実時間における音響像の直視法

(1)

——リアルタイム3-Dエコーグラフ——

正会員 服部 知彦*

The method of transformation from an acoustic distribution to a light intensity (1)

(Real time 3-D echograph)

Tomohiko-Hattori (Member)

(Nagoya University College of Medical Technology Department of Radiological Technology)

ABSTRACT

A new US imaging system of "Real time 3-D echograph" for the medical application is described in this paper. It is theoretically explained that characteristics of transformation from an acoustic distribution to a light intensity one.

The approximate analytic formula of this characteristics is compared with the experimental data that a light intensity was directly proportional to an amplitude of vibration concerning transformation from an acoustic distribution to a light intensity one.

1. はじめに

従来、超音波診断装置のうち、超音波断層装置と呼ばれるものがある。この装置の特徴は、実時間で人体の皮膚面から体内方向への二次元的な超音波物性による映像が得られることである。

今回、この超音波診断装置の新たなバリエーションとして、音響レンズおよび、レーザー光による光学的演算処理を利用して、実時間で人体の皮膚面から体内方向への超音波物性による三次元映像が得られる装置を考案した。そこで、この装置における音響像の直視に関して、理論的考察および基礎実験データを示すものである。

2. 方法

1. 図1の如く、音響レンズを用いて、超音波振動子より発振した超音波の被観察物からの反射鏡面で結像させる。
2. 図1の如く鏡面に、平行な光束のレーザー光を当て、反射光に対して二重回折装置¹⁾を置く。
3. 二重回折装置の空間フィルターは、レーザー光の光軸の中心に光が通過できないよう不透明にし、空間フィルターの周囲にいくほど透明度が高くなるよう空間フィルターを設計する。
4. 図1の超音波変調装置²⁾とバリフォーカルミラー³⁾と超音波振動子を同期させ、超音波反射像の立体映像を作り出す。

図1 Schematic diagram of "Real time 3-D echo-graph".

5. 超音波振動子は指向性が小さく、物質を伝播する超音波の波面の振幅強度が、できるだけ均等となるものを用いる。

3. リアルタイム3-Dエコーグラフについての考察

図2の如く互いに共役な軸上の点 P_0 と P_0' の焦点を原点とする座標を x と x' で表し、これらの座標は焦点から光の進行方向

*名古屋大学医療技術短期大学部診療放射線技術学科
Tomohiko Hattori (Member)
(Nagoya University College of Medical Technology Department of Radiological Technology)

本稿の要旨は、昭和63年度電気関係学会東海支部連合大会において発表した。

図 2 A ray tracing which contains focussed plane concerning optical lense.

を測ったときを正とし、 n_1 を物体側、 n_k を像側の屈折率とすると、

$$\beta' = \frac{\ell_k'}{\ell_1} = -\frac{n_1 x'}{n_k f} = \frac{f}{x} \quad (1)$$

である⁴⁾。ただし、 β は横倍率⁵⁾、 ℓ_1 は点 P_0 に対する点 P の変位量、 ℓ_k' は点 P_0' に対する点 P' の変位量、 f はレンズの焦点距離とする。式(1)より、

$$xx' = -\frac{n_k'}{n_1} f^2 \quad (2)$$

である。

図1では図3のように図2の x は0であり、 x' は ∞ である。よって P から発した光で $P_0 P_0'$ に平行な光は P_0' を通過し、レンズの中心を通る光は PH の延長上の点 P' を通過する。

よって図4において、光軸に平行な光は必ず、レンズから焦点距離に位置する光軸上の点 P_0' を通る。また物体側の点光源 P より発した光は、像側のレンズから空間フィルター間でそれぞれ

図 3 A ray tracing concerning optical lense when the distance between an object and a lense is focus distance f .

図 4 A ray tracing concerning the ray not parallel to an optical center axis which angle is θ .

平行な光路をとる。ここで点 P から発する光で、光軸となす角が θ の光について、式(3)が成り立つ。

$$d = f \cdot \tan \theta \quad (3)$$

よって、物体側 P より発し、光軸に対して θ の角度を有する光は、像側の空間フィルター面において、中心軸 P_0' より $f \cdot \tan \theta$ だけ変移した点を通過する。ここで図1において、非観察物より反射した超音波は音響レンズにより、鏡面に結像される。この超音波の結像により、鏡面にゆらぎが生じ、図4における光軸に対して角度 θ を持った光が生じる。また鏡面に結像した超音波の振幅強度が大きいほど、鏡面のゆらぎも大きくなるので、図4における d が大きくなる。よって空間フィルターの光軸上は不透明にし、さらに周辺部へ行くほど透明度を高くすることにより、鏡面での超音波による振幅強度が大きい部分のレーザー光が空間フィルターを通過しやすくなる。そして図1の空間フィルターから散乱板(ビントガラス)までは、図4の空間フィルターの光軸 P_0' を中心とした、図4と点対称の幾何学的配置であるので、散乱板には鏡面の光軸に対して角度 θ を有したレーザー光の倒立像が得られる。

図5は図1における非観察物と音響レンズと鏡面の関係図である。ここで A は許容ボケ長であり、 β' を横倍率とすると $B = \beta' A$ であるから、 B はこの装置の音響レンズの軸と直角の横方向の解像力を示す値である。また、図6は、超音波の入力波とその反射波と、超音波変調をかけたレーザー光の強度、およびバリフォーカルミラー駆動のための電気信号の、簡単なタイムチャートである。ここで η は超音波振動子から入力されたパルスが、超音波振動子から図5における点 b で反射し点 d で結像するまでの時間で、 τ は図5で超音波が、点 a と点 b を往復する時間である。よって時間 τ の間、図1の鏡面に入射させるレーザー光は、トランスデューサから発信された球面波音源がパワー W を放射する場合、超音波が物質中を通過する際の距離を r とすると、鏡面に

図 5 An acoustic schematic depicting bound of focussed field and resulting acoustic image at a surface of mirror as a focal plane.

図 6 A simple example illustrating timing chart to operate "Real time 3-D echograph" as a continuous function.

ける超音波の強度は、 $\frac{W}{4\pi r^2}$ に音響インピーダンス等により求まる減弱分を加味した値となるので、それを補正する意味において図6の如くだんだん強くする必要がある。また観察者にとって不必要な映像が鏡面で反射超音波像として結像している場合は、レーザー光は無発振状態である。これらのレーザー光の強度の変調は、図1においては、超音波変調器によって行っている。また、鏡面に入射させるレーザー光を、短いパルス状に、超音波振動子と同期発振させることによって、非観察物のある深さの面で、1パルスに音波が非観察物中を進む距離の半分の厚さの、超音波断層像が奥行き標本化³⁾を行うことで立体的に観察できる。

4. 空間フィルターについての考察

ある空間周波数成分(周期 T)の場合の、鏡面における微小区間での波の方程式は近似的に、図7の如く、

$$y = E_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

である⁶⁾とする。ただし x は鏡面の1次元的空间座標、 E_0 は鏡面の空間座標における周期 T 内の最大振幅、 y は x に対する振幅である。式(4)を x で微分すると、

$$\dot{y} = \frac{2\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

である。図7における式(4)の法線の傾きは式(5)より

$$-\frac{T}{2\pi \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)}$$

であり、鏡面で反射したレーザー光の傾きは、 θ が小さいとき、近似的にその半分の

$$-\frac{T}{4\pi \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)}$$

である。よって図4における $\tan \theta$ は、

$$\tan \theta = -\frac{4\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right) \quad \dots\dots\dots(6)$$

であり、式(6)を式(3)に代入すると

$$d = -\frac{4f\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

である。

また、 θ が大きい時は図7における式(4)の法線の傾きは式(5)より、

$$-\frac{T}{2\pi \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)}$$

図7 Relation between the incident Laser beam and the reflected Laser beam at a surface of mirror.

よって、

$$\tan \theta/2 = -\frac{2\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)$$

であり、

$$\theta/2 = \tan^{-1}\left\{-\frac{2\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)\right\}$$

$$\theta = 2 \tan^{-1}\left\{-\frac{2\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)\right\}$$

$$= \tan^{-1} \frac{2\left\{-\frac{2\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)\right\}}{1 - \left\{-\frac{2\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)\right\}^2}$$

$$\tan \theta = \frac{-\frac{4\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)}{1 - \left\{-\frac{2\pi}{T} \cdot E_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right)\right\}^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

である。式(7)より以下のことが分る。

1. この装置の鏡面での振幅強度 E_0 と空間フィルターにおけるレーザー光の通過する位置である中心軸からの距離 d とは比例している。
2. この装置の鏡面での振動において、空間的位相が同位相であれば、空間フィルターにおけるレーザー光の通過する位置である中心軸からの距離 d と空間周波数は比例(周期 T に反比例)している。

性質1を利用して、二重回折装置の空間フィルターは、レーザー光の光軸の中心に光が通過できないよう不透明にし、空間フィルターの周囲にいくほど透明度が高くなるよう空間フィルターを設計することにより、鏡面に結像した反射超音波の振幅強度分布像が、パリフォーカルミラーを介して観察できる。また、性質2を利用すると、空間フィルターにより、鏡面に結像した反射超音波の振幅強度分布像の周波数強調を行うことができる。ただし、今回我々の設計した二重回折装置では θ が大きい場合鏡面の反射光は二重回折装置に入力されないが、もし θ が大きくても二重回折装置に鏡面の反射光が入力される場合を考えると、二重回折装置の入力および出力レンズを大口径にしたり、焦点距離を極端に

図8 Experimental schematic which is the montage de double diffraction with a speaker and mirror.

図9 Relation between the luminance at diffuser and the input frequency to speaker with constant voltage 2.5 Vp-p.

短くしなければならず、光学設計上の困難が予想される。よって今回は式(8)による考察は省略する。

5. 実験および結果と考察

図8の如く、鏡面を通常の音響スピーカーのコーンに張り付けた実験系において、鏡面の共振周波数を求めるため、鏡面振動の周波数を変化させ、その時の散乱板の輝度を測定した。ただし、スピーカー入力電圧は2.5 (Vp-p)一定とし、入力波形は正弦波とした。結果は図9に示した。ただし、ビームエキスパンダーの対物レンズの倍率は60倍、それと対の凸レンズの口径および焦点距離は52 mm, 200 mm, 二重回折装置に用いた凸レンズの口径および焦点距離は75 mm, 250 mmで、また使用したレーザー光の波長および出力は632.8 nm, 1.0 mwであった。

次に図9より、共振周波数は126(Hz)であったので、スピーカー入力周波数を126(Hz)一定とし、スピーカー入力電圧を変化させ、その時の散乱板の輝度を測定した。ただし、入力波形は正弦波とした。結果は図10に示した。図10より鏡面の振幅と散乱板に映った像の輝度は比例関係であった。また、実験系の空

図10 The approximate line concerning luminance (cd/m²) at diffuser as a function of input p-p voltage to speaker with constant frequency 126(Hz).
 $y = 0.633 + 0.238x$ R-square : 0.937

図11 A sample of really used spatial filter at this experiment.

図12 Schematic diagram of "Real time 3-D echograph" without coma aberration.

間フィルターは図11の如くであり、図10において、鏡面に振動が無い時でも散乱板に輝度が生じるのは、図8における二重回折装置の物体側レンズに、コマ収差⁷⁾が生じたためである。我々はこのコマ収差を解消させるために、図12の如く、ハーフラーを用いた装置を考案し、検討中である。

6. 結 論

リアルタイム3-Dエコーグラフの最大の特徴は、音響像の振幅分布を、実時間で光強度分布に変換するという点である。この方法では、従来から行われている音響モード像のような干渉縞でない、振動面の振動がその振幅に比例した光の強度として観察された。

参 考 文 献

- (1) 服部知彦：“コヒーレント結像系における光デバイスとしての液晶板の特異性”，日本医学放射線学会物理部会誌，p. 21 Vol. 8, No. 1, (April 1988)
- (2) 服部 肇，“オプトエレクトロニクスの活用” p. 62, 大河出版 (1984)
- (3) J. Hamasaki and Y. Nagata：“Real-time Transmission of 3D Image Using Volume Scanning and Spatial Modulation”，Applied Optics, Vol. 16, No. 6, pp.

1675～1678 (June, 1977)

- (4) 三宅和夫, “レンズ設計の原理”, p. 26, 講談社, (1977)
- (5) 三宅和夫, “レンズ設計の原理”, p. 18, 講談社, (1977)
- (6) 松平 精, “基礎振動学”, p. 267, 現代工学社, (1973)
- (7) 松居吉哉, “レンズ設計法”, p. 6, 光学技術シリーズ 1, 共立出版株式会社, (1979)

(受付 1989 年 1 月 25 日)