

# テーブル型 3D ディスプレイにおける プロジェクタ配列と光線再生像に関する考察

吉田 俊介

京都橘大学 工学部 情報工学科

## 1. はじめに

著者らはテーブル面より下に円環状に配列した多数のプロジェクタと、すり鉢状の光学素子を含む幾つかの光学系によって、テーブル面上に浮かび上がるように裸眼で全周 360 度から立体映像を観察可能なテーブル型 3D ディスプレイをこれまでに開発した[1,2].

本原理では立体映像を構成する光線群が放射される場所（以下、光線源）が、円周方向に大量かつ密に必要であるが、所望する像の大きさ・解像度に対して、光線源の配列密度がどの程度真に必要なものは未だ明らかでない。

そこで本研究では、光線源の配列密度や投射する要素画像の画角、光路に挿入する円筒鏡の有無などが、どのような形で観察される立体映像の画質に現れるのか、考察したので報告する。

## 2. 光線像再生式テーブル型 3D ディスプレイ

提案方式では、テーブルの上に「ある」とする物体の光を、さまざまな方向から飛来する光線を用いて再現する（図 1）。

初期の試作[1]においては、288 台のプロジェクタを円環状に配列し、円周に定義したある視点には、そのうち 20 台強の光線源から光の一部が到達することが確認できた。観察されるそれぞれの光線源からの光は、垂直方向の縦縞状のものであり、それが水平方向に連なり網膜上で一つの像として観察される。別の視点では異なる方角から飛来する光線群が観察されるため、適切に計算して光線群を提示することで円周のあらゆる方向からの両眼立体視が成立する。

この原理を発展させ、円筒形の鏡を用いて光路を操作することにより、バーチャルに光線源の数を増加させる手法も提案した。文献[2]では、物理的なプロジェクタ台数は 288 台のまま、ある視点で観察されるスリット状の光線の数を 200 以上にすることができ、光線源が見かけ上 10 倍以上に増加した。

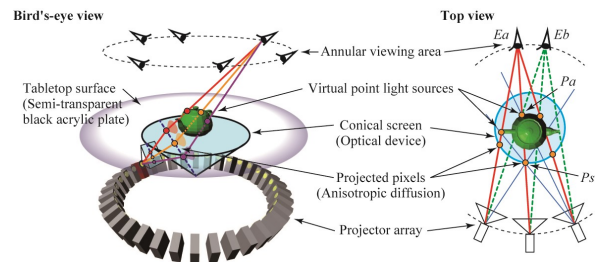


図 1 テーブル型 3D ディスプレイの再生原理[1]

## 3. 再生像と光線源の関係

図 2 に、文献[1]の単純な（円筒形の鏡を用いない）構成における再生像のシミュレーション結果を示す。各プロジェクタからの要素画像が投射されるすり鉢状光学素子は、異方性拡散をする背面投射型スクリーンであり、垂直方向には強い拡散性能を持つが、円周方向にはほとんど拡散させない性質を与えられている。よって、ある光線源から投射される要素画像は縦縞状の一部のみが観察される（例えば図 1 の  $Ea$  に集中する赤い実線の光に該当）。

ここで光線源が十分密でない場合は、左の図のように飛来する光がなく観察像に黒い間隙が生じる。これを解消するためには光線源の密度を上げることが好ましいが、物理的な制約などで困難である。次善の策は、水平面に弱い拡散板を置いて拡散性能を少し広げ、縦縞の幅を拡大することである。中や右の図は拡散性能を上げた状態を示すが、それは像全体を強くぼかすことも意味し、画質の面で問題があった。

一方で文献[2]で提案した方式では、光路を円筒鏡によって操作することで、見かけ上の配列密度が向上する。光線源が増すことで黒い間隙の箇所にも光が観察できるようになり、円周方向の拡散性能を広げる必要性は低下した。

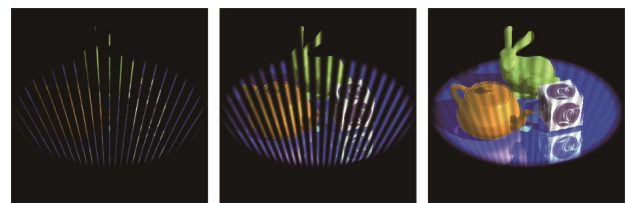


図 2 縦縞状の光線群による立体映像の再生

A Study on Projector Arrangement and Light-field Reproduced 3D Images in a Tabletop 3D Display  
Shunsuke Yoshida, Department of Information and Computer Science, Faculty of Engineering, Kyoto Tachibana University

#### 4. 投射画像と再生像の解像度の関係

観察像の画質を表す指標として像の画素数を像のサイズで割った解像度が候補になる。本稿では、文献[1,2]の実験系において解像度を比較し考察する。なお、本原理で再生される像のサイズは、利用するすり鉢状光学素子の大きさによって定まり、ここでは最大直径 12 cm の球である。実験系は同一の光学素子を用いるため、像の画素数のみを検討の対象とすればよい。

##### 4.1 観察像の垂直方向の画素数

上記サイズの球を再生すると、垂直方向では像中央の画素列が最も長い。これらはテーブル中央を挟んで正対する方向より飛来する光線群が対応する。文献[1]の鏡を用いない構成（以下、直接条件）では、真正面のプロジェクタの投射画像内の中央垂直画素列がこれに対応する。文献[2]の鏡で反射する構成（反射条件）においては、光線が 2 回反射して達する点が異なるものの、結果的に直接条件と同様の、真正面のプロジェクタの中央垂直画素列が対応する。よって、両実験系における再生像の垂直方向の画素数は、すり鉢状光学素子に投射された画像の垂直方向の画素数により決定する。

ここで光線源の画素ごとにすり鉢状光学素子までの光路長を計算すると、今回の反射条件の構成においては、直接条件と比較して全体的に約 2 倍に拡大することが確認された。投射画角は像のサイズを投射距離で割ったものであるため、同一サイズの像を同一画素数で再生するには、反射条件のプロジェクタの垂直投射画角は、直接条件の半分程度が好ましいことがわかる。

##### 4.2 観察像の水平方向の画素数

図 2 に示すように、本再生原理では視点と光線源を結ぶ線上に縦縞の像が確認でき、便宜上これを幅 1 画素の列とみなすことができる。すなわち、水平方向の観察像の画素数は、像を構成する光線源の数に比例する。

直接条件の場合、観察像に現れる光線源は、視点正面に並ぶプロジェクタである。試作機[1]では 21 台ほどが寄与したがこれだけでは像として視認しがたい（図 2 左参照）。拡散させることで幅 10 数画素分の光線が届き像として視認できる（図 2 右）が、像が著しくぼけるため、画質（解像度）は低いと言わざるを得ない。

反射条件の場合、円筒の半径を調整するなどにより、物理的なプロジェクタの台数と同じかそれ以上の数の光線源を観察像に対応させることも可能である。試作機[2]では観察像に約 200

の光線源を寄与させることに成功し、この場合の理論的な水平画素数は約 200 画素と言える。しかしながら物理的な円周方向の拡散性能をちょうど 1 画素幅にすることは困難で、数画素の幅として観察されるため、微弱な拡散フィルタを通した像に類似すると考えられる。

各画素の光路長を比較すると、垂直条件と同じく反射条件の距離は平均して直接条件の約 2 倍になるのに加え、像の左右方向になるほどより長く（最大 7.5 %）なることが確認された。図 3 に反射条件における観察像の場所ごとの光路長を正規化して表す。ここで、0 は光路長が 720 mm、1 は 774 mm である。図 3 右は各丸数字間の垂直・水平画素列における正規化光路長の変化を表す。これより、垂直方向に比べて水平方向は像の両脇に向かうほど光路の伸び率が大きいことが確認できる。反射条件にて観察像の両脇に対応する光線群は、プロジェクタの水平画角外側の画素群である。投射距離が延びることで画素はより大きく投射されるため、投射画像の 1 画素の幅は中央から端に向けて徐々に小さくなるものが好ましいことがわかる。

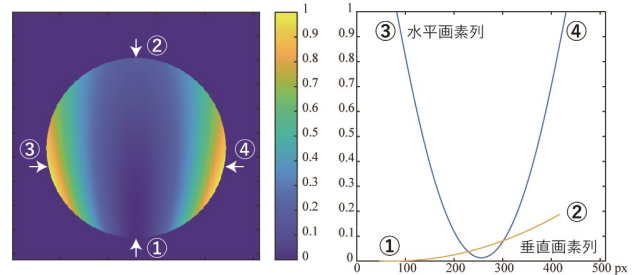


図 3 反射条件における観察像と光路長の関係

#### 5. おわりに

本稿では、提案するテーブル型 3D ディスプレイにおいて、光線源の配列密度や光学系の構成が観察像にどのように現れるかを調査した。

結果、光線源を密にする目的で反射条件の採用が有用であるが、直接条件に比べて投射画角を半分にし、投射画像の左右端に向かって画素ピッチが小さくなるような特殊なプロジェクタの採用が望ましいことが分かった。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP22K12139 の助成を受けたものです。

##### 参考文献

- [1] S. Yoshida, “fVisiOn: 360-degree viewable glasses-free tabletop 3D display composed of conical screen and modular projector arrays,” *Optics Express*, 24(12), 13194–13203 (2016).
- [2] S. Yoshida, “Virtual multiplication of light sources for a 360°-viewable tabletop 3D display,” *Optics Express*, 28(22), 32517–32517 (2020).