

ホログラフィック光相関システムと  
その応用に関する研究

池田 佳奈美

電気通信大学大学院 情報理工学研究科

博士(工学)学位申請論文

2018年1月



# ホログラフィック光相関システムと その応用に関する研究

## 博士論文審査委員会

先進理工学専攻	准教授	渡邊恵理子(主査)
先進理工学専攻	教授	渡邊昌良
先進理工学専攻	教授	美濃島薫
先進理工学専攻	准教授	宮本洋子
総合情報学専攻	教授	庄野 逸



著作権所有者

池田 佳奈美

2018年1月



# Abstract

In recent years, the amount of information handled globally has been on the rise exponentially, and a technique for analyzing this enormous amount of data in real time is necessary. However, this is faced with the problem that a large amount of machine power is required in order to process the large volume of data using the current computers, because there exists a trade-off between the data capacity and the processing speed. In other words, the transfer speed between the storage device and the processing device forms a bottleneck in the current generation of computers because processing is performed separately by these devices. Therefore, it is difficult to solve this problem only through software, and we expect that parallel computing realized by hardware implementation will bring about a breakthrough in this situation. Certain parallel computing systems using devices such as a graphics processing unit and resistive random-access memory have been proposed. This study is focused on the optical correlation technology as one of the hardware implementation of parallel computers.

In this paper, the potential of realizing high-speed correlation with an enormous amount of data was experimentally shown in the optical correlation system for which the holographic shift multiplex recording method is introduced. I constructed a hologram recording method with uniform light energy based on spatial frequency distribution control, experimentally evaluated correlation signal for high-speed and high-density recording, and performed automatic control of optical experimental system. In addition, cross-domain image retrieval was realized, using a new coding method, in which machine learning techniques were introduced, widening the scopes of application for optical correlation systems.

By using the experimental results of the high-speed optical correlation system, potential of the optical correlation with the enormous amount of data was demonstrated. In addition, the possibility that applications and scopes of the optical correlation system can be expanded was shown by fusion with digital information processing. Thus, the optical correlation system could induce a breakthrough in improving the performance of data analysis in our information-driven society.





## 概要

昨今、世界中で取り扱われる情報量が爆発的に増加しており、膨大なデータを実時間で分析するデータ解析技術が求められている。しかし、現状の計算機を用いたデータ解析技術では、データ容量と処理速度は相反関係であるため、膨大なデータの実時間処理には多大なマシンパワーが必要となる課題がある。これは現状の計算機では記憶装置と演算装置によりデータ蓄積と演算を別々に処理するためそれらの間の転送速度がボトルネックとなり、ソフトウェア面からのみでの課題解決は難しい。したがって、ハードウェア実装による新規の並列コンピューティングはブレイクスルーとなる期待が大きく、これまでに **Graphics Processing Unit** および **Resistive Random Access Memory** による並列コンピューティング等が提案されている。このような背景のもと、本研究においては光相関技術に着目した。

本論文では、ホログラフィック光多重記録手法を導入した光相関演算システムにおいて、空間周波数分布の制御により光エネルギーを均一化し、高速に高密度記録を行う手法の提案と実験評価、および光学実験系の自動制御化などにより、膨大なデータにおいても超高速相関演算を実現できる可能性を実験的に示した。更に、機械学習を導入した光相関用符号化技術により、クロスドメイン検索を実現し、光相関演算技術の適用分野を大幅に広げた。

本研究によって光相関システムの高速度が実験的に示されたことによって、デジタル情報処理技術との融合による光相関システムの応用展開可能性が広がり、光相関システムが情報化社会におけるデータ解析性能向上のブレイクスルーとなり得ることを示した。



# 目次

<b>第1章</b>	<b>緒論</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
1.2	光相関の研究開発動向	3
1.2.1	光相関演算	3
1.2.2	光相関の研究開発動向	3
1.2.3	光相関の分類	6
1.3	研究目的	7
1.4	本論文の構成	8
<b>第2章</b>	<b>コアキシャルホログラフィック光相関演算システム</b>	<b>11</b>
2.1	緒言	11
2.2	ホログラフィック光相関原理	12
2.2.1	ホログラムメモリと光相関	12
2.2.2	コアキシャルホログラフィック光相関	13
2.3	コアキシャルホログラフィック光相関システムの速度	15
2.3.1	光相関データベース記録密度	18
2.3.2	データベーススキャン速度	21
2.4	光相関演算・転送速度	22
2.5	結言	22
<b>第3章</b>	<b>ホログラフィック光相関システムの高速化</b>	<b>25</b>
3.1	緒言	25
3.2	ホログラフィック光相関システム	26
3.3	高速化に向けた本研究での実施項目	29
3.4	ハードウェア改良	30
3.4.1	高精細空間光変調器の導入	30

3.4.2	高速アクチュエータの試作 . . . . .	31
3.4.3	ホログラフィック光相関の制御系の自動化 . . . . .	33
3.5	光エネルギー分布の評価と実験的最適化 . . . . .	36
3.5.1	データベース記録シミュレーション . . . . .	36
3.5.2	空間周波数分布に基づく光エネルギー分布評価 . . . . .	38
3.5.3	実験による高密度化の考察 . . . . .	39
3.6	高速光相関演算の実験実証 . . . . .	42
3.7	デジタル相関との速度比較 . . . . .	43
3.8	光相関システムの高速度性 . . . . .	49
3.9	結言 . . . . .	50
<b>第4章</b>	<b>ホログラフィック光相関システムの安定化</b>	<b>53</b>
4.1	緒言 . . . . .	53
4.2	サーボ制御系とディスク構造 . . . . .	54
4.2.1	サーボ制御系 . . . . .	54
4.2.2	HVD フォーマット基板 . . . . .	56
4.3	光相関用簡易・安価なディスク構造 . . . . .	57
4.3.1	シミュレーションによる溝構造の最適化 . . . . .	57
4.3.2	光相関用簡易・安価なディスク構造 . . . . .	59
4.4	トラッキング用溝上での光相関演算実験 . . . . .	60
4.4.1	溝の影響の評価 . . . . .	60
4.4.2	シングルトラックでの実験 . . . . .	61
4.5	結言 . . . . .	62
<b>第5章</b>	<b>光相関システムの応用 I : 類似画像検索システム</b>	<b>63</b>
5.1	緒言 . . . . .	63
5.2	類似画像検索のための光相関用符号化法 . . . . .	65
5.2.1	シミュレーションによる情報光設計 . . . . .	65
5.2.2	実験による情報光設計 . . . . .	68
5.2.3	ホログラフィック光相関システムの基礎実験 . . . . .	70
5.3	クラウド環境における光相関システム . . . . .	71
5.3.1	クラウド環境における光相関システムの位置づけ . . . . .	71
5.3.2	データベースのアドレス情報 . . . . .	74

5.4	2クラス分類における本研究での評価基準	77
5.4.1	分離度	77
5.4.2	登録拒否率と非登録受け入れ率	78
5.5	光相関に基づく著作権管理システム	80
5.5.1	システムの基本構成	80
5.5.2	著作権管理システムのボトルネックと階層構造の提案	81
5.5.3	カラー特徴によるアニメ・実写カテゴライズ	84
5.6	光相関に基づく著作権管理システムの評価	89
5.6.1	評価実験	89
5.6.2	性能評価	90
5.7	結言	90
<b>第6章</b>	<b>光相関システムの応用II：クロスドメイン検索システム</b>	<b>93</b>
6.1	緒言	93
6.2	スケッチベース画像検索システムの基本構成	94
6.2.1	光相関用変換モジュールの学習	95
6.3	光相関に基づくスケッチベース画像検索システムの実験実証	98
6.3.1	実験条件	98
6.3.2	実験結果	99
6.4	結言	102
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>103</b>
	謝辞	105
	参考文献	107
	研究業績	121



# 第1章 緒論

## 1.1 研究背景

コンピューター技術の発展によってその適用範囲が拡大し、世界中で取り扱われる情報量が爆発的に増加している。2009年に1.2ゼタバイト (ZB : zeta byte =  $10^{18}$  byte) であった世界中で取り扱われるデータ量が2016年には16.1 ZBまで増加している。更には、2025年までに2016年の10倍の163 ZBのデータ量に到達すると予測されているなど、今後の爆発的増大も見込まれており [1]、これに伴った消費電力増加も課題である。コンピュータの性能は飛躍的に向上してきているが、膨大な量のデータ処理など、コンピュータの性能に対する要求は減少しない。このような時代背景のもと、データ蓄積はもちろんのこと、解析によっていかにして有用な情報を見出すかが重要となり、データ蓄積と解析を省エネルギーかつ高速で実現する情報処理技術が強く求められている。一方、パターン認識タスクにおいて、機械学習や深層学習アルゴリズムによる高い性能報告が近年続いている。深層学習によって静止画の分類タスクにおいては既に高い性能が実現されており [2,3]、マルチモーダル検索やクロスドメインのデータ検索、および動画照合などが、更に難しいタスクとして取り組まれている [4,5]。しかしながら、シーケンシャルなノイマン型コンピュータにおいては大規模データを取り扱う際に、そのデータ転送と照合が深刻なボトルネックとなり得る [6–9]。これは、従来の計算機では、2次記憶装置から主記憶装置へのデータ転送がボトルネックとなり、高速メモリバンド幅が機能する容量が主記憶装置などの半導体メモリ上に展開できる容量に限られるためである。例えば、dynamic random access memory (DRAM) の規格のDDR4の一つDDR4 SDRAM PC4-25600はデータ転送速度204.8 giga bit per second (Gbps)と高速であるが、蓄えられる容量は4~16ギガバイト (GB: Giga Byte= $10^9$  byte)程度である。このようなハードウェアの限界によって、なるべく小さいサイズの照合特徴量を生成する技術の開発は非常に進展している。しかしながら、データ

を可能な限り小さくしているため照合の大規模な汎用展開が難しい。また、特徴量を実数ではなく 2 値や 3 値の表現に分割することによってデータサイズの縮小による転送の高速化と CPU にハードウェア実装されているポップカウントを利用してデータ照合を高速化する試みが行われておりソフトウェアによる高速化として有用である [10]。更に、近年では深層学習に基づくデータ圧縮と組み合わせることによって、データ転送におけるボトルネックを回避する試み [11] も提案されている。しかしながら、ソフトウェア面からのアプローチだけではブレイクスルーとなる技術はいまだない。このように、大規模データの取り扱いにおいてはソフトウェア面からだけの課題解決は困難である。そこで、ハードウェア実装による新規の並列コンピューティングへの期待は大きく、様々な取り組みが行われている。例えば、hybrid memory-type storage class memory/NAND flash solid-state drive (Hybrid SSD) [7], Field Programmable Gate Array(FPGA) 実装, resistive random access memory (RRAM) による並列コンピューティング [9, 12] およびナノフォトニック回路による光実装 [13] などが提案されてきている。

本研究においては、データ解析に必要な不可欠な照合過程の高速化を実証すること目指し、光情報処理技術の中でも光相関演算に注目した。光情報処理の中でも特に光に関連した物理現象によって情報処理を実現する光計算 [14] は、レンズによってレンズの前側焦点の物体の 2 次元フーリエ変換がレンズの後ろ側焦点に高速並列に演算できる光学的フーリエ変換 [15] など、高速処理において期待が大きい。また、光計算には、光相関演算 [16, 17], フラクタル合成器 [18] などのアナログ光計算, 並列光論理演算法 [19] などのデジタル光計算などがあり、高速性に対する期待から、これまでに数多くの手法が提案されてきた。これらは、既存の 2 次記憶メモリの転送速度に高速性が依存してしまっていた従来のデータ解析を数桁高速かつ省エネルギーで演算できる可能性を有している [20, 21]。

以上の特徴に基づき、光計算の中でも光相関演算システムが大規模データを取扱う時代の並列演算器として有効であると考え、本研究では光相関演算に注目する。光相関演算は、データを並列に処理することが可能であり、その並列性・高速性が注目され、研究が進められてきている [16, 17, 22, 23]。本研究においてはホログラフィック光多重記録手法を導入した光相関演算システムにおいて、空間周波数分布制御による光



エネルギー均一化記録手法構築，相関フィルタの高密度記録のための光エネルギーと相関信号の実験的評価，および光学実験系の自動制御化などにより，膨大なデータにおいても超高速相関演算を実現できる可能性を実験的に示す．更に，機械学習を導入した光相関用符号化技術により，クロスドメイン検索を実現し，光相関演算技術の適用分野を大幅に広げる．次節では，光相関の研究開発動向を基本的な空間フィルタリング手法の概要を含めて述べる．

## 1.2 光相関の研究開発動向

### 1.2.1 光相関演算

2次元データ  $f_1(x,y)$  と  $f_2(x,y)$  の相関は

$$c(x,y) = f_1(x,y) \otimes f_2(x,y) \quad (1.1)$$

と表せる．この式はフーリエ空間においては

$$C(v_x, v_y) = F_1(v_x, v_y) F_2^*(v_x, v_y) \quad (1.2)$$

と書くことができる．ここで， $F_1(v_x, v_y) = \text{FT}[f_1(x, y)]$ ， $F_2(v_x, v_y) = \text{FT}[f_2(x, y)]$  であり， $\text{FT}[\ ]$  は実空間の信号のフーリエ変換を表している．また，フーリエ空間で得られた  $C(v_x, v_y)$  を逆フーリエ変換することによっても2次元データ  $f_1(x, y)$  と  $f_2(x, y)$  の相関結果を得ることができる．

### 1.2.2 光相関の研究開発動向

光相関は1960年代から研究開発が行われてきている．本節では，光相関の研究開発動向を1960～79年，1980～2004年，2005年～14年および2015年以降の4つの年代に区分けして周辺技術の発展と共に整理する．

まず，1960～79年における研究開発動向について述べる．1960年代はコンピュータへの集積回路の利用が行われ始めた時期である．光コンピューティングの分野においては1960年にレーザー [24] が発明され，レーザーの発展によってホログラフィ [25]

が情報処理に利用されるようになった。これに伴い，2次元画像を並列に処理することが可能な光相関演算の研究が1960年代から進められた [16, 17]。提案された光相関器は大きく分けて2種類あり，1つ目がVanderLugt相関器（VLC：VanderLugt Correlator）[16]，2つ目が結合変換相関器（JTC：Joint Transform Correlator）[17]である。VLCはマッチトフィルタリングの光学的实现法であり，1964年にVanderLugtによって提案された。これはフーリエ変換ホログラムの光学系を用いて複素振幅分布を持つ空間周波数フィルタを作成し照合に用いる手法である。図1.1にVLCでの空間フィルタリングの基本的な光学系を示す。レンズによる光学的フーリエ変換の光学系を直列に並べた4f光学系により光学的に空間フィルタリングが実現できる。このように光相関演算は1960年代から研究が進められてきたが，構成デバイス性能が十分ではなかったために基礎的研究にとどまっていた。

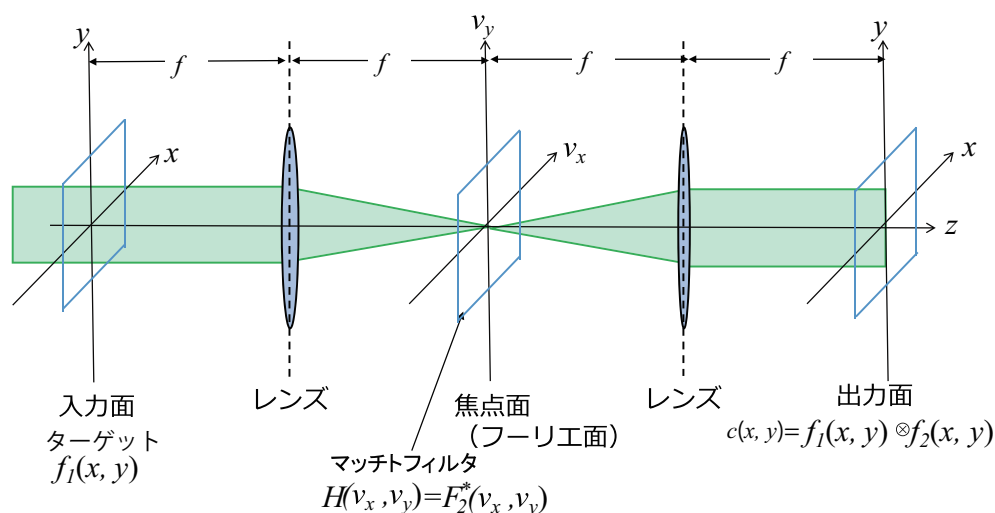


図 1.1: 空間フィルタリングの概念図.

1980～2004年においては，集積化などの技術によって急速に発展したデジタル計算機技術の限界が議論され始めるようになったことが後押しとなり，デジタル光並列演算 [19]，光ニューラルネットワーク [26, 27]，光インターコネクションなどの研究開発が活発に研究された光コンピューティングの黄金期と言われる年代である [20]。また，様々な特性を持った空間光変調器（SLM: spatial light modulator）が開発されたことが光相関の研究開発に大きな影響を及ぼした。この年代の後半には，光コンピューティ

ング技術に関しては技術的な課題が多く研究は縮小していったが、アナログ光計算の中で光相関演算は研究が継続された。Javidi らは 80 年代後半に、非線形な JTC を提案した [22,28,29]。特に、90 年代より光相関演算に関する研究開発が活発化し、日本では多重相関パターン認識システム [30] が開発され、スペイン [31]、イギリス [32,33]、インド [34]、ウクライナ [35] 等の様々なグループから光相関演算システムの報告があった。

2005～2014 年には、モスクワ [36] や、タイ [37,38]、台湾 [39]、中国 [40] などから光相関演算システムの研究開発の報告がされている。また、清華大学のグループによって、結晶を用いたフォトリフラクティブ効果による角度多重記録を利用した 7000 並列演算 [42] や読み出し専用のポータブルな光相関器 [43,44] の報告がされている。この光相関器のサイズは  $200 \times 160 \times 110\text{mm}^3$  であり、重量は 2.9 kg であった。また、ウクライナと韓国のグループでは独自で開発したフォトポリマーをマッチトフィルタに用いた VLC が構築された [45]。

2015 年以降、英国スタートアップ企業の Optalysys はゲノム配列解析に利用可能な光相関器を開発しており、2017 年末の製品化をめざしていることを発表した [46]。2016 年度は Florida の Hollywood Beach で行われた **Advances in Genome Biology and Technology (AGBT) conference** においてゲノム解析センターの **Earlham Institute** と共同でデモ展示を行っている [47]。この他にも光相関の応用展開については、従来から積極的に取り組まれている顔認識 [48,50,51] に加えて、道路標識認識 [49]、産業用パターン認識 [52]、虹彩検出とトラッキング [55] などの応用が提案された。このように近年光相関による高速・省エネルギーな演算が再注目されており、従来の光相関手法の適用拡大に向けた取り組みの報告が続いている [49,52–54,56,57]。さらに、光相関演算システムを構成するデバイスである光源やフォトポリマーなどの記録媒体および SLM 等の研究開発も進んできている [58]。この数年間でも光の並列性・高速性を活かした光相関は様々な分野への組み込みが目指されており、多くの応用が提案された。近年提案されている新規応用は光相関ハードウェアのみではなくソフトウェアのアルゴリズムと組み合わせた全体設計によって有効なものとなる特徴がある。しかしながら、提案されている新規応用は数値計算によって提案の有用性は証明済みであるものの、実証まで行われているものは限られており、光学系を用いた実験実証が期待

されている。

### 1.2.3 光相関の分類

光相関機が VLC と JTC に大きく分類できることは前項で述べた。さらに、VLC 型の光相関器は大きく 2 つに分類できる。ここで、本研究において基本となる VLC 型の光相関演算システムの分類について述べる。フィルタに SLM を用いる方式 [23, 53, 60–65] と、フィルタにアナログホログラムを用いる方式 [42, 56, 66–76] に分けられる。前者の方式は、マッチトフィルタを電子コンピュータに保存して随時 SLM に呼び出す方式であり、hard disk drive (HDD) や solid-state drive (SSD) などに保存したデジタルデータから読み出す。これは、フィルタの書き換えが容易であるため、柔軟性が高くシーンマッチングなどへの応用性が高い。例えば、Boulder Nonlinear Systems, Inc. は小型で汎用的な光相関器 ( $51 \times 76 \times 51 \text{mm}^3$ ) を開発した [77]。また、SLM にレンズの機能も持たせることで 1 枚の SLM のみを用いて構成する光相関器が提案されるなど、本方式は小型化に関する報告も多い [60]。近年では Cambridge correlator [78] などが実用化されている。しかしながら、マッチトフィルタを電子コンピュータに保存して随時 SLM に呼び出すため、照合速度は SLM の画像表示フレームレイトと SLM へのデータ転送速度に制限されてしまう。これは、光相関における光の高速性を活かしきれていないとは言えない。一方、フィルタにアナログホログラムを用いる後者の方式は、あらかじめアナログホログラムとしてホログラム記録しておく。実際には機械部分での制限があるものの前者より制約は少なく、データベースを高速に読み出せる。結晶を使ったホログラムを用いる手法 [42, 56, 67–70] やディスク型のフォトポリマーを用いる手法 [66, 71–76] がある。これらの手法は、フィルタの切り替え速度が SLM の転送レイトに依存してしまう前者の手法に比べて、原理的にはより高速に光相関演算を実現可能な手法である。

表 1.1 にはアナログのホログラムを相関フィルタに用いる光相関器をまとめた。アナログホログラムを相関フィルタに用いることによって、相関演算における相関フィルタの切替速度が大きなボトルネックとなる課題は回避できるが、相関信号を受光するディテクタの感度や応答速度等が次なるボトルネックとなる。そこで、本研究ではディテクタに光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier Tube) を用いて微弱な光相関信号で

あっても高速に取得可能な構成としている。本研究の光相関演算システムに関しては、次章以降で詳細に述べる。

表 1.1: アナログホログラムを用いた光相関演算システム

研究開発機関	記録媒体	特徴	参考文献
サセックス大学	結晶	角度多重記録とシフト多重記録を組み合わせる構成	[33], [79]
清華大学	結晶	角度多重記録とシフト多重記録を組み合わせる構成	[42]
電気通信大学 (本研究)	フォトポリマー	従来の光ディスク制御技術と親和性の高いディスク型記録メディアを搭載	[66, 71–76]

### 1.3 研究目的

従来の光相関演算システムの多くでは、原理的な有用性・高速性を示すにとどまり、実験実証までは行われていない。そのため、本研究では実験的に光相関演算の高速性を実証することを重視し、ハードウェアとソフトウェアの両面からの性能向上とその応用について検討する。まず、ホログラフィック光多重記録手法を導入した光相関演算システムにおいて、膨大なデータにおいても超高速相関演算を実現できる可能性を実験的に示すことを目的とする。具体的には、空間周波数分布制御により光エネルギーを均一化し、高速に高密度記録を行う手法の提案と実験評価、および光学実験系の自動制御化などにより、100 Gbps 相当を上回る光相関演算を実験的に示す。また、最近傍画像検索における類似画像検索に有用な光相関用符号化法を構築し、画像照合を光相関システムによって実行することで、光相関器の有用性を示す。ここで、クラウド環境における分散設計に光相関システムを位置付けたデモシステムの構築も行う。更に、機械学習を導入した光相関用符号化技術により、クロスドメイン検索を実現し、光相関演算技術の適用分野の拡張を行う。光相関技術の応用展開拡大する新規応用手法技術の提案開発を行うことにより、ハードウェアとソフトウェアの両面から光相関器の有用性を示す。以上を踏まえた上で、デジタル情報処理技術との融合により光相関演算システムが情報化社会におけるデータ解析性能向上のブレイクスルーとなり得

ることを示すことを本研究の目的とする。

### 1.4 本論文の構成

本研究では、ホログラフィック光多重記録手法を導入した光相関演算システムにおいて、空間周波数分布制御による光エネルギー均一化記録手法構築、相関フィルタの高密度記録のための光エネルギーと相関信号の実験的評価、および光学実験系の自動制御化などにより、膨大なデータにおいても超高速相関演算を実現できる可能性を実験的に示す。更に、機械学習を導入した光相関用符号化技術により、クロスドメイン検索を実現し、光相関演算技術の適用分野を大幅に広げる。本論文の構成を以下に述べる。

本論文は全 7 章から構成されている。

第 1 章では、本研究に先立ち、光相関演算システムの従来の研究開発の動向を述べ、本研究の光相関演算システムの位置づけを明確にする。

第 2 章では、高速相関演算実証の前にコアキシャルホログラフィック光相関システムの速度に関する要素を整理し、光相関演算・転送速度を定義する。

第 3 章では、光相関器による光相関演算の高速性の実験的実証を目的とし、空間周波数制御による光エネルギー均一化記録手法構築、相関フィルタの高密度記録のための光エネルギーと相関信号の実験的評価、および光学実験系の自動制御化などにより、100 Gbps 相当を上回る速度での光相関演算を実験的に達成する。本実験結果によって膨大なデータにおいても超高速相関演算を実現できる可能性を示す。

第 4 章では、光相関器の安定性や再現性向上を目的とし、光相関演算システム用のディスク構造について提案する。トラッキングサーボ制御導入と光相関システム用ディスクによって 1000 枚を超えるデータベースとの相関信号の取得を目指す。従来の光ディスクのサーボ制御系と光相関器の組み合わせによる光相関演算システムの安定性の向上を実験的に確かめる。提案ディスクによって光相関信号取得実験を行い、提案光相関用ディスクの有効性を示す。

第 5 章では、光相関演算システムの最近傍法への適用における有用性を示すために、類似画像検索用符号化法を提案し、実験的に閾値を決定し、エラー率 0 % での照合を実現する。光相関演算システムのユーザビリティと汎用性の向上を目指し、クラウド

環境における光相関演算システムの位置づけを提案する。さらに、光相関演算システムを照合部に導入した光・デジタルハイブリッド動画検索システムの提案と実証を行う。著作権管理システムにおけるボトルネックの改善として、限られた画素数や変更されたサムネイル画像を対象に実写データを排除することを目的とした画像分類法を構築し、システム全体としての効率化の評価結果について述べる。

第6章では、光相関演算システムの用途拡大に向けて、深層畳み込みニューラルネットワークを特徴抽出器として用いるクロスドメイン類似画像検索システムを提案・構築する。光相関用の変換モジュールを **autoencoder** の学習に基づき生成し、深層畳み込みニューラルネットワークと共に光相関演算システムの前処理に加えるシステム構成を実現する。構築した変換モジュールによってクロスドメイン検索を光相関演算システムに基づいて実証した実験結果について述べる。

第7章では、本研究の成果をまとめ、今後の展望について述べる。

本研究によって光相関演算システムの高速度を実験的に示すことで、デジタル情報処理技術との融合による光相関演算システムの応用展開可能性が広がる。その上で、光相関演算システムが情報化社会におけるデータ解析性能向上のブレイクスルーとなり得ることを示す。

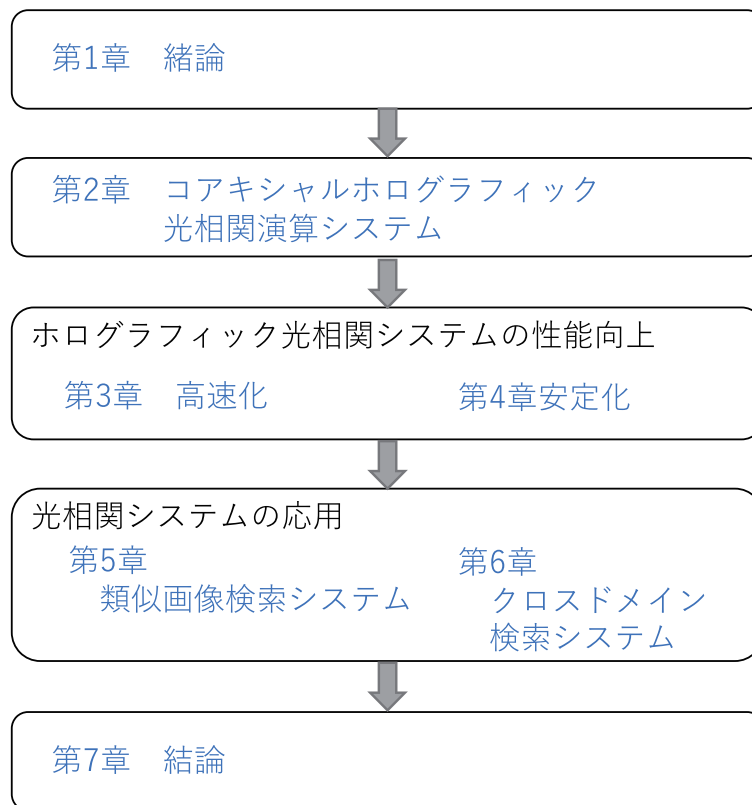


図 1.2: 本論文の構成.



## 第2章 コアキシャルホログラフィック 光相関演算システム

### 2.1 緒言

世界中で取り扱われる情報量は爆発的に増加しており、特にソーシャルメディアデータ、マルチメディアデータおよびセキュリティデータは膨大となっている [1]。大容量の画像・動画データとの照合・検索を行う場合、計算容量は膨大になる上、外部ストレージからの転送速度が処理速度のボトルネックとなってしまうことは第1章で述べた。1 テラバイト (TB: tera byte= $10^{12}$  byte) を超える大規模なデータベースとの照合においては、現状は HDD や SSD の持つ速くても数 Gbps 程度の転送速度がボトルネックとなる。したがって、従来の計算機では、大容量データの高速検索の際はデータベースの容量を削減して小さい特徴量で検索を行う方法が提案され、広く利用されている。しかしながら、高速な主記憶装置の持つデータ容量は小さく、2次記憶装置から主記憶装置へのデータ転送がボトルネックとなり、ソフトウェアのみでは抜本的なブレイクスルーとはならない課題があった。そこで、ハードウェアによる課題解決が期待され、光学分野においては特に光相関演算の実装と高速性が注目されている。しかし、提案されている多くのシステムの相関速度は空間光変調器の表示速度と並列受光素子の速度に依存しており [23, 53, 60–65]、大規模データベースに基づく高速検索という観点においては光本来の高速性を活かしておらず、ビデオレート以上の光相関演算の高速性の実証はなされていなかった。

本研究では、コアキシャルホログラフィの光学系に基づき、フォトポリマーに体積ホログラムをシフト多重記録してアナログな照合データベースとする構成の光相関システムの高速性の実験的実証を目指す。一般に、VLC のマッチトフィルタは薄いホログラムを用いてマッチトフィルタリングを行う。このマッチトフィルタを体積ホログ

ラムに置き換えるとシフト不変ではない相関となる [80]. 一方で, 体積ホログラムを用いることによって, シフト不変性は減少するもののシフト選択性は向上する. そのため, 高密度な相関フィルタデータベースの記録やその高速回転による高速相関演算が実現可能となる. そこで, ホログラム記録条件を最適化し照合フィルタの高密度記録を実現することによる 100 Gbps 以上の高速相関演算実証を目指した.

本章では, 高速相関演算実証の前に, コアキシャルホログラフィック光相関システムの速度に関わる要素を整理する. まず, 2.2 節では, 体積ホログラムを照合のフィルタとする光相関演算システムの原理及びコアキシャル型の光相関器の基本構成について述べる. 2.3 節ではコアキシャルホログラフィック光相関システムの速度に関わる要素について整理し, 2.4 節で光相関演算・転送速度を定義した後に, 2.5 節で本章の結言を述べる.

## 2.2 ホログラフィック光相関原理

### 2.2.1 ホログラムメモリと光相関

2.1 節で述べたように, 本研究で構築した光相関演算システムは照合フィルタとしてフォトポリマーに記録したアナログ体積ホログラムを用いている. 一般にデータをホログラム記録するシステムとしては, ホログラフィック光相関システムよりもホログラフィックデータストレージシステムがよく知られている. ホログラフィックデータストレージシステムの記録方式は 2 光束干渉方式 [81] とコアキシャル方式 [82] の 2 つに大きく分けられる. 図 2.1 に 2 光束干渉方式とコアキシャル方式の光学系の概略を示す. ここで, 2 光束干渉方式は, 参照光と情報光の光軸が異なっており角度多重記録方式 [83], ペリストロフィック多重記録方式 [84], シフト多重記録方式 [85] などさまざまなホログラム記録方式が適用できるという利点がある. しかしながら, 光学系が複雑になりシステム全体が大きくなるという欠点がある. 一方, コアキシャル方式は参照光と情報光が同軸であり, 多くの場合, シフト多重記録によってホログラム記録を行う. 参照光と情報光が同軸であるため光学系が簡易になり調整が容易であるという特徴がある. また, 光源の波長ドリフト, 外乱 (振動など) 及びディスクの傾き等に対して安定性が高いことも特徴である. さらに, CD や DVD といった従来

の光ディスクのサーボ制御機構を転用し活かしやすいなど利点が多い [86, 87]. 本研究ではコアキシャルホログラフィの光学系に基づき, 相関フィルタとして用いるホログラムをディスク型のホログラムメディアにシフト多重記録して生成する. ホログラムデータストレージシステムにおいては情報光と参照光を干渉させてホログラムを作成し, データ読み出し時には参照光を照射することによって記録してある情報を読み出す. 一方, 光相関においてはホログラム記録時に情報光に情報を載せた物体面に照合を行いたい物体を配置することによって出力面でその相関を観測することが可能となる.

ここで, 表2.1にホログラフィックデータストレージシステムとホログラフィック光相関システムの違いについて簡単にまとめる. 記録時に情報光と参照光の干渉縞をホログラム記録する点は同じであるが, 再生時の入力に参照光を照射し出力として情報光部分の像を得るホログラフィックデータストレージシステムに対して, ホログラフィック光相関システムにおいては情報光入力し出力として参照光部分の合計の光強度の強弱を検出するのみで良いことが大きな違いである. このことは, システム構築の面での制約がホログラフィックデータストレージシステムと比べてホログラフィック光相関システムが弱くなる可能性を持っていると言える.

表 2.1: ホログラフィックデータストレージシステムとホログラフィック光相関システム.

	記録	再生時の入力	出力
ホログラフィックデータストレージシステム	情報光 + 参照光	参照光	情報光の像
ホログラフィック光相関システム	情報光 + 参照光	情報光	参照光の強度

### 2.2.2 コアキシャルホログラフィック光相関

体積ホログラムを用いる本研究のホログラフィック光相関演算システムでは相関演算のデータベースとなるホログラム記録, 2つ目が光相関演算 (ホログラム再生) の2つの過程に分けられる. ホログラム記録過程においてはレンズの前側焦点の同一面内に情報光と参照光を配置したデータベース用画像を配置し平行光を照射する. これに

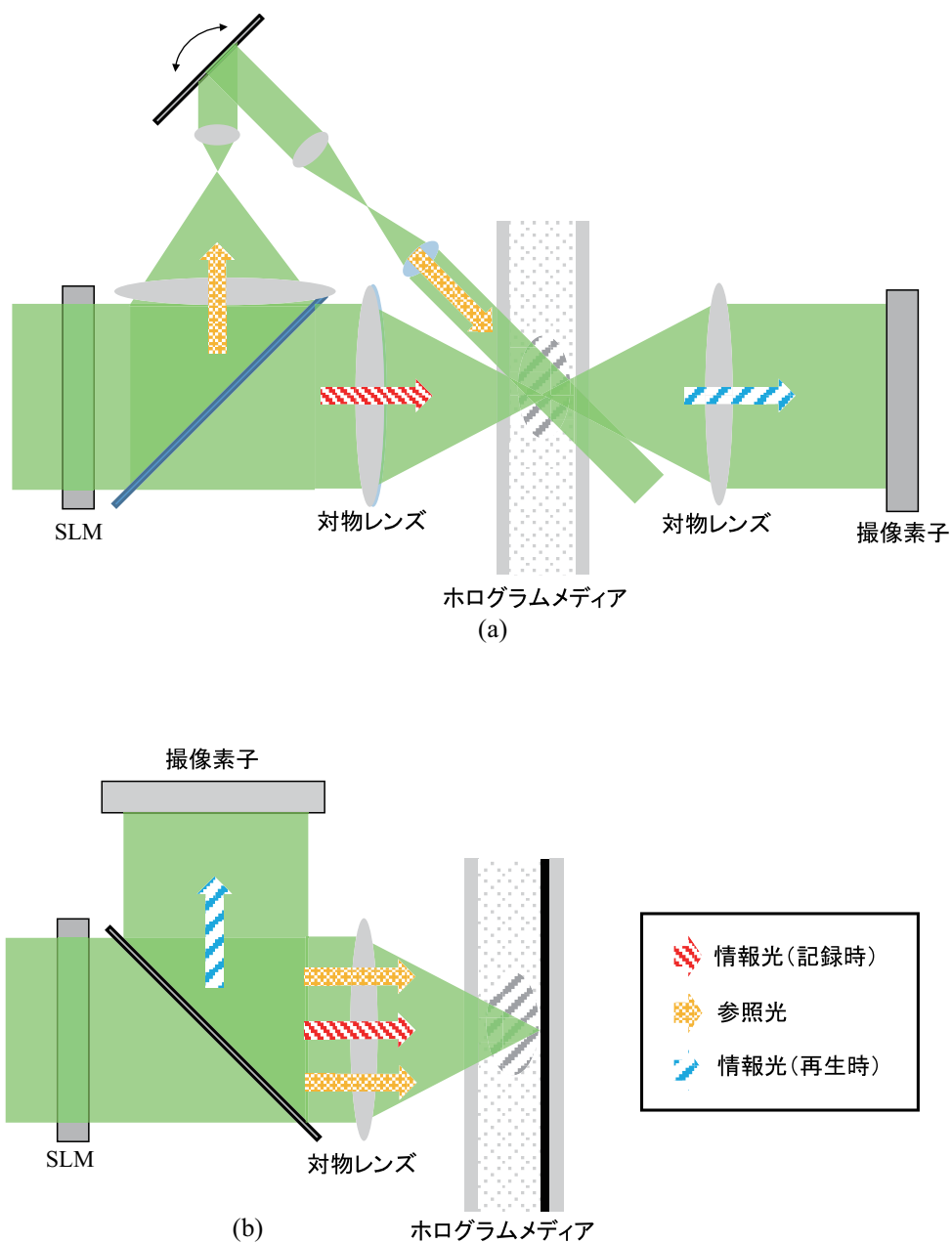


図 2.1: ホログラフィックデータストレージシステムの概略図 (a) 2 光束干渉方式 (b) コアキシャル方式.

より、情報光と参照光はレンズによってフーリエ変換され、情報光と参照光の干渉縞はホログラムメディアに記録される。このホログラムが光相関演算におけるフィルタとなる。光相関演算過程においては照合の入力として情報光のみをホログラムメディアに照射する。ホログラムに記録されたデータと入力データとの類似度によってホログラムからの回折光の強度が変わるため、この光強度を相関信号として検出する。図 2.2 にコアキシャルホログラフィック光相関演算システムの概略図を示す。

### 2.3 コアキシャルホログラフィック光相関システムの速度

前述のように、ホログラフィック光相関システムは予めホログラム記録してある照合のデータベースとなるホログラムをスキャンすることで照合を行うシステムである。光相関システムを用いたデータ照合時間について考えると、光相関器への入力、光相関器での照合、光相関器からの出力の 3 つに分類できる。コアキシャル光相関演算速度に関係する要素を表 2.2 にまとめた。光相関器への入力については、SLM へのデータ転送と SLM のデータ表示時間に依存し、これらは SLM ドライバのメモリ容量と SLM の構造によって決まる速度である。SLM へのデータ転送時間については、将来的には大容量のメモリを搭載した回路基板を搭載することによって高速化可能であり、また、SLM のデータ表示速度は一般に数百 ns から数 10 ms の時間を要する。光相関器からの出力は受光素子の応答速度と受光素子からのデータ転送で構成され、応答速度は受光素子の構造に依存し、相関結果出力のデータ転送はデータ入力時のデータ転送と同様に大容量のメモリを搭載した回路基板を搭載することによって光受光素子からの A/D 変換と処理メモリの容量の大量化と高速化が可能である。光相関器での照合時間については、ホログラムディスクの媒体や光学系等による様々な要素が複雑に絡み合っている。本節では、光相関器での照合時間について、大きくデータベース記録密度とデータベーススキャン速度に分けて整理する。

第2章 コアキシャルホログラフィック  
光相関演算システム

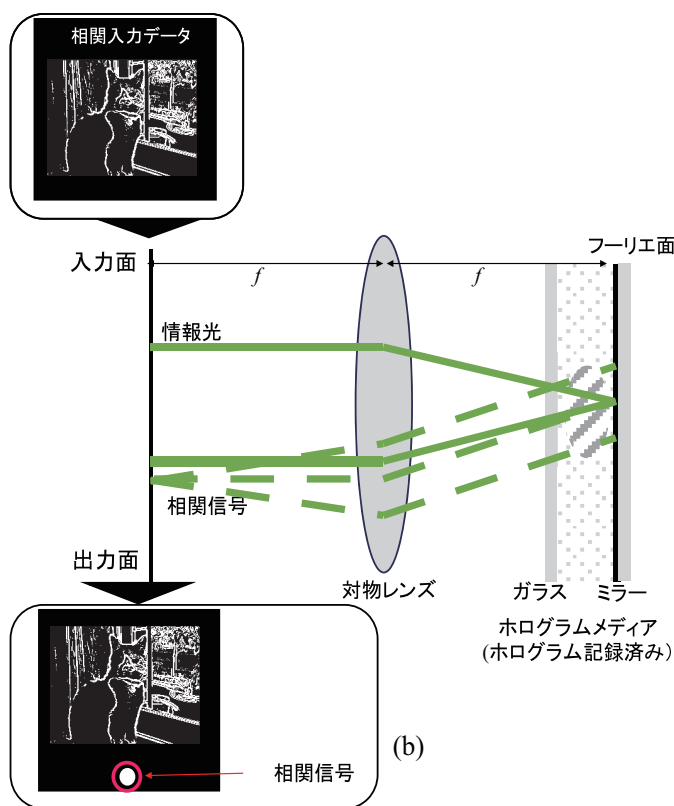
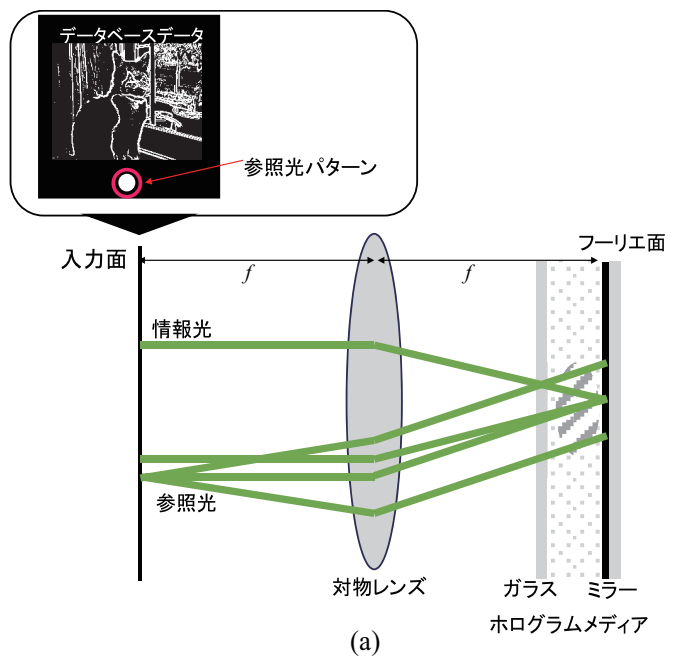


図 2.2: コアキシャルホログラフィック光相関演算システムの概略図 (a) 記録過程 (b) 相関演算過程.

表 2.2: コアキシャル光相関演算速度の要素.

項目		要素		既存デバイス	本研究
光相関器 への入力 (bit/s)	SLM へのデータ転送 (bit/s)	SLM ドライバの メモリ容量		—	256 MB
	SLM へのデータ表示 (bit/s)	SLM の構造		数十 ~ 1.7 kfps	1.1 kfps
光相関器 での照合 (bit/s)	データベース 記録密度 (bit/mm)	照合データ サイズ (bit)	SLM のサイズと ピクセルサイズ	数 ~ 十数 $\mu\text{m}$	10.7 $\mu\text{m}$
			対物レンズ (開口サイズ) と 光学系倍率	数 mm	3.8 mm 等倍
	ホログラム 記録密度 (1/mm)	記録媒体材料	—	—	
		フォーリエホログラム	波長 NA	532 nm 0.474	
		コアキシャルホログラフイ 光学系 (シフト選択性)	2 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	
データベース スキャン (mm/s)	ディスク 回転数 (rpm)	スピンドルの回転 アクチュエータの追従速度	~ 3 万 rpm ~ 2.5 万 rpm	900 rpm	
光相関器 からの出力 (bit/s)	受光素子の応答速度 (bit/s)	受光素子の構造		数 ns	0.78 ns
	受光素子からのデータ転送 (bit/s)	受光素子ドライバ のメモリ容量		—	2 MB

### 2.3.1 光相関データベース記録密度

まず、光相関データベース記録密度について述べる。光相関データベース記録密度は、ホログラムディスクの媒体や光学系等による様々な要素が複雑に絡み合って決まる。システム構成デバイスである SLM のサイズや対物レンズ（開口サイズ）及び光学系倍率に依存する照合データサイズ (bit) とホログラムの物理的限界である記録媒体材料、フーリエホログラム及びコアキシャルホログラフィ記録方式といった材料やホログラムに依存するホログラム記録密度 ( $1/\text{mm}^2$ ) についてそれぞれ述べていく。

#### 照合データサイズ (bit)

照合データサイズは SLM のサイズおよびピクセルサイズ、レンズの開口で決まる。SLM のサイズが対物レンズよりも大きい場合、SLM の有効領域は等倍の光学系ではレンズの直径によって決定され、SLM のサイズが対物レンズよりも小さい場合 SLM のサイズがデータサイズの制約となる。

ページ当たりのデータ容量  $C(\text{bit})$  は、レンズの開口部の面積によって決定され、

$$C \approx \frac{\pi(D/2)^2}{d_p^2} = \frac{\pi(NA)^2 f^2}{d_p^2} \quad (2.1)$$

となる [?]. ここで、 $D(\text{mm})$  は対物レンズの直径、 $NA$ 、 $f(\text{mm})$ 、 $d_p(\mu\text{m})$  はそれぞれ開口数、焦点距離、画素ピッチである。SLM から対物レンズの前側焦点までの間のリレー光学系を等倍ではなく  $1/a$  倍の縮小光学系とすると、

$$C \approx a^2 \cdot \frac{\pi(NA)^2 f^2}{d_p^2} \quad (2.2)$$

と表せる。しかしながら、この縮小パラメータは式2.7に示す1データページのスポットサイズにも影響し、また縮小光学系の持つ収差の影響なども考慮する必要が出てくるため、 $a$  の値は有限である。



ホログラム記録密度 ( $1/\text{mm}^2$ )

ホログラム記録密度はシフト多重記録シフト間隔の逆数であり、シフト多重記録シフト間隔に反比例して高密度となる。シフト多重記録シフト間隔は記録媒体材料、フーリエホログラム及びコアキシャルホログラフィ記録方式といった材料やホログラムに依存する。まず、シフト多重記録光相関データベースにおけるデータ記録密度の一般的な関係を示す [88]。ここで本研究では、ディスク状記録媒体を想定している。データベースとしてのホログラムディスクの面記録データベース密度  $\rho(\text{bit}/\text{mm}^2)$  は

$$\rho = \rho_H \cdot C \quad (2.3)$$

と定義可能である。ここで、 $\rho_H(\text{bit}/\text{mm}^2)$  はホログラムディスク上の面記録ホログラム密度、 $C(\text{bit})$  は前述した単一照合データ（一情報光）あたりのデータ量である。例えば、 $x, y$  方向のシフトピッチをそれぞれ  $\delta_x, \delta_y$  とすると、面記録ホログラム密度  $\rho_H(1/\text{mm}^2)$  は、

$$\rho_H = 1/(\delta_x \cdot \delta_y) \quad (2.4)$$

となり、ホログラムディスク上の同じ位置に多重化されたデータの数、 $m = S/(\delta_x \cdot \delta_y)$  となる。ここで、 $S$  はホログラムディスク上の単一データが占める面積である (図2.3)。

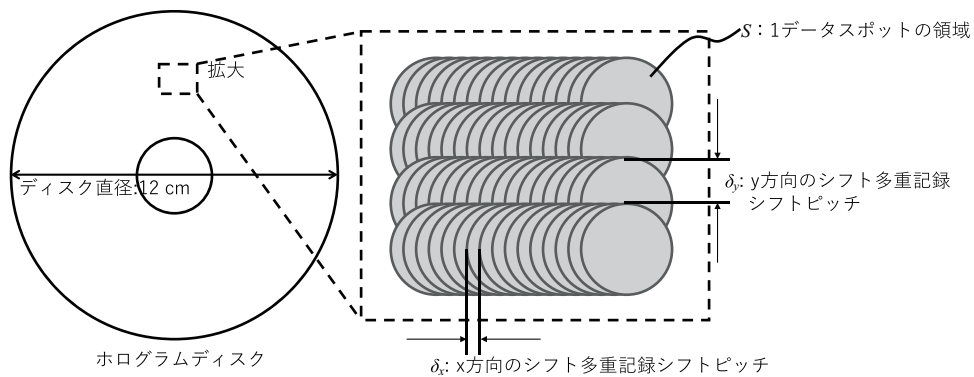


図 2.3: データベースの配置.

よって、データベースとしてのホログラムディスクの面記録データベース密度  $\rho(\text{bit}/\text{mm}^2)$

は,

$$\rho = m \cdot \frac{C}{S} = \frac{C}{\delta_x \delta_y} \quad (2.5)$$

とも表すことが可能であり, 上述した照合データサイズ  $C$  に加えてシフト多重記録シフト間隔 (特に速度について考える上ではディスク型メディアの接線方向でのシフト多重記録間隔である  $\delta_x$ ) がパラメタになる. 次に, このシフト多重記録シフト間隔がどのような物理量によって決まるかを記録媒体材料, フーリエホログラム及びコアキシャルホログラフィ記録方式の3つに分けて次に述べる.

### 1. 記録媒体の材料

フォトポリマーは参照光と物体光の干渉縞の明るい部分のモノマーがポリマー化し屈折率が高くなることによってホログラムを記録する. 記録媒体のダイナミックレンジが十分に大きくない場合, データベースホログラム記録密度は記録媒体によって制限される. これは, ページ多重数  $m$  が主に記録媒体の  $M/\#$  によって決定されるためである. フォトポリマーの場合には  $M/\#$  は,

$$M/\# = \sum_{i=1}^M \sqrt{\eta_i} \quad (2.6)$$

と定義可能である [89]. この式は,  $M$  ページのホログラムを記録することを考えており,  $\eta_i$  は書き込んだホログラムの  $i$  番目のページの回折効率である. また,  $M/\#$  だけでなく記録プロセス中の媒体の散乱, 収縮, 露光に対する屈折率変化の非線形性などの他の要因もデータベースホログラム記録密度に関係すると言われている [90] [91]. ページ多重数  $m$  の上限は, 記録媒体の特性だけで決まると一般に言われているが, 明らかにされていない点が多い. この媒体の感度は光記録反応のための光開始剤の性能で決まると言われている. 角度多重方式等では基本的にはメディアの厚みを厚くすると記憶容量が増えるが, コアキシャル光学系では参照光と情報光の配置設定によって干渉領域が決まるため, メディアの厚みを厚くすることだけでは高密度化は期待できない. また, 後述のコアキシャルホログラフィ光学系のシフト選択性の影響を受ける.

### 2. フーリエホログラム

次に, 情報光が対物レンズの焦点面の近くすなわちフーリエ面で記録される事

によるデータベースホログラム記録密度への影響を考える [88]. SLM がコヒーレントな平面波によって照射されるとき, SLM の単一ピクセルを通る回折光波は, Fraunhofer 領域にある. 1 ページ分の記録領域  $S(\text{mm}^2)$  は,

$$S \approx \pi \left( \frac{f\lambda}{d_p} \right)^2 \quad (2.7)$$

と表せる. ここで,  $f$ ,  $\lambda$ ,  $d_p$  はそれぞれ焦点距離, 波長, 画素ピッチであり, SLM 上のピクセル間の隙間領域を無視する近似をして考えている. したがって, 光相関データベースとしてのホログラムディスクの面記録データベース密度  $\rho(\text{bit}/\text{mm}^2)$  は,

$$\rho \approx m / \left( \frac{\lambda}{NA} \right)^2 \quad (2.8)$$

となり, フーリエホログラムの観点からのデータベース密度には波長に加えて NA がパラメタとなる.

3. コアキシャルホログラフィ光学系 (コアキシャルホログラムのシフト選択性)
 

記録媒体が理想的な特性でありページ多重数  $m$  を制限しない場合を考えると, データベース密度はコアキシャルホログラフィ光学系の主に 1 照合ページあたりのデータ容量の上限とシフト選択性によって制限される. コアキシャルホログラフィ光学系のホログラムディスクでは CD や DVD 等の従来光ディスクとは異なり, そのデータ容量は対物レンズの NA と光源の波長  $\lambda$  で決まるというよりはむしろ, 記録媒体のブラッグ選択性とブラッグ縮退性によって決定され, 数  $\mu\text{m}$  から 10  $\mu\text{m}$  程度のシフト選択性が報告されている [92].

以上のように, 光相関システムにおいては空間の 1 点が 1 bit を表し, デジタル情報がアナログな物理量に変換される. そのため, デジタル情報の単位と物理単位を組み合わせる必要がある.

### 2.3.2 データベーススキャン速度

照合時のデータベーススキャンはスピンドルモータの回転数とアクチュエータが追従可能なディスク回転数によって決まる. コアキシャルホログラフィの光学系は CD

やDVDおよびBlu-ray Discのスピンドルやアクチュエータとの互換性が高いことが特徴である。ディスク制御には高精度な制御が要求されるが、従来光ディスクの制御技術の転用によって高速回転でのディスク制御が可能である。

## 2.4 光相関演算・転送速度

前述のように光相関システムは情報の単位と物理の単位を融合して考える必要がある。以上の要素を踏まえ、本研究では

$$V = C \cdot \frac{2\pi r}{\delta_x} \cdot \frac{R}{60} \quad (2.9)$$

で示した  $V$  を光相関演算システムにおける光相関演算・転送速度 (bps) と呼ぶ [72]。ここで、 $C$  (bit) は1ページデータのデータサイズ、 $R$  (rpm) は回転数、 $d$  (mm) はシフト多重記録シフト間隔、 $r$  (mm) はディスク半径である。式中の定数60の単位は sec/min であり、 $R$  (rpm) の回転数を1秒あたりに変換している。一般的なコンピュータにおいて大規模データの照合を行う際には、まず2次記憶装置からRAM等の1次記憶メモリにデータを読み出し、CPUによって演算処理を行う。つまり、データ照合プロセスにおいて、照合処理だけでなくデータ転送も行われる。このことから、本研究においては光相関演算システムの照合速度をデータベースからのデータ転送も含めた速度として考え定義した。

## 2.5 結言

本章では、コアキシャルホログラフィック光相関システムに関わる要素を整理した。まず、ホログラフィックメモリシステムとホログラフィック光相関システムの比較とともに、体積ホログラムを照合のフィルタとする光相関演算システムの原理及びコアキシャル型の光相関器の基本構成について述べた。光相関システムを用いたデータ照合時間について光相関器への入力、光相関器での照合および光相関器からの出力の3つに分類し、コアキシャル光相関演算速度に関係する要素をまとめた。特に光相関器での照合時間については、ホログラムディスクの媒体や光学系等による様々な要素が

絡み合っており複雑であるが、大きくデータベース記録密度とデータベーススキャン速度に分けて整理した。最後に、本研究で高速化を推進する上で基準となる光相関演算・転送速度を情報単位と物理単位の組み合わせによって定義した。次章ではこの光相関演算・転送速度を基準に、高速化に向けて本研究での取り組みについて報告する。



## 第3章 ホログラフィック光相関システムの高速化

### 3.1 緒言

コアキシャルホログラフィの光学系に基づく光相関システムの速度に関する要素を第2章で示した。特に光相関器での照合時間については、ホログラムディスクの媒体や光学系等による様々な要素が絡み合っており複雑であるが、大きくデータベース記録密度とデータベーススキャン速度に分けてそれぞれの要素が検討可能である。本研究では、コアキシャルホログラフィの光学系に基づき、フォトポリマーに体積ホログラムをシフト多重記録してアナログな照合データベースとする構成の光相関器の高速性の実験的実証を目指しており、光相関器での照合速度に関しては照合データサイズ  $C$  (bit) とホログラム記録密度  $\rho_H$  (bit/mm<sup>2</sup>) によって定まるデータベース記録密度  $\rho$  (bit/mm<sup>2</sup>) とディスクの回転数  $R$  (rpm) によってきまるデータベーススキャン速度が要素となる。

本章では、高速化のためのハードウェア改良およびシミュレーション及び実験によってホログラム記録条件を最適化し照合フィルタの高密度記録を実現することによる 100 Gbps 以上の高速相関演算を実証する。3.2 節では、本研究の光相関システムの仕様をまとめ、3.3 節では本研究で高速化実証のために取り組む項目についてまとめる。3.4 節に於いては高速相関実験実証に向けてハードウェアの改良検証について述べる。また、光相関技術のシステム化に関して構築システムのシステムタイミングチャートとともに述べる。3.5 節では、相関フィルタの高密度記録に向けて、空間周波数分布制御による光エネルギー均一化記録手法構築および相関フィルタの高密度記録のための光エネルギーと相関信号の実験的評価結果を示す。3.6 節では、実際に高速光相関演算の実験実証を行った結果を述べる。3.7 節では、実験的に実証した光相

関演算の速度に関してデジタル相関演算と比較を行いその高速性を明確にした結果を示す。3.8節で2.3節で整理した項目について本研究での光相関システムの限界について精査すると共に、今後の展望について考察した後、3.9節で本章の結言を述べる。

## 3.2 ホログラフィック光相関システム

図3.1に本研究にて構築した光相関演算システムの光学系を示す。前述のように本システムは、コアキシャル型の光学系配置 [82,87,93] によって、SLM を1台のみ用いた光相関演算システムである。本システムには回転するディスクにページデータを記録するため Q-switched (Q-SW) レーザー、相関演算時にホログラムを連続再生するための CW レーザー及び記録時・相関演算時共に回転するディスクに対してフォーカシングやトラッキングを行うサーボ用の赤色レーザーの3つのレーザーを搭載した。ホログラム記録時には、SLM に記録用ページデータを表示し、パルスレーザーを照射することでホログラムディスクにホログラムを記録する。この時、ホログラム記録エネルギーは照射するパルス数によって制御する。ホログラムディスク上の同じスポットに光相関用フィルタを正確に作成する必要がある。光相関演算時には、SLM に再生用(相関演算の入力)のページデータを表示し、CW レーザーを連続的に照射する。ホログラムディスク上の光相関用フィルタを通過したのちに、光受光素子にて相関信号を検出する。



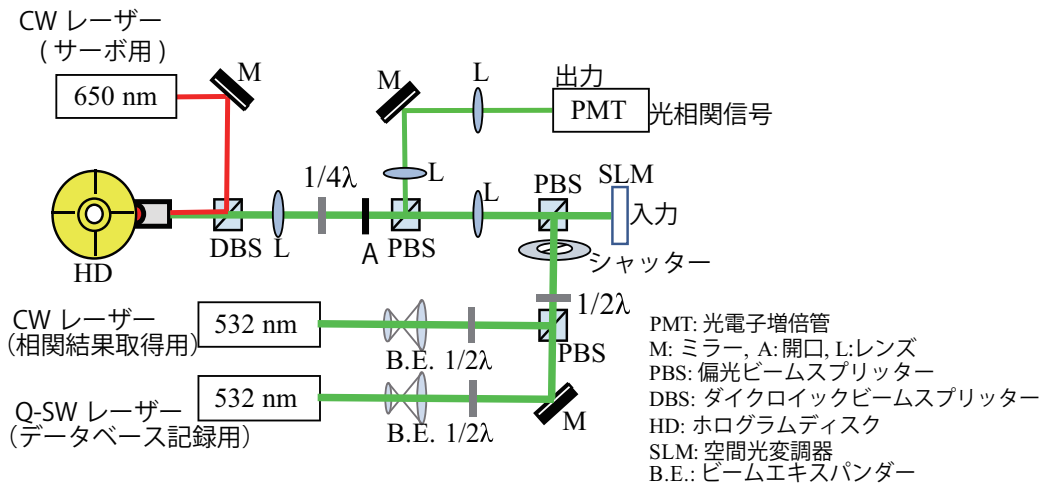


図 3.1: ホログラフィック光相関器光学系.

前述のように、本システムには3つのレーザーを搭載した。まず、回転するディスクにページデータをホログラム記録するために波長 532 nm の Q-switched (Q-SW) レーザー (Spectra-Physics Inc., Navigator II J80-YHP70) 搭載した。ホログラム記録はこのパルスレーザーによって実行するため、ホログラム記録エネルギーは照射するパルス数によって制御することができる。また、高速に回転するディスクに正確にホログラムを記録する点においては、用いる Q-SW パルスレーザーのパルス幅が重要となる。これは、パルス幅が長いと回転するディスクの広い範囲に1回の照射で記録されてしまうためである。つまり、高密度大容量記録のためにはパルス幅は短いほうがよく、シフト多重記録間隔に対して、記録される領域の伸びが十分に小さいことが求められる。本システムの制御の点においては、パルス幅 70 ns の Q-SW パルスレーザーを搭載している。たとえば、ディスクの最外周 (半径 55.0 mm) に記録することを考えると、パルス幅 70 ns より、ディスク回転数 900 rpm の時、1パルス間にディスクが回転する距離は約 0.36  $\mu\text{m}$  であり、シフト多重記録シフト間隔に対して十分小さく実現できる。次に、波長 532 nm の CW レーザー (Showa Optronics Co., Ltd., H6780-01) は相関演算時に連続して相関信号を取得し続けるために用いるレーザーである。また、波長 650 nm の赤色レーザーはサーボ用であり、記録時・相関演算時共に回転するディスクに対してフォーカシングやトラッキングを行い高精度記録・相関を実現するため

に搭載した。

本光相関演算システムにおいて、ホログラムディスクは相関フィルタを記憶する媒体である。本研究で主に用いたホログラムディスクの概形と断面図を図3.2に示す。本研

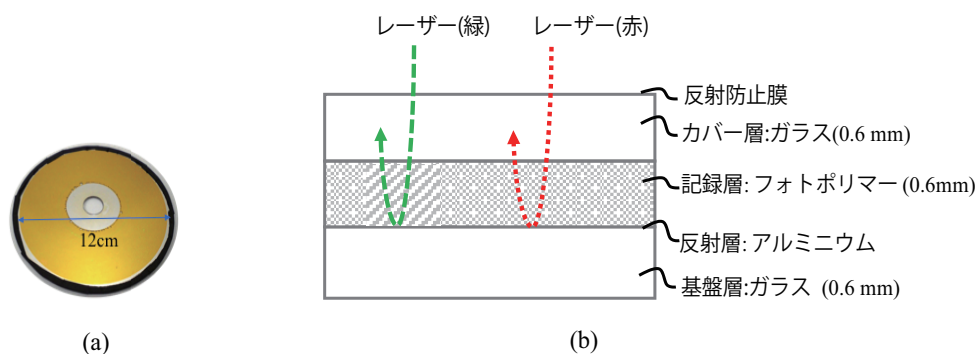


図 3.2: ホログラムディスク (a) 概形 (b) 断面図。

究においてはホログラム記録媒体としてフォトポリマーを採用した。ホログラフィック光相関システムにおけるフィルタ用の記録媒体としては、従来ホログラフィックデータストレージシステム用に研究開発されてきたものを転用できる。従来、ホログラフィックデータストレージシステムのメディア材料には  $\text{LiNbO}_3$  に代表される結晶 [94] やフォトポリマー [95, 96] などが用いられてきた。近年ではモノマー中に有機無機ナノ微粒子を分散させたナノ微粒子ポリマーコンポジット材料なども提案されてきている [97]。フォトポリマーは体積ホログラムを容易に作成できるため、高い回折効率が得られるメリットがあるが実用材料としては研究開発段階にある。ホログラフィックデータストレージのメディアに要求される条件は記録感度が高いこと、屈折率変調が高いこと、体積収縮が低いこと、保存性が良いことなどであり、材料の要求やメディアへの要求値の議論もされている [98]。本研究で用いたフォトポリマーは緑の光に強い感度を持つため、波長  $532 \text{ nm}$  のレーザーをホログラム記録・再生に用いた。一方、赤の光には感度を持たないため赤レーザーは記録材料に反応することなくサーボ調節として用いることが可能である。このサーボ用レーザーによって、回転するディスクの偏芯・面ブレなどを検知し、常にフォーカスの合った状態を持続することなどが可能である。また、本システムはコアキシャルホログラフィの光学系を採用しているため、第4章で述べるように、ディスク基板の構造を変えることによって、

### 3.3 高速化に向けた本研究での実施項目

フォーカシング制御だけでなく、トラッキング制御も可能である。また、前述のように、ホログラフィックデータストレージシステムの場合、記録されたデータを像として読み出すために2次元の受光素子を採用する一方で、ホログラフィック光相関システムにおいては、出力面における積分された光強度を検出できればよく、その像を解像する必要はない。そのため、2次元撮像素子より高速に光強度を検出することが可能なシングルピクセルの受光素子を用いることができる(表2.1)。この点も本ホログラフィック光相関システムが高速に相関演算を実行するための特徴の一つである。本システムにおいては受光素子として光電子増倍管(PMT: Photomultiplier)を採用した。表3.1に本研究の光相関システムの仕様をまとめる。

表 3.1: 本研究の光相関システムの仕様。

要素デバイス	概要(型番)
レーザー	Q-SW レーザー (Spectra-Physics Inc., Navigator II J80-YHP70) CW レーザー (Showa Optronics Co., Ltd., H6780-01)
リレー光学系倍率	等倍
SLM	強誘電性液晶 (Displaytech Inc., SLM-1216-1)
記録媒体	フォトポリマー
受光素子	光電子増倍管 (浜松ホトニクス, H6780-01)

### 3.3 高速化に向けた本研究での実施項目

光相関器での照合時間については、ホログラムディスクの媒体や光学系等による様々な要素が絡み合っており複雑であることは2.3節で述べた。本論文では大きくデータベース記録密度とデータベーススキャン速度に分けてそれぞれの要素を検討してきた。光相関器での照合速度に関しては照合データサイズ  $C$  (bit) とホログラム記録密度  $\rho_H$  (bit/mm<sup>2</sup>) によって定まるデータベース記録密度  $\rho$  (bit/mm<sup>2</sup>) とディスクの回転数  $R$  (rpm) によって定まるデータベーススキャン速度が要素となる。表3.2に式2.9中のそれぞれのパラメーターに関連する要素と、本研究で高速化のために実施した項目についてまとめる。

表 3.2: 光相関演算高速化のパラメタと本研究での実施項目.

パラメタ	本研究での実施項目	該当箇所
データサイズ $C$ (bit)	高精細 SLM の導入	3.4.1
ディスク回転数 $R$ (rpm)	高速アクチュエータの試作	3.4.2
シフト多重記録シフト間隔 $\delta_x$ ( $\mu\text{m}$ )	光エネルギー分布評価とシフト多重記録間隔の実験的最適化	3.5

### 3.4 ハードウェア改良

#### 3.4.1 高精細空間光変調器の導入

電子的なデジタルデータを光に変換するデバイスとして SLM がある. 図3.3に SLM の基本的機能を示す.

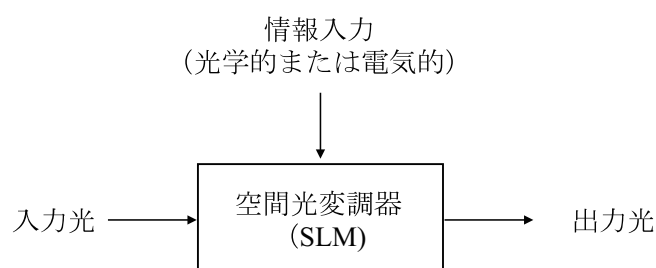


図 3.3: SLM の基本的機能.

情報を光学的又は電氣的に SLM に入力することにより, 入力光に情報を載せる役割を SLM は担う. 本光相関演算システムにおいては, SLM には強誘電性液晶 (FLCOS: Ferroelectric Liquid Crystal on Silicon Display, Displaytech Inc., SLM-1216-1) を採用した. 従来の光相関演算システムにおいては, digital micromirror device (DMD) を搭載していた [23]. 本システム構築にあたり, SLM を DMD から FLCOS に変更した事によって, 新規に搭載した FLCOS のピクセルサイズが  $10.7 \mu\text{m}$  と従来の DMD に比べて小さくなり, 式2.1に示した 1 スポットに記録可能なデータ量  $C$  が 1.64 倍に向上した. 表3.3に従来と本研究の SLM の比較を示す. また, FLCOS は, シリコン反射板と FLC およびガラスカバーで構成されており, シリコン反射板に供給する電圧をコントロールすることで電子バイナリデータが与えられる. したがって, 本 SLM の変

更は、記録可能なデータ量の増大だけでなく、FLCOS が全反射型のデバイスであることで再生互換性の確保と光学系の簡易化も同時に達成した。

表 3.3: SLM の比較.

	従来システム	本研究
種類	Digital Micromirror Device (DMD)	Ferroelectric Liquid Crystal on Silicon Display (FLCOS)
型番	Texas Instruments, Inc. DMD Discovery™1000	Displaytech Inc. SLM-1216-1
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 45 度入射. 光学系が大きい</li> <li>・ 個体差が大きい</li> <li>・ 光利用効率が高くない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 反射型. 光学系がシンプル</li> <li>・ 液晶貼り付防止のため長時間の状態維持が困難</li> </ul>
階調	2 値	2 値
ピクセル 間隔	13.68 $\mu\text{m}$	10.7 $\mu\text{m}$

### 3.4.2 高速アクチュエータの試作

ホログラムディスクにおいては、従来の CD や DVD などのピット読み出しの光ディスクとは異なり像を取り扱うため、その像のズレ等の対策のために対物レンズだけでなく、立ち上げミラーも一緒に動かす方式が多く取り入れられる。本研究においてもその方式を導入することとした。その結果、従来のホログラフィックデータストレージシステム用のアクチュエータは組み合わせレンズ [99] となり、その組み合わせレンズの重さによって安定した追従は低速回転のディスクに限られていた。本研究においては、ホログラフィックデータストレージシステムが像を取得するシステムであるのに対して、ホログラフィック光相関システムが回折してきた参照光の合計光強度を検出するのみで良いことに着目した。従来の組み合わせレンズではなく CD 用の単レンズ (Edmund Optics Inc., 48137, 0.62 NA, 4.03 FL) を搭載し、光相関演算システム専用に設計した高速回転に追従可能なアクチュエータを試作・導入した。従来の組み合わせレンズを単レンズに入れ替え対物レンズを軽量化したことにより、アクチュエータは従来の約 20 倍の 1200 rpm で回転するディスクに追従可能となった。また、3.6 節や 5.2.3 項などの実験結果に示すように、試作したアクチュエータによって光相関演算が実行可能であることが確かめられ、組み合わせレンズを敢えて使わなくても光相関

演算が可能であることを実験的に確認した。ここで、本研究でアクチュエータに搭載した対物レンズ（Edmund Optics 社製 NT48-137）の評価を行った結果を示す。このレンズは、CD用の単レンズとして設計されたガラスレンズであり、従来の光ディスク用の対物レンズは球面収差やコマ収差が良好に補正されるアプラナティック条件を満たすように設計されている非球面レンズである。球面収差や軸外のコマ収差が良好に補正されることからホログラム記録にも使用可能であると考え、ホログラフィック光相関システムへの搭載を決めた。本研究においては、像高を光軸中心、光軸中心から 0.400 mm, 0.800 mm, 1.200 mm および 1.590 mm に設定してシミュレーションを用いて評価した。図3.4にシミュレーションの構成と光線追跡によって像面湾曲を確認した結果を示す。

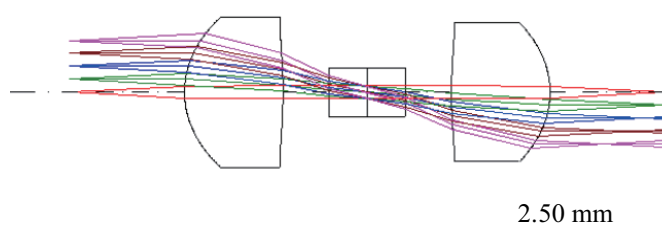


図 3.4: レンズ検証シミュレーションの構成。

次に、通常の光学系の光線追跡的な評価はインコヒーレント照明を前提にするが、本システムにおいてはレーザー光を広げた平面波で照明するため、コヒーレント照明としても解析を行った。使用する SLM の画素ピッチが 0.0107 mm であるため、評価する最高周波数は 46.7 lp/mm とし、それぞれの像高の位置に 5 本線を配置するシミュレーションとした。シミュレーションの構成は図3.4と同じであり、図3.5に結果を示す。

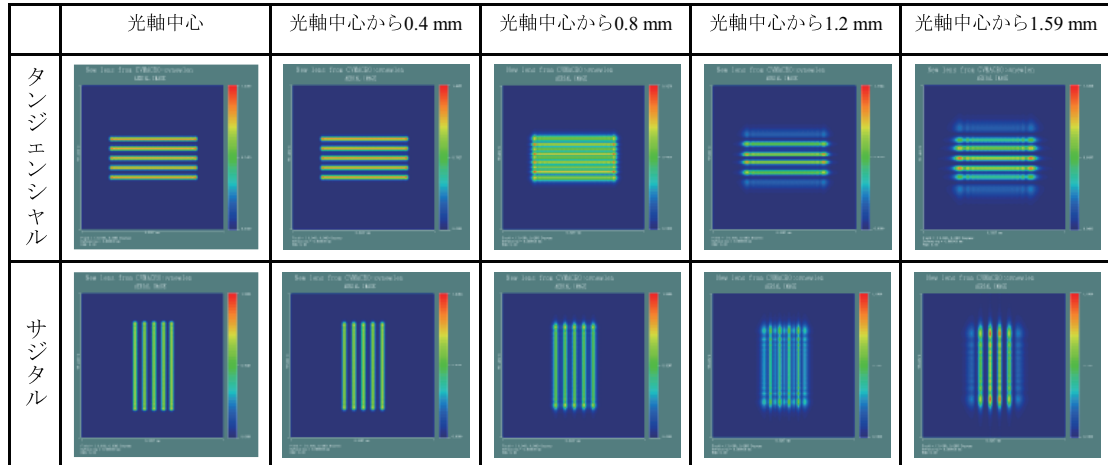


図 3.5: レンズのコヒーレント解析の結果.

ここで、入力データが  $180 \times 240$  pixel のとき、光軸中心から最も離れた情報光の位置は光軸中心から 1.2 mm の位置である。本シミュレーション結果では上手く結像できていない結果となった。一方で、3.6節で示す実験結果の様に、レンズの収差が大きい領域も用いても光相関演算が達成できる結果となることを確認している。したがって、対物レンズの持つ収差は光相関演算の精度への影響は無いとは言えないものの、本研究で光相関システムに搭載した CD 用の対物レンズは光相関演算において利用可能であることが確かめられた。これは、光相関演算システムがホログラフィックデータストレージシステムと異なり、像としてピクセル単位での出力結果が不要なことが大きな要因であると考えられる。以上のことから、光相関演算システムにおける対物レンズへの制約はホログラフィックデータストレージよりも小さいこと、従来の組レンズを使わずとも光相関演算が可能なが確かめられ、従来 300 rpm のディスク回転数 [71] までしか追従可能でなかったディスク回転数に対するアクチュエータの追従速度を 1200 rpm まで向上することに成功した。

### 3.4.3 ホログラフィック光相関の制御系の自動化

図3.6に本研究で構築した光相関演算システムのシステム構成を示す。本光相関演算システムは制御用のコンピュータ、FLCOS の表示タイミングに合わせて CW レーザーを照射するためのシャッターとそのコントローラ、FLCOS とそのコントローラ、

### 第3章 ホログラフィック光関連システムの高速化

Q-SW パルスレーザーとそのコントローラ、及びホログラフィック光ディスクとアクチュエータからなるディスクユニットと本体ユニットとメカニカルユニットから成るディスクユニットコントローラで構成される。これらはディスクの回転を基準に同期するシステムとした。

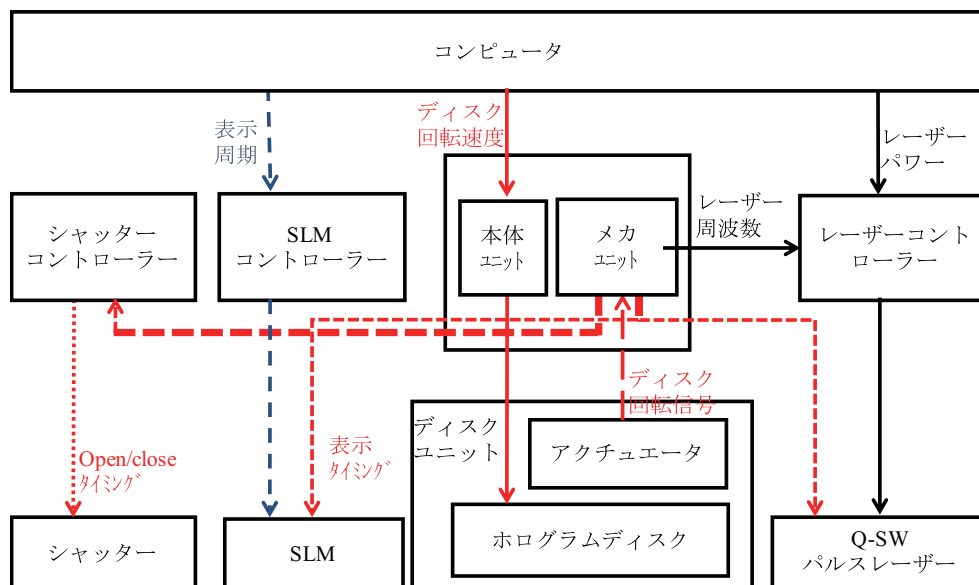


図 3.6: システム構成図.

さらに、従来それぞれ独立したソフトウェアで動作していた各デバイスを統合制御可能なソフトウェアを構築することでシステムの自動化を実現した。システムの自動化に当たり、測定したシステムタイムチャートを図3.7に示す。このように、ディスクの回転を基準にしたトリガ信号を用いて画像表示素子である FLCOS とシャッターを同期している。ここで、図3.7に示したタイムチャートはディスク回転数 900 rpm の時のものである。



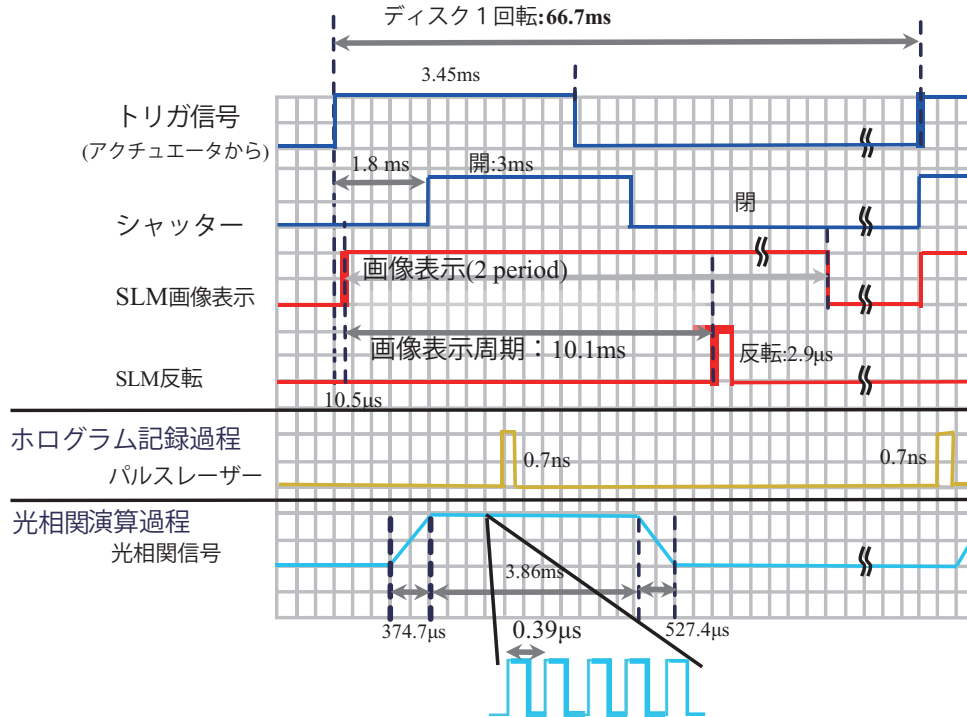


図 3.7: システムタイムチャート.

ここで、本研究において構築した光相関演算システムは、照合時の高速性を重視したシステムであるが、大量のホログラムを記録する必要のある本システムにおいてホログラム記録に費やされる時間も無視できないことも述べておく。本システムにおける照合のデータベースは、SLM に表示した 2 次元データにパルスレーザーによって平行光を照射して光信号に変換し、照合のフィルタとしてホログラム記録される。この時、ホログラム記録にかかる時間は、SLM のフレームレイト、露光に必要なレーザーパルス数、ディスク回転数に比例する。記録されるホログラムは、例えばシフト多重記録シフト間隔が、円周方向に  $2\ \mu\text{m}$  間隔、半径方向に  $10\ \mu\text{m}$  間隔であるとき、1 ディスクに  $2.7\ \text{TB}$  程度の大容量データを記録可能であるが、記録ホログラム数は  $5 \times 10^8$  枚にも及ぶことになる。そのため、本研究においては、高密度記録について検証する際に、同時に 1 パルス記録でのデータベース作製の可能性を探る。

### 3.5 光エネルギー分布の評価と実験的最適化

フォトポリマーを用いたホログラムは、情報光と参照光の干渉によって生じた光強度の空間分布に従い、モノマーが光重合しポリマーが生成される。このポリマーが凝集することにより、干渉縞を屈折率格子として記録することが出来る。一般に、ホログラム記録媒体での情報光の光強度分布に偏りがあると局所的な収縮が生じてしまうことなどによって、ホログラム記録媒体の記録密度を損なう。そのため、均質なフーリエスペクトルを得るためのページデータ設計が検討されている [100–103]。例えば、すりガラスを用いてランダムな波面を生成したり [100]、相関の少ない位相マスクを作成する手法などが提案されている。また、特定のランダム位相マスクを利用することによる暗号化も提案されている [101,102]。しかし、これまでの手法においては、SLMを利用して高密度記録を実現する手法はコストが多くかかる欠点があり [103]、ランダム位相マスクを用いるシステムやすりガラスを用いるシステムはセキュリティ面での利点があるものの検索システムとしては再現性の面で欠点があった。本研究では光の高速性と並列性を活かした検索システムにおいて、多重度の向上による高速転送速度化・高精度化に向けて、追加のデバイスを用いずに画像のみでの高精度化を目指した。本節では、ホログラム記録シミュレーションに基づく情報光設計の評価と、本システムにおけるホログラムの高密度化に関して実験によってその限界を考察した結果について述べていく。

#### 3.5.1 データベース記録シミュレーション

ページデータとホログラム記録条件の最適化について述べる前に、本節では本研究で用いたデータベース記録シミュレーションについて述べる。ここでは、計算量・計算機メモリ使用量など計算コストの少ないスカラー回折理論に基づく方法を用いて体積ホログラムのシミュレーションを構築し検証を行った。図3.8に示すのは本研究で用いたシミュレーションのモデルである。入力 (SLM) 面、フーリエ変換レンズ2つ、像面の関係が  $4f$  配置となる光学系モデルとなっている。また、シミュレーションにおいても実験時と同様に、ホログラム記録過程と光相関演算過程に分けられる。ホログラム記録過程での記録媒体上での光強度分布に注目し、記録媒体の3次元構造を複数

の層を重ねるモデルで表現し，コアキシャル型ホログラフィック光学系に基づく光相関演算システムにおけるページデータについて検証を行った。

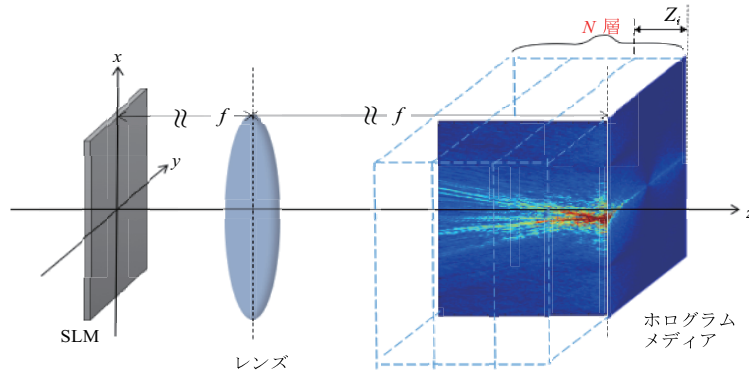


図 3.8: データベース記録シミュレーションモデル。

ここで，シミュレーションの手順について述べる．図3.9にフローチャートを示す．

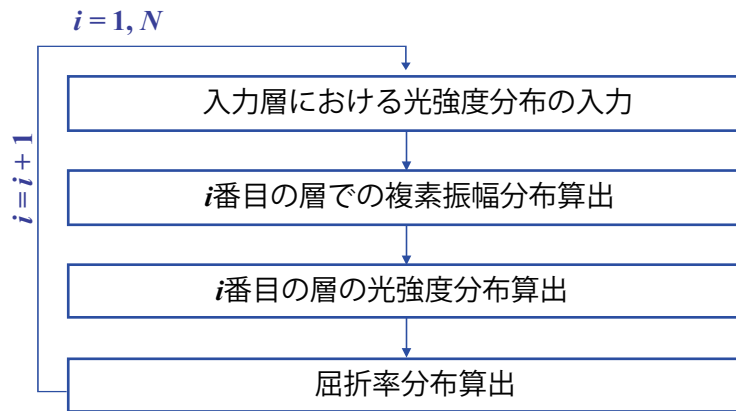


図 3.9: データベース記録シミュレーションフローチャート。

ホログラムメディアを光軸方向に  $N$  枚の層に分割し， $i$  番目の層のデフォーカス量を考慮したフーリエ変換 [15] によってホログラム記録の様子を計算するシミュレーションを構築した．SLM に表示されたページデータに平行光を入射し，フーリエ変換レンズを通過した後のホログラム媒体のレイヤー上での複素振幅分布は，デフォーカ

スを考慮した FFT を用いると,

$$U_m(v_x, v_y, z_i) = \iint U_{\text{SLM}} \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} z_i (x^2 + y^2) / f^2\right] \cdot \exp[j2\pi(v_x x + v_y y)] dv_x dv_y \quad (3.1)$$

と表される. ここで,  $x, y$  は入力面における座標,  $f$  はフーリエ変換レンズの焦点距離,  $z_i$  は焦点面と  $i$  番目の層の距離 (デフォーカス量) である. 式 3.1 の複素振幅分布より,

$$I_m(v_x, v_y, z_i) = |U_m(v_x, v_y, z_i)|^2 \quad (3.2)$$

として  $i$  番目の層の強度分布が求まる. この強度分布がホログラムを形成し, ホログラムとして屈折率分布に記録される. ここでは, ホログラム記録による媒体の屈折率変化は照射される干渉縞の光強度に比例すると仮定し, 下記の式で強度分布を屈折率分布に変換した.

$$n(v_x, v_y, z_i) = n_0 + n_1 I_m(v_x, v_y, z_i) \quad (3.3)$$

ここで,  $n_0$  は媒体が持つ屈折率,  $n_1$  は比例定数である. 比例定数は今回は  $n_1 = \frac{\Delta n}{I_{\text{MAX}}}$  として干渉縞光強度の最大値で規格化した. この屈折率分布から, ホログラムの屈折率による位相変化の分布は,

$$B_m(v_x, v_y, z_i) = \exp[(2\pi j / \lambda) dn] \quad (3.4)$$

と求められ, 算出した位相分布の各層のデータを保存する.

### 3.5.2 空間周波数分布に基づく光エネルギー分布評価

ホログラフィックデータストレージシステムにおいてデータを記録する際の符号化手法に (2, 9) 変調や (3, 16) 変調がある [104]. 前者は  $3 \times 3$  の 9 ピクセルの内の 2 ピクセルを光らせる 36 通りのパターンに対して 5 ビット (00000 から 11111) を割り当てる符号化手法である. 後者は  $4 \times 4$  の 16 ピクセル内の 3 ピクセルを光らせる 560 通りのパターンに対して 8 ビットを割り当てる符号化手法である. これらの手法でデータの符号化を行うと, いかなる入力データにおいてもデータの持つ光エネルギーは均一となり, また, 周波数分布も高い確率で均一となる. しかしながら, 本符号化方法を用

いて光相関演算を行うと、複数ビット単位で変調されてしまうため完全な一致データ以外のデータを類似したデータと判断することが難しい。そこで、本研究においては、ホログラフィックメモリシステムの(3, 16)変調でのホワイトレイトとほぼ等しいホワイトレイト 20%に光エネルギーを統一することとし、また、照合に適した光相関用符号化手法を構築することとした。しかしながら、照合に特化したデータとして、例えば特定サイズの画像に対してエッジ抽出およびホワイトレイト 20%となるような2値化処理を施した画像を光相関用のページデータとして用意すると、異なる入力データが入力されたときに生成されるページデータの持つ周波数分布が大きく異なってしまう。これは、記録媒体の局所的な消費等が発生し、データベースの記録密度の低下を招く課題がある。そこで、前節で述べたシミュレーションによって出力されるメディア上の空間周波数分布に基づき、 $i$ 番目の層の強度分布を全ての層について算出し、下式によって分散を算出することで評価することを提案する。

$$\mu(x, y) = \frac{1}{N_p} \sum_{n_p=1}^{N_p} I_i(x, y) \quad (3.5)$$

$$\sigma^2(x, y) = \frac{1}{N_p} \sum_{n_p=1}^{N_p} (I_i(x, y) - \mu(x, y))^2 \quad (3.6)$$

ここで、 $I_i(x, y)$  は記録媒体断面での光強度、 $N_p$  は算出した光強度分布のデータサイズである。異なる入力データが入力されたときに作成されるページデータそれぞれについて上記  $\sigma^2(x, y)$  を算出しそれらの分散算出することで、作られる空間周波数分布の入力画像間分散を評価することで、より均一な情報光設計を実現できる。本研究においては、動画像データベースの符号化手法を検討し、動画像を円形のランダム画像に符号化する手法を構築した。本符号化手法についての詳細は第5章にて述べる。

### 3.5.3 実験による高密度化の考察

次に、この情報光を用いて光相関記録再生実験を行い、そこから得られる自己相関信号と相互相関信号を基に情報光を評価する指標を定義する。この評価のための指標

として, Similarity Rate (SR)

$$SR = 10\log(S_{ac}/S_{cc}) \quad (3.7)$$

を定義する [72]. ここで自己相関信号  $S_{ac}$ , 相互相関信号  $S_{cc}$  である. 本研究において光相関実験から算出される SR は, 光相関信号強度値として計測される自己相関信号と相互相関信号を用いて算出した. 光相関における自己相関信号と相互相関信号の例を図3.10に示す.

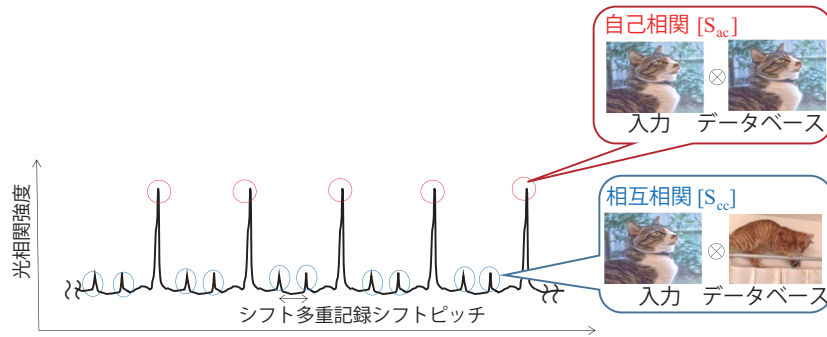


図 3.10: 光相関における自己相関信号と相互相関信号の例.

SR が高ければ高いほど, 類似データを検出する用途において自己相関信号が他の相互相関信号よりも十分に高く現れ, その検出が容易であることを意味する. ここでは, シフト多重記録シフト間隔を設定するために 1 スポット記録されたホログラムから得られた相関信号光強度分布を評価した. 相関演算用に前処理を施した情報光の画像 1 枚, 情報光に参照光パターンを付加したホログラム記録用の画像 1 枚を利用し, 半値幅と  $1/e^2$  幅を評価した. 図3.11(a)に示すように, 再生信号の  $1/e^2$  幅  $2.39 \mu\text{m}$ , 半値幅  $1.05 \mu\text{m}$  となったため, シフト多重記録シフト間隔を  $2.0 \mu\text{m}$  を本システムの限界と考えた.

ここで, 光相関演算における多重ピッチを評価するために  $q_1, q_2$  2 つのパターンの類似度を

$$S_s = (q_1 \cdot q_2) / (\|q_1\| \cdot \|q_2\|) \quad (3.8)$$

と定義する. パターンはあらかじめ特徴量抽出と 2 値化の前処理が施された画像であり, 自己相関での値は 1 と計算できる. 前述の SR (式3.7) を利用し, デジタル演算

結果光相関演算結果とを比較することで記録パルス数とシフト多重間隔の最適な条件を算出した。記録パルス数の最適条件を算出するためにパルス数の変化に加えて、30%、50%、70%のNDフィルタを挿入して1パルス以下の光エネルギーを変化させた。さらに、シフト多重間隔の許容を算出するために、2.3 μmと5.4 μmの2つの異なるシフト多重間隔によるSRをプロットした。ここで、SRの算出には全15の自己相関信号と相互相関信号を用いた。ディスク回転数600 rpmとした。図3.11(b)に横軸にパルス数、縦軸にSRのグラフを示す。

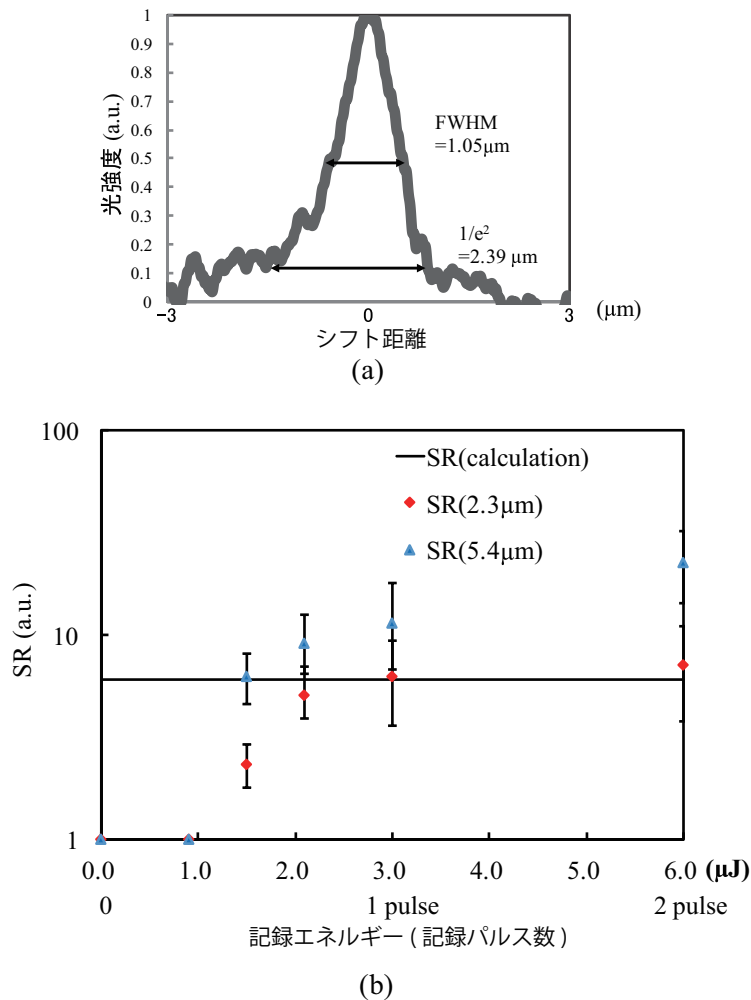


図 3.11: (a)1 スポット自己相関信号, (b)記録エネルギーと Similarity Rate(SR)

5.2 μm の記録間隔では 0.5 パルスの記録エネルギーで計算による SR を上回ること

が図3.11 (b) からわかる。一方、 $2.3\ \mu\text{m}$  の多重記録間隔では1パルスの多重記録エネルギーで計算によるSRを上回った。この結果より、シフト多重間隔 $2\ \mu\text{m}$ 以上、記録パルス数1パルスでの条件を利用することとした。

### 3.6 高速光相関演算の実験実証

以上のように決定した条件を元に半径 $52.0\ \text{mm}$ 、回転数 $900\ \text{rpm}$ 、シフト多重記録シフト間隔 $2\ \mu\text{m}$ においてページデータ100枚のシフト多重記録実験結果を図3.12に示す。図3.12はdata 1を100回シフト多重記録し、同一のデータcode 1を入力すると100個の自己相関信号が検出された(図3.12)。このように、ピーク間隔 $0.4\ \mu\text{s}$ を達成し $2.4 \times 10^6\ \text{fps}$ という超高速光相関を実証した。これを転送速度(式2.9)に換算すると $143\ \text{Gbps}$ 相当となった[73]。このように、照合したい情報をバイナリの特徴量に変換するという前処理が必要ではあるものの、バイナリデータの照合において超高速に演算可能であることを実証した。

表 3.4: 実験条件

データサイズ (bit)	$280 \times 210$
記録半径 (mm)	52.0
ディスク回転数 (rpm)	900
シフト多重記録間隔 ( $\mu\text{m}$ )	2



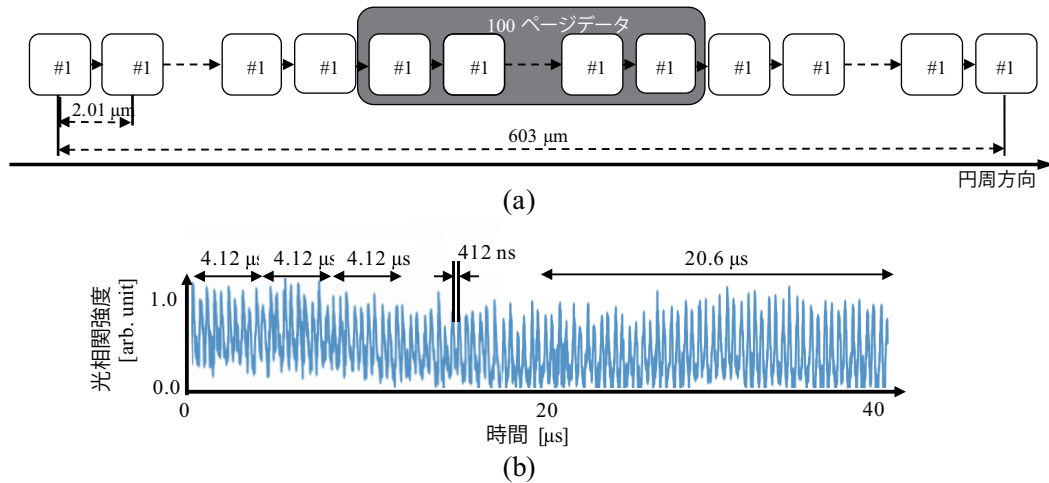


図 3.12: 高速光相関演算実験結果. (a) データベース作成時のシーケンス, (b)100 個の自己相関信号 (41 μs).

### 3.7 デジタル相関との速度比較

光相関演算システムの高速性の実験実証についてここまで述べた。ここで、光相関演算の有効活用のためにはデジタルサーバーによる照合との比較が重要となる。しかしながら、近年の半導体デバイスの発展が著しい中で、光相関演算の高速性についてをデジタル演算と実験的に比較を行った報告はされていない。そこで、本節では、本研究で実証した 143 Gbps での光相関演算について、デジタル照合と比較する。これまでに、デジタルコンピュータにおいて様々な高速化に向けた提案がなされている。例えば、二分探索法などの分割統治法 [106] やポップカウントを用いる方法 [107] など照合時のアルゴリズムによって高速化する手法の提案が行われている。前者は効率よく探索することによる高速化のアプローチである。後者は機械語ベースで用意されていたり、あらかじめ計算を表として用意しておく等によって照合を高速化するアプローチである [107, 108]。従来の CPU による計算において、演算速度の高速化は CPU 並列化やメモリの増設により可能ではあるものの、演算コストとストレージコストが同時に上昇する。図3.13に本節における速度比較のための画像照合の流れとその中で光相関の位置づけを示す。ここで、画像照合の流れについて述べる。

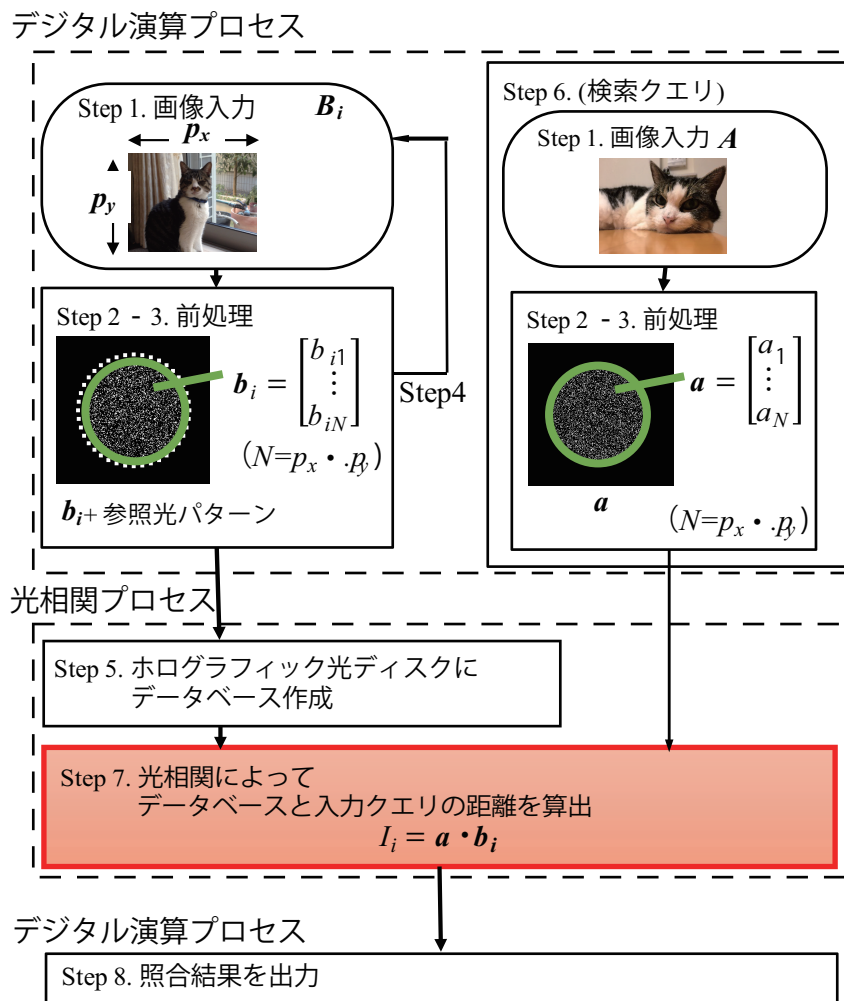


図 3.13: 画像照合の流れとその中での光相関の位置づけ.

1. カラー画像（RGB：3チャンネル）を読み込む。
2. 画像の各チャンネルに対してエッジフィルタをかける。ここで、エッジ画像の各画素についてエッジ強度が上位 20%のとき 1 とし、下位 80%であるとき 0 とし、2 値化画像を生成する。
3. 光相関器に入力するために 2 次元ページパターンに変調する。
4. 全てのデータベース用データに 1 から 3 を繰り返す。
5. データベース用の 2 次元ページパターンをホログラムに光記録しておく。
6. 入力データに関しても 1 から 3 の処理をおこなう。
7. 入力画像の 2 次元変調パターンを光相関演算システムに入力する。
8. ホログラフィックディスクを高速回転させることでデータベース内の画像データそれぞれとの相関結果を光強度として取得し、最も高いピークの得られた照合先画像を結果として返す。

本実験では図3.13の赤枠のホログラムメモリに記録したデータベースと 1 枚の入力照合にかかる時間を計測し、速度を算出した。ここで、本研究において光相関演算と比較するデジタルコンピュータを用いた画像照合は、類似度をハミング距離で評価する手法を採用した。ハミング距離とは、互いに対応するビット列の値が異なっているビット数のことである。言い換えると、2つのビット列において対応したビットの排他的論理和を求め、その中で 1 となっているビットの数を数えることで求まる。これは、非常にシンプルな演算なため、現在一般に用いられている CPU に機械語ベースで用意されていたり、先にテーブルを作成しておくことなどが可能であることから、内積計算よりも高速であると言われている。そして、Intel の Core i7 など、SSE4.2 に対応しているプロセッサであれば、専用の演算命令を用いることでビットカウントをきわめて高速に処理できる [109]。

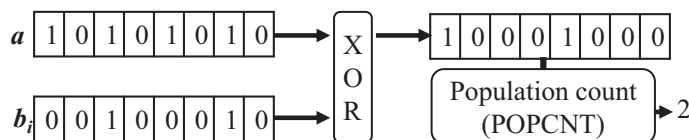


図 3.14: 比較に用いたデジタル画像照合の概要.

デジタルにおける画像照合処理においては，図3.13の光相関演算システム利用時の照合手順3から8の行程を下記のように変えて計測をした．

3. 2値化画像について左上の画素から右下の画素へ1行のbit列と見なし，これを入力画像の特徴量（ハッシュ値）とする．
4. 全てのデータベース用データに1から3を繰り返す．
5. データベース用のハッシュ値はデータセットとしてSSDに記録しておく．
6. 入力データに関しても1から3の処理を実行する．
7. 入力画像のハッシュ値と照合先画像のハッシュ値とのハミング距離をポップカウントによって求める．
8. データセットに登録された全ての照合先画像について6.を繰り返して距離を求め，最近傍となる照合先画像を結果として返す．

図3.15にデジタル照合のフローチャートを示す．計測開始時にはデータベースデータはRAM上に載せられるだけ乗せた状態であり，乗り切らない分はSSDにあるという状態とした．

## デジタル演算プロセス

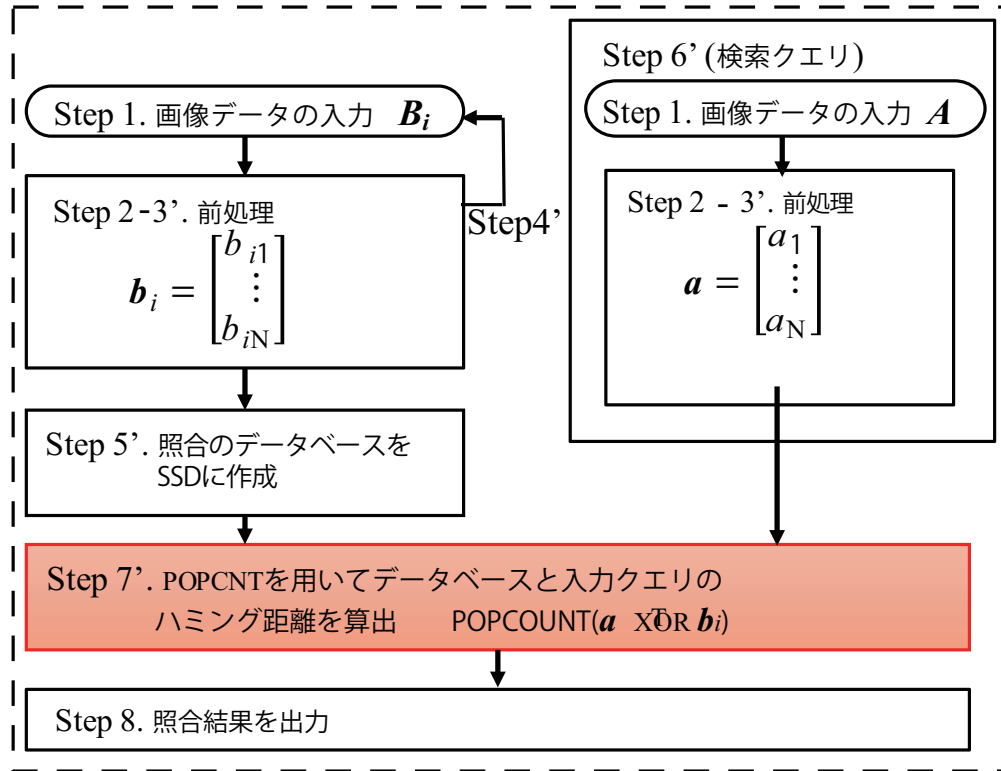


図 3.15: デジタル照合のフローチャート

また、この時、並列化処理を行い、並列化の数  $N_S$ 、照合先画像枚数  $N_R$  から、各スレッドが処理する照合先画像枚数  $RT = R/N_S$  を求め、スレッド  $m = [1, N_S]$  は照合先画像の番号  $[(m-1) \times RT + 1, m \times RT]$  を担当して照合作業を実行するアルゴリズムとした。ここで、光相関演算を用いた照合速度との比較に用いるためのデジタル照合速度としては上記手順の 7, 8 にかかった処理時間を計測した。また、一般に、サーバーの並列数を増やせばデジタル照合の速度は向上する。しかしながら、並列台数が増えるとそれに伴って消費電力も増加するため、本研究においてはサーバー 1 台と光相関器 1 台で比較を行った。本検証においてデジタル照合の計測に使用したサーバーの CPU は Intel® Xeon® CPU E5-2407 v2 @ 2.40 GHz×4, 16 GB RAM, Ubuntu である。ここでの照合演算は、1 枚の入力画像に対して大量のデータベースと照合する演算を実行した。実験結果を図 3.16 に示す。横軸は作製したデータベースのサイズ

であり、縦軸は照合速度である。ポップカウントの演算では、データ転送（データ保持）+入力データと保持したデータとの XOR 演算と異なるビットカウントの演算が行われる。このことから実際の演算において平均して 64 Gbps でのデータ照合が行われていることは、それなりに妥当である。デジタル照合の速度検証の結果、デジタル照合では照合のデータベースの大きさが1次記憶装置のメモリサイズを超えるとその速度が、急激に低下してしまうことが実験的に明らかになった。

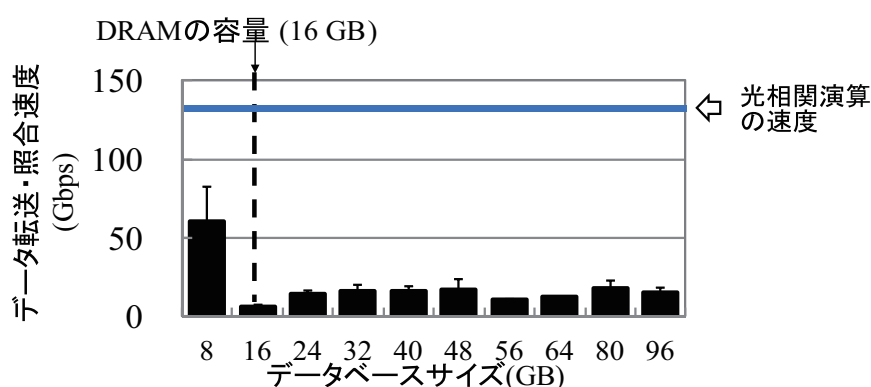


図 3.16: 光照合とデジタル照合の比較

光相関器は1枚の入力画像とあらかじめホログラフィック光ディスクに記録してあるデータとの照合がデータの読み出しを行うことなく実行可能であることから、照合速度がストレージ間のデータ転送速度によらずに高速で行える。本検証では、現状の光相関演算の入力画像サイズである  $280 \times 210$  pixels の画像での検証結果より、現状の照合速度で 21 倍光相関演算の方が高速である結果となった。また、デジタル照合においては画像サイズによって照合フレーム速度が遅くなることを確認した。一方で、光相関演算は基本的には入力画像サイズを大きくしても照合フレーム速度は変化しない。また、現在の光学系は等倍系であり、今後縮小光学系や更なる高速回転を実現することで更なる高速化が期待できる。次項では、今後更なる高速化に向けた考察を述べる。

### 3.8 光相関システムの高速度性

本節では光相関システムの高速度性についてまとめる。3.6節で示した結果はデータサイズ  $C = 280 \times 210$  pixels, 記録半径  $r = 55$  mm, ディスク回転数  $R = 900$  rpm, シフト多重記録シフト間隔  $\delta_x = 2$   $\mu\text{m}$  の条件で達成した実験であり, 相関信号ピーク間隔  $0.4\mu\text{s}$  を達成し  $2.4 \times 10^6$  fps という超高速光相関を実証したものである。これを光相関演算・転送速度(式2.9)に換算すると 143 Gbps 相当となり, 本研究で初めて転送速度 100 Gbps 以上の速度を持つシステムが実現可能であることを確認した [73]。本研究において, データサイズ  $C$  は搭載した対物レンズのサイズと SLM のピクセル間隔から決まる限界値を採用しており, また, シフト多重記録シフト間隔も図 3.11 に示した実験結果から今回用いたフォトポリマーのほぼ限界値で利用していると考えている。今後の更なる高速化の展開としては, 下記の方法が考えられる。

#### 1. SLM の高精細化もしくは縮小光学系の導入

縮小光学系の持つ収差の影響なども考慮する必要が出てくるため, 縮小光学系の組み込みによりある程度の高精細化は可能であるものの, 画素サイズが小さい SLM が開発されることが好ましい。例えば, 近年に於いては,  $7.8$   $\mu\text{m}$  ピクセルピッチの SLM が開発されているなど, SLM の高分解能化の発展が続いている [58]。

#### 2. 記録材料の高感度化

媒体の感度は光記録反応のための光開始剤の性能で決まると言われている。光開始剤は光を吸収し活性化するため光エネルギーの高い青色レーザーのほうが感度良く記録可能だろう。実際に媒体感度の点においては緑色レーザーよりも青色レーザーのほうが 30 倍良いとも言われている [59] また, 式2.8に示したようにデータベース記録密度は波長に反比例するため, 緑色より波長の短い青色レーザーを用いるほうがより高速な光相関を実現できる。しかしながら, 青色レーザーにおいては安定性の面等に課題があり, 記録媒体を基準に青色レーザーにすればシステムの性能が向上するとは単純には言えないものの, データベースの高密度化, ホログラフィック光相関システムの高速度化に於いて記録媒体の性能向上への期待は大きい。

### 3. ディスク回転数の向上

現在までに Blu-ray Disc ドライブにおいては約 1 万 rpm での回転が実用化されており、従来光ディスクと互換性の高いコアキシャルホログラフィック光相関システムにおいても同様の速度の実現は可能であると考えられ、偏心の少ないガラス基板をホログラムディスクに利用し、現在 900rpm となっているディスク回転数を 1 万 rpm とすることが出来れば 10 倍以上の高速度化が見込める。

以上のように、今後、1 Tbps, 10 Tbps を達成するポテンシャルを光相関演算システムは持っている。特に、10 Tbps での転送速度で照合できる装置は半導体メモリではなし得ない速度であり、今後この光相関速度を実現できると極めてインパクトの高いものとなると考えられる。

## 3.9 結言

本章では、シミュレーションと実験によってホログラム記録条件を最適化し照合フィルタの高密度記録を実現することによる 100 Gbps 以上の高速相関演算を実証した。相関フィルタの高密度記録に向けて、空間周波数制御による光エネルギー均一化記録手法構築および相関フィルタの高密度記録のための光エネルギーと相関信号の実験的評価を行い、実際に高速光相関演算の実験的実証を達成した。これにより、光相関データベース作成時間の 10 倍以上の短縮を実現した。記録条件の最適化を行い、従来報告されていたシフト多重記録間隔の 1/4 以下のシフト多重記録間隔での相関演算データベース作成に成功した。このように、ピーク間隔 0.4  $\mu\text{s}$  を達成し  $2.4 \times 10^6$  fps という超高速光相関を実証した。これを転送速度（式2.9）に換算すると 143 Gbps 相当となり、転送速度 100 Gbps 以上の速度を持つシステムが実現可能であることを確認した [73]。従来光ディスク制御技術の導入による安定性の向上を示すことで、本技術の延長で 1 Tbps を上回る光相関実現の指針を示した。本章において高速光相関の実験実証について述べた。しかしながら、利用した画像は 100 枚であった。このように枚数が少ないのはトラッキングサーボがかかかっておらず、たくさんの画像をシフト多重記録した際に安定して再生できなかつたからである。このことから、真の実証に向けてトラッキングサーボ利用による 1000 枚を超えるデータベースとの相関信号の取得



を目指した検討について次章で述べる.



## 第4章 ホログラフィック光相関システムの安定化

### 4.1 緒言

光相関演算は大容量と高速転送速度の両方を実現するデータ解析ツールの1つとして、期待が寄せられ研究開発が行われている。データ転送速度として143 Gbps相当の実験実証を達成したことは第3章で述べた。前述のように、コアキシャルホログラフィの光学系に基づいた光学系はCDやDVD等の従来の光ディスクにおけるディスク制御技術との親和性が高いことが特徴として挙げられる[82,86,93]。この特徴を活かし、2005年にはコアキシャルホログラフィ光学系を用いたホログラムメモリとしてHolographic Versatile Disk (HVD)が提案されている[87,111]。このシステムはホログラム記録・再生用とサーボ制御用に2つの波長の異なるレーザーを搭載したシステムであった。HVDディスクはガラス基板、ピット、反射膜、ギャップ層、波長選択ミラー層、ギャップ層、ホログラム層、ガラス基板、AR膜層から構成されていた[111]。このHVDの構造は、ピットによる記録媒体の回折ノイズを除去するために、記録層と反射層との間に波長選択ミラー層を配置するものであった。これにより、サーボ制御用の赤色レーザーは、予めフォーマットされているピットのある反射層に到達してから反射するが、ホログラムを形成するための緑色のレーザーは、この波長選択ミラー層によって完全に反射される。言い換えると、ホログラムを記録再生する際にトラッキングやアドレスのためのプリフォーマットによってホログラムメモリの再生像の品質が劣化してしまうと考えられていたため、波長選択ミラー層が挿入されていた。しかしながら、この波長選択ミラー層によってディスク作成コストが大量生産となったとしても高価になってしまう課題があった。

コアキシャルホログラフィの光学系に基づく光相関システムももちろん従来のCD,

DVD等の光ディスクの制御技術（非点収差法やプッシュプル法）を有効利用可能なシステムである。しかしながら、これまでの実験的実証においては、相関フィルタ記録時のシステム安定性が高くない課題があった。これは、従来の実験においてはトラッキング制御をしておらず、回転による面ぶれや偏心の影響でホログラム記録位置がディスクの円周からずれてしまい、たくさんのデータを円周の長い範囲に安定的に記録することが困難であったことである。これはミラー基板とフォトポリマーおよびガラスの3つのみからなる非常にシンプルなディスクを用いており、トラッキング制御を実行できていなかったためである。

本章では、ホログラフィック光相関システムにおけるデータベース記録の安定化に向けてトラッキングサーボ制御導入と光相関用安価・簡易なディスク構造の提案・試作によって1000枚を超えるデータベースとの相関信号の取得を目指す。ディスクの安価・簡易化を目指し、光相関用に波長選択ミラー層を持たないシンプルなディスク基板を設計・試作した。試作ディスク基板に基づくホログラフィックディスクを用いて光相関信号取得実験を行い、簡易な光相関用ディスクの有効性を示す。4.2節では、本研究で用いたサーボシステムとそのサーボシステムによって制御可能なディスク構造に付いて述べる。4.3節では試作基板作成のためにシミュレーションによって溝の深さと溝の幅を検討した結果について述べる。4.4節では光相関用に設計試作した安価なディスク基板を用いた光相関演算結果について述べる。4.5節では本章の結言を述べる。

## 4.2 サーボ制御系とディスク構造

### 4.2.1 サーボ制御系

前述のように、コアキシャル型の光学系配置を採用した光相関システムは光学系がシンプルであることや従来の光ディスクの技術を利用しやすい等の利点をもつ。対物レンズを板バネによってアクチュエータに保持し、コイルに電流を流すことによってレンズをディスクのラジアル方向と光軸方向の2方向にそれぞれ動かすことが可能なディスク制御系が一般的である。ここで、本光相関システムはHVDのホログラムメモリシステムに倣い、ホログラムの記録と光相関演算のための緑色レーザーに加え

てフォーカシングサーボとトラッキングサーボ技術を実現するための赤色レーザーを搭載していることも前述した。また、非点収差法に基づくフォーカシング制御とプッシュプル法に基づくトラッキング制御を実現するためにサーボ制御系のディテクタに4チャンネルディテクタを採用した。この非点収差法とプッシュプル法はCDやDVD等の制御技術として広く利用されている技術である [112, 113]。非点収差法は非点収差のある光学系で結像した点像のひずみを検出することで光軸方向の変位を非接触で測定する手法であり、フォーカシング制御に用いられる。一般に、ディスクからサーボ用ディテクタまでの戻り光路中にシリンドリカルレンズを挿入する事によって実現可能である。光軸上の距離に依存して発生する非点収差によって縦長楕円、円形、横長楕円に変化するビームの形状を面内に45度回転した4分割ディスクで検出して2つの対角成分を合算し、その差をフォーカスエラー信号とすることによりフォーカシング制御を実現できる。一方、プッシュプル法はディスクの反射面で反射されて再び対物レンズに戻った光の強度分布が集光スポットとグループの相対的な位置により回折光の位相が変化することを利用する方法である。集光スポットとグループの中心位置が一致するとグループに直行する方向に左右の回折光の位相が等しくなるため、左右に等しい強度分布となり、位置関係がずれると左右異なった強度分布となる。つまり光の強度分布をトラック方向にそって左右2分割されたディテクタを搭載することでトラッキングエラー信号が取得可能である。ここで、非点収差法とプッシュプル法の2つで同時にフォーカシングとトラッキングを制御するための条件を整理すると以下の3点になる。

1. サーボ光学系にグループ溝に対して45度回転した方向に非点収差の発生するレンズを搭載すること。
2. グループ溝に対して上下左右の位置関係となる4チャンネルのディテクタを搭載すること。
3. ディスク基盤にトラッキングの案内の機能をするグループ溝が刻まれており、十分な大きさのトラッキングエラー信号が得られるグループ溝の幅と深さになっていること。

図4.1に本システムのサーボ光学系を示す。この光学系は上記1,2番の条件を満たして

いる。LD から出射された光は，コリメータレンズで平行光となり，アナモルフィックレンズでビーム径が広げられた後に PBS を通過し， $\lambda/4$  波長板で円偏光に変換，アクチュエータに搭載された対物レンズによって，光ディスク上に集光される。集光された光は，光ディスク面上で反射し，再び  $\lambda/4$  波長板を通過することで s 偏光に変換され，PBS で反射される。シリンドリカルレンズを通過して 4 チャンネル光検出器に入り，光信号から電気信号に変換され，フォーカシングエラー信号とトラッキングエラー信号が得られる。

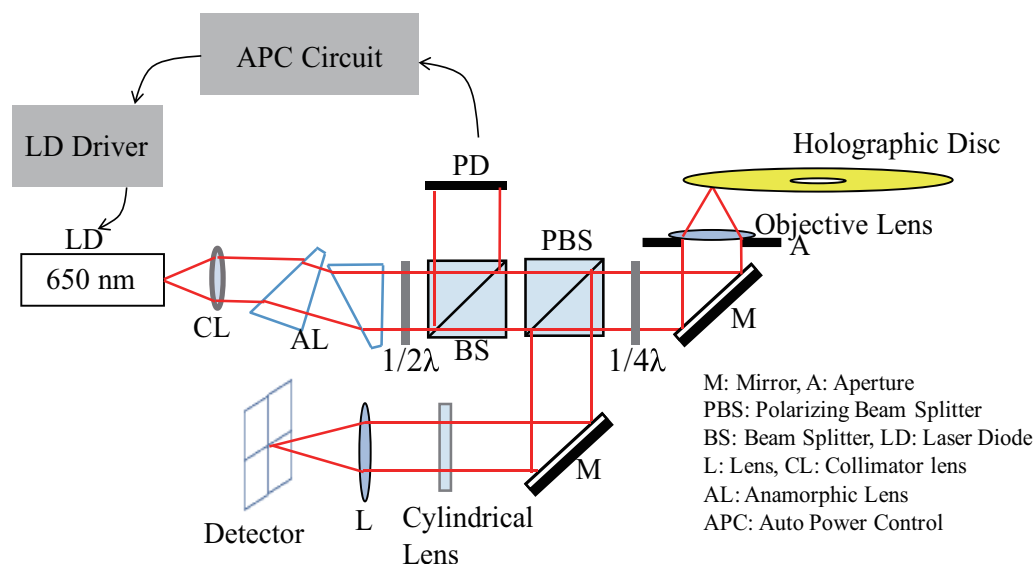


図 4.1: サーボシステム.

#### 4.2.2 HVD フォーマット基板

図4.2はコアキシャル型のホログラフィックメモリ用のディスク構造として提案された HVD (Holographic Versatile Disc) の断面図を示す。HVD ディスクはガラス基板，グループ層+反射膜，ギャップ層，ダイクロイック層，ギャップ層，ホログラム層，AR 膜層カバー層 (ガラス基板) からなる。ダイクロイック層は，ホログラムを記録再生する際にトラッキングやアドレスのためのプリフォーマットによって信号品質が劣化してしまうのを防ぐために導入された層である。しかしながら，ダイクロイック層を導入することでディスクが高価になってしまう課題がある。

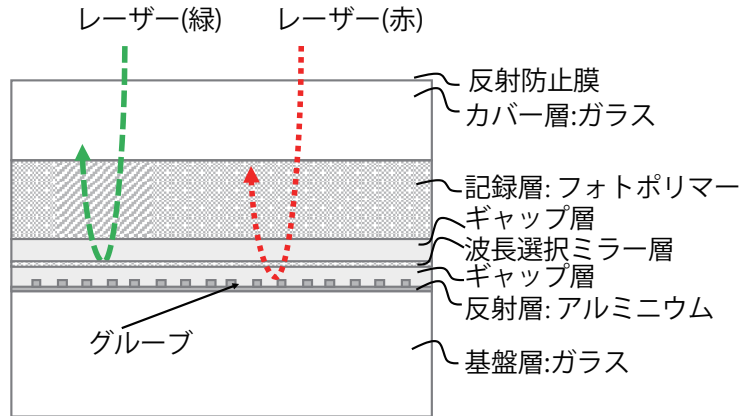


図 4.2: HVD のディスク構造.

### 4.3 光相関用簡易・安価なディスク構造

#### 4.3.1 シミュレーションによる溝構造の最適化

本研究におけるディスク試作においては、CD用のカッティングマシンを利用して試作することを検討した。しかしながら、CD用のカッティングマシンは $\lambda/4$ の光学深さとなるように調整されており、そのまま利用しグルーブ溝を作成すると得られるトラッキングエラー信号が弱くなってしまふ。一般に、グルーブ溝を搭載したディスクをプッシュプル法によってトラッキング制御する場合グルーブ溝の深さは $\lambda/4$ であるとトラッキングエラー信号が非常に弱くなるため、最大のエラー信号が得られる $\lambda/8$ の深さにできるだけ近づけるとすることが理想的であると言われている。ここで、 $\lambda$ は波長である。そこで、レジストの厚みをギリギリまで薄くして作製したスタンパーを用いてガラスフォトポリマリゼーション(ガラス2P)法によってグルーブ溝を試作することを検討した。これにより、実際にディスクの溝の深さは $85\text{ nm}$  ( $\approx \lambda/5$ )とすることができた。そこで、ディスクの溝の深さは $85\text{ nm}$ を基準にシミュレーションによって溝の幅を評価し設計することとした。シミュレーションでは矩形の溝を想定し、溝に対するデトラック量によって変化する戻り光を算出し、戻り光の光強度分布から図4.1に示した光学系で得られるトラッキングエラー信号を算出した。図4.3にトラッキングエラー信号のグルーブ深さ依存性をシミュレーションによって計算した結

果を示す。グラフの横軸はデトラック距離，縦軸はプッシュプル法によって得られるトラッキング信号である。ここでは，トラック間隔は十分に大きく単一の溝であると仮定しグループ溝の幅を 300 nm に固定し計算した。図4.3より，グループ溝の深さ 85 nm においても十分なトラッキングエラー信号が得られることを確認し，試作ディスクのグループ溝の深さを 85 nm に決定した。

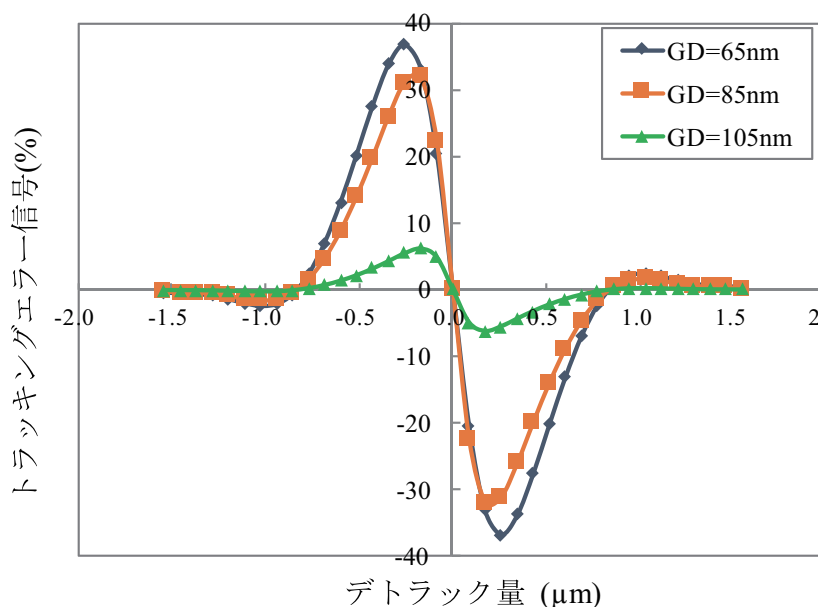


図 4.3: グループ深さ依存性.

次に，グループ溝の深さ 85 nm におけるグループ溝幅の違いによるトラッキングエラー信号についてシミュレーションを行った。図4.4はグループ溝の深さ 85 nm におけるグループ幅依存性の計算結果である。図4.4より，グループ溝深さ 85 nm において，グループ幅 300 nm よりなるべく大きくすることによって，より大きなトラッキングエラー信号が得られることが確かめられた。



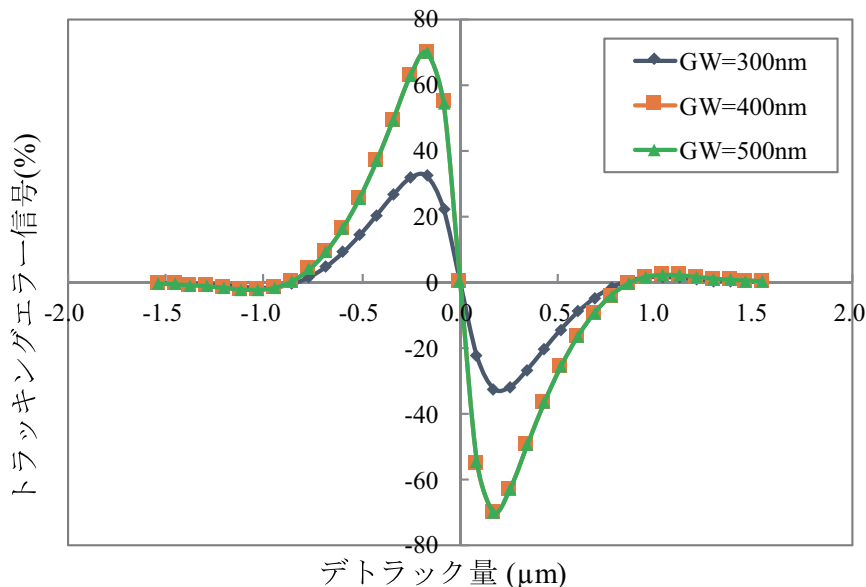


図 4.4: グループ幅依存性.

以上の結果より、本研究においてはグループ溝の深さ 85 nm 以下、グループ溝の半値幅約 400 nm を条件として光相関用に基板を設計することで 3 番の条件について満たせることを確認し、実験用に試作した。

#### 4.3.2 光相関用簡易・安価なディスク構造

図4.5に本研究で試作したディスクの断面概要図を示す。我々は、参照光パターンの積分強度を相関信号として扱う光相関システムにおいて、相関結果に対するディスク基板の溝の影響は少ないと考え、安価な構成のディスクとするためにもダイクロイック層を持たないディスクを試作した。試作ディスクは、ガラス基板、グループ層、反射膜層、ギャップ層、ホログラム層、カバー層(ガラス基板)、AR膜層で構成されている。図4.4で示したように、本ディスク構造は十分な大きさのトラッキングエラー信号が得られる幅と深さをもったグループ溝を備えており、図4.1に示した光学系のもとで本ディスクを導入することによってフォーカシング制御とトラッキング制御が可能となった。

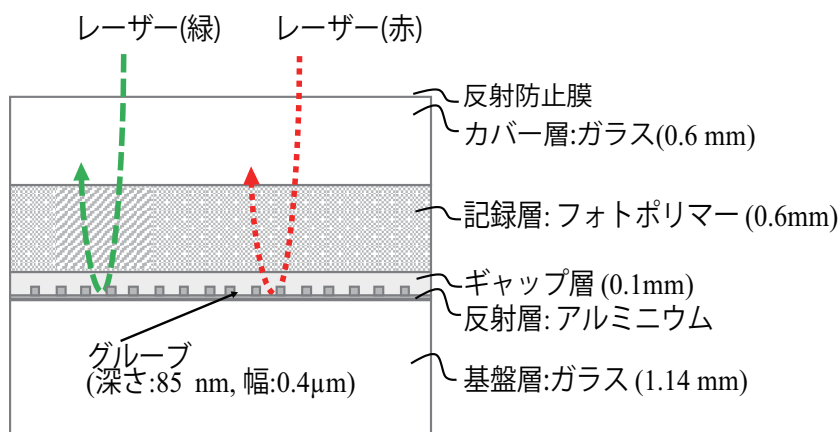


図 4.5: 提案ディスク構造.

## 4.4 トラッキング用溝上での光相関演算実験

### 4.4.1 溝の影響の評価

前述のように我々は、参照光パターンの積分強度を相関信号として扱う光相関システムにおいて、相関結果に対するディスク基板の溝の影響は少ないと考えた。そこで、図3.1に示す光相関光学系を用いて、トラック溝の影響について評価し、ダイクロイックレイヤーを持たないディスクにおいても良好な光相関演算が可能であることを確認した。本実験ではデータサイズ  $180 \times 240$  pixels のデータパターンを用いた。このパターンはあらかじめ第5章で示す符号化方法を利用した前処理が施された画像であり、自己相関演算値を1となるように規格化した上で相関信号の評価を行った。トラック溝の影響について評価するために提案基板溝なし箇所と提案基板溝ありの箇所で光相関演算を行った。また、データベースホログラムのシフト多重記録シフトピッチは  $2.6 \mu\text{m}$ 、実験時のディスク回転数  $300 \text{ rpm}$  とした。評価パラメータには自己相関・相互相関の信号比を用いた(式3.7)。表4.1に提案基板溝なし箇所と提案基板溝ありの箇所で光相関演算実験を行い得られた光相関信号から得られたSRを比較した結果を示す。本研究において光相関実験から算出されるSRは、光相関信号強度値として計測される自己相関信号と相互相関信号を用いて算出した。SRが高いほど入力データと一致するデータベースデータの検出が容易であることを意味する。

表 4.1: グループ溝なしとありでの SR の比較.

	電子 コンピュータ	光相関	
		グループなし ディスク	グループあり ディスク
データベース#1	10.0	14.4	11.8
データベース#2	8.2	13.4	9.0
データベース#3	6.0	10.6	7.8

ここでは3種類のデータベースを用いた。同一データベースデータ使用時のSRの値を溝ありと溝無しで比較すると、溝ありディスクを用いたときのSRは溝なしディスクを用いたときよりも低い値となった。しかしながら、溝ありディスク、溝なしディスク利用時共にデジタル演算におけるSRよりも大きな値のSRが得られたことから、データの識別に於いて、ダイクロイックレイヤーなしのディスクにおけるトラック溝の影響はないとはいえないものの、ダイクロイックレイヤーを持たないディスクの溝上のホログラムを用いた光相関演算においても良好な光相関演算信号が取得可能であることを示した。ダイクロイックレイヤーを持たない提案ディスクは光相関システムの実用化に向けて光相関システムの低価格化へ大きく寄与するため、精密照合には適しているとは言えないものの、アプリケーションに合わせて本ディスクを用いることで、価格低下による光相関システムの利用増加が見込める。

#### 4.4.2 シングルトラックでの実験

試作基板にフォトポリマーをはさみ、ホログラフィックディスク化した後、光相関実験を行った。試作ディスクのグループ溝間隔が1mmの部分を用い、赤色レーザーでフォーカスとトラッキング制御を行った状態で、データサイズ180×240 pixelsの同一画像データを2 μm間隔でシフト多重しホログラムを記録した。これらホログラム記録では時間を要したが、安定にホログラム記録ができることを確認した。光相関実験では、記録したホログラムに対し、緑色のCWレーザーを用いて記録と同一画像データを入力して自己相関信号を取得した。図4.6に実験で得られた自己相関信号を示す。2 μm間隔でのシフト多重にもかかわらず自己相関が十分取れている信号が得られており、試作ディスクを用いた光相関演算において良好な光相関信号が得られるこ

とが確認できた。新ディスクを試作しトラッキング制御を行いながらのホログラム記録を実現できたことで、システムの安定性が向上し、従来達成できていなかった 1000 枚を超えるホログラムの書かれたデータベースでの光相関実験に成功した。

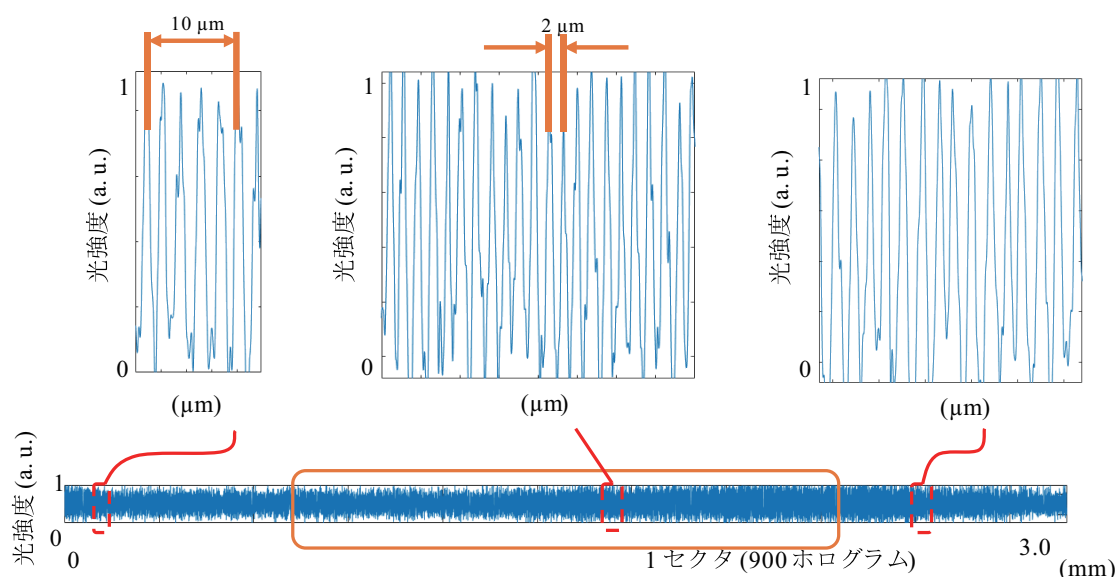


図 4.6: 光相関用簡易ディスク構造を用いた光相関演算実験結果。

## 4.5 結言

光相関システムの安定化を目指し、光相関システム用のディスク構造を提案した。波長選択ミラー層をもたない簡易・安価な構造の光ディスク基板について、シミュレーションに基づき最適設計した後、実験用に試作した。トラック溝による影響について評価することによって波長選択ミラー層を持たないディスクにおいても良好な光相関演算が可能であることを示した。波長選択ミラー層を持たない提案ディスクでの光相関演算の安定的実証は光相関システムの実用化に向けて光相関システムの低価格化へ大きく寄与する。トラッキングサーボ制御導入と試作した光相関システム用ディスクによってトラッキングサーボをかけた状態で、1000 個以上のホログラムを 2 μm 間隔でシフト多重記録によって相関フィルタとしてホログラムディスクに記録を達成した。記録した相関フィルタを用いて光相関演算実験を行い、良好な相関信号が得られることを確認し、簡易な光相関用ディスクの有効性を示した。

## 第5章 光相関システムの応用 I :

### 類似画像検索システム

#### 5.1 緒言

膨大なデータベースに基づくデータ解析を高速に実現することを目指し、光相関演算によるデータ照合システムの構築、高速データ転送と照合速度、その安定性の向上に関して前章まで述べてきた。本研究により構築した高速光相関システムは1秒間で200万枚のデータ照合を可能にしてきており、1フレームの入力データと1フレームのデータとの相関演算を約412ナノ秒で実現した [73]。光相関演算は特にあらかじめ蓄えてある膨大な数TB規模のデータとの照合が超高速で可能であり、今後の最適化によってさらなる高速化実現も可能であることも第3章で示した。しかしながら、新しいハードウェアが実際に広く利用されるためには、従来デバイスと比較して性能面での優位性があることはもちろん、既存のシステムとの融合しやすさも重要となる。

一方、SNSサービスの普及に伴い、高解像度静止画・音声・動画など、インターネット上の情報量は増加し続けている。例えば、User Generated Contents (UGC) サイトのひとつである Youtube には、2015年時点において毎分400時間を超える量の動画がアップロードされている [115]。そして、インターネット上では、コンテンツを劣化させることなく広範囲にコピー・流通できることから、アニメや実写映画などのコンテンツホルダーが保有する動画が無許諾で流出するなど、著作権保護の観点において課題が多い。この課題に対して、動画共有サイトの黎明期である2007年から基礎的な調査研究が行われており、インターネットにおける高速データ検索の重要性が提示されてきている [116]。近年では、平成25年度経済産業省によるユーザのオンライン正規版利用意向調査において、アニメ・マンガにおいてマネタイズしうる最大市場規模（小売）は1兆円を超えることが報告されている [117]。また、Manga-Anime

Guardians Project (MAG) プロジェクト [118] が行われた。米国の 50%以上、日本の 12%以上ものマンガ・アニメファンが海賊版作品を見たり読んでいると言われておりオンライン著作権侵害による損害の推定コストは、2 兆円 (約 200 億米ドル) とも言われている [118]。そこで、UGC サイト上にアップロードされている動画の中に著作権保有者の権利を侵害するものがあるかないかを照合し確認するサービスが実用化提供されている。例えば、Youtube 社の contents ID [119]、電気通信大学発のベンチャー企業 Photonic System Solutions 社の FReCs システム [120]、Vobile 社の Media DNA<sup>®</sup> [121] などがある。一般に著作権保護用データ検索システムにおいては、メタデータによるテキスト検索に加えて、画像データの内容や映像シーンの解析を可能とする画像・動画解析などが取り込まれている [122–124]。しかしながら、著作権管理システムは扱う動画や音楽などのデータ量が膨大なため、アルゴリズム改良による高速化やそれに関わるハードウェア利用方法の高速化、またはテキスト検索における入力データの削減等様々な視点からの改善がなされている。例えば、映像の特徴量を抽出してデータ容量を落としたフィンガープリントを作成しておき入力データのフィンガープリントとデータベースのフィンガープリントとを比較する方法が一般的である。これは、全ての画像・動画データとの検索を行う場合、計算容量は膨大になる上、HDD や SSD などの外部ストレージからの転送速度が検索処理速度のボトルネックとなり現実的ではないためである。さらに、より高速にデータにアクセスする手法として、データベースの最適クラスタリング処理を施すことや、HDD 上に類似クラスタを近接して配置する事、転送速度をデータ構造上で高速化する研究なども行なわれている [125]。

本章では、光相関演算システムの最近傍法への適用における有用性を示すことを目的とし、類似画像検索用符号化法を提案し、光相関に基づく最近傍画像検索を実証する。5.2 節では、類似画像検索用符号化法を提案し、実験的に閾値を決定し、そのエラー率を評価する。5.3 節では光相関演算システムのユーザビリティと汎用性の向上を目指し、まず、クラウド環境における光相関演算システムの位置づけを提案する。5.4 節では本システムの評価に用いる指標について述べる。5.5 節では、著作権管理システムにおけるボトルネックの改善として、限られた画素数や改変されたサムネイル画像を対象に実写データを排除することを目的とした画像分類法を構築し、ダウンロード数および照合数削減に基づくシステム全体としての効率化の評価結果について述べ

る。光相関システムの用途拡大に向けて、5.6 節では光相関に基づく著作権管理システムについてその性能の評価結果を述べる。5.7 節では本章の結言を述べる。

## 5.2 類似画像検索のための光相関用符号化法

### 5.2.1 シミュレーションによる情報光設計

本研究では光の高速性と並列性を活かした検索システムにおいて、多重度の向上による高速転送速度化・高精度化に向けて、追加のデバイスを用いずに画像のみでの高精度化を目指していることは第2章で述べた。本節では、動画像データベースの符号化方法を検討し、動画像を円形のランダム画像に符号化する手法の構築について述べる。従来の光学的画像照合に於いては、光相関演算用データベースを作成するために、グレースケール化、エッジ抽出および2値化の3ステップの処理を一般画像に施していた。この3ステップのみを行ったデータをそのままホログラム記録に用いてデータベースとしてホログラムを記録しようとする、フーリエ面で局所化してしまい、これにより高精度な検索や高密度な記録が行えないという課題が生じていた。そこで、従来の前処理手法に加えて動画像を円形にランダムに配置するという符号化を施すことを提案し、フーリエ面の分布の均一化を図ることで高速(高密度なデータベース)かつ高精度な検索システム実現を目指した。図5.1に情報光作成のフローチャートを示す。

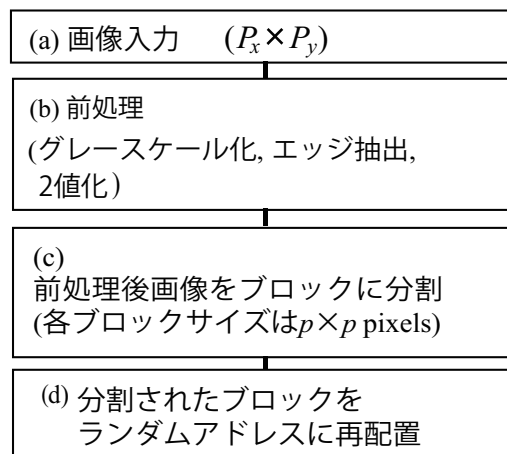


図 5.1: 情報光作成のフローチャート。

第 5 章 光相関システムの応用 I :  
類似画像検索システム

本研究の情報光作成においては、まず TV や DVD から抽出した RGB カラー画像をグレースケールに変換した。次に、その画像からエッジを抽出し、閾値によって 2 値化、2 値化された画像をを複数ピクセルの単位に分割し円形にランダムに再配置した。このようにブロックに分割してランダムアドレスに再配置して光強度分布を均一にする事で空間周波数分布を制御している。図5.2は図5.1のフローチャートに対応しており、情報光作成時の入力画像(元画像)例、グレースケール化・エッジ抽出・2 値化の 3 ステップの前処理後の画像例とそれを  $p \times p$  pixels のブロックに分割する概念図、ランダムアドレス再配置のアドレスの概念図およびランダムアドレス再配置後の画像例を示したものである。

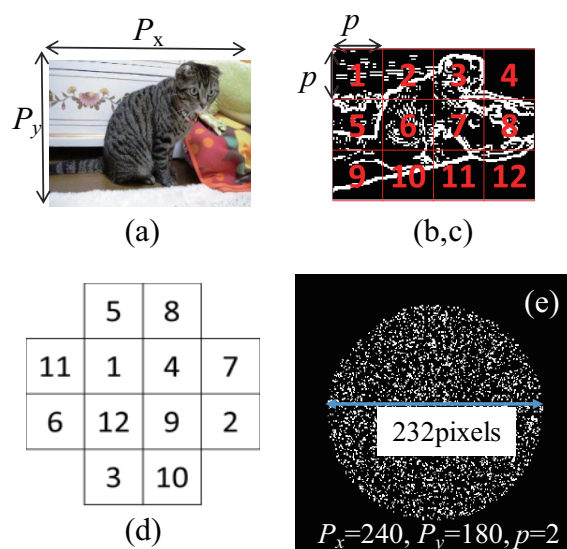


図 5.2: (a) 入力画像（元画像）, (b) 前処理後画像, (c) ブロック分割 ( $p \times p$  pixels), (d) ランダムアドレス再配置のアドレス, (e) ランダムアドレス再配置後の画像.

シミュレーションのパラメータを表5.1に示す。さらに、従来前処理画像、ランダム配置前処理画像それぞれに対して式3.6で示した標準偏差  $\sigma$  を求めその違いを確認した。



表 5.1: シミュレーションのパラメータ.

光源の波長 $\lambda$ (nm)	532
レンズの焦点距離 $f$ (mm)	4.03
記録層の数 $M$	100
記録媒体の厚み $T$ ( $\mu\text{m}$ )	500
各レイヤーの厚み $\Delta T$ ( $\mu\text{m}$ )	5.0
記録媒体の屈折率 $n_0$	1.5
計算領域 (ピクセル数)	$2048 \times 2048$
入力面のピクセルサイズ ( $\mu\text{m}$ )	$2.675 \times 2.675$
記録媒体上 (フーリエ面) でのセルサイズ (nm)	194

以上のように従来前処理を施した画像とランダム配置前処理を施した画像を用いて、シミュレーションによってレンズ焦点面での強度分布 (図5.3) とメディア内での強度分布の断面図を算出した (図5.4)。

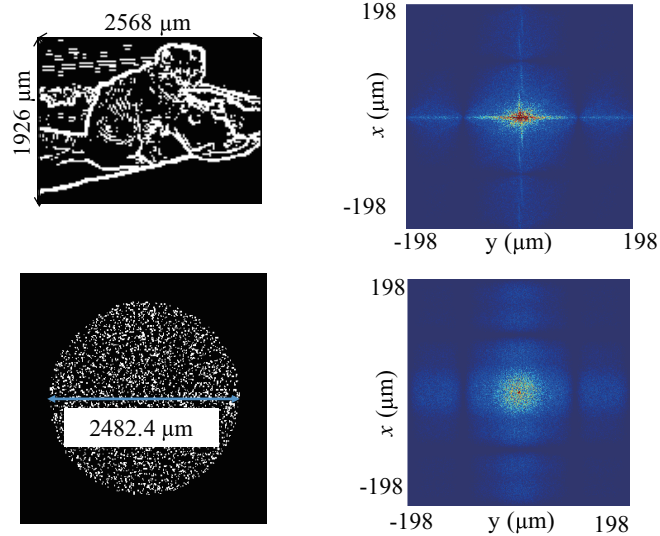


図 5.3: シミュレーションによるレンズ焦点面での強度分布の比較.

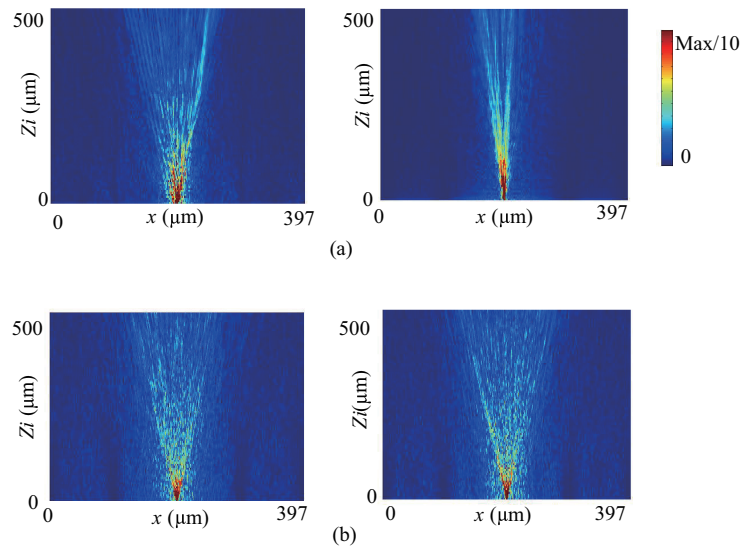


図 5.4: シミュレーションによるメディア内での強度分布の比較. (a) 従来前処理後画像を入力とした時 (b) ランダム配置前処理後画像を入力とした時

式3.5, 3.6を基に  $\overline{\sigma_r^2}/\overline{\sigma_n^2}$  算出すると 0.417 となった. ここで,  $\overline{\sigma_n^2}$  と  $\overline{\sigma_r^2}$  はそれぞれ, ランダム配置導入前の前処理方法における  $\sigma^2$  の平均値とランダムアドレス再配置を前処理に加えたときの  $\sigma^2$  の平均値である. これはランダムアドレス再配置導入によって異なる画像間での光強度の分散の抑制を達成したと言える. このように, ランダムアドレス再配置導入前はフーリエ面で局所化してしまっていた情報光設計において, ランダム符号化を導入したことにより, フーリエ面において均一に分布する情報光を実現した [?, 105].

### 5.2.2 実験による情報光設計

次に, 分割ブロックのサイズを検討するため, 分割ブロックサイズ  $p$  の値を 10, 5, 2, 1 と変更させた 4 種類のランダムアドレス再配置画像を用意し, 式3.7に示す SR を用いてブロックサイズ  $p$  の評価を実験的に行った. 本研究では, アニメ動画を静止画像化して抽出した  $240 \times 180$  pixels の画像データをオリジナルデータとして用い, シフト多重記録シフト間隔  $5 \mu\text{m}$ , ディスク回転数  $600 \text{ rpm}$ , 1 ページデータの記録に用いたパルス数 1 パルスで実験をおこなった. その結果得られた光相関信号より, SR を

評価した結果を図5.5に示す。

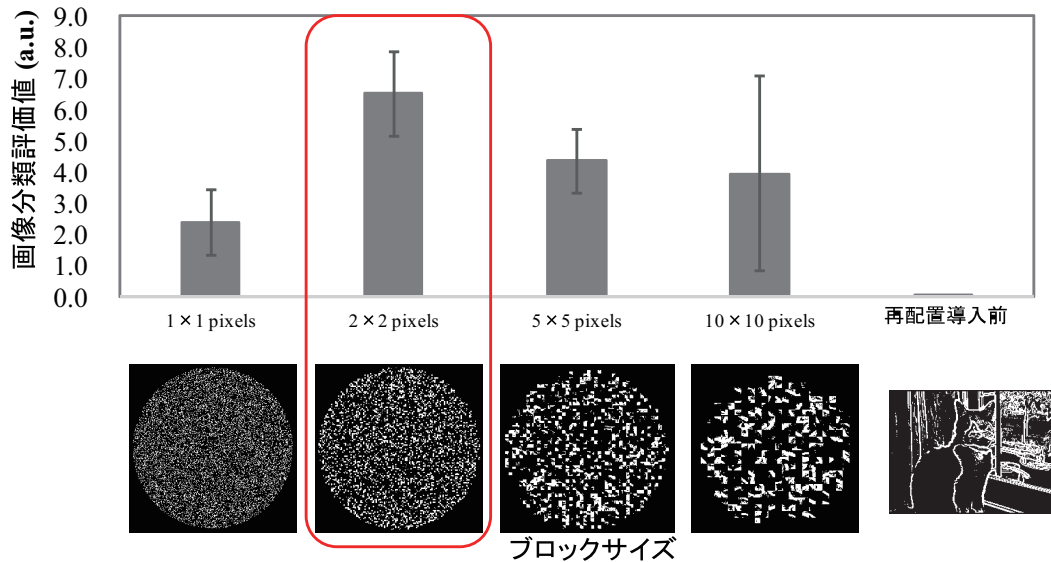


図 5.5: 光相関における自己相関信号と相互相関信号の例。

実験結果より、分割数を小さくするほど信号が安定する傾向がみられ、 $p=2$ のとき最も高いSRが得られたことから $180 \times 240$  pixelsのサイズの画像データを入力としエッジ抽出・2値化の前処理を行ったデータに対して光相関システムによって一致データを検出する際には $p=2$ を利用することが適していると決定した。また、 $p=2$ でのランダム配置設計を行うことによって、ランダム配置設計処理なしの場合と比較して2.3倍のSRが得られる結果となった。以上のように、エッジ抽出、2値化の前処理を行った画像を $p \times p$ のブロックに分割しランダムアドレスで再配置することによって、高周波成分が多くなりフーリエ変換面で弱い光が広範囲に広がり、情報光の記録媒体上での光強度分散均一化が達成された。この光強度分散均一化によって参照光との干渉範囲が均一かつ広域にわたり、干渉縞の形成が均一化されるためホログラムの高密度記録に有効であることが確かめられた。

### 5.2.3 ホログラフィック光相関システムの基礎実験

次に、構築した光相関用符号化を用いて光相関演算実現の基礎検証を行った結果について述べる。ディスク半径 48.0 mm, シフト多重記録シフト間隔 2.45  $\mu\text{m}$  でデータベースを記録し、光相関演算時にディスク回転数 900 rpm で相関演算を実行する演算実験を行った。表5.2に実験条件をまとめた。実験で用いた記録用データ例と光相関入力データ例を図 refdata-ex に示した。図5.7は、実験時のデータベース記録シーケンスと取得した光相関信号である。図5.7(b)は data #1 を 300 回、図5.7(a)に示すシーケンスのようにシフト多重記録したデータベースに対して、同一のデータ code #1 を入力した時に得られた自己相関信号である。ここで相関信号を取得する 100 枚分のホログラム記録位置におけるホログラム多重数が均一となるように全体では 300 枚のホログラムをシフト多重記録し、中央の 100 枚分の相関信号を検証に用いた。この実験で、自己相関ピーク間隔 542 ns となっている光相関信号を確認した。また、図5.7(d)は data #1 から #100 を図5.7(c)に示すシーケンスのようにシフト多重記録したデータベースに対して、data#30 と同一のデータ code#30 を入力した結果である。以上の実験結果から、ディスク型のホログラフィックメディアに約 2  $\mu\text{m}$  のシフト多重記録シフト間隔にてシフト多重記録したデータベースを高速回転させ、入力の情報光をそのデータベースに照射することによって、自己相関信号や相互相関信号を時系列の光強度情報として取得可能なシステムであることを確認した [72]。

表 5.2: 実験条件.

データサイズ (bit)	240 × 180
記録半径 (mm)	48.0
ディスク回転数 (rpm)	900
シフト多重記録間隔 ( $\mu\text{m}$ )	2.45

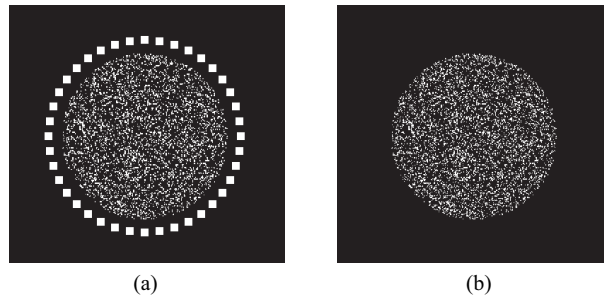


図 5.6: 実験で用いたデータの例. (a) 記録用データ例と (b) 光相関入力データ例.

## 5.3 クラウド環境における光相関システム

### 5.3.1 クラウド環境における光相関システムの位置づけ

光相関システムは超高速なデータ照合が可能であることは第 3 章で述べた. しかしながら, 現状では高速性実現のために機能が限定的であり, バイナリの 2 次元データ同士の照合のみが実現可能である. このことは, 光相関システム単体での利用は難しく, 既存システムの融合が非常に重要となることを意味する. そこで, 本研究ではクラウド環境における分散設計において光相関器をその演算部に位置づけけたシステムを提案する.

近年, クラウドコンピューティングの進展に伴って, 専用演算器を組み合わせたディスアグリゲーション型のコンピューティングとそれに基づくシステム全体の省エネ化の検討が進められている (図 5.8) [126]. 例えば, Facebook 社の Open Compute project [127] や Intel 社の Rack Scale Design [128] もその例である. そこで, 本研究で構築した光相関システムはこれら分散設計の一部に位置づけられると提案する. 提案する光相関システムのクラウド環境での位置づけを図 5.9 に示す. これは, 照合の負荷を考慮した分散設計となっているシステムのサーバセットアップに位置づけけたものである. 光相関システムを分散設計ネットワークの中の電子相関サーバーと並列であり, 光相関システムはデジタル相関サーバと完全に置き換えられる構成になっており入出力データフォーマットは同等である. さらに, 光相関器の汎用性及び利便性向上を目指し, デジタルサーバや web ブラウザを介してクラウド環境で画像検索を実行可能な光相関器で構成される光デジタルハイブリッド画像検索システムを開発した [75].

第5章 光相関システムの応用 I :  
類似画像検索システム

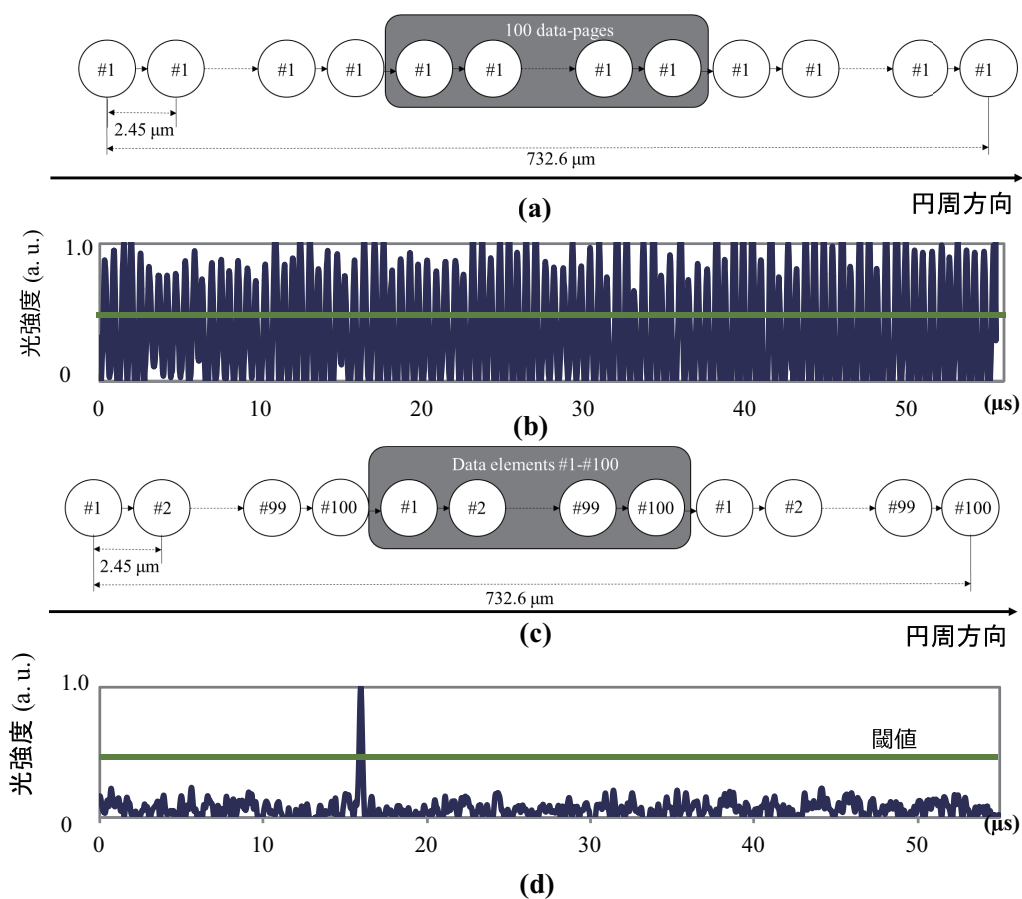


図 5.7: 光相関システムでの基礎実験結果. (a) データベース記録シーケンス, (b)(a) に示すシーケンスのようにシフト多重記録したデータベースを用いて相関演算を行ったときの相関信号, (c) データベース記録シーケンス, (d)(c) に示すシーケンスのようにシフト多重記録したデータベースを用いて相関演算を行ったときの相関信号.

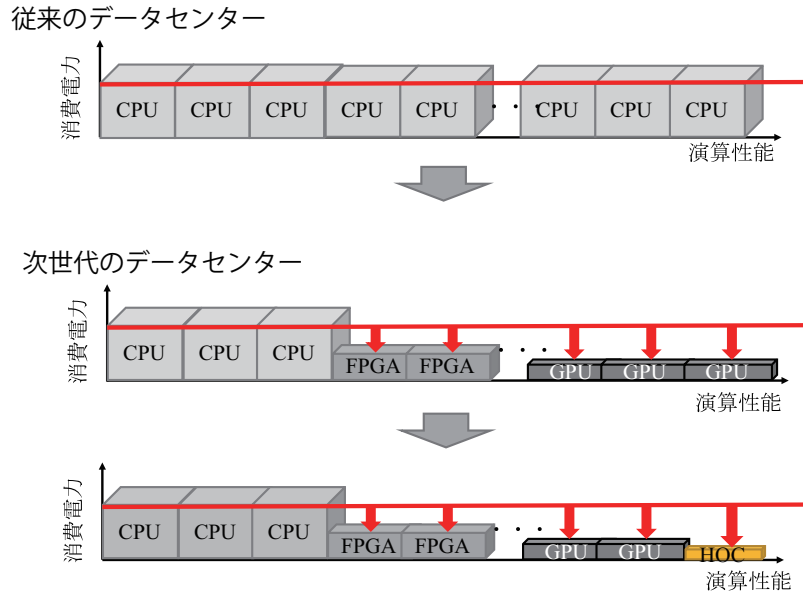


図 5.8: データセンターの構成の変化. (CPU:central processing unit, FPGA:field-programmable gate array, GPU:graphics processing unit, HOC:holographic optical correlator)

クライアント PC で web ブラウザ上からの操作によって検索操作ができるように実装することで、これまで専門的知識・技術を持つ技術者のみの利用にとどまっていた光相関システムの利用しやすさを向上できる。グローバル IP を保持する web サーバーの下にローカルな LAN でデータベースサーバ、デジタル相関サーバ、光相関器制御サーバと光相関器からの相関信号をアナログーデジタル変換するためのオシロスコープがつながっている。本システムはクライアント PC から検索の入力となる入力画像をクライアント PC のローカルファイルから選択する。図5.10に示すのは本研究で構築した web ブラウザ画面の構成である。図5.10(a) は検索設定のための画面であり、光またはデジタルの選択及び検索クエリ画像の選択、相関実行のリクエスト送信の機能を持っている。照合プロセス完了後は図5.10(b) のような画面で結果が表示される。図5.10(b) では検索クエリ画像、データベースにある画像それぞれとの相関値を示したグラフ、最も高い相関値が得られた画像のオリジナルイメージが表示される。このように、クライアント PC から web ブラウザ上での操作によって検索操作ができるように実装した [129].

第5章 光相関システムの応用 I :  
類似画像検索システム

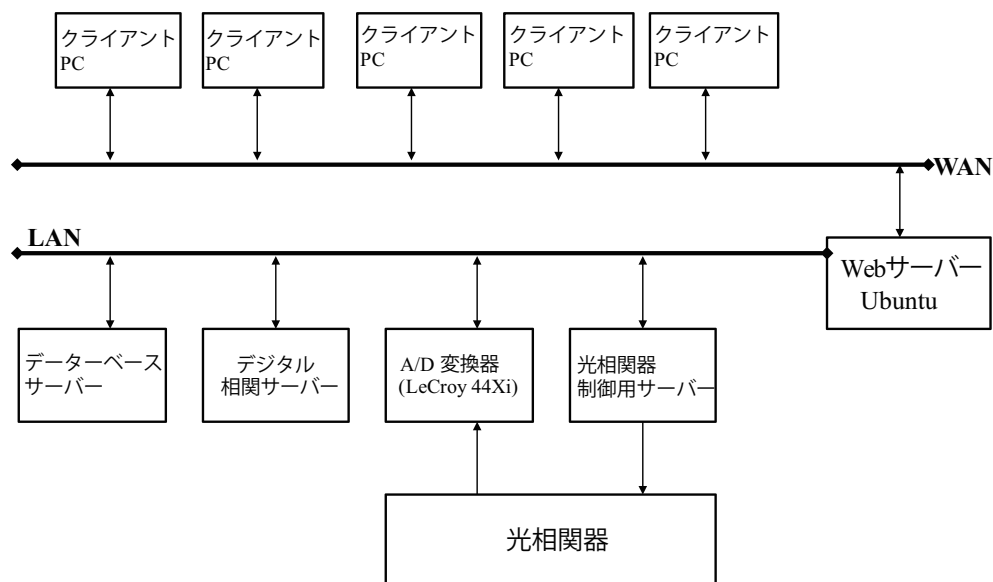


図 5.9: 光相関システムのクラウド環境での位置づけ。

### 5.3.2 データベースのアドレス情報

DVDなどのディスク型のデバイスにおいては、ディスク自体に物理フォーマットによってアドレス情報を付けている [110]。物理フォーマットに於いてはセクタ情報やセクタ番号などが決められている。物理フォーマットが決められていることで、作成したディスクを誰もがディスク上のセクタを探し出しデータを読み出すことが可能である。このように、光ディスクにおいてはスピンドルとディスクのずれを考慮し、ディスク上に物理フォーマットを作成するのが通常である。しかしながら、ホログラフィック光ディスクはパワーキャリブレーションが必要であるという、従来の光ディスクにはなかった課題が発生する。そこで、本研究ではディスク上の物理フォーマットを利用せずに簡易かつ自動的に取得する手法を提案する。提案手法は、ホログラフィック光ディスクの物理フォーマットによるアドレスを使用せずに1トラックの相関値を自動的に簡単に取得できる手法である。提案するデータ構造を図5.11に示す。



### 5.3 クラウド環境における光相関システム

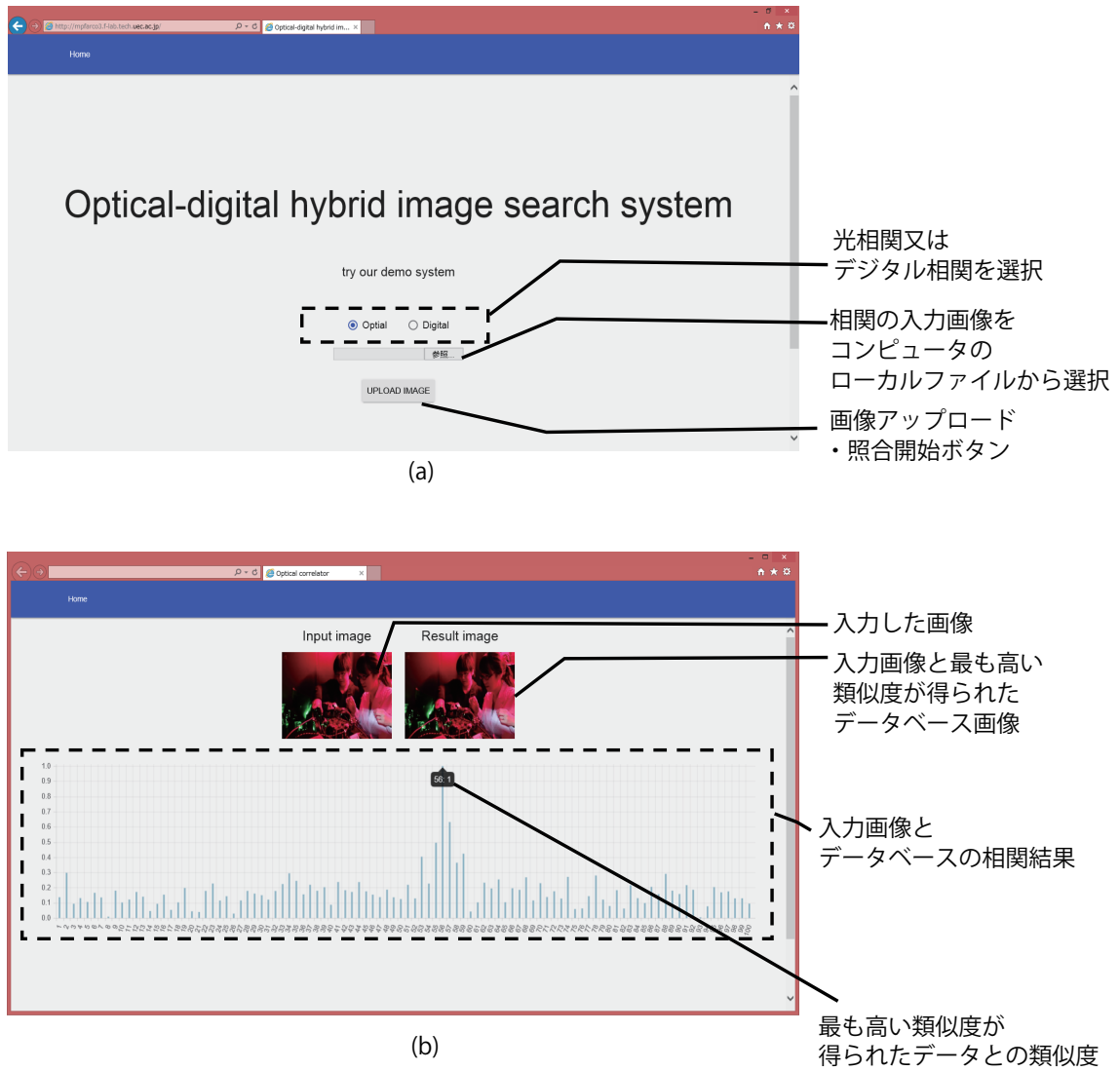


図 5.10: 光相関システムを Web ブラウザから利用可能なデモシステムにおける Web ブラウザ画面.(a) 検索設定画面, (b) 相関結果画面.

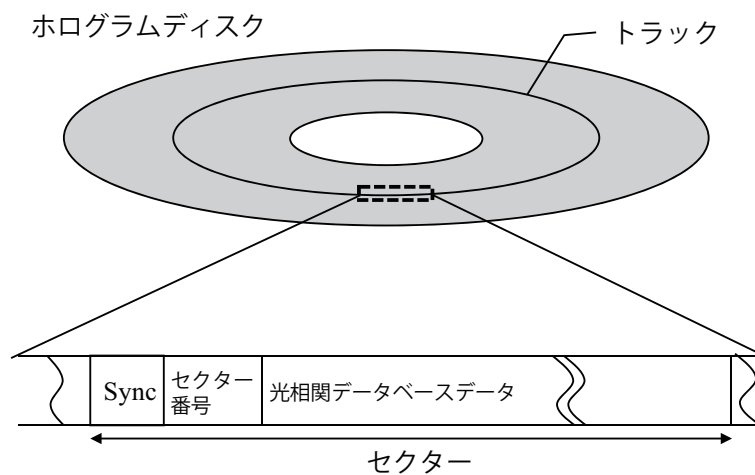
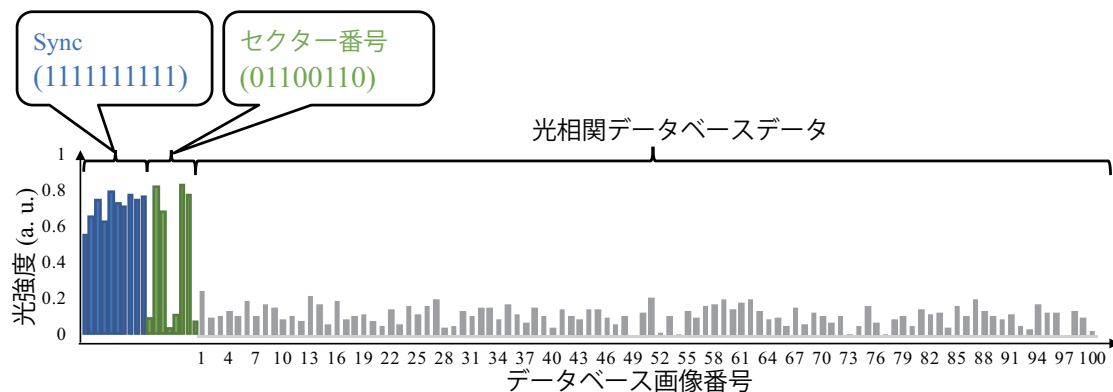
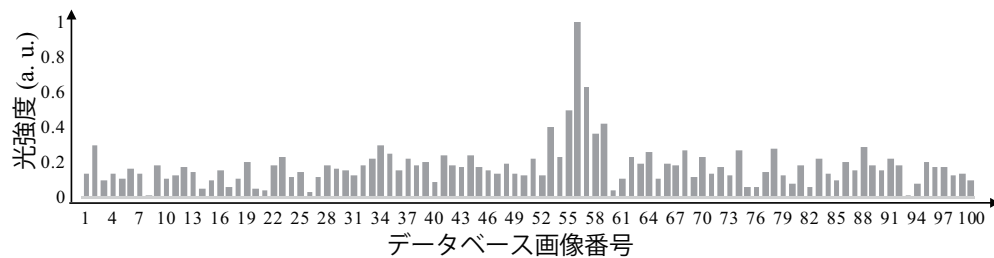


図 5.11: 光相関におけるホログラムディスクトラック上でのデータ構造の概念図.

この手法を実現し、実験で実際に取得した信号を図5.12に示す.



(a)



(b)

図 5.12: 光相関におけるホログラムディスクトラック上でのデータ構造の概念図.

本提案手法においては、各セクタの先頭に Sync 信号とセクタ番号に相当するホログラムを記録しておき、光相関データベースデータとの照合を実施する前にプレスキャンとして記録してある Sync 信号とセクタ番号を読み出す。図5.12(a)は Sync 信号とセクタ番号を実験的に読み出したときに得られた光強度信号である。セクタの開始位置を示す Sync 信号は 10 ホログラム分で表現し、セクタ番号に関しては、本システムは 1 トラック 120 セクタに分割して制御しているためセクタ番号として 8 ホログラム記録することで表現した。図5.12(b)は本実験時の 56 番のデータベース画像と同様の画像を本システムに入力したときの相関信号である。

以上のように、光相関器をクラウド環境から利用可能なデモシステムを構築し、光相関器の汎用性と利用しやすさの向上を実現した。デジタルサーバと光相関システムを組み合わせた光・デジタルハイブリッド画像検索システムの実装によって、光相関器は Web ブラウザ上から利用可能となった。これにより、これまで専門的知識・技術を持つ技術者のみの利用にとどまっていた光相関システムの汎用性の向上を達成した。

## 5.4 2 クラス分類における本研究での評価基準

### 5.4.1 分離度

認証の評価として 2 クラスの分離度 (separation metrics: SM), 登録拒否率 (false rejection rate: FRR) と非登録受け入れ率 (False Acceptance Rate: FAR) を用いた。まず、2 クラスの分離度について述べる。2 クラスの分離度の大きさはクラス 1 とクラス 2 の識別しやすさを意味する。したがって、この SM を最大化するような特徴量を選択することにより、誤認識のもっとも少ない値幅を特徴量として選択できる。ここではクラス内分散とクラス間分散を用いて SM を求める [130]。また、クラス内分散は小さければ小さいほど、クラス間分散は大きければ大きいほど 2 クラスの分類には有効である。2 クラスの分離度の概念を図5.13に示す。

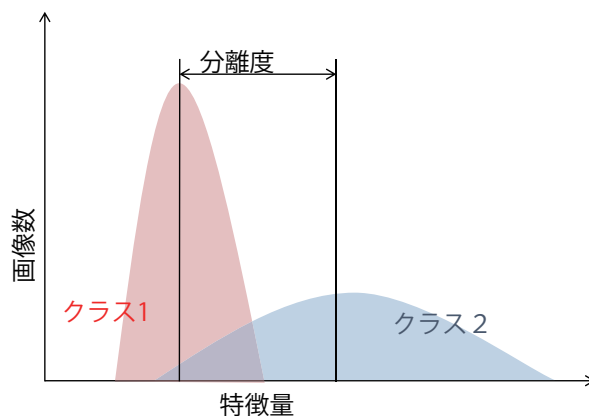


図 5.13: 2 クラスの分離度.

ここで、クラス 1 群のデータ数を  $\omega_1$ 、平均を  $m_1$ 、分散を  $\rho_1$ 、クラス 2 群のデータ数を  $\omega_2$ 、平均を  $m_2$ 、分散を  $\rho_2$  としたときクラス内分散  $\rho_W^2$  は

$$\rho_W^2 = \frac{\omega_1 \rho_1^2 + \omega_2 \rho_2^2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (5.1)$$

クラス間分散  $\rho_B^2$  は

$$\rho_B^2 = \frac{\rho_1 \rho_2 (m_1 - m_2)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} \quad (5.2)$$

で表される。これらを用いてクラス間分散とクラス内分散との比  $SM$  を

$$SM = \frac{\rho_B^2}{\rho_W^2} \quad (5.3)$$

としてそれぞれの値に対して算出する [130].

#### 5.4.2 登録拒否率と非登録受け入れ率

次に、認証の評価として用いた登録拒否率 **FRR** と非登録受け入れ率 **FAR** について述べる。登録拒否率と非登録受け入れ率はバイオメトリクス認証の精度を表すためによく用いられる [たとえば [131, 132]]. 本論文では、画像認証における精度の評価にこれらの指標を用いていく。データベースとの認証におけるエラーには、登録データを登録されていないデータであると判断するエラーと、登録されていないデータを登録

されているデータと判断するエラーの2つがある。前者は登録拒否 (False Rejection), 後者は非登録受け入れ (False Acceptance) と呼ばれ, その割合をそれぞれ FRR, FAR と呼ぶ。FRR と FAR はトレードオフの関係にあり, 単純に一方だけをよくすることは不可能である。図5.14に FRR と FAR の例を示す。図5.14に示しているのは, 閾値を設定して閾値以上をクラス2と判断するとした時のクラス2の FRR とクラス1の FAR の位置づけである。

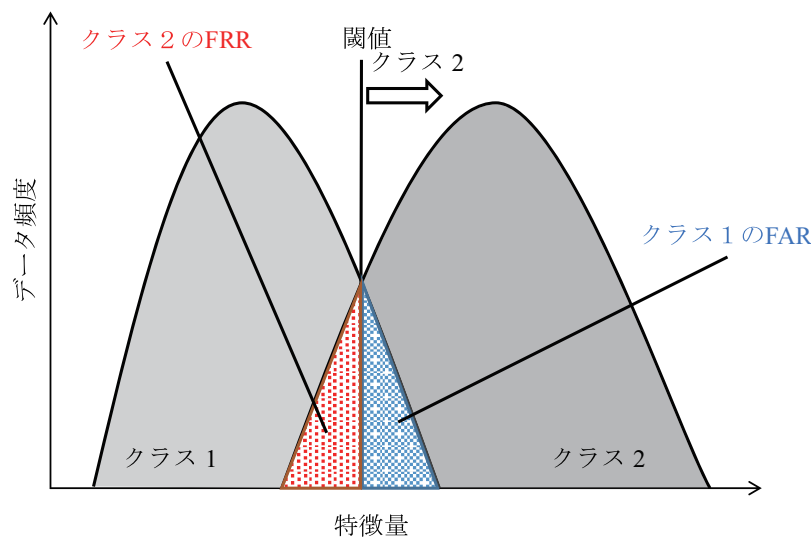


図 5.14: 登録拒否率 FRR と非登録受け入れ率 FAR.

図5.15に縦軸がエラー率, 横軸が閾値を示し, 閾値の設定値による FRR と FAR を示すグラフの概形を示す。このグラフからも FRR と FAR はトレードオフの関係にあり, 単純に一方だけをよくすることは不可能であることが明らかである。また, 分布グラフの交点である  $FRR = FAR$  となる時のエラー率を等価エラー率 (EER : Equal Error Rate) と呼び, 認証の精度性能の目安となる。EER は低ければ低いほどよく,  $EER=0\%$  となれば, エラー率  $0\%$  での識別が可能であることを意味する。また, 本研究では  $EER=0\%$  である領域の広さを識別の信頼度として定義し, 評価値とする。

$$W_{th} = Th_{(FRR=0)} - Th_{(FAR=0)} \quad (5.4)$$

ここで,  $Th_{(FRR=0)}$  は  $FRR=0$  となるときのしきい値の値,  $Th_{(FAR=0)}$  は  $FAR=0$  とな

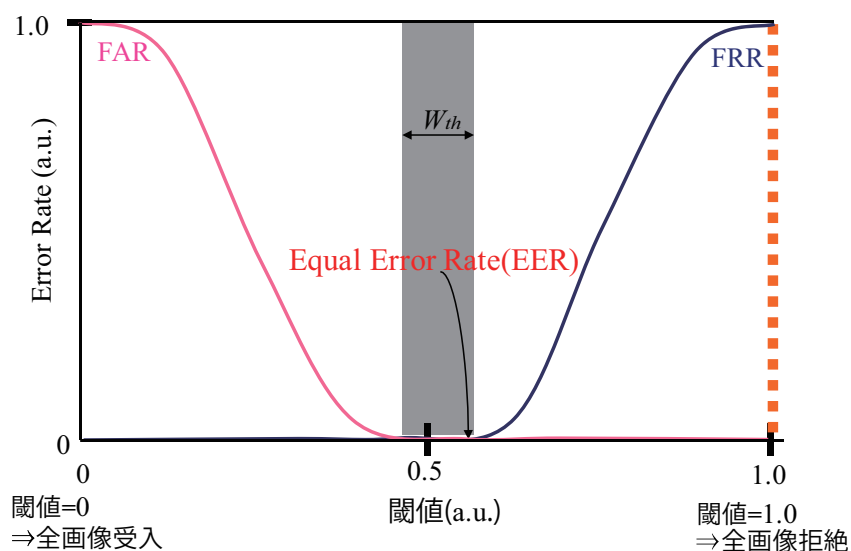


図 5.15: FAR と FRR と EER と閾値幅.

るときのしきい値の値である.

## 5.5 光相関に基づく著作権管理システム

本節では、クラウド環境での光相関演算システムについて、特に、UGC サイトのデータをクロージングして検索し著作物との照合を行う著作権管理システムの高速化を検討する。また、システムのボトルネックを洗い出しデータ入力部の効率化の必要性を提示する。

### 5.5.1 システムの基本構成

図5.16は光相関システムのインターネット上での利用を想定した一連の著作権管理システムの構成である。全体構造は図5.9に示したとおりであるが、光相関システムに基づく著作権管理システムの構成で基本となるのは、ローカルコンピュータ、コントロールサーバー、Web サイトおよび光相関システムの4つである。図5.16(1)のローカルコンピュータからインターネット上で検索したいキーワードを設定し、インターネット

上のコントロールサーバ (図5.16(2)) に指令を送る。コントロールサーバはシステム全体の管理とクローリングを担う。コントロールサーバはローカルコンピュータから受け取ったキーワードによって、図5.16(3)のウェブサイトから画像を検索し、クローリングを行う。まず、サムネイル画像を用いて実写かアニメかを判定し、データベースと同一の 카테고리의動画をダウンロードした後、照合の入力データとして光相関システム (図5.16(4)) に入力する。相関演算のデータベースは前もってホログラフィック光ディスクに光記録しておいたホログラムであり、入力データをホログラフィック光ディスク上のデータベースと照合する。

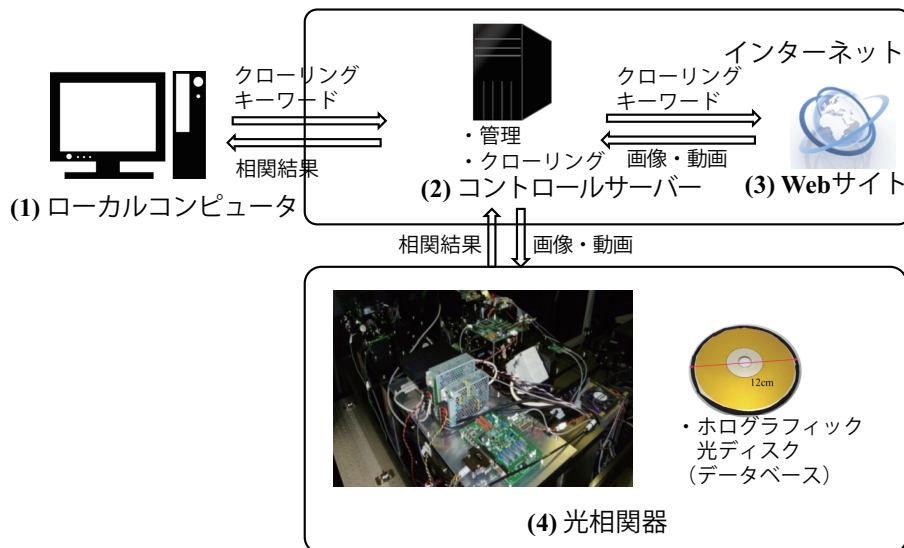


図 5.16: 光相関システムに基づく著作権管理システム。

### 5.5.2 著作権管理システムのボトルネックと階層構造の提案

次に著作権管理システムとしての全体の高速化・効率化を考えるためにシステム全体におけるボトルネックについて整理する。UGC サイト向けの動画識別著作権管理システムにおけるボトルネックは2つある。1つ目は大容量動画データのダウンロード、2つ目はダウンロードしたデータとデータベースの照合である。ここで、照合のボトルネックを光相関システムを導入することで解消するシステムを考えると、システム全体におけるボトルネックはデータのダウンロードと SLM へのデータ転送となる。図5.17に光相関システムを導入した著作権管理システムのボトルネックを示す。

## 第5章 光相関システムの応用 I : 類似画像検索システム

現状の光相関システムにおいては基本的に入力数に比例した演算時間が必要である。つまり、入力数の削減が可能となると、システムの高速化に直結する。さらに、著作権管理システム全体の照合速度はダウンロードの負荷にも比例するため、入力データの削減は重要である。そこで、本研究では、UGC サイトで共有されている動画はアニメと実写の二つの分類に分けることができることに注目した。実際、シンプルで短いキーワードを頼りに動画データをクローリングを行うと、実写動画とアニメ動画の割合は実写動画のほうが多くなるのが一般的である [133]。このことは、アニメ動画の著作権管理に特化して考える場合、テキスト検索による分類に加えて実写かアニメかをサムネイル画像で分類できれば入力動画データ数を削減できることになる。入力動画データ数の削減が可能となると、画像や動画識別の高速化という観点もさることながら動画ダウンロード数を同様に削減可能でありシステム全体の効率化に対して極めて有効となる。これまでの動画分類に関する研究においては、高度なアルゴリズムを利用した数多くのカテゴリー分類に関する提案がなされてきた [134, 135]。しかしながら、これらは画像の分類を目的とするものであり、アニメ画像のみを抽出するという観点とは異なっていた。そこで、本研究では著作権管理システムにおけるボトルネックの改善として、限られた画素数や改変されたサムネイル画像を対象に実写データを排除することを目的とした画像分類法を構築した。構築した画像分類法を用いて図5.18に示すように動画ダウンロード前に画像のカラー特徴によるアニメ・実写カテゴリーを導入手導入する階層構造を提案する。

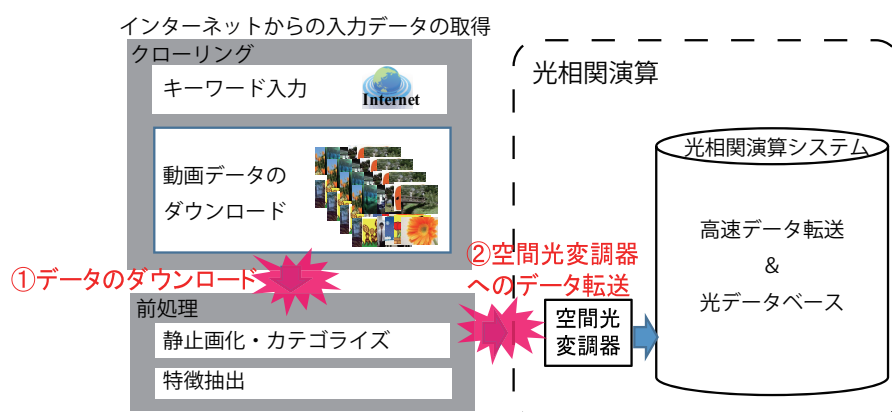


図 5.17: 光相関システムを導入した著作権管理システムのボトルネック。



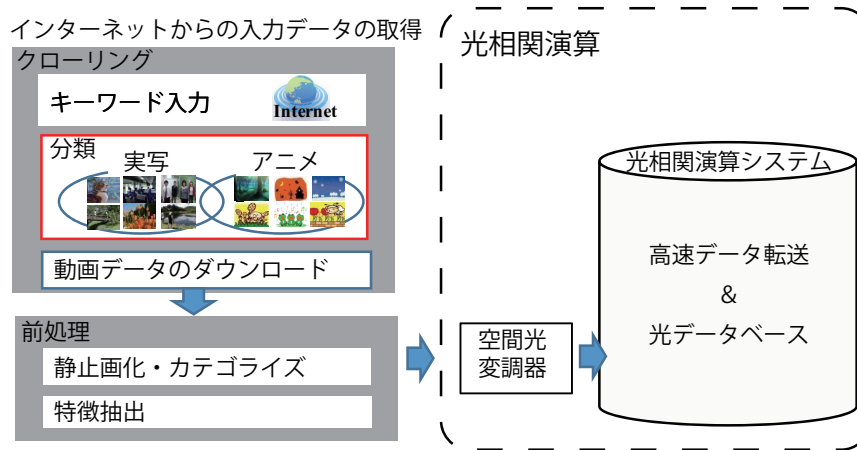


図 5.18: 光相関に基づく著作権管理システムの効率化のための提案階層構造。

キーワード検索して集めた動画のサムネイル画像を入力動画候補として色特徴量を算出し、アニメ・実写カテゴリに分類する。つまり、図5.19 (b) 中に赤太枠で示している前処理の部分にアニメ・実写カテゴリ化を組み込む。そして、データベースとカテゴリが同じ動画のみダウンロードを行い、光相関システムでの照合用の前処理を行い照合用のデータを作成する。このように、動画ダウンロードと光相関システムによる画像対画像での照合を行う前にアニメ・実写カテゴリ化を行うことにより、大容量の動画データのダウンロード数を減らせると同時に光相関システムへの入力データの数を絞り込むことが可能となり、照合効率向上が可能となる。

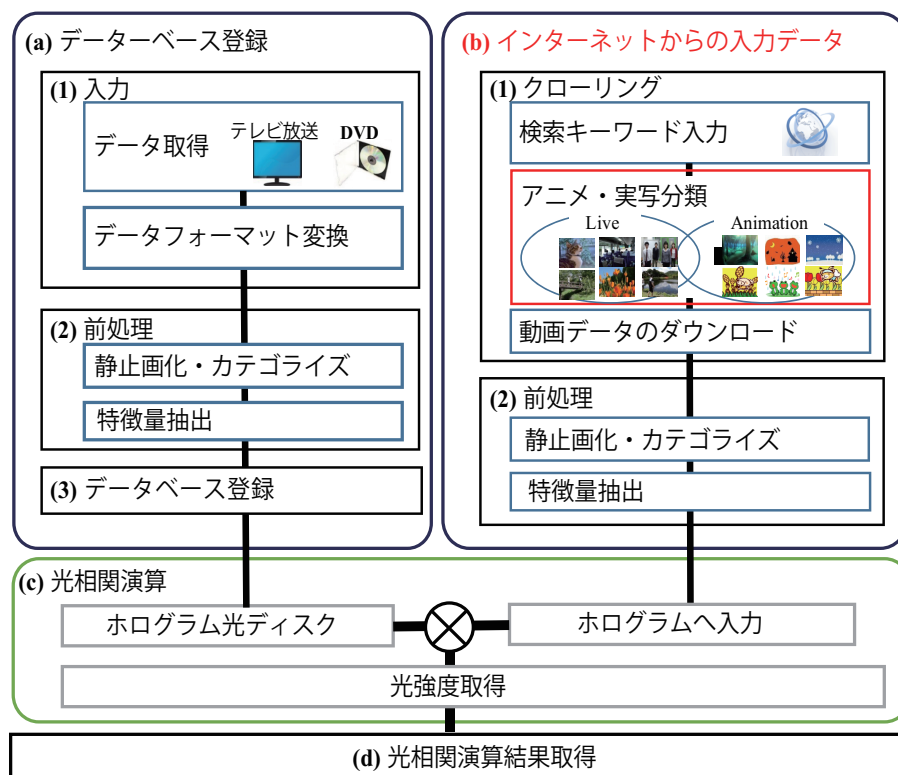


図 5.19: 光・デジタルハイブリット著作権管理システムのフローチャート。

### 5.5.3 カラー特徴によるアニメ・実写カテゴリ化

次に、本研究で提案・導入するカラー特徴によるアニメ・実写カテゴリ化について述べる。アニメや実写動画の間にはその種類によって色の分布の仕方が異なっていることに注目し、アニメと実写を識別する。カラー特徴を用いたカテゴリ化においては、各シーン画像におけるカラーヒストグラムをもとに特徴量を抽出し、アニメや実写といった動画の特徴に関する分類を行うことによってカテゴリ化を行った。図 5.20 に 1 枚の画像のカラー特徴量算出のフローを示す。特徴量の算出は、(1) 画像入力過程、(2) ピーク検出過程、(3) 特徴量取得過程および (4) 識別過程の 4 つの過程からなる。

1. 画像入力過程：入力した画像を R,G,B に分ける。

2. ピーク検出過程：各画像の R,G,B の 3 つのカラーヒストグラムを算出し，それぞれのヒストグラムから 5 つずつピーク点を検出する．
3. 特徴量取得過程：5 つのピークに対して最小二乗法を用いて近似した後，そのピークの幅を算出し，特徴量を算出する．
4. 識別過程：決定した算出した **FQ** が閾値以下である場合にはアニメ，閾値以上であれば実写と判定しそれぞれのデータベースと相関演算を行う画像であると識別する．

本研究の特徴量取得過程においては，1 枚の画像に対して 15 個 (5 つ× RGB3 色) のピーク幅が得られたのちに，15 個のピーク幅の中で最も小さいピーク幅をその画像の色特徴量 (**FQ**) として定義した．ここで，それぞれのピークの最大値を  $\rho$  としたとき， $c$  の値の時のピーク幅を **FQ** とした ( $0 < c < 1$ ) (図5.21)．本研究での **FQ** を定義するにあたり，アニメ画像と実写画像のクラス分離度によって図5.21に示すような **FQ** 取得位置の評価を行い  $c$  の値を決定した．識別過程においては，例外として，RGB どのヒストグラムからも 5 つのピークが取得できなかった場合は，アニメ・実写両方のデータベースと相関演算を行う対象であると識別する．

第5章 光相関システムの応用 I :  
類似画像検索システム

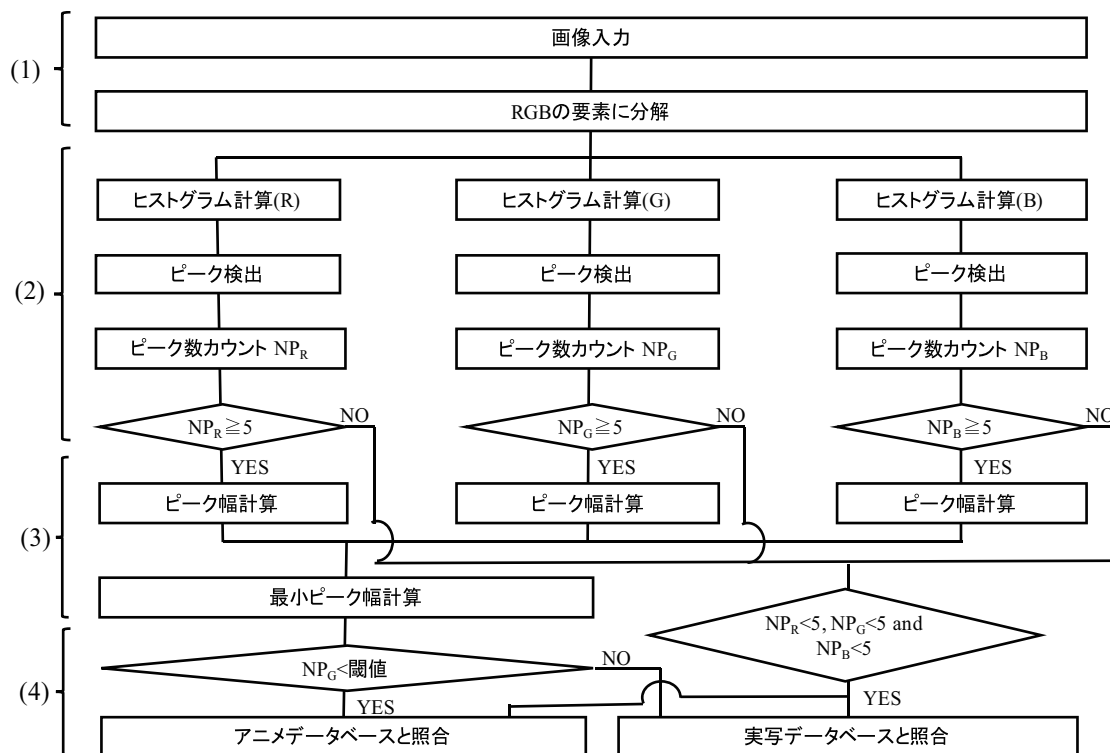


図 5.20: 1 枚の画像のカラー特徴量算出のフロー.(1) 画像入力過程 (2) ピーク検出過程 (3) 特徴量算出過程 (4) 識別過程.

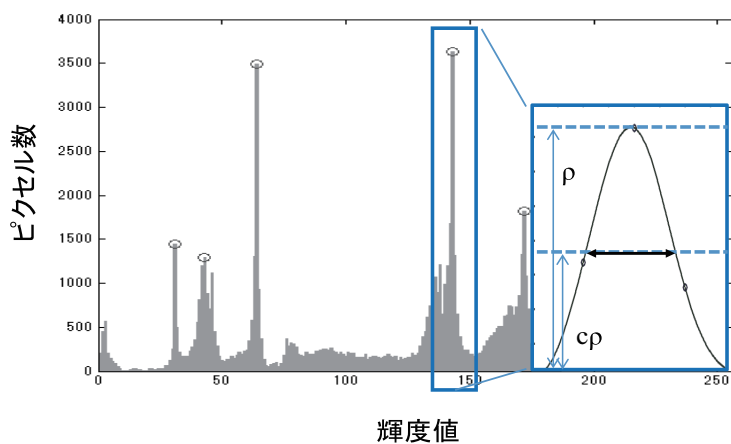


図 5.21: 画像カラーヒストグラムにおけるピーク特徴.

ここで前述の separation metrics(SM) を用いることで特徴量を定義した. 2 クラス

の **SM** の大きさはアニメ画像と実写画像の識別しやすさを意味する。したがって、この **SM** を最大化するような特徴量を選択することによって、誤認識のもっとも少ない値幅を特徴量として選択することができる。ここではクラス内分散とクラス間分散を用いて **SM** を求めた。本研究では、アニメ 3 種から計 1500 枚、実写ドラマ 3 種から計 1500 枚の画像を DVD の動画データから切り出し、アニメ画像群と実写画像群を用意した。図5.22にピーク幅取得位置  $c$  と **SM** とアニメ画像 **FRR** の関係を示す。

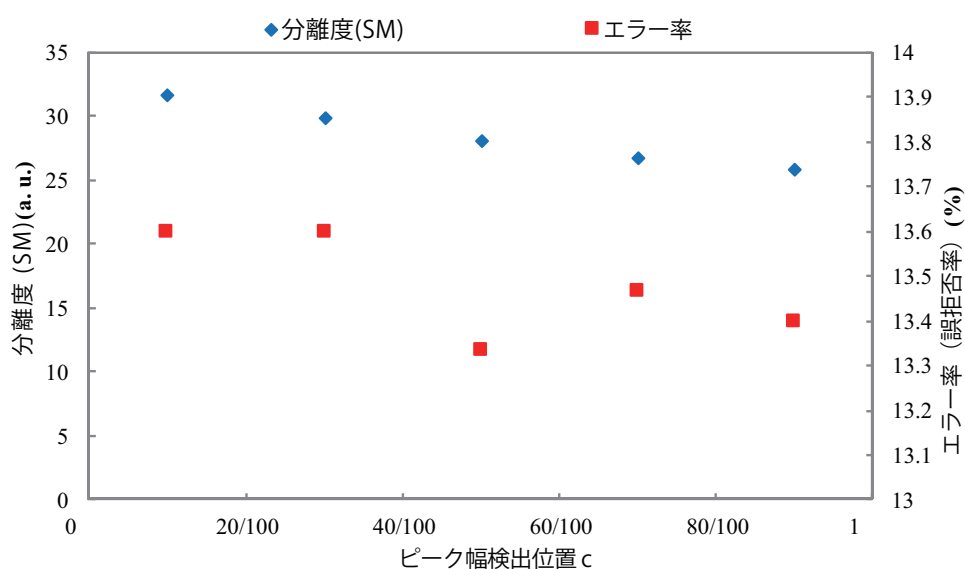


図 5.22: 特徴量算出位置と **SM** とアニメ画像 **FRR**.

この結果より、特徴量抽出位置は低いほど **SM** が高い値となる傾向がみられ、**SM** は高ければ高いほど分類には良いため、**SM** のみで特徴量抽出位置を決めるならば、 $1/10$  値幅が最適であった。また、アニメ画像 **FRR** は低ければ低いほどアニメ実写分離には良く、アニメ実写分類のみで特徴量抽出位置を決めるならば、 $1/2$  値幅が最適である結果となった。アニメ **FRR** の特徴量取得位置による変化量は  $0.3\%$  程度であるが、1000 枚のデータ中の 3 枚であり、この手法は大量のデータの分類に用いるので  $0.3\%$  でもエラーは小さい程良い。以上の結果より、最も低いアニメ画像 **FRR** が得られた  $1/2$  値幅をアニメ実写分類のための画像の **FQ** 取得位置と定義した。図5.22により最適化した  $1/2$  値幅より算出する **FQ** を利用し作成した色特徴量分布ヒストグラムを図5.23に示す。

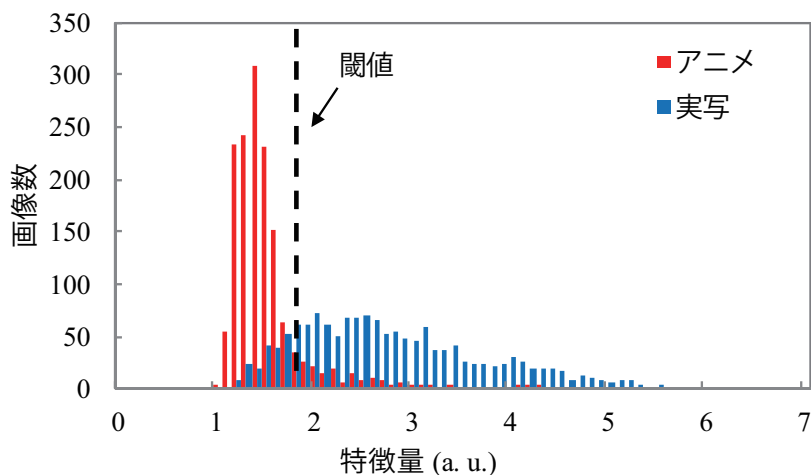


図 5.23: アニメ・実写画像分類結果.

$FQ=1.72$  を閾値とすると、 $FRR$  13.3 %で分類ができた。特徴量をアニメと実写で比較するとアニメの  $FQ$  の分布は実写画像よりも小さい傾向がある。画像検索においては、 $FQ \leq 1.72$  の画像をアニメ画像検索時の入力データとし、 $FQ > 1.72$  の画像を実写画像検索時の入力データとした。この分類においては、それらが等しい誤り率 (Equal Error Rate:  $EER$ ) になるように閾値を決定した。ここで  $EER$  を閾値として選んだのは、 $FRR$  と  $FAR$  のトレードオフを考慮したためであるが、適用先や所望の精度によっては、 $FRR=0\%$  や  $FAR=0\%$  の位置に閾値を設定することも考えられる。また、表5.3に示す通り、動画検索の際には1つの動画から4枚の画像を抽出して閾値以下の特徴量を持つ画像が4枚中2枚以上の時をアニメ動画と判定することによって、このシンプルな手法でもアニメ動画の  $FRR=0.847\%$ 、実写動画の  $True\ Rejection\ Rate(TRR)=91.2\%$  での分類が可能な結果となった。

表 5.3: 分類法を用いた動画識別の結果.

	1 画像利用時	4 画像利用時
アニメ動画の $FRR$	13.3 %	0.847 %
実写動画の $TRR$	86.7 %	91.2 %

## 5.6 光相関に基づく著作権管理システムの評価

### 5.6.1 評価実験

ホログラフィック光相関システムにおいてデータベースとなるホログラフィック光ディスクには、円周方向に  $2.3 \mu\text{m}$  のシフト間隔，半径方向に  $4.6 \mu\text{m}$  のシフト間隔で記録を行うことによって1枚のディスクに7.8億フレーム以上の画像を記録することが可能である。これは、1映画90分と仮定し24 frames/s中の15 frames/sで登録すると、1ディスクに過去10年間日本国内において公開された全世界の映画(8199本) [137]の記録が可能であること試算できる。光相関システムによる画像識別の精度評価のために、アニメ画像50枚を用いて、光相関演算実験を行った。実験結果をもとに作製したEERグラフを図5.24に示す。

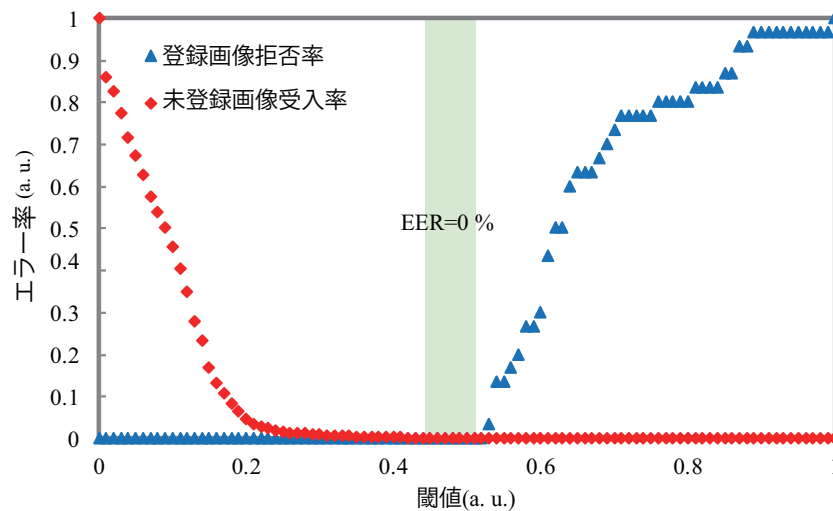


図 5.24: 光相関演算実験結果に基づく EER グラフ。

図5.24より，光相関システムによる画像識別評価実験の結果から作成した光相関システムによる画像識別は EER 0 %にて識別可能であることが確かめられた [72].

### 5.6.2 性能評価

次に、動画とアニメの割合から本手法を組み込んだ場合にいかに効率化されるかを考察する。アニメ実写分類を取り入れた際の削減率  $R$  は、

$$R = \frac{N}{N_{\text{all}}} = \frac{N_{\text{all}} - (N_{\text{live}} \times TRR_{\text{live}} + N_{\text{anime}} \times FRR_{\text{anime}})}{N_{\text{all}}} \quad (5.5)$$

と記載できる。ここで、アニメ実写分類を取り入れた際の光相関演算への入力動画数を  $N$ 、キーワード検索によって検索される全動画数を  $N_{\text{all}}$ 、実写動画の数を  $N_{\text{live}}$ 、アニメの数を  $N_{\text{anime}}$ 、 $TRR_{\text{live}}$  とはアニメ実写分類によって閾値以下をアニメとしたときに正しく削除できる実写動画の割合、 $FRR_{\text{anime}}$  は閾値以下をアニメとしたときに間違っ削除してしまうアニメ動画の割合を意味する。例えば、 $N_{\text{live}} = N_{\text{anime}}$  で閾値を  $EER$  の値とした場合、 $R = 0.5$  となる。これは、動画ダウンロード数、光相関演算数を 0.5 倍に削減可能ということである。実際には、一般的な単語の入ったタイトルのアニメをキーワードによって検索すると集まる動画の中のアニメと実写の割合は、実写の方が多い (3:7 といわれたりする) ことが報告されている。そのため  $R=0.35$  と算出でき、ダウンロード数、光相関演算ともに 0.35 倍の演算数となるため、効率化が実現可能である [74]。

## 5.7 結言

本章では、光相関演算システムの最近傍法への適用における有用性を示すために、類似画像検索用符号化法を提案し、実験的に閾値を決定し、エラー率 0% の照合を実現した。光相関演算システムのユーザビリティと汎用性の向上を目指し、クラウド環境における光相関演算システムの位置づけを提案し、Web ブラウザから光相関器が利用可能なデモシステムを構築した。さらに、光相関システムのインターネット上での利用を想定した一連の著作権管理システムにおいて、インターネットからの動画ダウンロード部、光相関器へのデータの入力部にボトルネックがあることを明らかにした。著作権管理システムの照合効率の向上・高速化を目指してカラー特徴を用いた画像分類法を提案し、アニメ画像  $FRR_{13.3\%}$  で 86.7% の実写画像を除外することが可能である結果を得た。サムネイル画像に画像分類法を適用することでダウンロードするデー



タ数・光相関システムへの入力データの量を 0.35~0.5 倍の量に減らすことができ、大容量の動画データのダウンロード数を減らしサーバの負荷を軽減すると同時に光相関システムへの入力データの数を絞り込むことが可能となった。このアニメ・実写分類により動画ダウンロードから照合まで、一連の著作権管理システムとして、全体を 2 倍以上効率化可能であることを示した。



## 第6章 光相関システムの応用 II :

### クロスドメイン検索システム

#### 6.1 緒言

タッチスクリーンデバイスなどの普及によって、スケッチベースの画像検索システムなど手書き入力を検索クエリとした曖昧検索システムの要望は強い。深層学習によって静止画の分類タスクにおいては既に高い性能が実現されており [2,3], マルチモーダル検索やクロスドメインのデータ検索などが、更に難しいタスクとして取り組まれている [4,5]。これらの多くは、特徴量抽出器として深層畳み込みニューラルネットワーク (DCNN) に代表される深層学習を用いる取り組みである。深層学習によって高精度な処理が可能になったのは、従来最も難しい処理であった特徴量の抽出処理、すなわちデータのどこに注目するかを発見する処理を自動化できたことが大きなブレイクスルーとなったと考えられる。しかしながら、大規模データを扱う検索タスクにおいて、従来のコンピュータでは多くの電力や時間を要する課題がある。これは、CPU や GPU などを利用した高速演算では、高速メモリバンド幅が機能する容量が 1 次記憶メモリである DRAM などの半導体メモリ上に展開できる容量に限られているためである。そこで、照合に用いるデータのサイズの縮小や、計算コストの削減や応答時間の短縮に関する研究が近年活発に行われている [10,11]。このような背景のもと、大規模データを高速かつリアルタイムに処理できるハードウェア技術への期待は大きく、本研究で構築した光相関システムもこの課題を解決できるハードウェアの一つであると考えた。しかし、これまでの光相関演算は入力データの光強度による規格化が必要である点や、利用する空間光変調器に適用させた特徴量抽出が必要な点が新規応用展開に於いて課題であり、特定の条件の画像など演算できるデータに限られ、クロスドメイン検索の光相関による実現の報告はこれまでなかった。

本章では，光相関システムの用途拡大に向けて，具体的な適用例として，深層畳み込みニューラルネットワーク (DCNN) を特徴抽出器として用いるクロスドメイン類似画像検索システム実験実証について述べる．これまででは画像の前処理として，カラー画像に対してグレースケール化・エッジ抽出・二値化を行っていたが，この手法は二値化の手法としては非常にシンプルである一方で，特定の画像サイズの完全一致を検索する照合に限られ，限定的であった．そこで，画像処理によるパターン認識などでロバスト性向上のために導入されている前処理の手法を光相関システムの前処理に適用することによって光相関システムにおける画像識別能力の向上を検討する．具体的には，光相関用の変換モジュールを `autoencoder` [145] を用いて生成し，その変換モジュールによってスケッチベースの類似画像検索を光相関システムに基づいて実証した結果について述べる．6.2 節では，本スケッチベース画像検索システムの基本構成と本研究で導入した光相関用変換モジュールについて述べる．6.3 節では，6.2 節で提案した基本構成を用いて実際に光相関器に基づいたクロスドメイン画像検索システム (フリーハンドのスケッチ画像を検索クエリとした類似画像検索) を実証した報告をする．6.4 節では本章の結言を述べる．

## 6.2 スケッチベース画像検索システムの基本構成

図6.1に構築したスケッチベース画像検索システムの基本構成を示す．本システムは大きく分けて特徴量抽出器，光相関用変換モジュール，光相関器の 3 つで構成される．まず，特徴量抽出器によって用途に合わせた特徴量を抽出する．第 2 に，光相関用変換モジュールにより光相関用のデータに変換する．第 3 に，本論文で構築した光相関器によってデータ照合を行う．

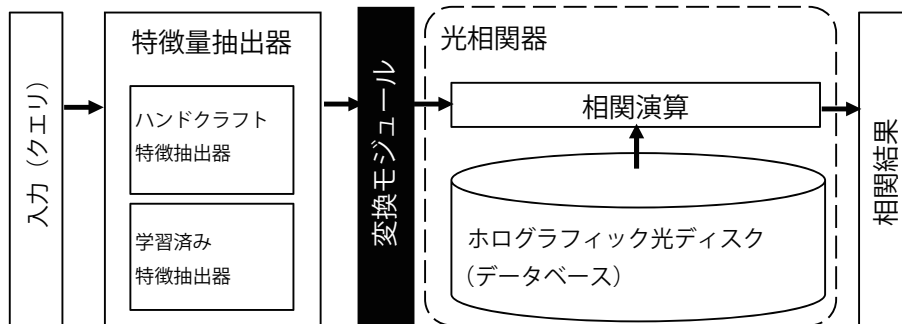


図 6.1: 光相関用変換モジュールを導入したデータ照合システムの基本構成

光相関用変換モジュールを導入した本システム構成は、様々な特徴量抽出器に適用展開が期待でき、電子コンピュータに於ける深層学習の研究で構築済みのモデルをそのまま転用して特徴量抽出器として用いることが可能であることも魅力である。

### 6.2.1 光相関用変換モジュールの学習

図6.2に光相関用変換モジュールの構成を示す。光相関用変換モジュールはその実数で構成された特徴量の近似を行い、その後バイナリ化し光相関器の開口サイズに合わせた円形のレイアウトに再配置する機能を持つ。

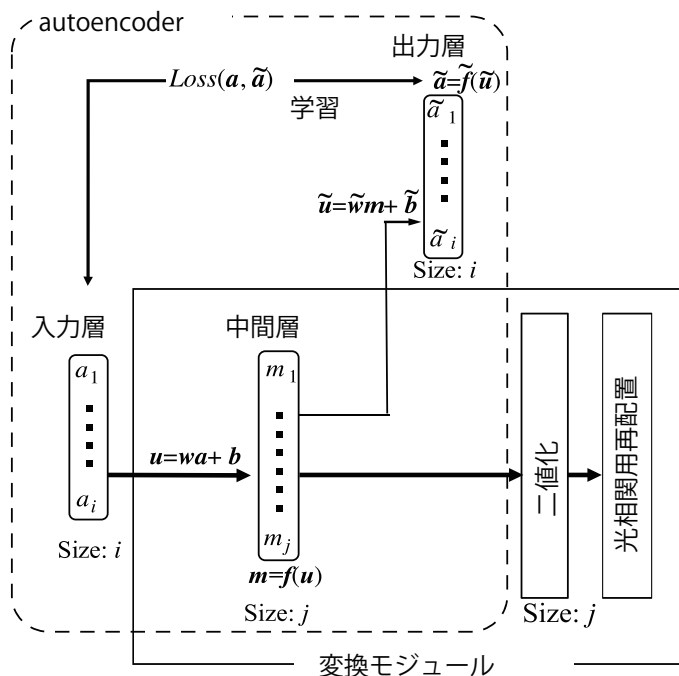


図 6.2: autoencoder の学習に基づいて構築した光相関用変換モジュール.

ここで、2 値化に向けた近似の層生成法としてニューラルネットワークの一種である autoencoder [145] を用いて学習したことは特徴的である。通常の深層学習においては要素数削減に用いる autoencoder であるが、本光相関用データ変換モジュールにおいてはバイナリ化における情報損失を可能な限り抑制するための要素数拡大に用いるため、中間層の次元数が入力層より大きい autoencoder を採用した。本実験で用いた autoencoder は出力データが入力データをそのまま再現する 3 層のニューラルネットワークである。autoencoder の学習の過程では入力されたデータは入力層から中間層、出力層に向けて伝播され、中間層は

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1i} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{j1} & w_{j2} & \cdots & w_{ji} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_j \end{bmatrix}, \quad (6.1)$$

$$\mathbf{m} = f(\mathbf{u}) \quad (6.2)$$

と表される。ここで、 $\mathbf{m}$  は入力層の出力に対して重みをかけ、バイアスを加算した結果を活性化関数に入力した際の出力である。学習の過程では2乗和誤差

$$Loss(\mathbf{a}, \tilde{\mathbf{a}}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^i (\tilde{a}_k - a_k)^2 \quad (6.3)$$

を損失関数として用いて、出力層が入力データと同じ値を持つように、誤差逆伝搬法 [146] によって、重みとバイアスを更新していく。本システムでは、バイナリ近似のために、活性化関数として

$$f(\mathbf{u}) = 1/(1 + \exp(-g\mathbf{u} - c)), \quad (6.4)$$

を用いた。ここで、 $g$  と  $c$  はそれぞれ入力値とオフセット値であり、この式 (6.4) 中のゲイン  $g$  を1より大きな数に設定することによって、シグモイド関数をステップ関数に近づけることができる。本実験では  $g=1000$  を採用した。また、**autoencoder** の出力層の活性化関数に用いた活性化関数は、

$$\tilde{f}(\tilde{\mathbf{u}}) = \tanh(\tilde{\mathbf{u}}) \quad (6.5)$$

である。

**autoencoder** を用いてバイナリ化のための近似を行う層を生成することによって、任意の行列サイズのバイナリ特徴量への変換が可能となる。これは、空間光変調器のサイズやレンズの開口サイズに合わせた要素数で最適化したバイナリ変換器を生成するために有効である。このように、中間層に対して制約を加えた状態で学習させることにより、制約を満たした光相関用バイナリ近似で用いる重みとバイアスを自動的に獲得可能である。**autoencoder** を学習させた後は、出力層を取り外し、中間層の出力を利用することで光相関用変換モジュール中のバイナリ近似機能として作用させることができる (図6.2)。また、2値化した特徴量を光相関器の開口サイズに合わせた円形のレイアウトに再配置するのは、光相関器において **SLM** 領域を最大限に利用できるデータサイズで演算を行えるようにするためである。

## 6.3 光相関に基づくスケッチベース画像検索システムの実験実証

### 6.3.1 実験条件

提案基本構成において, Sketch-a-Net [5] を特徴量抽出器として用い, フリーハンドスケッチを検索クエリとした類似画像検索について光相関器を用いて実験を行った. 学習・テストには参考文献 [5] で利用されているデータベースを用いた. これは, 2次元のカラー商品椅子画像を 297 枚とそれに対応したスケッチ画像 297 枚で構成されたデータベースである. 本実験における CNN の学習による特徴抽出器生成過程においては, 参考文献 [5] と同様に, 学習用データとしてカラー商品画像 200 枚とそれらに対応したスケッチ画像 200 枚を用いて学習を行い, 特徴量抽出器を生成した. また, 2 値化近似のためのパラメータ生成時の autoencoder での学習過程においても, CNN での特徴量抽出器学習時と同様の 200 ペアの学習データを用いた. 照合の精度を確かめる実験に於いては学習過程とは異なる 2 次元のカラー商品画像 97 枚をデータベースとして採用し, それぞれに対応したスケッチ画像 97 枚を入力データとして照合精度の検証を行った. ここで, Sketch-a-Net を用いたのは, 学習済みネットワーク及び特徴量抽出を実行するためのプログラムが著者らによって公開されているため CNN の知識が多くなくとも容易に利用可能であったためである. このように, 光相関用モジュールを導入して光相関用のバイナリデータを生成する本システム構成は, 様々な特徴量抽出器との組み合わせの実現可能性がある. このように, 電子コンピュータにおける深層学習の研究で構築済みのモデルをそのまま転用して光相関システムの前処理に特徴量抽出器として用いることが可能であることは今後の光相関の汎用性の観点に於いて魅力的である.

本実験では椅子のデータに対して, CNN を用いて特徴量抽出したのち (要素数  $i = 2560$  の Float 値の行列), 提案手法を用いて光相関用のバイナリ行列を要素数  $j = 40000$  で生成した. 変換したデータベース用のデータをホログラムディスクにパルスレーザを用いて  $10 \mu\text{m}$  のシフト多重記録シフトピッチでホログラム記録した光相関データベースを用いて実験を行った. 本実験のホログラム記録時はデータベースの商品写真から特徴量抽出し, 光相関用変換モジュールによって光相関用に変換した情報光パターンの外側にホワイトレイト 50% のランダムな参照光パターンを付加して作製した (図



6.3(a). 光相関演算時の入力用ページデータはスケッチデータから特徴量抽出し，光相関用変換モジュールによって光相関用に変換した情報光パターンである (図6.3(b)).

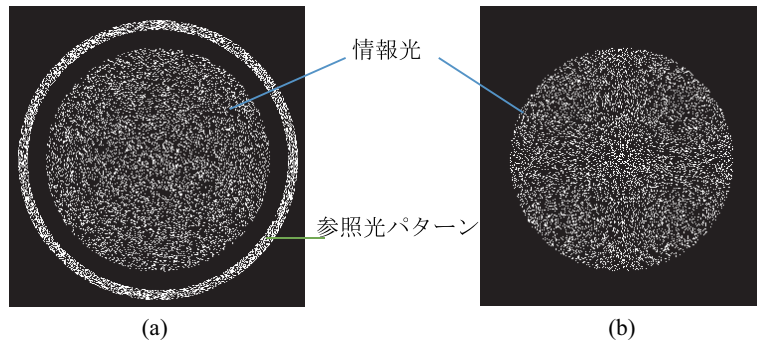


図 6.3: 実験で用いたパターン例 (a) 記録用, (b) 再生用.

また，データベースの記録密度と光相関演算精度に影響するため，ホワイトレイトのデータ間差が小さいことが望ましく，その分散は0であることが望ましい．図6.4は抽出された特徴量に対して提案光相関用変換モジュールなしにバイナリ化した場合と提案光相関用変換モジュールによってバイナリ化した場合のホワイトレイト存在割合を示したグラフである．光相関用変換モジュールなしでは標準偏差 1.9 %となってしまうのに対し，光相関用変換モジュールによって分散 0 の均一なホワイトレイトを持つ情報光パターンへの変換が可能であることが確かめられた．本実験では，光相関用変換モジュール内の autoencoder で近似時に，情報光のホワイトレイトが 20 %で均一となるように式 (2) のオフセット値  $c$  を設定してしる．ここで，情報光パターンと参照光パターンエネルギー比は 2:1 であり，記録時のエネルギーは 2.8  $\mu\text{J}$  であった．その後，データベース記録を行ったディスク上のデータベースをスキャンし，相関信号を取得した．ここで，再生時のエネルギーは 4.5  $\mu\text{W}$  であった．

### 6.3.2 実験結果

図6.5は光相関システムでの照合結果例である．光相関出力として得られた光強度の大小関係によって，類似形状を持つデータベース画像を判定した．例えば，図6.5 (a) のスケッチを入力すると，図6.5 (b) に示すような光強度が得られ，高い相関値が得ら

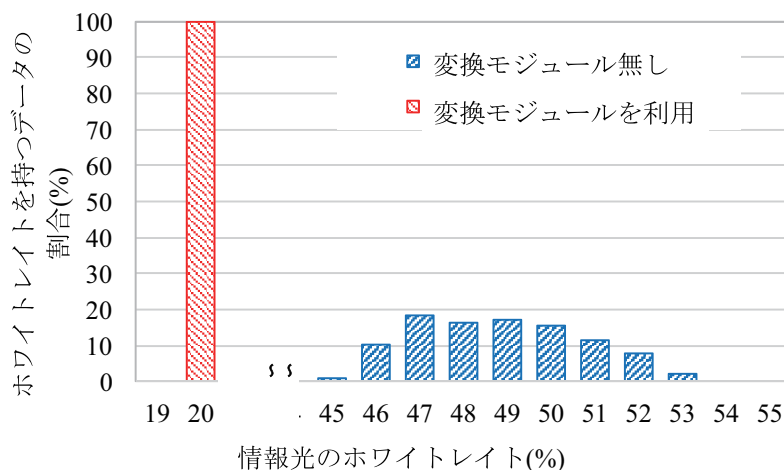


図 6.4: 実験で用いたパターンのホワイトトレイトの存在割合.

れているデータベース画像は入力スケッチデータとよく類似している結果が得られた。このように、入力データと類似した画像を検出するあいまい検索を光相関器を用いて実現した。次に、精度について評価した結果を述べる。本研究では、97 枚のスケッチをそれぞれ入力した際に、そのスケッチと対応する商品が上位 10 枚以内に現れた確率を精度とした。学習済みの CNN 特徴量抽出器で特徴量抽出を行った結果実数値の状態では 97.94 % の精度となるデータに対して、光相関用変換モジュールを用いて光相関用のバイナリに変換後デジタルシミュレーションによって同様の精度を検証した結果、97.94 % となった。このことから、光相関用変換モジュールを導入してバイナリ特徴量を生成する過程において、バイナリ化時の情報量低下の照合精度への影響を最小限に抑えられていることが確認できた。また、光相関器を用いてデータ変換したときの精度は 91.75 % となった。

表 6.1: スケッチベース画像検索システムの精度

(a) 学習済みの CNN 特徴量抽出器で特徴量抽出を行った実数値の特徴量	97.94 %
(b) (a) の特徴量を光相関用変換モジュールで変換したバイナリ特徴量	97.94 %
(c) (b) の特徴量を用いた光相関演算実験	91.75 %

これは、ホログラムのシフト多重によるノイズの増大や、光電子増倍管などの本実

### 6.3 光相関に基づくスケッチベース画像検索システムの実験実証

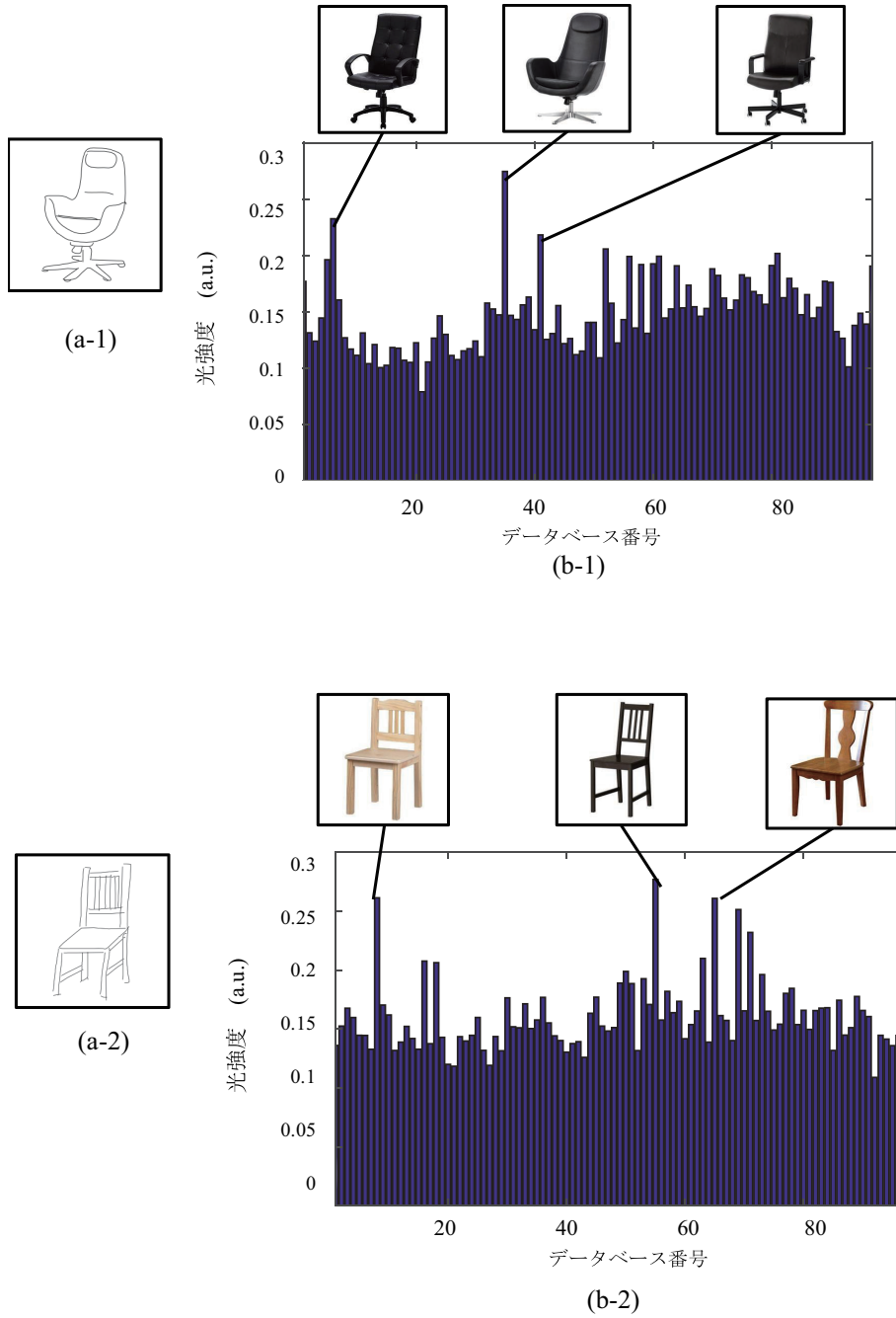


図 6.5: 光相関器を用いた類似画像検索の結果。(a) 入力クエリとして用いたスケッチ画像, (b) (a)を入力した時の光相関器の出力と高い相関値が得られているデータベース画像上位3つの商品画像。

験で用いたデバイスにおける電気ノイズの影響が出たと考えられる。本精度の低下に関しては、ホログラフィックディスクに記録時のデータ配置の順番の工夫などにより、今後改善が期待される。また、本研究におけるあいまい検索での相関出力が、類似の高いものでも完全自己相関を1として規格化したときに0.3程度と低いことも、本実験において精度の低下を招いた要因であることが考えられるため、今後、類似した画像との一致率がより高くなるような特徴量変換器を構築することも有効であると考えられる。

## 6.4 結言

本章では、手書きスケッチ画像を検索クエリとした類似画像検索システムを、光相関用変換モジュールを開発し導入することで光相関器と組み合わせて実装した。光相関用変換モジュールはあらゆるデータを光相関システム用のバイナリに変換する。本実験では、電子コンピュータにおける深層学習の研究で構築済みのモデルをそのまま転用しており、本手法を用いることによって光相関システムに於いて従来不可能であったクロスドメイン検索を実験実証した。本実験によって、学習済み特徴量抽出器と光相関用変換モジュールの組み合わせにより光相関システムで新たな応用実証を示せたことで、今後光相関の応用展開が広がると期待できる。本システムは、電子コンピュータで実行するにはデータベースの容量が多い(1次記憶装置の記憶容量を上回るデータでの)検索時に特に有効である。

## 第7章 結論

本研究では、ホログラフィック光多重記録手法を導入した光相関演算システムにおいて、空間周波数制御による光エネルギー均一化記録手法構築、相関フィルタの高速かつ高密度な記録のための光エネルギーと相関信号の実験的評価、および光学実験系の自動制御化などにより、膨大なデータにおいても超高速相関演算を実現できる可能性を実験的に示した。更に、機械学習を導入した光相関用符号化技術により、クロスドメイン検索を実現し、光相関演算技術の適用分野の拡張を行った。以下に各章ごとに概要と得られた研究成果をまとめる。

第1章では、本研究に先立ち、光相関システムの従来の研究開発の動向を述べ、本研究の位置づけを明確にした。

第2章では、高速相関演算実証の前にコアキシャルホログラフィック光相関システムの速度に関する要素を整理し、光相関演算・転送速度を定義した。

第3章では、光相関器による光相関演算の高速性の実験的実証を目的とし、空間周波数分布制御による光エネルギー均一化記録手法構築、相関フィルタの高速かつ高密度な記録のための光エネルギーと相関信号の実験的評価、および光学実験系の自動制御化などにより、毎秒 143 Giga bit 相当での光相関演算を実験的に達成した。本実験結果によって膨大なデータにおいても超高速相関演算を実現できる可能性を示した。

第4章では、光相関器の安定性や再現性向上を目的とし、従来の光ディスクのサーボ制御系と光相関器の組み合わせによる光相関システムの安定性の向上を実験的に確かめた結果について述べた。相関システムの実用化に向けて、ダイクロイック層なしのホログラムディスクでのシンプルかつ安価な光相関の安定化も提案し、従来のホログラフィックメモリシステムで用いられていたディスクよりも安価な構成で安定した光相関を実現できる可能性を実験的に示した。

第5章では、光相関システムの最近傍法への適用における有用性を示すために、完

全一致画像検索用符号化法を提案し、実験的に閾値を決定し、エラー率0%での照合を実現した。光相関システムのユーザビリティと汎用性の向上を目指し、まず、クラウド環境における光相関システムの位置づけを提案した。さらに、光相関システムを照合部に導入した光・デジタルハイブリッド動画検索システムの提案と実証を行った。著作権管理システムにおけるボトルネックの改善として、限られた画素数や改変されたサムネイル画像を対象に実写データを排除することを目的とした画像分類法を構築し、システム全体としての効率化を評価した。

第6章では、光相関システムの用途拡大に向けて、深層畳み込みニューラルネットワークを特徴抽出器として用いるクロスドメイン類似画像検索システムを提案・構築した。光相関用の変換モジュールを **autoencoder** の学習に基づき生成し、深層畳み込みニューラルネットワークと共に光相関システムの前処理に加えるシステム構成を実現した。構築した変換モジュールによってクロスドメイン検索を光相関システムに基づいて実証した実験結果について述べた。

本論文では、光相関器の制御系を確立し、光相関におけるデータベース作成条件を最適化することによって **143 Gbps** 相当での光相関演算を実験実証し、既存の電子デバイスにおけるデータ転送の物理制約を打破するシステムを実証した。また、安定化のためのディスク構造提案を行いその有用性を実証した。更に、デジタル画像処理・深層学習との融合によって、光相関システムの新規応用手法技術を開発した。本研究によって光相関システムの高速度性が実証されたことにより、画像処理・深層学習等のデジタル情報処理技術との融合による光相関システムの応用展開可能性が飛躍的に広がり、光相関システムが情報化社会におけるデータ解析性能向上のブレイクスルーとなり得ることを示した。本研究は光相関システムの高速度性を実験的に示したうえで情報処理・機械学習技術と光相関システムを融合した研究であり、深層学習技術を光技術の中に取り入れた一つの成功事例として情報処理技術と光技術の融合の加速・進展に貢献できたと考えています。

## 謝辞

本研究は電気通信大学大学院情報理工学研究科先進理工学専攻において、本学大学院情報理工学研究科渡邊恵理子准教授のご指導のもとに行ったものである。本研究を遂行するにあたり、懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました渡邊恵理子准教授に深く感謝の意を表すと共に厚く御礼申し上げます。渡邊恵理子准教授には研究ならびに学生生活の上でも数々の有益なご指導、激励を賜りました。心より感謝申し上げます。

本学大学院情報理工学研究科先進理工学専攻美濃島薫教授、渡邊昌良教授、宮本洋子准教授、総合情報学専攻庄野逸教授には、本研究の副査を快く了承頂き、本論文作成にあたり貴重な御教示を頂きました。ここに深く感謝致します。

小館香椎子特任教授をはじめとする株式会社 **Photonic System Solutions** の皆様には光相関システムのアプリケーションを考える上でご助言を賜りましたことを深く感謝いたしております。

本学産学連携研究員福本敦氏にはホログラフィックメモリシステムに関して、本学産学連携研究員菅谷寿鴻氏及びパルステック工業株式会社丸山洋一氏には光ディスクの制御系に関して多くのご助言を賜りましたことを深く感謝いたしております。

研究遂行にあたり助成して下さいました独立行政法人日本学術振興会、コニカミノルタ科学技術振興財団の皆様には深く感謝致します。

研究生生活を共に過ごした渡邊研究室の皆様には感謝の意を表します。最後に、応援してくれた家族に感謝致します。





## 参考文献

- [1] D. Reinsel, J. Gantz and J. Rydning, "Data Age 2025:The Evolution of Data to Life-Critical Don't Focus on Big Data; Focus on the Data That's Big," IDC White paper, sponsored by SEAGATE (2017).
- [2] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, and A. Rabinovich, "Going deeper with convolutions," in *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (IEEE, 2015)* pp. 1-9.
- [3] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification," arXiv preprint arXiv:1502.01852 (2015).
- [4] F. Wang, L. Kang and Y. Li, "Sketch-based 3D shape retrieval using Convolutional Neural Networks," in *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (IEEE, 2015)* pp. 1875-1883.
- [5] Q. Yu, F. Liu, Y. Z. Song, T. Xiang, T. M. Hospedales and C. C. Loy, "Sketch Me That Shoe," in *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (IEEE, 2016,)* pp. 799-807.
- [6] Y. Shimeng, G. Bin, F. Zheng, Y. Hongyu, K. Jinfeng, W. H.-S. Philip, "Stochastic learning in oxide binary synaptic device for neuromorphic computing," *Frontiers in Neuroscience* **7**, 186 (2013).
- [7] K. Takeuchi, "Memory system architecture for the data centric computing," *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** 04EA02 (2016).
- [8] G. Indiveri and S. C. Liu, "Memory and Information Processing in Neuromorphic Systems," in *Proceedings of the IEEE*, 103 (IEEE, 2015) pp. 1379-1397.

- [9] B. Chen, F. Cai, J. Zhou, W. Ma, P. Sheridan and W. D. Lu, "Efficient in-memory computing architecture based on crossbar arrays," in Proceedings of the IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) (IEEE,2015) pp. 17.5.1-17.5.4.
- [10] M. Ambai, I. Sato, "SPADE: Scalar Product Accelerator by Integer Decomposition for Object Detection", ECCV2014(European Conference on Computer Vision)
- [11] J. Johnson, M. Douze and H. Jégou, "Billion-scale similarity search with GPUs," arXiv preprint arXiv:702.08734(2017).
- [12] Y. Jiang, J. Kang and X. Wang, "RRAM-based parallel computing architecture using k-nearest neighbor classification for pattern recognition," Scientific Reports **7**, 45233 (2017).
- [13] Y. Shen, N. C. Harris, S. Skirlo, M. Prabhu, T. Baehr-Jones, M. Hochberg, X. Sun, S. Zhao, H. Larochelle, D. Englund and M. Soljačić, "Deep learning with coherent nanophotonic circuits," Nat. Photon. advance online publication (2017).
- [14] 谷田純; "ナチュラルコンピューティングシリーズ 第1巻 光計算" 近代科学社.
- [15] J. W. Goodman *Introduction To Fourier Optics* Roberts & Co., 2004.
- [16] A. V. Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering," IEEE Transactions on Information Theory, **10**, 139-145 (1964).
- [17] C. S. Weaver and J. W. Goodman, "A Technique for Optically Convolver Two Functions," Appl. Opt. **5**, 1248-1249 (1966).
- [18] J. Tanida, A. Uemoto and Y. Ichioka, "Optical fractal synthesizer: compact and experimental verification," Appl. Opt. **32**, 653 (1993).
- [19] J. Tanida and Y. Ichioka, "Optical logic array processor using shadowgrams," J. Opt. Soc. Am. **73**, 800 (1983).
- [20] P. Ambs, "Optical Computing: A 60-Year Adventure," Hindawi Publishing Corporation Advances in Optical Technologies 2010, 372652 (2010).
- [21] R. Athale and D. Psaltis "Optical Computing Past and Future," OPTICS & PHOTONICS NEWS JUNE 2016, 32-39 (2016).

- [22] B. Javidi and C. Kuo, "Joint transform image correlation using a binary spatial light modulator at the Fourier plane," *Appl. Opt.* **27**, 663-665 (1988).
- [23] E. Watanabe and K. Kodate, "Implementation of a high-speed face recognition system that uses an optical parallel correlator," *Appl. Opt.* **44**, 666-676 (2005).
- [24] T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby," *Nature*, **187**, 493 (1960).
- [25] D. Gabor, "A New Microscopic Principle," *Nature* **161**, 777 (1948).
- [26] D. Psaltis and N. Farhat, "Optical information processing based on an associative-memory model of neural nets with thresholding and feedback," *Opt. Lett.* **10**, 98 (1985).
- [27] T. Yatagai, Y. Yagai, M. Mori, M. Watanabe, "Real-time face recognition system with optical learning neural network," *Proc. SPIE 3466, Algorithms, Devices, and Systems for Optical Information Processing II*, (9 October 1998).
- [28] B. Javidi, "Nonlinear joint power spectrum based optical correlation," *Appl. Opt.* **28**, 2358-2367 (1989).
- [29] B. Javidi, "Comparison of nonlinear joint transform correlator and nonlinearly transformed matched filter based correlator for noisy input scenes," *Opt. Eng.* **29**, 1013 (1990).
- [30] K. Matsuoka, "Optical pattern recognition system using multiple optical correlators," *OSA Annual Meeting* (1999).
- [31] A Vargas, J Campos, C Iemmi, S Ledesma and M.J Yzuel: "Optical codification for multiclass pattern recognition using a parallel correlator" *Optics Communications* **162**, 121 (1999).
- [32] H Zhang, C.M Cartwright, M.S Ding and W.A Gillespie: "Optical implementation of a photorefractive joint transform correlator with wavelet filters", *Optics Communications* **181**, 223 (2000).
- [33] P. M. Birch, A. Gardezi, R. Young and C. Chitin, "Woluwe holographic MACH correlator," *Proc. SPIE 7696, Automatic Target Recognition XX; Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXIV; and Optical Pattern Recognition XXI*, 76961L (May 12, 2010).

- [34] G Unnikrishnan, J. Joseph and K Singh: "A non-zero order joint transform correlator for space-variant pattern recognition", *Optics Communications* **171**, 149 (1999).
- [35] P. V. Yezhov, O. A. Il'in, T N Smirnova and E A Tikhonov, "Binary phase masks on self-developing photopolymers: the technique for formation and testing in an optical correlator," *LASER APPLICATIONS AND OTHER TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS* **33**, 559 (2003).
- [36] M. V. Konnik, and S. N. Starikov, "The use of a consumer grade photo camera in optical-digital correlator for pattern recognition and input scene restoration", *Optics Communications* **282**, 4210 (2009).
- [37] J. Widjaja, "Noisy face recognition using compression-based joint wavelet-transform correlator", *Optics Communications* **285**, 1029 (2012).
- [38] J. Widjaja, and K. Kaewphaluk, "Experimental verifications of noise suppression in retinal recognition by using compression-based joint transform correlator", *Optics Communications* **315**, 188 (2014).
- [39] C. Chen, and C. Chen, "A Mach- Zehnder joint transform correlator with the simulated annealing algorithm for pattern recognition", *Optics Communications* **284**, 3946 (2011).
- [40] Q. Wang, Q. Guo, L. Lei, and J. Zhou, "Iterative partial phase encoding based on joint fractional Fourier transform correlator adopting phase-shifting digital holography", *Optics Communications* **313**, 1 (2014).
- [41] T. Manzur, J. Zeller, and S. Serati, "Optical correlator based target detection, recognition, classification, and tracking", *Appl. Opt.* **51**, 4976 (2012)
- [42] T. Zheng, L.Cao, Q. He, G. Jin, "Full-range in-plane rotation measurement for image recognition with hybrid digital-optical correlator *Opt. Eng.* **53**, 011003 (2013).
- [43] T. Zhao, L. Cao, T. Zhen, Y. Yi, Q. He, and G. Jin "Portable read-only volume holographic optical correlator", 53-54, *IWH2012* (2012).
- [44] T. Zheng, L. Cao, T. Zhao, Q. He and G. Jin, "Large range rotation distortion measurement for remote sensing images based on volume holographic optical

- correlator", Proc. SPIE 8498, Optics and Photonics for Information Processing VI, 84980F (2012)
- [45] P. Yezhov, A. Kuzmenko, J. Kim, and T. Smirnova, "Method of synthesized phase objects for pattern recognition: matched filtering", Opt. Express **20**, 29854 (2012).
- [46] Optalysys , "New video from Optalysys showing co-processor product" <<http://optalysys.com/new-video-optalysys-showing-co-processor-product/>> (2017 年 3 月 24 日参照)
- [47] Optalysys , "Optalysys and EI demo sequence alignment technology at AGBT" <<http://optalysys.com/optalysys-ei-demo-sequence-alignment-technology-agbt/>> (2017 年 3 月 24 日参照)
- [48] F. Bouzidi, M. Elbouz, A. Alfalou, C. Brosseau, A. Fakhfakh, "Optimization of the performances of correlation filters by pre-processing the input plane," Opt. Commun. **358**, 132-139 (2016).
- [49] Y. Ouerhani, A. Alfalou, M. Desthieux, C. Brosseau, "Advanced driver assistance system: Road sign identification using VIAPIX system and a correlation technique," Opt. Laser. Eng. **89**, 184-194 (2017).
- [50] Q. Wang , A. Alfalou and C. Brosseau, "New perspectives in face correlation: discrimination enhancement in face recognition based on iterative algorithm," Proc. SPIE 9845, Optical Pattern Recognition XXVII, 98450H (2016).
- [51] T. Napoléon and A. Alfalou, "Pose invariant face recognition: 3D model from single photo," Opt. Laser. Eng. **89**, 150-161 (2017).
- [52] D. Solus, L. Ovseník and J. Turán, "Optical Correlator in Industrial Image Pattern Recognition System," Carpathian J. Electron. Comput. Eng. **9**, 27-31 (2016).
- [53] P. Xu, C. Hong, G. Cheng, L. Zhou, and Z. Sun, "Planar optical correlators integrated with binary optical lens," Opt. Express **23**, 6773-6779 (2015).
- [54] E. Ouabida, A. Essadique, A. Bouzid, "Vander Lugt Correlator based active contours for iris segmentation and tracking," Expert Syst. Appl. **71**, 383-395 (2017).

- [55] E. Ouabida, A. Essadique, A. Bouzid, "Vander Lugt Correlator based active contours for iris segmentation and tracking," *Expert Syst. Appl.* **71**, 383-395 (2017).
- [56] Y. Yi, L. Cao, W. Guo, Y. Luo, J. Feng, Q. He, and G. Jin, "Optical fingerprint recognition based on local minutiae structure coding," *Opt. Express* **21**, 17108-17121 (2013).
- [57] A. V. Zea, J. F. B. Ramirez, and R. Torroba, "Three-dimensional joint transform correlator cryptosystem," *Opt. Lett.* **41**, 599-602 (2016).
- [58] T. Hoshizawa, Y. Tada, and N. Nakai, "Holographic Data Storage System with Terabyte Capacity and Gigabit Transfer Rate ," *ISOM Tech. Dig.*, 2015, p. 6.
- [59] 平成 29 年度機械システム振興協会「光相関技術による Web 掲載違法動画像等の超高速検索システムに関する戦略策定」実施報告書 (2018).
- [60] X. Zeng, J. Bai, C. Hou, and G. Yang, "Compact optical correlator based on one phase-only spatial light modulator", *Opt. Lett.* **36**, 1383 (2011).
- [61] A. Alfalou and C. Brosseau, "Robust and discriminating method for face recognition based on correlation technique and independent component analysis model," *Opt. Lett.* **36**, 645 (2011).
- [62] S. Goyal, N. K. Nishchal, V. K. Beri, and A. K. Gupta, "Wavelet-modified maximum average correlation height filter for rotation invariance that uses chirp encoding in a hybrid digital-optical correlator," *Appl. Opt.* **45**, 4850 (2006).
- [63] N. Fukuchi, T. Inoue, H. Toyoda and T. Hara, "Lensless Vanderlugt optical correlator using two phase-only spatial light modulators," *Chin. Opt. Lett.* **7**, 1131-1133 (2009).
- [64] P. K. Banerjee and A. K. Datta, "A preferential digital - optical correlator optimized by particle swarm technique for multi-class face recognition," *Opt. Laser Technol.* **50**, 33 (2013).
- [65] M. S. Monjur, S. Tseng, R. Tripathi, J. J. Donoghue, and M. S. Shahriar, "Hybrid optoelectronic correlator architecture for shift-invariant target recognition," *J. Opt. Soc. Am. A* **31**, 41 (2014).

- [66] E. Watanabe and K. Kodate, " Optical Correlator for Face Recognition Using Collinear Holographic System", *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 6759 (2006).
- [67] F. T. S. Yu and X. J. Lu, "A real-time programmable joint transform correlator," *Opt. Commun.* **52**, 10 (1984).
- [68] A. Heifetz, J. T. Shen, J. K. Lee, R. Tripathi, and M. S. Shahriar, "Translation-invariant object recognition system using an optical correlator and a super-parallel holographic random access memory," *Opt. Eng.* **45**, 1 (2006).
- [69] C. Gu, H. Fu, and J. R. Lien, " Correlation patterns and cross-talk noise in volume holographic optical correlators," *J. Opt. Soc. Am. A* **12**, 861 (1995).
- [70] A. Pu, R. Denkewalter, and D. Psaltis, "Real-time vehicle navigation using a holographic memory," *Opt. Eng.* **36**, 2737 (1997).
- [71] E. Watanabe Y. Ichikawa, R. Akiyama, and K. Kodate, "Ultrahigh-Speed Optical Correlation System Using Holographic Disc," *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 5964 (2008).
- [72] K. Ikeda and E. Watanabe, "High-speed optical correlator with coaxial holographic system," *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 09ME02 (2015).
- [73] K. Ikeda and E. Watanabe, "High-speed image matching with coaxial holographic optical correlator," *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 09SC01 (2016).
- [74] K. Ikeda and E. Watanabe: "Reducing Input Data via Image Categorization to Improve the Speed of Copyright Content Management Systems", *Opt. Rev.* **22**, 93-98 (2015).
- [75] K. Ikeda, K. Kodate and E. Watanabe, "Optical-digital hybrid image search system in cloud environment," *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 09SC03 (2016).
- [76] K. Ikeda, H. Suzuki and E. Watanabe, "Optical-correlation based cross-domain image retrieval system," *Opt. Lett.* **42**, (2017).
- [77] D. M. Simon, S. A. Serati; Optical correlator using ferroelectric liquid crystal spatial light modulators and Fourier transform lenses, US patent US5418380 A, 1994 April 12.

- [78] T. D. Wilkinson; Optical correlator, UK patent application number WO2004029746, 9726386.7, 1997 December 12.
- [79] P. Birch, A. Gardezi, Bhargav Mitra, R. Young and C. Chatwin, "An optical space domain volume holographic correlator," Proc. SPIE 7340, Optical Pattern Recognition XX, 734004 (April 13, 2009).
- [80] C. Gu, F. Mok, J. Hong, I. McMichael, and R. Saxena, "Cross-talk-limited storage capacity of volume holographic memory," J. Opt. Soc. Am. A **9**, 1978 (1992).
- [81] H. J. Confal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, eds., "Holographic data storage" (Springer- Verlag, 2000).
- [82] H. Horimai, X. Tan and J. Li, "Collinear holography," Appl. Opt. **44**, 2575-2579 (2005).
- [83] E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marks, and N. Massey, " Holographic data storage in three-dimentional media", Appl. Opt. **5**, 1303 (1966).
- [84] K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing" Opt. Lett. **19**, 993 (1994).
- [85] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu and G. Barbastathis, "Holographic storage using shift multiplexing," Opt. Lett., **20**,782-784 (1995).
- [86] H. Horimai, X. Tan, J. Li, and K. Suzuki, "Wavelength margin analysis in advanced collinear holography," Jpn. J. Appl. Phys. **44**, 3493 - 3494 (2005).
- [87] X. Tan, H. Horimai, T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, and K. Kuroda, "Collinear technology for holographic versatile disc (HVDTM) system," Proc. SPIE6343, 63432W (2006).
- [88] T. Shimura, Y. Ashizuka, M. Terada, R. Fujimura, and K. Kuroda, "What Limits the Storage Density of the Collinear Holographic Memory?," in Optical Data Storage, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2007), paper TuD1.
- [89] M. Ortuno, S. Gallego, C. Garcia, C. Neipp, and I. Pascual: Appl. Opt. **44**, 1448 (2005).



- [90] 福田隆史"小特集ホログラム記録の現状と実用化への道 2. 各種記録方式の最新技術 2-3. 記録メディア," 映像情報メディア学会誌 61, 741-743 (2007).
- [91] 志村努, "ホログラフィックメモリの記録材料評価法の標準化に向けて," レーザー研究, 38, 338-342 (2010).
- [92] T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, K. Kuroda, X. Tan, and H. Horimai, "Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function," *Opt. Lett.*, 31, 1208-1210 (2006).
- [93] T. Nobukawa, Y. Wani, and T. Nomura, "Multiplexed recording with uncorrelated computer-generated reference patterns in coaxial holographic data storage," *Opt. Lett.* 40, 2161-2164 (2015).
- [94] A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levinstein and K. Nassau, "OPTICALLY - INDUCED REFRACTIVE INDEX INHOMOGENEITIES IN LiNbO<sub>3</sub> AND LiTaO<sub>3</sub>", *Appl. Phys. Lett.* 9, 72 (1966).
- [95] S. Martin, C. A. Feely, and V. Toal, "Holographic recording characteristics of an acrylamide-based photopolymer," *Appl. Opt.* 36, 5757 (1997).
- [96] J. H. Kwon, H. C. Hwang, and K. C. Woo, "Analysis of temporal behaviour of beams diffracted by volume gratings formed in photopolymers," *J. Opt. Soc. Am. B* 16, 1651 (1999).
- [97] K. Momose, S. Takayama, E. Hata, and Y. Tomita, "Shift-multiplexed holographic digital data page storage in a nanoparticle-(thiol - ene) polymer composite film," *Opt. Lett.* 37, 2250 (2012).
- [98] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems", *Proc. IEEE* 92, 1231 (2004).
- [99] 橋村淳司, 野口一能"ホログラフィックメモリー用対物レンズの開発," KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, 4 (2007).
- [100] W. Su and C. Lin, "Enhancement of the Angular Selectivity in Encrypted Holographic Memory," *Appl. Opt.* 43, 2298 (2004).
- [101] K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto, and K. Watanabe, "Improved performance in coaxial holographic data recording," *Appl. Opt.* 15, 16196 (2007).

- [102] C. Burckhardt, "Use of a Random Phase Mask for the Recording of Fourier Transform Holograms of Data Masks," *Appl. Opt.* **9**, 695 (1970).
- [103] A. Emoto and T. Fukuda, "Randomly displaced phase distribution design and its advantage in page-data recording of Fourier transform holograms," *Appl. Opt.* **52**, 1183 (2013).
- [104] T. Kume, S. Yagi, T. Imai and M. Yamamoto, "Digital Holographic Memory Using Two-Dimensional Modulation Code." *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 1732 (2001).
- [105] K. Ikeda and E. Watanabe; "Optimization of recording conditions in ultra-high-speed holographic optical correlation", IONS 2014 (September 2014).
- [106] T. Bray, in *Beautiful Code: Leading Programmers Explain How They Think*, ed. G. Wilson and A. Oram (Oreilly Media Inc., 2007) p. 41.
- [107] H. S. Warren, in *Beautiful Code: Leading Programmers Explain How They Think*, ed. G. Wilson and A. Oram (Oreilly Media Inc., 2007) p. 147.
- [108] H. S. Warren, *Hakker's Delight* (Addison-Wesley, 2003), p. 65.
- [109] Intel: SSE4 Programming Reference: [software.intel.com/file/18187](http://software.intel.com/file/18187). (2007).
- [110] Standard ECMA-267 120 mm DVD - Read-Only Disk 3rd edition (April 2001)
- [111] Standard ECMA-377, Information Interchange on Holographic Versatile Disc (HVD) Recordable Cartridges - Capacity:200 Gbytes per Cartridge.
- [112] D.K. Cohen, W.H. Gee, M. Ludeke, and J.Lewkowitz, "Automatic focus control: the astigmatic lens approach," *Appl. Opt.* **23**, 565 (1984).
- [113] G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. Van Rosmalen and K. S. Immink: *Principles of Optical Disc Systems* (Adam Hilger, Bristol and Boston, 1985).
- [114] K. Ikeda, T. Sugaya and E. Watanabe "Optical correlation system using simple structure holographic optical disk ", *International Workshop on Holography and related technologies(IWH2016)*126-127 (2016).
- [115] "500 Hours of Video Uploaded To YouTube Every Minute [Forecast]" <http://tubularinsights.com/hours-minute-uploaded-youtube/>(2017年7月25日閲覧)

- [116] E. Watanabe, L. Kitabayashi, T. Takahashi, J. Mizuno, M. Kubo, and K. Kodate, "Copyright Contents Management on the Internet", ISGIT2010, 401 (2010).
- [117] 平成 25 年度 知的財産権ワーキング・グループ等 侵害対策強化事業（コンテンツ海賊版対策調査） 最終報告書, 経済産業省
- [118] Manga - Anime here, [<http://manga-anime-here.com/guardians>] Manga-Anime Guardians Project
- [119] " Content ID の仕組み - YouTube ヘルプ" <https://support.google.com/youtube/answer/2797370?hl=ja> (2017 年 7 月 25 日閲覧)
- [120] " 株式会社 Photonic System Solutions" <http://www.psss.co.jp/frecs.html> (2017 年 7 月 25 日閲覧)
- [121] "Vobile Japan 株式会社（ヴォバイルジャパン株式会社） | テクノロジー" <http://www.vobile.jp/technology/index.html> (2017 年 7 月 25 日閲覧)
- [122] L. Lin, C. Chen, M. L. Shyu, S. C. Chen, "Weighted Subspace Filtering and Ranking Algorithms for Video Concept Retrieval", *MultiMedia, IEEE* **18**, 32 (2011).
- [123] Y. Sun, K. Sudo, Y. Taniguchi, "TRECVID 2013 Semantic Video Concept Detection by NTT- MD- DUT", *TREC Video Retrieval Evaluation 2013*.
- [124] X. Wu, S. Satoh, "Ultrahigh- Speed TV Commercial Detection, Extraction, and Maching", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* **23**, 1054(2013).
- [125] A. Sarkar, P. Ghosh, E. Moxley and B. S. Manjunath, "Video Fingerprinting: Features for Duplicate and Similar Video Detection and Query- based Video Retrieval", *Proc. SPIE 6820 (2008) 68200E*.
- [126] 森 雅彦, "将来のコンピューティング技術とシリコンフォトニクス,"日本光学会コンテンポラリーオプティクス研究会 (2015).
- [127] "Open Compute Project" <http://opencompute.org/>(2018 年 1 月 7 日閲覧)
- [128] "Intel ® Rack Scale Design Is Now Ready for Open Source Development - IT Peer Network" <https://itpeernetwork.intel.com/intel-rack-scale-design-now-ready-open-source-development/>(2018 年 1 月 7 日閲覧)

- [129] K. Ikeda, Y. Taniguchi, S. Maskawa, J. Mizuno, K. Kodate and E. Watanabe "Optical-digital hybrid image search system operable from web browsers", International Symposium on Optical Memory 2015 Technical Digest,(October 2015).
- [130] K. Fukunaga: Introduction to Statistical Pattern Recognition, (Academic Press 1990) 2nd ed.
- [131] M. Mori, T Shinzaki and S. Sasaki, "Biometric Authentication Technology" FUJITSU **54**, 272 (2003).
- [132] A. J. Mansfield and J. L. Wayman, "Best Practices in Testing and Reporting Performance of Biometric Devices" 2.01 (2002).
- [133] L. Kitabayashi, E. Watanabe, and K. Kodate, "Practical Use of Copyright Protection System to Digital Contents", Journal of Intellectual Property Association of Japan **7**, 43 (2011).
- [134] Z. Wang, M. Zhao, Y. Song, S. Kumar, and B. Li, "YouTubeCat: Learning to Categorize Wild Web Videos", CVPR2010, 879 (2010).
- [135] T. George, A. Hrishikesh, P. Marius, S.Luciano, and Y. Jay, "Finding Meaning on YouTube: Tag Recommendation and Category Discovery", CVPR2010, 3447 (2010).
- [136] E. Watanabe, K. Ikeda, and K. Kodate, "High-speed holographic correlation system by a time-division recording method for copyright content management on the Internet", Proc. SPIE 8498 84980A (2012).
- [137] ” 公益財団法人 ユニジャパン | 映画業界統計情報”, <http://unijapan.org/reference/statistics.html>, UNIJAPAN (2017年7月25日閲覧) .
- [138] K. Ikeda and E. Watanabe, "Improvement of the correlation speed in an optical correlation system using a holographic disc," in Imaging and Applied Optics 2014, OSA Technical Digest (online) paper JW3A.5.
- [139] K. Ikeda and E. Watanabe; "Optimization of recording conditions in ultra-high-speed holographic optical correlation", Proc. International Symposium on Optical Memory 2014 (2014).

- [140] B. Javidi and F. T. S. Yu, "Real-time image recognition by partially coherent light," *Appl. Opt.* **25**, 2365 (1986).
- [141] K. Ikeda, S. Wakita and E. Watanabe, "Three dimensional object recognition using a high-speed optical corrector," *SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging*, 9867-21 (2016).
- [142] J. Li, T. Zhong, X. Dai, C. Yang, R. Li, Z. Tang, "Compressive optical image watermarking using joint Fresnel transform correlator architecture," *Opt. Laser. Eng.* **89**, 29-33(2017).
- [143] Y. Guo, Y. Liu, A. Oerlemans, S. Lao, S. Wu, M. S. Lew, "Deep learning for visual understanding: A review," *Neurocomputing*, **187**, 27-48 (2015).
- [144] S. Yasuda, "Simultaneous readout of positive and negative images for dc-removed coaxial holographic data storage," *Opt. Lett.* **34**, 3101-3103 (2009).
- [145] G. E. Hinton, R. R. Salakhutdinov, "Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks," *Science* **313**, 504-507 (2006).
- [146] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and R. J. Williams, "Learning representations by back-propagating errors," *Nature* **323**, 533-536 (1986).



## 研究業績

### 原著論文

1. Kanami Ikeda, Hidenori Suzuki and Eriko Watanabe: "Optical-correlation based cross-domain image retrieval system," Optics Letters, Vol.42, 2603-2606 (2017).
2. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe:"High-speed image matching with coaxial holographic optical correlator," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.55, 09SC01 (2016).
3. Kanami Ikeda, Kashiko Kodate and Eriko Watanabe: "Optical - digital hybrid image search system in cloud environment," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.55, 09SC03 (2016).
4. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe: "High-Speed Optical Correlator using Coaxial Holographic System," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.54, 09ME02 (2015).
5. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe: "Reducing Input Data via Image Categorization to Improve the Speed of Copyright Content Management Systems", Optical Review, Vol. 22, pp. 93-98 (2015).

### 国際会議

[筆頭]

1. Kanami Ikeda, Hidenori Suzuki and Eriko Watanabe,"Cross-domain image retrieval system using an optical correlator in a cloud environment," The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) , Tu1F-05 (Shinjuku, Japan, 2017.8).

2. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe, "Optical correlation-based image retrieval system with a deep convolutional neural network," The 9th International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2017) , (Harbin, China, 2017.7). **invited**
3. Kanami Ikeda, Natsumi Hara, Katsunari Okamoto and Eriko Watanabe, "Bio-imaging using planar lightwave circuit digital holographic microscope," Proc. SPIE 10251, Biomedical Imaging and Sensing Conference, 1025115 (Yokohama, Japan, 2017.4).
4. Kanami Ikeda, Natsumi Hara, Katsunari Okamoto and Eriko Watanabe, "Design comparison between two planar lightwave circuits for a digital holographic microscope," The Sixth Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics, P20-51 (Sapporo, Japan, 2016.12).
5. Kanami Ikeda, Toshihiro Sugaya and Eriko Watanabe, "Optical correlation system using simple structure holographic optical disk ", International Workshop on Holography and related technologies (IWH2016) (Taiwan 2016. 11).
6. Kanami Ikeda, Hidenori Suzuki, Hiroki Satake, Toshihiro Sugaya, and Eriko Watanabe, "Stabilization of the optical correlation output signal using new methods, Interdisciplinary research and global outlook (Irago) conference 2016, GSS2-2 (Tokyo 2016. 11 ).**Best Presentation Award**
7. Kanami Ikeda, Hidenori Suzuki and Eriko Watanabe,"A novel coding method for holographic optical correlator using convolutional neural network," International Symposium on Optical Memory 2016 , We-L-4 (Kyoto, Japan, 2016. 10).
8. Kanami Ikeda, Natsumi Hara, Katsunari Okamoto and Eriko Watanabe," Improvement of spatial resolution of planar lightwave circuit digital holographic microscope," Digital Holography 3-D Imaging (DH), DTh1I.2 (Heidelberg, Germany, 2016. 7).
9. Kanami Ikeda, Natsumi Hara, Takashi Hoshiba, Eriko Watanabe., "Microscopic Polarization Imaging of Human Breast Cancer Cells", The 2nd Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC'16) (Yokohama, Japan, 2016. 5).
10. Kanami Ikeda, Suguru Wakita and Eriko Watanabe,"Three dimensional object



- recognition using a high-speed optical corrector," Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 9867-21 (Baltimore, U.S.A. 2016. 4).**invited**
11. Kanami Ikeda, Suguru Wakita and Eriko Watanabe, "Data coding method for optical correlator with co-axial holographic system", International Workshop on Holography and related technologies (IWH) 2015(Okinawa, Japan, 2015. 12).
  12. Kanami Ikeda, Suguru Wakita and Eriko Watanabe, "Basic evaluation of two-dimensional modulation code for optical correlator", The Irago Conference 2015, S-06 (Irago, Japan, 2015. 10) . **Best Presentation Award**
  13. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe,"Optical Correlation Method for Partial Image Matching with Coded Reference Pattern", International Symposium on Optical Memory 2015 Technical Digest (Toyama, Japan,2015. 10). **Best Student Paper Award**
  14. Kanami Ikeda, Yasufumi Taniguchi, Sachiko Maskawa, Jun Mizuno, Kashiko Kodate and Eriko Watanabe " Optical-digital hybrid image search system operable from web browsers", International Symposium on Optical Memory 2015 Technical Digest, Tu-PP-02(Toyama, Japan, 2015. 10).
  15. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe, "Optimization of recording conditions in ultra-high-speed holographic optical correlation", International Symposium on Optical Memory 2014 Technical Digest (Hsinchu, Taiwan, 2014. 10).
  16. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe, "Design of page data pattern for coaxial holographic optical correlation system", Abstract of Second MIPT-UEC joint workshop on optical science (Tokyo, Japan, 2014. 10).
  17. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe, "Design of Signal Pattern for Optical Correlator using Coaxial Holography", IONS-Asia 5(Sapporo, Japan, 2014. 8).
  18. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe, "Improvement of the correlation speed in an optical correlation system using a holographic disc", Imaging and Applied Optics 2014, OSA Technical Digest (online), JW3A.5 (Seattle, U.S.A. 2014. 7).
  19. Kanami Ikeda, and Eriko Watanabe, "Image coding method for a high-accuracy co-axial holographic optical correlator ", International Workshop on Holography and related technologies 2013, 16c-6 (Kitami, Japan, 2013. 10).

20. Kanami Ikeda and Eriko Watanabe, "High-Speed Correlation with a Practical Holographic Optical Correlation System", International Symposium on Optical Memory 2013 Technical Digest, 192-193 (Incheon, Korea 2013. 8).
21. Kanami Ikeda, Ryotaro Kosaka and Eriko Watanabe, "High-speed holographic correlation system by time-division recording method", International Workshop on Holography and related technologies 2012, 91-92 (Taoyuan, Taiwan, 2012.11).

[共著]

1. Hiroki Satake, Kanami Ikeda , Katsutoshi Inomoto , Katsunari Okamoto and Eriko Watanabe, "Experimental demonstration of a digital holographic microscope based on a planar lightwave circuit," 22nd Microoptics Conference, P-39 (Tokyo, Japan, 2017.11).
2. Hiroki Satake, Kanami Ikeda, Hiroyuki Kowa, Takashi Hoshihara and Eriko Watanabe, "Microscopic optical path length difference and polarization measurement system for cell analysis," the 3rd International Conference on Photonics Solutions, 260 (Pattaya, Thailand, 2017.11).
3. Ren Usami, Hidenori Suzuki, Kanami Ikeda and Eriko Watanabe, "Convolutional neural network based video identification system for content management system with optical correlator," Interdisciplinary research and global outlook (Irago) conference 2017, GSS2-1 (Tokyo, Japan 2017. 11) .
4. Eriko Watanabe, Kanami Ikeda and Katsunari Okamoto, "Lensless Digital Holographic Microscope Based on Planer Lightwave Circuit" The 25th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-25), Th-VII2 (Jeju, Korea, 2017.4).  
**invited**
5. Hidenori Suzuki, Kanami Ikeda and Eriko Watanabe, "Widely applicable coding method for optical correlators based on an autoencoder," Information Photonics 2017, 19PM-2-1 (Yokohama, Japan, 2017.4).
6. Natsumi Hara, Kanami Ikeda, Katsunari Okamoto and Eriko Watanabe, "Evaluation of planar lightwave circuit for digital holographic microscope", The Irago Conference 2016, P67 (Tokyo 2016. 11).**Best Poster Award**
7. Yasufumi Taniguchi, Kanami Ikeda, Hironobu Fujiyoshi and Eriko Watanabe, "Optical linear classifier based on approximation calculation", The Korea-Japan

- joint workshop on Frontiers of Computer Vision(FCV)2016, P2-20 (Gifu, Japan, 2016. 2).
8. Natsumi Hara, Kanami Ikeda, Eriko Watanabe, "High-precision microscopic phase-measurement system for multilayered cell sheets", The Irago Conference (Irago, Japan, 2015. 10) .
  9. Eriko Watanabe and Kanami Ikeda,"Compact digital holographic microscope using spherical reference beam,"The 5th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2015) (Gangneung, Korea, 2015. 9).**invited**
  10. Eriko Watanabe, Kanami Ikeda, Kazuhiro Hoshino, "Portable digital holographic microscope using spherical reference beam and its biomedical applications", DSS Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2015, (Baltimore, U.S.A., 2015. 4). **invited**
  11. Eriko Watanabe, Kanami Ikeda, Kenichi Moriya, Jun Mizuno, Kashiko Kodate, "An Optical-digital Hybrid Copyright Management System Using an Optical Correlator with Classification Method ", Proceedings of International Conference on Optics-photonics Design Fabrication 2014, 13PDb-29 (Tokyo, Japan, 2014. 2).
  12. Eriko Watanabe, Kanami Ikeda, Kashiko Kodate, "High-speed holographic correlation system for video identification on the internet", Proceedings of SPIE Vol. 9042, 90420L (Beijin, China, 2013. 11). **invited**
  13. Eriko Watanabe, Kanami Ikeda and Kashiko Kodate, "High-speed holographic correlation system by a time-division recording method for copyright content management on the internet", Proc. SPIE 8498, Optics and Photonics for Information Processing VI, 84980A (Sun Diego, U.S.A, 2012.8).

## 国内発表

1. 池田佳奈美, 鈴木秀典, 渡邊恵理子, "ホログラフィック光相関システムと深層畳み込みニューラルネットワークを組み合わせたクロスドメイン画像検索," 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 5p-A413-7(福岡, 2017. 9)

2. 池田佳奈美, 佐竹宏基, 岡本勝就, 渡邊恵理子, "平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡による生体観察," 第 23 回画像センシングシンポジウム, IS3-12 (横浜, 2017. 6)
3. 池田佳奈美, 原菜摘, 岡本勝就, 渡邊恵理子, "平面導波路型レンズレスデジタルホログラフィック顕微鏡の試作と評価," レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, F207p II 06(徳島, 2017. 1)
4. 池田佳奈美, 菅谷 寿鴻, 渡邊 恵理子, "ホログラフィック光ディスクを用いた光相関システムー新構造ディスクを用いた相関信号の安定化ー"日本光学会年次学術講演会 Optics Photonics Japan 2016, 31aES8 (東京, 2016.11)
5. 池田佳奈美, 鈴木秀典, 渡邊恵理子, "深層畳み込みニューラルネットワークを導入した光相関によるスケッチベース 3 次元物体照合," 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 15a-C42-3(新潟, 2016. 9)
6. 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "超高速データ解析に向けた光相関システムの研究," 第 17 回情報フォトンクス研究グループ研究会, I-02 (京都 2016. 9) 招待講演
7. 池田佳奈美, 谷口泰史, 渡邊恵理子, "近似計算を導入した光線形識別器と応用," 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 21p-S224-1 (東京 2016. 3)
8. 池田佳奈美, 脇田英, 渡邊恵理子, "2 次元変調符号を用いた光相関演算システムの基礎検討," 日本光学会年次学術講演会 Optics Photonics Japan 2015, P42 (2015. 11)
9. 池田佳奈美, 門屋春菜, 岡本勝就, 渡邊恵理子, "平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡," 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-PA3-2 (名古屋 2015. 9)
10. 池田佳奈美, "光の新技术に向けた精密計測と情報処理," 国際光年記念シンポジウム, 94 (東京 2015. 4)
11. K. Ikeda and E. Watanabe, "High-Speed Coaxial Holographic Optical Correlation System," International Symposium of Optical Memory 2014 Workshop, 104 (東京 2014. 12) **Excerpt Poster Award.**
12. 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "コアキシャルホログラフィによる光相関システムのページデータ設計", 日本光学会年次学術講演会 Optics Photonics Japan 2014(2014.11)

13. 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "ホログラフィック光相関演算における記録条件の最適化," 2014 年<第 76 回>応用物理学会秋季学術講演会 (2014. 9).
14. 池田佳奈美, "光の新技术に向けた精密計測と情報処理,"先端フォトニクスシンポジウム (東京, 2014.8)
15. 池田佳奈美, 兵藤光, 渡邊恵理子, 小館香椎子: "光・デジタルハイブリッド動画検索システムの高速度化—著作権管理応用におけるアニメ・実写画像分類の導入—" 第 20 回画像センシングシンポジウム (横浜 2014. 6)
16. 池田佳奈美, 阿部耶依, 原菜摘, 小池綾, 渡邊恵理子, "定量位相・偏光顕微計測による細胞識別", 情報フォトニクス研究グループ第 8 回関東学生研究論文講演会 (東京 2014. 3)

[共著]

1. 佐竹宏基, 井元克駿, 池田佳奈美, 岡本勝就, 渡邊恵理子, "平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡における多波長化に向けた基礎検討," 平成 29 年度第 1 回コンテンポラリーオプティクス研究会, 23 (東京, 2017.12).
2. 宇佐美廉, 鈴木秀典, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "Residual Network を用いた改ざん動画検出," 平成 29 年度第 1 回コンテンポラリーオプティクス研究会, 20 (東京, 2017.12).
3. 斎藤圭佑, 池田佳奈美, 菅谷寿鴻, 渡邊恵理子, "高密度多重記録に向けた光相関システム用のデータベース記録方法の検討," 平成 29 年度第 1 回コンテンポラリーオプティクス研究会, 19 (東京, 2017.12).
4. 渡邊恵理子, 池田佳奈美, 武田光夫 "揺らぎ媒質解明へ向けた顕微位相イメージング,"日本光学会年次学術講演会 Optics Photonics Japan 2017, 2aES2 (東京, 2017.11).
5. 佐竹宏基, 井元克駿, 池田佳奈美, 岡本勝就, 渡邊恵理子 "平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡の多波長化 に向けた基礎検討,"日本光学会年次学術講演会 Optics Photonics Japan 2017, 31aP6 (東京, 2017.11).
6. 鈴木秀典, 宇佐美廉, 池田佳奈美, 渡邊恵理子 "汎用的光データ検索のための自己符号化器を利用した符号化手法," 日本光学会年次学術講演会 Optics Photonics Japan 2017,1aD6 (東京, 2017.11).

7. 鈴木秀典, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "光相関システムによるクロスドメイン検索-自己符号化器を組み込んだデータ変換法の導入-, " 第 23 回画像センシングシンポジウム, IS1-10 (横浜, 2017.6) .
8. 原菜摘, 池田佳奈美, 岡本勝就, 渡邊恵理子, "平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡の開発", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-P9-6 (横浜 2017. 3).
9. 倍味幸平, 池田佳奈美, 高和宏行, 渡邊恵理子, "定量位相計測と偏光計測を組み合わせた細胞評価の研究", 第 11 回関東学生研究論文講演会, P2 - 20 (宇都宮, 2017.3) .
10. 佐竹宏基, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "線形識別関数の光演算実装に関する研究", 第 11 回関東学生研究論文講演会, P1 - 21 (宇都宮, 2017.3) .
11. 鈴木秀典, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "自己符号化器を組み込んだ光相関演算用データ変換法", 第 11 回関東学生研究論文講演会, O3 - 05 (宇都宮, 2017.3) **優秀講演賞**
12. 倍味幸平, 池田佳奈美, 高和宏行, 渡邊恵理子, "定量位相計測と定量偏光計測を組み合わせた細胞識別のための特徴量の基礎検討", 平成 28 年度第 1 回コンテンツポラリーオプティクス研究会, H28-13 (東京, 2016. 10)
13. 佐竹宏基, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "近似計算を導入した線形識別器の光相関演算での実装 ~基底数・基底エネルギーの評価~, " 平成 28 年度第 1 回コンテンツポラリーオプティクス研究会, H28-12 (東京, 2016. 10)
14. 鈴木秀典, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "光相関演算制約条件を付加した CNN 特徴量の基礎検討~スケッチベース画像照合への適用~, " 平成 28 年度第 1 回コンテンツポラリーオプティクス研究会, H28-14 (東京, 2016.10)
15. 原菜摘, 池田佳奈美, 岡本勝就, 渡邊恵理子, "平面導波路型レンズレスデジタルホログラフィック顕微鏡のための平面導波路の評価", 平成 28 年度第 1 回コンテンツポラリーオプティクス研究会, H28-11 (東京, 2016.10)
16. 原菜摘, 池田佳奈美, 岡本勝就, 渡邊恵理子, "平面導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡の高分解能化", 日本光学会年次学術講演会 Optics Photonics Japan 2016, 1pP18 (東京, 2016.11)

17. 脇田英, 佐竹宏基, 鈴木秀典, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "光演算制約条件を付加した CNN 特徴量によるスケッチベース 3 次元物体照合," 第 22 回画像センシングシンポジウム SSII2016(横浜 2016. 6)
18. 門屋春菜, 池田佳奈美, 原菜摘, 岡本勝就, 渡邊恵理子, "平面導波路型レンズレスデジタルホログラフィック顕微鏡," 第 10 回関東学生研究論文講演会, P2-17 (千葉 2016. 3)
19. 谷口泰史, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "バイナリ分解手法を組み込んだ光相関演算による線形識別器," 第 10 回関東学生研究論文講演会, P1-19 (千葉 2016. 3)
20. 脇田英, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "CNN を利用した光相関演算によるスケッチベース 3 次元物体照合," 第 10 回関東学生研究論文講演会, O1-03 (千葉 2016. 3)
21. 門屋春菜, 池田佳奈美, 岡本勝就, 渡邊恵理子, "平面導波路型レンズレスデジタルホログラフィック顕微鏡の基礎評価," レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会, 10a I-5 (名古屋 2016. 1)
22. 原菜摘, 池田佳奈美, 高和宏行, 小館香椎子, 渡邊恵理子, "細胞検査に向けた走査型定量位相顕微計測システムの広面積化," 第 21 回画像センシングシンポジウム (SSII2015), IS2-05 (横浜 2015. 6)
23. 兵藤光, 池田佳奈美, 渡邊恵理子, "ステレオ法を用いた 3 次元光計測システムに関する研究—高精度嚙下機能計測へ向けた体動成分除去の検討—"第 9 回関東学生研究論文講演会, (静岡 2015. 3)
24. 渡邊恵理子, 池田佳奈美, 小館香椎子, "大規模映像識別に向けた光並列画像処理-インターネット上の著作権管理システムへの応用例-", 第 134 回微小光学研究会「微小光学とビッグデータ」(東京 2014. 12) 招待講演.
25. 渡邊恵理子, 原菜摘, 池田佳奈美, 阿部耶依, 香取良祐, 林竜平, 西田幸二: "重層上皮細胞イメージングに向けた位相計測システム" 第 20 回画像センシングシンポジウム (横浜 2014. 6)
26. 小池綾,池田佳奈美, 渡邊恵理子,"細胞検査に向けた偏光顕微計測", 情報フォトニクス研究グループ第 8 回関東学生研究論文講演会 (東京 2014. 3)

## 特許出願

1. 「光学測定装置」, 渡邊恵理子, 岡本勝就, 水野潤, 星野和博, 池田佳奈美, (特願 2015-0114).
2. 「特徴量変換モジュール、パターン識別装置、パターン識別方法、およびプログラム」, 渡邊 恵理子, 藤吉 弘亘, 谷口 泰史, 池田佳奈美, 脇田 英, 鈴木 秀典. (WO2017/141997).

## 受賞

1. The Irago Conference 2016 Best Presentation Award [K. Ikeda, et. al, "Stabilization of the optical correlation output signal using new methods"] 2016.11
2. 2016 年度コニカミノルタ光みらい学生奨励金「光相関制約条件を付加した基底ベクトルへの分解法」(日本光学会) 2016 年 11 月
3. 平成 27 年度電気通信大学学生表彰 (電気通信大学) 2016 年 3 月
4. The Irago Conference 2015 Best Presentation Award [K. ikeda, S. Wakita and E. Watanabe "Basic evaluation of two-dimensional modulation code for optical correlator"] 2015.10
5. ISOM(The International Symposium of Optical Memory) 2015 Best student paper award [K. ikeda and E. Watanabe "Optical Correlation Method for Partial Image Matching with Coded Reference Pattern"] 2015.10
6. 平成 26 年度電気通信大学学生表彰 (電気通信大学) 2015 年 3 月
7. ISOM (The International Symposium of Optical Memory) Workshop Excellent Poster Award [K. ikeda and E. Watanabe "High-Speed Coaxial Holographic Optical Correlation System"] 2014 年 12 月