(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年9月24日(24.09.2020)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2020/188640 A1

(51) 国際特許分類:
G01N 29/14 (2006.01) *G01N 29/44* (2006.01)
G01N 29/07 (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2019/010887

(22) 国際出願日： 2019年3月15日(15.03.2019)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(71) 出願人: 株式会社東芝 (**KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA**) [JP/JP]; 〒1050023 東京都港区芝浦一丁目１番１号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 飯田 早苗 (**IIDA Sanae**); 〒1050023 東京都港区芝浦一丁目１番１号 株式会社東芝内 Tokyo (JP). 碓井 隆 (**USUI Takashi**); 〒1050023 東京都港区芝浦一丁目１番１号 株式会社東芝内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人 志賀国際特許事務所 (**SHIGA INTERNATIONAL PATENT OFFICE**); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目９番２号 Tokyo (JP).

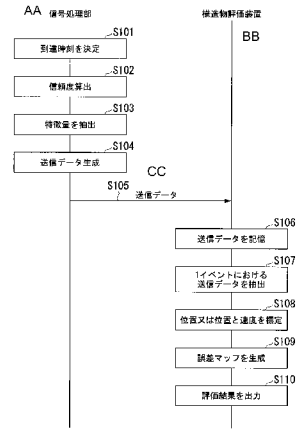
(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,

(54) **Title:** STRUCTURE EVALUATION SYSTEM, STRUCTURE EVALUATION DEVICE, AND STRUCTURE EVALUATION METHOD

(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

[図7]



S101 Determine arrival times
S102 Calculate reliabilities
S103 Extract feature values
S104 Generate transmission data
S106 Store the transmission data
S107 Extract transmission data for one event
S108 Specify positions or positions and speeds
S109 Generate error map
S110 Output evaluation results
AA Signal processing unit
BB Structure evaluation device
CC Transmission data

(57) **Abstract:** A structure evaluation system according to an embodiment comprises a plurality of sensors, an arrival time determination unit, a reliability calculation unit, and a map generation unit. The plurality of sensors detect elastic waves. The arrival time determination unit uses the elastic waves detected by the plurality of sensors to determine the arrival times of the elastic waves. The reliability calculation unit calculates the reliabilities of measured waveforms of the elastic waves on the basis of the arrival times. The map generation unit generates a first map on the basis of the calculated reliabilities or the reliabilities and distances.

(57) 要約：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を用いて、前記弾性波の到達時刻を決定する。信頼度算出部は、前記到達時刻に基づいて、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又は前記信頼度と距離に基づいて第１のマップを生成する。

WO 2020/188640 A1

[続葉有]

LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

一　国際調査報告（条約第21条(3)）

明　細　書

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

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。

[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、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ＡＥ信号を用いる方式はＡＥ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ＡＥ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、ＡＥ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] 特許文献1：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を用いて、前記弾性波の到達時刻を決定する。信頼度算出部は、前記到達時刻に基づいて、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又は前記信頼度と距離に基づいて第１のマップを生成する。

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。

[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。

[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。

[図16]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－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ＡＥ源信号に変換する。センサ１０は、ＡＥ源信号を増幅器１１に出力する。

[0012] センサ１０には、例えば１０ｋＨｚ～１ＭＨｚ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ＡＥ源信号に変換する。その後、加速度センサは、変換後のＡＥ源信号を増幅器１１に出力する。構造物の厚さは、例えば１５ｃｍ以上である。

[0013] 増幅器１１は、センサ１０から出力されたＡＥ源信号を増幅し、増幅後のＡＥ源信号をＡ／Ｄ変換器１２に出力する。

Ａ／Ｄ変換器１２は、増幅されたＡＥ源信号を受けとると、ＡＥ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１２は、ＡＥ源信号をデジタルの時系列データとして信号処理部２０に出力する。

信号処理部２０は、Ａ／Ｄ変換器１２から出力された時系列データを入力とする。信号処理部２０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２０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２０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３０に出力する。

[0014] 構造物評価装置３０は、バスで接続されたＣＰＵ（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３０は、評価部３１、表示部３２を備える装置として機能する。なお、構造物評価装置３０の各機能の全て又は一部は、ＡＳＩＣ（Application Specific Integrated Circuit）やＰＬＤ（Programmable Logic Device）やＦＰＧＡ（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、ＲＯＭ、ＣＤ－ＲＯＭ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。

[0015] 評価部３１は、信号処理部２０から出力された送信データを入力とする。評価部３１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３２は、液晶ディスプレイ、有機ＥＬ（Electro Luminescence）ディスプレイ等の画像表示装置である。表示部３２は、評価部３１の制御に従って評価結果を表示する。表示部３２は、画像表示装置を構造物評価装置３０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３２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。

[0016] 図２は、第１の実施形態における信号処理部２０の機能を表す概略ブロック図である。信号処理部２０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２０４、特徴量抽出部２０５、送信データ生成部２０６、メモリ２０７及び出力部２０８を備える。

波形整形フィルタ２０１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２０１は、例えばデジタルバンドパスフィルタ（ＢＰＦ）である。波形整形フィルタ２０１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２０２、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。

[0017] ゲート生成回路２０２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を入力とする。ゲート生成回路２０２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２０２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。

[0018] 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）、ＣｈａｎｇｅＦｉｎｄｅ

ｒ、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、ＣｈａｎｇｅＦｉｎｄｅｒ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Δｔ＝|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ト数［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Ｔ１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。ノイズ除去弾性波信号のゼロクロスカウント数は、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Ｔｗ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ｄｍａｘを用いて、Ｔｗ≧ｄｍａｘ／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、Ｔｗ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Ｔｗ＝ｄｍａｘ／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搬速度を標定する。

[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搬速度の標定には、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。

[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８００ｍｍ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５Ａ～図５Ｅに示す。図５Ａはセンサ１０－１で検出した弾性波の波形を表し、図５Ｂはセンサ１０－２で検出した弾性波の波形を表し、図５Ｃはセンサ１０－３で検出した弾性波の波形を表し、図５Ｄはセンサ１０－４で検出した弾性波の波形を表し、図５Ｅはセンサ１０－５で検出した弾性波の波形を表す。図５Ａ～図５Ｅ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５Ａ～図５Ｅ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５Ａ～図５Ｅにおけるt_{CF1}の時刻は、到

達時刻決定部２０３がＣｈａｎｇｅＦｉｎｄｅｒ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５Ａ～図５Ｅ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。

[0033] 図５Ａ及び図５Ｂ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。

[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] 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、・・・、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]

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

[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]

$$Y = HX + V \quad \cdots (式2)$$

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

[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。

[0045] [数3]

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

[0046] 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＾（＾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]

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

[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、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。

[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] 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。

[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。

[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１２Ａはセンサ１０－１で検出した弾性波の波形を表し、図１２Ｂはセンサ１０－２で検出した弾性波の波形を表す。図１２Ａ及び図１２Ｂ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１２Ａ及び図１２Ｂの下図において、縦軸はＣＦのスコアを表し、横軸は時間を表す。図１２Ａ及び図１２Ｂにおけるt_{CF1}の時刻は、到達時刻決定部２０３がＣｈａｎｇｅＦｉｎｄｅｒ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１２Ａ及び図１２Ｂ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１２Ａ及び図１２Ｂ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１２Ａ及び図１２Ｂ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。

[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２０４ｂに出力する。

信頼度算出部２０４ｂ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。

[0063] 図１３Ａは誤差マップ５０の具体例を示す図であり、図１３Ｂは速度場マップ６０の具体例を示す図であり、図１３Ｃ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６０ａの具体例を示す図である。

図１３Ｃに示すように、到達時刻が補正されたことによって、図１３Ｂ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１３Ｃのほうが図１３Ｂ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] 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）

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３１ｃの機能を表す概略ブロッ

ク図である。評価部３１ｃ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２．４ＧＨｚ、９２０ＭＨｚ帯（日本国内においては９１５ＭＨｚ～９２８ＭＨｚ）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。

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ＡＥ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ＡＥ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ＡＥ源信号を保存する。そして、信号処理部２０は、保存したＡＥ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ＡＥ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ＡＥ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２０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。

[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。

[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。

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を用いて、前記弾性波の到達時刻を決定する到達時刻決定部と、

前記到達時刻に基づいて、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又は前記信頼度と距離に基づいて第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] 前記到達時刻決定部は、所定の手法により第１の到達時刻と第２の到達時刻を決定し、

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、前記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。

[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到着時刻を決定する、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を用いて決定された前記弾性波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又は前記信頼度と距離に基づいて第１のマップを生成するマップ生成部を、

を備える構造物評価装置。

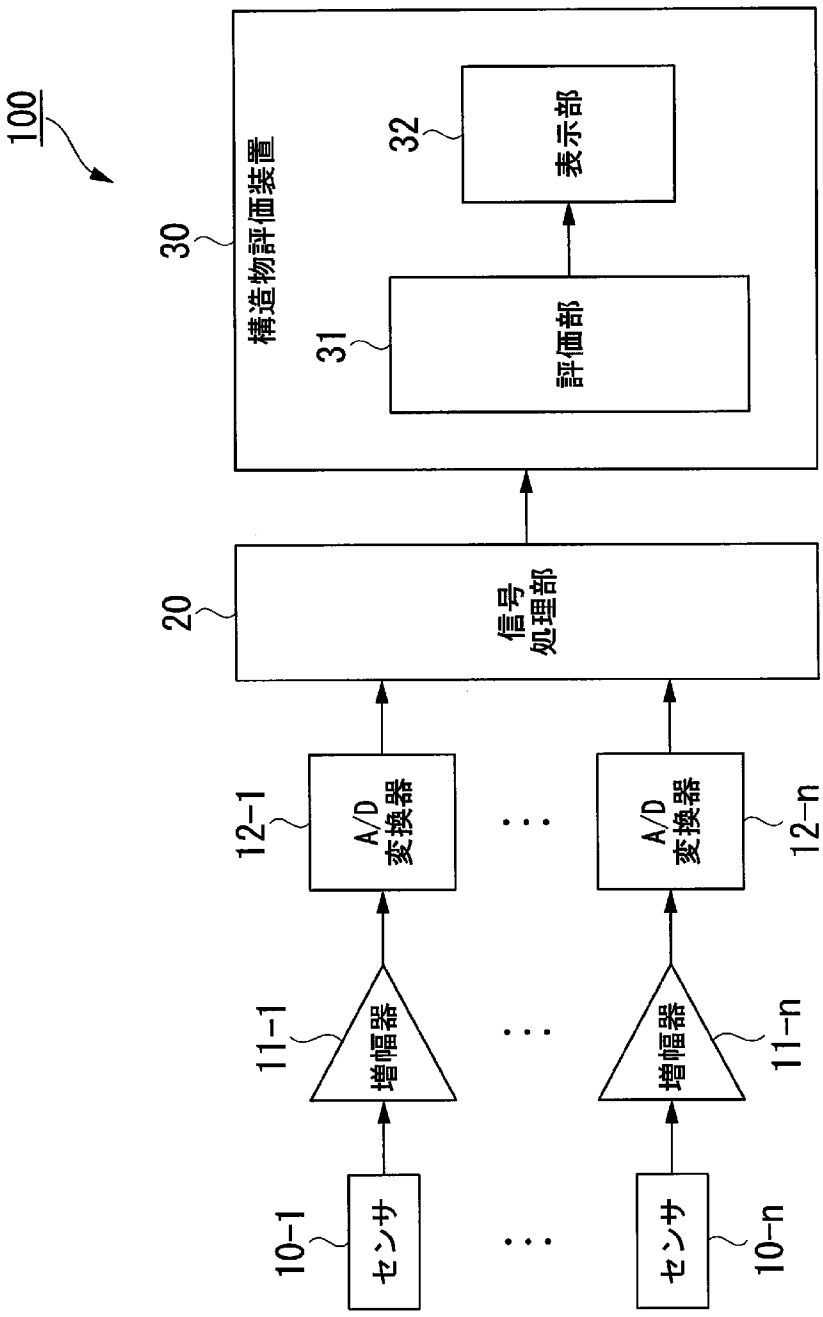
[請求項10] 弾性波を検出する複数のセンサそれぞれによって検出された弾性波を用いて、前記弾性波の到達時刻を決定する到達時刻決定ステップと、

前記到達時刻に基づいて、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、

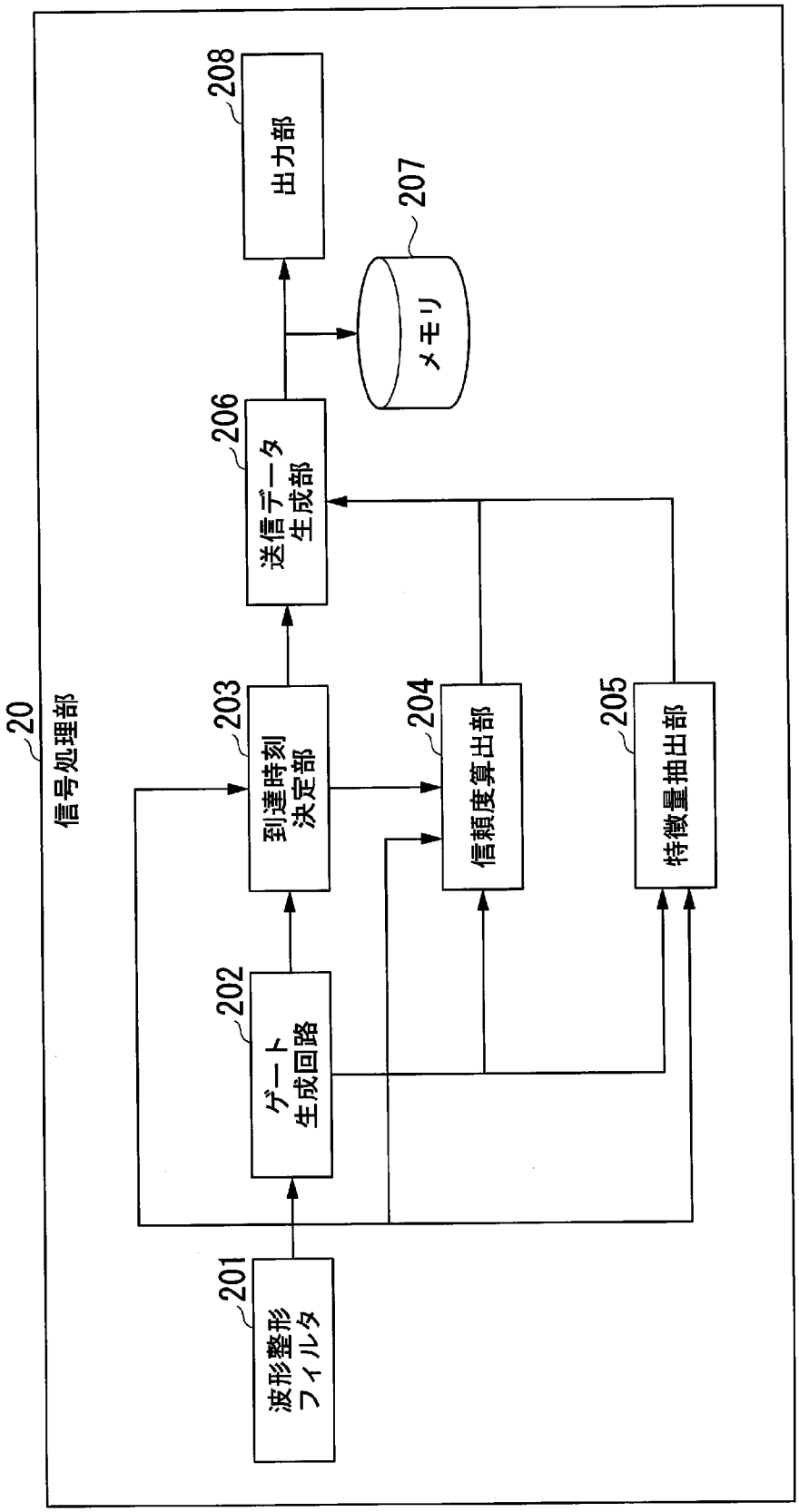
算出された前記信頼度又は前記信頼度と距離に基づいて第１のマップを生成するマップ生成ステップと、

を有する構造物評価方法。

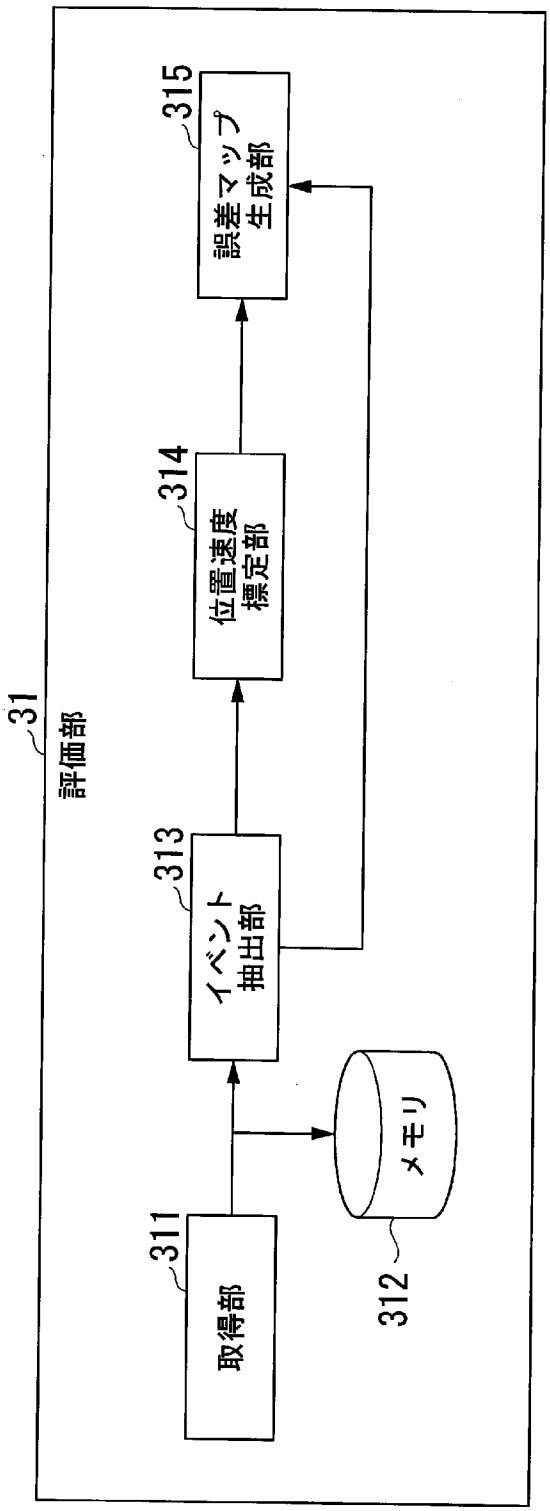
[図1]


100
30
構造物評価装置
32
表示部
31
評価部
20
信号処理部
12-1
A/D変換器
12-n
A/D変換器
11-1
増幅器
11-n
増幅器
10-1
センサ
10-n
センサ

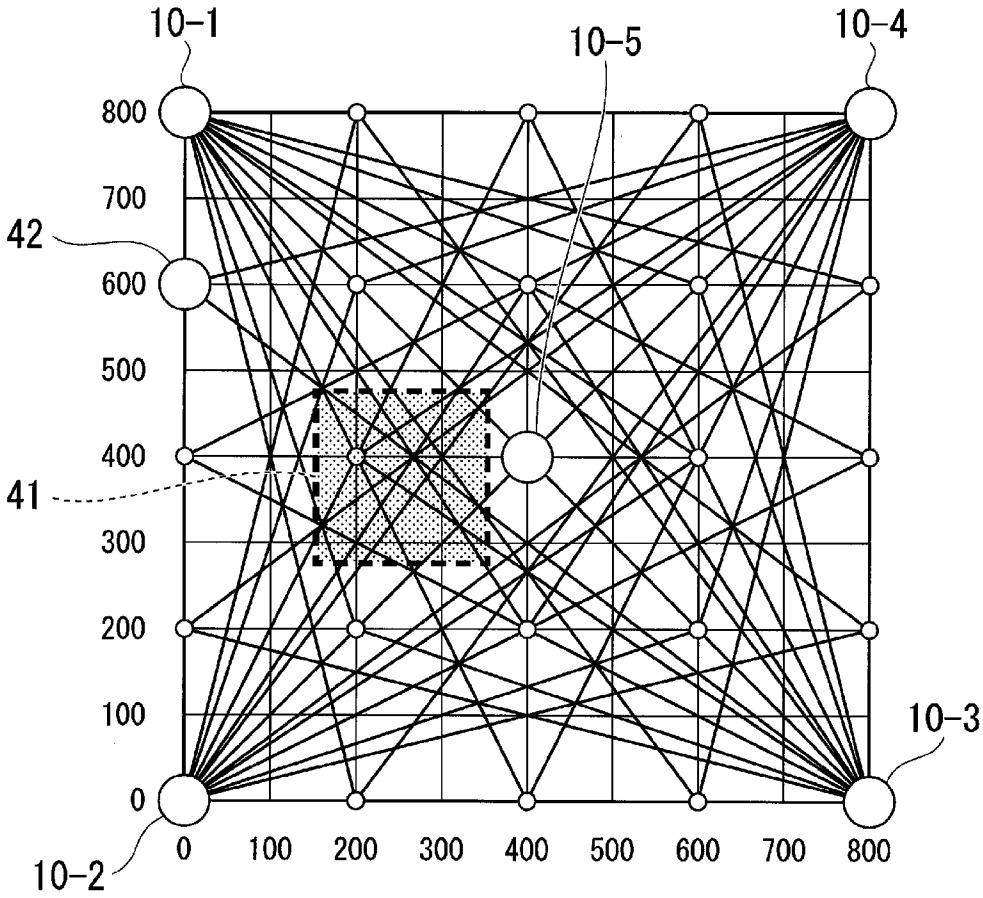
[図2]


20
信号処理部
201
波形整形フィルタ
202
ゲート生成回路
203
到達時刻決定部
204
信頼度算出部
205
特徴量抽出部
206
送信データ生成部
207
メモリ
208
出力部

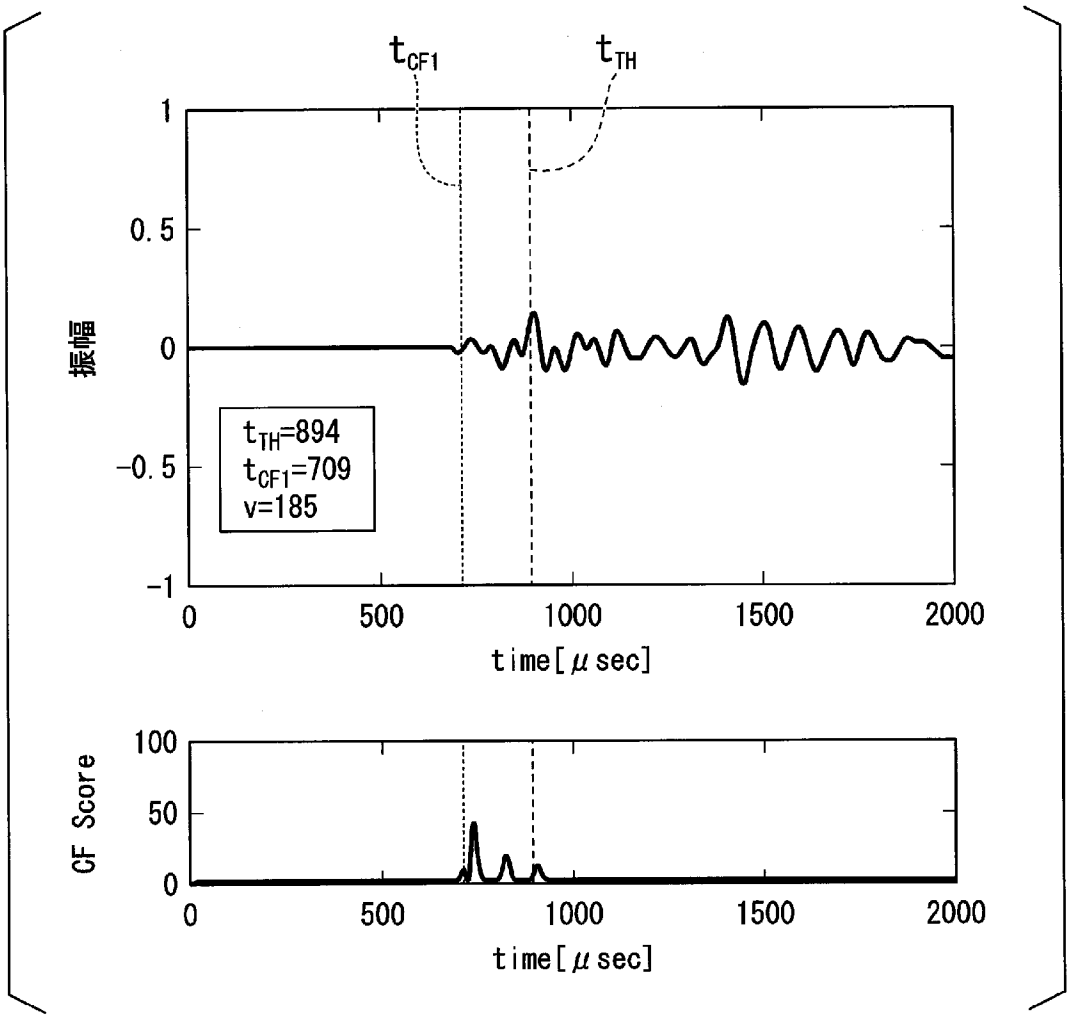
[図3]



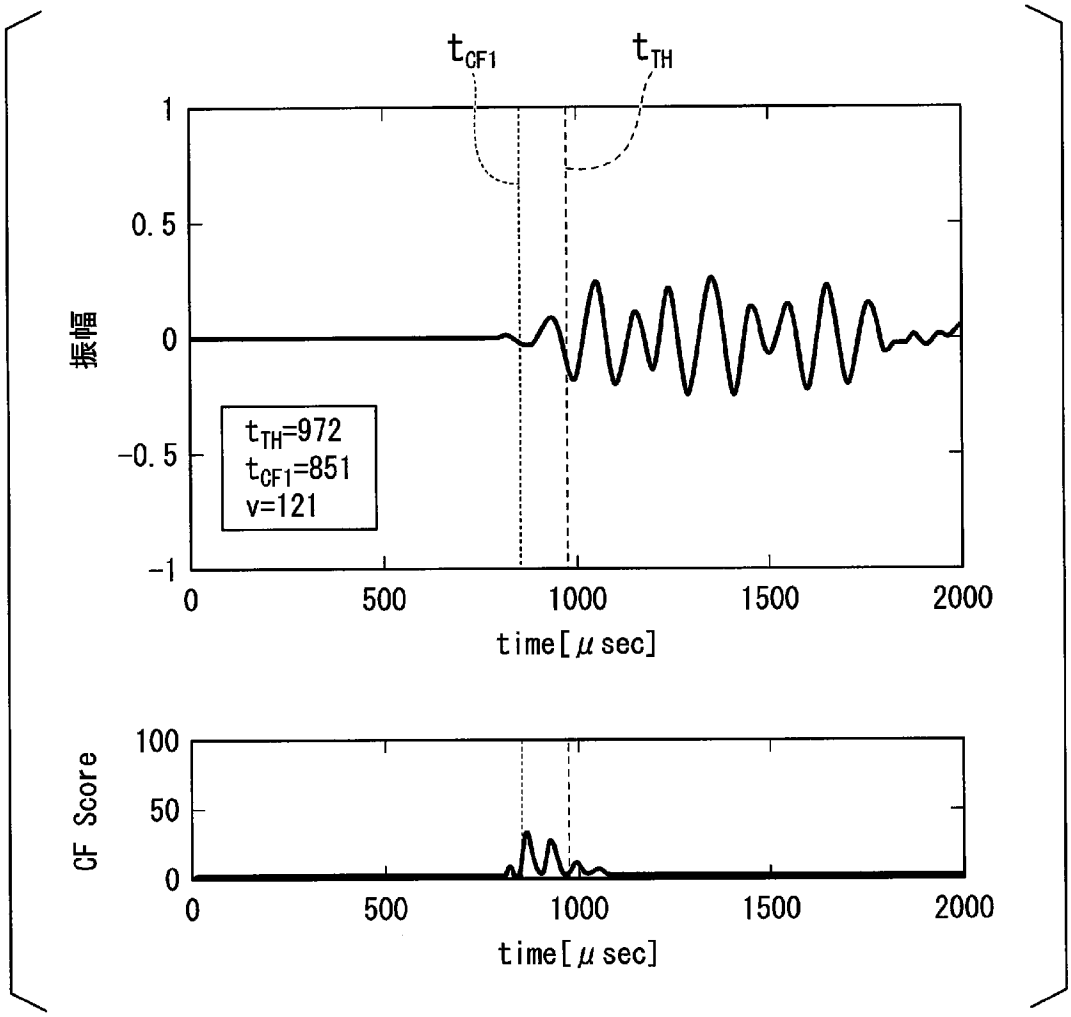
[図4]


10-1
10-5
10-4
800
700
42
600
500
400
41
300
200
100
10-3
0
10-2
0
100
200
300
400
500
600
700
800

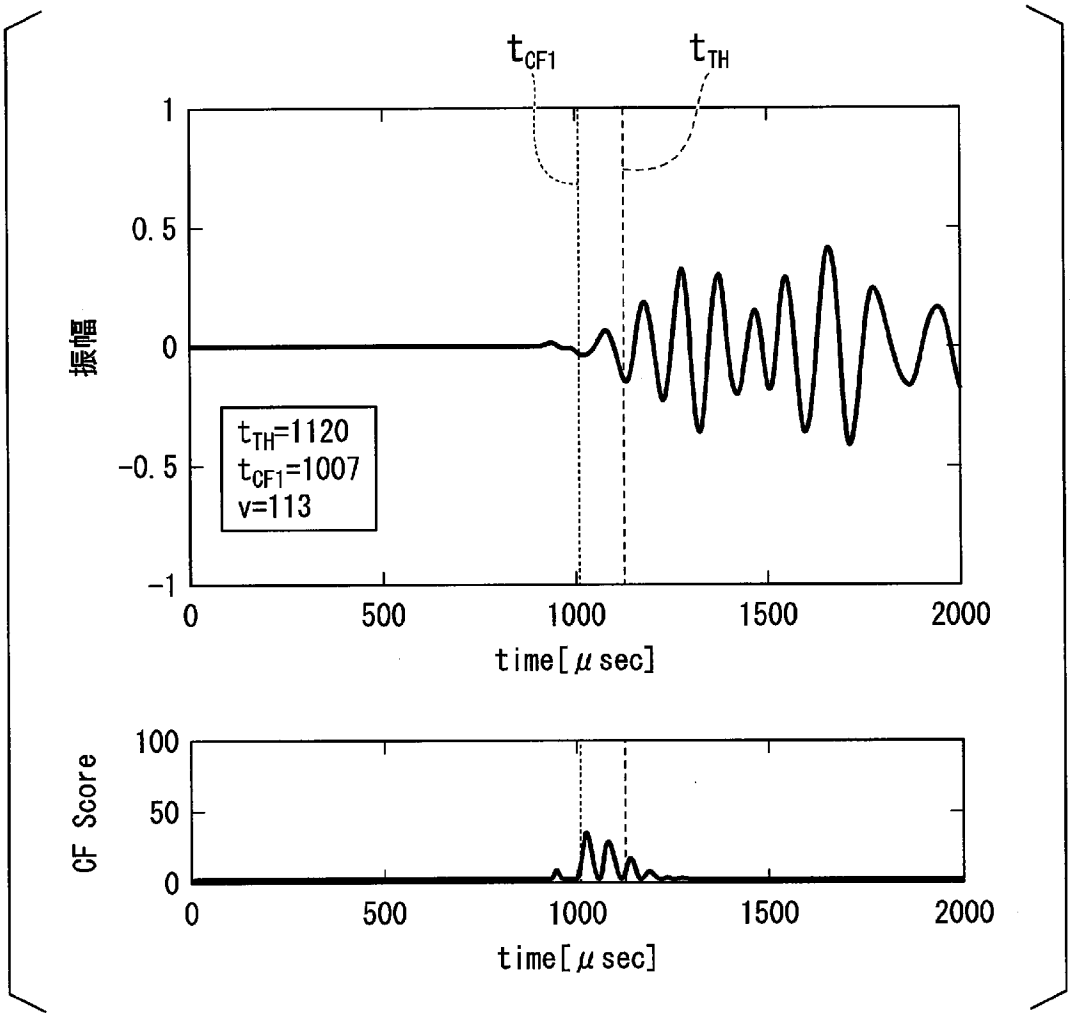
[図5A]


t_{CF1}
t_{TH}
1
0.5
0
-0.5
-1
振幅
t_{TH}=894
t_{CF1}=709
v=185
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]
100
50
0
CF Score
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]

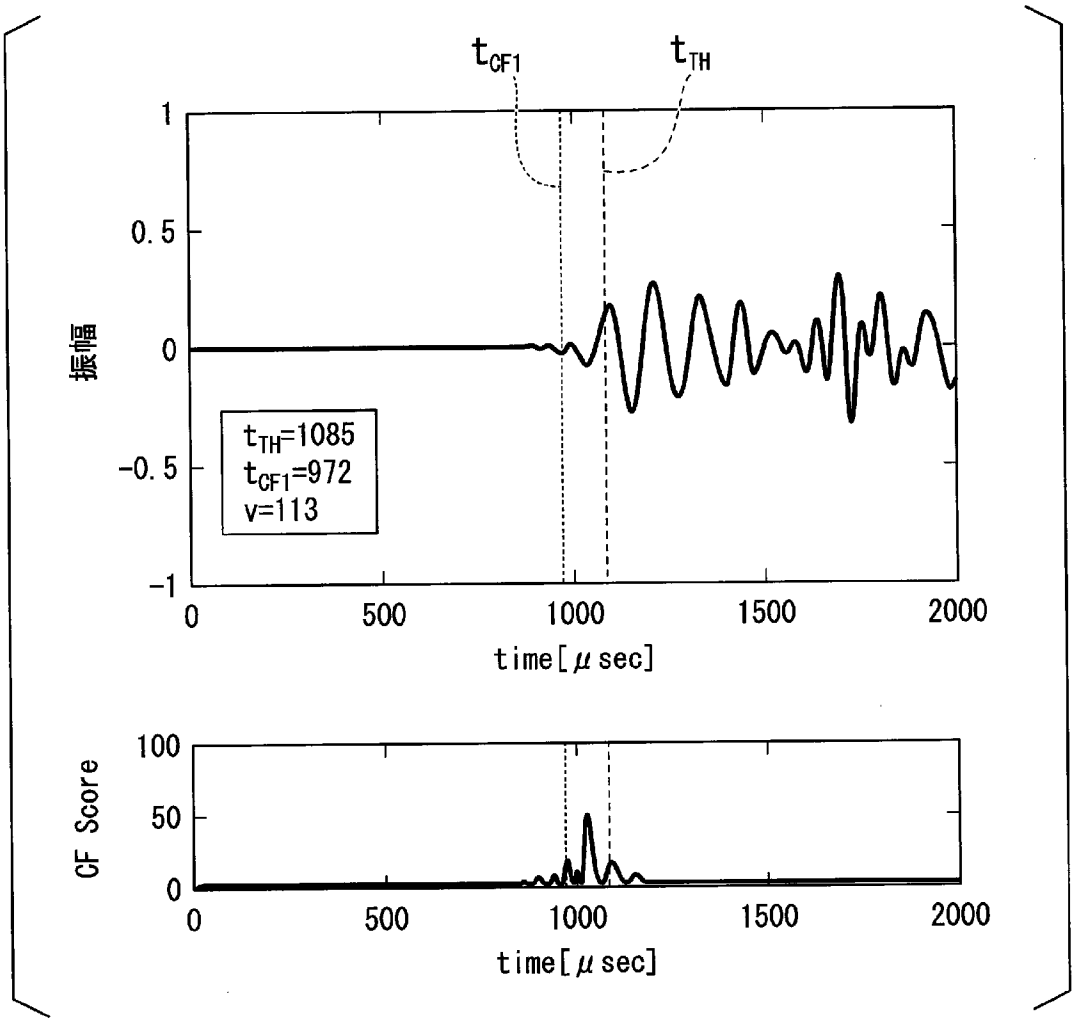
[図5B]


t_{CF1}
t_{TH}
1
0.5
0
-0.5
-1
振幅
t_{TH}=972
t_{CF1}=851
v=121
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]
100
50
0
CF Score
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]

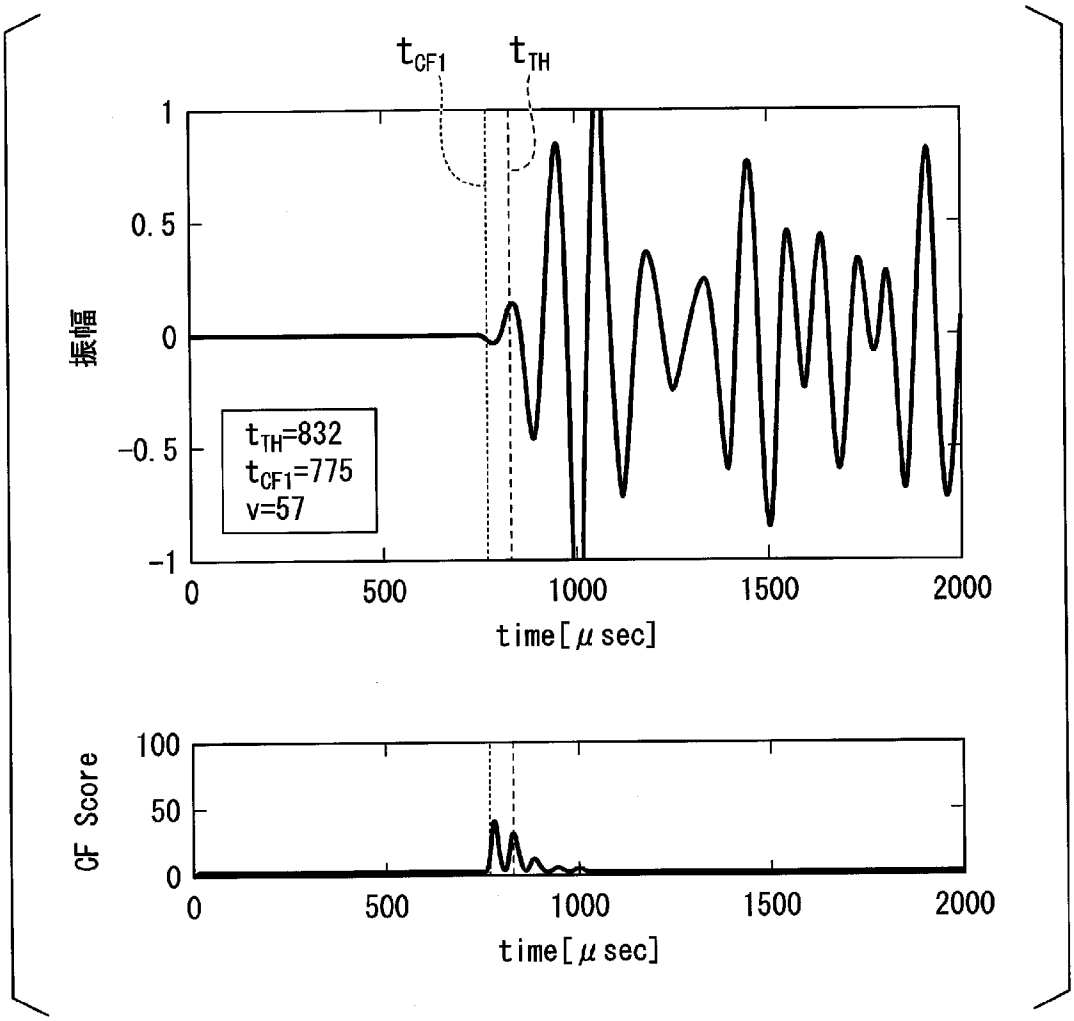
[図5C]


t_{CF1}
t_{TH}
1
0.5
0
-0.5
-1
振幅
t_{TH}=1120
t_{CF1}=1007
v=113
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]
100
50
0
CF Score
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]

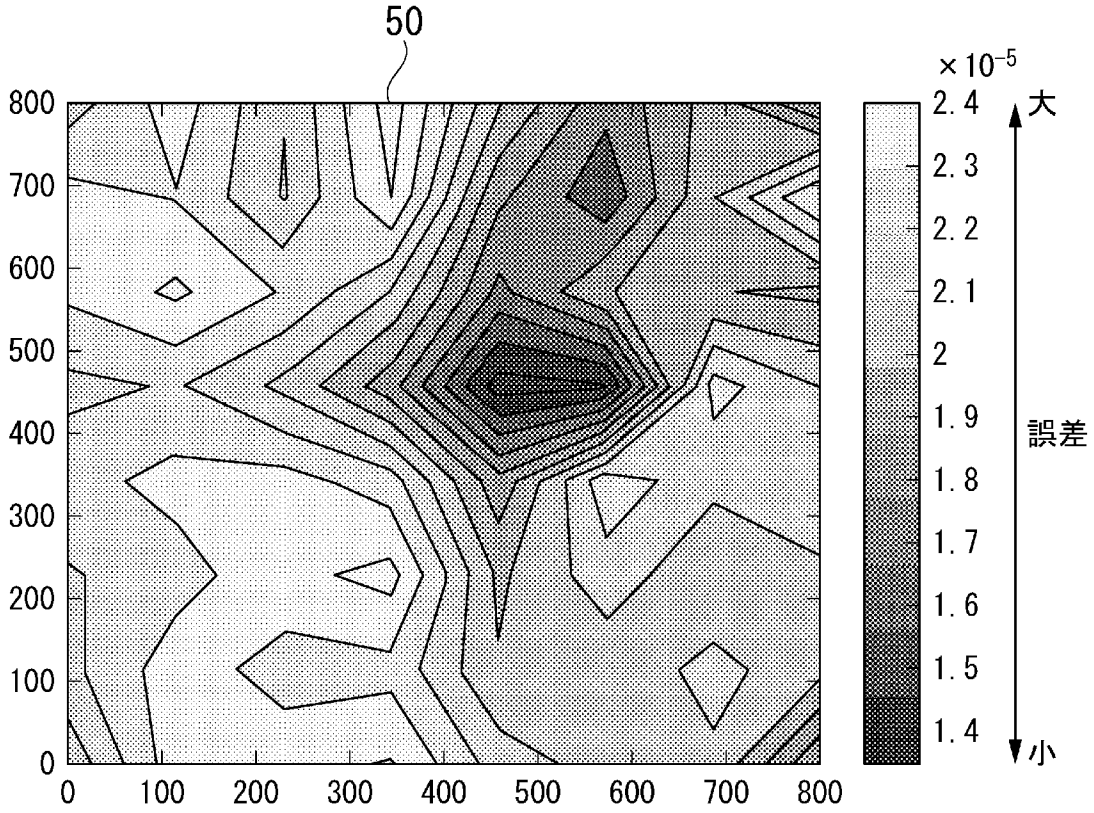
[図5D]


t_{CF1}
t_{TH}
1
0.5
0
-0.5
-1
振幅
t_{TH}=1085
t_{CF1}=972
v=113
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]
100
50
0
CF Score
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]

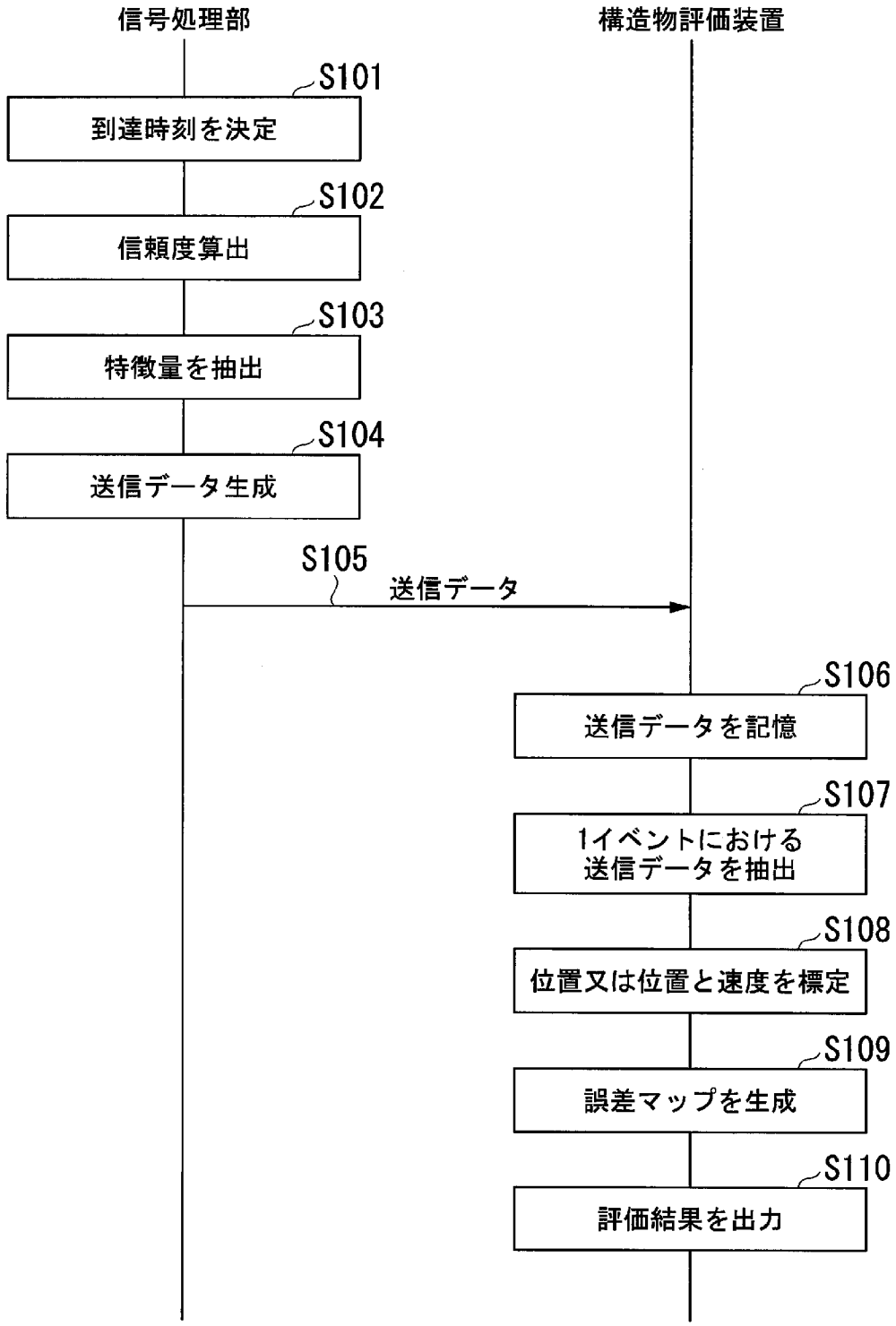
[図5E]


t_{CF1}
t_{TH}
振幅
1
0.5
0
-0.5
-1
t_{TH}=832
t_{CF1}=775
v=57
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]
CF Score
100
50
0
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]

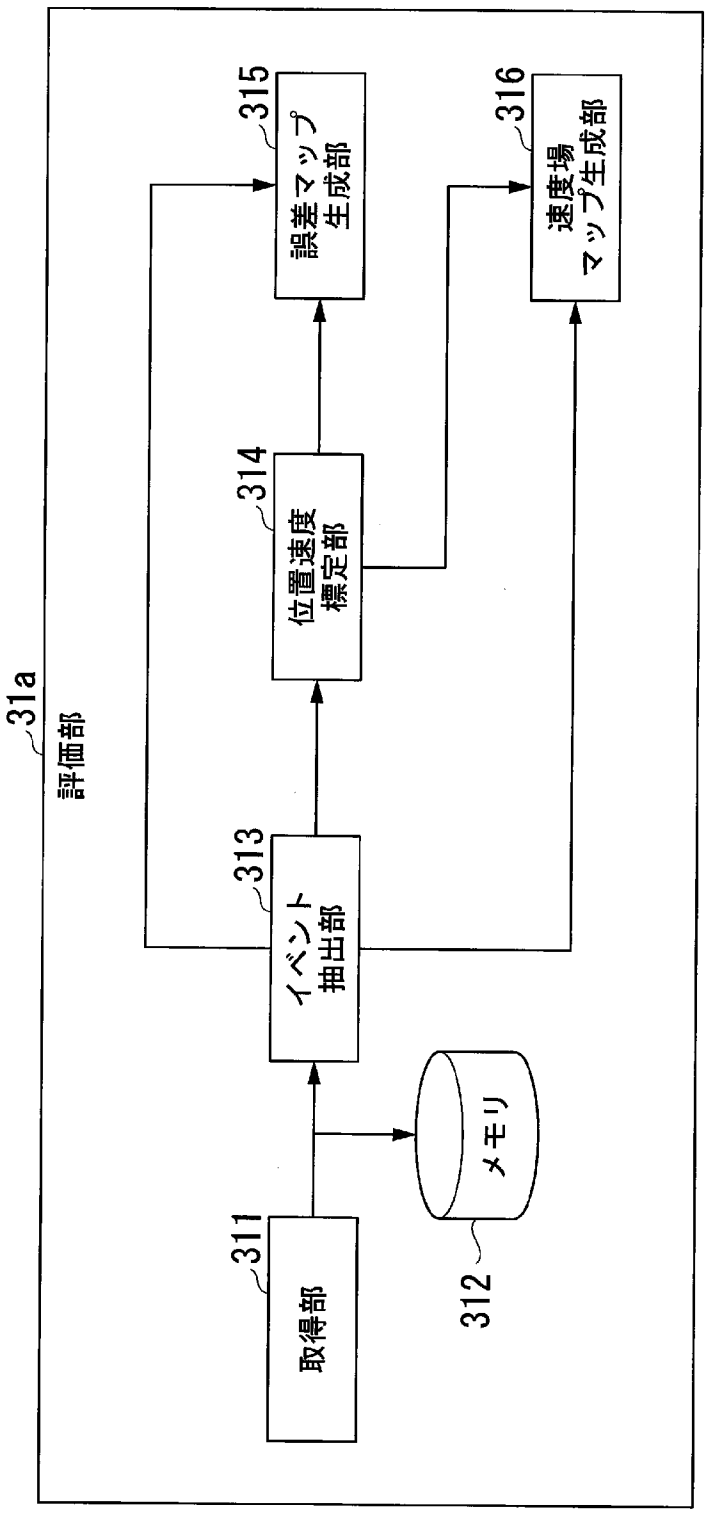
[図6]


50
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
×10−5
2.4
2.3
2.2
2.1
2
1.9
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
大
誤差
小

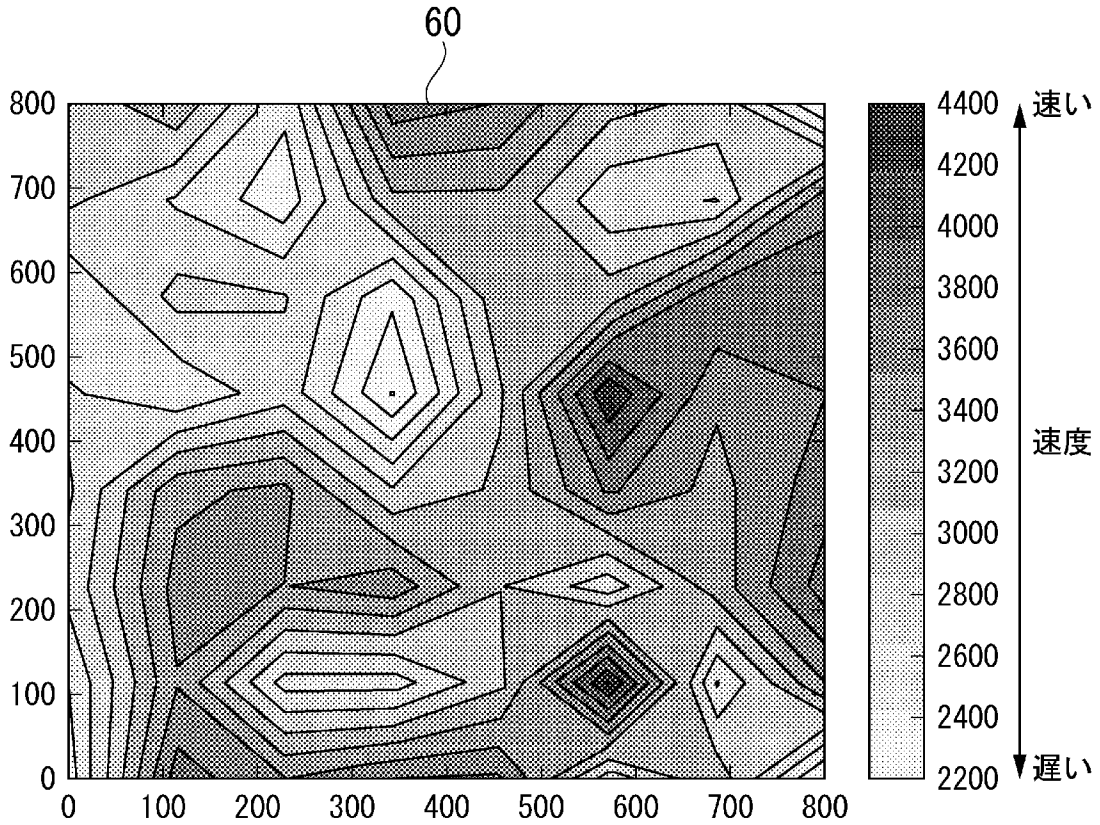
[図7]


信号処理部
構造物評価装置
S101
到達時刻を決定
S102
信頼度算出
S103
特徴量を抽出
S104
送信データ生成
S105
送信データ
S106
送信データを記憶
S107
1イベントにおける
送信データを抽出
S108
位置又は位置と速度を標定
S109
誤差マップを生成
S110
評価結果を出力

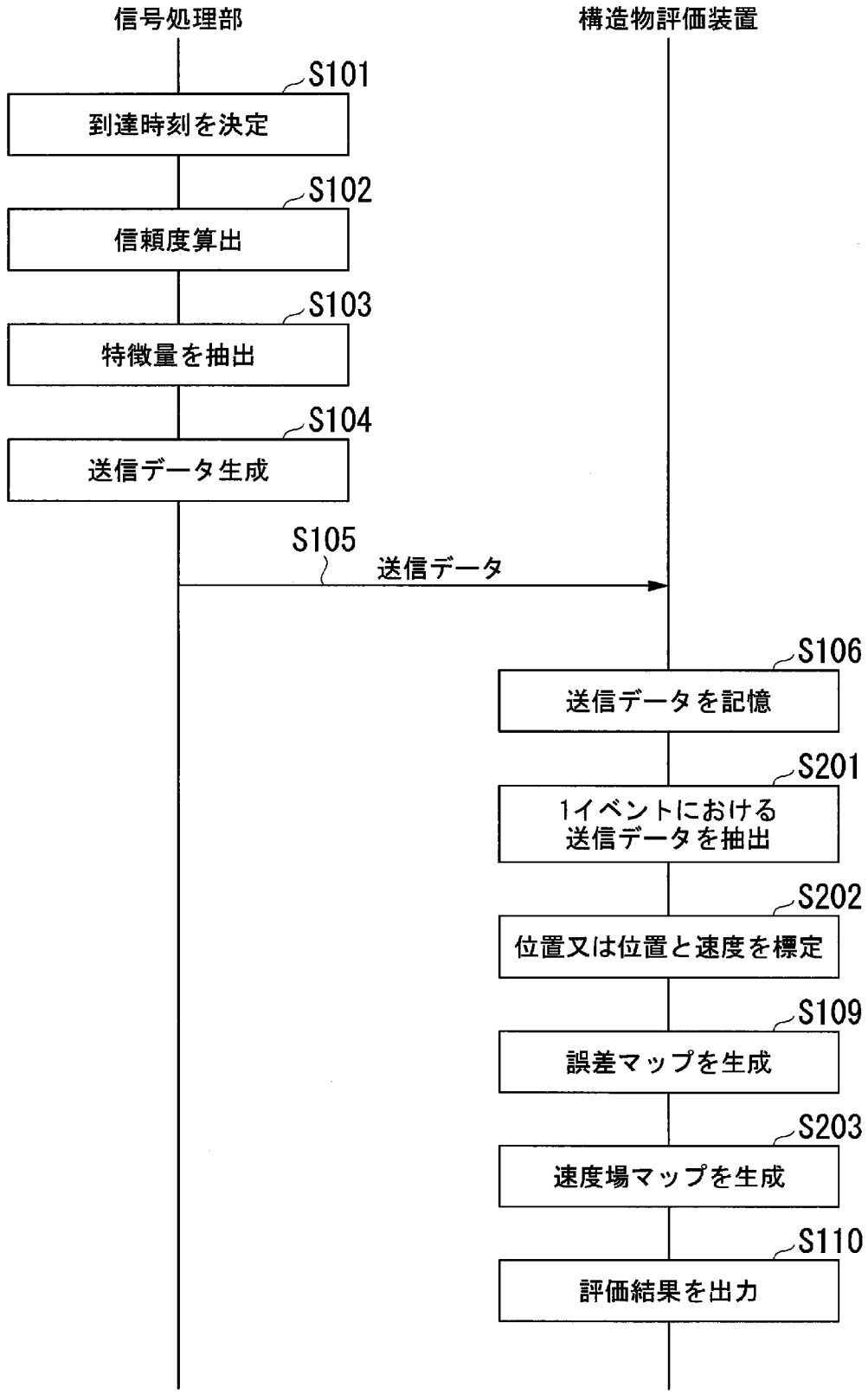
[図8]


31a
評価部
311
取得部
312
メモリ
313
イベント抽出部
314
位置速度標定部
315
誤差マップ生成部
316
速度場マップ生成部

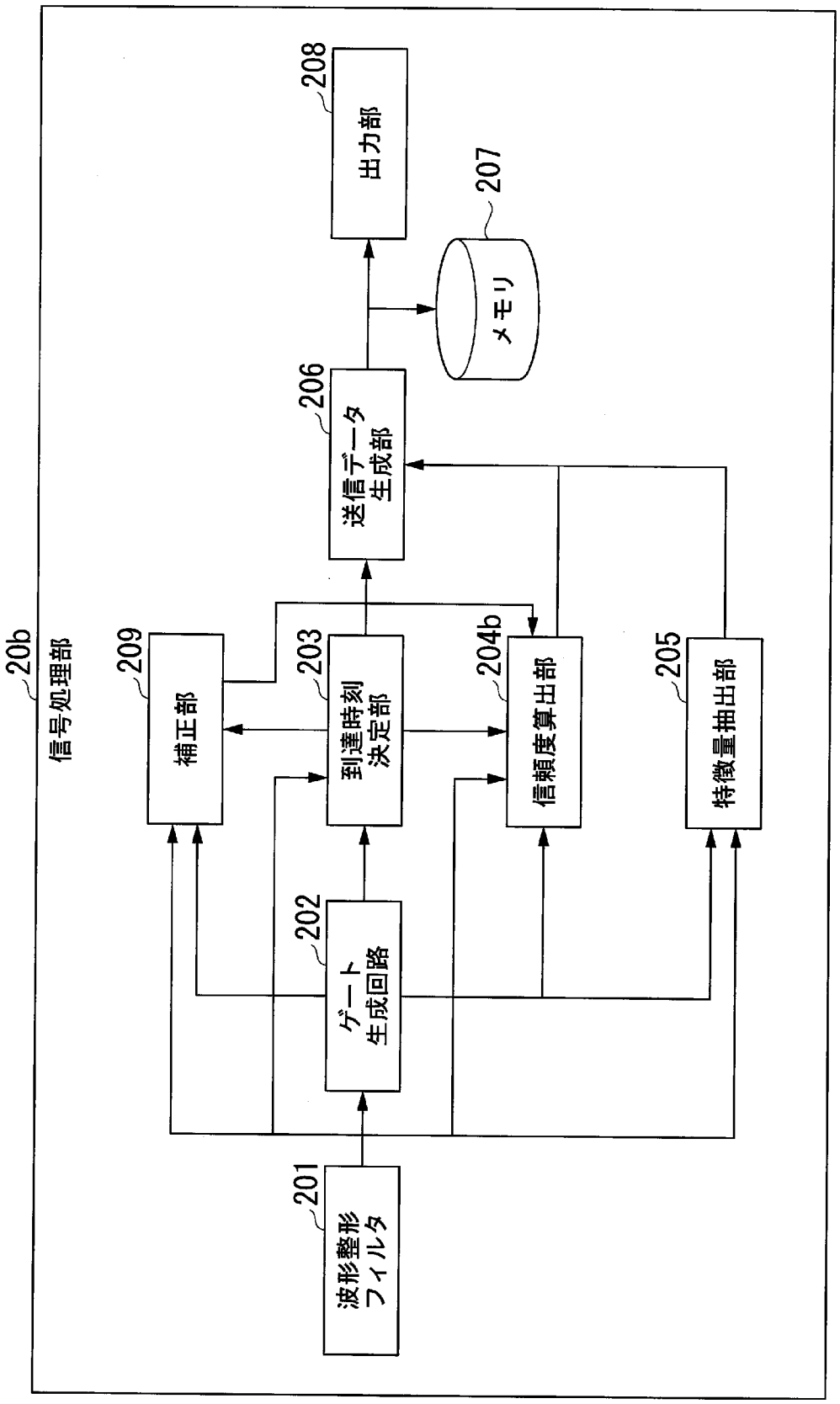
[図9]


60
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
4400
4200
4000
3800
3600
3400
3200
3000
2800
2600
2400
2200
速い
速度
遅い

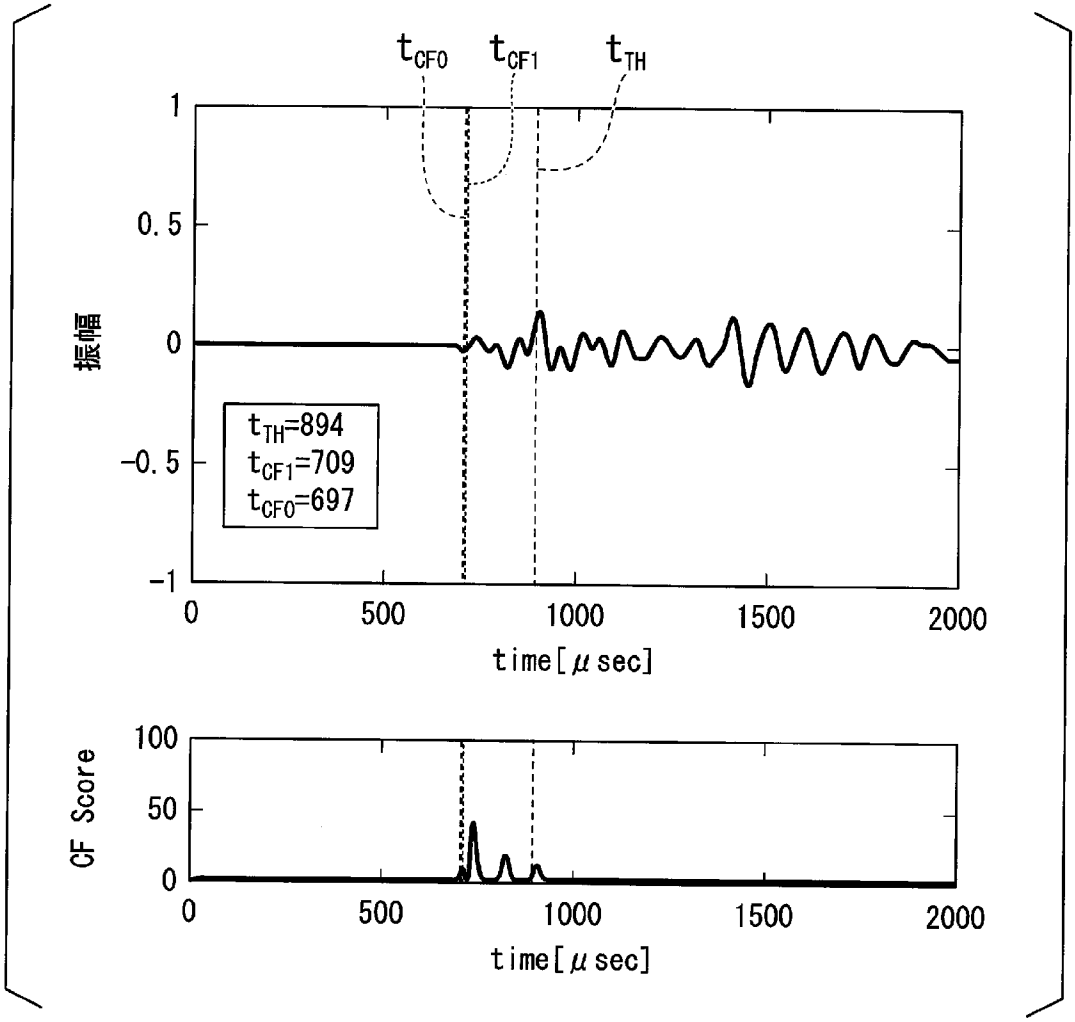
[図10]


信号処理部
構造物評価装置
S101
到達時刻を決定
S102
信頼度算出
S103
特徴量を抽出
S104
送信データ生成
S105
送信データ
S106
送信データを記憶
S201
1イベントにおける
送信データを抽出
S202
位置又は位置と速度を標定
S109
誤差マップを生成
S203
速度場マップを生成
S110
評価結果を出力

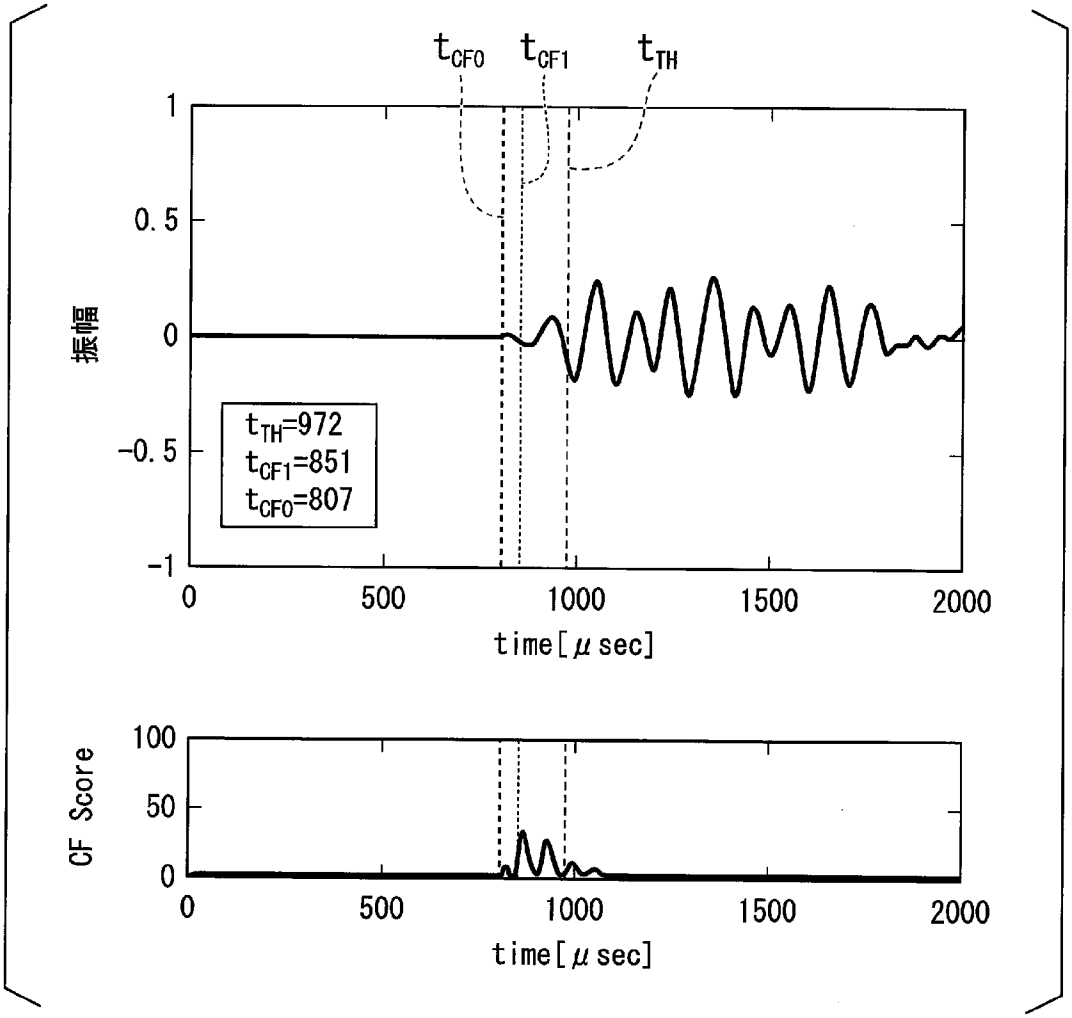
[図11]


20b
信号処理部
201
波形整形フィルタ
202
ゲート生成回路
203
到達時刻決定部
204b
信頼度算出部
205
特徴量抽出部
206
送信データ生成部
207
メモリ
208
出力部
209
補正部

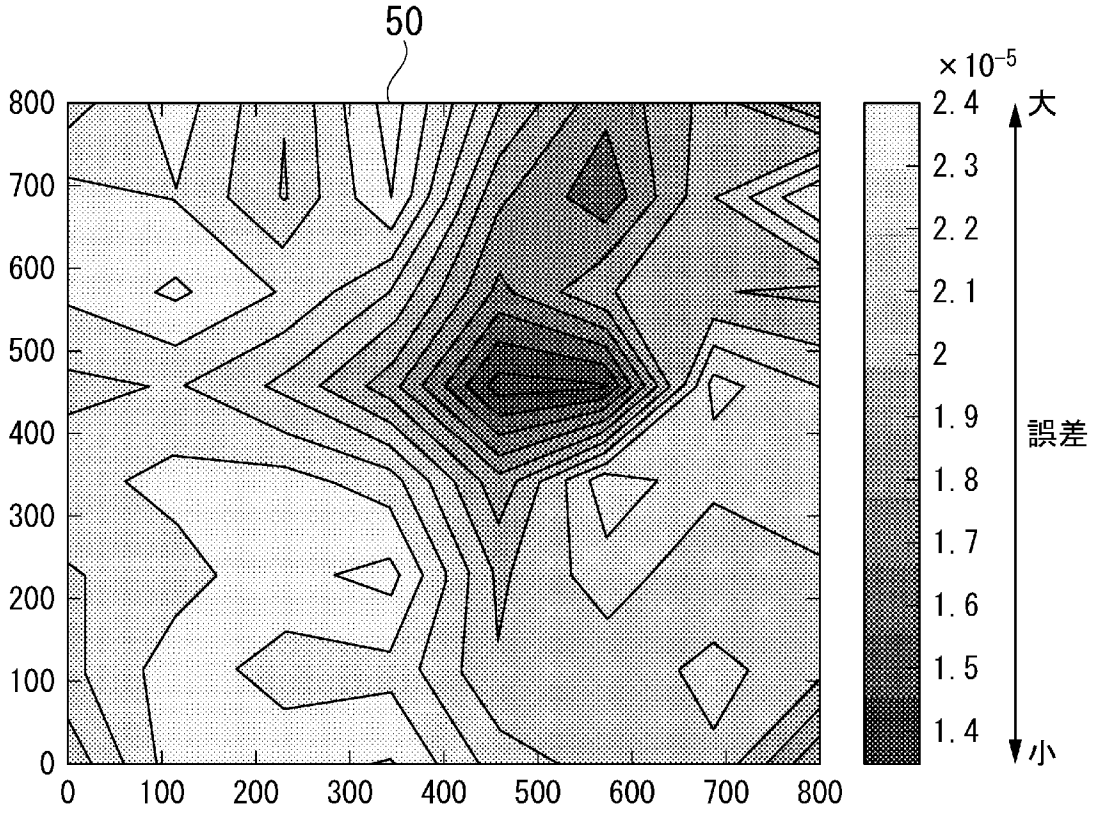
[図12A]


t_{CF0}
t_{CF1}
t_{TH}
1
0.5
0
-0.5
-1
振幅
t_{TH}=894
t_{CF1}=709
t_{CF0}=697
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]
100
50
0
CF Score
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]

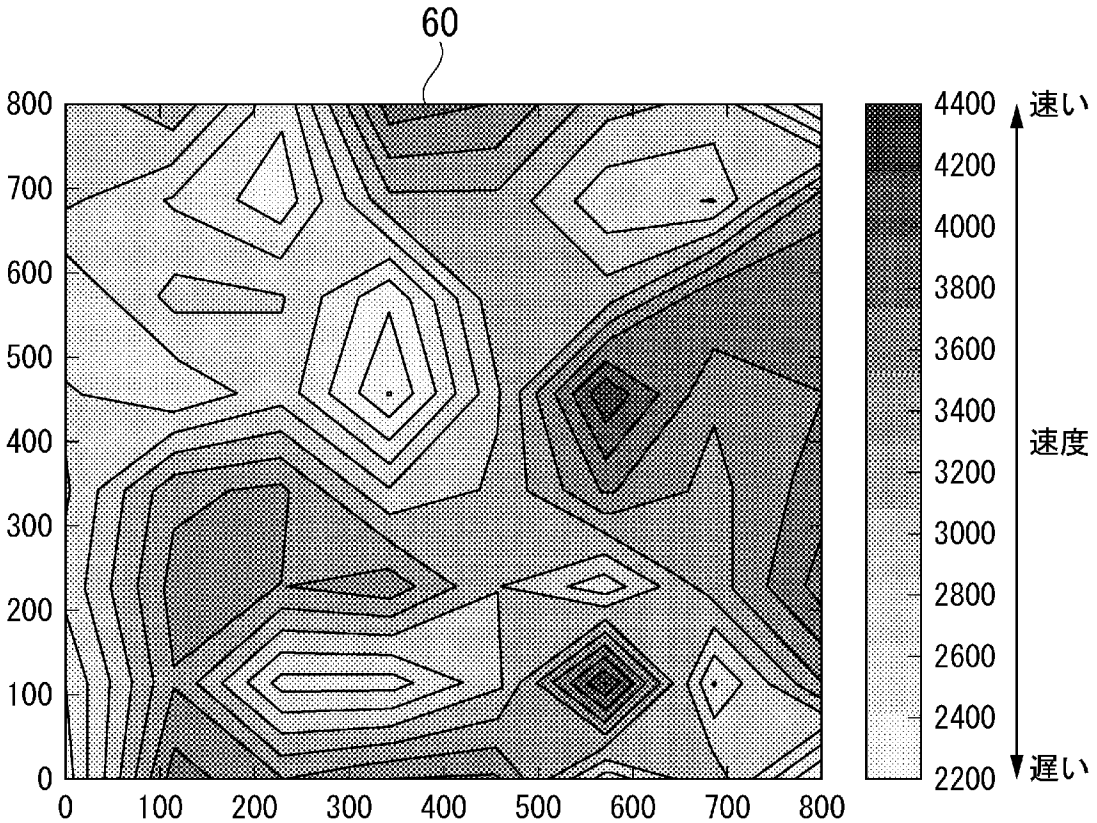
[図12B]


t_{CF0}
t_{CF1}
t_{TH}
振幅
1
0.5
0
-0.5
-1
t_{TH}=972
t_{CF1}=851
t_{CF0}=807
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]
CF Score
100
50
0
0
500
1000
1500
2000
time[μsec]

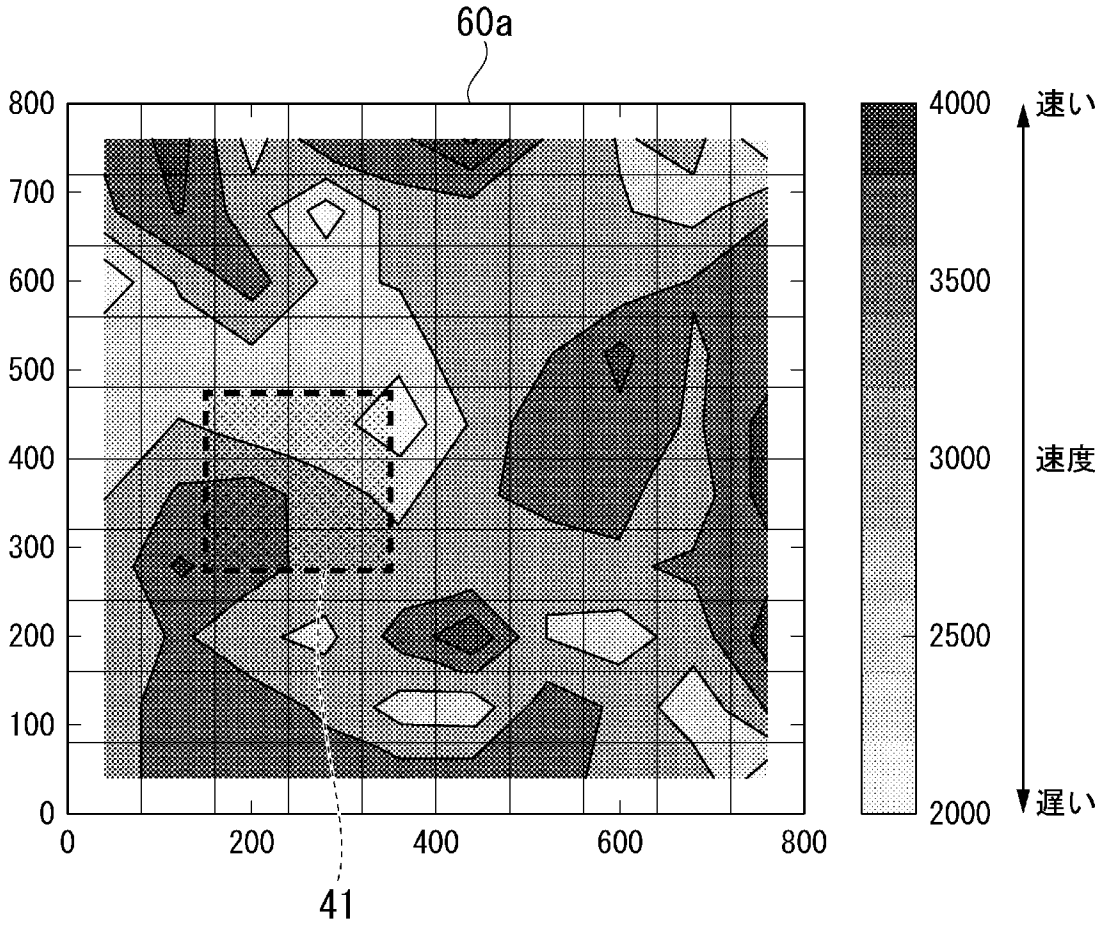
[図13A]


50
×10⁻⁵
2.4
2.3
2.2
2.1
2
1.9
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
大
誤差
小
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800

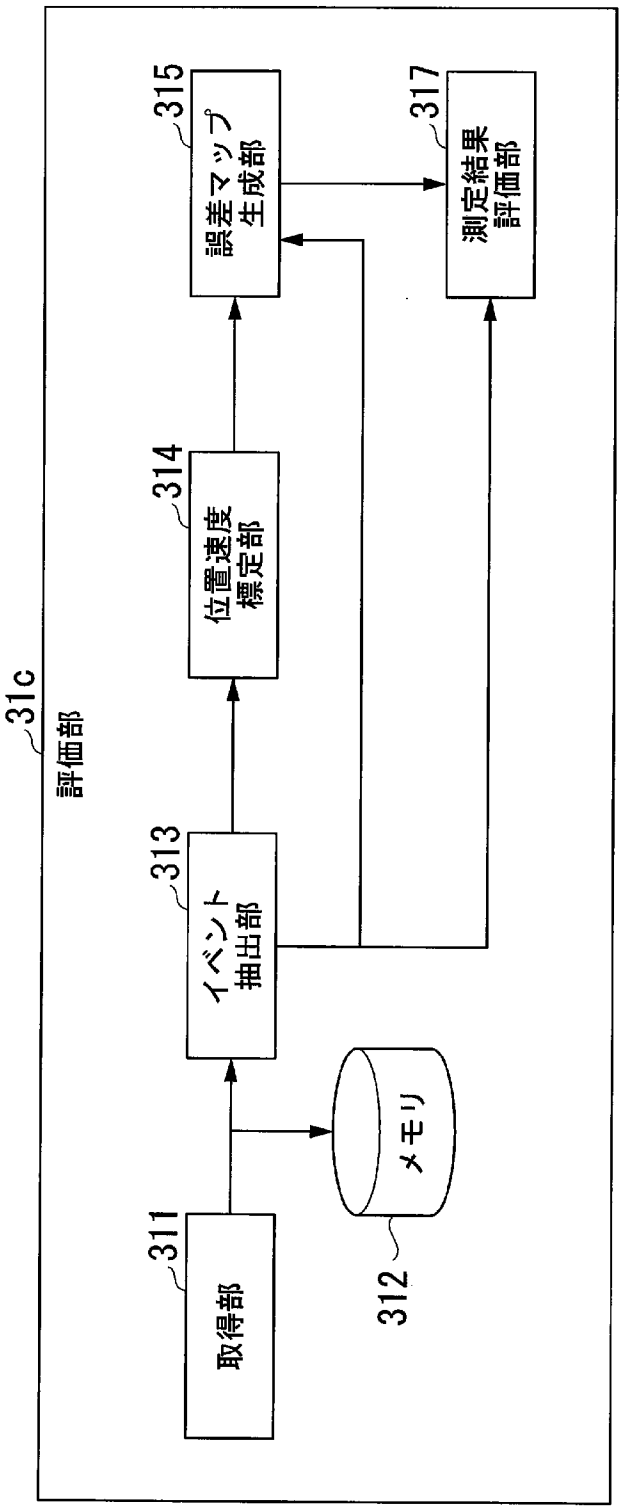
[図13B]


60
4400
4200
4000
3800
3600
3400
3200
3000
2800
2600
2400
2200
速い
速度
遅い
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800

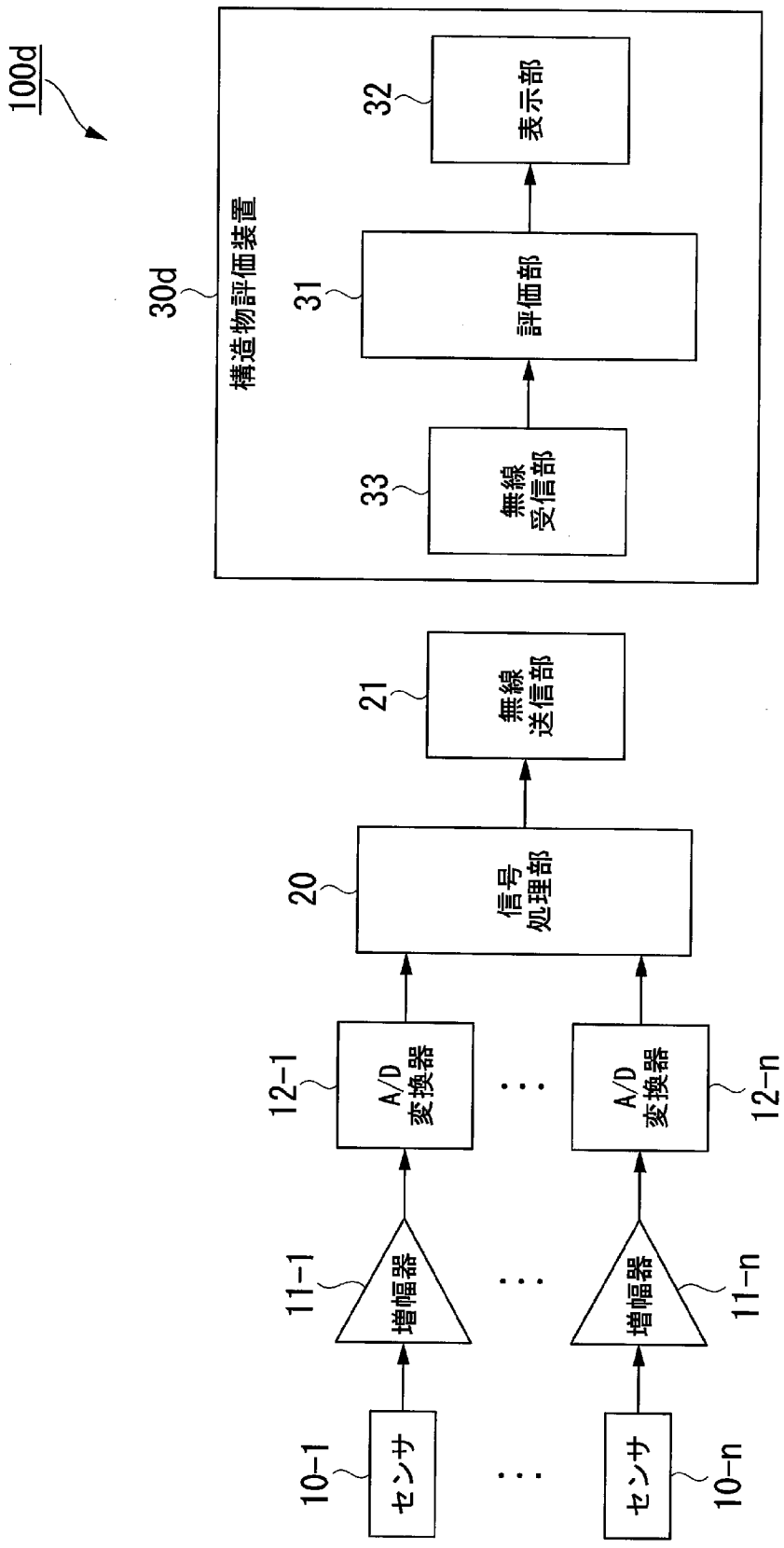
[図13C]


60a
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
200
400
600
800
41
4000
3500
3000
2500
2000
速い
速度
遅い

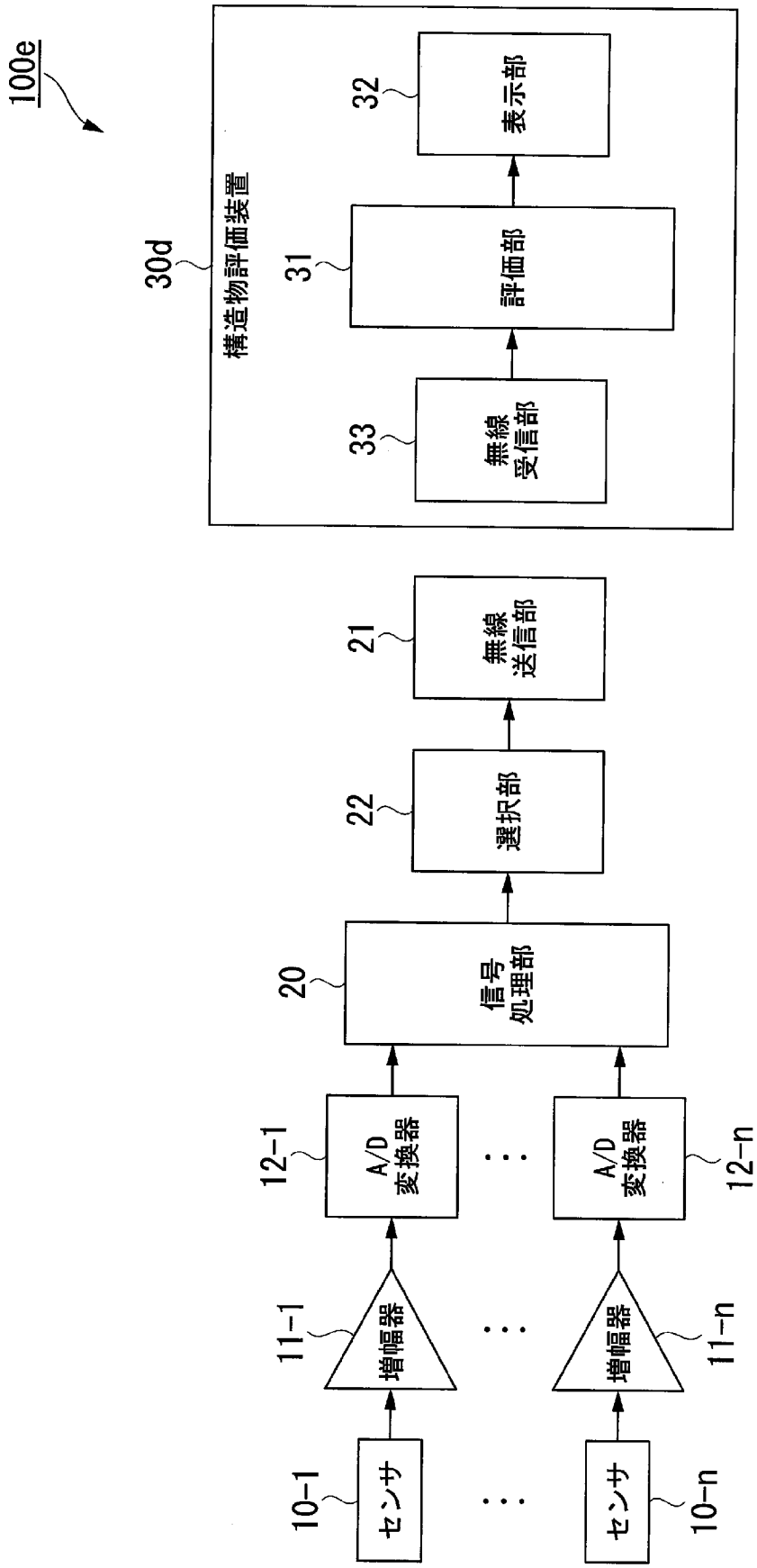
[図14]


31c
評価部
311
取得部
312
メモリ
313
イベント抽出部
314
位置速度標定部
315
誤差マップ生成部
317
測定結果評価部

[図15]


100d
30d
構造物評価装置
32
表示部
31
評価部
33
無線
受信部
21
無線
送信部
20
信号
処理部
12-1
A/D
変換器
12-n
A/D
変換器
11-1
増幅器
11-n
増幅器
10-1
センサ
10-n
センサ

[図16]


100e
30d
構造物評価装置
31
評価部
32
表示部
33
無線
受信部
21
無線
送信部
22
選択部
20
信号
処理部
12-1
A/D
変換器
12-n
A/D
変換器
11-1
増幅器
11-n
増幅器
10-1
センサ
10-n
センサ

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2019/010887

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int. Cl. G01N29/14(2006.01)i, G01N29/07(2006.01)i, G01N29/44(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int. Cl. G01N29/00-29/52

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2019
Registered utility model specifications of Japan 1996-2019
Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2018-165732 A (TOSHIBA CORP.) 25 October 2018, paragraphs [0008]-[0051], [0062], fig. 1-5C & US 2018/0074019 A1, paragraphs [0026]-[0075], [0092], fig. 1-5C & US 2018/0074023 A1 & WO 2018/051534 A1 & WO 2018/051535 A1 & EP 3321673 A1 & EP 3321674 A1 & CN 108076657 A & CN 108076656 A	1, 3-4, 7-10
X	JP 2004-219075 A (CIVIL ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE OF HOKKAIDO) 05 August 2004, paragraphs [0006], [0015]-[0023], fig. 3-6 (Family: none)	1, 7, 9-10
A	CN 108459083 A (CHINA INSTITUTE OF WATER RESOURCES AND HYDROPOWER RESERCH) 28 August 2018 (Family: none)	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
23.05.2019	04.06.2019
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer Telephone No.

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１９／０１０８８７

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01N29/14(2006.01)i, G01N29/07(2006.01)i, G01N29/44(2006.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01N29/00-29/52

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０１９年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１９年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１９年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
X	JP 2018-165732 A (株式会社東芝) 2018.10.25, 段落[0008]-[0051], [0062], 図 1-5C & US 2018/0074019 A1, 段落[0026]-[0075], [0092], 図 1-5C & US 2018/0074023 A1 & WO 2018/051534 A1 & WO 2018/051535 A1 & EP 3321673 A1 & EP 3321674 A1 & CN 108076657 A & CN 108076656 A	1, 3-4, 7-10

☑　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☐　パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー

「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献

「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「＆」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
２３．０５．２０１９	０４．０６．２０１９

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
郵便番号１００－８９１５
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

特許庁審査官（権限のある職員）　２Ｗ　４４６２
越柴　洋哉
電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２５８

C（続き）．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
X	JP 2004-219075 A (独立行政法人北海道開発土木研究所) 2004.08.05, 段落[0006],[0015]-[0023],図 3-6 (ファミリーなし)	1,7,9-10
A	CN 108459083 A (中国水利水申科学研究院) 2018.08.28, (ファミリーなし)	1-10