

コンピュータ・ホログラフィの開発

大坊 真洋*

ホログラフィの現状について調査し、県内企業の現存技術で作成可能な応用製品として立体ディスプレイを検討した。プラスチック性の黒色板に、針で扇状の擦り傷をつけて、白色光を照射し散乱光を両眼で観察すると、板表面よりも奥または手前の空中に3次元像が再生できることを試作により確認した。高精度を必要とせず、安価な装置で製作が可能であり、立体看板や、標識、壁窓材装飾等の3次元表示器へ応用できる。

キーワード：CGH、立体ディスプレイ

A Development of Computer Generated Holography

DAIBO Masahiro*

The application of state-of-the-art of holography is investigated, and it is examined that the application product which could be made by existence technology of a firm in this prefecture. A large-scale three dimensional display is one of good choice. A fan-shaped fine grooves is engraved with a needle of compasses onto the surface of a black board made by plastic. Many grooves are drawn in the same way, a three dimensional display is produced experimentally. When I illuminated the board with collimated white light, then observed scattering light with both eyes, specific points along the groove shined brightly. Three dimensional images are reconstructed both below and above the actual board surface. Using this technique, production of three dimensional display becomes feasible by the cheap device which is not strictly necessary high precision. This display can be applied to 3D display, decoration of wall or window materials. The implementation of 3D display and the experimental results are presented.

key words : CGH, three dimensional display

1 緒言

ホログラフィは、光の波面を任意に変調でき、従来の単純レンズや反射鏡では不可能な複雑な波面を実現可能とする。このため、ホログラフィは光技術の主要な要素の一つであり、立体ディスプレイや計測、光素子に利用されている。ホログラフィは、本質的に制御を要する空間の大きさが光の波長以下であり、高精度と高分解能が要求されるため、その製作や制御は容易ではなく、これが工業的な活用を制限している。

しかし近年、子供用玩具からハイテク機器の部品に至るまで、日常生活の所々にホログラフィを応用した製品を目にする機会が少しずつ増えてきている。ホログラフィを計算機と電子機器によって実現する方法（コンピュータ・ホログラフィ）も、電子デバイスの発展により現実的となり、今後光を扱ういろいろな場面で、ホログラフィが応用され、本格的に発展することが期待され

る。

この報告では、ホログラフィのさまざまな応用のなかで、人間の感性に強いインパクトを与えることが可能な立体表示に注目し、最初に最新の技術動向を述べ、次に簡単な機械的加工によって製作が可能な立体ディスプレイの製作方法と、その試作結果について述べる。

2 技術動向

2-1 3次元物体の表示器への応用

ホログラフィの身近な応用例の一つに、3次元物体の表示器があり、あたかも実際に物体がそこにあるかのように立体像を空間に表示することが可能である。例えば、重要文化財や美術品をホログラフィに撮影して展示する例や、肖像として記録保存している例がある。これらは、銀塩乾板やゼラチン、ポリマー等の感光性材料に、干渉縞の光強度の二乗を記録させており、特にカ

ラー化を施したホログラフィの再生像は、本物と見間違えるくらい精巧である。また芸術・美術分野への応用も始まっている。本物そっくりに記録するばかりでなく、見る方向によって3次元像が色彩豊かに変化する現象を応用した新しい芸術が生まれ育ちつつある。

しかし、このような従来のホログラフィは、撮影時に振動がない環境でレーザを使用しなければならず、さらに現像や漂白といった化学的な処理が必要であり、これらのことがホログラフィの普及を制限している一因となっている。

2-2 セキュリティー印刷への応用

別の実用化の例として、セキュリティー印刷分野への応用があげられる。一般的に、ホログラフィは、光の波長で干渉縞を記録した物であるので、構造は非常に微細(サブ・ミクロン~数ミクロン)で、複雑である。このため複製が困難となり、ホログラフィを付加すると偽物や不正複製は減少する。また見る角度によって見え方が変化するので、美しく魅惑的であり商品付加価値が向上する。このようなOVD(Optically Variable Device)は、具体的にはクレジットカード、小切手、旅行小切手、証明書、イベントチケット、切符、パスポート、免許証、保険証、薬品パッケージ、コンピュータソフト、CD、ビデオ、密封シール、IDカード、切手、紙幣等の偽造防止のために利用されている。ホログラフィの世界市場規模は1994年で、表1のようになる¹⁾。特にパッケージ装飾の伸び率は大きく1993年に比べて約1.9倍になっている。

分類	市場規模 (億円)
セキュリティー書類	55
ブランド証明	43
パッケージ装飾	34
販売促進広告	26
置物	19
ギフト	13
出版	4
合計	194

表1 ホログラフィの世界市場規模(1994年)

2-3 3次元テレビへの応用

3次元ディスプレイの究極ともいえる動画ホログラフィも活発に研究されており、いろいろな方式が検討されている。MITメディアラボは、超音波光変調器とポリゴンミラーによってリアルタイムのホログラフィを実現した²⁻⁴⁾。また、アラバマ大学は、LSI上の液晶層を下部のLSIの電極の電界で直接駆動する"IC Vision"を提案している^{5,6)}。一方、凸版印刷は、液晶ディスプレイの上にあ

かじめ計算で求めておいたグレーティングを搭載し、必要な方向のグレーティングに対応した液晶ディスプレイのピクセルを駆動する"Grating Image"方式を開発している⁷⁾。これらの動画ホログラフィは、電子的に制御するので、膨大なホログラフィの情報量を巧みに処理して、ビデオレートでホログラフィの再生が可能となるように工夫されている。超音波光変調器を使用するタイプは、あらかじめ計算しておいたルックアップテーブルのデータを使って超音波光変調器を制御している。IC VisionとGrating Imageは、グレーティングによって観測位置への偏向角度をあらかじめ決めてい

2-4 機械加工で実現可能な立体ディスプレイ

SPIE学会のホログラフィ・ワーキング・グループでサイエンス・ホビイストのWilliam Beatyが擦り傷によるホログラフィック・ディスプレイを議論している。黒色の車の洗車時の傷が、太陽の光に照らされた時に、立体的なゴーストが見える現象を発見したのがきっかけになっている。彼は、白色光再生が可能なレンボーホログラムの干渉パターンと、この擦り傷によるホログラフィック・ディスプレイのパターンの類似性を指摘している。

またそれとは別に、金属表面を回転工具で円状にラッピングすると、その擦り傷により光が散乱されて、立体的なゴーストイメージが出現し、それを幾何学的に解析した報告がなされている⁸⁾。

これらの現象は、機械的加工で可能な分解能の大きさ(数十~数百ミクロン)で、立体ディスプレイの実現が可能なことを示唆している。

3 実験方法

3-1 立体ディスプレイの試作

今回、簡単な設備で製作が可能であるという理由から、立体ディスプレイの実現する方法として、擦り傷によるホログラフィック・ディスプレイを選択した。一般にホログラフィを実現するには、光の波長程度の光学的な構造(回折格子)が必要となるが、数百nm~数 μ m程度の細かさで、ホログラフィ回折パターンを製作可能な、電子ビーム描画装置や、レーザ描画装置は非常に高価である。またこのような装置を使用しても、一度に描画できる範囲は数mmから数cmであり、看板等に使用できるような大型(数十cm~数m)のディスプレイは製作することが困難である。一方、擦り傷によるホログラフィック・ディスプレイは、一般的なホログラフィのような微細な回折格子が必要でなく、簡単な機械的加工で立体ディスプレイが実現可能である。

立体ディスプレイの試作は、William Beatyがインター

ネット上での説明した方法と同様な方法で行った。図1に製作方法を示す。表示する立体像は、深さ6 cmの位置に1辺6 cm正方形と、深さ8 cmに直径3 cmの円と、深さ11 cmに1辺3 cm正方形のオブジェクトが配置され、2つの正方形の各頂点を互いに結んだモデルとした。このモデル像を図1(a)に示す。Z軸に平行な方向で、正面からみると図1(b)のようなイメージとなる。煩雑さをさけるために図1(b)~(d)では円オブジェクトは割愛した。次に、黒色のプラスチック板上に、立体像を表示する位置から、各オブジェクトを奥行き深さの分だけ平行移動させて、レイアウトした。この状態を図1(c)に示す。奥行きとシフトさせる量は比例する。次にレイアウトしたそれぞれのオブジェクト上(外形)の任意の点を中心として、シフトさせた量と等しい半径で円弧を描く。角度は約120度~180度とした。この角度が大きいくほど、視点を動かした時に立体像が動く範囲が広がる。コンパスの先端は針に変えてあるので、微細な円弧状の傷(溝)がプラスチック板上に描かれる。ここで重要なのは、光を散乱させるために、溝は十分に微細でなければならない。先端が鋭利な針でプラスチック板、あるいは、金属板上に傷をつけることにより、この条件は容易に実現できる。円弧を描く操作を、コンパスの中心を同一オブジェクト上で少しずつ移動させて繰り返す。これを図1(d)に示す。ここでは図を見やすくするために、縦の太い線で描いた辺に対応する円弧だけを表示している。同一の深さにある部分は、円弧の半径が等しい。コンパスの中心を移動させる刻み値は、溝と隣接する溝の相互作用による光の回折が不必要なので、基本的に目の分解能程度であればよい。立体像を観測する距離に依存するが、例えば200ミクロンあれば十分な細かさである。今回は装置を使わず、手作業で試作したので刻み値は500ミクロン程度である。次に、深さの違うパターンについても、半径を変えて同様な操作を行い、図1(d)のように多数の重なり合った円弧を描く。

4 実験結果

製作したプラスチック製のディスプレイに、太陽のコリメートされた白色光をあてると、円弧状に描いた溝の特定箇所が明るく輝いて観察された。光源が蛍光灯の場合であっても、蛍光灯の長手方向と、円弧状の傷の接線が直交するようにすると、特定箇所が明るく輝いた。

輝点は白色であった。多数の溝に対応した輝点群を結ぶと、三次元的に立体像が再生されて観測できた。再生した方法を図2に示す。図2(a)のようにすると、設計通りの立体像が、ディスプレイの奥に(プラスチック板表面よりも奥)観測された。図2(b)のようにした場合には、奥行きが反対になった共役像がプラスチック板表面手前の空間に再生された。

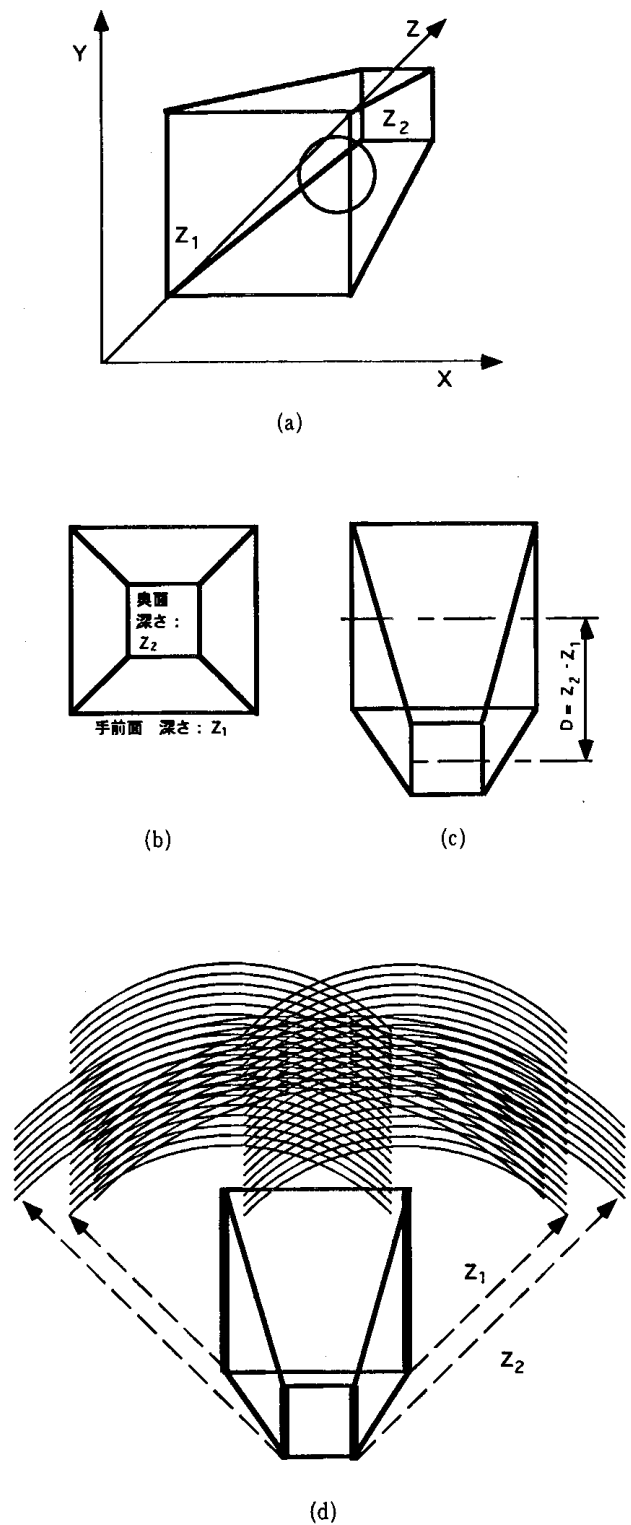


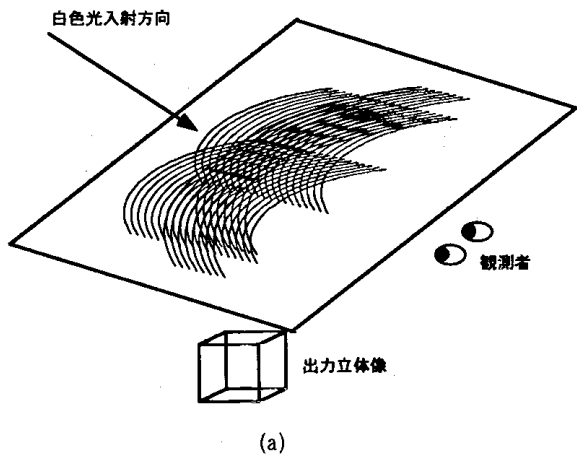
図1 試作した立体ディスプレイの製作方法

- (a) 表示する立体オブジェクトのモデル
- (b) 正面から見た場合のモデル
- (c) オブジェクト要素の平行移動
- (d) 各オブジェクトの外形の任意の点を中心として、奥行きに対応した半径で、溝を刻み込む方法の説明

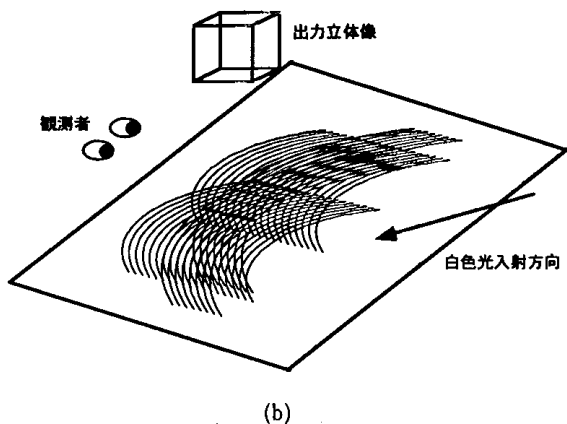
図3は、図2(a)の構成の場合の再生像である。全て奥の方に見え、奥行きが浅い方から正方形(大)、円、正方形(小)の順に再生された。図4は、図2(b)の構成の場合の再生像であり、奥行きは反対となっている。図2(a)の構成の場合、観測位置を左右に動かすと、動いた方向と同一方向に再生像が動いた。図2(b)の構成の場合、動いた方向と反対方向に動いた。

視点と関連して再生像が動く動き方は、半径が大きいほど移動量が大きかった。表面よりも奥に再生された像は、奥行きが大きい部分(観測者から遠い)の方が、記録面に近い部分よりも、動きが大きく、見え方が実世界と異なった。一方、表面よりも上に再生された像は、半径が大きいほど移動量が大きいが、観測者に近い空間に再生されるので、動き方は自然であった。また、奥行きの絶対値を大きくするほど(半径を大きくするほど)、擦り傷上の輝点が不鮮明になった。

このように、このディスプレイは、水平方向の奥行き情報を円弧の半径として記録しており、このような簡単な方法で立体ディスプレイが実現できることを試作によって実際に確認した。



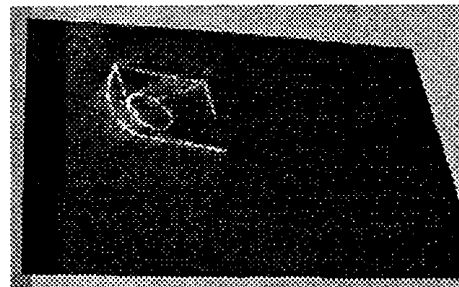
(a)



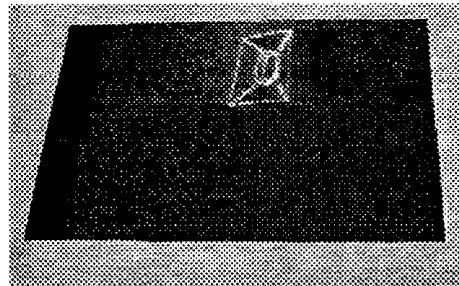
(b)

図2 立体ディスプレイの再生方法

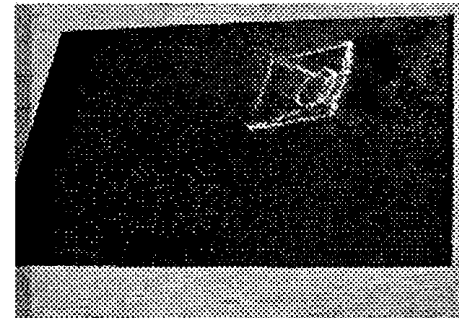
(a) 板表面より奥に再生, (b) 手前の空間に再生



(a)



(b)



(c)

図3 立体ディスプレイの再生像

再生光は太陽光、左(a)から中央(b),そして右(c)へ観測位置を移動するにつれて、立体的に再生像の見え方が変化する様子。像はパネルの奥の方に見える。

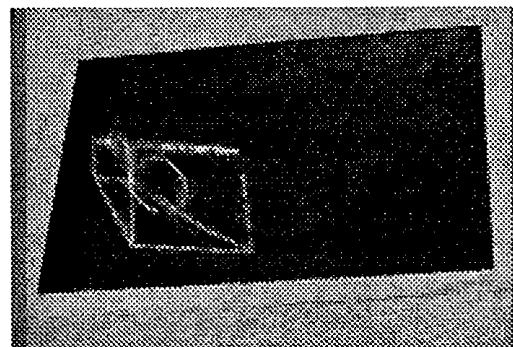


図4 立体ディスプレイの共役再生像

再生光を反対方向から照明した場合の再生像。像は板の手前の空中に飛び出て見える。

5 考察

5-1 立体視について

レインボーホログラムは、瞳の径程度の幅の水平スリットを通して記録している。このため垂直方向の情報は失われるが、波長分散により像が重なり合うボケが生じないので、白色光で再生可能である。副産物的効果であるが、像が虹色に見えることからレインボーホログラムと呼ばれている。

人間の眼は2眼が水平に配置されており、もともと垂直方向の視差はない。このため垂直方向の奥行き情報が欠落しても、立体感が得られる。人間が立体感を感じるためにはフレネルホログラムのような物理的に完全な波面情報が必要なわけではない。レインボー・ホログラムの場合であっても、両眼が同一物体を捕らえるときに内側に向かう輻輳と、水晶体のピント調節と、物体が網膜上で結像する位置のずれで物体の前後関係を弁別する両眼視差による知覚が働くので、バーチャルリアリティで使用されるヘッドマウントディスプレイとは異なり、自然な感覚で立体感を感じることができる。

今回試作した立体ディスプレイも、垂直方向の情報は失われているが、水平方向の奥行き情報は記録されており、レインボー・ホログラムと共通点である。実際に90度横方向から試作したディスプレイを観察すると、擦り傷で散乱される光は観察されるが、立体感は失われ平面的な像として観測される。

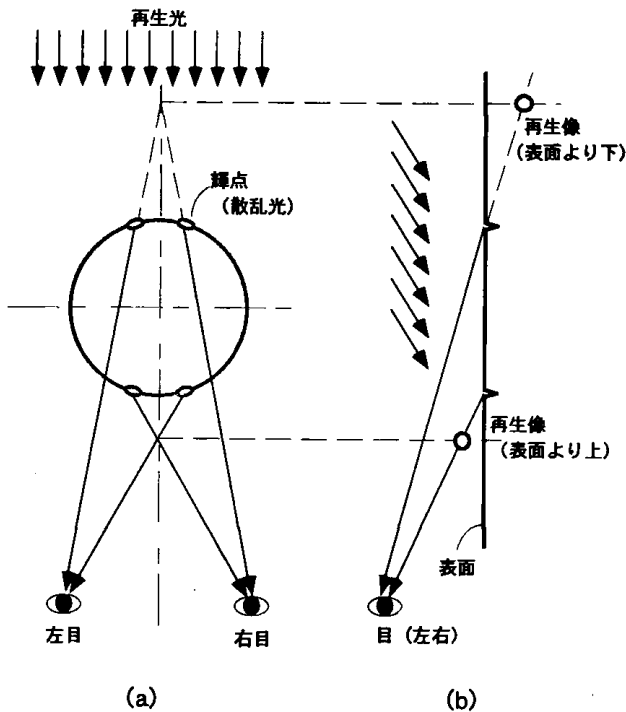


図5 試作したディスプレイの立体視メカニズム
(a) 平面図, (b) 側面図

水平の2個の輝点を一点にする生理作用が働いて立体感が生じる。

レインボーホログラムも、前述したIC VisionとGrating Imageも、再生像を決めているのは回折格子の角度であり、これによって立体像の奥行きを制御している。これは、今回の立体ディスプレイでは溝全体（溝内部ではない）の半径に相当する。

図5に、試作したディスプレイの立体視メカニズムを示す。円状の擦り傷に光照射すると、ある観測点（片目）に対して、円の中心を点対称として2つの輝点が現れる。両目では4つの輝点が現れる。輝点が水平に2つあった場合、それを一点として見ようとする生理機能が働く。これにより、円弧状の溝の向こう側には、実際の表面より奥に再生像が虚像として観測され、円弧の手前側には表面よりも上に観測されていると考えられる。

5-2 コンピュータによる製作方法

今回は、設備の都合により人間の手作業でこのディスプレイを試作した。手作業で立体ディスプレイが実現可能であること自体が驚くべきことである。しかし、今回試作したような単純なオブジェクトの場合はそれほどではないが、すこし複雑なオブジェクトになると、膨大な数の円弧（平面の画素数×奥行き枚数）を描く必要があり、コンピュータによる自動化をしなければならない。図6に検討した自動製作のための流れ図を示す。このよ

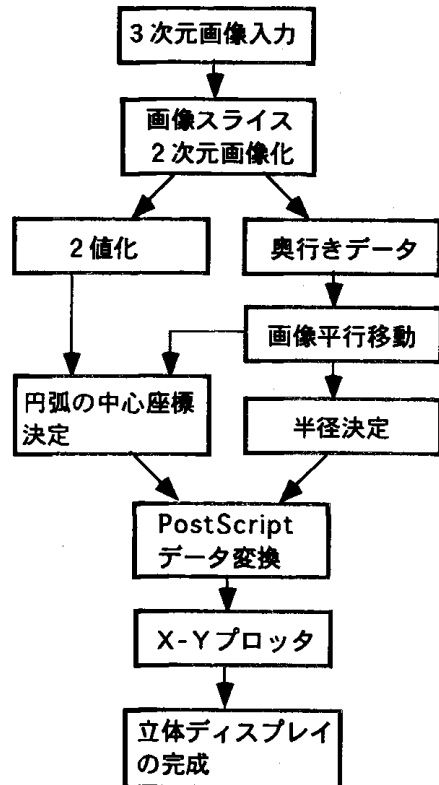


図6 自動製作のための流れ図

うな操作をすると、CADや3次元グラフィックスで設計データや、デジタイザーで読み込んだ座標データから、立体ディスプレイが試作できる。製作装置は、PCとXYプロッターがあれば十分であり、安価に実現可能である。現在までの研究で、PostScriptで必要なデータを生成できるようになっている。

5-3 情報量

ホログラフィは、物理的に忠実に波面を再現して立体ディスプレイとして、利用されてきた。しかし情報量が膨大であるため電子ディスプレイや安価なディスプレイとして使われるためには、大幅な情報の削減が必須である。例えば2次元ディスプレイの代表であるテレビは、残像現象を利用して走査を行い、1次元情報に情報量を大幅に削減している。立体ディスプレイの場合は、さらに人間の感覚を利用して情報の削減を行わなければならない。レインボー・ホログラムや、IC VisionとGrating Imageのように、垂直方向の視差を無視するのは、非常に有効である。この研究で試作した立体ディスプレイは、水平方向の視差だけを利用し、さらに人間に目の分解能でサンプリングをしているのと同等のことを行っている。回折格子を使わないので光の波長程度の製作分解能を必要としない。

ホログラフィの出力として可能なものに、レーザプリンターと類似した装置でイメージセッターがあり、印刷に一般的使用されている。イメージセッターはレーザプリンターと異なり、トナーを使用せず、印画紙に潜像を書き込んで、現像によって画像が得られる。分解能は4000dpi(6.4 μ m)が可能である。しかし、この程度の分解能でも回折させるには十分ではない。実際には、この10倍の分解能が必要である。この装置でA4サイズのホログラフィを作ると1.5Gピクセル必要である。本研究の場合は、回折が生じない程度である300 μ mの分解能とすると、0.7Mpixelで十分である。約2000分の1以下に情報量を削減できる。これにより計算機の負荷は大幅に軽減できる。

6 結 語

ホログラフィの現状について調査し、県内企業の現存技術で作成可能な応用製品として立体ディスプレイを検討した。プラスチック製の黒色板に、コンパスと手作業により針で扇状の擦り傷をつけて、立体ディスプレイのプロトタイプを試作した。このディスプレイに白色光を照射し散乱光を両眼で観察すると、板表面よりも奥または手前の空間に3次元像が再生できた。立体的に見えるメカニズムを説明し、また、コンピュータによる設計、製作手法を検討した。さらに情報量の削減について議論し、回折を利用したタイプに比べて少なくとも1/2000に

削減できることを示唆した。

この立体ディスプレイは、高精度を必要とせず、安価な装置で製作が可能であり、大型の広告用立体看板や、立体標識、壁窓材装飾等の3次元表示器への応用が期待できる。

本研究を進めるに当たり、有益な議論を頂いた東北学院大学工学部の木村光照教授に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Ian M Lancaster: The Future Security Applications of Optical Holography, SPIE International Conference on Application of Optical Holography proceedings, 2577, 71-76 (1995).
- 2) Pierr St. Hilaire et. al.: Electronic Display system for computational holography, SPIE Practical Holography IV, 1212, 174-182 (1990).
- 3) Pierr St. Hilaire et. al.: Advances in Holographic Video, SPIE proc. 1914, 188-196 (1993).
- 4) M. Lucente et. al.: Progress in holographic video with the acousto-optical modulator display, SPIE Applications of Optical Holography proc. 2577, 2-7 (1995).
- 5) J. Kulick et. al.: IC Vision - A VLSI Based Holographic Display System, SPIE proc. 1914, 219-229 (1993).
- 6) Jeffrey Kulick et. al.: Demonstration of a real-time implementation of the IC Vision holographic stereogram display, SPIE International Conference on Application of Optical Holography proceedings, 2577, 8-19 (1995).
- 7) Fujio IWATA: Grating Image Technology, SPIE International Conference on Application of Optical Holography proceedings, 2577, 66-70 (1995).
- 8) William T. Plummer and Leo R. Gardner: A mechanically generated hologram?, Applied optics, 31, 6585-6588 (1992).