



未知の視野拡大光学系に対する光線空間ディスプレイによる補償

Image Forming Compensation for Unknown Magnifying Optics using Light Field Display

谷口 和優¹⁾, 木島 竜吾²⁾
Kazumasa TANIGUCHI, 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, kzm21taniguchi@gmail.com)
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: HMD は一般に、面積の限られたディスプレイを眼前におき、像を拡大して広い視野を得ようとする。この際に、拡大率が大きいと光学系の収差によりボケが生じて解像度が下がる。光線空間ディスプレイを収差補償に用いることで、光学シースルーHMD は収差の影響によるボケを軽減することが可能である。本研究では、観察像を実測で求め、光線空間ディスプレイによる収差補償の効果を評価した。

キーワード: 光線空間ディスプレイ, 収差, 空間コード化法

1. はじめに

Head Mounted Display (以下 HMD) において広視野を得るためには、拡大率の大きいレンズや曲面鏡が必要である。このような極端な光学系では収差が無視できないが、HMD の場合には重量やサイズ制約が強く、組みレンズの枚数を増やして解決することは望ましくない。このため筆者らは光線空間ディスプレイを使用し、計算により収差を除去する方法を提案している。本稿では、光線空間ディスプレイと目の間に凸レンズを挿入した例を取り上げ、光線追跡などの計算ではなく、実測により光学系をも考慮したレンダリングを行う方法を示す。

1.1 光線空間ディスプレイ

光線空間ディスプレイ (Light Field Display, 以下 LFD), 特に Near-Eye LFD [nVidia の論文 3 章] の典型的な構成は、ディスプレイと蝸の目レンズを組み合わせたものである。ディスプレイの画素を光らせる位置により、射出する光線の方向を指定する。多数のレンズから光線を発することで、3次元空間内の任意の位置にその光線 (ないし延長線) が交わる輝点を生成する。図 1 に LFD の構成を示す。Near-eye LFD では全ての射出光線はアイボックスと呼ばれる投影瞳を通り、ここにユーザの瞳をおく。

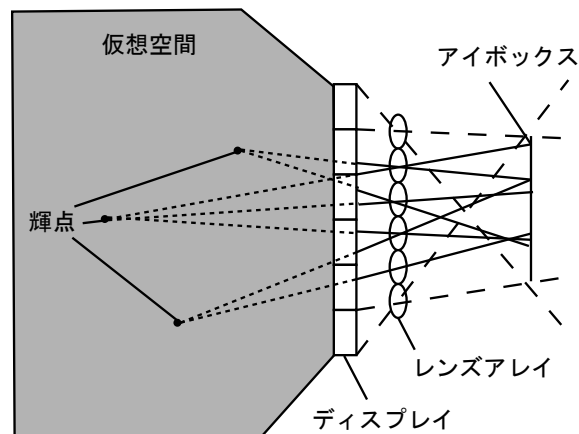


図 1: 光線空間ディスプレイ。

2. 収差補償理論

LFD のディスプレイ素子撮像素子に変更すると、LFD と対称な光線空間カメラ (以下 LFC) ができる。LFC で撮影した光線群を、LFD により逆方向に射出すると、現実空間に再び物体像を作ることができる。

LFD と LFC の両方に同じ光学系を装着した場合を考える。LFC で撮影された像には光学系が派生する収差が含まれるのだが、LFD で射出される光線は光学系で曲げられることも含め撮影時と全く同じ光路をたどり、撮影空間にあった光線と同じものになる。つまり、収差はキャ

ンセルされる。

図 2 に、追加の光学系がない場合を示す。物体から出た光線 v は、LFC によって撮影され、タイル画像の画素値となる。LFC により光線群をタイル画像 t にする撮影変換を C とすると、

$$t = Cv \tag{1}$$

である。LFD では、この画素から放たれた光線が蠅の目レンズの一つによって外部に放出される光線 r となる。LFD によりタイル画像から射出光線への射出変換を P とする。

$$P = -C^{-1} \tag{2}$$

であり、射出光線 r は、

$$r = Pt = -C^{-1}Cv = -v \tag{3}$$

となる。図 3 に LFD/LFC 外部にレンズをおいた場合を示す。レンズを通過する光線は、レンズの望ましい動作により曲げられるだけでなく、望まない派生動作つまり収差の影響をも受けるのだが、それも含めたレンズの撮影時の動作を S とする。撮影により生成されるタイル画像 t は

$$t = CSv \tag{4}$$

である。この画像には収差を含む光線が記録されている。表示により生成される光線 r は、

$$r = S^{-1}Pt = S^{-1}(-C^{-1})CSv = -v \tag{5}$$

となり、レンズの動作はキャンセルされ、その収差は補償される。

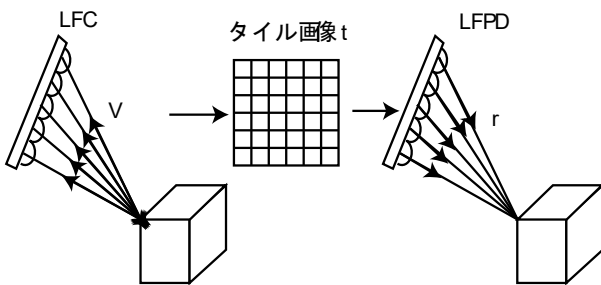


図 2: 光線空間カメラと光線空間ディスプレイの関係。

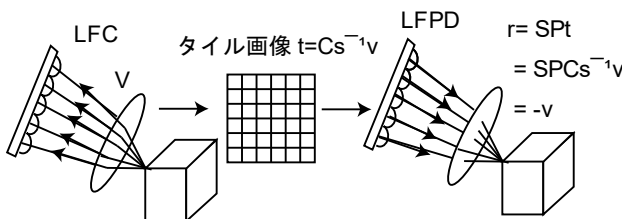


図 3: 収差を含む光線についての収差補償。

3. 実測に基づくレンダリング

3.1 方法

2 章の説明では、LFD と対称な光線空間カメラ LFC を考えた。HMD 使用時には、LFC は実際のカメラではなく、仮想空間を撮像つまりレンダリングするためのカメラモデルである。これは光線追跡シミュレーションにより精密に行うことはできるが、実際には、1. 計算コストが高いこと、2. 追加光学系を設計どおりの位置姿勢に設置するのが難しいことという現実的な問題がある。そのため、追加光学系を含めた表示をカメラで観察し、その実測結果を用いて 2 章で述べたものと類似のカメラモデルをつくりレンダリングを行う方法を試みる。なお、本稿では図 4 のように視点から一定の深さにある像面 1 枚を考え、この面上に平面像を表示することを目標とする。

3.2 理論値によるタイル画像の生成

追加の光学系をもたない、生の LFD の場合には、蠅の目レンズと表示素子の位置関係や大きさに基づき、多数のカメラで通常の透視投影変換を行うことで、タイル画像を生成できる。LFD は平面表示画像を目標像面に反転投影する小さなピンホールプロジェクタが並んだものとみなすことができる。一つのプロジェクタは一つの蠅の目レンズ（以下レンズレット）とこれに対応するディスプレイ上の小領域（以下ディスプレイレット）のペアである。実際のレンズレットの位置に通常のカメラモデルを置き、投影面としてディスプレイレットを用いれば、透視投影変換により、そのディスプレイレットに表示すべき画像がレンダリングできる。これはいわば理論値に基づくレンダリングである。

3.3 実測値によるタイル画像の生成

ユーザの目があるべき場所にカメラをおき、目標像面に焦点を合わせて LFD の提示画像を撮影する。生の LFD の場合、あるディスプレイレット全体を光らせると、目標像面にはそれと相似な投影矩形が現れる。この矩形内部で拡大率が一定であり、画像を表示した場合には、表示画像を目標像面上の矩形に単に拡大して貼り付けたものが見える。従って、まず、表示すべき目標平面像をレンダリングし、その中であるディスプレイレットからの投影矩形領域を切り出してディスプレイレットに貼り付ければ良い。これが実測に基づく方法であり、必要な情報は小プロジェクタごとの目標像面上での投影矩形領域である。

追加の光学系（本稿では凸レンズ）を有する LFD の場合にも、ほぼ同様の方法でレンダリングが可能である。ただし各小プロジェクタの投影領域は矩形ではなく、また拡大率は場所により異なる。つまり非線形に歪んでいる。従って、目標画像からこの投影領域形状を切り出し、適切なワーピングをかけて矩形のディスプレイレットに貼り付けることが必要である。これはグラフィックスの基本機能であるテクスチャマップにより図 5 のように実装できる。

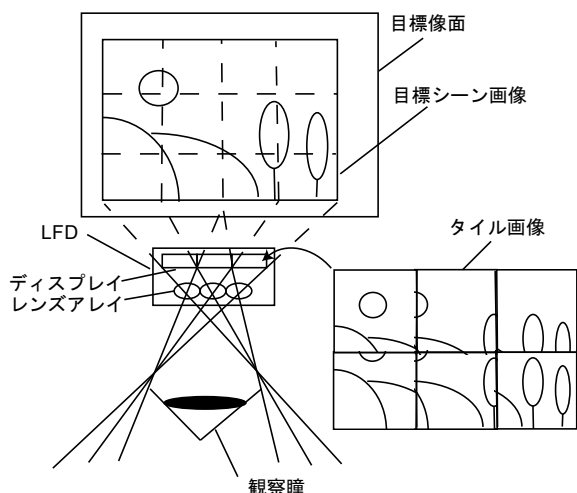


図 4: LFD にタイル画像を表示し、目標像面上に目標シーン画像を表示する。

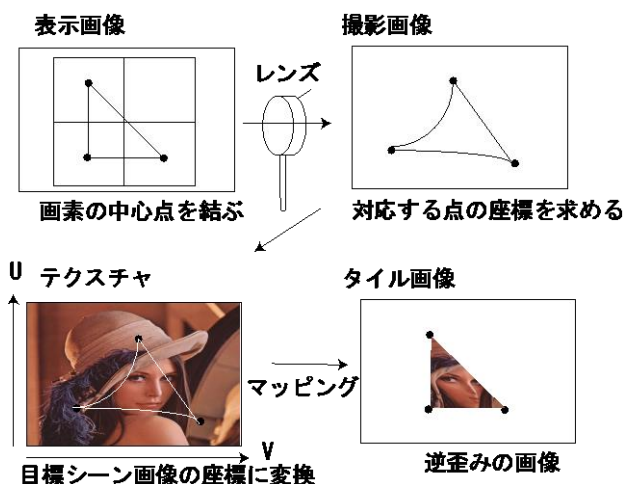


図 5: テクスチャマッピングによるタイル画像の生成。

3.4 実測による UV マップの算出

3.3 で述べた方法には目標画像中の画像座標 (UV 座標) で定義された投影領域形状が必要である。この領域内部での拡大率の変化をも捉えるため、形状の外形だけで不十分であり、理想的には各画素を点灯させた場合にその点が観察される位置全てを計測しておきたい。実際にはこれには相当な時間を要するため、コード化光投影によって処理量を削減する。

まず、あるディスプレイレットを取り上げ、そこにのみバイナリコード画像を表示し、カメラで撮影する。反転したバイナリコードも表示撮影し、比較することで、白黒の境界線を算出する。図 6 のようにバイナリコードの分割数を倍に増やしながら同様の処理を行う。これらの情報から、ディスプレイレット上にメッシュを表示したときの観察画像と、表示メッシュ交点と観察メッシュ交点の対応関係が得られる。なお、本稿では表示メッシュの単位幅は 8 画素とした。

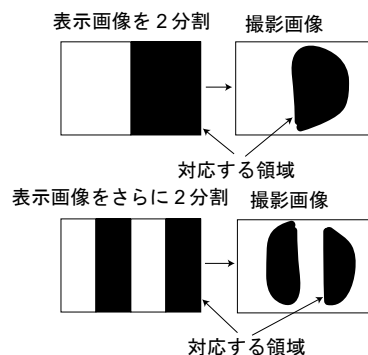


図 6: 対応関係の判別方法。

4. 実験

4.1 LFD および実験装置

実験のため製作した LFD の仕様を表 1 に示す。HP 社の HMD 製品である WindowsMR VR1000-100 を分解し、液晶ディスプレイとして利用した。蠅の目レンズには Frenel Tech 社の Fly-Eye Lens No.730 4887(レンズ直径 1.9[mm], レンズピッチ 2.0[mm], 焦点距離 10.0[mm], 六角配列)をディスプレイから焦点距離だけ離して設置した。アイボックスは 7.6×6.6[mm]とし、アイリリーフは 28[mm]となった。バックライトには OptoSupply 社の 3W 白色パワー LED OSW4XNE3CIS を 4 個使用した。

図 8 に実験時の LFD と撮影カメラの配置を示す。通常の使用では、アイリリーフ距離にアイボックス分の穴を開けた遮蔽板を設置するのだが、ここにカメラレンズの等価入射瞳を置き、遮蔽板の代わりにカメラレンズに備わっている絞りをを用いた。

4.2 実験方法と結果

凸レンズのない状態用のタイル画像を理論値からレンダリングし (3.3 節) また、凸レンズを付加した状態で撮影実測にもとづいたタイル画像も生成した。表示実験は凸レンズを加えた環境で行い、上記 2 種類の画像を表示、撮影した。表示内容は上方向にギャップのあるランドルト環、MTF 計測を行うための濃淡画像とした。

図 9 にランドルト環を表示した場合を示す。凸レンズの効果を考慮しない理論値レンダリングの場合には、各小プロジェクタからの像が図 7 ずれて重なっている様子が観察され、実測により凸レンズの効果を含んだレンダリングの場合は、このずれが解消されている様子がわかる。

図 10 に MTF 計測結果を示す。凸レンズの効果を考慮した方が高い解像度を示した。コントラスト 0.5 を下回るのは、前者が約 0.1[cpd]なのに対し、後者は約 0.15[cpd]であった。また高周波領域ではコントラストが落ちるが、後者の方が残存するコントラストが高い傾向にあった。凸レンズによる拡大率は 1.5 倍であった。

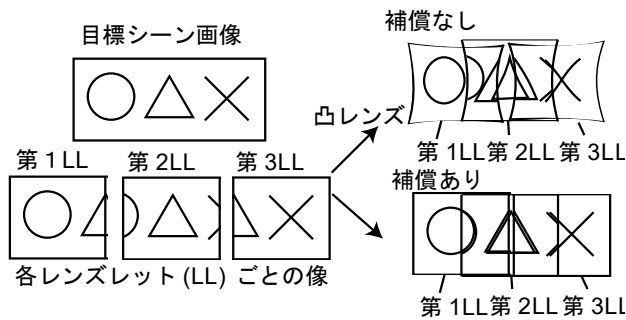


図 7: 凸レンズの効果を考慮しない理論値レンダリングと凸レンズの効果を含んだレンダリングのタイル画像を表示した際のレンズレットごとの像の重なりの違い。

表 1: LFD の仕様諸元

ディスプレイサイズ	51.91[mm]×51.91[mm]
解像度	1440[pixel]×1440[pixel]
画素サイズ	0.036[mm]
レンズピッチ	2.0[mm]
焦点距離	10.0[mm]
アイボックスサイズ	7.6[mm]×6.6[mm]
アイリリーフ	28[mm]

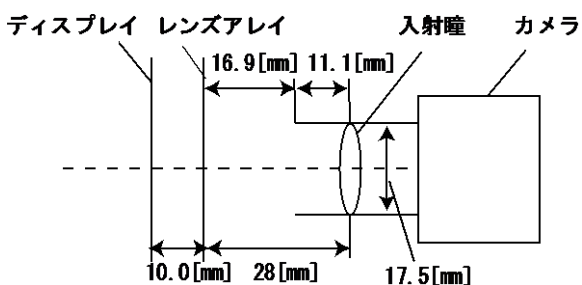


図 8: 実験環境

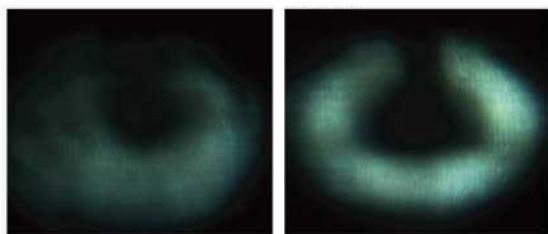


図 9: 凸レンズの効果を考慮しない理論値レンダリングの視力 0.09 (凸レンズを考慮した換算視力 0.06) のランドルト環 (左) と凸レンズの効果を含んだレンダリングの視力 0.06 のランドルト環 (右) を LFD に表示し、凸レンズを通して撮影した画像。

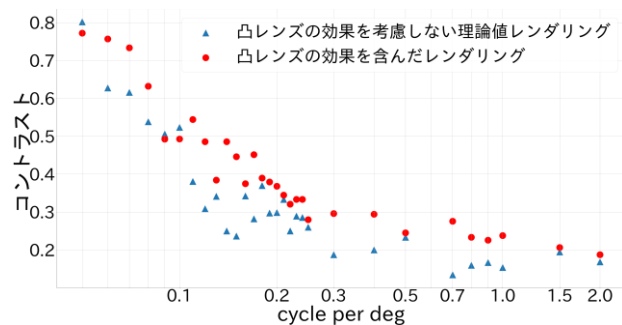


図 10: MTF グラフ。

5. 結論

レンズによる光線の屈折には、理想的な動作に加え不都合な収差が含まれている。光線空間ディスプレイとレンズの組み合わせを正しく動作させるためには、レンダリングにこのレンズの動作を含めておかなければならないが、正しくモデル化ができれば収差を補償することができる。バイナリコードを表示、観察し、これに基づいて提示すべき画像から適切な領域を切り出し適切に変形させて表示に用いることで、実際に設置されたレンズの動作を考慮したレンダリングを行なった。ランドルト環を表示させたところ、レンズを考慮しないレンダリングではブレた像が観察されるが、レンズを含むレンダリングではブレは消えること、濃淡波画像を用いた MTF 計測の結果は、後者の方が高い周波数まで表示可能であった。

参考文献

- [1] Douglas Lanman, David Luebke : Near-Eye Light Field Displays, ACM Transactions on Graphics(TOG), Volume 32 Issue 6, SIGGRAPH Asia, 2013.
- [2] 清川 清 : 双曲面半透過鏡を用いた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, pp. 4346, 2007.
- [3] 犬飼悟 : 光線空間ディスプレイを用いた拡大鏡型光学シースルー性 ディスプレイの試作による光学収差補償の検証, 岐阜大学修士学位 論文