

ホログラムメモリーの高速大容量転送に関する研究

Studies on High-Speed and Large-Capacity Data Transfer  
of Holographic Data Storage

2022年4月

片野 祐太郎  
Yutaro KATANO

ホログラムメモリーの高速大容量転送に関する研究

Studies on High-Speed and Large-Capacity Data Transfer  
of Holographic Data Storage

2022年4月

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

片野 祐太郎  
Yutaro KATANO

# 目次

第1章	序章	3
1.1.	研究背景	3
1.2.	ホログラムメモリーの原理と研究開発動向	6
1.3.	高転送速度化に向けた本論文のアプローチ	11
1.4.	本論文の構成	14
	参考文献	16
第2章	波面補償を用いた8K映像の安定再生	18
2.1.	緒言	18
2.2.	記録媒体の歪みと波面補償技術	18
2.3.	波面補償実験	21
2.4.	8K映像リアルタイム再生実験	27
2.5.	結言	30
	参考文献	32
第3章	透過参照光を使ったデュアルページ再生	34
3.1.	緒言	34
3.2.	デュアルページ再生手法の原理	34
3.3.	透過参照光を使ったデュアルページ再生	37
3.4.	透過参照光の強度	38
3.5.	記録再生光学系の構築	40
3.6.	記録再生実験	42
3.6.1	実験条件	42
3.6.2	再生データ品質評価	44
3.6.3	データ転送速度評価	47
3.7.	結言	48
	参考文献	50
第4章	畳み込みニューラルネットワークを使ったデータ復調	51
4.1.	緒言	51
4.2.	ホログラムメモリーで生じるノイズと再生エラー	51
4.3.	畳み込みニューラルネットワークによる復調原理	57
4.4.	振幅2値変調方式の再生データを用いた復調特性評価	59
4.4.1	ネットワーク構成	59
4.4.2	学習	61
4.4.3	復調結果	62

4.5.	結言 .....	65
	参考文献 .....	67
第 5 章	振幅 4 値変調方式と再生データの復号 .....	69
5.1.	緒言 .....	69
5.2.	10 : 9 変調符号 .....	69
5.3.	空間結合 LDPC 符号による誤り訂正 .....	71
5.4.	CNN と空間結合 LDPC 符号を組み合わせた復号システム .....	74
5.5.	実験結果 .....	78
5.5.1	学習および復調結果 .....	78
5.5.2	対数尤度比分布 .....	80
5.5.3	誤り訂正結果 .....	80
5.6.	結言 .....	83
	参考文献 .....	85
第 6 章	複素振幅 16 値変復調技術 .....	87
6.1.	緒言 .....	87
6.2.	20 : 9 変調符号と変調テーブルの最適化 .....	87
6.3.	シンボル位置信号と複素振幅信号を独立に復調する CNN 復調 .....	94
6.4.	復調特性評価 .....	98
6.5.	結言 .....	101
	参考文献 .....	102
第 7 章	総論 .....	103
	謝辞 .....	106
	研究業績 .....	107

# 第1章 序章

## 1.1. 研究背景

IoT デバイスやクラウドサービスの普及, AI や 5G などの急速な発展・普及につれて, 身の回りのあらゆる情報がデジタル化されてデータとして取り扱われるようになり, ビッグデータ時代の進展が一段と加速している. 以前は放送局などの限られた人間が扱ってきた高画質な映像コンテンツも, 今やスマートフォンを使って誰もが容易に撮影できるようになり, 手軽にインターネット上で共有される. 膨大なデータは生活の利便性を大いに高めると同時に, デジタルトランスフォーメーションによる社会変革を活性化している. この超大容量データ社会を影で支えているのがストレージである. 磁気, 半導体, 光などを駆使したさまざまなメモリーがこれまでに開発され, 記憶容量, サイズ, データ寿命, コストなど, それぞれが持つ特徴にあわせて適材適所で利用されている. 2025 年には全世界で 175 ZB (Zetta Byte, 1 ZB =  $10^{21}$  Byte) もの膨大なデータが発生すると見込まれる[1]中で, 懸念されるのは発生から時間の経過したデータの扱いである. データアクセスのほとんどは, 発生した直後のデータに集中する. こうしたデータは“ホットデータ”と呼ばれる. 時間の経過につれて急速にアクセス頻度は低下し, 数年経てばデータを読み出すことはほぼなくなるに等しい. しかしながら, 遡ってアクセスする可能性もゼロではなく, また貴重な資産でもあるため, 削除することはできない. ホットデータとは対照的に, これらは“コールドデータ”と呼ばれる. 今後, 長期保管の必要なデータも爆発的に増加していくことは明らかであり, それに対応できるメモリーが

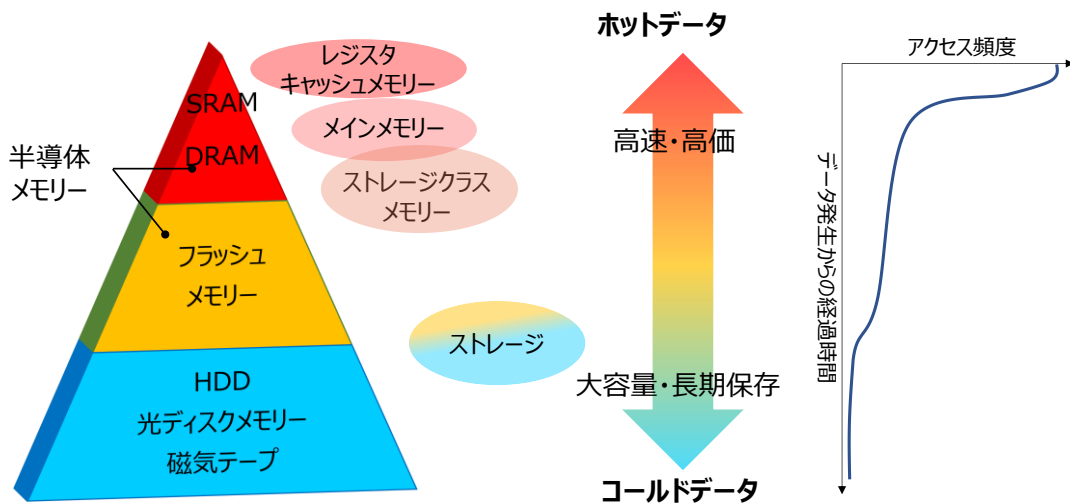


図 1.1 記録データの種類と保管メディア

必要となる。アクセス性の高いホットデータのメモリーには、超高速性が求められる一方で、長期保存性は必要ではないため、ビット単価の高い半導体メモリーが使用される。これに対して、コールドデータ用のメモリーとしては、アーカイブするために堅牢性や長期の寿命が必要となり、加えてアクセス頻度は低いため、特に低コストであることが求められる。

こうしたアーカイブ用のメモリーとして重要な役割が期待されるデバイスが光メモリーである。これまで実用化されてきた CD (Compact Disc), DVD (Digital Versatile Disc), BD (Blu-ray Disc) ではいずれも高い長期保管性が示されており、加速試験によって 50 年以上の長期保管が可能であると評価されている[2]。加えて、2005 年に米国で発生したハリケーン、カトリナの災害では、水没した記録媒体のうち光メディアのみが唯一再生できたという報告もあり[3]、堅牢性も兼ね備えている。コスト面においては、ディスク媒体の材料費だけでなく、保管寿命が長いことから、データマイグレーションと呼ばれるデータ移行の頻度が低い点も有利である。ハードディスクを使用する現行のデータセンターでは、排熱用空調設備や待機電力が原因となって費用や環境に関する問題を抱えている。一方で、光メモリーではこうした課題も解決できるため、パナソニックが大規模データセンター向け光ディスクアーカイブシステムを Facebook (現 Meta) と連携して開発するなど、実用化に向けた動きも活発である[4]。勿論、4K 映像を記録再生可能な UHD BD (Ultra-High Definition Blu-ray Disc) 規格[5]に対応した製品が販売され、最新ゲーム機にも対応ドライブが搭載されるなど、大容量性や高速性においても優れている。アーカイブ用途のメモリーとして、BD をベースにした Archival Disc[6]の開発も進められている。また、放送局などで現在アーカイブメディアとして一般的に使われている磁気テープと比べると、光メモリーはランダムアクセスが可能である点も有利である。

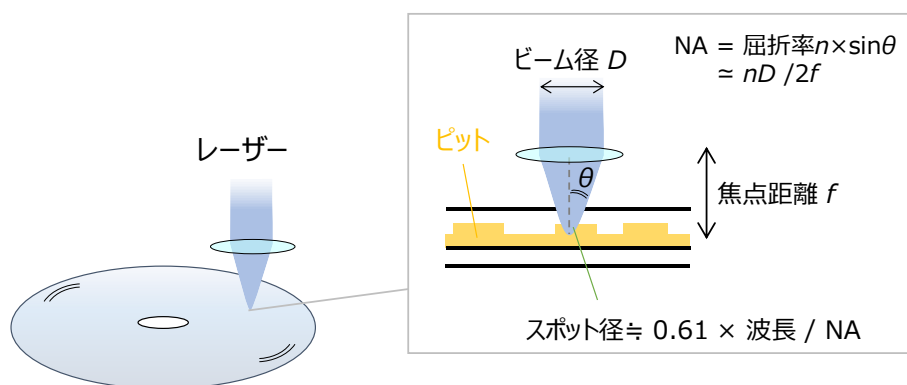


図 1.2 従来型 (ビットバイビット方式) の光メモリー

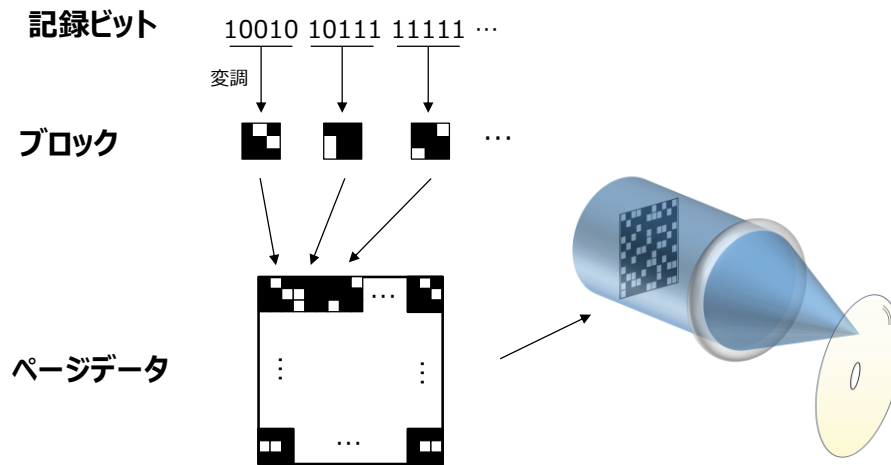


図 1.3 ページデータを使ったホログラムメモリーの光記録

従来型の光メモリーの再生原理について述べる．光ディスクにはピットとランドと呼ばれる領域が存在する．それぞれの領域で反射光の強度が異なり，ピットでは反射光の強度が低く，ランドでは高い．これにより，レーザーを照射して光ピックアップ部で“0”または“1”を判定する．一度の光照射では1ビットの情報が再生され，ディスクを回転させながらシーケンシャルにデータを読み出していく．ピットが微細であれば面積あたりに記録可能な情報量が増えることになるため，ディスクに照射するビームのスポット径を小さくすることでCDからDVD，BDへと次第に記録容量が向上した．光のスポット径 $d$ は，光源の波長 $\lambda$ とレンズの開口数（Numerical Aperture, NA）を用いて $d = 0.61 \times \lambda / \text{NA}$ で表され，波長に比例し，かつNAに反比例する．そのためCDでは780 nm，DVDでは650 nm，BDでは405 nmと，次第に波長の短いレーザー光源がそれぞれ用いられ，NAも0.45, 0.6, 0.85と高められてきた[5]．その一方で，さらに短波長である紫外領域には適した光学部品やレーザー光源がないこと，加えてNAの理論限界値は1であることから，ビットバイビットと呼ばれる従来の記録方式では，さらなる発展を遂げるには極めて難しい状況にある．

こうした中で，これまでとは全く異なる記録再生手法を用いた光メモリーとして期待されるのがホログラムメモリーである[7]．ホログラムメモリーでは，図1.3に示すように，記録対象のビット列を変調し，ページデータと呼ばれる2次元配列のデータフォーマットにして記録再生する．すなわち，一度の光照射でメガビット級の膨大な情報を読み書きできるため，従来の光メモリーと比べるとデータ転送速度を爆発的に向上できる．加えて，記録媒体上の同一箇所に，異なる情報を重ね書き（多重記録）可能であり，さまざまな多重記録方式を組み合わせることで高密度にデータを記録できる．記録媒体に

フォトポリマー（感光性樹脂）材料を用いることで、従来の光メモリー同様に 50 年以上の長期保存性があることも確認されており[8]，次世代光メモリーとして盛んに研究されている。

## 1.2. ホログラムメモリーの原理と研究開発動向

Gabor によってホログラフィー技術がもたらされたのは 1948 年である[9]。顕微鏡の分解能を向上させるための手法として発案されたが、当時はホログラムを生成するにあたって十分なコヒーレンス長を持つ光源が少なかった。その後、1960 年にレーザーが誕生する[10]と、ホログラフィー技術を用いたさまざまな応用技術が生み出され、飛躍的に発展することとなる。1964 年に Leith が発案した 3 次元表示ディスプレイ[11]とほぼ同時期にホログラムメモリーが 3 次元記録ストレージとして提案され[7]，多重記録手法や記録材料の進化が組み合わさり，現在に至るまで性能向上が進められてきた。

ホログラムメモリーの記録再生原理を図 1.4 に示す。データの記録には、まず記録対象のビット列を変調してページデータを生成する。これを空間光変調器に表示し、ペー

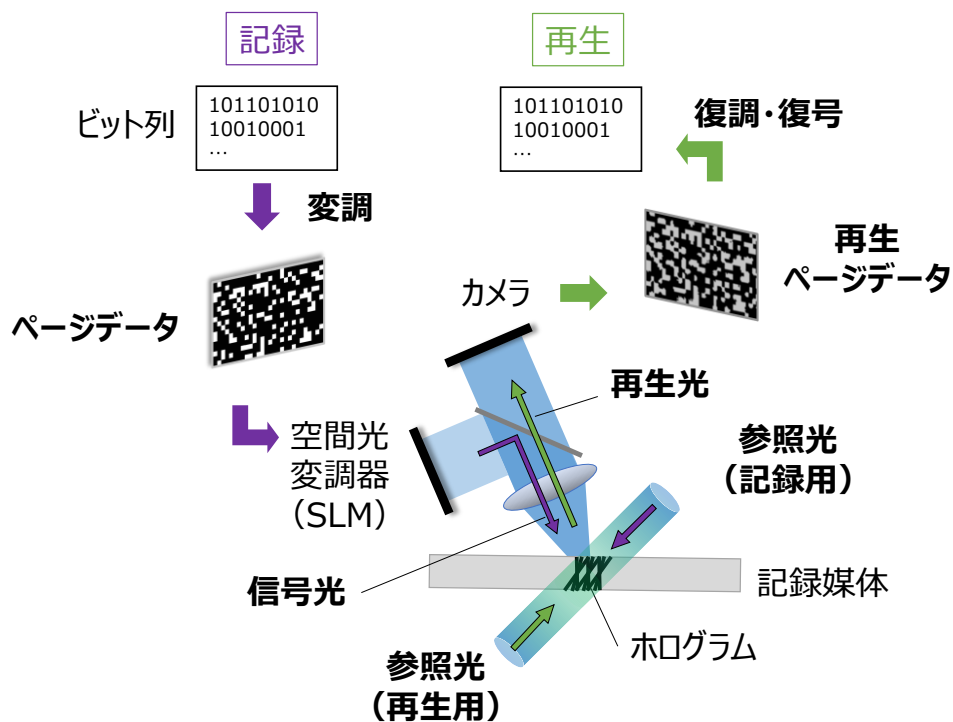


図 1.4 ホログラムメモリーの記録再生原理



ジデータを担持するように変調した光が信号光である。無変調の参照光を同時に記録媒体に照射すると、2つの光が干渉して干渉縞（光の強弱の分布）が生じる。この干渉縞を記録媒体中に屈折率分布として保存したものがホログラムである。再生時には、参照光のみをホログラムに照射する。参照光はホログラムに回折され、ページデータが重畳された再生光を読み出すことができる。再生光をカメラで撮影し、画像として取得した再生ページデータを信号処理によって元のビット列に復調、復号する。ホログラムの特徴として、光の振幅と位相の双方を記録できることが挙げられる。これにより、ディスプレイでは立体（奥行）情報を取り扱うことが期待でき、メモリーとしては大容量化を図ることが可能となる。

記録再生の原理を詳細に述べる。信号光 $S(\mathbf{r})$ と参照光 $R(\mathbf{r})$ は光波であるから、ある位置 $\mathbf{r}$ においてそれぞれ

$$S(\mathbf{r}, t) = S_0 e^{i(\omega_S t - \mathbf{k}_S \cdot \mathbf{r} + \varphi_S)} \quad (1.1)$$

$$R(\mathbf{r}, t) = R_0 e^{i(\omega_R t - \mathbf{k}_R \cdot \mathbf{r} + \varphi_R)} \quad (1.2)$$

となる。ここで $S_0$ および $R_0$ は信号光と参照光の振幅、 $\omega_S$ と $\omega_R$ は信号光と参照光の角周波数、 $\mathbf{k}_S$ と $\mathbf{k}_R$ は信号光と参照光の波数ベクトル、 $\varphi_S$ と $\varphi_R$ は信号光と参照光の初期位相である。干渉縞は2つの波の和の強度となるから、

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}, t) &= |S(\mathbf{r}, t) + R(\mathbf{r}, t)|^2 \\ &= |S(\mathbf{r}, t)|^2 + |R(\mathbf{r}, t)|^2 + R^*(\mathbf{r}, t)S(\mathbf{r}, t) + S^*(\mathbf{r}, t)R(\mathbf{r}, t) \\ &= S_0^2 + R_0^2 + 2S_0R_0 \cos[(\omega_R - \omega_S)t + (\mathbf{k}_S - \mathbf{k}_R) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_R - \varphi_S)] \end{aligned} \quad (1.3)$$

となる。\*はエルミート転置を表す。第三項の  $\cos$  関数がホログラムの縞模様（光の強弱分布）を表しており、 $\mathbf{k}_S - \mathbf{k}_R$ が記録された干渉縞のベクトルである。

ホログラムの振幅透過率分布 $T$ は、干渉縞の強度に比例し、

$$T(\mathbf{r}) = T_0 + T_m I(\mathbf{r}) \quad (1.4)$$

となる。ここで、 $T_0$ はバイアスとなる基準透過率、 $T_m$ は透過率変調度である。ホログラムを透過した光の振幅分布 $D(\mathbf{r}, t)$ は、読み出しに用いる再生用参照光 $R(\mathbf{r}, t)$ との積、すなわち

$$D(\mathbf{r}, t) = R(\mathbf{r}, t)T(\mathbf{r}) \quad (1.5)$$

である。代入すると、

$$\begin{aligned}
 D(\mathbf{r}, t) &= R(\mathbf{r}, t)\{T_0 + T_m I(\mathbf{r})\} \\
 &= R(\mathbf{r}, t)[T_0 + T_m\{S_0^2 + R_0^2 + R^*(\mathbf{r}, t)S(\mathbf{r}, t) + S^*(\mathbf{r}, t)R(\mathbf{r}, t)\}] \\
 &= R(\mathbf{r}, t)\{T_0 + T_m(S_0^2 + R_0^2)\} + T_m |R(\mathbf{r}, t)|^2 S(\mathbf{r}, t) + T_m R^2(\mathbf{r}, t) S^*(\mathbf{r}, t) \quad (1.6)
 \end{aligned}$$

となる。上式の第一項は、参照光のうちホログラムを透過してそのまま直進する光、すなわち0次の回折光である。第二項は信号光 $S(\mathbf{r}, t)$ の関数となっており、ホログラムに記録された情報が再生された1次回折光であり、再生光である。第三項は、 $S^*(\mathbf{r}, t)$ の関数であり、信号光の共役光である。波数ベクトル、すなわち光波の伝搬方向が逆転した信号光であり、-1次回折光である（図1.5）。

再生に用いる参照光を記録媒体の逆側から照射した場合、すなわち記録に用いる参照光の共役光とした場合には、記録媒体から回折される光は

$$\begin{aligned}
 D'(\mathbf{r}, t) &= R^*(\mathbf{r}, t)\{T_0 + T_m I(\mathbf{r})\} \\
 &= R^*(\mathbf{r}, t)[T_0 + T_m\{S_0^2 + R_0^2 + R^*(\mathbf{r}, t)S(\mathbf{r}, t) + S^*(\mathbf{r}, t)R(\mathbf{r}, t)\}] \\
 &= R(\mathbf{r}, t)\{T_0 + T_m(S_0^2 + R_0^2)\} + T_m |R^*(\mathbf{r}, t)|^2 S^*(\mathbf{r}, t) + T_m R^{*2}(\mathbf{r}, t) S(\mathbf{r}, t) \quad (1.7)
 \end{aligned}$$

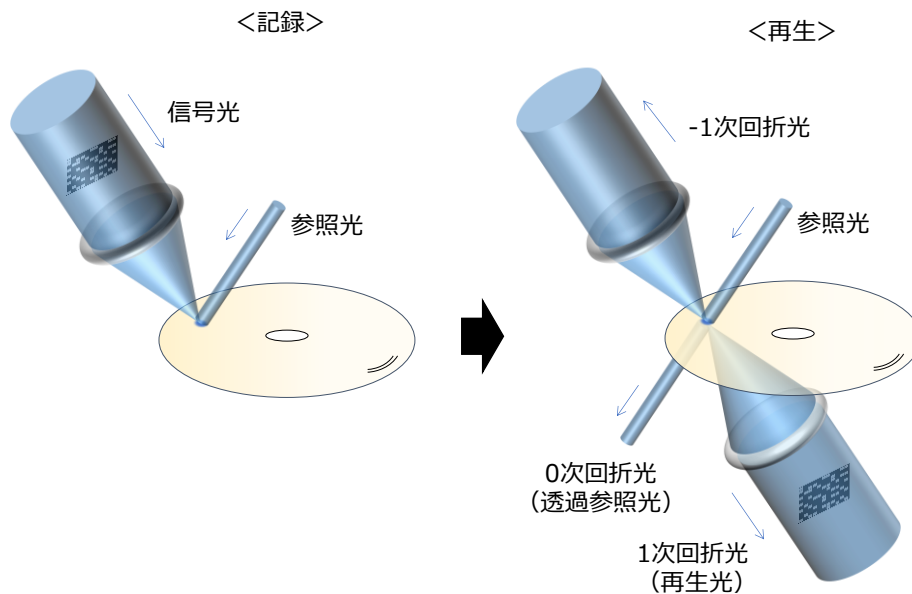


図 1.5 ホログラム記録再生時の信号光，参照光，回折光

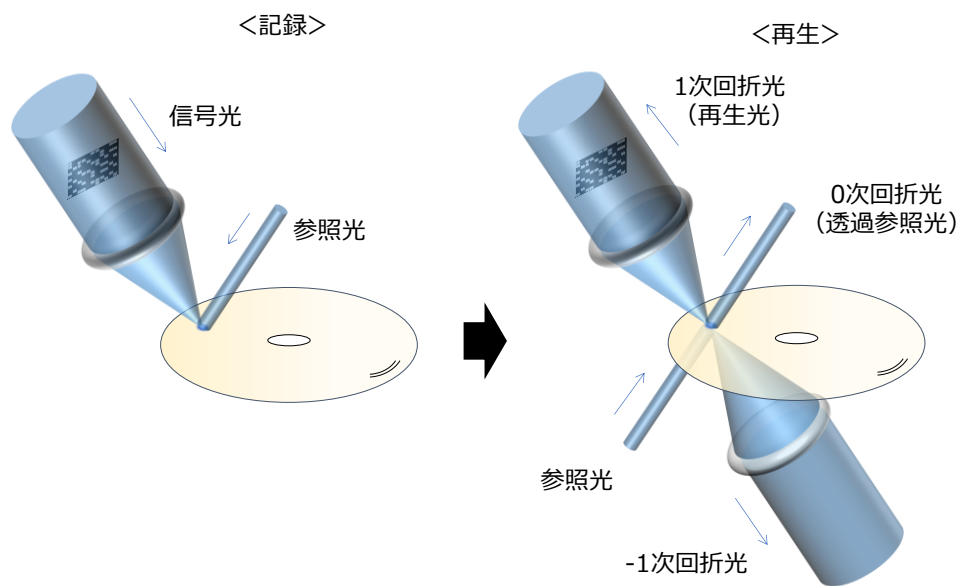


図 1.6 位相共役再生

となる．再生光である 1 次回折光は上式の第二項であり， $S^*(\mathbf{r}, t)$  の関数となっていることから記録時の信号光の共役である．つまり，図 1.6 に示すように，再生光は記録時の信号光と同じ光路を逆方向に伝搬する．これを位相共役再生と呼ぶ[12-14]．このような再生手法をとれば，記録時にレンズ等の光学部品を伝搬して信号光に収差が生じてても，同じ光学部品を逆伝搬することによって収差をキャンセルでき，高品質にデータを再生できる．

次に，多重記録手法について述べる．ホログラムメモリーの記録容量増加のために，これまでにさまざまな多重記録方法が提案されている．参照光に球面波を用いて記録媒体をわずかに位置シフトさせながら多重記録していく球面シフト多重方式[12]を用いた例では，2015年にディスク 1 枚あたりの記録容量として 2 TB が報告されている[13]．光通信の大容量伝送を支える WDM (Wavelength Division Multiplexing, 波長分割多重) のように，光源の波長に応じて形成される干渉縞が異なることに着目した波長多重方式[14, 15]も提案されたが，複数のレーザー光源が必要となるため，システムの大型化が課題となっている．そのほかにも，ランダムに位相変調した参照光を用いて，スペックル径に相当する距離分のシフトをして多重するスペックルシフト多重方式[16]，記録媒体を面内方向に回転させて多重するペリストロフィック多重方式[17, 18]などが提案されている．しかしながら，いずれも多重可能なホログラムの数や，要求されるアライメント精度なども踏まえて総合的に評価すれば一長一短であると言える．そういった中で，

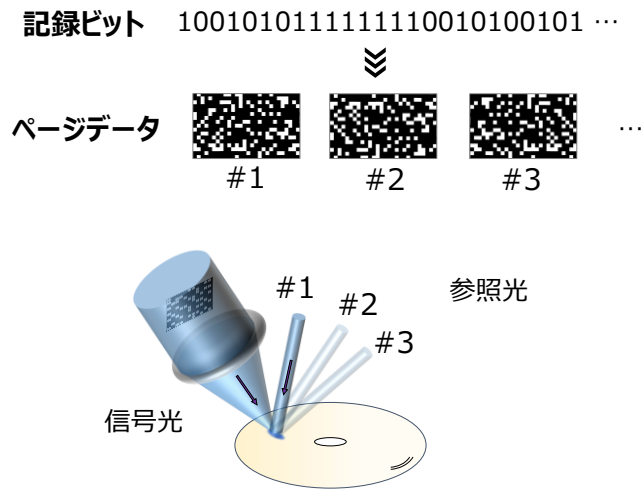


図 1.7 角度多重記録

これまでに記録密度のレコードを次々と打ち破ってきた手法が角度多重方式[19, 20]である。これは図 1.7 に示すように、記録媒体に対して参照光の入射角を変えることで、同一箇所異なるページデータを多重記録する方法である。角度選択性が高く、数十ミリ度間隔で多重できる[8]ため、同一箇所数百のページデータを多重記録できる。2009年には 663 Gb/inch<sup>2</sup>[21], 2013 年には 1 Tb/inch<sup>2</sup>[22], 2016 年には 2.4 Tb/inch<sup>2</sup>[8]がそれぞれ報告されている。

最後に、記録媒体の発展について述べる。古くから用いられていたのは、LiNbO<sub>3</sub> (ニオブ酸リチウム) である。電気光学結晶である LiNbO<sub>3</sub> 内で光を干渉させると、光の強度に応じて電荷が移動して結晶内に電界が発生し、電気光学効果によって屈折率が変化する (フォトリフレクティブ効果)。この屈折率分布は光の照射後も保存されるため、メモリーとなる。LiNbO<sub>3</sub> は、光通信の分野では高速大容量のネットワークを支える光変調器として現在でも広く用いられる。1.3 μm 以下の波長帯では、強度の高い光信号が光変調器の導波路を伝搬すると、同様に導波路内に屈折率分布が生じて伝搬損失が生じる (光損傷) ため、Mg や Zn を添加して光損傷を抑制する手法がとられる[23, 24]。一方、ホログラムメモリー用途では、回折効率を高める目的で Fe が添加されたものが一般的に用いられ、書き換え可能なメモリーとしての活用が期待されていた[25, 26]。しかしながら、寿命が数か月程度[27]と短く、また感度が低いため記録には強力な光照射が必要であることが課題となっていた。

これらの課題を解決できる材料として 2000 年頃から積極的に用いられるようになって

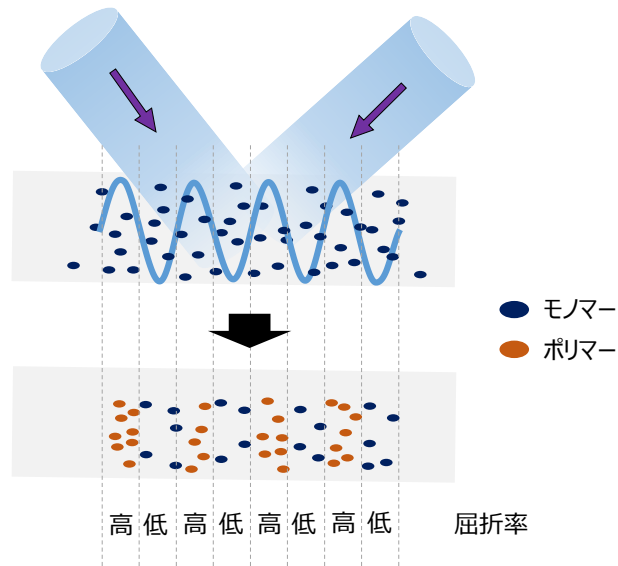


図 1.8 フォトポリマーでの記録原理

たのがフォトポリマー材料である[28, 29]. 記録前, フォトポリマー材料内ではモノマー (低分子) が一様に分布している. 光が照射されると光重合反応が発生し, モノマーが光強度の高い領域に流れ込んでいき, 分子の体積を収縮させながら結合してポリマー (高分子) となる. このように干渉縞の光の強度分布に合わせてモノマーの分布が変化するため, 屈折率分布として干渉縞を記録できる (図 1.8). 光重合反応は一般に非可逆なプロセスであることから, 書き換えのできないライトワンス型のメモリーとなる反面, 記録した情報が消えづらく, 長期保存性に優れている.

こうした技術進展に加えて, ホログラムメモリーの光学システムを構成する光デジタルデバイスの開発が進んだ. ページデータを光に重畳する SLM (Spatial Light Modulator, 空間光変調器) や DMD (Digital Micromirror Device, デジタルマイクロミラーデバイス), 再生時にページデータを取得するためのイメージセンサーなどの, 高画素化, 高速化, 高感度化が, ホログラムメモリーの記録密度と転送速度の向上に大いに貢献している.

### 1.3. 高転送速度化に向けた本論文のアプローチ

昨今の情報化社会で生み出されるデータの特徴として, 単に大容量であるだけでなく, データレートが高いことが挙げられる. 映像コンテンツの高精細化が進み, 動画配信サービスでも 4K の動画コンテンツが多く扱われ, スマートフォンでも 4K/8K 映像が撮影可能となった今日では, アーカイブ用途のメモリーにおいても高速性への要求が急速に

高まっている。世界に先駆けて日本では 2018 年から 4K/8K 放送が開始された。8K は  $7,860 \times 4,320$  の画素数，最大 120 Hz のフレームレート，最大 12 ビットの深度を併せ持つため，非圧縮では最大 144 Gbps のビットレートとなる[30]。H.265/MPEG-H HEVC (High Efficiency Video Coding) や H.266/VVC (Versatile Video Coding) など，映像データを高精細に圧縮できるコーデックの開発も進んでいるものの，アーカイブの場合には，単に長期保管して再生されるだけでなく，映像素材として再編集される可能性もあるため，可能な限り Raw (非圧縮の生データ) に近い，圧縮率の低い状態で保管されることが望ましい。すなわち，ストレージには数ギガから数十ギガビット/秒クラスの転送速度が必要となる。例えば，現行では放送局のアーカイブシステムで用いられる 8K プレイアウト映像のビットレートは 1.8 Gbps[31]，8K 制作システムで用いられる映像のビットレートは 3.6 Gbps[32]となっている。ホログラムメモリーにおいては 2004 年に転送速度 1 Gbps が報告されており[16]，高いポテンシャルが示されているものの，これらのレベルには到達しておらず，実用化に向けて求められる要求条件の一つとなっている。

ホログラムメモリーにおける転送速度は、「①単位時間あたりの再生ページデータ数」と「②ページデータあたりの情報量」の積で表せる (図 1.9)。したがって，この双方を改善していく必要がある。①を高めるために，これまでは一般的にカメラの露光時間を短くする，すなわち再生光の強度を高める技術が開発されてきた。具体的には，データの記録時には，レーザー光の強度を高めたり，照射時間を長くしたりすることで干渉縞の回折効率を高め，データの再生時には，読み出しに用いる参照光の強度を高める手法がとられる。しかしながら，回折効率を高めれば記録媒体中のモノマーが大量に消費されてしまい，多重記録可能なページデータ数が少なくなるため，記録密度が低下してしまう。参照光の強度を上げるためにレーザー光源の出力を高める手法もとられるが，最も記録密度を高められる青紫色の波長においてはレーザーの出力に限られるのと同時に，光学システムの大規模化や高コスト化が課題となる。つまり，転送速度以外の要素とトレードオフの関係であることから，これまで大きな改善は見られなかった。また，フレームレートや感度の高いカメラの導入といった，周辺技術の進歩に依存していたとも言える。

そこで本論文では，①を向上させるために従来とは異なるアプローチをとり，直交する 2 つの偏光状態の参照光を同時に記録媒体に照射する技術に取り組む。2 つの参照光を用いれば，2 つのページデータを同時に読み出すことができ，単位時間あたりに再生できるページデータ数が 2 倍となる。加えて，記録媒体に入射した参照光は，再生光以外の大部分はそのまま記録媒体を透過するため，透過光を再利用して再度記録媒体に入射させる光学系にすれば，レーザー光源は従来のもをそのまま用いることができ，効率化できる。

②のこれまでの進展についても，①と同様に，これまではデバイス技術の進展の寄与

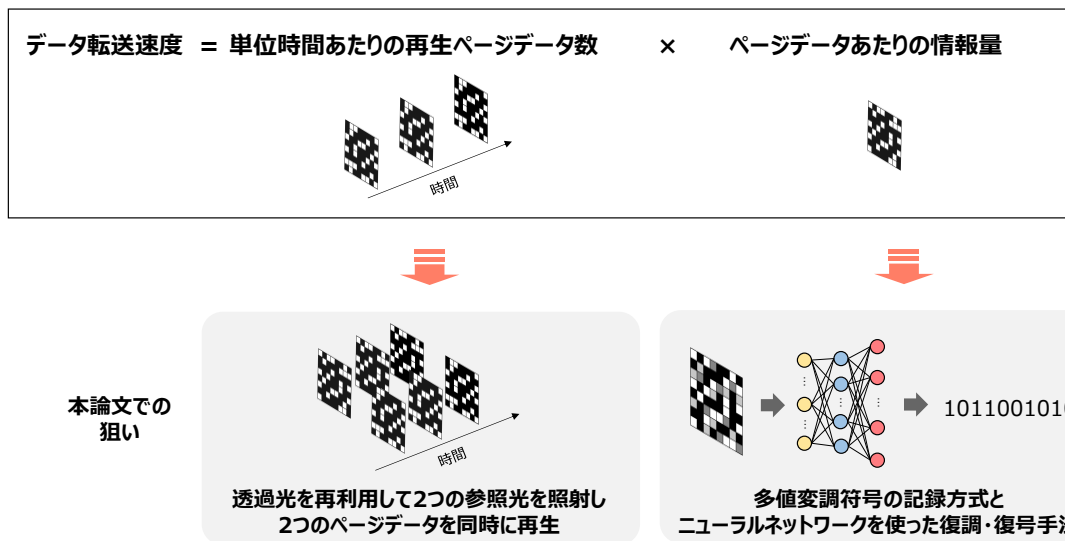


図 1.9 データ転送速度の定義と本論文での狙い

が大きい。ページデータを表示する空間光変調器やイメージセンサーの高精細化によって、ページデータ中のシンボル数が増え、情報量が増加していた。しかし、シンボル数をさらに増加させるには大面積のデバイスが必要となり、レンズなどの光学部材も含めて光学システムが大型化してしまう。そこで近年研究開発が加速しているのが、ページデータを生成する変調方式の多値化である。高い記録密度や転送速度が報告されたこれまでの多くの研究が光の振幅(強度)2値のみを用いた変調符号を使用している一方で、立体映像表示などのアプリケーションに用いられるように、ホログラムの特徴は光の振幅と位相の双方を記録できることにある。よって、複素振幅を使った多値の変調符号を導入できれば、ページデータの情報量を増やすことができ、転送速度は勿論、記録容量も高められる。そのため、②を向上させるため、本論文でもページデータを生成する変調符号の多値化を目指す。ここで一番の課題となるのが、ノイズである。多値信号では信号対雑音比 (SNR, Signa-to-Noise Ratio) が低下するため、信号がノイズに埋もれてしまい、再生エラーが発生する。従来研究では、その対策としてノイズを除去するためのさまざまな手法が提案されてきたが、完全なノイズ除去は不可能である。そこで、本研究ではノイズを除去するのではなく、ノイズが混入した再生データにおける復調精度の向上を目指す。そして新たな手法として、再生データの特徴をあらかじめ学習させたニューラルネットワークによる高精度復調技術を提案する。まず、振幅 2 値変調符号で同手法の検証をし、振幅 4 値変調符号および複素振幅 16 値変調符号の開発や、誤り訂正技術への応用を含めた、高精度かつ高効率の復調・復号システムを提案する。

## 1.4. 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

第2章では、ホログラムメモリーの安定的な再生とデータ転送速度面での実用性を実証することを目的とし、波面補償技術を用いた8K映像データのリアルタイム再生実験について述べる。はじめに、再生エラーの原因となる記録媒体の状態変化に伴うホログラムの歪みと、歪みに応じて参照光の波面を変化させる波面補償技術について述べる。波面補償機構を搭載した8Kプロトタイプドライブを新たに開発し、歪みの生じたホログラムを再生する基礎実験と、8K実用放送と同じビットレートである85 Mbpsの映像コンテンツを用いたリアルタイム再生実験について述べる。

第3章では、単位時間当たりの読み出しページデータ数を高効率に2倍にする高速化手法として、2つの参照光を同時に記録媒体に照射するデュアルページ再生手法について述べる。読み出しに使用した参照光のほとんどが記録媒体を透過することに着目し、透過参照光を取り出して偏光状態を変えた後に再照射する、効率的な高速再生手法を新たに提案する。偏光ごとに異なる損失を評価した上で最適化した記録再生条件と、構築した光学系について述べる。振幅2値変調方式の5:9変調符号で生成した48枚のページデータを角度多重記録し、再生したデータの品質とデータ転送速度について評価する。

第4章では、記録再生の過程で発生するノイズに埋もれた記録信号を正確に復調することを目的とし、畳み込みニューラルネットワークネットワーク (Convolutional Neural Network, CNN) を用いた復調手法について述べる。ホログラムメモリーの再生において、記録媒体から再生されるデータはカメラで検出される一種の画像データである。これに着目し、本章では画像認識に優れるCNNにノイズの混入した再生ページデータの特徴を学習させる手法を新たに提案する。ホログラムメモリーで生じるノイズについて説明した後に、CNNによる復調原理について述べる。振幅2値復調方式で記録された再生データを用いて、従来手法と復調精度や特性を比較する。

第5章では、ページデータあたりの情報量の増大と再生マージンの拡大を目的とし、振幅4値変調方式の開発と、CNNと空間結合LDPC (Low-Density Parity-Check) 符号を組み合わせた新たな復号手法の提案について述べる。はじめに、振幅4値変調方式として、5:9変調符号に対してデータ量を2倍に増やすことが可能な10:9変調符号を新たに提案する。次に、空間結合LDPC符号による誤り訂正について述べる。特に、従来の誤り訂正において、記録再生光路がAWGN (Additive White Gaussian Noise, 加算性白色ガウス雑音) チャンネルとされていたことについて課題を指摘する。空間結合LDPC符号の復号処理で用いる尤度分布を、CNN復調の過程で得られるクラス確率から算出する手法を新たに提案し、従来手法と誤り訂正能力について比較する。

第6章では、光の振幅と位相の双方を記録できるホログラムの特徴を活かした、複素振幅16値変調手法の導入について述べる。記録データ量をさらに2倍増大可能な20:



9 変調を新たに提案する．特に，復調時のビット誤りが低減されるよう，膨大な組み合わせの中から効率的に変調テーブルを生成する最適化手法について述べる．加えて， $2^{20}$ もの膨大な組み合わせからなるビット列を効率的に復調する手法について述べる．複素振幅信号と，複素振幅信号が重畳されたシンボル位置信号をそれぞれ独立に復調する効率的な CNN を提案し，ネットワークサイズの比較や復調精度について検証する．

第 7 章では，本論文について総括し，今後の展望について述べる．

## 参考文献

1. D. Reinsel, J. Gantz, and J. Rydning, "The digitization of the world from edge to core," IDC White Paper (2018).
2. J. Iraci, "Blu-Ray Media Stability and Suitability for Long-Term Storage," *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material* **39**, 129-155 (2018).
3. K. Wood, "Optical Media Technical Roadmap: The Revival of Optical Storage," in *The 29th IEEE Conference on Massive Data Storage* (2013).
4. I. Matsumoto and E. Sakata, "Possibility of the market expansion of large capacity optical cold archive," in *SPIE Optical Engineering + Applications* (2017).
5. Blu-ray Disc Association, "White Paper Blu-ray Disc™ Format 5th Edition" (2018).
6. Sony and Panasonic, "White Paper: Archival Disc Technology 2nd Edition" (2020).
7. P. J. van Heerden, "Theory of Optical Information Storage in Solids," *Appl. Opt.* **2**, 393-400 (1963).
8. T. Hoshizawa, K. Shimada, K. Fujita, and Y. Tada, "Practical angular-multiplexing holographic data storage system with 2 terabyte capacity and 1 gigabit transfer rate," *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 09SA06-01-09SA06-09 (2016).
9. D. Gabor, "A New Microscopic Principle," *Nature* **161**, 777-778 (1948).
10. T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby," *Nature* **187**, 493-494 (1960).
11. E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects," *J. Opt. Soc. Am.* **54**, 1295-1301 (1964).
12. G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, "Shift multiplexing with spherical reference waves," *Appl. Opt.* **35**, 2403-2417 (1996).
13. 東京理科大学報道発表資料, "世界初, 情報アーカイブに適した2テラバイト容量のホログラムメモリーの技術開発に成功～超大容量, 省電力, 長期保存, 低運用コストの同時実現～" (2015).
14. G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, "Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms," *Opt. Lett.* **17**, 1471-1473 (1992).
15. D. Lande, J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, "Digital wavelength-multiplexed holographic data storage system," *Opt. Lett.* **21**, 3, 1780-1782 (1996).
16. S. S. Orlov, W. Phillips, E. Bjornson, Y. Takashima, P. Sundaram, L. Hesselink, R. Okas, D. Kwan, and R. Snyder, "High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system," *Appl. Opt.* **43**, 4902-4914 (2004).
17. K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing," *Opt. Lett.* **19**, 13, 993-994 (1994).

18. Z. Ushiyama, H. Kurata, Y. Tsukamoto, S. Yoshida, and M. Yamamoto, "Shift-Peristrophic Multiplexing for High Density Holographic Data Storage," *Applied Sciences* **4**, 2, 148-157 (2014).
19. E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marks, and N. Massey, "Holographic data storage in three-dimensional media," *Appl. Opt.* **5**, 1303-1311 (1966).
20. F. H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Opt. Lett.* **18**, 915-917 (1993).
21. K. Shimada, T. Ishii, T. Ide, S. Hughes, A. Hoskins, and K. Curtis, "High density recording using monocular architecture for 500GB consumer system," in *2009 Optical Data Storage Topical Meeting*, (2009), 61-63.
22. M. Hosaka, T. Ishii, A. Tanaka, S. Koga, and T. Hoshizawa, "1 Tbit/inch<sup>2</sup> Recording in Angular-Multiplexing Holographic Memory with Constant Signal-to-Scatter Ratio Schedule," *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LD01-01-09LD01-05 (2013).
23. X. Zhen, Q. Li, H. Li, Z. Liu, Y. Xu, and L. Zhao, "Spectroscopic characterizations and optical damage resistance of Zn:Yb:Er:LiNbO<sub>3</sub> crystals," *J. Lumin.* **114**, 288-292 (2005).
24. C. Huang and L. McCaughan, "980-nm-pumped Er-doped LiNbO<sub>3</sub> waveguide amplifiers: a comparison with 1484-nm pumping," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **2**, 367-372 (1996).
25. D. K. McMillen, T. D. Hudson, J. Wagner, and J. Singleton, "Holographic recording in specially doped lithium niobate crystals," *Opt. Express* **2**, 491-502 (1998).
26. A. Yariv, S. S. Orlov, and G. A. Rakuljic, "Holographic storage dynamics in lithium niobate: theory and experiment," *J. Opt. Soc. Am. B* **13**, 2513-2523 (1996).
27. H. M. Smith, *Holographic Recording Materials* (Springer Berlin Heidelberg, 2006).
28. L. Dhar, A. Hale, H. E. Katz, M. L. Schilling, M. G. Schnoes, and F. C. Schilling, "Recording media that exhibit high dynamic range for digital holographic data storage," *Opt. Lett.* **24**, 487-489 (1999).
29. J. E. Boyd, T. J. Trentler, R. K. Wahi, Y. I. Vega-Cantu, and V. L. Colvin, "Effect of film thickness on the performance of photopolymers as holographic recording materials," *Appl. Opt.* **39**, 2353-2358 (2000).
30. Recommendation ITU-R BT.2020, "Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange" (2012).
31. H. Arai, "NHK Challenges for Preserving UHD Materials," in *FIAT/IFTA World Conferences* (2017).
32. 宮下英一, "8K ファイルフォーマットの動向と標準化への取り組み (スーパーハイビジョン符号化技術 特集号)," *NHK 技研 R&D*, 14-25 (2019).

## 第2章 波面補償を用いた 8K 映像の安定再生

### 2.1. 緒言

ホログラムメモリーの大容量化に向けたさまざまな技術が提案されてきた中で、記録密度のみならず転送速度についても高い数値が報告されている。例えば、2000 年頃には転送速度として 1 Gbps のシステム[1, 2]が報告されており、圧縮された JPEG (Joint Photographic Experts Group) 画像を読み出す[2]など、光学系だけでなく信号処理も含めたトータルのシステムで高い有望性が示されている。しかしながら、動画コンテンツを使った再生実験においてはビデオレートが 1.7 Mbps [3]や 6 Mbps [4]程度となっており、大容量映像コンテンツを記録再生するためのメディアとしては実用性が十分に示されていない。その原因の一つは記録媒体の性質にある。フォトポリマー材料は記録容量や長期保存性に優れる一方で、環境の変化にも敏感であるため、高速かつ大容量のデータコンテンツを安定的に読み出すことは容易ではない。本章では、まずフォトポリマーの状態変化に伴って生じる干渉縞の歪みをもたらす再生エラーについて述べる。次に、歪んだ干渉縞から記録されたデータを正確に読み出すための波面補償技術の原理について述べる。新たに開発した、波面補償光学機構を組み込んだホログラムメモリープロトタイプドライブについて述べ、波面補償の有用性を実験で確認する。最後に、85 Mbps の 8K 動画を 30 秒記録したホログラムディスクから、リアルタイムに映像を再生する実験について述べる。

### 2.2. 記録媒体の歪みと波面補償技術

フォトポリマー材料を使った記録媒体における記録原理は、1.2 節で述べたとおり、光照射によってモノマーが結合する光重合反応によるものである。モノマーは重合時に体積が収縮するため、記録媒体も収縮してしまう。また、フォトポリマー材料は温度変化に対して敏感であるため、温度上昇に伴う記録媒体の膨張や、逆に温度低下に伴う記録媒体の収縮も生じやすい。これらが原因となって記録された干渉縞が膨張／収縮すると、参照光を照射しても記録された情報を正確に再生できなくなってしまう。信号光と参照光が共に平面波である場合は図 2.1 のようになり、干渉縞の縞間隔 $d$ は、

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2.1)$$

で表される。ここで $\lambda$ は光源の波長、 $\alpha$ は信号光と参照光の成す角である。膨張／収縮に

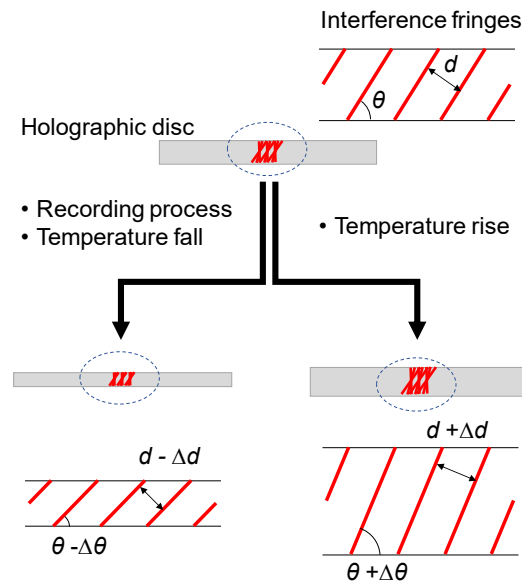


図 2.1 記録媒体の膨張収縮による干渉縞の変化

よって干渉縞間隔が変化することから、変化した縞間隔に比例して参照光の波長を意図的にずらす必要があることわかる[5, 6]. また、干渉縞のベクトルも回転することから、参照光の入射角も微調整する必要がある. しかしながら、干渉縞の膨張/収縮には異方性があることに加え、信号光は本来レンズで集光される球面波であることを鑑みれば、参照光の波長や入射角を調整しても、ページデータ面内すべての領域で完全な補償をすることはできない.

こうした異方性歪みの生じたホログラムからデータを再生する手法として、干渉縞の変化に応じて参照光の波面を変える、波面補償技術を用いた再生手法が提案されている[7, 8]. ホログラムの記録再生は、信号光や参照光の波数ベクトルを用いてエワルド球で表すことができる[9]. 波面補償の原理を図 2.2 に示す. 信号光と参照光は同波長の光であり、この二つの光の干渉でホログラムが生じることから、信号光ベクトルを  $\mathbf{k}_s$ 、記録用参照光ベクトルを  $\mathbf{k}_{rw}$ 、記録時の干渉縞ベクトルを  $\mathbf{K}$  とすると、図 2.2(a)のように信号光ベクトル  $\mathbf{k}_s$  および記録用参照光ベクトル  $\mathbf{k}_{rw}$  はエワルド球の中心から球面へのベクトル、干渉縞ベクトル  $\mathbf{K}$  は 1.2 節の(1.3)式で示したとおり 2 つのベクトルの差としてそれぞれ表せる. 信号光ベクトル  $\mathbf{k}_s$  が複数のベクトルからなる合成ベクトルであるから、干渉縞ベクトル  $\mathbf{K}$  も合成ベクトルである. 記録媒体に膨張や収縮がなければ、再生用参照光の照射により、再生用参照光ベクトル  $\mathbf{k}_{rr}$  と干渉縞ベクトル  $\mathbf{K}$  の差である再生光ベクトル  $\mathbf{k}_d$  が読み出される (図 2.2(b)). 再生光ベクトル  $\mathbf{k}_d$  は、信号光ベクトルを  $\mathbf{k}_s$  の逆

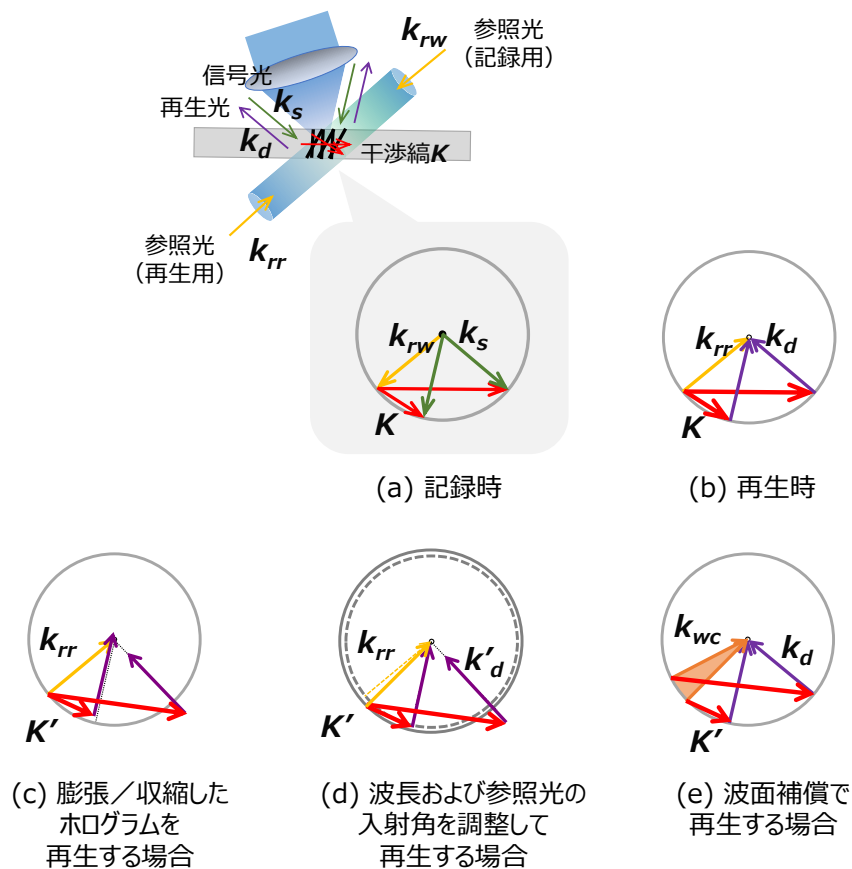


図 2.2 記録媒体の膨張収縮による干渉縞の変化

ベクトルとなっており、位相共役再生であることを示す。一方で、図 2.2(c)のように記録媒体で膨張や収縮が生じると、干渉縞ベクトル  $\mathbf{K}$  が変化する。前述したとおり異方性があるため、大きさや向きが変化した干渉縞ベクトル  $\mathbf{K}'$  の終点のほとんどはエワルド球の球面上に存在しない。よって、記録用参照光ベクトル  $\mathbf{k}_{rw}$  の逆ベクトルである再生用参照光ベクトル  $\mathbf{k}_{rr}$  をそのまま照射しても、一部の情報しか正確に読み出されない。再生用参照光の波長および参照光の入射角を調整した場合は、図 2.2(d)のようになる。再生用参照光ベクトル  $\mathbf{k}_{rr}$  の大きさや向きが変化し、干渉縞ベクトル  $\mathbf{K}'$  の終点が球面上に現れるようになるが、完全な補償はできない。これに対して、波面を変化させた参照光ベクトル  $\mathbf{k}_{wc}$  を用いれば、図 2.2(e)に示すように、膨張/収縮した干渉縞ベクトル  $\mathbf{K}'$  を構成する各ベクトルに応じて最適な波面の参照光を照射することができるため、歪んだホログラムであっても正確に情報を読み出すことができる。

波面補償に用いる任意の波面を生成する手法について述べる。波面形状  $\Phi$  はゼルニケ多項式で表され、同式の各次数の係数を定めることによって任意の波面を近似すること

表 2.1 ゼルニケ多項式

Order $n$	Polynomial $Z_n$
1	$r \cos(\varphi)$
2	$r \sin(\varphi)$
3	$2r^2 - 1$
4	$r^2 \cos(2\varphi)$
5	$r^2 \sin(2\varphi)$

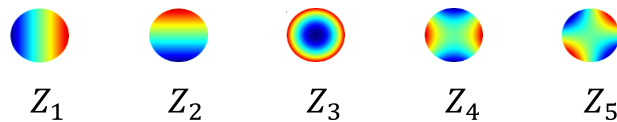


図 2.3 低次のゼルニケ項

ができる。極座標 $(r, \phi)$ においては、波面形状 $\Phi(r, \phi)$ は

$$\Phi(r, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n Z_n(r, \phi) \quad (2.2)$$

となる。ここで $C_n$ と $Z_n$ はそれぞれ次数 $n$ における係数およびゼルニケ項である。定数となる0次以降の各項は表 2.1 で表され、それぞれ図示すると図 2.3 のようになる。図 2.3 からわかるように、1次および2次はxおよびy方向のチルト、3次はデフォーカス、4次および5次は非点収差を表しており、6次以降の低次項もコマ収差や球面収差などザイデルの5収差に関連した収差が並んだ基底関数となっている。各次数の係数を決定して生成した波面形状を、位相変調 SLM (Phase-Modulation Spatial Light Modulator) やデフォーダブルミラーに表示して参照光を変調すれば、記録媒体中の歪んだホログラムに応じた理想的な波面を持つ参照光を照射できる。

### 2.3. 波面補償実験

再生光路中に波面補償機構を搭載したホログラムメモリープロトタイプドライブを開発し (図 2.4), 8K 映像を記録したデータにおける波面補償の効果を検証した。ドライブおよびディスク型記録媒体の仕様を表 2.2 に示す[10]。角度多重記録により、高い

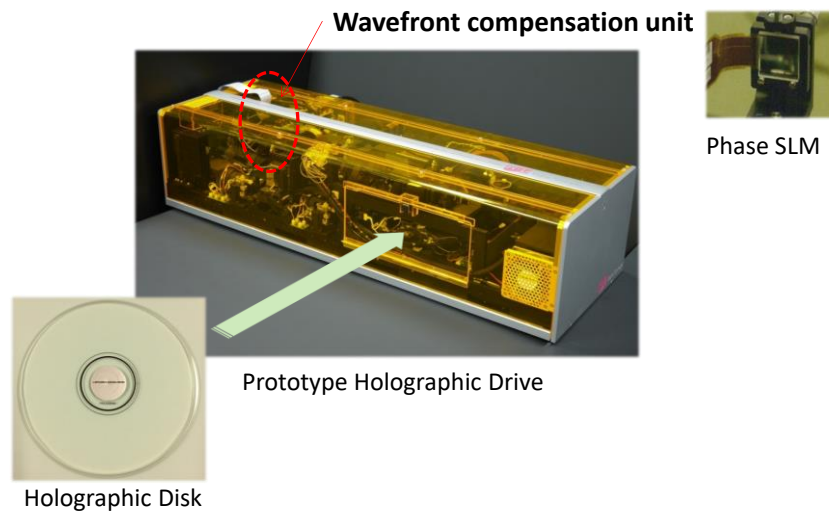


図 2.4 ホログラムメモリープロトタイプドライブとディスク型記録媒体

表 2.2 ホログラムメモリープロトタイプドライブの仕様

Dimensions	300 (W) × 900 (D) × 215 (H) mm
Recording density	2.4 Tb/inch <sup>2</sup>
Data transfer rate	520 Mbps
Wavelength of laser	405 ± 3 nm
Disc size	130 mm in diameter
Disc thickness	2.9 mm
Disc capacity	estimated 2 TB

記録密度を実現している。多重記録時および再生時に、高速かつ精密に参照光の入射角を制御するため、二軸のガルバノミラーを用いている。波面補償には、このガルバノミラーと、反射型の位相変調 SLM を用いた。ゼルニケ多項式における 1 次と 2 次の成分は x と y 方向のチルト収差であるため、ガルバノミラーの角度調整により補償できることになる。したがって、3 次以降の項の補償のために位相変調 SLM を用いる。位相変調 SLM は 1,408 × 1,058 画素となっており、各画素で最大で  $4\pi$  の位相差を付与できる。原理を図 2.5 に示す。変調時に動作するネマティック液晶が、シリコン基板とガラス基



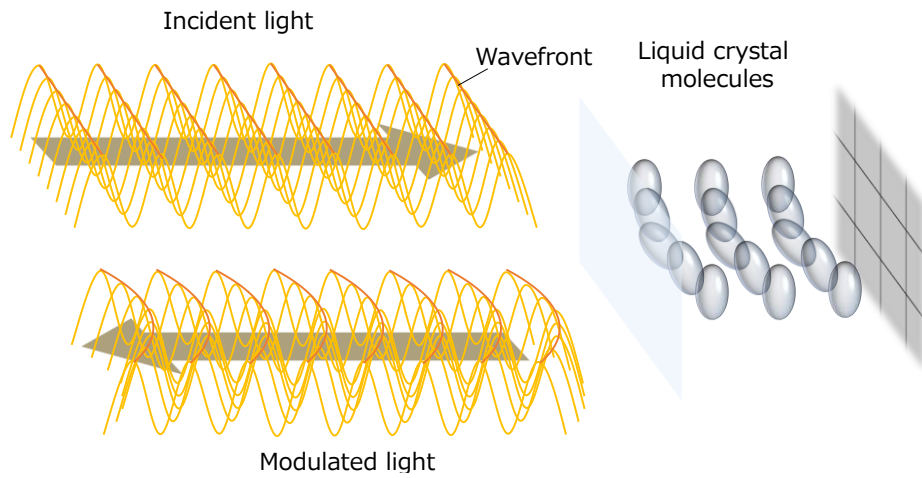


図 2.5 位相変調 SLM による波面の変化

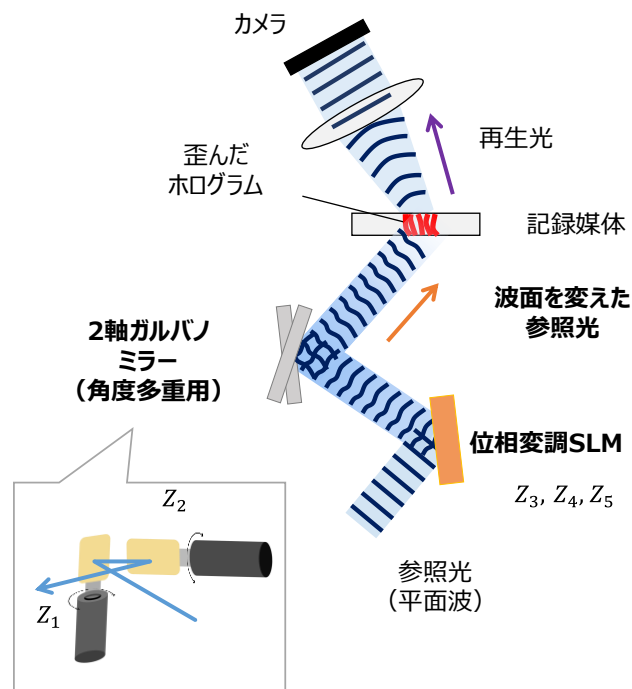


図 2.6 位相変調 SLM による波面の変化

板の間に挟まれている．液晶分子は基板に平行に配向しており，電圧をかけることで傾き，屈折率が変化する．これにより，入射光の位相に変化を与え，波面を変化させる．記録媒体の膨張収縮によるホログラムの歪みに対しては，ゼルニケ多項式のうち 5 次までの低次項の補償効果が支配的であることがわかっているため[7]，本論文においては 3

次から 5 次までのゼルニケ項の成分の和で生成した波面を位相変調 SLM に表示して、任意の波面を生成した (図 2.6).

本研究では、100 ページデータを角度多重記録し、エラー指数で再生データの品質を評価した。本指数は、ページデータ内に一定間隔で埋め込まれた既知のデータから算出されるものであり、0.05 を下回れば誤り訂正によってエラーフリーでの再生が可能となる。結果を図 2.7 に示す。記録直後に 1 ページ目のページデータを使って参照光の波長および入射角を最適化して再生した結果 (黒線)、すべてのページデータにおいてエラー指数が 0.05 を下回っており、平均 0.036 となっていることから良好な品質であることがわかる。その後、記録媒体が収縮してホログラムに歪みが生じると、青線に示すように、角度多重されたページデータのうち後半 50 ページで大きくエラー指数が増加し、平均では 0.058 となった。最もエラー指数が高くなった 92 番目の再生ページデータを図 2.8(a)に示す。ページデータの右下の領域では回折条件を満たさなくなり、データが再生されていない。エラー指数は 0.11 であった。一方、波面補償をした参照光を照射すると、図 2.7 中の赤線に示すとおり、エラー指数が大きく低減されたことがわかる。なお、波面補償は再生エラーの影響が顕著だった 41 ページ以降のページデータの再生でのみ適用した。エラー指数が低くなるようにゼルニケ係数を調整した結果、エルニケ係数  $C_3$ 、 $C_4$  および  $C_5$  はそれぞれ 0.0008、0.000005、0.0 となった。位相変調 SLM に表示し

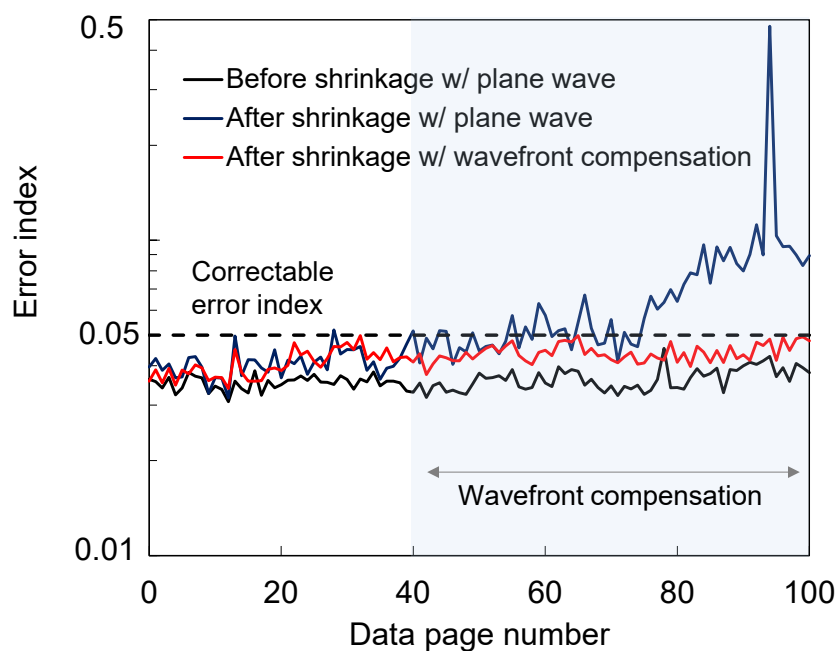


図 2.7 再生データ品質の比較

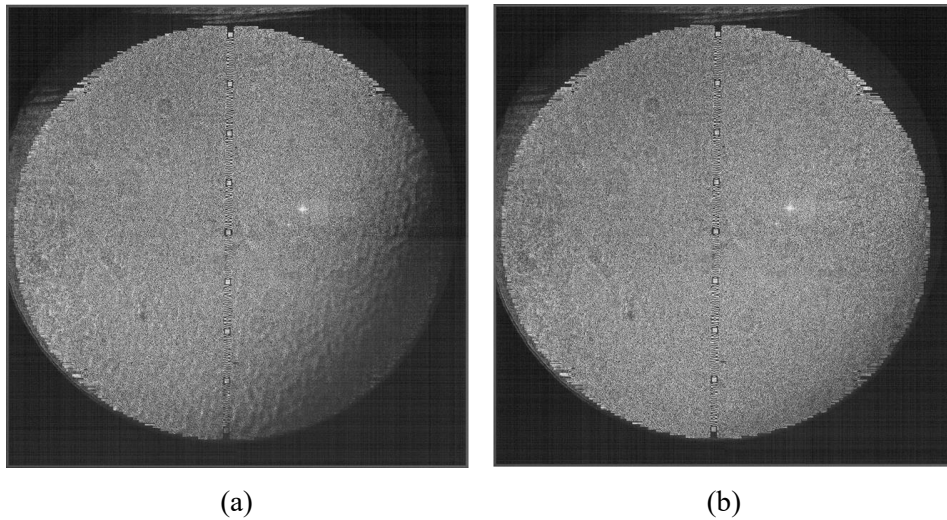


図 2.8 再生ページデータの例 (a) 波面補償なし, (b) 波面補償あり

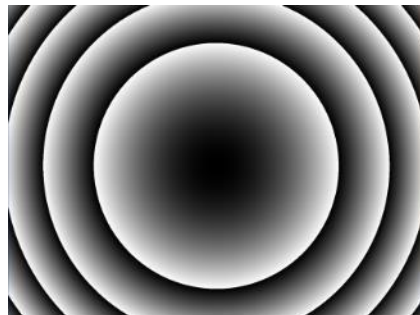


図 2.9 位相変調 SLM に表示した波面形状

た波面形状を図 2.9 に示す. 図 2.9 および各係数からわかるとおり, 従来研究[7]と同様に 3 次のゼルニケ係数が最も支配的な波面形状となっている. 波面補償により, 図 2.8(b) に示すとおり, 92 番目のページデータでも全面でデータが良好に再生されており, エラー指数は 0.047 に低減された. 100 ページ平均でのエラー指数も 0.040 に改善し, 全ページをエラー無く再生できることを確認した.

次に, 理想的な波長から敢えて波長をずらした参照光を用いて波面補償の効果を検証

した。前述したように、膨張／収縮したホログラムからデータを読み出すために、参照光の波長を記録時の波長から微調整する手法がとられる。最適な波長を決定するために、波長をスイープさせながら再生データ品質を順次評価するため、時間を要する。参照光の波長がずれていても波面補償によりデータを読み出すことができれば、利便性が大きく向上する。

結果を図 2.10 に示す。まず、角度多重記録された 1 ページ目のページデータに対して、波面補償をせずに平面波の参照光を照射して最適な波長を調べた。その結果、波長が 405.06 nm の時、最もエラー指数が低くなった。この波長から徐々に波長をずらしていくと、波面補償がない場合には、図 2.10 中の各青線に示すようにエラー指数が次第に上昇していく。これに対して、波面補償した参照光を用いると、図 2.10 中の各赤線に示すようにエラー指数が大幅に低下した。なお、位相変調 SLM に照射した波面形状は、同様に  $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$  がそれぞれ 0.0008、0.000005、0.0 のゼルニケ係数からなる。再生デー

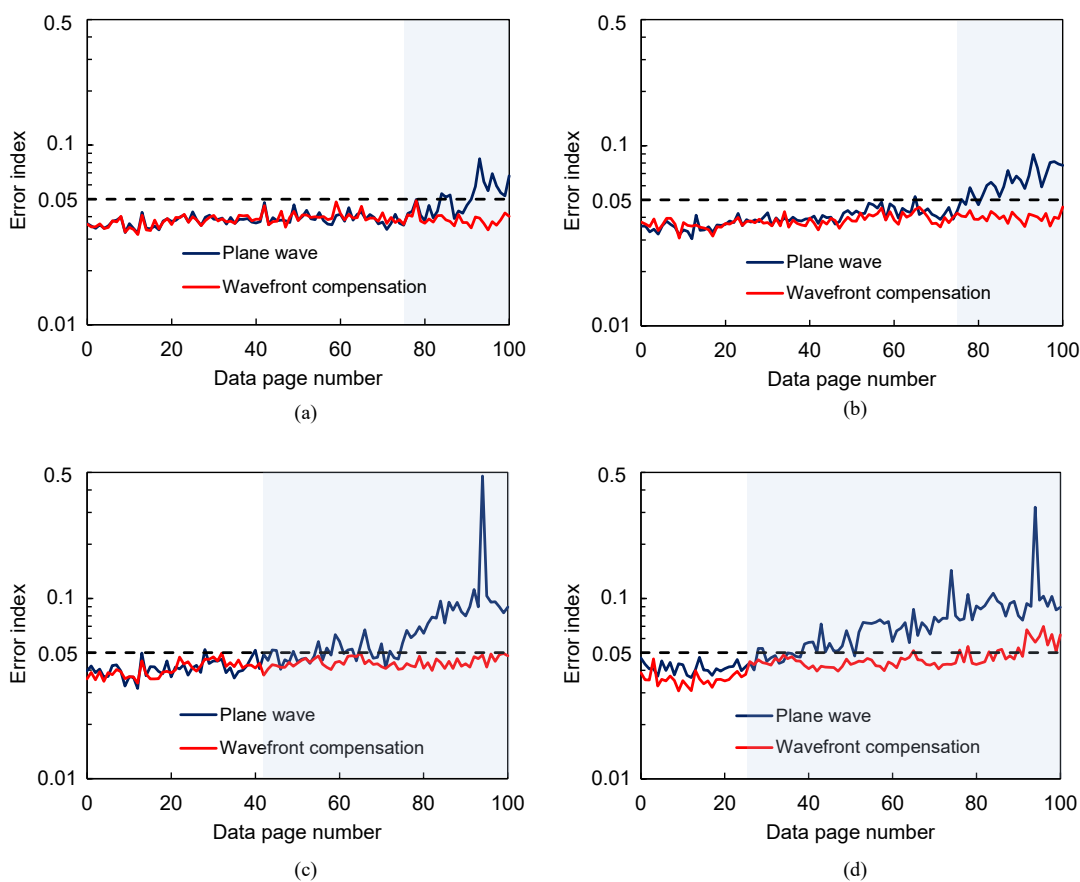


図 2.10 最適な波長 (405.06 nm) からずれた参照光における波面補償の効果  
(a) 405.01 nm, (b) 404.94 nm, (c) 404.86 nm, (d) 404.80 nm

表 2.3 各波長における再生データのエラー指数

Wavelength	Average error index of angle-multiplexed data pages		Start page no. of wavefront compensation
	Plane wave	Wavefront compensation	
404.80 nm	0.066	0.044	#26
404.86 nm	0.058	0.04	#41
404.94 nm	0.046	0.039	#76
405.01 nm	0.041	0.038	#76

タの平均エラー指数と波面補償開始ページ番号を表 2.3 にまとめた。波面補償がない場合には、最適波長から 0.2 nm ずれた 404.86 nm となると平均エラー指数が許容値である 0.05 を上回っており、データインターリーブなどの手法によって再生エラーの影響を各ページに分散させても再生できないことがわかる。一方で、波面補償を用いた場合には、いずれの波長においても平均エラー指数が 0.05 を下回っていることから、正確にデータを再生可能であることがわかる。以上の実験結果から、波面補償の効果として、歪みの生じたホログラムから安定的にデータを読み出せることに加え、波長調整を簡易化できることが示せた。

## 2.4. 8K 映像リアルタイム再生実験

プロトタイプドライブを使って、高ビットレートの 8K 映像をリアルタイムに再生する実験をした。システムの系統図を図 2.11 に示す。8K 映像として、HEVC/H.265 のコーデックで圧縮された 30 秒の動画を使用した。ビットレートは 85 Mbps となっており、これは 2018 年 12 月に日本で開始された 8K 放送における映像のビットレートと同等である[11]。この動画ファイルに対して、外符号の誤り訂正符号としてリードソロモン符号でエンコードし、バースト誤りに対する耐性を高めるためデータインターリーブする。さらに内符号として RLL (Run-Length Limited) とターボ符号を組み合わせた変調方式 [12, 13]で、ページデータを生成する。その結果、トータルのデータ量は 368 MB となった。ページデータあたりの容量は 144 kB であるため、合計のページデータ数は 2,500 となる。これを 1 スポットに 100 ページごとと角度多重記録した (同一箇所にも角度多重されたページデータの集合はブックと呼ばれる)。つまり、ディスク型記録媒体上に 25 ブッ

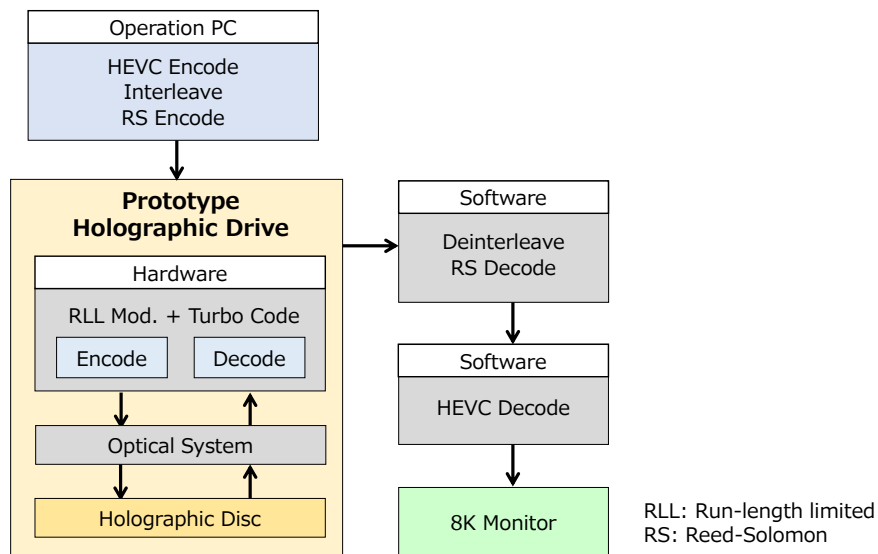


図 2.11 ホログラムメモリープロトタイプドライブを用いた圧縮 8K 映像のリアルタイム再生システム

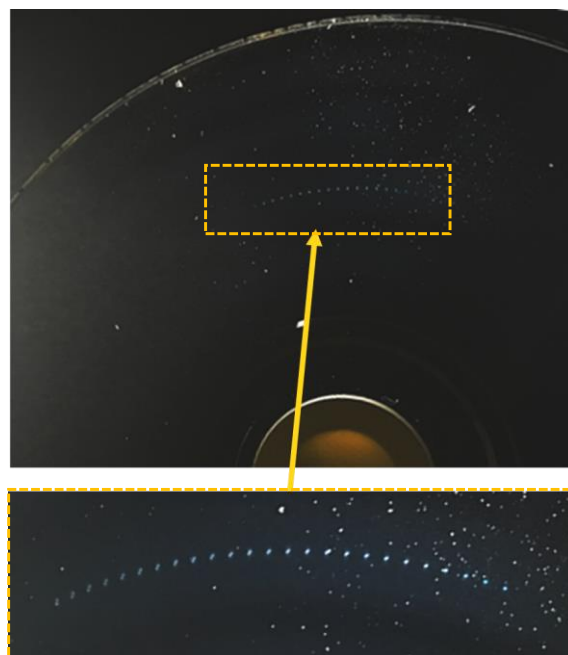


図 2.12 角度多重記録された 25 ブックのホログラム

クの角度多重ホログラムを記録した。記録されたホログラムを図 2.12 に示す。データの読み出し動作は、従来のディスク型光メモリーのように常時ディスクが回転するので

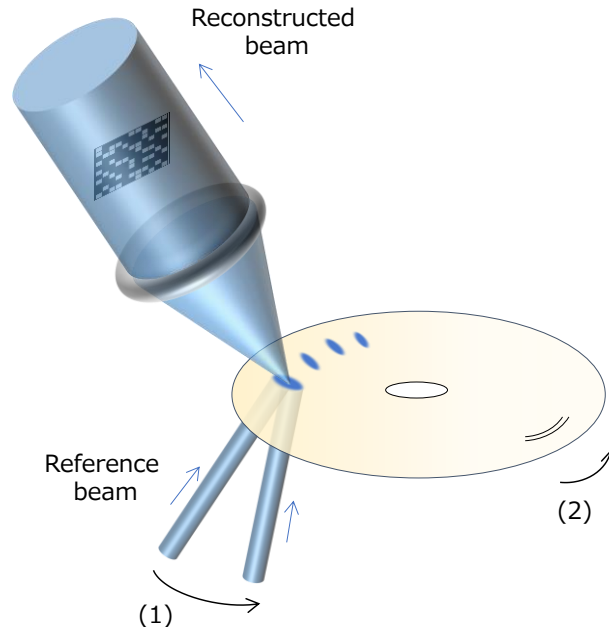


図 2.13 角度多重ホログラムの読み出し動作

はなく，図 2.13 に示すように，(1)ディスクが静止した状態で参照光の角度のみを変えて 100 ページのデータを読み出し，(2)次のブックに記録されたページデータを再生するためにディスクが回転して静止，というストップアンドゴーの動作の繰り返しとなる．トータルの読み出し時間 $T_R$ は，

$$T_R = \left( \sum_{n=1}^m T_{E_n} + \sum_{n=1}^{m-1} T_{M_p} \right) s + T_{M_s}(s-1) \quad (2.3)$$

となる．ここで， $T_{E_n}$ ， $T_{M_p}$ ， $T_{M_s}$ ， $m$ ， $s$ はそれぞれ $n$ 番目のページデータを再生する際のカメラの露光時間，ページデータ間の参照光角度調整時間，スポット間移動時間，スポット内の角度多重されたページデータ数，スポット数（ブック数）である．参照光角度調整時間 $T_{M_p}$ とスポット間移動時間 $T_{M_s}$ は一定であるが，露光時間 $T_{E_n}$ はページデータ番号 $n$ によって異なる．これは，角度多重されたページデータを読み出すために参照光の入射角を変えると，それに応じて光の回折効率が変わり，再生光の強度が変化するためである．今回の実験では，露光時間 $T_{E_n}$ は 0.89 ミリ秒から 1.21 ミリ秒の範囲で最適化され，いずれのページデータの読み出しにおいても $T_{E_n}$ と $T_{M_p}$ の和は 4 ミリ秒以内となった．また，スポット間の移動時間 $T_{M_s}$ は 22 ミリ秒であった[10]ことから，トータルの読



図 2.14 8K 映像のリアルタイム再生デモの様子

み出し時間は 30 秒以内となっており、30 秒の映像をリアルタイムに再生できた。読み出したページデータを、デインターリーブおよび内符号と外符号の誤り訂正の後に映像コーデックでデコードし、図 2.14 に示すように 8K ディスプレーで表示させてエラーがないことを確認した。

## 2.5. 結言

本章では、波面補償技術を組み込んだプロトタイプドライブを開発し、ホログラムメモリーが高速かつ大容量のデータを安定的に再生できることを示した。ホログラムメモリーの実用化に向けて課題の一つとなっている記録媒体の膨張／収縮に伴うホログラムの歪みに対して、波面補償技術が有用であることを原理とともに説明した。波面補償の有用性を実験的に確かめるために、2つの基礎実験をした。まず、プロトタイプドライブで記録したデータに歪みが生じた状態で再生した。波面補償をせずに平面波の参照光を用いた場合には多くのデータ誤りが生じた一方で、位相変調 SLM を用いて波面形状を変えた参照光を用いた場合には、誤り訂正によってエラーフリーとなる許容レベル以下に再生エラーを抑制できた。次に、波長がずれた参照光における波面補償の効果を検証した。その結果、最適な波長から 0.26 nm ずれた参照光であっても、波面補償を用いれば許容レベル以下の誤り量でデータを再生できることが確認でき、長時間を要する



波長の最適化作業を簡易化できるメリットを示した。最後に、8K 映像のリアルタイム再生実験をした。30 秒の動画を繰り返しリアルタイムで、かつエラー無く再生できることを確認した。また、現行の 8K 放送と同じ 85 Mbps の映像データを用いたことで、高速・大容量のデータにおけるホログラムメモリーの実用性の高さを示せた。従来研究の再生デモンストレーションと比較して 10 倍以上高いビットレートの動画を一定時間リアルタイム再生できたことから、実用化に向けた大きな前進である。一方で、アーカイブ用途では映像素材に近い低圧縮率または Raw の映像コンテンツを保管しなければならないことを考慮すれば、さらに高ビットレートの動画を扱えるよう、ホログラムメモリーの転送速度をさらに高める必要がある。次章以降では、ホログラムメモリーの転送速度を向上させるための各要素技術についてフォーカスする。

## 参考文献

1. J. Ashley, M. P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and G. T. Sincerbox, "Holographic data storage technology," *IBM J. Res. Dev.* **44**, 341-368 (2000).
2. S. S. Orlov, W. Phillips, E. Bjornson, Y. Takashima, P. Sundaram, L. Hesselink, R. Okas, D. Kwan, and R. Snyder, "High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system," *Appl. Opt.* **43**, 4902-4914 (2004).
3. A. J. Daiber, R. Snyder, J. Colvin, R. Okas, and L. Hesselink, "Fully functional digital video holographic storage system," in *OSA Annual Meeting* (1997)
4. E. Hwang, P. Yoon, N. Kim, B. Kang, K. Kim, J. Park, and J. Park, "Real-time video demonstration of holographic disk data storage system," in *Optical Data Storage 2006*, (SPIE, 2006).
5. M. Toishi, T. Tanaka, M. Sugiki, and K. Watanabe, "Improvement in Temperature Tolerance of Holographic Data Storage Using Wavelength Tunable Laser," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 1297-1304 (2006).
6. T. Tanaka, K. Sako, R. Kasegawa, M. Toishi, and K. Watanabe, "Tunable blue laser compensates for thermal expansion of the medium in holographic data storage," *Appl. Opt.* **46**, 6263-6272 (2007).
7. T. Muroi, N. Kinoshita, N. Ishii, K. Kamijo, Y. Kawata, and H. Kikuchi, "Compensation of hologram distortion by controlling defocus component in reference beam wavefront for angle multiplexed holograms," *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications* **8**, 13080-1-13080-7 (2013).
8. T. Muroi, N. Kinoshita, N. Ishii, K. Kamijo, Y. Kawata, and H. Kikuchi, "Optical compensation for hologram distortion using wavefront interpolation in angle-multiplexed holograms," *Journal of Modern Optics* **61**, 746-754 (2014).
9. T. Jansson, "Information capacity of Bragg holograms in planar optics," *J. Opt. Soc. Am.* **71**, 342-347 (1981).
10. T. Hoshizawa, K. Shimada, K. Fujita, and Y. Tada, "Practical angular-multiplexing holographic data storage system with 2 terabyte capacity and 1 gigabit transfer rate," *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 09SA06-01-09SA06-09 (2016).
11. Y. Matsuo and S. Sakaida, "Coding efficiency improvement by wavelet super-resolution restoration for 8K UHD TV broadcasting," in *17th IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, ISSPIT 2017*, (2018), 205-210.
12. Y. Nakamura, K. Shimada, T. Ishii, H. Ishihara, M. Hosaka, and T. Hoshizawa, "High-Density Recording Method with RLL Coding for Holographic Memory System," in

*Nonlinear Optics*, OSA Technical Digest (CD) (2011), OMB5.

13. Y. Nakamura and T. Hoshizawa, "Two high-density recording methods with run-length limited turbo code for holographic data storage system," *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 09SA01-01-09SA01-10 (2016).

## 第3章 透過参照光を使ったデュアルページ再生

### 3.1. 緒言

1章で述べたとおり，データ転送速度は「単位時間あたりの再生ページデータ数」と「ページデータあたりの情報量」の積で定義できる．本章では，前者を向上させるためのデュアルページ再生技術について述べる．

これまでの読み出しページデータ数の向上においては，光学デバイスの発展の寄与が大きな役割を果たしてきた．ページデータの検出に用いるカメラの高感度化や，再生用参照光に用いるレーザー光源の高出力化といった近年の技術進歩によってカメラの露光時間が短くなり，ページデータを高速に読み出せるようになった．露光時間を短くするだけでなく，読み出すページデータ数を増やすという観点で改善を図れば，「単位時間あたりの再生ページデータ数」はさらに向上の余地がある．1枚のページデータの再生には1つの参照光と1台のカメラが必要であることから，2つの参照光を同時に照射して2つの再生光を2台のカメラで同時に検出できれば，転送速度を倍増できる．

本章では，偏光状態の異なる2つの参照光を用いて，読み出しページデータ数を2倍にするデュアルページ再生手法について述べる．まず，デュアルページ再生の原理について，偏光を交えながら説明する．次に，記録媒体に照射された再生用参照光のほとんどが記録媒体を透過することに着目し，参照光を再利用する効率的なデュアルページ再生手法を新たに提案する．同手法を用いた記録再生実験をし，再生ページデータの品質と転送速度について評価する．

### 3.2. デュアルページ再生手法の原理

記録時の信号光および参照光の偏光と，ホログラムに回折されて生じる再生光の偏光の関係について述べる．1.2節で述べたホログラムの生成および再生光について，偏光も考慮して改めて説明する． $xy$ 平面における信号光 $\mathbf{S}(\mathbf{r})$ と参照光 $\mathbf{R}(\mathbf{r})$ をジョーンズベクトルを用いて表すと，(1.1)および(1.2)式から

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}, t) = \begin{bmatrix} S_{0x} e^{i(\omega_S t - \mathbf{k}_S \cdot \mathbf{r} + \varphi_S)} \\ S_{0y} e^{i(\omega_S t - \mathbf{k}_S \cdot \mathbf{r} + \varphi_S + \Delta\varphi)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{0x} \\ S_{0y} e^{i\Delta\varphi} \end{bmatrix} e^{i(\omega_S t - \mathbf{k}_S \cdot \mathbf{r} + \varphi_S)} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{r}, t) = \begin{bmatrix} R_{0x} e^{i(\omega_R t - \mathbf{k}_R \cdot \mathbf{r} + \varphi_R)} \\ R_{0y} e^{i(\omega_R t - \mathbf{k}_R \cdot \mathbf{r} + \varphi_R + \Delta\varphi)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{0x} \\ R_{0y} e^{i\Delta\varphi} \end{bmatrix} e^{i(\omega_R t - \mathbf{k}_R \cdot \mathbf{r} + \varphi_R)} \quad (3.2)$$

となる．ここで $S_0$ および $R_0$ は信号光と参照光の振幅， $\omega_S$ および $\omega_R$ は信号光と参照光の

角周波数,  $\mathbf{k}_S$ と $\mathbf{k}_R$ は信号光と参照光の波数ベクトル,  $\mathbf{r}$ は位置ベクトル,  $\varphi_S$ と $\varphi_R$ は信号光と参照光の初期位相,  $\Delta\varphi$ は  $x$  成分と  $y$  成分の位相差を表す. 干渉縞は(1.3)式のとおり

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}, t) &= |\mathbf{S}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{R}(\mathbf{r}, t)|^2 \\ &= |\mathbf{S}(\mathbf{r}, t)|^2 + |\mathbf{R}(\mathbf{r}, t)|^2 + \mathbf{R}^*(\mathbf{r}, t)\mathbf{S}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{S}^*(\mathbf{r}, t)\mathbf{R}(\mathbf{r}, t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

となる. 展開すると

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}, t) &= (S_{0x}^2 + S_{0y}^2) + (R_{0x}^2 + R_{0y}^2) \\ &\quad + (S_{0x}R_{0x} + S_{0y}R_{0y}) \exp[i\{(\omega_R - \omega_S)t - (\mathbf{k}_R - \mathbf{k}_S) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_R - \varphi_S)\}] \\ &\quad + (S_{0x}R_{0x} + S_{0y}R_{0y}) \exp[i\{(\omega_S - \omega_R)t - (\mathbf{k}_S - \mathbf{k}_R) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_S - \varphi_R)\}] \\ &= S_{0x}^2 + S_{0y}^2 + R_{0x}^2 + R_{0y}^2 \\ &\quad + 2(S_{0x}R_{0x} + S_{0y}R_{0y}) \cos[(\omega_R - \omega_S)t - (\mathbf{k}_R - \mathbf{k}_S) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_R - \varphi_S)] \end{aligned} \quad (3.4)$$

と表せる. 簡単のため,  $p$  偏光と  $s$  偏光がそれぞれ  $x$  方向と  $y$  方向に対応する場合を考える. 信号光と参照光が共に  $p$  偏光あるいは  $s$  偏光の場合, 干渉縞の強度分布はそれぞれ

$$I_p(\mathbf{r}, t) = S_{0x}^2 + R_{0x}^2 + 2S_{0x}R_{0x} \cos[(\omega_R - \omega_S)t - (\mathbf{k}_R - \mathbf{k}_S) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_R - \varphi_S)] \quad (3.5)$$

$$I_s(\mathbf{r}, t) = S_{0y}^2 + R_{0y}^2 + 2S_{0y}R_{0y} \cos[(\omega_R - \omega_S)t - (\mathbf{k}_R - \mathbf{k}_S) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_R - \varphi_S)] \quad (3.6)$$

となる. 信号光と参照光の波長は等しいので $\omega_R = \omega_S$ であり,  $(\mathbf{k}_R - \mathbf{k}_S) \cdot \mathbf{r}$ は定数であるから, 振幅が等しければ, いずれの偏光で生成しても干渉縞の強度分布は等しくなる.

再生光については, (1.6)式と同様に, 振幅透過率分布 $T(\mathbf{r})$ と再生用参照光 $\mathbf{R}(\mathbf{r}, t)$ との積で表せる. したがって, 再生光 $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ は以下の式のとおりになる.

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{R}(\mathbf{r}, t)\{T_0 + T_m I(\mathbf{r})\} \\ &= \mathbf{R}(\mathbf{r}, t) \left[ T_0 + T_m \left\{ (S_{0x}^2 + S_{0y}^2 + R_{0x}^2 + R_{0y}^2) + \mathbf{R}^*(\mathbf{r}, t)\mathbf{S}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{S}^*(\mathbf{r}, t)\mathbf{R}(\mathbf{r}, t) \right\} \right] \\ &= \mathbf{R}(\mathbf{r}, t) \left\{ T_0 + T_m (S_{0x}^2 + S_{0y}^2 + R_{0x}^2 + R_{0y}^2) \right\} \\ &\quad + T_m |\mathbf{R}(\mathbf{r}, t)|^2 \mathbf{S}(\mathbf{r}, t) + T_m \mathbf{R}^2(\mathbf{r}, t) \mathbf{S}^*(\mathbf{r}, t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

位相共役再生の場合には、同様に

$$\begin{aligned}
 \mathbf{D}'(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{R}^*(\mathbf{r}, t)\{T_0 + T_m I(\mathbf{r})\} \\
 &= \mathbf{R}^*(\mathbf{r}, t)\{T_0 + T_m(S_{0x}^2 + S_{0y}^2 + R_{0x}^2 + R_{0y}^2)\} \\
 &\quad + T_m |\mathbf{R}^*(\mathbf{r}, t)|^2 \mathbf{S}^*(\mathbf{r}, t) + T_m \mathbf{R}^{*2}(\mathbf{r}, t) \mathbf{S}(\mathbf{r}, t) \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

となる。(3.7)式および(3.8)式のいずれの場合においても、ホログラムから再生される各回折光の和である $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ が再生用参照光 $\mathbf{R}(\mathbf{r}, t)$ と（位相共役再生の場合は $\mathbf{D}'(\mathbf{r}, t)$ が $\mathbf{R}^*(\mathbf{r}, t)$ と）同一の偏光状態となることがわかる。

以上をまとめる。まず、ホログラムの記録に用いた各光の偏光と、再生に用いる光の偏光は異なっても再生可能である。例えば、 $p$  偏光の信号光と参照光で記録したホログラムから  $s$  偏光の参照光でデータを再生できる。また、再生光の偏光は、再生用参照光の偏光と同一になる。したがって、 $p$  偏光の再生用参照光と  $s$  偏光の再生用参照光を同時に記録媒体に照射すれば、 $p$  偏光と  $s$  偏光の再生光を得られる。角度多重記録されたホログラムであれば、2つの参照光の入射角度を変えることで、同時に2つの異なる

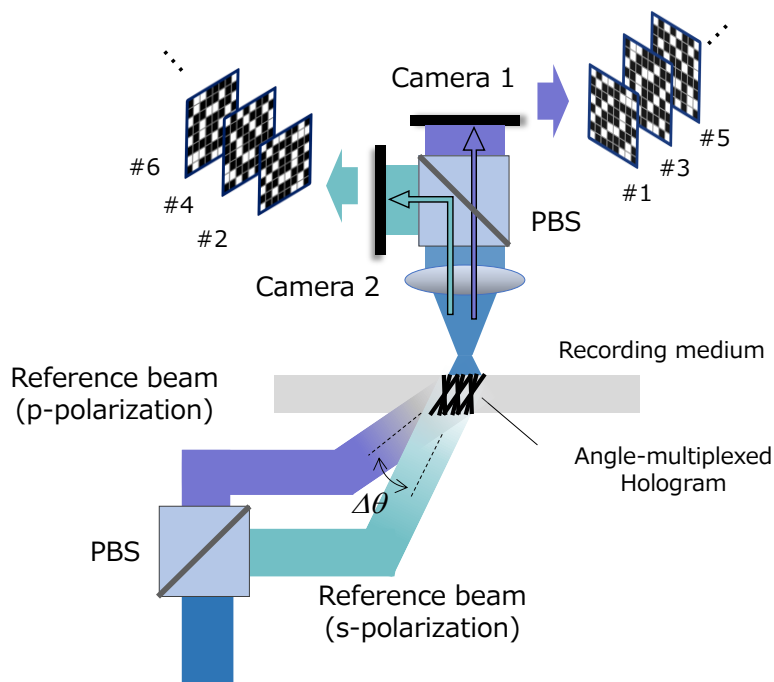


図 3.1 デュアルページ再生

るページデータを再生できるが、偏光の特性を活かして2つの再生光を分離して2台のカメラで同時に検出すれば、転送速度を2倍にできる。図3.1は光学系の例であり、斜め45度の直線偏光にした参照光をPBS（Polarizing Beam Splitter、偏光ビームスプリッター）で2つの直線偏光（p偏光、s偏光）に分けた後に記録媒体に照射し、再生された2つの再生光をPBSで分離して2枚のページデータを同時に再生している[1]。

### 3.3. 透過参照光を使ったデュアルページ再生

デュアルページ再生により転送速度を2倍にできるメリットがある一方で、2つの参照光をどのようにセットアップするかという点では課題がある。前述した例のように、1つの参照光を2つに分ける場合、参照光の出力が従来と変わらないのであれば、分割されたそれぞれの参照光の強度は半分になるため、再生光の強度も低下してしまう。これによりカメラの露光時間が長時間となってしまえば、転送速度の改善量は小さくなる。したがって、光源の出力を2倍にしたうえで分割しなければならない。しかしながら、緑色や赤色などと比べて記録密度を高められる（スポット径を小さくできる）青紫色の光源を用いる場合、レーザー光源の出力は限られており、高出力光源の導入は容易

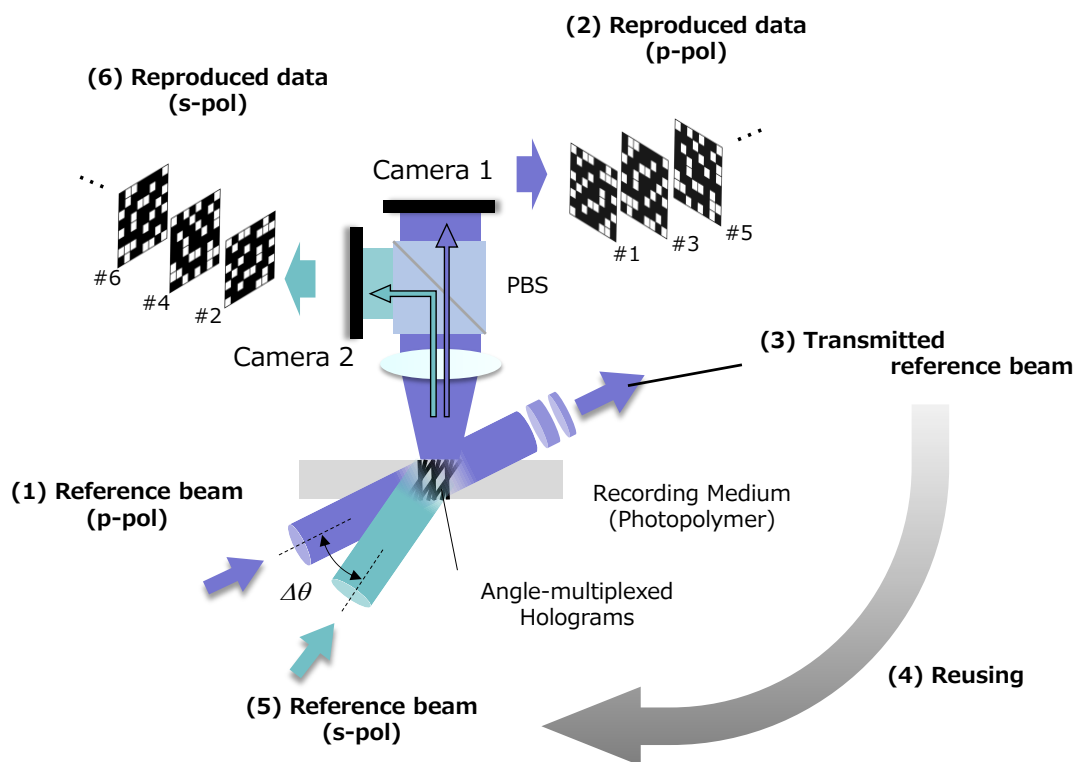


図 3.2 透過参照光を用いたデュアルページ再生の原理

でない。レーザー光源を2つ用いることも可能だが、いずれの場合においても光学系やシステムの大型化、それに伴うコストの増大が避けられない。したがって、デュアルページ再生を実用化させるためには、より効率の高い光学系の構築が不可欠である。

そこで本章では、記録媒体を透過する参照光を再利用する手法を新たに提案する。1.2節で述べたとおり、(3.7)式あるいは(3.8)式の第一項は、記録媒体を透過した参照光である。後述するように、多重数が増すにつれて回折効率が低下するため、同式の第二項および第三項にあたる±1次の回折光成分はわずかであり、記録媒体に照射された参照光のほとんどは透過する。この透過した参照光の偏光状態を変えて再度記録媒体に照射すれば、光源を追加することなく2つのページデータを再生できる。図3.2を用いて具体的に説明する。元々の参照光をp偏光としているため、この参照光がホログラムによって回折されて生成される再生光もp偏光である。透過した参照光もp偏光であるが、偏光をs偏光にして再度記録媒体に照射すれば、s偏光の再生光を同時に取得できる。2つの参照光の角度差 $\Delta\theta$ は、角度多重記録されたページデータの角度間隔と等しくする。これにより、p偏光では奇数番号のページデータを、s偏光では偶数番号のページデータを再生できることになる。勿論、オリジナルの参照光をs偏光とし、透過参照光をp偏光に変えて再照射することも可能である。記録媒体を透過する際には若干のパワーロスが生じるため、元々の参照光に対して、透過参照光の光強度が低いことを考慮して光学系を構築する必要がある。次節では、光学系の最適化に向けて、透過参照光の強度について考察する。

### 3.4. 透過参照光の強度

再生時に参照光が照射された記録媒体から出射する光は、前述のように(3.7)式あるいは(3.8)式で表され、第一項の透過参照光と、第二項および第三項の1次および-1次回折光からなる。

まず、回折光について述べる。ホログラムの回折効率 $\eta$ は、多重数が十分に高い場合には以下の式で表される[2]。

$$\eta = \left(\frac{M\#}{N}\right)^2 \quad (3.9)$$

ここで $M\#$ はMナンバーと呼ばれる値で、記録媒体固有のダイナミックレンジを示す[3]。Nは多重されたホログラム数である。多重数Nが大きい値をとる、すなわち記録容量が高い場合には、上式から回折効率は低くなり、回折光の強度が低下してしまうことになるが、透過参照光を再利用する観点ではむしろ好都合と言える。一般的に、数百の多重記録においては、回折効率は0.3%以下程度となっている[4]。



次に、第一項の透過参照光の損失について述べる。透過参照光の強度は、記録時の信号光および参照光の振幅と、強度基準透過率 $T_0$ および透過率変調度 $T_m$ によって決定される。これらの透過率は、記録媒体による光の吸収と反射を意味するが、吸収による影響はほぼ無視できることが知られている[5]。すなわち、パワーロスの原因としては、記録媒体における反射の影響が最も大きく、透過参照光の強度を決定づける重要なファクターとなる。p 偏光の光と s 偏光の光が記録媒体に入射角 $\alpha$ で入射した場合、それぞれの光における反射率 $R_p$ および $R_s$ は以下の式で表せる。

$$R_p = \frac{\left| N_2^2 \cos \alpha - N_1 \sqrt{N_2^2 - N_1^2 \sin^2 \alpha} \right|^2}{\left| N_2^2 \cos \alpha + N_1 \sqrt{N_2^2 - N_1^2 \sin^2 \alpha} \right|^2} \quad (3.10)$$

$$R_s = \frac{\left| N_1 \cos \alpha - \sqrt{N_2^2 - N_1^2 \sin^2 \alpha} \right|^2}{\left| N_1 \cos \alpha + \sqrt{N_2^2 - N_1^2 \sin^2 \alpha} \right|^2} \quad (3.11)$$

ここで、 $N_1$ は入射側、 $N_2$ は出射側媒質の屈折率である。これらの式を用いて、2つのカバーガラスに挟まれたフォトポリマーからなる記録媒体を用いた場合の、入射角 $\alpha$ における参照光の反射率を計算すると図 3.3 のようになる。まず、全体的に p 偏光の方が s

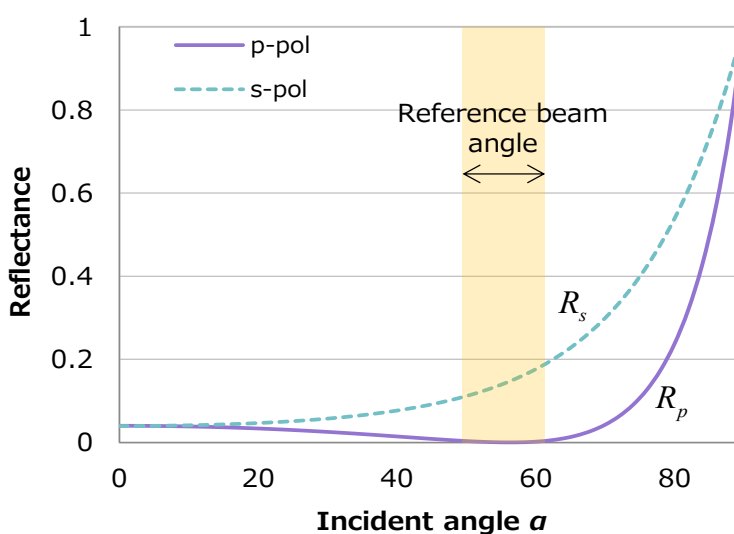


図 3.3 参照光の反射率シミュレーション

偏光と比べて反射率が低いことがわかる。よって、 $p$  偏光を第一の参照光とした方が、透過参照光の強度を高くすることができる。特に、 $p$  偏光においては、入射角 56 度付近がブリュースター角となっており、反射率がゼロになる。このことから、この角度を中心として 51.2 度から 60.6 度を角度多重記録に用いる参照光の入射角の範囲とした。これによって、第一の参照光が記録媒体を透過する際のパワーロスを小さくでき、再利用の効率を高められる。

### 3.5. 記録再生光学系の構築

構築した光学系における記録時の光路を図 3.4 に示す。なお、光学系は 2 階建ての構造となっており、図 3.4 は 2 階の記録媒体周辺部のみを示す。1 階ではレーザーから出力されたビームの空間的なノイズ除去や、ビーム径の拡大、信号光と参照光への分割をし、ミラーによってビームを 2 階に持ち上げている。記録には、ともに  $p$  偏光の信号光と参照光を用いる。信号光は PBS1 を透過して強度変調 SLM に到達し、SLM に表示されたページデータのパターンに基づいて変調される。ページデータ内の明シボルの領域に反射した光のみが  $s$  偏光となり、再度 PBS1 に到達した際に、当該領域の光が PBS1 によって反射され、記録媒体へ向かう。記録媒体までの光路中にある HWP1 (Half-Wave Plate, 半波長板) によって偏光状態を  $s$  偏光から  $p$  偏光に変え、PBS2 を透過できるよ

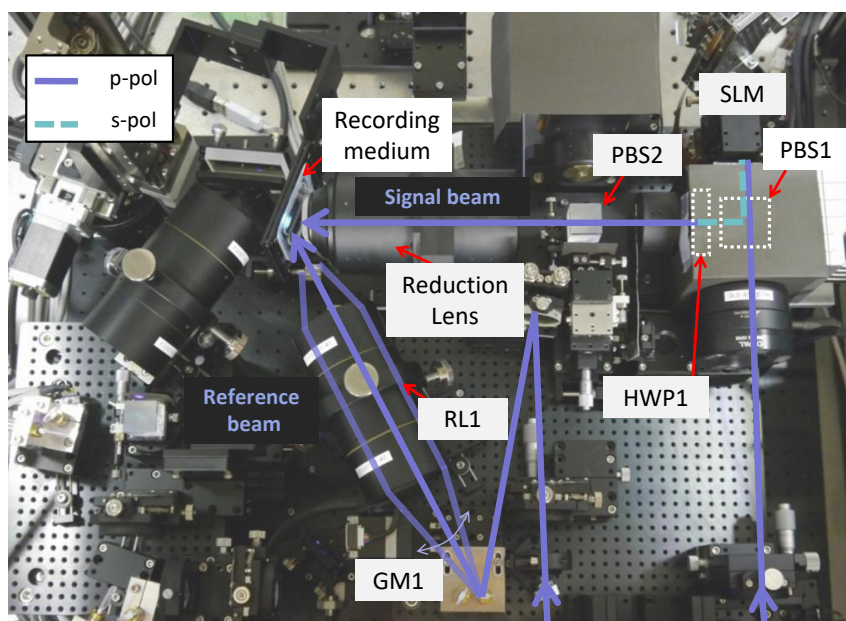


図 3.4 デュアル再生光学系における記録光路

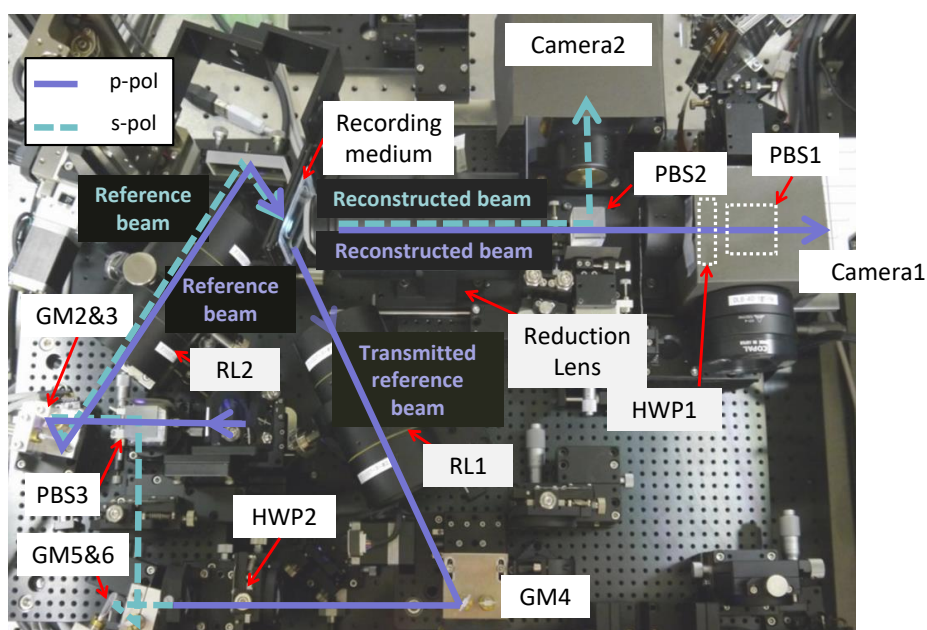


図 3.5 デュアル再生光学系における再生光路

うにしている．PBS2 は，再生時にデュアルページ再生により再生された 2 つのビームを分割するために用いており，本来記録時には不要である．しかしながら，記録時に信号光に重畳された収差を再生時に位相共役再生によってキャンセルするためには，記録時の信号光と再生時の再生光が同一光路である必要がある．そのため，記録時にも光路内に PBS2 を設け，偏光を制御することで同一光路での記録再生を実現した．PBS2 を透過した信号光は，Reduction Lens（縮小レンズ）によって集光されて記録媒体に照射される．一方の参照光は，GM1（Galvanometer Mirror，ガルバノミラー）に反射されたのち，RL1（Relay Lens，リレーレンズ）を透過して記録媒体に照射される．電圧を印加することでガルバノミラーの反射角を高速に制御でき，RL1 によって記録媒体上の同一点に対して異なる入射角で参照光を照射できる．これによって角度多重記録が可能となる．

図 3.5 は再生時の光路を示す．記録時同様，光学系の 1 階でビームの空間的なノイズ除去やビーム径の拡大をしたのち，ミラーによって p 偏光のビームを 2 階に持ち上げる．この光を再生用参照光として記録媒体に照射する．まず，PBS3 を透過したのちに，GM2 と GM3 の二軸のミラーによって，角度多重記録されたホログラムから  $2n - 1$  番目 ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) のページのデータを読み出すための角度調整がされる．ミラーの角度に関わらず，RL2 によって再生用参照光は記録媒体の同一箇所に照射され，p 偏光の再生光を得られる．参照光を記録時とは反対側の面から記録媒体に照射しており，位相共役再生となっている．この再生光は p 偏光のため PBS2 を透過する．HWP1 の光学軸は

再生光の偏光方向と一致しており，HWP1 を透過しても再生光の偏光状態が変わらないため，再生光は PBS1 を透過してカメラ 1 に到達する．一方，記録媒体に照射された p 偏光の参照光は，そのまま記録媒体を透過し，RL1 に入射する．記録媒体への入射角に関わらず，RL1 を通過した透過参照光は GM4 に到達する．GM4 のミラー角度を，参照光の記録媒体への入射角に応じて調整することで，透過参照光は HWP2 へ反射される．HWP2 によって s 偏光とし，透過参照光はデュアルページ再生のための第二の参照光となる．角度多重記録されたホログラムから  $2n$  番目のページデータを読み出せるよう，GM5 および GM6 にて s 偏光の参照光の記録媒体への入射角を調整する．その後，PBS3 を経由して，第一の参照光である p 偏光の参照光と共に記録媒体に照射する．読み出された s 偏光の再生光は，PBS2 で反射され，カメラ 2 で撮影される．

### 3.6. 記録再生実験

#### 3.6.1 実験条件

実験条件を表 3.1 に示す．記録に用いたビット列は，あらかじめ誤り訂正のため空間結合 LDPC 符号 (Spatially Coupled Low-Density Parity-Check Code) [6, 7] でエンコードし

表 3.1 記録再生条件

Data page size	1,740 × 1,044 pix.
Number of angle-multiplexing	48 pages
Pixel pitch of SLM	8.0 μm
Pixel pitch of cameras	5.5 μm
Angle pitch in angle-multiplexing	0.2 deg.
Wavelength of laser	405 nm
Output power of laser	50 mW
Power of signal beam	0.48 mW
Power of reference beam (recording)	8.6 mW
Power of reference beam (reproduction)	22.1 mW

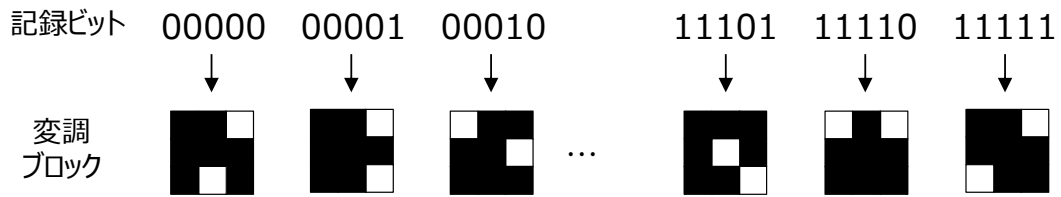


図 3.6 5 : 9 変調符号の変調テーブル例

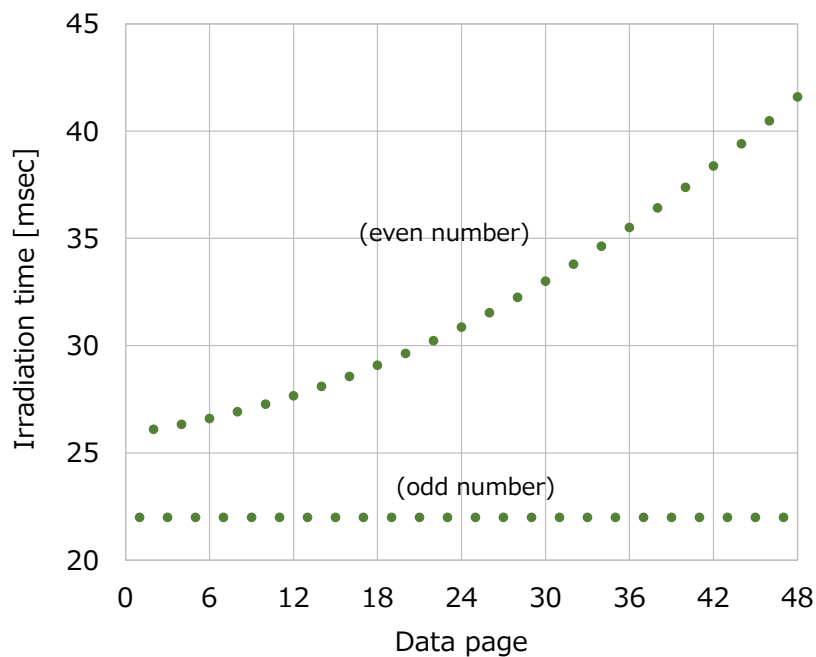


図 3.7 記録時間スケジュール

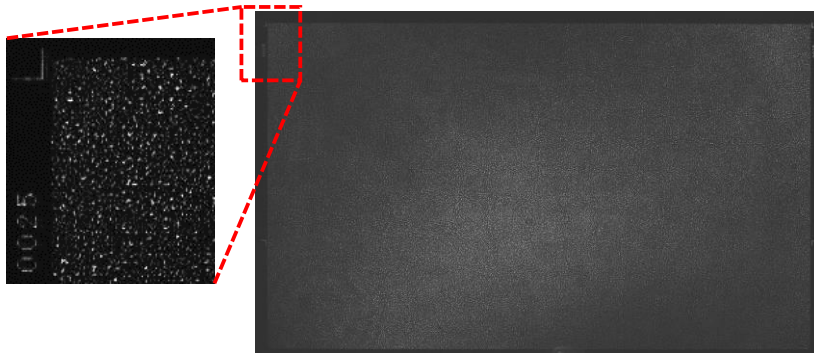
た. このビット列を振幅 2 値変調方式の 5:9 変調符号[8]によってページデータ化する. 5 : 9 変調符号は, 記録ビット列を 5 ビットごとに 9 (3 × 3) シンボルで構成されるブロックに変換して, ブロックを 2 次元状に並べていくことでページデータを生成する符号である. 変調テーブルの例を図 3.6 に示す. ページデータを表示する SLM は 2K (1,920 × 1,080) の画素数を有するが, ページデータの周辺部にデータ領域検出用のマーカーが埋め込まれているため, ページデータは 2K よりも一回り小さいサイズとなっている. ページデータの 1 シンボルを SLM の 1 画素で構成しており, ページデータ 1 枚で 1,740 × 1,044 シンボルの情報量を取り扱う.

3.4 節で述べたとおり，記録媒体への参照光の入射光量は，反射の影響を強く受けるため偏光状態によって異なり，特に s 偏光の場合には損失が顕著である．本再生手法では，記録時には p 偏光の光しか取り扱わないが，再生では両偏光を用いる．加えて，s 偏光の参照光は透過参照光であり，記録媒体における損失だけでなく，再び記録媒体に入射されるまでの間に通過するレンズやプリズムにおける光量低下も考慮しなければならない．これらの理由から，記録時の照射時間を図 3.7 のようにスケジューリングした．照射時間を長くすれば，その分グレーティングの強度（回折効率）が上がり，再生光の強度が高くなるため，カメラの露光時間を短くできる．p 偏光で再生される奇数番目のページデータについては，記録媒体での反射の影響が少ないため，どのページデータにおいてもほぼ一定の照射時間で記録した．一方，s 偏光で再生される偶数番目のページデータについては，記録媒体での反射の影響が参照光の入射角によって大きくなるため，ページデータ番号が増す（入射角が大きくなる）につれて照射時間を長くした．その結果，図 3.7 は，図 3.3 に示した反射の影響を補償するような形状をしており，これに加えて前述した光学部品における光量低下を補償する分，偶数番目のページデータの露光時間は全体的に長くなっている．これにより，偶数番目のみホログラムの回折効率が高くなり，光量の低い s 偏光の透過参照光で読み出される再生光と，p 偏光の参照光で読み出される再生光の光量差を小さくした．これにより，カメラ 2 の露光時間が長時間化してしまうことを避けられる．

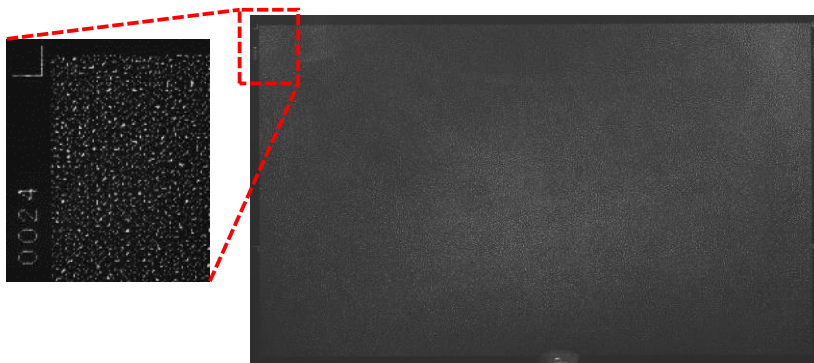
### 3.6.2 再生データ品質評価

再生したページデータの例を図 3.8 に示す．拡大図からは，マーカーとともにページ番号が確認できる．奇数番目および偶数番目のページデータともに，ページデータ全面で良好に再生されたことがわかる．角度多重記録されたページデータ全体のビット誤り率を図 3.9 に示す．ともに空間結合 LDPC 符号を用いた誤り訂正によりエラーフリーにできる  $8.0 \times 10^{-2}$  以下となっており，透過参照光を使ったデュアルページ再生手法を実証できた．

一方で，奇数番目と偶数番目のページでビット誤り率に差があり，s 偏光で再生されたページデータの方が p 偏光で再生されたページデータよりも全体的にビット誤り率が高い．この原因は再生光路の違いにある．記録媒体から回折された再生光が各カメラで撮影されるまでの光路の違いを図 3.10 に示す．本光学系では，前述したように記録時とは逆側の面から参照光を照射する位相共役再生手法を用いており，記録時と同じ光路を逆方向に伝搬することで，記録時に信号光に重畳された収差成分をキャンセルできる．実際に，p 偏光の再生光は縮小レンズ，PBS2，レンズ 1，HWP1，PBS1 を記録時とは逆順に透過してカメラに到達するため，再生光が信号光の位相共役となっており，ビット誤りを抑制できている．一方の s 偏光の再生光については，縮小レンズを透過した



(a)



(b)

図 3.8 再生ページデータの例  
 (a) p 偏光の参照光によって再生  
 (b) s 偏光の透過参照光によって再生

のちに PBS2 によって反射されるため、記録時とは異なる光路でカメラ 2 に到達する。これにより、記録時に重畳された収差成分がキャンセルされないだけでなく、記録光路にないレンズ 2 を透過することで新たな収差成分が再生時に重畳され、再生ページデータの品質が低下してしまう。この収差によるエラーを補償するために、図 3.9 に示すように HWP3 と PBS4 を追加した。これらは、データの読み出しには本来不要な光学部品である。しかしながら、記録光路にあった HWP1 と PBS1 を s 偏光の再生光が透過しないことから、これらを追加することで s 偏光の再生光も信号光と同じ光学部品群を伝搬してカメラに到達することになる。なお、PBS4 を透過できるように、HWP3 によって再生光の偏光状態を p 偏光とする。同一光路を逆方向に伝搬しているわけでないため、完

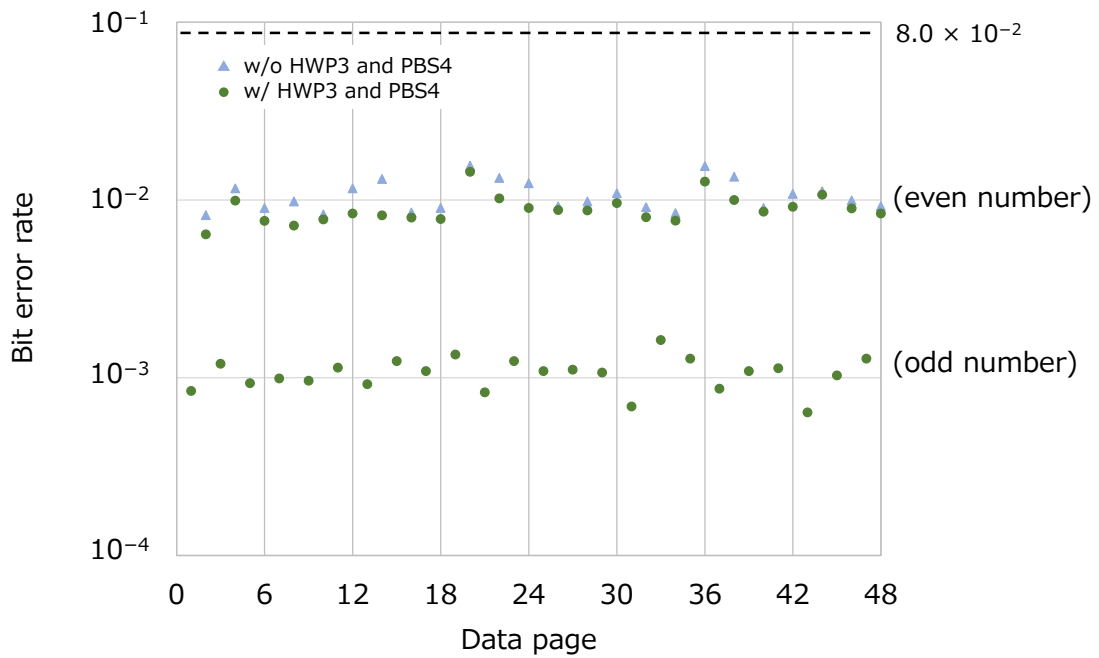


図 3.9 再生ページデータのビット誤り率

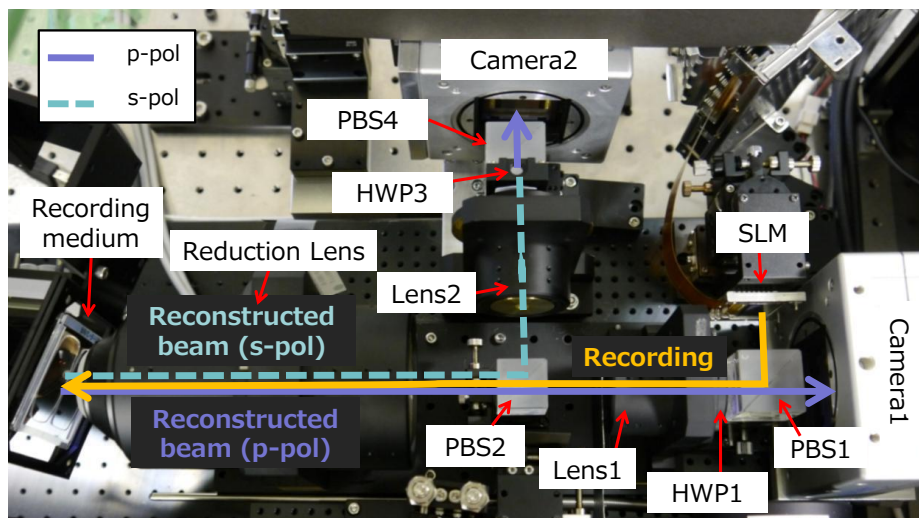


図 3.10 信号光と各再生光の光路

全な位相共役にはならないが、図 3.9 に示すように HWP3 と PBS4 の追加によってビット誤りを平均で約 15%抑制できた。ページデータの平均ビット誤り率は、奇数番目と偶



数番目でそれぞれ  $1.07 \times 10^{-3}$ ,  $9.01 \times 10^{-3}$  となった.

デュアルページ再生において, 偶数番目のページデータでビット誤りが多くなる他の要因として, クロストークが挙げられる. 2つの再生光を分離する PBS2 において, 反射光の消光比はわずかに透過光よりも低いことが一般的である. このため, 同時に読み出された p 偏光の再生光がカメラ 2 に混入する影響は大きく, 偶数番目の再生ページデータではビット誤りが増えてしまう. 同現象は, 透過参照光を用いない従来のデュアルページ再生でも報告されており, クロストーク抑制のためにカメラ 1 で取得した奇数番目のページデータ情報をもとに減算処理をすることで補正する手法が提案されている [1]. 一方で, 本論文においては, p 偏光の再生光が PBS2 によって反射されても, 位相共役補償のために挿入した HWP3 によって同光は s 偏光になり, PBS4 によって光路外に反射されるため, カメラ 2 に混入しない. したがって, HWP3 と PBS4 の挿入は, クロストーク抑制の観点でも有益である.

### 3.6.3 データ転送速度評価

角度多重記録されたページデータを連続的に再生する際のデータ転送速度について述べる. 最適化した結果, カメラ 1 とカメラ 2 の露光時間はそれぞれ 0.5 ミリ秒, 0.6 ミリ秒となった. また, 図 3.7 に示したスケジューリングによって, 参照光の入射角に依存せず露光時間は一定である. 奇数番目と偶数番目のページデータで露光時間の差が大きくならないよう, 透過参照光で読み出す偶数番目のページデータではホログラムの回折効率が高くなるように記録しているが, (3.9)式に示すように, 回折効率が高くなるにつれて多重記録可能なページデータ数が減少してしまう. トレードオフの関係にあるため, 十分な数のページデータを記録でき, かつ記録時の回折効率を高められるよう調整した結果, わずかにカメラ 2 の露光時間がカメラ 1 よりも長くなった.

デュアルページ再生において, データ転送速度は以下の式で表せる [9].

$$(\text{データ転送速度}) = \frac{C}{T_E + T_M} \times 2 \quad (3.12)$$

ここで  $C$  は再生ページデータの容量,  $T_E$  はカメラの露光時間,  $T_M$  は角度多重されたページデータを読み出すためにガルバノミラーがミラー角度を変更する時間である. 本光学系では 2つのページデータを同時に読み出すため, 2 が乗じられる. ページデータサイズと変調効率から, 再生ページデータ容量  $C$  は  $1,740 \times 1,044 \times (5/9) = 1,009,200$  ビットである. カメラの露光時間は 2 台で異なるものの, より露光時間の長いカメラ 2 がボトルネックとなり,  $T_E$  は 0.6 ミリ秒となる. 測定の結果,  $T_M$  は 1.4 ミリ秒であった. これらを (3.12) 式に代入すれば, データ転送速度は 1.0 Gbps となる. これまでにも転送速度

1 Gbps を達成した報告例はあるが、例えばスペックルシフト多重方式を用いた場合[10]には、本論文で用いている角度多重方式ほどの記録容量は期待できないため、転送速度と記録容量の両立が難しい。また、同様に角度多重方式を用いて 1 Gbps を達成した例[9]では、2 倍以上の面積を有する SLM や 0.3 ミリ秒の露光時間で高速に撮影できるカメラなどを独自開発して使用している。こうした専用のデバイスを本光学系に導入すれば、数 Gbps の転送速度を実現することも見込める。

### 3.7. 結言

本章では、透過参照光を用いたデュアルページ再生技術を提案し、2 つの参照光をホログラムに同時に照射することで転送速度を向上できることを示した。レーザー光源の追加や高出力のレーザー光源の導入の必要なく 2 つのページデータを同時に再生でき、高効率に高速化が実現できる。出力が限られる青紫色の光源を用いる場合にはとりわけ有効であり、本章でも同波長を用いて実証したことから、本手法の高い有用性を示せた。

まず、再生時の参照光の偏光が、記録時に用いる光の偏光と異なってもページデータを読み出せること、再生光の偏光が参照光の偏光と等しくなることについて原理を説明し、偏光の特性を活かすことでデュアルページ再生が可能であることを述べた。次に、再生時に参照光のほとんどが記録媒体を透過することから、この透過参照光を角度多重間隔分だけ入射角を変えて再照射する本手法の原理に述べたのち、透過参照光に生じる損失について分析した。参照光の光量低下が主に記録媒体表面での反射に起因し、かつ偏光によって違いがあることから、元々の参照光を p 偏光、透過参照光を s 偏光として光学系を構築し、実証実験した。データの記録時には、記録媒体での反射を考慮して照射時間をスケジューリングし、再生時に 2 台のカメラの露光時間が参照光の入射角によらず一定になるようにした。再生ページデータの品質を評価した結果、誤り訂正によってエラーフリーとなるレベル以下のビット誤り率となり、本再生手法の原理を実証した。s 偏光側の再生光路中には半波長板と PBS を挿入し、位相共役再生による収差成分のキャンセルとクロストーク成分の除去を施した。

転送速度は 1.0 Gbps となった。本手法は時間あたりの再生ページデータ数を増やす高速化手法であるから、ページデータの情報量を増やせば更なる高速化が見込める。その一つとしては、他の報告で見られるような、画素数の多い空間光変調器とカメラを用いてページデータ内のシンボル数を増やす、という手法が挙げられる。本章で用いた SLM は 2K 解像度だが、4K 解像度の SLM やカメラはすでに流通しており、これらに換えれば単純に転送速度は 4 倍にできる。ただ、このデバイス頼みのいわば“力技”ともいえる方法では限界があるのは明らかである。ページデータが大面積化すれば、レンズの口径も大きくなり、光学システムの大型化やコストの増大も課題となる。次章以降では、ページデータを生成する変調符号を多値化する研究について述べる。通信技術と同

様に, 変調符号を多値化すれば, より多くの情報をページデータに詰め込むことができ, 大容量化と高速化ができる. まず 4 章では, 多値化を進めるうえで重要な鍵となるノイズ対策について述べる.

## 参考文献

1. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Dual-page reproduction to increase the data transfer rate in holographic memory," *Opt. Lett.* **42**, 2287-2290 (2017).
2. F. H. Mok, G. W. Burr, and D. Psaltis, "System metric for holographic memory systems," *Opt. Lett.* **21**, 896-898 (1996).
3. L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE* **92**, 1231-1280 (2004).
4. B. E. Miller and Y. Takashima, "Cavity techniques for holographic data storage recording," *Opt. Express* **24**, 6300-6317 (2016).
5. W. Wilson, A. Hoskins, M. Ayres, A. Hill, and K. Curtis, "Introduction to Holographic Data Recording," in *Holographic Data Storage* (2010), pp. 17-43.
6. S. Abu-Surra, E. Pisek, and R. Taori, "Spatially-coupled low-density parity check codes: Zigzag-window decoding and code-family design considerations," in *2015 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, (2015), 275-281.
7. N. Ishii, Y. Katano, T. Muroi, and N. Kinoshita, "Spatially coupled low-density parity-check error correction for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 09NA03-01-09NA03-04 (2017).
8. T. Kume, S. Yagi, T. Imai, and M. Yamamoto, "Digital Holographic Memory Using Two-Dimensional Modulation Code," *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 1732-1736 (2001).
9. T. Hoshizawa, K. Shimada, K. Fujita, and Y. Tada, "Practical angular-multiplexing holographic data storage system with 2 terabyte capacity and 1 gigabit transfer rate," *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 09SA06-01-09SA06-09 (2016).
10. S. S. Orlov, W. Phillips, E. Bjornson, Y. Takashima, P. Sundaram, L. Hesselink, R. Okas, D. Kwan, and R. Snyder, "High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system," *Appl. Opt.* **43**, 4902-4914 (2004).

## 第4章 畳み込みニューラルネットワークを使った データ復調

### 4.1. 緒言

ページデータあたりの情報量を増加させていくために、多値記録方式の導入は必須とも言える。基礎的な実験としては、古くから3階調[1]、4階調[2]、6階調[3]の振幅レベルで記録再生した報告がある。しかしながらこうした多値変調が一般的な変調フォーマットとならず、依然として明暗の2値で構成されたページデータが使用される要因は、ノイズ耐性の低さにある。従来のCD、DVDなどの光記録メモリーでは、一度の光照射で再生できるのは1ビットのみであり、ディスク上の微小なピットから反射されるビームの強度を検出するのみである。それに対して、ホログラムメモリーでは、一度の照射で多ビットの情報を記録するために、ビームを“点”ではなく“面”で扱う。ページデータ内のシンボル数を高めて記録再生するために1インチ以上の口径で光学系が構成されることが多い。収差や光量低下などが再生エラーの原因となるが、これらの特性はビーム面内ではばらつきも持つ。加えて、多重記録で生じるクロストークなどもノイズ源となる。以上の点から、従来の光記録メモリー以上に十分なノイズ対策が必要となる。

これまでもさまざまなノイズ対策手法が提案されてきたが、いずれも“ノイズを除去する”ことが念頭に置かれている。例えば、*inverse filter* をページデータに重畳する手法[2]、有限インパルス応答フィルター (Finite Impulse Response, FIR) を再生ページデータに適用する手法[4]、ニューラルネットワークを用いたイコライザ[5]、またはオートエンコーダ[6]などが挙げられる。しかしながら、ノイズ源は多岐にわたるため、光学系からノイズを完全に除去することは極めて難しい。であれば、“ノイズが重畳されたデータからいかに情報を復調するか”という観点で新たなノイズ対策を考える必要がある。

本章では、ノイズが混入した再生ページデータから、CNNを用いて正確にデータを復調する手法を新たに提案する。まず、ホログラムメモリーにおいてビット誤りの原因となるノイズについて説明した後、提案する畳み込みニューラルネットワークによる復調原理について述べる。従来手法と復調精度の比較をし、再生ページデータと復調結果の関係から提案手法の効果を検証する。

### 4.2. ホログラムメモリーで生じるノイズと再生エラー

振幅2値変調方式で記録されたページデータを再生した例と、そのヒストグラムを図4.1に示す。記録時には8ビット階調の0と255のみで構成されたページデータであっ

ても，記録再生の光路の過程でデータの品質が低下する．振幅 2 値変調方式において，SNR は

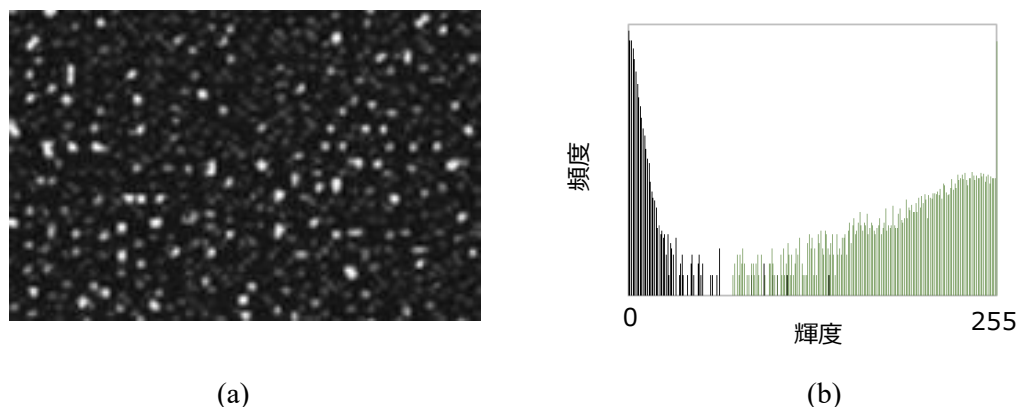


図 4.1 振幅 2 値変調方式で記録されたデータを再生した例  
(a) ページデータ，(b) ヒストグラム

表 4.1 角度多重ホログラムメモリのノイズ分類

記録系の 固定パターンノイズ	信号光および参照光のビームプロファイル， 光学部品間の多重干渉，埃などの汚れ
再生系の 固定パターンノイズ	参照光ビームプロファイル， 記録媒体の非平坦性，埃などの汚れ
符号間干渉	スペイシャルフィルター，レンズ収差
リサンプリングノイズ	SLM 画素とカメラ画素のピッチ差 および位置ずれ
ランダムノイズ	イメージセンサーのショット雑音， 熱雑音，乱反射光
装置不安定性	記録媒体の変化，光路中の乱反射， レーザー発振不安定性

$$\text{SNR} = 20 \log \left( \frac{\mu_{on} - \mu_{off}}{\sqrt{\sigma_{on}^2 - \sigma_{off}^2}} \right) \quad (4.1)$$

と表せる[2]. ここで $\mu_{on}$ と $\mu_{off}$ は明シンボルと暗シンボルの平均輝度値,  $\sigma_{on}$ と $\sigma_{off}$ は明シンボルと暗シンボルの分散を示す. ノイズの混入によって0であった暗シンボルの輝度値が上がり, 255であった明シンボルの輝度値は逆に低下する. 角度多重ホログラムメモリーにおけるノイズは前述のとおり多岐にわたる. ノイズの分類とその定量的な評価についてはこれまでも報告例があり[7], 表 4.1 のようにまとめることができる. これらのうち, 特に再生データ品質に対して影響が大きいものについてそれぞれ詳細に述べる.

信号光と参照光のビームプロファイルによる固定パターンノイズは, ビームの面内不

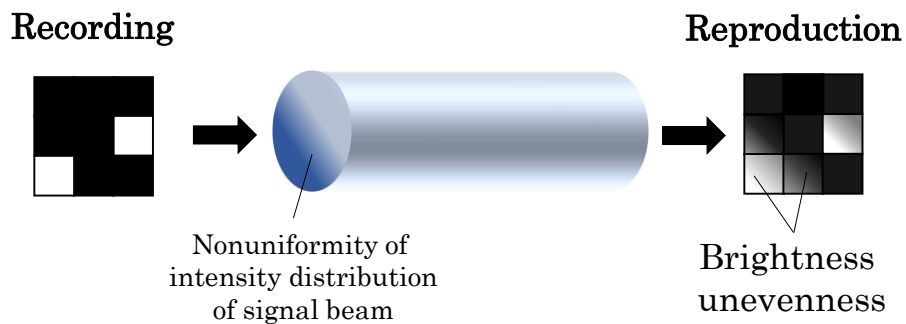


図 4.2 ビーム不均一性

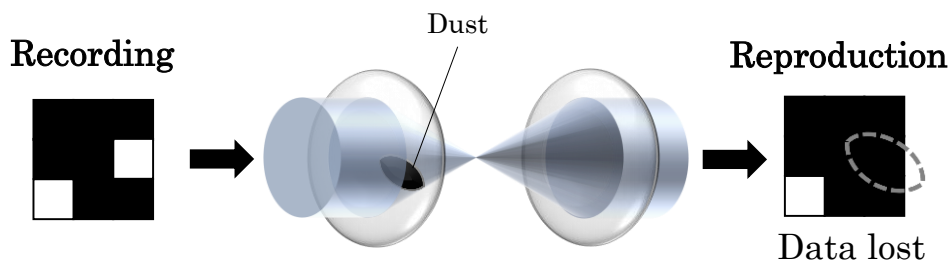


図 4.3 埃によるデータロスト

均一性によるものである (図 4.2). レーザー光源はガウシアンプロファイルであるが, 信号光や参照光として使用するためには, ページデータ面内で均一な強度分布にする必要がある. そのために, レーザー光のビーム径を十分に拡大した上でビーム中央部のみを用いるか, あるいはビームシェイパーを使うことでフラットトップなビームにする. しかし, 光源そのものの不均一性もあり, いずれの場合であっても完全に均一な分布とはならない. これによって, 特定のシンボルのみ輝度値が高くなったり, あるいは逆に低くなったりする. 同様に固定パターンノイズ源としては, 光学部品に付着した埃なども挙げられる. 同領域では光が遮断されてしまうため, シンボル情報が失われてしまう (図 4.3).

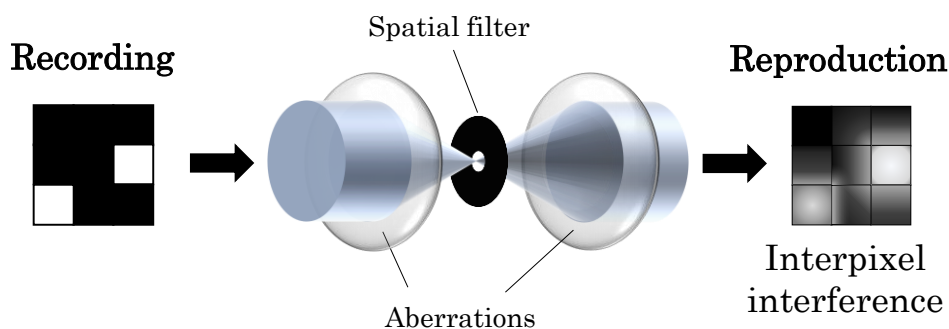


図 4.4 符号間干渉

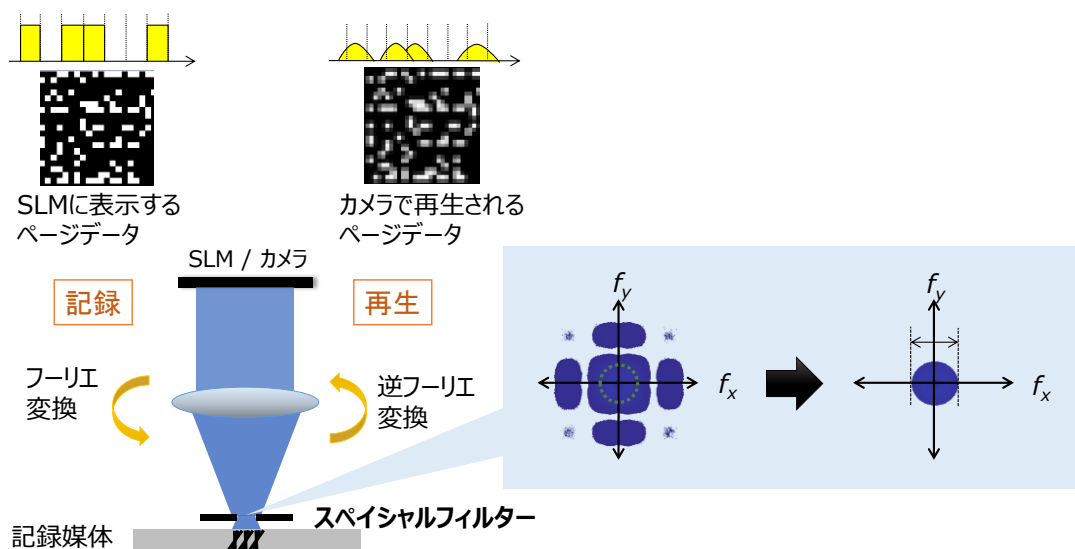


図 4.5 スペイシャルフィルター



符号間干渉 (Interpixel Interference) [8, 9]は、レンズ収差やスペイシャルフィルターの挿入などによって生じる (図 4.4)。収差があると、像が完全に 1 点に結像せずぼやけるため、各シンボルで光が干渉し合う。図 4.5 はスペイシャルフィルターの原理を示す。レンズの作用により、焦点面で光はフーリエ変換される。2 次元のフーリエ変換によって、焦点面では光軸中心にページデータの 0 次成分、外周部になるにつれてページデータの高次成分が現れる。スペイシャルフィルターを焦点面付近に設けて外周部の光を物理的にカットすることで、記録媒体上のホログラムのサイズを小さくでき、記録密度を向上できる。一方で、低周波成分のみを通過させるローパスフィルターであるから、フィルタリングされたホログラムは高周波成分を失っており、再生ページデータでは符号間干渉が生じる。許容されるフィルター径 (ナイキスト径  $L$ ) はサンプリング定理に基づいており、

$$L = \frac{f\lambda}{\Delta_{sym}} \quad (4.2)$$

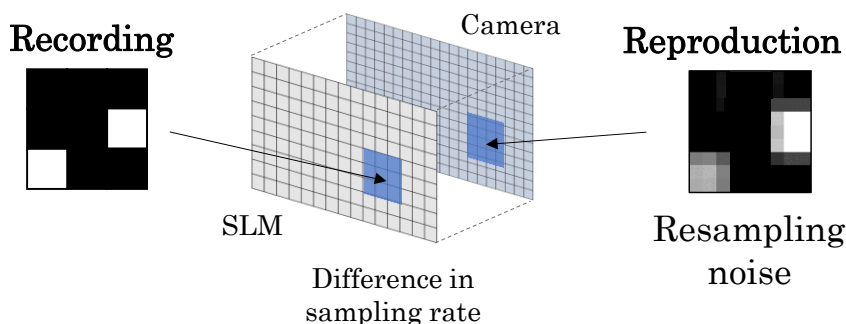


図 4.6 リサンプリングノイズ

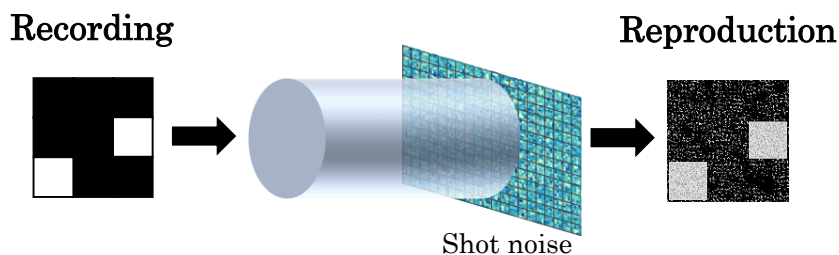


図 4.7 イメージセンサーにおけるノイズ

となる．ここで、 $f$ はレンズの焦点距離、 $\lambda$ は波長、 $\Delta_{sym}$ はページデータにおけるシンボルピッチである．

リサンプリングノイズは、再生されたページデータをカメラで撮影する際に生じる（図 4.6）．記録時に使用する空間光変調器の画素ピッチとカメラの画素ピッチは一致しないことが一般的である．完全にピッチが一致しても、置かれた位置関係にずれがあれば正確に再生ページデータを検出できない．スペイシャルフィルタでのローパスフィルタリングと同様に、サンプリング定理を満たすように十分にカメラの画素ピッチが狭ければ正確に再生ページデータのシンボルを検出できるが、空間光変調器と同程度の面積かつ狭画素ピッチのカメラは少なく、また画素数が多いカメラではフレームレートが低いいため転送速度の低下を招く．

ランダムノイズとしては、カメラ固有のノイズである熱雑音やショット雑音が挙げられる（図 4.7）．これらはすべての周波数帯域で一様な分布となるホワイトノイズである．

これらのノイズが混入したページデータで発生するエラーについて、従来の復調手法を交えて説明する．3章でも用いた5:9変調符号は、5ビットの情報を、2次元の9シンボルからなるブロックに変換するコードである．図 3.6 に示したとおり、ブロックは

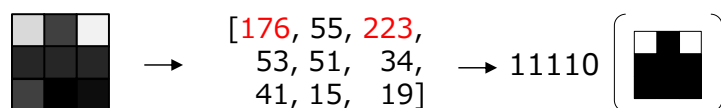


図 4.8 硬判定による復調例

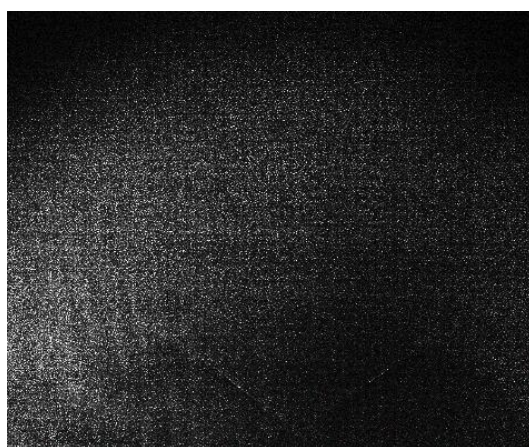


図 4.9 再生ページデータ内に輝度むらがある例（ビット誤り率： $7.4 \times 10^{-2}$ ）

2つの明シンボルと7つの暗シンボルから構成される。このため、9つのシンボルの輝度値を測定し、そのうち最も輝度値が高い2つのシンボルを明シンボルとし、それ以外を暗シンボルとみなして復調する（図4.8）。したがって、再生エラーが生じるのは、ノイズによって暗シンボルの輝度値がブロック内で1番目あるいは2番目に高くなった場合である。本復調手法は硬判定（Hard Decision）と呼ばれ、シンプルであり高速処理できるメリットがあることから広く一般に用いられている。また、5:9変調符号のようなブロックに変換する変調符号と組み合わせると、ブロック内の局所的な領域で輝度値を比較して復調するため、例えば図4.9のようにページデータ内で広範囲に生じた輝度むらに対してロバストであり、比較的ノイズ耐性の高い復調が可能となる。一方で、最も明るい2つの明シンボル位置の情報しか取り扱わないことから、復調精度の面ではデメリットもある。例えば、残りの7シンボルの輝度値が高ければノイズ混入の影響が大きいと想定できるが、硬判定の場合には下位7シンボルの輝度値は復調結果には反映されず、無視されてしまう。9つのシンボルすべての情報を使った復調手法があれば、復調精度は改善できると考えられる。

### 4.3. 畳み込みニューラルネットワークによる復調原理

本章では、ノイズの混入した再生データにおける復調精度を改善するために、AI（Artificial Intelligence, 人工知能）技術のひとつである、CNNを用いた復調手法を新たに提案する。CNNは、近年急速に発展したニューラルネットワークの一種であり、特に画像認識において優れる（図4.10）。例えば、物体認識においては、教師データとして複数の種類の画像データとそれに対応するラベルを用意し、物体の画像をCNNに入

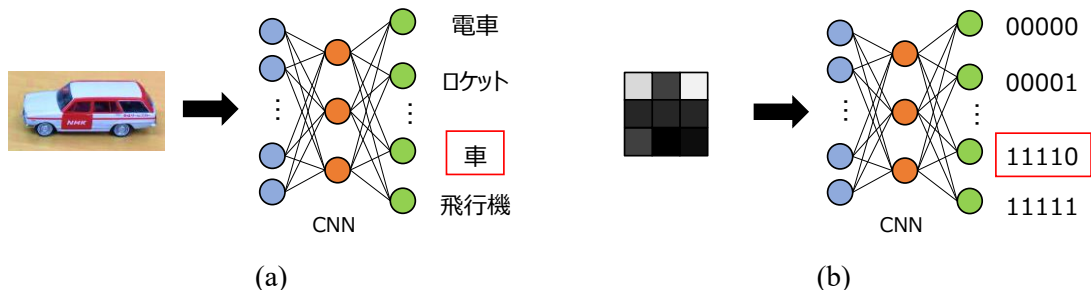


図4.10 CNNによる画像認識

(a) 物体識別, (b) ホログラムメモリーにおけるデータ復調

力した際にその出力が対応するラベルになるように特徴を学習させることで、正確に該当のクラスに分類することができるようになる。ホログラムメモリで再生されるページデータは、カメラで取得した一種の画像データであると言える。つまり、再生ページデータと対応するビットを用意して、再生ページデータに重畳されたノイズ情報を含めて特徴を CNN で学習させれば、高精度にデータ復調ができる。一般に CNN の入力は、画像の各画素値である。すなわち、ホログラムメモリの復調の場合には再生ページデータ中の各シンボルの輝度値であり、ノイズの混入した明暗すべてのシンボルの情報を活用して復調できることになる。

変復調の全体の系統図を図 4.11 に示す。再生ページデータと、それに対応する記録ビット列をペアとした教師データを一定数、事前に用意する。学習は、9つのシンボルで構成されるブロック単位で行う。CNN はランダムなパラメーターで初期化するため、学習前には正しい復調ができないが、繰り返し教師データを入力させることで特徴を学習し、復調精度が向上する。再生ページデータには、記録再生の光学系の過程でノイズが重畳されている。したがって、学習を進めていくにつれて、ノイズ特性を踏まえた復調ができるようになる。5:9 変調方式では、5 ビット、すなわち 32 種類 ( $2^5$ ) のブロックが存在するため、32 種類のクラス分類と同義である。CNN は 32 種類の尤度 (尤もらしさ) 分布を出力するので、その中から最も高い値であるものを復調ビットとみなす。

前述したように、固定パターンノイズの場合、どの再生ページデータにおいても同位置に同程度のノイズが発生する。このような位置依存性のあるノイズの特性を正確に学

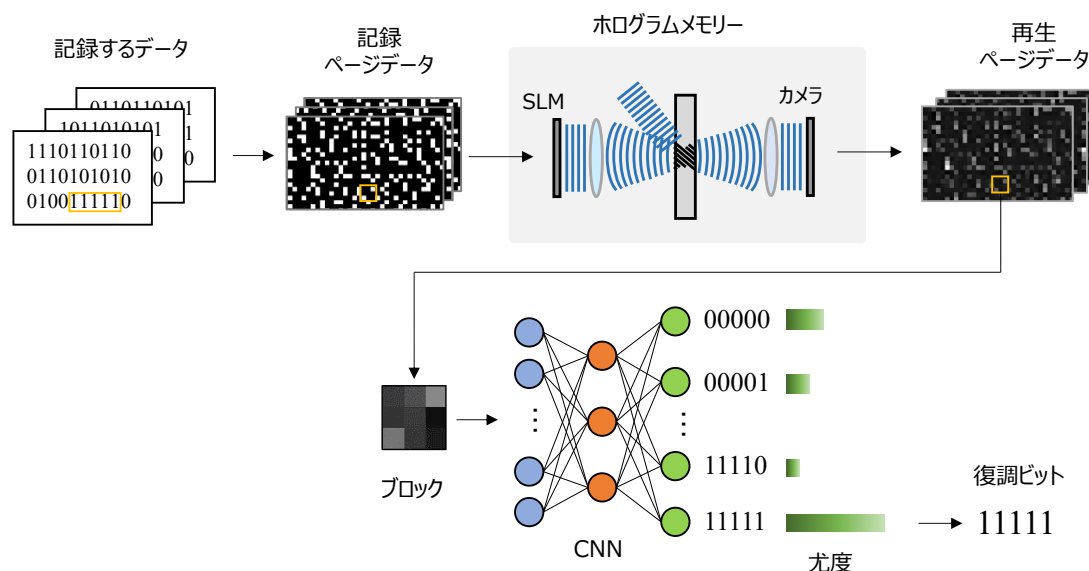


図 4.11 CNN 復調を用いた記録再生系統図

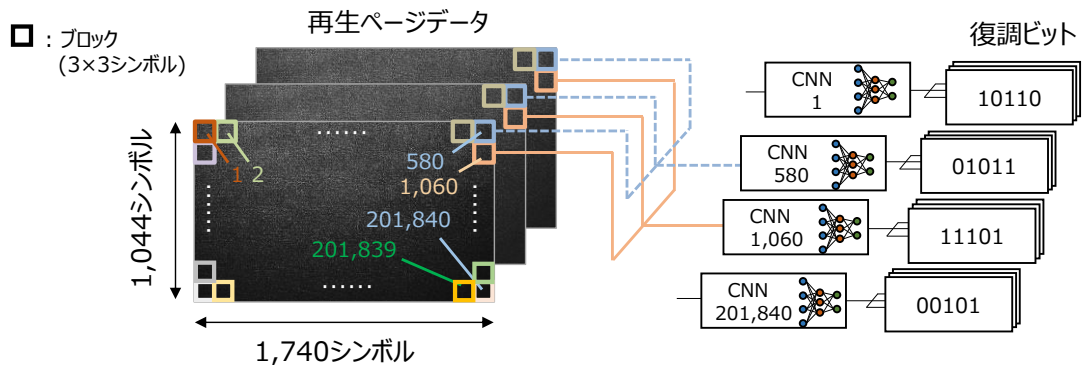


図 4.12 ブロックごとに独立な CNN 復調

習させるため、CNN はブロックごとに複数用意した (図 4.12)。それぞれで独立に学習と復調をすることで、より高精度な復調が可能となる。

#### 4.4. 振幅 2 値変調方式の再生データを用いた復調特性評価

##### 4.4.1 ネットワーク構成

本章で構成した CNN の構造を図 4.13 に示す。近年のニューラルネットワーク技術の発展の特徴として、Deep Learning と呼ばれるように、“深い”，すなわち層数の多いネットワークを使った学習や推定が可能となり、精度が向上したことが挙げられる。一方で、

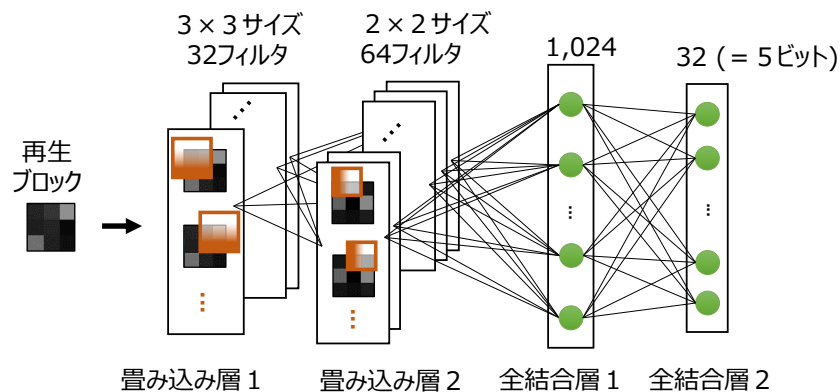


図 4.13 5 : 9 変調符号における CNN 復調アーキテクチャー

層数と CNN の処理時間はトレードオフの関係にある。CNN の復調処理時間が増大すると、ホログラムメモリにおいては転送速度の低下につながりかねない。そのため、2つの畳み込み層と、2つの全結合層のみで“浅い”ネットワークを構成した。一般的に、CNN では畳み込み層と全結合層のほかに、次元削減の役割を果たすプーリング層が用いられる[10, 11]が、本ネットワークには挿入しなかった。理由として、まず、入力の時点ですでに十分に次元数が低いことが挙げられる。例えば、2K の画像を 100 クラスのいずれかに分類するような問題の場合には、入力は  $1,920 \times 1,080 = 2,073,600$  次元、出力は 100 次元であり、次元を削減する処理が必須となる。一方で、本章の場合には CNN への入力が 9 つのシンボル (= 9 次元) のみであり、次元を削減する必要がない。加えて、一定範囲内で最大値のみを取り出す Max プーリング[12]、あるいは平均値を出力するによって Average プーリング[13]など、いずれを用いてもプーリング処理によって各シンボルの輝度値に重畳されたノイズ情報が消失してしまう可能性がある。

CNN へ入力した 9 つのシンボルの輝度値について、まず畳み込み層で特徴を抽出する。具体的には、 $3 \times 3$  サイズあるいは  $2 \times 2$  サイズの畳み込みフィルターをスライドさせながら入力信号に対して積和演算をする。具体的には以下の式で表せる。

$$x_{i,j} = \sum_p \sum_q y_{i+p,j+q} w_{p,q} \quad (4.3)$$

ここで  $x_{i,j}$  は二次元の出力信号、 $y_{i,j}$  は二次元の入力信号、 $w_{p,q}$  は畳み込みフィルターである。 $p$  および  $q$  はフィルターのサイズにあたり、畳み込み層 1 では 3、畳み込み層 2 では 2 とした。入力信号に対して、複数のフィルターで特徴抽出を試みる。本章の CNN では、畳み込み層 1 および畳み込み層 2 でそれぞれ 32 種類および 64 種類のフィルターを用意した。畳み込み処理の際には、入力されたブロックの外周部についても特徴を正確に抽出するため、事前に入力信号の外側に輝度値が“0”のシンボルを追加している（ゼロパディング）。後段の全結合層は、前後の層を接続する層である。ノードと呼ばれる、値を格納するユニットの集合で構成され、最終的に全結合層 2 では 32 のノードに結合する。過学習を防ぐため、全結合層 1 の出力にはドロップアウト[14]を適用した。

表 4.2 CNN の学習条件

Dropout rate	0.8
Optimization algorithm	Adam
Initial learning rate	$1 \times 10^{-4}$
Batch size	10

活性化関数としては、正規化線形関数 (Rectified Linear Unit, ReLU) を用いた。ネットワークの学習に関する条件を表 4.2 に示す[15]。

#### 4.4.2 学習

検証に用いるデータセットとして、角度多重方式で記録再生された 864 枚のページデータ (96 ページデータ × 9 ブック) を用意した。同ページデータは、8K 映像を記録再生したものである[16]。各ページデータは  $1,740 \times 1,044$  シンボルで構成されるため、ブロックごとに独立な 201,840 の CNN を用意した。データセットを分割し、700 枚の教師データでネットワークの学習、164 枚のテストデータで復調精度の評価をそれぞれ行った。

学習の例を図 4.14 に示す。エポック数が増えていくにつれて CNN の復調精度が向上していく。特徴として、各 CNN で学習の進行に差があることが挙げられる。これは、ページデータ面内でノイズ特性が異なることが原因である。CNN は、ノイズが混入した条件のもとで変調符号に対応した復調方法を学習するため、ノイズ量の多い領域では学習が完了するのに時間を要し、逆にノイズ量が少なければ数回のエポックで十分な復調精度が得られる。今回の実験では、201,840 の CNN において、最小 9 エポック、最大

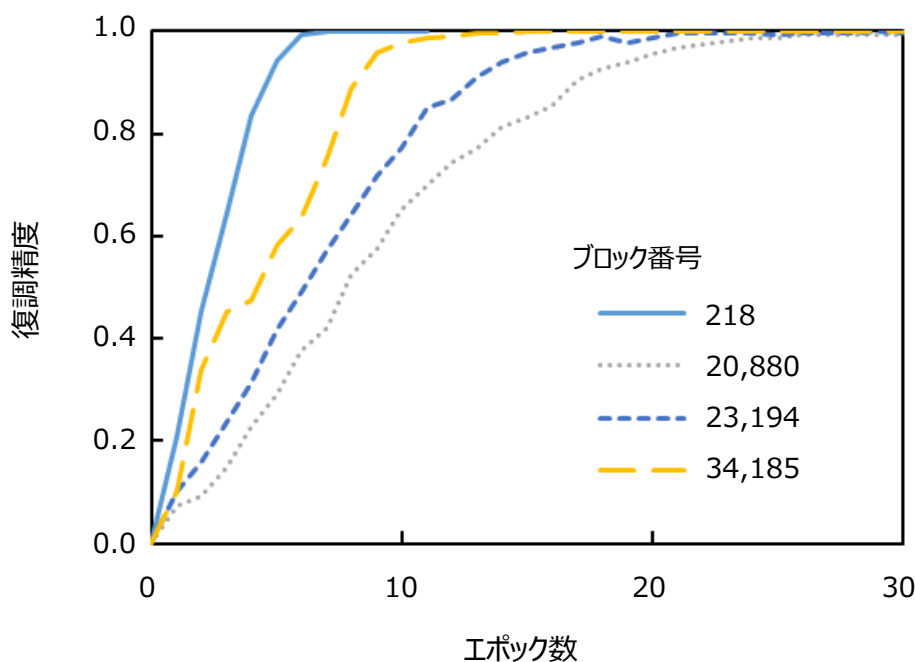


図 4.14 CNN の学習特性

200 エポックで学習が完了した。すべての CNN で一律にエポック数を設定してしまうと、未学習や過学習が発生するため、過学習が生じる前に学習を中断させるアーリーストッピング手法[17]を適用し、CNN ごとに最適なエポック数を設定した。

### 4.4.3 復調結果

従来手法である硬判定と CNN で復調精度を比較した結果を図 4.15 に示す。テストデータである 164 枚のページデータのすべてにおいて、CNN を用いることで硬判定よりも復調誤りを低減できた。ビット誤り率は、硬判定では  $6.3 \times 10^{-4}$  であったのに対し、CNN では  $1.6 \times 10^{-4}$  となり、ビット誤りは約 1/4 となった。復調処理時間を計測した結果、1 ブロックを復調するのに 0.16 ミリ秒かかった。処理がシンプルな硬判定では 0.043 ミリ秒とより高速であったが、ページデータ再生時のカメラの露光時間が 1.8 ミリ秒 [16]であることから、ブロックごとにパラレルに CNN で復調すれば、復調処理時間がシステム全体のボトルネックとならないことが確認できた。なお、復調には GPU (Graphics Processing Unit) として NVIDIA GeForce GTX 1060 を用いた。

復調誤りについて、ブロックごとに評価すると図 4.16 のようになる。このデータをもとに CNN 復調の効果を詳細に考察する。まず、横軸の両端、すなわちブロック番号

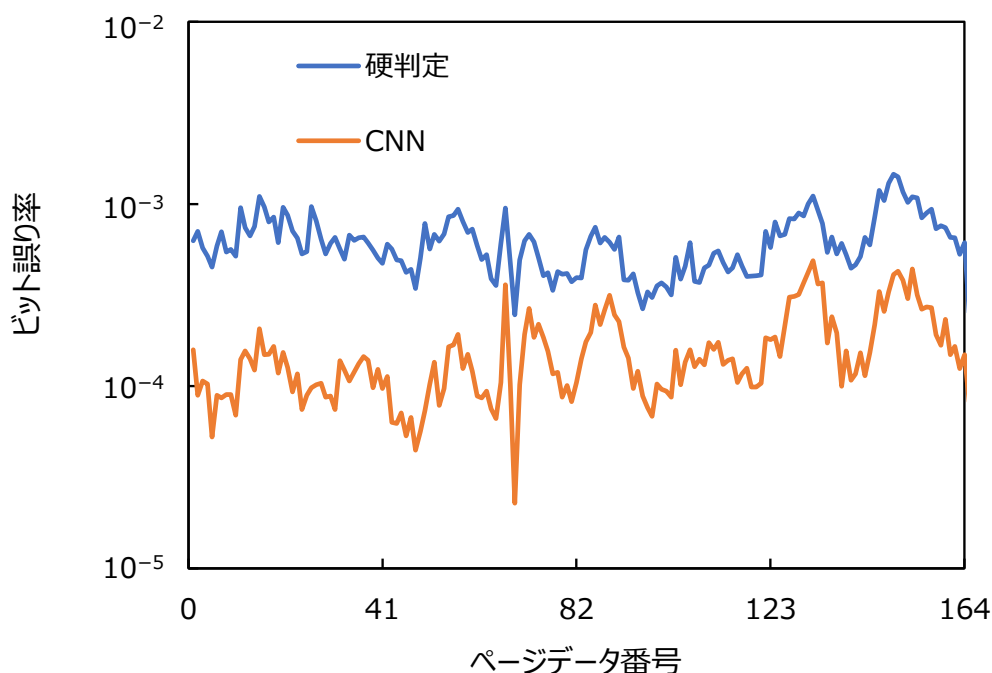


図 4.15 ページデータごとの復調精度比較



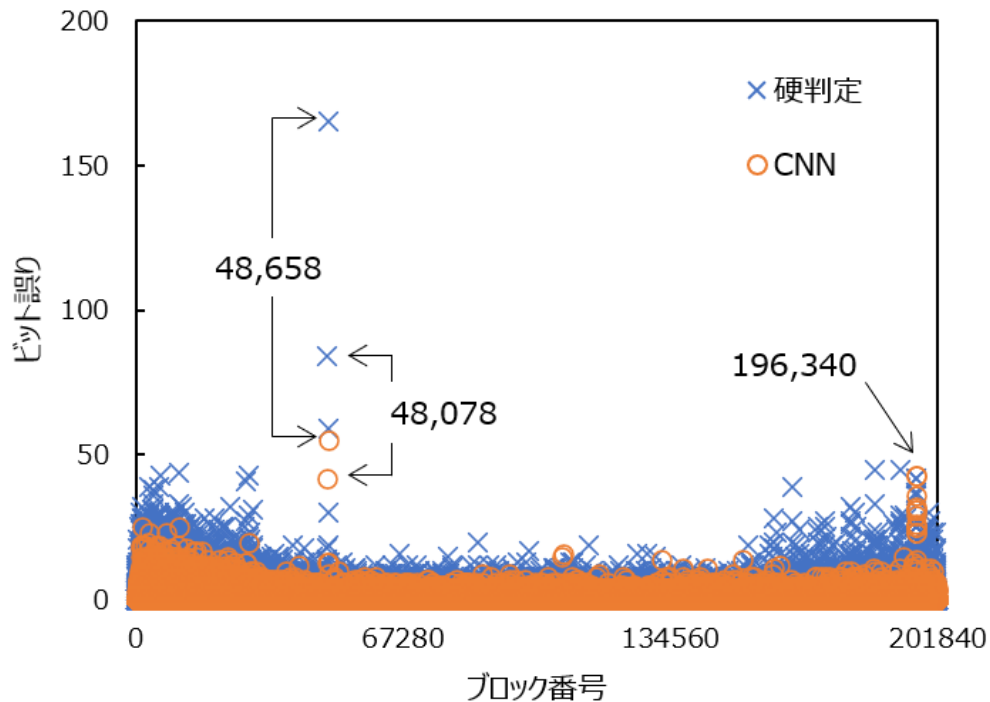


図 4.16 ブロックごとの復調精度比較

1 付近とブロック番号 201,840 付近の領域において、硬判定と比べて CNN 復調では大きくビット誤りを低減できていることがわかる。同領域は、ページデータの外周部にあたる。記録再生時に信号光の光軸から最も離れた位置にあたるため、レンズ収差の影響を受けやすい。ビット誤り低減の効果が大きかったことから、収差に対して CNN の復調性能がロバストであることがわかる。

次に、ページデータ内で最もビット誤りが多かった、ブロック番号 48,078 およびブロック番号 48,658 について検証した。ブロック番号差が 580 であることから明らかだが、これら 2 つのブロックはページデータ内で縦方向に隣接して位置するブロックである ( $580 \times 3 = 1,740$ )。同領域において、CNN 復調ではビット誤りが生じず、かつ硬判定ではビット誤りが発生したページデータの例を図 4.17 に示す。ブロック番号 48,087 の右上のシンボルと、ブロック番号 48,658 の中央右のシンボルに注目すると、記録再生の過程でいずれのページデータでも輝度値が著しく低下したことがわかる。他のページデータでも同様の傾向が見られたことから、固定パターンノイズによる輝度低下であることがわかった。加えて、硬判定の復調で 2 番目に輝度値が高いと判定されたシンボルは、いずれも隣接シンボルが明シンボルであることから、符号間干渉による復調誤りの

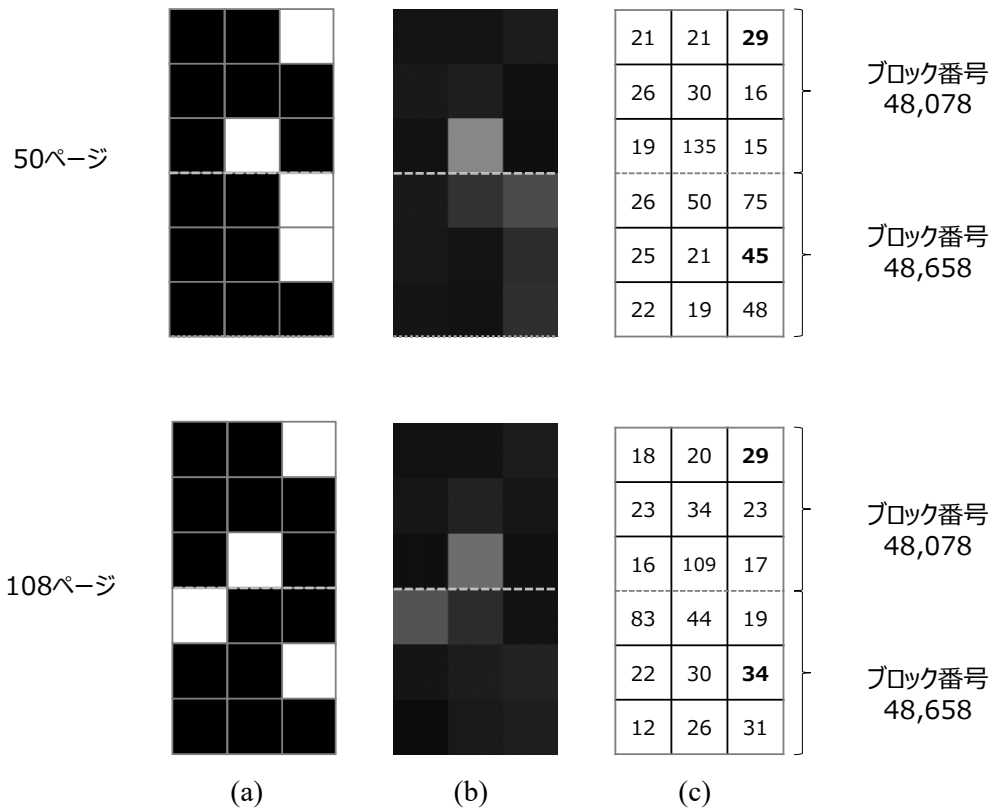


図 4.17 硬判定でのみエラーが発生したブロック  
(a) 記録, (b) 再生, (c) (b)の輝度値

発生も確認できる。これにより、硬判定では2番目に輝度値の高いシンボルの検出に失敗し、ビット誤りが発生していた。一方、CNNでは誤り無く復調でき、固定パターンノイズや符号間干渉の特性を教師データから事前に学習できていたことがわかる。

また、ブロック番号 196,340 付近においては、硬判定と CNN 復調でビット誤りの数がほぼ同数であった。再生ページデータを検証した結果、光学部品間の乱反射によって一部のページデータにおいて図 4.18 に示すような迷光が混入していたことがわかった。教師データのすべてに混入していなかったため、学習や復調が正確にできなかった。ページデータに迷光が混入する条件があらかじめわかる場合には、混入するページデータのみを使った学習や復調をする、あるいは、再生ページデータだけでなく迷光混入有無を示す情報をあわせて入出力できるようなネットワークを構築すれば、さらに復調精度を向上できると考えられる。

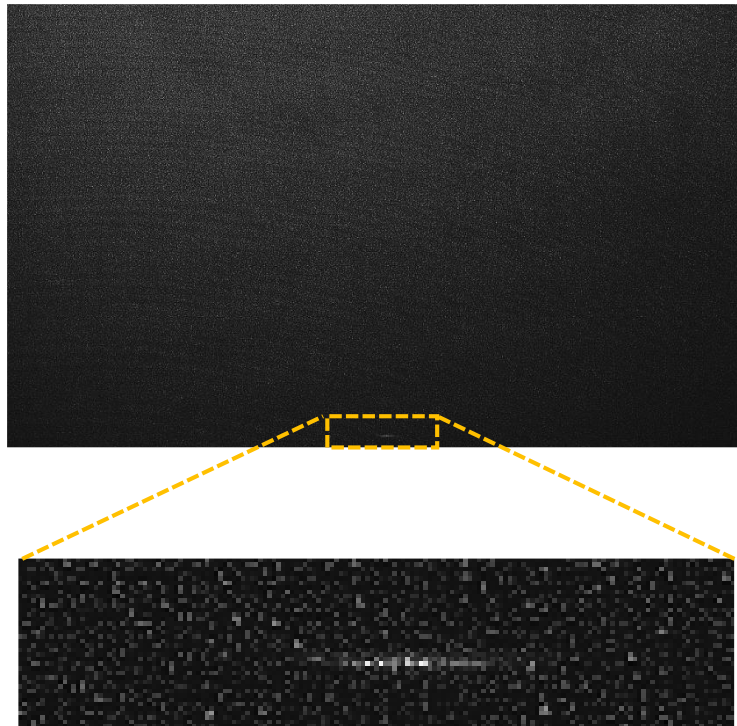


図 4.18 眩光の混入

## 4.5. 結言

本章では、ノイズが重畳された再生データから記録された情報を正確に復調可能な、畳み込みニューラルネットワークを用いた復調手法を新たに提案した。はじめに、プログラムメモリーにおけるノイズの分類や特徴について述べた。5:9 変調符号を例に、これまで用いられてきた硬判定による復調について説明し、ノイズが混入したデータにおける復調精度の改善には、ブロックを構成するすべてのシンボルを用いる必要性について述べた。これらを踏まえ、再生ページデータがカメラで取得される画像情報の一種であることから、画像認識に優れる機械学習技術である CNN を用いた復調手法を提案した。CNN への入力は、ブロックを構成するすべてのシンボルの輝度値であり、出力は復調ビット列である。入力する各シンボルの輝度値には、記録再生の過程で重畳された光学ノイズが重畳されていることから、CNN は教師あり学習によってノイズ特性を踏まえた復調が可能となる。固定パターンノイズや収差は、ページデータ面内で特性が大きく異なることから、CNN はブロックごとに独立に用意した。複数の CNN を用いて並列に復調できることから、処理速度の面でもメリットがある。8K 映像を記録再生した

ページデータを用いて、硬判定との比較検証をした。CNN を用いた場合、復調後のビット誤りは硬判定を用いた場合の約 1/4 となり、復調精度を大幅に改善した。ページデータ面内の各領域における復調結果を分析した結果、収差、固定パターンノイズ、符号間干渉の特性を踏まえた復調が可能であることを確認した。

一方で、図 4.18 で示した迷光のように、教師データ内でランダム性のあるノイズが混入した場合には特徴をうまく抽出できず、復調精度を改善することはできない。残留ビット誤りは、後段の誤り訂正によって訂正されなければならない。次章では、本章で提案した CNN 復調手法を用いて多値記録方式の導入を検討することに加え、CNN 復調を利用した誤り訂正手法について述べる。

## 参考文献

1. B. M. King, G. W. Burr, and M. A. Neifeld, "Experimental demonstration of gray-scale sparse modulation codes in volume holographic storage," *Appl. Opt.* **42**, 2546-2559 (2003).
2. G. W. Burr, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, and C. M. Jefferson, "Noise reduction of page-oriented data storage by inverse filtering during recording," *Opt. Lett.* **23**, 289-291 (1998).
3. G. W. Burr, G. Barking, H. Coufal, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, and M. A. Neifeld, "Gray-scale data pages for digital holographic data storage," *Opt. Lett.* **23**, 1218-1220 (1998).
4. Y. Takahata, Y. Kondo, S. Yoshida, and M. Yamamoto, "Signal quality improvement of holographic data storage using adaptive two-dimensional filter," *Optical Review* **17**, 204-209 (2010).
5. H. Osawa, S. Natsui, Y. Okamoto, and Y. Nakamura, "Neural Network Equalizer Matched to Recording Code in Holographic Data Storage," *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 09MB05-1-09MB05-4 (2011).
6. T. Shimobaba, Y. Endo, R. Hirayama, Y. Nagahama, T. Takahashi, T. Nishitsuji, T. Kakue, A. Shiraki, N. Takada, N. Masuda, and T. Ito, "Autoencoder-based holographic image restoration," *Appl. Opt.* **56**, F27-F30 (2017).
7. N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Classification and Evaluation of Noises in Holographic Memory System," *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 08KD12-01-08KD12-02 (2010).
8. M. P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, E. Oesterschulze, R. M. Shelby, G. T. Sincerbox, and M. Quintanilla, "Effects of multilevel phase masks on interpixel cross talk in digital holographic storage," *Appl. Opt.* **36**, 3107-3115 (1997).
9. J. F. Heanue, K. Gurkan, and L. Hesselink, "Signal detection for page-accessoptical memories with intersymbol interference," *Appl. Opt.* **35**, 2431-2438 (1996).
10. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks," in *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 1*, (Curran Associates Inc., Lake Tahoe, Nevada, 2012), pp. 1097-1105.
11. Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature* **521**, 436-444 (2015).
12. M. A. Ranzato, Y.-L. Boureau, and Y. LeCun, "Sparse Feature Learning for Deep Belief Networks," in *Advances in neural information processing systems 20 (NIPS'08)*, (2007),

- 1185-1192.
13. Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, "Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition," in *Proceedings of the IEEE*, (1998), 2278-2324.
  14. N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, and R. Salakhutdinov, "Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting," *Journal of Machine Learning Research* **15**, 1929-1958 (2014).
  15. D. P. Kingma and J. L. Ba, "Adam: A Method for Stochastic Optimization," in *3rd International Conference for Learning Representations*, (2014) , 1-15.
  16. N. Kinoshita, Y. Katano, T. Muroi, and N. Saito, "Demonstration of 8K SHV Playback from Holographic Data Storage," in *International Symposium on Optical Memory*, (2015), 8-9.
  17. L. Prechelt, "Early Stopping — But When?," in *Neural Networks: Tricks of the Trade: Second Edition*, G. Montavon, G. B. Orr, and K.-R. Müller, eds. (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012), pp. 53-67.

## 第5章 振幅 4 値変調方式と再生データの復号

### 5.1. 緒言

4 章では、提案した CNN を用いた復調手法により、ノイズが混入したページデータから高精度に記録された情報を復調できることを振幅 2 値変調方式 (5 : 9 変調符号) のデータで示した。これにより、ページデータあたりの容量を増やすことが可能な多値記録方式の導入に目処が立った。

本章では振幅 4 値変調方式の導入を目指す。位相も含めた変調符号と異なり、振幅多値変調であれば、カメラや光変調器といったデバイスを含め、振幅 2 値変調方式の光学系をそのまま適用できるメリットがある。これまでに報告のある振幅多値記録再生実験 [1-3] は、いずれも複数のピークからなる再生データのヒストグラムを示したのみであり、多値記録方式の導入による記録容量や転送速度についての具体的な改善量は不明瞭である。そこで、本章ではまず振幅 2 値変調方式である 5 : 9 変調符号と比べてページデータ容量を 2 倍に増加可能な、振幅 4 値変調方式の 10 : 9 変調符号を提案する。次に、シミュレーションによりノイズを付加したページデータを用いて、振幅 4 値変調方式における CNN 復調の効果を検証する。さらに CNN 復調で生じたビット誤りを訂正するための強力な誤り訂正手法を提案する。3 章でも誤り訂正に用いた空間結合 LDPC 符号は、復号時に再生データから最も確からしいビット列を推定するために、確率計算を繰り返す。一方、CNN 復調では、尤度分布、つまり各ビット列の尤もらしさを表す確率分布が出力される。この分布を活用した復号手法を開発し、従来手法との比較検証をする。

### 5.2. 10 : 9 変調符号

振幅 2 値変調符号で用いていた 5 : 9 変調符号は、5 ビットを 9 シンボルの 2 次元データに変換する。本章では、振幅 4 値変調方式の導入によって変調効率を 2 倍にするべく、10 ビットを 9 シンボルで表す 10 : 9 変調符号を提案する。変調テーブルの例を図 5.1 に示す。9 シンボルを、3 つの明シンボルと 6 つの暗シンボルで構成する。明シンボルは、輝度レベルとして 3 種類 ( $L_1, L_2, L_3$ ) をとる。したがって、暗シンボル ( $L_0$ ) を含めた振幅 4 値変調となる。すべてのブロックが必ず輝度レベル  $L_3$  (8 ビットで輝度値 255) のシンボルを含むものとした。これにより、再生時にはこのシンボルをリファレンスシンボルとしてブロック全体の輝度値を正規化できる。以上の条件を満たす組み合わせは、

$${}_9C_3 \times (3^3 - 2^2) = 1,596 \quad (5.1)$$

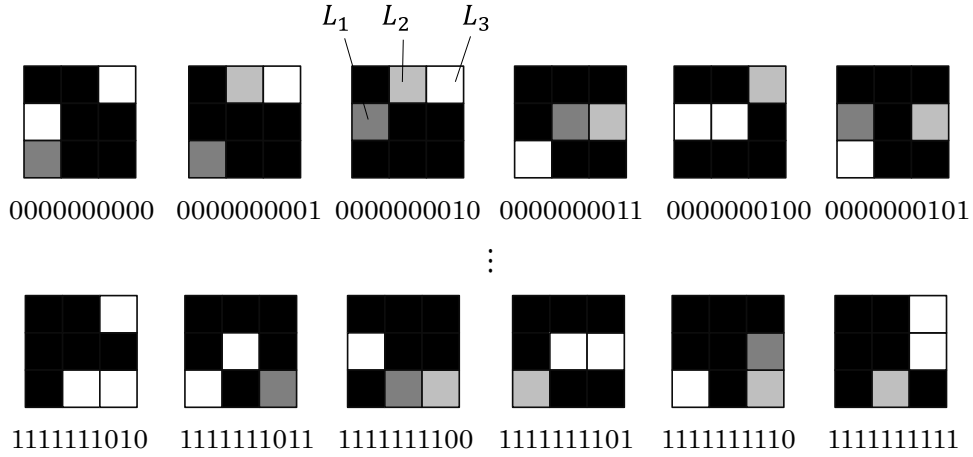


図 5.1 10 : 9 変調符号の変調テーブル例

である。一方、10 ビットの情報を記録するのに必要なブロック数は、 $2^{10}=1,024$  である。1,596 種類のブロックから 1,024 種類を選択するために、各ブロック間で明シンボルと輝度レベルについてのユークリッド距離を計算し、類似度が高いものを排除した[4]。これにより、互いに相関性の低いブロックのみで変調テーブルを構成することができ、復調誤りが生じにくくなる。

上記の変調規則から、硬判定による復調手順は以下のとおりとなる。まず、9 つのシンボルの輝度値を取得し、そのうち上位 3 つの輝度値を持つシンボルを明シンボルと判定する。次に、各シンボルの輝度値を正規化する。9 シンボルのうち最も輝度値が高いシンボル（リファレンスシンボル）の輝度値  $I_{max}$  は本来 255、逆に最も輝度値が低いシンボル  $I_{min}$  の輝度値は本来 0 であるはずなので、正規化後の各シンボルの輝度値  $I_{norm}$  は、

$$I_{norm} = (I_{meas} - I_{min}) \times \frac{255}{I_{max} - I_{min}} \quad (5.2)$$

となる。ここで  $I_{meas}$  は各シンボルの正規化前の輝度値である。最後に、明シンボルの輝度レベル  $L_{demod}$  を決定する。最も輝度値が高いシンボルは自動的に  $L_3$  となる。残りの 2 つのシンボルについては、しきい値  $B_{12}$  と  $B_{23}$  を設けて以下のように判定される。

$$L_{demod} = \begin{cases} L_1 & (I_{norm} < B_{12}) \\ L_2 & (B_{12} \leq I_{norm} < B_{23}) \\ L_3 & (I_{norm} \geq B_{23}) \end{cases} \quad (5.3)$$



### 5.3. 空間結合 LDPC 符号による誤り訂正

復調されたビット列の誤りを訂正する復号処理として、通信技術と同様にホログラムメモリーでも多くの符号がこれまでに検討されてきた。例えば、リードソロモン符号[5]、ターボ符号[6]、LDPC 符号[7]などが挙げられる。特に、LDPC 符号は通信容量の理論限界値であるシャノン限界に接近する高い誤り訂正能力を持つが、さらに LDPC ブロックを帯状に結合した検査行列を用いる空間結合 LDPC 符号[8, 9]は、より強力な復号能力を有する符号として注目されており、ホログラムメモリーにおいてもその有用性が示されている[10]。

LDPC 符号の復号法として用いられる Sum-Product 法[11]は、通信路モデルに応じた対数尤度比 (Log Likelihood Ratio, LLR) を用いて、図 5.2 に示すようなチェックノード処理や変数ノード処理と呼ばれる反復計算により誤り訂正する。通信路モデルとして一般的に使用されるのは、AWGN チャネルである (図 5.3)。同モデルについて、シーケンシャルに 1 次元のシンボルを扱うケースで説明する。通信路への  $n$  番目の入力  $x_n =$

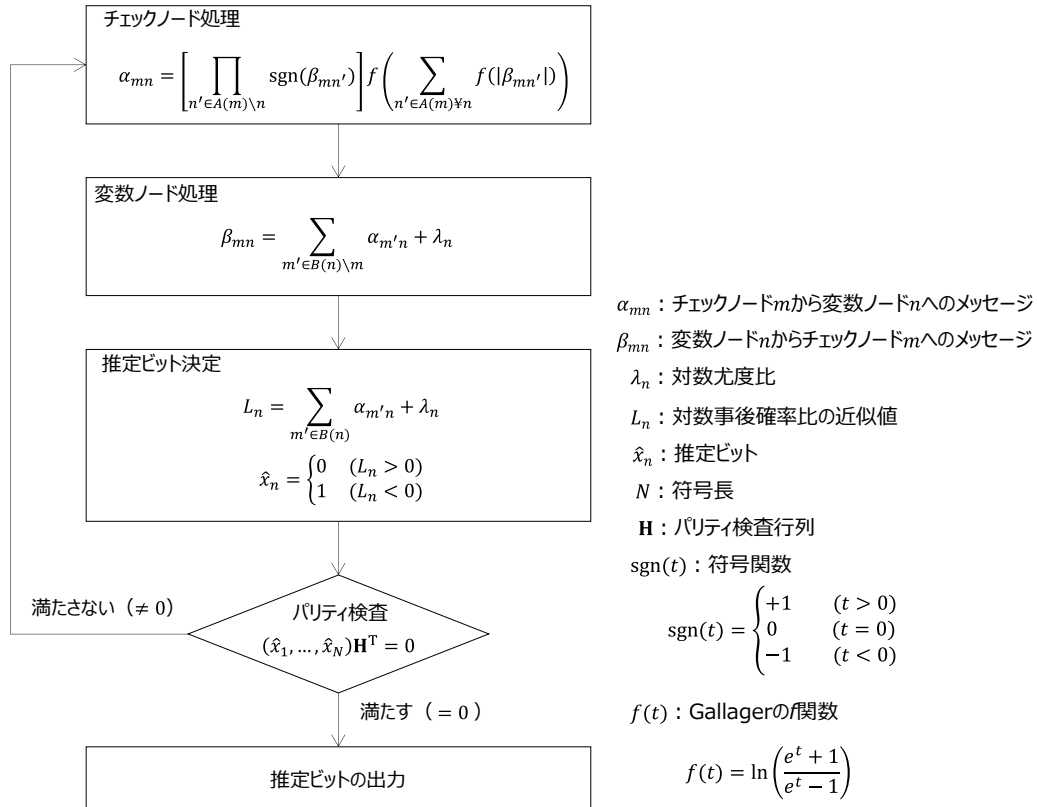


図 5.2 Sum-Product 法

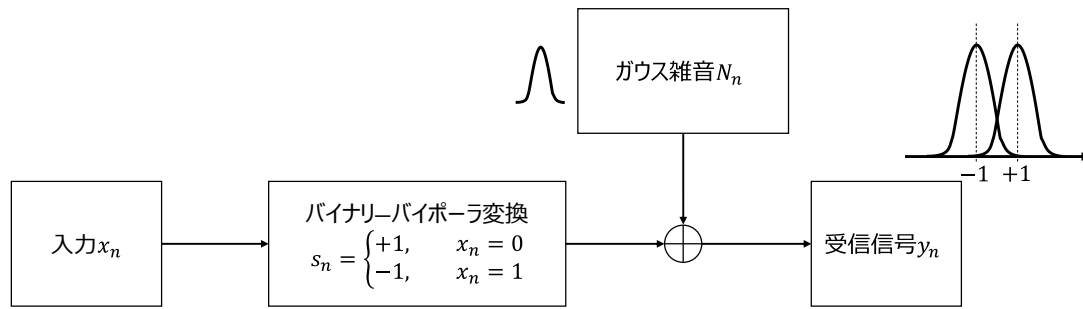


図 5.3 AWGN チャンネル

$\{0,1\}$ をバイナリ-バイポーラ変換した $s_n = \{+1, -1\}$ の受信信号 $y_n$ は

$$y_n = s_n + N_n \quad (5.4)$$

と表せる。ここで、 $N_n$ は平均0かつ分散 $\sigma^2$ のガウス雑音である。AWGN チャンネルの条件付確率密度分布 $p(y_n|s_n)$ は、ガウス雑音により

$$p(y_n|s_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y_n - s_n)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.5)$$

となる。 $n$ ビット目の対数尤度比 $\lambda_n$ は以下の式で定義される。

$$\lambda_n = \ln \frac{p(y_n|s_n = +1)}{p(y_n|s_n = -1)} \quad (5.6)$$

よって1次元信号における $n$ ビット目の対数尤度比 $\lambda_{1d_n}$ は、(5.5)式を代入して

$$\lambda_{1d_n} = \frac{2y_n}{\sigma^2} \quad (5.7)$$

となる。

一方、ホログラムメモリーの場合には2次元信号のページデータを扱うため、対数尤度比を改めて定義する必要がある。従来研究では、条件付確率密度分布として、再生されたブロック内の輝度値で減算処理する手法[7]や、記録前のブロックの輝度値と再生されたブロックの輝度値間のユークリッド距離を用いる手法[12]などが提案されてい

る. 例えば, 後者の場合における $n$ ビット目の対数尤度比 $\lambda_{conv_n}$ は

$$\lambda_{conv_n} = d^2(\mathbf{B}_{rep}, \mathbf{B}_{rem}(b_n = 0)) - d^2(\mathbf{B}_{rep}, \mathbf{B}_{rem}(b_n = 1)) \quad (5.8)$$

と定義されている. ここで,  $d$ はユークリッド距離,  $\mathbf{B}_{rep}$ は再生されたブロックのバイポーラ変換,  $b_n$ は硬判定によって復調された $n$ 番目のビット,  $\mathbf{B}_{rem}$ は復調ビット列を再変調したブロックである. 具体例を図 5.4 に示す. 9 番目のビットについて計算した場合, 対数尤度比は

$$\begin{aligned} \lambda_{conv_9} &= (0.33 - (-1.0))^2 - (-1.0 - (-1.0))^2 \\ &\quad + (-0.33 - 0.90)^2 - (1.0 - 0.90)^2 \\ &\quad + (1.0 - 0.49)^2 - (0.33 - 0.49)^2 \\ &\quad + (-1.0 - 0.97)^2 - (1.0 - 0.97)^2 \\ &\quad + (1.0 - (-0.17))^2 - (-0.33 - (-0.17))^2 \\ &= 8.7 \end{aligned} \quad (5.9)$$

となる. いずれの従来の手法も, 再生ページデータの画素値を対数尤度比の算出に直接用いている. しかしながら, 4.2 節で述べたように, 再生ページデータ内の各シンボルには記録再生の過程で混入したさまざまなノイズ (固定パターンノイズ, 符号間干渉, リサンプリングノイズ, ランダムノイズ) が重畳されている. にもかかわらず, いずれの従来手法も一般的な AWGN チャネルを通信路に設定している. ガウスノイズのみを光路で想定しているため, 誤り訂正能力を十分に生かし切れていない. ホログラムメモリーの光学系にあわせた通信路を設定することで訂正能力を改善する手法も一考だが, それぞれのノイズは互いに複雑に混入しており, また, 4.3 節で述べたとおり, ページデータの面内でノイズ特性が異なるため, 一意に通信路を定義できない.

誤り訂正能力の向上に向けて, 本章では復調に用いる CNN に注目した. 4.3 節で述べたとおり, CNN 復調時に出力されるのは復調ビット数に応じたクラス確率である. この尤度分布は, 学習時に特徴抽出した固定パターンノイズ, 符号間干渉, リサンプリングノイズなどの特性を踏まえて出力されるため, ノイズゆらぎの少ない, いわば CNN に入力されたブロックに対する, ピュアな各ビットの尤もらしさを表している. ただし, ランダムなノイズについては教師あり学習で特徴を抽出できないため, 出力されるクラス確率はランダムノイズの影響を受ける. これらの理由から, AWGN チャネルを通信路として誤り訂正をし, かつ CNN から出力される尤度情報から対数尤度比を算出して復号すれば, さまざまなノイズ源に対応した強力な誤り訂正が実現できる.

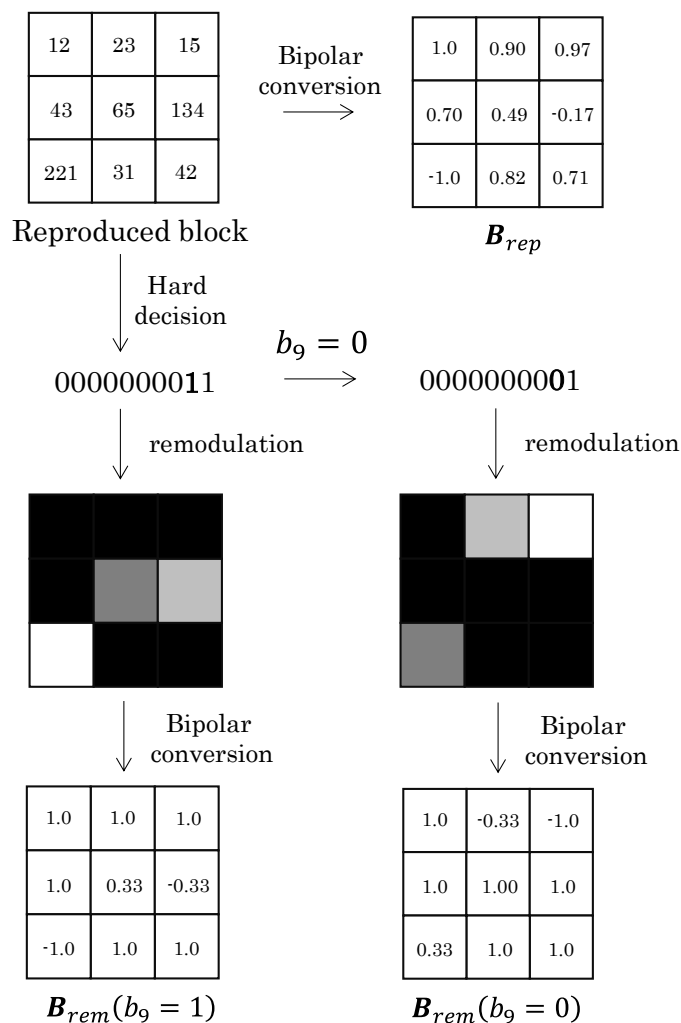


図 5.4 従来手法による対数尤度比の算出例

## 5.4. CNN と空間結合 LDPC 符号を組み合わせた復号システム

新たに提案する，CNN による復調と空間結合 LDPC 符号による誤り訂正を組み合わせた復号システムを図 5.5 に示す．CNN には，再生ページデータから抽出したブロックが入力される．復調した結果として出力されるのはクラス確率である．10 : 9 変調符号を用いた場合であれば，10 ビット，すなわち  $2^{10}$  (=1,024) 種類の確率分布が得られる．この確率分布を誤り訂正で活用する．一般的な 1 次元のシンボルを用いた誤り訂正同様，バイポーラ変換して対数尤度比を算出し，Sum-Product 法によって復号する．

復調 CNN を図 5.6 に示す．振幅 2 値変調方式においては明シンボルの位置さえ特定

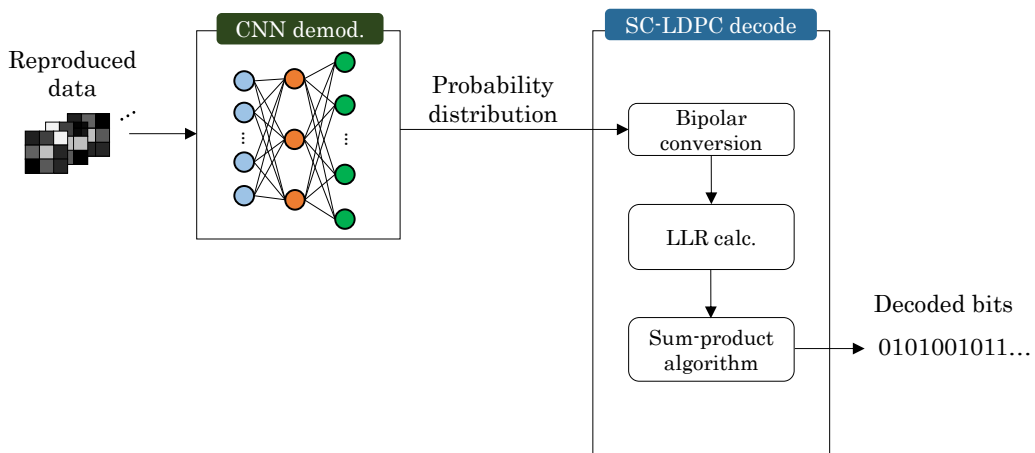


図 5.5 CNN と空間結合 LDPC 符号を組み合わせた復号システム

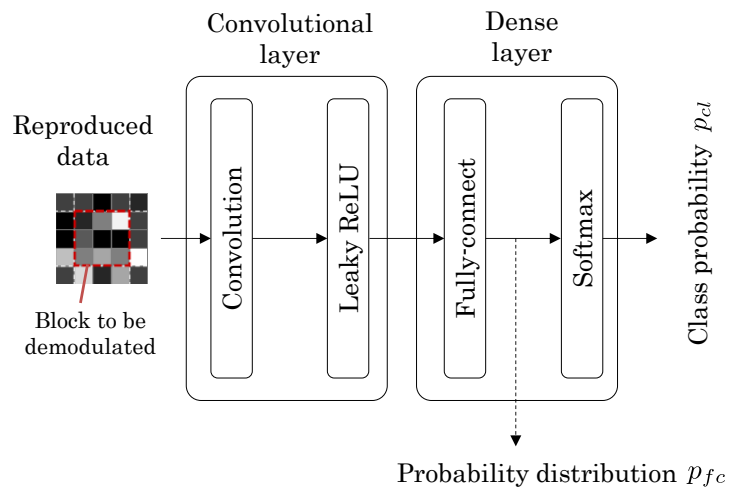


図 5.6 CNN 復調アーキテクチャとその出力

できれば誤りなく復調できたため、符号間干渉によって輝度値に多少の変動が生じていても問題はなかった。一方、振幅 4 値変調方式では、明シンボルの位置は勿論、その輝度レベルも正確に判定しなければならない。そのため、符号間干渉によるノイズに対してよりロバストになるよう、復調対象データの CNN への入力手法を改善した。ページデータは、ブロックが 2 次元状に配列されたものである。よって、ブロック内のシンボ

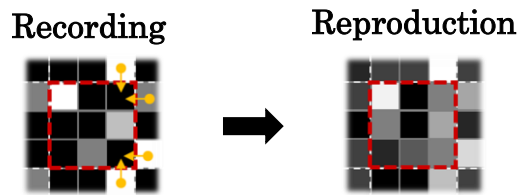


図 5.7 隣接ブロックからの符号間干渉

ル間だけではなく、隣接するブロックのシンボルからも符号間干渉が生じる (図 5.7). これを抑制するため、復調対象のブロックに加えて、周囲 1 シンボル分の情報を含めた 25 シンボル (5×5) の情報を CNN へ入力する. 入力された情報について、まず畳み込み層で特徴を抽出する. その後、全結合層 (出力層) により 1,024 種類のクラス確率  $p_{cl}$  を出力する. 活性化関数として、畳み込み層では復調精度の高さから Leaky ReLU 関数[13] を用い、全結合層ではソフトマックス関数[14]を用いた. ソフトマックス関数は、

$$t_i = \frac{\exp(s_i)}{\sum_{i=0}^{N_c-1} \exp(s_i)} \quad (5.10)$$

で表される. ここで、 $s_i$  および  $t_i$  は、それぞれ関数への入力と出力であり、 $N_c$  はクラス数である. ネットワークの出力値は正の値となり、かつ総和が 1 となるよう正規化されるため、ソフトマックス関数を用いることで学習時にネットワーク内のパラメーター最適化を少ないエポック数で実現できる. CNN のその他の仕様を表 5.1 に示す.

対数尤度比については次のように定義する. 前述のように、CNN 復調時に得られる尤度分布を用いるが、CNN から出力されるクラス確率  $p_{cl}$  は、(5.10)式に示すソフトマッ

表 5.1 10 : 9 変調符号用復調 CNN の仕様

Weight in the convolutional layer	$2 \times 2 \times 4$
Stride of convolution	1
Optimizer	Adam
Batch size	10
Slope parameter in leaky ReLU	0.25

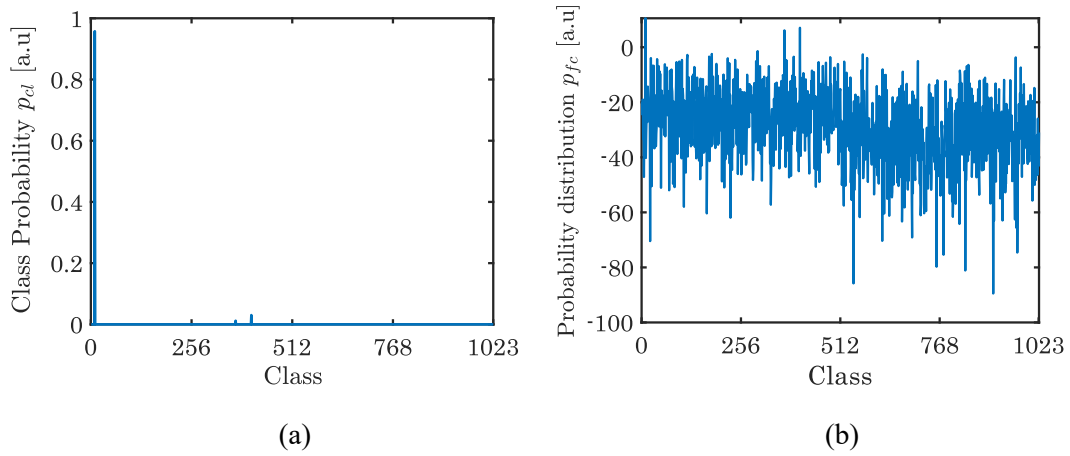


図 5.8 確率分布の比較例

- (a) ソフトマックス関数から出力されたクラス確率 $p_{cl}$ ,  
 (b) 全結合演算の出力分布 $p_{fc}$

クラス関数によって正規化されており、多くのクラスではほぼゼロの値となる。出力した例を図 5.8(a)に示す。本例は、ビット列“0000001010”，すなわちクラス番号 10 のデータを復調した結果を示しており、同クラス番号以外ではクラス確率の値がほぼゼロに近い値となっている。正規化によって尤度情報が大きく消失している。このことから、ソフトマックス関数へ入力される分布、すなわち全結合演算の出力分布 $p_{fc}$ を対数尤度比の算出に用いた。同分布の例を図 5.8(b)に示す。これを-1 から 1 の値にバイポーラ変換した $p_{bfc}$ を用いて、条件付確率密度分布 $p_{CNN}$ を下記のように定義した。

$$p_{CNN} = \exp(p_{bfc}) \quad (5.11)$$

したがって、(5.6)式より $n$ 番目のビットの対数尤度比 $\lambda_{CNN_n}$ は、

$$\lambda_{CNN_n} = p_{bfc}(b_n = 0) - p_{bfc}(b_n = 1) \quad (5.12)$$

となる。パリティ検査行列は、図 5.9 に示す疎なベース行列 $\mathbf{B}$ によって生成される。ベース行列 $\mathbf{B}$ 中の“1”は、 $M \times M$ のランダムな置換行列によって置き換えられる ( $M$ : リフティング値) [8]。パリティ検査行列の仕様を表 5.2 に示す。符号化率については、ノイズに対して十分に堅牢な信号とするため 0.65 とした。





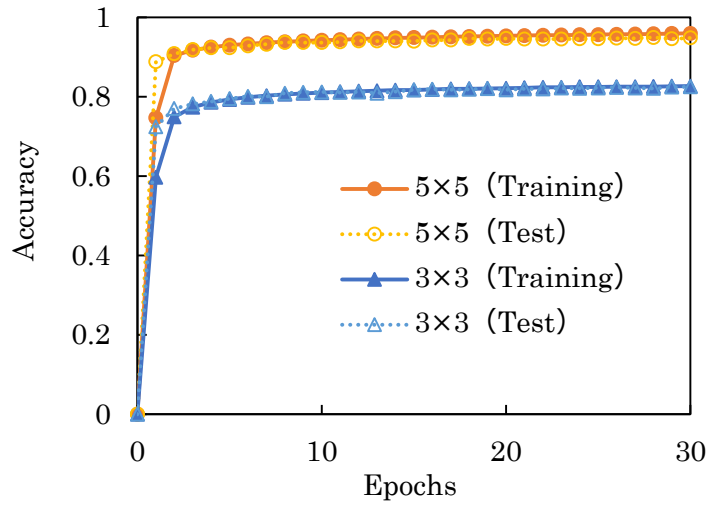


図 5.10 入力シンボルサイズと精度

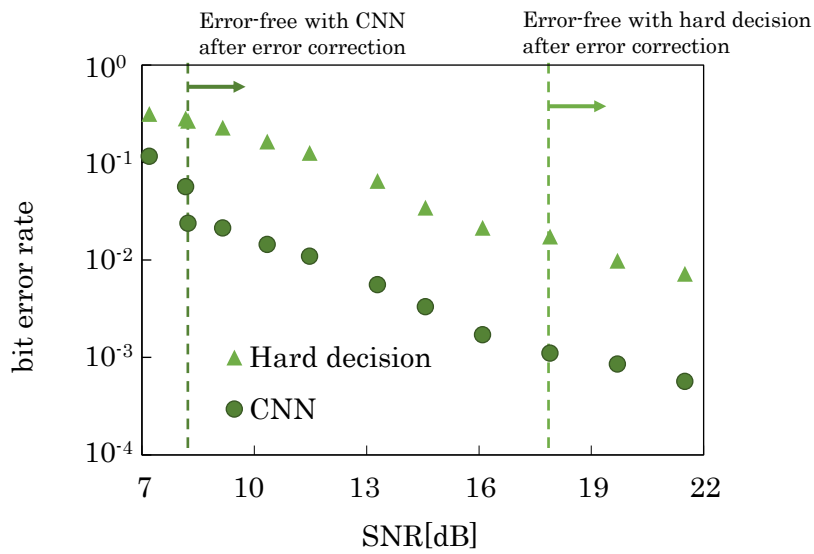


図 5.11 10 : 9 変調符号における CNN 復調結果

い. このことから、周辺ブロック内のシンボルもあわせて学習させることで、符号間干渉の影響に対してよりロバストになったことがわかる。

次に、復調能力について検証した。結果を図 5.11 に示す。ここで SNR は、

$$\text{SNR}[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=0}^{u-1} \sum_{j=0}^{v-1} O_{ij}^2}{\sum_{i=0}^{u-1} \sum_{j=0}^{v-1} |O_{ij} - R_{ij}|^2} \quad (5.13)$$

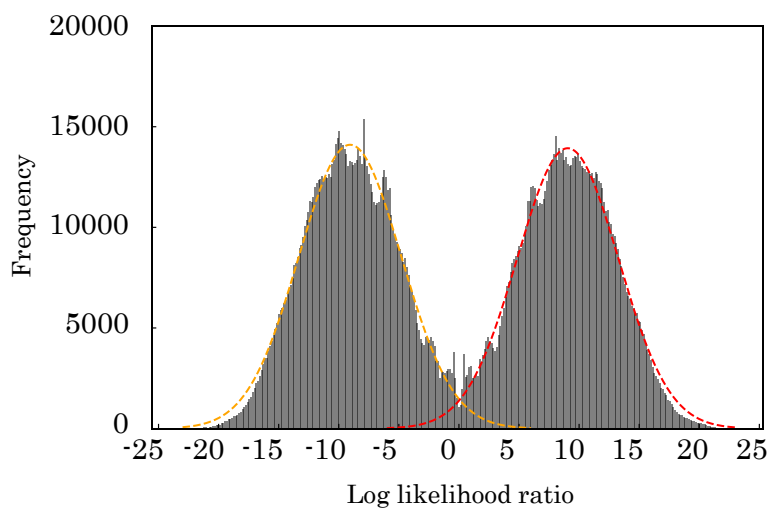
と定義した[15]. ここで $O_{ij}$ および $R_{ij}$ はそれぞれ記録前と再生後のシンボルの輝度値であり,  $u$ および $v$ はページデータの幅および高さ方向のシンボル数である. 図 5.10 の結果に示すとおり, SNR が低い (8.1 dB 未満) 領域では CNN 復調を用いてもビット誤り率は高く, 硬判定による復調と比べても改善量は小さい. これは, 記録された信号が完全にノイズに埋もれてしまっており, 教師あり学習で復調手順を上手く学習できなかったことを表している. SNR が高くなるにつれて, CNN は高精度にデータセットの特徴を抽出できるようになり, 復調精度が向上する. CNN 復調後のビット誤り率は, 硬判定を用いた場合と比較して約 1/10 に低減できた. ブロックあたりの復調速度について評価した結果, ビットレートは 106 kbps となった. 2K サイズの SLM を光学系に用いた 4 章の例では, ページデータ中のシンボル数は  $1,740 \times 1,044$  であった. これをブロックごとに並列に CNN で復調した場合, ページデータあたりの復調速度は 21.5 Gbps となり, 光学系の読み出し速度 (2 章の例では 1.0 Gbps) に対して復調が十分に高速であることが確認できた.

### 5.5.2 対数尤度比分布

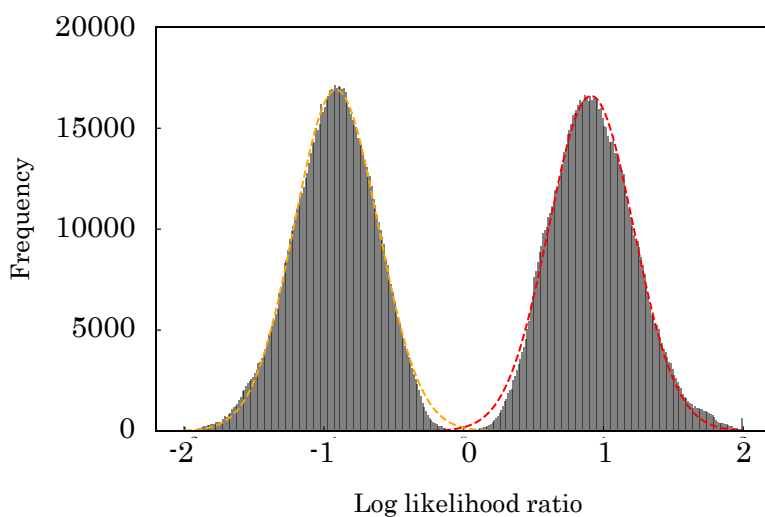
算出される対数尤度比の分布について, 従来手法と提案手法で比較した. 比較例を図 5.12 に示す. 分布が重なり合う領域は, ビット誤りが生じることを示している. AWGN チャネルの場合, 理想的な対数尤度比分布は図 5.3 のような 2 つのガウス関数からなる. オレンジと赤の波線は, それぞれの条件付確率密度分布について最小二乗法を用いてガウス関数にフィッティングしたカーブである. 従来手法のように, 再生ページデータの画素値から対数尤度比を算出した場合には多数のスパイクがあり, ばらつきも大きい. この原因として, さまざまな光学ノイズの影響があげられる. 対照的に, CNN から出力された確率分布を用いた場合には, ガウスノイズ以外のノイズ成分の影響が取り除かれてことで滑らかな分布形状が得られており, CNN 出力の確率分布を活用する提案手法の有効性が実証された.

### 5.5.3 誤り訂正結果

前節で算出した対数尤度比を用いて, 誤り訂正能力を評価した. 従来手法と提案手法について, Sum-Product 法で復号した結果 (実機の再生データとほぼ同品質である, SNR = 13.2 dB のデータセットを用いた例) を図 5.13 に示す. 図 5.13(a)と(b)で復号前の初期



(a)

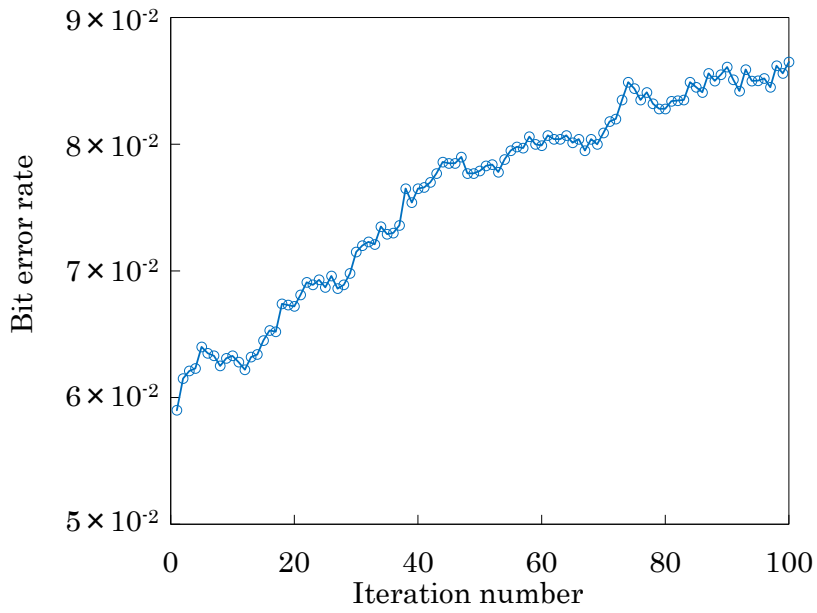


(b)

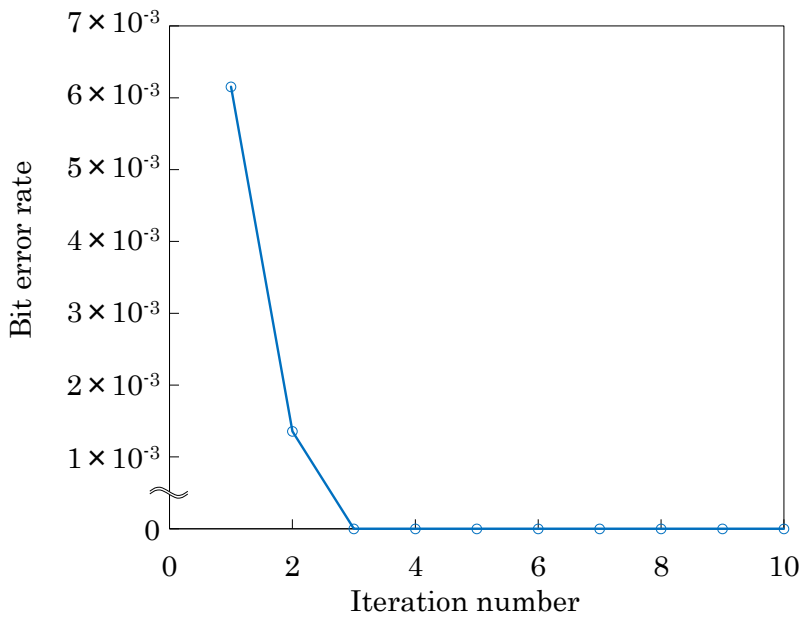
図 5.12 対数尤度比分布の例

(a) 画素値から算出した場合, (b) CNN 復調から得た確率分布を用いた場合

のビット誤り率に差があるが, これは復調手法が異なる (それぞれ硬判定と CNN) ためである. 従来手法で算出した対数尤度比を用いた場合, Sum-Product 法で復号してもビット誤りが訂正されず, 反復計算を進めるにつれてむしろ逆に誤りが増大している. 一方, CNN を用いた提案手法の場合には, わずか 3 回の反復計算ですべてのビット誤りが訂正された. 他のデータセットについても, 再生データの SNR と訂正能力の関係



(a)



(b)

図 5.13 対数尤度比の違いによる復号処理の比較

(a) 再生データの画素値から算出, (b) CNN 復調で得た確率分布から算出

について同様に評価した。なお、反復回数によって訂正可否が異なるが、復号処理がシステム全体のボトルネックとならないよう、最大反復回数は 10 回とした。まず、従来

手法を用いた場合、硬判定復調後のビット誤り率が  $1.8 \times 10^{-2}$  以下となれば完全に誤りを訂正できることを確認した。これを図 5.11 にあてはめると、所要 SNR は 17.9 dB となる。一方、提案手法を用いた場合、CNN 復調後のビット誤り率が  $2.3 \times 10^{-2}$  以下となれば誤りなく復号できた。すなわち、対数尤度比の算出手法を改善したことで、復号前の所要ビット誤り率が 2 倍高くなった。また、同様に図 5.11 より提案手法における所要 SNR は 8.23 dB である。したがって、「硬判定復調+再生データの画素値から算出した対数尤度比による誤り訂正」の従来手法に対して、「CNN 復調+CNN 復調時に得られた確率分布から算出した対数尤度比による誤り訂正」の本提案手法を用いることにより、所要 SNR を 9.67 dB 改善した。

## 5.6. 結言

本章では、振幅 4 値変調符号と、CNN と空間結合 LDPC 符号を組み合わせた復号手法を提案した。

まず、振幅 4 値変調方式として開発した 10 : 9 変調符号の変復調プロセスについて述べた。従来の振幅 2 値変調方式である 5 : 9 変調符号に対してページデータあたりの情報量を 2 倍に増やすことができる。リファレンスシンボルをブロック内に設けることで、復調時に輝度値を正規化でき、ノイズによる輝度変動の影響を受けづらい特徴を持つ。

次に、空間結合 LDPC 符号を用いた誤り訂正について述べた。Sum-Product 法における対数尤度比の算出について、AWGN チャネルを用いて説明した。従来のホログラムメモリーにおける誤り訂正では、記録再生の光学系を AWGN チャネルとして設定していたものの、ガウスノイズだけではなくあらゆるノイズが混入した再生データの画素値から算出した対数尤度比を復号に用いており、訂正能力を十分に活かし切れていなかった。これを改善するため、CNN 復調時に出力されるクラス確率に着目した。ノイズが重畳された再生ページデータを用いた教師あり学習によって、学習可能なノイズの特徴を踏まえた確率分布が復調時に出力される。すなわち、学習不可であるランダムなガウスノイズのみがクラス確率に大きなゆらぎを与えている。そこで、光学系を AWGN チャネルとみなし、対数尤度比の算出に CNN 出力の確率分布を用いれば、強力な誤り訂正ができると考えた。ノイズ条件の異なる複数のデータセットを用意し、復調と誤り訂正能力についてそれぞれ評価した。復調においては、振幅 2 値変調方式と比べて符号間干渉によるエラーが生じやすくなるため、復調対象のブロックだけでなく周辺 1 シンボルも含めて入力するよう、CNN を改良した。復調後のビット誤りは、CNN を用いることで硬判定復調と比べて約 1/10 に低減できた。処理速度についても、光学系の読み出し速度に対して十分高速であることを確認した。復号性能の評価にあたり、まず対数尤度比の分布を比較した。CNN 出力の確率分布を用いることで、ガウス関数に近い形状

の分布となることを確認した。復号能力について評価した結果，CNN 復調と組み合わせた提案手法により，所要 SNR を約 10 dB 低減できることを確認した。以上の結果から，振幅 4 値変調方式を導入し，ページデータあたりの情報量を 2 倍向上させることができた。加えて，所要 SNR を改善したことで，さらなる多値化への展望が開けた。一方で，多くのカメラや SLM が 8 ビット駆動，すなわち 0 から 255 の整数値のみを取り扱う中で，振幅情報のみを取り扱って多値化を進めていくのには限界がある。次章では，振幅だけでなく位相も組み合わせた変調方式を検討し，情報量をさらに増大させることを目指す。

## 参考文献

1. B. M. King, G. W. Burr, and M. A. Neifeld, "Experimental demonstration of gray-scale sparse modulation codes in volume holographic storage," *Appl. Opt.* **42**, 2546-2559 (2003).
2. G. W. Burr, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, and C. M. Jefferson, "Noise reduction of page-oriented data storage by inverse filtering during recording," *Opt. Lett.* **23**, 289-291 (1998).
3. G. W. Burr, G. Barking, H. Coufal, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, and M. A. Neifeld, "Gray-scale data pages for digital holographic data storage," *Opt. Lett.* **23**, 1218-1220 (1998).
4. N. Ishii, Y. Katano, T. Muroi, and N. Kinoshita, "10:9 modulation code for multi-level recording and error correction method using spatially coupled LDPC in HDS," in *International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory*, (2019), 149-150.
5. N. Mark Allen and C. Wu-Chun, "Likelihood-based error correction for holographic storage systems," in *Proc.SPIE*, (1999), 48-53.
6. Y. Nakamura and T. Hoshizawa, "Two high-density recording methods with run-length limited turbo code for holographic data storage system," *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 09SA01-01-09SA01-10 (2016).
7. H. Hayashi and K. Kimura, "Low-Density Parity-Check Coding for Holographic Data Storage," *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 3495-3498 (2005).
8. S. Kudekar, T. J. Richardson, and R. L. Urbanke, "Threshold Saturation via Spatial Coupling: Why Convolutional LDPC Ensembles Perform So Well over the BEC," *IEEE Trans. Inf. Theory* **57**, 803-834 (2011).
9. D. J. Costello, L. Dolecek, T. E. Fuja, J. Kliwer, D. G. M. Mitchell, and R. Smarandache, "Spatially coupled sparse codes on graphs: theory and practice," *IEEE Communications Magazine* **52**, 168-176 (2014).
10. N. Ishii, Y. Katano, T. Muroi, and N. Kinoshita, "Spatially coupled low-density parity-check error correction for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 09NA03-01-09NA03-04 (2017).
11. 和田山正, "低密度パリティ検査符号とその復号法について," *映像情報メディア学会技術報告* **25.81**, 39-46 (2001).
12. 室井哲彦, 石井紀彦, 木下延博, 上條晃司, 菊池宏, "ホログラム記録における LDPC 符号化 5:9 変調方式の復号と HD 映像再生," *映像情報メディア学会技術報告* **36**, 9-12 (2012).
13. A. L. Maas, A. Y. Hannun, and A. Y. Ng, "Rectifier Nonlinearities Improve Neural

Network Acoustic Models,” in *Proceedings of the 30 th International Conference on Machine Learning*, (2013).

14. S. Lawrence, C. L. Giles, A. C. Tsoi, and A. D. Back, “Face recognition: a convolutional neural-network approach,” *IEEE Transactions on Neural Networks* **8**, 98-113 (1997).
15. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing, Third Edition* (Pearson, 2007).



## 第6章 複素振幅 16 値変復調技術

### 6.1. 緒言

5 章では、4 章で提案した CNN 復調技術を活用した復号技術を開発した。ノイズに対してさらにロバストな再生処理系を構築できたことで、さらなる多値化の可能性が開けた。

本章では、ページデータあたりの情報量をさらに増大させることを目的とし、振幅と位相を組み合わせた複素振幅 16 値の変復調手法を提案する。3 次元表示ディスプレイへの応用が期待されるように、光の振幅と位相の双方（複素振幅）を記録できることがホログラムの大きな特徴の一つである。これまでも複素振幅を用いた記録方式の検討がされている[1-3]。しかしながら、いずれの報告でも、複素振幅信号を記録するため、あるいは正確に再生信号を検出するために、SLM の複数画素で 1 シンボルを構成する必要があった。シンボルサイズが大きくなってページデータ内のシンボル数が減少すると、一度の光照射で記録再生できる情報量も少なくなってしまう。同時に、ページデータの空間周波数が低下して記録媒体上のホログラムサイズは小さくなり[4]、記録媒体面上でホログラムの空間的な記録間隔を詰められるため、記録密度の面ではこれは問題とならない。一方で、転送速度の面では、一度に記録再生できる情報量が減るため、多値化したにもかかわらず低下してしまうことになる。そのため、記録密度とデータ転送速度の双方を向上できるよう、1 シンボルを 1 つの SLM 画素で構成できる複素振幅変調符号が必要である。また、コンスタレーションマップ上の信号点の配置や変調テーブルなども考慮された具体的な変調符号はこれまでに報告されていない。複素振幅変調方式を実用化するためには、再生時にビット誤りが生じにくい堅牢な変調符号でなければならない。これらの観点から、まず提案する複素振幅変調符号について、信号点の配置や変調テーブルなどの最適化手法も含めて述べる。次に同符号の復調手法について述べる。復調には、4 章で述べた CNN を用いた手法を提案する。多値化によって復調ビット数が増えることで CNN のネットワークが巨大化してしまうことを考慮し、コンパクトなネットワークを用いた効率的な復調手法を開発する。

### 6.2. 20 : 9 変調符号と変調テーブルの最適化

16 値の複素振幅変調方式として、20 : 9 変調符号を提案する。図 6.1 は、記録対象のビット列を 20 : 9 変調符号で変調してページデータを生成する手順を示す。同符号は、20 ビットのデータを 9 (3 × 3) 個のシンボルで構成されるブロックに変調する。したがって、ページデータ容量は 5 章で用いた 10 : 9 変調符号の 2 倍となる。20 ビットのう

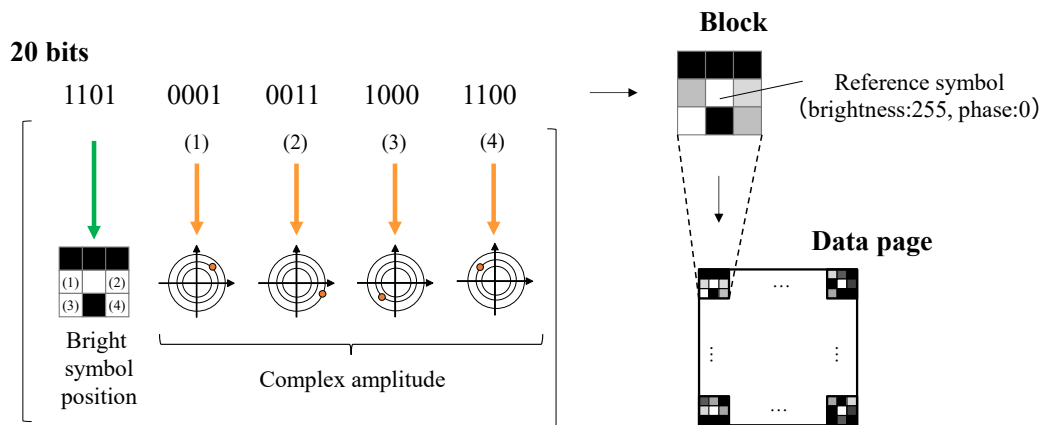


図 6.1 20 : 9 変調符号におけるページデータ生成手順

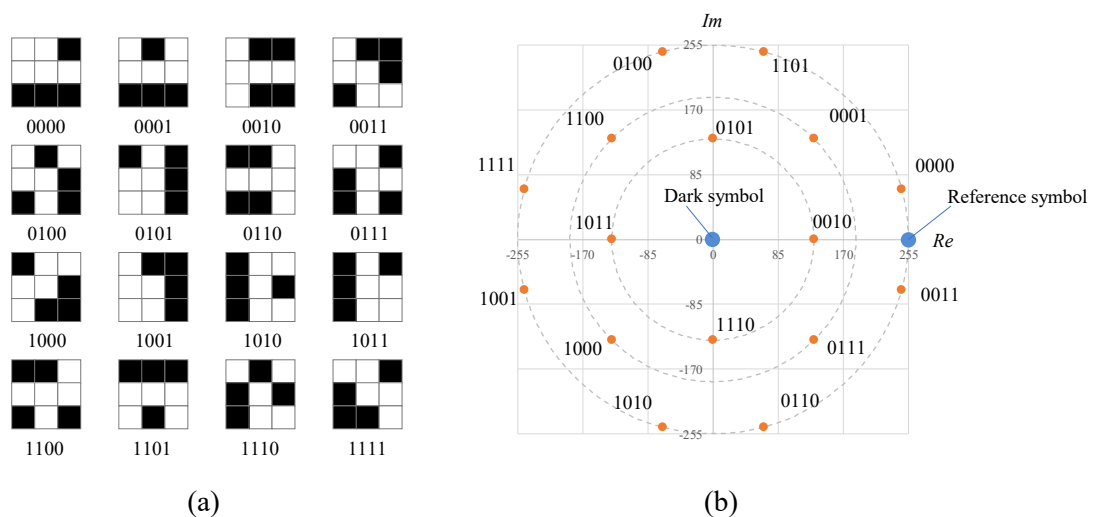


図 6.2 変調テーブル

(a) シンボル位置信号, (b) 複素振幅信号

ち最初の 4 ビットは、ブロック内のシンボルの位置を表す。残りの 16 ビットは、明シンボルに重畳されたそれぞれの複素振幅信号をラスタースキャン順に並べたものである。

各信号の変調テーブルを図 6.2 に示す。図 6.2(a)に示すように、20 : 9 変調符号のブロックは、4 つの明シンボル、4 つの暗シンボル、1 つのリファレンスシンボルで構成す

る。ブロックの中央のシンボルはリファレンスシンボルで、輝度は 255 (8 ビット)、位相は 0 とする。復調時、明暗シンボルの輝度値や位相値を補正するために、リファレンスシンボルの値を基準値として正規化する。図 6.2(b)は、複素振幅信号の変調テーブルである。4 ビットを表す複素振幅値は、コンスタレーションマップ上の信号点として表すことができる。ブロック内の明シンボルはそれぞれ 4 ビットの情報を持つため、 $16 (= 2^4)$  種類の複素振幅値がコンスタレーションマップ上に存在する。再生時のエラーが少なくなるよう、この信号点の配置を最適化した。まず輝度レベルについては、5 章で得た知見をベースとするため、暗シンボルも含めて 4 レベルになるよう固定した。また、輝度レベルを等間隔の階調にして記録 ( $L_0 = 0, L_1 = 85, L_2 = 170, L_3 = 255$ ) すると、ノイズの影響で最も輝度レベルの低い明シンボル ( $L_1$ ) が暗シンボルと混同して復調され、エラーが発生しやすいことがわかっている[5]。勿論、コンスタレーションマップ上の各信号点が互いに近接していると、ノイズの影響を受けやすくなるため、可能な限り信号点同士が遠く配置されることが望ましい。以上の条件をもとに、最適化問題を設定した。最適化問題の解法には Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) 法[6]を用いた。その結果、図 6.2(b)に示す信号点配置が得られた。3 つの輝度レベル  $L_1, L_2, L_3$  はそれぞれ 132, 187, 255 となった。

次に図 6.2(a)に示したシンボル位置と 4 ビット、図 6.2(b)に示したコンスタレーションマップ上の信号点と 4 ビットのそれぞれにおけるビットの割り当て手法について述べる。4.2 節で述べたようなノイズ (固定パターン、ランダム)、符号間干渉 (収差やスペイシャルフィルタによる高周波成分の欠落)、SLM とカメラの画素の不一致 (リサンプリングノイズ) などによって再生時にビット誤りが発生しても、変調テーブルが最

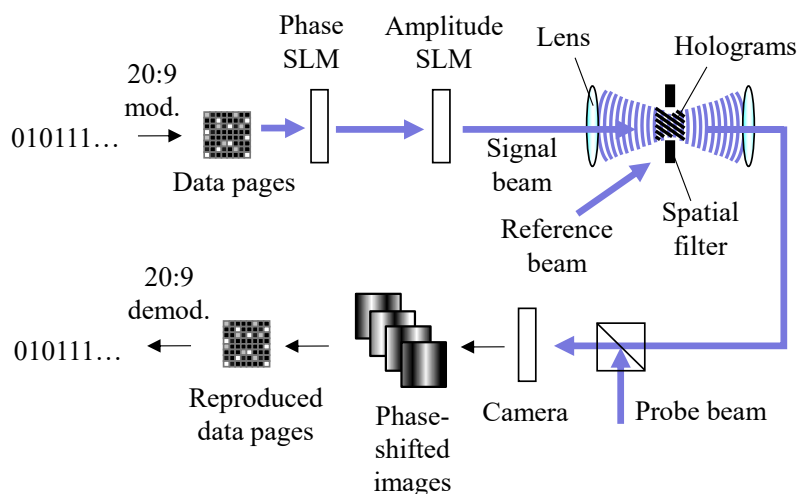


図 6.3 光学シミュレーター

適化されていればビット誤り数を最小限に抑制できる。ノイズの影響を考慮し、最適化には図 6.3 に示す構成の光学シミュレーターを用いた。まず、ビット列を 20 : 9 変調符号によってページデータに変換する。位相と振幅をそれぞれ変調する 2 枚の SLM でページデータの情報が重畳された信号光を生成する。この信号光と参照光の同時照射により、ホログラムを形成する。ホログラムに参照光を照射すると再生光が得られるが、このビームをカメラで撮影しても光の位相情報は直接取得できない。位相情報の検出には、フーリエ縞解析[7]、TIE (Transport of Intensity Equation) [8]、位相シフト法[9]など、さまざまなアルゴリズムが用いられる。位相シフト法では、複数の位相シフトした画像が必要だが、ハイフレームレートのカメラは勿論、ピエゾアクチュエーターなどの位相シフトに必要なデバイスも数百 Hz を超える速度で高速に動作する。また、位相シフト法は、フーリエ変換の計算が必要な他の 2 つの方法と比べると、計算コストが低いというメリットもある。これらの点から、本章では 4 ステップ位相シフト法をベースにシミュレーションした。位相シフト法では、再生光 $O_r$ に対して位相の異なる 4 種類のプローブ光 $O_{p_n}$  ( $n = 0, 1, 2, 3$ ) を順次合波し、4 枚の位相シフトした干渉縞画像 $I_n$ 、すなわち

$$I_n = |O_r + O_{p_n}|^2 = |A_0 \exp(i\phi_0) + A_p \exp\{i(\phi_p + \Delta\phi_{p_n})\}|^2 \quad (6.1)$$

を得る。なお、 $A_0$ および $A_p$ は再生光とプローブ光の振幅、 $\phi_0$ および $\phi_p$ は再生光とプローブ光の初期位相、 $\Delta\phi_{p_n}$ は位相シフト量 ( $\Delta\phi_{p_0} = 0, \Delta\phi_{p_1} = \pi/2, \Delta\phi_{p_2} = \pi, \Delta\phi_{p_3} = 3\pi/2$ ) を表す。複素振幅値は下記のように求められる。

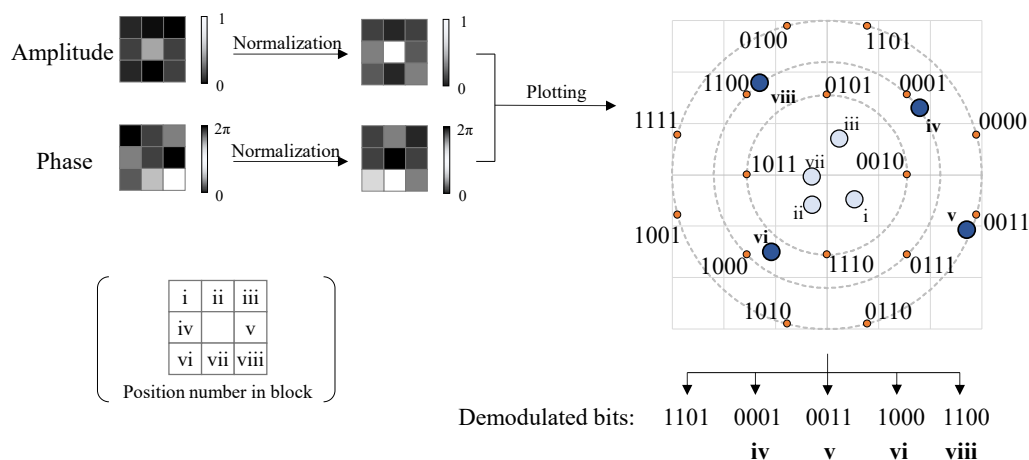


図 6.4 20 : 9 変調符号の硬判定復調手順

$$\text{Re}[O_r] = \frac{I_0 - I_2}{4A_p} \quad (6.2)$$

$$\text{Im}[O_r] = \frac{I_1 - I_3}{4A_p} \quad (6.3)$$

得られた各シンボルの複素振幅値から 20 ビットのデータを復調する．硬判定による復調手順を図 6.4 に示す．まず，リファレンスシンボルを除いた 8 つのシンボルの振幅と位相の値を，基準シンボルを用いて正規化する．得られた 8 つのシンボルの複素振幅値をコンスタレーションマップ上にプロットする．4 つの明シンボルと 4 つの暗シンボルが存在するため，外周部に位置する 4 点は明シンボル，中央付近の 4 点は暗シンボルと判断でき，シンボル位置が特定できたことから変調テーブルをもとに最初の 4 ビットを復調する．最後に，各明シンボルにおいて，それぞれのプロットから最も近い信号点を選択することで残りの 16 ビットを復調できる．

復調されたビットと記録時のビットを比較してビット誤り率を求め，ビット誤り率を損失関数として各変調テーブルを最適化する．2 つの変調テーブルの組み合わせ最適化には，遺伝的アルゴリズム[10]を用いた．遺伝的アルゴリズムでは，選択，交叉，突然変異をループしながら最適解を探索する．世代あたりの個体数は 10 個体とし，選択には適応度の高い個体を選択するエリート戦略を取り入れ，交叉方法としては重複を排除するため部分一致交叉法[10]を採用した．光学シミュレーターの条件を表 6.1 に示す．シミュレーションで得られる再生ページデータに重畳されているノイズ量は，カメラや SLM の仕様によって大きく左右される．より正確なシミュレーションをするために，表 6.1 と同条件のデバイスを用いて振幅 4 値変調方式による記録再生実験をし，シミュレーター中のノイズ量を調整した．図 6.5 に再生データのヒストグラムを比較した結果を示す．ノイズ量の調整により，光学シミュレーターから出力された再生データの品質

表 6.1 光学シミュレーターの仕様

Wavelength [nm]	405
Data page size	192 × 192
SLM pixel pitch [μm]	13.6
Camera pixel pitch [μm]	3.8
Nyquist aperture diameter [mm]	1.16

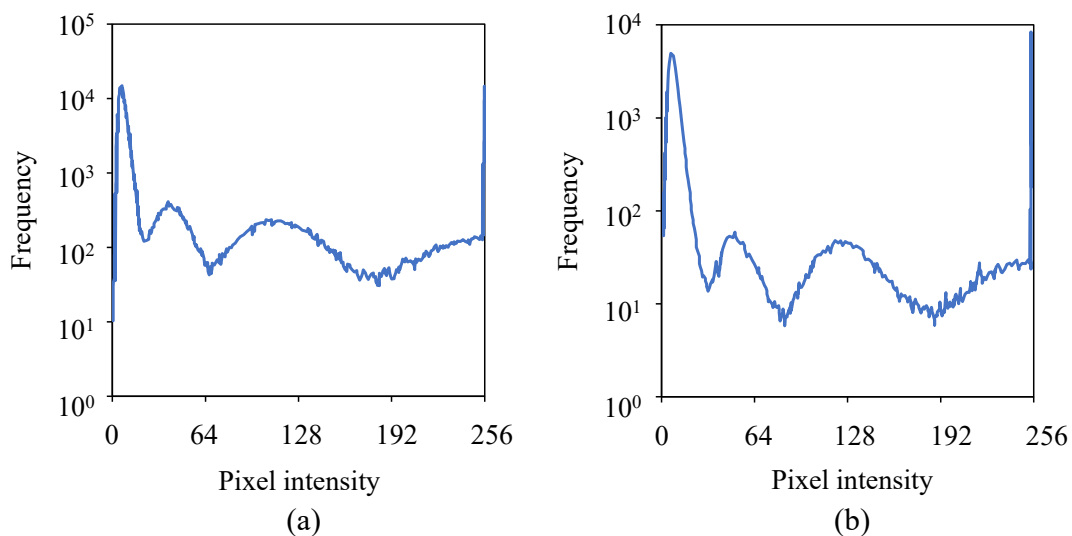


図 6.5 再生ページデータのヒストグラム比較  
(a) 実験, (b) 光学シミュレーション

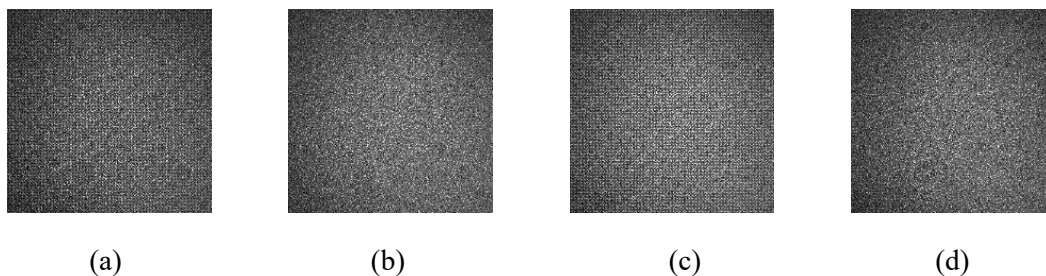


図 6.6 光学シミュレーターで位相シフトにより得られたページデータ  
位相シフト量は (a) 0, (b)  $\pi/2$ , (c)  $\pi$ , (d)  $3\pi/2$

は、実験で得られたものとほぼ同等となった。なお、シミュレーションの計算コストを考慮し、光学シミュレーターで用いたページデータサイズを実験で用いたものよりも小さくしたため、図 6.5 中の 2 つのグラフでは縦軸が異なっている。図 6.6 は、光学シミュレーターで出力された 4 枚の位相シフトした再生ページデータである。これらを用いて 4 ステップ位相シフト法により得られた複素振幅値をプロットすると、図 6.7 のようになる。さまざまなノイズが重畳しており、理想的な信号点に対して離散的に分布している。なお、先頭 4 ビットに対応するシンボル位置信号にエラーが生じると、誤ったシ

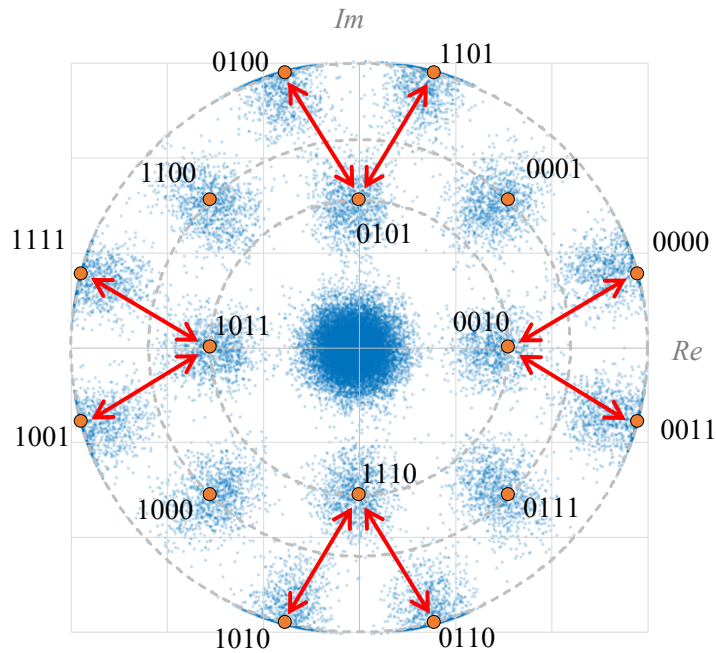


図 6.7 光学シミュレーターで出力された再生ページデータの複素振幅分布

ンボルに重畳された複素振幅信号を復調することになるため、後半の 16 ビットで多くのビット誤りが発生してしまう懸念がある。このことから、シンボル位置信号はノイズ耐性の高い信号とした。シンボルの明暗のみを判定すればよいことに加えて、 $70 (= {}_8C_4)$  とおりのシンボル位置の組み合わせがあるにもかかわらず、 $16 (= 2^4)$  パターンしか使用しない変調テーブルとなっている。つまり、使用されていない 54 パターンのいずれかに硬判定で復調された場合でも、尤もらしい 16 パターンのいずれかに振り分けられるため、復調エラーを減らすことができる。なお、ビット割り当てまで考慮すると、シンボル位置の変調テーブルには  ${}_{70}P_{16} \approx 5.2 \times 10^{28}$  とおりの組み合わせが存在する。遺伝的アルゴリズムによる最適化を行った結果、シンボル位置信号の変調テーブルにおいては、最適化後のテーブルとランダムに初期化したものとのビット誤り率は変化せず、 $2.75 \times 10^{-4}$  であった。一方、 ${}_{16}P_{16} \approx 2.1 \times 10^{13}$  の組み合わせを持つ複素振幅信号の変調テーブルにおいては、初期にランダムに決定したときのビット誤り率が  $1.01 \times 10^{-2}$  であったのに対し、50 世代まで繰り返したところビット誤り率は  $5.06 \times 10^{-3}$  に改善された。図 6.7 に示すように、最適化後の各信号点へのビット割り当てを見ると、最も近い 2 つの信号点間のハミング距離は多くが 1 となっている。そのため、ノイズによって複素振幅信号の復調にエラーが生じて、ビット誤りを低減できる。特に、位相ノイズよりも支配的

な振幅ノイズによって再生信号が半径方向により強く分散するため、半径方向に隣接する信号点間（図 6.7 中の矢印線間）では、ハミング距離は全て 1 となっている。

### 6.3. シンボル位置信号と複素振幅信号を独立に復調する CNN 復調

4 章や 5 章で提案した CNN 復調手法は、ノイズが重畳された再生データから正確に記録された信号を復調できる。振幅変調方式で有望性を確認した同手法を、本章では複素振幅変調方式に応用する。そのためには、ネットワークにおける位相情報の取り扱いに加えて、復調するビット情報が増えることから、ネットワークの巨大化が大きな課題となる。CNN は、これまでに述べたとおり、入力データの特徴マップを取得する畳み込み層、隣接する層間のノードを接続する全結合層、全結合層の一種で、各クラスの確率分布を出力する出力層で構成される。図 6.8 に示すように、出力層のノード数は復調ビットのクラス数と等しく、記録するビット列の数を  $n$  とすると  $2^n$  になる。例えば、5 章で用いた 10:9 変調符号のデータでは、1,024 ( $=2^{10}$ ) クラスの確率分布が出力されていた。出力層での演算は、シンプルな行列積である。出力層への入力を  $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{1 \times m}$  とすると、出力層のパラメーター（重み）  $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{m \times 2^n}$  との行列積  $\mathbf{I} \cdot \mathbf{W}$  が確率分布  $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{1 \times 2^n}$  を与

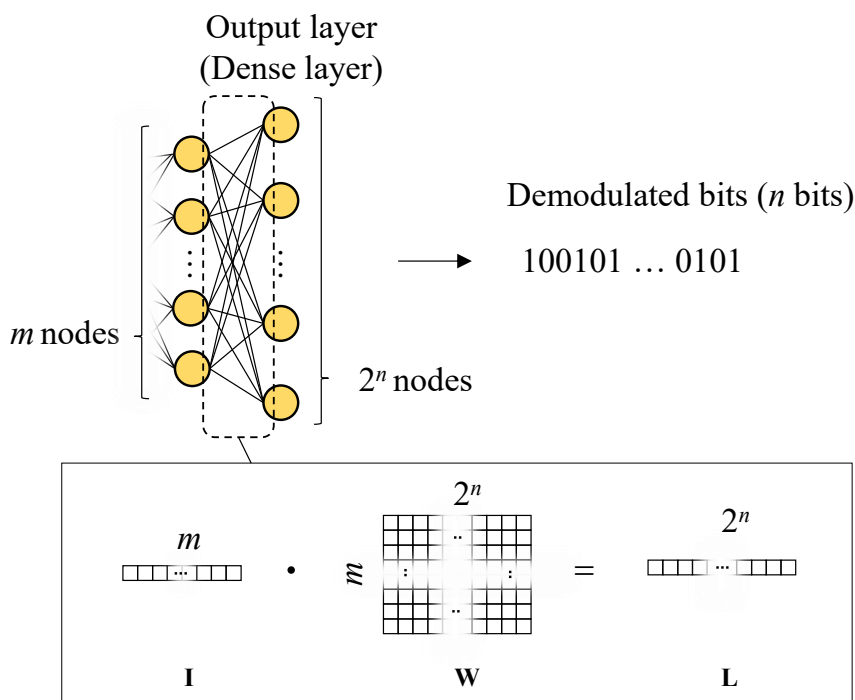


図 6.8 CNN の出力層



える。ここで、 $m$  は出力層の 1 層前に結合された層のノード数である。したがって、20 : 9 変調符号で記録されたデータに単純に適用した場合、CNN は膨大な数 ( $2^{20} = 1,048,576$ ) のクラス確率を出力することとなり、重みも大規模な行列となる ( $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{m \times 2^{20}}$ )。行列が巨大になると演算に時間がかかるため、復調速度の低下や、学習の長時間化が問題となる。最悪の場合には、メモリー空間を確保できず、学習や復調の演算そのものが不可となる。加えて、学習によって調整された重み等のパラメーターを保存しておくために、膨大な記録領域が必要となってしまう。

これらの問題を解決するため、20:9 変調符号が 2 つの変調テーブルからなるように、復調についても 2 つの CNN で独立に実行する手法を提案する。図 6.9 に復調の全体的な系統図を示す。シンボル位置信号用の CNN1 と複素振幅信号用の CNN2 で、それぞれ 4 ビットと 16 ビットのデータを復調する。先頭の 4 ビットを復調する CNN1 には、位相シフトした 4 枚の再生ブロックを 4 チャンネルの情報として直接入力する。すなわ

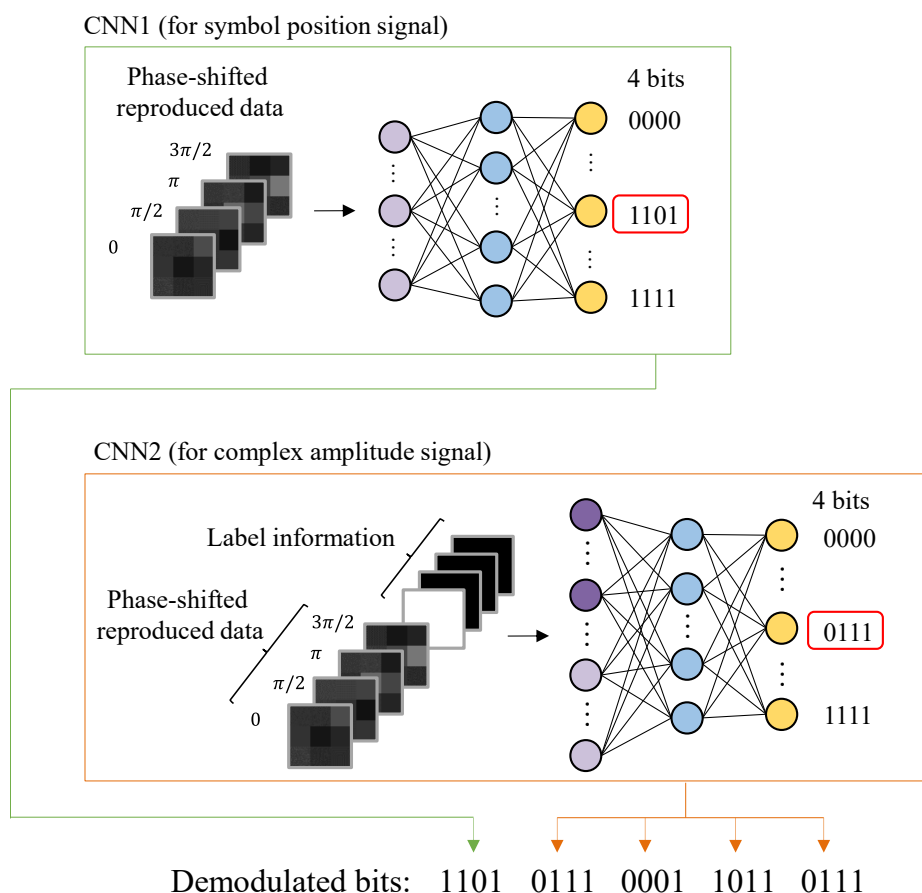


図 6.9 提案する 20 : 9 変調符号用復調 CNN の構成

ち、硬判定で用いる 4 ステップ位相シフト計算はせず、複素振幅値も使用しない。一方で、CNN2 も同様の構成とした場合、4 枚の位相シフト画像を入力して 16 ビットのデータを出力するネットワークになる。しかしながら、この構成では  $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{m \times 2^{16}}$  の巨大な重みを用いた行列演算が出力層で必要となってしまう。そこで、さらに効率的な復調手法を検討する。複素振幅信号の 16 ビットは 4 つの明シンボルに重畳された 4 ビットの情報の集まりであるから、CNN2 では 16 ビットのデータを一度に出力する必要はなく、むしろ明シンボルごとに 4 ビットを出力すればよい。明シンボルごとに 4 つの独立な CNN を設ける手法も考えられるが、どの CNN についても求められる能力は複素振幅信号の復調であり、対象シンボルが異なるだけである。同一性能の CNN を複数設けることは冗長であり、また、学習後に保存の必要なパラメータ数も著しく増えてしまう。

これらの観点から、複数のシンボルに重畳された複素振幅信号を単一のネットワークで復調する手法を新たに提案する。図 6.9 に示すように、4 つの再生ブロックに加えて、復調対象のシンボルを示す情報として、ラベル情報をあわせて CNN2 に入力する。ラベル情報を生成する手順の一例を図 6.10 に示す。ラベル情報は One-Hot 形式となっており、CNN への入力チャンネル数はブロック中の明シンボルの数と等しい。したがって、20 : 9 変調符号の場合、CNN2 への入力は、4 枚の位相シフトした再生ブロックと合わせて 8 チャンネルとなる。ラベル情報のサイズは、再生ブロックとともに CNN2 に入力するため、ブロックと同サイズになる。復調対象となる明シンボルの位置番号は、ブロック内でラスタースキャン順にカウントする。例えば、図 6.10 中の点線で囲まれた明シンボルの場合には、3 番目となる。したがって、このシンボルの複素振幅信号を復調するために入力されるラベル情報は、(暗, 暗, 明, 暗) となる。同じ再生ブロックを CNN2 に入力しても、ラベル情報に応じて異なる明シンボルに重畳された複素振幅信号が復調される。これにより CNN2 の出力は 4 ビットとなり、出力層で用いられる行列は

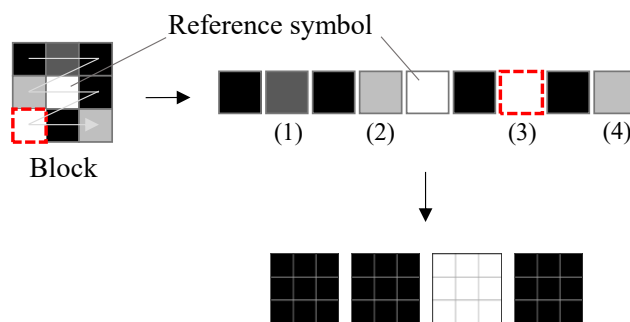


図 6.10 ラベル情報の生成例

$\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{m \times 2^4}$  となる。加えて、学習済みのパラメーターをセットした CNN2 をコピーして 4 つ用意すれば、各シンボルの複素振幅信号を並行して処理でき、復調を高速化することも可能となる。

ネットワーク中のパラメーター数について具体的に比較する。20 ビットを直接復調する構成を CNN-A とする。また、4 ビットのシンボル位置信号と 16 ビットの複素振幅信号を独立に復調する構成を CNN-B とする。最後に、本章で提案する、4 ビットのシンボル位置信号を復調する CNN1 と、ラベル情報を用いて 4 ビットごとに複素振幅信号を復調する CNN2 からなるネットワークを CNN-C とする。一例として全てのネットワークにおいて畳み込み層と全結合層の数をそれぞれ 1 と 2 に設定し、出力層を除く全ての層でノード数を固定してパラメーター数を比較した。表 6.2 から 6.4 に CNN の詳細な構成とパラメーター数を示す。表 6.2 および 6.3 に示すとおり、クラス数が多い場合には、合計パラメーター数において出力層のノード数が支配的な要素となる。このため、ネットワークを 2 つに分けた CNN-B では、CNN-A と比べてパラメーター総数を大

表 6.2 CNN-A のネットワーク構成およびパラメーター数

Layer	Configuration		Trainable parameters
Convolutional	size	$2 \times 2$	1,088
	channel	64	
Dense	node	1,024	1,639,424
Output	node	1,048,576 ( $2^{20}$ )	1,074,790,400
Total	-		1,076,430,912

表 6.3 CNN-B のネットワーク構成およびパラメーター数

Layer	Symbol position			Complex amplitude		
	Configuration		Trainable parameters	Configuration		Trainable parameters
Convolutional	size	$2 \times 2$	1,088	size	$2 \times 2$	1,088
	channel	64		channel	64	
Dense	node	1,024	1,639,424	node	1,024	1,639,424
Output	node	$16 (2^4)$	16,400	node	$65,536 (2^{16})$	67,174,400
Total	-		1,656,912	-		68,814,912

表 6.4 提案する CNN-C のネットワーク構成およびパラメーター数

Layer	Symbol position (CNN1)			Complex amplitude (CNN2)		
	Configuration		Trainable parameters	Configuration		Trainable parameters
Convolutional	size	$2 \times 2$	1,088	size	$2 \times 2$	2,112
	channel	64		channel	64	
Dense	node	1,024	1,639,424	node	1,024	1,639,424
Output	node	$16 (2^4)$	16,400	node	$16 (2^4)$	16,400
Total	-	-	1,656,912	-	-	1,657,936

大きく低減できる。CNN-B と CNN-C を比較すると、ラベル情報の入力追加が必要となるため、CNN-C 中の CNN2 では畳み込み層中のパラメーター数がわずかに増加するものの、CNN2 の出力層のパラメーター数が大幅に減少し、ネットワーク構成を非常にコンパクトにできる。同構成で実際に学習および復調を試みたが、パラメーターの数が多い CNN-A と CNN-B の場合、VRAM (Video Random Access Memory) サイズが 32 GB の GPU ではメモリ不足となり実行できなかった。

#### 6.4. 復調特性評価

提案する CNN-C 構成のネットワークで復調特性を評価した。まず、CNN1 と CNN2 のそれぞれのネットワークの構造について述べる。図 6.11 に CNN1 のアーキテクチャ

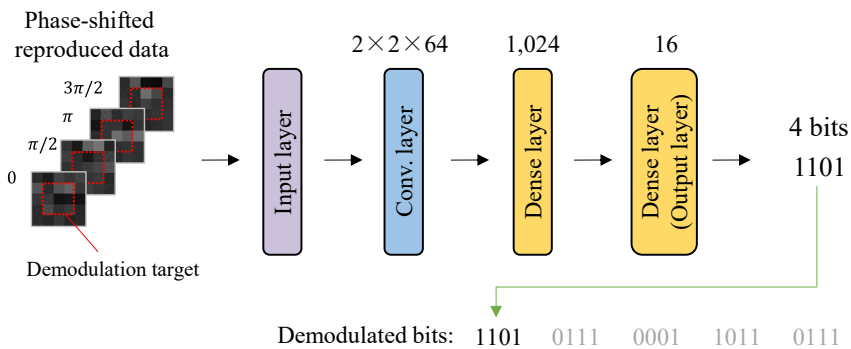


図 6.11 シンボル位置信号を復調する CNN1 のアーキテクチャー

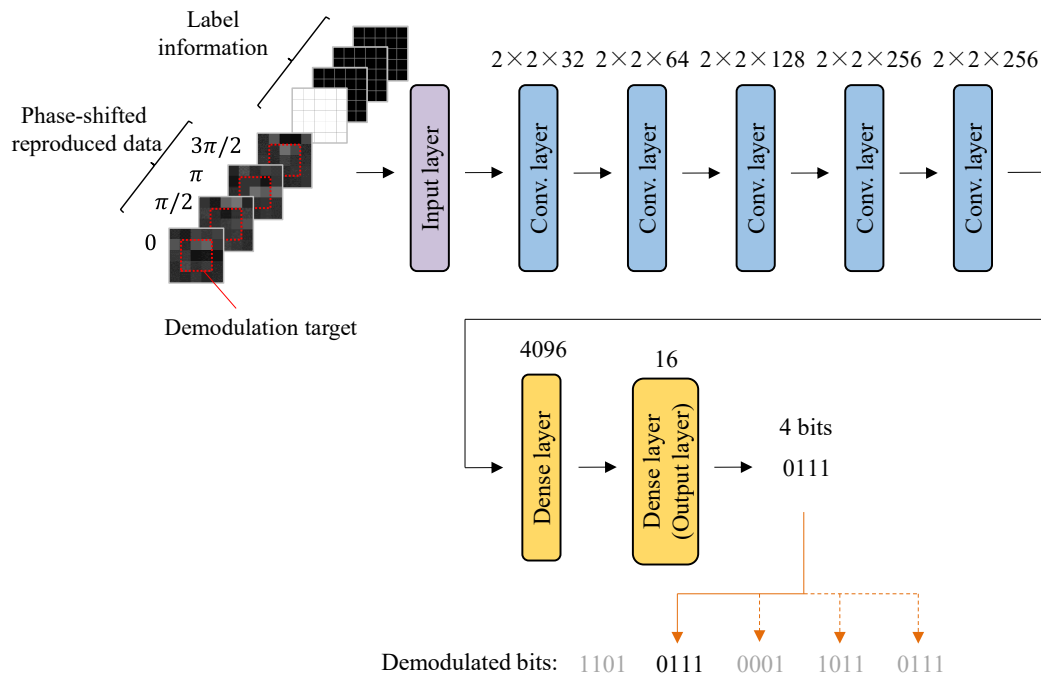


図 6.12 複素振幅信号を復調する CNN2 のアーキテクチャー

一を示す。学習と復調の精度を高めるため、5章と同様に復調対象のブロックに加えて周辺 1 シンボルを含めた  $5 \times 5$  サイズのシンボルを CNN に入力する。6.2 節で述べたとおり、シンボル位置信号はノイズに対してよりロバストである。したがって、CNN1 は層数が少なくても十分な復調精度が得られる。CNN2 のアーキテクチャーを図 6.12 に示す。CNN2 においてもネットワークへの入力サイズは  $5 \times 5$  としたため、ラベル情報のサイズは  $5 \times 5 \times 4$  となる。変調テーブルの最適化で示したとおり、複素振幅信号の方がビット誤りは生じやすく、シンボル位置信号よりも複雑な信号となっている。したが

表 6.5 CNN の学習および復調条件

Batch size	1,024
Activation function	Leaky ReLU (convolutional and dense layer) Softmax (output layer)
Optimizer	Adam

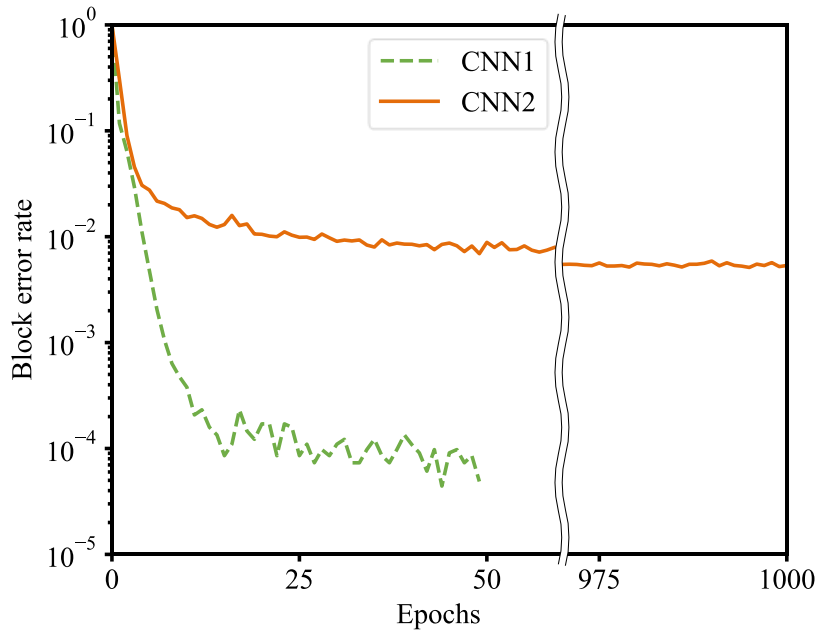


図 6.13 学習特性の比較

表 6.6 復調後のビット誤り率の比較

	Symbol position signal	Complex amplitude signal	Total
Hard decision	$2.75 \times 10^{-4}$	$5.06 \times 10^{-3}$	$4.10 \times 10^{-3}$
CNN	$5.49 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$

って、CNN2 では、入力データの特徴抽出のため、CNN1 よりも多くの畳み込み層とノードが必要となる。その他のネットワーク条件を表 6.5 に示す。

光シミュレーターでノイズが重畳された再生データを生成し、復調性能を評価した。教師データとして 819,200 個、テストデータとして 204,800 個の再生ブロックを用意した。図 6.13 に学習特性を示す。CNN1 では約 50 エポックで学習が収束したが、CNN2 では収束までに 1,000 エポックを要した。ネットワークを 2 つに分離したことで、ノイズ耐性の異なる信号特性に応じて、このように各 CNN に対して独立にハイパーパラメーターを設定可能であり、過学習を避けられる。表 6.6 に復調結果を示す。いずれの信号においても、CNN を用いることでビット誤り率を低減できることを確認した。硬判定と比較して、トータルで約 60% 抑制した。また、復調処理時間を計測した結果、1 ブロックあたり 0.04 ミリ秒となった。4 章とは異なる GPU を用いており単純比較はでき

ないが（本章では Nvidia Quadro GP100 を使用）、5 : 9 変調符号のデータ復調よりも復調処理時間が短く、実用面でも問題がないことを確認した。

## 6.5. 結言

本章では、複素振幅 16 値変調方式の変復調手法として、20 : 9 変調符号と、同符号を復調する効率的な CNN を提案した。20 : 9 変調符号は、4 ビットのシンボル位置信号と 16 ビットの複素振幅信号を有する 9 シンボルで構成する。コンスタレーションマップ上での信号点配置は、BFGS 法によって最適化した。各信号の変調テーブルにおけるビットの割り当ては、光シミュレーターと遺伝的アルゴリズムで最適化した。特に、複素振幅信号については、ランダムに生成された変調テーブルを用いた場合と比較して、最適化によりビット誤り数を約半分に抑制できることを確認した。20 : 9 変調符号が 2 つの信号で構成されることにあわせて、復調においても 2 つの CNN で独立に処理する構成とした。カメラでは直接位相情報を検出できないため、位相シフトした複数枚の再生ブロックが必要であるが、硬判定方式とは異なり、4 ステップ位相シフト法によって複素振幅値を計算する必要はなく、再生ブロックを直接 CNN へ入力する。複素振幅信号を復調する CNN においては、復調対象のシンボル位置を表すラベル情報を再生ブロックとあわせて入力するネットワークを設計した。これにより、コンパクトなネットワークによる 20 ビットの復調を実現した。それぞれを独立な CNN としたため、層数、ノード数、エポック数などのハイパーパラメーターを個別に設定できる。これにより、復調対象の信号の性質が異なっても正確な復調ができ、過学習を避けられる。加えて、同時に並行して復調できるため、処理速度の面でも有利となる。提案手法で得られた復調精度を硬判定と比較した結果、シンボル位置信号と複素振幅信号のどちらにおいてもビット誤り率を 50%以上低減できた。これにより、複素振幅変調方式の導入に目処が立ち、ページデータあたりの情報量を、4 章で用いた 5 : 9 変調符号に対しては 4 倍、5 章で用いた 10 : 9 変調符号に対しては 2 倍増加させることができた。

## 参考文献

1. T. Nobukawa and T. Nomura, "Multilevel recording of complex amplitude data pages in a holographic data storage system using digital holography," *Opt. Express* **24**, 21001-21011 (2016).
2. M. Bunsen and S. Tateyama, "Detection method for the complex amplitude of a signal beam with intensity and phase modulation using the transport of intensity equation for holographic data storage," *Opt. Express* **27**, 24029-24042 (2019).
3. S. Honma and H. Funakoshi, "A two-step exposure method with interleaved phase pages for recording of SQAM signal in holographic memory," *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, SKKD05-01-SKKD05-11 (2019).
4. Y. Nakamura and T. Hoshizawa, "Two high-density recording methods with run-length limited turbo code for holographic data storage system," *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 09SA01-01-09SA01-10 (2016).
5. N. Kinoshita, Y. Katano, T. Nobukawa, T. Muroi, and N. Ishii, "Improvement of Signal Quality for Multi-Level Amplitude Modulation in Holographic Data Storage," in *International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory*, (2019), 67-68.
6. R. Fletcher, *Practical methods of optimization*, 2nd ed., (Wiley, 2000).
7. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 156-160 (1982).
8. M. R. Teague, "Deterministic phase retrieval: a Green's function solution," *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 1434-1441 (1983).
9. I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* **22**, 1268-1270 (1997).
10. D. E. Goldberg and R. Lingle, "Alleles, loci, and the traveling salesman problem," in *Proceedings of an international conference on genetic algorithms and their applications*, (1985), 154-159.



## 第7章 総論

大容量のデータを低コストで長期保管できる光メモリーとして、ホログラムメモリーに大きな期待が寄せられている。近年では 4K/8K などの超高精細映像をはじめとして高ビットレートのデータが膨大に増えており、ストレージにおいては単に記録容量だけではなくデータ転送速度の向上が強く求められている。本論文では、光学的なアプローチと信号処理のアプローチで、ホログラムメモリーのデータ転送速度を飛躍的に向上させるためのさまざまな技術を提案した。ホログラムメモリーにおいて、データ転送速度は「単位時間あたりの再生ページデータ数」と「ページデータあたりの情報量」の積と定義できる。本研究ではその双方を高めると同時に、高ビットレートの映像を安定再生する技術を提案し、実用面でも有望性を高めた。以下に各章で得られた成果を示す。

第2章では、高ビットレートの映像を安定的にデータ再生することを目的とし、波面補償技術を用いた 8K 映像データのリアルタイム再生実験をした。温度変化などが原因となって記録されたホログラムに歪みが生じたり、読み出しに用いる参照光の波長が最適な波長からずれていたりしても、参照光の波面を変化させることで正確にデータ再生できることを確認した。加えて、実用放送と同ビットレートである 85 Mbps の 8K 映像データを用いて、30 秒の映像を安定的に繰り返し再生できることを確認した。

第3章では、単位時間あたりの再生ページデータ数を増やすことを目的とし、光の利用効率を高めて再生ページデータ数を2倍にする高速化手法として、透過参照光を用いたデュアルページ再生技術を提案した。読み出しに用いる参照光の大半は記録媒体を透過するため、偏光状態と記録媒体への入射角を変えて再照射することで、角度多重記録されたホログラムから異なる2つのページデータを同時に読み出す。p 偏光および s 偏光の参照光で読み出されたページデータが、いずれも誤り訂正によって完全に訂正可能なレベル以下のビット誤り率であることを確認した。データ転送速度は 1 Gbps を達成した。

以降では、ページデータあたりの情報量を増やすことを目指した。第4章では、ノイズの重畳された再生データから正確に記録された信号を復調することを目的とし、画像認識に優れる CNN を用いた復調手法を提案した。ノイズの混入した再生ページデータとそれに対応するビット列をペアとしたデータセットを用いた教師あり学習により、ノイズ特性を踏まえた高精度な復調を実現した。振幅2値変調方式である 5:9 変調符号で記録再生したデータを用いて従来手法と復調精度を比較した結果、ビット誤りを約 1/4 に低減できることを確認した。

第5章では、振幅4値変調方式の導入と再生マージン拡大を目的とし、10:9 変調符号と、CNN と空間結合 LDPC 符号を組み合わせた復号処理技術を開発した。CNN において教師あり学習で特徴を抽出できないランダムノイズによるビット誤りを強力に訂正すべく、CNN から出力された確率分布を復号処理中の尤度比計算に用いることで、

強力な誤り訂正システムを構築した。5:9 変調符号に対してページデータあたりの情報量が2倍となる10:9 変調符号を用いて検証し、許容 SNR を約 10 dB 改善した。

第6章では、光の振幅と位相の双方を活用した多値化の導入を目的とし、複素振幅16値変調符号の変復調手法を提案した。シンボル位置信号と複素振幅信号によって20ビットを表現する20:9 変調符号を新たに開発した。変調テーブルの生成にあたっては、ビット誤りが少なくなるよう、BFGS法や遺伝的アルゴリズムを用いて最適化した。復調手法としては、 $2^{20}$ の組み合わせからなるビット列を効率的に復調するべく、2つの信号をそれぞれ独立のCNNで復調する手法を新たに提案した。ネットワークを2つに分離し、それぞれの信号特性に応じた構成からなる最適なネットワークを構築した。加えて、復調対象のシンボルを示すラベル情報を入力可能なネットワークとすることで、学習後に保存が必要なネットワークのパラメーター数を大幅に低減した。復調評価の結果、複素振幅変調方式の導入見通しが得られた。

以上の成果をまとめる。第3章で提案したデュアルページ再生により、転送速度1 Gbpsを達成している。本成果は、振幅2値変調方式の5:9 変調符号を記録再生に用いている。第6章では、5:9 変調符号よりも4倍の情報量を記録再生可能な20:9 変調符号の技術を確立した。これらを組み合わせることにより、データ転送速度4 Gbpsのホログラムメモリーが実現できる目処が立った。第1章で述べた、放送局のアーカイブシステムで用いられる8Kプレイアウト映像のビットレートである1.8 Gbps、さらには8K制作システムで用いられる映像のビットレートの3.6 Gbpsを上回ることから、ホログラムメモリーを用いたアーカイブシステムの実用化に大きく貢献しうる成果である。加えて、4章以降の多値化技術は、記録容量の面でもホログラムメモリーの発展に大きく寄与するものである。

最後に今後の展望について述べる。高転送速度化に向けた課題の一つは、記録材料の性能である。多重数や長期保管性を保ちつつ、あるいは向上させながら、さらに回折効率の高い材料が開発されれば、再生時のカメラの露光時間をより短くでき、高速化できる。フォトポリマーなどのホログラム材料は、ヘッドマウントディスプレイなどの次世代ウェアラブルデバイス用途においても注目されており、高性能材料の開発には大いに望みがある。加えて、光読み出し手法にも改善の余地がある。角度多重記録されたページデータ間の遷移は高速であるが、ディスク回転などによるスポット間移動は低速である。ディスクを回転させながら光を照射するCDやDVDといった旧来の光メモリーとは再生原理が異なるため、ホログラムメモリーではそもそも記録媒体がディスク形状である必要はなく、これを活かした新しい再生手法が求められる。また、近年放送局などにも相次いで採用されているArchival Discでは、光ピックアップを光ディスクの表裏に複数設けて並列にデータを読み出す手法が導入されている。シンプルではあるものの、複数のヘッドによってパラレルにデータを再生する手法はホログラムメモリーにも十分適用可能である。これらの進展とあわせて、SLMやカメラの高画素化、高フレームレ

ート化や, AI 技術の進化による信号処理能力の向上といった周辺技術の発展により, ホログラムメモリーがさらなる高性能化を遂げ, 実用化を迎えることに大いに期待する.

## 謝辞

本研究を論文として纏めるにあたり、御多忙中にも関わらず主査を引き受けていただき、御指導ならびに御鞭撻を賜りました早稲田大学 理工学術院 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻 森島繁生教授に深く感謝申し上げます。また、副査として有益な御教示を下さいました竹内淳教授、澤田秀之教授、中島啓幾名誉教授に心より厚く御礼申し上げます。中島啓幾名誉教授には、学部4年次および修士課程の3年間に研究室の枠を超えたさまざまな経験をさせていただきました。一つの技術に固執せず、幅広い分野の技術に探求心を抱いて研究する現在の私のスタイルは、当時自由に研究させていただいたことが原点であると感じております。心より感謝申し上げます。

本論文は、NHK 放送技術研究所にて2014年から2021年までに遂行した研究をとりまとめたものです。研究の機会を与えていただいた、放送技術研究所の所長をはじめ、職員や関係者の皆様に深く感謝申し上げます。本研究に携わる上で多くの御指導と御支援をいただいた林直人 元部長、石井啓二 研究主幹、島本洋 元部長、斎藤信雄 元上級研究員に厚く御礼申し上げます。放送技術研究所に着任した当初には光学やホログラムメモリーについて知識のなかった未熟な私に対して、変調符号や誤り訂正符号などの技術的な面は勿論、研究の方向性やアウトプットに至るまで多大な御指導と御助言をいただきました石井紀彦 部長に厚く感謝の意を表します。実験やシミュレーションを通じて熱心な御指導をいただき、また多くの議論の機会をいただいた木下延博 副部長、室井哲彦 主任研究員、信川輝吉 職員に深く感謝申し上げます。

実験を遂行する上で、所外からも多くの方々のご協力を賜りました。新日鉄住金化学株式会社(現 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社)および三菱ケミカル株式会社には、記録媒体のサンプルを提供いただきました。株式会社日立製作所および株式会社日立エルジーデータストレージには、ホログラムメモリープロトタイプドライブの開発で多くの御尽力をいただきました。心から感謝申し上げます。

## 研究業績

### 本論文に関する研究業績リスト

#### 学術論文

1. Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Highly efficient dual page reproduction in holographic data storage,” *Opt. Express* 29, 33257-33268 (2021).
2. Y. Katano, T. Nobukawa, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “CNN-based demodulation for a complex amplitude modulation code in holographic data storage,” *Optical Review* 28, 662-672 (2021).
3. Y. Katano, T. Nobukawa, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Efficient Decoding Method for Holographic Data Storage Combining Convolutional Neural Network and Spatially Coupled Low-Density Parity-Check Code,” *ITE Transactions on Media Technology and Applications* 9, 161-168 (2021).
4. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Spatial Filter and Combination of Angle and Peristrophic Multiplexings to Achieve Recording Density of 1 Tbit/inch<sup>2</sup> in Holographic Data Storage,” *ITE Transactions on Media Technology and Applications* 9, 153-160 (2021).
5. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Reduction of spatio-temporal phase fluctuation in a spatial light modulator using linear phase superimposition,” *OSA Continuum* 4, 1846-1858 (2021).
6. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, N. Ishii, and N. Hayashi, “Applying digital filter to data pages before recording to increase signal-to-noise ratio in holographic memory,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 57, 09SC02-01-09SC02-05 (2018).
7. Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, N. Ishii, and N. Hayashi, “Data demodulation using convolutional neural networks for holographic data storage,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 57, 09SC01-01-09SC01-05 (2018).
8. N. Ishii, Y. Katano, T. Muroi, and N. Kinoshita, “Spatially coupled low-density parity-check error correction for holographic data storage,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 09NA03-01-09NA03-04 (2017).
9. Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Prototype holographic data storage drive with wavefront compensation for playback of 8K video data,” *IEEE Trans. Consum. Electron.* 63, 243-250 (2017).
10. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Dual-page reproduction to increase the data transfer rate in holographic memory,” *Opt. Lett.* 42, 2287-2290 (2017).

## 講演（国際会議）

1. T. Muroi, T. Nobukawa, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Toward Complex Amplitude Multi-Level Holographic Memory," in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2021), 35-36.
2. N. Kinoshita, T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, and N. Ishii, "20:9 Modulation Code for Complex Amplitude Multi-Level Recording in Holographic Memory," in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2020), 3-4.
3. Y. Katano, T. Nobukawa, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, "CNN Demodulation for Complex Amplitude Modulation Code in Holographic Data Storage," in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2020), 71-72.
4. N. Kinoshita, Y. Katano, T. Nobukawa, T. Muroi, and N. Ishii, "Improvement of Signal Quality for Multi-Level Amplitude Modulation in Holographic Data Storage," in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2019), 67-68.
5. Y. Katano, T. Nobukawa, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Effective Data-Decoding Method by Combining Convolutional Neural Network and Spatially Coupled Low-Density Parity-Check Code for Holographic Data Storage," in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019, (2019), 73-74.
6. N. Ishii, Y. Katano, T. Muroi, and N. Kinoshita, "10:9 modulation code for multi-level recording and error correction method using spatially coupled LDPC in HDS," in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2019), 149-150.
7. Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Demodulation of Multi-Level Data using Convolutional Neural Network in Holographic Data Storage," in 2018 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA), (2018), 1-5.
8. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Investigation of Oversampling for Amplitude Multi-Level Two-Dimensional Data Array in Holographic Memory," in 19th International Symposium on Optomechatronic Technology, (2018), 152-153.
9. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Superimposed Spatial Guard Interval on Data Page for Reducing Inter-Symbol Interference in Amplitude Multi-Level Recording Holographic Memory," in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2018), 13-14.
10. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Holographic Memory Prototype Drive with Wavefront Compensation for Storing Ultra-High-Definition Video Signal," in SPIE Photonics West 2018: the optoelectronics, photonic materials and devices conference (OPTO 2018), (2018).
11. Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Deep-Learning Based Data Demodulation

- for High Density Holographic Data Storage,” in International Workshop on Holography and related technologies, (2017).
12. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Use of Digital Filter before Recording Data Pages to Improve SNR in Holographic Memory,” in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2017), 99-100.
  13. Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Image Recognition Demodulation Using Convolutional Neural Network for Holographic Data Storage,” in Imaging, Sensing, and Optical Memory 2017, (2017), 35-36.
  14. Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Prototype holographic drive with wavefront compensation for playback of 8K video data,” in 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), (2017), 298-299.
  15. N. Ishii, Y. Katano, T. Muroi, and N. Kinoshita, “Spatially coupled LDPC error correction code for HDS,” in International Symposium on Optical Memory, (2016), 20-21.
  16. Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Efficient high-speed readout in holographic memory by reusing transmitted reference beam,” in 21st Microoptics Conference (MOC’16), (2016).
  17. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, “High Density Data Recording Using Angle and Peristrophic Multiplexing in Holographic Memory, ” in European Optical Society Bi-Annual Meeting 2016 (EOSAM 2016), (2016).
  18. N. Kinoshita, Y. Katano, T. Muroi, and N. Saito, “Playback demonstration of compressed 8K UHD TV video from holographic data storage,” in SPIE Optics + Photonics 2016, (2016), 9959-2.
  19. Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, N. Ishii, and N. Saito, “Dual-page reproduction with the reusing of a transmitted reference beam in holographic data storage,” in SPIE Photonics WEST: Optoelectronic Materials, Devices, and Applications 2016 (OPTO 2016) (2016), 388.
  20. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, N. Ishii, and N. Saito, “Investigation of Intensity Distribution of Signal Beam to Increase SNR in Phase-Conjugated Holographic Memory,” in International Workshop on Holography and Related Technologies 2015 (IWH 2015), (2015).
  21. N. Kinoshita, Y. Katano, T. Muroi, and N. Saito, “Demonstration of 8K SHV Playback from Holographic Data Storage,” in International Symposium on Optical Memory, (2015), 8-9.
  22. T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Saito, “Simultaneous Reproduction of Two Datapages for Increasing Data-Transfer Rate in Holographic Data Storage,” in 2015 European Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference, (2015), CI\_3\_5.

## 講演（国内会議）

1. 片野祐太郎, 信川輝吉, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “振幅位相記録ホログラムメモリーにおけるノイズ推定手法の一検討,” 映像情報メディア学会創立 70 周年記念大会, (2020).
2. 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “光複素振幅分布の変調のための離散化した線形位相キャリアを導入した位相ホログラム,” 映像情報メディア学会創立 70 周年記念大会, (2020).
3. 木下延博, 片野祐太郎, 信川輝吉, 室井哲彦, 石井紀彦, “振幅多値ホログラムメモリーにおけるノイズ低減手法の実験的検証,” 映像情報メディア学会 マルチメディアストレージ研究会, (2019), 25-28.
4. 木下延博, 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 石井紀彦, “ホログラムメモリーにおける時分割露光を用いた振幅多値記録,” 映像情報メディア学会年次大会, (2019).
5. 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “畳み込みニューラルネットワークによる多値記録ホログラムメモリー再生信号の復調手法の検討,” 映情学技報 **43**, 5, (2019), 205-208.
6. 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “空間分割位相シフト法を用いた位相多値記録ホログラムメモリーのデータ読み出し精度の向上,” 映像情報メディア学会冬季大会, (2018).
7. 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “ホログラムメモリーにおける振幅多値記録方式の一検討,” 映像情報メディア学会年次大会, (2018).
8. 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “畳み込みニューラルネットワークによるホログラムメモリー再生データの符号間干渉の抑制,” 映像情報メディア学会技術報告 **42**, (2018), 267-270.
9. 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “空間分割位相シフト法を用いた位相多値記録ホログラフィックメモリーのデータ読み出し手法,” 映像情報メディア学会技術報告, **42**, 33, (2018), 35-40.
10. 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “位相格子を用いた空間分割位相シフト法による位相多値記録ホログラムメモリー用データ読み出し手法の検討,” 映像情報メディア学会年次大会, (2018).
11. 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “ホログラムメモリーにおける畳み込みニューラルネットワークの効率的な学習手法の一検討,” 映像情報メディア学会冬季大会, (2017).
12. 木下延博, 片野祐太郎, 室井哲彦, 石井紀彦, “ホログラムメモリーにおける固定パターンノイズ除去手法,” 映像情報メディア学会 マルチメディアストレージ研究会, (2017), 53-58.



13. 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “ロールオフフィルターによるホログラムメモリーの SN 比改善,” 映像情報メディア学会年次大会, (2017).
14. 石井紀彦, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, “ホログラムメモリーにおける差分コード最適化(II),” 映像情報メディア学会年次大会, (2017).
15. 室井哲彦, 片野祐太郎, 木下延博, 石井紀彦, “ホログラムメモリーにおける 8K 圧縮映像信号再生のための GPU による並列信号処理,” 映像情報メディア学会年次大会, (2016).
16. 石井紀彦, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, “ホログラムメモリーにおける差分コード最適化(I),” 映像情報メディア学会年次大会, (2016).
17. 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “透過参照光を利用したホログラムメモリーの高転送速度化,” 映像情報メディア学会年次大会, (2016).
18. 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “スーパーハイビジョン映像のためのホログラフィックメモリ再生技術,” 第 23 回日本光学会ボリュームホログラフィックメモリ技術研究会, (2016), 1-6.
19. 木下延博, 片野祐太郎, 室井哲彦, 斎藤信雄, “ホログラムメモリーからの 8K スーパーハイビジョン圧縮映像再生,” 電子情報通信学会技術研究報告, (2016).

## そのほかの研究業績リスト

### 学術論文

1. T. Nobukawa, Y. Katano, M. Goto, T. Muroi, N. Kinoshita, Y. Iguchi, and N. Ishii, “Coherence aperture restricted spatial resolution for an arbitrary depth plane in incoherent digital holography,” *Appl. Opt.* 60, 5392-5398 (2021).
2. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Bimodal Incoherent Digital Holography for Both Three-Dimensional Imaging and Quasi-Infinite-Depth-of-Field Imaging,” *Sci. Rep.* 9, 1-10 (2019).
3. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Sampling requirements and adaptive spatial averaging for incoherent digital holography,” *Opt. Express* 27, 33634-33651 (2019).
4. T. Nobukawa, T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Single-shot phase-shifting incoherent digital holography with multiplexed checkerboard phase gratings,” *Opt. Lett.* 43, 1698-1701 (2018).
5. Y. Katano, S. Shinada, S. Nakajima, T. Kawanishi, and H. Nakajima, “Monolithic mode-locked erbium-doped LiNbO<sub>3</sub> waveguide laser with dielectric multilayer mirror,” *IEICE Electronics Express* 9, 245-249 (2012).

## 講演（国際会議）

1. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, and N. Ishii, “Common-path configuration for single-shot phase-shifting incoherent digital holography with a single diffraction grating,” in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2021), 115-116.
2. K. Kimura, M. Nagata, Y. Wada, Y. Katano, N. Ishii, E. Watanabe, and T. Muroi, “Reduction of Random Noise in Parallax Images Acquired by Single-Pixel Imaging using Deep Neural Network,” in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2021), 47-48.
3. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Single-shot incoherent holography with multiplexed gratings for 3D imaging,” in 12th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (ODF'20), (2021).
4. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Incoherent-holography-based computational imaging system for 3D imaging and infinite depth-of-field imaging,” in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2020), 55-56.
5. T. Muroi, T. Nobukawa, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Using a Digital Filter in Incoherent Digital Holography to Improve the Quality of Reconstructed Images,” in OSA Imaging and Applied Optics Congress 2020, (2020).
6. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Effect of rotational shear on imaging properties of bimodal incoherent digital holography system,” in SPIE Photonics West: Optoelectronics 2020 (OPTO 2020), (2020), 113060I.1-113060I.6.
7. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Grating-aided single-shot phase-shifting incoherent digital holography,” in 8th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP 2018), (2018), 22.
8. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Single-shot Phase-shifting Incoherent Digital Holography Using Multiplexed Phase Gratings,” in International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, (2018), 123-124.
9. T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, “Grating-assisted spatial phase-shifting incoherent digital holography with compressive sensing for noise reduction,” in Workshop on Information Optics 2018 (WIO 2018), (2018).

## 講演（国内会議）

1. 室井哲彦, 信川輝吉, 片野祐太郎, 木下延博, 石井紀彦, “インコヒーレントホログラフィーにおける干渉縞に生じるランダムノイズが再構成画像に与える影響,” 映

像情報メディア学会創立 70 周年記念大会, (2020).

2. 室井哲彦, 信川輝吉, 片野祐太郎, 木下延博, 石井紀彦, “インコヒーレントホログラフィにおける領域分割取得による再構成画像の画質改善,” *Optics & Photonics Japan*, (2020).
3. 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “インコヒーレントデジタルホログラフィのホログラムのコントラスト,” *Optics & Photonics Japan*, (2020).
4. 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “位相格子を用いた単一露光位相シフトインコヒーレントホログラフィ,” レーザー学会学術講演会第 40 回年次大会, (2020).
5. 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “空間平均によるインコヒーレントホログラフィのノイズ低減,” 2019 年映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, (2019).
6. 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “位相シフトインコヒーレントホログラフィの再生像品質の評価,” 映像情報メディア学会技術報告, vol. 43, no. 22, MMS2019-52, (2019), 1-4.
7. 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, “インコヒーレントデジタルホログラフィのための多重位相格子を用いた単一露光位相シフト法,” 春季第 65 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, (2018).

## 受賞

1. 第 22 回優秀研究発表賞, 映像情報メディア学会 (2019)
2. 第 51 回鈴木記念奨励賞, 映像情報メディア学会 (2018)
3. The Program Chair Award, International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2017 (2017)
4. Best Paper Award (3rd Place), 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (2017)