, p.179-188, 23 巻 3 号, 2018.
- [5] 道下幹也, 犬飼悟, 木島竜吾: 頭部搭載光線空間プロジェクタ, 日本バーチャルリアリティ学会大会第 23 回大会論文集, 14D-5, VRSJ, 2018.
- [6] Kijima, R., Hirose, M.: A Compound Virtual Environment Using the Projective Head Mounted Display, Procs. of ICAT/VRST '95, pp.111-121, ACM-SIGCHI, 1995.
- [7] Inami, M., Kawakami, N., Sekiguchi, D., Yanagida, Y., Maeda T., Tachi, S.: Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector, Procs. of IEEE Virtual Reality of Central Florida, 2003 (PhD).
- [8] Hua, H., Gao, C., Biocca, F., Rolland, J. P.: An Ultra-light and Compact Design and Implementation of Head-Mounted Projective Displays, Procs. of IEEE Virtual Reality 2001, pp.175-182, IEEE, 2001.