



Title	ホログラフィックステレオグラムの作製システムおよびその原画生成法に関する研究
Author(s)	木下, 健治
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3144141
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

ホログラフィックステレオグラムの作製システム
およびその原画生成法に関する研究

1997 年 11 月

木 下 健 治

内 容 梗 概

本論文は、著者が富山商船高等専門学校情報工学科で行った“ホログラフィックステレオグラムの作製システムおよびその原画生成法に関する研究”をまとめたもので、8章から構成されている。以下、各章について、内容の梗概を述べる。

第1章 序論

3次元ディスプレイとして、ホログラフィの一方式であるホログラフィックステレオグラムが有望な候補であることを示す。このため、他の3次元画像表示方式と比較してホログラフィックステレオグラムの特徴を述べるとともに、従来のホログラフィックステレオグラム作製における問題点を指摘して、本研究の目的と課題を明らかにする。

第2章 ホログラフィックステレオグラムの設計および作製システム

本章では、最初に、ホログラフィックステレオグラムの設計手法について述べる。次に、虚像再生型ホログラフィックステレオグラムの作製システムについて述べる。このシステムでは空間光変調器として白黒液晶テレビパネルを用い、合成過程をコンピュータで制御しているが、ホログラフィックステレオグラムを従来よりも短時間で作製できることを示す。

第3章 液晶パネルの空間光変調特性のホログラフィックステレオグラム

再生像への影響

本章では、ホログラフィックステレオグラム合成に用いる液晶テレビパネルの空間光変調特性が、再生像に与える影響について検討する。画質評価のための実験では、人物を白黒CCDテレビカメラで撮影した画像を原画として用いる。そして、ホログラフィックステレオグラムから得られる再生像の画質を高

める場合に、原画の濃度階調変換が有効であることを示す。

第4章 ホログラフィックステレオグラムの実時間記録

ホログラフィックステレオグラムの作製時間を短縮する場合に問題となるのが、記録材料の現像処理である。本章では、ホログラフィックステレオグラムの作製に、湿式現像処理が不要なサーモプラスチックを用いる方法について述べる。このシステムを用いると、平面形ホログラフィックステレオグラムの作製および画像再生が2分程度の実時間で行えることを示す。

第5章 一視点から撮影した画像からの多視点原画の生成

ホログラフィックステレオグラムは、少しずつ視点を移動して撮影した多数の原画（多視点原画）を用いて作製される。本章では、実際に多視点原画を撮影できない場合に、一視点から撮影した1枚の画像から多視点原画を生成する手法を確立する。具体例として形状が簡単な地球の北半球を選び、この部分を撮影した気象衛星ひまわり画像を用いて、本手法の評価を行う。

第6章 3次元形状復元法を用いた多視点原画の生成と両眼立体視の

シミュレーション

本章では、原画撮影過程の簡略化を被写体の形状が簡単な場合について検討する。このため、被写体を撮影した1枚の画像に形状復元法を適用して3次元モデルを作成し、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する手法を確立する。具体例として建物を選び、本手法の評価を行う。また、ホログラフィの結像式に基づいて再生像の立体視シミュレーションを行う手法を確立する。

第7章 被写体の近似的な3次元モデルに基づく多視点原画の生成

本章では、原画撮影過程の簡略化を被写体の形状が複雑な場合について検討

する。被写体として人物を選び、被写体の正面輪郭線と側面輪郭線を用いて近似的な3次元人物モデルを作成して、多視点原画の生成を行う手法を確立する。ここでは、側面輪郭線が生成原画の画質に与える影響について検討する。また、被写体の正面輪郭線しか得られない場合の3次元人物モデルの作成方法についても検討する。

第8章 結論

本研究で得られた成果を総括し、今後の課題を明らかにする。

ホログラフィックステレオグラムの作製システムおよび その原画生成法に関する研究

目 次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	3次元ディスプレイの方式と問題点	2
1.2.1	3次元ディスプレイ	2
1.2.2	ホログラフィックステレオグラムの問題点	6
1.3	本研究の目的と課題	6
1.4	本論文の構成	8
第2章	ホログラフィックステレオグラムの設計および 作製システム	11
2.1	緒言	11
2.2	ホログラフィックステレオグラムの設計手法	11
2.2.1	ホログラフィックステレオグラムの原理	12
2.2.2	ホログラフィックステレオグラム合成用の 空間光変調器の種類	15
2.2.3	原画生成法	18
2.2.4	両眼立体視による再生像の観察法	20
2.2.5	スリット幅の設定法	22
2.2.6	従来の作製法の問題点	26
2.2.7	試作を行う合成システムの設計目標	27
2.2.8	本研究と関連するホログラムの種類	29

2.3	ホログラフィックステレオグラムのコンピュータによる原画生成	30
2.3.1	物体の定義	30
2.3.2	光線追跡法による原画生成	31
2.4	液晶空間光変調器としての液晶テレビ	32
2.5	ホログラフィックステレオグラムの作製	34
2.5.1	コンピュータ制御方式の合成システム	34
2.5.2	コンピュータグラフィックス画像の再生像例	36
2.5.3	検討	39
2.6	結言	39
第3章	液晶パネルの空間光変調特性のホログラフィックステレオ グラム再生像への影響	41
3.1	緒言	41
3.2	小形液晶テレビの空間光変調器への応用	41
3.3	人物像のホログラフィックステレオグラム作製	42
3.3.1	ホログラムによる人物像の表示	42
3.3.2	実験の手順	44
3.3.3	原画の視点移動角度	46
3.4	画像再生の結果と考察	48
3.4.1	人物像の再生像	48
3.4.2	再生像の画質改善	50
3.4.3	輪郭線画像のホログラフィックステレオグラム	53
3.5	両眼立体視のシミュレーション	55
3.6	結言	56

第4章	ホログラフィックステレオグラムの実時間記録	57
4.1	緒言	57
4.2	サーモプラスチック感光材料	57
4.3	ホログラフィックステレオグラムの作製	60
4.3.1	設計目標	60
4.3.2	原画生成	60
4.3.3	合成システム	61
4.3.4	合成手順	64
4.3.5	画像再生の結果と検討	65
4.4	小形液晶テレビを用いたホログラフィックステレオ グラム作製システム	67
4.4.1	合成システムの変更点	67
4.4.2	画像再生の結果と検討	68
4.5	結言	70
第5章	一視点から撮影した画像からの多視点原画の生成	72
5.1	緒言	72
5.2	視点移動による多視点原画の生成法	72
5.2.1	ひまわり画像の視点移動操作	73
5.2.2	最適な視点移動角度	74
5.3	北半球画像のホログラフィックステレオグラム作製	76
5.3.1	実験の手順	77
5.3.2	気象衛星ひまわり画像の受信	77
5.3.3	ひまわり画像データの変換	79
5.3.4	原画生成	79
5.4	画像再生の結果と考察	81
5.4.1	画像再生の結果	81

5.4.2	実験結果の検討	83
5.5	結言	84
第 6 章	3次元形状復元法を用いた多視点原画の生成と両眼立体視のシミュレーション	86
6.1	緒言	86
6.2	形状復元法の原理	87
6.3	ホログラフィックステレオグラム作製への応用	90
6.3.1	実験の手順	90
6.3.2	建物画像の原画生成と画像再生例	90
6.4	立体視像のコンピュータシミュレーション	94
6.4.1	ホログラフィの結像式	94
6.4.2	シミュレーション手順	97
6.4.3	シミュレーション結果	98
6.5	結言	100
第 7 章	被写体の近似的な 3 次元モデルに基づく多視点原画の生成	102
7.1	緒言	102
7.2	被写体の原画撮影を簡略化する手法	102
7.3	人物像の多視点原画の生成	103
7.3.1	被写体の写真撮影	103
7.3.2	3次元人物モデルの作成と多視点原画の生成	103
7.4	原画生成法の検討	107
7.4.1	側面輪郭線の影響	107
7.4.2	最適な側面輪郭線	111
7.4.3	正面画像 1 枚からの原画生成	112

7.5	ホログラフィックステレオグラムの作製と検討	114
7.6	結言	115
第 8 章	結論	117
	謝辞	120
	参考文献	121
	関連発表文献	127

第1章 序論

1.1 研究の背景^{1) - 11)}

ホログラフィは、電子顕微鏡画像を改良することを目的に 1948 年に Gabor により考案されたが、しばらく実用化されなかった。その後、1962 年に Leith と Upatniekes がレーザを用いた二光束法で記録したホログラムで、画期的に良質の 3 次元再生像が得られることを示した。それ以来、ホログラフィの研究が精力的に行われて今日に至っている。ホログラフィに関する技術は、一部が実用化されている（ホログラム光学素子、偽造防止など）が、いまだに研究段階のものも数多い。本研究と関係のある 3 次元ディスプレイ用のホログラムについては、以下の経緯で長年にわたり研究開発が行われている。

ホログラフィの基本原理の大部分は、1960 年代に考案されている。すなわち、白色光再生型ホログラフィに関しては、Denisyuk によりリップマンホログラム、Stroke と Rosen によりイメージホログラム、Benton によりレインボウホログラムの手法が考案されている。また、McCrickerd らによりホログラフィックステレオグラムが考案されている。光学的に記録されたホログラムでない計算機合成ホログラム (CGH) については、Lohmann らにより考案されている。1970 年代に、大越らにより投射型ホログラフィ、Cross によりマルチプレックスホログラムが考案されている。3 次元ディスプレイの研究以外に、光メモリ、光計測、光情報処理などへの応用研究がこの時期に盛んに行われたが、実用化に向けて多くの技術的問題点が明らかになり、1975 年を境にしてホログラフィの研究活動は低下している。

1980 年代に、ホログラフィックステレオグラムの再生像歪みについての検討、リップマンカラーホログラム、レインボウカラーホログラムなどについて報告されている。1988 年頃から新しい傾向として、空間光変調器に液晶パネルを用いてホログラフィックステレオグラムやマルチプレックスホログラムの作製が行われた。そして、1990 年代に入り、この分野の研究は活発に行われ

るようになった。本研究はこのような背景のもとで開始した。また、1990年代に入って動画ホログラフィの研究が開始され、超音波光変調器とポリゴンミラーを用いた機械走査的手法や、高密度液晶パネルを空間光変調器として用いた電子的手法でホログラフィ画像が生成されている。ディスプレイ用ホログラムの作製に空間光変調器を用いる方法は、計算機で生成した3次元静止画像または動画像を容易に表示できる点が有用であり、今後の進展が期待される。

1.2 3次元ディスプレイの方式と問題点

1.2.1 3次元ディスプレイ

3次元画像を表示する場合にホログラフィは極めて有用であるが、3次元ディスプレイ^{12) - 14)}にはホログラフィ以外に多様な方式がある。図1.1に本研究のホログラフィックステレオグラムと関連する方式を示す。立体画像表示(2眼式画像)は一方向のみで奥行き感を観察できる表示方式で、3次元画像表示は多方向からも奥行き感を観察できる表示方式である。二つの表示方式に

3次元ディスプレイ

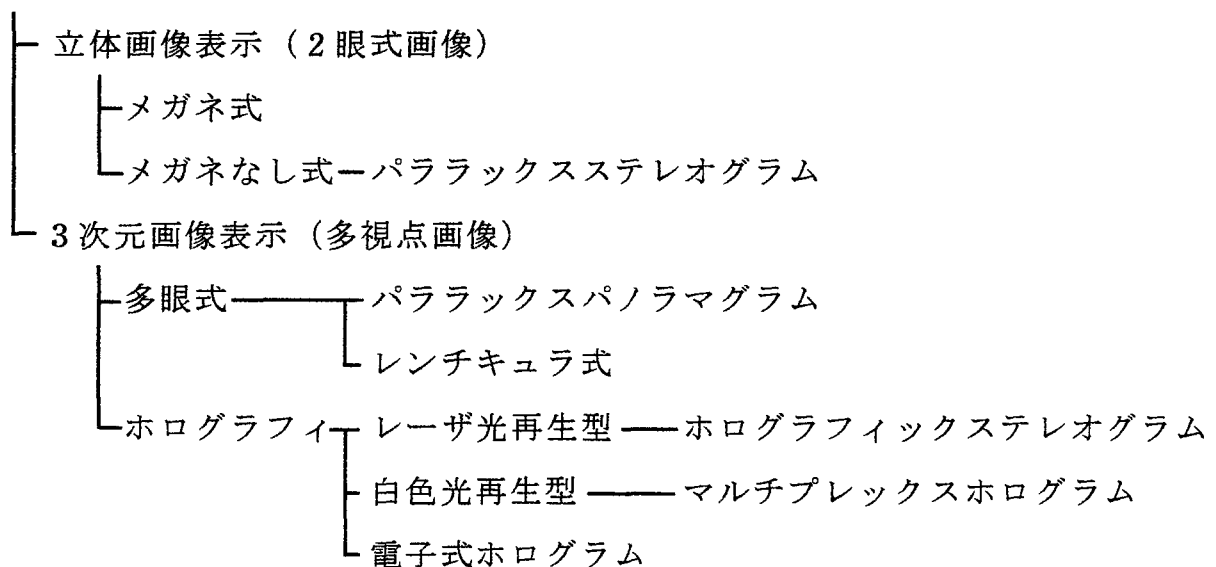


図 1.1 3次元ディスプレイの方式

よるディスプレイをまとめて3次元ディスプレイとしている（この分類は、立体画像システム研究会の1988年の報告書に基づく¹³⁾）。

立体画像表示は立体視の主な生理的要因である両眼視差を利用したものであり、左眼用と右眼用の2枚の平面画像を用いるだけなので、異なる多数の視点から撮影した画像（多視点画像）の表示はできない。メガネなしの立体画像表示の代表的な方式としてパララックスステレオグラムがある。これは、パララックスバリア（細長いスリット状の開口部を複数個並べたもの）を左右2眼分の画像の前に配置し、特定の視点からのみ左右画像を分離観察して立体像を得るものである。なお、一般的に、ステレオグラムは少し異なる角度で撮影した複数の写真を示す。

3次元画像表示で、本研究で述べるホログラフィックステレオグラム^{15) - 17)}（2次元画像のホログラムとステレオグラムの組み合わせ）と似ているのは、以下に述べる多眼式の二つの方式である。パララックスパノラマグラムは、2眼式のパララックスステレオグラムを多視点画像を観察できるように拡張したものである。この方式に関する最近の研究として、液晶パネルでパララックスバリアを作成して3次元画像を表示する方式が報告されている¹⁸⁾。レンチキュラ式はパララックスバリアの代わりにレンチキュラレンズ板（半円筒形レンズを配置した板）を用いる方式である。レンチキュラレンズの焦面に多視点から撮影した画像を置くと、観察者の移動に応じてその方向から見た画像を立体的に観察できる。近年、この方式を用いた液晶投射式の4眼式3次元テレビジョンの試作結果が報告されている¹⁹⁾。

3次元ディスプレイとしては、多視点から見た画像が得られる3次元画像表示が、2眼式の立体画像表示よりも多くの情報を表示できるので有利である。次に、多眼式とホログラフィを比較してみる。現状で、3次元カラー動画像表示において多眼式がホログラフィよりも優れている。しかし、多眼式は異なる方向から撮影した画像が8眼程度であり、再生時にこの方向でのみ3次的に観察できる。この範囲を広げるには視点追従方式（視点の移動に応じて画像を

切り換える方式)の導入が必要となる。一方、ホログラフィは広範囲で異なる方向から見た3次元画像を容易に再生することができる。また、多眼式は画像再生時にパララックスバリアやレンチキュラレンズの光学的位置合わせが難しいが、ホログラフィは再生光を照射するのみで3次元画像を再生できる。

ホログラフィの情報処理への応用を考えると、実在する物体をレーザ光を用いて記録する方式でなく、計算機で生成したコンピュータグラフィックス画像などを3次元的に表示できる方式が有用である。この目的に使用可能なレーザ光再生型ホログラフィの一つがホログラフィックステレオグラムであり、白色光再生型のものはマルチプレックスホログラムと呼ばれている。これらは、計算機で生成した3次元画像をハードコピー形式で出力する手段として、有望視されている。本研究で取り扱うホログラフィックステレオグラムは、通常のホログラムで記録できないか、または記録しづらい画像の3次元表示を目標としている。このため、第2章以降の実験で、コンピュータグラフィックス画像、気象衛星ひまわり画像、実在する建物の画像、人物画像などを取り扱う。

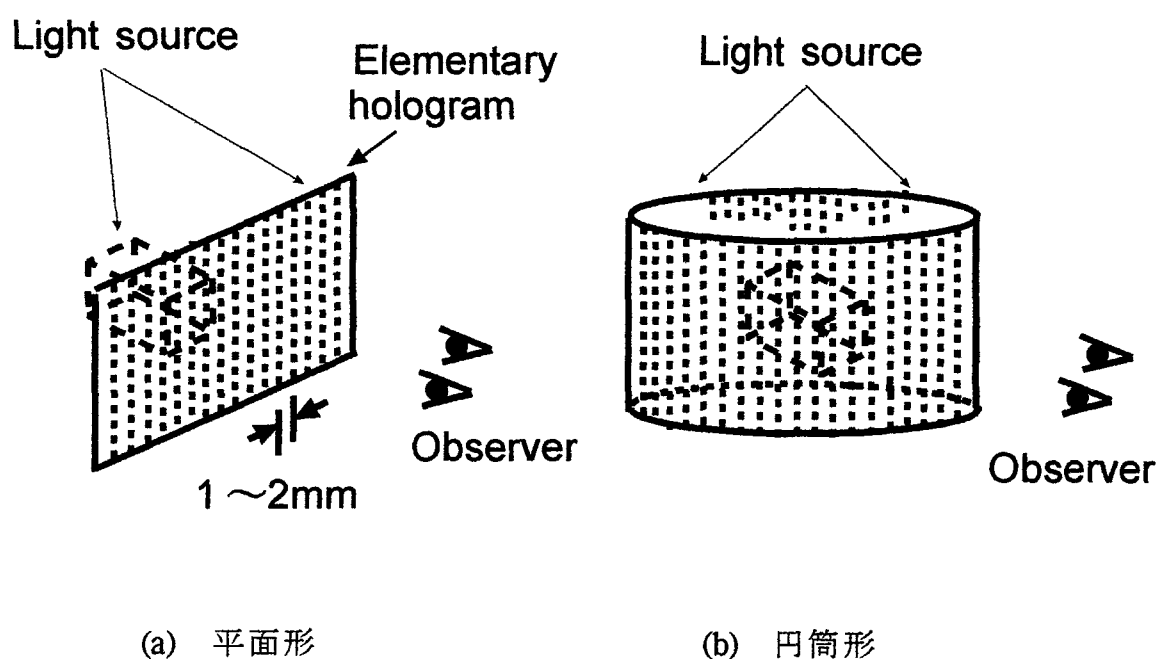


図 1.2 ホログラフィックステレオグラム

ホログラフィックステレオグラムを合成したフィルムは、図 1.2 に示すように平面形または円筒形にして再生像を観察する。このフィルムに幅が 2mm 以下の細長い短冊状ホログラムが多数（平面形で数十個程度、円筒形で数百個程度）含まれており、各々に少しずつ視点を変えて撮影した 2 次元画像（多視点画像）が記録されている。それ故、視点を移動して再生像の両眼立体視を行うと 3 次元画像が得られる。この短冊状ホログラムの作製に 2 次元画像を用いるので、表示を行う被写体に制限がない。なお、ホログラフィックステレオグラムの合成に用いる画像は原画と呼ばれることが多いため、合成に用いる多視点画像を本論文では多視点原画と記述する。

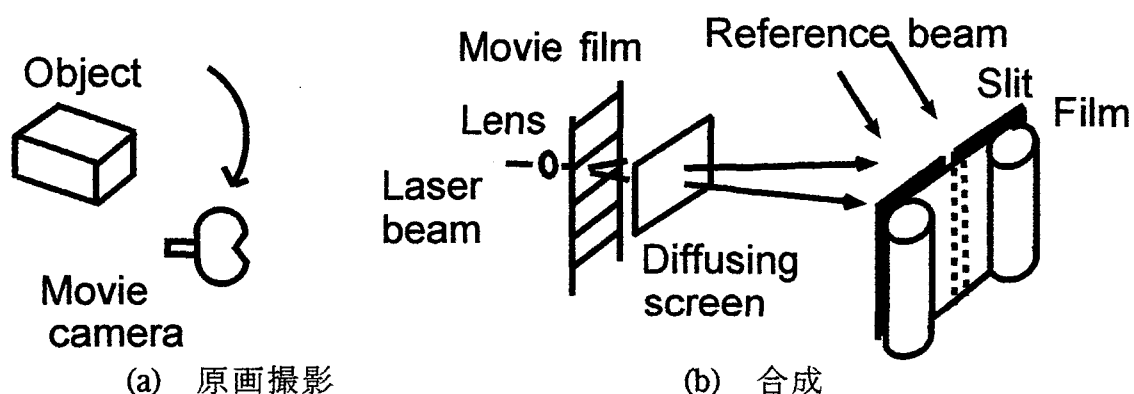


図 1.3 映画フィルムを用いたホログラフィックステレオグラム作製

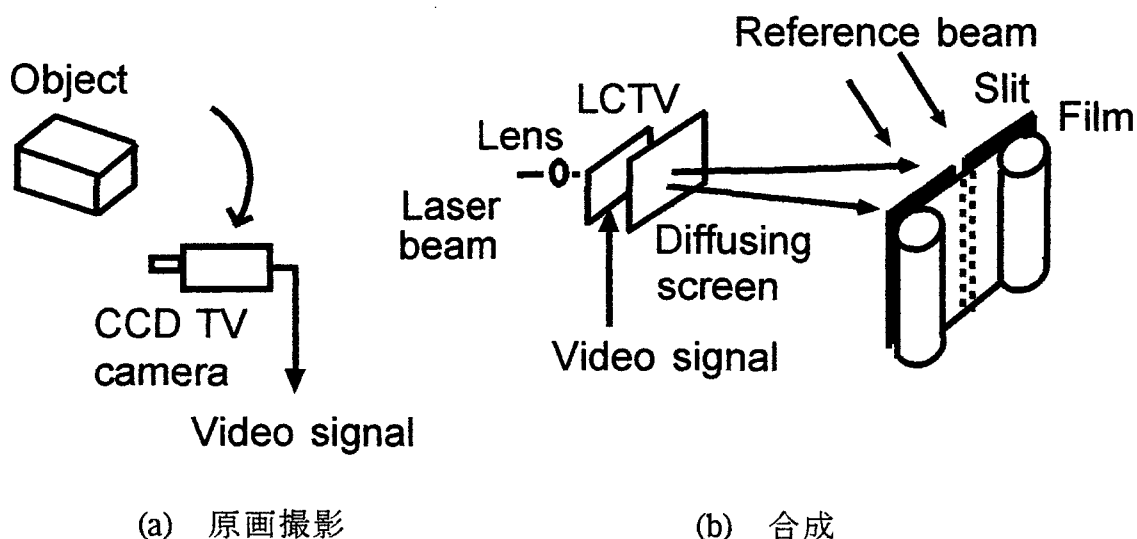


図 1.4 液晶テレビを用いたホログラフィックステレオグラム作製

1.2.2 ホログラフィックステレオグラムの問題点

従来、ホログラフィックステレオグラム作製は図 1.3 に示すような 2 段階方式で行われていた²⁰⁾。すなわち、第 1 段階で表示を試みる被写体の周囲で多数の原画を撮影して映画フィルムに記録し、第 2 段階でこれらの原画を 1 コマずつ拡散スクリーンに投影して、ホログラム用フィルムにレーザ光を用いて記録していた。この方法では、映画フィルムの現像処理を必要とし、数百枚の原画を記録した映画フィルムにレーザ光を照射してホログラフィックステレオグラムを合成する過程も、手間がかかるなどの問題点があった。

このため、被写体の原画撮影方法、液晶空間光変調器を効率的に使用したホログラフィックステレオグラムの合成方法²¹⁾、ホログラム記録材料などに関して検討を行って、ホログラフィックステレオグラムの新しい作製手法を確立する必要があった。

1.3 本研究の目的と課題

〔目的〕 本研究の目的は、ホログラフィックステレオグラム作製における問題点を明確にし、その問題点に対処した新しい作製手法を提案するとともに提案した手法の有効性をホログラフィックステレオグラムを実際に作製して、検証することである。

〔課題〕 本研究を開始するにあたり、次のような課題があった。

(1) 図 1.3 に示した原画の記録に映画フィルムを用いる方法では、ホログラフィックステレオグラム作製を短時間で行えなかった（少なくとも数時間は必要）。

この課題に対して、本研究では、原画の記録に映画フィルムを使用しない方法について検討する。このため、図 1.4 に示すように映画フィルムの代わりに白黒液晶テレビ (LCTV) を原画の空間光変調器として使用し、コンピュータで制御した使いやすいホログラフィックステレオグラム合成システムを新たに提案する。なお、原画に、CCD テレビカメラで撮影した画像やコンピュータグラフィックスの手法で生成した画像を用いる。この方法では映画フィルムの現

像処理が不要となり、ホログラフィックステレオグラム合成も短時間（100枚の原画で約15分）で行えて、ホログラム用フィルムの現像処理も含めたホログラフィックステレオグラムの作製時間を1時間程度に短縮できる（第2章）。

(2) 図1.3の方式で用いる映画フィルムと比較して、図1.4の方式で用いる液晶テレビの液晶パネルは中間調を表示する性能や画素数が十分でない。このため、液晶テレビを用いて合成したホログラフィックステレオグラムの再生像の画質に関して、詳細に検討がなされていなかった。

この課題に対して、本研究では、被写体として人物を用いてホログラフィックステレオグラムを作製し、液晶パネルの空間光変調特性が再生像の画質へ与える影響について検討する（第3章）。

(3) ホログラフィックステレオグラムの作製に銀塩感光材料であるフィルムを使用していたので、手間のかかる湿式現像処理を必要としていた。

この課題に対して、本研究では湿式現像処理をなくすため、電氣的に記録像の現像と消去が可能なサーモプラスチック乾板を記録材料に用いる方法を新たに提案する。この方法を用いると、現像処理もコンピュータ制御で行えるので、ホログラフィックステレオグラムの作製時間を短縮できる（第4章）。

(4) 一般的に、ホログラフィックステレオグラムは、少しずつ視点を移動して撮影した数十枚以上の多視点原画を用いて作製される。しかし、表示を試みる被写体の周囲で合成に必要な多視点原画を撮影できない場合もある。

この課題に対して、本研究では、テレビカメラなどの撮影機を被写体の周囲で移動せずに、必要な多視点原画を生成する手法を提案する。この場合、既知の条件を用いて被写体の3次元モデルを作成し、被写体を撮影した1枚の画像のテクスチャマッピング（模様の貼り付け）を行って、コンピュータグラフィックスの手法で多視点原画を生成する。ホログラフィックステレオグラム作製の実験では、気象衛星ひまわり画像を用いる（第5章）。

(5) ホログラフィックステレオグラム作製に用いる多視点原画の撮影は、手間がかかることが多い。これらの原画撮影を簡略化することについて、十分に

検討がなされていなかった。

この課題に対して、本研究では、被写体の形状が簡単な場合に、被写体を撮影した1枚の画像にコンピュータビジョン（画像から計算機によって対象物体の3次元的な形状を再現する手法）で使用されている3次元形状復元法を適用して3次元モデルを作成し、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する手法を提案する。そして、直方体形状の建物を被写体に用いて、この手法の評価を行う。また、作製したホログラフィックステレオグラムから得られる3次元画像の位置を、コンピュータシミュレーションを行って確認する（第6章）。

次に、被写体の形状が複雑な場合に、被写体を正面と側面から撮影した2枚の画像に基づいて近似的な3次元モデルを作成し、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する手法を提案する。そして、人物の上半身を被写体として、既に提案されているモデルを改良した近似的な3次元モデルを作成する。その後、生成した原画と実際に撮影した被写体の画像との間で類似度を判定して、近似的な3次元モデルの有効性を確認する（第7章）。

1.4 本論文の構成

図1.5に、本論文のブロックダイアグラム（HSはホログラフィックステレオグラム）を示す。第2章では、最初にホログラフィックステレオグラムの設計手法について述べる。次に、空間光変調器として液晶テレビを用いるとともにコンピュータ制御で合成過程を自動化したホログラフィックステレオグラム合成システムの構成と、コンピュータグラフィックス画像の合成結果について述べる。第3章では、空間光変調器として使用した液晶テレビパネルの空間光変調特性が、ホログラフィックステレオグラムの再生像へ与える影響について検討する。第4章では、記録材料にサーモプラスチック乾板を用いて実時間でホログラフィックステレオグラム合成を行うシステムの構成と、画像再生の結果について述べる。第5章では、実際に多視点原画を撮影できない場合に、一視

点から撮影された画像から合成に必要な多視点原画を生成する手法を，被写体の形状が簡単な場合について述べる。第6章では，原画撮影過程を簡略化するため，3次元形状復元法を1枚の画像に適用して被写体の3次元モデルを作成し，このモデルの周囲で多視点原画を生成する手法について述べる。また，両眼立体視のシミュレーション結果についても述べる。第7章では，被写体の形状が複雑な場合に，近似的な3次元モデルを作成して多視点原画を生成する手

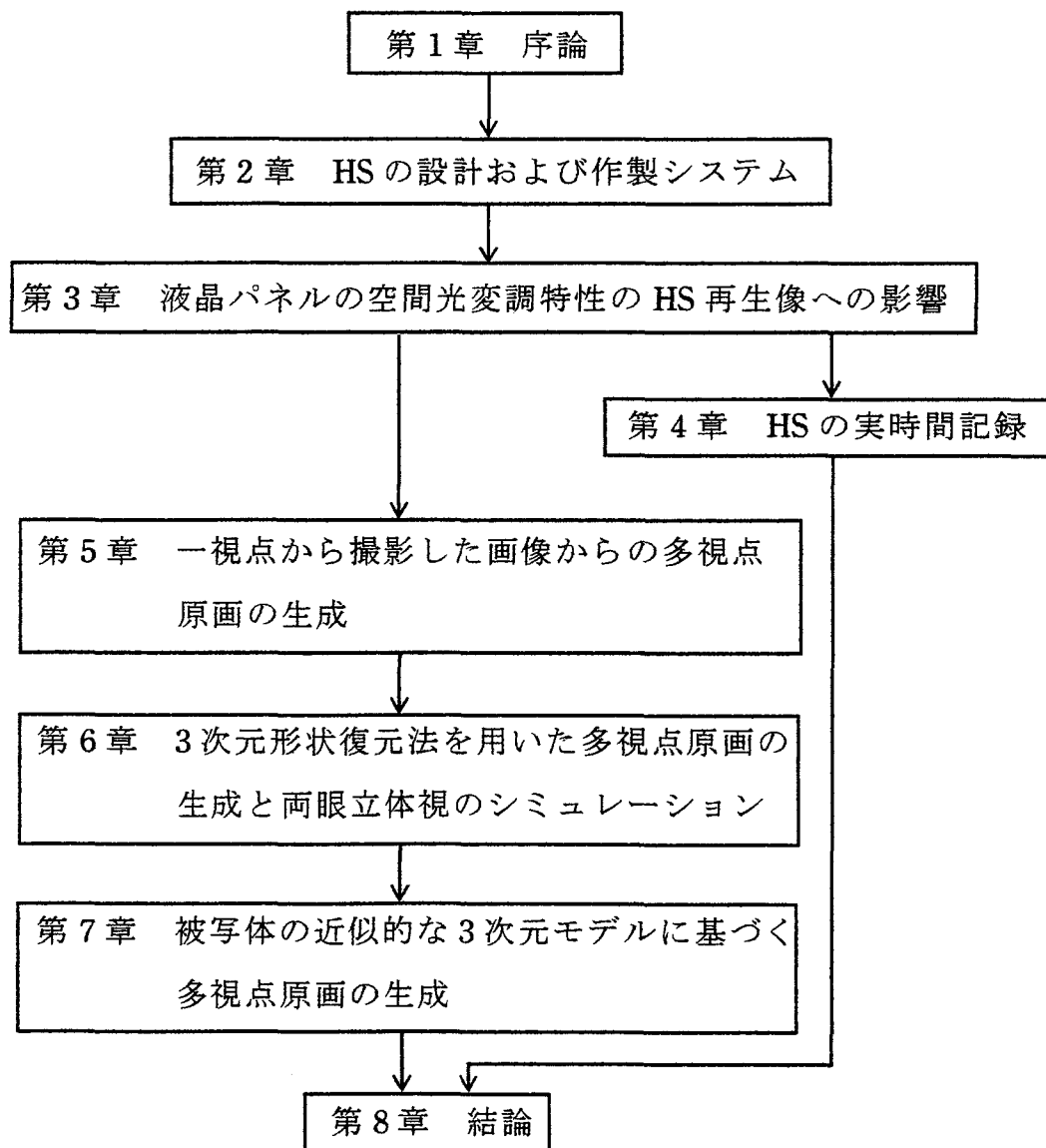


図 1.5 本論文の構成を示すブロックダイアグラム

法について述べる。第 8 章では、本研究において得られた成果を総括するとともに、今後の問題点と課題を指摘する。

第2章 ホログラフィックステレオグラムの設計および 作製システム^{22) - 24)}

2.1 緒言

ホログラフィックステレオグラムは2次元画像を用いて作製されるため、普通のホログラムのように被写体に制限がない。それ故、風景やコンピュータグラフィックス画像も表示が可能²⁵⁾であり、3次元ディスプレイとしてさまざまな分野に応用できる。しかし、従来はホログラフィックステレオグラムの作製に長時間を要して、3次元ディスプレイとして使いづらい問題点があった。使いやすくするには作製時間を短縮して、さまざまな画像を容易に表示できるようにする必要がある。

本章では、最初に、ホログラフィックステレオグラムの一般的な設計手法について述べる。次に、レーザ光再生型ホログラフィックステレオグラムの作製を1時間程度(現像処理も含む)で行えるシステムの構成方法を提案する。このシステムでは、空間光変調器に液晶テレビ^{21)・26)・27)}を用いるとともに、多視点原画のホログラム用フィルムへの記録をコンピュータで制御して、ホログラフィックステレオグラム合成を自動的に行えるようにしている。

最後に、本章で提案するシステムの応用として、作製したホログラフィックステレオグラムから中間調を含むコンピュータグラフィックス画像の再生を試みる。これは、液晶テレビを用いて作製したホログラフィックステレオグラムから、中間調を含む高画質の再生像を得た結果が報告されていなかったためである。

2.2 ホログラフィックステレオグラムの設計手法

ホログラフィックステレオグラムの作製方法に関しては、その概要を第1章の図1.3と図1.4に示した。ここでは、最初に図2.1に基づいて、原画を映画フィルムに記録する従来のレーザ光再生型ホログラフィックステレオグラムの原

理^{20), 28)}を画像再生も含めて述べる。次に、ホログラフィックステレオグラムの設計に必要な事項（空間光変調器の種類，液晶空間光変調器に必要な画素数，原画生成法，両眼立体視による再生像の観察法，スリット幅の設定法）や従来の作製法の問題点について述べた後，提案するシステムの設計目標について述べる。また，本研究と関連するホログラムについても述べる。

2.2.1 ホログラフィックステレオグラムの原理

ホログラフィックステレオグラムの作製は，第1章で述べたように，映画フィルムへの原画記録（第1段階）と現像した映画フィルムを用いたホログラフィックステレオグラム合成（第2段階）の二つの段階を経て行われていた。こ

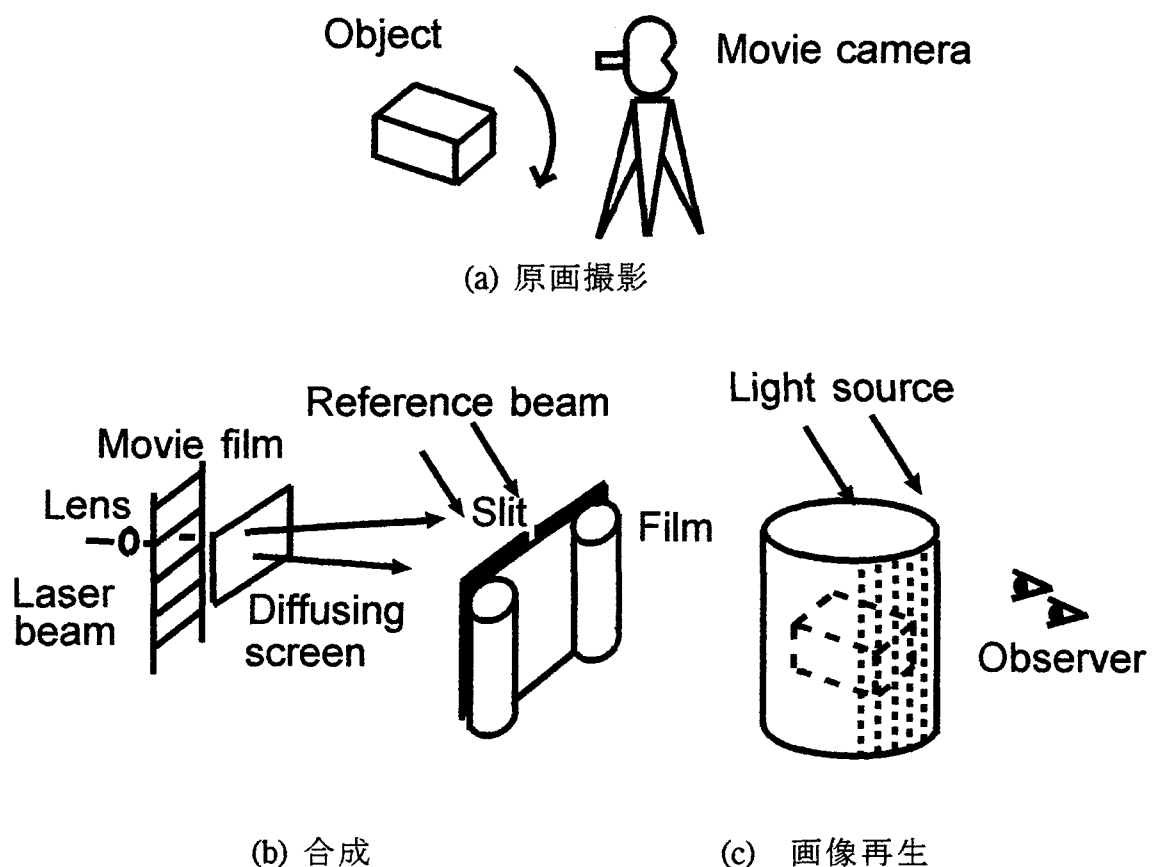


図 2.1 円筒形ホログラフィックステレオグラムの原理

ここでは、ホログラフィックステレオグラムが円筒形の場合について考える。なお、作製とは三つの過程（原画撮影，合成，感光材料の現像処理）を示す。

(a) 原画撮影

実在する被写体の場合は、その周囲で撮影機を回転させるか、またはターンテーブルに乗せた被写体を回転させて、少しずつ一定間隔で視点を移動した数百枚程度の原画を映画フィルムに記録する。架空3次元物体の場合は、光線追跡法などのコンピュータグラフィックスの手法で視点を移動した多数の原画を生成し、ディスプレイに表示して映画フィルムに記録する。

(b) ホログラフィックステレオグラム合成

原画を記録した映画フィルムを現像した後、レーザ光を照射して原画を拡散スクリーンに投影する。拡散スクリーンの位置を移動すれば投影画像の大きさを変更できる。参照光と拡散スクリーンを通過した物体光をスリットを前に置いたフィルムに照射して、ホログラムとして記録する。1回の露光でスリット幅の短冊状ホログラムが記録される。ホログラフィックステレオグラム合成を行うには、フィルムをスリット幅だけ移動し、映画フィルムに記録した多数の原画を順番に露光すればよい。

(c) 画像再生

現像したフィルムを図 2.1(c) に示すように円筒形にして、レーザ光を円筒フィルムの中心の上方から照射すれば、歪みのない再生像を観察できる。ここで、再生像を任意の方向から観察した場合に、立体画像として見える理由について述べる。

最初に、複数の要素ホログラムからの再生像 I_R を、右眼で観察する様子を図 2.2 に示す。RS 間にある要素ホログラム $H_1, \dots, H_6$ を通して、それぞれ AB, $\dots$, GH の部分の再生像が観察され、これらをつなぎ合わせた2次元的な再生像 I_R が右眼で観察される。同様に、左眼からも複数の要素ホログラムを通して別の再生像が観察される。

次に、フィルムから少し離れた位置で右眼で観察する再生像 I_R と左眼で観

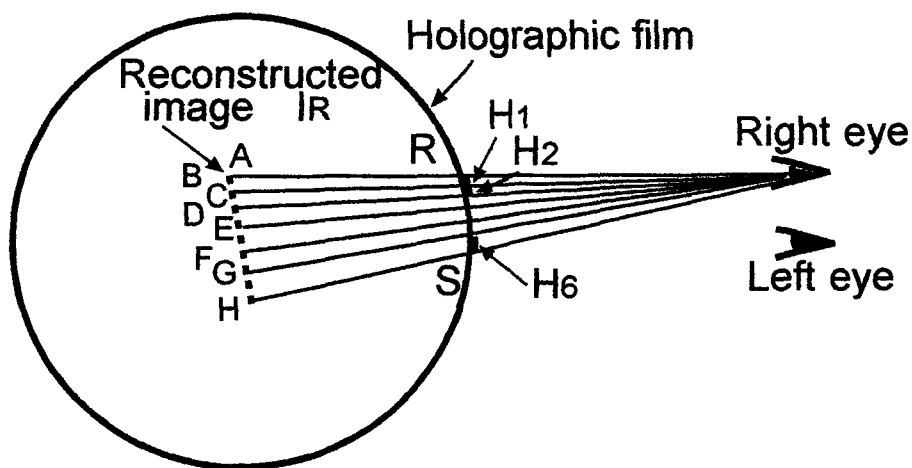


図 2.2 要素ホログラムから観察される再生像

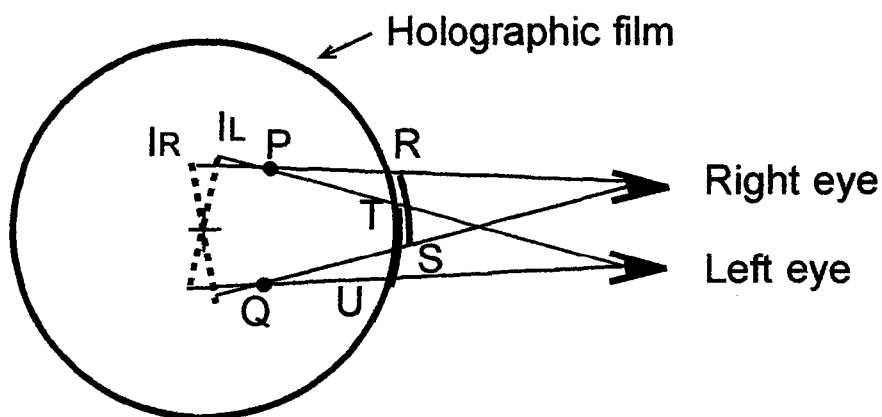


図 2.3 再生像の立体視

察する再生像 IL の立体視を行う様子^{2.9)}を、図 2.3 に基づいて述べる。IR と IL の上端の点について立体視を行うと点 P，下端の点について立体視を行うと点 Q が得られる。再生像全体について考えるとフィルム内に立体視像が得られる。フィルムを回転させると、被写体を異なる方向から見た再生像を観察できるので、3次元画像を得ることができる。

一般的に3次元画像の画質は、ホログラフィックステレオグラムから再生される2次元画像の画質と、立体視による奥行き画像の画質の影響を受けると考

えられている¹³⁾。以下、2次元画像の画質に関する空間光変調器（映画フィルムや液晶パネル）について述べた後、3次元画像に関する事項（原画生成法、両眼立体視による再生像の観察法、スリット幅の設定法）について述べる。

2.2.2 ホログラフィックステレオグラム合成用の空間光変調器の種類

① 空間光変調器の種類

2次元画像の要素ホログラムへの記録は、空間光変調器にレーザ光を照射し

表 2.1 ホログラフィックステレオグラム合成に使用可能な空間光変調器

	映画フィルム	小形液晶テレビの 液晶パネル	液晶プロジェクタの 液晶パネル
サイズ (縦×横)	16mm × 22mm(35ミリ) 7.4mm × 10mm(16ミリ)	38mm × 51mm (対角 2.5 インチ)	20mm × 27mm (対角 1.3 インチ)
画素数	分解能は数十本/mm (推定値)	縦 146 × 横 160	縦 480 × 横 640 ～
コントラスト	200 (フィルム濃度 からの換算値)	10	200 ～
中間調表示	64 段階～ (推定値)	約 5 段階	10 ～ 16 段階 (推定値)
入手の容易さ	入手し難い	入手し易い (本研究で使用)	パネル単独では 入手し難い
HS に関して	再生像は高画質であるが、作製に時間がかかる	画質は良くないが 作製が容易	再生像の画質は良く 今後は有望な方式

(注) HS: ホログラフィックステレオグラム

て拡散スクリーンに投影された画像をホログラム用フィルムに記録することで行われる。空間光変調器としては、前述した映画フィルム³⁰⁾ 以外に、本論文で述べる液晶テレビの液晶パネル³¹⁾ や、液晶プロジェクタの液晶パネル³¹⁾ などがある。これらの空間光変調器について主な性能を表 2.1 に示す（一部に推定値を記載）とともに、特徴を簡単に述べる。表 2.1 で、小形液晶テレビの液晶パネルは本研究で使用したものであり、液晶プロジェクタのパネルは市販製品の一例である。表 2.1 の中間調表示は、濃度階調 (gray scale) パターンを空間光変調器でスクリーンに投影した場合、肉眼で区別できる濃度値 (gray level) の段階を示している。また、コントラストは最大透過光強度を最小透過光強度で割った値とする。

映画フィルムを用いる方法は、ホログラフィックステレオグラムが考案された当初から用いられている。この方法の欠点は、原画を映画フィルムに記録しているため、ホログラフィックステレオグラムの作製期間が長くなることである。しかし、映画フィルムの分解能、コントラスト、中間調を表示する性能（以下、中間調表示性能と記す）などが高く、高画質の再生像を必要とするホログラフィックステレオグラムに適している。

液晶テレビの液晶パネルを用いる方法は、ホログラフィックステレオグラムの作製時間を短縮するため、映画フィルムを使用する代わりに考案された。ホログラフィックステレオグラム合成は容易に行えるが、液晶パネルの画素数は少なく、コントラストと中間調表示性能も十分でないため、高画質の再生像が得られない。しかし、映像信号の駆動回路付きの透過型液晶パネルは安価で、容易に入手できる。それ故、本研究でこの方法を使用する。

液晶プロジェクタは TFT (Thin Film Transistor) を用いたアクティブマトリックス方式の液晶パネルを使用しているため、液晶パネルの画素数は液晶テレビの液晶パネルよりも多い。また、コントラストと中間調表示性能も液晶テレビの液晶パネルより良くなっている。それ故、高画質の再生像を得る場合は、空間光変調器として液晶プロジェクタの液晶パネルを用いる方がよい。液晶プ

ロジェクタの中級機で液晶パネルの画素数は 480×600 画素程度であり，高級機では 1024×1280 画素の高密度液晶パネルが使用されている。中間調に関しては，10～16段階の表示が行えたと推定される。一般的に，映像信号の駆動回路付きの液晶パネルは入手しにくく，市販の液晶プロジェクタを改造して用いた方がホログラフィックステレオグラム合成システムを作製しやすい。

② 液晶空間光変調器に必要な画素数

空間光変調された2次元画像を拡散スクリーンに投影してホログラフィックステレオグラムを合成する方法では，拡散スクリーン上への投影画像の解像度が再生像の画質に関係する。肉眼で一定距離から2次元画像を観察する場合，細部の解像能力に限界がある。すなわち，人間の眼の視認限界は視角 1° あたり 22 サイクル（空間周波数が 22 cycle/deg.）と報告されている³¹⁾。白黒の1サイクルの表示に2画素を必要とするので，視角 1° あたり 44 画素を表示できればよいことになる。この値をホログラフィックステレオグラムの再生像に適用して，空間光変調器に必要な画素数の算出を試みる。

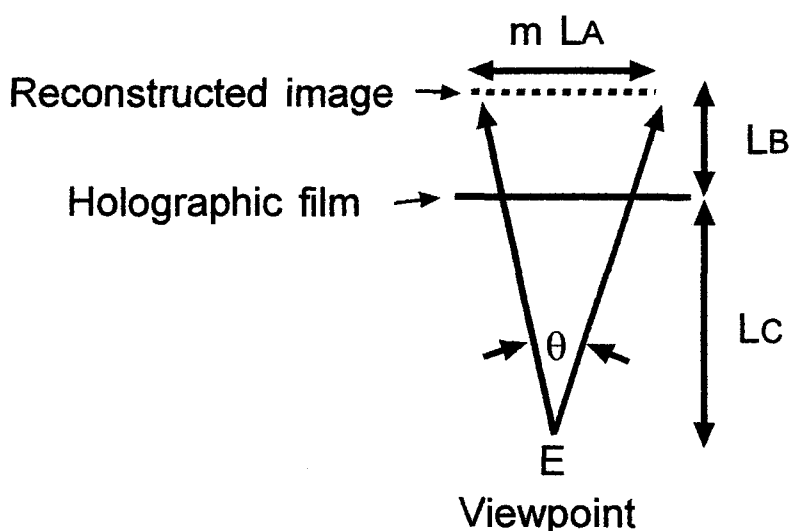


図 2.4 ホログラムの再生像と視点の位置関係

図 2.4 は，ホログラムから虚像を再生する様子を示している。横幅 L_A の液晶テレビパネルを用いて記録した画像が m 倍に拡大されてホログラムから距離 L_B の位置に再生され，ホログラムから距離 L_C の位置で角度 θ （単位は度）で観察する。この場合，前述した人間の眼の視認限界（視角 1° に対して 44 画素）を用いると，横方向 1 ラインに対する画素数 N の上限は，

$$\begin{aligned} N &\approx 44 \theta \\ &= 44 \cdot 2 \cdot \tan^{-1} \frac{m L_A}{2(L_B + L_C)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

で与えられる。

例えば，数値例として第 3 章で述べる実験値， $m=1$ ， $L_A=5\text{cm}$ ， $L_B=15\text{cm}$ ， $L_C=20\text{cm}$ を用いると， $N \approx 360$ になる。液晶パネルの縦方向の画素数は横方向の $3/4$ とすると，液晶パネルの画素数は 270（縦） $\times$ 360（横）画素程度あればよい。

2.2.3 原画生成法

次に，ホログラフィックステレオグラムの原画を得る方法について述べる。多視点原画は，実在する被写体の周囲で少しずつ視点を移動して撮影するか，または透視投影法で生成して得ることができる。

① 被写体を撮影して原画を得る場合

円筒形ホログラフィックステレオグラムの原画を得るには，後に述べるスリット幅に相当する角度間隔で，被写体の多数枚の画像を連続して撮影する。しかし，実際に被写体の周囲で撮影機を一定間隔で移動させて原画を撮影することは煩雑であるし，風景では撮影ができない場合もある。原画撮影を簡略化するため，撮影した 1 枚の画像（被写体の形状が既知の場合）または 2 枚の画像（被写体の形状が未知の場合）からホログラフィックステレオグラムの作製に必要な原画を生成する方法は，第 5 章～第 7 章で述べる。

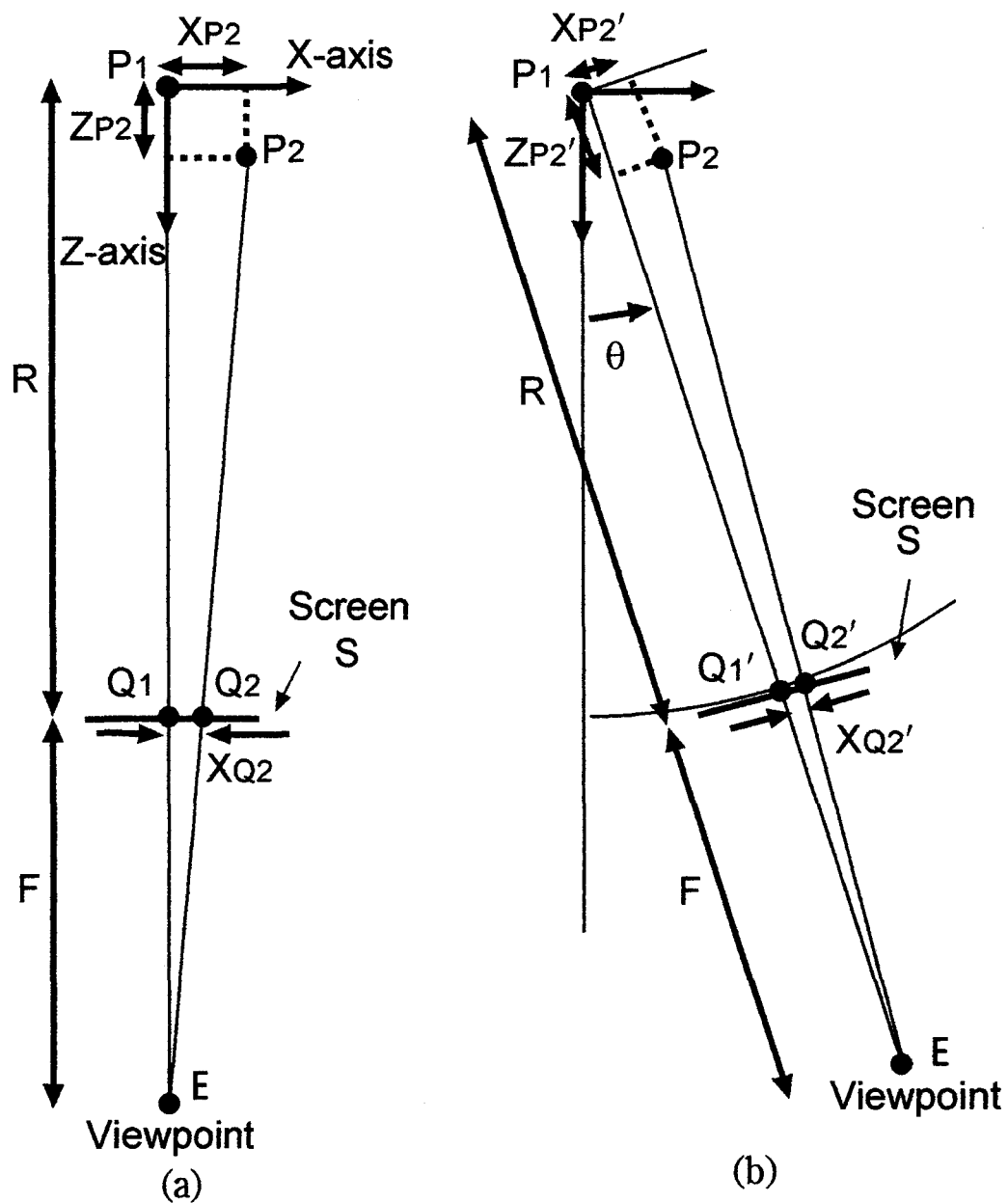


図 2.5 透視投影による原画生成

② 透視投影法による原画生成の場合

透視投影法では、表示を試みる被写体の3次元モデルの周囲でスクリーンと視点を移動しながら多数の原画を生成する。計算方法を、図 2.5 に示す2次元図形の点 P_1 と P_2 を例にとって述べる。いま、 X 、 Z で表される2次元座標の

原点に点 P_1 があり、少し離れた位置に点 P_2 があるとする。視点 E が図 2.5(a) で示される位置にある場合、 P_1 はスクリーン S の中央の Q_1 、 P_2 は Q_1 から X_{Q2} だけ離れた Q_2 に透視投影される。ここで X_{Q2} は、

$$X_{Q2} = \frac{X_{P2} F}{F+R - Z_{P2}} \quad (2.2)$$

で与えられる。

次に、図 2.5(b) に示すように、 P_1 と P_2 を固定したままでスクリーン S と視点 E を角度 θ だけ移動させた場合、 P_1 と P_2 はスクリーン上で Q_1' と Q_2' に透視投影される。 Q_1' と Q_2' の間隔 $X_{Q2'}$ は、

$$X_{Q2'} = \frac{X_{P2'} F}{F+R - Z_{P2'}} \quad (2.3)$$

$$X_{P2'} = X_{P2} \cos \theta - Z_{P2} \sin \theta \quad (2.4)$$

$$Z_{P2'} = X_{P2} \sin \theta + Z_{P2} \cos \theta \quad (2.5)$$

で与えられる。ここで、 $X_{P2'}$ と $Z_{P2'}$ は式 (2.4) と (2.5) で与えられる。 X_{Q2} と $X_{Q2'}$ は異なるので視点を移動したときの情報（視差）が原画に含まれることになる。

ホログラフィックステレオグラムの作製を想定した場合、一定間隔で視点とスクリーンを移動させ、被写体をスクリーンに透視投影して多視点原画を生成する。なお、原画を生成する際の視点移動角度の算出方法は、第 3 章と第 5 章で述べる。

2.2.4 両眼立体視による再生像の観察法

原画を記録したホログラフィックステレオグラムから得られる再生像は、両眼立体視で観察する。ここでは、両眼立体視像の位置を求める方法、両眼立体視像と両眼視差との関係について述べる。

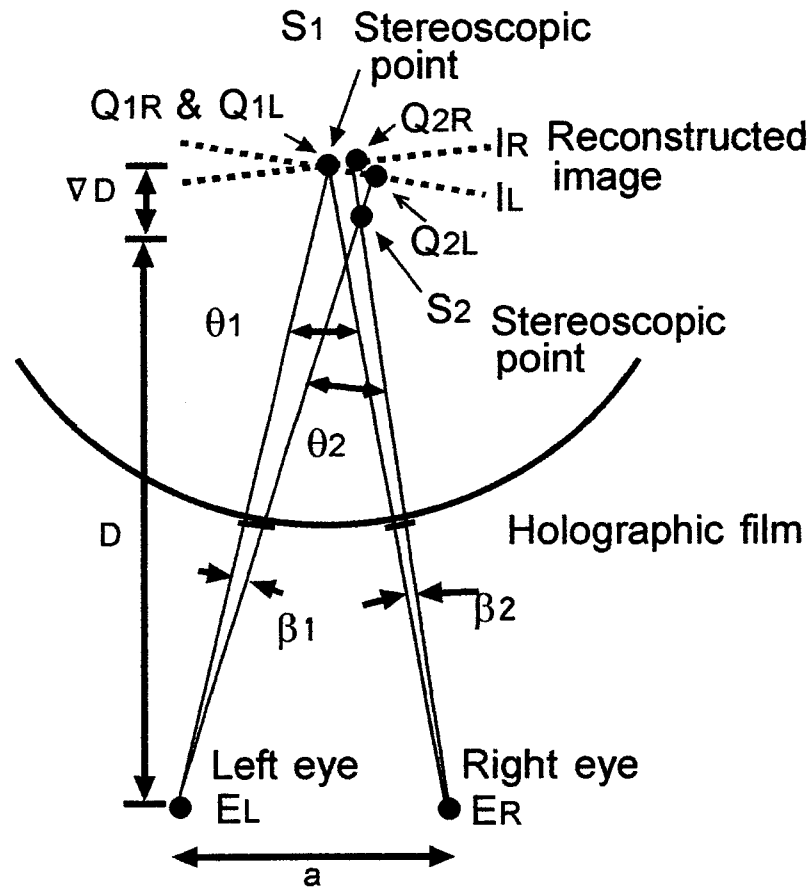


図 2.6 再生像の立体視

最初に、任意の位置から両眼立体視を行う方法を図 2.6 に基づいて述べる。右眼 E_R で観察される複数の要素ホログラムからの再生像を I_R 、同様に左眼 E_L で観察される再生像を I_L とする。図 2.5 の原画生成時の点 P_1 は、再生像 I_R において点 Q_{1R} 、再生像 I_L で点 Q_{1L} の位置に見える（再生像 I_R と I_L の中央なので Q_{1R} と Q_{1L} は同じ位置）。図 2.5 の点 P_2 は、再生像 I_R で点 Q_{2R} 、再生像 I_L で点 Q_{2L} の位置に見える。点 P_1 に対応する両眼立体視点は、直線 $Q_{1R}E_R$ と直線 $Q_{1L}E_L$ の交点 S_1 になる（ Q_{1R} 、 Q_{1L} 、 S_1 は同じ位置）。点 P_2 に対応する両眼立体視点は、直線 $Q_{2R}E_R$ と直線 $Q_{2L}E_L$ の交点 S_2 になる。

従って、視点 E_R 、 E_L と再生像における被写体の位置（例えば、 Q_{1R} 、 Q_{1L} 、

Q2R, Q2L) がわかれば, 両眼立体視点の位置を計算で求めることができる。なお, ホログラフィックステレオグラムから得られる両眼立体視像の位置を, ここで述べた方法に基づいてコンピュータシミュレーションで求める手順は第 6 章に示す。

一方, 3 次元画像の立体感は輻輳角 (対象点を頂点として両眼の視線のなす角) と両眼視差 (二つの対象点で視角が左右眼でどれだけ違うかを示す) によって得られると考えられている^{32), 33)}。点 S1 と S2 に対する輻輳角 θ_1 と θ_2 は,

$$\theta_1 \doteq \frac{a}{D + \nabla D} \quad (\text{ラジアン}) \quad (2.6)$$

$$\theta_2 \doteq \frac{a}{D} \quad (\text{ラジアン}) \quad (2.7)$$

で与えられる。また, 両眼視差 $\nabla \beta$ は,

$$\begin{aligned} \nabla \beta &= \beta_1 - \beta_2 \\ &= \theta_2 - \theta_1 \\ &= \frac{a}{D} - \frac{a}{D + \nabla D} \\ &\doteq \frac{a \nabla D}{D^2} \quad (\text{ラジアン}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

で表され, 点 S1 と S2 の奥行き方向の差 ∇D に比例する。従って, 点 S1 と S2 (図 2.5 の点 P1 と P2 に対応) は立体感をもって見えることがわかる。

2.2.5 スリット幅の設定法

ホログラフィックステレオグラム合成に用いるスリット幅 (要素ホログラムの幅) は, 眼の瞳径 (直径が 2 ~ 5mm 程度) よりも狭くすれば再生像でフリッピング (飛びによる不連続性) を生じないとされている³⁴⁾。それゆえ, 一般的にスリット幅は 2mm 以下に設定されるが, ここではスリット幅の設定方

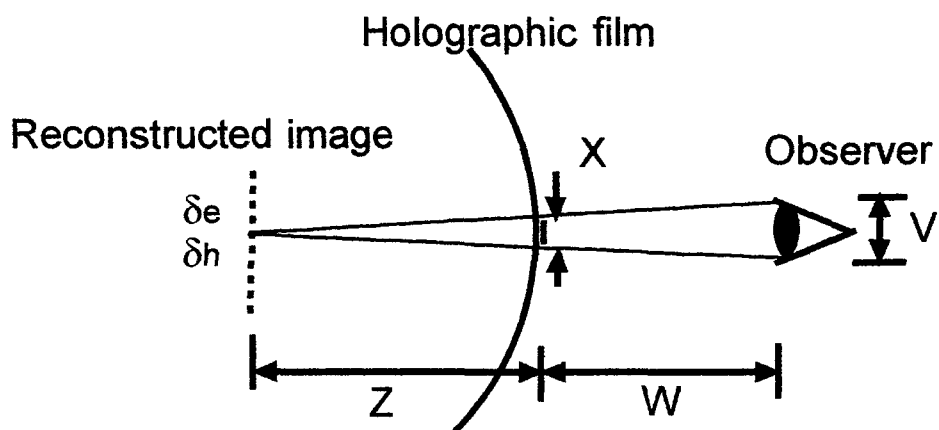


図 2.7 回折（瞳孔と要素ホログラム）による再生像の解像限界

法について検討する。

① 最小スリット幅

設定可能な最小スリット幅を，眼の瞳孔と要素ホログラムの回折効果に基づいて算出する。ホログラフィックステレオグラムの再生像において，円形の瞳孔で決まる横方向の解像限界（レーリーの定義による） δ_e は，

$$\delta_e = \frac{1.22 \lambda (Z+W)}{V} \quad (2.9)$$

で示される^{3.5)}。係数 1.22 は回折口が円形であることによる。ここで，図 2.7 に示すように，眼の瞳孔の直径を V ，眼からホログラムを記録したフィルムまでの距離を W ，このフィルムから再生像までの距離を Z とする。 λ は再生用光源の波長である。また，フィルムに記録されている矩形の要素ホログラムの回折で決まる解像限界（レーリーの定義による） δ_h は，

$$\delta_h = \frac{\lambda Z}{X} \quad (2.10)$$

で示される³⁵⁾。ここで、 X は要素ホログラムの幅である。

式(2.10)で与えられる δh は X を小さくすると、式(2.9)で与えられる δe に等しくなるときに、最小の解像限界が得られる。このときの微小な要素ホログラムの幅、すなわちスリット幅 X は、

$$X = \frac{Z V}{1.22(Z+W)} \quad (2.11)$$

で与えられる。数値例として、実験値の一例 ($Z=15\text{cm}$, $W=20\text{cm}$, $V=2\text{mm}$) を用いれば、 $X \approx 0.70\text{mm}$ になる。

② スリット幅の上限値の検討

ここでは、スリット幅の上限を再生像のフリッピングを考慮して求める³⁶⁾。いま、ホログラフィックステレオグラムで、図 2.8 に示す二つの隣接する要素ホログラム H_i と H_{i+1} を考える。視点 E_i から要素ホログラム H_i を見た場合、観察される再生像の一点を Q_i とする。次に、視点を E_{i+1} に移動させて隣接する要素ホログラム H_{i+1} を見た場合、観察される点を Q_{i+1} (H_i の Q_i に対応する点) とする。

直線 $E_i Q_i$ と直線 $E_{i+1} Q_{i+1}$ の延長線上の交点 P は再生像から Z_d だけ離れた位置にあり、立体視で 3 次元表示を行う点に対応する。二つの要素ホログラム間での視点の移動角度 α が小さければ(すなわち、 $Q_i Q_{i+1}$ の間隔 Y が小さい) ,

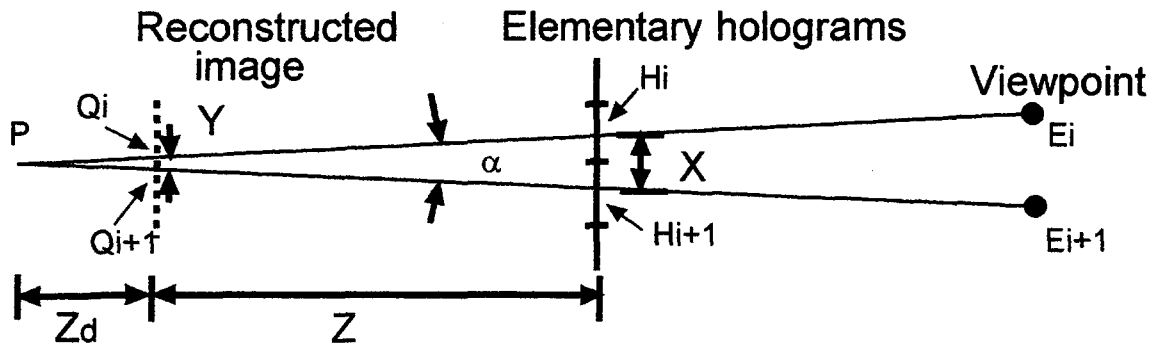


図 2.8 隣接する二つの要素ホログラムからの再生

再生像が連続的に見える。角度 α が大きいと再生像にフリッピングを生じる。いま，フリッピングの目安として再生像の 2 点の間隔 Y を考えると，図 2.8 より Y は，

$$Y = \frac{Z_d X}{Z + Z_d} \quad (2.12)$$

で表される。

式(2.13)で示されるように Y が再生光学系の最小解像限界 β よりも小さければ，フリッピングは無視できる。

$$Y \leq \beta \quad (2.13)$$

ホログラフィックステレオグラム合成で一般的に使用される条件，すなわちスリット幅（要素ホログラムの幅）が眼の瞳孔の直径（2～5mm）よりも狭い場合について，最小解像限界 β を以下の二つの場合に分けて検討する。

最初に，ホログラフィックステレオグラムから得られる再生像の解像度が，瞳の解像度より高い場合について考える。この状態で最小解像限界 β は，式(2.10)で示される δ_h （矩形の要素ホログラムの回折による解像限界）になる。立体視像の深度を $Z_d=3\text{cm}$ に設定した場合，式(2.13)で $Y=\beta$ として， $Z=15\text{cm}$ ， $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ の値を用いると $X \approx 0.75\text{mm}$ となる。この値よりもスリット幅が大きくても再生像は観察可能であるが，視点を移動した場合にフリッピングを生じることになる。

次に，液晶空間光変調器の画素数が少なく再生像の解像度が低い場合について考える。最小解像限界 β は，液晶空間光変調器を用いて拡散スクリーンに投影された画像で決まる。簡単化のため，拡散スクリーンに投影された画像と液晶空間光変調器に表示された画像を同一の大きさとすれば， β は液晶パネルの 1 画素の大きさに対応すると考えられる。数値例として，第 3 章の実験で

用いる液晶パネルの値を用いてみる。このパネルは、5.1cmの間隔（横方向）に160画素を含んでいるので、 β に対応する1画素の幅は0.32mmとなる。立体視像の深度を $Z_d=3\text{cm}$ に設定した場合、式(2.13)で $Y=\beta$ として $Z=15\text{cm}$ を用いると、 $X \simeq 1.9\text{mm}$ となる。

2.2.6 従来の作製法の問題点

原画の記録に映画フィルムを用いる方法は専用の現像処理装置を必要とし、更にホログラフィックステレオグラム合成の過程で、映画フィルムを1コマずつ移動させる装置を必要としていた。このため、医学分野の応用例によると、一つのホログラフィックステレオグラム作製に1週間程度の期間が必要であった³⁷⁾。作製に要する期間が長いため、ホログラフィックステレオグラムは計算機で処理した画像を3次元的に表示する手段として、極めて使い難いものであった。

この問題点に対処するため、空間光変調器として用いた液晶テレビに原画を表示して、ホログラフィックステレオグラムやマルチプレックスホログラムを従来の方法よりも短時間で作製する方法が1988年に報告された^{21)・26)}。しかし、再生像は簡単なワイヤフレーム画像（線画）を2値表示したものが主であり、中間調を含む原画で合成したホログラフィックステレオグラムから、高画質の再生像を得た結果は報告されていなかった。このため、空間光変調器として液晶テレビを用いた場合に得られる再生像の画質について、検討する必要がある。また、感光材料の現像処理を含めたホログラフィックステレオグラムの作製時間（例えば、比較的合成を行いやすい100～200枚程度の原画を用いた場合）も明確でなかった。

ホログラフィックステレオグラムの合成時間は液晶空間光変調器を用いると短縮できるが、実際の建築物や人物などを表示対象とする場合は、一定間隔でテレビカメラなどの撮影機を移動して、多視点原画を撮影する手間のかかる操作を必要とする。この原画撮影を簡略化する方法についても、十分に検討が行

われていなかった。

本研究では、これらの問題点を考慮して、ホログラフィックステレオグラム作製システムの設計を行う。

2.2.7 試作を行う合成システムの設計目標

次に、本章で提案するホログラフィックステレオグラムの方式を図 2.9 に示す。そして、その設計目標を以下に述べる。

① 多視点原画の実際の撮影を省き、図 2.9(a) に示すように原画にコンピュータグラフィックス画像を用いる。生成時間を考慮して解像度が 128×128 または 256×256 画素の原画を取り扱う。なお、実在する被写体を用いた実験については第 3 章で述べる。そして、実在する被写体を対象とした原画撮影過程の簡略化については、第 5 章～第 7 章で述べる。

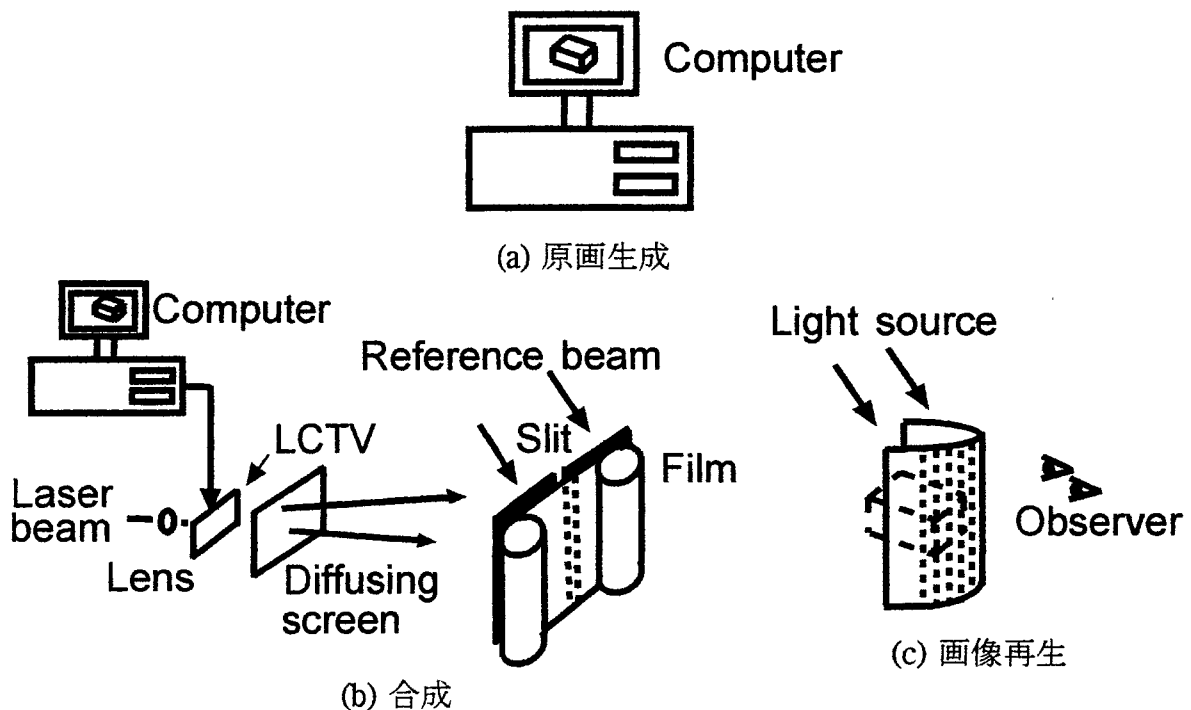


図 2.9 提案するホログラフィックステレオグラムの方式

② 図 2.9(b) に示すように、空間光変調器として液晶テレビ (LCTV) を用い、合成過程をコンピュータで制御して、原画の要素ホログラムへの記録が短時間で行われるようにする。後述するように、記録時に対物レンズで拡大したレーザ光をパネル全面に照射するため、液晶空間光変調器は小形のもの（試作システムの光学系では $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 以下）がよい。また、2.2.2 で述べたように画素数は縦 270 × 横 360 画素程度ある方が好ましい。この条件を満たすのは液晶プロジェクタ用のパネルであるが、システムを試作した時点でこの仕様を満たす液晶パネルを入手することができなかったため、液晶テレビ（大きさは縦 $53.7\text{mm} \times$ 横 71.7mm 、画素数は縦 146 × 横 160 画素）を改造して用いる。

③ 空間光変調された原画を投影する拡散スクリーンとして、ポリエチレン薄膜シートを用いる。これは、5mW 程度の低出力レーザ光で明るい投影像が得られて、拡散性を持つためである。

④ ホログラフィックステレオグラム作製の容易さを考えて、フィルム装着、合成、フィルム現像（現像 3 分、定着 5 分、水洗 5 分、乾燥 10 分程度）などの合計時間は 1 時間以内とする。この場合、合成時間は 30 分程度まで許されるが、実験では 20 分以内を目標とした。ホログラムの記録にフィルム形状の銀塩感光材料（アグファホロテスト 10E75）を用いる。

⑤ ホログラフィックステレオグラムは作製が容易なレーザ光再生型とし、画像再生時のホログラムの形状は図 2.9(c) に示すように、半円筒形とする。これは、 360° の周囲で観察可能な円筒形とすると原画枚数が多くなり、合成時間が長くなるからである。記録する原画枚数は、平面形ホログラフィックステレオグラム（原画は数十枚程度）よりも多視点で観察可能な、100 ～ 200 枚とする。最大原画枚数は、試作装置で一つの短冊状ホログラムを記録するのに要する時間を考慮して決める。

⑥ 要素ホログラムを記録するスリットの幅は、2.2.5 で述べた理論値（液晶パネルで解像限界が決まる場合）と同程度の値に設定する。

⑦ ホログラフィックステレオグラムの応用として、通常の光学的ホログラ

ムで記録できない画像や、計算機で処理した画像などの3次元表示を考える。例えば、第2章でコンピュータグラフィックス画像、第3章以降で人物像や建物画像などを取り扱う。

2.2.8 本研究と関連するホログラムの種類

ここで、本論文で述べるレーザ光再生型ホログラフィックステレオグラムと密接に関連するホログラムを、以下の①～⑥に記す。近年、①～③と⑥のホログラム作製に液晶空間光変調器を使用した例が報告されている。また、ホログラフィックステレオグラムはカラー化が試みられている^{38), 39)}。

① 円錐形ホログラフィックステレオグラム^{40), 41)}

実像が空中に浮いているような再生像が得られるように、ホログラフィックステレオグラムの形状を円錐形にしている。

② マルチプレックスホログラム^{37), 42)}

ホログラフィックステレオグラムとレインボウホログラムの技術を組み合わせて作製したホログラムを、円筒形にしたものである。白色光再生が可能であるがレインボウホログラムであるため、眼を上下方向に移動するに従って再生像は虹色に変化するという特徴を持つ。

③ マルチドットプリンタ^{43), 44)}

ホログラフィックステレオグラムやマルチプレックスホログラムは、水平方向の視差情報のみを含む。マルチドット法と呼ばれる方式では微小な矩形または円形の要素ホログラムを平面形状の記録材料に2次元的に多数記録して、垂直方向の視差情報も含めている点に特徴がある。白色光再生とするためリップマン型として、計算機用の3次元プリンタへ応用する研究が行われている。一般的に、ホログラフィックステレオグラムよりも作製時間が長くなる。

④ アルコーブホログラム⁴⁵⁾

凹面半円筒形ホログラムの中心部に計算機で生成した架空物体の3次元実像を生成できる。180°の広い範囲から実際に空中に浮かんでいるような実像を

観察できる点に特徴がある。

⑤ CGH^{36), 46)}

フーリエ変換 CGH を多数並べてホログラフィックステレオグラムの手法で 3 次元画像を得る方法が報告されているが、高画質の 3 次元画像を得ることは難しい。近年、フレネルホログラムの干渉縞パターンを計算機で作成して、製版用の高解像度レーザプリンタ（イメージセッタ）で出力する方法が報告されている。2.9cm × 5.8cm 程度の大きさのフィルムに記録した CGH からは、2 値図形や文字であれば高画質の 3 次元画像を再生することができる。

⑥ 動画ホログラフィ^{11), 47)}

CGH の手法で計算したホログラム干渉縞のデータを実時間で動作可能な液晶空間光変調器や音響光学素子に加え、レーザ光をこれらの素子に入力すればホログラムの再生像をリアルタイムで得ることができる。ホログラフィックステレオグラム方式で動画を表示する実験もなされている。

2.3 ホログラフィックステレオグラムのコンピュータによる原画生成

次に、図 2.9 に示す方法でホログラフィックステレオグラムを実際に作製する場合に用いる、原画の生成方法について述べる。

2.3.1 物体の定義

ホログラフィックステレオグラム合成用の原画として、第 2 章では実在する物体の画像でなく、コンピュータグラフィックス画像⁴⁸⁾を用いる。なお、コンピュータグラフィックス画像の生成において、物体を定義する基本的なモデルとして、以下に示す①～③の方法がある。

① ワイヤフレームモデル

物体を構成する稜線だけで 3 次元形状を表現するモデルであり、画像生成に最も時間がかからない。

② サーフェースモデル

物体は中味が空洞の立体として考え、平面単位に分解して考える。例えば、直方体は6枚の平面で構成される。その平面を塗りつぶして3次元形状を表現するモデルであるが、平面の前後関係を判定して視点から見える範囲しか塗りつぶさないようにする。

③ ソリッドモデル

物体は中味が詰まった立体として考えるモデルである。例えば、直方体は一つの塊として表現され、数学的な関数を用いて表現される。一般的な物体はプリミティブと呼ばれる基本形状（球、直方体、その他）を、論理積や論理和などの演算操作で組み合わせて表現できる。

液晶空間光変調器として用いる液晶テレビは画素数が少ないので、物体を線画で表示するワイヤフレームモデルは滑らかな画像を表示しづらい。そこで、今回は物体をソリッドモデルで定義して、コンピュータグラフィックスの分野でよく使用される光線追跡法を用いて原画を生成した。光線追跡法は中間調を含む高画質の画像を生成できるが、表示対象が複雑な場合に計算時間が長くなる。なお、光線追跡法のプログラムはFORTRAN言語を用いて作成した。

2.3.2 光線追跡法による原画生成

作成したプログラム中で、光線追跡法で用いる物体のソリッドモデルは、6種類のプリミティブ（直方体、平面、錐、楕円体、一葉双曲面、二葉双曲面）の論理演算操作を用いて定義されている。プリミティブによる物体の定義方法は参考文献[48]に詳しく記載されているので、ここでは原画として用いた3種類の画像について、プリミティブの種類とその数（括弧内）のみを表2.2に示す。椅子の画像は、大きさの異なる8個の直方体と椅子を乗せる薄い1個の直方体で構成できる。カクテルグラスやワイングラスは、異なる種類のプリミティブの論理差、論理和、論理積操作を行って構成することができる。なお、原画生成の結果については後述する（図2.16を参照）。

表 2.2 3 種類の画像で用いたプリミティブ数

椅子	カクテルグラス	ワイングラス
直方体 (9)	円錐 (2) 楕円体 (2) 直方体 (4)	楕円体 (2) 直方体 (4)

生成した原画の解像度は 128×128 画素である。この解像度で物体の周囲 360° のうち半周分の 180° について、 1° 間隔で視点を移動した 180 枚の原画を生成する。180 枚の原画数は、ホログラフィックステレオグラムの合成時間が 20 分以下になるように決めた。 1° の間隔は、良好な視差画像が得られるように実験的に決めている。計算時間は生成する物体の形状により異なる。なお、光線追跡法による原画生成において視点を移動した様子がよくわかるように影をつけているが、影を省くと計算時間を短縮することができる。

2.4 液晶空間光変調器としての液晶テレビ

第 2 章で提案するホログラフィックステレオグラム合成システムの液晶空間

表 2.3 液晶テレビの仕様

液晶テレビの型式	白黒液晶テレビ (CITIZEN WIDE-3.5)
画面サイズ	縦 53.7mm × 横 71.7mm
画素数	縦 146 × 横 160
素子	単純マトリックス TN 形
画像入力	複合映像信号で入力
画像表示	中央部の 1/4 のみ使用

光変調器として、入手が容易な小形の白黒液晶テレビを用いる。このテレビの液晶パネルをレーザ光が通過するように改造する。この液晶テレビの仕様を表 2.3 に示す。液晶パネルは単純マトリックス TN 型で、大きさは縦 53.7mm × 横 71.7mm，全画素数は縦 146 × 横 160 画素である。

液晶テレビの光強度変調特性は、図 2.10 の光学系で測定した。すなわち、顕微鏡の対物レンズで拡大したレーザ光を拡散スクリーンを背後に置いた液晶

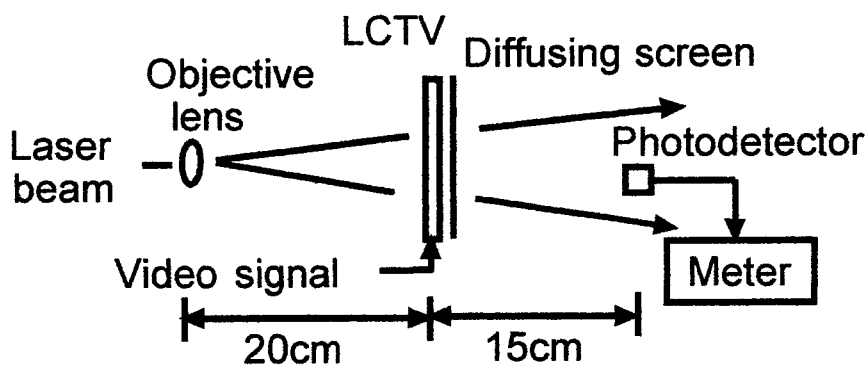


図 2.10 液晶テレビの光強度変調特性を測定するための光学系

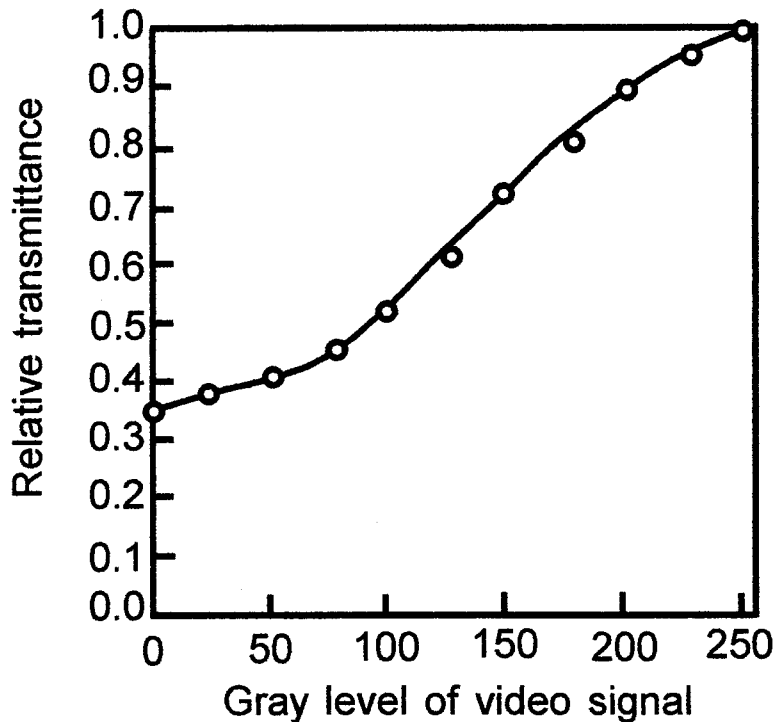


図 2.11 液晶テレビの光強度変調特性

テレビに照射し、透過光強度を光検出器で測定する。図 2.11 は測定した液晶パネルの光強度変調特性で、横軸は液晶テレビに映像信号として入力する 0（最小信号レベル）から 255（最大信号レベル）までの 256 段階（8 ビット）の濃度値を示している。縦軸は透過光強度であるが、濃度値 255 の最も明るいところを 1.0 とした相対値で示している。この特性は液晶テレビの輝度調整ボリュームを動かして中間調をよく表示できる状態で測定したが、濃度値 0 でもわずかにレーザ光が透過する。この状態で拡散スクリーンを除いて円筒形フィルムの前面に白紙を置き、He-Ne レーザ光を照射して液晶パネルに表示した 8 段階の濃度階調パターンを白紙へ投影して、約 4 段階の中間調を区別できた。

コンピュータグラフィックス画像（解像度は 128×128 画素）は、液晶テレビ中央部（全面の $1/4$ ）に表示する。それゆえ、空間光変調に使用する液晶パネルの有効画素数は前述した縦横の画素数の半分（縦 $73 \times$ 横 80 画素）程度になる。全面を使用しないのは、今回使用したホログラム記録光学系で液晶パネル全面に 5mW のレーザ光を十分な強度で拡大できないためである。

2.5 ホログラフィックステレオグラムの作製

次に、第 2 章で提案する、ホログラフィックステレオグラム合成システムの構成について述べる。その後、コンピュータグラフィックス画像を用いて作製した、ホログラフィックステレオグラムからの再生像を示す。

2.5.1 コンピュータ制御方式の合成システム

図 2.9 に示す原理に基づいて合成システムを試作した。図 2.12 はホログラフィックステレオグラム合成のために試作したシステムの構成図^{2.2) - 2.4)}であり、表 2.4 はその仕様と特性である。使用する光学系は、ホログラフィ実験^{3.5)}に用いる程度のものでよい。出力 5mW の He-Ne レーザを用いた場合、1 枚の原画の露光時間は 1.7 秒である。磁気ディスクから読み出した原画データは高速でフレームメモリに表示できるので、180 枚の原画のホログラフィックステ

レオグラム合成は約 15 分で終了する。フィルム装着時間、ホログラフィックステレオグラム合成時間、フィルム現像処理（現像，定着，水洗，乾燥）時間などの合計は約 1 時間となる。それ故，**2.2.7** で述べたホログラフィックステレオグラムの設計目標を満たすことができる。

なお，医療診断用のマルチプレックスホログラムに関して，液晶空間光変調器を用いた実用システムの試作結果が報告されている³⁷⁾。この場合，原画の解像度と要素ホログラム数は本章で述べた数値と異なるが，合成からフィルム現像までの時間は 3 ～ 4 時間である。それ故，一つのホログラフィックステレオグラムを 1 時間程度で作製できたことは，第 2 章の新しい成果である。

試作したシステムを用いると，計算機で生成したコンピュータグラフィックス画像を，3 次元表示が可能なハードコピー形式で保存できる利点がある。

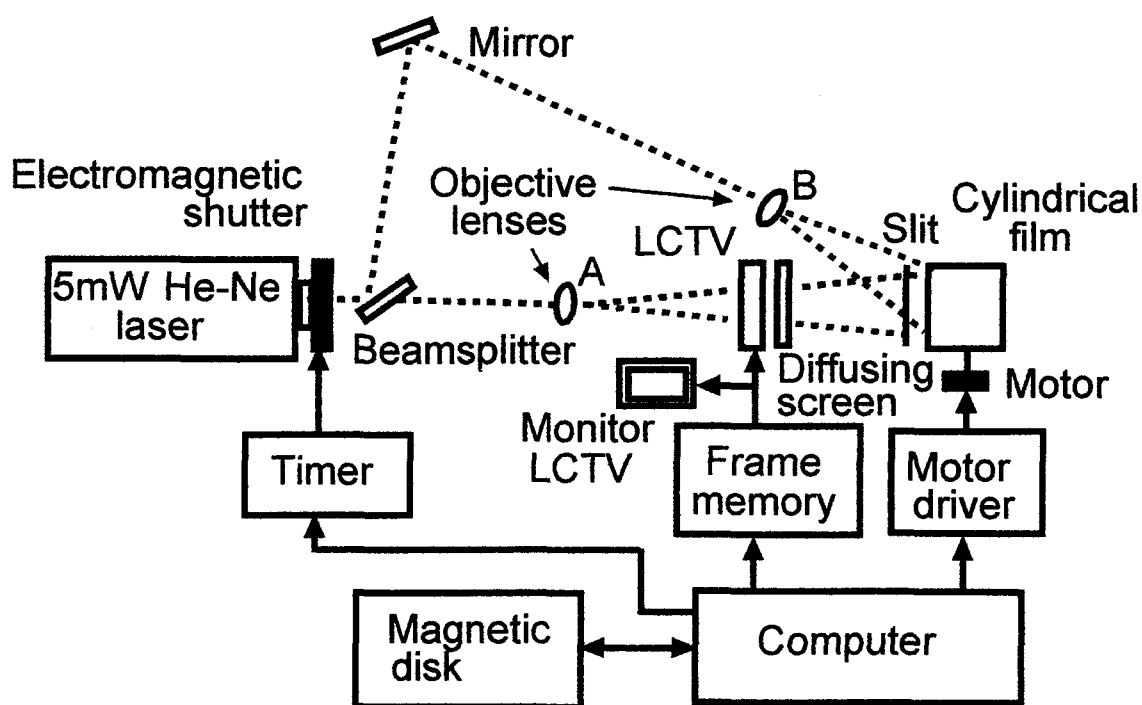


図 2.12 ホログラフィックステレオグラム合成システム

表 2.4 ホログラフィックステレオグラム合成システムの仕様と特性

CG 画像生成	生成手法	光線追跡法
	生成時間	1 枚の画像は 8 秒以上
	生成枚数	180 枚
	使用した言語	FORTRAN 77
	解像度	128 × 128 画素
	階調数	8 ビット
	演算 CPU	INTEL DX4 75MHz
	画像記録装置	磁気ディスク
HS 合成光学系	制御言語	アセンブリ言語
	中間調表示	約 4 段階（液晶テレビパネル）
	スリット幅	1.8mm
	レーザ	5mW He-Ne
	記録フィルム	アグファホロテスト 10E75
	フィルムサイズ	70mm × 300mm
	ホログラム露光時間	1.7 秒
	HS 合成時間	15 分

2.5.2 コンピュータグラフィックス画像の再生像例

180 枚の原画を記録したフィルムを図 2.13 のように半円筒形にし、レーザ光を照射して再生像を得る。フィルムを回転させれば、表示物体の半周分である 180° の範囲で、再生像を観察することができる。図 2.14 はホログラフィックステレオグラムを合成したフィルムであり、漂白は行っていない。図 2.15 は図 2.14 のフィルムにレーザ光を照射して得た再生像（虚像）であり、明るい室内で撮影したものである。

図 2.16(a) ～ (c) は光線追跡法で生成した、椅子、カクテルグラス、ウィング

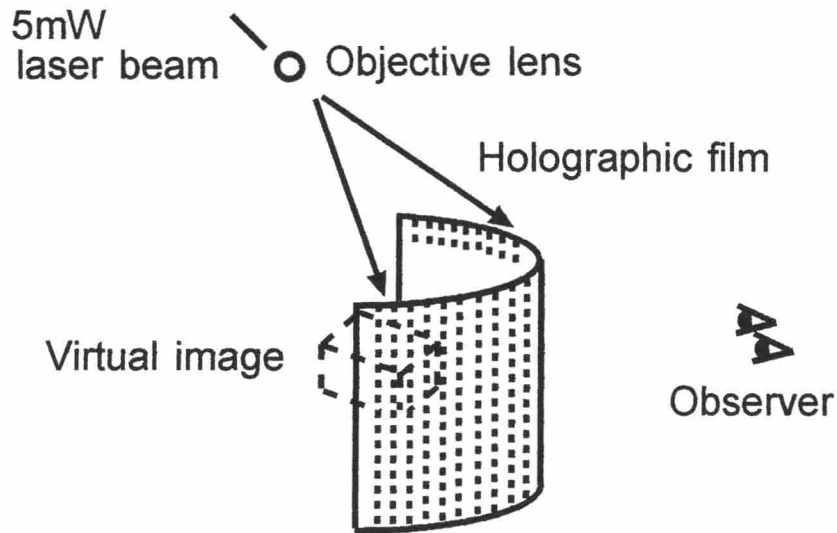


図 2.13 再生光学系

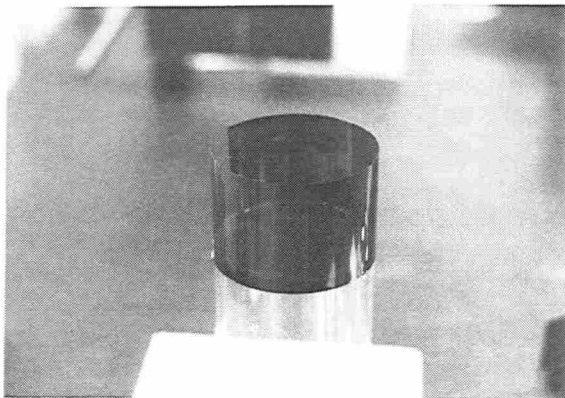


図 2.14 ホログラフィックステレオ
グラムを合成したフィルム

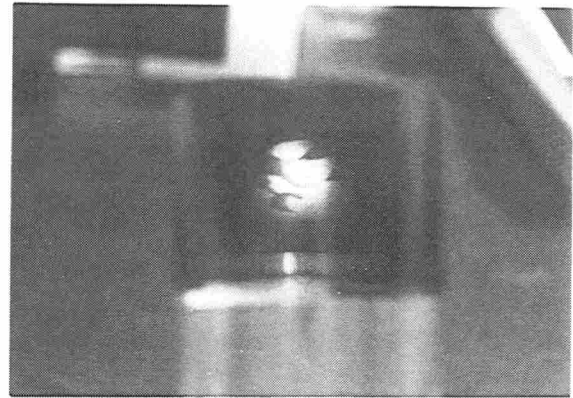


図 2.15 ホログラフィックステレオ
グラムからの再生像

ラスのコンピュータグラフィックス画像（解像度は 128×128 画素）を，コンピュータの CRT ディスプレイに 16 階調（4 ビット）で表示した画像である。図 2.16(d) ～ (i) は，180 枚のコンピュータグラフィックス画像を合成した 3 種類のホログラフィックステレオグラムからの再生像である。3 種類の画像について二つの異なる角度から撮影しているが，カクテルグラスやワイングラスなどの回転対称物体は影の位置で方向を判断できる。再生像の垂直方向の視域は約 25° であった。

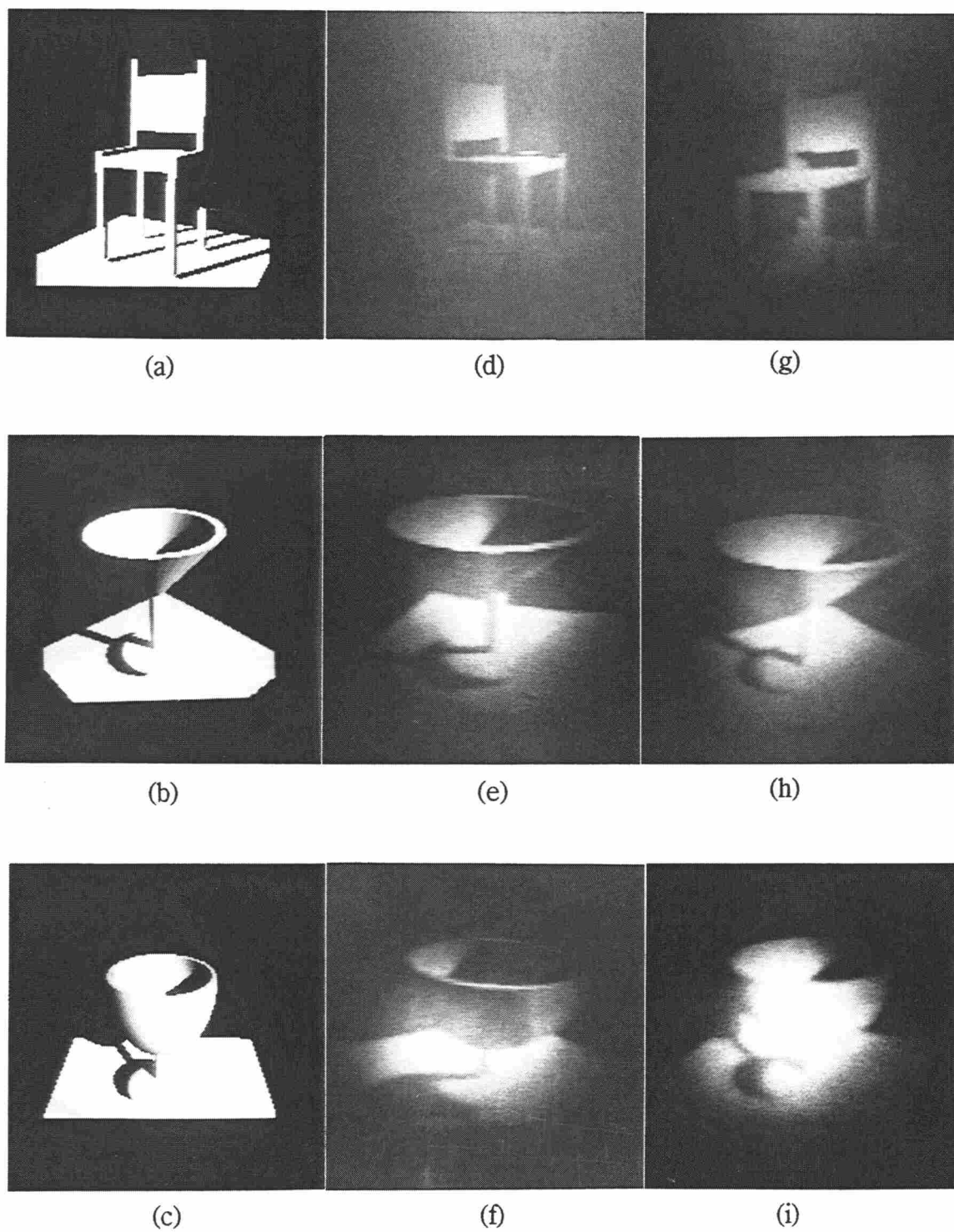


図 2.16 光線追跡法で生成した解像度が 128×128 画素の原画 (a) ~ (c) と
ホログラフィックステレオグラム再生像 (d) ~ (i)

(a) (d) (g) : 椅子, (b) (e) (h) : カクテルグラス, (c) (f) (i) : ワイングラス

2.5.3 検討

ホログラフィックステレオグラムの再生像は、液晶テレビの中間調表示性能が低くて画素数も少ないため、必ずしも高画質でない。また、レーザ光再生型であるために再生像はスペックル雑音を含む。このような問題点はあるがフィルムから離れた位置に再生像が浮かんで見え、少し視点を移動するかフィルムを回転させると再生像が変化するので、肉眼で観察して立体感が得られた。

使用した液晶テレビの画素数は **2.2.2** の②で述べた値よりも少ないが、簡単な構図のコンピュータグラフィックス画像で予想したよりも良好な再生像を得ることができた。これは、ワイヤフレームで生成した線画よりも光線追跡法で生成した塗りつぶした画像が画素数の少ない液晶テレビで見やすく表示できること、コンピュータグラフィックス画像はコントラストが高いため中間調表示性能の低い液晶テレビで見やすい画像を表示できることに、関係すると考えられる。また、拡散性を持つとともに光透過率の高いポリエチレン薄膜シートを拡散スクリーンとして用いたことも、良好な再生像を得た理由と考えられる。

2.2.2 で述べたようにコントラスト、中間調表示性能、画素数に関しては液晶プロジェクタ用のパネルを用いれば改善することができると考えられる。なお、ホログラフィックステレオグラム特有の再生像歪⁴⁾⁹⁾はコンピュータグラフィックス画像の生成時に補正することが可能であるが、今回の実験で補正を行っていない。

180枚の原画を生成する場合、椅子の画像で25分、カクテルグラスの画像で60分、ワイングラスの画像で100分程度(CPUはINTEL DX4 75MHz)を必要とする。プログラムをFORTRAN以外の言語で作成し、アルゴリズムを改良すれば更に計算時間を短縮できる。

2.6 結言

本章の前半では、レーザ光再生型ホログラフィックステレオグラム作製システムの設計手法について検討した。その結果、本研究で取り扱うホログラフィ

ックステレオグラム（レーザ光照射による虚像再生型）において、液晶空間光変調器の画素数は縦 270 × 横 360 画素程度、要素ホログラムの記録に用いるスリット幅は 1.9mm 程度あればよいことがわかった。また、3次元画像の評価に必要な、両眼立体視像の位置を求める方法を明らかにした。

後半では、空間光変調器として液晶テレビを用いるとともに合成過程をコンピュータで制御して、ホログラフィックステレオグラム作製を従来よりも短時間で行えるシステムの構成について述べた。光線追跡法による原画の生成時間（25分～100分）を除けば、解像度が 128 × 128 画素の 180 枚の原画を合成したホログラフィックステレオグラムは1時間程度で作製することができた。空間光変調器として用いた液晶テレビの画素数、中間調表示性能、コントラストは高画質の再生像を得るのに不十分であるが、中間調を含む簡単な構図のコンピュータグラフィックス画像のホログラフィックステレオグラム作製に有用なことがわかった。

なお、記録用レーザ光源の大出力化、液晶空間光変調器の高性能化、画像再生装置の小型化、現像処理過程の自動化などは検討事項として残されている。

第3章 液晶パネルの空間光変調特性のホログラフィック ステレオグラム再生像への影響^{50) - 53)}

3.1 緒言

ホログラフィックステレオグラムの作製において、液晶テレビが空間光変調器として有用なことが第2章の実験で明らかになった。しかし、液晶テレビは中間調表示性能や画素数が十分でない。液晶テレビパネルの空間光変調特性がホログラフィックステレオグラムの再生像へ与える影響については、主に濃度階調パターンを対象として報告されているのみであった²⁷⁾。実際の被写体を撮影した原画を用いてホログラフィックステレオグラムを作製し、その再生像の画質を評価することは行われていなかった。

本章では、被写体として人物を用いてホログラフィックステレオグラムを作製し、得られた再生像の画質について検討する。原画として、CCDテレビカメラから入力した中間調画像を用いる。再生像の画質を向上させるため、空間光変調器に第2章で述べた液晶テレビよりも少し小形の液晶テレビを使用する。そして、合成に用いる原画に濃度階調変換を行って見やすい再生像を得る方法を提案する。また、2値化した輪郭線画像のホログラフィックステレオグラム作製も試みる。

被写体の多視点原画の入力に関しては、CCDテレビカメラの回転角度が、再生像の両眼立体視の条件から求められることを示す。最後に、両眼立体視で得られる3次元画像の評価のために行った、再生像の立体視シミュレーションの結果を示す。

3.2 小形液晶テレビの空間光変調器への応用

第2章のホログラフィックステレオグラム合成システムで空間光変調器として使用した液晶テレビでは、表示対象が実用的なもの（例えば、人物像）で高画質の再生像が得られない問題点があった⁵⁰⁾。空間光変調特性は、二つの要

因（光強度変調特性と光強度変調に用いる全画素数）で決まると考えられる。この二つの要因について改善を行うため、第3章では小形の液晶テレビを用いてホログラフィックステレオグラム再生像の画質向上を試みた。使用した小形液晶テレビの仕様および特性を表3.1に、光強度変調特性を図3.1に示す。この液晶テレビは、図2.12に示す合成システムのモニタ用液晶テレビと同一のものであるが、液晶パネルをレーザ光が通過するように改造を行っている。なお、この液晶テレビの位相変調特性は、位相型計算機合成ホログラムの作製と関連して、既に報告されている⁵⁴⁾。第2章の表2.3で示した液晶テレビと比較して、表3.1に示す小形液晶テレビの縦横の寸法は短く、中間調表示性能とコントラストは改善されている。

3.3 人物像のホログラフィックステレオグラム作製

ここでは、人物像のホログラフィックステレオグラム作製に関する事項（ホログラムによる人物像表示、実験の手順、原画の視点移動角度）について述べる。なお、人物を用いるのはホログラフィックステレオグラムが実用化された場合に、表示対象として使用される可能性が高いためである。

3.3.1 ホログラムによる人物像の表示

従来、人物像のホログラム作製^{6), 55)}に大出力パルスレーザが用いられていた。この方法では、撮影時にレーザ光が眼に入射しないように注意する必要があった。一方、ホログラフィックステレオグラムの場合は原画として2次元画像を用いるので、通常ホログラム作製と比較して被写体の撮影条件が緩やかである。映画フィルムに原画を記録して人物像のホログラフィックステレオグラムを作製した結果は既に報告されている²⁰⁾が、大規模な設備を必要とする欠点があった。

第2章で述べたように、液晶テレビを空間光変調器として用いるとホログラフィックステレオグラムは1時間程度で作製することができる。そこで、被写

表 3.1 小形液晶テレビの仕様と特性

液晶テレビの型式	白黒液晶テレビ (CITIZEN UB-250)
画面サイズ	縦 38mm × 横 51mm
全画素数	縦 146 × 横 160
中間調表示	約 5 段階 (実測値)
コントラスト	約 10
駆動方法	単純マトリックス
動作モード	TN (Twisted Nematic) モード

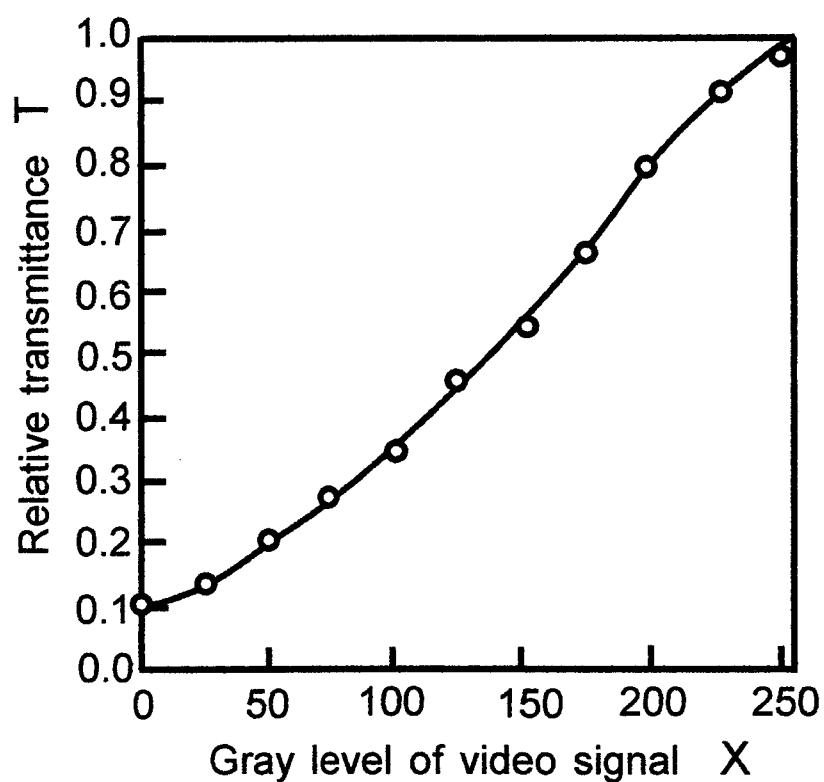


図 3.1 小形液晶テレビの光強度変調特性

体の周囲で白黒 CCD テレビカメラを回転させる原画入力装置を試作し，人物像のホログラフィックステレオグラム作製を試みた。最初に第 2 章で述べたシステムで，解像度が 128×128 画素の原画を用いてホログラフィックステレオグラムを作製したが，明瞭な再生像が得られなかった^{5.0)}。そこで，原画の解像度を 256×256 画素と高くするとともに，空間光変調器に表 3.1 に示す小形液晶テレビを用いてホログラフィックステレオグラムを作製した。その結果，再生像の画質を高めることが可能となった^{5.1) - 5.3)}。

3.3.2 実験の手順

図 3.2 に，人物像のホログラフィックステレオグラム作製と画像再生の手順を示す。ホログラフィックステレオグラムの合成と画像再生の手順は第 2 章と同一である。但し，再生像の画質を高めるために括弧内に示す状態へ，He-Ne レーザ光源（出力 30mW），液晶テレビ（CITIZEN UB-250），液晶パネルの空間光変調用の画素数（縦 146 × 横 160 画素），原画の解像度（ 256×256 画素）を変更した。

原画入力と前処理に関する仕様および特性を表 3.2 に示す。ホログラフィックステレオグラム合成に用いる 100 枚の原画入力は，自動焦点方式の白黒 CCD テレビカメラを一定間隔（約 0.6° ）で回転させて行う。100 枚の原画枚数はホログラフィックステレオグラム作製を 1 時間以内にするため，試みに用いた値である。なお，原画入力装置と合成システムの接続はオフラインである。もし，原画入力装置をオンラインでホログラフィックステレオグラム合成システムに接続すれば，原画入力（約 6 分），合成（100 枚で約 17 分），フィルム現像処理（30 分以下）などを 1 時間程度で行うことが可能となる。

原画の前処理は以下の場合に行う。入力画像のコントラストは被写体の照明条件に大きく依存する。入力画像が低コントラストの場合は，液晶空間光変調器を用いて合成したホログラフィックステレオグラムで明瞭な再生像が得られないため，原画の濃度階調変換を行う。また，100 枚の原画入力の時間内に，

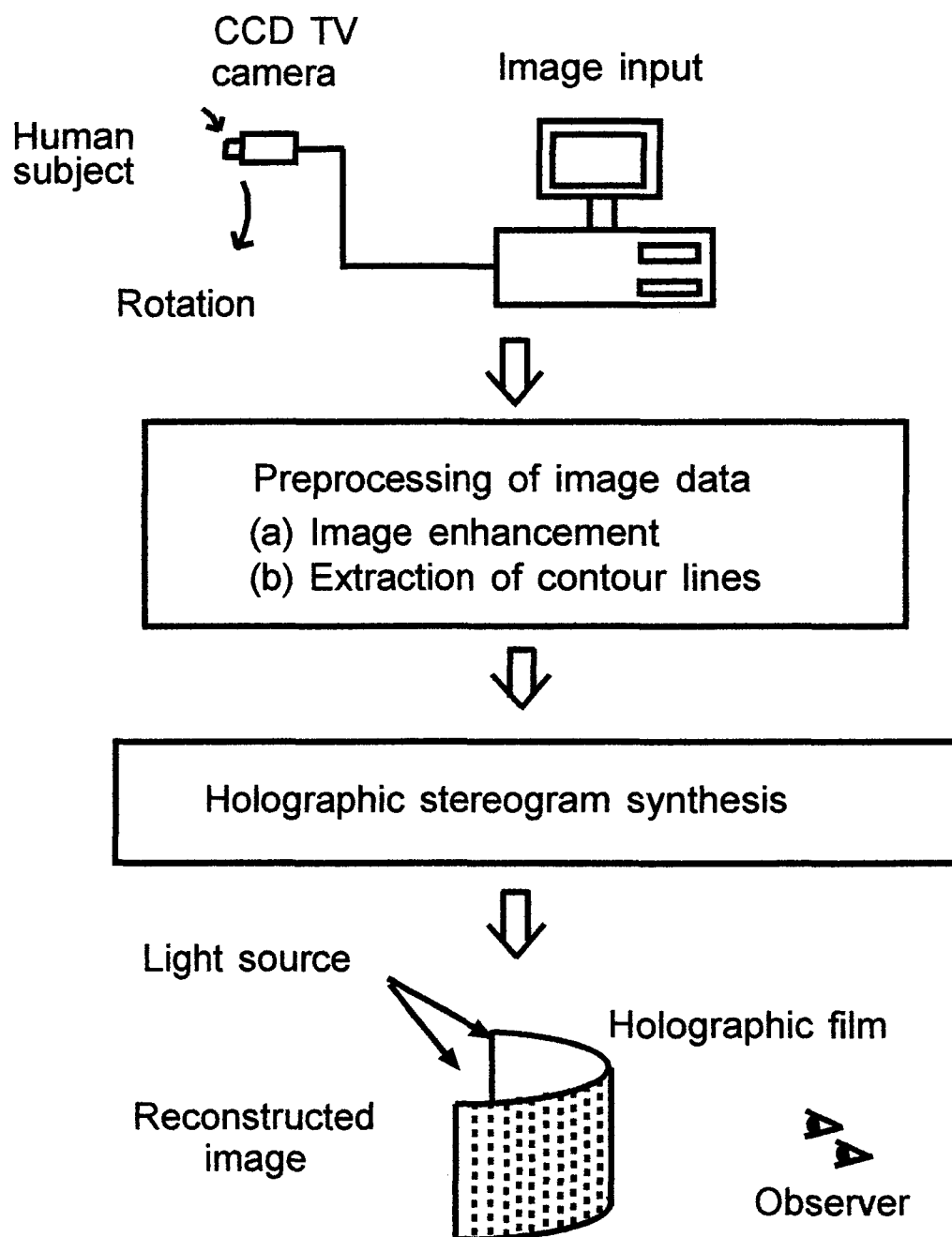


図 3.2 実験の流れ図

表 3.2 原画入力と前処理の仕様と特性

画像入力	入力素子	白黒 CCD テレビカメラ
	回転制御	直流モータ
	解像度	256 × 256 画素
	階調数	8 ビット
	回転角度	約 0.6° / フレーム
	原画数	100 枚
	入力時間	約 6 分
前処理	濃度階調変換	
	合成に不適切な画像の除去	
	輪郭線抽出	

人物が完全に静止していることは難しい。それ故，眼を閉じたり表情が大きく変化している画像は取り除き，隣接する正常な画像と置き換える。なお，前処理に，輪郭線画像のホログラフィックステレオグラムを作製する場合の輪郭線抽出も含まれる。

3.3.3 原画の視点移動角度

原画撮影において視点移動角度を適切な値に設定しないと，再生像を観察する場合に立体視の条件を満たさない。また，視点移動角度が適切な値よりも大きいと，微小な要素ホログラムからの再生像は不連続になる。ここで，両眼立体視の条件から視点移動角度（CCD テレビカメラの回転角度）の概算値を求める方法について述べる。

図 3.3 は，ホログラフィックステレオグラムに記録された二つの要素ホログラムから再生される液晶テレビ画像を，両眼で観察する様子を示している。こ

ここでは、立体視像の位置が液晶テレビ再生像のやや後方になる場合について考える。 $L_1(=15\text{cm})$ はホログラムから液晶テレビ再生像まで、 L_2 はホログラムから立体視像の中心までの距離を示す。ホログラムから観察者までの距離は $L_3(=20\text{cm})$ である。 θ は両眼で立体視像の中心を見る角度とする。 L_4 は角度 θ 内に含まれるフィルムの長さとする。ホログラフィックステレオグラムは半円筒形状であるが、計算の簡単化のため、 L_4 の範囲で直線として取り扱う。 $L_5(=6.5\text{cm})$ は両眼の間隔である。幾何学的な関係より、 θ は式 (3.1) で、 L_4 は式 (3.2) で計算される。

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{L_5}{2(L_2 + L_3)} \quad (3.1)$$

$$L_4 = \frac{L_2 L_5}{L_2 + L_3} \quad (3.2)$$

いま、要素ホログラムの幅（スリット幅）を $L_s(=1.8\text{mm})$ とすると、長さ L_4 内に含まれる要素ホログラムの数 N は式 (3.3) で求められる。

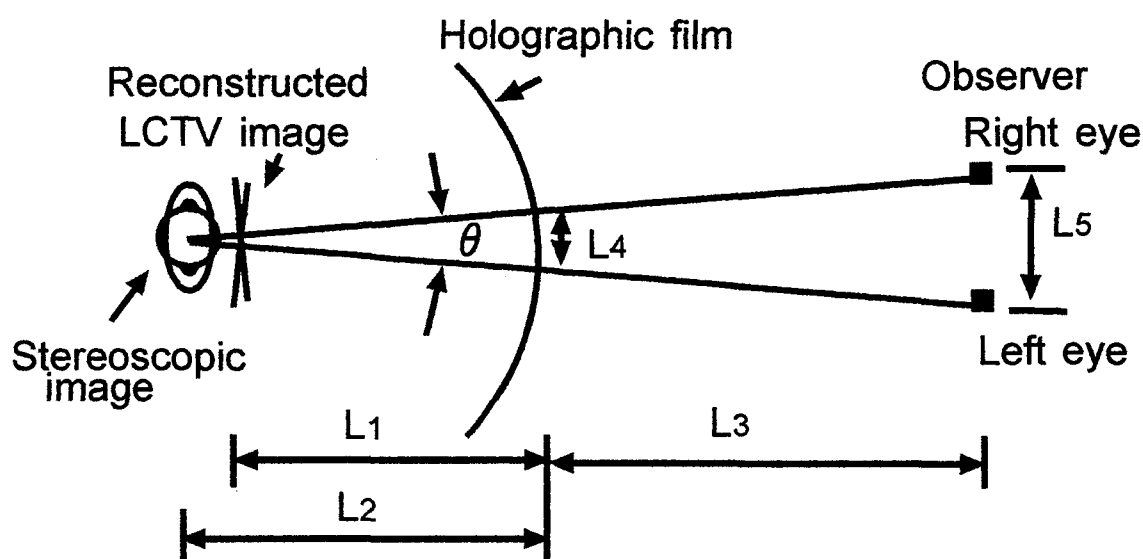


図 3.3 再生像の両眼立体視

$$N \doteq \frac{L_4}{L_s} \quad (3.3)$$

式 (3.4) に示すように θ を N で割れば，一つの要素ホログラムに対する角度，すなわち視点移動角度 α が得られる。

$$\alpha = \frac{\theta}{N} \quad (3.4)$$

いま， $L_2=18\text{cm}$ と仮定し，第 3 章の実験値として， $L_3=20\text{cm}$ ， $L_5=6.5\text{cm}$ ， $L_s=1.8\text{mm}$ をこれらの式に代入すると， $\alpha \doteq 0.57^\circ$ となる。ここで， L_2 は複数のシミュレーション結果に基づく値である。原画入力で CCD テレビカメラの回転角度は，この値に設定すればよい。

3.4 画像再生の結果と考察

3.4.1 人物像の再生像

ホログラフィックステレオグラム合成を行ったフィルムを図 3.4 に示す。焦点をフィルムに合わせて撮影を行ったため，この図において虚像である再生像はぼけている。なお，フィルムは無漂白なので写真で黒く写っている。縦方向の細線は 1.8mm 幅の要素ホログラムを示す。

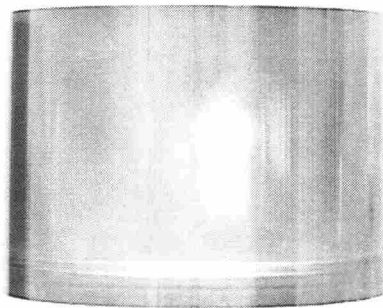


図 3.4 ホログラフィックステレオグラムを合成したフィルム



(a) 30 番目の原画



(b) 55 番目の原画

図 3.5 モニタ用の液晶テレビに表示した原画



(a) 左側



(b) 正面

図 3.6 再生した人物像

図 3.5 (a), (b) は CCD テレビカメラから入力した解像度が 256×256 画素の原画を，そのままモニタ用液晶テレビ（画素数は縦 $146 \times$ 横 160 画素で空間光変調器として使用した液晶テレビと同じ）に表示したものである。100 枚の原画の中で，30 番目と 55 番目の原画を示す。これらの原画は白と黒レベルが多くて中間調レベルが少ないように感じられるが，被写体の撮影は適切な照明下で行っている。それ故，濃度値は 0（黒）から 255（白）までの広範囲の値を含む。図 3.6(a), (b) は図 3.4 に示すホログラフィックステレオグラムを回転させて，人物の左側および正面付近の再生像を撮影したものである。実験で使用した液

晶テレビ用のパネルは，再生像において中間調を多く表示できないが，人物の特徴を表現可能である。

ホログラフィックステレオグラムの作製に使用した液晶テレビは，図 3.1 に示すように入力信号の濃度値が 0 でわずかにレーザ光が透過するため，表示画像のコントラストは高くない（約 10）。入力信号の濃度値が 0 の状態でレーザ光の透過が少ない素子，例えば，第 2 章の 2.2.2 で述べた液晶プロジェクタ用のパネルを用いれば，画質を向上させることができると考えられる。

3.4.2 再生像の画質改善

図 3.1 に示す光強度変調特性を持つ液晶パネルを用いて作製したホログラフィックステレオグラムの再生像は，肉眼で観察した場合に，全体的にやや明るい（写真撮影を行うと白っぽくなる）傾向があった。これは，液晶パネルに原画の中間調がよく表示されるようにした状態で，原画がやや明るくなる（光透過率が高くなる）ためである。液晶テレビに付属している輝度調整ボリュームを回して，表示した画像を少し暗くすると中間調を表示できず，画質の良いホログラフィックステレオグラムを作製することができなかった。

そこで，CCD テレビカメラから入力した原画に非線形の濃度階調変換を行って，ホログラフィックステレオグラムから見やすい再生像を得るための検討を行った^{5,6)}。最初に，比較のために CCD テレビカメラから入力した原画をモニタ用液晶テレビに表示したものを，図 3.7(a) に示す。図 3.7(b) は，この 1 枚の原画を記録したホログラムからの再生像であり，全体的にやや明るい。

次に，原画に対して式 (3.5) に示す非線形の濃度階調変換を行った。

$$X_2 = \frac{X_1^2}{255} \quad (3.5)$$

ここで， X_1 は濃度階調変換前の原画の濃度値で， X_2 は濃度階調変換後の濃度値である。図 3.8(a) はモニタ用液晶テレビに表示した濃度階調変換後の原画で



(a) 原画



(b) 再生像

図 3.7 濃度階調変換前の原画とホログラムからの再生像



(a) 原画



(b) 再生像

図 3.8 濃度階調変換後の原画とホログラムからの再生像

あり，図 3.8(b) はこの原画を記録したホログラムからの再生像である。図 3.7 と比較して全体的に白レベルの部分が減少している。ホログラフィックステレオグラム合成に，この濃度階調変換を行った原画を用いると見やすい再生像を得ることができる。

ここで，濃度階調変換も含めた光強度変調特性についての検討を行う。図 3.1 で，相対光透過率 T と濃度値 X は式 (3.6) の関係で表されると仮定する。

$$T = A X^{\gamma} + B \quad (3.6)$$

定数については、 $\gamma=1.3$ 、 $A=0.00072$ 、 $B=0.10$ である。これは、図 3.1 で 3 箇所 の X 、 T の値（ $X=0$ で $T=0.10$ 、 $X=125$ で $T=0.45$ 、 $X=250$ で $T=0.94$ ）を式 (3.6) に代入すると得られる。

次に、式 (3.7) による非線形の濃度階調変換について考える。

$$\frac{X_2}{255} = \left(\frac{X_1}{255} \right)^\beta \quad (3.7)$$

ここで、濃度値 X_1 、 X_2 を 255 で割っているのは正規化を行うためである。濃度階調変換で、 β の値は観察しやすい再生像が得られるように決めるが、式 (3.5) は式 (3.7) において $\beta=2.0$ とした場合である。

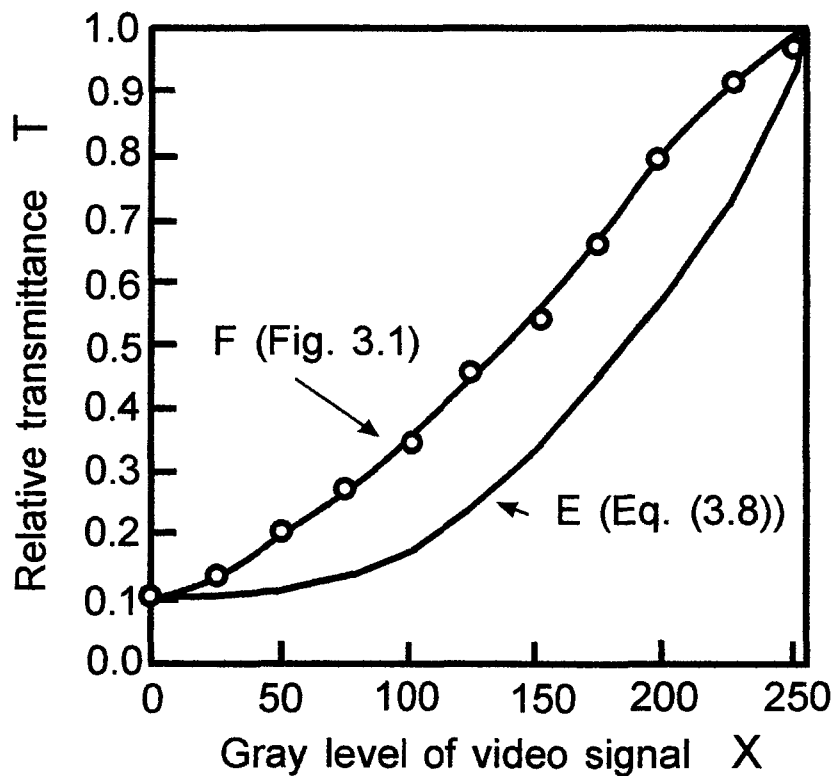


図 3.9 濃度階調変換も含めた光強度変調特性

式 (3.7) の X_2 を式 (3.6) の X に代入した後、 X_1 を X に置き換えると、濃度階調変換を含めた相対光透過率を表す式 (3.8) を得る。

$$T = \frac{A}{255^{\gamma(\beta-1)}} X^{\beta\gamma} + B \quad (3.8)$$

すなわち、濃度値 X に対する光強度変調特性は $\beta\gamma$ の積で決まる。

式 (3.8) で表される光強度変調特性を図 3.9 の曲線 E に示す 但し、式 (3.8) の A , B , β , γ に、前述した数値を用いている。比較のため、図 3.1 の光強度変調特性を曲線 F に示す。曲線 E に示す光強度変調特性の場合、画像の明るい（濃度値 X が大きい）箇所で高コントラストになり、見やすい画像が得られる。これは、図 3.8(a) の原画で顔の部分に対応すると考えられる。

3.4.3 輪郭線画像のホログラフィックステレオグラム

中間調表示性能の低い液晶テレビは 2 値画像の表示が行いやすく、ホログラフィックステレオグラムからも高コントラストの再生像を得やすい。それ故、2 値画像の一つである輪郭線画像のホログラフィックステレオグラム作製を試みた。輪郭線抽出に画像処理でよく使用される微分オペレータを用いる。実験では、ロバーツ（Roberts）のフィルタ

$$f = |A - D| + |B - C| \quad (3.9)$$

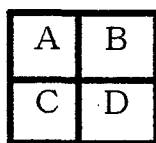
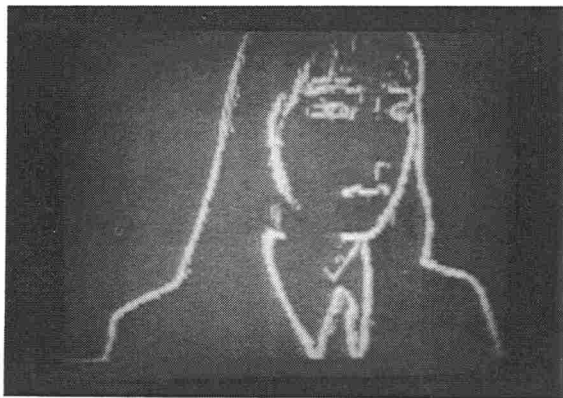
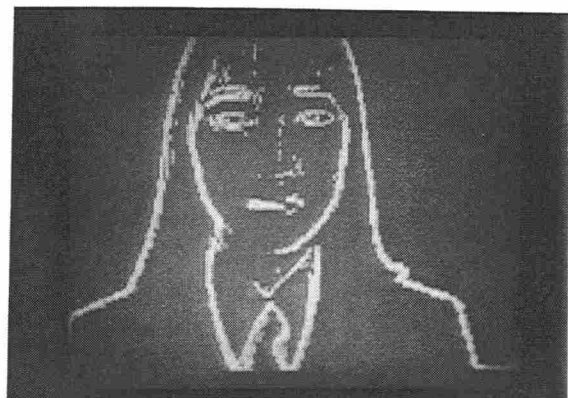


図 3.10 注目画素近傍の 2×2 画素



(a) 20 番目の原画



(b) 55 番目の原画

図 3.11 モニタ用の液晶テレビに表示した輪郭線画像



(a) 左側



(b) 正面

図 3.12 再生した輪郭線画像

を 100 枚の原画に作用させて、その後に 2 値化した。式 (3.9) に用いる画素の関係を図 3.10 に示す。

輪郭線抽出を行った 100 枚の原画の中で、20 番目と 55 番目の原画を図 3.11(a), (b) に示す。人物の少し左側と正面からの再生像を図 3.12 (a), (b) に示す。微分オペレータと 2 値化処理で得た輪郭線は不連続であり、両眼で観察して対応点のある場所のみ立体視が可能である。再生像を肉眼で観察した場合の立体感とは、図 3.6 よりも図 3.12 の方が強く感じられた。これは 2 値画像において、左右の対応点を両眼で認識しやすいためであると考えられる。

3.5 両眼立体視のシミュレーション

3次元画像の評価を行うため、ホログラフィックステレオグラム再生像の立体視効果をコンピュータシミュレーションで確認した。人物は複雑な形状をしているが計算を簡単化するため、人物の断面を円状と仮定した。この円が液晶テレビに1次元図形として表示された場合に、第6章の6.4.1で述べる方法に従って液晶テレビ再生像（拡散スクリーンに投影された画像）の位置を求めた。次に、第2章の2.2.4で述べたように両眼で二つの再生像に含まれる対応点を観察するとして、立体視像の位置を求めた。その結果を図3.13に示す。なお、立体視像は観察可能な範囲、すなわち円の約半周分について計算を行った。ここで、ホログラフィックステレオグラムから観察者までの距離は20cm、再生光源位置（記録光源位置と同じ）からホログラフィックステレオグラムまでの距離は18.5cmとした。

例えば、図3.13で半円の下端の立体視点は、37番目と53番目の要素ホログラムから再生される液晶テレビ画像の対応点を両眼で観察して得られる。立体視像は再生光源と液晶テレビ再生像の中間付近に得られるが、その深度はこの

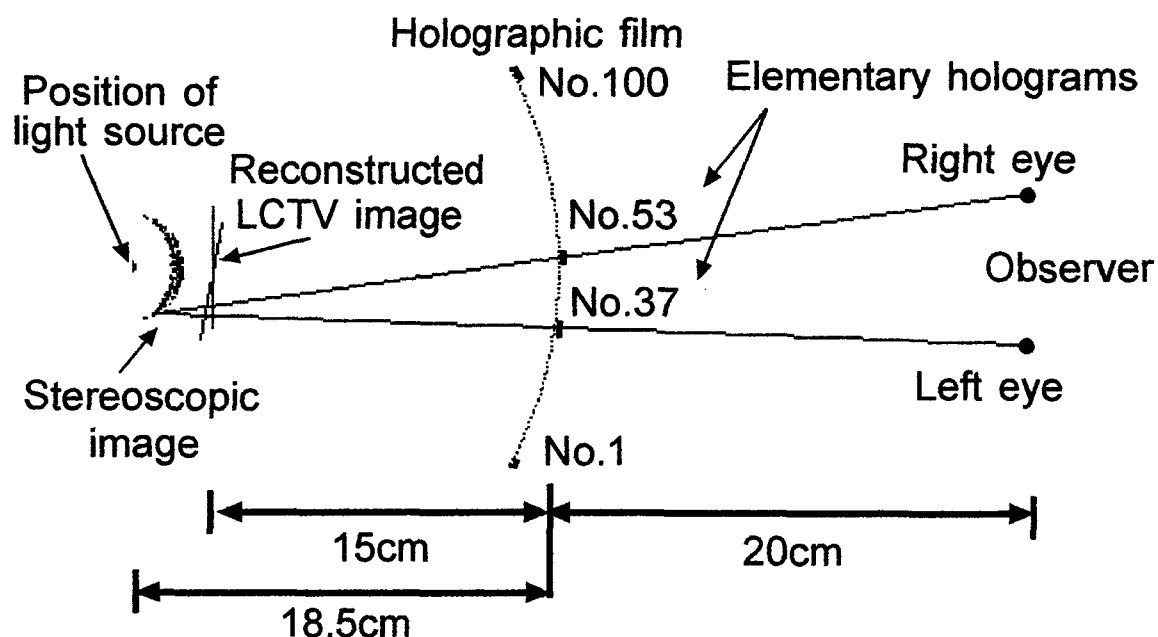


図 3.13 両眼立体視のコンピュータシミュレーション

間隔の約半分程度，すなわち 2cm 弱である。それ故，ホログラフィックステレオグラムから 20cm 離れた位置で再生像を観察した場合，立体視効果はやや浅い感じである。再生像は完全な円状でなく楕円状で歪みを含むが，再生像の歪みについては既に報告されている⁴⁾⁹⁾。

3.6 結言

実際の被写体（人物）を CCD テレビカメラで撮影した原画を用いて，小形液晶テレビの空間光変調特性がホログラフィックステレオグラムの再生像へ与える影響について調べた。

液晶パネルの画素数が縦 146 × 横 160 画素でも，合成したホログラフィックステレオグラムから被写体の特徴を十分に表現できる再生像を得られることがわかった。しかし，液晶パネルの中間調表示が約 5 段階の場合，レーザ光を照射して得たホログラフィックステレオグラムの再生像は，中間調表示に関して高画質でなかった。

液晶パネルの空間光変調特性の影響で，ホログラフィックステレオグラムの再生像が全体的に明るい（撮影画像が白っぽくなる）場合は，入力した原画に非線形の濃度階調変換を行えば画質を改善できることがわかった。そして，この画質改善は，濃度階調変換と液晶パネルの光強度変調特性の両方を考慮した光強度変調特性に基づいて説明できることを示した。

なお，肉眼でホログラフィックステレオグラムの再生像を観察した場合の立体感は，テレビカメラから入力した中間調を含む画像よりも 2 値化した輪郭線画像の方が，得やすかった。

第4章 ホログラフィックステレオグラムの実時間記録^{5 7) - 6 1)}

4.1 緒言

第2章で述べたように、空間光変調器として液晶テレビを用いて合成過程をコンピュータで制御し、記録材料としてフィルムを使用するとホログラフィックステレオグラムの作製を1時間以内で行える。しかし、ホログラム記録に銀塩感光材料であるホログラム用フィルムを用いると、湿式現像処理を必要として手間がかかるとともに、作製時間が長くなる問題点がある。

化学的な湿式現像を必要としない記録材料として、フォトクロミックス^{6 2)}、BSO結晶^{6 3)}、サーモプラスチック^{6 4) - 6 8)}などが研究されている。前述した問題点に対処するため、これらの記録材料の中でサーモプラスチックを使用して、ホログラフィックステレオグラムの実時間記録を試みる。

本章では、空間光変調器として液晶テレビを用い、記録材料にサーモプラスチックを用いたホログラフィックステレオグラムの合成方法を提案する。液晶テレビとサーモプラスチックは、両方とも電氣的に制御が行える。このため、提案する方法では、ホログラフィックステレオグラム合成から現像処理までの過程をコンピュータで制御できる利点がある。最初に、サーモプラスチックの構造について述べた後、ホログラフィックステレオグラム合成システムの構成とその仕様および性能について述べる。そして、2種類の液晶テレビを用いて作製したホログラフィックステレオグラムの再生像について検討する。

4.2 サーマプラスチック感光材料

サーモプラスチック^{6 9)}を用いると、熱可逆性樹脂の表面に帯電された電荷の静電引力と、熱可逆性樹脂の持つ生来のフロスト変形を利用して樹脂を任意に変形させて、ホログラム干渉縞を記録することができる。サーモプラスチック感光材料として、図4.1に示す積層構造のものが主に使用されている。すなわち、透明導電体としてのネサ膜、光導電体としての有機半導体層、熱可逆性

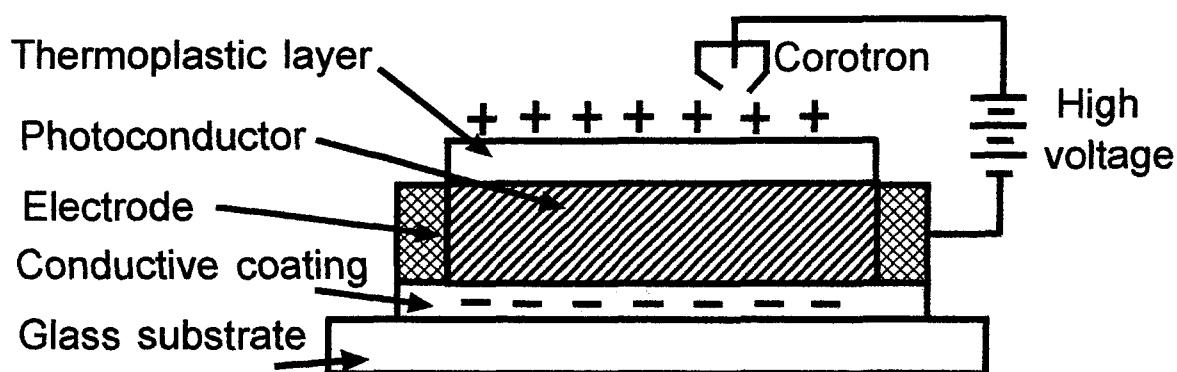


図 4.1 サーマンプラスチック感光材料

樹脂としてのサーモプラスチック層が、ガラス基板上に3層構造になっている。サーモプラスチック層として、スタベライトエステル10などのエステル樹脂が使用される。

ホログラムを記録する場合、熱可逆性樹脂を軟化する手段に熱を用いる加熱軟化法と、溶剤蒸気を用いる溶剤蒸気軟化法がある⁶⁾⁹⁾。溶剤蒸気軟化法を用いると加熱軟化法よりも高画質の再生像が得られるが、溶剤蒸気の排出機構を必要とするため、今回は使用しない。加熱軟化法にはコロナ帯電と露光を同時に行う同時法と、コロナ帯電と露光を逐次的に行う逐次法がある。今回使用する装置は逐次法を用いている。サーモプラスチックへのホログラム干渉縞の記録からその消去までは、以下の手順で実行する⁷⁾⁹⁾。

- (1) コロナ帯電・・・光に対する感度を持たせるため、サーモプラスチックを帯電する。これは図4.1に示すように、サーモプラスチック表面を移動する電極 (Corotron) と透明導電体であるネサ膜に、高電圧を印加することで可能となる。
- (2) 露光・・・・・・・・ホログラムの干渉縞を記録する。
- (3) 再コロナ帯電・・・潜像を作るため、サーモプラスチックに再帯電する。
- (4) 加熱軟化・・・・・・・・パルス電流印加で生じたジュール熱で潜像を現像する。
- (5) 加熱消去・・・・・・・・再使用のため、加熱して記録像を消去する。

本研究では、サーモプラスチックホログラム記録装置（富士写真光機（株））を、ホログラフィックステレオグラムの作製に用いた。使用したサーモプラスチックプレート（以下、単にサーモプラスチックと記す）は 76mm × 76mm の大きさで、40 回程度まで再使用することができる。ホログラムは位相型となり、最適空間周波数（約 500 本/mm）での回折効率は約 10% である。なお、高電圧を印加しない状態でサーモプラスチックは光に感光しないため、明るい場所で未感光の乾板を取り扱える利点がある。しかし、製品として入手可能なサーモプラスチックは、この素子の電氣的制御ユニットが高価であるため、感光材料としてあまり普及していない。

サーモプラスチックホログラム記録装置において、サーモプラスチックとそのホルダー部を図 4.2 (a), (b) に、手動スイッチとリモートコントロールを含む

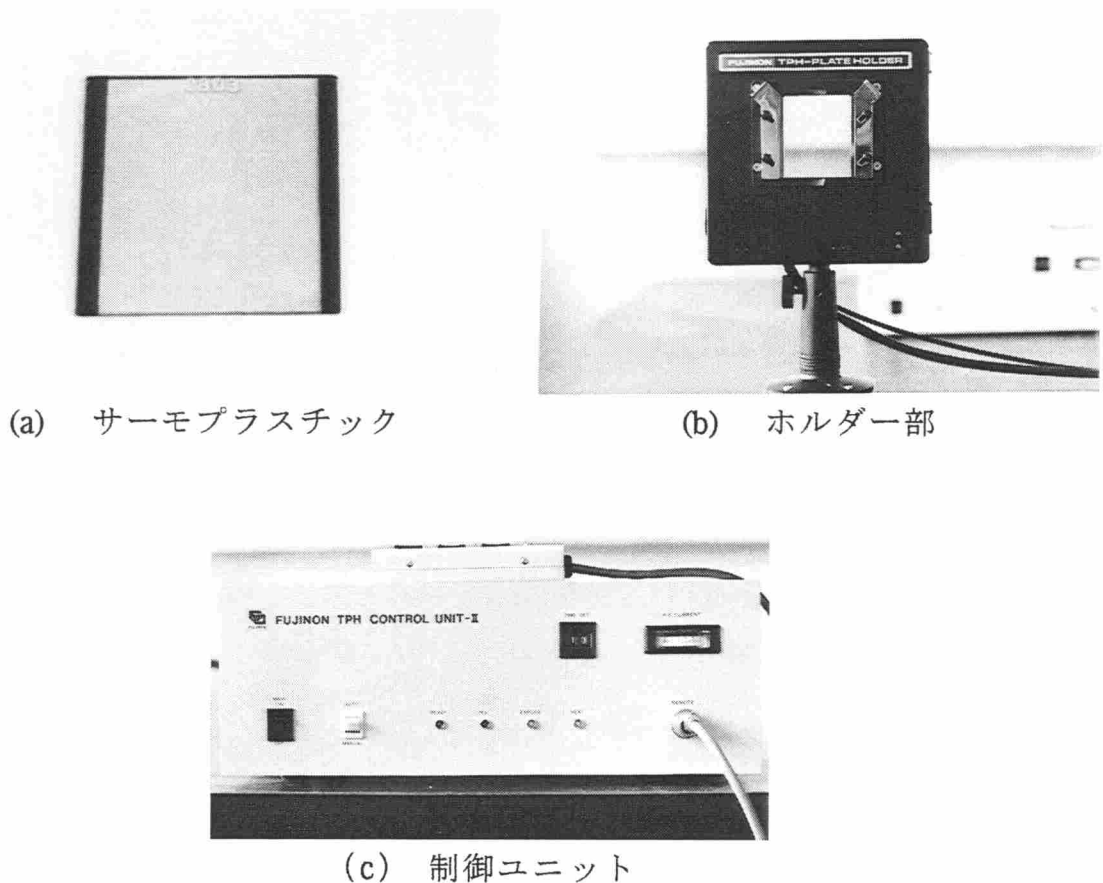


図 4.2 サーモプラスチックホログラム記録装置

制御ユニットを図 4.2(c) に示す。なお，サーモプラスチックホログラム記録装置をコンピュータで制御するために，インターフェース回路を開発して制御ユニットに接続している。

4.3 ホログラフィックステレオグラムの作製

本章で提案するホログラフィックステレオグラム合成システムの設計目標，原画生成，合成システムの構成，合成手順，再生像の画質などについて述べる。

4.3.1 設計目標

① 形状は平面形とする。これは，サーモプラスチック感光材料にガラス基板を用いているからである。

② 空間光変調器として第 2 章と第 3 章の実験で使用した液晶テレビを用いるが，実験では液晶パネルの中央部（ 73×80 画素）のみを用いる。これは，液晶パネル全面（ 146×160 画素）にレーザ光を照射すると強度が弱くなり，サーモプラスチックにホログラムを記録できないためである。

③ 原画枚数は 35 枚以下とする。これは，サーモプラスチックの横幅 70mm（76mm で電極部分を除く）を，スリット幅 2mm で割れば得られる。なお，②で述べたように空間光変調に用いる画素数が少ないため，原画の解像度は 128×128 画素とする。

④ 一つのホログラフィックステレオグラムの作製と再生は実時間（ここでは数分間を意味する）で行えるようにする。

4.3.2 原画生成

ホログラフィックステレオグラムの作製に用いる多視点原画は，第 2 章で述べた光線追跡法で生成する。実験では，図 4.3 に示す簡単な物体（平面上の球）をプリミティブを用いて定義した。球と平面の関係を明確にするため右上方に光源を配置し，球の影を平板上に投影する。ホログラフィックステレオグラム

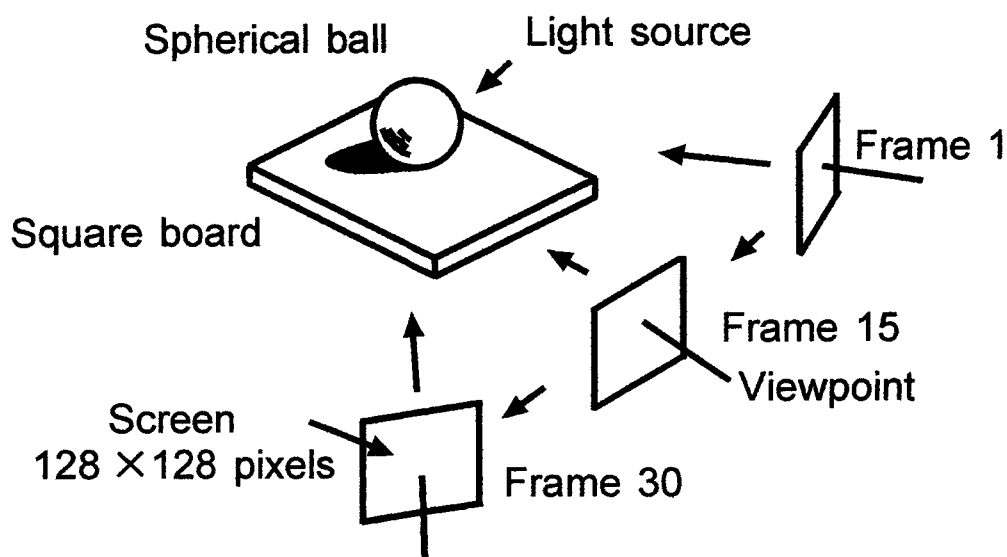


図 4.3 原画生成のモデル

の作製に用いるサーモプラスチックは平面形なので、コンピュータグラフィックス画像の生成時にスクリーンと視点を水平方向に移動して、約 30° の範囲で 30 枚の原画を生成した。なお、平面形ホログラフィックステレオグラムの再生像歪みを補正するため、原画の生成において球を少し上下方向に長くして、フットボールの形状に変形して計算した。

4.3.3 合成システム

サーモプラスチックを記録材料として用いたホログラフィックステレオグラム合成システム^{57) - 59)}の構成を図 4.4 に、合成光学系の写真を図 4.5 に示す。また、システムの仕様および特性を表 4.1 に示す。

合成システムの基本構成は第 2 章の図 2.12 と同一であるが、サーモプラスチックは平面形なので、それを移動させるステージを使用している。また、液晶テレビと対物レンズ A の間に置いたレンズ C は、物体光強度を調整してサーモプラスチックの最適露光条件を満たすように、レーザ光強度を調整するために用いている。

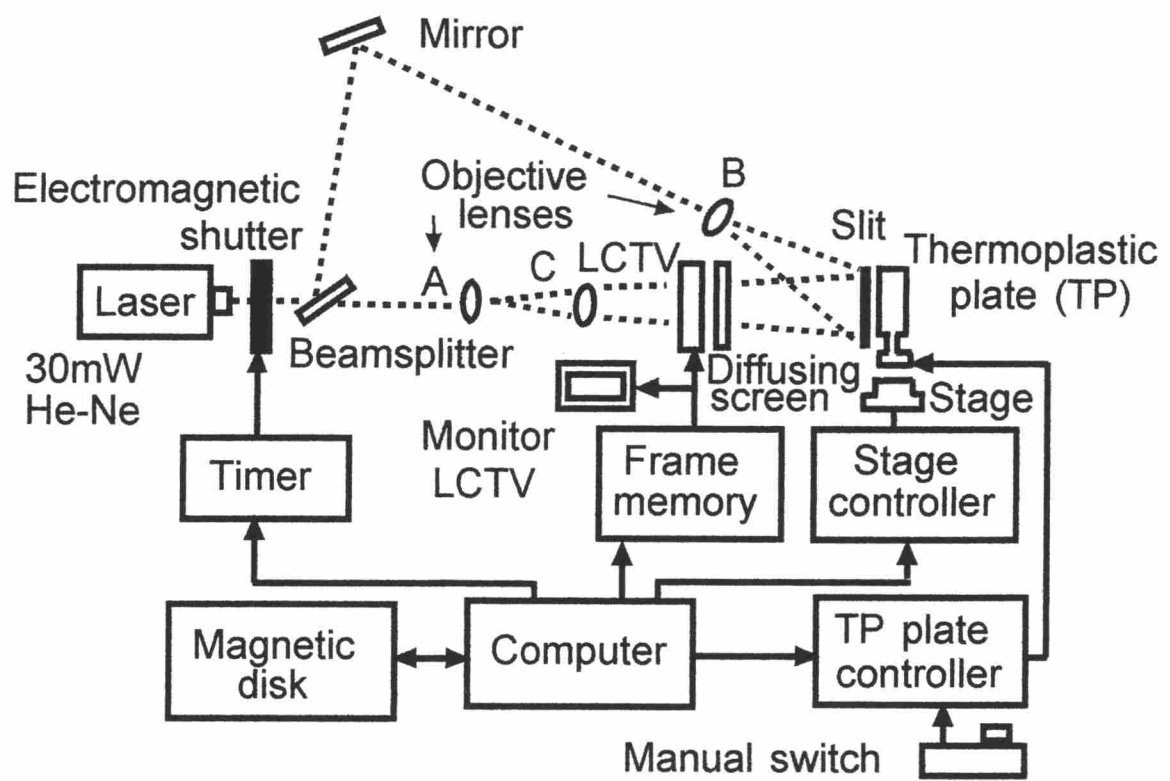


図 4.4 ホログラフィックステレオグラム合成システムの構成図

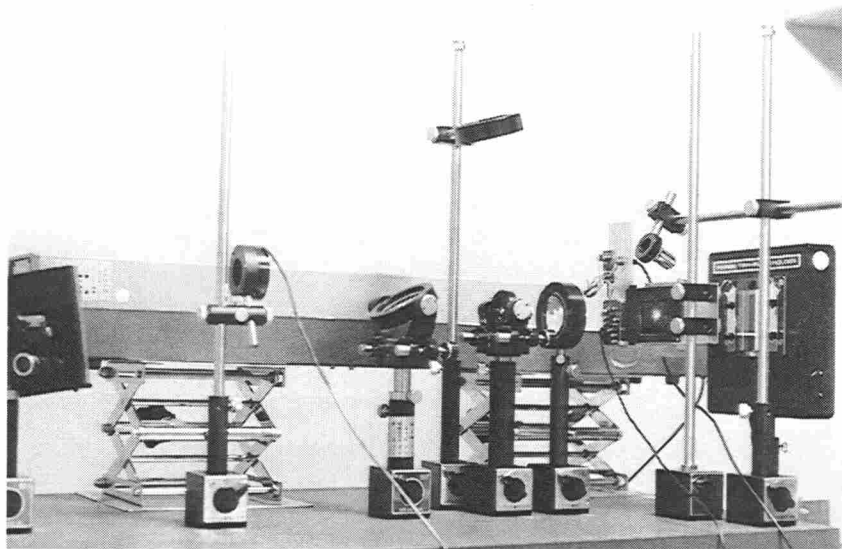


図 4.5 合成光学系

表 4.1 ホログラフィックステレオグラム合成システムの仕様および特性

レーザ	種類	He-Ne
	波長	6328 Å
	出力	30mW
原画	生成法	光線追跡法
	解像度	128 × 128 画素
	階調数	8 ビット
	原画枚数	30 枚
液晶テレビ (液晶テレビは 表 2.3 と同様)	型式	CITIZEN WIDE-3.5
	サイズ	53.7mm × 71.7mm
	全画素数	縦 146 × 横 160
	空間光変調用画素数	縦 73 × 横 80
	中間調表示	約 4 段階
サーモプラスチック	素子	単純マトリックス TN 型
	サイズ	76mm × 76mm
	帯電時間	15 秒
	現像時間	2.5 秒
	冷却時間	10 分
	繰り返し使用	約 40 回
	スリット幅	2.0mm
	露光時間	0.58 秒/フレーム
HS 合成	合成時間	約 100 秒

表 4.2 ホログラフィックステレオグラム合成の手順

手順	動作
(1)	サーモプラスチックの帯電 (15 秒)
(2)	原画を液晶パネルに表示
(3)	1 枚の原画をサーモプラスチックに露光 (0.58 秒)
(4)	移動ステージによりサーモプラスチックをスリット幅だけ移動
(5)	30 枚の画像に対して (2) ~ (4) を繰り返す (約 100 秒)
(6)	サーモプラスチックの再帯電 (15 秒)
(7)	ジュール熱による潜像の現像 (2.5 秒)
(8)	再生像の観察
(9)	ジュール熱による記録像の消去 (3.0 秒)
(10)	再使用のためにサーモプラスチックを冷却 (10 分)

4.3.4 合成手順

ホログラフィックステレオグラムの合成手順を表 4.2 に示す。最初の帯電で、サーモプラスチックに高電圧 (5 ~ 7KV) を約 15 秒間加える。この帯電を複数回繰り返せば、サーモプラスチックの光に対する感度を高められる。手順の 6 番目で、高電圧による再帯電を行うのは、サーモプラスチックに潜像を作るためである。

サーモプラスチックに合成したホログラフィックステレオグラムからの再生像は、図 4.6 の光学系で得ることができる。すなわち、図 4.4 の合成光学系でサーモプラスチックの前方のスリットを取り除き、対物レンズ A に入射するレーザ光をシャッタで遮る。その後、再生像を観察しながら、手動スイッチを操作して約 0.3 秒間のパルス電流を数回だけ流して再加熱する。この操作は表 4.2 に示す手順の 7 番目に対応する。この過程で手動操作を行うのは、パルス電流の最適な印加期間が素子ごとに異なるためである。

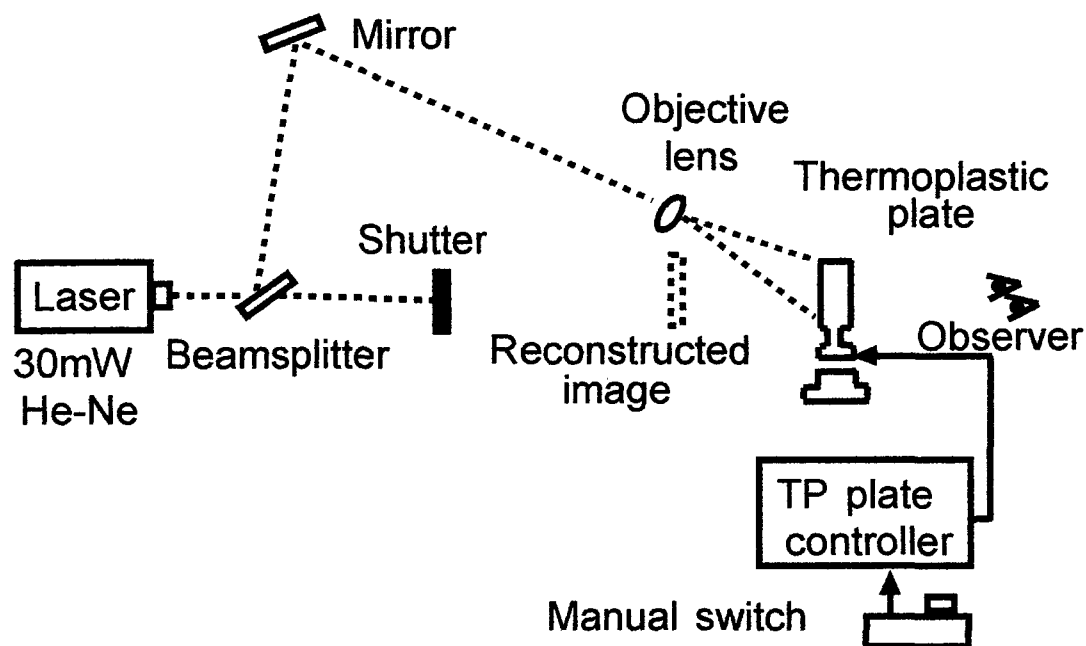


図 4.6 再生光学系

なお、ホログラフィックステレオグラムの合成からレーザ光による虚像の再生までを、実時間（約 2 分間）で行えることが、このシステムの特徴である。

4.3.5 画像再生の結果と検討

光線追跡法で生成した原画をモニター用液晶テレビに表示したものを、図 4.7(a), (b), (c) に示す。実際のコンピュータグラフィックス画像を示すため、4.3.2 で述べた再生像の歪みを少なくする補正は、これらの画像に適用していない。図 4.7(d), (e), (f) は、第 2 章で述べた液晶テレビを用いて合成したホログラフィックステレオグラムからの再生像の拡大写真である。これらの写真は、三つの異なった方向（左、中央、右）から撮影しているので、球の影は変化している。図 4.4 のホログラフィックステレオグラム合成光学系で拡散スクリーンを置いた場所（液晶テレビの投影像の位置）に、再生像（虚像）が得られる。両眼で観察すれば立体視像が得られる。垂直方向の観察視域は約 25° である。

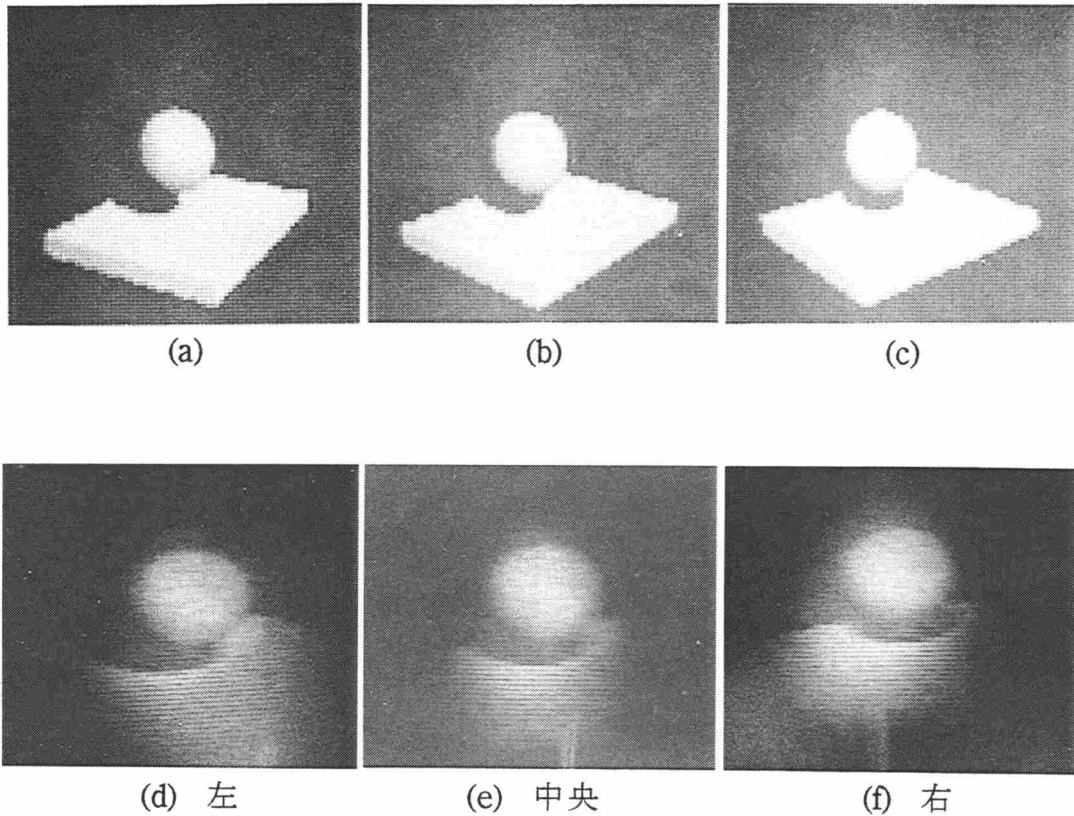


図 4.7 モニタ用液晶テレビに表示した原画と再生像

再生像で、球の下にある四角板の周辺が再生されていない。これはホログラフィックステレオグラム合成の光学系において、対物レンズで上げた参照光と物体光の強度がサーモプラスチック表面において一様でなく、ホログラムの干渉縞がサーモプラスチックに最適に記録されなかったためである。原画全体をサーモプラスチックに記録するには、以下の方法が考えられる。最初の方法はレンズなどの光学系はそのままにして、空間光変調器として小形の高密度液晶パネルを用いることである。他の方法は空間光変調器として用いる液晶テレビはそのままにして、液晶パネルを照射するレーザ光を上げることである。この場合、大出力のレーザを必要とする。なお、再生像で球は少し歪んでいるが、これは原画の補正が完全でないためである。

再生像の中間調は、液晶テレビの中間調表示性能に依存する。図 4.7(d), (e), (f) の中間調は、おそらく 4 段階以下である。もし、液晶プロジェクタ用の液晶パネルを空間光変調器として用いたならば、より多くの中間調を表示することができると考えられる。

実験に用いたサーモプラスチックは繰り返し使用できるが、使用回数が増える（例えば、20 回以上）と回折効率が減少する。使用回数が 20 回を越えた場合は、高電圧を複数回（例えば、3 回）加えてコロナ帯電を行う。その結果、帯電イオンが増加して光に対する感度が高くなり、再生時にサーモプラスチックの回折効率は少し高くなる。なお、1000 回以上も再使用することが可能なサーモプラスチックが市販されているが、専用の制御ユニットが別に必要なため、今回の実験で使用していない。

30 枚の原画のサーモプラスチックへの記録と画像再生に約 2 分を要す。そして加熱消去後、再使用のための冷却に約 10 分を要す。それ故、約 15 分間隔でホログラフィックステレオグラムの作製を行えることは、今回提案した合成システムの特徴である。サーモプラスチックを用いると必要なホログラム像のみをハードコピー形式で保存し、不必要なホログラム像を消去できることも特徴の一つである。

4.4 小形液晶テレビを用いたホログラフィックステレオグラム作製

システム^{60), 61)}

次に、画質を改善するため、空間光変調器として小形液晶テレビを用いた実験結果について述べる。

4.4.1 合成システムの変更点

図 4.7 に示した実験結果で、ホログラフィックステレオグラムから原画全体が再生されない問題点があった。これは、表 2.3 の仕様の液晶テレビパネルにレーザ光を拡大して照射すると、レーザ光の強度がサーモプラスチック表面で

弱くなることに起因すると考えられる。そこで、表 3.1 に示した仕様の小形液晶テレビを用いて、原画全体の記録を試みた。なお、ホログラフィックステレオグラムの合成手順は表 4.2 と同一である。合成に用いる 128×128 画素の原画は、液晶パネル中央部（ 80×80 画素程度）の領域に表示している。

4.3 で述べた実験からの変更点を以下に示す。液晶パネルを照射するレーザー光を絞って、サーモプラスチック表面で光強度を強くした。サーモプラスチックに対する最初のコロナ帯電を 4 回として、光に対する感度を高めた。これは、製造して 1 年半程度を経過したサーモプラスチックを用いたため、未使用のサーモプラスチックで光感度が低下していたためである。

4.4.2 画像再生の結果と検討

最初に、液晶テレビに表示した 2 次元的な画像をサーモプラスチックにホログラムとして記録して、再生像の検討を行った。図 4.8 はコンピュータグラフィックス (CG) 画像、図 4.9 はテレビカメラで入力した人物像の再生像である。いずれも、表示できる中間調は少ないが比較的画質の良い再生像を得ることが

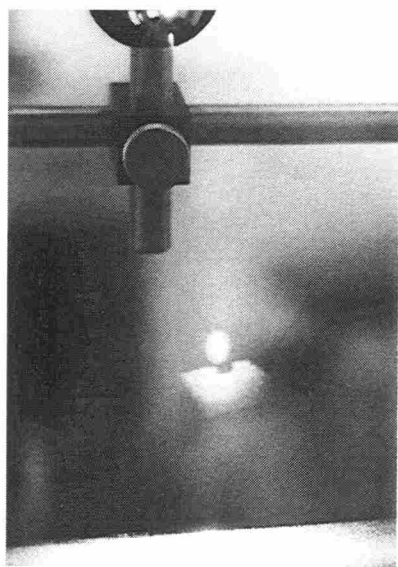


図 4.8 CG 画像（2 次元）の
再生像



図 4.9 人物像（2 次元）の
再生像

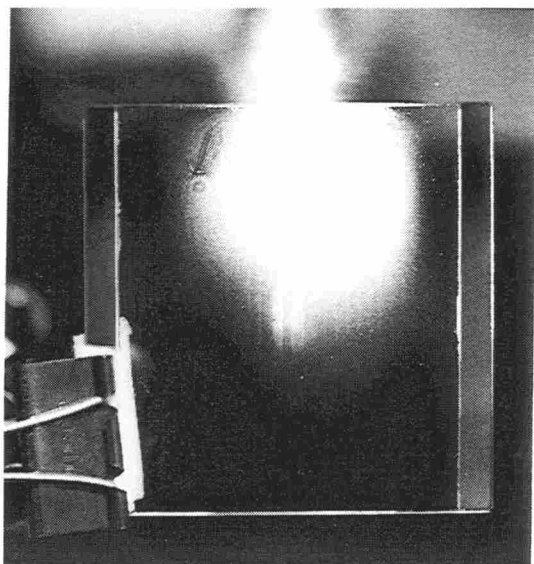


図 4.10 CG の HS を合成した
サーモプラスチック

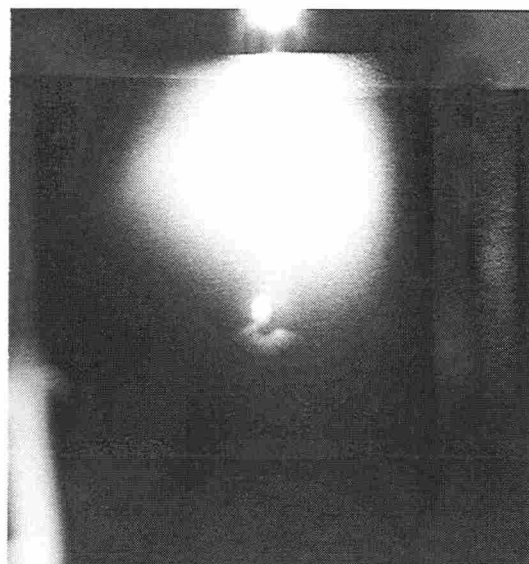


図 4.11 図 4.10 からの再生像



(a) 中央



(b) 右側

図 4.12 再生像の拡大写真

できた。次に、少しずつ視点を変えて生成したコンピュータグラフィックス画像と、第3章の人物像の原画を用いてホログラフィックステレオグラムの合成を試みた。各々の原画数は30枚である。図4.10はコンピュータグラフィックス画像をホログラフィックステレオグラムとして合成したサーモプラスチックであり、図4.11は図4.10からの再生像である。図4.12(a), (b)は、再生像を中央および右側から撮影した写真を拡大したものである。球の下の四角板全体が再

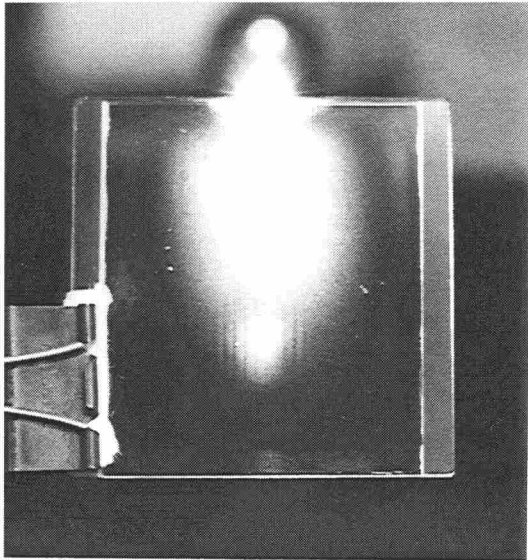


図 4.13 人物の HS を合成した
サーモプラスチック

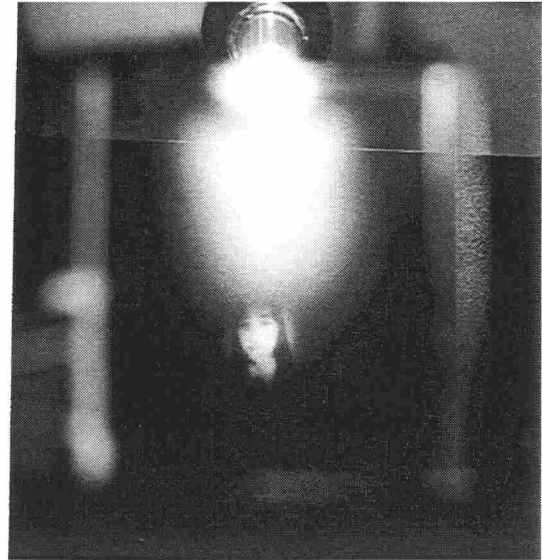


図 4.14 図 4.13 からの再生像

生されていないが，図 4.7(d), (e), (f) の実験結果と比較して，画質の良い再生像が得られている。図 4.13 は人物像をホログラフィックステレオグラムとして合成したサーモプラスチック，図 4.14 は図 4.13 からの再生像である。人物像については原画の解像度が低いため，画質の良い再生像が得られなかった。再生像の中間調は，記録材料にホログラム用フィルムを用いる場合よりもやや少なく，硬調の感じになる傾向があった。

4.5 結言

単純マトリックス TN 型液晶パネルを空間光変調器として用いるとともに，記録材料に湿式現像処理を必要としないサーモプラスチックを用いて，実時間で平面形ホログラフィックステレオグラムの作製が可能なシステムの構成について述べた。原画枚数が 30 枚の場合，このシステムを用いてホログラフィックステレオグラムの合成から画像再生までを約 2 分間で行えた。加熱消去後の冷却時間を含めると，約 15 分間隔でホログラフィックステレオグラムを作製することができた。

サーモプラスチックは、40回程度まで繰り返し使用することができた。使用回数が多くなると、光の回折効率が低下して再生像の明るさは低下した。この場合、最初の高電圧印加による帯電回数を4回程度にすると、明るい再生像が得られた。また、製造して長期間を経たサーモプラスチックは帯電回数を4回程度に増やすと、明るい再生像が得られることがわかった。

再生像の画質は、記録材料にホログラム用のフィルムを用いた場合と比較して、やや硬調の感じになる傾向があった。

第5章 一視点から撮影した画像からの多視点原画の生成^{71) - 73)}

5.1 緒言

3次元画像の表示に用いるホログラフィックステレオグラムの作製では、被写体を多視点から撮影した原画を必要とする。原画撮影のため、視点の数だけテレビカメラなどの撮影機を設置するか、撮影機を一定間隔で移動させて原画を撮影するのは効率的な方法でない。このため、少数の画像から被写体の3次元形状を求め、撮影した画像をその形状にテクスチャマッピングして、コンピュータグラフィックスの手法で多視点原画を生成する方法が検討されている¹³⁾。この場合、3次元形状を求めるのに、例えば、ステレオ視の条件で撮影された2枚の画像が用いられている。

本章では、表示を試みる被写体の周囲で多数の原画を撮影できない場合に、一視点から撮影された1枚の画像から多視点原画を生成する手法を提案する。ここでは、被写体の形状が簡単で、既知の条件からその3次元モデルを作成できる場合について考える。なお、本章で述べる手法は第6章と第7章の基礎となるものである。

特殊な例であるが、実験に用いる被写体として地球の北半球を選ぶ。この場合、一視点から撮影された画像は静止気象衛星ひまわり画像（ひまわり画像と記す）となる。以下、視点移動計算による多視点原画の生成法、気象衛星ひまわり画像受信システムから1枚の北半球画像を取り出す方法、北半球を対象とした多視点原画の生成結果について述べる。そして、実際にホログラフィックステレオグラムを作製して、この手法の有効性について検討する。

5.2 視点移動による多視点原画の生成法

ここでは、一視点から撮影されたひまわり画像に視点移動操作を行って、多視点原画を生成する手法について述べる。また、視点移動角度の概算値を求める方法についても述べる。

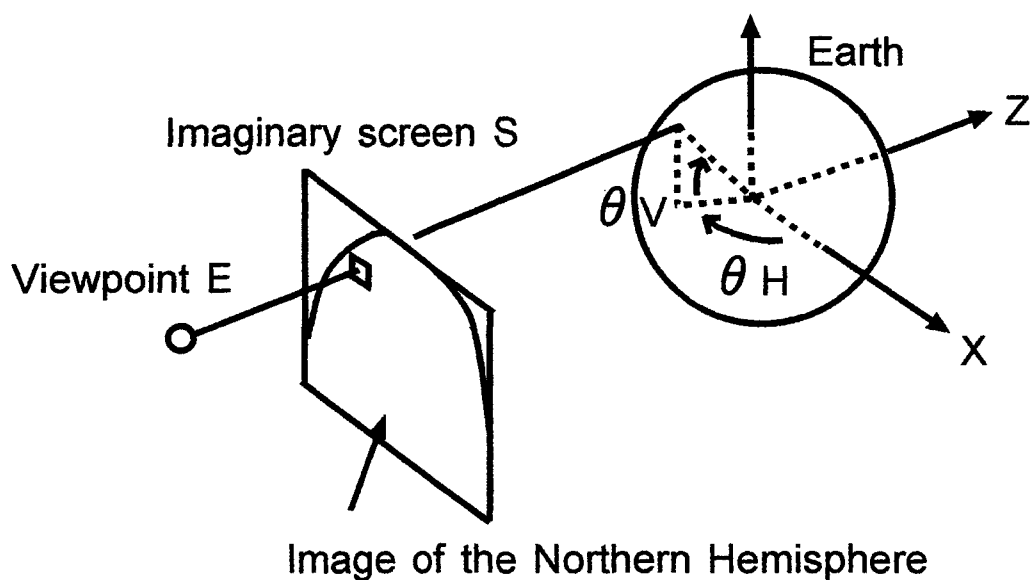


図 5.1 地球の透視投影

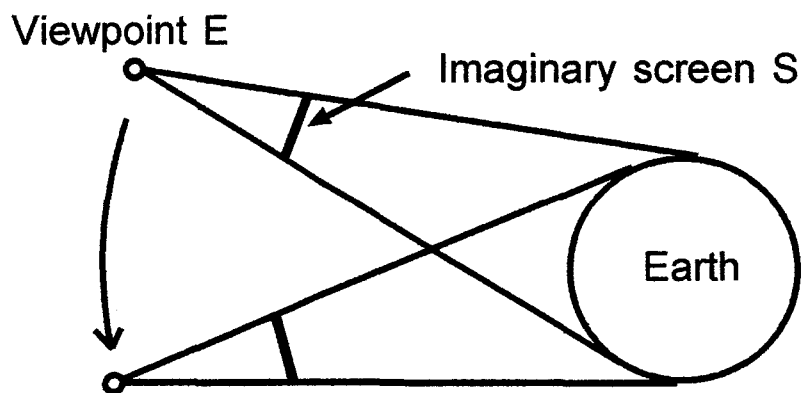


図 5.2 北半球に対しての視点移動

5.2.1 ひまわり画像の視点移動操作

ひまわり画像は、地球の北半球を透視投影した画像であると考えることができる。すなわち、図 5.1 に示す仮想的なスクリーン S に投影された画像と見なすことができる。なお、視点 E の位置は気象衛星ひまわりの位置とする。ここで、球状の 3 次元地球モデルにおける緯度 θ_V と経度 θ_H に正しく対応するように逆投影を行って、ひまわり画像を地球モデルにテクスチャマッピングする。その後、図 5.2 に示すようにスクリーン S を 3 次元地球モデルの周囲で少しず

つ移動させて、透視投影法で地球の北半球をスクリーンに投影すれば視点移動を行った多数の原画を得ることができる。

なお、5.3.4で述べるように、ひまわり画像を用いて地球モデルにテクスチャマッピングが可能な範囲は、図 5.1 で $\theta_v=0^\circ \sim 70^\circ$ 、 $\theta_H=10^\circ \sim 170^\circ$ 程度である。それ故、透視投影法では、この範囲の画像のみを用いて原画生成を行う。

5.2.2 最適な視点移動角度

北半球のホログラフィックステレオグラム合成に用いる多視点原画の生成において、原画間の視点移動角度を適切な値に設定しないと、要素ホログラムから再生される画像が不連続になる。それ故、視点移動角度の概算値を図 5.3 に示す関係から求める。図 5.3 は、要素ホログラムを記録したホログラフィック

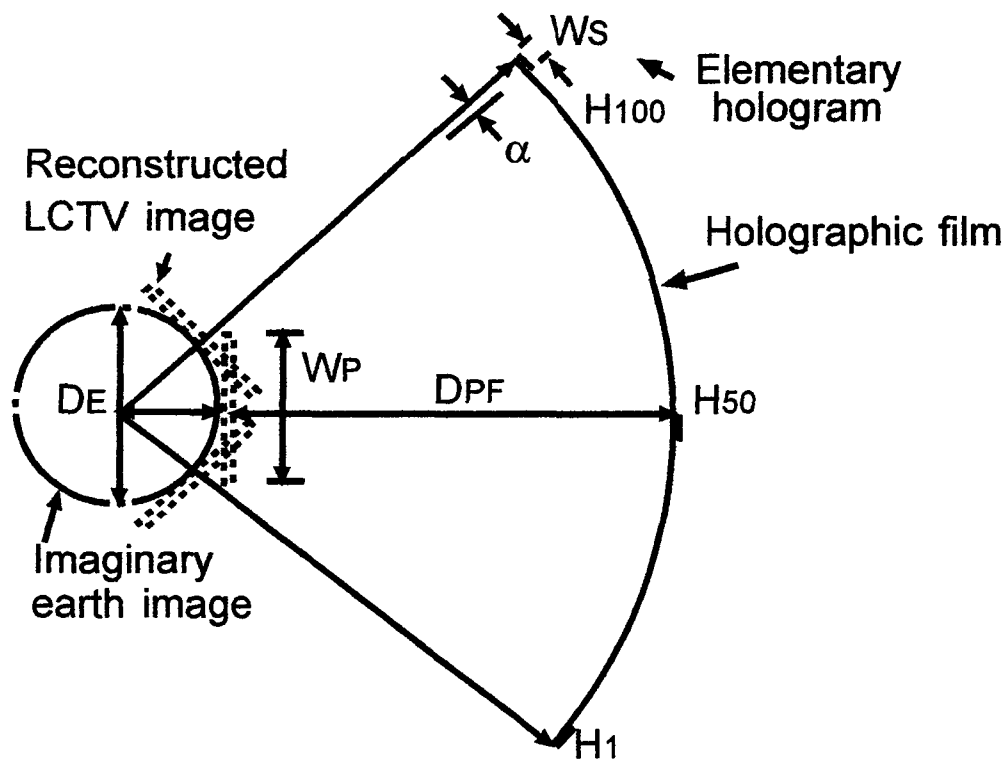


図 5.3 液晶テレビ再生像と視点移動角度との関係

ステレオグラムと、観察される再生像の位置関係だけを模式的に示したものである。なお、実際のホログラフィックステレオグラム合成は第2章の図2.12の光学系で行い、再生は図2.13の光学系で行う。図5.3では立体視の条件を含めていないが、第6章で述べる立体視シミュレーションの計算方法を用いても、原画間の視点移動角度は同程度の値を得ることができる。

いま、ホログラム用フィルムに H1 から H100 までスリット幅 W_s の要素ホログラムが 100 個記録され、これらが北半球のホログラフィックステレオグラムを構成しているとする。これらの要素ホログラムから再生される画像は、ホログラム記録時に液晶テレビに接して置かれた拡散スクリーンに、投影された液晶テレビの画像である。北半球のホログラフィックステレオグラムはレーザ光再生型なので、例えば、要素ホログラム H1, H50, H100 からは、DPF（ホログラフィックステレオグラム合成システムで、液晶テレビに接して置かれた拡散スクリーンとホログラム用フィルム間の距離）の位置にある幅 W_p の液晶テレビの再生像を観察することになる。これらの再生像は視点移動を行った 100 枚の原画に対応しているが、組み合わせて考えると等価的に直径 D_E の北半球画像を見ていることになる。 D_E の値は、液晶テレビに表示した北半球画像の経線の間隔を基準にして求めることができる。

北半球のホログラフィックステレオグラムにおいて、隣接する短冊状の要素ホログラムからの再生像が連続的であるように、合成に用いる原画の視点移動角度 α を決める必要がある。 α は一つの要素ホログラムを見込む角度である。図5.3からわかるように、ホログラフィックステレオグラムを含む円の一周に対する要素ホログラムの幅 W_s （スリット幅に等しい）の割合は、

$$2\pi \left(DPF + \frac{D_E}{2} \right) : W_s = 360 : \alpha \quad (5.1)$$

となる。実験に使用した装置での値、 $DPF=15\text{cm}$ 、 $D_E=7.5\text{cm}$ 、 $W_s=1.8\text{mm}$ の値を用いて式(5.1)の計算を行うと、 $\alpha \doteq 0.55^\circ$ となる。但し、 D_E の値は北半

球の一部を液晶テレビに表示した場合の北半球画像の直径である。 α の値は、第3章の式(3.4)で計算した値(0.57°)と同程度になる。

5.3 北半球画像のホログラフィックステレオグラム作製

前述した手法の有効性を確認するため、北半球を撮影した気象衛星ひまわり画像を用いてホログラフィックステレオグラムの作製を行う。

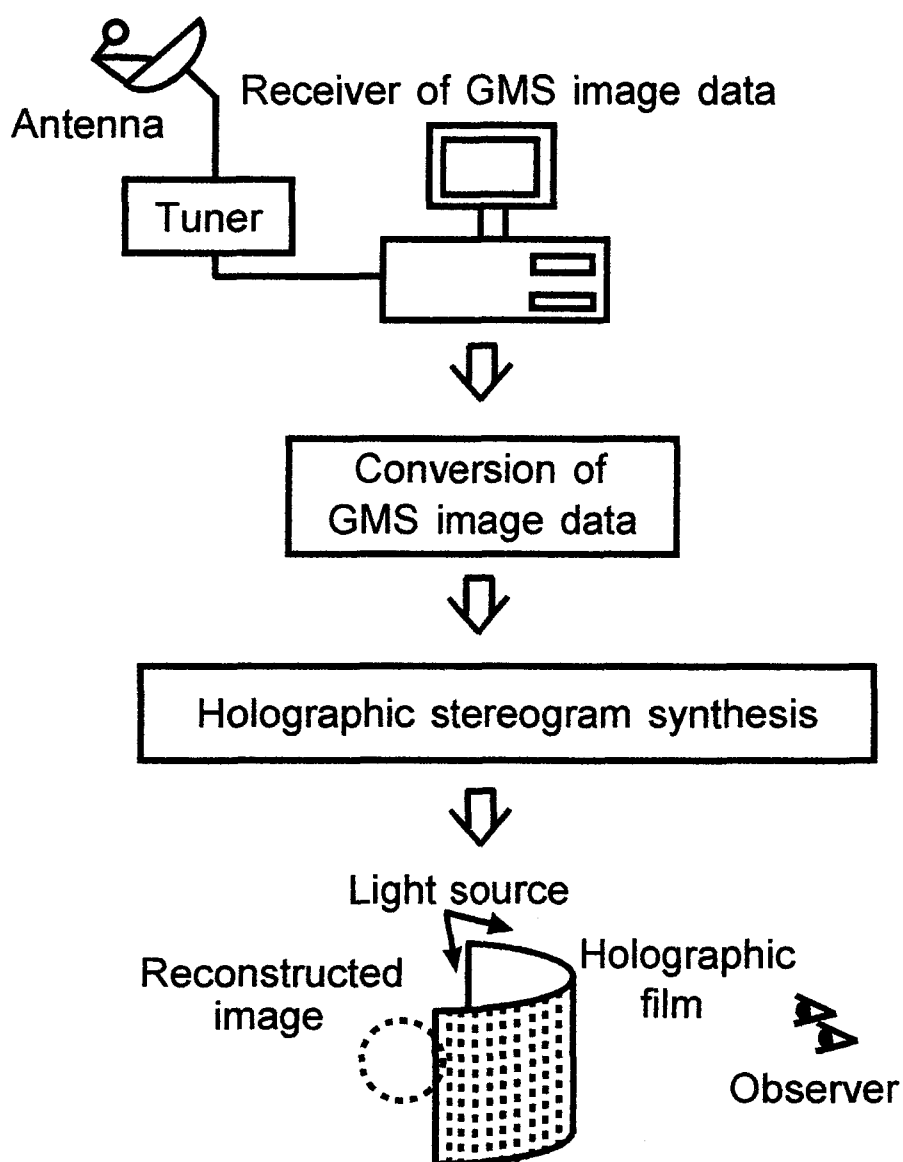


図 5.4 実験の流れ図

5.3.1 実験の手順

図 5.4 は、多視点原画の生成に用いるひまわり画像の受信から、画像再生までの実験全体の流れ図である。

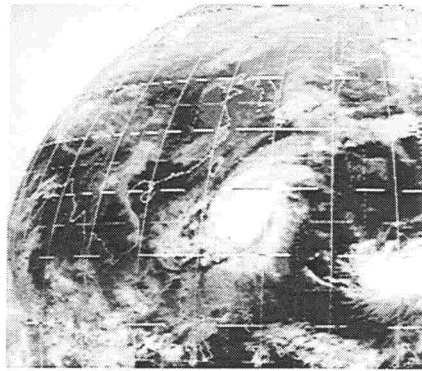
以下、この図に沿って実験の手順を簡単に説明する。なお、ひまわり画像をホログラフィの手法で表示することについて、雲の移動状態の観測を目的として検討はなされている⁷⁴⁾が、実験結果は報告されていない。

最初に、気象衛星ひまわり画像受信システムから 2 枚の画像を取り出して、1 枚の北半球画像を合成する。この 1 枚の北半球画像に対して 5.2 で述べた視点移動操作を行って、ホログラフィックステレオグラムの合成に必要な多視点原画を生成する。今回の実験で、原画数は試みに 100 枚とした。これは実験を行いやすくするため、ホログラフィックステレオグラムの合成時間とホログラム用フィルムの現像時間の合計を 1 時間以内としたためである。北半球のホログラフィックステレオグラム合成と画像再生は第 3 章と同様の方法で行う。

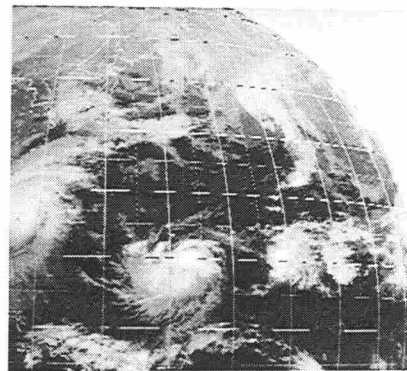
5.3.2 気象衛星ひまわり画像の受信

気象衛星ひまわり⁷⁵⁾は GMS (Geostationary Meteorological Satellite) と呼ばれ、赤外線と可視光センサで地球画像を撮影している。気象衛星ひまわりは東経 140° の赤道上空 35800Km の位置に静止し、可視および近赤外回転走査放射計で地球画像を撮影している。気象衛星ひまわりから送信された信号は気象衛星センターのコンピュータで処理され、緯線、経線、地形線を入れた小規模利用局向け低分解能ファクシミリ信号が作られる。この信号は再び気象衛星ひまわりに送られて、利用局に送信される。実験で、ひまわり画像の受信に市販のシステム (KENWOOD WEATHERSENSOR-100MK) を用いた。

気象衛星ひまわりから 1 時間毎に地球全体を分割した赤外画像、雲画像、可視画像などが、合計 9 枚（通称、A～H 画像と I または J 画像）ずつ送信される。今回の実験では、図 5.5 に示す領域を撮影した 2 枚の画像（A と B 画像）を用いた。この 2 枚の画像を用いると、北半球の大部分を表示できる。



(a) A 画像



(b) B 画像

図 5.5 WEATHERSENSOR-100MK で受信したひまわり画像

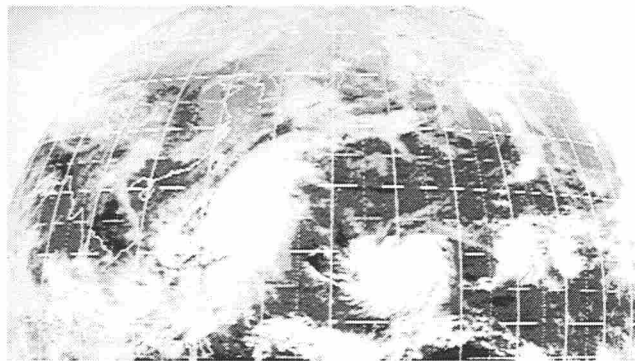


図 5.6 合成した北半球画像 (カラー表示)

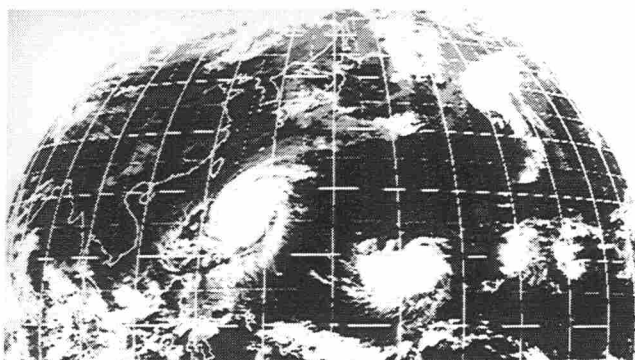


図 5.7 合成した北半球画像 (16階調表示)

5.3.3 ひまわり画像データの変換

気象衛星ひまわり画像受信システムで取得した画像データは自動的にコンピュータ (NEC PC9801) の磁気ディスクに記録され、必要に応じて読み出して CRT ディスプレイに縦 400 × 横 400 画素の疑似カラー 16 色で表示される。磁気ディスクに記録されているデータの形式は不明であるため、ホログラフィックステレオグラム合成に用いる画像データはコンピュータの画像メモリから読み出す。この場合、縦 400 × 横 400 画素で CRT ディスプレイに表示される画像の上部にグレイスケールやアノテーション (画像の種類、画像の配信時刻、その他の表示) が含まれるが、不用であるので除去すると 1 枚の画像の有効領域は縦 380 × 横 400 画素程度になる。

図 5.5 (a), (b) に示す解像度が縦 380 × 横 400 画素の 2 枚の画像を合成すると、図 5.6 に示す解像度が縦 380 × 横 590 画素程度の 1 枚の北半球画像を得る。ひまわり画像は 1990 年 9 月の画像であるが、太平洋上に台風が撮影されていて見やすいため、実験に使用した。図 5.5 と図 5.6 において雲は白色系統で地球の大陸と海は水色系統の疑似カラー 16 色で表示されているが、合成用の原画とするため図 5.7 に示すように白黒 16 階調 (4 ビット) のデータに変換している。この場合、薄雲の分布状態は図 5.6 と少し異なった感じになるが、実験の原画としてそのまま使用した。

5.3.4 原画生成

ホログラフィックステレオグラム合成に必要な多視点原画の生成は、5.2 で述べた方法で行う。球状の 3 次元地球モデルにひまわり画像をテクスチャマッピングする場合、地球モデル上で計算される経度と緯度の値が、受信したひまわり画像に含まれる経線と緯線に一致するようにする。図 5.6 に示す画像で経線はほぼ一致したが、緯線は北半球の左側部分の 40° 以上でわずかにずれを生じた。これは図 5.5(a), (b) に示す 2 枚の画像を合成するとき、この領域においてわずかのずれを生じることが主な原因である。このため、ずれが目立つ領

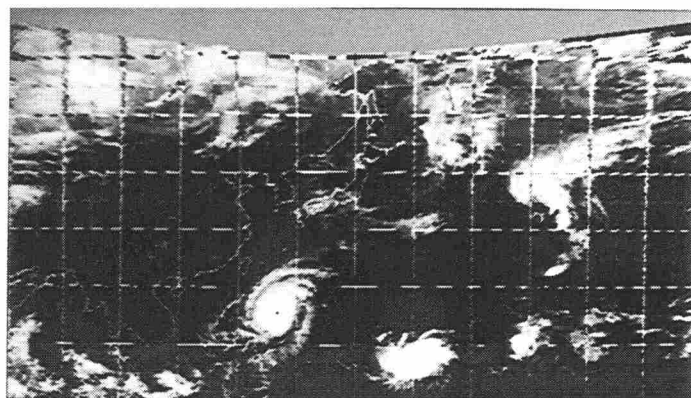
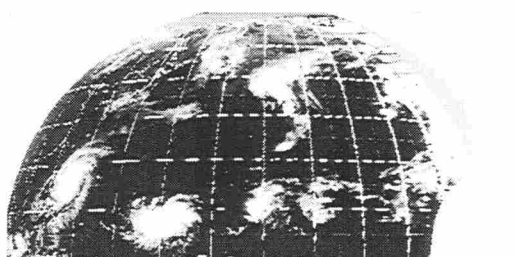
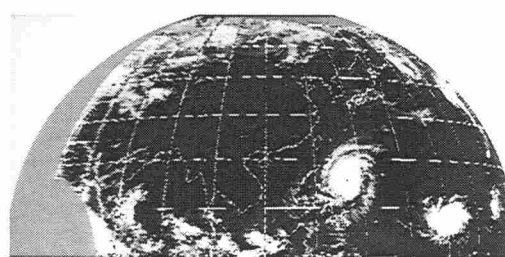


図 5.8 テクスチャマッピング用画像データ



(a) 中央は東経 110°



(b) 中央は東経 170°

図 5.9 CRT ディスプレイに表示した視点移動画像

域において線形のアフィン変換による補正を行って，テクスチャマッピング用のデータを取り出している。

今回の実験でテクスチャマッピングに用いる画像データは，経度は東経 60° から西経 140°（図 5.1 で $\theta_H=170^\circ \sim 10^\circ$ ）までの 160° の範囲で，緯度は北緯 0° から 70°（ $\theta_v=0^\circ \sim 70^\circ$ ）までの範囲で，それぞれ 0.2° 間隔で，受信したひまわり画像から取り出して配列（経度方向が 800，緯度方向が 350）に記憶している。配列に記憶した北半球のテクスチャマッピング用画像データ（アフィン変換により補正して取り出したデータ）を，コンピュータの CRT ディスプレイに表示したものを図 5.8 に示す。周辺部は流れたような画像になっているが，これは図 5.7 の北半球画像の周辺部の情報がもともと少ないためである。

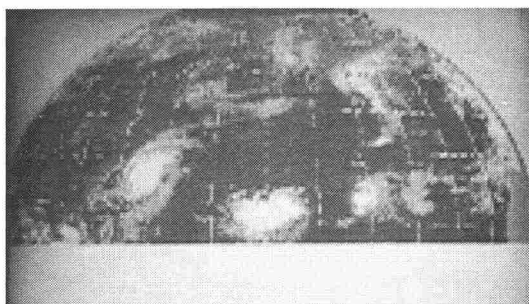
北半球のホログラフィックステレオグラム合成に使用した液晶テレビの画素数は多くないので、視点移動を行った原画の解像度を 256×256 画素とした。そして、視点を東経 110° から 170° まで移動させて約 110 枚の原画（合成には 100 枚のみを使用）を生成した。これらの原画の生成時間は約 8 時間であった。視点移動を行った北半球画像の例を図 5.9 に示す。図 5.9(a), (b) は視点を、緯度が 0° で経度を東経 110° と東経 170° に置いた場合である。但し、これらの画像は液晶テレビでなく CRT ディスプレイに表示しているので、解像度を縦 $380 \times$ 横 590 画素と高くした。受信画像に含まれていない箇所（上部と左右の端）やテクスチャマッピングを行っていない範囲（経度方向で 160° の範囲以外）は、視点移動を行った画像で表示することができない。

5.4 画像再生の結果と考察

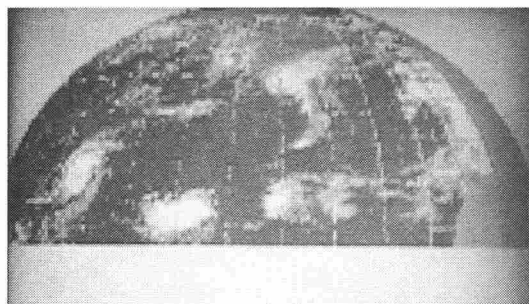
5.4.1 画像再生の結果

256×256 画素に縮小した北半球全体の原画を、空間光変調器として使用した液晶テレビ（縦 $146 \times$ 横 160 画素）に表示すると、緯線、経線、地形線などの情報はかなり失われる。それ故、ホログラフィックステレオグラムの再生像は、雲の分布が大まかにわかる程度であった。視点移動を行った原画をモニタ用液晶テレビに表示したものを図 5.10(a), (b) に、再生像の拡大写真を図 5.11(a), (b) に示す。

次に、雲の分布を観察しやすい再生像を得るため、北半球の一部を拡大して表示するホログラフィックステレオグラムを作製した。合成に用いた原画は、5.2.1 で述べた視点移動操作において、画像を透視投影するスクリーン S を地球に近づけて計算すれば得られる。100 枚の原画生成において連続した 2 枚の原画間の視点移動角度 α は、5.2.2 で述べた理論値 0.55° に設定している。ホログラフィックステレオグラムを合成した半円筒形のフィルムを図 5.12 に、図 5.12 のホログラフィックステレオグラムからの再生像を図 5.13 に示す。モニタ用液晶テレビに表示した原画を図 5.14(a), (b) に、北半球の再生像の拡大写



(a) 中央は東経 150°



(b) 中央は東経 170°

図 5.10 モニタ用液晶テレビに表示した北半球全体の視点移動画像



(a) 中央は東経 145° 付近



(b) 中央は東経 165° 付近

図 5.11 北半球全体の再生像

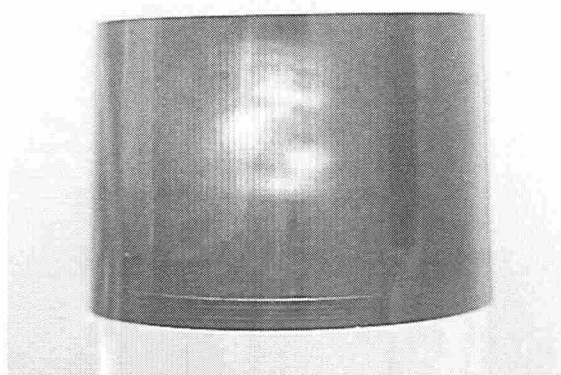


図 5.12 ホログラフィックステレオ
グラムを合成したフィルム

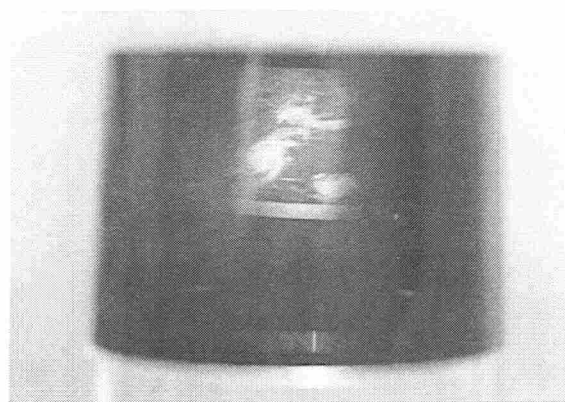
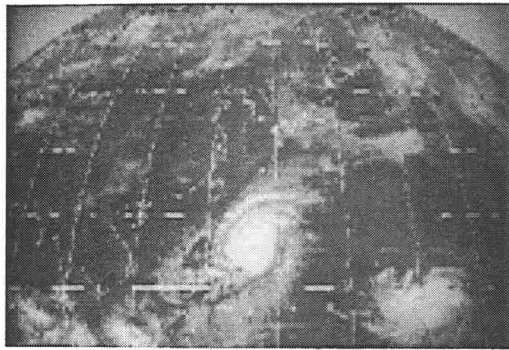
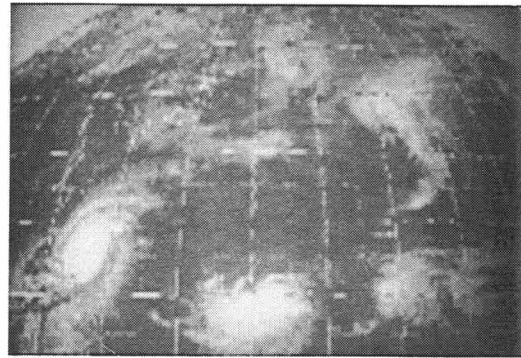


図 5.13 図 5.12 のホログラムフィ
ルムからの再生像

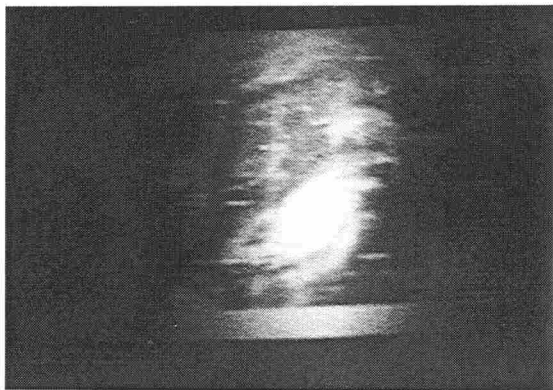


(a) 中央は東経 130°

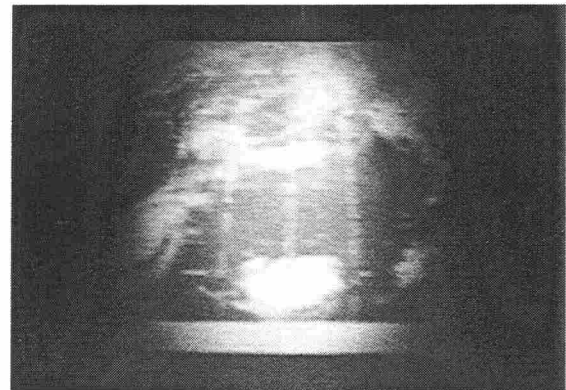


(b) 中央は東経 150°

図 5.14 モニタ用液晶テレビに表示した北半球の一部の視点移動画像



(a) 中央は東経 120° 付近



(b) 中央は東経 150° 付近

図 5.15 北半球の一部についての再生像

真を図 5.15(a), (b) に示す。台風付近の画像が再生されている。原画は白色の雲を中心としたものであるため、再生像は 2 値画像に近い。

5.4.2 実験結果の検討

使用した液晶パネルの画素数は多くないため、北半球全体の雲の分布を詳細に観察できる解像度の高い再生像を得ることができなかった。高解像度の再生像を得るには、画素数の多い液晶プロジェクタ用の液晶パネルを用いる必要がある。

雲の再生像は 2 値画像に近いが、再生像の中間調表示に関して改善の余地が

ある。すなわち、使用した液晶パネルは約 5 段階の中間調表示が行えるので、**5.3.3** で述べた疑似カラー 16 色のデータを白黒 16 階調に変換する操作で、雲の中間調段階が良く表示されるようにすればよい。

視点移動を行って生成した原画は雲の高度情報を含んでいないが、以下に述べる方法で雲の高度情報を含められる可能性がある。すなわち、気象衛星ひまわりは赤外面像において温度の低い雲（上空にある雲）ほど白く撮影しているので、雲画像の濃度値から雲のおよその高度を算出することができる。その後の透視投影で、雲の高度を考慮して原画を生成すればよい。雲の高度を考慮した北半球のホログラフィックステレオグラムを合成することができれば、奥行き感のある再生像が得られる。

北半球のホログラフィックステレオグラム合成に 0.55° 間隔で視点移動を行った 100 枚の原画を使用しているため、観察される再生像の視域は 55° になる。観察できる視域を広げるには、視点移動を行った原画の枚数を増せばよい。しかし、気象衛星ひまわりで撮影される地球画像の範囲は限定されており、原画の枚数を増やしても地球の端の画像があまり含まれていない原画が多くなり好ましくない。これを避けるには、複数の視点で撮影された画像を用いればよい。例えば、赤道上で別の位置にある静止気象衛星（経度 0° の欧州宇宙機構の METEOSAT、西経 75° のアメリカの GOES-E、西経 135° のアメリカの GOES-W）で撮影された画像と気象衛星ひまわりで撮影された画像のうち、できるだけ近い時刻で撮影されたものを組み合わせた画像に対して、視点移動操作を行えばよい。このようにすれば、地球の周囲で雲の分布を観察可能なホログラフィックステレオグラムの作製が可能になる。

5.5 結言

被写体の周囲で原画を撮影することができない場合に、形状が既知の条件より求められる被写体を対象として、ホログラフィックステレオグラム作製に必要な多視点原画を生成する方法について検討した。このため、被写体として地

球の北半球を選び、球状の3次元モデルに一視点から撮影した静止気象衛星ひまわり画像をテクスチャマッピングして、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する手法を示した。そして、ホログラフィックステレオグラムを作製して再生像の評価を行った。

3次元モデルにテクスチャマッピングを施した範囲でのみ多視点原画を生成することができるが、地球の北半球では経度方向に 55° の範囲で100枚程度の原画生成が可能であった。それゆえ、多視点原画生成の一つの手法として有効であることがわかった。

空間光変調器として使用した液晶テレビの画素数が少ない（縦146×横160画素）ため、再生像は高画質でなかった。このため、北半球全体の様子（雲の分布状況）を詳細に観察することができなかった。

第6章 3次元形状復元法を用いた多視点原画の生成と両眼立体視 のシミュレーション^{76) - 78)}

6.1 緒言

ホログラフィックステレオグラム作製で多視点原画を撮影する過程は、一般的に機械的な移動機構を必要として手間がかかることが多い。この過程を簡略化することができれば、ホログラフィックステレオグラムの作製が行いやすくなる。このため、撮影した少数の画像に補間を行って多視点原画を生成する方法が既に報告されている^{79) - 81)}。また、被写体の形状が既知の場合、一視点から撮影した1枚の画像に基づいて多視点原画を生成する手法については、第5章で述べた。

本章では、原画撮影過程の簡略化に関して二つの新しい提案を行う。第1点は、3次元形状復元法^{82) - 84)}（以下、形状復元法と記す）の多視点原画生成への応用である。すなわち、被写体を撮影した1枚の画像に形状復元法を適用して3次元モデルを作成し、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する手法を提案する。第2点は被写体の撮影を容易にするため、1枚の画像の撮影に普通の35mmカメラを使用して、その画像データをフォトCD-ROM (Compact Disk-Read Only Memory) に記録しておくことである。以下、具体例として形状が簡単な建物を被写体として選び、形状復元法の原理、形状復元に必要な条件、1枚の画像からの多視点原画の生成例、合成したホログラフィックステレオグラムからの再生像について述べる。

次に、再生像の立体視シミュレーションの手法について述べる。ホログラフィックステレオグラムに含まれる要素ホログラムにホログラフィの結像式を適用し、再生される液晶テレビ画像の位置を求めた後、ステレオ視の原理に基づいて立体視像の位置が求められることを示す。そして、実験で使用した建物の再生像に対して、具体的な計算を行って、その有効性を確かめる。

6.2 形状復元法の原理

ここでは、被写体の3次元形状を求めるために無限遠点^{8.5)}を用いた形状復元法^{8.2)}の適用を試みるが、任意の状態で撮影された1枚の画像から3次元形状を復元することは難しい。このため、3次元形状復元に必要な他の条件が、既知である場合について検討する。

形状復元法に関しては既に多数の報告がなされている^{8.2) - 8.4)}が、今回の原画生成は参考文献[82]の方法に基づく。最初に、基本原理について簡単に述べるが、被写体である建物は2点透視法で撮影されたものと仮定する。

図6.1において、 $P_0 \sim P_5$ は被写体である建物（直方体の形状）の頂点とする。ここで、 P_0 は基準点とする。 $Q_0 \sim Q_5$ は、スクリーンに投影された建物の2次元画像の頂点である。 $Q_{\infty 1}$ 、 $Q_{\infty 2}$ は2次元画像上での無限遠点である。 $Q_{\infty 1}$ は直線 $\overline{Q_0 Q_1}$ と直線 $\overline{Q_3 Q_2}$ との交点で、 $Q_{\infty 2}$ は直線 $\overline{Q_0 Q_5}$ と直線 $\overline{Q_3 Q_4}$ との交点である。無限遠点は、3次元空間中で平行な直線（例えば、 $\overline{P_0 P_1}$ と $\overline{P_3 P_2}$ ）が2次元スクリーンに投影された場合の、交点である。 O は視点（カメラによる結像と考えた場合はレンズセンターに相当）である。ここで、

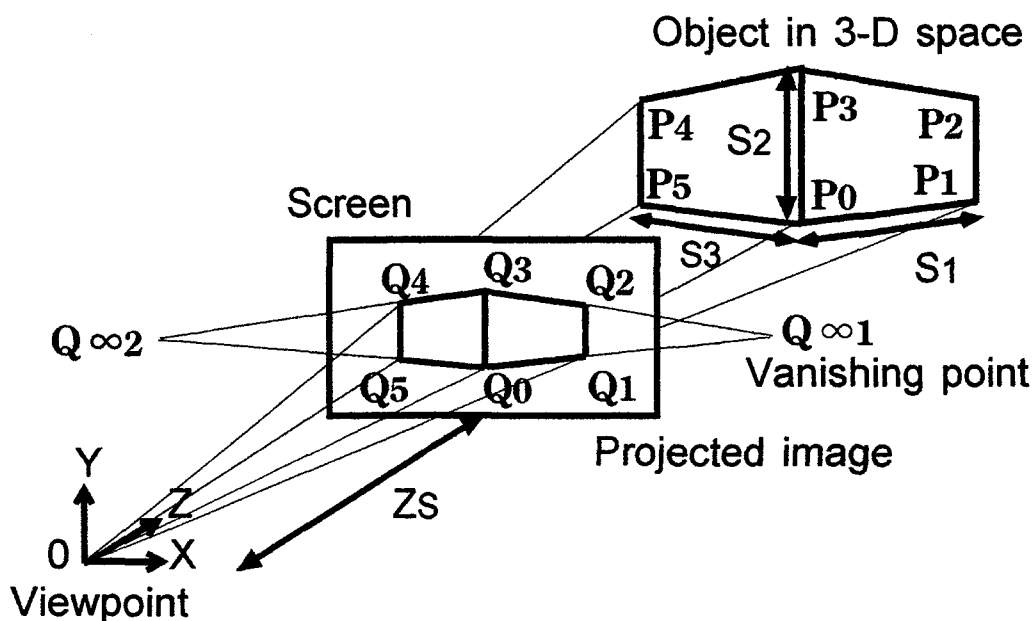


図 6.1 形状復元の原理図

$\mathbf{P}_0 \sim \mathbf{P}_5$, $\mathbf{Q}_0 \sim \mathbf{Q}_5$, $\mathbf{Q}_{\infty 1}$, $\mathbf{Q}_{\infty 2}$ は視点 $\mathbf{O}$ からのベクトルで表される。

3次元空間中で建物の3辺の長さ $S_1(=\overline{\mathbf{P}_0\mathbf{P}_1})$, $S_2(=\overline{\mathbf{P}_0\mathbf{P}_3})$, $S_3(=\overline{\mathbf{P}_0\mathbf{P}_5})$ は式 (6.1) ~ (6.3) で, S_1 , S_3 の方向ベクトル $\mathbf{U}_1$, $\mathbf{U}_2$ は式 (6.4), (6.5) で求められる。なお, A_0 は定数で, $\parallel$ はノルムを示す。

$$S_1 = A_0 \frac{\parallel \mathbf{Q}_1 - \mathbf{Q}_0 \parallel \parallel \mathbf{Q}_{\infty 1} \parallel}{\parallel \mathbf{Q}_{\infty 1} - \mathbf{Q}_1 \parallel} \quad (6.1)$$

$$S_2 = A_0 \parallel \mathbf{Q}_3 - \mathbf{Q}_0 \parallel \quad (6.2)$$

$$S_3 = A_0 \frac{\parallel \mathbf{Q}_5 - \mathbf{Q}_0 \parallel \parallel \mathbf{Q}_{\infty 2} \parallel}{\parallel \mathbf{Q}_{\infty 2} - \mathbf{Q}_5 \parallel} \quad (6.3)$$

$$\mathbf{U}_1 = \frac{\mathbf{Q}_{\infty 1}}{\parallel \mathbf{Q}_{\infty 1} \parallel} \quad (6.4)$$

$$\mathbf{U}_2 = \frac{\mathbf{Q}_{\infty 2}}{\parallel \mathbf{Q}_{\infty 2} \parallel} \quad (6.5)$$

式 (6.1) ~ (6.3) の S_1 , S_2 , S_3 を X , Y , Z 成分を用いて書き換えると,

$$S_1 = A_0 \frac{\sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} \sqrt{X_{\infty 1}^2 + Y_{\infty 1}^2 + Z_s^2}}{\sqrt{(X_{\infty 1} - X_1)^2 + (Y_{\infty 1} - Y_1)^2}} \quad (6.6)$$

$$S_2 = A_0 \sqrt{(X_3 - X_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2} \quad (6.7)$$

$$S_3 = A_0 \frac{\sqrt{(X_5 - X_0)^2 + (Y_5 - Y_0)^2} \sqrt{X_{\infty 2}^2 + Y_{\infty 2}^2 + Z_s^2}}{\sqrt{(X_{\infty 2} - X_5)^2 + (Y_{\infty 2} - Y_5)^2}} \quad (6.8)$$

を得る。 Z_s は視点から投影スクリーンまでの距離を示す。

3次元空間での頂点 $\mathbf{P}_1$, $\mathbf{P}_5$ は, 式 (6.9), (6.10) より求められる。 $\mathbf{P}_2$, $\mathbf{P}_3$, $\mathbf{P}_4$ は, $\mathbf{P}_1$, $\mathbf{P}_0$, $\mathbf{P}_5$ の Y 方向成分に S_2 の値を加えると求まる。

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_0 + S_1 \mathbf{U}_1 \quad (6.9)$$

$$\mathbf{P}_5 = \mathbf{P}_0 + S_3 \mathbf{U}_2 \quad (6.10)$$

3次元空間中で建物の相対位置を求める場合、係数 A_0 は任意の値でよい。それ故、視点からスクリーンまでの距離 Z_s が既知であれば、スクリーン面での $\mathbf{Q}_0 \sim \mathbf{Q}_5$ と無限遠点 $\mathbf{Q}_{\infty 1}$, $\mathbf{Q}_{\infty 2}$ の座標値から3次元空間中での建物頂点の相対位置を知ることができる。

しかし、任意の状態で撮影された1枚の画像において、視点からスクリーンまでの距離 Z_s は未知である。それ故、ここでは別の条件を付加して Z_s の値を求め、その後で、3次元形状復元の計算を行う方法について検討する。例えば、 Z_s は以下の①または②の付加条件を用いると計算できる。

① 建物の一つの側面について2辺の比（例えば、 $S_2 : S_3$ ）がわかっているならば、式(6.2)と(6.3)より Z_s が求められる。これは、被写体から離れた位置で一つの側面の縦横比を撮影できる場合に可能となる。なお、建物の左右側面を別々に撮影可能であれば3次元形状復元法を用いる必要はないが、ここでは、このような撮影ができない場合について考える。

② 被写体の一部について、その大きさの直接測定が可能であれば、式(6.1)～(6.3)より Z_s が求められる。例えば、建物の右側面に大きさを測定することができる窓がある場合は、その部分に式(6.1)と(6.2)を適用して Z_s が求められる。 Z_s がわかれば、その後で建物全体の3次元形状を求めることができる。

形状復元法を応用すると、視点を基準にして3次元空間中で建物の各頂点の位置 $\mathbf{P}_0 \sim \mathbf{P}_5$ を相対的に求めることができるが、ホログラフィックステレオグラムの原画生成用の3次元モデルの作成には、3辺の比 $S_1 : S_2 : S_3$ がわかれば十分である。

被写体が大きさの異なる直方体を複数個組み合わせた形状の場合は、本手法を各頂点に適用して3次元形状を復元することができると予想される。

6.3 ホログラフィックステレオグラム作製への応用

6.3.1 実験の手順

実験全体の流れを図 6.2 に示す。最初に被写体（建物）の画像を 35mm カメラで撮影して、画像データはフォト CD-ROM に記録する。形状復元理論を適用するため、カメラによる撮影は近似的に 2 点透視法の条件を満たすように行うが、その他の条件は考慮しなくてもよい。それ故、被写体の周囲において一定間隔で多数の原画を撮影する過程を大幅に簡略化できる利点がある。また、フォト CD-ROM に 5 種類の解像度の画像（ 128×192 , 256×384 , 512×768 , 1024×1536 , 2048×3072 画素）が記録されているので、ホログラフィックステレオグラム合成に使用する液晶空間光変調器の画素数に応じて、これらの画像を多視点原画の生成の際に使い分けられる利点がある。

今回の実験では、解像度が 256×384 画素の画像をフォト CD-ROM から読み出してコンピュータのディスプレイに表示し、マウスを操作して対話型処理で建物の頂点座標を指定する。マウスによる座標値の取得は誤差を伴うので、複数回の取得の平均をとる。次に、取り出した頂点座標値に形状復元法を適用して、被写体の 3 次元座標値を相対的に求める。視点からスクリーンまでの距離 Z_s は未知なので、今回は付加条件として一つの側面の 2 辺の比（図 6.1 で、 $S_2 : S_3$ ）が既知であるとして他の側面の位置を求め、建物全体の形状復元を試みる。その後、形状復元結果に基づき 3 次元モデルを作成して、コンピュータグラフィックスの手法で合成に必要な多視点原画を生成する。ホログラフィックステレオグラム合成と画像再生の方法は、第 5 章と同一である。

6.3.2 建物画像の原画生成と画像再生例

実験に用いた建物画像の例を図 6.3 に示す。フォト CD-ROM に記録した画像を、縦 $256 \times$ 横 384 画素の解像度でコンピュータのディスプレイに表示したものである。形状復元法を適用するため、撮影した建物画像は 2 点透視であると仮定する。

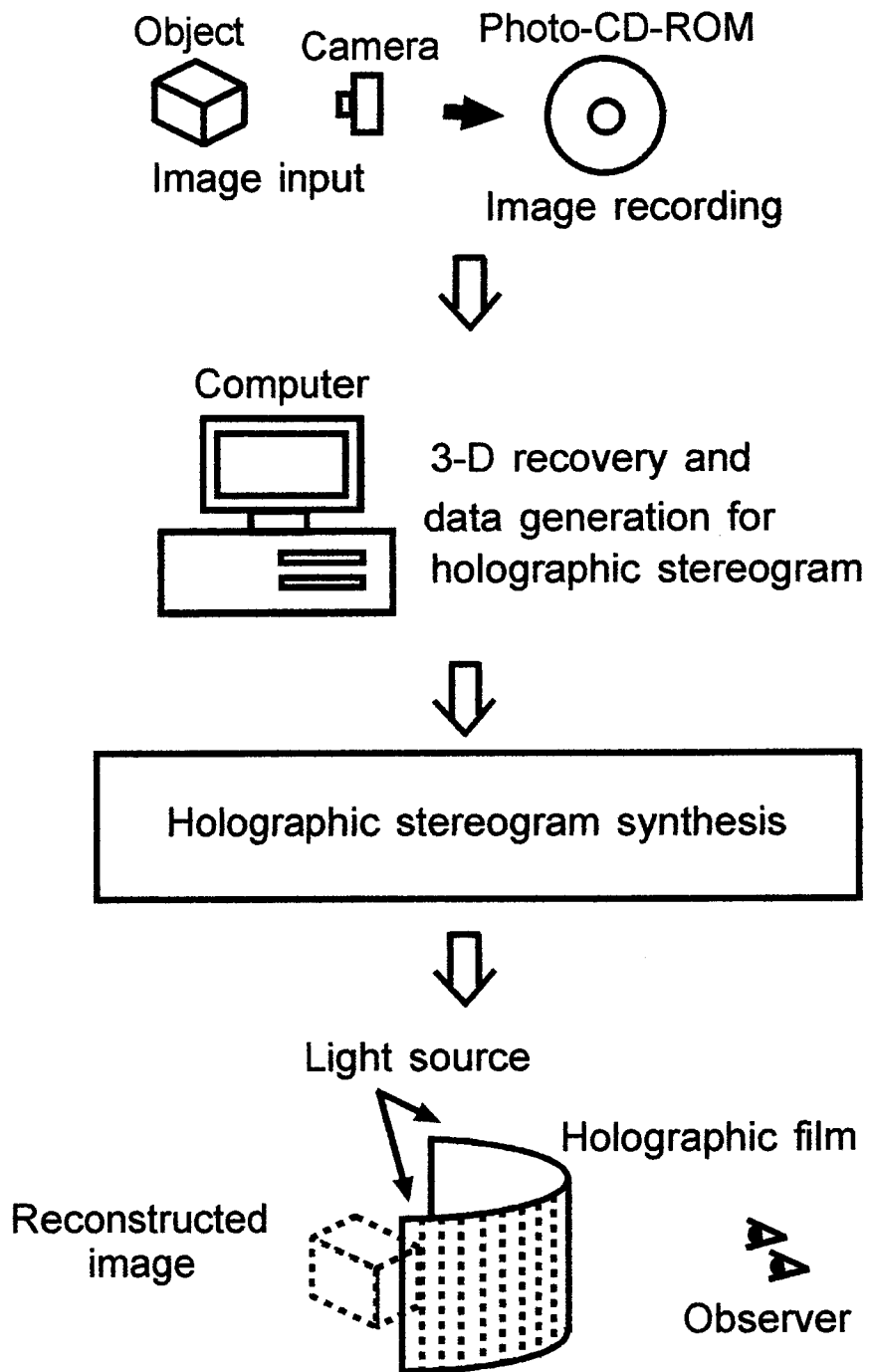


図 6.2 実験の流れ図

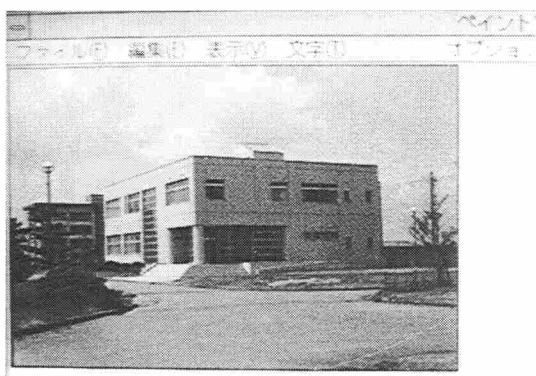
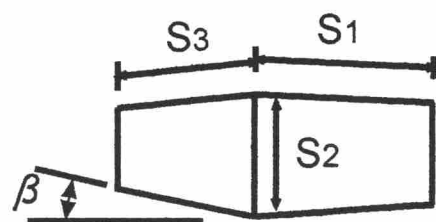


図 6.3 フォト CD-ROM に
記録した建物画像



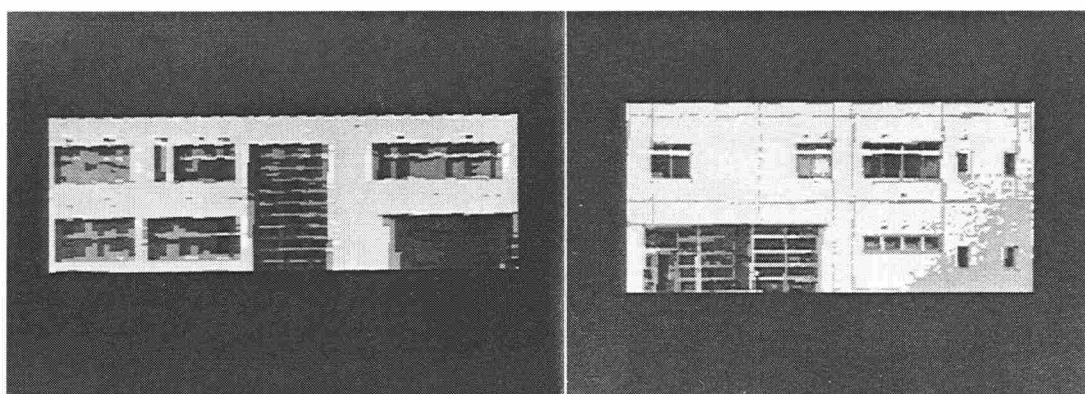
$$S1 : S2 : S3 = 195 : 90 : 273$$

$$\beta = 64^{\circ}$$

図 6.4 形状復元結果

実験では、視点からスクリーンまでの距離 Z_s を求めるため、建物左側面の縦横比を既知 ($S2 : S3 = 90 : 273$) とした。この比は、建物左側面に平行な裏側の側面を撮影した写真（立地条件より側面と平行に写真撮影が可能であったため）から求めている。なお、90の数値は図 6.3 の画像で $S2$ の部分の 90 画素分に対応している。その後、式 (6.7) と (6.8) より視点からスクリーンまでの距離 Z_s を算出し、式 (6.6) より $S1$ を求めて 3 辺の比 $S1 : S2 : S3$ を決める。式 (6.4) と (6.5) で方向ベクトルを計算すれば、斜め方向に位置した建物の角度 β も求められる。得られた 3 辺の比は $S1 : S2 : S3 = 195 : 90 : 273$ で、図 6.4 に示す角度 β は約 64° である（なお、建物の設計図に基づく実際の 3 辺の比は、 $S1 : S2 : S3 = 186 : 90 : 273$ である）。マウスによる座標の指定方法などの要因により、形状復元結果は誤差が大きい場合もあるので、複数回の計算値で実際の値に最も近いものを用いている。今回の実験は多視点原画の生成に重点を置いているため、形状復元の誤差評価は今後の問題点として残されている。

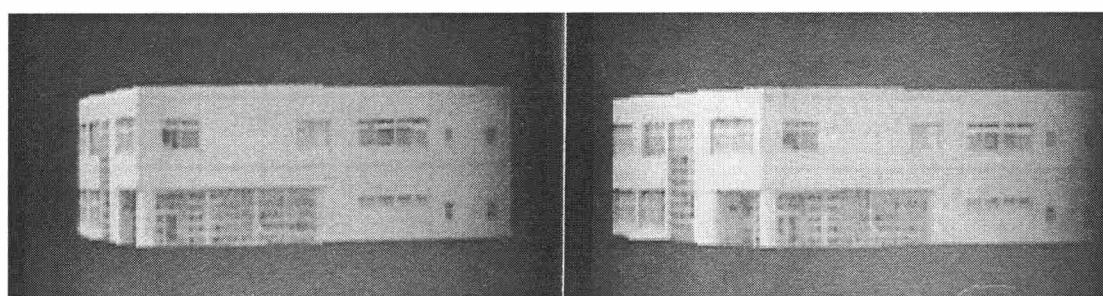
得られた 3 辺の比より建物の 3 次元モデルを作成し、左右側面に貼り付けるテクスチャマッピング用データを図 6.3 より取り出す。取り出した画像データを図 6.5(a), (b) に示す。図 6.5(a) の解像度は縦 90 × 横 273 画素で、図 6.5(b) の解像度は縦 90 × 横 195 画素である。これらの画像はコントラストを高めるため



(a) 左側面

(b) 右側面

図 6.5 テクスチャマッピング用の原画



(a) 20 番目の原画

(b) 60 番目の原画

図 6.6 液晶テレビに表示した原画例

に濃度階調変換を行っている。

ホログラフィックステレオグラム合成に用いる 100 枚の原画は、テクスチャマッピング用データを貼り付けた 3 次元モデルの周囲で視点と投影スクリーンを回転させて、コンピュータグラフィックスの手法で生成する。なお、原画生成時の視点移動角度は、第 5 章の式 (5.1) に基づいて約 0.5° としている。図 6.6 (a), (b) はモニタ用液晶テレビに表示した原画の例で、100 枚の原画の中で 20 番目と 60 番目の原画である。

図 6.7 は、合成したホログラフィックステレオグラムに He-Ne レーザ光を照射して、フィルム中央部から撮影した再生像の写真である。フィルムの漂白は行っていない。図 6.8 (a), (b) は左右から撮影した再生像の拡大写真である。

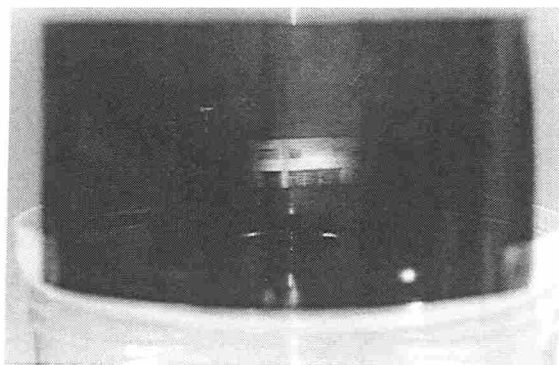
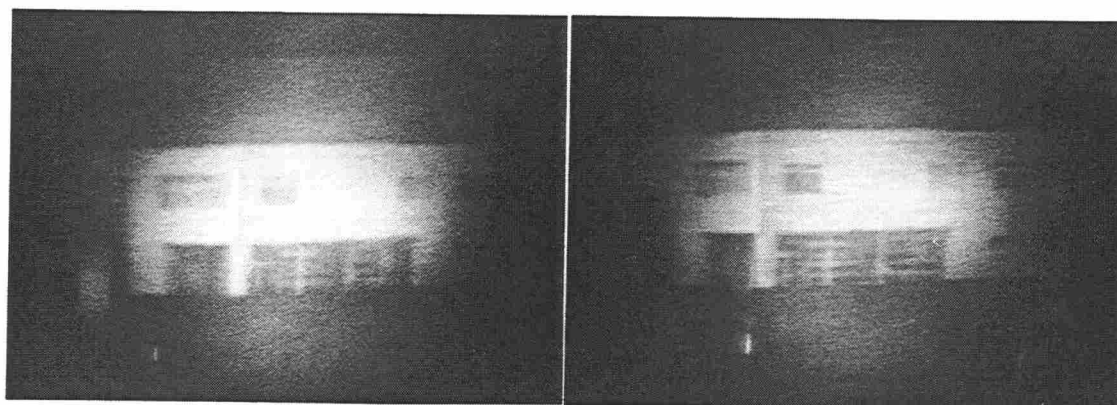


図 6.7 画像再生例



(a) 左側

(b) 右側

図 6.8 再生像の拡大写真

6.4 立体視像のコンピュータシミュレーション

建物画像のホログラフィックステレオグラムから得られる両眼立体視像の位置を，コンピュータシミュレーションで求めた結果について述べる。

6.4.1 ホログラフィの結像式

立体視像のコンピュータシミュレーションは，実験で使用したホログラフィックステレオグラム合成光学系（図 6.9）と再生光学系（図 6.10）に基づいて

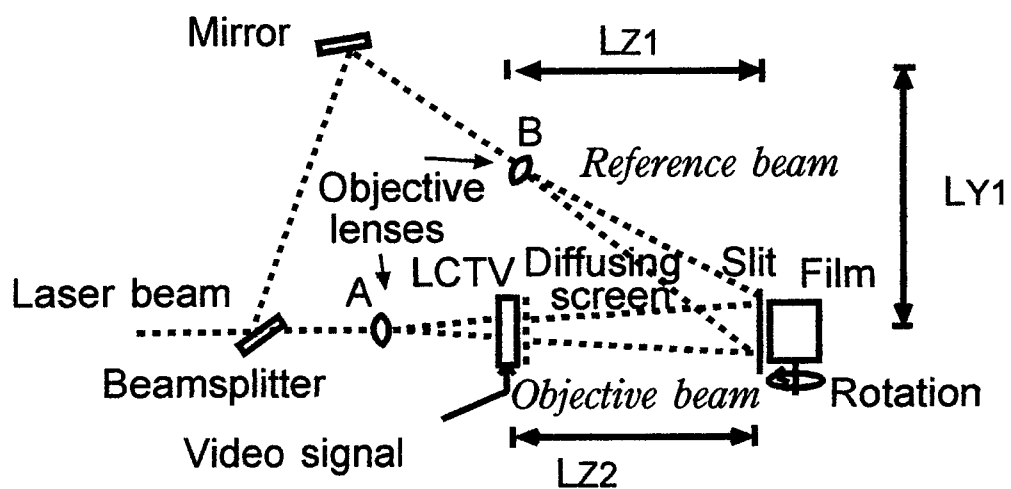


图 6.9 合成光学系

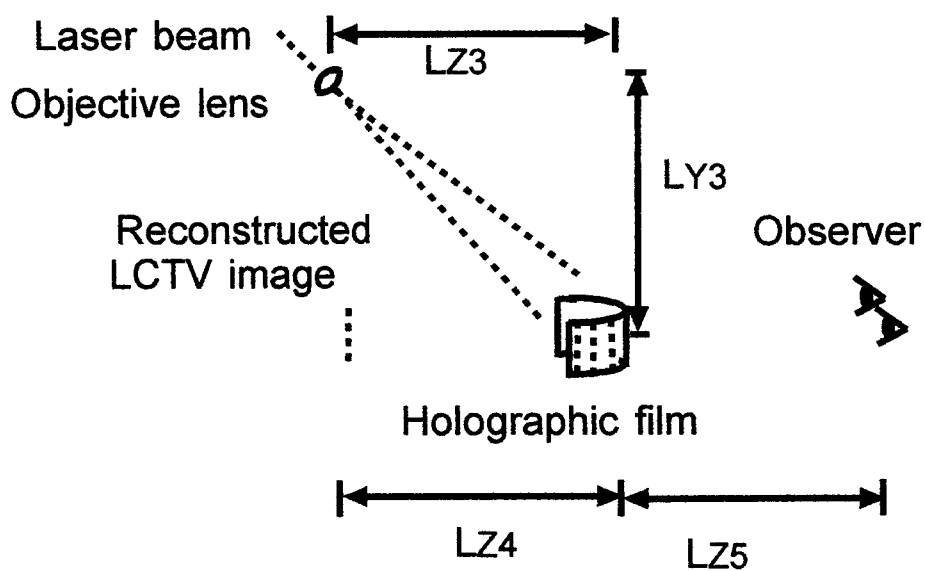
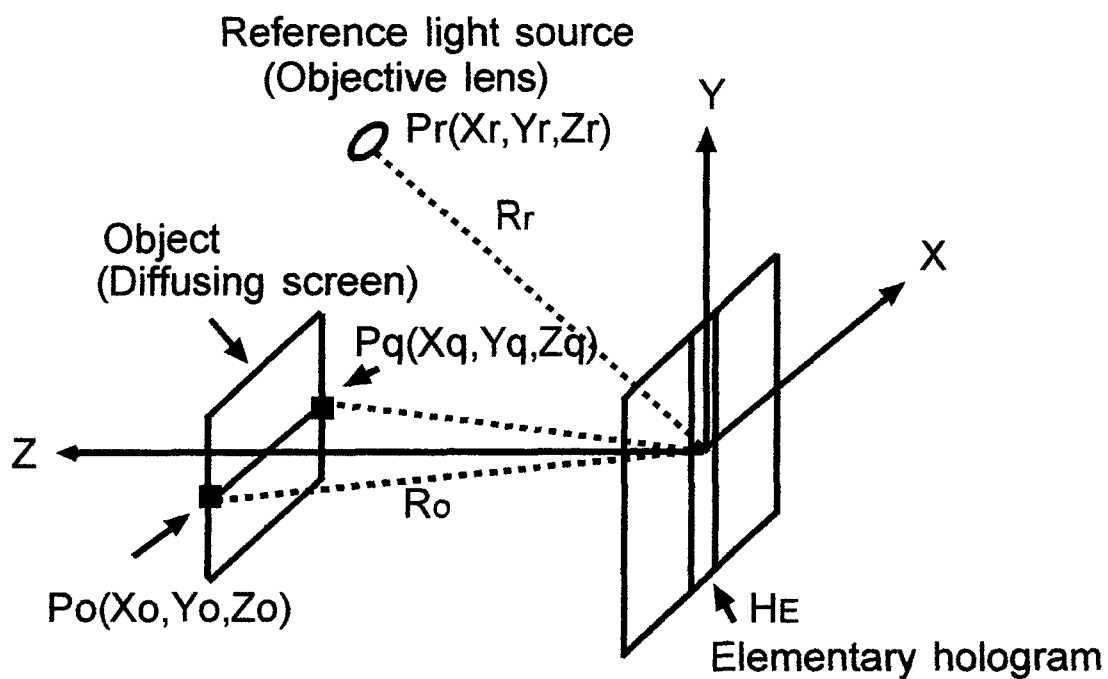
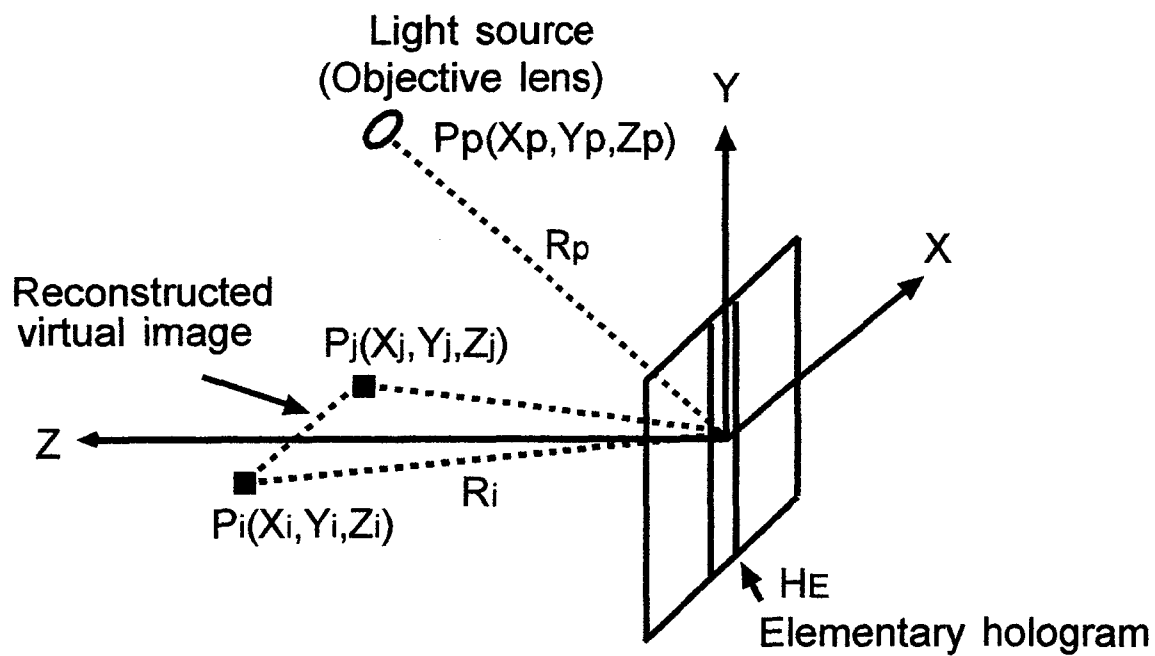


图 6.10 再生光学系



(a) Recording



(b) Reconstruction

図 6.11 液晶テレビ画像の記録と再生

行う。最初に、図 6.11(a), (b) に沿って液晶テレビ画像の要素ホログラムへの記録と要素ホログラムからの画像再生について考える。いま、図 6.11(a) で参照用点光源 P_r (図 6.9 で対物レンズ B の位置に対応) により、記録物点 P_o (図 6.9 で拡散スクリーンに投影された液晶テレビ画像の左端に対応) が要素ホログラム HE の中央に記録されたとする。次に、図 6.11(b) に示すように、この要素ホログラムを再生用点光源 P_p (図 6.10 の対物レンズの位置に対応) で光を照射すると、液晶テレビ左端の再生点 P_i が得られる。ここで、図 6.11(a) の P_r に関して、 R_r は要素ホログラム HE の中央からの P_r までの間隔を、 X_r , Y_r , Z_r はその 3 方向成分を示している。 P_o , P_p , P_i についても同様である。

計算の簡単化のため、要素ホログラムへの画像記録と画像再生に用いるレーザ光源の波長は同一とし、ホログラムの拡大率は 1 とする。その結果、要素ホログラム HE から再生像までの間隔 (R_i , X_i , Y_i) は、ホログラフィの結像式^{8,6)}を簡単化した、

$$\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \quad (6.11)$$

$$\frac{X_i}{R_i} - \frac{X_p}{R_p} = \frac{X_o}{R_o} - \frac{X_r}{R_r} \quad (6.12)$$

$$\frac{Y_i}{R_i} - \frac{Y_p}{R_p} = \frac{Y_o}{R_o} - \frac{Y_r}{R_r} \quad (6.13)$$

で計算できる。シミュレーションでこれらの式のパラメータに、図 6.9 および図 6.10 の光学系における値を代入して計算する。

図 6.11(b) に示す液晶テレビ右端の再生点 P_j についても同様に計算でき、液晶テレビ中央の 1 ライン分の再生像は P_i と P_j を結ぶ直線になる。

6.4.2 シミュレーション手順

再生像の立体視シミュレーションは 1 次元 (液晶テレビ再生像の 1 ライン分)

についてのみ、以下の手順で行った。

① シミュレーション用原画の生成 原画生成に図 6.4 に示す建物モデル（3 辺の比が 195 : 90 : 273）を用いるが、1 次元のシミュレーションなので建物の任意の断面（直方形）において、左側面と右側面の比 ($S_1 : S_3 = 195 : 273$) のみが関係する。この 1 次元建物モデルの周囲で視点を 0.5° 間隔で移動させ、スクリーン上に投影される画像データを 100 枚生成する。100 枚の画像データに、建物の左側面と右側面の位置情報を記録する。

② パラメータの初期値設定 図 6.9 のホログラフィックステレオグラム合成光学系の記録用参照光源の位置と拡散スクリーンの位置、図 6.10 の再生光学系の再生用参照光源の位置、視点位置、フィルム半径などの値を設定する。

③ 液晶テレビ再生像の位置決定 手順①で生成した 1 次元建物画像が記録されていると仮定した半円筒形ホログラフィックステレオグラムで、各要素ホログラムから再生される液晶テレビ再生像の位置を、ホログラフィの結像式 (6.11) ~ (6.13) を用いて計算する。

④ 液晶テレビの再生像の観察範囲決定 手順③で計算した液晶テレビ再生像について、100 個の要素ホログラムの各々を通して左右の眼で観察される範囲を求める。これは、第 2 章の図 2.2 に基づいて行うことができる。

⑤ 立体視像の計算 手順④で得られる左眼画像と右眼画像で対応点を両眼で観察したとして、立体視像の位置を第 2 章の 2.2.4 で述べた両眼立体視の手法で計算する。

6.4.3 シミュレーション結果

立体視像のシミュレーション結果を図 6.12 に示す。この計算では図 6.9 と図 6.10 に示す光学系において、 $Ly_1=Ly_3=10.5\text{cm}$ 、 $Lz_1=Lz_2=Lz_3=15\text{cm}$ 、 $Lz_5=20\text{cm}$ とした。画像再生において、半円筒形のホログラフィックステレオグラムの半径は 15cm とした。記録および再生光源位置は黒丸印で示す。両眼立体視像（建物の左側面は AB、右側面は BC で示す）は液晶テレビ再生像の

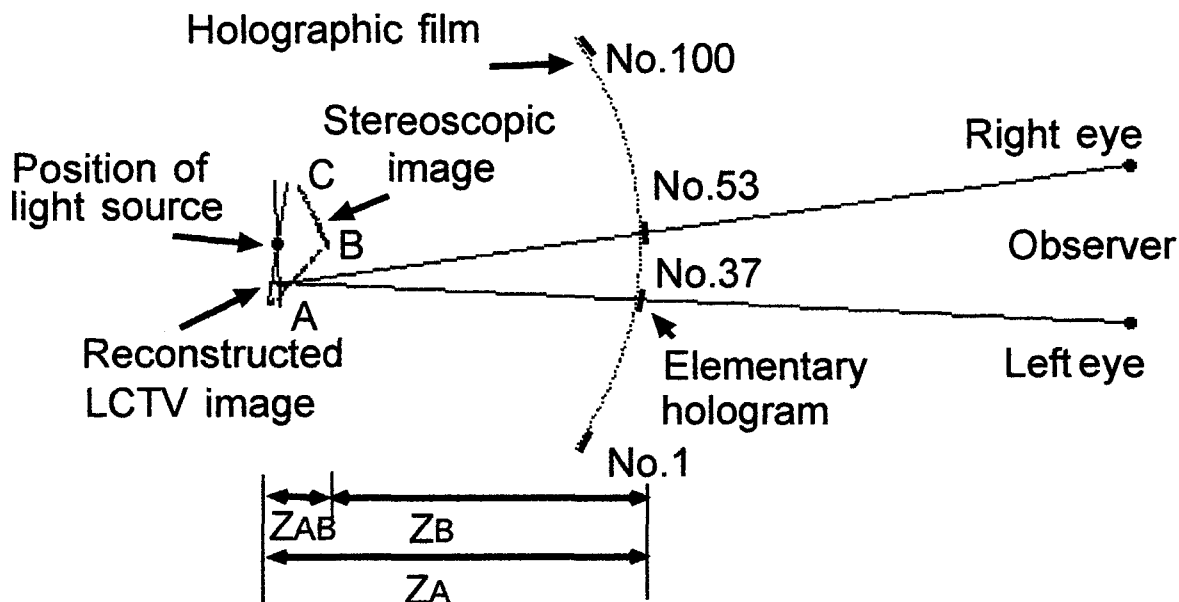


図 6.12 立体視シミュレーションの結果

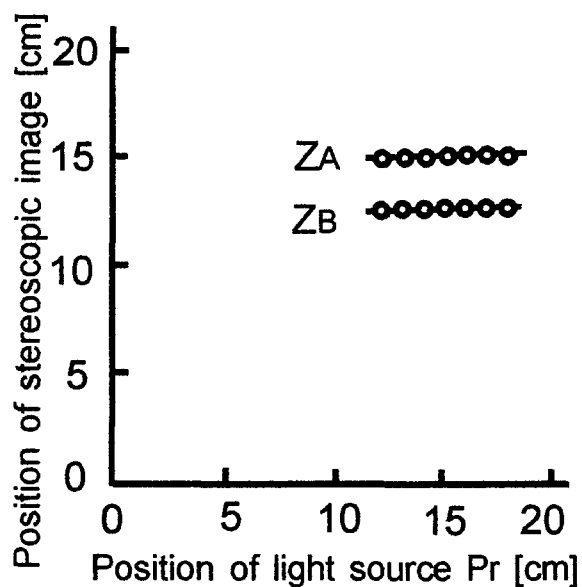


図 6.13 記録用参照光源の位置を変化させた場合の立体視像の位置

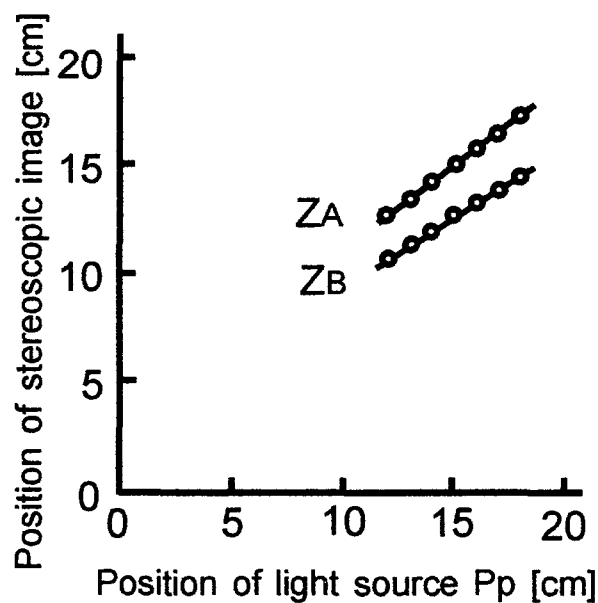


図 6.14 再生用参照光源の位置を変化させた場合の立体視像の位置

前方になる。例えば、37番目と53番目の要素ホログラムから得られる液晶テレビ再生像の両眼立体視点は二つの直線の交点になる。立体視像の深度（図6.12の Z_{AB} ）は2cm弱であり、ホログラフィックステレオグラムから20cm程度離れた位置で観察した場合の立体感はやや弱い。

次に、以下のパラメータを単独に変化させて、立体視像の位置変化を計算した。光学系の条件を図6.12の計算で用いた値から変えると再生像に歪みを生じると考えられるが、今回はこれを考慮していない。

① 記録用参照光源の位置 記録用参照光源の位置（図6.9の対物レンズBに対応する図6.11(a)の P_r ）のみを $Lz_1=12 \sim 18\text{cm}$ の範囲で変えた場合の立体視像の位置を図6.13に示す。図6.13の Z_A と Z_B は、図6.12に示す再生像のA点とB点の位置（ Z_A と Z_B ）に対応する。この場合、 Lz_1 を変えても立体視像の位置はほぼ一定である。

② 再生用参照光源の位置 再生用参照光源の位置（図6.10のレンズに対応する図6.11(b)の P_p ）のみを $Lz_3=12 \sim 18\text{cm}$ の範囲で変えた場合の立体視像の位置を図6.14に示す。 Lz_3 の値が大きくなるに従って、立体視像の位置 Z_A と Z_B はフィルムから離れたところになる。

6.5 結言

本章では、原画撮影を簡略化する手法について検討した。このため、被写体を撮影した1枚の画像に形状復元法を適用して被写体の3次元モデルを作成し、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する手法を建物画像について示した。生成した原画を用いてホログラフィックステレオグラムを作製するとともに、3次元画像の評価のため、再生像の立体視シミュレーションを行った。

形状復元法に用いる画像は、2点透視法で被写体を35mmカメラで撮影し、その画像データをフォトCD-ROMに記録することにより得た。この画像に形状復元法を適用する場合、視点から投影スクリーンまでの距離 Z_s を知る必要

がある。任意の状態で撮影された 1 枚の画像から Z_s は求まらないため、建物の左側面の縦横比が既知であるとして Z_s を求めた。その後、撮影した画像から建物全体の形状復元を行った。このような制限が形状復元法にあるが、原画撮影中に一定間隔で撮影機を移動する必要があるため、本手法は多視点原画の生成に有効であることがわかった。

第7章 被写体の近似的な3次元モデルに基づく多視点原画の生成^{87) - 89)}

7.1 緒言

本章では、被写体の形状が複雑な場合に、原画撮影の簡略化を試みる。このため、被写体の近似的な3次元モデルを作成して、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する手法を提案する。ここでは、人物の上半身を被写体として、近似的な3次元モデルを作成する方法を示す。なお、このモデルは、顔の断面を楕円で近似する基本的な3次元モデル⁹⁰⁾を発展させたものである。提案する3次元人物モデルは三つの部分（顔、耳、胴体）で構成されるが、その形状は被写体の正面画像と側面画像から得られる正面輪郭線と側面輪郭線に基づいて決定できることを示す。そして、近似的な3次元モデルを用いて生成した原画と実際に被写体を撮影した画像とを比較して類似度を評価し、近似的な3次元モデルの有効性について検討する。

7.2 被写体の原画撮影を簡略化する手法

ホログラフィックステレオグラムの作製に関して、これまでに報告されている原画撮影の簡略化手法（①～④）を、以下に述べる。①の方法では、被写体の3次元モデルを作成しなくてもよい。②，③の方法では、比較的精度の良い3次元モデルを用いて原画の生成を行える。④の方法は、近似的な3次元モデルを用いる場合である。

① テレビカメラなどの撮影機で入力する画像の数を少なくし、補間を用いて必要な多視点原画を生成する方法^{79) - 81)}では、補間に用いる画像間で対応点に注意する必要がある。この方法は補間を画像全体に対して行うので、被写体の3次元モデルを作成しなくてもよい。

② 表示を試みる被写体の3次元形状を *rasterstereography* 法で実際に求めて3次元モデルを作成し、別に撮影した画像をこのモデルにテクスチャマッピングしてコンピュータグラフィックスの手法で原画を生成する方法では、被写体

の顔の部分は計測しやすいが、髪部分は計測しにくい⁹¹⁾。

③ ステレオ法で撮影した2枚の画像から被写体の3次元形状を求めてコンピュータグラフィックスの手法で必要な原画を生成する方法では、左右の画像で3次元モデル作成用の対応点を取り出すのに手間がかかる⁹²⁾。

④ 3次元モデルが近似的なものでよい場合は、正面および側面から撮影した2枚の画像をもとに、人物の断面を楕円で近似することができる⁹⁰⁾。この場合、2枚の画像の撮影条件は前述した①、③における撮影条件と比較して緩やかである。本章では、参考文献[90]の手法を改良した方法を用いて被写体の上半身の近似的な3次元モデルを作成し、コンピュータグラフィックスの手法でホログラフィックステレオグラムの作製に用いる多視点原画の生成を試みる。

7.3 人物像の多視点原画の生成

7.3.1 被写体の写真撮影

最初に、35mmカメラで被写体の正面と側面方向から2枚の写真を撮影する。図7.1は撮影した正面と側面の画像であるが、顔の輪郭線を明確にするため、髪を短くして撮影している。画像データは、第6章の場合と同様にフォトCD-ROMに記録する。5種類の解像度の画像がフォトCD-ROMに記録されているが、取扱いの容易さから今回は256×384画素の画像を用いる。ホログラフィックステレオグラムの原画生成のために、カラー画像は白黒画像に変換する。

7.3.2 3次元人物モデルの作成と多視点原画の生成

図7.1の2枚の画像をもとに、人物の上半身の3次元モデルを作成する。人物の上半身を楕円で連続的に近似すると良好な原画を生成することができないため、上半身を顔、耳、胴体（ここでは首と胸の部分）にわけた近似的な3次元モデルを新たに作成する⁸⁹⁾。このため、図7.2に示す輪郭線を用いる。こ

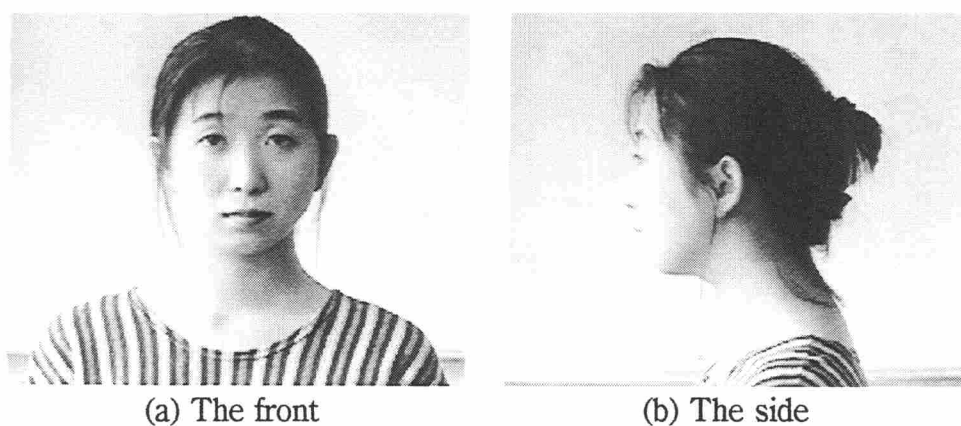


図 7.1 正面と側面画像

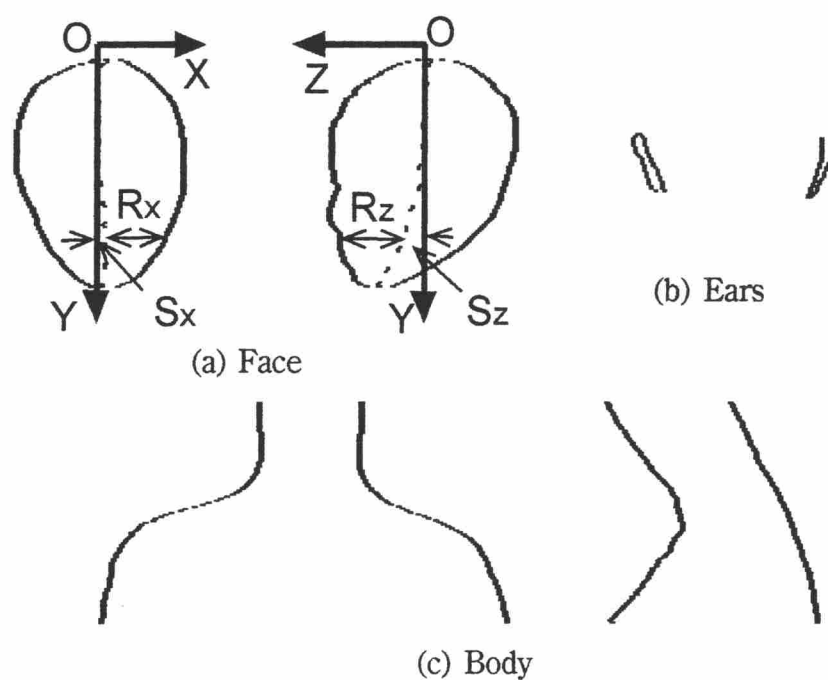


図 7.2 顔，耳，胴体における輪郭線

これらの輪郭線は図 7.1 の画像をコンピュータのディスプレイに表示して，対話型処理で不要な箇所を取り除いた顔，耳，胴体の画像から求めている。顔の正面の輪郭線は耳の部分を除いて作成し，顔の側面輪郭線は 7.4.1 で述べるように鼻，口，眼などの部分を滑らかにして作成する。両耳の輪郭線は正面画像のみから取り出す。3次元モデルを用いた原画の生成において，顔と首の不連続

性を無くすため、首の輪郭線は数画素分だけ長くしている。

今回の3次元人物モデルは、顔と胴体の断面を楕円で近似している。式(7.1)の楕円近似を、顔を例にとって説明する。

$$\frac{(X-S_x)^2}{R_x^2} + \frac{(Z-S_z)^2}{R_z^2} = 1 \quad (7.1)$$

いま、3次元空間におけるX, Y, Z軸は図7.2(a)に示す方向に設定する。なお、この図において顔の正面輪郭線と側面輪郭線の中心は破線で示してある。式(7.1)の R_x と S_x は、図7.2(a)の顔の任意の位置におけるX方向の半径 R_x と基準軸(Y軸)からの変位 S_x に対応している。同様に、 R_z はZ方向の半径を、 S_z は基準軸からの変位を示す。

式(7.1)を用いて断面を楕円で近似した3次元人物モデルを、図7.3(a)に示す。これは、3次元モデルを2値化して、水平方向と垂直方向に一定間隔で表示したものである。視点は3次元モデルに向かって、正面から左 20° の位置に設定してある。このモデルは、図7.3(b)～(d)に示す顔、胴体、耳の部分を作成して構成されている。なお、耳の断面は直線で近似しているが、これは図7.3(e)

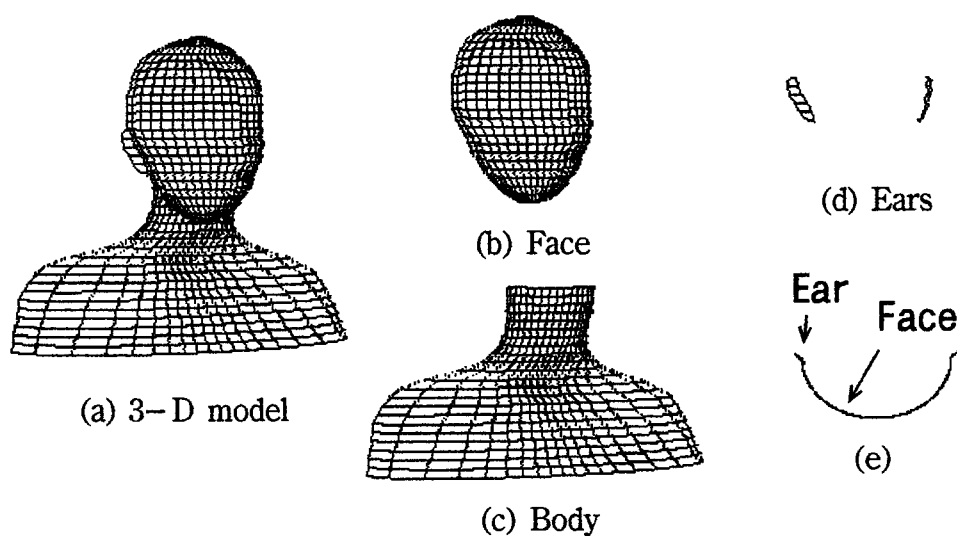


図 7.3 3次元人物モデル

に示すように、顔の断面を示す楕円の半周の両端から約 45° の方向に接続している。この直線を水平方向に投影した長さは、図 7.2(b) の耳の輪郭線の左右の間隔に対応するようにしている。なお、今回は 3 次元人物モデルの簡単化のため、鼻の高さを考慮していない。顔と胴体の断面を表す楕円の数はそれぞれ 110 個と 115 個であり、耳を表す直線の数も左右ともに 26 本である。原画の生成において、顔と胴体の断面を表す楕円の半周分と耳を表す直線に、図 7.1(a) の正面画像のみをテクスチャマッピングする。顔の両端付近は髪やほおであり、テクスチャマッピングに用いる正面画像の解像度が低くても、生成する原画の画質の低下は少ないと考えられる。

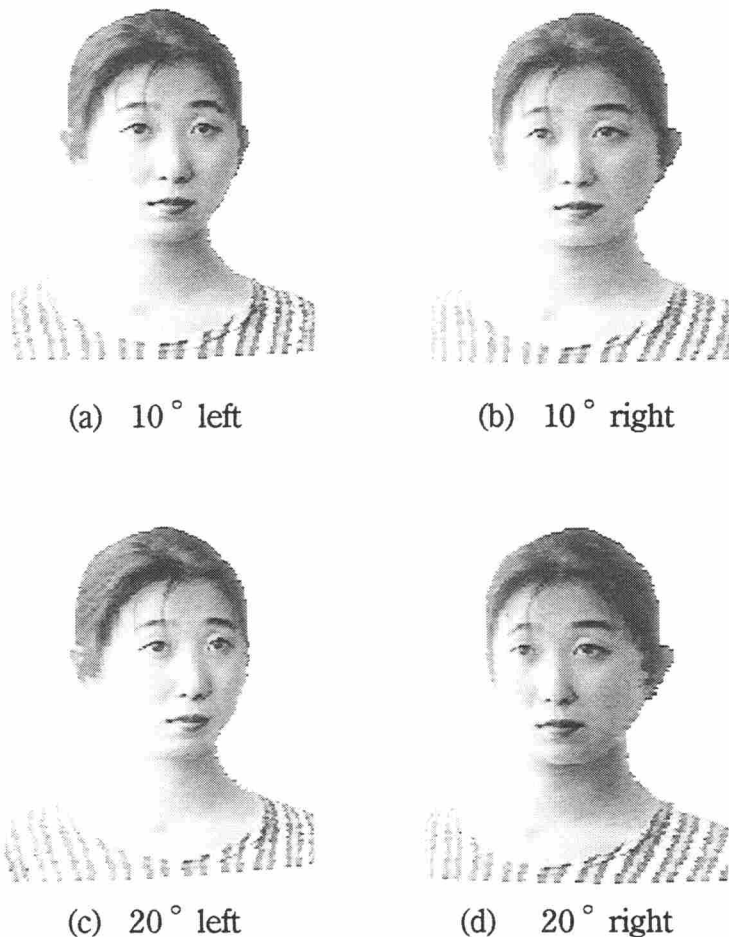


図 7.4 3 次元モデルを用いて生成した原画

図 7.3(a) に示す 3 次元モデルを用いて原画の生成を行った場合、視点位置が正面から左右 20° 程度の範囲で、被写体と顔の表情が類似した原画を生成することができた。視点位置が左右 20° 以上になると、この角度が大きくなるに従って生成した原画の顔の表情に不自然さが増大して、被写体との類似度は低下した。図 7.4 に視点位置を正面から左右 20° と左右 10° に置いて生成した原画の例を示す。原画の解像度は 256×256 画素で階調数は 8 ビットである。原画の生成は FORTRAN 言語で記述したプログラムで行った。

7.4 原画生成法の検討

7.4.1 側面輪郭線の影響

3 次元人物モデルを用いた原画の生成において視点位置が正面から離れる（例えば、左右 20° 以上）と、生成した原画の顔の表情が側面輪郭線の形状により微妙に異なる。このため、図 7.5 に示すように側面輪郭線の形状を変えて、被写体と最も類似した原画を得ることのできる側面輪郭線について検討した。図 7.5(a) は図 7.1(b) の顔と頭部の部分にほぼ忠実に輪郭線を生成（但し、後髪の部分は省く）しており、鼻や唇も明確である。図 7.5(b) は眼、鼻、唇を滑らかにした以外は、図 7.5(a) と同様である。図 7.5(c) ～ (e) では、少しずつ輪郭線の右側を左側に近づけて間隔を狭くしてある。図中の数値は、図 7.5 の眼の位置における輪郭線の左右の間隔（図 7.5(a) の場合を 100 とした相対値）を示す。

視点を左 20° の位置に設定して、図 7.5(b) ～ (e) の輪郭線を用いて生成した原画を図 7.6(a) ～ (d) に示す。図 7.5(a) の側面輪郭線を用いて生成した原画は被写体と類似度が低く、図 7.6 に示していない。また、生成した原画と比較するため、正面から左 20° 程度の位置で実際に撮影した画像（撮影画像）を図 7.7(a) に示す。図 7.7(a) は図 7.1 と撮影日時が異なるため、顔の表情に少し差がある。また、比較を行いやすいように、背景を取り除いて髪の毛部分を頭部の形状に沿って滑らかにしてある。生成した原画の定量的評価を行うため、顔の上下方向における眼、鼻、口の位置で矢印で示す間隔（図 7.7(b)）を、図 7.6(a) ～ (d) の

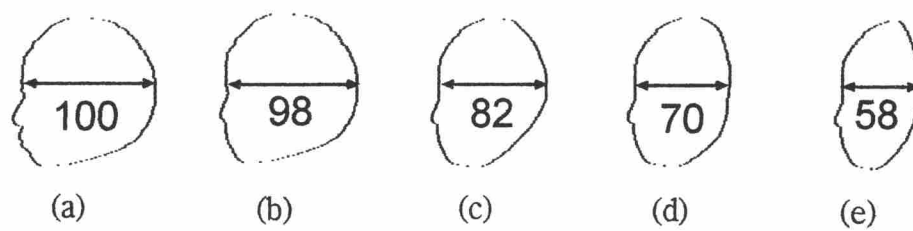


図 7.5 形状の異なる側面輪郭線



図 7.6 図 7.5 の輪郭線で生成した原画

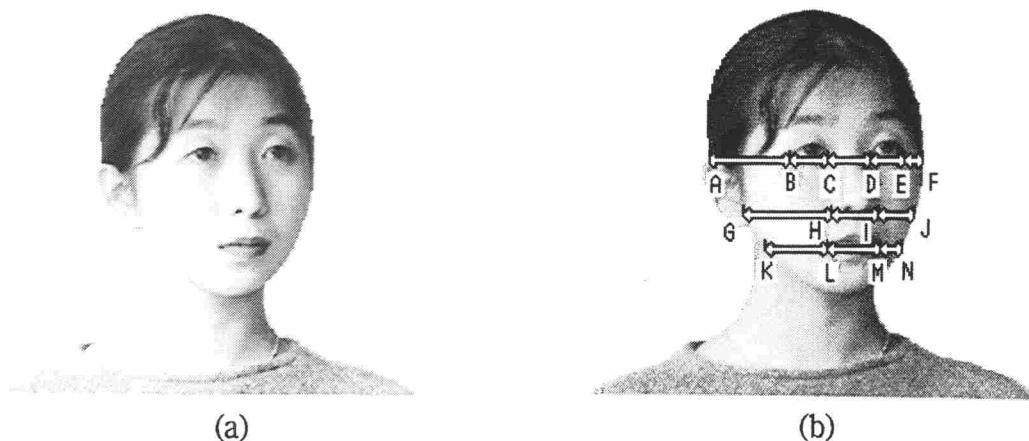


図 7.7 左 20° 方向からの撮影画像

原画と図 7.7(a) の撮影画像で比較した。生成した原画と撮影画像で画像の大きさが異なるため，比較する箇所（例えば，向かって左眼は BC 間）を比較する箇所における顔の両端間隔（左眼で AF 間）で割った，式 (7.2) で示す値 S を評価に用いた。

$$S = \frac{\text{比較箇所の長さ}}{\text{比較箇所における顔の両端間隔}} \quad (7.2)$$

比較する任意の箇所において，生成した原画の S を S_g ，撮影画像の S を S_p とした場合に，式 (7.3) に示す二つの値の比

$$R = \frac{S_g}{S_p} \quad (7.3)$$

を計算したものを図 7.8 に示す。顔の各部において R の値が 1 に近いほど，生成した原画と撮影画像は一致していることになる。図 7.5(b) の側面輪郭線を用いた図 7.6(a) では，3 次元モデルが近似的であることなどの理由で顔の左側の部分が長くなり，類似度は低い。図 7.5(d) の輪郭線を用いた図 7.6(c) は撮影画

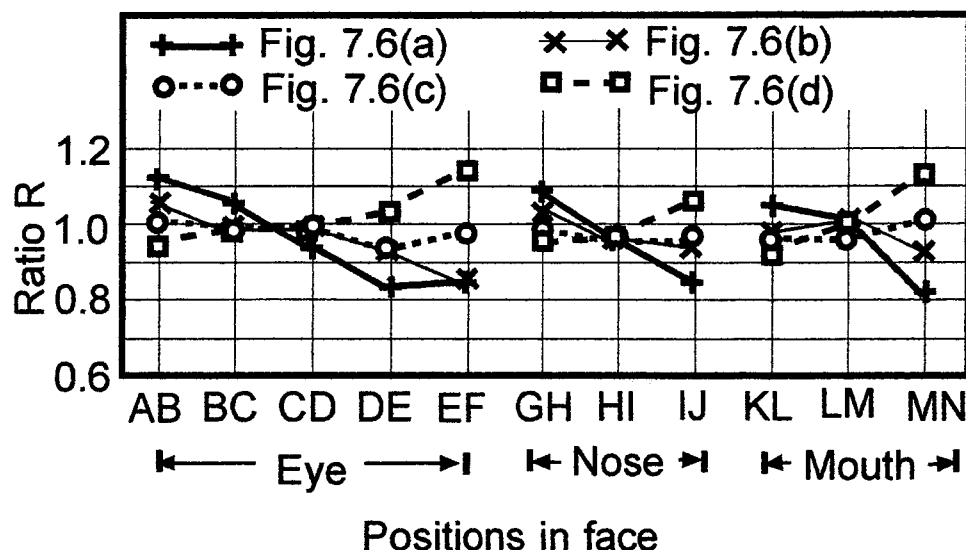


図 7.8 生成した原画（図 7.6）と撮影画像（図 7.7）における顔の比較結果

像とかなり一致している。間隔を狭くした図 7.5(e) の輪郭線を用いた図 7.6(d) で、顔の右側の部分が長くなる。

撮影画像と生成した原画の顔の方向が一致しても、被験者と顔の表情が異なることも考えられる。そこで、図 7.5 の輪郭線を用いて生成した原画と被写体の類似度を主観的に調べた。類似度は 12 名の評価者が 5 段階で行った。異なる輪郭線で生成した原画は一見すると互いに似ており、区別しがたい。このため、類似度の判定を行いやすくするために被写体となる人物と面識がある者を評価者とし、図 7.7(a) の撮影画像で示す顔の類似以外に、評価者が被写体となる人物に対して持つ印象も含めて総合的に類似度を判断している。図 7.5 の側面輪郭線を用いて生成した原画の類似度評価と 5 段階の評価基準を表 7.1 に示す。図 7.5(a) の側面輪郭線で生成した原画は図 7.6 に示していないが、評価は 3 以下が多く類似度は低い。図 7.6(a) では評価 3 と 4 が半々で、図 7.6(b) では評価 4 が評価 3 よりも多く、側面輪郭線の間隔が狭くなると類似度は増加する。図 7.6(c) では評価にばらつきがあるが評価 5 も含まれ、類似度は高いと考えら

表 7.1 生成した原画と被写体との類似度評価

評価 段階	使用した輪郭線 図7.5 (a) (b) (c) (d) (e)					
	生成した原画 図7.6	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
5		0	0	0	4	0
4		1	5	9	3	3
3	(数値は評価人数)	6	5	3	5	4
2		4	2	0	0	4
1		1	0	0	0	1

〈生成した原画の評価基準〉

- 5 非常によく似て、ほとんど一致している。
- 4 よく似ているが、わずかに異なる部分がある。
- 3 雰囲気は似ているが、所々異なる。
- 2 少し似ているが、異なる部分が多い。
- 1 あまり似ていない。

れる。輪郭線の間隔が最も狭い図 7.6(d) で、評価 2 と 1 が含まれて類似度は再び低下する。以上の主観的评价で評価の高い原画は、図 7.8 の定量的評価で R が 1 に近い場合と一致する傾向がある。

図 7.8 の定量的評価と表 7.1 の主観的评价の結果より、側面輪郭線の形状を図 7.5(c) から図 7.5(d) のように実際の輪郭線間隔よりも狭くすれば、被写体と類似した原画の生成が可能であることがわかった。

7.4.2 最適な側面輪郭線

被写体と最も類似した原画を生成可能な側面輪郭線を、側面画像から対話処理で求めることは手間がかかる。このため、実際よりも少し間隔の狭い顔の側面輪郭線を求めた後、微調整は楕円を示す式 (7.1) の変数を変えて計算する方

法が考えられる。このため、顔を表す楕円の部分について Z 軸方向の半径 R_z と中心軸からの変位 S_z に、係数 α と β を掛けた

$$\frac{(X-S_x)^2}{R_x^2} + \frac{(Z-\beta S_z)^2}{(\alpha R_z)^2} = 1 \quad (7.4)$$

で近似した 3 次元モデルを用いて原画の生成を試みた。 α を 1 より小さくすると側面輪郭線の左右の間隔が狭くなり、7.4.1 で述べた結果と同様に被写体と顔の表情が類似した原画が得られる。また、係数 β を 1 より小さくすると口やあごの位置を引っ込める効果があり、顔が丸みを帯びた柔らかい表情の原画を生成しやすいことが、別の実験結果より明らかになっている。

7.4.3 正面画像 1 枚からの原画の生成

表 7.1 の評価結果より、3 次元人物モデル作成に用いる適切な側面輪郭線は実際の輪郭線と異なることがわかる。それ故、3 次元モデルの作成を試みる人物を撮影した写真が正面のものしかない場合は、側面輪郭線をよく似た体形の他の人物の側面画像から求める方法が考えられる。

よく似た体形でないが、実験で図 7.9(a) の側面画像から顔と胴体部分の側面

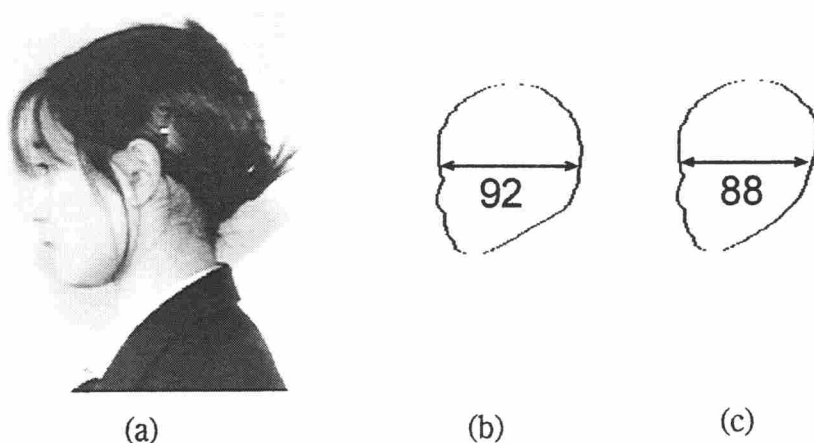


図 7.9 別の側面画像と輪郭線



図 7.10 図 7.9 の側面輪郭線で生成した原画

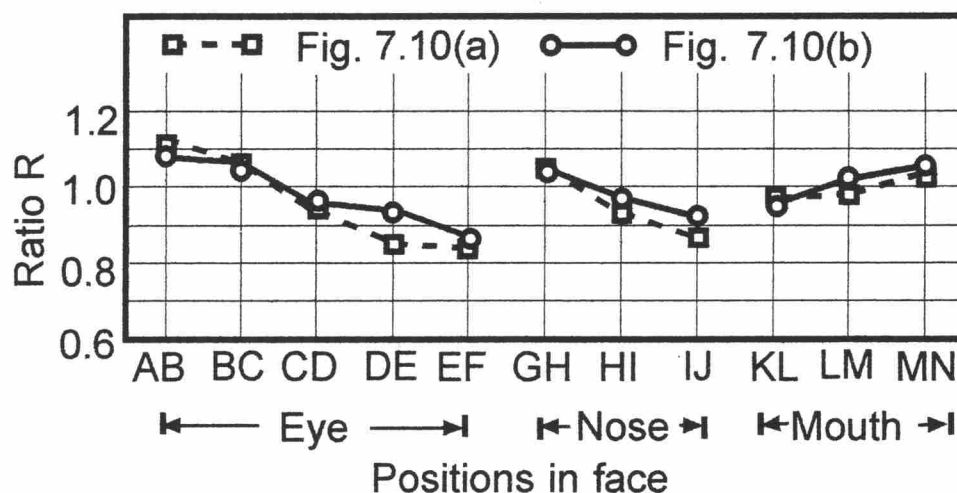


図 7.11 生成した原画（図 7.10）と撮影画像（図 7.7）における顔の比較結果

輪郭線を求めて原画の生成を試みた。側面画像の大きさは異なるので、顔の部分の大きさを図 7.1(a) の正面画像に一致させる。原画の生成に用いた側面輪郭線のうち、顔部分の側面輪郭線を図 7.9 (b), (c) に示す。これらの輪郭線は図 7.5 の輪郭線と比較して、あごの部分の形状が少し異なる。図中の数値は、図 7.5(a) を基準とした相対値を示す。なお、原画の生成で顔、耳、胴体の正面輪

郭線として図 7.2 のものを用いる。

生成した原画を図 7.10 に、定量的評価を図 7.11 に示す。図 7.10 の原画では、R の値は 1 から離れている。12 名の評価者による主観的評価の結果は、図 7.10(a) で評価 3 が多く（評価 3 が 9 名、評価 4 が 3 名）、少し間隔を狭くした側面輪郭線を用いて生成した図 7.10(b) で評価 4 が増加（評価 3 が 5 名、評価 4 が 6 名、評価 5 が 1 名）して、類似度は高くなる。この結果より、他の人物の側面輪郭線を用いて近似的な 3 次元人物モデルを作成しても、被写体と顔の表情がある程度類似した多視点原画を生成することができると考えられる。

7.5 ホログラフィックステレオグラムの作製と検討

3 次元人物モデルを用いたホログラフィックステレオグラム作製と画像再生の実験手順は、第 6 章の図 6.2 とほぼ同様である。第 6 章の手順と比較して異なっているのは、被写体を建物から人物に変更したこと、それに伴って被写体の 3 次元モデルの作成方法が変わったことである。ホログラフィックステレオグラムの原画生成、ホログラフィックステレオグラム合成、画像再生方法は第 6 章と同一である。

ホログラフィックステレオグラム合成のため、図 7.2(a) の正面輪郭線と図 7.5(d) の側面輪郭線を用いて近似的な 3 次元モデルを作成した。そして、3 次元モデル正面の左右 20° の範囲において視点を 0.5° 間隔で移動させて、コンピュータグラフィックスの手法で 80 枚の原画を生成した。なお、 0.5° の視点移動角度は第 5 章の式 (5.1) に基づいて設定している。ホログラフィックステレオグラムを合成した半円筒形のフィルムを図 7.12(a) に、このフィルムを回転させて左右方向から観察した再生像（虚像）の拡大写真を図 7.12(b), (c) に示す。作製したホログラフィックステレオグラムは虚像再生型であり、第 6 章のシミュレーション結果からわかるように両眼立体視による奥行き深度は浅い。再生像の両眼立体視は第 2 章の図 2.6 で説明した原理に基づくが、第 3 章のテレビカメラから入力した原画を用いた場合と、本章の近似的な 3 次元モデルに

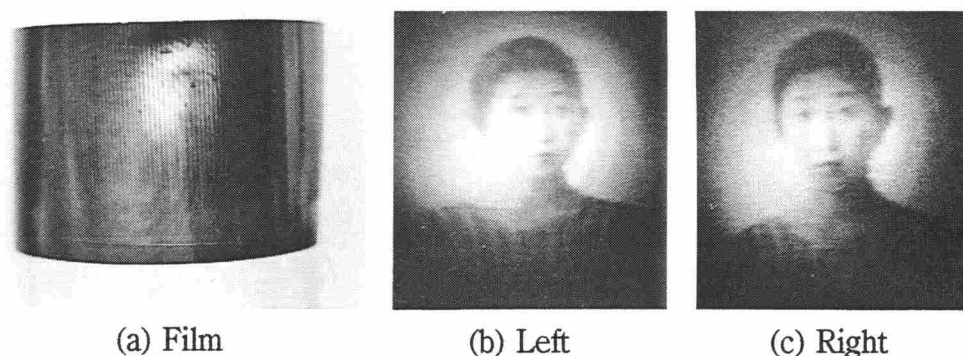


図 7.12 ホログラムフィルムと再生像

よる原画を用いた場合とで、実際に肉眼で観察して明確な差（例えば、鼻の高さ）を認識できなかった。3次元画像の評価を行うには、フィルム前方の空間に浮き出た立体感の強い再生像を得ることのできる、実像再生型のホログラフィックステレオグラム⁴⁵⁾を用いる方が適切であると考えられる。

なお、3次元人物モデルの精度を高めるために鼻の高さ情報を含めること、被写体が男性の場合についての原画生成などは、今後の課題である。

7.6 結言

原画撮影を簡略化するため、被写体(人物)の近似的な3次元モデルを作成し、正面から撮影した1枚の画像をテクスチャマッピングして、コンピュータグラフィックスの技術を用いてホログラフィックステレオグラム作製のための多視点原画を生成する手法を示した。

近似的な3次元モデルの形状は、被写体の正面輪郭線と側面輪郭線から求められることを示した。二つの輪郭線は正面と側面から被写体を撮影した画像から求められ、従来のように撮影機を移動させての原画撮影は不要となった。被写体と表情がよく似た多視点原画は、近似的な3次元モデル正面の左右20°程

度の範囲で生成可能であった。この範囲において 0.5° の間隔で 80 枚の多視点原画を生成して、ホログラフィックステレオグラムを作製することができた。

近似的な 3 次元モデルを作成する場合、他の人物の側面輪郭線を用いても、表示を試みる被写体の多視点原画を生成することができた。これは、被写体を正面から撮影した写真が 1 枚あれば、近似的な 3 次元モデルを作成して、ホログラフィックステレオグラム作製が可能なことを示している。この結果は、これまでに報告されていない新しい成果である。

第8章 結論

さまざまな画像の3次元表示に使用可能なホログラフィックステレオグラムは、作製（原画撮影、合成、感光材料の現像処理の過程）に長時間を要し、3次元ディスプレイとして使い難い面があった。このため、本研究では作製システムや多視点原画の生成法に関して新しい手法を提案し、その検証を行った。その結果として得た新しい知見を以下に要約し、本論文の結論とする。

第2章では、最初に、ホログラフィックステレオグラムの設計手法を体系化した。次に、ホログラフィックステレオグラムの作製時間を従来よりも短くできる、作製システムの構成について述べた。

- (1) 設計手法では、液晶空間光変調器に必要な最大画素数、短冊状ホログラムを記録するスリット幅などを求める式を導いた。
- (2) 液晶空間光変調器を用いて合成過程をコンピュータで制御すれば、半円筒形状のレーザ光再生型ホログラフィックステレオグラムの作製を、1時間程度（原画の生成時間を除く）で行えることを示した。なお、原画として、解像度が 128×128 画素の画像を180枚使用した。

第3章では、液晶テレビパネルの空間光変調特性がホログラフィックステレオグラムの再生像に与える影響を、実際の被写体（人物）を撮影した原画を用いて検証するとともに、画質の改善方法について述べた。

- (1) 画素数が縦 $146 \times$ 横 160 画素で、中間調表示が約5段階の液晶パネルを用いても、ホログラフィックステレオグラムから被写体の特徴を再現可能な再生像が得られた。但し、中間調表示は十分でない。
- (2) ホログラフィックステレオグラムの再生像において、明度の高い部分で濃淡（例えば、顔の表情）を区別しづらい場合は、撮影した原画に非線形の濃度階調変換を行うと、画質を改善できることがわかった。

第4章では、ホログラフィックステレオグラムの作製に、湿式現像処理が不

要なサーモプラスチックを記録材料として用いる方法について述べた。

- (1) 解像度が 128×128 画素の原画を 30 枚用いた場合、平面形ホログラフィックステレオグラムの作製は約 2 分間（原画の生成時間を除く）で行えることがわかった。なお、再生像の画質はやや硬調であった。
- (2) サーマプラスチックは、ホログラフィックステレオグラム作製に約 40 回まで繰り返し使用することができた。

第 5 章では、多視点原画を撮影できない場合に、被写体の 3 次元モデルを作成し、一視点から撮影した画像をテクスチャマッピングして、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する手法を確立した。既知の条件より被写体の形状を決められる例として地球の北半球を選び、気象衛星ひまわりで撮影した画像を用いて、この手法の評価を行った。

- (1) 一視点から撮影した画像を用いて、北半球の経度方向に 55° の範囲で 100 枚程度の多視点原画を生成できることがわかった。
- (2) 空間光変調器として使用した液晶テレビの画素数が少ないため、北半球全体の状況を詳細に観察できる高画質の再生像は得られなかった。

第 6 章では、被写体の形状が簡単な場合に、被写体を撮影した 1 枚の画像に形状復元法を適用して 3 次元モデルを作成し、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する手法を確立した。実験では、建物画像を用いて本手法の評価を行った。また、3 次元画像の評価のため、再生像の立体視シミュレーションを行った。

- (1) 3 次元モデルの作成には 2 点透視法で被写体を撮影した 1 枚の画像を用いるのみでよく、撮影機を移動しての原画撮影は不要になった。但し、形状復元法の計算に、視点から投影スクリーンまでの値が別に必要であった。
- (2) ホログラフィックステレオグラムの作製に用いる 100 枚の多視点原画は、3 次元モデルの周囲 50° の範囲で十分に生成可能であった。

第 7 章では、被写体の形状が複雑な場合に、被写体の近似的な 3 次元モデルを作成し、コンピュータグラフィックスの技術を用いて多視点原画を生成する

新しい手法を確立した。実験では、人物上半身を対象としてこの手法の評価を行った。

- (1) 近似的な3次元モデルは、被写体の正面輪郭線と側面輪郭線から決定できた。この二つの輪郭線は、被写体を正面と側面から撮影した2枚の画像から得られるので、従来の原画撮影を簡略化することができた。
- (2) 顔の側面輪郭線の左右の間隔を実際の輪郭線よりも狭く（70%～80%程度）すれば、被写体と顔の表情がよく似た原画を生成できることがわかった。そして、近似的な3次元モデル正面の左右20°程度の範囲で、80枚の多視点原画が生成可能であった。
- (3) 被写体の正面画像しか得られない場合は、他の人物の側面画像を用いても多視点原画の生成が可能であった。

本研究を通して、ホログラフィックステレオグラムの設計に必要なパラメータの値を決めることが可能になり、ホログラフィックステレオグラムの作製システムが機能化されて作製手順が従来よりも簡略化され、作製時間も短縮化された。このように、作製システムが使いやすくなったため、コンピュータグラフィックス画像や計算機で処理した画像などを、3次元静止画像の表示が行えるハードコピー形式で保存することが容易になった。また、被写体の一視点から見た2次元画像だけが与えられている場合、この画像から多視点原画をコンピュータによって生成することが必要になるが、本研究の手法により、この生成は3次元モデルの周囲40°から50°程度の広い範囲で行えるようになった。これは、再生像を肉眼で観察した場合、ホログラフィックステレオグラムに水平方向の視差情報を持たせるのに十分な角度である。

なお、ホログラフィックステレオグラム作製システムにおいて、画素数の多い、かつ中間調表示性能の高い液晶パネルを空間光変調器として用いることにより、再生像の画質を高めることが実用的見地からは、重要な課題の一つであろう。

謝 辞

本論文を完遂するにあたり、終始ご親切なご指導、ご鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科西原浩教授に謹んで感謝の意を表します。また、本論文をまとめるにあたり、ご親切なご指導とご討論を賜りました同大学工学研究科一岡芳樹教授ならびに吉野勝美教授に衷心より謝辞を表します。

本論文の作成にあたり、ご指導頂きました同大学工学研究科濱口智尋教授、尾浦憲治郎教授、森田清三教授に深く感謝の意を表します。

筆者が大阪大学大学院工学研究科に在学中にご指導頂きました、同大学名誉教授中村勝吾博士に感謝の意を表します。また、同大学産業科学研究所岩崎裕教授に感謝致します。

筆者が情報処理内地研究員として同大学で研究を行うにあたり、有益なご助言を頂いた同大学医学部春名正光教授、同大学工学研究科栖原敏明助教授、裏升吾講師、藤村晶寿助手に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、多方面から終始有益なご助言を頂いた湘南工科大学電気工学科佐藤甲癸教授に深く感謝致します。

最後に、本研究の一部を卒業研究として担当された富山商船高等専門学校情報工学科の卒業生（第1期～第7期）の方々に感謝します。

参考文献

- [1] 大越孝敬：“ホログラフィ,” 第1章, 電子通信学会 (1977).
- [2] T. S. Huang：“Digital holography,” Proc. IEEE, vol. 59, no. 9, pp. 1335-1346 (1971).
- [3] T. Okoshi：“Three-dimensional displays,” Proc. IEEE, vol. 68, no. 5, pp. 548-564 (1980).
- [4] S. A. Benton：“Holographic displays: 1975-1980,” Opt. Eng., vol. 19, no. 5, pp. 686-690 (1980).
- [5] 中島真人, 花野和生：“ディスプレイホログラフィーハンドブック,” 第1章, 暁印書院 (1985).
- [6] P. Hariharan：“Optical holography,” Chap. 1, Cambridge University Press (1986).
- [7] G. Tricoles：“Computer generated holograms: an historical review,” Appl. Opt., vol. 26, no. 20, pp. 4351-4360 (1987).
- [8] P. C. Mehta and V. V. Rampal：“Lasers and holography,” Chap. 4, World Scientific (1993).
- [9] 久保田敏弘：“ホログラフィ入門ー原理と実際ー,” 第3章, 第4章, 朝倉書店 (1995).
- [10] 平田渥美, 鈴木清明：“3次元ディスプレイ,” テレビ誌, vol. 41, no. 7, pp. 610-618 (1987).
- [11] 佐藤甲癸：“動画ホログラフィの研究動向,” テレビ誌, vol. 46, no. 5, pp. 586-593 (1992).
- [12] 増田千尋：“3次元ディスプレイ,” 第3章, 産業図書 (1990).
- [13] 泉 武博 監修/NHK放送技術研究所 編：“3次元映像の基礎,” 第5章, 第6章, オーム社 (1995).
- [14] 磯野春雄：“3次元画像ディスプレイ,” 信学会誌, vol. 78, no. 7, pp. 694-698 (1995).
- [15] J. T. McCrickerd and N. George：“Holographic stereogram from sequential component photographs,” Appl. Phys. Lett., vol. 12, no. 1, pp. 10-11 (1968).
- [16] D. J. DeBitetto：“Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recordings,” Appl. Opt., vol. 8, no. 8, pp. 1740-1741 (1969).
- [17] M. C. King, A. M. Noll and D. H. Berry：“A new approach to computer-generated holography,” Appl. Opt., vol. 9, no. 2, pp. 471-475 (1970).
- [18] 磯野春雄, 安田 稔, 笹沢秀明：“液晶パララックスバリヤ方式3次元画像ディスプレイ,” 信学会論文誌 C-II, vol. J76-C-II, no. 1, pp. 24-30 (1993).

- [19] 磯野春雄, 安田 稔, 竹森大祐, 金山秀行, 山田千彦, 千葉和夫 : “多眼式メガネなし3次元テレビジョン,” 信学会論文誌 C-II, vol. J76-C-II, no. 1, pp. 16-23 (1993).
- [20] 辻内順平 編著 : “ホログラフィックディスプレイ,” 第II編2章, 産業図書 (1990).
- [21] J. R. Andrews, B. Tuttle, M. Rainsdon, R. Damm, K. Thomas and W. E. Hass : “Holographic stereograms generated with a liquid crystal spatial light modulator,” Proc. SPIE, vol. 902, pp. 92-94 (1988).
- [22] 木下健治 : “ホログラフィック・ステレオグラムによるCG画像の表示,” 信学技報, EID90-12 (1990).
- [23] 木下健治 : “光線追跡法で生成した画像を用いたホログラフィックステレオグラムの自動合成,” 信学会論文誌, vol. J75-C-I, vol. 3, pp. 141-147 (1992).
- [24] K. Kinoshita : “Automatic synthesis of holographic stereograms with ray-traced image data,” Electronics and Communications in Japan, Part 2, vol. 75, no. 7, pp. 41-50 (1993).
- [25] C. Newswanger, C. Outwater and D. Coons : “Holographic stereograms from computer generated images,” Proc. SPIE, vol. 812, pp. 139-146 (1987).
- [26] 山口雅浩, 辻川 普, 大山永昭, 本田捷夫, 辻内順平 : “液晶TVによるホログラフィック・ステレオグラムの合成,” 第35回応物春季予稿集, p. 763 (1988).
- [27] T. Honda, M. Yamaguchi, D. -K. Kang, K. Shimura, J. Tsujiuchi and N. Ohyama : “Printing of holographic stereogram using liquid-crystal TV,” Proc. SPIE, vol. 1051, pp. 186-191 (1989).
- [28] 鈴木正根 : “実践ホログラフィ技術,” 第3章, オプトロニクス社 (1986).
- [29] 本田捷夫 : “白色光再生円筒型ホログラフィック・ステレオグラム,” 光学, vol. 8, no. 4, pp. 196-202 (1979).
- [30] 白井 茂, 山本豊孝, 八木信忠, 広沢文則 : “映画撮影技術ハンドブック,” 第1章, 第7章, 写真工業出版社 (1986).
- [31] 内田龍男 編著 : “次世代液晶ディスプレイ技術,” 第1章, 第13章, 第14章, 工業調査会 (1995).
- [32] 大越孝敬 : “三次元画像工学,” 第3章, 産業図書 (1974).
- [33] 田崎京二, 大山 正, 樋渡涓二 編集 : “視覚情報処理,” 第2章, 朝倉書店 (1979).
- [34] 本田捷夫 : “ホログラフィック・ディスプレイの最近の動向,” 光学, vol. 21, no. 9, pp. 590-596 (1992).

- [35] 松下 昭, 平井紀光 : “ホログラフィの基礎と実験,” 第5章, 第6章, 共立出版 (1979).
- [36] T. Yatagai : “Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms,” *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 11, pp. 2722-2729 (1976).
- [37] 鈴木正根, 齋藤隆行 : “医療診断用立体視システム,” 日本光学会ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報, no. 1, pp. 2-9 (1991).
- [38] 久保田敏弘 : “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, pp. 311-314 (1989).
- [39] 佐藤甲癸 : “ホログラフィックステレオグラムによるカラー立体像再生システムの最適設計に関する検討,” 画像電子学会誌, vol. 23, no. 5, pp. 499-504 (1994).
- [40] 岡田勝行, 吉井進一, 俣木宗蔵, 加藤 学, 辻内順平 : “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, pp. 319-322 (1989).
- [41] L. M. Murillo-Mora, K. Okada and J. Tsujiuchi : “Color conical holographic stereogram,” 第23回画像工学コンファレンス論文集, pp. 333-336 (1992).
- [42] Y. -S. Cheng, J. -Y. Lin : “Experimental use of a low cost liquid crystal TV in multiplex holography,” *Appl. Opt.*, vol. 28, no. 5, pp. 829-830 (1989).
- [43] 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, pp. 323-326 (1989).
- [44] M. Yamaguchi, N. Ohyama and T. Honda : “Holographic three-dimensional printer : new method,” *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 2, pp. 217-222 (1992).
- [45] S. A. Benton : ““Alcove” holograms for computer-aided design,” *Proc. SPIE*, vol. 761, pp. 53-61 (1987).
- [46] Y. Kajiki, H. Ueda, K. Tanaka, H. Okamoto and E. Shimizu : “Miniature light bulb reconstructible and large-sized computer generated holograms recorded with an image setter,” *Proc. SPIE*, vol. 2577, pp. 60-63 (1995).
- [47] J. S. Kollin, S. A. Benton and M. L. Jepsen : “Real-time display of 3-D computed holograms by scanning the image of an acousto-optic modulator,” *Proc. SPIE*, vol. 1136, pp. 178-185 (1989).
- [48] 山本 強 : “The 3 dimensional computer graphics,” 第2章, CQ出版社 (1983).
- [49] T. Honda, K. Okada and J. Tsujiuchi : “3-D distortion of observed images reconstructed from a cylindrical holographic stereogram. (1) laser light reconstruction type,” *Opt. Comm.*, vol. 36, no. 1, pp. 11-16 (1981).

- [50] K. Kinoshita : "Human image holographic stereograms synthesized with a liquid crystal display panel," Technical Digest of International Symposium on Optical Memory, pp. 175-176 (1991).
- [51] 木下健治, 中市賀英子 : "ホログラフィックステレオグラムによるポートレートの作製," 信学技報, EID93-137 (1994).
- [52] K. Kinoshita and K. Nakaichi : "Attempt at making portraits using holographic stereograms," Meeting Digest of ICO Topical Meeting, p. 309 (1994).
- [53] 木下健治, 中市賀英子 : "ホログラフィックステレオグラムによる人物像の表示," 画像電子学会誌, vol. 24, no. 5, pp. 595-602 (1995).
- [54] T. H. Barnes, T. Eiji, K. Matsuda and N. Ooyama : "Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television," Appl. Opt., vol. 28, no. 22, pp. 4845-4852 (1989).
- [55] D. A. Ansley : "Techniques of pulsed laser holography of people," Appl. Opt., vol. 9, no. 4, pp. 815-821 (1970).
- [56] 木下健治, 門村英城 : "ホログラフィックステレオグラム合成用原画の前処理," 信学'95 春大 D-404 (1995).
- [57] 木下健治 : "書換え可能なホログラフィック・ステレオグラム," 第21回画像工学コンファレンス論文集, pp. 205-208 (1990).
- [58] K. Kinoshita : "Novel trial to use thermoplastic plates for rewritable holographic stereograms," Technical Digest of the third Microoptics Conference, pp. 264-267 (1991).
- [59] K. Kinoshita : "Novel use of thermoplastic plates for rewritable holographic stereograms," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 31, Part 1, no. 5B, pp. 1677-1681 (1992).
- [60] 木下健治 : "液晶空間光変調器とサーモプラスチックを用いたホログラム記録についての検討," 第25回画像工学コンファレンス論文集, pp. 233-236 (1994).
- [61] 木下健治 : "液晶空間光変調器によるサーモプラスチックへのホログラム記録," 3D 映像, vol. 9, no. 1, pp. 62-65 (1995).
- [62] K. Higuchi and K. Komiya : "Updating of holographic patterns on photochromic materials," Proc. Japan Display '89, pp. 642-645 (1989).
- [63] Y. Osugi, A. Honda, A. Hamajima, S. Toyoda, Y. Kozuka and T. Minemoto : "A method for making high-resolution pockels readout optical modulator (PROM)," 光学, vol. 21, no. 4, pp. 237-240 (1992).

- [64] T. Saito, S. Oshima, T. Honda and J. Tsujiuchi : "An improved technique for holographic recording on a thermoplastic photoconductor," Opt. Comm., vol. 16, no. 1, pp. 90-95 (1976).
- [65] T. Saito, T. Imamura, T. Honda, and J. Tsujiuchi : "Solvent vapour method in thermoplastic photoconductor media," J. Optics (Paris), vol. 11, no. 5, pp. 285-292 (1980).
- [66] B. Ineichen, C. Liegeois and P. Meyrueis : "Thermoplastic film camera for holographic recording of extended objects in industrial applications," Appl. Opt., vol. 21, no. 12, pp. 2209-2214 (1982).
- [67] T. Minemoto and T. Nonami : "Recording a binary computer-generated hologram on a thermoplastic film," Opt. Comm., vol. 47, no. 2, pp. 97-100 (1983).
- [68] H. Farhoosh, Y. Fainman, K. Urquhart and S. H. Lee : "Real-time display of 3-D computer data using computer generated holograms," Proc. SPIE, vol. 1052, pp. 172-176 (1989).
- [69] 斎藤高宏 : "ホログラム記録用プラスチック・光導電体感光材料," O plus E, no. 18, pp. 78-85 (1981).
- [70] 鈴木正根, 金谷元徳, 北裏富磨 : "ホログラフィカメラにおけるサーモプラスチック電子写真記録," 電子写真学会誌, vol. 20, no. 2, pp. 38-40 (1982).
- [71] 木下健治, 佐藤甲癸 : "ホログラフィックステレオグラムによる気象衛星ひまわり画像の表示方法," 信学技報, IE92-111 (1993).
- [72] 木下健治, 佐藤甲癸 : "気象衛星ひまわり画像からホログラフィ画像を生成する方式の提案," テレビ誌, vol. 48, no. 9, pp. 1141-1147 (1994).
- [73] 木下健治 : "気象衛星ひまわり画像からホログラフィ画像を生成する方式の提案," 画像ラボ, vol. 6, no. 4, pp. 59-62 (1995).
- [74] 佐藤龍司, 森 邦彦, 藤吉康志 : "ホログラフィの"ひまわり"画像への応用," 第35回応物春季予稿集, p. 760 (1988).
- [75] 土屋 清 編著 : "リモートセンシング概論," 第2章, 朝倉書店 (1990).
- [76] 木下健治, 黒田剛弘 : "原画入力を簡単化したホログラフィックステレオグラの合成," 信学技報, EID94-1 (1994).
- [77] K. Kinoshita : "Generation of sequential perspective views from a single two-dimensional image for holographic stereogram synthesis," Proc. SPIE, vol. 2577, pp. 50-59 (1995).

- [78] 木下健治：“ホログラフィックステレオグラムの再生像についての検討,” 日本光学会ホログラフィックディスプレイ研究会講演論文集, pp. 21-24 (1995).
- [79] S. Takahashi, T. Honda, M. Yamaguchi, N. Ohyama and F. Iwata : “Generation of intermediate parallax-images for holographic stereograms,” Proc. SPIE, vol. 1914, pp. 2-8 (1993).
- [80] 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, vol. 22, no. 11, pp. 707-713 (1993).
- [81] 網島宣浩, 中島真人：“オクルージョンを考慮した2眼ステレオ画像からの多眼ステレオ画像生成,” 画像電子学会誌, vol. 24, no. 5, pp. 576-582 (1995).
- [82] 中谷広正, 北橋忠宏：“無限遠点を用いた情景中の対象物の3次元構造の復元,” 信学会論文誌, vol. J68-D, no. 8, pp. 1481-1488 (1985).
- [83] T. Kanade : “Recovery of the three-dimensional shape of an object from a single view,” Artificial Intelligence, vol. 17, pp. 409-460 (1981).
- [84] 光本浩士, 岡崎耕三, 田村進一, 梶見直樹, 副井 裕：“面对称性に基づく単眼視からの3次元復元,” 信学会論文誌 D, vol. J71-D, no. 10, pp. 2032-2040 (1988).
- [85] M. J. Magee and J. K. Aggarwal : “Determining vanishing points from perspective images,” Computer Vision, Graphics and Image Processing, no. 26, pp. 256-267 (1984).
- [86] 村田和美：“ホログラフィー入門,” 第3章, 朝倉書店 (1976).
- [87] K. Kinoshita and H. Tsuru : “Holographic display of human images generated using a three-dimensional model,” Technical Digest of the 1996 International Topical Meeting on Optical Computing, pp. 104-105 (1996).
- [88] 木下健治：“3次元モデルに基づく人物像のホログラフィ表示についての検討,” 3次元画像コンファレンス'96講演論文集, pp. 201-206 (1996).
- [89] 木下健治：“3次元モデルを用いた人物像ホログラフィックステレオグラムの原画生成法,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J80-D-II, no. 8, pp. 2088-2094 (1997年8月).
- [90] 沼崎浩明, 佐藤 誠, 小川英光：“モデルに基づく顔画像からの人物識別,” 信学技報, PRU87-122 (1988).
- [91] 大沼一彦, 岩田藤郎, 小高将裕, 江森康文：“平面型ホログラフィックステレオグラム用原画作製,” 光学, vol. 17, no. 8, pp. 413-417 (1988).
- [92] 岡田勝行, 木村 亨, 本田捷夫：“顔面三次元画像の簡易作成,” 3次元画像コンファレンス'96講演論文集, pp. 76-81 (1996).

関連発表文献

[1] 論文

- 1) 木下健治：“光線追跡法で生成した画像を用いたホログラフィックステレオグラムの自動合成,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J75-C-I, no. 3, pp. 141-147 (1992年3月).
- 2) K. Kinoshita : “Novel use of thermoplastic plates for rewritable holographic stereograms,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 31, Part 1, no. 5B, pp. 1677-1681 (1992年5月).
- 3) K. Kinoshita : “Automatic synthesis of holographic stereograms with ray-traced image data,” Electronics and Communications in Japan, Part 2, vol. 75, no. 7, pp. 41-50 (1993年1月).
- 4) 木下健治, 佐藤甲癸：“気象衛星ひまわり画像からホログラフィ画像を生成する方式の提案,” テレビジョン学会誌, vol. 48, no. 9, pp. 1141-1147 (1994年9月).
- 5) 木下健治, 中市賀英子：“ホログラフィックステレオグラムによる人物像の表示,” 画像電子学会誌, vol. 24, no. 5, pp. 595-602 (1995年10月).
- 6) 木下健治：“3次元モデルを用いた人物像ホログラフィックステレオグラムの原画生成法,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J80-D-II, no. 8, pp. 2088-2094 (1997年8月).

[2] 国際会議

- 1) K. Kinoshita : “Human image holographic stereograms synthesized with a liquid crystal display panel,” Technical Digest of International Symposium on Optical Memory, pp. 175-176, Sapporo (1991年10月).
- 2) K. Kinoshita : “Novel trial to use thermoplastic plates for rewritable holographic stereograms,” Technical Digest of the third Microoptics Conference, pp. 264-267, Yokohama (1991年10月).
- 3) K. Kinoshita and K. Nakaichi : “Attempt at making portraits using holographic stereograms,” Meeting Digest of ICO Topical Meeting, p. 309, Kyoto (1994年4月).
- 4) K. Kinoshita : “Generation of sequential perspective views from a single two-dimensional image for holographic stereogram synthesis,” Technical Digest Summary of International Conferences on Optical Fabrication and Testing and Applications of Optical Holography, no. 2577-06, Tokyo (1995年6月).

- 5) K. Kinoshita : "Generation of sequential perspective views from a single two-dimensional image for holographic stereogram synthesis," Proc. SPIE, vol. 2577, pp. 50-59 (1995年8月).
- 6) K. Kinoshita and H. Tsuru : "Holographic display of human images generated using a three-dimensional model," Technical Digest of the 1996 International Topical Meeting on Optical Computing, pp. 104-105, Sendai (1996年4月).

[3] 研究会

- 1) 木下健治 : "ホログラフィック・ステレオグラムによるCG画像の表示," 信学技報, EID90-12 (1990年6月).
- 2) 木下健治 : "書換え可能なホログラフィック・ステレオグラム," 第21回画像工学コンファレンス論文集, pp. 205-208 (1990年12月).
- 3) 木下健治, 佐藤甲癸 : "ホログラフィックステレオグラムによる気象衛星ひまわり画像の表示方法," 信学技報, IE92-111 (1993年1月).
- 4) 木下健治, 中市賀英子 : "ホログラフィックステレオグラムによるポートレートの作製," 信学技報, EID93-137 (1994年2月).
- 5) 木下健治, 黒田剛弘 : "原画入力を簡単化したホログラフィックステレオグラムの合成," 信学技報, EID94-1 (1994年6月).
- 6) 木下健治 : "液晶空間光変調器を用いたホログラムの記録," 日本光学会ホログラフィックディスプレイ研究会講演論文集, pp. 7-10 (1994年11月).
- 7) 木下健治 : "液晶空間光変調器とサーモプラスチックを用いたホログラム記録についての検討," 第25回画像工学コンファレンス論文集, pp. 233-236 (1994年12月).
- 8) 木下健治 : "ホログラフィックステレオグラムの再生像についての検討," 日本光学会ホログラフィックディスプレイ研究会講演論文集, pp. 21-24 (1995年11月).
- 9) 木下健治 : "3次元モデルに基づく人物像のホログラフィ表示についての検討," 3次元画像コンファレンス'96講演論文集, pp. 201-206 (1996年7月).
- 10) 木下健治 : "3次元モデルに基づく人物像のホログラフィ表示についての検討," 三次元映像のフォーラム第38回研究会 (1996年10月).

[4] 学会発表

- 1) 木下健治：“液晶TVを用いたホログラフィックステレオグラムによるCG画像の表示,” 1989年信学秋季全大 C-327 (1989年9月).
- 2) 木下健治：“ホログラフィックステレオグラムによる人物像の表示,” 1990年信学春季全大 C-399 (1990年3月).
- 3) 木下健治：“液晶ディスプレイとサーモプラスチック・フィルムを用いたホログラム,” 第37回春季応物講演会 29a-D-7 (1990年3月).
- 4) 木下健治：“ホログラフィック・ステレオグラムによる2値画像の表示,” 1990年信学秋季全大 C-380 (1990年10月).
- 5) 木下健治, 篠川敏行, 羽物俊秀：“液晶シャッタを用いた立体視システムの試作,” 平成2年電気関係学会北陸支部連合大会 B-97 (1990年10月).
- 6) 木下健治, 春名正光, 西原 浩：“レーザビーム描画法で作製した変形アキシコンの出射ビーム特性,” 第53回秋季応物講演会 18p-N-8 (1992年9月).
- 7) 木下健治, 羽物俊秀：“縮小写真撮影によるフレネルゾーンプレートの作製,” 平成4年電気関係学会北陸支部連合大会 D-60 (1992年10月).
- 8) 木下健治, 佐藤甲癸：“気象衛星ひまわり画像のホログラフィックステレオグラム,” 信学'93春大 D-464 (1993年3月).
- 9) 木下健治：“ホログラフィックステレオグラムによる立体像の表示,” 信学会第8回動画ホログラフィ研究会会報, no. 8, p. 11 (1993年9月).
- 10) 木下健治, 中市賀英子：“ホログラフィック・ポートレート制作の試み,” 信学'93秋大 SD-7-8 (1993年9月).
- 11) 木下健治：“計算機合成ホログラムの作製についての一検討,” 平成5年電気関係学会北陸支部連合大会 D-32 (1993年9月).
- 12) 木下健治, 黒田剛弘：“ホログラフィックステレオグラムの原画生成についての検討,” 信学'94春大 D-373 (1994年3月).
- 13) 木下健治：“サーモプラスチックへのホログラム記録についての検討,” 第55回秋季応物講演会 20a-B-2 (1994年9月).
- 14) 木下健治, 酒井直樹：“レーザプリンタを用いた計算機合成ホログラムの作製,” 平成6年電気関係学会北陸支部連合大会 D-61 (1994年9月).
- 15) 木下健治, 門村英城：“ホログラフィックステレオグラム合成用原画の前処理,” 信学'95春大 D-404 (1995年3月).

- 16) 木下健治：“ホログラフィックステレオグラムの再生像についての検討,” 第56回秋季応物講演会 26p-E-3 (1995年8月).
- 17) 木下健治, 大井智香子, 堀田裕美, 門村英城：“フォトCD-ROMを用いた画像処理システム,” 平成7年電気関係学会北陸支部連合大会 F-74 (1995年9月).
- 18) 木下健治, ハンティシユー, 畑野篤：“計算機合成ホログラムのデータ作成,” 日本物理学会・応用物理学会北陸支部講演会 B-9 (1995年12月).
- 19) 木下健治, 釣 裕美：“楕円モデルで近似した人物のホログラフィ画像生成,” テレビ学会1995年映像メディア部門冬季大会 5-1 (1995年12月).
- 20) 木下健治, 釣 裕美：“3次元モデルを用いて生成した人物像のホログラフィ表示,” 信学'96春大 D-433 (1996年3月).
- 21) 木下健治：“人物像ホログラフィックステレオグラムの原画生成,” 1996年画像電子学会大会 21 (1996年6月).
- 22) 木下健治, 畑野 篤, ハンティシユー：“計算機合成ホログラムの作製,” 信学'96秋大 D-309 (1996年9月).
- 23) 木下健治, 武田亜美, 鷺北祐子：“3次元画像用の原画生成法,” 平成8年電気関係学会北陸支部連合大会 F-39 (1996年10月).
- 24) 木下健治：“フレネル型計算機合成ホログラム,” 日本物理学会・応用物理学会北陸支部講演会 B-29 (1996年12月).
- 25) 木下健治, 西村隆志：“OpenGLによる3次元画像の原画生成,” 日本物理学会・応用物理学会北陸支部講演会 B-30 (1996年12月).
- 26) 木下健治：“ホログラフィ表示に用いる3次元人物モデルの検討,” 信学'97春大 D-11-149 (1997年3月).

[5] 解説

- 1) 木下健治：“液晶空間光変調器によるサーモプラスチックへのホログラム記録,” 3D映像, vol. 9, no. 1, pp. 62-65 (1995年1月).
- 2) 木下健治：“気象衛星ひまわり画像からホログラフィ画像を生成する方式の提案,” 画像ラボ, vol. 6, no. 4, pp. 59-62 (1995年4月).