

平成 13 年度
学士学位論文

自然動画ホログラフィの高速転送方式
に関する研究

Development of High Speed Transportation System
of Object-Unrestricted Motion Holography

1020327 三谷 乙弘

指導教員 島村 和典

2002 年 2 月 8 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

自然動画ホログラフィの高速転送方式 に関する研究

三谷 乙弘

ホログラフィは、他の 3 次元画像技術と異なり、観察者の視機能に全く矛盾を生じない立体像を与えることができる。この技術の発展を目的として、ホログラフィのカラー化や動画化の研究がこれまで数多くなされてきた。

そこで、本研究では自然の対象物をフルカラーで表現し、かつ滑らかな動きのホログラフィ像（自然動画ホログラフィ像）の Network 転送という分野について着目した。

また、Network 回線は年々高速化しており、またコンピュータ端末の処理性能も向上している。そして今後もこれらはさらに発展していくことが予想される。

これらの要因から、本研究では将来の Network 回線、コンピュータ端末上で動作させることを想定して、自然動画ホログラフィ像を Network 転送する技術を開発し、実際に検証できる系を構成することを最終目標として進めていく。そのためのステップとして、本研究で用いる自然動画ホログラフィを既存ホログラフィの中から選出し、さらにこれを Network 転送するための 1 方式を今回提案する。

キーワード ホログラフィ，フルカラー動画，自然，Network 転送

Abstract

Development of High Speed Transportation System of Object-Unrestricted Motion Holography

Otohiro Mitani

Holography, unlike the other 3-dimensional picture technology, can give three-dimensional images which does not produce inconsistency at all in observer's eye mechanism. Many research trials which wake holography full-color and animated have so far been made for the development of this technology.

Then, I paid my attention to a field of transporting holographic images which natural objects can be expressed in full-color with smooth motion (that is called "OMH") through the network.

Also, it continues that network lines are becoming wide-banded and processing ability of computers are being powered in their processing power every year, and it is expected that these are developed further.

From these factors, operating and assuming it on future network lines and computer terminals, I develop the network transportation scheme of the object-unrestricted motion holography image and I study building an actually verifiable system as the final objective. As a step for that, I select the object-unrestricted motion holography used by this research from the existing holographies, and propose a network transportation system of this holography.

key words Holography, Full-Color Motion Picture, Object-Unrestricted,
Transportation through Network

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	Network 回線の大容量化	1
1.1.2	コンピュータ端末の処理性能の向上	1
1.1.3	ホログラフィ関連分野の盛んな研究	2
1.2	研究の目的	2
第 2 章	ホログラフィ	3
2.1	ホログラフィとは	3
2.2	ホログラフィの原理	3
2.2.1	基本原理	3
2.3	ホログラムの記録・再生	4
2.3.1	ホログラムの記録	5
2.3.2	ホログラムの再生	6
2.4	ホログラフィの特徴	7
2.4.1	ホログラフィの長所	7
2.4.2	ホログラフィの短所	8
第 3 章	自然動画ホログラフィ	9
3.1	カラーホログラフィ	9
3.1.1	レーザー光再生カラーホログラフィ	9
3.1.2	白色光再生カラーホログラフィ	11
3.2	ホログラフィックステレオグラム	12
3.2.1	白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムの記録・再生	13

3.3	デジタルホログラフィ	14
3.4	動画ホログラフィ	15
3.5	自然動画ホログラフィ	15
3.5.1	自然動画ホログラフィの定義	15
3.5.2	本研究で用いる自然動画ホログラフィ	16
第 4 章	提案する転送方式と構築する実験系	17
4.1	提案する転送方式	17
4.1.1	記録系	18
4.1.2	転送系	19
4.1.3	再生系	19
4.2	構築する実験系	20
4.2.1	記録系・再生系	20
4.2.2	転送系	22
第 5 章	技術的課題	23
5.1	ホログラフィ自体が現在抱えている課題	23
5.1.1	光学系の複雑化	23
5.1.2	CCD, LCD の解像度の不足	23
5.1.3	サイズの大きいホログラフィデータへの対応	24
5.1.4	計算機に実装する干渉縞の計算式の最適化	25
5.2	その他の考えられる課題	25
5.2.1	3色のレーザー光を使用した干渉縞を CCD が記録できるか	25
5.2.2	NIC のバンド幅性能の不足	26
5.2.3	動画フレーム数が少ない場合に滑らかな動きの再生像が得られるか	26
第 6 章	今後の研究推進企画	27

6.1	実験系の構築	27
6.2	転送実験の実施	27
6.2.1	技術的課題への対処	27
6.2.2	再生動画像の評価	28
6.2.3	記録 - 再生にかかる時間の測定	28
6.3	別の転送方式の考案	29
6.3.1	新たなレーザーを用いた自然動画ホログラフィの転送方式	29
6.3.2	白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムを用いた 自然動画ホログラフィの転送方式	29
第 7 章	考察	30
7.1	特徴	30
7.2	今後の研究で提案していく新しい転送方式との比較	31
7.2.1	新たなレーザーを用いた自然動画ホログラフィの転送方式	31
7.2.2	白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムを用いた 自然動画ホログラフィの転送方式	31
第 8 章	むすび	32
	謝辞	33
	参考文献	34
付録 A	付録	36
A.1	除振系	36
A.2	レーザー系	37

目次

2.1	物体を認識するメカニズム	4
2.2	代表的な記録方式	5
2.3	代表的な再生方式	7
3.1	レーザー光再生カラーホログラフィの再生	10
3.2	ゴースト像の例	11
3.3	白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムの記録方式	14
3.4	白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムの再生方式	14
4.1	系の分類	17
4.2	記録光学系	18
4.3	転送系	19
4.4	再生光学系	20
4.5	当面の記録実験系	21
4.6	当面の再生実験系	21

表目次

7.1 提案した転送方式の長所・短所	30
------------------------------	----

第 1 章

はじめに

1.1 研究の背景

本研究の背景として、以下の要因を挙げる。

1.1.1 Network 回線の大容量化

Network 回線の速度はここ数年の間に急速に伸びた。現在の広域網は、もはや主役は xDSL や FTTH に代表される、いわゆるブロードバンドと呼ばれる技術に移行しつつある。また LAN に用いられる回線も、Fast Ethernet や Gigabit Ethernet が使用されるようになってきており、加えて 10Gigabit Ethernet のようなさらに高速な通信技術も開発されている。これらの要因から Network 回線の大容量化は今後もますます進められていくことが容易に推測できる。

1.1.2 コンピュータ端末の処理性能の向上

コンピュータ端末の性能もここ数年で飛躍的に進歩した。ハードディスク容量は、一般的な PC でも数十 GB、メモリ容量は数百 MB はもはや当然となっていており、また、クロック周波数も GHz 級のものが普及している。よって、Network 回線と同様に今後もますますこの傾向は続くであろうと考えられ、現在よりもさらに大容量かつ高速なコンピュータ端末が登場してくることが推測できる。

1.1.3 ホログラフィ関連分野の盛んな研究

ホログラフィは光の波面を記録する技術として 1948 年に開発されて以来，究極の 3 次元画像表示技術として，現在では主に装飾やアートの分野での映像表現の手法として広く用いられている [1]．その他にも，ホログラフィは様々な分野への応用が期待されている．中でもホログラフィを動画に応用する研究やホログラフィのカラー化に関する研究は非常に興味深く，この技術を応用したホログラフィ TV やホログラフィ映画などの実現に向けた研究が進められている [2]．

1.2 研究の目的

前述したように，動画ホログラフィやカラーホログラフィなどの研究は盛んであるが，まだホログラフィデータの通信方式に関する研究はなされていない．その理由として，現在の Network 回線の容量やコンピュータ端末の処理性能が，データ量の大きいホログラフィデータを転送するのに性能的に力不足であるという点が大きいのである．しかし，ホログラフィデータの通信方式は動画ホログラフィの発展形であるホログラフィ TV などを実現するためには必要不可欠な技術になってくることは明確である．

そこで，本研究ではコンピュータ端末の処理性能が向上したと仮定し，また次世代の数百 Gigabit, さらには Terabit 級や Petabit 級の Network 上で動作させることを想定して，後述する自然動画ホログラフィ像を Network 転送できるシステムの開発を目的とし，ホログラフィ分野のさらなる発展を図る．

第 2 章

ホログラフィ

本章では、ホログラフィの基本的な考え方や特徴について説明する。後の章で述べるカラーホログラフィや動画ホログラフィといった技術は、全てこの章で説明する考え方が基本となっている。

2.1 ホログラフィとは

3次元画像表示技術と言え、コンピュータグラフィックスやステレオグラムなどが一般によく知られているが、これらは眼の輻輳（両眼視線の交差角）と両眼視差（両眼映像がずれて見える現象）を利用して、観察者に平面像を立体像であると錯覚させることによって3次元表示を実現している。しかし、これらの技術は視機能に矛盾が発生するため、結果として、観察が長時間に及ぶ場合は観察者に疲労感を感じさせてしまうという欠点がある。

これに対して、ホログラフィは輻輳と両眼視差だけでなく、眼の調節機能（レンズの焦点合わせ）にも矛盾なく観察者に立体像を与えることができ、またステレオグラムなどのように、立体像の観察に特殊な器具を観察者が装着する必要も無い。このため、観察者は通常の物体を見る場合と同様に、ごく自然に立体像を観察することが可能である [3]。

2.2 ホログラフィの原理

2.2.1 基本原理

人間が物体を見る場合、通常次のようなステップを踏む (図 2.1 参照)。

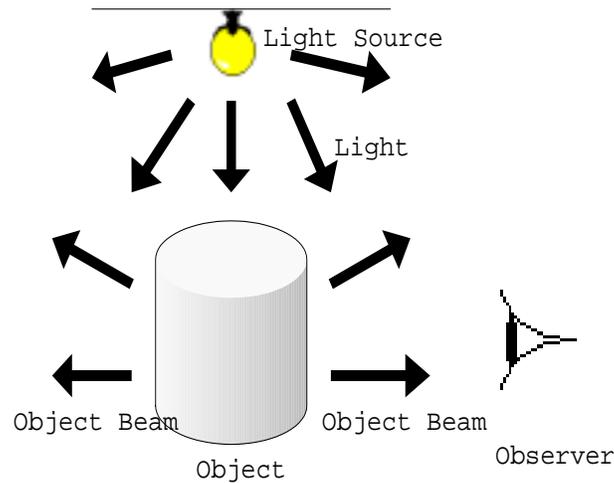


図 2.1 物体を認識するメカニズム

1. 対象となる物体に照明をあてる.
2. 物体に衝突した光は周囲に散乱する.
3. 散乱した光を眼から取り込む.
4. 取り込んだ光から形状・性質といった物体の3次元情報を読み取る.

ホログラフィではこれを利用し、物体の3次元情報をもつ2の散乱光をフィルムなどの記録メディアに記録しておき、この光のみを再現することによって、観察者にもとの物体と全く同じ立体像を見せることを可能にしている。

2.3 ホログラムの記録・再生

一般的なホログラムの記録・再生ではレーザーが用いられることが多い。しかし、ホログラムの記録・再生において振動やほこりは大敵であるため、レーザー発振器の振動も無視できない。仮に、これらへの対策を怠るとホログラムに余計な干渉縞がノイズとなって記録されてしまい、結果それは再生像の質を著しく劣化させることになってしまう。よって、良質なホログラフィ像を得るために、記録・再生を行うときは以下の条件を満たしている必要がある。

1. 空気中にちりやほこりが少ない場所で行う。
2. 空気の流れが極力少ない密閉された場所で行う。
3. 関係の無い光が極力射し込まない暗室のような場所で行う。
4. レーザー発振器や地面などからの振動を軽減する除振台の上に光学系を構築して記録・再生を行う。

2.3.1 ホログラムの記録

同一の光源から出た光を2つの光に分け、それらを干渉させることによって位相の分布情報を干渉縞として記録できることが証明されている。これを利用して、ホログラフィでも光源から出た光を2つの光に分割する。そして、その一方の光で物体を照明し、その物体によって回折した光（物体光）を生じさせる。この物体光には、物体の表面情報が位相のずれというかたちで含まれている。ここで、同じ光源から出たもう1方の光（参照光）を、その位相のずれを測る基準として導入し、物体光と重ね合わせて干渉させる。これによって、できあがった干渉縞（光波の模様）を専用の記録メディアに記録する（干渉縞を記録して現像したものをホログラムという）。

図 2.2 はホログラムの代表的な記録方式である。

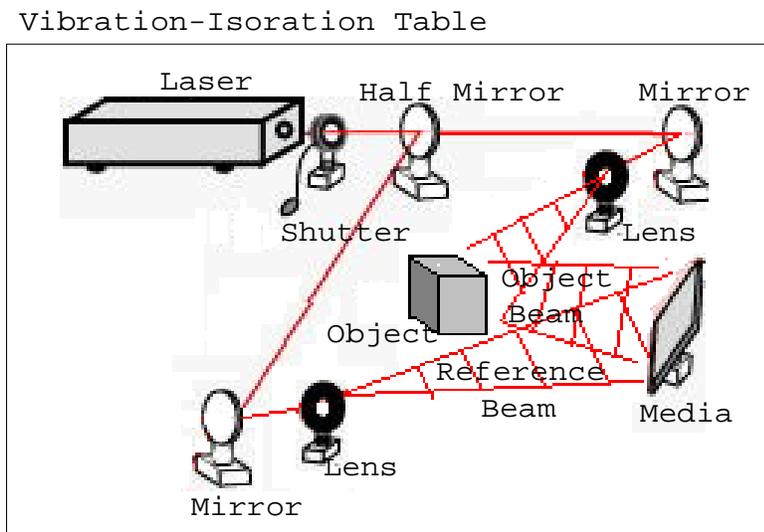


図 2.2 代表的な記録方式

図 2.2 を踏まえて、ホログラム完成までのおおまかな手順を簡単に説明する。

レーザーから出力された光を、ハーフミラーで 2 つの光に分割する。

うち一方の光軸をレンズで広げ、対象物体に照射する。

物体からの散乱光（物体光）を感光材料に照射させる。

もう一方の光軸をレンズで広げ、参照光として感光材料に照射する。これは 2、3 と並行して、同時に行う必要がある。

との干渉波を干渉縞として感光材料に記録する。

できあがった感光材料に現像処理を施す。この結果、現像されたものがホログラムである。

また、物体光と参照光の関係は以下のように調整するのが適当である [4]。

- 物体光の光量比：参照光の光量比 = 約 1:4
- 物体光と参照光のなす角：30° ~ 45° 程度

2.3.2 ホログラムの再生

ホログラムに参照光と同じ光を照射し回折を生じさせれば、回折した光はもとの物体光と同じになる。よって、ホログラムの再生の光学系は記録時のものほど複雑ではなく、記録時に用いた参照光と同じ光をホログラムに照射させるだけでよい。

図 2.2 で記録したホログラムを再生する手順を図 2.3 に示す。図 2.3 を踏まえて、ホログラム再生のおおまかな手順を説明する。

レーザーから出力された光を、ハーフミラーで 2 つの光に分割する。

一方の光軸を衝立などで遮断する。

もう一方の光軸（参照光と同じもの）をレンズで拡大し、ホログラム面に照射する。

観察者は、ホログラム面の逆側から再生された像を観察する。

Vibration-Isolation Table

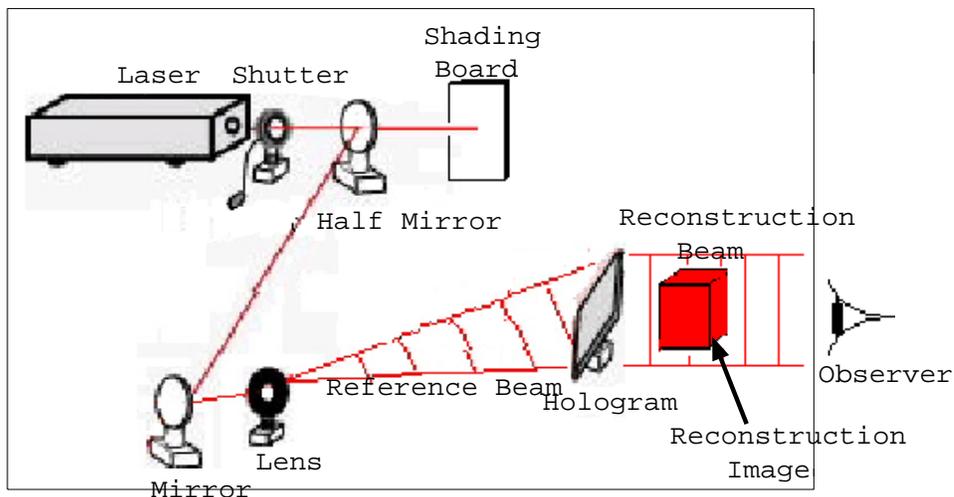


図 2.3 代表的な再生方式

2.4 ホログラフィの特徴

ホログラフィの特徴として、長所と短所を次に挙げる [5].

2.4.1 ホログラフィの長所

1. 自然な立体像

両眼視差と輻輳だけでなく、眼の調節にも矛盾のない立体感を感じさせることができる。これが可能な 3 次元画像表示技術は、現在ホログラフィだけである。

2. キズや汚れに強い

ホログラム面のある一部分が汚損しても、再生像の一部が損失するわけではなく、再生像の全面的画質を劣化させる。これは、像の各点の情報はホログラム上では広範囲にわたって蓄積されるためである。

3. 高い情報記憶密度

上記の 2 の関連で、ホログラフィはきわめて高い情報記憶密度を可能にする。

2.4.2 ホログラフィの短所

1. 記録・再生時の制約が多い

良質なホログラフィ像を得るためには、2.3 に挙げた条件を満たす必要がある。つまり、環境として暗室、密閉空間、クリーンな空間が求められ、さらに振動が天敵のため床などからの振動を緩和する高性能な除振システム（除振台など）が必要である。

2. 光学系が高価

1 のような暗室や除振システム、さらにはレーザー発信器やミラーなどのホログラフィ光学機器は、現在のところ非常に高価で入手は容易ではない [6]。

3. 大物体、大再生像は困難

大物体を記録するのに必要なレーザーの出力が現状では不足している。

4. 莫大な情報量

ホログラフィは Giga クラスの膨大な情報量を持つ。例えば、ホログラムの大きさが 100mm 角で、記録時のレーザー光の波長を 633nm（赤色）を使用したとすると、ホログラム面上の全標本点数は 1.98×10^9 となる。これを 1 標本点あたり 8bit で量子化したとすると 15.8Gbit となる [7]。よって、ホログラフィをデジタルデータとして扱う際には工夫が必要である。

第 3 章

自然動画ホログラフィ

この章では、本研究で用いる自然動画ホログラフィに関連するホログラフィ技術としてカラーホログラフィ、動画ホログラフィについて説明する。そして、それらを踏まえて自然動画ホログラフィについて述べる。

3.1 カラーホログラフィ

ホログラフィによって得られる像は、元となった物体に近い立体情報が再現されることは第 2 章で述べた。この像がさらに元の色彩を得ることができれば、触感やにおいを除いてほぼ全ての物体に関する情報が再現されることになる。これを実現するホログラフィをカラーホログラフィと呼ぶ。

カラーホログラフィは、レーザー光再生のものと白色光再生のものに分類できる。

3.1.1 レーザー光再生カラーホログラフィ

レーザー光再生カラーホログラフィを用いたホログラフィ像のカラー化は赤、緑、青の光のモノクローム像を重ね合わせることで実現できる。詳しく言えば、従来の赤色のレーザー光に加え緑、青のレーザー光を用いて被写体を記録し、赤、青、緑についてそれぞれホログラムを 1 枚ずつ作成する。そして、再生の際はそれぞれの色で記録したホログラムを同色の参照光で照射して、再生された 3 つのモノクローム像を重ね合わせてフルカラー像とする（図 3.1 参照）。

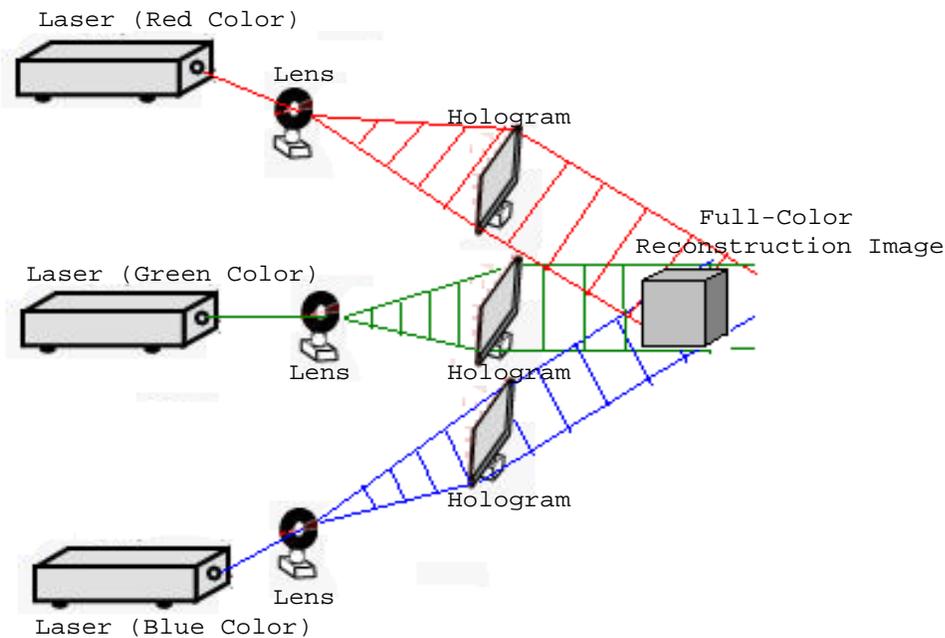


図 3.1 レーザー光再生カラーホログラフィの再生

しかし、レーザー光再生カラーホログラフィには次のような欠点がある。

1. 光学系が複雑

光源が3つになるため、単純に光学系を構築した場合ミラーやレンズなどの数も3倍必要になる。結果、記録・再生時の光学系がモノクロームホログラフィに比べ複雑になってしまう。

2. ゴースト像の発生

3色のレーザー光がそれぞれ回折するため、求めるカラー再生像の他にゴースト像と呼ばれる意図しない像が現れる(図3.2参照)。このゴースト像が正しいカラー像に重なって、再生像の質を著しく低下させてしまう。

このうち、1の解決法として、ダイクロイックミラー(特定の波長の光のみを反射するミラー)を用いることで、光学系の複雑さが若干緩和する[8]。他に、メタルハライドランプのような白色レーザー(赤、緑、青の波長の光を同時発振するレーザー)を用いて、再生光学系を大幅に単純化させる研究も行われている([9],[10])。

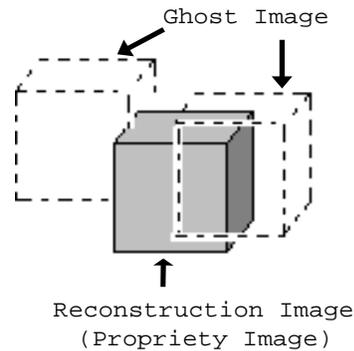


図 3.2 ゴースト像の例

2 を回避するアプローチとしては、正しい再生像にゴースト像が重ならないようにする方法やゴースト像のみを除去する方法など、これまでに多くの提案がされているが有効な対策法と言えるレベルにはまだ達していない [11] .

3.1.2 白色光再生カラーホログラフィ

白色光再生カラーホログラフィには、カラーレインボウホログラフィ、カラーリップマンホログラフィがある。これらは、電灯や太陽光などの白色光で再生できるため、レーザー光再生のものより実用的である。

- カラーレインボウホログラフィ

レインボウホログラムの記録は、通常 2 ステップを要する。まず、図 2.2 の要領でマスターホログラムを作成する。そして、そのマスターホログラムを参照光とは逆方向から照明して再生像を生じさせ、その再生光をさらに新しい記録メディアに記録する。この時、マスターホログラム面に横方向に細長いスリットを置き、その間からの再生光のみを記録メディアに記録する。カラーレインボウホログラフィの場合は赤、緑、青の 3 色のレーザー光を用いてこの操作を行う。

再生像は、視点を変化させることによって 7 色のレインボーカラーが観察できる。しかし、スリットの間からの光のみを記録するため垂直方向の視差が小さい。

- カラーリップマンホログラフィ

図 2.2 の光学系において、通常のホログラムの記録ではメディア面に対し参照光を物体光と同方向から入射させているが、リップマンホログラムの記録ではメディア面に対して物体光とは逆方向（メディア面の裏側）から参照光を入射させてホログラムを記録する。これをカラー化するには赤、緑、青の3色のレーザー光を用いてこの操作を行う。これによって得られる再生像は、カラーレインボーホログラフィのように視点を変化させても再生像の色は変化せず、また垂直方向の視差も大きい。リップマンホログラムの干渉縞は非常に細かいため、解像力の高い記録メディアが必要である。

3.2 ホログラフィックステレオグラム

ホログラフィックステレオグラムは、ホログラフィの中では最も実用的な技術であると言われている。このホログラフィはステレオグラムの技術をホログラフィに応用したものであり、そのため純粋なホログラフィとは様々な面で性質が異なる。まず、ステレオグラムを用いることにより生じる欠点を次に挙げる。

- 再生像の垂直方向の視差が無い
- 両眼視差に矛盾が生じる

しかし、ホログラフィックステレオグラムでは、短所よりむしろ長所の方が重要である。ホログラフィックステレオグラムの最大の特徴は、記録にレーザーを必要としないことである。この特徴は次のようなメリットをもたらす。

- 屋外での撮影が可能

従来のレーザーでの記録の際には暗室が必要不可欠であった。しかし、ホログラフィックステレオグラムでは暗室が不要なため、撮影場所には制限が無い。また、除振システムも不要である。

- 被写体に制限が無い

従来のレーザーでの記録では，現在のレーザーの性能からサイズの大きい物体の記録ができず，さらに，動体の記録が困難であった．しかし，ホログラフィックステレオグラムではこれらの制限が無く，加えて架空物体（CG など）も撮影することができる．

ホログラフィックステレオグラムには，レーザー光再生のものと白色光再生のものがあり，さらにホログラムの形状も平面型のものや円筒型のもがそれぞれに存在する．それらの中でも，白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラム（マルチプレックスホログラフィックとも呼ばれる）は最も古く，また最も普及しているホログラフィックステレオグラムである．この白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムは，上記のホログラフィックステレオグラムの特徴に加えフルカラー表現が可能で，また動画の分野にも応用されるようになってきている（[12],[13]）．

3.2.1 白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムの記録・再生

ホログラフィックステレオグラムの記録には，レーザーではなく映画カメラを使用する．これによって被写体を普通写真として撮影し，さらに様々な角度から複数枚撮影する．実際には図 3.3 のような方式で原画の撮影が行われる．

まず，被写体をターンテーブルの上に置き，ターンテーブルを回転させながら次々にカメラで複数枚撮影していく．これによって得られた複数枚の原画を専用の装置によって合成し，1枚の円筒型のホログラムを得る．このホログラムを図 3.4 のように白色光で照明すると，円筒の中に 3次元像が再生される．

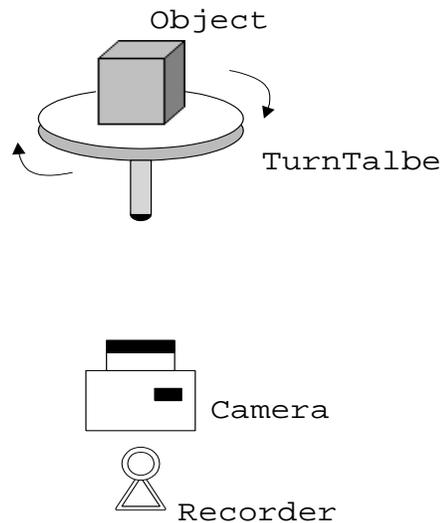


図 3.3 白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムの記録方式

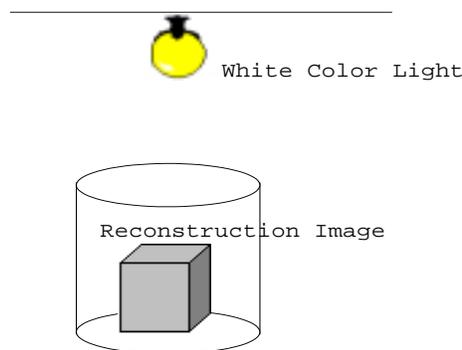


図 3.4 白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムの再生方式

3.3 デジタルホログラフィ

デジタルホログラフィは、記録時にフィルム等の感光材料を用いるかわりに、CCD(Charge-Coupled Device)を使用する。このため、運動物体や自然物も記録でき、さらに干渉縞を記録すると同時にそれをデジタルデータに変換できるという特徴を持つ。再生は、CCD から送られてきた干渉縞のデータをもとに計算機処理によって干渉縞を計算し、この復元された干渉縞を LCD(Liquid Crystal Display)に表示する。そして、この LCD に

レーザー光を照射することによって、像が再生される。この技術の欠点は、CCD と LCD の現在の性能がホログラフィの情報量を満足させるレベルではないということである。このため、被写体のサイズは小さい物体に制限され、また、再生像も小さいサイズの像しか再生できない。

この技術は、ホログラムの現像処理が不要なため記録・再生を実時間で行うことができ、リアルタイム動画に適しているためしばしばホログラフィ TV などの動画ホログラフィの分野の研究に用いられる [14]。また、干渉縞をデジタルデータとして扱えるため、蓄積・伝送にも適していることから、本研究においても重要な技術であると言える。

3.4 動画ホログラフィ

ホログラムの撮影の際には、物体光と参照光でできる干渉縞を比較的感度の低い感光材料で記録するため、露光時間が長くなりがちである。そのため、その間被写体は静止していることが要求され、運動物体の撮影は困難とされてきた。しかし、パルスレーザーやホログラフィックステレオグラムの開発によって、運動物体の撮影は可能となり、それに伴いホログラフィの動画化の研究が盛んにされるようになった。動画ホログラフィの研究は、映画と TV の 2 つに方向性が分かれている。両者とも、まだ実用的とは言えるレベルではないが、これまでの種々の研究によって良質な動画像が得られるようになってきている。中でも、デジタルホログラフィの技術を用いた動画ホログラフィの研究は、今後より一層盛んになっていくと考えられる [15]。

3.5 自然動画ホログラフィ

3.5.1 自然動画ホログラフィの定義

本研究では、次の 3 つの条件を満たすホログラフィを自然動画ホログラフィと定義づける。

- 自然物を記録できる

静止物体はもちろん，人物などの運動物体も撮影できる．また，自然界に存在するあらゆる物体を記録することができる．

- フルカラーである

被写体の色情報を，フルカラーで再現できる．

- 滑らかな動きを表現できる

ホログラフィ動画を滑らかに再生できる．

3.5.2 本研究で用いる自然動画ホログラフィ

上記の条件から自然動画ホログラフィとして最も理想的であると考えられるのは，これまで説明してきた既存のホログラフィの中では円筒型ホログラフィックステレオグラムのみである．しかし，本研究では上記の3つの条件に加えて Network 転送に適しているかという条件も加わる．そのため，円筒型ホログラフィックステレオグラムのような，ホログラム作成までに多くのステップを要するホログラフィは基本的にリアルタイム転送には不向きである．撮影手順の複雑なカラーレインボウホログラフィについても同様である．

Network 転送に最適なホログラフィはデジタルホログラフィである．また，デジタルホログラフィは被写体のサイズに制限があることを除けば，自然動画ホログラフィの条件をほぼ満たしている．そこで，本研究で用いる自然動画ホログラフィはこのデジタルホログラフィを土台とする．

また，デジタルホログラフィのカラー化に必要な光学系の候補として，前述のレーザー光再生カラーホログラフィの方式を採用する．よって，本研究ではデジタルホログラフィとレーザー光再生カラーホログラフィを組み合わせることによって，自然動画ホログラフィとして用いる．

第 4 章

提案する転送方式と構築する実験系

本章では，自然動画ホログラフィ像の提案する一転送方式についてと，これを検証するための実験系について述べる．

4.1 提案する転送方式

本研究で提案する転送方式は，大別すると図 4.1 のように記録系，転送系，再生系の 3 つに分類できる．

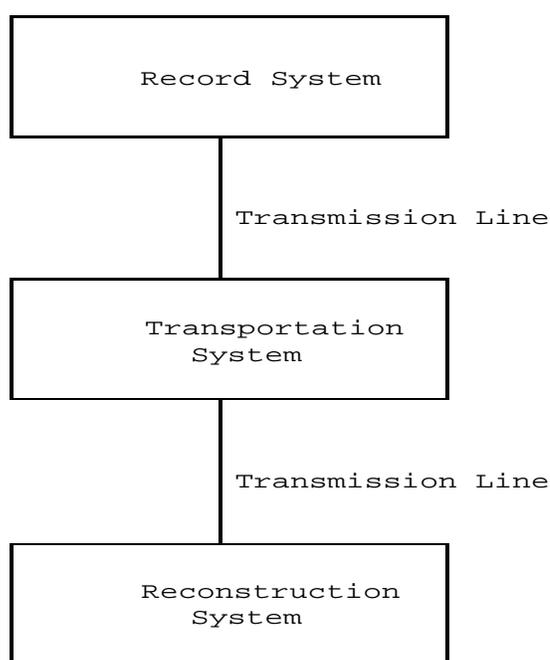


図 4.1 系の分類

4.2.1～4.2.3 でそれぞれの系を詳しく説明する。

4.1.1 記録系

記録系では、カラーホログラフィとデジタルホログラフィの技術を組み合わせることによって、擬似自然動画ホログラフィとして物体を記録する。この光学系を図 4.2 に示す。

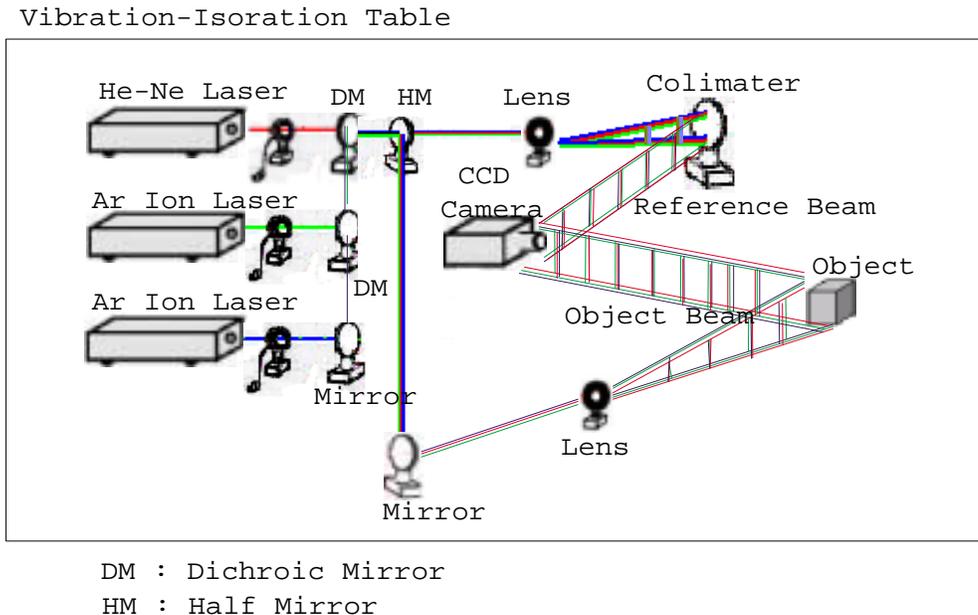


図 4.2 記録光学系

手順を簡単に説明する。

1. RGB のそれぞれのレーザー光をダイクロイックミラー（特定の波長光のみを反射し、それ以外は透過するミラー）によって光軸をそろえる。
2. ハーフミラーで、物体照射用と参照光用に光軸を 2 分割する。
3. 物体光と参照光の干渉縞を CCD で記録する。
4. 記録した干渉縞のデータを電気信号に変換して転送系に送る。

以上の一通りの操作によって、動画の 1 コマを記録することができる。よって、この手順を繰り返し行う（秒間 10～60 回）ことで、動画データとして記録することができる。

4.1.2 転送系

転送系は、図 4.3 のような流れで行う。

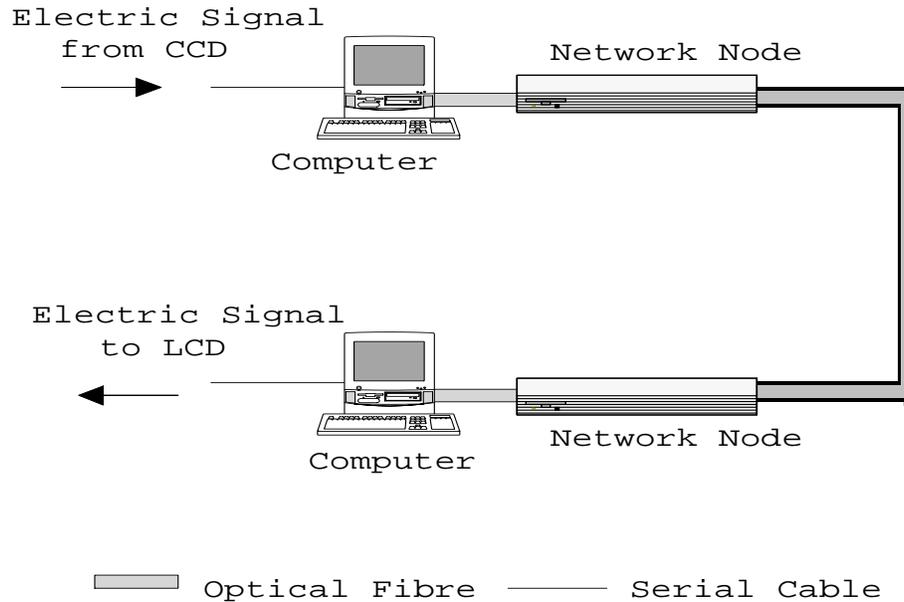


図 4.3 転送系

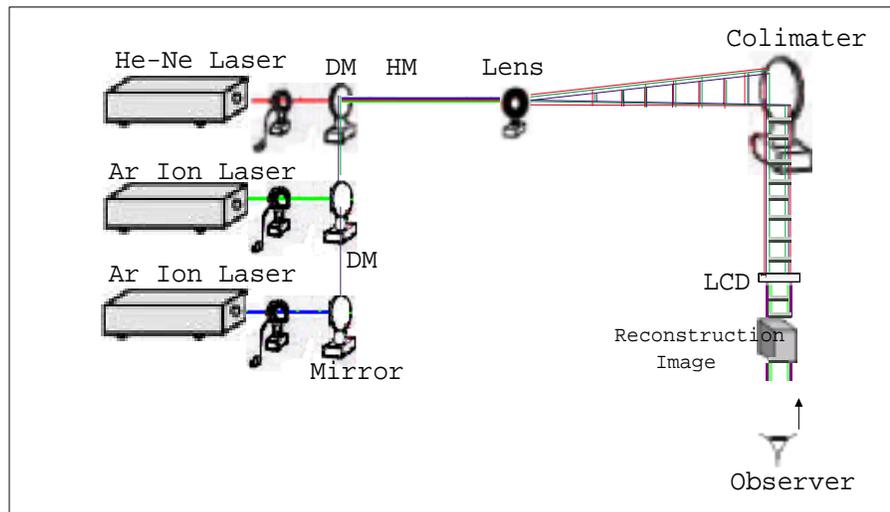
手順を簡単に説明する。

1. 記録系の CCD からの電気信号を計算機を經由して、UDP/IP によって光ファイバで送信する。
2. 計算機からのデータをネットワークノード (ルータ or スイッチ) を介して、転送する。
3. ネットワークノードからのデータを計算機で受信し、干渉縞計算を施す。
4. 計算結果 (干渉縞) を再生系の LCD に送信する。

4.1.3 再生系

再生系も記録系と同様に、カラーホログラフィとデジタルホログラフィを併用する。再生光学系を図 4.4 に示す。

Vibration-Isolation Table



DM : Dichroic Mirror
 HM : Half Mirror

図 4.4 再生光学系

手順を簡単に説明する．

1. LCD に干渉縞を表示する．
2. RGB のそれぞれのレーザー光をダイクロイックミラーによって光軸をそろえる．
3. そろえた光軸を LCD に照射して、像を再生する．

以上の一通りの操作によって、動画の 1 コマを再生することができる．よって、この手順を繰り返し行う (秒間 10 ~ 60 回) ことで、動画像として再生することができる．

4.2 構築する実験系

4.2.1 記録系・再生系

記録系と再生系については、図 4.2 や図 4.4 のように RGB の 3 本のレーザーを使用して、フルカラーとして記録・再生の実験を行うのが本研究では理想である．しかし、レーザーをはじめとするホログラフィ光学器材は非常に高価で入手し難い．よって、記録・再生の光学

系ははじめは図 4.5, 図 4.6 のようなレーザーを 1 本のみ用いたモノクロームの光学系で実験系を構築し, まず動画についてのみ実験を行い, 検討を進めていく. その後, モノクローム動画での結果がある程度得られ, またフルカラー化に必要な器材がそろい次第図 4.2, 図 4.4 の実験系を構築してフルカラー動画についても検討を行う.

Vibration-Isolation Table

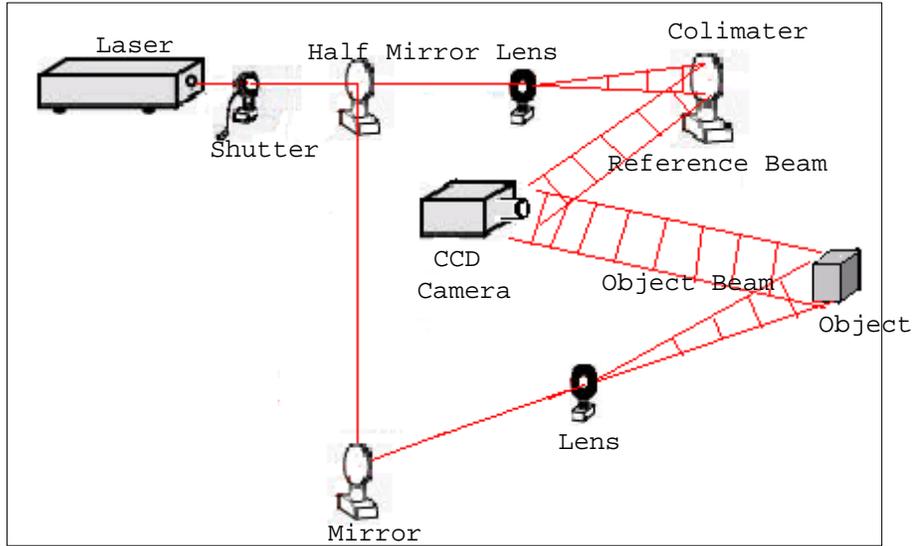


図 4.5 当面の記録実験系

Vibration-Isolation Table

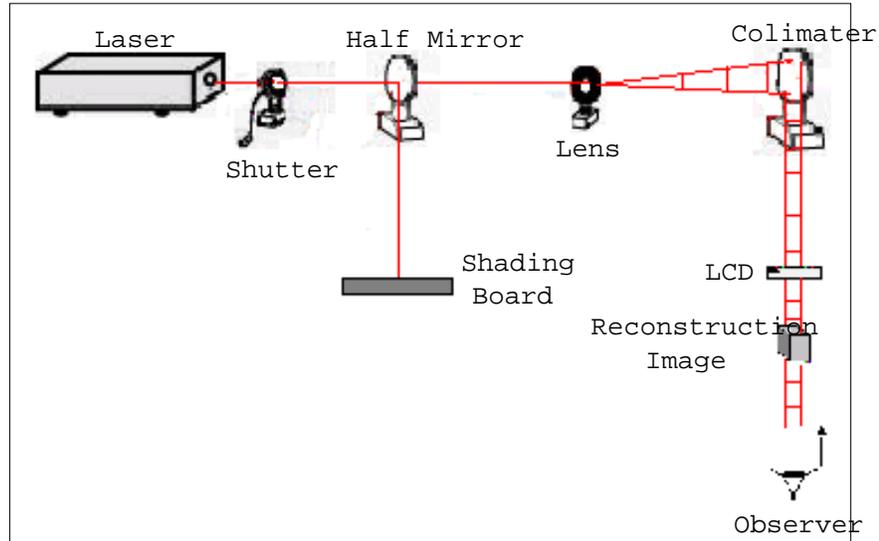


図 4.6 当面の再生実験系

4.2.2 転送系

転送系に関する実験系は、まず短距離間での転送から検証していくため、当面はネットワークノード間の距離は短めに設定する。その後、実験結果が得られ次第距離を伸ばしていく。

また、単色の実験系をフルカラーの実験系に拡張しようとした際に、記録・再生系においてレーザーが計 6 本必要となるため、レーザーが不足する可能性が有る。この場合は、記録・再生系の光学系を独立に構築せずに、記録光学系を再生時にも利用する。つまり、記録した動画データを一度 PC 端末に蓄積・保存しておき、この間に光学系におけるミラーなどの配置を再生光学系の配置に変更する。この状況でリアルタイム転送をシミュレートしてデータを UDP/IP で転送して再生するという、擬似リアルタイム転送の実験系を構築し、フルカラー時の転送系の要件を求める。

第 5 章

技術的課題

本章では，本研究における技術的な課題について述べる．

5.1 ホログラフィ自体が現在抱えている課題

本方式に用いる自然動画ホログラフィとして，レーザー光再生カラーホログラフィとデジタルホログラフィを組み合わせることは前に述べた．よって，本方式の自然動画ホログラフィは，以下に示すこの 2 つのホログラフィが現在抱えている課題も継承するかたちとなっている．

5.1.1 光学系の複雑化

レーザーを使用したカラーホログラフィの光学系が複雑になるということは第 3 章でも触れた．このことは，本研究についても同様で，記録系・再生系にダイクロイックミラーを用いることで多少の光学系の簡略化が可能であるが，それでもまだ光学系は複雑である．

5.1.2 CCD，LCD の解像度の不足

第 4 章でも述べたが，CCD，LCD の性能はホログラフィに適用するには，まだ実用的とは言えないのが現状である．将来，CCD，LCD の性能が向上していけばこの課題はクリアできるものと考えられるが，現時点においては両者の性能は良質のホログラフィ像を得るためには不足している [16]．

- CCD の解像度の不足

現在の CCD は、画素サイズがホログラフィの記録に十分なほど高精細ではない。一般に、CCD でホログラムを記録するためには 1mm あたり千～数千本の解像度が必要とされるが、現在の CCD の解像度は百本程度である。ホログラフィでは、参照光と物体光のなす角は $30^\circ \sim 45^\circ$ に設定するのが良質な像を得る条件の 1 つであるが、CCD の解像度の不足のために、この角度は極端に小さな値しかとることができない。結果として、再生時に正当な像とゴースト像が重なってしまうという問題が発生する。

そこで、ゴースト像が重ならない再生像を得る位相シフト法やゴースト像を除去する手法などの CCD の画素数を有効に使う方式や、位置シフト撮影法を用いて CCD の画素数を見かけ上増やし、再生像の領域を拡大するといった方式が提案されている [17]。

- LCD の解像度の不足

LCD についても同様に、現在の LCD の性能では再生像の大きさは 10～20mm 角程度が限界である。これについては、接眼レンズを用いて再生像を拡大する方式や、複数の LCD を並列に並べて高分解能・大画面の LCD を実現する方法など多くの手法が提案されており、どの方式においても比較的良い結果が得られている ([18],[19])。しかし、どのアプローチにおいても LCD の分解能の限界から、実用レベルにはまだ達していない。

5.1.3 サイズの大きいホログラフィデータへの対応

第 2 章でも触れた通り、ホログラフィは莫大な情報量を持つため、一般に伝送には不向きであると言われている。よって、本研究のようにホログラフィデータを転送し、良質な動画を得ようとする場合、情報量の圧縮が必要である。ホログラフィデータの圧縮方式については、これまでも様々な研究がされており、多少の再生像の劣化は見られるものの、データ量を $1/4 \sim 1/200$ 程度まで圧縮を実現した例も報告されている ([20]～[23])。

しかしながら、データ圧縮処理によりリアルタイム性が犠牲になることが考えられる。

5.1.4 計算機に実装する干渉縞の計算式の最適化

前述したように、ホログラフィは莫大な情報量を持つ。これは、デジタル化されたホログラフィデータから干渉縞を計算して復元する際にも障害となり、本研究においても滑らかな動画を実現を妨げる要因の1つと言える。計算機の処理速度は年々高性能になっているが、それでもこれまで一般的な計算手法である点充填モデル(物体の表面が発光する点で充填されているものとして扱う)を用いた場合、計算時間は数十時間にもなる。

そこで、この計算時間を短縮するために、点充填モデルに変わる新たな計算手法の研究([24]~[26])、また干渉縞計算専用のハードウェアの開発などがされており[27]、いずれも3桁~4桁の高速化が実現されている。

5.2 その他の考えられる課題

本方式において、今後生じる可能性の有る課題を挙げる。

5.2.1 3色のレーザー光を使用した干渉縞を CCD が記録できるか

デジタルホログラフィにおいて、単色のレーザー光を使用した干渉縞の記録については数多くの前例がある。しかし、本方式のような、3色のレーザー光を使用した、いわゆるカラーデジタルホログラフィ干渉縞の記録はまだ行われていない。さらに、レーザー光再生カラーホログラフィの色再現範囲は、人間が感知できる色度範囲よりも狭く、また再生像が暗くなりがちである。このことから、レーザー光再生カラーホログラフィによって記録されたフルカラー情報を持つ干渉縞を、1台のCCDのみでは前述の解像度の課題から再生像をさらに暗くしてしまう可能性が有る。

この場合の解決案として、CCDもRGBについて1台ずつの計3台用意するという手法が考えられる。これにより、CCDはそれぞれ単色の干渉縞を記録するだけでよい。また、この方法によって記録した干渉縞データを転送する際は、Network回線も3本用意して送信する、もしくは波長多重方式を用いて1本の回線で多重化して送信する。

5.2.2 NIC のバンド幅性能の不足

本方式の転送系では、回線に光ファイバを用いることにより、干渉縞データの高速転送を図る。しかし、現在の Gigabit NIC (Gigabit Network Interface Card) の性能は光ファイバの性能に追いついておらず、比較的性能の高いものでも 500Mbit/s 前後である。このため、転送実験を行った際、再生動画像が滑らかに再生できない可能性が有る。

この場合は、記録時に CCD の解像度を低めにし、転送する干渉縞データのサイズを調節することによって対処する。

5.2.3 動画フレーム数が少ない場合に滑らかな動きの再生像が得られるか

本方式では、動画フレーム数を秒間 10 ~ 60 フレーム転送する。ここで、動画フレーム数が 60 フレームや 30 フレームの場合は、現在の TV や CATV などで採用されていることから、動画フレーム数としては問題無い。しかし、動画フレーム数を 10 フレームのように低めに設定した時、Network にかかる負荷は軽減されるが、再生動画は滑らかに表現できないことが考えられる。

よって、これを滑らかに表現するために、受信側で直前と直後の干渉縞を復元した後、それらの干渉縞をもとに間の動きを補間することを検討する。ただしこの場合、受信側に次のフレームが到着するまで待機する必要があるため、リアルタイム性が犠牲になる。

第 6 章

今後の研究推進企画

本章では、今後 2 年間の研究において実施すべき内容を述べる。

6.1 実験系の構築

第 4 章で説明した実験系の構築は、今後の検討を進めていく上でまず第一に行わなければならない。しかし、その構築に必要な器材が全てそろっていないのが現状である。よって、必要器材の入手、さらにそれらを用いた実験系の構築が急務である。

6.2 転送実験の実施

実験系の構築ができ次第転送実験を実施する。まず、実験系のテストを兼ねてモノクローム動画の転送について実験を行い、以下の項目について評価・検討する。その後、結果が良好であればフルカラー動画像（自然動画ホログラフィ像）について、以下の項目について評価・検討していく。

6.2.1 技術的課題への対処

第 5 章で挙げた課題のうち、特に 5.2 で述べた課題が転送実験を実施した結果発生した場合は、それぞれについて対処法を施す。また、それ以外に別の課題が発生した場合は、それらへの解決案も検討していく。

6.2.2 再生動画像の評価

再生動画像の評価は、次のような項目について実施する。

- 動画フレーム数の違いによる再生像への影響

最初は TV と同じ秒間 30 フレーム数で動画転送を行う。その後、フレーム数を減少させた場合と増加させた場合において、それぞれ動画転送を行う。フレーム数を減少させた場合は、動画自体の質は落ちるがその分回線や干渉縞計算の負荷が減少するため、動画の質をあまり損なわずに再生できる。逆に、フレーム数を像がさせた場合は、動画の質は高いが回線や干渉縞計算への負荷が増加するため、再生系で再生動画像は滑らかに再生されない可能性がある。そこで、秒間フレーム数を変えた場合の再生動画像への影響を調べ、最適なフレーム数を導き出す。

- 圧縮率の違いによる影響

莫大なデータ量のホログラフィデータを Network 転送する場合、その圧縮を行うことが必須である。そこで、ホログラフィデータを圧縮率を様々に変更して転送を行い、自然動画ホログラフィ像の転送に最適な圧縮率を導き出す。その際の圧縮方式には、既存のホログラフィ動画に対する圧縮方式を適用するか、あるいはそれが困難であった場合は独自に自然動画ホログラフィ像を圧縮する方式を作成する。

6.2.3 記録 - 再生にかかる時間の測定

元物体を記録系で記録してからそのデータが転送系を通り、さらに再生系で自然動画ホログラフィ像として再生されるまでの時間を計測する。これにより、全システムにおいてどの系が最も負荷がかかり、何がボトルネックとなっているか等を調べる。この評価項目についても 6.2.1 と同様に、フレーム数を変更した場合とデータを圧縮した場合に時間にどのような影響を与えるかを実験によって評価する。

6.3 別の転送方式の考案

第4章で提案した転送方式は、第5章で述べたような様々な課題があり、まだ理想的とは言えない。そこで、今後この課題を改善できるような転送方式を以下の2つの方向性に基づいて考案する。

6.3.1 新たなレーザーを用いた自然動画ホログラフィの転送方式

この方式では、記録・再生にはやはりレーザーを用いる。しかし、CCD、LCDの解像度の面で課題があるデジタルホログラフィを使用せずにA/D(D/A)変換が可能な方式について、あるいは参照光と物体光の干渉波をデジタル化せずにアナログのまま転送する方式などについて検討していく。

6.3.2 白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムを用いた 自然動画ホログラフィの転送方式

第3章でも述べたように、原画を撮影してからホログラムを得るまでの手順がリアルタイム動画転送に不向きであると判断したことから、本研究ではこの白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムを用いることを見送っていた。しかし、ホログラフィックステレオグラムは被写体に制限が無い、フルカラーかつ動画としても用いることができるといった特徴から、既存技術の中では最も理想的な自然動画ホログラフィであると言える。そこで、この技術を用いた自然動画ホログラフィの転送方式について今後検討し、今回提案した転送方式との比較を行う。

第 7 章

考察

この章では、今回提案した転送方式についてこれまで説明してきたことをまとめておく。

7.1 特徴

今回提案した転送方式は、以下のような特徴を持つ。

1. 記録・再生に 3 本 (RGB) のレーザー光を使用する。
2. 干渉縞の記録に CCD を使用する。
3. 干渉縞をデジタルデータに変換して転送する。
4. 再生時の干渉縞の表示に LCD を使用する。

また、これらの特徴に起因して、下の表 7.1 のような長所・短所がある。

	長所	短所
1 に起因		光学系が複雑
2 に起因	干渉縞を記録しながらデジタルに変換できる	被写体のサイズに制限がある
3 に起因	Network 転送に有利 保存の際干渉縞の劣化を防げる	再生時に干渉縞データの復元計算が必要
4 に起因		再生像のサイズに制限がある

表 7.1 提案した転送方式の長所・短所

7.2 今後の研究で提案していく新しい転送方式との比較

提案した転送方式は、Network 転送が容易にできることを最重要視したため、表 7.1 のような短所を持つこととなった。しかし、今後提案していく第 6 章で述べた 2 つの新しい転送方式では、この短所をいくらかカバーできるのではないかと考えている。

7.2.1 新たなレーザーを用いた自然動画ホログラフィの転送方式

提案した転送方式はデジタルホログラフィの技術を用いて干渉縞のデジタル化、及び復元（アナログ化）を行う。これに比べて、新しい転送方式ではデジタルホログラフィを用いずにこれを行う。よって、表 7.1 の 2, 3, 4 に起因する短所について改善できると考えられる。しかし、撮影法を変えることから 2 に起因する長所が犠牲になる可能性はある。

7.2.2 白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラムを用いた 自然動画ホログラフィの転送方式

上記の方式は、今回提案した転送方式の改良とも言える。しかし、この方式は今回の技術を使用しない全く新しい方式である。この方式では、白色光再生ホログラフィックステレオグラムを用いることで、表 7.1 の全ての短所が改善できる。

しかし、Network 転送への応用、つまりデジタル化が困難である。これに関しては、当初はデジタルホログラフィの技術を用いることも考えたが、この方法ではデジタルホログラフィの性質から被写体のサイズに制限が出てしまうという短所が残ってしまい、ホログラフィックステレオグラムの特有の長所を生かしきれない。そこでこの方式のデジタル化には、7.2.1 で提案した方式を応用するかこの方式専用のデジタル化の方法を考案して行う。

第 8 章

むすび

ホログラフィは究極の 3 次元画像技術であり，多くの分野への応用が期待されている．だが，ホログラフィの歴史は浅く実用化にはまだ様々な課題が山積しているのが現状である．これを少しずつ改善していこうとこれまで種々の研究がなされてきた．これらのアプローチにより，ホログラフィは実用化に向けて確実に進歩している．さらに，今日でもホログラフィの改善を目的とする研究は盛んに行われている．

本研究ではこれらの研究と同様にホログラフィの発展を目的としており，これまで行われなかったホログラフィ動画を Network 転送するという新しい研究分野に着目して検討を進めてきた．今後は，提案した転送方式について実験・検証を行い，自然動画ホログラフィの高速 Network 転送を実現する．

謝辞

本研究を行うに際し，多大なる御指導，御鞭撻を頂いた，本情報システム工学科の島村 和典 教授 に深く感謝致します．また，本講座院生 加藤 寛治氏，中平 拓司氏，山岡 徹夜氏，浦西 慶規氏，小林 寛征氏，橋本 江里子氏，ならびに本講座学部生 谷岡 亮介君，中平 和友君，松本 憲英君，山田 敦君，大島 和雄君，酒井 愛さん，藤原 達也君，三木 勝君に深く感謝致します．さらに，在学中親切なる御助言を頂いた岡田 守 教授，岩田 誠 教授 をはじめとする諸先生方に心より感謝致します．

参考文献

- [1] 横田英嗣; ”美しい光の世界”, 東海大学出版会.
- [2] 佐藤甲癸; 動画ホログラフィの最近の展望, 画像電子学会誌 Vol.22, No.4, pp.307-314.(1993).
- [3] 久保田ホログラム工房, <http://homepage2.nifty.com/kubotaholo/> (2001/12/20 現在).
- [4] 辻内順平; ”ホログラフィックディスプレイ”, 産業図書.
- [5] 大越孝敬; ”三次元画像工学”, 朝倉書店.
- [6] 中央精機(株) カタログ; ”CENTRAL CATALOGUE No.33”(2001).
- [7] 佐々木建光, 吉川浩; 動画ホログラフィの情報低減, 画像電子学会誌 Vol.22, No.4, pp.329-336.(1993).
- [8] 久保田敏弘; カラーホログラフィ, 画像ラボ Vol.10, No.2, pp.35-38.(1999).
- [9] 佐藤甲癸; 白色レーザによるカラーホログラフィ 3 D-TVのぼけの軽減, 3次元画像コンファレンス 2001(2001).
- [10] 高野邦彦, 佐藤甲癸; 白色光源とLCDを用いたホログラフィ立体テレビの特性改善, ディスプレイアンドイメージング Vol.8, No.3, pp.209-216.(2000).
- [11] 辻内順平; ”ホログラフィー”, 裳華房.
- [12] 深谷直樹, 小倉久忠, 阿部真也, 本田捷夫; 自然な観察を目指した3次元動画像表示, デンソーテクニカルレビュー Vol.5, No.1, pp.101-110.(2000).
- [13] 高野誠, 阪本邦夫, 高橋秀也, 志水英二; ホログラフィックステレオグラムを用いた3Dムービー, 画像ラボ Vol.9, No.1, pp.30-33.(1998).
- [14] 佐藤甲癸; 液晶デバイスを用いた動画ホログラフィ研究の展望; ディスプレイアンドイメージング Vol.2, No.4, pp.309-315.(1994).
- [15] 佐藤甲癸; ホログラフィ技術の現状と今後の課題, 3次元画像コンファレンス

- 2001(2001).
- [16] 佐藤甲癸；ホログラフィを用いた立体動画像表示に関する研究動向，通信・放送機構 高度立体動画像プロジェクト最終成果報告書，pp.8-18.(1997).
- [17] 浅野高史，大頭仁；位置シフト撮影法を用いたハイブリッドホログラフィー，光学会誌 Vol.29，No.10(2000).
- [18] 前野敬一；LCD 方式電子ホログラフィックディスプレイの研究開発，通信・放送機構 高度立体動画像プロジェクト最終成果報告書，pp.60-77.(1997).
- [19] 飯田直治，佐藤甲癸；接眼方式ホログラフィを用いた立体テレビの検討，テレビジョン学会技報 Vol.20，No.60，pp.55-58.(1996).
- [20] 佐々木建光，吉川浩；電子ホログラフィックディスプレイにおける情報低減，信学会論文誌 Vol.J76-D-II，No.9，pp.2151-2152.(1993).
- [21] 小野智正，吉川浩；ホログラフィック三次元画像情報圧縮の一方法，テレビジョン学会技報 Vol.20，No.60，pp.13-16.(1996).
- [22] 丹治英一郎，吉川浩；高効率符号化を用いたホログラフィック 3 次元画像の圧縮法，テレビジョン学会誌 Vol.47，No.12，pp.1678-1680.(1993).
- [23] 吉川浩；ホログラフィック 3 次元画像の圧縮技術，テレビジョン学会誌 Vol.47，No.2，pp.177-182.(1993).
- [24] 岡田孝常，西川修；ホログラム計算の高速化に関する研究開発，通信・放送機構 高度立体動画像プロジェクト最終成果報告書，pp.94-125(1997).
- [25] 坂本雄児；基本平面モデルによる計算機合成ホログラム，3 次元画像コンファレンス 2001(2001).
- [26] 松島恭治；波面展開法を用いた表面モデル CGH の高速計算法，3 次元画像コンファレンス 2001(2001).
- [27] 下馬場朋禄，伊藤智義；ホログラフィ専用計算機 HORN-4，3 次元画像コンファレンス 2001(2001).

付録 A

付録

ここでは、今後そろえる予定の実験機材について載せておく。

A.1 除振系

除振系には、実際に床からの振動を軽減する除振脚と、レーザーなどの光学機器を配置するためのテーブルトップがから構成されるタイプの除振台と、テーブルトップのみから構成されるタイプの除振台の 2 台を用いる。なお、メーカーは両者とも Newport 社 (<http://www.newport-japan.co.jp/index.html>) である。

1. 除振脚とテーブルトップから構成される除振台

- 除振脚

型名： I-2000 シリーズ

固有振動数： 垂直方向 < 1.1Hz

水平方向 < 1.5Hz

負荷量： 3600kg/4脚

要求空気圧： 0.7 ~ 6.0kg/cm²(専用コンプレッサによって圧縮空気を送る)

サイズ： 直径 2.54m , 高さ 0.8m (1脚あたり)

- テーブルトップ

型名： RS4000 シリーズ

平面度： 600mm 幅に対して ± 0.1mm

1m²あたり ± 0.05mm

ハニカムコア： スチールコア

サイズ： 幅 $1.2m$, 長さ $2.4m$

2. テーブルトップのみから構成される除振台

型名： RS4000 シリーズ

平面度： $600mm$ 幅に対して $\pm 0.1mm$

$1m^2$ あたり $\pm 0.05mm$

ハニカムコア： スチールコア

サイズ： 幅 $1.2m$, 長さ $3.6m$

A.2 レーザー系

レーザー系は、下記に挙げるもの以外にも入手を検討しているが、ここではスペックが確認できているものを載せる。

1. Ar イオンレーザー (要冷却)

メーカー： Coherent 社 (<http://www.coherent.co.jp/>)

型名： Innova70

発振波長： $514nm$ (緑色), $488nm$ (青色)

発振出力： $5W$

発振間隔： 連続発振

冷却方式： 水冷式 (10-30)

2. Nd-YAG レーザー

メーカー： Spectra-Physics 社 (<http://www.splasers.com/>)

型名： Quanta-Ray DCR-3

発振波長： $532nm$ (緑色)

発振出力： $850mW$

発振間隔： $10pulse/s$