

平成 28 年度 博士学位論文

MEMS 空間光変調器を用いた
水平走査型ホログラフィックディスプレイの
高画質化

Improvement of Image Quality of
Horizontally Scanning Holographic Displays
Using MEMS SLMs

指導教員 高木 康博 教授

東京農工大学大学院 工学府

電子情報工学専攻

松本 祐二

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	5
1.3 本論文の構成.....	6
第2章 関連研究.....	7
2.1 電子的なホログラフィーの課題.....	7
2.3 MEMS SLM.....	8
2.3 従来の研究.....	9
第3章 水平走査型ホログラフィー.....	18
3.1 スクリーン走査型システム.....	18
3.2 視域走査型システム.....	22
3.3 調節応答の測定.....	27
3.4 水平走査型ホログラフィーと従来研究との比較.....	29
第4章 誤差拡散法を用いた階調表現の実現.....	30
4.1 研究目的.....	30
4.2 ホログラムの2値化による画質低下.....	30
4.3 誤差拡散法.....	32
4.4 実験装置.....	34
4.5 実験結果.....	34
4.6 考察.....	39
4.7 本章のまとめ.....	40
第5章 スクリーン走査型システムのカラー化.....	41
5.1 研究目的.....	41
5.2 水平走査型ホログラフィーでのホログラムの計算方法.....	41
5.3 時分割表示によるカラー化.....	43
5.4 RGB 合波法.....	44
5.5 誤差拡散法の改良.....	47
5.6 実験装置.....	48
5.7 実験結果.....	52
5.8 考察.....	55
5.9 本章のまとめ.....	56

第6章 視域走査型システムのカラー化	57
6.1 研究目的	57
6.2 時分割表示によるカラー化	57
6.3 実験装置	59
6.4 実験結果	63
6.5 考察	63
6.6 本章のまとめ	64
第7章 実用化に向けた検討	66
第8章 結論	67
謝辞	68
参考文献	69
業績	73
査読論文（本研究に関わるもの）	73
受賞歴（本研究に関わるもの）	73
国際発表	73
国内発表	74

第 1 章 序論

1.1 研究背景

ホログラフィーはもともと立体表示を目的として発明されたわけではなく、電子顕微鏡の高解像度化を目的として発明された技術である[1]。電子顕微鏡は、光の代わりに極めて短波長の波動である電子ビームを用いた顕微鏡であり、 0.05 \AA 程度の極めて高い解像度が期待された。しかし、電子顕微鏡のレンズ系の球面収差が原因となり、通常的方式では解像限界 5 \AA 程度の実現が限界であった。そこで、1942年に Gabor は、電子ビームを用いてフィルムに記録した干渉パターンを、可視光で照明して再生することで、電子線と可視光の波長の比率を倍率とする電子顕微鏡を提案した[1]。この方法ではレンズ系を用いて拡大結像しないため、収差による制約を受けないことが特徴である。Gabor は原理確認の実験を行ったが、当時はレーザー光源がまだ実在しておらず、光源の可干渉性が悪かったため、あまり良い再生像は得られなかった。また、再生像の他にも共役像と呼ばれる別の象が生じ、重なって見えることも問題であった。

そこで、1962年に Leith と Upatnieks が、共役像の問題を解決する方法を提案している。また、その後に実用期に入ったレーザーを可干渉光源として用いることで、高品質な再生像の表示を実現した[2]。

ホログラフィー[1, 2]は人間の立体知覚の生理的要因をすべて満たすため、視覚疲労がない立体像を表示できる。また、ホログラフィーは波面再生型の立体表示のため、二眼式や多眼式などの光線再生型の立体表示に比べて、ボケが少ない立体像が表示できる。以上のことから、ホログラフィーは理想的な立体表示方式といわれている。

ホログラムテレビを実現するためには、電子的なホログラム表示の実現が必要である。ここでは、電子的なホログラム表示について説明する前に、光学的なホログラム表示の原理について説明する。図 1-1 に示すように、光学的なホロ

グラム表示では、波長オーダーの分解能をもつホログラムフィルムを用いて物体光 O と参照光 R の干渉縞の光強度 I を記録する。光強度 I を式(1.1)に示す。

$$\begin{aligned}
 I &= |O + R|^2 \\
 &= |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

現像したホログラムフィルムに、参照光と同一の光である再生光 R を照射すると再生像が得られる。干渉縞を記録して現像したホログラムフィルムのことをホログラムと呼ぶ。ホログラムに再生光 R を照明すると式(1.2)のように計算できる。

$$RI = (|O|^2 + |R|^2)R + O|R|^2 + O^*R^2
 \tag{1.2}$$

第2項を確認すると、定数 $|R|^2$ がかかっているが、物体光 O が再現されていることが分かる。第1項は再生光と同じ方向に進むゼロ次光、第3項は共役光である。光学的なホログラフィーでは、写真フィルムを用いるため、静止画のみ表示が可能であり、動画表示はできない。

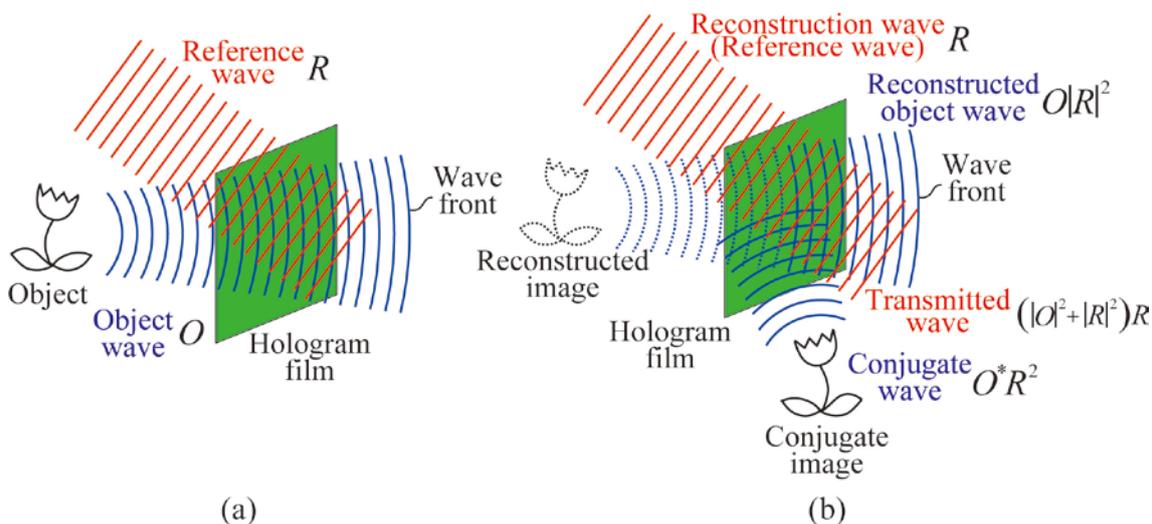


図 1-1 光学的なホログラム表示: (a) 記録、(b) 再生

光学的なホログラム表示ではホログラムフィルムを用いて干渉縞の記録を行うのに対して、電子的なホログラム表示では図 1-2 に示すようにイメージセンサを用いて干渉縞を記録する。撮影した干渉縞を液晶ディスプレイなどの表示デ

バイスに表示して、再生光を照射することで再生像を発生する。ホログラムパターンを表示する表示デバイスのことを空間光変調器(Spatial Light Modulator : SLM)と呼ぶ。電子的なホログラム表示では、ホログラムの記録にはイメージセンサを、表示には SLM を用いるため、動画表示が実現できる。

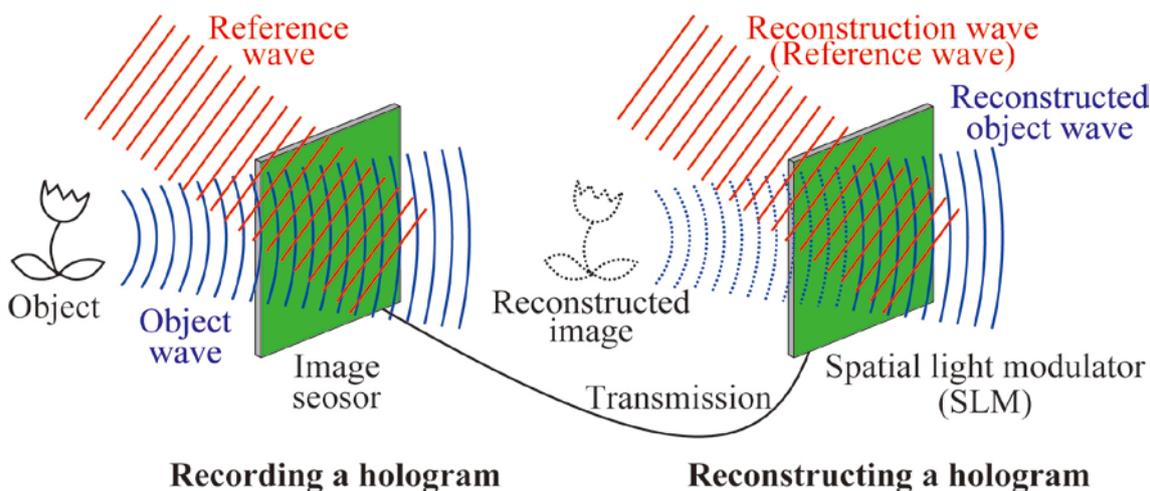


図 1-2 電子的なホログラム表示

ホログラフィーでは、再生像のほかに、透過光や共役像といった不要光が生じる。そのため、不要光を除去するための工夫が必要になる。不要光を分離するために物体光と参照光の角度を大きく取ることが行われる。そのため、干渉縞の間隔が微細化するので、電子的なホログラム表示では波長オーダーのピクセルピッチがイメージセンサと SLM に求められる。詳しくは第 2 章で説明するが、SLM のピクセルピッチを縮小すると再生像が観察できる範囲である視域が拡大する。ピクセルピッチを縮小する場合、画面サイズを拡大するためには解像度を増やす必要がある。そのため、電子的ホログラム表示を実現するためには、波長オーダーのピクセルピッチと膨大な解像度を有する SLM が必要となる。現在、このような超高精細な SLM は存在しないため、電子的なホログラム表示は視域が狭く画面サイズが小さいことが問題となっている。そこで、われわれの研究グループでは、視域と画面サイズの両方を拡大できる水平走査型ホログ

ラフィー[3-7]を提案している。本研究では、この水平走査型ホログラフィーの高画質化に取り組む。

二眼式や多眼式などの光線再生型の立体表示で問題となる視覚疲労について説明する。人間の立体知覚の生理的要因としては、輻輳、調節、運動視差、両眼視差の4つの要因が知られている。視覚疲労を引き起こす要因である輻輳と調節について、ここでは説明する。輻輳は、図1-3(a)に示すように、左右の眼の回転角をもとに三角測量の原理で奥行きを知覚する機能である。調節は、図1-3(b)に示すように、眼のピント合わせ情報にもとづく奥行き知覚機能である。図1-4に示すように、左右の眼に視差のある左眼用と右眼用の画像が表示されると、左右の眼は回転して輻輳は正しく奥行きを知覚する。これに対して、左右の画像はディスプレイのスクリーン上に表示されているため、眼のピントはスクリーン上に合い、立体像には合わない。そのため、輻輳と調節の間に不一致が生じる。輻輳と調節の間には作用があるため、輻輳と調節が一致しないと頭がストレスを感じ、視覚疲労が生じる[35]。

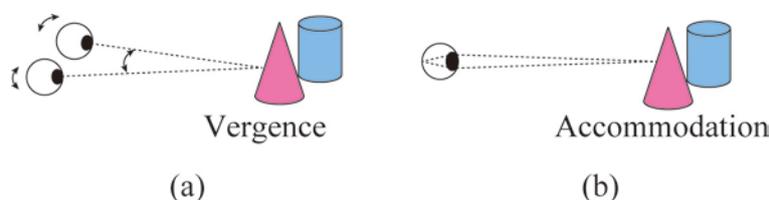


図1-3 立体知覚の生理的要因: (a)輻輳、(b)調節

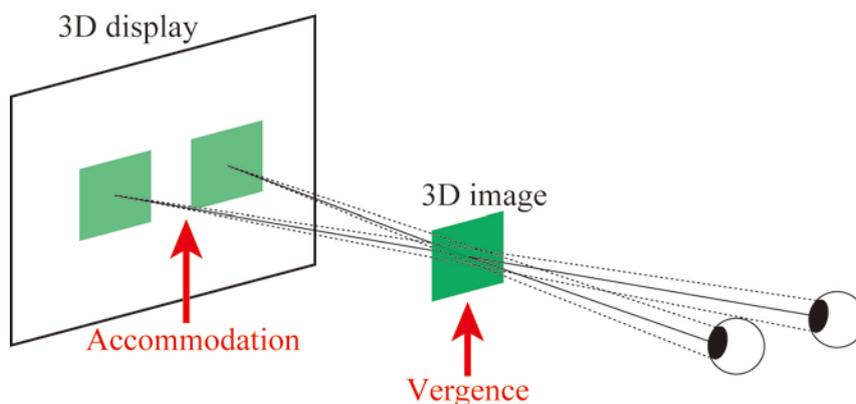


図1-4 輻輳と調節の不一致

光線再生型ではインコヒーレント光である光線で立体表示するため、図 1-5(a)に示すように、光線をいくら重ねてもビーム径は細くならず、立体像に眼のピントを合わせるとボケて見える。それに対して、図 1-5(b)に示すように、波面再生型のホログラフィーではコヒーレント光を用いて、物体を構成する物体点に集光する球面波を発生する。球面波はシャープな集光点を空間に発生できるため、ぼけのない立体像が表示できる。そのため、ホログラフィーの立体像に眼がピント合わせすることができ、調節が機能する。すなわち、輻輳と調節の不一致が生じない。

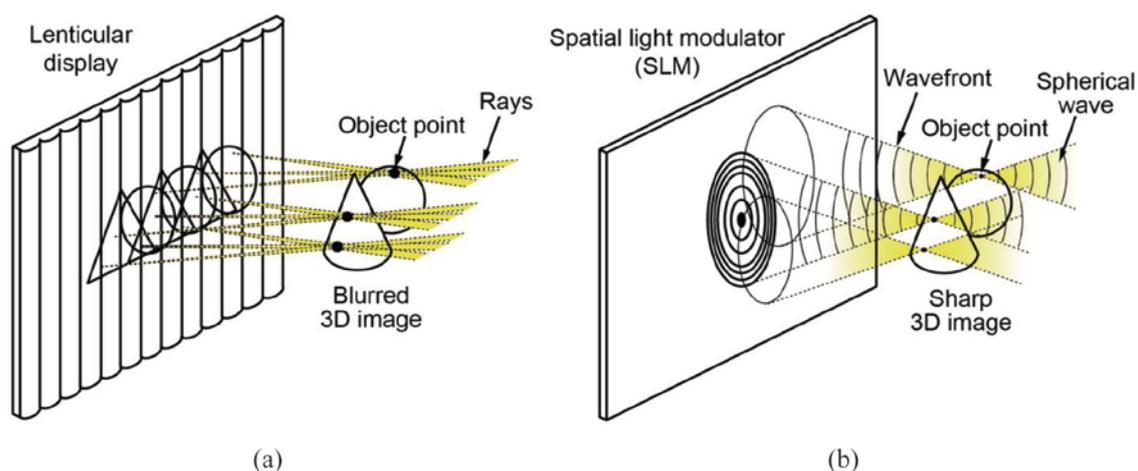


図 1-5 立体表示方式: (a)光線再生型、(b)波面再生型

1.2 研究目的

我々の研究グループは以前に提案した水平走査型ホログラフィーでは、高フレームレートな SLM として MEMS (Microelectromechanical-system) SLM を用いる。MEMS SLM は 2 値表示のものが多く、水平走査型ホログラフィーでも 2 値表示のものを用いている。そのため、表示するホログラムパターンを 2 値化する必要がある、再生像の階調表現性が低下する。そこで、本研究では、再生像の階調表現性の向上に取り組む。また、以前の水平走査型ホログラフィーで

は単色表示しか実現できない。そこで、本研究では、再生像のカラー化にも取り組む。

1.3 本論文の構成

本論文は以下のように構成される。第2章では、電子的なホログラフィーの課題について説明する。また、電子的なホログラフィーの課題を解決するために、様々な研究が行われているが、それらを関連研究として紹介する。第3章では、水平走査型ホログラフィーの構成方法としてスクリーン走査型 [3-6]と視域走査型 [7]について説明する。第4章では、水平走査型ホログラフィーの再生像の階調表現性の向上法について説明する。第5章では、スクリーン走査型システムの時分割表示を用いたカラー化法について説明する。第6章では、視域走査型システムのカラー化について説明する。最後に、第7章で本研究を総括する。

第 2 章 関連研究

2.1 電子的なホログラフィの課題

従来の電子的なホログラム表示では、図 2-1 に示すように、SLM を用いて波面再生することで、立体表示を行う。光の波長を λ 、SLM のピクセルピッチを p 、解像度を $N \times M$ で表すと、電子的なホログラム表示の視域角 Φ は $\Phi = 2\sin^{-1}(\lambda/2p)$ で、画面サイズは $Np \times Mp$ と与えられる。ここで、図 2-2 に示すように、視域は再生像を観察可能な範囲で、視域角は画面から見た視域の大きさを角度で表したものである。視域角の式からわかるように、視域角を拡大するためにはピクセルピッチ p を小さくする必要がある。ピクセルピッチを縮小する場合、画面サイズを拡大するためには解像度を増加させる必要がある。そのため、実用的なホログラム表示を実現するためには、波長オーダーのピクセルピッチと膨大な解像度が必要になる。

例えば、画面サイズ 40 インチで視域角 30° のホログラフィックディスプレイを実現することを考える。波長を 500 nm とすると、ピクセルピッチは $p = 0.97 \mu\text{m}$ で解像度は $N \times M = 842,000 \times 632,000$ と求められる。現状のハイビジョンテレビの解像度が $1,920 \times 1,080$ で、NHK が東京オリンピックに向けて実用化を進めているスーパーハイビジョンテレビの解像度が $7,680 \times 4,320$ であることを考えると、スーパーハイビジョンテレビの約 100 倍 \times 100 倍の解像度が要求されることが分かる。このように、電子的なホログラム表示を実現するためには、表示デバイスの性能向上を待つだけでは難しく、表示方式に関するブレイクスルーが必要である。

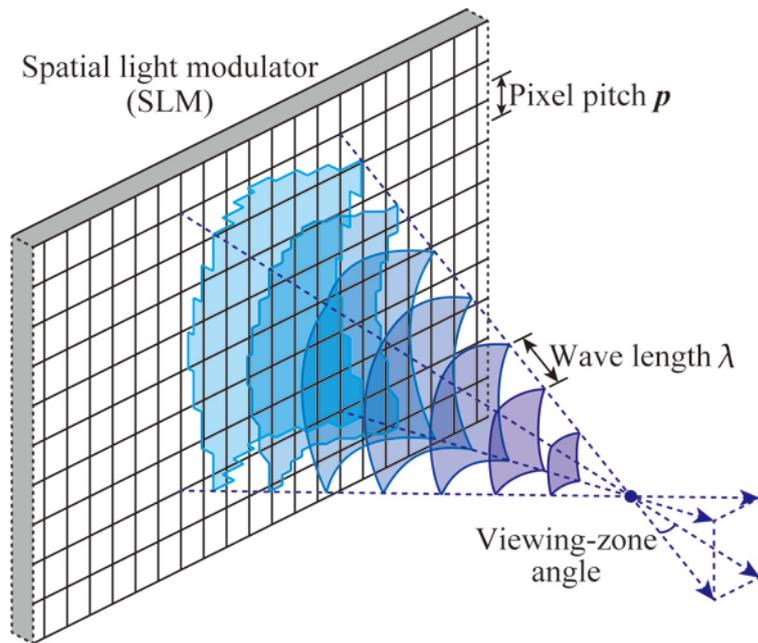


図 2-1 SLM

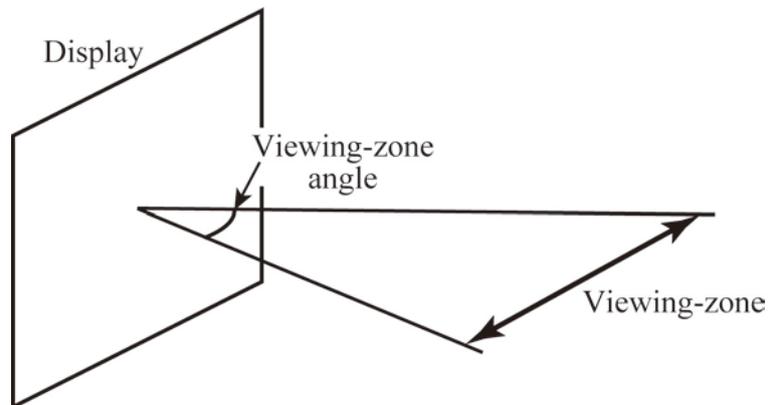


図 2-2 視域と視域角

2.3 MEMS SLM

Microelectromechanical system (MEMS SLM)は大規模集積回路(large-scale integrated circuit : LSI)などで用いられる集積技術によって作成された、微小な構造を有する SLM である。SLM の動作箇所を縮小すると慣性力は小さくなるため、MEMS SLM は高速な動作が可能である。

液晶ディスプレイでは液晶の回転に時間がかかるためリフレッシュレートは 60 Hz 程度であるが、MEMS SLM は数十 kHz の高速な動作が可能である。解像度に関しては液晶ディスプレ

イの方が有利であるが、単位時間あたりに表示できる実質的な解像度は MEMS SLM が非常に高速なため有利である。

2.3 従来の研究

電子的なホログラム表示の視域と画面サイズを拡大するために、これまでに多くの研究が様々な研究機関で行われてきた。ここでは、過去に行われた代表的な研究を紹介する。

(1) AOM を用いる方法

MIT (マサチューセッツ工科大学)のメディアラボは、音響光学変調器 (Acoustic Optical Modulator : AOM)を用いて視域角と画面サイズを拡大する方法を提案している[8]。図 2-3 に原理図を示す。AOM を用いて一次元変調した光を縮小結像することで視域角を拡大する。縮小した変調光をポリゴンミラーによって水平走査することでホログラム走査線を発生し、ホログラム走査線をガルバノミラーによって垂直に走査することで画面サイズを拡大する。このシステムでは 2 次元走査を行うことによって広視域角で大画面のホログラム表示を実現している。また、水平方向にのみ視域角を拡大しているため、垂直方向の視域角は狭い。そこで、垂直方向拡散板を用いて垂直方向に光を拡散することで、垂直方向の視域を拡大している。そのため、垂直方向に視差はなく、水平視差 (Horizontal Parallax Only : HPO)型のホログラム表示となる。

図 2-4 に示すように、3 チャンネルの AOM を用いて各チャンネルに RGB のレーザー光を対応させることでカラーのホログラム表示を実現している[9]。図 2-5 に示すように、AOM は RGB のレーザー光によって回折角が異なるため、ホログラフィック光学素子 (Holographic Optical Elements : HOE)を用いて RGB レーザー光の進行方向を補正している。

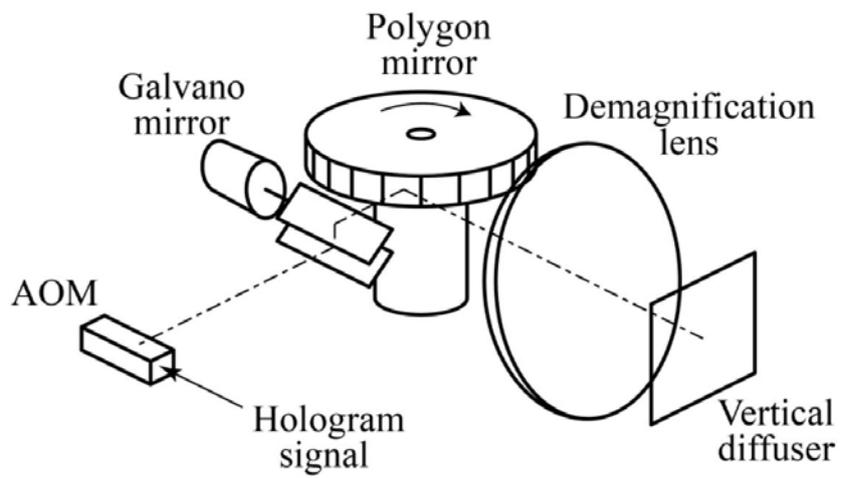


図 2-3 AOM を用いるホログラフィックディスプレイ

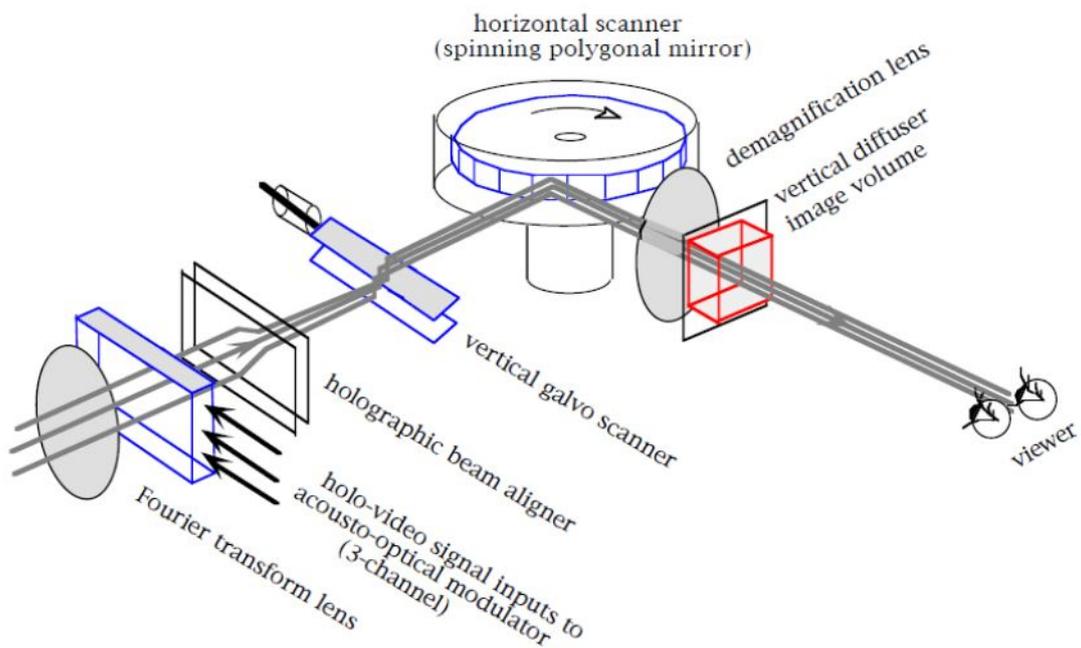


図 2-4 カラー化を行った AOM を用いるホログラフィックディスプレイ

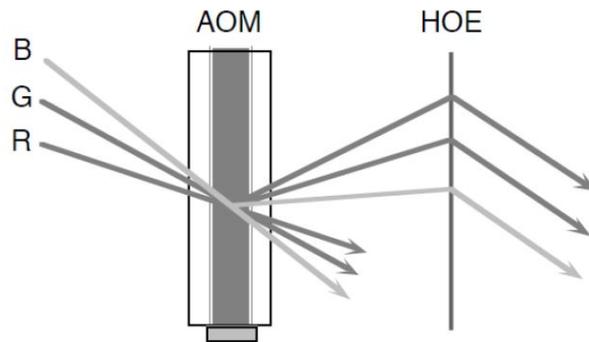


図 2-5 HOE を用いた RGB による回折角の補正

最近、18 チャンネルの異方性導波路型の光変調器[10]を用いる構成方法について報告があった [11]。画面サイズ $35 \times 20 \text{ mm}^2$ (1.6 inch) で、視域角 26° のカラー表示が実現されている。図 2-6 に得られた再生像を示す。

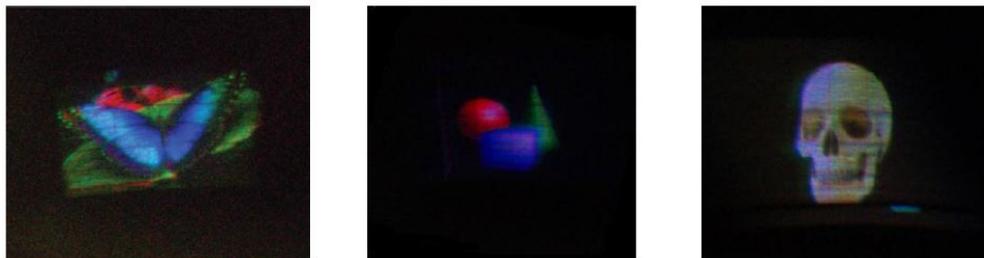


図 2-6 MIT の提案システムによるカラー再生像

(2) 複数の SLM を用いる方法

複数の SLM を用いて視域角と画面サイズを拡大する方法が、TAO(旧通信・情報機構)[12]、NICT (情報通信研究機構)[13-15]、Seoul National University (ソウル大学)[16]、University of Cambridge (ケンブリッジ大学)[17]、A*STAR (シンガポール科学技術研究庁) [18, 19]などの複数の機関から報告されている。ここでは、A*STAR の方法について説明する。

複数の SLM を空間的にタイリングした SLM アレイと水平走査を組み合わせることで、視域角と画面サイズを拡大している[18, 19]。図 2-7 に表示システムの構成を示す。SLM には高フレームレートな動作が可能な強誘電性液晶

(Ferroelectric Liquid Crystal on Silicon : FLCoS)を用いている。図2-8に示すように、24 台の SLM とビームスプリッタを用いて SLM アレイを構成している。SLM のフレームレートは 720 Hz である。SLM アレイで表示したホログラム群を 2 つの曲面鏡を用いて縮小結像することで視域角を拡大する。SLM アレイを用いて表示したホログラム群は垂直方向に隙間なく表示できるように配置されており、表示したホログラムを水平走査することで画面サイズを拡大する。

このシステムでは、RGB レーザー光源とクロス・ダイクロプリズムを用いることでカラー表示を実現している[19]。カラー表示を実現するために 2 つの方法を提案している。第一の方法は、SLM アレイは 3 本の縦長の要素ホログラムを一度に表示し、それぞれの要素ホログラムを異なる波長の光で照明して RGB を空間分割し、水平走査することでカラー化する方法である。図 2-9(a)に、この方法を用いて得られたカラー再生像を示す。第二の方法は、時分割で RGB レーザー光を切り替えてホログラム全体を照明する方法である。図 2-9(b)に、この方法を用いて得られたカラー再生像を示す。画面サイズは、前者で $251 \times 70.0 \text{ mm}^2$ (10 inch)で、後者で $126 \times 70.0 \text{ mm}^2$ (5 inch)である。視域角はどちらの方法でも 3.79° とかなり小さい。

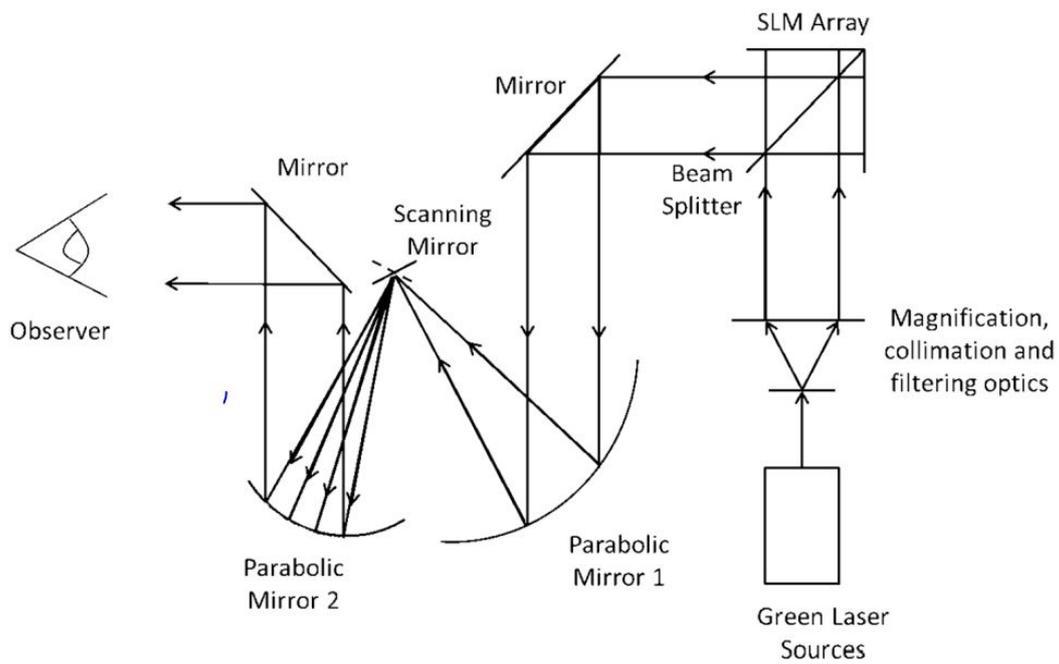


図 2-7 SLM アレイと水平走査を組み合わせる方法のホログラフィックディスプレイ

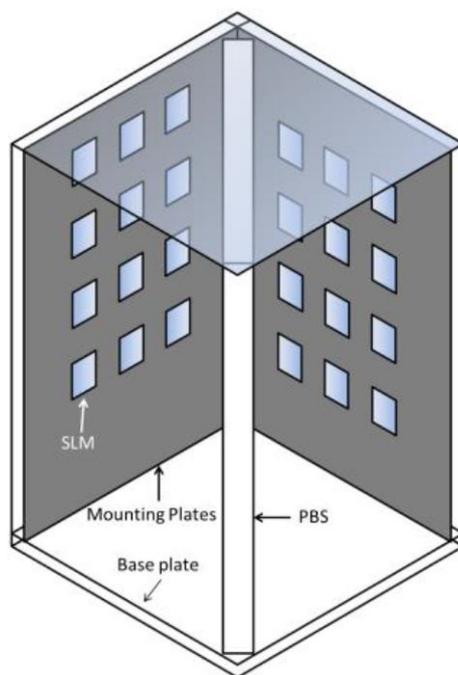


図 2-8 SLM アレイ



図 2-9 A*STAR の提案システムによるカラー再生像の表示結果

カラー化の実現方法: (a) 空間分割照明と水平走査の組み合わせ, (b) 時分割照明

(3) フォトリフラクティブポリマーを用いる方法

フォトリフラクティブポリマー (Photorefractive polymer : PRP)とは、干渉縞の光強度分布に応じて屈折率が変化する有機材料である。フォトリフラクティブポリマーを用いた電子的なホログラフィーの実現方法は、京都工芸繊維大学[20]や The University of Arizona (アリゾナ大学)[21, 22]などで研究されている。ここでは、アリゾナ大学の研究について説明する。

アリゾナ大学 [21]は、高速に書き換え可能なフォトリフラクティブポリマーを用いた方法を提案している。図 2-10 に表示システムの構成図を示す。水平方向に縮小した要素ホログラムをフォトリフラクティブポリマーに水平方向に並べて記録することで広視域で大画面なホログラム表示を実現している。提案システムは HPO 型のホログラムである。

画面サイズが $101 \times 101 \text{ mm}^2$ (5.7 inch)で、水平視域角が 45° のホログラムの作製に成功している。各要素ホログラムのサイズが $0.8 \times 101 \text{ mm}^2$ で、要素ホログラム数が 120 個である。ただし、120 個の要素ホログラムの書き込みに 3 分を要する。RGB 毎に参照光の照明方向を変化させることによってカラー表示を実現している。カラーのホログラム再生像を図 2-11 に示す。

最新の研究[21]では、120 個の要素ホログラムの書き込み時間を 2 秒まで短縮している。これはフレームレートにして 0.5 Hz であり、フリッカーの生じない動画表示のフレームレートが 60 Hz であることを考えると、動画表示の実現はま

だ難しい。さらに、60 Hz で書き換え可能な装置が実現した場合には、フォトリフラクティブポリマーを用いなくてもフリッカーのない立体像が観察できるため、フォトリフラクティブポリマーは不要になる。

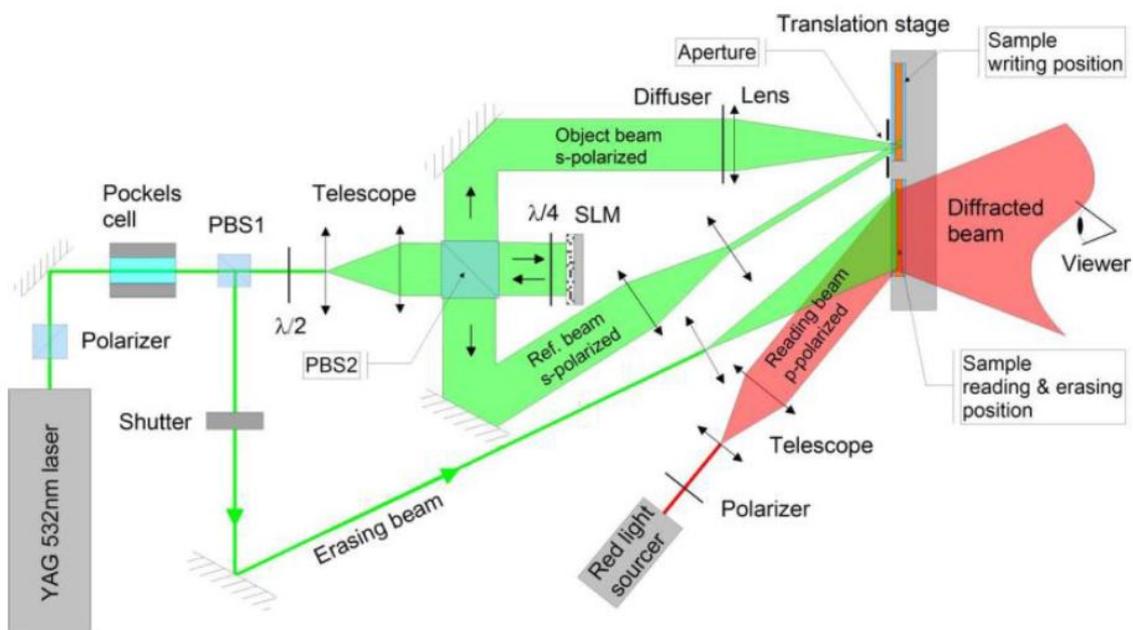


図 2-10 フォトリフラクティブポリマーを用いる方法の
ホログラフィックディスプレイ



図 2-11 アリゾナ大学の提案システムによるカラー再生像

(4) アイトラッキングを用いる方法

ドイツの SeeReal Technologies 社によって、アイトラッキング技術を用いた大画面のホログラフィックディスプレイの実現方法が提案されている[23-25]。図

2-12 に原理図を示す。視域角を拡大するためにピクセルピッチを縮小する方法がよく用いられるが、提案システムでは画面サイズを拡大することによって縮小した視域を観察者の眼の位置に形成することで再生像の観察を可能にしている。ディスプレイに取り付けたカメラを用いて観察者の左右の眼の位置を検出し、眼の移動に応じて縮小した視域を左右の眼の位置に移動させることにより広視域な表示を実現している。

画面サイズ 20 inch の表示システム[23, 24]が実現されていて、時分割でカラー表示[25]も実現されている。図 2-13 にカラー再生像の表示結果を示す。

この方法では、アイトラッキングと組み合わせて視域を移動するため、複数人で観察した場合、観察者ごとにホログラム表示を順次行う必要がありフレームレートが低下する。そのため、複数人での利用は難しい。本研究で研究する視域走査型システムでは、縮小した視域を水平走査することで、時分割で視域を拡大する。そのため、複数の観察者が同時に観察できる。ただし、高フレームレートな SLM が必要になる。

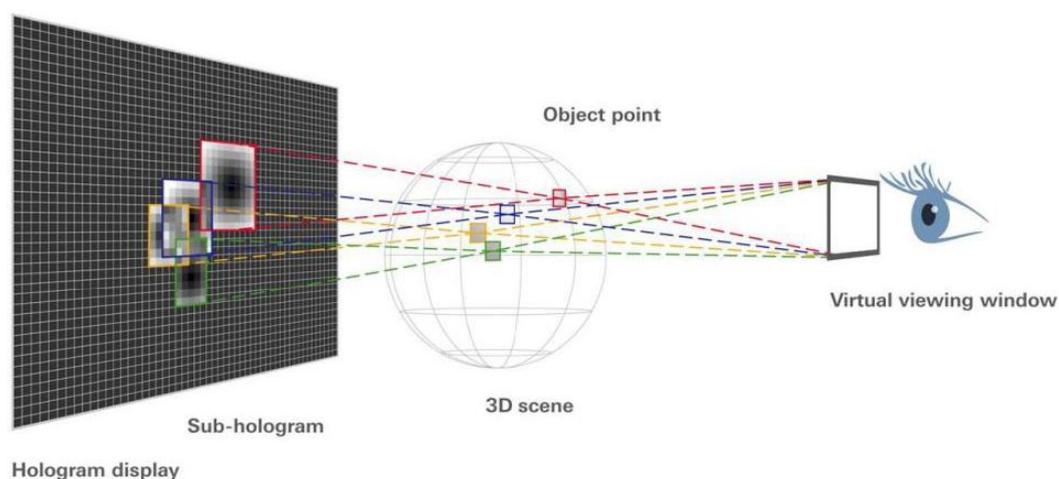


図 2-12 アイトラッキングを用いるホログラフィックディスプレイ

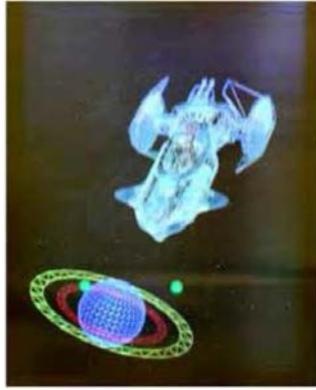


図 2-13 SeeReal の提案システムによるカラー再生像の表示結果

第 3 章 水平走査型ホログラフィー

本章では、本研究で用いる水平走査型ホログラフィーについて簡単に説明する。これは、高フレームレート表示が可能な MEMS SLM と水平走査を組み合わせた時分割表示を原理とする。水平走査型ホログラフィーには、スクリーン走査型と視域走査型の表示システムがある。これらについて以下で簡単に説明する。

3.1 スクリーン走査型システム

最初にスクリーン走査型の表示システム[3-6]について説明する。

図 3-1 に示すように、スクリーン走査型システムは MEMS SLM、アナモルフィック光学系、水平スキャナ、スクリーンレンズ、および垂直方向拡散板で構成される。MEMS SLM は、ホログラムパターンを高フレームレート表示する。アナモルフィック光学系は、直交させた二枚のシリンドリカルレンズで構成され、水平方向と垂直方向で異なる結像倍率を持つ。MEMS SLM で表示したホログラムパターンを、アナモルフィック光学系によって水平方向に縮小し、垂直方向に拡大してスクリーンに結像する。スクリーンに結像した縦長のホログラムを要素ホログラムと呼ぶ。水平方向にはピクセルピッチが縮小するため、水平視域角が拡大する。垂直方向に拡大した要素ホログラムを、水平スキャナにより水平走査することで画面サイズを拡大する。以上により、視域角と画面サイズの拡大を実現する。このシステムでは垂直方向のピクセルピッチが拡大するため、HPO 型ホログラムである。そこで、垂直方向拡散板を用いて垂直方向に光を拡散することで垂直方向の視域を拡大する。アナモルフィック光学系内に設置したシングルサイドバンド(Single-sideband: SSB)フィルターにより共役像成分やゼロ次光などの不要光を除去する[26, 27]。スクリーンレンズは、スクリーンからの回折光を観察領域の中心側に向ける役割を持つ。また、スクリーン

レンズの焦点距離を適切に設定することで、特定の観察距離で視域を最大化することができる[28]。

要素ホログラムの表示ピッチを要素ホログラムの幅よりも小さくすることで、図 3-2 に示すように、連続したホログラム表示が実現できる。

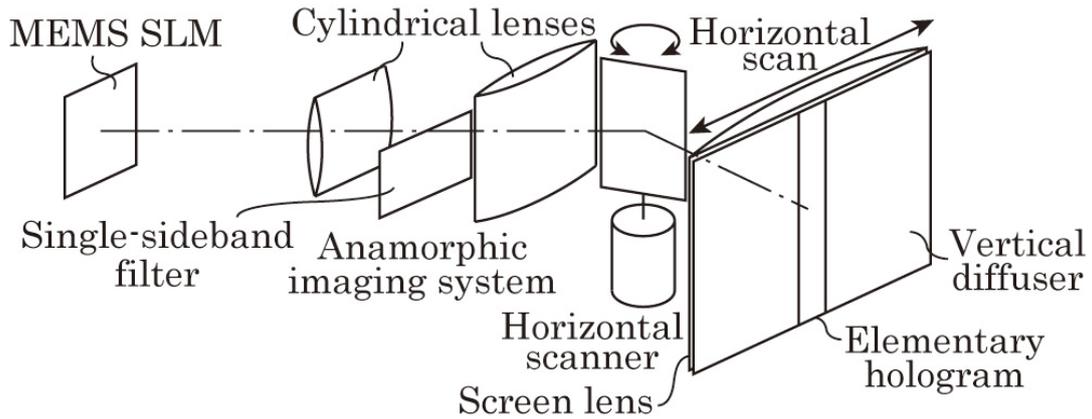


図 3-1 スクリーン走査型システム

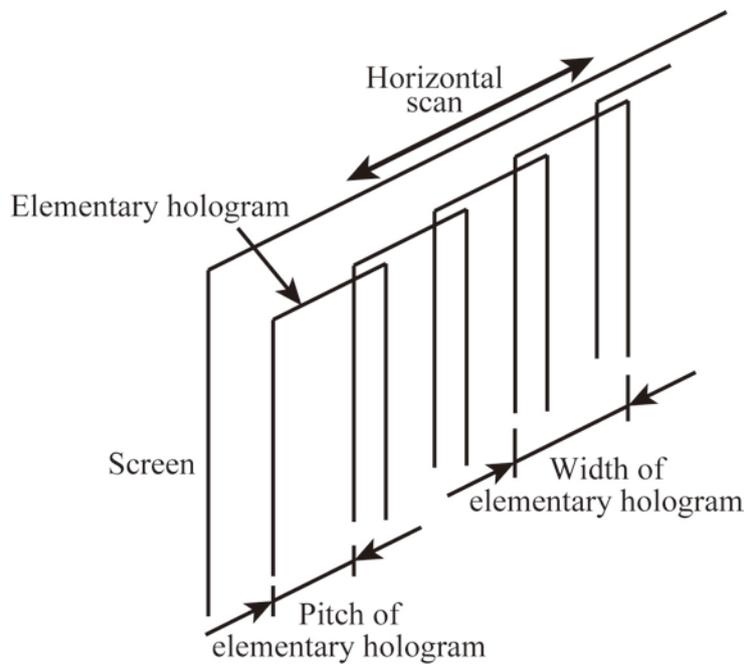


図 3-2 連続した要素ホログラムの表示

最初に製作された実験システムについて説明する[3]。MEMS SLM には Texas Instruments 社製の Discovery™ 3000 を用いている。解像度は $1,024 \times 768$ で、ピクセルピッチは $13.68 \mu\text{m}$ である。フレームレートは 13.333 kHz である。アナモルフィック光学系の水平倍率は 0.183 倍で、垂直倍率は 5.00 倍である。スクリーン上に結像される要素ホログラムのサイズは $2.56 \text{ mm} \times 52.5 \text{ mm}$ である。光源には波長 635 nm の半導体レーザーを用いている。要素ホログラムの水平方向のピクセルピッチは $2.50 \mu\text{m}$ となり、水平視域角は 14.5° に拡大される。

水平スキャナとしてガルバノミラーを用いている。ガルバノミラーの走査周波数は 60 Hz である。走査角度は $\pm 10^\circ$ である。ガルバノミラーはモーターを用いて走査角度を制御しており、モーターへの印加電圧に応じて走査角度を制御する。水平走査をするときは、モーターに三角波の電圧を印加してミラーを高速に振動させるが、ミラーの回転方向を切り替えるときに、モーターに負担がかかり発熱する。モーターの温度が高くなりすぎると制御が不安定になるため、実際には回転方向の切り替え部分にはサイン波を用いて制御している。そのため、ガルバノミラーの走査には非線形な部分が生じる。一回の水平走査で DMD が表示する画像は 222 であり、ガルバノミラーの非線形な走査部分を除去するために、186 個の要素ホログラムを表示している。

要素ホログラムの表示ピッチを 0.32 mm としている。拡大された画面サイズは $73.1 \text{ mm} \times 52.5 \text{ mm}$ である。垂直方向拡散板としてレンチキュラレンズを用いた。レンチキュラレンズはシリンドリカルレンズで構成されており、シリンドリカルレンズのピッチは 0.10 mm である。垂直方向の拡散角は 52° である。

スクリーン走査型システムで表示した再生像を図 3-2 に示す。再生像を構成するばつと菱形はそれぞれスクリーンから 100 mm と 150 mm の位置に表示している。図 3-3 (a), (b), (c) は、再生像をそれぞれ右、中央、左から撮影した結果である。実測値で、視域角は 15° で、画面サイズは $70 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$ (3.4 inch) であった。他の再生像を図 3-4 に示す。

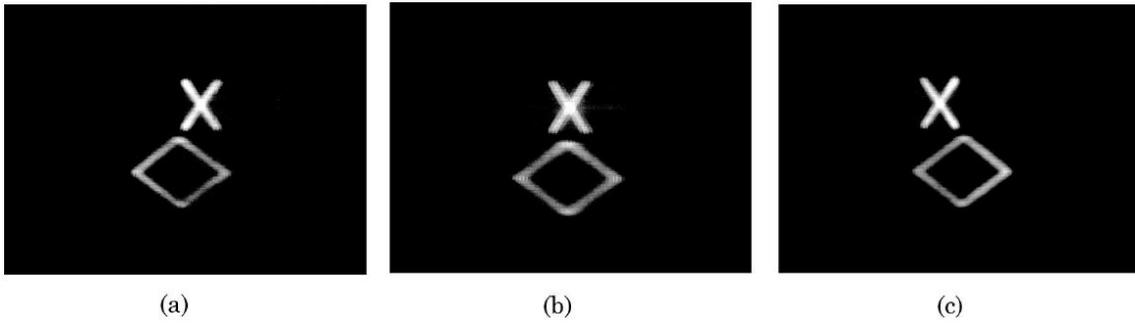


図 3-3 スクリーン走査型システムによる再生像
 撮影位置: (a)右, (b)中央, (c)左

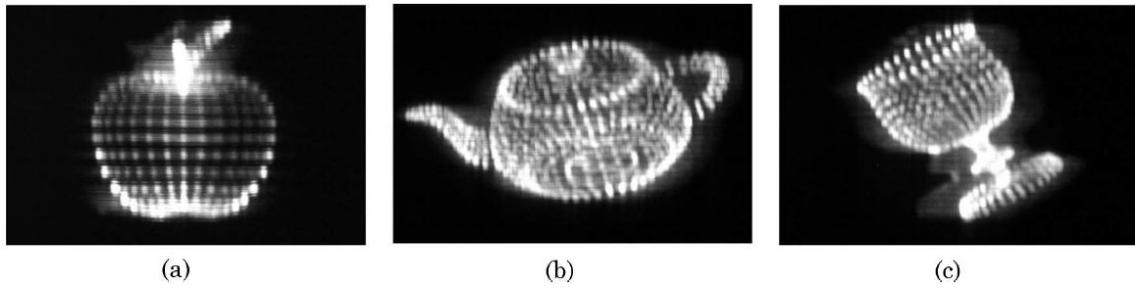


図 3-4 スクリーン走査型システムによる再生像
 (a) apple, (b) teapot, (c) wine glass

3.2 視域走査型システム

つぎに視域走査型システム[7]について説明する。

視域走査型システムは、図 3-5 に示すように、MEMS SLM、拡大結像系、水平スキャナで構成される。MEMS SLM は、ホログラムパターンを高フレームレート表示する。拡大結像系は、2 枚の球面レンズで構成され、二つの機能をもつ。ひとつは MEMS SLM に表示したホログラムパターンを水平スキャナに拡大結像し、もうひとつは結像後の光を一点に集光する機能である。拡大結像するため、画面サイズが拡大する。画面サイズの拡大によりピクセルピッチも拡大するため、視域が縮小する。拡大結像系の集光位置に縮小された視域が形成される。縮小された視域を、水平スキャナを用いて水平走査することで、視域を拡大する。これにより、画面サイズと視域の拡大が実現する。スクリーン走査型システムで用いるアナモルフィック光学系は、結像により微細なパターンを発生するため大きなレンズが必要である。それに対して、視域走査型システムでは、拡大結像系を行うため大きなレンズは必要ない。

ここで、縮小した視域の幅を眼の瞳孔径より大きくすることで、実質的な波面再生が実現できる。

図 3-6 に示すように、視域の表示ピッチを視域幅以下にすることで、連続した視域が形成できる。

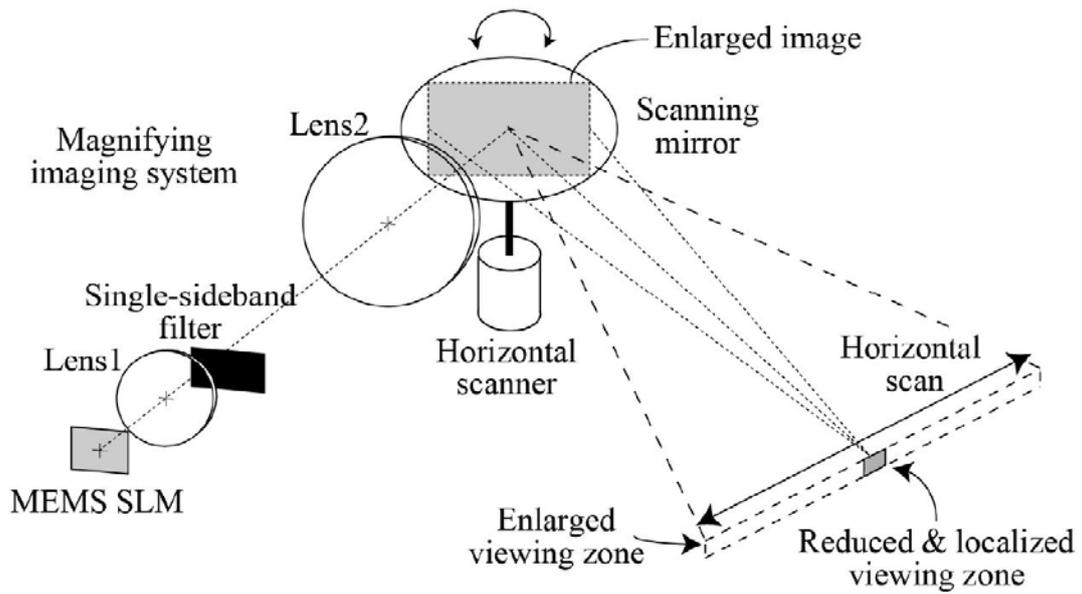


図 3-5 視域走査型システム

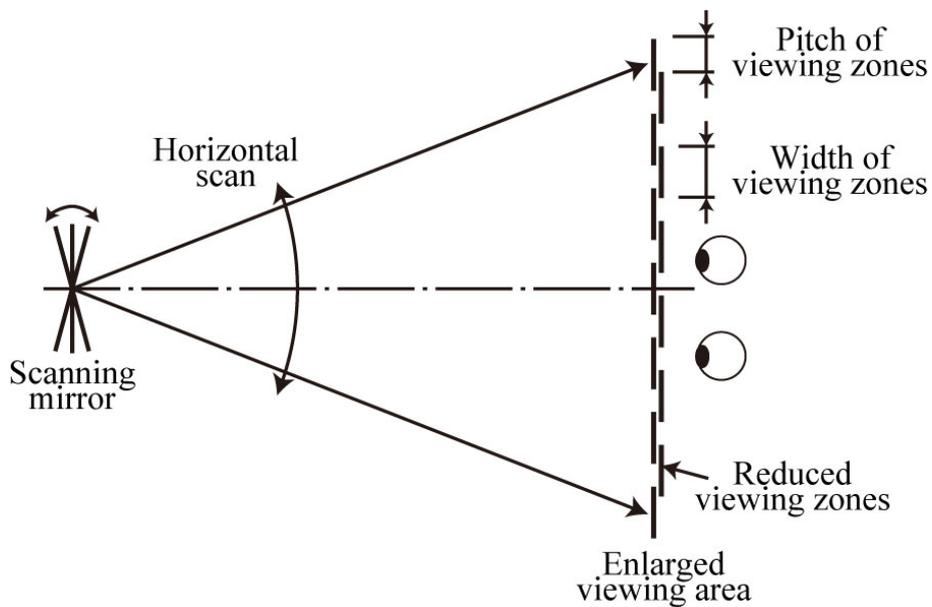


図 3-6 連続した視域の形成

以前に製作された実験システムについて説明する[7]。MEMS SLM として DMD を用いた。DMD には Texas Instruments 社製の Discovery™ 3000 を用いている。解像度は $1,024 \times 768$ であり、ピクセルピッチは $13.68 \mu\text{m}$ である。フレームレートは 13.333 kHz である。拡大結像系の倍率は 2.86 倍である。画面サ

イズは $40.0\text{ mm} \times 30.0\text{ mm}$ (2.0 inch) に拡大される。ピクセルピッチは $39.1\text{ }\mu\text{m}$ に拡大するため、視域は $9.74\text{ mm} \times 4.87\text{ mm}$ に縮小する。平均瞳孔径が 5 mm なのに対して、視域の幅の方が大きいため、実質的な波面再生が実現できている。縮小された視域の表示ピッチは 1.98 mm としている。縮小された視域の表示ピッチを視域幅よりも小さくすることで、連続した視域を形成している。光源としては波長 635 nm の半導体レーザーを用いた。水平スキャナにはガルバノミラーを用いた。ガルバノミラーとしては、Cambridge Technology 社製の Micro MaxTM series 671 を用いた。ミラーサイズは 50 mm であり、走査角は $\pm 20.0^\circ$ で、走査周波数は 60 Hz である。一回の水平走査で DMD が表示する画像は 222 であり、ガルバノミラーの非線形な走査部分を除去するために、186 個のホログラムが表示できる。ガルバノミラーにより縮小した視域幅を水平走査することで、視域を 437 mm に拡大している。

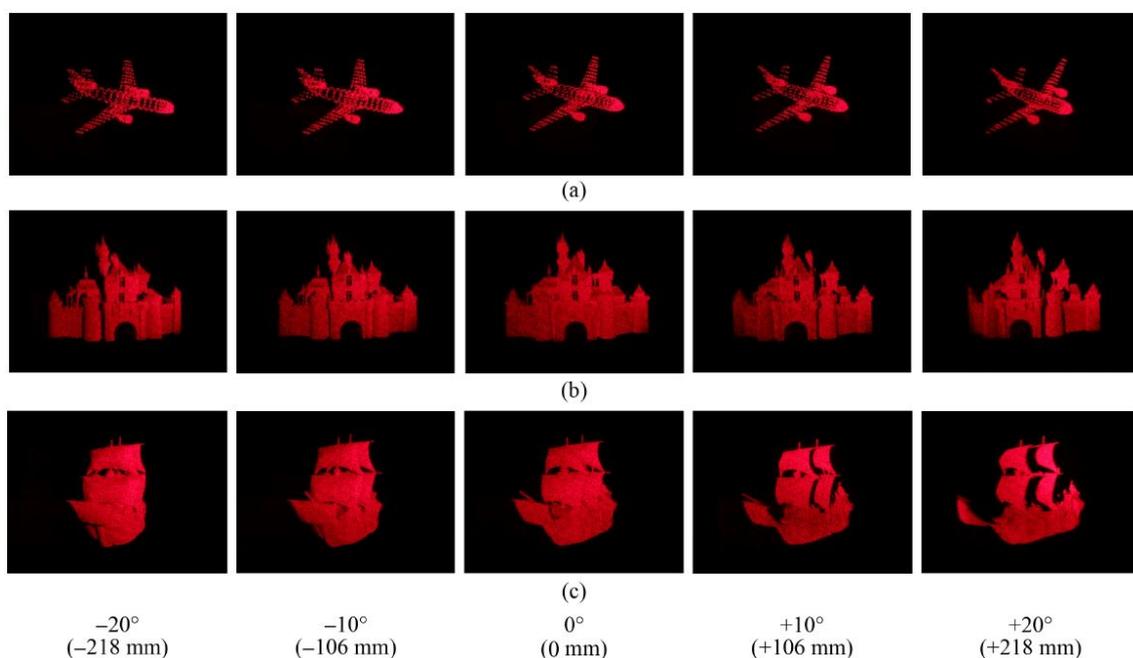


図 3-7 視域走査型システムによる再生像

(a) plane, (b) castle, (c) ship

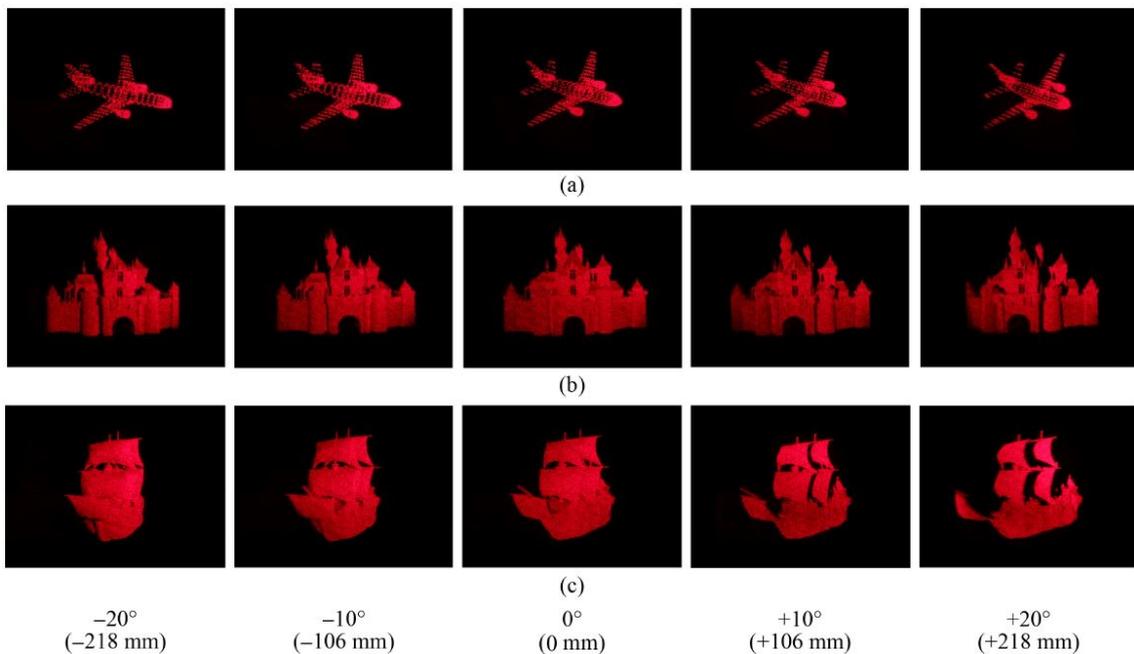


図 3-8 視域走査型システムによる再生像 (垂直方向拡散板を設置)

(a) plane, (b) castle, (c)ship

視域走査型システムで表示した再生像を図 3-7 に示す。図 3-7 は異なる 5 か所の水平位置から撮影した結果である。視域幅が 400 mm 以上あるため、再生像を広い範囲で観察することができる。水平スキャナの手前（観測者側）に垂直方向拡散板を設置した場合の再生像を図 3-8 に示す。垂直方向拡散板を設置することで、広い垂直位置で観察可能となる。しかし、垂直方向拡散板を設置すると、垂直方向の視差は失われるため、HPO 型ホログラムとなる。

図 3-9 に、再生像として異なる奥行き表示位置に 3 つのパターン表示した写真を示す。3D と TUAT はそれぞれスクリーン手前 100 mm, 30 mm に表示した。円はスクリーン奥 100 mm に表示した。図 3-9 に示すように、ピントを合わせた再生像はシャープに撮影できて、他の二つの再生像はぼけていることが分かる。

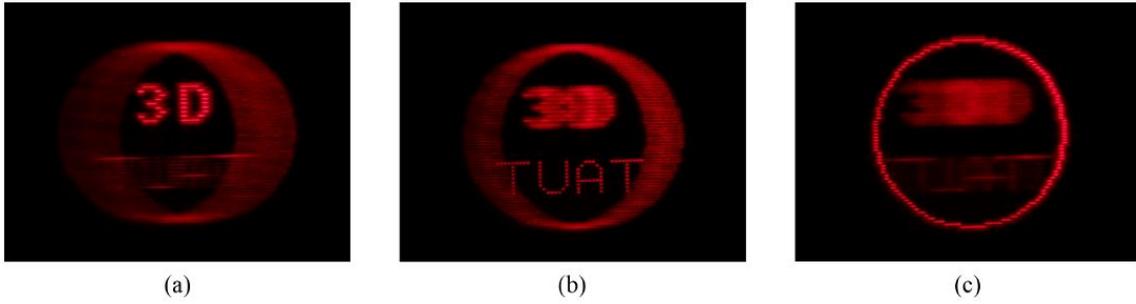


図 3-9 視域走査型システムによる再生像

ピント位置 : (a) + 100 mm, (b) + 30 mm, (c) - 100 mm

3.3 調節応答の測定

水平走査型ホログラフィーで発生した立体像に対して、人間が目のピント合わせできるかを確認するために調節応答の測定が行われている[5]。

視標として図 3-10 に示すシーメンススターを表示して、調節応答の測定している。スクリーンから観察者までの距離は 1,100 mm とし、視標の表示位置は 50 ~ 550 mm の範囲で 50 mm の間隔で表示している。視標のサイズは、視野角が $1.1^\circ \times 1.1^\circ$ で一定となるように設定している。

調節応答の測定には、グラッド精工製の両眼開放型レフラクトメータ (FR5000S) を用いている。レフラクトメータの測定単位は距離 [m] の逆数である Diopter [D] で表され、測定間隔は 0.2 秒ごと、表示精度は 0.01 D である。



図 3-10 視標

図3-11に実視標と立体像の調節応答の比較を示す。横軸は実視標に対する調節応答で、縦軸は立体像に対する調節応答である。プロットは3回の測定値の平均値を表している。実視標と立体像に対する調節応答が同等であれば、点線で示した線上にプロットが分布する。図3-11に示すように、どの被験者に対しても、ほとんどの視標表示位置で、立体像と実視標でほぼ同等な調節応答が得られている。しかし、被験者Y.U.、被験者Y.S.、被験者Y.T.は立体像をスクリーン手前 500 mm と 550 mm に表示した場合に、立体像と実視標に同等な調節応答が得られていない。被験者M.Y.は、立体像をスクリーン手前 450 mm、500 mm、550 mm に表示した場合に、立体像と実視標に同等な調節応答が得られていない。測定結果から、表示位置を 400 mm 以下にすることで、実視標とほぼ同等な調節応答

が得られることがわかる。

われわれの研究グループでは、以前に光線再生型の立体表示で輻輳と調節の不一致を解決する表示方式である超多眼立体表示に対する調節応答を測定したが [36]、それと比較するとスクリーン走査型システムに対する調節応答は、より広い奥行き範囲で調節が機能し、安定した調節応答が得られていることが報告されている。

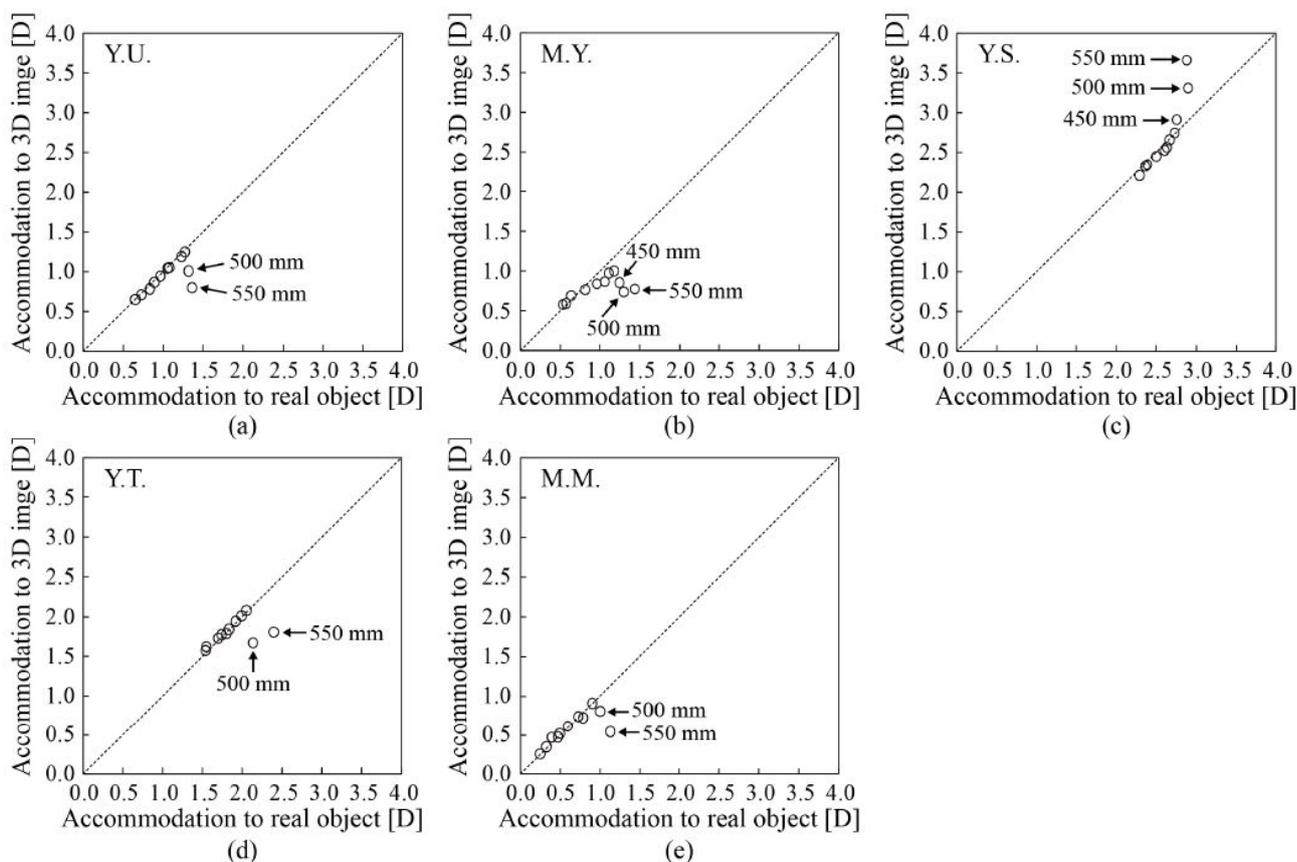


図 3-11 立体像と実視標の調節応答の比較：

(a) Y. U., (b) Y. S., (c) M. Y., (d) Y. T., and (e) M. M.

3.4 水平走査型ホログラフィーと従来研究との比較

2章で紹介した従来の研究と水平走査型ホログラフィーの比較を行う。フォトリフラクティブポリマーを用いた方法は、60 Hz で書き込み可能な装置が実現した場合、フォトリフラクティブポリマーが不要となるため、比較から除外した。また、アイトラッキングを用いた方法は、複数人での視聴が可能なホログラム TV を実現できないため除外した。比較した表を以下に示す。

表 3.1 水平走査型ホログラフィーとの比較

	AOM を用いた方法	複数の SLM を用いた方法	スクリーン走査型システム	視域走査型システム
画面サイズ	1.6 inch	5 inch	3.4 inch	2.0 inch
視域角	26°	3.8°	15°	40°
フレームレート	30 Hz	20 Hz	60 Hz	60 Hz

AOM を用いた方法では、2次元走査が必要であり、水平走査に要求される走査周波数が厳しいため、フレームレートは 30 Hz と低い。実用可能な電子的なホログラム表示の実現には、スーパーハイビジョンの約 100 倍×100 倍必要である。それに対して、今回紹介した研究では SLM を 6×4 しか実現できていない。そのため、複数の SLM を単純にタイリングするだけでは、実用的な電子的なホログラム表示の実現は困難である。

第 4 章 誤差拡散法を用いた階調表現の実現

4.1 研究目的

水平走査型ホログラフィーでは、MEMS SLM として 2 値の表示デバイスである DMD を用いる。そのため、ホログラムパターンを 2 値化処理する必要がある。従来の水平走査型ホログラフィーでは、ホログラムの振幅分布を、単純に閾値を用いて 2 値化する単純 2 値化を用いていた。そのため、再生像の階調表現性が低下する問題があった。そこで、本研究では、二次元画像の 2 値化において階調表現性の向上法として知られている誤差拡散法を適用することで水平走査型ホログラフィーの再生像における階調表現性の向上を試みる。

誤差拡散法[29, 30]は、2 値画像の点の密度を変化させることで疑似的に階調表現を行う技術で、プリンターなど二次元画像の分野で広く用いられている。誤差拡散法をフレネル型ホログラム[31]やフーリエ変換型ホログラム[32-34]に適用した研究は過去に行われている。しかし、HPO 型ホログラムに対して誤差拡散法を適用した研究例はない。

水平走査型ホログラフィーの階調表現性の向上法としては、複数の閾値で 2 値化した要素ホログラムを時分割で重ね合わせることで階調表現性を向上させる方法が過去に提案されている[6]。

4.2 ホログラムの 2 値化による画質低下

水平走査型ホログラフィーの MEMS SLM として用いる DMD の構造を、図 4-1 に示す。DMD の表示面では、1 ピクセルがひとつのマイクロミラーで構成され、マイクロミラーの傾きを変えることで、ピクセルのオン・オフを切り替える[37]。そのため、表示できる画像の階調数は 2 値となる。

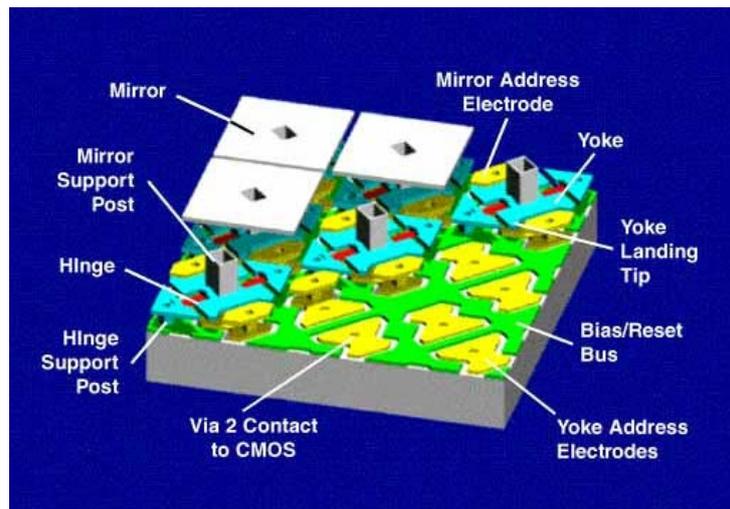


図 4-1 DMD の表示面の構造

従来のスクリーン走査型システムでは、DMD にホログラムパターンを表示するために単純 2 値化を用いていた。画素値 f を持つ画素を、閾値 t を用いて単純 2 値化すると、2 値化後の画素値 f' は、 $f \geq t$ の場合は $f' = 255$ 、 $f < t$ の場合は $f' = 0$ とする。画素値は $0 \leq f \leq 255$ とする。図 4-2 に、単純 2 値化を用いたホログラムパターンの例を示す。図 4-3 に、単純 2 値化が再生像に与える影響を示す。ホログラムパターンの回折像が再生像であるため、ホログラムパターンの 2 値化が再生像の 2 値化を必ずしも意味するわけではないが、三次元形状データであるテクスチャ画像との比較から、階調表現性が低下していることがわかる。

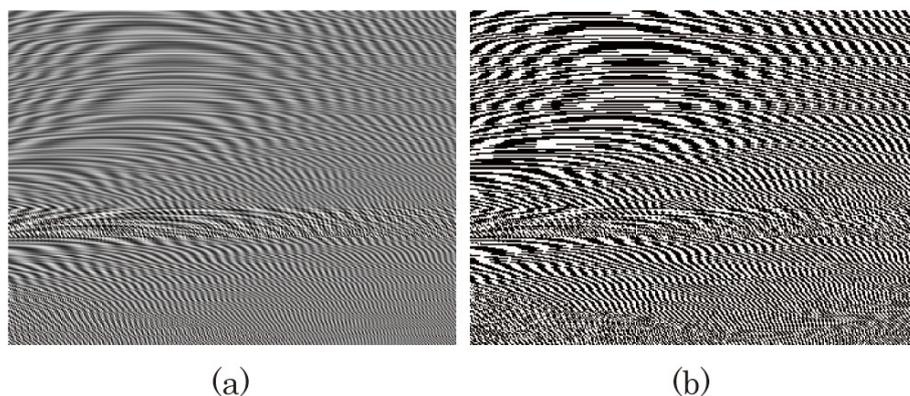


図 4-2 要素ホログラム: (a)連続階調、(b)単純 2 値化

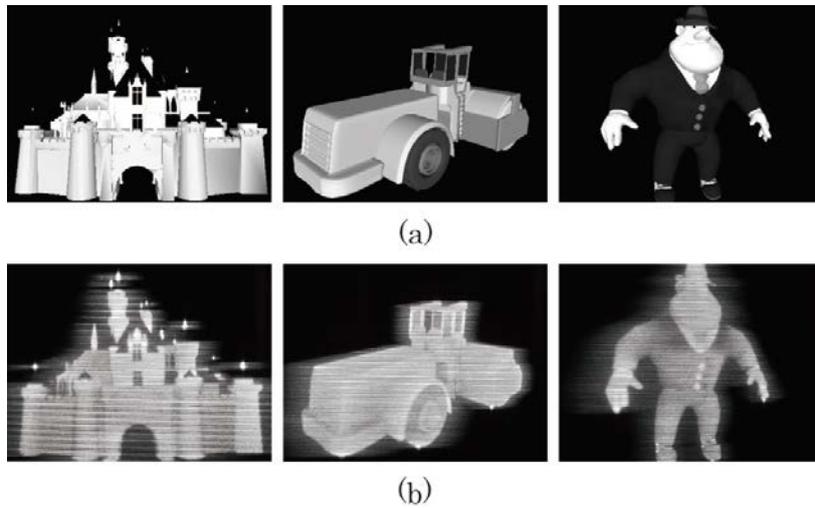


図 4-3 階調表現性の確認: (a)テクスチャ画像、(b)単純 2 値化を用いた再生像

4.3 誤差拡散法

ここでは、二次元画像で用いられる誤差拡散法について説明する。図 4-4 に示すように、画素値 f を持つ画素を、閾値 t を用いて 2 値化し、周囲の画素 f_1, f_2, f_3, f_4 へ誤差を拡散する。画素値 f と閾値 t を比較して、2 値化後の画素値 f' は、 $f \geq t$ の場合は $f' = 255$ 、 $f < t$ の場合は $f' = 0$ とする。画素値は $0 \leq f \leq 255$ とする。2 値化後の画素値 f' と 2 値化前の画素値 f を用いて、2 値化により生じた誤差 e を計算し、誤差 e を拡散係数 A_1, A_2, A_3, A_4 で重み付して画素 f_1, f_2, f_3, f_4 へ拡散する。以上の閾値処理と誤差拡散を、図 4-5(a) に示すように、画像の左上から右下へと順次行うことで、疑似階調表現を実現する。例として f_1, f_2, f_3, f_4 へ誤差を拡散したが、実際には目的に応じて拡散範囲と拡散係数を適宜設定する。閾値 t は、画素値の平均がよく用いられる。

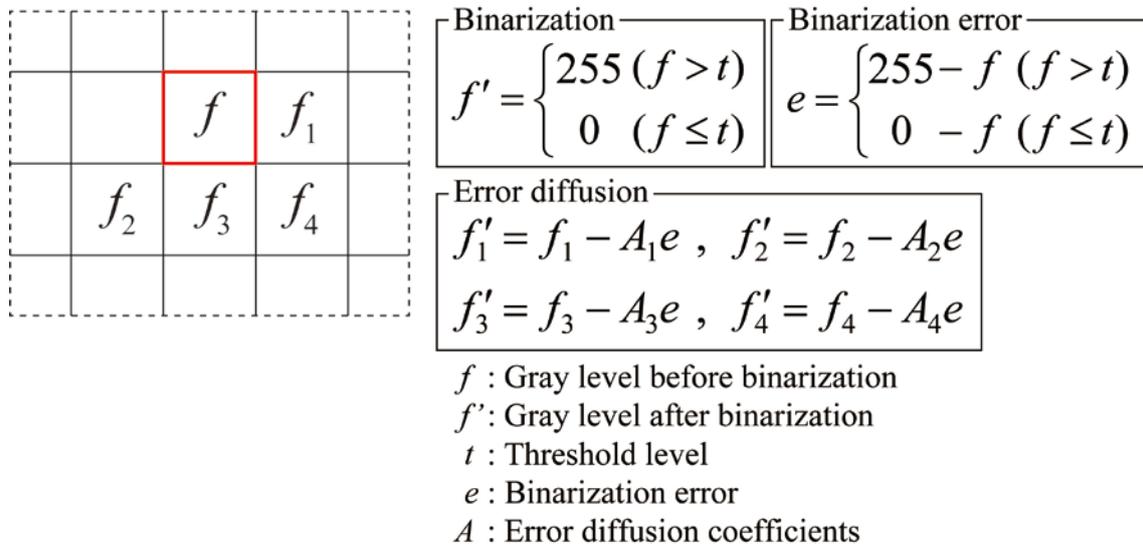


図 4-4 誤差拡散法の計算方法

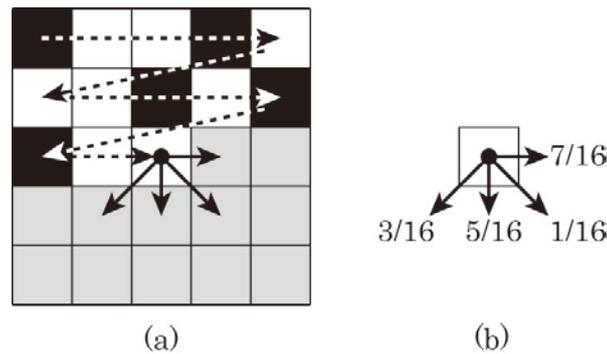


図 4-5 誤差拡散法: (a) 計算の順番, (b) Floyd-Steinberg の拡散係数

スクリーン走査型システムは HPO 型ホログラムである。要素ホログラムは、水平方向の分布で再生像を再現し、垂直方向の分布はフーリエ面において物体光を共役光とゼロ次光から分離するように決める。そのため、誤差拡散は水平方向と垂直方向の両方に行う必要がある。そこで、本研究では、HPO 型ホログラムに二次元の誤差拡散法を適用する。

本研究では、二次元画像の分野で開発された 2 値化処理法である Floyd-Steinberg アルゴリズム[30]を適用する。拡散係数を図 4-5(b)に示す。ホログラム計算で

求めた分布は正負の値の合計がほぼ等しいため、2 値化に用いる閾値はゼロとする。

4.4 実験装置

MEMS SLM として、DMD を用いた。ただし、第 3 章で説明していた初期のシステムで使用していた Discovery™ 3000 に変えて、本研究では Discovery™ 4100 を用いた。解像度は $1,024 \times 768$ で、ピクセルピッチは $13.68 \mu\text{m}$ で同一であるが、フレームレートは 22.727 kHz で約 1.7 倍である。アナモルフィック光学系の水平倍率を 0.183 倍とし、垂直倍率を 4.74 倍として、要素ホログラムのサイズを $2.56 \text{ mm} \times 49.8 \text{ mm}$ とした。水平方向のピクセルピッチが $2.50 \mu\text{m}$ に縮小するため、水平方向の視域角は 14.7° に拡大される。ガルバノミラーの走査角は $\pm 16^\circ$ で、走査周波数は 60 Hz である。そのため、画面サイズは $149 \text{ mm} \times 49.8 \text{ mm}$ (6.20 inch) に拡大する。要素ホログラム数は 1,514 で、要素ホログラムの表示ピッチは 0.193 mm とした。光源には波長 640 nm の半導体レーザーを用いた。

4.5 実験結果

要素ホログラムに誤差拡散法を適用した場合の階調表現性を、実験により確認した。階調表現性を確認するために、図 4-6 に示す強度が異なる正方形で構成されるテストパターンを表示した。各正方形の大きさは $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ で、スクリーン手前 50 mm に表示した。階調値は 1, 32, 64, 96, 128, 160, 192, 224, 255 とした。比較のため、単純 2 値化を用いたホログラムで再生像も表示した。図 4-7 に要素ホログラムの例を示す。図 4-7(a)は 2 値化を行う前の連続階調の要素ホログラムで、図 4-7(b)は単純 2 値化を用いた要素ホログラムで、図 4-7(c)は Floyd-Steinberg アルゴリズムを用いた要素ホログラムである。図 4-7 に示すように、誤差拡散法を適用することで、もとの連続階調のホログラムパターンに近づくことが分かる。

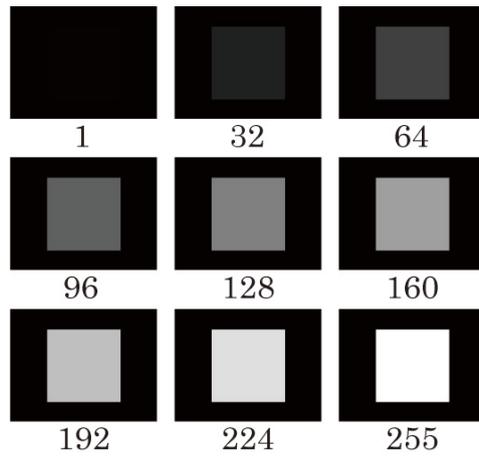


図 4-6 テストパターン

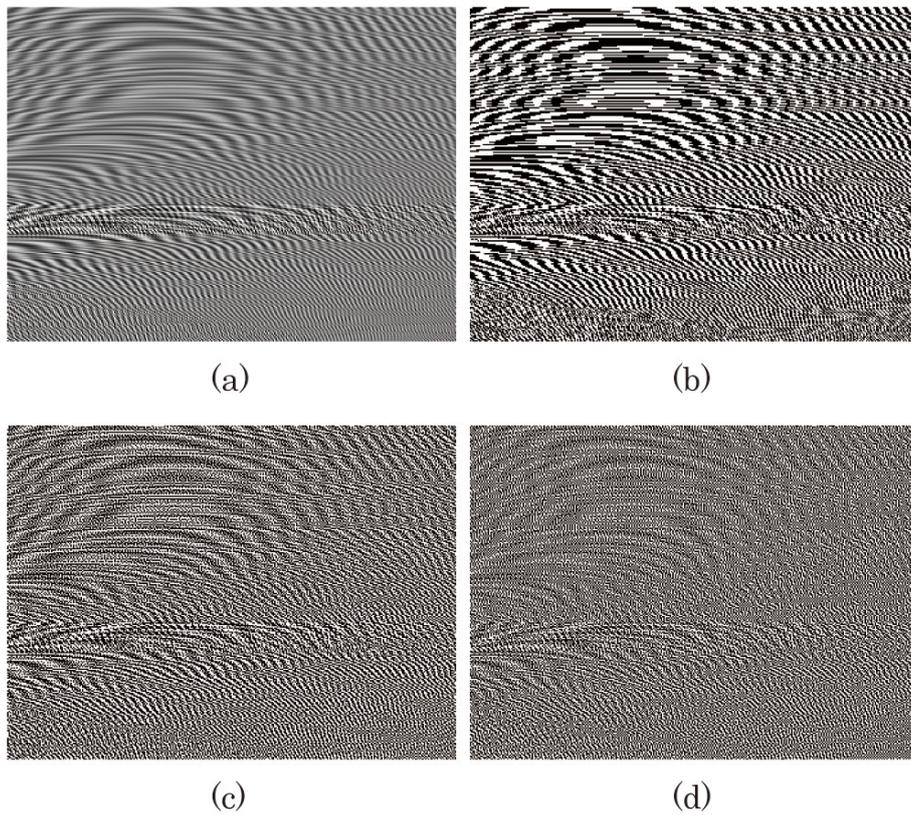


図 4-7 要素ホログラム: (a) 連続階調, (b) 単純 2 値化, (c) Floyd-Steinberg アルゴリズム, (d) 補正テーブルを用いた誤差拡散法

図 4-8 に再生像を示す。冷却 CCD を用いて再生像を撮影した。図 4-8(a), (b) にそれぞれ単純 2 値化を用いたテストパターン、誤差拡散法を用いたテストパ

ターンの表示結果を示す。正方形の平均光強度を測定した結果を、図 4-9 に示す。単純 2 値化では、再生像の階調表現性が低いことが分かる。誤差拡散法を用いると、再生像の階調表現性が向上することが分かる。しかし、テストパターンの階調値と再生像の光強度の関係が非線形になっている。

本研究では、補正テーブルを用いて再生像の階調表現の非線形性を補正することを試みた。補正テーブルは、図 4-9 の誤差拡散法による測定結果の逆数を用いて作成した。測定した 9 点以外の補正テーブルの値は、線形補間により求めた。要素ホログラムを計算する前に、補正テーブルを用いて三次元形状データの階調値を補正する。補正テーブルを用いて 2 値化した要素ホログラムを図 4-7(d)に、テストパターンの再生像を図 4-8(c)に、再生像の平均光強度の測定結果を図 4-9 に示す。補正テーブルを用いることで、再生像の階調表現の線形性が向上していることがわかる。

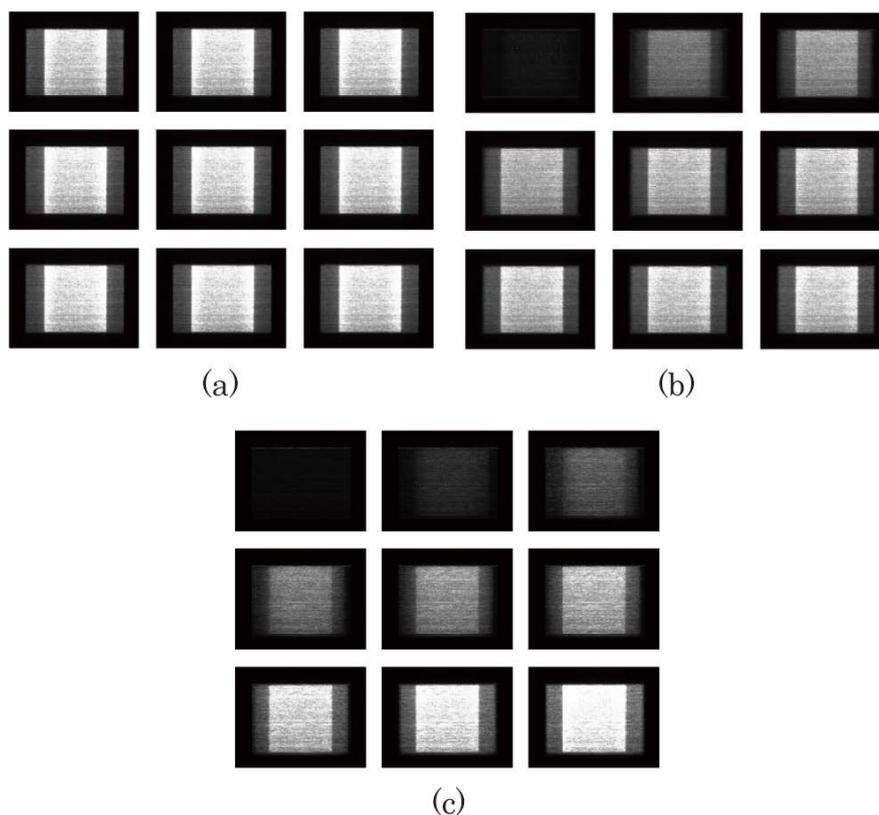


図 4-8 テストパターンの表示結果

2 値化方法: (a) 単純 2 値化, (b) 誤差拡散法,

(c) 補正テーブルを用いた誤差拡散法

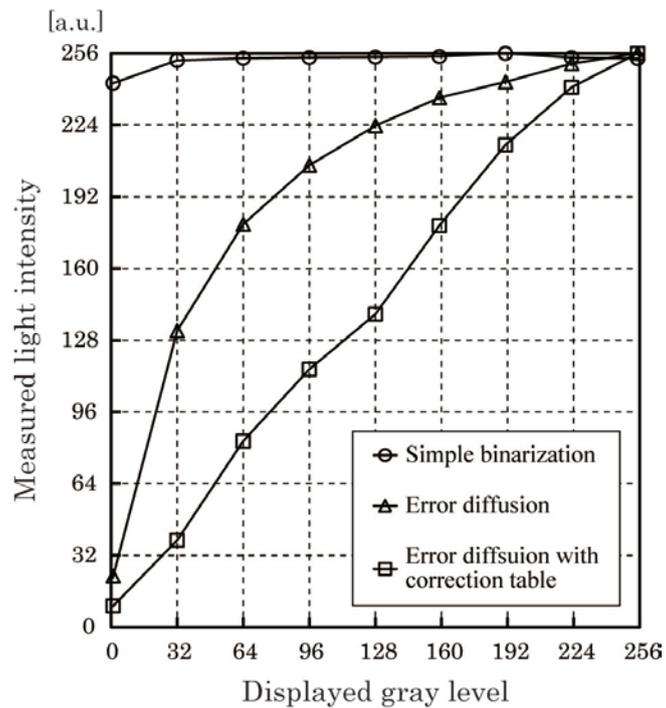


図 4-9 再生像の光強度の測定結果

提案法を用いていくつか立体像を表示した。図 4-10(a), (b)は三次元形状データのテクスチャ画像とデプス画像を示す。図 4-10(c), (d), (e)は、それぞれ、要素ホログラムを単純 2 値化した場合の再生像、Floyd-Steinberg アルゴリズムにより 2 値化した場合の再生像、補正テーブルを用いた誤差拡散法により 2 値化した場合の再生像を示す。補正テーブルを用いた誤差拡散法による再生像が、三次元形状データのテクスチャ画像に最も近いことが分かる。

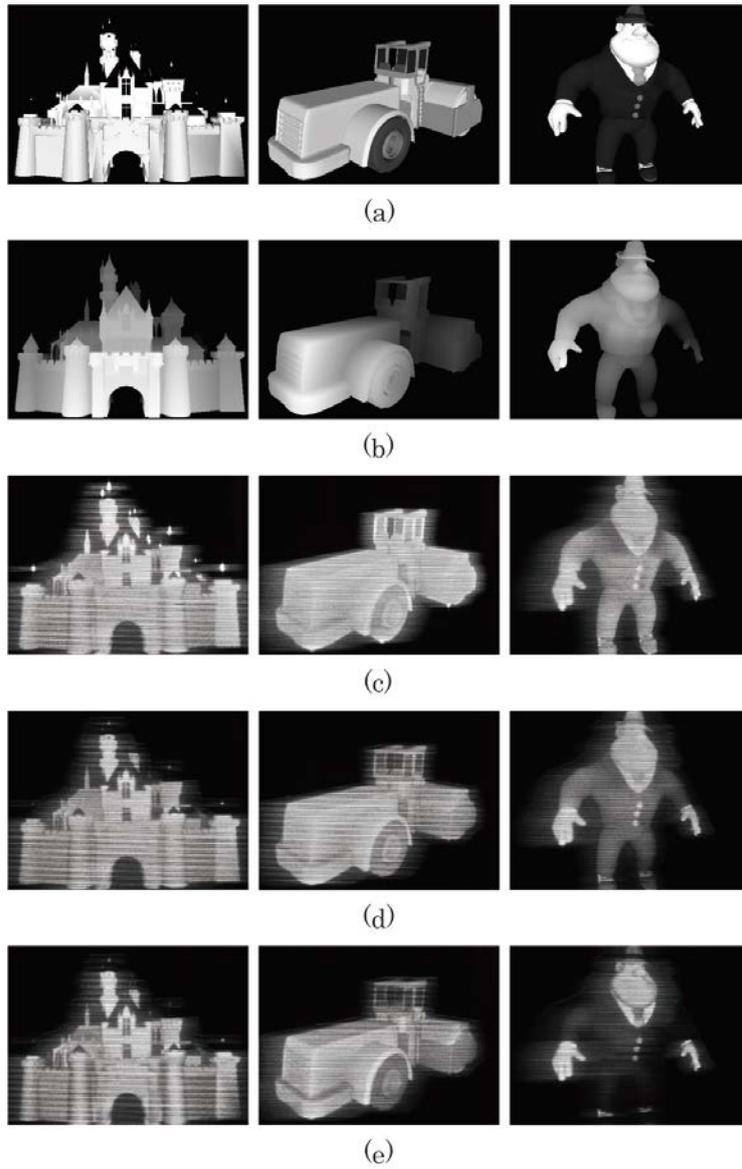


図 4-10 三次元の再生像:

- (a) テクスチャ画像, (b) デプス画像;
 2 値化方法: (c) 単純 2 値化, (d) 誤差拡散法,
 (e) 補正テーブルを用いた誤差拡散法

4.6 考察

過去に提案されたスクリーン走査型システムにおける階調表現性の向上方法 [6]では、レーザー光源を強度変調して、時分割で重ね合わせることで階調表現性を向上させた。そのため、光強度の時間平均値は低下する。これに対して、本研究で提案した誤差拡散法と補正テーブルを組み合わせた方法では、より明るい再生像が得られた。

本研究で提案した方法では、スクリーン走査型システムにおいて、誤差拡散法が再生像の階調表現性の向上に有効であることを示した。しかし、本研究でホログラムの2値化に用いた Floyd-Steinberg アルゴリズムは、もともと二次元画像の2値化のために開発されたものである。図 4-11 に示すように、要素ホログラムは、水平方向には高い空間周波数を有し、誤差拡散法を用いたときに高い空間周波数成分を保存する必要がある。そのため、スクリーン走査型システムに適した誤差拡散法を開発することで、さらなる階調表現性の向上が期待できる。これについては、第 5 章のカラー化において改良した誤差拡散法を用いているので、第 5 章で詳しく述べる。

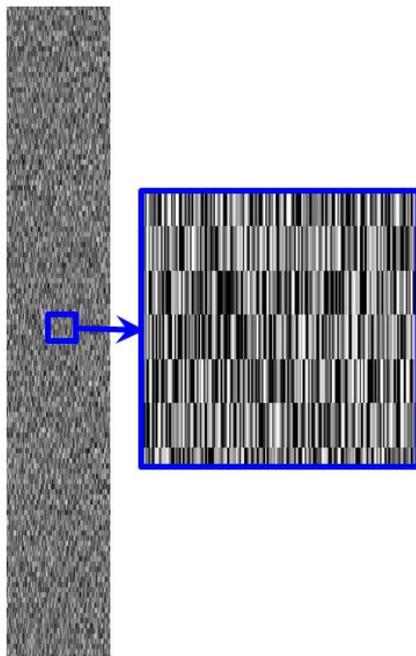


図 4-11 要素ホログラム

4.7 本章のまとめ

本研究では、スクリーン走査型システムにおいて、要素ホログラムの 2 値化処理法として誤差拡散法を適用した。誤差拡散法と補正テーブルを組み合わせることで、再生像の階調表現性のさらなる向上を実現した。

第5章 スクリーン走査型システムのカラー化

5.1 研究目的

電子的なホログラム表示のカラー化に関しては、過去に多くの研究が行われている[8-25]。複数の SLM を用いた方法[12-19]や時分割表示[19,25]を用いる方法が代表的な方法としてあげられる。

従来の水平走査型ホログラフィーは単色表示が実現されていた。そこで、本研究では、水平走査型ホログラフィーのカラー化に取り組む。また、第4章で述べた誤差拡散法を、水平走査型ホログラフィーに適した誤差拡散法に改良する。

5.2 水平走査型ホログラフィーでのホログラムの計算方法

水平走査型ホログラフィーのホログラムの計算方法について説明する。水平走査型ホログラフィーでは、図 5-1 に示すように、立体像を点光源の集合として物体光 o の計算を行う。従って、物体光 o は各物体光から発せられる球面波の足し合わせで計算できる。水平走査型ホログラフィーは HPO 型ホログラムのため、下式のように、一次元の球面波の足し合わせでホログラム計算を行う。

$$o(x, y) = \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{r_n} e^{-ikr_n} \quad (5.1)$$
$$r_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + z_n^2}$$

ただし、 N 個の物体点で構成される再生像の n 番目の物体点の表示位置を (x_n, y_n, z_n) 、振幅を A_n 、波数を k とした。

計算した複素振幅分布 o を振幅変調型 SLM に表示するために実振幅分布 S に変換する必要がある。実振幅分布 S は SSB 法[26, 27]をもとに求めることができる。SSB 法では、フーリエ面において、物体光 o と共役光 o^* を原点対象な位置に配置することで実振幅分布 S を得る。実振幅分布 S を下式に示す。

$$\begin{aligned}
S(x, y) &= F[O(v_x, v_y) + O^*(-v_x, -v_y)] \\
&= \iint_{-\infty}^{\infty} \{O(v_x, v_y) + O^*(-v_x, -v_y)\} e^{-iv_x x} dv_x e^{-iv_y y} dv_y \quad (5.2)
\end{aligned}$$

S が実振幅分布であることを確認する。 S の共役複素数 S^* は、

$$\begin{aligned}
S^*(x, y) &= \iint_{-\infty}^{\infty} \{O^*(v_x, v_y) + O(-v_x, -v_y)\} e^{+iv_x x} dv_x e^{+iv_y y} dv_y \\
&= \iint_{\infty}^{-\infty} \{O^*(-v_x, -v_y) + O(v_x, v_y)\} e^{-iv_x x} (-dv_x) e^{-iv_y y} (-dv_y) \quad (5.3) \\
&= \iint_{-\infty}^{\infty} \{O(v_x, v_y) + O^*(-v_x, -v_y)\} e^{-iv_x x} dv_x e^{-iv_y y} dv_y
\end{aligned}$$

$$S^*(x, y) = S(x, y)$$

と計算できる。このように、 S が実振幅分布であることが分かる。

以上により、共役光 o^* はフーリエ面において物体光 o と空間的に分離できる。そのため、フーリエ面の共役光 o^* が生じる場所に **SSB** フィルターを配置することで、共役光 o^* を除去できる。ゼロ次光は原点位置に生じるため、**SSB** フィルターを原点と重なるように配置することで除去できる。水平走査型ホログラフイーでは、フーリエ面に **SSB** フィルターを配置することで共役光とゼロ次光を除去する。

フーリエ面で **SSB** フィルターを配置した方向に解像度が低下する。水平走査型ホログラフイーは **HPO** 型ホログラムであるから、共役光 o^* を垂直方向に配置する。そのため、要素ホログラムは、水平方向のホログラム分布は再生像を再現する役割があり、垂直方向のホログラム分布は共役光とゼロ次光を除去する役割がある。

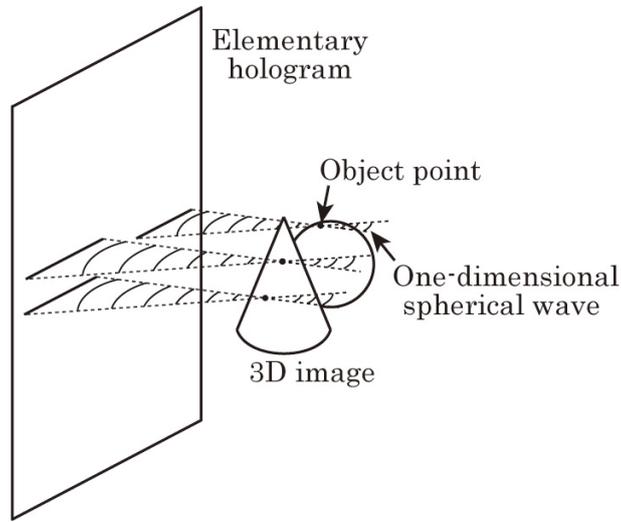


図 5-1 要素ホログラムの計算

5.3 時分割表示によるカラー化

スクリーン走査型システムでは、要素ホログラムの重なりを利用して、時分割表示によりカラー化を実現する。図 5-2 に示すように、要素ホログラムの表示ピッチを要素ホログラム幅の 1/3 倍以下にすることで、要素ホログラム群を 3 個以上生成できる。要素ホログラム群ごとに、RGB レーザー光を時分割で切り替えて照明することで、再生像のカラー化を実現する。

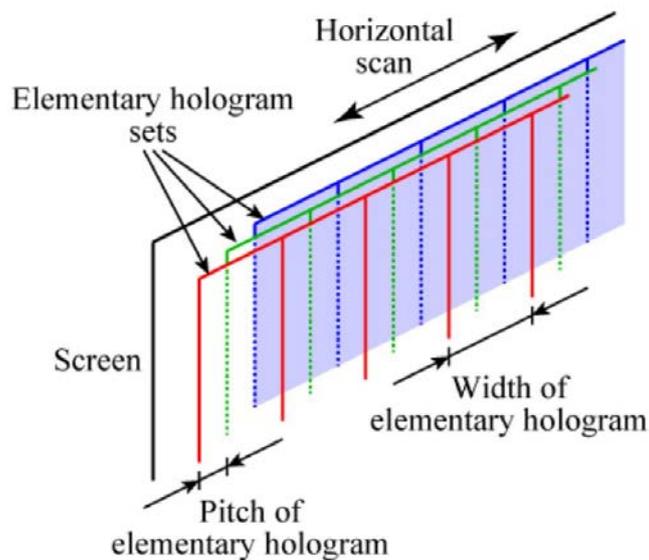


図 5-2 時分割表示による要素ホログラム群の生成

5.4 RGB 合波法

従来のスクリーン走査型システムでは、垂直方向拡大用のシリンダリカルレンズによるフーリエ面に SSB フィルターを配置していた。そのため、垂直方向にしかフーリエ変換が行えていなかった。そこで、二次元的なフーリエ面で不要光を除去するために、1枚の球面波をアナモルフィック光学系に導入した。図 5-3 に示すように、球面レンズが作るフーリエ面に SSB フィルターを配置する。

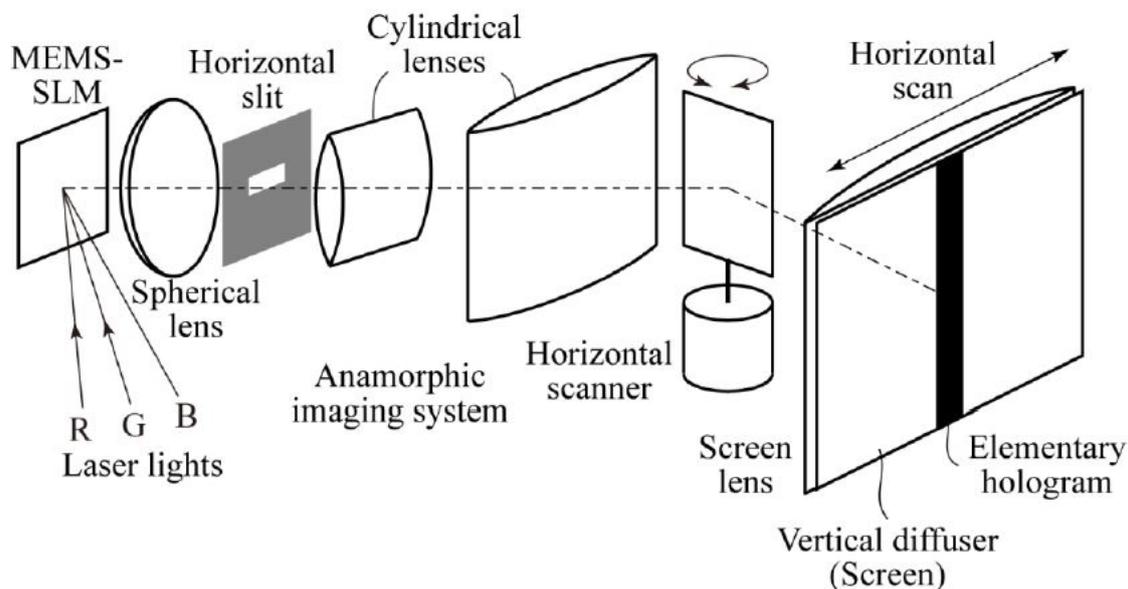


図 5-3 カラー化を実現するスクリーン走査型システム

水平走査型ホログラフィーで MEMS SLM として用いる DMD は、表示面がマイクロミラーで構成されており、マイクロミラーの傾きを変化させることでピクセルのオン・オフを切り替える。そのため、図 5-4 に示すように、DMD の変調面は反射型 Blazed 回折格子の構造を有する。

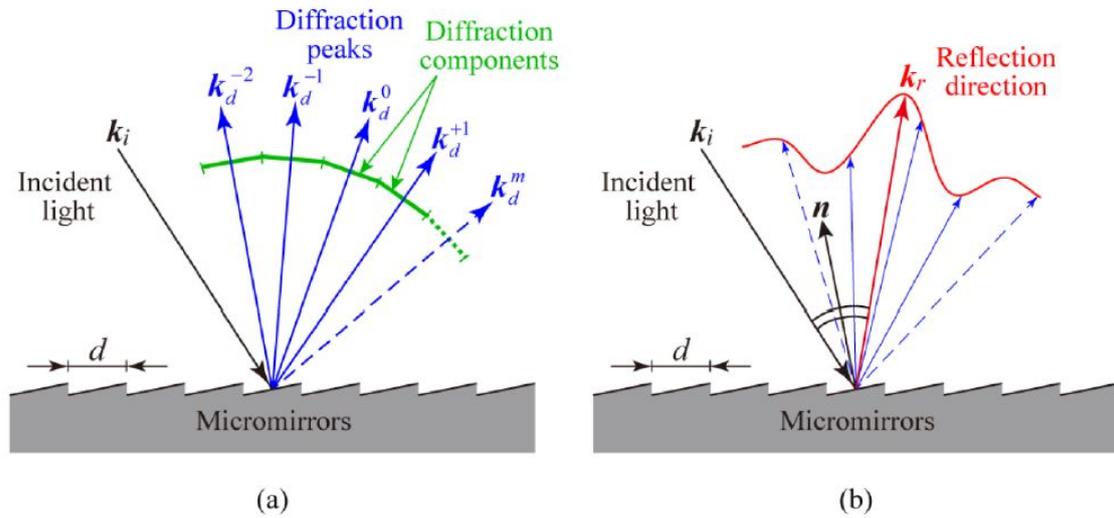


図 5-4 DMD の表示面: (a)回折ピークの方法、(b)正反射の方法

高次回折光の回折ピークの様子を図 5-4(a)に示す。フーリエ面において、回折ピークはゼロ次光になり、回折ピークの周辺に再生光と共役光が現れる。図 5-4(b)に示すように、マイクロミラーの正反射の方法で最大光強度が得られる。そのため、RGB の正反射の方法を一致させなければ再生像に色ムラが生じる。RGB で正反射の方法を一致させると、回折ピークの方法は一致できないが、SSB フィルターのエッジに回折ピークが現れるように設計することでゼロ次光を除去する。そのような回折ピークと正反射の方法を満たすように、入射光の入射方法を計算で求める。

回折ピークの方法は下式で表せる。

$$\mathbf{k}_i + \mathbf{k}_d^{m_x, m_y} = i m_x (2\pi / d) + j m_y (2\pi / d), \quad (5.4)$$

ただし、入射光と回折光の波数ベクトルをそれぞれ \mathbf{k}_i 、 $\mathbf{k}_d^{m_x, m_y}$ 、マイクロミラーのピッチを d 、 x 方向と y 方向の単位ベクトルをそれぞれ \mathbf{i} 、 \mathbf{j} とした。

入射光の正反射の方法は下式で表せる。

$$\mathbf{k}_r = \mathbf{k}_i - 2(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}, \quad (5.5)$$

ただし、反射光の波数ベクトルを \mathbf{k}_r 、マイクロミラーの法線ベクトルを \mathbf{n} とした。図 5-5(a)のように、本研究では、回折ピークを SSB フィルターの上下のエッジのどちらかに配置する。そこで、回折ピークの状態は下式のように表せる。

$$(\lambda/2\pi)k_d^y f_s = 0 \quad \text{or} \quad h, \quad (5.6)$$

ただし、アナモルフィック光学系の球面レンズの焦点距離を f_x 、SSB フィルターの高さを h 、回折ピークの波数ベクトルの y 成分を k_d^y とした。

水平走査型ホログラフィーは HPO 型ホログラムであるから、図 5-5(b)に示すように、RGB の最大光強度は水平方向に一致させれば、色ムラが生じないカラー表示が実現できる。そこで、正反射の状態は下式のように表せる。

$$k_r^x = 0, \quad (5.7)$$

ただし、反射光の波数ベクトルの x 成分を k_r^x とした。

入射光の方向、回折ピークの方向、正反射の方向を表す 6 個のパラメーター $(k_i^x, k_i^y), (k_d^x, k_d^y), (k_r^x, k_r^y)$ を求める方法を説明する。最初に、式(5.6), (5.7)を用いて k_r^x, k_d^y を求める。次に、式(5.4), (5.5)の次数 m_x, m_y を決定することで $k_i^x, k_i^y, k_d^x, k_r^y$ を求める。これらのパラメーターをもとに、ファイバーアレイを設計する。

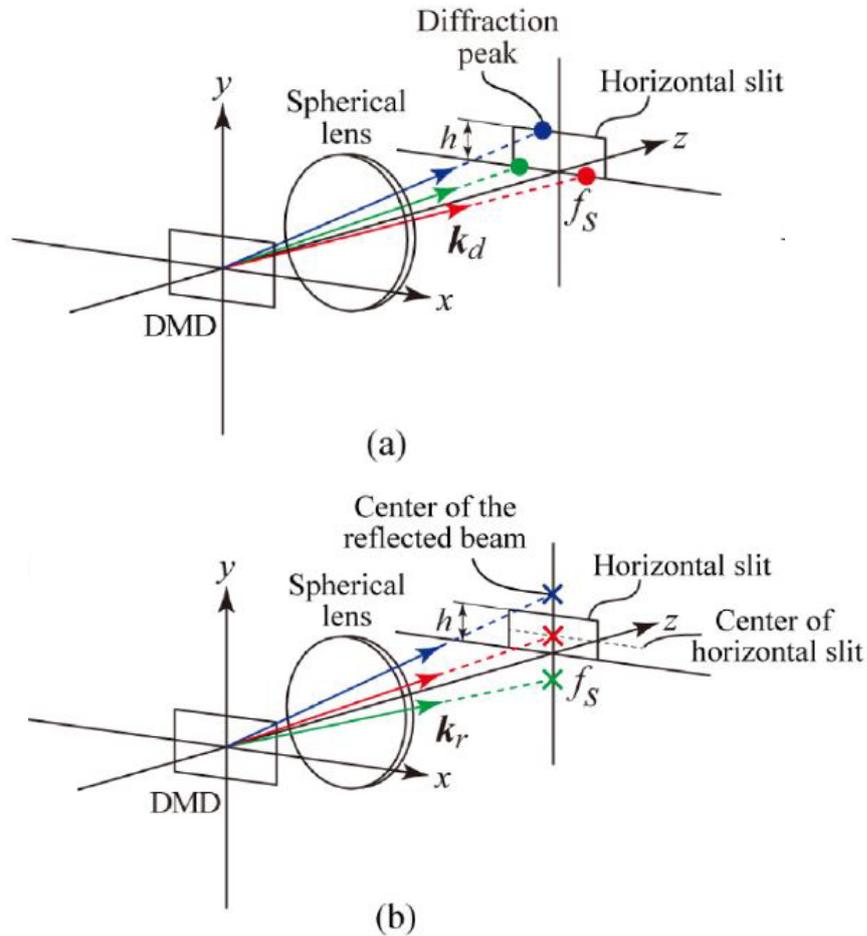


図 5-5 カラーのホログラム表示に要求される条件: (a)回折光、(b)反射光

5.5 誤差拡散法の改良

第 4 章で説明した誤差拡散法による階調表現性の向上方法では、二次元画像の分野で広く用いられている Floyd-Steinberg アルゴリズムを用いた。本研究では、Hauck らがホログラムの 2 値化のために提案した誤差の拡散方法[38]を、RGB のホログラムパターンの 2 値化に適用する。Hauck の方法では、ホログラムパターンのキャリア方向と直交する方向に誤差を拡散する。

フーリエ面での回折ピークと回折光の分布の様子を図 5-6(a)に示す。回折光の分布は再生光と共役光で構成されている。本研究では、再生光と共役光を、回折ピークを原点として原点对称な位置に生じさせ、垂直方向に分離するようホログラム計算を行う。回折ピークは、SSB フィルターの上下のエッジに配置して

おり、回折光の分布は水平方向には一致しない。そのため、RGBの再生光がフーリエ面の開口部分で一致するように、参照波を加えてホログラムパターンを計算する。ホログラム計算で用いる参照波の方向を図5-6(b)に示す。この参照波の方向がホログラムパターンのキャリア方向である。本研究ではHauckの方法を用いるため、図5-6(c)に示すように、誤差拡散の方向はキャリア方向と直交する方向となる。そのため、誤差拡散の方向は、RGBによって異なる。

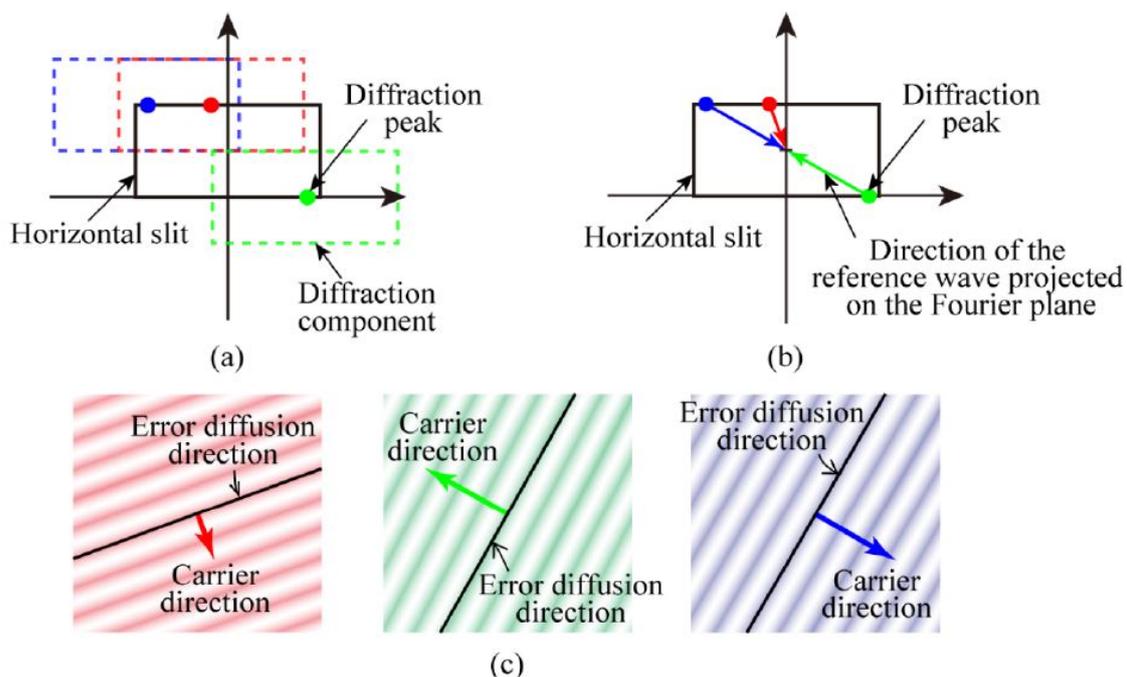


図 5-6 提案法での誤差拡散の原理: (a)回折ピークと回折光の分布、
(b)参照波の方向、(c)誤差の拡散方向

5.6 実験装置

本研究では、DMDとしてTexas Instruments社製のDiscoveryTM 4100を用いた。解像度は $1,024 \times 768$ で、ピクセルピッチは $13.68 \mu\text{m}$ である。フレームレートは 22.727 kHz である。アナモルフィック光学系の水平倍率は0.183倍で、垂直倍率は4.74倍である。要素ホログラムのサイズは $2.56 \text{ mm} \times 49.8 \text{ mm}$ となり、水平方向のピクセルピッチは $2.50 \mu\text{m}$ となる。水平スキャナにはガルバノミラーを用いた。ガルバノミラーの走査角は $\pm 13.6^\circ$ で、走査周波数は 30 Hz である。画面サイ

ズは 150 mm × 49.8 mm (6.2 inch) である。一回の走査で DMD が表示する画像は 757 で、ガルバノミラーの非線形な走査部分を除去するために、696 個の要素ホログラムを表示している。RGB ごとの要素ホログラム数は 232 個である。要素ホログラムの表示ピッチは 0.284 mm であり、要素ホログラムの幅 2.56 mm の 1/3 倍 (0.853 mm) よりも小さいため、隙間のないホログラムを表示できる。

光源には波長 640 nm, 515 nm, 445 nm の半導体レーザーを用いた。SSB フィルターの開口のサイズは、幅と高さが $(\lambda f_s/d)$ と $(\lambda f_s/2d)$ である。そのため、開口のサイズは最も波長の短い B によって決定し、13.0 mm × 6.51 mm ($h = 6.51$ mm) とした。水平視域角は RGB でそれぞれ 14.7°, 11.8°, 10.2° である。水平方向の開口のサイズにより、ディスプレイの視域角は 10.2° となる。

スクリーンレンズには焦点距離 200 mm のフレネルレンズを用いた。垂直方向拡散板にはレンチキュラーレンズを用いた。スクリーン走査型システムの実験装置の外観を図 5-7 に示す。

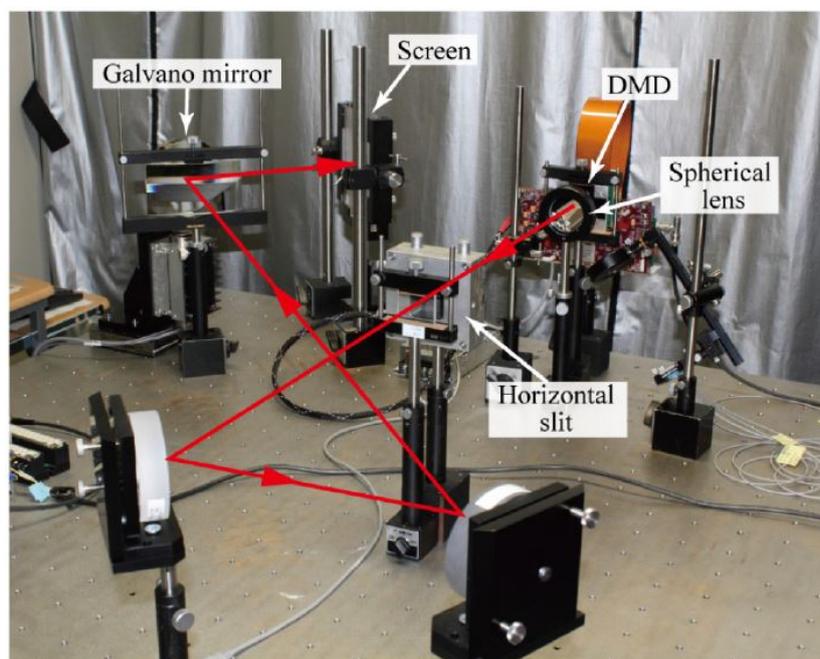


図 5-7 カラー化を実現するスクリーン走査型システムの外観

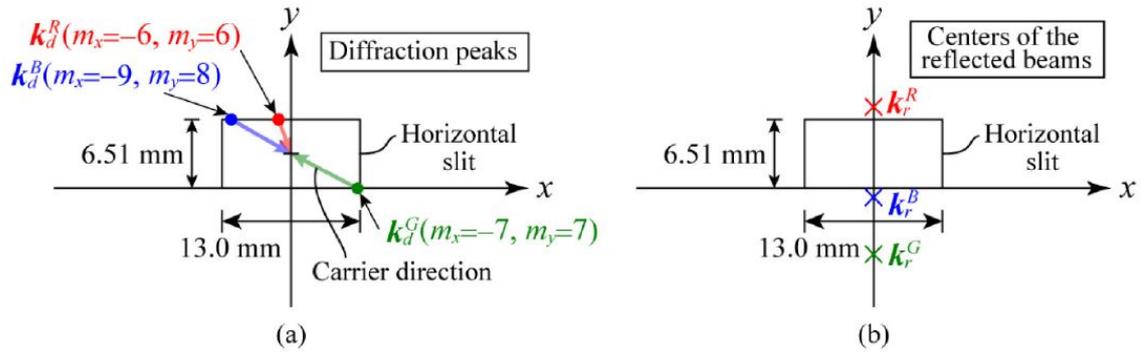


図 5-8 フーリエ面の設計: (a)回折ピーク的位置、(b)反射光の中心位置

DMD への照明光の波数ベクトル \mathbf{k}_i を求める。DMD のマイクロミラーは対角線方向に傾くため、マイクロミラーの法線ベクトルは $\mathbf{n} = (\sin \alpha/\sqrt{2}, -\sin \alpha/\sqrt{2}, \cos \alpha)$ である。 α はマイクロミラーの傾き角である。 α を測定した結果、 $\alpha = 11.6^\circ$ であり、 $\mathbf{n} = (0.142, -0.142, 0.980)$ となる。照明方向は $(\lambda/2\pi) \mathbf{k}_i$ で与えられるため、照明光の単位波数ベクトルは、RGB でそれぞれ $(-0.278, 0.297, -0.914)$, $(-0.279, 0.264, -0.923)$, $(-0.278, 0.276, -0.920)$ と求まる。このとき、回折次数 (m_x, m_y) は $(-6, 6)$, $(-7, 7)$, $(-9, 8)$ となる。図 5-8(a) にフーリエ面での回折ピークを示す。水平方向のピーク位置は $(\lambda/2\pi) k_{d_s}^x$ で与えられる。図 5-8(b) には、フーリエ面での反射光の中心位置を示す。

光源として、ファイバー出力の半導体レーザーを用いた。ファイバーから出射した光はコンデンサレンズを用いてコリメートし、RGB ごとに異なる方向から DMD を照明する。ファイバーの位置は、先ほど求めた照明光の波数ベクトルをもとに決定した。ファイバーアレイと照明光学系の外観を図 5-9 に示す。実験によって得られたフーリエ面の様子を図 5-10 に示す。回折ピークはスリットの上下のエッジに位置し、垂直方向に RGB が変化していることがわかる。

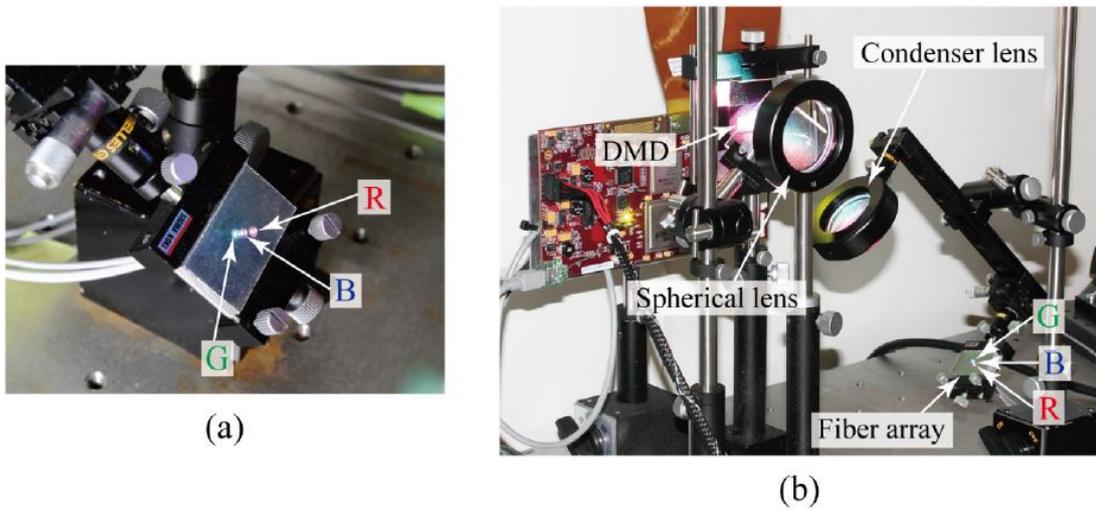


図 5-9 照明システム: (a)ファイバーアレイ、(b)照明光学系

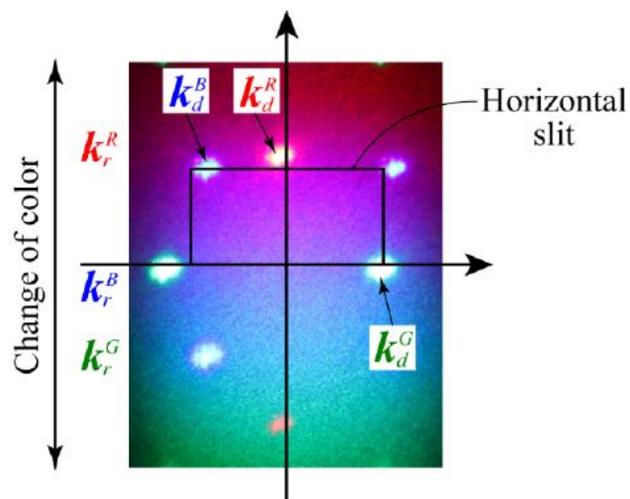


図 5-10 フーリエ面の撮影像

つぎに、拡散係数を求める。図 5-11(a)に示すキャリア方向は、図 5-8(a)に示す回折ピークの位置から求められる。図 5-11(b)に示す誤差の拡散方向は、キャリア方向と直交する方向とする。閾値処理による誤差は、拡散方向の隣接する 2 つのピクセルに拡散する。図 5-11(c)に示すように、拡散係数を求める。

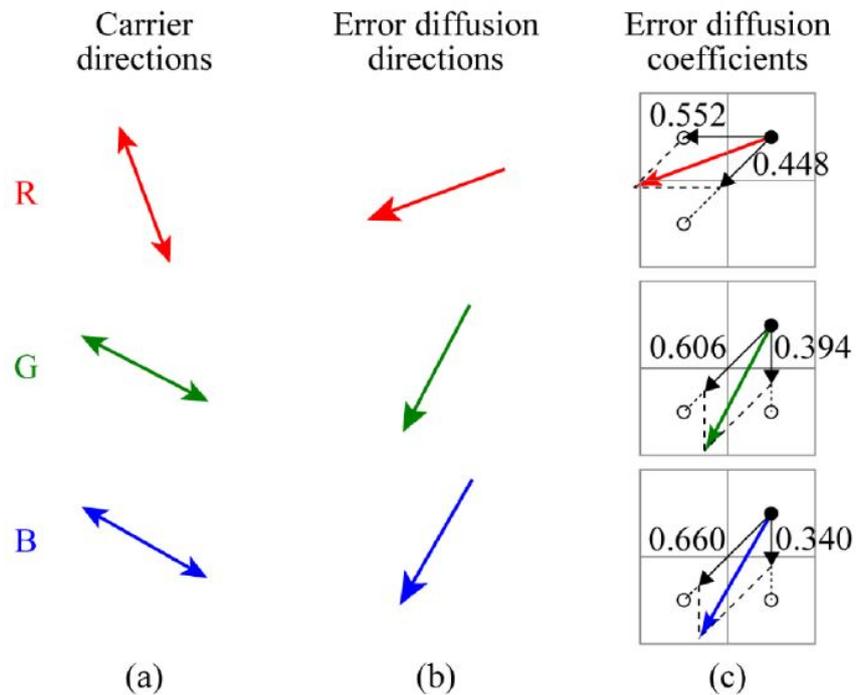


図 5-11 RGB の誤差拡散: (a)キャリア方向、(b)誤差の拡散方向、(c)拡散係数

5.7 実験結果

第 4 章で述べた誤差拡散法を適用したときに生じる非線形性の修正方法を、本研究でも適用した。図 5-11 に RGB ごとの再生像とカラー再生像を示す。単色の再生像を図 5-11 の上 3 列に示す。2 値化処理には、単純 2 値化、Floyd-Steinberg アルゴリズム、波長により拡散係数を決める方法を用いた。単純 2 値化の場合、再生像のエッジ部分が強調されるため、階調表現性が低下する。従来の誤差拡散法の場合、単純 2 値化と比較して、階調表現性が向上する。しかし、再生像の周辺にノイズが生じている。波長により拡散係数を決める方法の場合、再生像の周辺のノイズが低減され、コントラストが向上した。図 5-11 の最下列にカラー再生像を示す。

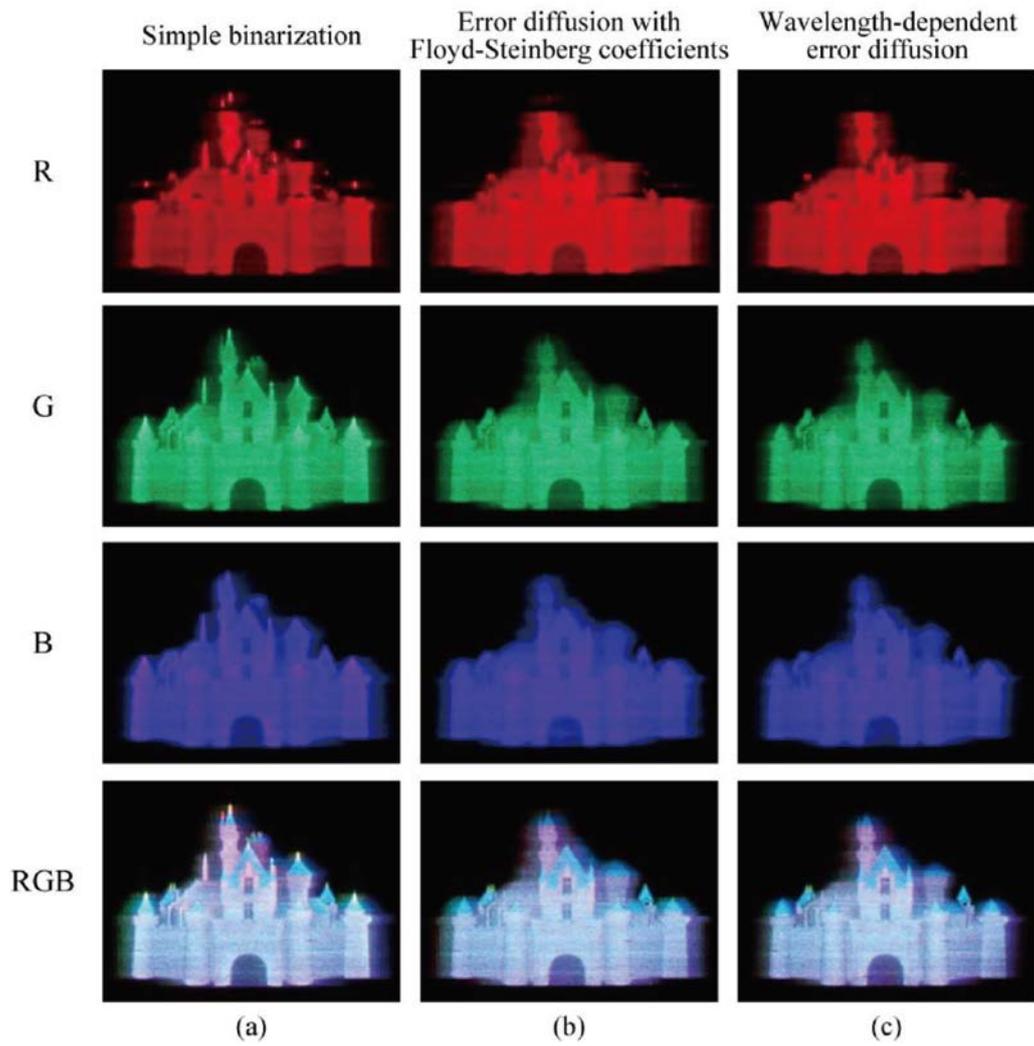


図 5-12 RGB ごとの再生像とカラー再生像: (a)単純 2 値化、(b)Floyd-Steinberg アルゴリズム、(c)提案法

他のカラー再生像を図 5-13 に示す。単純 2 値化の場合、緑色や橙色など、三次元形状データであるテクスチャ画像と異なる色で表示されており、色再現性が低い。Floyd-Steinberg アルゴリズムを用いた場合、単純 2 値化と比較して、色再現性が向上している。波長により拡散係数を決める方法の場合、色再現性が最も優れおり、コントラストも向上していることがわかる。

図 5-14 は、提案法によるカラー再生像を異なる 3 か所の水平位置から撮影した結果である。カラー再生像は滑らかな運動視差を有し、視域が拡大しているため広い範囲で再生像を観察することができる。さらに、観察位置によらず、色再現性が高い再生像が表示できていることが確認できる。

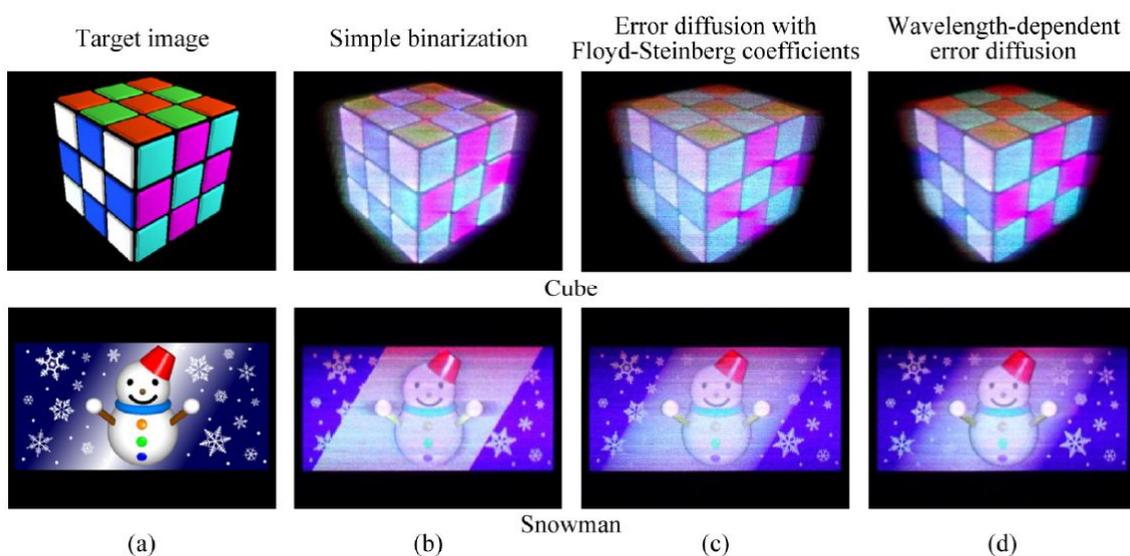


図 5-13 実験結果: (a)目標の画像、2 値化方法: (b)単純 2 値化、(c)Floyd-Steinberg アルゴリズム、(d)提案法

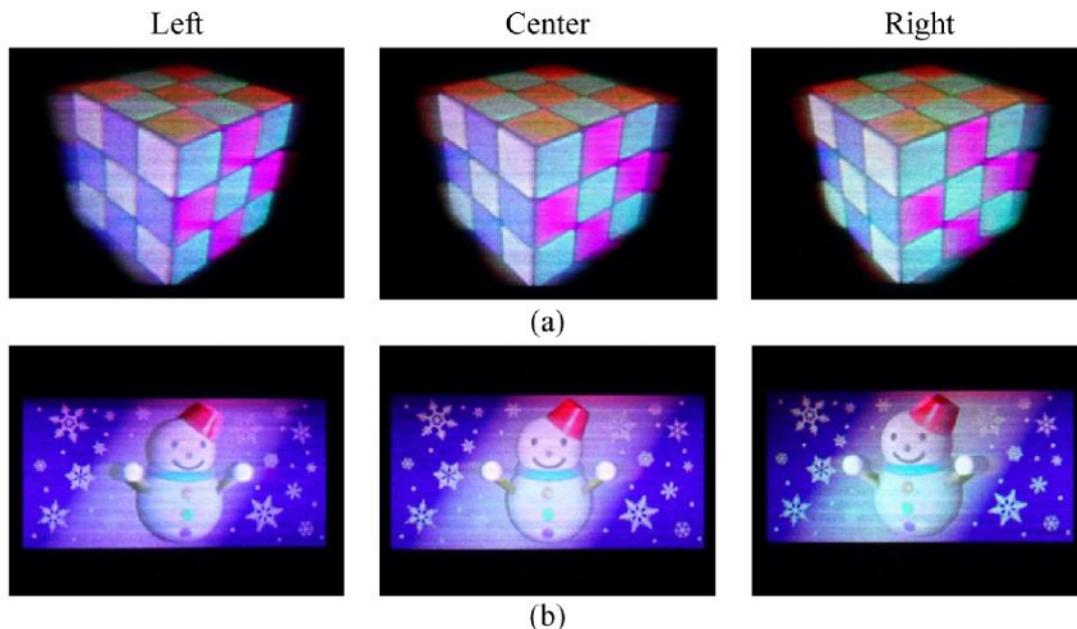


図 5-14 提案法による再生像: (a)Cube、(b)Snowman

5.8 考察

提案する RGB 合波法は、DMD 表示面の反射型 Blazed 回折格子の構造を利用することで RGB レーザー光を合波するため、マイクロミラーの傾き角が非常に重要である。DMD の仕様書には傾き角が 12° と記載されているため、最初はこの値を用いてファイバーアレイを作製した。しかし、実験したところ、フーリエ面での回折ピークと反射光の状態は設計と異なる結果となった。そこで、マイクロミラーの傾き角を実測したところ、傾き角は 11.6° であり、この値により設計通りの分布が得られた。

テクスチャ画像の色を正確に再現するには、G は 530 nm で、B は 430 nm に近い波長の光源が求められる。しかし、本研究では、G は 515 nm で、B は 445 nm の半導体レーザーを光源として用いたため、テクスチャ画像の色を正確に再現できなかった。本研究では、G の光源にはデジタル変調が可能な半導体レーザーを優先したため、波長 515 nm の半導体レーザーを用いた。スクリーン走査型システムは、アナモルフィック光学系に BK7 のレンズを用いているため、B の

色収差が大きくなった。以前の研究では色収差を抑えるために 488 nm の半導体レーザーを用いていたが、本研究では色域を拡大するために 445 nm の半導体レーザーを用いた。

以前のスクリーン走査型システムでは、小型のガルバノミラーを用いていたため、フレームレートが 60 Hz でフリッカーは生じなかった。本研究では、光学系の変更に伴い、小型のガルバノミラーではケラレが生じたため、以前より 170 mm 大きなミラーを用いた。その結果、フレームレートが 30 Hz となり、フリッカーが生じた。

実験結果から、本研究で提案する波長により誤差拡散係数を決める方法が、再生像の階調表現性の向上に有効であることを示した。要素ホログラム幅が 2.56 mm で表示ピッチが 0.284 mm のため、9 個の要素ホログラム群を表示できる。3 個の要素ホログラム群は RGB に利用し、残りの要素ホログラム群を異なる光強度で照明することで、さらなる階調表現性の向上が期待できる。

5.9 本章のまとめ

本研究では、スクリーン走査型システムにおけるカラー化法を提案した。ファイバーアレイを用いた RGB レーザー光の照明光学系と 1 台の DMD を用いて、時分割法により、カラー化を実現した。DMD による回折光は、高次の回折光を利用してカラー化を実現した。誤差拡散法の改良として、RGB のホログラムパターンのキャリア方向に応じて、波長ごとに拡散係数に適切に設定することで、再生像の色再現性を向上した。実験により、視域角は 10.2°で、画面サイズは 6.2 inch のカラーのホログラム表示を実現した。フレームレートは 30 Hz である。

第 6 章 視域走査型システムのカラー化

6.1 研究目的

第 5 章で述べたように、スクリーン走査型システムでは、時分割表示と DMD 表示面の構造を利用してカラー化を実現している。本章では、視域走査型システムのカラー化について説明する。

6.2 時分割表示によるカラー化

カラー化を実現する視域走査型システムを図 6-1 に示す。カラー化を実現するために、MEMS SLM の照明光学系にファイバーアレイを用いたシステムへ変更する。ファイバーアレイは、第 5 章で説明した RGB 合波法を用いて設計する。視域と画面サイズの拡大方法は、単色表示の場合と同様である。

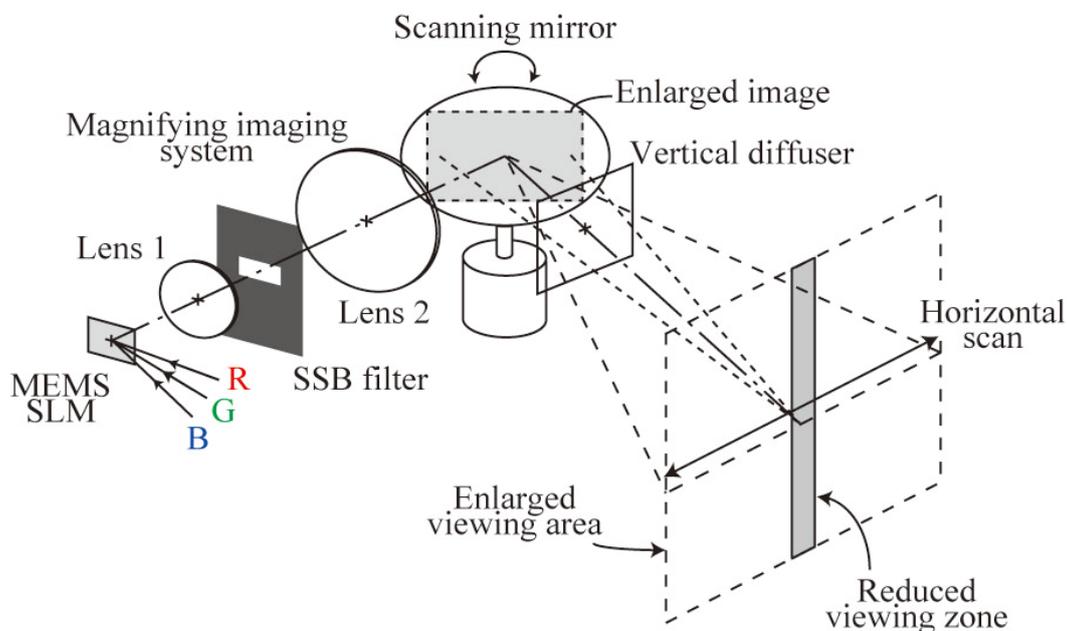


図 6-1 カラー化を実現する視域走査型システム

スクリーン走査型システムでは、要素ホログラムの重なりを利用して、時分割表示によりカラー化を実現する。視域走査型システムでは、縮小した視域の重なりを利用して、時分割表示によりカラー化を実現する。図 6-2 に示すように、縮小した視域の表示ピッチを視域幅の 1/3 倍以下にすることで、視域群を 3 個以上生成できる。視域群ごとに、RGB レーザー光を時分割で照明することで、視域走査型システムのカラー化を実現する。

視域幅は RGB の波長によって決定し、波長が短くなるほど視域の幅は小さくなる。視域走査型システムをカラー化する場合、最も波長が短い B の視域に合わせるため、単色表示のときよりも視域は狭くなる。そこで、B の視域に合わせて水平スキャナの走査角や走査周波数を決定し、視域の表示ピッチが視域幅の 1/3 倍になるように設定する。

スクリーン走査型システムでは、最も波長が短い B によって視域角が決定するが、視域走査型システムでは水平スキャナの走査角によって視域角が決定する。そのため、高フレームレートな SLM を用いることで視域の表示ピッチを小さくでき、単色表示のときと同一の視域角でカラー表示を実現できる。

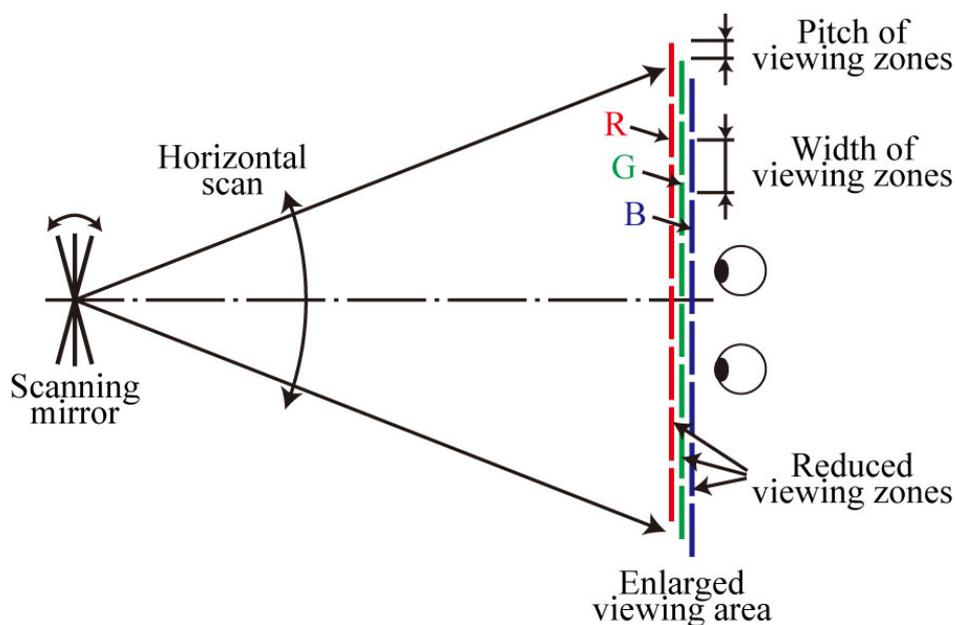


図 6-2 時分割表示による視域群の生成

6.3 実験装置

MEMS SLM としては、DMD を用いた。ただし、第 3 章で説明していた初期のシステムで使用していた Discovery™ 3000 に変えて、第 5 章のスクリーン走査型システムのカラー化でも使用した Discovery™ 4100 を用いた。解像度は $1,024 \times 768$ で、ピクセルピッチは $13.68 \mu\text{m}$ である。フレームレートは 22.727 kHz である。拡大結像系の倍率は 2.86 倍である。画面サイズは $40.0 \text{ mm} \times 30.0 \text{ mm}$ (2.0 inch) に拡大される。水平スキャナには、ガルバノミラーを用いた。走査角度は $\pm 20^\circ$ で、走査周波数は 60 Hz である。一回の走査で DMD が表示する画像は 378 で、ガルバノミラーの非線形な走査部分を除去するために、348 個のホログラムを表示している。RGB ごとのホログラム数は 116 個である。

光源には波長 635 nm , 515 nm , 488 nm の半導体レーザーを用いた。縮小した視域の大きさは、RGB でそれぞれ 9.74 mm , 7.90 mm , 7.48 mm である。本研究では、縮小した視域の大きさは、SSB フィルターの開口のサイズと同一にした。そのため、縮小した視域の大きさは RGB で同一であり、最も波長の短い B によって決定するため、縮小した視域の大きさは 7.48 mm になる。平均瞳孔径が 5 mm なのに対して、視域の方が大きいため、実質的な波面再生が実現できている。視域の表示ピッチは 1.16 mm であり、視域の大きさの $1/3$ 倍 (2.49 mm) よりも小さいため、連続した視域を表示できる。そのため、カラー表示を実現した場合の視域角は、水平スキャナの走査角度と同一の $\pm 20^\circ$ である。これは、単色表示の場合と同一の視域角である。

垂直方向拡散板にはレンチキュラーレンズを用いた。視域走査型システムの実験装置の外観を図 6-3 に示す。

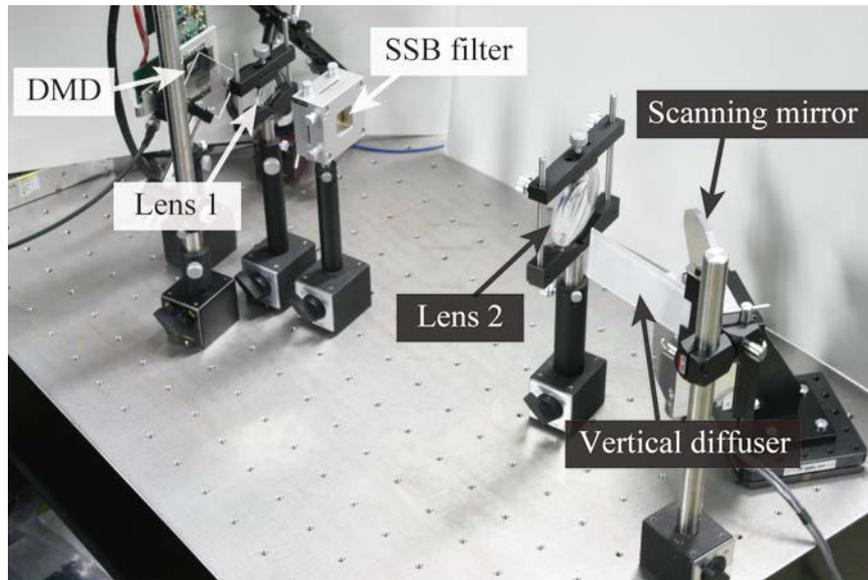


図 6-3 カラー化を実現した視域走査型システムの外観

本研究では、ファイバー出力の半導体レーザーを用いた。ファイバーから出射した光はコンデンサレンズを用いてコリメートし、RGB光で異なる方向からDMDを照明する。ファイバーの位置は、スクリーン走査型システムと同様の方法で求めた照明光の波数ベクトルをもとに決定した。ファイバーアレイと照明光学系の外観を図6-4に示す。実験によって得られたフーリエ面の様子を図6-5に示す。回折ピークはスリットの上下のエッジに位置し、垂直方向にRGBが変化していることがわかる。

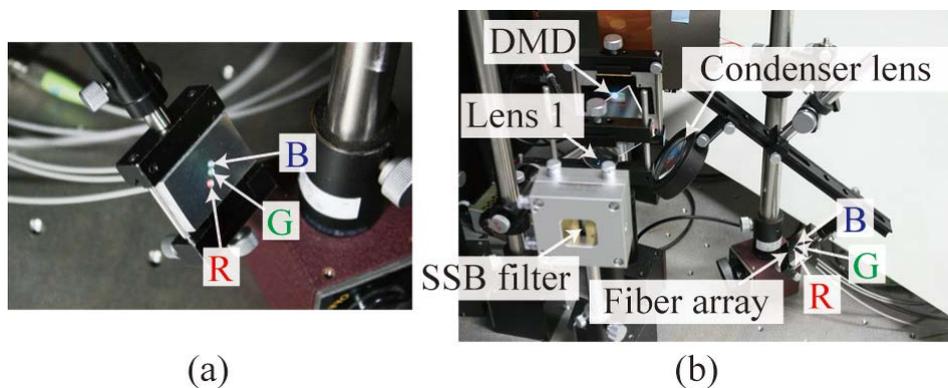


図 6-4 照明システム: (a)ファイバーアレイ、(b)照明光学系

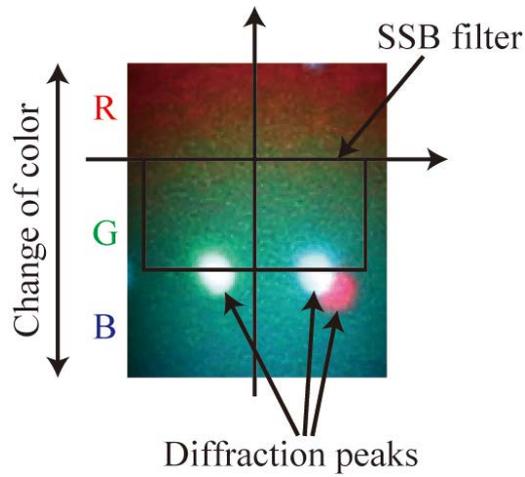


図 6-5 フーリエ面の様子

DMD のマイクロミラーの傾き角 α を測定した結果、 $\alpha = 12.3^\circ$ であり、マイクロミラーの法線ベクトルは $\mathbf{n} = (0.151, -0.151, 0.977)$ となる。図 6-6 にフーリエ面での回折ピークと反射光の中心位置を示す。回折ピーク的位置からキャリア方向を求め、拡散係数を求めたので図 6-7 に示す。

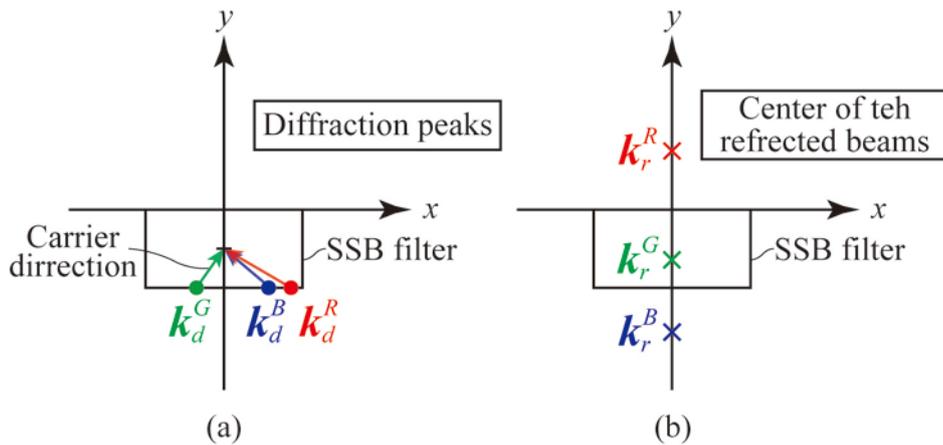


図 6-6 フーリエ面の分布: (a)回折ピーク的位置、(b)反射光の中心位置

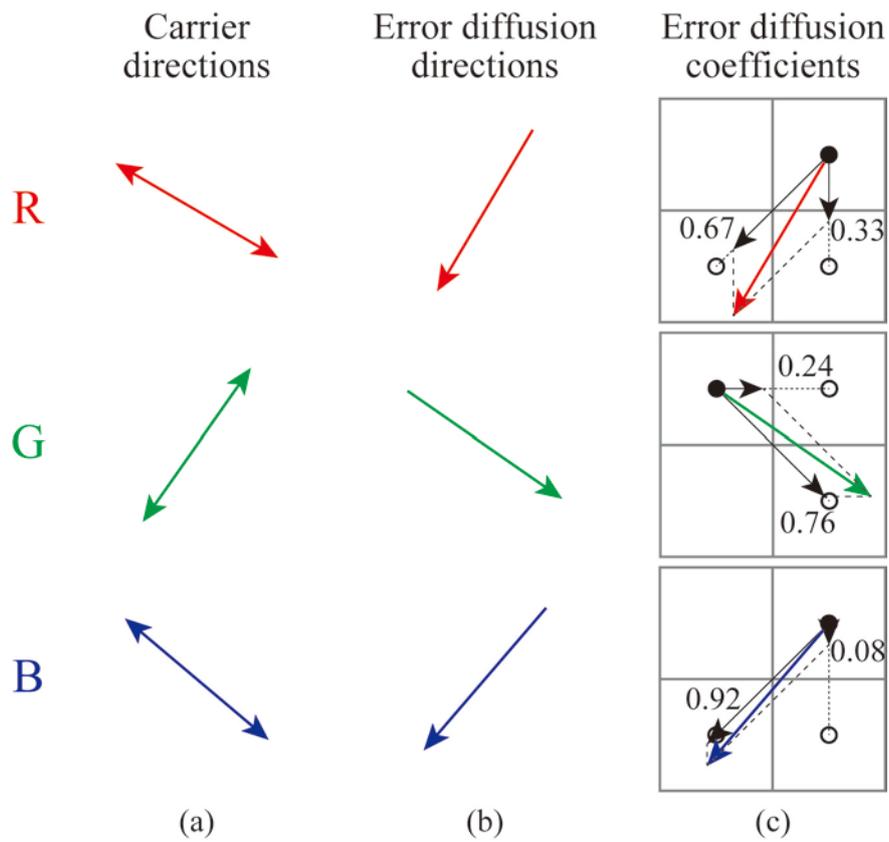


図 6-7 RGB の誤差拡散: (a)キャリアの方向、(b)誤差拡散の方向、(c)拡散係数

6.4 実験結果

異なる5か所の水平位置から撮影した再生像を図6-8に示す。図6-8より、カラー再生像は滑らかな運動視差を有し、視域を拡大しているため広い範囲でカラー再生像が観察できる。また、観察位置を変えてもカラー再生像を観察できていることが確認できる。

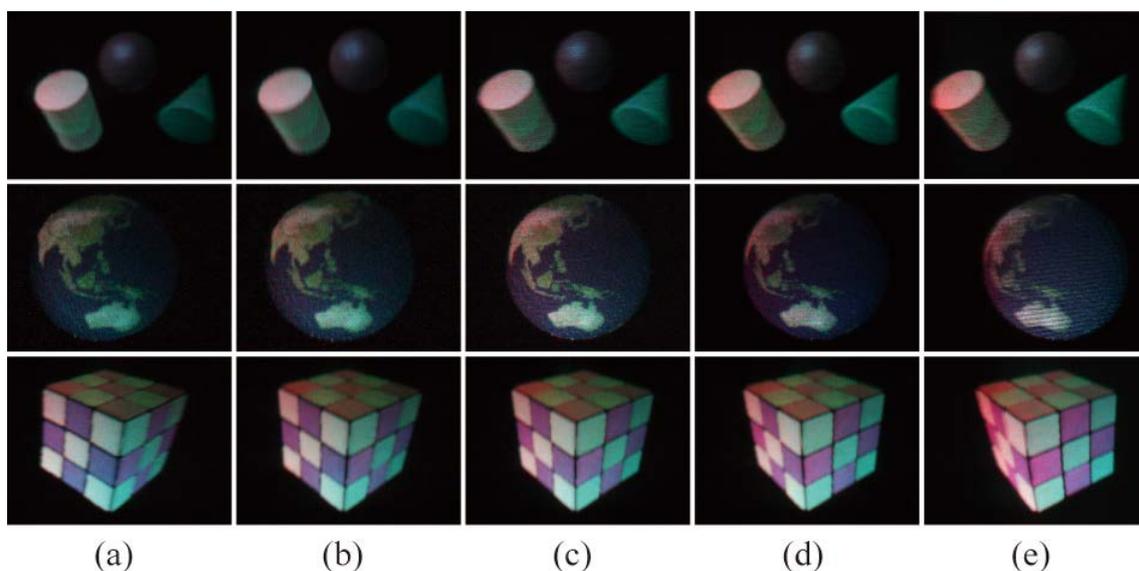


図6-8 視域走査型システムによるカラー再生像
撮影位置: (a)-20°, (b) -10°, (c) 0°, (d) +10°, (e) +20°

6.5 考察

スクリーン走査型システムでは、視域角は縮小したピクセルピッチと B の波長によって決まるため、単色表示のときよりもカラー表示の視域角が小さくなった。視域走査型システムでは、縮小した視域の幅が B の視域幅と同一になるため、単色表示のときよりもカラー表示の視域幅が小さくなる。しかし、本研究では、水平スキャナの走査速度に対して MEMS SLM の動作速度が十分高速であったため、単色表示のときと同一の視域角をカラー表示でも実現できた。画面サイズは、スクリーン走査型と視域走査型のどちらも単色表示のときと変

化がなかった。フレームレートは、スクリーン走査型と視域走査型の両方が時分割でカラー表示を実現しているため、高フレームレート SLM を用いることで単色表示と同一のフレームレートでカラー表示が可能である。

再生像の色再現性について考察する。三次元形状データであるテクスチャ画像と再生像の色を比較すると、色は正確に再現されていない。この原因は3つ考えられる。第一の原因は、本研究で用いたBの半導体レーザーの波長が488 nmと長いため、色域が狭いためである。図6.1.1 をみると、実験システムの光源波長で表現できる色の範囲は、三次元形状データに使われている色の範囲をカバーできず、色域外の色が再現できなかった。今後は、488 nm より短い波長の半導体レーザーを用いることで再生像の色再現性の向上が期待できる。第二の原因は、RGBの半導体レーザーのパワー調整が不十分であったことが考えられる。本研究では、RGBの半導体レーザーのパワー調整は、白色のテストパターンを再生像として表示し、目で見たときに白く見えるように設定した。そのため、表示されている色が白色であるという定量的な評価ができていない。今後は、再生像のRGBの光強度を光パワーメーターにより測定するか、色彩輝度計を用いて色度を測定して、白色を定量的に評価する必要がある。この評価結果をもとに半導体レーザーのパワー調整を行うことで、再生像の色再現性をテクスチャ画像の色に近づけることができる。第三の原因は、ファイバーアレイの製作過程で生じた誤差、もしくは光学系の調整不足のためだと考えられる。図6-8の再生像をみると、右から観察するほど赤色が強くなっていることがわかる。この色ムラは、フーリエ面におけるRの最大光強度の中心位置が、GとBから離れているからだと考えられる。この色ムラはファイバーアレイの製作精度の向上や光学系の再調整により低減が期待できる。

6.6 本章のまとめ

本研究では、視域走査型システムのカラー化を、ファイバーアレイを用いたRGB レーザー光の照明光学系と1台のDMDを用いて、時分割法により実現し

た。RGB のホログラムパターンのキャリア方向に応じて、波長ごとに適切な拡散係数を用いることで、再生像の階調表現性を向上させた。また、高フレームレートな SLM を用いることで、画面サイズ、視域角、フレームレートが単色表示と変わらないカラーのホログラム表示を実現した。実験により、視域角が 40° で、画面サイズが 2.0 inch のカラーホログラム表示を実現した。フレームレートは 60 Hz である。

第7章 実用化に向けた検討

2.1節では、画面サイズ 40 inch で視域角 30° のホログラフィックディスプレイを実現するためには、ピクセルピッチは $p = 0.97 \mu\text{m}$ で解像度は $N \times M = 838,000 \times 628,000$ の SLM が要求されることを説明した。本章では、水平走査型ホログラフィーを実用化するためには、どの程度のデバイスが要求されるかを説明する。

スクリーン走査型システムでは、水平方向のピクセルピッチ $1.0 \mu\text{m}$ として検討する。画面サイズ 24 inch \times 32 inch を実現する場合、水平方向のホログラムの解像度は 813,000 が要求される。現在利用可能な DMD を用いた場合、解像度 $1,024 \times 768$ であるため、1回の水平走査で表示する要素ホログラム数は 1,588 となる。フレームレート 60 Hz を実現するためには $1,588 \times 60 \text{ Hz} = 95.3 \text{ kHz}$ の SLM が必要となる。DMD のフレームレートは 22.727 kHz であるため、5 台の DMD をタイリングすることで画面サイズ 40 inch を実現できる。

視域走査型システムでは、再生像の観察距離をディスプレイの高さの 3 倍程度の距離である 2,000 mm として検討する。実質的なホログラム表示を実現するためには、視域幅を瞳孔径よりも大きくする必要がある。そのため、拡大したピクセルピッチは $200 \mu\text{m}$ でなければいけない。DMD のピクセルピッチは $13.68 \mu\text{m}$ であるため、拡大倍率は 14.6 倍となる。1つの DMD を 14.6 倍したときの画面サイズが $204 \times 153 \text{ mm}^2$ (10 inch) であるため、 4×4 台の SLM をタイリングすることで、画面サイズ 40 inch を実現できる。しかし、視域走査型システムの場合は、画面サイズが水平スキャナのサイズに制限されるため、40 inch の水平スキャナが必要となる。

第 8 章 結論

本論文では、視域と画面サイズの拡大を実現できる電子的なホログラム表示である、水平走査型ホログラフィックディスプレイの高画質化に関する研究を行った。高画質化として、カラーのホログラム表示における階調表現性と色再現性の向上方法について研究を行った。

最初に、ホログラムパターンの 2 値化方法として二次元画像の分野で広く用いられている Floyd-Steinberg の誤差拡散法を適用することで、階調表現性の向上を実現した。また、誤差拡散法と補正テーブルを組み合わせることで、さらなる階調表現性の向上を実現した。

つぎに、水平走査型ホログラフィックディスプレイに適した誤差拡散法を提案し、カラー再生像の階調表現性と色再現性の向上を実現した。また、DMD の表示面の反射型 Blazed 回折格子の構造を利用する新しい RGB 合波法を提案した。スクリーン走査型システムにおいては、画面サイズ 6.2 inch で視域角が 10.4° のカラーのホログラム表示を実現した。同様な手法を用いて視域走査型システムのカラー化及び会長表現性の向上を行い、画面サイズ 2.0 inch で視域角が 40.0° のカラーのホログラム表示を実現した。

謝辞

まず、本研究の機会を与えてくださり、貴重なお時間を割いて細やかにご指導とご鞭撻をくださりました高木康博教授に心より感謝を申し上げます。本研究は、先生のご理解とご指導なしには成し遂げられませんでした。お忙しい中、研究や論文作成の方針について数々の有益なご助言をくださり、広範にご支援くださりましたことに深く感謝の意を表します。

研究の進め方に関して数々のご助言とご指導をくださりました中村先生、研究のさまざまな面で支援いただいた高木研究室の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] D. Gabor, "Microscopy by Reconstructed Wave-Fronts," Proc. R. Soc. London **197** (1051), 454-487 (1949).
- [2] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstructed Wavefronts and Communication Theory," J. Opt. Soc. Am. **52**(10), 1123-1130 (1962).
- [3] Y. Takaki and N. Okada, "Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator," Appl. Opt. **48**(17), 3255-3260 (2009).
- [4] Y. Takaki and N. Okada, "Reduction of image blurring of horizontally scanning holographic display," Opt. Express **18**(11), 11327-11334 (2010).
- [5] Y. Takaki and M. Yokouchi, "Accommodation measurements of horizontally scanning holographic display," Opt. Express **20**(4), 3918-3931 (2012).
- [6] Y. Takaki, M. Yokouchi, and N. Okada, "Improvement of grayscale representation of the horizontally scanning holographic display," Opt. Express **18**(24), 24926-24936 (2010).
- [7] Y. Takaki and K. Fujii, "Viewing-zone scanning holographic display using a MEMS spatial light modulator," Opt. Express **22**(20), 24713-24721 (2014).
- [8] P. S. Hilaire, S. A. Benton, M. E. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa and J. S. Underkoffler, "Electronic display system for computational holography," Proc. SPIE **1212**, 174-182 (1990).
- [9] P. S. Hilaire, A. Benton, M. Lucente and P. M. Hubel, "Color images with the MIT holographic video display," Proc. SPIE **1667**, 73-84 (1992).
- [10] D. E. Smalley, Q. Y. J. Smithwick, V. M. Bove, J. Barabas, and S. Jolly, "Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays," Nature **498**, 313-317 (2013).
- [11] D. Henrie, B. Haymore, M. Zhang, D. Alrabidi, D. Smalley, S. Jolly, and V. M. Bove, "Progress on a low-cost holographic video monitor," in *Digital Holography*

and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper DW2B.3.

- [12] K. Maeno, N. Fukaya and O. Nishikawa, "Electro-Holographic Display Using 15MEGA Pixels LCD," Proc. SPIE **2652**, 15-23 (1996).
- [13] K. Yamamoto, Y. Ichihashi, T. Senoh, R. Oi and T. Kurita, "3D objects enlargement technique using an optical system and multiple SLMs for electronic holography," Opt. Express **20**(19), 21137-21144 (2012).
- [14] H. Sasaki, K. Yamamoto, Y. Ichihashi and T. Senoh, "Image Size Scalable Full-parallax Coloured Three-dimensional Video by Electronic Holography," Sci. Rep. **4**, 4000 (2014).
- [15] H. Sasaki, K. Yamamoto, K. Wakunami, Y. Ichihashi, R. Oi and T. Senoh, "Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators," Sci. Rep. **4**, 6177 (2014).
- [16] J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park and B. Lee, "Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators," Opt. Express **16**(16), 12372-12386 (2008).
- [17] J. S. Chen, Q. Y. J. Smithwick and D. P. Chu, "Coarse integral holography approach for real 3D color video displays," Opt. Express **24**(6), 6705-6718 (2016).
- [18] Z. M. A. Lum, X. Liang, Y. Pan, R. Zheng and X. Xu, "Increasing pixel count of holograms for three-dimensional holographic display by optical scan-tiling," Opt. Eng., **52**(1), 015802 (2013).
- [19] X. Xu, X. Liang, Y. Pan, R. Zheng, Z. A. Lum, P. P. Mar, Y. Lwin and S. Solanki, "Development of full-color full-parallax digital 3D holographic display system and its prospects," Proc. SPIE **8644**, 86440909-10 (2013).
- [20] K. Kinashi, T. Fukami, Y. Yabuhara, S. Motoishi, W. Sakai, M. Kawamoto, T. Sassa and N. Tsutsumi, "Molecular design of azo-carbazole monolithic dyes for updatable full-color holograms," NPG Asia Mater. **8**, e311 (2016).

- [21] Savas Tay, P.-A. Blanche, R. Voorakaranam, A.V. Tunc, W. Lin, S. Rokutanda, T. Gu, D. Flores, P. Wang, G. Li, P. St Hilaire, J. Thomas, R.A. Norwood, M. Yamamoto and N. Peyghambarian, "An updatable holographic three-dimensional display," *Nature* **451**, 694-698 (2008).
- [22] P.-A. Blanche, A. Bablumian, R. Voorakaranam, C. Christenson, W. Lin, T. Gu, D. Flores, P. Wang, W.-Y. Hsieh, M. Kathaperumal, B. Rachwal, O. Siddiqui, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto and N. Peyghambarian, "Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer," *Nature* **468**, 80-83 (2010).
- [23] A. Schwerdtner, N. Leister and R. Häussler, "A New Approach to Electro-Holography for TV and Projection Displays," in *SID 2007 International Symposium*, Digest of Technical Papers, 1224-1227 (2007).
- [24] R. Häussler, A. Schwerdtner and N. Leister, "Large holographic displays as an alternative to stereoscopic displays," *Proc. SPIE* **6803**, 68030M (2008).
- [25] R. Häussler, S. Reichelt, N. Leister, E. Zschau, R. Missbach and A. Schwerdtner, "Large real-time holographic displays: from prototypes to a consumer product," *Proc. SPIE* **7237**, 72370S (2009).
- [26] O. Bryngdahl and A. Lohmann, "Single-sideband holography," *J. Opt. Soc. Am.* **58**, 620-624 (1968).
- [27] Y. Takaki and Y. Tanemoto, "Band-limited zone plates for single-sideband holography," *Appl. Opt.* **48**(34), H64-H70 (2009).
- [28] T. Kurihara and Y. Takaki, "Improving viewing region of 4f optical system for holographic displays," *Opt. Express* **19**(18), 17621-17631 (2011).
- [29] G. Sharma and R. Bala, *Digital Color Imaging Handbook*, (CRC, 2002).
- [30] R. W. Floyd and L. Steinberg, "An adaptive algorithm for spatial gray-scale," *Proc. Soc. Inf. Disp.* **17**, 75-77 (1976).
- [31] F. Fetthauer, S. Weissbach, and O. Bryngdahl, "Computer-generated Fresnel holograms: quantization with the error diffusion algorithm," *Opt. Commun.* **114**(3), 230-234 (1995).

- [32] R. Hauch and O. Bryngdahl, "Computer-generated holograms with pulse-density modulation," *J. Opt. Soc. Am. A* **1**(1), 5-10 (1984).
- [33] S. Weissbach, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Quantization noise in pulse density modulated holograms," *Opt. Commun.* **67**(3), 167-171 (1988).
- [34] S. Weissbach, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Digital phase holograms: Coding and quantization with an error diffusion concept," *Opt. Commun.* **72**(1), 37-41 (1988).
- [35] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks, "Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue," *Journal of Vision*, **8**(3), 1–30 (2008).
- [36] J. Nakamura, K. Tanaka, and Y. Takaki, "Increase in Depth of Field of Eyes Using Reduced-View Super Multi-View Displays," *Appl. Phys. Express* **6**(2), 022501-1–022501-3 (2013).
- [37] D. Dudley, W. M. Duncan, and J. Slaughter, "Emerging digital micromirror device (DMD) applications," *Proc. SPIE* **4985**, 14–25 (2003).
- [38] R. Hauck and O. Bryngdahl, "Computer-generated holograms with pulse-density modulation," *J. Opt. Soc. Am. A* **1**(1), 5–10 (1984).

業績

査読論文（本研究に関わるもの）

1. **Y. Matsumoto** and Y. Takaki, “Improvement of gray-scale representation of horizontally scanning holographic display using error diffusion,” Opt. Letter **39**(12), 3433-3436(2014).
2. Y. Takaki, **Y. Matsumoto**, and T. Nakajima, “Color image generation for screen-scanning holographic display,” Opt. Express **23**(21), 26986-26998(2015).

受賞歴（本研究に関わるもの）

1. Best Paper Award (Three Dimensional Systems and Applications (3DSA), Korea, May 2014.)

国際発表

1. T. Nakajima, **Y. Matsumoto** and Y. Takaki, "Color Image Generation by Horizontally Scanning Holography," Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (DH), Kohala Coast, Hawaii, USA, Apr. 2013.
2. **Yuji Matsumoto** and Yasuhiro Takaki: “Grayscale 3D Image Generation by Horizontally Scanning Holographic Display Using Error Diffusion,” Three Dimensional Systems and Applications (3DSA), Korea, May 2014.
3. **Yuji Matsumoto** and Yasuhiro Takaki: “Comparison of color holographic displays based on screen scanning and viewing-zone scanning,” Three Dimensional Systems and Applications (3DSA), Japan, December 2016.

国内発表

1. 松本祐二, 横内理人, 高木康博: “水平走査型ホログラフィーのカラー化,” 3次元画像コンファレンス 2012, 東京, 2012年7月.
2. 松本祐二, 高木康博: “水平走査型ホログラフィーへの誤差拡散法の適用,” ホログラフィックディスプレイ研究会 2013, 千葉, 2013年9月.
3. Y. Matsumoto, T. Sugihara, Y. Iwasaki, H. Umeda and Y. Takaki, “Proposal and development of adaptive laser light distribution system for growing plants,” JSHS(園芸学会) 2015.
4. T. Inoue, Y. Matsumoto and Y. Takaki, “半導体レーザーと位相型ホログラムを用いた植物栽培の提案,” JSAP(応用物理学会) March. 2016.