

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	ホログラフィックディスプレイの実現に向けた磁気光学デバイス開発および再生像評価に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	東田 諒
Author(English)	Ryo Higashida
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12711号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山口 雅浩,金子 寛彦,中村 健太郎,渡辺 義浩,ファム ナムハイ
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12711号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

# 学位論文

ホログラフィックディスプレイの実現に向けた  
磁気光学デバイス開発および  
再生像評価に関する研究

2024年2月

東京工業大学 工学院 情報通信系

東田 諒



---

---

# 目次

第 1 章	序論	
1.1	研究背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	論文構成	3
第 2 章	ホログラフィーの 3 次元映像再生システムへの応用	
2.1	ホログラフィーの概要	5
2.2	電子ホログラフィーの概要	9
2.3	電子ホログラフィーにおける SLM の基本要件	12
2.4	計算機合成ホログラムの取り扱い	14
2.4.1	光波の伝搬計算	14
2.4.2	デジタルデータとしてのホログラム	16
2.5	ホログラフィーによる 3 次元映像システム	18
2.5.1	表示デバイス開発	19
2.5.2	表示システム開発	21
第 3 章	磁気光学式空間光変調器の研究	
3.1	研究の背景	24
3.2	MOSLM による光変調	26
3.3	光変調素子の作製と駆動実証	29
3.3.1	研究の目的・提案手法	29
3.3.2	実験・考察	30
3.4	アレイ素子の作製と光変調検証	35
3.4.1	研究の目的・提案手法	35
3.4.2	実験・考察	39
3.5	多重反射による回折効率の改善	46

---

3.5.1	研究の目的・提案手法 .....	46
3.5.2	実験・考察.....	47
3.6	MOSLM の開発とホログラム再生.....	53
3.7	本章の結論 .....	57
第 4 章 CGH 再生像の評価技術に関する研究		
4.1	研究の背景 .....	60
4.2	シミュレーションによる再生像評価 .....	61
4.2.1	CGH の再生シミュレーション方法 .....	61
4.2.2	CGH 再生像の評価方法.....	65
4.2.3	参照物体による再生像正規化手法の検証.....	66
4.2.4	再生像の評価手法の検証 .....	73
4.3	本章の結論 .....	77
第 5 章 結論		
5.1	本論文の総括 .....	78
5.2	学術的な意義、発展性 .....	78
5.3	課題と今後の展望.....	79
参考文献 81		
謝辞 89		
業績一覧 90		

---

# 第1章

## 序論

---

### 1.1 研究背景

従来、放送技術は高精細化を中心に研究開発が進められてきた [1], [2]。日本では、1926 年に走査線 40 本のテレビが開発され、1953 年には走査線 525 本でテレビ本放送が開始され、1989 年には走査線数 1,125 本のハイビジョン実験放送が開始された。その後、ブラウン管モニターから液晶モニターなどが主流になるにつれて、走査線数ではなく水平方向の画素数で精細度を示すようになり、2014 年には水平画素数 3,840 の 4K 試験放送、2016 年には水平画素数 7,680 の 8K 試験放送が開始された。また、8K 放送では高精細化に加えて、広色域化、高フレームレート化、多階調化、高輝度化に関しても実現されている [3], [4]。8K という画素数は、臨場感に関する主観評価実験によって決定されており [5]、2 次元(2D)映像としては究極の臨場感を提示可能であるとされている。近年、映像体験のさらなる高臨場化に向け、ヘッドマウントディスプレイやドーム型ディスプレイのような没入型映像 [6]や、触覚や嗅覚などを提示する技術など [7]、従来の高精細化とは異なるアプローチで研究開発が進められている。

また、高臨場感を提示する技術として、3 次元(3D)映像技術に関しても、古くから研究開発が進められてきた [8]。3D 映像の表示方式としてさまざまな手法が提案されているが、2 眼式の技術がよく知られている。2 眼式は、右目と左目に異なる映像を表示することで立体感を提示する技術であり、3D 映画や 3D テレビとして商用化されている [9]。この方式では、目の焦点はディスプレイに調節される一方、輻輳は再生した 3D 映像に調整されるため、これらの不一致により観察者は疲労を感じると考えられている。また、視機能の発達への影響が懸念されており、子どもには視聴制限がある。

このような輻輳調節矛盾のない、自然な 3D 映像を提示可能な技術として、空間像再生方式が知られている [10]。空間像再生方式は、物体から出る光を再現することで、特別なメガネをかけることなく、3D 映像を表示可能である。光の再現を、光線として実現するライトフィールド方式 [11]と、波面として実現するホログラフィー方式 [12]がある。ライトフィールド方式は、光線密度を増やすことで映像品質を向上させることが可能であるが、光線密度の増加に伴い回折の影響を無視できなくなるため、深い奥行き of 3D 映像表示が困難である。ホログラフィー方式は、回折を利用した技術であり、深い奥行き of 3D 映像表示が可能であるが回折を制御するには、従来の 2Dディスプレイより遥かに高性能な映像システムが必要と

なる。

図 1.1 は、NHK 放送技術研究所が想定する、2030–2040 年頃のメディア環境の一例である [13]。従来の 2D ディスプレーによる映像視聴だけでなく、多様な視聴デバイスによってメディアと接すると想定されている。その中で 3D 映像表示は、これまでにない映像体験をもたらす重要なメディア技術に位置づけられる。



図 1.1 2030–2040 年頃のメディア環境の一例

## 1.2 研究の目的

本研究は、実物が目の前にあるかのような、臨場感・没入感の高い、究極の映像体験の提示を目指し、特別なメガネをかけることなく、深い奥行きを有した 3D 映像を提示可能な、ホログラフィーによる 3D 映像表示システムを研究の対象とする。特に、システムの根幹である、空間光変調器 (SLM) という表示デバイスに着目する。光学的に記録された静止画のホログラムでは、実物があるかのような映像の再現が実証されているが、SLM に表示したホログラムで再生された映像は、究極の映像と大きな隔たりがある。従来、汎用的な SLM が利用されてきたが、臨場感・没入感の高い映像を提示するには、新規の表示デバイス開発が必要不可欠である。

そこで、ホログラフィーによる 3D 映像表示システムの将来性やデバイス開発の方向性を明らかにすることで、専用表示デバイスの開発を促進することを研究の目的とする。本研究は、新規 SLM の開発と再生像評価技術の構築の両輪で研究を推進する。新規 SLM 開発では、従来の SLM 性能を上回る SLM を提案・実証し、将来展望を示す。また、再生像評価

---

の研究では、SLM の要求性能の導出を目指し、SLM 性能を模擬したホログラムを再生し、その再生像を評価する方法をシミュレーション、光学再生の両面から提案し、実現する。

## 1.3 論文構成

本論文の構成を図 1.2 に示す。

第 1 章では、本論文の研究背景と目的について述べた。

第 2 章では、ホログラフィーによる 3 次元映像システムについて概説し、既存の研究や課題を説明する。

第 3 章では、電流誘起磁壁移動を駆動に用いた磁気光学式空間光変調器 (MOSLM) の研究について説明する。はじめに、SLM の狭画素ピッチ化を実現するため、サブミクロンスケールの微小な磁壁移動型光変調素子を作製する手法を提案し、電流注入による磁化反転および光変調動作を実証する。つづいて、磁壁移動型光変調素子を高密度かつ高開口率で配置する構造を提案する。さらに、SLM の光変調動作を模した検証素子を作製し、回折特性の評価やホログラムの再生を検証する。また、光変調素子の磁気光学効果を増大して回折効率を改善するため、磁性体での多重反射条件を調整し、検証素子を用いてその光変調性能を検証する。最後に、これらの研究成果を基に開発した磁壁移動型 MOSLM によってホログラムを再生し、その性能を評価する。

第 4 章では、SLM 要求性能の導出に向けた、ホログラムの再生像評価に関する研究について説明する。SLM の性能を模擬したホログラムを生成し、その再生像を評価することで、SLM 開発の加速化・高度化を目指す。はじめに、計算機上で任意の性能のホログラムの再生をシミュレーションし、その再生像を評価するため、再生像の強度分布の正規化手法および理想像からの画質劣化を数値的に評価する手法を提案する。つづいて、ホログラムを光学的に再生して、その再生像を評価するため、微細なパターンを大面積に形成するプロセスを提案し、狭画素ピッチ多画素の静止画ホログラムを作製する。最後に、これらの再生像評価技術の SLM 開発への有効性を検証する。

第 5 章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題や展望について述べ、総括とする。

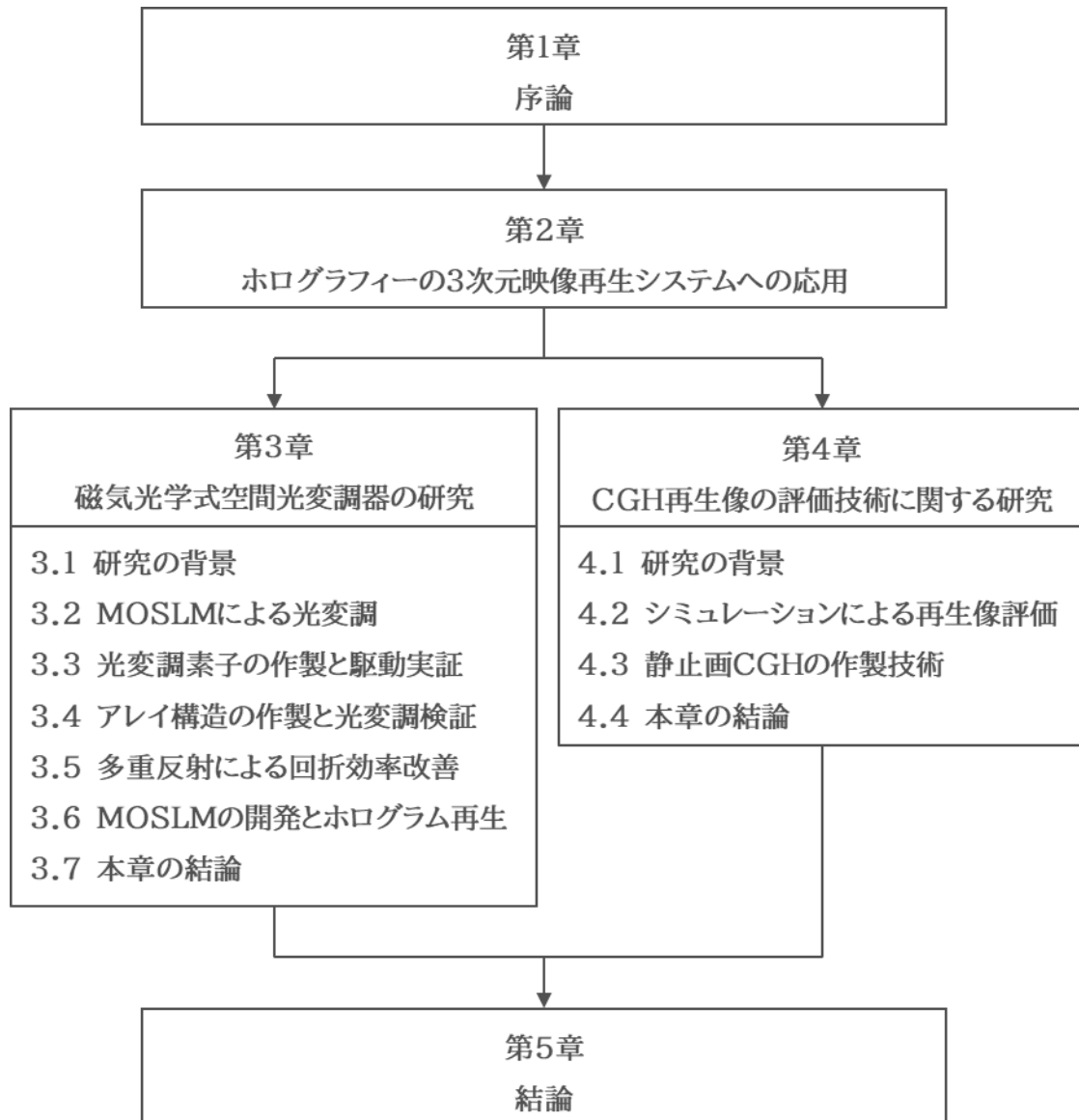


図 1.2 本論文の構成

## 第2章

### ホログラフィーの

### 3次元映像再生システムへの応用

#### 2.1 ホログラフィーの概要

ホログラフィーは、光の干渉・回折現象を利用して、物体の 3D 情報を記録・再生する技術である [12]。通常の写真技術は、物体から出る光(物体光)の振幅情報のみが記録可能であるが、ホログラフィーは、参照光という補助の光と物体光を干渉させることで、振幅情報に加えて位相情報も記録可能である。図 2.1 にホログラフィーの原理の図を示す。以下、数式を用いてホログラフィーの原理を説明する。

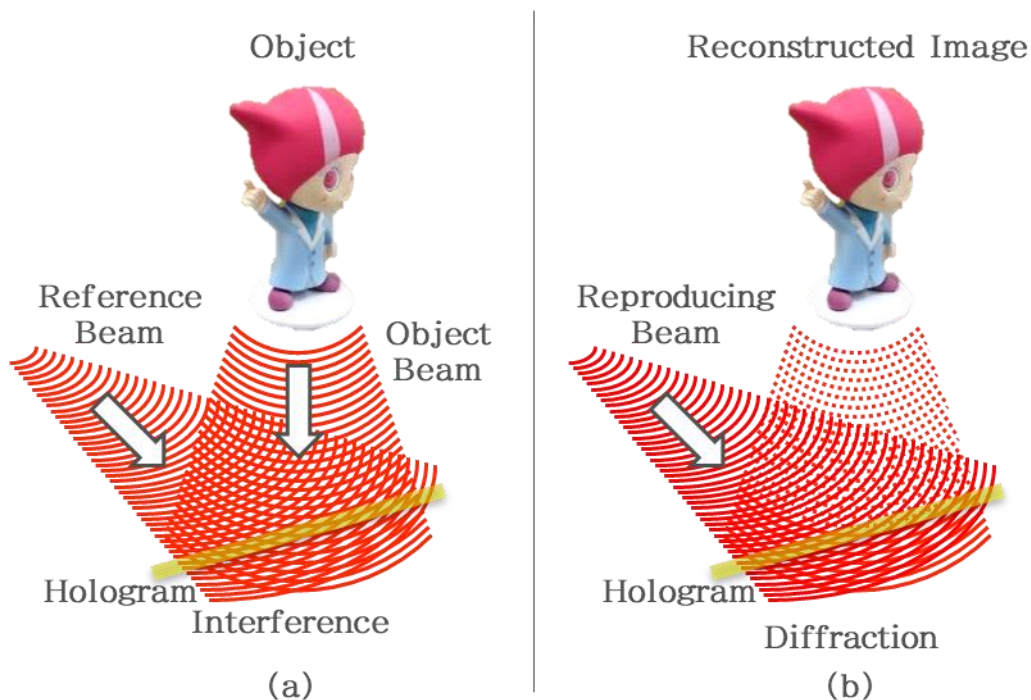


図 2.1 ホログラフィーの原理  
(a)記録、(b)再生

物体光  $O$  と参照光  $R$  をそれぞれ以下のように表す。

$$O(x, y) = A_O(x, y) \exp[j\phi_O(x, y)] \quad (2.1)$$

$$R(x, y) = A_R(x, y) \exp[j\phi_R(x, y)] \quad (2.2)$$

ここで、 $x$ 、 $y$  は空間座標であり、 $A_O$ 、 $A_R$  はそれぞれ物体光と参照光の振幅成分、 $\phi_O$ 、 $\phi_R$  はそれぞれ物体光と参照光の位相成分である。これらの光を干渉させた時、干渉縞の強度  $I_H$  は以下の式で表される。

$$I_H(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + 2\Re[O(x, y)R^*(x, y)] \quad (2.3)$$

ここで、 $\zeta^*$  は複素数  $\zeta$  の複素共役、 $\Re[\zeta]$  は、複素数  $\zeta$  の実部である。干渉縞を記録した媒体をホログラムと呼ぶ。ホログラムに、再生照明光として参照光と同じ光を入射すると、以下のように表される。

$$I_H(x, y)R(x, y) = \{|O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2\}R(x, y) + O(x, y)|R(x, y)|^2 + O^*(x, y)R^2(x, y) \quad (2.4)$$

第 1 項は、ホログラムで回折されなかった光であり、0 次光と呼ぶ。第 2 項は、元の物体光の振幅と位相が完全に再現された光であり、真の像または再生像と呼ぶ。第 3 項は、元の物体光の位相が反転した光であり、共役像と呼ぶ。ホログラフィーによって物体光が完全に再現可能であるが、0 次光や共役像といった不要な光も発生するため、それらの除去が必要である。

ホログラムの記録過程では光を干渉させる必要があるため、通常、光源にはレーザーのようなコヒーレント光が用いられる。また、暗室下で振動のない環境で記録する必要があるため、人間の全身や風景といった被写体の記録は困難である。後述する計算機合成ホログラム (CGH) は、計算機上で光の干渉を計算してホログラムのデータを生成する技術であり、3D モデルを定義出来さえすれば、上述のような被写体でもホログラムを生成することが可能である。

また、上記の数式に従わずに物体光を再現するものであっても、広義の意味でホログラムと呼ばれているものがあるため、それらについても説明する [14]。表 2.1 にホログラムの分類をまとめる。ここでは、3 つのカテゴリーでホログラムを分類した。それぞれのカテゴリーの組み合わせでホログラムを示す。代表的なものを名称の列に示した。

表 2.1 ホログラムの分類

① 情報	② 変換	③ 変調	名称
振幅(A) 位相(P) 複素振幅(C)	ホログラム(H) 波面再生(W)	振幅(A) 位相(P) 複素振幅(C)	C-H-A: 振幅ホログラム C-H-P: 位相ホログラム C-H-C: 複素振幅ホログラム P-W-P: キノフォーム C-W-C: 複素振幅変調

1 つめのカテゴリーである”情報”は、ホログラムに記録する物体光に含まれる情報による分類である。振幅情報のみを記録する  $O_A$ 、位相情報のみを記録する  $O_P$ 、両方を記録する  $O$  の 3 つのタイプが考えられ、以下の式で表される。なお、 $O$  は式(2.1)で表される。

$$O_A(x, y) = \text{abs}[O(x, y)] = A_O(x, y) \quad (2.5)$$

$$O_P(x, y) = \exp\{j \arg[O(x, y)]\} = \exp[j\phi_O(x, y)] \quad (2.6)$$

ここで、 $\text{abs}[\zeta]$ 、 $\arg[\zeta]$  は、それぞれ複素数  $\zeta$  の絶対値と偏角を示す。 $O_A$ 、 $O_P$ 、 $O$  をそれぞれ、振幅情報(または振幅のみ)、位相情報(または位相のみ)、複素振幅情報(または複素振幅)と呼ぶ。しかし、振幅情報のみの記録は写真技術と同じであるため、ホログラフィーとしては取り扱わない。

2 つめのカテゴリーである”変換”は、物体光を変調するための変換方式による分類である。厳密な意味でのホログラムは、式(2.3)に示したように、物体光を干渉縞の強度情報に変換する。もう一つの変換方式である波面再生は、物体光を直接変調する方法である。波面再生  $W$  は以下の式で表される。

$$W(x, y) = O(x, y)R^*(x, y) \quad (2.7)$$

3 つめのカテゴリーである”変調”は、ホログラムにおける変調方式による分類である。振幅変調型、位相変調型、複素振幅変調型の 3 つのタイプが考えられる。しばしば混同されるが、物体光のもつ”情報”とは別の分類である。

表 2.1 の名称の欄には、以上の 3 つの分類を組み合わせで頭文字を繋いだものと、その名称の代表例を記載した。以下、それぞれのホログラムについて説明する。

“変換”のカテゴリーにおける、厳密な意味での“ホログラム”には、位相情報、複素振幅情

報を有した物体光それぞれに対して、振幅変調型、位相変調型、複素振幅変調型が定義できる。物体光の位相情報のみを記録したホログラムは、物体のエッジを強調することができるため、パターンマッチングの分野で用いられる [15]。しかしながら、ディスプレイ応用としては複素振幅情報を記録したものに比べて利点がないため用いられない。

複素振幅情報を含む物体光を記録したホログラムは、変調方式毎に、複素振幅情報振幅変調型ホログラム、複素振幅情報位相変調型ホログラム、複素振幅情報複素振幅変調型ホログラムとなるが、省略して、振幅ホログラム、位相ホログラム、複素振幅ホログラムと呼ばれる。

振幅ホログラム  $H_A$  は、干渉縞の強度分布を記録媒体の透過率分布として記録したものであり、以下の式で表される [16]。

$$H_A(x, y) = \beta + \alpha I_H(x, y) \quad (2.8)$$

ここで  $\alpha$ 、 $\beta$  は、記録媒体に依存する透過率の係数である。

位相ホログラム  $H_P$  は同様に、干渉縞の強度情報を記録媒体の位相分布として記録したものであり、以下の式で表される [16]。

$$H_P(x, y) = \exp[j\gamma_p I_H(x, y)] \quad (2.9)$$

ここで  $\gamma_p$  は、記録媒体に依存する位相変調の係数である。また、 $I_H$  は余弦関数であるため、位相ホログラムは第 1 種ベッセル関数で表される。 $I_H = \cos \varphi$  とすると、位相ホログラムは以下のように表される。

$$\begin{aligned} & \exp\{j\gamma_p \cos \varphi\} \\ &= \cos(\gamma_p \cos \varphi) + j \sin(\gamma_p \cos \varphi) \\ &= J_0(\gamma_p) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\gamma_p) \{\cos 2n\varphi\} + j 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} J_{2n-1}(\gamma_p) \{\cos(2n-1)\varphi\} \\ &= J_0(\gamma_p) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\gamma_p) \{\exp(j2n\varphi) + \exp(-j2n\varphi)\} \\ & \quad + j \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} J_{2n-1}(\gamma_p) \{\exp[j(2n-1)\varphi] + \exp[-j(2n-1)\varphi]\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

1 次の回折光が再生光であるため、 $J_1(\gamma_p)$  が最大するとき、回折効率は最大となる。位相ホログラムは振幅ホログラムを漂白化することで作製することができる [14]。

複素振幅ホログラムは、干渉縞の強度分布を記録媒体の透過率分布および位相分布として記録したものであり、以下のように表される [16]。

$$H_C(x, y) = H_A(x, y)H_P(x, y) \quad (2.11)$$

つづいて、“変換”のカテゴリーにおける、“波面再生”は、直接物体光を変調するため、物体光に含まれる「情報」と「変調」が同一でなければならない。したがって、物体光の位相情報を位相変調するもの、複素振幅情報を複素振幅変調するものが定義され、位相情報位相変調型波面再生、複素振幅情報複素振幅変調型波面再生となるが、それぞれキノフォーム、複素振幅変調と呼ぶ。

キノフォームは、物体光の位相情報のみを直接位相変調するものであり、以下の式で表される。

$$W_P(x, y) = \exp[j \arg\{W(x, y)\}] = \exp[j\{\phi_O(x, y) - \phi_R(x, y)\}] \quad (2.12)$$

キノフォームは原理上、物体光の振幅成分は記録されない。また、干渉縞への変換を介さないため、0次光や共役光は発生しない。

同様に、複素振幅変調は以下の式で表される。

$$W_C(x, y) = \text{abs}[W(x, y)]W_P(x, y) = A_O(x, y)A_R(x, y)\exp[j\{\phi_O(x, y) - \phi_R(x, y)\}] \quad (2.13)$$

複素振幅変調はキノフォームと同様に不要光が発生しないとともに、振幅成分も再現可能な理想的な方法である。しかし、実際に振幅と位相を同時に変調することは困難であるため、実用上は振幅ホログラムとキノフォームがよく用いられる。

## 2.2 電子ホログラフィーの概要

従来のホログラフィーは、物体にコヒーレント光を照射し、参照光と干渉させ、その干渉縞を感光材料に記録していた。書き換え可能な感光材料に干渉縞を記録することで動画化する技術が提案されている [17]-[19]。光学的に記録されたホログラムの再生像は実物がそこにあるかのように高品質であるが、2.1 節で述べたように、記録可能な被写体に制限があること、記録システムが大型であること、動画としてのフレームレートの実現が困難であるといった課題がある。

従来、アナログ技術によって実現されてきたホログラフィーの記録と再生の過程を電子化し、干渉縞をデジタルデータとして取り扱う、電子ホログラフィーの技術が提案されている

[20]-[22]。電子ホログラフィーでは、感光材料の代わりに、光の空間的な分布を制御する SLM にホログラムを表示して 3D 映像を再生する。

電子ホログラフィーは、1960 年代に理論が示され原理実証がなされたものの、周辺技術の不足から実現は困難であると考えられていた。その後、ハードウェアや計算機の技術が発展し、1990 年頃に音響光学変調器(AOM)を SLM として用いた 3D 映像システムが実現された [23]。AOM は 1 次元の光変調デバイスであるため、水平方向の視差のみが再現されており、垂直方向にスキャンすることで映像が表示された。水平方向の視差情報のみとすることで、表示に必要なデータ量が格段に削減され、初めて両目で観察可能な電子ホログラフィーが実証された。また、液晶パネルを SLM として用いた 3D 映像システムも同時期に実証されている [24]。液晶パネルを用いた方法は、AOM を用いたシステムと比較して画面サイズなどは小さいが、垂直方向の視差も再現可能であり、再生光学系がシンプルであることから、以後活発に研究開発が進められてきた。

SLM に表示するデジタルデータとしてのホログラムの作成としては、光の干渉を計算機上でシミュレーションしてホログラムを生成する CGH の技術が提案されている [25]。また、感光材料ではなく撮像素子に干渉縞を記録することでデジタルデータとしてのホログラムを取得するデジタルホログラフィーの技術が提案されている [26]。さらに、コヒーレント光ではなく、自然光を用いたインコヒーレントデジタルホログラフィーの技術も提案されている [27]。

図 2.2 に、SLM を用いたホログラフィックディスプレイの一般的な構成を示す。簡単のため、再生照明光は SLM に対して入射角  $0^\circ$  の平面波とする。SLM に表示したホログラムパターンによって入射光が回折され、記録された 3D 映像が再構成される。

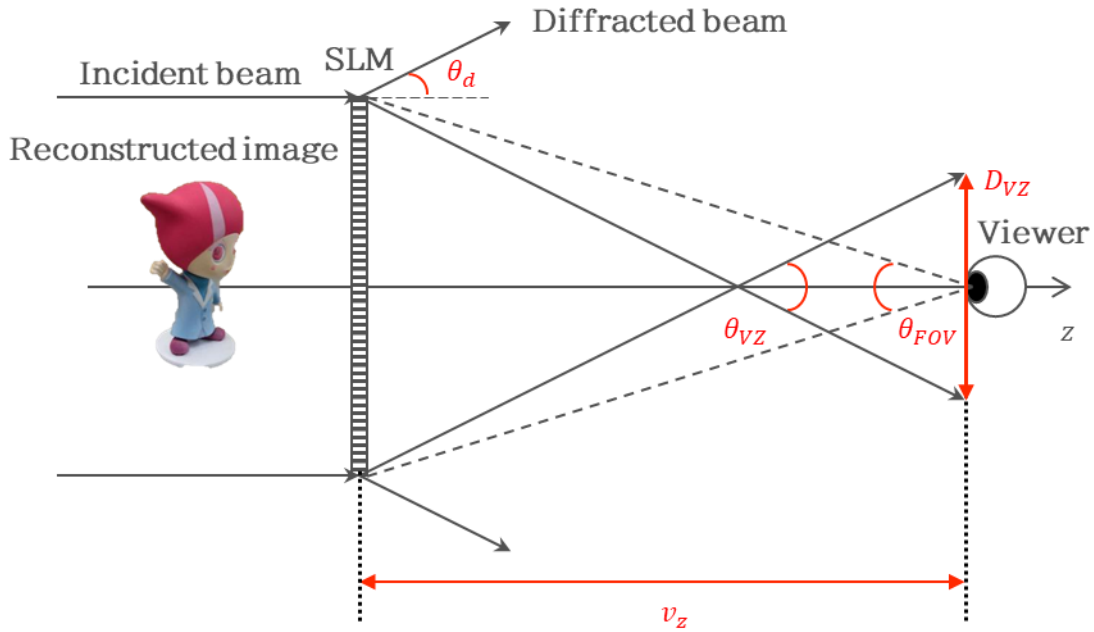


図 2.2 SLM を用いたホログラフィックディスプレイの一般的な構成

SLM の画素ピッチを  $p$ 、入射光の波長を  $\lambda$  とすると、1 次回折光の最大回折角  $\theta_d$  は以下の式で表される [28]。

$$\theta_d = \sin^{-1}(\lambda/2p) \quad (2.14)$$

観察者が正しく再生像を見ることが出来る範囲を視域と呼び、その角度である視域角  $\theta_{VZ}$  は回折角によって決定し、以下の式で表される。

$$\theta_{VZ} = 2\theta_d = 2 \sin^{-1}(\lambda/2p) \quad (2.15)$$

観察者が視域内で SLM に平行して移動できる幅  $D_{VZ}$  は、観察距離を  $v_z$ 、SLM の画素数を  $N$  とすると、以下の式で表される。

$$D_{VZ} = 2v_z \tan \theta_d - Np \quad (2.16)$$

また、観察者が SLM を見込む角である視野角  $\theta_{FOV}$  は、観察距離と SLM の画面サイズで決定する。

$$\theta_{FOV} = 2 \tan^{-1}(Np/2v_z) \quad (2.17)$$

式(2.15)、(2.17)より、視域角の拡大には SLM の狭画素ピッチ化が必要であるが、狭画素ピッチ化により画面サイズが小さくなるため、視野角の拡大には多画素化が必要となる。つまり、光を制御可能な面積と、制御可能な角度の積の拡大が必要である。この量を、光学理論ではエテンデュー、情報理論では空間帯域幅積と呼ぶ。面積(空間的な広がり)は  $Np$  で決定し、角度(周波数的な広がり)は  $1/p$  で決定するため、これらの積は結果として画素数  $N$  で決定する。したがって、設計の自由度は画素数によって制限される。

## 2.3 電子ホログラフィーにおける SLM の基本要件

映像の視聴形態は多様化が進んでおり、視域角や視野角に関する表示デバイスへの要求は視聴形態によって様々であるため、ここでは代表的な視聴形態を例として、ホログラフィックディスプレイの SLM に求められる基本要件を説明する。図 2.3 は視聴形態毎の SLM と観察者の位置関係を示す図である。

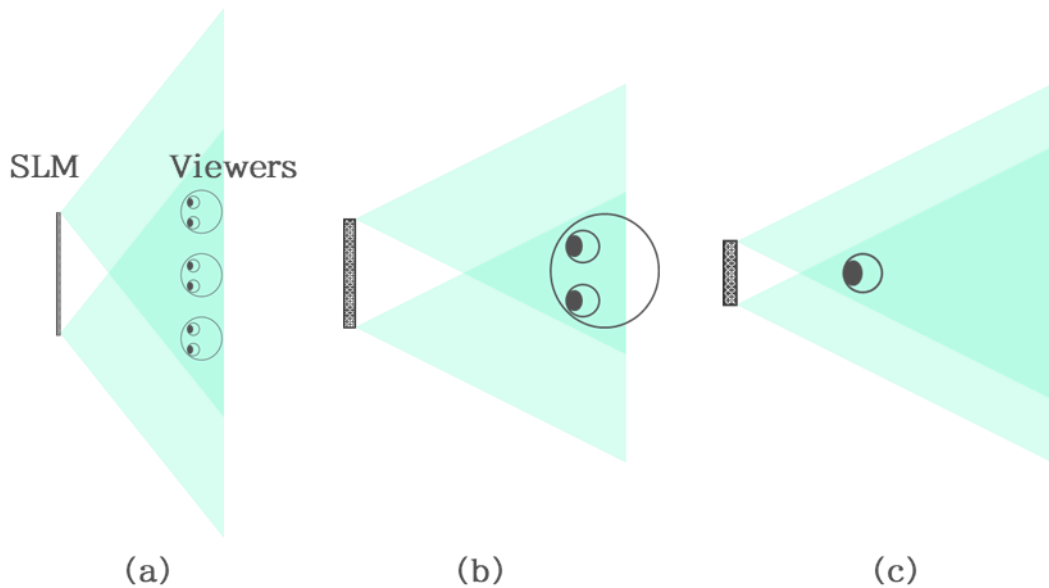


図 2.3 視聴形態毎の SLM と観察者の位置関係の違い  
(a)据置型、(b)携帯型、(c)グラス型

据置型の場合、SLM と観察者の距離は 1~2 m 程度、画面サイズは 40~70 インチ程度、視域は複数人の観察者をカバーすることが望ましい。

携帯型の場合、SLM と観察者の距離は 30 cm 程度、画面サイズは 3~6 インチ程度、視域は観察者の両目をカバーすることが望ましい。個人視聴が主な用途であり、複数人視聴をカバーする必要はないが、手元に表示した 3D コンテンツを様々な角度から楽しむためには

視域はさらに必要となる。

グラス型の場合、SLMと観察者の距離は 10 から 30 mm 程度、画面サイズは 20 mm 程度である。SLMと観察者の距離が近いことから Near-eye Displayとも呼ばれる。視野角としては、AR 応用では最低限 20°、VR 応用では最低限 100°以上必要とされている [29]。また、視域ではなく、目を動かすことができる範囲  $D_{VZ}$  が指標とされ、アイボックスと呼ばれる。眼球運動の幅である 12 mm 程度をカバーできることが望ましい。目の前に接眼レンズを設置して視野角を拡大することが多いが、この場合アイボックスは減少する。SLM (または接眼レンズ)と観察者の距離  $v_z$  はアイレリーフと呼ばれる。

視聴形態毎の SLM 基本要件の目安と従来の SLM 性能を図 2.4 に示す。例えば据置型の場合、可視光の波長領域で約 30°の視域角を実現するには SLM の画素ピッチは 1  $\mu$  m 以下とする必要がある。1  $\mu$  m の画素ピッチで、1 m 幅のホログラムを実現するには、1辺で 1000k 画素必要となる。従来の据置型 2D ディスプレーは、画素ピッチが数十～数百  $\mu$  m 程度であり、1辺の画素数は最大でも 8k であることから、画素ピッチ、画素数ともに極めて高性能な表示デバイスが必要となる。現状の汎用的な SLM の性能は、画素ピッチが約 4  $\mu$  m 程度、1 辺の画素数が 4k である [30]。比較的要求が低いグラス型であっても、従来の SLM 性能は不十分である。これらの基本要件を満たすには、膨大なデータの生成、記録、伝送、表示が必要であり、電子ホログラフィー実現の大きな課題である。

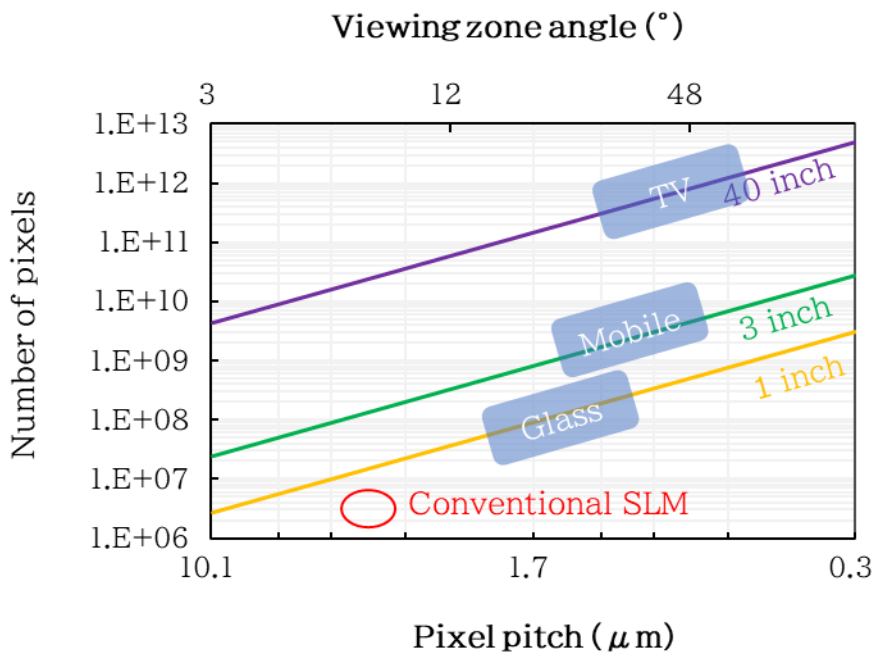


図 2.4 視聴形態毎の SLM 基本要件の目安と従来の SLM 性能

## 2.4 計算機合成ホログラムの取り扱い

CGH は、計算機上で物体光と参照光の干渉を計算し、ホログラムデータを生成する技術である。図 2.5 に CGH 計算の基本構成を示す。計算の流れとしては、①CGH 面上での物体光の波面を求め、②参照光との干渉を計算し、③SLM へ表示するために符号化する。

2.3 節で述べたようにホログラフィーによる 3 次元映像システムでは、大規模なデータを扱う必要があるため、CGH 面上での物体光の波面を効率的に計算するために様々な方法が提案されている [31]。本研究は計算方法そのものに主眼を置いていないため、ここでは CGH の計算や再生において重要となる、光波の伝搬計算と、2.1 節で述べた各種ホログラムのデジタルデータとしての扱いについて述べる。

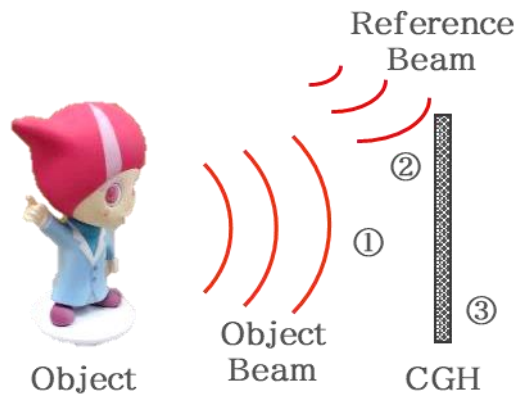


図 2.5 CGH 計算の基本構成

### 2.4.1 光波の伝搬計算

ホログラフィーはこれまでに述べたように、光の波の性質を利用した技術である。したがって CGH の各種計算において、光波の伝搬計算が重要な役割を担う。図 2.6 に光波の伝搬計算の構成を示す。

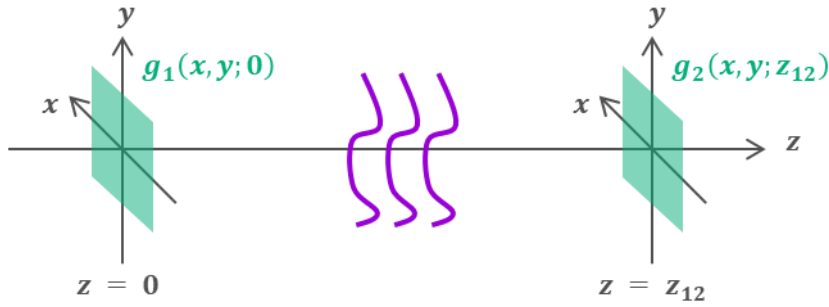


図 2.6 光波の伝搬計算

$z = 0$  平面の光波分布を  $g_1(x, y; 0)$  とすると、 $z = z_{12}$  平面の光波分布  $g_2(x, y; z_{12})$  は、角スペクトル理論によれば以下の式で表される [32]。

$$g_2(x, y; z_{12}) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}[g_1(x, y; 0)] \cdot H(u, v; z_{12})] \quad (2.18)$$

ここで、 $\mathcal{F}[\cdot]$ 、 $\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$  はそれぞれ、フーリエ変換と逆フーリエ変換、 $u$ 、 $v$  は、周波数空間での座標である。 $H(u, v; z_{12})$  は伝搬伝達関数と呼ばれ、以下の式で表される。

$$H(u, v; z_{12}) = \begin{cases} \exp\left\{j\left(\frac{2\pi z_{12}}{\lambda}\right)\sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}\right\} & (\lambda u)^2 + (\lambda v)^2 < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.19)$$

伝搬伝達関数は、伝搬距離とともに周波数が増加するアップチャープ関数であるため、離散空間で上記の計算を行う場合、標本不足によるエイリアシングに注意が必要である。標本化定理より、エイリアシングが生じない標本化間隔  $\Delta u$ 、 $\Delta v$  および、その最大周波数は以下の式で表される。

$$\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \left\{ \left( \frac{2\pi z_{12}}{\lambda} \right) \sqrt{1 - (\lambda u)^2} \right\}}{\partial u} \leq \frac{1}{2\Delta u}, \quad \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \left\{ \left( \frac{2\pi z_{12}}{\lambda} \right) \sqrt{1 - (\lambda v)^2} \right\}}{\partial v} \leq \frac{1}{2\Delta v} \quad (2.20)$$

$$|u| \leq \frac{1}{\lambda \sqrt{1 + (2z_{12}\Delta u)^2}}, \quad |v| \leq \frac{1}{\lambda \sqrt{1 + (2z_{12}\Delta v)^2}} \quad (2.21)$$

以上の条件をみたま伝搬距離内で計算を行うか、式(2.21)より高い周波数を制限することで、エイリアシングノイズのない光伝搬計算を行うことができる [33]。

また、式(2.18)のフーリエ変換には、計算の高速化のために FFT が用いられるが、巡回

畳み込みによるエイリアシングを防ぐため、配列を 2 倍の大きさに拡張し、拡張した領域を 0 で埋める必要がある(ゼロパディング)。

### 2.4.2 デジタルデータとしてのホログラム

CGH は、計算した干渉縞を直接表示するポイント型と、干渉縞を複数のセルに分割し、セルの中の開口の大きさと位置で物体光の複素振幅分布を表示するセル型に分類される [34]。図 2.7 にこれらの CGH の表示形式の例を示す。セル型は CGH の初期の研究で用いられ、振幅と位相を変調する Lohman 型 [25] と、実部と虚部を変調する Lee 型 [35] がよく知られている。バイナリー型の変調器で複素振幅変調が可能という利点はあるが、空間周波数が低くなり、光の利用効率も低いことから、現在ではポイント型を使用することが一般的である。以下では、ポイント型を対象として説明をする。

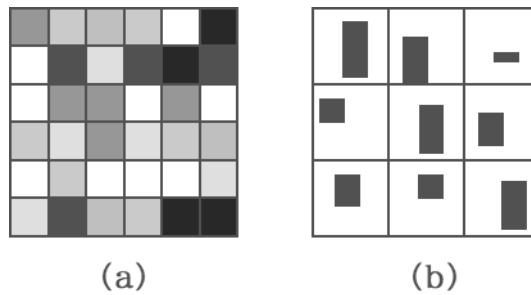


図 2.7 CGH の表示形式の例  
(a)ポイント型、(b)セル型

2.1 節では、ホログラムの分類について述べた。これらのホログラムは CGH として表現することができるが、その形式は研究者間で十分に統一されていない。特に第 4 章で述べる、CGH の再生像評価において、どのように定義した CGH であるかを明確にしなければ、正しく再生することができない。ここでは、本研究で用いた CGH データの取り扱いについて述べる。

離散空間  $[m, n]$  において、振幅 CGH は式(2.8)より、以下のように表される。

$$H_A[m, n] = \beta + \alpha I_H[m, n] \quad (2.22)$$

振幅 CGH において、 $\beta$ 、 $\alpha$  は任意に設定可能であるため、 $I_H[m, n]$  のうち、物体光の振幅と位相情報が含まれた  $\Re[OR^*]$  のみを正規化する。ここで、 $\Re[OR^*]$  はガウス分布であるため、最大値での正規化は望ましくない。ここでは、標準偏差  $\sigma$  の 3 倍の値をしきい値とし、それ以

上の値は外れ値として、しきい値に丸める。

$$I_{th} \equiv \max[\Re[OR^*]] \times 3\sigma \quad (2.23)$$

$$\Re[OR^*]' = \text{clip}[\Re[OR^*], -I_{th}, I_{th}] \quad (2.24)$$

ここで、 $\text{clip}\{\xi, \min, \max\}$  は、変数  $\xi$  の値が値域  $[\min: \max]$  を超えた場合にそれぞれ  $\min$ 、 $\max$  の値に変換する関数である。

振幅 CGH を値域  $[0:1]$  で正規化すると、以下のように表される。

$$H_{An}[m, n] = \frac{1}{2} + \frac{\Re[O[m, n]R^*[m, n]]'}{2I_{th}} \quad (2.25)$$

ただし、上記のように、記録する物体毎に CGH を正規化すると、異なる CGH 間で物体の最大振幅が一致してしまうため、最大の振幅を有する物体を規定し、一律の正規化係数によって正規化する。この操作により、CGH のコントラストが低下し、回折光の強度が制御されるため、物体の最大振幅が正しく記録される。正規化の基準となる物体光を  $O_{ref}$  とすると、しきい値  $I_{ref}$  および正しく正規化された振幅 CGH  $H_{Aref}$  は以下のように表される。

$$I_{ref} \equiv \max[\Re[O_{ref}R^*]] \times 3\sigma \quad (2.26)$$

$$H_{Aref}[m, n] = \frac{1}{2} + \frac{\Re[O[m, n]R^*[m, n]]'}{2I_{ref}} \quad (2.27)$$

最後に CGH を量子化する。

$$H_{Aq}[m, n] = Q[H_{Aref}[m, n]] \quad (2.28)$$

階調数を  $B$  とすると、変数  $\xi$  の量子化  $Q[\xi]$  は以下のように表される。

$$Q[\xi] = \begin{cases} 0 & \xi < 0 \\ 1 & \xi \geq 1 \\ \text{floor}[\xi \times 2^B] / (2^B - 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.29)$$

ここで、 $\text{floor}[\eta]$  は、変数  $\eta$  の小数点以下の切り捨てである。

位相 CGH、複素振幅 CGH も同様に標準化、正規化、量子化され、以下の式で表される。

$$H_{Pq}[m, n] = \exp\{j\gamma_p H_{Aq}[m, n]\} \quad (2.30)$$

$$H_{Cq}[m, n] = H_{Aq}[m, n] H_{Pq}[m, n] \quad (2.31)$$

つづいて、キノフォームは以下のように表される。

$$W_p[m, n] = \exp\left\{j2\pi \frac{2^B - 1}{2^B} Q \left[ \frac{\arg(O[m, n]R^*[m, n])}{2\pi} \right]\right\} \quad (2.32)$$

キノフォームは振幅成分を変調できないため、基準となる物体を基に正規化することはできない。

最後に、複素振幅変調はしきい値の基準を  $W_{ref}$  とすると以下の式で表される。

$$W_{ref} \equiv \max[\text{abs}[O_{ref}R^*]] \times 3\sigma \quad (2.33)$$

$$W_c[m, n] = Q \left\{ \frac{\text{abs}(O[m, n]R^*[m, n])'}{W_{ref}} \right\} W_p[m, n] \quad (2.34)$$

本研究では、上記のように定義された CGH を扱う。

## 2.5 ホログラフィーによる 3 次元映像システム

ホログラフィーによる 3 次元映像システムのご概念は 1965 年に提案された [20]。しかしながら、巨大なデータを扱わなければいけないことや、波長程度の微細な画素をもつ SLM が必要であることから、理論は示されたものの実現は困難であると考えられていた。その後、計算法や電子デバイス技術の進化に伴って徐々に研究が活発になり、これらの課題に対して、デバイス開発とシステム開発のアプローチで研究が進められてきた。以下に、従来の研究の概要と現状の課題を示す。

### 2.5.1 表示デバイス開発

2.3 節で述べたように、広視域かつ大画面のホログラフィックディスプレイを実現するには、狭画素ピッチかつ多画素の SLM が必要である。図 2.8 に一般的な SLM の構成を示す。SLM は光の空間的な分布を動的に制御するデバイスであり、アドレス部から制御信号を入力して光変調部の状態を制御し、光変調部で入力光を変調して出力光を出力する。

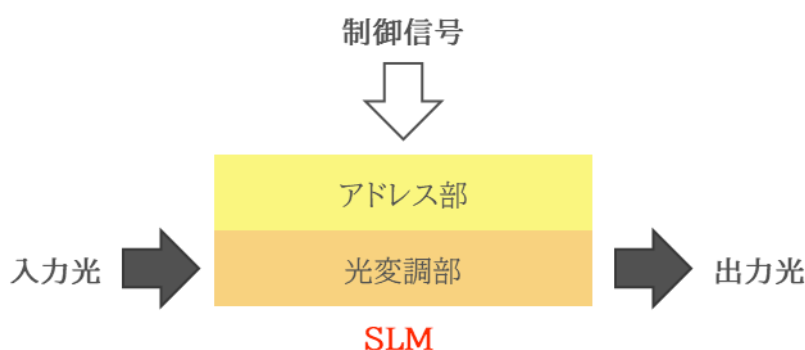


図 2.8 一般的な SLM の構成

アドレス部への信号書き込みには、光信号 [36]や電子銃 [37]など様々な方式が用いられるが、現在はトランジスタ回路を用いて、電氣的に制御信号を入力する方式が主流である [30]エラー! 参照元が見つかりません。、[38]。また、光変調部には、液晶材料 [30]や微小なミラー [38]を用いたものが主流である。以下、各種 SLM を概説する。

液晶 SLM は液晶分子の傾きを制御することで、入射光の偏光や位相を変調する。光の変調特性に優れ、再生像の明るさに影響する回折効率が高い。しかしながら、変調部の状態を維持するためにキャパシターが必要であり、アドレス部のトランジスタ回路が複雑になるという欠点がある。したがって、画素を微細化するには、高性能なトランジスタ回路の設計と開発が必要となる。また、隣接する画素に生じる電界漏れによって画素間のクロストークが問題となる。クロストークを軽減するために、画素間に壁構造を配置する手法や [39]、電界漏れが生じない駆動方式である強誘電性液晶を用いる方法 [40]が提案されている。一般的に使用されるネマティック液晶の応答速度は ms オーダーである。現在市販されている SLM の画素ピッチは  $4 \mu\text{m}$  程度、1辺の画素数は 4k 程度である エラー! 参照元が見つかりません。。また、研究レベルでは画素ピッチが  $1 \times 9 \mu\text{m}$ 、画素数が  $16\text{k} \times 3.2\text{k}$  の SLM が開発されている [41]。

DMD(Digital Micro Mirror Device)は 2 次元的に配置された微小なミラーアレイであり、各ミラーによって入射光の強度を変調するバイナリー型の SLM である。ミラーを用いた SLM であるため、液晶 SLM と同様に光の変調特性に優れたデバイスである [38]。ま

た、数 kHz の高速動作が可能である [42]。高速動作を利用したホログラフィックディスプレイの品質改善については、2.5.2 項で述べる。物理的な可動部を備えるため、狭画素ピッチ化と多画素化には、高精度な作製技術が要求される。以前にサブミクロンスケール化の検討が進められたが、電気的な駆動は実現されなかった [43]。現在市販されている SLM の画素ピッチは  $5.4 \mu\text{m}$ 、1 辺の画素数は QHD 程度である [38]。また最近では、光軸方向にミラーが移動する、Phase Light Modulator が提案されている [44]。この方式では、多階調の位相制御が可能である。

また、我々の研究グループでは、磁気光学(MO)材料を光変調部に用いた、磁気光学式空間光変調器(MOSLM)の研究開発を進めてきた [45]。MO 効果は図 2.9 に示すように、磁性体の磁化方向に応じて、入射光の偏光状態が変化する現象であり、反射光を変調するものを MO カー効果(MOKE)、透過光を変調するものを MO ファラデー効果(MOFE)と呼ぶ [46]。

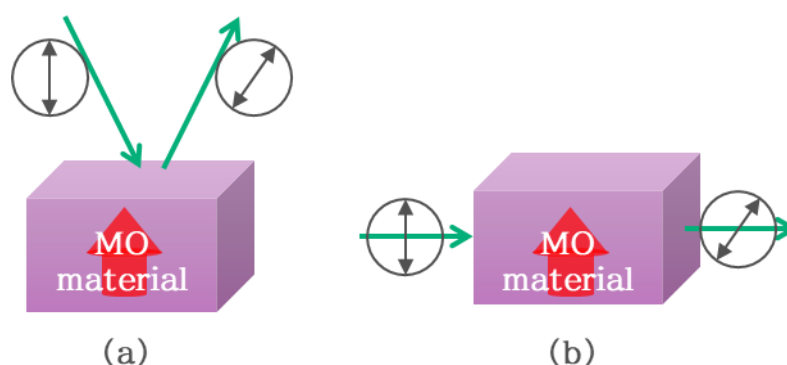


図 2.9 磁気光学効果

(a) カー効果(MOKE)、(b) ファラデー効果(MOFE)

磁性体は不揮発性の特性があるため、画素回路にキャパシターが必要なく、アドレス部のトランジスター回路の微細化に有利である。また、磁化方向の反転は ns オーダーが見込まれるため、高速なフレームレートを有する SLM が期待できる [45]。磁化の状態は上向きと下向きのみであることから階調数は 2 値である。また、MO 効果による偏光の回転角は小さいため、液晶や DMD と比較すると光変調性能は低い。

相変化材料を用いた SLM は、電流注入によって材料のアモルファス状態と結晶状態を制御し、入射光の反射率と位相を変調する。128 × 128 画素の小規模なデバイスが実証されている [47]。MOSLM と同様に微細化や高速化の実現可能性があると考えられている。

AO 材料を用いた SLM は、超音波信号によって材料内に屈折率分布を生じさせ、回折光を出力する [23]。2.2 節で述べたように、1次元の光変調デバイスであるため、水平・垂直

両方の視域を有する 3D 映像を再生することは出来ない。他の SLM と異なり、画素構造がなくアナログ的に光を変調できることから、量子化誤差や不要な次数の回折光が生じないといった利点がある [48]。

代表的な SLM の研究開発動向および特徴を表 2.2 に示す。SLM の高性能化は進んでいるが、2.3 節で示した基本要件を満たす SLM は実現されていない。従来は汎用的な SLM をホログラフィックディスプレイに用いられてきたが、ホログラフィックディスプレイの特性を理解し、ホログラフィックディスプレイに適した SLM の設計・開発が、究極の映像体験の提示には必要不可欠である。

表 2.2 SLM の 研究開発動向および特徴

方式	市販			研究開発		
	液晶	DMD	DMD	液晶	DMD	MO
画素数	3840 ×2160	2716 ×1528	1920 ×1080	16000 ×3200	960 ×540	1000 ×1000
画素ピッチ ( $\mu\text{m}$ )	3.74	5.4	10.8	1×9	10.8	2
微細化	-	-	-	△	△	○
フレームレート (fps)	60	9523	23148	24	5700	-
高速化	-	-	-	△	○	○
変調	位相 8bit	振幅 2 値	振幅 2 値	位相 4bit	位相 4bit	振幅 2 値
光変調性能	-	-	-	○	○	△

## 2.5.2 表示システム開発

2.5.1 項では、現状の SLM の開発状況とその性能について述べた。不足している SLM 性能を光学システムによって補償する研究がこれまでに多く行われてきた。データ量削減の観点では、垂直方向の視差情報を削減する方式 [23],[49]や、観察者の目に入射する光を発するホログラムだけを表示する視点追従方式 [50]が提案されている。また、比較的データ量が少なくてもよいガラス型応用の研究が近年盛んである [51]。視域拡大の観点では、縮小光学系によって画素ピッチを変換する方式 [29]や、高次回折光を利用した方式 [52]、散乱マスクによって回折角を増大する方式 [53]が提案されている。多画素化の観点では、複数の SLM を空間的にタイリングする方式 [54]やフレームレートの高速度性を利用して時間的にタイリングする方式 [55]が提案されている。再生像の高画質化の観点では、

フレームレートの高速性を利用してスペckルノイズを軽減する方式 [56]や、擬似的に複素振幅変調を行う方式 [57]が提案されている。SLM の補正技術として、特に位相変調型液晶 SLM において、基板や液晶層の平坦性など製造上の欠陥から生じる位相誤差を校正する方法が提案されている [58] また、Near-eye ディスプレーの光学系において、視点位置にカメラを設置して再生像を取得し、結果をフィードバックして SLM に表示するパターンを補正する技術が提案されている [59]。

上記のようにさまざまな技術が提案され、ホログラフィックディスプレイの高性能化が図られてきたものの、性能向上にはなんらかのトレードオフが発生するため、デバイスとシステムの両面から研究開発が必要である。また、上述のように、SLM のフレームレートの高速性を利用して大画面化や高画質化など多くの品質改善技術が提案されてきた。ホログラフィックディスプレイにおいて、SLM のフレームレートの高速化は、狭画素ピッチ化と多画素化に並び、デバイス開発の有力な方向性の 1 つである。

また、表示システムとしては、SLM を外部から照射する光源が必要である。波長ごとに異なる干渉縞が形成されるため、再生像のカラー化には RGB3枚のホログラムの再生像の合成が必要である。従来の 2D ディスプレーと同様に、3枚の SLM で再生した映像を空間的に合成するか [60]、1枚の SLM で各再生像を時間的に合成する方法 [61]が一般的である。さらに、0 次光や共役光が発生するため、それらを除去する必要がある。このような、入射光学系および再生光学系の設計が必要である。また、光源に関しては、レーザーのようなコヒーレントな光を利用すると再生像にスペckルノイズが含まれる。一方で LED のような部分的にコヒーレントな光ではスペckルノイズは軽減できるが、再生像にボケが含まれる。再生像の画質と分解能を両立するためには、光源のコヒーレンスの最適化が必要である。

表示システムだけでなく、3 次元映像システムとしての観点では、データの生成、圧縮、伝送についても研究開発が必要である。2.4 節で述べたように、大規模な CGH 生成は計算負荷が大きい。

例えば、画素数が  $128k \times 128k$  の CGH を扱う場合、データ型を複素数の単精度浮動小数点数とし、伝搬計算時のゼロパディングを考慮すると、計算機上での配列の大きさは、 $\text{画素数} \times \text{ゼロパディング} \times \text{データ型サイズ} \times \text{複素数} = 128k \times 128k \times 2 \times 2 \times 4 \times 2 = 512 \text{ GB}$  となる。その後、振幅 8 bit の CGH に符号化したとしても 16 GB の容量となる。このよう大規模な配列の計算を行う必要がある [62]。

また、60 fps のフルカラー動画とすると、 $\text{CGH データ量} \times \text{フレームレート} \times \text{カラー} = 16 \text{ GB} \times 60 \times 3 = 2,880 \text{ GB/s} \doteq 2.3 \times 10^{13} \text{ bps}$  というデータ量となる。最新の映像入出力インターフェースである DisplayPort 2.1 の最大帯域幅は  $8.0 \times 10^{10} \text{ bps}$  であり、CGH 1 枚のデータ入力に 1.6 秒要するため、映像の入出力にも課題がある。

映像伝送については、2つの考え方があるが、まず、このような大規模な計算をサーバーで行ってデータを配信する場合、ホログラフィー専用のシステムとなり汎用性は低い。また、

CGH は自然画像と性質が大きく異なるため、独自の圧縮技術が必要となる。一方、3D データを配信し、クライアント側で CGH データを生成する場合、その他の映像システムと共有できるため汎用性は高いが、現状の計算機性能では上記のような大規模な CGH 計算は困難であり、計算のさらなる効率化が必要となる。

本研究では SLM 開発に主眼を置くが、CGH 生成やデータ入出力、再生光学系などの周辺技術の発展も必要不可欠である。また、デバイス開発においても、このようなシステム上の課題を把握することは極めて重要である。

## 第3章

# 磁気光学式空間光変調器の研究

### 3.1 研究の背景

2.3 節では、電子ホログラフィーにおける SLM の基本要件について、狭画素ピッチかつ多画素の SLM が必要であると述べた。また、2.5.1 項では、SLM の概要と課題について述べ、ホログラフィーによる 3次元映像システムへの応用には、現状では性能が不足していることを示した。様々な方式の SLM が提案されているが、MO 材料を用いた SLM は微細化と高速性に優れているため、ホログラフィックディスプレイの表示デバイスとして適した SLM 性能を実現できる可能性がある。

MOSLM は当初、書き換え可能なホログラム媒体として、1970 年代に提案された [63]-[65]。このとき、アドレス方式としては、光書き込みが用いられ、キュリー温度以上の熱を与えることで干渉縞を書き込んだ。MOSLM では、各画素の磁性体の磁化方向で干渉縞を表現し、MO 効果によって光を回折する。また、1980 年代には、電気アドレス式の MOSLM が開発された [66]。画素の周囲に配置した電極からの誘導磁界によって、光変調部の磁化方向を制御するものであった。画素数は  $128 \times 128$ 、画素ピッチは  $76 \mu\text{m}$ 、フレームレートは  $1 \text{ kHz}$  と、MOSLM の高速性を実証したものであった。その後、磁化反転の低電流化に向けて磁性材料や画素構造の最適化などが行われてきた [67]。

誘導磁界による磁化反転方式はクロストークが避けられないため、MOSLM の狭画素ピッチ化が困難であった。そこで我々の研究グループでは、メモリー分野で研究開発が進められてきたスピントロニクス技術を磁化反転に採用した SLM を提案した [45]。これまでにスピン注入磁化反転を駆動に用いた画素ピッチ  $2 \times 2 \mu\text{m}$ 、画素数  $1\text{k} \times 1\text{k}$  の MOSLM の開発に成功している [68]。

狭画素ピッチ化に伴い、トランジスターから供給可能な電流が小さくなるため、磁化反転の低電流化が必要となる。しかしながら、この SLM は図 3.1(a)に示すように、膜の垂直方向に電流が流れる CPP (Current-Perpendicular-to-Plane) 方式であることから、低電流化を進めるには変調部の面積を小さくする必要があり、開口率が小さくなることから、さらなる狭画素ピッチ化は困難であった。上述の SLM は、光変調部の面積が  $500 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$  であり、開口率は約 6%、磁化反転に必要な電流は  $1.5 \text{ mA}$  であった。一方で、図 3.1(b)に示すように電流が膜面内方向に流れる CIP (Current-In-Plane) 方式であれば、電流が流れる断面積が小さくなるため、低電流での磁化反転が期待できる。また、電流の流

れる経路を長くしても電流量は増えないため、開口率の拡大も期待できる。

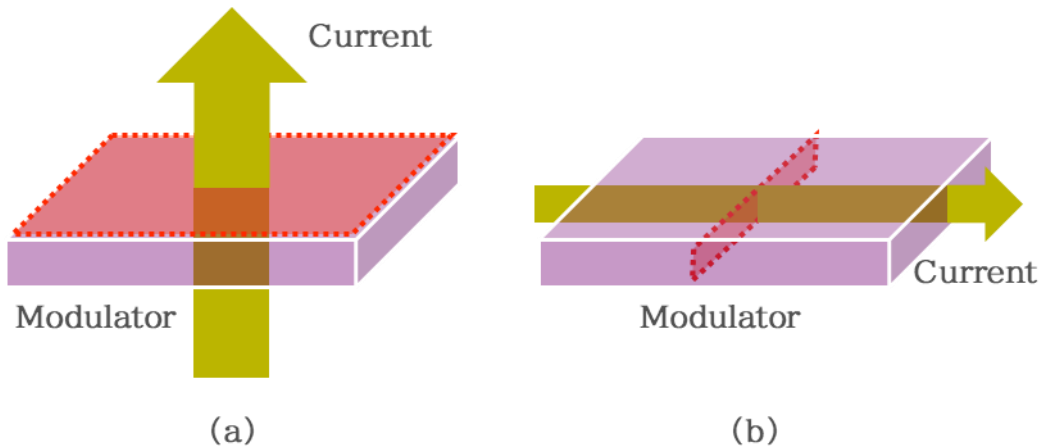


図 3.1 画素に流れる電流経路の違い (a)CPP-type、(b)CIP-type

MOSLM のさらなる狭画素ピッチ化に向けて、我々の研究グループでは、CIP 方式である、電流誘起磁壁移動 [69], [70]によって磁化反転を制御する構造を提案した [71]。電流誘起磁壁移動は、磁性体の磁化方向の遷移領域である磁壁に電子を注入することで磁壁を移動して磁化を反転する技術である。電流誘起磁壁移動もまた、メモリー分野で開発された技術であるため、MOSLM に応用するには、MO 効果が大きな材料を用いる必要がある。また、トランジスターの電流供給量の制約から、低電流での磁化反転が求められる。我々はこれまでに、比較的 MO 効果が大きい Gd-Fe 合金を光の変調部に適用したデバイスを検討し、低電流での磁化反転が可能な組成に最適化している [71]。

図 3.2 に、提案した MOSLM の 1 画素に相当する、電流誘起磁壁移動型光変調素子の構造を示す。この素子は、MOKE によって光を変調する磁性細線(NW)と、NW に磁壁を導入する 2 つのハードマグネット(HM)、素子に電流を注入する画素選択トランジスターからなる。HM はそれぞれ異なる磁化方向に固定されており(反平行磁化配置)、それぞれの HM からの漏れ磁界によって NW には磁区が形成される。NW の磁化方向は電流誘起磁壁移動によって制御され、電子の注入方向に応じて磁壁が移動し、磁区の拡大と縮小が起こる。したがって、画素選択トランジスターからのパルス電流の注入方向によって、素子の磁化方向を制御できる。

電流誘起磁壁移動を駆動に用いた MOSLM は、デバイス構造がシンプルであること、また、CIP 方式であることから SLM の狭画素ピッチ化に適していると考えられる。また、電流は選択した素子のみ流れるため、隣接画素に影響はない。さらにメモリーデバイスでは ns オーダーの磁化反転が実証されており [72]、高速性を利用して高品質化を図ることができる。

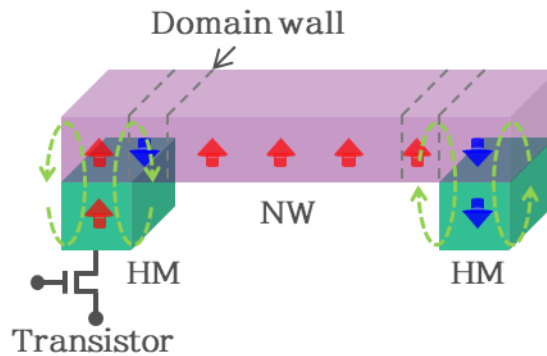


図 3.2 電流誘起磁壁移動型光変調素子の構造

## 3.2 MOSLMによる光変調

MOSLM の研究開発の内容を説明する前に、MOSLM による光の回折について説明する。MO 効果による基本的な回折理論は、初期の光書き込みによる磁気ホログラムの研究で報告されている [64]。磁気ホログラムにおいて、光の回折効率は、MO 材料の反射率と複素カー回転角で決定される。一方で電気アドレス式の MOSLM は、それぞれの画素が分離しており、光アドレス式で表示する磁化によるパターンと異なるため、回折理論の拡張が必要である。

はじめに画素が分離していない、理想的な磁化のパターンを表示した場合の MOKE による光の回折について説明する。図 3.3 に、 $x$  軸方向に磁化方向が交互に並んだ磁化方向による回折格子パターンを示す。ここでは、磁性体は垂直磁化膜であるとする。 $x$  軸方向に偏光した光を入射すると、MO 効果によって磁化方向に応じて偏光が回転する。その結果、異なる磁化方向の領域で反射した光の  $x$  成分は同一であるが、 $y$  成分は反対向きとなる。したがって磁化方向による回折格子パターンは、2 値の位相回折格子のように振る舞う。結果として回折光の偏光面は、入射光の偏光面から  $90^\circ$  回転する。 $x$  成分と  $y$  成分の大きさはカー回転角によって決定し、カー回転角が  $90$  度の時、回折効率は最大となる。しかし実際にはカー回転角は極めて小さいため、入射光を遮蔽して回折光のみを取り出すために検光子(偏光板)を用いる。2値の位相回折格子は、2値の振幅回折格子と回折効率以外は同じ性質であるため、CGH データは 2 値化された振幅 CGH が用いられる。

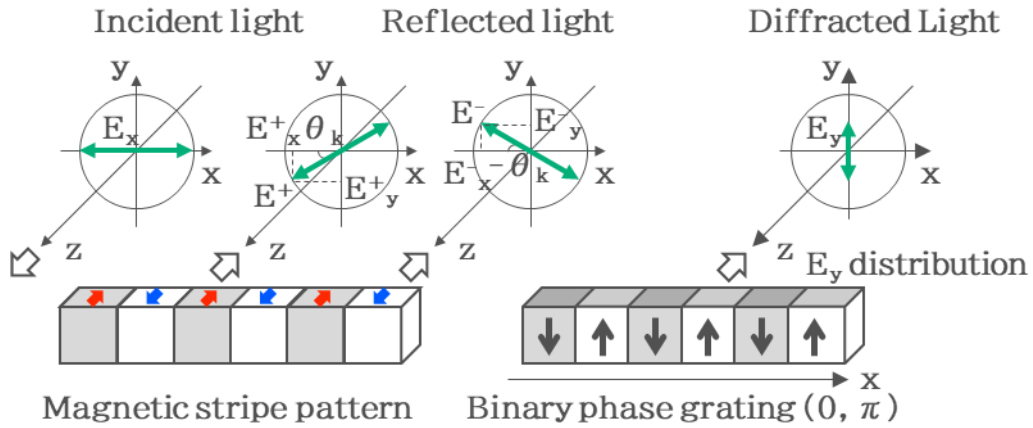


図 3.3 磁化方向による回折格子パターンによる光の回折

次に MO 材料の周囲を絶縁体で囲んだ、電気アドレス式の MOSLM における理論的な回折効率を導出する。1 次元の磁化による回折格子パターンを  $M(x)$  とすると、反射光  $\mathbf{E}_r$  は以下の式で表される。

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_i r \{ \hat{\mathbf{x}} - j C M(x) \hat{\mathbf{y}} \} \quad (3.1)$$

ここで、 $\mathbf{E}_i$  は入射光、 $r$  は振幅反射係数、 $C$  は定数である。電流誘起磁壁移動型 MOSLM は磁性体の周囲が絶縁体で囲まれているため、 $M(x)$  は図 3.4 および以下のように表される。

$$M(x) = \begin{cases} M_s & \left( \frac{p_x - w_x}{2} \leq x < \frac{p_x + w_x}{2} \right) \\ 0 & \left( -p_x \leq x < -\frac{p_x + w_x}{2} \right) \\ & \left( -\frac{p_x - w_x}{2} \leq x < \frac{p_x - w_x}{2} \right) \\ & \left( \frac{p_x + w_x}{2} \leq x < p_x \right) \\ -M_s & \left( -\frac{p_x + w_x}{2} \leq x < -\frac{p_x - w_x}{2} \right) \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで、 $M_s$  は磁化、 $p_x$  はピクセルピッチ、 $w_x$  は NW の幅である。

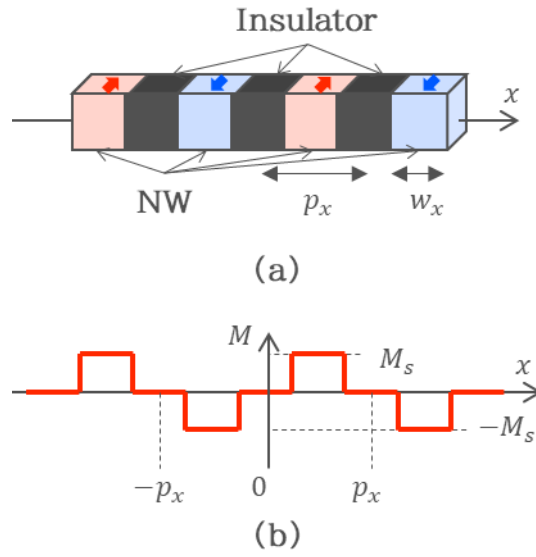


図 3.4 電流誘起磁壁移動型 MOSLM における磁化方向による回折格子

式(3.2)のフーリエ級数展開は、以下のように表される。

$$M(x) = \frac{4M_s}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(-\frac{n\pi}{2} \cdot \frac{w_x}{p_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi x}{p_x}\right) \quad (3.3)$$

したがって、1 次回折光の強度は以下の式で表される。

$$\left|E_r^{1st}\right|^2 = \frac{4|r|^2}{\pi^2} |E_0|^2 |CM_s|^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{w_x}{p_x}\right) = \frac{4R}{\pi^2} |E_0|^2 |\phi_k|^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{w_x}{p_x}\right) \quad (3.4)$$

ここで、 $E_0$  は入射光の強度、 $R = |r|^2$ 、 $\phi_k = CM_s$  であり、複素カー回転角である。 $y$  方向の開口率  $S_y$  を考慮すると、1 次回折効率は以下の式で表される。

$$\eta^{1st} = \left| \frac{E_r^{1st}}{E_0} \right|^2 = \frac{4R}{\pi^2} |\phi_k|^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{w_x}{p_x}\right) \cdot S_y \quad (3.5)$$

したがって、回折効率の増大には、磁性体の反射率、複素カー回転角、開口率の増大が必要である。

また、MO 効果を利用したデバイスの光の利用効率を示す値として性能指数  $FOM$  を以下の式で定義する [46]。

$$FOM \equiv R|\phi_k|^2 \quad (3.6)$$

式(3.5)、(3.6)より、回折効率 $\phi_k$ は性能指数に比例する。

p 偏光の光を磁性体に入射した時、複素カー回転角は以下の式で表される [73]。

$$\phi_k \approx \frac{r_{ps}}{r_{pp}} \quad (3.7)$$

$r_{pp}$  は通常の反射係数、 $r_{ps}$  は MO 効果によって p 偏光を s 偏光に変換する反射係数である。また、反射率  $R$  は、

$$R \approx |r_{pp}|^2 \quad (3.8)$$

である。したがって性能指数は以下の式で表される。

$$FOM \approx |r_{ps}|^2 \quad (3.9)$$

同様の議論は s 偏光の光を入射した場合にも成り立つ。

$$FOM \approx |r_{sp}|^2 \quad (3.10)$$

$r_{sp}$  は MO 効果によって s 偏光を p 偏光に変換する反射係数である。 $r_{sp} = r_{ps}$  は常に成り立つため、性能指数は入射光の偏光方向によらない。

### 3.3 光変調素子の作製と駆動実証

#### 3.3.1 研究の目的・提案手法

3.1 節では、CPP 方式である電流誘起磁壁移動を駆動に用いた MOSLM が狭画素ピッチ化に適した構造であることを示した。これまでに MO 材料を用いた電流誘起磁壁移動型光変調素子で基本動作の検証に成功したものの、そのサイズは  $20 \mu\text{m}$  程度と大きく、微小な素子の作製及び動作は実証されていない。まずはトランジスターからの電流供給ではなく、1 画素に相当する動作検証用の素子を作製することで、MOSLM の実現可能性を示す。

電流誘起磁壁移動型光変調素子はデバイス構造がシンプルであるものの、微小な画素エ

リア内に NW と 2 つの HM を形成する必要がある。また、HM を反平行磁化配置とするため、磁化を反転するために必要な磁界の強さ(保磁力)が 2 つの HM で異なる必要がある。従来、この保磁力差は異なる磁性材料を用いて HM を形成することで実現していた [71]。したがって画素選択トランジスター上へ、①HM1 の形成、②HM2 の形成、③NW の形成の 3 回のリソグラフィプロセスが必要となる。狭画素ピッチ化に伴い、リソグラフィによる位置ズレのマーヅンは小さくなるため、それぞれの重ね合わせは高精度なものが要求される。

もし、異なる保磁力をもつ HM を同一材料、同一プロセス内で形成することができれば、リソグラフィによる重ね合わせ回数を減らすことができる。保磁力の決定要因は様々であるが、磁性体のサイズが大きくなれば、格子欠陥による磁化反転の核生成確率が増し、低保持力になると考えられる。そこで、2 つの HM のサイズを変えることで保磁力を制御できないか検証した。この素子では、NW の長手方向に HM を長くすると光変調部の領域が狭くなるため、短手方向に長くすることとした。

### 3.3.2 実験・考察

HM は NW に磁区を導入するため、磁化方向が NW と同様の垂直磁化膜である必要がある。ここでは、室温成膜可能で、作製が容易である Co/Pd 多層膜を用いた。HM の幅は 100 nm で固定し、長さを 0.3  $\mu\text{m}$  から 300  $\mu\text{m}$  までとした。HM は、表面熱酸化 Si 基板上に、DC マグネトロンスパッタで Co を 3 nm、Pd を 6 nm、25 回積層し、電子線(EB)描画装置でネガ型レジストをパターニングした後、イオンビームミリングで Co/Pd 多層膜を削り、RF スパッタで周囲を SiN で埋戻して、最後にレジストを剥離することで作製した。

長さの異なる HM および Co/Pd 多層膜の保磁力を測定した結果を図 3.5 に示す。HM はそれぞれの長さで 10 個作製し、平均値を求めた。HM 形状への加工前の保磁力は 0.85 kOe であった。HM 形状に加工後、長さ 300  $\mu\text{m}$  では保磁力が 2 kOe、1  $\mu\text{m}$  まで微細化すると保磁力は 6 kOe まで増加した。この結果から、同じ材料であっても HM の長さを変えることで保磁力を制御することができ、HM の反平行磁化配置を実現するために十分な保磁力差を設計可能であることが明らかとなった。

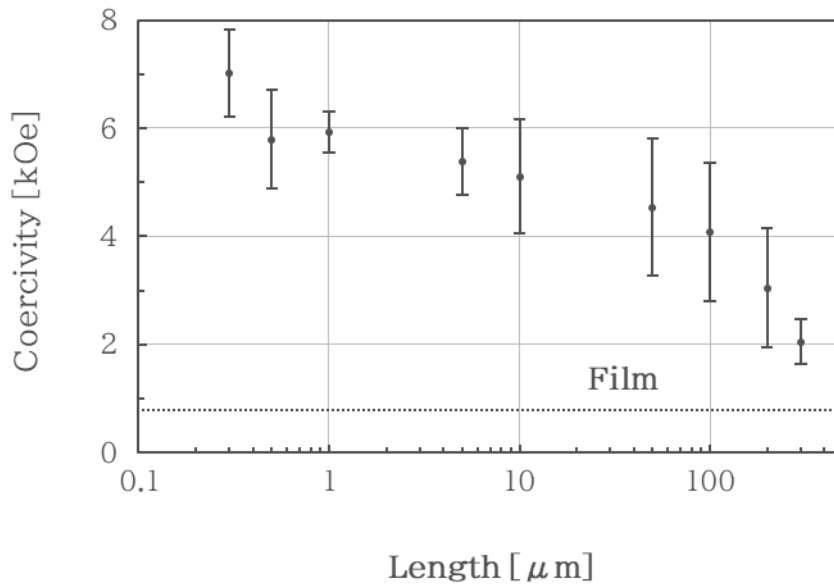


図 3.5 長さの異なる HM の保磁力

上述の HM の保磁力制御技術を用いて、微小な磁壁移動型光変調素子を作製した。HM の長さは、 $300 \mu\text{m}$  と  $15 \mu\text{m}$  とした。動作検証のため、画素選択トランジスタからの電流注入ではなく、電極を外部に作製し、HM を経由して NW に電流を流す構造とした。また、HM 間の距離は  $0.5 \mu\text{m} \times 2.0 \mu\text{m}$  とした。NW は、HM 上にイオンビームスパッタで  $\text{Gd}_{0.24}\text{Fe}_{0.76}$  合金を成膜し、HM と同様のプロセスで形成した。MOKE の大きさを示す値であるカー回転角は、 $658 \text{ nm}$  の光源波長で  $0.15$  度であった。作製した電流誘起磁壁移動型光変調素子の顕微鏡像を図 3.6 に、膜構成を図 3.7 に示す。

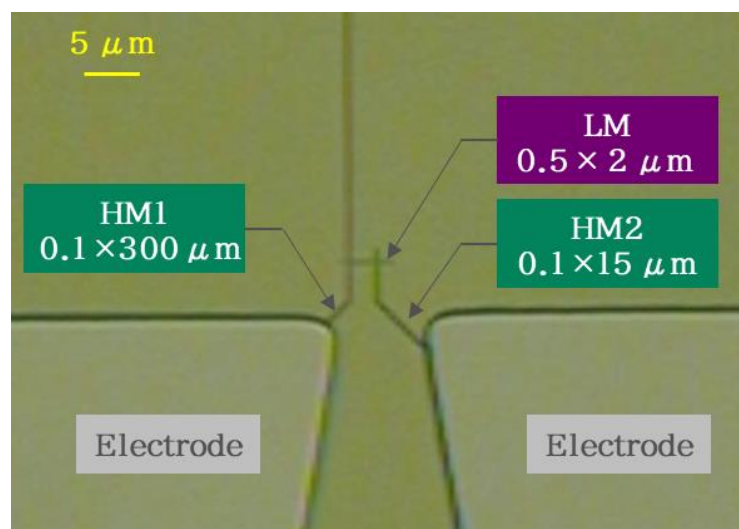


図 3.6 作製した電流誘起磁壁移動型光変調素子の顕微鏡像

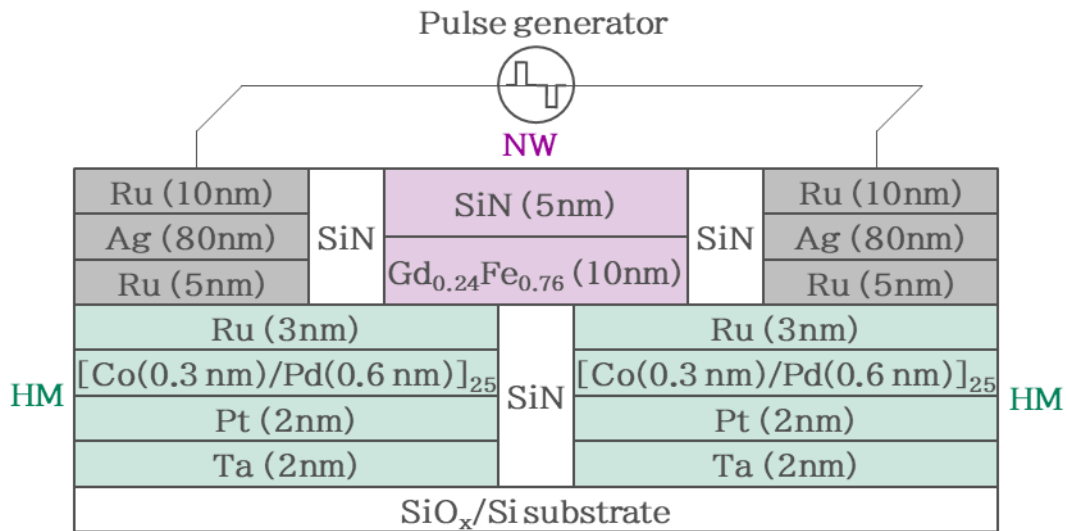


図 3.7 作製した電流誘起磁壁移動型光変調素子の膜構成

図 3.8 に作製した HM のヒステリシスループを示す。長い HM (HM1) と短い HM (HM2) の保磁力はそれぞれ 2 kOe と 5 kOe であった。初めに強い外部磁界を印加し、両方の HM の磁化方向を揃えた後、保磁力の低い HM2 のみが反転するような外部磁界を印加することで反平行磁化配置とした。

HM の反平行磁化配置は、NW のヒステリシスループを測定することで確認できる。HM が反平行磁化配置となっている場合、図 3.9(a) に示すように、磁化反転は磁壁移動によって生じるため、ヒステリシスループは軸に対して対称となり保磁力は低くなる。一方で、HM が平行磁化配置となっている場合、図 3.9(b) に示すように、磁化反転は負の磁界では磁壁移動によって生じるが、正の磁界では一斉磁化反転によって生じるため、ヒステリシスループは軸に対して非対称となり保磁力は高くなる。HM の保磁力制御技術によって、HM を反平行磁化配置とすれば、NW は図 3.9(a) のような特性を持ち、NW 上に磁壁が導入されることから、電流誘起磁壁移動による磁化反転が可能となる。

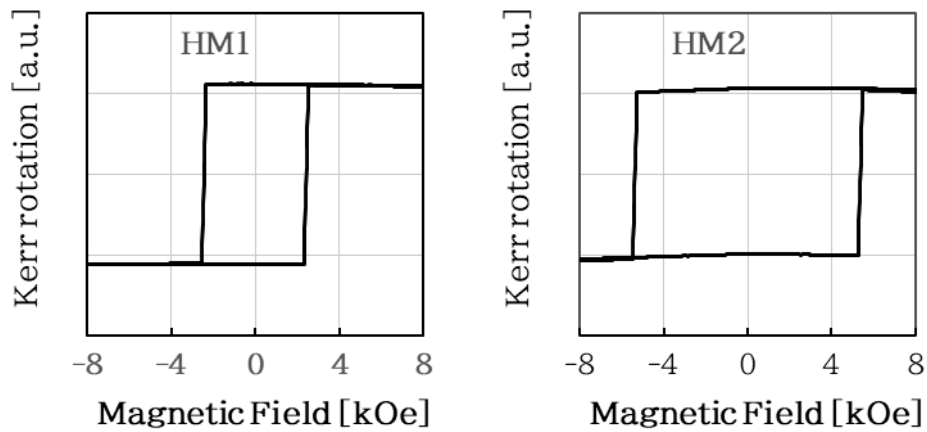


図 3.8 作製した電流誘起磁壁移動型光変調素子の HM の保磁力

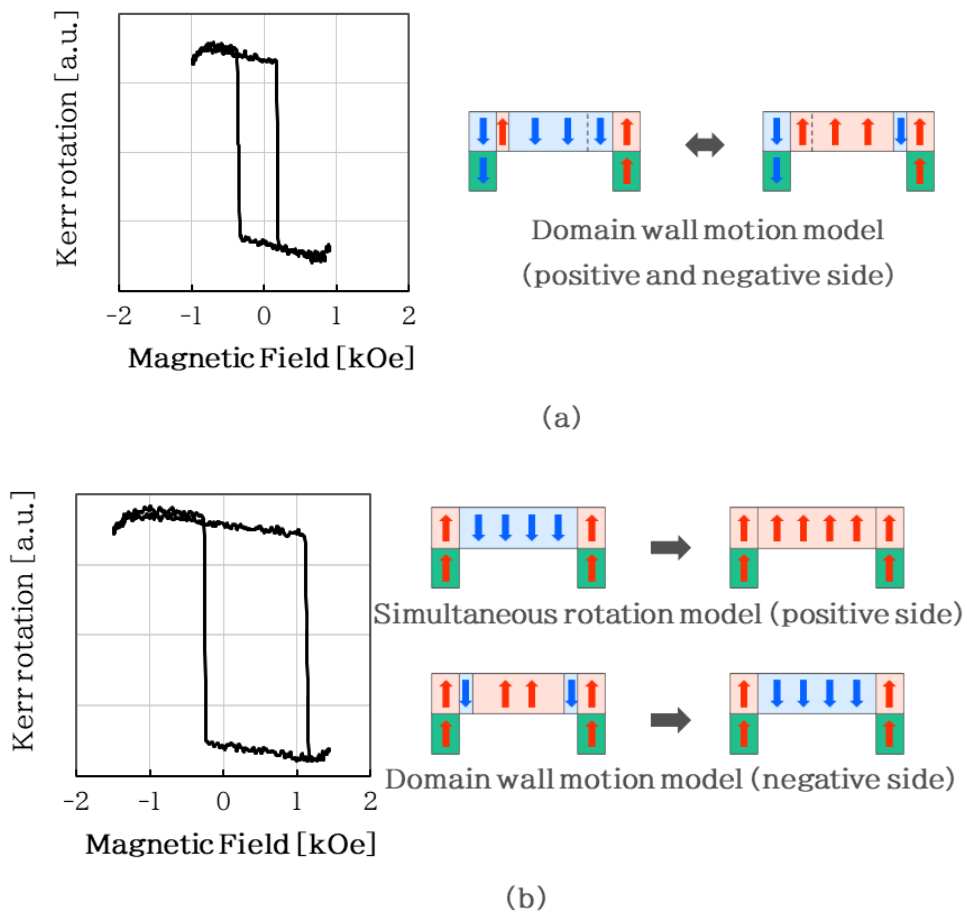


図 3.9 作製した電流誘起磁壁移動型光変調素子の NW のヒステリシスループとその磁化反転メカニズム  
(a)HM 反平行磁化配置、(b)HM 平行磁化配置

電流注入による磁化反転を検証するため、偏光顕微鏡で電流注入前後を撮影し、その差分像を計算した。電流誘起磁壁移動は、注入する電子の数によって磁化反転確率が決定する。注入するパルス電流のパルス幅を  $1 \mu\text{s}$  に固定し、電流量を  $0.6 \text{ mA}$  から  $1.0 \text{ mA}$  の範囲として磁化反転確率を測定した。短い HM から長い HM の方向へ  $0.8 \text{ mA}$  のパルス電流を流したときの偏光顕微鏡の図 3.10(a)に示す。パルス電流注入によって磁化反転が発生し、入射光の偏光面が回転して、偏光顕微鏡の検光子を透過する光が増加している。同様に反対方向に  $0.8 \text{ mA}$  のパルス電流を流した結果が図 3.10(b)であり、検光子を透過する光が減少している。このように、電流の注入方向によって、微小な電流誘起磁壁移動型光変調素子の磁化方向を制御できることを実証した。

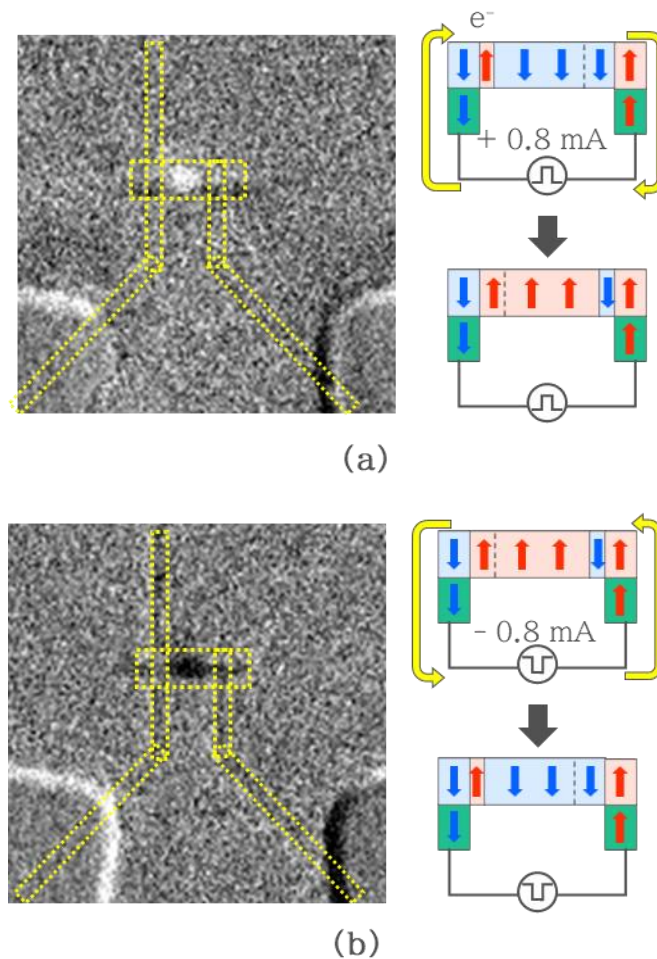


図 3.10 作製した電流誘起磁壁移動型光変調素子にパルス電流を注入したときの偏光顕微鏡差分像  
(a)+ $0.8 \text{ mA}$ 、(b)- $0.8 \text{ mA}$

図 3.11 に磁化反転確率のパルス電流値依存の測定結果を示す。測定毎に素子は磁界によって初期化を行い、各 20 回測定した結果を示す。この結果から、今回作製した素子は、パルス電流値 0.8 mA 以上の電流印加で動作可能であった。なお、1.4 mA 以上の電流を流した時、ジュール加熱により NW 内にマルチドメインが形成され、正しい駆動ができなかった。

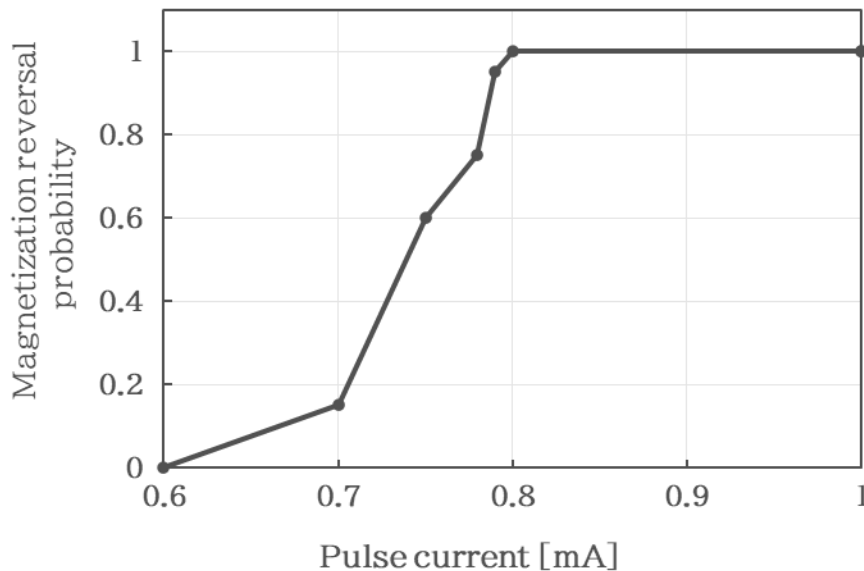


図 3.11 作製した電流誘起磁壁移動型光変調素子の磁化反転確率のパルス電流値依存

0.8 mA という駆動電流は、我々がこれまでに開発を進めてきたスピン注入磁化反転を用いた光変調素子の駆動電流である 1.5 mA より遥かに小さな値である。したがって、 $2 \times 2 \mu\text{m}$  以下の画素ピッチの画素選択トランジスターによる駆動が期待できる。また、従来のデバイスのサイズは  $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$  であり、今回作製したデバイスは  $0.5 \times 2.0 \mu\text{m}^2$  であることから、光の変調領域も遥かに大きい。微小な電流誘起磁壁移動型光変調素子の電流駆動を実証したことにより、SLM の狭画素ピッチ化と高開口率化の可能性を示した。

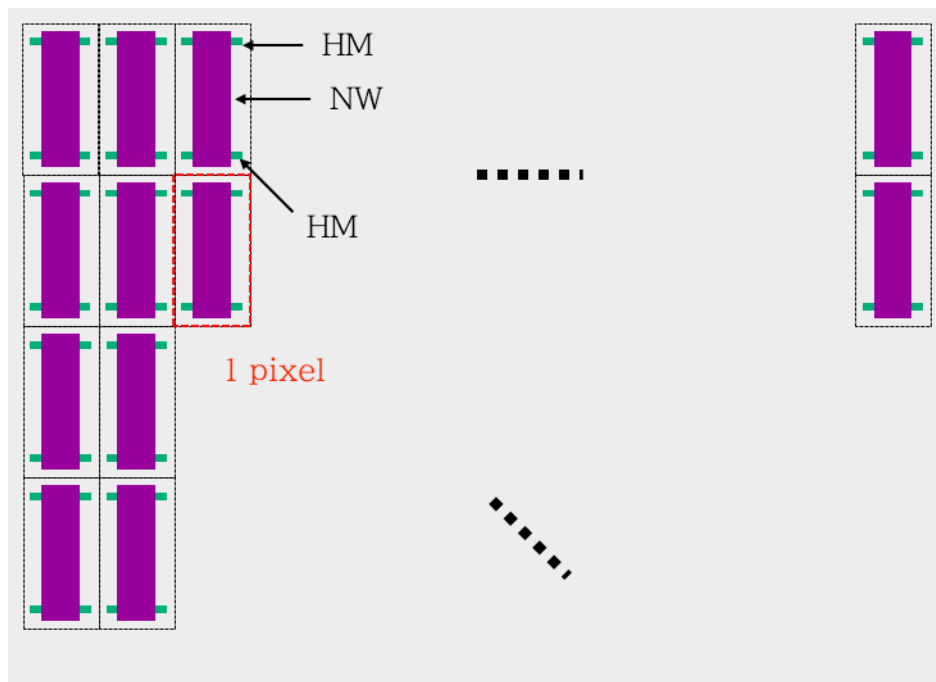
## 3.4 アレイ素子の作製と光変調検証

### 3.4.1 研究の目的・提案手法

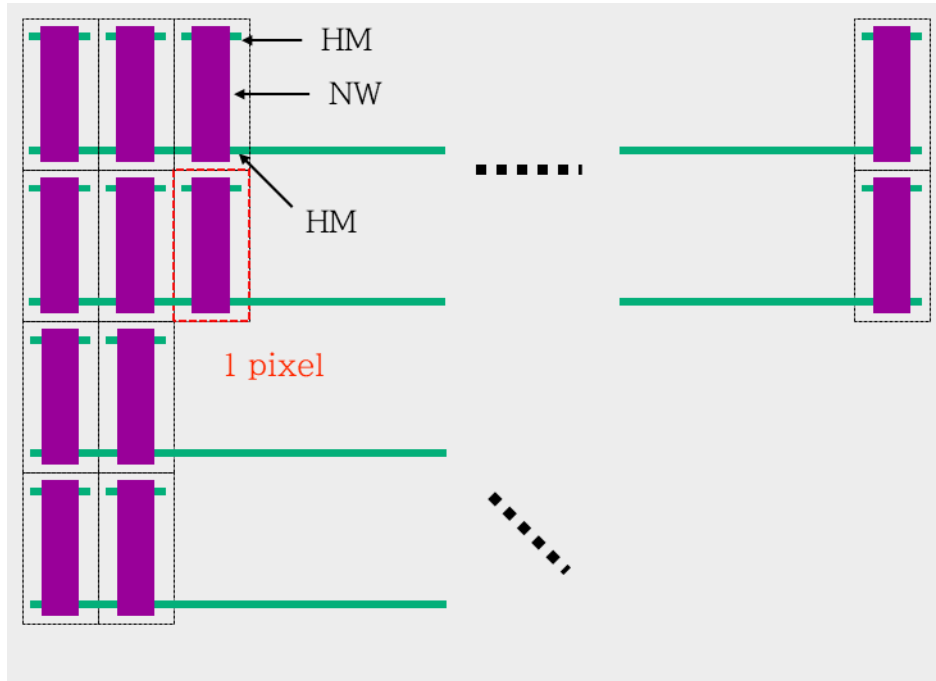
3.3 節では微小な電流誘起磁壁移動型光変調素子を作製し、その光変調動作を実証した。MOSLM を実現するには、素子のアレイ化が必要である。微小な素子からなる高密度なアレイ構造の実現には、3.3 節で提案した HM の保磁力制御技術をアレイ構造に適用する必要がある。また、このような微小な画素からなる MOSLM の光変調性能は明らかではなく、

CGH 再生が可能であるか不明である。そこで、HM 保磁力制御技術を適用したアレイ構造を提案する。また、大規模な画素選択トランジスタアレイの作製には大きなコストを要するため、ここでは Si ウェハ上でアレイ素子を作製するプロセスを構築する。しかし当然ながら、画素選択トランジスタがなければ、磁壁移動型光変調素子を電流注入によって磁化反転することはできない。そこで、磁壁移動型光変調素子の特性を利用することで、画素選択トランジスタからの電流注入ではなく、外部磁界印加によって固定のパターンを表示する検証用素子を作製する。

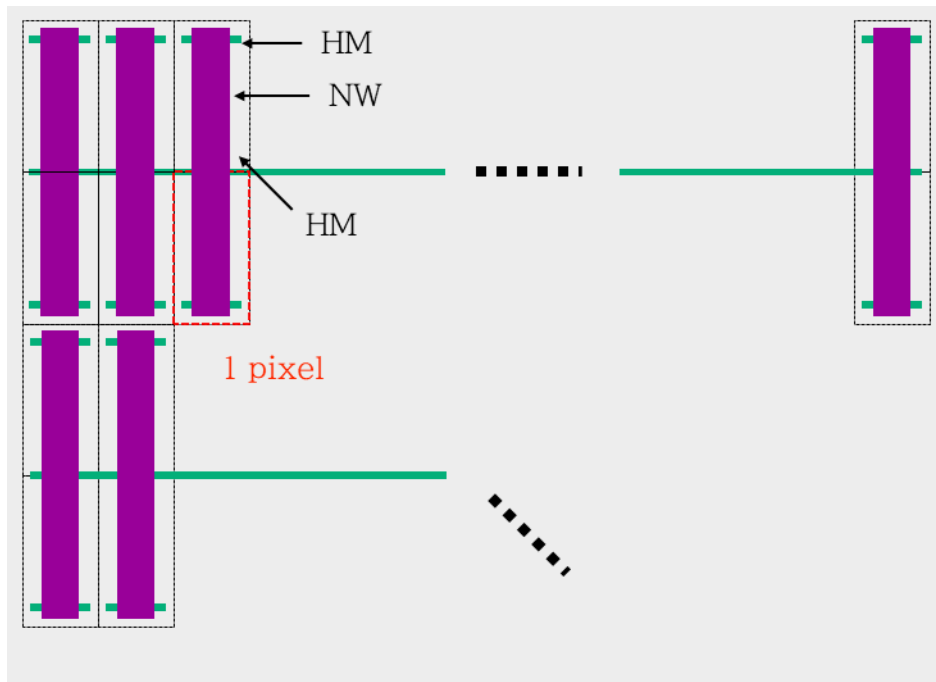
図 3.12(a)に、磁壁移動型光変調素子を 2 次元のアレイ状に並べた MOSLM の上面図を示す。従来、各画素の中に、NW と 2 つの HM を形成することを考えていた。一方、3.3 節で提案した HM の保磁力制御技術は 2 つの HM の長さを変えるものであった。この技術を MOSLM の構造に適用したものが図 3.12(b)である。HM の長さを変え、長い HM は水平方向の隣接画素と共有する。図 3.5 に示したように、例えば HM の長さを  $300 \mu\text{m}$  と  $1 \mu\text{m}$  とすれば十分な保磁力差を設計できる。長い HM には画素選択トランジスタの共通電極をつなげれば、各画素は独立に駆動できる。さらに、図 3.12(c)に示すように、垂直方向の隣接画素に関しても、HM と NW を共通化すれば、光変調領域を拡大することができる。



(a)



(b)



(c)

図 3.12 磁壁移動型 MOSLM の構造

(a)従来構造、(b)HM 保磁力制御技術の適用構造、(c)光変調領域の拡大構造

次に、磁壁移動型 MOSLM の光変調性能を検証するための、提案手法について説明する。図 3.13 に、HM の有無による磁壁移動型光変調素子の外部磁界応答の違いを示す。(a)は通常の磁壁移動型光変調素子である。NW に磁壁が導入されることで、(b)に示すように、NW の保磁力は小さくなる。(c)は NW の両端に HM がない場合である。NW に磁壁が導入されないため、(d)に示すように、NW の保磁力は高くなる。(e)は NW の片側にのみ HM がある場合である。図 3.9 の説明と同様に、ヒステリシスループは非対称となる。

つまり、HM の有無によって、NW の外部磁界応答が変化する。予め表示したいパターンに応じて HM の有無を設計してアレイ素子を作製し、外部磁界を印加するだけで、固定のパターンを表示可能である。したがって、大規模な画素選択トランジスタアレイがなくても、電流誘起磁壁移動型 MOSLM とほぼ同じ構造でその光変調特性を評価することができる。

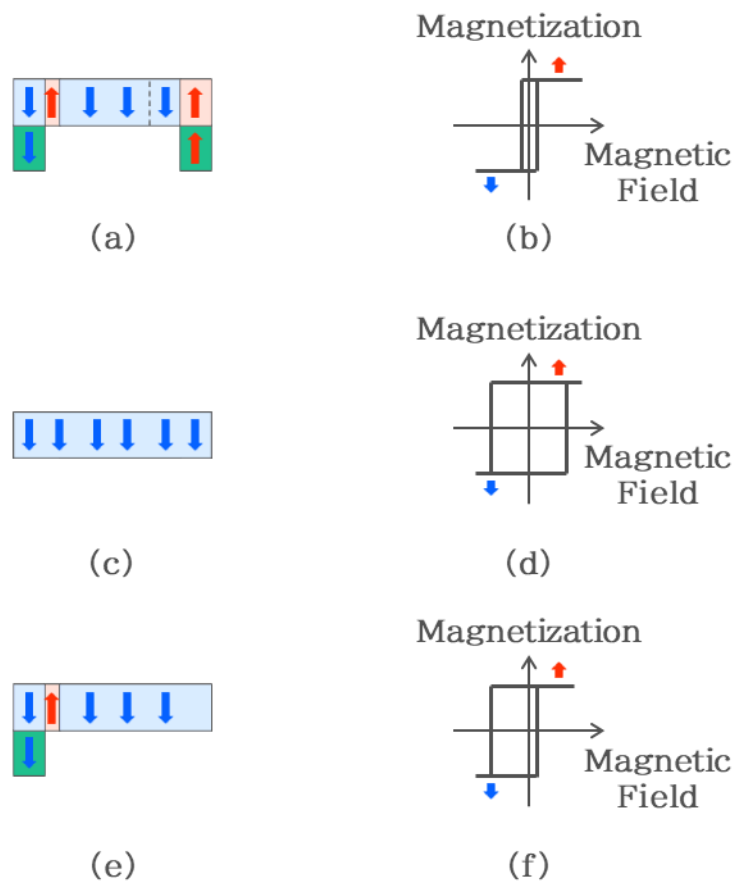


図 3.13 HM の有無による磁壁移動型光変調素子の外部磁界応答の違い

## 3.4.2 実験・考察

HMが両方ある場合、片方のみの場合、両方ない場合のNWを作製した。作製プロセスと材料は3.3節で説明したものと同様である。図3.14に、作製した素子とそれぞれのヒステリシスループを示す。NWの磁化反転が、外部磁界の大きさに制御できることが示された。

-0.1 kOeの外部磁界では、HMが両方あるNWのみが反転し、+0.1 kOeでは、HMが両方または片方あるNWが反転する。

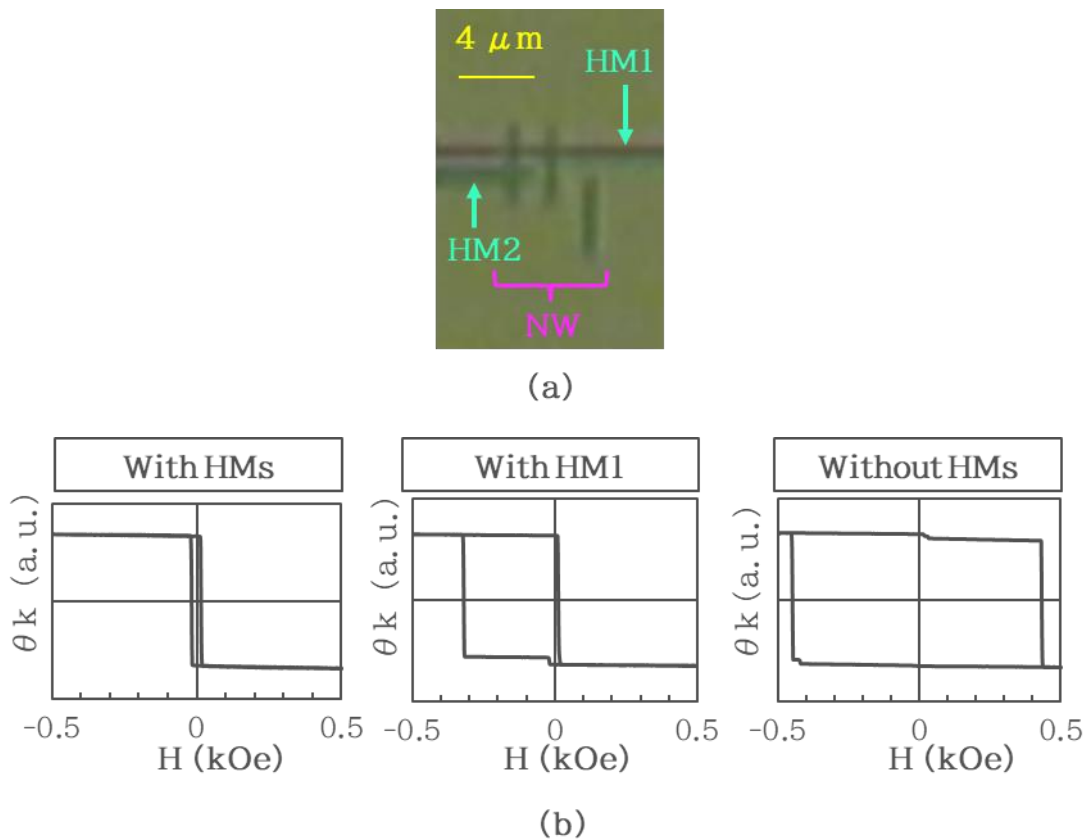


図 3.14 HMが両方ある場合、片方のみの場合、両方ない場合のNW  
(a)作製したNWの顕微鏡像(b)ヒステリシスループ

外部磁化印加によって設計したパターンを表示可能であることを示すため、表示したいパターンの黒画素にはNWにHM2を取り付けた。HM1は全てのNWに取り付けた。アレイ構造は図3.12(c)の構造とし、画素ピッチは $1 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ ピッチとした。NWのサイズは $0.5 \mu\text{m} \times 3.8 \mu\text{m}$ 、HM1のサイズは $0.1 \mu\text{m} \times 599.8 \mu\text{m}$ 、HM2のサイズは $0.1 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ とした。表示するパターンおよび作製した素子のAFM像を図3.15に示す。また、このアレイ素子を作製するにあたり、各種プロセスの条件出しを行った。

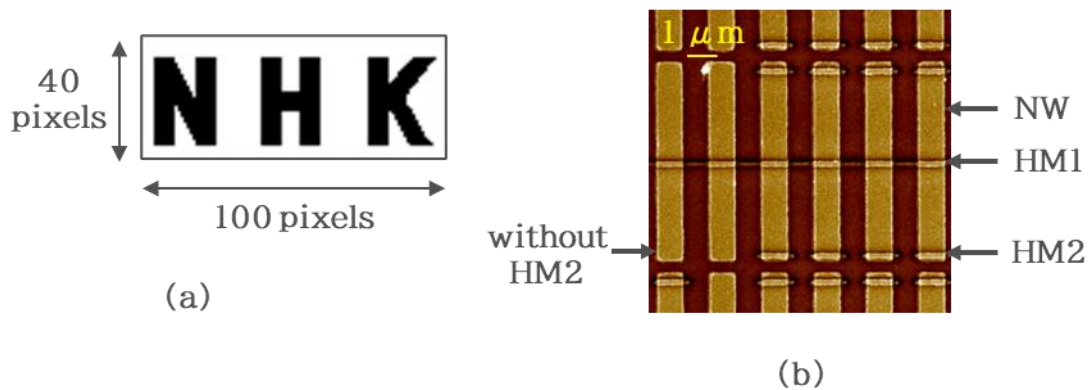


図 3.15 磁壁移動型光変調素子アレイの検証素子によるパターン表示  
(a)表示するパターン(b)作製した素子の AFM 像

作製した素子に  $-0.1$  kOe の外部磁界を印加して HM2 のある NW の磁化方向のみを反転し、偏光顕微鏡で撮影した結果を図 3.16 に示す。外部磁化印加により、固定のパターンを表示可能であることを示した。

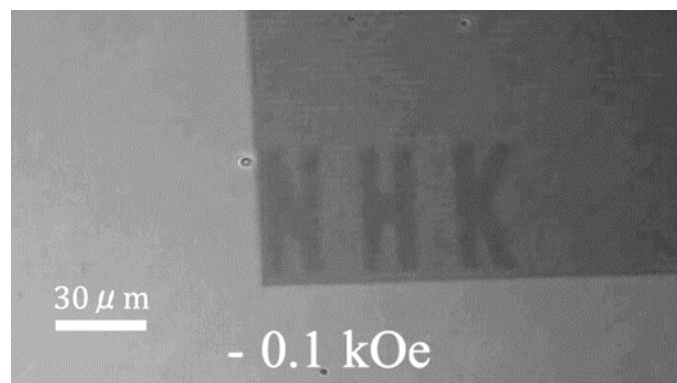


図 3.16 磁壁移動型光変調素子アレイの検証素子による  
2D パターン表示の偏光顕微鏡像

次に光の回折性能を評価するため、1 次元の回折格子パターンを表示する素子を作製した。作製した素子に、波長  $632.8$  nm の He-Ne レーザーで光を入射し、その回折光を測定した。作製した素子の AFM 像および回折光の取得光学系を図 3.17 に示す。

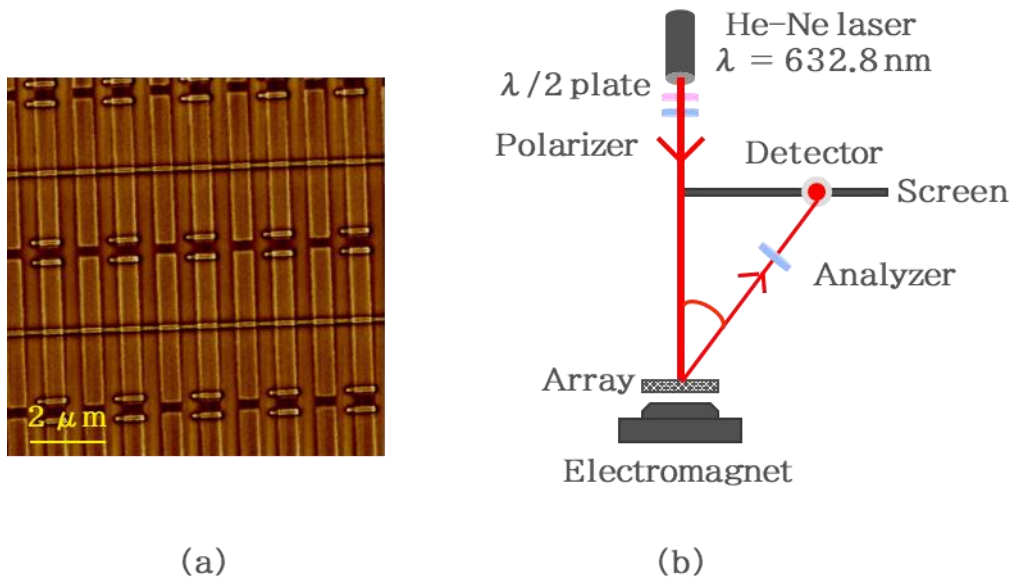
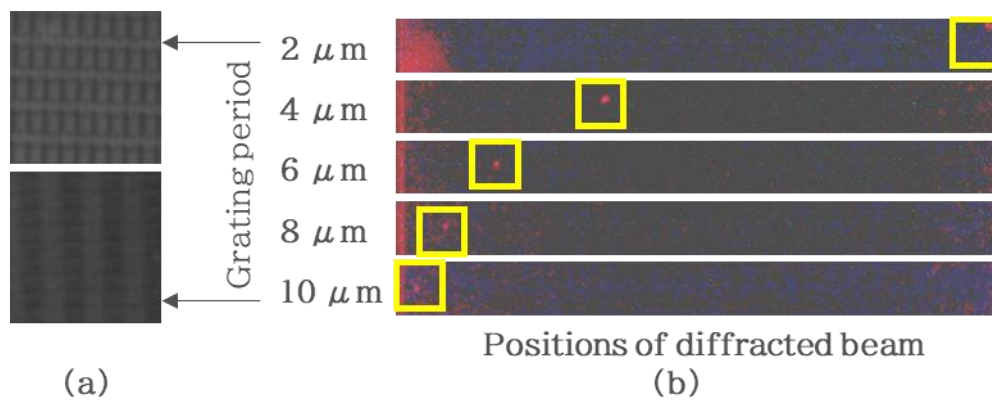


図 3.17 磁壁移動型光変調素子アレイの検証素子による光回折実験  
 (a) 1次元回折格子パターンを表示する検証素子の AFM 像  
 (b) 回折光の取得光学系

まず、表示する回折格子の周期が 2, 4, 6, 8, 10  $\mu\text{m}$  のものを作製し、その回折角を測定した。図 3.18 に結果を示す。表示した周期に応じて、回折光の位置が変化し、回折角は理論値と一致した。



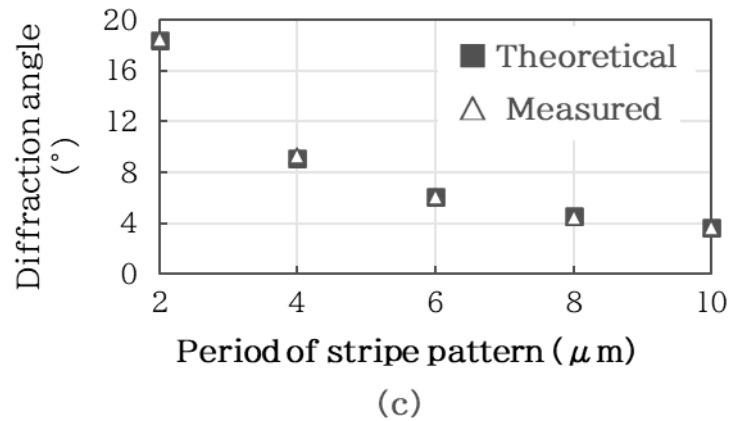


図 3.18 回折格子の周期による回折角の違い

(a)表示した回折格子の偏光顕微鏡像(b)スクリーンに投影した回折光

(c)回折角の理論値と測定値

次に、周期  $2 \mu\text{m}$  の回折格子で、NW の幅を変えて、それぞれの回折効率を測定した。図 3.19 に結果を示す。NW の幅を太くすることで、開口率が大きくなるため、回折効率は改善した。NW の幅は太いほうが望ましいが、電流による磁化反転では、より大きな電流が必要となるため、画素選択トランジスタから供給可能な電流量によって制限される。

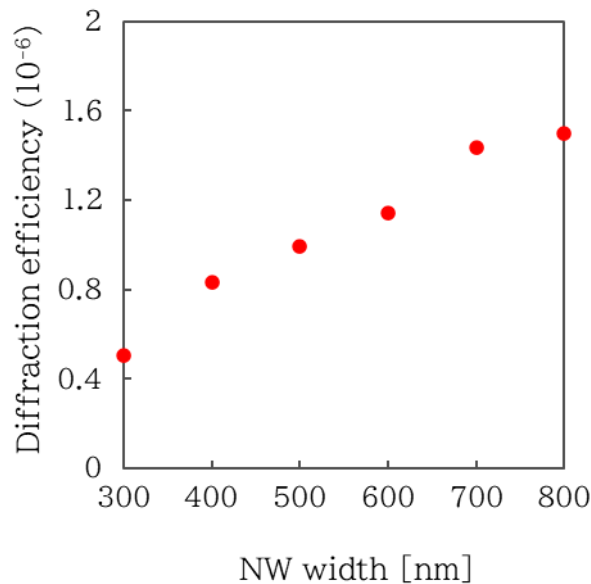


図 3.19 回折効率のNW幅依存

つづいて、図 3.13 で示した 3 つの状態を用いて、2 種類の回折格子周期を表示可能な

パターンを作製した。図 3.20 に設計のデザインと、外部磁化印加時の表示パターンを示す。この素子にレーザー光を入射し、回折光を撮影した様子を示す。外部磁界印加によって異なる周期のパターンが表示され、異なる位置に光が回折されることが実証された。

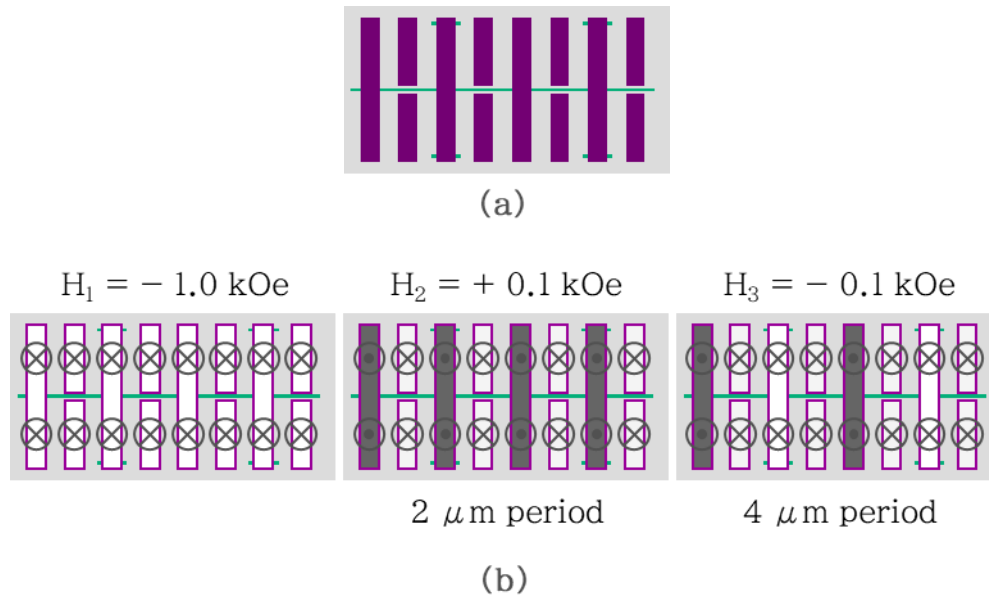


図 3.20 2 種類の回折格子パターンを表示する検証素子  
(a)デザイン (b)磁界応答

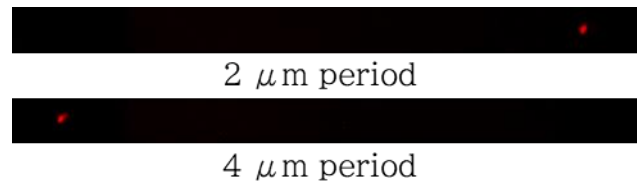


図 3.21 2 種類の回折格子パターンを表示する検証素子による回折光

最後に、CGH パターンを表示する検証素子を作製し、レーザー光で再生した。作製した素子のパラメーターを表 3.1 に、記録した 3D オブジェクトの配置を図 3.22 に示す。CGH は点群モデルから作製した。

表 3.1 検証素子による CGH のパラメーター

画素数	10k × 10k
画素ピッチ	1 × 2 μm
CGH サイズ	10 × 20 mm
波長	632.8 nm

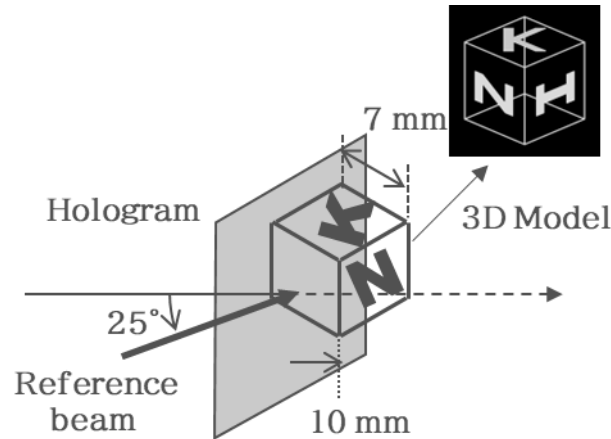


図 3.22 磁壁移動型光変調素子アレイの検証素子に表示する CGH に記録した 3D オブジェクトの配置

CGH を再生する光学系を図 3.23 に示す。波長 632.8 nm の He-Ne レーザーをエキシマレーザーで拡大し、偏光子で偏光方向を揃えた光を、作製した素子に照射して再生した。素子の背面には電磁石が設置されており、外部磁化の印加によって磁化方向によるパターンの表示と非表示が制御可能である。再生した映像のうち、MO 効果によって回折した光のみを取得するため、検光子を取り付けたカメラで撮影した。

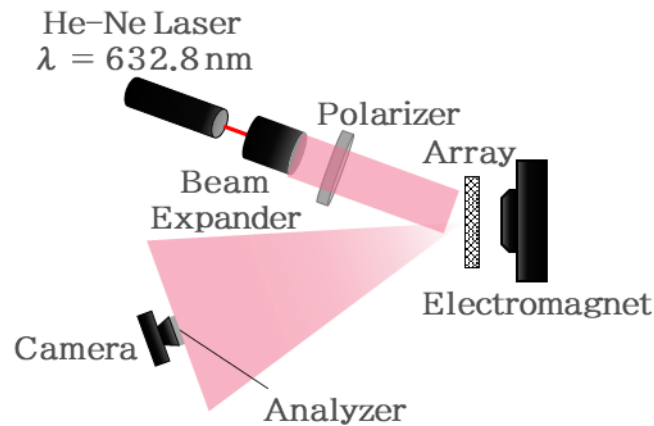


図 3.23 磁壁移動型光変調素子アレイの検証素子に表示した CGH の再生光学系

再生した CGH を様々な位置から撮影した結果を図 3.24 に示す。視点位置の移動により、再生像の見え方が変化し、運動視差が再現されていることが分かる。このように、磁壁移動型光変調素子をアレイ状に並べた素子により、磁化方向で表示した CGH の再生が可能であることが実証された。また、水平方向に  $1 \mu\text{m}$ 、垂直方向に  $2 \mu\text{m}$  と狭画素ピッチ化を実現したことにより、水平方向に  $36^\circ$ 、垂直方向に  $18^\circ$  の広い視域を実現した。この検証素子は事前に設定した固定のパターンしか表示できないが、磁壁移動型 MOSLM とほぼ同様の構造であり、このようなデバイス構造で光変調が可能であることを示した。通常の構造の磁壁移動型光変調素子を画素選択トランジスター上に形成することで、任意のパターンを表示して光変調ができる MOSLM の実現が期待される結果となった。

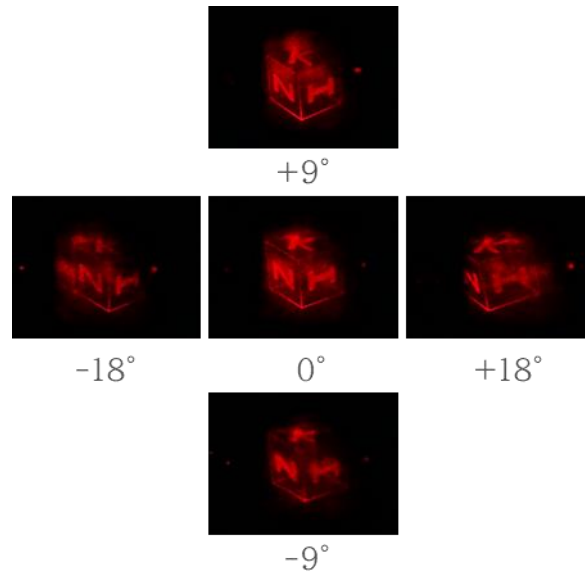


図 3.24 磁壁移動型光変調素子アレイの検証素子による CGH の再生像

## 3.5 多重反射による回折効率の改善

### 3.5.1 研究の目的・提案手法

3.4 節では、電流誘起磁壁移動型 MOSLM の構造を模した検証用デバイスで CGH の再生に成功したものの、回折効率が低く明るい像の再生は困難であった。回折効率の改善には、3.2 節で説明したように性能指数の改善が必要である。

NW は図 3.25 に示すように、磁性体が薄く透明な絶縁体に挟まれた多層膜構造となっており、入射光は各界面で反射と透過を繰り返す(多重反射)。したがって、光の入射角や絶縁体の厚みによって多重反射の条件が変化し、性能指数が変化する。参考文献[74]では、Gd-Fe 合金の誘電率テンソルを求めるため、異なる保護層材料(Si-N, Ru)を用いて Gd-Fe 合金の多層膜構造の光学特性を評価している。Si-N を保護層としたとき、特定の波長領域では Si-N 層内部での多重反射によりファブリペローのような共振が生じ、MOKE が増強された。共振領域では、MOKE による偏光の回転角は増大する一方で、光吸収が増大して反射率が減少すると想定される。したがって、それらの積から示される性能指数を指標とすることで、利用効率を最大化することができる。多重反射による MOKE の増大は、反射光の利用効率の改善に用いられているが、回折光への影響は明らかではない。多重反射の条件を最適化することで、性能指数を増大し、回折効率を改善できないか検討した。また、このような微小な画素からなる MOSLM の光回折特性は不明であり、詳細に解析した。

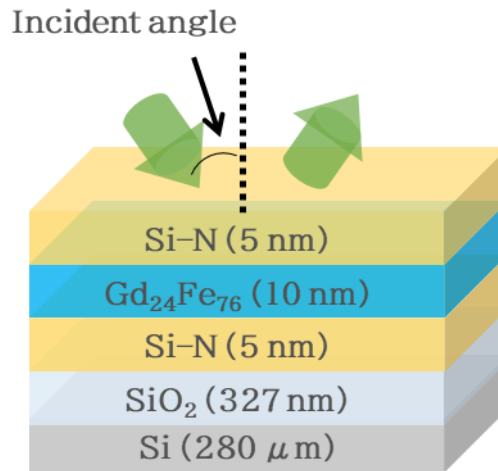


図 3.25 NW の膜構成

### 3.5.2 実験・考察

磁性体を含む多層膜構造の光解析シミュレーターである MM Research 社の Multilayer [74]で NW の性能指数を計算した。Gd-Fe 膜の誘電率テンソルは参考文献 [74]の値を使用した。磁性体周囲の絶縁層である Si-N の光学定数は J. J. A. Woollam 社の M-2000 で測定した。基板である Si と SiO<sub>2</sub> の光学定数は参考文献 [76]および [77]の値を使用した。なお、このシミュレーションは、多層膜の無限平面構造で計算されており、デバイス構造は考慮されていない。

はじめに、NW 上部の絶縁体層であるキャップ層の厚みを 5 nm から 30 nm まで 5 nm ステップで、入射光の波長は可視光領域である 380 nm から 780 nm を 1 nm ステップで変化させた。入射角は 0°とした。つぎに、660、532、473 nm の波長に関して、入射角 0°から 15°まで 1°間隔で変化させた。シミュレーション結果をそれぞれ図 3.26、図 3.27 に示す。

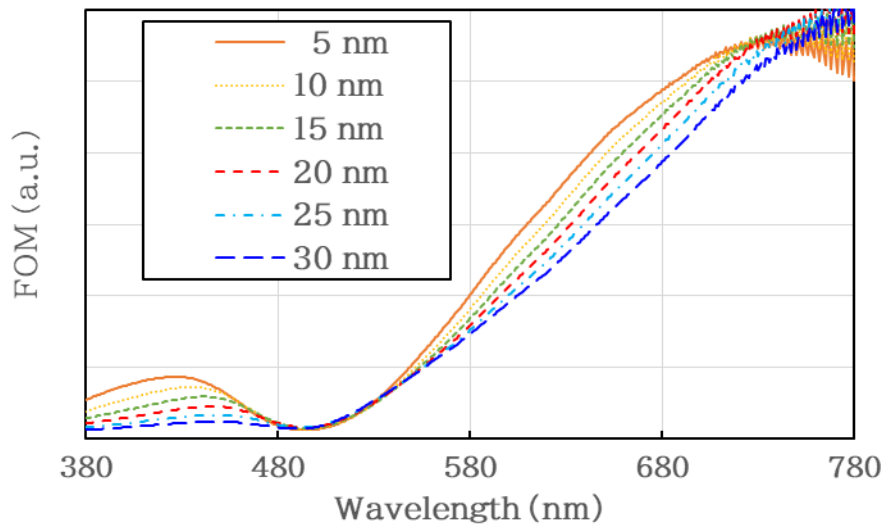
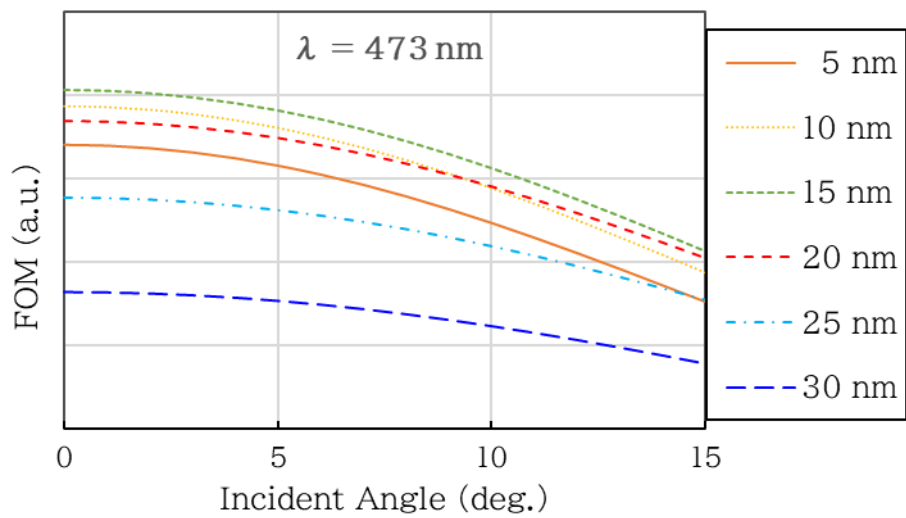
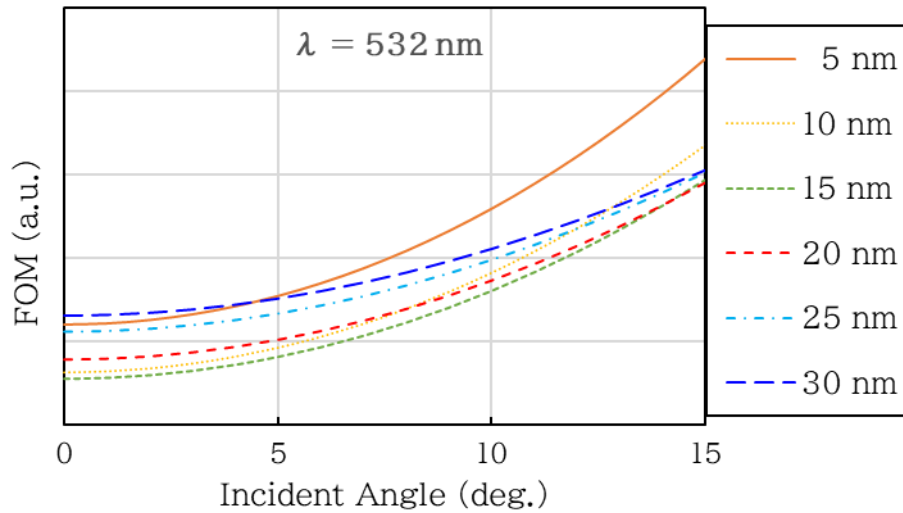


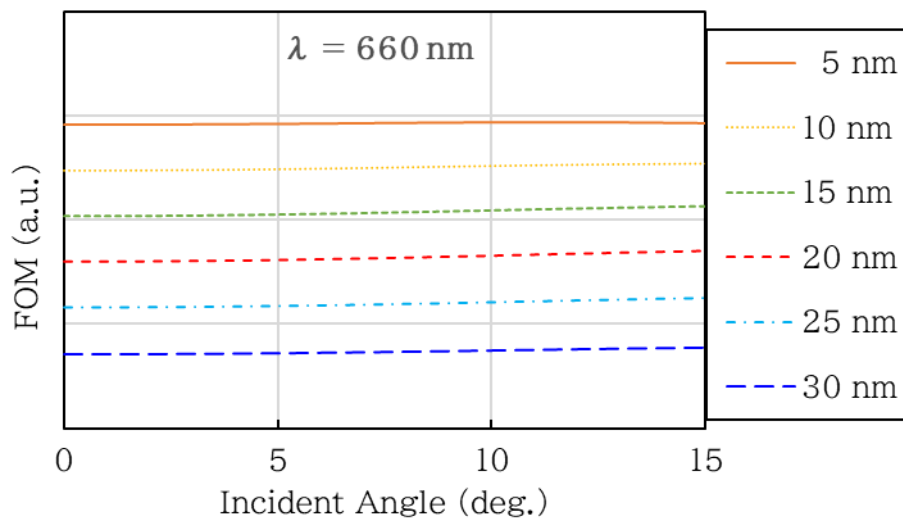
図 3.26 光解析シミュレーターによって計算した磁壁移動型光変調素子の性能指数の波長・キャップ層厚み依存



(a)



(b)



(c)

図 3.27 光解析シミュレーターによって計算した磁壁移動型光変調素子の性能指数の入射角・キャップ層厚み依存  
(a) 660 nm、(b) 532 nm、(c) 473 nm

可視光領域ではほとんどの波長でキャップ層が薄いほど性能指数が大きくなる結果となった。入射角に対する応答は波長によってさまざまであり、多重反射による性能指数の増大は、波長ごとの設計が必要であることが確認された。

次に、3.4 節で提案した検証素子で、磁化方向による 2 次元回折格子を表示する素子を作製し、その回折効率を測定した。図 3.28 に作製した素子の概略図と表示する 2D 回折格

子パターンを示す。NW や HM の作製プロセスや材料、寸法などは 3.4 節と同様である。

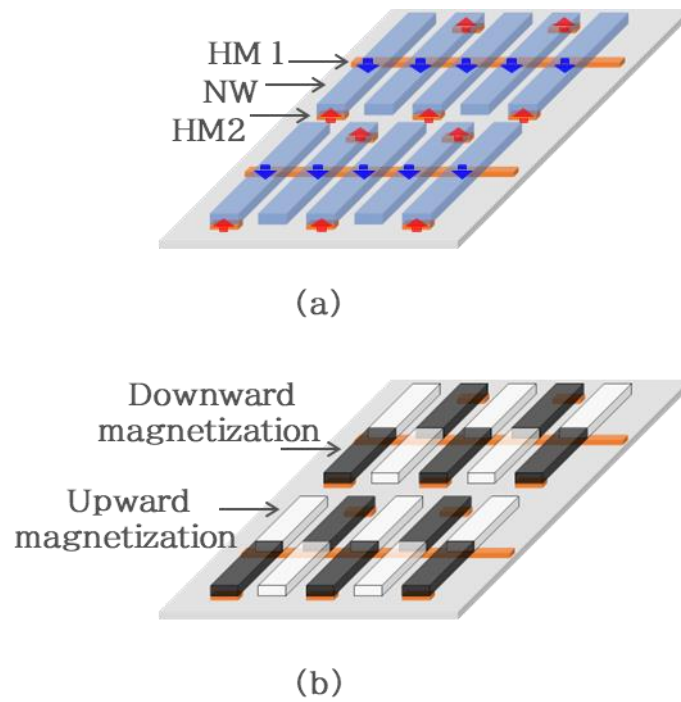
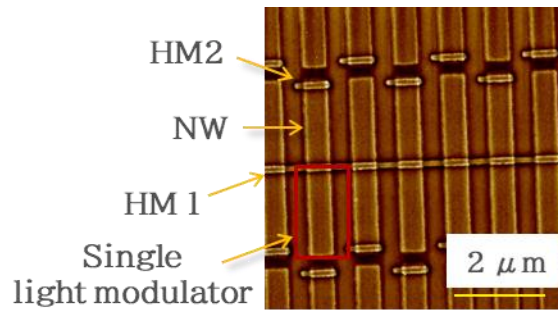
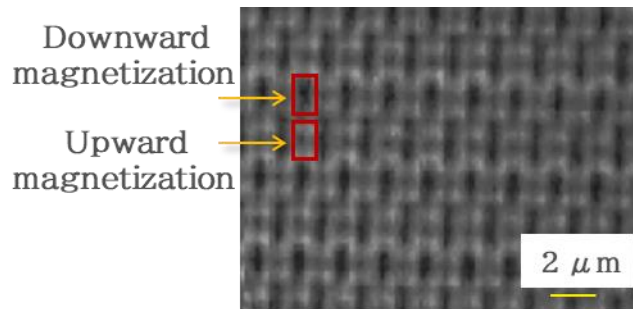


図 3.28 磁壁移動型光変調素子アレイの検証素子による 2D 光回折実験  
(a) 概略図、(b) 磁化方向による 2D 回折格子

図 3.29 に、作製した素子の AFM 像、および素子に  $-0.1$  kOe の外部磁界を印加して表示した 2D 回折格子の偏光顕微鏡像を示す。



(a)



(b)

図 3.29 磁壁移動型光変調素子アレイの検証素子による 2D 光回折実験

(a) 作製した素子の AFM 像、(b) 作製した素子の偏光顕微鏡像

作製した素子の 1 画素は微細であり、NW の光変調部の複素カー回転角の測定は困難であるため、NW 形状への加工前の状態で複素カー回転角を測定した。光源波長は 532 nm、入射角は 5°、10°、15°、偏光は p 偏光とした。結果を図 3.30 に示す。複素カー回転角は Si-N 層が薄いほど高い結果となった。

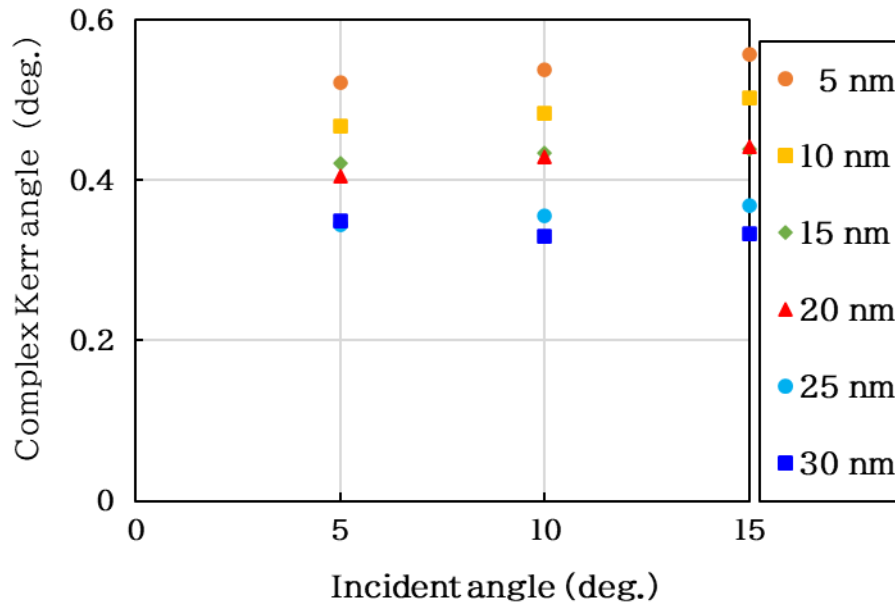
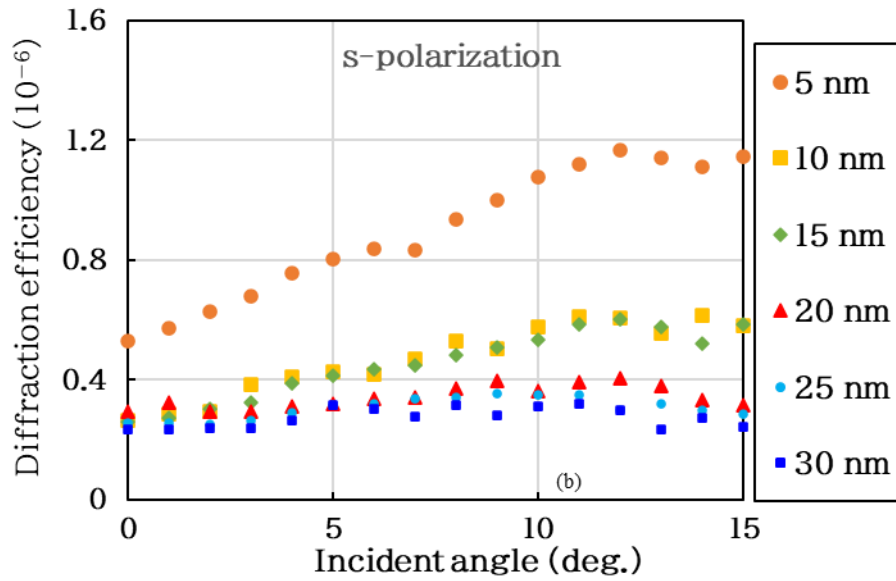
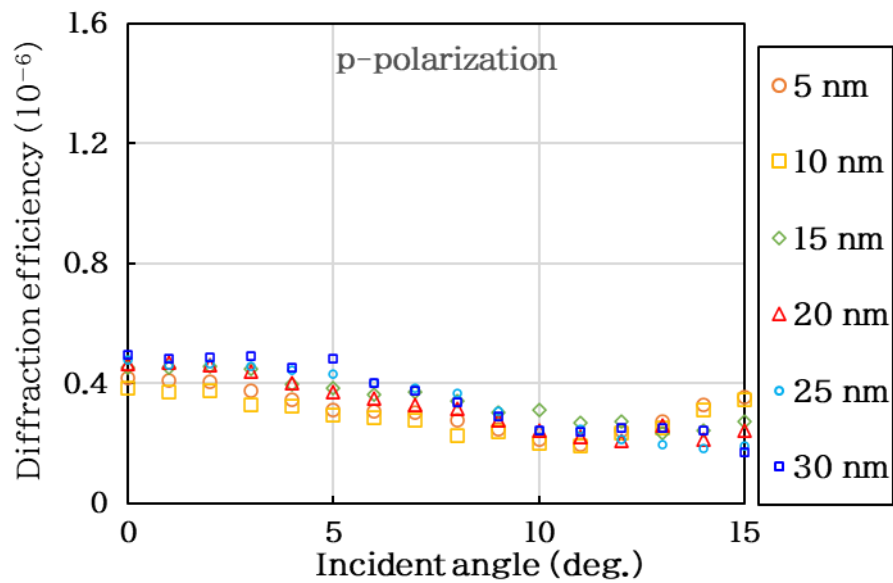


図 3.30 複素カー回転角の測定結果

つづいて、作製した検証素子の回折効率を測定した。光源波長は 532 nm とした。結果を図 3.31 に示す。性能指数には偏光依存がない一方で、作製した素子の回折効率には偏光依存が生じた。今回作製した素子は、画素ピッチが波長程度であり、また、画素形状が正方形ではないことに起因していると考えられる。この素子では、NW の長手方向に偏光した光の方が、回折効率が高くなった。また、回折効率は性能指数と同様に、キャップ層の厚みが薄く、光の入射角が大きい時に最大となった。なお、キャップ層は、磁性体の酸化を防ぐための機能も担うため、薄層化には限界がある。また、光の入射角は、ホログラフィックディスプレイへの応用を考えると、最大回折角以下で光を入射する必要があるため、今回は 15°以下とした。これらの条件の下で、多重反射条件を最適化するとともに、偏光方向についても最適化することで、狭画素ピッチの MOSLM では回折効率を改善できることが明らかになった。また、図 3.26、図 3.27 に示したように、このような多層膜構造において性能指数には波長依存が存在する。2.5.2 項で述べたように、再生像のカラー化の際、1枚の SLM で時間的に RGB3 枚の再生像を合成する場合は、3 つの波長で最適化すべきであることに注意が必要である。



(a)



(b)

図 3.31 磁壁移動型光変調素子アレイの検証素子による 2D 光回折実験  
回折効率の測定結果 (a) s 偏光、(b) p 偏光

### 3.6 MOSLM の開発とホログラム再生

これまでの研究成果を基に、画素選択トランジスタアレイ上に、電流誘起磁壁移動型光変調素子を作製した。なお、素子の膜構成や作製プロセスは上記の研究の中で最適化した

ものである。SLM の作製および評価は研究グループで分担して行ったため、ここでは主に担当した CGH 再生の結果を示す。作製した電流誘起磁壁移動型 MOSLM の性能を表 3.2 に、外観図と顕微鏡像、SEM 像を図 3.32 に示す。画素ピッチは世界最小、画素数は世界最大規模の性能である。

表 3.2 SLM の性能

画素ピッチ	$1 \times 4 \mu\text{m}$
画素数	$10,000 \times 5,000$
画面サイズ	$10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$
階調数	2 値
フレームレート	0.2 Hz

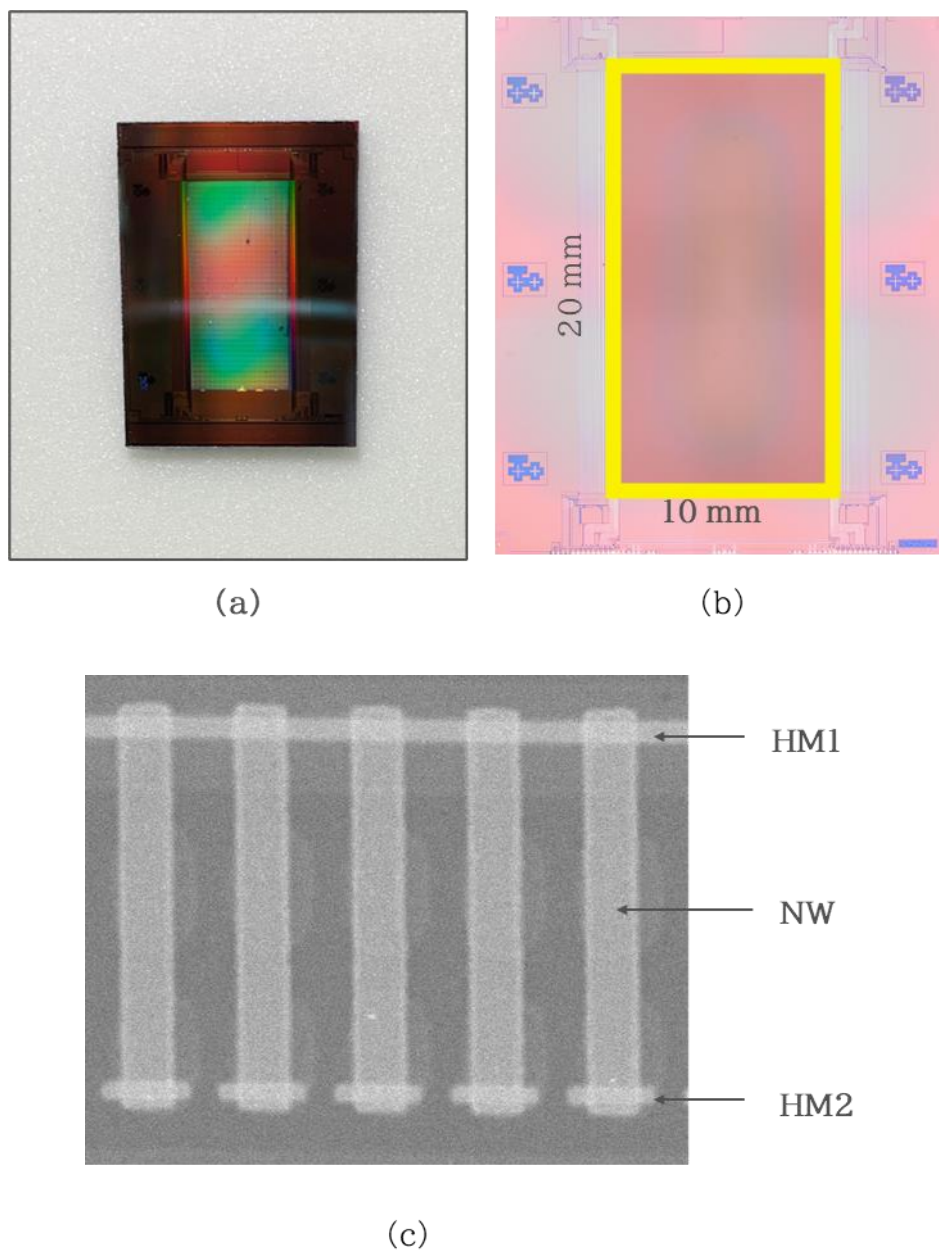


図 3.32 作製した磁壁移動型 MOSLM  
(a) 外観図、(b) 顕微鏡像、(c) SEM 像

図 3.33 に CGH の再生光学系を示す。波長 532 nm のレーザーをエキスパンダーで拡大し、ミラーで入射角を制御して SLM へ入射する。PC 上の CGH データを駆動回路とプロブカードを経由して SLM へ書き込んだ。また、SLM の裏に電磁石を取り付けて磁化方向を初期化できるようにした。

図 3.34 に再生する 3D オブジェクトの配置を示す。この 3D オブジェクトを記録した

CGH を磁壁移動型 MOSLM に表示し、SLM に光を入射して再生した。CGH は点群モデルから作成した。

図 3.35 に水平方向に視点位置を変えながら再生像をカメラで撮影した写真を示す。画素選択トランジスタからの電流注入により、磁壁移動型 MOSLM の各画素の磁化方向を制御し、磁化方向によって表現した CGH を再生できることを実証した。また、視点位置の移動により、運動視差が再現されていることが分かる。水平方向の画素ピッチが  $1 \mu\text{m}$  と狭画素ピッチ化を実現できたことにより、水平方向に約  $30^\circ$  の広い視域を実現することに成功した。

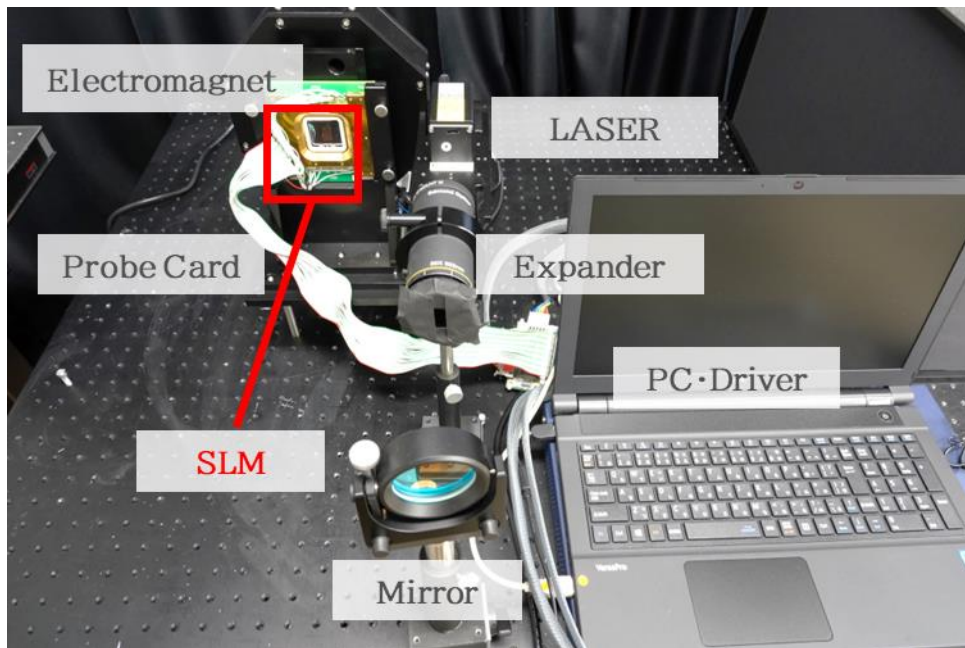


図 3.33 磁壁移動型 MOSLM の CGH 再生光学系

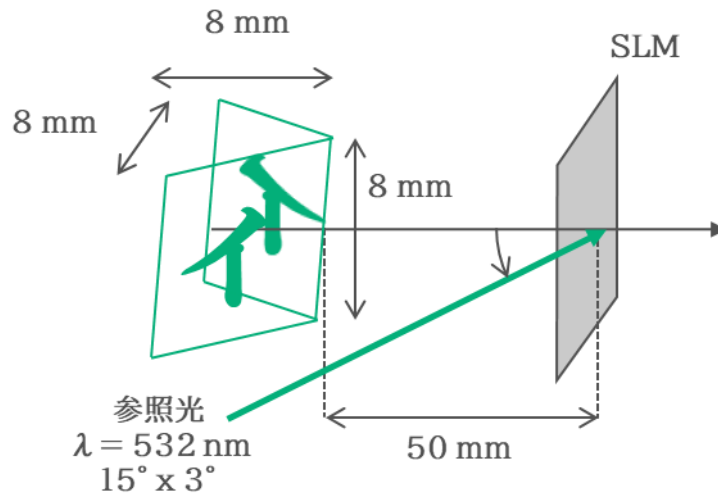


図 3.34 磁壁移動型 MOSLM に表示する CGH に記録した 3D オブジェクトの配置

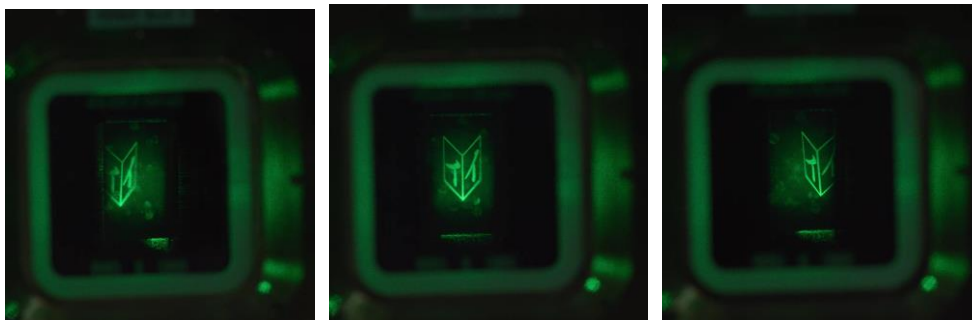


図 3.35 水平方向に視点位置を変えながら撮影した再生像

### 3.7 本章の結論

従来の SLM よりも狭画素ピッチ、多画素な SLM の実現を目指し、電流誘起磁壁移動型 MOSLM の研究を推進した。単素子の作製、動作実証から始まり、アレイ化、回折効率の改善を経て、最終的に SLM としての動作を実証した。作製した SLM は、世界最小の画素ピッチ及び最大規模の画素数を持ち、水平方向に約 $30^\circ$ の広い視域を実現した。

提案・設計・作製・動作実証を経て、明らかになった課題及び今後の展望をまとめる。

#### (i) 垂直方向の広視域化

今回作製した SLM は画素が縦長の構造であり、垂直方向の広視域化が望ましい。縦長の構造としたのは、HM の上部は光変調に寄与しないため、光変調領域を確保することが主要因である。光変調領域を拡大するために、磁壁の位置を制御する技術が提案されている [78]。

## (ii) フレームレート的高速化

3.3 節の動作検証では、1 画素は  $1 \mu\text{s}$  のパルス電流で駆動できた。しかし、作製した SLM では  $50 \mu\text{s}$  程度のパルス電流が必要となり、フレームレートが低下した主要因となった。SLM では画素選択トランジスター上に素子を作製するが、単素子の場合と異なり、わずかな段差が存在するため、磁壁移動により大きなパルス幅が必要になったと考えている。

MOSLM に必要な磁壁移動速度は画素の光変調領域の大きさで決定する。磁壁移動方向の開口領域を  $2 \mu\text{m}$  と仮定すると、パルス幅が  $1 \mu\text{s}$  のとき、速度は  $2 \text{ m/s}$  が必要であり、参考文献 [71] では、同じ素子構造において、この磁壁移動速度は電流  $14 \text{ MA/cm}^2$  で達成された。パルス幅が  $50 \text{ ns}$  のとき、速度は  $40 \text{ m/s}$  が必要であるが、最大速度は  $12 \text{ m/s}$  であり、電流  $28 \text{ MA/cm}^2$  で達成された。 $2 \mu\text{m}/(12 \times 50 \text{ ns}) = 3.33$  回パルスが必要である。電流量は  $28/14=2$  倍の増加に対し、パルス印加時間は  $1000/(50 \times 3.33)=6$  倍縮小された。したがって、駆動電流の増加に対して、フレームレートを大きく改善可能である。トランジスターの性能向上による駆動電流の増大と、基板の平坦化による磁壁移動の促進により、フレームレートが改善できると考えられる。

また、この SLM は電流で駆動するデバイスであるため、複数の画素を同時に駆動すると大きな電流が流れる。画素選択トランジスター回路に流すことができる電流には制限があるため、画面全体を一度に切り替える面一括駆動は困難であり、線順次駆動が必要となる。線順次駆動の画面切り替え中は前フレームのデータが残るため正しい像を再生できない。また、線順次駆動の場合、フレームレートは同時に駆動可能な画素数と駆動回路のクロック周波数に制限される。今回開発した MOSLM は、クロック周波数が  $50 \text{ MHz}$ 、データの並列入力数が  $200$ 、並列書き込み数が最大  $1000$  画素であり、駆動には  $50 \mu\text{s}$  のパルス電流が必要であった。したがって、データ転送時間は、全画素 ( $10\text{k} \times 5\text{k}$ ) / 並列入力数 ( $200$ ) / クロック周波数 ( $50 \text{ MHz}$ ) =  $5 \text{ ms}$ 、データ書き込み時間は、全画素 ( $10\text{k} \times 5\text{k}$ ) / 並列数 ( $1000$ )  $\times$  パルス幅 ( $50 \mu\text{s}$ ) =  $2.5 \text{ s}$  必要であった。各画素に  $0.8 \text{ mA}$  流れたとすると、並列書き込みによって全体では  $0.8 \text{ A}$  流れる。駆動電圧は  $2.5 \text{ V}$  であり、常にデータを書き込んでいたとすると、デバイスの消費電力は  $2 \text{ W}$  であった。また、フレーム周期よりデータ書き換え時間を小さくすることができれば、低消費電力化が図れる。近年、電圧によって磁化反転を制御する研究が報告されており、今回のような多画素なデバイスでは有望な技術である [79]。

## (iii) 大画面化

世界最大規模の画素数ではあるものの、画面サイズは不十分である。第 2 章で述べたように、ホログラフィックディスプレイでは視域と画面サイズはトレードオフの関係にあり、SLM の狭画素ピッチ化によって画面サイズを大きくすることができなかった。また、画素選択トランジスターのような微小なデバイスは半導体露光装置によって回路パターンを露光するが、作製可能な素子のサイズは最大露光面積で決定するため、微細なパターンを大面積に描画す

ることは困難である。したがって、ホログラフィックディスプレイの大面积化には、抜本的な半導体作製プロセスの改良、または、小さな SLM を複数並べるタイリングによる CGH 再生技術 [54], [55]が必要となる。

(iv)回折効率の改善

今回 NW の材料に採用した Gd-Fe 合金のカー回転角は  $0.15^\circ$ 程度であり、理想的な  $90^\circ$ には程遠いものであった。3.5 節で提案した多重反射により数倍の改善は見込まれるものの、数桁レベルの改善が必要である。MO 効果の大きな材料の研究が進められている [80]-[82]。

上述のようにいくつかの課題は残されているが、それぞれの課題に対する研究も進められている。今回、電流誘起磁壁移動を駆動に用いた光変調素子の研究を推進することで、従来にない性能の SLM を実現し、広視域のホログラフィックディスプレイを実証した。

---

## 第4章

# CGH 再生像の評価技術に関する研究

---

### 4.1 研究の背景

第 3 章では、ホログラフィックディスプレイの広視域・大画面化を目指し、新しい SLM を提案・実証した。ホログラフィックディスプレイの視域・画面サイズと SLM の画素ピッチ・画素数の関係性およびその基本要件については第 2 章で説明した通りである。視聴形態によってそれぞれの要求は異なると考えられるが、具体的な値については明らかになっていない。また、SLM に表示するのは CGH であるが、観察者が見るのは CGH の再生像である。SLM の表示特性と再生像の画質の関係性は明らかではない。具体的には、SLM の変調方式や階調性が再生像の画質にどのような影響を及ぼすかは明らかではない。また、再生像に含まれるノイズを時間方向に積算することで平均化する手法が知られている [56]。観察者の臨界融合周波数以上に高速積算することができれば再生像の画質を改善することができる。このように、ホログラフィックディスプレイに要求される SLM は現状明らかではない。しかし当然ながら、理想的な SLM は現状存在しないため、SLM の要求性能を導出するには、SLM を模擬した CGH の再生像評価方法を確立する必要がある。第3章では、MO 効果を用いた SLM に関する研究について説明したが、本章では MOSLM に限定しない。将来の SLM がどうあるべきかを示すために、さまざまな SLM を評価対象とする再生像評価技術を提案する。本研究では 2 種類のアプローチで研究を推進する。

はじめに、計算機上での CGH 再生シミュレーションによる再生像の評価方法を提案する。シミュレーションであるため、任意の SLM 性能を想定することができる。一方で、計算結果は数値データであるため、主観的な評価は困難である。

2 つめに、現状の SLM では表示困難な性能の CGH を静止画として作製する技術を提案する。模擬可能な性能は作製技術によって限定されるものの、実際に光学再生が可能であるため、主観的な評価が可能である。

これらの技術が確立されれば、SLM 開発の高度化・加速化が見込まれるとともに、CGH 生成方法や CGH データ圧縮方法など、CGH に関するあらゆる分野への波及が期待できる。

## 4.2 シミュレーションによる再生像評価

### 4.2.1 CGH の再生シミュレーション方法

ホログラフィーは、これまでに述べたように、深い奥行きに 3D 映像を表示可能である。したがって、CGH の再生シミュレーションでは、従来の 2D ディスプレーと異なり、3D 空間での観察者の位置や注視点を調整できなければならない。また、3D 空間で物体を観察する場合、注視点から離れた位置の物体はデフォーカスされるため、そのような効果も反映されなければならない。また、ホログラムの種類によっては、0 次光や共役光などの不要な光が発生し、再生像の観察を妨害することがあるため、それらの再現も必要である。さらに、コヒーレンス光で CGH を再生する場合、観察者の瞳開口に起因するスペckルノイズの発生を再現する必要がある。

CGH を計算機上で再生する方法はこれまでにいくつか提案されている [83]-[85]。ここで、ホログラフィックディスプレイ用の CGH 再生と、デジタルホログラフィーで取得したホログラムの再生の違いには注意が必要である。1 つめに、ホログラフィックディスプレイでよく用いられる振幅ホログラムやキノフォームは実数のデータであるが、デジタルホログラフィーでは複数枚のホログラムを撮影し、複素数のデータに変換する方法がよく用いられる [86]。このようなデータのホログラムを再生する場合、再生像に 0 次光や共役光は含まれない。2 つめに、ホログラフィックディスプレイでは、再生像を観察者がさまざまな視点から観察することが主目的であるが、デジタルホログラフィーでは、関心領域の強度分布を求めることが主目的である。CGH の再生シミュレーションにおいて、多くの研究が上記の違いを十分に考慮しておらず、ホログラフィックディスプレイの評価としては不十分なことが多い。図 4.1 を用いて、従来の CGH の再生シミュレーション方法を説明する。

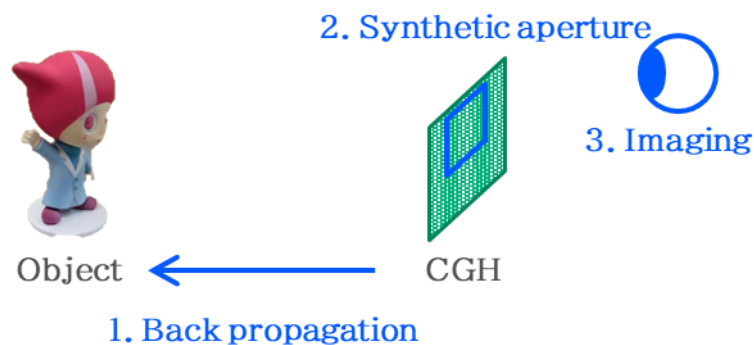


図 4.1 従来の CGH の再生手法

逆伝搬法 [83]は、CGH 面から物体面までの光伝搬計算により、物体面上での強度分

布を計算する手法である。簡易的に再生像が得られる手法であるが、観察者が想定されておらず、視点を変えて再生像を計算することができないため、ホログラフィックディスプレイの再生方法としては不十分である。また、CGH の画素数が増えるにつれて、意図せず被写界深度が深くなってしまう。

合成開口法 [84]は、観察者の目に入射する光を発する CGH のみを切り出して、逆伝搬法によって物体面上での強度分布を計算する手法である。開口の位置と大きさによって、視点位置や被写界深度の調整が可能であるが、視点移動は CGH 面内に限られ、開口の大きさによって視野が制限されるなど、任意の調整はできない。

結像法 [85]は、CGH の再生光波を、観察者の目のレンズによって網膜に結像し、網膜上での強度分布を計算する手法である。レンズの位置・大きさ・焦点距離によって、視点位置・被写界深度・注視点の調整が可能である。また、スペckルノイズも反映可能である。

したがって、観察者を考慮しなければならないホログラフィックディスプレイとしての評価には、結像法による再生シミュレーションが必要である。

今回、従来の結像法をベースに網膜上での強度分布を計算し、強度分布を再生像評価のためのデータに変換した。シミュレーション構成を図 4.2 に示す。

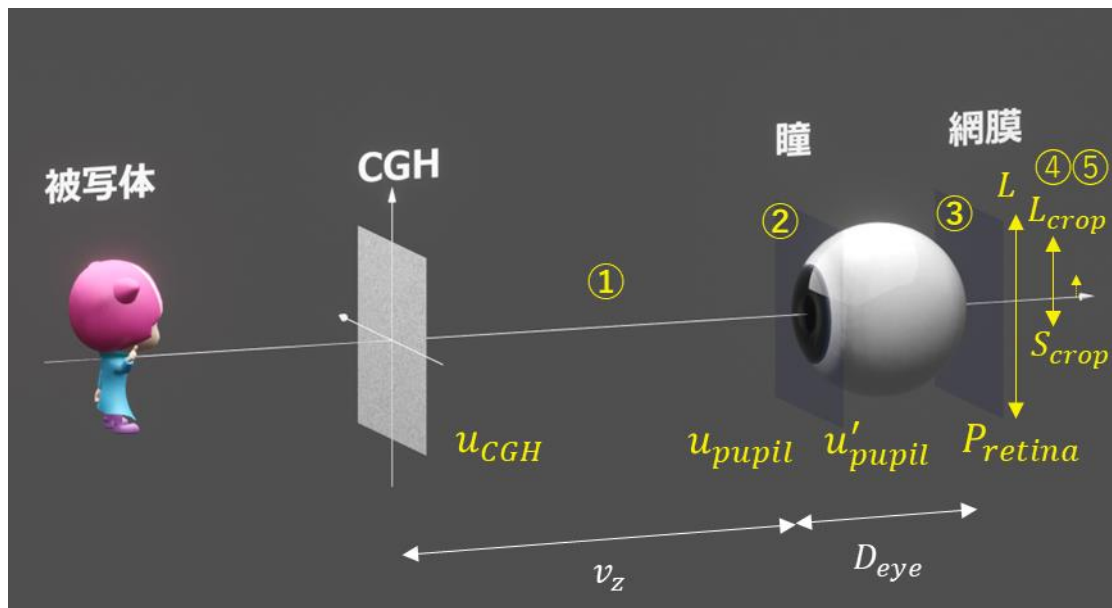


図 4.2 提案する再生シミュレーション構成

以下に計算手法を示す。①～⑤のうち、③までは従来手法と同じである。

① CGH 面から観察者の瞳面までの波面伝搬計算

CGH 面上での波面  $u_{CGH}$  は、CGH に再生照明光  $R_{rec}$  を乗算したものである。

$$u_{CGH}(x, y; 0) = HR_{rec} \quad (4.1)$$

観察者の瞳面上での波面  $u_{pupil}$  は、2.4.1 項で示したような角スペクトル伝搬法などで計算できる。

$$u_{pupil}(x, y; v_z) = \text{Prop}_{v_z}[u_{CGH}(x, y; 0)] \quad (4.2)$$

ここで  $\text{Prop}_z[\cdot]$  は距離  $z$  の伝搬計算演算子とする。離散領域で計算をする場合は、エイリアシングに注意が必要である。

② 目のレンズの複素振幅透過率分布を乗算

瞳面上での波面  $u_{pupil}$  に、観察者の注視位置を反映した焦点距離のレンズの複素振幅透過率分布  $\varphi(x, y)$  を乗算する。

$$u'_{pupil}(x, y; v_z) = u_{pupil}(x, y; v_z) \varphi(x, y) \quad (4.3)$$

$$\varphi(x, y) = a(x, y) \exp\{-j\pi(x^2 + y^2)/\lambda f\} \quad (4.4)$$

$a(x, y)$  は瞳関数であり、瞳孔径を  $D_p$ 、視点位置の中心からの移動量を  $x$  軸、 $y$  軸方向にそれぞれ  $v_x$ 、 $v_y$  とすると、以下の式で表される。

$$a(x, y) = \begin{cases} 1, & (x - v_x)^2 + (y - v_y)^2 \leq (D_p/2)^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.5)$$

瞳の位置を変えることでさまざまな視点位置からみた再生像を計算可能である。また、瞳開口の大きさによって、被写界深度やスペックルノイズが反映される。

レンズの焦点距離  $f$  は、瞳と注視位置との距離  $r$ 、眼球のサイズ  $D_{eye}$  で決定する。注視位置をそれぞれ  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸方向に  $g_x$ 、 $g_y$ 、 $g_z$  とすると、以下の式で表される。

$$f = \frac{1}{1/r + 1/D_{eye}} \quad (4.6)$$

$$r = \sqrt{(v_x - g_x)^2 + (v_y - g_y)^2 + (v_z - g_z)^2} \quad (4.7)$$

また、観察距離が  $x - y$  平面での移動距離に比べて十分大きいとすると、

$$r \approx v_z - g_z \quad (4.8)$$

と簡略化される。注視位置を設定することで、レンズの焦点距離が変更され、任意の位置に焦点を調節することができる。

ここで、 $\varphi(x, y)$  はアップチャープ関数であるため、離散領域で計算する場合はエイリアシングに注意が必要である。 $\varphi(x, y)$  の局所空間周波数から求められる瞳面上でのサンプリングピッチ  $p_{pupil}$  は以下の式で表される。

$$\frac{1}{2p_{pupil}} \geq \left| \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\pi(x^2 + y^2)}{\lambda f} \right) \right| \quad (4.9)$$

$$p_{pupil} \leq \frac{\lambda f}{D_p} \quad (4.10)$$

③ 瞳面から網膜面までの波面伝搬計算および強度分布の計算

つづいて、瞳面での波面を網膜面まで伝搬し、強度に変換する。

$$P_{retina}(x, y; v_z + D_{eye}) = \left| \text{Prop}_{D_{eye}} [u'_{pupil}(x, y; v_z)] \right|^2 \quad (4.11)$$

④ 視野角内の強度分布のみの切り出し

再生像の評価には、CGH から再生された光のみが重要である。観察位置  $v_z$  では、目のレンズによって倍率  $M$  で CGH が縮小結像される。網膜面上での強度分布から、観察者が CGH を見込む角である視野角内の強度分布のみを切り出す。CGH の大きさを  $L$ 、網膜上での大きさを  $L_{crop}$  とすると以下の式で表される。

$$M = \frac{D_{eye}}{v_z} \quad (4.12)$$

$$L_{crop} = ML \quad (4.13)$$

また、瞳の位置が移動すると、結像位置も移動する。 $x$  軸方向に  $v_x$  移動したとすると、切り出し位置は以下のように移動する。

$$S_{crop} = v_x(M + 1) \quad (4.14)$$

#### ⑤ 目の角度分解能でダウンサンプリング

光の伝搬計算は基本的に伝搬元と伝搬先のサンプリングピッチは等しい。したがって、CGH の画素ピッチが光の波長程度であることを考えると、強度分布は人間の目には見えなほどのサンプリングピッチで計算される。したがって、人の目の角度分解能を考慮して、強度分布をダウンサンプリングする。目の角度分解能を  $cpd_{eye}$  とすると、ダウンサンプリング後の画素数は以下の式で表される。

$$N_{eye} = cpd_{eye} \times 2\theta_{FOV} \quad (4.15)$$

以上の手順で、評価用の CGH 再生像を計算する。

### 4.2.2 CGH 再生像の評価方法

CGH の再生シミュレーション方法が標準化されていないことと同様に、計算した再生像の評価方法についても標準化されていない。従来の CGH 再生像の評価方法については、明確化されていない 2 つの問題点がある。

1 つめに、再生像の正規化がアドホックに行われており、評価が曖昧である。正規化の方法によって、再生像の数値評価の結果は大きく変化する。CGH の再生において、再生照明光が CGH で回折され、像が再生されるが、CGH の回折効率、CGH の表現方式や計算方法によって決定するため、再生像の正規化は、物理的には再生照明光の光源強度を制御する操作である。静止画の 1 枚の CGH のみを評価する場合はアドホックな正規化でも問題ないが、ホログラフィーによる 3 次元映像システムにおいて、光源強度は通常一定であり、記録した物体毎や、観察条件毎に光源強度を制御することは想定されていないため、統一した正規化が必要である。統一した正規化を行わなければ、CGH に記録した物体の最大強度によらずに再生されるため、例えば、暗い物体が明るく再生され、階調を拡大されて評価されてしまう。また、画質は高くても光の利用効率が低い CGH を高く評価してしまう。光沢のある物体については、同じ物体でも視点位置によって明るさが変化してしまう。CGH の表現方式や階調数の違いにより、回折効率が異なる CGH 間の評価を正しくことが出来ない。さらに、再生像にはスペckルノイズが含まれるため、適切な値で正規化を行わなければ、コントラストが著しく低下する。

2 つめに、CGH 再生像の比較対象となる理想像の設定が不十分である。例えば、CGH に記録した物体の 2D 画像そのものがしばしば比較対象とされているが [83]、3D 映像は対象外である。また、CGH データの圧縮の分野では、非圧縮の CGH データの再生像を理想像としているが [87]、そもそも CGH の再生像は、実世界の像から劣化しており、理想像としてはふさわしくない。

そこで、まず、再生像の正規化については、強度が既知の物体(参照物体)を記録した CGH の再生像を事前に計算し、その強度分布から正規化係数を求め、評価対象の再生像を一律に正規化する。また、再生像にはスペckルノイズが含まれるため、一定の領域の平均強度を用いて正規化を行う。これにより、強度も含めた再生像の数値的な評価が可能となる。

つぎに、比較対象の設定については、3D 物体を自然光下で観察する場合の光学的な理想像を CGH 再生像の比較対象とする。この理想像は、CGH の再生計算を行う観察光学系で、物体の位置に点光源を置き、注視点を設定して、網膜上での点像分布関数 (PSF) を計算し、それを元の物体の強度分布に畳み込むことで計算する。計算した理想像にはデフォーカス像も含まれる。これにより、実世界で物体を観察する場合の像からの劣化を 3D 映像として評価可能となる。

### 4.2.3 参照物体による再生像正規化手法の検証

提案手法によって、CGH 再生像の強度や画質の評価ができることを示す。従来研究では、商用の SLM 程度の画素数や画素ピッチの CGH 再生像を逆伝搬法などにより再生しているが、このような CGH の再生像は小さく、視域が狭いため、SLM の要求性能を導出するという目的には不十分である。したがって、ある程度理想的な SLM 性能を仮定してシミュレーションを行った。ここでは、観察者と SLM の距離が短い、ガラス型のシステムを仮定し、最低限必要とされている視野角  $20^\circ$ 、眼球運動の移動距離 12 mm を満たす SLM とした。式 (2.16)、(2.17) より、SLM の画素ピッチは  $1.0 \mu\text{m}$ 、画素数は 21,242 とした。図 4.3 に、今回仮定したシステムの構成を示す。

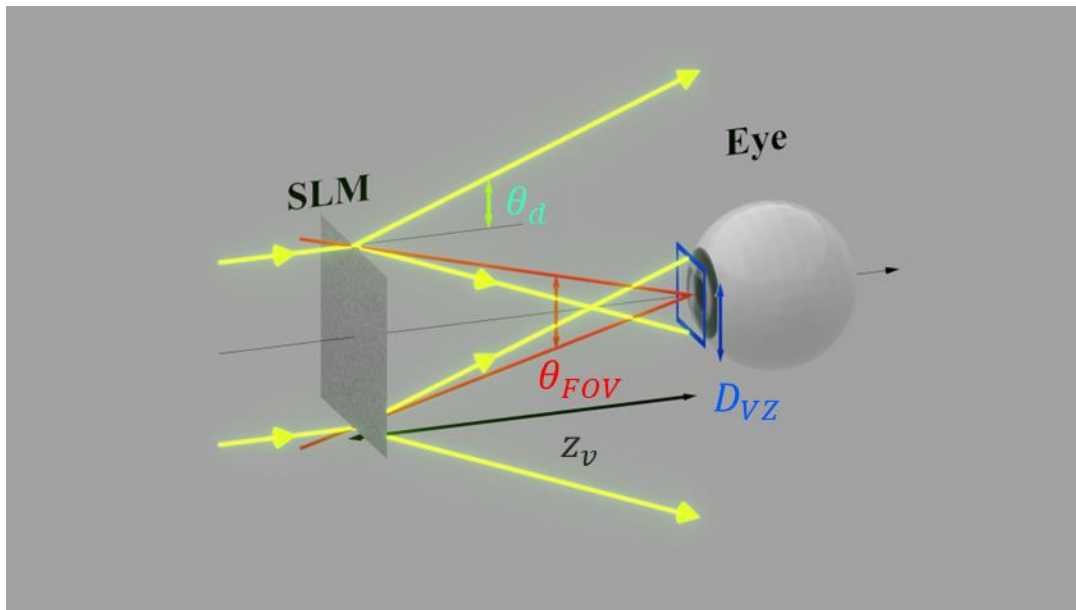


図 4.3 CGH 再生シミュレーションで仮定したシステム

評価対象の CGH の正規化に用いる参照物体は、CGH と同じ大きさ  $s$  の正方形で、振幅は 255 の平方根、位相はランダム位相とした。また、奥行き位置は、角スペクトル法においてエイリアシングが生じない最大距離 ( $2z_0 = Np/2 \tan \theta_d$ ) とした。参照物体の振幅がシミュレーション上の最大の振幅となる。観察者のパラメーターとしては一般的な成人の値とし、瞳の直径は 3 mm、眼球のサイズは 24 mm、角度分解能は 60 cpd (視力 2.0 相当) とした。また、観察位置は CGH の中心とし、参照光および再生照明光の入射角を  $x$  軸、 $y$  軸方向共に  $12^\circ$  をすることで、観察位置に 0 次光や共役像は入らないようにした。

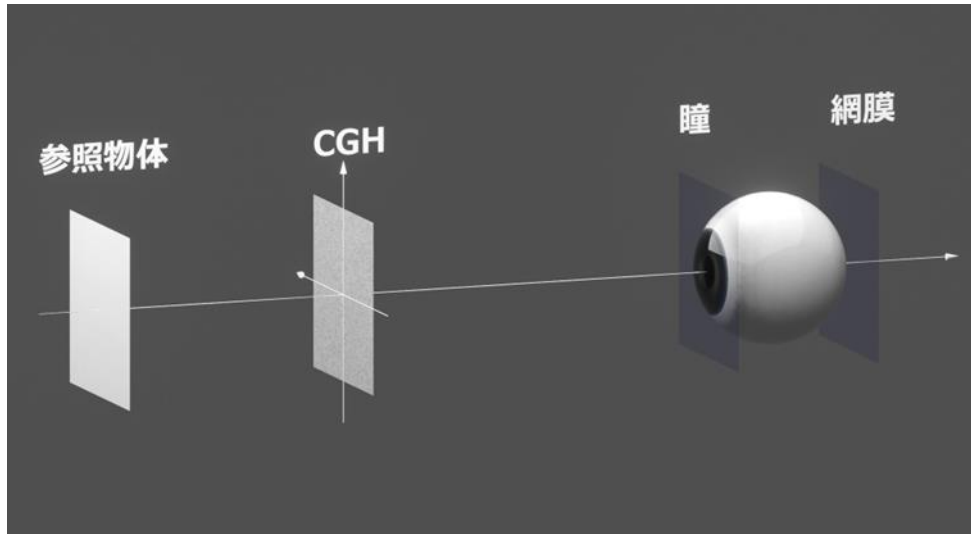


図 4.4 参照物体による正規化の再生シミュレーション構成

はじめに、平均強度の計算に必要な面積を導出する。図 4.5 に、再生像のうち、平均強度の計算に用いる正方形の 1 辺の長さを変えたときの平均強度を示す。ランダムなスペckルノイズが含まれるため、辺が短すぎると平均強度は正しく計算できない。また、参照物体の再生像のエッジ部分は多少ボケが生じるため、再生像全体で平均強度を計算するのは望ましくない。ここでは、1 辺の長さが 50 % の領域を平均強度の算出面積とした。再生像が小さい場合は有効な画素数が得られなくなるため、参照物体はある程度の大きさが必要である。

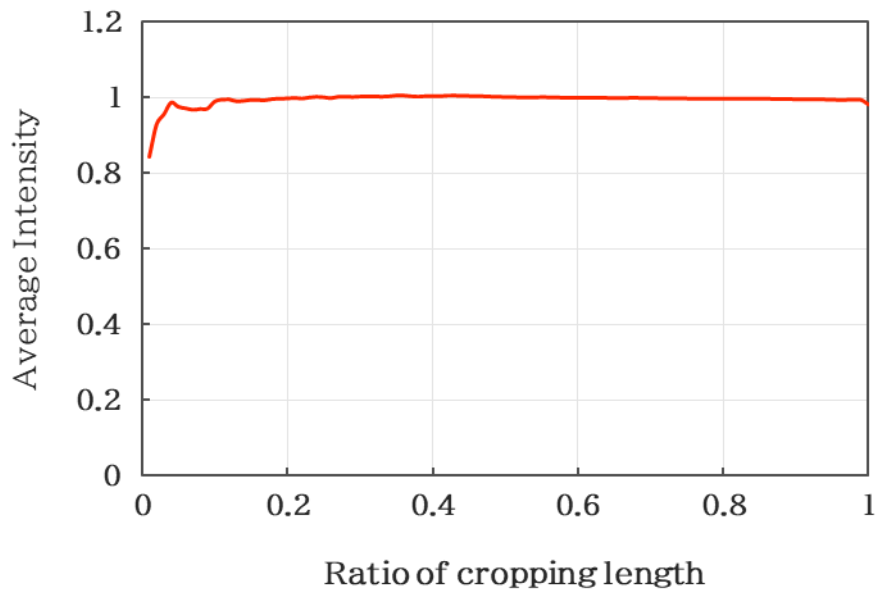


図 4.5 参照物体の平均強度算出に必要な面積の導出

次に、提案手法により、異なる振幅の物体が記録された CGH を正しく再生可能であるか検証する。評価対象の CGH として、CGH の 4 分の 1 のサイズ  $S/4$  の正方形を、奥行き位置  $2z_0$  に配置し、物体の振幅は 64, 128, 192, 255 の平方根、位相はランダム位相として 4 種類の CGH を生成した。また、CGH は振幅 CGH で階調数は 8 bit とした。参照光および再生照明光の入射角は、参照物体を記録した CGH と同様に、 $x$  軸、 $y$  軸方向共に  $12^\circ$  とした。参照物体を記録した CGH の再生像から求めた平均強度を用いて評価対象の CGH 再生像を一律に正規化した。シミュレーションの構成は図 4.4 と同様であり、物体の振幅のみが異なる。

それぞれの再生像を図 4.6 に、平均強度値を表 4.1 に示す。物体の振幅が 255 の平方根の場合、参照物体で設定したシミュレーションの最大の強度と等しくなり、ここではその値を 1 とした。なお、再生像の強度分布を平均強度で正規化しているため、画像出力のときには 255 以上の値を丸めて出力している。わずかな違いがあることに注意が必要である。従来のアドホックな正規化の場合、このような物体を記録した CGH の再生像はすべて同じとなるが、提案した参照物体を用いた方法によって一律に正規化することで、異なる振幅を持つ物体が記録された CGH を正しく再生できるようになった。

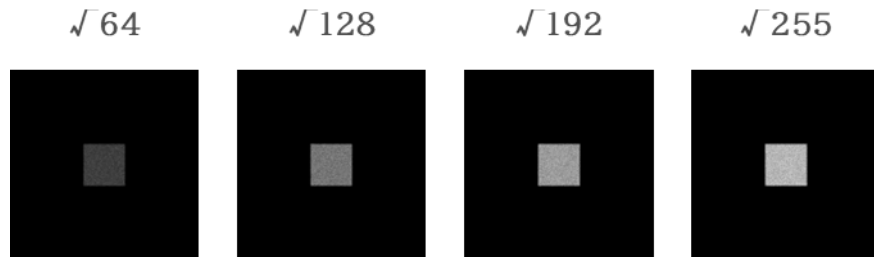


図 4.6 異なる振幅の物体を記録した CGH の再生シミュレーション結果

表 4.1 CGH 再生像の平均強度

物体の振幅	$\sqrt{64}$	$\sqrt{128}$	$\sqrt{192}$	$\sqrt{255}$
再生像強度比	0.25	0.50	0.75	1.00

つづいて、評価対象の物体のサイズや奥行き位置が変わった時にも、正しく CGH が再生可能であるか検証した。記録した物体の振幅は 255 の平方根、サイズは CGH と同じ大きさ  $S$  と 4 分の 1 の大きさ  $S/4$ 、奥行き位置は  $z_0$  と  $2z_0$  とした。参照光および再生照明光の入射角は、 $x$  軸、 $y$  軸方向共に  $10^\circ$  とした。その他は上記の CGH と同様である。また、CGH は振幅 CGH、キノフォーム、複素振幅変調とした。それぞれの再生像を図 4.7 に、平均強度値を表 4.2 に示す。

振幅 CGH の再生像の左上の強い光は 0 次光である。また、物体のサイズが CGH と同

じ大ききで奥行き位置が  $z_0$  のときに含まれているノイズは共役像である。振幅 CGH で再生される 0 次光と共役像が正しくシミュレーションされている。また、物体の振幅は、サイズや奥行きが変わっても正しく再現されている。このような共役像が再生像と重なる場合、強度値が約 2 倍になるため、従来の正規化方法では、正しく強度を再現出来ない。

キノフォームの場合、光の振幅を制御することができないため、物体の振幅は、サイズや奥行き位置によって変化する。また、キノフォームでは共役像は発生しない。これらのキノフォームの原理から考えられる結果とシミュレーション結果が一致した。

複素振幅変調の場合、物体の振幅は、サイズや奥行きが変わっても正しく再生されている。また、共役像は発生しない。このような最も望ましい特性がシミュレーションでも正しく再現された。

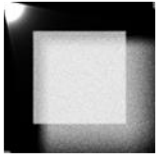
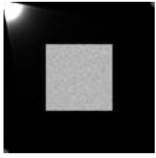
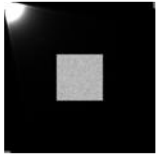
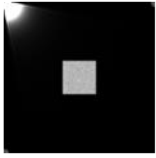
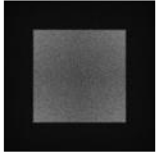
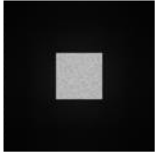
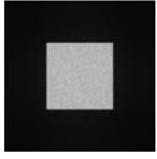
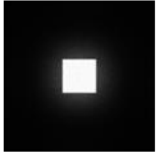
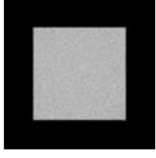
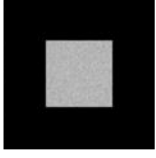
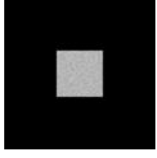
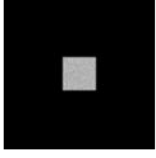
Size	$S$		$S/4$	
	$z_0$	$2z_0$	$z_0$	$2z_0$
(a)				
(b)				
(c)				

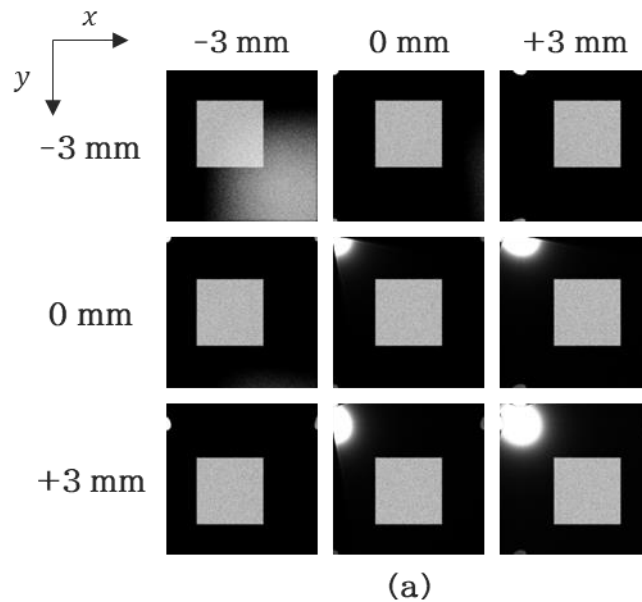
図 4.7 物体のサイズ、奥行きを変えたときの CGH の再生シミュレーション結果  
(a)振幅 CGH、(b)キノフォーム、(c)複素振幅変調

表 4.2 物体のサイズ、奥行きを変えたときの CGH 再生像の平均強度

サイズ		$S$		$S/4$	
奥行き		$z_0$	$2z_0$	$z_0$	$2z_0$
CGH	振幅 CGH	2.00	1.00	1.01	1.00
	キノフォーム	0.34	1.00	1.01	3.88
	複素振幅変調	1.01	1.00	1.01	0.97

次に、観察者の位置が変わった場合にも、正しく CGH が再生可能であるか検証した。記録した物体の振幅は 255 の平方根、サイズは CGH と同じ大きさ  $S$ 、奥行き位置は  $2z_0$  である。CGH は振幅 CGH と複素振幅変調とした。視点位置は CGH の中心から  $x$  軸、 $y$  軸方向にそれぞれ  $\pm 3$  mm 移動した。それぞれの再生像を図 4.8 に、平均強度値を表 4.3 に示す。

視点移動によって、視野内での再生像の位置が変化していることが分かる。振幅 CGH では 0 次光や共役像の位置が変化することも確認された。また、再生像の平均強度は、視点位置によっても変化しないことが確認された。



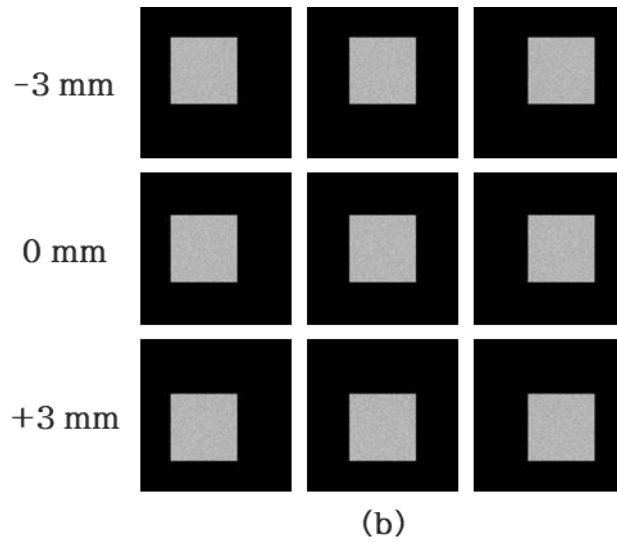


図 4.8 視点位置を変えたときの CGH の再生シミュレーション結果  
(a) 振幅 CGH、(b) 複素振幅変調

表 4.3 視点位置を変えたときの CGH 再生像の平均強度

		振幅 CGH			複素振幅 CGH		
		$x$ 軸移動 (mm)					
		-3	0	+3	-3	0	+3
$y$ 軸移動 (mm)	-3	1.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00
	3	0.99	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00

最後に、複数の異なる振幅を有する物体を CGH に記録し、その振幅が正しく再生されるかを検証した。物体のサイズは CGH と同じ大きさ  $S$ 、奥行き位置は  $2z_0$  で、図 4.9 (a) に示すように、振幅は  $x$  軸方向に 64, 128, 192, 255 の平方根で変化するものとした。CGH は振幅 CGH、キノフォーム、複素振幅変調とした。それぞれの再生像を図 4.9 (b)(c)(d) に、平均強度値を表 4.4 に示す。このように異なる複数の振幅を有する物体であっても、正しく再生されることが確認された。

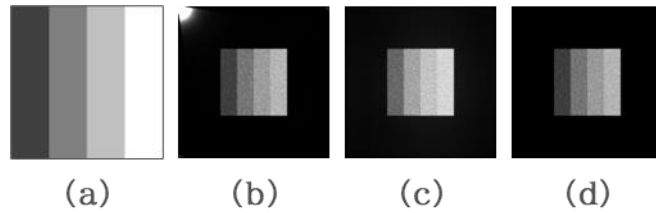


図 4.9 複数の異なる振幅を有する物体の再生シミュレーション

(a)記録した物体

およびシミュレーション結果

(b) 振幅 CGH、(c) キノフォーム、(d) 複素振幅変調

表 4.4 CGH 再生像の平均強度

CGH	物体の振幅			
	$\sqrt{64}$	$\sqrt{128}$	$\sqrt{192}$	$\sqrt{255}$
振幅 CGH	0.26	0.50	0.76	1.00
キノフォーム	0.29	0.55	0.79	1.00
複素振幅変調	0.25	0.51	0.76	1.00

以上のように、参照物体を用いて事前に再生シミュレーションにおける最大の強度値を設定し、評価対象の CGH 再生像を一律に正規化することで、記録された物体の振幅を正しく再現できることが示され、正しい数値評価が可能となった。また、この手法により、振幅 CGH やキノフォームなど異なる CGH 間の評価も可能となった。

#### 4.2.4 再生像の評価手法の検証

図 4.10 にシミュレーション構成を示す。今回は、異なる奥行き位置に配置した平面画像を CGH に記録した。物体のサイズは CGH の 4 分の 1 の大きさ  $S/4$  で、正面から観察したときにそれぞれが重ならないようにした。奥行き位置はそれぞれ  $z_0$  と  $2z_0$  とし、参照光および再生照明光の入射角は、 $x$  軸、 $y$  軸方向共に  $12^\circ$  とした。CGH は振幅 CGH とした。また、注視位置は  $2z_0$  とした。再生像は 4.2.3 項と同様の参照物体で正規化した。

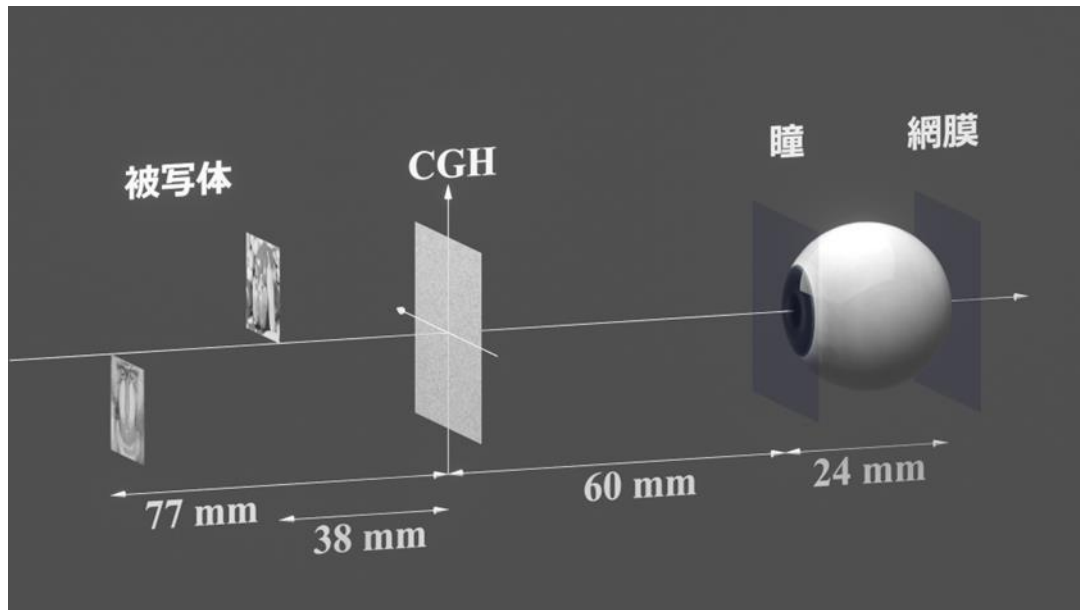


図 4.10 再生像評価のシミュレーション構成

自然光下での光学的な理想像を求めるため、PSF を計算した。点光源の奥行き位置  $z_0$ 、注視位置  $2z_0$  の PSF を図 4.11 (a) に、点光源の奥行き位置  $2z_0$ 、注視位置  $2z_0$  の PSF を図 4.11 (b) に示す。点光源の位置と注視位置が異なるときの網膜上での点光源が大きく広がっていることが分かる。また、コヒーレント光で計算しているため、PSF は回折パターンとして現れる。

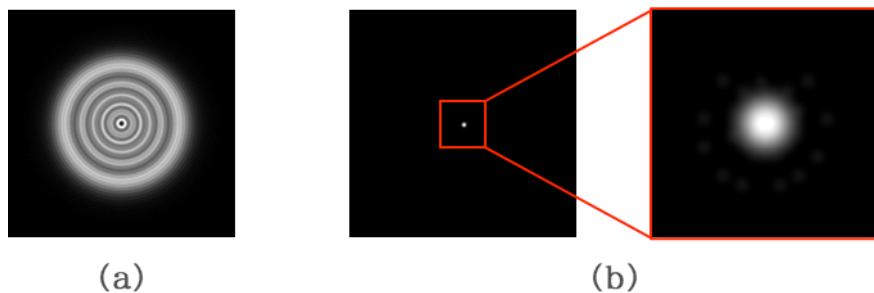


図 4.11 計算した PSF  
点光源位置と焦点位置が (a) 同じ場合、(b) 異なる場合

PSF をそれぞれの物体に畳み込み、計算した理想像が図 4.12 (a) である。手前の物体がデフォーカスされ、奥の像はインフォーカスされている。このように、3D 空間での観察者の焦点位置が反映された理想像が計算された。(b) は CGH の再生像である。CGH の再生像もまた、観察者の焦点位置が反映されている。これらを数値的に比較することで、デフォーカス

も含めた 3D 映像としての再生像の理想像からの誤差を評価可能となった。このときの二乗平均平方根誤差(RMSE)は、0.129 [a.u.]であった。

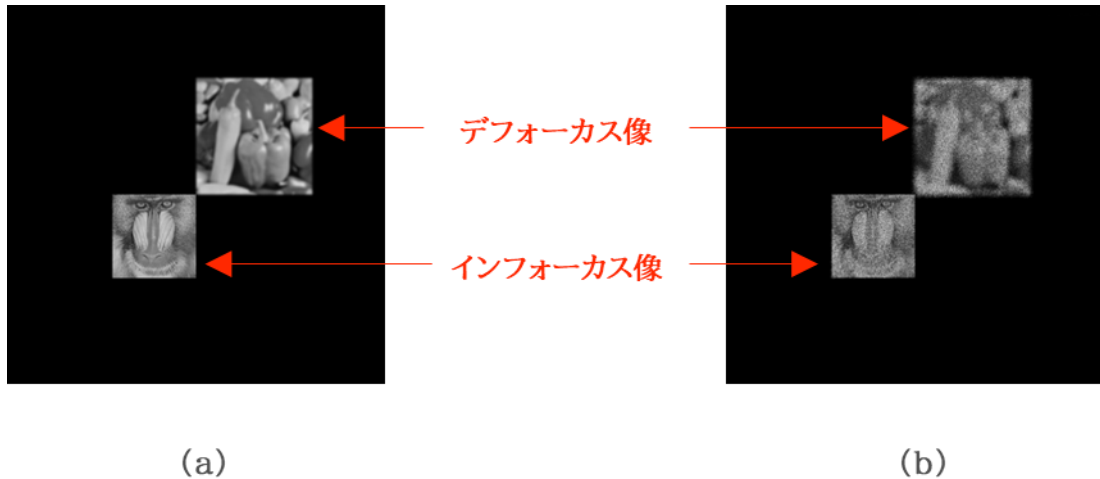


図 4.12 再生像評価の再生シミュレーションの再生像  
(a)理想像(b)CGH 再生像

CGH 再生像の画質を改善する手法として、CGH 生成時に付与するランダム位相を変化させ、複数の CGH の再生像を積算することで、ノイズを平均化する手法が提案されている [56]。この手法を、提案した手法でも再現できるかを検証するため、4 枚の CGH を生成し、それぞれの再生像を積算した。その結果、RMSE は 0.078 [a.u.]と低下し、誤差改善の効果が示された。

最後に、従来手法と提案手法の比較を示す。図 4.13(a)に示す、Stanford Bunny を CGH に記録する 3D オブジェクトとし、正射影法を用いて CGH を生成した。CGH の画素ピッチは  $2 \mu\text{m}$ 、光源の波長は 532 nm とした。CGH は複素振幅変調とした。図 4.13(b)(c)にそれぞれ、逆伝搬方法によって再生した画素数が 2k と 8k の CGH の再生像を、(d)に提案手法によって再生した画素数が 8k の CGH の再生像を示す。2k のような画素数の少ない CGH においては、逆伝搬でも正しく再生されているように見えるが、画素数が 8k の場合は、被写界深度が深く、フォーカス位置以外は大きなボケが発生している。一方で提案手法の再生像は、逆伝搬法のような不自然な被写界深度になっていない。なお、提案手法の再生像の大きさが異なるのは、観察位置から観察される像の大きさを正しく反映しているためである。

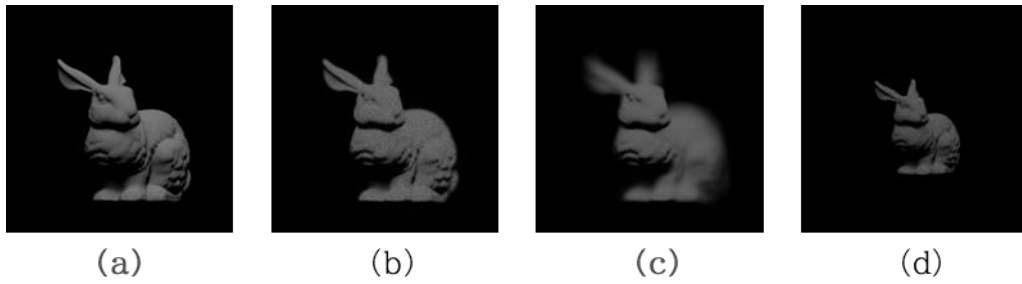


図 4.13 再生シミュレーション方法の違い

(a)記録した 3D オブジェクト

(b)逆伝搬法(2k CGH)、(c) 逆伝搬法(8k CGH) (d) 提案手法(8k CGH)

次に、図 4.14 (a)に示すように、Stanford Bunny の奥に、光沢のある明るい Stanford Dragon を配置して、CGH を生成した。Stanford Dragon の有る場合と無い場合でそれぞれ、従来の任意の正規化をした場合と、提案手法による正規化をした場合の再生像をそれぞれ、図 4.14 (b)(c)(d)(e)に示す。従来手法の場合は、CGH 毎に正規化を行うため、物体の明るさが変化している。提案手法の場合は、一律に正規化を行うため、異なる CGH でも物体の明るさが一定であり、正しく再現されている。



(a)

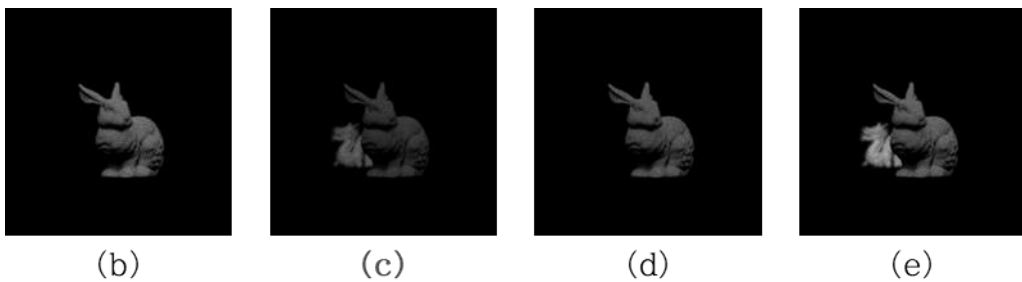


図 4.14 正規化手法の違い  
(a)(b)従来手法、(c)(d)提案手法

---

以上のように、3D 空間で再生像を観察する場合に必要となる、再生シミュレーション機能を実現し、また、再生像の正規化手法および評価手法によって数値的な劣化を評価可能とした。今回提案した網膜上での、光学的な理想像からの誤差は、3D 映像の知覚に何らかの影響を与えていると考えられる。視点位置や注視点を変えながら、それぞれの誤差を計算し、主観評価実験の結果と比較することで、網膜上での誤差と知覚の関係性が得られると考えられる。

### 4.3 本章の結論

本章では、SLM 要求性能の導出を目指し、CGH 再生像の評価手法を提案・実証した。

シミュレーションによる再生像評価技術については、参照物体による正規化および、自然光下での光学的な理想像を比較対象とすることにより、数値的な評価を可能とした。

CGH の再生シミュレーションにおいては、実際の光学再生との比較により、シミュレーションによる再生像評価の妥当性を検証する必要がある。また、物体、CGH 共に様々なパラメータで解析が必要である。物体については、より複雑な 3D 物体、奥行き位置や大きさ、CGH については、階調数や積算数、変調方式などが考えられる。さらに、今回はガラス型の構成としたが、携帯型、据置型などさまざまな視聴形態に応じたシミュレーションが必要である。また、今回は理想像からの劣化を RMSE で評価したが、デフォーカスも含まれた 3 次元映像の評価に適切な客観指標および数値の捉え方については、主観的な評価実験と並行して検討していく必要がある。

今後、提案・実証した評価方法を基に再生像評価を進め、SLM 性能と CGH 再生像品質の関係性を解明することで、SLM の具体的な開発方針を示すことが期待される。

---

# 第5章

## 結論

---

### 5.1 本論文の総括

本研究では、ホログラフィックディスプレイによる究極の 3D 映像の実現を目指し、表示デバイスである SLM の開発と再生像評価に関する研究を推進した。

第 3 章では、ホログラフィックディスプレイ用の表示デバイスとして、画素の微細化と駆動の高速化が期待される磁壁移動型 MOSLM の研究について報告した。はじめに、微細化に有用な HM の保磁力制御技術を提案し、 $0.5 \times 2.0 \mu\text{m}$  サイズの素子を作製し、電流注入による磁化反転および光変調を実証した。つづいて、保磁力制御技術を、微細な素子を並べたアレイ構造に適用するとともに、光変調領域を拡大する構造を提案した。また、そのアレイ構造の作製プロセスを構築するとともに、外部磁界印加によって光変調動作を検証可能な素子構造を提案し、磁壁移動型 MOSLM を模した構造で、CGH の再生に成功した。さらに、NW の多重反射と入射光の偏光方向を最適化することで回折効率が改善可能であることを実証した。最後に、これらの研究成果を基に、磁壁移動型 MOSLM を開発し、 $1 \times 4 \mu\text{m}$  という微細な画素ピッチを活かし、水平視域  $30^\circ$  の広視域な CGH 再生を実証した。

第 4 章では、SLM に要求される性能の導出を目指した、CGH 再生像の評価技術の研究について報告した。はじめに、計算機上で CGH の再生シミュレーションをおこない、その再生像を評価する方法について提案した。従来、十分に統一されていなかった、再生像の正規化方法について、参照物体を用いて正規化係数を導出して評価対象の CGH を一律に正規化することで、あらゆる CGH の再生像を正しく再現可能であることを示した。また、CGH 再生像を評価するために、実世界の理想的な光学像を比較対象とし、PSF からその理想像を計算して、劣化を評価可能であることを示した。

### 5.2 学術的な意義、発展性

本研究では、ホログラフィックディスプレイにおける SLM 開発について、様々な面から研究を進めてきた。

3.3 節から 3.6 節の一連の MOSLM に関する研究については、ホログラフィックディスプレイの表示デバイスとして、従来性能を上回る SLM を実証し、これまでにない広視域のホログラフィックディスプレイを実現した。ホログラフィックディスプレイ用の SLM 開発としての先

導性を示したほか、スピントロニクス技術の光学デバイス応用という新たな分野を開拓した。また、光の波長程度の領域における MO 効果の振る舞いは十分に解明されておらず、今回開発した MOSLM がそれらを解析するためのデバイスとなりうる。

4.2 節の CGH の再生シミュレーションによる再生像の評価方法については、SLM 開発や、CGH 生成方法の評価、CGH データの圧縮方法の評価など、CGH のあらゆる分野で核となる技術である。これらの方法はこれまで標準化されておらず、各研究者で異なる方法が使用されてきた。今回提案した方法は、従来の問題とその解決策を初めて提起したものであり、今後の議論の基となりうる成果である。

## 5.3 課題と今後の展望

最後に本研究の課題と今後の展望について述べる。なお、提案手法に対するそれぞれの課題については各章の結論で述べたので、ここではホログラフィックディスプレイ研究としての総括を述べる。

まず、MOSLM 開発では、ホログラフィックディスプレイ用の表示デバイスとして、これまでにない動作原理を利用した SLM を提案・実証した。従来の 2D ディスプレーとは大きく異なる性能を求められるホログラフィックディスプレイの表示デバイス開発において、このように、従来のデバイス開発の延長線ではなく、斬新なデバイス開発によって大きく性能を飛躍させることが必要不可欠であると考えている。

ホログラフィックディスプレイにおいては、特に画素ピッチ、画素数の要求が極めて高い。画素ピッチの微細化については、近年微細化が進んでいるが、画素選択トランジスター回路、光変調部ともにさらなる研究開発が必要である。

多画素化については、2D ディスプレーとしての究極の映像である 8K 映像が実現された現状の中で、さらなる高画素化のデバイス開発が進むかどうかは不明瞭である。現時点では有効な解決策はないため、膨大なデータを扱わなければならないことについて抜本的な解決策が必要である。CGH 生成の分野では、観察者の視点位置に応じた計算 [36] や、中心視野付近のみを高解像度に計算 [88] することで、データ量を削減する研究が進められている。デバイス開発においても、はじめはこのような用途を制限することで、再生像の高品質化を図ることができる可能性がある。また、画面サイズが完全に画素数に拘束されないようなデバイス構造を実現する必要があるかもしれない。

また、2.5.2 項で述べたように臨界融合周波数以上の高速なフレームレートを有する SLM により、再生像の画質改善や視域、画面サイズの拡大などが可能である。高速化はシステム設計の自由度を増やす有効な手段である。

その他の階調数や開口率、変調方式と再生像品質の関係性については、今後の研究課題である。今回提案した CGH 再生像の評価技術が有用であると考えている。ユースケース毎

に要求性能を導出し、具体的な設計指針を導出できれば、デバイス開発が加速すると考えている。

また、深い奥行きに高分解能の映像を再生できるため、究極の3次元映像提示技術と呼ばれるホログラフィーであるが、扱うべきデータ量が莫大であることや、コヒーレントな再生に起因したスペckルノイズの発生など、実世界と同様の映像を実際に再現することができるかは未だ示されていない。様々な3次元映像技術が提案されている中で、ホログラフィーが本当に究極であるかは検証が必要である。

最後に、映像システムとしてのホログラフィーを考えると、データ生成や表示システム、伝送、圧縮の研究、さらにはコンテンツの開拓も必要である。これらは、個人や研究グループの研究開発のみでは成し遂げられない。ホログラフィックディスプレイの魅力を示し、映像業界が新たなメディアの創出に取り組み環境づくりが必要である。SLM 開発や静止画 CGH の作製によって、CGH を光学的に再生し、これまでにない、価値ある映像体験を提供することで、ホログラフィックディスプレイ開発の機運が高まると考えている。

---

## 参考文献

- [1] 吉野章夫, “テレビ技術史概要と関連資料調査,” 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第4集, 2004.
- [2] 総務省情報流通行政局放送技術課, “4K・8K の取組について,” 情報通信審議会 情報通信技術分科会(第116回)配付資料 116-3, 2016.
- [3] ITU-R, “Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange,” Recommendation ITU-R BT.2020-2, 2015.
- [4] ITU-R, “Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange,” Recommendation ITU-R BT.2100-2, 2018.
- [5] M. Masaoka et al., “Contrast effect in evaluating the sense of presence for wide displays. Journal of the Society for Information Display,” Journal of the Society for Information Display, 14, 785-791, 2006.
- [6] 一般財団法人機械システム振興協会, “没入型映像システムに関する戦略策定報告書,” 2016.
- [7] 岸野文郎, “高臨場感・バーチャルリアリティ技術の展望,” 画像電子学会誌, 38, 3, 274-277, 2009.
- [8] 泉武博 監修, “3次元映像の基礎,” オーム社, 1995.
- [9] 3D テレビに関する検討会, “3D テレビに関する検討会最終報告書,” 2012.
- [10] 高木康博 監修, “空間立体表示とユーザインターフェイス,” S&T 出版, 2019.
- [11] A. Gershun, “The Light Field,” Translated by P. Moon et al., Journal of Mathematics and Physics, 18, 51-151, 1939.
- [12] D. Gabor, “A new microscopic principle,” Nature, 161, 777-778,

---

1948.

- [13] NHK 放送技術研究所, “Future Vision 2030-2040,”  
[https://www.nhk.or.jp/str1/future\\_vision/index.html](https://www.nhk.or.jp/str1/future_vision/index.html), 2023
- [14] W. T. Cathey, “Phase holograms, phase-only holograms, and kinoforms,” *Appl. Opt.* 9, 1478-1479, 1970.
- [15] A. F. Metherell et al., “Acoustical Holography,” Springer, 1967.
- [16] T. Okoshi, “Three-Dimensional Imaging Techniques 1st ed.,” Academic, 1976.
- [17] S. Tay et al., “An updatable holographic three-dimensional display,” *Nature*, 451, 694-698, 2008.
- [18] P. A. Blanche, et al., “Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer,” *Nature*, 468, 80-83, 2010.
- [19] N. Tsutsumi, et al, “Real-time three-dimensional holographic display using a monolithic organic compound dispersed film,” *Opt. Mater. Express*, 2, 1003-1010, 2012.
- [20] E. N. Leith, et al., “Requirements for a Wavefront Reconstruction Television Facsimile System,” *Journal of the SMPTE*, 74, 10, 893-896, 1965.
- [21] L. H. Enloe et al., “B.S.T.J. briefs Hologram transmission via television,” *The Bell System Technical Journal*, 45, 2, 335-339, 1966.
- [22] T. Mishina, “Electro-holography,” *Broadcast Technology*, 24, 2005.
- [23] P.S. Hilaire et al., “Electronic Display System for Computational Holography,” *SPIE Proc.* 1212, 20, 174-182, 1990.
- [24] N. Hashimoto et al., “Real-time Holography using the High-

- 
- resolution LCTV-SLM,” SPIE Proc., 1461, 44, 291-300, 1991.
- [25] A. W. Lohmann et al., “Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer,” Appl. Opt., 6, 1739-1748, 1967.
- [26] J. W. Goodman et al., “DIGITAL IMAGE FORMATION FROM ELECTRONICALLY DETECTED HOLOGRAMS,” Appl. Phys. Lett., 11, 3, 77-79, 1967.
- [27] J. Rosen et al., “Digital spatially incoherent Fresnel holography,” Opt. Lett., 32, 912-914, 2007.
- [28] D. Blinder et al., “Signal processing challenges for digital holographic video display systems,” Signal Process. Image Commun., 70, 114-130, 2019.
- [29] C. Chang, et al., ”Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective,” Optica, 7, 1563-1578, 2020.
- [30] HOLOEYE Photonics AG, GAEA-2, <https://holoeye.com/products/spatial-light-modulators/gaea-2-phase-only/>
- [31] E. Sahin et al., “Computer-Generated Holograms for 3D Imaging: A Survey,” ACM Comput. Surv., 53, 2, 32, 1-35, 2021.
- [32] J. Goodman, “Introduction to Fourier optics 4th ed.,” W. H. Freeman, 2017.
- [33] K. Matsushima et al., “Band-Limited Angular Spectrum Method for Numerical Simulation of Free-Space Propagation in Far and Near Fields,” Opt. Express, 17, 19662-19673, 2009.
- [34] 谷田貝豊彦, “計算機合成ホログラムの展開,” 光学, 30, 3, 156-166, 2001.
- [35] W. H. Lee, ”Sampled Fourier Transform Hologram Generated by Computer,” Appl. Opt., 9, 639-643, 1970.
-

- 
- [36] N. Mukohzaka et al., “Diffraction efficiency analysis of a parallel-aligned nematic-liquid-crystal spatial light modulator,” *Appl Opt.*, 33, 14, 2804-2811, 1994.
- [37] 原勉, “電子ビームアドレス型素子,” *応用物理*, 62, 6, 595-596, 1993.
- [38] Texas Instruments, DLP660TE, <https://www.ti.com/product/ja-jp/DLP660TE>
- [39] Y. Isomae et al., “Design of 1- $\mu$ m-pitch liquid crystal spatial light modulators having dielectric shield wall structure for holographic display with wide field of view,” *Opt. Rev.*, 24, 2, 165-176, 2017.
- [40] Y. Isomae et al., “Superior spatial resolution of surface-stabilized ferroelectric liquid crystals compared to nematic liquid crystals for wide-field-of-view holographic displays,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 59, 4, 040901, 2020.
- [41] C.-S. Hwang et al., “1  $\mu$ m pixel pitch spatial light modulator panel for digital holography,” *Dig. Tech. Pap. - Soc. Inf. Disp. Int. Symp.* 51, 297-300, 2020.
- [42] Texas Instruments, DLP9500, <https://www.ti.com/product/ja-jp/DLP9500>
- [43] R. Stahl et al., “Modular sub-wavelength diffractive light modulator for high-definition holographic displays”, *Journal of Physics: Conference Series*, 415, 012057, 2013.
- [44] P. I. Oden et al., “Innovations with a massively paralleled, microelectromechanical systems (MEMS) toward piston-mode-based phase light modulator (PLM),” *Proc. SPIE 11294*, 112940G, 2020.
- [45] K. Aoshima et al., “Submicron magneto-optical spatial light modulation device for holographic displays driven by spin-polarized electrons,” *J. Display Technol.*, 6, 9, 374-380, 2010.
- [46] 佐藤勝昭, “光と磁気,”朝倉書店, 2001.
-

- 
- [47] Y.-H. Kim, et al. "Crafting a 1.5  $\mu\text{m}$  pixel pitch spatial light modulator using  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  phase change material [Invited]," *J. Opt. Soc. Am. A*, 36, D23-D30, 2019.
- [48] D. Smalley, et al., "Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays." *Nature*, 498, 313-317, 2013.
- [49] Y. Takaki et al., "Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator," *Appl. Opt.*, 48, 17, 3255-3260, 2009.
- [50] A. Schwerdtner, et al., "A new approach to electroholography for TV and projection displays," in *Proc. SID Symp. Dig. Tech. Papers* 1224-1227, 2007.
- [51] Z. He et al., "Progress in virtual reality and augmented reality based on holographic display," *Appl. Opt.*, 58, A74-A81, 2019.
- [52] T. Mishina et al., "Viewing-zone enlargement method for sampled hologram that uses high326 order diffraction," *Appl. Opt.*, 41, 8, 1489-1499, 2002.
- [53] G. Kuo et al., "High resolution étendue expansion for holographic displays," *ACM Trans. Graph.*, 39, 4, 66, 2020.
- [54] H. Sasaki et al., "Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators," *Sci. Rep.* 4(1), 6177, 2014.
- [55] C. Slinger et al., "Computer-generated holography as a generic display technology," *Computer*, 38, 8, 46-53, 2005.
- [56] J. Amako, et al., "Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator," *Appl. Opt.* 34, 3165-3171, 1995.
- [57] J.-P. Liu et al., "Complex Fresnel hologram display using a single SLM," *Appl. Opt.*, 50, H128-H135, 2011.
-

- 
- [58] R. Li et al., “Progress in Phase Calibration for Liquid Crystal Spatial Light Modulators.” *Appl. Sci.* 9, 2012 ,2019.
- [59] Y. Peng, et al., “Neural holography with camera-in-the-loop training.” *ACM Trans. Graph.* 39, 6, 185, 2020.
- [60] H. Nakayama et al., “Real-time color electroholography using multiple graphics processing units and multiple high-definition liquid-crystal display panels,” *Appl. Opt.* 49, 5993–5996, 2010.
- [61] M. Oikawa et al., “Time-division color electroholography using one-chip RGB LED and synchronizing controller,” *Opt. Express*, 19, 12008–12013, 2011.
- [62] Y. Deng, et al., “Coherence properties of different light sources and their effect on the image sharpness and speckle of holographic displays.” *Sci Rep*, 7, 5893, 2017.
- [63] R. S. Mezrich, “Reconstruction effects in magnetic holography,” *IEEE Trans. Magn.*, 6, 537–541, 1970.
- [64] H. M. Haskal, “Polarization and efficiency in magnetic holography,” *IEEE Trans. Magn.*, 6, 542–545, 1970.
- [65] R. S. Mezrich, “Magnetic holography,” *Appl. Opt.*, 9, 2275–2279, 1970.
- [66] W. E. Ross et al., “Two-dimensional magneto-optic spatial light modulator for signal processing,” *Opt. Eng.*, 22, 4, 224485, 1983.
- [67] 高木 宏幸 ほか, “磁気光学効果を用いた新しい空間光変調器,” *光学*, 42, 1, 20–25, 2013.
- [68] H. Kinjo et al., “Two micron pixel pitch active matrix spatial light modulator driven by spin transfer switching,” *Electronics*, 5, 55, 2016.
- [69] A. Yamaguchi et al., “Real-space observation of current-driven domain wall motion in submicron magnetic wires,” *Phys. Rev. Lett.*,
-

---

92, 077205, 2004.

- [70] S. S. P. Parkin et al., “Magnetic domain-wall racetrack memory,” *Science*, 320, 190-194, 2008.
- [71] K. Aoshima et al., “Current-induced domain-wall motion in patterned nanowires with various Gd-Fe compositions for magneto-optical light modulator applications,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 57, 9S2, 09TC03, 2018.
- [72] K. J. Kim, et al., “Fast domain wall motion in the vicinity of the angular momentum compensation temperature of ferrimagnets,” *Nature Mater.*, 16, 1187-1192, 2017.
- [73] M. Mansuripur, “The Physical Principles of Magneto-optical Recording,” Cambridge University Press, 1995.
- [74] E. Jesenska et al., “Optical and magneto-optical properties of Gd<sub>22</sub>Fe<sub>78</sub> thin films in the photon energy range from 1.5 to 5.5 eV,” *Materials*, 9, 1, 23, 2016.
- [75] M. Mansuripur, “Analysis of multilayer thin-film structures containing magneto-optic and anisotropic media at oblique incidence using 2×2 matrices,” *J. Appl. Phys.*, 67, 6466, 1990.
- [76] D. E. Aspnes et al., “Spectroscopic analysis of the interface between Si and its thermally grown oxide,” *J. Electrochem. Soc.*, 127, 6, 1359-1365, 1980.
- [77] I. H. Malitson, “Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica,” *J. Opt. Soc. Am.*, 55, 10, 1205-1208, 1965.
- [78] 青島賢一 ほか, “磁気光学型空間光変調器とノッチ構造を用いた磁区制御”, 2023 年秋季応用物理学会学術講演会
- [79] N. Funabashi et al., “Magneto-optical Light Modulation Using VCMA Effect in MgO/Co-Fe/Gd/Gd-Fe Layers”, *AIP Advances*, 9, 3, 035336, 2019.

- [80] M. Gomi et al., “Giant Faraday rotation of Ce-substituted YIG films epitaxially grown by RF sputtering,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 27, L1536-L1538, 1988.
- [81] M. Inoue et al., “A theoretical analysis of magneto-optical Faraday effect of YIG films with random multilayer structures,” *J. Appl. Phys.*, 81, 5659-5661, 1997.
- [82] S. Kharratian et al., “RGB magnetophotonic crystals for high-contrast magneto-optical spatial light modulators,” *Sci. Rep.*, 9, 644, 2019.
- [83] Z. He et al., “Optimal quantization for amplitude and phase in computer-generated holography,” *Opt. Express*, 29, 119-133, 2021.
- [84] R. Corda et al., “Recent advances in the processing and rendering algorithms for computer-generated holography,” *Electronics*, 8, 556, 2019.
- [85] 村上 和也 ほか, “数値的レンズ結像を用いた全方向視差計算機合成ホログラムの波動光学的再生シミュレーション,” *映像情報メディア学会誌*, 65, 12, 1793-1800, 2011.
- [86] I. Yamaguchi et al., “Phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.*, 22, 1268-1270, 1997.
- [87] R. K. Muhamad, et al., “JPEG Pleno holography: scope and technology validation procedures,” *Appl. Opt.*, 60, 641-651, 2021.
- [88] C. Chang et al., “Foveated holographic near-eye 3D display,” *Opt. Express*, 28, 1345-1356, 2020.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、社会人博士課程の学生として受け入れていただき、熱心にご指導いただきました山口雅浩教授に深く感謝を申し上げます。研究の進め方や論文の執筆方法、ホログラフィーに関する様々な事柄など、広くご指導いただきました。

本論文の執筆や審査にあたり、中村健太郎教授、金子寛彦教授、渡辺義浩准教授、Pham Nam Hai 准教授には多数のご助言をいただき、深く感謝いたします。

NHK 放送技術研究所のホログラフィックディスプレイの研究グループの皆様には、素晴らしい研究の場をご提供いただき、また、社会人博士課程への進学を後押ししていただき、感謝いたします。デバイス開発に関する一連の研究を経験させていただき、研究の幅が大きく広がりました。その他、研究所の皆様には、日々の議論や設備利用など多大なるご支援をいただきました。

山口研究室の皆様とは直接一緒に研究を進めることはできませんでしたが、ミーティングでの皆様の研究報告や、学会等での活躍は大変刺激になりました。

最後に、社会人博士課程の取得を暖かく応援していただいた家族に一層の感謝を申し上げます、謝辞に変えさせていただきます。

## 業績一覧

### 本論文に関する研究業績

#### 査読付き学術論文

1. R. Higashida, N. Funabashi, K. Aoshima, and K. Machida, "Submicron-scale light modulation device driven by current-induced domain wall motion for electro-holography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 59, 053001, 2020.  
3.3 節の内容に相当
2. R. Higashida, N. Funabashi, K. Aoshima, M. Miura and K. Machida, "Diffraction of light using high-density magneto-optical light modulator array, *Opt. Eng.* , 59, 6, 064104, 2020.  
3.4 節の内容に相当
3. R. Higashida, N. Funabashi, K. Aoshima, and K. Machida, "Enhancement of a Diffracted Beam in a Domain-wall-motion-type Light Modulator Array," *IEEE Trans. Mag.*, 58, 2, 4000505, 2021.  
3.5 節の内容に相当
4. R. Higashida, M. Miura, Y. Yamaguchi, N. Funabashi, K. Aoshima, K. Machida, and M. Yamaguchi, "Image quality assessment procedure for holographic displays based on exact numerical reconstruction of computer-generated holograms," *J. Opt. Soc. Am. A*, 40, B15-B24, 2023.  
4.2 節の内容に相当

#### 国際会議論文

1. R. Higashida, N. Funabashi, K. Aoshima and K. Machida, "A Current Induced Domain Wall Motion Type Light Modulation

- 
- Device for Electro-Holography”, Joint MMM-Intermag Conference 2019
2. R. Higashida, N. Funabashi, K. Aoshima and K. Machida, “Magnetic Hologram Reconstruction Using Magneto-optical Light Modulator Array Base on Domain Wall Motion”, IDW’19
  3. R. Higashida, N. Funabashi, K. Aoshima, M. Miura and K. Machida “ Holographic image reconstruction by magneto-optical light modulation device array”, SPIE Photonics WEST2020
  4. R. Higashida, N. Funabashi, K. Aoshima and K. Machida, “Enhancement of a Diffracted Beam by Optimizing an Incident Beam and Cap Layer Thickness in a Domain-Wall-Motion Type Light Modulator Array”, INTERMAG2021
  5. R. Higashida, M. Miura, Y. Yamaguchi, N. Funabashi, K. Aoshima, K. Machida, and M. Yamaguchi, “Simulation of Reconstructed Image Quality for Designing Ideal Holographic Near-eye Display”, Optica DH2022
  6. R. Higashida, M. Kawana, K. Aoshima, and N. Funabashi “ Holographic Display Using Magneto-optical Spatial Light Modulator with 50-M pixels and 1- $\mu$ m pixel pitch”, Optica DH2023

## 国内会議

1. 東田諒, 船橋信彦, 青島賢一, 町田賢司, “電子ホログラフィ応用を目指した W スピン磁壁移動型光変調素子”, 2018 年映像情報メディア学会年次大会
2. 東田諒, 船橋信彦, 青島賢一, 町田賢司, “磁壁移動型光変調素子アレイによる光回折の検証”, 2019 年秋季応用物理学会学術講演会
3. 東田諒, 船橋信彦, 三浦雅人, 青島賢一, 町田賢司, “サブミクロンスケール磁壁移動型光変調素子の電流駆動と高密度アレイ化”, 2020 年 10 月映像情報メディア学会 MMS 研究会

4. 東田諒, 船橋信彦, 青島賢一, 町田賢司, “磁壁移動型光変調素子における磁気光学性能指数の最適化”, 2021 年春季応用物理学会学術講演会
5. 東田諒, 三浦雅人, 山口祐太, 船橋信彦, 青島賢一, 町田賢司, “空間光変調器の基本性能がホログラフィック 3 次元像に及ぼす影響”, 2021 年映像情報メディア学会冬季大会
6. 東田諒, 三浦雅人, 山口祐太, 船橋信彦, 青島賢一, 町田賢司, “ホログラフィック AR グラスの実現に向けた空間光変調器設計の諸検討”, 2022 年 3 月映像情報メディア学会立体映像技術研究会
7. 東田諒, 三浦雅人, 信川輝吉, 山口祐太, 青島賢一, 船橋信彦, 山口雅浩, “計算機合成ホログラムの再構成特性評価”, 2022 年映像情報メディア学会冬季大会
8. 東田諒, 川那真弓, 青島賢一, 船橋信彦, “電流誘起磁壁移動を用いた空間光変調器によるホログラム再生”, 2023 年映像情報メディア学会年次大会

## 特許

1. 東田諒, 船橋信彦, 青島賢一, 町田賢司, 久我淳, 麻生慎太郎, 吉野数馬, “磁壁移動型空間光変調器”, 特開 2019 220544
2. 東田諒, 船橋信彦, 青島賢一, 町田賢司, 麻生慎太郎, 吉野数馬, “磁壁移動型空間光変調器の開口率向上構造”, 特許第 7168359 号
3. 東田諒, 船橋信彦, 青島賢一, 町田賢司, “磁壁移動型空間光変調器検査装置及び磁壁移動型空間光変調器の初期化磁界導出装置”, 特許第 7345361 号
4. 東田諒, 船橋信彦, 青島賢一, 町田賢司, “回折効率最適化システムおよび回折効率最適化方法”, 特開 2022 126985
5. 東田諒, 三浦雅人, 山口祐太, 青島賢一, 町田賢司, “ホログラムデータ生成装置、電子ホログラフィ表示装置およびそれらのプログラム”, 特開 2023 114496

## その他の業績

### 査読付き学術論文

1. N. Funabashi, R. Higashida, K. Aoshima, and K. Machida, “Magneto-optical Light Modulation Using VCMA Effect in MgO/Co-Fe/Gd/Gd-Fe Layers”, AIP Advances, vol.9, no.3, 035336, 2019.
2. K. Aoshima, N. Funabashi, R. Higashida, and K. Machida, “Current induced domain wall motion with a Ta/Gd-Fe/Si-N magnetic nanowire for a magneto-optical light modulator”, AIP Advances
3. K. Aoshima, N. Funabashi, R. Higashida, M. Kawana, S. Aso, J. Shibasaki, Y. Yamaguchi, and K. Machida, “Magneto-optical spatial light modulator driven by current induce domain wall motion for holographic display application”, Optics Express
4. S. Aso, K. Yamamoto, K. Aoshima, R. Higashida, N. Funabashi, J. Shibasaki, T. Ishinabe, Y. Shibata, H. Fujikake, and K. Machida, “Ferroelectric liquid crystal array driven by a two-layer electrode with a  $1 \times 1 \mu\text{m}$  pixel pitch for light modulation in electro-holography”, J Soc Inf Display. 2023.

### 国際会議論文

1. N. Funabashi, R. Higashida, K. Aoshima and K. Machida, “Magneto-optical Light Modulation Using VCMA Effect in MgO/Co-Fe/Gd/Gd-Fe Layers”, Joint MMM-Intermag Conference 2019
2. K. Aoshima, N. Funabashi, R. Higashida and K. Machida, “Current induced Domain Wall Motion with a Ta/Gd-Fe/Si-N Magnetic Nanowire for a Magneto-optical Light Modulator”, MMM2019

3. S. Aso, Y. Isomae, K. Aoshima, R. Higashida, N. Funabashi, J. Shibasaki, T. Ishinabe, Y. Shibata, K. Machida, H. Fujikake and H. Kikuchi, “A Two-Dimensionally Aligned Array with 1m Pixel Pitch Using Ferroelectric Liquid Crystal Pixels for Holography Application”, SID2020
4. K. Aoshima, T. Yamamoto, M. Nishikawa, R. Higashida, N. Funabashi, T. Ishibashi, K. Machida, “ Spin-Hall magneto-resistance in Pt/Ga:YIG prepared by the metallic organic decomposition method”, JEMS2020
5. J. Shibasaki, S. Aso, K. Aoshima, R. Higashida, N. Funabashi, T. Ishinabe, Y. Shibata, H. Fujikake and K. Machida, “Evaluation and Analysis of Light Diffraction from One-Dimensional Liquid Crystal Devices with small Pixel-Pitch more than 1  $\mu\text{m}$ ”, IDW’ 20
6. S. Aso, K. Aoshima, R. Higashida, N. Funabashi, J. Shibasaki, T. Ishinabe, Y. Shibata, H. Fujikake and K. Machida, “Ferroelectric Liquid Crystal Pixel Arrays with  $1\times 1\text{-}\mu\text{m}$  Pixel Pitch for Electro-Holography”, IDW’ 20
7. S. Aso, K. Aoshima, R. Higashida, N. Funabashi, J. Shibasaki, T. Ishinabe, Y. Shibata, H. Fujikake and K. Machida, “Ferroelectric Liquid Crystal Pixels with Extremely Small Pixel for Holographic Displays”, AM-FPD’ 21
8. S. Aso, K. Yamamoto, K. Aoshima, J. Shibasaki, R. Higashida, N. Funabashi, T. Ishinabe, Y. Shibata, H. Fujikake and K. Machida, “Viewing Zone Evaluation and Analyses of the Holographic Images Reconstructed by  $1\text{-}\mu\text{m}$  Ferroelectric Liquid Crystal Pixel Arrays”, IDW’ 21
9. T. Muroi, R. Higashida, T. Nobukawa, Y. Katano and K. Hagiwara “Optical Reconstruction of 3D Information Acquired by Incoherent Digital Holography” IDW’ 22
10. K. Aoshima, N. Funabashi, R. Higashida, M. Kawana, S. Aso, J. Shibasaki, Y. Yamaguchi and K. Machida, “A Magneto-optical

- 
- Spatial Light Modulator with Narrow Pixel Pitch for Holography Application”, SID2023
11. T. Nobukawa, R. Higashida, Y. Miyamoto and K. Hagiwara, “Metasurface for complex amplitude detection based on a generalized four-step phase-shifting interferometer”, Optica Flat Optics 2023
  12. T. Nobukawa, R. Higashida, and K. Hagiwara, “Complex amplitude measurement with off-axis and phase-shifting methods for characterizing and evaluating metasurfaces”, SPIE Industrial Optical Devices and Systems (ODS 2023)
  13. K. Aoshima, N. Funabashi, R. Higashida, M. Kawana, Y. Yamaguchi, and K. Machida, “Holographic Image Reconstruction Using a Magneto-optical Spatial Light Modulator with its Pixel Pitch of 1 $\mu$ m and its Layout”, IDW2023

## 国内会議

1. 船橋信彦, 東田諒, 青島賢一, 町田賢司, “磁壁移動型 MO 光変調素子における Co/Pd ナノマグネットの保磁力制御”, 2018 年秋季応用物理学会学術講演会
2. 船橋信彦, 上野鷹幸, 東田諒, 麻生慎太郎, 青島賢一, 町田賢司, 石橋隆幸, 菊池宏, “MgO/Co-Fe/Gd/Gd-Fe における電圧磁気異方性制御効果”, 日本磁気学会第 84 回ナノマグネティックス専門研究会
3. 青島賢一, 船橋信彦, 東田諒, 町田賢司, “磁壁駆動を用いた磁気光学光変調素子の初期磁区形成”, 2019 年春季応用物理学会学術講演会
4. 船橋信彦, 東田諒, 麻生慎太郎, 青島賢一, 町田賢司, 石橋隆幸, 菊池宏, “MgO/Co-Fe/Gd/Gd-Fe に生じる VCMA 効果を用いた磁気光学光変調デバイス”, IDEMA JAPAN ヘッド・ディスク部会ワークショップ
5. 船橋信彦, 東田諒, 青島賢一, 町田賢司, “磁壁移動型スピン光変調素子の高密度 1 次元アレイ試作”, 2019 年映像情報メディア学会年次大会

6. 青島賢一,船橋信彦, 東田諒, 町田賢司, “垂直磁化磁性細線へのサブミクロンサイズハードマグネットによる磁区形成”, 2019年12月映像情報メディア学会MMS研究会
7. 麻生慎太郎, 青島賢一, 東田諒, 船橋信彦, 柴崎純一, 石鍋隆宏, 柴田陽生, 藤掛英夫, 町田賢司, “ホログラフィー応用に向けた $1\mu\text{m}$ ピッチ・2次元強誘電性液晶画素アレイの試作と評価”, 2020年10月映像情報メディア学会IDY研究会
8. 麻生慎太郎, 青島賢一, 東田諒, 船橋信彦, 柴崎純一, 石鍋隆宏, 柴田陽生, 藤掛英夫, 町田賢司, “ $1\mu\text{m}$ ピッチ・2次元強誘電性液晶画素アレイの試作とホログラフィー応用に向けた検討”, 2020年日本液晶学会オンライン研究会
9. 柴崎純一, 麻生慎太郎, 青島賢一, 東田諒, 船橋信彦, 石鍋隆宏, 柴田陽生, 藤掛英夫, 町田賢司, “狭ピッチ1次元液晶デバイスの回折特性評価”, 2020年映像情報メディア学会創立70周年記念大会
10. 早乙女拓真, 青島賢一, 保坂千都, 船橋信彦, 東田諒, 秋山泰伸, 町田賢司, “Gdx-Fel-x 磁性細線を用いた磁気光学光変調素子の電流誘起磁壁移動特性”, 2021年10月映像情報メディア学会MMS研究会
11. 山口祐太, 三浦雅人, 東田諒, 青島賢一, 町田賢司, “空間光変調器の斜め画素配置によるホログラフィックディスプレイの視域拡大”, 2021年映像情報メディア学会冬季大会
12. 信川輝吉, 東田諒, 宮本泰敬, 萩原啓, “複素振幅分布検出用のメタサーフェスの設計・作製”, 2022年春季応用物理学会学術講演会
13. 橋本和也, 東田諒, 項福林, 武山彩織, 山口雅浩, “ハードコピーでの動画CGH再生のための光線-波面変換に基づく計算手法”, 2023年3月映像情報メディア学会立体メディア技術研究会
14. F. Xiang, K. Hashimoto, R. Higashida, T. Sakamoto, S. Takeyama and M. Yamaguchi, “An Animated Computer Generated Hologram in Hardcopy based on Ray-Wavefront Conversion”, 3次元画像コンファレンス2023
15. 青島賢一, 小西怜美, 川那真弓, 東田諒, 船橋信彦, 秋山泰伸, 町田賢司, “磁気光学型空間光変調器とノッチ構造を用いた磁区制御”, 2023年秋季応用物理

## 学会学術講演会

16. 川那真弓, 東田諒, 青島賢一, 船橋信彦, “狭ピッチ磁壁移動型空間光変調器の開発と駆動率改善”, 第 47 回日本磁気学会学術講演会
17. 川那真弓, 東田諒, 青島賢一, 山口祐太, 町田賢司, 船橋信彦, “水平画素ピッチ  $1\mu\text{m}$  の磁壁移動型空間光変調器の開発とホログラム再生像実証”, 2023 年情報ディスプレイ研究会
18. 町田賢司, 川那真弓, 東田諒, 青島賢一, 船橋信彦, “ホログラフィックディスプレイ用磁気光学空間光変調器の開発 ～自然な 3 次元映像の再生に向けて～”, 高臨場感ディスプレイフォーラム 2023

## 特許

1. 麻生慎太郎, 町田賢司, 青島賢一, 吉野数馬, 東田諒, 船橋信彦, 菊池宏, “液晶光変調器、液晶表示装置、およびホログラフィ装置”, 特許 7165556 号
2. 青島賢一, 船橋信彦, 東田諒, 町田賢司, “磁気光学型光変調素子および空間光変調器”, 特許 7228404 号
3. 船橋信彦, 東田諒, 青島賢一, 麻生慎太郎, 柴崎純一, 町田賢司, “磁壁移動型空間光変調素子および磁壁移動型空間光変調器”, 特開 2020-160220
4. 柴崎純一, 麻生慎太郎, 町田賢司, 青島賢一, 吉野数馬, 東田諒, 船橋信彦, 菊池宏, “液晶デバイスの表示色初期化方法”, 特許 7281369 号
5. 町田賢司, 船橋信彦, 青島賢一, 東田諒, 麻生慎太郎, 柴崎純一, “磁壁移動型空間光変調器”, 特開 2021-110787
6. 三浦雅人, 東田諒, 柴崎純一, 船橋信彦, 麻生慎太郎, 青島賢一, 町田賢司, “ホログラムデータ生成装置およびそのプログラム”, 特開 2022-39234
7. 青島賢一, 船橋信彦, 東田諒, 町田賢司, “磁壁移動素子、磁気記憶素子、空間光変調器および磁気メモリ”, 特開 2022-83931
8. 三浦雅人, 平野芳邦, 宮本裕司, 東田諒, 山口祐太, 青島賢一, 柴崎純一, 町

- 田賢司, “ホログラフィ用再生照明光照射装置およびホログラフィックディスプレイ”, 特開 2023-8330
9. 町田賢司, 東田諒, 船橋信彦, 青島賢一, 村井俊介, 田中勝久, “磁気光学デバイス”, 特開 2023-62555
10. 信川輝吉, 東田諒, 萩原啓, “光学デバイス及び可変光学装置”, 特開 2023-78789
11. 山口祐太, 三浦雅人, 東田諒, 青島賢一, 町田賢司, “空間光変調器およびホログラムデータ生成装置並びにホログラム表示システム”, 特開 2023-80909
12. 信川輝吉, 佐々木桃子, 東田諒, 片野祐太郎, 後藤正英, 室井哲彦, 萩原啓, “インコヒーレントデジタルホログラム信号処理装置および撮像表示システム”, 特開 2023-124051
13. 川那真弓, 船橋信彦, 東田諒, 青島賢一, 町田賢司, “磁壁移動型空間光変調器”, 特開 2023-136628
14. 船橋信彦, 川那真弓, 東田諒, 青島賢一, 町田賢司, “磁壁移動型空間光変調器”, 特開 2023-136629