

明 細 書

発明の名称：映像化装置及び映像化方法

技術分野

[0001] 本開示は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する映像化装置等に関する。

背景技術

[0002] 散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する映像化装置等に関する技術として、特許文献1～7に記載の技術がある。

[0003] 例えば、特許文献1に記載の技術では、マイクロ波送出器から送出されたビームが検査対象に入射され、散乱したビームの振幅及び位相がマイクロ波検出器により検出される。そして、マイクロ波検出器の出力信号から誘電率の分布が計算され、検査対象における断層の像表示が行われる。

先行技術文献

特許文献

- [0004] 特許文献1：特開昭62-66145号公報
特許文献2：国際公開第2014/125815号
特許文献3：国際公開第2015/136936号
特許文献4：国際公開第2021/020387号
特許文献5：国際公開第2021/053971号
特許文献6：国際公開第2022/260112号
特許文献7：国際公開第2022/265017号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化することは容易ではない。具体的には、計測領域内の状態が既知である場合において、計測領域に入射された波動に対して計測領域から放射される散乱波の計測データを推定することは、順方向問題と呼ばれ、容易である。

一方、散乱波の計測データが既知である場合において、計測領域内の状態を求めることは、逆方向問題と呼ばれ、容易ではない。

[0006] また、複数の送信器が連動して波動を送信し、複数の受信器が連動して波動の散乱波を受信する場合、情報の粒度が粗くなり、計測領域における物体を映像化することが困難になる可能性がある。

[0007] そこで、本開示は、連動して波動を送信する複数の送信器、及び、連動して波動の散乱波を受信する複数の受信器を用いて、計測領域における物体を効率的に映像化することができる映像化装置等を提供する。

課題を解決するための手段

[0008] 本開示の一態様に係る映像化装置は、第1方向に連結され連動する複数の送信器をそれぞれが含む1つ以上の送信器アレイであって、それぞれが前記複数の送信器によって計測領域へ波動を送信する1つ以上の送信器アレイと、前記第1方向とは異なる第2方向に連結され連動する複数の受信器をそれぞれが含む1つ以上の受信器アレイであって、それぞれが前記複数の受信器によって前記計測領域から前記波動の散乱波を受信する1つ以上の受信器アレイと、前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化する情報処理回路とを備え、前記情報処理回路は、前記物体の映像化において、前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する。

[0009] なお、これらの包括的又は具体的な態様は、システム、装置、方法、集積回路、コンピュータプログラム、又は、コンピュータ読み取り可能なCD-ROMなどの非一時的な記録媒体で実現されてもよく、システム、装置、方法、集積回路、コンピュータプログラム、及び、記録媒体の任意な組み合わせ

せで実現されてもよい。

発明の効果

[0010] 本開示によれば、連動して波動を送信する複数の送信器、及び、連動して波動の散乱波を受信する複数の受信器を用いて、計測領域における物体を効率的に映像化することが可能になる。

図面の簡単な説明

[0011] [図1]図1は、参考例における超音波送受信装置を示す外観図である。

[図2]図2は、参考例における超音波ダイナミックデプスフォーカスを示す概念図である。

[図3]図3は、実施の形態における2次元送受信素子アレイの構成例を示す概念図である。

[図4]図4は、送信器アレイの動作例を示す概念図である。

[図5]図5は、受信器アレイの動作例を示す概念図である。

[図6]図6は、計測領域を示す概念図である。

[図7]図7は、フェーズドアレイ方式と散乱場解析方式との関係を示す関係図である。

[図8]図8は、送信器アレイ及び受信器アレイの位置を示す模式図である。

[図9]図9は、曲面に配置される2次元送受信素子アレイを示す概念図である。

[図10]図10は、曲面に配置される2次元送受信素子アレイにおける送信器アレイ及び受信器アレイの位置を示す模式図である。

[図11]図11は、映像化装置の基本構成を示すブロック図である。

[図12]図12は、映像化装置の基本動作を示すフローチャートである。

発明を実施するための形態

[0012] 本開示の一態様に係る映像化装置は、第1方向に連結され連動する複数の送信器をそれぞれが含む1つ以上の送信器アレイであって、それぞれが前記複数の送信器によって計測領域へ波動を送信する1つ以上の送信器アレイと、前記第1方向とは異なる第2方向に連結され連動する複数の受信器をそれ

それぞれが含む1つ以上の受信器アレイであって、それぞれが前記複数の受信器によって前記計測領域から前記波動の散乱波を受信する1つ以上の受信器アレイと、前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化する情報処理回路とを備え、前記情報処理回路は、前記物体の映像化において、前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する。

[0013] これにより、連動して波動を送信する複数の送信器、及び、連動して波動の散乱波を受信する複数の受信器を用いて、2つの方向に対応する計測データを取得することが可能になる。そして、2つの方向に対応する計測データを用いて散乱場関数及び映像化関数を的確に導出することが可能になる。したがって、計測領域における物体を効率的に映像化することが可能になる。

[0014] 例えば、前記1つ以上の送信器アレイ及び前記1つ以上の受信器アレイのそれぞれは、フェーズドアレイである。

[0015] これにより、適応的に定められる方向へ波動を送信することが可能になり、適応的に定められる方向から散乱波を受信することが可能になる。したがって、適応的に定められる範囲における物体を効率的に映像化することが可能になる。

[0016] また、例えば、前記1つ以上の送信器アレイは、前記第2方向に移動する1つの送信器アレイであり、前記1つ以上の受信器アレイは、前記第1方向に移動する1つの受信器アレイである。

[0017] これにより、複数の送信器アレイ及び複数の受信器アレイを削減することが可能になる。そして、複数の送信器アレイ及び複数の受信器アレイを準備し配置するためのコストを削減することが可能になる。

[0018] また、例えば、前記 1 つ以上の送信器アレイは、前記第 2 方向に並ぶ複数の送信器アレイであり、前記 1 つ以上の受信器アレイは、前記第 1 方向に並ぶ複数の受信器アレイであり、前記複数の送信器アレイは、順次、前記波動を送信する。

[0019] これにより、送信器アレイ及び受信器アレイを移動させる機構を削減することが可能になる。また、計測において、送信器アレイ及び受信器アレイの移動にかかる時間を削減することが可能になる。

[0020] また、例えば、前記 1 つ以上の送信器アレイ及び前記 1 つ以上の受信器アレイは、平面上に配置される。

[0021] これにより、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイの配置を簡略化することが可能になる。したがって、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイを配置するためのコストを削減することが可能になる。また、散乱場関数及び映像化関数を導出するための演算量を削減することが可能になる。

[0022] また、例えば、前記 1 つ以上の送信器アレイ及び前記 1 つ以上の受信器アレイは、曲面上に配置される。

[0023] これにより、1 つ以上の送信器アレイの特性、1 つ以上の受信器アレイの特性、又は、計測領域の特性に応じて、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイを曲面上に配置することが可能になる。そして、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイを柔軟に配置することが可能になる。

[0024] また、例えば、前記 1 つ以上の送信器アレイ及び前記 1 つ以上の受信器アレイは、平面上に配置され、前記第 1 方向は y 軸方向であり、前記第 2 方向は x 軸方向であり、前記散乱場関数は、

[数1]

$$\Phi(x_1, y_1, z, \alpha, \beta, k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1)} \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{iz \left\{ \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}} \right\}} dk_{x_1} dk_{y_1}$$

で表現され、前記散乱場関数の z は、前記送信位置及び前記受信位置の z 座標を示し、前記散乱場関数の x_1 は、前記送信位置の x 座標を示し、前記散乱場関数の y_1 は、前記受信位置の y 座標を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 k_{x_1} 及び k_{y_1} は、前記散乱場関数の x_1 及び y_1 に関する波数を示し、 α は、前記 1 つ以上の受信器アレイの位相因子を示し、 β は、前記 1 つ以上の送信器アレイの位相因子を示し、

[数2]

$$\tilde{Q}$$

は、フーリエ変換された前記計測データを示す。

[0025] これにより、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイが平面上に配置されることに従って、散乱場関数を的確に導出することが可能になる。したがって、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイの配置に対応する散乱場関数を的確に導出することが可能になる。

[0026] また、例えば、前記映像化関数は、

[数3]

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y)} \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \left\{ \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{ik_z z} \right\} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_z$$

で表現され、前記映像化関数の x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 k_z は、

[数4]

$$k_z = \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}}$$

で定められる。

[0027] これにより、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイが平面上に配置されることに従って定式化された散乱場関数に対応する映像化関数を的確に導出することが可能になる。

[0028] また、例えば、前記映像化関数は、

[数5]

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y)} \sum_\alpha \sum_\beta \left\{ \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{ik_z z} \right\} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_z$$

で表現され、前記映像化関数の x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示し、 k_z 及び dk/dk_z は、

[数6]

$$k_z = \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}}$$

$$\frac{dk}{dk_z} = \frac{1}{\frac{(1-\beta^2)k}{\sqrt{(1-\beta^2)k^2 - k_{x_1}^2}} + \frac{(1-\alpha^2)k}{\sqrt{(1-\alpha^2)k^2 - k_{y_1}^2}}}$$

で定められる。

[0029] これにより、1つ以上の送信器アレイ及び1つ以上の受信器アレイが平面上に配置されることに従って定式化された散乱場関数に対応する映像化関数を的確に導出することが可能になる。また、変換された積分変数に応じて、効率的に演算を行うことが可能になる。

[0030] また、例えば、前記1つ以上の送信器アレイ及び前記1つ以上の受信器アレイは、曲面上に配置され、前記第1方向は y 軸方向であり、前記第2方向は x 軸方向であり、前記散乱場関数は、

[数7]

$$\Phi(x_1, y_1, z, k) = \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1)} \left\{ \sum_{x_2, y_2} e^{-i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} e^{iv_2 \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2}} e^{iu_2 \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2}} \right\} \cdot b(k_{x_1}, k_{y_1}, k) e^{iz \left(\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2} \right)} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2}$$

で表現され、前記散乱場関数の z は、前記送信位置及び前記受信位置の z 座標を示し、前記散乱場関数の x_1 は、前記送信位置の x 座標を示し、前記散乱場関数の y_1 は、前記受信位置の y 座標を示し、 k は、前記波動の波数を示し、 k_{x_1} 、 k_{y_1} 、 k_{x_2} 及び k_{y_2} は、積分変数を示し、 b は、

[数8]

$$b(k_{x_1}, k_{y_1}, k) = \sum_{I, J} b_{I, J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k)$$

で定められ、 I は、前記 1 つ以上の送信器アレイが前記波動を送信する x 座標のインデックスを示し、 J は、前記 1 つ以上の受信器アレイが前記散乱波を受信する y 座標のインデックスを示し、 $b_{I, J}$ は、

[数9]

$$b_{I, J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k) = \frac{e^{i(k_{x_1}x_I + k_{y_1}y_J)} \Phi(x_I, y_J, 0, k)}{(2\pi)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{I, J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_2} dk_{y_2}}$$

で定められ、 $\Phi(x_I, y_J, 0, k)$ は、前記計測データを示し、 $G_{I, J}$ は、

[数10]

$$G_{I, J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_2}m\Delta x + k_{y_2}n\Delta y)} e^{iv_2(x_I, n\Delta y) \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2}} e^{iu_2(y_J, m\Delta x) \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2}}$$

で定められ、 Δx は、前記複数の受信器のうちの隣り合う 2 つの受信器の距離を示し、 Δy は、前記複数の送信器のうちの隣り合う 2 つの送信器の距離を示し、 v_2 及び u_2 のそれぞれは、前記曲面の形状を表現する関数を示す。

[0031] これにより、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイが曲面上に配置されることに従って、散乱場関数を的確に導出することが可能になる。したがって、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイの配置に対応する散乱場関数を的確に導出することが可能になる。

[0032] また、例えば、前記映像化関数は、

[数11]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \Phi(x, y, z, k) dk$$

で表現され、前記映像化関数の x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0033] これにより、1 つ以上の送信器アレイ及び 1 つ以上の受信器アレイが平面

上に配置されることに従って定式化された散乱場関数に対応する映像化関数を的確に導出することが可能になる。

[0034] また、本開示の一態様に係る映像化方法は、第1方向に連結され連動する複数の送信器をそれぞれが含む1つ以上の送信器アレイのそれぞれの前記複数の送信器によって計測領域へ波動を送信するステップと、前記第1方向とは異なる第2方向に連結され連動する複数の受信器をそれぞれが含む1つ以上の受信器アレイのそれぞれの前記複数の受信器によって前記計測領域から前記波動の散乱波を受信するステップと、前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化するステップとを含み、前記物体を映像化するステップでは、前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出し、前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する。

[0035] これにより、連動して波動を送信する複数の送信器、及び、連動して波動の散乱波を受信する複数の受信器を用いて、2つの方向に対応する計測データを取得することが可能になる。そして、2つの方向に対応する計測データを用いて散乱場関数及び映像化関数を的確に導出することが可能になる。したがって、計測領域における物体を効率的に映像化することが可能になる。

[0036] 以下、図面を用いて、実施の形態について説明する。なお、以下で説明する実施の形態は、いずれも包括的又は具体的な例を示す。以下の実施の形態で示される数値、形状、材料、構成要素、構成要素の配置位置及び接続形態、ステップ、ステップの順序等は、一例であり、請求の範囲を限定する主旨ではない。

[0037] また、以下の説明において、特に上記の特許文献2～7に記載の技術等が既存の技術として参照され得る。また、以下の説明において、主に超音波が

波動として想定されているが、波動はこれらに限られず、ミリ波であってもよいし、他の弾性波、他の電波又は他の電磁波等であってもよい。また、散乱に基づく映像化は、散乱トモグラフィと表現され得る。したがって、以下の説明における映像化装置及び映像化方法は、それぞれ、散乱トモグラフィ装置及び散乱トモグラフィ方法とも表現され得る。

[0038] (実施の形態)

本実施の形態における映像化装置は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する。以下、本実施の形態における映像化装置をその基礎となる技術及び理論なども含めて、詳細に説明する。

[0039] <1 概要>

本開示では、主に超音波を用いてリアルタイム3次元映像を生成する技術について述べる。しかしながら、超音波とは物理的に異なるミリ波などのような他の波動に対して、同様の送受信方法及び映像再構成方法を適用することが可能である。

[0040] 超音波映像化装置は、古くから様々な分野で広く用いられており、特に、医療分野、及び、金属構造物等の非破壊検査分野において、超音波映像化装置が用いられている。医療分野では、超音波映像化装置は、エコー装置又は超音波診断装置とも呼ばれ、超音波診断に用いられる。

[0041] 図1は、参考例における超音波送受信装置を示す外観図である。図1に示された超音波送受信装置は、医療用の超音波映像化装置に用いられる。このような超音波送受信装置のプロープには、送信器及び受信器の単一ペア、又は、1次元アレイが用いられることが圧倒的に多い。

[0042] 図2は、参考例における超音波ダイナミックデプスフォーカスを示す概念図である。例えば、医療用の超音波映像化装置では、1次元アレイが用いられ、図2のように空間中の所望の深さにおいてフォーカスを有するような超音波信号群が用いられる。具体的には、一定の深さにフォーカスを有するように送受信素子毎に超音波信号の処理遅延が制御される。フォーカスの深さは、1段階又は2段階で制御されてもよい。さらに、一次元アレイ上でリニ

ア走査を行うことで、超音波診断のためのBモード画像が得られる。

[0043] しかしながら、フォーカスの位置の手前に超音波を反射する物体があれば、フォーカスの位置における情報を得ることは困難である。したがって、3次元映像を得ることは容易ではない。

[0044] 図3は、本実施の形態における2次元送受信素子アレイの構成例を示す概念図である。図3に示された2次元送受信素子アレイ150は、複数の送信器101及び複数の受信器102を備え、送信信号切替器103及び受信信号切替器104に接続される。2次元送受信素子アレイ150は、例えば2次元圧電素子アレイであってもよい。2次元送受信素子アレイ150は、送信信号切替器103及び受信信号切替器104を備えてもよい。図3に示された複数の構成要素は、映像化装置に含まれ得る。

[0045] 送信器101は、例えば超音波等の波動を送信する圧電素子であり、図3においてハッチングのない正方形で示されている。複数の送信器101は、それぞれが1次元アレイである複数の送信器アレイを構成する。各送信器アレイは、y軸方向に連結された複数の送信器101で構成され、送信信号切替器103に接続される。各送信器アレイを構成する複数の送信器101が、連動して波動を送信する。

[0046] 受信器102は、例えば超音波等の波動を受信する圧電素子であり、図3においてハッチングのある正方形で示されている。複数の受信器102は、それぞれが1次元アレイである複数の受信器アレイを構成する。各受信器アレイは、x軸方向に連結された複数の受信器102で構成され、受信信号切替器104に接続される。各受信器アレイを構成する複数の受信器102が、連動して波動を受信する。

[0047] 送信信号切替器103は、送信器アレイ毎に波動を送信させる回路である。また、受信信号切替器104は、受信器アレイ毎に波動を受信させる回路である。送信信号切替器103は、送信器アレイの端に位置する送信器101に接続することにより、送信器アレイに含まれる他の送信器101に間接的に接続する。同様に、受信信号切替器104は、受信器アレイの端に位置

する受信器 102 に接続することにより、受信器アレイに含まれる他の受信器 102 に間接的に接続する。したがって、配線及び制御が簡素化される。

[0048] 本実施の形態では、複数の送信器 101 が連結される方向と、複数の受信器 102 が連結される方向とが異なっている。つまり、送信器アレイが配置される方向と受信器アレイが配置される方向とが異なっている。これにより、複数の方向に対応する情報を取得することが可能になる。

[0049] より具体的には、送信器アレイが配置される方向と受信器アレイが配置される方向とが直交している。つまり、複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 が、直交 2 次元配列を構成する。これにより、複数の送信器 101 及び複数の受信器 102 によって得られる情報の処理が簡素化される。

[0050] さらに、本実施の形態において、送信器アレイ及び受信器アレイは、フェーズドアレイとして動作してもよい。

[0051] 図 4 は、送信器アレイの動作例を示す概念図である。図 4 において、複数の送信器 101 は、送信器アレイ 111 を構成する。また、複数の送信器 101 は、図 3 のように y 軸方向に連結される。送信器アレイ 111 は、複数の送信器 101 にそれぞれ対応する複数の遅延器を備えていてもよい。

[0052] 各送信器 101 が波動を送信することにより、送信器アレイ 111 は、複数の波動が合成された 1 つの波動を送信することができる。また、送信器アレイ 111 は、送信処理の遅延量（図 4 における $\Delta t_1 \sim \Delta t_5$ ）を制御することで、送信される波動の方向を制御することができる。これにより、送信器アレイ 111 は、フェーズドアレイとして動作し、所望の方向へ波動を送信することができる。

[0053] 遅延の制御は、送信器アレイ 111 によって行われることに限られず、送信器 101 によって行われてもよいし、他の構成要素によって行われてもよい。

[0054] 図 5 は、受信器アレイの動作例を示す概念図である。図 5 において、複数の受信器 102 は、受信器アレイ 112 を構成する。また、複数の受信器 102 は、図 3 のように x 軸方向に連結される。受信器アレイ 112 は、複数

の受信器 102 にそれぞれ対応する複数の遅延器を備えていてもよい。さらに、受信器アレイ 112 は、波動信号を合算する合算器を備えていてもよい。

[0055] 各受信器 102 が波動を受信することにより、受信器アレイ 112 は、複数の波動が合成された 1 つの波動を受信することができる。また、受信器アレイ 112 は、受信処理の遅延量（図 5 における $\Delta t_1 \sim \Delta t_5$ ）を制御することで、受信される波動の方向を制御することができる。これにより、受信器アレイ 112 は、フェーズドアレイとして動作し、所望の方向から波動を受信することができる。

[0056] 遅延及び合成の制御は、受信器アレイ 112 によって行われることに限られず、受信器 102 によって行われてもよいし、他の構成要素によって行われてもよい。

[0057] 図 6 は、計測領域を示す概念図である。具体的には、図 6 において、 $x-y$ 平面上に配置された 2 次元送受信素子アレイ 150 から z 方向に離れた位置における計測領域が示されている。

[0058] 本実施の形態における映像化装置は、計測領域へ波動を送信し、計測領域から波動の散乱波を受信する。そして、映像化装置は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する。したがって、波動を遠くまで送信し、遠くから散乱波を受信することができれば、遠くの物体を映像化することができる。

[0059] 2 次元送受信素子アレイ 150 における複数の送信器 101 は、連動して波動を送信することで、波動を遠くまで効率的に送信することができる。2 次元送受信素子アレイ 150 における複数の受信器 102 は、連動して波動を受信することで、遠くから散乱波を効率的に受信することができる。

[0060] さらに、2 次元送受信素子アレイ 150 の各行及び各列が、フェーズドアレイとして動作することにより、送信の方向及び受信の方向を制御することができる。例えば、図 6 において、図 4 及び図 5 における遅延量に基づいて定められる位相パラメータ（ α 、 β ）によって、送信の方向及び受信の方向

が制御されている。

[0061] 上記の動作に従って、2次元送受信素子アレイ150からz方向に離れた位置における計測領域を図6のように広げることが可能になる。さらに、2次元送受信素子アレイ150によって、様々な方向に対応する情報を収集することが可能になる。したがって、2次元送受信素子アレイ150によって、高いS/N比を有する映像を生成することが可能になる。

[0062] そして、2次元送受信素子アレイ150によって得られた計測データ、及び、散乱場解析方式を用いて、高精度の3次元画像を再構成することが可能になる。

[0063] 図7は、フェーズドアレイ方式と散乱場解析方式との関係を示す概念図である。本開示の方式の例は、フェーズドアレイ方式と、散乱場解析方式との組み合わせに対応する。また、本開示は、世界初の技術を提供する。また、本開示の方式の例は、超音波を用いて容易に実現されるが、マイクロ波及びミリ波等を用いても実現され得る。

[0064] <2 平面上の2次元送受信素子アレイを用いる映像化装置>

本実施の形態における映像化装置は、例えば、超音波を用いてリアルタイムの3次元映像を生成する。映像化装置は、超音波映像化装置と呼ばれる装置であってもよい。本章において、映像化装置は、平面上の2次元送受信素子アレイ150を用いる。

[0065] <2-1 2次元送受信素子アレイ>

図6のように、2次元送受信素子アレイ150における複数の送信器101又は複数の受信器102が列単位又は行単位で結合されている。

[0066] そして、超音波等の波動の送信は、複数の送信器101を列単位で切り替えながら行われる。一列内の複数の送信器101は、直接ワイヤで結ばれていてもよい。あるいは、一列内の複数の送信器101は、フェーズドアレイとして動作するため、遅延素子を介して結合されていてもよい。

[0067] また、超音波等の波動の受信は、複数の受信器102を行単位で切り替えながら行われてもよいし、複数の受信器102の複数の行で同時に行われて

もよい。一列内の複数の受信器 102 は、直接ワイヤで結ばれていてもよい。あるいは、一列内の複数の受信器 102 は、フェーズドアレイとして動作するため、遅延素子を介して結合されていてもよい。

[0068] 例えば、送信用に、2次元配列の中のある1列が選択され、受信用に、2次元配列の中のある1行が選択される。送信の列数及び受信の行数のそれぞれがNである場合、 N^2 個の組み合わせがある。この N^2 個の組み合わせに対応する散乱データから物体の形状が再構成される。

[0069] 図6において、2次元送受信素子アレイ150は、複数の送信器アレイ111及び複数の受信器アレイ112を備える。しかしながら、2次元送受信素子アレイ150は、複数の送信器アレイ111及び複数の受信器アレイ112の代わりに、1つの送信器アレイ111及び1つの受信器アレイ112のみを備えていてもよい。

[0070] そして、y軸方向に沿う1つの送信器アレイ111が、x軸方向の複数の位置に順次移動して、波動を送信してもよい。また、x軸方向に沿う1つの受信器アレイ112が、y軸方向の複数の位置に順次移動して、波動を受信してもよい。これにより、1つの送信器アレイ111及び1つの受信器アレイ112が、複数の送信器アレイ111及び複数の受信器アレイ112の役割を果たし得る。

[0071] <2-2 フェーズドアレイ方式における散乱場解析方式>

図8は、送信器アレイ111及び受信器アレイ112の位置を示す模式図である。送信器アレイ111がy軸方向に沿って配置され、送信器アレイ111に含まれる複数の送信器101がy軸方向に沿って配置される。また、受信器アレイ112がx軸方向に沿って配置され、受信器アレイ112に含まれる複数の受信器102がx軸方向に沿って配置される。

[0072] 送信器アレイ111は、y軸方向に沿うライン状の領域から波動を送信する。また、送信器アレイ111は、x軸方向に走査を行う。

[0073] 具体的には、送信器アレイ111は、電氣的に走査を行ってもよい。つまり、複数の送信器アレイ111がx軸方向に並べて配置され、波動を送信す

る送信器アレイ 1 1 1 が、複数の送信器アレイ 1 1 1の中から x 軸方向に順次切り替えられてもよい。あるいは、送信器アレイ 1 1 1は、機械的に走査を行ってもよい。つまり、1つの送信器アレイ 1 1 1が、 x 軸方向の複数の位置に移動して、波動を送信してもよい。

[0074] 受信器アレイ 1 1 2は、 x 軸方向に沿うライン状の領域において波動を受信する。また、受信器アレイ 1 1 2は、 y 軸方向に走査を行う。

[0075] 具体的には、受信器アレイ 1 1 2は、電氣的に走査を行ってもよい。つまり、複数の受信器アレイ 1 1 2が y 軸方向に並べて配置され、波動を受信する受信器アレイ 1 1 2が、複数の受信器アレイ 1 1 2の中から y 軸方向に順次切り替えられてもよい。あるいは、受信器アレイ 1 1 2は、機械的に走査を行ってもよい。つまり、1つの受信器アレイ 1 1 2が、 y 軸方向の複数の位置に移動して、波動を受信してもよい。

[0076] あるいは、受信器アレイ 1 1 2は、走査を行わず、 y 軸方向に並べて配置された複数の受信器アレイ 1 1 2が、同時に波動を受信してもよい。

[0077] 送信器アレイ 1 1 1及び受信器アレイ 1 1 2を備える2次元送受信素子アレイ 1 5 0は、 $N \times N$ 直交フェーズドアレイとして動作し得る。

[0078] なお、 x 軸方向、 y 軸方向及び z 軸方向は、3次元空間において、互いに直交する3つの方向として任意に規定される。例えば、複数の受信器 1 0 2が連結される方向が x 軸方向として規定される。また、 x 軸方向に対して直交し、複数の送信器 1 0 1が連結される方向が、 y 軸方向として規定される。そして、 x 軸方向及び y 軸方向に直交する方向が z 軸方向として規定される。

[0079] 図8の例において、送信器アレイ 1 1 1内の点 $P_1(x_1, y_2, z)$ に対応する送信器 1 0 1から放射された波動が物体上の点 $P(\xi, \eta, \zeta)$ で反射し、受信器アレイ 1 1 2内の点 $P_2(x_2, y_1, z)$ に対応する受信器 1 0 2で受信される。この条件のもとに、散乱場方程式が以下のように構築される。

[0080] まず、点 P_1 と点 P との距離 ρ_1 、及び、点 P_2 と点 P との距離 ρ_2 は、次式

(2-2-1) のように定められる。

[0081] [数12]

$$\begin{aligned}\rho_1^2 &= (x_1 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2 \\ \rho_2^2 &= (x_2 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z - \zeta)^2 \\ &\dots (2-2-1)\end{aligned}$$

[0082] 次に、以下の式 (2-2-2) のような関数が定義される。以下の式 (2-2-2) の関数は、点 $P_1 (x_1, y_2, z)$ から送信され、点 $P (\xi, \eta, \zeta)$ で反射し、点 $P_2 (x_2, y_1, z)$ で受信される波動に対応する。

[0083] [数13]

$$\begin{aligned}\phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, \omega) &= \frac{e^{ik\rho_1 + i\beta ky_2}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2 + i\alpha kx_2}}{\rho_2} \\ &\dots (2-2-2)\end{aligned}$$

[0084] ここで、時間の因子は、 $\exp(-i\omega t)$ に比例すると仮定されている。 k は、波動の波数である。 α は、受信器アレイ 112 の位相因子であって、無次元の値として規定される。同様に、 β は、送信器アレイ 111 の位相因子であって、無次元の値として規定される。具体的には、 x 軸上の位相は、 $\alpha k x_2$ として規定される。同様に、 y 軸上の位相は、 $\beta k y_2$ として規定される。

[0085] 図8の例において、 x 軸方向に隣り合う2つの受信器102の間の距離は、 Δx である。 y 軸方向に隣り合う2つの送信器101の間の距離は、 Δy である。したがって、 x 軸方向に隣り合う2つの受信器102の間の位相差は、 $\alpha k \Delta x$ である。 y 軸方向に隣り合う2つの送信器101の間の位相差は、 $\beta k \Delta y$ である。

[0086] 関数 ϕ の微分は、次式 (2-2-3) のように表現される。

[0087]

[数14]

$$\begin{aligned}
\partial_{x_1}\phi &= ik \frac{(x_1 - \xi)}{\rho_1} \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{y_1}\phi &= ik \frac{(y_1 - \eta)}{\rho_2} \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{x_2}\phi &= ik \left(\frac{x_2 - \xi}{\rho_2} + \alpha \right) \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{y_2}\phi &= ik \left(\frac{y_2 - \eta}{\rho_1} + \beta \right) \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_z\phi &= ik(z - \zeta) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{x_1}\partial_{x_1}\phi &= (ik)^2 \frac{(x_1 - \xi)^2}{\rho_1^2} \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{x_2}\partial_{x_2}\phi &= (ik)^2 \left(\frac{x_2 - \xi}{\rho_2} + \alpha \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{y_1}\partial_{y_1}\phi &= (ik)^2 \frac{(y_1 - \eta)^2}{\rho_2^2} \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{y_2}\partial_{y_2}\phi &= (ik)^2 \left(\frac{y_2 - \eta}{\rho_1} + \beta \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_z\partial_z\phi &= (ik)^2 (z - \zeta)^2 \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
&\dots (2-2-3)
\end{aligned}$$

[0088] 次に、以下の式（2-2-4）のような擬微分演算子 ∂_u 及び ∂_v が導入される。 ∂_u 及び ∂_v に対応するシンボル k_u 、 k_v は、フーリエ変換を用いて、それぞれ以下の式（2-2-4）の右側のように定義される。

[0089] [数15]

$$\begin{aligned}
\partial_u &= \partial_{x_2} - i\alpha k & : & \quad k_u = k_{x_2} + \alpha k \\
\partial_v &= \partial_{y_2} - i\beta k & : & \quad k_v = k_{y_2} + \beta k \\
&\dots (2-2-4)
\end{aligned}$$

[0090] 式（2-2-3）の3、4、7及び9行目は、式（2-2-4）の擬微分演算子 ∂_u 及び ∂_v を用いて、次式（2-2-5）のように表現される。

[0091]

[数16]

$$\partial_u \phi = ik \frac{x_2 - \xi}{\rho_2} \phi + o(\rho^{-3})$$

$$\partial_v \phi = ik \frac{y_2 - \eta}{\rho_1} \phi + o(\rho^{-3})$$

$$\partial_u \partial_u \phi = (ik)^2 \left(\frac{x_2 - \xi}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3})$$

$$\partial_v \partial_v \phi = (ik)^2 \left(\frac{y_2 - \eta}{\rho_1} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3})$$

・・・(2-2-5)

[0092] O(ρ⁻³)の項が無視される場合、次式(2-2-6)が成立する。

[0093] [数17]

$$\begin{aligned} \Delta_5 \phi &= (ik)^2 \left\{ 2 + \frac{2(z-\zeta)^2}{\rho_1 \rho_2} \right\} \phi \\ &= (ik)^2 \left\{ 2 + 2 \sqrt{1 + \frac{1}{k^2} \partial_{x_1}^2 + \frac{1}{k^2} \partial_v^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{k^2} \partial_u^2 + \frac{1}{k^2} \partial_{y_1}^2} \right\} \phi \end{aligned}$$

$$\Delta_5 = \partial_{x_1}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_u^2 + \partial_v^2 + \partial_z^2$$

・・・(2-2-6)

[0094] 式(2-2-6)を整理することにより、次式(2-2-7)が得られる。

[0095] [数18]

$$\begin{aligned} \left\{ (\Delta_5 + 2k^2)^2 - 4(k^2 + \partial_{x_1}^2 + \partial_v^2)(k^2 + \partial_u^2 + \partial_{y_1}^2) \right\} \phi &= 0 \\ \cdots (2-2-7) \end{aligned}$$

[0096] 式(2-2-7)は、散乱場関数が満たす散乱場方程式である。式(2-2-7)をさらに整理することにより、次式(2-2-8)が得られる。

[0097] [数19]

$$\begin{aligned} \left\{ \Delta_5^2 + 4k^2 \partial_z^2 - 4(\partial_{x_1}^2 + \partial_v^2)(\partial_u^2 + \partial_{y_1}^2) \right\} \phi &= 0 \\ \cdots (2-2-8) \end{aligned}$$

[0098] 式(2-2-8)の両辺をフーリエ変換することにより、式(2-2-9)

）が得られる。

[0099] [数20]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{x_1}x_1+ik_{y_1}y_1+ik_{x_2}x_2+ik_{y_2}y_2} \cdot \left\{ \Delta_s^2 + 4k^2 \partial_z^2 - 4(\partial_{x_1}^2 + \partial_v^2)(\partial_u^2 + \partial_{y_1}^2) \right\} \phi \, dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 = 0$$

・・・(2-2-9)

[0100] z方向の微分が D_z で表現される場合、式(2-2-9)から、次式(2-2-10)で表現される1変数微分方程式が得られる。

[0101] [数21]

$$\left\{ (D_z^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_u^2 - k_v^2)^2 + 4k^2 D_z^2 - 4(k_{x_1}^2 + k_v^2)(k_u^2 + k_{y_1}^2) \right\} \cdot \tilde{\phi}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, z, k) = 0$$

・・・(2-2-10)

[0102] 式(2-2-10)の解の形式が e^{sz} と仮定される場合、sに関して次式(2-2-11)が得られる。

[0103] [数22]

$$(s^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_u^2 - k_v^2)^2 + 4k^2 s^2 - 4(k_{x_1}^2 + k_v^2)(k_u^2 + k_{y_1}^2) = 0$$

・・・(2-2-11)

[0104] 式(2-2-11)から、次式(2-2-12)で表現される4つの解が得られる。

[0105] [数23]

$$s = \pm i \left\{ \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + (k_{y_2} + \beta k)^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + (k_{x_2} + \alpha k)^2\}} \right\}$$

・・・(2-2-12)

[0106] したがって、式(2-2-8)の解である散乱場関数は、次式(2-2-13)のように表現される。

[0107]

[数24]

$$\begin{aligned}
& \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} e^{-i(k_{x_2} x_2 + k_{y_2} y_2)} a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{iz \left\{ \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + (k_{y_2} + \beta k)^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + (k_{x_2} + \alpha k)^2\}} \right\}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \\
&\quad \dots (2-2-13)
\end{aligned}$$

[0108] 送信器アレイ 1 1 1 は、y 軸方向に連結された複数の送信器 1 0 1 によって、複数の波動が一体化された波動を送信する。また、受信器アレイ 1 1 2 は、x 軸方向に連結された複数の受信器 1 0 2 によって、複数の波動が一体化された波動を受信する。そこで、変数 x_2 、 y_2 に関して式 (2-2-13) の和を用いることにより、次式 (2-2-14) が導出される。

[0109] [数25]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, z, \alpha, \beta, k) \\
&= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \phi(x_1, y_1, m\Delta x, n\Delta y, z, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_2} m\Delta x + k_{y_2} n\Delta y)} \right\} a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) \\
&\quad \cdot e^{iz \left\{ \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + (k_{y_2} + \beta k)^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + (k_{x_2} + \alpha k)^2\}} \right\}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \\
&\quad \dots (2-2-14)
\end{aligned}$$

[0110] 式 (2-2-14) において、 $m\Delta x$ が x_2 に対応し、 $n\Delta y$ が y_2 に対応する。ここで、 m 及び n のそれぞれは、整数である。次に、式 (2-2-14) から Σ を取り除くため、次式 (2-2-15) によって表現される公式が用いられる。

[0111] [数26]

$$\begin{aligned}
& 2\pi\delta(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{inx} \\
& \dots (2-2-15)
\end{aligned}$$

[0112] 式 (2-2-15) から直ちに次式 (2-2-16) が得られる。

[0113]

[数27]

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-ik_{x_2} m \Delta x} = 2\pi \delta(k_{x_2} \Delta x)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-ik_{y_2} n \Delta y} = 2\pi \delta(k_{y_2} \Delta y)$$

$$\cdots (2-2-16)$$

[0114] 以下において、フェーズドアレイの位相因子が α 、 β である場合における $a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k)$ を識別するため、この場合における $a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k)$ は、 $a_{\alpha, \beta}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k)$ と表現される。また、 $k_{x2}=0$ 及び $k_{y2}=0$ における $a_{\alpha, \beta}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k)$ は、 $b(k_{x1}, k_{y1}, \alpha, \beta, k) = a_{\alpha, \beta}(k_{x1}, k_{y1}, 0, 0, k)$ と表現される。

[0115] 式(2-2-14)から、式(2-2-16)を用いて、次式(2-2-17)が得られる。

[0116] [数28]

$$\Phi(x_1, y_1, z, \alpha, \beta, k)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1} x_1 + k_{y1} y_1)} \delta(k_{x2} \Delta x) \delta(k_{y2} \Delta y) a_{\alpha, \beta}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k)$$

$$\cdot e^{iz \left\{ \sqrt{k^2 - \{k_{x1}^2 + (k_{y2} + \beta k)^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y1}^2 + (k_{x2} + \alpha k)^2\}} \right\}} dk_{x1} dk_{y1} dk_{x2} dk_{y2}$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^2 \Delta x \Delta y} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1} x_1 + k_{y1} y_1)} b(k_{x1}, k_{y1}, \alpha, \beta, k)$$

$$\cdot e^{iz \left\{ \sqrt{k^2 - \{k_{x1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y1}^2 + \alpha^2 k^2\}} \right\}} dk_{x1} dk_{y1}$$

$$\cdots (2-2-17)$$

[0117] 式(2-2-17)が、フェーズドアレイの散乱場関数に対応する。

[0118] 計測データは、 $z=0$ で得られる。式(2-2-17)に $z=0$ を代入することにより、計測データを示す Q は、次式(2-2-18)によって表現される。

[0119]

[数29]

$$Q(x_1, y_1, \alpha, \beta, k) = \frac{1}{(2\pi)^2 \Delta x \Delta y} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} b(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) dk_{x_1} dk_{y_1} \\ \dots (2-2-18)$$

[0120] 式(2-2-18)の逆フーリエ変換により、次式(2-2-19)が得られる。

[0121] [数30]

$$b(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) = \Delta x \Delta y \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \\ \dots (2-2-19)$$

[0122] したがって、散乱場関数は、次式(2-2-20)のように得られる。

[0123] [数31]

$$\Phi(x_1, y_1, z, \alpha, \beta, k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \\ \cdot e^{iz \left\{ \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}} \right\}} dk_{x_1} dk_{y_1} \\ \dots (2-2-20)$$

[0124] 式(2-2-20)の散乱場関数は、映像化関数に対応する。式(2-2-20)が映像化関数として用いられた場合、フェーズドアレイの位相因子(α 、 β)毎に映像が得られる。しかしながら、本来、位相因子(α 、 β)によらず、物体を示す映像として1つの映像が得られるべきである。そこで、式(2-2-20)は、(α 、 β)に関して合成される。この結果、映像化関数 $\rho(x, y, z)$ が次式(2-2-21)のように得られる。

[0125] [数32]

$$\rho(x, y, z) \\ = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x + k_{y_1} y)} \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \left\{ \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{ik_z z} \right\} dk dk_{x_1} dk_{y_1} \\ k_z = \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}} \\ \dots (2-2-21)$$

[0126] さらに、積分変数を dk から dk_z へ変換することにより、次式(2-2-22)が得られる。

[0127] [数33]

$$\begin{aligned} & \rho(x, y, z) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y)} \sum_\alpha \sum_\beta \left\{ \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{ik_z z} \right\} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_z \\ & k_z = \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}} \\ & \dots (2-2-22) \end{aligned}$$

[0128] ここで、 k と k_z の関係は、次式 (2-2-23) のように表現される。

[0129] [数34]

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{\sqrt{1-\alpha^2}} \sqrt{k_{y_1}^2 + \left\{ \frac{-\frac{1-\beta^2}{1-\alpha^2} k_{y_1}^2 + k_{x_1}^2 + k_z^2}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \left(\frac{1-\beta^2}{1-\alpha^2} - 1 \right) \left(\frac{1-\beta^2}{1-\alpha^2} k_{y_1}^2 - k_{x_1}^2 - k_z^2 \right)}} \right\}^2} \\ & \dots (2-2-23) \end{aligned}$$

[0130] また、式 (2-2-22) における積分変数の変換には、次式 (2-2-24) が用いられる。

[0131] [数35]

$$\begin{aligned} \frac{dk}{dk_z} &= \frac{1}{\frac{(1-\beta^2)k}{\sqrt{(1-\beta^2)k^2 - k_{x_1}^2}} + \frac{(1-\alpha^2)k}{\sqrt{(1-\alpha^2)k^2 - k_{y_1}^2}}} \\ & \dots (2-2-24) \end{aligned}$$

[0132] 映像化装置は、平面上に配置される2次元送受信素子アレイ150によって得られる計測データから、式 (2-2-21) 又は式 (2-2-22) の映像化関数を用いて、計測領域における物体を映像化することができる。ここで、2次元送受信素子アレイ150は、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112で構成される。

[0133] <2-3 k 及び k_z の関係>

式 (2-2-23) に示された k 及び k_z の関係は、以下のように導出される。

[0134] まず、式 (2-2-21) から、次式 (2-3-1) が導出される。

[0135] [数36]

$$\begin{aligned} k_z &= \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}} \\ &= \sqrt{(1 - \beta^2)k^2 - k_{x_1}^2} + \sqrt{(1 - \alpha^2)k^2 - k_{y_1}^2} \\ &\dots (2-3-1) \end{aligned}$$

[0136] 記号を簡単にするために、次式（2-3-2）のように一時的に変数が置換えられる。

[0137] [数37]

$$\begin{aligned} 1 - \beta^2 &\Rightarrow \alpha, \quad 1 - \alpha^2 \Rightarrow \alpha, \quad k_{x_1}^2 \Rightarrow a, \quad k_{y_1}^2 \Rightarrow b, \quad k^2 \Rightarrow k \\ &\dots (2-3-2) \end{aligned}$$

[0138] 式（2-3-1）は、式（2-3-2）を用いて、次式（2-3-3）のように表現される。

[0139] [数38]

$$\begin{aligned} \sqrt{\beta k - a} + \sqrt{\alpha k - b} &= k_z \\ &\dots (2-3-3) \end{aligned}$$

[0140] さらに、式（2-3-3）に対して、次式（2-3-4）のような変数が導入される。

[0141] [数39]

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{k'} = \sqrt{\alpha k - b} \\ &\dots (2-3-4) \end{aligned}$$

[0142] この結果、次式（2-3-5）の方程式が得られる。

[0143] [数40]

$$\begin{aligned} \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1\right)x^2 + 2k_z x + \frac{\beta}{\alpha}b - a - k_z^2 &= 0 \\ &\dots (2-3-5) \end{aligned}$$

[0144] 式（2-3-5）から、式（2-3-6）が得られる。

[0145]

[数41]

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{-k_z \pm \sqrt{k_z^2 - \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1\right) \left(\frac{\beta}{\alpha} b - a - k_z^2\right)}}{\frac{\beta}{\alpha} - 1} \\
 &= \frac{-\frac{\beta}{\alpha} b + a + k_z^2}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1\right) \left(\frac{\beta}{\alpha} b - a - k_z^2\right)}} \\
 &\dots (2-3-6)
 \end{aligned}$$

[0146] 式(2-3-6)において、式(2-3-2)によって置き換えられた変数が、次式(2-3-7)によって元に戻される。

[0147] [数42]

$$\begin{aligned}
 1 - \beta^2 &\Leftarrow \alpha, \quad 1 - \alpha^2 \Leftarrow \alpha, \quad k_{y_1}^2 \Leftarrow a, \quad k_{x_1}^2 \Leftarrow b, \quad k^2 \Leftarrow k \\
 &\dots (2-3-7)
 \end{aligned}$$

[0148] 最終的に次式(2-3-8)が得られる。

[0149] [数43]

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \sqrt{k_{y_1}^2 + \left\{ \frac{-\frac{1 - \beta^2}{1 - \alpha^2} k_{y_1}^2 + k_{x_1}^2 + k_z^2}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \left(\frac{1 - \beta^2}{1 - \alpha^2} - 1\right) \left(\frac{1 - \beta^2}{1 - \alpha^2} k_{y_1}^2 - k_{x_1}^2 - k_z^2\right)}} \right\}^2} \\
 &\dots (2-3-8)
 \end{aligned}$$

[0150] また、式(2-3-1)のように、 k_z は、次式(2-3-9)で表現される。

[0151] [数44]

$$\begin{aligned}
 k_z &= \sqrt{(1 - \beta^2)k^2 - k_{x_1}^2} + \sqrt{(1 - \alpha^2)k^2 - k_{y_1}^2} \\
 &\dots (2-3-9)
 \end{aligned}$$

[0152] 式(2-3-9)の両辺の微分によって、次式(2-3-10)が得られる。

[0153]

[数45]

$$dk_z = \left\{ \frac{(1-\beta^2)k}{\sqrt{(1-\beta^2)k^2 - k_{x_1}^2}} + \frac{(1-\alpha^2)k}{\sqrt{(1-\alpha^2)k^2 - k_{y_1}^2}} \right\} dk$$

・・・(2-3-10)

[0154] 式(2-3-10)から、上述された式(2-2-24)が導出される。

[0155] <3 曲面上の2次元送受信素子アレイを用いる映像化装置>

本章において、映像化装置は、曲面上の2次元送受信素子アレイ150を用いる。例えば、ポリフッ化ビニリデンなどの高分子圧電素子は、膜厚が40～100μmである薄膜で構成される。そして、薄膜の伸びに比例する電荷が薄膜の両面に現れる。このような薄膜が圧電素子として2次元送受信素子アレイ150に用いられる場合、薄膜の伸びに応じて、曲面上に2次元送受信素子アレイ150が配置される場合がある。

[0156] 図9は、曲面上に配置された2次元送受信素子アレイ150を示す概念図である。本章では、図9のように曲面上に2次元送受信素子アレイ150が配置された場合の測定データから、物体の再構成画像が生成される。

[0157] 図10は、曲面に配置される2次元送受信素子アレイ150における送信器アレイ111及び受信器アレイ112の位置を示す模式図である。例えば、2次元送受信素子アレイ150は、 $z = f(x, y)$ で表現される曲面上に配置される。そして、2次元送受信素子アレイ150は、 $N \times N$ 直交曲面アレイとして動作する。この例において、以下に示されるような散乱場関数及び映像化関数が導出される。

[0158] まず、次式(3-1-1)のように表現される散乱場関数が検討される。

[0159] [数46]

$$\phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, \omega) = \iint_D \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \varepsilon(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

・・・(3-1-1)

[0160] ここで、 (x_1, y_2, z_1) は、送信点 P_1 に対応し、 (x_2, y_1, z_2) は、受信点 P_2 に対応する。 ω は、波動の角周波数を示す。 k は、波動の波数

を示す。 $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ は、物体の点 P (ξ, η, ζ) での反射率に対応する。点 P (ξ, η, ζ) は、反射点に対応する。なお、 $\varepsilon(\xi, \eta, \zeta)$ は、未知である。また、ここでは、時間の因子が $e \times p(-i \omega t)$ に比例すると仮定されている。また、 ρ_1 及び ρ_2 は、次式 (3-1-2) によって表現される。

[0161] [数47]

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \sqrt{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2} \\ \rho_2 &= \sqrt{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2 + (z_2 - \zeta)^2} \\ &\dots (3-1-2)\end{aligned}$$

[0162] $\phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, \omega)$ が満たす方程式は、以下のよう
に導出される。

[0163] まず、式 (3-1-1) の被積分項にあるカーネル関数は、次式 (3-1-3) の ϕ で表現される。

[0164] [数48]

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{e^{ik\rho_1}}{\rho_1} \frac{e^{ik\rho_2}}{\rho_2} \\ &\dots (3-1-3)\end{aligned}$$

[0165] 次に、この式 (3-1-3) が漸近的な解となる偏微分方程式が検討される。そのため、微分結果に生ずる $1/\rho$ に関して高次の項を無視して計算が行われる。ここでは、微分の略記法が式 (3-1-4) のように定義される。

[0166] [数49]

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} &\rightarrow \partial_t, \frac{\partial}{\partial x_1} \rightarrow \partial_{x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2} \rightarrow \partial_{x_2}, \frac{\partial}{\partial y_1} \rightarrow \partial_{y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2} \rightarrow \partial_{y_2}, \frac{\partial}{\partial z_1} \rightarrow \partial_{z_1}, \frac{\partial}{\partial z_2} \rightarrow \partial_{z_2} \\ &\dots (3-1-4)\end{aligned}$$

[0167] ϕ の各次数の微分結果は、以下の式 (3-1-5) のように表現される。

[0168]

[数50]

$$\begin{aligned}
\partial_{x_1}\phi &= ik \frac{(x_1 - \xi)}{\rho_1} \phi + o(\rho^{-3}) & \partial_{y_1}\phi &= ik \frac{(y_1 - \eta)}{\rho_2} \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{x_2}\phi &= ik \left(\frac{x_2 - \xi}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3}) & \partial_{y_2}\phi &= ik \left(\frac{y_2 - \eta}{\rho_1} \right) \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{z_1}\phi &= ik \left(\frac{z_1 - \zeta}{\rho_1} \right) \phi + o(\rho^{-3}) & \partial_{z_2}\phi &= ik \left(\frac{z_2 - \zeta}{\rho_2} \right) \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{x_1}\partial_{x_1}\phi &= (ik)^2 \frac{(x_1 - \xi)^2}{\rho_1^2} \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{x_2}\partial_{x_2}\phi &= (ik)^2 \left(\frac{x_2 - \xi}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{y_1}\partial_{y_1}\phi &= (ik)^2 \frac{(y_1 - \eta)^2}{\rho_2^2} \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{y_2}\partial_{y_2}\phi &= (ik)^2 \left(\frac{y_2 - \eta}{\rho_1} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{z_1}\partial_{z_1}\phi &= (ik)^2 \left(\frac{z_1 - \zeta}{\rho_1} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
\partial_{z_2}\partial_{z_2}\phi &= (ik)^2 \left(\frac{z_2 - \zeta}{\rho_2} \right)^2 \phi + o(\rho^{-3}) \\
&\dots (3-1-5)
\end{aligned}$$

[0169] 以下では、複雑な $\circ$ （*）の項は省略される。2階微分に関する6個の式の和に従って、次式（3-1-6）が得られる。

[0170] [数51]

$$\begin{aligned}
\Delta_6\phi &= (\partial_{x_1}^2 + \partial_{x_2}^2 + \partial_{y_1}^2 + \partial_{y_2}^2 + \partial_{z_1}^2 + \partial_{z_2}^2)\phi \\
&= 2(ik)^2\phi \\
&\dots (3-1-6)
\end{aligned}$$

[0171] 式（3-1-6）の両辺に対してフーリエ変換を行うことにより、次式（3-1-7）が得られる。

[0172] [数52]

$$\begin{aligned}
&\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_{x_1}x_1 + ik_{y_1}y_1 + ik_{x_2}x_2 + ik_{y_2}y_2} \left\{ \Delta_6 - 2(ik)^2 \right\} \phi \, dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 = 0 \\
&\dots (3-1-7)
\end{aligned}$$

[0173] z_1 、 z_2 に関する偏微分をそれぞれ D_{z_1} 、 D_{z_2} と表現することにより、以下の式（3-1-8）が得られる。

[0174] [数53]

$$\{(D_{z_1}^2 + D_{z_2}^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2 - k_{y_2}^2) + 2k^2\} \tilde{\phi} = 0$$

$$\cdots (3-1-8)$$

[0175] 次に、式（3-1-8）の方程式を解くことが検討される。この方程式には、 z_1 、 z_2 の2つの変数が存在する。したがって、境界条件のみから解を定めることは困難である。しかしながら、 $z_1 = z_2$ の場合の解は既に求められている。式（3-1-8）の解は、 $z_1 = z_2$ の場合の解に対して、整合性を有する。したがって、境界条件と、整合性の条件の2つの条件によって、式（3-1-8）の解が一意に求められる。例えば、式（3-1-8）の解は、次式（3-1-9）のように仮定される。

[0176] [数54]

$$E(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_1}, k_{y_2}, z_1, z_2) = \exp(is_1 z_1) \exp(is_2 z_2)$$

$$\cdots (3-1-9)$$

[0177] $z_1 = z_2$ の場合において、式（3-1-9）を式（3-1-8）に代入することにより、次式（3-1-10）が得られる。

[0178] [数55]

$$s_1^2 + s_2^2 + k_{x_1}^2 + k_{y_1}^2 + k_{x_2}^2 + k_{y_2}^2 - 2k^2 = 0$$

$$\cdots (3-1-10)$$

[0179] また、フェーズドアレイの位相因子 α 、 β のそれぞれが0である場合の式（2-2-12）及び式（2-2-13）、並びに、後方散乱が用いられることに基づいて、次式（3-1-11）が得られる。

[0180] [数56]

$$s_1 + s_2 = \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2}$$

$$\cdots (3-1-11)$$

[0181] 式（3-1-10）及び式（3-1-11）から、 s_1 及び s_2 が次式（3

− 1 − 1 2) のように求められる。

[0182] [数57]

$$\begin{aligned} s_1 &= \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2} \\ s_2 &= \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2} \\ &\dots (3-1-12) \end{aligned}$$

[0183] したがって、方程式 (3-1-6) の解は、次式 (3-1-13) のように表現される。

[0184] [数58]

$$\begin{aligned} \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\ = \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1)} e^{-i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) \\ \cdot e^{iz_1\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2}} e^{iz_2\sqrt{k^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2}} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \\ \dots (3-1-13) \end{aligned}$$

[0185] 次に、式 (3-1-13) の $a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k)$ を導出することが検討される。そのため、次式 (3-1-14) の変数が用いられる。

[0186] [数59]

$$\begin{aligned} z_1 &= z + v_2(x_1, y_2) \\ z_2 &= z + u_2(y_1, x_2) \\ &\dots (3-1-14) \end{aligned}$$

[0187] 式 (3-1-14) において、 u_2 、 v_2 は曲面の形状を表す変数であり、 z は基準平面の位置を表す。また、 u_2 は、 (x_1, y_2) に依存する変数であり、 (x_1, y_2) を入力として用いる関数に対応する。また、 v_2 は、 (y_1, x_2) に依存する変数であり、 (y_1, x_2) を入力として用いる関数に対応する。式 (3-1-14) を式 (3-1-13) に代入することにより、次式 (3-1-15) が得られる。

[0188]

[数60]

$$\begin{aligned}
& \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1+k_{y1}y_1)} e^{-i(k_{x2}x_2+k_{y2}y_2)} a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) \\
&\quad \cdot e^{i(z+y_2)\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y2}^2}} e^{i(z+u_2)\sqrt{k^2-k_{y1}^2-k_{x2}^2}} dk_{x1} dk_{y1} dk_{x2} dk_{y2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-1-15)
\end{aligned}$$

[0189] 送信器アレイ 1 1 1 は、y 軸方向に連結された複数の送信器 1 0 1 によって、複数の波動が一体化された波動を送信する。また、受信器アレイ 1 1 2 は、x 軸方向に連結された複数の受信器 1 0 2 によって、複数の波動が一体化された波動を受信する。そこで、変数 x_2 、 y_2 に関して式 (3-1-15) の和を用いることにより、次式 (3-1-16) が導出される。

[0190] [数61]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, z, k) \\
&= \sum_{x_2, y_2} \phi(x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1+k_{y1}y_1)} \left\{ \sum_{x_2, y_2} e^{-i(k_{x2}x_2+k_{y2}y_2)} e^{iv_2\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y2}^2}} e^{iu_2\sqrt{k^2-k_{y1}^2-k_{x2}^2}} \right\} \\
&\quad \cdot a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) e^{iz(\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y2}^2}+\sqrt{k^2-k_{y1}^2-k_{x2}^2})} dk_{x1} dk_{y1} dk_{x2} dk_{y2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-1-16)
\end{aligned}$$

[0191] 例えば、 $z=0$ の基準平面に対応する計測データが得られる。この計測データを境界条件として未知関数 $a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k)$ を導出することが検討される。ここで、式 (3-1-16) に基づいて、次式 (3-1-17) のような積分方程式が成立する。左辺は、計測データに対応し、既知である。

[0192] [数62]

$$\begin{aligned}
& \Phi(x_1, y_1, 0, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1+k_{y1}y_1)} \left\{ \sum_{x_2, y_2} e^{-i(k_{x2}x_2+k_{y2}y_2)} e^{iv_2\sqrt{k^2-k_{x1}^2-k_{y2}^2}} e^{iu_2\sqrt{k^2-k_{y1}^2-k_{x2}^2}} \right\} \\
&\quad \cdot a(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) dk_{x1} dk_{y1} dk_{x2} dk_{y2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-1-17)
\end{aligned}$$

[0193] 例えば、送信器アレイ 1 1 1 の x 座標の位置が x_i で表現され、受信器アレイ 1 1 2 の y 座標の位置が y_j で表現される場合、 $x_i \neq x_i$ 又は $y_i \neq y_j$ では計測データが得られない。したがって、式 (3-1-17) は、次式 (3-1-18) のように解釈され得る。

[0194] [数63]

$$\begin{aligned} & \Phi(x_i, y_j, 0, k) \delta(x_i - x_j) \delta(y_i - y_j) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_i + k_{y1}y_i)} \\ & \quad \cdot \left\{ \sum_{x_2, y_2} e^{-i(k_{x2}x_2 + k_{y2}y_2)} e^{i v_2(x_j, y_2) \sqrt{k^2 - k_{x1}^2 - k_{y2}^2}} e^{i u_2(y_j, x_2) \sqrt{k^2 - k_{y1}^2 - k_{x2}^2}} \right\} \\ & \quad \cdot a_{I,J}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) dk_{x1} dk_{y1} dk_{x2} dk_{y2} \\ & \quad \dots (3-1-18) \end{aligned}$$

[0195] 式 (3-1-18) の両辺に対して x_i 、 y_i に関する逆フーリエ変換を行うことにより、次式 (3-1-19) が得られる。

[0196] [数64]

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x1}'x_i + k_{y1}'y_i)} \Phi(x_i, y_i, 0, k) \delta(x_i - x_j) \delta(y_i - y_j) dx_i dy_i \\ &= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{x1}'x_i + k_{y1}'y_i)} e^{-i(k_{x1}x_i + k_{y1}y_i)} \\ & \quad \cdot \left\{ \sum_{x_2, y_2} e^{-i(k_{x2}x_2 + k_{y2}y_2)} e^{i v_2(x_j, y_2) \sqrt{k^2 - k_{x1}^2 - k_{y2}^2}} e^{i u_2(y_j, x_2) \sqrt{k^2 - k_{y1}^2 - k_{x2}^2}} \right\} \\ & \quad \cdot a_{I,J}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) dk_{x1} dk_{y1} dk_{x2} dk_{y2} dx_i dy_i \\ & \quad \dots (3-1-19) \end{aligned}$$

[0197] 式 (3-1-19) から、式 (3-1-20) が得られる。

[0198]

[数65]

$$\begin{aligned}
& e^{i(k_{x_1}'x_I+k_{y_1}'y_J)}\Phi(x_I,y_J,0,k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(k_{x_1}-k_{x_1}')\delta(k_{y_1}-k_{y_1}') \\
&\quad \cdot \left\{ \sum_{x_2,y_2} e^{-i(k_{x_2}x_2+k_{y_2}y_2)} e^{iv_2(x_I,y_2)\sqrt{k^2-k_{x_1}^2-k_{y_2}^2}} e^{iu_2(y_J,x_2)\sqrt{k^2-k_{y_1}^2-k_{x_2}^2}} \right\} \\
&\quad \cdot a_{I,J}(k_{x_1},k_{y_1},k_{x_2},k_{y_2},k) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2} \\
&= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{x_2,y_2} e^{-i(k_{x_2}x_2+k_{y_2}y_2)} e^{iv_2(x_I,y_2)\sqrt{k^2-k_{x_1}^2-k_{y_2}^2}} e^{iu_2(y_J,x_2)\sqrt{k^2-k_{y_1}^2-k_{x_2}^2}} \right\} \\
&\quad \cdot a_{I,J}(k_{x_1}',k_{y_1}',k_{x_2},k_{y_2},k) dk_{x_2} dk_{y_2} \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-1-20)
\end{aligned}$$

[0199] さらに、式(3-1-20)から、式(3-1-21)が得られる。

[0200] [数66]

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{x_2,y_2} e^{-i(k_{x_2}x_2+k_{y_2}y_2)} e^{iv_2(x_I,y_2)\sqrt{k^2-k_{x_1}^2-k_{y_2}^2}} e^{iu_2(y_J,x_2)\sqrt{k^2-k_{y_1}^2-k_{x_2}^2}} \right\} \\
&\quad \cdot a_{I,J}(k_{x_1},k_{y_1},k_{x_2},k_{y_2},k) dk_{x_2} dk_{y_2} \\
&\quad = e^{i(k_{x_1}x_I+k_{y_1}y_J)}\Phi(x_I,y_J,0,k) \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-1-21)
\end{aligned}$$

[0201] さらに、式(3-1-21)から、式(3-1-22)が得られる。

[0202] [数67]

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_2}m\Delta x+k_{y_2}n\Delta y)} e^{iv_2(x_I,n\Delta y)\sqrt{k^2-k_{x_1}^2-k_{y_2}^2}} e^{iu_2(y_J,m\Delta x)\sqrt{k^2-k_{y_1}^2-k_{x_2}^2}} \right\} \\
&\quad \cdot a_{I,J}(k_{x_1},k_{y_1},k_{x_2},k_{y_2},k) dk_{x_2} dk_{y_2} \\
&\quad = e^{i(k_{x_1}x_I+k_{y_1}y_J)}\Phi(x_I,y_J,0,k) \\
&\quad \cdot \cdot \cdot (3-1-22)
\end{aligned}$$

[0203] 式(3-1-22)の左辺の被積分項に含まれる因子は、次式(3-1-23)の $G_{I,J}(k_{x_1},k_{y_1},k_{x_2},k_{y_2},k)$ によって表現される。さらに、曲面の曲率が小さい場合、次式(3-1-23)の最終行のように、 $G_{I,J}(k_{x_1},k_{y_1},k_{x_2},k_{y_2},k)$ は簡素化される。

[0204]

[数68]

$$\begin{aligned}
& G_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) \\
&= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_2} m \Delta x + k_{y_2} n \Delta y)} e^{i v_2(x_I, n \Delta y) \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2}} e^{i u_2(y_J, m \Delta x) \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{x_2}^2}} \\
&\xrightarrow{u_2, v_2 \rightarrow 0} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_2} m \Delta x + k_{y_2} n \Delta y)} = (2\pi)^2 \delta(k_{x_2} \Delta x) \delta(k_{y_2} \Delta y) \\
&\dots (3-1-23)
\end{aligned}$$

[0205] 式(3-1-23)に従って、式(3-1-22)における主要な項を積分の外に出すことが可能である。また、式(3-1-22)から、次式(3-1-24)が導出される。

[0206] [数69]

$$\begin{aligned}
& a_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, 0, 0, k) \\
&= e^{i(k_{x_1} x_I + k_{y_1} y_J)} \Phi(x_I, y_J, 0, k) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_2} m \Delta x + k_{y_2} n \Delta y)} \left\{ e^{i v_2(x_I, n \Delta y) \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2}} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \cdot e^{i u_2(y_J, m \Delta x) \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{x_2}^2}} - 1 \right\} \right] a_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_2} dk_{y_2} \\
&\dots (3-1-24)
\end{aligned}$$

[0207] 式(3-1-24)は、 $a(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k)$ に関する第2種のフレドホルムの積分方程式である。式(3-1-24)の方程式は、次のような置換えが可能であることを示す。

[0208] [数70]

$$\begin{aligned}
& a_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) = b_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k) \\
&\dots (3-1-25)
\end{aligned}$$

[0209] 式(3-1-22)において $b_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k)$ を積分の外へ出すことにより次式(3-1-26)が得られる。

[0210] [数71]

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{(2\pi)^2} b_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_2} dk_{y_2} \\
&= e^{i(k_{x_1} x_I + k_{y_1} y_J)} \Phi(x_I, y_J, 0, k) \\
&\dots (3-1-26)
\end{aligned}$$

[0211] 式(3-1-26)から直ちに $b_{I,J}(k_{x1}, k_{y1}, k)$ が次式(3-1-27)のように求められる。

[0212] [数72]

$$b_{I,J}(k_{x1}, k_{y1}, k) = \frac{e^{i(k_{x1}x_I + k_{y1}y_J)} \Phi(x_I, y_J, 0, k)}{\frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{I,J}(k_{x1}, k_{y1}, k_{x2}, k_{y2}, k) dk_{x2} dk_{y2}}$$

・・・(3-1-27)

[0213] I, J に関して $b_{I,J}(k_{x1}, k_{y1}, k)$ の和を用いることにより、 $b(k_{x1}, k_{y1}, k)$ が次式(3-1-28)のように定められる。

[0214] [数73]

$$b(k_{x1}, k_{y1}, k) = \sum_{I,J} b_{I,J}(k_{x1}, k_{y1}, k)$$

・・・(3-1-28)

[0215] 式(3-1-28)によって定められる $b(k_{x1}, k_{y1}, k)$ を用いて、式(3-1-16)から映像化関数が次式(3-1-29)のように導出される。

[0216] [数74]

$$\rho(x_1, y_1, z) = \int_0^{\infty} \Phi(x_1, y_1, z, k) dk$$

$$\Phi(x_1, y_1, z, k) = \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1)} \left\{ \sum_{x_2, y_2} e^{-i(k_{x2}x_2 + k_{y2}y_2)} e^{i v_2 \sqrt{k^2 - k_{x1}^2 - k_{y2}^2}} e^{i u_2 \sqrt{k^2 - k_{y1}^2 - k_{x2}^2}} \right\}$$

$$\cdot b(k_{x1}, k_{y1}, k) e^{i z \left(\sqrt{k^2 - k_{x1}^2 - k_{y2}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y1}^2 - k_{x2}^2} \right)} dk_{x1} dk_{y1} dk_{x2} dk_{y2}$$

・・・(3-1-29)

[0217] 映像化装置は、曲面上に配置される2次元送受信素子アレイ150によって得られる計測データから、式(3-1-29)の映像化関数を用いて、計測領域における物体を映像化することができる。

[0218] <4 変形例>

第2章及び第3章では、互いに直交する送信器アレイ111及び受信器アレイ112が示されている。送信器アレイ111及び受信器アレイ112は

、直交ではなく、互いに異なる方向に沿って配置されてもよい。つまり、第1方向に複数の送信器101が連結され、第1方向とは異なる第2方向に受信器102が連結されてもよい。第1方向とは異なる第2方向は、第1方向に平行でない第2方向とも表現され得る。

[0219] また、第3章において、位相因子 α 、 β のそれぞれが0である。しかしながら、第3章において、位相因子 α 、 β のそれぞれが0であることに限られなくてもよい。また、第2章において、位相因子 α 、 β のそれぞれが0であってもよい。また、第2章における説明が第3章に適用されてもよいし、第3章における説明が第2章に適用されてもよい。

[0220] 上記のような変形例においても、上述された理論と同種の理論に基づいて、散乱場関数及び映像化関数が導出され得る。

[0221] <5 映像化装置の基本構成及び基本動作>

上述された内容に基づいて、以下に、散乱波の計測データを用いて計測領域における物体を映像化する映像化装置の基本構成及び基本動作を示す。

[0222] ここで、散乱波の計測に用いられる波動は、例えば、超音波であるが、マイクロ波、ミリ波又はテラヘルツ波等の電波であってもよいし、電磁波であってもよい。また、波動として光が用いられてもよいし、その他の音が用いられてもよい。

[0223] また、計測領域は、空中の領域であってもよく、物体は、飛行物体であってもよい。計測領域における物体は、周辺の媒質の物理特性とは異なる物理特性を有する。具体的には、この物理特性は、波動の反射率に対応する物理特性である。波動として電波が用いられる場合、物理特性は誘電率であってもよい。

[0224] 図11は、本実施の形態における映像化装置の基本構成を示すブロック図である。図11に示された映像化装置100は、1つ以上の送信器アレイ111、1つ以上の受信器アレイ112、及び、情報処理回路130を備える。また、映像化装置100は、ディスプレイ140を備えてもよい。

[0225] 各送信器アレイ111は、波動を送信する回路であって、複数の送信器1

01のそれぞれを回路素子として備える。各送信器101は、圧電素子等のような超音波を送信する送信素子であってもよい。複数の送信器101は、第1方向に連結され、連動する。

[0226] 送信器アレイ111は、複数の送信器101によって波動を送信する。具体的には、送信器アレイ111に含まれる各送信器101が、波動を送信する。送信器アレイ111は、送信器アレイ111に含まれる複数の送信器101によって送信される複数の波動によって形成される波動を送信する。

[0227] 各受信器アレイ112は、波動の散乱波を受信する回路であって、複数の受信器102のそれぞれを回路素子として備える。各受信器102は、圧電素子等のような超音波を受信する受信素子であってもよい。複数の受信器102は、第1方向とは異なる第2方向に連結され、連動する。

[0228] 受信器アレイ112は、複数の受信器102によって散乱波を受信する。具体的には、受信器アレイ112に含まれる各受信器102が、散乱波を受信する。受信器アレイ112は、受信器アレイ112に含まれる複数の受信器102によって受信される複数の散乱波によって形成される散乱波を受信する。

[0229] 情報処理回路130は、情報処理を行う回路である。具体的には、情報処理回路130は、散乱波の計測データを取得し、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する。例えば、情報処理回路130は、計測データを用いて物体を映像化する際に、上述された理論に示される演算処理を行う。

[0230] また、情報処理回路130は、コンピュータ、又は、コンピュータのプロセッサであってもよい。情報処理回路130は、メモリからプログラムを読み出し、プログラムを実行することにより情報処理を行ってもよい。また、情報処理回路130は、計測データに基づいて、計測領域における物体を映像化する専用回路であってもよい。

[0231] また、情報処理回路130は、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112と通信可能であってもよい。そして、情報処理回路

130は、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112の動作を制御してもよい。また、情報処理回路130は、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112から位置情報及び計測データを取得してもよい。

[0232] また、情報処理回路130は、複数の送信器アレイ111に接続された送信信号切替器103と通信可能であってもよい。そして、情報処理回路130は、送信信号切替器103を制御することにより、各送信器アレイ111が波動を送信する動作を制御してもよい。あるいは、情報処理回路130は、送信器アレイ111を移動させるアクチュエータと通信可能であってもよい。そして、情報処理回路130は、アクチュエータを制御することにより、送信器アレイ111の位置を制御してもよい。

[0233] また、情報処理回路130は、複数の受信器アレイ112に接続された受信信号切替器104と通信可能であってもよい。そして、情報処理回路130は、受信信号切替器104を制御することにより、各受信器アレイ112が波動を受信する動作を制御してもよい。あるいは、情報処理回路130は、受信器アレイ112を移動させるアクチュエータと通信可能であってもよい。そして、情報処理回路130は、アクチュエータを制御することにより、受信器アレイ112の位置を制御してもよい。

[0234] また、情報処理回路130は、物体の映像化において、物体を示す画像を生成してもよい。そして、情報処理回路130は、物体を示す画像をディスプレイ140等に出力してもよい。あるいは、情報処理回路130は、物体を示す画像をプリンタ（図示せず）に出力してもよい。あるいは、情報処理回路130は、有線又は無線の通信によって画像を電子データとして他の装置（図示せず）に送信してもよい。

[0235] ディ스플레이140は、液晶ディスプレイ等のディスプレイ装置である。なお、ディスプレイ140は、任意の構成要素であって、必須の構成要素ではない。また、ディスプレイ140は、映像化装置100を構成しない外部の装置であってもよい。

[0236] 図12は、図11に示された映像化装置100の基本動作を示すフローチャートである。具体的には、図11に示された映像化装置100の1つ以上の送信器アレイ111、1つ以上の受信器アレイ112及び情報処理回路130等が、図12に示された動作を行う。

[0237] まず、各送信器アレイ111は、第1方向に連結され連動する複数の送信器101によって、計測領域へ波動を送信する(S101)。また、各受信器アレイ112は、第1方向とは異なる第2方向に連結され連動する複数の受信器102によって、計測領域から波動を受信する(S102)。そして、情報処理回路130は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する(S103、S104及びS105)。

[0238] 具体的には、情報処理回路130は、計測データを用いて散乱場関数を導出する(S103)。散乱場関数は、波動の送信位置及び散乱波の受信位置が入力されて受信位置における散乱波の量が出力される関数である。

[0239] 次に、情報処理回路130は、散乱場関数を用いて、映像化関数を導出する(S104)。映像化関数は、映像化対象位置が入力されて映像化対象位置の画像強度が出力される関数であり、送信位置及び受信位置として映像化対象位置を散乱場関数に入力することで散乱場関数から出力される量を用いて定められる関数である。

[0240] そして、情報処理回路130は、映像化関数を用いて、計測領域における物体を映像化する(S105)。

[0241] これにより、連動して波動を送信する複数の送信器101、及び、連動して波動の散乱波を受信する複数の受信器102を用いて、2つの方向に対応する計測データを取得することが可能になる。そして、2つの方向に対応する計測データを用いて散乱場関数及び映像化関数を的確に導出することが可能になる。したがって、計測領域における物体を効率的に映像化することが可能になる。

[0242] 例えば、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112のそれぞれは、フェーズドアレイであってもよい。これにより、適応的に

定められる方向へ波動を送信することが可能になり、適応的に定められる方向から散乱波を受信することが可能になる。したがって、適応的に定められる範囲における物体を効率的に映像化することが可能になる。

[0243] また、例えば、1つ以上の送信器アレイ111は、第2方向に移動する1つの送信器アレイ111であってもよく、1つ以上の受信器アレイ112は、第1方向に移動する1つの受信器アレイ112であってもよい。これにより、複数の送信器アレイ111及び複数の受信器アレイ112を削減することが可能になる。そして、複数の送信器アレイ111及び複数の受信器アレイ112を準備し配置するためのコストを削減することが可能になる。

[0244] また、例えば、1つ以上の送信器アレイ111は、第2方向に並ぶ複数の送信器アレイ111であってもよく、1つ以上の受信器アレイ112は、第1方向に並ぶ複数の受信器アレイ112であってもよい。そして、複数の送信器アレイ111は、順次、波動を送信してもよい。これにより、送信器アレイ111及び受信器アレイ112を移動させる機構を削減することが可能になる。また、計測において、送信器アレイ111及び受信器アレイ112の移動にかかる時間を削減することが可能になる。

[0245] また、例えば、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112は、平面上に配置されてもよい。これにより、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112の配置を簡略化することが可能になる。したがって、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112を配置するためのコストを削減することが可能になる。また、散乱場関数及び映像化関数を導出するための演算量を削減することが可能になる。

[0246] また、例えば、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112は、曲面上に配置されてもよい。これにより、1つ以上の送信器アレイ111の特性、1つ以上の受信器アレイ112の特性、又は、計測領域の特性に応じて、1つ以上の送信器アレイ111及び1つ以上の受信器アレイ112を曲面上に配置することが可能になる。そして、1つ以上の送信器

アレイ 1 1 1 及び 1 つ以上の受信器アレイ 1 1 2 を柔軟に配置することが可能になる。

[0247] また、例えば、1 つ以上の送信器アレイ 1 1 1 及び 1 つ以上の受信器アレイ 1 1 2 は、平面上に配置されてもよい。また、第 1 方向は y 軸方向であってもよい。また、第 2 方向は x 軸方向であってもよい。

[0248] そして、散乱場関数は、

[数75]

$$\Phi(x_1, y_1, z, \alpha, \beta, k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1} x_1 + k_{y_1} y_1)} \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{iz \left\{ \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}} \right\}} dk_{x_1} dk_{y_1}$$

で表現されてもよい。

[0249] ここで、散乱場関数の z は、送信位置及び受信位置の z 座標を示す。散乱場関数の x₁ は、送信位置の x 座標を示す。散乱場関数の y₁ は、受信位置の y 座標を示す。k は、波動の波数を示す。k_{x₁} 及び k_{y₁} は、散乱場関数の x₁ 及び y₁ に関する波数を示す。α は、1 つ以上の受信器アレイ 1 1 2 の位相因子を示す。β は、1 つ以上の送信器アレイ 1 1 1 の位相因子を示す。

[0250] また、

[数76]

$\tilde{Q}$

は、フーリエ変換された前記計測データを示す。

[0251] これにより、1 つ以上の送信器アレイ 1 1 1 及び 1 つ以上の受信器アレイ 1 1 2 が平面上に配置されることに従って、散乱場関数を的確に導出することが可能になる。したがって、1 つ以上の送信器アレイ 1 1 1 及び 1 つ以上の受信器アレイ 1 1 2 の配置に対応する散乱場関数を的確に導出することが可能になる。

[0252] また、例えば、映像化関数は、

[数77]

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y)} \sum_\alpha \sum_\beta \left\{ \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{ik_z z} \right\} dk dk_{x_1} dk_{y_1}$$

で表現されてもよい。

[0253] ここで、映像化関数の x 、 y 及び z は、映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。 k_z は、

[数78]

$$k_z = \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}}$$

で定められる。

[0254] これにより、1つ以上の送信器アレイ 1 1 1 及び1つ以上の受信器アレイ 1 1 2 が平面上に配置されることに従って定式化された散乱場関数に対応する映像化関数を的確に導出することが可能になる。

[0255] また、例えば、映像化関数は、

[数79]

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y)} \sum_\alpha \sum_\beta \left\{ \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{ik_z z} \right\} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_z$$

で表現されてもよい。

[0256] ここで、映像化関数の x 、 y 及び z は、映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。 k_z 及び dk/dk_z は、

[数80]

$$k_z = \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}}$$

$$\frac{dk}{dk_z} = \frac{1}{\frac{(1-\beta^2)k}{\sqrt{(1-\beta^2)k^2 - k_{x_1}^2}} + \frac{(1-\alpha^2)k}{\sqrt{(1-\alpha^2)k^2 - k_{y_1}^2}}}$$

で定められる。

[0257] これにより、1つ以上の送信器アレイ 1 1 1 及び1つ以上の受信器アレイ

1 1 2 が平面上に配置されることに従って定式化された散乱場関数に対応する映像化関数を的確に導出することが可能になる。また、変換された積分変数に応じて、効率的に演算を行うことが可能になる。

[0258] また、例えば、1 つ以上の送信器アレイ 1 1 1 及び 1 つ以上の受信器アレイ 1 1 2 は、曲面上に配置されてもよい。また、第 1 方向は y 軸方向であってもよい。また、第 2 方向は x 軸方向であってもよい。

[0259] そして、散乱場関数は、

[数81]

$$\begin{aligned} \Phi(x_1, y_1, z, k) \\ = \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1)} \left\{ \sum_{x_2, y_2} e^{-i(k_{x2}x_2 + k_{y2}y_2)} e^{i v_2 \sqrt{k^2 - k_{x1}^2 - k_{y2}^2}} e^{i u_2 \sqrt{k^2 - k_{y1}^2 - k_{x2}^2}} \right\} \\ \cdot b(k_{x1}, k_{y1}, k) e^{iz(\sqrt{k^2 - k_{x1}^2 - k_{y2}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y1}^2 - k_{x2}^2})} dk_{x1} dk_{y1} dk_{x2} dk_{y2} \end{aligned}$$

で表現されてもよい。

[0260] ここで、散乱場関数の z は、送信位置及び受信位置の z 座標を示す。散乱場関数の x₁ は、送信位置の x 座標を示す。散乱場関数の y₁ は、受信位置の y 座標を示す。k は、波動の波数を示す。k_{x1}、k_{y1}、k_{x2} 及び k_{y2} は、積分変数を示す。

[0261] また、b は、

[数82]

$$b(k_{x1}, k_{y1}, k) = \sum_{I, J} b_{I, J}(k_{x1}, k_{y1}, k)$$

で定められる。

[0262] また、I は、1 つ以上の送信器アレイ 1 1 1 が波動を送信する x 座標のインデックスを示す。J は、1 つ以上の受信器アレイ 1 1 2 が散乱波を受信する y 座標のインデックスを示す。

[0263] また、b_{I, J} は、

[数83]

$$b_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k) = \frac{e^{i(k_{x_1}x_I + k_{y_1}y_J)} \Phi(x_I, y_J, 0, k)}{\frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_2} dk_{y_2}}$$

で定められる。 $\Phi(x_I, y_J, 0, k)$ は、前記計測データを示す。

[0264] また、 $G_{I,J}$ は、

[数84]

$$G_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_2}m\Delta x + k_{y_2}m\Delta y)} e^{iv_2(x_I, m\Delta y) \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2}} e^{iu_2(y_J, m\Delta x) \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{x_2}^2}}$$

で定められる。

[0265] また、 Δx は、複数の受信器 102 のうちの隣り合う 2 つの受信器 102 の距離を示す。 Δy は、複数の送信器 101 のうちの隣り合う 2 つの送信器 101 の距離を示す。 v_2 及び u_2 のそれぞれは、曲面の形状を表現する関数を示す。

[0266] これにより、1 つ以上の送信器アレイ 111 及び 1 つ以上の受信器アレイ 112 が曲面上に配置されることに従って、散乱場関数を的確に導出することが可能になる。したがって、1 つ以上の送信器アレイ 111 及び 1 つ以上の受信器アレイ 112 の配置に対応する散乱場関数を的確に導出することが可能になる。

[0267] また、例えば、映像化関数は、

[数85]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \Phi(x, y, z, k) dk$$

で表現されてもよい。

[0268] ここで、映像化関数の x 、 y 及び z は、映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す。

[0269] これにより、1 つ以上の送信器アレイ 111 及び 1 つ以上の受信器アレイ

1 1 2 が平面上に配置されることに従って定式化された散乱場関数に対応する映像化関数を的確に導出することが可能になる。

[0270] また、例えば、上記の基本構成及び基本動作において示された構成、処理及び数式には、本実施の形態において示された他の構成、処理及び数式等が適宜適用され得る。また、本実施の形態において示された数式等が適宜変形して適用されてもよい。例えば、上述された数式と実質的に同じ内容を他の表現で示す数式が用いられてもよいし、上述された理論に基づいて導出される他の数式が用いられてもよい。

[0271] (補足)

以上、映像化装置の態様を実施の形態に基づいて説明したが、映像化装置の態様は、実施の形態に限定されない。実施の形態に対して当業者が思いつく変形が施されてもよいし、実施の形態における複数の構成要素が任意に組み合わせられてもよい。例えば、実施の形態において特定の構成要素によって実行される処理を特定の構成要素の代わりに別の構成要素が実行してもよい。また、複数の処理の順序が変更されてもよいし、複数の処理が並行して実行されてもよい。

[0272] また、映像化装置の各構成要素で行われるステップを含む映像化方法が、任意の装置又はシステムによって実行されてもよい。例えば、映像化方法の一部又は全部が、プロセッサ、メモリ及び入出力回路等を備えるコンピュータによって実行されてもよい。その際、コンピュータに映像化方法を実行させるためのプログラムがコンピュータによって実行されることにより、映像化方法が実行されてもよい。

[0273] また、非一時的なコンピュータ読み取り可能な記録媒体に、上記のプログラムが記録されていてもよい。

[0274] また、映像化装置の各構成要素は、専用のハードウェアで構成されてもよいし、上記のプログラム等を実行する汎用のハードウェアで構成されてもよいし、これらの組み合わせで構成されてもよい。また、汎用のハードウェアは、プログラムが記録されたメモリ、及び、メモリからプログラムを読み出

して実行する汎用のプロセッサ等で構成されてもよい。ここで、メモリは、半導体メモリ又はハードディスク等でもよいし、汎用のプロセッサは、CPU等でもよい。

[0275] また、専用のハードウェアが、メモリ及び専用のプロセッサ等で構成されてもよい。例えば、専用のプロセッサが、計測データを記録するためのメモリを参照して、上記の映像化方法を実行してもよい。

[0276] また、映像化装置の各構成要素は、電気回路であってもよい。これらの電気回路は、全体として1つの電気回路を構成してもよいし、それぞれ別々の電気回路であってもよい。また、これらの電気回路は、専用のハードウェアに対応していてもよいし、上記のプログラム等を実行する汎用のハードウェアに対応していてもよい。

[0277] また、映像化装置は、物理的に一体の装置であることに限られず、分散して配置された複数のサブ装置を備えていてもよい。また、映像化装置は、映像化システムと表現されてもよい。

産業上の利用可能性

[0278] 本開示の一態様は、散乱波の計測データを用いて、計測領域における物体を映像化する映像化装置に有用であり、超音波診断装置及び金属探査システム等に適用可能である。

符号の説明

- [0279] 100 映像化装置
 101 送信器
 102 受信器
 103 送信信号切替器
 104 受信信号切替器
 111 送信器アレイ
 112 受信器アレイ
 130 情報処理回路
 140 ディスプレイ

1 5 0 2次元送受信素子アレイ

請求の範囲

- [請求項1] 第1方向に連結され連動する複数の送信器をそれぞれが含む1つ以上の送信器アレイであって、それぞれが前記複数の送信器によって計測領域へ波動を送信する1つ以上の送信器アレイと、
- 前記第1方向とは異なる第2方向に連結され連動する複数の受信器をそれぞれが含む1つ以上の受信器アレイであって、それぞれが前記複数の受信器によって前記計測領域から前記波動の散乱波を受信する1つ以上の受信器アレイと、
- 前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化する情報処理回路とを備え、
- 前記情報処理回路は、前記物体の映像化において、
- 前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、
- 映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出し、
- 前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する
- 映像化装置。
- [請求項2] 前記1つ以上の送信器アレイ及び前記1つ以上の受信器アレイのそれぞれは、フェーズドアレイである
- 請求項1に記載の映像化装置。
- [請求項3] 前記1つ以上の送信器アレイは、前記第2方向に移動する1つの送信器アレイであり、
- 前記1つ以上の受信器アレイは、前記第1方向に移動する1つの受信器アレイである

請求項 1 又は 2 に記載の映像化装置。

[請求項4]

前記 1 つ以上の送信器アレイは、前記第 2 方向に並ぶ複数の送信器アレイであり、

前記 1 つ以上の受信器アレイは、前記第 1 方向に並ぶ複数の受信器アレイであり、

前記複数の送信器アレイは、順次、前記波動を送信する

請求項 1 又は 2 に記載の映像化装置。

[請求項5]

前記 1 つ以上の送信器アレイ及び前記 1 つ以上の受信器アレイは、平面上に配置される

請求項 1 又は 2 に記載の映像化装置。

[請求項6]

前記 1 つ以上の送信器アレイ及び前記 1 つ以上の受信器アレイは、曲面上に配置される

請求項 1 又は 2 に記載の映像化装置。

[請求項7]

前記 1 つ以上の送信器アレイ及び前記 1 つ以上の受信器アレイは、平面上に配置され、

前記第 1 方向は y 軸方向であり、

前記第 2 方向は x 軸方向であり、

前記散乱場関数は、

[数1]

$$\Phi(x_1, y_1, z, \alpha, \beta, k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1)} \tilde{Q}(k_{x1}, k_{y1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{iz \left\{ \sqrt{k^2 - \{k_{x1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y1}^2 + \alpha^2 k^2\}} \right\}} dk_{x1} dk_{y1}$$

で表現され、

前記散乱場関数の z は、前記送信位置及び前記受信位置の z 座標を示し、前記散乱場関数の x₁ は、前記送信位置の x 座標を示し、前記散乱場関数の y₁ は、前記受信位置の y 座標を示し、k は、前記波動の波数を示し、k_{x1} 及び k_{y1} は、前記散乱場関数の x₁ 及び y₁ に関する波数を示し、α は、前記 1 つ以上の受信器アレイの位相因子を示

し、 β は、前記 1 つ以上の送信器アレイの位相因子を示し、

[数2]

$$\tilde{Q}$$

は、フーリエ変換された前記計測データを示す

請求項 2 に記載の映像化装置。

[請求項8]

前記映像化関数は、

[数3]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) \\ = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y)} \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \left\{ \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{ik_z z} \right\} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_z \end{aligned}$$

で表現され、

前記映像化関数の x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、

y 座標及び z 座標を示し、 k_z は、

[数4]

$$k_z = \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}}$$

で定められる

請求項 7 に記載の映像化装置。

[請求項9]

前記映像化関数は、

[数5]

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) \\ = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty e^{-i(k_{x_1}x + k_{y_1}y)} \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \left\{ \tilde{Q}(k_{x_1}, k_{y_1}, \alpha, \beta, k) \cdot e^{ik_z z} \right\} \left(\frac{dk}{dk_z} \right) dk_{x_1} dk_{y_1} dk_z \end{aligned}$$

で表現され、

前記映像化関数の x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、

y 座標及び z 座標を示し、 k_z 及び dk/dk_z は、

[数6]

$$k_z = \sqrt{k^2 - \{k_{x_1}^2 + \beta^2 k^2\}} \pm \sqrt{k^2 - \{k_{y_1}^2 + \alpha^2 k^2\}}$$

$$\frac{dk}{dk_z} = \frac{1}{\frac{(1-\beta^2)k}{\sqrt{(1-\beta^2)k^2 - k_{x_1}^2}} + \frac{(1-\alpha^2)k}{\sqrt{(1-\alpha^2)k^2 - k_{y_1}^2}}}$$

で定められる

請求項7に記載の映像化装置。

[請求項10]

前記1つ以上の送信器アレイ及び前記1つ以上の受信器アレイは、
曲面上に配置され、

前記第1方向はy軸方向であり、

前記第2方向はx軸方向であり、

前記散乱場関数は、

[数7]

$$\Phi(x_1, y_1, z, k)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_1}x_1 + k_{y_1}y_1)} \left\{ \sum_{x_2, y_2} e^{-i(k_{x_2}x_2 + k_{y_2}y_2)} e^{i v_2 \sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2}} e^{i u_2 \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2}} \right\}$$

$$\cdot b(k_{x_1}, k_{y_1}, k) e^{i z (\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2} + \sqrt{k^2 - k_{y_1}^2 - k_{x_2}^2})} dk_{x_1} dk_{y_1} dk_{x_2} dk_{y_2}$$

で表現され、

前記散乱場関数のzは、前記送信位置及び前記受信位置のz座標を示し、前記散乱場関数のx₁は、前記送信位置のx座標を示し、前記散乱場関数のy₁は、前記受信位置のy座標を示し、kは、前記波動の波数を示し、k_{x1}、k_{y1}、k_{x2}及びk_{y2}は、積分変数を示し、bは、

[数8]

$$b(k_{x_1}, k_{y_1}, k) = \sum_{I, J} b_{I, J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k)$$

で定められ、Iは、前記1つ以上の送信器アレイが前記波動を送信するx座標のインデックスを示し、Jは、前記1つ以上の受信器アレイ

が前記散乱波を受信する y 座標のインデックスを示し、 $b_{I,J}$ は、

[数9]

$$b_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k) = \frac{e^{i(k_{x_1}x_I + k_{y_1}y_J)} \Phi(x_I, y_J, 0, k)}{\frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) dk_{x_2} dk_{y_2}}$$

で定められ、 Φ は、前記計測データを示し、 $G_{I,J}$ は、

[数10]

$$G_{I,J}(k_{x_1}, k_{y_1}, k_{x_2}, k_{y_2}, k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i(k_{x_2}m\Delta x + k_{y_2}n\Delta y)} e^{iv_2(x_I, n\Delta y)\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{y_2}^2}} e^{iu_2(y_J, m\Delta x)\sqrt{k^2 - k_{x_1}^2 - k_{x_2}^2}}$$

で定められ、 Δx は、前記複数の受信器のうちの隣り合う2つの受信器の距離を示し、 Δy は、前記複数の送信器のうちの隣り合う2つの送信器の距離を示し、 v_2 及び u_2 のそれぞれは、前記曲面の形状を表現する関数を示す

請求項1に記載の映像化装置。

[請求項11]

前記映像化関数は、

[数11]

$$\rho(x, y, z) = \int_0^{\infty} \Phi(x, y, z, k) dk$$

で表現され、

前記映像化関数の x 、 y 及び z は、前記映像化対象位置の x 座標、 y 座標及び z 座標を示す

請求項10に記載の映像化装置。

[請求項12]

第1方向に連結され連動する複数の送信器をそれぞれが含む1つ以上の送信器アレイのそれぞれの前記複数の送信器によって計測領域へ波動を送信するステップと、

前記第1方向とは異なる第2方向に連結され連動する複数の受信器をそれぞれが含む1つ以上の受信器アレイのそれぞれの前記複数の受

信器によって前記計測領域から前記波動の散乱波を受信するステップと、

前記散乱波の計測データを用いて、前記計測領域における物体を映像化するステップとを含み、

前記物体を映像化するステップでは、

前記波動の送信位置及び前記散乱波の受信位置が入力されて前記受信位置における前記散乱波の量が出力される散乱場関数を、前記計測データを用いて導出し、

映像化対象位置が入力されて前記映像化対象位置の画像強度が出力される映像化関数であって、前記送信位置及び前記受信位置として前記映像化対象位置を前記散乱場関数に入力することで前記散乱場関数から出力される量を用いて定められる映像化関数を導出し、

前記映像化関数を用いて、前記計測領域における前記物体を映像化する

映像化方法。