超音波ホログラフィによる
3次元形状認識の計算機シミュレーション

大木　誠・宮田　仁志・小西　雅人
貝原　功二*・大北　正昭

電気電子工学科・*㈱マティ

(1995年9月1日受理)

Computer Simulation of Three-Dimensional Shape Recognition with the Supersonic Holography

by

Makoto OHKI, Hitoshi MIYATA, Masato KONISHI,
Kouji KAIHARA*, Masaaki OHKITA

Department of Electrical and Electronic Engineering
*Matty Corporation

(Received September 1, 1995)

To a system of an environmental recognition of the autonomous mobile robot that we have constructed experimentally, the acoustic imaging, i.e., the supersonic holography is introduced. Since the acoustic imaging does not depend on the light source, it has expectations to be able to recognize an object in the dark area.

At present, we have made an experiment on three-dimensional shape recognition by means of the supersonic holography. In our experiment, the following quantities are investigated as the parameters, i.e., an interval between adjoining receivers on a hologram plane, a position of a transmitter, a frequency and a length of the burst wave composing of a supersonic wave and a distance between a hologram plane and an object. During the experiment, the modification of their parameters is often required, and inconvenient it takes much time and becomes a hard work. To diminish this difficulty, an introduction of computer simulation would be effective.

In this paper, the theory of the supersonic holography and a method to simulate the holography are described. Besides, the results by the computer simulation are compared with experimental results.

Key words : Autonomous mobile robot, Supersonic holography, Computer simulation.

1．はじめに

我々の研究室ではファジィ推論を用いた自律移動ロボットの研究を行っており，ロボットの視覚として超音波ホログラフィを応用することを提案している．しかしながら現段階では，基礎実験として３次元形状を認識する実験を行っており，超音波素子をアレイ状に配置したホログラム面と送波器の位置関係や，超音波素子の間隔，超音波の周波数の変更等の要求が頻繁に生ずる．しかし，実験設備は容易に変更することが難しく，多大な労力を要する．

この問題を解決するには，計算機シミュレーションの導入が効果的であり，また，これによってホログラム面の構成や，再生アルゴリズムの検討のためのモデルデータを得ることができる．本報告では，超音波ホログラフィの計算機シミュレーションの実現について述べる．

2．超音波ホログラフィの理論

ホログラフィとは，波動の持つ振幅と位相に含まれている情報から，物体の像をホログラムとして記録し，物体の像を再生するという，波面の記録と再生の２段階を経由する映像法である．

ここでは，超音波ホログラフィでの２次元像再生の方法[1]とその３次元像再生への拡張について述べる．

2．1　超音波ホログラフィによる２次元像再生

図１に示すように，送波器から超音波を照射して，物体から反射された散乱波をアレイ状に配置した受波器で受信する．これらの受信した波動を複素数で表現したものをホログラムとする．ハイゲンスの原理より物体から反射された波（物体波）は物体表面各点からの球面波の重ね合わせと考えることができる．物体表面のある点からの物体波は次式で表せる．

$$s(x, y; z)=\frac{1}{r_0}\exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}r_0\right] \tag{1}$$

$$r_0=\sqrt{x^2+y^2+z^2} \tag{2}$$

ただし，$j=(-1)^{1/2}$である．

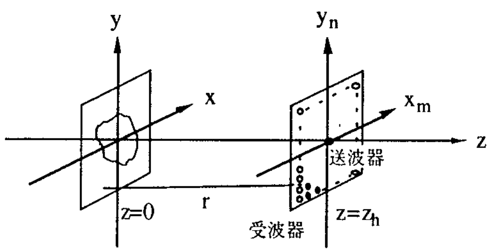

図１　２次元像再生のモデル

$z=0$ の面に $p(x, y; 0)$ なる波源分布があれば，$z=z_h$ のホログラム面で観測される複素音圧は $p_h(x_m, y_n)$ は，フレネル＝キルヒホフの回折理論を用いて，次式のように積分で表現できる．

$$p_h(x_m, y_n)=\iint_{-\infty}^{+\infty}C(r)p(x, y; 0)\frac{1}{r}\exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}r\right]dxdy \tag{3}$$

$$r=|\mathbf{r}|=\sqrt{(x_m-x)^2+(y_n-y)^2+z_h^2} \tag{4}$$

$$\mathbf{r}=(x_m-x,\ y_n-y,\ z_h) \tag{5}$$

$$C(r)=\frac{1}{j\lambda}\cos(z_h, r) \tag{6}$$

ここで，式（６）の $\cos(z_h, r)$ は z 軸と，物体点と受波器を結ぶベクトル$\mathbf{r}$とのなす角による余弦である．式（３）により波動場が計算されるが，使用する波動の波長や，物体面と観測面との距離，観測面の大きさにより解析方法は異なる[2]．本報告ではＬを観測面すなわちホログラム面の開口長，Ｎを１辺の受波器の個数すなわち空間サンプル数とし，$z \leqq L^2/(N\lambda)$の領域（フレネル回折領域）での解析手法について議論を進める．この領域では，$1/r$ の変化が $\exp[j2\pi r/\lambda]$ の変化に比べて緩やかであり，$1/r$ を $1/z_h$ で近似することができる．さらに，$(x_m-x)^2+(y_n-y)^2$ が z_h^2 に比べて極小であるので，式（４）は次のように近似できる．

$$\begin{aligned} r&=z_h\sqrt{1+\frac{(x_m-x)^2}{z_h^2}+\frac{(y_n-y)^2}{z_h^2}} \\ &\fallingdotseq z_h\left\{1+\frac{(x_m-x)^2}{2z_h^2}+\frac{(y_n-y)^2}{2z_h^2}\right\} \\ &=z_h+\frac{(x_m-x)^2}{2z_h}+\frac{(y_n-y)^2}{2z_h} \end{aligned} \tag{7}$$

また，式（６）において，$\cos(z_h, r)\fallingdotseq 1$とみなすことで，

$$C(r)\fallingdotseq\frac{1}{j\lambda} \tag{8}$$

とできる．式（７），（８）を用いて式（３）は次のように書き直せる．

$$p_h(x_m, y_n) \fallingdotseq \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{j\lambda} p(x, y; 0) \frac{1}{z_h} \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda} z_h\right] \cdot \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda}\left\{\frac{(x_m - x)^2}{z_h} + \frac{(y_n - y)^2}{z_h}\right\}\right] dxdy \tag{9}$$

$$= \frac{1}{j\lambda z_h} \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda} z_h\right] \cdot \iint_{-\infty}^{+\infty} p(x, y; 0) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda}\left\{\frac{(x_m - x)^2}{z_h} + \frac{(y_n - y)^2}{z_h}\right\}\right] dxdy \tag{10}$$

$$= A(z_h) \iint_{-\infty}^{+\infty} p(x, y; 0)\, s(x_m - x, y_n - y; z_h) dxdy \tag{11}$$

ここで，

$$s(u, v; z_h) = \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda z_h}(u^2 + v^2)\right] \tag{12}$$

$$A(z_h) = \frac{1}{j\lambda z_h} \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda} z_h\right] \tag{13}$$

である．式（11）をみると，これはコンボリューションであるので，コンボリューションの演算を示す記号＊を用いて，次式のように表現できる．

$$p_h(x_m, y_n) = A(z_h)\left[p(x_m, y_n; 0) * s(x_m, y_n; z_h)\right] \tag{14}$$

各関数 $p_h(x_m, y_n)$，$p(x_m, y_n; 0)$，$s(x_m, y_n; z_h)$ のそれぞれのフーリエ変換を $P_h(u, v)$，$P(u, v; 0)$，$S(u, v; z_h)$ で表現する．これらの関係は次式で与えられる．

$$P_h(u, v) = A(z_h)\left[P(u, v; 0) \cdot S(u, v; z_h)\right] \tag{15}$$

離散座標 m，n に関するサンプル数をそれぞれ偶数 M，N として，

$$m = -\frac{M}{2}, -\frac{M}{2}+1, \cdots, \frac{M}{2}-1$$
$$n = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2}+1, \cdots, \frac{N}{2}-1 \tag{16}$$

により与える．さらに，空間でのサンプリング間隔をそれぞれ，$1/L_x$，$1/L_y$ とすると球面波の関数 $s(x_m, y_n; z_h)$ の離散フーリエ変換 $S(m, n; z_h)$ は解析的に次のように表せる．

$$S(m, n; z_h) = \exp\left[-j\pi\lambda z_h\left\{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2\right\}\right] \tag{17}$$

従って，式（15），（17）より再生像は次式で与えられる．

$$p(x_m, y_n; 0) = \frac{1}{A(z_h)} \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{P_h(m, n)}{S(m, n; z_h)}\right] \tag{18}$$

すなわち，ホログラム面上の各点で観測した複素2次元配列を2次元フーリエ変換し，これを (m, n) 領域の解析的関数の値で除し，再び逆フーリエ変換することによって像を再生することができる．

2．2　超音波ホログラフィによる3次元像再生

2次元像再生のアルゴリズムを3次元像再生に拡張する．3次元像は平面すなわち2次元像の重ね合わせであると考え，図2に示すように物体面とホログラム面を配置する．

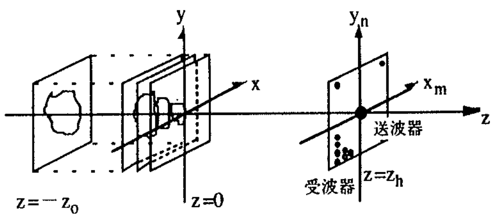

図2　3次元像再生のモデル

ここでは照明波としてバースト波を用いており，奥行き方向（z 方向）の距離は反射波の時間的な情報から求めることができる．今，注目している物体面の奥行き位置を $-z_0$（$z_0>0$），送波器から物体面までの距離を $z_l = z_h + z_0$ として，式（17）の関数 $S(m, n; z_h)$ の定義を次のように変更する．

$$S(m, n; z_l) = \exp\left[-j\pi\lambda z_l\left\{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2\right\}\right] \tag{19}$$

この奥行き位置 $-z_0$ に相当する時刻において，ホログラム・データをサンプルし，式（18），（19）を用いて2次元像再生を行い，得られた2次元像を z 方向に重ねて3次元像を得る．

3．計算機シミュレーションによるホログラム・データの生成

3．1　ホログラム・データ生成の理論

送波器を1つとし，これから照明波として球面波が発せられるものとする．照明波は物体表面の各点で反射され，物体各点から球面波が出ているものとすることができる．その反射波は受波器により受波され，実数部と，$\pi/2$位相をずらした虚数部に記録され，ホログラム・データとなる．

シミュレーションによるホログラム・データを，計算機シミュレーションで得るために，図3に示されるモデルを考える．

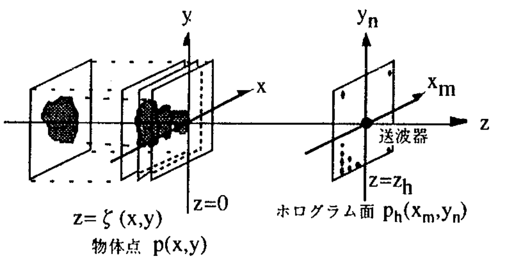

図3　シミュレーションによるホログラム・データの生成

まず超音波の伝搬距離を求めるために，送波器，物体点，受波器の位置ベクトルを次のように定義する．

$$\text{送波器の位置ベクトル：}\mathbf{r}_t=(x_t,\ y_t,\ z_t) \tag{20}$$

$$\text{物体点の位置ベクトル：}\mathbf{r}_0=(x_0,\ y_0,\ z_0) \tag{21}$$

$$\text{受波器の位置ベクトル：}\mathbf{r}_r=(x_r,\ y_r,\ z_r) \tag{22}$$

このとき，対象物体の反射係数は $p(x_0,\ y_0)$ であり，その表面関数の方程式は

$$z_0=\zeta(x_0,\ y_0) \tag{23}$$

で表される．よって式（21）は次のように表すことができる．

$$\mathbf{r}_0=(x_0,\ y_0,\ \zeta(x_0,\ y_0)) \tag{24}$$

これらを用いることにより，送波器と物体点の間の距離は $|\mathbf{r}_0-\mathbf{r}_t|$ で表され，物体点と受波器の間の距離は $|\mathbf{r}_r-\mathbf{r}_0|$ で表される．この2つの距離を加算すれば，送波器から物体点を経由した後，受波器で観測された超音波の伝搬距離 r が求められる．

$$r=|\mathbf{r}_0-\mathbf{r}_t|+|\mathbf{r}_r-\mathbf{r}_0| \tag{25}$$

また伝搬距離 r からは，伝搬時間 r/c が求められる．ここで，c は音速である．

ここでは，球面波の式として次の式を用いる．

$$s(x,\ y,\ z)=\frac{\exp[j(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)]}{4\pi r} \tag{26}$$

$$\mathbf{r}=(x,\ y,\ z) \tag{27}$$

$$\mathbf{k}=\frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}k=\left(\frac{x}{|\mathbf{r}|}k,\ \frac{y}{|\mathbf{r}|}k,\ \frac{z}{|\mathbf{r}|}k\right) \tag{28}$$

ここで $\mathbf{k}$ は波数ベクトルを表す．k は波数であり，$k=2\pi/\lambda$ である．

式（25）及び式（26）から，ある1つの伝搬経路に注目して求めた測定音圧は次式のようになる．

$$s(x_o,\ y_o;\ \zeta(x_o,\ y_o))=\frac{\exp[j\{\mathbf{k}_1\cdot(\mathbf{r}_o-\mathbf{r}_t)+\mathbf{k}_2\cdot(\mathbf{r}_r-\mathbf{r}_o)-\omega t\}]}{4\pi r} \tag{29}$$

式（27）及び式（28）を用いて波数を計算する．

$$\begin{aligned}\mathbf{k}_1\cdot(\mathbf{r}_o-\mathbf{r}_t)&=\mathbf{k}_1\cdot(x_o-x_t,\ y_o-y_t,\ \zeta(x_o,\ y_o)-z_t)\\&=\frac{(x_o-x_t)^2}{|\mathbf{r}_o-\mathbf{r}_t|}k+\frac{(y_o-y_t)^2}{|\mathbf{r}_o-\mathbf{r}_t|}k+\frac{(\zeta(x_o,\ y_o)-z_t)^2}{|\mathbf{r}_o-\mathbf{r}_t|}k\end{aligned} \tag{30}$$

ここで

$$|\mathbf{r}_o-\mathbf{r}_t|=\sqrt{(x_o-x_t)^2+(y_o-y_t)^2+(\zeta(x_o,\ y_o)-z_t)^2} \tag{31}$$

より式（30）は次のようになる．

$$\mathbf{k}_1\cdot(\mathbf{r}_o-\mathbf{r}_t)=k|\mathbf{r}_o-\mathbf{r}_t| \tag{32}$$

同様に

$$\mathbf{k}_2\cdot(\mathbf{r}_r-\mathbf{r}_o)=k|\mathbf{r}_r-\mathbf{r}_o| \tag{33}$$

が求められる．よって

$$\mathbf{k}_1\cdot(\mathbf{r}_o-\mathbf{r}_t)+\mathbf{k}_2\cdot(\mathbf{r}_r-\mathbf{r}_o)=k\,r \tag{34}$$

となり，式（29）は次のように与えられる．

$$s(x_o,\ y_o;\zeta(x_o,y_o))=\frac{\exp[j(k\,r-\omega t)]}{4\pi r} \tag{35}$$

次に，ホログラム・データの実数部と虚数部を求める．振幅を A，位相を ϕ とすると式（35）より，

$$A=\frac{1}{4\pi r} \tag{36}$$

$$\phi=k\,r-\omega t=\frac{2\pi}{\lambda}r-\omega t \tag{37}$$

となる．これを用いると，式（35）は次のように表せる．

$$\begin{aligned} s(x_o,\ y_o;\zeta(x_o,y_o))&=A\exp[j\phi]\\ &=A\cos\phi+jA\sin\phi \end{aligned} \tag{38}$$

像再生においては透過波を逆伝搬させるので，シミュレーションではこの式の複素共役，

$$\begin{aligned} s_R(x_o,\ y_o;\zeta(x_o,y_o))&=A\exp[-j\phi]\\ &=A\cos(-\phi)+jA\sin(-\phi)\\ &=A\cos\phi-jA\sin\phi \end{aligned} \tag{39}$$

を用いる．ここで，$A\cos\phi$ に各物体点の反射係数をかけたものが実数部となり，$-A\sin\phi$ に反射係数をかけたものが虚数部となる．

これらはある1点の物体の反射波によるものであるので，すべての物体点についての計算を行う．$p(x,y)$ を各物体点での反射係数とすると，ホログラム面 $z=z_h$ 上のサンプル点 (x_m,y_n) でのホログラムは式（35）より，

$$p_h(x_m,\ y_n)=\iint_{-\infty}^{+\infty}\frac{p(x,\ y)}{4\pi r}\exp\left[-j\left(\frac{2\pi}{\lambda}r-\omega t\right)\right]\Theta_T\left(t-\frac{r}{c}\right)dxdy \tag{40}$$

で与えられる．ここで

$$\Theta_T\left(t-\frac{r}{c}\right)=\begin{cases}1 & \left(\frac{r}{c}\leqq t<T+\frac{r}{c}\right)\\ 0 & (\text{otherwise})\end{cases} \tag{41}$$

である．この関数はバースト波を表しており，Tはバースト波の長さである．ゆえに式（40）は各サンプル面のサンプル時間に受波された反射波のみ線形結合していくことを表している．

3．2　計算機シミュレーションの実現

計算機上で超音波ホログラムのシミュレーションを実現するために次のように問題を設定する．

2．1で述べた超音波ホログラムの計算式は，送波器から発射される超音波を平面波としているが，シミュレーションではこの照明波を球面波とする．実験装置の照明波は厳密には球面波ではないが，球面波で近似できるものとする．また，ハイゲンスの原理に従うと物体波は物体各点から出て行く球面波の包絡面として求められる．これを計算機上で実現するには，本来連続値である物体表面の各点を離散値とする必要がある．物体を離散的な物体点の集まりとすることにより，計算機によるシミュレーションが可能となる．この物体点は64×64×128点を定義し，各点について物体が存在する場合0～9の値を与える．この値により各物体点の反射係数が決定される．また，物体点は広さや奥行きなどの大きさは持たないものとする．

この64×64×128個の物体点を持つ物体空間と受波面，そして送波器の関係を図4に示す．

ここで受波面と平行になる面を64×64点で表し，この面を水平方向とする．この物体面を受波面に対し垂直方向に128枚並べることにより，物体空間を構成している．この物体点どうしの間隔は，水平方向と垂直方向で別々に定義できるようにしている．送波器は1つとし，受波面は実験装置と同様に16×16個の受波器をアレイ状に配置している．送波器，物体，受波器それぞれの座標は図4の(a), (b), (c)の座標で指定してあり，これらは自由に移動できる．

音速は340[m/s]，用いる超音波は40[kHz]のバースト波とする．また音場は無歪み伝送場とし，反射による超音波の変形や，位相の乱れは起こらないものとする．またセンサ素子に指向性はなく，素子による超音波の減衰や変形もないものとする．これらに基づき，1つの受波器について任意のサンプル間隔で30回計算することで，2次元のホログラム・データを30個得る．

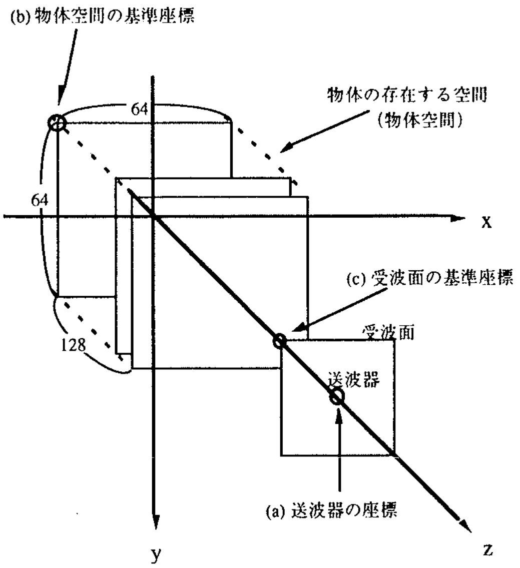

図４　送波器，物体空間，受波面の配置

次にシミュレータの計算のプロセスについて述べる．図５にシミュレータの主な計算部，音場シミュレート部のフローチャートを示す．

まず物体空間の各点につき，物体が存在するかどうかを調べながらｘ方向，ｙ方向，ｚ方向に走査する．物体が存在する場合，図４の(b)に示す物体空間の座標から物体の水平方向・垂直方向のサンプル・レートをもとに物体点の座標を求め，図４の(a)に示す送波器の位置からの距離を計算する．次にある１つの受波器に対して図４の(c)に示す受波面の座標から，受波器の間隔をもとに受波器の座標を求め，先ほど求めた物体点の位置からの距離を計算する．この２つの距離を加算して伝搬距離と伝搬時間を計算する．各サンプル面について，式（41）による評価を行い，測定範囲内であれば，式（36）により振幅，式（37）により位相の計算を行う．そして得られた振幅・位相から，式（39）により実数部・虚数部の計算を行う．この計算をすべてのサンプル面について，すべての受波器について行えば，ある１つの物体点によるホログラム・データが得られ，すべての物体点について行えば，任意の物体のホログラム・データが得られる．

３．３　計算機シミュレーションの結果

図６に示すように，受波面と同じ平面内の中央に送波器を配置し，この受波面と垂直な方向に送波器から 400[mm] 離して点物体を配置し，計算機シミュレーションによって，ホログラム・データを得た．得られた点物体のホログラム・データを図７に示す．ここで受波器の間隔は 17[mm]，バースト波の長さは10波長分としている．また，像再生した結果を図８に示す．

ホログラム・データは各サンプル点の丸の大きさが，振幅レベルの大きさを表し，黒い方が＋，白い方が－を表している．再生像の方は＋－の区別はなく，振幅レベルの大小で表している．

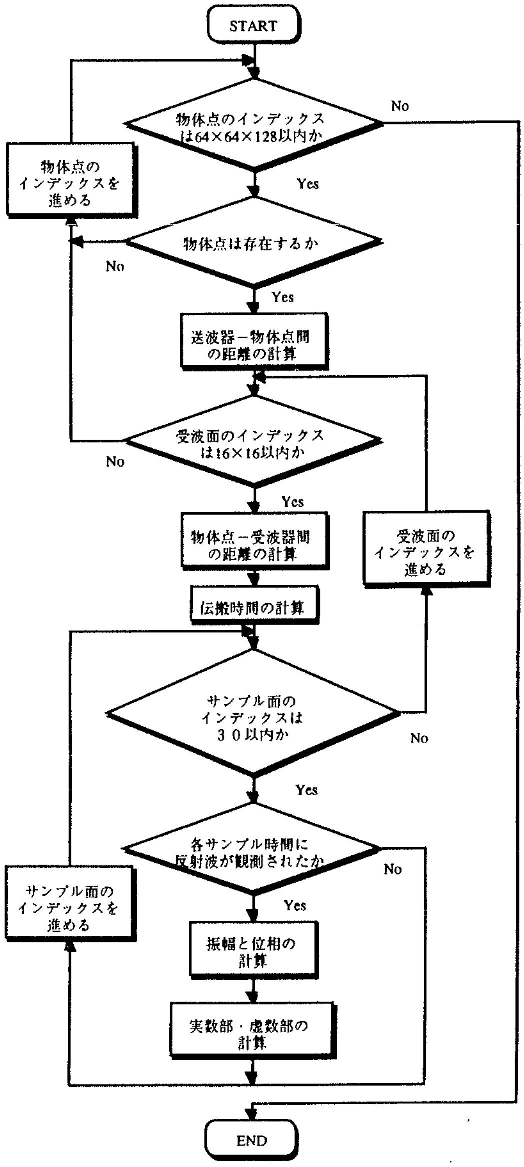

図５　音場シミュレート部のフローチャート

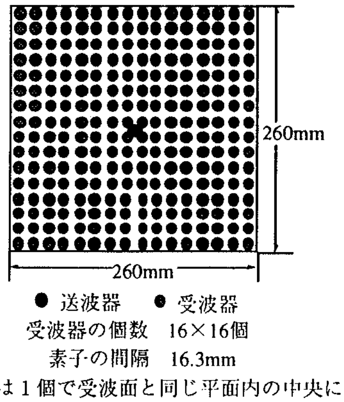

図６　送受波器の構成

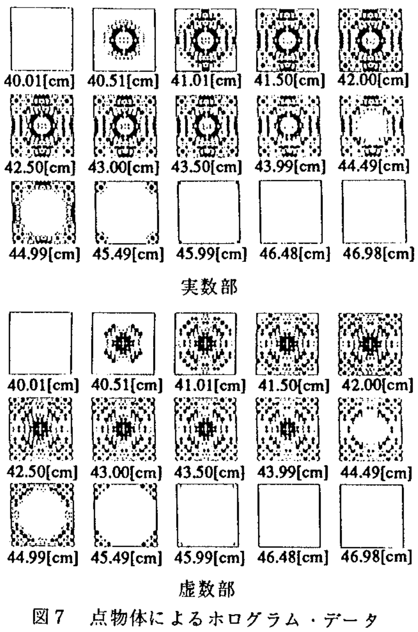

図７　点物体によるホログラム・データ

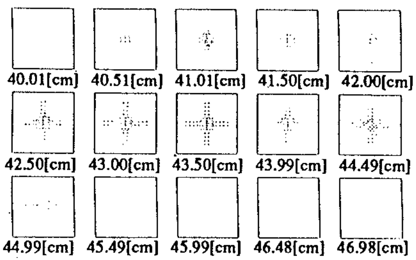

図８　点物体の再生像

４．実験結果との比較検討

ここでは，図９に示す正三角形と凹型の物体を対象物体として，シミュレーションを行いそれから得られる再生像と，実験により同じ条件で得られる再生像とを比較した．

実験装置の概要を図10に示す．まず，パソコンから制御回路，ストレージスコープにバースト波の長さを決定するデータ，制御用データをそれぞれに送り，初期設定を行う．送波器より対象物体にバースト波を照射して物体波を生じさせ，ホログラム面上の受波器で物体波を取り込む．取り込んだ物体波は制御回路内で実数部と虚数部に分けられ出力される．その波形をストレージスコープで取り込み，一定時間間隔でサンプルしたデータをパソコンに転送する．送波器と受波器は１個ずつで構成されているので，受波器を機械的に走査していくことで複数の受波器からなるホログラム面を構成するものとし，ホログラム・データを得る．

今回の比較の条件として，時間サンプル間隔 68[μs]，時間サンプル数 30，受波器の間隔 16.3[mm]，受波器の個数 16×16 とし，バースト波の長さは10波長分とした．正三角形の物体はホログラム面から 365[mm] 離して配置し，凹型の物体は最短距離にして 308[mm] 離して配置した．

図11 は正三角形の物体に対する再生像である．図12 は凹型の物体に対する再生像である．

どちらも実験による再生像の方は，4[cm] ほど遅れて物体が現れている．これは超音波素子における伝搬遅れが原因であると考えられ，シミュレーション結果と検討して補正することも可能であると思われる．

また，平面物体である正三角形の物体において，シミュレーションの方の結果は再生像が 4[cm] ほどの間で消えているが，実験による再生像では 10[cm] 以上も再生像が現れている．バースト波の長さが 85[mm] であるので，その半分の 42.5 [mm]で再生像が消え始めなければならない．この問題も今後検討の必要がある．

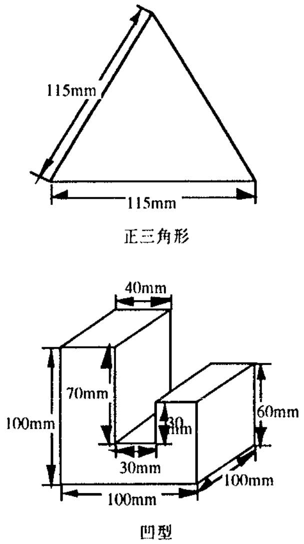

図９　対象物体の形状

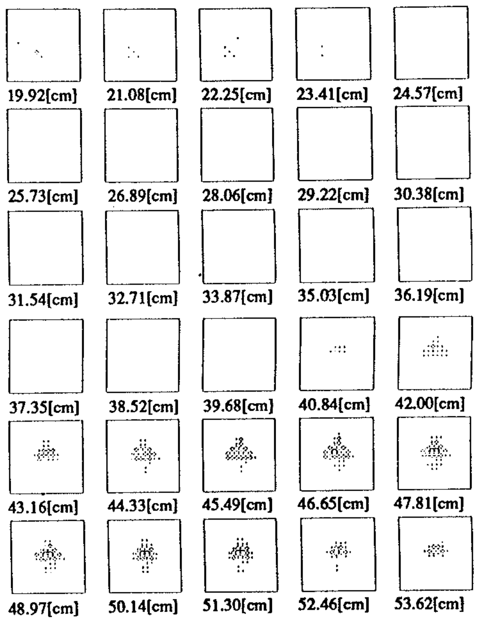

図11(a)　正三角形の再生像（実験）

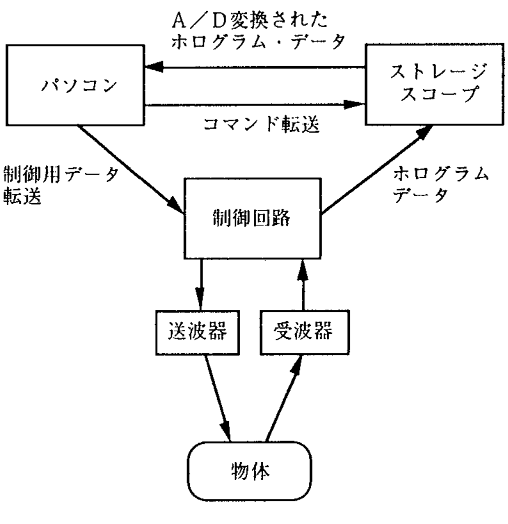

図10　実験装置の概要

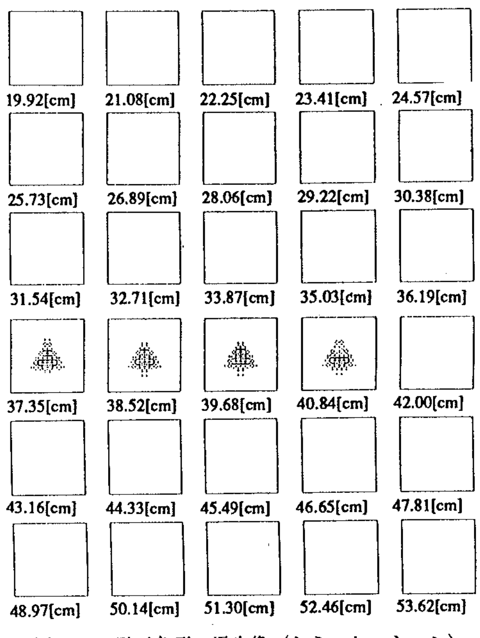

図11(b)　正三角形の再生像（シミュレーション）

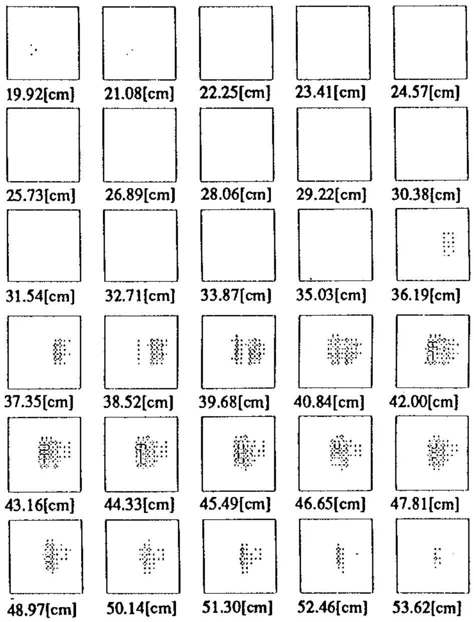

図12(a)　凹型の再生像（実験）

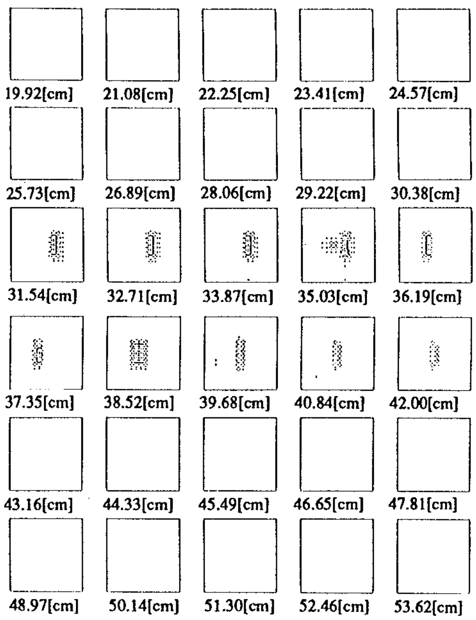

図12(b)　凹型の再生像（シミュレーション）

5．おわりに

超音波ホログラフィの理論，計算機シミュレーションによるホログラム・データの生成について述べ，実験との比較検討を行った．計算機シミュレーションにより，理想的なモデルでの超音波ホログラム・データを得ることができた．これにより，計算機シミュレーションによるホログラム・データからの再生像と実験によるホログラム・データからの再生像を比較することによって，実験における問題点を検討することができ，より良い結果が得られるように実験設備を改善することができる．しかし今回作製したシミュレータはセンサの指向性を考慮していないなど，実験環境とは異なる部分があり，シミュレータ自体の改良も必要である．

今後の課題としては，シミュレータを再生アルゴリズムや認識アルゴリズムの検討に応用すること，波形の歪みや非直線的な周波数特性およびセンサの指向性等の要素をシミュレータに持たせ実験環境に近いモデルに対応させることがあげられる．

参考文献

1)永井啓之亮：超音波ホログラフィ　開口合成による映像，日刊工業新聞社，1989
2)青木由直：波動信号処理，森北出版株式会社，1986