

## 円弧状傷での散乱光による立体ディスプレイの開発\*

大坊 真洋\*\*、多田 三郎\*\*

金属板や透明板に付けられた円弧状の傷に光を照射したときに、散乱により明るく見える場所が右目と左目で異なる現象を利用したステレオ視立体ディスプレイを開発した。また連続的に円弧状の傷を配置して立体ディスプレイを作製する装置を試作した。この立体ディスプレイは、円弧状の傷を基板に付ける機械的加工だけで作製することができ、特殊な眼鏡やレーザー光線を必要とせず、空間に3次元の虚像を表示することが可能である。

キーワード：立体ディスプレイ，ステレオ画像，ホログラフィ

### Development of Three-dimensional Display using Scattered Light on Arc Shaped Fine Grooves

DAIBO Masahiro and TADA Saburo

A three-dimensional display based on auto-stereoscopic image, which utilize the phenomenon that the different points along arc shaped fine groove can be seen more brightly by the right eye and the left eye, respectively, is developed. A computer controlled X-Y cutter plotter and a handy pantagraph tracer have been used to draw many arc shaped fine grooves on the flat board. This display can show us three dimensional images in space without special glasses or laser light, and can be manufactured with simple mechanical processing. Experimental result indicates that this technique is favorable low cost manufacturing capability for large scale three-dimensional display.

key words : three-dimensional display, stereoscopic image, holography

#### 1 緒言

ホログラフィーは、光を自在に操ることができる究極の光技術であり、平面的な絵とは異なり、空間に3次元像を表示することが可能な技術である。ホログラフィの概念は1948年にD. Gaborにより提案され、レーザーが開発されたことにより、1965年頃から応用研究が盛んに行われた。この発明の功績が評価されD. Gaborには1971年にノーベル物理学賞が与えられた。しかし実用的立場からみると、期待が大きかった反面、制約が多く一般にまで普及が進まなかった。ホログラフィの普及を制限している要因として、感光性の基板が必要なことと、超微細な構造が必要であることがあげられる。従来のホログラフィは、物体光と参照光の2つの光を干渉させて、その干渉縞を感光性材料に記録するのが一般的であった。これには、例えば1mmに1,000本から7,000本もの非常に細かな模様を記録する感光性材料が使われている。普通の写真と比べると10倍から100倍の解像度であり、このような材料は、一般的に耐候性が十分でな

く、湿度や紫外線によってホログラムが消えてしまうといった問題がある。また撮影環境の条件も厳しく、光の波長程度(0.5ミクロン程度)の振動があると全く撮影できず、空気のゆらぎや、温度変化に敏感であり、大面積のホログラムの撮影は難しい<sup>1-3)</sup>という問題がある。

一方、コンピュータを利用して、干渉縞を数値計算で求めるCGH(Computer Generated Hologram)が研究されており<sup>4-9)</sup>、実在しないものや、大きすぎてホログラムの撮影ができないものであっても、コンピュータで物体波と参照波の干渉を計算することによって、ホログラムの実現が可能となっている。しかしホログラム干渉縞の空間分解能が前述のように非常に細かいため、膨大で複雑な計算をする必要があった。さらに、その計算結果に基づいて、高価な電子ビーム露光装置等で膨大な量の微細パターンを基板に書き込む必要があり、大がかりな装置が必要であった。またこの場合でも基板は、電子線に感光する特性を持ったものでなければならない。従

\* コンピュータホログラフィの開発 (第2報)

\*\* 電子機械部

来のホログラフィは、完全な立体情報(波面)を記録したものであったが、人の目は注視しても、たかだか70ミクロン(距離500mm)程度の解像度しかない<sup>10)</sup>。さらに、目が水平に配置されているため、上下方向の立体感を犠牲にしても、通常は立体感が保たれる。そのため、情報量を大幅に減少しても、人が見る分には問題なく立体画像の表示ができる可能性がある。

そこで、いろいろな基板に描画することができ、人の目に十分立体感を感じさせることができる立体ディスプレイを、安価な装置で作製する方法が開発されれば、中小企業でも製造することができ有益と思われる。また、その手軽さから工芸や芸術分野にも展開が期待できる。

さて、ニッケル板を回転研磨したときに「板の上下の空間に虚像が現れる」といった現象が報告<sup>11)</sup>されている。今回の研究目的は、この現象を積極的に利用して、任意の立体像を空間に表示する立体ディスプレイを開発することである。開発した立体ディスプレイは、簡単に説明すると、円弧状の傷に光を照射したときに、円弧の法線方向に光が散乱され、目の位置の移動とともに円弧上の輝点が円弧上を連続的に移動する現象を利用しており、右目と左目に別々の散乱光による画像が入射されて、自動的なステレオ視により立体感が得られることを原理としている。本論文では、その立体ディスプレイの原理を定式化して設計方法を明示するとともに、製作方法、作製装置、情報量について述べ、さらに実験結果の項では実際に再生した立体像を示す。

## 2 円弧傷での散乱による立体視の原理

光の波長程度の凸凹を有した十分に細い幅の円形の軌跡の傷を基板に付けて光を照射すると、その傷で光が散乱する。近傍で散乱された光同士はホログラフィックに干渉して、円弧と直交する面に沿った方向を最大強度として方向性をもって散乱される。この光は、前述の方向性を持っているが、光源が白色光であることと、円弧傷の散乱が完全でないことが加わり、ある程度の角度範囲で広がった分布を有していると考えられる。

傷の凸凹が光の波長に対して低周波で、十分に散乱できない場合は、散乱放射の強度が最大になる方向は、光源からの光が透明基板を透過する方向や、反射基板で全反射する0次方向に傾くが、基本的に散乱による放射の主方向は、円弧に直交する面に沿った方向になっていると考えられる。

目を空間のある位置に置いた場合、円弧のいろいろな位置で散乱された光のなかで、最大強度で目に散乱光を届けることができる円弧傷の円周上の点の位置は図1のようになっていると考えられる。

図1は光源と目が同一方向にある(Y軸の符号が一致する)場合について、光源の位置:  $S(X_s, Y_s, -Z_s)$ 、観測

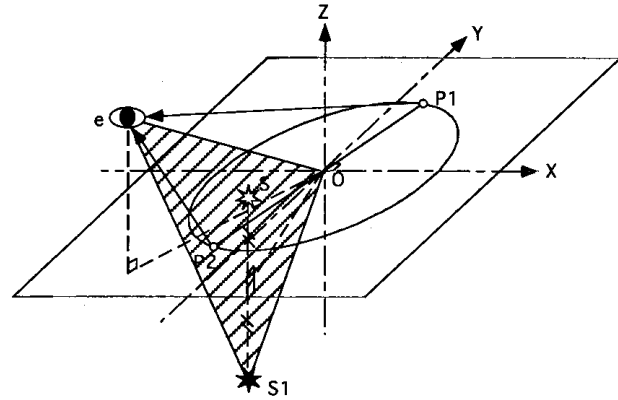


図1 光源と目が同一方向にある(Y軸の符号が一致する)場合について、光源の位置:  $S(X_s, Y_s, -Z_s)$ 、観測位置(目):  $e(X_e, Y_e, Z_e)$ 、円弧の中心:  $O(0, 0, 0)$ 、円弧上の輝点:  $P1(X_{p1}, Y_{p1}, 0)$ 、 $P2(X_{p2}, Y_{p2}, 0)$ との位置関係

位置(目):  $e(X_e, Y_e, Z_e)$ 、円弧の中心:  $O(0, 0, 0)$ 、円弧上の輝点:  $P1(X_{p1}, Y_{p1}, 0)$ 、 $P2(X_{p2}, Y_{p2}, 0)$ との位置関係を示している。虚光源:  $S1(X_s, Y_s, Z_s)$ とは、反射型基板の場合に考える光源であり、基板に対して光源の位置と対称な位置にある。円弧上で明るく見える輝点:  $P1, P2$ は、三角形 $eOS1$ を含む平面と、基板上的円弧が交わる点と考えられる。

三角形 $eOS1$ を含む平面は、 $S1 = \overline{OS1}$ 、 $e = \overline{Oe}$ とすると式(1)で表すことができる。

$$(S1 \times e) \cdot (x, y, z) = 0 \quad \dots(1)$$

外積を成分に分解すると

$$(g_x, g_y, g_z) \cdot (x, y, z) = 0 \quad \dots(2)$$

ただし

$$\begin{aligned} g_x &= Y_s Z_e - Z_s Y_e \\ g_y &= Z_s X_e - X_s Z_e \\ g_z &= X_s Y_e - Y_s X_e \end{aligned}$$

内積を展開すると

$$g_x x + g_y y + g_z z = 0 \quad \dots(3)$$

式(3)の平面と円弧が乗っている $z = 0$ の平面が交差する直線は次式になる。

$$y = -(g_x / g_y) x \quad \dots(4)$$

中心が $(0, 0, 0)$ で $z = 0$ の平面にある半径 $r$ の円の方程式は式(5)で表される。

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad \dots(5)$$

式(5)に式(4)を代入して円弧と直線の交点の座標 $P1(X_{p1}, Y_{p1})$ 、 $P2(X_{p2}, Y_{p2})$ を求めると次のようになる。

$$X_{p1} = -X_{p2} = r((g_x/g_y)^2 + 1)^{-1/2} \quad \dots(6-1)$$

$$Y_{p1} = -Y_{p2} = -X_{p1} g_x / g_y \quad \dots(6-2)$$

光源と目が反対方向にある場合(Y軸の符号が反対)についても、輝点の場所の関係は図1と同様に、三角形 $eOS1$ を含む平面と、基板上的円弧が交わる点であることには変わらない。図1からわかるように、目を移動させ

ると、それに伴い、輝点は円弧上を移動する。円弧上の、どこでも光が散乱されているが、その中で前述の三角形で決まる特定の2点P1, P2だけが明るく見える。いろいろな場所から同時に円弧をみても、その位置に対応した場所だけが明るく見える。輝点の動き方は、滑らかで連続的である。

図2(a)で立体視の原理を説明する。右目と左目の位置は左右にずれているので、同一円弧上であっても、右目と左目では明るく見える輝点の位置が異なる。それぞれの目に対して円弧の中心Oの法線を通る面方向が主成分の散乱光が入り、円弧上に2つの輝点が観測される。例えば左目Lには、BとCから、右目Rには、AとDから散乱された光が入る。両目でみると、CとDは、基板の下の空間の点Fの場所が光っている場合と等価に見える。同様にAとBは、基板の上の空間の点Eの場所が光っている場合と等価に見える。このように、ステレオ視により基板

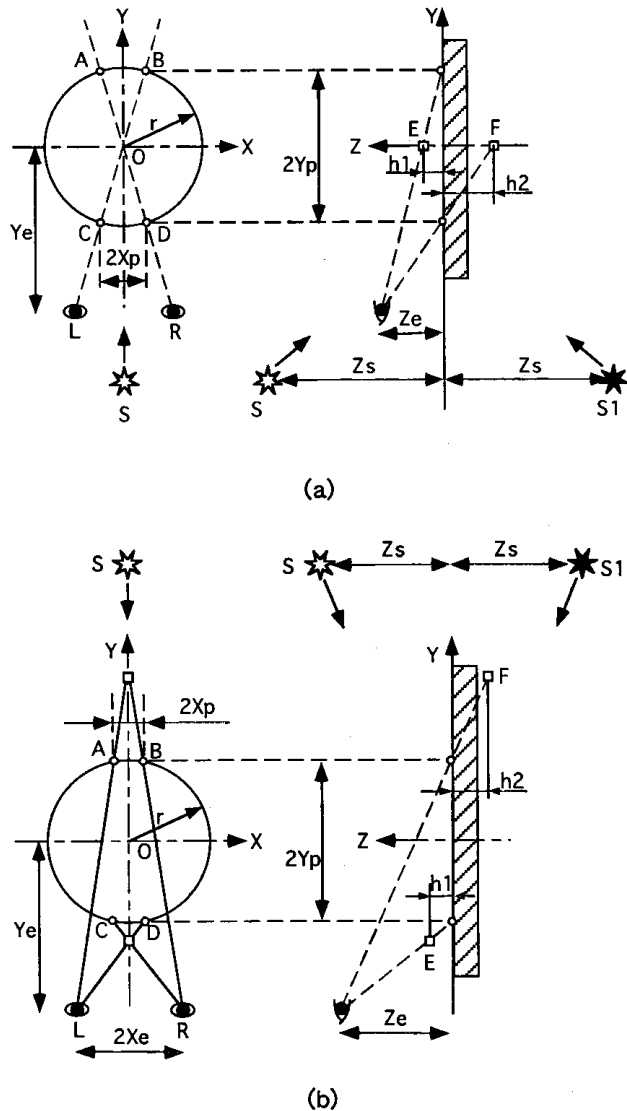


図2 立体視の原理を説明 (a)光源と目が円弧中心をはさんで同一方向にある場合、(b)反対方向にした場合

面上ではない空間に点の虚像が見えることになる。

目L, RのZ座標とY座標の絶対値をそれぞれ $Z_e, Y_e$ 、輝点A, B, C, DのY座標の絶対値を $Y_p$ とすると虚像の高さ $h1, h2$ は、幾何学的に求まる。

$$h1 = Z_e Y_p / (Y_e + Y_p) \quad \dots(7-1)$$

$$h2 = Z_e Y_p / (Y_e - Y_p) \quad \dots(7-2)$$

$Y_e \gg Y_p$ ならば式(7)の分母は $Y_e$ に近似でき、式(7)に式(6)を代入すると、虚像の奥行き $h1, h2$ は円弧の半径 $r$ に比例する。

$$h1 \approx h2 \approx r Z_e (g_x / g_y) ((g_x / g_y)^2 + 1)^{-1/2} / Y_e \quad \dots(7-3)$$

一方、光源と目を円弧中心をはさんで反対方向にした場合は、図2(b)の様な見え方になる。この位置関係の場合は、目に届く光は、円弧の中心Oの法線を通らない。回折光の強度はある程度の角度範囲で分布しているので、最大になる方向(円弧の中心Oの法線を通る方向)ではないが、目に向かう成分があり、これによって輝点が観測される。両目でみると輝点は、円弧の中心のOの法線上ではなく、斜めに傾いて観測される。この場合の虚像の奥行き $h1, h2$ は式(8)で求まる。

$$h1 = Z_e X_p / (X_e + X_p) \quad \dots(8-1)$$

$$h2 = Z_e X_p / (X_e - X_p) \quad \dots(8-2)$$

$X_e \gg X_p$ ならば、式(8)の分母は $X_e$ に近似でき、式(8)に式(6)を代入すると、虚像の奥行き $h1, h2$ は円弧の半径 $r$ に比例する。

$$h1 \approx h2 \approx r Z_e ((g_x / g_y)^2 + 1)^{-1/2} / X_e \quad \dots(8-3)$$

となり、この場合も虚像の高さは円弧の半径 $r$ に比例する。

図2(a), (b)のいずれの場合でも像の奥行き:  $h1, h2$ は、半径が小さい領域では近似的に円の半径 $r$ に比例し、半径を調節することによって、奥行きを自由に設定できる。XY平面上の輝点の位置は、円弧の中心をXY平面上で移動させることによって、平行移動できる。このように円弧の中心位置と半径を調節することによって、3次元空間の任意の1点を記録して、再生することが可能となる。

図3に任意の3次元形状を、3次元空間中の点の集合として表示する方法を示す。はじめに表示したい3次元像をX-Y平面と平行な面でスライスしたときの断面画像P1~P4を求める。例えば3次元CTスキャナーの断層写真や、3次元CADで設計した形状データなどをこの画像として使用できる。このディスプレイは3次元物体を透明に内部まで表示できるが、内部を表示しない場合は断面の輪廓だけを使用し、陰に隠れて見えない向こう側の輪廓を使わないようにする。

断面画像のそれぞれの画素に円弧の中心を移動させ、Z方向の高さに比例した半径 $r$ で円弧を描く。断面P1~P4

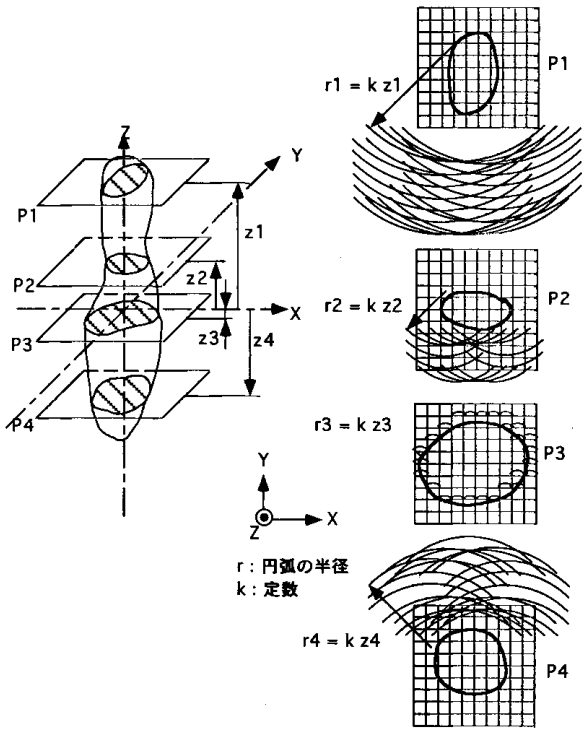


図3 任意の3次元形状を3次元空間中の点の集合として表示する方法

は、記録する基板上で同一位置に置く。ただし、図2(b)で説明した位置関係で立体像を観察する場合は、z軸が傾いて像が再生されるので、Y方向にシフトさせながらP1~P4を配置するとよい。

### 3 立体ディスプレイ作製装置の試作

#### 3-1 パンタグラフ比例トレース型立体ディスプレイ作製装置

図4に、試作したパンタグラフ比例トレース型立体ディスプレイ作製装置を示す。立体像を記録する基板に、モータでブラシを回転させて擦り付けることによって、基板表面に円弧状の擦り傷を付ける。ならない点を下絵に沿って動かすと、パンタグラフ機構により、円弧の中心は下絵と相似形にトレースされる。パンタグラフの支点を変えると、立体像の倍率を変化させることができる。モータを回転させながら、円弧の中心を移動させると、ブラシの軌跡は厳密には円弧でなく歪んだ円弧になるが、トレースの速度に対して十分に速くモータを回転するようにすると、断面画像と相似の中心位置を持った、たくさんの円弧を描くことができる。ブラシには紙ヤスリ(800番)を使用し、基板は塩化ビニル板を使用した。円弧の半径は、ブラシの位置を半径方向にスライドさせる機構により調節できようにした。回転軸は、傷が全円でなく円弧になるように基板に対して $\theta$ だけ傾けた。回転軸を傾けてもブラシが全く変形しなければ基板と1点でしか接触できないが、ブラシが弾力性を持ち変

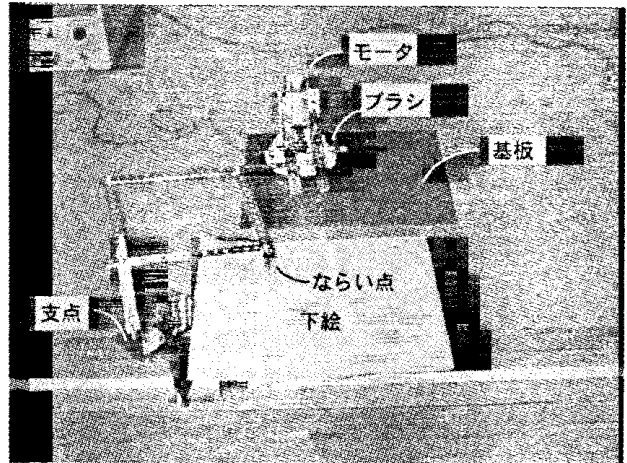


図4 試作したパンタグラフ比例トレース型立体ディスプレイ作製装置の外観

形すれば、円弧状に基板に接触し続けることが可能である。回転中心軸からブラシまでの距離を $r$ 、ブラシの変形量を $L$ 、回転中心軸と基板の垂線のなす角度を $\theta$ 、擦り傷の扇型の半角を $\delta$ とすると、 $\delta$ は式(9)で求めることができる。

$$\delta = \cos^{-1} (1 - L / (r \cos \theta \sin \theta)) \quad \dots (9-1)$$

$\theta$ は小さいので近似的に

$$\delta \approx \cos^{-1} (1 - L / (r \sin \theta)) \quad \dots (9-2)$$

適切な長さや長さのブラシを選択して、重りなどでブラシの変位量 $L$ を調節し、さらに回転軸の傾き $\theta$ も調節して、 $\delta$ を所望の角度に設定することができる。

扇形が半円になるのは、 $\delta$ が $\pi/2$ のときであるので、式(10)の条件が成立するようにすればよい。

$$\theta \approx \sin^{-1} (L / r) \quad \dots (10)$$

$\delta$ を大きくすると、輝点が動く範囲が広がるので、立体視の視域を大きくすることができる。しかし $\delta$ を $\pi/2$ 以上にすると、同一円弧上に輝点が2カ所現れるようになり、奥行きが反対になった2つの像が現れるので、一般的な立体像を表示する場合には見にくくなる。ただし模様等で積極的にこの効果を利用すると、ビジュアルな効果が高い立体模様を作製することができる。

この装置によって、下絵をなぞるだけで簡単に奥行きのある立体画像を作製することが可能になった。

#### 3-2 XYZ制御型立体ディスプレイ作製装置

図5にコンピュータでXYZ軸を制御して、コンピュータ内でデザインした画像を立体像として書き込むプログラム作製装置を示す。このシステムは、カッタープロッター(Graphtec製FC3200-50H)のカッター取り付け部に、ミニルーター(Sumflex製Joy丸)を加工して取り付け、PCからHP-GLでXYZ座標を制御する構成で実現した。XY座標は、円弧の中心座標に対応しており、同一深さの断面画像をトレースするようにした。またZ方向は上下させて、基板にブラシを接触させたり、離したりすることができるようにした。これにより一筆

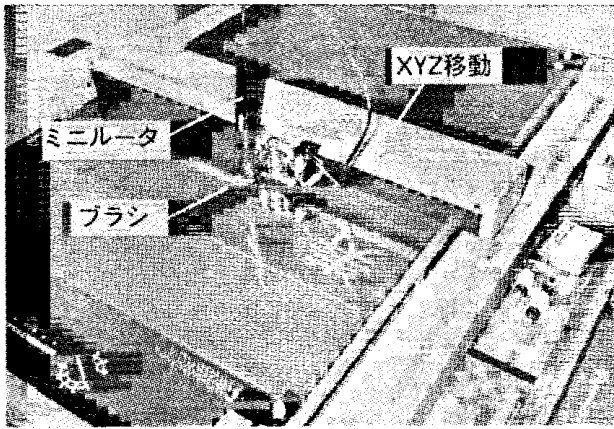


図5 コンピュータでXYZ軸を制御して、コンピュータ内でデザインした画像を立体像として書き込む立体ディスプレイ作製装置の外観

書きで描けないような不連続なトレースとなる場合でも、ブラシを基板から離してから移動させることができるので、不必要な傷がつかない。さらに治具により $\theta$ を与えて、円弧の角度 $\delta$ を調節できるようにした。ブラシは金属製のワイヤを使用した。

円弧状の擦り傷の密度は、モータの回転速度と回転中心の移動速度で制御可能である。モータの角速度を $\omega$ 、移動速度ベクトルを $V(x,y)$ 、ブラシの本数を $n$ 、円周率を $\pi$ とすると、溝の密度 $C(x,y)$ は

$$C(x,y) = n \omega / (2\pi V(x,y)) \quad \dots(11)$$

となる。この密度を可変することによって、濃淡を表現することも原理的には可能である。現状では、ブラシの押しつけ圧力の制御ができないこと、半径が変えられないなどの改善すべき点があり、実用には不十分であるが、この試作システムによりコンピュータ制御の機械的な傷付け加工で立体ディスプレイが作製可能なことを実証できた。

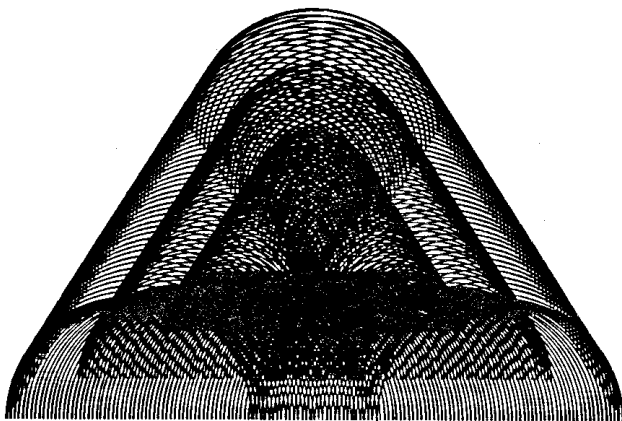
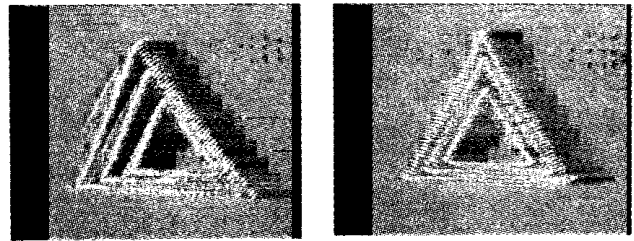


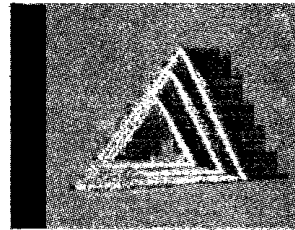
図6 円弧のパターンの一例を示す。三角錐を3つの断面で表示するためのパターン

#### 4 立体像の再生実験結果

図6に円弧のパターンの一例を示す。これは三角錐を



(a) (b)



(c)

図7 立体ディスプレイの再生像。図6のパターンをカッタープロッタで塩化ビニル基板に傷をつけて書き込んで白色光で照明して再生。観測位置は(a)左、(b)中央、(c)右

3つの断面で表示するためのパターンである。図7に、このパターンをカッタープロッタで塩化ビニル基板に傷をつけて書き込み、白色光で照明したときの再生像を示す。ただし、これはブラシを回転させて作製したのではなく、円弧の形状と数を正確に把握し光散乱溝をシャープにするために、数値制御でカッターを半円型に移動させて作製したものである。一断面の三角形1個を表示するために、189個の円弧を使用している。三角形の大きさは一辺が60, 46, 29mmである。円弧の半径はそれぞれ20, 15, 9.5mmであり、円弧間のピッチは底辺部で約0.63, 0.48, 0.30mm、斜辺部で0.78, 0.59, 0.38mmである。

この立体ディスプレイを500mm程度離れて観察した場合、0.38mmのピッチ（図7の最小の三角形）ならばほぼ連続的に見えた。それ以上のピッチでは像が不連続に観測された。このことから、2値画像ならば最小円弧ピッチは実用上0.3mmで十分であることが確かめられた。また、左右に観測位置を変えると奥行きに応じて像が左右に動き、両眼で見るとステレオ視により奥行きをもって観測された。光源と目と円弧の位置関係によって、基板の上方の空間でも下方の空間でも自在に立体像を発生することができた。輝点は円弧上を動くので、他のステレオ法であるレンチキュラー法や、バララックスバリア法のように輝点の動きが飛び飛びにならず、滑らかで連続的であった。

#### 5 考察

##### 5-1 情報量の見積もり

壁材等に装飾を施すことを仮定して、1200mm×1200mmの大面积基板に立体像を書き込む場合の情報量

について見積もる。基板を0.3mmの間隔で格子状に区切り、その画素の中心を円弧の中心とすると、円弧の中心の数は、

$$(1200/0.3)^2 = 16 \times 10^6 \text{個} \text{ になる。}$$

この円弧の中心点の座標は、3byteあれば総数 $16 \times 10^6$ 個の座標点から十分に識別可能である。

$$2^{(3 \times 8)} > 16 \times 10^6 \text{個}$$

奥行きの高さの分解能を、基板の上下の空間でそれぞれ32づつで64段階とすると、1byteで十分に表現できる。基板の1画素に64個の円弧が割り当てられるので、基板全体で描かれる円弧の総数は、

$$16 \times 10^6 \text{個} \times 64 = 10^9 \text{個} \text{ となる。}$$

円弧の中心点の3byteと半径の1byteを足して、空間の1点(円弧1個)を4byteで表現できる。全体では $10^9 \text{個} \times 4 \text{byte} = 4 \text{Gbyte}$ の情報量となる。従来のホログラムの場合を試算<sup>10)</sup>すると、30Tbyteにもなるが、本法のデータの大きさは現存の一般的な計算機で十分に扱うことができる大きさであり、この程度の情報量で $1200 \times 1200 \text{mm}$ の大きさの立体ディスプレイを実現することが可能となる。

## 5-2 応用分野

この立体ディスプレイは、従来よりも基板への制限が小さく、簡単で安価に作製可能なので、例えば立体絵、立体看板、立体広告、立体印刷、窓装飾、壁装飾、漆塗工芸品装飾、自動車塗装装飾、鏡装飾、光学玩具、貴金属装飾、インテリア内外装飾、美術品、宗教用具および包装装飾などへの応用が考えられる。

## 6 結 論

円弧状の傷に光を照射したときに、輝点がどのように見えるかを定式化した。左右の目から見える円弧上の輝点の位置のずれに起因するステレオ視により、立体的に見えることを説明し、任意の3次元像を表示する立体ディスプレイの設計方法を示した。さらに、パンタグラフ比例トレース型とXYZ制御型の立体ディスプレイ作製装置を試作し、立体ディスプレイをこの装置により作製した。またカッタープロッターでいろいろなピッチで円弧状に傷を付けて立体像を書き込み、0.3mm程度のピッチで十分に滑らかに像が観測できることを確認した。この実験結果から、情報量について見積もり、従来よりも大幅に少ない情報量で大型の立体ディスプレイを作製できることがわかった。

この立体ディスプレイは、従来のホログラフィが抱えていた問題を解決可能であり、次のような特徴がある。

- (1) 擦り傷がつく材料ならばどのようなものにも、記録ができる。
- (2) 機械加工だけで作製が可能で化学処理が不要。
- (3) 記録部は擦り傷なので、半永久的な耐候性がある。

(4) 安価な装置で作製が可能である。

(5) 加工分解能が数百ミクロンでよく情報量が少ないので大型のディスプレイが作製できる。

なお下記の2点がこの研究の成果としてあげられる。

- ① 特許出願(平成9年特許願第18071号)「ホログラム、ホログラムの作成方法及びホログラムの作製装置」(岩手県と東北学院大学工学部木村光照教授との共願)を行った。
- ② 科学技術振興事業団 地域研究開発促進拠点支援事業 新技術コンセプト・モデル化課題「3次元虚像発生装置のモデル化」に株式会社マイクロトップが採択された。著者はコンセプトエンジニアとしてホログラフィの原理指導を実施中である。

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、通産省工業技術院機械技術研究所の松田浄史博士に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 久保田敏弘：ホログラフィ入門，朝倉書店(1995)。
- 2) 鈴木正根：実践ホログラフィ技術，オプトロニクス社(1993)。
- 3) 辻内順平：ホログラフィ，丸善(1993)。
- 4) Pierr St. Hilaire et. al.: Electronic Display system for computational holography, SPIE Practical Holography IV, 1212, 174-182 (1990)。
- 5) Pierr St. Hilaire et. al.: Advances in Holographic Video, SPIE proc. 1914, 188-196 (1993)。
- 6) M. Lucente et. al.: Progress in holographic video with the acousto-optical modulator display, SPIE Applications of Optical Holography proc. 2577, 2-7 (1995)。
- 7) J. Kulick et. al.: IC Vision - A VLSI Based Holographic Display System, SPIE proc. 1914, 219-229 (1993)。
- 8) 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)。
- 9) Fujio IWATA: Grating Image Technology, SPIE International Conference on Application of Optical Holography proceedings, 2577, 66-70 (1995)。
- 10) 吉川浩，佐々木建光：動画ホログラフィの情報低減，画像電子学会誌，22，329-336 (1993)。
- 11) William T. Plummer and Leo R. Gardner: A mechanically generated hologram?, Applied optics, 31, 6585-6588 (1992)。