



多視点裸眼立体視ディスプレイ LuminantCube の キャリブレーション手法

大橋 由暉^{*1} 遠藤 竜太^{*1} 藤井 巧哉^{*2} 石井 裕剛^{*1} 下田 宏^{*1}

Calibration Methods for LuminantCube: Omnidirectional and Autoscopic 3D Display

Yoshiki Ohashi^{*1}, Ryuta Endo^{*1}, Takuya Fujii^{*2}, Hirotake Ishii^{*1} and Shimoda Hiroshi^{*1}

Abstract – The 3D display using light diffusion within 3-dimensionally positioned micro voids processed in a crystal glass cuboid is able to present 3D objects which can be observed by naked eye. In order to successfully present 3D objects, the projection must be adjusted precisely for each individual micro void by investigating the correspondence between each projector pixel and micro voids. In this research, hence, calibration methods which can perform such adjustment automatically were developed, namely; Pixel-Scan Method, Line-Scan Method and Structured-Light Method. Line-Scan Method and Structured-Light Method were developed in aim of shortening the processing time of the calibration. Subjective experiment was conducted in order to evaluate the calibration methods. The results show that Structured-Light Method is faster in processing time but degraded in quality for the presented images. However, despite Line-Scan Method being faster than Pixel-Scan Method, the degradation of the presented images was minor.

Keywords : auto-stereoscopic, volumetric display, multiview, light diffusion, structured-light

1. はじめに

これまで、様々な種類の立体視ディスプレイが研究・開発されてきている。Nayar らは、ガラス内部に 3 次元配置した微小空隙での光の拡散を利用した立体視ディスプレイを開発している^[1]。このディスプレイは裸眼での観察が可能であり、かつ、任意の視点から複数人が同時に観察可能である。また、観察時に輻輳調節矛盾^[2] が起こらないと期待される。このディスプレイで立体映像を表示するためにはプロジェクタの位置のキャリブレーションを行う必要があるが、Nayar らはこのキャリブレーションを手動で行っており、多くの時間と労力が必要である。空隙数の増加に伴って所要時間は増大する上、ディスプレイの解像度（空隙の密度）の向上に伴って、より高精度なキャリブレーションが要求されるため、手動でのキャリブレーションは困難になる。このことがディスプレイの解像度を向上させる上での妨げの 1 つとなっている。

そこで本研究では、微小空隙での光の拡散を利用した立体視ディスプレイ (LuminantCube)^[3] のキャリブレーションを一部自動化・高速化する手法を開発した。これにより、装置を移動させるなどしてプロジェクタの位置ずれが起こった場合でも、キャリブレーション

を実行し直すことが従来よりも容易になった。また、キャリブレーションを一部自動化したことで、空隙の密度が高いディスプレイに対しても高精度でのキャリブレーションが行えるようになり、ディスプレイの高解像度化にも成功した。本研究ではまた、被験者実験を実施することにより、キャリブレーションの結果から正しく立体映像を提示することができるかを評価した。

2. 関連研究

立体視ディスプレイの内、メガネなどの特殊な装置を装着する必要がなく、裸眼で観察できるものを、裸眼立体視ディスプレイと呼ぶ。Nayar らは、ガラス内部に加工した微小空隙による光の散乱を利用した裸眼立体視ディスプレイを開発している^[1]。この方式では、内部に多数の微小空隙を加工配置したガラスをディスプレイ本体とし、プロジェクタから光を照射することで空隙を発光させ立体映像を表示する。ほぼ全ての方向から、輻輳調節矛盾^[2] のない立体視が可能である。このディスプレイで目的の形状の立体物を表示するためには、微小空隙ごとに照射の有無を制御する必要がある。そのためには、プロジェクタのどのピクセルを発光させれば、どの空隙に光が照射されるかを事前に知る必要がある。Nayar らは少数の空隙に対して、その空隙とプロジェクタのピクセルの対応付けを手作業で行い、それら少数の対応関係から残りの対応関係を予測する式を求めた。しかし、空隙の加工位置に誤差

*1: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

*2: 現在、ソフトバンク株式会社

*1: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

*2: Present; SoftBank Corp.

が生じることなどが原因で、予測式のみでは正しい対応付けができない空隙も生じる。そのような空隙は対応付けを一点一点手動で補正している。そのため全ての対応関係を正しく求めるために約6時間の時間を要する。

3. 装置の構成とキャリブレーション手法の提案

本研究では、LuminantCubeの空隙とプロジェクタのピクセルを対応付けるためのキャリブレーションを一部自動的に行う手法を開発した。本章では作成したディスプレイ装置の構成と開発したキャリブレーション手法について説明する。

3.1 装置の構成

本研究で作成したLuminantCubeの構成を図1に示す。LuminantCubeは、内部にレーザ誘起損傷^[4]を与え空隙加工を施した直方体のクリスタルガラス、空隙にレーザ光を照射するためのレーザプロジェクタ、立体映像の表示の際にプロジェクタへの入力画像を生成するコンピュータで構成される。

クリスタルガラスのサイズは $80 \times 80 \times 140$ [mm]で、その中心 $50 \times 50 \times 80$ [mm]の領域に、3000点の空隙を配置した。プロジェクタから照射されたレーザ光は、1個の空隙ですべてが散乱されるのではなく、一部の光が通過するため、空隙の配置は、各ピクセルから照射されるレーザ光の軌跡上に複数の空隙が同時には配置されないように決定した。プロジェクタからの距離をランダムに決定し、その上で空隙間の最小距離を3.5 [mm]と設定することで、全体の密度がほぼ均一となるようにした。また、後に述べるキャリブレーションに使用するために、ガラス内部に16点の空隙を図2に示す配置で追加した。

光源にはCelluon社のレーザプロジェクタ、PicoProを使用した。LuminantCubeでは、プロジェクタからの距離が異なる複数の空隙を同時に発光させる必要があるため、レーザ光源であり焦点調節が不要な本プロジェクタを採用した。プロジェクタは、ガラスに合わせた縦長の領域にレーザ光を照射するため、図3(左)に示す向きで使用している。プロジェクタのスローレシオを考慮し、レーザ光が空隙加工領域全体に照射されるよう、プロジェクタはガラスの界面から120 [mm]離れた位置に固定している。作製したLuminantCubeの写真を図3(右)に、使用したプロジェクタの仕様を表1に示す。コンピュータのOSはWindows 7 Professional, 64 bit、CPUはIntel(R) Core i7-3770 3.40 GHz、RAMは16GBであった。

3.2 開発したキャリブレーション手法

LuminantCubeでは、表示したい立体映像に応じて、レーザ光を照射する対象の空隙を正確に制御する必要

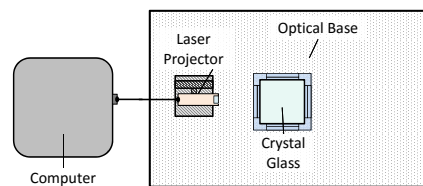


図1 ディスプレイの構成
Fig. 1 Schematic View of the Display.

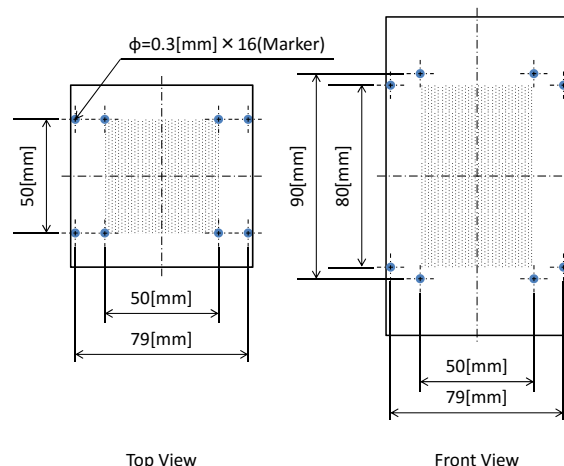


図2 キャリブレーション用マーカの配置
Fig. 2 Arrangement of Markers for Calibration.

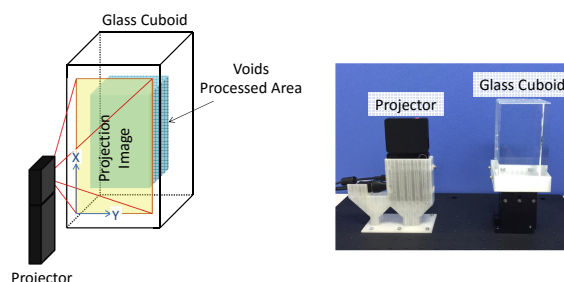


図3 プロジェクタの向きと画像座標系(左)と作成したディスプレイ装置(右)
Fig. 3 Pose of the Projector and Image Coordination (left) and Experimental Display Device (right).

表1 レーザプロジェクタの仕様
Table 1 Specification of Laser Projector.

Product Name	PicoPro
Resolution	1920×720 [pixel]
Brightness	32 [ANSI Lumens]
Refresh Rate	60 [Hz]
Color Depth	RGB 24 [bit]
Throw Ratio	1.3

がある。設計図上での空隙の配置情報とプロジェクタの位置・姿勢のみを元にレーザ光を制御した場合、空隙の加工位置の誤差や、装置を固定する際のズレなどが影響し、狙った空隙に精確にレーザ光を照射することができない。そのため装置を組み立てた後に、プロジェクタの各ピクセルと、そのピクセルを発光させた

際にレーザ光が照射される空隙の対応付けのテーブルを取得するためのキャリブレーションを実行する必要がある。本研究では、プロジェクタからレーザ光を照射したときのディスプレイ本体の様子をカメラで撮影し、画像処理で発光した空隙を検出することで、キャリブレーションを一部自動化した。このときプロジェクタから照射するレーザ光のパターンは様々なものが考えられるが、1ピクセルずつ順番に照射し対応関係を調べる方法が最も精度良くキャリブレーションできると予想される。この方法によるキャリブレーションを Pixel-Scan 法と名付ける。しかし、Pixel-Scan 法は精度が良いと予想される反面、プロジェクタのピクセル数に比例した時間を要する。そこで高速化を目指した手法として、Line-Scan 法、Structured-Light 法を開発した。本節では開発した3つの手法の詳細を説明する。

3.2.1 Pixel-Scan 法

キャリブレーション用のカメラを含む LuminantCube の構成を図4に示す。図に示すように、ガラスの底面の1つの角を原点とし、上方向を z 軸の正の方向、 z 軸と垂直でガラスの各辺に沿った方向をそれぞれ x 軸・ y 軸の正の方向とする右手座標系を定義する。プロジェクタは x - z 平面に垂直な方向から映像を照射するように配置する。本研究ではシステムを簡素化するためにキャリブレーションに用いるカメラの台数を1台とするが、その1台を x - z 平面に垂直な方向から撮影するように配置した場合、空隙の y 軸方向の位置が推定できない。そこでカメラは y - z 平面に垂直な方向から撮影する。

Pixel-Scan 法によるキャリブレーションは以下の4つのステップで構成される。

1. ディスプレイ本体を基準としたプロジェクタ及びキャリブレーション用カメラの位置・姿勢の推定
2. プロジェクタからのレーザ光の照射と撮影
3. 光を散乱している空隙（発光点）の検出
4. 空隙の座標の計算と記録

それぞれのステップの詳細を以下で説明する。

1. ディスプレイ本体を基準としたプロジェクタ及びキャリブレーション用カメラの位置・姿勢の推定

ディスプレイを撮影して得た画像から発光点を認識し、その座標を計算するためには、カメラ及びプロジェクタの位置・姿勢が必要となる。また発光点を検出する際に、カメラ及びプロジェクタの位置・姿勢の情報を用いて画像内の探索領域を限定すれば、処理時間を短縮できる。さらにノイズを除外することができるため、キャリブレーションの安定化にもつながる。そこでキャリブレーションの最初のステップで、プロジェクタ及びカメラの位置・姿勢を推定する。

カメラの位置・姿勢は、3次元座標が既知の空隙と、その空隙が発光している様子を撮影した際の空隙の画像座標系での2次元座標との対応関係から推定する。この推定問題は PnP 問題 (Perspective-n-Point Problem) ^[5] として知られる。図2に示したように、ディスプレイの内部には16点のキャリブレーション用マークを設けている。16点の3次元座標はレーザ加工時の設計データの値を用いる。カメラはこの16点のマーク全てが写る位置に設置する。16点のマークそれぞれについてカメラ画像中で対応するピクセルを見つけ、 $n=16$ の場合の PnP 問題を解いてカメラの位置・姿勢を推定する。本研究では、Graphics and Media Lab が公開しているカメラキャリブレーション用のソフトウェア、GML C++ Camera Calibration Toolbox ^[6] を利用して、カメラの内部パラメータを求め、カメラから取得した画像の歪を除去した後、OpenCV (Version 2.4.11) が提供する solvePnP 関数を用いてカメラの位置・姿勢を求めた。

次に、プロジェクタの位置・方向を求める方法について述べる。プロジェクタはカメラとは入出力が逆の光学機器と捉えることができるため、カメラと同様のモデル化が可能である。そのため、3次元座標が既知の点と、その点に光を照射するプロジェクタのピクセル座標との対応関係から PnP 問題を解くことで、プロジェクタの位置・姿勢を推定できる。プロジェクタの内部パラメータは解像度とスローレシオから決定する。このとき歪みは無いものとして扱う。カメラ同様、16点のキャリブレーション用マークを用いて位置・姿勢を推定する。

カメラ及びプロジェクタの位置・姿勢が全く分からない段階では、マークが写る可能性がある画像上の領域を絞ることができないため、ノイズなどの影響を受け易く、認識の安定性が低い。そのため16点のマークのカメラ画像座標系での2次元座標の認識と、対応するプロジェクタのピクセル座標の探索は手動で行う。手動での探索用に、プロジェクタに全体の輝度値が0 (OFF) で1ピクセルのみ輝度値が最大 (ON) の画像を入力し、1ピクセル分のレーザ光を出力させるプログラムを作成した。目視による確認を行いながら ON 状態にあるプロジェクタのピクセルの座標を変化させ、マークにレーザ光が当たる位置に調整する。この時に ON 状態にあるピクセルの座標が、レーザ光が当たっているマークと対応付けられるプロジェクタ上の座標である。このときマークを発光させた状態でカメラによる撮影を行い、その発光が取得画像に写る位置から、マークのカメラ画像座標系での2次元座標を取得する。マークに対応するプロジェクタのピクセル座標の探索、カメラ画像座標系での2次元座標の認識

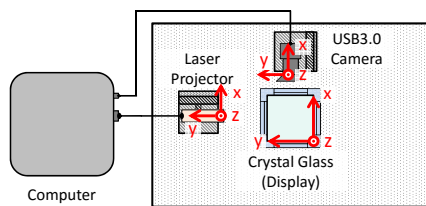


図4 キャリブレーション時の LuminantCube の構成

Fig. 4 Schematic View of Apparatus for Calibration.

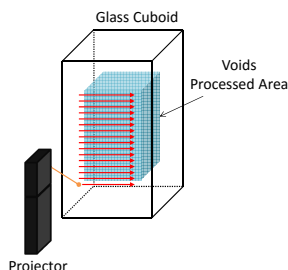


図5 Pixel-Scan 法におけるレーザー光の照射順
Fig. 5 Order of Laser Output for Pixel-Scan Method.

から、PnP 問題を解いてプロジェクタ及びカメラの位置・姿勢を求めるまでの所要時間は、装置の扱いに慣れた者が行った場合 10 分程度である。

2. プロジェクタからのレーザー光の照射と撮影

このステップは暗室で行う。予備実験において、同じ空隙にレーザー光が当たるプロジェクタのピクセルは、隣接する数十～百ピクセル程度（縦横それぞれ数ピクセル～十ピクセル程度）であることが判明している。そこでキャリブレーションの所要時間を短縮するために、最小ピクセル単位を 2×2 の 4 ピクセルとした。これにより、どの空隙にも光が当たらないピクセルを対応付けてしまったり、本来 1 つの空隙のみに光を照射するピクセルを複数の空隙に光を照射するピクセルと判定してしまう可能性が考えられる。本研究では、複数の空隙に光を照射すると判定されたピクセルを映像表示に利用しないものとしたため、いずれの場合も不要な発光点を増やすことにはならず、このことが表示映像に与える影響は小さいと予想される。図 5 に示すように、プロジェクタに 4 ピクセルのみ ON の画像を入力することで、4 ピクセル分のレーザー光を出力させ、その時のディスプレイ本体をカメラで撮影する。ON のピクセルの輝度値は $(R, G, B) = (255, 255, 255)$ とした。以降のキャリブレーション手法においても同様である。これを座標を縦・横に 2 ピクセルずつずらしながら、プロジェクタの全ピクセルに対して実行し、撮影した画像を保存する。

3. 光を散乱している空隙（発光点）の検出

このステップではステップ 2 で撮影された画像から画像処理により発光点を検出する。図 6(a) に示すよ

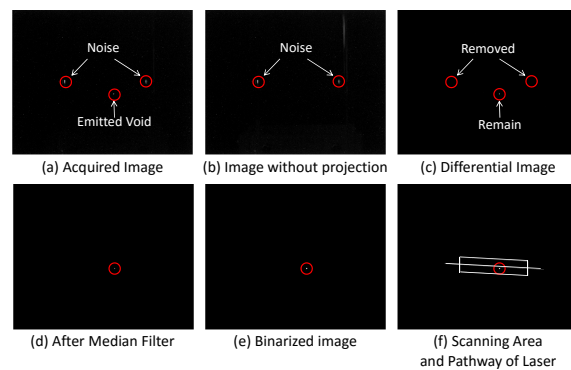


図6 発光点の検出

Fig. 6 Detection of a Lighting Point.

うに、ステップ 2 で撮影した画像には多くのノイズが見られるため、図 6(b) に示すようなレーザー光を照射していない時の画像との差分をとることで、このノイズを除去する。ノイズ除去後の画像の例を図 6(c) に示す。さらに、完全には除去できなかったノイズを取り除くため 3×3 のメディアンフィルタを適用する。メディアンフィルタ適用後の画像の例を図 6(d) に示す。発光点は複数ピクセルにまたがって写るのに対し、ノイズはランダムな位置に 1 ピクセルずつ現れるものが多いため、このフィルタで多くのノイズを取り除くことができる。次に図 6(e) に示すように、画像を 2 値化処理し、発光点と背景を区別する。最後に画像内を走査して発光点を検出する。この時、ステップ 1 で推定したカメラ・プロジェクタの位置・姿勢からレーザー光の軌跡とそれがカメラに写る位置を計算し、計算で求めた位置を中心に上下 50 ピクセルずつの範囲を走査領域とした。図 6(f) の直線がレーザー光の軌跡、平行四辺形が限定された走査領域である。

4. 空隙の座標の計算と記録

プロジェクタの位置・姿勢及びレーザー光照射に用いたピクセルの座標から、ディスプレイ本体を基準としたレーザー光の 3 次元空間上での軌跡を表す直線が求まる。また、カメラの位置・姿勢及び検出された発光点のピクセル座標から、3 次元空間上で発光点とカメラ原点（焦点）とを結ぶ直線が求まる。これら 2 直線の交点が発光した空隙の 3 次元位置であるが、実際にはステップ 1 で求めたカメラの位置・姿勢や、画像処理により認識した発光点の座標に誤差が含まれるため、2 直線が交わらない。そこで検出された発光点を画像内で上下方向にシフトし、レーザー光の軌跡上に移動させた点を求め、その点に対応する座標を空隙の 3 次元座標とした。以上の処理により求めた空隙の座標はプロジェクタのピクセル座標と対応付けて記録する。発光点が検出されなかった場合や、空隙加工の誤差や装置組み立ての際のズレなどが原因でレーザー光の軌跡上に複数の空隙が重なり、複数の発光点が検出された場

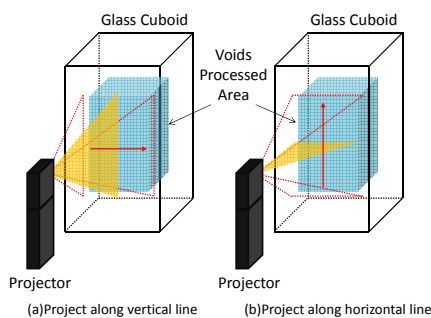


図7 Line-Scan 法におけるレーザ光の照射
Fig.7 Laser output for Line-Scan method

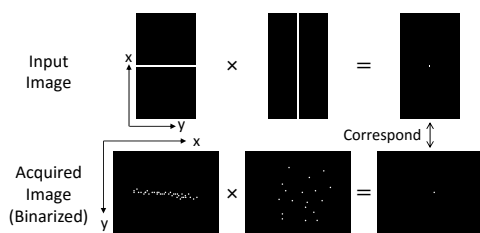


図8 Line-Scan 法でのキャリブレーション用仮想画像の生成
Fig.8 Virtual Image Generation for Line-Scan Method Calibration.

合は、立体映像の表示には使用しない。

3.2.2 Line-Scan 法

Pixel-Scan 法では、プロジェクタの画素数の 1/4 の枚数の画像を取得する必要がある。そのため、キャリブレーションにかかる時間が長くなる。そこで、より少ない画像でキャリブレーションを行う方法として、Line-Scan 法を開発した。

Line-Scan 法では、図7に示すように、縦および横 1 ライン（幅 2 ピクセル）のみを ON とする画像をプロジェクタに入力し、レーザ光を照射する。この時に取得した 2 枚の画像をそれぞれ 2 値化し、図8に示すように、両画像の同じ座標毎に論理積を求めることで新しい画像を生成する。縦の 1 ラインを照射したときの取得画像 m 枚と、横の 1 ラインを照射したときの取得画像 n 枚の合計 $m+n$ 枚の画像から、 $m \times n$ 枚の画像が論理積で作成される。この画像は、Pixel-Scan 法でのプロジェクタの 4 ピクセルのレーザ光照射時の空際の発光の様子を写した画像を 2 値化したものに相当すると考えることができる。この仮想的に作り出した画像を用いて、Pixel-Scan 法と同様の手順で発光点の検出及び空隙座標の計算と記録を行う。Pixel-Scan 法ではプロジェクタの画素数（縦方向の解像度 $\times$ 横方向の解像度）の撮影が必要であるのに対し、Line-Scan 法では縦方向の解像度と横方向の解像度の和の回数（線の幅を 2 ピクセルとする場合にはその半分）の撮影でキャリブレーションを行うことができる。

3.2.3 Structured-Light 法

図9に、Structured-Light 法で照射するレーザ光のパターンと、その時の取得画像の各座標毎の論理積から 4 ピクセル分のレーザ光照射時の発光の様子を表す画像を仮想的に作り出す様子を示す（図はプロジェクタの幅の解像度が 1280 ピクセルの場合を示している）。Structured-Light 法では、プロジェクタの x 軸方向に沿ったレーザ光の照射時は Line-Scan 法と同様の 1 ラインの画像を入力し、 y 軸方向に沿ったレーザ光の照射時は Line-Scan 法とは異なる縞模様の画像を入力する。縞の幅はプロジェクタの解像度の半分から開始し、段階的に半減させていく。縞模様の ON/OFF を反転させたものでもレーザ光を照射して画像を取得することで、任意のピクセルについてそのピクセル分のレーザ光照射時の発光の様子を表す画像を仮想的に作り出せる。縞と縞の間隔が小さく、複数の縞からのレーザ光が同一の空隙に照射された場合、対応付けに誤りが生じるためキャリブレーションが正しく行えない。そこで縞の幅が 40 ピクセルを下回った後は、図9に示すように ON の部分の幅を 2 ピクセルとして、OFF の部分の幅を広く（図の例では 38 ピクセル）することで誤対応を防ぐ。この縞模様では ON の部分を 2 ピクセルずつずらしながら撮影を行う。これにより、プロジェクタの縦方向の解像度の回数+横方向の解像度の対数オーダーの回数の撮影でキャリブレーションを行うことができる。プロジェクタの x 軸方向についても縞模様を入力してレーザ光を照射し、撮影を行うことも考えられるが、その場合、取得画像にはカメラから見た奥行きが異なる複数の発光点が重なって写り、キャリブレーションを正しく実行できないことが判明した。そのためプロジェクタの x 軸方向については、Line-Scan 法と同様の 1 ラインずつの画像を用いた。

3.3 キャリブレーションの実行情例

Pixel-Scan 法、Line-Scan 法、Structured-Light 法の 3 手法でそれぞれキャリブレーションを行い、所要時間及び結果を比較した。結果は、最も精度が高くなると予想される Pixel-Scan 法の結果を基準として、対応付けの結果が一致したピクセルのプロジェクタの全ピクセルに対する割合で比較した。

キャリブレーション用のカメラは XIMEA 社の MQ013CG-E2 を使用した。表2にこのカメラの仕様を示す。露光などのカメラの設定は全手法で共通とした。カメラはガラス内の全空隙ができる限り大きく写る距離で固定した。空隙のわずかな発光も捉えるために、絞りはガラス内の全ての空隙にピントが合っていることを目視で確認できる範囲で最大限開いた。カメラの露光時間は、発光点を安定して撮影できる最短時間を予備実験で調べ、0.1[s] とした。

装置に用いたプロジェクタの解像度は 1280×720 ピ

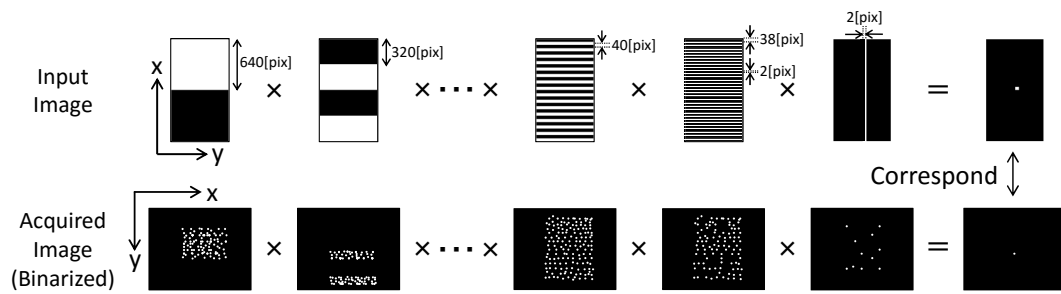


図9 Structured-Light 法でのキャリブレーション用仮想画像の生成（横 1280 ピクセルのプロジェクタを使用した場合）

Fig.9 Virtual Image Generation for Structured-Light Method Calibration (when the projector with 1280 pixels width is used).

クセルであった。そのため Structured-Light 法では、縞の幅を 640 ピクセルから 40 ピクセルまで半減させていき、最後は幅が 2 ピクセルで隣の縞までの間隔が 38 ピクセルの縞を入力画像としてキャリブレーションを行った。それぞれの手法での撮影回数は Pixel-Scan 法で $(1280 \times 720) \div 4 = 234,000$ 回、Line-Scan 法で $(1280 + 720) \div 2 = 1,000$ 回、Structured-Light 法で $2 \times 5 + 20 + 720 \div 2 = 390$ 回であった。

空隙発光の様子撮影はグレースケールで行った。取得画像の各ピクセルの輝度値は 0～255 の 8bit 整数で表される。発光点検出時の 2 値化の閾値は、それぞれの手法に対して抽出した数枚の画像から目視により決定した。その結果閾値は Pixel-Scan 法で 8、Line-Scan 法で 50、Structured-Light 法で横方向の縞模様入力時の取得画像に対しては縞の幅が 640～20 ピクセルの時 70、2 ピクセルの時 60、縦方向の 1 ライン ON の画像入力時は Line-Scan 法と同様の 50 とした。この方法での閾値の決定には 5 分程度を要した。閾値の決定を自動化することは今後の課題である。

以上の条件でキャリブレーションを行った。画像の取得と処理に使用したパソコンは、3.1 節で述べたパソコンと同じである。各手法の所要時間及び Pixel-Scan 法の結果との一致率を表 3 に示す。Pixel-Scan 法ではキャリブレーションに 10.2[h] の時間を要したが、Line-Scan 法及び Structured-Light 法では大幅に短縮されている。それぞれの手法でのキャリブレーション結果を見ると、いくつかのピクセルのレーザ光は複数の空隙を光らせたために、立体映像の表示に使用されないものとして記録されている場合があることが分かった。しかしそのような場合でも、その付近の別のピクセルがそれぞれの空隙を単独に光らせることができていた。このためガラス内に加工された 3000 点の空隙の内の約 96 % が立体映像の表示に利用できていることが確認できた。

Structured-Light 法によるキャリブレーション結果の Pixel-Scan 法との一致率が Line-Scan 法に比べ低

表2 キャリブレーションに使用したカメラの仕様
Table 2 Specification of Camera Used in Calibration.

Model Number	MQ013CG-E2
Pixel Size	5.3×5.3 [μm]
Sensor Size	1/1.8" (Diagonal 8.7 [mm])
Resolution	1280×1024 [pixel]
Focal Length	12 [mm]
F-Number	1.4

くなった理由として、ガラス界面での反射による影響が考えられる。プロジェクタから照射されたレーザ光は $y = 0[\text{mm}]$ のガラス界面で反射し、空隙を発光させることがある。Structured-Light 法では、この反射による発光を別の縞からの直接の照射による発光と誤認することがあるため、キャリブレーション結果に差が生じたものと考えられる。これを回避する方法として、各縞ごとに色を変えるなどの対策が考えられる。

4. キャリブレーション手法の主観評価

3 章で述べた Line-Scan 法と Structured-Light 法によるキャリブレーション結果は、Pixel-Scan 法によるキャリブレーション結果と比べて 9 割以上で一致することを確認した。しかし、それぞれの手法による結果の差が表示映像にどの程度影響するのかは不明である。そこで、表示される立体映像の質を評価する実験をそれぞれの手法のキャリブレーション結果を用いて行った。実験では各種形状の立体映像をサイズを変えながら表示し、観察者がその形状を認識できる最小のサイズを確かめることで、各キャリブレーション手法による表示映像の質の違いを評価した。

4.1 実験参加者

実験は 22 歳から 26 歳の視力に障害の無い健康な大学生及び大学院生 10 名 (内、男性 9 名、女性 1 名) に対して行った。

4.2 実験環境

実験は室内で行った。立体映像の観察時には照明を落とし暗室 ($< 0.1 [\text{Lux}]$) とした。図 10 に参加者とディスプレイ装置との位置関係を示す。プロジェクタ

表 3 キャリブレーションの所要時間と結果の一致率
Table 3 Required Time and Concordance Rate of Calibration Methods.

	Pixel-Scan Method	Line-Scan Method	Structured-Light Method
Calibration Time	10.2[h]	392[sec]	236[sec]
Concordance Rate	—	95.20 %	92.85 %

は、図の手前から奥に向けてレーザ光を照射する。参加者はディスプレイ装置の正面に設置された椅子に座り、手と腰を椅子につけた状態で立体映像を観察した。観察者と装置との距離は約 50cm とした。

4.3 実験の手順

実験は参加者 1 名ずつ順に図 11 に示すプロトコルで行った。まず 10 分程度で参加者に実験の詳細と注意点を説明した。その後部屋の照明を落とし、暗順応のために 10 分間待機してもらった。暗順応の完了後、まず LuminantCube での立体映像の観察に慣れるため、3.5 分間のデモ映像を観察してもらった。デモ映像の観察後、表示されている立体物の形状を認識できるか確認するための実験を行った。所要時間は平均約 8 分であった。予備実験で、赤色が最も形状を認識しやすいことが分かったため、全ての立体物は赤色で表示した。

4.4 デモ映像

図 12 にデモ映像の内容とその表示順を示す。デモでは 10 種類の形状の立体物を順に 8 秒ずつ、計 30 回表示した。その際、実験者が口頭で表示されている立体物の名称を伝えた。これにより観察者に立体映像の観察に慣れてもらった。

4.5 形状認識実験

この実験ではデモで表示した立体物をディスプレイ中央に表示し、参加者にその名称を解答してもらった。設問が進むにつれて解答の選択肢が絞られることを防ぐため、デモで表示した立体物の内、球、立方体、直方体、四角錐、円錐、円柱の 6 種類のみをランダムな順番で表示した。参加者にはデモで表示した 10 形状の内のいずれかが表示され、同じものが複数回表示されることもあると説明して実験をした。このとき立体映像表示のためのキャリブレーション手法もランダムに選択した。同じ参加者に対して各手法による表示が 2 形状ずつとなるようにした。表示順による認識のしやすさの違いなどの影響を抑えるため、参加者ごとに表示する立体物とキャリブレーション手法の組み合わせ及び順番を変えて実験を行った。立体物の形状を認識できるかどうかは表示される大きさにも依存する。そのため立体物は始めは幅 10[mm] で表示し、7 秒ごとに 5[mm] ずつ拡大した。これを幅 50[mm] までの 9 ステップ繰り返した。幅 50[mm] での 7 秒間の表示が終わった後、1 秒間何も表示しないインターバルをはさんで次の形状を表示した。次の形状も幅 10[mm] か

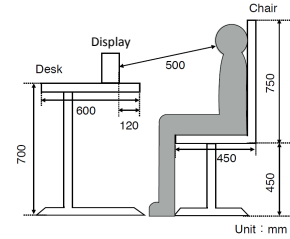


図 10 参加者とディスプレイ装置の位置関係
Fig. 10 Positional relation between participant and display

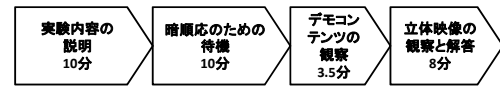


図 11 実験のプロトコル
Fig. 11 Protocol of the experiment

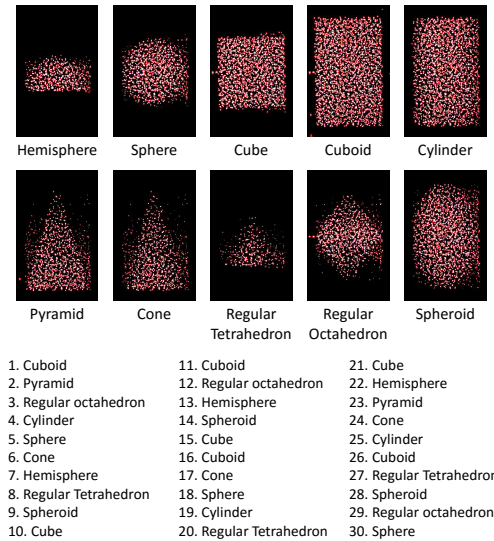


図 12 デモで表示した 10 種類の立体物とその表示順
Fig. 12 3D contents for demonstration and displaying order of them

ら表示を始め、7 秒ごとに 50[mm] まで拡大していく。参加者には、表示されている立体物の名称が分かった時点でそれを口頭で答えてもらった。途中で別の形状に見えた場合は、いつでも何度でも解答を変更することができることとした。直方体、四角錐、円錐、円柱の 4 形状の高さは全て幅の 1.6 倍とした。6 形状について幅 50[mm] での、各キャリブレーション手法の結果を用いて立体物を表示した例を図 13 に示す。

4.6 実験結果と考察

図 14 に各キャリブレーション手法ごとの正解率を示す。横軸が立体映像のサイズ、縦軸がその表示サイ

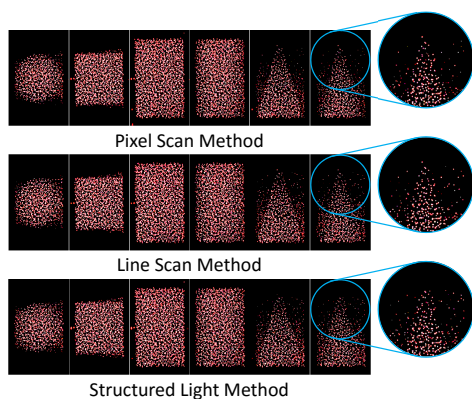


図 13 キャリブレーション手法ごとの表示映像 (幅 50[mm])

Fig. 13 Differences of Displayed Images Due to the Calibration Method (width: 50[mm]).

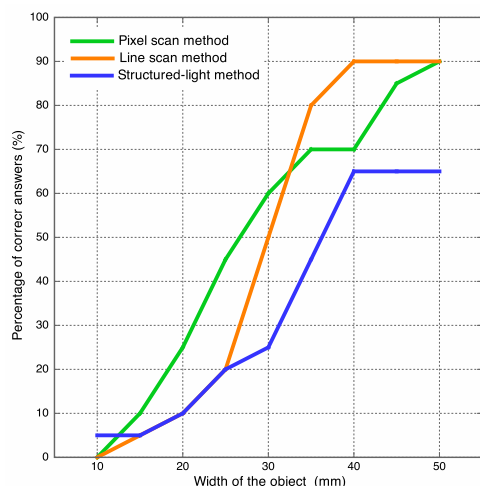


図 14 形状認識実験の正解率

Fig. 14 Percentage of Correct Answers in Shape Recognition Experiment.

ズまでに正解できた割合である。Pixel-Scan 法及び Line-Scan 法では、幅 30[mm] までに半数以上が正解できている。このとき参加者から見て、立体角が約 0.004[sr] の範囲に立体映像が写る。それ以降のサイズで解答を迷っていたのは、四角錐と円錐、直方体と円柱の間でどちらか判断がつかなかった場合で、正面付近からの観察では奥行き方向を含む平面内の角や丸みが判断しづらかったものと思われる。Structured-Light 法では、表示幅 35[mm] でも正解が半数未満であった。最大サイズの 50[mm] での正解率を見ても、Line-Scan 法は Pixel-Scan 法と同等の結果を示しているが、Structured-Light 法の正解率は 2 つの手法よりも低くなっている。キャリブレーションの精度が低いと、映像表示の際、光らせたい空隙以外の空隙の発光が多くなる。Structured-Light 法の結果を用いた映像表示では、これが原因で映像の輪郭が認識しづらくなり、正解率が低くなったと考えられる。

5. 結論

本研究では、ガラス内部に加工した微小空隙での光拡散を利用した裸眼立体視ディスプレイのキャリブレーション手法を開発した。まず、プロジェクタの各ピクセルのレーザ光を順番に照射し、その時の空隙の発光の様子を撮影してキャリブレーションを行う Pixel-Scan 法を開発した。Pixel-Scan 法は精度が良いと予想される反面、プロジェクタのピクセル数に比例した時間を要する。そこで、Pixel-Scan 法に改良を加え高速化した Line-Scan 法、Structured-Light 法の 2 手法を開発した。Line-Scan 法ではプロジェクタの縦および横 1 ラインずつのレーザ光を照射しながら、Structured-Light 法では縞模様のレーザ光を照射しながら撮影を行い、取得画像のピクセル毎の論理積を用いることでキャリブレーションを行った。これによってキャリブレーションに必要な撮影回数が減り、キャリブレーションに要する時間を大幅に削減することに成功した。また、開発したキャリブレーション手法を評価するために、被験者実験を実施した。開発したキャリブレーション手法のうち、Structured-Light 法はキャリブレーション精度が低く映像が劣化する結果となったが、Line-Scan 法では Pixel-Scan 法に比べ大幅に時間を短縮しつつ映像の劣化も少ないことが確認された。自動で高速に行えるキャリブレーション手法が開発されたことで、より高密度に配置された空隙に対するキャリブレーションが容易になった。今後は、複数台のプロジェクタを並列に利用して映像領域を拡大する、同一の空隙を複数台のプロジェクタで発光させてコントラスト比を向上させるなどの改善が考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP 26540044 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Nayar,S.K., et al.: 3D display using passive optical scatterers; Computer, **Vol.40**, No.7, pp.54-63 (2007).
- [2] Hoffman,D.M., et al.: Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue; Journal of Vision, **Vol.8**, No.3, Article 33, pp.1-30 (2008).
- [3] 藤井, 他: 3次元配置した微小領域でのレーザ光拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイの開発; ヒューマンインタフェースシンポジウム 2015 (2015).
- [4] Ristau,D. ed.: Laser-Induced Damage in Optical Materials; CRC Press (2014).
- [5] Fischler,M.A., et al.: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography; Communications of the ACM, **Vol.24**, No.6, pp.381-395 (1981).
- [6] Graphics and Media Lab —GML C++ Camera Calibration Toolbox—: <http://graphics.cs.msu.ru/en/node/909>