

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7589121号
(P7589121)

(45)発行日 令和6年11月25日(2024.11.25)

(24)登録日 令和6年11月15日(2024.11.15)

(51)国際特許分類	F I			
G 0 1 N 29/04 (2006.01)	G 0 1 N	29/04		
G 0 1 N 29/44 (2006.01)	G 0 1 N	29/44		
G 0 6 T 7/00 (2017.01)	G 0 6 T	7/00	6 1 0 Z	
	G 0 6 T	7/00	3 5 0 B	

請求項の数 11 (全27頁)

(21)出願番号	特願2021-135295(P2021-135295)	(73)特許権者	000003078
(22)出願日	令和3年8月23日(2021.8.23)		株式会社東芝
(65)公開番号	特開2023-30258(P2023-30258A)		東京都港区芝浦一丁目1番1号
(43)公開日	令和5年3月8日(2023.3.8)	(73)特許権者	317015294
審査請求日	令和6年3月1日(2024.3.1)		東芝エネルギーシステムズ株式会社
			神奈川県川崎市幸区堀川町7番地34
		(74)代理人	110001380
			弁理士法人東京国際特許事務所
		(72)発明者	高橋 菜太
			神奈川県川崎市幸区堀川町7番地34
			東芝エネルギーシステムズ株式会社内
		(72)発明者	大塚 優
			神奈川県川崎市幸区堀川町7番地34
			東芝エネルギーシステムズ株式会社内
		(72)発明者	星 岳志
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 ボクセルデータ評価システムおよびボクセルデータ評価方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

検査の対象となる対象物に含まれる検出対象の探傷を行う探傷装置により得られるデータまたはこれを模して生成されるデータの少なくとも一方であり、機械学習に用いられる複数の学習用データを取得する学習用データ取得部と、

それぞれの前記学習用データに存在する前記検出対象の特定の領域を示す特定共通領域を前記検出対象の位置として設定した教師ラベルを生成する教師ラベル生成部と、

前記学習用データとそれぞれの前記学習用データに対応する前記教師ラベルとを用いて、前記検出対象が存在するか否かを判定可能な判定値を、データ中の位置を示す単位ごとに算出可能な判定モデルを生成する判定モデル生成部と、

前記探傷装置により得られるボクセルデータであり、判定に用いられる判定用データを取得する判定用データ取得部と、

前記判定モデルを用いて、前記判定用データ中の位置を示す前記単位ごとに前記判定値を算出する判定部と、

を備える、

ボクセルデータ評価システム。

【請求項2】

前記探傷装置を用いて前記対象物を探傷して得られる複数の画像を前記探傷した位置に対応付けた状態で重ね合わせて3次元的なデータを生成可能な3次元データ生成部を備える、

請求項 1 に記載のボクセルデータ評価システム。

【請求項 3】

前記判定用データは、前記探傷装置を用いて前記対象物を探傷して得られる複数の画像に基づいて、前記 3 次元データ生成部が生成するものである、

請求項 2 に記載のボクセルデータ評価システム。

【請求項 4】

前記学習用データは、前記探傷装置により得られる画像またはこれを模して生成される画像の少なくとも一方である学習用画像であり、

前記教師ラベル生成部は、前記学習用画像に対応する 2 次元の前記教師ラベルを生成し、

前記 3 次元データ生成部は、複数の前記学習用画像とそれぞれの前記学習用画像に対応する前記教師ラベルとを用いて、3 次元の前記学習用データとこれに対応する 3 次元の前記教師ラベルとを生成する、

請求項 2 または請求項 3 に記載のボクセルデータ評価システム。

【請求項 5】

前記学習用データは、前記探傷装置により得られるボクセルデータまたはこれを模して生成されるボクセルデータの少なくとも一方である、

請求項 1 から請求項 3 のいずれか 1 項に記載のボクセルデータ評価システム。

【請求項 6】

前記探傷装置は、超音波を用いて探傷を行う超音波探傷装置であり、

前記特定共通領域の最大長は、前記探傷装置が用いた前記超音波の周波数の波長の 4 分の 1 以上である、

請求項 1 から請求項 5 のいずれか 1 項に記載のボクセルデータ評価システム。

【請求項 7】

前記特定共通領域は、前記検出対象の端部である、

請求項 1 から請求項 6 のいずれか 1 項に記載のボクセルデータ評価システム。

【請求項 8】

前記判定用データから算出された前記判定値に基づいて生成された判定済データから前記検出対象の位置を抽出する抽出部をさらに備える、

請求項 1 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載のボクセルデータ評価システム。

【請求項 9】

前記判定値は、前記単位ごとに算出された連続値であり、

前記抽出部は、前記単位ごとの前記判定値を閾値に基づいて二値化して前記検出対象の位置を抽出する、

請求項 8 に記載のボクセルデータ評価システム。

【請求項 10】

前記単位は、ボクセルであり、

前記機械学習は、セグメンテーションに関するものである、

請求項 1 から請求項 9 のいずれか 1 項に記載のボクセルデータ評価システム。

【請求項 11】

検査の対象となる対象物に含まれる検出対象の探傷を行う探傷装置により得られるデータまたはこれを模して生成されるデータの少なくとも一方であり、機械学習に用いられる複数の学習用データを、学習用データ取得部が取得するステップと、

教師ラベル生成部が、それぞれの前記学習用データに存在する前記検出対象の特定の領域を示す特定共通領域を前記検出対象の位置として設定した教師ラベルを生成するステップと、

判定モデル生成部が、前記学習用データとそれぞれの前記学習用データに対応する前記教師ラベルとを用いて、前記検出対象が存在するか否かを判定可能な判定値を、データ中の位置を示す単位ごとに算出可能な判定モデルを生成するステップと、

前記探傷装置により得られるボクセルデータであり、判定に用いられる判定用データを、判定用データ取得部が取得するステップと、

10

20

30

40

50

判定部が、前記判定モデルを用いて、前記判定用データ中の位置を示す前記単位ごとに前記判定値を算出するステップと、

を含む、

ボクセルデータ評価方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、ボクセルデータ評価技術に関する。

【背景技術】

【0002】

10

従来、超音波検査技術は、構造物の非破壊検査を行うものとして広く使われている。検査員は、超音波検査によって得られる断面画像からその構造物の内部の欠陥の有無を検出し、その位置と深さの測定を行う。欠陥の深さを測定する方法の1つに端部エコー法がある。この端部エコー法とは、欠陥の上端部または下端部からのエコーのビーム路程と屈折角から欠陥の深さを測定する方法である。検査員は、自らの専門知識と経験に基づいて判定を行っているが、検査員の技量によって評価結果にばらつきが生じる場合がある。そこで、超音波検査において、信号処理または人工知能（AI：Artificial Intelligence）などを用いて自動評価する技術が開発されつつある。

【0003】

第1の例として、超音波画像を機械学習の入力として用い、欠陥を検出する技術が知られている。この技術は、超音波画像に欠陥が含まれるか否かを判定するものであり、画像中の欠陥の位置と大きさは特定できない。

20

【0004】

第2の例として、超音波の応答波形から探傷画像を生成し、パターン認識アルゴリズムを用いて、この探傷画像を正常パターン画像と比較する技術が知られている。この技術では、正常パターン画像と異なる探傷画像であった場合、その探傷画像中の形状エコーと欠陥エコーを判定することで、欠陥の位置を検出できる。この技術では、探傷画像に基づいて個々のエコーを含む画像を切り出す作業が必要である。しかし、仮にノイズの強度が大きく、欠陥エコーが不明瞭な画像である場合、または形状エコーと欠陥エコーが重なり合っている場合には、切り出し作業が困難になる可能性があり、欠陥を見逃すおそれがある。また、切り出したエコーを、形状エコーと欠陥エコーに分類し、教師データを作成している。しかし、欠陥エコーか形状エコーかの判定は、常に表示されているか否かで判定しており、溶接部の組織または内在物由来のエコーなども欠陥エコーと判定されるおそれがある。

30

【0005】

近年、自動運転技術または医療分野などを中心に、物体認識のAIを用いて画像中の物体を検出する試みがなされている。物体認識の中でもよく知られた技術としてセグメンテーションがある。セグメンテーションとは、画像に対してピクセルレベルでクラス分類を行う機械学習アルゴリズムであり、ピクセルレベルで物体を検出することができる。このセグメンテーションの学習モデル構築には、教師あり学習が用いられる。例えば、ピクセル単位で物体毎に色付けされた教師ラベルを使って学習を行う。セグメンテーションを超音波画像の欠陥検出に適用する場合、カメラ画像に適用する場合と比べると教師ラベルの作成に労力とコストがかかる。カメラ画像と超音波画像を比較した場合、カメラ画像は、物体と背景との境界が明瞭に分かるものが多い。一方、超音波画像は、物体からの超音波エコーの他に溶接金属から発生する散乱波のようなノイズエコーも含まれる。そのため、超音波画像は、一般的なカメラ画像と比較して、物体とそれ以外の境界が不明瞭なものが多い。つまり、超音波画像では、ピクセル単位で物体を区別する作業が非常に困難である。

40

【0006】

超音波画像のセグメンテーションにおいて、教師ラベルの作成を自動化させるために、いくつかの方法が提案されている。例えば、閾値を設定し、検出対象のエコーとそれ以外

50

とを分離する方法がある。しかし、この方法では、ノイズ強度が大きく、欠陥エコーが不明瞭な画像であった場合、または形状エコーと欠陥エコーが重なり合っている場合には、閾値での分離が困難となる。また、常に表示されているか否かで欠陥エコーかノイズエコーかを分離する方法がある。しかし、この方法では、溶接部の組織または内在物由来のエコーなども欠陥エコーとして分類されるおそれがある。

【0007】

また、現在主流のセグメンテーション方法として、1枚の画像に対してセグメンテーションを実行する方法がある。この方法は、ある画像を学習モデルに入力すると、対象ごとにセグメンテーションされた画像が出力されるものである。

【0008】

一方、実際の超音波検査では、検査員はプローブを走査し、着目している画像中の欠陥エコーの輝度と形状が走査に合わせてどのように変化するかを読み取り、欠陥を判定している。例えば、検査員がプローブを走査しても、画面上の同じ位置にエコーが表示され続けていれば、そのエコーは欠陥由来のものである可能性が高い。一方、単発的にエコーが出現または消滅する場合、そのエコーはノイズが画面に現れているものである可能性が高い。1枚の画像に対してセグメンテーションを実行する方法では、このような欠陥の連続性を考慮した判定が行えず、ノイズと欠陥エコーとの判定が困難となる。そこで、超音波画像を走査方向に重ね合わせて3次元的なデータであるボクセルデータとして扱い、非破壊検査の精度を向上させたいという要望がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【文献】特表2020-503509号公報

【文献】国際公開第2015/001624号

【文献】特開2001-13114号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

本発明が解決しようとする課題は、非破壊検査に用いるボクセルデータの評価において対象物に含まれる検出対象の位置を検出する精度を向上させることができるボクセルデータ評価技術を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明の実施形態に係るボクセルデータ評価システムは、検査の対象となる対象物に含まれる検出対象の探傷を行う探傷装置により得られるデータまたはこれを模して生成されるデータの少なくとも一方であり、機械学習に用いられる複数の学習用データを取得する学習用データ取得部と、それぞれの前記学習用データに存在する前記検出対象の特定の領域を示す特定共通領域を前記検出対象の位置として設定した教師ラベルを生成する教師ラベル生成部と、前記学習用データとそれぞれの前記学習用データに対応する前記教師ラベルとを用いて、前記検出対象が存在するか否かを判定可能な判定値を、データ中の位置を示す単位ごとに算出可能な判定モデルを生成する判定モデル生成部と、前記探傷装置により得られるボクセルデータであり、判定に用いられる判定用データを取得する判定用データ取得部と、前記判定モデルを用いて、前記判定用データ中の位置を示す前記単位ごとに前記判定値を算出する判定部と、を備える。

【発明の効果】

【0012】

本発明の実施形態により、非破壊検査に用いるボクセルデータの評価において対象物に含まれる検出対象の位置を検出する精度を向上させることができるボクセルデータ評価技術が提供される。

【図面の簡単な説明】

10

20

30

40

50

【 0 0 1 3 】

- 【図 1】ボクセルデータ評価システムを示すブロック図。
- 【図 2】超音波探傷装置を示す構成図。
- 【図 3】超音波探傷装置の走査態様を示す平面図。
- 【図 4】超音波探傷装置の走査態様を示す側面図。
- 【図 5】超音波探傷装置による走査で得られる超音波画像を示す画像図。
- 【図 6】学習用超音波画像を示す画像図。
- 【図 7】2次元教師ラベルを示す画像図。
- 【図 8】学習用超音波データからチャンネルを選定する流れを示す説明図。
- 【図 9】検出対象を検出したエコーの受信波形を示すグラフ。 10
- 【図 10】検出対象を検出したエコーの受信波形を絶対値化したものを示すグラフ。
- 【図 11】2次元教師ラベルの画素を示す説明図。
- 【図 12】判定用3次元超音波データを示す画像図。
- 【図 13】学習用3次元超音波データを生成する流れを示す説明図。
- 【図 14】3次元教師ラベルを生成する流れを示す説明図。
- 【図 15】判定用3次元超音波データを生成する流れを示す説明図。
- 【図 16】判定済データを示す画像図。
- 【図 17】判定済データを二値化したもの示す画像図。
- 【図 18】判定済データに出現した像を示す説明図。
- 【図 19】特定共通領域の座標を示す説明図。 20
- 【図 20】検出対象とノイズが写る判定値を示す画像図。
- 【図 21】ノイズのみが写る判定値を示す画像図。
- 【図 22】超音波画像の取得位置と検出対象との関係を示すグラフ。
- 【図 23】超音波画像の取得位置とノイズとの関係を示すグラフ。
- 【図 24】検出対象の位置を3D-CADモデルにプロットする態様を示す説明図。
- 【図 25】2次元教師ラベルの生成方法を示すフローチャート。
- 【図 26】判定モデルの生成方法を示すフローチャート。
- 【図 27】判定用3次元超音波データの評価方法を示すフローチャート。
- 【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 4 】

以下、図面を参照しながら、ボクセルデータ評価システムおよびボクセルデータ評価方法の実施形態について詳細に説明する。

【 0 0 1 5 】

本実施形態では、一般的にフェーズドアレイ超音波探傷試験と呼ばれる超音波探傷方法を用いる形態を例示する。その中でも、一定方向に超音波ビームを形成しながら駆動させる超音波素子を電子走査させていくリニア画像法、駆動させる超音波素子を固定または電子走査しながら超音波ビームを形成する角度を扇状に変化させるセクタ画像法、任意の座標領域に網羅的に焦点を設けてビームを集束させるTotal Focusing Method (TFM)、または開口合成法などの超音波を用いた映像化方法を用いることができる。なお、単一プローブを用いて機械的に走査し取得した超音波探傷方法を用いても良い。以下の説明では、代表的なりニア画像法について例示する。 40

【 0 0 1 6 】

図1の符号1は、本実施形態のボクセルデータ評価システムである。このボクセルデータ評価システム1は、検査の対象となる対象物Qの欠陥（検出対象C）の有無を評価するものである。本実施形態では、所定の超音波探傷方法により取得した超音波データを、人工知能（AI）を備えるコンピュータを用いて自動的に解析し、対象物Qの欠陥の有無を評価する。この欠陥の有無を評価することで、対象物Qの健全性診断などに活用できる。つまり、ボクセルデータ評価システム1は、機械学習により得られた人工知能を用いて対象物Qの解析を行うものである。

【 0 0 1 7 】

10

20

30

40

50

なお、本実施形態で処理の対象となっている「超音波データ」という用語は、画像（２次元のデータ、ピクセルデータ）とボクセルデータ（３次元ボリュームデータ）の少なくとも一方の意味を含んでいる。例えば、判定時に処理の対象となる超音波データは、ボクセルデータとなっている。一方、超音波探傷方法により取得されるとき超音波データは、画像となっている。また、超音波データは、静止画または動画のいずれでも良い。なお、ボクセルデータが動画である場合は、３次元のデータに時間の経過を示す４次元目のデータを加えたものである。以下の説明では、理解を助けるために静止画の超音波データを例示している。

【００１８】

ボクセルデータ評価システム１は、超音波探傷器１０と超音波探傷装置２０と超音波画像処理装置３０と超音波データ評価装置１００とを備える。

10

【００１９】

超音波探傷装置２０と超音波画像処理装置３０と超音波データ評価装置１００は、ＣＰＵ、ＲＯＭ、ＲＡＭ、ＨＤＤなどのハードウェア資源を有し、ＣＰＵが各種プログラムを実行することで、ソフトウェアによる情報処理がハードウェア資源を用いて実現されるコンピュータで構成される。さらに、本実施形態のボクセルデータ評価方法は、各種プログラムをコンピュータに実行させることで実現される。

【００２０】

ボクセルデータ評価システム１の各構成は、必ずしも複数のコンピュータに設ける必要はない。例えば、ボクセルデータ評価システム１の各構成を１つのコンピュータに設けても良い。

20

【００２１】

図２に示すように、超音波探傷器１０は、検査対象となる対象物Ｑに超音波Ｕを発し、検出対象Ｃで反射した反射波を検出する。なお、以下の説明では、反射波をエコー（出現像）と称する場合がある。この超音波探傷器１０は、超音波Ｕを発する複数の超音波素子１１Ａが配列された探触子１１を備える。これら超音波素子１１Ａは、超音波探傷器１０の走査方向に対して直角を成す方向に直線的に並んで配置されている。この超音波探傷器１０により取得される超音波画像（２次元の超音波データ）は、対象物Ｑの断面を示す画像となる。

【００２２】

対象物Ｑとしては、金属材料で構成された部材を例示する。特に、溶接部Ｗ（図３および図４）に生じた検出対象Ｃをボクセルデータ評価システム１により評価する。なお、金属材料以外の材料、例えば、鉄筋コンクリート、モルタル、繊維強化プラスチックなどの複合材料を対象物Ｑとしても良い。このような対象物Ｑの内部または表面に生じた検出対象Ｃを、ボクセルデータ評価システム１により評価する。

30

【００２３】

検出対象Ｃは、ボクセルデータ評価システム１のユーザが任意に定めることができる。検出対象Ｃ（欠陥）としては、対象物Ｑの内部または表面に生じた亀裂、疵、空洞、丸穴、剥離、減肉、介在物などを任意に定めることができる。

【００２４】

本実施形態の超音波探傷器１０は、超音波探傷装置２０により電圧が印加されて制御される。超音波探傷器１０としては、一定方向に超音波Ｕのビームを形成しながら、駆動対象の超音波素子１１Ａを電子走査するフェーズドアレイ超音波探傷方式を例示する。なお、本実施形態は、他の方式に適用できる。例えば、Total Focusing Method（ＴＦＭ）、セクタ画像法、開口合成法などの方式に適用しても良い。さらに、単一プローブを用いて機械的に走査し取得した超音波探傷方法に適用しても良い。

40

【００２５】

対象物Ｑの検査時に、超音波探傷器１０と対象物Ｑとの間に、楔と称される音響伝搬媒質２が設けられる。この音響伝搬媒質２は、指向性の高い角度で超音波Ｕを対象物Ｑへ入射させるためのものである。

50

【 0 0 2 6 】

音響伝搬媒質 2 としては、超音波 U が伝搬可能で音響インピーダンスが把握できている等方材を用いる。なお、対象物 Q の表面が平坦である場合には、音響伝搬媒質 2 を使用しなくても良い。

【 0 0 2 7 】

音響伝搬媒質 2 として用いられる等方材としては、例えば、アクリル、ポリイミド、ゲル、その他高分子などがある。音響伝搬媒質 2 としては、超音波素子 1 1 A の前面板（図示略）と音響インピーダンスが近い、または同じ材質を用いることができる。また、対象物 Q と音響インピーダンスが近い、または同じ材質を用いることもできる。また、段階的または漸次的に音響インピーダンスを変化させる複合材料を用いても良い。

10

【 0 0 2 8 】

また、音響伝搬媒質 2 の内部の多重反射波が探傷結果に影響を与えないように、音響伝搬媒質 2 の内外にダンピング材を配置しても良い。また、山型の波消し形状を設けても良い。多重反射低減機構を設けても良い。

【 0 0 2 9 】

なお、以下の説明では、超音波探傷器 1 0 から対象物 Q へ超音波 U を入射させる際の説明において音響伝搬媒質 2 の表現を省略している場合がある。

【 0 0 3 0 】

超音波探傷器 1 0 から対象物 Q に至る経路の接触部には、超音波 U を伝搬させるための音響接触媒質（図示略）が用いられる。例えば、音響伝搬媒質 2 を使用する場合には、超音波探傷器 1 0 と音響伝搬媒質 2 との接触部、および音響伝搬媒質 2 と対象物 Q との接触部に、音響接触媒質（図示略）が用いられる。音響伝搬媒質 2 を使用しない場合には、超音波探傷器 1 0 と対象物 Q との接触部に、音響接触媒質（図示略）が用いられる。この音響接触媒質には、例えば、水、グリセリン、マシン油、ひまし油、アクリル、ポリスチレン、ゲルなどの超音波 U を伝搬できる媒質が用いられる。

20

【 0 0 3 1 】

次に、超音波探傷器 1 0 を用いて対象物 Q の表面を走査する態様を図 3 から図 5 を参照して説明する。例えば、対象物 Q に直線的に延びる溶接部 W が設けられているものとする（図 3 および図 4）。この溶接部 W に沿って生じた亀裂などの欠陥が、検出対象 C であるとする。

30

【 0 0 3 2 】

ここで、超音波探傷器 1 0 を対象物 Q の表面に沿って、かつ溶接部 W が延びる方向に沿って、一方向（直線的）に走査すると、それぞれの位置における対象物 Q の断面を示す超音波画像が得られる。例えば、対象物 Q のそれぞれの位置（ $X_n \sim X_{n+4}$ ）に対応してそれぞれの超音波画像（ $X_n \sim X_{n+4}$ ）が得られる（図 5）。これらの超音波画像（ $X_n \sim X_{n+4}$ ）は、例えば、学習用超音波画像 3 1 または判定用超音波画像 3 5 である。

【 0 0 3 3 】

溶接部 W の付近に存在する検出対象 C で超音波 U が反射した場合には、超音波画像（ $X_n \sim X_{n+4}$ ）に検出対象 C の出現像が現れるようになる。ここで、溶接部 W に沿って連続的に発生した亀裂のような検出対象 C の場合は、それぞれの超音波画像（ $X_n \sim X_{n+4}$ ）に現れる検出対象 C の出現像の位置に相関がある。

40

【 0 0 3 4 】

例えば、図 5 に示すように、検出対象 C が無い位置に対応する超音波画像（ X_n ）には、検出対象 C の出現像が現れない。一方、検出対象 C が有る位置に対応する超音波画像（ $X_{n+1} \sim X_{n+4}$ ）には、検出対象 C の出現像が同じ箇所に現れる。

【 0 0 3 5 】

特に、超音波画像（ X_{n+1} ）で検出対象 C の出現像が現れ始めたときは、そのサイズが小さいが、次の超音波画像（ $X_{n+2} \sim X_{n+3}$ ）に掛けて、そのサイズが次第に大きくなる。そして、検出対象 C の終端に差し掛かると、その超音波画像（ X_{n+4} ）の検出対象 C の出現像のサイズは、次第に小さくなる。これが検出対象 C に起因する特有のエコ

50

ー強度（超音波Uの反射強度）の変化である。

【0036】

図1に示すように、超音波探傷器10で検出された反射波の情報を含む検出信号は、超音波探傷装置20に入力される。そして、この超音波探傷装置20で得られた検出信号が、超音波画像処理装置30で処理される。

【0037】

超音波画像処理装置30は、超音波Uを用いて対象物Qに含まれる検出対象Cの探傷を行う超音波画像を取得するものである。この超音波画像処理装置30は、超音波Uの反射波に基づいて、超音波素子11Aのスキャン方向に沿った超音波画像を生成することができる。

10

【0038】

図6は、代表的なりニアスキャン画像としての超音波画像を例示している。この超音波画像が、本実施形態の学習用データ（学習用画像）としての学習用超音波画像31として用いられる。この学習用超音波画像31では、背景Bが黒色で表示され、超音波Uが対象物Qに入射された入射範囲32がグレー色で表示され、対象物Qの表面33が白色のラインで表示され、検出対象Cが白色で表示される。なお、本実施形態は、超音波画像がRGBなどで表されるカラー画像でも実施可能であるが、説明を明瞭にするため、超音波画像がグレースケール画像であるものとして説明する。図6の例では、1つの検出対象Cが学習用超音波画像31に写っている。

【0039】

本実施形態では、複数の超音波画像を重ね合わせることで、ボクセルデータを生成することができる。例えば、複数の学習用超音波画像31から生成されたボクセルデータを学習用3次元超音波データ51（図13）として用いることができる。さらに、複数の判定用超音波画像35から生成されたボクセルデータを本実施形態の判定用データとしての判定用3次元超音波データ55（図15）として用いることもできる。

20

【0040】

図2に示すように、超音波探傷器10から対象物Qに入射された超音波Uは、遅延時間に従って入射および屈折角度が決定され、対象物Qの内部を伝搬する。この伝搬した超音波Uは、検出対象Cなどで反射または散乱され、再び超音波探傷器10に到達する。また、検出対象C以外にも、対象物Qの角部（図示略）でも超音波Uが、反射または散乱され、超音波探傷器10に到達する。

30

【0041】

超音波探傷器10に到達した反射波（散乱波）は、到達時間および超音波素子11Aの情報に基づいて映像化される。このとき、対象物Qに検出対象Cが存在する場合に、検出対象Cのエコー（出現像）が学習用超音波画像31の中に出現する。

【0042】

本実施形態では、超音波画像処理装置30が、超音波画像を生成する。例えば、学習用超音波画像31（図6）を生成する。超音波画像は、超音波画像処理装置30から超音波データ評価装置100に入力される。

【0043】

なお、本実施形態の学習用超音波画像31（または学習用3次元超音波データ51）は、超音波探傷装置20により得られる超音波画像を模して、コンピュータグラフィックス（CG）を用いて生成されるCG画像でも良い。また、超音波探傷装置20により得られる超音波画像を人手または自動的に編集して多種多様な学習用超音波画像31を生成しても良い。

40

【0044】

さらに、超音波伝搬の数値シミュレーションにより得られる超音波画像を用いても良い。例えば、対象物Qの内部における超音波の伝搬を可視化するシミュレーション技術を用いて超音波画像を生成し、それを学習用超音波画像31として用いても良い。

【0045】

50

図 1 に示すように、超音波データ評価装置 100 は、学習用超音波画像 31 に基づき生成された学習用 3 次元超音波データ 51 (図 13) を用いて機械学習を行い、この機械学習の結果に基づいて、判定モデルを生成する。そして、判定に用いられる判定用 3 次元超音波データ 55 (図 15) に含まれる検出対象 C の位置を、判定モデルを用いて特定するものである。

【0046】

つまり、本実施形態のコンピュータを用いた解析には、人工知能の学習に基づく解析技術を用いることができる。例えば、ニューラルネットワークによる機械学習により生成された学習モデル、その他の機械学習により生成された学習モデル、深層学習アルゴリズム、回帰分析などの数学的アルゴリズムを用いることができる。

10

【0047】

本実施形態のシステムは、機械学習を行う人工知能を備えるコンピュータを含む。例えば、ニューラルネットワークを備える 1 台のコンピュータでシステムを構成しても良いし、ニューラルネットワークを備える複数台のコンピュータでシステムを構成しても良い。

【0048】

ここで、ニューラルネットワークとは、脳機能の特性をコンピュータによるシミュレーションによって表現した数学モデルである。例えば、シナプスの結合によりネットワークを形成した人工ニューロン(ノード)が、学習によってシナプスの結合強度を変化させ、問題解決能力を持つようになるモデルを示す。さらに、ニューラルネットワークは、深層学習(Deep Learning)により問題解決能力を取得する。

20

【0049】

なお、学習対象となる各種情報項目に報酬関数が設定されるとともに、報酬関数に基づいて価値が最も高い情報項目が抽出される深層強化学習をニューラルネットワークに用いても良い。

【0050】

本実施形態では、教師有りの機械学習方法を用いる。例えば、セマンティックセグメンテーション(Semantic segmentation)を使用する。ただし、これに限定されず、複数のタイプの機械学習方法を組み合わせても良いし、何か 1 つの機械学習手法を採用しても良い。

【0051】

30

セマンティックセグメンテーション以外の機械学習方法としては、全畳み込みニューラルネットワーク(Fully Convolutional Neural Network)、画像認識で実績のある R-CNN(Region Convolutional Neural Network)、k-近傍法、ロジスティック回帰、サポートベクターマシン(SVM)、深層学習(Deep Learning)などを用いることができる。

【0052】

なお、深層学習には、オートエンコーダ、RNN(Recurrent Neural Network)、LSTM(Long Short-Term Memory)、GAN(Generative Adversarial Network)などの各種手法がある。これらの手法を本実施形態に適用しても良いし、他の機械学習の手法を用いても良い。

40

【0053】

図 12 に示すように、判定用 3 次元超音波データ 55 は、背景 B となる空間のボクセルが黒色で表示され、超音波 U が対象物 Q に入射された入射範囲 32 のボクセルがグレー色で表示され、対象物 Q の表面 33 のボクセルが白色で表示され、検出対象 C のボクセルが白色で表示される。図 12 の例では、2 つの検出対象 C が判定用 3 次元超音波データ 55 に写っている。そして、判定モデルを用いて、この判定用 3 次元超音波データ 55 から判定済データ 36 (図 16) が生成される。なお、判定済データ 36 は、3 次元ボリュームデータとなっている。

【0054】

図 16 に示すように、判定済データ 36 は、背景 B となる空間のボクセルが黒色で表示

50

され、検出対象Cの端部が存在する可能性が高い領域37ほど、ボクセルが明るく表示される。つまり、グレー色から白色に表示される。図16の例では、2つの領域37が判定済データ36に写っている。そして、この判定済データ36から二値化画像38(図17)が生成される。なお、二値化画像38は、対象物Qのそれぞれの位置(断面)に対応する2次元のデータ(画像)となっている。

【0055】

図17に示すように、二値化画像38は、背景Bが黒色で表示され、検出対象Cの端部が存在する特定共通領域39が白色で表示される。図17の例では、2つの特定共通領域39が二値化画像38に写っている。そして、この二値化画像38から検出対象Cの位置と深さを求めることができる。

10

【0056】

図1に示すように、超音波データ評価装置100は、入力部110と演算部120と判定モデル生成部130と記憶部140と出力部150とを備える。

【0057】

入力部110には、超音波Uを対象物Qに入射することで得られる超音波画像が外部から入力される。本実施形態では、超音波画像処理装置30から超音波画像が入力される形態を例示するが、他の装置から超音波画像が入力されても良い。

【0058】

入力部110に入力される超音波画像には、機械学習に用いられる学習用超音波画像31(図6)と判定用3次元超音波データ55(図12)の2種類がある。この入力部110が、本実施形態の学習用データ取得部と判定用データ取得部となっている。

20

【0059】

本実施形態では、機械学習を行うときに、複数枚の学習用超音波画像31が入力部110に入力される。そして、この学習用超音波画像群 t_n (図13)に基づいて、2次元のデータである2次元教師ラベル群 l_n (図14)が生成される。

【0060】

さらに、学習用超音波画像群 t_n を用いて、3次元のデータの集まりである学習用3次元超音波データ群 T_k (図13)が生成される。また、2次元教師ラベル群 l_n を用いて、3次元のデータの集まりである3次元教師ラベル群 L_k (図14)が生成される。そして、学習用3次元超音波データ群 T_k と3次元教師ラベル群 L_k を用いて、判定モデルが生成される。

30

【0061】

一方、この判定モデルを用いて判定用3次元超音波データ55の中に含まれる検出対象Cを判定するときに、判定用3次元超音波データ55が入力部110に入力される。なお、判定用3次元超音波データ55は、生成された判定モデルに入力され、検出対象Cが含まれているか否かの判定が行われる。

【0062】

演算部120は、2次元教師ラベル生成部121と3次元データ生成部122と判定部123と抽出部124と検出対象位置算出部125とノイズ除去部126とを備える。これらは、メモリまたはHDDに記憶されたプログラムがCPUによって実行されることで実現される。

40

【0063】

記憶部140は、超音波探傷によって得られた超音波データおよび判定モデルなどを記憶する。この記憶部140は、学習用3次元超音波データ記憶部141と3次元教師ラベル記憶部142と判定モデル記憶部143と判定用3次元超音波データ記憶部144と検出対象位置記憶部145とを備える。これらは、メモリ、HDDまたはクラウドに記憶され、検索または蓄積ができるよう整理された情報の集まりである。

【0064】

出力部150は、所定の情報の出力を行う。例えば、判定用3次元超音波データ55の検出対象Cの位置を示す3D-CADモデル60(図24)を表示する。この出力部15

50

0 は、デジタルデータを表示できるものであれば良く、所謂 PC 用のディスプレイ、テレビジョン、プロジェクタ、ヘッドマウントディスプレイなどが考えられる。また、ブラウン管のように一度アナログ信号化してからその画面に画像を表示させるものでも良い。つまり、超音波データ評価装置 100 には、解析結果の出力を行う画像の表示を行う装置が含まれる。さらに、出力部 150 は、紙媒体に所定の情報を印字するプリンタでも良い。また、出力部 150 は、USB メモリなどの着脱可能で可搬性を有する記憶媒体に所定の情報を書き込むものでも良い。

【0065】

なお、出力部 150 は、超音波エコーの合成信号、映像化結果、超音波探傷器 10 の座標および検出対象 C との相対位置、遅延時間、焦点深さ、探傷屈折角などの探傷条件を表示しても良い。また、出力部 150 は、設定した条件に応じて、音または発光によりアラームを生じさせたり、タッチパネルとして操作を入力したりするユーザインタフェース機能を有しても良い。

10

【0066】

なお、超音波データ評価装置 100 は、他の構成を備えても良い。例えば、通信部（図示略）を備えても良い。この通信部は、例えば、インターネットなどの通信回線を介して他のコンピュータと通信を行う。

【0067】

超音波データ評価装置 100 の各構成は、必ずしも 1 つのコンピュータに設ける必要はない。例えば、ネットワークで互いに接続された複数のコンピュータを用いて 1 つの超音波データ評価装置 100 を実現しても良い。

20

【0068】

2 次元教師ラベル生成部 121 は、それぞれの学習用超音波画像 31（図 6）に存在する検出対象 C の特定の領域を示す特定共通領域 39（図 7）を検出対象 C の位置として設定した 2 次元教師ラベル 40 を生成する。1 つの 2 次元教師ラベル 40 は、1 つの学習用超音波画像 31 に対応して生成される。そして、学習用超音波画像群 t_n （図 13）に対応する 2 次元教師ラベル群 l_n （図 14）が生成される。

【0069】

図 7 に示すように、2 次元教師ラベル 40 は、対応する学習用超音波画像 31 と同一のサイズの画像（2 次元のデータ）である。つまり、学習用超音波画像 31 と同一の画素数を有する画像である。この 2 次元教師ラベル 40 では、背景 B が黒色で表示され、検出対象 C の特定共通領域 39 が白色で表示される。つまり、2 次元教師ラベル 40 は、特定共通領域 39 の画素値を「1」、それ以外の画素値を「0」として構成される二値画像である。この 2 次元教師ラベル 40 における特定共通領域 39 の位置（座標）は、学習用超音波画像 31 に写る検出対象 C の上端部の位置に対応している。

30

【0070】

2 次元教師ラベル 40 には、検出対象 C のエコー（出現像）がある部分に対応した特定共通領域 39 を設定する。特定共通領域 39 は、例えば、亀裂の場合は亀裂端部、ブローホールの場合はその中心部、検出対象 C の種類に合わせて任意に設定できる。この設定は、ユーザが行っても良いし、超音波データ評価装置 100 が自動的に行って良い。

40

【0071】

検出対象 C が亀裂の場合には、検出対象 C のエコーの端部を特定共通領域 39 と定める。すると、学習用超音波画像 31 の特定共通領域 39 は、亀裂の端部の位置に相当する。そして、超音波データ評価装置 100 が、学習用超音波画像 31 から特定共通領域 39 を検出する。さらに、判定用 3 次元超音波データ 55 において、特定共通領域 39 と対象物 Q の表面 33 のエコーとの距離 D（図 12）を算出することで、亀裂の深さを求めることができる。

【0072】

次に、2 次元教師ラベル 40 の生成方法について図 25 のフローチャートを用いて説明する。なお、図 1 に示すブロック図を適宜参照する。また、検出対象 C を亀裂とし、その

50

端部を特定共通領域 3 9 として説明する。

【 0 0 7 3 】

図 2 5 に示すように、まず、ステップ S 1 1 において、超音波画像処理装置 3 0 により複数の学習用超音波画像 3 1 (学習用データ) が取得される。これら学習用超音波画像 3 1 が超音波データ評価装置 1 0 0 の入力部 1 1 0 (学習用データ取得部) に入力される。

【 0 0 7 4 】

次のステップ S 1 2 において、検査員、研究者または専門家などのユーザにより、学習用超音波画像 3 1 の確認が行われる。ユーザは、それぞれの学習用超音波画像 3 1 に亀裂が写っているか否かの精査を行う。

【 0 0 7 5 】

次のステップ S 1 3 において、2次元教師ラベル生成部 1 2 1 では、学習用超音波画像群 t_n (図 1 3) に存在する検出対象 C の位置を定義した 2次元教師ラベル群 l_n (図 1 4) を生成する。例えば、2次元教師ラベル生成部 1 2 1 は、学習用超音波画像 3 1 (図 6) に亀裂が写っている場合に、超音波探傷器 1 0 のチャンネルを選定する。例えば、超音波探傷器 1 0 が備える複数 (例えば、N 個) の超音波素子 1 1 A のうち、亀裂の端部からのエコーが含まれる受信波形 4 1 (図 9) を特定する。そして、この受信波形 4 1 を受信した超音波探傷器 1 0 のチャンネルを選定する。ここで、そのチャンネルの番号を m (図 8) とする。

【 0 0 7 6 】

次のステップ S 1 4 において、2次元教師ラベル生成部 1 2 1 は、選定されたチャンネル番号 m の受信波形 4 1 から亀裂の端部のエコーを取得し、このエコーのピーク位置でのビーム路程 X_d を求める。なお、チャンネル番号 m の選定は、2次元教師ラベル生成部 1 2 1 が行っても良いし、ユーザが行っても良い。

【 0 0 7 7 】

例えば、図 9 に示すように、チャンネル番号 m の受信波形 4 1 には、対象物 Q の表面 3 3 のエコーの波形 4 2 と、亀裂の端部のエコーの波形 4 4 とが含まれているものとする。そして、チャンネル番号 m の受信波形 4 1 の振幅の値を $A_m(X)$ とする。さらに、受信波形 4 1 を絶対値化した波形 4 5 を図 1 0 に示す。

【 0 0 7 8 】

ここで、2次元教師ラベル生成部 1 2 1 は、 $A_m(X)$ の絶対値である $|A_m(X)|$ から、亀裂の端部のエコーのピークの値 $|A_m(X_d)|$ を求める。そして、2次元教師ラベル生成部 1 2 1 は、この位置までのビーム路程 X_d を求めることができる (図 8) 。

【 0 0 7 9 】

図 2 5 に戻り、次のステップ S 1 5 において、2次元教師ラベル生成部 1 2 1 は、チャンネル番号 m 、ビーム路程 X_d 、屈折角 α 、 β から、2次元教師ラベル 4 0 (図 7) の特定共通領域 3 9 の中心部の座標 E_x 、 E_y を求める (図 8) 。

【 0 0 8 0 】

次のステップ S 1 6 において、2次元教師ラベル生成部 1 2 1 は、座標 E_x 、 E_y を中心とする一辺の長さ d の正方形を設定する (図 1 1) 。ここで、正方形を「1」とし、それ以外を「0」とする二値画像を生成する。この二値画像が2次元教師ラベル 4 0 (図 7) となる。そして、2次元教師ラベル 4 0 の生成方法を終了する。

【 0 0 8 1 】

図 1 1 に示すように、本実施形態の特定共通領域 3 9 のサイズ (最大長) は d で表される。例えば、 $d \times d$ の正方形としている。ここで、特定共通領域 3 9 の対角線は、亀裂の端部のエコーの波長 λ の 4 分の 1 以上とする。

【 0 0 8 2 】

【 数 1 】

10

20

30

40

$$\sqrt{2}d \geq \frac{\lambda}{4}$$

【 0 0 8 3 】

図 9 に示すように、波長 λ の 4 分の 1 という長さは、波形の立ち上がりからピークに到達するまでの長さに相当し、亀裂の端部からのエコーの特徴量を含む最小の長さとなる。仮に、特定共通領域 3 9 のサイズ（最大長）が波長 λ の 4 分の 1 に満たない場合、特定共通領域 3 9 にエコーの特徴が十分に含まれず、亀裂の端部を正しく検出できない可能性が生じる。

10

【 0 0 8 4 】

なお、いくつかの波が連続しているエコーの場合でも、その波から代表的な波形を取り出し、波長を求める必要がある。

【 0 0 8 5 】

特定共通領域 3 9 を円とする場合には、円の直径を波長 λ の 4 分の 1 以上のサイズに設定する。特定共通領域 3 9 を楕円とする場合には、楕円の長軸を波長 λ の 4 分の 1 以上に設定する。また、特定共通領域 3 9 は、円以外において、多角形、不定形で設定することも可能である。その場合は、それぞれの最大長が波長 λ の 4 分の 1 以上に設定される。

【 0 0 8 6 】

20

本実施形態では、特定共通領域 3 9 のサイズ d が、超音波探傷装置 2 0 が用いた超音波 U の周波数の波長の 4 分の 1 以上であることで、特定共通領域 3 9 に検出対象 C の特徴が十分に含まれるようになり、検出対象 C を正しく検出することができる。そして、検出対象 C をノイズと区別できるようになる。

【 0 0 8 7 】

図 1 に示すように、判定モデル生成部 1 3 0 は、学習用超音波画像 3 1 とそれぞれの学習用超音波画像 3 1 に対応する 2 次元教師ラベル 4 0 とを用いて、検出対象 C が存在するか否かを判定可能な判定値 Y_k （図 1 6）を、超音波データ中の位置を示す単位ごとに算出可能な判定モデルを生成する。

【 0 0 8 8 】

30

本実施形態において、超音波データ中の位置を示す単位とは、例えば、ボクセルデータ（3 次元ボリュームデータ）中のボクセルである。なお、ボクセルデータ中の所定のボクセルが存在する位置（座標）は、従来公知の方法で管理されている。

【 0 0 8 9 】

なお、本実施形態では、超音波データ中の位置を示す単位をボクセルとしているが、その他の態様であっても良い。例えば、隣接する複数のボクセルで 1 つの単位としても良い。また、ボクセルを複数のグリッドで区切り、そのグリッドの 1 つのマス目（区画）を 1 つの単位としても良い。

【 0 0 9 0 】

3 次元データ生成部 1 2 2 は、超音波探傷器 1 0 および超音波探傷装置 2 0 を用いて対象物 Q を探傷して得られる複数の超音波画像を探傷した位置に対応付けた状態で重ね合わせて 3 次元的なデータを生成可能となっている。このようにすれば、2 次元のデータである超音波画像（学習用超音波画像 3 1 または判定用超音波画像 3 5）しか得られない超音波探傷器 1 0 および超音波探傷装置 2 0 を用いる場合でも、対象物 Q の表面を一方向に走査して得られる複数の超音波画像を重ね合わせることで、3 次元的なデータであるボクセルデータを得ることができる。

40

【 0 0 9 1 】

この 3 次元データ生成部 1 2 2 は、学習用 3 次元超音波データ 5 1 と 3 次元教師ラベル 5 0 と判定用 3 次元超音波データ 5 5 を生成する。いずれの場合も連続する画像を順番通りに重ねて、3 次元のデータとして生成する。重ねる枚数として、例えば、4 枚以上、1

50

6枚以下を目安としている。例えば、少な過ぎると検出対象Cの連続性の情報を活用できず、多すぎると計算量が膨大になるためである。

【0092】

図13および図14に示すように、学習用データとしては、 n 枚の学習用超音波画像31の集まりである学習用超音波画像群 t_n と、これらに対応する n 枚の2次元教師ラベル40の集まりである2次元教師ラベル群 l_n とがある。そして、この学習用超音波画像群 t_n から k 個の学習用3次元超音波データ群 T_k が生成される。さらに、この2次元教師ラベル群 l_n から k 個の3次元教師ラベル群 L_k が生成される。

【0093】

また、図15に示すように、本実施形態で判定に用いられる判定用データとしては、 n 枚の判定用超音波画像35の集まりである判定用超音波画像群 x_n がある。そして、この判定用超音波画像群 x_n から k 個の判定用3次元超音波データ群 X_k が生成される。

【0094】

なお、学習用3次元超音波データ51と判定用3次元超音波データ55を生成する場合において、取得する複数の超音波画像の枚数は、互いに同じ枚数にする必要がある。さらに、学習用3次元超音波データ51と判定用3次元超音波データ55において、超音波画像を重ねる枚数は、互いに同じ枚数にする必要がある。

【0095】

また、本実施形態の判定用データは、超音波探傷器10および超音波探傷装置20を用いて対象物Qを探傷して得られる複数の判定用超音波画像35に基づいて、3次元データ生成部122が生成するものである。このようにすれば、検出対象Cを3次元的な構造で判定できるため、判定の精度を高めることができる。また、検出対象Cを認識し易くなる。

【0096】

次に、判定モデルの生成方法について図26のフローチャートを用いて説明する。なお、図1に示すブロック図を適宜参照する。

【0097】

図26に示すように、まず、ステップS21において、判定モデル生成部130は、入力部110に入力され、学習用3次元超音波データ記憶部141に格納された複数の学習用超音波画像31を取得する。

【0098】

次のステップS22において、判定モデル生成部130は、複数の学習用超音波画像31と、それぞれの学習用超音波画像31に対応する2次元教師ラベル40の対応付けを行う。

【0099】

次のステップS23において、3次元データ生成部122は、複数の学習用超音波画像31に基づいて、学習用3次元超音波データ51の生成を行う。ここで、学習用3次元超音波データ51の集まりである学習用3次元超音波データ群 T_k (図13)は、学習用3次元超音波データ記憶部141に格納される。

【0100】

次のステップS24において、3次元データ生成部122は、複数の2次元教師ラベル40に基づいて、3次元教師ラベル50の生成を行う。ここで、3次元教師ラベル50の集まりである3次元教師ラベル群 L_k (図14)は、3次元教師ラベル記憶部142に格納される。このようにすれば、2次元のデータである超音波画像(学習用超音波画像31)しか得られない超音波探傷器10および超音波探傷装置20を用いる場合でも、対象物Qの表面を一方向に走査して得られる複数の超音波画像を重ね合わせることで、3次元教師ラベル50を生成することができる。

【0101】

次のステップS25において、判定モデル生成部130は、教師あり学習により判定モデルを生成する。この判定モデル生成部130は、 k 個の学習用3次元超音波データ群 T_k と、それぞれに対応する3次元教師ラベル群 L_k に基づいて、教師あり学習を行う。

10

20

30

40

50

【 0 1 0 2 】

教師あり学習を行うことで、ボクセルデータ（３次元のデータ）中に検出対象Ｃの特定共通領域３９が含まれるか否かを判定し、その判定値Ｙ_ｋをボクセルごとに出力する性能を有する判定モデルが生成される。この判定モデルにより、判定用３次元超音波データ５５（図１２）を入力値として受け入れた場合に、判定済データ３６（図１６）を出力値として出力可能となる。

【 0 1 0 3 】

例えば、２次元のデータ（画像）を入出力データとする教師あり学習と比較すると、３次元のデータを用いた教師あり学習では、超音波探傷器１０の走査方向の情報を保持できる。そのため、検出対象Ｃが連続しているときに徐々に輝度値が変化する検出対象Ｃに特有の傾向を新たに学習することが可能となる。

10

【 0 1 0 4 】

例えば、教師あり学習方法の１つである畳み込みニューラルネットワークの例として、２次元のデータの畳み込み演算と３次元のデータの畳み込み演算とが存在する。ここで、２次元のデータの畳み込み演算と３次元のデータの畳み込み演算とを比較すると、２次元のデータの畳み込み演算では、２次元の入力データ（画像）と２次元のフィルタで畳み込み演算を行うため、出力データも２次元のデータとなる。一方、３次元のデータの畳み込み演算は、フィルタが３次元なので、奥行方向（走査方向）の情報を失わずに３次元のデータを出力できる。この学習により判定モデルを生成した後、判定用３次元超音波データ群Ｘ_ｋを入力値として受け入れて、判定値Ｙ_ｋ（図１６）を出力値として出力可能となる。

20

【 0 1 0 5 】

なお、判定モデルの生成（教師あり学習）には、学習用３次元超音波データ５１を可能な限り多く用意し、それらを用いて判定モデルを生成することが望ましい。

【 0 1 0 6 】

また、学習用３次元超音波データ５１としては、検出対象Ｃが存在するものと存在しないものの両方があっても良い。例えば、検出対象Ｃが存在しない学習用超音波画像３１のみを重ね合わせて学習用３次元超音波データ５１を生成しても良い。また、学習用３次元超音波データ５１には、検出対象Ｃが存在せず、表面３３のエコーのみが存在するものが含まれていても良い。さらに、１つの学習用３次元超音波データ５１に対して複数の検出対象Ｃが存在するものが含まれていても良い。

30

【 0 1 0 7 】

次のステップＳ２６において、判定モデル生成部１３０は、生成した判定モデルを判定モデル記憶部１４３に格納する。そして、判定モデルの生成方法を終了する。

【 0 1 0 8 】

図１に示すように、判定部１２３は、判定モデルを用いて、判定用３次元超音波データ５５のボクセルごとに、検出対象Ｃが存在するか否かを示す判定値Ｙ_ｋを算出する。

【 0 1 0 9 】

次に、判定用３次元超音波データ５５の評価方法について図２７のフローチャートを用いて説明する。なお、図１に示すブロック図を適宜参照する。

40

【 0 1 1 0 】

図２７に示すように、まず、ステップＳ３１において、超音波画像処理装置３０により判定用超音波画像３５（判定用データ）が取得される。この判定用超音波画像３５が超音波データ評価装置１００の入力部１１０（判定用データ取得部）に入力される。

【 0 1 1 1 】

次のステップＳ３２において、３次元データ生成部１２２は、複数枚の判定用超音波画像３５に基づいて、判定用３次元超音波データ５５の生成を行う。ここで、判定用３次元超音波データ５５の集まりである判定用３次元超音波データ群Ｘ_ｋ（図１５）は、判定用３次元超音波データ記憶部１４４に格納される。

【 0 1 1 2 】

50

次のステップS 3 3において、判定部 1 2 3は、判定用 3 次元超音波データ記憶部 1 4 4に格納された判定用 3 次元超音波データ群 X_k (図 1 5)を学習済みの判定モデルに入力し、判定値 Y_k としての判定済データ 3 6 (図 1 6)を生成する。

【0 1 1 3】

図 1 6に示すように、判定済データ 3 6 (判定値 Y_k)は、判定用 3 次元超音波データ 5 5と同一のサイズのボクセル (3 次元のデータ)である。判定済データ 3 6のそれぞれのボクセルは、判定値 Y_k としての「0」から「1」までの連続値で表される。

【0 1 1 4】

図 1 8に示すように、判定済データ 3 6では、検出対象Cの端部が存在する可能性が高い領域 3 7ほど、ボクセルが明るく表示される。例えば、判定値 Y_k が「0」の場合は黒色のボクセル値となる。判定値 Y_k が「1」の場合は白色のボクセル値となる。判定値 Y_k が「0」を超え、かつ「1」未満の場合はグレー色のボクセル値となる。つまり、判定済データ 3 6では、判定値 Y_k が「1」に近いほど、特定共通領域 3 9が存在する可能性が高いことを表している。

【0 1 1 5】

図 2 7に戻り、次のステップS 3 4において、抽出部 1 2 4は、判定値 Y_k を含む判定済データ 3 6 (図 1 6)から検出対象Cの位置を抽出する。この抽出部 1 2 4は、判定済データ 3 6において、判定用超音波画像 3 5の取得位置、例えば、対象物Q (図 3)のそれぞれの位置 ($X_n \sim X_{n+4}$)に対応する部分で二値化処理を行い、特定共通領域 3 9を抽出した二値化画像 3 8 (図 1 7)をそれぞれ生成する。

【0 1 1 6】

図 1 7および図 1 9に示すように、1つの判定済データ 3 6 (判定値 Y_k のボクセルデータ)を2階調化して複数枚の二値化画像 3 8が生成される。例えば、ユーザが予め閾値を設定する。そして、判定済データ 3 6のそれぞれのボクセル値が、閾値を上回っている場合は白色の値「1」に置換し、閾値を下回っている場合は黒色の値「0」に置換する。その後、判定済データ 3 6 (3 次元のデータ)を1枚1枚の2次元のデータへスライスする。つまり、1つの判定済データ 3 6を複数の二値化画像 3 8に分ける。このようにすれば、スライスされた2次元のデータである二値化画像 3 8に特定共通領域 3 9の像を出現させることができる。

【0 1 1 7】

図 2 7に戻り、次のステップS 3 5において、検出対象位置算出部 1 2 5は、抽出部 1 2 4で抽出された特定共通領域 3 9に基づいて、検出対象Cの位置 (亀裂の位置)を算出する。さらに、この検出対象Cの位置に基づいて検出対象Cの深さ寸法を計算する。

【0 1 1 8】

例えば、検出対象位置算出部 1 2 5は、二値化画像 3 8の特定共通領域 3 9の中心位置の座標 (G_{x1} , G_{y1} および G_{x2} , G_{y2})を算出する (図 1 9)。この座標は、必ずしもその二値化画像 3 8における特定共通領域 3 9の中心である必要はない。例えば、二値化画像 3 8の特定共通領域 3 9の中で最大強度を持つ座標でも良い、または、所定の閾値を超える画素群の重心を座標としても良い。即ち、特定のロジックによって一意に求められるものであれば良い。

【0 1 1 9】

検出対象位置算出部 1 2 5は、二値化画像 3 8の特定共通領域 3 9の中心位置の座標と、対象物Qの表面 3 3のエコーまでの相対距離 (亀裂の深さ)を算出する。例えば、対象物Qの表面 3 3から検出対象Cの端部の位置までの距離Dを算出する (図 1 2)。なお、距離を算出するときには、画素数から長さの次元への換算を行う。

【0 1 2 0】

なお、対象物Qの表面 3 3の位置は、所定の方法で予め求められているものとする。例えば、対象物Qの表面 3 3の座標の計算方法は、それぞれのエコーの最大値を座標としても良いし、所定の閾値を超えるエコーの中心を用いても良い。

【0 1 2 1】

10

20

30

40

50

また、検出対象位置算出部 1 2 5 は、算出した検出対象 C (亀裂) の位置と深さを検出対象位置記憶部 1 4 5 に格納するとともに、出力部 1 5 0 を用いて出力する。

【 0 1 2 2 】

次のステップ S 3 6 において、ノイズ除去部 1 2 6 は、検出対象 C の位置 (亀裂の深さ) を、判定用超音波画像 3 5 の取得位置 (例えば、図 3 に示す対象物 Q におけるそれぞれの位置 ($X_n \sim X_{n+4}$)) ごとにプロットして、検出対象 C に起因するエコーとノイズに起因するエコーの判別を行う。例えば、判定用超音波画像 3 5 の取得位置ごとに二値化画像 3 8 の特定共通領域 3 9 を取得して判別を行う。

【 0 1 2 3 】

ここで、検出対象 C に起因するエコー (二値化画像 3 8 の特定共通領域 3 9) は、連続して出力される特徴がある。このことから、検出対象 C に起因するものである可能性が高いエコーは、着目している判定用超音波画像 3 5 の 1 つ前または 1 つ後の判定用超音波画像 3 5 とほぼ同じ箇所 (深さ) にエコーが出力される。

10

【 0 1 2 4 】

例えば、図 2 0 および図 2 2 に示すように、連続する 4 枚の判定用超音波画像 3 5 に対応する二値化画像 3 8 ($y_1 \sim y_4$) が有る場合において、画像 y_1 から画像 y_4 まで連続して出力されるエコー $D_1_1 \sim D_4_1$ は、検出対象 C である可能性が高い。さらに、画像 y_2 と画像 y_3 に連続して出力されるエコー $D_2_2 \sim D_3_2$ も、検出対象 C である可能性が高い。

【 0 1 2 5 】

20

一方、着目している判定用超音波画像 3 5 の 1 つ前または 1 つ後の判定用超音波画像 3 5 とほぼ同じ箇所 (深さ) にエコー (特定共通領域 3 9) が存在せず、単発的にエコーが出力されている場合は、そのエコーが検出対象 C である可能性は低く、判定用超音波画像 3 5 のノイズを誤ってエコーとして出力してしまった可能性が高い。例えば、図 2 1 および図 2 3 に示すように、連続する 4 枚の判定用超音波画像 3 5 に対応する二値化画像 3 8 ($y_5 \sim y_8$) が有る場合において、画像 y_7 のみに出力されるエコー D_7_1 は、ノイズである可能性が高い。

【 0 1 2 6 】

このように、連続している判定用超音波画像 3 5 のそれぞれのエコーを考慮することで、エコーが真に検出対象 C を検出したものであるか、ノイズを誤検出したものであるかを精度よく判別できる。

30

【 0 1 2 7 】

次のステップ S 3 7 において、演算部 1 2 0 は、検出対象 C を模した 3 D - C A D モデル 6 0 (図 2 4) に検出対象 C の位置の座標をプロットする。そして、この 3 D - C A D モデル 6 0 を、出力部 1 5 0 を用いて出力する。そして、判定用 3 次元超音波データ 5 5 の評価方法を終了する。このようにすれば、対象物 Q において亀裂が発生した位置を 3 次元で可視化することができ、ユーザが対象物 Q の劣化の状況を把握しやすくなり、検査後の補修の提案などに活用することができる。

【 0 1 2 8 】

本実施形態では、検出対象 C のエコー全体をラベル付けするのではなく、検出対象 C の端部のみをラベル付けしている。そのため、2 次元教師ラベル 4 0 の作成のための労力を格段に低減させることができる。また、検出対象 C の全部ではなく、その端部のみを検出させるため、超音波画像のそれぞれで検出対象 C の形状が異なっても、その深さの計測に共通して必要な端部 (特定共通領域 3 9) を安定して検出することができる。

40

【 0 1 2 9 】

また、特定共通領域 3 9 が、検出対象 C の端部であることで、検出対象 C が存在する深さを求める精度を向上させることができる。

【 0 1 3 0 】

また、抽出部 1 2 4 が、判定用 3 次元超音波データ 5 5 (図 1 2) から算出された判定値 Y_k を含む判定済データ 3 6 (図 1 6) から検出対象 C の位置を抽出することで、判定

50

済データ 3 6 から検出対象 C の位置を抽出し、判定用 3 次元超音波データ 5 5 に存在する検出対象 C を検出することができる。

【 0 1 3 1 】

また、抽出部 1 2 4 が、超音波データ中の位置を示す単位ごとの判定値 Y_k (図 1 6) を閾値に基づいて二値化して検出対象 C の位置を抽出することで、判定済データ 3 6 における検出対象 C が存在する可能性が高い部分を抽出することができる。

【 0 1 3 2 】

なお、本実施形態の単位をボクセルとすることで、ボクセルデータの最小単位であるボクセルごとに処理を行えるようになり、詳細に判定用 3 次元超音波データ 5 5 を判定することができる。

10

【 0 1 3 3 】

また、本実施形態では、2 次元のデータである超音波画像 (判定用超音波画像 3 5) を奥行方向 (走査方向) に重ね合わせて 3 次元のボクセルデータ (ボリュームデータ) として扱うことで、超音波画像の評価 (ボクセルデータの評価) において、検出対象 C (欠陥) の位置と深さをより確実に特定することができる。

【 0 1 3 4 】

さらに、本実施形態では、3 次元の超音波データを生成することで検出対象 C の連続性の情報を保持し、それを用いて学習させた判定モデルを生成することができる。このようにすれば、従来の 1 枚の超音波画像に対してセグメンテーションを実行する方法と比較して、検出対象 C の連続性という新たな情報を加味した判定を行うことができる。

20

【 0 1 3 5 】

なお、本実施形態において、基準値 (閾値) を用いた任意の値 (画素値またはボクセル値) の判定は、「任意の値が基準値以上か否か」の判定でも良いし、「任意の値が基準値を超えているか否か」の判定でも良い。或いは、「任意の値が基準値以下か否か」の判定でも良いし、「任意の値が基準値未満か否か」の判定でも良い。また、基準値が固定されるものでなく、変化するものであっても良い。従って、基準値の代わりに所定範囲の値を用い、任意の値が所定範囲に収まるか否かの判定を行っても良い。また、予め装置に生じる誤差を解析し、基準値を中心として誤差範囲を含めた所定範囲を判定に用いても良い。

【 0 1 3 6 】

なお、本実施形態のフローチャートにおいて、各ステップが直列に実行される形態を例示しているが、必ずしも各ステップの前後関係が固定されるものでなく、一部のステップの前後関係が入れ替わっても良い。また、一部のステップが他のステップと並列に実行されても良い。

30

【 0 1 3 7 】

本実施形態のシステムは、専用のチップ、FPGA (Field Programmable Gate Array)、GPU (Graphics Processing Unit)、または CPU (Central Processing Unit) などのプロセッサを高集積化させた制御装置と、ROM (Read Only Memory) または RAM (Random Access Memory) などの記憶装置と、HDD (Hard Disk Drive) または SSD (Solid State Drive) などの外部記憶装置と、ディスプレイなどの表示装置と、マウスまたはキーボードなどの入力装置と、通信インターフェースとを備える。このシステムは、通常のコンピュータを利用したハードウェア構成で実現できる。

40

【 0 1 3 8 】

なお、本実施形態のシステムで実行されるプログラムは、ROM などに予め組み込んで提供される。もしくは、このプログラムは、インストール可能な形式または実行可能な形式のファイルで CD-ROM、CD-R、メモリカード、DVD、フレキシブルディスク (FD) などのコンピュータで読み取り可能な非一過性の記憶媒体に記憶されて提供するようにしても良い。

【 0 1 3 9 】

また、このシステムで実行されるプログラムは、インターネットなどのネットワークに接続されたコンピュータ上に格納し、ネットワーク経由でダウンロードさせて提供するよ

50

うにしても良い。また、このシステムは、構成要素の各機能を独立して発揮する別々のモジュールを、ネットワークまたは専用線で相互に接続し、組み合わせて構成することもできる。

【0140】

なお、本実施形態では、超音波検査で取得した画像の解析を例示しているが、その他の態様であっても良い。例えば、X線検査、可視光検査、顕微鏡検査、赤外線検査、紫外線検査などで取得した画像の解析に本実施形態を適用しても良い。

【0141】

また、本実施形態では、超音波画像（またはボクセルデータ）がグレースケール画像であるものとして説明したが、その他の態様であっても良い。例えば、超音波画像がRGBなどで表されるカラー画像でも良い。その場合には、例えば、閾値を上回っている画素値を赤色にし、閾値以下の画素値を青色として、表示の形態に特徴を持たせても良い。

【0142】

なお、本実施形態の学習用データは、超音波探傷装置20により得られる複数の学習用超音波画像31から生成される学習用3次元超音波データ51となっているが、その他の態様であっても良い。さらに、本実施形態の判定用データは、超音波探傷装置20により得られる複数の判定用超音波画像35から生成される判定用3次元超音波データ55となっているが、その他の態様であっても良い。例えば、超音波探傷器10がマトリックス・アレイ・プローブで構成され、対象物Qの超音波データを最初からボクセルデータである学習用3次元超音波データ51または判定用3次元超音波データ55として取得しても良い。また、この場合における特定共通領域39（図11）は、立方体であっても良い。

【0143】

さらに、本実施形態の学習用データは、超音波探傷装置20により得られるボクセルデータまたはこれを模して生成されるボクセルデータの少なくとも一方でも良い。このようにすれば、3次元的情報で検出対象Cの学習を行えるため、学習の効率が向上する。

【0144】

以上説明した実施形態によれば、判定モデルを用いて、判定用データ中の位置を示す単位ごとに判定値を算出する判定部を備えることにより、非破壊検査に用いるボクセルデータの評価において対象物に含まれる検出対象の位置を検出する精度を向上させることができる。

【0145】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更、組み合わせを行うことができる。これら実施形態またはその変形は、発明の範囲と要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。

【符号の説明】

【0146】

1...ボクセルデータ評価システム、2...音響伝搬媒質、10...超音波探傷器、11...探触子、11A...超音波素子、20...超音波探傷装置、30...超音波画像処理装置、31...学習用超音波画像、32...入射範囲、33...対象物の表面、35...判定用超音波画像、36...判定済データ、37...端部が存在する可能性が高い領域、38...二値化画像、39...特定共通領域、40...2次元教師ラベル、41...受信波形、42...対象物の表面のエコーの波形、44...亀裂の端部のエコーの波形、45...絶対値化した波形、50...3次元教師ラベル、51...学習用3次元超音波データ、55...判定用3次元超音波データ、60...3D-CADモデル、100...超音波データ評価装置、110...入力部、120...演算部、121...2次元教師ラベル生成部、123...判定部、124...抽出部、125...検出対象位置算出部、130...判定モデル生成部、140...記憶部、141...学習用3次元超音波データ記憶部、142...3次元教師ラベル記憶部、143...判定モデル記憶部、144...判

10

20

30

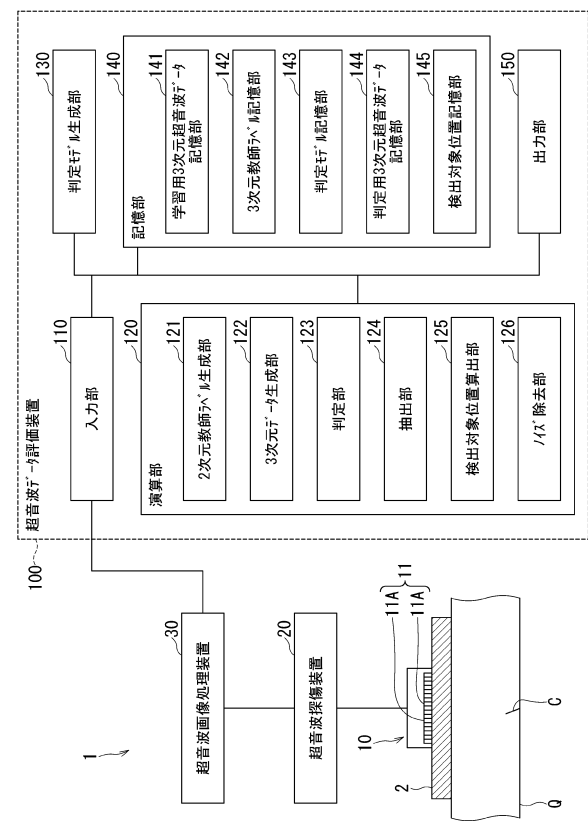
40

50

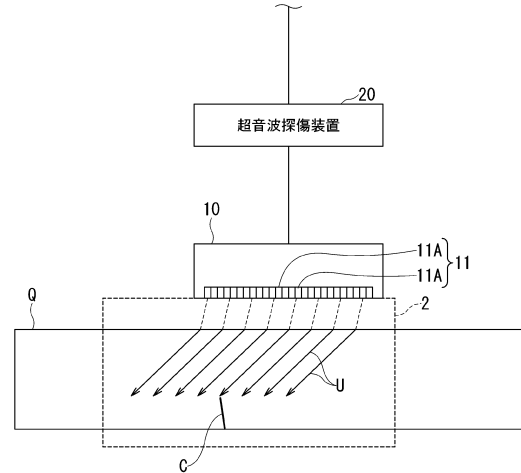
定用 3 次元超音波データ記憶部、145...検出対象位置記憶部、150...出力部、B...背景、C...検出対象、Q...対象物、U...超音波、W...溶接部。

【図面】

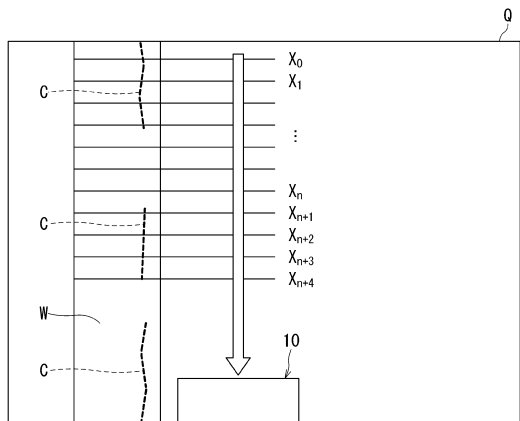
【図 1】



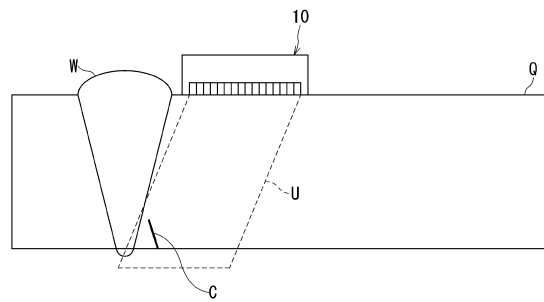
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

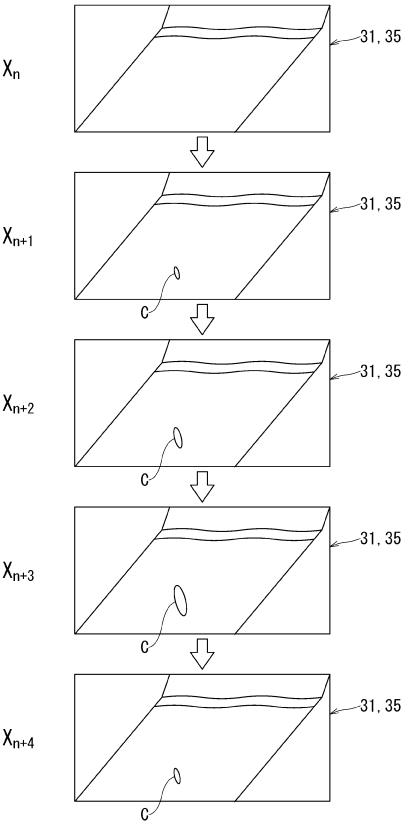
20

30

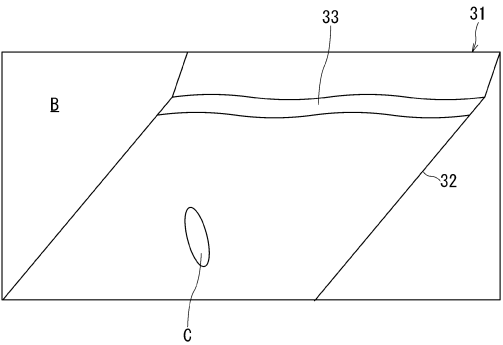
40

50

【図 5】



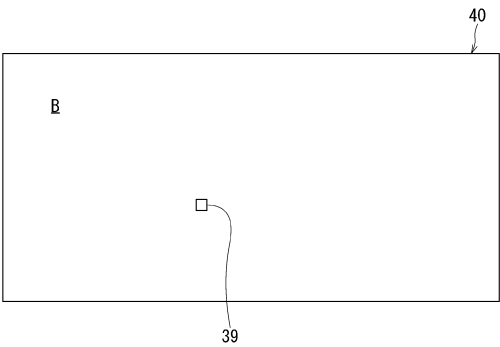
【図 6】



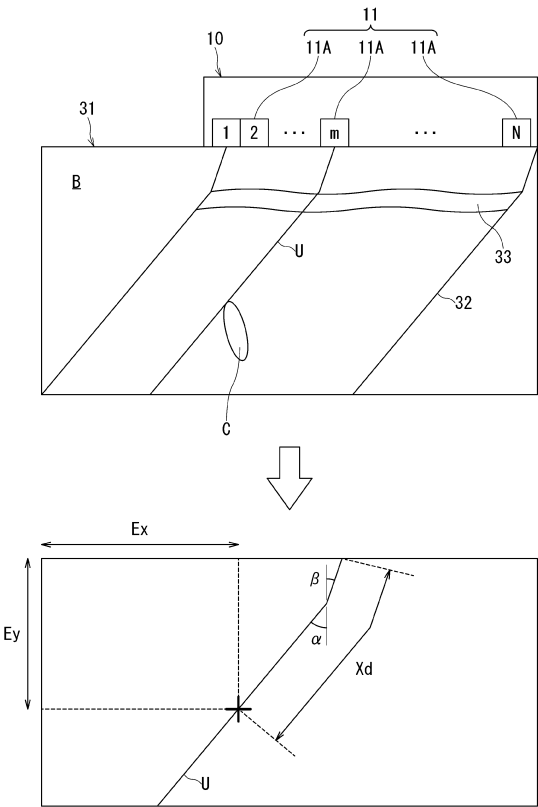
10

20

【図 7】



【図 8】

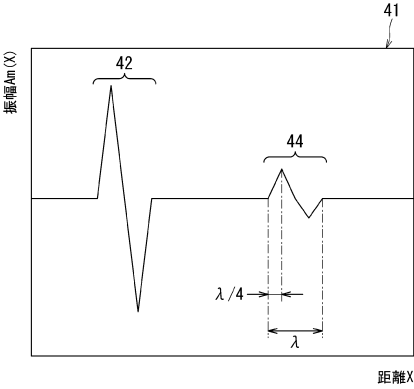


30

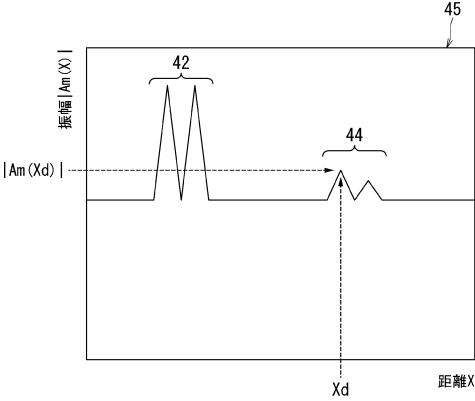
40

50

【図 9】

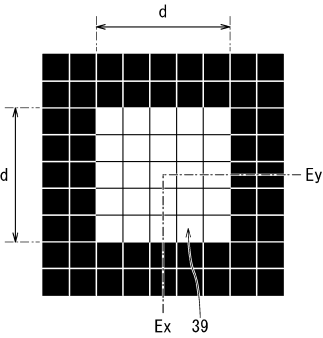


【図 10】

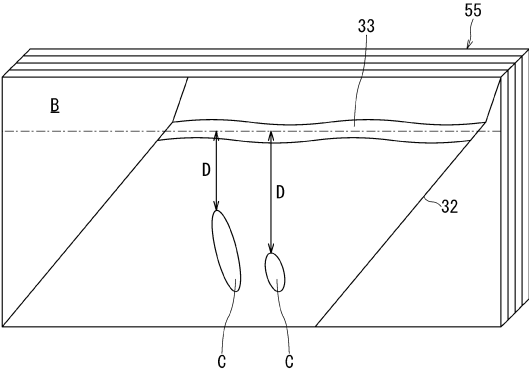


10

【図 11】



【図 12】



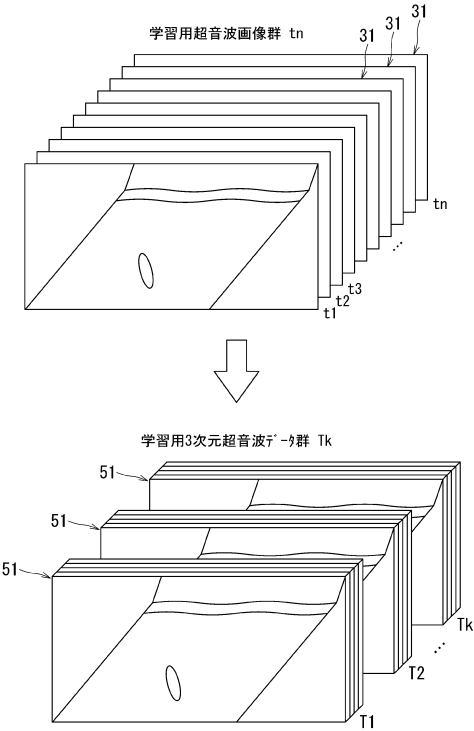
20

30

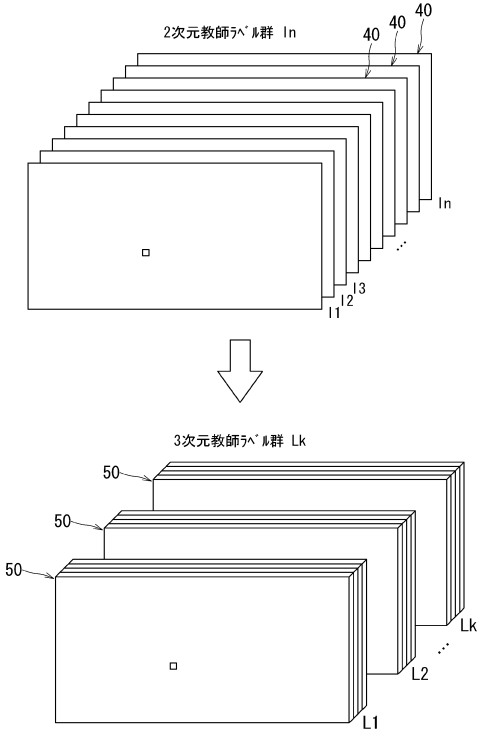
40

50

【図 1 3】



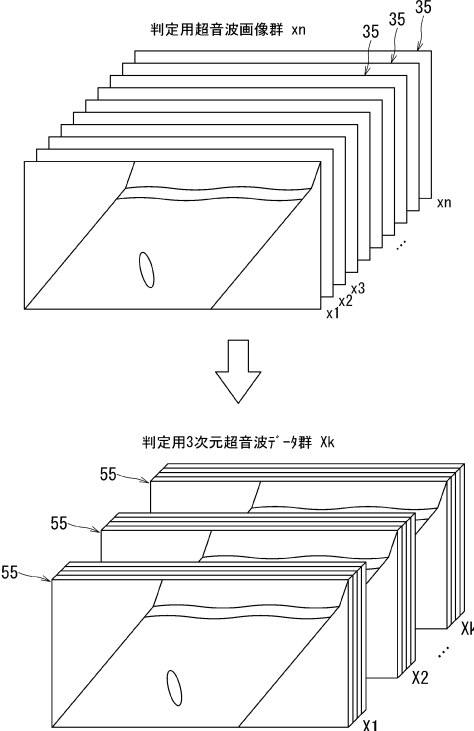
【図 1 4】



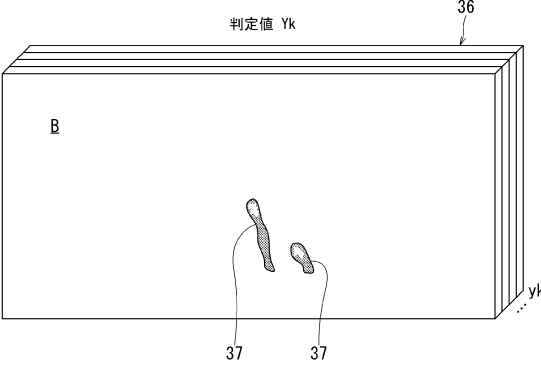
10

20

【図 1 5】



【図 1 6】

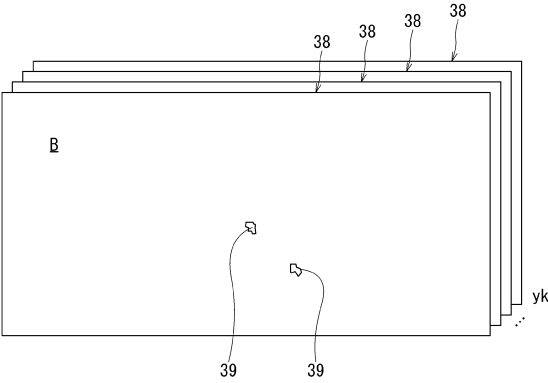


30

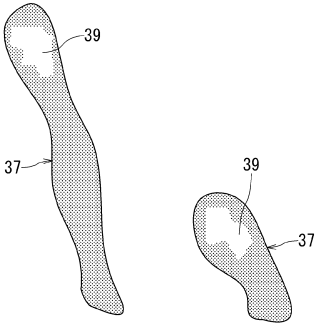
40

50

【図 1 7】

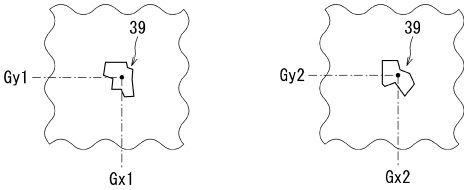


【図 1 8】

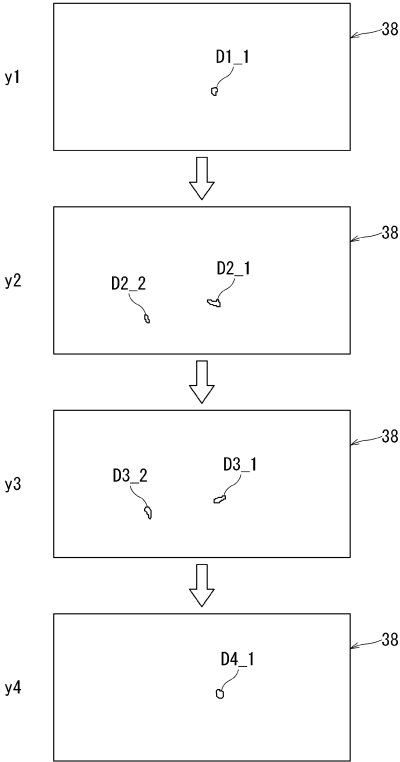


10

【図 1 9】



【図 2 0】



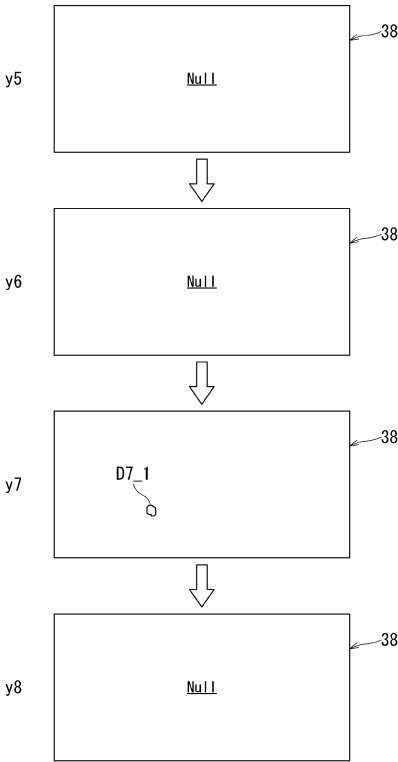
20

30

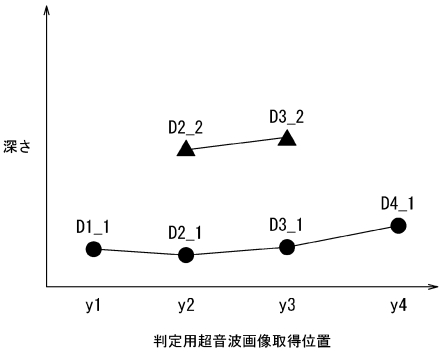
40

50

【図 2 1】

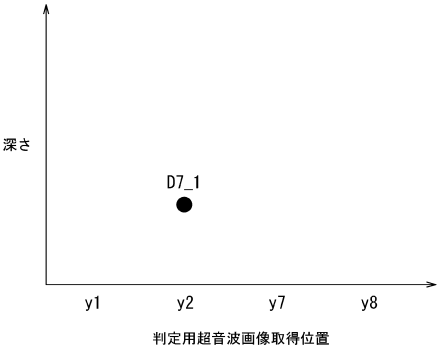


【図 2 2】

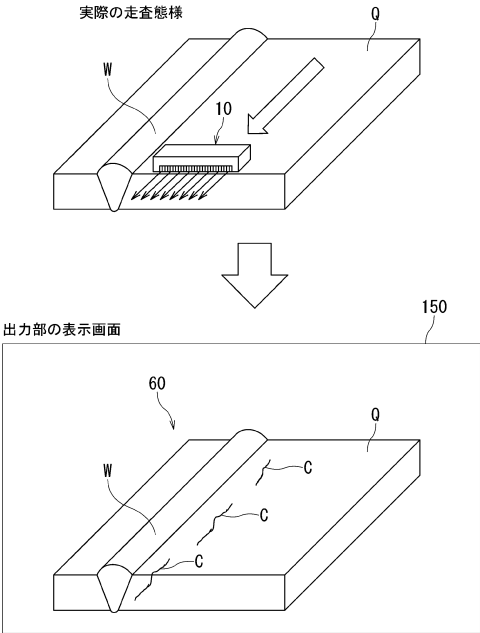


10

【図 2 3】



【図 2 4】

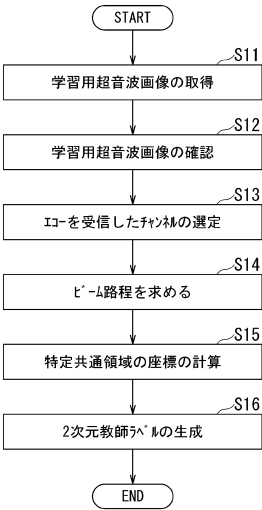


30

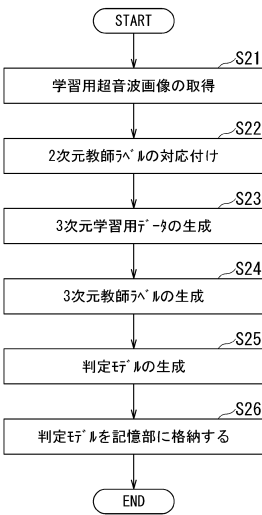
40

50

【図 2 5】

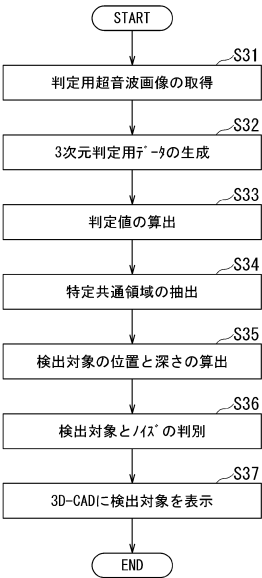


【図 2 6】



10

【図 2 7】



20

30

40

50

フロントページの続き

神奈川県川崎市幸区堀川町 7 2 番地 3 4 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
(72)発明者 千星 淳
神奈川県川崎市幸区堀川町 7 2 番地 3 4 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
(72)発明者 高橋 淳介
神奈川県川崎市幸区堀川町 7 2 番地 3 4 東芝エネルギーシステムズ株式会社内

審査官 村田 顕一郎
(56)参考文献 特開 2 0 2 0 - 0 8 1 8 6 6 (J P , A)
特開 2 0 2 0 - 1 4 4 6 8 8 (J P , A)
特表 2 0 2 0 - 5 3 5 8 9 7 (J P , A)
特開 2 0 2 1 - 0 7 1 3 7 7 (J P , A)
特開 2 0 1 1 - 0 9 8 1 9 5 (J P , A)
特開平 0 8 - 2 9 3 0 2 5 (J P , A)
特表 2 0 2 1 - 5 1 5 3 2 6 (J P , A)
国際公開第 2 0 1 9 / 1 8 2 5 2 0 (W O , A 1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)
G 0 1 N 2 9 / 0 0 - 2 9 / 5 2
G 0 6 T 7 / 0 0 - 7 / 1 9 4
G 0 1 N 2 3 / 1 8
A 6 1 B 6 / 0 0 - 8 / 1 5
A 6 1 B 5 / 0 5 5
G 0 1 N 2 4 / 0 0 - 2 4 / 1 4
J S T P l u s / J M E D P l u s / J S T 7 5 8 0 (J D r e a m I I I)