



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	任意波面形態を持つ電子参照波を用いた超音波ホログラフィ
Author(s)	伊東, 則昭; Itoh, Noriaki; 青木, 由直 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 85, 61-70
Issue Date	1977-09-16
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41435
Type	departmental bulletin paper
File Information	85_61-70.pdf



任意波面形態を持つ電子参照波を用いた 超音波ホログラフィ

伊東則昭* 青木由直** 田中勤二**

(昭和 52 年 3 月 31 日受理)

Ultrasonic Holography using an Electronic Reference with Arbitrary Wavefronts

Noriaki ITOH Yoshinao AOKI Kinji TANAKA

(Received March 31, 1977)

Abstract

A technique of ultrasonic holography is proposed, where an electronic reference with arbitrary wavefronts is introduced. A theoretical discussion shows that the reference wave can be simulated by controlling the phase of the reference signals from an oscillator. An experiment was conducted according to the theoretical discussion, where the phase control was carried out using the scanning motion of a receiving transducer and a phase delay circuit. Ultrasonic holograms were constructed by illuminating an object immersed in water with a 1 MHz ultrasonic wave, while the simulated electronic reference and the object signals from the receiving transducer were superposed and detected. The images were optically reconstructed from the holograms, resulting in the validity of the theoretical discussion. Referring to the obtained results, an advanced technique is discussed to simulate an electronic reference with arbitrary wavefronts. For a preliminary experiment a few kinds of wavefronts, such as cylindrical and spherical ones were simulated, where a micro-computer controlled the phase delay circuit. A discussion is made with respect to the availability of the ultrasonic-holographic technique proposed in this paper.

1. ま え が き

走査型超音波ホログラフィにおける特徴の 1 つとして線形検波 (linear detection) が可能であることが挙げられる。つまり、物体波を受波する際に、振幅情報と共に位相情報をも得ることができ、その代表的な応用例として電子参照波法¹⁾がある。電子参照波法とは、電気信号の段階で仮想参照波をシミュレートするもので、本質的に無指向性であり、波面の揃った参照波を形成することができる。

一方、ホログラフィにおける参照波は、物体情報をとり出すためのオペレータ的な性格を持つものと考えられるが、本論文で述べる任意の波面形態をとることのできる電子参照波は、このオペレータの性格を前面に押し出したものである。例えば、ホログラム面に対して傾いた平面波

* 現在は電々公社

** 電子工学科 電波応用工学講座

を参照波として用いれば、傾角（空間周波数）に対応した量だけ、像成分を0次項成分からずらすことができるし（2ビーム干渉法）、物体を含む平面内に中心を持つ球面波を参照波として用いても、球面波の中心座標に対応した量だけフーリエ変換面において像成分をシフトすることができる（レンズレスフーリエ変換ホログラフィ）。その他の非線形な波面を参照波として用いた場合でも、上述の性格を見いだすことができよう。

そこで、この観点にたつて参照波を扱うならば、物体波に対して付加的な立場にあった参照波が、単なる像を読み出すだけに存在するのではなく、像成分に操作を与えるという役割を持つようになり、再生像処理系においてより重要な位置を占めるものとなろう。

本論文では超音波ホログラフィにおいて、任意の波面形態をとることのできる電子参照波の有効性を示し、それを実現する方法について述べる。また、代表的な波面のシミュレーション実験を行なっている。

2. ホログラム面の走査方向に傾いた平面波

まず、参照波面として簡単な平面波面を考える。物体を照射する信号と同周波数かつ同位相（あるいは一定位相差）の信号を電子参照波として用いると、ホログラム面に対して垂直に入射する平面波をシミュレートしていることになるが、周波数²⁾あるいは瞬時位相^{3),4)}を操作すると、ホログラム面に対して傾いた平面波をシミュレートすることができ、ホログラム面に垂直に入射する物体波と干渉させることにより2ビーム干渉法を実現することができる。

2ビーム干渉法⁵⁾とは、通信理論における搬送波通信の概念をホログラフィに導入したもので、これにより物体の像成分を0次項成分より分離させて再生することが可能となり、ノイズの影響が少ない良質の再生像が得られる。

走査型超音波ホログラフィにおいて、ホログラム面に対して傾いた平面波をシミュレートする場合、ホログラム面の（ラスタ状）走査方向に沿って傾いているか、あるいは走査方向に対して垂直に傾いているかが1つの問題となる（図-1参照）。後者の場合、傾いた参照波によりシフトされた再生像と、サンプリング（走査と垂直な方向に行なわれる）の影響による aliasing 像とが同一方向に形成され、サンプリングが粗い場合には、再生像の画質を著しく低下させる。そこで、ここでは前者の走査方向に傾きを持つ平面波を参照波として採用することにする。

走査方向 x に対して θ (rad) 傾いた平面波の座標系を図-2のようにとるならば、ホログラム面の座標 x における瞬

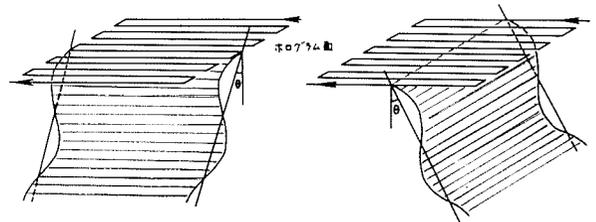
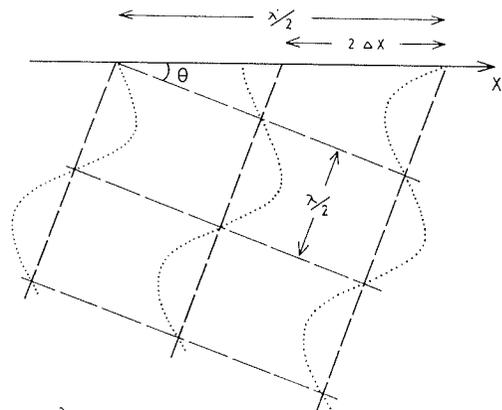


図-1 ホログラム面の走査方向に対する参照波の入射方向



$$\frac{\lambda}{\lambda} = \sin \theta$$

図-2 ホログラム面の走査方向 x に対して傾いた平面波

時の位相 $\varphi_{PR}(x, t)$ は次式で与えられる⁶⁾。

$$\begin{aligned}\varphi_{PR}(x, t) &= \omega_s t + 2\pi x \sin \theta / \lambda_s + \varphi_0 \\ &= \omega_s \{t + T_D(x, \theta)\} + \varphi_0\end{aligned}\quad (1)$$

但し、

$$T_D(x, \theta) = x \sin \theta / v_s \quad (2)$$

ここで、 $\omega_s (=2\pi f_s) = 2\pi v_s / \lambda_s$ は超音波の角周波数、 φ_0 は初期位相である。式(1)は、角周波数 ω_s の参照波基準信号に、座標 x 及び傾角 θ に関して式(2)の時間遅延を加えれば、ホログラム面の走査方向 x に対して傾いた平面波がシミュレートできることを示している。また、図-2に示すように、ホログラム面上の Δx 離れた2標本点間の位相差を考え、これを $\Delta\varphi$ とすると、次式が成立する。

$$\Delta\varphi = \omega_s T_D(\Delta x, \theta) = 2\pi \Delta x \sin \theta / \lambda_s \quad (3)$$

式(2)、式(3)は、参照波基準信号に施す操作が座標 x に関して線形な操作であることを要求している。

3. 球面波面

再生像の画質向上を目的とした方法としては、前述の2ビーム干渉の他に、フーリエ変換型ホログラフィ⁷⁾が挙げられる。また、無限遠における物体波の回折場(つまりフーリエ変換)を用いることなしに、近似的にフーリエ変換型ホログラムを得る方法としてレンズレスフーリエ変換ホログラフィがある。このホログラム記録法を図-3に示すが、ここで特徴的なことは、物体を含む平面内に波源を持つ球面波を参照波として用いることである。ホログラムがフーリエ変換型であることは、再生像の画質が向上するという特徴の他に、ホログラムを1回(逆)フーリエ変換するだけで再生像を得ることができることを大きな特徴として持つ。したがって、フーリエ変換型ホログラムを得ることは、計算機による高速像再生などを意図した系において非常に有益であると言えよう。

簡単のため、ホログラム面の1次元方向に関する成分(x)のみを考え、その座標系を図-4に示す。図-4において、ホログラム面上の座標 x における球面波面の瞬時位相 $\varphi_{SR}(x, R)$ は次式で表わされる。

$$\varphi_{SR}(x, R) = \omega_s t + \frac{2\pi}{\lambda_s} \{\sqrt{R^2 + x^2}\} + \varphi_0 \quad (4)$$

また、ホログラム面内で波源の延長線上にあたる標本点 A を基準点とするならば、座標 x の標本点 B と基準点との位相差(位相遅延) $\Delta\varphi_x$ は次式で与えられる。

$$\Delta\varphi_x = \frac{2\pi}{\lambda_s} \{\sqrt{R^2 + x^2} - R\} \quad (5)$$

つまり、波源とホログラム面との距離 R をパラメータとして、ホログラム面の座標 x に関して、式(5)で示される非線形な位相遅延を参照波基準信号に施せば、所望の球面波をシミュレートすることができる。

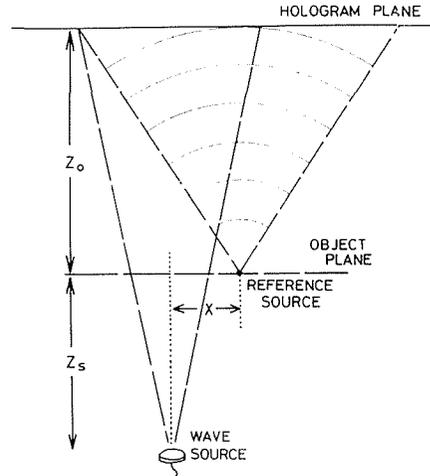


図-3 レンズレスフーリエ変換型ホログラムの作成

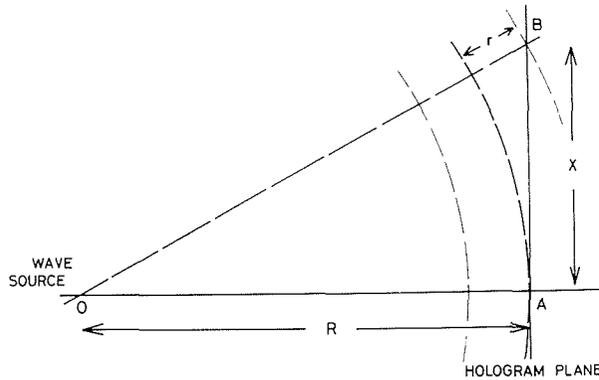


図-4 シミュレートする球面波の座標系

4. その他の非線形な参照波面

ホログラフィで用いる参照波面としては、その波面に再現性がある限りひずみのない再生像を得ることが可能で、波面形態に制限はない。かと言って、無理して複雑な波面を用いる必然性はないが、系の構成上起こり得る欠陥（例えば、ホログラムのひずみ）などを補正するために、非線形な波面を必要とする場合も考えられる。

例えば、走査型超音波ホログラフィにおいて、受波系及び表示にそれぞれ1次元アレイを用いてホログラムを得るような系（図-5参照）において、ひずみのないホログラム*となるためには、 z 方向の条件として次式を満足しなければならない⁸⁾。

$$\frac{n}{m} = \frac{z_0}{z_r - z_0} \quad (6)$$

そのような場合に、参照波として次式で示される楕円波面を用いることを考えてみよう。

$$U_{rs} = \exp\left\{jk(x_r^2 + sy_s^2 + z_r^2)\right\} \\ \simeq \exp\left[jkz_r\left\{1 + \frac{1}{2z_r^2}(x_r^2 + sy_s^2)\right\}\right] \quad (7)$$

ここで、 k は超音波の波数で、式(7)の第2式には近軸光近似を用いている。また、振幅項は無視するものとする。この波面を用いて得たホログラムの真の像(true image)に関する成分はホログラム表示後次のようになる。

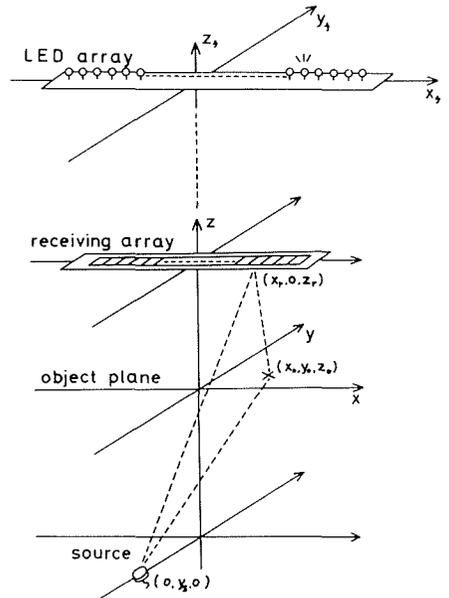


図-5 1次受波器および表示器アレイを用いたホログラム作成系の座標系

* ひずみのないホログラムとは、点像に対してホログラムからの再生波面が楕円波面とならずに、結像面が一意に定まり、物体とホログラムからの再生像が相似形であるようなものを言う。ただし、受波器アレイの全長が発光ダイオード(LED)アレイの全長の m 倍、送波器の走査距離がLEDアレイの走査距離の n 倍になっているものとする。

式(6)は、受波器アレイ、物体及び送波器の相対位置に関する条件であるが、各々の相対位置が式(6)を満たさない系より得られたホログラムはひずみ、正しい再生像は得られない。

$$H_{ts}(x_f, y_f) = U_0 \cdot U_{rs}^* \simeq \exp \left[jk \left\{ \frac{z_0 m^2}{z_r(z_r - z_0)} \cdot \frac{x_f^2}{2} + \frac{z_r - s z_0}{z_0 z_r} n^2 \frac{y_f^2}{2} - \frac{x_0}{z_r - z_0} m x_f - \frac{y_0}{z_0} n y_f + \frac{(x_0^2 + y_0^2) z_r}{2(z_r - z_0) z_0} \right\} \right] \quad (8)$$

ただし、 U_0 は物体の一点として点 (x_0, y_0, z_0) を考えた場合の物体波である。また (x_f, y_f) は表示後のホログラムの座標系であり、 $x_r = m x_f$, $y_r = n y_f$ が成立している。ここで再生波面がホログラム通過後に楕円波面とならないためには式 (8) より、次式を満足しなければならない。

$$\frac{n^2}{m^2} = \frac{z_0^2}{(z_r - z_0)(z_r - s z_0)} \quad (9)$$

したがって、 m, n 及び z_r, z_0 の値に応じて楕円参照波の長径と短径の比 s を変えると、 x, y 両方向の結像面が一意に定まり、再生像がいわゆる“astigmatic な像”になることはない。しかし残念ながら、もう一つのホログラムの無歪条件である物体と再生像が相似形となるという条件をも同時に満たすことはできない。つまり、再生像の x, y 両方向の結像位置 (x_i, y_i) はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \frac{z_r}{z_0} \cdot \frac{1}{m} \cdot x_0 \\ y_i &= \frac{z_r}{z_r - s z_0} \cdot \frac{1}{n} \cdot y_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

となり、両方向の倍率が等しくなる場合は、式 (9)、式 (10) より

$$\frac{n}{m} = \frac{z_0}{z_r - z_0} \quad (11)$$

を満足する場合に限られ、これは最初の式 (6) の条件に他ならない。したがって楕円参照波を用いても、完全にひずみのないホログラムを得ることは一般には不可能となるが、物体と再生像が相似形となるという条件は結像作用とは関係がなく、しかも簡単なインコヒーレント画像処理で修正することができるので、“non-astigmatic な像”を得ることが画像処理系としては最も重要な要素となろう。

その他、得られたホログラムから像を再生する場合に非線形な波面で再生しなければならないような特殊な映像系に対して、適当な非線形波面を参照波として用いることにより、平面波あるいは球面波等の簡単な波面で再生できるように補正することも可能となろう。

5. システムの構成

任意の波面形態を持つ参照波をシミュレートするシステムの基本的な考え方は、ホログラム面の座標 x に関して式 (3)、式 (5) 等で表わされるある基準点に対する位相差を参照波基準信号に位相遅延という形で与えることにより、ホログラム面上で参照波面をシミュレートしようというものである。参照波基準信号に与える位相遅延量としては、 $0 \sim 2\pi$ (rad) まで連続的に与えることが波面形成上理想的ではあるが、その実現は非常に困難であると思われる。そこで、 $0 \sim 2\pi$ (rad) を N 分割した離散的な位相遅延量を持つ N 個の遅延ゲートを設け、ホログラム面の座標 x に対応した位相遅延量を持つゲートを適時スイッチングするという方式を採用する。この場合、サンプリング定理により $N \geq 2$ であれば波面の唯一性は保証される。一方、波面の精度は N の大きさによって決定される。

このように、本システムはデジタル処理を含んでいることを特徴としている。そのために、

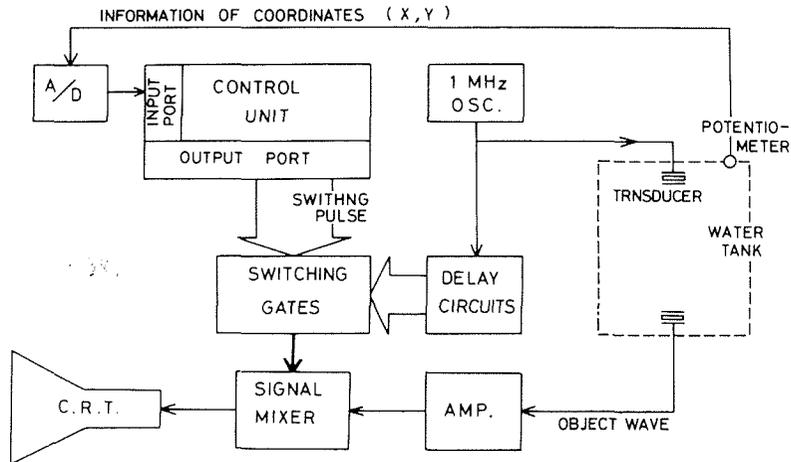


図-6 任意波面をシミュレートするシステムのブロック図

デジタル処理を計算機を用いて行ないソフトウェアで制御することにより、非常に汎用性のあるシステムを構成することができる。本システムのブロック図を図-6に示す。図-6において、control unit がデジタル処理部であるが、ここでは、ホログラム面の座標 x に相当する位相遅延量を計算し、対応する遅延ゲートをスイッチングするパルス発生を専用のマイクロコンピュータを用いて行っている。遅延回路は、アナログ遅延線とバッファゲート及び位相反転回路より構成されている。図-7にホログラム面における座標 x の情報が走査装置のポテンショメータにより与えられて、スイッチングパルスを発生するまでの演算シーケンスの一例を示す。図-7で座標原点決定の操作は、例えばホログラム面における球面波の中心の座標を決定するもので、原点パラメータ θ が与えられる。

また、波面の精度を決定するパラメータ N の大きさであるが、もちろん波面の精度という点からは大きいことが望まれる。しかしその値は、A/D 変換器のスピード及びマイクロコンピュータ自体の演算速度、さらにホログラム面の波動場を受波する受波器の走査速度をも考慮に入れて慎重に選択しなければならない。本システムでは $N=8$ 、つまり $\pi/4$ ごとの位相遅延を与えることができるようになっている。

6. 実験(1)—2ビーム干渉法

前述のように、ホログラム面に対して傾いた平面波をシミュレートするには、ホログラム面の座標 x に関して線形な位相推移を与えればよい。もちろんこの場合も前節で述べたようにして波面をシミュレートできるわけだが、位相推移が座標 x に関して線形であることから簡単なハードウェアでシミュレートすることができる。つまり、受波器の走査速度が一定であることを前提として、座標 x に関する線形性を時間 t に関する線形性と解釈することにより、一定周期を持つ

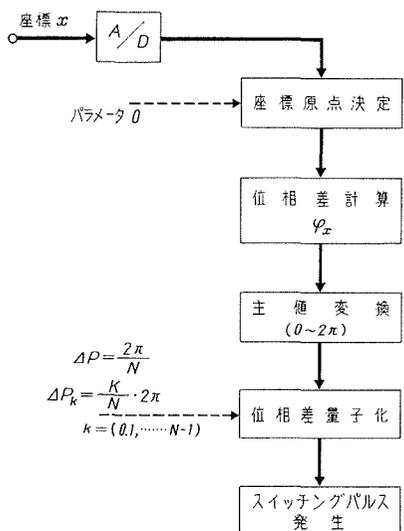


図-7 制御機器における演算シーケンスの1例

パルスで順次規則的に遅延ゲートをスイッチングすることでホログラム面に対して傾いた平面波をシミュレートすることができる。この場合、スイッチングパルスの周波数を f_x 、走査速度を v_x とすると、 Δx の間隔を持つ標本点を与えるサンプリング周波数 (f_x) は次式で与えられる。

$$f_x = \frac{v_x}{\Delta x} \quad (12)$$

この標本点間隔が $\Delta\varphi (=2\pi/N)$ の位相差に相当するものとするならば、式 (3)、式 (12) より傾角 θ に関して次の関係式が得られる。

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{\lambda_s}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{v_x} \cdot f_x \right\} \quad (13)$$

式 (13) は、 $\Delta\varphi$ 、 λ_s 、 v_x を定数とするならば、サンプリング周波数 f_x を変化させることにより任意の傾角 θ が得られることを示している。

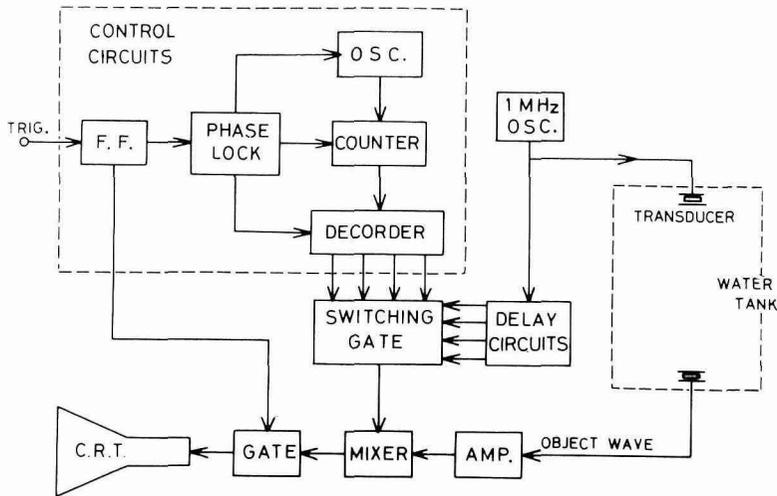


図-8 傾いた平面波をシミュレートするシステムのブロック図

この場合、システムの構成としては図-6の特殊な場合として考えることができるが、これを図-8に示す。また、本実験装置ではラスタ状走査を施してホログラムを得ているので、参照波面の反復走査方向と垂直な方向の位相を揃えるために、走査装置の方向切換時の信号を利用した phase lock 機構を設けている。

実験で使用した超音波の周波数は 1 MHz で、水中での波長は 1.5 mm である。また、本システムで参照波基準信号に与えることのできる最小位相遅延量は $\pi/4$ となっている ($N=8$)。

物体波信号として送波器から発せられた超音波自体を用いた場合の CRT 上に表示された干渉パターン (ホログラム) を図-9に示す。この場合、物体波はホログラム面上ではほとんど球面波となっているために、得られたホログラムは、ホログラム開口外に中心を持つフレネルゾーンプレートとなっている。この時のタイミングパ

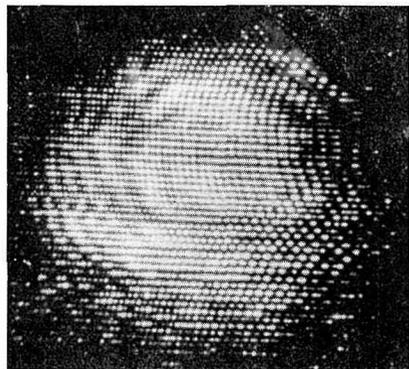


図-9 シミュレートされた傾いた平面波を送波器からの照明波の干渉パターン (フレネルゾーンプレート)

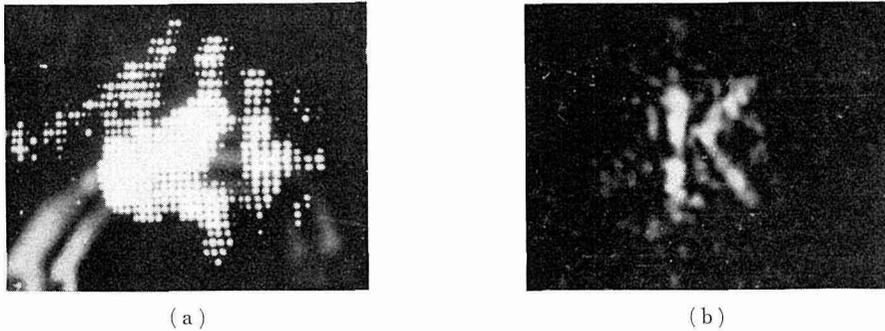


図-10 文字を K 物体として用いた時の超音波ホログラム (a) とその光学的再生像 (b)

ルスの周波数 f_x は約 17 Hz で式 (13) より $\theta \approx 15$ (deg) の傾角を持つ平面波をシミュレートしていることになる。但し、 $v_x \approx 12.5$ mm/s としている。物体として簡単な文字を用いて得られたホログラムとその光学的再生像を図-10 に示す。用いた物体は、独立気泡スポンジのシートに切り抜かれた文字“K”で、大きさは 4 cm × 4 cm、線の太さ 0.6 cm である。シミュレートされた平面波は $f_x \approx 26$ Hz であり、対応する傾角は約 22 (deg) となっている。尚、図-10 (b) の再生像は、0 次光成分と分離した物体の像成分のみを示している。また、物体とホログラム面との距離は約 40 cm である。

7. 実験 (2)——非線形波面のシミュレーション

ホログラム面の座標 x がポテンショメータよりアナログ量として A/D 変換器に入力される。次に、A/D 変換器からのデジタル出力が入力ポートよりマイクロコンピュータ内に入力され、図-7 の演算シーケンスを機械語で組んだプログラムを実行し、出力ポートより 8 個の遅延ゲートから 1 個のゲートを選択するスイッチングパルスが発生する。その遅延ゲートを通過した時系列の参照波信号と受波器からの物体波信号との和がとられて CRT のカソードに入力され、受波器の位置と同期した CRT 蛍光面上のスポットを輝度変調する。これをくり返すことにより、CRT 上に 2 次元の干渉パターン (ホログラム) を表示する。以上が、任意の波面形態を持つ参照波をシミュレートしホログラムを得るまでの過程である。

この方法論にのっとり、式 (5) に従って円筒波面及び楕円波面をシミュレートした結果をそれぞれ図-11、図-12 に示す。図-11、図-12 では、波面形成の様子を見るために、物体波として超音波発振器出力の一部 (これはホログラム面に垂直に入射する平面波に相当する) を用いている。

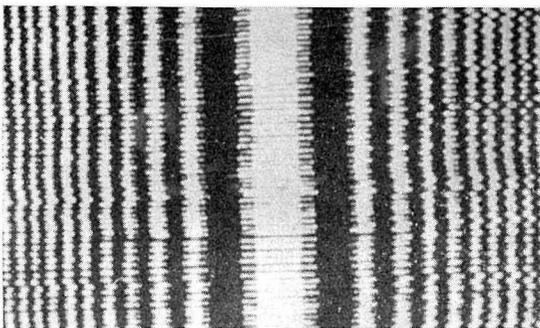


図-11 シミュレートされた円筒波面

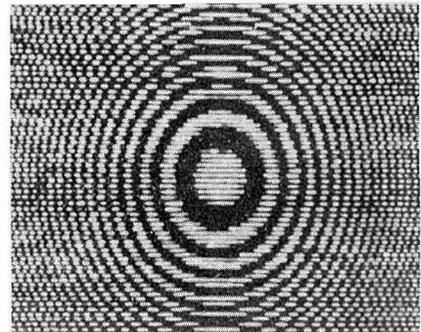


図-12 シミュレートされた楕円波面

図-11において、パラメータ R としては 64 cm, 一方 図-12 では 48 cm となっている。また 図-12 の楕円波面では、長径と短径の比 S は約 1.2 となっている。図-11, 図-12 中に多少見られるジグザグ模様は、量子化段階での誤差及び巻き線型のポテンショメータを用いることによる座標情報の微妙なずれによるものである。しかし、参照波面としてほぼ満足できる波面が形成されていることがわかる。

本システムにおいて、物体波を受けてからホログラムを表示するまでの速度で最も重要な要素となるものは、マイクロコンピュータの演算速度である。例えば、式 (5) の位相差計算を近似式を用いずに直接計算すると、計算の精度を上げるため最高 4 倍長 (32 ビット) で行なった場合、上述の 1 スポットを得るのに約 20 m·sec 要した。したがって、ホログラム面の近くに波源を持つような球面波をシミュレートする場合には、ホログラム開口の周辺付近で $\Delta\varphi (= \pi/4)$ だけ変化する速度が計算速度を上回ることも起こりうる。これに対して走査速度を落とせば問題はないのだが、これでは本質的な解決にはならず、よりスピードの速いマイクロプロセッサの出現を期待するところである。

8. あとがき

任意の波面形態をとることのできる参照波を電子的にシミュレートする方法を述べ、その超音波ホログラフィにおける有効性を示した。本論文で述べたシステムでは、制御機器としてマイクロコンピュータを採用しソフトウェアで制御を施すことにより、非常に汎用性の高いシステムが構成されており、画像処理系としての要素も備わったシステムとなっている。

ここで述べたシミュレート法によると、結果的に、連続波として受波が可能な走査の方向に対してもサンプリングを施していることになるが、ラスタ状走査を施す限り、ホログラム面の x, y 両方向の解像度 (あるいは帯域幅) という観点からはさほど不合理なことにはならないと考えられる。また、参照波として球面波をシミュレートすることにより、レンズレスフーリエ変換ホログラムが得られることを示したが、ホログラムがフーリエ変換型であることにより、FFT (Fast Fourier Transform) のアルゴリズムを用いて高速な像再生が可能となった。そこで、図-6 における Mixer の出力信号を再度 A/D 変換器を通して計算機内のメモリーに一時格納し、参照波のシミュレーションに従事しているコンピュータを時分割で用いる (あるいはマルチプロセスシステムにする) ことにより随時 FFT を実行して、ホログラム面を走査し終わった時には CRT 上に再生像が表示されているといった、いわゆる (準) 実時間超音波映像システムを構成することも可能となろう。

文 献

- 1) 岩崎, 青木, 鈴木: “電子参照波を用いた合成走査超音波ホログラフィ”, 応用物理, 43-5, p. 468 (1974).
- 2) E. Marom *et al.*: “Ultrasonic holography by electronic scanning of a piezoelectric crystal”, Appl. Phys. Lett., 12-2, p. 26 (1968).
- 3) R. B. MacAnally: “Inclined reference acoustic holography”, Appl. Phys. Lett., 11-8, p. 266 (1967).
- 4) A. F. Metherell and H. M. A. El-Sum: “Simulated reference in a coarsely sampled acoustical hologram”, Appl. Phys. Lett., 11-8, p. 20 (1967).
- 5) E. N. Leith and J. Upatnieks: “Reconstructed wavefronts and communication theory”, J. Opt. Soc. Am., 52, p. 13 (1962).
- 6) 伊東, 青木: “走査方向に傾きを持つ電子参照波を用いた超音波ホログラフィ”, 信学論 (C), 59-10, p. 686 (1976).

- 7) E. N. Leith and Upatnieks: "Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional object", J. Opt. Soc. Am., 54, p.1295 (1964).
- 8) 伊東, 青木: "一次元振動子アレイおよび発光ダイオードアレイを用いた超音波ホログラフィ", 応用物理, 45-5, p. 484 (1976).