

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4494089号
(P4494089)

(45) 発行日 平成22年6月30日(2010.6.30)

(24) 登録日 平成22年4月16日(2010.4.16)

(51) Int.Cl. F I
A 6 1 B 8/00 (2006.01) A 6 1 B 8/00
G 0 1 N 29/26 (2006.01) G 0 1 N 29/26 5 0 3

請求項の数 10 (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2004-164116 (P2004-164116)
 (22) 出願日 平成16年6月2日(2004.6.2)
 (65) 公開番号 特開2005-342140 (P2005-342140A)
 (43) 公開日 平成17年12月15日(2005.12.15)
 審査請求日 平成19年2月27日(2007.2.27)

(73) 特許権者 306037311
 富士フイルム株式会社
 東京都港区西麻布2丁目26番30号
 (74) 代理人 100110777
 弁理士 宇都宮 正明
 (74) 代理人 100100413
 弁理士 渡部 温
 (72) 発明者 佐藤 良彰
 神奈川県足柄上郡開成町宮台798番地
 富士写真フイルム株式会社内
 審査官 川上 則明

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超音波送受信装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

被検体に超音波を送信し、被検体から反射された超音波エコーを受信する複数の超音波トランスデューサを含む超音波トランスデューサアレイと、

前記複数の超音波トランスデューサをそれぞれ駆動する駆動信号を発生する駆動信号発生手段と、

前記複数の超音波トランスデューサから送信される超音波が少なくとも1つの超音波ビームを形成するように、前記駆動信号発生手段を制御する送信制御手段と、

前記複数の超音波トランスデューサによって受信された超音波エコーに基づいて得られた複数の検出信号に対して被検体内の複数の領域に受信焦点を順次形成するように受信フォーカス処理を施すことにより、前記複数の領域に関する少なくとも1組の計測値を求める信号処理手段と、

前記信号処理手段によって求められた少なくとも1組の計測値を格納する第1の格納手段と、

超音波ビームを送信することによって形成される音圧強度分布と前記信号処理手段において施される受信フォーカス処理とに基づいて設定された複数の異なる音圧強度プロファイルを格納する第2の格納手段と、

前記少なくとも1組の計測値と、前記複数の異なる音圧強度プロファイルとに基づいて、前記複数の領域に関する画像データを算出する算出手段と、

を具備し、前記算出手段が、受信フォーカス処理が施された複数の検出信号を積分するこ

10

20

とにより少なくとも1組の積分値を算出し、該少なくとも1組の積分値に基づいて画像データを算出する、超音波送受信装置。

【請求項2】

前記複数の異なる音圧強度プロファイルが、超音波ビームが送信されてから所定の時間経過後に到達する面である等時間面に含まれる複数の領域における音圧強度又は音圧強度比を表す、請求項1記載の超音波送受信装置。

【請求項3】

前記送信制御手段が、同時に複数の方向に複数の超音波ビームがそれぞれ送信されるように、前記駆動信号発生手段を制御する、請求項1又は2記載の超音波送受信装置。

【請求項4】

前記信号処理手段が、被検体内の複数の領域に関する1組の計測値を求め、
前記算出手段が、前記1組の計測値と、前記1組の計測値を求めるためにそれぞれ施された受信フォーカス処理に対応する複数の音圧強度プロファイルとを用いて、前記複数の領域に関する画像データを算出する、請求項1～3のいずれか1項記載の超音波送受信装置。

【請求項5】

前記信号処理手段が、被検体内の複数の領域について、異なる複数の受信フォーカス処理を行うことにより複数組の計測値を求め、

前記算出手段が、各組の計測値と、各組の計測値にそれぞれ施された受信フォーカス処理に対応する複数の音圧強度プロファイルとを用いて、前記複数の領域に関する画像データを算出する、

請求項1～3のいずれか1項記載の超音波送受信装置。

【請求項6】

前記算出手段が、前記少なくとも1組の計測値と前記複数の異なる音圧強度プロファイルとに基づいて、前記複数の領域に関する少なくとも1組の反射率を画像データとして算出する、請求項1～5のいずれか1項記載の超音波送受信装置。

【請求項7】

前記算出手段において少なくとも1組の積分値を算出する際に用いられる積分範囲を設定する制御手段をさらに具備し、

前記算出手段が、設定された積分範囲に基づいて少なくとも1組の積分値を算出し、該少なくとも1組の積分値と設定された積分範囲に対応する音圧強度プロファイルとに基づいて画像データを算出する、

請求項1記載の超音波送受信装置。

【請求項8】

所定の領域に関する計測値と、第1の等時間面に対応する音圧強度プロファイルとに基づいて、第2の等時間面に対応する音圧強度プロファイルを補正する補正手段をさらに具備する、請求項2記載の超音波送受信装置。

【請求項9】

被検体に超音波を送信し、被検体から反射された超音波エコーを受信する複数の超音波トランスデューサを含む超音波トランスデューサアレイと、

前記複数の超音波トランスデューサをそれぞれ駆動する駆動信号を発生する駆動信号発生手段と、

前記複数の超音波トランスデューサから送信される超音波が少なくとも1つの超音波ビームを形成するように、前記駆動信号発生手段を制御する送信制御手段と、

前記複数の超音波トランスデューサによって受信された超音波エコーに基づいて得られた複数の検出信号に対して被検体内の複数の領域に受信焦点を順次形成するように受信フォーカス処理を施すことにより、前記複数の領域に関する少なくとも1組の計測値を求める信号処理手段と、

前記信号処理手段によって求められた少なくとも1組の計測値を格納する第1の格納手段と、

10

20

30

40

50

超音波ビームを送信することによって形成される音圧強度分布と前記信号処理手段において施される受信フォーカス処理とに基づいて設定され、超音波ビームが送信されてから所定の時間経過後に到達する面である等時間面に含まれる複数の領域における音圧強度又は音圧強度比を表す複数の異なる音圧強度プロファイルを格納する第2の格納手段と、

所定の領域に関する計測値と、第1の等時間面に対応する音圧強度プロファイルとに基づいて、第2の等時間面に対応する音圧強度プロファイルを補正する補正手段と、

前記少なくとも1組の計測値と、前記複数の異なる音圧強度プロファイルとに基づいて、前記複数の領域に関する画像データを算出する算出手段と、

前記第1の等時間面に含まれる少なくとも1つの領域に関する計測値に基づいて求められた反射率が、予め設定された閾値よりも大きいか否かを判定する判定手段と、

を具備し、前記補正手段が、前記反射率が前記閾値よりも大きい場合に、前記第2の等時間面に対応する音圧強度プロファイルを補正する、超音波送受信装置。

【請求項10】

ユーザの指示に従い、前記閾値を設定する手段をさらに具備する請求項9記載の超音波送受信装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、被検体に超音波を送信し、被検体内部において反射された超音波エコーを受信することにより超音波画像を得るために用いられる超音波送受信装置に関する。

【背景技術】

【0002】

図12は、一般的に用いられている超音波探触子に含まれる超音波トランスデューサアレイから超音波ビームが送信される様子を模式的に表している。図12の(a)に示すように、超音波トランスデューサアレイ100は、複数の超音波トランスデューサ101を、例えば、リニアに多数配列することによって作製されている。超音波の送信及び受信に用いられる素子(超音波トランスデューサ)としては、PZT(チタン酸ジルコン酸鉛:Pb(lead) zirconate titanate)に代表される圧電セラミックや、P(VDF)(ポリフッ化ビニリデン:polyvinyl difluoride)に代表される高分子圧電素子を含む圧電性を有する材料(圧電材料)の両端に電極を形成したものが一般的に用いられている。

【0003】

これらの超音波トランスデューサ101には、パルサ等の駆動信号発生回路がそれぞれ接続されている。超音波トランスデューサ101に電圧を印加すると、圧電効果により圧電素子が伸縮して超音波を発生する。その際に、所定の時間差を設けて複数の超音波トランスデューサ101を駆動することにより、それぞれの超音波トランスデューサ101から送信される球面波が合成され、所望の方向且つ所望の深度に焦点が形成された超音波ビームを送信することができる。

【0004】

また、図12の(b)に示すように、1組のエレメントにA系パルスとB系パルスの2組のタイミングパルスを印加することにより、図12の(a)に示す超音波ビームA及び超音波ビームBを、異なる方向に同時に送信することができる。A系パルスとB系パルスとが重なる場合には、加算結果である共通パルスを発生すれば良い。なお、図12の(b)において、横軸は、各駆動信号発生回路におけるパルス発生時刻からの経過時間を示している。

以下において、このように同時に送受信される複数の超音波ビームのことを、マルチビームという。

【0005】

ところで、超音波撮像においては、超音波ビームが送信される際に生じるサイドローブが問題となっている。指向性を有する超音波ビームを送信した場合に、音圧強度の空間分布において、送信方向の中心軸上に現れる極大はメインローブ(主極)、それ以外の方向

10

20

30

40

50

に現れる極大はサイドローブ（副極）と呼ばれる。このサイドローブは、超音波トランスデューサの素子ピッチと超音波周波数との関係によって生じたり（グレーティングローブと呼ばれる）、超音波トランスデューサの不要振動によって生じる。通常、超音波トランスデューサによって受信された超音波エコーは、メインローブ方向から伝搬してきたものとして信号処理される。そのため、サイドローブ成分が大きかったり、サイドローブ方向に強い反射体が存在する場合には、アーティファクト（虚像）が生じ、超音波画像の画質が低下してしまう。

【 0 0 0 6 】

このような現象を避けるために、送受信ビームの遅延精度を向上させたり、素子を微細化する等、サイドローブの出現を抑える工夫がなされてきた。しかしながら、これらの手法には限界があり、まだ、十分なレベルまでサイドローブが低減されているとは言えない。また、超音波ビームを大きくステアリングする場合や、超音波をマルチビーム送信する場合には、サイドローブ成分のレベルがさらに高くなるので、これを軽減することがさらに困難になる。そのため、画質への影響が大きな問題になっている。

【 0 0 0 7 】

特許文献 1 には、超音波をマルチビーム送受信する際に、サイドローブによる影響を低減するために、次のような技術が開示されている。即ち、1つの送信ビームに対して、複数の受信ビームを形成する方法や、複数の送信ビームの周波数を変えたり、バーカ（Barker）符号やゴレイ（Golay）符号等を用いて送信ビームを符号化することにより送信ビームを識別し、受信された超音波エコーとの相関を取る方法が挙げられている。また、メインローブとサイドローブとの間には、ナル（null）ラインと呼ばれる音圧が概ねゼロとなる領域が存在するので、その領域に、別の超音波ビームのメインローブをアライメントする方法や、単に送信ビーム間隔を離す方法、送信ビームの中心周波数をずらす方法も挙げられている。しかしながら、これらの方法においては、超音波の送信又は受信の際に、何らかの制約を受けてしまう。例えば、送信ビームの中心周波数をずらす場合には、それらの送信ビームの間で、距離に対する減衰特性が異なってしまうという問題がある。

【 0 0 0 8 】

ところで、近年、医療用画像技術分野において大きく発達したものの1つとして、X線CT（computed tomography）が挙げられる。X線CTとは、被検体に複数の方向からX線を照射し、被検体を透過したX線に基づいて被検体の断層像を生成する技術である。しかしながら、高画質のX線CT画像を得るためには、異なる数百方向から被検体を透過したX線信号が必要とされるので、X線源及びX線検出部を回転させるための複雑で精密な機構や、膨大な量のデータを処理するための多大な時間と高性能のデータ処理装置等が必須である。そのため、装置が大がかり且つ高価となり、一般への普及を阻む要因となっていた。また、被検体に照射されるX線の被曝量も問題となっていた。

【 0 0 0 9 】

そのような問題を解決するために、特許文献 2 には、投影方向が少なくても良質な画像を高速に得ることができるCT装置が開示されている。このCT装置においては、予め定められた複数の異なる透過経路と格子状に区切られた計算空間の各々の画素が、上記透過経路を透過線が通ったときの投影値に及ぼす各画素毎の影響の度合いである影響係数との関係を行列表示した投影モデル行列を、特異値分解して予め算出した一般化逆行列を記憶しておき、異なる方向から投影されたX線の交点（格子状に区切られた計算空間）における投影値と、上記一般化逆行列とを用いて画像表示のためのデータを生成することが行われている。

しかしながら、この手法は、異なる複数の透過経路における投影値（透過経路の積分値）から、これらの透過経路が交わる格子点における信号を推定するものであり、このような技術を、被検体から反射された超音波エコーの音圧強度から被検体に関する情報を得る超音波撮像にそのまま適用することはできない。

【特許文献 1】米国特許第 6 1 7 9 7 8 0 号明細書

【特許文献 2】特開平 9 - 1 6 1 0 4 1 号公報

10

20

30

40

50

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

そこで、上記の点に鑑み、本発明は、超音波エコーを受信して得られた検出信号に基づいて、サイドローブが存在しない状態の検出信号を推定することにより、サイドローブの影響が低減された画質の良い超音波画像を得ることができる超音波送受信装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

以上の課題を解決するため、本発明の1つの観点に係る超音波送受信装置は、被検体に超音波を送信し、被検体から反射された超音波エコーを受信する複数の超音波トランスデューサを含む超音波トランスデューサアレイと、複数の超音波トランスデューサをそれぞれ駆動する駆動信号を発生する駆動信号発生手段と、複数の超音波トランスデューサから送信される超音波が少なくとも1つの超音波ビームを形成するように、駆動信号発生手段を制御する送信制御手段と、複数の超音波トランスデューサによって受信された超音波エコーに基づいて得られた複数の検出信号に対して被検体内の複数の領域に受信焦点を順次形成するように受信フォーカス処理を施すことにより、上記複数の領域に関する少なくとも1組の計測値を求める信号処理手段と、該信号処理手段によって求められた少なくとも1組の計測値を格納する第1の格納手段と、超音波ビームを送信することによって形成される音圧強度分布と信号処理手段において施される受信フォーカス処理とに基づいて設定された複数の異なる音圧強度プロファイルを格納する第2の格納手段と、少なくとも1組の計測値と、複数の異なる音圧強度プロファイルとに基づいて、上記複数の領域に関する画像データを算出する算出手段とを具備し、該算出手段が、受信フォーカス処理が施された複数の検出信号を積分することにより少なくとも1組の積分値を算出し、該少なくとも1組の積分値に基づいて画像データを算出する。

【発明の効果】

【0013】

本発明によれば、少なくとも1組の計測値と複数の異なる音圧強度プロファイルとに基づいて、複数の領域に関する超音波画像情報を算出するので、サイドローブによる影響が低減された良質な超音波画像を効率良く取得することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

以下、本発明を実施するための最良の形態について、図面を参照しながら詳しく説明する。なお、同一の構成要素には同一の参照番号を付して、説明を省略する。

図1は、本発明の第1の実施形態に係る超音波送受信装置を示すブロック図である。この超音波送受信装置は、超音波を送受信する超音波トランスデューサアレイ10と、超音波の送受信を制御すると共に、取得された超音波検出信号に基づいて超音波画像を生成する超音波送受信装置本体とを含んでいる。

【0015】

超音波トランスデューサアレイ10は、例えば、2次元マトリクス状に配列された複数の超音波トランスデューサを含んでいる。各超音波トランスデューサは、例えば、PZT（チタン酸ジルコン酸鉛：Pb(lead) zirconate titanate）に代表される圧電セラミックや、PVDf（ポリフッ化ビニリデン：polyvinylidene difluoride）に代表される高分子圧電素子等の圧電性を有する材料（圧電体）の両端に電極を形成することによって作製されている。このような超音波トランスデューサの電極に、パルス状の電気信号或いは連続波電気信号を送って電圧を印加すると、圧電体が伸縮して超音波を発生する。そこで、複数の超音波トランスデューサを電子的に制御して、それぞれの超音波トランスデューサからパルス状或いは連続的な超音波を発生させる。これにより、それらの超音波の合成によって超音波ビームが形成され、被検体が電子的に走査される。また、複数の超音波トランスデューサは、伝搬する超音波を受信することによって伸縮し、電気信号を発生する。

これらの電気信号は、超音波の検出信号として出力される。このような超音波トランスデューサアレイ 10 は、ケーブルを介して超音波送受信装置本体と接続されている。

【0016】

或いは、超音波トランスデューサとして、超音波変換方式の異なる複数種類の素子を用いても良い。例えば、超音波を送信する素子として上記の振動子を用い、超音波を受信する素子として光検出方式の超音波トランスデューサを用いるようにする。光検出方式の超音波トランスデューサとは、超音波信号を光信号に変換して検出するものであり、例えば、ファブリーペロー共振器やファイバブラッググレーティングによって構成される。

【0017】

超音波送受信装置本体は、制御部 20 と、走査制御部 21 と、駆動信号発生部 22 と、送受信切換部 23 と、信号処理部 24 と、A/D変換器 25 と、位相整合部 26 と、音線メモリ 27 と、画像データ生成部 30 と、強度プロファイル記憶部 31 と、画像メモリ 32 と、D/A変換器 33 と、表示部 34 と、操作卓 35 と、記録部 36 とを含んでいる。

制御部 20 は、CPUとソフトウェア(制御プログラム)とによって構成されており、超音波送受信装置の各部を制御している。

【0018】

走査制御部 21 は、制御部 20 の制御の下で、超音波を送信する方向に応じて、超音波トランスデューサアレイ 10 に含まれる複数の超音波トランスデューサを駆動するための駆動信号に与えられる遅延時間を設定する。超音波ビームの走査方式としては、セクタ走査、リニア走査、コンベックス走査、ラジアル走査等、様々な方式を用いることができる。

【0019】

駆動信号発生部 22 は、超音波トランスデューサアレイ 10 に含まれる複数の超音波トランスデューサに対応する複数のパルサを含んでいる。各パルサは、走査制御部 21 の制御の下で、設定されたタイミングで駆動信号を発生する。これにより、複数の超音波トランスデューサから、超音波が所定の時間差をもってそれぞれ発生する。

【0020】

送受信切換部 23 は、駆動信号発生部 22 から出力される駆動信号の超音波トランスデューサアレイ 10 への供給と、超音波トランスデューサアレイ 10 から出力される検出信号の信号処理部 24 への取り込みとを、制御部 20 の制御に従って所定のタイミングで切り換える。検出信号の読み取り時間帯を限定することにより、被検体の特定の深さから反射された超音波エコー信号が検出される。

【0021】

信号処理部 24 は、複数の超音波トランスデューサに対応する複数のチャンネルを含んでいる。これらのチャンネルの各々は、対応する超音波トランスデューサから出力された検出信号を所定のタイミングで取り込み、対数増幅、検波、可変STC(センシティブィ・タイム・コントロール)、フィルタ処理等の信号処理を行う。なお、本実施形態においては、後で詳しく説明するように、画像データ生成部 30 において超音波の距離減衰量を含めた演算を行うので、一般的な固定STCは不要となる。

A/D変換器 25 は、信号処理部 24 において処理されたアナログ信号をデジタル変換することにより、検出データを生成する。

【0022】

位相整合部 26 は、デジタル変換された複数の検出データに適切な量の遅延を与え、それらを加算することにより、受信フォーカス処理を行う。これにより、所定の音線方向に焦点が絞り込まれた受信ビームを表す検出データ(音線データ)が生成される。なお、可変STCを信号処理部 24 に設ける替わりに、位相整合部 26 に設けても良い。

【0023】

音線メモリ 27 は、位相整合部 26 において生成された音線データを順次格納する。この音線データは、被検体に関する超音波情報と、超音波ビームの空間的な広がり起因するサイドローブ成分に関する情報とを含んでいる。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 4 】

画像データ生成部 30 は、音線メモリ 27 に格納されている 1 フレーム分の音線データに基づいて演算を行うことにより、サイドローブ成分が抑圧された超音波画像データを生成する。画像データ生成部 30 の構成については、後で詳しく説明する。

【 0 0 2 5 】

強度プロファイル記憶部 31 は、複数の異なる音圧強度プロファイル（単に、強度プロファイル又はプロファイルともいう）を記憶している。強度プロファイルは、超音波ビームが送信されてから所定の時間経過後に到達する面に含まれる複数の領域における音圧強度又は音圧強度比を表している。本実施形態においては、音圧強度によって表された強度プロファイルを用いている。

10

【 0 0 2 6 】

ここで、超音波が送受信される空間には、超音波ビームを送信することによって形成される音圧強度分布と位相整合部 26 において施される受信フォーカス処理とにより、音圧強度の空間分布（音場）が形成されていると想定される。本実施形態においては、検出信号におけるサイドローブの影響を除去するために、このような音圧強度の空間分布を利用している。

【 0 0 2 7 】

強度プロファイル記憶部 31 に記憶されている複数の強度プロファイルは、超音波ビームの送信方向と超音波エコーの受信フォーカス処理（受信方向及び受信焦点の深さ）とに基づいて設定されている。或いは、音圧強度プロファイルを設定するための要素として、超音波トランスデューサアレイ 10 に含まれる素子の内、使用される素子の数、素子ピッチ、使用される素子の開口径、開口内重み付けを含む開口条件を含めても良い。このような強度プロファイルは、上記の開口条件や、送信遅延パターンを含む送信条件や、受信遅延パターンを含む受信条件に基づいて音場をシミュレートすることにより求めることができる。或いは、散乱ファントムに対してこれらの条件に基づいて超音波ビームを送受信し、計測によって得られた超音波エコーの強度比を用いて強度プロファイルを求めても良い。

20

【 0 0 2 8 】

画像メモリ 32 は、表示用の画像データを、例えば、ラスタスキャンが可能な形式で記憶する。また、D/A変換器 33 は、画像メモリ 32 から読み出された画像データをアナログ信号に変換して出力する。

30

表示部 34 は、例えば、ラスタスキャン方式の CRT ディスプレイ又は LED ディスプレイであり、アナログ変換された画像信号に基づいて超音波画像を表示する。

操作卓 35 は、超音波送受信装置本体に種々の命令や情報を入力する際に用いられる。操作卓 35 は、キーボード、タッチパネル等の入力デバイスや、マウス等のポインティングデバイスや、可変 STC 用の調節ツマミや、入力ボタン等を含んでいる。

【 0 0 2 9 】

記録部 36 は、超音波送受信装置に含まれる CPU に動作を実行させるための基本プログラム及び種々の処理を行うためのプログラム（ソフトウェア）や、それらの処理に用いられる情報等を記録している記録媒体である。記録媒体としては、内蔵のハードディスクの他に、外付けハードディスク、フレキシブルディスク、MO、MT、RAM、CD-ROM、又は、DVD-ROM等を用いても良い。

40

なお、画像データ生成部 30 よりも後段に、ゲイン調整及びコントラスト調整を含む線形の階調処理や、補正を含む非線形な階調処理等の画像処理を施す画像処理部を設けても良い。

【 0 0 3 0 】

次に、本実施形態における超音波送受信の原理と、その原理を利用した画像データ生成部 30 の構成について、図 2 を参照しながら説明する。

図 2 に示すように、あるセクタ領域を超音波ビームによって所定のピッチで走査することにより、等時間面 SF 上に存在する物体（反射体）OB₀ ~ OB₅₉ に関する超音波情

50

報を取得する場合を考える。この場合に、そのセクタ領域に関する超音波情報は、60個の音線 $SB_0 \sim SB_{59}$ に対応する音線データによって表される。ここで、等時間面とは、超音波ビームが送信されてから所定の時間経過後に到達する面のことをいう。等時間面に含まれる複数の領域においては、超音波ビームの送信位置からの距離がほぼ等しいと考えられる。

【0031】

一般に、超音波トランスデューサアレイ10からある方向に向けて超音波ビームを送信すると、音圧強度の空間分布においては、それ以外の方向にも音圧が発生してしまう。例えば、図2に示すように、音線 SB_{25} 方向に超音波ビームを送信することにより、音線 SB_{25} 方向にメインローブが形成されるだけでなく、音線 SB_5 方向及び音線 SB_{45} 方向にサイドローブが形成される。図2には、そのような音圧強度分布を表すプロファイル PL_{25} が示されている。ここで、それぞれの音線方向の等時間面上における音圧強度は、強度プロファイル PL_{25} の上の点と超音波の送信位置との距離によって表されている。

10

【0032】

図2に示すように、超音波ビームの広がりにより、音線 SB_{25} 上の等時間面 SF における音線データの値(計測値)には、等時間面 SF 上に存在する物体 OB_{25} に関する超音波情報だけでなく、同時刻に受信された他の方向に関する情報、即ち、同じ等時間面 SF 上の物体 $OB_0 \sim OB_{24}$ 及び $OB_{26} \sim OB_{59}$ に関する超音波情報も含まれてしまう。即ち、音線 SB_{25} に関する音線データの値を SL_{25} とすると、次式(1)に示すように、計測値 SL_{25} は、物体 $OB_0 \sim OB_{59}$ において発生した超音波エコー信号の加算結果といえる。

20

$$SL_{25} = PL(25, 0) \times TL_0 + PL(25, 1) \times TL_1 + \dots \\ \dots + PL(25, 25) \times TL_{25} + \dots PL(25, 59) \times TL_{59} \dots (1)$$

ここで、 $PL(m, n)$ は、音線 SB_m 方向に超音波ビームを送受信することによって形成された音圧空間における音線 SB_n 方向の音圧強度を示しており、 TL_n は、音線 SB_n 方向に存在する物体 OB_n の反射率を示している。

【0033】

ここで、従来においては、超音波情報を取得する際に超音波ビームの広がりあまり考慮されておらず、次式(2)に示すように、計測値 $SL_0 \sim SL_{59}$ は、音線 $SB_0 \sim SB_{59}$ 方向に関する情報のみをそれぞれ表すものとして取り扱われていた。そのため、その結果得られた超音波画像は、アーティファクトを含む精度の低いものとなっている。

30

【数1】

$$\begin{pmatrix} SL_0 \\ SL_1 \\ SL_2 \\ \vdots \\ SL_m \\ \vdots \\ SL_{59} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P(0,0) & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P(1,1) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P(2,2) & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P(m,n) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & P(59,59) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} TL_0 \\ TL_1 \\ TL_2 \\ \vdots \\ TL_m \\ \vdots \\ TL_{59} \end{pmatrix}$$

40

… (2)

【0034】

これに対し、本実施形態においては、より現実に即して、式(1)に示すように、ある計測値 SL_n は音線 SB_n 方向以外の方向に関する情報を含むものとして取扱うことによ

50

り、超音波情報の精度を向上させている。

即ち、音線 $SB_0 \sim SB_{59}$ 方向に関する計測値 $SL_0 \sim SL_{59}$ を、それぞれの方向に関する強度プロファイル $PL_0 \sim PL_{59}$ における音圧強度 $PL(0,0) \sim PL(59,59)$ と、等時間面 SF 上に存在する物体 $OB_0 \sim OB_{59}$ の反射率 $TL_0 \sim TL_{59}$ とによって表すことにより、次式(3)に示す連立方程式が得られる。

【数2】

$$\begin{aligned}
 SL_0 &= P(0,0) \times TL_0 + P(0,1) \times TL_1 + \dots + P(0,n) \times TL_n + \dots + P(0,59) \times TL_{59} \\
 SL_1 &= P(1,0) \times TL_0 + P(1,1) \times TL_1 + \dots + P(1,n) \times TL_n + \dots + P(1,59) \times TL_{59} \\
 SL_2 &= P(2,0) \times TL_0 + P(2,1) \times TL_1 + \dots + P(2,n) \times TL_n + \dots + P(2,59) \times TL_{59} \\
 &\vdots \\
 SL_m &= P(m,0) \times TL_0 + P(m,1) \times TL_1 + \dots + P(m,n) \times TL_n + \dots + P(m,59) \times TL_{59} \\
 &\vdots \\
 SL_{59} &= P(59,0) \times TL_0 + P(59,1) \times TL_1 + \dots + P(59,n) \times TL_n + \dots + P(59,59) \times TL_{59}
 \end{aligned} \tag{3}$$

そこで、この連立方程式(3)を解いて反射率 $TL_0 \sim TL_{59}$ を求めることにより、物体 $OB_0 \sim OB_{59}$ に関し、より正確な超音波情報を得ることができる。

【0035】

このような連立方程式(3)は、次式(4)に示すような行列の関係式(線形方程式)に変形することができる。

【数3】

$$\begin{pmatrix} SL_0 \\ SL_1 \\ SL_2 \\ \vdots \\ SL_m \\ \vdots \\ SL_{59} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P(0,0) & P(0,1) & P(0,2) & \dots & P(0,n) & \dots & P(0,59) \\ P(1,0) & P(1,1) & P(1,2) & \dots & P(1,n) & \dots & P(1,59) \\ P(2,0) & P(2,1) & P(2,2) & \dots & P(2,n) & \dots & P(2,59) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ P(m,0) & P(m,1) & P(m,2) & \dots & P(m,n) & \dots & P(m,59) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ P(59,0) & P(59,1) & P(59,2) & \dots & P(59,n) & \dots & P(59,59) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} TL_0 \\ TL_1 \\ TL_2 \\ \vdots \\ TL_m \\ \vdots \\ TL_{59} \end{pmatrix} \tag{4}$$

さらに、計測値 $SL_0, SL_1, \dots, SL_{59}$ を成分とするベクトルを SL 、強度プロファイルにおける各位置の音圧強度 $PL(0,0), PL(0,1), \dots, PL(59,59)$ を成分とする行列を G 、反射率 $TL_0, TL_1, \dots, TL_{59}$ を成分とするベクトルを TL とすると、式(4)は、次のように表すことができる。

$$SL = G \times TL \quad \dots (4')$$

【0036】

式(4')において、行列 G が正則である場合には逆行列 G^{-1} を求め、式(4)の両辺に左側から作用させることにより、式(4'')に示すように、反射率ベクトル TL を算出することができる。

$$TL = G^{-1} \times SL \quad \dots (4'')$$

逆行列 G^{-1} の求め方としては、例えば、掃き出し法(ガウスの消去法)やこれを用いた LU 分解法を含む直接法や、 SOR 法を含む反復法等を用いることができる。なお、行列

Gが正則でない場合における線形方程式(4')の解き方については、後で説明する。

このような演算を、図2に示すセクタ領域内の各等時間面について行うことにより、あるフレームに関する超音波情報を得ることができる。

【0037】

再び、図1を参照すると、このような原理に基づいて画像データの生成を行う画像データ生成部30は、計測値算出部1と、行列演算部2と、デジタルスキャンコンバータ(DSC)3と、演算制御部4とを含んでいる。

計測値算出部1は、音線メモリ27に記憶されている音線データに基づいて、行列演算に用いられる計測値SLを算出する。ここで、超音波エコーの検出信号はノイズの影響を受け易いので、行列演算を行う際に音線データの値をそのまま用いると、計算精度が低下するおそれがある。そこで、本実施形態においては、図3に示すように、反射率算出用の計測値として、等時間面SF_kに対応する時刻t_kを含む所定の範囲(例えば、時刻t_kを中心とする範囲)tにおける積分値を用いている。それにより、SN比を高くして、算出された反射率の精度を向上させることができる。

【0038】

この積分範囲tの最適値は、被検体の条件等によって変化する。そのため、本実施形態においては、送信される超音波の周波数や演算対象となっている信号が取得された深さに応じ、制御部20の指示の下で、演算制御部4が積分範囲tの値を設定している。或いは、ユーザが操作卓35を用いて積分範囲tの値を調整できるようにしても良い。

【0039】

行列演算部2は、走査制御部21において設定された送信ビームの方向と、受信フォーカス処理における受信ビームの方向と、演算制御部4によって設定されたtの値とに基づいて、強度プロファイル記憶部31に記憶されている複数のプロファイルの中から所定の強度プロファイルを選択する。そして、その強度プロファイルにおける音圧強度を表す行列Gと、計測値算出部1によって算出された計測値SLとを用いて、式(4'')に示す反射率TLを求める演算を行う。それによって求められた反射率TLが、図2に示すセクタ領域に関するフレームデータのデータ値として用いられる。

【0040】

DSC3は、生成されたフレームデータについて走査フォーマットを変換することにより、超音波ビームの走査空間における音線データを、物理空間における表示用の画像データに変換する。即ち、DSC3は、画像表示範囲に対応するリサンプリングと、超音波の走査方式に対応する座標変換及び補間を行う。例えば、リニア走査によって得られたデータには、リニア画像を生成するための補間処理が施される。また、セクタ走査や、コンベックス走査や、ラジアル走査によって得られたデータには、極座標変換及び補間処理が施される。

演算制御部4は、制御部20の制御の下で、計測値算出部1において用いられる積分範囲tの値を設定すると共に、画像データ生成部30の各部1~3の動作を制御する。

【0041】

次に、本発明の第1の実施形態に係る超音波送受信方法について、図1~図6を参照しながら説明する。本実施形態においては、視野角60度の領域について、1度ピッチのセクタ走査を行う。図4は、本実施形態に係る超音波送受信装置の動作を示すフローチャートである。また、図5は、撮像対象であるセクタ領域を示している。

【0042】

図4のステップS1において、図1に示す超音波送受信装置は、制御部20によってフリーズ解除される。これにより、超音波トランスデューサアレイ10は、走査制御部21の制御の下で超音波ビームの送信を開始すると共に、被検体から反射された超音波エコーを受信し、検出信号を出力する。出力された検出信号は、信号処理部24~位相整合部26において所定の信号処理を受け、音線データとして音線メモリ27に記憶される。このような超音波の送受信を、超音波ビームの送信方向を1度ずつ変化させながら繰り返すことにより、音線メモリ27に1フレーム分の音線データが蓄積される(ステップS2)。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 3 】

ステップ S 3 において、画像データ生成部 3 0 は、 $k = 0$ として、図 5 に示す最初の等時間面 $S F_0$ における反射率の算出を開始する。ここで、 k は、等時間面の番号を表しており、等時間面 $S F_k$ における反射率は、超音波が送信されてから t_k 時間後に到達する深さ領域に関する情報を表す。そのために、まず、画像データ生成部 3 0 の演算制御部 4 は、ユーザによって入力された命令に基づいて、計測値算出部 1 及び行列演算部 2 に積分範囲 t の値を設定する。次に、ステップ S 4 において、計測値算出部 1 は、音線メモリ 2 7 に記憶されている音線データの各々について、図 3 に示すように、例えば、 $k = 0$ の場合に、時刻 t_0 を中心とする積分範囲 t について積分を行うことにより、計測値 $S L(0)_0$ 、 $S L(0)_1$ 、...、 $S L(0)_{59}$ を算出する。このようにして得られる計測値 $S L(k)_j$ ($j = 0 \sim 59$) は、等時間面 $S F_k$ に関する計測値ベクトル $S L(k)$ の成分となる。また、行列演算部 2 は、強度プロファイル記憶部 3 1 から、積分範囲 t に応じた等時間面 $S F_k$ に関する強度プロファイルを読み出し、音圧強度 $P L_k(0, 0) \sim P L_k(59, 59)$ を成分とする行列 $G(k)$ を取得する。

10

【 0 0 4 4 】

次に、ステップ S 5 において、行列演算部 2 は、行列 $G(k)$ の逆行列 $G(k)^{-1}$ を算出し、ステップ S 6 において、式 $T L(k) = G(k)^{-1} \times S L(k)$ を利用して、等時間面 $S F_k$ における反射率 $T L(k)_0 \sim T L(k)_{59}$ を成分とする反射率ベクトル $T L(k)$ を求める。なお、強度プロファイル記憶部 3 1 に、行列 $G(k)$ に対応する逆行列 $G(k)^{-1}$ を予め記憶させておくことにより、ステップ S 5 を省略することができる。

20

【 0 0 4 5 】

図 6 は、ステップ S 5 において求められた反射率の算出結果を表す図である。図 6 の (a) に示すように、この算出結果は、視野角範囲 60 度 (± 30 度) のセクタ領域に、深さ 70 mm の等時間面の視野角 0 度及び 10 度の位置に反射体をそれぞれ配置し、48 個の超音波トランスデューサを含むアレイから、70 mm の深さに焦点を合わせて送信される超音波ビームにより、上記セクタ領域を 1 度ピッチで走査するシミュレーションにより得られたものである。ここで、従来の方法、即ち、音線データの値を単に超音波ビームの強度によって規格化する方法を用いた場合には、図 6 の (c) に示すように、算出された反射率は、超音波ビームの広がりによる影響を受けるので、方位分解能が低下してしまう。これに対して、ステップ S 5 において説明した方法を用いた場合には、図 6 の (b) に示すように、超音波ビームの広がりによる影響が排除されるので、視野角 0 度又は 10 度を含む狭い範囲のみにおいて反射率の値が現れ、方位分解能が著しく向上していることが分かる。

30

【 0 0 4 6 】

再び、図 4 を参照すると、ステップ S 7 において、演算制御部 4 は、等時間面の番号 k をインクリメントし、ステップ S 8 において、インクリメントされた k の値が、トータルの等時間面の数 K よりも小さいか否かの判定を行う。そして、判定の結果が $k < K$ であった場合には、処理はステップ S 4 に移行し、次の等時間面 $S F_k$ ($k = 1$) における反射率の算出を開始する。さらに、ステップ S 4 ~ S 7 を繰り返すことにより、等時間面 $S F_k$ ($k = 1, 2, \dots, K - 2, K - 1$) における反射率ベクトル $T L(1)$ 、 $T L(2)$ 、...、 $T L(K - 2)$ 、 $T L(K - 1)$ を求める。図 5 に示すように、このようにして取得された反射率ベクトルの成分である反射率 $T L(k)_j$ ($k = 0 \sim 59$ 、 $j = 0 \sim 59$) は、音線 $S B_j$ と等時間面 $S F_k$ とが交差する領域に関する超音波情報を表している。

40

【 0 0 4 7 】

一方、ステップ S 8 における判定の結果が $k = K$ となった場合には、ステップ S 9 において、画像データの生成が行われる。即ち、行列演算部 2 は、反射率ベクトル $T L(k)$ の成分である反射率 $T L(k)_j$ 、又は、その対数値 $\log T L(k)_j$ を D S C 3 に出力する。その際に、演算制御部 4 は、ユーザの選択に従い、反射率又はその対数値のいずれかを出力させるための制御信号を行列演算部 2 に出力する。ユーザは、例えば、計算結

50

果が直接的に表された画像を表示させたい場合には、反射率を選択すれば良く、一般的な超音波撮像装置におけるBモード画像に近い画像を表示させたい場合には、反射率の対数値を選択すれば良い。

【0048】

次に、DSC3は、行列演算部2から出力された反射率 $TL(k)_j$ 又はその対数値 $\log TL(k)_j$ を量子化すると共に、超音波ビームの走査空間におけるデータを物理空間における表示用の画像データに変換するために、画像メモリ32におけるアドレスを算出してそれらのデータに与え、画像メモリ32に出力する。これにより、反射率 $TL(k)_j$ 又はその対数値 $\log TL(k)_j$ に基づいて生成された画像データは、音線 SB_j 上の等時間面 SF_k における領域に対応するメモリ領域(SB_j 、 SF_k)に記憶される。

10

【0049】

このように、ステップS9においては、1フレーム分の音線データに基づいて、1つの断面に関する超音波情報を表す画像データが生成される。この画像データを、D/A変換器33によりアナログ変換し、表示部34に出力することにより、表示部34の画面に超音波画像が表示される。

さらに、ステップS10において、図1に示す制御部20は、超音波送受信装置をフリーズするか否かを判定し、フリーズしない場合には、動作はステップS2に移行し、ステップS2～S9において、異なるフレームに関する画像データの生成が行われる。

【0050】

20

以上説明したように、本実施形態によれば、1フレーム分の音線データと予め記憶されている強度プロファイルとに基づいて算出された反射率データを用いて超音波画像を生成するので、超音波ビームの広がりやサイドローブの影響を低減し、方位分解能を向上させることができる。また、その際に用いられる強度プロファイルに超音波の距離減衰分を含め、取得された超音波情報を反射率によって表すことにより、信号処理系に固定STCを設ける必要がなくなり、信号処理系を簡単にすることができる。さらに、反射率算出用の計測値として積分値を用いるので、ノイズの影響を低減して反射率の精度をさらに良くすることが可能になる。

【0051】

次に、本発明の第2の実施形態に係る超音波送受信装置について、図7及び図8を参照しながら説明する。

30

図7は、本実施形態に係る超音波送受信装置の構成を示すブロック図である。この超音波送受信装置は、図1に示す超音波送受信装置に対して、演算制御部4の制御の下で動作するプロファイル補正部40をさらに有している。その他の構成については、図1に示す超音波送受信装置と同様である。

【0052】

ここで、超音波撮像においては、骨のように反射率の高い物体を観察する場合や、そのような物体が撮像領域内に存在する場合に、その物体が存在する等時間面よりも深部に関する強度プロファイルが影響を受けて変化してしまう。例えば、反射率の高い物体の裏側においては超音波ビームが大きく減衰してしまうので、そのような領域に反射体が存在していたとしても、情報を取得することができない。従って、そのような領域については、強度プロファイルを補正する必要がある。そのため、本実施形態においては、強度プロファイル記憶部31に記憶されている強度プロファイルの値を補正するプロファイル補正部40を設けている。

40

【0053】

図8は、本実施形態に係る超音波送受信装置の動作を示すフローチャートである。

図8のステップS20において、ユーザは、図1に示す操作卓35を用いて反射率の閾値 TL_s を指定する。ユーザは、被検体に関する様々な条件(例えば、撮像部位等)に応じて、この閾値 SL_s の大きさを随時調整することができる。これに応じて、画像データ生成部30の演算制御部4は、プロファイル補正部40に対して反射率の閾値 SL_s を設

50

定する。

【0054】

次に、ステップS1～S6において、第1の実施形態において説明したのと同様に、超音波の送受信を行い、検出信号について所定の処理を行うことにより、等時間面SF(k)における反射率TL(k)₀、TL(k)₁、...を求める。

【0055】

次に、ステップS21において、プロファイル補正部40は、算出された反射率TL(k)₀、TL(k)₁、...の各々が、反射率の閾値SL_Sよりも大きいかなんかを判定する。そして、プロファイル補正部40は、それらの反射率TL(k)₀、TL(k)₁、...のいずれかが閾値SL_Sよりも大きい場合に、ステップS22において、強度プロファイル記憶部31に記憶されている次の等時間面SF(k+1)に関する強度プロファイルを表す行列G(k+1)を補正する。或いは、強度プロファイル記憶部31に逆行列G(k+1)⁻¹が記憶されている場合には、その逆行列を補正する。

10

【0056】

一方、ステップS21における判定の結果、等時間面SF(k)における反射率TL(k)₀、TL(k)₁、...のいずれも閾値SL_Sよりも大きくない場合には、処理はステップS7に移行する。さらに、ステップS7～S10において、第1の実施形態において説明したのと同様にして、画像データを生成する。

このように、本実施形態においては、直前の等時間面における反射率に基づいて強度プロファイルを補正するので、反射率の高い物体の影になる領域についても、正確な超音波情報を取得することができる。

20

【0057】

次に、本発明の第3の実施形態に係る超音波送受信方法について説明する。本実施形態に係る超音波送受信方法は、図1又は図7に示す超音波送受信装置において用いることができる。

先に説明した本発明の第1の実施形態においては、式(3)や(4)を用いて反射率が算出される。これらの式(3)や(4)においては、未知数(反射率)の数と方程式の数が一致しているので、未知数が一意に定まる。しかしながら、複数の計測値の内には信頼性の低いデータが含まれている可能性があり、1つのデータの信頼性が低い場合においても、全ての反射率の推定精度が落ちてしまう。そこで、本実施形態においては、解の安定性を高めるために、方程式の数が未知数の数よりも多くなるように連立方程式を構成する。

30

【0058】

連立方程式を構成する式の数を増やすためには、所定の領域に関する複数種類の計測値と、その領域に関する異なる複数種類の強度プロファイルを用意する必要がある。そのためには、例えば、以下の3つの方法が考えられる。

【0059】

(1) 受信フォーカスにおける位相遅延量を変化させる方法

図9に示すように、取得された一連の検出信号について、音線SB_A方向に受信ビーム(実線)が形成されるように受信フォーカス処理を行うことにより、計測値SL_Aを得ることができる。また、同じ一連の検出信号について、音線SB_B方向に受信ビーム(破線)が形成されるように位相遅延量を変化させて受信フォーカス処理を行うことにより、計測値SL_A'を得ることができる。さらに、それらの受信フォーカス処理において用いられた遅延パターンに対応する強度プロファイルを表す行列G_A及びG_Bをそれぞれ作成することにより、等時間面SF_k上の音線SB_A方向における反射率TL(k)を未知数とする連立方程式(5)を作成することができる。

40

$$SL(k)_A = G(k)_A \times TL(k)$$

$$SL(k)_A' = G(k)_B \times TL(k) \quad \dots (5)$$

【0060】

(2) 受信開口径を変化させる方法

50

図10に示すように、取得された一連の検出信号について行われる受信フォーカス処理において、超音波エコーを受信する超音波トランスデューサアレイの開口径を変化させることにより、受信ビーム径の異なる計測値 $SL(k)$ 及び $SL(k)'$ を取得する。また、それらの開口径に対応する強度プロファイルを表す行列 $G(k)$ 及び $G(k)'$ を作成する。これにより、等時間面 SF_k における反射率 $TL(k)$ を未知数とする連立方程式(6)を作成することができる。

$$SL(k) = G(k) \times TL(k)$$

$$SL(k)' = G(k)' \times TL(k) \quad \dots (6)$$

【0061】

(3) 等時間面 $SF(k)$ の近傍に超音波ビームの受信焦点を形成する方法 10

図11に示すように、取得された一連の検出信号について、等時間面 SF_k とその近傍の等時間面 SF_{k_1} 及び SF_{k_2} に受信焦点を形成するように焦点深度の異なる受信フォーカス処理を施すことにより、等時間面 SF_k 上の領域に関する3種類の計測値 $SL(k)$ 、 $SL_{k_1}(k)$ 、及び、 $SL_{k_2}(k)$ を取得することができる。また、それらの受信フォーカス処理に対応する強度プロファイルをそれぞれ表す行列 $G(k)$ 、 $G_{k_1}(k)$ 、及び、 $G_{k_2}(k)$ を作成する。これにより、等時間面 SF_k における反射率 $TL(k)$ を未知数とする連立方程式(7)を作成することができる。

$$SL_{k_1}(k) = G_{k_1}(k) \times TL(k)$$

$$SL(k) = G(k) \times TL(k)$$

$$SL_{k_2}(k) = G_{k_2}(k) \times TL(k) \quad \dots (7)$$

20

【0062】

このような解の数よりも方程式の数が多い連立方程式(過剰条件方程式)は、例えば、最小自乗法や一般逆行列を用いることにより、精度の高い解 $TL(k)$ を求めることができる。以下において、次式(8)に示す線形方程式の一般逆行列を用いた解法について、詳しく説明する。式(8)において、 b は、 m 個の成分を有する既知のベクトルであり、 x は、 m 個の成分を有する未知のベクトルであり、 A は、 $m \times n$ 型($m > n$)の行列である。

$$b = A x \quad \dots (8)$$

【0063】

ここで、 $m \times n$ 型の行列 A に対して、 $A X A = A$ を満たす行列 X は、一般逆行列と呼ばれる。一般逆行列 X は、式(8)のベクトル x に対する最小自乗解を与える。しかしながら、一般逆行列 X によって与えられる解は一般的な解であり、一意には定まらない。 30

【0064】

そこで、一般逆行列 X に対して、一般逆行列の条件 $A X A = A$ に加え、下記の3条件を与える。

$$X A X = X \quad \dots (9)$$

$$(X A)^T = X A \quad \dots (10)$$

$$(A X)^T = A X \quad \dots (11)$$

ここで、行列 K^T は、行列 K の転置行列を意味する。

これらの条件(9)~(11)を全て満足する行列 X をムーア-ペンローズ(MP)の一般逆行列と呼び、 A^+ と表す。MP一般逆行列 A^+ は、行列 A の最小自乗解が不定の場合に、ベクトル x のノルム最小という条件を用いて一般逆行列を一意に定めるものである。即ち、MP一般逆行列を用いることにより、連立方程式の精度の高い解を求めることができる。 40

【0065】

MP一般逆行列 A^+ は、特異値分解法(singular value decomposition: SVD法)によって求めることができる。まず、 $m \times n$ 型の行列 A をハウスホルダ(Householder)変換によって2重対角化し、さらに、QR法によって対角化して r 個の固有値 λ_1 、 λ_2 、 \dots 、 λ_r を求める。これにより、特異値 $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ が求められる。この σ_i を対角要素として持つ r 次の対角行列を Σ とする。また、対応する対称行列 $A A^T$ 及び $A^T A$ の正規 50

化された固有ベクトルを順に並べた $m \times r$ 行列、及び、 $n \times r$ 行列を、それぞれ U 、 V とする。これらを用いて、 A は、式 (12) のように分解される。

$$A = U V^T \dots (12)$$

このとき、MP一般逆行列 A^+ は、次 (13) のように表される。

$$A^+ = V^+ U^T \dots (13)$$

ここで、 V^+ は $n \times m$ 対角行列であり、 V の対角要素を v_i としたとき、 V^+ の対角要素 v_i^+ は、次のように表される。

$$v_i^+ = 1 / v_i \quad (v_i \neq 0)$$

$$v_i^+ = 0 \quad (v_i = 0)$$

【0066】

式 (8) 及び (13) より、ベクトル x は式 (14) によって求められる。

$$x = A^+ b = V^+ U^T b \dots (14)$$

実際の計算においては、行列 A のランクを落とし、圧縮された行列 A_0 を用いて MP一般逆行列を求めることが望ましい。連立方程式における不安定条件緩和、即ち、項に含まれるノイズを抑制するためである。

【0067】

次に、連立方程式の不安定条件緩和について詳しく説明する。

誤差を含まない真のベクトルを b_0 、求めるべき真のベクトルを x_0 、ノイズを含まない真のボケ関数を A_0 とする。真のベクトル x_0 にボケ関数 A_0 を作用させることにより、真の既知ベクトル b_0 が得られる。

$$b_0 = A_0 x_0 \dots (8')$$

これに対して、式 (8) におけるベクトル b 及びボケ関数 A は、次のように表される。

$$b = b_0 + k \dots (15)$$

$$A = A_0 + \Delta A \dots (16)$$

ここで、 k はベクトル b の誤差を成分とするベクトルである。また、 ΔA はボケ関数の誤差であり、 A_0 は真のボケ関数である。

【0068】

式 (8)、(8')、(15)、(16) を用いると、ベクトル b は、式 (17) によって表される。

$$b = b_0 + k = A_0 x_0 + k$$

$$= (A - \Delta A) x_0 + k$$

$$= A x_0 - \Delta A x_0 + k$$

$$b = A x_0 + \dots (17)$$

ここで、 $\Delta A x_0$ は等価雑音であり、 $\Delta A x_0 = -\Delta A x_0 + k$ と表される。

このように、ボケ画像から原画像を求める線形逆問題は、ベクトル b から未知のベクトル x_0 を推定することに置き換えられる。

【0069】

ここで、式 (17) の両辺に MP一般逆行列 A^+ を作用させる。

$$x = A^+ b = A^+ A x_0 + A^+ \Delta A x_0 \dots (18)$$

式 (18) より明らかなように、例えば、 A が少し振られると x が大きく変化してしまう場合には、 A^+ が極端に大きくなってしまふ。そのような場合に、 $x = A^+ b = x_0 + A^+ \Delta A x_0$ を x_0 の推定値として用いることは適当でない。そこで、精度の高い解を求めるために、行列のランクを低減することが望ましい。

【0070】

式 (12) 及び (13) に示す行列 A 及び A^+ の特異値分解は、次のように表現することができる。

10

20

30

40

【数4】

$$A = \sum_{r=1}^R \kappa_r w_r v_r^T \quad \dots (19)$$

$$A^+ = \sum_{r=1}^R \kappa_r^{-1} v_r w_r^T \quad \dots (20)$$

ここでRは行列Aのランクを表し($R = \text{Rank}(A)$)、 $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_R$ は行列Aの特異値であり、 $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_R > 0$ である。また、 w_r は、対応する AA^T の正規化された固有ベクトルであり、 v_r は、対応する $A^T A$ の正規化された固有ベクトルである。さらに、 κ_r^{-1} は、特異値の逆数である。

10

【0071】

式(19)において、特異値 κ_r ($r = 1, 2, \dots, R$)の内、大きいものからQ個残すことによって得られる行列を、行列AをランクQで近似した行列 A_Q とする。

【数5】

$$A_Q = \sum_{r=1}^Q \kappa_r w_r v_r^T$$

$$A_Q^+ = \sum_{r=1}^Q \kappa_r^{-1} w_r v_r^T \quad \dots (21)$$

20

これより、真の原データ近似ベクトル x_Q は、近似された行列 A_Q のMP一般逆行列 A_Q^+ を用いて、式(22)によって推定することができる。

$$x_Q = A_Q^+ b \quad \dots (22)$$

【0072】

このように、行列Aのランクを落とすことにより、不安定条件を緩和することができる。しかしながら、ランク低減の度合いによっては、誤差が増幅されてしまう場合がある。ランクを落とさない行列A(ランクR)によって推定される原データ推定ベクトル x_R は、式(17)を用いて、次のように表される。

30

【数6】

$$x_R = A^+ b$$

$$= A^+(Ax_0 + \epsilon)$$

$$x_R = \sum_{r=1}^R \left((x_0)_r + \kappa_r^{-1} \epsilon_r \right) v_r \quad \dots (23)$$

式(23)より明らかなように、小さい特異値は、等価雑音をより増幅させる。そのため、小さい特異値を切り捨てるように行列Aのランクを落とすことにより、推定値の真値 x_0 との近似度やノイズの増幅度を変化させることができる。

40

【0073】

原データの真値を成分とするベクトル x_0 の推定値として、ランクAの行列によって求められたベクトル x_R を用いる場合に、自乗推定誤差 S_R を、原データ推定ベクトル x_R と真の原データベクトル x_0 との差ベクトルのノルム $\|x_R - x_0\|$ を用いて、次のように定義する。

【数 7】

$$S_R = \|x_R - x_0\|^2 = \sum_{n=1}^N ((x_R)_n - (x_0)_n)^2$$

ここに、式(23)を代入する。ただし、 $1 \leq r \leq R < N$ より、 $n = 1 \sim R$ 、 $R + 1 \sim N$ とした。

【数 8】

$$S_R = \sum_{n=1}^R ((x_R)_n - (x_0)_n)^2 + \sum_{n=R+1}^N ((x_R)_n - (x_0)_n)^2 \quad 10$$

【0074】

ここで、式(23)においては $1 \leq r \leq R$ なので、 $r > R$ の場合には、ベクトル $v_R = 0$ になる。従って、上式の第2項($R + 1 \leq n \leq N$)において、ベクトル $x_R = 0$ となる。これより、式(24)が得られる。

【数 9】

$$\begin{aligned} S_R &= \sum_{n=1}^R ((x_0)_n + \kappa_n^{-1} \epsilon_n - (x_0)_n)^2 + \sum_{n=R+1}^N (-(x_0)_n)^2 \quad 20 \\ &= \sum_{r=1}^R (\kappa_r^{-1} \epsilon_r)^2 + \sum_{n=R+1}^N (x_0)_n^2 \quad \cdots (24) \end{aligned}$$

【0075】

式(24)の第1項は、雑音の混入によって生じる誤差であり、 ϵ_n をほぼ一定とすることにより推定することができる。しかしながら、第2項は、真の原データベクトル x_0 が不明なので、原理的には推定不可能である。一方、定性的には、ランク R を落とすと第1項は減少し、第2項は増加することが知られている。即ち、原データベクトルを推定するための最適なランク R が存在することになる。 30

【0076】

ランク R の最適値は、次のように判断することができる。ランクが低減された行列 A_Q によって算出される解ベクトル(原データ近似ベクトル) x_Q と、真の原データベクトル x_0 との自乗推定誤差 S_Q は、式(25)によって表される。

【数 10】

$$\begin{aligned} S_Q &= \|x_Q - x_0\|^2 \\ &= \sum_{n=1}^Q (\kappa_n^{-1} \epsilon_n)^2 + \sum_{n=Q+1}^N (x_0)_n^2 \quad 40 \end{aligned}$$

式(24)を代入すると、

$$S_Q = S_R - \sum_{n=Q+1}^R \kappa_n^{-2} \epsilon_n^2 + \sum_{n=Q+1}^R (x_0)_n^2 \quad \cdots (25)$$

式(25)より、 $S_R - S_Q$ が正の場合に、原データ近似ベクトル x_Q は原データ推定ベクトル x_R より優れた推定値、即ち、より真の原データに近い値であると判断される。

【0077】

次に、 $S_R > S_Q$ が平均的に成立するか否かを判断するために、確率密度関数を導入す 50

る。

【数 1 1】

$$\Delta Q = \langle S_R \rangle - \langle S_Q \rangle$$

$$\Delta Q = \sum_{n=Q+1}^R \left(\kappa_n^{-2} \langle \varepsilon_n \rangle^2 - \langle (x_0)_n \rangle^2 \right) \cdots (26)$$

ここで、 $\langle \cdot \rangle$ は、確率密度関数を表す。確率密度関数を $f(n) = \langle \cdot \rangle$ とすると、確率密度関数は次のような性質を有している。

【数 1 2】

$$\sum_{n=1}^{\infty} f(n) = 1$$

式(26)において、 $Q > 0$ の場合に、原データ近似ベクトル x_Q は原データ推定ベクトル x_R より優れた推定値であると判断すれば良い。式(26)においては、等価雑音及び原データベクトルの確率密度関数が用いられている。 Q を厳密に評価する場合には、これらの確率密度関数を求めておくことが望ましい。

【0078】

一方、 Q を評価するために確率密度関数を求めていると、計算量が多くなるという問題が生じる。そのため、実際の計算においては、特異値を切り捨てる閾値を調節しつつ解の良し悪しを判断することにより、最適なランク Q を設定することが望ましい。この閾値は、超音波撮像の対象である部位や超音波の送受信条件によってある程度決定されるので、図1に示す操作卓35を用いてユーザが調整したり、超音波ビームの送信方向等に応じて制御部20が設定できるようにすることが望ましい。

【0079】

以上説明したように、MP一般逆行列を用いることにより、行列Aの条件に関わらず、線形方程式(8)を解くことができる。

なお、本発明の第1の実施形態においても、行列Aが正則でない正方行列の場合には、MP一般逆行列を用いることにより、反射率の算出することができる。さらに、行列Aが正方且つ正則の場合にも、MP一般逆行列を用いても良い。

【0080】

以上説明した本発明の第1～第3の実施形態においては、超音波ビームを1本ずつ送信しているが、同時に複数の超音波ビームを異なる方向に送信するマルチビーム送信を行っても良い。マルチビーム送信は、図12を用いて説明したように、複数の超音波トランスデューサを駆動するための遅延パターンを組み合わせることにより行うことができる。その場合には、1フレーム分の音線データを高速に取得することができるので、超音波画像を高速に表示できるだけでなく、各フレーム間における微小な時間差を小さくすることができるので、より良質な超音波画像をリアルタイムに表示させることが可能になる。

【産業上の利用可能性】

【0081】

本発明は、医療や構造物の非破壊検査に用いられる超音波診断装置において利用可能である。

【図面の簡単な説明】

【0082】

【図1】本発明の第1の実施形態に係る超音波送受信装置の構成を示すブロック図である。

【図2】本発明の第1の実施形態に係る超音波送受信の原理を説明するための図である。

【図 3】反射率算出用の計測値を求める方法を説明するための図である。

【図 4】図 1 に示す超音波送受信装置の動作を示すフローチャートである。

【図 5】本発明の第 1 の実施形態において走査される領域を示す図である。

【図 6】反射率の算出結果を表す図である。

【図 7】本発明の第 2 の実施形態に係る超音波送受信装置の構成を示すブロック図である。

【図 8】図 7 に示す超音波送受信装置の動作を示すフローチャートである。

【図 9】本発明の第 3 の実施形態に係る超音波送受信方法において、連立方程式を構成する式の数を増やす第 1 の方法を説明するための図である。

【図 10】本発明の第 3 の実施形態に係る超音波送受信方法において、連立方程式を構成する式の数を増やす第 2 の方法を説明するための図である。

10

【図 11】本発明の第 3 の実施形態に係る超音波送受信方法において、連立方程式を構成する式の数を増やす第 3 の方法を説明するための図である。

【図 12】図 12 の (a) は、従来の超音波探触子に含まれる超音波トランスデューサアレイから超音波ビームが送信される様子を示す模式図であり、図 12 の (b) は、それぞれの超音波トランスデューサに印加されるタイミングパルスを示す図である。

【符号の説明】

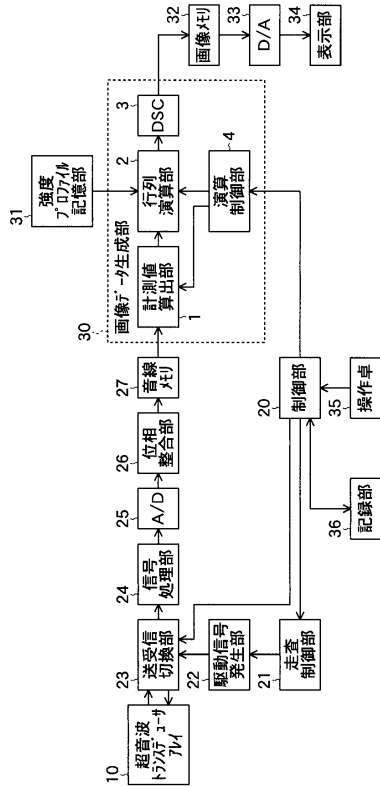
【 0 0 8 3 】

- 1 計測値算出部
- 2 行列演算部
- 3 デジタルスキャンコンバータ (D S C)
- 4 演算制御部
- 1 0、1 0 0 超音波トランスデューサアレイ
- 2 0 制御部
- 2 1 走査制御部
- 2 2 駆動信号発生部
- 2 3 送受信切換部
- 2 4 信号処理部
- 2 5 A / D 変換器
- 2 6 位相整合部
- 2 7 音線メモリ
- 3 0 画像データ生成部
- 3 1 強度プロファイル記憶部
- 3 2 画像メモリ
- 3 3 D / A 変換器
- 3 4 表示部
- 4 0 プロファイル補正部
- 1 0 1 超音波トランスデューサ

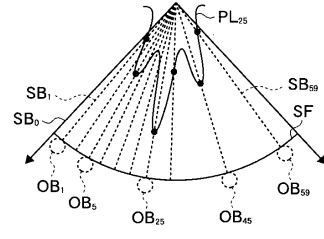
20

30

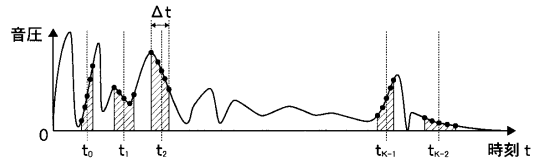
【図1】



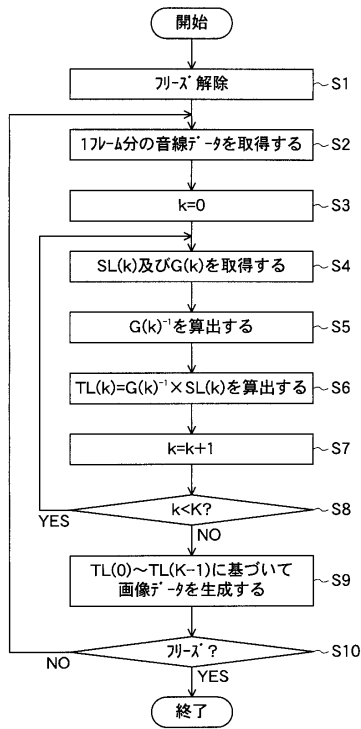
【図2】



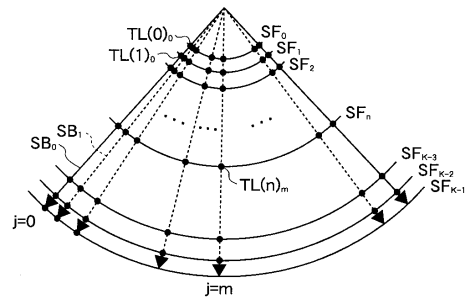
【図3】



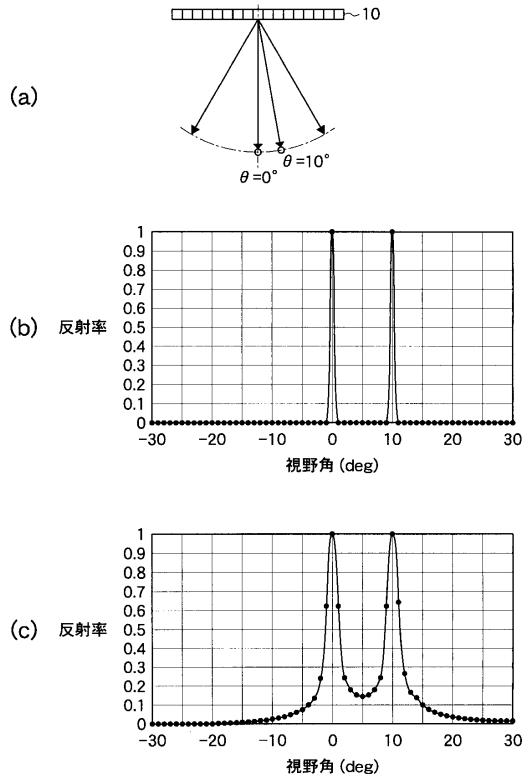
【図4】



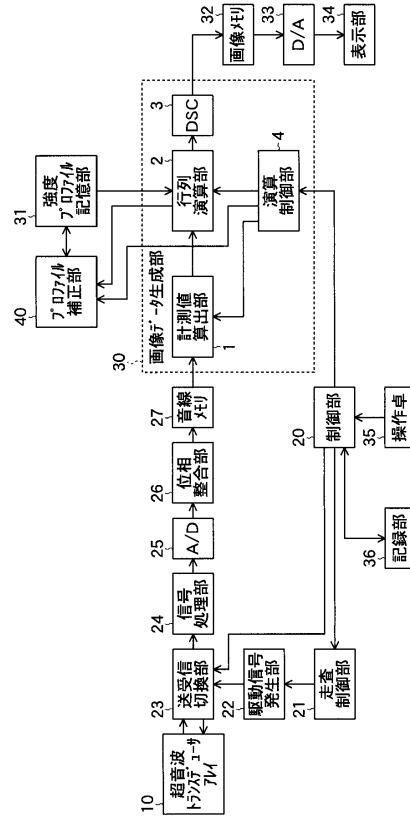
【図5】



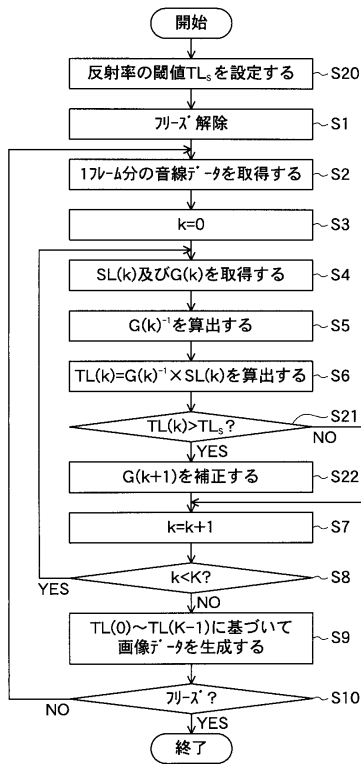
【図6】



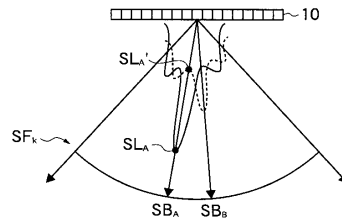
【図7】



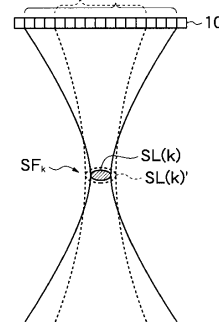
【図8】



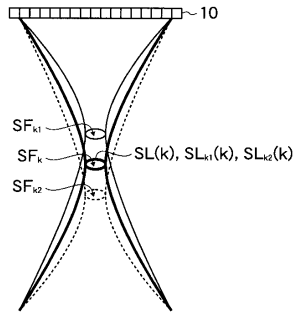
【図9】



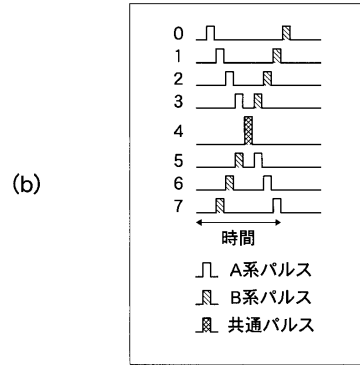
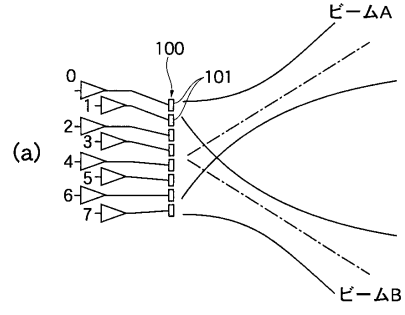
【図10】



【図 1 1】



【図 1 2】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特許第4244300(JP, B2)
特開平08-038472(JP, A)
特開平10-146337(JP, A)
特開平10-118063(JP, A)
特開昭56-136537(JP, A)
特開昭57-112850(JP, A)
特開平04-244145(JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
A61B 8/00
G01N 29/26

专利名称(译)	超声波送受信装置		
公开(公告)号	JP4494089B2	公开(公告)日	2010-06-30
申请号	JP2004164116	申请日	2004-06-02
[标]申请(专利权)人(译)	富士胶片株式会社		
申请(专利权)人(译)	富士胶片有限公司		
当前申请(专利权)人(译)	富士胶片株式会社		
[标]发明人	佐藤良彰		
发明人	佐藤 良彰		
IPC分类号	A61B8/00 G01N29/26		
FI分类号	A61B8/00 G01N29/26.503 A61B8/14		
F-TERM分类号	2G047/BA03 2G047/BC07 2G047/BC13 2G047/CA01 2G047/DA02 2G047/DB02 2G047/EA07 2G047/GB02 2G047/GF17 2G047/GF18 2G047/GF20 2G047/GF22 2G047/GF31 2G047/GG14 2G047/GG19 2G047/GG33 2G047/GG34 2G047/GG41 4C601/BB02 4C601/EE04 4C601/GB04 4C601/HH22 4C601/HH27 4C601/HH28 4C601/HH29 4C601/HH30 4C601/JB05 4C601/JB40 4C601/JB46 4C601/JB51 4C601/LL05		
代理人(译)	宇都宫正明		
审查员(译)	川上 则明		
其他公开文献	JP2005342140A		
外部链接	Espacenet		

摘要(译)

要解决的问题：提供能够提供超声波图像的超声波收发器，以减少旁瓣的影响。ZOLUTION：该超声波收发器包括：超声波换能器阵列，包括多个超声波换能器；驱动信号发生部分，分别产生驱动多个超声波换能器的驱动信号；扫描控制部分，控制驱动信号发生部分，使得超声波从多个超声波换能器形成超声波束，相位匹配部分通过对由多个超声波换能器检测到的多个检测信号进行接收聚焦处理，找到与被检体中的多个区域相关的一组测量值，声学存储该组测量值的光线存储器，通过发送超声波束形成的声压强度分布，存储基于由信号处理装置执行的接收聚焦处理设置的多个不同声压强度分布的强度分布存储部分，矩阵运算部基于该组测量值和多个不同的声压强度分布计算与多个区域相关的图像数据。Z

$$\begin{pmatrix} SL_0 \\ SL_1 \\ SL_2 \\ \vdots \\ SL_m \\ \vdots \\ SL_{59} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P(0,0) & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P(1,1) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P(2,2) & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P(m,n) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & P(59,59) \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} TL_0 \\ TL_1 \\ TL_2 \\ \vdots \\ TL_m \\ \vdots \\ TL_{59} \end{pmatrix}$$