

複数の2次元情報を記録・表示する ボリュームディスプレイ

2017年1月

千葉大学大学院工学研究科
人工システム科学専攻 電気電子系コース

平山 竜士

(千葉大学学位申請論文)

複数の2次元情報を記録・表示する
ボリュームディスプレイ

2017年1月

千葉大学大学院工学研究科

人工システム科学専攻 電気電子系コース

平山 竜士

概要

本論文では、複数の視野あるいは人に向けて、独立した2次元情報を同時に伝える機能を持つ次世代ボリュームディスプレイシステム実現に向けた研究成果を示す。特定の視点方向にのみ情報を伝えられるという特徴から、高い指向性を有する情報伝達手段であり、デジタルサイネージやセキュリティ技術としての応用が期待される。本論文では主に、以下の三つの課題に取り組んだ。

一つ目が、複数の2次元情報を保持する3次元構造体設計アルゴリズムの開発である。このアルゴリズムを用いることで、任意枚数の2次元情報（階調を持った画像など）を一つの3次元構造体に記録することが可能となる。記録された2次元情報は、特定の方向にのみ表示される。また、開発したアルゴリズムに反復計算の考え方を取り入れた改良版アルゴリズムでは、ほかの画像からの影響で発生する表示画像上のノイズを抑制することができる。さらに、ガラス曲面における光の屈折を補正し、表示方向に関する制約を取り除くアルゴリズムを提案した。結果として、最大8枚の2次元画像を表示する3次元構造体を作製することに成功した。

二つ目が、既存のボリュームディスプレイ方式を用いた3次元構造体のカラー動画像である。発光ダイオードを3次的に配置する方式と、糸とプロジェクタを用いる方式という2種類のボリュームディスプレイを作製し、上述した提案アルゴリズムの考え方をそれぞれに適用した。どちらの方式においても、直交する2方向にそれぞれ異なるフルカラー動画像を表示させることに成功した。

三つ目が、高解像度を実現するための新たな光制御ボリュームディスプレイ方式の創出である。光を介したワイヤレスでの画素制御による高解像度ボリュームディスプレイの実現を目指して、光に反応する材料を画素とするディスプレイを試作した。ボリュームディスプレイの解像度の向上のため、インクジェットプリンタを利用した画素形成手法を開発し、複数枚のフルカラー2次元画像を表示する3次元構造体を作製した。さらに試作を通して、フォトクロミック材料の着色特性に基づく新規ボリュームディスプレイ方式を提案し、基礎実験による実証に成功した。フォトクロミック材料に基づくボリュームディスプレイ方式が実現されれば、非常に簡単な構造で、3次元フルカラー動画像の表示が可能になる。

Volumetric display containing multiple two-dimensional images

Ryuji Hirayama

Abstract: This paper presents a study on a novel volumetric display system, which can provide individual two-dimensional (2D) information for multiple users simultaneously. This system can exhibit the information only to the appropriate directions. Therefore, it can be applied for a human–computer interaction having directional characteristics in many fields including digital signage and security. There are three main challenges in this study as shown below.

The first challenge is a development of an algorithm to design a unique three-dimensional (3D) structure containing multiple 2D images. This algorithm enables an arbitrary number of 2D images recorded in a 3D structure. The recorded images are only visible in specific directions. The background noise occurring in each image, due to the effect from the other images, can be reduced by an improved algorithm combining the original algorithm and an iterative calculation method. Moreover, I proposed an algorithm that can compensate refractive effects at the curved glass surface and remove the constraint on the exhibition directions. I succeeded in demonstrating a 3D glass structure exhibiting up to eight images.

The second is using conventional volumetric display methods for realizing dynamic color 3D structures exhibiting multiple images in different directions. I made two types of volumetric displays, i.e., an array of light-emitting diodes arranged in 3D layout and an array of strings on which an image is projected. Each of the displays demonstrated that the system exhibited two moving full-color images in two orthogonal directions by applying the idea of the proposed algorithm.

The third is a development of an optically controlled volumetric display. For the realization of a high-resolution volumetric display based on a wireless addressing via light, I made a prototype of the display comprising photoreactive materials. I also proposed a fabrication method of such display by using an inkjet printer to improve its resolution. Moreover, the coloration principles of photochromic materials were proposed and experimentally demonstrated. These principles ultimately pave the way for a dynamic full-color 3D volumetric display with an extremely simple structure.

目次

緒論	1
第1章 複数の2次元情報を保持する3次元構造体	6
1.1 緒言	6
1.2 3次元構造体の設計手法	7
1.2.1 画像の投影	7
1.2.2 記録アルゴリズム	8
1.2.3 記録枚数の拡張	10
1.3 アルゴリズムの検証	10
1.3.1 シミュレーション結果	10
1.3.2 乗算および加算に基づくアルゴリズム	13
1.3.3 3Dクリスタルへの実装	13
1.4 取り組む課題	14
1.4.1 画質劣化に関する課題	15
1.4.2 カラー化に向けた課題	16
1.4.3 動画化に向けた課題	18
1.5 結言	18
第2章 反復計算法に基づく画質改善アルゴリズム	19
2.1 緒言	19
2.2 画質改善手法	19
2.2.1 逐次近似法	19
2.2.2 逐次近似法に基づく画質改善アルゴリズム	20
2.3 アルゴリズムの検証	22
2.3.1 シミュレーション結果	22
2.3.2 3Dクリスタルへの実装結果	25
2.4 任意枚数表示に向けた課題	27
2.5 結言	27
第3章 ガラス曲面での屈折補正アルゴリズムと応用	29
3.1 緒言	29

3.2	屈折補正手法	29
3.2.1	球体状や円柱状のガラスにおける屈折の影響	30
3.2.2	屈折補正アルゴリズム	30
3.2.3	画質改善アルゴリズムとの併用	31
3.3	アルゴリズムの検証	32
3.3.1	CG シミュレーションの結果	32
3.3.2	3D クリスタルへの実装結果	34
3.4	屈折補正アルゴリズムの応用	36
3.4.1	3D クリスタル実装による検証	36
3.5	結言	37
第4章	電子制御ボリュームディスプレイ	40
4.1	緒言	40
4.2	LED 型ボリュームディスプレイ	40
4.2.1	表示ユニット	41
4.2.2	制御ユニット	42
4.3	実験結果	43
4.3.1	単色表現の結果	44
4.3.2	マルチカラー表現の結果	44
4.3.3	動画表現の結果	44
4.3.4	フルカラー表示に向けた課題	45
4.4	パルス幅変調方式を用いたボリュームディスプレイ	46
4.4.1	フルカラー表示用の制御ユニット	47
4.4.2	性能評価実験	49
4.4.3	複数画像表示デモンストレーション	51
4.5	電子制御型の利点と課題点	51
4.6	結言	52
第5章	糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイ	53
5.1	緒言	53
5.2	ディスプレイ構造と画素制御手法	53
5.2.1	システムの概要	54
5.2.2	画素制御手法	54
5.3	ボリュームディスプレイの試作	55
5.3.1	設計したボリュームディスプレイ	55
5.3.2	複数の2次元動画像を表示するボリュームディスプレイ	56
5.4	解像度の向上	57
5.4.1	システムの概要	57

5.4.2	複数の2次元動画像を表示するボリュームディスプレイ	58
5.4.3	今後の解像度向上に関するアプローチ	59
5.5	結言	61
第6章	量子ドットに基づく光制御ボリュームディスプレイ	62
6.1	緒言	62
6.2	量子ドットボリュームディスプレイ	63
6.2.1	量子ドットの発光特性	63
6.2.2	量子ドット含有ボクセルの作製方法	63
6.2.3	ボリュームディスプレイの設計と構成	65
6.3	実験結果	66
6.3.1	量子ドット含有ボクセル	66
6.3.2	量子ドットボリュームディスプレイの試作結果	67
6.3.3	順序依存性の検証	68
6.4	考察	70
6.4.1	量子ドットボリュームディスプレイの特性	70
6.4.2	現状の課題	71
6.5	結言	71
第7章	インクジェットプリンタによる高解像度化の検討	73
7.1	緒言	73
7.2	プリンタを用いたボリュームディスプレイ	73
7.2.1	基本コンセプト	74
7.2.2	ボリュームディスプレイの作製方法	74
7.3	フルカラー3次元像表示	75
7.3.1	ボリュームディスプレイの設計	76
7.3.2	3次元像の表示結果	76
7.4	複数の2次元画像を表示する3次元構造体	77
7.4.1	ボリュームディスプレイの設計	77
7.4.2	3枚のフルカラー画像を記録した結果	78
7.4.3	投影画像枚数の拡張	79
7.5	フィルム枚数の再生像への影響評価実験	79
7.5.1	実験方法	80
7.5.2	評価実験の結果	80
7.6	結言	81

第 8 章	フォトクロミック材料を用いたフルカラー 3 次元動画像表示	83
8.1	緒言	83
8.2	これまで提案されてきた光制御動画化アプローチ	83
8.2.1	レーザー照射による手法	84
8.2.2	T-type フォトクロミック材料を用いた手法	84
8.3	提案するボリュームディスプレイ手法	85
8.3.1	着色の新原理	85
8.3.2	画素制御手法	87
8.4	実験方法	88
8.4.1	1 種類の PM を用いた位置選択的着色実験	89
8.4.2	2 種類の PM を用いた色選択的着色実験	90
8.5	実験結果	91
8.5.1	位置選択的な着色原理の実証	91
8.5.2	色選択的な着色原理の実証	92
8.6	考察	93
8.6.1	システムのフレームレート	93
8.6.2	システムの空間解像度	94
8.6.3	本論文における位置付け	94
8.7	結言	94
	結論	96
	参考文献	99
	謝辞	106
	業績リスト	107

緒論

人と機械をつなぐヒューマンインターフェイスとして自然な映像を表示するために、3次元ディスプレイは不可欠な技術である。現在実用化されているものは主に、2次元のディスプレイから左右の目に異なる映像を表示し、立体的に見せる方式を採用している。目の錯覚を利用した方式であり、人間が立体を知覚する用件の一部を満たせないため、観察者の目に負担をかけてしまうことが問題視されている。

そのため、多視点映像（ライトフィールド）方式やホログラフィ方式、ボリュームディスプレイ方式といった3次元ディスプレイの研究が行われている¹⁾。なかでもボリュームディスプレイは、実際の3次元空間に、体積を持つ3次元像をそのまま描画するディスプレイである^{2,3)}。3次元像が本来あるべきところに実際の画素を有するため、目の焦点位置がずれることによる眼精疲労を起こさず、観察者は360°様々な方向から3次元像を観察可能となる。医療、教育、建築、デザインといったあらゆる分野における3次元可視化技術としての応用が期待されている。

現在製品として数多く販売されている3Dプリンタや、ガラス内部にレーザ加工をすることで任意の3次元像を描画する技術^{4,5)}を用いた3Dクリスタルなどは、一度描画した3次元像を動かして動画にすることはできないものの、3次元的に画素を有するという点ではボリュームディスプレイの一つといえる。一方、動画像を表示するためのボリュームディスプレイ方式もいくつか提案されている。例えば、回転するスクリーン^{6,7)}や、多層に配置した液晶ディスプレイ⁸⁾、糸⁹⁾や水滴¹⁰⁾、上述した3Dクリスタル¹¹⁾、超音波で浮遊させた小物体（ビーズなど）¹²⁾などを3次元スクリーンとして、プロジェクタで映像を投影することで3次元像を描画する方式が提案されている。他にも、光ファイバを用いて蛍光材料にアドレスする方式¹³⁾や、レーザ照射によって液体中^{14,15)}や固体中^{16,17)}、空気中¹⁸⁻²⁰⁾に任意の3次元像を描画する方式などが提案されている。

一方、『ゲーデル、エッシャー、バッハ - あるいは不思議の環²¹⁾』（通称 GEB）という書籍の表紙には、ある不思議な3次元構造体が描かれている。この3次元構造体には、三つの文字“G”、“E”、“B”（タイトルのイニシャル）が組み込まれており、三つの投影軸にそれぞれ異なる文字（2次元画像）を映し出す。図1にコンピュータグラフィックス（Computer Graphics: CG）で作成した同様のものを示す（“X”、“Y”、“Z”を表示）。これらの3次元構造体は、各2次元画像に対する積の集合演算を行うことによって造形される。このような考え方は、3次元CG分野において基本

的なモデリング手法の一つである Constructive Solid Geometry (空間領域構成法)²²⁾に基づいており，CG ソフトウェアなどを使うことで容易に設計可能である．しかしこれらの設計手法では，表示可能な 2 次元画像は 2 値に限定され，画像の組み合わせや数，表示方向にも強い制限がある．

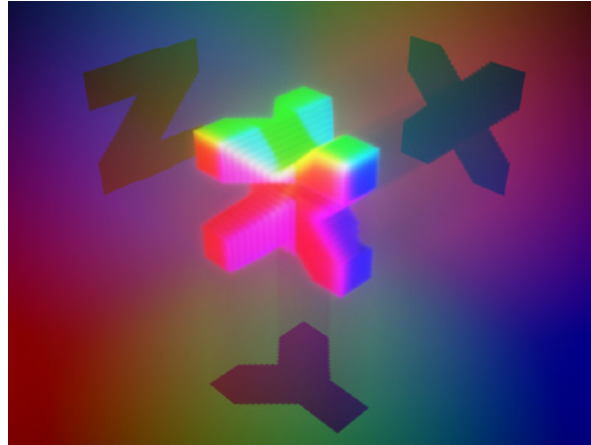


図 1: “X”，“Y”，“Z” の 3 文字を表示する 3 次元構造体．

そこで，3 次元構造体の各体積要素（ボクセル）が階調を持っている場合にこれらの制限を外し，通常の写真のようなあらゆる 2 次元画像の表示を可能にする手法を開発した²³⁾．この手法で設計された 3 次元構造体は，言い換えるならば，複数の視野あるいは人に向けて独立した 2 次元情報を同時に伝える機能を持っている．また，特定の視点方向にのみ情報を伝えられるという特徴から，高い指向性を有する情報伝達手段でもある．このような 3 次元構造体をボリュームディスプレイで表示することによって，これまでにない新たな情報伝達システムが実現できる．例えば複数の観察者に対して，それぞれに適した言語広告を表示する多言語サイネージシステムなどが挙げられる（図 2）．このとき，観察者の位置をトラッキングし，それぞれに対して情報を独立に提示し続けるといったことが可能になる．スマートフォンや装着型のディスプレイ端末など特別な装置を受信者が用意することなく，各個人の需要に合わせた情報を，個人情報保護しながらも効率的に伝達する技術を確立できる．芸術やエンターテインメント分野の他に，デジタルサイネージを含む広告技術，安心・安全を提供するセキュリティ分野など社会に新たな付加価値をもたらすことができると考えている．

しかし提案手法に基づく情報伝達システムの実現には，表示画像の画質劣化に関する課題と，カラー化に向けた課題，動画化に向けた課題がそれぞれ残っている．本研究では，これらの課題を解決することを目的とする．以下に，本論文の構成と内容を示す．

1 章では，本研究の基礎となる，複数の 2 次元情報を保持する 3 次元構造体の基本

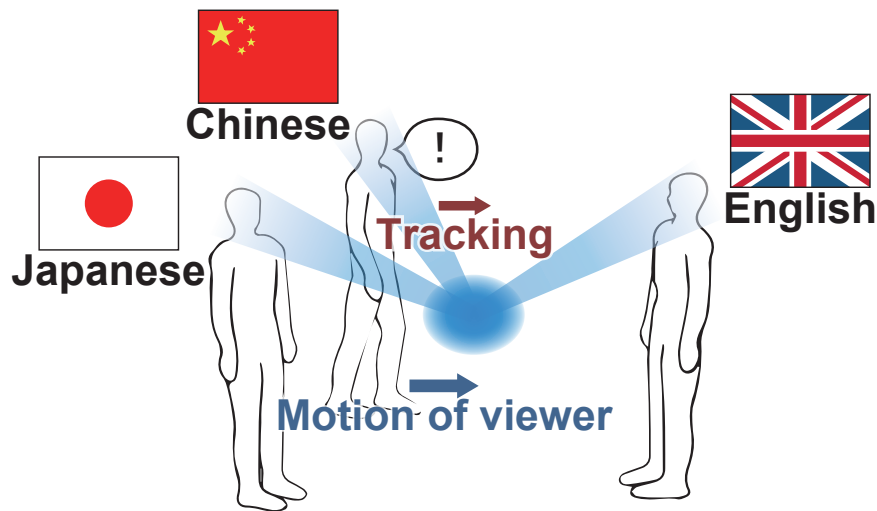


図 2: 複数の 2 次元情報を表示するボリュームディスプレイの応用例: 多言語サインページシステム.

原理²³⁾を示す. 複数枚の画像を一つの 3 次元構造体に記録するアルゴリズムを説明し, CG シミュレーションや実際の試作によってアルゴリズムの有用性を示す. 試作には, ガラス内部にレーザ加工をすることで任意の 3 次元像を描画する 3D クリスタルを用いた. 現状の課題と, その課題解決のために行った本研究の実施項目を述べる.

1 章で示した提案手法を用いることで, 原理的には任意枚数の 2 次元画像を同時に表示する 3 次元構造体の設計が可能である. しかし, 表示画像枚数の増加が画質の劣化を引き起こしてしまう. そこで 2 章では, 表示画像の画質劣化に関する課題を解決するために提案した画質改善アルゴリズムと, その実装結果^{24,25)}について述べる. このアルゴリズムは反復計算法に基づいており, 表示画像の画質を改善することができる. 計算機シミュレーションによって提案手法の有用性を定量的に評価した後, これまでよりも多い枚数の 2 次元画像を表示する 3D クリスタルの試作結果を示す.

3 次元構造体から表示させる 2 次元画像の枚数を増やしていくと, 3 次元構造体の形状は, 究極的に円柱もしくは球体に近づいていく. つまり曲面を有することになる. しかし 3D クリスタルにおいて, ガラス曲面での光の屈折は画質低下の原因となってしまう. そこで 3 章では, 光の屈折の影響を補正するアルゴリズム²⁶⁾を提案する. CG シミュレーションおよび 3D クリスタル試作によって, 提案する補正手法の有用性を示す. さらに, 屈折の影響を逆に利用することで, これまで不可能であった平行表示軸への画像表示が実現できることも実験的に示す.

1 章から 3 章までで使用してきた 3D クリスタルでは, ガラス中に誘起された小

さな傷によって3次元像を表現するため、モノクロの静止画のみしか表現できないという課題がある。提案する3次元構造体を映像システムとして応用するためには、カラー化および動画化が不可欠である。そこで4章では、発光ダイオード（Light Emitting Diode: LED）の3次元配置に基づく電子制御ボリュームディスプレイを使用する。フルカラー化のために、LEDの点灯を高速に制御する専用回路を設計したので、そのハードウェア構成について詳しく説明する。さらに、複数のフルカラー動画像を表示するデモンストレーションを行った結果を示す²⁷⁾。

4章で示したLEDの3次元配置に基づく電子制御ボリュームディスプレイの開発を進める一方で、糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイ⁹⁾による研究も並行して行ってきた。5章では、この方式のボリュームディスプレイシステムについて、基本原理を説明する。さらに、複数のフルカラー動画像を表示する3次元構造体のデモンストレーションを行った結果についても述べる。また、糸の本数を増やし、より解像度の高い3次元像を表示させるための手法²⁸⁾を提案したので、その検証結果についても述べる。

4章および5章で示したボリュームディスプレイでは、視点に近い位置にある画素（LEDや糸）が、後方にある画素を物理的に隠してしまうことがある。そのため、画素を緻密に配置できず、高集積化には向いていないという課題を有している。この課題を解決するために、ナノ光材料の3次元配置に基づく光制御ボリュームディスプレイの研究を行っている。6章では、量子ドットと呼ばれる発光材料を用いたボリュームディスプレイ²⁹⁾について述べる。光で制御することにより、3章で説明した電子制御では不可能なレベルの高精細・高解像度のボリュームディスプレイが実現可能であると考えている。量子ドットを画素とするボリュームディスプレイを実際に試作し、その特性を実験的に調査した結果について示す。

6章で示した量子ドットボリュームディスプレイは、手作業で作製したため低解像度であった。高解像度のボリュームディスプレイを作製するためには、製作過程の一部または全てを機械化する必要がある。そこで7章では、インクジェットプリンタを用いた高解像度ボリュームディスプレイ作製手法を提案する。インクジェットプリンタで発光材料を機械的かつ微細に配置していくことで、高解像度化の実現が期待できる。この実験では、量子ドットの代わりに市販の蛍光インクを用いて試作を行った。さらに、複数のフルカラー2次元画像を表示するボリュームディスプレイを作製した結果について説明し、提案手法の評価実験結果を示す。

6章および7章で示したボリュームディスプレイは、外部からの光照射によって3次元像を表示するというコンセプトを実現したものの、各画素の発光状態を独立に制御することができず、動画化の実現は困難であるという課題を有する。8章では、フォトクロミック材料と2種類の制御光を用いることで、任意の場所を任意の色で発色させられるという新原理を実験的に示し、この発色原理に基づく新たな光制御ボリュームディスプレイシステムの提案を行う³⁰⁾。このボリュームディスプレイ方

式では，場所ごとに発色を制御できるため，動画化を実現可能である．
最後に本研究を総括し，今後の研究課題について述べる．

第1章 複数の2次元情報を保持する 3次元構造体

1.1 緒言

Hofstadter の書籍 (GEB)²¹⁾ の表紙に描かれたものや図1に示したような3次元構造体は、「両側の」という意味を持つ“ambi”と、「書かれたもの、文字」という意味を持つ“gram”という言葉から、3次元アンビグラム (3D ambigram) という名でも知られており、芸術作品の一つとして親しまれている³¹⁾。ここで図1.1(a)に、直交する2方向にそれぞれ“X”と“Y”の2文字を映し出す3次元構造体の設計手法を示す。最下段に示したように、緑と赤の線のどちらにも囲われた領域だけで立体を形成することで、所望の3次元構造体を設計できる。しかしこの設計手法では、表示可能な2次元画像は2値に限定され、画像の組み合わせや数、表示方向にも強い制限がある。例えば図1.1(b)に示したように、直交した2方向にそれぞれ横線と縦線を表示する3次元構造体の設計は不可能である。3次元構造の最適化によって、これらの制限を緩和する手法なども提案されているものの³²⁾、未だに大きな制限を有する。そのため、このような3次元構造体を芸術分野やエンターテインメント分野以外で応用した例は、調べた限り報告されていない。

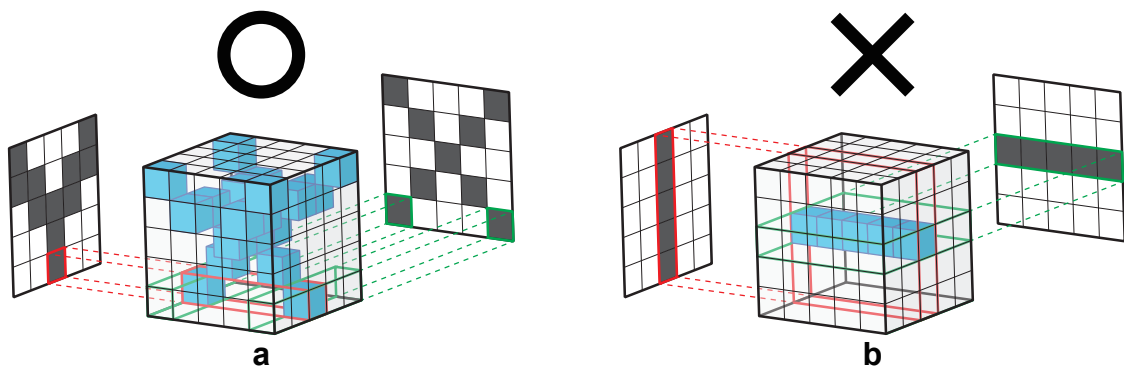


図 1.1: 3次元アンビグラムの設計手法。(a) 可能な組み合わせ (“X” と “Y”) と (b) 不可能な組み合わせ (横線と縦線)。

本論文で扱う提案手法²³⁾と、これまでの3次元アンビグラム設計手法との最大の

相違点は、3次元構造体を構成する体積要素（Volume elements から Voxel またはボクセルと呼称される）および表示される2次元情報が階調を持つか否かである。これまでの3次元アンビグラム設計手法では2値しか持たなかったため、表現できるのは文字やキャラクタのシルエットといった簡単なものだけであった。これを多階調化することによって、通常の写真（256階調）なども扱うことができ、表現力が向上する。また、他の画像との相互的な影響を背景のノイズとみなすことができるようになるため、従来の制限を大きく緩和できる。そのため、芸術分野やエンターテインメント分野のみならず、様々なシーンで応用可能な情報伝達システムの実現に発展する可能性を秘めた技術である。

本章では、複数の2次元情報を保持する3次元構造体の設計手法について述べる。この設計手法は、本論文の基盤技術となっている。まず1.2節で、どのようなアルゴリズムによって3次元構造体を設計するかについて説明する。次に1.3節で、計算機シミュレーションおよび3Dクリスタル加工技術による試作を行った結果を示し、提案アルゴリズムの有用性を検証する。また1.4節で、本論文で主に取り扱う二つの課題について述べた後、それらの課題における具体的な解決策を簡単に示す。最後に1.5節で、本章をまとめる。

1.2 3次元構造体の設計手法

本節では、複数の2次元情報を保持する3次元構造体の設計手法について説明する。まずは表示画像が3枚の場合についてアルゴリズムの説明を行う。さらに、 N 枚の画像を取り扱うため、アルゴリズムを一般化して説明する。

1.2.1 画像の投影

記録アルゴリズムの説明の前に、階調をもった3次元構造体から各投影方向へ表示される2次元画像について説明する。図1.2のように、ボクセル値 $V(x, y, z)$ （例えば点の密度や光の輝度）で構成される3次元構造体を、 w 軸方向に投影した画像のピクセル値を $P(u, v)$ とする。 $P(u, v)$ は、3次元構造体が w 軸方向に表示する画像と言い換えることもできる。 w 軸は投影軸、 u 軸は投影画像の水平成分、 v 軸は垂直成分を表している。投影座標系 (u, v, w) は、直交座標系 (x, y, z) を z 軸周りに θ 、 y 軸周りに ϕ だけ回転したものであり、右手の法則に従う。3次元構造体を構成する $V(x, y, z)$ は階調を持っており、また透過性を持つと仮定する。すると投影画像 $P(u, v)$ は次式で示すように、 $V(x, y, z)$ を w 軸（投影画像 $P(u, v)$ の投影軸）方向に沿って足し合わせた値として与えられる。

$$P(u, v) = \sum_w V(x, y, z). \quad (1.1)$$

投影画像 $P(u, v)$ が、ある所望の2次元情報 $I(u, v)$ として認識できるように、3次元構造体のボクセルの値 $V(x, y, z)$ を決定することを「2次元情報を3次元構造体へ記録する」と表現する。次節以降で、2次元情報を記録するアルゴリズムについて述べる。

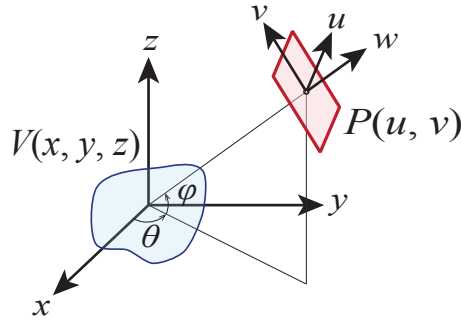


図 1.2: 3次元構造体から投影軸方向に表示される画像。

1.2.2 記録アルゴリズム

本手法を用いることで、原理的には任意数の2次元情報が記録された3次元構造体を設計可能である。まずは簡単のため、3枚の2次元画像を、直交する3方向に表示する3次元構造体を設計する場合について説明する。

記録したい3枚の入力画像のピクセル値をそれぞれ、 $I_1(u_1, v_1)$ 、 $I_2(u_2, v_2)$ 、 $I_3(u_3, v_3)$ とする。これらの画像は例えば通常のビットマップ形式のようなグレースケール画像であり、ピクセル値が階調を持っている。3次元構造体は (x, y, z) 座標系に置かれており、各ボクセルの画素値を $V(x, y, z)$ とする。ここで図 1.3 に示すように、3次元構造体と記録元となる3枚の入力画像を、それぞれ投影軸が直交するような投影座標上に仮想的に配置する。

提案手法では次式のように、3枚の画像が持つピクセルの値を掛け合わせることで、ボクセル値 $V(x, y, z)$ を計算する。

$$V(x, y, z) = I_1(u_1, v_1)I_2(u_2, v_2)I_3(u_3, v_3). \quad (1.2)$$

ここで図 1.3 から、投影座標系はそれぞれ $(u_1, v_1, w_1) = (x, y, z)$ 、 $(u_2, v_2, w_2) = (-z, y, x)$ 、 $(u_3, v_3, w_3) = (x, -z, y)$ となる。そのため、式 (1.2) は次のように書きなおすことができる。

$$V(x, y, z) = I_1(x, y)I_2(-z, y)I_3(x, -z). \quad (1.3)$$

上記のように設計した3次元構造体を、各画像の投影軸方向から見たときに認識できる投影画像のピクセル値を、それぞれ $P_1(u_1, v_1)$ 、 $P_2(u_2, v_2)$ 、 $P_3(u_3, v_3)$ とする。こ

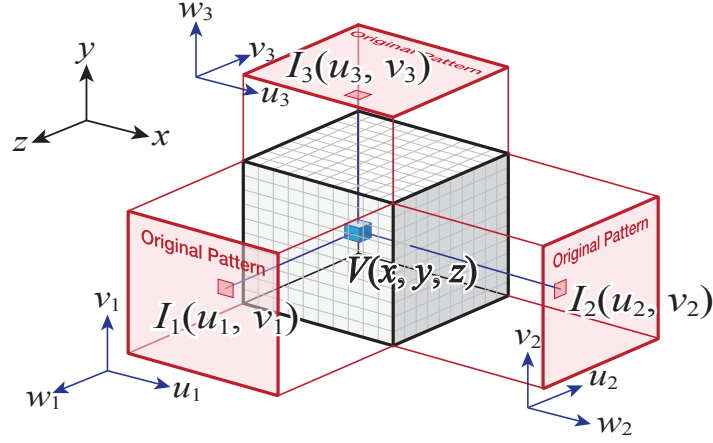


図 1.3: 記録アルゴリズム (3 枚の画像を記録する場合)。

これらの値は式 (1.1) と式 (1.3) から、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 P_1(u_1, v_1) &= \sum_{w_1} V(x, y, z) \\
 &= I_1(u_1, v_1) \sum_z I_2(-z, y) I_3(x, -z).
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

$$\begin{aligned}
 P_2(u_2, v_2) &= \sum_{w_2} V(x, y, z) \\
 &= I_2(u_2, v_2) \sum_x I_1(x, y) I_3(x, -z).
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

$$\begin{aligned}
 P_3(u_3, v_3) &= \sum_{w_3} V(x, y, z) \\
 &= I_3(u_3, v_3) \sum_y I_1(x, y) I_2(-z, y).
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

3 枚の投影画像が持つピクセル値はそれぞれ、 $P_1(u_1, v_1) = I_1(u_1, v_1)$ 、 $P_2(u_2, v_2) = I_2(u_2, v_2)$ 、 $P_3(u_3, v_3) = I_3(u_3, v_3)$ となるのが理想的である。しかし式 (1.4)、(1.5)、(1.6) から投影画像は、入力画像に対してピクセルごとに変化する総和演算の値 (式 (1.4) における $\sum_z I_2(-z, y) I_3(x, -z)$) を乗じた形で表される。つまりそれぞれの投影軸方向には、入力画像に背景ノイズを乗じた 2 次元情報が表示される。人の目の認識において、一般的に背景ノイズよりも入力画像の変化のほうが支配的になる。特に、背景ノイズが一様に近い場合には、観察者は入力画像が表示されているように認識できる。

1.2.3 記録枚数の拡張

1.2.2節では、3枚のグレースケール画像を、直交した投影軸に表示する3次元構造体の設計アルゴリズムについて述べた。3枚のときと同様の手法を用いることで、記録枚数は容易に拡張することができ、投影軸は任意の角度に設定することが可能となる。ここでは、 N 枚の画像を表示する3次元構造体を設計するため、より一般化した設計アルゴリズムについて述べる。

3枚の画像を表示する場合と同様に、3次元構造体は階調を持つボクセルによって構成されると仮定する。記録したい N 枚の入力画像のピクセル値を、図1.4のように $I_i(u_i, v_i)$ とする（ここで $i = 1, 2, 3, 4, \dots, N$ ）。それぞれの投影軸 w_i は、平行にならないように設定する必要がある。3枚記録するときと同様に、入力画像のピクセル値 $I_i(u_i, v_i)$ を掛け合わせることで、ボクセルの値 $V(x, y, z)$ は次の式で求められる。

$$V(x, y, z) = \prod_{i=1}^N I_i(u_i, v_i). \quad (1.7)$$

N 枚の投影画像のピクセル値を、 $P_i(u_i, v_i)$ とすると、これらの値は式(1.1)と式(1.7)から、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} P_i(u_i, v_i) &= \sum_{w_i} V(x, y, z) \\ &= I_i(u_i, v_i) \sum_{w_i} \left(\prod_{j=1, j \neq i}^N I_j(u_j, v_j) \right). \end{aligned} \quad (1.8)$$

このように、3枚記録するときと同様に、投影画像は入力画像に背景ノイズを乗じた形で表すことができる。そのため、式(1.7)に従ってボクセル値を設定することで、 N 枚の画像を保持する3次元構造体の設計が可能となる。

1.3 アルゴリズムの検証

1.2節で説明したアルゴリズムについて、計算機シミュレーションおよび3Dクリスタル加工技術による試作を行うことで、有用性の検証を行った。

1.3.1 シミュレーション結果

本節では、1.2節で説明したアルゴリズムを用いて設計した3次元構造体について、計算機によってシミュレーションを行った結果を示す。シミュレーションの手順としてはまず、表示させたい入力画像を必要な枚数分だけ用意する。今回の実験では、 64×64 ピクセルからなる256階調（8-bit）のグレースケール画像を用いた。

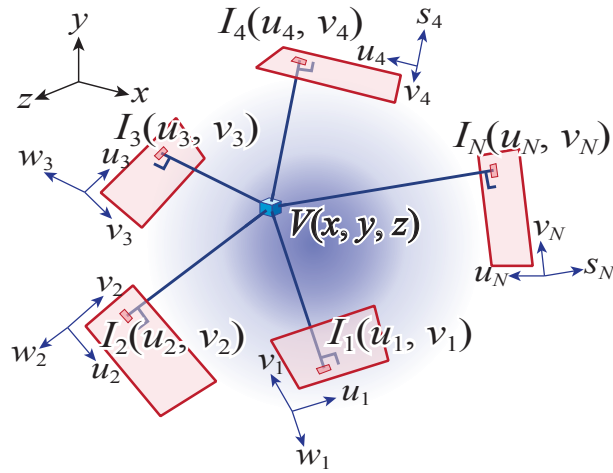


図 1.4: 記録枚数の拡張.

次に、3次元構造体を構成するボクセルの値 $V(x, y, z)$ を式 (1.7) に従って計算していく。ここで、3次元構造体のボクセル数は $64 \times 64 \times 64$ とした。設計した3次元構造体からそれぞれの方向にどのような2次元画像 $P_i(u_i, v_i)$ が表示されるのかを、式 (1.1) に従って計算し、256階調に正規化した後、投影画像として出力する。なお、アルゴリズムの有用性を確かめるための検証なので、ガラス平面における屈折の影響などは考慮していない。画像同士の視覚的な比較を容易にするため、出力画像と入力画像における平均値と標準偏差がどちらも等しくなるよう正規化して出力している。

まずは図 1.5(a) に示すように、直交する3軸に3枚の入力画像 I_1-I_3 を表示する立方体状の3次元構造体についてシミュレーションを行った。図 1.5(b) に示した3枚の画像は、左から順にそれぞれ I_1, I_2, I_3 を表す。図 1.5(c) の3枚の画像は、それぞれの投影軸方向に表示される投影画像を示す。投影画像を見ると、問題なく元の入力画像として認識できるため、提案する設計アルゴリズムの有用性が実証できた。しかし同時に、投影画像にライン状の背景ノイズが乗っていることも確認できる。このノイズは、式 (1.4), (1.5), (1.6) における総和演算の値である。

次に図 1.6(a) に示すように、4枚の入力画像 I_1-I_4 (図 1.6(b)) を表示する正八角柱状の3次元構造体についてシミュレーションを行った。ここで、表示画像の投影軸はそれぞれ 45° ずつ離れており、正八角柱の側面から画像が視認できるようになっている。図 1.6(c) に示すように、3枚の画像を記録したときと同様にノイズが生じてしまっているものの、十分に認識できるレベルである。

また図 1.7(a) は、正十二面体の各面に6枚の入力画像 I_1-I_6 (図 1.7(b)) を表示する3次元構造体のシミュレーションを示す。図 1.7(c) のように、記録枚数を増やしても投影画像は入力画像として認識でき、提案する設計アルゴリズムが有用であることを確認した。

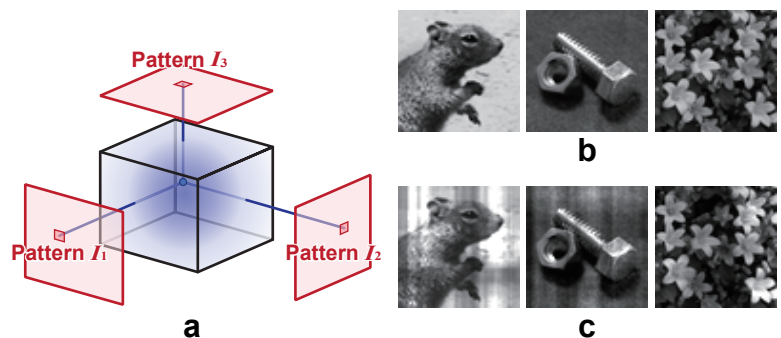


図 1.5: 3枚の2次元画像を表示する立方体状の3次元構造体. (a) 3次元構造体と表示画像の位置関係. (b) 表示させたい入力画像. (c) 表示される投影画像.

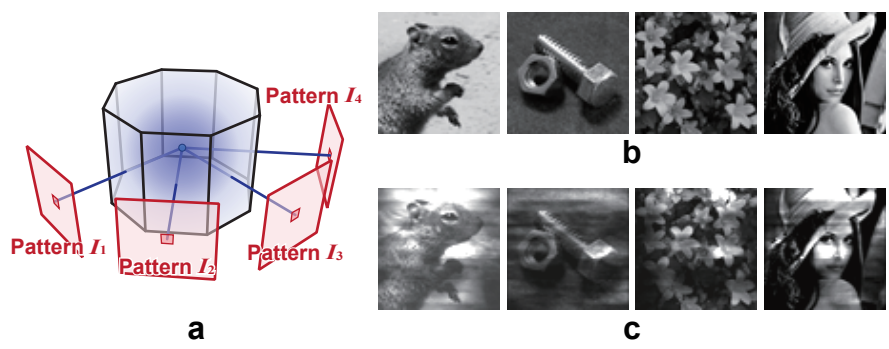


図 1.6: 4枚の2次元画像を表示する正八角柱状の3次元構造体. (a) 3次元構造体と表示画像の位置関係. (b) 表示させたい入力画像. (c) 表示される投影画像.

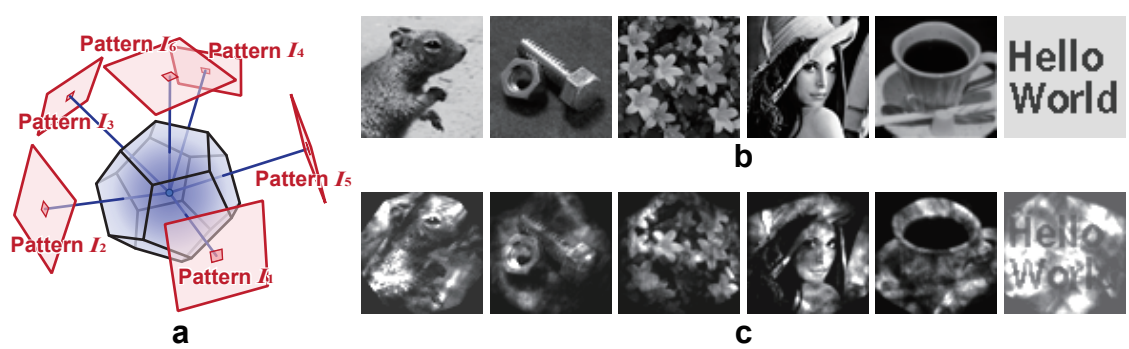


図 1.7: 6枚の2次元画像を表示する正十二面体状の3次元構造体. (a) 3次元構造体と表示画像の位置関係. (b) 表示させたい入力画像. (c) 表示される投影画像.

表示する入力画像の数を3枚, 4枚, 6枚とした場合のシミュレーションを行い, 設計アルゴリズムの有用性を確認した. しかし同時に, 表示画像数を増やすごとに投影画像の画質が劣化してしまうことを確認した. この課題については, 1.4.1節にて詳しく述べる.

1.3.2 乗算および加算に基づくアルゴリズム

1.2節で説明した提案アルゴリズム²³⁾では, 式(1.2)および(1.7)で示したように, 入力画像のピクセル値を乗算することで3次元構造体のボクセル値が求まる. この乗算を行っている部分を加算に変更した場合でも, 同様の3次元構造体を設計できるものと考えられる. そこで本節では, 加算を用いた場合の有用性を検証するために行ったシミュレーションの結果を示す. 加算法におけるボクセル値の決定式を式(1.9)に示す.

$$V(x, y, z) = \sum_{i=1}^N I_i(u_i, v_i). \quad (1.9)$$

図1.8は, 入力画像数が(a)3枚, (b)4枚, (c)6枚の場合について, 乗算法および加算法における投影画像をシミュレーションで比較した結果である. 加算法を用いた場合, 投影画像のコントラストが低下してしまっている. しかしコントラストの低下により, ノイズが抑制され, 目立たなくなっている様子も確認できる. この結果は, 加算法も十分に有用であり, 乗算法に対して有利な点と不利な点を有していることを示している. ボリュームディスプレイとして3Dクリスタルを用いて検証を行う際には, よりコントラストが高いほうが人の目の認識には有利であると考えた. そこで本論文では, これ以降は乗算アルゴリズムに基づき説明を行う.

1.3.3 3Dクリスタルへの実装

本節では, 図1.5に示した3次元構造体のシミュレーション結果を基に, 実際に試作を行った結果を示す. 試作には, 3Dクリスタル加工技術を利用した. 3Dクリスタル加工とは, レーザによって透明なガラス中に小さな傷を作り⁴⁾, 傷の集合によって任意の立体を表現する技術の総称である. レーザによって加工するので, 非常に細かく(本実験では点の大きさが約0.3 μm)精密に加工できるのが特徴である. 3Dクリスタル加工技術を用いることで, 図1.9のように任意の3次元オブジェクトを表現可能である(図の3Dクリスタルは銀河系を表している). 3Dクリスタルで表現できるのは単色の静止画に限定されるが, 現在実用化されている中では, 最も高解像度なボリュームディスプレイの一つである.

試作には60 mm × 60 mm × 60 mmサイズの立方体状のガラスを用いた. ボクセルの数はシミュレーションと同様64 × 64 × 64とし, 各ボクセルのサイズは0.78

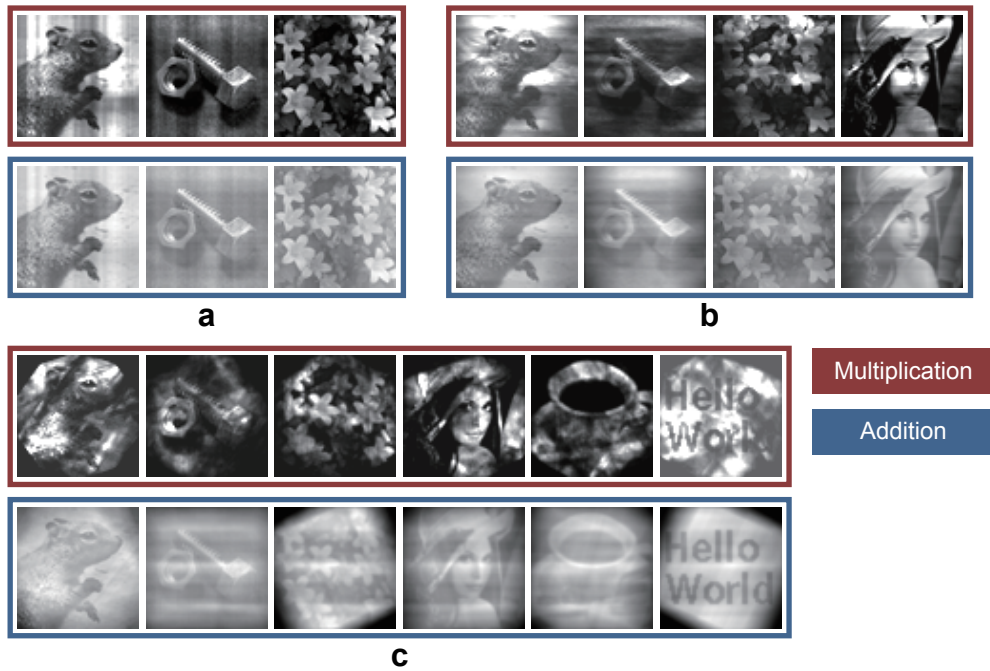


図 1.8: 乗算法と加算法のシミュレーションによる比較. 入力画像数が (a) 3 枚の場合と (b) 4 枚の場合, (c) 6 枚の場合.

mm × 0.78 mm × 0.78 mm に設定した. 1.3.1 節のシミュレーションにおいて計算したボクセル値 $V(x, y, z)$ に比例した数の点を, ボクセル中にランダムに描画することで試作を行った. 総点数は 492,719 点となった. 作製した 3 次元構造体を図 1.10(a) に示す. 俯瞰してみると意味のある情報は得られないが, 図 1.10(c) に示すように, 投影軸方向からは記録元となった入力画像を認識できる. シミュレーションとほぼ同等の投影画像が, 適切な視点方向からのみ得られていることから, 投影画像が高い指向性を有していることが確認できた. この結果から, 実際の 3 次元構造体として作製した場合においてもアルゴリズムが有用であることが実証された.

1.4 取り組む課題

1.2 節において 3 次元構造体設計アルゴリズムについて説明をし, 1.3 節ではそのアルゴリズムの有用性を示した. しかし, 提案手法を用いた 3 次元構造体を用いて, 図 2 に示したような新たな情報伝達システムを実現するためには, 解決すべき課題が残されている. 本節では, 本論文で取り組む三つの課題について述べる.

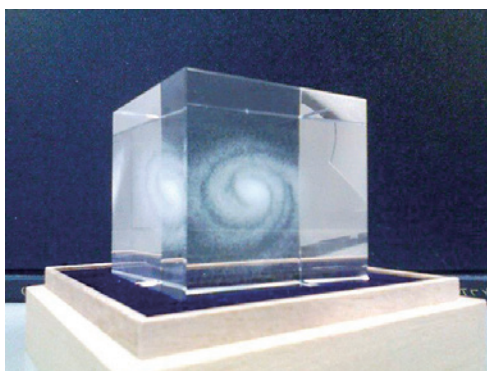


図 1.9: 3D クリスタル加工技術による銀河系アート.

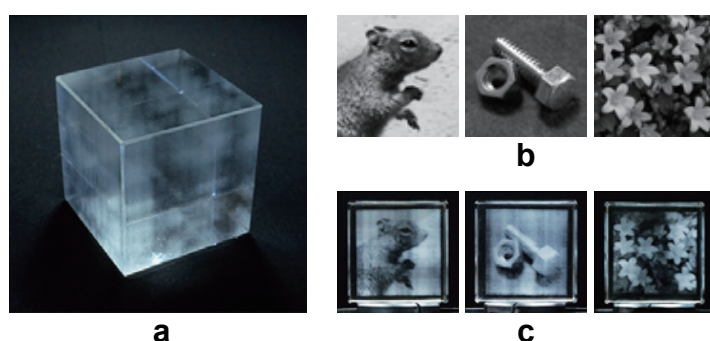


図 1.10: 3枚の2次元画像を直交方向に表示する3Dクリスタル. (a) 作製した3Dクリスタルの俯瞰図. (b) 表示させたい入力画像. (c) 実際に表示される投影画像.

1.4.1 画質劣化に関する課題

1.3節で確認したように、提案アルゴリズムによって設計した3次元構造体から表示される画像の画質は、入力画像の枚数が増えるほど劣化していく。実際に、どの程度画質劣化が生じるのかを定量的に評価するため、Structural similarity (SSIM)³³⁾という評価指標を採用した。SSIMとは、参照画像（劣化前の画像）に対して劣化後の画像がどれだけ誤差を持っているかを示す指標である。局所領域において、2枚の画像の輝度値（画素値）とコントラスト、構造を比較することで評価を行う。ある局所領域におけるSSIMの値 s_i は、簡略化することで以下の式 (1.10) で求められる。

$$s_i = \frac{(2\mu_{ref}\mu_{dest} + C_1)(2\sigma_{xcov} + C_2)}{(\mu_{ref}^2 + \mu_{dest}^2 + C_1)(\sigma_{ref}^2 + \sigma_{dest}^2 + C_2)}. \quad (1.10)$$

ここで μ_{ref} と μ_{dest} は、比較する2枚の画像が持つ画素値の平均を局所領域において算出したものを表す。また、 σ_{ref} と σ_{dest} は局所領域におけるそれぞれの画像の標準偏差を、 σ_{xcov} は相互共分散を表しており、 C_1 および C_2 は定数である。局所領域を1画素ずつ移動させていき、画像全体の領域において s_i ($i = 1, 2, \dots, M$) を算出し

ていく．画像全体の評価指標 S はこれらの値の平均を求めることで，以下のように表される．

$$S = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i. \quad (1.11)$$

SSIM の値は 0 から 1 までを取り，1 に近いほど誤差が少なく高画質な画像である．人が感じる違いをより正確に定量化するために開発された指標であり，提案手法の評価に適している．

図 1.5, 1.6, 1.7 に示したシミュレーション結果について，入力画像を参照画像とし，投影画像の SSIM を計算した．計算した SSIM を表 1.1 に示す．この結果から，画像の枚数を増やすことによって投影画像の画質が劣化していることを定量的に確認した．3次元構造体の設計段階において，ボクセル値 $V(x, y, z)$ を最適化し，投影画像の画質を改善するためのアルゴリズムの開発が不可欠である．そこで本論文の 2 章では，反復計算に基づく画質改善アルゴリズムを提案する．

表 1.1: 表示画像枚数の増加に伴う画質劣化の SSIM による定量的評価．

	画像 I_1	画像 I_2	画像 I_3	画像 I_4	画像 I_5	画像 I_6	平均値
3 枚 (立方体)	0.628	0.735	0.921	-	-	-	0.761
4 枚 (正八角柱)	0.506	0.564	0.637	0.708	-	-	0.604
6 枚 (正十二面体)	0.298	0.469	0.521	0.426	0.468	0.391	0.429

また，表示させる 2次元画像の数を増やしていくと，3次元構造体は円柱や球体などの曲面を有する形状に近づいていく．このとき，ガラス曲面での光の屈折が影響して，表示画像が歪んでしまうという課題が生じる．そこで本論文の 3 章では，屈折の影響を補正するアルゴリズムを提案する．

1.4.2 カラー化に向けた課題

これまでは，入力画像と投影画像がどちらも単色である場合を考えてきたが，本節ではカラー化を行う場合について述べる．通常のディスプレイ技術や印刷技術などにおいてカラー画像を表現する場合は，色を 3 原色に分けて考えるのが一般的である．ディスプレイなどの発光型デバイスではレッド (R)，グリーン (G)，ブルー (B) という 3 色によって表現し，印刷物などの発光しない場合はシアン (C)，マゼンタ (M)，イエロー (Y) の 3 色によってカラーを表現する．

図 1.11 は，提案アルゴリズムを発光型デバイスに実装するときの考え方を示している．まず，入力画像を RGB の各色要素ごとに分離する (図 1.11(a))．次に，各色要素ごとに 1.2 節で説明したアルゴリズムを適用し，3次元構造体の RGB 要素を設計する (図 1.11(b))．設計した 3次元構造体からは，図 1.11(c) に示した 3 枚の投

影画像が表示される．このように，提案アルゴリズムの原理はカラー化する場合に対しても容易に適応可能である．

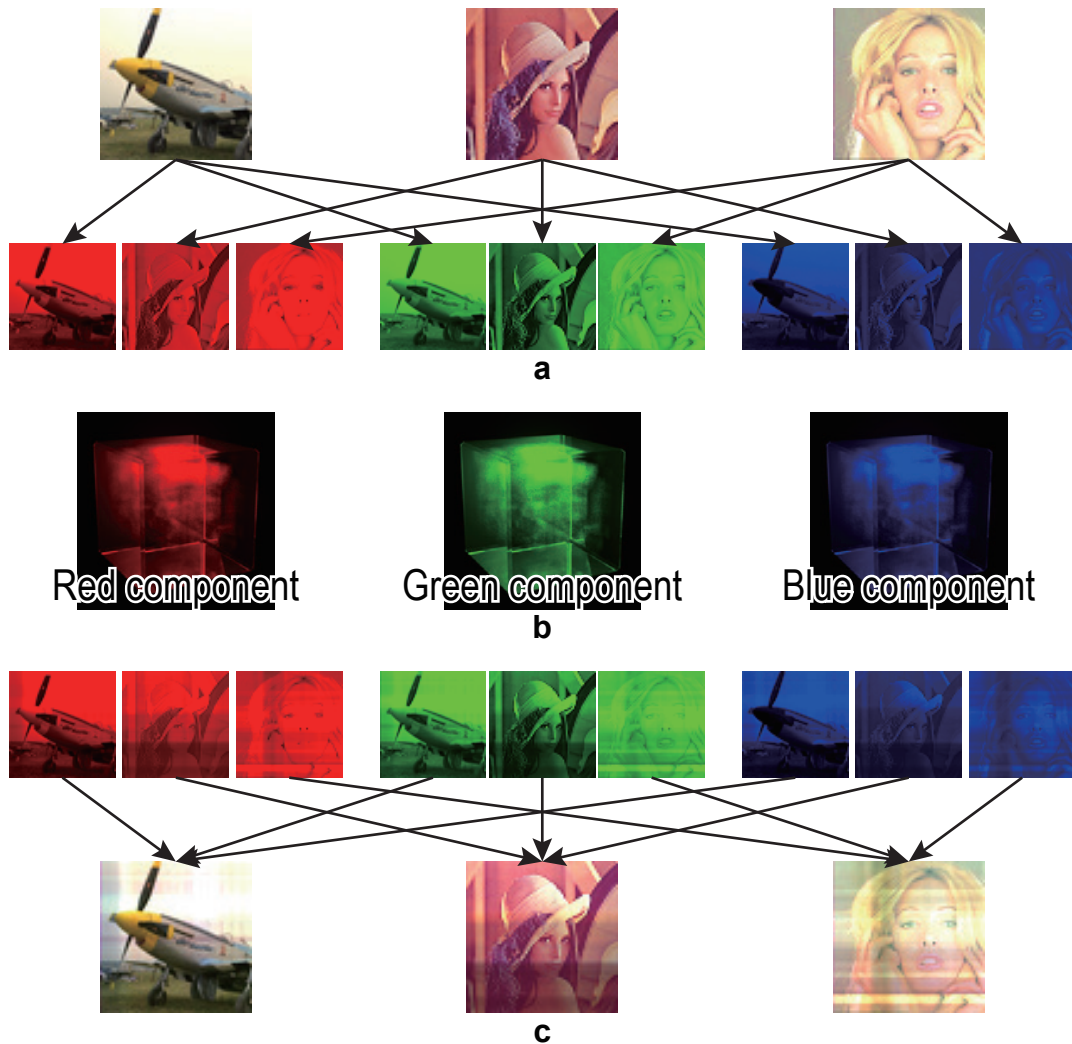


図 1.11: 3 枚のカラー画像を表示する 3 次元構造体. (a) 表示させたいカラー入力画像. (b) 俯瞰図のイメージ. (c) シミュレーションで得られる投影画像.

原理的にカラー化が容易であることを述べたが，実際にはデバイス面での課題が生じる．3D クリスタルで表現できるボクセルの色は単色のみである．そのため，3D クリスタルに代わるカラー表現可能なデバイスに対して，提案手法を実装することが不可欠となる．

そこで本論文では，3D クリスタル以外の既存ボリュームディスプレイ方式に本提案アルゴリズムを実装し，デモンストレーションを行う．4 章では，3 次的に配置した LED によって構成され，ボクセルの色を電子的に制御可能なボリュームディスプレイに提案アルゴリズムを実装した結果を示す．また 5 章では，糸とプロジェク

タによって構成されるボリュームディスプレイ⁹⁾に実装した結果を示す。さらに6章から8章では、光で制御するというコンセプトの新たな光制御ボリュームディスプレイ方式^{29,30)}について説明する。

1.4.3 動画化に向けた課題

3Dクリスタルでは、ガラス中にレーザーで物理的に傷を作り、その集合により3次元像を表現する。そのため、一度描画された3次元像を別の3次元像に切り替えることはできず、動画3次元像の表示は不可能である。本提案手法を情報伝達システムとして応用する場合、表示画像の動画化は必須である。この課題については主に、4章と5章、8章で説明する。

1.5 結言

本章では、本論文の基盤となった、複数の2次元情報を保持する3次元構造体について述べた。

1.2節では、複数の2次元情報を保持する3次元構造体の設計アルゴリズムについて説明した。提案アルゴリズムでは、他の2次元画像との相互的な影響を背景のノイズとみなせる。そのため、従来の制限を大きく緩和することができ、任意枚数の画像を表示する3次元構造体の設計が可能である。

1.3節では、計算機シミュレーションと3Dクリスタル加工技術による試作を行うことで、提案アルゴリズムの有用性を検証した。背景ノイズの影響を受けるものの、どちらの検証においても提案アルゴリズムが有用であることを示した。

1.4節では、提案手法が抱える三つの課題について述べた。一つ目が画質劣化に関する課題で、二つ目がカラー化に向けた課題、三つ目が動画化に向けた課題である。これらの課題に対して、本論文でどのように取り組むかについて簡単に述べた。

第2章 反復計算法に基づく 画質改善アルゴリズム

2.1 緒言

1章では，複数の2次元画像を異なる方向に表示する3次元構造体の設計手法について述べた．提案アルゴリズムを検証した結果，表示される複数枚の画像は，人の目で認識する分には問題ないレベルの画質を有していることが確認できた．しかし同時に，表示画像枚数の増加に伴い画質が劣化していくという課題も明らかになった（1.4.1節）．情報伝達手段として複数人に対して正確な情報を伝えるためには，より高画質化な画像を表示させる必要がある．そのため，アルゴリズムの改良が不可欠である．

そこで本章では，1.4.1節で述べた課題を解決するために開発した反復計算による画質改善手法^{24,25)}について述べる．この画質改善手法は，2.2.1節で説明する逐次近似法という考え方に基づいており，反復計算によって画質を改善していくことができる．まず2.2節で，画質改善手法のアルゴリズムについて詳しく説明する．次に2.3節で，計算機シミュレーションおよび3Dクリスタル加工技術による試作を行うことで，提案アルゴリズムの有用性を検証する．さらに2.4節で，任意枚数を表示する3Dクリスタルを作製する際に生じる課題について述べる．最後に2.5節で，本章をまとめる．

2.2 画質改善手法

前述したとおり，提案する画質改善手法は逐次近似法という考え方に基づいている．本節では，まず逐次近似法の考え方について簡単に述べた後，その考え方を利用した画質改善手法のアルゴリズムについて説明する．

2.2.1 逐次近似法

コンピュータ断層撮影法（Computed Tomography: CT）は図2.1(a)に示すように，3次元物体に対して周囲からX線や放射線などを照射し，その物体からの透過

や反射のデータを取得するイメージング技術である³⁴⁾。取得したデータ（投影データ）から3次元物体の断面画像を再構成可能なため、医療現場における検査技術として広く利用されている技術である。図2.1(b)に示すように、複数枚の投影データを用いて計算機上で逆投影処理を行うことで、未知の3次元物体の断面図を再構成できる。しかし通常の逆投影処理では再構成画像の画質が低く、正確な検査が行えない。そのため、逆投影と順投影の処理を反復計算することで、高画質な再構成画像を得る手法などが用いられている^{35,36)}。実際に取得されたデータと順投影処理によって得られる投影画像との誤差が、最小となるように演算を反復するアルゴリズムで、逐次近似法と呼ばれる。

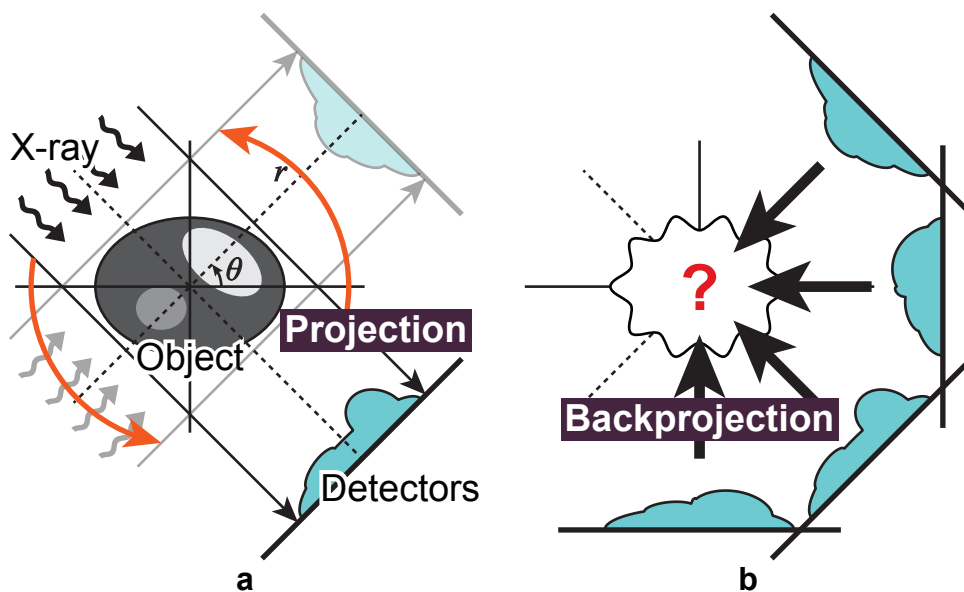


図 2.1: CT の原理図. (a) 物体からの投影. (b) 取得したデータからの逆投影.

一方、本論文で扱うアルゴリズム²³⁾はこれまで説明してきたように、設定した方向に任意の2次元画像を表示する3次元構造体を設計する手法である。CTが3次元物体情報を「取得する技術」であるのに対し、本手法は複数枚の2次元画像情報を「表示する技術」であるため、両技術はまったく異なるものである。しかし、投影画像から元の3次元構造体を構成するという点では共通している。そのため、画質改善を行うために、CT技術と同様に逐次近似法を適用可能であると考えられる。

2.2.2 逐次近似法に基づく画質改善アルゴリズム

提案する画質改善アルゴリズムの概略を、図2.2に示す。処理は大きく3ステップに分かれており、これを反復して行うことで表示画像の画質を改善する。以下にそれぞれについて詳しく説明する。

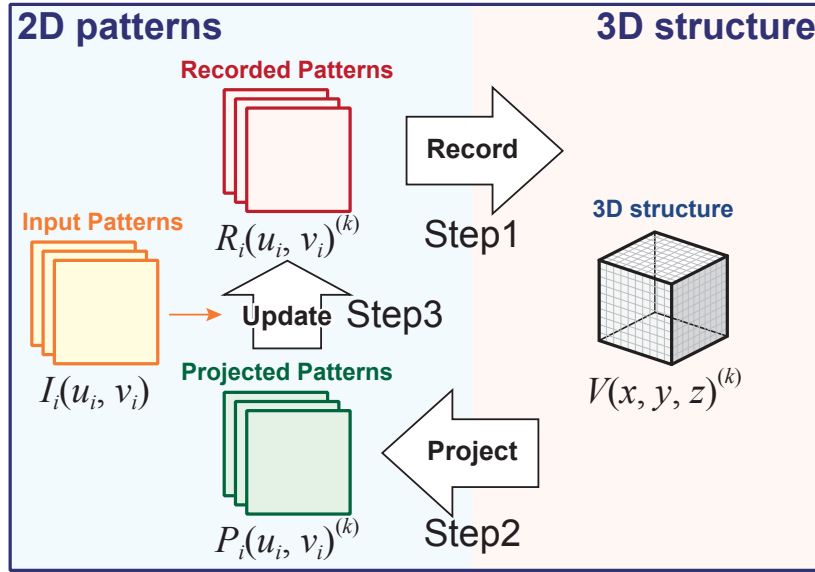


図 2.2: 画質改善アルゴリズムの概略図.

ステップ 1 : 記録

ステップ 1 では, N 枚の 2 次元記録画像 $R_i(u_i, v_i)^{(k)}$ から, 3 次元構造体のボクセル値 $V(x, y, z)^{(k)}$ を決定する処理 (記録) を行う. ここで i は何枚目の 2 次元画像であるかを表しており, $i = 1, 2, \dots, N$ の値を取る. また添え字 (k) は k ループ目の値であることを表している. 記録式は以下のように表される.

$$V(x, y, z)^{(k)} = \prod_{i=1}^N \sqrt[N]{R_i(u_i, v_i)^{(k)}}. \quad (2.1)$$

この式は, 1.2.3 節で述べたオリジナルアルゴリズムの式 (1.7) を基にしている. オリジナル手法との相違は, それぞれの画像の値を掛け合わせるだけでなく, 相乗平均をとっている点にある. 相乗平均をとることによって, $V(x, y, z)^{(k)}$ の変化が緩やかになり, ループしたときに近似値に収束しやすいようにしている. 記録画像の初期値 $R_i(u_i, v_i)^{(0)}$ には, 3 次元構造体に表示させたい理想的な入力画像 $I_i(u_i, v_i)$ を用いる.

ステップ 2 : 投影

ステップ 2 では, ステップ 1 で定義された 3 次元構造体のボクセル $V(x, y, z)^{(k)}$ から, それぞれの軸方向に投影を行う. 投影によって得られる 2 次元画像 $P_i(u_i, v_i)^{(k)}$

は，式 (1.1) を用いて次の式で表される．

$$P_i(u_i, v_i)^{(k)} = \sum_{w_i} V(x, y, z)^{(k)}. \quad (2.2)$$

ここで，投影画像 $P_i(u_i, v_i)^{(k)}$ は，理想的な入力画像 $I_i(u_i, v_i)$ と比較するために正規化される．全ての投影画像におけるピクセルについて $P_i(u_i, v_i)^{(k)} = I_i(u_i, v_i)$ となるのが理想である．

ステップ 3：更新

ステップ 3 では，投影画像と入力画像を比較してその誤差をフィードバックする．フィードバックした値を基に，次のループのステップ 1 における記録画像を更新する．本提案手法では乗除型の逐次近似法を用いているので，フィードバックする値として投影画像と入力画像との比を用いる．すると次のループにおける記録画像 $R_i(u_i, v_i)^{(k+1)}$ は，次の式で表される．

$$R_i(u_i, v_i)^{(k+1)} = R_i(u_i, v_i)^{(k)} \frac{I_i(u_i, v_i)}{P_i(u_i, v_i)^{(k)}}. \quad (2.3)$$

例えば入力画像のピクセル値 $I_i(u_i, v_i)$ に比べて，投影画像のピクセル値 $P_i(u_i, v_i)^{(k)}$ が大きくなってしまっている場合，次ループでの記録画像のピクセル値 $R_i(u_i, v_i)^{(k+1)}$ は抑制される．すると必然的に，投影画像のピクセル値 $P_i(u_i, v_i)^{(k+1)}$ も低くなるように補正され，理想画像に近似していく．

2.3 アルゴリズムの検証

2.2.2 節で説明した画質改善アルゴリズムについて計算機シミュレーションおよび 3D クリスタル加工技術による試作を行った．オリジナルアルゴリズムと比較することで，改善アルゴリズムの有用性を検証した．

2.3.1 シミュレーション結果

本節では，計算機シミュレーションによってオリジナル手法と画質改善手法を比較した結果を示す．シミュレーションの条件は，1.3.1 と同様とし，表示させたい入力画像としては図 2.3(a) に示した画像（左から I_1 – I_6 ）を用いた．入力画像枚数が 3 枚（図 2.3(b), (c)），4 枚（図 2.3(d), (e)），6 枚（図 2.3(f), (g)）のときについてそれぞれ投影画像の比較を行った．画質改善手法における反復回数は，表示画像が 3 枚と 4 枚のときは 10 回，6 枚のときは 5 回に設定した．どの投影画像においても，オ



図 2.3: 投影画像の比較. (a) 表示させたい入力画像 (左から I_1 - I_6). 入力画像が 3 枚の場合の (b) オリジナル手法と (c) 画質改善手法. 4 枚の場合の (d) オリジナル手法と (e) 画質改善手法. 6 枚の場合の (f) オリジナル手法と (g) 画質改善手法.

オリジナル手法で生じているライン状のノイズが、画質改善手法では抑制されていることが確認できる。

画質改善手法の効果を定量的に評価するため、1.4.1節と同様に SSIM の値を計算した。表 2.1 に、それぞれの場合における SSIM の値を示す。入力画像枚数が 6 枚のときの画像 I_6 以外の全ての場合において、画質改善手法が高画質であるという結果が出た。全体的に SSIM の値が向上しており、画質改善手法の有用性が確認できた。

表 2.1: オリジナル手法と画質改善手法の SSIM による定量的評価.

	手法	画像 I_1	画像 I_2	画像 I_3	画像 I_4	画像 I_5	画像 I_6	平均値
3 枚	オリジナル	0.628	0.735	0.921	-	-	-	0.761
	画質改善	0.756	0.836	0.946	-	-	-	0.846
4 枚	オリジナル	0.506	0.564	0.637	0.708	-	-	0.604
	画質改善	0.645	0.744	0.864	0.805	-	-	0.765
6 枚	オリジナル	0.298	0.469	0.521	0.426	0.468	0.391	0.429
	画質改善	0.614	0.558	0.693	0.538	0.590	0.302	0.549

さらに、入力画像に対する投影画像の SSIM が、反復回数に応じてどのように変化するかを調べた。図 2.4 の実線グラフは、入力画像が 4 枚の場合における SSIM の変化を表す。また破線は、オリジナル手法における SSIM を示す。3 回以上反復計算を繰り返すことによって、全ての表示画像において、画質改善手法での表示画像がオリジナル手法よりも誤差が小さくなり、高画質化されることが確認できる。しかし画像 I_4 においては、反復回数が 9 以降になると値が減少していることが分かった。適切な反復回数で、処理を打ち切る必要がある。

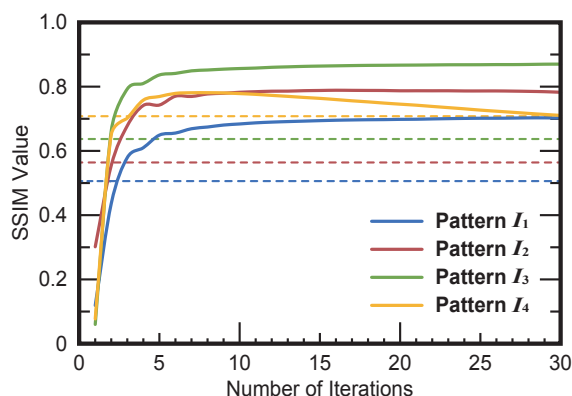


図 2.4: 反復回数に対する構造的類似性 (SSIM) の変化.

2.3.2 3D クリスタルへの実装結果

本節では，2.3.1 節で示したシミュレーション結果を基に，3D クリスタルを作製した結果について述べる．

まずは入力画像が3枚の場合について，オリジナル手法で作製したものと画質改善手法で作製したものを比較する．画質改善手法で設計した3次元構造体を，1.3.3 節と同様の条件で試作したところ，総点数は486,565点となった．図2.5(a)にオリジナル手法で作製した試作を，図2.5(b)に画質改善手法で作製したものを示す．シミュレーションと同様にライン状のノイズが抑制されており，3D クリスタルにおいても画質改善手法の効果を確認できた．

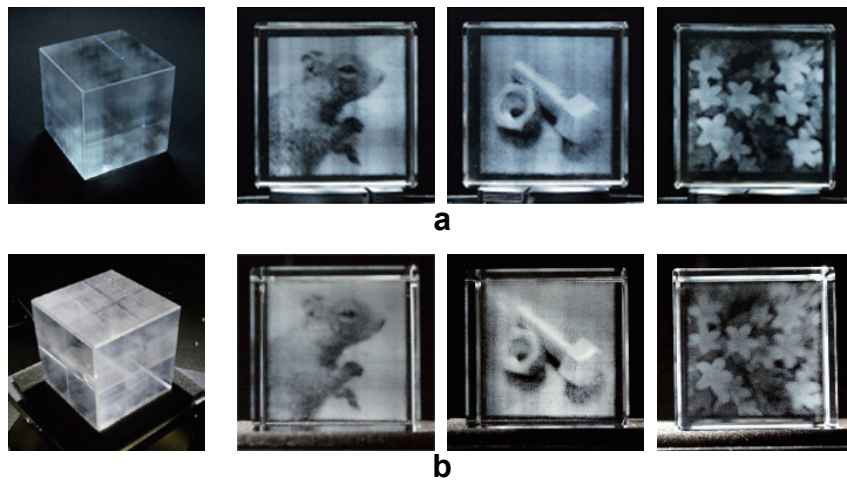


図 2.5: 試作した3D クリスタルにおける投影画像の比較．入力画像が3枚の場合の (a) オリジナル手法と (b) 画質改善手法．

さらに，4枚の2次元画像を表示する3次元構造体（図2.3(d)）を画質改善手法を用いて設計し，正八角柱，立方体，球体という3種類の形状を持つ3D クリスタルに実装した．485,000点からなる3次元構造体から，4枚の画像 I_1-I_4 が 45° ずつ離れた方向に表示されるように設定した．

図2.6(a)は4枚の画像を表示する正八角柱状の3D クリスタルである．底面が一辺41 mmの正八角形で，高さが80 mmの正八角柱状の3D クリスタル内に，3次元構造体が描画されている．図2.6(a)に示すように，4枚の画像の表示方向が，角柱の側面と垂直な方向になるように設定した．側面と垂直な方向から3D クリスタルを観察すると，図2.6(b)に示すように，入力画像を認識できる．平行な面同士には互いに左右反転された画像が表示されており，各側面に対して1枚の画像を表示することが確認できた．しかし画像の両端が表示されていない．これは表示画像の横幅が側面よりも大きいため，ガラス表面での屈折の影響を受けてしまうからである．

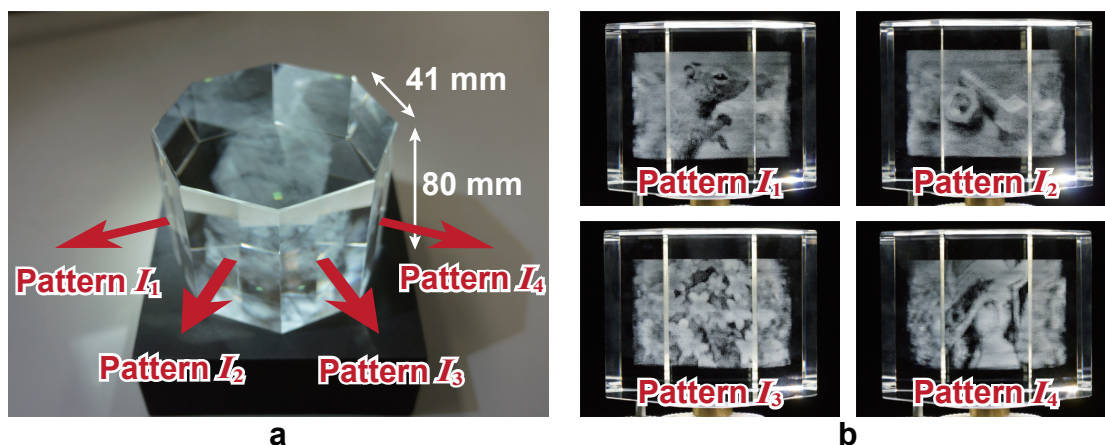


図 2.6: 4 枚の画像を表示する正八角柱状の 3D クリスタル. (a) 作製した 3D クリスタルの俯瞰図. (b) 実際に表示される投影画像.

次に、3D クリスタルの各面と垂直な方向以外へも画像を表示可能であることを示すため、立方体状の 3D クリスタルを作製した. 図 2.7(a) は、4 枚の画像を表示する立方体状（一辺 80 mm）の 3D クリスタルである. 立方体の 1 面につき 2 枚の画像が表示されるように設計した. 図 2.7(b) に示したとおり、4 枚の画像を認識できる. しかし屈折の影響により、設定した投影軸と実際の表示方向が一致せず、画像の一部が表示されていない様子が確認できた.

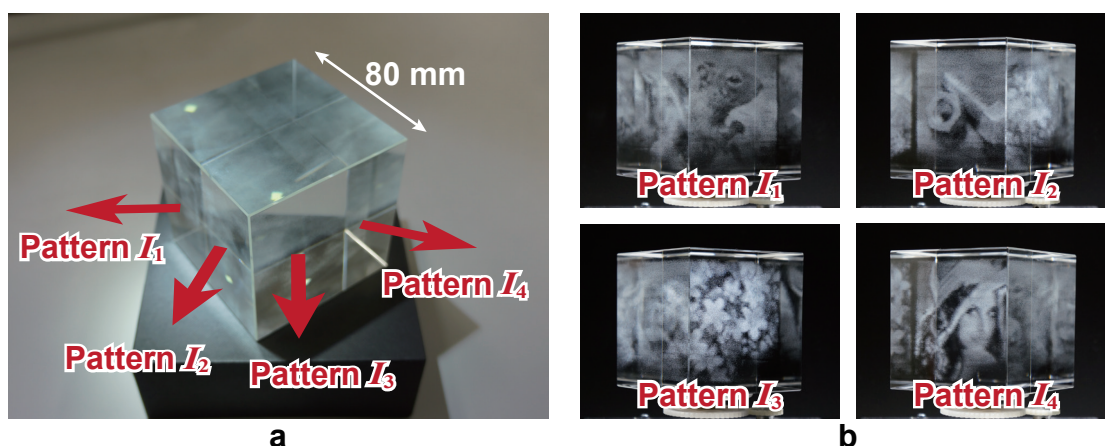


図 2.7: 4 枚の画像を表示する立方体状の 3D クリスタル. (a) 作製した 3D クリスタルの俯瞰図. (b) 実際に表示される投影画像.

任意枚数の 2 次元画像を、任意方向に表示する 3 次元構造体を作製することを考えた場合、3D クリスタルの形状は球体が理想となる. そこで図 2.8(a) に示すよう

に、4枚の画像を表示する球体状の3Dクリスタルを作製した。直径100 mmの球体状ガラスの底面をカットし、カットした平面からレーザー加工を行い3次元構造体を描画した。図2.8(b)に示すように、4枚の画像を認識することができる。しかし屈折の影響で投影画像は拡大されており、さらに画質劣化の様子が確認された。

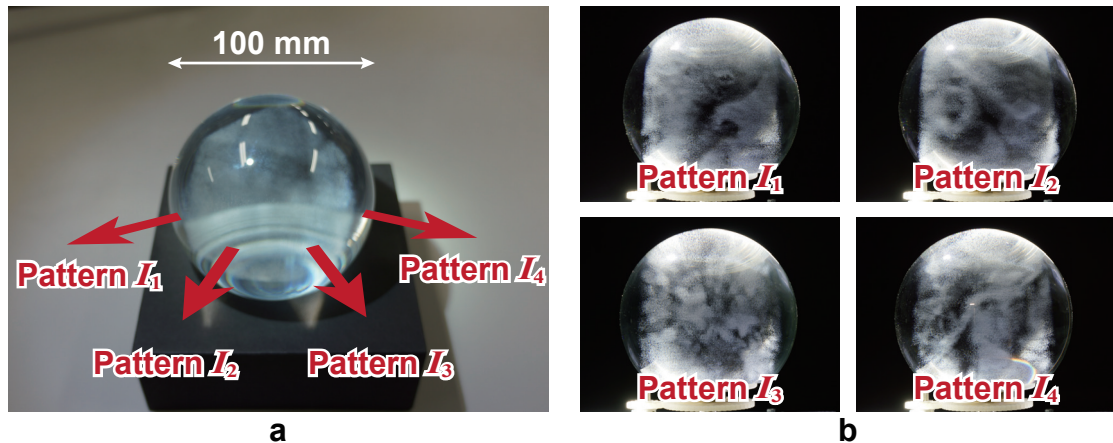


図 2.8: 4枚の画像を表示する球体状の3Dクリスタル。(a) 作製した3Dクリスタルの俯瞰図。(b) 実際に表示される投影画像。

2.4 任意枚数表示に向けた課題

任意枚数の2次元画像を表示する3次元構造体を考慮した場合、円柱状や球体状のガラスへの実装を行う必要がある。2.3.2節の試作では球体状の3Dクリスタルの試作に成功したが、屈折の影響を受けて投影画像が歪んでしまうことも確認した。3次元構造体を設計する際に、表示軸がガラス表面での屈折によって曲がることも考慮して、アルゴリズムを構築しなおす必要がある。この課題の解決手法については3章で述べる。

2.5 結言

本章では、設計した3次元構造体から表示される投影画像の画質を、改善する手法について述べた。

2.2節では、提案する画質改善手法の原理について詳しく説明した。この提案手法では逐次近似法の考え方を取り入れており、反復計算を繰り返すことで、表示される投影画像の画質を改善できる。

2.3節では、計算機シミュレーションおよび3Dクリスタル加工技術による試作を行い、提案アルゴリズムを検証した結果を示した。どちらの検証においても、画質改善アルゴリズムの有用性を示すことに成功した。

2.4節では、球体状や円柱状などの曲面を有する3Dクリスタルに、提案手法を実装する際の課題点について述べた。投影画像が屈折の影響で歪んでしまうため、それを補正する手法の開発が必要となる。

第3章 ガラス曲面での 屈折補正アルゴリズムと応用

3.1 緒言

2章では、設計した3次元構造体から表示される投影画像の画質改善手法について述べた。また正八角柱、立方体、球体といった3種類の3Dクリスタルに対して、4枚の2次元画像を表示する3次元構造体を描画できることを確認し、画質改善手法の有用性を示した。しかし同時に、球体や円柱などの曲面を有する3Dクリスタルの場合に、投影画像が屈折の影響で歪んでしまう課題についても述べた。3次元構造体から表示させる投影画像の枚数を増やすためには、曲面を有する3Dクリスタルを用いることが必要になるため、解決すべき課題の一つであった。

そこで本章では、曲面を有する3Dクリスタル（特に球体や円柱）に3次元構造体を描画する際に問題となる屈折の影響を、補正するためのアルゴリズム²⁶⁾を提案する。まず3.2節で、提案する屈折補正アルゴリズムについて説明する。次に3.3節で、CGシミュレーションおよび3Dクリスタル加工技術による試作を行った結果を示し、屈折補正アルゴリズムの有用性を検証する。さらに3.4節で、屈折の影響を逆に利用することにより、これまでに生じていた投影軸方向に関する制限を取り除くことができることを示す。最後に3.5節で、本章をまとめる。

3.2 屈折補正手法

光波の伝播速度は、媒質ごとに異なる。光が異なる媒質中に入射したとき、伝播速度の変化によって媒質の境界で光の進行方向が曲がる現象が、光の屈折である。3Dクリスタルは1.3.3節でも述べたように、ガラス中にレーザで誘起した小さな傷によって3次元像を描く。小さな傷からの散乱光を見ていることになるので、ガラス面と垂直な方向以外から観察した場合には、光の屈折によって本来の位置とは異なる位置から散乱しているように見える。そのため、結果として投影画像が歪んでしまう。本節では、この光の屈折現象を考慮に入れた補正アルゴリズムについて説明する。

3.2.1 球体状や円柱状のガラスにおける屈折の影響

複数の2次元情報を保持する3次元構造体設計アルゴリズムでは、投影画像はボクセル値を足し合わせることで求められると説明してきた(1章および2章)。図3.1(a)に示すように、ガラス平面に画像を表示させる場合には屈折は生じない。そのため、これまで述べてきたオリジナル手法や画質改善手法では、以下に表す投影式における投影軸 w はすべてのピクセルにおいて平行であると仮定し、アルゴリズムが構築されていた。

$$P(u, v) = \sum_w V(x, y, z). \quad (3.1)$$

しかし図3.1(b)に示すように、ガラス曲面に画像を表示させる場合には屈折が生じる。そのため、投影軸 w が曲がることを考慮に入れてアルゴリズムを構築する必要がある。投影軸がどの程度曲がるかは、スネルの法則によって求められることがよく知られている。空気の屈折率を1、ガラスの屈折率を n とした場合、ガラス中から空気中への入射角 θ_{in} および屈折角 θ_{ref} は、以下の式を満たす。

$$\sin \theta_{ref} = n \sin \theta_{in}. \quad (3.2)$$

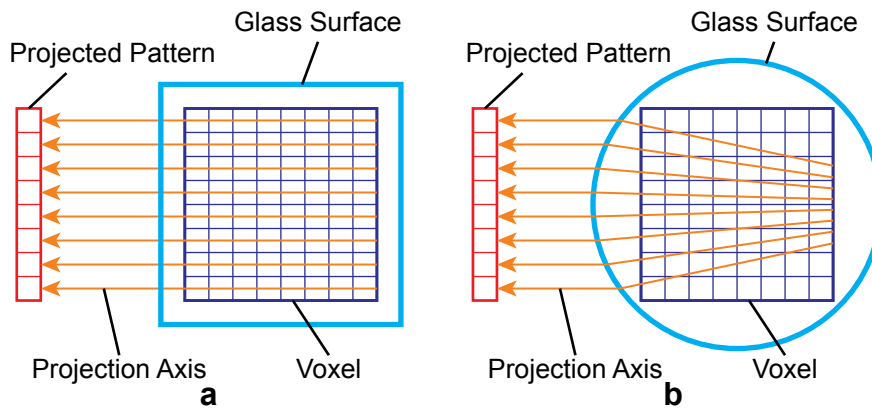


図 3.1: 3D クリスタルから投影される2次元画像。(a) 平面に投影する場合。(b) 曲面に投影する場合。

3.2.2 屈折補正アルゴリズム

図3.2(a)に示すように、4枚の2次元画像 I_1-I_4 を 45° ずつ離れた方向に表示する円柱状の3Dクリスタルを設計する場合を考える。

まずは図3.2(b)のように、屈折を考慮しないオリジナル手法の場合を考える。ボクセルの場所 (x, y, z) からそれぞれの画像へと単に垂線を降ろしたときの交点を

$(u_1, v_1), (u_2, v_2), (u_3, v_3), (u_4, v_4)$ とする. 式 (1.7) と同様に, 交点におけるそれぞれの画像のピクセル値を掛け合わせることで, ボクセル値 $V(x, y, z)$ は以下のように求められる.

$$V(x, y, z) = \prod_{i=1}^N I_i(u_i, v_i). \quad (3.3)$$

しかしこの場合, 前述のとおり屈折の影響を受けて投影像が歪んでしまう.

屈折によって投影軸が曲がることを考慮した場合, 図 3.2(c) に示すように, ボクセルが投影される位置はそれぞれ $(u'_1, v'_1), (u'_2, v'_2), (u'_3, v'_3), (u'_4, v'_4)$ にずれる. この場合, ボクセル値 $V(x, y, z)$ は以下のように求められる.

$$V(x, y, z) = \prod_{i=1}^N I_i(u'_i, v'_i). \quad (3.4)$$

式 (3.4) に示したように, ボクセルの値を決定する際に屈折の影響を考慮することで, 作製された 3次元構造体から画像が投影される際に屈折の影響を補正できる. ここまでは円柱状の 3D クリスタルの場合を説明してきたので, 1 軸 (水平) 方向に生じる屈折の影響のみを考慮していた. 球状の 3D クリスタルの場合は, 2 軸 (水平・垂直) 方向に生じる屈折を考慮すればよく, 上述と同様の手法で屈折の影響を補正できる.

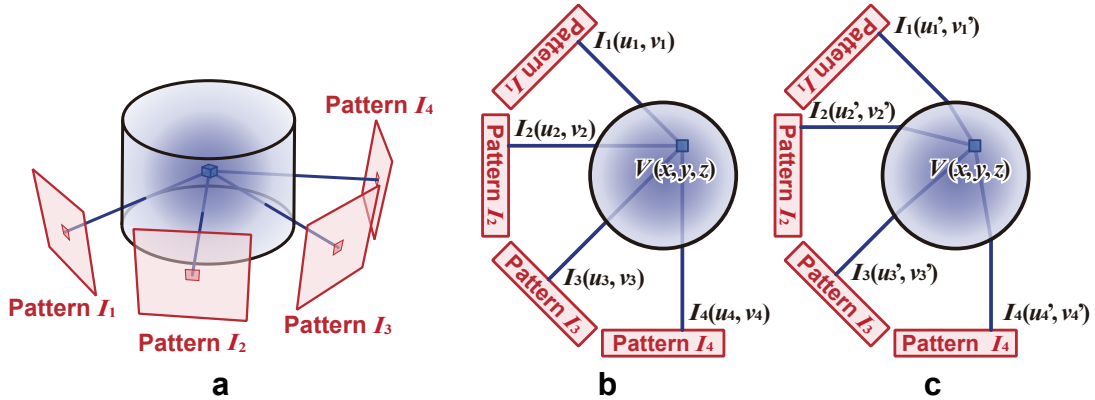


図 3.2: 3次元構造体設計アルゴリズム. (a) オリジナル手法 (屈折を考慮しない). (b) 屈折補正手法.

3.2.3 画質改善アルゴリズムとの併用

3.2.2 節では, 1 章で説明したオリジナル手法に, 屈折補正を加えたアルゴリズムを説明した. 2 章で説明した画質改善手法も, 基本的にはオリジナル手法に基づいているため, 同様に屈折の影響を補正可能である. この手法では図 2.2 で示したと

おり，記録・投影・更新の3ステップを計算機上で反復計算することによって画質を改善していく．この記録と投影のステップにおいて，屈折の影響を考慮することで屈折補正を行うことが可能である．

3.3 アルゴリズムの検証

本節では，3.2.2節で説明したアルゴリズムについて，CGによるシミュレーションおよび3Dクリスタルでの試作によって有用性を検証した結果を示す．

3.3.1 CGシミュレーションの結果

ガラス曲面における光の屈折の影響を検証するために，Autodesk社が販売するCGソフト‘MAYA’を用いた．シミュレーションの手順を説明する．まず各種アルゴリズムを用いて，計算機上で3Dクリスタルを作製する際の点群座標データを生成する．3Dクリスタルに表示させる2次元画像としては，図3.3に示した64×64ピクセルのグレースケール画像を用いた．生成した点群座標データをMAYA用のパーティクルファイルに変換すると，MAYA上でパーティクルの色や大きさなどを自由に調整できる．次に，円柱状もしくは球体状のガラス（屈折率を持つ透明なオブジェクト）を，上記パーティクルを含むような形で配置する（図3.4）．本実験は屈折率を1.51に設定して行った．視点（カメラ）とライトの位置を定めてレンダリングを実行すると，ガラス曲面における光の屈折を考慮した投影画像が得られる．ここで，物理的に正確な光シミュレーションを行うため，レンダリングソフトウェアにはNVIDIA社のmental rayを用いている．

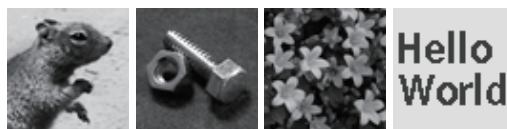


図 3.3: 3Dクリスタルに表示させる2次元画像．

まずは円柱状の3Dクリスタルの場合について，オリジナル手法と屈折補正手法をCGシミュレーションによって比較した結果を示す．図3.5(a)が示すように，4枚の2次元画像を45°ずつ離れた方向へ表示するように設計した．4枚の投影画像の投影軸は全て，円柱の側面と垂直な方向とした．単位ボクセル中に打つ点の数を最大20に設定して正規化したところ，オリジナル手法の総点数は119,899点，屈折補正手法では51,529点となった．同じサイズの画像を投影する場合でも，屈折補正手法の場合は限られた領域に点が打たれるため，総点数が減少している．

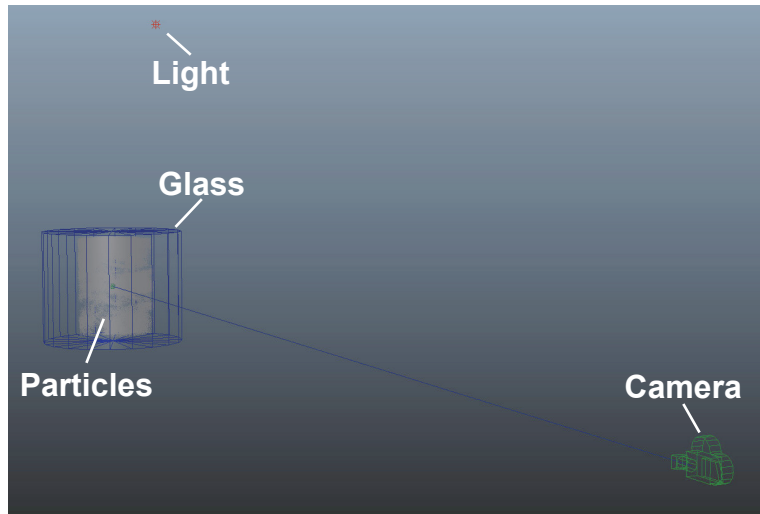


図 3.4: CG ソフトウェアの画面.

図 3.5(b) にオリジナル手法のシミュレーション結果を示す. 屈折の影響で水平方向に投影画像が拡張されてしまっているだけでなく, 像が歪んでしまっていることが確認できる. 一方, 図 3.5(c) が示す屈折補正手法の結果を見ると, 投影画像が水平方向に拡張されておらず, 像の歪みもない. これらの結果から, ガラス曲面における屈折の影響を補正できていることが確認できた. 円柱状の 3D クリスタルにおいて, 屈折補正手法の有用性を示した.

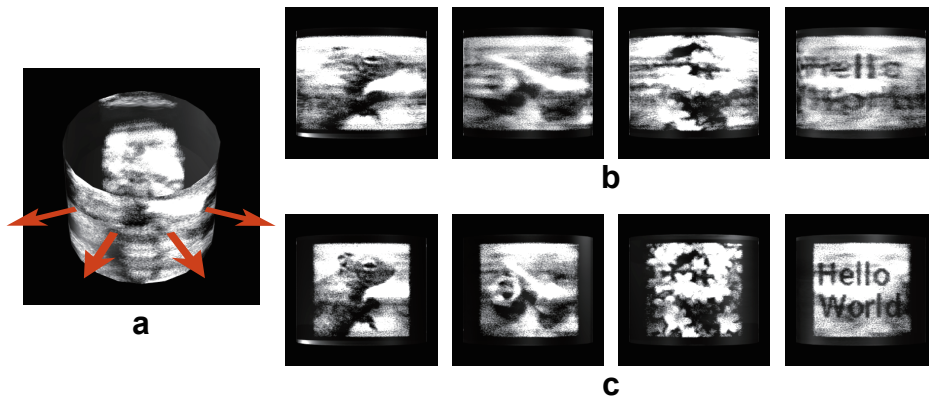


図 3.5: 円柱状 3D クリスタルにおける CG シミュレーション. (a) レンダリングした 3D クリスタルの俯瞰図. (b) オリジナルアルゴリズムおよび (c) 屈折補正アルゴリズムの投影画像.

次に, 図 3.6(a) に示すような球体状の 3D クリスタルの場合についても, 円柱と同様の条件で比較を行った. 総点数はオリジナル手法で 119,899 点, 屈折補正手法では 36,034 点である. 図 3.6(b) が示すように, オリジナル手法の投影画像は垂直・水平方向に屈折の影響を受けて拡張されてしまっている. さらに, 投影画像が大きく

歪んでしまっていることも確認できる．一方，図 3.6(c) が示す屈折補正手法の投影画像では，屈折の影響が見られず高画質な画像が投影されている．球体状の 3D クリスタルにおいても，屈折補正アルゴリズムの有用性を確認することができた．

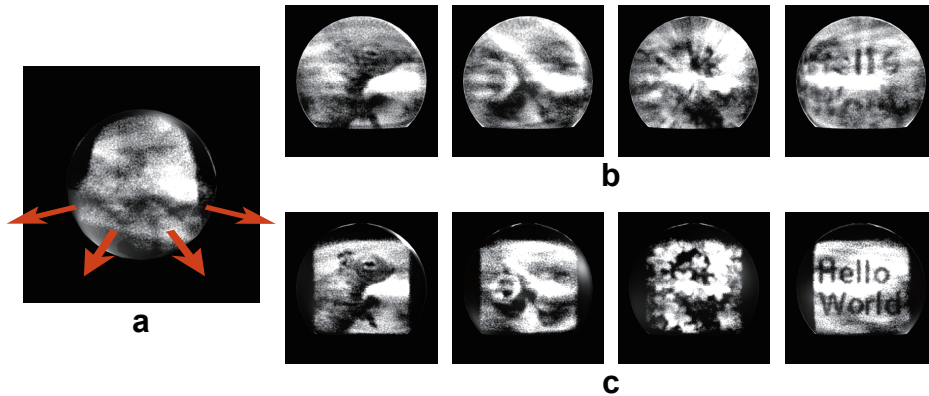


図 3.6: 球体状 3D クリスタルにおける CG シミュレーション．(a) レンダリングした 3D クリスタルの俯瞰図．(b) オリジナルアルゴリズムおよび (c) 屈折補正アルゴリズムの投影画像．

本実験では屈折補正手法の有用性を示すため，円柱と球体という 2 種類の形状を持つ 3D クリスタルを CG で作成し，シミュレーションを行った．これら以外の形状でも，屈折を考慮して投影軸を適切にモデル化することで，あらゆる形状の 3D クリスタルの屈折補正が可能である．

3.3.2 3D クリスタルへの実装結果

本節では，3.3.1 節でのシミュレーション時に作成した物体点データを用いて，実際の 3D クリスタルを作製した結果について述べる．円柱状および球体状の 2 種類の 3D クリスタルを試作した．

図 3.7(a) に，試作した円柱状 3D クリスタルを示す．この 3D クリスタルは，高さが 80 mm で直径 50 mm の円を底面に持ち， 45° ずつ離れた方向に合計 4 枚の 2 次元画像を表示する．クリスタル中に打つ点の数は，シミュレーションと同様 51,529 とした．図 3.7(b) に各投影軸方向から撮影した様子を示す．シミュレーション結果と同様に，屈折の影響を補正できていることが確認できた．

次に，試作した球体状の 3D クリスタルを図 3.8(a) に示す．直径 100 mm の球体状ガラスの底面をカットし，その面からレーザで 3 次元構造体を描画している．クリスタル中に打つ点の数は，シミュレーションと同様 36,034 とした．図 3.8(b) に各投影軸方向から撮影した様子を示す．円柱状クリスタルの試作と同様に，球体の場合でも屈折の影響を補正できることを確認した．しかし球体の場合にはガラス表面での光反射の影響により，投影画像の確認が困難であることも分かった．

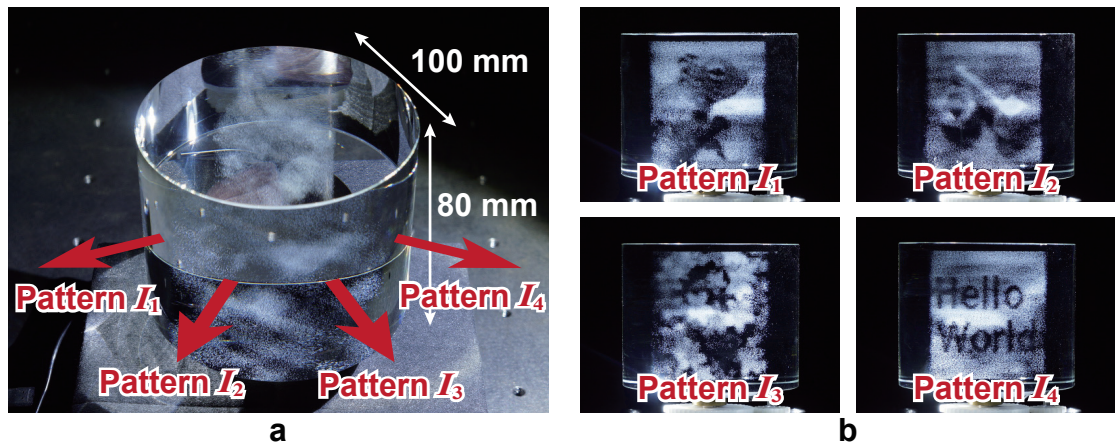


図 3.7: 4 枚の 2 次元画像を表示する円柱状 3D クリスタル. (a) 作製した 3D クリスタルの俯瞰図. (b) 実際に表示される投影画像.

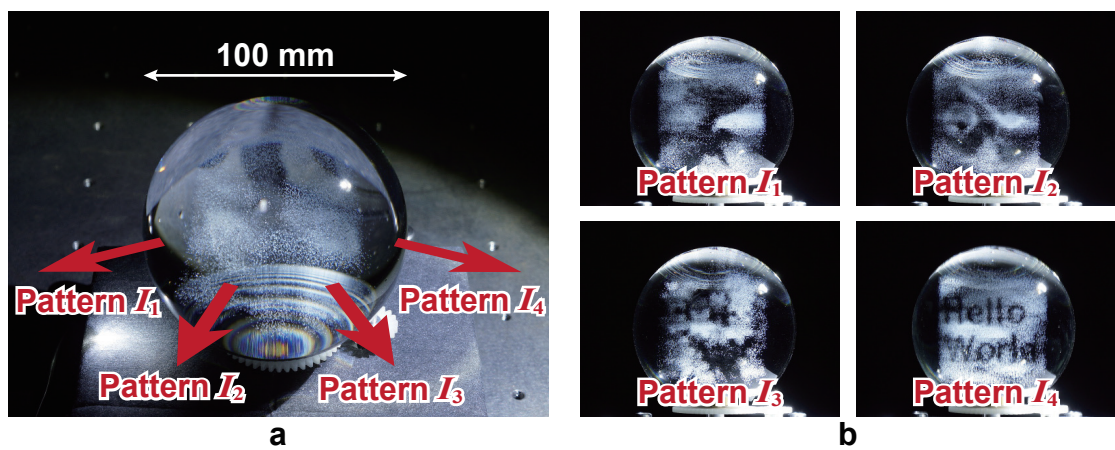


図 3.8: 4 枚の 2 次元画像を表示する球体状 3D クリスタル. (a) 作製した 3D クリスタルの俯瞰図. (b) 実際に表示される投影画像.

円柱状および球体状，どちらの形状のガラスを用いた場合でも，屈折補正アルゴリズムが有用であることが確認できた。

3.4 屈折補正アルゴリズムの応用

曲面を持たない3Dクリスタル（立方体や正八角柱）の場合，図3.9に示すように，平行平面同士には左右が反転した同じ2次元画像が投影される．そのため，立方体（正六面体）では最大3枚，正八角柱の側面には4枚の画像までしか表示させることができない．これは，平行平面同士でまったく同じ投影軸を持つことに起因している．

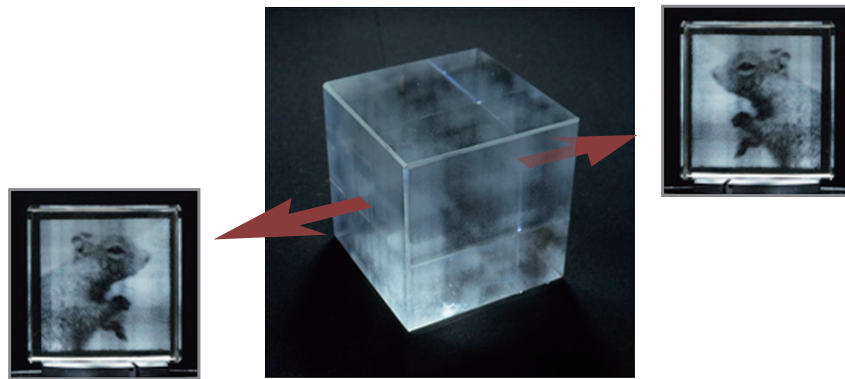


図 3.9: 3D クリスタルにおいて平行な2面に投影される2次元画像．

一方，曲面を有する3Dクリスタル（円柱や球体）の場合，図3.1(b)から分かるように，投影軸が屈折の影響で曲がる．すると，互いに 180° 反対方向の場合でも投影軸が異なる．そのため，まったく異なる2次元画像を表示させることが可能である．つまり平面の場合と比べて，2倍の数の投影軸を設定可能ということである．この特性を利用することで，より柔軟に投影軸を設定可能となり，応用の幅が広がるものと考えている．

3.4.1 3Dクリスタル実装による検証

3.4節で説明したように，互いに 180° 反対方向の投影軸へも画像表示可能なことを示すため，3Dクリスタルの試作を行った．表示させる元画像として，図3.10(a)に示した4枚の2次元画像を用いた．全て画素数 64×64 の256階調画像である．図3.10(b)に示すように，4枚の画像 I_1 – I_4 を側面に表示する円柱状の3Dクリスタルを作成した．4本の投影軸は，それぞれ 90° ずつ離れるように設定した．このとき，高画質な投影画像を表示させるために，2章で説明した画質改善アルゴリズムを用い

た。前述の実験と同様，ボクセル中に打つ点の数を最大 20 に設定して正規化したところ，総点数は 90,961 点となった。図 3.10(c) に 4 枚の投影画像を示す。立方体や正八角柱では実現不可能であった，互いに 180° 反対方向の投影軸にそれぞれ異なる画像が表示可能であることを確認した。

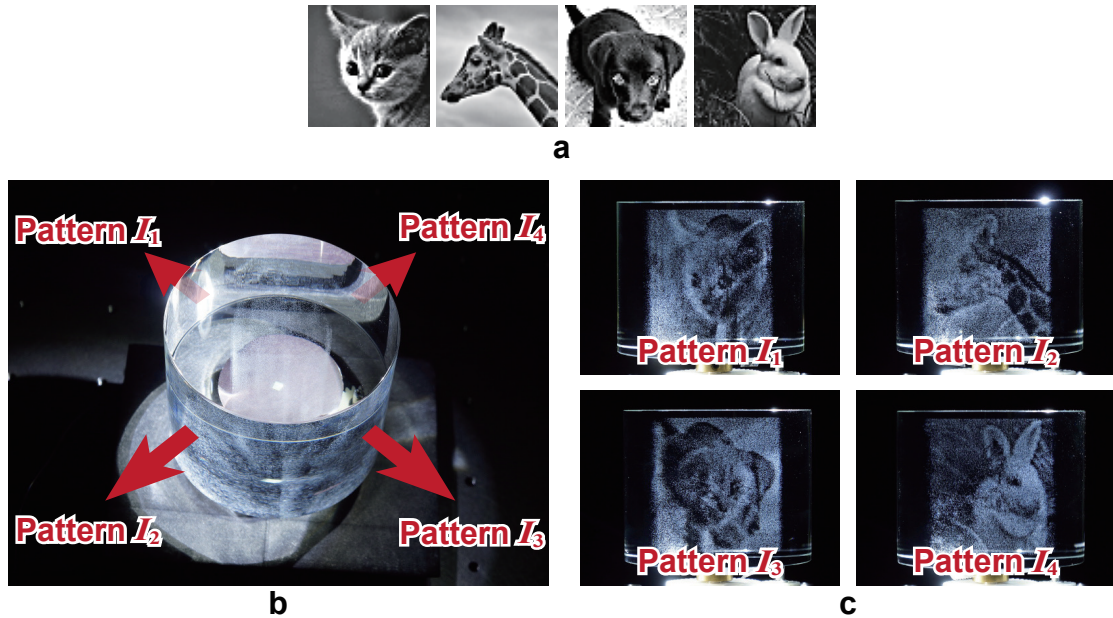


図 3.10: 反対方向も含めて 4 枚の画像を表示する円柱状 3D クリスタル．(a) 表示される 4 枚の入力画像．(b) 作製した 3D クリスタルの俯瞰図．(c) 実際に表示される投影画像．

さらに，図 3.11(a) に示した 8 枚の 2 次元画像を表示する円柱状 3D クリスタルを作製した．このとき，投影軸は図 3.11(b) に示すように 45° ずつ離れている．4 枚のときと同様に画質改善アルゴリズムを用いて 3 次元構造体を設計したところ，総点数は 116,829 点であった．図 3.11(c) に 8 枚の投影画像を示す．これまでで最大の 8 枚の画像を表示する 3D クリスタルの作製に成功した．

3.5 結言

本章では，提案アルゴリズムで設計した 3 次元構造体を，円柱状および球体状の 3D クリスタルに実装するための手法を提案した．この手法により，ガラス曲面における光の屈折による影響を補正できる．

3.2 節では，提案する屈折補正アルゴリズムについて説明した．ボクセル設計時に事前に屈折の影響を考慮しておくことで，投影画像における屈折の影響が補正され，高画質な画像が得られる．

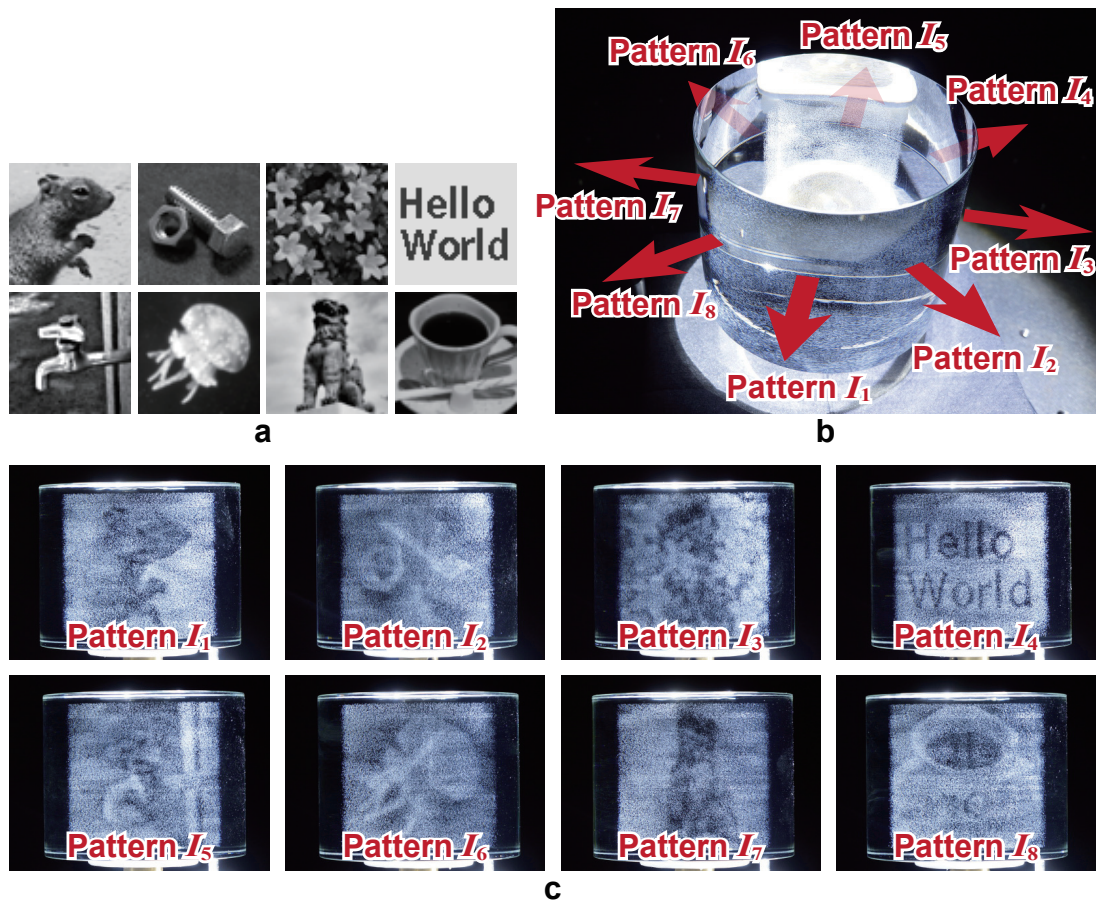


図 3.11: 反対方向も含めて 8 枚の画像を表示する円柱状 3D クリスタル. (a) 表示される 8 枚の入力画像. (b) 作製した 3D クリスタルの俯瞰図. (c) 実際に表示される投影画像.

3.3節では、CGシミュレーションおよび3Dクリスタル加工技術による試作を行った結果を示し、屈折補正アルゴリズムの有用性を検証した。どちらの検証でも屈折補正アルゴリズムの有用性を示すことに成功した。

3.4節では、屈折の影響を逆に利用することで、投影軸方向に関する制限を取り除くことができることを示した。多面体状の3Dクリスタルでは不可能であった、180°反対方向にも異なる画像を表示することができることを確認した。

第4章 電子制御 ボリュームディスプレイ

4.1 緒言

1章から3章までは，提案手法で設計した3次元構造を描画するボリュームディスプレイとして，3Dクリスタルを用いてきた．現状では，3Dクリスタルは最も高解像度な3次元像を表示可能なボリュームディスプレイの一つであり，提案手法の検証に用いるには適している．しかし1.4.2節および1.4.3節で説明したように，3Dクリスタルで表現できるのは単色の静止画のみである．将来的に，提案する3次元構造体を情報伝達システムとして応用することを考えた場合，表示画像のカラー化・動画化は不可欠である．

そこで本章では，フルカラー発光ダイオード（Light Emitting Diode: LED）を3次元アレイ状に並べ，その点灯を電子的に制御することで任意の3次元像を表示可能なボリュームディスプレイの試作結果を示す．電子的に制御可能なため，フルカラー動画像の表示が実現できる²⁷⁾．まず4.2節で，作製したLED型ボリュームディスプレイの構造や制御方法について説明する．次に4.3節で，LED型ボリュームディスプレイに複数のマルチカラー2次元画像を表示させた結果を示す．次に4.4節で，フルカラー表示に向けて開発したLEDアレイ専用制御回路についての説明と，複数のフルカラー動画像表示のデモンストレーションを行う．さらに4.5節で，LED型ボリュームディスプレイの利点と課題を述べる．最後に4.6節で，本章をまとめる．

4.2 LED型ボリュームディスプレイ

LEDを3次元アレイ状に配置したボリュームディスプレイは，3D LED Cubeという名前でも知られており，商品として既にいくつか販売されている．また，LEDの扱いやすさから，比較的小規模かつ単色のものであれば自作も可能である．

本節では，今回作製したLED型ボリュームディスプレイの構造と制御方法について述べる．図4.1に示すように，LED型ボリュームディスプレイは表示ユニットと制御ユニットで構成される．表示ユニットとしては， $8 \times 8 \times 8$ 個のフルカラーLEDからなる3次元LEDアレイを用いており，制御ユニットにはマイクロコンピュータ

を用いた。以下、それぞれのユニットに関して詳しく説明する。

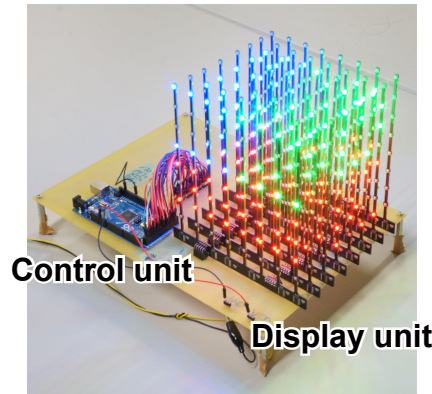


図 4.1: LED 型ボリュームディスプレイ。

4.2.1 表示ユニット

表示ユニットとして用いられる LED アレイは、図 4.2(a) に示すように、 8×8 個のフルカラー LED が搭載された 8 枚の LED 基板で構成される。これらの基板は LEDGEND Technology 社製の ‘3D LED Cube MB8X’ という製品を分解することで得られる。図 4.2(b) が示すように、各基板には 12 個の LED 制御用ドライバ ‘SCT2024’³⁷⁾ が縦列接続されている。12 個のドライバはシフトレジスタのような構造になっており、シリアル入力に対して 16 個の平行出力を持つ。そのため、1 枚の基板に付き合計 192 の要素（64 ボクセル \times 3 チャンネル）を、1 本のシリアル入力と 3 本の制御用信号だけで独立に制御可能である。ここでチャンネル 1, 2, 3 は、それぞれ R, G, B の成分を表す。使用した LED ドライバの仕様を表 4.1 に示す。

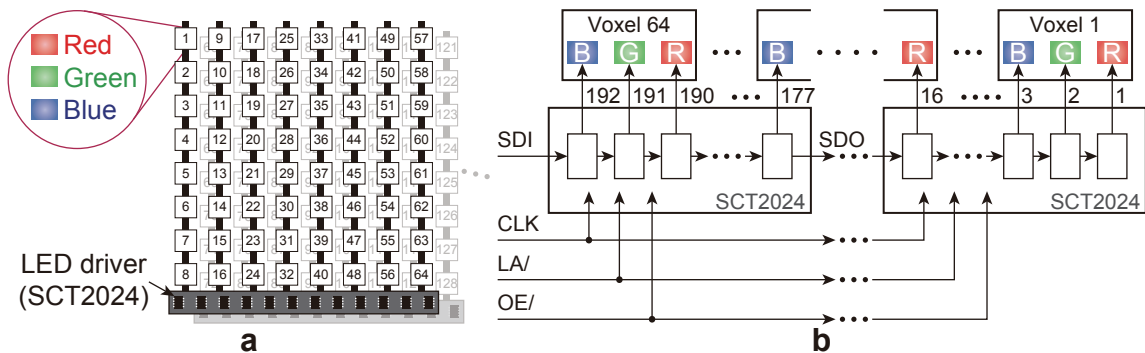


図 4.2: 表示ユニット。 (a) 表示ユニットの概要。 (b) 簡略化したブロック図。

表 4.1: LED ドライバ ‘SCT2024’ の仕様.

動作電圧	3.3-5.0 V
出力電流	5-45 mA (at 5 V)
パラレル出力数	16
最大動作周波数	25 MHz

LED ドライバはクロック信号 (CLK), シリアル入力データ (SDI), ラッチ信号 (LA/), 出力イネーブル信号 (OE/) という 4 本の 1-bit 信号線によって制御される. 基板 1 枚分を制御するための詳細な方法を以下に示す.

1. この LED ドライバの出力は, LA/ が Low のときにはラッチ (保持) される. SDI の入力中は LA/ を Low にしておく.
2. 図 4.2(a), (b) に示すように, 最初の入力信号 SDI₁ (1 番目のボクセルの R 要素) から最後の入力信号 SDI₁₉₂ (64 番目のボクセルの B 要素) までを順番に入力する. SDI は, CLK 信号の立ち上がりでサンプリングされる.
3. 全ての SDI を入力後, LA/ を High にすることでシフトレジスタ上のデータが出力可能状態になる.
4. OE/ を Low にすることにより, SDI の入力を High にした全ての要素が一斉に点灯する. 具体的な制御方法は, 次節において点灯例を挙げて説明する.

以上の処理を基板 8 枚分に対して並列に行うことで, 全ての LED を制御可能となる.

4.2.2 制御ユニット

制御ユニットには, マイクロコンピュータが搭載されたボード ‘Arduino Mega 2560’ (Arduino 社) を用いた. このボードは 54 のデジタル I/O ピンを有しており, C/C++ に準じたプログラミングによって容易に制御が可能である. 仕様を表 4.2 に示す.

表 4.2: マイクロコンピュータボード ‘Arduino Mega 2560’ の仕様.

動作電圧	5.0 V
デジタル I/O ピン数	54
Flash ROM 容量	256 KB
動作クロック周波数	16 MHz

ボード内部の Flash ROM にソースコードを書き込んでおくと, マイクロコンピュータが点灯パターンを解釈して, 点灯に必要な制御信号を表示ユニットに送信する. ボー

ドにはシリアル通信ポートが搭載されているが、今回は使用しておらず、点灯パターンはソースコード内に直接記述されている。

図 4.3 に具体的なタイミングチャートを示す。まずは 1 枚目の基板に送信する信号について説明する。OE/が High の間は、8 枚の LED 基板上における全 LED が消灯状態となる。OE/が Low になっている間は、SDI の信号に応じていくつかの LED が点灯し、結果として全てのボクセルが特定の色（赤・緑・青・シアン・マゼンタ・イエロー・白または消灯のどれか）を有するようになる。ボクセル 1 について考えると、SDI₁ が High で SDI₂ と SDI₃ が Low、つまり R 成分だけが High なので、OE/を Low にしている間は赤色に点灯する。同様に、ボクセル 2 は緑色、ボクセル 3 はマゼンタ色（R + B）に、ボクセル 64 は白色（R + G + B）に点灯する。マイクロコンピュータでは並列な処理は困難であるため、8 枚の基板を並列に制御することはできない。そのため、8 枚の LED 基板を順番に制御する必要がある。

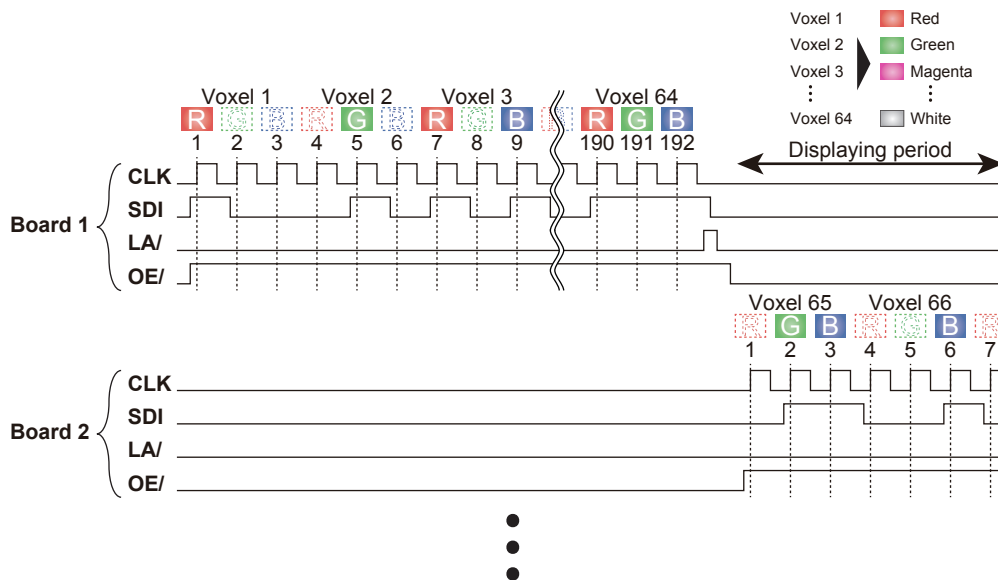


図 4.3: 制御信号のタイミングチャート。OE/が Low になっている間（Displaying period）に、SDI 信号に応じた LED が点灯する。

4.3 実験結果

本節では、構築した LED 型ボリウムディスプレイシステムによって、任意の 3 次元像を表示可能であること示す。単色表現、マルチカラー表現、動画表現という三つの場合について、複数の 2 次元情報をボリウムディスプレイに組み込むアルゴリズムと組み合わせて実験を行った。本実験で用いる画像は全て 8 × 8 ピクセルで構成されている。各ピクセルは RGB の 3 チャンネルを有しており、それぞれのチャンネルは 1 (On) か 0 (Off) の 2 状態を持つものとする。

4.3.1 単色表現の結果

まずは図 4.4(a) に示すように、単色（緑）での実験結果を示す。図 4.4(b) に示す 3 枚の 2 次元画像 “X”, “Y”, “Z” を、直交する 3 方向に対して表示するように点灯パターンを作成した。1 章で説明したアルゴリズムを用いることでボクセル値を計算した。ボクセル値が 0 の LED は消灯, 1 の LED は点灯としたときの様子を図 4.4(a) に示す。さらに、このボリュームディスプレイを各平面方向から観察したときの様子を図 4.4(c) に示す。それぞれの入力画像が確認できる。

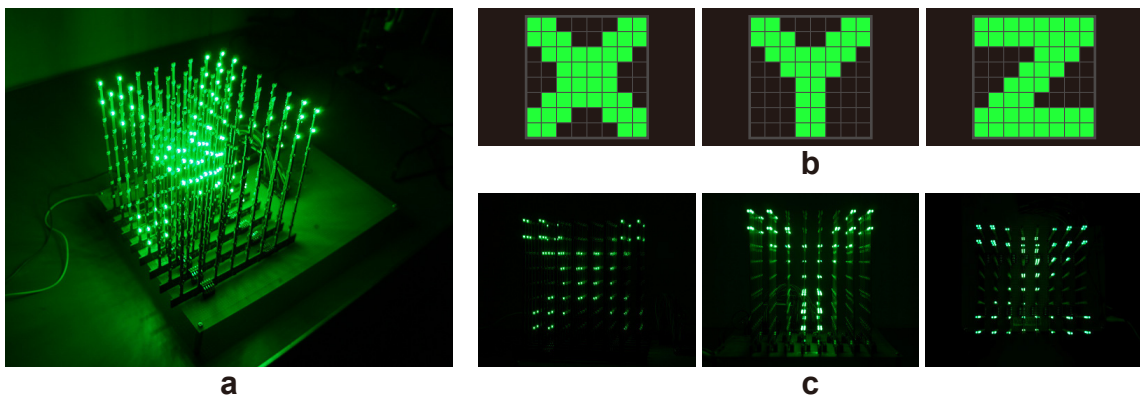


図 4.4: 単色表現の実験結果. (a) ボリュームディスプレイの俯瞰図. (b) 表示させた入力画像. (c) 実際に表示される投影画像.

4.3.2 マルチカラー表現の結果

次に図 4.5(a) に示すように、マルチカラーでの実験結果を示す。ここでマルチカラーとは、赤・緑・青の 3 原色に加えて、それらの中間色であるシアン、マゼンタ、イエロー、さらに白と黒の全 8 色での色表現を表す。この実験では、図 4.5(b) に示す 2 枚のマルチカラー 2 次元画像を、直交する 2 方向に表示するようにした。図 4.5(c) に、それぞれの方向に投影される 2 次元画像を示す。この結果から、異なる色味を持った画像をそれぞれ別方向に表示可能であることが確認できた。

4.3.3 動画表現の結果

フレームごとに点灯パターンを切り替えていくことで、動画表現も可能となる。図 4.6 は、直交する 2 方向にアルファベット (A-L) の文字列と数字 (0-9) の文字列を表示させた様子である。ここではフレームごとに表示色を切り替えている。この実験結果から、複数の 2 次元動画像を保持するボリュームディスプレイを実現可能なことが確認できた。

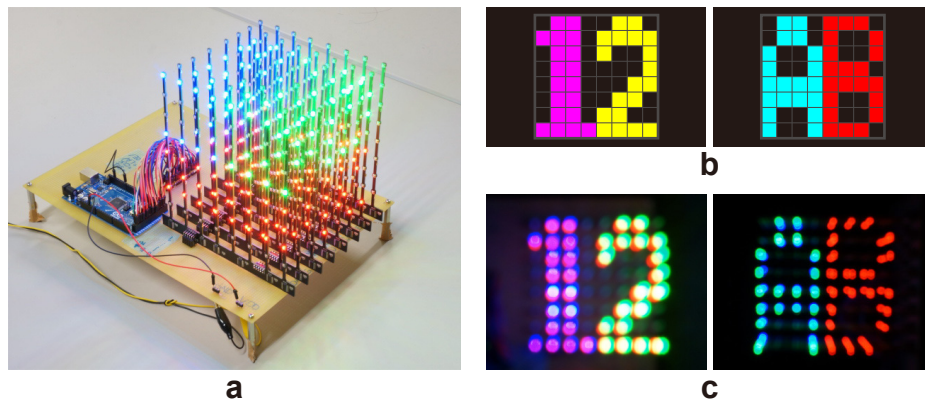


図 4.5: マルチカラー表現の実験結果. (a) ボリュームディスプレイの俯瞰図. (b) 表示させたい入力像. (c) 実際に表示される投影画像.

基板1枚分を制御するのに必要な時間をオシロスコープで測定したところ, 3.9 msであった. つまり, 基板8枚分(3次元像1フレーム分)を制御するのに必要な時間は31.2 msであり, フレームレートは32 Hzとなる.

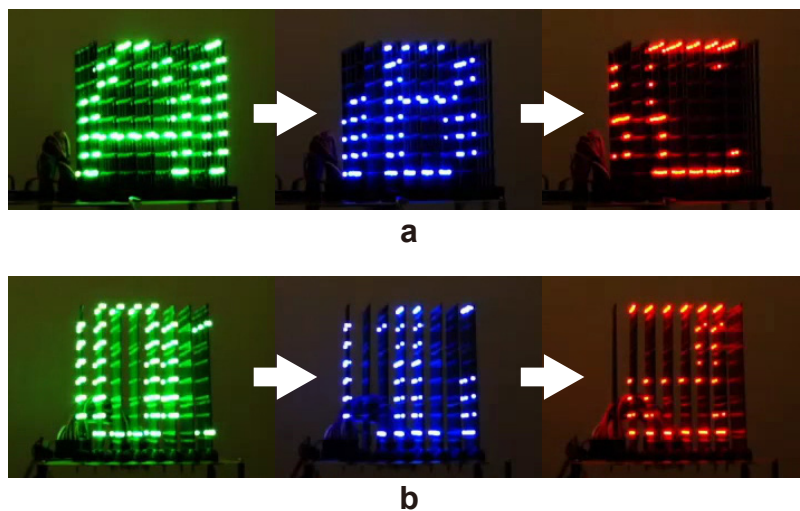


図 4.6: 動画表現の実験結果. (a) 正面方向に表示されるアルファベットの文字列. (b) 側面方向に表示される数字の文字列.

4.3.4 フルカラー表示に向けた課題

ここまでの実験結果で, 複数のカラー動画像を表示可能であることを確認した. しかし, 作製したボリュームディスプレイで表現できるのはマルチカラーのみである. LEDの発光輝度を制御することで, フルカラー像を表示することが次の課題となる.

4.4 パルス幅変調方式を用いたボリュームディスプレイ

発光輝度を制御する一つの方法として、各LEDに流れる電流値を個別に制御する方法が挙げられる。しかしこの方法は、4.2.1節で示した表示ユニットの回路構成では実現できず、実現のためにはより複雑な表示ユニット回路の再構成が必要となってしまう。

そこで本システムでは、パルス幅変調 (Pulse Width Modulation: PWM) 方式^{38,39)}を用いてフルカラー表現の実現を目指すこととした。PWM方式は、人間の目が認識できない短い期間でLEDのONとOFFの時間比を制御し、その時間比に比例した輝度値を表現する手法である。電流値を制御する必要がないため、表示ユニットのハードウェアを設計しなおさずに、フルカラー化を実現できる。

図4.7に、新たに構築したフルカラー表示可能なLED型ボリュームディスプレイシステムを示す。制御の流れは以下に示すとおりである。

1. ホストPCがシリアル通信を介して制御ユニットにボクセルデータを送る。ボクセルデータとは、RGBの3成分(各8-bit)から構成される色情報である。
2. PWM方式に基づき、制御ユニットが必要な信号をボクセルデータから生成し、表示ユニットに送信する。
3. 受信した制御信号を基に、任意のフルカラー3次元像が表示ユニットに描画される。

本節では、新たに開発した制御ユニットについて説明する。さらに、開発したシステムで行った実験結果について述べる。

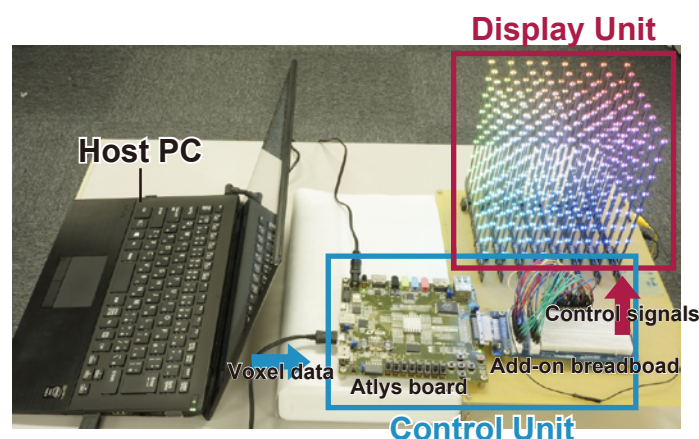


図 4.7: フルカラー表示可能なLED型ボリュームディスプレイシステム。

4.4.1 フルカラー表示用の制御ユニット

PWM方式は、短い時間にマルチカラー画像を何度も切り替えることで人間の目にフルカラー画像として見せる手法である。そのため、非常に高速な信号処理が必要となる。例えば一般的なテレビと同様に、RGB各256階調(24-bit)のフルカラー3次元像を約30Hzのフレームレートで表示する場合を考える。すると、1/30 sの間に256枚のマルチカラー3次元像を表示する必要がある。つまり、マルチカラー像の切り替え時間は $1 / (30 \times 256) = 130 \mu\text{s}$ 以内に、フレームレートで表すと7.7 MHz以上で制御を行う必要がある。

ここまでの実験では、制御ユニットとしてマイクロコンピュータを用いてきた。4.3.3節で述べたように、この制御ユニットにおけるマルチカラー3次元像のフレームレートは32 Hzである。求められるフレームレートと 10^5 倍ほどの差があるため、PWM方式の実現は不可能である。これは、マイクロコンピュータの動作周波数が16 MHzと比較的低速であることと、並列化が困難であることに起因する。そこで、フルカラー表示用の制御ユニットをFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて新たに設計した。FPGAを用いて高速かつ並列に信号処理を行う専用制御回路を開発することで、フルカラー化が実現可能となる。

制御ユニットを開発するために、Digilent社が提供するデジタル回路設計プラットフォーム‘Atlys Board’⁴⁰⁾を用いた。この基板には‘Spartan-6 LX45’⁴¹⁾というFPGAチップが搭載されており、最大100 MHzの周波数で動作する。表4.3に今回用いたFPGAチップの仕様を示す。Atlys Boardは、‘VmodBB’という名称のアドオンボード(ブレッドボード)を取り付けることで、デジタルI/Oピンが使用できるようになる。このデジタルI/Oピンで表示ユニットの制御を行った。

表 4.3: FPGA チップ ‘Spartan-6’ の仕様.

Logic Cell	43,661
Slice	6,822
Flip-Flop	54,576
Distributed RAM	401 Kb
Block RAM	2,088 Kb
動作周波数	100 MHz

図4.8に、FPGAに実装した専用制御回路のブロック図を示す。各ブロックについて、以下に詳しく説明する。

1. シリアルポート制御ブロックが、Atlys Board上に搭載されたシリアルポートを介して、ホストPCからボクセルデータを受け取る。1-bitずつ受け取ったシリアルデータは一度メモリに格納され、8-bit貯まったごとにガンマ補正ブ

ロックに送られる。1フレームの3次元像を表示するのに必要なボクセルデータは全部で12,288-bit (= 8-bit × 3チャンネル × 512ボクセル)となる。Atlys Boardにおけるシリアル通信のボーレートは最大で12 Mbps⁴²⁾であるが、今回の設計では1.8 Mbpsとした。この通信速度は、リアルタイム表示を考慮に入れても十分な速度である。

2. 人の目に対して自然な階調を表現するために、通常の2次元ディスプレイの出力映像では、出力値が入力値の γ 乗に補正されるように設計されている。ここで γ はガンマ値と呼ばれるパラメータで、一般的には1.8から3.0までの値をとる。開発したシステムでもガンマ補正ブロックが同様の補正処理を行う。このブロックは入力された値(ボクセル値)を γ 乗して出力する。このブロックの入力は、RGBいずれかのチャンネルにおいて階調の値を示す8-bit信号である。ここでは情報落ちを防ぐため、出力が入力よりも1-bit大きくなるよう、9-bit出力とした。累乗処理は8-bit入力/9-bit出力のルックアップテーブルで実装されている。
3. ガンマ補正されたボクセル値は、PWMブロックのRAMに格納される。ここで、8枚の基板を並列に制御するために8個分のRAMを用意した。このブロックではPWMの原理に基づき(本節の最後に図4.9を用いて詳しく説明する)、9-bitのボクセル値から1-bit信号(SDI)を生成する。同時に生成された8本分のSDIを、まとめてディスプレイ制御ブロックに送信する。
4. ディスプレイ制御ブロックは、適切なタイミングでPWMブロックに対してSDIを要求し、受け取ったSDIに加えてCLK, LA/, OE/の3信号を生成し出力する。CLK, LA/, OE/は、1枚の基板に対してそれぞれ1信号ずつ必要となるため、出力信号は全部で32本(4信号 × 8基板)となる。クロック信号CLKはAtlys boardの動作クロック(100 MHz)を1/4に分周し、LEDドライバの仕様に合わせて25 MHzとして使用した。またPWMにおけるパルス幅(LEDドライバの出力をオンにする時間)は192個のSDIを送信するのにかかる時間と等しくなるように設定した。

処理の流れについて具体的な例を用いて説明する。図4.9(a)が示すように、ボクセル1のRGB成分がそれぞれ511, 255, 127である場合を考える。このRGB成分は、ガンマ補正後であるため各9-bit信号となっている。フルカラーシステムで1フレーム分の像を表示するためには、4.2.1節で説明したマルチカラーシステムにおける1フレーム分の処理を、511回繰り返す必要がある。このとき、繰り返すごとにカウンタ(CNT)をまわしていき、入力の値がカウンタの値よりも大きい場合にLEDを点灯させることによって、入力値に比例した発光輝度が得られる。タイミングチャートを図4.9(b)に示す。この場合、CNTが1から127までの間はRGB全て

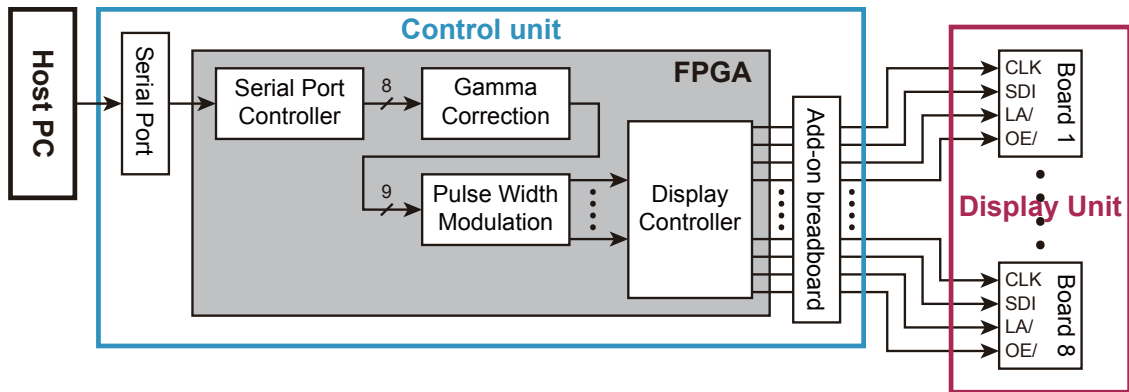


図 4.8: フルカラー表示用制御ユニットのブロックダイアグラム。

が点灯，CNT が 128 から 255 までの間は R と G が点灯，CNT が 256 から 511 までの間は R のみが点灯する．このように点灯させることによって，ボクセル 1 が所望の色に発光する．

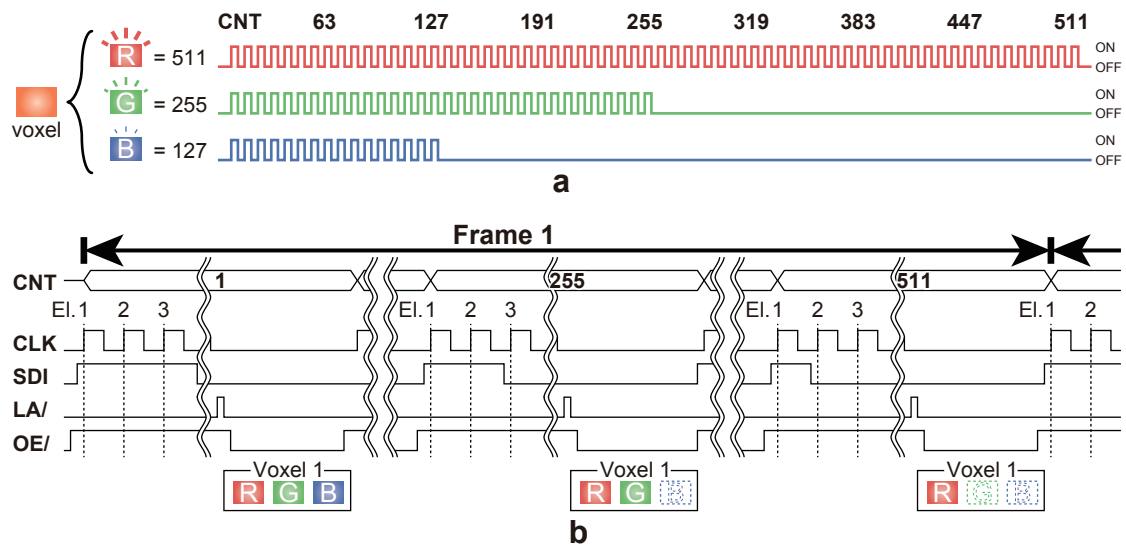


図 4.9: フルカラーシステムにおける具体的な処理の流れ．(a)PWM の考え方．(b) 制御信号のタイミングチャート．

4.4.2 性能評価実験

フルカラーボリュームディスプレイシステムの性能を評価するために，入力したボクセル値 (X) に対する LED の輝度値 (Y) を測定した．Sanwa Electric Instrument 社製の照度計 ‘Laser Power Meter LP1’ を用いて，図 4.10(a) が示すセットアップで測定を行った．図 4.10(b) のグラフは，発光色を赤単色とし，最大値が 1 となるよう

に正規化した測定データを示している。この結果は、理想的な出力である $Y = X^{\gamma}$ を同様に規格化したグラフと一致していることが確認できた。実験結果と理論値の平均二乗誤差はほぼゼロ（約 10^{-3} ）であり、理想的な出力を行っていることが確認できる。発光色を緑と青にした場合についても同様の結果が得られた。

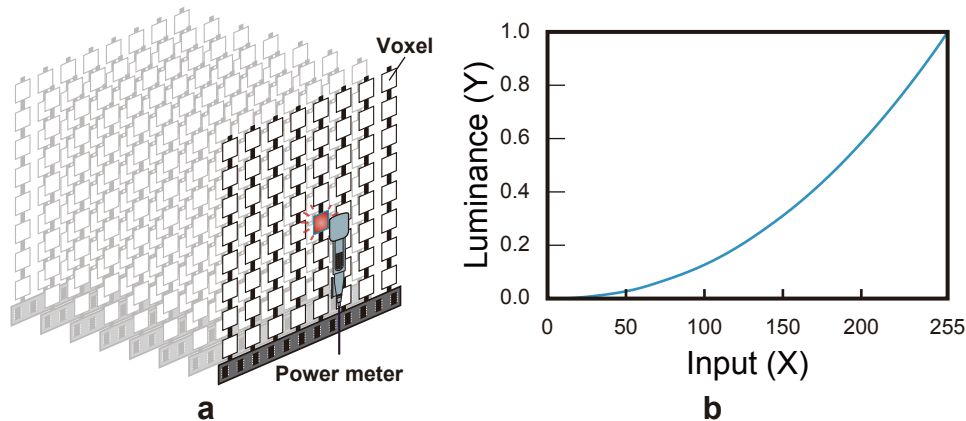


図 4.10: 入力したボクセル値に対する LED の出力の測定結果. (a) 実験方法. (b) 測定した LED の発光輝度.

ここでさらにフレームレートに関する評価を行う。1枚の LED 基板上の要素数は 192 (64 ボクセル \times 3 チャンネル) である。そのため、制御ユニットが表示ユニット (25 MHz で動作) へ 192 の SDI を送信するのに必要な時間は $7.7 \mu\text{s}$ ($=192 / 25\text{M}$) となる。4.4.1 節で述べたように、PWM におけるパルス幅 (LED ドライバの出力時間) は、SDI の送信時間 ($7.7 \mu\text{s}$) と等しくなるよう設定している。SDI を送信し出力するという一連の処理を合計 511 回繰り返す必要があるため、フルカラー像を 1 フレーム分表示するのにかかる総時間は 7.9ms ($2 \times 7.7 \mu\text{s} \times 511$) である。また、シリアル通信のボーレートは 1.8 Mbps なので、1 フレーム分の表示に必要な全てのボクセルデータ通信時間は 6.8ms ($= 8\text{-bit} \times 3 \text{チャンネル} \times 512 \text{ボクセル} / 1.8 \text{Mbps}$) である。通信時間が 1 フレーム分を表示するのにかかる時間よりも短いため、前フレームを表示している間に通信を完了させることができる。そのため、フレームレートを決定する際には通信時間を考慮する必要がなくなる。つまり、開発したフルカラーシステムのフレームレートは、表示にかかる総時間 (7.9ms) から 127 Hz となる。通常のテレビのフレームレートである 30 Hz 以上が必要だと考えた場合、今回開発した制御ユニットで現在の解像度の 4 倍程度まで大規模化に対応可能である。例えば、現状の制御回路のままでも、 $16 \times 16 \times 8$ ボクセルからなるディスプレイの開発が可能である。

4.4.3 複数画像表示デモンストレーション

図 4.11 は、直交する 2 方向にそれぞれ異なるフルカラー動画像を表示するポリウムディスプレイである。正面方向には A から L までのアルファベット文字列（図 4.11(a)）を、側面方向には 0 から 9 までの数字列（図 4.11(c)）を表示する。開発したシステムのフルカラー表現性を示すために、フレームを切り替えるごとに LED の色相 (Hue) を 5° ずつ増加させた。ここで、彩度 (Saturation) と明度 (Brightness) は最大値に固定している。開発したシステムは RGB 色空間に基づいているため、HSB の値を RGB に変換してから制御ユニットに送信した。図 4.11 の左から $H = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, \dots, 360^\circ$ となっている。図 4.11(b) および図 4.11(d) は、それぞれの方向に表示されるフルカラー動画像を表示している。マルチカラーシステムでは表現できなかったばオレンジ色や紫色などの色が、フルカラーシステムでは表現できていたことが確認できた。

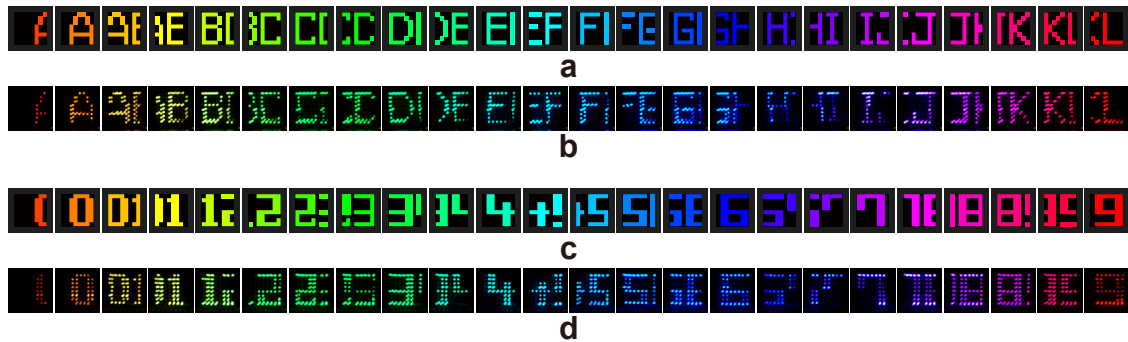


図 4.11: 直交する 2 方向に異なるフルカラー動画像を表示するポリウムディスプレイ。(a) 正面に表示させたい入力画像 (A から L までのアルファベット文字列)。(b) 実際に正面へ表示される投影画像。(c) 側面に表示させたい入力画像 (0 から 9 までの数字列)。(d) 側面に表示される投影画像。

4.5 電子制御型の利点と課題点

例えば図 1.10 に示した 3D クリスタルが $64 \times 64 \times 64$ ボクセルであるのに対して、本ポリウムディスプレイシステムは $8 \times 8 \times 8$ ボクセルである。そのため図 4.11 に示したように、表示できる 2 次元画像は文字などの単純な模様限定されている。しかし、LED などの電子制御デバイスは設計や制御が容易である点から、大規模化に適している。既に $32 \times 32 \times 32$ ボクセルの LED キューブも製品化されており、今後も大規模化が進んでいくものと考えられる。今後はより大規模化を目指して電子制御ポリウムディスプレイシステムの開発を行い、通常カラー写真のような 2 次元動画像を、複数枚同時に表示可能なシステムの実現を目指す。

また、電子制御を行うためには、電気的な配線が不可欠となる。今回開発したシステムでは黒い基板に配線が施されており、その基板上にLEDが配置されるという設計になっている。特定の視点方向からボリュームディスプレイを観察した際に、この基板によって裏側のLEDが物理的に隠されてしまい、見えなくなってしまう現象を確認した。ディスプレイの背面に配線を隠蔽することが可能な通常の2次元ディスプレイに対し、この配線によって生じる問題はボリュームディスプレイ固有の課題である。より高密度に画素を配置し、高精細な画像を表示可能なシステムを構築するためには、今後基板の透明化などに取り組む必要がある。他にも、電気配線を使用せずにボクセルを制御する、光制御方式ボリュームディスプレイの開発にも取り組んでいる。この取り組みについては6章から8章で説明する。

4.6 結言

本章では、LEDの3次元配置に基づく電子制御ボリュームディスプレイについて、そのシステム構成を中心に述べた。

4.2節では、LED型ボリュームディスプレイの構造や制御方法について説明した。8×8×8個の3次元アレイ状に並んだLEDの点灯パターンを独立に制御することで、任意の3次元像を表示できる。

4.3節では、作製したLED型ボリュームディスプレイに複数の2次元画像を表示させた結果を示した。表示させる3次元像を切り替えることができるため、動画像の表示が可能である。

4.4節では、フルカラー化の実現のために新たに開発したボリュームディスプレイについて述べた。FPGAを用いて専用制御回路を設計したことによって、PWM制御が可能となりフルカラー動画像表示を実現できた。

4.5節では、LED型ボリュームディスプレイの利点と課題について議論した。電気的配線によって背後の画素を遮蔽してしまう課題が明らかになった。

第5章 糸とプロジェクタを用いた ボリュームディスプレイ

5.1 緒言

4章では、LEDを画素とした電子制御ボリュームディスプレイを作製した。そのディスプレイに提案アルゴリズムを実装することで、複数の2次元フルカラー動画像を表示する3次元構造体のデモンストレーションを行った。一方緒論でも述べたように、現在様々な方式のボリュームディスプレイが提案されており、提案アルゴリズムを実装することで、複数の2次元情報を保持する3次元構造体を実現可能である。例えば通常の2次元プロジェクタを用いて、3次元的なスクリーンに映像を投影するボリュームディスプレイ方式がいくつか提案されている。この3次元スクリーンとしては、糸⁹⁾や水滴¹⁰⁾、試作に使用してきた3Dクリスタル¹¹⁾などを用いる方式がある。

その中でも、糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイ方式⁹⁾は、材料を入手しやすく比較的容易に作製可能である。そこで本章では、糸を用いたボリュームディスプレイを作製し、複数の2次元情報を表示する3次元構造体のデモンストレーションを行う²⁸⁾。まず5.2節で、糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイの設計手法および画素制御方法について説明する。次に5.3節で、直交する2方向にそれぞれ異なるフルカラー動画像を表示するボリュームディスプレイの結果について述べる。次に5.4節で、より解像度（糸の本数）の高いボリュームディスプレイを作製した結果を述べる。最後に5.5節で、本章をまとめる。

5.2 ディスプレイ構造と画素制御手法

本節では、今回作製したボリュームディスプレイシステムの構造および画素制御方法について述べる。3次元空間上に配置された糸を任意の色で光らせることができるため、提案するアルゴリズムを容易に実装可能であり、複数の2次元情報を表示するボリュームディスプレイを実現できる。

5.2.1 システムの概要

図 5.1 に、システムの概観を示す。3次元像が描画される表示スペースは、2枚の板（27 cm 四方）と 4本の支柱で構成されるフレームに、長さ約 25 cm の糸を 7 × 7 の格子状に配置することで作製した。糸の両端にはナットが結び付けられている。糸の上端に付けられたナットは、磁石によって上面の板に固定されており、下端のナットが重りとなって垂直に吊るされた状態となる。7 × 7 の磁石が板の上に配置されているため、これらの磁石の位置を動かすことで糸の位置を微調整できる。垂直に張られた糸に対して、レーザプロジェクタ（Micoro Vision 社、‘SHOWWX Pico Projector’）から映像を投影することで3次元像を描画する。このプロジェクタの仕様は、画素数が 848 × 480、輝度が 15 ルーメン、コントラスト比が 5,000:1 となっており、焦点フリーであるという特徴を持つ。

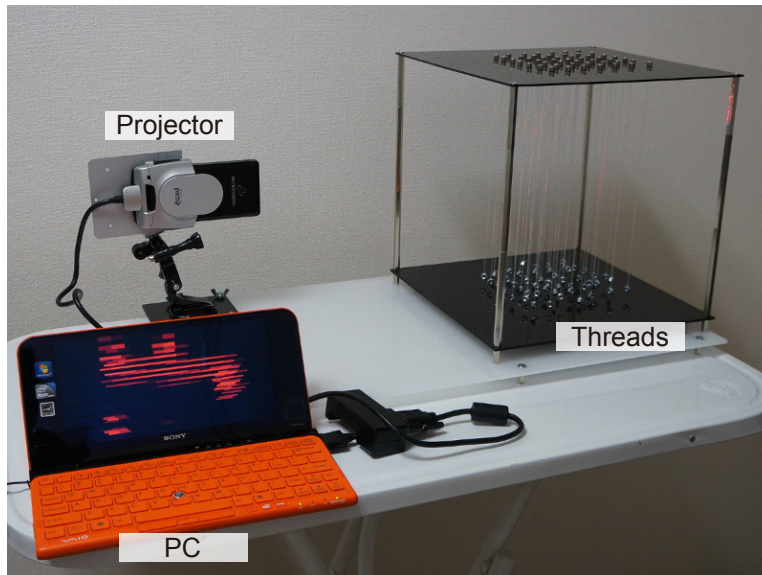


図 5.1: 糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイシステムの概観。

5.2.2 画素制御手法

プロジェクタから投影される 2次元パターンを利用して、3次元像を描画する方法について説明する。ここでは簡単のため、3 × 3本の糸で構成されるボリュームディスプレイについて考える。プロジェクタから投影された光は糸に当たると全周囲に散乱するため、観察者は周囲の様々な方向から散乱光を観察できる。9本の糸の散乱光を独立に制御するためには、図 5.2(a) に示すように、プロジェクタから見たときにそれぞれの糸が重ならないように配置し、それぞれの糸に独立して光を照射する必要がある。つまりこの手法では、プロジェクタの水平（X'）方向の解像度

を、ボリュームディスプレイにおける奥行き (Z) 方向に割り当てることによって3次元像を描画する。糸の配置や投影画像については事前に設定しておくことができるが、設置の際に生じたわずかなずれを修正するため、糸の配置を微調整することが必要となる。

このボリュームディスプレイにおける垂直 (Y) 方向に関しては、プロジェクタの垂直 (Y') 方向とそのまま一致しているため、容易に制御することができる。ただしここで図5.2(b) が示すように、プロジェクタからの投影光が垂直方向に広がることを考慮に入れ、補正の必要がある。プロジェクタから近い糸はプロジェクタのピクセルを有効に使用できるが、離れた糸では光の一部が当たらないため、限られたピクセルで垂直方向を表現する必要がある。垂直方向の解像度は、水平および奥行き方向と比較して十分に高いため、この制限はあまり問題にはならない。

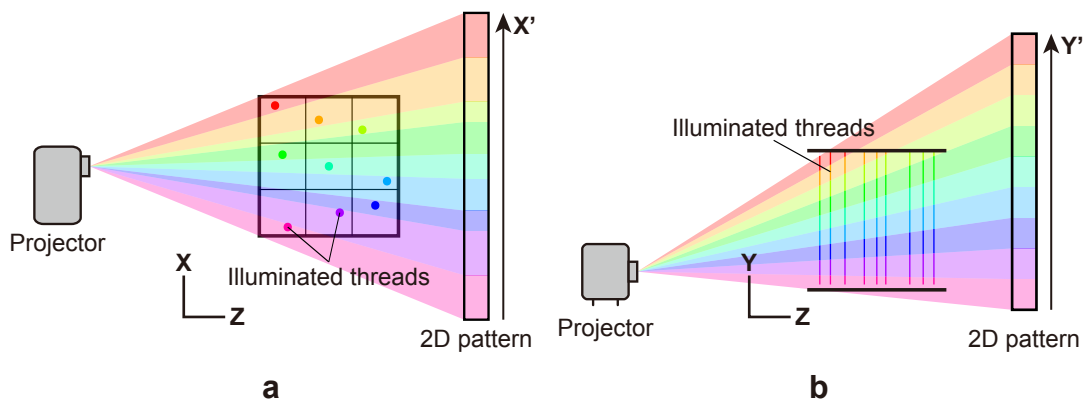


図 5.2: 糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイシステムの画素制御手法。(a) 糸の配置方法。(b) 縦方向のキャリブレーションの必要性。

5.3 ボリュームディスプレイの試作

本節では、糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイを試作した結果について説明する。さらに、複数の2次元情報を同時に表示する3次元構造体を表示させた結果を示す。

5.3.1 設計したボリュームディスプレイ

この実験ではプロジェクタを90°傾けて使用しているため、プロジェクタの持つ水平 (X') および垂直 (Y') 方向の解像度はそれぞれ480および848である。図5.3は、このプロジェクタの持つ水平 (X') 方向の解像度を、ボリュームディスプレイ

を構成する49本の糸にどのように割り当てたかを示している。1本の糸に割り当てられた画素は、最小が7ピクセル、最大が22ピクセルであった。

糸の配置に関しては、プロジェクタの光源から見たときに重なってはならないという制限があるため等間隔にはならなかったものの、 7×7 の格子状に配置することができた。プロジェクタや糸の位置についてはある程度事前に決定しておくが、手作業で配置しているため、ずれが生じてしまうことがある。そこで、プロジェクタから図5.3に示した2次元調整用パターンを照射し、49本の糸が適切な色で光るように糸の位置を微調整する必要がある。調整の結果、任意の糸を任意の色で光らせることができるようになった。

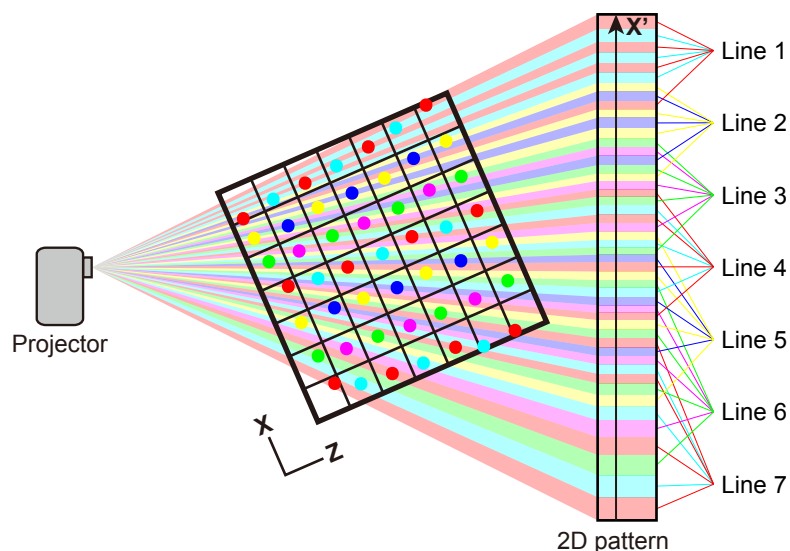


図 5.3: 実際に設計した 7×7 本の糸から構成されるボリュームディスプレイ。

5.3.2 複数の2次元動画像を表示するボリュームディスプレイ

任意の糸を任意の色で光らせることができるようになったので、次は、複数の2次元情報を保持する3次元構造体を開発したシステムに描画した。この実験では、正面方向へは数字の文字列(1-0)が、側面方向からはアルファベットの文字列(A-J)が順番に表示されるようにした。表示させる画像のサイズは、どちらも 7×7 ピクセルとした。図5.4(a)は正面方向からボリュームディスプレイを撮影した様子を示しており、図5.4(b)は側面方向からの様子を示している。複数の2次元動画像を表示するボリュームディスプレイが実現できることを確認した。

この試作におけるボリュームディスプレイは、 $7 \times 7 = 49$ 本の糸で構成されている。解像度は低く、図5.4に示したような単純な図形しか表現できなかった。より複雑な2次元画像を表示させるためには、解像度の向上が必要となる。

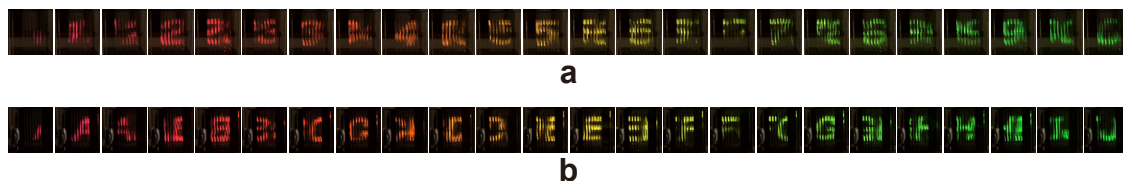


図 5.4: 複数の 2 次元動画像を表示するボリュームディスプレイ. (a) 正面に表示される投影画像 (数字). (b) 側面に表示される投影画像 (アルファベット).

5.4 解像度の向上

5.3 節で試作したボリュームディスプレイでは、使用したプロジェクタの画素数は 480×848 ピクセルであった. この水平方向の解像度 480 ピクセルを $7 \times 7 = 49$ 本の糸に割り当てるため、1 本の糸に割り当てられる画素数は平均で約 10 ピクセルほどであった. 糸の本数を増やし、ボリュームディスプレイの解像度を向上させるためには、より画素数の多いプロジェクタを用いる必要がある.

5.4.1 システムの概要

図 5.5 に作製したボリュームディスプレイの概観を示す. 90 cm 四方のホワイトボードが、地面と平行となるようにフレームによって高さ 180 cm の位置に固定されている. 糸 (長さ 100 cm) の両端にはナットが結び付けてあり、上端のナットとホワイトボードを磁石によって固定した. 下端のナットが重りとなることで、糸は全て垂直となる. ホワイトボードは 20×20 の格子状に区分けされており、それぞれの領域に 1 本ずつ糸を張ることで、合計 400 本の糸からなるボリュームディスプレイを構成することを目標とした.

この実験では、SONY 製のプロジェクタ ‘VPL-FHZ55’ を使用した. 5.3 節で使用したプロジェクタと、主な仕様を比較した結果を表 5.1 に示す. このプロジェクタは、投影距離 (D) と投影画像幅 (W) の比 (スローレシオ: D / W) が大きいという特徴を持つ. この比の値が大きいと、プロジェクタから照射されるパターンは平行光に近くなる. すると、垂直方向の光の広がりをあまり考慮しなくてよくなるため、垂直方向のピクセルを効率よく使用することができる. また、単純に水平方向の解像度が 4 倍となっており、糸の本数を増加させることができる.

この実験では、糸の配置に関するシミュレーションを事前に行った. プロジェクタから見たときに糸がお互い重ならないように配置するという制限に加えて、ボリュームディスプレイの正面および側面方向から観察した際に、糸が重ならないようにするという制限を行った. これは、それぞれの方向から 2 次元情報を観察した際に、糸同士の隙間を小さくするためである. また、どの方向から見ても糸の見え方に偏り

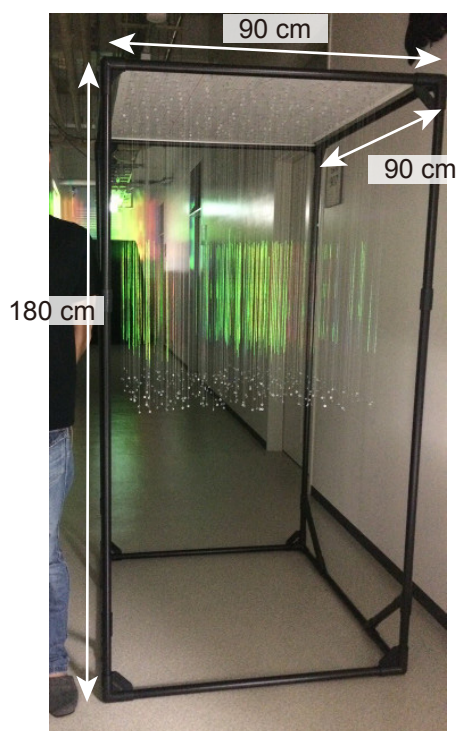


図 5.5: 作製したボリュームディスプレイの概観.

表 5.1: プロジェクタの仕様比較.

プロジェクタ	SHOWWX	VPL-FHZ55
解像度	480 × 848	1,920 × 1,200
輝度 (ルーメン)	15	4,000
最大コントラスト比	5,000:1	8,000:1
スローレシオ	1.0	2.2

が生じないようにするために、糸全体の配置が不規則となるための制限も行った。糸配置のシミュレーション結果を基にして、実際に糸を配置した座標を図 5.6 に示す。図中の X 印は、三つの制限を満たすことができなかった、または、磁石の作用により物理的に糸を配置できなかったことを示している。結果的には、合計 345 本の糸によってボリュームディスプレイを構成することとなった。

5.4.2 複数の 2 次元動画像を表示するボリュームディスプレイ

図 5.7 は、直交する 2 方向にそれぞれ異なるフルカラー動画像を表示するボリュームディスプレイである。正面方向へはアルファベット文字列 (“SUNNY” や “CLOUDY” など天気に関する英単語) を表示し (図 5.7(a))、側面方向へは文字に対応したマークを表示する (図 5.7(c))。図 5.7(b) および図 5.7(d) は、直交する 2 方向からボリューム

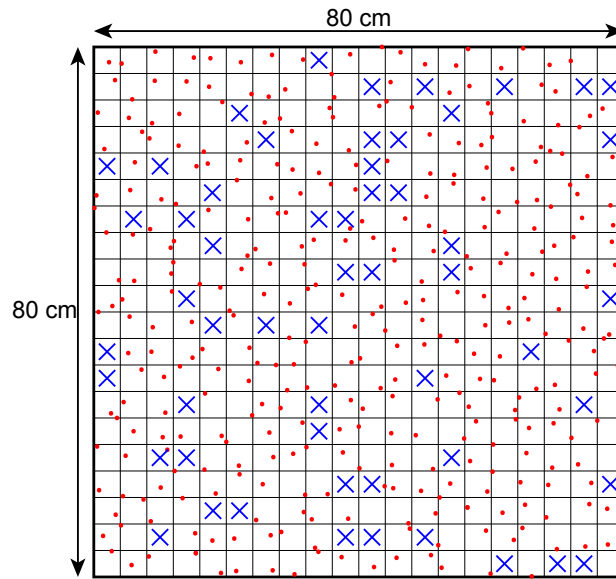


図 5.6: 糸の配置.

ムディスプレイを撮影した様子を示す。それぞれの方向に、異なるフルカラー動画が表示されていることが確認できた。この結果が示すように、本システムは大規模に構成できるため、デジタルサイネージなどの広告システムとしての応用に適すると考えている。

5.4.3 今後の解像度向上に関するアプローチ

現状のシステムでは、プロジェクタの水平方向における解像度 1,920 ピクセルを、345 本の糸に割り当てている。そのため、糸 1 本当たりにつき平均約 6 ピクセルが割り与えられていることとなる。これ以上 1 本当たりのピクセル数を減らすと、微調整がよりシビアになっていき、糸が光を適切に散乱しない可能性が生じることとなる。糸の本数を増加し、ボリュームディスプレイの解像度を向上させるためには、より解像度の高いプロジェクタを用いるか、複数台のプロジェクタを用いる必要がある。

糸の本数を増加させていくと、それだけ位置調整に大きな労力を要する。ボリュームディスプレイを移動させるたびに、この調整が必要となるため、5.4.2 節で示したような広告としての応用には不向きとなってしまふ。そこで、例えばカメラなどを使用して、糸の配置に合わせてプロジェクタからの投影画像を自動でキャリブレーションするためのシステム開発などが必要である。

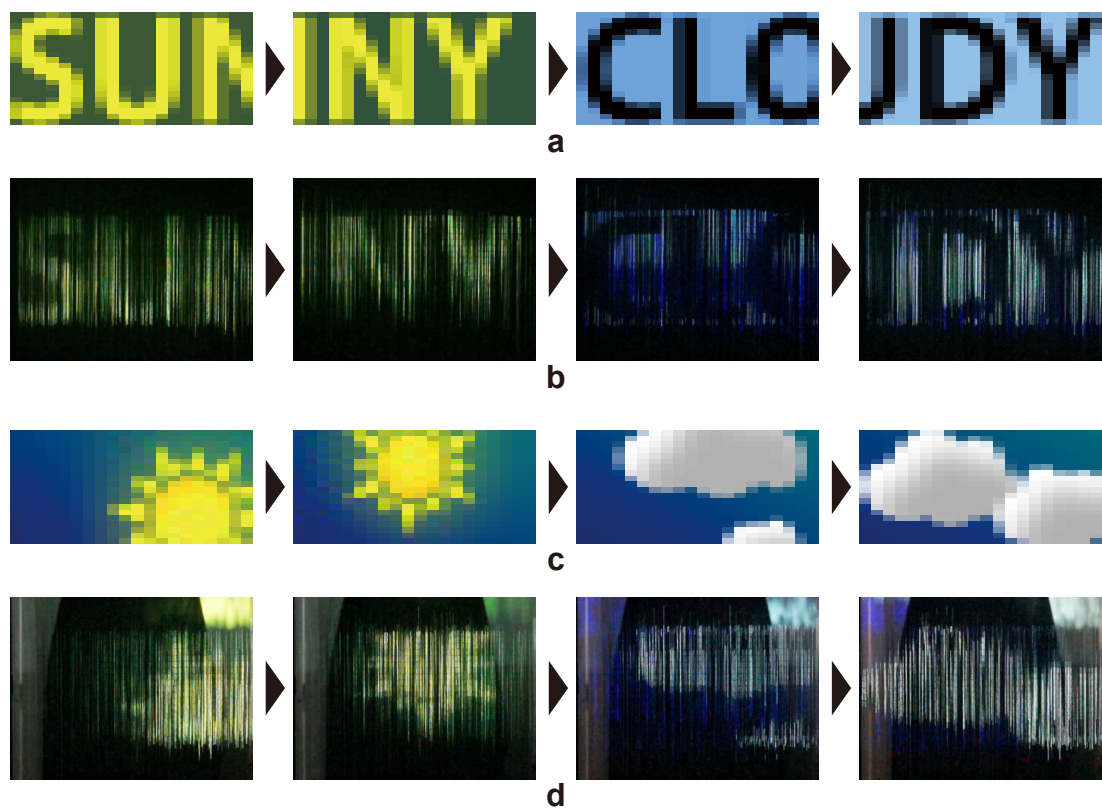


図 5.7: 2 方向に異なるフルカラー動画像を表示するボリュームディスプレイ. (a) 正面に表示させたい入力画像 (天気に関する英単語). (b) 実際に正面へ表示される投影画像. (c) 側面に表示させたい入力画像 (天気のマーク). (d) 側面に表示される投影画像.

5.5 結言

本章では，糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイを作製し，複数の2次元フルカラー動画像を表示させることに成功した。

5.2節では，糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイの設計手法と画素制御方法について説明した。プロジェクタから見て糸が重ならないよううまく配置することで，それぞれの糸に当たる光を独立に制御できる。

5.3節では，作製したボリュームディスプレイを用いて，直交する2方向に異なるフルカラー動画像を表示させた。7 × 7 = 49本の糸という小規模な構成ではあるが，本手法のデモンストレーションを行った。

5.4節では，解像度の向上に取り組んだ。合計345本の糸で構成されるボリュームディスプレイを実現し，実用化に向けた具体的な応用例を示すことに成功した。

第6章 量子ドットに基づく 光制御ポリウムディスプレイ

6.1 緒言

4章および5章では、既存のポリウムディスプレイ手法を用いることで、複数のフルカラー2次元動画像表示に成功した。これらのポリウムディスプレイは、比較的容易に作製することができるという特徴を持つ。一方で、図6.1(a)に示すように、視点に近い位置にある画素（LEDや糸）や配線および基板などが、後方にある画素を物理的に遮蔽してしまうことがある。そのため、高集積化が困難であるという課題を有している。この問題を解決するためには、新たな方式のポリウムディスプレイシステムの開発が必要となる。

そこで、ナノ光材料の3次元配置に基づく光制御ポリウムディスプレイの開発を行っている。電気的な配線を必要とせず、外部からの照射光によるエネルギー供給が可能であるため、高精細かつ高解像度のポリウムディスプレイを実現できる。図6.1(b)は、ナノ光材料として量子ドット（Quantum Dots: QD）という発光材料を用いたポリウムディスプレイを示している。図に示したような複数の2次元画像（“X”、“Y”、“Z”）を表示する3次元構造体だけでなく、あらゆる3次元構造を表示可能な次世代ポリウムディスプレイの実現を目指して、開発を行っている。

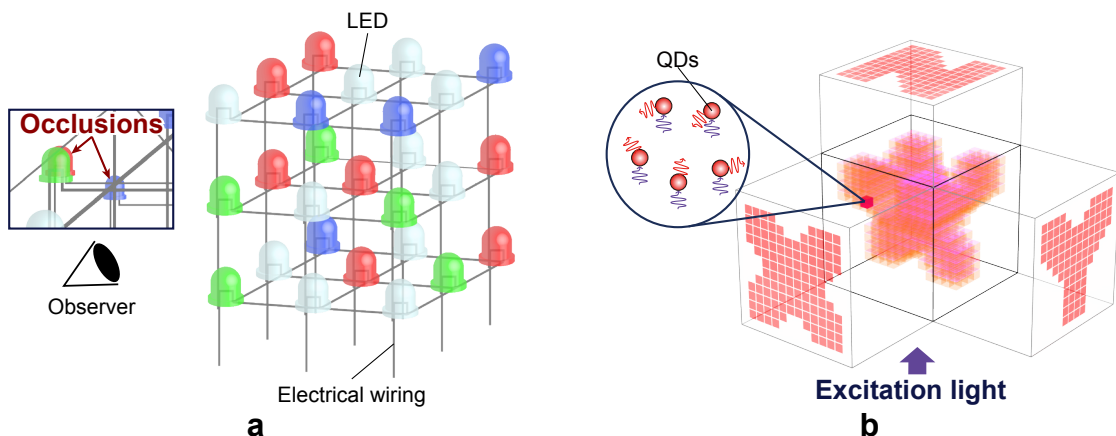


図 6.1: 光制御ポリウムディスプレイの開発コンセプト。(a) 電子制御ポリウムディスプレイの課題。(b) 量子ドットに基づく光制御ポリウムディスプレイ。

本章では、光制御ポリウムディスプレイの実現に向けて、量子ドットポリウムディスプレイを試作した結果²⁹⁾について述べる。まず6.2節で、開発した量子ドットポリウムディスプレイのコンセプトや作製方法について述べる。次に6.3節で、量子ドットポリウムディスプレイの試作結果を示し、各種評価実験を行った結果を示す。さらに6.4節で、ディスプレイ特性に関する議論および今後の課題について述べる。最後に6.5節で、本章をまとめる。

6.2 量子ドットポリウムディスプレイ

本章で作製した量子ドットポリウムディスプレイは、量子ドットを透明樹脂中に封入することで量子ドット含有ボクセルを作製し、3次的に配置することで構成される。本節では、まず量子ドットの発光特性を述べ、ポリウムディスプレイの設計理論および構成手法について述べる。

6.2.1 量子ドットの発光特性

量子ドットとは、量子力学に基づく特有の光学特性を持つ半導体素子の名称である。図6.2(a)はSIGMA-ALDRICH社が製造する量子ドットをトルエン溶液中に分散させた製品を示す。通常時は発光しないが、紫外光などの短波長光を照射することで、固有の波長で発光する蛍光材料の一つである。量子ドットを画素とするポリウムディスプレイを構成することで、電気的な配線を介さずに、ワイヤレスでのエネルギー供給を実現できる。

最大の特徴は、量子ドット自身のサイズに依存して異なる発光波長を持つため、様々なカラーバリエーションが表現できる点である⁴³⁾。図6.2(b)が示すように、サイズが小さくなるほど短い波長の光を、大きくなるほど長い波長の光を発する。また他の傾向材料と比較して高い量子効率や鋭い発光スペクトルを有している⁴⁴⁾。そのため、通常の2次元ディスプレイへの応用研究が盛んに行われており⁴⁵⁻⁴⁷⁾、商品として実用化されるなど高い注目を集める材料である。これらの特徴は、2次元ディスプレイだけでなく、3次元ポリウムディスプレイ応用にも重要な特徴である。さらに、量子ドットはナノスケールの大きさなので、緻密に3次元配置が可能である。

6.2.2 量子ドット含有ボクセルの作製方法

ポリウムディスプレイを構成するボクセルは、量子ドットを透明樹脂中に封入し、固化することによって作製した。量子ドットには、SIGMA-ALDRICH社製のLumidot CdSe/ZnSと呼ばれる製品を用いた。この量子ドットは、CdSe（セレン化カドミウム）とZnS（硫化亜鉛）の2層からなるコアシェル型と呼ばれるもので、ト

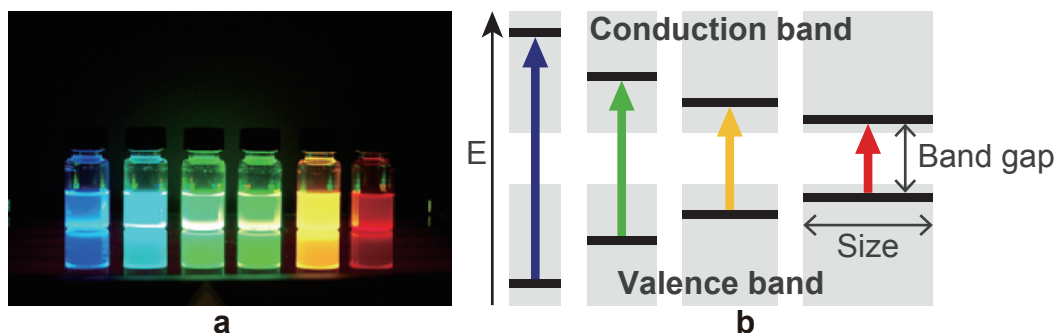


図 6.2: 量子ドット. (a) 市販されている量子ドット (SIGMA-ALDRICH ウェブサイト⁴⁸⁾ から引用). (b) 発光波長のサイズ依存性.

ルエン溶液中に 5 mg/mL の濃度で分散した状態で購入可能である. 様々なカラーバリエーションが入手可能であるが, 本実験では発光ピーク波長がそれぞれ 610 nm (赤) と 530 nm (緑) である 2 種類のものを使用した. 透明樹脂には, ポリジメチルシロキサン (PDMS) からなる Dow Corning Toray 社製の SYLGARD 184 Silicone Elastomer Kit を用いた. このキットには主剤と硬化剤が含まれており, この 2 種類の液体を 10:1 の割合で混ぜ合わせ, 加熱することで固形化させることが可能である. PDMS は, 紫外から可視領域にかけて非常に高い透明度を有しているため, 様々な応用先に使用されている樹脂である^{49,50)}. 本システムにおいてもその高い透明性から, 量子ドットの吸収・発光プロセスを妨げることなく固形化させることができる. 量子ドット含有ボクセル作製の流れは以下に示すとおりである.

1. PDMS の主剤と硬化剤に量子ドット溶液を加えて混合する. 発光輝度と集積度から経験的に判断した結果, 1.1 mL の樹脂 (主剤: 1.0 mL, 硬化剤: 0.1 mL) に対して, 赤い量子ドットの場合は 50 μ L, 緑の場合は 40 μ L を混合した.
2. 混合した液体を, 内寸 1 cm \times 1 cm \times 4 cm の直方体状の型に入れ, 真空状態で脱泡する.
3. 脱泡した樹脂を固形化させる. 室温でも固形化されるが, 100 $^{\circ}$ C で加熱すると 3 時間程度で固形化させることができる.
4. 固形化した樹脂を, 任意のボクセルサイズにカットする. ボリュームディスプレイを試作する際のボクセルサイズは, 一辺 2.5 mm とした.

量子ドットを樹脂中に封入することで, 固形化する以外にも, 量子ドットの発光が劣化する主原因である表面酸化を防ぐというメリットがある. 量子ドット含有ボクセルの発光波長や発光強度は, 封入する量子ドットの種類や濃度を変更することで容易に調整することができる.

6.2.3 ボリュームディスプレイの設計と構成

赤・緑それぞれの色で発光する量子ドット含有ボクセルを、6.2.2節で説明した手法を用いて作製し、図6.3に示した設計図に従って3次的（ $8 \times 8 \times 8$ ボクセル）に配置することでボリュームディスプレイを構成する。図6.3(a)は、構成したボリュームディスプレイを異なる視点から観察した様子を示している。直交する3方向からそれぞれ異なる2次元画像が観察できるように設計されている。

ボリュームディスプレイを構成するときの手順は以下に示すとおりである。

1. 2.5 mm 四方の立方体状の量子ドット含有ボクセルを、図6.3(b)に従って型の中に配置する。8個の型を用意し、層ごとに独立して作製する。
2. ボクセルの作製に用いた透明樹脂キットに含まれる主剤と硬化剤を、10:1の割合で混合し、真空状態で脱泡する。
3. 脱泡した樹脂を量子ドット含有ボクセルの高さまで流し入れる。このとき、量子ドット含有ボクセルが配置されていない領域には透明樹脂が流し込まれるため、この部分が透明ボクセルとなる。
4. 透明樹脂が固化されるまで $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ で約3時間程度熱する。
5. 作製した8層を全て重ねることで、 $8 \times 8 \times 8$ ボクセルで構成されるボリュームディスプレイを作製できる。

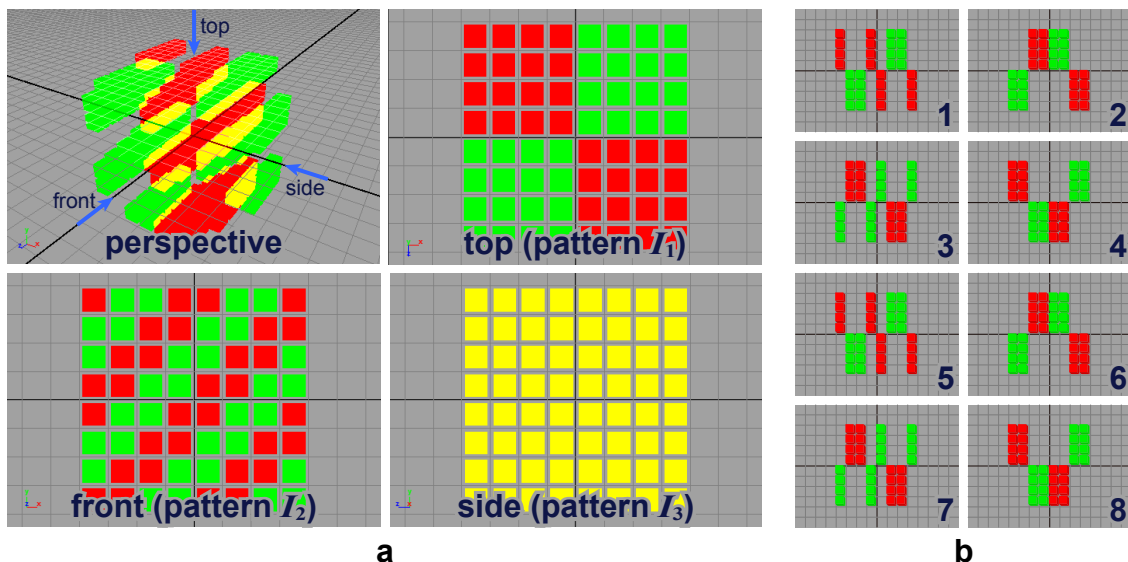


図 6.3: 量子ドットボリュームディスプレイの試作における設計。(a)異なる視点から観察したボリュームディスプレイ。(b)ボリュームディスプレイの層ごとの設計図。

図 6.3(b) の設計図で量子ドット含有ボクセルが配置されなかった場所は、透明な樹脂が流し込まれる。この領域を透明ボクセルと呼称する。つまり、今回設計したボリュームディスプレイは、赤ボクセルと緑ボクセルに透明ボクセルを加えた 3 種類で構成される。各視点からボリュームディスプレイを観察したとき、奥行き方向にボクセルが 8 個並ぶように設計されている。この組み合わせによって、観察される 2 次元画像を構成するピクセルの色が決定する。奥行き方向に並んだ 8 個のボクセルのうち、(1) 4 個が赤ボクセルで残り 4 個が透明ボクセルであった場合は赤ピクセルが、(2) 4 個が緑ボクセルで残り 4 個が透明ボクセルであった場合は緑ピクセルが、(3) 2 個が赤ボクセルで 2 個が緑ボクセル、残り 4 個が透明ボクセルであった場合は、赤と緑の混合色である黄色のピクセルが得られるとする。図 6.3(a) が示すように、画像 A および画像 B は赤ピクセルと緑ピクセルで構成されており、画像 C は黄色ピクセルのみで構成される。

6.3 実験結果

本節ではまず、量子ドットを封入した透明樹脂を立方体状に形成することで量子ドット含有ボクセルを作製し、作製したボクセルの吸収および発光スペクトルを測定した結果について述べる。また、作製した量子ドット含有ボクセルを用いることで、3 方向に異なる画像を表示するボリュームディスプレイを作製した結果を示す。さらに、複数色の量子ドット含有ボクセルを用いた実験結果についても述べる。

6.3.1 量子ドット含有ボクセル

図 6.4(a) は、固形化した量子ドット含有透明樹脂ボクセルを示す。ボリュームディスプレイを構成する際のボクセルサイズにカットする前の状態であり、サイズは $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ である。この写真では、AS ONE 製の紫外光源 'MID-170' により 302 nm の紫外光を照射し、励起させている。2 種類の量子ドットを用いて作製したボクセルが、それぞれ赤と緑の色で発光している様子が確認できる。

図 6.4(b) に示した実線のグラフは、照射に使用した紫外光源のスペクトルに加えて、赤ボクセルと緑ボクセルの発光スペクトルを規格化したものを示す。325 nm のピーク波長 (KIMMON KOHA, 'IK3052R-BR') を持つ紫外レーザを用いてボクセルを励起し、発光スペクトルを測定した。赤および緑ボクセルの発光スペクトルはそれぞれ、629 nm と 541 nm でピークを取るという結果となった。透明樹脂に封入する前の溶液の状態で測定した発光スペクトルのピークが、それぞれ 615 nm と 530 nm であったため、長波長側にピークがシフトしていることが確認できた。これらレッドシフトと呼ばれる現象は、透明樹脂にエネルギーが流れたために起きてしまったものと考えられるが、発光強度の観点からは影響がない。

また、図 6.4(b) に示した破線のグラフは、赤ボクセルと緑ボクセルの吸収スペクトル（200–620 nm まで）を表す。可視光領域においてほとんど吸収が見られず、他のボクセルの発光を妨げないことが確認できた。

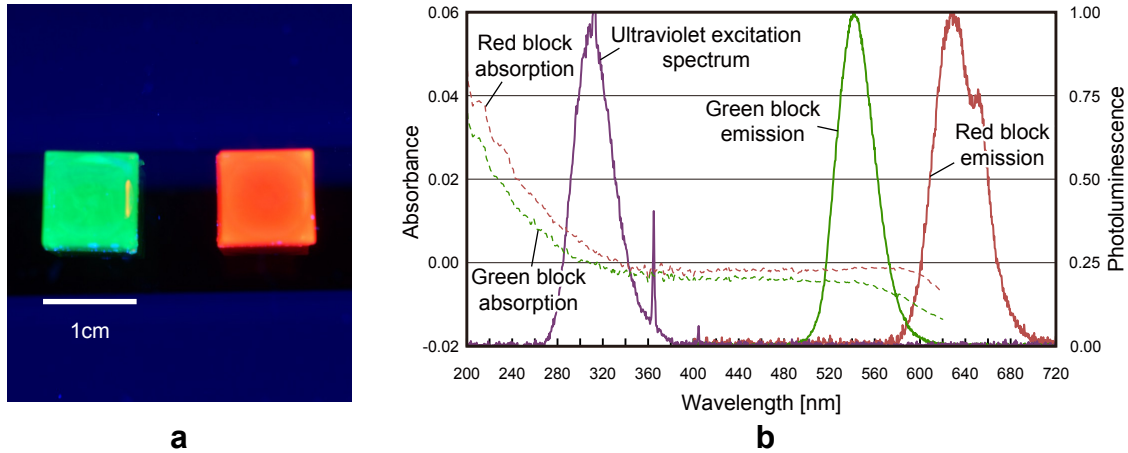


図 6.4: 作製した量子ドット含有ボクセル。(a) 赤および緑ボクセルを紫外光で励起させ発光させた際の様子。(b) 赤および緑ボクセルの発光・吸収スペクトルと紫外光源のスペクトル。

6.3.2 量子ドットボリュームディスプレイの試作結果

図 6.5 に、CMOS カメラで撮影した量子ドットボリュームディスプレイの試作結果を示す。自然光下では発光せず（図 6.5(a)）、紫外光を照射した際に 3 次元像を表示する（図 6.5(b)）。紫外光照射時にこの量子ドットボリュームディスプレイを異なる視点から観察すると、上面からはチェック画像が（図 6.5(c)）、正面からはストライプ状の画像が（図 6.5(d)）、側面からは均一な画像が（図 6.5(e)）得られることを確認した。

さらに、作製した量子ドットボリュームディスプレイの特性を示すため、CMOS カメラで撮影した写真を用いて評価を行った。図 6.6(a) は赤ボクセルおよび緑ボクセル単体の RGB 値を示す。図 6.4(a) において、赤ボクセルおよび緑ボクセルに該当する各領域で、RGB の 3 成分に対して平均値を計算し、最大値が 1 となるように正規化したものをグラフ化している。赤ボクセルは G および B 成分よりも高い R 成分を有しており、緑ボクセルは R および B 成分よりも高い G 成分を有している。図 6.4(b) の発光スペクトルからは、どちらのボクセルにも青色の成分は含まれていないはずであるが、図 6.6(a) の結果には B 成分が現れている。撮影の際に紫外光の影響を受けてしまったためであると思われる。

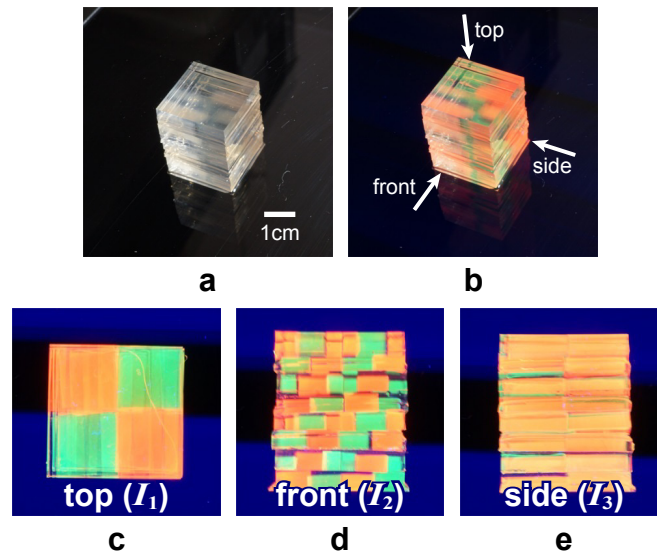


図 6.5: 作製した量子ドットポリウムディスプレイ. (a) 自然光下における俯瞰図. (b) 励起光下 (302nm) における俯瞰図. ポリウムディスプレイの (c) 上面方向 (d) 正面方向 (e) 側面方向に表示される投影画像.

また図 6.6(b)–(d) はそれぞれ、ポリウムディスプレイの上面に表示される画像 I_1 (図 6.5(c))、正面に表示される画像 I_2 (図 6.5(d))、側面に表示される画像 I_3 (図 6.5(e)) におけるピクセルの RGB 値を示す。画像 I_1 および I_2 は、32 画素の赤ピクセルと、32 画素の緑ピクセルで構成されているため、それぞれの平均をグラフ化している。画像 I_3 は、全 64 画素の黄色ピクセルで構成されており、その平均をグラフ化している。なお、図中のエラーバーは最大値と最小値を示している。画像 I_1 および I_2 における赤ピクセルの RGB 値を、赤ボクセル単体のものと比較すると、G 成分が増加していることが確認できる。これは、緑ボクセルから発せられた緑色の光が、赤ボクセルの表面において散乱することが原因ではないかと考えられる。同様に、画像 I_1 および I_2 における緑ピクセルについては、緑ボクセル単体のときと比較して R 成分が増加していることが確認できた。一方、図 6.5(e) に示した画像 I_3 における黄色ピクセルは、一見すると画像 I_1 および I_2 における赤ピクセルと同様に見える。しかしここで図 6.6(b)–(d) を比較すると、画像 I_3 の黄色ピクセルは高い G 成分の値を有しており、画像 I_1 および I_2 の赤ピクセルとは明確に異なる色が表現できていることが確認できる。

6.3.3 順序依存性の検証

複数色ボクセルを配置する際に、励起光源の位置に対してボクセルの配置順を変更すると、各ボクセルの吸収および透過係数に応じて発光される光の色が変化する。

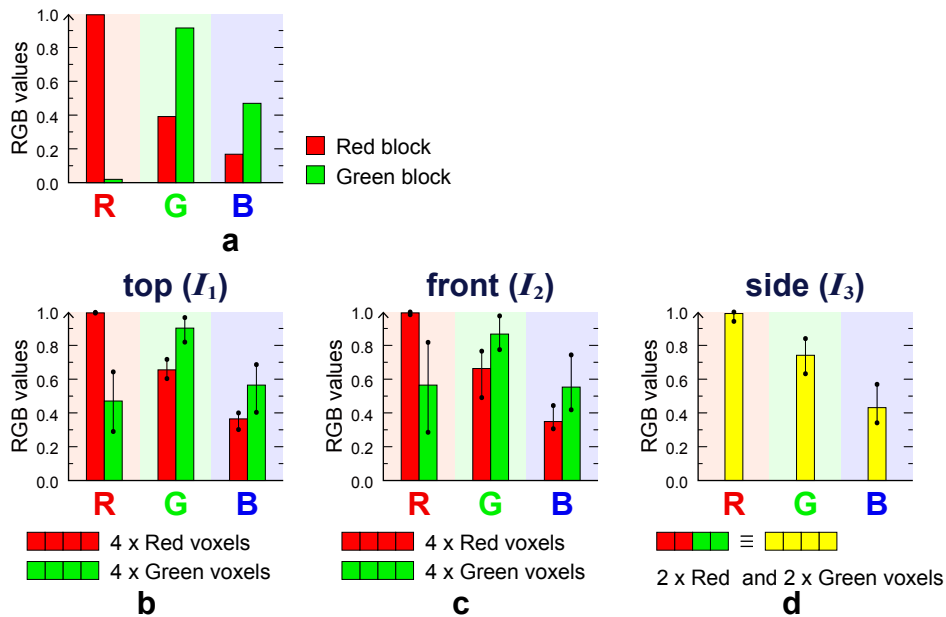


図 6.6: ボリュームディスプレイの評価実験結果. (a) 赤ボクセルおよび緑ボクセル単体を撮影した際の RGB 値. (b) 投影画像 I_1 (上面) (c) 投影画像 I_2 (正面) (d) 投影画像 I_3 (側面) における RGB 値.

この特性に関して、赤ボクセルと緑ボクセルの2種類を用いて評価を行った。つまり図 6.7(a) が示すように、赤ボクセルが励起光源に近くなるように配置した場合 (RG 配置) と、配置順を逆にした場合 (GR 配置) とでスペクトルの変化を調べた。

図 6.7(b) 中の破線および実線はそれぞれ、RG 配置と GR 配置における発光スペクトルを示す。RG 配置において、541 nm にピークを持つ緑ボクセルからの発光が、GR 配置と比べて 29%減少していることが確認できる。このような発光スペクトルの変化は人が見た際の色味の変化に相当するため、ボクセルから得られる色はボクセルの順序に依存すると結論付けることができる。図 6.7(c) はスペクトルの変化を色度図で示した結果である。色度座標は、1964 年に制定された等色関数を基に計算した。この等色関数は、国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Eclairage: CIE) のウェブページ⁵¹⁾に掲載されている。RG 配置と GR 配置の色度座標上での距離は、 3.56×10^{-2} であった。今回得られた座標付近においては、人の目は 0.5×10^{-2} 以上の距離であれば違いを認識できるという研究結果が発表されている⁵²⁾。そのため、ボクセルの配置順序に依存して、明確な色の変化が得られるということを定量的に評価することができた。

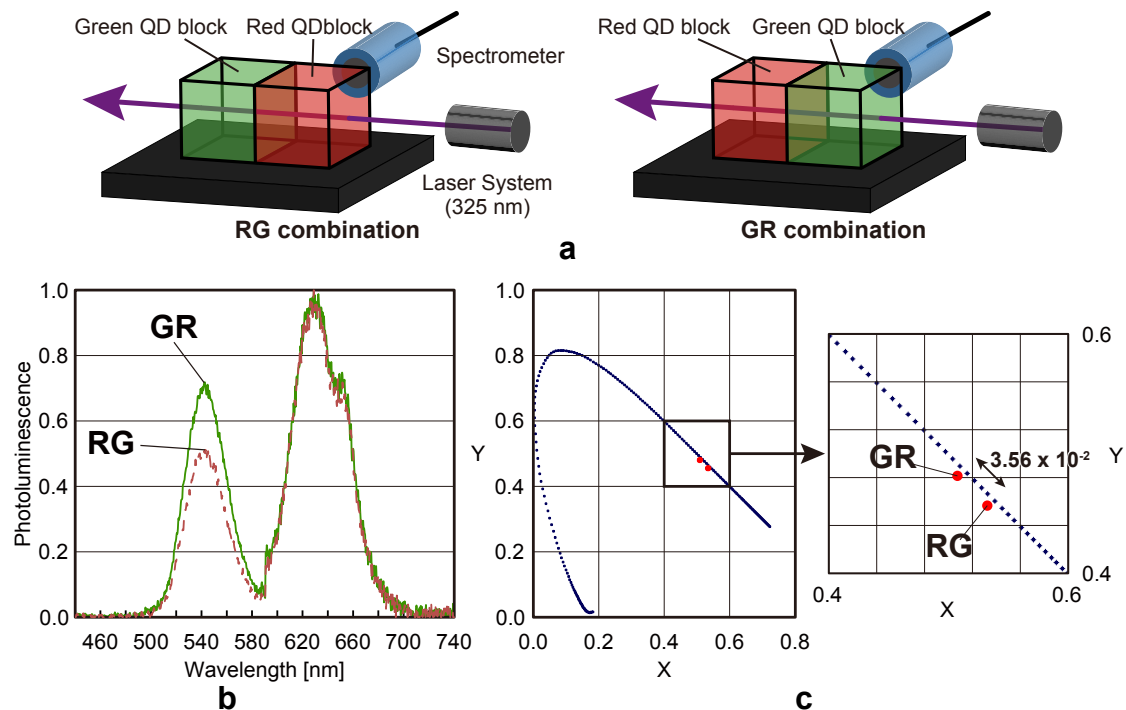


図 6.7: 量子ドットボリュームディスプレイにおける発光色の順序依存性. (a) 実験のセットアップ. (b) 発光スペクトルの変化. (c) 色度図上で表される順序依存性.

6.4 考察

本節では、提案した量子ドットボリュームディスプレイの特性を評価し、今後の課題について述べる.

6.4.1 量子ドットボリュームディスプレイの特性

試作したボリュームディスプレイでは、構成する全てのボクセルをディスプレイ外部から励起し、発光させられることを確認した. すなわち、電気配線やボクセル自体によって他の画素が遮蔽されてしまうという課題を解決し、高解像度・高精細のボリュームディスプレイを実現できると考えられる.

本研究では、赤と緑の光を発する2種類の量子ドットだけを用いたが、他の色で発光する量子ドットも既に発売されている. 同様の方法で量子ドット含有ボクセルを作製することができるため、容易にカラーバリエーションを増やすことができ、フルカラー化も実現できる.

また6.7節で示した実験結果から、量子ドット含有ボクセルを励起する順番に依存して、発光スペクトルが変化するという特性を発見した. この順序依存特性を議論するうえで、発光波長よりも短波の光を吸収して励起され、発光するという量子

ドットの特徴は重要な要素となる。つまり、緑色の量子ドットが発光した緑色の光を、赤色の量子ドットが再吸収することによって発光色が変わることが考えられる。しかし今回の順序依存性の実験結果にはその影響は見られなかった。今回の実験システムのようなボクセルの集積度が低い場合は、発光再吸収の問題を考慮する必要はない。しかし、将来的に高集積度のシステムとして応用する場合は、発行再吸収を最適に扱うアルゴリズムの開発が必要になる。

異なるサイズの量子ドットを密に配置すると、近接場光を介した量子ドット間のエネルギー移動が生じる⁵³⁻⁵⁹。将来的には、このような量子ドット固有の特性を利用して、量子ドットボリュームディスプレイに新たな機能的特性を付加できるのではないかと考えている。

6.4.2 現状の課題

量子ドットを画素として用いることで、直交する3方向に異なる2次元画像を表示するボリュームディスプレイの試作に成功した。しかし全て手作業で作製したため、図6.5に示したように、画素数が $8 \times 8 \times 8$ と低く小規模であり、ボクセルサイズにもばらつきがあった。より高解像度で高品質なボリュームディスプレイを実現するためには、量子ドットのような光反応材料を、機械的かつ3次的に配置する手法の確立が必要である。高解像度ボリュームディスプレイの実現に向けたアプローチについては、7章で説明する。

また今回作製したシステムでは、赤、緑、透明のボクセルの配置は固定されており、それらを紫外光によって一様に照射するため、表示できる投影画像は静止画のみとなる。つまり、描画された3次元像の書き換えを行うことはできない。映像システムとしての応用を考えた場合、動画化の実現は必要不可欠である。光制御によって動画3次元像を表示するためのアプローチについては、8章で詳しく述べる。

6.5 結言

本章では、光制御ボリュームディスプレイの実現に向けて、量子ドットを画素とする新たなボリュームディスプレイを試作した結果について述べた。

6.2節では、量子ドットボリュームディスプレイのコンセプトや作製方法について述べた。透明樹脂中に量子ドットを封入し、固化化したものをボクセルとし、3次的に組み上げることでボリュームを形成する。

6.3節では、量子ドットボリュームディスプレイの試作結果を示し、評価実験を行った結果を示した。赤と緑の2種類の量子ドットを用いることで、直交する3方向に異なる2次元画像を表示する量子ドットボリュームディスプレイの試作に成功した。また、ボクセルの順序によって発光色が変わるという特性を見出した。

6.4節では、量子ドットボリュームディスプレイの特性および今後の課題を述べた。光を介したワイヤレスでの画素制御を実現できるが、低解像度であり、動画化が困難であるという課題が残されている。

第7章 インクジェットプリンタによる 高解像度化の検討

7.1 緒言

6章では、光を介したエネルギー供給により、直交する3方向に異なる3枚の画像を表示する量子ドットボリュームディスプレイを開発した。配線が必要ないため、微細加工する手法が確立されれば、超高精細なボリュームディスプレイを実現可能である。しかし6.4.2節で述べたように、ボクセルの加工からそれらを組み上げてボリュームディスプレイを構築するまで全て手作業で行っていたため、試作したディスプレイの解像度は $8 \times 8 \times 8$ と小規模なもので、ボクセルサイズにもばらつきがあった。

そこで本章では、ナノ光材料の3次元配置に基づくボリュームディスプレイの高解像度化に向けた検討を行う。具体的には、インクジェットプリンタを用いたボリュームディスプレイの高解像度化手法を提案する。プリンタを用いることで、ボクセルの配置を機械的かつ緻密に行うことができ、高解像度化を実現できる。まず7.2節で、インクジェットプリンタを用いた高解像度化手法のコンセプトおよびボリュームディスプレイの作製手法を説明する。次に7.3節で、提案手法を用いてフルカラー3次元像を表示するボリュームディスプレイを作製した結果を示す。次に7.4節で、複数のフルカラー2次元画像を表示するボリュームディスプレイの作製結果を示す。さらに7.5節で、作製したボリュームディスプレイを評価するために行った実験結果および提案手法についての考察を述べる。最後に7.6節で、本章をまとめる。

7.2 プリンタを用いたボリュームディスプレイ

本提案手法は、量子ドットなど、光に反応するあらゆる材料を画素として用いることを想定している。ここでは実験の容易さから、市販の蛍光インクを画素とするボリュームディスプレイを開発した。そのため、これ以降は蛍光材料を用いて説明を行う。

本節では、インクジェットプリンタを用いて高解像度のボリュームディスプレイを構成するという基本コンセプトと、具体的な作製手法について説明する。

7.2.1 基本コンセプト

図 7.1 に、インクジェットプリンタを用いたボリュームディスプレイ作製手法の概要を示す。基本的なコンセプトとしては、透明度の高いフィルムに蛍光材料を任意のパターンで印刷し、それを重ね合わせることでボリュームを構成する。自然光下では蛍光材料が光を発しないためボリュームはほぼ透明状態であるが、紫外光などの励起光を照射することで材料が発光し、ボリューム中に 3 次元像が浮かびあがる。3D プリンタ技術などと同様に、一度印刷したパターンを切り替えることは難しいので動画像表示はできない。しかし、外部からの励起光照射によって 3 次元像の表示・非表示を切り替えられるのに加えて、自発光するため暗い場所などでも像を表示できるという特徴を持つ。

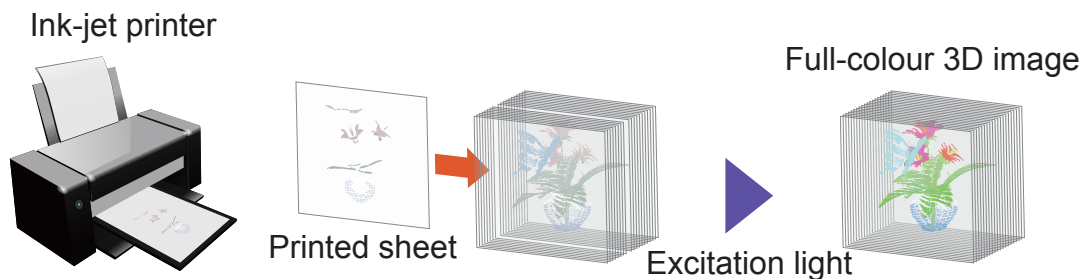


図 7.1: 高解像度ボリュームディスプレイ実現に向けた開発コンセプト。

7.2.2 ボリュームディスプレイの作製方法

ボリュームディスプレイ作製には、SO-KEN 社が販売するインクジェットプリンタ ‘TPW-105BL’ を使用した。このプリンタは、通常のインクの代わりに SO-KEN 社製の蛍光インクを用いることができ、最大 $5,760 \times 1,440$ dpi の解像度で 2 次元パターンを印刷可能である。励起光照射時に、赤・緑・青の 3 色で発光する蛍光インクを使用することで、フルカラー印刷を実現できる。使用した 3 種類のインクは、ユーロピウム錯体（赤）、 β -キノフタロン（緑）、クマリン系染料（青）をそれぞれ材料とする。発光量子収率測定装置（浜松ホトニクス、‘Quantaurus-QY C11347-01’）を用いて測定した量子収率を図 7.2(a) に、360 nm の励起光を照射した際の発光スペクトル図 7.2(b) に示す。通常の印刷紙ではなく、ポリエステル製の透明フィルム（folex, ‘BG-36A4’）に蛍光インクを印刷することとした。

図 7.3 に、作製したボリュームディスプレイを示す。このボリュームディスプレイは、3 次元像の断面画像が印刷された 20 枚の透明フィルム（厚さ約 0.1 mm）からなる。フィルム間にスペースを設けるため、厚さ 0.5 mm のアクリル板が挟まれている。3 次元像の描画スペースは、 $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ となった。図 7.2(a) の

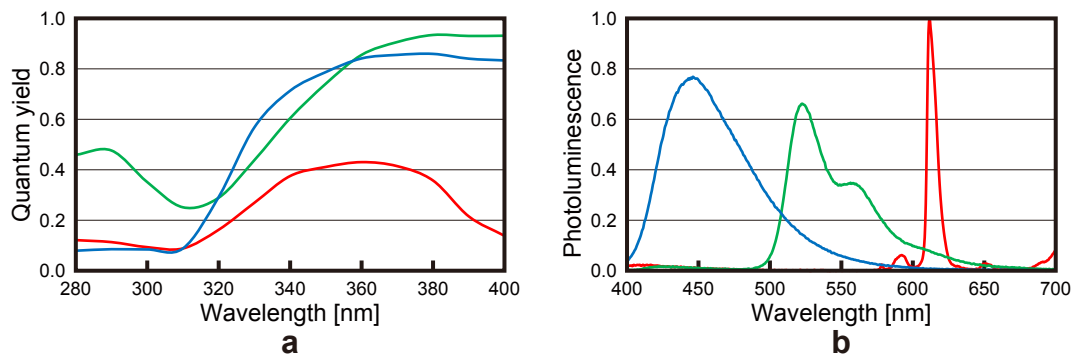


図 7.2: 蛍光インクの光特性. (a) 測定した量子収率. (b)360 nm の励起光における発光スペクトル.

量子収率から判断し、紫外光源には 365 nm にピーク波長を持つ AS ONE 製の UV ランプ ‘LUV-4’ を用いた. 図 7.3 に示すように、フィルムと垂直な方向から紫外光を照射して観察することとした.

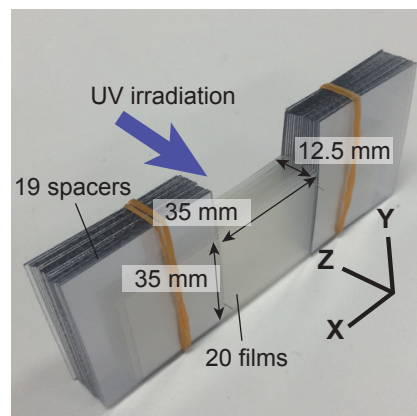


図 7.3: 作製したボリュームディスプレイ.

7.3 フルカラー 3 次元像表示

本節では、提案手法により任意のフルカラー 3 次元像ディスプレイを表示できることを示すために、実際に試作を行った結果を示す. ここでは、複数の 2 次元画像を異なる方向に表示する 3 次元構造体ではなく、一般的な 3 次元物体（花と蝶の 3 次元像）を表示させる.

7.3.1 ボリュームディスプレイの設計

20枚のフィルムに印刷する2次元断面画像の説明を行う。ここでは、点の集合で3次元物体を表現する点群データを用いた。このデータは、51,767の点から構成されており、それらの点はRGB各色に対して階調を持っている。図7.4(a)に、CGを用いてこのフルカラー3次元物体点を描画した結果を示す。このデータを奥行き方向に20分割して作成した断面画像群を図7.4(b)に示す。1番の画像が手前になるように順番に積層することで、フルカラー3次元像が再生される。

ここで、断面画像の作成方法について説明する。20枚のフィルムはそれぞれ $z = Z_1, \dots, Z_{20}$ の位置に置かれており、3次元物体を構成するある点が座標 (O_x, O_y, O_z) にあるとする。このとき、 $Z_n < O_z < Z_{n+1}$ であれば、この点はn番目のフィルムの (O_x, O_y) の位置に印刷される。これを全ての点に対して行うことで、20枚の断面画像が作成できる。

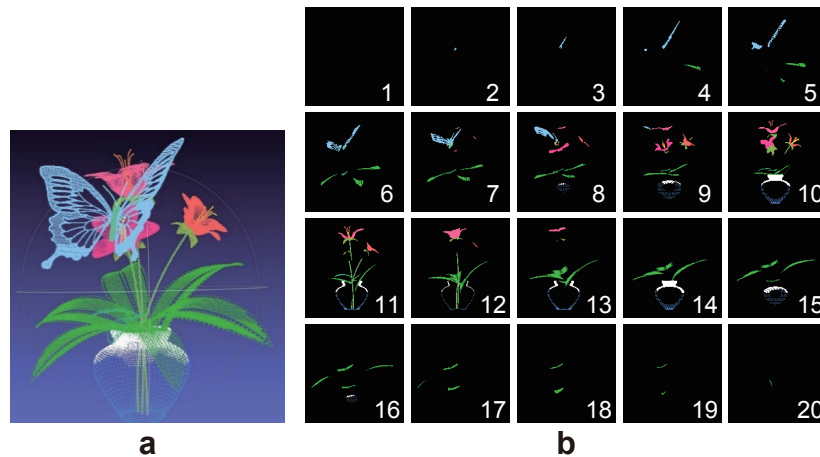


図 7.4: フルカラーボリュームディスプレイの設計. (a)3次元像の物体点データ. (b)20枚の2次元断面画像.

7.3.2 3次元像の表示結果

インクジェットプリンタを用いて作製したフルカラーボリュームディスプレイについて、基にした3次元ポリゴンデータ(図7.5(a))と撮影した写真(図7.5(b))を示す。図7.5において、左の画像は左斜め(約30°)方向から、真ん中が正面から、右が右斜め(約30°)方向からの様子を示している。視点を移動させると見え方が変化するため、運動視差が表現できていることが確認できる。作製したボリュームディスプレイによって、元データどおりの3次元像を表示できていることが確認できた。この結果が示すように、3原色の蛍光インクを用いることで容易にフルカラー化を実現できる。

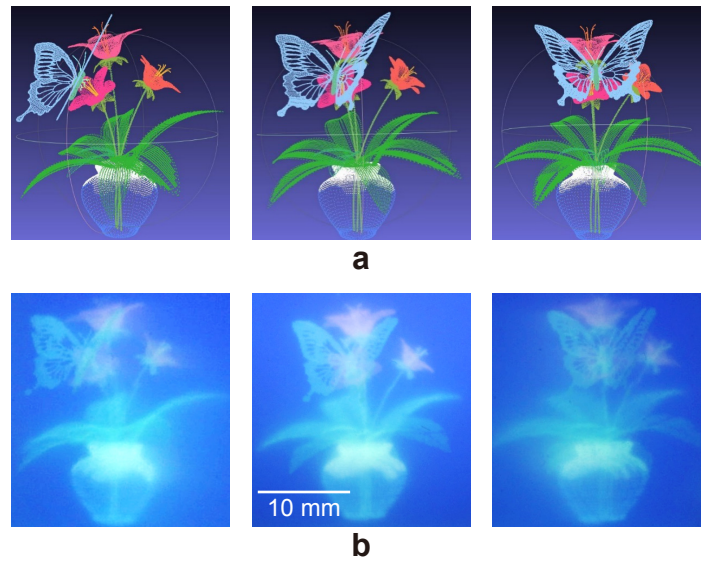


図 7.5: フルカラーボリュームディスプレイの 3次元像. (a)3次元点群データ. (b) 表示される 3次元像.

7.4 複数の 2次元画像を表示する 3次元構造体

ここでは、提案したボリュームディスプレイ作製手法を用いることで、複数のフルカラー 2次元画像を表示する 3次元構造体のデモンストレーションを行った結果を示す。

7.4.1 ボリュームディスプレイの設計

複数の 2次元画像を表示する 3次元構造体の設計手法は、1章で述べたとおりである。本手法の場合、ボクセル値 $V(x, y, z)$ は印刷するインクの量を表す。フルカラー表示のため、ボクセル値は RGB 成分 $(V_R(x, y, z), V_G(x, y, z), V_B(x, y, z))$ を有しているとする。各色成分に対して 1章で説明したアルゴリズムを適応することで、フィルムに印刷する 2次元断面画像を作成することができる。

本実験では図 7.6(a) に示したように、異なる 3 方向にそれぞれ異なる 3 枚のフルカラー 2次元画像 I_1-I_3 を表示するボリュームディスプレイを設計した。表示させる入力画像には、RGB 各 256 階調を有する画素数 512×512 の画像を用いた。画像 I_2 はフィルムと垂直な方向に表示されるように設定し、画像 I_1 および I_3 は Y 軸を中心に $\pm 30^\circ$ 回転させた方向に表示されるように設定した。作成した 2次元断面画像を図 7.6(b) に示す。

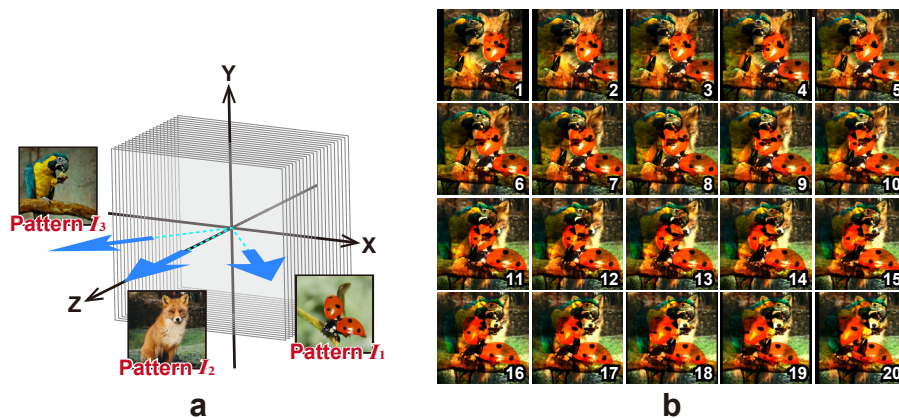


図 7.6: 複数のフルカラー2次元画像を表示するボリュームディスプレイ. (a) ボリュームディスプレイの設計. (b) 設計したボリュームディスプレイの断面画像.

7.4.2 3枚のフルカラー画像を記録した結果

ボリュームディスプレイの試作を行う前に、設計した3次元構造体から表示される2次元画像を確認するためのシミュレーションを行った。このシミュレーションは設計手法の有用性を確かめるために行ったものなので、フィルムやインクによる光吸収などの物理的な影響は考慮していない。図7.7(a)は使用した入力画像を示しており、図7.7(b)は異なる3方向にどのような画像が表示されるかを、シミュレーションによって示した結果である。他の画像からの影響によってそれぞれの投影画像における画質が劣化しているが、入力画像として認識できることを確認した。このシミュレーションから、3次元構造体設計アルゴリズムはフルカラー画像にも適用可能であることが確認できた。

次に、図7.6(b)に示した断面画像を印刷した20枚のフィルムを重ね合わせることで、ボリュームディスプレイを実際に試作した。図7.7(c)に、試作したボリュームディスプレイを異なる角度から撮影した際の写真を示す。7.3節ではフィルムと垂直な方向から紫外光を照射していたが、この照射方法ではフィルムが紫外光を吸収し、投影画像に影響がでてしまう。そこで本節の実験では、フィルムと垂直な方向から照射するために、二つの紫外光源をボリュームディスプレイの上下に置いて紫外光照射を行った。シミュレーションによって予測された結果と比較すると、投影画像が不明瞭になってしまっているものの、3枚のフルカラー画像を確認することができた。このような画質劣化に関しては主に、フィルムによる光吸収が原因であると考えられる。これについては7.5節で詳しく述べる。

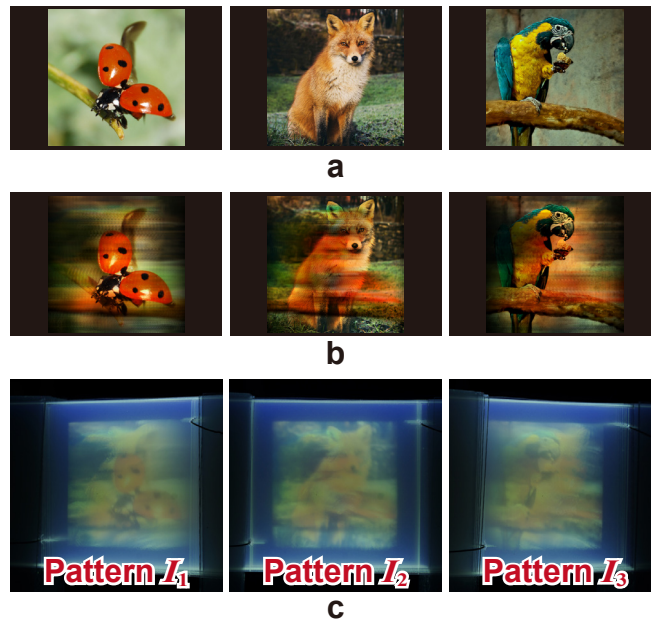


図 7.7: 試作したボリュームディスプレイ. (a) 表示させたい 3 枚の入力画像. (b) 投影画像のシミュレーション結果. (c) 実際に表示される投影画像.

7.4.3 投影画像枚数の拡張

表示方向は自由に設定することができる. そのような特性を実験的に示すために, 図 7.8(a) に示すように, 異なる方向に 4 枚のフルカラー画像 I_1 – I_4 を表示するボリュームディスプレイを作製した. この実験において, 4 枚の画像が持つ投影軸は, フィルムと垂直な方向 (Z 軸) を, X 軸および Y 軸を中心に $\pm 20^\circ$ 回転させた方向に設定した. 図 7.8(b) に投影画像のシミュレーション結果を示す. 入力画像が 3 枚のとき (図 7.7(b)) と比べるとコントラストが低下し, 背景ノイズが生じてしまっているものの, 4 枚の異なるフルカラー 2 次元画像をそれぞれの視点から確認できた. 今回の実験では, 1 章で説明したオリジナルのアルゴリズムを用いたが, このような背景ノイズに関しては 2 章で述べた反復計算アルゴリズムによって低減できるものと考えられる.

図 7.8(c) は, 作製したボリュームディスプレイを異なる視点から撮影した写真である. シミュレーション結果と比較して画質の劣化は見られるが, 異なる 4 枚の投影画像を観察することに成功した.

7.5 フィルム枚数の再生像への影響評価実験

今回使用したインクジェットプリンタは, 最大 $5,760 \times 1,440$ dpi という高解像度で 2 次元断面画像の印刷が可能である. しかし, フィルムの厚さ (0.1 mm) とフィ

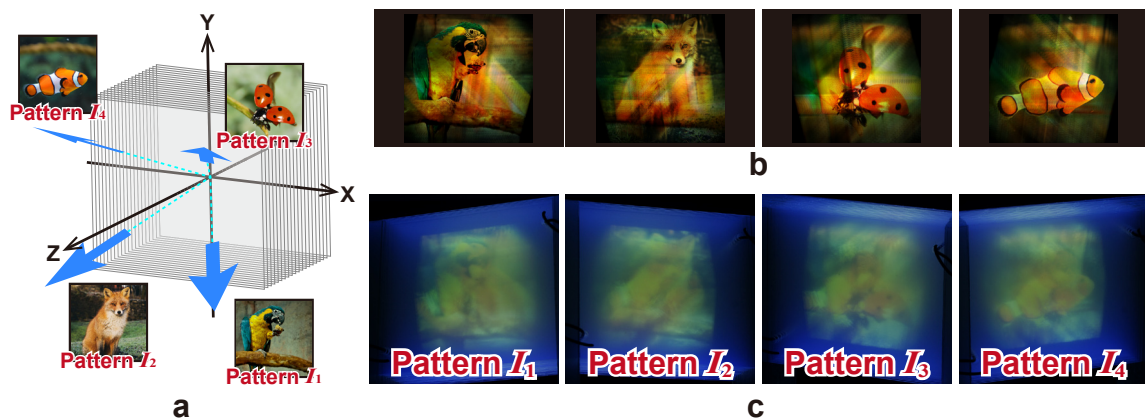


図 7.8: 試作したボリュームディスプレイ. (a) ボリュームディスプレイの設計. (b) 投影画像のシミュレーション結果. (c) 実際に表示される投影画像.

フィルム間のギャップ (0.5 mm) から、奥行き方向における解像度は 42 dpi と求まる。また奥行き方向の画素数 (フィルム枚数) も 20 となっており、今後は奥行き方向の解像度の向上を目指していく必要がある。そのためには、フィルムの枚数を増やす必要がある。しかし、フィルム枚数を増やすごとに紫外光および可視光 (インクの発光) の減衰が生じ、再生像に影響を及ぼすものと考えられる。本節では、フィルム枚数の増加が再生像に及ぼす影響を調べるために行った評価実験の結果を示す。

7.5.1 実験方法

図 7.9(a) に本実験のセットアップを示す。実験系は、赤・緑・青の 3 色の円が重なった 2 次元パターンが印刷された 1 枚のフィルム、蛍光インクが印刷されていない多層透明フィルム、紫外光源およびカメラで構成されている。図中の N_{UV} は、パターンが印刷されたフィルムと紫外光源との間に配置された透明フィルムの枚数を、 N_{VIS} はパターンが印刷されたフィルムとカメラとの間に配置された透明フィルムの枚数をそれぞれ表す。本章で提案するボリュームディスプレイ方式において、奥行き方向の画素数を向上させるためには N_{UV} と N_{VIS} を増加させなければならない。しかし、 N_{UV} の増加は蛍光インクを励起するために必要な紫外光の減衰を、 N_{VIS} の増加はインクから発せられた可視光の減衰をそれぞれ引き起こしてしまう。

7.5.2 評価実験の結果

$N_{VIS} = 0$ に固定し、 $N_{UV} = 0, 5, \dots, 25$ としたときに得られた撮影画像を、図 7.9(b) に示す。カメラの焦点は、パターンが印刷されたフィルムに合わせている。この結果から、 N_{UV} の増加が画像の輝度およびコントラストを著しく低下させていること

が確認できた。これは、紫外領域（365 nm）において、使用したフィルム一枚あたりの透過率が82%であることに起因する。 $N_{UV} = 20$ のとき、蛍光インクを励起するための紫外光は約2%まで、 $N_{UV} = 25$ のときは1%以下まで減衰してしまうため、これらの場合は発光の様子をほとんど確認することはできない。

次は $N_{UV} = 0$ に固定し、 $N_{VIS} = 0, 5, \dots, 25$ としたときに得られた撮影画像を、図7.9(c)に示す。図7.9(b)の結果と比較すると、 N_{VIS} 増加による輝度およびコントラストの低下はあまり見られない。これは、可視光領域におけるフィルムの透過率が、紫外領域と比較して高い（約90%）ため、あまり減衰の影響を受けないためである。一方、 N_{VIS} の増加に伴い、画像にぼけが生じ、不鮮明になっていることが確認できる。この結果は、インクから発せられた可視光が、フィルム面で散乱および屈折することが原因であると考えられる。

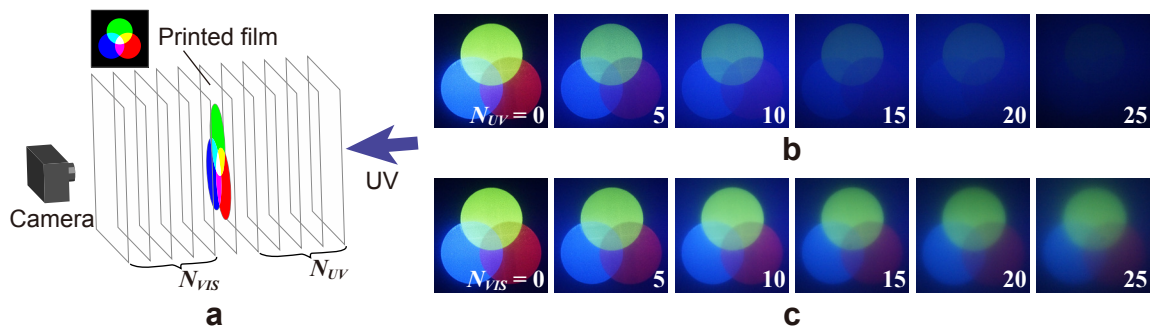


図 7.9: フィルムの光吸収による再生像の影響。(a) 実験方法。(b) 紫外光吸収による影響の評価。(c) 可視光吸収による影響の評価。

評価実験の結果から、フィルムとして用いた材料の透明度が、ボリュームディスプレイの画質に著しく影響することが分かった。今後フィルム枚数を増やしていくうえで、フィルムの透過率向上が不可欠となる。例えば、6章の実験でも使用したPDMSは有力な候補の一つとして考えられる。光路長の長さが10 mmの場合、可視光領域におけるPDMSの透過率は90%以上である。そのため、PDMSを0.1 mmのフィルム上に形成することで、1枚あたりの透過率99%以上のフィルムとして使用可能となる。

7.6 結言

本章では、ナノ光材料の3次元配置に基づくボリュームディスプレイの高解像度化に向けて、インクジェットプリンタを用いた画素形成手法を提案した。

7.2節では、インクジェットプリンタを用いた高解像度化手法のコンセプトと、ボリュームディスプレイの作製手法について説明した。蛍光材料の配置作業を機械的に行えるため、緻密かつ正確な画素配置を実現可能となる。

7.3節では、フルカラー3次元像を表示するボリュームディスプレイの設計と、実際に作製したディスプレイの結果を示した。20枚の透明フィルムに蛍光インクを印刷し、積層することで高解像度ボリュームディスプレイを作製することに成功した。

7.4節では、提案するボリュームディスプレイ作製手法を用いることで、複数のフルカラー2次元画像を表示する3次元構造体を作製した。3枚および4枚のフルカラー2次元画像を表示するボリュームディスプレイの試作に成功した。

7.5節では、作製したボリュームディスプレイを評価するために行った実験結果を述べた。フィルム枚数が、ボリュームディスプレイの再生像に及ぼす影響について評価し、今後の課題を述べた。

第8章 フォトクロミック材料を用いたフルカラー3次元動画像表示

8.1 緒言

6章では、光を介したエネルギー供給によって、直交する3方向にそれぞれ異なるマルチカラー画像を表示する量子ドットポリウムディスプレイについて述べた。さらに7章では、インクジェットプリンタを用いることで、より高解像度なポリウムディスプレイを実現し、またフルカラー化も可能となることを示した。しかし、これらのシステムで表示できるのは静止画のみであり、動画化が必要であるという課題を6.4.2節で述べた。光制御によって3次元動画像を表示するためのポリウムディスプレイの実現に向けて、既に様々な手法が提案されているが^{14-20,60)}、実用化された例は確認されていない。

本章では、フォトクロミック材料を用いた新たな光制御ポリウムディスプレイ手法を提案する³⁰⁾。フォトクロミック材料は、光照射によって色状態が変化するという特性を有している。この特性を利用することで、本論文で主に扱ってきた複数の2次元情報を保持する3次元構造体のみならず、あらゆる3次元動画像を表示可能なポリウムディスプレイが実現できる。まずは8.2節で、これまで提案されてきた光制御ポリウムディスプレイの動画化手法について原理を簡単に説明し、それぞれの特徴について述べる。次に8.3節で、従来手法の特徴を踏まえた上で、新たなポリウムディスプレイ方式の原理を説明する。次に8.4節で、原理確認のために行った基礎検証実験の方法を説明する。さらに8.5節で、原理確認実験の結果を示す。さらに8.6節で、提案するシステムのフレームレートおよび空間解像度に関する考察を行う。最後に8.7節で、本章をまとめる。

8.2 これまで提案されてきた光制御動画化アプローチ

本節では、光制御によって動画化を実現するために提案されたいくつかのポリウムディスプレイ手法を紹介し、それぞれの手法について特徴を述べる。

8.2.1 レーザ照射による手法

ナノ秒またはフェムト秒オーダーの高輝度短パルスレーザを、レンズなどを用いて集光させると、焦点付近でプラズマの発光が生じる。この発光をいくつも発生させ、空中に任意の3次元像を描画可能なボリュームディスプレイが開発された¹⁸⁻²⁰⁾。何も無い空中に3次元像を描画できるほか、レーザ光の出力を調整することで、人の手で像に直接接触れるという重要な特徴を持つ。しかし、プラズマ発光の色は用いるレーザの波長に依存しないため、カラーの3次元像を描画することはできない。

発光材料（量子ドット¹⁴⁾や発光色素¹⁷⁾など）で構成されるボリュームディスプレイも提案されている。これらのアプローチは2光子吸収の原理に基づいており、3次元的な空間の任意の場所における発光を実現できる。ここで、具体的な例を挙げて2光子吸収を用いたボリュームディスプレイ方式について簡単に説明する。例えば、400 nm以下の光を吸収することで励起され、緑色の可視光（500 nm）を発光する材料Aで満たされたボリュームを考える。このボリュームを400 nmで励起する場合、励起光が通過した全経路において発光が生じてしまうため、ボリューム中の任意の点だけを発光させることはできない。一方で2光子吸収は、発光材料が二つの光子を同時に吸収し励起される過程である。2光子吸収のピークは通常の吸収の2倍付近になることが多いので、この材料の場合は800 nmの近赤外光によって励起できる。また2光子吸収は、通常のレーザ照射ではほとんど発生しないが、光子（エネルギー）密度が非常に高い場合において高確率で発生する。そのためプラズマ発生と同様に、パルスレーザを集光させることによって、焦点付近のみで部分的に発生させることができる。このとき、発光色は材料の種類に依存するため、3原色（RGB）の発光を持つ材料を用いることでフルカラー化を実現できる。しかし、3色の発光材料は互いに別の場所に配置される必要があるため、ボリュームは多層構造などの複雑な構造になってしまう。

8.2.2 T-type フォトクロミック材料を用いた手法

8.2.1節で述べた短パルスレーザを用いた手法とは異なるアプローチの光制御ボリュームディスプレイが提案された⁶⁰⁾。このボリュームディスプレイは、フォトクロミズムと呼ばれる化学的な現象に基づいている。フォトクロミズムとは、光の効果によって材料の持つ分子構造が、異なる吸収スペクトルを持つ2状態間で可逆的に変化する現象と定義される。フォトクロミズムを有する材料はフォトクロミック材料（Photochromic Materials: PM）と呼ばれる⁶¹⁾。可視領域における吸収スペクトルの違いは、その材料の色の違いであると言い換えることができる。つまりPMは、光の作用によって色が変化する材料である。

文献⁶⁰⁾では、スピロピランというフォトクロミック材料が使われている。この材

料は、通常時は無色透明であるが、紫外光を吸収することで分子構造が変化し着色される。紫外光を照射し続けている間は着色され続けるが、紫外光照射を遮ると熱の作用によって (Thermally) 逆反応が起き、無色透明に戻る (消色される)。そのため、T-type の PM に分類される。この T-type PM を透明なプレート上に添付し、重ね合わせることでボリュームディスプレイを構成する。紫外光プロジェクタによって、添付された PM の着色・消色状態を制御する。任意の 3 次元像を描画するためには、紫外プロジェクタが全てのボクセルの発色状態を独立に制御する必要がある。つまり、5 章で説明した糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイと同様の原理で、画素制御を行っている。そのため、2 次元プロジェクタを用いる他のボリュームディスプレイ手法⁹⁻¹¹⁾と同様に、プロジェクタの視点から見て、ボクセル同士が重ならないように配置する必要がある。また発光材料を使用した場合と同様に、3 原色 (この場合はシアン、マゼンタ、イエロー) の PM を個別に配置する必要がある。このように、ボクセル配置に強い制限を持つため、この手法での高精細ボリュームディスプレイの実現は困難である。

8.3 提案するボリュームディスプレイ手法

新たに提案するボリュームディスプレイでは、P-type の PM に分類されるジアリールエテン^{62,63)} という材料を画素として用いる。この材料は、通常時は透明であるが、紫外光照射によって分子固有の色に着色される。T-type の PM とは異なり熱安定性を有しているため、紫外光照射を遮っても色は消えない。ただし、適当なスペクトルを持つ可視光を照射すると、光の作用によって (Photochemically) 消色反応を起こすことができる。着色状態と消色 (透明) 状態ではその分子構造が異なり、それぞれ開環体および閉環体になっている。従来研究で用いられてきた量子ドットや発光色素、T-type の PM においては、発光および発色状態は 1 種類の光のみに依存していた。それに対して P-type の PM の発色状態は、紫外光と可視光という 2 種類の光によって決定される。本手法ではこの P-type PM の特性に着目し、ボリュームディスプレイの新たな設計原理を開発した。

8.3.1 着色の新原理

図 8.1(a) に、P-type の PM に基づくフルカラーボリュームディスプレイのコンセプトを示す。3 次元像が描画されるボリューム空間は、紫外光照射時に異なる色 (シアン・マゼンタ・イエロー) に変化する 3 種類の PM の混合体で構成されている。この混合体を PM ボリュームと呼ぶ。PM ボリュームに、2 系統の制御光、つまり紫外光と可視光を異なる角度から照射することで、任意の 3 次元像を描く。PM ボリューム

ムを使用した3次元像表示は、位置選択的着色および色選択的着色という二つの新原理に基づいて実現される。

まずは、PMにおける位置選択的着色原理について述べる。図8.1(a)に示すように、紫外光と可視光の2制御光を異なる角度から照射すると、光の交差領域が生じる。ここで、着色のための紫外光と消色のための可視光が同時に照射されたPMが、どのような色反応を示すかを考える。着色と消色のどちらが優先されるかは、2制御光の照射輝度バランスと、材料が持つ吸収スペクトルに依存する。この現象は、ポテンシャルエネルギー曲面と、関連する分子特性に基づいてる。ポテンシャルエネルギー曲面は、PMの着色反応（開環体から閉環体）および消色反応（閉環体から開環体）における反応経路を決定する^{63,64}。本研究では、紫外光と可視光が同時に照射された際には、消色反応が優先して起きるように、2制御光バランスが設定されているという前提に基づく。紫外光および可視光の照射パターンを空間的に変調することで、2制御光の交差領域は任意かつ動的に設定でき、その交差領域において位置選択的な着色を実現できる。

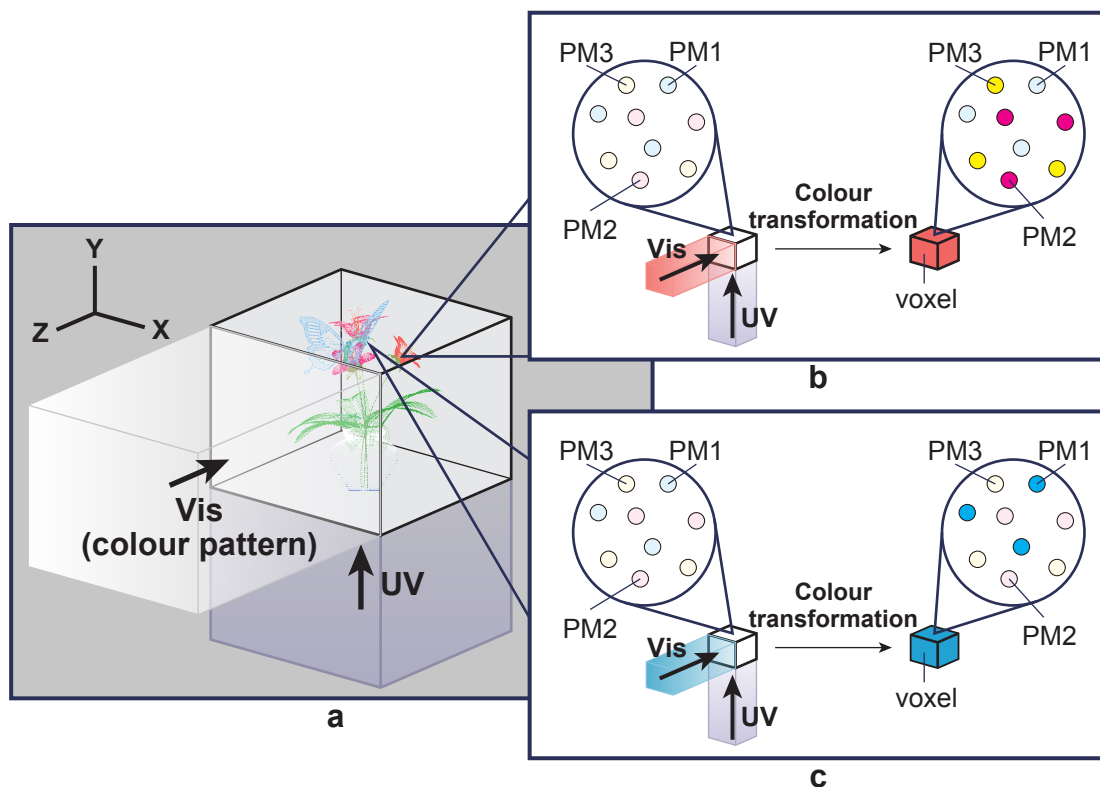


図 8.1: PM 混合体を用いたボリュームディスプレイのコンセプト。(a) 概略図。(b) 赤色または (c) シアンの可視光を紫外光と同時に照射した場合におけるボクセルの色反応。

次に、PMの色選択的着色原理について述べる。PMの色選択的着色は図8.1(b),

(c) が示すように、可視光のスペクトル（色）で制御できる。PM ボリュームは、着色状態でシアン、マゼンタ、イエローの色に変化する3種類のPM（それぞれPM1, PM2, PM3）で構成される。ここで、これらのPMが持つ吸収スペクトルが、図8.2(a)に示すように、理想的なスペクトルを有していると仮定する。PMの消色反応を起こすためには、PMが吸収する波長帯の可視光を照射する必要がある。つまり、PM1, PM2, PM3を消色する際に必要な可視光の色はそれぞれ赤、緑、青となる。

ここで、3種類のPMの混合体であるボリュームのある領域（ボクセル）において、紫外光と赤色の可視光が同時に照射された場合について考える（図8.1(b)）。紫外光と同時に赤い可視光が照射されたことで、PM1（シアン）においてのみ消色が優先され、PM2（マゼンタ）およびPM3（イエロー）は着色される。そのため、結果的にボクセルは赤色（マゼンタ+イエロー）に着色される。紫外光と同時にシアン（緑+青）の可視光を照射した場合、PM2およびPM3では消色が優先され、PM1のみが着色されるため、結果としてボクセルはシアンに変化する。このように、消色に必要な可視光スペクトルを制御することで、色選択的な着色が実現できる。このシステムは単に複数種類のPMを混ぜ合わせるだけで構成されるため、極めてシンプルな構造となる。このアプローチでのボクセルサイズは、理論的には分子の大きさと等しくなるため、高精細なボリュームディスプレイの実現が可能となる。

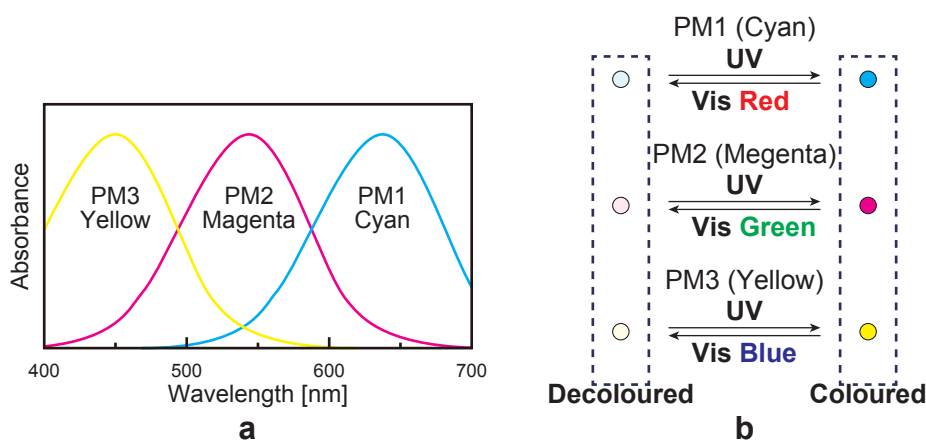


図 8.2: 使用する3原色（シアン・マゼンタ・イエロー）のフォトクロミック材料。(a) 着色時の理想的な吸収スペクトル。(b) 各材料における色応答。

8.3.2 画素制御手法

8.3.1 節で説明した二つのPM着色原理に基づくボリュームディスプレイ手法について、図8.3を用いて説明する。PMを着色させるための紫外光と消色させるための可視光の照射パターンは、二つの空間光変調器（Spatial Light Modulator: SLM）

によって同時に制御される。紫外光，可視光の制御に用いるものをそれぞれ SLM1, SLM2 とする。SLM1 によって，PM ボリューム中の特定の奥行きのみ紫外光を照射する。同時に，直交する角度から SLM2 によって可視光パターンを照射すると，紫外光が照射された領域にのみ，2次元パターンが描画される。各ボクセルの色は可視光のスペクトルによって決定される。つまり，プロジェクタが発する3原色の光（赤，緑，青）のバランス調整によって任意の色を表現可能となる。紫外光を照射する領域を，SLM1 によって奥行き（Z 軸）方向に走査していくことで，任意の奥行き（ $z = 1, 2, \dots, N$ ）に任意の2次元パターンを順番に描画していく。全ての領域を走査するのにかかる時間が人の目の時間分解能よりも短くすることで，連続する N 枚の2次元パターンを一つの3次元像として認識できる。

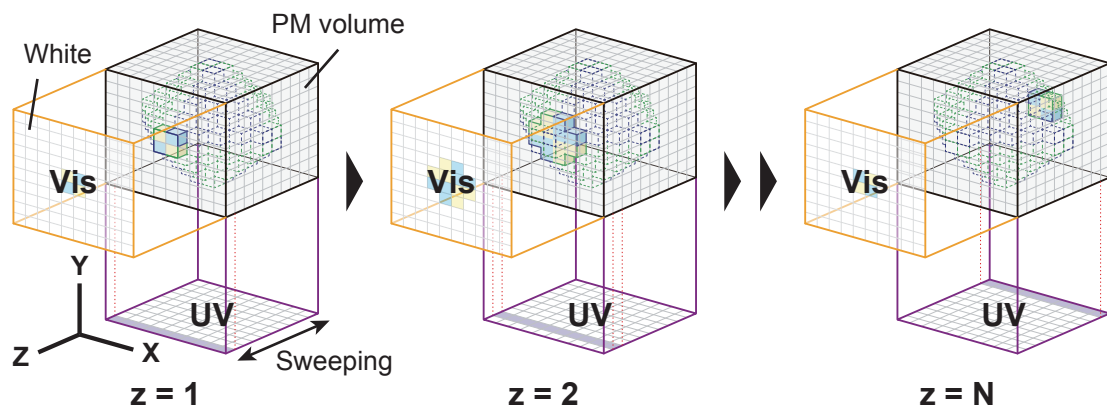


図 8.3: 位置選択的および色選択的着色原理に基づくボリュームディスプレイシステム。

8.4 実験方法

上記で示した二つの着色原理を実証するために，2種類の基礎実験を行った。P-type の PM として，どちらの実験でもジアリールエテンを用いた。数ある PM の中で本研究で使用したジアリールエテン誘導体は，その光学的安定性から最も良く研究・開発されている分子の一つである⁶³⁾。実験では，山田化学工業から購入した3種類のジアリールエテンを用いた。位置選択的着色原理の実証実験には赤色の PM ‘DAE-0004’ を，色選択的着色実験には黄色の PM ‘DAE-0068’ と青色の PM ‘DAE-0018’ の2種類を用いた。

8.4.1 1種類のPMを用いた位置選択的着色実験

ここでは1種類のPMを用いて、位置選択的にPMを着色可能であることを示すための実験方法について述べる。図8.4(a)は、トルエンに溶かしたPM（濃度：2 mg/mL）を撮影した写真であり、紫外光照射によって着色し（右）、可視光照射によって消色する（左）様子を示している。図8.4(b)は、PM溶液における着色前後の吸収スペクトルを示している。消色（透明）状態では可視光領域においてほとんど吸収は見られず、着色（赤）状態では青から緑までの可視光を吸収することが確認できる。

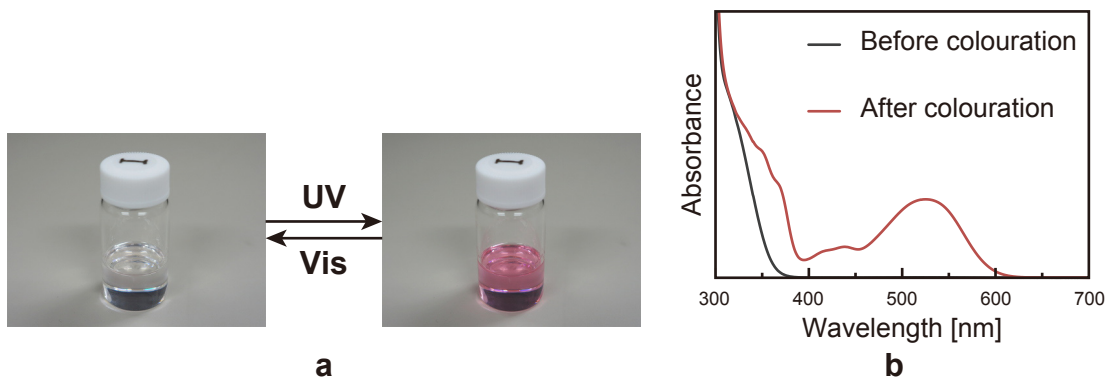


図 8.4: 使用したフォトクロミック材料. 着色前後における状態変化を示す (a) 写真および (b) 吸収スペクトル.

図8.5に実験の様子を示す。図の中央に置かれたPMボリュームの作製には、量子ドットボクセルの作製方法（6.2.2節を参照）と同様に、透明樹脂（PDMS）を用いた。2 mLのPM溶液と4.4 mLのPDMS（主剤：4.0 mL，硬化剤：0.4 mL）を混合し、1 cm × 1 cm × 4 cmの型に流し込み、真空状態で脱泡した後、約100 °Cで熱することで固化させた。最後に1 cm × 1 cm × 3 cmの大きさにカットし、PMボリュームを作製した。樹脂中に封入したことによって、着色されたPMがボリューム中を流動し、透明状態のPMと混合してしまうことを防げる。またPDMSは紫外から可視領域にかけて非常に高い透明度を有しているため、PMの吸収スペクトルは、材料を樹脂中に封入したことによる影響をほとんど受けない。

302 nmにピークを持つ紫外光源（AS ONE, 'MID-170'）が、図8.5下方に配置されており、PMボリュームを均一に照射する。任意2次元パターンを照射する可視光源としては、通常のプロジェクタ（Vivitek, 'QUMI Q5'）を用いた。8.3.1節でも述べたように、紫外光と可視光の両方が照射された場所ではPMの消色反応が生じ、紫外光だけが照射された領域でのみ着色反応が生じることで、位置選択的着色が実現される。可視光が照射されていない間に紫外光が照射された場合、不必要な部分の着色を誘起してしまうため、2制御光の到着時刻と照射継続時間を適切に調

節する必要がある。

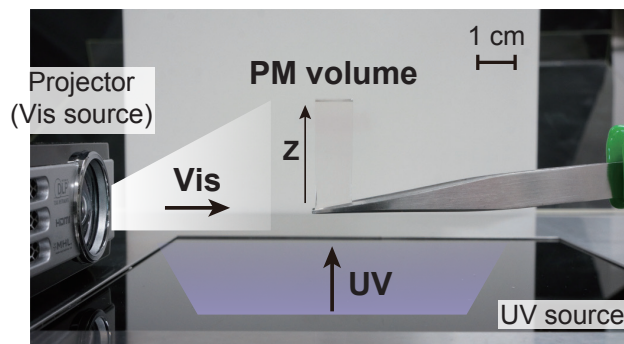


図 8.5: 位置選択的着色実験の様子。

8.4.2 2種類のPMを用いた色選択的着色実験

次に、色選択的にPMを着色可能であることを示すための実験方法について述べる。この実験では2種類（黄色と青）のPMを用いた。図8.6(a)に、着色前後においてPM溶液の色が変化の様子を示す。左から、黄色PMだけを含んだ溶液、黄色PMと青PMどちらも含んだ溶液、青PMだけを含んだ溶液である。また図8.6(b)に、黄色PMと青PMに紫外光照射によって着色された後の吸収スペクトルを示す。これら2種類のPMが持つ吸収スペクトルは、吸収帯域が可視領域においてほとんど重なっていない。黄色PMは350–450 nm付近の可視光（青色）を照射することで、青PMは500–650 nm付近の可視光（例えば黄色）を照射することで、消色反応を起こすことができる。つまり、可視光の照射スペクトルを制御することで、黄色PMと青PMのどちらを消色させるかを自由に選択できる。

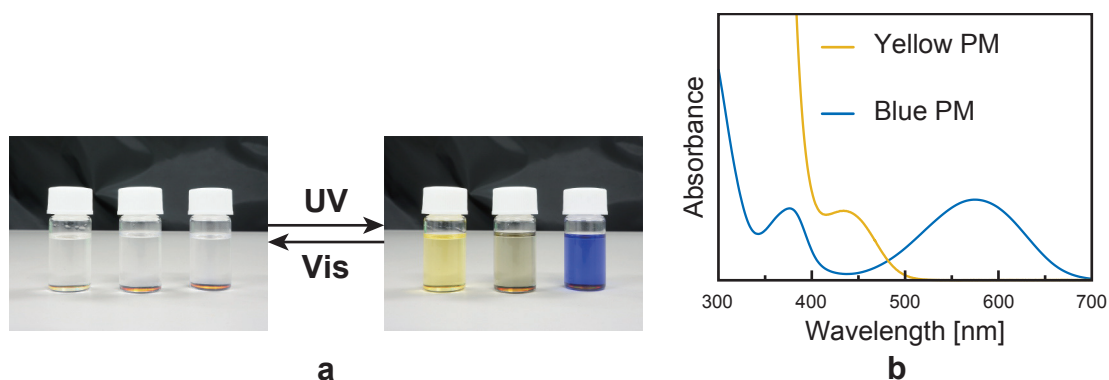


図 8.6: 使用した2種類のフォトクロミック材料。(a) 着色前後における状態変化を示す写真。(b) 着色後の吸収スペクトル。

図 8.7 に実験の概略図を示す。PM ボリュームは黄色と青の 2 種類の PM を封入しており、大きさは $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ とした。位置選択的着色実験と同様に、紫外光源と可視光源を異なる角度から照射することで、原理の実証を行う。

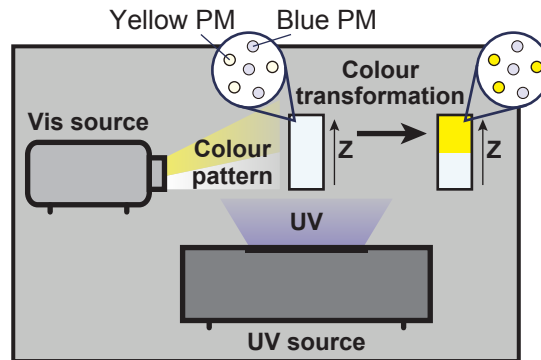


図 8.7: 色選択的着色実験の様子。

8.5 実験結果

本節では、位置選択的および色選択的着色原理の検証実験結果を述べる。

8.5.1 位置選択的な着色原理の実証

図 8.8(a) は、PM ボリュームの色変化（下段）が紫外光と可視光の照射パターン（上段）に依存する様子を示している。まず、紫外光のみを照射した場合は、PM ボリューム全体が赤く着色される（図 8.8(a-1)）。紫外光と同時に、白色のみで構成される 2 次元パターンを可視光プロジェクタから照射した場合、可視光照射による消色が優先されるため、PM ボリュームは透明なままとなる（図 8.8(a-2)）。照射輝度はそれぞれ、紫外光が 0.84 mW/cm^2 、可視光が 15.04 mW/cm^2 であった。次に、プロジェクタからの可視光 2 次元パターンを変化させ、位置選択的な着色を起こした。図 8.8(a-3-5) が示すように、PM ボリュームは、可視光が照射されずに紫外光のみが照射された領域のみで着色されていることが確認できた。

図 8.8(b) 中のグラフは、図 8.8(a) の画像をグレースケール化し、最大値が 1 になるように画素値を正規化した結果を示す。Z 軸は画像の垂直方向（紫外光源から見た奥行き方向）を表している。画素値は高いほど淡い色（より透明）を示しており、低いほど濃い色を表している。グラフ 3-5 から、位置選択的に色変化を制御できていることが定量的にも確認できた。

この実験では、紫外光源は PM を一様に照射していたため、着色反応の位置選択性は奥行き方向に限定されていた。デジタルミラーデバイスやガルバノスキャナ

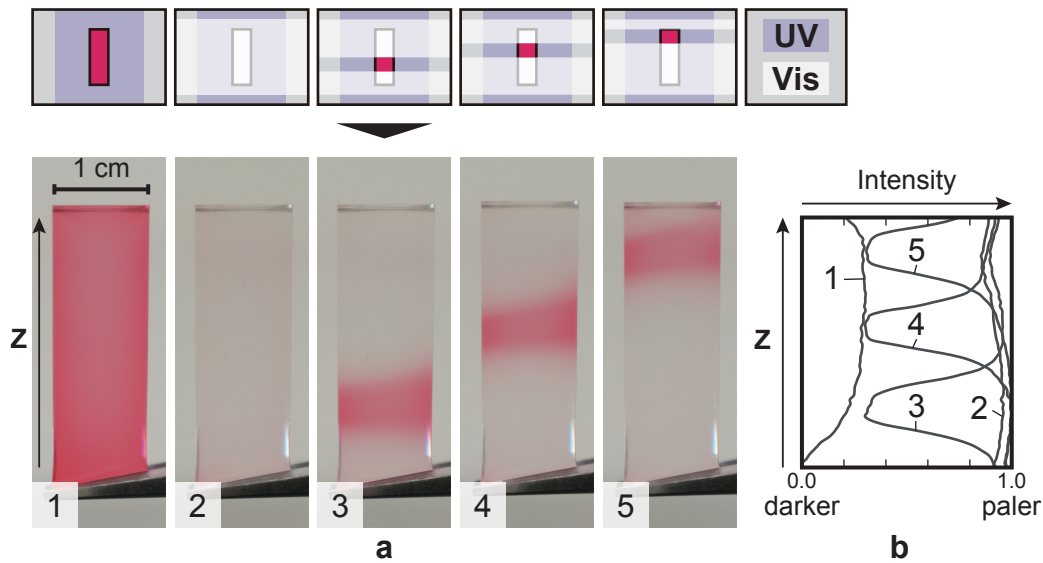


図 8.8: 位置選択的着色実験の結果. (a) 紫外光と可視光照射パターン (上段) に対する色変化の様子 (下段). (b) 奥行き (Z 軸) 方向に対応する画素値の変化.

など, 適切な SLM 器を使用して紫外光照射パターンを制御することで, 任意の 2 次元パターンを任意の場所に描くことができる.

8.5.2 色選択的な着色原理の実証

図 8.9(a) は, PM ボリュームの色変化 (下段) が紫外光と可視光の照射パターン (上段) に依存する様子を示している. 紫外光と同時に, 白色のみで構成される 2 次元パターンを可視光プロジェクタから PM ボリュームに対して照射した場合, ボリュームは透明なままとなる (図 8.9(a-1)). これは, 白色光に黄色 PM を消色させるために必要な青い可視光と, 青色 PM を消色させるために必要な黄色の可視光が両方含まれているためである. 次に, PM ボリュームの下半分のみに対して白色の可視光を照射し, 上半分には可視光を照射しなかった場合について考える. 可視光が照射されなかった PM ボリュームの領域は, 黄色と青色の混色に着色される (図 8.9(a-2)). この領域では, 黄色 PM と青色 PM のどちらも消色されず着色状態となるためである. 可視光の照射パターンの半分を黄色にした場合, 黄色 PM は黄色の可視光を吸収しないため, 青色 PM だけが消色される. 黄色 PM のみが着色状態となるため, PM ボリュームは結果的に黄色に着色される (図 8.9(a-3)). また図 8.9(a-4) に, 可視光の一部を青色にした場合も, 同様の結果が得られることを示す. 以上の結果から, 可視光のスペクトル (色) によって, PM を着色する際の色を自由に制御できることが確認できた.

図 8.9(b) のグラフは, 図 8.9(a) の画像において, 最大値が 1 になるよう画素値を

正規化した結果を示す。ここでは色の変化を確認するために、RGB の値をそれぞれ示している。図 8.8(b) と同様に、Z 軸は垂直方向を表す。PM ボリュームの透明な領域において、RGB 全ての値が高い数値を示しているのに対して、黄色と青色の混色に着色された領域では RGB 全ての値が低い数値を有しており、黄色 PM と青色 PM の両方が着色されていることが定量的に確認できる。黄色に着色された領域では、R と G の値が高く ($R+G = \text{黄色}$)、B の値が低い。逆に、青色に着色された領域では B の値が高く、R と G の値が低い。これらの結果から、色選択的な色変化の様子を定量的に示すことができた。今回は 2 色のみを用いたが、シアン・マゼンタ・イエローの 3 色を用いることでフルカラー表示も実現できる。

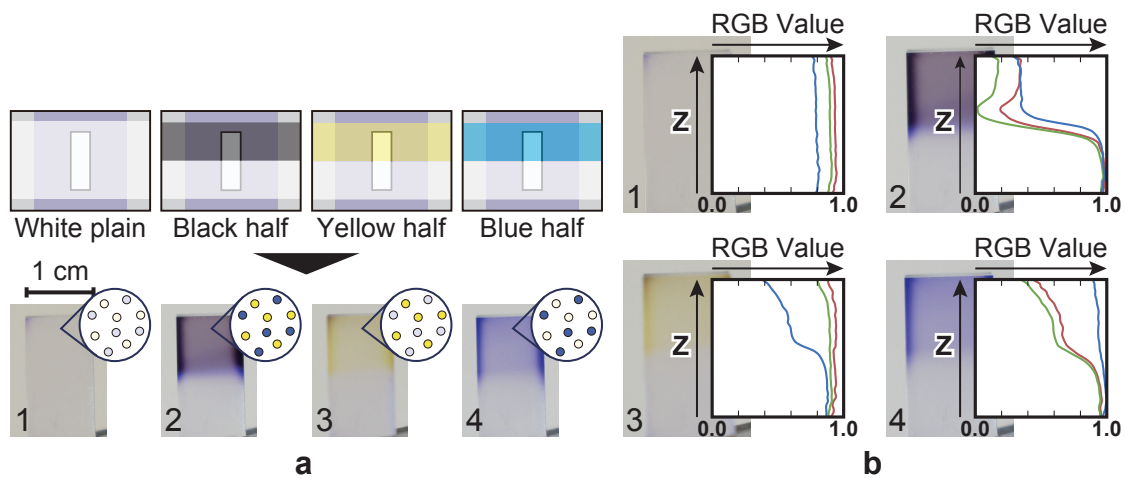


図 8.9: 色選択的着色実験の結果。(a) 紫外光と可視光照射パターン (上段) に対する色変化の様子 (下段)。(b) 奥行き (Z 軸) 方向に対応する画素の RGB 値の変化。

8.6 考察

提案した着色原理に基づくボリュームディスプレイシステムを構築するためには、システムのフレームレートと空間解像度を考慮する必要がある。本節では、これらに関する考察を述べる。

8.6.1 システムのフレームレート

映像を切り替える際のちらつきを抑えるためには、15 Hz 以上のフレームレートを有する必要があることが知られている。そこで、ボリュームディスプレイは 15 Hz 以上のフレームレートを持つ必要があるとする。ボリュームディスプレイの奥行き方向の解像度を N とした場合、任意奥行きにおいて 1 枚の 2 次元パターンを描画す

る処理は、 $1/(15N)$ 秒以内に完了する必要がある。ジアリールエテン分子の色変化は十分に高速（ピコ秒スケール）に行われるため⁶³⁾、SLMのフレームレートが提案システムのボトルネックになると考えられる。近年では、ディスプレイ応用に向けて高速度SLMがいくつか開発され、利用されている^{65,66)}。これらのデバイスが、今回提案した着色原理に基づくボリュームディスプレイシステムに要求されるスペックを、提供可能であると考えている。

8.6.2 システムの空間解像度

提案するボリュームディスプレイにおける奥行き（Z軸）方向の理論的な解像度は、SLM1（紫外光）からの照射画像の解像度によって決まり、水平（X軸）および垂直（Y軸）方向の解像度は、SLM2（可視光）からの照射画像の解像度によって決まる。各SLMが投影できる最小の光点のサイズに関しては、光の回折限界によって決定する。しかし、実験結果の画像（図8.8(a-3-5)）が示すように、着色領域と消色領域の境界においてボケが生じている。図8.8(b)中のグラフ3-5が着色状態と消色状態の間を急峻に変化せず、緩やかに変化していることから、ぼけが生じている様子が定量的に確認できる。この原因は、境界領域において可視光が広がってしまったことにより、余分な消色が誘起されたためであると推測できる。2色のPMを用いた実験でも、同じ要因で発生したと思われる色境界における色割れの様子（図8.9(a-2)および図8.9(b-2)）が確認できた。このような問題は、高い指向性を持つ光源、例えばレーザープロジェクタ⁶⁷⁾などを用いることで解決できると考えられる。

8.6.3 本論文における位置付け

本章で実験的に示したフォトクロミック材料の着色原理を利用することで、フルカラー3次元動画像表示が可能なボリュームディスプレイシステムが実現できると考えている。今後はシステム開発を進めていき、通常の3次元像表示のみならず、本論文で提案してきた複数の2次元画像を表示する3次元構造体を描画し、次世代情報伝達システムとしての応用を目指す。

8.7 結言

本章では、フォトクロミック材料を用いた新たなボリュームディスプレイ方式を提案した。二つの着色原理によって、簡易なディスプレイ構造で動画化を実現できる方式である。

8.2節では、本研究以前に提案された光制御ボリュームディスプレイの動画化手法について原理を簡単に説明し、それぞれの特徴を述べた。

8.3節では、フォトクロミック材料を用いた新たなボリュームディスプレイ方式の原理を説明した。この方式は、フォトクロミック材料の位置選択的着色と色選択的着色という二つの新原理に基づいている。複数種類のPMを単に混ぜ合わせるという単純な構造で、フルカラー3次元像表示を実現できる。

8.4節では、原理確認のために行った基礎検証実験の方法を説明した。

8.5節では、原理確認実験の結果を示した。位置選択的着色と色選択的着色という二つの新原理を実証することに成功した。

さらに8.6節において、提案するシステムのフレームレートおよび空間解像度に関する考察を行い、今後取り組むべき課題について述べた。

結論

本論文では、次世代のボリュームディスプレイシステム実現に向けて取り組んだ研究成果をまとめた。このシステムは、複数の視野あるいは人に向けて独立した2次元情報を同時に伝える機能を持つ。特定の視点方向にのみ情報を伝えられるという特徴から、高い指向性を有する情報伝達手段である。複数の2次元情報を保持する3次元構造体設計アルゴリズムの開発と、設計した3次元構造体を表示するための立体ディスプレイの開発という二つの課題に取り組んだ。

以下、本研究において得られた成果を章ごとに総括する。

1章では、複数の2次元情報を保持する3次元構造体設計アルゴリズムについて述べた。この提案アルゴリズムでは、他の2次元画像との相互的な影響を背景のノイズとみなせるため、任意枚数の画像を同時に表示するような3次元構造体の設計が可能である。計算機シミュレーションと3Dクリスタル加工技術による試作を行うことで、提案アルゴリズムが有用であることを示した。さらに提案手法が抱える三つの課題について述べ、本論文でそれらの課題に対してどのように取り組んだかを簡単に説明した。

2章では、3次元構造体から表示される複数枚の2次元画像の画質を、改善するための手法について述べた。この画質改善手法は逐次近似法の考え方を取り入れており、反復計算を繰り返すことで、表示される投影画像の画質を改善できる。計算機シミュレーションにおいては、構造的類似性（SSIM）という画質評価指標を用いて、提案手法の有用性を確認した。さらに、3Dクリスタル加工技術による試作では、正八角柱、立方体、球体という3種類のガラスを用いて、4枚の2次元画像を表示する3次元構造体を実装することに成功した。

3章では、ガラス曲面における光の屈折による影響を補正するアルゴリズムを提案した。3次元構造体に記録する2次元画像の枚数を増加させていく際は、円柱状や球体状の3Dクリスタルを用いることになる。このとき、ガラス曲面で生じる光の屈折によって、投影画像が劣化してしまう課題があったが、提案アルゴリズムを用いることでこれを補正し、高画質な投影画像を有する3次元構造体の設計が可能となる。CGシミュレーションおよび3Dクリスタル加工技術による試作によって、アルゴリズムの有用性を示した。さらに、屈折の影響を逆に利用することで、投影軸方向に関する制限を取り除くことができる。8枚の2次元画像を、45°ずつ離れた投影軸に向けて同時に表示する円柱状3Dクリスタルの試作に成功した。

4章では、LEDの3次元配置に基づく電子制御ボリュームディスプレイについて述べた。8×8×8個のフルカラーLEDによって構成されており、LEDの点灯パターンを独立に制御することで、任意のカラー3次元動画像を表示できる。複数の2次元情報を保持する3次元構造体の設計アルゴリズムと組み合わせることで、直交する2方向に異なる2次元カラー動画像を表示させることに成功した。さらに、表示画像のフルカラー化を実現するために、FPGAを用いて制御回路を設計した。この制御回路によって、高速な信号処理を必要とするPWM制御が可能となり、RGB各色256階調のフルカラー化を実現した。

5章では、糸とプロジェクタを用いたボリュームディスプレイについて述べた。この方式では、プロジェクタから見て糸同士が重ならないように糸の配置を調整することで、それぞれの糸に当たる光を独立に制御することが可能となる。そのため、糸とプロジェクタという容易に入手可能な材料で、フルカラーの3次元動画像を表示することができる。実際に作製したボリュームディスプレイで、直交する2方向にそれぞれ異なるフルカラー動画像を表示させることに成功した。さらなる解像度の向上に取り組んだ結果、合計345本の糸で構成されるボリュームディスプレイを実現した。実用化に向けて、デジタルサイネージという具体的な応用例を示すことに成功した。

6章では、量子ドットを画素とする新たなボリュームディスプレイについて述べた。電気的な配線を必要とせず、光を介した画素制御を行うことができれば、高精細・高解像度の3次元像表示が可能になるものと考えている。透明樹脂中に量子ドットを封入し固形化したものをボクセルとし、8×8×8の格子状に組み上げることでボリュームディスプレイを構成した。赤と緑の2種類の量子ドットを用いることで、直交する3方向に異なる2次元画像を表示する量子ドットボリュームディスプレイの試作に成功した。また、ボクセルの順序によって発光色が変わるといった特性を見出した。

7章では、ナノ光材料の3次元配置に基づくボリュームディスプレイの高解像度化に向けて、インクジェットプリンタを用いた画素形成手法を提案した。インクジェットプリンタを用いることで、蛍光材料の配置作業を機械的に行うことができ、緻密かつ正確な画素配置を実現可能となる。20枚の透明フィルムに蛍光インクを印刷し積層することで、5,760×1,440×42 dpiという、水平および垂直方向に高い解像度を有するボリュームディスプレイを作製した。さらに作製したボリュームディスプレイを用いて、複数のフルカラー2次元画像を表示する3次元構造体のデモンストラーションを行った。

8章では、フォトクロミック材料を用いた新たなボリュームディスプレイ方式を提案した。この方式は、フォトクロミック材料の位置選択的および色選択的着色という二つの新原理に基づいている。複数種類のフォトクロミック材料を単に混ぜ合わせるだけという単純な構造で、フルカラー3次元像の動画表示を実現できる手法

である。二つの着色原理についての基礎実験を行い、原理検証を行った。

以下、本研究の将来展望および今後の課題について述べる。

複数の2次元情報を保持する3次元構造体の設計アルゴリズムとその改良について、主に1章から3章までで述べてきた。このとき、設計した3次元構造体からどのような2次元画像が投影されるかは、非常に簡略化したモデルで表せるものとした。そのため、例えば3Dクリスタルにおける光源の位置や、散乱の異方性などの影響を無視している。このようなデバイスに依存する様々な要因を考慮に入れて、画質改善アルゴリズムに適用することで、より高画質な投影像が得られると考えられる。同時に、アルゴリズム自体のさらなる改良も続ける。例えば、表示画像の領域ごとに重要度を設定し（前面のオブジェクトを背景よりも優先するなど）、重要度の高い領域を優先的に画質改善するアルゴリズムなどが考えられる。

本研究以前に提案されていた既存手法によるボリュームディスプレイを作製し、複数の2次元動画像を表示する3次元構造体のデモンストレーションを行った結果について、4章および5章で述べた。LED型ボリュームディスプレイと糸を用いたボリュームディスプレイという二つの方式により、どちらもフルカラー化および動画化までは実現できた。一方、映像システムの実現に向けての現状の課題として、画素数が低いことが挙げられる。今後の展開としては、画素数の向上を目指し、システムの大規模化を行っていく。このとき、LED型ボリュームディスプレイにおける基板の透明化や、糸を用いたボリュームディスプレイにおける自動キャリブレーションシステムの構築など、個別の課題にも取り組む予定である。

よりハイエンド（高精細・高解像度）な3次元映像表示技術を目指し、光で制御を行うというコンセプトで開発しているボリュームディスプレイについて、6章から8章までで述べてきた。フォトクロミック材料の持つ位置選択的および色選択的着色という二つの原理によって、光制御というコンセプトを満たした上で、フルカラー化および動画化が実現可能であるという根拠を実験的に示した。今後はこの原理に基づくボリュームディスプレイシステムを実際に構築し、フルカラー3次元動画像の表示デモンストレーションを行う。将来的には、複数の2次元情報を保持する3次元構造体をこの方式のディスプレイに適用し、次世代ボリュームディスプレイシステムを実現する。

参考文献

- [1] J. Geng, “Three-dimensional display technologies,” *Advances in Optics and Photonics*, **5**(4), 456–535 (2013).
- [2] B. G. Blundell, A. J. Schwarz, and D. K. Horrell, “Volumetric three-dimensional display systems: their past, present and future,” *Engineering Science and Education Journal*, **2**(5), 196–200 (1993).
- [3] G. E. Favalora, “Volumetric 3d displays and application infrastructure,” *Computer*, **8**, 37–44 (2005).
- [4] D. W. Bäuerle, *Laser Processing and Chemistry 3rd edition* (Springer, 2000).
- [5] S. Hasegawa, Y. Hayasaki, and N. Nishida, “Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase fresnel lenses,” *Optics Letters*, **31**(11), 1705–1707 (2006).
- [6] G. E. Favalora, J. Napoli, D. M. Hall, R. K. Dorval, M. Giovinco, M. J. Richmond, and W. S. Chun, “100-million-voxel volumetric display,” in *Proceedings of SPIE*, **4712**, 300–312 (2002).
- [7] A. Jones, I. McDowall, H. Yamada, M. Bolas, and P. Debevec, “Rendering for an interactive 360° light field display,” *ACM Transactions on Graphics*, **26**(3), 40 (2007).
- [8] A. Sullivan, “Depthcube solid-state 3d volumetric display,” in *Proceedings of SPIE*, **5291**, 279–284 (2008).
- [9] M. Parker, “Lumarca,” in *Proceedings of ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies: Adaptation*, 77 (2009).
- [10] P. C. Barnum, S. G. Narasimhan, and T. Kanade, “A multi-layered display with water drops,” *ACM Transactions on Graphics*, **29**(4), 76 (2010).
- [11] S. K. Nayar and V. N. Anand, “3d display using passive optical scatterers,” *Computer*, **40**(7), 54–63 (2007).

- [12] Y. Ochiai, T. Hoshi, and J. Rekimoto, “Pixie dust: graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field,” *ACM Transactions on Graphics*, **33**(4), 85 (2014).
- [13] D. L. MacFarlane, “Volumetric three-dimensional display,” *Applied Optics*, **33**(31), 7453–7457 (1994).
- [14] I. T. Lima and V. R. Marinov, “Volumetric display based on two-photon absorption in quantum dot dispersions,” *Journal of Display Technology*, **6**(6), 221–228 (2010).
- [15] H. Kimura, A. Asano, I. Fujishiro, A. Nakatani, and H. Watanabe, “True 3d display,” in *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, 20 (2011).
- [16] E. Downing, L. Hesselink, J. Ralston, and R. Macfarlane, “A three-color, solid-state, three-dimensional display,” *Science*, **273**, 1185–1189 (1996).
- [17] K. Kumagai, D. Suzuki, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, “Volumetric display with holographic parallel optical access and multilayer fluorescent screen,” *Optics Letters*, **40**(14), 3356–3359 (2015).
- [18] H. Kimura, T. Uchiyama, and H. Yoshikawa, “Laser produced 3d display in the air,” in *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies*, 20 (2006).
- [19] H. Saito, H. Kimura, S. Shimada, T. Naemura, J. Kayahara, S. Jarusirisawad, V. Nozick, H. Ishikawa, T. Murakami, J. Aoki, A. Asano, T. Kimura, M. Kakehata, F. Sasaki, H. Yashiro, M. Mori, K. Torizuka, and K. Ino, “Laser produced 3d display in the air,” in *Proceedings of SPIE*, **6803**, 680309 (2008).
- [20] Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, J. Rekimoto, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, “Fairy lights in femtoseconds: Aerial and volumetric graphics rendered by focused femtosecond laser combined with computational holographic fields,” *ACM Transactions on Graphics*, **35**(2), 17 (2016).
- [21] D. R. Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid* (Basic Books, 1979).
- [22] A. G. Requicha, “Representations for rigid solids: Theory, methods, and systems,” *ACM Computing Surveys*, **12**(4), 437–464 (1980).

- [23] H. Nakayama, A. Shiraki, R. Hirayama, N. Masuda, T. Shimobaba, and T. Ito, “Three-dimensional volume containing multiple two-dimensional information patterns,” *Scientific Reports*, **3**, 1931 (2013).
- [24] R. Hirayama, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, “3-d crystal exhibiting multiple 2-d images with directivity,” in *Proceedings of SIGGRAPH Asia 2015 Posters*, 1 (2015).
- [25] R. Hirayama, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, “Image quality improvement for a 3d structure exhibiting multiple 2d patterns and its implementation,” *Optics Express*, **24**(7), 7319–7327 (2016).
- [26] R. Hirayama, A. Shiraki, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, “3-d crystal with a curved surface projecting multiple 2-d images,” in *Proceedings of SIGGRAPH Asia 2016 Posters*, 41 (2016).
- [27] R. Hirayama, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, “Development of volumetric display based on multi-bit color LED,” in *Proceedings of APCCAS 2014* (2014).
- [28] 池田 正隆, 白木 厚司, 中山 弘敬, 平山 竜士, 角江 崇, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義, “指向性ポリウムディスプレイの高解像度化手法の提案,” FIT 2014 学会予稿集 (2014).
- [29] R. Hirayama, M. Naruse, H. Nakayama, N. Tate, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, M. Ohtsu, and T. Ito, “Design, implementation and characterization of a quantum-dot-based volumetric display,” *Scientific Reports*, **5**, 8472 (2015).
- [30] R. Hirayama, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, “Optical addressing of multi-colour photochromic material mixture for volumetric display,” *Scientific Reports*, **6**, 31543 (2016).
- [31] I. Symeonidou, “Anamorphic experiences in 3d space: Shadows, projections and other optical illusions,” *Nexus Network Journal*, 1–19 (2016).
- [32] N. J. Mitra and M. Pauly, “Shadow art,” *ACM Transactions on Graphics*, **28**(5), 156 (2009).
- [33] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, “Image quality assessment: from error visibility to structural similarity,” *IEEE Transactions on Image Processing*, **13**(4), 600–612 (2004).

- [34] A. C. Kak and M. Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging* (IEEE Press, 1979).
- [35] P. Gilbert, “Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections,” *Journal of Theoretical Biology*, **3**(1), 105–107 (1972).
- [36] A. K. Hara, R. G. Paden, A. C. Silva, J. L. Kujak, H. J. Lawder, and W. Pavlicek, “Iterative reconstruction technique for reducing body radiation dose at ct: Feasibility study,” *Journal of Theoretical Biology*, **193**(3), 764–771 (2009).
- [37] StarChips Technology Inc., *SCT2024 16-bit Serial-In/Parallel-Out Constant-Current LED Driver* (2011). http://www.starchips.com.tw/pdf/datasheet/SCT2024V01_03.pdf.
- [38] P. Narra and D. S. Zinger, “An effective LED dimming approach,” in *Proceedings of Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*, **3**, 1671–1676 (2009).
- [39] L. Svilainis, “LED PWM dimming linearity investigation,” *Displays*, **29**(3), 243–249 (2008).
- [40] Digilent Inc., *AtlysTM Board Reference Manual* (2013). http://ee.sharif.edu/~asic/Assignments/Assignment_7/Atlys_rm_V2.pdf.
- [41] Xilinx Inc., *Spartan-6 Family Overview* (2011). http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds160.pdf.
- [42] EXAR Co., *XR21V1410, 1-ch full-speed USB UART* (2014). <https://www.exar.com/content/document.ashx?id=1414>.
- [43] B. Mahler, P. Spinicelli, S. Buil, X. Quelin, J. P. Hermier, and B. Dubertret, “Towards non-blinking colloidal quantum dots,” *Nature Materials*, **7**, 659–664 (2008).
- [44] V. I. Klimov, *Semiconductor and metal nanocrystals: synthesis and electronic and optical properties* (CRC Press, 2003).
- [45] J. Lee, V. C. Sundar, J. R. Heine, M. G. Bawendi, and K. F. Jensen, “Full color emission from II–VI semiconductor quantum dot-polymer composites,” *Advanced Materials*, **12**(15), 1102–1105 (2000).

- [46] S. Coe, W. K. Woo, M. Bawendi, and V. Bulović, “Electroluminescence from single monolayers of nanocrystals in molecular organic devices,” *Nature*, **420**, 800–803 (2002).
- [47] V. Wood, M. J. Panzer, J. Chen, M. S. Bradley, J. E. Halpert, M. G. Bawendi, and V. Bulović, “Inkjet-printed quantum dot-polymer composites for full-color AC-driven displays,” *Advanced Materials*, **21**(21), 2151–2155 (2009).
- [48] <http://www.sigmaaldrich.com/japan/materialscience/nano-materials/lumidots.html>.
- [49] Y. Wang, S. Bish, J. W. Tunnell, and X. Zhang, “Mems scanner enabled real-time depth sensitive hyperspectral imaging of biological tissue,” *Optics Express*, **18**(23), 24101–24108 (2010).
- [50] N. Tate, W. Nomura, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, “Mems scanner enabled real-time depth sensitive hyperspectral imaging of biological tissue,” *Optics Express*, **22**(9), 10262–10269 (2014).
- [51] <http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/?service=restart>.
- [52] D. L. MacAdam, “Visual sensitivities to color differences in daylight,” *Journal of the Optical Society of America*, **32**(5), 247–274 (1942).
- [53] T. Kawazoe, H. Fujiwara, K. Kobayashi, and M. Ohtsu, “Visible light emission from dye molecular grains via infrared excitation based on the nonadiabatic transition induced by the optical near field,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **15**(5), 1380–1386 (2009).
- [54] M. Naruse, T. Kawazoe, R. Ohta, W. Nomura, and M. Ohtsu, “Optimal mixture of randomly dispersed quantum dots for optical excitation transfer via optical near-field interactions,” *Physical Review B*, **80**(12), 125325 (2009).
- [55] S. Yukutake, T. Kawazoe, T. Yatsui, W. Nomura, K. Kitamura, and M. Ohtsu, “Selective photocurrent generation in the transparent wavelength range of a semiconductor photovoltaic device using a phonon-assisted optical near-field process,” *Applied Physics B*, **99**(3), 415–422 (2010).
- [56] H. Fujiwara, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, “Nonadiabatic multi-step excitation for the blue–green light emission from dye grains induced by the near-infrared optical near-field,” *Applied Physics B*, **98**(2), 283–289 (2010).

- [57] T. Kawazoe, M. A. Mueed, and M. Ohtsu, “Highly efficient and broadband Si homojunction structured near-infrared light emitting diodes based on the phonon-assisted optical near-field process,” *Applied Physics B*, **104**(4), 747–754 (2011).
- [58] K. Kitamura, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, “Homojunction-structured ZnO light-emitting diodes fabricated by dressed-photon assisted annealing,” *Applied Physics B*, **107**(2), 293–299 (2012).
- [59] M. Naruse, N. Tate, M. Aono, and M. Ohtsu, “Information physics fundamentals of nanophotonics,” *Reports on Progress in Physics*, **76**(5), 056401 (2013).
- [60] T. Hashida, Y. Kakehi, and T. Naemura, “Photochromic sculpture: Volumetric color-forming pixels,” in *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, 11 (2011).
- [61] H. Dürr and H. Bouas-Laurent, *Photochromism: molecules and systems: molecules and systems* (Gulf Professional Publishing, 2003).
- [62] M. Irie and M. Mohri, “Thermally irreversible photochromic systems. reversible photocyclization of diarylethene derivatives,” *The Journal of Organic Chemistry*, **53**(4), 803–808 (1988).
- [63] M. Irie, T. Fukaminato, K. Matsuda, and S. Kobatake, “Photochromism of diarylethene molecules and crystals: Memories, switches, and actuators,” *Chemical Reviews*, **114**(24), 12174–12177 (2014).
- [64] Y. Asano, A. Murakami, T. Kobayashi, A. Goldberg, D. Guillaumont, S. Yabushita, M. Irie, , and S. Nakamura, “Theoretical study on the photochromic cycloreversion reactions of dithienylethenes; on the role of the conical intersections,” *Journal of the American Chemical Society*, **126**(38), 12112–12120 (2004).
- [65] Y. Watanabe, G. Narita, S. Tatsuno, T. Yuasa, K. Sum-ino, and M. Ishikawa, “High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay,” in *Proceedings of the International Display Workshops* (2015).
- [66] H. Yamamoto, K. Sato, S. Farhan, and S. Suyama, “Hand-waving steganography by use of a high-frame-rate LED panel,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, **45**(1), 915–917 (2014).

- [67] K. Kasazumi, Y. Kitaoka, K. Mizuuchi, and K. Yamamoto, “A practical laser projector with new illumination optics for reduction of speckle noise,” *Japanese Journal of Applied Physics*, **43**(8S), 5904 (2004).

謝 辞

本研究は千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻において、伊藤智義教授のご指導の下に行ったものである。

千葉大学に入学してから9年もの間、様々なご指導、ご支援をいただき、進むべき道を示してくださった、千葉大学工学研究科の伊藤智義教授に深く感謝の意を表すと共に、厚く御礼申し上げます。

また、本研究に対していつもの確な助言を与えてくださった、千葉大学工学研究科の下馬場朋禄准教授に深く感謝申し上げます。

また、身近な存在として、公私共にたくさんのご指導をいただいた、千葉大学工学研究科の角江崇助教に深く感謝申し上げます。

また、研究の遂行や論文執筆、研究発表など、様々な面でご助言をいただいた、千葉大学統合情報センターの白木厚司准教授に深く感謝申し上げます。

本研究の元となった技術の考案者として、ご助言や技術的なサポートをしてくださった、国立天文台の中山弘敬研究員に深く感謝申し上げます。

また、幅広い知識で本研究のサポートをしてくださった、東京理科大学基礎工学部電子応用工学科の増田信之准教授に深く感謝申し上げます。

また伊藤・下馬場・角江研究室で出会い共に過ごした研究室の先輩、同輩、後輩の皆様にも心より感謝申し上げます。

最後に、これまで支えてくれた両親、家族に心より感謝いたします。

業績リスト

査読付論文（筆頭）

1. R. Hirayama, M. Naruse, H. Nakayama, N. Tate, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, M. Ohtsu, and T. Ito, “Design, Implementation and Characterization of a Quantum-Dot-Based Volumetric Display,” *Scientific Reports*, **5**, 8472 (2015).
2. R. Hirayama, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, “Image quality improvement for a 3D structure exhibiting multiple 2D patterns and its implementation,” *Optics Express*, **24**(7), 7319–7327 (2016).
3. R. Hirayama, A. Shiraki, M. Naruse, S. Nakamura, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, “Optical Addressing of Multi-Colour Photochromic Material Mixture for Volumetric Display,” *Scientific Reports*, **6**, 31543 (2016).

査読付論文（共著）

1. H. Nakayama, A. Shiraki, R. Hirayama, N. Masuda, T. Shimobaba, and T. Ito, “Three-Dimensional Volume Containing Multiple Two-Dimensional Information Patterns,” *Scientific Reports*, **3**, 1931 (2013).
2. T. Shimobaba, H. Yamanashi, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, and T. Ito, “Inline digital holographic microscopy using a consumer scanner,” *Scientific Reports*, **3**, 2664 (2013).
3. T. Shimobaba, M. Makowski, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, N. Masuda, and T. Ito, “Lensless zoomable holographic projection using scaled Fresnel diffraction,” *Optics Express*, **21**, 25285–25290 (2013).
4. T. Shimobaba, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, N. Masuda, and T. Ito, “Non-uniform sampled scalar diffraction calculation using non-uniform Fast Fourier transform,” *Optics Letters*, **38**, 5130–5133 (2013).

5. T. Shimobaba, T. Kakue, M. Oikawa, N. Takada, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, and T. Ito, "Calculation reduction method for color computer-generated hologram using color space conversion," *Optical Engineering*, **53**(2), 024108 (2014).
6. T. Shimobaba, T. Kakue, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, and T. Ito, "Ptychography by changing the area of probe light and scaled ptychography," *Optics Communications*, **331**, 189–193 (2014).
7. T. Shimobaba, M. Makowski, T. Kakue, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, and T. Ito, "Numerical investigation of lensless zoomable holographic projection to multiple tilted planes," *Optics Communications*, **333**, 274–280 (2014).
8. D. Arai, T. Shimobaba, K. Murano, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, T. Kakue, and T. Ito, "Acceleration of computer-generated hologram using tilted wavefront recording plane method," *Optics Express*, **23**, 1740–1747 (2015).
9. T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, M. Sano, M. Oikawa, T. Sugie, and T. Ito, "Random phase-free kinoform for large objects," *Optics Express*, **23**, 17269–17274 (2015).
10. T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, M. Sano, M. Oikawa, T. Sugie, and T. Ito, "Improvement of the image quality of random phase-free holography using an iterative method," *Optics Communications*, **355**, 596–601 (2015).
11. T. Sanpei, T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, M. Sano, M. Oikawa, T. Sugie, and T. Ito, "Optical encryption for large-sized images," *Optics Communications*, **361**, 138–142 (2016).
12. T. Shimobaba, M. Makowski, Y. Nagahama, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, M. Sano, T. Kakue, M. Oikawa, T. Sugie, N. Takada, and T. Ito, "Color computer-generated hologram generation using the random phase-free method and color space conversion," *Applied Optics*, **55**(15), 4159–4165 (2016).
13. T. Shimobaba, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, Y. Nagahama, S. Hasegawa, M. Sano, T. Takahashi, T. Kakue, M. Oikawa, and T. Ito, "Holographic micro-information hiding," *Applied Optics*, **56**(4), 833–837 (2017).

14. T. Shimobaba, Y. Endo, R. Hirayama, Y. Nagahama, T. Takahashi, T. Nishitsuji, T. Kakue, A. Shiraki, N. Takada, N. Masuda, and T. Ito, "Autoencoder-based holographic image restoration," *Applied Optics*, **56**(13), F27–F30 (2017).

国際会議（筆頭）

1. R. Hirayama, T. Shimobaba, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, "Optical encryption using three-dimensional volume containing multiple two-dimensional information patterns," DHIP 2012, Tokushima, Japan (2012.11).
2. R. Hirayama, H. Ando, A. Shiraki, H. Nakayama, T. Kakue, N. Masuda, T. Shimobaba, and T. Ito, "Image-quality improvement of multiple two-dimensional patterns contained in three-dimensional volume," 3DSA 2013, Osaka, Japan (2013.6).
3. R. Hirayama, R. Omura, Y. Kobayashi, A. Shiraki, H. Nakayama, T. Kakue, N. Masuda, T. Shimobaba, and T. Ito, "Development of a digitized volumetric display containing multiple two-dimensional patterns," 3DSA 2013, Osaka, Japan (2013.6).
4. R. Hirayama, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Volumetric Display Containing Multiple Two-Dimensional Color Motion Pictures," SPIE DSS 2014, Baltimore, USA (2014.5).
5. R. Hirayama, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Development of Volumetric Display Based on Multi-Bit Color LED," APCCAS 2014, Ishigaki, Japan (2014.11).
6. (invited) R. Hirayama, M. Naruse, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Optically Controlled Volumetric Display Exhibiting Multiple Two-Dimensional Patterns," CC3DMR 2015, Busan, South Korea (2015.6).
7. R. Hirayama, A. Shiraki, M. Naruse, H. Nakayama, N. Tate, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Optically Controlled Quantum-Dot-Based Volumetric Display Exhibiting Multiple Patterns," JSAP-OSA Joint Symposia 2015, Nagoya, Japan (2015.9).

8. R. Hirayama, A. Shiraki, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "3-D Crystal Exhibiting Multiple 2-D Images with Directivity," ACM SIGGRAPH Asia 2015, Kobe, Japan (2015.11).
9. (invited) R. Hirayama, A. Shiraki, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "3-D Crystal Exhibiting Multiple 2-D Images with Directivity," VRCAI 2015, Kobe, Japan (2015.10).
10. R. Hirayama, A. Shiraki, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Refraction-compensating algorithm for a 3D glass structure exhibiting multiple 2D images," Frontiers in Optics / Laser Science 2016, Rochester, USA (2016.10).
11. R. Hirayama, A. Shiraki, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "3-D crystal with a curved surface projecting multiple 2-D images," ACM SIGGRAPH Asia 2016, Macao, China (2016.12).

国際会議（共著）

1. (invited) T. Kakue, N. Masuda, Y. Endo, R. Hirayama, N. Okada, T. Shimobaba, and T. Ito, "Special-purpose computer for real-time reconstruction of holographic motion picture," OIT'13, Beijing, China (2013.11).
2. (invited) A. Shiraki, H. Nakayama, R. Hirayama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Volumetric Display Containing Multiple Two Dimensional Information Patterns," IDW 2015, Otsu, Japan (2015.12).
3. M. Oikawa, D. Hiyama, R. Hirayama, S. Hasegawa, Y. Endo, T. Sugie, N. Tsumura, M. Kuroshima, M. Maki, G. Okada, C. Lei, Y. Ozeki, K. Goda, and T. Shimobaba, "A computational approach to real-time image processing for serial time-encoded amplified microscopy," SPIE Big Data Instrumentation and Management, San Francisco, USA (2016.3).
4. F. Kawashima, R. Hirayama, A. Shiraki, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Gradation expression by overlap of voxels in volumetric display composed of photochromic materials," 3DSA 2016, Fukuoka, Japan (2016.12).

国内会議（筆頭）

1. 平山竜士, 中山弘敬, 白木厚司, 春名恭平, 下馬場朋禄, 増田信之, 伊藤智義, “複数の2次元情報を保持するボリュームディスプレイの画質改善アルゴリズムの開発,” 3次元画像コンファレンス2012, 大久保・早稲田大学 (2012.7).
2. 平山竜士, 下馬場朋禄, 中山弘崇, 白木厚司, 角江崇, 増田信之, 伊藤智義, “複数の2次元情報を保持する3次元物体の光暗号化技術への応用,” 第11回情報科学技術フォーラム, 小金井・法政大学 (2012.9).
3. (招待講演) 平山竜士, 白木厚司, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “複数の二次元情報を保持する三次元オブジェクト,” 第14回情報フォトンクス研究グループ研究会, 札幌・研修保養施設倶楽部錦渓 (2013.9).
4. 平山竜士, 成瀬誠, 中山弘敬, 豎直也, 白木厚司, 角江崇, 下馬場朋禄, 大津元一, 伊藤智義, “複数情報を投影する量子ドットボリュームディスプレイ,” 第61回応用物理学会春季学術講演会, 相模原・青山学院大学 (2014.3).
5. 平山竜士, 成瀬誠, 中山弘敬, 豎直也, 白木厚司, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “多種量子ドットの3次元配置に基づく多色ボリュームディスプレイ,” OPJ2014, 大塚・筑波大学 (2014.11).
6. 平山竜士, 中山弘敬, 白木厚司, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “複数の指向性画像を同時表示可能な3次元オブジェクト,” 映像表現・芸術科学フォーラム, 西早稲田・早稲田大学 (2015.3).
7. 平山竜士, 白木厚司, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “複数の指向性画像を同時表示可能な立体構造作製手法,” 映像情報メディア学会年次大会, 新宿・東京理科大学 (2015.8).
8. 平山竜士, 白木厚司, 成瀬誠, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “フォトクロミック材料に基づくボリュームディスプレイの動画化方式の提案,” OPJ2015, 大塚・筑波大学 (2015.10).
9. (招待講演) 平山竜士, 白木厚司, 角江崇, 成瀬誠, 中山弘敬, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “フォトクロミック材料と2制御光によるボリュームディスプレイ,” 平成28年第1回ホログラフィック・ディスプレイ研究会, 宇都宮・宇都宮大学 (2016.3).
10. 平山竜士, 成瀬誠, 白木厚司, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “多色ボリュームディスプレイのためのフォトクロミック材料混合体,” 第63回応用物理学会春季学術講演会, 大岡山・東京工業大学 (2016.3).

11. 平山竜士, “複数の2次元情報を記録・表示するポリュームディスプレイ,” 平成28年度育志賞発表会, 神田駿河台・明治大学 (2016.8).

国内会議（共著）

1. （招待講演）白木厚司, 中山弘敬, 春名恭平, 平山竜士, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, “複数の2次元情報を内包するポリュームディスプレイ技術の開発,” 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム2012, 長岡・長岡技術科学大学 (2012.1).
2. 白木厚司, 中山弘敬, 高橋星奈, 春名恭平, 平山竜士, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, “複数の二次元情報を内包するポリュームディスプレイの電子化,” 3次元画像コンファレンス2012, 大久保・早稲田大学 (2012.7).
3. （招待講演）白木厚司, 高橋星奈, 中山弘敬, 平山竜士, 角江崇, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, “複数の二次元画像を記録する技術の応用,” 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム2013, 長岡・長岡技術科学大学 (2013.1).
4. （招待講演）角江崇, 遠藤優, 檜山大輔, 平山竜士, 下馬場朋祿, 伊藤智義, “並列位相シフトデジタルホログラフィによる高速振動体の振動変位観察,” 平成26年第2回ホログラフィック・ディスプレイ研究会, 千葉・千葉大学 (2014.5).
5. 下馬場朋祿, 檜山大輔, 岡田直久, 遠藤優, 平山竜士, 角江崇, 伊藤智義, “2次元断層画像群からのカラー計算機合成ホログラムの高速生成,” 3次元画像コンファレンス2014, 本郷・東京大学 (2014.7).
6. 川島史也, 平山竜士, 白木厚司, 成瀬誠, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋祿, 伊藤智義, “複数画像を同時に表示するフォトクロミック材料を用いたポリュームディスプレイ,” OPJ2015, 大塚・筑波大学 (2015.10).
7. 鈴木智孝, 平山竜士, 白木厚司, 成瀬誠, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋祿, 伊藤智義, “インクジェットプリンターを用いたポリュームディスプレイの開発,” OPJ2015, 大塚・筑波大学 (2015.10).
8. （招待講演）白木厚司, 池田正隆, 中山弘敬, 平山竜士, 角江崇, 下馬場朋祿, 伊藤智義, “ポリュームディスプレイの特性を活かした高指向性ディスプレイの開発,” 平成28年第1回ホログラフィック・ディスプレイ研究会, 宇都宮・宇都宮大学 (2016.3).
9. 白木厚司, 池田正隆, 中山弘敬, 平山竜士, 角江崇, 下馬場朋祿, 伊藤智義, “高指向性多視点ディスプレイの開発,” 2016年電気情報通信学会総合大会, 福岡・九州大学 (2016.3).

10. 川島史也, 平山竜士, 成瀬誠, 白木厚司, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “フォトクロミック材料を用いたポリュームディスプレイにおける濃淡表現,” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 大岡山・東京工業大学 (2016.3).
11. 鈴木智孝, 平山竜士, 成瀬誠, 白木厚司, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “インクジェットプリンターを用いた高解像度ポリュームディスプレイのフルカラー化,” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 大岡山・東京工業大学 (2016.3).
12. 川島史也, 平山竜士, 白木厚司, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “フォトクロミックポリュームディスプレイの実現に向けたボクセル濃度が投影像に及ぼす影響の検証,” 第 17 回情報フォトンクス研究グループ研究会, 城陽・プラムイン城陽 (2016.9).
13. 池田正隆, 白木厚司, 中山弘敬, 平山竜士, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “指向性ポリュームディスプレイの高解像度化手法の提案,” 第 15 回情報科学技術フォーラム, 富山・富山大学 (2016.9).

特許

1. 伊藤智義, 平山竜士, 中山弘敬, 角江崇, 成瀬誠, “量子ドットディスプレイおよびそれを用いたディスプレイ表示方法,” 特開 2015-165611 (2015.9) (特願 2014-39972, 2014.2).
2. 下馬場朋禄, 平山竜士, 杉江崇繁, 遠藤優, 老川稔, 合田圭佑, 鶴川昌士, “信号データ処理装置,” 特開 2016-016805 (2016.1).
3. 伊藤智義, 平山竜士, 白木厚司, 角江崇, 下馬場朋禄, “三次元表示装置及びそれを用いた三次元表示方法,” 特願 2016-081583 (2016.4).

解説記事

1. 白木厚司, 平山竜士, 伊藤智義, “量子ドットで立体型ディスプレイ -電子制御から光制御へ-,” 月刊画像ラボ 2016, **27**(6), 46-50, 日本工業出版株式会社 (2016).
2. R. Hirayama, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, “Optical addressing method for full-color 3D display,” SPIE Newsroom (2016).

外部資金

1. 公益財団法人 NEC C&C 国際会議論文発表者助成 (2014).
2. 26年度千葉大学国際交流公募事業 大学院生等の海外派遣支援プログラム (2014).
3. 日本学術振興会 27年度特別研究員奨励費 (2015).
4. 日本学術振興会 28年度特別研究員奨励費（育志賞による特別枠） (2016).
5. 28年度千葉大学国際交流公募事業 大学院生等の海外派遣支援プログラム (2016).
6. 28年度千葉大学国際交流公募事業 グローバルプロミネント研究基幹・若手先導人材育成支援プログラム (2016).

受賞

1. 平成 25 年度 千葉大学学長賞（学業成績優秀） (2014).
2. 平成 25 年度 千葉大学工学研究科長賞（学業成績優秀） (2014).
3. 2014 年度公益財団法人 NEC C&C 若手優秀論文賞 (2015).
4. 平成 26 年度日本光学会 光みらい学生奨励金 (2015).
5. 映像表現・科学芸術フォーラム 2015 人材育成パートナー企業賞（フォーラムエイト） (2015).
6. 第 6 回日本学術振興会 育志賞 (2016).