

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7155277号

(P7155277)

(45)発行日 令和4年10月18日(2022.10.18)

(24)登録日 令和4年10月7日(2022.10.7)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 N 29/14 (2006.01)

G 0 1 N 29/14

G 0 1 N 29/07 (2006.01)

G 0 1 N 29/07

G 0 1 N 29/44 (2006.01)

G 0 1 N 29/44

請求項の数 10 (全23頁)

(21)出願番号 特願2020-546513(P2020-546513)

(86)(22)出願日 平成31年3月15日(2019.3.15)

(86)国際出願番号 PCT/JP2019/010887

(87)国際公開番号 WO2020/188640

(87)国際公開日 令和2年9月24日(2020.9.24)

審査請求日 令和2年9月4日(2020.9.4)

(出願人による申告)平成30年度、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト／インフラ状態モニタリング用センサシステム開発／道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(73)特許権者 000003078

株式会社東芝

東京都港区芝浦一丁目1番1号

(74)代理人 110001634弁理士法人志賀国際特許事務所

(72)発明者 飯田 早苗

東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

(72)発明者 碓井 隆

東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

審査官 越柴 洋哉

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 構造物評価システム、構造物評価装置及び構造物評価方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

弾性波を検出する複数のセンサと、

前記複数のセンサそれぞれによって検出された弾性波毎に、前記弾性波の第1の到達時刻と第2の到達時刻とを決定する到達時刻決定部と、

前記弾性波の第1の到達時刻と第2の到達時刻とに基づいて、前記弾性波の測定波形に関する信頼度を算出する信頼度算出部と、

算出された前記信頼度に基づいて第1のマップを生成するマップ生成部と、
を備える構造物評価システム。

【請求項2】

前記信頼度算出部は、前記第1の到達時刻と前記第2の到達時刻との時刻差の逆数に関する値の積算値を前記信頼度として算出する、請求項1に記載の構造物評価システム。

【請求項3】

前記マップ生成部は、構造物の健全性の評価領域を複数の区画に分割し、分割後の区画に対して前記信頼度に応じた値を割り当てることによって前記第1のマップを生成する、請求項1又は2に記載の構造物評価システム。

【請求項4】

前記複数のセンサそれぞれによって検出された複数の弾性波の到達時刻に基づいて、弾性波の発生源の位置又は弾性波の発生源の位置と前記弾性波の速度を標定する位置速度標定部をさらに備え、

前記マップ生成部は、前記弾性波の発生源の位置及び前記弾性波の速度に基づいて、前記弾性波の速度に関する第２のマップをさらに生成する、請求項１から３のいずれ一項に記載の構造物評価システム。

【請求項５】

前記弾性波に基づいて、前記弾性波の第１の到達時刻を補正する補正部をさらに備える、請求項１から４のいずれか一項に記載の構造物評価システム。

【請求項６】

前記補正部は、１つのセンサで得られる複数の弾性波に基づいて、異常が生じている可能性があるセンサを特定し、前記異常が生じている可能性があるセンサで検出された前記弾性波の前記第１の到達時刻を補正する、請求項５に記載の構造物評価システム。

10

【請求項７】

前記信頼度に基づいて、評価領域内において損傷が生じている領域、又は、前記センサに異常が生じている可能性がある旨の評価を行う測定結果評価部をさらに備える、請求項１から６のいずれか一項に記載の構造物評価システム。

【請求項８】

前記弾性波の振幅に応じて評価に利用する弾性波を選択する選択部をさらに備え、

前記到達時刻決定部は、選択された前記弾性波を用いて前記第１の到達時刻と第２の到達時刻を決定する、請求項１から７のいずれか一項に記載の構造物評価システム。

【請求項９】

弾性波を検出する複数のセンサそれぞれによって検出された弾性波毎に決定された前記弾性波の第１の到達時刻と第２の到達時刻に基づいて算出された前記弾性波の測定波形に関する信頼度に基づいて第１のマップを生成するマップ生成部、
を備える構造物評価装置。

20

【請求項１０】

弾性波を検出する複数のセンサそれぞれによって検出された弾性波毎に、前記弾性波の第１の到達時刻と第２の到達時刻とを決定する到達時刻決定ステップと、

前記弾性波の第１の到達時刻と第２の到達時刻とに基づいて、前記弾性波の測定波形に関する信頼度を算出する信頼度算出ステップと、

算出された前記信頼度に基づいて第１のマップを生成するマップ生成ステップと、
を有する構造物評価方法。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明の実施形態は、構造物評価システム、構造物評価装置及び構造物評価方法に関する。

【背景技術】

【０００２】

近年、高度経済成長期に建設された橋梁等の構造物の老朽化に伴う問題が顕在化してきている。万が一にも構造物に事故が生じた場合の損害は計り知れないため、従来から構造物の状態を監視するための技術が提案されている。例えば、内部亀裂の発生、又は、内部亀裂の進展に伴い発生する弾性波を、高感度センサにより検出するＡＥ（Acoustic Emission:アコースティック・エミッション）方式により、構造物の損傷を検出する技術が提案されている。ＡＥは、材料の疲労亀裂の進展に伴い発生する弾性波である。ＡＥ方式では、圧電素子を利用したＡＥセンサにより弾性波をＡＥ信号（電圧信号）として検出する。ＡＥ信号は、材料の破断が生じる前の兆候として検出される。したがって、ＡＥ信号の発生頻度及び信号強度は、材料の健全性を表す指標として有用である。そのため、ＡＥ方式によって構造物の劣化の予兆を検出する技術の研究が行われている。

40

【０００３】

ところで、ＡＥ信号を利用した構造物の評価方法の一つとして、トモグラフィ法が知られている。トモグラフィとは、複数のセンサ間で検出された信号の到達時間差を利用して

50

、計測領域における内部速度場構造を推定する逆解析手法の一つである。トモグラフィは、速度場の変化として、構造物内部の損傷部分を検出する非破壊検査法として利用することができる。特に、その信号源として材料内部から発生するA E信号を用いる方式はA Eトモグラフィとして知られている。しかしながら、実環境におけるA Eトモグラフィで得られる結果には、測定誤差に基づく推定誤差が含まれるため必ずしも正確ではない。そのため、A Eトモグラフィで得られる結果に基づく構造物の劣化状態の評価精度が低い場合があった。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

10

【文献】特開2014-95555号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本発明が解決しようとする課題は、構造物の劣化状態の評価精度を向上させることができる構造物評価システム、構造物評価装置及び構造物評価方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0006】

実施形態の構造物評価システムは、複数のセンサと、到達時刻決定部と、信頼度算出部と、マップ生成部とを持つ。複数のセンサは、弾性波を検出する。到達時刻決定部は、前記複数のセンサそれぞれによって検出された弾性波毎に、前記弾性波の第1の到達時刻と第2の到達時刻とを決定する。信頼度算出部は、前記弾性波の第1の到達時刻と第2の到達時刻とに基づいて、前記弾性波の測定波形に関する信頼度を算出する。マップ生成部は、算出された前記信頼度に基づいて第1のマップを生成する。

20

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図1】第1の実施形態における構造物評価システムの構成を示す図。

【図2】第1の実施形態における信号処理部の機能を表す概略ブロック図。

【図3】第1の実施形態における評価部の機能を表す概略ブロック図。

【図4】シミュレーション用に用意したコンクリート床板の構造物モデルを示す図。

30

【図5A】センサで検出した弾性波の波形を表す図。

【図5B】センサで検出した弾性波の波形を表す図。

【図5C】センサで検出した弾性波の波形を表す図。

【図5D】センサで検出した弾性波の波形を表す図。

【図5E】センサで検出した弾性波の波形を表す図。

【図6】本実施形態における誤差マップの具体例を示す図。

【図7】第1の実施形態における構造物評価システムによる劣化状態の評価処理の流れを示すシーケンス図。

【図8】第2の実施形態における評価部の機能を表す概略ブロック図。

【図9】本実施形態における速度場マップの具体例を示す図。

40

【図10】第2の実施形態における構造物評価システムによる劣化状態の評価処理の流れを示すシーケンス図。

【図11】第3の実施形態における信号処理部の機能を表す概略ブロック図。

【図12A】センサで検出した弾性波の波形を表す図。

【図12B】センサで検出した弾性波の波形を表す図。

【図13A】本実施形態における誤差マップの具体例を示す図。

【図13B】本実施形態における速度場マップの具体例を示す図。

【図13C】本実施形態における補正後の速度場マップの具体例を示す図。

【図14】第4の実施形態における評価部の機能を表す概略ブロック図。

【図15】第5の実施形態における構造物評価システムのシステム構成を示す図。

50

【図 1 6】第 6 の実施形態における構造物評価システムのシステム構成を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0008】

以下、実施形態の構造物評価システム、構造物評価装置及び構造物評価方法を、図面を参照して説明する。

(第 1 の実施形態)

図 1 は、第 1 の実施形態における構造物評価システム 100 の構成を示す図である。

構造物評価システム 100 は、構造物の健全性の評価に用いられる。以下の説明において、評価とは、ある基準に基づいて構造物の健全性の度合い、すなわち構造物の劣化状態を決定することを意味する。なお、以下の説明では、構造物の一例としてコンクリートで構成された橋梁を例に説明するが、構造物は橋梁に限定される必要はない。構造物は、亀裂の発生または進展、あるいは外的衝撃（例えば雨、人工雨など）に伴い弾性波が発生する構造物であればどのようなものであってもよい。例えば、構造物は、岩盤であってもよい。なお、橋梁は、河川や渓谷等の上に架設される構造物に限らず、地面よりも上方に設けられる種々の構造物（例えば高速道路の高架橋）なども含む。

【0009】

また、構造物の劣化状態の評価に影響を及ぼす損傷としては、例えば亀裂、空洞、土砂化等の弾性波の伝搬を妨害する構造物内部の損傷がある。ここで、亀裂には、縦方向の亀裂、横方向の亀裂及び斜め方向の亀裂等が含まれる。縦方向の亀裂とは、センサが設置されている構造物の面に垂直な方向に生じている亀裂である。横方向の亀裂とは、センサが設置されている構造物の面に水平な方向に生じている亀裂である。斜め方向の亀裂とは、センサが設置されている構造物の面に水平及び垂直以外の方向に生じている亀裂である。土砂化とは、主にアスファルトとコンクリート床版の境界部でコンクリートが土砂状に変化する劣化である。

以下、構造物評価システム 100 の具体的な構成について説明する。

【0010】

構造物評価システム 100 は、複数のセンサ 10 - 1 ~ 10 - n（n は 3 以上の整数）、複数の増幅器 11 - 1 ~ 11 - n、複数の A/D 変換器 12 - 1 ~ 12 - n、信号処理部 20 及び構造物評価装置 30 を備える。信号処理部 20 と構造物評価装置 30 とは、有線により通信可能に接続される。なお、以下の説明では、センサ 10 - 1 ~ 10 - n を区別しない場合にはセンサ 10 と記載する。以下の説明では、増幅器 11 - 1 ~ 11 - n を区別しない場合には増幅器 11 と記載と記載する。以下の説明では、A/D 変換器 12 - 1 ~ 12 - n を区別しない場合には A/D 変換器 12 と記載する。

【0011】

センサ 10 は、構造物に設置される。例えば、センサ 10 は、橋梁のコンクリート床版に設置される。センサ 10 は、圧電素子を有し、構造物内部から発生する弾性波を検出する。センサ 10 は、弾性波を検出することが可能な位置に設置される。例えば、センサ 10 は、構造物の表面、側面及び底面のいずれかの面上に設置される。センサ 10 は、検出した弾性波を電圧信号である A/E 源信号に変換する。センサ 10 は、A/E 源信号を増幅器 11 に出力する。

【0012】

センサ 10 には、例えば 10 kHz ~ 1 MHz の範囲に感度を有する圧電素子が用いられる。センサ 10 は、周波数範囲内に共振ピークをもつ共振型、共振を抑えた広帯域型等の種類があるが、センサ 10 の種類はいずれでもよい。また、センサ 10 が弾性波を検出する方法は、電圧出力型、抵抗変化型及び静電容量型等があるが、いずれの検出方法でもよい。なお、センサ 10 に代えて加速度センサが用いられてもよい。この場合、加速度センサは、構造物内部から発生する弾性波を検出する。そして、加速度センサは、センサ 10 と同様の処理を行うことによって、検出した弾性波を電圧信号である A/E 源信号に変換する。その後、加速度センサは、変換後の A/E 源信号を増幅器 11 に出力する。構造物の厚さは、例えば 15 cm 以上である。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 3 】

増幅器 1 1 は、センサ 1 0 から出力された A E 源信号を増幅し、増幅後の A E 源信号を A / D 変換器 1 2 に出力する。

A / D 変換器 1 2 は、増幅された A E 源信号を受けると、A E 源信号を量子化してデジタル信号に変換する。A / D 変換器 1 2 は、A E 源信号をデジタルの時系列データとして信号処理部 2 0 に出力する。

信号処理部 2 0 は、A / D 変換器 1 2 から出力された時系列データを入力とする。信号処理部 2 0 は、入力した時系列データのデジタル信号に対して、信号処理を行う。信号処理部 2 0 が行う信号処理は、例えば、ノイズ除去、パラメータ抽出等である。信号処理部 2 0 は、信号処理後のデジタル信号を含む送信データを生成し、生成した送信データを構造物評価装置 3 0 に出力する。

10

【 0 0 1 4 】

構造物評価装置 3 0 は、バスで接続された C P U (Central Processing Unit) やメモリや補助記憶装置などを備え、評価プログラムを実行する。評価プログラムの実行によって、構造物評価装置 3 0 は、評価部 3 1、表示部 3 2 を備える装置として機能する。なお、構造物評価装置 3 0 の各機能の全て又は一部は、A S I C (Application Specific Integrated Circuit) や P L D (Programmable Logic Device) や F P G A (Field Programmable Gate Array) 等のハードウェアを用いて実現されてもよい。また、評価プログラムは、コンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録されてもよい。コンピュータ読み取り可能な記録媒体とは、例えばフレキシブルディスク、光磁気ディスク、R O M、C D - R O M 等の可搬媒体、コンピュータシステムに内蔵されるハードディスク等の記憶装置である。また、評価プログラムは、電気通信回線を介して送受信されてもよい。

20

【 0 0 1 5 】

評価部 3 1 は、信号処理部 2 0 から出力された送信データを入力とする。評価部 3 1 は、入力した送信データに基づいて構造物の健全性を評価する。

表示部 3 2 は、液晶ディスプレイ、有機 E L (Electro Luminescence) ディスプレイ等の画像表示装置である。表示部 3 2 は、評価部 3 1 の制御に従って評価結果を表示する。表示部 3 2 は、画像表示装置を構造物評価装置 3 0 に接続するためのインタフェースであってもよい。この場合、表示部 3 2 は、評価結果を表示するための映像信号を生成し、自身に接続されている画像表示装置に映像信号を出力する。

30

【 0 0 1 6 】

図 2 は、第 1 の実施形態における信号処理部 2 0 の機能を表す概略ブロック図である。信号処理部 2 0 は、波形整形フィルタ 2 0 1、ゲート生成回路 2 0 2、到達時刻決定部 2 0 3、信頼度算出部 2 0 4、特徴量抽出部 2 0 5、送信データ生成部 2 0 6、メモリ 2 0 7 及び出力部 2 0 8 を備える。

波形整形フィルタ 2 0 1 は、入力された時系列データのデジタル信号から所定の信号帯域外のノイズ成分を除去する。波形整形フィルタ 2 0 1 は、例えばデジタルバンドパスフィルタ (B P F) である。波形整形フィルタ 2 0 1 は、ノイズ成分除去後の信号 (以下「ノイズ除去弾性波信号」という。) をゲート生成回路 2 0 2、到達時刻決定部 2 0 3、信頼度算出部 2 0 4 及び特徴量抽出部 2 0 5 に出力する。

40

【 0 0 1 7 】

ゲート生成回路 2 0 2 は、波形整形フィルタ 2 0 1 から出力されたノイズ除去弾性波信号を入力とする。ゲート生成回路 2 0 2 は、入力したノイズ除去弾性波信号の波形が持続しているか否かを示すゲート信号を生成する。ゲート生成回路 2 0 2 は、例えばエンベロープ検出器及びコンパレータにより実現される。エンベロープ検出器は、ノイズ除去弾性波信号のエンベロープを検出する。エンベロープは、例えば、ノイズ除去弾性波信号を二乗し、二乗した出力値に対して所定の処理 (例えばローパスフィルタを用いた処理やヒルベルト変換) を行うことで抽出される。コンパレータは、ノイズ除去弾性波信号のエンベロープが所定の閾値以上であるか否かを判定する。

【 0 0 1 8 】

50

ゲート生成回路 202 は、ノイズ除去弾性波信号のエンベロープが所定の閾値以上となった場合、ノイズ除去弾性波信号の波形が持続していることを示す第 1 のゲート信号を到達時刻決定部 203、信頼度算出部 204 及び特徴量抽出部 205 に出力する。一方、ゲート生成回路 202 は、ノイズ除去弾性波信号のエンベロープが所定の閾値未満になった場合、ノイズ除去弾性波信号の波形が持続していないことを示す第 2 のゲート信号を到達時刻決定部 203、信頼度算出部 204 及び特徴量抽出部 205 に出力する。

【0019】

到達時刻決定部 203 は、波形整形フィルタ 201 から出力されたノイズ除去弾性波信号と、ゲート生成回路 202 から出力されたゲート信号とを入力とする。到達時刻決定部 203 は、第 1 のゲート信号が入力されている間に入力されたノイズ除去弾性波信号を用いて、第 1 の弾性波到達時刻 t_M 及び第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} を決定する。第 1 の弾性波到達時刻 t_M 及び第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} は、機械学習により求められる弾性波の到達時刻、ノイズ除去弾性波信号の振幅が所定の閾値を超えた時刻、あるいは、これらの情報を組み合わせた所定の基準を満たした時刻のいずれかの時刻である。

【0020】

機械学習により求められる弾性波の到達時刻は、機械学習によりセンサ 10 に弾性波が受信されたと判定された時刻である。機械学習により第 1 の弾性波到達時刻 t_M を求める方法としては、例えば AIC (Akaike's Information Criterion)、Change Finder、深層学習による変化点検出アルゴリズム等の手法を用いることができる。以下の説明では、第 1 の弾性波到達時刻 t_M を求める手法として、Change Finder を用い、第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} を求める手法として、ノイズ除去弾性波信号の振幅が所定の閾値を超えた時刻を用いた場合について説明する。到達時刻決定部 203 は、決定した第 1 の弾性波到達時刻 t_M 及び第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} を時刻情報として信頼度算出部 204 及び送信データ生成部 206 に出力する。

【0021】

信頼度算出部 204 は、ノイズ除去弾性波信号と、ゲート信号と、時刻情報とを入力とする。信頼度算出部 204 は、第 1 のゲート信号が入力されている間に得られた時刻情報に基づいて、弾性波の測定波形に関する信頼度を算出する。信頼度は、第 1 の弾性波到達時刻 t_M と第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} との差 $\Delta t = |t_M - t_{TH}|$ の逆数に関する値である。信頼度算出部 204 は、算出した信頼度の情報を送信データ生成部 206 に出力する。

【0022】

特徴量抽出部 205 は、波形整形フィルタ 201 から出力されたノイズ除去弾性波信号と、ゲート生成回路 202 から出力されたゲート信号とを入力とする。特徴量抽出部 205 は、第 1 のゲート信号が入力されている間に入力されたノイズ除去弾性波信号を用いて、ノイズ除去弾性波信号の特徴量を抽出する。特徴量は、ノイズ除去弾性波信号の特徴を示す情報である。

【0023】

特徴量は、例えばノイズ除去弾性波信号の波形の振幅 [mV]、ゲート信号の立ち上がり時間 [usec]、ゲート信号の持続時間 [usec]、ノイズ除去弾性波信号のゼロクロスカウンタ数 [times]、ノイズ除去弾性波信号の波形のエネルギー [arb.] 及びノイズ除去弾性波信号の周波数 [Hz] 等である。特徴量抽出部 205 は、抽出した特徴量に関するパラメータを送信データ生成部 206 に出力する。特徴量抽出部 205 は、特徴量に関するパラメータを出力する際に、特徴量に関するパラメータにセンサ ID を対応付ける。センサ ID は、構造物の健全性の評価対象となる領域（以下「評価領域」という。）に設置されているセンサ 10 を識別するための識別情報を表す。

【0024】

ノイズ除去弾性波信号の振幅は、例えばノイズ除去弾性波信号の中で最大振幅の値である。ゲート信号の立ち上がり時間は、例えばゲート信号がゼロ値から予め設定される所定値を超えて立ち上がるまでの時間 T_1 である。ゲート信号の持続時間は、例えばゲート信号の立ち上がり開始から振幅が予め設定される値よりも小さくなるまでの時間である。ノ

10

20

30

40

50

イズ除去弾性波信号のゼロクロスカウンタ数は、例えばゼロ値を通る基準線をノイズ除去弾性波信号が横切る回数である。ノイズ除去弾性波信号の波形のエネルギーは、例えば各時点において振幅を二乗したものを時間積分した値である。なお、エネルギーの定義は、上記例に限定されず、例えば波形の包絡線を用いて近似されたものでもよい。ノイズ除去弾性波信号の周波数は、ノイズ除去弾性波信号の周波数である。

【0025】

送信データ生成部206は、時刻情報と、信頼度の情報と、特徴量に関するパラメータとを入力とする。送信データ生成部206は、入力した時刻情報と、信頼度の情報と、特徴量に関するパラメータとを対応付けることによって送信データを生成する。

メモリ207は、送信データを記憶する。メモリ207は、例えばデュアルポートRAM(Random Access Memory)である。

出力部208は、メモリ207に記憶されている送信データを構造物評価装置30に逐次出力する。

【0026】

図3は、第1の実施形態における評価部31の機能を表す概略ブロック図である。図3に示すように、評価部31は、取得部311、メモリ312、イベント抽出部313、位置速度標定部314及び誤差マップ生成部315を備える。

取得部311は、信号処理部20から出力された送信データを取得する。取得部311は、取得した送信データをメモリ312に記憶する。

メモリ312は、取得部311によって取得された送信データを記憶する。メモリ312は、磁気ハードディスク装置や半導体記憶装置などの記憶装置を用いて構成される。

【0027】

イベント抽出部313は、メモリ312に記憶されている送信データの中から1イベントにおける送信データを抽出する。イベントとは、構造物で起こったある弾性波発生事象を表す。構造物におけるクラックの発生などに伴い、1回のイベントが発生した場合、複数のセンサ10で略同時刻に弾性波が検出されることになる。すなわち、メモリ312には、略同時刻に検出された弾性波に関する送信データが記憶されている。そこで、イベント抽出部313は、所定の時間窓を設け、到達時刻がその時間窓の範囲内に存在する全ての送信データを1イベントにおける送信データとして抽出する。イベント抽出部313は、抽出した1イベントにおける送信データを位置速度標定部314及び誤差マップ生成部315に出力する。

【0028】

時間窓の範囲 T_w は、対象とする構造物の弾性波伝播速度 v と、最大のセンサ間隔 d_{max} を用いて、 $T_w = d_{max} / v$ の範囲になるように決定してもよい。誤検出を避けるためには、 T_w をできるだけ小さい値に設定することが望ましいため、実質的には $T_w = d_{max} / v$ とすることができる。

位置速度標定部314は、イベント抽出部313によって抽出された複数の送信データに基づいて、弾性波の発生源(以下「弾性波源」という。)の位置及び構造物の弾性波伝播速度を標定する。

【0029】

なお、位置速度標定部314は、構造物に対して設置されたセンサ10の設置位置に関する情報(以下「センサ位置情報」という。)をセンサIDに対応付けて予め保持する。センサ位置情報は、例えば緯度および経度、あるいは構造物の基準となる位置からの水平方向および垂直方向の距離などである。弾性波源の位置及び構造物の弾性波伝播速度の標定には、カルマンフィルタ、最小二乗法などが用いられてもよい。位置速度標定部314は、標定した弾性波源の位置情報を誤差マップ生成部315に出力する。

【0030】

誤差マップ生成部315は、イベント抽出部313から出力された複数のイベントにおける送信データに含まれる信頼度の情報及び時刻情報と、評定された弾性波源の位置とに基づいて誤差マップ(第1のマップ)を生成する。誤差マップは、評価領域が複数の区画

10

20

30

40

50

に分割され、各区画に対して弾性波の到達時刻の時刻差の逆数に関する値の積算値が割り当てられた分布図を表す。すなわち、誤差マップは、評価領域において弾性波の到達時刻の時刻差（誤差）の大きさの度合いが示された分布図である。なお、誤差マップにおいて、各区画の弾性波の通過頻度に差がある場合、通過頻度が高い区画は信頼度の積算値が大きく、通過頻度の低い区画は信頼度の積算値が小さくなる。誤差マップの生成には、カルマンフィルタや最小二乗法等の各種正則化最小二乗法を用いることができる。誤差マップにより、評価領域のどの領域において弾性波の到達時刻の時刻差の度合いが大きいのか、また各区画における弾性波の通過頻度の多さを把握することが可能になる。弾性波の到達時刻の時刻差の度合いが大きいほど、センサ 10 の接着不良等の障害が生じている可能性が高い。

10

【0031】

次に、図 4 から図 6 を用いて、本実施形態における構造物評価システム 100 の処理について説明する。図 4 は、シミュレーション用に用意したコンクリート床板の構造物モデルを示す図である。図 4 に示すコンクリート床板は、一辺が 800 mm の正方形である。コンクリート床板の四隅にはセンサ 10 - 1 ~ 10 - 4 が設置され、コンクリート床板の中央にはセンサ 10 - 5 が設置されている。また、図 4 において領域 41 は損傷が生じている領域（以下「損傷領域」という。）を表す。また、シミュレーションの例として、25 点の衝撃をコンクリート床板に加え弾性波を発生させた。

【0032】

図 4 における点 42 で示す位置でコンクリート床板に衝撃を加えた場合に、各センサ 10 - 1 ~ 10 - 5 で検出された弾性波の波形を図 5 A ~ 図 5 E に示す。図 5 A はセンサ 10 - 1 で検出した弾性波の波形を表し、図 5 B はセンサ 10 - 2 で検出した弾性波の波形を表し、図 5 C はセンサ 10 - 3 で検出した弾性波の波形を表し、図 5 D はセンサ 10 - 4 で検出した弾性波の波形を表し、図 5 E はセンサ 10 - 5 で検出した弾性波の波形を表す。図 5 A ~ 図 5 E の上図において、縦軸は弾性波の振幅を表し、横軸は時間を表す。また、図 5 A ~ 図 5 E の下図において、縦軸は CF (Change finder) のスコアを表し、横軸は時間を表す。図 5 A ~ 図 5 E における t_{CF1} の時刻は、到達時刻決定部 203 が Change Finder の手法により求めた第 1 の弾性波到達時刻 t_M である。すなわち、時刻 t_{CF1} は、CF のスコアがある閾値を超えた時刻である。図 5 A ~ 図 5 E における t_{TH} の時刻は、第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} である。

20

30

【0033】

図 5 A 及び図 5 B において、第 1 の弾性波到達時刻 t_M と第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} との誤差が大きいことがわかる。これは、測定波形の振幅が小さく (SN (Signal-to-Noise) が悪く)、弾性波の振幅が閾値を超える時刻が遅く検出されたことが原因と考えられる。センサ 10 - 1 及びセンサ 10 - 2 を後で調べると、接着不良の問題があったことがわかった。

【0034】

図 6 は、本実施形態における誤差マップの具体例を示す図である。

図 6 では、上記のシミュレーションにおいて 25 点の衝撃をコンクリート床板に加えて弾性波を発生させた際の誤差マップ 50 をコンター図で示している。図 6 に示すように、誤差マップ 50 の左側の領域では、誤差が大きくなっている。これは、センサ 10 - 1 及びセンサ 10 - 2 に接着不良があったことが原因であると考えられる。

40

【0035】

図 7 は、第 1 の実施形態における構造物評価システム 100 による劣化状態の評価処理の流れを示すシーケンス図である。図 7 に示す例では、ゲート生成回路 202 から第 1 のゲート信号が出力された後の処理を示している。

到達時刻決定部 204 は、ノイズ除去弾性波信号に基づいて第 1 の弾性波到達時刻 t_M 及び第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} を決定する (ステップ S101)。到達時刻決定部 203 は、決定した時刻情報を信頼度算出部 204 及び送信データ生成部 206 に出力する。

【0036】

50

信頼度算出部 204 は、第 1 のゲート信号が入力されている間に得られた時刻情報に基づいて、ノイズ除去弾性波信号の信頼度を算出する（ステップ S102）。例えば、信頼度算出部 204 は、第 1 の弾性波到達時刻 t_M と第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} との時刻差の逆数に関する値を信頼度として算出する。信頼度算出部 204 は、算出した信頼度の情報を送信データ生成部 206 に出力する。

特徴量抽出部 205 は、第 1 のゲート信号が入力されている間に得られたノイズ除去弾性波信号の特徴量を抽出する（ステップ S103）。送信データ生成部 206 は、ステップ S101 からステップ S103 までの処理で取得された情報を対応付けることによって送信データを生成する（ステップ S104）。出力部 208 は、生成された送信データを構造物評価装置 30 に出力する（ステップ S105）。なお、ステップ S101 からステップ S105 までの処理は、センサ 10 において弾性波が検出されて第 1 のゲート信号が出力される度に実行される。すなわち、第 1 のゲート信号が出力される度に、第 1 の弾性波到達時刻 t_M 、第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} 、信頼度及び特徴量が取得される。

【0037】

取得部 311 は、信号処理部 20 から出力された送信データを取得し、取得した送信データをメモリ 312 に記憶する（ステップ S106）。イベント抽出部 313 は、メモリ 312 に記憶されている送信データの中から 1 イベントにおける送信データを抽出する（ステップ S107）。なお、イベント抽出部 313 は位置及び速度標定するために必要となる数（例えば、3 つ）より多い 1 イベントにおける送信データを抽出する。イベント抽出部 313 は、抽出した送信データを位置速度標定部 314 に出力する。

【0038】

位置速度標定部 314 は、1 イベントにおける送信データに基づいて、1 イベントで発生した弾性波源の位置又は位置と弾性波の速度を標定する（ステップ S108）。なお、位置速度標定部 314 が、弾性波源の位置のみを標定する場合、構造物評価装置 30 には弾性波の速度を標定する他の機能部が設けられてもよい。以下、弾性波源の位置又は位置と弾性波の速度の導出方法について具体的に説明する。複数のセンサ 10 のうち、1 つのセンサ 10 を原点とする 3 次元座標系を考える。センサ 10 の数を n 個とした場合、原点のセンサ S_0 と、他のセンサ S_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) との間の到達時間差 Δt_i は、弾性波源の座標 (x_s, y_s, z_s) 、センサ S_i の座標 (a_i, b_i, c_i) 、弾性波伝播速度 v とすると以下の式 1 のように表される。

【0039】

【数 1】

$$\Delta t_i = \frac{\sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2 + (z-c_i)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v} \quad \dots (式 1)$$

【0040】

観測される値は t_i であり、 n 個のセンサに対して $n-1$ 個の (x_s, y_s, z_s, v) を未知数とする非線形連立方程式が得られる。種々の近似的解法を用いることにより未知数 (x_s, y_s, z_s, v) を求めることが可能になる。位置速度標定部 314 は、評定した弾性波源の位置情報を誤差マップ生成部 315 に出力する。

【0041】

誤差マップ生成部 315 は、イベント抽出部 313 から出力された複数のイベントにおける送信データに含まれる信頼度の情報及び時刻情報と、弾性波源の位置情報とに基づいて誤差マップを生成する（ステップ S109）。

【0042】

まず、誤差マップ生成部 315 は、構造物の評価領域を複数の区画に分割する。次に、誤差マップ生成部 315 は、各区画の弾性波の速度の逆数であるスローネス S を測定値に

10

20

30

40

50

最も合うように調整して、対象領域の速度場分布を推定する。これを定式化すると観測方程式は式(2)のように表される。

【0043】

【数2】

$$Y = HX + V \quad \dots (式2)$$

$$Y = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1m} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & l_{nm} \end{bmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad 10$$

【0044】

式(2)において、Yは測定値(到達時刻)ベクトル、Hは観測行列、Xは未知パラメータ(スローネス)ベクトル、Vは測定誤差ベクトルを表す。観測行列Hの要素 l_{ij} (i, j は1以上の整数)は、センサ10-iで測定された弾性波が区画jを通過する線分の長さを指す。この連立方程式になるべくよく合う解を得るため、何らかの目的関数を最小化するXを求める。以下、カルマンフィルタを用いたときの目的関数について説明する。目的関数は、以下の式(3)のように表される。

20

【0045】

【数3】

$$\min. J(X) = (Y - HX)^T R^{-1} (Y - HX) + (X - \bar{X})^T P^{-1} (X - \bar{X}) \quad \dots (式3)$$

【0046】

30

式(3)において、 $X - (-$ はXの上、以下同様)はXの推定値を表し、PはXの推定誤差共分散行列を表し、Rは Δt を対角成分に持つ測定誤差共分散行列を表す。なお、Rの逆数が、時刻差の逆数に関する値に対応する。この式(3)を最小化する $X^{\wedge}$ ($\wedge$ はXの上、以下同様)は以下の式(4)のように与えられる。

【0047】

【数4】

$$\begin{aligned} \hat{X}_k &= \hat{X}_{k-1} + K_k (Y - H\hat{X}_{k-1}) \\ P_k &= (P_{k-1}^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} \quad \dots (式4) \\ K_k &= P_k H^T R^{-1} \end{aligned}$$

40

【0048】

Pの対角項はパラメータXの推定誤差分散を表し、その平方根は推定誤差に相当する。つまり、誤差マップ生成部315は、各区画のPの対角項を対応する区画にマッピングすることで、評価領域の推定誤差マップ(誤差マップ)を得る。ここでPの更新式をみると、Pが大きな値をもつ(更新されない)のは、観測行列Hの各要素が値を持たないとき、

50

又は測定誤差共分散行列 R の対角成分 Δt が大きな値をもつときと分かる。誤差マップ生成部 315 は、生成した誤差マップを表示部 32 に出力する。表示部 32 は、評価結果として、生成された誤差マップを誤差の高低に応じたコンター図で表示する（ステップ S110）。

【0049】

以上のように構成された構造物評価システム 100 では、センサ 10 によって検出された弾性波毎に、第 1 の弾性波到達時刻 t_M と、第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} との時刻差の逆数に関する値の積算値を信頼度として取得し、取得した信頼度を用いて誤差マップを生成する。センサ 10 の接着不良が生じている場合、弾性波源から接着不良のセンサ 10 への経路上の領域に対応する誤差マップ内の領域の誤差が大きくなる。このように、構造物評価システム 100 では、システムの利用者が構造物の劣化状態の評価精度を低下させる要因を発見しやすくなる。推定誤差が大きい範囲が広がっている場合、システムの利用者はセンサ 10 の接着不良等の問題を踏まえて調査することができる。このように、構造物の劣化状態の評価精度を向上させることができる。

【0050】

また、システムの利用者は、誤差マップを見ることによって推定誤差が大きい領域は何かしらの要因により評価結果が信頼できないと推定することができる。したがって、推定誤差が大きい領域については、弾性波等を人為的に発生させて再度測定するように促すことができる。そのため、構造物の評価精度を低下させる要因を発見しやすくなる。これにより、要因に応じた対応が可能になる。

【0051】

（第 2 の実施形態）

第 2 の実施形態は、評価部が、誤差マップに加えて速度場マップをさらに生成する点で第 1 の実施形態と構成が異なる。以下、相違点についてのみ説明する。

図 8 は、第 2 の実施形態における評価部 31a の機能を表す概略ブロック図である。評価部 31a は、取得部 311、メモリ 312、イベント抽出部 313、位置速度標定部 314、誤差マップ生成部 315 及び速度場マップ生成部 316 を備える。

【0052】

速度場マップ生成部 316 は、イベント抽出部 313 から出力された 1 イベントにおける送信データに含まれる信頼度の情報及び時刻情報と、位置速度標定部 314 により標定された弾性波源の位置又は位置及び弾性波の速度とに基づいて速度場マップ（第 2 のマップ）を生成する。速度場マップは、評価領域が複数の区画に分割され、各区画に対して構造物で発生した弾性波の伝搬速度を示す値が割り当てられた分布図を表す。すなわち、速度場マップは、評価領域において弾性波の伝搬速度が示された分布図である。また、速度場マップ生成部 316 は、位置速度標定部 314 が弾性波源の位置のみを標定する場合、構造物評価装置 30 には弾性波の速度を標定する。すなわち、速度場マップ生成部 316 は、位置速度標定部 314 から弾性波の速度に関する情報が得られなかった場合には、弾性波の速度を標定してもよい。速度場マップの生成には、式（3）のようにカルマンフィルタを用いる方法や、最小二乗法等の各種正則化最小二乗法を用いることができる。

【0053】

図 9 は、本実施形態における速度場マップの具体例を示す図である。

図 9 に示す速度場マップ 60 は、図 6 に示す誤差マップ 50 と同じ環境下で得られた情報を用いて生成されている。図 9 では、25 点の衝撃をコンクリート床板に加え弾性波を発生させた際の速度場マップ 60 をコンター図で示している。

センサ 10 の設置不良の問題がある場合、設置不良が生じているセンサ 10 周辺の速度が遅くなる。これは、センサ 10 - 1 とセンサ 10 - 2 に接着不良の問題があったためである。速度場マップ 60 において、速度が遅い領域が、図 4 に示す損傷領域 41 からやや上にずれているのは、センサ 10 - 1 の接着不良により弾性波の到達時刻が遅く推定され、速度が遅い領域がそれに引きずられ上にずれたと考えられる。

【0054】

一方、誤差マップ50は、センサ10-1及びセンサ10-2周辺にまたがり誤差が大きくなっている。これは、センサ10-1及びセンサ10-2の接着不良によるSN低下があったことを意味している。

【0055】

図10は、第2の実施形態における構造物評価システム100による劣化状態の評価処理の流れを示すシーケンス図である。なお、図10において、図7と同様の処理は図7と同様の符号を付して説明を省略する。

イベント抽出部313は、メモリ312に記憶されている送信データの中から1イベントにおける送信データを抽出する(ステップS201)。イベント抽出部313は、抽出した送信データを位置速度標定部314及び誤差マップ生成部315に出力する。

10

【0056】

位置速度標定部314は、抽出された1イベントにおける送信データに基づいて、1イベントで発生した弾性波源の位置又は位置と弾性波の速度を標定する(ステップS202)。位置速度標定部314は、評定した弾性波源の位置情報を誤差マップ生成部315に出力する。また、位置速度標定部314は、位置情報と弾性波の速度情報を速度場マップ生成部316に出力する。速度場マップ生成部316は、イベント抽出部313から出力された1イベントにおける送信データに含まれる信頼度の情報及び時刻情報と、弾性波源の位置情報又は位置情報と弾性波の速度情報とに基づいて速度場マップを生成する(ステップS203)。これにより、構造物評価装置30は、構造物の劣化状態を評価する。

【0057】

20

以上のように構成された第2の実施形態における構造物評価システム100によれば、構造物評価装置30は、誤差マップ50のみならず、速度場マップ60も生成する。したがって、システムの利用者は、誤差マップ50と速度場マップ60とを比較することによって、推定結果がどの程度正確であるのかを判断するだけでなく、センサ10の接着不良等の異常検知をより精度よく発見することができる。

【0058】

(第3の実施形態)

第3の実施形態は、信号処理部が、到達時刻を補正する点で第1の実施形態及び第2の実施形態と構成が異なる。以下、相違点についてのみ説明する。

図11は、第3の実施形態における信号処理部20bの機能を表す概略ブロック図である。信号処理部20bは、波形整形フィルタ201、ゲート生成回路202、到達時刻決定部203、信頼度算出部204b、特徴量抽出部205、送信データ生成部206、メモリ207、出力部208及び補正部209を備える。

30

【0059】

補正部209は、各センサ10により検出された弾性波に基づいて、異常が生じている可能性のあるセンサ10の到達時刻を補正する。具体的には、まず補正部209は、1つのセンサ10で検出された弾性波に基づくノイズ除去弾性波信号を所定の期間取得する。これにより、補正部209は、1つのセンサ10で検出された弾性波に基づくノイズ除去弾性波信号を複数取得する。次に、補正部209は、取得した複数のノイズ除去弾性波信号それぞれの第1の弾性波到達時刻 t_M 及び第2の弾性波到達時刻 t_{TH} を到達時刻決定部203から取得する。補正部209は、取得した第1の弾性波到達時刻 t_M 及び第2の弾性波到達時刻 t_{TH} に基づいて時刻差を算出する。補正部209は、算出した複数の時刻差の平均及び分散を算出する。補正部209は、上記の処理をセンサ10毎に実行する。

40

【0060】

補正部209は、平均又は分散の値が閾値以上のセンサ10を異常が生じている可能性のあるセンサ10と判定する。なお、センサ10の異常とは、接着不良や故障などである。補正部209は、異常が生じている可能性のあるセンサ10については、第1の弾性波到達時刻 t_M を決定する閾値を下げることによって異常が生じている可能性のあるセンサ10の到達時刻を補正する。例えば、補正部209は、センサ10-1及びセンサ10-2を、異常が生じている可能性のあるセンサ10と判定した場合、センサ10-1及びセ

50

ンサ 10 - 2 における第 1 の弾性波到達時刻 t_M を決定する閾値を下げる。

【 0061 】

図 12 A はセンサ 10 - 1 で検出した弾性波の波形を表し、図 12 B はセンサ 10 - 2 で検出した弾性波の波形を表す。図 12 A 及び図 12 B の上図において、縦軸は弾性波の振幅を表し、横軸は時間を表す。また、図 12 A 及び図 12 B の下図において、縦軸は C F のスコアを表し、横軸は時間を表す。図 12 A 及び図 12 B における t_{CF1} の時刻は、到達時刻決定部 203 が Change Finder の手法により求めた第 1 の弾性波到達時刻 t_M である。図 12 A 及び図 12 B における t_{TH} の時刻は、第 2 の弾性波到達時刻 t_{TH} である。図 12 A 及び図 12 B における t_{CF0} の時刻は、補正後の第 1 の弾性波到達時刻 t_M である。図 12 A 及び図 12 B に示すように、異常が生じている可能性のあるセンサ 10 で検出された第 1 の弾性波到達時刻 t_M が、補正前に比べて早い時刻で検出されていることがわかる。

10

【 0062 】

また、補正部 209 は、センサ 10 全体の時刻差の平均及び分散を算出する。その後、補正部 209 は、各センサ 10 の平均及び分散を、センサ 10 全体の時刻差の平均及び分散に基づいて規格化する。ここで、規格化とは、各センサ 10 の平均及び分散を、センサ 10 全体の時刻差の平均及び分散に近づけることを意味する。これにより、センサ 10 毎の検出感度のずれを調整する。補正部 209 は、規格化後のセンサ 10 毎の時刻差の平均及び分散値を信頼度算出部 204 b に出力する。

信頼度算出部 204 b は、得られた分散値をセンサ 10 毎の信頼度として送信データ生成部 206 に出力する。

20

【 0063 】

図 13 A は誤差マップ 50 の具体例を示す図であり、図 13 B は速度場マップ 60 の具体例を示す図であり、図 13 C は補正後の到達時刻に基づいて生成された速度場マップ 60 a の具体例を示す図である。

図 13 C に示すように、到達時刻が補正されたことによって、図 13 B に示す速度場マップ 60 と比較して結果が変化していることがわかる。例えば、図 13 C のほうが図 13 B に比べて構造物内部に劣化が生じている領域（損傷領域 41）がより明確に示されていることがわかる。

【 0064 】

30

以上のように構成された第 3 の実施形態における構造物評価システム 100 によれば、補正部 209 が、異常が生じている可能性のあるセンサ 10 で検出された弾性波の第 1 の弾性波到達時刻 t_M を補正する。例えば、補正部 209 は、異常が生じている可能性のあるセンサ 10 で検出された弾性波の第 1 の弾性波到達時刻 t_M が、到達時刻決定部 203 により決定された第 1 の弾性波到達時刻 t_M よりも手前になるように補正する。これにより、接着不良等の異常により本来弾性波が検出されているべき時刻で検出されていない場合にも、本来の検出時刻に近づけることができる。そのため、構造物の劣化状態の評価精度の低下を抑制することができる。

【 0065 】

（第 4 の実施形態）

40

第 4 の実施形態は、評価部が、測定結果を評価する点で第 1 の実施形態から第 3 の実施形態と構成が異なる。以下、相違点についてのみ説明する。

図 14 は、第 4 の実施形態における評価部 31 c の機能を表す概略ブロック図である。評価部 31 c は、取得部 311、メモリ 312、イベント抽出部 313、位置速度標定部 314、誤差マップ生成部 315 及び測定結果評価部 317 を備える。

【 0066 】

測定結果評価部 317 は、信頼度に基づいて、評価領域内において損傷領域、又は、センサ 10 に異常が生じている可能性がある旨の評価を行う。具体的には、測定結果評価部 317 は、誤差マップ生成部 315 によって生成された誤差マップを参照し、信頼度で示される値が閾値以下の領域を、損傷領域、又は、センサ 10 の異常により評価結果が低下

50

している領域と判定する。なお、センサ 10 の異常とは、接着不良や故障などである。

【0067】

測定結果評価部 317 は、判定結果を表示部 32 に表示させる。具体的には、測定結果評価部 317 は、信頼度で示される値が閾値以下の領域が、損傷領域、又は、センサ 10 の異常により評価結果が低下している領域であることを示す表示を表示部 32 に表示させる。例えば、測定結果評価部 317 は、ポップアップや吹き出しなどの表示により判定結果を表示部 32 に表示させる。

【0068】

以上のように構成された第 4 の実施形態における構造物評価システム 100 によれば、評価部 31c は、信頼度に基づいて損傷領域、又は、センサ 10 の異常により評価結果が低下している領域を判定する。そして、評価部 31c は、判定結果を表示部 32 に表示させる。これにより、システムの利用者に対して、評価結果を提供することができる。システムの利用者は、提供された評価結果を参考にして、センサ 10 の接着不良を直したり、損傷領域を把握することができる。

【0069】

以下、第 4 の実施形態における構造物評価システム 100 の変形例について説明する。

評価部 31c が、第 2 の実施形態に示した速度場マップ生成部 316 を備えるように構成されてもよい。このように構成される場合、測定結果評価部 317 は、誤差マップと速度場マップとに基づいて、損傷領域、又は、センサ 10 に異常が生じている可能性がある旨の評価を行うように構成される。具体的には、測定結果評価部 317 は、誤差マップにおいて信頼度で示される値が閾値以下の領域、かつ、速度場マップにおいて速度の値が閾値以下の領域を、損傷領域、又は、センサ 10 の異常により評価結果が低下している領域と判定する。信頼度で示される値が閾値以下の領域、かつ、速度場マップにおいて速度の値が閾値以下の領域は、構造物内部の劣化又はセンサ 10 の異常により弾性波が遅く検出されてしまったことなどが原因となる。したがって、評価部 31c は、誤差マップと速度場マップとの 2 つのマップを用いた評価を行うことによって、損傷領域、又は、センサ 10 の異常により評価結果が低下している領域をより精度よく判定することができる。

【0070】

(第 5 の実施形態)

図 15 は、第 5 の実施形態における構造物評価システム 100d のシステム構成を示す図である。構造物評価システム 100d は、複数のセンサ 10 - 1 ~ 10 - n、複数の増幅器 11 - 1 ~ 11 - n、複数の A/D 変換器 12 - 1 ~ 12 - n、信号処理部 20、無線送信部 21 及び構造物評価装置 30d を備える。構造物評価装置 30d は、評価部 31、表示部 32 及び無線受信部 33 を備える。第 5 の実施形態では、信号処理部 20 と、構造物評価装置 30d との間を無線通信によって接続する。この場合、無線送信部 21 は、信号処理部 20 から出力された送信データを構造物評価装置 30d に送信する。無線受信部 33 は、無線送信部 21 から送信された送信データを受信し、受信した送信データを評価部 31 に出力する。無線送信部 21 と無線受信部 33 との間の無線の周波数帯は、例えば 2.4 GHz、920 MHz 帯 (日本国内においては 915 MHz ~ 928 MHz) 等のいわゆる ISM バンド (Industry Science Medical Band) を用いることができる。

【0071】

このように構成されることによって、センサ 10、増幅器 11、A/D 変換器 12、信号処理部 20 及び無線送信部 21 をセンサノードとして、評価対象となる橋梁等の構造物に設置し、構造物評価装置 30d を監視室に設置することが可能になり、遠隔地から構造物の劣化状態をモニタリングすることも可能になる。

【0072】

構造物評価システム 100d は、信号処理部 20 に代えて信号処理部 20b を備えるように構成されてもよい。

構造物評価システム 100d は、評価部 31 に代えて評価部 31a 又は評価部 31c のいずれかを備えるように構成されてもよい。

10

20

30

40

50

構造物評価システム 100d は、第 4 の実施形態と同様に変形されてもよい。

【0073】

(第 6 の実施形態)

図 16 は、第 6 の実施形態における構造物評価システム 100e のシステム構成を示す図である。構造物評価システム 100e は、複数のセンサ 10 - 1 ~ 10 - n、複数の増幅器 11 - 1 ~ 11 - n、複数の A/D 変換器 12 - 1 ~ 12 - n、信号処理部 20、無線送信部 21、選択部 22 及び構造物評価装置 30d を備える。選択部 22 は、特徴量の情報に応じて、評価に利用する送信データを選択する。具体的には、選択部 22 は、信号の特徴量における振幅が所定の閾値以上の送信データのみ無線送信部 21 に出力する。

【0074】

このように構成されることによって、無用なノイズ情報を送信データとして送信することが抑制され、送信側の消費電力を削減することが可能になる。また、無用なノイズ情報を送信データとして送信することによる構造物の評価の劣化を抑制することも可能になる。

選択部 22 と、構造物評価装置 30d との間は有線接続であってもよい。このように構成される場合、選択部 22 は、選択した送信データを有線通信により構造物評価装置 30d に出力する。なお、このように構成される場合、構造物評価システム 100e は、無線送信部 21 及び無線受信部 33 を備えなくてもよい。

【0075】

構造物評価システム 100e は、信号処理部 20 に代えて信号処理部 20b を備えてもよい。

構造物評価システム 100e は、評価部 31 に代えて評価部 31a 又は評価部 31c のいずれかを備えるように構成されてもよい。

構造物評価システム 100e は、第 4 の実施形態と同様に変形されてもよい。

【0076】

以下、各実施形態に共通の変形例について説明する。

センサ 10 は、増幅器 11 を内蔵していてもよい。このように構成される場合、構造物評価システム 100 は増幅器 11 を備えなくてよい。

誤差マップ生成部 315 及び速度場マップ生成部 316 は、1 つのマップ生成部で実現されてもよい。

【0077】

構造物評価装置 30 が備える各機能部は、一部又は全てが別の筐体に備えられていてもよい。例えば、構造物評価装置 30 が評価部 31 のみを備えて、位置標定部 401 および表示部 32 が別の筐体に備えられてもよい。このように構成される場合、評価部 31 は、弾性波源分布を別の筐体から取得し、取得した弾性波源分布を用いて構造物の健全性を評価する。そして、評価部 31 は、評価結果を別の筐体が備える表示部 32 に出力する。

このように構成されることによって、弾性波源分布の導出に既存の装置を用いることによって、構造物評価装置 30 の製造コストを抑えることができる。

【0078】

信号処理部 20 は、入力した A/E 源信号のうち、ノイズレベルより高く定められた第 1 の閾値より高い振幅値を有する A/E 源信号に対して信号処理を行うように構成されてもよい。具体的には、まず信号処理部 20 は、第 1 の閾値と比較して大きい振動が検出された場合、第 1 の閾値を超えた時刻から所定の時間分の信号を弾性波波形と判断し、第 1 の閾値より高い振幅値を有する A/E 源信号を保存する。そして、信号処理部 20 は、保存した A/E 源信号が示す弾性波波形のデータに基づいて、弾性波に関する情報を含む A/E 特徴量を抽出する。なお、第 1 の閾値は、予め設定される。

【0079】

信号処理部 20、20b は、構造物評価装置 30、30d に備えられてもよい。このように構成される場合、信号処理部 20、20b は、センサ 10 による処理が施された A/E 源信号を、センサ 10 から直接、又は、不図示の中継装置を介して取得する。

図 1、図 15 及び図 16 では、複数のセンサ 10 - 1 ~ 10 - n に 1 台の信号処理部 2

10

20

30

40

50

0 が接続されているが、構造物評価システム 100, 100d, 100e は複数台の信号処理部 20 を備え、各センサ 10 にそれぞれ信号処理部 20 が接続されて複数台のセンサユニットを備えるように構成されてもよい。

【0080】

誤差マップ生成部 315 は、誤差マップを新たに生成した場合、前回までに生成された同じ評価領域の誤差マップと、新たに生成した誤差マップとを用いて誤差マップを更新するように構成されてもよい。また、速度場マップ生成部 316 は、速度場マップにおいても誤差マップと同様に、新たに生成した速度場マップと、前回までの速度場マップとを用いて速度場マップを更新する。このように構成される場合、速度場マップ生成部 316 は、例えば、新たに生成した速度場マップを含めたこれまでの速度場マップの分割領域における弾性波伝播速度 v の平均値を分割区間毎に算出し、算出した値を更新値として各分割区間に割り当てることによって速度場マップを更新する。

10

【0081】

以上説明した少なくともひとつの実施形態によれば、弾性波を検出する複数のセンサ 10 と、複数のセンサ 10 それぞれによって検出された弾性波を用いて、弾性波の到達時刻を決定する到達時刻決定部 203 と、到達時刻に基づいて、弾性波の測定波形に関する信頼度を算出する信頼度算出部 204 と、算出された信頼度に基づいて、弾性波の到着時刻に関する誤差マップを生成する誤差マップ生成部 315 とを持つことにより、構造物の劣化状態の評価精度を向上させることができる。

20

【0082】

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、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や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。

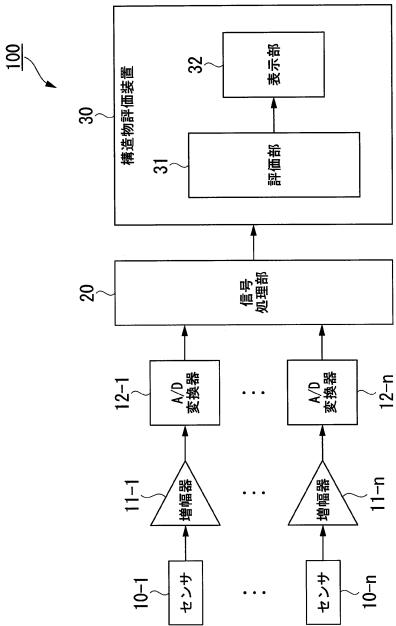
30

40

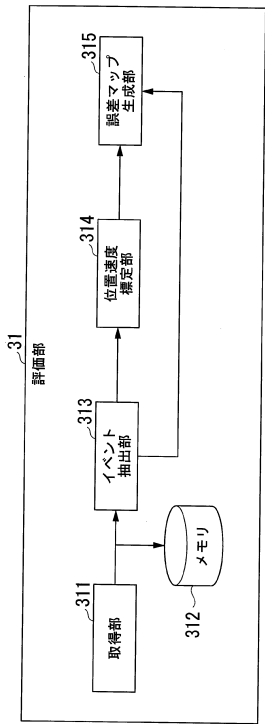
50

【図面】

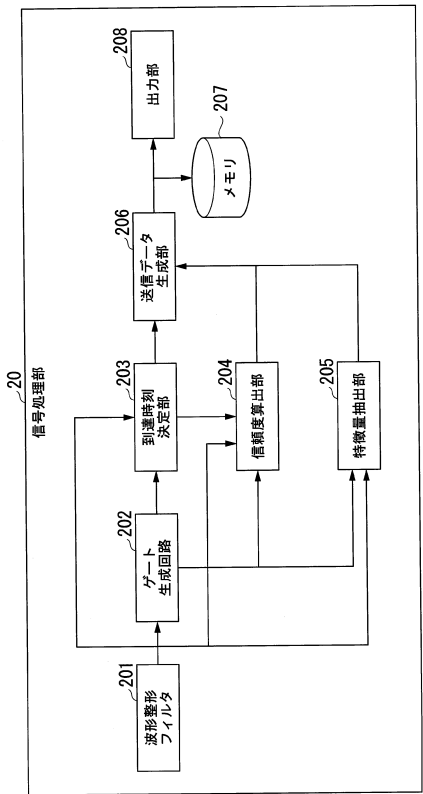
【図 1】



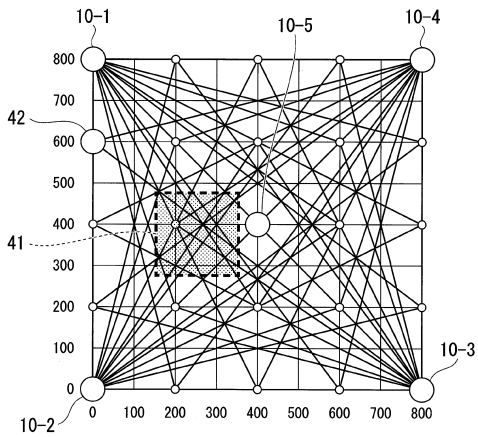
【図 3】



【図 2】



【図 4】



10

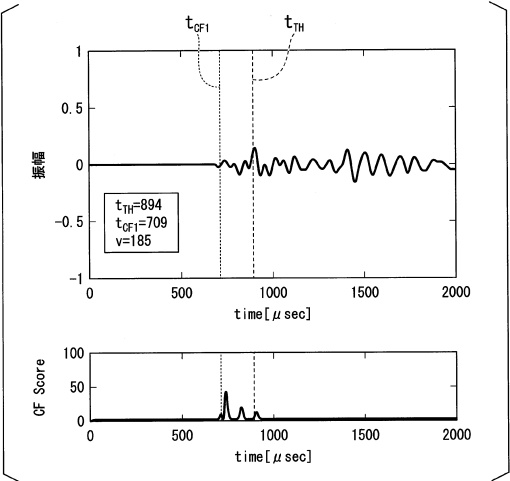
20

30

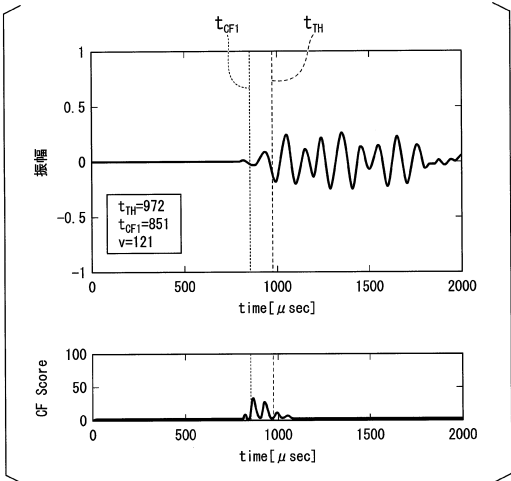
40

50

【図 5 A】

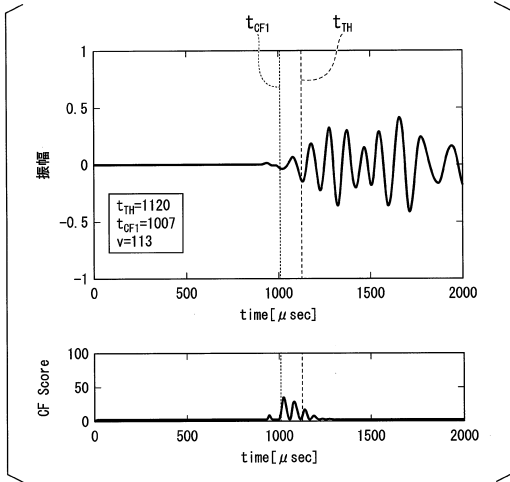


【図 5 B】

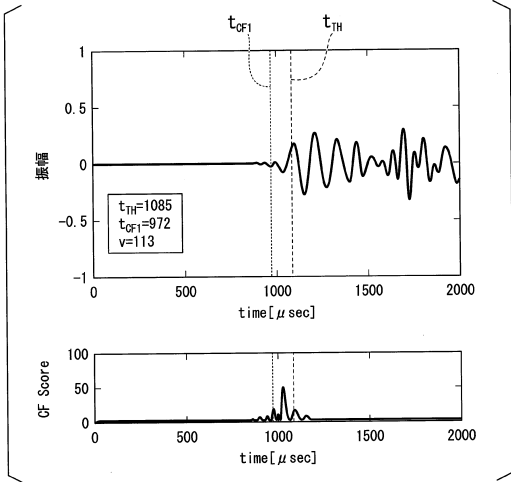


10

【図 5 C】



【図 5 D】

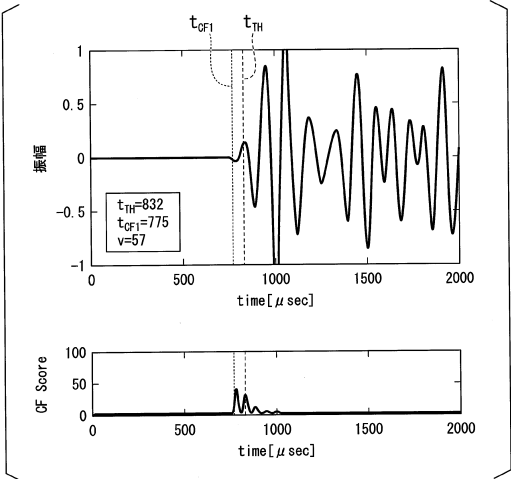


30

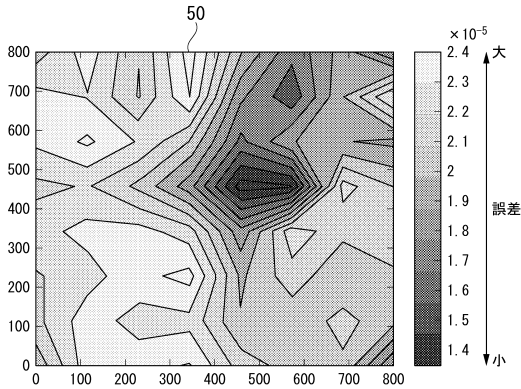
40

50

【図 5 E】

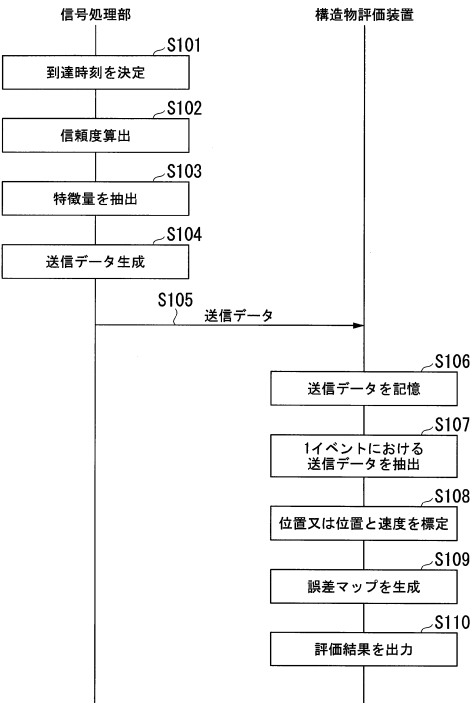


【図 6】

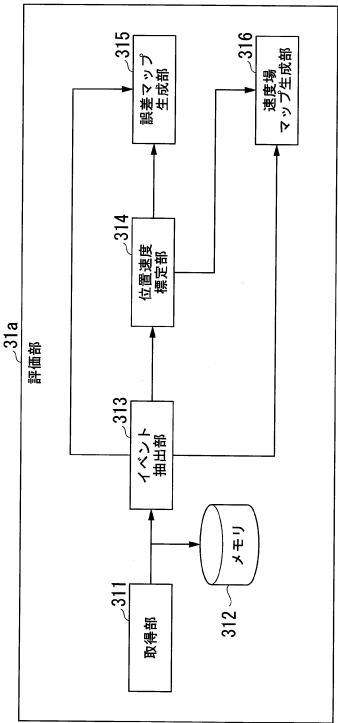


10

【図 7】



【図 8】



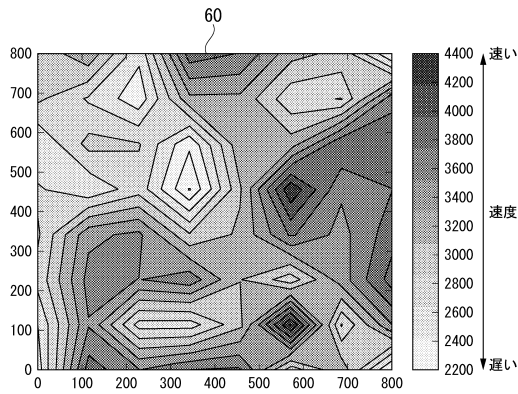
20

30

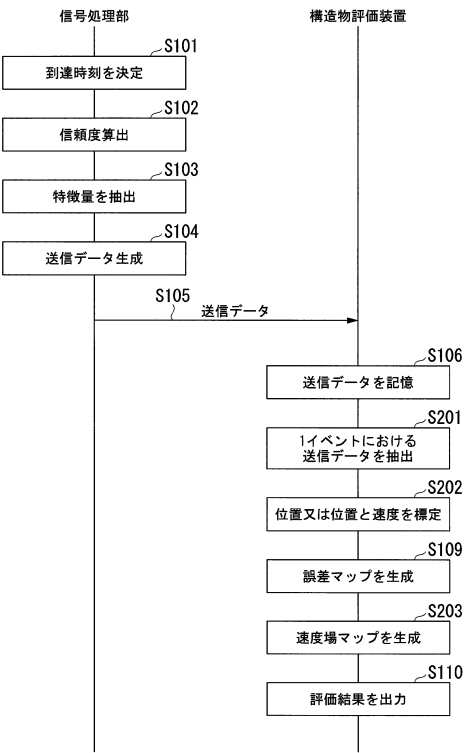
40

50

【図 9】



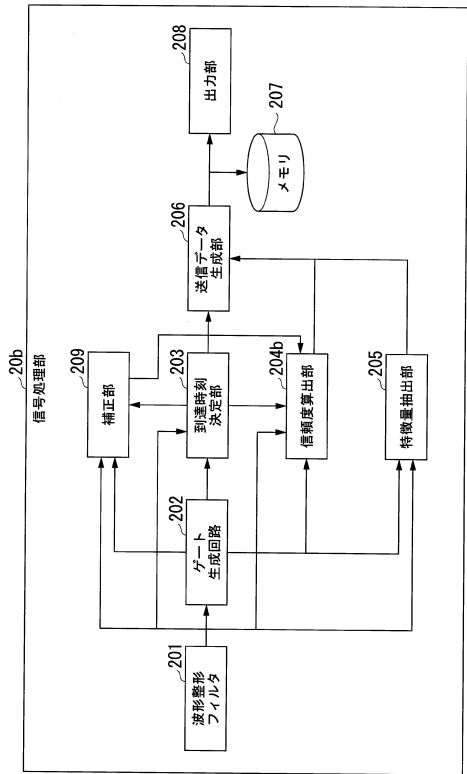
【図 10】



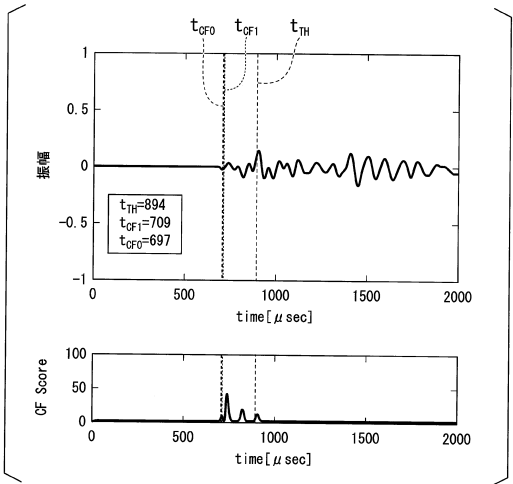
10

20

【図 11】



【図 12 A】

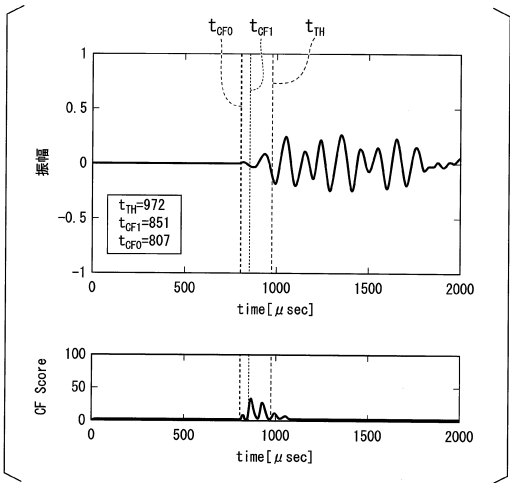


30

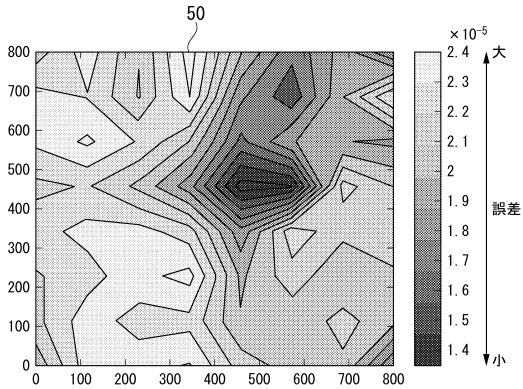
40

50

【図 1 2 B】

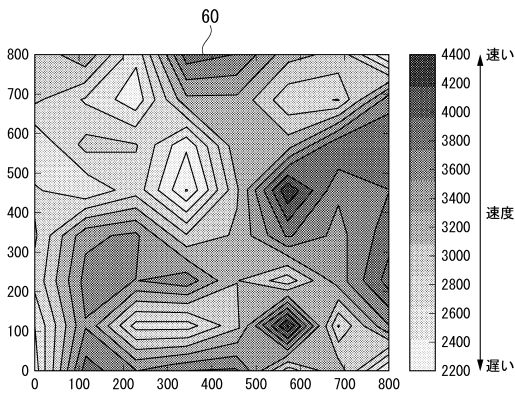


【図 1 3 A】

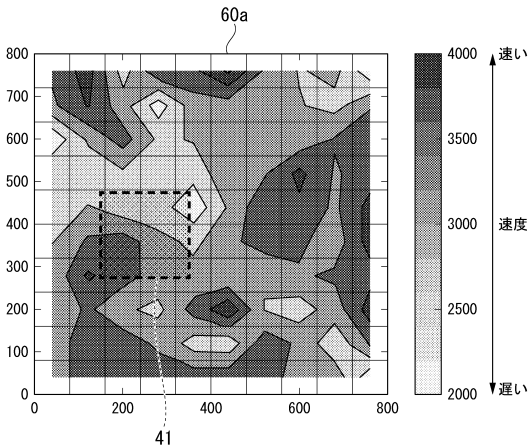


10

【図 1 3 B】



【図 1 3 C】



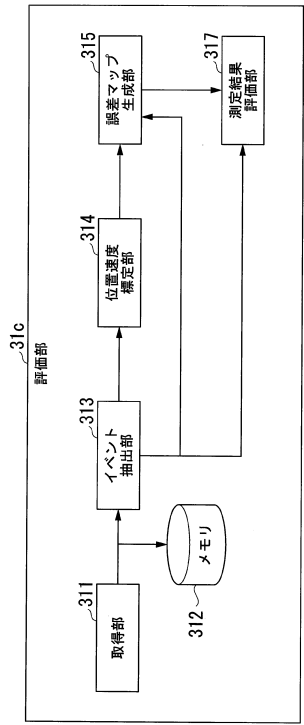
20

30

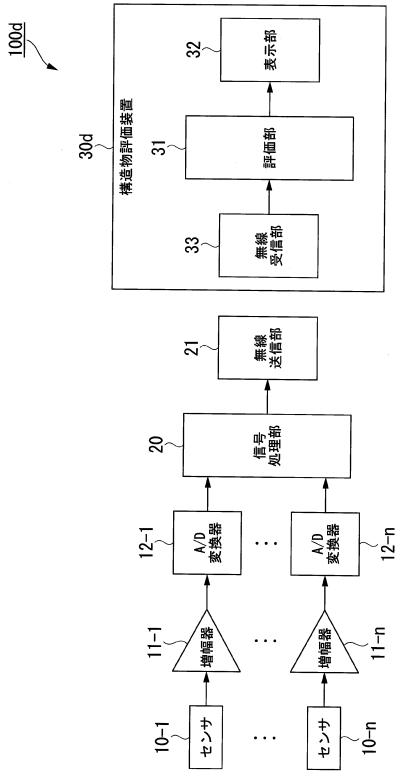
40

50

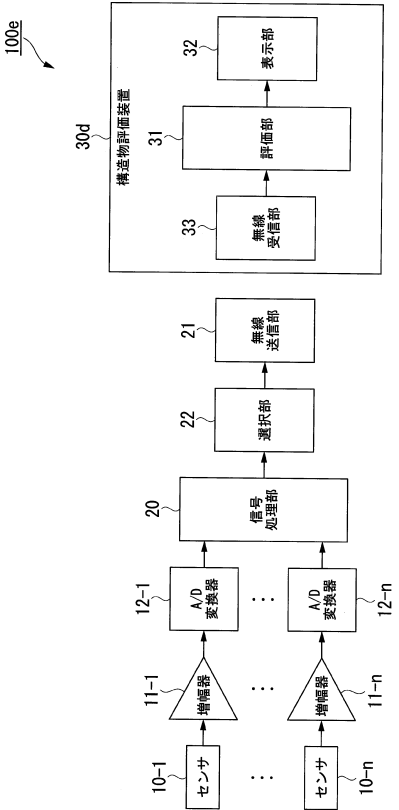
【図 1 4】



【図 1 5】



【図 1 6】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開 2 0 1 8 - 1 6 5 7 3 2 (J P , A)
特開 2 0 0 4 - 2 1 9 0 7 5 (J P , A)
中国特許出願公開第 1 0 8 4 5 9 0 8 2 (C N , A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)
G 0 1 N 2 9 / 0 0 - G 0 1 N 2 9 / 5 2