

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ホログラフィック・3 - D プリンタを用いた 3 次元画像出力法の研究
Title(English)	Holographic 3-D printer for 3-D image hardcopies
著者(和文)	山口雅浩
Author(English)	Masahiro Yamaguchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第2694号, 授与年月日:1994年11月30日, 学位の種別:論文博士, 審査員:大山永昭
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第2694号, Conferred date:1994/11/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

ホログラフィック・3-Dプリンタを用いた3次元画像出力法の研究

Holographic 3-D printer for 3-D image hardcopies

山口 雅浩

Masahiro Yamaguchi

1994, 10, 25

目 次

第1章 序論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 本論文の構成	3
第2章 3次元画像システムとホログラフィ	5
2. 1 はじめに	5
2. 2 3次元画像システムと表示技術	6
2. 2. 1 3次元画像システム	6
2. 2. 2 3次元画像	6
2. 2. 3 視差	8
2. 2. 4 ハードコピーとソフトコピー	9
2. 3 ホログラフィ	9
2. 3. 1 ホログラフィの原理と応用	9
2. 3. 2 レインボウホログラム	11
2. 3. 3 リップマンホログラム	14
2. 4 ホログラフィック・ステレオグラム	18
2. 4. 1 ホログラフィック・ステレオグラムの原理	18
2. 4. 2 ホログラフィック・ステレオグラムの種類	20
2. 4. 3 ホログラフィック・ステレオグラムの応用	22
2. 4. 4 ホログラフィック・ステレオグラム以外の立体像表示法	24
2. 4. 5 ホログラフィック・3-Dプリンタ	26
2. 4. 6 動画ホログラフィ	27
2. 5 3次元画像の表示法	29
2. 5. 1 3次元コンピュータグラフィックス	29
2. 5. 2 ボリュームデータの表示	30
2. 5. 3 光学モデル	31
2. 5. 4 ハイブリッド処理の応用	32
2. 5. 5 ハイブリッド処理の3-Dプリンタへの応用	35
2. 6 結論	37
第3章 ホログラフィック・3-Dプリンタの開発	38
3. 1 はじめに	38
3. 2 ホログラフィック・3-Dプリンタの必要条件	38
3. 3 マルチドット記録法	40
3. 3. 1 マルチドット記録法の原理	40
3. 3. 2 マルチドット記録法の特徴	42
3. 4 ホログラフィック・3-Dプリンタシステム	44
3. 4. 1 概要	44
3. 4. 2 画像処理系	45
3. 4. 3 露光システム	46
3. 4. 4 液晶パネルに関する検討	47
3. 4. 5 記録材料	49
3. 4. 6 実験結果	50

3. 5	デジタル拡散板による画質改善	56
3. 5. 1	要素ホログラムの高密度化	56
3. 5. 2	実験	58
3. 5. 3	考察	61
3. 6	プロトタイプ試作	62
3. 6. 1	プロトタイプ試作の目的	62
3. 6. 2	構成	63
3. 6. 3	実験および考察	68
3. 7	高速化	69
3. 7. 1	高速化のための検討	69
3. 7. 2	並列露光光学系	70
3. 7. 3	レンズアレイの作成精度の影響	71
3. 7. 4	実験結果および考察	72
3. 8	まとめ	75
第4章	カラー画像の記録	76
4. 1	はじめに	76
4. 2	カラーホログラフィ	77
4. 2. 1	ホログラフィのカラー化の方法	77
4. 2. 2	カラー・ホログラフィック・ステレオグラムの方法	78
4. 3	ホログラフィック・3-Dプリンタのカラー化	79
4. 4	色再現のための画像処理法	80
4. 5	実験	81
4. 6	結論	84
第5章	アニメーション画像の記録	85
5. 1	はじめに	85
5. 2	ホログラフィによる動画表示	86
5. 3	ホログラフィック・3-Dプリンタによるアニメーション表示	89
5. 3. 1	原理	89
5. 3. 2	画像処理法	92
5. 3. 3	再生像の視域	93
5. 4	実験	95
5. 5	結論	98
第6章	反射型ホログラフィック・スクリーンによる立体像表示	99
6. 1	はじめに	99
6. 2	原理	99
6. 3	像再生の特性	102
6. 3. 1	再生像の歪	102
6. 3. 2	再生像の解像度	103
6. 4	実験および考察	105
6. 4. 1	実験結果	105
6. 4. 2	マルチドット法によるホログラフィック・ステレオグラムとの比較	107
6. 4. 3	レインボウ型ホログラフィック・スクリーン	107
6. 4. 4	ホログラフィック・スクリーンを用いた3-Dプリンタ	108
6. 5	結論	109
第7章	マルチドット法によるレインボウホログラムの記録	110
7. 1	はじめに	110
7. 2	原理	112

7. 2. 1	レインボウ型ホログラム記録の原理	112
7. 2. 2	マルチカラーホログラム記録の原理	113
7. 2. 3	スリット位置の導出	116
7. 2. 4	回折の影響	118
7. 3	実験	118
7. 4	結論	120
第8章	像再生特性に関する考察	122
8. 1	はじめに	122
8. 2	マルチドット法によるホログラフィック・ステレオグラムの像再生特性	123
8. 2. 1	再生像の視域	123
8. 2. 2	ホログラフィック・ステレオグラムの結像公式	124
8. 2. 3	再生像の歪	126
8. 2. 4	再生像の分解能	130
8. 2. 5	要素ホログラム間隔と視差方向数	132
8. 2. 6	視覚特性との関係	133
8. 3	ホログラフィック・ステレオグラムの限界についての考察	135
8. 3. 1	本節の目的	135
8. 3. 2	像再生の定式化	135
8. 3. 3	再生波面の比較	140
8. 3. 4	位相を付加したステレオグラム (PAS)	141
8. 3. 5	実験	143
8. 4	結論	144
第9章	位相を付加したステレオグラムによる立体像表示	145
9. 1	はじめに	145
9. 2	位相を付加したステレオグラムの原理	146
9. 3	位相を付加したステレオグラムのCGH計算法への応用	148
9. 4	実験	149
9. 5	結論	150
第10章	結論	151
参考文献		155
研究業績		161

第1章 序論

1. 1 研究の背景

近年、計算機技術の発展やマルチメディア技術の普及などにもともない、3次元画像を取り扱うシステムが多くの分野で利用されはじめている。例えば、建築や服飾などの設計では計算機支援によるデザインシステム（CAD：Computer Aided Design）を用いて3次元のデザインが行われ、また3次元コンピュータグラフィックスは3次元CADにより作成したデータの可視化だけでなく、バイオサイエンスや医用工学などの分野でもその応用が期待されている。医療においては、コーンビームX線CT（Computed Tomography）やヘリカルスキャンCTなどのような3次元の画像データを収集するさまざまな画像装置が開発されている。これらの3次元画像システムにおける表示媒体としては、CRT（Cathode Ray Tube）モニタのようなソフトコピーと、プリンタなどのハードコピーが目的に応じて必要とされる。現在、3次元画像データのソフトコピーとしては、コンピュータグラフィックスの手法により陰影処理された2次元画像をモニタに表示する方法が主に用いられており、回転や視点の移動により物体の3次元的な構造をある程度把握することができる。一方3次元データのハードコピーとしては、上記のように陰影処理された画像をイメージプリンタにより出力したり、多数の断層像を並べて出力するマルチフォーマットカメラなどが使用されているが、ハードコピーでは視点を移動して観察することができないため、このようなハードコピーから物体の3次元的な構造を理解することは困難である。これらの理由から、3次元画像システムのヒューマンインタフェースとして立体的な表示の可能なハードコピーの必要性が非常に高まっている。

本研究では、立体像表示が可能なハードコピーを出力する装置を3次元画像システムの端末装置として開発することを目的とし、ホログラフィの技術を用いてこれを実現するホログラフィック・3-Dプリンタに関する研究を行った。ホログラフィは写真技術に基づいて光の波面を記録・再生できる技術であり、シート状の写真感材に立体像を記録・表示することができ、特に再生される立体像の画質が非常に優れていることから、この目的に対して最も適したものと考えられる。しかし3次元画像処理システムなどの端末装置として立体像を出力する3-Dプリンタを実現するためには、計算機内の3次元画像データから自動的にホログラムを生成する技術を確立する必要がある。また、画像のハードコピーとしては（1）正確な画像を記録できる、（2）持ち運びや保管が容易、（3）特別な観察装置を必要とせずに見ることができる、などの条件が必要とされるが、これらを満たす技術が現在まで開発されていない。本研究ではこれらの条件を満足する新しいホログラム記録方法を考案し、自動的に歪みのない立体像を合成する技術の開発を行った。さらにホログラフィック・3-Dプリンタのプロトタイプ装置の試作を行い、開発した手法により3-Dプリンタを実現できることを実証し、実用化のための問題点を明らかにした。

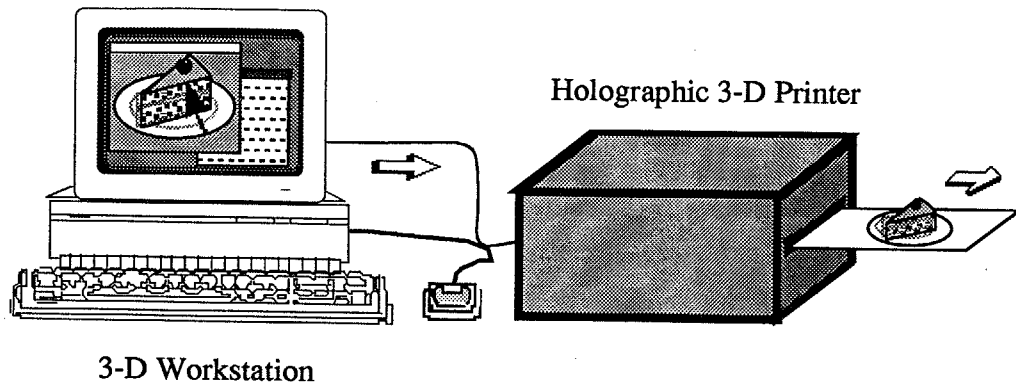


Fig. 1. 1
ホログラフィック・3-Dプリンタの概念図

Fig. 1. 1にホログラフィック・3-Dプリンタの概念図を示す。3次元画像システムでデザインし、処理された3次元画像データをホログラフィック・3-Dプリンタに送ることにより、立体像を再生するハードコピーを自動的に出力する。このハードコピーはフィルムに記録され、白熱灯などの通常の照明の下で再生できる。再生像は水平・垂直方向の視差を持っているので、照明条件さえ満足していれば観察位置によらず歪みのない立体像を見ることができる。

3次元データのハードコピーとしては、機械加工技術や光硬化性樹脂等を用いて計算機のデータから模型を自動的に作成する装置が実用化されている。作成装置は大がかりなものとなるが、サンプルとして模型が必要な場合や人工骨などの原型としては有用である。一方ホログラフィック・3-Dプリンタは、シート上に3次元画像データの立体像としてのハードコピーを記録するシステムであり、上記のようなモデルを作成する装置とは目的が異なる。コンピュータシステムの端末装置として、従来のイメージプリンタの3次元版のような3-Dプリンタが実現されれば多くの分野で利用することが可能と考えられる。

ディスプレイを目的としたホログラフィの研究は、これまで大きく発展し、実物と見分けのつかない優れた画質のホログラムを作成できるようになっている。しかし、現状ではホログラムを作成するためには特殊な装置と専門的技術を必要とし、特に画質の高いホログラムを作成するには熟練した技能が重要な要素である。このような問題点がホログラムの広い分野での利用を妨げていると考えられる。誰でも手軽にあらゆる3次元画像をホログラムとして記録できるような技術確立することが、ディスプレイホログラフィの応用には非常に重要であるといえる。ホログラフィック・3-Dプリンタは、

(1) 3次元データはコンピュータにより処理・生成される。

(2) 3次元画像データから自動的に合成できる。

という2つの理由により、架空の3次元物体を含むあらゆる3次元画像情報を手軽にホログラムとして作成できる装置であり、ホログラフィに関する専門的知識を持たなくても誰にでもホログラムを作成できるため、3-Dプリンタの開発によりホログラフィの応用分野が大きく広がることが期待できる。

1. 2 本論文の構成

本論文では、前述のようなホログラフィック・3-Dプリンタに関して行った研究結果を報告する。

まず第2章では、3次元画像処理システムにおける画像出力の必要性和問題点を中心に議論する。はじめにホログラフィとホログラフィック・ステレオグラムの原理と応用について述べ、3次元画像システムに関連する様々な分野に対するホログラフィック・ステレオグラムの応用の可能性を検討する。そしてホログラフィック・ステレオグラムは3次元画像のハードコピーとしての応用に最適であるが、現状では正確な立体像を自動的に記録する技術が確立されていないことを指摘する。また、3次元画像システムのソフトコピーに関して検討し、医療の分野などで重要な3次元ボリュームデータを表示する際の問題点について述べる。本研究では3次元ボリュームデータを高速に表示する新しい手法を提案し、基礎的な実験結果を示す。さらにこの表示手法を3-Dプリンタで記録する画像の計算に用いる方法に関して検討する。

第3章は本論文の最も中心をなす章であり、ホログラフィック・3-Dプリンタの原理および開発を行った結果について述べる。まずホログラフィック・3-Dプリンタに必要とされる技術的な条件を明確にした後、水平・垂直方向の視差情報を自動的に記録するために開発したマルチドット記録法の原理を説明する。そしてこのマルチドット法を用いたホログラフィック・3-Dプリンタ装置の構成を示し、自動的な合成に必要な技術について検討を行う。3-Dプリンタの原理を確認する基礎的な実験結果を示し、問題点を明らかにする。次に再生像の画質向上を目的として、ホログラフィックメモリの分野で開発されたデジタル拡散板をホログラフィック・3-Dプリンタに対して適用し、階調を持つ高解像度の画像を表示できることを実験的に示す。また、ホログラフィック・3-Dプリンタ実用化のための問題点を明らかにするためにプロトタイプ装置の試作を行い、実験を行った結果を示す。これらの研究により、マルチドット法によるホログラフィック・3-Dプリンタの基本的な技術を確認することができたが、本手法による3-Dプリンタの最大の問題点は露光に長時間を要する点であり、次に合成時間の短縮を図る方法の検討を行う。複数の要素ホログラムを同時に露光する並列露光光学系を用いて要素ホログラムを並列露光することにより露光時間を短縮できることを実験的に示す。

第4章では、カラーの立体像を合成する手法について検討を行い、モニタに表示する際と同様な色再現を行うための処理法と、3色のレーザを用いて行った基礎的な実験結果について述べる。

第5章では、ホログラフィック・3-Dプリンタにより動きのある立体像を記録する方法について述べる。この手法では垂直方向の視差を記録する代わりに被写体の動きの情報をホログラムに記録する。本手法を用いれば、露光する画像を変更するだけでホログラフィック・3-Dプリンタにより3次元アニメーションをハードコピーとして出力でき、簡単な装置で観察することができる。

第6章では、より簡便に3-Dプリンタを実現する方式として、3次元画像データを通常の高解像度プリンタを用いて透過フィルム上に出力し、これに画像の記録されていない反射型ホログラフィック・スクリーンを張り付ける手法を提案する。ホログラフィック・スクリーンは低コストで大量生産でき、画像の記録には従来のレーザプリンタを利用できるため、3-Dプリンタの第1段階として有望な方法と考えられる。

第7章では、ホログラフィック・3-Dプリンタのために開発したマルチドット記録法を、レインボウ型ホログラムの合成に応用する。円筒型マルチプレックス・ホログラムは広告や装飾の目的に有望な媒体であるが、大型のホログラムの作成には大きな光学部品が必要であり、その合成が困難であった。本論文で提案するマルチドット記録法は、小型の光学部品で大きなホログラムの合成が可能であることから、大型マルチプレックス・ホログラムの合成に対しても有用である。また、物体光の変調方法を制御することで容易にマルチカラーのホログラムの合成が可能である。ここでは実験的にレインボウ型ホログラムとマルチカラーホログラムの合成を行い、その原理の妥当性を示す。

第8章では、本手法によるホログラフィック・ステレオグラムにおける立体像再生の特性に関する考察を行う。これまで、ホログラフィック・ステレオグラムの再生像の特性に関しては、水平方向の視差のみを記録していることによる再生像の歪みの問題や視差のサンプリングが粗いことによる問題点を中心に議論されてきたが、本論文で提案する手法を用いる場合にはこのような問題は解決される。しかしステレオグラムでは波面を忠実に再現することはできないため、再生像の画質は制限される。そこでホログラフィック・ステレオグラムによる波面再生の特性に関して考察し、記録・再生される波面の成分を明らかにする。さらにホログラフィック・ステレオグラムとフレネル型ホログラムの中間的性質を持つ位相を付加したステレオグラム(PAS: Phase Added Stereogram)を提案し、それぞれに記録されている成分を考えることで、これらの媒体の特性の比較を行う。そして以上の理論的考察について実験的に検証を行った結果についても述べる。

第9章では、第8章で示したPASが計算機ホログラムの計算法としても有効であることを示し、PASの原理に基づいて3次元画像のCGHを作成する実験結果について述べる。

第10章では本論文の結論として、本研究の総括を行い、計算機の3次元画像データから自動的に歪みのない立体像を出力する技術の基盤を確立できたことを述べる。

第2章 3次元画像システムとホログラフィ

2. 1 はじめに

本章では、3次元画像システムにおける画像表示技術について述べ、ホログラフィ技術の適用の可能性について検討する。現状では、ホログラフィ技術は3次元画像データのハードコピーとして適したものと考えられ、特にホログラフィック・ステレオグラムの手法を用いることが現状では最適と考えられる。しかし現状のホログラフィ技術では、コンピュータなどの端末装置として歪のない立体像を自動的に出力することは不可能である。そこで本研究では、3次元画像データのハードコピー出力法としてホログラフィック・3-Dプリンタの開発を行った。

一方、ソフトコピー出力としてはインタラクティブな表示システムが有効であるが、ホログラフィを用いた3次元インタラクティブ表示システムの実現にはまだ時間を要する。インタラクティブな表示技術に関しては、3次元空間の各点が値を持つボリュームデータを表示する手法が確立されておらず、本研究ではボリュームデータを高速に表示する方法に関して検討した。3次元ボリュームデータはデータ量が膨大で表示のための計算に時間を要するので、本研究では高速に像を回転して表示するシステムを実現するために、電子-光学的ハイブリッド処理を用いたシステムの開発を行った。ハイブリッド系を用いることにより、比較的小規模な演算システムで、高速に像を回転しながらボリュームデータを表示することが可能になる。また3次元ボリュームデータの表示法として最近提案された光学モデルの概念を適用すれば、注目する部分をインタラクティブに表示する高速なシステムが実現できる。さらにホログラフィック・3-Dプリンタに対し同様の手法を適用する方策についての検討も行った。

2. 2節で、現状の3次元画像システムにおける画像表示技術と現状における課題を概説し、本研究で扱う対象の範囲を明確化する。2. 3節ではホログラフィの基礎知識と立体像表示に必須な白色光再生の方法に関して説明し、3次元画像データの表示に最適と考えられるホログラフィック・ステレオグラムの技術について2. 4節で述べる。また、関連する立体像表示技術に関して特にホログラフィック・3-Dプリンタに関しては、海外でも同種の研究が行われており、本研究の位置づけを明らかにする。また2. 5節では、3次元画像データのインタラクティブな表示に必要な技術として、3次元ボリュームデータから表示のための画像を高速に生成するハイブリッドシステムを提案し、X線CTにより得られた3次元データから画像を作成した実験の結果を示す。さらにホログラフィック・3-Dプリンタで露光する画像作成に対するハイブリッド処理系の応用の可能性についても述べる。

2. 2 3次元画像システムと表示技術

2. 2. 1 3次元画像システム

近年の計算機技術の飛躍的な発展とともなって、様々な分野で3次元情報をコンピュータにより取り扱うことが多くなっている。特にCPUの処理速度の向上やメモリの大容量化が進んでおり、高速で小型のコンピュータシステムが広く普及している。加えて情報ネットワークやマルチメディア技術の進歩により、コンピュータを用いた画像システムが今後もさらに普及してゆくと考えられる。現在のところマルチメディアシステムで扱われる画像は主に2次元画像に限られているが、近い将来3次元画像を含めたシステムが利用されることは容易に予測できる。

3次元情報は、様々な分野で利用されている。建築や商品設計においてはコンピュータによりデザインを行う3次元のCADシステムが使われており、バイオサイエンスや工学の分野でも、分子構造や染色体などの3次元構造の計算機による処理や、流体や熱などの分布の3次元的可視化などが行われている。医療においては、CTやMRI (Magnetic Resonance Imaging) などにより骨や軟部組織の情報をイメージングする手法が開発され、多くのモダリティにより3次元画像が収集されている。さらに3次元コンピュータグラフィックスの技術は、デザインや広告およびアートなど多くの分野で用いられている。

従来これらの分野においては、3次元情報を表示するために、2次元の表示デバイス上に3次元画像データの一部を順次または同時に表示する方法が一般に用いられている。例えば、X線CTなどにより撮影された3次元物体の断層像を2次元的に並べてフィルムに出力する装置であるマルチフォーマットカメラや、モニタ上に断層像をアニメーションのように表示するシネ表示と呼ばれる手法などが用いられている。また、3次元画像データを2次元表示媒体上に表示する手法としては、3次元コンピュータグラフィックスを用いて陰影処理を行った投影像を表示する方法があり、さらにこれを回転させて表示することで人間の奥行き知覚の重要な要因である動的視差を利用し、立体感を得ることができる。しかしこれらの方法は本質的に2次元の表示デバイス上への表示であるため、3次元構造を理解するのに困難な場合が多い。より優れたヒューマンインタフェースを実現する必要があることから、立体像表示を行う媒体の開発が期待されている。

2. 2. 2 3次元画像

ところで、3次元画像という言葉は現在しばしば使われているが、場合によって様々な意味で用いられている。通常は、立体像として表示されるか2次元表示デバイス上に表示されるかには関わらず、3次元的情報を持つ画像のことを3次元画像と呼んでおり、本論文ではこのうち主にコンピュータや画像表示機器などで扱われる画像情報を対象としている。ここでは言葉の定義を明確にするために、3次元情報の種類についての比較をTable 2. 1に示す。数学的な定義は別とすれば、3次元情報という言葉は、通常は空間的な3次元(x , y , z)として表現される情報を指すことが多い。物体の高さや奥行きの情

報を表す深さ画像 (Depth map) は、2次元画像と同じ形式であるが、 x , y , z の情報を表すことから3次元データと呼ばれている。また、2次元画像は、これをワイヤフレーム表示などのように空間的な3次元に割り当てて表示したときに3次元画像となる。一方、画像という言葉は視覚的な表現を示す単語であり、ここでは、空間的な3次元を表し、視覚的に表現される情報のことを3次元画像または3次元画像データと呼ぶことにする。ところで、3次元データという単語もしばしば用いられるが、3次元画像が表示を前提としたデータを表すのに対し、3次元データは視覚的な表現とは関わりなく純粋にデータそのものを表すと解釈できる。したがって物体の形状を示す3次元データ (Shape data) は、正確には、陰影処理などを行って表示することを前提としたときに3次元画像データと呼ばれる。本論文の主題であるホログラフィック・3-Dプリンタは、このような3次元画像の出力装置として位置づけられる。

Table 2. 1 からわかるように、3次元画像データのうちボリュームデータは他のデータと比較してデータ量が非常に多い。奥行き画像 (Depth Map) や表面データ (Surface Data) と比較すると次元が1次元多い。このように3次元画像にも様々な種類があり、データ量も大きく異なるため、それぞれに適した表示法を適用する必要がある。

Table 2. 1 3次元情報^{*1)}の種類

Type	Parameters ^{*2)}	Amount of data ^{*3)}
2-D image	x, y, value	$N^2 \times L$
Depth map	x, y, depth	$N^2 \times L$
Shape data	x, y, z	$3P \times X$
Surface data	$x, y, z, \text{reflectivity}$ $x, y, z, \text{color etc.}$	$3P \times L \times X$
Slice stack	$x, y, \text{value, number}$	$N^2 \times L \times D$
Stereography	$x, y, \text{value, angle}$	$N^2 \times L \times M$
Volume data	x, y, z, value	$N^3 \times L$
Sequential image	$x, y, \text{value, t}$	$N^2 \times T$

*1) 比較のため、2次元画像および時系列画像も同時に示した。時系列2次元画像も3次元情報と呼ばれることも多いが、本論文では取り扱わない。

*2) 3次元情報を表すパラメータ。 x, y, z は空間の座標軸、value は輝度、反射率、透過率などの値、 t は時間を表す。

*3) 3次元データを離散化した場合のデータ量の概算。 N は空間軸方向へのサンプル数、 L は輝度、反射率、透過率、奥行きなどの量子化数、 P は3次元物体を点で表現した際の点の数、 X は空間座標の量子化数、 D はスライスの枚数、 M は多眼視ステレオ画像の方向数、 T は時間軸方向へのサンプル数を示す。

2. 2. 3 視差

3次元画像を表示する方式としては、2次元的な表示デバイスに時間的に変化させたり空間的に配列して表示する方法と、立体像として表示する方法がある。立体像としての表示法は、視差を表示する方式と奥行き異なる2次元画像を表示する方式に大きく分類される。視差とは、物体を異なる位置で観察した際の見え方の差のことであり、左右の瞳の間の視差が両眼視差と呼ばれている。また目を移動させて観察する際の移動による見え方の変化は運動視差と呼ばれる。

表示される視差が2方向の場合は、人間の立体知覚の要因のうち両眼視差が立体像表示に利用される。このとき、目の焦点の位置と両眼視差により表示される像の位置が一致しないため、立体像は不自然に見える、目の疲労が激しい。ステレオ写真の場合はさらに輻輳の位置も異なるので短時間の観察でもすぐに目が疲れる。色つきの眼鏡や偏光板やシャッタのついた眼鏡（3-D眼鏡）を用いる方式が一部で利用されているが、眼鏡の着用が煩わしいという問題点もある。眼鏡なしの立体ディスプレイであるレンチキュラーレンズを用いる方法は、2～10枚の異なる視点から見た画像を表示でき、観察位置を移動すると各視点に対応する像が観察される。このとき各方向の視点の画像は互いに視差を持っており、本論文ではこの視点の数のことを視差方向数と呼ぶ。そしてこのようにして表示された立体像は、2～10方向の水平方向の視差を持つ立体像と呼ばれる。

レンチキュラー方式においては、レンズの性能やアラインメントなどの問題で表示できる視差方向数が少ないため、観察位置を移動すると再生像は不連続に変化し、自然な立体像とは言えない。またあらかじめ決められた位置で観察する必要がある、不適切な距離から観察すると異なる視点の像が混ざってしまい、再生像上にトビを生じる。この問題を解決するには十分多くの視点の画像を表示する必要があるが、現在これを現実的に行うことができるのは、ホログラフィック・ステレオグラムによるものである。水平方向のみの視差を記録するホログラフィック・ステレオグラムとしては10～500方向程度の視差を持つものが製作されており、記録した視差方向数が多ければ、視点による像の不連続な変化や再生像上のトビなどの問題はほぼ解決される。したがって数十～数百方向の視差を記録すれば、人間の立体知覚の要因のうち、両眼視差、輻輳、動的視差を満足する立体像表示を行うことが可能である。

ホログラフィは光の波面を記録・再生する技術であるため、通常は視差を表示する方式とは言われていない。しかし視差の表示という観点から考えると、ホログラフィは、連続的な視差を記録・再生するものと言うことができる。なお、ホログラフィは奥行き異なる画像を表示しているとも考えることもできる。

ところで、人間の目の特性を考慮すると水平方向の視差が重要であるため、従来開発されている立体像表示法のほとんどは水平方向の視差のみを表示するものである。しかし、実在の3次元物体を正確に再現するためには垂直方向の視差を含めて表示する必要がある。3.3章で述べるように、垂直方向の視差が記録されていないと、目を上下に移動するときだけでなく、前後に移動しても再生像に歪を生じる。

本研究で提案するホログラフィック・ステレオグラムのマルチドット記録法は、水平・垂直方向の視差を記録できるため、観察位置によらず歪のない立体像を表示することができる。

2. 2. 4 ハードコピーとソフトコピー

次節で述べるホログラフィは、写真感材上に立体像を記録し、自然な立体像表示が可能な技術であり、3次元画像のハードコピーとして有望な方法である。ハードコピーは、ファイルしたり持ち運んで観察することを目的として利用されるものであり、回転させたり表示された像を操作することができないため、自然な立体像を表示できることが必要とされる。例えば2眼視のステレオ写真などでは、両眼視差により立体像として3次元画像を表示できるが、異なる角度から観察することはできず、ハードコピーとしては不十分である。一方、画像データのソフトコピーとしては、動画表示やインタラクティブな操作などの要素が重要である。平面的なディスプレイに表示しても回転などの操作によりある程度の立体感を得ることができるが、最近3次元画像を立体像として表示するソフトコピーの手法に関する研究が活発化している。動画立体ディスプレイを目的として、動画ホログラフィまたは電子ホログラフィ (Electro-holography) などに関する研究が行われており、音響光学変調素子 (AOM: Acoust-Optical Modulator) や液晶素子などを用いて干渉縞や波面を表示し、ホログラムを電子的に生成する技術が開発されつつある。現在のところ、デバイスの性能や膨大な計算量の問題などにより実用化には時間がかかると思われるが、将来的にはソフトコピーにおいても立体像表示の技術が利用されることが考えられる。

これらのことから、現在3次元画像の出力として人間にわかりやすい形式で立体像を出力するハードコピーの必要性は非常に高いといえる。

2. 3 ホログラフィ

2. 3. 1 ホログラフィの原理と応用

ホログラフィは光の波面の記録・再生を可能とする技術であり、1948年にGaborにより電子顕微鏡への応用を目的に発明された [1, 2]。その後、高コヒーレンスのレーザ光の実現によりその応用分野は大きく広がった。LeithとUpatnieksはレーザ光を用い、3次元物体からの波面をホログラフィにより記録し、再生することで立体像表示が可能であることを示した [3]。現在では、光計測、立体像表示、光学エレメント、光情報処理や偽造防止など、多くの分野での応用について研究されており、一部は既に実用化されている。ホログラフィの原理に関してはここでは詳しくは述べないが、ホログラフィは、直接観測することが不可能な波動を干渉縞の形で記録し、回折現象により元の波面を再生するものであり、この性質を利用して、様々な分野に対して応用されている。

光計測においては、ホログラフィ干渉計測により物体の変形や基準形状からの誤差の測定が行われている。物体の変形や変位を測定する場合には、変形前の物体のホログラムを作成し、これを変形後の物体からの光で照明することで変位を干渉縞から計測できる。また、光学部品などの設計形状に基づいて計算によりホログラムを作成し、ホログラムにより生成した基準波面と被検体からの波面を干渉を用いて比較する形状誤差の計測方法も開発されている。このようにホログラムは、光の波面の生成や制御が可能なことから、干渉計測の分野では非常に重要な技術となっている。

本研究の対象分野である立体像表示に関しても古くから研究されてきた。ホログラムをレーザ光などの単色光で照明すればクリアな立体像が得られるが、干渉性が強い再生像にスペックルが生じてざらざらした像が観察される。立体像表示に用いる場合には、通常の白色光照明により観察できる必要があるが、白熱灯や太陽光のような白色光で照明すると波長によって回折角が異なることによりボケを生じてしまう。波長による回折角の違いに起因するボケは、再生像がホログラム面から離れているほど大きくなることから、再生像をホログラム面近傍にすることでそのボケを低減することができる。Benton は、垂直方向の視差を犠牲にし、白色光照明下でボケのない像を再生するレインボウホログラムと呼ばれる手法を開発した [4]。レインボウホログラムは、垂直方向に関してホログラムに回折格子の役割を持たせることで、観察位置で再生光が分光されるようにホログラムを記録する方法で、目に入射する光は分光されたある波長の光のみになるため、再生像のボケはほとんど取り除くことができる。しかし 2. 3. 2 節で述べるように、垂直方向の視差を犠牲にしており、目を垂直方向に移動すると色が異なる歪を持つ像が観察されてしまう欠点がある。

白色光でホログラムを再生する方法として Denisjuk により提案された手法は、リップマンにより提案されたカラー写真法 [6] と似ていることからリップマンホログラムと呼ばれており、垂直方向の視差も含めて再生できる [5]。リップマンホログラムでは、物体光と参照光をホログラム面に対して反対方向から入射し、ホログラム面にほぼ平行な干渉縞を、乳剤の厚い感材に記録する。このホログラムを白色光で照明すると、多重干渉による波長選択性によってほぼ単色の光が再生される。リップマンホログラムは、現在のところ白色光照明下で水平・垂直方向に視差を持つ立体像をホログラムにより表示できる唯一の手法である。また 3 色のホログラムを用いてカラー表示も可能であり、立体像表示を目的とした用途には最も適したものといえる。2. 3. 3 節でリップマンホログラムの記録法と原理について述べる。

ホログラフィは光の干渉縞を記録するものであり、その記録においては光の波長レベルの除振が必要とされる。したがって例えば人間の顔や体などの非剛体を直接記録することは困難である。また空気の揺らぎや音などの環境が大きく影響するため、ホログラムを撮影するための環境に対する要求は非常に厳しい。特に大きなホログラムを作成する場合には被写体やホログラム感材を光の波長以下の振動に抑えて固定することは非常に困難である。これらの問題を解決する手段として、パルスレーザを用いて振動よりも高速にホログラムを撮影する方法があるが、現在でもパルスレーザは高価であり取り扱いも難しい。

ホログラムは被写体からの光の波面を正しく記録・再生するもので、被写体を 3 次元的に忠実に複製することはできるが、表示できる立体像は実物のコピーであるため、この技術だけではその応用は限られる。また前記の振動などの問題からホログラムとして撮影できる被写体が限定されることもその応用を制限する要因となる。ホログラフィック・ステレオグラムはこれらの問題点を解決する有効な手法である。ホログラフィック・ステレオグラムは、様々な方向から撮影した 2 次元画像から立体像をホログラムとして合成でき、上記のような被写体に関する制限を取り除くだけでなく、計算機で作成した画像を用いることで架空の 3 次元物体を立体像として合成することを可能にする。また物体の大きさを拡大・縮小して立体像表示を行うことも容易であり、ホログラフィによる立体像表示の応用を大きく広げる技術といえることができる (2. 4 節)。

また、ホログラフィを広く利用するためには、安価に複製する技術が重要となる。レインボウホログラムのような薄いホログラム（2. 3. 2 節参照）については、ホログラムを表面の凹凸として記録し、これを印刷技術を用いて安価に大量複製する手法が実用化されている。これは、エンボスホログラムと呼ばれ、後述の偽造防止ラベルやパッケージなどへ広く利用されている。エンボスホログラムの技術はレインボウ型のように薄いホログラムに対して用いることができるが、厚いホログラム（2. 3. 3 節参照）であるリップマンホログラムはこのような方法で複製することはできない。リップマンホログラムは光学的にコピーする手法で複製する装置や材料についての研究が行われており、レインボウ型ほど安価にはできないが、大量生産する技術は近い将来確立すると考えられる。

ホログラフィによる立体像表示は、印刷や広告などのディスプレイ媒体として、パッケージや本の装飾に応用されている。また、希少な美術品や歴史的工芸品などをホログラムに記録し、その複製として複数の博物館などに展示する目的などに用いられている。さらに最近は、セキュリティを目的とした利用が広く行われている。セキュリティにおいては立体像表示の性質は本質的ではないが、微少な構造を持つ干渉縞により立体像を再生するため一般の印刷よりも複製が困難であり、装飾を兼ねた偽造防止法として、クレジットカード、ビデオやコンピュータソフトウェア、一部の銀行券などへ応用されている。さらに、ホログラフィック・ステレオグラムの技術を用いてコンピュータグラフィックス画像の立体表示を行うシステムの研究も行われている。医用 3 次元画像の立体像表示を目的として、X 線 CT などにより得られた 3 次元データから骨や腫瘍などを立体的に表示するシステムの研究が行われ、円筒型ホログラムを自動的に合成するシステムが開発されている。

本研究で目的とする 3 次元画像システムの出力としては、ホログラフィック・ステレオグラムの技術が最も適していると考えられる。しかし、現在ホログラフィック・ステレオグラムの作成にはホログラム専用の光学定盤や装置および専門の技術者が必要であり、広くコンピュータの端末装置として用いることは困難である。また歪みのない立体像を表示できる白色光再生型のホログラフィック・ステレオグラムの記録法は確立されていないため、ホログラフィック・ステレオグラムを自動的に記録する新しい技術を開発する必要がある。

2. 3. 2 レインボウホログラム

ホログラムの垂直方向の視差を犠牲にして、通常の白色光で再生する手法がレインボウホログラムであり、現在ディスプレイ用ホログラムに広く用いられている。レインボウホログラムの記録法としてはいくつかの手法が提案されているが、本節では代表的な 2 ステップの記録法について説明し、その特徴を記す。

Fig. 2. 1 に 2 ステップのレインボウホログラムの記録の原理図を示す。第 1 ステップでは水平方向に細いスリット状のホログラムを撮影する [Fig. 2. 1 (a)]。このホログラムは、フレネル型ホログラムであり、マスターホログラムまたは H1 と呼ばれる。次に、Fig. 2. 1 (b) のように現像したマスターホログラムを記録時の参照光に対して共役な照明光で再生し、物体の実像を再生する。そしてこの実像の近傍にホログラム乾板を置き、参照光を入射して第 2 ステップのホログラム (H2) を撮影する。このようにして記録されたホログラムには、物体とマスターホログラムの両方の情報が記録され

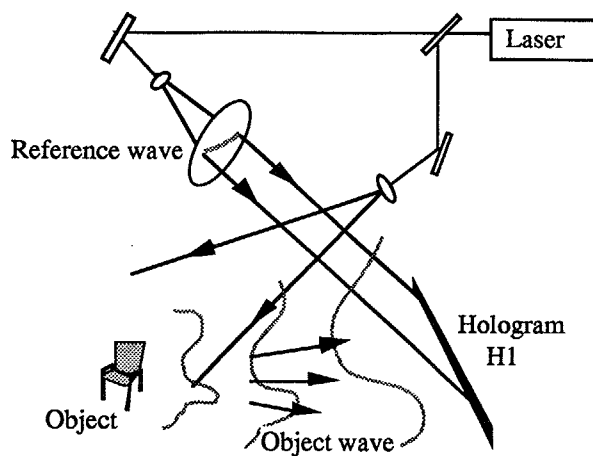
ているため、このホログラムを再び Fig. 2. 1 (b) における参照光と共役な光で照明すると、物体の情報を持つ光がマスターホログラムが置かれていた位置に再生される [Fig. 2. 1 (c)]。したがってこのホログラムには水平方向の視差のみが記録されており、レーザ光で再生した場合はマスターホログラムの位置に目をおいたときのみ再生像を観察することができる。

上記のようにして記録したレインボウホログラムを白色光で再生すると、Fig. 2. 2 のようにマスターホログラムの実像が波長毎に異なる高さで再生される。ホログラムを観察する際にはマスターホログラムに対応する位置に目をおくので、瞳に入射する光はほぼ単色の光となり、単色の再生像を観察することができる。ホログラムでは波長毎に再生像の倍率が異なるため、このようにしてスペクトルの分離を行わないと、異なる倍率の再生像が重なり合って大きなボケを生じる。レインボウホログラムの手法を用いれば単色の再生像を観察することになるので、このようなボケを避けることができる。

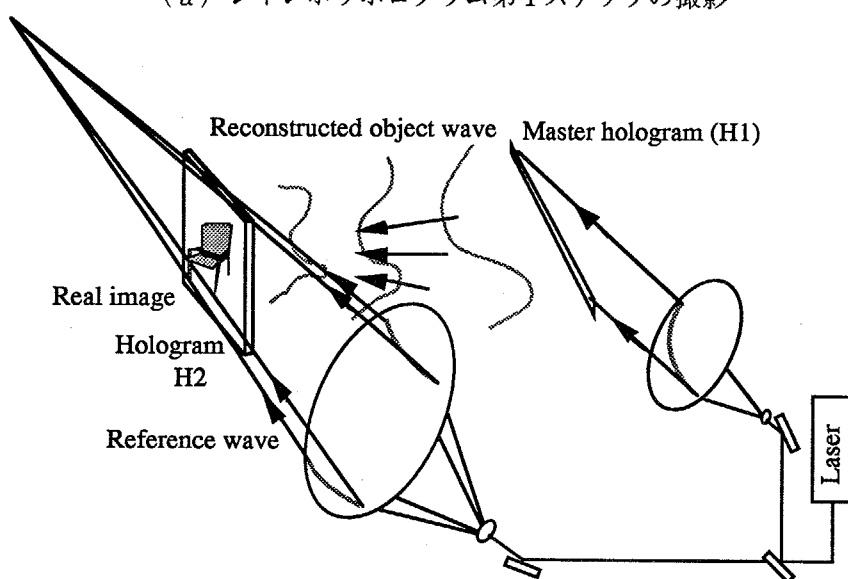
Fig. 2. 2 から明らかなように目の位置を上下に移動させると異なる波長の再生像を見ることがになり、再生光の波長によって像の倍率が異なるため、水平方向の倍率のみが波長に依存して変化する。したがって目を上下に移動させると、再生像の色が変わると同時に像の縦横比が変わって像に歪みを生じる。また目を前後に移動させると、再生像の高さによって異なる波長の光が瞳に入射し、虹色の歪んだ再生像が見えることになる。垂直方向の視差が記録されていないため、色による倍率の違いの問題を除いても正確な像を再生することはできず、レインボウ型ホログラムにおいて再生像を歪みなく観察できる位置は、記録時のマスターホログラムに対応する線上のみであり、これ以外の位置で観察すると必ず歪みを持つ像が観察される。

レインボウ型ホログラムの特徴を以下に列挙する。

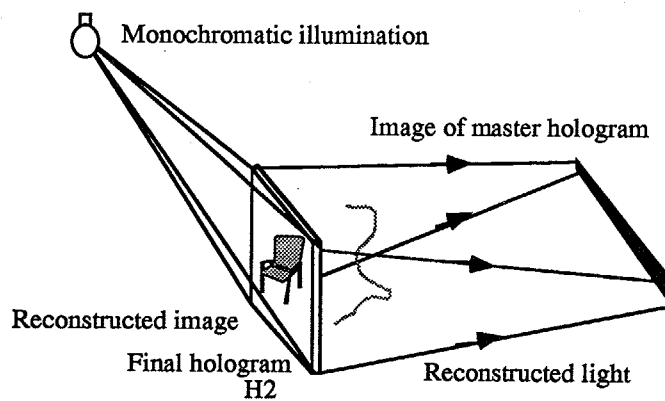
- (1) 水平方向の視差のみしか記録することはできない。したがってマスターホログラムの再生位置で観察したときのみ、正しい立体像が観察される。
- (2) 目を上下に移動すると異なる色の再生像が観察される。また前後に移動して観察すると、像の高さによって異なる色の像となる。加えて色により縦横比が異なって歪んだ再生像になる。
- (3) 再生照明光をホログラム面に対して観察者と反対方向から入射して、透過型で再生される。また、ミラーを張り付けたりコーティングすることで反射型ホログラムとしても再生できる。
- (4) 干渉縞がホログラム面にほぼ垂直であり、薄いホログラムであるため、表面レリーフ型のホログラムとしてエンボス法により安価に大量生産することが可能である。
- (5) ホログラムが特定の波長の光に対しては垂直方向に集光する特性を持っているため、再生光を有効に用いており再生像が明るい。
- (6) 2ステップで記録する場合には、ホログラムとほぼ等しい大きさの平行光を生成しなければならず、大型の光学部品を必要とする。1ステップで記録する方法は、視域に限られるなどの問題点がある。これらの特徴から、レインボウ型ホログラムは装飾や広告など、立体像の正確さは必要とされないが目立つことが要求される分野や、低コストで大量に用いるような分野で有効であるといえる。



(a) レインボウホログラム第1ステップの撮影



(b) レインボウホログラム第2ステップの撮影



(c) レインボウホログラムの単色光による再生

Fig. 2. 1

2ステップ・レインボウホログラムの記録と単色光による再生

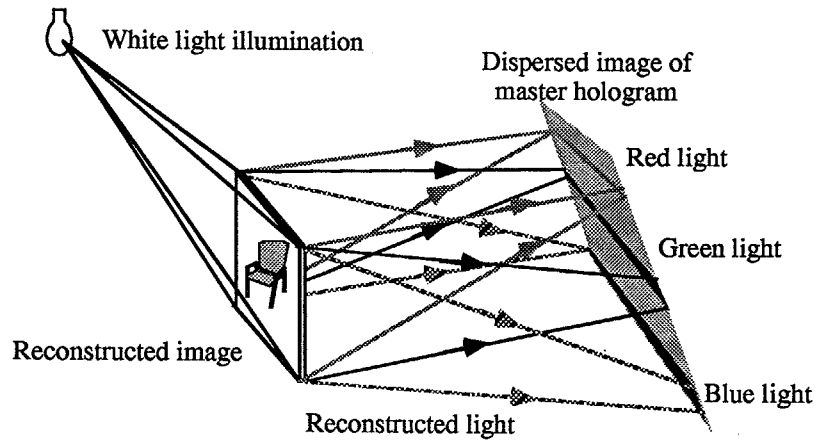


Fig. 2. 2

レインボウホログラムの白色光による再生

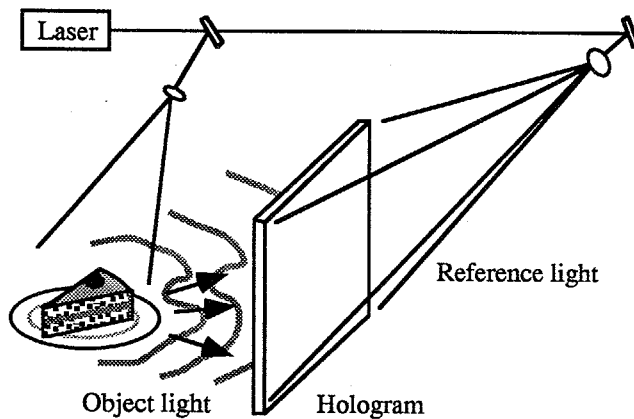


Fig. 2. 3

リップマンホログラムの記録

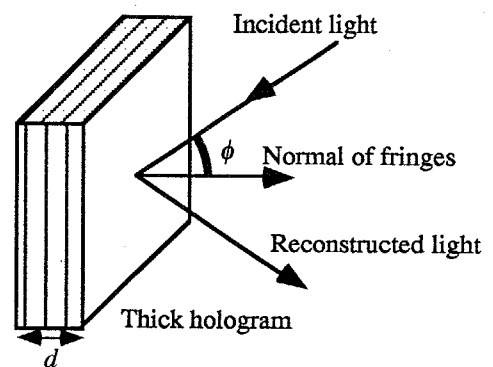


Fig. 2. 4

リップマンホログラムの再生

2. 3. 3 リップマンホログラム

リップマンホログラムは、レインボウホログラムと同様に白色光照明の下でボケの少ない立体像の再生が可能な方法であるが、レインボウホログラムとは異なり垂直方向の視差を犠牲する必要がない。乳剤が光の波長に対して厚いホログラムの感材を用い、Fig. 2. 3のように物体光と参照光をホログラム感材に対して反対方向から入射して撮影する。このとき生成される干渉縞は、Fig. 2. 4のようにホログラム面にほぼ平行な縞となり、このため厚いホログラムまたは体積型ホログラムと呼ばれる。このホロ

グラムを再生すると、乳剤の厚み方向に記録された干渉縞による多重干渉が起き、高い波長選択性および角度選択性を持つ。すなわちブラッグの条件に適合する光のみが回折されるため、白色光で照明しても再生光はほぼ単色となり、ボケのほとんどない再生像が得られる。Fig. 2. 4のようにホログラム面に対してほぼ平行に記録された干渉縞によるホログラムにおいては、Braggの条件により

$$\lambda = p \sin \phi \quad (2.1)$$

を満たす光のみが回折される。ただし ϕ は干渉縞の方向に対する再生光の入射角、 p は干渉縞の間隔、 λ はホログラム乳剤内部での光の実効的な波長である。

実際にはホログラムの厚みが有限であることや照明光源の大きさの影響により再生像にボケを生じる。ホログラムの厚さなどの影響による波長および角度選択性に関する詳しい解析は、Kogelnik の結合波理論 (Coupled wave theory) により説明されるが、ここでは粗い近似によりその影響について簡単に述べる。簡単のため、ホログラム面に対して互いに反対方向から垂直に入射する物体光と参照光により記録したホログラムを考える。このとき干渉縞はホログラム面に平行になるため、ホログラム面に対して垂直方向からある波長 λ の光で照明したとき、干渉縞で反射された光が多重干渉を起こすと考えられる。ここでは単純化したモデルとして、干渉縞を間隔 p で重なる多層ミラーと考え、各ミラーから反射した光がホログラム表面上で重ね合わせられるとする。多重反射や反射による減衰などを無視すると、ホログラム表面上における再生光の波動 u は

$$u = \sum_{l=0}^{\infty} \exp\{-jk(z + 2lp)\} \text{rect}\{z/d\} \quad (2.2)$$

と表される。ここで k は空気中での光の波数、 n はホログラム乳剤内の平均屈折率、 d はホログラム乳剤の厚さである。なお、ホログラム面に対して垂直方向の座標軸を z 軸とした。また、記録時の波長を λ_0 とすると $2np = \lambda_0$ である。実際には、多重干渉はホログラムの乳剤内部で起きるため、この近似は正しくないが、再生波長の広がりを見積もることはできる。(2.2) 式をフーリエ変換することで、再生光のスペクトルを次式のように得る。

$$U = \text{comb}(\lambda_0 v / n) * \text{sinc}(dv) \quad (2.3)$$

ここでは式全体にかかる定数は無視した。(2.3) 式から、再生光強度のスペクトルは λ_0 を中心とし、ほぼ sinc 関数の2乗にしたがって広がるのがわかる。その周波数における広がりを sinc 関数の第1ゼロ点により評価する。 sinc 関数の第1ゼロ点は、

$$v_{\pm} = n / \lambda_0 \pm 1/d \quad (2.4)$$

であり、これを波長に対する式に書き換えると、

$$\lambda_{\pm} = d\lambda_0 / (nd \mp \lambda_0) \quad (2.5)$$

となり、これより再生光の波長の広がり $\Delta\lambda$ は

$$\Delta\lambda = (1/2) 2\lambda_0^2 d / (nd^2 - \lambda_0^2) \doteq \lambda_0^2 / nd \quad (2.6)$$

となる。(2.6) 式はかなり単純化した粗い近似であり、参照光および物体光がホログラム面に対して

垂直に入射する場合の式である。傾いた入射光における波長選択性については、フレネル・キルヒホッフの回折積分から見通しのよい式を得ることができる [6, 7]。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{d} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}}{n^2 - \sin \theta_0 \sin \theta_r + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0} \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_r}} \quad (2.7)$$

ここで θ_0, θ_r は物体光と参照光の入射角である。

(2.6) 式または (2.7) 式のように再生波長が広がりを持つ場合、再生される光線は角度方向に広がりを生じる。再生波長の広がりによる角度方向の光線の広がり角 $\Delta\theta$ は、 $\theta_0 = 0$ の方向に対して

$$\Delta\theta = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \sin \theta_r \quad (2.8)$$

と与えられる。このとき、 $z = z_0$ に再生される再生像のボケ δ は、

$$\delta = 2|\Delta\theta|z_0 \quad (2.9)$$

となる。

また、再生光源が点光源であれば波長選択性によりほぼ単色の像が観測されるが、光源が有限の大きさを持つ場合にはホログラムが十分厚くても再生像にボケを生じる。実際にリップマンホログラムにより立体像を再生する場合にはこの影響が特に大きい。ホログラム面から光源までの距離を z_s とし、光源の大きさを w_s とすると、ホログラム面から光源を見込む角度 $\Delta\theta_s$ は、 $\Delta\theta_s = w_s / z_s$ で与えられる。したがって光源の大きさによる再生像のボケ δ_s は、

$$\delta_s = 2|\Delta\theta_s|z_0 = 2\frac{w_s}{z_s}z_0 \quad (2.10)$$

となる [8]。

以上のことから、リップマンホログラムにおける再生像はほぼ単色の光で再生されるが、ホログラムの乳剤の厚みが薄い場合にはボケが大きくなる。また、照明光源が大きさを持つ場合にもその大きさに比例したボケを生じる。これらのボケは、再生像のホログラム面からの距離に比例して大きくなる。本節で記述したリップマンホログラムの特性の多くはそのまま後述のマルチドット法によるホログラムに適用される。

リップマンホログラムは、前述のように単色の再生像を得ることができるため、異なる色のホログラムを組み合わせることでカラーの再生像を得る手法も実現されている [9-11]。3色のレーザを用いてカラーホログラムの作成が可能であることは、Leith と Upatnieks により示されていた [3] が、透過型のホログラムではクロストークの問題があるため満足な画像を得ることが困難である。リップマンホログラムでは、波長選択性により不必要な像が回折されないため優れた画質のカラー立体像を得ることができる。注意深くカラーコントロールを行ってカラーリップマンホログラムを作成すれば、実物と見分けがつかないほど完全な立体像を再生する [11]。

以下にリップマンホログラムの特徴をまとめておく。

- (1) 波長選択性により単色の像が再生される。
- (2) 物体光と参照光をホログラム面に対して反対方向から入射するため、干渉縞の間隔が細かい。さらにホログラム乾板の固定の方法も制限されるため、振動の影響を受けやすい。
- (3) 反射型で再生される。
- (4) 厚いホログラムであるため、エンボス法で複製できない。光学的複製が必要であり、レインボウホログラムよりもコストがかかる。
- (5) 再生像のボケは、ホログラム乳剤が厚いほど小さく、光源サイズに比例して大きくなる。また、再生像がホログラム面から離れるほど大きくなる。
- (6) 高画質のカラー表示が可能である。

以上の特徴から、リップマンホログラムは画質の高い正確な表示を行う必要がある分野に適している。特に白色光で歪のない立体像を表示できるため、持ち運んで観察するハードコピーの用途には最適な手法と考えられる。

2. 4 ホログラフィック・ステレオグラム

2. 4. 1 ホログラフィック・ステレオグラムの原理

前節で述べたように、ホログラムの記録においてはレーザ光を必要とし、わずかな振動も避けなければならないため、限られた被写体しか撮影することはできない。一方ホログラフィック・ステレオグラムの方法は、様々な角度から撮影した2次元の画像列からホログラムとして立体像を合成するもので、視差を持つ2次元画像列を作成すればホログラムを合成できる。視差を持つ画像から記録するため、被写体からの波面を再現するものではないが、十分に立体感のある表示を行うことができる。

1967年にPoleは物体をハエの目レンズで記録し、そのレーザ光による共役再生像をホログラムに記録する手法を提案した[12]。この手法ではインコヒーレントな光でfly's eyeレンズを用いて3次元物体を撮影し、その再生像をホログラムに合成する。その後、McCrickerdらは視差を持った画像を撮影した写真からホログラムを合成し[13]、De Bitettoも同様の手法でホログラフィック・ステレオグラムの技術を開発した[14]。さらに、Kingらは、計算機で作成した架空の物体の立体像をホログラフィック・ステレオグラムの手法を用いて作成した[15]。また、Crossの開発したマルチプレックス・ホログラム[16, 17]は、円筒型で360度から観察でき、1ステップで記録できる方法で、その後医用画像の立体像表示へと応用されている[18-20]。

様々な方式のホログラフィック・ステレオグラムが提案されているが、その種類については次節で述べることにして、ここではレーザ再生型ホログラフィック・ステレオグラムの例にしてその原理を説明する。ホログラフィック・ステレオグラムとしては、水平、垂直両方向の視差を記録する方法と水平方向の視差のみを記録する方法があるが、ここでは簡単のため、水平方向のみの視差を記録する場合を考える。

Fig. 2. 5にホログラフィック・ステレオグラムの記録法を示す。まず、移動ステージに乗せたカメラでステージを移動しながら被写体を各方向から撮影する[Fig. 2. 5(a)]。このようにして撮影された各画像を本論文では原画と呼ぶ。撮影した写真フィルムを現像し、Fig. 2. 5(b)のホログラム合成系でホログラフィック・ステレオグラムの撮影を行う。ある位置で撮影された原画は、投影レンズにより透過拡散スクリーン上に結像され、スクリーンからの拡散光と参照光の干渉縞をスリット状の細い領域に記録する。このスリット状のホログラムはある視点からみた2次元画像のホログラムとなり、要素ホログラムと呼ばれている。このとき、原画撮影系とホログラム合成系を相似な配置とし、ホログラム面上のスリットは原画を撮影したカメラ位置に対応する位置に配置する。そして原画を次々に投影してカメラの移動間隔に対応するピッチでスリットを移動してスリット状のホログラムを順次撮影する。このようにしてホログラム全体を露光し、ホログラフィック・ステレオグラムが作成される。

Fig. 2. 6にホログラフィック・ステレオグラムの再生の様子を示す。参照光と同じ方向からレーザ光で照明し、目をホログラム面に近づけて観察すると[Fig. 2. 6(a)]、左右の瞳でそれぞれの方向から見た画像を記録したスリット状のホログラムを観察することになる。各スリット状のホログラムからは、対応するカメラ位置で撮影した画像を拡散スクリーン上へ投影した像が再生されるため、左右

の目のそれぞれの視点に対応する画像を見ることになり、両眼視差により物体を立体像として知覚できる。また目を左右に移動させると、観察される画像も目の移動に対応して変化し、運動視差も表示される。

Fig. 2. 6 (b) のようにホログラム面から離れた位置から観察するとき、視差情報が十分細かく記録されていれば、それぞれの要素ホログラムから再生された画像が合成されて、目の位置に対応した画像を見ることができ、立体像として認識することができる。しかし Fig. 2. 5 のように水平方向の視差のみしか記録しない場合には、垂直方向には視差を持った像が合成されないため、ホログラム面から離れて観察すると再生像が歪を持って見えることになる。歪のない正確な立体像を表示するためには、垂直方向の視差情報を記録する必要がある。

ホログラフィック・ステレオグラムについても通常のホログラムと同様いくつかのカラー化の方法が提案されている。ホログラフィック・ステレオグラムではレーザー光で撮影するホログラムと異なり、インコヒーレント光照明下で画像を撮影したり、実在しない物体から計算により画像を作成するため、単色のレーザー光を用いてカラー画像を得る方法も開発されている。レインボウ型ホログラムの特性を利用してある高さで観察すると正しい色に見えるように高さの異なるスリットを3本用いる方法や、リップマンホログラムで乳剤の厚さを変化させる方法などが知られている [9]。ホログラフィック・ステレオグラムのカラー化の方法については第5章で述べる。

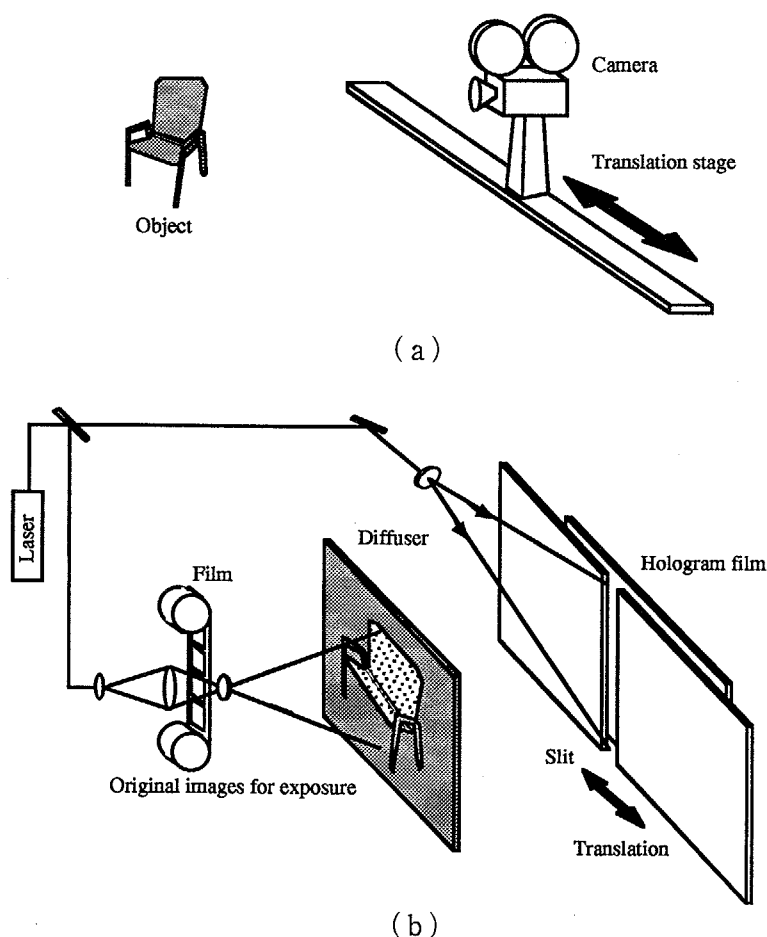
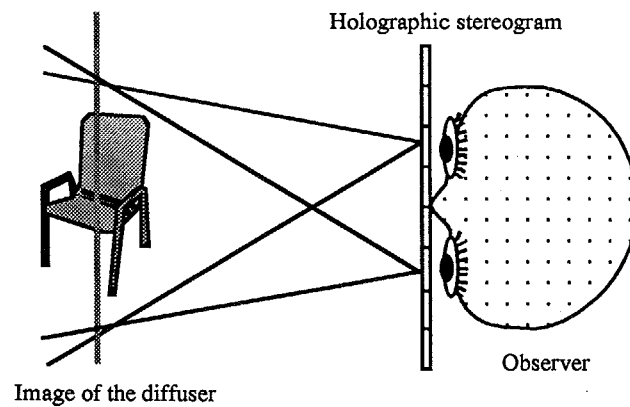


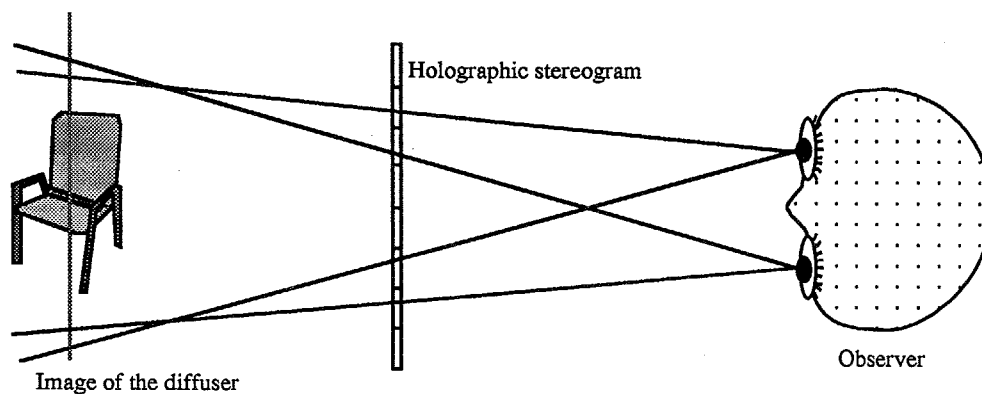
Fig. 2. 5

レーザー再生ホログラフィック・ステレオグラムの記録

(a) 原画撮影、(b) ホログラフィック・ステレオグラムの合成



(a)



(b)

Fig. 2. 6

ホログラフィック・ステレオグラムの観察

(a) ホログラム面近くからの観察

(b) ホログラム面より離れた位置からの観察

2. 4. 2 ホログラフィック・ステレオグラムの種類

ホログラフィック・ステレオグラムとしては様々なタイプのものが提案されており、形状および記録方法や再生方式がそれぞれ異なる。ホログラフィック・ステレオグラムの種類は以下のような観点から分類することができる。

A. 原画撮影方法

- (1) Fly's eye レンズやレンチキュラーレンズなどの微小レンズアレイを用いて撮影
- (2) カメラレンズを用いて撮影
- (3) 計算機により画像を生成

B. 形状

- (1) 平面型

- (2) 円筒型
- (3) 半円筒型
- (4) 円錐型

C. 記録する視差情報

- (1) 1次元 (水平方向)
- (2) 2次元 (水平・垂直方向)

D. 再生光源と白色光再生の方法

- (1) レーザ再生
- (2) レインボウ型
- (3) リップマン型

E. 合成方法

- (1) 1ステップ
- (2) 2ステップ

これらの組み合わせにより様々な方法が発表されている。代表的なホログラフィック・ステレオグラムの方式と本研究の方式の分類をTable 2. 2に示す。なお、上記の組み合わせは独立ではなく、例えばD-(2)のレインボウ型ホログラムを用いてC-(2)のような水平・垂直方向の視差の記録はできない。また、再生像の歪を補正する必要があるためにA-(3)のように計算機で原画を処理する必要がある方式もある。

Table 2. 2に示すように、白色光再生型で水平・垂直の視差を記録する方式はこれまで開発されていない。これは、従来はカメラで画像を撮影することを前提としてホログラフィック・ステレオグラムの研究が行われており、画像枚数が膨大になり合成することが困難であったためと考えられる。本研究では3次元画像処理システムの出力に用いることを目的としており、原画は計算機により生成する。また、3章で述べるように液晶パネルなどの空間光変調器を用いて自動的に合成を行うため、2次元の視差情報の記録が現実的に可能になった。

本研究ではホログラフィック・3-Dプリンタに適した手法として、第3章で述べる新しいホログラフィック・ステレオグラムの方式の開発を行った。表から明らかなように、3次元画像システムの出力の目的には最も適したものといえる。

Table 2.2 代表的なホログラフィック・ステレオグラムの分類

名称	原画撮影法	形状	視差情報	再生法	合成方法	Reference
Pole の方法	Fly's eye lens	平面	水平・垂直	レーザ再生	1 Step *	1 2
McCrickerd らの方法	カメラ	平面	水平・垂直	レーザ再生	1 Step *	1 3
レインボウ平面型	カメラ	平面	水平のみ	レインボウ	2 Step	2 1
リップマン平面型	カメラ	平面	水平のみ	リップマン	2 Step	2 2
マルチブックス・ホログラム	カメラ 計算機	円筒	水平のみ	レインボウ	1 Step	1 6, 1 7
平面型マルチブックス・ホログラム	カメラ 計算機	平面	水平のみ	レインボウ リップマン	1 Step	2 3
円錐型ホログラフィック・ステレオグラム	計算機	円錐	水平のみ	レインボウ	1 Step	2 4
Alcove 型	計算機	半円筒	水平のみ	レインボウ リップマン	2 Step	2 5, 2 6
本研究の手法 (マルチドット型)	計算機	平面	水平・垂直	リップマン	1 Step	
本研究の手法 (レインボウマルチドット型)	計算機	平面・円筒	水平のみ	レインボウ	1 Step	

* レーザ再生型であるため、原画撮影を別にとするとホログラム合成は1ステップである。

2. 4. 3 ホログラフィック・ステレオグラムの応用

既に述べたように、ホログラフィック・ステレオグラムの技術はコンピュータで生成した3次元データの出力を目的として研究されている。それ以外にも、以下に示すような応用が考えられている。

(1) 図鑑や解剖書など出版分野

医学書や図鑑などで3次元的な被写体の表現に苦勞する分野は多い。解剖図などを立体像として出版できれば2次元的な写真を見るよりもはるかにわかりやすい。わかりやすい立体像表示が可能な印刷技術が確立されれば、特に教育への効果は大きいと考えられる。このような画像は最近コンピュータのデータベース化されており、これを用いることでホログラフィック・ステレオグラムの技術により立体像を表示することができる。白色光再生型ホログラムであれば、白熱灯などの通常の光源で立体像を観察できる。

(2) 人物像 (ポートレート)

ポートレートや記念写真を立体像として記録することは、現在はパルスレーザを用いたホログラフィにより行われているが、大きな設備を持つスタジオが必要であり、広く普及していない。また、パルスホロ

グラフィックでは、実物大のホログラムが作成されるため、大がかりとなりコストもかかる。ホログラフィック・ステレオグラムを用いると、通常の照明で撮影した画像からホログラムを作成でき、また像の拡大縮小も容易であることから、より手軽に3次元の記念写真などを利用可能になると考えられる。現在のところホログラフィック・ステレオグラムを撮影するために特殊な装置が必要であり、また原画の撮影もカメラを精密に移動させて多数枚の写真を撮影しなければならないため、一般に広まってははいない。ビデオなどで撮影した画像から手軽に立体像を記録できれば、容易に3次元ポートレイトを利用可能となる。なお、このようなシステムの実現のためには、ビデオなどで撮影した画像からホログラフィック・ステレオグラム記録に必要な画像を生成する画像処理技術の開発が必要である。

(3) 偽造防止

偽造防止ラベルなどの目的には、必ずしも立体像を表示する必要はないが、以下のような理由によりホログラフィック・ステレオグラムの利用が考えられている。

- ・直接観察して真偽のチェックができる。
- ・通常のホログラムで記録できないコンピュータグラフィックスなどの特殊な画像を用いることで偽造をより困難にする。

なお、本研究で目的とするホログラフィック・3-Dプリンタはあらゆる立体像を誰にでも手軽に記録できる技術を目指すもので、このような偽造防止の目的には適さないと思われる。

(4) 電子的立体像表示システム

3次元画像データのソフトコピーなどを目的とした動画立体像表示システムとして、ホログラフィを用いたシステムの開発も行われている。電子的なホログラフィシステムでは計算機によりホログラムを生成する必要があり、光の回折をコンピュータにより計算してホログラムを生成する。この計算量は膨大なものであり、現在のところ超並列コンピュータなどを用いて準リアルタイム表示が行われている。ホログラムの干渉縞の計算を行う際にホログラフィック・ステレオグラムの概念を用いると、計算量は大幅に削減される[27]ため、計算の手法としての応用が検討されている。本論文では、ホログラフィック・ステレオグラムと同様の考え方に基づく計算法として、ホログラフィック・ステレオグラムを用いる場合とほぼ同等の計算量でより優れた画質の立体像表示を可能とする手法に関して第9章で述べる。

上記のようにホログラフィック・ステレオグラムは様々な分野での応用が期待されているが、まだ広く普及しているとはいえない。これはホログラフィック・ステレオグラムを合成するために、レーザで記録するホログラフィ同様、特殊な設備と専門的技術が必要であるためと考えられる。本研究で目的としているホログラフィック・3-Dプリンタは、誰にでも手軽に立体像を合成できるようにするもので、ホログラフィック・3-Dプリンタを開発することでこれらの問題点を解決してホログラフィック・ステレオグラムの様々な分野への応用を可能にすると考えられる。

2. 4. 4 ホログラフィック・ステレオグラム以外の立体像表示法

3次元画像処理システムの出力として立体像表示を行う媒体としては、ホログラフィック・ステレオグラム以外にもいくつかの手法が考えられる。本節ではホログラフィック・ステレオグラム以外の方法について、その現状と応用の可能性に関して検討する。

ホログラフィック・ステレオグラム以外の手法としては、ホログラフィ技術を利用するものとして計算機合成ホログラム (CGH) [28] や断層面多重記録ホログラム [29] などが研究されている。またホログラフィ以外の技術としては、視差を表示する手法や体積的に表示する手法が考えられる。以下それぞれの手法についての検討を行う。

(1) CGH

3次元物体から作成されるホログラムの干渉縞を直接計算されたホログラムがCGHである。この技術を用いれば、任意の3次元物体のホログラムを作成できるため、3次元データからCGHを作成する研究も行われている [28]。CGHでは、ホログラフィック・ステレオグラムとは異なり、被写体からの波面を正確に再現できるため、主に計測の分野では有効である。ディスプレイを目的とした場合には以下のような問題点があり、実用にはいたっていない。

A) 記録デバイス・材料の問題

B) 計算量の問題

C) リップマン型ホログラムを作成できない。

しかしCGHの技術を用いれば、回折を考慮した計算によりホログラフィック・ステレオグラムよりも高画質の立体像表示の可能性があるため、今後上記の問題点を解決する技術の開発が行われれば本研究のような目的にも利用可能であると考えられる。

(2) 断層面多重記録ホログラム

ホログラフィック・ステレオグラムにおいては物体を様々な方向から見た視差をホログラムとして記録するのに対し、断層面多重記録ホログラムでは奥行きが異なる断層像を記録することで立体像表示を行う。したがって、X線CTなどの3次元ボリュームデータの立体像表示法として期待され、研究が行われている [29]。多重断層ホログラムの方式では、複数の断層像のホログラムの多重露光を行うため、回折効率の低下が大きな問題である。最近、レインボウホログラムと同様の方法で多重露光を行わない手法が提案されているが [30]、奥行きにより色が異なるという問題もある。

多重断層ホログラムにおける最大の問題点は、多数枚の断層像を重ねて表示することで複数の像が重なり像が見にくい点である。3次元ボリュームデータは、3次元空間内の各点が値を持つものであり、立体像表示するだけでは、人間にわかりやすい表示とはならない。人間の理解に適した画像として表示するための処理が必要である。

(3) レンチキュラー板を用いた手法

立体写真としてよく知られているレンチキュラーシートを3次元画像データの表示に用いる試みも提案されている[31]。レンチキュラー写真は、拡散照明で観察可能でカラー表示も容易であることから、簡便な手法であるといえる。レンチキュラーレンズは、かまぼこ型の微小な円筒レンズを並べたもので、水平方向の視差の表示ができる。しかし、主にレンズの収差の影響によりホログラフィック・ステレオグラムよりも表示できる画像の画質は劣る。これまで作成されているレンチキュラー写真では視差方向数が少ないため、目を移動して観察すると像に跳びを生じる。

(4) Fly's-eye-lens array

Fly's-eye-lens array (ハエの目レンズ) は、レンチキュラーシートと同様に微小レンズアレイを用いて視差を持つ画像の表示を行う手法であり、水平・垂直方向の視差の記録が可能である。最近このfly's eye レンズシートに写真感材を塗布した材料を用いて、医用3次元画像データからワイヤフレームの立体像を自動的に作成する3次元プロッタが発表されている[32]。現在のところ隠面消去などのコンピュータグラフィックスの技法を適用することは困難で、透過型のワイヤフレーム画像しか表示できないが、高速に記録できる点とシャウカステンなどで容易に観察できる点で有望な手法である。

(5) 移動スクリーン法

移動スクリーンによる立体像表示法は、多重断層ホログラムと同様に断面を表示するもので、移動スクリーン法では奥行き方向に高速に移動するスクリーンに順次断層像を表示して立体像表示を行う。目の残像効果を利用して立体感を表現する。この方法は基本的にはハードコピーでなく動画表示を目的としたものである。X線CTなどによる医用3次元データの表示システムへも応用されている。多重断層ホログラムの項で述べたようにボリュームデータの断層像を重ねて表示するとあまり見やすいとはいえないが、インタラクティブにパラメータを変化させて表示すれば3次元構造の理解に有効な手法と考えられる。パラメータを変化させて表示する処理手法については、今後検討する必要がある。なお、この移動スクリーン法も視差を表示する手法でないため、現状では、隠面消去などのコンピュータグラフィックス技法を直接適用することはできない。

(6) その他

そのほかにも立体像表示のための手法についてはいくつか提案されており、特に動画表示をめざした研究が行われている。バリフォーカルミラーは電圧により焦点距離を変化できる凹面鏡を用いて奥行き異なる像を順次表示する方式である。また、パララックス・バリア法やピンホールカメラ法などは視差を表示する方法で、立体テレビジョンへの応用が検討されている[33]。同様の原理に基づく走査スリット法をはじめ、様々な方式についての研究が行われている。

動画立体像表示に関しては2. 4. 6節で再び述べるが、表示する画像の帯域の問題が画質を制約する要因となっている。十分高い画質を持つ動画立体像表示にはまだ時間がかかることが予想される。

3次元画像のハードコピーとしては、立体像を記録する方式であるホログラフィやレンチキュラーやFly's eye レンズなどの方法が適していると考えられる。現在のところコンピュータグラフィックスの技法の表現が容易に導入できる視差を表示する方式が有望である。中でもホログラフィック・ステレオグラムは、非常に高画質の立体像表示が可能であり[34]、3-Dプリンタとして最適な手法と考えられる。

2. 4. 5 ホログラフィック・3-Dプリンタ

コンピュータ等の3次元データから立体像を自動的に記録・再生する目的には、現状ではホログラフィック・ステレオグラムの技術が最も適していると考えられる。ホログラフィック・ステレオグラムは、様々な視点からみた2次元画像からホログラムとして立体像を合成するもので、コンピュータ・グラフィックスの手法等により各視点の画像を作成し、これをホログラフィックに露光することで立体像を得ることができる。計算機の3次元データの出力としてホログラフィック・ステレオグラムを用いる研究はKingら[15]をはじめとして古くから行われてきたが、最近、イメージプリンタのように画像システムの端末装置としてホログラムを生成するホログラフィック・3-Dプリンタの開発が行われている。ホログラフィック・3-Dプリンタは3次元データを画像としてハードコピー出力するものであるが、このような装置を実現するためには新しいホログラフィック・ステレオグラムの技術を開発する必要がある。

ホログラフィック・ステレオグラムを通常の白色光で再生するために、ホログラム記録のプロセスを2回用い、レインボウ型またはリップマン型ホログラムとして記録する手法が知られている。しかしコンピュータのデータから自動的に記録するためには、1回の露光プロセスで記録する手法が望ましい。

1回の露光プロセスで合成することが可能なマルチプレックス・ホログラム[16, 17]は、円筒に巻き付けたフィルムを回転させることで360°の方向から立体像を観察できるもので、マルチプレックス・ホログラムにより医用3次元画像を立体表示する研究も行われている[18-20]。特に、X線CTなどにより得られたデータから骨や臓器を抽出し、マルチプレックス・ホログラムとしてその3次元構造を表示する手法が提案され[19]、最近これを自動的に合成するシステムが開発された[20]。またAlcove型と呼ばれる方式でコンピュータ・グラフィックスによる画像を立体表示する手法も提案されている[25, 26]。Alcove型ホログラムは半円筒型で、その中心付近に実像が観察されるものである。像の歪を補正するために、ホログラムの特性を考慮した特殊な光線追跡により露光する画像を作成し、CAD (Computer Aided Design) により作成された3次元モデルの表示が行われている。

これらのホログラフィック・ステレオグラムを合成する際には、まずコンピュータにより様々な視点の画像を計算し、各画像を映画フィルムに順次記録する。そしてこの映画フィルムを現像したものをレーザー光で照明し、各画像をホログラフィック・ステレオグラムに露光する。このような複雑なプロセスを省略するために、液晶パネルのような空間光変調器を用いて計算した画像をホログラムに露光する手法の開発が行われた。これにより計算機の3次元データから直接ホログラムの露光を行うことができ、簡便な装置

の実現が可能となった。

円筒型マルチプレックス・ホログラムやAlcove型ホログラムは、専用の表示装置を用いて観察するものであるが、これに対して近年は特殊な観察装置を必要とせず、光源さえあれば持ち運んでどこでも観察できるような平面型のホログラムの手法が注目されており、この技術を用いて立体像を出力する3-Dプリンタの開発が行われている。

本研究におけるホログラフィック・3-Dプリンタの提案の後、平面型の立体像を計算機のデータから自動的に出力する装置の研究が行われている。MIT Media Lab. のKlugらはウルトラグラムプリンタと名付けた方式により水平方向のみの視差を持つホログラフィック・ステレオグラムの自動的な合成システムの開発を行っている[35, 36]。さらに最近、高分子感光材料を用いてカラー立体像を出力する手法についての発表を行っている[37]。これはリップマン型のホログラフィック・ステレオグラムを液晶パネルを用いて1ステップで記録するシステムであるが、垂直方向の視差は記録していない。小型の記録システムで大きなホログラムを作成するためにホログラムを垂直方向に分割して露光を行っている。Dutch Holographic Lab. のNulandらは2ステップ方式の平面型ホログラフィック・ステレオグラムの自動合成システムを開発し、さらに現在は1ステップ方式のプリンタ (Office holoprinter) の開発を行っている[38, 39]。また、レンチキュラー板を用いた方式やホログラフィック光学素子を用いて2眼視の立体像をホログラムに記録する手法など[40]により3-Dプリンタを実現するための提案がなされている。

なお本研究では、ホログラフィ技術を用い、コンピュータの端末装置として立体像のハードコピーを自動的に出力するプリンタのことをホログラフィック・3-Dプリンタ (Holographic 3-Dprinter: holoprinter) と呼ぶことにする。ホログラフィック・プリンタ、ホログラフィック・レーザプリンタなどの言葉は文献[25]などで以前より用いられているが、上記のような明確な定義はされておらず、本研究による提案以前はホログラフィック・レーザプリンタは光学定盤上で実現されていた。液晶パネルなどを用いて自動的に合成する方法は確立されていなかった。上記の定義に基づくホログラフィック・3-Dプリンタの概念は本研究により初めて明確にされたものである。

本研究のホログラフィック・3-Dプリンタでは、リップマン型のホログラムに水平・垂直方向の視差情報を記録するもので、歪のない立体像を白色光照明下で再生できる。したがって上記の他の3-Dプリンタの方式と比較して最も高画質の画像を出力できる可能性を持つ。一方記録するデータ量と露光点数が多いため、合成に時間がかかる問題がある。この点については3.7節で検討する。また装置の小型化や安定性の観点からいえば、本手法は一度に露光する面積が小さいため、他の手法と比較しても優れたものといえる。これらのことから、本研究におけるホログラフィック・3-Dプリンタは合成時間の問題を解決できれば、最も将来性のある方式ということができる。

2.4.6 動画ホログラフィ

コンピュータによって処理・生成した3次元の画像データを立体表示したり、テレビ放送などを立体化することを目的とした研究が最近活発化している。中でもホログラフィの技術を中心としてこのようなシステムを構築する試みが動画ホログラフィ (Electro-holography) として注目されている[41]。

動画立体像表示法としては、偏光フィルタやシャッタ方式などによる3-D眼鏡方式がすでに実用化されている。しかし眼鏡を必要とすることや目の疲れの問題から、眼鏡なしで動画立体像を表示するための研究が行われている。眼鏡なし立体像表示法としてよく知られているレンチキュラー方式やパララックスバリア方式などをテレビジョンや3次元システムのモニタなどに用いる研究もなされている[33, 42]。しかしこれらの方式では視差方向数が限られていることなどにより、現在のところ自然な立体像表示が困難であるため、自然な立体像表示の能力を持つホログラフィ技術への期待が高まっている。

電子的な立体像表示法として現在最も研究が進んでいるのはMIT Media Lab.のグループであり[43-46]、最近ではカラー表示も実現されている。このシステムでは、ホログラムが必要とする時空間周波数帯域を表示するために、音響光学変調素子(AOM)を用いている。AOMでは結晶中を進む超音波による粗密波で屈折率の変調が行われるが、波の進む速度を打ち消す方向の走査と画面上の走査を組み合わせるホログラムの表示を行っている。3次元データからの干渉縞の計算は超並列マシンにより行われ、ほぼリアルタイムのインタラクティブ表示が可能となっている。国内でも同様の手法による3次元表示システムの研究が行われている。

また、液晶表示デバイスを用いてホログラムを実時間で表示する研究も行われている[47]。液晶空間光変調器では、光の振幅および位相を変調できるため光の波面を直接変調できるという特徴も持っている。したがって光計測や光演算などの分野への応用は十分期待できる。3次元画像表示に関しては、現在のところ満足な立体像は得られていないが、今後液晶パネルの解像度が改善され、また十分な時空間周波数帯域を表示することができれば、立体像表示の分野への応用も可能になると考えられる。

このように、ホログラフィ技術を用いて電子的な3次元の画像データを自由に表示するシステムの実現にはまだ時間を要する。ところで、動画ホログラフィにおける研究の目的は、以下のような3つの要素に整理できる。

- (1) 電子的3次元画像データの立体像としての可視化
- (2) インタラクティブな表示
- (3) 動画表示

上記のように現状ではこれらを全て満足するシステムの実現は困難である。(1)の目的に対しては、ここで提案するホログラフィック・3-Dプリンタが一つの方式として有効なものと考えられる。本研究では、(3)の動画表示の一手法として、ホログラフィック・3-Dプリンタによりアニメーション画像を出力するシステムについて提案を行った。(2)インタラクティブな表示については現状でホログラフィが有効な手段かどうかは明らかでない。本研究で提案するハイブリッド処理系を用いた高速なインタラクティブ表示法は、3次元データのうちボリュームデータを表示する場合の一つの解決策として有効なものといえる。

2. 5 3次元画像の表示法

2. 5. 1 3次元コンピュータグラフィックス

2. 2節でも述べたように、3次元画像データは、表面の座標や色の情報を持つサーフェスデータと、3次元空間内の各点が値を持つボリュームデータに分類できる。現在3次元コンピュータグラフィックスなどで多く用いられているのは前者のサーフェスデータであり、その表示法としては、様々なサーフェスシェーディングや2次元画像の表面へのマッピングの技法などが既に実用化されている。また、光線追跡法などによりさらに高画質の優れた画像が得られている。これらは建築物や自動車などのデザインの他、様々な分野へ応用され、また専用のソフトウェアやハードウェアが開発されている。

一方、医用画像システムなどにおいては3次元のCTやMRIなどによりボリュームデータが収集され、診断などに用いられている。3次元CTやMRIなどから得られるボリュームデータにおいては、Fig. 2. 7に示すようにボクセルと呼ばれる立体的な画素が格子状に配列され、各ボクセルがそれぞれ値を持つ。従来、このような3次元ボリュームデータの表示には、主に(1)シネ表示や(2)コンピュータ・グラフィックスによる表面画表示などの方法が用いられている。実際には複数の断層像を同時に表示して観察するケースが多いが、観察者自身が3次元的な構造を再構築しなければならない。また、シネ表示とは多数の断層画像をアニメーションとして連続的に表示するものであるが、これも3次元的な構造を把握するのに十分な表示方法とはいえない。

3次元ボリュームデータの表示に関して、現状では以下のような問題点が残されている。

(1) 表示のための処理法が確立されていない。

(2) データ量が多いため処理時間がかかる。

本章では従来のボリュームデータの表示法の問題点を検討し、(1)の問題点に対して有効な光学モデルに基づく表示法を2. 5. 3節で紹介する。そして3次元ボリュームデータから表示のための画像を高速に作成することを目的として、光学的処理を用いたハイブリッドシステムの提案を行う。ハイブリッド系によれば、小規模なシステムで高速に画像表示が可能であり、3次元ボリュームデータのソフトコピーとして最も重要な要素であるインタラクティビティを実現する有効な方策である。

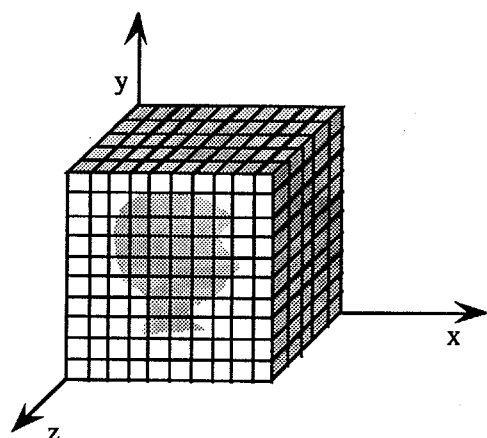


Fig. 2. 7
3次元ボリュームデータ

2. 5. 2 ボリュームデータの表示

これまで3次元ボリュームデータを直接3次元的に表示する手法として用いられているのは、コンピュータ・グラフィックスによる表面画表示である。例えばX線CTなどにおいては、CT値にはっきりとしたコントラストがある骨などの部位を表示する際に用いられており、特に整形および形成外科の領域での利用が考えられている。代表的なアルゴリズムとしては、予めCT値から閾値処理等によって表示物体の領域を抽出し、サーフェスデータに変換して前節で述べた手法を適用するものである。この手法においては演算は3次元データそのものではなく表面の座標値のみについて行うため、演算量は比較的少なく高速に回転して表示を行うことが可能である。しかし頂点の座標数の多いデータの場合には無駄な演算を行うことになるため、この手法は比較的解像度の低い画像表示に適している。

解像度の高い画像表示を行う手法としては、ボクセル法[48]が知られている。ボクセル法では、まず3次元的に配列されたボクセルに対し閾値処理等によって表示する部分を抽出する。そして各ボクセルを観察面に投影した際の深さ画像を作成し、光源の方向を考慮して陰影付けを行なう。ボクセル法は解像度の高い画像の表現が可能で、また物体をカットするような操作はボクセルに対して直接行えばよいいためインタラクティブな表示にも適している。しかし閾値処理などによって予め表示すべき部位を抽出しておく必要があり、表示できる対象が限られる。X線CTの断層像から腫瘍などを表示する場合は医師がマウスやライトペン等でその境界を入力する必要がある。また異なる部位を表示する場合には再び閾値処理のプロセスに戻る必要があるため計算に時間がかかるなどの問題がある。

現在、境界が曖昧なデータから自動的に領域を抽出する手法についての研究が行われているが、完全に自動的に領域を抽出ことは困難である。多くの場合、各断層像において手でその境界を入力する必要がある。また腫瘍などの場合その境界がはっきりしない場合が多く、曖昧な境界をどのように表現するかという問題がある。さらに上記のような手法では異なる部位の表示を行う必要がある場合には前処理からやり直さなければならないため、高速に表示できるのは3次元ボリュームデータのうちの限られた部分的な情報である。したがってより一般的な3次元ボリュームデータを表示する手法の確立が必要とされている。

ボリュームレンダリング[49-50]は、表面だけでなくボリュームデータの持つ値の分布を可視化する技術であり、この方法の特徴は閾値処理等による表面の検出を行わないことで、医用画像の分野ではこれを用いて臓器や脂肪などの軟部組織を可視化することができる。ボリュームレンダリングでは、各点の値に対して統計的な最適化の手法などにより組織のクラスタリングを行ない、各組織に属するボクセルに不透明度や色の情報を与えて表示を行なう。この不透明度や色の割付け方により様々な部位を表示することができる。この手法の問題点としては、3次元の全てのボクセルのデータを用いて計算を行なうため、膨大な計算量を要する点が挙げられる。また、回転変換において補間の方法によってはエイリアジグなどに起因するアーティファクトが現われる場合があることや、特定の組織についてのクラスタリングは可能だが、予め特徴のわかっていない組織の表示を行なうことが困難であること、などの問題点がある。

2. 5. 3 光学モデル

従来のボリュームデータの表示法は、基本的に異なる媒質の境界の形状を可視化することを目的として開発されている。しかし上記のようにボリュームデータでは、境界だけでなく3次元的な分布そのものの可視化が必要となる。ここではこの目的のために提案された光学モデルによる画像表示法 [51] について述べる。

光学モデルとは、3次元的な値の分布を、Fig. 2. 8に示すように物理的な光学常数にマッピングすることでボリュームデータの表示を行う手法である。このマッピングにより3次元的な光学常数の分布を作成できるため、その分布を持つ物体を照明した際に生じる吸収や散乱などを計算によりシミュレートすることで表示を行う。マッピング関係は利用者が自由に決めることができるため、観察したい領域に合わせてインタラクティブに表示を行うことができる。

光学モデルにおける画像の計算では、まず、オリジナルのボクセル値を屈折率や吸収係数などの光学的な量にマッピングする。マッピングの関係は観察者が表示したい部位に応じて自由に設定する。そして物体に対して平行光の入射を仮定し、マップされたボリュームデータを走査して光線を追跡する計算を行う。屈折率の異なる媒質の境界で起こる反射や媒質中での吸収などを考慮し、最終的な像を対象からの反射光の総和として合成する。ボリュームデータには表面という概念はないが、規格化グラジエントの概念を用いることで、屈折率変化がある境界で法線ベクトルを計算し、入射角や屈折角を求める。

光学モデルにおける問題点は、回転や補間の処理に長い計算時間を要する点である。本研究では、ボリュームデータの表示を行う際の計算時間の問題を解決する方法として、光学的処理を用いたハイブリッドシステムを提案する。ハイブリッドシステムを用いて光学モデルの計算を高速に行うことも可能である [52]。光学モデルは3次元ボリュームデータの表示のための一般的な概念であり、マップされる光学常数の種類や応用分野などによって今後更に発展する手法と思われ、さらにハイブリッド処理を併用することで演算の高速化が図られ、ボリュームデータのインタラクティブな表示システムが実現できる。

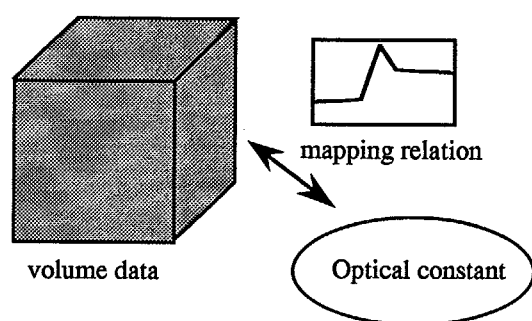


Fig. 2. 8

光学モデルの概念図。

3次元空間内の各点の値を光学常数にマップする。

2. 5. 4 ハイブリッド処理の応用

本研究では、3次元データのソフトコピーとして重要な要素であるインタラクティビティを実現するために、光演算を用いた電子-光学的ハイブリッド処理系を提案する。光学モデルなどの手法を用いて3次元ボリュームデータの表示を行う際に、計算に時間を消費するのは主に像を回転する演算である。ボリュームデータは通常3次的に配列されたボクセルから構成されており、斜めの方向に投影する際には像の回転処理が必要となる。Fig. 2. 9に示すように、正面から観察した画像を作成する場合はボクセルデータの列に沿って走査して投影処理を行えばよいが、Fig. 2. 9 (b)のように傾いた方向から観察した画像を作成するためには、ボクセル配列に対して斜めに走査する必要があるため、画像の2次元的な補間処理が必要となる。2次元補間の処理には大きなメモリが必要であり、2次元的な処理を行わなければならないため、現状では計算時間が膨大になる。専用のハードウェアを用いる場合にも2次元画像を記憶する大きなメモリと大規模なプロセッサが必要のため大規模なシステムになる。

光学系を用いたハイブリッド処理システムでは、断層像の回転を光学系により行う。例えばFig. 2. 10に示す光学系を用い、CRTまたは液晶パネルなどに表示した断層像を回転したCCDカメラにより撮像することによって像の回転を実現する。像回転光学系としてはDove Prismを用いることもできる。CRTの画素とCCDの画素のサンプリングの間でスムーズな補間を行うためには、CCDカメラのフォーカスをCRTからわずかにはずすことで撮像された断層像に1画素と同等の大きさの微少なボケを与える。この光学系により回転された断層像が得られるので、ある角度からみた投影像を得るためにはFig. 2. 9 (c)に示すように回転後の断層像に対して1次元的な走査を行って計算すればよい。1次元的な走査による投影像の計算は電子的なデジタル演算器により高速に行うことができる。このように光学的な並列演算を利用することで、小規模なシステムで高速な画像表示を行うことが可能になる。

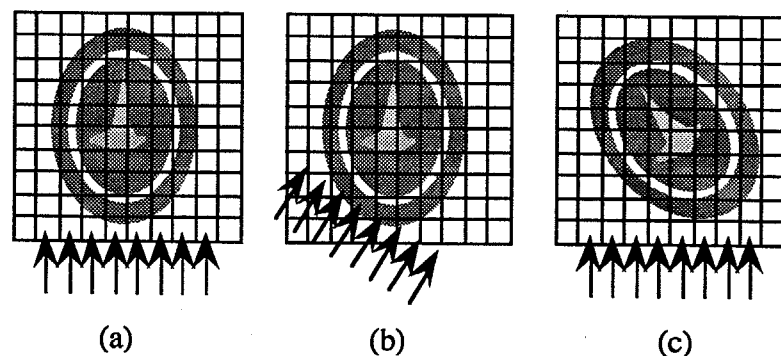
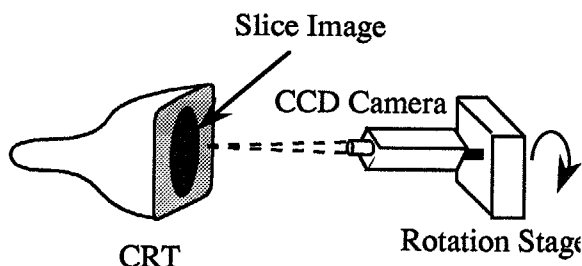


Fig. 2. 9

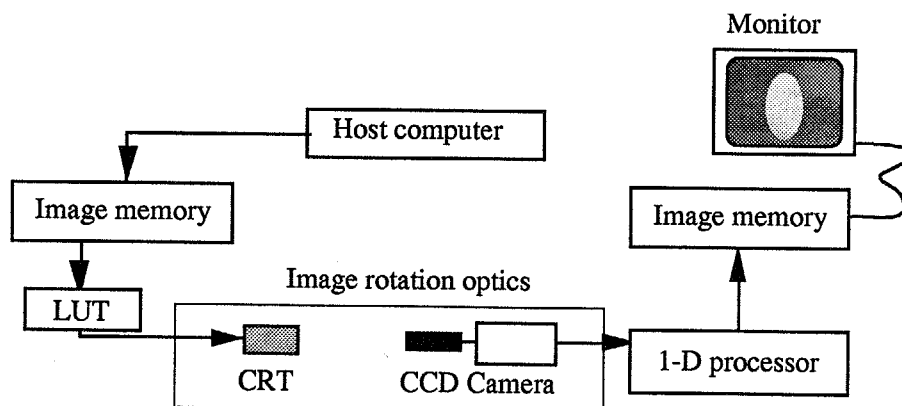
断層像からの表面画作成の計算。

- (a) 正面への投影。ボクセルの列に沿って走査する。
- (b) 傾いた方向への投影。走査を斜めに行なうため2次元的な補間処理が必要になる。
- (c) 光学系等により予め断層像を回転しておけば、回転された断層像に対してボクセルに沿った1次元走査を行えばよい。



F i g . 2 . 1 0

像回転光学系



F i g . 2 . 1 1

光学処理を用いたハイブリッド処理による画像表示システムの構成

LUT : Look Up Table

F i g . 2 . 1 1 に画像表示のためのハイブリッドプロセッサの構成を示す。現存のビデオ信号処理系を活用したハイブリッドシステムでも毎秒60枚程度の断層像の処理が可能と考えられ、 $256 \times 256 \times 128$ ボクセル程度からなる3次元データの表示が約2秒の計算時間で実現できると考えられる。さらにCRTまたは液晶パネルとCCDカメラからなるハードウェアを複数用いて並列に処理を行うことではリアルタイムで画像を回転して表示することができる。また、F i g . 2 . 1 0 の光学系で、CCDカメラのレンズを動かすことでズームを行ったり、回転前の断層像に電子的または光学的なマスクをかけることで物体の切削などができるため、手術シミュレーションなどへの応用が可能と考えられる。

ここではハイブリッド処理系の原理を確認するため、X線CTによる3次元ボリュームデータから骨の表面画を作成する実験を行った。F i g . 2 . 1 2 に実験結果を示す。実験ではCRTに表示した画像をCCDカメラを回転して撮像することで像の回転を行った。また、ズームレンズを用いてCRT上の画像を拡大し、CRTの一部をマスクして撮影することで物体の切削および視点の移動を行った。本実験によりハイブリッド系によるボリュームデータの表示の基本原理を確認した。

光学モデルによる計算は1次元的な走査に基づいて行われるため、上記の電子-光学的ハイブリッド処理系を直接利用することが可能である。F i g . 2 . 1 1 に示す構成を用いて、回転された断層像を撮像し、回転後の像に対して光の反射・吸収の計算を行う。この光線追跡の処理は、走査を行う列のボクセルとその上下前後左右のとなりあうボクセルの値を用いて行われるので、回転された断層像を用いれば1次元的な一種のコンボリューション演算であり、デジタル系でも十分高速に行うことが可能である。

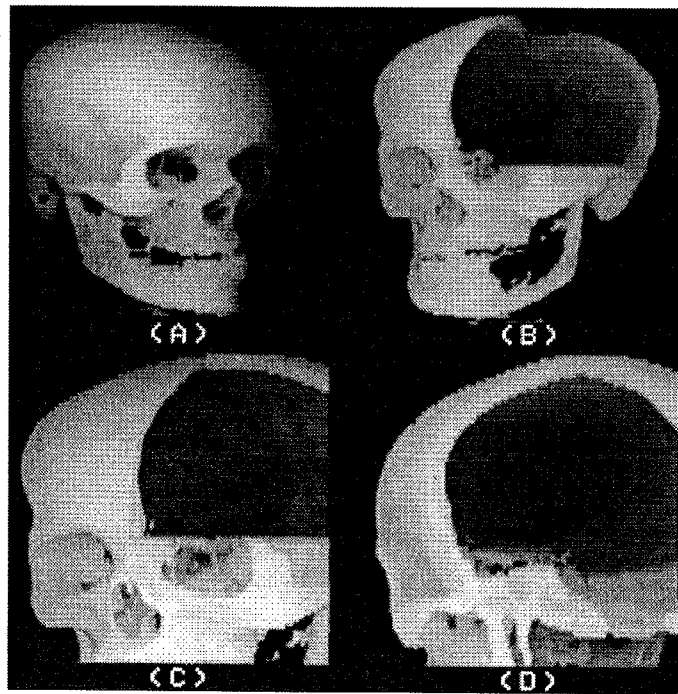


Fig. 2. 12

ハイブリッド系により実験的に作成した頭蓋骨の表面画
(a) 回転、(b) 切削、(c, d) ズームの各処理結果を示す。

光学モデルでは各ボクセルのCT値を変換テーブルを用いて屈折率や吸収率等の光学常数へマップする。従ってFig. 2. 11のハイブリッド処理系では、断層像の各画素の持つ値をルックアップテーブルにより変換してCRTに表示する。しかしCRTに表示した画像をCCDカメラで撮像する場合、これらのデバイスの非線形性の影響が無視できない。そこでCRT-CCDカメラ間の入出力特性についてあらかじめ計算しておき、ルックアップテーブルに書き込むテーブルには、必要なマッピングテーブルをその入出力特性曲線によって補正した値を用いる。X線CTにおけるCT値のダイナミックレンジは12ビット程度とかなり大きい、3次元的な画像を計算するのに必要なレンジは比較的低いため、CRTやCCDカメラ等のダイナミックレンジの低いデバイスを利用してもほとんど問題ない。CRTとCCDカメラ間の特性はズームやデフォーカス等によって変化するため、光学系のセッティングのパラメータに合わせていくつか用意しておく必要がある。そしてズーム等を行った場合は対応する入出力曲線を用いてルックアップテーブルを補正し直す。

このようにして電子-光学的ハイブリッド処理系を用いて光学モデルの計算を行うことにより、高速に像を回転して表示することができる。電子的な処理系を用いて高速に像を回転する処理を行うことは可能でも大規模で高価なシステムとなるが、本手法を用いればワークステーションレベルのシステムで実現できるため実用性は高いと思われる。

2. 5. 5 ハイブリッド処理の3-Dプリンタへの応用

前節では3次元画像データのソフトコピーに対する提案として、光学的演算を用いた処理システムについて述べた。この処理システムでは3次元データから2次元投影像を高速に計算することができるため、第3章以降に述べるホログラフィック・3-Dプリンタに対しても応用できる可能性がある。マルチドット法において露光する画像の作成方法は次節以降で述べるが、基本的には露光する要素ホログラムを中心とする中心投影の演算である。特に前述のようなボクセルデータでは、3次元的に傾いた光線に沿って走査して投影する必要があるため、前節と同様に補間の問題が存在する。ボリュームデータを回転して表示する場合と異なるのは、3次元的に傾いた光線を計算しなければならない点である。したがって3次元的な補間を行う必要があり、ハイブリッド処理を直接適用することはできない。

ホログラフィック・3-Dプリンタの原画の計算のように3次元的な補間処理をハイブリッド処理により高速に行うためには、単一の断層像でなく複数の断層像を計算に用いる必要がある。したがって複数の断層像を同時に表示して処理する方法が望ましいが、単純なCCDカメラの回転などで変換を行うことは困難であり、新しい光学系を開発しなければならない。また高速に大容量のデータを光学系に入力する技術の開発や、処理結果を再び光学系にフィードバックするなどの工夫が必要となる。

ホログラフィック・3-Dプリンタでは水平・垂直方向の視差の記録を行うが、応用分野によっては水平方向の視差のみを表示すればよい場合もある。また第7章で述べるレインボウ型の場合は水平方向の視差しか記録できない。水平方向の視差のみを記録する場合は比較的容易にハイブリッド処理を適用できる。これは水平視差のみを記録する際に、無限遠から観察することを仮定すると、投影の計算は水平方向のみに関して2次元的に行うことができるためである。以下に考えられる方法について簡単に述べる。

(1) 光線の入れ替えを用いる方法

前節のハイブリッド処理系では像回転光学系を用いることによってある方向への平行投影像を高速に作成できる。第3章で述べるマルチドット法において、ある要素ホログラムに記録する画像は、要素ホログラムを中心とした中心投影像であるが、これらはお互いに光線の順序が異なるだけで同じ光線の情報を持っている。したがってハイブリッド処理系で作成した投影像から、光線の順序を入れ替える処理を行えばマルチドット法で露光する画像を作成できる。水平方向の視差のみを記録する場合は、観察位置を上下に移動しても観察される像は変化しないので、各要素ホログラムに露光する画像は垂直方向に構造を持たない画像となり、これは水平方向の断層面内で投影して求めた1次元のデータを垂直方向に並べることで作成する。光線の順序の入れ替えはFig. 2. 13に示すように、各画像から対応する光線を集める処理となる。この光線の入れ替えは基本的にマルチプレックス・ホログラムの歪補正法[23, 53]などと同様のアルゴリズムであるが、全ての方向に投影した画像から計算する必要があるため、高速に計算するためには全ての方向の投影像を記憶できる大容量のメモリを用いることが望ましい。

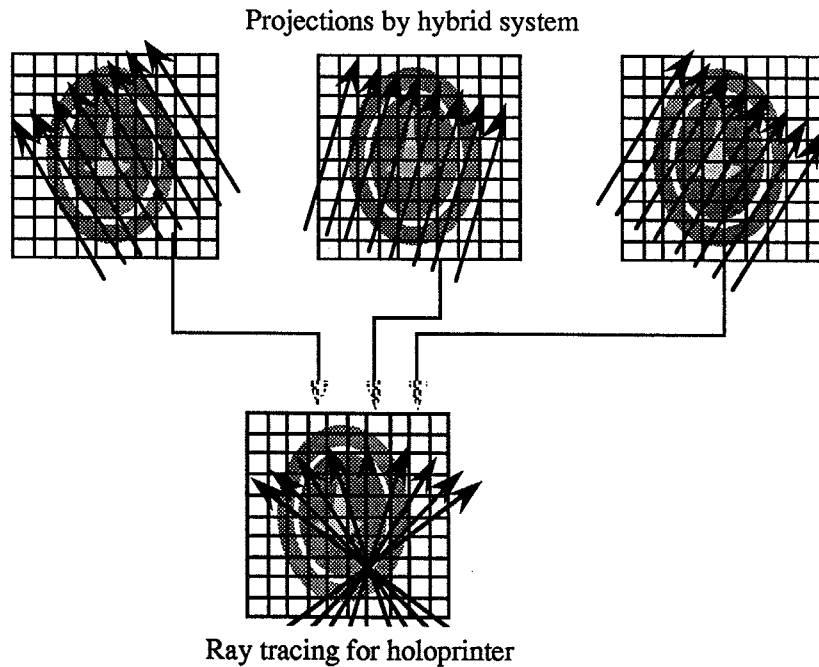


Fig. 2. 13

ハイブリッド系における投影（上段）とホログラフィック・3-Dプリンタで露光する画像（下段）における投影の関係。矢印のように入れ替えを行うことで互に変換できる。

（2）専用光学系を用いる方法

前述のようにホログラフィック・3-Dプリンタに露光する原画の計算と像回転光学系による投影像の計算では投影する光線の順序は異なる。したがって光学系を効率的に用いるためには計算する光線の順序を入れ替える光学系を開発する必要がある。Fig. 2. 13のような光線を計算するには垂直方向に関して倍率がそれぞれ異なる系を用いればよい。この光学系によって歪を与えられた画像をCCDカメラで撮像し、これを画像の列に沿って走査して投影の演算を行えば、ある要素ホログラムに露光する画像を計算できる。そしてCRTまたは液晶パネルなどに表示する画像を平行移動することで各要素ホログラムに記録する画像の計算を行うことができる。ただし通常のレンズを用いてこの歪を持つ光学系を実現することは困難であるため、ホログラフィックインターコネクションなどの座標変換の技術を活用することが必要となる。

これらの方法により、表面画表示や光学モデルによる半透明像表示をホログラフィックに出力するための画像を、高速に作成する演算システムの可能性がある。今後、光学的演算などによる高速処理技術の確立が期待される。

2. 6 結論

本章では3次元画像処理システムのディスプレイとしての出力法について検討を行い、ホログラフィ技術の応用の可能性を検討した。2. 3節および2. 4節でホログラフィによる立体像表示に関する既存の技術と応用分野について、白色光再生の方法とホログラフィック・ステレオグラムによる架空物体などの立体像表示法を中心に述べた。現状ではホログラフィは3次元画像システムのハードコピー出力として非常に有効な手段であり、殊にホログラフィック・ステレオグラムはコンピュータなどによって生成・処理された3次元画像データの立体像としてのハードコピーにも最適な方法といえる。一方ソフトコピー出力としては動画表示やインタラクティブ表示が必要とされる。3次元データの中でも医用画像などの分野で重要なボリュームデータのソフトコピー表示技術に残された問題点を解決するために、ここではボリュームデータの表示を行う高速処理に関する研究を行った。ボリュームデータの表示に関しては、表示アルゴリズムの開発と高速処理法の確立が必要であることを述べ、有効なアルゴリズムとして提案されている光学モデルに基づく手法を紹介した。そして像の回転・切削・ズームなどの高速処理法として光学的演算を用いたハイブリッドシステムの提案を行い、ハイブリッド系で像の回転を行ってボリュームデータの表示が可能であることを実験的に示した。またボリュームデータのハードコピー出力においても同様の手法を利用できる可能性があることを示した。

本章で述べたように、ホログラフィは3次元画像システムのハードコピー出力として有力な技術であるが、広く一般に用いるための技術が確立されていない。現状ではホログラフィは実験室内で作成されており、通常のオフィスなどの環境で誰にでも作成できないことがその普及を妨げる要因となっている。本研究では、3次元画像の表示法として優れた技術であるホログラフィを様々な分野で利用可能とするために、3次元画像システムの端末装置としてのホログラフィック・3-Dプリンタの開発を行った。

第3章 ホログラフィック・3-Dプリンタの開発

3.1 はじめに

本研究で目的とするホログラフィック・3-Dプリンタは、3次元画像処理システムの端末装置として、立体的な画像ハードコピーを出力する装置である。本研究ではホログラフィック・3-Dプリンタを実現するための手法を検討し、白色光再生で歪みのない立体像を表示できるホログラフィック・ステレオグラムを自動的に合成する新しい手法を開発した。さらに実用的な3-Dプリンタを実現するための諸問題について検討した。

本章ではまずホログラフィック・3-Dプリンタに必要とされる条件を明確化し、必要な条件を満たす方法として開発したマルチドット記録法について説明する。3.4節では、提案するホログラフィック・3-Dプリンタシステムと、基本原理の確認のための実験結果を示す。3.5節では、ホログラフィック・3-Dプリンタにより出力される立体像の画質を改善するために、デジタル拡散板の適用に関して実験的に検討を行う。さらにホログラフィック・3-Dプリンタのプロトタイプを試作を行い、その実用化に必要な課題について検討を行った。3.6節では、試作した装置の構成と実験結果を示す。さらに合成時間を短縮することを目的として並列露光光学系の開発を行った結果を3.7節に示す。

3.2 ホログラフィック・3-Dプリンタの必要条件

前章で、ホログラフィック・ステレオグラムの技術が本目的に対して適していることを述べた。しかし従来のホログラフィック・ステレオグラムの手法では、3次元画像処理システムの端末装置としてホログラフィック・3-Dプリンタを実現することは困難である。ここでは、3-Dプリンタを実現するためにホログラフィック・ステレオグラムに対して必要と考えられる条件を以下に示す。

(1) 自動的に合成可能。

従来のホログラフィック・ステレオグラムの手法のうち、2ステップで記録する方式では、ホログラムを二回撮影する必要があり、自動化が困難である。また1ステップで記録するホログラフィック・ステレオグラムの方法でも、従来は露光する画像（原画）を映画フィルムなどに記録してからホログラムの合成を行うため、映画フィルムの現像を行う必要があった。

完全に自動的にホログラフィック・ステレオグラムを合成するためには、1ステップの記録法を用い、計算機で作成した原画を液晶パネルなどの空間光変調器で直接ホログラムに露光する技術を確立しなければならない。

(2) 白色光再生型。

立体像を持ち運んでどこでも観察するためには、通常の白熱灯などの白色光源で再生できるものである必要がある。したがって白色光再生可能なレインボウ型やリップマン型のホログラフィック・ステレオグラムの手法を用いる必要がある。

(3) 正確な立体像を表示。

これまで1ステップでホログラフィック・ステレオグラムを合成する手法として、マルチプレックス・ホログラムなどが開発されているが、レインボウ型であるため水平方向の視差のみしか記録することができない。また目の位置を上下に移動すると再生像の色やアスペクト比が変化し、歪を持つ像が観察される。歪のない再生像を得るためには、水平・垂直方向の視差を記録したリップマン型のホログラムである必要がある。なお、応用分野によって像の歪がある程度許容される場合には垂直方向の視差を省略してもよいが、垂直視差を記録できないと応用分野は限定される。

(4) 平面型

前述のマルチプレックス・ホログラムは、円筒型であるため専用の再生装置を必要とする。また Alcove 型ホログラム [25, 26] も3次元データの出力を目的に開発されたものであるが、半円筒型でやはり専用の再生装置がなければ見ることはできない。3次元画像データのハードコピーとしてホログラフィック・ステレオグラムを利用するためには、ファイルしたり持ち運んでどこでも観察できる必要があり、したがってホログラムの形状は取扱いや観察の容易な平面型であることが望ましい。

(5) 通常のオフィスなどでの使用が可能。

従来、ホログラムの合成には、光学系を構成するために高度な除振装置を備えた定盤を用い、空気のゆらぎや振動の少ない暗室で作業する必要があった。しかし3-Dプリンタとして用いるためにはデスクサイドやデスクトップで用いることが必要とされるため、振動に対して強いシステムを実現しなければならない。振動の影響を低減するためには、A) 露光時間を短時間にする、B) 露光面積を小さくする、C) 光学系を小型にする、などの対策が有効である。

(6) 小型の装置

前項と同じ理由により、ホログラフィック・3-Dプリンタを広くオフィスなどで使用するためには、できるだけ小型の装置である必要がある。例えば従来のマルチプレックス・ホログラムの合成系では、再生像サイズ(150 mm)とほぼ等しい口径のレンズを用い、画像を拡大投影するために幅1500 mm近い広さの定盤を必要としていた。光学系を折り畳んで小型化しても、デスクトップのプリンタを構成することはほぼ不可能である。基本的にこれらの方法は再生像の高さとほぼ等しい大きさの光学部品を必要とするため、作成するホログラムのサイズに依存して光学系のサイズが大きくなる。従来の2次元のレー

ザプリンタやイメージプリンタでは走査により2次元的な記録を行っており、ホログラフィック・3-Dプリンタでも点を走査する方式で記録することで、作成するホログラムのサイズに依存しない小型のシステムを実現すべきであると考えられる。

本研究では上記に示す条件を満足する方法として、1ステップで水平・垂直方向の視差を持つリップマン型ホログラムを自動的に合成する手法を考案した。この手法ではドット状の微少なホログラムを順次記録するため、露光時間は短く露光する面積も非常に小さいため、振動の影響を受けにくい。また光学系も単純で小型のシステムとなる。さらに液晶パネルを用いて計算機の3次元データから直接ホログラムを露光できるため、ホログラフィック・3-Dプリンタに必要とされる条件を満足する方法である。

3. 3 マルチドット記録法

3. 3. 1 マルチドット記録法の原理

マルチドット方式によるホログラフィック・ステレオグラムの原理は、物体からの光線の強度と方向をホログラム面上に記録し、再生するものである。Fig. 3. 1 (a) に記録光学系を示す。液晶パネル (LC Panel) に表示した2次元画像によって変調されたレーザ光をホログラム面に集光し、参照光との干渉縞をホログラムとして記録する。この単一のホログラムを要素ホログラムと呼ぶ。参照光をホログラム面に対して反対方向から入射し、リップマン型の要素ホログラムを露光する。リップマン型ホログラムでは、白色光再生の下でブラッグの条件に適合する光のみが回折されるため、ほぼ単色の像を再生することができる。この光学系により、ホログラムフィルムを上下・左右に移動しながらホログラム面全面を塗りつぶすように要素ホログラムを露光する。

簡単のため、はじめに物体がホログラム面よりも後方にある場合を考える。このとき、液晶パネルに表示する画像は、Fig. 3. 1 (b) に示す幾何配置に従いコンピュータ・グラフィックスと同様の手法を用いて作成する。要素ホログラムの中心を視点として投影像を作成し、この画像をFig. 3. 1 (a) の光学系でホログラム面の対応するそれぞれの位置に露光する。ホログラムでは記録した光線の強度と方向を記録・再生できるため、ホログラム面全面に要素ホログラムを露光すれば、物体からホログラム面を通過する光線が正しく再生される。例えばホログラム面に目を近づけて観察することを考えると、各視点から見える2次元画像を対応する要素ホログラムの位置で観察することができる。したがって観察者からは、ホログラム面を窓として、あたかもこの窓から物体を覗いているように見える。

さらにFig. 3. 2のように物体がホログラム面の前後にある場合でも、同様の原理で物体からの光線を正しく再生することができる。このとき、3次元空間から2次元面への投影における投影の中心点は露光する要素ホログラムの中心とするが、観察位置は投影中心とは一致せずFig. 3. 2 (a) の右側である。したがって、投影中心よりも後方の点についても投影を行う必要があり、また隠面消去はこの観察位置に基づいて行われる。観察位置と投影中心が一致しないという点でこの画像作成法は通常のコンピュー

タ・グラフィックスと異なるが、基本的な処理は同等のアルゴリズムに基づいており、様々なコンピュータ・グラフィックス用のソフトウェアやハードウェアを利用することができる。

本手法を用いれば、Fig. 3. 2 (b) のようにホログラム面を通る光線が3次元物体が実際に存在した場合と同様に再生されるため、水平・垂直方向の視差を持った歪のない立体像を見ることができる。ホログラフィック・ステレオグラムから再生される光線を考えると明らかなように、垂直方向の視差を記録しない場合は、ホログラム面からある距離離れた位置から観察したときに歪のない像を観察できるように記録を行うことは可能であるが、ホログラム面から離れたり近づいて観察すると歪を生じてしまう。したがって歪のない正確な立体像を表示するためには、垂直方向の視差を記録しなければならない。

このマルチドット法により、水平・垂直方向に視差を持つ (Full-parallax) 立体像をホログラフィック・ステレオグラムとして自動的に合成することが可能になる。なおこのマルチドット法と同様の手法の提案 [54] がなされているが、実際に垂直方向の視差を持つホログラムの作成を行った報告はなく、また白色光再生を行うことについては検討されていない。

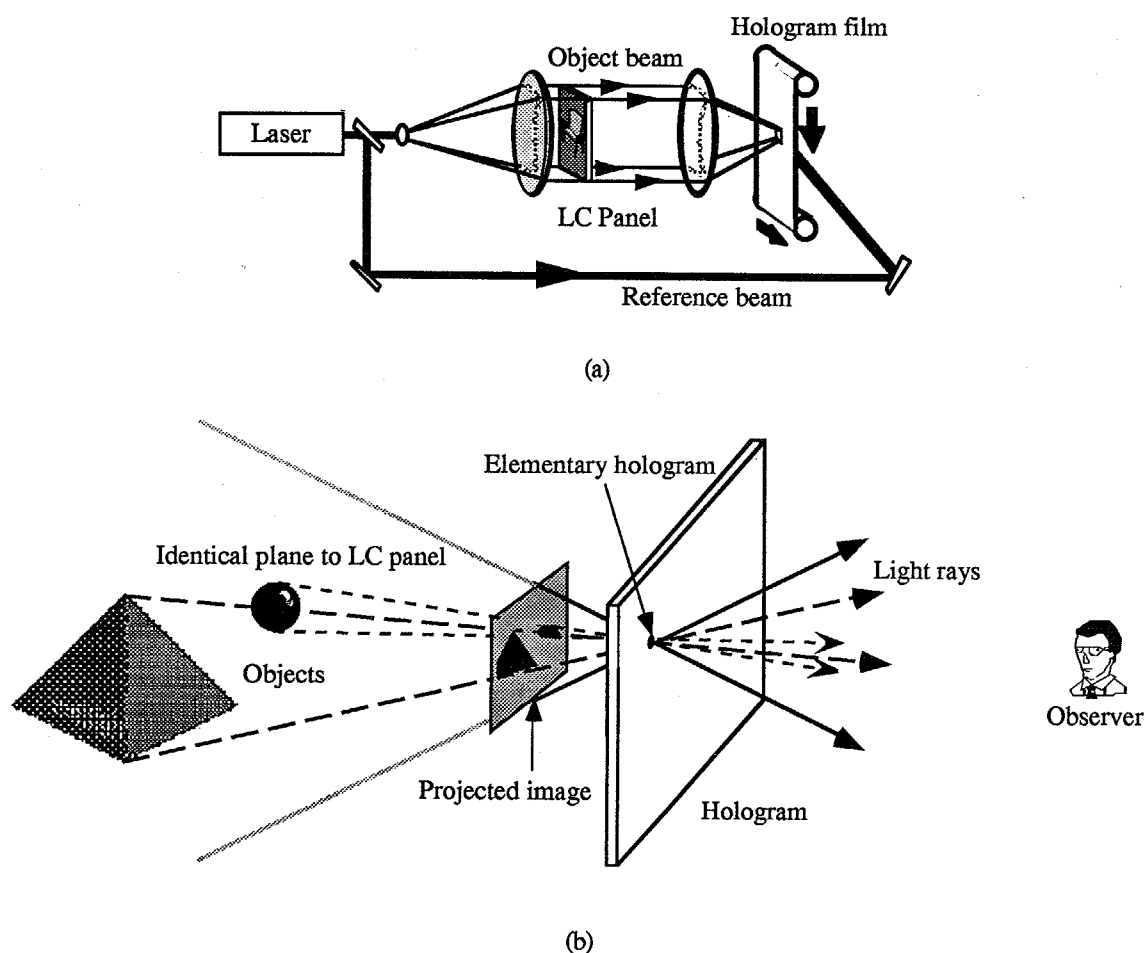
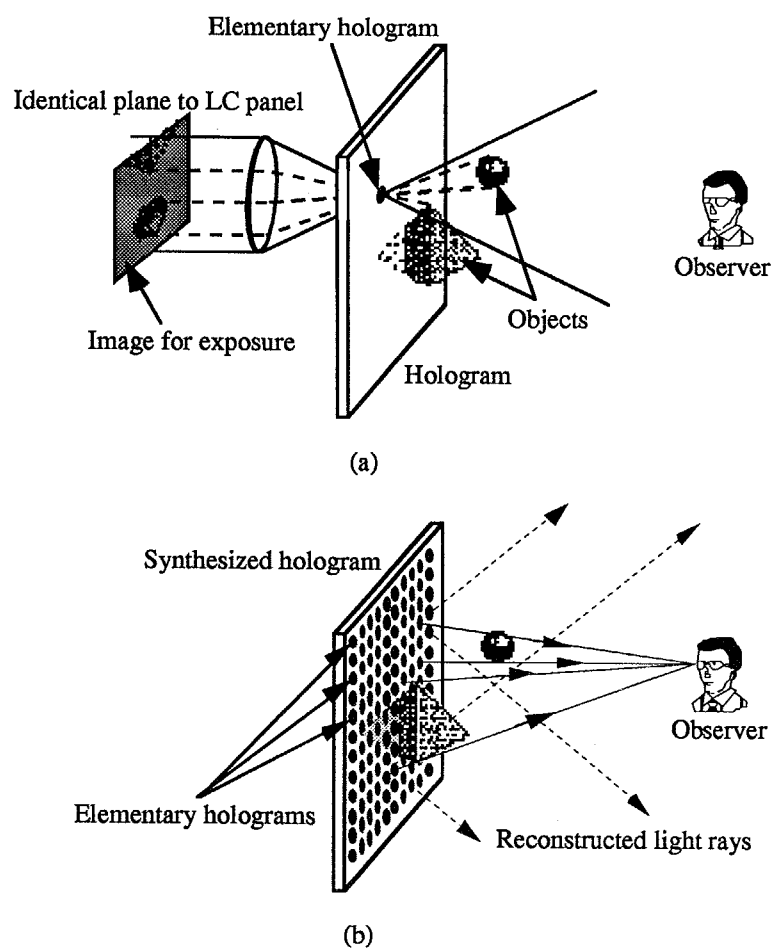


Fig. 3. 1

- (a) マルチドット方式によるホログラフィック・ステレオグラムの合成光学系
 (b) 露光する画像の作成の原理図。要素ホログラムの中心を視点として作成した投影像を
 (a) の光学系で液晶パネル (LC Panel) に表示して記録する。

LC Panel : Liquid Crystal Panel



F i g . 3 . 2

マルチドット方式による立体像記録・再生の原理

(a) 露光する画像の計算とホログラムの合成

(b) 合成されたホログラムの再生

3. 3. 2 マルチドット記録法の特徴

本手法を用いたホログラフィック・3-Dプリンタの特徴としては、以下の点が挙げられる。

(1) 水平・垂直方向の視差情報が記録されており、完全に歪のない立体像表示が可能。

従来のホログラフィック・ステレオグラムの手法では水平方向の視差のみしか記録しないため、特定の位置の観察者に対しては歪補正処理を行うことが可能であるが、観察者が上下や前後に移動すると像に歪を生じる。正確な立体像を表示するためには本手法のように水平・垂直方向の視差情報を記録する必要がある。またこの垂直視差方向の自由度を他の目的に利用することも可能である。本研究ではこの垂直視差方向の自由度を動きの表示（5章）や色の表示（7章）などに用いる方法も示している。

(2) 光学系が小型である。

Fig. 1に示すようなコンパクトな光学系でホログラムを記録することができ、ホログラフィック・3-Dプリンタとして小型の端末装置が実現できると考えられる。大型のホログラムを作成する際も同じ小型の光学系を用いて合成することができ、大型の光学部品を使用する必要がない。

(3) 露光時間が短い。

(4) 一度に露光する面積が小さい。

レーザ光がホログラム面上の微少な領域に集光されて露光されるため、露光時間を非常に短くすることが可能であり、振動に対して比較的強いシステムが実現できる。したがって通常振動や空気のゆらぎ等によりホログラムは記録できないオフィス等のような環境でもホログラフィック・3-Dプリンタの使用が可能となると考えられる。

問題点としては

(5) 露光点数が膨大

(6) リップマンホログラムの記録のため物体光と参照光をホログラム面に対して反対方向から入射する必要がある。

(7) 要素ホログラム間隔が粗いとドットが目立つ。

などの点が挙げられる。このうち(5)および(7)に関してはそれぞれ3.7章と3.5章で解決策を示す。

3. 4 ホログラフィック・3-Dプリンタシステム

3. 4. 1 概要

Fig. 3. 3にホログラフィック・3-Dプリンタシステムの構成を示す。3次元画像データからホログラムに露光する画像（原画）を作成する画像処理部と、ホログラムの露光を行う光学系とシャッターやモータなどの制御を行うコントローラからなる。3次元画像データからコンピュータグラフィックスの手法を用いて原画を作成し、ホログラムに直接露光するか、磁気ディスクやビデオディスクなどに一時蓄積する。ホログラムの合成の際には、レーザ光を変調する液晶パネルに原画を表示し、シャッターを開閉して要素ホログラムの露光を行う。そしてホログラムフィルムを水平または垂直方向に移動してホログラム面全面に要素ホログラムを露光する。ホログラム面全面を露光した後、現像処理を行って3次元画像の立体画像ハードコピーを出力する。なお現在ホログラムの作成に最も多く用いられている銀塩感材は、湿式の現像処理が必要であるが、最近研究が進んでいる高分子の感光材料を用いれば、乾式の処理で現像を行うことができる。

次節よりこの3-Dプリンタシステムの各部分に関して具体的に説明する。

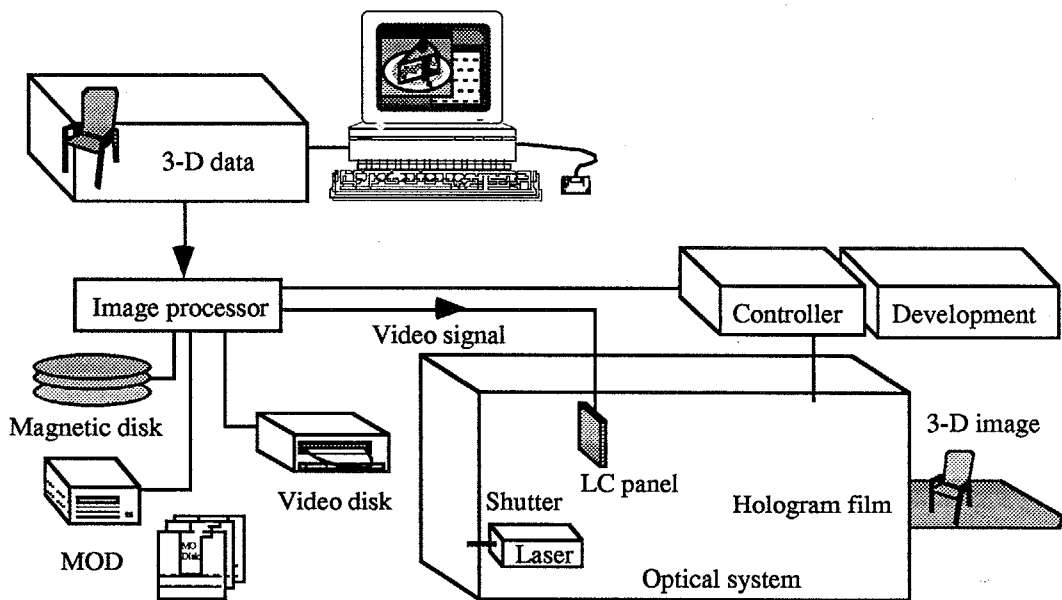


Fig. 3. 3

ホログラフィック・3-Dプリンタのシステムの概念図。

3次元データからImage Processorにより原画列を作成し、ビデオディスクや光磁気ディスク(MOD)などに一時保存し、液晶パネルに表示してホログラフィック・ステレオグラムを合成する。光学系のシャッターやホログラムフィルム送り装置などはコントローラで制御され、自動的に合成される。露光されたホログラムフィルムは現像処理の後立体画像ハードコピーとして出力される。

3. 4. 2 画像処理系

画像処理部では、計算機内の3次元データからホログラムに露光する原画の作成を行う。原画の作成方法は3. 2節で述べた原理に基づいて行うが、ここでは処理の方法を説明する。

原画の作成は、要素ホログラムを露光する点に対する投影変換であり、隠面消去など3次元コンピュータグラフィックスのアルゴリズムを利用して行うことができる。様々なコンピュータグラフィックスのシェーディングの手法もそのまま適用できる。さらに光線追跡法も同様に用いることができる。ホログラフィック・3-Dプリンタのための原画作成と通常のコンピュータグラフィックスが異なるのは、通常のグラフィックスでは視点と投影中心点が一致しており、投影中心点よりも後方の物体は投影しないのに対し、原画作成ではFig. 3. 2のように投影中心と実際の視点が一致せず、実際の視点に合わせて隠面処理を行う点である。

3次元物体から2次元の原画への投影の関係を以下に示す。ここではワールド座標系と呼ばれるような、ホログラム面の中心を原点とし、z軸を光軸方向に、x-y平面をそれと垂直な面とする座標系を考える[Fig. 3. 4]。ホログラム面上の点 (x_{hi}, y_{hi}) に記録されるi番目の要素ホログラムに露光する原画上の座標を、その中心を原点として (x_i, y_i) とし、物体光を集光するレンズの焦点距離を f とすれば、3次元空間内の点 (x_0, y_0, z_0) は原画上的点 (x_{i0}, y_{i0})

$$\begin{aligned} x_{i0} &= \frac{f}{z_0}(x_{hi} - x_0) \\ y_{i0} &= \frac{f}{z_0}(y_{hi} - y_0) \end{aligned} \quad (3. 1)$$

に投影される。この投影の関係に基づいて3次元物体の各点を投影する。実際の視点はこの投影の関係には影響しないためその位置は任意であるが、一般には無限遠方(Fig. 3. 4の右遠方)と考え、視点に近い面を優先して隠面消去を行えばよい。

コンピュータグラフィックスの技法の一つである光線追跡法は、非常に優れた画質の画像を作成することができるものであるが、ここでホログラフィック・3-Dプリンタの原画作成に用いる方法について簡単に述べる。通常の光線追跡法では、あらゆる方向からあるウインドウを通過し、視点の位置に向かう光線の反射・屈折・拡散などを計算して求める。一方、本方式のホログラフィック・ステレオグラムには、物体からホログラム面を通過し、あらゆる方向へ向かう光線を記録する。したがって原画の各点の明るさはある方向へ進む光線の強度を表す。Fig. 3. 4で、ホログラム面上の点 (x_{hi}, y_{hi}) に露光する原画上の点 (x_i, y_i) は、次式の直線で表される光線の強度として計算できる。

$$\frac{z}{f} = -\frac{x - x_{hi}}{x_i} = -\frac{y - y_{hi}}{y_i} \quad (3. 2)$$

この式で表される光線の強度を原画上の各点に対して計算し、さらに全ての要素ホログラムに露光する原画についてこの計算を繰り返す。

また、通常のコンピュータグラフィックスで作成した画像から本システムで用いる原画を計算することも可能である。前述のように、通常のコンピュータグラフィックスでは視点の位置と投影中心が一致した

系で投影を行うので、物体がホログラム面前後にある場合は工夫が必要である。例えば全ての方向から観測した画像の計算を行い、画像の各画素のデータを入れ換えることにより、物体がホログラム面前後にある場合の原画を作成することができる。これは基本的にはホログラフィック・ステレオグラムにおいて再生像の位置を画像処理により変化させる手法〔23〕と同じ原理に基づく。

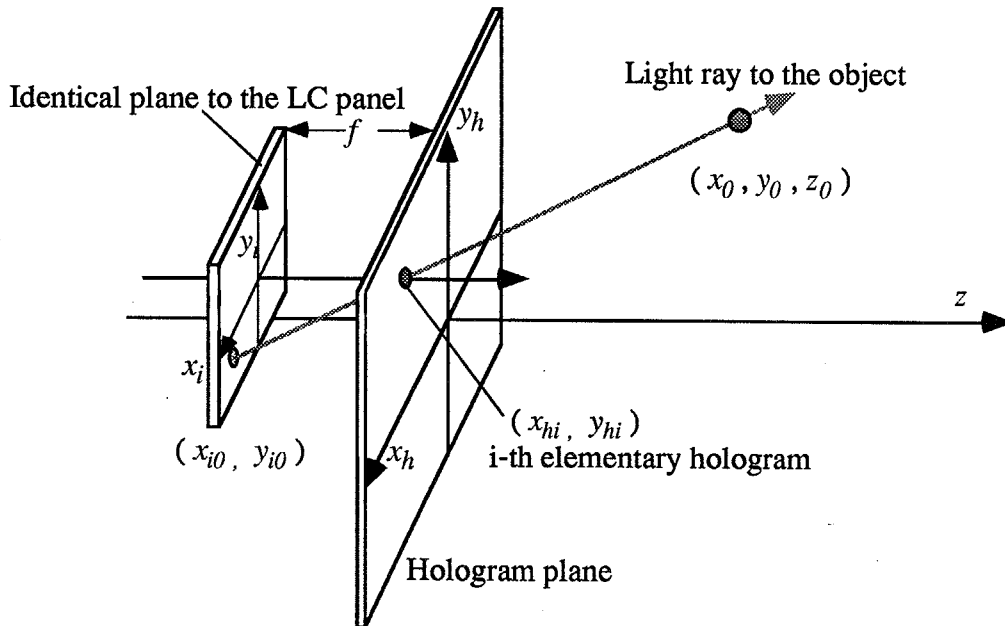


Fig. 3. 4
原画計算の幾何配置

3. 4. 3 露光システム

露光システムはFig. 3. 1に示した光学系と、レーザ光をON/OFFするためのシャッタと、フィルムを移動するためのフィルム送り機構からなる。従来のホログラフィック・ステレオグラムの露光システムでは水平方向の視差のみの記録を行うため、ホログラムフィルムまたはスリットを水平方向に移動して要素ホログラムを露光してゆくのに対し、本手法では水平・垂直方向に移動を行う必要がある。実験ではホログラム乾板をXYステージに固定して2次元的な移動を行った。3. 6節で述べるプロトタイプ装置では、ホログラムフィルムを垂直方向に移動するフィルム送り機構を、水平方向に移動する移動ステージ上に設置して移動を実現した。小型のホログラフィック・3-Dプリンタを実現するためには、半導体レーザなどを用いて光学系を小型化し、光学系の移動とフィルムの送りを組み合わせた移動機構を開発することが望ましい。

光源となるレーザとしては、小型のホログラフィック・3-Dプリンタ装置を考えると半導体レーザの利用が有望である。マルチドット法の光学系ではホログラム面にレーザ光を集光して露光を行うので、レーザ光の利用効率が高く、低出力のレーザを用いても短い露光時間でホログラムの記録を行うことができる。したがって、現在実用化されている可視の半導体レーザを本光学系に適用することは十分可能と思われる。

シャッタとしては、通常のホログラムの露光では機械式シャッタが用いられているが、マルチドット法では露光回数が非常に多いため、機械式シャッタでは寿命が短すぎるという問題がある。実験ではソレノイドを用いた電気制御の機械式シャッタを用いたが、シャッタ速度の高速化に限界がある。ホログラムの露光においては振動が再生像の質に大きく悪影響を及ぼすため、短時間露光によって振動の影響を避ける必要がある。本手法は前述のようにホログラム面に集光して露光する光学系であるため、高速なシャッタを使用すれば短い露光時間でホログラムの記録を行うことができる。3. 6節のプロトタイプでは高速シャッタとして音響光学変調 (AOM) 素子を用いている。AOMは高速な応答特性を持ち振動を発生しないため本目的に適している。また半導体レーザを光源に用いる場合には直接レーザをON/OFFすることでシャッタ機能を実現することも可能である。

8. 2. 1節で述べるように、液晶パネルを透過した物体光を集光するレンズのFナンバーにより再生像を観察できる視域が決まるため、できるだけFナンバーの小さいレンズを用いる必要がある。光軸に平行な平行光を入射して用いるため、軸上の球面収差の影響を抑制しなければならない。3. 4. 5節の実験ではFナンバー0. 63の非球面のコンデンサーレンズを用い、3. 6節で述べるプロトタイプ装置ではFナンバー0. 79の3枚組レンズを使用した。

3. 4. 4 液晶パネルに関する検討

画像処理部で作成した原画列を用いてホログラフィック・ステレオグラムを自動的に合成するためには、画像によりレーザ光を変調するための空間光変調器を用いる必要がある。空間光変調器としてはいくつかの種類のもので研究されており、代表的なものとしては以下に示すデバイスがある [55]。

- (1) 液晶パネル
- (2) 液晶ライトバルブ
- (3) 空間光変調管

このうち、(2)、(3)のデバイスは光書き込み式であるため、画像書き込みのための表示装置を必要とする。(1)の液晶パネルは、電子アドレス方式でビデオ信号などで直接画像を表示でき、扱いも容易である。最近ノート型コンピュータのディスプレイや液晶テレビとして急速に普及しており、またビデオプロジェクタやビデオカメラのビューファインダなどに小型のパネルが利用されている。現在多く用いられている液晶パネルはアクティブ・マトリクス型と単純マトリクス型があるが、コントラストの点でアクティブマトリクス型のものが優れている。最近は強誘電性液晶を用いたデバイスも開発されており、今後本目的にも利用できる可能性がある。

ここではビデオプロジェクタに用いられているアクティブマトリクス型液晶パネルを用いて、ホログラフィック・ステレオグラムの記録への液晶パネルの応用に関して検討した。まず、液晶パネルをレーザ光で照明した際の変調特性の線形性を調べる実験を行った。Table 3. 1に本実験で使用した液晶パネルの仕様を示す。液晶パネルはNTSCビデオ信号を入力端子に持つドライバを用いて駆動しており、パーソナルコンピュータの画像メモリ装置からD/A変換器を介してビデオ信号を入力する。ここでは、

画像メモリにセットした階調値に対する液晶パネルの強度透過率を測定した。Fig. 3. 5に測定結果を示す。ここでは液晶パネル全面に同じ階調値をセットし、透過光を集光してフォトディテクタで透過光強度を測定した。完全に線形ではないが十分階調を表示する能力を持っていることがわかる。また、ここでは使用した偏光板の特性が十分ではないため、コントラスト比は約1:100となっているが、同様の実験で1:1000程度のコントラストが得られることが報告されている[56]。

上記の実験では、液晶パネルを透過したレーザ光を集光して測定しているため、強度変調の均一性に関しては無視している。そこで液晶パネルを透過したレーザ光をレンズにより拡散板に結像させてそのパターンを観察した。液晶パネルの全面が一定の透過率を持つようにビデオ信号を入力し、液晶パネルを透過したレーザ光の写真をFig. 3. 6に示す。写真からわかるように、全体に弱い干渉パターンが観察される。これはガラス板などの表面や裏面での反射光が干渉して発生していると考えられる。この影響については、3. 5節で述べる疑似ランダム位相板により抑制できることが報告されている[56]。

本論文で行った実験では、以下全てTable 3. 1に示した液晶パネルを用いた。

Table 3. 1 実験で用いた液晶パネルの仕様

画素数	340×220画素
サイズ	35mm×24mm
入力信号	NTSCビデオ信号

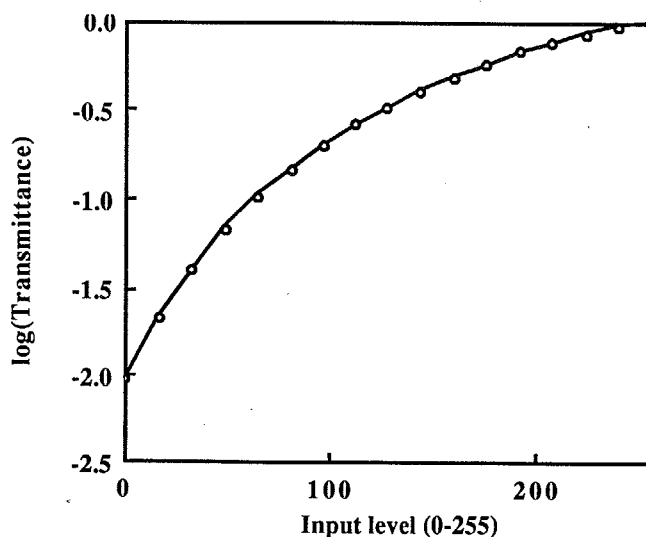


Fig. 3. 5

液晶パネルの階調表示特性

横軸：画像メモリに入力したグレイレベル（0-255）

縦軸：He-Neレーザ光に対する透過率の対数（最大値で規格化した）

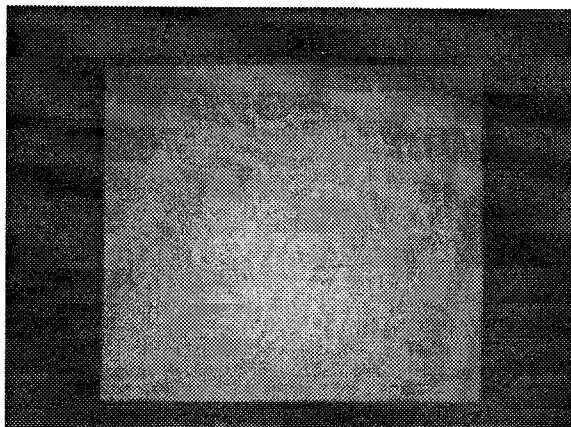


Fig. 3. 6

液晶パネルに全面が透過率最大になる信号を入力し、He-Neレーザを照明した際の投影像。縞状のノイズが観察される。

3. 4. 5 記録材料

現在ホログラムの記録材料として広く用いられているのは銀塩の感光材料である。通常の写真と異なるのは（１）干渉縞を記録するため高解像力が必要、（２）高回折効率を得るためには振幅変調でなく位相変調とすることが要求される、などの点である。またリップマンホログラムを記録するためにはさらに

（３）厚い乳剤層が必要である。銀塩感光材料は現像に湿式の処理を要するが、ホログラフィック・３-Dプリンタをオフィスなどで利用するためには湿式の現像処理は望ましくない。銀塩材料以外では、フォトレジストや重クロム酸ゼラチンなどが用いられているが、現状ではリップマンホログラム用記録材料として手軽に利用することは困難である。現在本目的に対して最も有望な材料は高分子感光材料

（Photopolymer）である〔５７〕。高分子感光材料は、感度の点では銀塩感材にはるかに及ばないが、紫外線露光と加熱処理という乾式の処理でホログラムの現像を行うことができるので、プリンタでの使用に適している。また簡単な処理でカラーの再生像を合成できる可能性がある〔５８〕。感度は銀塩感光材料の $1/1000$ 以下であるため今後その改善が期待される。現状では解像度の点でコピーやレーザプリンタで用いられる電子写真方式は利用できないが、プリンタに適した新しい記録材料および方式の開発が今後の課題といえる。

なお、本研究で行った実験では銀塩感光材料を用いた。

3. 4. 6 実験結果

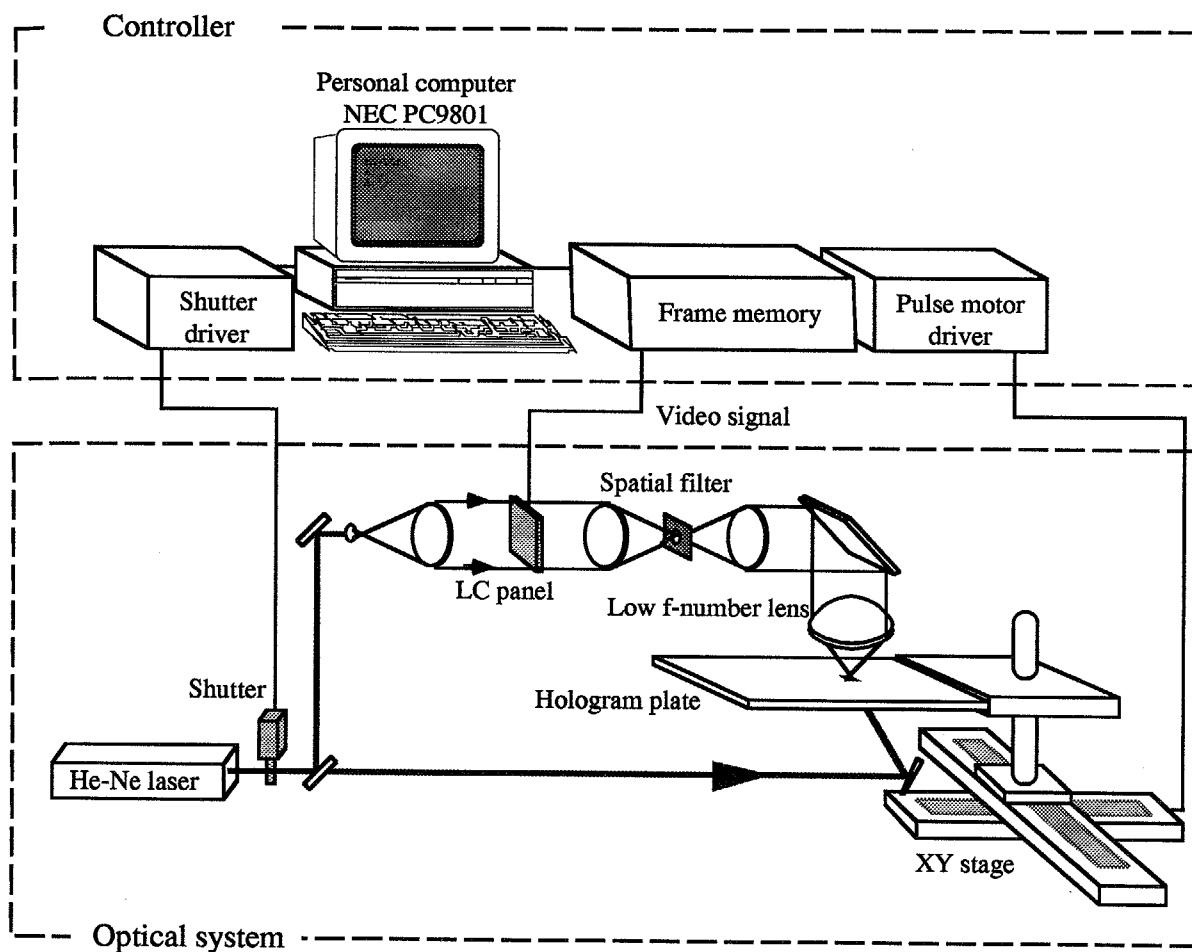
水平・垂直方向の視差を持つホログラフィック・ステレオグラムを合成するマルチドット記録法の基本原理を確認するために、ワイヤーフレームの立体像を合成する実験を行った。実験に使用した光学系をFig. 3. 7に示す。Fig. 3. 1の光学系と異なるのは、液晶パネルの画素構造による回折パターンを取り除くために、フーリエ変換—逆フーリエ変換を行う空間フィルタリング系を用いている点である。空間フィルタリングにより液晶の画素構造を除去した後、Fナンバーの小さいレンズでホログラム面に物体光を集光する。参照光はホログラム面に対して物体光と反対方向から平行な細いビームを入射する。ホログラム乾板はXYパルスステージに固定し、縦横に移動させた。合成システムはパーソナルコンピュータ(PC9801UX)により制御されており、液晶パネルへの画像表示、シャッタの開閉、ステージの移動のシーケンスをソフトウェアにより行った。Fig. 3. 8及びFig. 3. 9に合成光学系の様子を、Fig. 3. 10に制御に用いたパーソナルコンピュータによるコントローラ部の様子を示す。

ホログラムに露光する画像は、ワークステーションを用いてあらかじめ計算し、パーソナルコンピュータのハードディスクにあらかじめ蓄積した。合成の際には、ハードディスクから画像メモリ装置にデータを転送し、画像メモリ装置のD-A変換器でビデオ信号に変換して液晶パネルに画像を表示した。

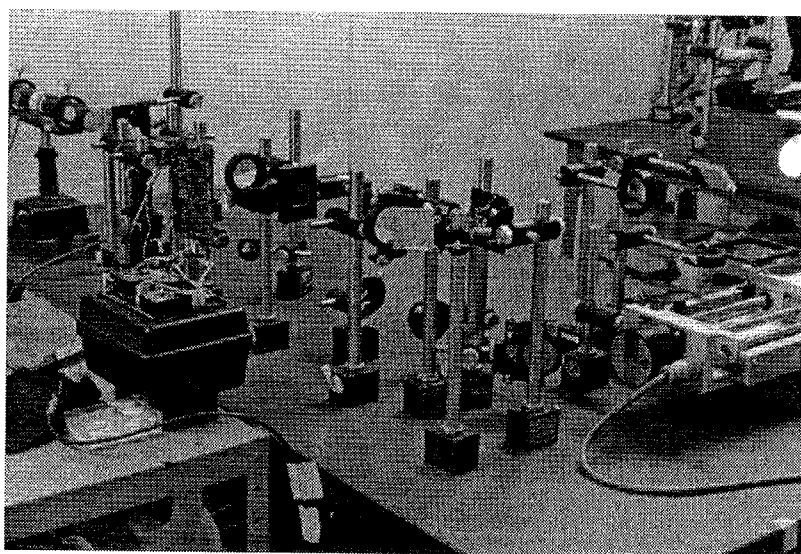
ここではFig. 3. 11に示すような2値のワイヤーフレームの3次元物体をホログラフィック・ステレオグラムとして合成した。Fig. 3. 11は3次元データを異なる4方向に対して平行投影した画像を示したものである。Fig. 3. 11に示した3次元物体から $160 \times 128 = 20480$ 点の要素ホログラムに露光する原画を計算により作成した。Fig. 3. 12に作成した原画の中の4枚を例として示す。この原画はそれぞれ 64×64 画素の画像とした。各要素ホログラムの間隔は0.5 mmであり、ホログラム全体のサイズは80 mm $\times$ 64 mmとなる。

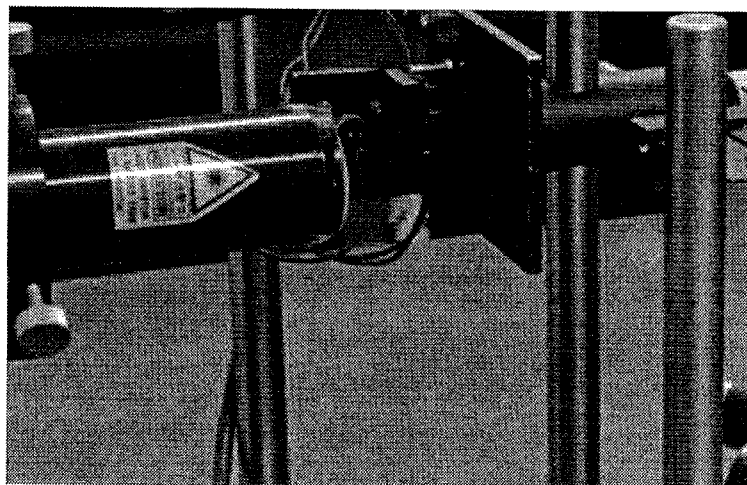
ホログラムの記録には銀塩感材(Agfa 8E75HD)を用い、現像処理には記録時とほぼ同じ波長で再生できるCWC2現像、PBQ2漂白の処理[59]を行った。

合成したホログラムからの再生像をFig. 3. 13に示す。水平・垂直方向に視差があり歪のない立体像が再生できていることがわかる。要素ホログラムの間隔が比較的粗いため、写真ではドットが観察されるが、500 mm以上離れて観察すると、再生像を注視すればほとんど目立たない。

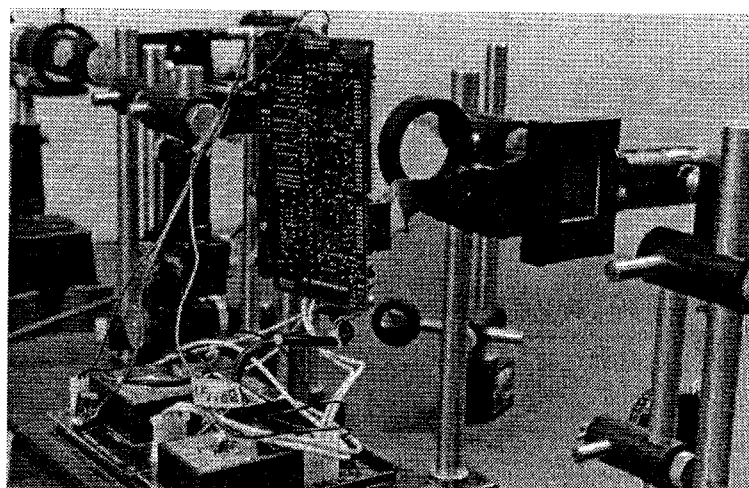


F i g . 3 . 7 実験システム

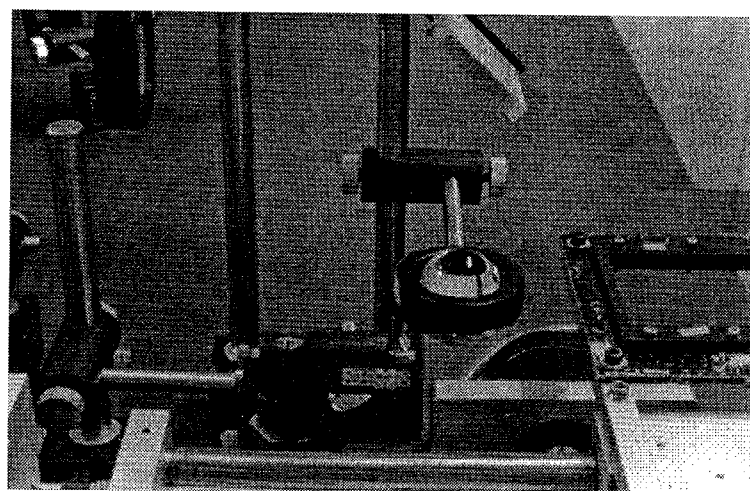
F i g . 3 . 8
合成光学系の写真 (全体)



(a) レーザヘッド及びシャッター

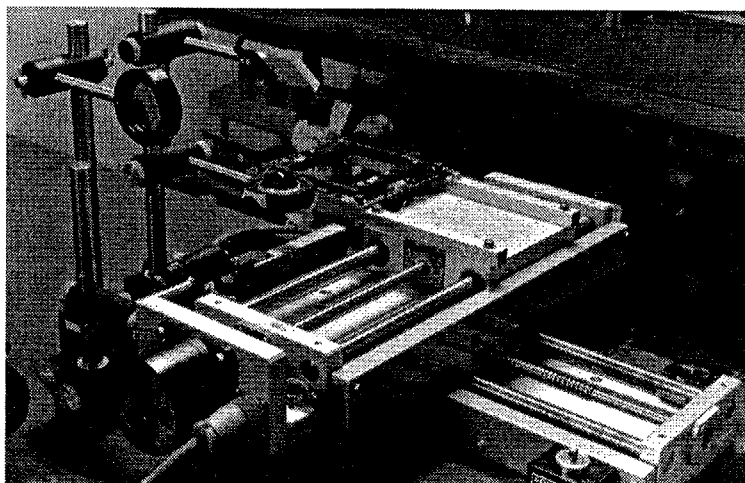


(b) 液晶パネル



(c) 物体光集光レンズ

Fig. 3. 9 合成光学系



(d) XYステージとホログラム乾板ホルダー

Fig. 3. 9 合成光学系

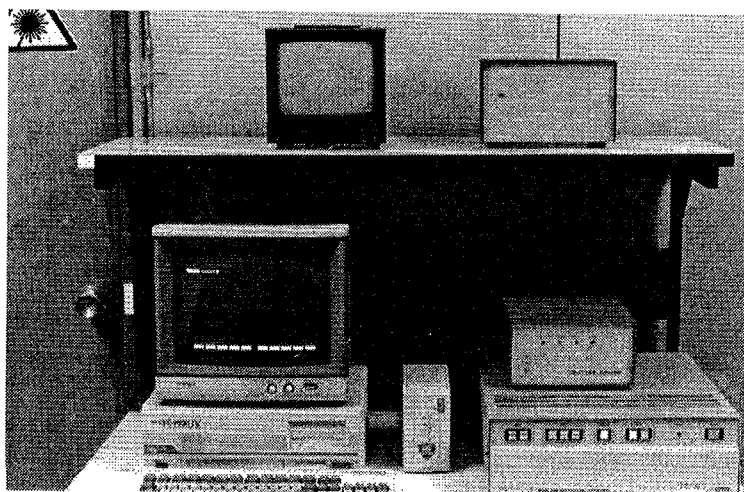


Fig. 3. 10

システムコントローラの写真

3. 4. 7 考察

本節の実験では、水平・垂直方向に視差のあるワイヤーフレームの立体像をマルチドット法によりホログラフィック・ステレオグラムに合成した。その結果、十分に立体感の感じられる再生像を得ることができた。しかし以下に示すような問題点および課題が明らかになった。

(1) 要素ホログラムのドットがアーティファクトとして現れている。

今回の実験では要素ホログラム間隔を0.5 mmとしたが、ホログラム面近くで観察するとホログラム面上のドットが目立つ。要素ホログラムを観察したとき、各要素ホログラムから点光源が観察され、各点

光源の間からは回折光が見えないため、ドット状のアーティファクトとして見える。ホログラム面から離れた再生像を観察する際には、目の焦点がホログラム面からはずれるため比較的ドットは知覚されないが、ホログラム面付近の再生像を観察すると、目の焦点深度内にホログラム面が入るためドットがはっきりと見えるようになる。対策としては、要素ホログラム間の間隔を細かくすることと、要素ホログラムからの再生光にわずかに広がりを持たせることが有効であると思われる。3. 5節では一種の拡散板を用いて要素ホログラムの間隔を小さくし、この問題を解決する方法を述べる。

(2) 合成に長時間を要する。

今回の実験では各要素ホログラムの露光に約9秒を要し、Fig. 3. 13のホログラムの合成に約50時間かった。各露光で最も時間を消費したプロセスは画像データを画像メモリへ転送する処理であった。これは高速の画像メモリ装置を用い、また処理方法を工夫することで短縮できる。合成時間の短縮に関しては3. 7節で議論し、高速化の方法を提案する。

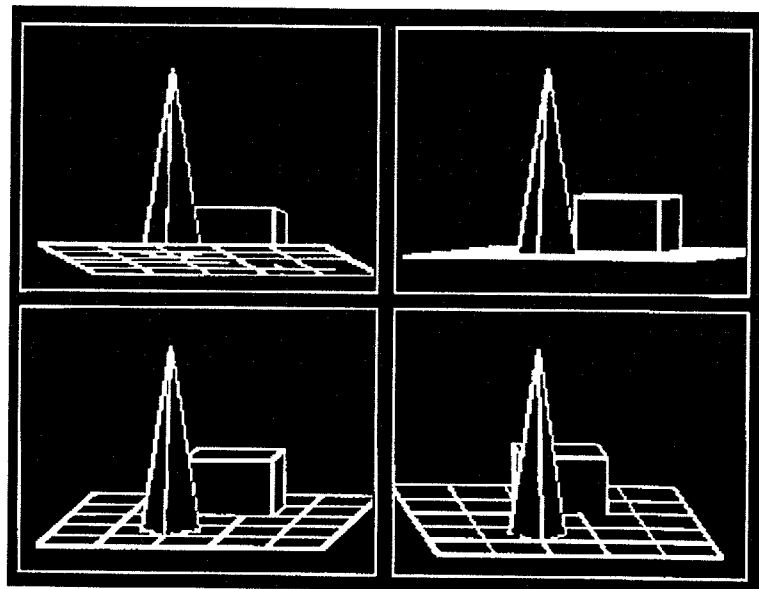


Fig. 3. 11
記録した3次元物体。4方向への平行投影像を示す。

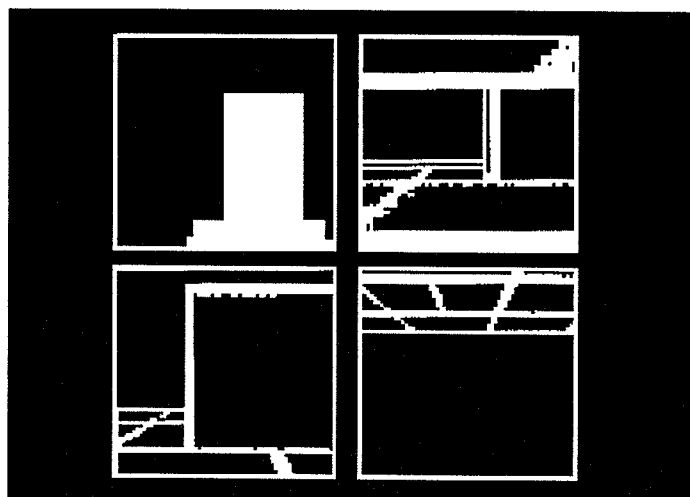


Fig. 3. 12

要素ホログラムに露光する原画パターンの例。160×128枚の原画のうち4枚を例として示す。

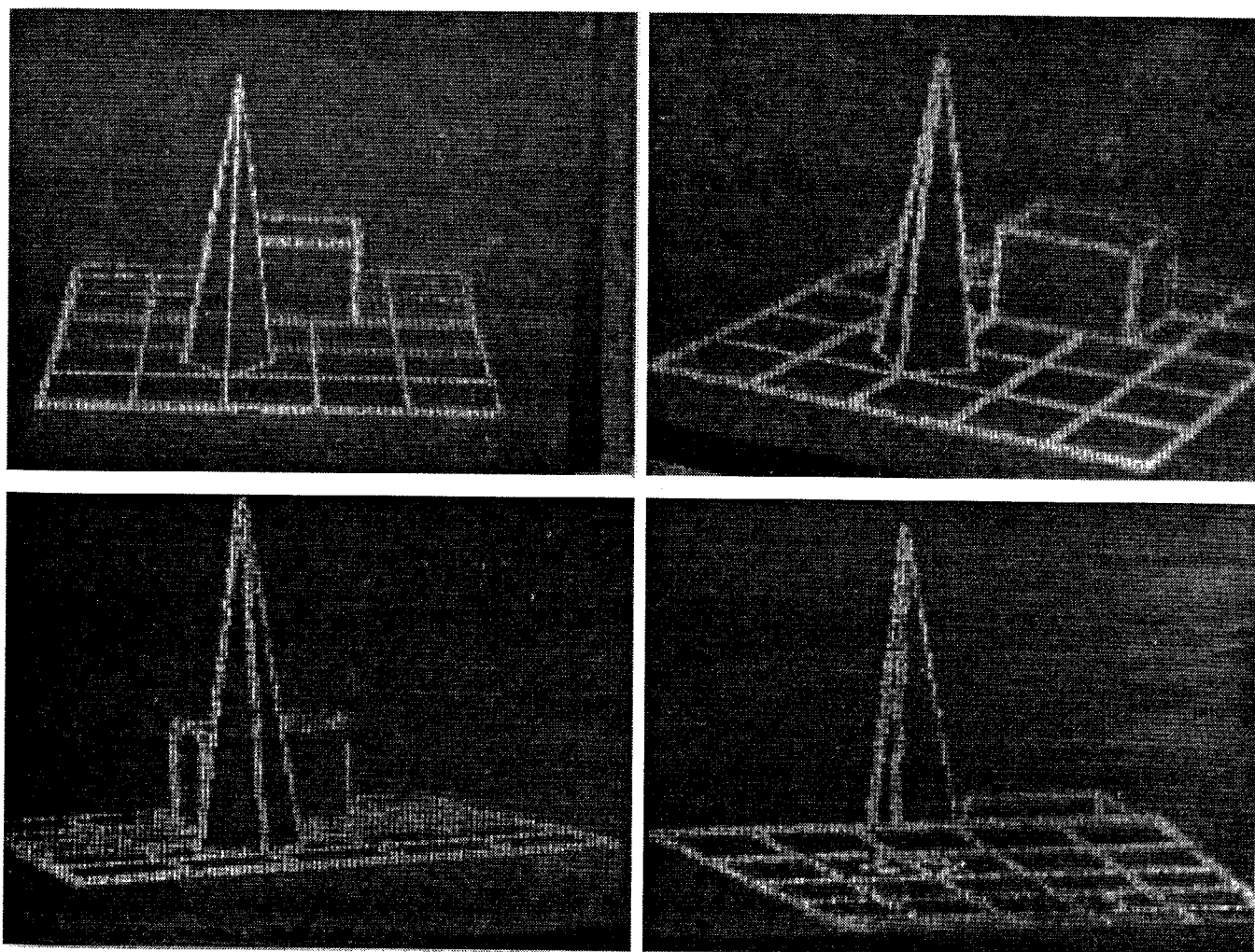


Fig. 3. 13

合成したホログラフィック・ステレオグラムによる再生像

3. 5 デジタル拡散板による画質改善

3. 5. 1 要素ホログラムの高密度化

前節で述べたように、マルチドット方式によりホログラフィック・ステレオグラムを合成すると、要素ホログラムをホログラム面を分割して記録するため、ドット状のアーティファクトが観察される。また、前記の実験では要素ホログラムの間隔を0.5 mmとしていたが、より高解像度の像の表示が望まれる。さらに階調を持った3次元画像の記録を行う手法を確立する必要がある。本節では、これらの問題点を解決する手法として、デジタル拡散板 [56, 60, 61] を本手法によるホログラフィック・ステレオグラムの合成に適用する。

Fig. 3. 1に示した本方式のホログラフィック・ステレオグラムの合成光学系では、物体光を集光して要素ホログラムを撮影するが、このとき実際はホログラムをレンズの焦点面からわずかにデフォーカスして露光する。これは物体光がホログラム面上でできるだけ均一になるようにし、ホログラム感材のダイナミックレンジ内で干涉縞の記録を行うためである。しかし、再生像の解像度を向上するために要素ホログラム間隔を小さくすると、デフォーカスにより物体光が広がりを持つため、複数の要素ホログラムが多重露光される。ホログラムが多重露光されるとやはり感材のダイナミックレンジの制限から回折効率が低下する。そこで多重露光を避けるため、ホログラム面をレンズの焦点面に近づける必要があるが、レンズの焦点面付近で撮影すると高効率のホログラムを記録することは困難である。これは以下のような理由による。

ホログラム面をレンズの焦点面つまりフーリエ変換面において撮影すると、ホログラム面における物体光の強度分布は、液晶パネルに表示した画像の空間周波数成分に依存する。液晶パネルに表示した画像の振幅透過率は3次元物体の投影像であり、一般には低周波成分が支配的である。液晶パネルでは物体光の位相も変調されるが、液晶パネル上の位相分布は振幅分布に依存して決まるため、ほぼ振幅分布と同様の周波数成分を持つ。したがって物体光を変調する画像は振幅・位相とも低周波成分が支配的であり、ホログラム面で物体光はほとんど要素ホログラムの中心付近に集光される。その結果ホログラム面上での物体光は大きな強度分布を持つことになり、ホログラム感材のダイナミックレンジの制約によりフーリエ面における全ての空間周波数成分を効率よくホログラムに記録することは不可能である。さらに階調を持つ画像を記録するためには、干涉縞の振幅が線形的に記録される必要があり、さらに条件は厳しくなる。

ホログラフィックメモリなどの研究では、フーリエ変換ホログラムを記録する際には拡散板を用いたり、物体光にランダムな位相変調を加えることによりこのような問題を解決している。そこで本研究のようなディスプレイの目的にも弱い拡散板を用いてホログラム面上で物体光をできるだけ均一にすることを考える。しかし、拡散板としてスリガラスなどを用いると、物体光の損失が大きくなり、またスペckルノイズが再生像に現れる。ホログラフィックメモリの研究分野でも同様の問題が発生し、これを解決するデバイスとして帯域制限された拡散板が望まれる。

拡散板の大きさは有限であるため、完全に帯域制限された拡散板は実現不可能である。疑似帯域制限

(quasi-band-limited) された拡散板は、そのフーリエスペクトルを均一にして広がりをはできるだけ小さくするように、位相分布を最適化して設計することができる。これは計算機によるデジタル処理を用いて離散的な位相分布を作成するもので、デジタル拡散板と呼ばれる [62]。その設計手法としては、Fienup の位相回復アルゴリズムを用いる手法など、いくつか提案されている。位相分布を記録する方法としては、キノフォームのように厚さの変化を用いる手法やホログラフィックに実現する方法が報告されている。疑似帯域制限された拡散板を用いれば、拡散した光のほぼ全てがホログラムに記録されるため、スペックルの発生を抑制することができる。

そこで本研究では、疑似帯域制限されたデジタル拡散板を用いることで、微小な要素ホログラムを効率よく記録する方法を提案する。Fig. 3. 14 にデジタル拡散板を用いた場合のホログラフィック・ステレオグラム合成光学系を示す。液晶パネルの直前にデジタル拡散板を挿入し、レンズの焦点面でホログラムを撮影する。デジタル拡散板で拡散された光のうち不要な回折光はホログラム面直前の開口で除去する。ホログラム面での物体光の強度分布はほぼ一様になり、効率の高いホログラムを記録することが可能になる。

以下の実験ではデジタル拡散板として、疑似ランダム位相板 [56, 60, 61] を用いた。実験で用いた 4 レベルの疑似ランダム位相板は、 $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ の 4 レベルの位相がほぼランダムに並んでいる。ただしとなりあうセルの間の位相差は $+\pi/2$ か $-\pi/2$ のどちらかとなっている。疑似ランダム位相板はほぼ帯域制限されることが計算機シミュレーション及び実験により示されており、またフーリエ面で用いる開口のサイズについての検討も行われている [60]。

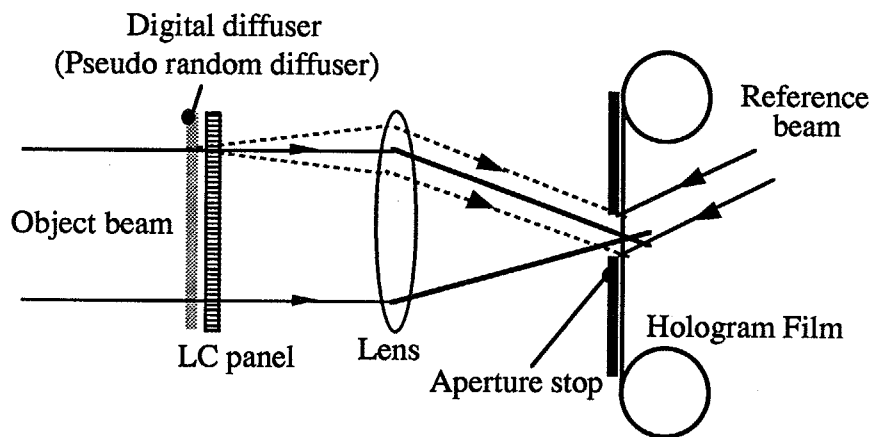


Fig. 3. 14

デジタル拡散板を用いた要素ホログラム露光光学系

3. 5. 2 実験

実験では、疑似ランダム位相板の効果を確認するため、はじめにホログラムによる階調再現特性について調べ、次に高解像度の立体像を表示するホログラフィック・ステレオグラムの合成を行った。

ホログラフィック・ステレオグラムの階調再現特性を調べるため、疑似ランダム位相板を使用した光学系 [Fig. 3. 14] と使用しない光学系 [Fig. 3. 1] でグレイスケールを記録したホログラムを作成した。グレイスケールホログラムは、各要素の間隔が 0.5 mm の $5.0\text{ mm} \times 5.0\text{ mm}$ の複数の要素ホログラムアレイから成り、各アレイには一定の階調値が記録されている。ある階調値の記録された $5.0\text{ mm} \times 5.0\text{ mm}$ の各領域をそれぞれ白色平行光で照明し、再生された光の強度をホログラム面から約 300 mm 離れた位置に置いたフォトディテクタで測定した。再生光強度の測定は、Fig. 3. 15 に示すように、ホログラム面に垂直な方向と、ホログラム面の法線に対して 25° 傾いた方向からフォトディテクタで観測した。フォトディテクタの開口は直径約 4.0 mm であり、Fig. 3. 15 の系は人間がホログラムを観察する場合とほぼ一致している。測定した光強度は、各方向毎に最大値で規格化し、相対的な階調再現性を調べた。Fig. 3. 16 に疑似ランダム位相板を用いた場合と用いない場合についての測定結果を示す。正面から観察した場合には両者の差は少ないが、斜めから観察した場合、疑似ランダム位相板を用いるとコントラストはわずかに劣化するものの階調が表現されているのに対し、疑似ランダム位相板を用いないときはコントラストの反転などが発生し、階調を正しく再現できていない。これは疑似ランダム位相板を用いない場合、レンズの収差や回折の影響により物体光の強度がホログラム面で大きな分布を持っていることによると考えられる。

露光した要素ホログラムからの再生光を拡大して撮影した写真を Fig. 3. 17 に示す。疑似ランダム位相板を用いない場合は各要素ホログラムからの再生光が小さな点状に見えるのに対して、疑似ランダム位相板を用いて露光すると各要素ホログラムからの光は広がりをもって観察される。これは拡散板の効果によるものであり、ホログラムを観察したときにドットを目立ちにくくする効果と、再生像を明るく見せる効果を持つ。ここで疑似ランダム位相板を用いたときの広がり、要素ホログラム間隔よりも小さく、この拡散の効果によるボケは十分小さいと考えられる。

上記の結果を基に、レイトレーシングによるコンピュータグラフィックスの手法を用いて作成した画像から、高解像度のホログラムを作成する実験を行った。各要素ホログラムに露光する画像は 64×64 ピクセルで、 $348 \times 220 = 76,560$ 個の要素ホログラムを記録した。画像の階調は、Fig. 3. 17 の測定結果から、液晶板に表示した輝度レベルとホログラムの再生像の強度との関係のテーブルを作成し、この変換テーブルを用いて線形に再生されるように補正を行った。なお、ここでは16階調をもつ画像を作成して記録した。Fig. 3. 18 に記録したホログラムからの再生像を示す。各要素ホログラムの間隔は 0.3 mm であり、ホログラムの大きさは $104\text{ mm} \times 66\text{ mm}$ となっている。このようにドットはほとんど知覚できず、また階調が良好に再現されるホログラムを作成することができた。これらの実験より疑似ランダム位相板を用いることでスペckルノイズを発生させることなくホログラム面における物体光強度分布を一様にし、要素ホログラムの高密度記録が可能となることを確認した。

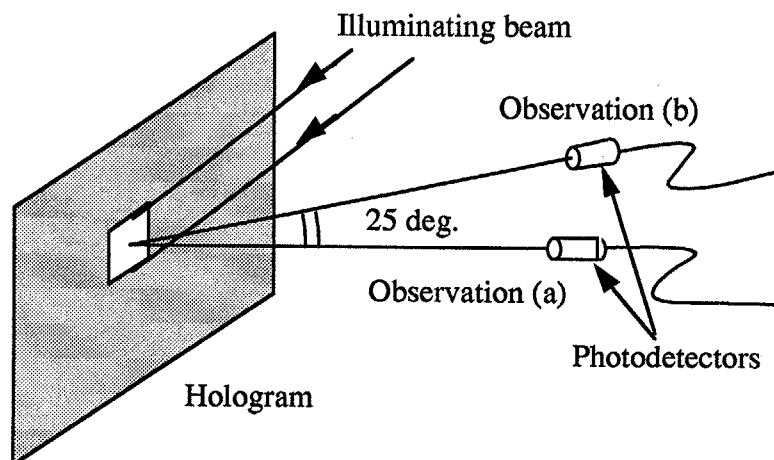


Fig. 3. 15

階調特性測定光学系。Observation (a) と (b) はそれぞれ Fig. 3. 16 の (a) と (b) のグラフにそれぞれ対応する。

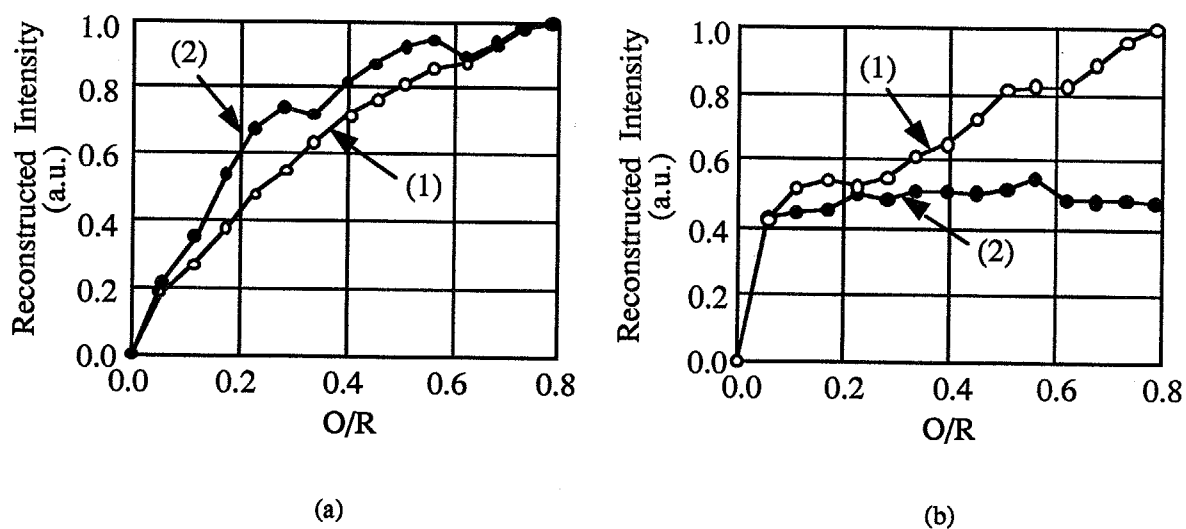


Fig. 3. 16

階調特性の測定結果。(a) 正面から測定した場合。(b) ホログラム面に対して25°傾いた方向から測定した結果。O/R: 物体光/参照光の比。曲線(1)および(2)はそれぞれ疑似ランダム位相板を用いた場合と用いない場合の相対再生光強度を示す。

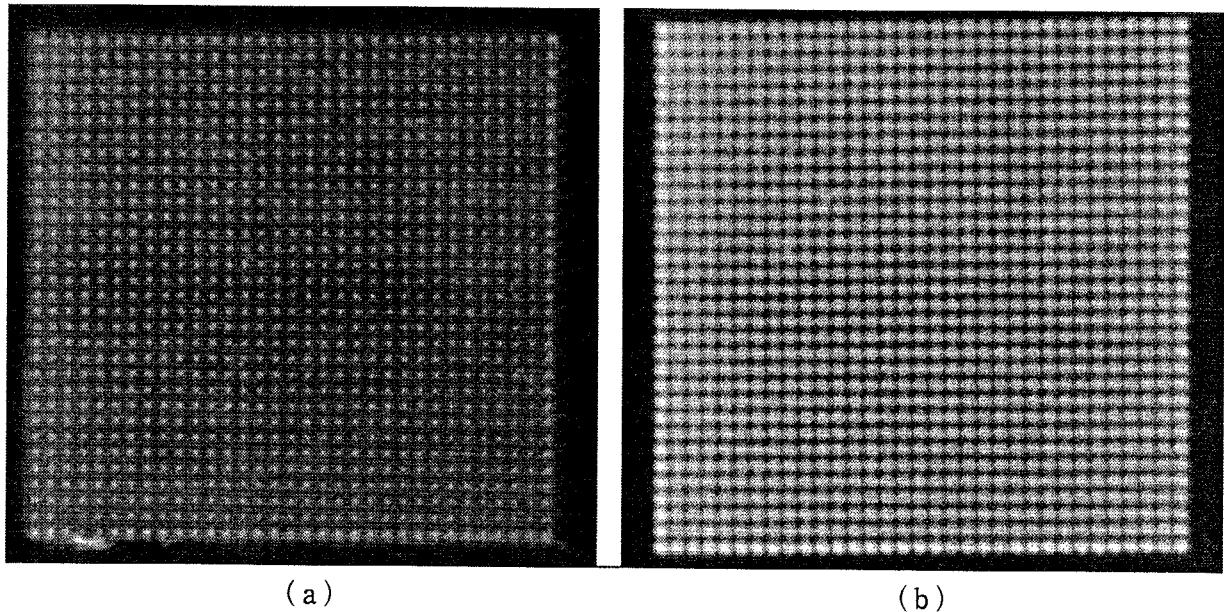


Fig. 3. 17

要素ホログラムからの再生光の拡大写真。明るく見える点が再生された光で、(a)は疑似ランダム位相板を用いない場合、(b)は疑似ランダム位相板を用いて記録した場合の写真である。明らかに(b)で再生光が広がりをもって観察される。

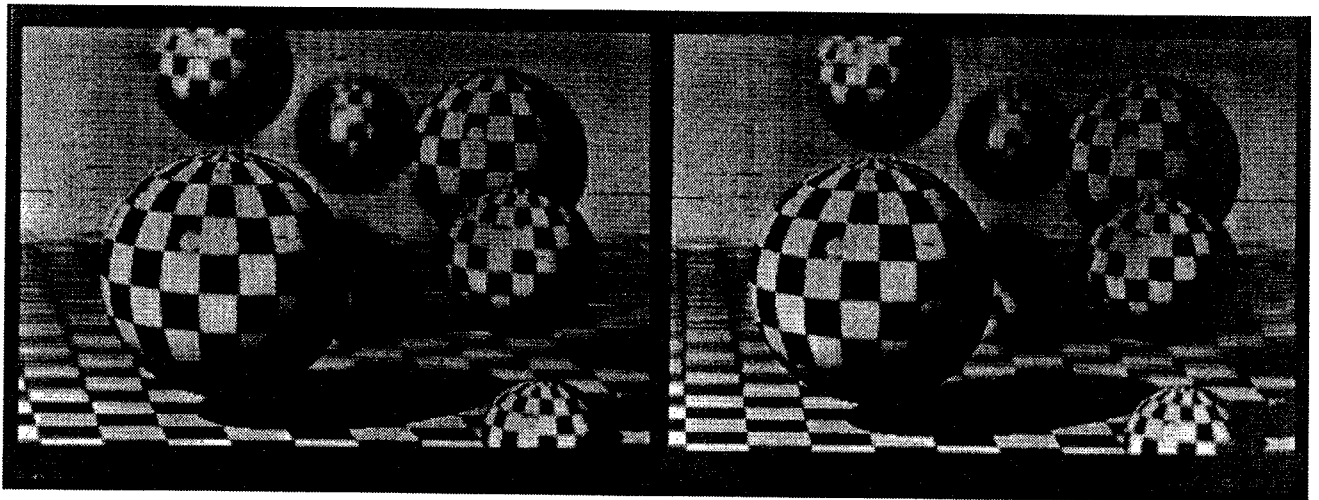


Fig. 3. 18

疑似ランダム位相板を用いて記録した階調を持つホログラフィック・ステレオグラムの再生像
(ステレオ写真)

3. 5. 3 考察

本実験では、液晶パネルの直前に疑似ランダム位相板を用いることにより、ホログラム面での物体光強度を均一にし、線形性のよい高効率なホログラムを合成できることを明らかにした。また、疑似ランダム位相板を用いることで、3. 4. 4節で述べたような液晶パネルによる干渉パターンの発生を抑制できることも報告されており[56]、本目的に対する疑似ランダム位相板の使用は有効と考えられる。ホログラムを記録して測定した階調特性を用いてテーブルを作成し、この変換テーブルにより非線形性を補正する方法により、階調をもつ3次元画像を立体表示することに成功した。

Fig. 3. 18に示す再生像で、画面左側の最も大きな球の再生像をよく観察すると、球の右端の部分において、背景の強度がエッジの部分で強調されたように見える。この球はホログラム面付近に再生されているものである。これは以下のような理由によるものと考えられる。すなわち、このホログラムでは要素ホログラムがわずかながら多重露光されているため、均一な明るさの部分では回折効率が低下している。一方、暗い部分（球の影の部分）と接している要素ホログラムは、暗い部分で物体光がほとんど入射しないため、多重露光による回折効率の低下が抑えられる。殊に、この球の影の部分はホログラム面付近に再生されているため、全ての方向について物体光はほとんどなく、この部分と接している領域の要素ホログラムの回折効率が相対的に高くなり、境界が強調されていると考えられる。この問題を解決するためには、(1) 多重露光を避ける、(2) 画像処理的手法を用いて補正する、などの対策が考えられる。

なお、階調再現特性を計測する実験では、各方向から観測した再生光強度をそれぞれ規格化して評価しており、観察方向を変えた場合に再生像の明るさが変化する問題については考慮していない。実際には両眼で異なる方向から観測することや正確な階調再現を考慮した場合、観察方向毎の特性の違いは問題となる。観測方向に応じてホログラムの干渉縞間隔は異なり、感材のMTF (Modulated Transfer Function) の影響で特性も変化すると考えられるため、厳密には方向による階調再現特性の差についても検証しなければならない。しかし、観察方向毎に正しく階調を再現できれば、一度に観察される画像についてほぼ自然な階調画像を観察することができる。

さらに、この実験で作成したグレイスケールのホログラムは全ての方向について一様な強度の光を再生するものだが、再生光の均一性についての評価は行っていない。これらの問題点を検討するためには、物体光や参照光の均一性の確保や、光学部品の汚れの除去などを十分に行って評価する必要がある。さらに現像処理における再現性なども問題となる。これらの点については今回は行っていないが、ホログラフィック・3-Dプリンタを実用化するには検討を要する課題である。

3. 6 プロトタイプ試作

3. 6. 1 プロトタイプ試作の目的

これまでの実験でマルチドット方式によるホログラフィック・3-Dプリンタの原理とその有効性を確認することができた。しかし実験では、光学定盤上にマグネットスタンドを用いて構成した実験系によりホログラムの合成を行い、またホログラム感材としてはガラス乾板を用いている。デスクトップのホログラフィック・3-Dプリンタを実現するためには、高度な除振装置を用いない通常のオフィスなどの環境で、フィルムに立体像を記録するシステムが望ましい。そこで、本節ではホログラフィック・3-Dプリンタの実用化のための実際的な問題点について検討を行うため、光学系を装置化したプロトタイプの試作を行った。試作により検討を行うべき課題を以下に示す。

(1) フィルムへの記録

これまでの実験ではホログラム感光材料としてガラス乾板を用いてきた。これはXYステージなどへの固定が容易で振動などの影響を受けにくいためである。しかしガラス乾板では割れやすくファイルしたり持ち運んで観察するには不便であり、フィルムを用いることが要求される。フィルムに記録を行うためには、ホログラムフィルムを縦横に移動して露光を行うためのフィルム送り機構を開発する必要がある。また振動の影響を受けやすくなるため、振動による影響などの検討も行う必要がある。

(2) 光学系の耐環境性

ホログラムはサブミクロンの干渉縞を記録するものであるため、露光中のわずかな振動さえも避けなければならない。すでに述べたように従来のホログラム合成システムは専用の暗室内の精密な除振装置を持つ定盤上で実現されている。しかしプリンタとして用いるためには、デスクトップのような通常のオフィスなどの環境でホログラムの記録を行う必要がある。ホログラフィック・3-Dプリンタは露光する面積が小さく露光時間が短いため、振動に強い特徴を持っているが、耐環境性について実験的に検討する。

(3) 合成時間

マルチドット方式による記録では、膨大な数の要素ホログラムを記録するため合成に長時間を要する。合成時間を短縮するためには、フィルムの移動に要する時間や露光時間および振動の影響を抑えるための待ち時間などの短縮が必要である。これらの時間は装置の構成に大きく依存するため、試作したプリンタシステムを用いて実際の装置における限界を検討する。

以下に試作を行った装置の構成と、プロトタイプを用いて行った実験の結果を示す。

3. 6. 2 構成

試作を行ったプロトタイプは、Fig. 3. 19に示す光学系と、合成システムを制御するコントローラからなる。ここでは計算時間などの問題から、3次元データからの原画計算はワークステーションなど他の装置で行い、計算した画像列を本システムに入力してホログラムを合成する。Fig. 3. 20に制作したプロトタイプ装置の外観を示す。光学系を組み込んだ装置のサイズは、840 mm×500 mm×450 mmである。以下に本装置の各部の構成について説明する。

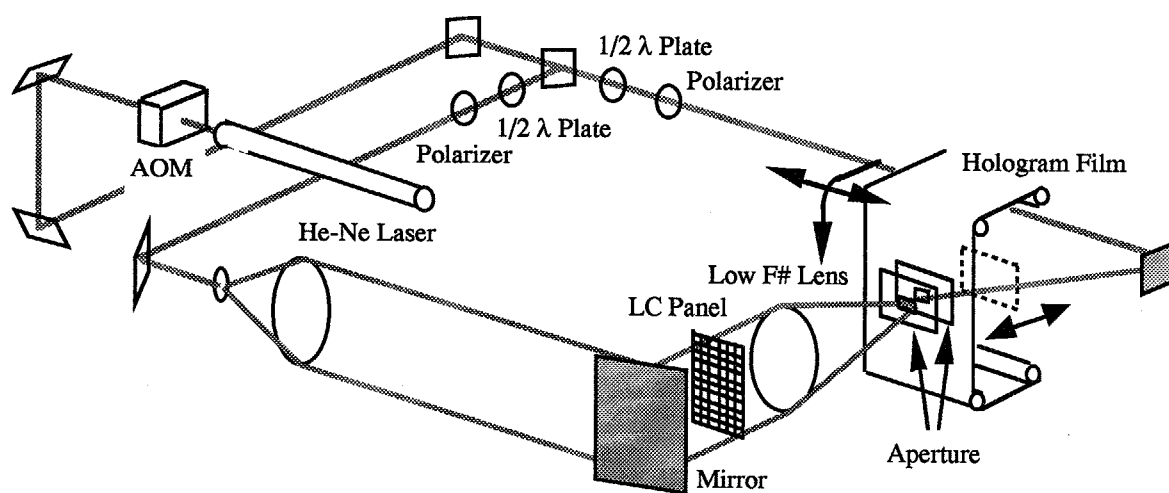


Fig. 3. 19
本システムの光学系

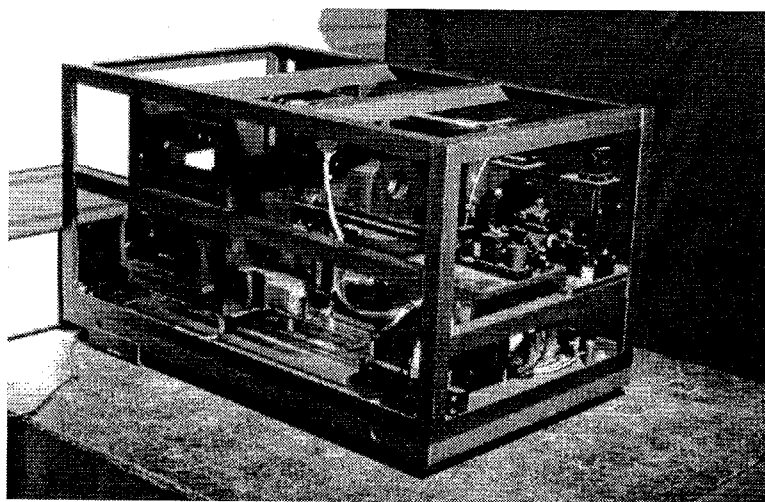


Fig. 3. 20
プロトタイプ装置の外観

(1) 光学系

光学系はFig. 3. 19に示す構成となっている。光源としては出力20mWで波長632.8nmのHe-Neレーザを用いた。物体光と参照光の光量比と偏光方向を調節するため、物体光と参照光それぞれに半波長板と偏光板を用いている。液晶パネルは旋光性を利用して光の振幅変調を行うため、半波長板と偏光板によって入射するレーザ光の偏光方向を調整する。シャッタ、液晶パネル、物体光集光用レンズ、ホログラムフィルム送り機構については以下に述べる。

(2) シャッタ

これまでの実験システムでは、シャッタとして機械式シャッタを用いていた。開閉回数が非常に多いため寿命の長いものを用いたが、パルスによるシャッタの開閉において10msec以下のパルスではシャッタが反応しないという問題点があり、高速な露光が困難であった。加えて機械式シャッタでは、シャッタ羽の動作により振動が発生し、ホログラム露光に悪影響を及ぼす可能性がある。

以上の理由によりここでは電子式シャッタとして、音響光学変調素子(AOM: Acousto-Optical Modulator)を用いた。電子式シャッタとしては、液晶を用いたものなども市販されているが、消光比が小さいためホログラムフィルムにかぶりを生じる危険がある。AOMを用いたシャッタは、AOMに高周波をかけた場合の回折光を用いるため、OFF時には透過光はほとんど発生しない。AOMは機械式シャッタと比較して小型であり、ON/OFF時に振動を生じない。また高速な応答特性を持ち、 μ secのシャッタ速度も十分可能である。シャッタとしてAOMを用いる場合には、1次回折光のみを透過するピンホールを置き、0次光をカットする。ここでは633nm用、回折角14.6mrad、開口サイズ1mm ϕ 、最大回折光率85%の仕様を持つAOM(HOYA A-100-633)を用いた。

(3) 液晶パネル

本システムでは、空間光変調器としてはこれまでの実験と同一性能を持つ液晶パネルを用いた。ツイストネマティック型液晶を用いたもので、直線偏光で照明し、アナライザをパネル直後に置くことで振幅変調を行う。この液晶パネルはビデオプロジェクタに用いられているもので、ビデオ信号によるドライバ回路とともに装置に組み込まれている。したがって装置に対してはビデオ信号として画像を入力する。

(4) 物体光集光レンズ

再生像を観察できる範囲(視域)を十分広くするためには、液晶により振幅変調された物体光をホログラム面に集光するレンズとして、Fナンバーの小さいレンズを用いる必要がある。このレンズは一種のフーリエ変換レンズであり、入射光は軸上の平行光に限られるため、基本的には軸上の球面収差が消されたレンズを用いる。ここでは、Table 3. 2のような3枚構成のレンズを用いており、この構成で収差はホログラムの露光にはほとんど影響しないと考えられる。

Table 3.2 フーリエ変換レンズの仕様

設計波長	632.8 nm
レンズ構成	3枚
焦点距離	26.0 mm
有効径	$\phi 33.0$ mm
Fナンバー	0.79
スポット径	20 μ m以下

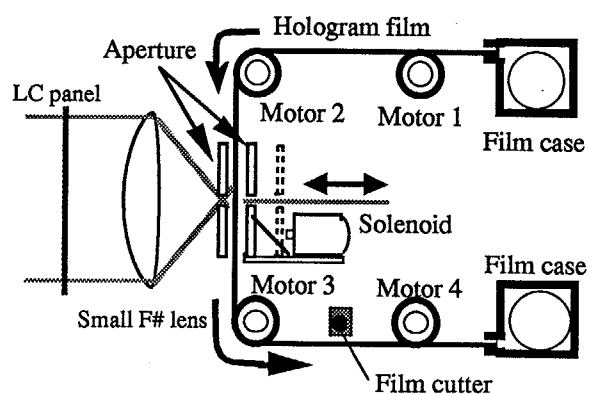
(5) フィルム送り機構

本手法では、要素ホログラムを2次的に並べて露光する必要があるため、ホログラムフィルムをレーザ光学系に対して2次的に走査する機構を用いる。ここで試作したシステムでは、Fig. 3.21に示すように、ホログラムフィルムを垂直方向に移動するフィルム送り装置を移動ステージ上に配置し、移動ステージにより水平方向の移動を行った。なお、光学系を水平方向に移動し、フィルムを垂直方向に移動するような構成も考えられるが、今回はHe-Neレーザを用いており光学系が比較的大きいため、フィルム送り装置を移動する構成を採用した。垂直方向のフィルム送りには4個のパルスモータと2個のフィルム位置検出センサを用いており、フィルムのロードから排出までをほぼ全自動的に行うことができる。

露光中のフィルムの振動を抑制するために、フィルムの露光する部分は0.3 mm角の正方形の開口のある板で両側から抑えられる。この開口は、要素ホログラムのサイズと一致しており、液晶パネルの画素構造による回折パターンを取り除く役割も果たしている。またこの開口板はソレノイドにより前後に移動でき、フィルム挿入時や高速に移動する際にはこの開口をホログラムフィルムから離すことができる。

全てのモータやソレノイドはコントローラからのパルス信号により制御され、フィルムのロード、要素ホログラムの露光、フィルムの巻き取りを自動的に行う。なお、フィルムの切断は今回は自動的に行うことが困難であったため、手動で切断するカッターをフィルム送り部の下側に設置している。

Fig. 3.21
プロトタイプフィルム送り機構



(6) ホログラム記録感材

今回の実験の大きな目的は、ホログラム記録感材としてフィルムを用いることである。ここでは幅70mmのロールフィルムを用いる仕様とした。今回の実験では銀塩のホログラム用フィルム (Agfa 8E75HDおよびIlford HOTECH-R) を用いており、露光後に湿式現像処理を行う必要があるが、ホログラム用高分子感光材料の使用も可能な構成になっている。高分子感光材料では、紫外線照射と加熱処理だけで現像を行うことができるため、ホログラフィック・3-Dプリンタの実用化には有望な材料である。現状では感度が低いことが問題点である。

Fig. 3. 21のフィルム送り装置を用いているため、フィルムケースにロールフィルムをセットすれば、フィルムは自動的にロードされ、また露光済みのフィルムは下側のフィルムケースに収納される。現像処理はこの下側のフィルムケースを本体から外して行う。このようにほとんど全ての作業を明室で行うことができる。

(7) コントローラ

上記のシステムの制御はパーソナルコンピュータ (NEC PC9801FS) によりソフトウェアを用いて行われる。パーソナルコンピュータにはパルスモータコントローラおよび汎用I/O入出力インターフェースを接続し、これらにより5個のパルスモータとAOMシャッタおよびソレノイドなどを制御する。各モータなどの動作タイミングは、フィルムの位置を検出するセンサからの信号を用いて決定する。Fig. 3. 22にフィルムのロードからホログラム合成および排出までのフローチャートを示す。

ホログラムに露光する画像は、外部よりビデオ信号で入力する。ワークステーションなどであらかじめ計算した画像はハードディスクかビデオディスクなどに蓄積する。パーソナルコンピュータには画像メモリ装置を接続しており、ハードディスクを用いる場合には液晶に表示する画像をハードディスクから画像メモリ装置に順次転送し、D/A変換されたビデオ信号を液晶パネルに入力する。また、アナログビデオディスクに画像を記録する場合には、パーソナルコンピュータのRS232Cインターフェースを用いて制御を行って露光する画像を液晶パネルに表示する。

ここでは光学系の横にパーソナルコンピュータを設置して制御を行っているが、全ての調整が完了すれば、特にパーソナルコンピュータに対してキーボード操作することなくホログラムの合成を行うことも可能である。ここでは実験をフレキシブルに行うため、全てパーソナルコンピュータを用いて制御を行った。

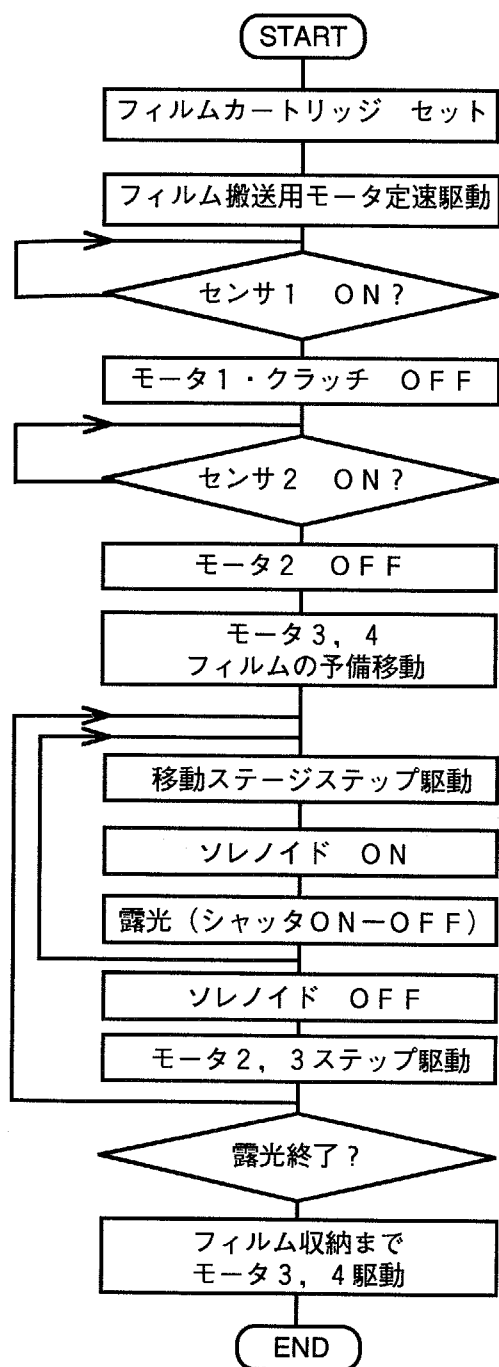
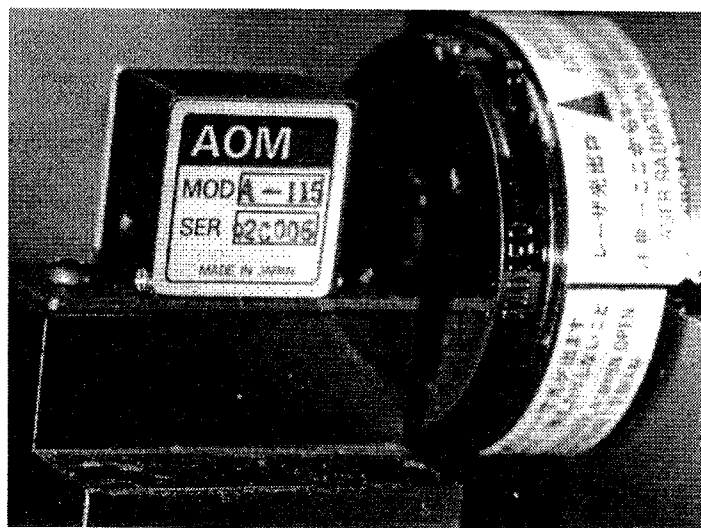
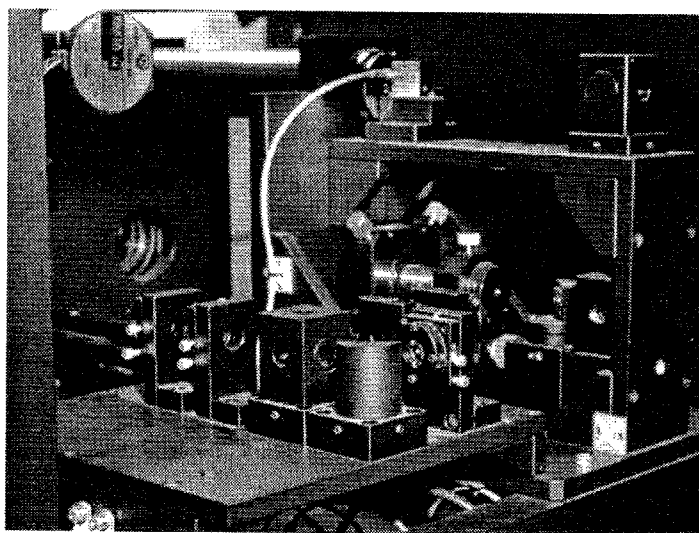


Fig. 3.22
モータ駆動のフローチャート
モータ1～4はFig. 3.21の
各モータを示す



(a)



(b)

Fig. 3.23
プロトタイプ装置の写真
(a) AOMによるシャッタ
(b) 光学系

3. 6. 3 実験および考察

本プロトタイプ装置の基本動作を確認するための実験を行った。ここでは要素ホログラム間隔0.3 mで $340 \times 200 = 68000$ 個の要素ホログラムからなるホログラフィック・ステレオグラムを合成した。Fig. 3. 24に再生像を示す。ホログラムのサイズは $102 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ で、各要素ホログラムに露光した原画は 64×64 画素の画像である。なおここで用いた画像は3. 5節で用いた原画と同じものであるが、液晶パネルの階調表示特性を本システムで改めて測定して補正を行った。

単一の要素ホログラムを露光するのに要する露光時間は28 msecであり、これは3. 5節の実験とほぼ同じ値である。3. 5節の実験では出力35 mWのレーザを用いており、本システムで20 mW出力のレーザで同等の光量を得ることができたのは、光学系を装置化することで損失を抑制できたためと考えられる。

要素ホログラムを連続して露光する際に、フィルムの移動による振動の影響を低減するため、フィルム移動の後、露光の前に待ち時間を設ける必要がある。ここでは待ち時間を変化させてホログラムの撮影を行い、要素ホログラムの明るさが劣化しない最短の待ち時間を実験的に求めた。今回の実験では最短の待ち時間は300 msecとなり、これは以前の光学系の約1/5となった。

また、本装置の外部の環境に対する安定性を調べるため、装置を設置した除振台の空気バネの空気を抜いた状態でホログラムの合成を行い、空気バネがある場合との比較を行った。空気を抜いて合成する際には前述の待ち時間を20%程度長くする必要があった。しかし合成されたホログラムの回折効率ほぼ同等のものが得られ、本手法によるホログラフィック・3-Dプリンタが外部の振動に対して比較的安定であることを実験的に確認することができた。

本実験により、コンピュータの3次元画像データから自動的に立体像を出力するホログラフィック・3-Dプリンタの実現可能性を実証できた。

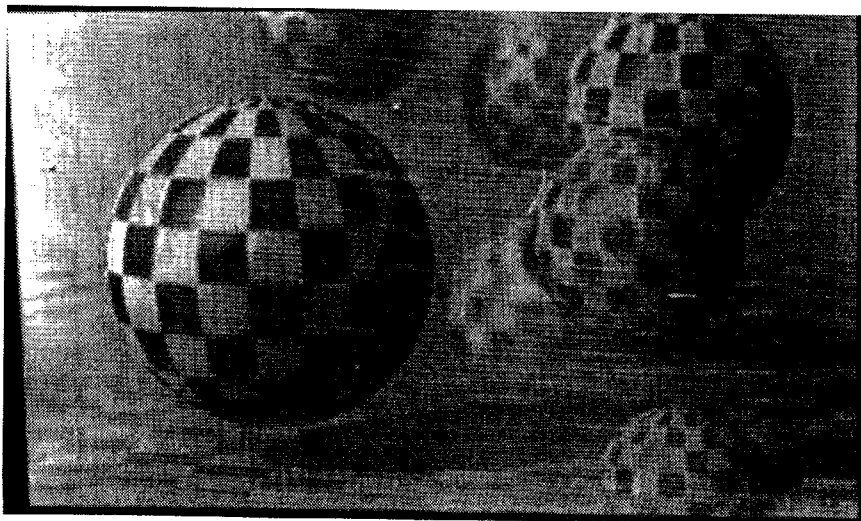


Fig. 3. 24
プロトタイプを用いて合成したホログラムからの再生像

3. 7 高速化

3. 7. 1 高速化のための検討

マルチドット法によるホログラフィック・3-Dプリンタの最大の問題点は、合成に時間がかかる点である。3. 4. 6節の実験では $160 \times 128 = 20480$ 個の要素からなるホログラムの合成に約50時間を要した。実用的なホログラフィック・3-Dプリンタを実現するためには合成時間の短縮が最大の課題である。合成時間の短縮を図るためには、(1)各露光にかかる時間を短縮し、(2)露光回数を削減する必要がある。本節では一回の露光に要する時間の短縮に関する検討結果を示し、次節で並列露光により露光回数を削減する手法を述べる。

一回の露光は、シャッタの開閉、ステージの移動、画像を液晶パネルに表示、振動の影響を避けるための待ち時間、の各プロセスからなる。Table 3. 3に実験で各プロセスに要した時間を示す。Table 3. 3から明らかなように、現状では画像の表示と待ち時間が合成時間の大部分を占めている。露光する画像を磁気ディスクから画像メモリ装置を介して液晶パネルに表示すると画像の転送に時間がかかるため、3. 5節の実験では、計算した画像をアナログビデオディスクに記録し、ビデオディスクをコマ送り再生して画像の表示を行った。ビデオディスクにおけるアクセス時間は、0. 1~0. 7 secだが、実験では画像の記録順などの最適化が不十分で平均約1. 5 secを要した。ビデオディスクを用いればビデオレートの数倍の時間で画像を入れ替えることも可能である。3. 5節の実験では一回の露光に要する時間を平均1. 7 secに短縮できたが、 $340 \times 225 = 76500$ 個の要素ホログラムの露光を行ったため合成時間は全体で36時間10分となった。なお、ビデオディスクを用いると計算した画像データをビデオディスクに記録するプロセスも必要となるので、計算機上のメモリから直接液晶パネルに表示して露光することが望ましい。画像メモリとして複数ページ持つメモリを用い、ページの切り替えで画像を表示できれば例えばステージの移動中などにデータの転送を同時に行うことができ、これらの対策により、基本的にはビデオレート(1/30 s)の数倍程度の時間に短縮することが可能と考えられる。

画像データの転送を高速化すると光学系の振動の影響を除去するための待ち時間が問題となる。待ち時間を短縮するためには、光学系の安定性を向上することと露光時間を短くすることが必要である。3. 5節の実験系で待ち時間を変化させて要素ホログラムの露光を行ったところ、待ち時間を約1. 5 s以下するとホログラムの回折効率が低下した。試作したプロトタイプでは光学系を装置化することで安定性が向上し、最短の待ち時間は300 msecとなり、約1/5に短縮することができた。

以上の検討より、現状でも各要素ホログラムの露光に要する時間は0. 5 sec程度まで短縮できることがわかる。さらに露光時間を短くできれば待ち時間を短縮でき、各要素ホログラムあたり0. 1~0. 2 secで露光することは可能になると考えられる。

3次元画像データから露光する画像を計算するプロセスの高速化も重要な課題である。コンピュータ・グラフィックスの計算であり既存のハード/ソフトウェアの活用が可能だが、計算する画像枚数が非常に多く現状では膨大な時間がかかる。3-Dプリンタの出力時間の短縮にはこの点も重要な問題である。

Table 3.3 各要素ホログラムの露光のプロセスに要する時間

プロセス	実験で要した時間
画像データ転送	4～8 s (ハードディスクと画像メモリ使用時) 0.1～1.5 s (ビデオディスク使用時)
ステージの移動	約100 ms
露光	10～50 ms
待ち時間	約1.5 s (定盤上の実験系) 約300 ms (プロトタイプ) (ただし画像データ転送時間に含めることも可能)

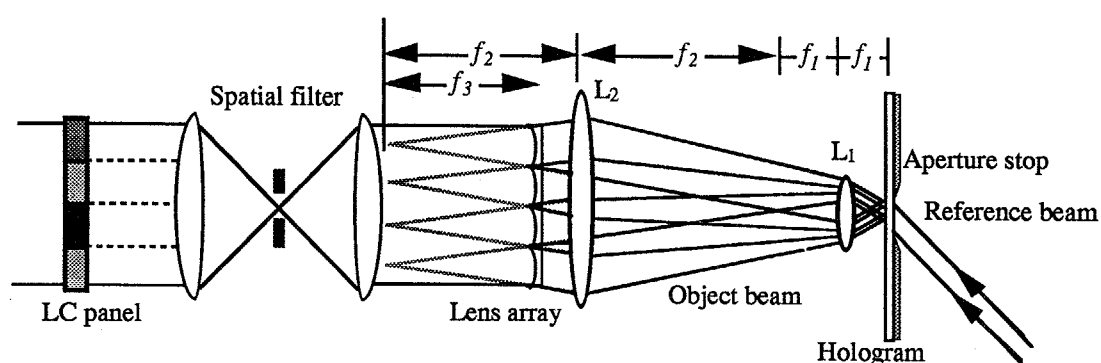


Fig. 3.25

並列露光光学系。 f_1, f_2, f_3 はそれぞれレンズ L_1, L_2 および凹レンズアレイの焦点距離である。

3.7.2 並列露光光学系

ホログラフィック・3-Dプリンタにおいて、再生像の持つ分解能は、物体がホログラム面に比較的近いときには要素ホログラムの数によりほぼ決定される。視差方向数は空間分解能への影響は比較的小さく、これまでの実験結果から、100方向以下でもある程度満足な画像を得ることができる。一方、画像を表示する液晶パネルの解像度は向上し、現在では画素数で500×500から1000×1000画素程度のは既に実用化されている。そこで液晶パネル上を分割し、複数の要素ホログラムに露光する画像を同時に表示して記録することで並列露光を実現する。並列露光の光学系としては複数の光学ヘッドを用いる方法も考えられ、本論文で提案する手法と併用することも可能である。ここでは単一の光学ヘッドで複数の要素ホログラムを同時に露光する光学系について検討を行う。

この並列露光のための光学系に必要とされる条件としては、以下の3点が挙げられる。

- (1) 安定性を損なわない。
- (2) 小型である。
- (3) 十分な視域を得るため、F数が小さい。

これらの条件を満足し、本目的に適した方法として、Fig. 3. 25に示すような光学系を開発した。液晶パネルには複数の要素ホログラムに露光する画像を同時に表示し、各画像はレンズアレイにより複数の要素ホログラムに露光される。ここでは光学系を小型にするためレンズアレイとして凹レンズを用いている。また、隣接した要素ホログラムを同時に露光する光学系であるので、ホログラムフィルムの固定が容易であり、安定性が保たれている。Fig. 3. 25の光学系では、フーリエ変換光学系を用いて液晶パネルの画素構造の影響を除去した後、レンズアレイによって各要素ホログラムに露光する光線に分割される。これを縮小光学系によりホログラム面の微少な領域に集光し、隣接した複数の要素ホログラムの露光を同時に行う。参照光には従来の光学系よりも太いビームを用いる必要があるが、例えば 4×4 個程度の要素ホログラムを並列に露光する場合には露光される面積は約 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 角であり、露光時間や振動の影響は従来の光学系とあまり変わらないと考えられる。

隣接する複数の要素ホログラムに並列に露光する物体光を生成するため、縮小光学系としてアフォーカル系を用いてレンズアレイからの波面を相似縮小する。縮小光学系の入射側のレンズの前側焦点面は、凹レンズアレイの後側焦点面と一致しており、物体光がホログラム面で要素ホログラム間隔で並び、複数の要素ホログラムが同時に露光される。

合成されたホログラムを観察できる領域（視域）は、要素ホログラムに露光される物体光のF数により決定される。F数が小さければより広い範囲で立体像を観察できる。Fig. 3. 25の光学系では、レンズアレイにより分割された波面が縮小光学系により縮小されるため、F数も縮小率に従って縮小される。光学系の縮小倍率を $1/M$ とし、レンズアレイに用いる各凹レンズのF数を F_o とすると、ホログラムに露光される物体光のF数は $F_o = -F_o/M$ で与えられる。当然ながら縮小光学系の射出側のレンズのF数は F_o よりも小さくなければならない。

3. 7. 3 レンズアレイの作成精度の影響

この光学系においては、レンズアレイの作成精度が不十分な場合、再生像に劣化を生じる。再生像に劣化を生じる原因としては主に以下の問題点が考えられる。

- (1) レンズアレイの光軸が正しい格子状に並んでいない。
- (2) レンズアレイの各レンズの傾きなどによる収差。
- (3) 縮小光学系の収差。

このうち、特に(1)の原因が大きいと考えられるので、ここではレンズアレイの各レンズの光軸のずれの影響について簡単に述べる。各レンズの光軸が正しく格子状に並んでいれば、液晶パネルに表示された画像が各要素ホログラムに正しく記録されるが、光軸がこの格子からずれた場合には記録される光線の方法が変わることになる。そこで、レンズアレイを構成する一つのレンズの光軸が Δx ずれた場合について、再生される光線の方法のずれ $\Delta\phi$ を求める。簡単のため1次元で考え、一つの凹レンズの幅を D とすると、幾何学的関係から

$$\Delta\phi = \frac{\Delta x}{F_o D} \quad (3. 1)$$

となる。各レンズごとに光線の方向にずれを生じると、要素ホログラムごとに再生される光線の方向がずれるため、再生される光線の角度方向の分解能が劣化し、その結果、ホログラム面から離れた位置の再生像にボケを生じる。一方、記録される光線の角度分解能は、液晶に表示する画像のうち一つのレンズに入射する部分の画素数により制限される。例えばホログラムに記録する視差方向数が N のとき、再生光線の角度分解能 $\Delta\phi$ は $1/(NF_0)$ である。したがって N 方向の視差情報の記録を行う場合、レンズアレイの光軸のずれによる角度分解能の劣化は $\Delta\phi$ よりも小さくなければならない。この関係より、レンズアレイの並びの精度は

$$\Delta x/D < 1/N \quad (3.2)$$

を満たしている必要がある。例えば64方向の視差情報を記録する場合、凹レンズの幅が6.0mmであれば $\Delta x > 94\mu\text{m}$ となるが、これは十分実現可能な値であると考えられる。

3.7.4 実験結果および考察

実験では、レンズアレイとして6mm×6mmの凹レンズを4×3枚配列したもの [Fig. 3.26] を用い、縮小比が1/20の縮小光学系 [Fig. 3.27] により、一回の露光で2.4mm×1.8mmの領域に12個のホログラムを同時に撮影する。ホログラム乾板はXYステージに設置されており、一回の露光で12個の要素ホログラムを記録した後、ステージにより次の露光位置に移動される。この光学系により、76160個の要素ホログラムから構成されるホログラムを作製した。Fig. 3.28に再生像の写真を示す。ホログラムの大きさは約102mm×67mmであり、340×224個の要素ホログラムから成っている。各要素ホログラムの間隔は水平・垂直方向とも0.3mmである。Fig. 3.28の再生像では、並列露光を行った各ブロックの端に位置する要素ホログラムが、多重露光の影響により回折効率が低下しておりアーティファクトとなっているが、歪みのない立体像が再生されている。光学系において参照光に適用している開口を現在よりホログラム面に近接した位置に置くことで多重露光を避ける必要があるが、前節で述べたプロトタイプ装置では、開口はホログラム面に接して配置しており、このアーティファクトは除去できると考えられる。また、再生像のボケが大きいのが、これは3.7.3節で述べたレンズアレイの光軸のずれによる影響と考えられる。Fig. 3.26からもわかるように、ここで用いたレンズアレイの配列の精度はあまり高くないため、再生像に大きなボケを生じている。前記のように凹レンズアレイの配列の精度を改善することによりこのボケは抑制できると考えられる。

Fig. 3.25の光学系においては、液晶パネル上の画像の結像位置は、空間フィルタリングを行う光学系と凹レンズアレイの間の距離により調節することができる。第8章の検討結果によると、合成光学系における液晶パネル上の画像の結像位置は、ホログラム面から十分離れた位置が望ましい。レンズ L_2 の焦点距離と凹レンズアレイの焦点距離がほぼ等しいときは、空間フィルタリングを行う光学系により液晶板上の画像を凹レンズアレイの前側焦点面近傍に結像させることで、レンズ L_1 を通過した後に画像の結像位置はほぼ無限遠となる。実験的にも画像の結像位置がホログラム面近傍となる光学系と、無限遠となる光学系を用いてホログラムを合成した結果、無限遠に結像させた系で作成したホログラムの方がボケが少

ない画像が得られた。このことから、並列露光システムにおいても液晶パネルに表示した画像はホログラム面より十分に離れた位置に結像する光学系を用いるべきであることを確認した。

各要素ホログラムの露光時間は、35 mWのHe-Neレーザを用いて、並列露光を行わない場合には30 msecであったのに対し、Fig. 3. 25の光学系を用いた場合は48 msecに増加した。これは単一露光の場合には露光する領域が0.3 mm角であったが、並列露光法では1.2 mm×0.9 mmであり、面積が大きくなり単位面積当たりの光量が少なくなったためと考えられる。露光時間が長いと振動の影響を抑制するための待ち時間を長くする必要があり、一回の露光に要する時間はステージの移動や待ち時間を含めて、単一露光法で1.7 sec、並列露光法で2.0 secとなった。しかし露光点数が1/12に削減されるため、合成時間を大幅に短縮することができる。3.5節の実験でFig. 3. 28と同じ大きさのホログラムを合成するのに36時間かかっていたのに対し、本実験では3時間35分で合成でき、1/10以下の時間に短縮することができた。現在の実験システムでは光学系の安定性の確保が不十分である点と、画像を液晶パネルに表示するために要する時間がかかる点で制約されているが、これらの点を改善することでさらに高速に露光することが可能になると考えられる。

本節では、ホログラフィック・3-Dプリンタにおいて最大の問題と考えられる合成に要する時間を短縮することを目的として、凹レンズアレイを用いた並列露光光学系を開発し、実験によりその有効性を確認した。今回の実験では作製時間は従来法に比べ1/10以下に短縮されており、この並列露光光学系を用いてホログラフィックプリンタの高速化を実現できることが確認された。

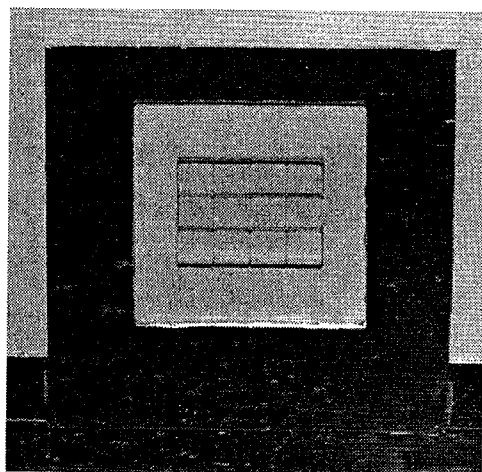


Fig. 3. 26
実験に用いた4×3凹レンズアレイ

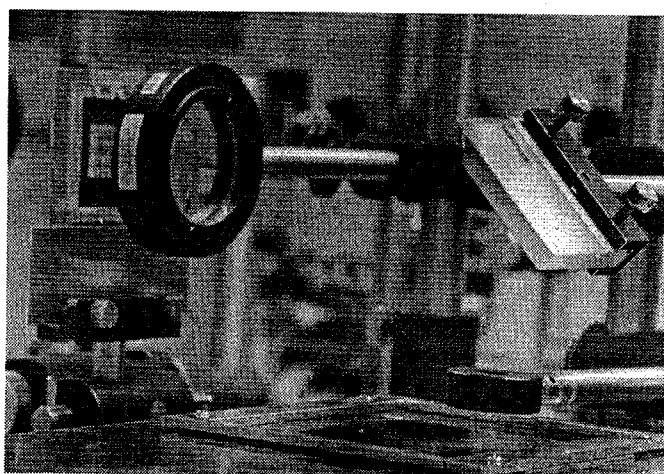


Fig. 3. 27
縮小光学系

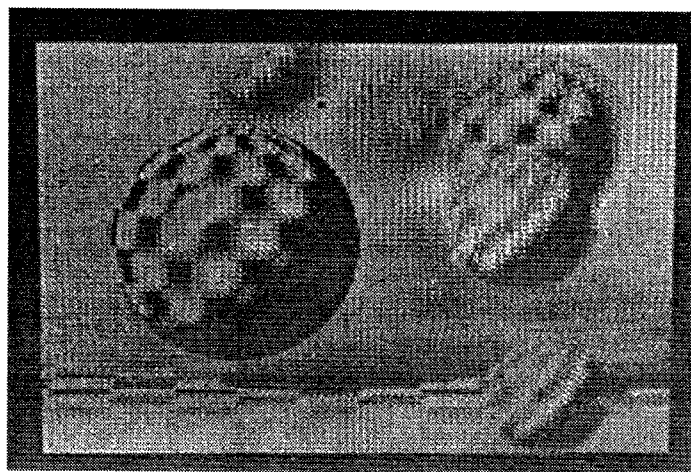


Fig. 3. 28
並列露光システムにより合成したホログラムの再生像

3. 8 まとめ

本章ではホログラフィック・3-Dプリンタに適したホログラムの記録法としてマルチドット法を提案し、マルチドット法を用いたホログラフィック・3-Dプリンタを実現するための検討結果を述べた。マルチドット記録法は、現状では、3. 2節で示したホログラフィック・3-Dプリンタに必要とされる条件を満足する唯一の方法である。従来のホログラムの合成には大型の光学定盤と高度な除振設備が必要であったが、ホログラフィック・3-Dプリンタはその常識を覆し、通常のオフィスなどの環境でホログラムを記録するシステムの実現を可能とする。3. 4節でホログラフィック・3-Dプリンタの基本的な構成と各要素技術に関して考察し、実験を行うことでマルチドット法による水平・垂直方向に視差を持つホログラフィック・ステレオグラム記録の基本原理を検証した。実験結果では要素ホログラムの間隔が粗いためドットが目立つという問題点が示されたが、デジタル拡散板を用いることでこれを解決し、階調を持った高画質の立体像が記録できることを明らかにした。またホログラフィック・3-Dプリンタ実用化の諸技術について検討を行うためにプロトタイプ装置の試作を行い、ホログラフィック・3-Dプリンタの実現可能性を実証した。マルチドット法によるホログラム合成の最大の問題点は合成に長時間を要することであるが、3. 7節で各露光にかかる時間を露光に必要なプロセスごとに検討を行い、その短縮の可能性を検討した。さらに複数の要素ホログラムを同時に露光する並列露光光学系を提案し、並列露光を行った実験では合成時間を $1/10$ 以下に短縮することができた。

これらの検討によりホログラフィック・3-Dプリンタ開発のための基本原理についてはその妥当性および有効性を明らかにすることができた。今後実用化に結びつけるためには、レーザプリンタや光ディスクおよび電子写真などの既存の技術を活用し、フィルム送り機構、記録材料、液晶パネル、レーザ光源などの要素技術を確立する必要がある。ホログラフィック・3-Dプリンタを計算機の端末として用いるためには上記のように露光時間の短縮が必須の課題であるが、例えば写真のラボサービスのように、ユーザーの持つ3次元画像データから専用のラボにおいて出力するなどの利用形態であれば、現状の技術でも十分に実用化は可能と考えられる。

第4章 カラー画像の記録

4. 1 はじめに

前章では、3次元画像処理システムの端末装置として用いることができるホログラフィック・3-Dプリンタの原理を提案し、高画質の立体像を自動的に出力できることを実験的に示した。ところで、3次元画像システムにおいては、より自然な画像としてカラーの表示が望まれるものや、画像を見やすくするために色をつけて表示することが必要な場合は多い。例えば、コンピュータグラフィックスでは現在そのほとんどがカラーの画像を扱っている。また医療用画像においても、部位によって色をつけたり病変部を強調するために、カラー表示がよく行われている。したがって3-Dプリンタにおいてもカラーのハードコピーの出力が要求される。そこで本章では、リアルカラーの3次元画像ハードコピーを出力する3-Dプリンタのための手法について検討し、実験を行うことでその実現可能性と問題点を明らかにする。

カラーホログラムの作成法についてはいくつかの方法が研究され、さらに最近優れた感光材料が開発されているため、しばしば見かけるようになってきた。ホログラフィック・ステレオグラムにおいてもカラー化の手法は提案されている。本章では、ホログラフィおよびホログラフィック・ステレオグラムにおける従来のカラー化の手法について4.2節に述べる。しかし、3-Dプリンタに用いるためには、歪のない像を表示するホログラフィック・ステレオグラムを自動的に合成できる新しい手法を開発する必要がある。

4.3節ではホログラフィック・3-Dプリンタに適したカラー化の手法について検討を行い、CRTなどに用いられているシャドウマスク方式やカラーの網点印刷と同様に、3原色の微少な点を並べることでよりカラーホログラムを作成する方法を提案する。この方法は自動的に合成するのに適しており、またマルチドット方式との整合性もよいため、3-Dプリンタにおけるカラー化の一手法として有望である。4.4節では、コンピュータのカラー画像データを出力する際に、適切な色再現を行うための画像処理法に関して述べる。また4.5節では、基礎的な実験の結果を述べ、マルチドット法によりカラーの立体像の表示が可能であることを示す。

4. 2 カラーホログラフィ

4. 2. 1 ホログラフィのカラー化の方法

ホログラフィによりカラーの再生像を得る従来の方法は、大きく以下の3種類に分類できる。

(1) 記録・再生に3色のレーザを用いる方法 [3]

ホログラムの記録と再生で同じ波長の3原色のレーザを用いればカラー画像の記録が可能である。これは各波長のホログラムを多重露光することにより記録するもので、波長ごとに干渉縞間隔が異なることを利用してカラー立体像を記録する。この方法では3種類の干渉縞がホログラム面に記録されるためこれらによる偽像が現れるため、これを避けるために参照光角度を変えるなどの方法が研究されている。しかし再生にレーザ光を用いる必要がある。

(2) リップマン型ホログラムを用いる方法

ホログラムを厚い乳剤に記録すれば、波長選択性の効果によりブラッグの条件に適合される波長の光のみが回折される。これを利用してカラーホログラムの記録を行えば、上記の偽像を避けることができ、加えて白色光による再生も可能となる。つまり、例えば赤のレーザで記録されたホログラムを白色光照明すると赤色の光で再生されるが、緑色の光は赤のホログラムによっては回折されないため、偽像の問題は発生しない。そこで3色のレーザを用いて各色のリップマンホログラムを記録する方法が開発され [10]、その後様々な改善がなされている [9, 11, 63, 64]。この方法を用いれば優れた画質のリアルカラーホログラムを作成することが可能であり、現状では他に匹敵する技術はない。問題点としては、乳剤の厚さの変化や回折効率が再生される色に大きく影響するため、これらの調整を注意深く行わなければならない点が挙げられる。さらに記録時には3色のレーザを必要とする。なおリップマンホログラムを記録するには厚い乳剤を用いる必要があり、このためエンボス法で安価に大量複製することはできない。

乳剤の厚みの変化で再生光の波長が変化することを利用してカラー表示する方法 [65] も報告されている。これは、記録時には単色のレーザ光で複数のホログラムを多重露光し、露光の前や間で化学的に乳剤の厚さや屈折率を変化させて色を調整する。記録時に照明光として単色光を用いるので、実際の物体の分光反射特性を反映したカラー表示を行うことはできない。したがってこの方法で得られる再生像は疑似カラー (Pseudocolor) 表示と呼ばれている。

(3) レインボウ型ホログラムを用いる方法

レインボウホログラムは垂直方向の視差を犠牲にして白色光再生を可能するもので、3色のレーザを用いて記録したマスターホログラムをそれぞれ同じ波長のレーザ光で再生して第2ステップのホログラムの作成を行えば、レインボウ型のカラーホログラムを作成できる [9]。ただし正確な色で像を観察できるのはマスターホログラムの位置に目を置いたときのみであり、上下や前後に目を移動すると正しい色では

なくなる。レインボウ型のため大量複製できる特長があるが、3色のレーザを用いた複雑な工程が必要である。

レインボウ型では参照光の角度を変えたり、第2ステップの撮影の際のスリット位置を調整することで白色光再生の下でカラーの立体像を再生する方法も報告されている[9]。これらの手法も単色のレーザ光でカラー画像の記録が可能だが、基本的には疑似カラー表示であり、物体の色を正しく表現するリアルカラー表示法ではない。

4. 2. 2 カラー・ホログラフィック・ステレオグラムの方法

ホログラフィック・ステレオグラムにおけるカラー表示法は、基本的には上記のカラーホログラムの応用である。しかし、物体にレーザを照射して撮影するホログラムと、インコヒーレント光で撮影したり計算機で生成した画像から合成するホログラフィック・ステレオグラムでは、カラー記録・表示の考え方が異なる。ホログラフィック・ステレオグラムでは、通常白色光照明で原画を撮影し、記録したカラーフィルムを色分解して各原色のホログラムに露光する画像を作成する。またコンピュータグラフィックスなどを原画として用いる場合はホログラムに記録する3原色の画像を計算により作成する。このような場合は、上記の疑似カラーと呼ばれるカラーホログラムの手法でも、色再現のための処理を適切に行うことで原物体と同様の色（リアルカラーまたはフルカラー）で再生することが可能である。したがって前節の（2）および（3）で述べたそれぞれの方法をホログラフィック・ステレオグラムに適用してフルカラーの再生像を得ることができる。レインボウ型でスリット位置を色により変えて単色のレーザ光で記録する方法[66]は、ホログラフィック・ステレオグラムを用いれば正しい色で再生でき、簡便であることとエンボス型で大量複製が可能である点から現在最も発展している。しかし正しい色で観察できるのはある正しい観察位置からだけであり、見る角度を変えると色が変わってしまうためその応用分野は限られる。なお本論文ではこれをリップマン型のフルカラーホログラムと区別してマルチカラーと呼ぶことにする。第7章でマルチドット法によりマルチカラーホログラムを記録する手法を述べる。

リップマン型のホログラフィック・ステレオグラムでは乳剤の厚みや屈折率を制御する方法で高画質のカラー立体像が得られている[58, 67]。各原色のホログラムを露光する際に乳剤を化学的に膨潤または収縮させて色を制御し、単色のレーザで全ての露光を行う。この方法は化学的処理を厳密に行う必要があるため処理が複雑となるが、露光の際のレーザは一種類でよいという利点がある。これらのカラーホログラムの方法は全て2ステップの記録プロセスによるものだが、最近カラーのホログラフィック・3-Dプリンタを目的として1ステップでカラーホログラフィック・ステレオグラムを記録する方法についての報告もなされている[37]。高分子感光材料では簡単な処理で乳剤の厚みを制御でき、また厚みの変化量は紫外線露光量などで調整できるため、有望な方法である。いずれにしてもカラーホログラムの技術には記録感材の研究が非常に重要な要素といえる。

4. 3 ホログラフィック・3-Dプリンタのカラー化

本研究で開発している3-Dプリンタにおいては、リップマン型ホログラフィの手法を用いているため、カラーの立体像を合成するためには、リップマン型のカラーホログラフィの技術を用いることができる。前節で述べたように、反射型ポリウムホログラムによりカラー画像を記録する手法としては、

- (1) 3色のレーザを用いる。
- (2) 乳剤の厚みを化学的に変化させる。

などの手法を適用できる可能性がある。銀塩感光材料では、(2)の化学的な処理によって乳剤の厚みをコントロールして3色のホログラムを作成する手法は、露光の際にウェットなプロセスを挿入する必要があるため、自動的な記録やオフィスでの使用を考慮すると望ましくない。高分子感光材料においては、ドライプロセスで乳剤の厚みを制御する方法が提案されており有望な方法であるが、感度の点で難点が残されている。ここでは、3色のレーザ光を用いて記録する方法の実験を行った。広い波長範囲で感度を持つ感材を用いるか、各色の露光でそれぞれ分光感度が適した感光材料を用いてこれらを重ねて表示することで、カラー表示を行うことができる。

Fig. 4. 1に本手法によるカラーホログラムの記録形態を示す。マルチドット方式であるためドット状の要素ホログラムが並べて記録されるが、カラーの場合、赤(R)、緑(G)、青(B)の3色のドットがそれぞれ記録される。このようにCRTや液晶パネルのストライプフィルタと同様にしてカラー画像の表示を行うものである。この記録には3色のレーザ光を用い、Fig. 3. 1のような光学ヘッドを3本用いるか、または1本のヘッドにより3色の露光を行う。1本のヘッドを用いる場合には光学系の色収差を補正しておかなければならない。

本手法によるカラーホログラムは、3色のレーザ光で順次各原色のホログラムを露光するため、露光段階で化学的な処理を行うことなく自動的な合成が可能である。また、単一の感材に多重露光する方式においては感材のダイナミックレンジの限界のためS/Nの低下が起こるのに対し、本手法においては空間的に各原色のホログラムを分割して記録するため、単色のホログラムと同等の高いS/N比の再生像を得ることができる。一方、本方式ではドット状のホログラム列のピッチが粗いとドット構造が目立ってしまうという問題があるが、第3章で述べたようにドット間のピッチを0.3mm以下にすればほとんどその構造を知覚できない。したがって本手法はカラーの3-Dプリンタに対して有効な手法と考えられる。

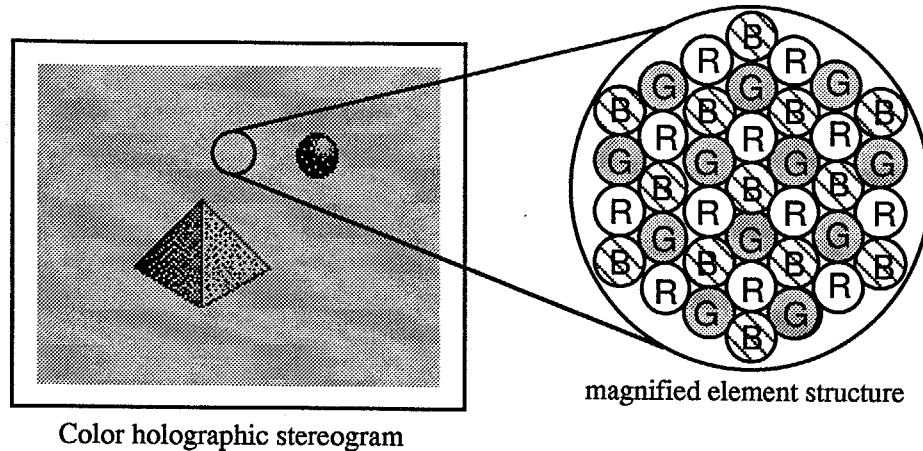


Fig. 4. 1

カラーマルチドットホログラム。多数のRGBの小さなドットによってカラー画像を表示する。

4. 4 色再現のための画像処理法

カラー3-Dプリンタは計算機によってデザインした3次元画像を出力するため、その色はCRTなどに表示される画像と同じ色であることが望ましい。カラーホログラムでは3原色の要素からカラー画像を表示するが、その原色はNTSCなどのテレビ系のRGBとは異なり、記録したレーザ光の波長により決まる単一波長の色である。そこで再生像の色が計算機中の画像データの色と色座標上で一致するような変換を行う必要がある。

3刺激値によってカラー3次元画像データが表現され、またホログラムは3原色の要素で表示されるとし、3刺激値からホログラムに記録するデータへの変換として線形変換を仮定すれば、この変換は 3×3 の変換マトリクスCを用いて

$$\mathbf{f}_{\text{HOLO}} = \mathbf{C} \mathbf{f}_{\text{NTSC}} \quad (4. 1)$$

と書くことができる。ここで $\mathbf{f}_{\text{HOLO}} = (f_{\text{AR}}, f_{\text{AG}}, f_{\text{AB}})^T$ は λ_j ($j = \text{R, G, B}$)のレーザ光でホログラムに記録する光線の強度、 $\mathbf{f}_{\text{NTSC}} = (f_{\text{R}}, f_{\text{G}}, f_{\text{B}})^T$ は3次元画像データにおけるRGB各色の値である。ここでは画像データの色の値はNTSCの3原色を考えることとするが、カラー画像が他の基準で表現されている場合にはこれを置き換えればよい。変換マトリクスCは、再生される色が一致するように以下のようにして決定する。

簡単のため、ここでは色の基準としてCIEのXYZ表色系を用い、この標準的な色空間で $\mathbf{f}_{\text{HOLO}}$ と $\mathbf{f}_{\text{NTSC}}$ が一致するように定める。これを式で表現すると

$$\mathbf{A} \mathbf{f}_{\text{HOLO}} = \mathbf{B} \mathbf{f}_{\text{NTSC}} \quad (4. 2)$$

となる。ここで $\mathbf{A} = (\mathbf{a}_{\text{R}}, \mathbf{a}_{\text{G}}, \mathbf{a}_{\text{B}})$ および $\mathbf{B} = (\mathbf{b}_{\text{R}}, \mathbf{b}_{\text{G}}, \mathbf{b}_{\text{B}})$ は 3×3 の行列で、各列の3次元のベクトル $\mathbf{a}_j$

および b_j ($j=R, G, B$) はそれぞれホログラムと NTSC 規格の CIE 色座標上での R, G, B の 3 刺激値である。(4.2) 式より、変換マトリクス C は

$$C = A^{-1} B \quad (4.3)$$

として決定される。

(4.3) 式で求められる変換マトリクスにより画像データの RGB 値を変換し、ホログラムに露光する原画を作成すれば、立体像再生においても CRT などに表示する場合とほぼ一致する色再現を行うことができる。ここでは基準として CIE 表色系を考えたが、他の基準を用いても線形な色空間である限りはこの方法で変換式を求めることができる。また、再生される光の分光的な性質ができるだけ再現されるように変換マトリクスを決めることも可能だが、ディスプレイとしては CIE 色度座標などの人間の視覚特性を考慮した色空間でマッチングをとることが妥当な方法と考えられる。

4.5 実験

本手法の原理を確認し、その問題点を明らかにするため、カラーホログラムを実際に合成する実験を行った。はじめに、平面画像のホログラムを合成することにより色再現の特性を検討し、次に 3 次元物体のホログラムの作成を行った。実験に用いた光学系を Fig. 4.2 に示す。合成システムは基本的には Fig. 3.7 に示す実験系と同様であるが、3 色のレーザ光を用いてこれを順次切り替えて 1 枚の乾板に露光した。赤の露光には He-Ne レーザの 632.8 nm、緑と青にはアルゴンレーザの 514.5 nm、488 nm または 476.5 nm を用いた。自動的に合成するには各波長を自動的に選択する必要があるが、本実験ではミラーを手動で移動させることにより各波長の露光を行った。本実験では振動等の問題を避けるため感材にはガラス乾板を用い、XY ステージに固定した。そして銀塩の感材を用いたため、露光後に現像、漂白処理を行った。

まず、3-D プリンタによる色再現の基本的特性を検討するため、各原色に対して一枚ずつの感材を用い、632.8 nm、514.5 nm および 476.5 nm の各波長で平面画像のホログラムを作成した。そしてその色再現特性をモノクロメータを用いて測定し、CIE 表色系の xy 色度図上での原色の座標を算出した。Fig. 4.3 にその結果を示す。○は RGB 各波長によるホログラムの再生光の色度座標、△は各原色のホログラムによる再生光の分光反射率分布からノイズ成分を見積もって差し引いたものである。銀塩感材の白化によるノイズが各原色の彩度を低下させていることがわかる。参考のために、Fig. 4.3 には NTSC に規定される RGB による色 3 角形を示す。NTSC の RGB による色 3 角形は、△による三角形の色域にカバーされており、散乱による彩度の低下を抑えることができればカラー CRT などとほぼ同じ色で立体像を表示することができる。

次に、階調の再生特性に関して基礎的な検討を行った。計算機によって作成した画像は 3 原色の光強度を示すデジタルデータであるが、液晶パネルの特性が非線形性を持つので、その補正を行う必要がある。さらにホログラムの露光量一回折効率の特性も非線形であるため、ここではそれらを総合的に補正するこ

とを試みた。Fig. 4. 4 (a) に計算機によって作成したデータの階調値に対するホログラムの再生光強度の特性を示す。液晶パネルに対して入力するデータは 8 b i t s (256 階調) を持つが、液晶の γ 値が高いため、入力データの 0-255 の階調値のうち約 130-155 の範囲について示してある。この特性を用いて階調の変換テーブルを作成し、補正した結果 Fig. 4. 4 (b) のようにほぼ線形に近い特性が得られた。しかしながら液晶の γ 値が高いためこの実験でとり得る階調数は各色 8 階調程度であった。これは液晶の入力信号に対して線形に近い補正を行うこと等により改善されうると考えられる。

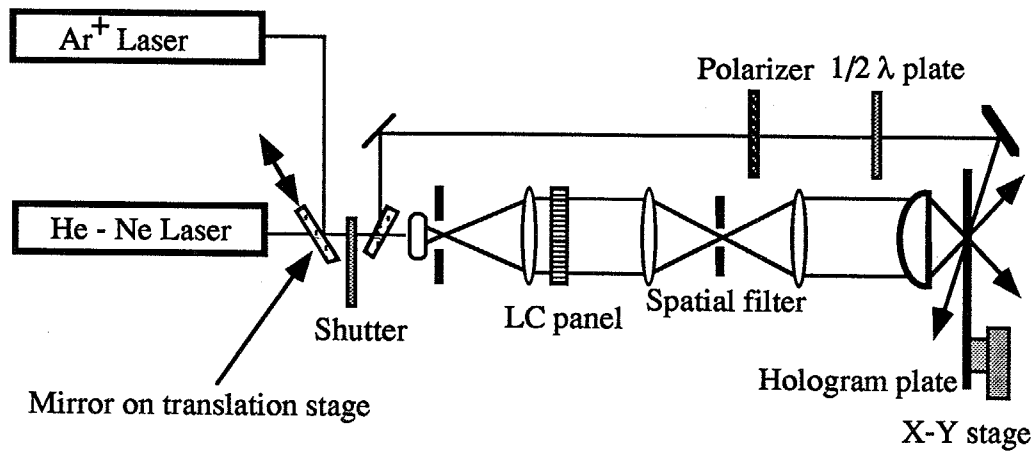


Fig. 4. 2

実験光学系。可動ミラーを移動して使用する波長を選択した。

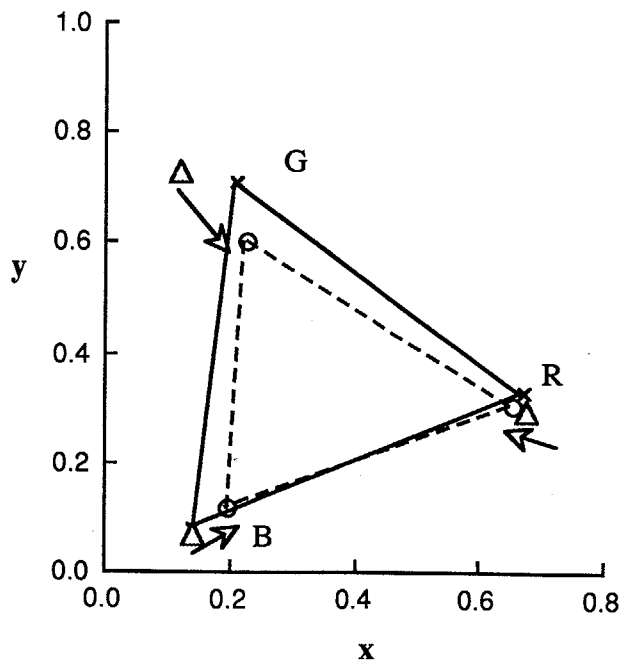
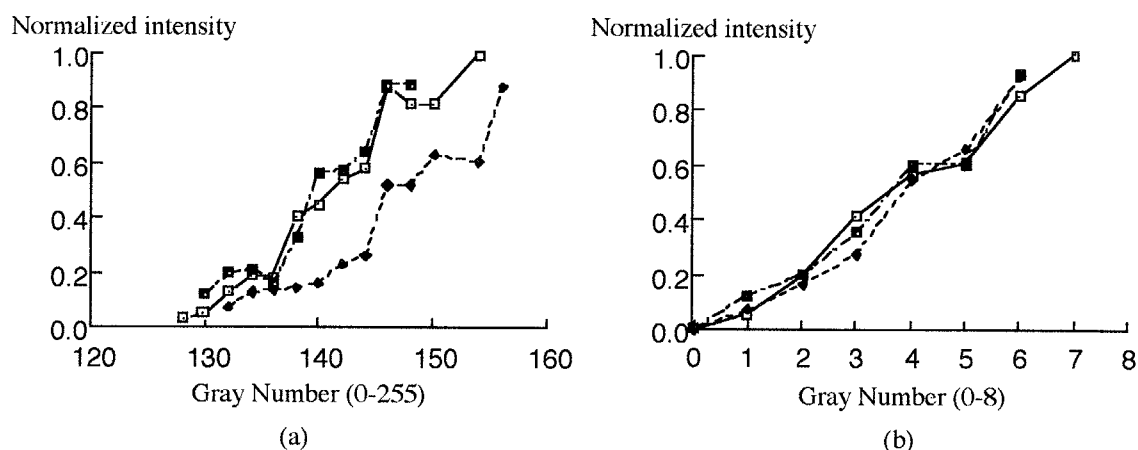


Fig. 4. 3

RGB各原色の再生光の色 (○)。CIE表色系における xy 色度座標上に示した。散乱成分を取り除くと Δ となる。×はNTSCで規定される3原色による色3角形。

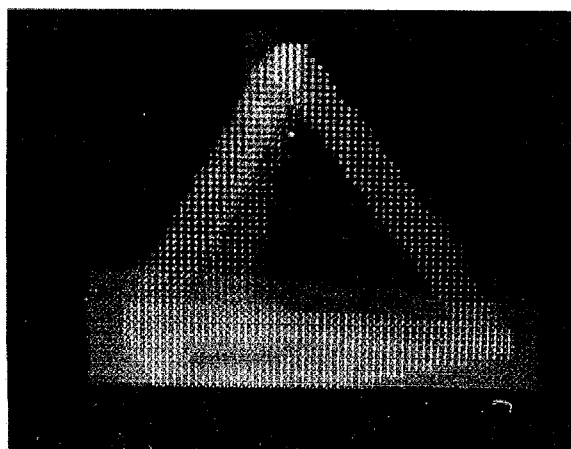


F i g . 4 . 4

階調特性の補正の効果。(a) 補正前、(b) 補正後。横軸は入力したデジタルデータの階調値であり、(a)では0-255、(b)では0-8の間の値をとる。縦軸は最大値を1.0に規格化した再生光強度を示す。実線、破線、一点鎖線はそれぞれ632.8nm, 514.5nm, 467.5nmによるホログラムについての特性を表している。

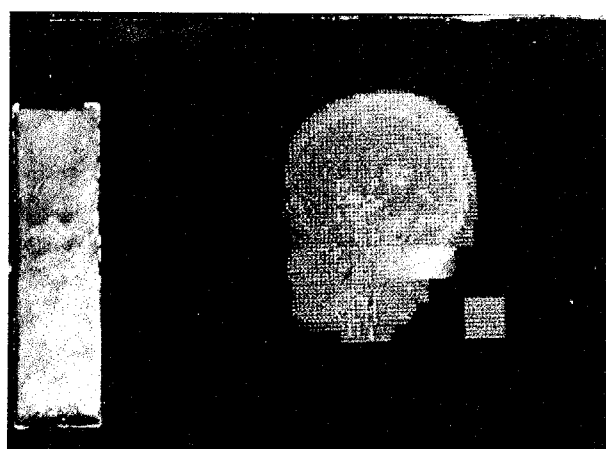
次に、カラーの3次元物体のホログラムを合成する実験を行った。物体は単純なワイヤフレームの正四面体で、低面に接する3辺が白、残る3辺が赤、緑、青である。F i g . 4 . 5 に要素ホログラム間隔が0.5mm のホログラムの再生像を示す。この結果ではアラインメントやレンズの特性の影響によってドットピッチが大きい点状の構造が目立つが、3.5節で述べた手法を用いて高解像度のホログラムの合成は可能と考えられる。

さらに、階調を持ったカラー立体像を合成する実験を行った。F i g . 4 . 4 に示す階調の補正を行い、X線CTにより得られた頭蓋骨の3次元画像に脳血管の画像を重ねたデータのカラー表示を試みた。ここでは頭蓋骨を白色に、血管を赤く再生するように記録した。F i g . 4 . 6 に再生像を示す。画像処理法が不十分であったことと感材の特性の問題などにより、画質は低い、本手法で立体感のあるカラー表示が可能であることは確認することができた。



F i g . 4 . 5

ワイヤフレームデータから作成したカラーホログラムの再生像。



F i g . 4 . 6

階調を持つ3次元データから作成したカラーホログラムの再生像。

Fig. 4. 5およびFig. 4. 6に示す再生像の撮影においては、ホログラムを照明する光源としてハロゲンランプを用いている。ハロゲンランプの分光強度スペクトルは赤で強く、青で弱いため、再生像の青い部分が暗く見える。太陽光や標準白色光として使用されるD 65によって照明すれば各色がほぼ同程度の明るさで再生される。このようにホログラムを観察する際の照明光源によって再生像の色は大きく影響を受ける。従って厳密な色再生が必要な場合には照明光源をセットとしてシステムを構築し、その照明光源の特性を用いてFig. 4. 4に示すような階調補正を行わなければならない。色の厳密さがそれほど要求されない場合には平均的に使われるような光源に合わせて補正を行えば、大きな問題はない。しかし、分光強度スペクトルに大きな偏りのある光源に対して階調補正を行うと、最も暗い色に合わせて補正しなければならないため全体に像が暗くなってしまう。したがって再生の際には、できるだけ白色に近い光源を用いることが望ましい。

銀塩感材としては、現在のところ感度や解像度の点で赤から青までの色の光に十分な特性を持つ材料がない。そこで本実験では赤色光用の感材に3色の露光を行ったが、赤色および緑色の光に関しては今回の実験に関する限り満足な回折効率が得られた。しかし、青色光の記録に関しては、回折効率がの点で不十分であり、またS/Nの低下も大きな問題であった。これは、感度の点では問題はないが、感材の解像力が不十分であることが原因と考えられる。今回の実験においてはデバイスや材料の問題により高画質のカラー3次元画像の表示には至っていないが、本手法の原理の妥当性および可能性を確認できた。

4. 6 結論

本章ではリアルカラーホログラフィック・3-Dプリンタの概念について述べ、そのための新しい手法に関して提案した。そして基礎的な実験により本手法の原理を確認し、また問題点を検討した。その結果、感光材料、液晶パネル、光源等の周辺技術の改善が重要な課題であるが、フルカラーの3-Dプリンタの実現の可能性を示すことができた。また、再生の際の光源に関しても注意が必要であることを述べた。

今後、リアルカラーの3-Dプリンタを実用化するためには、上記のように様々な要素技術に関する研究が必要である。光源としては、半導体レーザを用いた3原色のコンパクトな光源の開発が期待される。赤に関しては既にほぼ実用域であり、青、緑に関しては半導体レーザ[68]や非線形結晶による高調波発生[69]などが報告されている。感材については、3原色に感度のある散乱の少ない材料が必要である。特に高分子感光材料は紫外線露光量を調節して乳剤の厚みを制御することが可能であり、非常に期待できる材料であるが、感度や短時間露光に向かないなどの問題点がある。これらの研究課題の中には、これまで活発に研究されてきたレーザプリンタや光ディスクの技術と共通する点が多く、その成果を活用することにより、近い将来リアルカラーの3-Dプリンタが実現できると思われる。

第5章 アニメーション画像の記録

5. 1 はじめに

3次元画像システムにおいては、動きの情報が重要である場合も多く、ホログラフィック・3-Dプリンタも動きを持つ立体像を出力できることが望まれる。医用3次元画像を例にとると、関節の動きのシミュレーション〔70〕や心臓血管などの3次元アンギオグラフィにより3次元の動画情報が得られ、動きのある立体像のハードコピー出力が期待される。産業分野でも機械的な動きの3次元的なシミュレーションなどを動きを持つ立体像として表示することの要求は多い。

動きのある3次元データを表示する方法としては、インタラクティブな表示とハードコピーへの表示が考えられるが、ここではホログラフィック・3-Dプリンタの応用として、動きのある3次元画像データをハードコピーとして出力する手法の開発を行った。本手法は、マルチドット方式のホログラフィック・ステレオグラムにおいて記録できる垂直方向の視差情報を犠牲にして動きの表示を行うものである。したがって、ホログラフィック・3-Dプリンタに出力する画像を変更するだけで垂直方向の視差情報が動きの情報のどちらかを選択して記録することができる。記録されたホログラフィック3-Dアニメーションは、白色光照明の下で、ホログラムフィルムを垂直方向にスクロールして観察できる。

本章ではホログラフィによる動画表示技術の従来の研究について5. 2節で述べた後、ホログラフィック・3-Dプリンタにより立体アニメーション画像を出力する手法を提案する。また像を観察できる範囲および再生像の流れ劣化について検討を行い、マルチドット記録法により立体アニメーションを合成した実験結果を示す。

5. 2 ホログラフィによる動画表示

ホログラムを用いて動画像を記録する場合には、動きのある被写体からの波面を干渉縞として記録するためにパルスレーザかコマ撮り撮影を必要とする。ホログラフィ映画に関する研究は古くから行われており、特に旧ソ連における研究がよく知られている [71]。Jacobson により撮影されたルビーレーザーを用いたレーザ再生のホログラフィ映画 [72] は、Fig. 5. 1 に示すように、ホログラムフィルムを通常の映画フィルムのように用い、各コマに一枚のホログラムを記録するもので、ここではこれをホログラム面分割型と呼ぶことにする。この方法では、垂直方向の視差も記録でき完全な立体像表示が可能であるが、ホログラムフィルムを間欠送りする必要がある。また、ホログラム面付近に物体を表示して直接観察する場合、ホログラムフィルムを大量に消費することになり、フィルムを高速に送らなければならない。

また、垂直方向の視差を犠牲にし、ホログラムを垂直方向に連続的に移動させてホログラフィ映画の再生を行う手法も提案されている。De Bitteto の方法 [73] は、Fig. 5. 2 のように垂直方向の視差を犠牲にし、各コマを水平方向に細いホログラムとしたもので、ホログラムに目を近づけて観察する。そこでここではこの方法を覗き窓方式と呼ぶ。覗き窓方式においては、ホログラムフィルムを等速に送って立体像を表示できるため、間欠送りの必要がない。また一コマで消費するホログラムフィルムの量はホログラム面分割方式と比較して格段に少ない。しかし覗き窓方式ではホログラム面より離れた位置に像を表示しなければならないため、このままでは白色光再生を行うことは難しい。また目をホログラム面に近づけて観察しなければならず、観察しにくいという欠点がある。

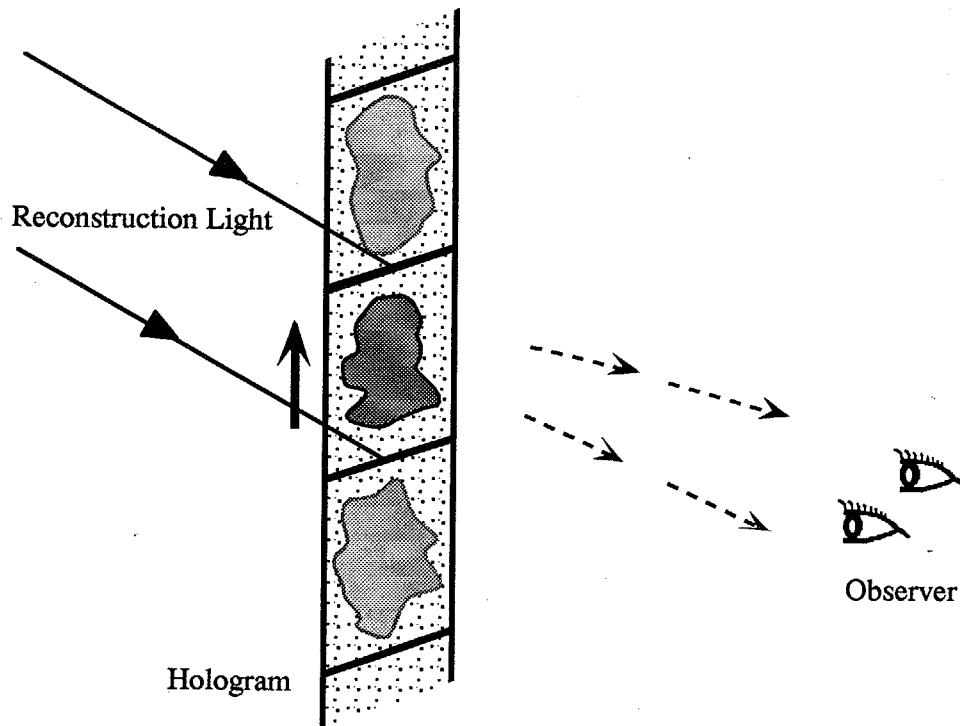


Fig. 5. 1
ホログラム面分割型

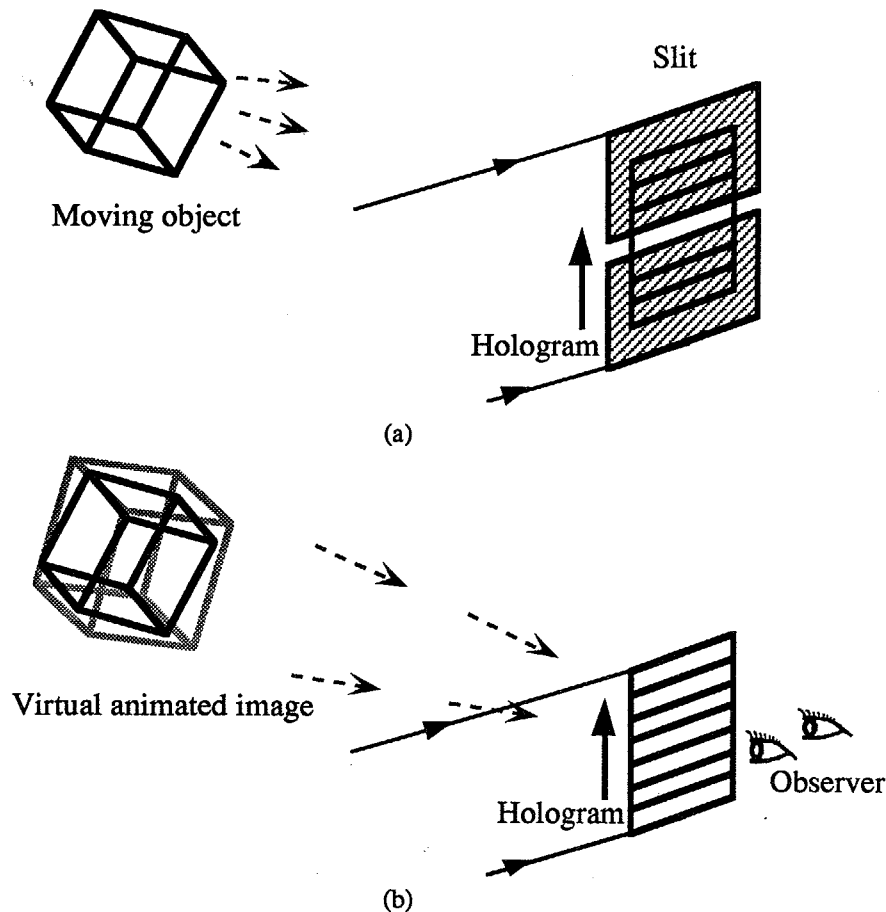


Fig. 5. 2

覗き窓方式。(a) ホログラムの撮影、(b) 再生

覗き窓方式と同様に撮影したホログラムをマスターホログラムとし、イメージホログラムを撮影すればリップマン型などにより白色光再生が可能になる [Fig. 5. 3]。観察時には目を上下に移動すると動きのある立体像表示が可能となる。この方式は視域分割方式と呼ぶことにする。視域分割方式では、マスターホログラムの撮影時にスリットを移動させるか、ホログラムフィルムを移動させるかにより作成されるホログラムの性質が異なる。Fig. 5. 3はスリットを移動させる場合であり、再生時には目を上下に移動するか、ホログラムを傾けて観察する。スリット移動の方法では、ホログラムの大きさは物体と等しいサイズでよいが、再生される動画像の長さは制限される。一方、ホログラムフィルムを移動して撮影したマスターホログラムを用いて2ステップ目の撮影を行った場合は、再生においてもホログラムフィルムを上下に移動して観察する。ホログラムフィルム移動の方法を用いれば、長時間の動画の再生も可能であるが、マスターホログラムが長くなるためこの方式を2ステップで行うことは困難である。

ホログラフィ映画の手法は、立体像表示だけではなく計測の分野に応用されており、振動の測定などにおいて有用な技術となっている。

一方、ホログラフィック・3-Dプリンタのように3次元画像システムの端末装置としての応用においては、架空の立体像を動画として表示しなければならない。しかしホログラフィック・ステレオグラムによる動画表示法として有効な方法はほとんど提案されていない。これは従来のホログラフィック・ステレ

オグラムがほとんど手作業で作成されており、また1枚のホログラフィック・ステレオグラムを合成するのに数十枚から数百枚の2次元画像を必要とするため、これを動画とするには膨大な作業と時間を要することが原因と思われる。ホログラフィック・ステレオグラムでは視点の移動に伴って像を動かして表示する手法がよく用いられており視覚的なインパクトはあるが、制限された動きしか表現することはできない。

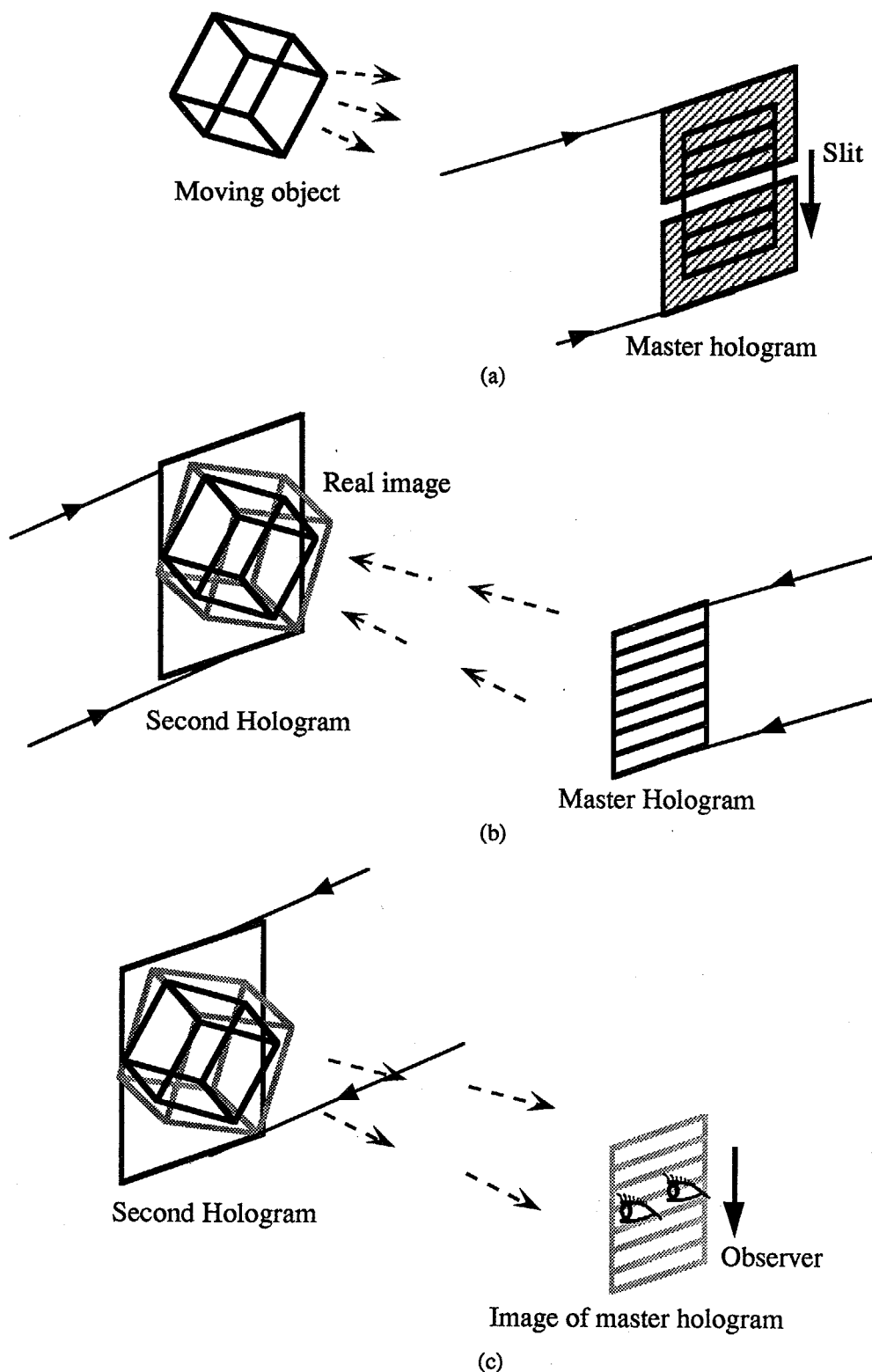


Fig. 5. 3

視域分割型。(a) マスターホログラムの撮影、(b) 第2ステップホログラムの撮影、(c) 再生

5. 3 ホログラフィック・3-Dプリンタによるアニメーション表示

5. 3. 1 原理

本研究で提案するホログラフィック・3-Dアニメーション (holoanimation) の原理を一言でいえば、ホログラフィック・3-Dプリンタで垂直方向の視差の記録に用いている自由度を利用して、視域分割方式と同様のホログラフィック・ステレオグラムを1ステップで記録するものである。視域分割方式ではスリットを移動してマスターホログラムの記録を行うため再生時間に制限があるが、本手法ではスリット移動とホログラム移動のどちらの方式もマルチドット法により記録できる。ここではアニメーションとして動画表示を行うため、ホログラム移動に基づく方式を考える。

ホログラフィック・3-Dアニメーションの再生の様子をFig. 5. 4に示す。白色平行光でホログラムを照明し、ホログラムを垂直方向へスクロールすることでホログラム面近傍に立体像としてアニメーション画像が表示される。Fig. 5. 4のように単純でコンパクトな再生装置で立体動画像の観察を行うことができる。このホログラムには、水平方向に関しては視差の情報が記録され、垂直方向の視差の代わりに被写体の動きの情報が記録されている。

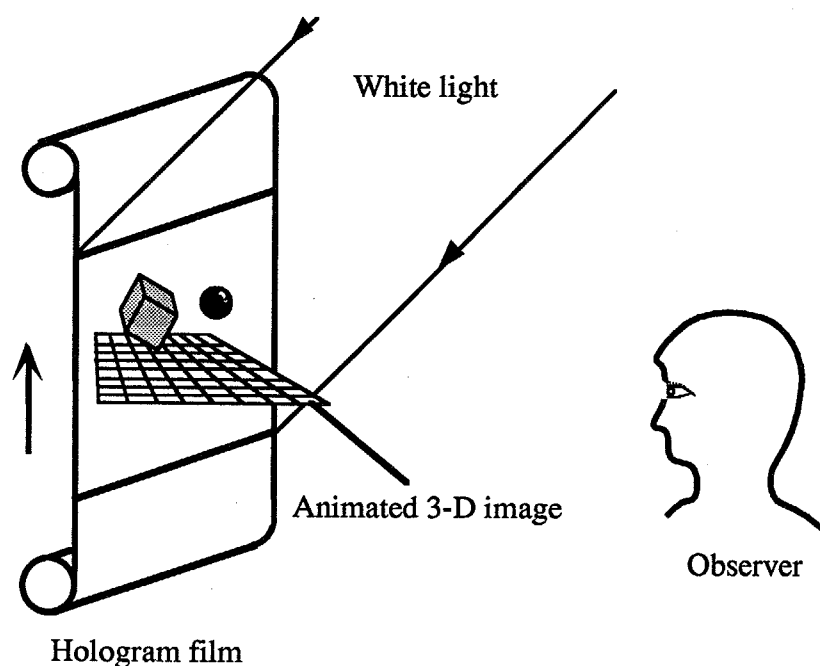


Fig. 5. 4
ホログラフィック・3-Dアニメーションの再生

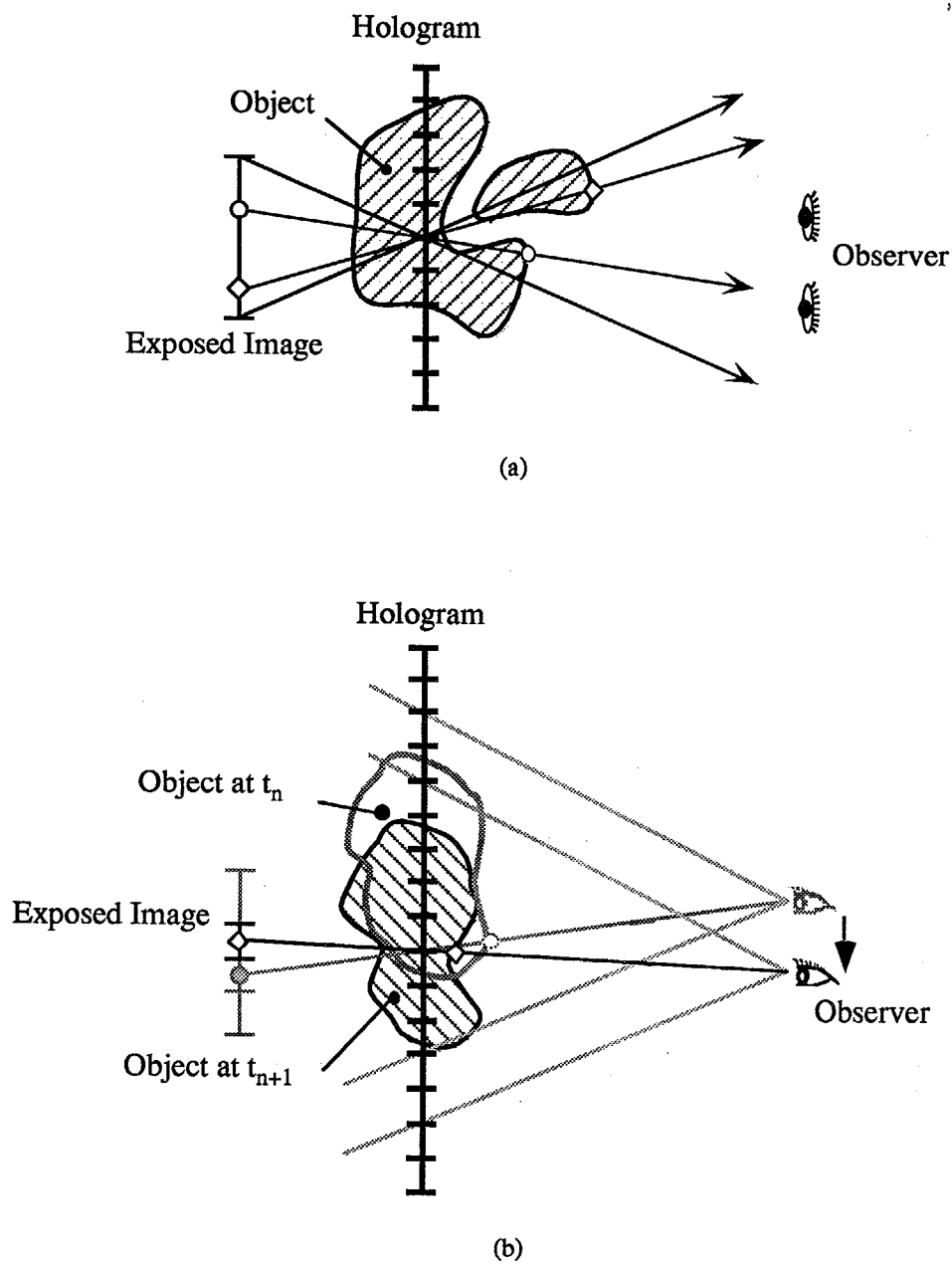
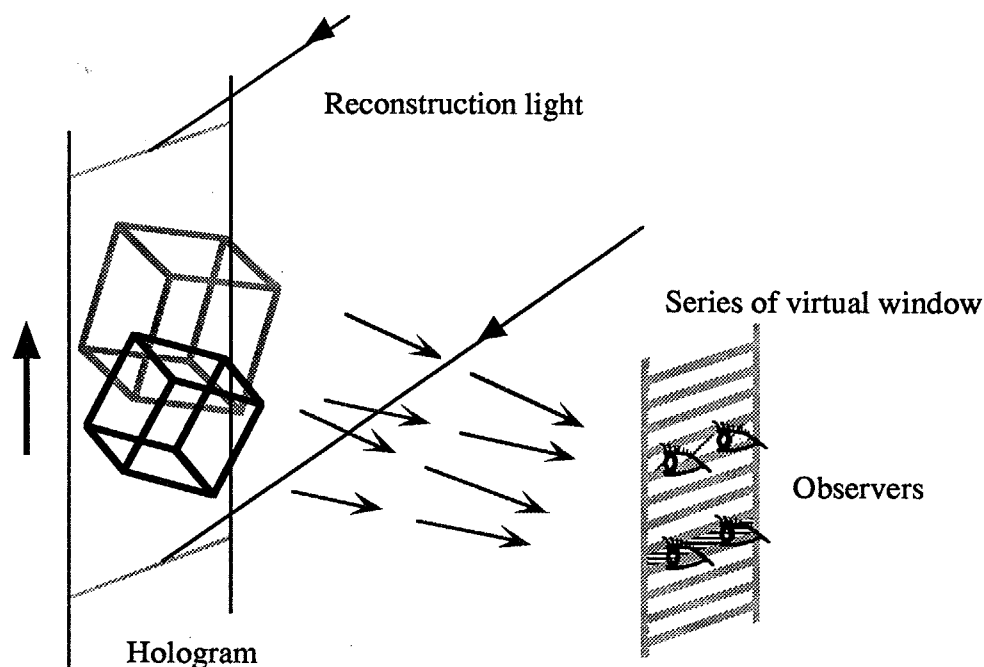


Fig. 5. 5

ホログラフィック・3-Dアニメーションの原画作成の原理

(a) 水平方向 (Top view)。視差の情報を記録する。

(b) 垂直方向 (Side view)。被写体の動きの情報を観察位置に合わせて記録する。



F i g . 5 . 6

ホログラフィック・3-Dアニメーションによる覗き窓の再生

F i g . 5 . 4 のホログラムは、ホログラフィック・3-Dプリンタと同じ光学系 [F i g . 3 . 1] により記録される。液晶パネルに表示する画像の計算はF i g . 5 . 5 に示す系に基づいて行う。F i g . 5 . 5 (a) のように、3次元物体の各点は、水平方向については要素ホログラムの中心点を投影中心として投影される。一方、垂直方向に関しては、再生時にはホログラムフィルムを垂直方向に移動して観察するので、F i g . 5 . 5 (b) に示すように、各時間のフレーム毎に視点の位置は垂直方向に移動する。したがって、垂直方向については、各時間フレームの物体がそれぞれの時間に対応する視点の位置を投影中心として投影される。その結果、露光する画像は、各高さの視点から観察されるべきフレームの画像が垂直方向に合成されたものとなる。この画像は、各時間毎に水平方向の視差を持つ画像を計算した後にこれらを合成することでも作成できる。

上記のようにして合成したホログラムを再生すると、ホログラム面から離れた視点の位置に、視域分割方式と同様に覗き窓の実像が再生される。5 . 2 節で述べた視域分割方式ではマスターホログラムの実像が窓を構成するが、本手法では液晶に表示された画像が合成されて窓を生成する。本手法では1ステップでこのような窓を形成できるため、5 . 2 節で述べた2ステップの方法では困難な長時間のアニメーションの記録も可能である。また、点状の要素ホログラムにより露光を行うため、大きな、長時間のホログラフィック・3-Dアニメーションでも小型の光学系を用いて記録できるという特徴を持つ。

5. 3. 2 画像処理法

本節では、ホログラフィック・3-Dアニメーション用原画の作成法について述べる。はじめに3次元アニメーションデータから直接原画を作成する場合について説明し、つぎに各時間で作成した視差画像から原画を合成する手法を示す。

ホログラム面を基準とした座標系をとり、光軸方向を z 軸、ホログラムを移動する垂直方向を y 軸、水平方向を x 軸とし、ホログラムは $z=0$ にあるとする。ホログラムは等速度 $-v$ で y 軸方向に上から下方向へ移動させる。このとき観察者のホログラムに対する相対位置 (x_e, y_e, z_e) は、 $y_e=vt$ で下から上方へ移動する。なお、 $t=0$ のとき $y_e=0$ とする。ある時間 t における物体上の点 (x_0, y_0, z_0) を考え、その点が記録される要素ホログラムの位置 (x_h, y_h) と投影された原画上の座標 (ξ_0, η_0) を求める。Fig. 5. 5

(b) より、垂直方向に関して、物体上の点と観察位置と要素ホログラムの位置および原画上での点像は一直線上に並ぶ。このことから、幾何学的関係よりこの物点が記録される要素ホログラムの y 座標 y_h は、

$$y_h = \frac{y_0 z_e - y_e z_0}{z_e - z_0} = y_0 - \frac{z_0}{z_e - z_0} (vt - y_0) \quad (5. 1)$$

となる。時間 t における物体上の点は、高さ y_h の各要素ホログラムに記録される。このときこの点は原画上の

$$\begin{aligned} \xi_0 &= \frac{f}{z_0} (x_h - x_0) \\ \eta_0 &= \frac{f}{z_0} (y_h - y_0) = \frac{f}{z_e - z_0} (y_0 - vt) \end{aligned} \quad (5. 2)$$

の点に投影される。(5. 1)、(5. 2) 式に従って3次元画像データから各要素ホログラムに露光する画像を作成することができる。

次に、各時間で観察位置から撮影した画像を用いて原画を作成する方法を述べる。ある時間 t で、 $x = x_j (j=0, \dots, N)$, $y = y_e = vt$, $z = z_e$ に位置する各視点から撮影した画像 $f_j(x'_h, y'_h)$ を持っている場合を考える。ここで (x'_h, y'_h) は投影面上の座標で、投影面をホログラム面と一致させると、 $(x'_h, y'_h) = (x_h, y_h - y_e)$ と書ける。ホログラム面上の (x_h, y_h) に記録する原画 $g(x_h, y_h; \xi, \eta)$ ((ξ, η) は原画上の座標) を得られている $f_j(x'_h, y'_h)$ から計算を行う場合、当然 (x_h, y_h) に記録する要素ホログラムには $f_j(x_h, y_h - y_e)$ の情報が記録されることから、幾何的に容易に

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{f}{z_e} (x_h - x_j) \\ \eta &= \frac{f}{z_e} (y_h - y_e) = \frac{f}{z_e} (y_h - vt) \end{aligned} \quad (5. 3)$$

が得られる。したがって得られている画像の各点を

$$f_j(x_h, y_h + y_e) = g\left\{x_h, y_h; \frac{f}{z_e} (x_h - x_j), \frac{f}{z_e} (y_h - vt)\right\} \quad (5. 4)$$

の関係を満足するように原画上の各点に入れ替えればよい。

上記の処理は、ホログラフィアニメーションにおける入れ替え処理 [74] と同じ原理であり、またホログラフィック・ステレオグラムにおける歪補正の処理法 [23] とほぼ同様の処理といえる。

5. 3. 3 再生像の視域

再生された3次元アニメーション画像は、Fig. 5. 7に示す斜線の領域の中から正しい像として観察できる。水平方向の視域は第8章で述べる通常のマルチドット法における視域と同じである。しかし垂直方向についてFig. 5. 7 (b)に示した視域より外部から観察すると、異なる時間の像が上下方向にずれて重なって観察される。

垂直方向に関する視域を構成する窓の垂直方向の幅 w_a と奥行き方向の深さ z_a を求めると、

$$\begin{aligned} w_a &= \frac{l}{f} d \\ z_a &= \frac{2s_v l}{s_v^2 - w_a^2} (w_a - e) \end{aligned} \quad (5. 5)$$

となる。ここで l は観察者とホログラム面の距離、 f は物体光集光用レンズの焦点距離、 d は液晶パネル上に表示された各フレームの画像の垂直方向の幅、 s_v はホログラム面における各フレームの画像の高さ、 e は目の瞳の大きさである。

(5. 5) 式より、アニメーション画像表示における視域を広くするためには、観察位置をホログラム面から離れた位置とし、また窓の垂直方向の幅 w_a を広くする必要がある。ホログラムフィルムを垂直方向に等速度に移動してアニメーション画像を表示すると、垂直方向に対して再生像にボケを生じる。これはホログラムフィルムを垂直方向に動かすと、Fig. 5. 7 (b) の視域の中では再生像も垂直方向に移動するためである。したがってこのボケの大きさは視域の窓の幅 w_a に一致する。これよりボケを小さくするためには w_a を小さくしなければならず、奥行き方向の視域 z_a が狭くなり、視域と動きによるボケの間に矛盾が生じることになる。本方式では再生像がホログラム面に対して垂直方向に移動するため、この点は回避できない本質的な問題点である。

(5. 5) 式では、液晶パネルに表示された各フレームの画像の垂直方向の幅は各フレームの画像の垂直方向の間隔と等しいものとしたが、液晶パネル上の画像の幅をその間隔よりも狭くすることで垂直方向のボケを低減することが可能である。しかし、この幅は液晶パネルの解像度により制限される。また液晶パネルがホログラム記録光学系で観察位置近傍に結像していれば液晶パネル上に表示された窓の幅の投影となるが、結像点が観察位置から離れていた場合には回折によって広がる。さらに、白色光で再生すると、光源サイズや波長分散によるボケによっても再生された窓の幅は広がる。垂直方向のボケをできるだけ小さくするためには、垂直方向の視域窓の幅をできるだけ小さくする必要がある。したがって液晶パネルは観察位置近傍に結像させるべきであり、また液晶パネル上でも幅の細い窓を表示ればよい。しかし、窓の幅には限界があり、また奥行き方向の視域 z_a が狭くなるため、窓の幅を細くする方法では根本的な解決はできない。

ボケを抑制する有効な方法は、パルス照明を行うことである。パルスを再生のフレームレートに同期させて照明すれば、ボケの量を削減することが可能である。パルス照明の発光時間を t 秒としたとき、垂直

方向の動きによるボケの量 b [mm] は

$$b = N w_a t$$

(5.6)

に削減される。ここで N は1秒あたりのフレーム数である。

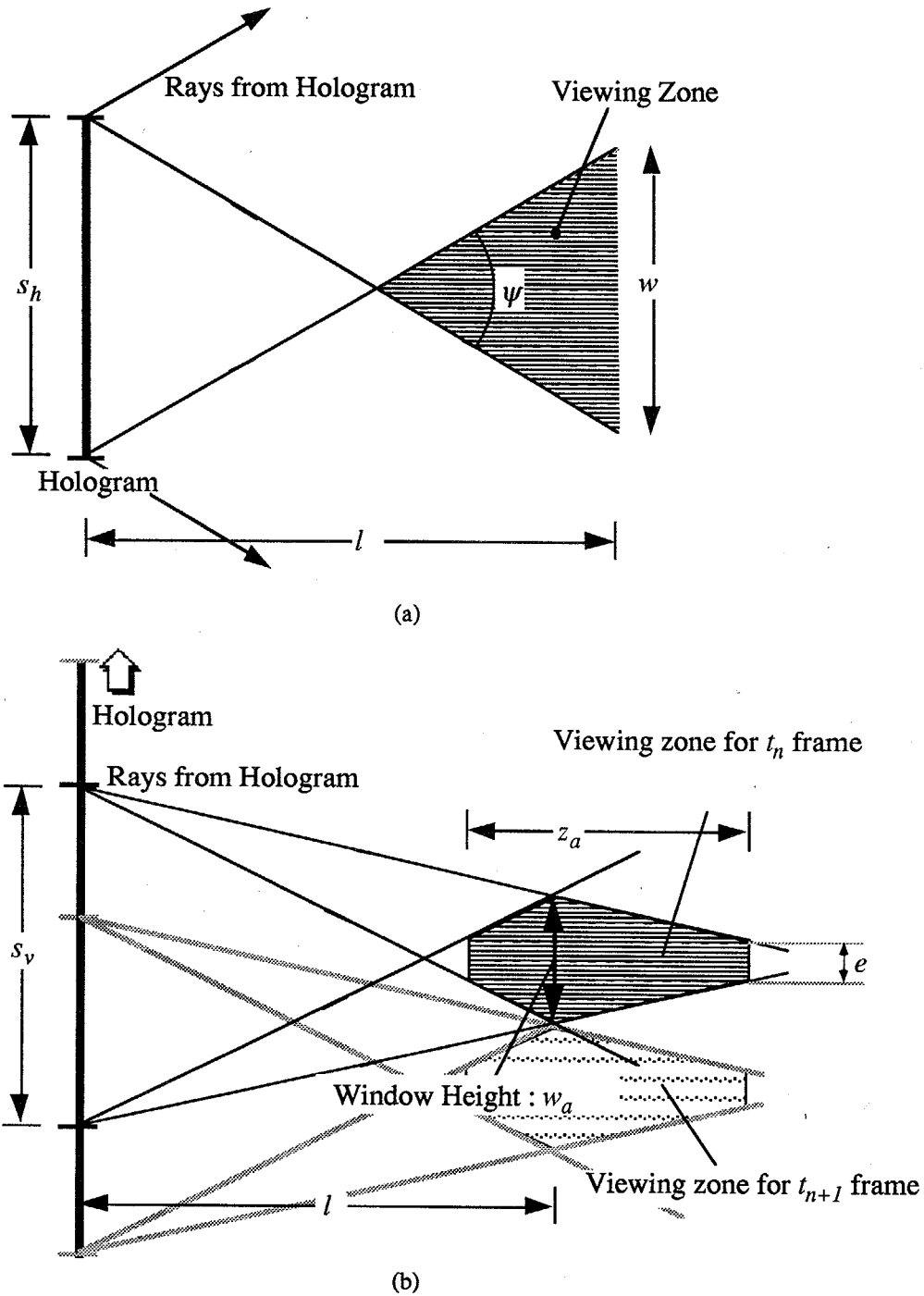


Fig. 5. 7

ホログラフィック・3-Dアニメーション再生像の視域

5. 4 実験

本手法によって動きのある3次元画像を立体像として合成できることを確認するため、短いアニメーション画像を合成する実験を行った。実験光学系は3. 3節で用いたシステムと同じものを用い、Fig 5. 8に示すワイヤーフレームによる25コマの3次元アニメーションデータをホログラムに記録した。Fig. 5. 9に再生像を示す。Fig. 5. 8とFig. 5. 9には記録したアニメーション中の1, 13, 25コマ目の左右の方向から観察した画像をそれぞれ示してある。

ホログラム感材としてガラス乾板を用いたため、アニメーションを分割して記録し、張り合わせて再生を行った。要素ホログラムの総数は、 160×512 個であり、これを3枚の乾板に分割し、3枚のうち2枚には 160×192 個、残りの1枚には 160×128 個の要素ホログラムを記録した。アニメーションの各フレームの立体像はそれぞれ 160×128 個の要素ホログラムで構成される。要素ホログラムの間隔は水平・垂直とも0. 5 mmで、各フレームのサイズは $80 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$ である。各要素ホログラムには、8フレーム分の画像が記録されている。液晶パネル上での各フレームの幅は画素数で1画素とし、残りの3画素の幅は光が透過しないように液晶パネルには画像を表示していない。これは、白色光再生における光源サイズや波長分散によるボケで再生された窓の幅が広がった際に、異なる時間の画像が重なって再生されることを避けるためである。液晶パネルに表示して露光した画像は $256 \times 32 \text{ pixel}$ であり、露光に用いたデータは2値画像で各画素1 bitであるが、総データ量は約 20 Mbyte となった。

液晶パネルに表示した画像からの回折の影響を避けるため、ここでは液晶パネルを観察位置近傍に結像させて合成を行った。また垂直方向のボケを低減するために参照光はホログラム面に対して水平方向から入射する系とした。しかし白色光再生した場合、ホログラム面から 500 mm 離れた観察位置で再生された窓の幅は約 8.0 mm であった。したがって等速移動で再生した場合には、Fig. 5. 10に示すように垂直方向に約 8.0 mm の像のボケが生じる。Fig. 5. 10はアニメーション再生中にカメラのシャッターを開放して撮影したもので、棒が倒れる動きがみえるが、垂直方向のボケが大きいことがわかる。なお各フレームに対応する窓の間隔は観察位置で 8.0 mm であり、各フレームの再生像が重なって再生されることはなかった。なお、Fig. 5. 9およびFig. 5. 10は 35 mm のカメラレンズで絞りを $f/11$ として撮影したものであり、このときカメラレンズの瞳の大きさは約 3.2 mm で、人間の瞳の大きさとほぼ等しい。したがってFig. 5. 9およびFig. 5. 10は人間が観察した際に見える画像とほぼ同等なものである。ストロボ照明でボケを低減する場合、例えば本ホログラムを 12 frames/sec の速度で再生するとき、 5 msec のストロボで照明すればボケの量は約 0.48 mm となり、これは要素ホログラム間隔よりも小さく十分小さい値といえる。

なお、Fig. 5. 9の再生像はホログラムを静止させて各コマの写真を撮影したものである。ホログラム面から 50 cm 離れた位置にカメラを置き、水平方向に関してカメラを移動させて観察すると、約 50 cm の幅の視域内で像を観察することができた。(8. 3)式による計算値では水平方向の視域の幅は 43 cm であり、ほぼ予想通りの結果を得ることができた。

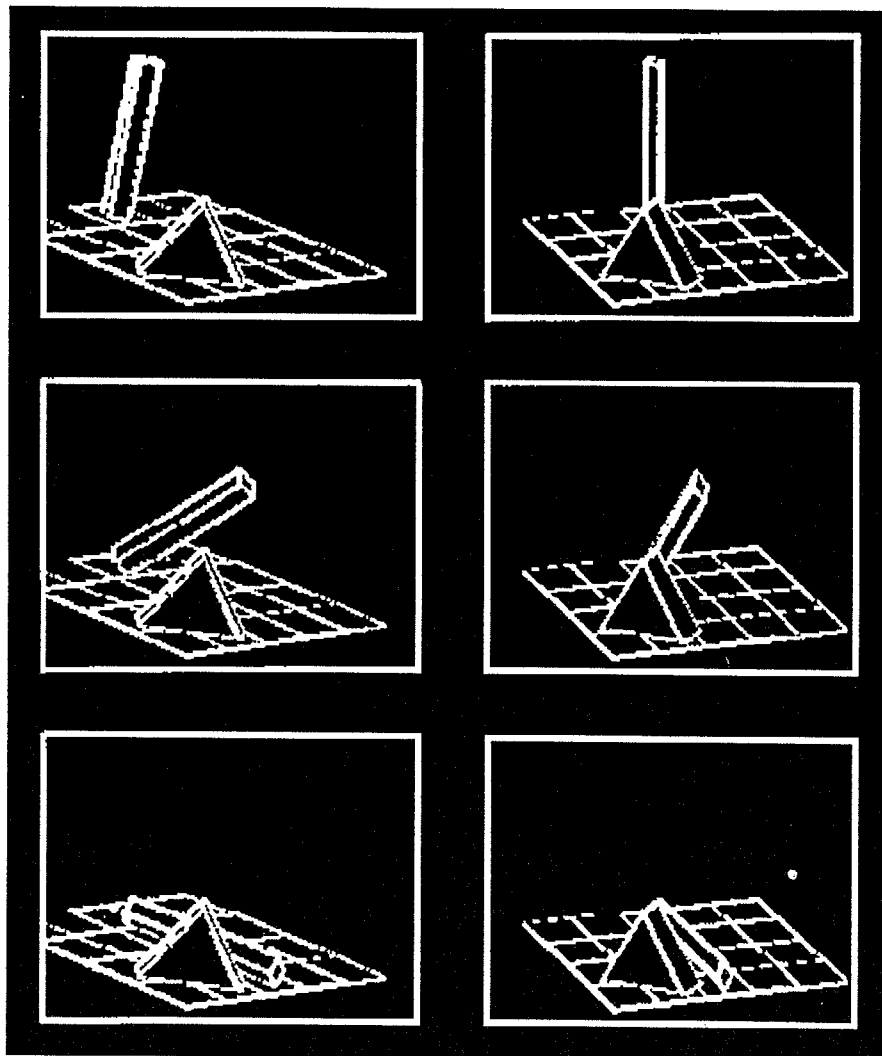


Fig. 5. 8

記録した物体から計算した投影像。1, 13, 25コマ目からの再生像に対応する画像を示す。

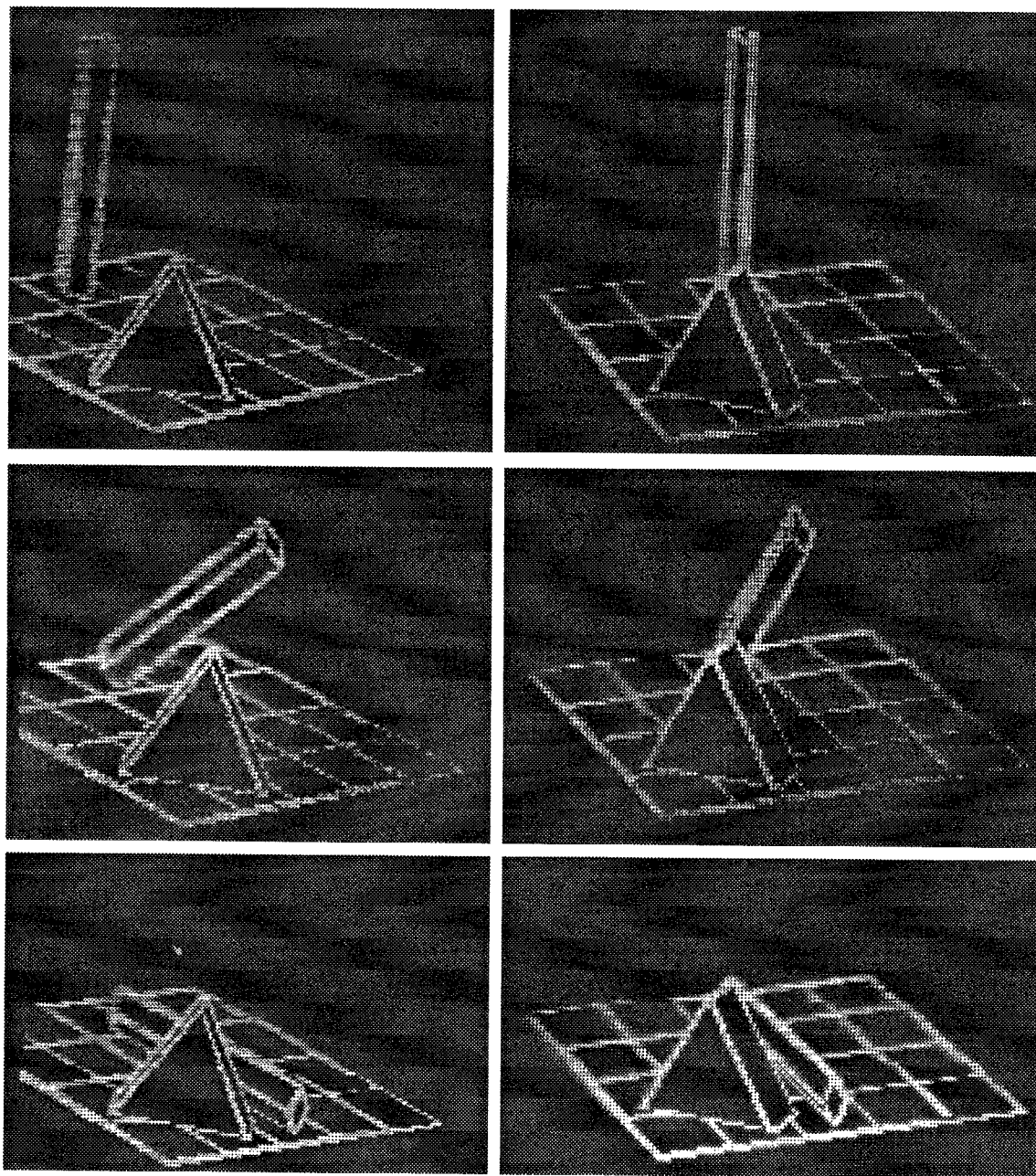


Fig. 5. 9

ホログラムからの再生像の写真。1, 13, 25コマ目からの左右それぞれから見た再生像を示す。

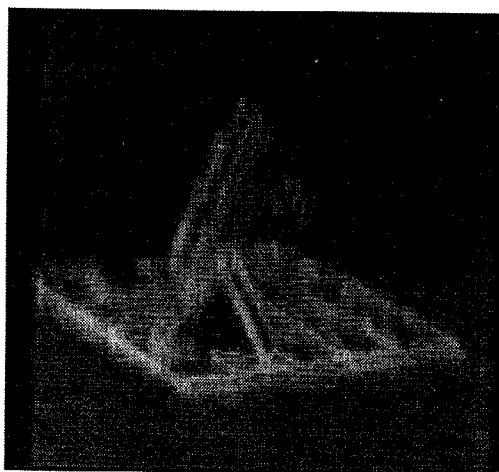


Fig. 5. 10

3-Dアニメーションの動画再生の様子。アニメーション再生中にカメラのシャッターを開放して撮影した。棒の部分が倒れていく様子がわかる。また垂直方向のブレによるボケが大きい。

5. 5 結論

本節では、ホログラフィック・3-Dプリンタの応用として、動きのある画像を記録する手法について述べた。マルチドット記録法ではドット状の微少な要素ホログラムの集まりとしてホログラムを合成するため、長時間の3-Dアニメーションも小型の光学系で合成できる。上記の実験のように複数のフィルムなどに分割して撮影し、ホログラム現像後につなぎ合わせることもできる。

長時間のアニメーションを記録する場合は、計算や合成に要する時間が大きな問題である。今回の実験では25コマからなるワイヤーフレームの物体についての原画を作成するのにワークステーション

(Sun-4/160)を用いて約13時間を要した。ホログラムの合成は全露光点数について計32時間となった。原画の計算は通常のコンピュータグラフィックスにおけるアニメーション計算と同様であるが、水平方向の視域で多数の視点（視差方向数分）に対する画像の計算を行わなければならない。原画の計算時間はコンピュータグラフィックスの技術の進歩により今後短縮されることが考えられるが、合成に要する時間を短縮するためにはホログラフィック・3-Dプリンタの合成の高速化が不可欠の課題であり、3.5節で述べたような高速化の方法は非常に重要である。

ホログラフィック・3-Dアニメーションは、マルチドット法で記録できる垂直方向の自由度を被写体の動きの情報に用いたものである。ホログラフィック・3-Dプリンタを用いれば、露光する画像を換えるだけでこれらの情報を選択できる。出力したい画像によっては被写体の形の精度や垂直方向の視差よりも動きの情報が重要である場合もあることから、本手法によりホログラフィック・3-Dプリンタの応用範囲を拡張できたといえる。

第6章 反射型ホログラフィック・スクリーンによる立体像表示

6. 1 はじめに

リップマン型ホログラフィック・ステレオグラムを用いたホログラフィック・3-Dプリンタは高画質の立体像を出力できるのだが、実用的な3-Dプリンタを実現するには新しい光学システムを開発しなければならない。またホログラフィ用感光材料に関しても取り扱いやコストの点で問題は多い。本章では、ホログラフィック・3-Dプリンタと同様の原理に基づく立体像表示を、従来の高解像度プリンタを用いて実現し、より簡便に立体像ハードコピー出力を行う手法について述べる。

本手法においては、ホログラフィック・3-Dプリンタで記録する原画の情報を通常のプリンタにより透明フィルムに出力し、この透過フィルムをあらかじめ作成した反射型のホログラフィック・スクリーンに張り付ける。この反射型スクリーンは光線の方向のみを制御するもので、3次元物体の情報は記録されていない。したがってホログラフィック・スクリーンはホログラムのコピーの技術を用いて大量生産することが可能であり、3-Dプリンタは画像を高解像度に記録する従来のプリンタ技術をそのまま利用でき、ホログラフィックな記録プロセスは不要となる。

本章では、反射型ホログラフィック・スクリーンを用いた立体像表示法の原理について述べ、表示できる画像の画質について、特に再生像の歪と視差方向数の限界の検討を行う。また実験的に立体像を記録した結果を示す。

6. 2 原理

本手法の原理は、マルチドット方式のホログラフィック・ステレオグラムと同様に光線の記録と再生の原理に基づいている。Fig. 6. 1のように画像を記録した透過フィルムをホログラフィック・スクリーンに張り付けることで、ホログラフィック・スクリーンから再生されるあらゆる方向へ向かう光線を変調し、立体像表示を行う。

ホログラフィック・スクリーンは、Fig. 6. 2に示すように反射型の微小な要素ホログラムアレイからなっており、平行光で照明すると各要素ホログラムから発散光が再生される。このホログラムはマルチドット方式の記録光学系で、画像パターンによる変調を行わずに露光することで作成できる。Fig. 6. 2からわかるように、ホログラフィック・スクリーンは凹レンズアレイと同様な役割を持っているが、凹レンズアレイと異なり表面が平面であるので、透過フィルムを張り付けて光線の強度変調を行うことが可能である。反射型のホログラフィック・スクリーンとしては、リップマン型とレインボウ型のものが考えられるが、ここではリップマン型のスクリーンについて考える。レインボウ型ホログラフィック・スクリーンに関しては6. 4. 3節で述べる。

一方、ホログラフィック・スクリーンに張り付ける透過フィルムには、視差情報を示す画像を記録する。

各要素ホログラムに対応する領域にそれぞれ一枚の画像を記録する。この画像は、マルチドット法で要素ホログラムに露光する原画と同じものであり、Fig. 6. 2 (a) の配置に基づいて、ホログラフィック・ステレオグラムの原画作成と全く同じ方法で計算される。各画像は要素ホログラムから再生される発散光の焦点を投影中心として投影変換されたものであり、各画像のそれぞれの画素は、ホログラフィック・スクリーンに張り付けた際にその画素の位置を通過し、ある方向へ再生される光線の強度を示している。このように透過フィルムは光の強度変調を行うものでホログラフィックな記録の必要はない。

再生においては、Fig. 6. 3 (b) のように、透過フィルムに記録した画像により照明光とホログラフィック・スクリーンからの回折光が同時に変調される。照明光の一部が透過フィルム上の画像によりブロックされ、透過した光のみがホログラフィック・スクリーンに入射する。ホログラフィック・スクリーンで回折された光は、再び透過フィルムで変調され、再生される。透過フィルムとホログラフィック・スクリーンの間隔が十分小さければ、3次元物体を表示する光線が正しく再生される。なお、階調を持つ画像を記録する場合には、透過フィルムで2回変調されることを考慮して階調の補正を行う必要がある。

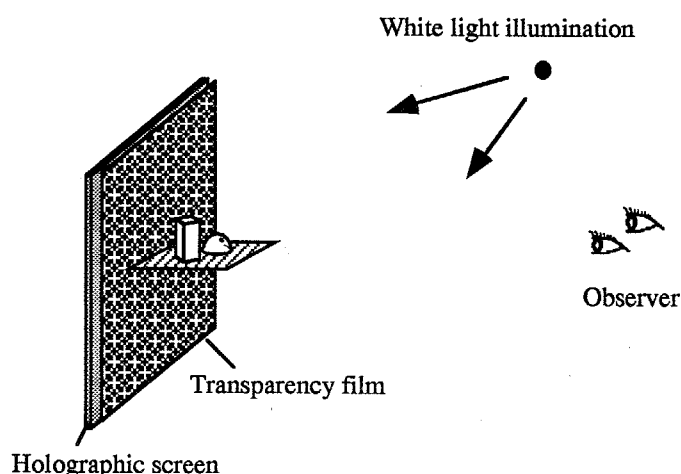


Fig. 6. 1

ホログラフィック・スクリーンを用いた立体像表示

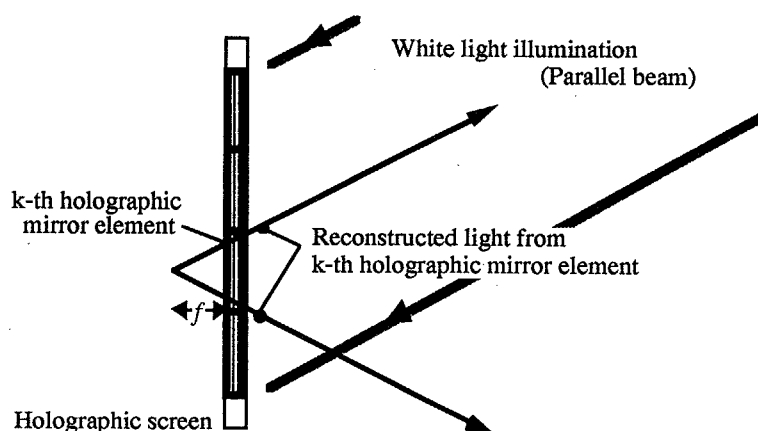
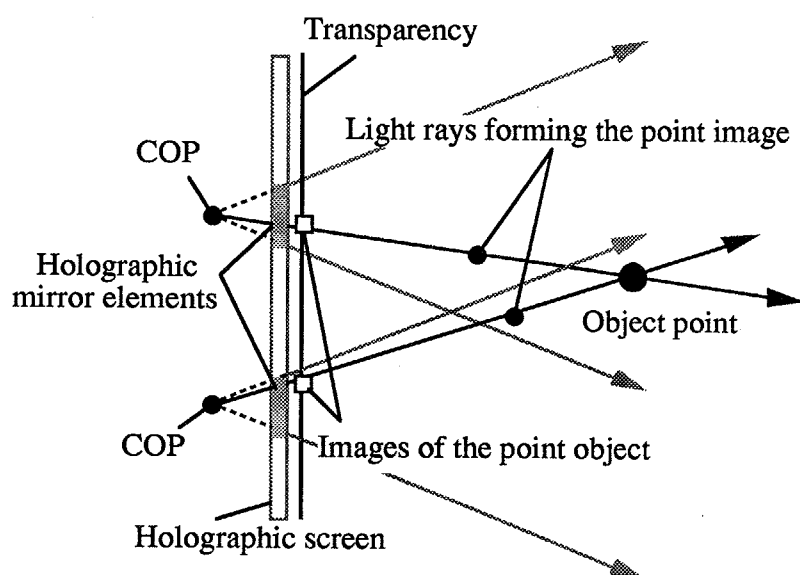
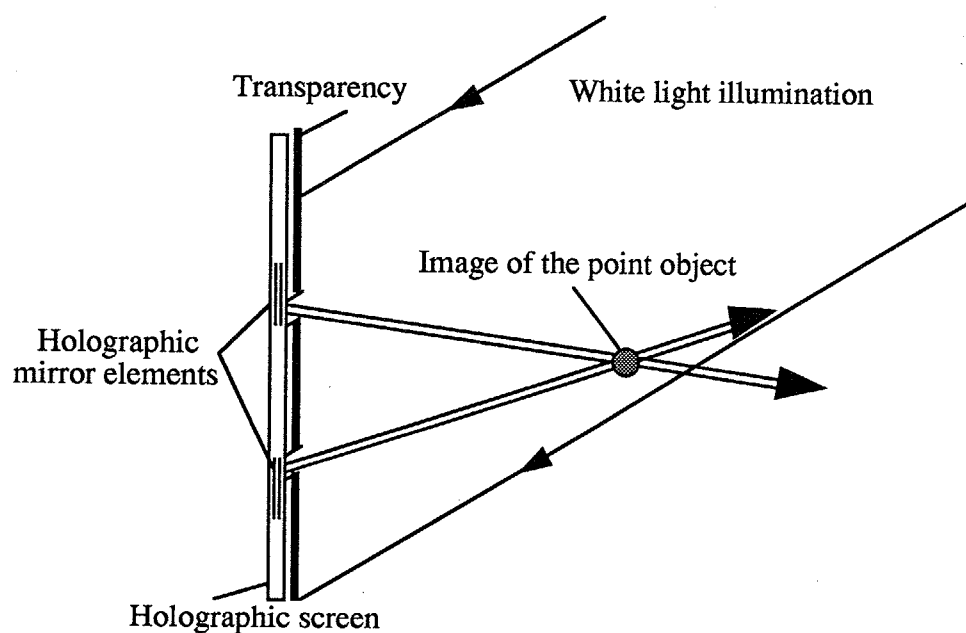


Fig. 6. 2

反射型ホログラフィック・スクリーンの拡大図。 f は要素ホログラフィックミラーの焦点距離



(a)



(b)

F i g . 6 . 3

ホログラフィック・スクリーンによる立体表示の原理

(a) 透過フィルム画像作成。(b) 再生。

COP : Center of projection

6. 3 像再生の特性

本節では、本手法による立体像再生の特性に関して考察する。マルチドット方式の再生像の画質に関しては第8章で詳しく考察を行うので、ここではホログラフィック・スクリーンを用いた場合の問題点を中心に述べる。

6. 3. 1 再生像の歪

再生像に歪を生じる原因としては、(A) 照明光が平行光でない、(B) 透過フィルムのアラインメントエラー、などが挙げられる。照明光が平行光でない場合の歪に関しては、通常ホログラムの場合と同等であるので、ここでは透過フィルムがホログラフィック・スクリーンに対して正しくセットされていない場合の歪について述べる。

再生像の歪を定量化する前に、まず本方式による光線の記録と再生の定式化を行う。ここでは、 (x_i, y_i, z_i) に位置する物点を記録する場合の再生像の位置のずれについて考える。ホログラフィック・スクリーンの中心を原点とし、光軸方向に z 軸をとる座標系を考え、 k 番目のエレメントの中心位置を (x_k, y_k) とすると、この点像は k 番目のエレメントの画像として、 k 番目のエレメントの中心から $(\Delta\xi_k, \Delta\eta_k)$ 離れた位置に記録される。幾何学的関係から、原画の計算は次式のように書くことができる。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\xi_k}{f} &= \frac{x_i - x_k}{z_i + f} \\ \frac{\Delta\eta_k}{f} &= \frac{y_i - y_k}{z_i + f}\end{aligned}\quad (6. 1)$$

ここで f はホログラムによる凹面鏡の焦点距離 (絶対値) である。なお、この点像が記録された座標 (ξ_k, η_k) は

$$\begin{aligned}\xi_k &= x_k + \Delta\xi_k \\ \eta_k &= y_k + \Delta\eta_k\end{aligned}\quad (6. 2)$$

である。

次にこのようにして記録した透過フィルムをホログラフィック・スクリーンに張り付けて再生することを考える。再生される光線を式で表すと、

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\xi'_k}{f} &= \frac{x - x_k}{z + f} \\ \frac{\Delta\eta'_k}{f} &= \frac{y - y_k}{z + f}\end{aligned}\quad (6. 3)$$

となる。ここで $(\Delta\xi'_k, \Delta\eta'_k)$ は点像が記録されている画像上の座標 (ξ'_k, η'_k) と次式の関係にある。

$$\begin{aligned}\xi'_k &= x_k + \Delta\xi'_k \\ \eta'_k &= y_k + \Delta\eta'_k\end{aligned}\quad (6. 4)$$

透過フィルムが正しい位置にセットされた場合、 $(\xi'_k, \eta'_k) = (\xi_k, \eta_k)$ であるので、

$$\frac{z+f}{z_i+f} = \frac{x-x_k}{x_i-x_k} \quad (6.5)$$

を得る。したがってこのとき全てのエレメントから再生された光線は $z = z_i$ で一点に交わり、その座標 (再生点像の座標) は当然 $(x, y, z) = (x_i, y_i, z_i)$ となり、歪のない立体像が再生される。

次に透過フィルムとホログラフィック・スクリーンの相対位置関係が正しい位置からシフトし、また透過フィルムに記録された画像の倍率が正確でない場合に関しての再生像の歪を求める。ここでは、透過フィルムがホログラフィック・スクリーンに対して微少なシフト $(\delta x, \delta y)$ および倍率 m のずれを持ってセットされた場合、 (x_i, y_i, z_i) に位置する点物体の再生像の位置を計算する。なおここでは倍率のずれは透過フィルムの中心 (原点) を中心に拡大または縮小されるものとした。上記のずれがある場合、

$$(\xi'_k, \eta'_k) = (m\xi_k + \delta x, m\eta_k + \delta y) \quad (6.6)$$

となるため、(6.6) 式を (6.3) 式に代入することで、再生点像の位置 (x_c, y_c, z_c) は

$$\begin{aligned} x_c &= x_i + \frac{(z_i + f)\{\delta x + (m-1)x_i\}}{f - (m-1)z_i} \\ y_c &= y_i + \frac{(z_i + f)\{\delta y + (m-1)y_i\}}{f - (m-1)z_i} \\ z_c &= z_i + \frac{(m-1)(z_i + f)z_i}{f - (m-1)z_i} \end{aligned} \quad (6.7)$$

となる。この式から、例えばホログラフィック・スクリーンが平行移動した場合、再生像も平行に移動するが、その奥行きによって移動量が異なるため、像がゆがんで表示されることがわかる。

さらに、 x 方向と y 方向の倍率が等しくない場合には、容易にわかるように点像を再生する場合に非点収差が発生する。また透過フィルムがホログラフィック・スクリーンに対して傾いた場合、ねじれた光線が再生され、観察位置を移動すると、再生点像の位置が変化してしまう。一方、スクリーンと透過フィルムの間に隙間がある場合には、透過フィルムを2回透過する光線が往復する際に異なる画素を通過するため、正しい立体像を表示できなくなる。一般には透過フィルムのセッティングの精度は、透過フィルムに記録された画像の解像度以上である必要がある。精度よくセッティングを行う手法に関しては、6.4.2 節で検討を行う。

6.3.2 再生像の解像度

ここでは再生像の解像度に関して、(A) 透過フィルム面上に観察される画像の解像度、(B) 再生される光線の角度分解能、の2点から考察を行う。(A) の透過フィルム上に観察される画像の解像度は、マルチドット法によるホログラフィック・ステレオグラムと同様、要素ホログラフィックミラーの間隔で決まる。つまり高解像度の画像を再生するためには、エレメント間隔を細かくする必要がある。一方再生像がスクリーン面から離れると再生される光線の角度分解能にも依存する。また再生される光線の角度方向への分解能は、記録できる視差の細かさを表しているともいうことができる。ここではまず再生光の角度分解能に関して検討し、その結果を用いてエレメント間隔に関する制限について述べる。

再生される光線の角度分解能は、主に以下に示す要因により劣化する。

- (1) ホログラフィック・スクリーンから再生される光線の広がり
- (2) 透過フィルム上の画像の解像度
- (3) 透過フィルム上の画像による回折

(1) の要因は、通常ホログラムにおける再生像のボケと同じものである。例えば光源に広がりがある場合や再生波長の広がりなどの影響により再生される光線が広がりを持つため、再生光の角度方向の分解能が劣化する。これらに関してはよく知られているボリュームホログラムなどの理論から明らかであるため、ここでは(2)および(3)の要因に関して考察する。

(2) の要因は、透過フィルム上の画像の解像度から幾何的に考察できる。ホログラム面から再生される光線の角度方向への広がり $\Delta\theta_g$ を考えると、

$$\Delta\theta_g = \frac{\delta}{f} \quad (6.8)$$

となることが容易にわかる [Fig. 6.4 (a)]。ここで δ は透過フィルム上の画像の空間分解能である。この広がり の頂点はホログラフィック凹面鏡の焦点位置となる。一方、透過フィルム上の画像により再生光は回折され、透過フィルム上から観察方向へ再生される光線は広がりを持つ。この回折による光線の角度方向への広がり $\Delta\theta_d$ は、Fig. 6.4 (b) より近似的に

$$\Delta\theta_d = \frac{\lambda}{\delta} \quad (6.9)$$

と書ける。ここで λ は再生光の波長である。なお、この広がり の頂点は透過フィルム上である。ここでは(6.8)式と(6.9)式で光線の広がり の頂点の差に関しては微小であるものとして無視する。

再生光の角度分解能 $\Delta\theta$ は、近似的に次式に示すように(6.8)、(6.9)式の和で表現できる。

$$\Delta\theta = \Delta\theta_g + \Delta\theta_d = \frac{\delta}{f} + \frac{\lambda}{\delta} \quad (6.10)$$

この式から、再生光の角度分解能は、透過フィルム上の画像の解像度に対してトレードオフの関係にあることがわかる。そこで透過フィルム上の画像の解像度を最適化することで角度分解能の限界を求める。

(6.10)式から容易に、最適化を行った際の分解できる最小線幅 δ_{max} とそのときの角度分解能に関して

$$\delta_{max} = \sqrt{\lambda f} \quad (6.11)$$

$$\Delta\theta_{opt} = 2\sqrt{\lambda/f} \quad (6.12)$$

を得ることができる。この結果から、本手法による再生光の角度分解能は、ピンホールカメラ・ステレオグラムと一致することがわかる [34]。これはホログラフィック・ステレオグラムなどと比較するとかなり劣る。

(6.12)式の角度分解能から、記録できる最大の視差方向数 N_{max} を求めると

$$N_{max} \leq \frac{d}{\sqrt{\lambda f}} \quad (6.13)$$

となる。ここで d はホログラフィック凹面鏡の幅である。このようにエレメントの大きさを小さくすると記録できる視差方向数は比例して小さくなる。エレメントの間隔をその幅よりも小さくすることは不可能であるため、ホログラフィック・スクリーン面上の画像の分解能は記録する視差方向数により (6. 13) 式のように制限されることがわかる。実際には観察する距離や再生像のサイズ及び位置などにより適当なパラメータを選択する必要がある。

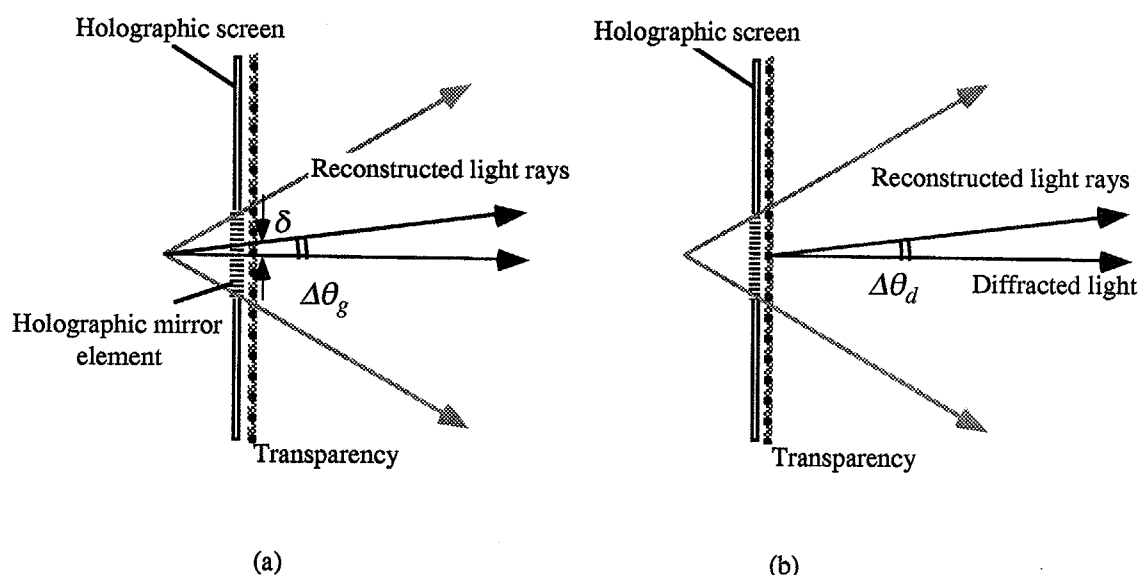


Fig. 6. 4

再生光線の角度分解能

- (a) 透過フィルム上の画像の分解能による光線の広がり
- (b) 透過フィルム上の画像における回折による光線の広がり

6. 4 実験および考察

6. 4. 1 実験結果

実験では、3次元データから投影像の計算をワークステーションにより行い、計算した画像から透過フィルムに記録するパターンを求めた。透過フィルムに記録する画像はポストスクリプトデータとして出力し、このデータを高解像度のレーザプリンタに送り、透明フィルムに画像を記録した。また、ホログラフィック・スクリーンとしては、第3章で述べたマルチドット方式のホログラム合成光学系において、空間光変調器を使用せずに撮影したホログラムを用いた。Fig. 6. 5に透明フィルムに記録した画像パターンを示す。ここでは2値のワイヤフレームの3次元物体の記録を行った。各エレメントの間隔は水平・垂直方向とも1.0mmとし、80×80個のエレメントからなる。各エレメントは25×25方向の視差情報を持ち、透明フィルム上には2000×2000画素の画像が記録されている。

ハロゲンランプにより照明した際の再生像をFig. 6. 6に示す。透明フィルムとホログラフィック・スクリーンの位置合わせは目視で行ったが、ほとんど歪のない再生像が得られている。

なお、ここで用いたホログラフィック凹面鏡は焦点距離が -1.45 mm であり、 $\lambda = 0.6\text{ }\mu\text{m}$ の光で再生した場合、記録可能な最大の視差方向数は(6.13)式から約34方向である。また、Fig. 6.5の画像には 1.0 mm に25方向の視差情報が記録されているので、画像の解像度は625 DPI (Dot per Inch) に対応する。記録可能な最大の視差方向数である34方向を記録する場合の透過フィルム上の画像の解像度は850 DPIとなり、2値画像に関しては現在のレーザプリンタの技術で十分である。

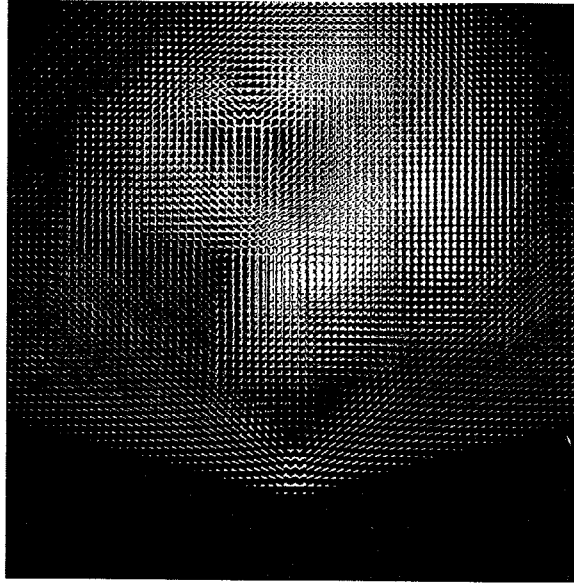


Fig. 6.5
透過フィルムに記録した画像パターン

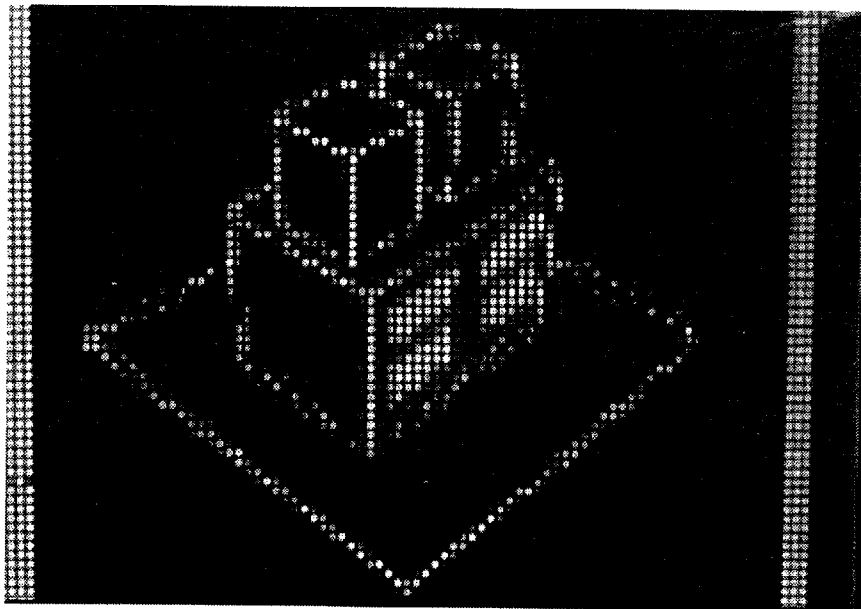
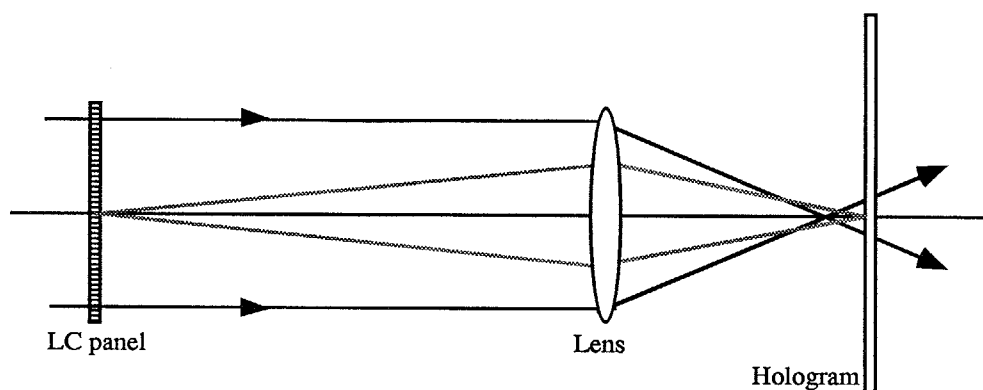


Fig. 6.6
再生像



F i g . 6 . 7

マルチドット記録法で原画をホログラム面近傍に結像させた光学系。実線は光線の向き、点線は結像関係を表す。

6. 4. 2 マルチドット法によるホログラフィック・ステレオグラムとの比較

ホログラフィック・スクリーンの方法は、マルチドット法でホログラフィック・ステレオグラムを合成する際の原画を透過スクリーンに記録し、ホログラムには光線方向を制御する機能のみを持たせたものと考えることができる。したがって両者の光線の記録・再生の原理は全く同様である。しかしホログラフィック・スクリーンにおいては記録できる視差情報の限界がホログラフィック・ステレオグラムと比較してかなり低い。これは回折の影響が大きく効くためと考えられる。

F i g . 3 . 1 のマルチドット法の記録光学系において、F i g . 6 . 7 のように液晶パネルの結像位置のみを変更した系を考える。このとき液晶パネルに表示した原画はホログラム面直後に結像しているため、ホログラム面を拡大してみると縮小された原画の強度分布がそのまま記録されている。言い換えれば原画の強度分布によりホログラムの干渉縞のコントラストが変調されている。この強度分布をホログラムとは別の透過フィルムに記録してホログラムに重ねても同じ効果を得ることができ、これがホログラフィック・スクリーンによる立体像表示法である。

このことから、マルチドット法のホログラフィック・ステレオグラムで原画の結像位置がホログラム面に近いときは、角度分解能が低いことがわかる。第8章での検討では、原画の結像位置を無限遠方にしたときに再生像のボケが小さくなることが示されており、上記の検討結果と一致する結論となっている。

6. 4. 3 レインボウ型ホログラフィック・スクリーン

本章の実験ではホログラフィック・スクリーンとしてリップマン型のホログラムを用い、水平・垂直方向に視差を持つ立体像を記録したが、レインボウ型のスクリーンを用いることも可能である。レインボウ型ホログラムは、薄いホログラムであるため、表面レリーフ型として反射型のホログラムを作成でき、エンボスの技術により低コストで大量生産することが可能である。当然レインボウ型を用いる場合には垂直方向の視差を記録することは不可能だが、簡便な3-Dプリンタとして有望な方法であると考えられる。

また、第7章で述べる手法を用いてマルチカラーの再生像を得ることもできる。この手法は波長による回折角の違いを利用してカラーの再生像を得るものであるため、モノクロのプリンタで自由なカラー表現が可能である。

なお、レインボウ型のホログラフィック・スクリーンを用いて立体像表示を行う考え方は、グレーティングイメージと呼ばれる手法〔75〕とほぼ同じ原理といえる。

6. 4. 4 ホログラフィック・スクリーンを用いた3-Dプリンタ

ホログラフィック・スクリーンを用いた立体像表示法は、あらかじめスクリーンを大量生産しておくことで、ホログラフィックな記録の必要がない簡便な3-Dプリンタを実現する手法として有効と考えられる。画質の点ではホログラフィック・3-Dプリンタには劣るが、はるかに実現は容易である。殊に前節で述べたようなレインボウ型ホログラフィック・スクリーンを用いれば、ホログラフィック・スクリーンは低コストで生産可能で、通常の高解像度レーザプリンタを用いて立体像を出力できる。また水平方向のみの視差を記録するための画像データは最近パーソナルコンピュータ用に安価で市販されている3次元グラフィックスのレンダリング用ソフトウェアを用いることで簡単に計算できる。

本手法を用いて3-Dプリンタを実現するためには、ホログラフィック・スクリーンに高精度で透過フィルムを張り付ける技術が必要とされる。アラインメントを行う方法としては、参照用の再生像をフィルムの両端または周囲などに記録しておき、その再生像が最もシャープに再生されるようにフォトディテクタなどでモニタしながら位置合わせを行う手法などが考えられる。(6. 7)式から、参照用の再生像がスクリーン面から離れているほど位置合わせの精度は高くなることがわかる。また、ホログラフィック・スクリーンに対する参照点の座標を測定することは困難であるが、奥行き異なる2つ以上の点を参照点として用いて、その再生点像の相対位置から平行移動を検知すればよいと考えられる。さらにプリント時にフィルムが熱などの影響で伸縮した場合には再生像が(6. 7)式に従って歪を持って再生される。これらの影響についても検討し、プリンタにより出力された透過フィルムに自動的にスクリーンを張り付ける装置を開発する必要がある。

6. 5 結論

本章では、3-Dプリンタを実現する簡便な方法として、反射型のホログラフィック・スクリーンを用いた方法について述べた。ホログラフィック・スクリーンに画像を記録した透過フィルムを張り付けることで立体像表示を行うことができる。この方法によれば、あらかじめホログラフィック・スクリーンを複製技術により作成しておくことで、3-Dプリンタにおいてはホログラフィックな記録を必要としないため、従来のプリンタ技術により3-Dプリンタを実現できる。本章では、透過フィルムを張り付ける際のアラインメント誤差に関して考察し、精度よくセットする装置が必要であることを述べた。また像再生の特性に関して考察し、本手法による再生光線の角度分解能はピンホールカメラステレオグラムと同等であり、ホログラフィック・ステレオグラムと比較して低いことが示された。しかし応用分野によってはこの程度の画質でも十分実用に耐えるものと考えられる。

本節の実験では、要素間のピッチ1.0 mmで視差方向数 25×25 の立体像を記録した。本手法の限界としては、要素間のピッチ0.5 mmで視域の角度が 60° のとき、記録できる最大の視差方向数は(6.13)式より29方向となる。このとき、透過スクリーン上の画像の解像度は 58 line/mm で、これは 1450 DPI 程度のプリンタを用いて記録することができる。この程度の解像度のプリンタは、現在既に実用化されており、近い将来一般にも普及すると予想される。本手法はパーソナルコンピュータとこの程度の解像度のプリンタおよびフィルムのアラインメント機構で3-Dプリンタを実現できるため、3-Dプリンタの第1段階として有用であると考えられる。

第7章 マルチドット法によるレインボウホログラムの記録

7. 1 はじめに

マルチプレックス・ホログラム [16] は、円筒型で 360° あらゆる方向から観察でき、円筒の回転に合わせて像の動きを表示できるなどの特徴を持っているため、イベントなどの展示や広告・宣伝などのディスプレイ媒体として有望である。またホログラフィック・ステレオグラムであるため、人物やコンピュータグラフィックスや建築物のモデルなど、様々な被写体を立体像として表示することができる。レインボウ型であるため再生像に歪が存在するが、上記のような応用においては像の正確さはそれほど重要ではないため、致命的な問題とはならない。しかし、従来のマルチプレックス・ホログラムの合成方法では再生像の大きさが制限されている。現在のところ利用されているマルチプレックス・ホログラムでは $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 程度の大きさが限界であり、これは上記のような目的に対しては不十分である。したがってマルチプレックス・ホログラムを上記目的に用いるためには大型のホログラムを作成する技術の開発が必要不可欠である。

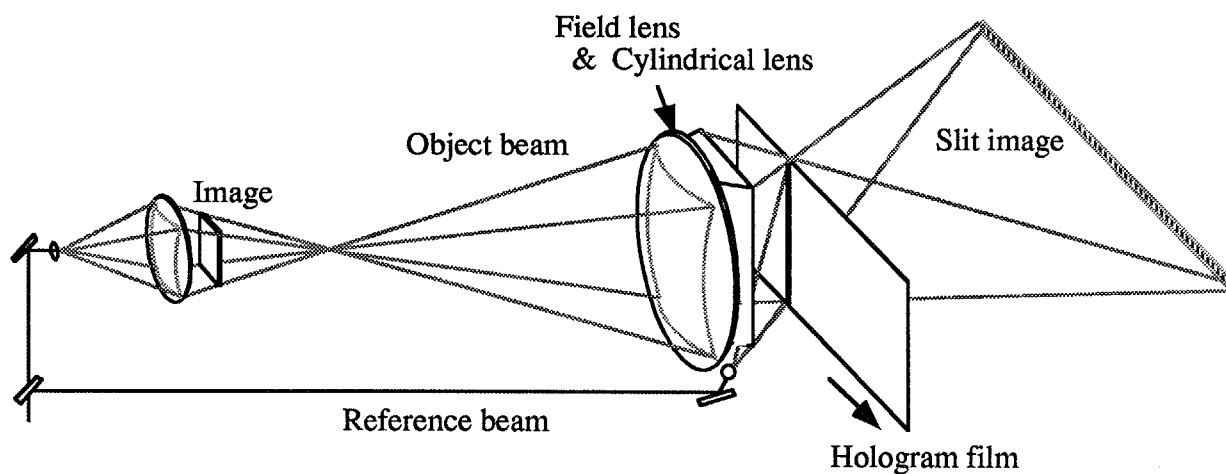
大型のマルチプレックス・ホログラムを作成する際の最大の問題点は、Fナンバーの小さな大型のシリンドリカルレンズが必要な点である。通常再生像のサイズと同等な大きさのレンズが必要である。これに対して、アナモルフィック光学系と呼ばれる細長いシリンドリカルレンズ系を組み合わせた光学系による方法が提案されている [76]。またホログラフィック光学素子を用いてFナンバーの小さいシリンドリカルレンズを作成し、大型のマルチプレックス・ホログラムを合成する手法も提案されている [17]。しかし、これらの手法を用いても、再生像のサイズが光学部品の大きさにより依然として制限される。また光学系が大きくなるため安定性の高い大きな光学定盤などの特殊な設備を用いる必要がある。さらに物体光と参照光の間の光路長差がホログラムの上部と下部で大きく異なるため、コヒーレント長の長いレーザを用いないと回折効率が低下するなどの問題点もある。

本章では、第3章で提案したマルチドット記録方式を、レインボウ型ホログラフィック・ステレオグラムの記録に用いることを提案する。ここではマルチドット法をレインボウ型ホログラムに対して適用し、垂直視差方向の自由度を用いてレインボウホログラムのスリットを合成する。さらにこの垂直方向の自由度を用いると、ある高さで観察するとカラーの立体像の再生が可能なマルチカラーホログラム (4. 2. 2 節参照) の記録も可能である。マルチドット記録方式は、点状の微少な要素ホログラムを順に記録して大きなホログラムの合成を行うものであるため、大型のホログラムを小型のシステムで記録できる。したがって、光学系サイズによる再生像の大きさの制限は解消する。

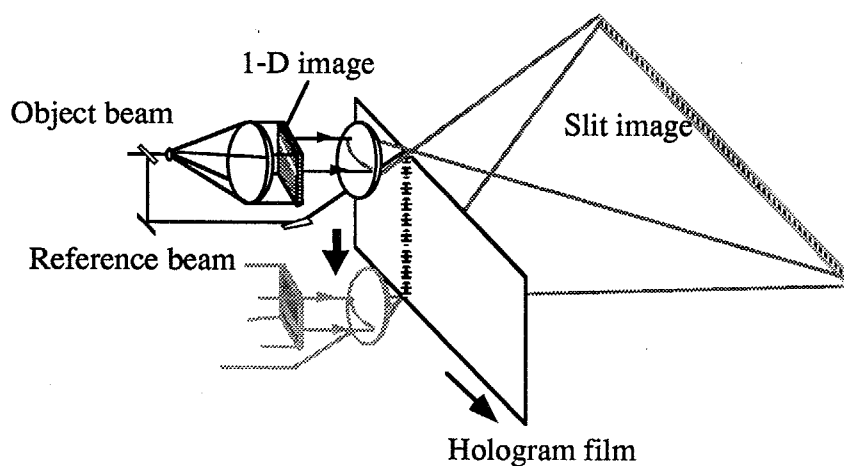
レインボウ型ホログラムでは、異なる高さに複数のスリットを記録してカラーホログラムやホログラフィック・ステレオグラムの記録を行う手法は既に提案されているが、ほとんどは2ステップのホログラム記録プロセスを必要とする。1ステップのホログラム記録法としては、3色のレーザを用いるか、参照光角度を各色毎に変えるシステムが報告されている。本論文の手法では、単色のレーザで、参照光角度は変えず

に物体光を変調する画像を変えるだけでマルチカラーホログラムの記録が可能である。

本章では、7. 2節でマルチドット法によるレインボウホログラムのスリットを記録する方法の原理を、7. 3節ではマルチカラーホログラムの記録の原理を述べる。また、レインボウホログラフィック・ステレオグラムとマルチカラーホログラフィック・ステレオグラムを記録した実験結果を7. 4節に示す。



(a)



(b)

Fig. 7. 1

マルチプレックス・ホログラムの記録システム

(a) 従来の記録光学系

(b) マルチドット法による記録

7. 2 原理

7. 2. 1 レインボウ型ホログラム記録の原理

従来のマルチプレックス・ホログラムの合成光学系では、F i g. 7. 1 (a) に示すように、垂直方向に細長い多数の要素ホログラムを順次記録する。F ナンバーの小さいシリンドリカルレンズは、視差情報を記録するために用いられ、焦点距離の長い球面レンズ（視野レンズ）は、物体光を垂直方向に対して観察位置に集光してレインボウホログラムのスリットを生成する。マルチドット法では、F i g. 7. 1 (b) のように、ホログラム面上を水平方向だけでなく垂直方向にも分割して記録する。光学系では小さな1組のレンズ系が上記の2つのレンズの役割を果たすため、小型の光学系で大型のホログラムを合成することができる。

本手法によるレインボウホログラム合成の光学系をF i g. 7. 2に示す。各要素ホログラムに記録する物体光は、水平方向に細長いパターンで変調されており、このパターンの高さを適切に変調することでレインボウホログラムのスリットが合成される。水平方向の視差情報に関しては第3章で述べたマルチドット法と同様の原理に基づいて記録・再生されるので、ここではスリットを合成する方法を以下に説明する。簡単のため、はじめに第3章と同様に幾何光学的に光線を用いて原理を説明し、回折の影響に関しては7. 2. 4節で述べる。

通常のレインボウホログラムにおいては、水平方向に細長いスリットの実像が観察者の瞳の位置に再生され、垂直方向に関する射出瞳になっている。このスリットの実像を生成するために、記録光学系で物体光を変調する空間光変調器（液晶パネル）には水平方向に細長い画像を表示する。この水平方向の線状の画像を液晶パネル上に表示する高さは、垂直方向について全ての光線が射出瞳の位置に集まるように以下の式に従って決められる。

ここで x 軸、 y 軸、 z 軸がそれぞれ水平方向、垂直方向、光軸方向に対応する座標系を考え、ホログラム面の中心が座標系の原点にセットされているとする。なおここでは平面型のホログラムを考えるが、垂直方向のスリットの生成に関しては円筒型でも全く同等である。F i g. 7. 3に記録・再生光学系の側面図を示す。幾何的關係から、 k 番目の要素ホログラムに露光する際に、液晶パネルに表示する線状の画像の高さ h_k は

$$h_k = \frac{(y_k - h_i)}{z_i} f \quad (7. 1)$$

とすればよいことがわかる。ここで射出瞳の位置（観察位置）は $y = y_i, z = z_i$ とした。 f は物体光を集光するレンズの焦点距離であり、 y_k は k 番目の要素ホログラムの中心位置の y 座標である。(7. 1) 式に従って1次元的な画像をホログラムに記録することにより、再生される光は垂直方向に関して射出瞳の位置に集光する。スリットの形状や幅は、液晶パネルに表示する画像を変えることで、容易に変更することが可能である。

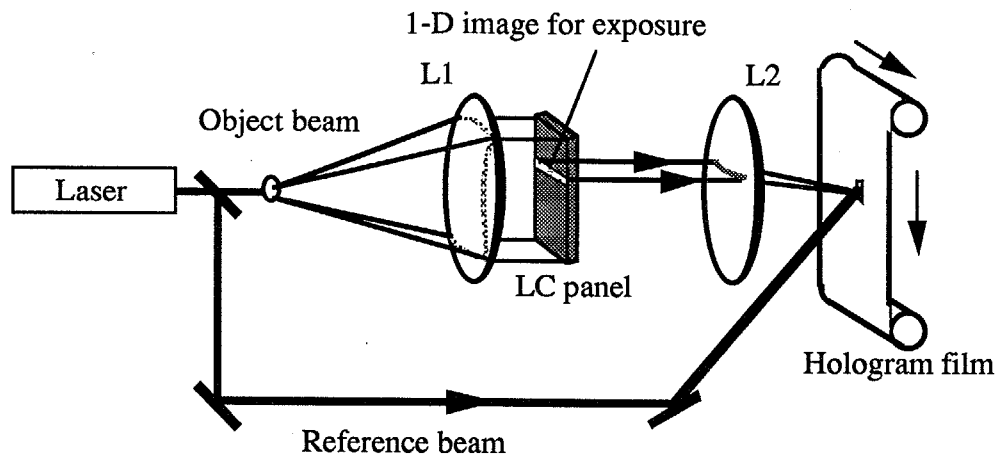


Fig. 7. 2

レインボウ・ホログラフィック・ステレオグラムのマルチドット法による記録光学系

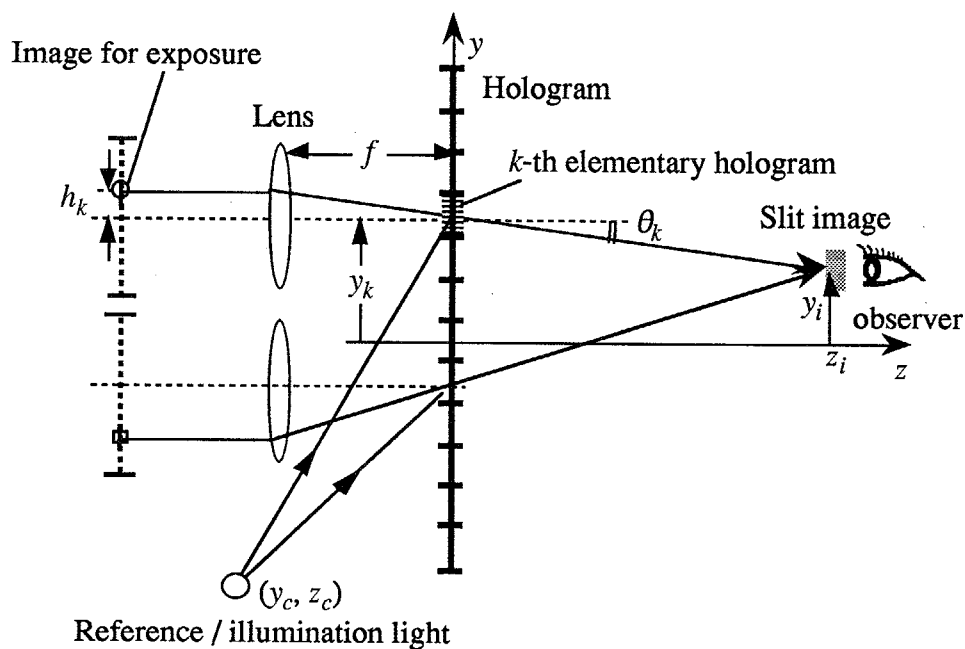


Fig. 7. 3

マルチドット法によるスリットの合成

7. 2. 2 マルチカラーホログラム記録の原理

マルチドット法を用いれば、任意の形状のスリットを記録することができることから、3つのスリットを異なる高さに記録することで、マルチカラーの立体像表示を行うことが可能である。なおレインボウ型のマルチカラー表示であるため、目の位置を上下に移動すると色が変わって観察されるが、ある高さで赤(R)、緑(G)、青(B)の再生像が重なって正しい色の再生像を見ることができる。これにより、円筒型のカラーホログラムを本手法を用いて合成できる。

レインボウホログラムにおいて、再生の際にスリットの実像が分光され、各波長のスリット像が並ぶ直線とホログラム面の法線のなす角をアクロマティック角と呼ぶ [22]。カラーレインボウホログラムを合成するためには、ホログラム面の法線に対してアクロマティック角をなす直線上に、3つのスリットの像が並ぶように記録を行う [Fig. 7. 4 (a)]。このホログラムを白色光で再生すると、再生光の波長分散により、3つのスリットの像がそれぞれアクロマティック角に沿って分光され、Fig. 7. 4 (b) のように虹色のスペクトルが観察者の位置の近くで重なりあう。R, G, Bの各スリットの実像が対応する色で再生されている位置に目をおいて観察すれば、各スリットからの光が正しく重なりあってカラーの立体像を観察できる。記録するスリットの位置は、再生において、各スリットからの3原色の光が射出瞳の位置で重なりあうように決めればよい。

簡単のため $y-z$ 面のみを考え、参照光源と再生照明光源の位置はどちらも (y_c, z_c) とする。フレネル近似の仮定の下で j 番目の色のスリットを記録すべき位置 (y_j, z_j) ($j=R, G, B$) は、

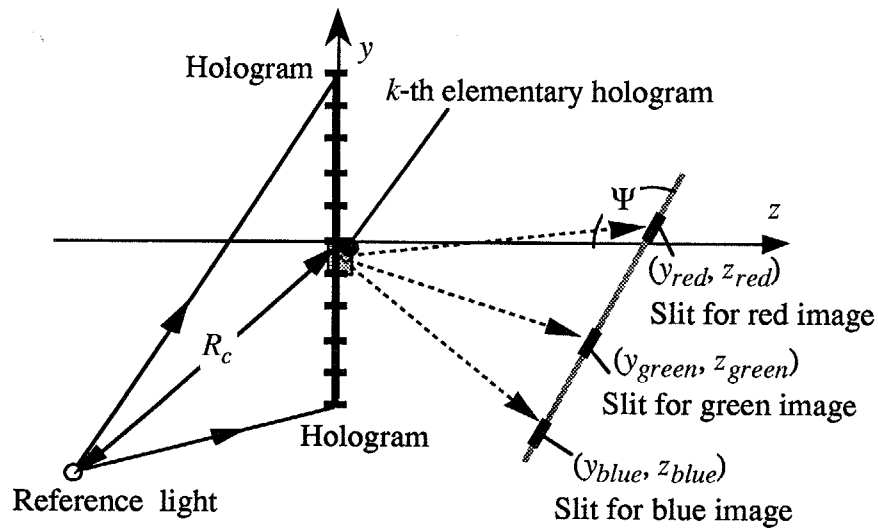
$$\begin{aligned} z_j &= z_i - \frac{(1-\mu_j)(z_i + R_c)z_i}{(1-\mu_j)z_i + R_c} \\ y_j &= y_i - \frac{(1-\mu_j)(y_i - y_c)z_i}{(1-\mu_j)z_i + R_c} \end{aligned} \quad (7.2)$$

ここで $R_c = \sqrt{y_c^2 + z_c^2}$ 、 $\mu_j = \lambda_j / \lambda_r$ 、 λ_r および λ_j はそれぞれ記録と再生における光の波長である。また射出瞳の位置は、 (y_i, z_i) にあるものとした。このとき、アクロマティック角 Ψ は (7.2) 式より、

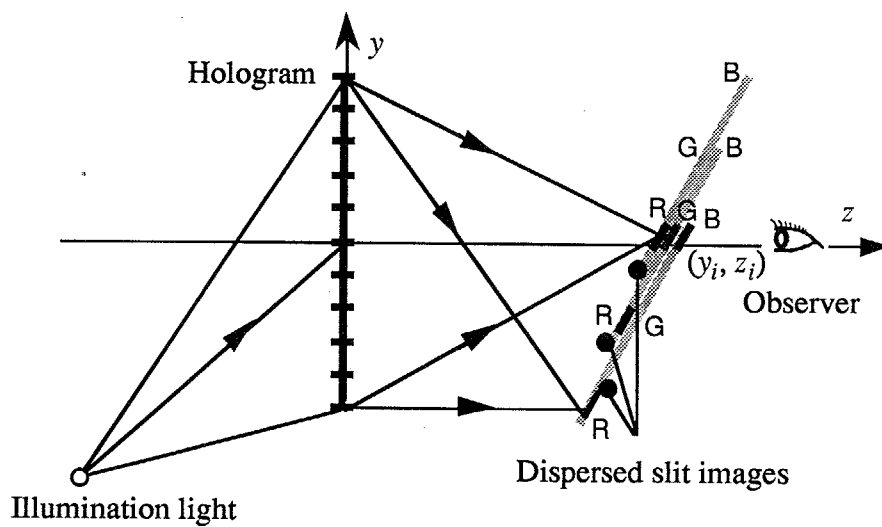
$$\tan \Psi = \frac{y_j - y_i}{z_j - z_i} = \frac{y_i - y_c}{z_i + R_c} \quad (7.3)$$

であり、従来のレインボウ型ホログラフィック・ステレオグラムの場合 [66] と一致する。(7.1) 式から (7.3) 式を用いて液晶パネルに表示する線上の画像の高さを決定すれば、本手法によりカラーの再生像を得ることができる。なお、(7.2) 式および (7.3) 式の導出は次節で述べる。

本手法によるカラーホログラムでは、記録に用いたレーザ光の波長と再生光の波長が各色のスリット毎に異なるため、再生像の横倍率がそれぞれ異なり、ボケの原因となる。再生像の色によるボケを避けるには、各要素ホログラムに記録する画像の横倍率を補正する必要がある。 j 番目の要素ホログラムに記録する画像の x 軸方向に対して、 $m_j = 1/\mu_j$ のようにあらかじめ計算機処理により画像の倍率を補正する。その結果再生されたスリットの像は正しく重なりあい、ボケのないカラーの立体像を表示することができる。



(a)



(b)

Fig. 7. 4

マルチカラーレインボウホログラムの記録

(a) 3原色のスリットの記録。 Ψ はアクロマティック角

(b) 白色光による再生。スリットの実像は射出瞳の位置に各原色の光で再生される。

7. 2. 3 スリット位置の導出

ここでは、前節のスリットの位置を求める式 (7. 2) の導出を示す。従来のホログラムやホログラフィック・ステレオグラムに対しては、同様の式が導出されているが、本手法は垂直方向にもホログラム面を分割して記録するため、導出方法は異なる。したがって、はじめに垂直方向に分割して記録するホログラフィック・ステレオグラムにおける結像 (光線の意味で) を定式化する。なお、回折の影響についてはここでは無視し、次節で考察する。

Fig. 7. 4 に示す系を考え、 k 番目の要素ホログラムにおける記録・再生の定式化を行う。簡単のため、 $y-z$ 面内でのみ考える。回折の影響を無視すれば、物体光はスリットの方に向かう平面波と仮定できる。このとき、 k 番目の要素ホログラムに記録される物体光の波面 U_o は、近似的に次式のように書ける。

$$U_o = A_o \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda_r} (y_h - y_k) \sin \theta_k\right\} \quad (7. 4)$$

ここで A_o は物体光の振幅で、 θ_k は物体光のホログラム面に対する入射角を表す。

ここでは参照光と再生照明光源は同じ点 (x_c, y_c) とし、再生像点を求めるために再生された光が (x_i, y_i) に収束すると仮定する。このとき、ホログラム面における記録波面 U_r と再生波面 U_c は

$$U_r = A_r \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda_r} \{(y_h - y_k) \sin \theta_k - r_c\}\right\} \quad (7. 5)$$

$$U_c = A_c \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda_c} (r_i - r_c)\right\} \quad (7. 6)$$

となる。ここで A_r および A_c は各波面の振幅であり、また

$$\begin{aligned} r_c &= \sqrt{(y_c - y_h)^2 + z_c^2} \\ r_i &= \sqrt{(y_i - y_h)^2 + z_i^2} \end{aligned} \quad (7. 7)$$

である。一般的なホログラムの結像理論 [77, 78] で行われる手法と同様に、 r_c, r_i および $\sin \theta_k$ を以下のように級数展開する。

$$\begin{aligned} r_c &= R_c + \frac{y_h^2}{2R_c} - \frac{y_c y_h}{R_c} + \dots \\ r_i &= z_i + \frac{(y_i - y_h)^2}{2z_i} + \dots \\ \sin \theta_k &= \frac{y_o - y_k}{\sqrt{(y_o - y_k)^2 + z_o^2}} = \frac{y_o - y_k}{z_o} \left\{1 + \frac{(y_o - y_k)^2}{2z_o^2} + \dots\right\} \end{aligned} \quad (7. 8)$$

ここで、 $R_c = \sqrt{y_c^2 + z_c^2}$ 。この級数は、

$$\begin{aligned}
R_c^2 &> y_h^2 - 2y_c y_h \\
z_i^2 &> (y_i - y_h)^2 \\
z_o^2 &> (y_o - y_k)^2
\end{aligned} \tag{7.9}$$

の条件が満足されれば収束する。(7.5)式と(7.6)式に(7.8)の展開式を代入し、2次よりも高次の項を無視すると、その位相項は、

$$\begin{aligned}
\phi_r &\equiv \frac{2\pi}{\lambda_r} \left\{ \frac{(y_o - y_k)(y_h - y_k)}{z_o} - \left(R_c + \frac{y_h^2}{2R_c} - \frac{y_h y_c}{R_c} \right) \right\} \\
\phi_c &\equiv \frac{2\pi}{\lambda_c} \left\{ z_i + \frac{(y_i - y_h)^2}{2z_i} - \left(R_c + \frac{y_h^2}{2R_c} - \frac{y_h y_c}{R_c} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{7.10}$$

となる。ここで ϕ_r と ϕ_c は(7.5)式と(7.6)式の位相項を示す。

第8章で述べるように、ホログラフィック・ステレオグラムには波面の2次の位相項が記録されていないため、文献[77, 78]などで用いられているような通常の位相マッチングによる結像関係の導出手法は用いることができない。そこで、ここでは波面の進む方向を比較してマッチングをとる手法を用い、位相の式の微分が整合するように像再生の式を求める。(7.10)式の微分を計算することで、

$$\begin{aligned}
\frac{d\phi_r}{dy_h} &\equiv \frac{2\pi}{\lambda_r} \left\{ \frac{(y_o - y_k)}{z_o} - \frac{y_h}{R_c} + \frac{y_c}{R_c} \right\} \\
\frac{d\phi_c}{dy_h} &\equiv \frac{2\pi}{\lambda_c} \left\{ \frac{(y_i - y_h)}{z_i} - \frac{y_h}{R_c} + \frac{y_c}{R_c} \right\}
\end{aligned} \tag{7.11}$$

となり、この2つの式が同等になるように (y_o, z_o) を求めればよい。これより、

$$\begin{aligned}
(1 - \mu_c) \frac{1}{R_c} - \frac{\mu_c}{z_o} + \frac{1}{z_i} &= 0 \\
(1 - \mu_c) \frac{y_c}{R_c} - \mu_c \frac{y_o}{z_o} + \frac{y_i}{z_i} &= 0
\end{aligned} \tag{7.12}$$

が得られる。ここで $m_o = \lambda_o / \lambda_r$ である。

上式より、正しいカラーの再生像を得るために、スリットを記録すべき位置を求める。各色のスリットからのそれぞれの波長の再生光が射出瞳の位置で正しく重なりあうように、記録すべきスリットの位置を求める。そこで j 番目の色のスリットに対して(7.12)式の添え字 o を j に置き換えることでスリットを記録すべき位置 (y_j, z_j) を以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned}
z_j &= z_i - \frac{(1 - \mu_j)(z_i + R_c)z_i}{(1 - \mu_j)z_i + R_c} \\
y_j &= y_i - \frac{(1 - \mu_j)(y_i - y_c)z_i}{(1 - \mu_j)z_i + R_c}
\end{aligned} \tag{7.13}$$

7. 2. 4 回折の影響

ここまでの節では、本手法の原理を全て光線により幾何光学的に記述してきたが、本節では回折の影響について簡単に述べる。ホログラフィック・ステレオグラムにおける回折の影響に関して詳しくは第8章で考察を行うが、ここでは再生されるスリットの幅に対する回折の効果について示す。

このホログラムの光学系においては、液晶パネルに表示した画像や要素ホログラムの位置における回折により、再生されるスリットの像の幅が広がる。Fig. 7. 2の光学系において、液晶パネルはレンズ L_2 の前焦点面付近にあり、ほぼスリットの位置に結像している。したがって液晶パネル上の画像による回折の影響は小さいと考えられる。このとき液晶パネル上に表示された線状の画像の幅を d_s とすると再生されたスリット上で幅 $w_s = (f + z_i) d_s / d = f(1 + f / z_i)$ に拡大投影される。ただし d は液晶パネルとレンズ L_2 の間の距離である。一方、要素ホログラムの幅による回折パターンは再生されたスリットの実像に重なる。フラウンホファー近似の下では、回折パターンの幅は約 $w_h = \lambda z_i / a_e$ となる。ここで a_e は要素ホログラムの幅である。単色光で再生されるスリットの幅は、近似的に $w_h + w_s$ で与えられる。

$f = d = 50 \text{ mm}$, $z_i = 0.6 \text{ } \mu\text{m}$, $a_e = 0.5 \text{ mm}$, $d_s = 50 \text{ } \mu\text{m}$ のとき、 $w_s + w_h$ は約 2.3 mm となり、これは通常のレインボウホログラムにおけるスリット幅とほぼ同等である。各要素ホログラムからのこのような回折パターンが射出瞳の位置で重なりあってスリットを形成する。

7. 3 実験

実験では、本手法を用いて、レインボウ型とマルチカラーのホログラフィック・ステレオグラムの合成を行った。ここでは平面型のホログラムを作成したが、原理的には円筒型と同じものである。ホログラム面近傍に再生されるような3次元物体データをワークステーションにより作成し原画の計算を行った。その後パーソナルコンピュータによって制御される合成システムに計算した画像データを転送した。実験システムは3. 3節のシステムとほぼ同様であるが、光学系はFig. 7. 5に示すように透過型のホログラム記録系となっている。参照光は物体光集光用レンズのワーキングディスタンスが小さいため、このレンズを通して入射した。このとき、参照光がホログラム面上に集光されることを防ぐために、小レンズを物体光集光用レンズの直前に挿入して補正した。

はじめにワイヤフレーム物体をレインボウ型ホログラムとして記録する実験を行った。要素ホログラム数は 150×120 で、原画の画素数は $256 \times 1 \text{ pixel}$ とした。線状の原画の高さは液晶パネルの1画素に対応し、液晶パネル上で $90 \text{ } \mu\text{m}$ で、ホログラム面から 1000 mm 離れた観察位置では 2.0 mm に拡大される。再生像をFig. 7. 6に示す。ホログラムの大きさは $120 \text{ mm} \times 96 \text{ mm}$ で、各要素ホログラムの間隔は 0.8 mm となっている。要素ホログラムによるドットが目立つが、 1000 mm 程度はなれて観察するとほとんど知覚できない。また、再生像が歪を持っていが、これは記録時の参照光は平行光であるにもかかわらず、再生照明光源がホログラム面から比較的近く発散光になっていることが原因であると考えられる。

次に、マルチカラーホログラムを合成した結果をFig. 7. 7に示す。3本の線状のパターンを同時に液晶パネルに表示してFig. 7. 5の光学系で露光を行った。Fig. 7. 7の画像は、奥行きのある7つの六角形パッチからなっており、中心が白色の六角形でその周りに赤、黄色、緑、シアン、青、マゼンタのパッチが浮いている。要素ホログラム数は 140×140 で、ホログラムのサイズは $98.0 \text{ mm} \times 98.0 \text{ mm}$ であり、要素ホログラムの間隔は 0.8 mm とした。なお、ここではカラーバランスの調整は行っていないが、比視感度の低い青の再生像を強調するため、青用のスリットの幅を他の色のスリットの2倍にすることで青の再生像を明るくし、ほぼバランスのとれた色の再生像が得られた。

垂直方向の視域の幅は約 30 mm と狭いが、ホログラムの大きさを大きくし、観察距離をホログラムの大きさに比例して遠くすれば、視域の幅もこれと比例して広がる。例えば現在のホログラムを相似に拡大して 1 m のホログラムを作成すれば、垂直方向に正しい色で観察できる視域は約 300 mm 程度となり、これは広告や装飾などの目的にも十分利用できると思われる。

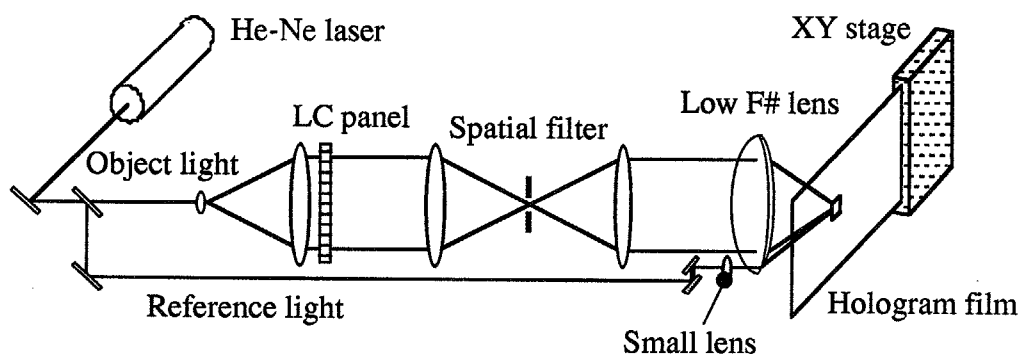


Fig. 7. 5
実験光学系

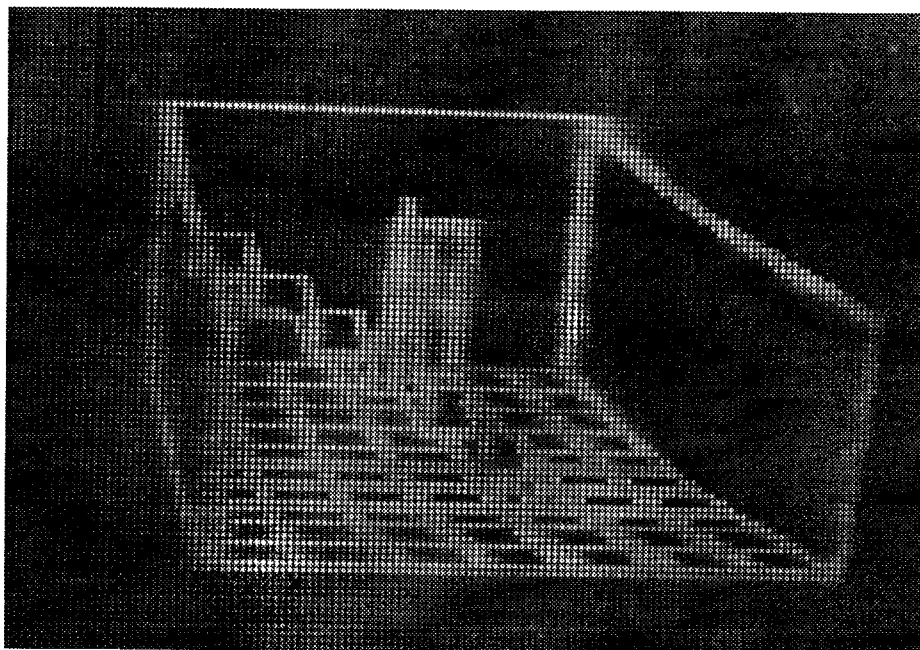
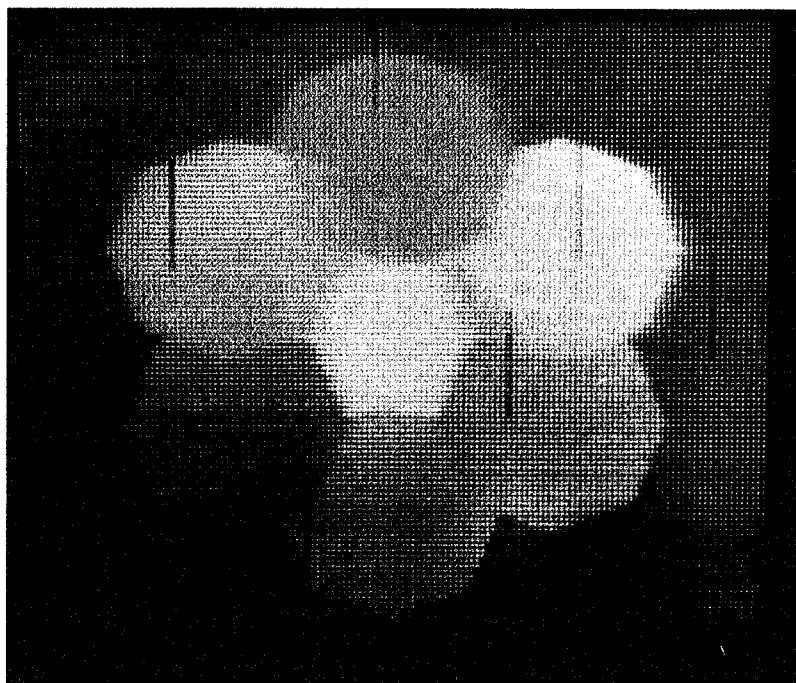


Fig. 7. 6
ワイヤーフレーム物体を記録したホログラムからの再生像



F i g. 7. 7

マルチカラーレインボウホログラムからの再生像。物体は六角形のパッチがホログラム面近傍に浮いているもので、R (赤), G (緑), B (青), Cy (シアン), Mg (マゼンタ), Ye (黄), および白の物体を記録した。

7. 4 結論

本章では、マルチドット記録法をレインボウホログラムに対して拡張し、大型のマルチプレックス・ホログラムの作成やカラーホログラムの作成に有効であることを示した。マルチドット記録法を用いれば光学系の大きさに依存せずに大型のホログラムの合成が可能である。

しかし大型のホログラムを合成するためには要素ホログラム数を非常に多くしなければならず、合成に時間がかかる点が大きな問題点である。本実験では各要素ホログラムの露光に約1秒程度かかっているが、合成系を改善することにより合成時間を短縮することは十分可能である。特にレインボウ型ホログラムの記録では、物体光と参照光は同方向から入射するので、ホログラムフィルムの固定が容易であり、光学系の安定性はリップマンホログラムよりもはるかに高い。加えて透過型ホログラム用感光材料はリップマンホログラム用と比較して感度が高いため、露光時間を非常に短くすることが可能である。またレンズ系を一部シリンドリカルレンズ系に交換し、水平・垂直方向の倍率を変えて物体光を有効に利用すれば、露光時間はさらに短くすることができ、振動を避けるための露光の待ち時間を格段に短縮できることが予想される。画像データを液晶板などに転送する時間を考慮すると、空間光変調器として1次元のデバイスを用いることも考えられる。通常の液晶パネルなどでは現在ビデオ信号で駆動するものが一般的であり、フレームレート以上の速度での露光は困難であるが、1次元の空間光変調器であればデジタル出力により直接

動するものなどを利用して画像の表示を高速に行うことができる。そして物体光の高さを調節する機構を別に用意することで高速な露光を実現できると思われる。加えて、広告やウィンドウ装飾などの分野では、記録にかかる時間の問題はそれほど致命的ではなく、例えば1～3日などで合成が可能であれば十分実用化は可能であると思われる。なぜならこれらの目的に使われている媒体は、現在手作りで作成されているものが多いからである。

本手法は、レインボウマルチカラー型ホログラフィック・ステレオグラム of 作成法としても有効な方法といえる。合成時間の問題が解決されれば、光学系は単純であり、原色とする波長の選択も容易に行えることから、幅広い応用が可能と考えられる。ここでは述べていないがアクロマティックホログラムの手法に適用して、白色の像を表示することも可能である。

本章ではマルチドット法のレインボウホログラム記録への応用について述べた。第5章のアニメーションは垂直視差方向の自由度を被写体の動きに用いたものであるが、本章の手法はレインボウホログラムのスリットを記録するために用いた。さらにマルチカラーホログラムとして、垂直視差方向の自由度を色の情報の表示に用いる手法を提案した。このことから、本節の方法を用いた新しいカラー画像の表示法が可能であることが容易にわかる。すなわち、本章の実験ではレインボウホログラムのスリットを3つ用いて3色の波長の像を射出瞳上に合成したが、 N 個のスリットを合成して N 波長の像を同時に表示することも可能である。これによりマルチスペクトル画像データを正しい色で表示するシステムが可能になる。今後このような応用に関する研究が期待される。

第8章 像再生特性に関する考察

8.1 はじめに

本節では、マルチドット記録法によりホログラフィック・3-Dプリンタから出力されたホログラムの再生像の画質について考察を行う。立体像における再生像の画質に関係する要因としては、(1) 再生像の解像度、(2) S/N比などの2次元画像と同様の要因の他に、(3) 再生像の3次元的な解像度、(4) 視差方向の解像度、(6) 再生像を観察できる範囲(視域)、(7) 再生像の歪、(8) 再生像を表示できる範囲などが挙げられる。再生像の解像度は、物体がホログラム面近傍にあるときは主に要素ホログラムの数と間隔により決定されるが、このとき解像度を向上するには多数の要素ホログラムを記録すればよい。しかしホログラム面から離れた位置に表示される物体の解像度に対してはいくつかの要因が影響する。本章ではまず、マルチドット法により記録されたホログラムにおける立体像の再生特性に関して、再生像の視域について述べ、その後像再生の特性を明らかにするためにホログラフィック・ステレオグラムによる像再生の定式化を行う。そして、再生像の歪および解像度、要素ホログラム間隔と視差方向数の関係、および視覚特性との関係について述べる。また画質を制限するそれぞれの要因において、立体像のディスプレイとして必要とされる条件を示す。

ところで、従来、ホログラフィック・ステレオグラムは基本的にステレオグラムとして扱われており、運動視差や両眼視差によって立体認識されるとして説明されている。しかし、これは記録された視差方向数が少ない場合に成立する条件であり、本手法のように視差方向数を十分多く記録した場合についてはほとんど考察されていない。最近ホログラフィック・ステレオグラムにおけるサンプリングについて、MTFという立場から解析がなされているが[77]、ホログラフィック・ステレオグラムにおいてホログラム面でのサンプリングを細かくして十分多くの視差方向数を記録した場合にホログラムと一致するか、という問題に対する解答は得られていない。8.3節では、視差情報を十分細かく記録したホログラフィック・ステレオグラムの特性について、コヒーレント光で照明した場合の再生波面を考え、波面を記録したホログラムと比較することでホログラフィック・ステレオグラムとホログラムの相違について理論的に明らかにする。さらにホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの中間的な性質を持つPAS(位相を付加したステレオグラム)を考え、ホログラフィに記録される波面の成分のうち、ホログラフィック・ステレオグラムに記録される成分を明確にする。結論から言えば、ホログラフィック・ステレオグラムはサンプリングを無限に細かくしてもホログラムとは一致しないが、PASはホログラムと一致する。さらに、写真縮小法を用いてCGHを作成する実験を行い、これらの考察と一致する結果を得た。

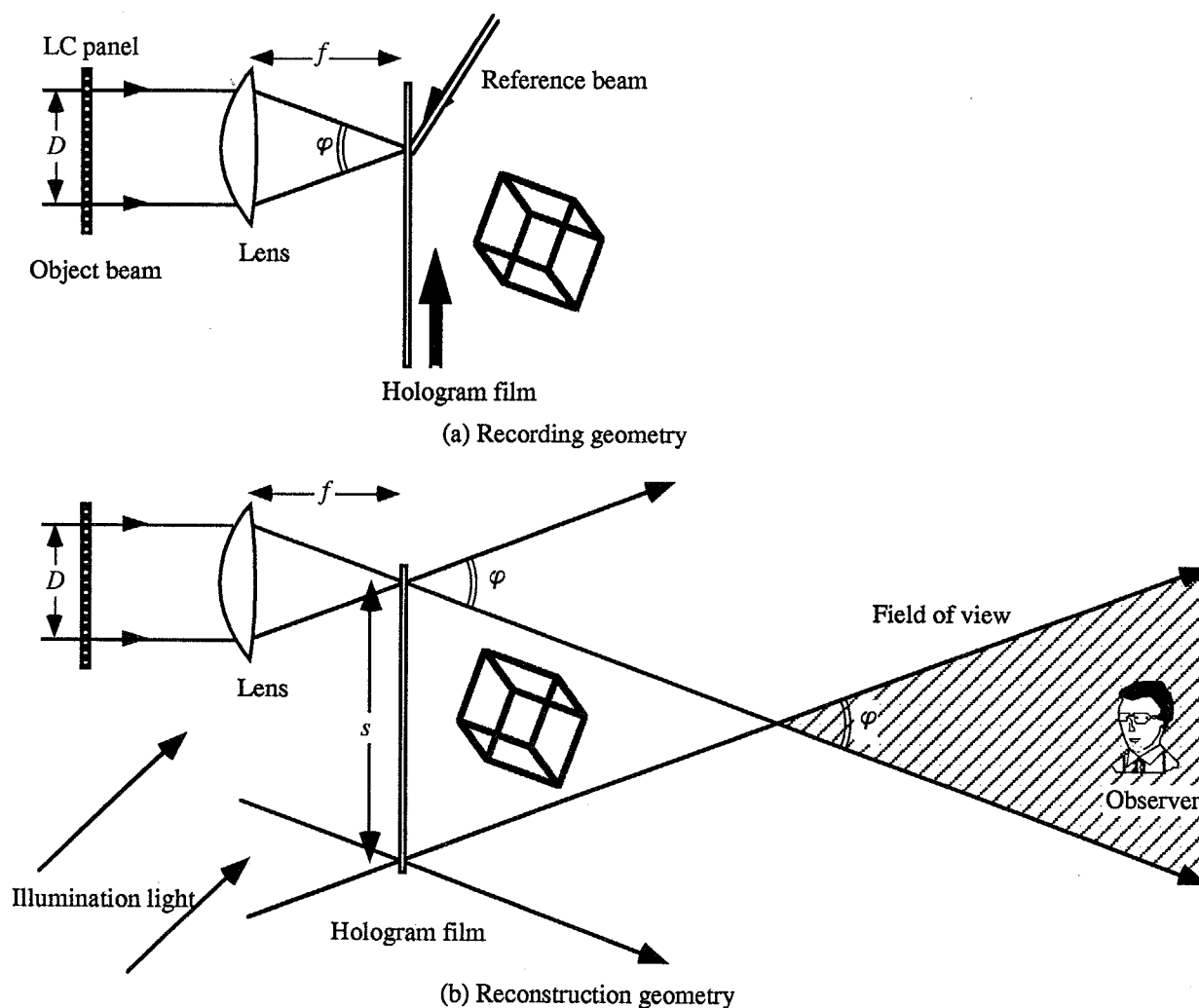


Fig. 8. 1
マルチドット法によるホログラフィック・ステレオグラムの視域
(a) 記録、(b) 再生

8. 2 マルチドット法によるホログラフィック・ステレオグラムの像再生特性

8. 2. 1 再生像の視域

再生像の視域は合成に使用するレンズの f 数で決まる。Fig. 8. 1 (a) のように液晶パネルを透過した光線をレンズにより集光して露光するので、観察時には Fig. 8. 1 (b) に示す斜線の領域内からホログラムを観察した場合に再生像全体を見ることができる。レンズの開口のうち、実際に使用するのは液晶パネルの大きさの範囲内のみであるので、液晶パネルの幅を D とし、レンズの焦点距離を f とすると、ホログラム面に記録される光線は

$$F_{eff} = f / D \quad (8. 1)$$

の f 値を持つレンズで集光された光線と同等である。そこでここでは F_{eff} を実効 f ナンバーと呼ぶことにする。すると、Fig. 8. 1 (b) における視域の広がり角 ϕ は

$$\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2F_{eff}} \quad (8.2)$$

となる。したがってホログラムの幅を s とすると、ホログラム面から l 離れた位置での視域の幅 w は、

$$w = \frac{l - s F_{eff}}{F_{eff}} \quad (8.3)$$

と表される。例えば、3.4節で述べたホログラフィック・3-Dプリンタ装置で用いたレンズ $f/0.79$ においては、レンズの口径を対角線とする正方形の領域を利用するとき、 $F_{eff} \approx 1.12$ となる。このとき視域の広がり角 $\varphi = 48 \text{ deg}$ となり、幅 100 mm のホログラムをホログラム面から 500 mm 離れて観察すると、視域の幅は $w \approx 350 \text{ mm}$ である。十分広い視域のホログラムを作成するためには f 数の小さいレンズの使用が不可欠であり、 $f/1.0$ 以下のレンズを用いることが望ましい。

同様に、物体を表示できる範囲についても、物体光を集光するレンズの f ナンバーに制約される。

8.2.2 ホログラフィック・ステレオグラムの結像公式

ホログラフィック・ステレオグラムは視差を持った2次元画像を記録するものであるが、視差の情報を十分細かく記録したときには、あらゆる向きへの光線が記録されていると考えることもでき、このような場合には、ホログラフィック・ステレオグラムによる結像を考えることも可能である。ホログラフィック・ステレオグラムによる結像に関しては焦点深度などについての考察が行われている[16]。回折の影響を含む像再生特性に関しては8.3節で述べるので、ここでは回折の影響は無視し、ホログラフィック・ステレオグラムによる結像の特性について幾何光学的に考える。7.2節でレインボウ型のホログラフィック・ステレオグラムにおける結像の定式化を行ったが、基本的に同様の手順でリップマン型の場合の式を算出できる。ただしリップマン型では再生光はブラッグの条件に合う角度および波長の光だけである点が異なる。7.2.3節とは幾何的配置が異なるので、ここで改めて本手法によるホログラフィック・ステレオグラムの結像関係についての定式化を行う。

光軸を z 軸とし、簡単のため $x-z$ 面内でのみ考える。 (x_o, z_o) にある一点からなる物体を記録するとき、 k 番目の要素ホログラムに記録される物体光の波面は、回折を無視すると近似的に次式のような平面波として書ける。

$$U_o = A_o \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda_o} (x_h - x_k) \sin \theta_o\right\} \quad (8.4)$$

ここで x_h, x_k はホログラム面上の座標および k 番目の要素ホログラムの中心位置、 λ_o は記録するレーザーの波長、 θ_o はホログラム面に対する物体光の入射角である。また物体光の振幅は一定値 A_o とした。参照光については、要素ホログラム毎に角度を変えることも可能だが、マルチドット法では通常全ての要素ホログラムで等しい角度で参照光を入射する。そこで記録時の参照光は平行光として扱うものとする、参照光のホログラム面上での複素振幅分布は、

$$U_r = A_r \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda_o} (x_h - x_k) \sin \theta_r\right\} \quad (8.5)$$

と書ける。ここで θ_r はホログラム面に対する参照光の入射角、 A_r は参照光の振幅である。したがって記録時におけるホログラム面上での干渉波面の複素振幅は、

$$U_1 = A_1 \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda_o} (x_h - x_k)(\sin \theta_o - \sin \theta_r)\right\} \quad (8.6)$$

となる。ここで A_1 は記録波面の振幅である。(8.6) 式の波面を記録したホログラムを (x_c, z_c) にある点光源で照明して再生する。再生光が点 (x_i, z_i) に結像するとすれば、(8.6) 式は

$$U_2 = A_2 \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda_i} (r_i - r_c)\right\} \quad (8.7)$$

と書けなければならない。ここで λ_i は再生光の波長、 $r_i = \sqrt{z_i^2 + (x_i - x_h)^2}$ 、 $r_c = \sqrt{z_c^2 + (x_c - x_h)^2}$ である。ホログラムにおける結像理論 [78, 79] では (8.6) 式と (8.7) 式の位相を整合させることにより再生点像の位置を求める。そこでここでも両式の $\exp$ 中の位相項を比較する。

収差の影響に関してはここでは考えず、近軸領域でこれらの式の比較を行うため、 r_c 、 r_i 、 $\sin \theta_o$ を 7.2.3 節の場合と同様に以下のように級数展開する。ただし参照光や再生照明光はホログラム面に対して大きな角度をもって入射するので、Champagne の手法に基づいて、より精度の良い展開を採用する。

$$\begin{aligned} r_c &= R_c + \frac{x_h^2}{2R_c} - \frac{x_c x_h}{R_c} + \dots \\ r_i &= z_i + \frac{(x_i - x_h)^2}{2z_i} + \dots \\ \sin \theta_o &= \frac{x_o - x_k}{\sqrt{(x_o - x_k)^2 + z_o^2}} = \frac{x_o - x_k}{z_o} \left\{ 1 - \frac{(x_o - x_k)^2}{2z_o^2} + \dots \right\} \end{aligned} \quad (8.8)$$

ここで $R_c = \sqrt{x_c^2 + z_c^2}$ 。これらの級数の収束条件は

$$\begin{aligned} R_c^2 &> x_h^2 - 2x_c x_h \\ z_i^2 &> (x_i - x_h)^2 \\ z_o^2 &> (x_o - x_k)^2 \end{aligned} \quad (8.9)$$

である。再生された点像をほぼ正面から観察する際にこの条件は明らかに成立する。(8.8) 式を (8.6) 式と (8.7) 式に代入し、1 次理論 (First order theory) に基づき高次の項を無視すると、両式の位相項は

$$\begin{aligned} \phi_1 &\equiv \frac{2\pi}{\lambda_o} \left\{ \frac{(x_o - x_k)(x_h - x_k)}{z_o} - (x_h - x_k) \sin \theta_r \right\} \\ \phi_2 &\equiv \frac{2\pi}{\lambda_i} \left\{ z_i + \frac{(x_i - x_h)^2}{2z_i} - \left(R_c + \frac{x_h^2}{2R_c} - \frac{x_h x_c}{R_c} \right) \right\} \end{aligned} \quad (8.10)$$

となる。高次の項による収差の影響についての解析はここでは省略するが、Meier および Champagne による結果 [78, 79] と同等である。

波面を記録したホログラムでは (8.10) 式の位相を整合させることで点像の位置を求めるが、ホロ

グラフィック・ステレオグラムにおいては、7. 2節および8. 3節でも述べているように、2次の位相項が記録されていないため従来法を直接適用することはできない。そこで(8. 10)式の微分を行うことで波面の方向を整合させる方法を用いる。(8. 10)式の微分を計算すると、

$$\begin{aligned}\frac{d\phi_1}{dx_h} &\cong \frac{2\pi}{\lambda_o} \left\{ \frac{(x_o - x_k)}{z_o} - \sin\theta_r \right\} \\ \frac{d\phi_2}{dx_h} &\cong \frac{2\pi}{\lambda_i} \left\{ -\frac{(x_i - x_h)}{z_i} - \frac{x_h}{R_c} + \frac{x_c}{R_c} \right\}\end{aligned}\quad (8. 11)$$

となり、この両式が一致するように点像の位置 (x_i, z_i) を求める。なお、波面の方向の比較は、各要素ホログラムの中心位置 $x_h = x_k$ で行う。これより、ホログラフィック・ステレオグラムにおける結像公式として

$$\begin{aligned}\frac{1}{z_i} - \frac{1}{R_c} &= \pm \frac{\mu_i}{z_o} \\ \frac{x_i}{z_i} - \frac{x_c}{R_c} &= \pm \mu_i \left\{ \frac{x_o}{z_o} - \sin\theta_r \right\}\end{aligned}\quad (8. 12)$$

が得られる。ここで $\mu_i = \lambda_i/\lambda_o$ であり、また負の符号は共役再生を示す。この式は一般のホログラムの結像の式と一致しており、回折の影響を無視すればホログラフィック・ステレオグラムでもホログラムと同じ結像理論を利用できることが分かる。ただしx軸やy軸に対して傾いた方向へ再生される物体光については3次元的な光線を考慮する必要がある。ところで、リップマン型ホログラムの場合には、ブラッグ角の条件に適合する波長の光のみが再生されるため、2. 3節で述べたように、(8. 12)式に加えて再生される波長についての条件を考慮しなければならない。

8. 2. 3 再生像の歪

本手法は水平・垂直方向の視差の情報を記録するため、理想的に記録・再生を行えば再生像に歪を生じることはない。歪を生じる原因としては、(1)光学系と原画の計算のパラメータが一致していない、(2)再生照明が平行光でない、(3)再生光の波長が記録時と異なる、などが挙げられる。本節ではこれらの3つの要因に加えて、(4)垂直方向の視差を記録しない際の像の歪についても述べ、垂直視差の記録の重要性を示す。

(1)の問題については、光学系のレンズの焦点距離や液晶パネルの大きさから(8. 1)式により決まる実効fナンバーと原画計算に用いるパラメータの間に誤差がある場合、光線の方向にずれが生じることにより発生する。これは実際に用いた光学系から実効fナンバーを計測して計算に用いることで補正することができる。

(2)再生照明が平行光でない場合に再生像に生じる歪は、基本的にはリップマンホログラムの再生像の歪[6]と同等である。ホログラフィック・3-Dプリンタにおいては、各要素ホログラムの露光時に参照光角度を変化させると装置が複雑になるため、通常は平行光照明で記録する。一方、再生照明光は一般的には点光源を用いることが多く、有限の距離から照明するので、記録と再生で参照光角度が変化したり、光源の位置が異なることにより再生像に歪を生じることになる。この要因による歪量を見積もるため、

前節で述べたホログラフィック・ステレオグラムにおける結像の関係を利用する。

リップマン型のホログラムでは、白色光再生においてブラッグの条件に適合する波長のみが回折される。エヴァルト (Ewald) の球を用いることで、記録・再生の特性を幾何的に容易に考察できる [22]。そこで、まず Fig. 8. 2 に示すように空間周波数領域におけるエヴァルトの球を用いて考察する。前節と同様に、光軸と光軸に垂直な方向の2次元面内 (x-z 面) で考える。ホログラム乳剤内部において、物体光、参照光、再生照明光、再生光の波数ベクトルをそれぞれ $\mathbf{k}_o'$, $\mathbf{k}_r'$, $\mathbf{k}_c'$, $\mathbf{k}_i'$ とし、干渉縞の波数ベクトルを $\mathbf{k}_f'$ で表す。また、ホログラム面に対する物体光、参照光、再生照明光、再生光の乳剤内部での入射角は、それぞれ θ_o' , θ_r' , θ_c' , θ_i' とする。Fig. 8. 2 (a) は干渉縞の記録を、Fig. 8. 2 (b) は再生を示す。図から容易に、

$$|\mathbf{k}_f'| = 2|\mathbf{k}_r'| \sin\left(\frac{\theta_o' - \theta_r'}{2}\right) = 2|\mathbf{k}_c'| \sin\left(\frac{\theta_i' - \theta_c'}{2}\right) \quad (8.13)$$

が得られる。なお、記録時の波長を λ_c とすると、

$$|\mathbf{k}_r'| = |\mathbf{k}_o'| = \frac{2\pi n}{\lambda_c} \quad (8.14)$$

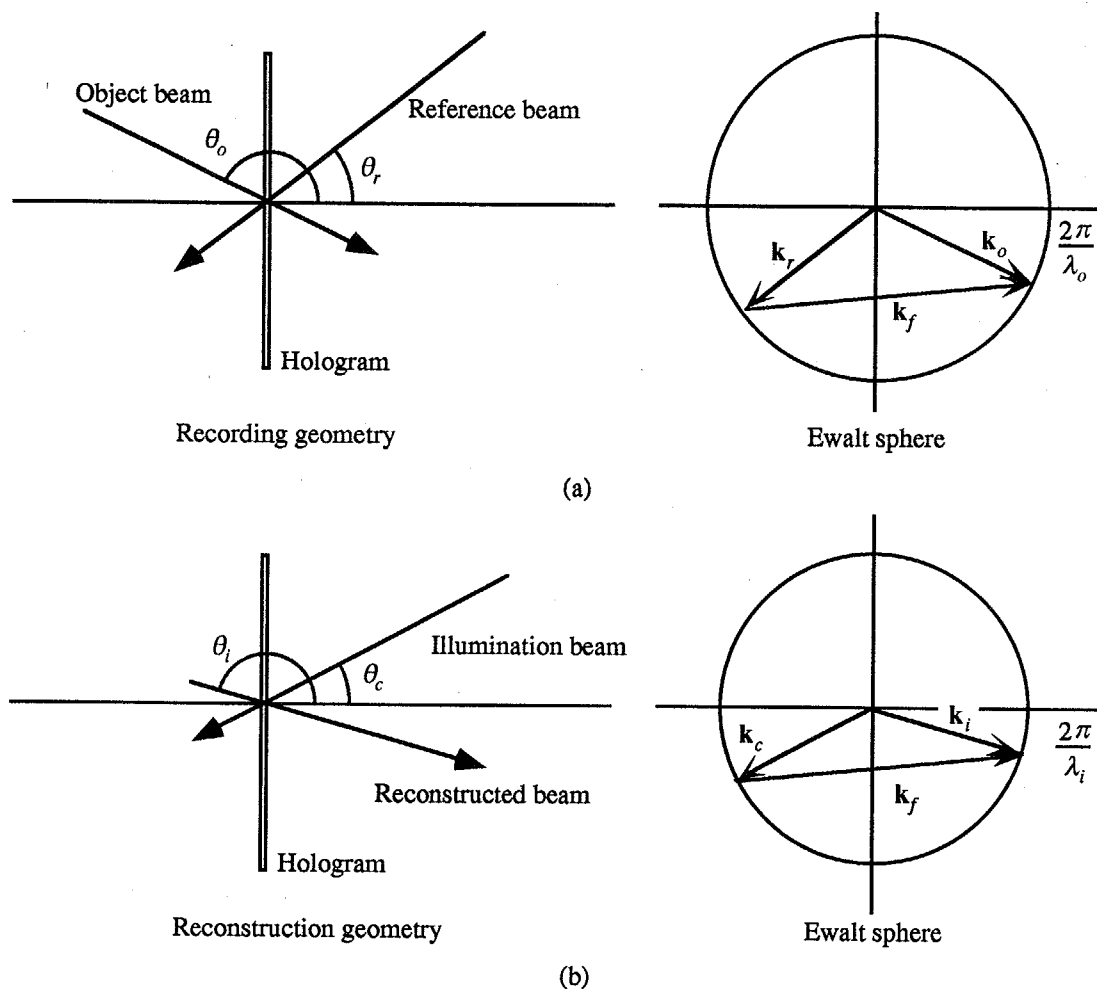


Fig. 8. 2

左図のリップマンホログラムにおける光線の記録と再生を、エヴァルトの球により右図に示す。(a) 記録、(b) 再生

である。ここで n は乳剤の屈折率である。また、以下では空気中の屈折率は 1 とする。したがって再生光の波長 λ_i に関して、Fig. 8. 2 と加法定理およびスネルの法則を用いて

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_o} = \frac{\sin(\frac{\theta_i' - \theta_c'}{2})}{\sin(\frac{\theta_o' - \theta_r'}{2})} = \frac{\sin \theta_c' - \sin \theta_i'}{\sin \theta_r' - \sin \theta_o'} = \frac{\sin \theta_c - \sin \theta_i}{\sin \theta_r - \sin \theta_o}$$

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_o} = \frac{\cos \theta_c' - \cos \theta_i'}{\cos \theta_r' - \cos \theta_o'} \quad (8.15)$$

が得られる。なお ' のない $\theta_o, \theta_r, \theta_c, \theta_i$ は空気中での入射角をそれぞれ表す。また、再生光の角度は図より幾何的に

$$\theta_i' + \theta_c' = \theta_o' + \theta_r' \quad (8.16)$$

である。これより、再生照明光の方向が記録時の参照光とわずかに異なる場合、 $\theta_c' = \theta_r' + \Delta\theta'$ とすると、

$$\theta_i' = \theta_o' - \Delta\theta' \quad (8.17)$$

となり、再生される色は、 $\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_o$ とすると、

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_o} = \frac{\cos \theta_r' + \cos \theta_o'}{\sin \theta_r' - \sin \theta_o'} \Delta\theta' = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_r} - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_o}}{\sin \theta_r - \sin \theta_o} \frac{\cos \theta_r}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_r}} \Delta\theta \quad (8.18)$$

のように変化する。ただし $|\theta_r| \leq \pi/2$ 、 $\pi/2 < |\theta_o| \leq \pi$ 、また $\Delta\theta = \theta_c - \theta_r$ 。例として、 $n = 1.5$ 、 $\theta_r = 45^\circ$ 、 $\theta_o = 180^\circ$ 、 $\lambda_o = 633 \text{ nm}$ 、 $\Delta\theta = \pm 5^\circ$ のとき、波長のシフトは約 7.4 nm であり、再生される波長は約 640 nm および 626 nm となる。またこのときホログラム面から 50 mm 離れた位置の再生像は約 4.4 mm 変位して再生されるが、再生照明光が平行光であれば、ホログラム面からの距離が一定の面内ではシフト量は等しいため、奥行き方向にのみ歪を生じる。

つぎに、このホログラムによる点像の記録と再生を考え、再生照明が不適切な場合の像歪を再生点像位置の変位として求める。再生像の一部を観察する場合、目の瞳に入射する光線はホログラム面上のごく一部からの光であるため、波長の広がりには少ない。しかし再生像上の一点は、照明光の角度が変化することにより (8.18) 式にしたがって再生波長が変化する。再生照明光源の位置を $(0, y_c, z_c)$ とすれば、

$$\Delta\theta = \frac{y_h}{R_c} \quad (8.19)$$

である。なお、 $R_c = \sqrt{y_c^2 + z_c^2}$ であり、注目する再生像上の点 $(0, y_o, z_o)$ を観察した際に目の瞳に入射する光線がホログラム面上の座標 $(0, y_h)$ から再生されているものとし、再生像点は y 軸上にあるとした。このとき、(8.12) 式から再生像の横倍率 M_{lat} および縦倍率 M_{long}

$$M_{lat} = \frac{\mu_i R_c}{z_o + \mu_i R_c}$$

$$M_{long} = \frac{R_c^2}{(z_o + \mu_i R_c)^2} \quad (8.20)$$

が導かれる。ここで、簡単のため有限距離にある照明光源は参照光と同じ方向に置かれ、ホログラム面の中心で照明光の入射角は記録時の参照光と一致するものとした。この式から分かるように、点像がホログ

ラム面から離れるに従って再生像の歪は大きくなる。また再生像の上下・前後の位置によって倍率が変わり、再生像に歪が現れる。なお、(8.20)式を見ると、再生波長の変化による倍率変化よりも照明光源の位置の影響が大きい。

例として、 $\theta_r = 45^\circ$ 、 $\lambda_o = 633 \text{ nm}$ 、照明光源のホログラム面からの距離 $R_c = 1000 \text{ mm}$ のとき、ホログラム面中心では 633 nm の光で再生され、倍率も 1.0 であるのに対し、 $y_o = 100 \text{ mm}$ 、 $z_o = 50 \text{ mm}$ の点像は $\Delta\lambda = 7.6 \text{ nm}$ 、横倍率は 0.953 、縦倍率は 0.908 となる。再生像のサイズが大きければさらに歪量は大きくなる。レンズなどを用いて $R_c = 5000 \text{ mm}$ とすれば、横倍率は 0.990 、縦倍率は 0.980 とかなり小さくなる。したがって歪のない表示を厳密に行うためには、光源の位置についても注意を払う必要があり、ホログラム面より 5 m 以上離すことが望ましい。

上記のような歪を低減するために、特定の照明位置を設定して記録する画像の歪補正を行うことも可能である。記録・再生における光線の方向は(8.17)式や(8.18)式などから求めることができ、これを用いてあらかじめ逆の歪を持たせた画像を記録すればよい[80]。

(3) 再生時の波長が記録時と異なる場合、ブラッグ角が変化し再生光の方向が変わるため、歪みが発生する。例えばホログラム感材の現像処理において、定着などの脱銀の処理を行うと乳剤が収縮して干涉縞の間隔が厚み方向に変わるため、再生波長が変化する。同様に湿度などの影響により乳剤の厚みが変化することもある。さらに乳剤の厚みや屈折率を変化させて比視感度の高い記録波長と異なる色で再生したり、カラーホログラムを作成する手法も行われている。このような場合に発生する歪についても、あらかじめその波長変化量がわかっていれば補正することも可能である[80]。乳剤の屈折率変化や厚みの膨潤または収縮による再生波長の変化は、近似的に

$$\mu_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_o} = \frac{n_2 t_2}{n_1 t_1} \quad (8.21)$$

で与えられる。ここで n_1 、 n_2 および t_1 、 t_2 はそれぞれ記録時と再生時における乳剤の屈折率および厚さである。(8.21)式および(8.20)式を用いればこのときの再生像の歪量を求めることができる。

(4) 通常のホログラフィック・ステレオグラムでは、垂直方向の視差を記録しないので、歪のない再生像を表示することができない。光線追跡を行う方法や異なる視点の画像を入れ替える方法[23, 26, 80]により、特定の観察位置に対して歪補正を行うことは可能であるが、観察者が前後または上下に移動すると再び再生像に歪を生じてしまう。このとき生じる歪は垂直方向に関するものであるので、ホログラム面の法線方向を z 軸とし、垂直方向を y 軸として y 、 z 軸を含む2次元面内でこの歪の特性を考える。観察者が位置 (y_o, z_o) から $(y_o + \Delta y_o, z_o + \Delta z_o)$ に移動したときについて点 (y_o, z_o) の再生像のずれを幾何光学的に求める。再生像の奥行き方向の位置は、水平方向の視差により決まると考えられるので、観察者が移動しても再生像の位置は z 軸方向には変化しない。再生像の垂直方向の移動量 Δy は、幾何学的関係より

$$\Delta y = \frac{z_o}{z_o + \Delta z_o} \left\{ \frac{y_o}{z_o + z_o} \Delta z_o + \Delta y_o \right\} \quad (8.22)$$

となる。例として、観察位置 (y_o, z_o) が $(500 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ から $(600 \text{ mm}, 100 \text{ mm})$ に移動したとき、点 $(y_o, z_o) = (50 \text{ mm}, 50 \text{ mm})$ の再生像は、約 9.4 mm 上方に移動する。

8. 2. 4 再生像の分解能

再生像の持つ分解能は以下の要因により制約される。

- (1) ホログラム面と視差方向に対する離散化の影響。
- (2) 光源の大きさや再生光の波長分散などによるボケ
- (3) 回折による再生光の広がり。

以下順にこれらの影響について述べる。

(1) ホログラム面と視差方向に対する離散化の影響。

レンチキュラー写真などの多眼視ステレオ画像による立体像表示法と同様に、マルチドット法により記録されたホログラムにおいても、再生される光線は角度方向に離散化されている。いいかえれば、表示される視差の情報がサンプリングされている。また、ホログラム面上の画像もサンプリングされており、これらの離散化の影響により再生像の分解能は制限される。基本的には、Fig. 8. 3のように再生される光線の交点に像を再生することができる。ホログラムに記録する原画の水平方向または垂直方向の画素数を N とすると、ホログラム面から z 離れた位置での再生における分解能 δ の限界は、再生光線の角度方向に対するサンプリングにより

$$\delta > \frac{z}{N F_{\text{eff}}} \quad (8. 23)$$

のように制限される。ホログラム面から離れるほど光線の密度は粗くなるため、分解能は低下する。

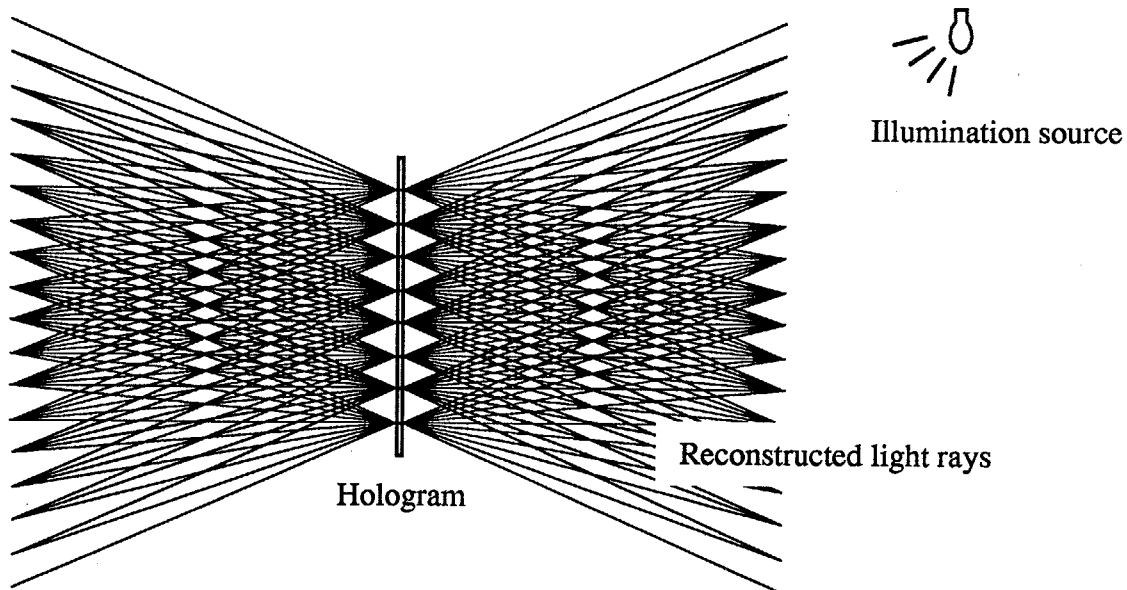


Fig. 8. 3

マルチドット法によるホログラフィック・ステレオグラムから再生される光線。光線の交点に像を再生できる。

(2) 光源の大きさや再生光の波長分散などによるボケ

第2章で述べたように、リップマンホログラムでは再生に用いる光源が点光源でなく大きさを持っていると、再生像にボケを生じる。またホログラムを記録する乳剤の厚みが有限であることにより再生波長が広がりを持つこともボケの原因となる。本手法によるホログラフィック・ステレオグラムにおいても、8.2.2節で述べたように通常のホログラムと同様な結像公式が成り立つことから、再生波長の広がりの影響に関しても通常のホログラムと同様の特性を持つと考えられる。したがって(2.9)式および(2.10)式より、再生像のボケ量 δ_λ はこれらの和として考えると、

$$\delta_\lambda \cong 2 \left\{ \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda_i} \sin \theta_r \right| + \frac{w_c}{R_c} \right\} z_i \quad (8.24)$$

となる。ここで w_c は光源のサイズであり、 R_c は光源までの距離である。なお、 $\Delta\lambda$ は(2.6)式または(2.7)式を用いて求めることができる。

例として、乳剤の屈折率1.5、参照光入射角 45° 、乳剤厚さ $10\mu\text{m}$ 、再生波長 633nm のとき、(2.6)式によると再生波長の広がり約 27nm となり、ホログラム面から 100mm 離れた位置の再生像のボケは約 3.0mm となる。また再生照明光源がホログラム面から 1000mm 離れた位置にあり、その大きさが 20mm のとき、ホログラム面から 100mm 離れた位置の再生像のボケは約 2.0mm となり、影響はかなり大きい。これらのボケを低減するために、乳剤の厚みを制御したり[8]、アクロマティック回折の原理を応用する提案[21]がなされており、本手法に対しても適用できる可能性がある。

(3) 回折による再生光の広がり

上記の解析では回折の影響を無視して考えてきたが、実際には回折の影響により再生像は劣化する。本研究では回折の影響についていくつかの側面から考察している[8.2.5節、8.3節参照]。ここでは要素ホログラムからの再生光の回折が再生像のボケに及ぼす影響について簡単に触れる。ホログラフィック・ステレオグラムでは物体の奥行きに応じた位相項が記録されていないため、各要素ホログラムから再生される波面の相対的な位相の関係は物体からの波面と一致しない[8.3節参照]。また液晶板に表示して露光する原画は再生像の位置には結像していないため、原画面での回折の影響も生じる。回折限界による分解能の限界は要素ホログラムサイズによって決まり、またこれらの影響に関しては8.3節で詳しく検討するが、ここでは再生像のボケ量に対する回折限界による影響を簡単に示す。要素ホログラムの大きさを a_e とすると再生像の回折パターンの幅 δ_a は近似的に

$$\delta_a \cong \frac{\lambda_i}{a_e} z_i \quad (8.25)$$

と書ける。例えば要素ホログラムサイズが 0.3mm のとき、 $z_i = 100\text{mm}$ の再生像はこの影響により約 0.2mm のボケを持つ。要素ホログラムサイズに関しては次節で述べる。

8. 2. 5 要素ホログラム間隔と視差方向数

本手法では、ホログラム面を分割して多数の要素ホログラムを記録するため、複数の要素ホログラムが重なって露光されると多重露光により回折効率が低下する。実験的にも多重露光のない場合の方がはるかに明るい再生像が得られる。したがって明るいホログラムを作成するためには多重露光を避ける必要がある。多重露光を避けるためには、要素ホログラムの大きさがその間隔よりも小さくしなければならない。しかし前節で述べたように、要素ホログラムサイズが小さいと回折の影響が大きくなる。ここでは回折の影響について、表示できる視差方向数のに注目して考察を行う。

マルチドット法において要素ホログラムを露光する光学系は、フーリエ変換ホログラムの記録光学系であるため、要素ホログラムの大きさはレンズの焦点距離と液晶に表示する画像（原画）の解像度により決まる。原画の画素数は記録する視差方向数であり、そのフーリエ変換パターンの大きさは記録する視差方向数を増やせば大きくなる。また3. 5節で述べた疑似ランダム位相板を用いる場合には、フーリエ変換ホログラムの大きさは疑似ランダム位相板の回折パターンのメインローブの幅と等しくしたときが最適である[60]。このメインローブの幅は原画のフーリエパターンをカバーしている必要があるので、疑似ランダム位相板のピクセル間隔は原画の画素間隔と等しいかまたは小さくしなければならない。したがって要素ホログラムの大きさ a_e は、1次元方向の視差方向数を N とすると

$$a_e = \lambda_o F_{eff} N \quad (8. 26)$$

となり、多重露光を避けるためには、要素ホログラムサイズをその間隔以下にする必要があるため、

$$a_e \leq p \quad (8. 27)$$

としなければならない。したがって、記録する視差方向数は

$$N \leq \frac{p}{\lambda_o F_{eff}} \quad (8. 28)$$

を満足する必要がある。(8. 28)式より、Fナンバーの小さなレンズを用いればより多くの視差情報を記録できるが、再生光線の角度分解能は要素ホログラムの大きさで制約され、記録できる視差方向数が制限される。再生光の角度分解能を $\Delta\phi$ とすれば、 $\Delta\phi \equiv 1/(N F_{eff})$ より

$$p \Delta\phi \geq \lambda_o \quad (8. 29)$$

の条件が得られる。この式は、要素ホログラム間隔と再生される光線の角度分解能についてトレードオフの関係があることを示している。要素ホログラム間隔を決めれば、Fナンバーの小さいレンズを用いたり解像度の高い液晶パネルを用いても角度方向の分解能は(8. 29)式以上にはできないことがわかる。

この条件の下で最大の視差方向数を記録したとき、再生光の角度方向の分解能を観察位置で考えると、

$$\Delta w = l \Delta\phi = \frac{l \lambda_o}{p} \quad (8. 30)$$

となる。ここで Δw は観察位置における光線の広がり、 l はホログラム面から観察者までの距離である。要素ホログラム間隔 0. 3 mm のホログラムを 500 mm 離れた位置から観察する場合、 $\Delta\phi = 2 \times 10^{-3}$ rad、 Δw は約 1. 1 mm となり、目の瞳の大きさよりも小さく、十分細かく視差の情報を記録する

ことができる。またこのときレンズの実効Fナンバーを1.0とすれば液晶パネルに表示する原画の画素数は500×500画素となる。

8.2.6 視覚特性との関係

3-Dプリンタのような立体像表示媒体の画質に関しては人間の視覚特性との関係を見捨てることはできない。ただし、ここではホログラフィック・ステレオグラムの立体像表示に関する視覚的な評価などは行わず、再生像の性質に関して人間の視覚のいくつかの特性との関係について簡単に述べるにとどめる。

(1) 視力

再生像の分解能は、視力により決まる人間の目の分解能よりも細かければ十分といえる。例えば視力 V のとき、目の分解能を角度方向に表現すると、

$$\Delta\phi_e = \frac{\pi}{V \times 60 \times 180} \quad [\text{rad}] \quad (8.31)$$

となる。例えば要素ホログラム間隔 p をホログラム面より l 離れた位置から観察した場合、その広がり角 $\Delta\phi_p$ は

$$\Delta\phi_p = \frac{p}{l} \quad [\text{rad}] \quad (8.32)$$

であり、 $\Delta\phi_p < \Delta\phi_e$ であれば要素ホログラム間隔は目で知覚できない。要素ホログラム間隔0.3mmのホログラムを500mm離れて観察した場合には $\Delta\phi_p \approx 6.0 \times 10^{-4} \text{ rad}$ であり、これは視力0.5の人間の眼の角度分解能 $5.8 \times 10^{-4} \text{ rad}$ とほぼ一致する。なおこれはホログラム面に目の焦点を合わせた場合の分解能であり、ホログラム面からある程度離れた位置の再生像を観察するときには視覚系の分解能はさらに低下するため要素ホログラム間隔はほとんど知覚することができない。したがって第3章の実験で用いた要素ホログラム間隔(0.3mm)は、観察者の目の分解能を考慮しても十分な値であるといえる。

(2) 奥行き知覚の要因

一般にステレオグラムは基本的に両眼視差により立体認識されると言われており、多眼視ステレオグラムでは同時に動的視差や輻輳などの要因も立体知覚に寄与すると考えられている。しかし本手法によるホログラフィック・ステレオグラムでは、視差方向の情報を持つ原画を記録する方式であるため、視差方向数を十分多くとることができる。したがって一点を観察したとき、Fig. 8.4に示すように、目の瞳の中に複数の要素ホログラムから再生された光線が入射すると考えられる。このとき、目の焦点調節について考えると、目の焦点を再生像点に合わせたときに再生像が最もシャープに観察できると考えられ、この点を観察する場合には目の焦点はほぼ再生像点の位置に合うことが予想される。

(8.23)式によると、実効Fナンバー1.12のレンズを用いて水平・垂直方向にそれぞれ200方向の視差を記録したホログラムを、ホログラム面から300mm離れた位置で観察する場合、瞳の位置

での光線のサンプリング間隔は約 1.3 mm であり、瞳の直径を約 3 mm とすると 5～6 本の光線が瞳に入射することになる。記録する視差方向数が水平・垂直方向にそれぞれ 500 方向であれば、瞳に入射する光線の本数は約 33 本となる。実際にはホログラム面上の汚れや要素ホログラムの間隔が見えるため理想的な状況とはいえないが、上記のようにホログラフィック・ステレオグラムでも視差方向のサンプリングを十分細かくすれば、視覚における立体知覚の要因を全て満足できることが予想される。

なお、水平方向のみに視差を持つ従来のステレオグラムにおいては、水平方向に関して上記のように瞳に複数の光線が入射する場合には再生像点が結像面といえるが、垂直方向に関しては視差が記録されていないのでホログラム面が結像面と考えられる。加えて瞳に入射する光線の本数も水平・垂直方向の視差を持つ場合と比較してはるかに少ない。水平方向のみに視差を持つステレオグラムの観察において眼の焦点が合う位置は現在のところ明らかになっていないが、立体知覚における焦点調節の要因には矛盾が生じている可能性がある。

ただし、ここで述べたようなホログラフィック・ステレオグラムにおける立体知覚に関する点に関しては実験的に証明されてはおらず、今後これらの点についての検証が期待される。

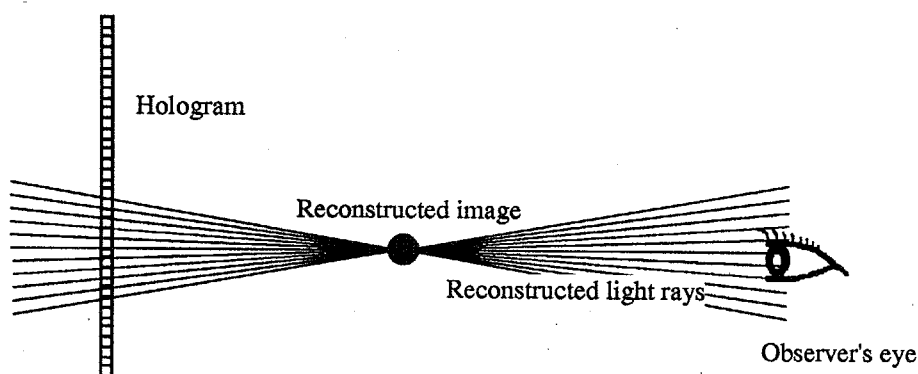


Fig. 8. 4
視差のサンプリングが十分細かい場合の観察

8. 3 ホログラフィック・ステレオグラムの限界についての考察

8. 3. 1 本節の目的

ホログラフィック・ステレオグラムは様々な視点からみた視差画像列からホログラムとして立体像を合成するもので、本研究で目的とするホログラフィック・3-Dプリンタなどへの応用に最適な手段として期待されている。従来、一般にホログラムは物体からの光を波面として記録・再生できるため、人間の全ての立体知覚の要因を満足した立体像再生が可能であるが、ホログラフィック・ステレオグラムにおいては左右の目で視差を持つ画像を見ることで両眼視差により立体知覚されると言われている。しかし、本研究で提案したマルチドット法を用いる場合、前節で述べたように、十分多くの視差情報を記録することが可能で、このとき両眼視差や輻輳だけでなく、焦点調節の要因も含めて片目でも立体認識されることが考えられる。このようなホログラフィック・ステレオグラムにおいては真のホログラムと立体知覚の要因には差はない。そこで本節では、ホログラフィック・ステレオグラムとホログラムによる立体像再生の本質的な相違を明らかにすることを目的として考察を行う。

これまでホログラフィック・ステレオグラムの像再生特性に関する研究としては、垂直方向の視差を記録しないことに起因する歪みの問題や、記録される視差方向数が少ないことによる像のトビなどに関して検討されている[27, 81-84]。しかし、本手法のように水平・垂直方向に細かく視差情報を記録した場合にはこれらの問題は発生しない。ここでは、コヒーレント光再生の仮定のもとでホログラフィック・ステレオグラムによる再生波面の定式化を行い、フレネルホログラムにおける再生波面と比較することでホログラフィック・ステレオグラムの立体像表示に関する能力の限界を明らかにする。視差やホログラム面でのサンプリングを十分細かくした場合において、フレネル型ホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの比較を行い、記録されている情報の差異について考察する。さらにホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの中間的な性質を持つ位相を付加したステレオグラム(PAS: Phase Added Stereogram)を考え、これらの媒体の像再生の特性を明確にする。

8. 3. 2 像再生の定式化

像再生特性を検討するために、まずホログラフィック・ステレオグラムによる記録と再生の定式化を行う。ここではマルチドット方式によるホログラフィック・ステレオグラムについて考える。マルチドット方式では水平・垂直方向の視差を高い分解能で記録・再生できるため、像の歪の影響を無視でき、さらに拡散板を用いていないためスเปックルノイズなどの他の要素を考える必要がなく、ホログラムとの相違に関する本質的な比較が容易である。もちろん他の方式によるホログラフィック・ステレオグラムにおいても基本的には以下の議論は成立する。ホログラフィック・ステレオグラムの記録および再生のプロセスは、原画作成、要素ホログラムの露光、ホログラム面から像面までの回折、の各ステップに分けて考えることができる。以下順を追って各プロセスについて定式化する。

要素ホログラムに記録する画像は、コンピュータグラフィックスの手法により計算される。この計算で

は、3. 3節で述べたように記録する要素ホログラムの中心を投影中心として物体を液晶板に対応する面に投影する。ここでは簡単のため面の拡散特性や隠面消去等の効果については考えず、多数の点光源からなる物体 $g(x, y, z)$ を記録する場合を想定する。このとき、ホログラム面上の点 (x_j, y_j) に要素ホログラムとして露光する画像 $f(\xi_j, \eta_j)$ の作成は (8. 33) 式のように書くことができる。

$$f(\xi_j, \eta_j) = \int g\left\{\frac{f}{z}(x_j - \xi_j), \frac{f}{z}(y_j - \eta_j), z\right\} dz \quad (8. 33)$$

ここで f は合成に用いるレンズの焦点距離である。なお、ホログラムは $z=0$ に z 軸に垂直に置かれているものとした。

要素ホログラムの露光は Fig. 8. 5 に示すフーリエ変換光学系で行われる。記録される各要素ホログラムはフーリエ変換型であり、ホログラム面上における複素振幅分布 $p_j(u_j, v_j)$ は (8. 33) 式をフーリエ変換することにより、

$$p_j(u_j, v_j) = \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f}\left(1 - \frac{d}{f}\right)\right] \iint f(\xi_j, \eta_j) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda f}(\xi_j u_j + \eta_j v_j)\right\} d\xi_j d\eta_j \quad (8. 34)$$

となる。ただし

$$u_j = x_h - x_j, \quad v_j = y_h - y_j \quad (8. 35)$$

であり、 (x_h, y_h) はホログラム面における絶対座標、 λ は記録に用いたレーザの波長、 d は Fig. 8. 5 の光学系において、液晶板からレンズまでの距離である。

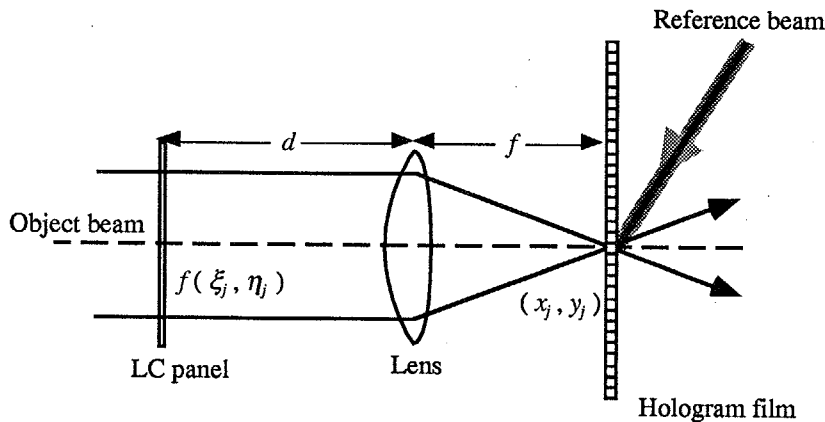


Fig. 8. 5
要素ホログラム記録の光学系

ここでは理想的な場合として、記録されたホログラムが完全に線形に再生されると考える。実際には要素ホログラムの多重露光が起きて回折効率が低下したり、要素ホログラムの大きさを限定するための開口を設けているなどの点で完全な記録・再生は行われないが、ここではこれらの影響に関しては無視する。このとき、(8. 34) 式に示すような複素振幅分布が各要素ホログラムから再生され、再生像の位置で重なりあう。したがってこのホログラムによる再生像 $\hat{g}(x, y, z)$ は、フレネル回折の仮定の下で

$$\hat{g}(x, y, z) = \sum_j \int \left[g \left\{ x - \left(\frac{z'}{z} - 1 \right) x_j, y - \left(\frac{z'}{z} - 1 \right) y_j, z' \right\} \right]^* \\ \left[\exp \left[-j \frac{\pi}{\lambda z'^2} \left\{ \frac{1}{f} \left(1 - \frac{d}{f} \right) + \frac{1}{z} \right\}^{-1} \left\{ x - \left(\frac{z'}{z} - 1 \right) x_j \right\}^2 + \left\{ y - \left(\frac{z'}{z} - 1 \right) y_j \right\}^2 \right\} \right] dz' \\ \frac{\exp(j 2 \pi z / \lambda)}{j \lambda z} \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda z} \{ (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \} \right] \quad (8.36)$$

となる。*はコンボリューションを表す。

ここで物体として $z = z_0$ にある 2 次元画像 $g_{z_0}(x, y)$ について考えると、(8.36) 式から、再生光の複素振幅分布は $z = z_0$ の面で

$$\hat{g}(x, y, z_0) = g_{z_0}(x, y) * \exp \left\{ -j \frac{\pi}{\lambda t} (x^2 + y^2) \right\} \frac{\exp \{ j 2 \pi z_0 / \lambda \}}{j \lambda z_0} \sum_j \left[\exp \left\{ -j \frac{\pi}{\lambda z_0} \{ (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \} \right\} \right] \quad (8.37)$$

となる。ここで

$$t = z_0^2 \left\{ \frac{1}{f} \left(1 - \frac{d}{f} \right) + \frac{1}{z_0} \right\} \quad (8.38)$$

である。ホログラムが十分大きく要素ホログラムの間隔が細かいとき、(8.37) 式の後半の位相項の影響は小さい。このとき、ホログラフィック・ステレオグラムからの再生像は元の 2 次元物体のフレネル積分の形になっている。したがって再生像は、元の物体が距離 t だけフレネル回折したパターンと等価になり、 t が大きいとこの回折の影響により像の劣化がおきる。この等価的なフレネル回折の距離 t は、

(8.38) 式のように物体とホログラム面間の距離 z_0 に依存する。Fig. 8. 6 に z_0 と t の関係を示す。 $d \neq f$ のとき、 $t = 0$ となるのはホログラム面と液晶板に表示した画像の結像位置であり、 $d = f$ のときはホログラム面のみである。再生像の位置がこれらの面から離れると t が大きくなり、回折の影響により像が劣化すると考えられる。つまりホログラム面や原画の結像面に近い位置に像を再生する場合は回折による劣化はほとんどないが、その面から離れるほど回折の影響で再生像に劣化を生じる。

例えば円筒型のマルチプレックス・ホログラム [17] においては、通常、合成時に原画は円筒の中心付近に結像されている。再生像の位置は円筒の中心とホログラム面の間であり、Fig. 8. 6 のグラフで比較的 t は小さく、回折の影響が抑制されている。また、2 ステップで記録する平面型ホログラフィック・ステレオグラムの場合は、マスターホログラムの位置と第 2 ステップホログラムの位置でそれぞれ $t = 0$ になると考えられ、ホログラム面前後で比較的 t は小さい。このように従来のホログラフィック・ステレオグラムの合成系は、経験的にこの回折の影響を抑制するように設計されている。

平面型のホログラフィック・ステレオグラムの場合はホログラム面の前後に像を再生させる場合が多いため、ホログラム面前後で平均的に t が小さくなるように光学系を設定するのが最適と考えられる。従って回折の影響を最も抑えるためには $d = f$ とすればよい。なお、このとき原画は無限遠に結像される。

以上の解析を確認するため簡単な実験を行った。原画をホログラム面近傍に結像させた光学系 ($d \gg$

f) と、無限遠に結像させた光学系 ($d \equiv f$) を用いて、2次元画像を再生するホログラフィック・ステレオグラムを作成した。テストチャートの2次元画像 (256×256 pixel s) はホログラム面の手前65 mmの位置に再生されるように原画を計算した。それぞれはリップマン型ホログラムとして合成し、白色光で再生した。再生像をFig. 8. 7に示す。なお再生像は、実際のホログラムを人間が観察する場合に近いように、 $f/32$ 、焦点距離100 mmのレンズ (開口サイズ約3 mm $\approx$ 人間の瞳の大きさ) でホログラム面から1000 mm離れた位置から撮影した。テストチャートの文字の部分などを観察すると、ホログラム面近傍に原画を結像させた光学系によるホログラムの方が再生像のぼけが大きいことがわかる。これは前述のように原画が再生像面に結像しておらず、原画面における回折がより大きく再生像に影響するためと考えられる。

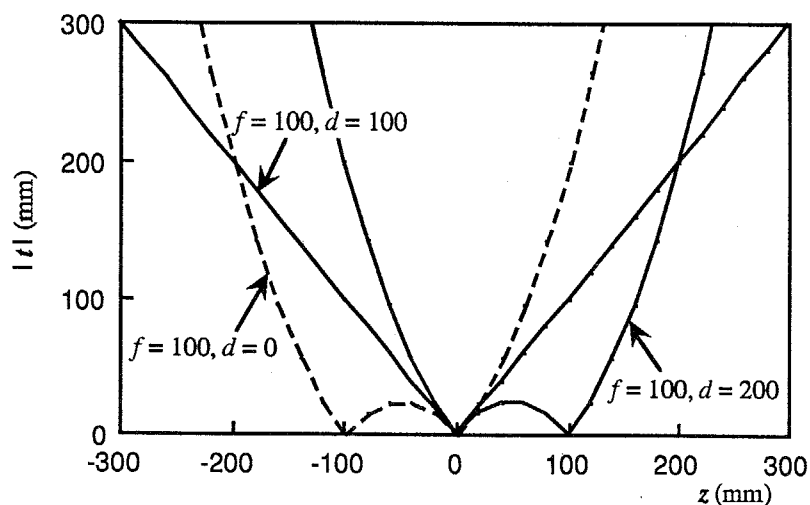
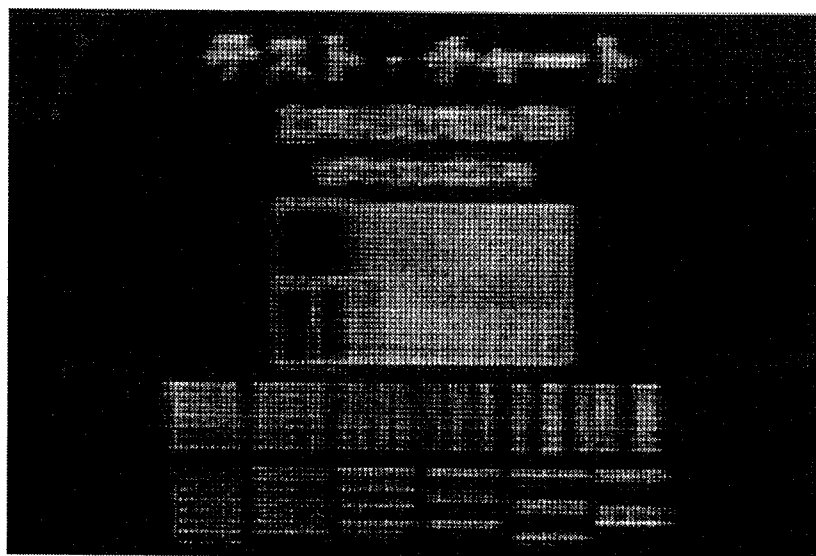
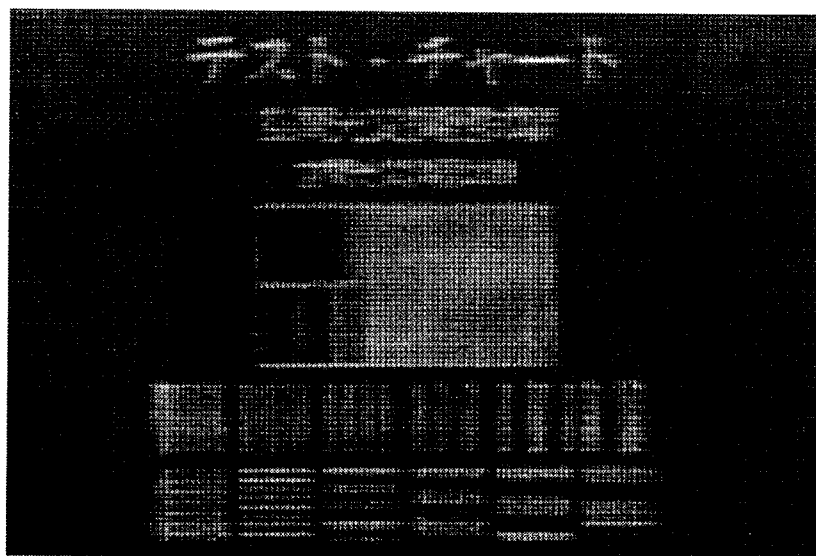


Fig. 8. 6

フレネル回折の距離 t 。実線は $f=d$ 、点線は $f < d$ 、破線は $f > d$ の場合の z_0 と t の関係を示す。



(a)



(b)

Fig. 8. 7

- ホログラフィック・ステレオグラムによる2次元テストチャートの再生像
- (a) 原画をホログラム面近傍に結像させた光学系で合成
 - (b) 原画を無限遠に結像させた光学系で合成

8. 3. 3 再生波面の比較

次に、ホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの波面再生特性に関して比較を行うために、ホログラム面直後の再生波面を定式化する。フレネル回折を仮定すると、3次元物体 $g(x, y, z)$ のホログラム面上での強度分布 $I_h(x_h, y_h)$ は、

$$I_h(x_h, y_h) = \left| R - \iiint g(x, y, z) \frac{\exp(-j2\pi z/\lambda)}{j\lambda z} \exp[-j\frac{\pi}{\lambda z}\{(x-x_h)^2 + (y-y_h)^2\}] dx dy dz \right|^2 \quad (8. 3 9)$$

となる。なお R は参照光の複素振幅である。ホログラムの記録・再生のプロセスが理想的に行われるものとし、再生光のうち一次回折光のみに注目すると、このフレネルホログラムからの再生波面はホログラム面直後で

$$U_h(x_h, y_h) = \iiint \frac{\exp\{j2\pi z/\lambda\}}{j\lambda z} g(x, y, z) \exp[-j\frac{\pi}{\lambda z}\{(x-x_h)^2 + (y-y_h)^2\}] dx dy dz \quad (8. 4 0)$$

と書くことができる。一方、ホログラフィック・ステレオグラムの再生波面 $U_{hsj}(x_h, y_h)$ は、前節で述べた $d=f$ の条件を (8. 3 4) 式に代入することにより

$$U_{hs}(x_h, y_h) = \iiint g(x_j + \Delta x_0, y_j + \Delta y_0, z) \exp\{j\frac{2\pi}{\lambda z}(\Delta x_0(x_h - x_j) + \Delta y_0(y_h - y_j))\} d\Delta x_0 d\Delta y_0 dz \quad (8. 4 1)$$

となる。ここで $\Delta x_0, \Delta y_0$ は

$$\Delta x_0 = x - x_j, \quad \Delta y_0 = y - y_j \quad (8. 4 2)$$

である。

ホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの再生波面を比較するため、ホログラム面上のある一点 (x_j, y_j) の周りの微小領域に着目し、

$$\Delta x_h = x_h - x_j, \quad \Delta y_h = y_h - y_j \quad (8. 4 3)$$

とすると、(8. 4 0, 4 1) 式は

$$U_h(x_j + \Delta x_h, y_j + \Delta y_h) = \iiint \frac{\exp\{j2\pi z/\lambda\}}{j\lambda z} g(x_j + \Delta x_0, y_j + \Delta y_0, z) \exp[-j\frac{\pi}{\lambda z}(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)] d\Delta x_0 d\Delta y_0 dz \quad (8. 4 4)$$

$$U_{hs}(x_j + \Delta x_h, y_j + \Delta y_h) = \iiint g(x_j + \Delta x_0, y_j + \Delta y_0, z) \exp[-j\frac{\pi}{\lambda z}\phi_2] d\Delta x_0 d\Delta y_0 dz \quad (8. 4 5)$$

と書き直すことができる。ここで

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \Delta x_h^2 + \Delta y_h^2 \\ \phi_2 &= -2(\Delta x_0 \Delta x_h + \Delta y_0 \Delta y_h) \\ \phi_3 &= \Delta x_0^2 + \Delta y_0^2 \end{aligned} \quad (8. 4 6)$$

である。

これらの式を比較すると、フレネルホログラムには積分内の位相項として3つの成分が記録されている

が、ホログラフィック・ステレオグラムにはそのうち光線の方角を示す項 (ϕ_2) のみが記録されていることがわかる。 ϕ_1 の項はホログラム面の微小領域内での微細な位相分布であり、 ϕ_3 の項はホログラムの離れた位置から再生される波面の相対的位相差を示している。フレネルホログラムではこれらの位相成分により再生像上で波面の位相が一致し、高い分解能で像を再生できるが、ホログラフィック・ステレオグラムではこの位相情報が記録されていないため回折の影響により像の分解能は低下する。

8. 3. 4 位相を付加したステレオグラム (PAS)

(8. 4 4) 式のホログラムに記録されている位相成分のうち、 ϕ_2 および ϕ_3 のみを記録したホログラムを考えてみる。その再生波面はホログラム面直後で

$$U_{PAS}(x_j + \Delta x_h, y_j + \Delta y_h) = \iiint g(x_j + \Delta x_0, y_j + \Delta y_0, z) \exp\{-j \frac{\pi}{\lambda z} (\phi_2 + \phi_3)\} d\Delta x_0 d\Delta y_0 dz \quad (8. 4 7)$$

とかくことができる。ところで、これを Fig. 8. 5 のフーリエ変換光学系を用いて記録することを考えると、(8. 4 7) 式を逆フーリエ変換することにより、液晶パネルに表示する画像 f_{PASj} は、次式のように求めることができる。

$$f_{PASj}(\xi_j, \eta_j) = \int g(-\frac{z}{f} \xi_j + x_j, -\frac{z}{f} \eta_j + y_j, z) \exp\{-j \frac{\pi z}{\lambda f^2} (\xi_j^2 + \eta_j^2)\} dz \quad (8. 4 8)$$

この $f_{PASj}(\xi_j, \eta_j)$ は、振幅は (8. 3 3) 式のホログラフィック・ステレオグラムに記録する原画と等しく、その面上の各点に物体の奥行きに応じた位相変調が付加されている。したがって、(8. 3 3) 式で表されるホログラフィック・ステレオグラムの原画に対し、物体の奥行きに応じた位相を付加することで (8. 4 7) 式に示されるような特性を持つホログラムを作成できる。ここではこれを位相を付加したステレオグラム (PAS: Phase Added Stereogram) と呼ぶ。(8. 4 7) 式に示されるように、PAS はホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの中間的な性質を持ち、ホログラフィック・ステレオグラムにおける回折の影響を抑制する効果を持つ。すなわち、ホログラム面上の離れた位置から再生される波面の相対的位相差が記録されているため、再生像上でこれらの位相が正しく再生され、解像度の高い画像を表示することが可能である。

フレネル型ホログラム、ホログラフィック・ステレオグラム、PAS の3種類の表示法を比較すると、ホログラム面近傍における再生像の解像度は、ホログラフィック・ステレオグラムや PAS においてはホログラム面でのサンプリングにより制限されるのに対し、フレネルホログラムでは感材の解像度により決まる。一般に前者は 0. 05 mm ~ 0. 5 mm で、後者は光の波長と同程度である。一方、ホログラム面から離れた位置での再生像の解像度は、フレネルホログラムではホログラムの大きさで決まる回折限界で決定されるのに対してホログラフィック・ステレオグラムの場合は前節で述べたような回折の影響で劣化する。しかし、PAS においては、各要素ホログラムからの光の位相が相対的に正しく再生されるため、ホログラム面から離れた位置でも比較的高い解像度の再生像を得ることができる。PAS において回折限界によって決まる分解能は、フレネルホログラムと同様にホログラムのサイズにより決まるが、ホログラム面のサンプリングや視差を離散的に記録していることの影響でフレネルホログラムより分解能は低い。

Fig. 8. 8に、フレネル回折、ホログラフィック・ステレオグラム、PASの原理に基づいて計算したゾーンプレートのパターンを示す。ホログラフィック・ステレオグラムやPASではホログラム面上におけるサンプリングの影響が強く現れており、各要素ホログラム内での干渉縞は直線状になっている。これは、フレネルホログラムに記録されているホログラム面上の微小な領域での位相分布が、ホログラフィック・ステレオグラムやPASには記録されていないためである。また、ホログラフィック・ステレオグラムでは要素ホログラム相互で干渉縞が繋がっていないが、PASでは各直線状の縞の包絡線を考えると円周状に縞が繋がっているように見える。これはPASには要素ホログラム相互の相対的位相差が記録されていることによる。Fig. 8. 9に、これらのそれぞれの媒体から再生される波面を概念的に図示する。一点を再生するホログラムを作成した場合、フレネルホログラムでは2次関数状の曲面の波面が再生されるが、ホログラフィック・ステレオグラムやPASでは、各要素ホログラムからそれぞれ平面波が再生される。PASによる再生波面は、各要素ホログラムから再生されるそれぞれの平面波の互いの相対的な位相が、球面波をサンプリングしたような形になっている。

(8. 45) 式のように、ホログラフィック・ステレオグラムには光線の方法は記録されているが要素ホログラム相互の相対的位相差が記録されていないため、要素ホログラム間隔を無限に小さくしても真のホログラムとは一致しない。(8. 47) 式およびFig. 8. 9からわかるように、ホログラフィック・ステレオグラムによる再生波面はサンプリングを細かくすると平面波に近づいてゆく。PASによる再生波面はホログラム面上の微小な領域での波面の曲率の情報は持っていないが、サンプリング間隔を無限に小さくすると、Fig. 8. 9からも明らかなように、要素ホログラム相互の相対的位相差が記録されているためホログラムと同様に球面波に近づいてゆく。

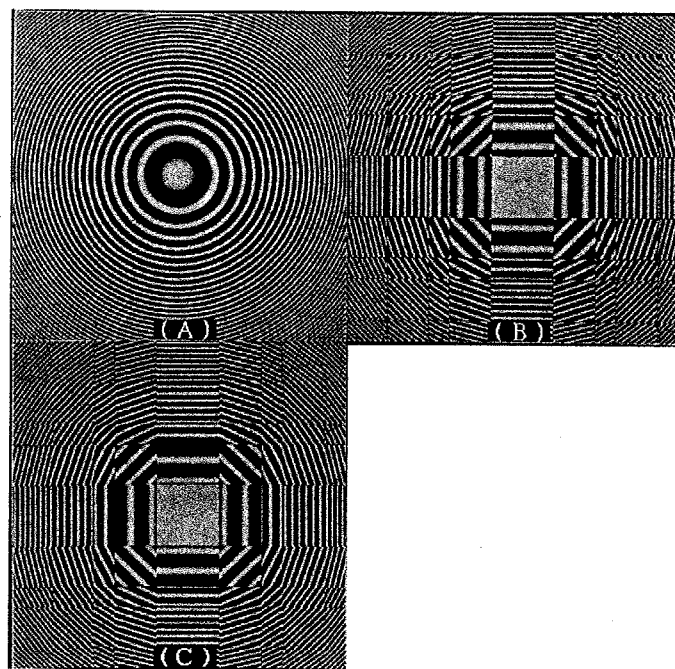


Fig. 8. 8

(a) フレネルホログラム、(b) ホログラフィック・ステレオグラム、(c) PASによるゾーンプレート

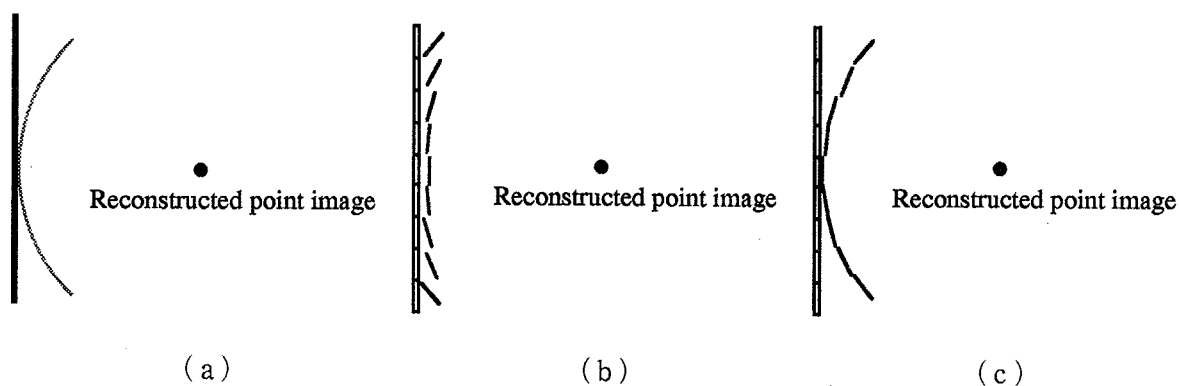


Fig. 8. 9

点像を記録し、再生した場合の (a) フレネルホログラム、(b) ホログラフィック・ステレオグラム、(c) PASによる再生波面の概念図。

8. 3. 5 実験

Fig. 8. 10に写真縮小法で作成したフレネルホログラム、ホログラフィック・ステレオグラム、PASのアルゴリズムに基づいて計算したCGHからの再生像を示す。ここでは2次元の文字パターンがホログラム面から200mm離れた位置で再生されるものとし、フレネル変換及びフーリエ変換ホログラムの干渉縞パターンは全て計算により求めた。計算した干渉縞パターンは 1024×1024 pixelで、この画像をCRTに表示し、これを写真縮小してミニコピーフィルムに記録した。CGHのミニコピーフィルム上での大きさは約4.0mmとなるようにしており、このとき干渉縞の最小の間隔は約 $4\mu\text{m}$ である。

再生像を観察するとホログラフィック・ステレオグラムによる再生像には回折の影響により文字の周りにアーティファクトが現れているのに対し、PASではそのようなアーティファクトはみられない。この結果よりPASに付加した位相項は再生像の画質に大きく寄与することが確認できる。

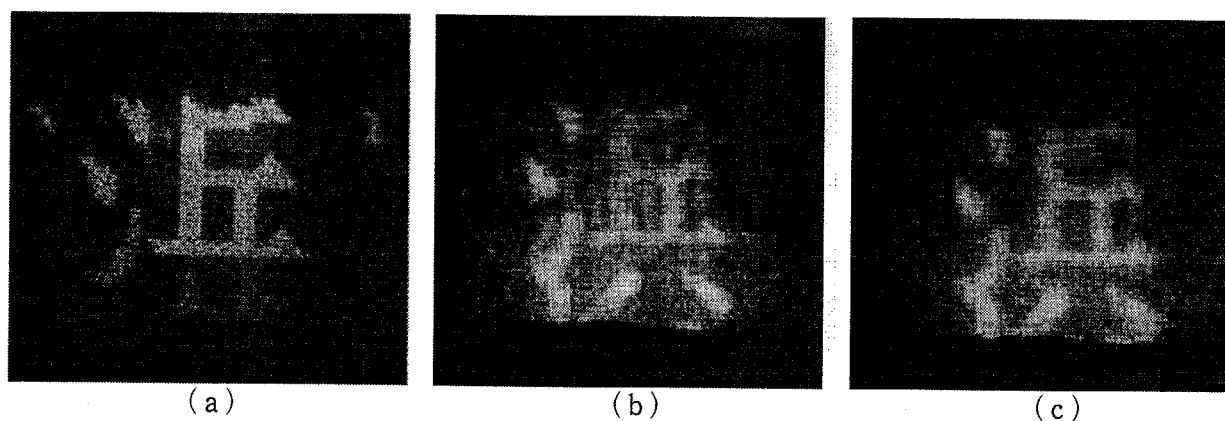


Fig. 8. 10

(a) フレネルホログラム、(b) ホログラフィック・ステレオグラム、(c) PASによる2次元画像のCGHからの再生像

8. 4 結論

本研究では、ホログラフィック・ステレオグラムによる像再生の性質に関して考察を行った。まず、マルチドット法によるホログラフィック・ステレオグラムの再生像の視域と解像度および像の歪について検討した。再生像の解像度は、ホログラム面や視差方向のサンプリング、再生光の色分散や照明光源の大きさによって劣化する。また再生像の歪は照明条件や乳剤の膨潤・収縮などにより発生する。観察条件が理想的でない場合、再生像の歪やボケが無視できないが、ホログラム面から5 m程度離れた位置から適切な角度で照明して観察すれば歪やボケの量は十分小さいと言える。したがってホログラフィック・3-Dプリンタにより出力された立体像を観察する場合には、通常はハロゲンランプや白熱灯などの光源で手軽に観察することができるが、厳密な表示を行う必要がある場合には照明条件などに配慮して観察系をセットすべきである。

なお、本章の考察では光軸を含む2次元面内で光線の記録・再生を考えたが、実際には3次元的な光線の振る舞いを考慮する必要がある。本論文では省略したが、3次元的な光線の特性は本節の式を3次元に拡張することによって記述できる。

また、ホログラフィック・3-Dプリンタによる立体像は、ステレオグラムの原理に基づいているが、サンプリング間隔を十分小さくして記録を行った場合に表示できる再生像の画質の限界について考察を行った。真のホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの違いは回折の効果であるため、ホログラフィック・ステレオグラムにおける波面再生に関して検討した。ホログラフィック・ステレオグラムにはフレネルホログラムに記録されている位相情報のうち光線の方向を示す成分のみが記録されており、ホログラム面から離れた位置では回折の影響により像は劣化する。これらの考察から、ホログラフィック・ステレオグラムに対し、フレネルホログラムに記録されている物体の奥行きに応じた二次の位相項を付加することで、ホログラム面から離れた再生像においても回折の影響を抑制し、高い分解能の像を得ることができることを示した。したがってホログラフィック・ステレオグラムは視差を表示し、回折計算によるホログラムは正しい立体像を表示するものと一概にいうことはできず、再生像の奥行きのレンジによってはホログラフィック・ステレオグラムでも十分な場合も多い。実際に3次元ディスプレイとしてホログラフィックな表示メディアを用いる場合には、像の奥行き等の条件を考慮し、各応用分野に応じて適した媒体を選択する必要がある。

第9章 位相を付加したステレオグラムによる立体像表示

9.1 はじめに

ホログラフィック・3-Dプリンタは、3次元画像処理システムの出力としてホログラフィック・ステレオグラムの技術を用いたハードコピーを生成する装置であるが、一方ホログラフィによりソフトコピーを実現する技術に関する研究も行われている。ホログラムを電子的に表示するシステム[43-46]においては、波面形状や干渉縞を計算により求め、これを高解像度の表示デバイスに表示する。したがってこれらのシステムを実現するために計算機ホログラム(CGH)による立体像表示技術の確立は重要な課題である。現状では表示デバイスの能力の問題が大きい、液晶や音響光学変調素子などを用いた高帯域の表示素子が開発されつつあり、将来、立体像を表示するホログラムを電子的に表示可能になると思われる。電子ホログラフィにおいてはデバイスの問題とともに、CGHの計算技術を確立する必要がある。ホログラフィの干渉縞の計算においてはデータ点が膨大であり計算時間の問題が大きく、3次元データからリアルタイムにホログラムを計算するために超並列コンピュータなどが用いられている。

CGHに関する研究としては、2値の表示媒体にCGHを記録するためのコーディングの手法に関する研究がよく知られている[85]。従来の研究の多くは、フーリエ変換型ホログラムの計算を行っており、これは3次元物体の表示に直接は利用できない。CGHによる3次元表示を目的とした方法としては、断層ごとのフレネル回折を計算する方法[28]、傾いた面の回折を計算する方法[86]、3次元物体の各点からの回折パターンをホログラム面で加算する方法[43]、ホログラフィック・ステレオグラムを利用した方法[27, 87]などが発表されている。これらのCGHの計算で問題となるのは、

- (1) 計算量が膨大
- (2) 隠面消去や面の反射特性などの表現が困難
- (3) 干渉縞のサンプリングによるエイリアジングの問題

などの点である。

ホログラフィック・ステレオグラムの原理を用いたCGH計算法[27, 87]は、これらの問題を解決する一手法として有効である。ホログラフィック・ステレオグラムではコンピュータグラフィックスの手法を用いることができるため、光線追跡法やシェーディングなどの様々な技法による立体像表示が可能である。ただし再生像の画質は第8章で述べたように回折の影響により制限され、再生像を表示できる奥行きに限界がある。最近動画ホログラフィに関する研究が活発化し、回折の計算を行って作成するCGHにおいても上記の問題点を解決することが試みられている。計算量の問題に対しては、あらかじめ干渉縞のパターンをテーブル化しておき、物体の位置によってテーブルを参照する方式[45]や、DFT

(Discrete Fourier Transform) やDCT (Discrete Cosine Transform) などを利用した方法[88]が発表されている。また(2)や(3)の問題に対しては、回折の計算で隠面消去や面の拡散特性の表現を行う手法[27, 89, 90]についての提案がなされている。

本研究では、前節で述べた位相を付加したステレオグラム（PAS）をCGHの計算法に対して応用する。PASはホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの中間的な性質を持つものでホログラフィック・ステレオグラムよりも立体像表示能力の点では優れているが、ホログラフィック・ステレオグラムとほぼ同様の計算法および同等の計算量で生成できるため、本目的に対して有効な方法と考えられる。ホログラフィック・ステレオグラムを用いたCGH計算法は上記の（１）－（３）の問題点に有効であるが、再生像の画質は低下する。PASはこれらの問題点を解決した上、より奥行きの高い立体像を高画質で表示できる能力を持っている。このことからPASは高画質の立体像表示をホログラフィを用いて行う際の手段として有用と考えられる。

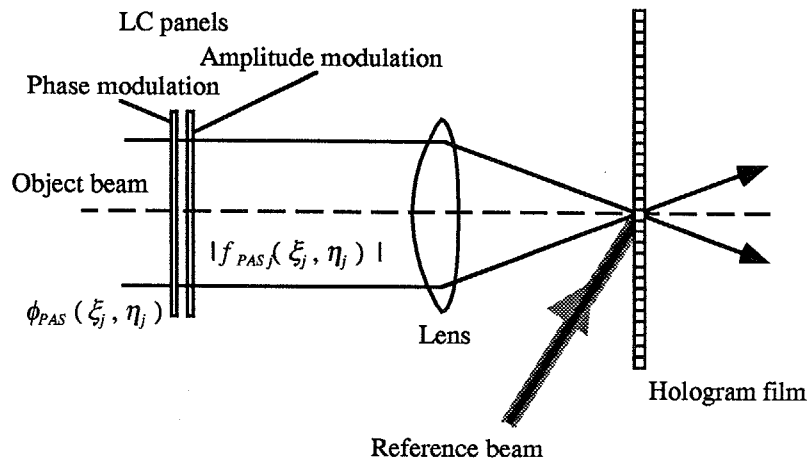


Fig. 9. 1

PAS作成の概念図

ホログラフィック・ステレオグラム合成系で、原画に物体の奥行きに応じた位相を付加して記録する。

9. 2 位相を付加したステレオグラムの原理

PASはホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの中間的な性質を持つもので、ホログラフィック・ステレオグラムよりも優れた画質の画像表示を行える可能性がある。本章ではPASの性質について考察し、PASを立体像表示に用いる手法を述べる。

第8章で述べたように、PASにはフレネルホログラムに記録されている位相成分のうち、光線の方角を示す項と要素ホログラム相互の相対的位相差を示す項が記録されている。そして（8. 48）式に示すようにホログラフィック・ステレオグラムの原画の各点に対して物体の奥行きに応じた位相を付加することで作成することができる。説明のため（8. 47, 48）式を以下に再び示す。

$$\begin{aligned}
 U_{PAS}(x_j + \Delta x_h, y_j + \Delta y_h) &= \iiint g(x_j + \Delta x_0, y_j + \Delta y_0, z) \exp\{-j \frac{\pi}{\lambda z} (\phi_2 + \phi_3)\} d\Delta x_0 d\Delta y_0 dz \\
 f_{PAS_j}(\xi_j, \eta_j) &= \int g(-\frac{z}{f} \xi_j + x_j, -\frac{z}{f} \eta_j + y_j, z) \exp\{-j \frac{\pi z}{\lambda f^2} (\xi_j^2 + \eta_j^2)\} dz
 \end{aligned} \tag{9.1}$$

したがって概念的には、Fig. 9. 1に示すようにホログラフィック・ステレオグラムの記録光学系で原画表示デバイスとして複素振幅変調素子 [9 1] を用いて位相を付加した原画を表示して記録すればよい。ただし実際には要素ホログラム相互の位相の関係を満足するためには、ホログラムフィルムの移動の精度や各露光でのホログラムフィルムの位置などに非常に高い精度が必要であり、Fig. 9. 1の光学系を用いてPASを記録するのは現実には困難である。ここではPASの原理をCGHの計算法に応用し、再生像の画質を保ったままで計算量の削減を実現する。

PASによる立体像表示法の特徴を以下に列挙する。

(1) コンピュータグラフィックスの手法を用いて計算できる。

したがって隠面消去、陰影処理、光線追跡、面の拡散特性の表現などをコンピュータグラフィックスの技法を活用して立体像表示に適用できる。

(2) 計算量の削減が可能。

回折の計算を行う場合と比較して計算量の削減が可能であり、ホログラフィック・ステレオグラムの原理を利用したCGH計算法とほぼ同等の計算量となる。また投影像の計算には、既存のコンピュータグラフィックス用ソフトウェアやハードウェアを活用でき、フーリエ変換の計算はホログラム面の一部のブロックで行えばよいので、DCTなどのハードウェアの利用が可能である。さらに演算のテーブル化や並列化も可能であり、高速化に適した計算法といえる。

(3) ホログラフィック・ステレオグラムよりも奥行き深い像を表示できる。

前章で述べたようにPASはホログラフィック・ステレオグラムで記録されていない位相成分を持つため、ホログラム面から離れた位置でも回折による劣化はほとんど生じない。フレネルホログラムと比較すると、要素ホログラム間隔以上の解像度の表示は不可能であるが、要素ホログラム間隔をホログラフィック・ステレオグラムと同様に0.1～0.3mm程度とすれば、人間の視覚特性を考慮すると十分である。ホログラムは光の波長程度の解像度の画像表示が可能であり、その計算を行うことは無駄が多いと考えられる。

9. 3 位相を付加したステレオグラムのCGH計算法への応用

PASをCGH計算法として用いる場合には、Fig. 9. 1に示す光学系により行われる演算を計算により行う。まず3次元データから f_{PASj} を(9. 1)式に従って算出する。したがって原画の各画素に付加される位相 $\phi_{PAS}(\xi, \eta)$ は(9. 2)式で与えられる。

$$\phi_{PAS} = -\frac{\pi z_o}{\lambda f^2}(\xi_j^2 + \eta_j^2) \quad (9. 2)$$

ここで z_o は原画上のその点に投影された3次元物体上の一点の奥行きである。実際の投影の演算では隠面消去の処理などを行うため(9. 1)式の処理とは異なるが、通常のコンピュータグラフィックスにより作成した画像の各画素に対し、その点に投影された物点の奥行き z_o から(9. 2)式を用いて計算すればよい。このようにして計算した原画をフーリエ変換することでホログラム面上における物体の複素振幅分布を求め、参照光との干渉縞を計算することでCGHのパターンを得ることができる。

Fig. 9. 2にPASの原理に基づくCGH計算の概念図を示す。コンピュータグラフィックスの手法を用いて各視点の画像を作成し、このときの z バッファの値から(9. 2)式により位相を画像の各点に与える。この複素画像をフーリエ変換し、参照光を加えて強度を求めることでホログラムの干渉縞を計算できる。したがってCGH作成のための計算量はホログラフィック・ステレオグラムの原理を用いた計算法と同等であり、回折の計算を行う場合と比較して大幅に削減される[27, 87]。

コンピュータグラフィックスの技法を用いることにより、隠面消去や面の拡散特性などの表現を容易に導入することができる。CGHの計算においてこれらの表現を行う手法は提案されているが、本手法を用いれば既存のコンピュータグラフィックスのソフトウェアやハードウェアの活用が可能であり、容易にこれらの表現が可能である。またコンピュータグラフィックスおよびFFTまたはDCTなどのハードウェアを組み合わせることで比較的小規模な高速処理システムの構築が可能であると考えられる。

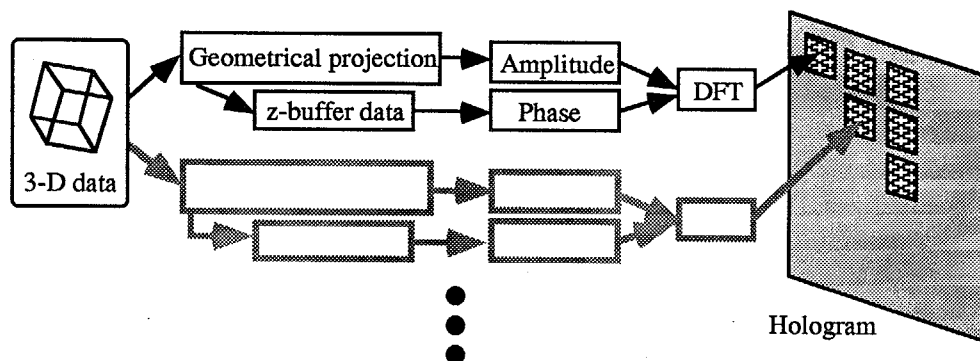


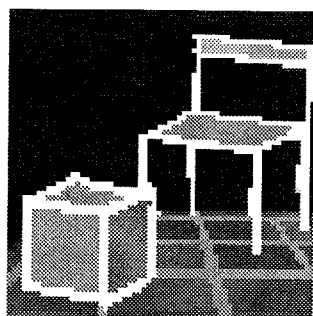
Fig. 9. 2

PASによるCGH計算。コンピュータグラフィックスなどによる幾何学的投影の演算とDFTによりホログラム面上の一領域の干渉縞パターンを求める。

9. 4 実験

PASのアルゴリズムに基づいて計算し、写真縮小法で作成したCGHからの再生像をFig. 9. 3およびFig. 9. 4に示す。Fig. 9. 3 (b)は(a)に示す物体から計算したPASによる再生像であり、 32×32 個の要素ホログラムに 32×32 方向の視差情報を記録した。計算した干渉縞パターンをCRTに表示し、ミニコピーフィルムに縮小して撮影した。ホログラムの大きさは $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ である。再生はHe-Neレーザの 633 nm の光で照明し、0次回折光はフーリエ変換光学系を用いて除去して観察および写真撮影を行った。

Fig. 9. 4に記録した物体は矩形の枠の後方に文字パターン"K"が浮かぶもので、枠と文字はそれぞれホログラム面の後方約 5 mm 、約 30 mm の位置に再生される。ホログラムは 64×64 方向の視差を持つ 64×64 個の要素ホログラムからなるもので、干渉縞は二値化してレーザプリンタにより出力し、写真縮小法によりミニコピーフィルムに撮影した。Fig. 9. 4は、再生された虚像を0次光カットフィルタを通して直接カメラで撮影したもので、(a)は文字"K"に、(b)は周囲の枠に焦点を合わせてある。出力したCGHの画素数の点で不十分なものではあるが、実験により本手法を用いて立体像を表示できることを確認した。

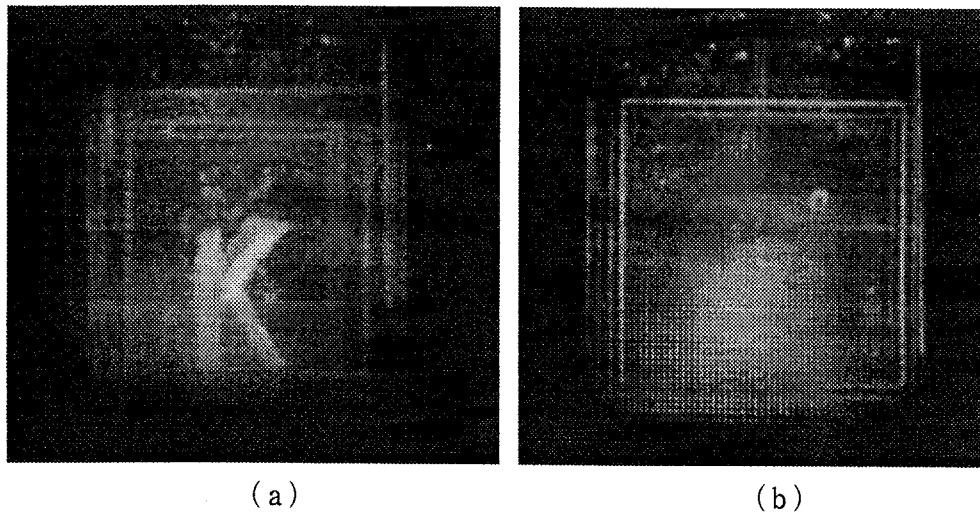


(a)



(b)

Fig. 9. 3
PAS作成の実験結果 (1)
(a) 記録した3次元物体
(b) 再生像



F i g . 9 . 4
P A S 作成の実験結果 (2)

(a) 文字パターン“k”にフォーカスを合わせて撮影した再生像の写真

(b) 周囲の矩形の枠にフォーカスを合わせて撮影した再生像の写真

9. 5 結論

本章では、ホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの中間的な性質をもつPASを考え、そのCGH計算法としての応用について述べた。PASはホログラフィック・ステレオグラムに対し、フレネルホログラムに記録されている物体の奥行きに応じた二次の位相項を付加したもので、ホログラム面から離れた再生像においても回折の影響を抑制し、高い解像度の像を得ることができる。またPASをCGHの計算法として用いることで、比較的小規模で高速にCGHを計算するシステムが実現できると考えられる。

今後高解像度の記録技術を活用することによりCGHを記録したり、電子デバイスに干渉縞を表示する動画ホログラフィなどの分野において、CGHによる3次元画像表示の技術が重要になることが予想され、PASはそのひとつの選択肢として有用と思われる。実際に3次元ディスプレイとしてホログラフィックな表示メディアを用いる場合には、必要な像の奥行き等の条件を考慮し、各応用分野に応じて適した手法を選択する必要がある。ホログラムは光の波長程度の情報を持つものであり、記録される情報量は非常に大きい。そのため立体像表示のためにホログラムを計算する場合は、人間の視覚的能力をはるかに超えた計算を行うことになる。この点でPASはホログラム面で分割して計算するため光の波長程度の計算は行わず、立体像表示のためのCGHの目的に対して効率的な手法と言える。

第10章 結論

本研究では、3次元画像システムにおける立体像としての画像ハードコピー出力を実現することを目的として、ホログラフィック・3-Dプリンタの開発を行った。まず3次元画像システムの端末装置としての3-Dプリンタに必要とされる条件について述べ、ホログラフィ技術の適用の可能性を検討した。ホログラフィック・ステレオグラムは様々な視点の2次元画像から立体像を合成できるため本目的に適したもののといえるが、ホログラフィック・3-Dプリンタに適用するためには現状の技術では不十分であり、新たな手法の開発が必要である。本研究では、3-Dプリンタに必要とされる条件を満足する手法として、マルチドット記録法と名付けたホログラフィック・ステレオグラムの記録法を開発し、立体的な画像ハードコピー出力が可能であることを示した。液晶パネルを用いて計算機の3次元画像データから自動的にホログラフィック・ステレオグラムを作成でき、また水平・垂直方向の視差を記録することで歪のない立体像を表示できる。

また、マルチドット記録法においては、要素ホログラム間隔が粗いと再生像上にドットが目立つという点と、露光点数が膨大で露光に長時間を要するという問題点があるが、これらの問題点の解決策の検討を行った。はじめに、要素ホログラム間隔を小さくして高解像度の画像を表示するために、デジタル拡散板を用いた光学系が有効であることを述べた。特に階調画像の表示特性について実験的に検討し、デジタル拡散板の一種である疑似ランダム位相板を使用することで階調表示特性を改善できることを示した。次に、ホログラフィック・ステレオグラムの記録の高速化を図るために、各露光に要する時間とその短縮の可能性についての検討し、複数の要素ホログラムを同時に露光する並列露光光学系の開発を行った。実験では12個の要素ホログラムを並列に露光する光学系を用いて、記録時間をそれまでの実験の約 $1/10$ に短縮し、 340×225 個の要素で構成されるホログラムを3時間35分で合成することができた。システムの最適化により各露光に要する時間はさらに $1/2 \sim 1/4$ 程度には容易に短縮できると考えられる。

さらに、ホログラフィック・3-Dプリンタ実現のための諸問題について検討することを目的として、プロトタイプ装置の試作を行い、製作した装置を用いて実験を行った。このプロトタイプは、水平・垂直方向の視差を持つ歪のない立体像を計算機の3次元データから自動的に記録できる初めての装置である。この装置により、マルチドット法によるホログラフィック・ステレオグラムをフィルムに記録することが可能となり、また光学系の調整や暗室を必要とせずにホログラムの記録ができるため、ホログラフィック・3-Dプリンタ実用化に大きく近づいたといえる。

ホログラフィック・3-Dプリンタが実際に用いられるようになれば、当然カラーの3次元画像の記録を行うことが要求される。本研究では3色のレーザを用いてドット毎に異なる色の要素ホログラムを記録・再生する方式について提案し、カラー表示が可能であることを実験的に示した。また計算機などの電子的カラー画像データを出力するための色の変換の方法を示した。現状では感光材料やレーザ光源の問題が大きいが、現在、単色のレーザでカラー表示できる感光材料や3色のレーザに対して感度を持つ優れた材料が開発されつつあり、また非線形結晶を用いた緑や青の半導体レーザも実現されていることから、カラー

のホログラフィック・3-Dプリンタも近い将来実現されると考えられる。

従来のホログラフィック・ステレオグラムの記録では、垂直方向の視差を記録しないため、スリット状の要素ホログラムを順次露光する方式が主に用いられていた。本研究でホログラフィック・3-Dプリンタのために開発したマルチドット記録法は、ドット状の要素ホログラムを露光するもので、水平・垂直方向の視差を記録できる。したがって、マルチドット記録法により、記録できる自由度を1次元増やすことができたといえる。人間の立体知覚においては垂直方向と比較して水平方向の視差が非常に重要な役割を果たしており、垂直方向の視差情報の記録が省略されることが多いが、垂直方向の視差の情報を記録しなければ正確な立体像を表示することができない。一方、再生像の正確さよりも被写体の動きの情報が重要な場合も多く、垂直方向の視差を犠牲にして動きの情報を記録することでマルチドット法により立体アニメーションを記録する方法を提案した。この立体アニメーションの方法は、マルチドット法で記録できる垂直方向の自由度を物体の動きの情報に利用したものである。また、第7章で述べたマルチドット記録法によるレインボウホログラムの記録法は、この垂直方向の自由度を用いてレインボウホログラムにおけるスリットの合成と、色の情報の表示を行うものである。カラーのホログラフィック・3-Dプリンタとしては第4章で述べたように水平・垂直方向の視差を持つカラーの立体像を記録できるリップマンホログラムを用いた方法が適しているといえるが、垂直方向の視差情報よりも色の情報が重要である場合には垂直方向の自由度を色の情報の表示に用いることができる。

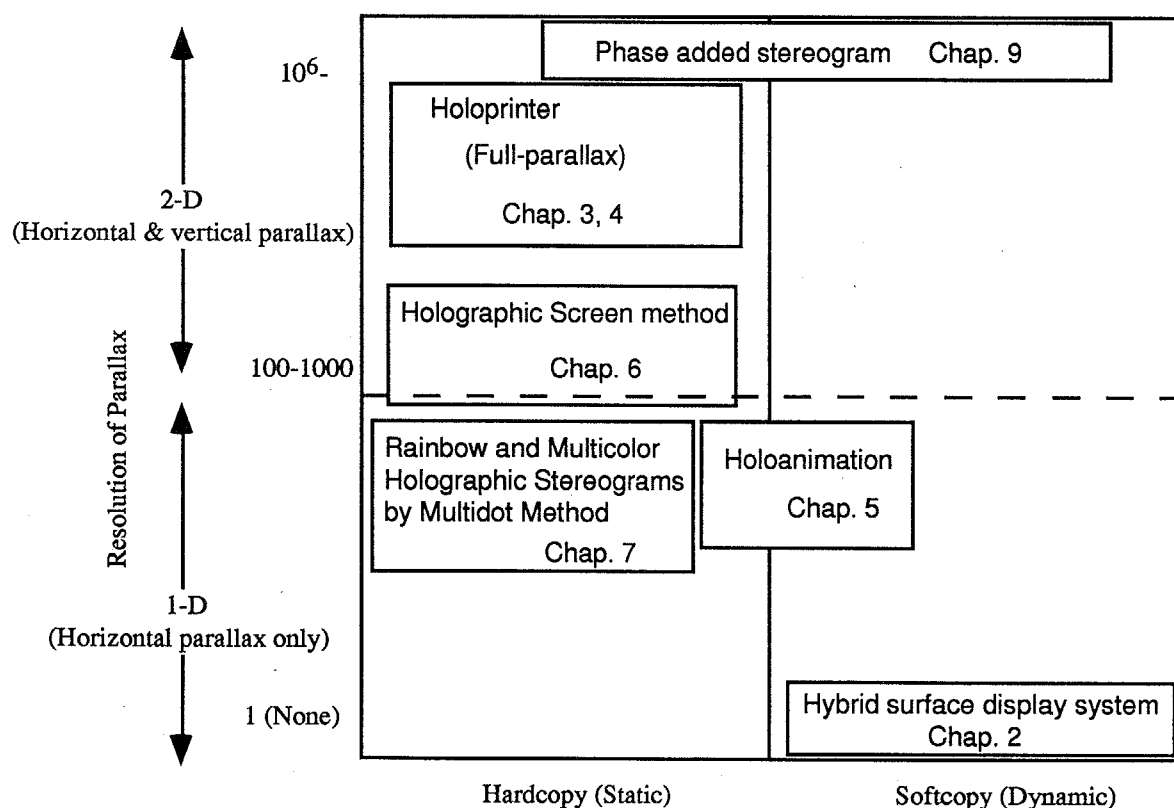


Fig. 10. 1

本研究の手法の分類。横軸はハードコピー／ソフトコピー（または静止画／動画）の別を表し、縦軸は記録できる視差情報の解像度を示している。

3次元画像システムにおける画像出力は、静止画と動画およびハードコピーとソフトコピーに分類できる。また視差情報の記録という観点から考えると、(1) 視差のない画像の表示、(2) 水平視差のみの表示、(3) 水平・垂直方向の視差の表示、に分類でき、さらに表示される視差の方向数により再生像の画質を評価できる。本論文に記載した研究はFig. 10. 1のように図示することができ、これらの中から目的に応じて最適な手法を選択すればよい。3-D眼鏡やレンチキュラーレンズを用いる方式においては記録できる視差情報が水平方向だけであり2-10方向と少ないが、本研究で開発を行った方法は $50-10^6$ 方向の視差を持つ高画質の立体像表示が可能である。マルチドット法によるホログラフィック・3-Dプリンタは、水平・垂直方向の視差を持つ静止画の立体像を記録する装置で、静止画の立体像として最も高い画質の画像出力が可能である。第6章のホログラフィック・スクリーンを用いた立体像表示法は、水平・垂直方向の視差を静止画として記録できるが、ホログラフィック・ステレオグラムを用いる場合表示できる視差方向数が少ない。しかし、あらかじめ作成したホログラフィック・スクリーンに、高解像度のプリンタで透過フィルムに出力した画像を張り合わせることで立体像表示が可能であり、3-Dプリンタの第1段階として有望な手法と考えられる。レインボウ型ホログラフィック・スクリーンを利用する場合は水平視差のみの表示が可能だが、スクリーンは安価で大量複製することが可能である。Fig. 10. 1の分類では、ホログラフィック・3-Dプリンタによる3-Dアニメーションは動画をハードコピーとして記録する方法で、記録する視差情報は水平視差のみである。3次元動画は表示するデータ量が非常に多いため、現状ではソフトコピーとして多数の視差方向を表示することは困難であり、ハードコピーとして動画を記録することが現実的な手法と考えられる。なお、第2章で述べた光学的処理によるボリュームデータの表示法は、動画のソフトコピーを2次元の画像として表示するための技術で、光学的処理を用いて視差の情報を時系列で表示する。

Fig. 10. 1に示されるように、ホログラフィック・3-Dプリンタにより出力される立体像は、現状では3次元画像システムの表示媒体として最も高い画質を持つものであるが、第8章ではその再生像の画質に関係する要因について考察を行った。再生像の視域と歪および分解能などについて検討し、適当な条件の下で記録・再生を行えば歪のない正確な立体像を高分解能に表示できることを示した。

しかし、ホログラフィック・ステレオグラムによる立体像表示は、記録する視差方向数を十分多くしてもホログラムとは一致しない。第8章ではさらに、ホログラフィック・ステレオグラムにおける立体像表示に関する能力の限界について考察した。ホログラフィック・ステレオグラムは2次元画像から視差により立体像を得るステレオ写真の原理に基づいており、ホログラムのような波面再生とは基本的に異なるが、真のホログラムとの違いはこれまで明らかにされていなかった。本論文ではホログラフィック・ステレオグラムにおける波面再生について考察を行い、ホログラムとの違いを理論的に示した。また、ホログラフィック・ステレオグラムの性質を明確にすることを目的として、ホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの中間的な性質を持つ位相を付加したステレオグラム(PAS)を提案した。ホログラフィック・ステレオグラムには光線の方角を示す成分のみが記録されており、サンプリング間隔を小さくしても再生波面は真のホログラムと一致しない。それに対してPASは、サンプリングを細かくした場合にホログラムと一致する。

PASは、ホログラフィック・ステレオグラムよりも優れた画質の立体像を表示できる能力を持っており、計算機ホログラム (CGH) の計算法としても有用である。現状では記録・表示媒体の問題によりCGHを用いて満足な画質が得られていないが、現在、電子的にホログラフィを生成・表示するシステムが研究されており、PASを適用することで、ホログラムの計算を高速に行うことができ、光線追跡法などのコンピュータグラフィックス画像をCGHにより表示できるようになる。ホログラフィック・ステレオグラムの原理を用いてCGHを計算する手法はすでに提案されているが、PASを用いればほぼ同じ計算量でさらに画質の高い立体像を表示できる可能性がある。

今後ホログラフィック・3-Dプリンタを実用化するためには、周辺技術の活用が重要な要素である。ホログラフィック・3-Dプリンタに適したレーザ光源や感光材料などの研究や、液晶パネルなどの空間光変調器の性能の向上が望まれる。また高速に記録するための光学系とフィルム送り機構などの開発も必要である。最近著しく進歩を遂げた光ディスクやレーザプリンタなどにおいては同様の基礎技術を基盤としており、これらの開発で得られた研究成果を活用することによりホログラフィック・3-Dプリンタは近い将来実用化できると考えられる。以上のように、本研究によりホログラフィック・3-Dプリンタの意義と基本原理を明らかにし、その実用化のための基礎を確立することができた。

参考文献

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature* 161 (1948) 777-778
- [2] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefronts," *Proc. Roy. Soc. A* 197 (1949) 454-491
- [3] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects," *J. Opt. Soc. Am.* 54 (1964) 1295-1301
- [4] S. A. Benton, "Hologram reconstructions with extended incoherent sources," *J. Opt. Soc. Am.* 59, (1969) 1545A
- [5] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics," 4th ed., Pergamon Press, Oxford, (1970) Chap. 7, 280
- [6] H. M. Smith, "Principles of Holography," Wiley, New York, (1969) Chap. 4
- [7] E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marks, and N. Massey, "Holographic data storage in three-dimensional media," *Appl. Opt.* 5, No.8 (1966) 1303-1311
- [8] 久保田、"リッパマンホログラム再生像の鮮明化の試み"、*光学* 16, No. 5 (1987) 204-209
- [9] P. Hariharan, "Colour holography," *Progress in Optics XX*, E. Wolf ed., IV (1983) 265-324
- [10] J. Upatnieks, J. Marks, and R. Fedrowicz, "Color holograms for white light reconstruction," *Appl. Phys. Lett.* 8 (1966) 286-287
- [11] T. Kubota and T. Ose, "Lippmann color holograms recorded in methylene-blue-sensitized dichromated gelatin," *Opt. Lett.* 4, No.9 (1979) 289-291
- [12] R. V. Pole, "3-D imagery and holograms of objects illuminated in white light," *Appl. Phys. Lett.* 10, (1967) 20-22
- [13] J. T. McCrickerd and N. George, "Holographic stereogram from sequential component photographs," *Appl. Phys. Lett.* 12 (1968) 10-12
- [14] D. J. DeBitetto, "Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recordings," *Appl. Opt.* 8, No.8 (1969) 1740-1741
- [15] M. C. King, A. M. Noll, and D. H. Berry; "A New Approach to Computer-Generated Holography", *Appl. Opt.* 9, 471-475 (1970).
- [16] L. Cross は文献で発表していない。初期の文献としては、L. Huff and R. L. Fusek, "Color holographic Stereograms," *Opt. Eng.* 19 (1980) 691-695
- [17] R. L. Fusek and L. Huff, "Use of holographic lens for producing cylindrical holographic stereograms," *Opt. Eng.* 20 (1981) 236-240
- [18] J. Tsujiuchi, "Multiplex holograms and their application in medicine," *Holography Applications, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 673 (1986) 53-61
- [19] N. Ohyama, Y. Minami, A. Watanabe, J. Tsujiuchi, and T. Honda, "Multiplex holograms of a skull made of CT images," *Opt. Commun.* 61, No.2 (1987) 96-99

- [2 0] J. Tsujiuchi et al., "Development of automatic hologram synthesizer for medical use," Practical Holography VI, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1667 (1992) 86-109
- [2 1] S. A. Benton, "Survey of holographic stereograms," Processing and Display of Three-Dimensional Data, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 367 (1982) 15-19
- [2 2] S. A. Benton, "The principles of reflection holographic stereograms," Proc. 3rd Int'l Symp. on Display Holography (Lake Forest College, July '88)
- [2 3] D. Kang, M. Yamaguchi, T. Honda, and N. Ohyama, "Image processing technique for arbitrary image positioning in holographic stereogram," Opt. Commun. 80, No.1, (1990) 7-12
- [2 4] 岡田、吉井、俣木、加藤、辻内、"円錐状ホログラフィックステレオグラム"、第20回画像工学コンファレンス論文集 (1989) 319-322
- [2 5] S. A. Benton, "'Alcove' holograms for computer-aided design," True 3D imaging Techniques and Display Technologies, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 761 (1987) 53-61
- [2 6] S. A. Benton, "The reflection alcove hologram: a computer-graphic holographic stereogram," Computer Generated Holography II, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 884 (1988) 106-113
- [2 7] T. Yatagai, "Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms," Appl. Opt. 15 (1976) 2722-2729
- [2 8] J. P. Waters, "Three-dimensional Fourier-transform method for synthesizing binary holograms," J. Opt. Soc. Am. 58, No.9 (1968) 1284-1288
- [2 9] K. M. Johnson, L. Hesselink, and J. W. Goodman, "Multiple exposure holographic display of CT medical data," Processing and Display of Three-Dimensional data, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 367 (1982) 149-154
- [3 0] 伊藤、宋、石垣、小池、岡田、辻内、"多重断層ホログラムによる医用画像の立体表示"、第22回画像工学コンファレンス論文集 (1991) 99-102
- [3 1] S. Love and D. F. McAllister, "Computer generated lenticular stereograms," Three-Dimensional Visualization and Display Technologies, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1083 (1989) 102-107
- [3 2] 岩原、西、鈴木、"3次元プロッタを用いた生体構造の立体表示"、Med. Imag. Tech. 11, No.3 (1993) 315-316
- [3 3] 磯野、安田、笹沢、"液晶アクティブバリア方式眼鏡なし3Dディスプレイ"、第22回画像工学コンファレンス論文集 (1991) 103-106
- [3 4] J. T. McCrickerd, "Comparison of Stereograms: pinhole, fly's eye, and holographic types," J. Opt. Soc. Am. 62, (1972) 64-70
- [3 5] M. A. Klug, M. W. Halle, M. Lucente, W. J. Plesniak, "A compact prototype one-step Ultragram printer," Practical Holography VII: Imaging and Materials, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1914 (1993) 15-24
- [3 6] M. A. Klug, M. W. Halle, P. M. Hubel, "Full color ultragrams," Practical Holography VI, S. A. Benton

- ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1667 (1992) 110-119
- [3 7] M. A. Klug and S. A. Benton, "Progress in one-step hologram imaging at MIT," *Frontiers in Information Optics, Topical Meeting of the ICO, Meeting Digest* (1994) 221
 - [3 8] W. Spierings and E. van Nuland, "Development of an office holoprinter II," *Practical Holography VI*, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1667 (1992) 52-62
 - [3 9] E. van Nuland and W. Spierings, "Development of an office holoprinter III," *Practical Holography VII: Imaging and Materials*, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1914 (1993) 9-14
 - [4 0] M. Monde, T. Uematsu, T. Toda, K. Ohnuma, Y. Yasuda, "The holographic three-dimensional printer using galvanometer scanners," *Frontiers in Information Optics, Topical Meeting of the ICO, Meeting Digest* (1994) 225
 - [4 1] 動画ホログラフィ研究会会報第1号 (1991) — 第8号 (1993)
 - [4 2] H. Higuchi and J. Hamasaki, "Real-time transmission of 3-D images formed by parallax panoramagrams," *Appl. Opt.* 17, (1978) 3895-3902
 - [4 3] P. S. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jpsen, J. Kollin, H. Yoshikawa, and J. Underkoffler, "Electronic display system for computational holography," *Practical Holography IV*, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1212 (1990) 174-182
 - [4 4] P. S. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, "Synthetic aperture holography: a novel approach to three-dimensional displays," *J. Opt. Soc. Am.* 9, No.11 (1992) 1969-1977
 - [4 5] S. A. Benton: "Experiments in Holographic Video Imaging," *Holography comemorating the 90th Anniversary of the birth of Dennis Gabor*, P. Greguss and T. H. Jeong eds., SPIE Institutes for advanced Optical Technologies IS8 (1990) 247-267
 - [4 6] P. St-Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, J. D. Sutter, W. J. Plesniak, "Advances in holographic video," *Practical Holography VII: Imaging and Materials*, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1914 (1993) 188-196
 - [4 7] N. Hashimoto and S. Morokawa, "Real-time electroholographic system using liquid crystal television spatial light modulators," *J. Electronic Imaging* 2, (1993) 93-99
 - [4 8] G. Frieder, D. Gordon, R. A. Reynolds, "Back-to-front display of voxel-based objects," *IEEE Computer Graphics and Applications* 5 (1985) 52-60
 - [4 9] D. R. Ney, E. K. Fishman, D. Magid, R. A. Drebin, "Volumetric rendering of Computed Tomography data: Principles and Techniques," *IEEE Computer Graphics and Applications* March (1990) 24-32
 - [5 0] M. Levoy, "Display of surfaces from volume data," *IEEE Computer Graphics and Applications* 8, No.3 (1988) 29-37
 - [5 1] J. J. Baez-Rojas, S. Ohishi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Visualization of 3D volume data using an optical model," *Opt. Commun.* 91, No.1,2, (1992) 34-40
 - [5 2] J. J. Baez-Rojas, M. Yamaguchi, and N. Ohyama, "Application of hybrid systems for the visualization of

3D volume data," *Opt. Commun.*, 109 (1994) 393-399

- [5 3] K. Okada, T. Honda, and J. Tsujiuchi, "A method of distortion compensation of multiplex holograms," *Opt. Commun.* 48, No.3 (1983) 167-170
- [5 4] K. A. Haines, "Computer aided holography and holographic computer graphics," U.S. Pat. #4778262
- [5 5] 山口雅浩、志村啓、康德寛、大山永昭、本田捷夫、辻内順平、"液晶TVを用いたホログラフィック・ステレオグラムの合成"、第19回画像工学コンファレンス論文集、(1988) 63-66
- [5 6] M. Kato, S. Hotta, and K. Kanai, "Generation of high quality holograms with liquid crystal SLM," *Practical Holography IV*, S. A. Benton ed., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 1212 (1990) 93-101
- [5 7] W. K. Smothers, A. M. Weber, D. J. Mickish, B. M. Monroe, and D. E. Keys, "Photopolymers for holography," *Practical Holography IV*, S. A. Benton ed., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 1212, (1990) 20-29
- [5 8] P. M. Hubel and M. A. Klug, "Color holography using multiple layers of Du Pont photopolymer," *Holography VI*, S. A. Benton ed., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 1667 (1992) 215-224
- [5 9] D. J. Cooke and A. A. Ward, "Reflection-hologram processing for high-efficiency in silver-halide emulsions," *Appl. Opt.* 23, (1984) 934-931
- [6 0] Y. Nakayama and M. Kato, "Diffuser with pseudorandom phase sequence," *J. Opt. Soc. Am.* 69 (1979) 1367-1372
- [6 1] M. Kato, Y. Nakayama, and T. Suzuki, "Speckle reduction in holography with a spatially incoherent source," *Appl. Opt.* 14, No.5 (1975) 1093-1099
- [6 2] R. Brauer, U. Wojak, F. Wyrouski, and O. Bryngdahl, "Digital diffusers for optical holography," *Opt. Lett.* 16 (1991) 1427-1429
- [6 3] L. H. Lin and C. V. LoBianco, "Experimental Techniques in Making Multicolor White Light Reconstructed Holograms," *Appl. Opt.* 6 (1967) 1255-1258
- [6 4] P. M. Hubel and L. Solymar, "Color-reflection holography: theory and experiment," *Appl. Opt.* 30, No.29 (1991) 4190-4203
- [6 5] P. Hariharan "Pseudocolor images with volume reflection holograms," *Opt. Commun.* 35 (1980) 42-44
- [6 6] J. R. Andrews, "Pseudocolor transmission holographic stereograms with point white light source illumination," *Appl. Opt.* 29, No.19 (1990) 2864-2871
- [6 7] 久保田、"ホログラフィック・ステレオグラムを使ったリップマンカラーホログラム"、第20回画像工学コンファレンス論文集 (1989) 311-314
- [6 8] M. A. Haase, J. Qiu, J. M. Depuydt, and H. Cheng, "Blue-green laser diodes," *Appl. Phys. Lett.* 59, (1991) 1272-1274
- [6 9] 尾松、"LD励起固体レーザのホログラムへの応用"、ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報、No.1 March (1993) 24-29
- [7 0] 大山、"3次元イメージングの将来に関する一提案"、*Med. Imag. Tech.* 7 (1989) 29-36

- [7 1] V. G. Komar "Progress on the holographic movie process in the USSR," Three-Dimensional Imaging, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 120 (1977) 127-144
- [7 2] A. D. Jacobson, V. Evtuhov, and J. K. Neeland, "Motion picture holography," Appl. Phys. Lett. 14, No.4 (1969) 120-122
- [7 3] D. J. DeBotteto, "A holographic motion picture film with constant velocity transport," Appl. Phys. Lett. 12, No.9 (1968) 295-297
- [7 4] J. R. Andrews, "Image processing for animated holograms," Practical Holography VI, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1667 (1992) 120-126
- [7 5] 戸田、康、岩田、" グレーティングイメージを利用した3次元ディスプレイ"、第40回応用物理学会関係連合講演会講演予稿集、(1993) 904
- [7 6] 志村、本田、山口、大山、" マルチプレックス・ホログラム再生像の拡大"、光学、20, No.3 (1991) 169-173
- [7 7] P. St Hilaire, "Modulation transfer function and optimum sampling of holographic stereograms," Appl. Opt. 33, No.5 (1994) 768-774
- [7 8] R. W. Meier, "Magnification and third-order aberrations in holography," J. Opt. Soc. Am. 55 (1965) 987-992
- [7 9] E. B. Champagne, "Nonparaxial imaging, magnification, and aberration properties of holography," J. Opt. Soc. Am. 57 (1967) 51-55
- [8 0] 康、" 白色光再生平面型One-stepホログラフィック・ステレオグラムの開発"、博士論文、東京工業大学、1991年1月
- [8 1] I. Glaser, "Anamorphic imagery in holographic stereograms," Opt. Commun. 7 (1973) 323-326
- [8 2] I. Glaser and A. A. Freasem, "Imaging properties of holographic stereograms," Three-Dimensional Imaging, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 120, (1977) 150-162
- [8 3] T. Honda, K. Okada, and J. Tsujiuchi, "3-D distortion of observed images reconstructed from a cylindrical holographic stereogram (1) Laser light reconstruction type," and K. Okada, T. Honda, and J. Tsujiuchi, "3-D distortion of observed images reconstructed from a cylindrical holographic stereogram. (2) White light reconstruction type," Opt. Commun. 36, No.1 (1981) 11-21
- [8 4] S. M. Jeffy, K. Dutta, "Digital perspective correction for cylindrical holographic stereograms," Three-Dimensional Imaging, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 120, (1977) 130-140
- [8 5] A. W. Lohmann and D. P. Paris, "Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer," Appl. Opt. 6, No.10 (1967) 1739-1748
- [8 6] D. Leseberg and C. Frere, "Computer-generated holograms of 3-D objects composed of tilted planar segments," Appl. Opt. 27, No.4 (1988) 3020-3024
- [8 7] T. Yatagai, "Three-dimensional displays using computer-generated holograms," Opt. Commun. 12, No.1 (1974) 43-45

- [8 8] 吉川、佐々木、亀山、" 3次元ディスプレイのための変換を利用したホログラムの計算法"、テレビジョン学会年次大会論文集 (1993) 327-328
- [8 9] 吉川、松丸、" 電子ホログラムディスプレイのための隠面およびシェーディング処理"、電子情報通信学会秋季大会論文集 (1992) 6-231
- [9 0] 松丸、吉川、" 電子ホログラフィックディスプレイのシェーディングにおける反つや消し面表現の一手法"、動画ホログラフィ研究会会報 No.7, (1993) 11-14
- [9 1] J. Amako, H. Miura, T. Sonehara, "Wave-front control using liquid crystal devices," Appl. Opt. 32, No.23 (1993)

研究業績

本研究に関係する投稿論文

- (1) M. Yamaguchi, S. Oh-ishi, N. Ohyama, T. Honda, and J. Tsujiuchi, "High-speed surface display through hybrid processing," *Opt. Lett.* 15, No.10, (1990) 565-567
- (2) M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Holographic three-dimensional printer: new method," *Appl. Opt.* 31, (1992) 217-222
- (3) M. Yamaguchi, H. Sugiura, T. Honda, and N. Ohyama, "Automatic recording method for holographic three-dimensional animation," *J. Opt. Soc. Am. A* 9, No.7, (1992) 1200-1205
- (4) 山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"ホログラフィック・ステレオグラムによる像再生特性に関する考察"、*光学* 22, No.11, (1993) 714-720
- (5) M. Yamaguchi, H. Endoh, T. Honda, N. Ohyama, "High-quality recording of a full-parallax holographic stereogram with a digital diffuser," *Opt. Lett.* 19, No.2 (1994) 135-137
- (6) M. Yamaguchi, T. Honda, N. Ohyama, J. Ishikawa, "Multidot recording of rainbow and multicolor holographic stereograms," *Opt. Commun.* 110, (1994) 523-528
- (7) M. Yamaguchi, T. Koyama, N. Ohyama, T. Honda, "A stereographic display using reflection holographic screen," *Optical Review* 1, No.2, to be published.
- (8) M. Yamaguchi, H. Endoh, T. Koyama, N. Ohyama, "Parallel exposure system for the recording of full-parallax holographic stereograms," *Opt. Commun.*, to be submitted.
- (9) M. Yamaguchi, H. Endoh, T. Koyama, N. Ohyama, and T. Honda, "Prototype full-parallax holoprinter," *Opt. Eng.*, to be submitted.
- (10) M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Calculation of computer-generated holograms by the stereographic method involving phase factor," *J. Opt. Soc. Am. A*, to be submitted.

本研究に関連する国際会議Proceedings

- (1) M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Holographic 3-D printer," *Practical Holography IV*, S. A. Benton ed., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 1212, (1990) 84-92
- (2) M. Yamaguchi, H. Enomoto, T. Honda, N. Ohyama, "High quality recording method for full-color holographic 3D printer," *Proceedings of the 12th International Display Research Conference*, Hiroshima, Japan, (1992) 319-322

- (3) M. Yamaguchi, H. Hoshino, T. Honda, and N. Ohyama, "Phase added stereogram: calculation of hologram using computer graphics technique," Practical Holography VII, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1914, (1993) 25-31
- (4) M. Yamaguchi, H. Endoh, T. Honda and N. Ohyama, "Recording of high quality 3-D images by holoprinter," O. V. Angelsky ed., Holography, Correlation Optics, and Recording Materials, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 2108, (1993) 214-219 (Invited)

学会発表など

- (1) 山口雅浩、辻川晋、大山永昭、本田捷夫、辻内順平、"液晶TVによるマルチブックス・ホログラムの合成"、第35回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1988) 763
- (2) 山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、辻内順平、"ハイブリッド処理による高速表面画再構成"、第36回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1989) 786
- (3) 山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、"ホログラフィック・3-Dプリンタ"、第50回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1989) 747
- (4) 山口雅浩、石川洵、本田捷夫、大山永昭、"空間分割記録によるレインボウマルチドットホログラム"、第51回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1990) 818
- (5) 杉浦弘明、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"3-Dアニメーションのためのホログラフィック・ステレオグラム"、第38回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1991) 791
- (6) 山口雅浩、杉浦弘明、本田捷夫、大山永昭、"ホログラフィック・ステレオグラムによる像再生 (I) 結像特性"、第38回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1991) 792
- (7) 榎本寿、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"3-D PRINTER のカラー化"、第52回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1991) 835
- (8) 山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"ホログラフィック・ステレオグラムによる像再生 (II) ホログラムとの比較"、第39回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1992) 828
- (9) 遠藤秀明、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"マルチドットホログラフィック・ステレオグラムの高密度記録"、第53回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1992) 797
- (10) 小山隆浩、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"ホログラムレンズアレイを用いた3次元像表示"、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 904
- (11) 遠藤秀明、山口雅浩、大山永昭、"並列露光によるホログラフィック・3-Dプリンタの高速化"、第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1994) 871
- (12) 山口雅浩、星野英志、本田捷夫、大山永昭、"位相を付加したステレオグラムによる3次元表示"、光学連合シンポジウム京都92講演予稿集、(1992) 99-100
- (13) 小山隆浩、山口雅浩、大山永昭、高橋進、岩田藤郎、"ホログラフィック・3-Dプリンタの試作"、光学連合シンポジウム浜松94講演予稿集、(1994) 69-70

- (14) 山口雅浩、志村啓、康德寛、大山永昭、本田捷夫、辻内順平、"液晶TVを用いたホログラフィック・ステレオグラムの合成"、第19回画像工学コンファレンス論文集、(1988) 63-66
- (15) 山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"リップマン・ホログラフィック・ステレオグラムを用いたホログラフィック・3-Dプリンタ"、第20回画像工学コンファレンス論文集、(1989) 323-326
- (16) 山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、石川洵、"大型レインボウ・マルチドットホログラム"、第21回画像工学コンファレンス論文集、(1990) 239-242
- (17) 杉浦弘明、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"1ステップ・リップマン・ホログラフィック・ステレオグラムによる3-Dアニメーション"、第21回画像工学コンファレンス論文集、(1990) 243-246^{*1)}
- (18) 榎本寿、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"3-D PRINTERのカラー化"、第22回画像工学コンファレンス論文集、(1991) 239-242
- (19) 遠藤秀明、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"ホログラフィック・3-Dプリンタの高密度記録"、第23回画像工学コンファレンス論文集、(1992) 317-320^{*2)}
- (20) 小山隆浩、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、"マルチドット・ホログラフィック・スクリーンを用いた立体像表示ー階調画像表現ー"、第24回画像工学コンファレンス論文集、(1993) 53-56
- (21) 山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"ホログラフィック・3-Dプリンタによる立体像ハードコピー技術"、画像電子学会誌、22, No.4 (1993) 342-345
- (22) 石川洵、山口雅浩、本田捷夫、"マルチドット大型マルチプレックス・ホログラムの製作"、3次元画像コンファレンス'93講演論文集、(1993) 17
- (23) 遠藤秀明、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"ホロプリンター画質に関する検討ー"、3次元画像コンファレンス'93講演論文集、(1993) 19-24
- (24) 小山隆浩、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"マルチドット・ホログラフィック・スクリーンによる立体像表示法"、3次元画像コンファレンス'93講演論文集、(1993) 33-38
- (25) 小山隆浩、遠藤秀明、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、高橋進、岩田藤郎、"ホログラフィック・3-Dプリンタ試作器の開発"、3次元画像コンファレンス'94講演論文集、(1994) 141-146
- (26) 山口雅浩、遠藤秀明、小山隆浩、大山永昭、"並列露光によるホログラフィック・3-Dプリンタの高速化"、3次元画像コンファレンス'94講演論文集、(1994) 147-152
- (27) 山口雅浩、ホセハビエル、大石悟、大山永昭、本田捷夫、"'光学モデル' 3次元ボリウムデータの新しい表示法"、動画ホログラフィ研究会会報 No.3, (1992) 5-7
- (28) 山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"ホログラフィックステレオグラムとホログラムによる像再生の比較"、動画ホログラフィ研究会会報 No.7 (1993) 7-10
- (29) 山口雅浩、榎本寿、本田捷夫、大山永昭、"リアルカラー・3-Dプリンタ"、画像ラボ3, No.7, (1992) 48-52
- (30) 遠藤秀明、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"ホログラフィック・3-Dプリンタによる高密度立体像記録"、日本写真学会秋季大会研究発表会講演要旨、(1992) 115-118

その他の投稿論文

- (1) M. Yamaguchi, N. Ohyama, T. Honda, J. Tsujiuchi, and S. Hiratsuka, "A color image sampling method with suppression of Moire fringes," *Opt. Commun.* 69, No.5,6 (1989) 349-352
- (2) M. Yamaguchi, T. Itoh, H. Haneishi, N. Ohyama, and T. Honda, "Image restoration using equivalent imaging optics," *Opt. Commun.* 88, No.2,3, (1992) 191-198
- (3) N. Ohyama, M. Yamaguchi, J. Tsujiuchi, T. Honda, and S. Hiratsuka, "Suppression of Moire fringes due to sampling of halftone screened images," *Opt. Commun.* 60, (1986) 364-368
- (4) D. Kang, M. Yamaguchi, T. Honda, and N. Ohyama, "Image processing technique for arbitrary image positioning in holographic stereogram," *Opt. Commun.* 80, No.1, (1990) 7-12
- (5) 康德寛、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、" One-step holographic stereogram のための被写体撮影"、*光学*、19, No.9 (1990) 595-600
- (6) 志村、本田、山口、大山、" マルチプレックス・ホログラム再生像の拡大"、*光学*、20, No.3 (1991) 169-173
- (7) J. J. Baez-Rojas, S. Ohishi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Visualization of 3D volume data using an optical model," *Opt. Commun.* 91, No.1,2, (1992) 34-40
- (8) 今井浩、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、" T N液晶パネルの円偏光位相変調特性"、*光学*、21, No.8 (1992) 550-554
- (9) S. Ohishi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Extraction of blood vessels in angiographic sequence," *Opt. Commun.*, 100, No.1,2,3,4, (1993) 72-78
- (10) S. Ohishi, H. Haneishi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, Satoru, "Reconstruction of blood vessels from an insufficient number of projections obtained from venography," *Opt. Commun.*, 102, No.5,6, (1993) 425-431
- (11) 高橋進、本田捷夫、山口雅浩、大山永昭、岩田藤郎、" ホログラフィック・ステレオグラムにおける視差画像の補間"、*光学*、22, No.11 (1993) 707-713
- (12) N. Oda, J. Hasegawa, T. Nonami, M. Yamaguchi, N. Ohyama, "Estimation of the surface topography from monocular endoscopic images," *Opt. Commun.*, 109 (1994) 215-221
- (13) J. J. Baez-Rojas, M. Yamaguchi, and N. Ohyama, "Application of hybrid systems for the visualization of 3D volume data," *Opt. Commun.*, 109 (1994) 393-399

その他の国際会議Proceedings

- (1) M. Yamaguchi and N. Ohyama "A prototype of ISAC workstation," *Medical & Biological Engineering & Computing* 29, Supplement, (1991) 619

- (2) T. Honda, M. Yamaguchi, D. Kang, K. Shimura, J. Tsujiuchi and N. Ohyama, "Printing of holographic stereogram using liquid-crystal TV," Practical Holography III, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1051 (1989) 186-191
- (3) N. Ohyama, M. Yamaguchi, S. Oh-ishi, T. Honda, and J. Tsujiuchi, "High-speed surface reconstruction through hybrid processing," Optics in Complex Systems, F. Lanzl, H.-J. Preuss, and G. Weigelt eds., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1319 (1990) 406-407
- (4) D. Kang, T. Honda, M. Yamaguchi, and N. Ohyama, "One-step Lippmann holographic stereogram," Practical Holography VI, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1667 (1992) 127-133
- (5) N. Oda, T. Nonami, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Estimation of surface shape from endoscopic image sequence," Medical Imaging 1993: Image Processing, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1898 (1993) 85-92
- (6) S. Takahashi, T. Honda, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and F. Iwata, "Generation of intermediate parallax-images for holographic stereogram," Practical Holography VII, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1914 (1993) 2-8
- (7) J. J. Baez-Rojas, S. Oh-ishi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Visualization of three dimensional data using a hybrid system," Optics as a Key to High Technology, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1983 (1993) 1030-1031
- (8) N. Ohyama, J. S. Lee, and M. Yamaguchi, "Integrated image processing system using optical neural network," International Symposium on Ultrafast and Ultra-Parallel Optoelectronics Technical Digest, (1994) 207-210

その他の学会発表・記事など

- (1) 大山永昭、吉本賢祐、山口雅浩、"フィルム I D の自動認識—合成識別関数とデータ照合技術を用いて"、INNERVISION, 8, No.4 (1993) 34-37
- (2) 三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、"離散—離散モデルを用いて C T 画像を再構成する場合の問題点"、Med. Imag. Tech., 10, No.3 (1992) 253-254
- (3) 倉西誠、小西稔、吉田寿、嘉戸祥介、伊藤一、中村衛、柿下正雄、大山永昭、山口雅浩、吉本賢祐、"文字自動認識技術を用いた P A C S の構築構想"、Med. Imag. Tech., 10, No.3 (1992) 279-280
- (4) 小尾高史、山口雅浩、大山永昭、関原謙介、小椋有希子、本田捷夫、"G A R D S を用いた脳内電流分布の再構成"、Med. Imag. Tech., 10, No.3 (1992) 301-302
- (5) 吉本賢祐、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、山中康司、松井美楯、小西稔、倉西誠、"線形多重フィルターを用いた X 線フィルムの I D 認識"、Med. Imag. Tech., 10, No.3 (1992) 325-326
- (6) 小尾高史、大山永昭、山口雅浩、"生体磁場逆問題における再構成アルゴリズム"、Med. Imag. Tech., 11, No.2 (1993) 107-112
- (7) 大石悟、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、"静脈造影法を用いた心臓血管の 3 次元再構成"、Med.

Imag. Tech., 11, No.3 (1993) 319-320

- (8) 小尾高史、大山永昭、山口雅浩、本田捷夫、関原謙介、" 生体電流の自己相関項を用いた生体磁場逆問題の解法"、Med. Imag. Tech., 11, No.3 (1993) 325-326
- (9) 三村昌弘、大山永昭、山口雅浩、本田捷夫、" γ 線の減衰およびコリメータ関数を考慮した新しいSPECT画像再構成手法"、Med. Imag. Tech., 11, No.3 (1993) 329-330
- (10) J. J. Baez Rojas, S. Ohishi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Visualization of 3-D MRI data using a hybrid system and the optical model," Med. Imag. Tech., 11, No.3 (1993) 353-354
- (11) 吉本賢祐、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、小西稔、倉西誠、山中康司、松井美楯、" 合成識別関数を用いたX線フィルムID番号自動認識システム"、Med. Imag. Tech., 11, No.3 (1993) 367-368
- (12) 小田紀彦、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、野波徹緒、" 単眼内視鏡を用いた被写体の表面形状推定"、Med. Imag. Tech., 11, No.3 (1993) 399-400
- (13) 三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、" Focused Collimatorを用いたSPECT断層像再構成に関する研究"、Med. Imag. Tech., 12, No.4 (1994) 463-464
- (14) 松林浩司、鬼頭伸一郎、小田紀彦、山口雅浩、大山永昭、" 電子内視鏡を用いた色調定量測定"、Med. Imag. Tech., 12, No.4 (1994) 543-544
- (15) 小田紀彦、山口雅浩、大山永昭、長谷川潤、野波徹緒、" 通常電子内視鏡による表面形状推定：胃粘膜画像への適用"、Med. Imag. Tech., 12, No.4 (1994) 545-546
- (16) 近藤隆、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、追田真也、田井修市、久間和生、" 曖昧な記憶からの高速画像検索システム"、第23回画像工学コンファレンス論文集、(1992) 39-42
- (17) 小田紀彦、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、野波徹緒、" 内視鏡時系列画像からの3次元形状推定"、第23回画像工学コンファレンス論文集、(1992) 115-118
- (18) 中山美穂、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、小宮康宏、" デジタル信号処理を用いた光学系の性能向上"、第23回画像工学コンファレンス論文集、(1992) 157~161
- (19) 小尾高史、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、関原謙介、小椋有希子、" 脳磁逆問題における連続電流分布の再構成"、第23回画像工学コンファレンス論文集、(1992) 203-206
- (20) 三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、" 離散-離散モデルを用いたCT画像再構成手法の問題点解析"、第23回画像工学コンファレンス論文集、(1992) 207-210
- (21) 吉本賢祐、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、山中康司、松井美楯、小西稔、倉西誠、" 合成識別関数を用いたX線フィルムID認識"、第23回画像工学コンファレンス論文集、(1992) 221-224
- (22) 大石悟、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、" Digital Angiography 動画画像からの心臓血管の強調"、第23回画像工学コンファレンス論文集、(1992) 225-228
- (23) 小田紀彦、山口雅浩、大山永昭、長谷川潤、野波徹緒、" 内視鏡時系列画像からの3次元形状推定(2)"、第23回画像工学コンファレンス論文集、(1993) 125-128
- (24) 松谷章弘、山口雅浩、大山永昭、菊地奨、" 光CT顕微鏡における少ない投影方向からの画像再構成"、第24回画像工学コンファレンス論文集、(1993) 129-132

- (25) 三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、" γ 線減衰率分布およびコリメータ関数を考慮した S P E C T 画像再構成手法"、第24回画像工学コンファレンス論文集、(1993) 133-136
- (26) 小尾高史、大山永昭、山口雅浩、関原謙介、" 磁場源の自己相関項のみを用いた生体磁場逆問題の解法"、第24回画像工学コンファレンス論文集、(1993) 137-140
- (27) 近藤隆、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、追田真也、田井修市、久間和生、" 曖昧な記憶からの高速画像検索システム (I I)"、第24回画像工学コンファレンス論文集、(1992) 201-204
- (28) 角田貢、今井浩、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、" 液晶パネルを用いた複素相関演算によるカラー相関システム"、第24回画像工学コンファレンス論文集、(1993) 233-236
- (29) 高橋進、本田捷夫、山口雅浩、大山永昭、岩田藤郎、" 少ない視差画像からのホログラフィック・ステレオグラムの原画作成"、3次元画像コンファレンス'93 講演論文集、(1993) 5-10
- (30) 山口雅浩、桂川英樹、本田捷夫、大山永昭、高橋進、" 立体像表示のための3次元画像入力法"、3次元画像コンファレンス'93 講演論文集、(1993) 173-178
- (31) 小尾高史、大山永昭、山口雅浩、本田捷夫、関原謙介、" 磁場源の自己相関項を用いた磁場源推定"、第8回日本生体磁気学会大会論文集、6, [1], (1993) 94-95
- (32) 近藤隆、山口雅浩、大山永昭、追田真也、田井修市、久間和生、" 連想メモリーを用いた大容量曖昧検索システム"、光学連合シンポジウム旭川'93講演予稿集、(1993) 25-26
- (33) 三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、" γ 線減衰率分布およびコリメータ関数を考慮した S P E C T 画像再構成手法"、光学連合シンポジウム旭川'93講演予稿集、(1993) 49-50
- (34) 鶴岡建夫、山田秀俊、山口雅浩、大山永昭、" ニューラルネットワークによるフラクタル画像の圧縮"、光学連合シンポジウム旭川'93講演予稿集、(1993) 55-56
- (35) 小尾高史、大山永昭、山口雅浩、" システムの分解能を考慮した連続-離散モデルに基づく再構成手法"、光学連合シンポジウム浜松'94講演予稿集、(1994) 63-64
- (36) 三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、" Spatially Varying Focal Length Collimator を用いた S P E C T 画像再構成手法"、光学連合シンポジウム浜松'94講演予稿集、(1994) 65-66
- (37) 鬼頭伸一郎、小田紀彦、山口雅浩、大山永昭、" 多重反射を考慮した被写体の色調推定法"、光学連合シンポジウム浜松'94講演予稿集、(1994) 73-74
- (38) 近藤隆、山口雅浩、大山永昭、" 認識の個人差を考慮に入れた画像曖昧検索"、光学連合シンポジウム浜松'94講演予稿集、(1994) 113-114
- (39) 角田貢、山口雅浩、大山永昭、" カラー画像の光学的相関演算-参照光入射による色の違いの検出"、光学連合シンポジウム浜松'94講演予稿集、(1994) 249-250
- (40) 山口雅浩、大山永昭、辻内順平、本田捷夫、平塚誠一郎、" 網点画像の入力時におけるモアレ縞の除去"、第47回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1986) 92
- (41) 山口雅浩、大山永昭、辻内順平、本田捷夫、平塚誠一郎、" カラー網点画像のサンプリングにおけるモアレ縞の除去"、第48回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1987)
- (42) 盧学農、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、追田真也、太田淳、久間和夫、" 知的な連想メモリシ

- システムの実現”、第51回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1990) 807
- (43) リリック、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、田中一義、”CCDラインセンサにおけるカラー合成法”、第51回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1990) 815
- (44) 康德寛、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、”レンティキュラーシートを用いた1-StepリップマンHS”、第51回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1990) 818
- (45) 志村啓、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、”1ステップ平面型ホログラフィック・ステレオグラムの大型化”、第37回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1990) 768
- (46) 大石悟、山口雅浩、ホセハビエル、大山永昭、本田捷夫、”CT値を用いた高速表面画再構成”、第37回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1990) 801
- (47) 伊藤卓也、山口雅浩、羽石秀昭、大山永昭、本田捷夫、”光学系を用いたシミュレーテッド・アニーリングによる劣化画像の復元”、第37回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1990) 802
- (48) J. J. Baez Rojas, S. Ohishi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, T. Honda, "A new way for the display of 3-D volume data," 第38回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1991) 791
- (49) 康德寛、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、”近距離照明による1-STEP平面型HSの歪みの補正”、第38回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1991) 792
- (50) 大石悟、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、”X線透視動画像からの血管の強調”、第38回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1991) 812
- (51) 小田紀彦、野波徹緒、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、”内視鏡時系列画像を利用したハレーション除去”、第38回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1991) 813
- (52) 追田真也、田井修市、久間和夫、盧学農、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、”知的な連想メモリシステムの実現(2)ー光ニューラルネットワークの導入ー”、第38回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1991) 863
- (53) 盧学農、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、追田真也、太田淳、久間和夫、”知的連想メモリのパフォーマンス評価”、第38回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1991) 864
- (54) 山口雅浩、盧学農、大山永昭、本田捷夫、追田真也、田井修市、久間和夫、”ニューラルネットワークの創造性”、第52回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1991) 818
- (55) 追田真也、田井修市、久間和夫、盧学農、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、”知的な連想メモリシステムの実現(3)ー量子化学学習則の導入ー”、第52回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1991) 820
- (56) 小尾高史、山口雅浩、大山永昭、小椋有紀子、関原謙介、本田捷夫、”SVDを用いた脳磁イメージング系の解析”、第52回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1991) 832
- (57) 今井浩、星野英志、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、”円偏光によるTN液晶の位相変調特性”、第52回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1991) 861
- (58) 小田紀彦、野波徹緒、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、”内視鏡時系列画像からの3次元形状推定”、第39回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1992) 796

- (59) 三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、"GARDSによるCT画像の再構成と従来手法との比較"、第39回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1992) 797
- (60) 中山美穂、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、"GARDSを用いた新しい画像回復法"、第39回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1992) 796
- (61) 近藤隆、山口雅浩、大山永昭、追田真也、田井修市、久間和夫、本田捷夫、"相互結合型ニューラルネットワークを用いたデータ検索法"、第39回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1992) 820
- (62) 小尾高史、山口雅浩、大山永昭、小椋有紀子、関原謙介、本田捷夫、"GARDSによる脳内電流分布の再構成"、第39回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1992) 826
- (63) 高橋進、本田捷夫、山口雅浩、大山永昭、"ホログラフィック・ステレオグラムにおける視差画像の補間"、第39回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1992) 829
- (64) 桂川秀樹、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"光切断法とステレオマッチングによる3次元画像入力法の提案"、第53回応用物理学学会学術講演会講演予稿集、(1992) 796
- (65) 高橋進、本田捷夫、山口雅浩、大山永昭、岩田藤郎、"ホログラフィック・ステレオグラムにおける視差画像の補間"、第53回応用物理学学会学術講演会講演予稿集、(1992) 797
- (66) 児玉巖、松本総一郎、本田捷夫、山口雅浩、大山永昭、"インラインホログラムの像再生法における開口の効果"、第53回応用物理学学会学術講演会講演予稿集、(1992) 797
- (67) 吉本賢祐、山口雅浩、大山永昭、山中康司、松井美楯、本田捷夫、"多クラス識別問題における合成識別関数の最適化と識別手法に関する考察"、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 866
- (68) 桂川英樹、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"パターン光投影およびステレオマッチングによる3次元画像入力法"、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 867
- (69) 今井浩、角田貢、山口雅浩、本田捷夫、大山永昭、"液晶パネルを用いた複素相関演算とそのパターンマッチングへの応用"、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 868
- (70) 大石悟、羽石秀昭、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、"静脈造影法に基づく心臓血管の三次元再構成"、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 907
- (71) 中山美穂、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、小宮康宏、"GARDSを用いた新しい画像回復法II-2次元への応用"、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 909
- (72) 小尾高史、山口雅浩、大山永昭、小椋有希子、関原謙介、本田捷夫、"生体磁場の時間的相関を用いた生体電流の再構成"、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 909
- (73) 三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、本田捷夫、" γ 線の減衰およびコリメータ関数を考慮した新しいSPECT画像再構成手法"、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 910
- (74) 吉川繁治、本田捷夫、大山永昭、山口雅浩、"フーリエ変換を用いたシアリング干渉計測の波面決定法"、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 935
- (75) 関海克、本田捷夫、山口雅浩、大山永昭、"Zone-Plate干渉系による大口径非球面鏡の計測にお

ける曲率半径の誤差の影響”、第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1993) 935

(76) J. J. Baez Rojas, M. Yamaguchi, N. Ohyama, "Visualization of volume data with a color hybrid system,"

第54回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1993) 902

(77) 李中淳、山口雅浩、大山永昭、"外部拘束条件を用いたホログラフィック画像連想メモリ"、第

41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1994) 865

(78) 角田貢、山口雅浩、大山永昭、"液晶パネルによる複素振幅変調を用いたカラー画像の光学的相関演算"、第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1994) 874

(79) 小田紀彦、長谷川潤、野波徹緒、山口雅浩、大山永昭、"内視鏡時系列画像からの3次元形状推定"、第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1994) 893

(80) 松林浩司、小田紀彦、山口雅浩、大山永昭、"電子内視鏡画像からの色調計測"、第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1994) 893

(81) 松谷章弘、菊地奨、山口雅浩、大山永昭、"光CT蛍光顕微鏡を用いた断層像再構成"、第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1994) 895

(82) 吉川繁治、関海克、山口雅浩、大山永昭、"シアリング干渉法の波面推定法に関する考察"、第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、(1994) 899

(83) 関海克、山口雅浩、大山永昭、"Lateral shearing 干渉計測におけるshear量の測定"、第55回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1994) 805

(84) 曾我峰樹、三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、"GARDSを用いたヘリカルスキャンX線CTの画像再構成"、第55回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1994) 829

(85) 金井洋一、三村昌弘、山口雅浩、大山永昭、"散乱線成分を用いた γ 線イメージング"、第55回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1994) 830

(86) 西澤秀和、近藤隆、山口雅浩、大山永昭、"階層的クラスタリングを用いたデータからの知識抽出"、第55回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1994) 831

(87) 日暮正樹、山口雅浩、大山永昭、"視覚系をモデルにしたイメージングシステム：ズーム機能の実現"、第55回応用物理学会学術講演会講演予稿集、(1994) 831

*1)、*2) 優秀ポスタ賞受賞

謝 辞

本研究を進めるにあたり、全ての面で多くの御指導をいただきました本学大山永昭教授に深く感謝いたします。

また本博士論文の作成にあたり、有益な御指導・御教唆をいただきました本学安居院猛教授、上田光宏教授、上羽貞行教授、内川恵二教授、酒井善則教授に深く感謝いたします。

千葉大学本田捷夫教授には本研究の開始前より多くの御指導をいただきました。心より感謝いたします。

本学辻内順平名誉教授には公私にわたり多大な御助力・御教示をいただきました。謹んで謝意を表します。

ホログラフィック・3-Dプリンタに関して様々な議論と御協力をいただきました(株)凸版印刷の岩田藤郎氏、高橋進氏に心より感謝いたします。(有)石川光学造形研究所の石川洵氏には円筒型マルチプレックス・ホログラムの記録に関して有益な討論をしていただきました。セイコーエプソン(株)の曾根原富雄博士には液晶パネルに関しての御協力と御助言をいただきました。また(株)松下電器工業の加藤誠博士、笠澄健一氏には液晶パネルおよび疑似ランダム位相板に関しての御協力と有益な討論をしていただきました。中央精機(株)の篠崎行啓氏、宗形豊氏にはホログラフィック・3-Dプリンタの装置化にあたり御協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究の一部は、文部省科学研究費助成金(奨励研究#05750035および#06750046)、(財)河上記念財団、(財)赤井録音録画技術研究助成会、(財)神奈川科学技術アカデミー、倉田奨励金の助成を得て行われました。貴重で有益なご援助に深く感謝いたします。

Mark Holzbach氏には本研究の初期において有益な御助言と討論をしていただきました。深く感謝いたします。本学卒業生の杉浦弘明氏、榎本寿氏、遠藤秀明氏、および本学修士過程在学中の小山隆浩氏には本研究の共同研究者として実験をお手伝いいただき、様々な有益な議論を行うことができました。誠にありがとうございました。

本学卒業生の谷内田益義博士、羽石秀明博士には、研究の内容や進め方に関して有益な御助言と御討論をしていただきました。また康德寛博士、志村啓氏にはホログラフィック・ディスプレイ全般に関して、盧学農博士、大石悟博士、Jose Javier Baez-Rojas博士はじめ辻内・本田・大山研究室の卒業生の皆様には様々な分野にわたり御討論と御協力をさせていただきました。誠にありがとうございました。

研究室における様々な点で御助力いただきました本学牧野房江主任、大山研究室久保田洋子秘書に感謝いたします。また大山研究室在籍の学生の皆様には論文作成ほか色々とお手伝いいただきました。どうもありがとうございました。

1994年10月