



# 多視点裸眼立体視ディスプレイ LuminantCube の開発と評価

遠藤 竜太<sup>\*1</sup> 大橋 由暉<sup>\*1</sup> 藤井 巧哉<sup>\*2</sup> 石井 裕剛<sup>\*1</sup> 下田 宏<sup>\*1</sup>

## Development and Evaluation of LuminantCube: Omnidirectional and Auto-stereoscopic 3D Display

Ryuta Endo<sup>\*1</sup>, Yoshiki Ohashi<sup>\*1</sup>, Takuya Fujii<sup>\*2</sup>, Hirotake Ishii<sup>\*1</sup> and Hiroshi Shimoda<sup>\*1</sup>

**Abstract** –In this research, a new 3D display named “LuminantCube” which provides omnidirectional and auto-stereoscopic views was developed. This display is composed of a glass cube and laser projectors. LuminantCube was realized by diffusion of lights projected from the projectors, caused within a volumetrically arranged micro voids processed numerously and randomly inside the cube. Calibration algorithm and middleware were developed. The calibration algorithm makes correspondence table between pixels of the projector and luminous voids. The middleware converts STL files to data for LuminantCube. Subjective experiments were conducted to evaluate the display performance. Results show that the 3D solid shape such as sphere and cuboid can be recognized by 65 % of subjects at the size of 35 [mm] in width. Results also show that the depth can be perceived by binocular parallax with an accuracy of 2 [mm] by 85 [%] of subjects.

**Keywords:** multi viewer, tracker less, transportable, accommodation and convergence, full color

### 1. はじめに

近年、立体視ディスプレイに関する研究が盛んに行われている<sup>[1-5]</sup>。中でも、特殊な装置の着用を必要としない裸眼立体視ディスプレイは、その利便性から高い注目を集めている。しかし、観察可能な位置・方向が制限される、視覚疲労を引き起こす等の問題があり、一般的な普及には至っていない。

そこで、筆者らは、3次元配置した微小領域でのレーザー光拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイ LuminantCube の開発を行ってきた<sup>[6][7]</sup>。本ディスプレイは、特殊な装置の着用を必要としない、自由な視点から立体像を鑑賞できる、多人数での同時鑑賞が可能、フルカラー表示が可能、輻輳調節矛盾<sup>[8-10]</sup>が生じないという特徴を持つ。本研究では、開発した LuminantCube の表示性能を被験者実験によって評価したので報告する。

### 2. 関連研究

一般に、両眼視差と運動視差のどちらか一方、もしくは両方を提示できるディスプレイを立体視ディスプレイ呼び、中でも特殊な装置の着用を必要としないものを裸眼立体視ディスプレイと呼ぶ。裸眼立体視ディスプレイは平面型ディスプレイと体積型ディスプレイに大別できる。平面型ディスプレイの例として、岩澤ら<sup>[1]</sup>が考案した複数のプロジェクタを用いて視点毎に異なる映像を提示するものが挙げられる。しかし、これらは観察可能な位置がディスプレイ正面付近に限られるという問題や、輻輳調節矛盾が生じるという問題がある。体積型ディス

プレイに関しても様々な研究が行われている<sup>[2-7]</sup>。Jonesら<sup>[2]</sup>や Sun ら<sup>[3]</sup>が考案した高速に回転するミラーにプロジェクタから回転角度に応じた異なる映像を投射し、立体映像を提示するミラー回転型ディスプレイや、石川ら<sup>[4]</sup>が考案した高出力レーザーを用いて空気中にプラズマを発生させ、その発光を利用して立体映像を表示させるレーザープラズマ型ディスプレイ等がある。しかし、ミラー回転型ディスプレイでは、ディスプレイの回転により映像がちらつくという問題や装置の大型化が難しいという問題がある。レーザープラズマ型ディスプレイでも、解像度とリフレッシュレートが低く、滑らかな動画を表示することが難しいという問題やフルカラー表示ができないという問題がある。

この他に、Nayar ら<sup>[5]</sup>はガラス内部に加工した微小空隙による光拡散を利用した光拡散型ディスプレイを考案した。プロジェクタからの光を用いて空隙を発光させることで立体映像を表示している。Nayar らは 200×200×70 [mm]のガラス中に 10,000 点の微小空隙を加工することで、任意の形状を表示可能な裸眼立体視ディスプレイを開発した。この方式では、プロジェクタのどのピクセルを光らせるとどの空隙が発光するかを事前に調べる必要がある。筆者ら<sup>[7]</sup>は Nayar らが手作業で行っていたこの対応付けを自動化し、精度を向上させることで 80×80×140[mm]のガラス中に 3,000 点の空隙を加工した光拡散型ディスプレイ LuminantCube を開発した。これによって Nayar らのディスプレイでは約 3.57[個/cm<sup>2</sup>]であった空隙の密度を 15[個/cm<sup>2</sup>]まで向上させることに成功した。しかし、この方式のディスプレイは未だ被験者実験などで表示性能が評価されていない。

\*1:京都大学大学院エネルギー科学研究科

\*1:Graduate School of Energy Science, Kyoto University

\*2:現在、ソフトバンクロボティクス株式会社

\*2:Present; Softbank Robotics Corp.

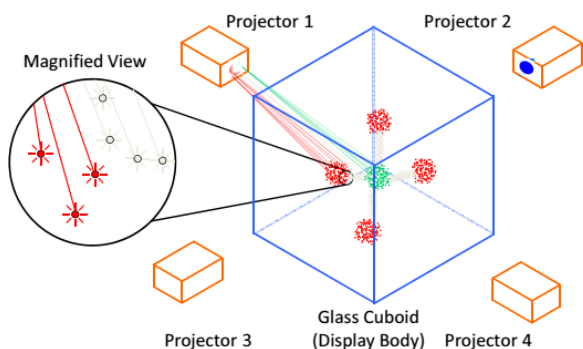


図1 LuminantCubeの原理図  
Fig. 1 Principle of LuminantCube.

### 3. LuminantCubeの開発

#### 3.1 LuminantCubeの概要

図1にLuminantCubeの原理を示す。3次元配置した空隙にレーザ光を照射し、光拡散を利用して各空隙を発光させることで立体映像を表示する。本装置は内部に球状の微小空隙を多数加工したディスプレイ本体、空隙にレーザ光を照射するためのプロジェクタ、制御用コンピュータで構成される。ディスプレイ本体は、透明度が高く、ガラス内部マーキング法<sup>[11]</sup>で任意に空隙を加工できるクリスタルガラスを用いた。ディスプレイ本体の大きさは $80 \times 80 \times 140$ [mm]で、その中心 $50 \times 50 \times 80$ [mm]の領域に3,000点の空隙をおよそ均一な密度になるように配置した(配置アルゴリズムの詳細は[12]を参照)。余白を設けたのはガラス界面におけるレーザ光の全反射による影響を防ぐためである。各空隙の大きさは原理上小さいほうが解像度の向上が見込めるため、照明を落とした暗室環境で、空隙の光拡散が知覚できる最小サイズである0.2[mm]で加工を行った。また、本装置では、照射距離の異なる空隙を同一のプロジェクタで発光させる必要があるため、焦点調節が不要なレーザ光源プロジェクタを用いた。本装置の外観を図2に示す。今回、試作したLuminantCubeではプロジェクタを一台だけ用いた。

#### 3.2 カリブレーション

本装置で、任意の形状の立体物を表示するためには、狙った空隙のみにレーザ光を照射する必要がある。そのためには、各空隙を発光させることができるプロジェクタのピクセルを知る必要がある。そのために、ガラス内空隙とプロジェクタのピクセルの対応関係を自動的に調べて記録するカリブレーションのアルゴリズムを開発した。以下、本アルゴリズムの概要を示す(詳細は[12]を参照)。このアルゴリズムの手順は(A)プロジェクタ及びカメラの位置・姿勢の推定、(B)レーザ光の照射と撮影、(C)発光点の検出、(D)空隙座標の計算と記録の4ステップに大別できる。カリブレーション時の構成を図3に示す。カリブレーションを行うにあたって用いるカメラはディ

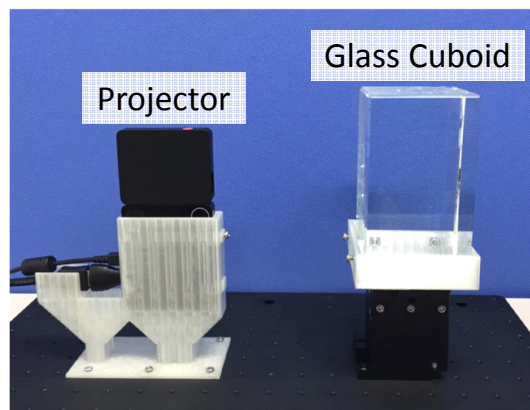


図2 LuminantCubeの外観  
Fig. 2 Schematic view of LuminantCube.

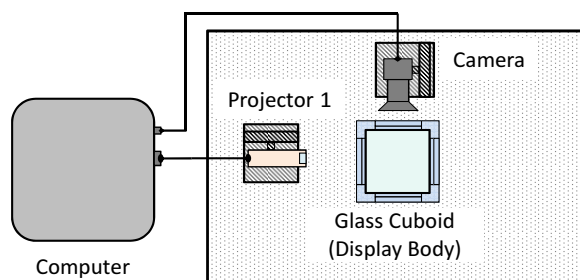


図3 カリブレーション時の構成  
Fig. 3 Hardware composition for calibration.

スプレィ横に設置する。まず、(A)プロジェクタ及びカメラの位置・姿勢を推定する。空隙座標を計算する際に、プロジェクタ及びカメラの位置・姿勢が必要となり、発光点を検出する際にもこれらの位置・姿勢の情報を用いて探索領域を限定すれば処理時間を短縮できるため、最初にこの処理を行う。カメラの位置・姿勢の推定は、LuminantCubeのガラス内部に16点のカリブレーション用マーカを予め設け、各々のマーカに対応するピクセルをカメラ画像中で見つけ、 $n=16$ の場合のPnP問題(Perspective-Point Problem)<sup>[13]</sup>を解くことで推定する。プロジェクタはカメラとは逆の入出力を行う光学機器であるため、カメラと同様のモデル化を行う。3次元座標が既知の $n$ 個の点と、その $n$ 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、位置・姿勢を推定する。16点のマーカについて、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。次に、(B)レーザ光の照射と撮影を行う。予め定めておいたピクセルのみ輝度値を最大、その他のピクセルは輝度値を0にした画像を入力し、カメラで空隙を撮影する。輝度値を最大にするピクセルの位置をずらしながら撮影を繰り返し、これをプロジェクタの全ピクセルに対して行う。このステップは暗室中で実施する。本研究では、輝度値を最大にするピクセルを $2 \times 2$ ピクセルずつの画像を入力するPixel-Scan法、幅2ピクセルの縦(横)1列のピクセルず

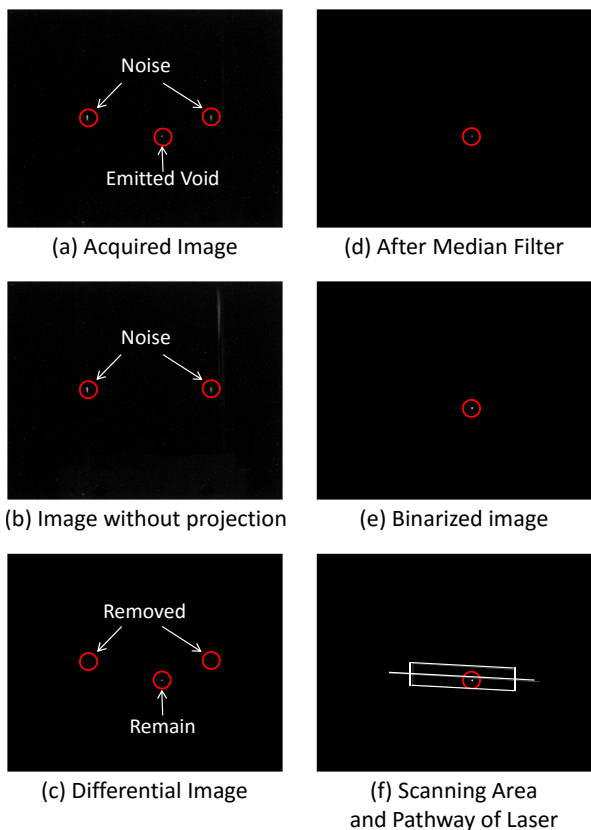


図4 発光点の検出  
Fig. 4 Detection of a lightning point.

つの画像を入力する Line-Scan 法、縞模様の画像を入力してレーザ光を照射し、その時の取得画像の積から  $2 \times 2$  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 Structured-Light 法の 3 手法を開発した。(B)のステップで撮影された画像から画像処理によって、(C)発光点の検出を行う。この手順を図 4 に示す。まず、撮影した画像(図 4.a)に含まれるノイズを除去する。これはレーザ光を照射していない時の画像(図 4.b)との差分を取ることで行う(図 4.c)。さらに、除去し切れなかったノイズを取り除くために  $3 \times 3$  のメディアンフィルタにかける(図 4.d)。次に二値化処理をし、発光点と背景を区別し(図 4.e)、最後に画像内を捜査して発光点を検出する。この時、推定したプロジェクタとカメラの位置・姿勢から走査領域を限定することで、処理時間の短縮と安定化を図る(図 4.f)。最後に、(D)空隙座標の計算として記録する。これまでの処理から、レーザ光の 3 次元空間上での軌跡を表す直線と、3 次元空間上で発光点とカメラ原点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。しかし、実際には、レーザ光の軌跡上からずれた位置に発光点が発出されるため 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にシフトし、レーザ光の軌跡上に移動させることで、発光点の 3 次元座標を求めている。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

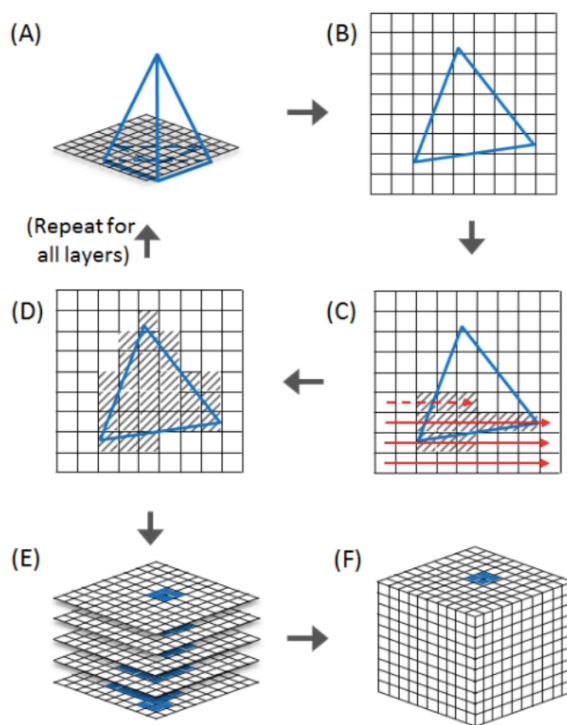


図5 ミドルウェアの変換処理手順  
Fig. 5 Algorithm of middleware.

光点が発出されなかった場合や複数の発光点が発出された場合は、使用しないピクセルとして記録する。

### 3.3 ミドルウェア

実際に動画像を表示する際には、立体画像のデータに LuminatCube で表示できるデータ群に変換しなければならない。そこで、一般的に 3DCG を出力する際に用いられるファイルフォーマットである STL 形式の 3D データを読み込んで、本装置での表示を可能にするミドルウェアを開発した。STL 形式で生成されるデータは物体表面を微小な三角形に分割したポリゴンの頂点座標で表現されるため、ポリゴン内部の充填情報を保持していない。LuminatCube は表示の性質上、立体像の表面だけではなく、内部を充填した立体コンテンツを表示した方が知覚しやすい。そのため、STL 形式のデータから中身を充填した上で、本装置での表示を可能にした。この変換処理手順を図 5 に示す。本ミドルウェアは、各軸の分割数が  $n$  ( $n$ : 整数) の立方格子に表示したい立体モデルを当てはめ、立体モデルの表面と干渉している格子を検出し、内部を充填する処理を行っている。まず、(A)(B)立方格子の水平面の一層と立体モデルとの交線を検出する。(C)その検出された交線を格子ごとに左端から右端に向かって走査し、図形と交差する箇所を検出する。この時、奇数回目と偶数回目に交差した箇所の間を立体モデルの内部にある領域とする。(D)全ての行に対して繰り返した後、同様の手順を全ての層に対して実施する。(E)全ての層に対してこれらの手順が完了したら、これらの結果を組み合わせて 3D モデルの内部か外部かの情報が入った

|     |   |       |  |
|-----|---|-------|--|
| [1] | 観察者が形状を認識できる精度で立体映像を表示することができる。                 | [1-A] | 立体映像が一定の大きさで認識される。                       |
|     |   | [1-B] | 立体映像が一定の形状で認識される。                        |
| [2] | 立体感が知覚できる。<br>-裸眼で<br>-どの視点からも<br>-複数人が同時に鑑賞できる | [2-A] | 遠近調節によって奥行感を知覚できる。                       |
|     |   | [2-B] | 運動視差によって奥行感を知覚できる。                       |
|     |   | [2-C] | 両眼視差によって奥行感を知覚できる。                       |
| [3] | 視覚疲労や酔いが抑制されている。                                | [3-A] | 焦点距離と輻輳距離の不一致によって引き起こされる視覚疲労や酔いが抑制されている。 |
|     |   | [3-B] | その他の原因による視覚疲労や酔いが抑制されている。                |
| [4] | 立体的な動画を表示できる。                                   | [4-A] | 観察者が立体物を認識できる精度で動画表示ができる。                |
|     |   | [4-B] | 一定以上のリフレッシュレートを持つ。                       |
| [5] | どんな立体映像でもフルカラー表示ができる。                           |       |  |
| [6] | 同時に鑑賞できる人の数を増やすために、装置のコストが増加することがない。            |       |  |

図6 LuminantCubeに求められる要件

Fig. 6 Requirements of LuminantCube.

格子のデータベースを作成する。(F)このデータベースに対応する領域に存在する空隙を発光点として処理し、カリブレーションによって作成した空隙座標とプロジェクタピクセルの対応テーブルを用いて照射用の画像データを作成する。本ミドルウェアを実際に使用する際には、 $n=100$ として処理を実行した。 $n$ の値が大きくなるほど、変換したモデルのボクセル数も大きくなるが、同時に処理時間も長くなる。LuminantCubeの現状の解像度の場合、分割数は100で十分だと判断した。

#### 4. LuminantCubeの表示性能評価

##### 4.1 被験者実験の目的

本研究の最終的な目的は既存の立体視ディスプレイが抱える問題を全て解決する次世代の立体視ディスプレイを開発することである。理想的な立体視ディスプレイが満たすべき要件を図6に記載する。本実験はLuminantCubeがこれらの要件を満たしているかを確認するために実施した。これらの要件のうち、[2-A], [2-B], [4-B], [5], [6]は本装置の性質から明らかであるため、[1-A], [1-B], [2-C]-[4-A]を評価するために被験者実験を行った。具体的には、(A)表示されている物の形状を認識できるか、(B)両眼視差を用いて奥行き感を正しく認知できるか、(C)視覚疲労や酔いを引き起こさないか、(D)動画でも表示されている内容を理解できるか、以上の4項目を調べる目的で実験を行った。それぞれ[1-A], [1-B]が

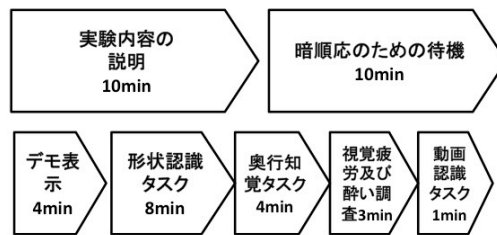


図7 実験のプロトコル

Fig. 7 Protocol of the experiment.

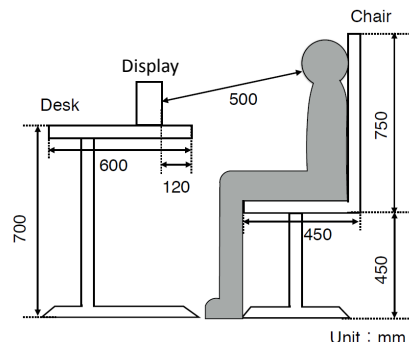


図8 被験者とディスプレイ本体の位置関係

Fig. 8 Positional relation between participant and display.

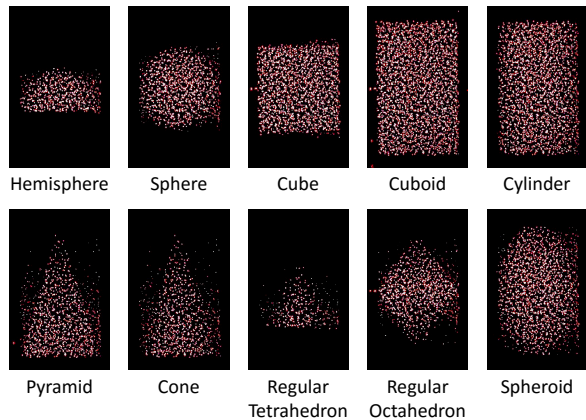
(A)に、[2-C]が(B)に、[3-A], [3-B]が(C)に、[4-A]が(D)に対応する。

##### 4.2 実験の概要

本実験は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(1名が女性、9名が男性)に対して1名ずつ順に実施した。実験のプロトコルを図7に示す。本実験は実験概要の説明、暗順応のための待機時間、デモ映像表示、形状認識タスク、奥行知覚タスク、視覚疲労及び酔い調査、動画認識タスクで構成される。まず、10分程度で参加者に実験内容の説明を行った。その後、照明を落とし、実験室を暗室(<math><0.1\text{[Lux]}</math>)とした状態で、暗順応のため10分間待機してもらった。暗順応完了後、評価者にLuminantCubeの正面に設置された椅子に着席してもらい、図8に示す状態で立体映像を観察してもらった。その後、LuminantCubeでの立体映像の観察に慣れるため、デモ映像を観察してもらった。デモでは、図9に示す10種類のプリミティブ形状の立体物を各形状3回ずつの図9に示す順番で計30回表示した。1回当たりの表示時間を8秒とし、この際、実験者が口頭で表示されている立体物の名称を伝えた。以下、実験を行った順に詳細を記載する。

##### 4.2.1 形状認識タスク

本タスクは(A)表示されているものの形状を認識できるかを調べるためのものである。徐々に大きくなる立体映像を表示し、形状を認識できる最小サイズを調べることで本装置の表示性能を評価する。表示した立体物の画像を図10に示す。本タスクでは、デモの際に表示した立



- |                        |                         |                         |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1. Cuboid              | 11. Cuboid              | 21. Cube                |
| 2. Pyramid             | 12. Regular octahedron  | 22. Hemisphere          |
| 3. Regular octahedron  | 13. Hemisphere          | 23. Pyramid             |
| 4. Cylinder            | 14. Spheroid            | 24. Cone                |
| 5. Sphere              | 15. Cube                | 25. Cylinder            |
| 6. Cone                | 16. Cuboid              | 26. Cuboid              |
| 7. Hemisphere          | 17. Cone                | 27. Regular Tetrahedron |
| 8. Regular Tetrahedron | 18. Sphere              | 28. Spheroid            |
| 9. Spheroid            | 19. Cylinder            | 29. Regular octahedron  |
| 10. Cube               | 20. Regular Tetrahedron | 30. Sphere              |

図9 デモ表示した10種類の立体物とその表示順

Fig. 9 3D contents for demonstration and displaying order.

体物をディスプレイ中央に表示し、評価者にその名称を口頭で答えてもらった。この際、表示する立体物を初めは幅10 [mm] で表示し、それを7秒ごとに5 [mm] ずつ、最大50 [mm] になるまで拡大した。評価者には立体物の名称がわかった時点でその名称を口頭で回答してもらい、回答後も別の形状に見えた場合は何度でも回答を変更できることとし、正答した場合の立体形状の大きさを記録した。このタスクを球、立方体、直方体、四角錐、円錐、円柱の6種類の形状で実施した。なお、直方体、四角錐、円錐、円柱の高さは全て幅の1.6倍にした。また、設問が進むにつれて選択肢が絞られることを防ぐため、被験者には、デモ表示で提示した形状のいずれかが表示され、同じ形状が複数回表示されることもあると事前に説明した。

#### 4.2.2 奥行知覚タスク

本タスクは(B)両眼視差を用いて奥行き感を正しく認知できるかを調べるためのものである。表示した立体物の画像を図11に示す。本タスクは、同じ操作を4回繰り返してもらう。まず、評価者から見て左側と右側に大きさの異なる2つの球が中心の高さが同じになるよう表示される。球の直径はそれぞれ20 [mm] と25 [mm] で、球と球との間隔は5 [mm] である。初回の操作で、左右どちらの球が大きいかはランダムに決定される。また、左側の球の中心はディスプレイ中央に固定されており、右側の球の中心は奥行方向でランダムな位置に現れる。右側の球は評価者の手元に用意されたキーボードの↑キーを押すたび1 [mm] 奥に、↓キーを押すたび1 [mm] 手前に移動する。右側の球の奥行きは左側の球の奥行きに対

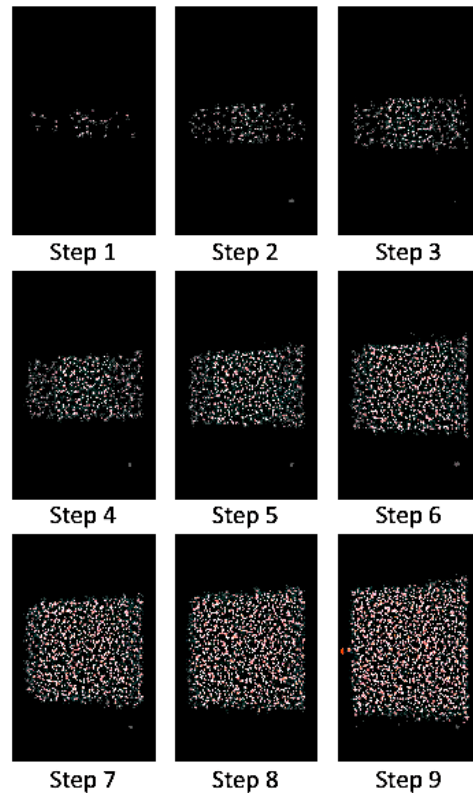


図10 ステップ毎の立体物(球)

Fig. 10 3D image(sphere) at each step.

して-12 [mm] ~+12 [mm] の範囲で移動できる。ここで、「-」は評価者から見た手前、「+」は評価者から見た奥を示す。評価者には自由にキーボードを操作してもらい、2つの球の奥行が一致したと思うところでEnterキーを入力し、操作を終了してもらった。この操作を4回繰り返し、毎回の操作終了時に、右側の球の奥行位置を記録した。2回目以降の操作時には球の大小関係が前回の操作時とは逆となるようにした。つまり、本タスクでは、右側の球が大きい場合と小さい場合の2回ずつで操作が実施される。なお、左右の球の大きさを変えたのは、見かけの球の大きさのみで奥行き感を判断させないためである。また、右の球が大きい場合と小さい場合をそれぞれ2回ずつ行ったのはカウンターバランスを取るためである。

#### 4.2.3 視覚疲労及び酔い調査

本調査は(C)視覚疲労や酔いを引き起こさないかを調べるためのものである。ここまでの実験が終了した段階で、本装置での立体映像の観察によって視覚疲労及び酔いを感じたかを視覚疲労と酔いそれぞれで「全く感じなかった」、「少し感じた」、「感じた」、「とても感じた」の4段階で評価してもらった。また、視覚疲労や酔いを感じたと回答した場合には、その理由を自由に述べてもらった。

#### 4.2.4 動画認識タスク

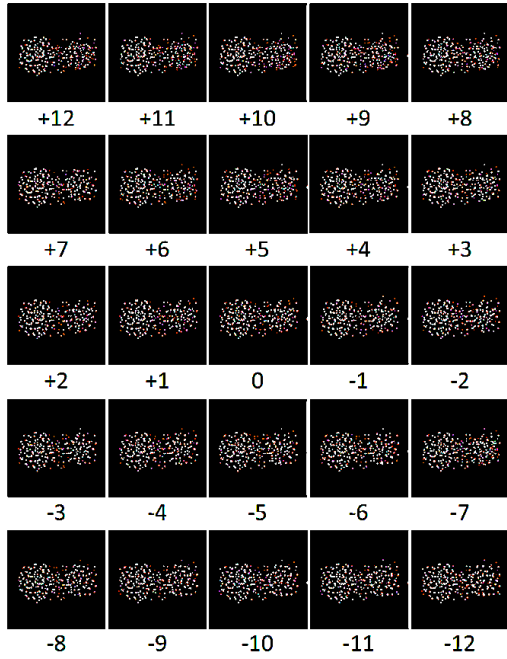


図 11 奥行知覚実験の表示映像 (右: 小さい)  
 Fig. 11 Images acquired at each position of the right sphere (Right: small).

本タスクは(D)動画で表示されている内容を理解できるかを調べるためのものである。表示した動画映像を図 12 に示す。これらの画像は 1 秒毎に撮影されたものであり、左上から順に表示した。評価者には、動画が表示されることを事前に伝え、見え方について口頭で説明してもらった。この動画は計 30 秒の長さであり、評価者から見てディスプレイ中心から 10 [mm] 左にずれた位置に赤い帽子を被った雪だるまを表示した。雪だるまは直径 30 [mm] の白い球 2 つで構成され、帽子は直径 12 [mm] の赤い球で表現した。この雪だるまが表示されていない領域に点滅する白い点をランダムに発光させながら、下側の白い直方体の高さを徐々に増していくことで雪が降り積もる様子を表現した。

### 4.3 結果と考察

#### 4.3.1 形状認識タスク

図 13 は表示した立体物の形状ごとに本タスクの結果をまとめたものである。横軸が立体映像の大きさに相当するステップ数 (ステップ 1 : 10 [mm] ~ ステップ 9 : 50 [mm])、縦軸がそのステップまでに正解できた割合 (累積正答率) である。最も正答率が低いのは円柱であるが、円柱に対する誤答は全て直方体であった。また、直方体を表示していた場合も、最初は円柱と回答していたが、言い直して直方体と答えるケースが見られた。円柱に準じて正答率が低い三角錐と円錐も、誤答した場合は全て三角錐と円錐の区別がつかないケースであった。これら



図 12 動画フレーム  
 Fig. 12 Animation frames.

の結果から LuminantCube では、立体形状の大まかな外観を表現することはできるが、立体形状の輪郭までを明確に表現できていないことがわかった。ただし、本タスクでは、観察方向をディスプレイの正面付近に制限していたため、奥行方向を含む平面内での角や丸みが判断しにくかったと考えられる。図 14 は全形状の結果を含めた各ステップにおける正答数と累計正答率を示したものである。最も回答数が多いのはステップ 6 (幅 : 35 [mm]) の位置にあり、この時の累積正答率は 65% である。この結果から、本装置では幅 35 [mm] の立体形状であれば半数以上の人が形状を認知できると言える。

#### 4.3.2 奥行知覚タスク

図 15 は本タスクを行った全ての評価者の回答結果右側の球が左側の球よりも大きい場合と小さい場合をそれぞれ分けてまとめたものである。横軸は右側の球の位置、縦軸は評価者がその位置で Enter キーを入力した回数を示す。球の大小を変えたのは大きさによる情報だけで奥行を判断しないようにするためであり、右の球が大きい場合と小さい場合を同じ回数だけ実施したのはカウンターバランスを取るためであったが、この結果を見ると球の大小関係によって奥行知覚に影響があることがわかる。ここで、球の位置が「-」であることは評価者から見てディスプレイ中央から球が手前に位置していること、「+」であることはその逆を示す。図 15 に示されているように、右側の球が左側の球よりも大きい場合は、右側の球が左側の球よりも小さい場合と比べて、右側球は奥にあると

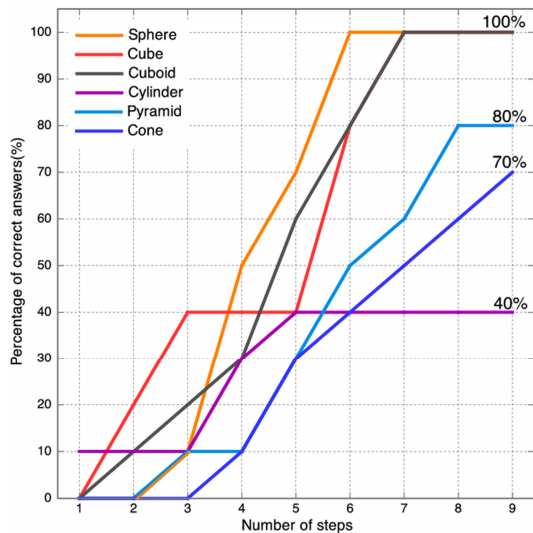


図 13 形状ごとの累積正答率

Fig. 13 Percentages of cumulative correct answers for each shape.

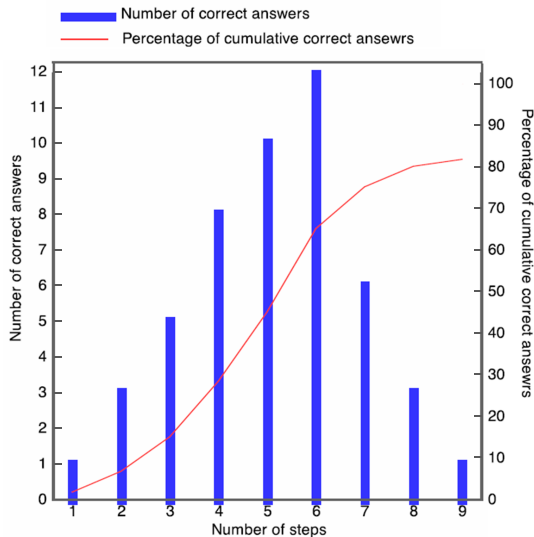


図 14 全形状を含めた正答数と累積正答率

Fig. 14 Total of correct answers and the percentages of cumulative correct answers.

認識される傾向があった。言い換えると、右側の球が小さい場合は手前があると認識される傾向があった。このことから、左右の球の大小を異なるものにしたことが評価者の奥行認知に影響を与えてしまった可能性がある。また、また、全体の結果を見ると、全体の 85% の解答が  $\pm 2$  [mm] の範囲に収まっている。このことから LuminatCube の立体映像は 8 割以上の人  $\pm 2$  [mm] 以内の範囲で奥行情報を知覚できていると言える。

#### 4.3.3 視覚疲労及び酔い調査

視覚疲労に関して、6 名が「全く感じなかった」と回答し、4 名が「少し感じた」と回答した。酔いに関しては 7 名が酔いを「全く感じなかった」と回答し、3 名が「少し感じた」と回答した。本装置を使って強い酔いを感じたものはいなかったが、今回、評価者に本装置での

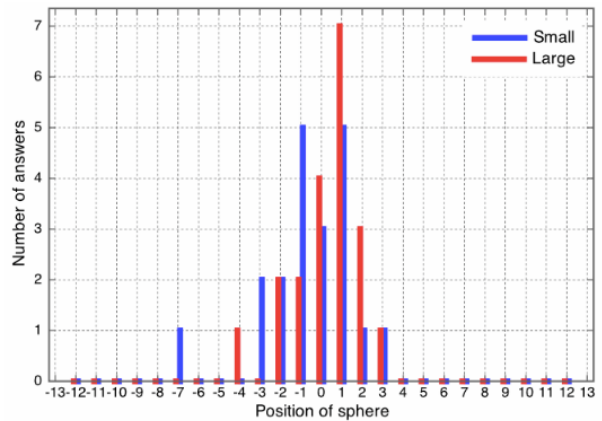


図 15 球の大小及び球の位置ごとにおける回答数 (青：右側の球が左側の球よりも小さい場合 赤：右側の球が左側の球よりも大きい場合)

Fig. 15 Number of answers at each distance with the right sphere being larger and smaller.

立体映像を 15 分程度観察してもらった後にこのアンケートを実施した。そのため、より長時間で観察を行った場合の視覚疲労や酔いへの影響は不明である。これらは今後確認していく必要がある。

#### 4.3.4 動画認識タスク

本タスクの回答は大きく 2 つに分けることができる。それは(A) 雪だるまや降雪といった意味のある名称が含まれた回答、(B)直方体等の単純な立体形状の名前しか含まれない回答の 2 通りである。10 名の評価者のうち 6 名は雪だるまを認識でき、更に、その内 5 名は降雪を認識できた。それに対し、残りの 4 名は雪だるまも降雪も認識することができず、白い直方体や赤い球があるという回答をただけであった。この 4 名が雪だるまを含むアニメーションを認識できなかった原因は主に 3 つ考えることができる。一つ目は、形状認識タスクで単純な立体形状を認識していたために、その印象が残っていたことが考えられる。二つ目は、ノイズが影響していた可能性が考えられる。ノイズが雪だるまの輪郭を不鮮明にしまったために、評価者はまとめて白い直方体と認識してしまったと考えられる。三つ目は、降り積もる雪を表現した部分が強く認識されてしまったために、雪だるま等に目が向かなかったことが考えられる。評価者はこれから動画が表示されることを事前に伝えられていたために、動きがある部分に集中しようと考え、その結果、高さが増していく降り積もった雪の部分ばかりに注意が向いて、白い直方体しか認識できなかったと考えられる。更に、時間が進むにつれて雪だるまは降り積もった雪の部分に覆われてしまうので、降り積もった雪に初期段階で集中していた評価者は雪だるまを認識することが困難であったと推測される。

## 5. 結論と今後の課題

### 5.1 結論

筆者らは、3次元配置した微小空隙でのレーザー光拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイ LuminantCubeを開発している。本研究では、開発した LuminantCube の表示性能を評価するために被験者実験を行った。その結果、幅 35[mm]の大きさをもつ立体形状であれば半数以上の人が立体映像の形状が認識できること、本装置が提示する立体映像では8割以上の人が±2 [mm] 以内の範囲で奥行情報を知覚できることがわかった。

### 5.2 今後の課題

今後の課題として、解像度の向上とコントラスト比の向上が挙げられる。現状、解像度が不十分なために立方体や球などの単純な形状の立体映像しか知覚できないという問題や、コントラスト比が低いために暗室でしか知覚できない問題が存在する。LuminantCube を実用的な裸眼立体視ディスプレイにするために、今後、プロジェクタを複数台用いることでこれらの問題の解決を目指す。例えば、プロジェクタを2台同時に用いることにより、異なる方向からレーザーを照射することを可能にすれば、他の空隙の影にあるためにレーザーを照射できなかった空隙にもレーザーを照射できるようになるため、解像度を向上させることができる。また、同じ空隙に対して複数のプロジェクタから同時にレーザーを照射すれば、輝度を向上させることもできる。今後、これらの工夫を併用しながら、LuminantCube の性能の向上を図りたい。

### 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] Iwasawa, S., Kawakita, M., Inoue, N. : REI: an automultiscopic projection display; Proceedings of Three Dimensional Systems and Applications, Selected paper 1, pp.1-4 (2013)
- [2] Jones, A., Mcdow, I., Yamada, H., Bolas, M., Debevec P. : Rendering for an Interactive 360 Light Field Display; ACM Transactions on Graphics, **Vol. 26**, No. 3, Article 40, pp.40 (2007).
- [3] Sun, C., Chang, X., Cai, M., Liu, J.: An Improved Design of 3D Swept-Volume Volumetric Display; JOURNAL OF COMPUTERS, **Vol. 9**, No. 1, pp. 235-242 (2014).
- [4] Ishikawa, H., Saito, H.: Point Cloud Representation of 3D Shape for Laser-Plasma Scanning 3D Display; IEEE, pp. 1913-1918 (2008).
- [5] Nayar, S., Anand, V.: 3D display using passive optical scatters; Computer, 40(7), pp.54-63 (2007)
- [6] 藤井, 遠藤, 大橋, 石井, 下田: 3次元配置した微小領域でのレーザー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, pp. 369-376 (2015).
- [7] Fujii, T., Endo, R., Ohashi, Y., Ishii, H., Shimoda, H. : LuminantCube: Omnidirectional and Auto-stereoscopic 3D Display using Diffusion of Laser-light within a Micro Region; International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems, pp.377-384 (2015).
- [8] Nagatani, H. : Evaluation of the safety of 3-dimensional image; ITE Technical Report, **Vol. 36**, No.43: pp. 29-34 (2012).
- [9] Emoto, M., Ysno, S. :The Influence of the Dissociation of Vergence and Accommodation on Visual Fatigue in Watching Stereoscopic Images; ITE Technical Report, **Vol. 56**, No. 3: pp. 447-454 (2002).
- [10] Yano, S., Ide, S., Mithshashi, T., Thwaites, H.: A study of visual fatigue and visual comfort for 3D HDTV/HDTV images; Displays 23, pp.191-201(2002).
- [11] Detlev, R.: Laser-Induced Damage in Optical Materials; CRC Press, Boca Raton London New York (2014)
- [12] 大橋, 遠藤, 藤井, 石井, 下田: 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; ヒューマンインタフェースシンポジウム 2016 (2016).
- [13] Fischler, M., Bolles, R. : 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).