

### 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

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

#### Omnidirectional and Auto-stereoscopic 3D Display using Diffusion of Laser-light within a Micro Region

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

**Abstract** – Standard flat screen 3D displays such as 3D-televisions use parallax to replicate spatial effect within the plane. However, such types require wearing special glass-like equipment and both viewing angle and total number of viewers are very limited. Thus, the present paper proposes a new 3 dimensional display named “LuminantCube”, which is able to provide omnidirectional and auto-stereoscopic views, meaning that there are no limitations of viewing angle and number of simultaneous viewers and can achieve stereo vision with naked eyes. LuminantCube, consisted of glass cube and a laser pico-projector, uses diffusion of lights projected from the projectors, caused within a volumetrically arranged micro voids processed numerously and randomly inside the cube. Currently, there are 3600 pixels inside LuminantCube and an original middleware and calibration algorithm are installed for projecting 3D contents. In the future, LuminantCube will be able to achieve higher resolution and contrast ratio by optimizing the algorithm of converting projector pixel to display pixel for multiple projectors for the former and overlapping multiple light rays for each individual micro voids for the latter.

**Keywords:** multi viewer, tracking less, transportable, correspondence of convergence and focusing, full colour

#### 1. はじめに

現在、3D テレビなどで採用されている平面型の立体視ディスプレイは視差を利用して平面上で立体感のある映像を再現している。しかし、特殊な眼鏡の装着が必要であること<sup>[1]</sup>や、視野角や同時に視聴可能な人数などが制約されるなどの問題があり<sup>[2]</sup>、一般的な普及には至っていない。そこで本研究では、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 (LuminantCube) を開発することにより、これらの問題を解決することを目的とする。本装置はディスプレイ本体であるガラスキューブとその周囲に配置されたレーザ光源プロジェクタで構成される。本装置では、ガラスキューブ内に3次的に加工された多数の微小空隙に、プロジェクタ光を照射した際に生じる光の拡散による発光現象を利用する。この発光する微小空隙の集合で立体物を表現し、発光位置を変化させることで3Dアニメーションを表示する。この方式では、複数の観察者が自由な視点から同時に観察できるだけでなく、裸眼で立体視が可能であり、輻輳角と焦点調節が矛盾しない表示方法のため視覚疲労や3D酔いを誘発しにくい。本装置では、現時点では明環境下でのコントラスト比が低いため、室内の暗い環境でのみ使用可能であるが、将来的には同じ微小空隙に対して複数のプロジェクタから同時にレーザ

光を照射することによりコントラスト比を向上させることも可能である。現在点では、高さ 80 [mm]、幅と奥行きが 50 [mm]の直方体ディスプレイ内に 3600 個の微小空隙が配置されている。将来的には、同時に使用するプロジェクタの数を増やし、多方向から照射することで、他の空隙との干渉を回避して照射できる空隙を増やす予定である。これにより、同サイズの直方体ディスプレイ内に配置する微小空隙の数を 1 万点以上に増やすことが可能である。

本装置の応用例は主に 3 種類挙げられる。一つ目は、複数人による同時観察や共同作業を伴う 3 次元コンピュータ支援設計のインタフェースである。例えば、化学反応における分子構造の変化の 3D アニメーションや、建築物の 3D 設計案を複数人で同時に観察したりできる。二つ目は、3次元のデジタルサインージュである。最後は、3次元テレコミュニケーションやテレプレゼンスを実現する装置への応用である。

#### 2. 関連研究

##### 2.1 多視点裸眼立体視を実現する上での課題

自然な立体視を実現するためには、左右の眼に異なる像が見えることにより生じる両眼視差と観察対象や観察者の視点が移動した時に映る像が変化することにより生じる運動視差の両方を再現する必要がある<sup>[3]</sup>。両眼視差では、両目から物体への視方向がなす角度である輻輳角の大きさと、物体に焦点を調節した時の両眼の水晶体の厚さを用いて、物体までの距離を検出している<sup>[4]</sup>。しかし、平面型などの立体視ディスプレイで観察者から画面

\*1: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

\*2: 京都大学 工学部電気電子工学科

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

\*2: Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Kyoto University.

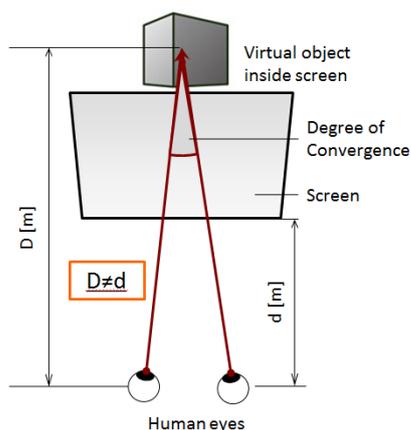


図1 輻輳角と焦点調節の不一致

Fig. 1 Conflict between degree of convergence and focusing.

までの距離よりも奥行きのある映像を再現しようとする  
と、輻輳角と焦点距離が矛盾する問題が生じる。すなわ  
ち、画面内のコンテンツを鑑賞しているときは、両眼は  
画面に焦点を合わせるため、焦点調節から認知する距離  
は実際のディスプレイまでの距離であり図1に示す  $d$  に  
等しい。一方で、実際よりも奥行きのある仮想コンテン  
ツを表示すると、輻輳角はディスプレイ上の物を見る場  
合よりも小さくなる。つまり、輻輳角の大きさから認知  
される距離は図1に示す  $D$  に等しい。このように、二つ  
の距離が一致しないため、3D 酔いや視覚疲労を誘発す  
る問題が生じる<sup>[5-7]</sup>。一般的な平面型立体視ディスプレイ  
の視聴における、視覚情報の両眼融合が可能な視差の範  
囲は $\pm 2-3$  [deg]とされており、この範囲内でコンテンツを  
提示しなければならない<sup>[8]</sup>。一方、運動視差に関しては、  
スクリーン前面にスリットやレンチキュラーレンズを配  
置し、複数のプロジェクタを用いて視点毎に異なる映像  
を提示する手法が実現されている<sup>[9-10]</sup>。しかし、観察可能  
な視点の数や観察者の数を増加させるに伴い装置が複雑  
で大型になり、コストが増大するなどの問題が生じる。  
これらの問題を解決するためには、我々が現実世界を見  
ているときと同じように、3D コンテンツを構成する各  
部から光を拡散させる方式が有効であると考えられる。

## 2.2 既往研究

これまで、特殊な眼鏡を用いて多視点からの立体視を  
実現するディスプレイに関する研究が多数行われてきたが、  
近年では特に裸眼立体視に関する研究が盛んである。し  
かし、前節で述べた課題を解決できておらず、自然な立  
体視を実現するディスプレイ方式は提案されていない。  
岩澤ら<sup>[11]</sup>や山田ら<sup>[12]</sup>が報告した平面型のディスプレイ  
は、フレネルレンズもしくはレンチキュラーレンズをス  
クリーン前面に配置し複数のプロジェクタを用いて視点  
毎に異なる映像を出力することにより裸眼立体視を実現  
している。これらは、裸眼であっても運動視差が再現可  
能であるが、観察可能な領域がディスプレイの正面付近

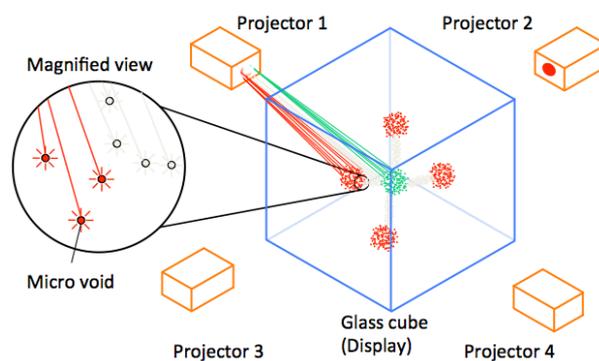


図2 LuminantCubeの原理図

Fig. 2 Principle of LuminantCube.

に限られる。また、Barnum ら<sup>[13]</sup>や後藤田<sup>[14]</sup>がそれぞれ提  
案した平面積層型のディスプレイは、平面型の透過ディ  
スプレイを観察者から見て奥行方向に多数積層し、それ  
ぞれに異なる映像を出力することで立体視を実現してい  
る。しかし、前述の岩澤らや Yamada らのディスプレイ  
と同様に観察可能な範囲が正面付近に限られる問題があ  
る。さらに、Jones ら<sup>[15]</sup>や Sun ら<sup>[16]</sup>がそれぞれ提案した  
回転方式のディスプレイでは、LED パネルやプロジェク  
タの照射光を反射するミラーなどを高速で回転させ、回  
転角度に応じて提示映像を変化させている。このように、  
全方向からの視点に対して異なる映像を表示することで  
運動視差を再現している。この方式は、裸眼かつ広い範  
囲で立体視が可能であるが、ディスプレイ本体が高速で  
回転しているため、そのサイズが制約される上にチラつ  
きが発生するなどの問題がある。一方、立体視が視野角  
に依存しない体積走査型のディスプレイの例として、  
Eitoku ら<sup>[17]</sup>が提案した水滴ディスプレイや中谷ら<sup>[18]</sup>が提  
案したレーザプラズマ式3次元ディスプレイなどが挙げ  
られる。前者は、一定の周期で規則的に落下する水滴を  
ボクセルと見立て、下部に設置したプロジェクタから映  
像を投射して立体視を実現している。しかし、解像度や  
映像のリフレッシュレートが低いという問題がある。後  
者は、高出力レーザが焦光すると、空气中にプラズマが  
発生して発光するという原理を利用している。任意の空  
間中に3D コンテンツを出力可能であるが、解像度を上  
げることが難しいため複雑な立体コンテンツを再現す  
るのは困難である。また、フルカラーの映像を提示す  
ることが困難であるなどの問題がある。

## 3. LuminantCubeの提案

### 3.1 提案手法の概要

裸眼で全方向からの立体視が可能なディスプレイを  
実現するために、本研究では、3次元配置した微小領域  
でのレーザ光の拡散を利用した手法を提案する。これは、  
図2に示すように光透過性素材の直方体内に微小な空隙  
を作成し、個々の空隙に対してプロジェクタから光を照

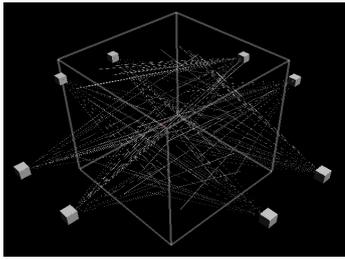


図3 照射光の軌跡の算出 (内部空隙数  $n=250$ )  
 Fig. 3 Calculation of projection trajectory  
 (Number of voids=250).

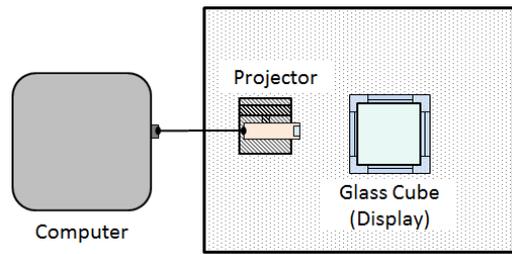


図4 装置の概略図  
 Fig. 4 Schematic view of the apparatus.

射して、空隙毎に異なる色や輝度の光を拡散させることでカラーの動画像を立体的に表示する手法である。ここで、微小空隙において光が全方向へ拡散するようにすれば、あらゆる視点から映像を立体的に視認できる。この方式では、観察者の視点のトラッキングも不要であり、複数人での同時観察に適しており、観察者は自由に動きまわることができる。さらに、裸眼で立体視が可能であり、輻輳角と焦点調節が矛盾しない表示方法のため視覚疲労や3D酔いを誘発しにくい。

しかし、予め空隙を配置した箇所でのみ発光が可能であり、プロジェクタからのレーザー光の照射経路に複数の空隙が存在すると、プロジェクタから見て奥に配置された空隙にはレーザー光を照射できない。そのため、高解像度の映像を提示するには空隙の配置や照射方法に工夫が必要である。また、レーザー光が空隙に入射した際、一部の光は想定通りに拡散するが、空隙を貫通して直進する光が残存する可能性もある。さらに、光透過性素材内に空隙を作成する際に、空隙の位置や直径に誤差が生じる。そのため、空隙を大きめに作成し、空隙をある程度余裕をもって離して配置する必要がある。そのため、空隙の隙間から本来は見えるべきではない奥に配置された空隙における発光が見えてしまう問題が起きたり、空隙が想定通りの色や輝度で発光しない場合が起きたりする。しかし、一定量以上の正しい視覚的情報を得られれば、欠損した情報の補完や間違った情報の排除などが脳内で行われ、映像を正しく認知できる事が Yu ら<sup>[19]</sup>によって報告されており、本手法でも観察者に十分な情報を伝えられると期待される。

### 3.2 照射光の軌跡の計算と空隙の設計

以下に直方体ディスプレイの大きさ、内部に加工する空隙の大きさ、加工数や配置を決定する方法について述べる。まず、直方体ディスプレイの大きさは、高さが 80 [mm]、幅と奥行きを 50 [mm]とした。実際にはより大きな直方体ディスプレイを用いることもできるが、今回は可搬性を優先し、装置全体の大きさを 500 [mm]四方以下、重量 10 [kg]以下にするためにこの大きさとした。次に、一般的に入手可能な小型レーザープロジェクタのスローレシオ約 1.3 を考慮し、直方体ディスプレイ内部に配置し

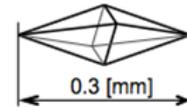


図5 空隙の概形

Fig. 5 Approximate shape of the micro voids.

た空隙全体にレーザー光を無駄なく照射可能な距離として、直方体ディスプレイと小型レーザープロジェクタとの距離を 70 [mm]とした。この際、プロジェクタから最も遠い位置にある空隙にプロジェクタの 1 ピクセル分のレーザー光を照射した際の、空隙の位置でのレーザー光の幅が約 0.3 [mm]となることから、空隙の幅を 0.3 [mm]とした。以上の条件でプロジェクタからレーザー光を照射する際に、他の空隙が干渉しないように以下のアルゴリズムで空隙の個数と照射を担当するプロジェクタを決定する。なお、プロジェクタのピクセル毎に照射経路を求め、その経路上に他のピクセルと干渉しないようにランダムに空隙を配置する方法も考えられるが、直方体ディスプレイとプロジェクタを互いに設計通りに正確に配置することは困難である。また、後述するように本研究で採用する空隙の加工方法では、空隙の加工位置にランダムな誤差が含まれるため、この方法で決めた配置通りに空隙を加工することも困難である。そこで、本研究では、空隙をランダムに配置し、後にカリブレーションによって各空隙にレーザー光を照射するピクセルを決定する方法を採用する。

まず、直方体ディスプレイ内に空隙をランダムに生成する。次に、直方体の中心に近い空隙から順番に、その空隙に対して各プロジェクタからレーザー光を照射した場合のレーザー光の軌跡を算出し、それぞれの軌跡上に他の空隙が存在していないかを検出する。他の空隙と干渉せずに照射できるプロジェクタの内、対象の空隙と最も近い位置にあるプロジェクタにその空隙の照射を割り当てる。この処理を全ての空隙に対して行う。直方体ディスプレイ内に配置する空隙の数を変化させてシミュレーションを実行した様子を図 3 に示す。レーザー光を照射できない空隙が検出された時点でシミュレーションを終了させた場合、4 側面から 70 [mm]離れた箇所に各 2 台 (合計 8 台) のプロジェクタを配置する条件では、内部には約 4 万個の空隙を配置できることが確認できた。

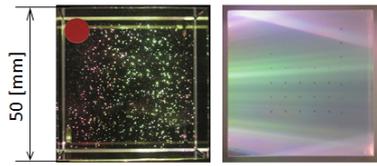


図 6 カリクリスタルガラス (左) と 3D プリントで出力した透過性樹脂 (右) との照射時の比較

Fig. 6 Comparison of emission between potassium crystal glass (left) and 3D-printed transparent resin (right).

表 1 プロジェクタの仕様

Table 1 Specifications of the projector

Display Performances	
Display Method	Laser
Brightness	32 [ANSI Lumens]
Aspect Ratio	16.9
Throw Ratio	1.3
Contrast Ratio	80000:1
Resolution	1920 x 720 [pixel]
Colour Depth	RGB 24 [bit]
Focus	Focus free

#### 4. LuminantCube の試作

##### 4.1 ハードウェア構成

本研究ではまず、プロジェクタ 1 台を使用した装置を試作する。同スペックのプロジェクタを同サイズの直方体ディスプレイの 1 側面から 70 [mm]離れた箇所に配置した場合、約 4 千個の空隙を配置できることが確認できた。実際の装置を組む上では、プロジェクタの設置位置や空隙の加工位置に誤差が生じるため、試作では 10%程度少ない 3600 個の空隙を配置することにした。試作した LuminantCube の概略を図 4 に示す。本装置は、高さが 80 [mm]、幅と奥行きがともに 50 [mm]のクリスタル・ガラス製の直方体ディスプレイ、側面から 70 [mm]離れた位置に設置されたレーザ・ピコプロジェクタおよびプロジェクタを制御するコンピュータで構成される。立方体の内部には、図 5 に示す概形の微小な空隙を 3600 個、ガラス内部マーキング法<sup>[20]</sup>を利用して加工した。また、直方体ディスプレイの一側面上に、後述するプロジェクタの位置のカリブレーションに使用するためのマーカーとなる空隙を同様に加工した。なお、ディスプレイ本体の素材を選定する上で、カリクリスタルガラスと 3D プリントされた光透過性樹脂 (Stratasys 社製、Objet500 Connex 3D プリンタと VeroClear-RGD810 素材を使用) を比較したが、図 6 に示すようにガラス素材の方が光透過性が高く、発光時の輝度や色再現性が高いため、ガラス素材を採用した。さらに、本方式では同じプロジェクタから異なる距離にある空隙に対して照射する必要があるため照射光の焦点が距離に依存しないレーザ光源のプロ

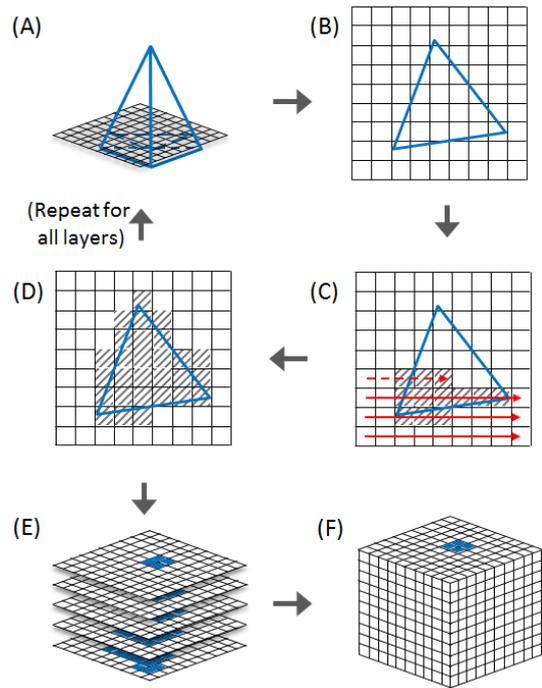


図 7 ミドルウェアの処理手順

Fig. 7 Algorithm of middleware.

ジェクタ (Celluon 社製、picopro) を使用した。プロジェクタの仕様を表 1 に示す。

##### 4.2 ミドルウェア

裸眼立体視で観察可能にする必要がある形状モデルとしては、一般的な 3DCAD ソフトなどで制作されるポリゴンモデル、Microsoft Kinect などの RGBD カメラで取得できる 3D 点群モデルや流体力学などで用いられるグリッドモデルなどが挙げられる。これらを本装置で表示するためには、これらのモデルを元に、各空隙に照射する色や輝度を決定する必要がある。開発するディスプレイを誰もが容易に使用可能にするためには、これらのモデルの違いやプロジェクタの配置、ディスプレイの空隙の配置などを意識せずに使えるようにすることが望ましい。そこで、本研究では、様々な形式のモデル情報から、各空隙に照射すべき色や輝度を求める処理を担うミドルウェアを開発している。以下では、そのミドルウェアの機能のうち、一般的な 3DCAD で使用されてい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表示可能にする変換処理について述べる。

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、ポリゴン内部の充填情報を保持していない。そのため、内部が充填された中実な立体モデルやコンテンツを表示したい場合は、その情報を追加する手順が必要になる。本ミドルウェアでは、図 7 に示すようにディスプレイ本体に見立てた、各軸の分割数が 100 の立方格子に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)立方格子の

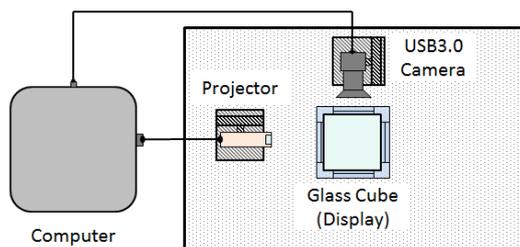


図 8 カリブレーション時の構成  
Fig. 8 Hardware composition for calibration.

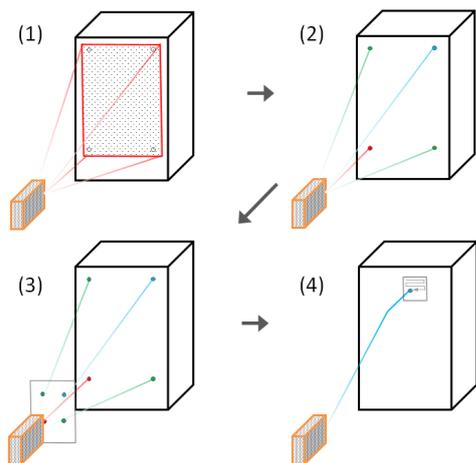


図 9 カリブレーションの処理手順  
Fig. 9 Calibration algorithm.

水平面の一層枚に立体モデルとの交線を検出する。(各層枚の水平面を以下、格子と呼ぶ)。この時、(B)平面の格子には立体モデルとの交線が囲まれた図形ができる。次に、(C)格子の各行毎に左端から右側に走査し、図形と交差する箇所を検出する。この際、奇数回目と偶数回目に交差した箇所の間は立体モデルの内部であるとして記録する。これを、(D)全ての行に対して繰り返した後、立体モデルの表面および内部と検出された格子を発光させる領域として設定し、モデルの色や輝度に応じて情報を設定する。この手順を全ての層で繰り返した後、(E)全ての層での結果を組み合わせると立方格子状の色・輝度データベースを形成する。最後に、(F)このデータベースと各格子に対応する領域に存在する空隙の照射を担当しているプロジェクタのピクセルのデータベースを照合し、照射用の画像データを生成する。

### 4.3 カリブレーション

ガラス内の微小な空隙に正確にレーザー光を照射するためには、ガラスの界面で生じる照射光の屈折を考慮した上で、照射する位置を調整するためのカリブレーションを行う必要がある。そのため、本装置では、図 8 に示す配置で固定されたカメラを用いて各空隙の発光の様子を検出し、プロジェクタの照射位置を調節する処理を行っている。このように、照射するピクセルによって各空隙が正しく発光するかを走査する方法は主に 2 種類挙げら

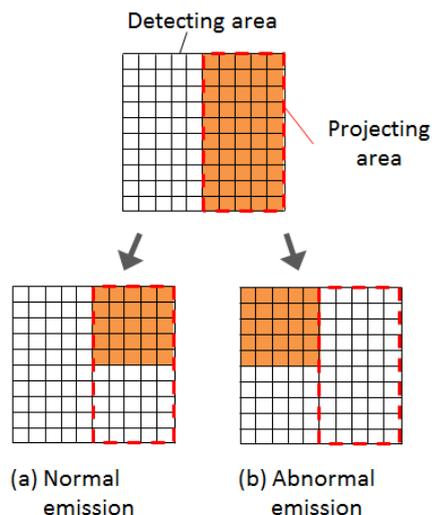


図 10 二分法の処理手順  
Fig. 10 Bisection method algorithm.

れる。1 つ目は、プロジェクタの 1 ピクセルのみを照射し、全ピクセルを順に回るように 1 ピクセルずつ走査しながら、どの空隙が発光するかを検出する方法 (以下、全画素走査法) である。2 つ目は、直方体ディスプレイ内に空隙を設置する際に決めた空隙の空間座標とプロジェクタの位置から、照射光の軌跡とその方向に照射できるピクセルのおおよその位置を推定し、その付近のピクセルのみを走査する方法 (以下、限定領域走査法) である。前者は、処理が単純であるが、プロジェクタの総画素数だけ処理を繰り返す必要があるため、総画素数に依存して処理の総所要時間が増加する。一方で後者は、走査領域を限定するためにプロジェクタの位置や姿勢を予め知る必要があるが、総所要時間が総画素数ではなく内部の空隙数にのみ依存するため総所要時間が大幅に削減できる。そのため、本設計では限定領域走査法を採用した。以下では、図 9 に示す限定領域操作法を利用したカリブレーション手順の詳細を述べる。

まず、(1)プロジェクタの照射光が空隙の加工領域全体に当たっていることを確認する。次に、(2)直方体ディスプレイの界面付近の四隅に加工されたプロジェクタの位置・姿勢推定用のマーカーに向けて光を照射できるプロジェクタ画面上の座標を、設計情報をもとに求める。そして、(3)直方体ディスプレイにおけるマーカーの 3 次元座標と、プロジェクタ画面上の座標の対応付け結果を利用して P4P 問題を解くことにより、直方体ディスプレイを基準としたプロジェクタの位置・姿勢を求める<sup>[21]</sup>。最後に、P4P を用いて求めたプロジェクタの位置・姿勢は誤差が含まれるため、(4)推定したプロジェクタの位置・姿勢と各空隙の空間座標から、各空隙を照射できるおおよそのピクセル領域を推定して走査する。ここで、推定した領域内での走査を高速化するために図 10 に示す二分走査法を実装した。本手法では、空隙が存在すると予

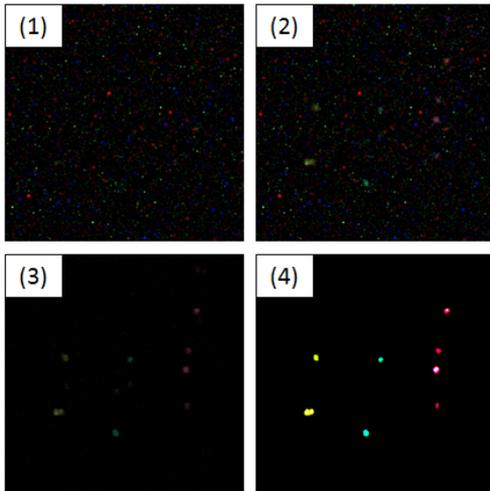


図 11 取得画像とノイズ除去後の画像との比較

Fig. 11 Comparison between raw image and corrected image.

想される領域を 2 分割し、そのどちらかの領域に実際に空隙が存在するかを調べる処理を繰り返すことにより、領域を絞り込んでいく。すなわち、空隙が存在すると予想される領域を 2 分割し、その片方の領域全体を照らすレーザー光を照射し、その領域での空隙が発光するか否かを画像処理で認識する。空隙が発光した場合は、その領域に対して同じ処理を繰り返し、発光しなかった場合は、反対の領域内に空隙が存在するとして処理を繰り返すことにより、対象の空隙に対応するピクセルを特定する。空隙 1 点当たりの走査領域を  $n \times n$  ピクセルとした場合、単純な全画素走査では  $n^2$  回の処理が必要であるが、二分法の場合は  $2 \log_2 n$  回に削減できる。

カメラを用いて空隙が発光しているかを検出するためには、発光点と発光していない領域とでコントラスト差が必要である。十分なコントラスト差が得られない場合は、カメラの露光時間や感度を上げなければ発光点を認識できず、逆にこれらを上げると画像中のノイズが増加するため、画像処理の精度が低下する。そこで、本研究ではプロジェクタからレーザー光を照射していない時の画像を予め取得し、照射時の画像からノイズを除去するために利用する。すなわち、図 11 に示すように、(1)未照射時のディスプレイの画像を、(2)照射時の画像から減算することで(3)発光点のみの画像を生成する。ただし、発光点の輝度が十分ではなく発光していないと検出される場合やノイズがわずかに残存する問題を軽減するため、2 値化の処理を加え(4)発光点と暗部とで十分にコントラスト差がある画像を生成する。

## 5. 3D コンテンツの出力例

### 5.1 LuminantCube での表示に適した 3D コンテンツの設計

本装置は、全方向から裸眼での立体視が可能であり、様々な立体物を表示するのに適している。中でも、プリ

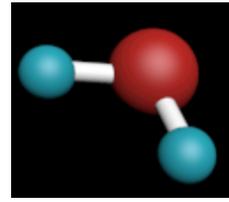


図 12 試作した 3D コンテンツの概形

Fig. 12 Design of 3D content prototype.

ミティブな形状の組み合わせであり、直感的に立体構造の理解が容易である分子構造モデルの再現に着目した<sup>[22]</sup>。一般的には、分子構造を再現する場合は立体模型を用いるが、異なる分子構造を表現するためには、手作業で分解・組立する必要があることや、時間変化を表現しにくいなどの欠点がある。本装置を用いれば、様々な構造にも対応でき、複数の物質の反応や構造の時間変化を再現できる。以上を考慮して試作した 3D コンテンツのモデルを図 12 に示す。

今後は、より複雑な 3D コンテンツを認知しやすくするため、立体感を強調する手法を 3D コンテンツの設計に取り入れる予定である。例えば、立体物の陰影や色のグラデーションの追加、輪郭の強調などによって表示しているコンテンツの認知度が向上することが報告されているため、それらのテクスチャをコンテンツに付加することが望ましい<sup>[23]</sup>。また、表示する立体物のワイヤフレームと表面とで輝度差や色コントラストを意図的に加えることで、立体感が強調され、立体物の形状や奥行き方向の順序などが正しく認知されやすくなる特性も利用できる<sup>[24,25]</sup>。

### 5.2 試作した 3D コンテンツの出力例

上述の 3D コンテンツの照射のシミュレーションを図 13、実際に照射したときの画像を図 14 にそれぞれ示す。本設計で使用したガラス内部マーキング法で生成される内部空隙の形状は、加工用のレーザー光の入射方向に大きく依存し、レーザー光の進行方向に縦長な八面体となる傾向にあることがわかった。すなわち、八面体の長手方向にプロジェクタの照射光を当てると、光が均等に拡散せず多くが貫通してしまうため、発光が非常に弱くなる。その結果、カリブレーション時のカメラによる発光点の検出が不安定になるため、各空隙に対する照射位置が確定せず、3D コンテンツの表示が困難となる。実際に、図 14 に示すように、一部の空隙は正確に照射できていることが確認できるが、意図した立体物を設計通りに表示するには至っていない。今後は、加工時のレーザー光の入射方向を慎重に検討し、より安定して全方向への発光が生じるように改善する必要がある。

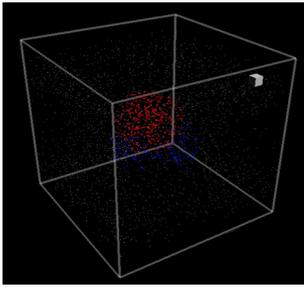


図 13 試作した 3D コンテンツの照射シミュレーション  
Fig. 13 Simulation of projecting 3D content prototype.

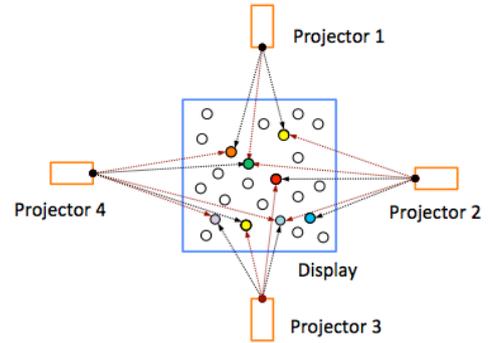


図 15 コントラスト比の向上  
Fig. 15 Method to improve contrast ratio.

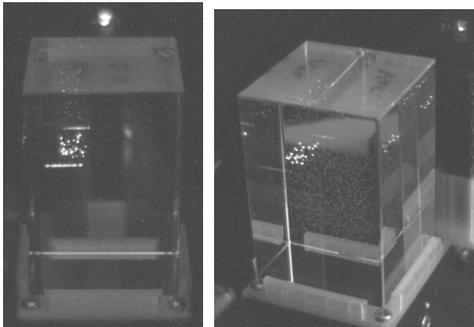


図 14 試作した 3D コンテンツの実際の照射  
正面 (左) とななめ (右)  
Fig. 14 Actual projection of 3D content prototype.  
Front view (left) and diagonal view (right).

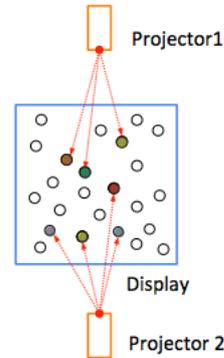


図 16 解像度の向上  
Fig. 16 Method to improve resolution.

## 6. まとめと今後の改良

### 6.1 まとめ

本研究では、3 次元配置した微小領域でのレーザー光の拡散を利用した多視点裸眼立体視ディスプレイ (LuminantCube) を提案した。また、試作の直方体ディスプレイの大きさ、素材や加工法と内部空隙の大きさ、加工数や配置を検討した結果、高さが 80 [mm]、幅と奥行きが 50 [mm] のカリクリスタルガラスにガラス内部マーキング法を用いて、0.3 [mm] 程度の微小な空隙を 3600 点加工する設計が適していることがわかった。さらに、一般的な 3DCAD で使用されてい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 LuminantCube で表示可能にする変換処理を担うミドルウェアを開発した。また、照射の位置を調整し空隙に正確にレーザー光を照射できるようにするためのカリブレーションを実装したが、各空隙での発光が弱くカメラによる発光点の検出が不安定であるため、現時点では全ての空隙に対して正確にレーザー光を照射するには至っていない。

### 6.2 今後の改良

今後は、まずカリブレーションの安定性を向上させる予定である。また、更なる改良点として、コントラスト比と解像度の向上が挙げられる。図 15 に示すように、個々の空隙に対して複数の照射光を同時に照射すること

で、コントラスト比や最高輝度を向上させることができると期待される。解像度に関しては、図 16 に示すように、複数のプロジェクターを用いることにより他の空隙と干渉せずに照射できる空隙の数を増やす方法が考えられる。

その他の改良点として、ディスプレイの大型化が挙げられる。本ディスプレイは少なくとも 600 [mm] の立方体まで大型化できると考えられる。水族館の大型水槽で使用されているアクリルガラスは 600 [mm] の厚みがありながら内部を確認できるほど光透過性が保たれており、この厚みまでディスプレイを大型化できれば、公共施設に設置する 3D デジタルサイネージへの応用が可能となる。

本装置の応用に関しては、kinect 等の RGBD カメラから得た映像を遠隔地に送信し、本装置で表示することを考えている。本研究で開発中のミドルウェアは、RGBD カメラから得た 3 次元点群の表示を容易にすることも考慮しており、この応用が実現すれば、映画「スターウォーズ」でのワンシーンのように、遠隔地間での自然なコミュニケーションが可能になると期待される。

## 謝辞

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 26540044.

## 参考文献

- [1] HIRATA A., SUZUKI K.: Three Dimensional Display-Types and Application to Television; ITE, **Vol. 41**, No. 7, pp. 610-618, (1987).
- [2] IMURA M., YAGI A., KURODA Y., OSHIRO O.: Multi-Viewpoint Interactive Fog Display; Int. Conf. on Artificial Reality and Telexistence, 1345-1278, p. 170, (2011).
- [3] HATADA T., SAKATA H.: Psychological Visual Perception and Display; Display Journal Report, **Vol. 34**, No. 4, pp. 245-255, (1977).
- [4] NAGATA S.: Visual Sensitivities to Cues for Depth Perception; **Vol. 31**, No. 8, pp. 649-655, (1977).
- [5] NAGATANI H.: Evaluation of the safety of 3-dimensional image; ITE Technical Report, **Vol. 36**, No. 43: pp. 29-34, (2012).
- [6] EMOTO M., YANO 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).
- [7] YANO S., IDE S., MITSUHASHI T., THWAITES H.: A study of visual fatigue and visual comfort for 3D HDTV/HDTV images; Displays 23, pp. 191-201, (2002).
- [8] YANO S., EMOTO M., MITSUHASHI T.: Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images; Displays 25, pp. 141-150, (2004).
- [9] BENZEROUAL K., ALLISON R. S., WILCOX L. M.: 3D Display size matters: Compensating for the perceptual effects of S3D display scaling; IEEE, pp. 45-52, (2012).
- [10] ZANG S., WANG Q., ZHAO W., ZHANG J., LIANG J.: A Frontal Multi-Projection Autostereoscopic 3D Display Based on a 3D-Image-Guided Screen; Journal of Display Technology, **Vol. 10**, No. 10, pp. 882-886, (2014).
- [11] IWASAWA S., YANO S., KAWAKITA M. et al.: Implementation of projector array-based autostereoscopic display; ITE Technical Report, **Vol.34**, No. 43, (2010).
- [12] YAMADA H., YABU H., YOSHIMOTO K., TAKAHASHI H.: Three-dimensional light field display with overlaid projection; Tenth Int. Conf. on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, IEEE Computer Society, pp. 407-410, (2014).
- [13] BARNUM P. C., NARASIMHAN S. G., KANADE T.: A Multi-Layered Display with Water Drops; ACM Transactions on Graphics, **Vol. 29**, No. 4, Article 76, pp. 76:1-76:7, (2010).
- [14] GOTODA H.: Implementation of an Autostereoscopic Display Using Multilayer LCDs; ITE Technical Report **Vol. 35**, No. 35, (2011).
- [15] JONES A., MCDOWALL 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.: (40-1)-(40-10), (2007).
- [16] 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).
- [17] EITOKU S., TANIKAWA T., SUZUKI Y. et al.: Display Composed of Water Drops for Filling Space with Materialized Virtual Three-dimensional Objects; Proc. of the IEEE Virtual Reality Conference, pp. 165-172, (2006).
- [18] ISHIKAWA H., SAITO H.: Point Cloud Representation of 3D Shape for Laser-Plasma Scanning 3D Display; IEEE, pp. 1913-1918, (2008).
- [19] YE G., STATE A., FUCHS H.: A Practical Multi-viewer Tabletop Autostereoscopic Display; IEEE International Symp. on Mixed and Augmented Reality Science and Technology Proc., pp. 147-156, (2010).
- [20] <http://www.musashino-kikailaser.jp/images/laser01.pdf> (last access, June 30th, 2015).
- [21] HORAUD R., CONIO B., LEBoulLEUX O., LACOLLE B.:An Analytic Solution for the Perspective 4-Point Problem; IEEE, pp. 500-507, (1989).
- [22] AKIZUKI R., NAEMURA T., ISHIKAWA H., SAITO H.: 3D contents generation by fusing two graphics for Aerial 3D Display; IEICE Technical Report, PRMU201-166, MVE2010-91, (2011).
- [23] MATSUSHIMA K., HONJYO K.: Computer-Generated Full-Parallax Holograms for Three-Dimensional Surface-Objects with Shading; ITE, **Vol. 56**, No. 6, pp. 986-992, (2002).
- [24] NAKATANI A., FUJISHIRO I., ISHIKAWA H., SAITO H.: Resource-Aware Rendering for Laser Plasma Scanning 3D Display Devices Using Surface Descriptors; TVRSJ Vol. 17, No.4, pp.419-428, (2012).
- [25] LIVINGSTON M. A., SWAN E. J., GABBARD J. L., HOLLERER T. H. et al.: Resolving Multiple Occluded Layers in Augmented Reality; Proc. of Intl. Symp. on Mixed and Augmented Reality, (2010).