

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540079

研究課題名(和文) 能動的結像制御スクリーンによる新しい虚像投影技術の研究

研究課題名(英文) A new scheme of virtual image projection display using active imaging screen

## 研究代表者

圓道 知博 (Yendo, Tomohiro)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70397470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：遠方に広がる風景をディスプレイ装置で再現する場合、一般には投影式の大画面を用いて視距離を長くする方法がとられているが、大がかりな設備が必要となる。一方、凹面鏡や凸レンズを用いて光学的虚像を得る方式もHMDやHUD等で採用されているが、画面サイズが光学系の口径に制限されるという問題がある。そこで本研究では投影スクリーン自体の作用で光学的虚像を直接作り出す、新しい投影技術を提案し、シミュレーション及び実験によって原理を実証した。

研究成果の概要(英文)：To display distant view, large projection display with long viewing distance is commonly used but large equipment and space is required. On the other hand, concave mirrors or convex lenses are employed to generate optical virtual image in HMD or HUD, the diameter of these imaging optics would be the dominant constraint on image size. In this study, we have proposed a new display scheme that enables to show large virtual image which is generated by the function of projection screen itself. We also confirmed principles of the scheme by both computer simulation and experiment.

研究分野：情報学

キーワード：バーチャルリアリティ 視覚ディスプレイ

### 1. 研究開始当初の背景

空間の広がりを感じさせる遠方視界の再現は、バーチャリアリティ分野における主要な応用の一つであるにも関わらず、遠景を表示するために特化したディスプレイ技術の研究は少ない。通常は投影によって画面サイズを大きくし、長い視距離を確保することで対応することになるが、設備の大きさとリアリティはトレードオフとなる問題がある。至近距離にある表示装置で遠方の風景を再現するには、光学的な虚像を生成し、遠方から飛来する平行光線を再現することが必要となる。従来技術としては、大口径の凹面鏡等を用いてこれを実現する **Collimated Display** と呼ばれる方式があるが、視域が狭いため観察者が大きく移動しない着座式の利用形態に限定される上、大型の光学系のため設計や調整に難しく、価格の面で訓練用フライトシミュレータ等の限られた用途にしか用いることができなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では従来の大口径光学系とは全く異なる、微小な結像光学系の集合によって構成される能動スクリーン構造を提案し、スクリーン自体であたかも遠くに見える虚像を直接結像することが可能となる画期的な虚像投影技術の確立を目指して原理実証を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、レンズアレイと拡散反射/透過面を組み合わせた投影スクリーンを用いた新しい投影技術を提案する。これは、投影スクリーン自体的作用によって光学的虚像を作り出し、従来は投影スクリーンと一致していた画像面があたかも遠方に存在するかのように見せることを可能とするものである。また、投影スクリーンの屈折状態を変化させることで虚像の奥行と視域を制御することができる。

### 4. 研究成果

#### (1) 凸レンズアレイによる虚像表示

まず初めに、提案手法の基本原理となる、凸レンズアレイを用いた虚像生成方法について説明する。図1に示すように、凸レンズアレイと、各レンズに対応する画像(要素画像と呼ぶ、Elemental image)を組み合わせたものを考える。各要素画像を各レンズの前側焦点よりわずかにレンズ寄りに配置すると、各レンズによって虚像が生成される。このとき、ある1つのレンズによって生成される虚像は、観察者の視点から当該レンズを通して見る範囲にのみ観察されることに注意する。レンズアレイ全体で一つの虚像を見るためには、それぞれのレンズで生成される虚像が滑らかにつながって観察されることが必要である。そのための条件については次節で述べる。

この方法における利点の一つは、画面全体を単一光軸の結像光学系で構成する場合に比べて、個々のレンズの焦点距離を大幅に短くすることが可能であり、装置の薄型化が期待できることである。

レンズアレイを用いる表示技術としてよく知られているものに Integral Photography (IP) [1] があるが、これは視差を持つ立体映像を再現する技術である。IPを用いた虚像生成が提案されており[2]、IPによって生成された像の品質を向上させる手法も提案されている[3]。加えてIPをHUDへ応用もされている[4]。提案手法では、表示する画像を平面の虚像としており、これは、IPにおいては全ての要素画像が同一であるという特殊な状態に相当する。

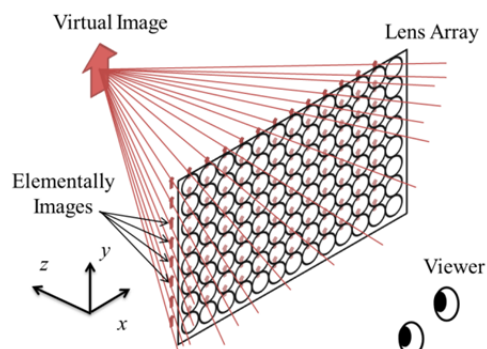


図1 レンズアレイによる虚像生成

#### (2) 凸レンズアレイの結像原理

凸レンズアレイにおいて各レンズの要素画像の虚像は観察者から見て1つの連続した虚像として見えなければならない。このときの各レンズとそれに対応した要素画像との位置関係及び結像される虚像の奥行きの関係について述べる。

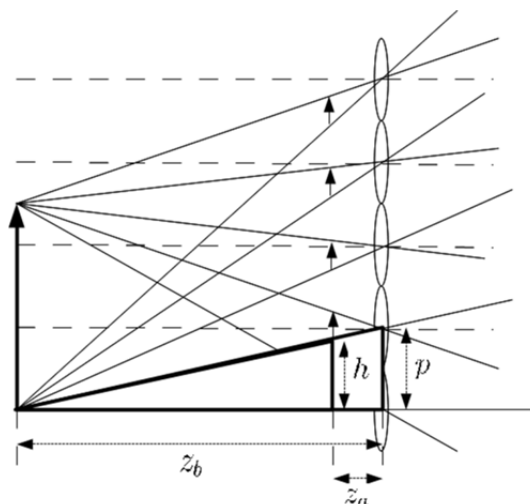


図2 要素画像の結像原理

図2は各レンズの主平面から $z_a$ の位置に要素画像を設置し、それぞれの虚像が奥行き $z_b$ の位置に結像している様子を表している。このとき各レンズにおける虚像の高さ方向の位置が互いに一致するためには、レンズと

要素画像との相対位置をレンズごとに変える必要があり，その相対位置変えたときの要素画像の間隔  $h$  は以下ようになる．

$$h = \frac{z_b - z_a}{z_b} \quad (1)$$

式(1) は各レンズの虚像が連続して見えるには，虚像表示距離から求まる間隔ごとに要素画像を配置しなければならないことを表している．また要素画像の間隔とレンズの間隔が等しい場合，虚像は無限遠に表示される．

### (3) 提案手法の構成

各レンズに必要な要素画像の生成方法について考える．まず考えられる方法として，レンズアレーと同じ大きさのディスプレイを用いて各レンズの大きさと位置に合わせて要素画像を並べて表示する方法がある．この方法は IP と同様であるが，提案手法は IP と異なり，同一の要素画像が並ぶ．これは同一の要素画像を表示するために別々の画素を使用することになり，画素の利用効率が極めて悪い．そこで同一な要素画像が並ぶという条件において，ひとつの像を表示しそれを光学的に複製させ，要素画像を生成する方法が考えられる[5]．この方法は光学的に複製させているため，画素の利用効率の問題を解決できる．そこで本稿では光学的に要素画像を複製し，同時に虚像の観察を行うために図3に示すようなレンズアレーとスクリーン，プロジェクタ，ハーフミラー(Beam Splitter)からなる方法を提案する．ハーフミラーは後述べる理由による観察者とプロジェクタとを共役な位置にしなければならないという問題を解決するために用いている．

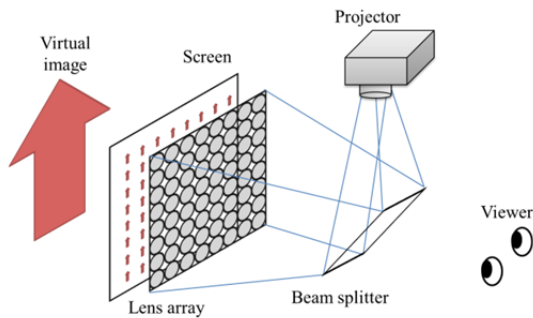


図3 システム構成

### (4) 提案手法の原理

まず観察する虚像が無限遠に生成される場合について述べる．無限遠離れた物体の光線をレンズアレーを用いて集光させスクリーン上に結像させることを考える．図4のように無限遠離れた物体の光線は平行光となってレンズアレーに届き，レンズの焦点面に結像される．この結像された像が，要素画像となる．

スクリーン上に結像された要素画像を同じレンズアレーを通して観察すると，図5のように物体の像が無限遠に生成される虚像として観察することができる．

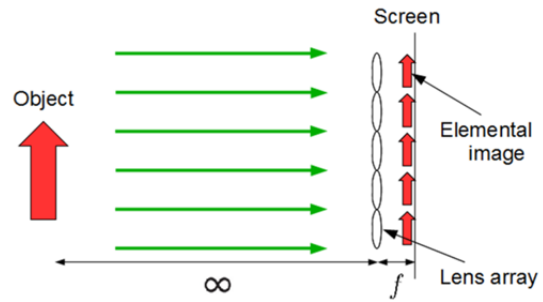


図4 レンズアレーによる要素画像の複製

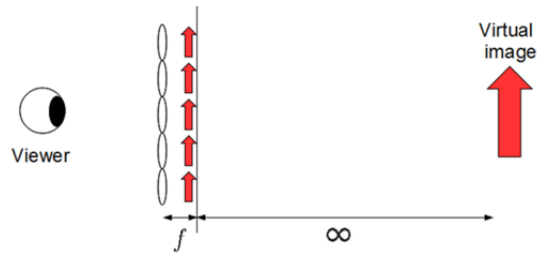


図5 レンズアレーによる虚像観察

提案手法では無限遠に物体を設置する代わりに，像を無限遠に投影するようにプロジェクタの焦点を無限遠に合わせている．提案手法においてプロジェクタからの光線はスクリーン上で結像し，その後スクリーンで反射した光線は元の経路を逆にたどる再帰反射をし，元の位置に帰ってくる．従って観察者はプロジェクタと同じ位置からしか虚像を観察することができない．そこでハーフミラーを用いてプロジェクタと観察者とを共役な位置に置くことが可能となる．以上の原理からひとつのレンズアレーは要素画像の生成と，虚像の生成の二つの機能を持っている．

一方で有限距離に像を表示させる際は，要素画像を結像させるスクリーンの位置をレンズの公式(2) とすることで実現できる．

$$z_a = \frac{z_b f}{z_b + f} \quad (2)$$

ここで  $z_a$  はレンズの主点からスクリーンまでの距離，  $z_b$  はレンズから虚像までの距離，  $f$  はレンズの焦点距離を表す．このときの要素画像の間隔  $h$  は式(1)，式(2) から以下のようになる．

$$h = \frac{z_b}{z_b + f} p \quad (3)$$

また要素画像の大きさは図6のようにプロジェクタの口径に依存した大きさとなり，視距離を  $Z$ ，レンズのスクリーンの位置(焦点距離)を  $f$ ，プロジェクタの口径を  $h_p$ ，レンズの口径を  $h_l$  とすると要素画像の大きさ  $h_e$  は次式で求まる．

$$h_e = \frac{f}{Z} (h_p + h_l) \quad (4)$$

レンズアレーの各レンズの間隔はこの要素

画像の大きさより大きくする必要がある。

(5) 虚像観察シミュレーション

提案手法が理論通りに遠方に虚像が表示されるかを確認するために、光線追跡を用いたシミュレーションを行った。このときのシミュレーション諸元を表1に、シミュレーション結果を図7に示す。レンズは後で述べる実験で用いたアクロマートレンズ(屈折率の異なる二つの素材を用いたレンズ)の仕様に合わせた。

図7左は虚像の観察結果の全体図であり、図7右はその左上の一部分を拡大した図である。全体図の結果から中心付近では各レンズの虚像が連続しているが、中心から離れたレンズの虚像にぼけや歪みが確認できる。

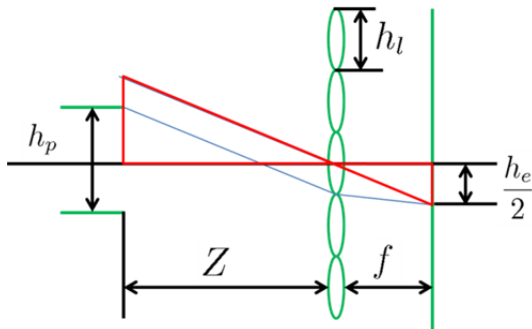


図6 要素画像の大きさ

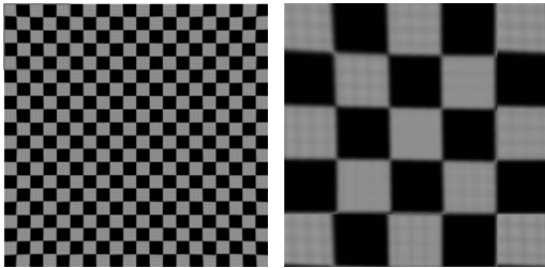


図7 原理検証シミュレーション結果 (左:全体図, 右:拡大図)

表1 虚像観察シミュレーション諸元

投影距離	1000mm
視距離	1000mm
プロジェクタ口径	30.0mm
レンズアレー配列	5 × 5
レンズピッチ	20.0mm
焦点距離	70.8mm
レンズ材質	BK7,SF2

(6) 虚像観察実験

シミュレーション結果から提案手法による虚像の観察が確認できたため、次に虚像の観察実験を行った。今回は図8のようにプロジェクタとカメラの位置を固定し、プロジェクタから画像を投影し、1つのレンズでの虚像を撮影する。その後XY自動ステージを用いて設計したレンズアレーの間隔分レンズの位置を移動させ、虚像の撮影を繰り返し行い、各位置で撮影した画像を撮影位置に応じて合成することで等価的にレンズアレーを

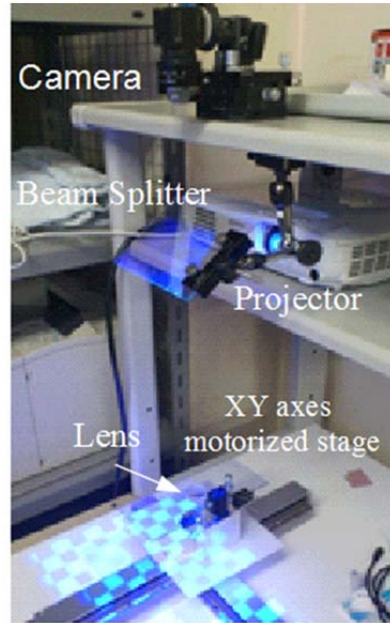


図8 実験構成図

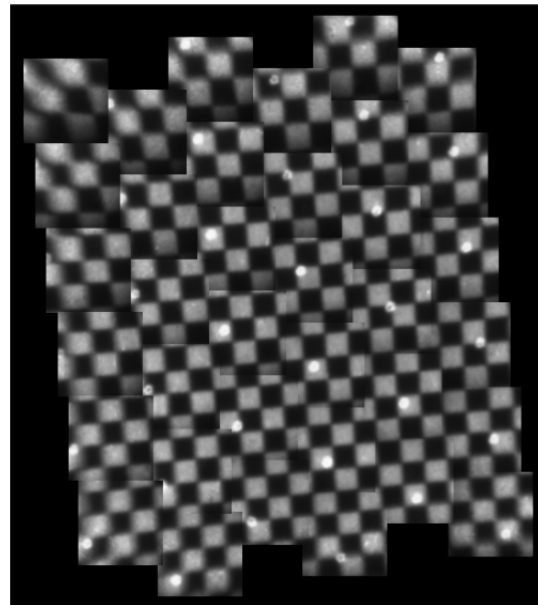


図9 虚像観察実験結果

実現させた。カメラ位置を固定し、各位置で虚像を撮影し、それぞれを合成した結果を図9に、このときの実験諸元を表2にそれぞれ示す。レンズはシグマ光機株式会社製のアクロマートレンズ(DLB-30-70PM)を用いた。図9の中心付近を見てみると、中心付近の各レンズの虚像が連続していることが確認された。また左上のレンズの虚像のように中心から離れたレンズの虚像にぼけや歪みが発生していることも確認された。これらはシミュレーションと同様な結果を示しているが、シミュレーション結果に比べて実験結果は虚像全体のぼけ具合が大きい。この原因としてスクリーンやレンズの性能などが考えられるが、明確に判明していないため詳細な原因の究明は今後の課題である。

表2 虚像観察実験諸元

投影距離	650mm
観察距離	650mm
カメラ焦点距離	7.75mm
カメラピクセルサイズ	$3.63 \times 10^{-3}$ mm
レンズアレー配列	6 × 6
レンズ焦点距離	70.8mm
レンズ直径	30mm
レンズ材質	BK7,SF2

(7) 虚像表示距離測定実験

次に虚像の表示距離を変化させるために、図10のような手動Zステージを用いてスクリーン位置を変化させる。虚像が目標値通りに表示されているかを確認するため、異なる撮影位置による視差画像を撮影し、視差画像からピクセル単位で視差量を求め、視差量を用いて虚像の表示距離を測定する。今回は虚像観察実験と同様な実験を行い、カメラを水平移動させることで視差画像を取得した。図11は表示距離が1000[mm]の時の視差画像を縦に並べ、左に90[度]回転させた図である。

$$z = \frac{fl}{dr} \quad (5)$$

式(5)を用いて、視差画像から虚像表示距離の測定を行った。ここでfはカメラの焦点距離、lはカメラの水平移動量、dは視差画像の視差量、rはピクセルサイズを表し、本実験におけるf、l、rの値は表3の通りである。

表示距離の目標値は視差量のピクセル値が整数倍になるように設定し、それに対応したスクリーン位置を式(2)から算出した。視差量は1[ピクセル]~19[ピクセル]の範囲で2[ピクセル]間隔とした。

表4は視差量から表示距離を算出した結果をまとめたもので、理論値と測定値それぞれを逆数(diopter)で示し、測定値から理論値を引いたものを誤差としている。

今回の実験で用いたカメラの仕様では、視差量が1[ピクセル]のときdiopterは0.05となる。つまりこの測定結果よりほとんどの測定点において誤差が1[ピクセル]以下(diopterが0.05以下)であり、ほぼ目標値通りの視差が得られていることが確認された。

表3 表示距離計算式のパラメータ

f	7.75mm
l	10.00mm
r	$3.63 \times 10^{-3}$ mm

(8) 参考文献

[1] G. Lippmann, "Epreuves reversibles donnant la sensation du relief." J. de Phys., 4 series, pp. 821-825, 1908.  
 [2] B. Lee, S. Jung, S.-W. Min, and J.-H. Park, "Threedimensional display by use of integral photography with dynamically

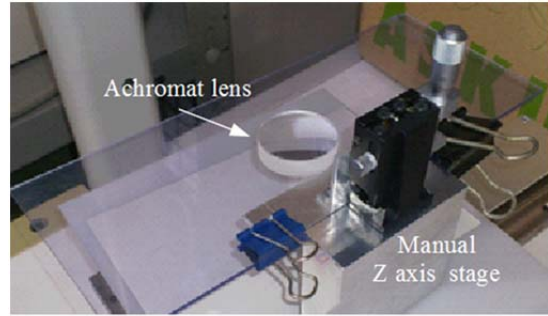


図10 手動Z軸ステージ

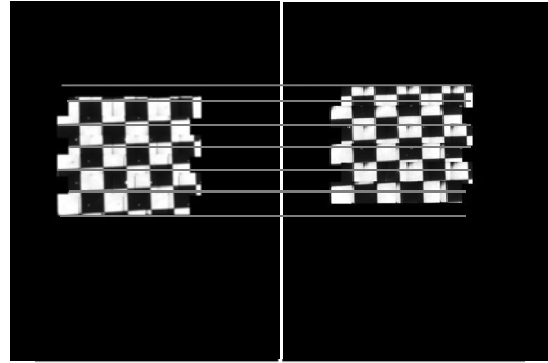


図11 視差画像(左:左画像, 右:右画像)

variable image planes", Opt. Lett. 26(19), 1481-1482 (2001).

[3] J.-H. Park, S. Jung, H. Choi, and B. Lee, "Integral imaging with multiple image planes using a uniaxial crystal plate", Opt. Express 11(16), 1862-1875 (2003).

[4] 掛谷英紀, "粗インテグラルイメージング法とその応用, 映像情報メディア学会技術報告", Vol. 31, No. 31, pp. 11-14, 2007.

[5] 竹市章, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸, "レンズアレイと奥行き分割を用いた3次元ディスプレイの新しい構造", 3次元画像コンファレンス2008 講演論文集, pp. 45-48, July. 2008.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

①長谷川達也, 島津航介, 圓道知博, "小口径結像系の集積による投影型虚像表示ディスプレイ", 電子情報通信学会論文誌 D, J98-D, pp. 448-458, 2015; doi:10.14923/transinfj.2014PDP0028  
 ② Tatsuya Hasegawa, Tomohiro Yendo, "Reduce blurring and distortion in a projection type virtual image display using integrated small optics", Proc. SPIE 9392, The Engineering Reality of Virtual Reality 2015, 93920P, Mar. 2015; doi: 10.1117/12.2183173  
 ③ Naoto Beppu, Tomohiro Yendo, "A full-parallax 3D display tracking with restricted viewing zone tracking

viewer's eye", Proc. SPIE 9391, Stereoscopic Displays and Applications XXVI, 939103, Mar 2015; doi: 10.1117/12.2083097

- ④ Jin Miyazaki, Tomohiro Yendo, "A super multi-view display with small viewing zone tracking using directional backlight", Proc. SPIE 9391, Stereoscopic Displays and Applications XXVI, 939115, Mar. 2015; doi: 10.1117/12.2082996

[学会発表] (計3件)

- ①長谷川達也, 圓道知博, "小口径結像系の集積による投影型虚像表示ディスプレイにおける歪みの低減", 三次元画像コンファレンス講演論文集, 22, pp, 63-66, 2014(2014年7月11日, 東京大学(東京都文京区)).
- ②長谷川達也, 島津航介, 圓道知博, "小口径結像系の集積による投影型虚像表示におけるぼけの低減", 電子情報通信学会信越支部大会平成25年度講演論文集, p. 83, 2013(2013年10月5日, 長岡技術科学大学(新潟県長岡市)).
- ③長谷川達也, 島津航介, 圓道知博, "小口径結像系の集積による投影型虚像表示の検討", 三次元画像コンファレンス講演論文集, 21, pp, 165-168, 2013(2013年7月5日, 早稲田大学(東京都新宿区)).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

圓道 知博 (YENDO Tomohiro)  
長岡技術科学大学・大学院工学研究科・  
准教授  
研究者番号：70397470