

(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7月16日(16.07.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/145215 A1

(51) 国際特許分類:
G01M 99/00 (2011.01) G01M 13/045 (2019.01)
G01M 17/08 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2019/051619

(22) 国際出願日: 2019年12月27日(27.12.2019)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2019-002055 2019年1月9日(09.01.2019) JP

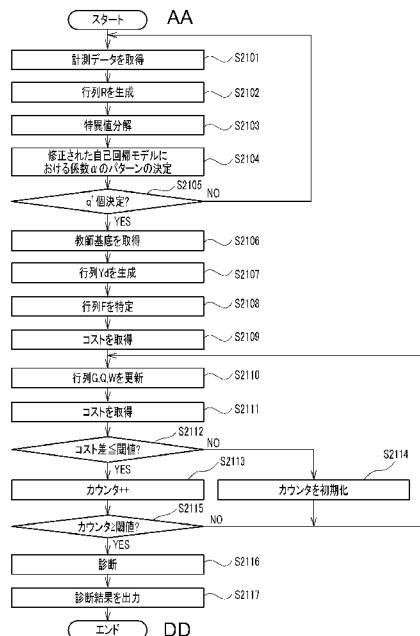
(71) 出願人: 日本製鉄株式会社 (NIPPON STEEL CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 中川 淳一 (NAKAGAWA, Junichi); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP). 南 秀樹 (MINAMI, Hideki); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP). 上島 啓之 (UESHIMA, Takayuki); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP). 竹下 章典 (TAKESHITA, Akinori); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP). 栗木 亮輔 (KURIKI, Ryosuke); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP).

(54) Title: INFORMATION PROCESSING DEVICE, INFORMATION PROCESSING METHOD, AND PROGRAM

(54) 発明の名称: 情報処理装置、情報処理方法及びプログラム

[図21]



S2101 Acquire measurement data
S2102 Generate matrix R
S2103 Analyze singular values
S2104 Determine pattern of coefficients α
in corrected autoregression model
S2105 q' values determined?
S2106 Acquire teacher basis
S2107 Generate matrix Y_d
S2108 Specify matrix F
S2109 Acquire cost
S2110 Update matrices G, Q, and W
S2111 Acquire cost
S2112 Cost difference $\leq$ threshold value?
S2113 Counter++
S2114 Initialize counter
S2115 Counter $\geq$ threshold value?
S2116 Diagnosis
S2117 Output diagnosis result
AA Start
DD End

(57) Abstract: In the present invention, on the basis of measurement data pertaining to periodic movements of an object, a pre-set number of correction coefficients which are coefficients in a corrected autoregression model are determined, a data matrix for storing non-negative-value data indicating a pattern of each of the determined correction coefficients is decomposed into a teacher basis matrix which is a matrix of non-negative values for storing data indicating a pattern of correction coefficients corresponding to a pre-set state, a teacher weight matrix which is a matrix of non-negative values

(74) 代理人：國分 孝悦 (KOKUBUN, Takayoshi);
〒1700013 東京都豊島区東池袋 1 丁目 1 7 番 8
号 NBF 池袋シティビル 5 階 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, 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))

indicating the weights of teacher bases in the data matrix, an extraction basis matrix which is a matrix of non-negative values for storing bases extracted from the data matrix, and an extraction weight matrix which is a matrix of non-negative values indicating the weights of extraction bases in the data matrix, and a diagnosis is made as to whether an object is in the pre-set state on the basis of the teacher weight matrix and the extraction weight matrix.

(57) 要約：物体の周期的な運動に係る計測データに基づいて、修正された自己回帰モデルにおける係数である修正係数を、予め定められた個数だけ決定し、決定された修正係数それぞれのパターンを示す非負値のデータが格納されたデータ行列を、予め定められた状態に対応する修正係数のパターンを示すデータを格納する非負値の行列である教師基底行列と、データ行列における教師基底の重みを示す非負値の行列である教師重み行列と、データ行列から抽出される基底を格納する非負値の行列である抽出基底行列と、データ行列における抽出基底の重みを示す非負値の行列である抽出重み行列と、に分解し、教師重み行列と、抽出重み行列と、に基づいて、物体が予め定められた状態であるか否かを診断する。

明 細 書

発明の名称： 情報処理装置、情報処理方法及びプログラム

技術分野

[0001] 本発明は、情報処理装置、情報処理方法及びプログラムに関する。本願は、2019年1月9日に日本に出願された特願2019-2055号に基づき優先権を主張し、それらの内容を全てここに援用する。

背景技術

[0002] 周期的な運動を行う物体の診断を行う技術として、運動を行っている物体から得られる信号を計測し、その信号の特徴量を算出し、その特徴量から物体の診断を行う方法がある。特許文献1には、信号の周波数特性を自己回帰モデルで同定することで、より高精度なスペクトル特性を取得する技術が開示されている。特許文献2には、以下の技術が開示されている。まず、物体の周期的な運動から計測された計測データから、自己相関行列を生成する。自己相関行列を特異値分解することにより得られた固有値のうち、最大のものから設定された数を用いて、計測データを近似する修正された自己回帰モデルの係数を決定する。決定した係数から、修正された自己回帰モデルの周波数特性を求める。求めた周波数特性に基づいて、軸受の異常を診断する。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2003-116811号公報

特許文献2：特開2018-163135号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 周期的な運動を行う物体が予め定められた状態であるか否かをより精度よく診断したいという要望がある。特許文献1、2等の従来技術では、この要望を満たすことができなかった。

本発明は、以上のような問題点に鑑みてなされたものであり、周期的な運

動を行う物体が予め定められた状態であるか否かをより精度よく診断することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0005] 本発明の情報処理装置は、周期的な運動を行う物体の前記周期的な運動に係る計測データを取得する取得手段と、前記取得手段により取得された前記計測データに基づいて、修正された自己回帰モデルにおける係数である修正係数を、予め定められた個数だけ決定する決定手段と、前記決定手段により決定された前記個数の前記修正係数それぞれのパターンを示す非負値のデータが格納されたデータ行列を、教師基底行列と、教師重み行列と、抽出基底行列と、抽出重み行列と、に分解する分解手段と、前記分解手段により前記データ行列が分解された前記教師重み行列と、前記抽出重み行列と、に基づいて、前記物体が前記予め定められた状態であるか否かを診断する診断手段と、を有し、前記修正された自己回帰モデルは、前記計測データの実績値と、前記実績値に対する前記修正係数と、を用いて、前記計測データの予測値を表す式であり、前記決定手段は、前記計測データから導出される自己相関行列を特異値分解することで導出される前記自己相関行列の固有値を対角成分とする対角行列と、前記自己相関行列の固有ベクトルを列成分とする直交行列と、から導出される第1の行列を係数行列とし、前記計測データから導出される自己相関ベクトルを定数ベクトルとする方程式を用いて、前記修正係数を決定し、前記自己相関ベクトルは、時差が1から前記修正された自己回帰モデルで用いられる前記実績値の数であるmまでの前記計測データの自己相関を成分とするベクトルであり、前記自己相関行列は、時差が0からm-1までの前記計測データの自己相関を成分とする行列であり、前記第1の行列は、1以上且つm未満の設定された数であるsに対して、前記自己相関行列のs個の固有値と前記対角行列とから導出される第2の行列 Σ_s と、前記s個の固有値と前記直交行列とから導出される第3の行列 U_s と、から導出される行列 $U_s \Sigma_s U_s^T$ であり、前記第2の行列は、前記対角行列の部分行列であって、前記s個の固有値を対角成分とする行列であり、前記第3の行列は

、前記直交行列の部分行列であって、前記 s 個の固有値に対応する固有ベクトルを列成分ベクトルとする行列であり、前記教師基底行列は、教師基底を格納する非負値の行列であり、前記教師重み行列は、前記教師基底の重みを示す非負値の行列であり、前記抽出基底行列は、抽出基底を格納する非負値の行列であり、前記抽出重み行列は、前記抽出基底の重みを示す非負値の行列であり、前記教師基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、前記抽出基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターン以外の前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、前記分解手段は、前記教師基底行列と前記教師重み行列との積と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との積との和と、前記データ行列と、の差分に関するコスト関数の値を適正化するように、前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との値を更新することで、前記データ行列を、前記教師基底行列と前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列とに分解する。

[0006] 本発明の情報処理方法は、情報処理装置が実行する情報処理方法であって、周期的な運動を行う物体の前記周期的な運動に係る計測データを取得する取得ステップと、前記取得ステップで取得された前記計測データに基づいて、修正された自己回帰モデルにおける係数である修正係数を、予め定められた個数だけ決定する決定ステップと、前記決定ステップで決定された前記個数の前記修正係数それぞれのパターンを示す非負値のデータが格納されたデータ行列を、教師基底行列と、教師重み行列と、抽出基底行列と、抽出重み行列と、に分解する分解ステップと、前記分解ステップでの分解により前記データ行列が分解された前記教師重み行列と、前記抽出重み行列と、に基づいて、前記物体が前記予め定められた状態であるか否かを診断する診断ステップと、を含み、前記修正された自己回帰モデルは、前記計測データの実績値と、前記実績値に対する前記修正係数と、を用いて、前記計測データの予測値を表す式であり、前記決定ステップでは、前記計測データから導出される自己相関行列を特異値分解することで導出される前記自己相関行列の固有

値を対角成分とする対角行列と、前記自己相関行列の固有ベクトルを列成分とする直交行列と、から導出される第1の行列を係数行列とし、前記計測データから導出される自己相関ベクトルを定数ベクトルとする方程式を用いて、前記修正係数を決定し、前記自己相関ベクトルは、時差が1から前記修正された自己回帰モデルで用いられる前記実績値の数であるmまでの前記計測データの自己相関を成分とするベクトルであり、前記自己相関行列は、時差が0からm-1までの前記計測データの自己相関を成分とする行列であり、前記第1の行列は、1以上且つm未満の設定された数であるsに対して、前記自己相関行列のs個の固有値と前記対角行列とから導出される第2の行列 Σ_s と、前記s個の固有値と前記直交行列とから導出される第3の行列 U_s と、から導出される行列 $U_s \Sigma_s U_s^T$ であり、前記第2の行列は、前記対角行列の部分行列であって、前記s個の固有値を対角成分とする行列であり、前記第3の行列は、前記直交行列の部分行列であって、前記s個の固有値に対応する固有ベクトルを列成分ベクトルとする行列であり、前記教師基底行列は、教師基底を格納する非負値の行列であり、前記教師重み行列は、前記教師基底の重みを示す非負値の行列であり、前記抽出基底行列は、抽出基底を格納する非負値の行列であり、前記抽出重み行列は、前記抽出基底の重みを示す非負値の行列であり、前記教師基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、前記抽出基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターン以外の前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、前記分解ステップでは、前記教師基底行列と前記教師重み行列との積と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との積との和と、前記データ行列と、の差分に関するコスト関数の値を適正化するように、前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との値を更新することで、前記データ行列を、前記教師基底行列と前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列とに分解する。

[0007] 本発明のプログラムは、周期的な運動を行う物体の前記周期的な運動に係

る計測データを取得する取得ステップと、前記取得ステップで取得された前記計測データに基づいて、修正された自己回帰モデルにおける係数である修正係数を、予め定められた個数だけ決定する決定ステップと、前記決定ステップで決定された前記個数の前記修正係数それぞれのパターンを示す非負値のデータが格納されたデータ行列を、教師基底行列と、教師重み行列と、前記抽出基底行列と、抽出重み行列と、に分解する分解ステップと、前記分解ステップでの分解により前記データ行列が分解された前記教師重み行列と、前記抽出重み行列と、に基づいて、前記物体が前記予め定められた状態であるか否かを診断する診断ステップと、を含むステップをコンピュータに実行させ、前記修正された自己回帰モデルは、前記計測データの実績値と、前記実績値に対する前記修正係数と、を用いて、前記計測データの予測値を表す式であり、前記決定ステップでは、前記計測データから導出される自己相関行列を特異値分解することで導出される前記自己相関行列の固有値を対角成分とする対角行列と、前記自己相関行列の固有ベクトルを列成分とする直交行列と、から導出される第1の行列を係数行列とし、前記計測データから導出される自己相関ベクトルを定数ベクトルとする方程式を用いて、前記修正係数を決定し、前記自己相関ベクトルは、時差が1から前記修正された自己回帰モデルで用いられる前記実績値の数である m までの前記計測データの自己相関を成分とするベクトルであり、前記自己相関行列は、時差が0から $m-1$ までの前記計測データの自己相関を成分とする行列であり、前記第1の行列は、1以上且つ m 未満の設定された数である s に対して、前記自己相関行列の s 個の固有値と前記対角行列とから導出される第2の行列 Σ_s と、前記 s 個の固有値と前記直交行列とから導出される第3の行列 U_s と、から導出される行列 $U_s \Sigma_s U_s^T$ であり、前記第2の行列は、前記対角行列の部分行列であって、前記 s 個の固有値を対角成分とする行列であり、前記第3の行列は、前記直交行列の部分行列であって、前記 s 個の固有値に対応する固有ベクトルを列成分ベクトルとする行列であり、前記教師基底行列は、教師基底を格納する非負値の行列であり、前記教師重み行列は、前記教師基底の重みを示

す非負値の行列であり、前記抽出基底行列は、抽出基底を格納する非負値の行列であり、前記抽出重み行列は、前記抽出基底の重みを示す非負値の行列であり、前記教師基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、前記抽出基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターン以外の前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、前記分解ステップでは、前記教師基底行列と前記教師重み行列との積と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との積との和と、前記データ行列と、の差分に関するコスト関数の値を適正化するように、前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との値を更新することで、前記データ行列を、前記教師基底行列と前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列とに分解する。

図面の簡単な説明

[0008] [図1A]図 1 Aは、実験の状況を示す図である。

[図1B]図 1 Bは、歯車箱に取り付けられている軸受を示す図である。

[図2]図 2 は、軸受の詳細の一例を説明する図である。

[図3A]図 3 Aは、固有値の分布の一例を示す図である。

[図3B]図 3 Bは、固有値の分布の一例を示す図である。

[図3C]図 3 Cは、固有値の分布の一例を示す図である。

[図3D]図 3 Dは、固有値の分布の一例を示す図である。

[図3E]図 3 Eは、固有値の分布の一例を示す図である。

[図4A]図 4 Aは、計測データの波形の一例を示す図である。

[図4B]図 4 Bは、計測データの波形の一例を示す図である。

[図4C]図 4 Cは、計測データの波形の一例を示す図である。

[図4D]図 4 Dは、計測データの波形の一例を示す図である。

[図4E]図 4 Eは、計測データの波形の一例を示す図である。

[図5A]図 5 Aは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図5B]図 5 Bは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図5C]図 5 Cは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図5D]図5 Dは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図5E]図5 Eは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図6A]図6 Aは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図6B]図6 Bは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図6C]図6 Cは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図6D]図6 Dは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図6E]図6 Eは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図7A]図7 Aは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図7B]図7 Bは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図7C]図7 Cは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図7D]図7 Dは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図7E]図7 Eは、修正された自己回帰モデルの波形の一例を示す図である。

[図8A]図8 Aは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図8B]図8 Bは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図8C]図8 Cは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図8D]図8 Dは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図8E]図8 Eは、修正された自己回帰モデルの周波数特性の一例を示す図である。

[図9]図9は、係数のパターンの一例を示す図である。

[図10]図10は、学習により特定された係数のパターンの一例を説明する図である。

[図11]図11は、各パターンの重みの一例を説明する図である。

[図12]図12は、教師基底の一例を示す図である。

[図13A]図13Aは、実験対象の軸受の一例を説明する図である。

[図13B]図13Bは、実験対象の軸受の一例を説明する図である。

[図13C]図13Cは、実験対象の軸受の一例を説明する図である。

[図14A]図14Aは、データ行列の分解結果の一例を説明する図である。

[図14B]図14Bは、データ行列の分解結果の一例を説明する図である。

[図15A]図15Aは、データ行列の分解結果の一例を説明する図である。

[図15B]図15Bは、データ行列の分解結果の一例を説明する図である。

[図16A]図16Aは、データ行列の分解結果の一例を説明する図である。

[図16B]図16Bは、データ行列の分解結果の一例を説明する図である。

[図17A]図17Aは、データ行列の分解結果の一例を説明する図である。

[図17B]図17Bは、データ行列の分解結果の一例を説明する図である。

[図18]図18は、診断システムのシステム構成等の一例を示す図である。

[図19]図19は、情報処理装置のハードウェア構成の一例を示す図である。

[図20]図20は、学習処理の一例を示すフローチャートである。

[図21]図21は、診断処理の一例を示すフローチャートである。

[図22A]図22Aは、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図22B]図22Bは、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図22C]図22Cは、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図22D]図22Dは、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図22E]図22Eは、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図23A]図23Aは、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図23B]図23Bは、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図23C]図23Cは、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図23D]図23Dは、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図23E]図 2 3 E は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図24A]図 2 4 A は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図24B]図 2 4 B は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図24C]図 2 4 C は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図24D]図 2 4 D は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図25A]図 2 5 A は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図25B]図 2 5 B は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図25C]図 2 5 C は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図25D]図 2 5 D は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図26A]図 2 6 A は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図26B]図 2 6 B は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図26C]図 2 6 C は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図26D]図 2 6 D は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図27A]図 2 7 A は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図27B]図 2 7 B は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図27C]図 2 7 C は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

[図27D]図 2 7 D は、教師基底と抽出基底との重みの一例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0009] <実施形態 1>

以下、本発明の一実施形態について図面に基づいて説明する。

[0010] (本実施形態の処理の概要)

本実施形態では、診断システムが鉄道台車に利用される軸受から計測された振動の信号に基づいて、その軸受の状態を診断する。

診断システムは、軸受の振動に応じた信号を計測する。診断システムは、計測された信号を自己回帰モデルで表現し、自己回帰モデルの係数に関する条件式における行列を特異値分解し、その行列の固有値を求める。診断システムは、求めた固有値のうち最大のものから設定された数のみを用いて、自己回帰モデルの係数を決定する。そして、診断システムは、決定した係数の

パターンに基づいて、軸受の状態を診断する。

[0011] (実験1)

鉄道台車に利用されている軸受の状態診断精度の評価のために行った実験について説明する。

図1Aは、本実験の状況を説明する図である。図1Aの状況は、実験室に鉄道台車における車輪の駆動機構が設置されている状況である。駆動モータ101は、駆動モータ軸102、歯車継手103、小歯車軸100を介して、小歯車105を回転させる。小歯車105は、回転することで、大歯車107を回転させる。それに合わせて、車軸109が回転し、車軸109に接続される車輪が回転することになる。本実験では、車軸109には、車輪の代わりにダイナモ110が接続されている。ダイナモ110は、疑似的な走行負荷を与えるために接続されている発電機である。本実験では、ダイナモ110を回転させるための負荷を、走行の際の負荷として想定する。

[0012] 小歯車105が嵌められた小歯車軸100と大歯車107が嵌められた車軸109とは、歯車箱104に固定されている。そして、歯車箱104には、小歯車軸との間に軸受106が装着されており、車軸109との間に軸受108が装着されている。図1Bは、歯車箱104に取り付けられている軸受106、108を側面から見た様子を示す図である。

[0013] 歯車箱104上の振動計測位置111は、振動計測装置が設置される位置である。振動計測装置は、加速度センサ、レーザ変位計等のセンサを含み、センサを介して物体の振動を検知し、検知した振動に応じた信号を出力する。振動計測位置111に設置された振動計測装置が振動計測位置111に伝達される振動を計測する。振動計測装置は、計測した振動を示す信号を外部の情報処理装置等に有線又は無線による通信を介して出力する。振動計測装置の計測周波数は、204800Hzである。ただし、他の例として、振動計測装置の計測周波数は、409600Hz、102400Hz等の他の周波数であることとしてもよい。本実験では、振動計測装置は、振動計測位置111に設置されるとするが、軸受106に起因する振動が伝達される位置

であるならば、任意の位置に設置することとしてもよい。

[0014] ここで、軸受106について、説明する。図2は、軸受106の一例の構成を説明する図である。軸受106は、外輪、内輪、転動体、保持器の4つの部分から構成される。図2には、軸受106の外輪、内輪、転動体、保持器の概要が示されている。軸受106は、外輪と内輪との間に保持器により保持された転動体が挟まれる構成となっている。

本実験では、小歯車105に装着されている軸受106として、疵のない正常な軸受、内輪に疵のある軸受、保持器に疵のある軸受のそれぞれを利用した。それぞれの軸受106毎に、駆動モータ101を駆動させ、振動計測位置111に設置された振動計測装置が振動を計測することで、軸受106の状態診断を行うための計測データを取得した。本実験では、駆動モータ101は、軸受106の内輪の回転数が2954.7rpm (round per minute) となるように駆動した。

[0015] 以上のように、軸受106が正常な場合、軸受106の内輪に疵がある場合、軸受106の保持器に疵がある場合、軸受106の転動体に疵がある場合、軸受106の外輪に疵がある場合について、振動計測位置111における振動の計測データを取得した。

[0016] 次に、振動計測装置が計測した計測データを用いた軸受106の状態診断の方法を説明する。以下では、振動計測装置が計測した計測データを、計測データ y とする。

[0017] 本実験では、計測データ y を、修正された自己回帰モデルで近似し、この修正された自己回帰モデルの係数から特徴量を算出することとした。

[0018] ある時刻 k ($k: 1 \leq k \leq M$ の整数)における計測データ y の値を y_k とする。 M は、計測データ y がどの時刻までのデータを含むかを示す数であり、予め設定されている。 M は、例えば、後述する自己相関(式5で定義される R_{jj})が統計量として十分な信頼性を得るように、事前に試行錯誤して決定すればよい。 y_k を近似する自己回帰モデルは、例えば、以下の式1のようになる。式1に示すように、自己回帰モデルとは、時系列データにおけるある

時刻 k ($m+1 \leq k \leq M$) のデータの予測値 $\hat{y}_k$ (式において $\hat{}$ は y の上に付けて表記) を、時系列データにおけるその時刻よりも前の時刻 $k-1$ ($1 \leq l \leq m$) のデータの実績値 y_{k-l} を用いて表す式である。

[0019] [数1]

$$\hat{y}_k = \sum_{l=1}^m \alpha_l y_{k-l}, \quad m+1 \leq k \leq M \quad \dots(\text{式1})$$

[0020] 式1における α は、自己回帰モデルの係数である。また、 m は、自己回帰モデルにおいてある時刻 k における計測データ y の値である y_k を、その時刻よりも前の過去幾つのデータを用いて近似するかを示す M 未満の整数である。ここでは、 m を 1500 とする。

[0021] 続いて、最小二乗法を用いて、自己回帰モデルによる予測値 $\hat{y}_k$ が実測値である y_k に近似するための条件式を求める。自己回帰モデルによる予測値 $\hat{y}_k$ が実測値である y_k に近似するための条件として、式1で与えられる $\hat{y}_k$ と y_k との二乗誤差を最小化することを考える。即ち、本実験では、自己回帰モデルによる予測値 $\hat{y}_k$ を y_k に近似するために最小二乗法を用いる。以下の式2は、計測データと自己回帰モデルによる予測値との二乗誤差を最小にするための条件式である。

[0022] [数2]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha_j} \sum_{k=m+1}^M \left| y_k - \sum_{l=1}^m \alpha_l y_{k-l} \right|^2 \\ &= 2 \sum_{k=m+1}^M \left\{ \left(y_k - \sum_{l=1}^m \alpha_l y_{k-l} \right) y_{k-j} \right\} \\ &= 2 \left\{ \sum_{k=m+1}^M y_k y_{k-j} - \sum_{l=1}^m \alpha_l \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-l} \right\} = 0, \quad 1 \leq j \leq m \quad \dots(\text{式2}) \end{aligned}$$

[0023] 式2より、以下の式3の関係を満たす。

[0024] [数3]

$$\sum_{k=m+1}^M y_k y_{k-j} = \alpha_1 \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-1} + \alpha_2 \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-2} + \dots + \alpha_m \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-m}, \quad 1 \leq j \leq m \quad \dots(\text{式3})$$

[0025] また、式 3 を変形（行列表記）することで、以下の式 4 のようになる。

[0026] [数4]

$$R_{j0} = (R_{j1} \ R_{j2} \ \dots \ R_{jm}) \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix}, \quad 1 \leq j \leq m \quad \dots(\text{式4})$$

[0027] 式 4 における R_{j1} は計測データ y の自己相関と呼ばれるもので、以下の式 5 で定義される値である。このときの $|j-1|$ を時差という。

[0028] [数5]

$$R_{jl} = \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-l}, \quad 1 \leq j \leq m, \quad 0 \leq l \leq m \quad \dots(\text{式5})$$

[0029] 式 4 を基に、以下の自己回帰モデルの係数に関する関係式である式 6 を考える。式 6 は、自己回帰モデルによる計測データの予測値と、その予測値に対応する時刻における計測データと、の誤差を最小化する条件から導出される方程式である。式 6 は、ユール・ウォーカー（Yule-Walker）方程式と呼ばれるものである。また、式 6 は自己回帰モデルの係数から成るベクトルを変数ベクトルとする線形方程式である。式 6 における左辺の定数ベクトルは、時差が 1 から m までの計測データの自己相関を成分とするベクトルである。以下では、式 6 における左辺の定数ベクトルを自己相関ベクトルとする。また、式 6 における右辺の係数行列は、時差が 0 から $m-1$ までの計測データの自己相関を成分とする行列である。以下では、式 6 における右辺の係数行列を自己相関行列とする。

[0030] [数6]

$$\begin{pmatrix} R_{10} \\ R_{20} \\ \vdots \\ R_{m0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix} \quad \dots(\text{式6})$$

[0031] また、式 6 における右辺の自己相関行列（ R_{jj} で構成される $m \times m$ の行列）を、以下の式 7 のように、自己相関行列 R と表記する。

[0032] [数7]

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mm} \end{pmatrix} \quad \dots(\text{式7})$$

[0033] 一般に、自己回帰モデルの係数を求める際には、式 6 を係数 α について解くという方法が用いられる。式 6 では、自己回帰モデルで導出されるある時刻 k における計測データの予測値 $\hat{y}_k$ が、その時刻 k における計測データの実績値 y_k にできるだけ近づくように係数 α が導出される。よって、自己回帰モデルの周波数特性に、各時刻における計測データの実績値 y_k に含まれる多数の周波数成分が含まれる。したがって、例えば、計測データ y に含まれるノイズが多い場合には、軸受 106 の振動に係る信号を抽出できなかったり、軸受 106 の故障の態様に応じた特徴を抽出することができなかったりするという問題が生じる。

[0034] そこで、本発明者らは、自己回帰モデルの係数 α に乗算される自己相関行列 R に着目し、鋭意検討した結果、自己相関行列 R の固有値の一部を用いて、計測データ y に含まれるノイズの影響が低減され、軸受の振動に係る信号成分が強調される（SN 比を高める）ように自己相関行列 R を書き換えればよいという着想に至った。

[0035] 以下で、このこと具体例を説明する。

自己相関行列 R を特異値分解する。自己相関行列 R の成分は、対称であるので、自己相関行列 R を特異値分解すると以下の式 8 のように、直交行列 U と、対角行列 Σ と、直交行列 U の転置行列との積となる。

[0036] [数8]

$$R = U \Sigma U^T \quad \dots(\text{式8})$$

[0037] 式 8 の行列 Σ は、式 9 に示すように、対角成分が自己相関行列 R の固有値となる対角行列である。対角行列 Σ の対角成分を、 σ_{11} 、 σ_{22} 、 $\dots$ 、 σ_{mm} とする。また、行列 U は、各列成分ベクトルが自己相関行列 R の固有ベクトルとなる直交行列である。直交行列 U の列成分ベクトルを、 u_1 、 u_2 、 $\dots$ 、 u_m とする。自己相関行列 R の固有ベクトル u_j に対する固有値が σ_{jj} という対応関係が有る。自己相関行列 R の固有値は、自己回帰モデルによる計測データの予測値の時間波形に含まれる各周波数の成分の強度に反映する変数である。

[0038] [数9]

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{mm} \end{pmatrix}, U = (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m) \quad \dots(\text{式9})$$

[0039] 自己相関行列 R の特異値分解の結果得られる対角行列 Σ の対角成分である σ_{11} 、 σ_{22} 、 $\dots$ 、 σ_{mm} の値は、数式の表記を簡略にするために降順とする。これらの自己相関行列 R の固有値のうち、最大のものから 1 以上且つ m 未満の設定された数である使用固有値数 s 個の固有値を用いて、以下の式 10 のように、行列 R' を定義する。行列 R' は、自己相関行列 R の固有値のうち使用固有値数 s 個の固有値を用いて自己相関行列 R を近似した行列である。

[0040] [数10]

$$R' = U_s \Sigma_s U_s^T \quad \dots(\text{式10})$$

[0041] 式 10 における行列 U_s は、式 8 の直交行列 U の左から s 個の列成分ベクトル（使用される固有値に対応する固有ベクトル）により構成される $m \times s$ 行列である。つまり、行列 U_s は、直交行列 U から左の $m \times s$ の成分を切り出して構成される部分行列である。また、 U_s^T は U_s の転置行列であり、式 8 の行列 U^T の上から s 個の行成分ベクトルにより構成される $s \times m$ 行列である。式 10 における行列 Σ_s は、式 8 の対角行列 Σ の左から s 個の列と上から s 個の

行により構成される $s \times s$ 行列である。つまり、行列 Σ_s は、対角行列 Σ から左上の $s \times s$ の成分を切り出して構成される部分行列である。

行列 Σ_s 及び行列 U_s を行列成分表現すれば、以下の式 11 のようになる。

[0042] [数11]

$$\Sigma_s = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{ss} \end{pmatrix}, \quad U_s = (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_s) \quad \dots(\text{式11})$$

[0043] 自己相関行列 R の代わりに行列 R' を用いることで、式 6 の関係式を、以下の式 12 のように書き換える。

[0044] [数12]

$$\begin{pmatrix} R_{10} \\ R_{20} \\ \vdots \\ R_{m0} \end{pmatrix} = U_s \Sigma_s U_s^T \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix} \quad \dots(\text{式12})$$

[0045] 式 12 を変形することで、係数 α を求める式 13 が得られる。式 13 によって求められた係数 α を用いて、式 1 により予測値 y^*_k を算出するモデルを「修正された自己回帰モデル」とする。

[0046] これまで対角行列 Σ の対角成分である σ_{11} 、 σ_{22} 、 $\dots$ 、 σ_{mm} の値を降順として説明したが、係数 α の算出過程において対角行列 Σ の対角成分は降順である必要はない。対角行列 Σ の対角成分は降順でない場合には、行列 U_s は直交行列 U から左の $m \times s$ の成分を切り出すのではなく、使用される固有値に対応する列成分ベクトル（固有ベクトル）を切り出して構成される部分行列である。また、対角行列 Σ の対角成分は降順でない場合には、行列 Σ_s は対角行列 Σ から左上の $s \times s$ の成分を切り出すのではなく、使用される固有値を対角成分とするように切り出される部分行列である。

[0047] 式 13 は、修正された自己回帰モデルの係数の決定に利用される方程式である。式 12、13 の行列 U_s は、自己相関行列 R の特異値分解により得られ

る直交行列の部分行列であって、利用される固有値に対応する固有ベクトルを列成分ベクトルとする行列である第3の行列である。また、式12、13の行列 Σ_s は、自己相関行列Rの特異値分解により得られる対角行列の部分行列であって、利用される固有値を対角成分とする行列である第2の行列である。そして、式12、13の行列 $U_s \Sigma_s U_s^T$ は、行列 Σ_s と行列 U_s とから導出される行列である第1の行列である。

[0048] [数13]

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix} = U_s \Sigma_s^{-1} U_s^T \begin{pmatrix} R_{10} \\ R_{20} \\ \vdots \\ R_{m0} \end{pmatrix} \quad \cdots(\text{式13})$$

[0049] 式13の右辺を計算することにより、修正された自己回帰モデルの係数 α が求まる。以上に、修正された自己回帰モデルの係数の導出方法の一例について説明してきたが、その基となる自己回帰モデルの係数の導出については直感的に分かり易いように予測値に対して最小二乗法を用いる方法で説明した。しかしながら、一般的には確率過程という概念を用いて自己回帰モデルを定義し、その係数を導出する方法が知られている。その場合に、自己相関は確率過程（母集団）の自己相関で表現される。この確率過程の自己相関は時差の関数として表されるものである。従って、本実施形態における計測データの自己相関は、確率過程の自己相関を近似するものであれば他の計算式で算出した値に代えても良い。例えば、 $R_{22} \sim R_{mm}$ は時差が0の自己相関であるが、これらを R_{11} に置き換えてもよい。

[0050] 本実験では、以下の4つの場合のそれぞれについて、得られた計測データ毎に、式5と式7を用いて自己相関行列Rを求め、式8で表される特異値分解を行うことによって自己相関行列Rの固有値を求め、自己相関行列Rの固有値の分布を求めた。4つの場合は、軸受106が正常な場合、軸受106の内輪に疵がある場合、軸受106の保持器に疵がある場合、および軸受106の転動体に疵がある場合、軸受106の外輪に疵がある場合である。

[0051] 次に、求めた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの周波数特性を求める方法を説明する。

式1で与えられる計測データの予測値 $y_k^{\wedge}$ の予測誤差 x_k が白色雑音になるという性質を使うと、修正された自己回帰モデルは白色雑音である予測誤差 x_k を入力とし、計測データの実測値 y_k を出力とする線形時不変システムとみなせる。従って、以下の手順で周波数特性の算出式を導出することができる。以下では、修正された自己回帰モデルを線形時不変モデルとみなしたものを、単にシステムと称することにする。予測誤差 x_k は、以下の式14で表される。

[0052] [数14]

$$y_k - \sum_{l=1}^m \alpha_l y_{k-l} = x_k \quad \cdots(\text{式14})$$

[0053] 式14の両辺に z 変換を施すと、以下の式15が得られる。

[0054] [数15]

$$(1 - \sum_{l=1}^m \alpha_l z^{-l}) Y(z) = X(z) \quad \cdots(\text{式15})$$

[0055] 式15から、システムのインパルス応答の z 変換である伝達関数 $H(z)$ は、以下の式16のように求まる。

[0056] [数16]

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{Y(z)}{X(z)} \\ &= \frac{1}{1 - \sum_{l=1}^m \alpha_l z^{-l}} \quad \cdots(\text{式16}) \end{aligned}$$

[0057] システムの周波数特性は、正弦波入力に対する出力の振幅と位相との変化として現れ、インパルス応答のフーリエ変換で求められる。言い換えると、 z が複素平面の単位円上を回転した時の伝達関数 $H(z)$ が周波数特性とな

る。ここで、式 16 における z を、以下の式 17 のように置くことを考える。

[0058] [数17]

$$z = e^{j\omega T} \quad \dots(\text{式17})$$

ここで、 j は虚数単位、 ω は角周波数、 T は標本間隔である。

[0059] その場合、 $H(z)$ の振幅特性（システムの周波数特性）は、以下の式 18 のように表すことができる。式 18 における ωT は、 $0 \sim 2\pi$ の範囲で変化するものとする。

[0060] [数18]

$$\left| H(e^{j\omega T}) \right| = \frac{1}{\left| 1 - \sum_{l=1}^m \alpha_l e^{-jl\omega T} \right|} \quad \dots(\text{式18})$$

[0061] 本実験では、得られた計測データ毎に、式 5 と式 7 を用いて自己相関行列 R を求め、式 8 で表される特異値分解を行うことによって自己相関行列 R の固有値を求め、自己相関行列 R の固有値の分布を求めた。また、得られた計測データ毎に、計測データの波形を求めた。また、得られた計測データ毎に、上記手順で求められた自己相関行列 R の特異値分解から式 11 を用いて行列 Σ_s と行列 U_s とを求め、式 5 と式 13 を用いて修正された自己回帰モデルの係数 α を求め、求めた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの波形を求めた。そして、得られた計測データ毎に、式 18 を用いて、修正された自己回帰モデルの周波数特性等を求めた。

求められた実験結果を、図 3 A ～ 図 8 E を用いて説明する。

[0062] 図 3 A ～ 図 3 E は、計測データそれぞれについて、上記手順で求められた自己相関行列 R の固有値の分布を示す図である。

図 3 A のグラフは、軸受 106 に疵がない正常な軸受を用いた場合に計測された計測データを利用した際の自己相関行列 R の固有値の分布を示すグラ

フである。図3Bのグラフは、軸受106に内輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データを利用した際の自己相関行列Rの固有値の分布を示すグラフである。図3Cのグラフは、軸受106に保持器に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データを利用した際の自己相関行列Rの固有値の分布を示すグラフである。図3Dのグラフは、軸受106に転動体に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データを利用した際の自己相関行列Rの固有値の分布を示すグラフである。図3Eのグラフは、軸受106に外輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データを利用した際の自己相関行列Rの固有値の分布を示すグラフである。

[0063] 図3A～図3Eの各グラフは、自己相関行列Rを特異値分解して得られた固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ を昇順に並べ替え、プロットしたグラフであり、横軸が固有値のインデックス、縦軸が固有値の値を示す。

[0064] 図3Aを見ると、他よりも顕著に高い値をもつ固有値が5つあるのが分かる。その5つの固有値の中でも特に2つの固有値が他の3つよりも高い値となっていることが分かる。

何れの場合にも、自己相関行列Rの固有値のうち値が他よりも顕著に高い固有値の数は、固有値全体の数よりも顕著に少ないことが分かる。

[0065] また、本実験では、得られた計測データ毎に、計測データの波形を求めた。

図4A～図4Eは、計測データそれぞれの波形を示す図である。

図4Aのグラフは、軸受106に疵がない正常な軸受を用いた場合に計測された計測データの波形を示すグラフである。図4Aのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの実績値を示す。図4Bのグラフは、軸受106に内輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データの波形を示すグラフである。図4Bのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの実績値を示す。図4Cのグラフは、軸受106に保持器に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データの波形を示すグラフである。図4Cのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時

間における計測データの実績値を示す。図4Dのグラフは、軸受106に転動体に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データの波形を示すグラフである。図4Dのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの実績値を示す。図4Eのグラフは、軸受106に外輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データの波形を示すグラフである。図4Eのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの実績値を示す。

[0066] 図4の各グラフを見ると、例えば、図4A及び図4Cが似通った波形をしているのが分かる。また、例えば、図4D及び図4Eが似通った波形をしているのも分かる。そのため、図4A～図4Eのグラフから軸受106に生じた異常の状態を診断することは困難である。

[0067] 図5A～図5Eは、使用固有値数 s を1として求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示す図である。

[0068] 図5Aのグラフは、使用固有値数 s を1として、軸受106に疵がない正常な軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図5Aのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。図5Bのグラフは、使用固有値数 s を1として、軸受106に内輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図5Bのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。図5Cのグラフは、使用固有値数 s を1として、軸受106に保持器に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図5Cのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。図5Dのグラフは、使用固有値数 s を1として、軸受106に転動

体に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図 5 D のグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。図 5 E のグラフは、使用固有値数 s を 1 として、軸受 106 に外輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図 5 E のグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。

図 5 A ～図 5 E の各グラフは、図 4 A ～図 4 E の各グラフと比べると、ノイズ成分が低減されていることが分かる。

[0069] 図 6 A ～図 6 E は、使用固有値数 s を 1 として求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの周波数特性を示す図である。図 6 A ～図 6 E の各グラフは、図 5 A ～図 5 E の各波形についての周波数特性を示すグラフである。

[0070] 図 6 A のグラフは、使用固有値数 s を 1 として、軸受 106 に疵がない正常な軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式 18 で求められた周波数特性を示すグラフである。図 6 A のグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。図 6 B のグラフは、使用固有値数 s を 1 として、軸受 106 に内輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式 18 で求められた周波数特性を示すグラフである。図 6 B のグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。図 6 C のグラフは、使用固有値数 s を 1 として、軸受 106 に保持器に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式 18 で求められた周波数特性を示すグラフである。図 6 C のグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。図 6 D のグラフは、使用固有値数 s を 1 として、軸受 106 に転動体に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから

求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式18で求められた周波数特性を示すグラフである。図6Dのグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。図6Eのグラフは、使用固有値数 s を1として、軸受106に外輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式18で求められた周波数特性を示すグラフである。図6Eのグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。

[0071] 図6Aのグラフを見ると、周波数824Hzの部分にピークが立っているのが分かる。また、図6Bのグラフを見ると、周波数1649Hzの部分にピークが立っているのが分かる。また、図6Cのグラフを見ると、周波数1646Hzの部分にピークが立っているのが分かる。

[0072] 図6Dのグラフを見ると、周波数19853Hzの部分にピークが立っているのが分かる。また、図6Eのグラフを見ると、周波数23007Hzの部分にピークが立っているのが分かる。

[0073] 図6A～図6Eの各グラフにおけるピークが立っている周波数を見ると、軸受106に疵がない場合は、軸受106に疵がある場合に比べて低い周波数でピークが立っていることが分かる。即ち、使用固有値数 s を1として、求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの周波数特性から、軸受106における疵の有無を判断することが可能であることが分かる。また、図6Dよりも、図6Eの方が高い周波数であることが分かる。また、図6D～図6Eの各グラフにおけるピークが立っている周波数は、図6A～図6Cの各グラフにおけるピークが立っている周波数よりも顕著に高いことが分かる。そのため、使用固有値数 s を1として、求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの周波数特性から、軸受106の転動体又は外輪の疵の有無を判断することが可能であることが分かる。

[0074] 以上より、自己相関行列 R の1個の固有値に基づいて求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの周波数特性に基づいて、軸受106の状態診断を行うことができるという知見を得ることができた。

[0075] しかし、図 6 B と図 6 C とのグラフに示されるように、軸受 106 の内輪に疵がある場合と、軸受 106 の保持器に疵がある場合と、では、似通った値の周波数において周波数特性のピークが立っている。そのため、使用固有値数 s を 1 として、求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの周波数特性から、軸受 106 に内輪の又は保持器の疵の有無を判断することは可能であるが、内輪の疵であるか、保持器の疵であるか、両方の疵であるか、を判断することは困難である。

[0076] そこで、本実験では、更に、使用固有値数 s の値を 5 に増やして、自己相関行列 R の固有値のうち、最大のものから 5 つを用いて係数 α を求め、求めた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの波形、周波数特性を求めた。

[0077] 図 7 A ～図 7 E は、使用固有値数 s を 5 として求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの波形を示す図である。

[0078] 図 7 A のグラフは、使用固有値数 s を 5 として、軸受 106 に疵がない正常な軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図 7 A のグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。図 7 B のグラフは、使用固有値数 s を 5 として、軸受 106 に内輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図 7 B のグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。図 7 C のグラフは、使用固有値数 s を 5 として、軸受 106 に保持器に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図 7 C のグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。図 7 D のグラフは、使用固有値数 s を 5 として、軸受 106 に転動体に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数

α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図7Dのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。図7Eのグラフは、使用固有値数 s を5として、軸受106に外輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルで近似された計測データの波形を示すグラフである。図7Eのグラフでは、横軸が時間、縦軸が対応する時間における計測データの予測値を示す。

[0079] 図8A～図8Eは、使用固有値数 s を5として求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルの周波数特性を示す図である。図8A～図8Eの各グラフは、図7A～図7Eの各波形についての周波数特性を示すグラフである。

[0080] 図8Aのグラフは、使用固有値数 s を5として、軸受106に疵がない正常な軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式18で求められた周波数特性を示すグラフである。図8Aのグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。図8Bのグラフは、使用固有値数 s を5として、軸受106に内輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式18で求められた周波数特性を示すグラフである。図8Bのグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。図8Cのグラフは、使用固有値数 s を5として、軸受106に保持器に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式18で求められた周波数特性を示すグラフである。図8Cのグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。図8Dのグラフは、使用固有値数 s を5として、軸受106に転動体に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式18で求められた周波数特性を示すグラフである。図8Dのグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。図8Eのグラフは、使用固有値数 s を5と

して、軸受 106 に外輪に疵がある軸受を用いた場合に計測された計測データから求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルについて、式 18 で求められた周波数特性を示すグラフである。図 8 E のグラフでは、横軸が周波数、縦軸が信号強度を示す。

[0081] 図 8 A のグラフを見ると、周波数 821 Hz と 1047 Hz の部分にピークが立っているのが分かる。また、図 8 B のグラフを見ると、周波数 1648 Hz、2021 Hz、6474 Hz の部分にピークが立っているのが分かる。また、図 8 C のグラフを見ると、周波数 1646 Hz、3291 Hz、1746 Hz の部分にピークが立っているのが分かる。図 8 D のグラフを見ると、周波数 19853 Hz の部分にピークが立っているのが分かる。また、図 8 E のグラフを見ると、周波数 22785 Hz、23020 Hz の部分にピークが立っているのが分かる。

[0082] 図 8 A ～図 8 E の各グラフにおけるピークと、図 6 A ～図 6 E の各グラフにおけるピークと、を見比べてみると、図 6 A ～図 6 E のグラフでピークが立っている周波数近辺においては、図 8 A ～図 8 E のグラフでもピークが立っているのが分かる。図 8 A ～図 8 E のグラフでは、更に、図 6 A ～図 6 E のグラフで見られなかったピークが見られるようになっている。

[0083] このように、係数 α を求めるのに利用される自己相関行列 R の固有値を増やすことで、修正された自己回帰モデルによる予測値において、図 6 A ～図 6 E でピークが立っていた周波数以外の周波数の成分の信号強度が増加したことが分かる。即ち、係数 α を求めるのに利用される自己相関行列 R の固有値は、求められた係数 α で特定される修正された自己回帰モデルによる計測データの予測値の時間波形に含まれる各周波数の成分の強度と相関があることが見出された。

[0084] また、図 8 B、図 8 C のグラフを見てみると、図 6 B、図 6 C のグラフと同様に、1640 Hz 付近にピークが立っているのが分かる。しかし、図 8 B では、更に、2021 Hz、6474 Hz においてもピークが立っており、図 8 C では、更に、3291 Hz、1746 Hz においてもピークが立っ

ていることが分かる。このように、図 8 B～図 8 C では、内輪に疵のある軸受 106 と保持器に疵のある軸受 106 とで、ピークが立っている周波数に顕著な違いが見て取れる。即ち、使用固有値数 s を 5 にすることで、軸受の疵が、内輪の疵であるか、保持器の疵であるか、両方の疵であるか、を見分けることができる。

[0085] このように本発明者らは、使用固有値数 s が 1 の場合には見分けることが困難であった疵の存在する部位を、使用固有値数 s を増やすことで、見分けることができるようになるという知見を得た。一方で、本発明者らは、使用固有値数 s を増やし過ぎると修正された自己回帰モデルが、実際の計測データに近づいていくことによって、軸受 106 の状態診断に有用でないノイズ成分等についても信号強度が増加されてしまい、式 18 で得られる周波数特性にもノイズ成分に起因するピークが生じるという知見を得た。即ち、自己相関行列 R の固有値のうち、相対的に値の高い一部の固有値を用いて係数 α を求めることで、計測データに含まれる成分のうち、物体の状態診断に有用な成分を近似した修正された自己回帰モデルを求めることができると考えられる。

[0086] 以上より、係数 α を求めるのに利用される自己相関行列 R の固有値の数である使用固有値 s を調整することで、より精度よく、軸受 106 の状態診断を行うことができるという知見を得ることができた。

[0087] (実験 2)

また、発明者らは、実験 1 と同様の実験状況において、以下のような実験を行った。軸受 106 が疵のない正常な状態である場合、内輪に疵がある状態である場合、保持器に疵がある状態である場合、転動体に疵がある状態である場合、外輪に疵がある状態である場合それぞれについて、以下の作業を q 回行った。 q は 50 としたが、30 や 100 等の他の値としてもよい。即ち、軸受 106 について、連続した M 個の計測データを取得し、取得した連続した M 個の計測データ毎に、式 11 を用いて行列 Σ_s と行列 U_s とを求め、式 5 と式 13 を用いて修正された自己回帰モデルの係数 α を求めた。使用固

有値数 s は、3 とした。

[0088] これにより、軸受 106 が正常な状態である場合、内輪に疵がある状態である場合、保持器に疵がある状態である場合、転動体に疵がある状態である場合、外輪に疵がある状態である場合の 5 つの場合それぞれについて、 q 個の修正された自己回帰モデルの係数 α を取得した。

[0089] 軸受 106 が取り得る状態は、疵のない正常な状態、内輪に疵がある状態、保持器に疵がある状態、転動体に疵がある状態、および外輪に疵がある状態の 5 つの状態であるとする。以下では、軸受 106 が取り得る状態の数を p とする。 p は、これらの 5 つの状態に対応して 5 とした。

[0090] 図 9 は、軸受 106 が正常な状態である場合、内輪に疵がある状態である場合、保持器に疵がある状態である場合、転動体に疵がある状態である場合、軸受 106 の外輪に疵がある場合それぞれについての、上記手順で求められた係数 α のパターンを示す図である。係数 α のパターンとは、係数 α の成分を並べた際の形状を示す情報である。 m の値は、500 とした。そのため、係数 α は、 $\alpha_1 \sim \alpha_{500}$ の 500 個の成分から成る。図 9 に示されるパターンそれぞれは、 α_i ($1 \leq i \leq 500$) をインデックス i 順に並べたパターンである。このインデックス i は、式 1 において係数の成分がかかる計測データ y の計測時点を示すインデックスとみなすことができる。即ち、図 9 に示されるパターンそれぞれは、係数 α の各成分を、式 1 において各成分がかかる計測データ y の計測時点に基づいて並べたパターンの一例である。

[0091] 係数 α のパターンには、例えば、係数 α の成分をインデックス順に並べたベクトル、係数 α の成分をインデックス順に予め定められた数（例えば、1 等）ずつとばしに並べたベクトル、係数 α の成分をインデックスと逆順に並べたベクトル等がある。また、係数 α のパターンには、例えば、各成分に同じ値が加算された係数 α の成分をインデックス順に並べたベクトル、各成分に同じ値が加算された係数 α の成分をインデックス順に予め定められた数（例えば、1 等）ずつとばしに並べたベクトル、各成分に同じ値が加算された係数 α の成分をインデックスと逆順に並べたベクトル等がある。また、係数

α のパターンには、例えば、各成分に同じ値が掛けられた係数 α の成分をインデックス順に並べたベクトル、各成分に同じ値が掛けられた係数 α の成分をインデックス順に予め定められた数（例えば、1等）ずつとばしに並べたベクトル、各成分に同じ値が掛けられた係数 α の成分をインデックスと逆順に並べたベクトル等がある。また、係数 α の成分を並べた際の形状を示す情報である係数 α のパターンは、ベクトルでなく、係数 α の成分を並べたグラフの画像であるとしてもよい。

[0092] 図9に示されるパターンを見てみると、以下のようなことが見てとれる。

軸受106の外輪に疵がある場合、 q 個の係数 α のパターンそれぞれは、上下対称な2つの波線で囲まれた領域を示すようなパターンとなっている。また、軸受106の転動体に疵がある場合、 q 個の係数 α のパターンそれぞれは、複数の波線が重なり合っているようなパターンとなっている。また、軸受106の内輪に疵がある場合、 q 個の係数 α のパターンそれぞれは、4つのピークのある山形のパターンが連続しているパターンとなっている。また、軸受106に疵がない場合、 q 個の係数 α のパターンそれぞれは、徐々に減衰していく波型のパターンとなっている。また、軸受106の保持器に疵がある場合、 q 個の係数 α のパターンそれぞれは、2つのピークのある山形のパターンが連続しているパターンとなっている。

[0093] このように、軸受106が正常な場合、軸受106の内輪に疵がある場合、軸受106の保持器に疵がある場合、軸受106の転動体に疵がある場合、軸受106の外輪に疵がある場合それぞれについて、修正された自己回帰モデルの係数 α が、特徴的なパターンを示すことが見て取れる。

[0094] そこで、発明者らは、修正された自己回帰モデルの係数 α のパターンが、どのようなパターンを示すのかを特定することで、軸受106の診断を行うことができるという知見を得た。

[0095] また、本実験では、以下のようにして、軸受106が正常な場合、軸受106の内輪に疵がある場合、軸受106の保持器に疵がある場合、軸受106の転動体に疵がある場合、軸受106の外輪に疵がある場合それぞれにつ

いて、修正された自己回帰モデルの係数 α の代表的なパターンを学習により特定した。

[0096] まず、各列が図9に示される係数 α それぞれを示す $m \times d$ のサイズの行列 Y を、以下の式19のように生成する。 d は、 $p \times q$ であり、250となる。

[0097] [数19]

$$Y = \begin{pmatrix} \alpha_{1,(0,1)} & \cdots & \alpha_{1,(0,q)} & \alpha_{1,(1,1)} & \cdots & \alpha_{1,(1,q)} & \cdots & \alpha_{1,(p-1,q)} \\ \alpha_{2,(0,1)} & \cdots & \alpha_{2,(0,q)} & \alpha_{2,(1,1)} & \cdots & \alpha_{2,(1,q)} & \cdots & \alpha_{2,(p-1,q)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{m,(0,1)} & \cdots & \alpha_{m,(0,q)} & \alpha_{m,(1,1)} & \cdots & \alpha_{m,(1,q)} & \cdots & \alpha_{m,(p-1,q)} \end{pmatrix} \quad \cdots(\text{式19})$$

[0098] 式19の $\alpha_{k, (i, j)}$ は、 i に対応する状態の軸受106から計測された q 個の計測データのうち j 番目の計測データから決定された係数 α の第 k 成分 α_k を示す。本実験では、外輪に疵がある状態の軸受106から計測された計測データから決定された係数 α の成分は、式19における $\alpha_{k, (0, j)}$ ($1 \leq k \leq m$ 、 $1 \leq j \leq q$)である。また、転動体に疵がある状態の軸受106から計測された計測データから決定された係数 α の成分は、式19における $\alpha_{k, (1, j)}$ ($1 \leq k \leq m$ 、 $1 \leq j \leq q$)である。また、内輪に疵がある状態の軸受106から計測された計測データから決定された係数 α の成分は、式19における $\alpha_{k, (2, j)}$ ($1 \leq k \leq m$ 、 $1 \leq j \leq q$)である。また、疵がない正常な状態の軸受106から計測された計測データから決定された係数 α の成分は、式19における $\alpha_{k, (3, j)}$ ($1 \leq k \leq m$ 、 $1 \leq j \leq q$)である。また、保持器に疵がある状態の軸受106から計測された計測データから決定された係数 α の成分は、式19における $\alpha_{k, (4, j)}$ ($1 \leq k \leq m$ 、 $1 \leq j \leq q$)である。ここでは、 p は5である。式19では、表記の都合で、 $\alpha_{k, (4, j)}$ を $\alpha_{k, (p-1, j)}$ とする。また、式19では、 $\alpha_{k, (2, j)}$ および $\alpha_{k, (3, j)}$ の表記を省略する。

[0099] 本実験では、この行列 Y を非負値行列因子分解することで、軸受106の状態それぞれについて、修正された自己回帰モデルの係数 α の代表的なパタ

ーンを特定する。行列Yを非負値行列因子分解するためには、行列Yの各列の係数 α のパターンを変えずに、行列Y自体の各成分を、非負値にするよう調整する必要がある。そこで、例えば、行列Yの0未満の成分のうち、最小のものの絶対値を、行列Yの各成分に加算することで、行列Yの各成分が非負値となるようにする。以下では、各成分が非負値である行列を、非負値行列とする。

[0100] 以下の式20に示すように、この行列Yを、非負値行列である行列Aと行列Pとに非負値行列因子分解する。行列Aは、 $m \times p$ のサイズの行列である。行列Pは、 $p \times d$ のサイズの行列である。行列Aの列数は、非負値行列因子分解における基底ベクトルの数であり、本実験では、軸受106が取り得る状態の数として $p(5)$ とする。これにより、行列Aの各列には、行列Yから導出された $p(5)$ 個の係数 α のパターン（基底ベクトルともいう）が格納されることとなる。

[0101] [数20]

$$Y \approx AP, \quad A \in \mathbb{R}^{m \times p}, P \in \mathbb{R}^{p \times d} \quad \dots(\text{式20})$$

[0102] 以下の式21のようにコスト関数Jを定義する。

[0103] [数21]

$$J(A, P) = \frac{1}{2} \|AP - Y\|_F^2 + \beta \sum_{i,k} P_{i,k} + \frac{\gamma}{2} \sum_{k,k:k \neq \bar{k}} (A^T A - I)_{k,\bar{k}} \quad \dots(\text{式21})$$

[0104] 式21の右辺第1項は、行列Aと行列Pとの積と、行列Yと、が、これらの残差の二乗和を最小にするという意味で近似的に一致するための条件を示す。式21の右辺第1項の右下のFr記号は、フロベニウスノルムであることを示す記号である。即ち、式21の右辺第1項内の $\|AP - Y\|_F$ は、フロベニウスノルムであり、行列 $(AP - Y)$ の各成分の絶対値の2乗の合計の平方根となる。式21の右辺第2項は、行列Pのスパース性を要求する条件を示す。この条件を付加することによって、非負値行列因子分解が過学習となることを防ぐことができる。

[0105] 式 2 1 の右辺第 2 項におけるインデックス i は、行列の行を示すインデックスである。また、式 2 1 の右辺第 2 項におけるインデックス k は、行列の列を示すインデックスである。式 2 1 の右辺第 3 項は、行列 A の異なる列に格納されるパターン同士の直交性を近似的に要求する条件を示す。式 2 1 の右辺第 3 項によって、行列 A の p (5) 個の列に格納されるパターンが可能な限り線形従属となることを防ぐ効果が得られる。行列 A の列に格納されるパターンが線形従属となれば、あるパターンを行列 A の列に格納されるパターンの線形結合で近似するときの係数（重みともいう）が一通りではなくなるため、パターンの同定が難しくなる。また、式 2 1 の右辺第 3 項における行列 A^T は、行列 A の転置行列であり、行列 I は、単位行列である。また、式 2 1 の右辺第 3 項におけるインデックス k 、 $\bar{k}$ （式中では、上にバーが引かれた k として表現）は、それぞれ行列の行と、列と、を示すインデックスである。

[0106] ここで、コスト関数 J として、式 2 1 の右辺第 1 項のみを用いても、非負値行列因子分解は機能するので、コスト関数 J として、式 2 1 の右辺第 1 項のみを用いてもよい。また、上述の過学習や線形従属といった問題が生じる場合に、コスト関数 J として、式 2 1 の右辺第 1 項に式 2 1 の右辺第 2 項、第 3 項を追加した式を用いることとしてもよい。そして、右辺第 2 項、第 3 項を追加する場合、軸受 106 の各状態と、図 14 A ~ 図 14 B 等で後述する方法で決定される学習パターンと、を良好に対応付けることが出来るように、例えば、ケーススタディにより係数 β と係数 γ とを予め決定しておく。本実施形態では、 β を 0.035、 γ を 0 とした。

[0107] このコスト関数 J を最小化するように、行列 Y を、行列 A と行列 P と分解する。即ち、以下の式 2 2 で定義されるコスト関数 J の最小化問題を解くこととなる。

[0108]

[数22]

$$\min_{A, P} J(A, P) = \min_{A, P} \left(\frac{1}{2} \|AP - Y\|_{Fr}^2 + \beta \sum_{i, k} P_{i, k} + \frac{\gamma}{2} \sum_{k, \bar{k}; k \neq \bar{k}} (A^T A - I)_{k, \bar{k}} \right) \quad \dots(\text{式22})$$

subject to $A, P \geq 0, (A^T A)_{k, k} = 1 \quad \forall k$

[0109] 式22における第1の制約条件は、行列Aと行列Pとが非負値行列であることを示す条件である。式22における第2の制約条件は、行列Aを基準化（normalize）するための条件である。また、式22の第2の制約条件におけるインデックスkは、行列の行と、列と、を示すインデックスである。

本実験では、コスト関数Jを最小化するために、以下のような処理を行う。即ち、以下の式23と式24とを用いて行列Aと行列Pとの更新を繰り返すことで、コスト関数Jを最小化する。また、コスト関数Jを最小化するために、以下に記載する方法以外の方法（例えば、最急降下法、ニュートン法、確率的勾配降下法等の最適化手法）を用いてもよい。

[0110] [数23]

$$P \leftarrow P - (\eta^P) \left(\frac{\partial J}{\partial P} \right) \quad \dots(\text{式23})$$

[0111] [数24]

$$A \leftarrow A - (\eta^A) \left(\frac{\partial J}{\partial A} \right) \quad \dots(\text{式24})$$

[0112] 式23の η^P は、行列Pの更新に用いられる緩和係数である。式24の η^A は、行列Aの更新に用いられる緩和係数である。

式23におけるコスト関数Jの行列Pによる偏微分は、以下の式25の通りとなる。

[0113] [数25]

$$\frac{\partial J}{\partial P} = A^T (AP - Y) + \beta E_1 \quad \dots(\text{式25})$$

[0114] 式25の行列 E_1 は、サイズが $p \times d$ の全ての成分が1の行列である。

式24におけるコスト関数 J の行列 A による偏微分は、以下の式26の通りとなる。

[0115] [数26]

$$\frac{\partial J}{\partial A} = (AP - Y)P^T + \gamma(AE_2 - A) \quad \dots(\text{式26})$$

[0116] 式26の行列 E_2 は、サイズが $p \times p$ の全ての成分が1の行列である。

式25を用いて、式23を書き換えると以下の式27が求まる。

[0117] [数27]

$$P_{i,k} - \eta_{i,k}^P (A^T(AP - Y) + \beta E_1)_{i,k} = P_{i,k} - \eta_{i,k}^P (A^T(AP) + \beta E_1)_{i,k} + \eta_{i,k}^P (A^T Y)_{i,k} \quad \dots(\text{式27})$$

[0118] 式27のインデックス i は、行列の行を示すインデックスである。式27のインデックス k は、行列の列を示すインデックスである。

[0119] 行列 P は、非負値であるため、式27の値は、非負値である必要がある。式27の右辺の第3項は、必ず非負値となる項である。即ち、式27の右辺から第3項を除いた式の値が0であるならば、必ず式27は、非負値となる。そのため、以下の式28に示すように、式27の右辺から第3項を除いた式が0であるという条件を満たすように、行列 P の更新を行うこととする。

[0120] [数28]

$$P_{i,k} - \eta_{i,k}^P (A^T(AP) + \beta E_1)_{i,k} = 0 \quad \dots(\text{式28})$$

[0121] 式28のインデックス i は、行列の行を示すインデックスである。式28のインデックス k は、行列の列を示すインデックスである。

式28から、式23における緩和係数 η^P の値が、以下の式29のように求まる。

[0122] [数29]

$$\eta_{i,k}^P = \frac{P_{i,k}}{(A^T AP + \beta E_1)_{i,k}} \quad \dots(\text{式29})$$

[0123] 式29のインデックス i は、行列の行を示すインデックスである。式29のインデックス k は、行列の列を示すインデックスである。

式29を用いて、式23を書き換えると、以下の式30のようになる。

[0124] [数30]

$$P_{i,k} \leftarrow P_{i,k} - \frac{P_{i,k} (A^T Y)_{i,k}}{(A^T A P + \beta E_1)_{i,k}} \quad \dots(\text{式30})$$

[0125] 式30のインデックス i は、行列の行を示すインデックスである。式30のインデックス k は、行列の列を示すインデックスである。この式30を用いて、行列 P の各成分を更新することで、行列 P を更新していくこととなる。

また、式26を用いて、式24を書き換えると以下の式31が求まる。

[0126] [数31]

$$A_{k,j} - \eta_{k,j}^A ((AP - Y)P^T + \gamma (AE_2 - A))_{k,j} = A_{k,j} - \eta_{k,j}^A ((AP)P^T + \gamma (AE_2 - A))_{k,j} + \eta_{k,j}^A (Y P^T)_{k,j} \quad \dots(\text{式31})$$

[0127] 式31のインデックス k は、行列の行を示すインデックスである。式27のインデックス j は、行列の列を示すインデックスである。

行列 A は、非負値であるため、式31の値は、非負値である必要がある。式31の右辺の第3項は、必ず非負値となる項である。即ち、式31の右辺から第3項を除いた式の値が0であるならば、必ず式27は、非負値となる。そのため、以下の式32に示すように、式31の右辺から第3項を除いた式が0であるという条件を満たすように、行列 A の更新を行うこととする。

[0128] [数32]

$$A_{k,j} - \eta_{k,j}^A ((AP)P^T + \gamma (AE_2 - A))_{k,j} = 0 \quad \dots(\text{式32})$$

[0129] 式32のインデックス k は、行列の行を示すインデックスである。式32のインデックス j は、行列の列を示すインデックスである。

式32から、式24における緩和係数 η^A の値が、以下の式33のように求

まる。

[0130] [数33]

$$\eta_{k,j}^A = \frac{A_{k,j}}{(APP^T + \gamma(AE_2 - A))_{k,j}} \quad \dots(\text{式33})$$

[0131] 式33のインデックスkは、行列の行を示すインデックスである。式33のインデックスjは、行列の列を示すインデックスである。

式33を用いて、式24を書き換えると、以下の式34のようになる。

[0132] [数34]

$$A_{k,j} \leftarrow A_{k,j} - \frac{A_{k,j}(YP^T)_{k,j}}{(APP^T + \gamma(AE_2 - A))_{k,j}} \quad \dots(\text{式34})$$

[0133] 式34のインデックスkは、行列の行を示すインデックスである。式34のインデックスjは、行列の列を示すインデックスである。この式34を用いて、行列Aの各成分を更新することで、行列Aを更新していくこととなる。

また、式22における第2の制約条件を満たすようにするため、以下の式35に示すように、行列Aを更新する。

[0134] [数35]

$$A_{k,j} \leftarrow \frac{A_{k,j}}{\sqrt{(A^T A)_{j,j}}} \quad \dots(\text{式35})$$

[0135] 式35のkは、行列の行を示すインデックスである。式35のjは、行列の行又は列を示すインデックスである。

コスト関数Jの値が、収束するまで、式30を用いて行列Pを更新し、式34、式35を用いて行列Aを更新することを繰り返す。例えば、各更新段階において、更新後の行列P及び行列Aから、それぞれ更新前の行列P及び行列Aを引いた差である行列 ΔP 及び行列 ΔA を求める。そして、行列 ΔP 及び行列 ΔA それぞれのフロベニウスノルムを計算する。各更新段階におけ

る行列 ΔP 及び行列 ΔA のフロベニウスノルムの、それぞれ最初の更新段階における行列 ΔP 及び行列 ΔA のフロベニウスノルムに対する比が、予め定められた閾値以下となる更新段階をもって、コスト関数 J の値が収束したとする。そして、その際の行列 A と行列 P とをコスト関数 J を最小化させる行列とする。

[0136] 本実験では、以上のように、コスト関数 J を最小化させる行列 A と行列 P とを求めることとした。ただし、他の例として、行列 P と行列 A との更新前後で、コスト関数 J の値の変動が予め定められた閾値以下となることが、予め定められた回数連続したら、コスト関数 J の値が収束したとすることとしてもよい。そして、その際の行列 A と行列 P とをコスト関数 J を最小化させる行列とすることとしてもよい。

[0137] コスト関数 J が収束した際の行列 A の各列が示すパターンを確認した。図10に、コスト関数 J が収束した際の行列 A の各列が示すパターンの一例を示す。行列 A 列には、列毎に、 m (500) 個の値が含まれ、係数 α のパターンを示す。

図10の一番上のグラフは、行列 A の1列目の m 個の値 ($A_{i,1}$ ($1 \leq i \leq m$)) を、行を示すインデックス順に並べたパターンを示す。図10の上から2つ目のグラフは、行列 A の2列目の m 個の値 ($A_{i,2}$ ($1 \leq i \leq m$)) を、行を示すインデックス (i) 順に並べたパターンを示す。図10の上から3つ目のグラフは、行列 A の3列目の m 個の値 ($A_{i,3}$ ($1 \leq i \leq m$)) を、行を示すインデックス順に並べたパターンを示す。図10の下から2つ目のグラフは、行列 A の4列目の m 個の値 ($A_{i,4}$ ($1 \leq i \leq m$)) を、行を示すインデックス順に並べたパターンを示す。図10の一番下のグラフは、行列 A の5列目 (p 列目) の m 個の値 ($A_{i,5}$ ($1 \leq i \leq m$)) を、行を示すインデックス順に並べたパターンを示す。

[0138] また、コスト関数 J が収束した際の行列 P の各成分の値を確認した。式20から得られる以下の式36に示されるように、行列 P の各列 (第 j 列 $P_{k,j}$ ($1 \leq k \leq p$)) は、行列 Y の各列 (第 j 列 $Y_{i,j}$ ($1 \leq i \leq m$))

に示されるパターンを行列Aの各列に示されるパターン（基底ベクトル）の線形結合で近似するときの係数（重み）を示している。

[0139] [数36]

$$\begin{pmatrix} Y_{1,j} \\ \vdots \\ Y_{m,j} \end{pmatrix} \approx \sum_{k=1}^p P_{k,j} \begin{pmatrix} A_{1,k} \\ \vdots \\ A_{m,k} \end{pmatrix} \quad \cdots(\text{式36})$$

[0140] 図11に、コスト関数Jが収束した際の行列Pの各行の値を示すグラフを示す。図11のグラフの横軸は、行列Pの列のインデックスを示す。図11のグラフの縦軸は、行列Pの各成分の値を示す。

[0141] 図11のライン1101は、行列Pの1行目のd（250）個の値を結んだラインである。ライン1101は、横軸が0以上、50未満の範囲（1列目からq（50）列目までの範囲）では、約12となり、それ以外の範囲では、12と比べて非常に微小な値（約0）となっている。

[0142] 図11のライン1102は、行列Pの2行目のd個の値を結んだラインである。ライン1102は、横軸が50以上、100未満の範囲（q+1列目から2q列目までの範囲）では、約12となり、それ以外の範囲では、12と比べて非常に微小な値（約0）となっている。

[0143] 図11のライン1103は、行列Pの4行目のd個の値を結んだラインである。ライン1103は、横軸が100以上、150未満の範囲（2q+1列目から3q列目までの範囲）では、約12となり、それ以外の範囲では、12と比べて非常に微小な値（約0）となっている。

[0144] 図11のライン1104は、行列Pの5行目のd個の値を結んだラインである。ライン1104は、横軸が150以上、200未満の範囲（3q+1列目から4q列目までの範囲）では、値が約12となり、それ以外の範囲では、12と比べて非常に微小な値（約0）となっている。

[0145] 図11のライン1105は、行列Pの3行目のd個の値を結んだラインである。ライン1105は、横軸が200以上、250未満の範囲（4q+1

列目から $5q$ 列目までの範囲) では、約 12 となり、それ以外の範囲では、12 と比べて非常に微小な値 (約 0) となっている。

[0146] 即ち、行列 P の各列の値は、1 列目から q (50) 列目までの範囲では、1 行目の値が約 12 となり、2～5 行目の値が約 0 となる。また、行列 P の各列の値は、 $q+1$ 列目から $2q$ 列目までの範囲では、2 行目の値が約 12 となり、1 行目、3～5 行目の値が約 0 となる。また、行列 P の各列の値は、 $2q+1$ 列目から $3q$ 列目までの範囲では、4 行目の値が約 12 となり、1～3 行目、5 行目の値が約 0 となる。また、行列 P の各列の値は、 $3q+1$ 列目から $4q$ 列目までの範囲では、5 行目の値が約 12 となり、1～4 行目の値が約 0 となる。また、行列 P の各列の値は、 $4q+1$ 列目から $5q$ 列目までの範囲では、3 行目の値が約 12 となり、1、2、4、5 行目の値が約 0 となる。

そのため、行列 AP の 1 列目から q 列目までの各列のデータが示すパターンは、図 10 の一番上のグラフに示されるパターンに約 12 の重み、図 10 のそれ以外のグラフに示されるパターンに約 0 の重み、で図 10 の各パターンが重ね合わされたパターンであり、図 10 の一番上のグラフに示されるパターンに類似するパターンとなる。また、行列 AP の $q+1$ 列目から $2q$ 列目までの各列のデータが示すパターンは、図 10 の上から 2 つ目のグラフに示されるパターンに約 12 の重み、図 10 のそれ以外のグラフに示されるパターンに約 0 の重み、で図 10 の各パターンが重ね合わされたパターンであり、図 10 の上から 2 つ目のグラフに示されるパターンに類似するパターンとなる。また、行列 AP の $2q+1$ 列目から $3q$ 列目までの各列のデータが示すパターンは、図 10 の下から 2 つ目のグラフに示されるパターンに約 12 の重み、図 10 のそれ以外のグラフに示されるパターンに約 0 の重み、で図 10 の各パターンが重ね合わされたパターンであり、図 10 の下から 2 つ目のグラフに示されるパターンに類似するパターンとなる。また、行列 AP の $3q+1$ 列目から $4q$ 列目までの各列のデータが示すパターンは、図 10 の一番下のグラフに示されるパターンに約 12 の重み、図 10 のそれ以外の

グラフに示されるパターンに約0の重み、で図10の各パターンが重ね合わされたパターンであり、図10の一番下のグラフに示されるパターンに類似するパターンとなる。また、行列APの $4q+1$ 列目から $5q$ 列目までの各列のデータが示すパターンは、図10の上から3番目のグラフに示されるパターンに約12の重み、図10のそれ以外のグラフに示されるパターンに約0の重み、で図10の各パターンが重ね合わされたパターンであり、図10の上から3つ目のグラフに示されるパターンに類似するパターンとなる。

[0147] 行列Yの1列目から q 列目までの各列のデータが示すパターンは、図9に示す外輪に疵がある軸受106に対応するパターンである。また、行列Yの $q+1$ 列目から $2q$ 列目までの各列のデータが示すパターンは、図9に示す転動体に疵がある軸受106に対応するパターンである。また、行列Yの $2q+1$ 列目から $3q$ 列目までの各列のデータが示すパターンは、図9に示す内輪に疵がある軸受106に対応するパターンである。また、行列Yの $3q+1$ 列目から $4q$ 列目までの各列のデータが示すパターンは、図9に示す疵のない正常な軸受106に対応するパターンである。また、行列Yの $4q+1$ 列目から $5q$ 列目までの各列のデータが示すパターンは、図9に示す保持器に疵がある軸受106に対応するパターンである。

[0148] 行列Yと行列Aとを見比べてみると、双方の各列のデータが示すパターンは、類似するパターンとなっていることが分かる。即ち、行列Aの各列のデータが示すパターンは、それぞれ、各状態の軸受106に対応する係数 α のパターンとなっていることが分かる。行列Aの1列目のデータは、外輪に疵がある状態の軸受106に対応する係数 α の代表的なパターンを示す。行列Aの2列目のデータは、転動体に疵がある状態の軸受106に対応する係数 α の代表的なパターンを示す。行列Aの3列目のデータは、保持器に疵がある状態の軸受106に対応する係数 α の代表的なパターンを示す。行列Aの4列目のデータは、内輪に疵のある状態の軸受106に対応する係数 α の代表的なパターンを示す。行列Aの5列目のデータは、疵のない正常な状態の軸受106に対応する係数 α の代表的なパターンを示す。

[0149] 以上より、行列 Y を生成し、生成した行列 Y を、式22を満たすように、非負値行列因子分解により学習することで、行列 A の各列（基底ベクトル）として、各状態の軸受106に対応する係数 α のパターンが特定されたことが確認された。

[0150] （実験3）

また、発明者は、軸受106の状態を診断する方法の着想を得た。この着想の概要について説明する。状態が既知な軸受106についての計測データから、予めその状態に対応する修正された自己回帰モデルの係数 α のパターンを示す非負値の行列を、教師基底行列として特定する。そして、状態が未知な軸受106についての計測データから修正された自己回帰モデルの係数 α を予め定められた個数だけ求めて、求めたその個数の係数 α それぞれのパターンを示す非負値のデータを各列に格納する行列を、教師基底行列と、教師基底行列の重み行列と、この非負値のデータを各列に格納する行列から抽出される基底を示す抽出基底行列と、抽出基底行列の重み行列と、に分解する。そして、教師基底行列の重み行列と、抽出基底行列の重み行列と、を比較することで、状態が未知な軸受106の状態が、教師基底行列に対応する状態であるか否かを診断する。以上が、発明者が得た着想の概要である。

[0151] そこで、発明者らは、この着想で得られた方法の実効性を検証するため、実験1と同様の実験状況において、以下のような実験を行った。本実験では、使用固有値数 s は、3とした。また、 m は、500とした。

[0152] 実験2で説明した方法で、疵のない正常な状態の軸受106に対応する係数 α のパターンを示すデータ（式20の行列 A の正常な軸受106に対応する列のデータ）を、教師基底に属する基底ベクトルとして取得した。取得した正常な状態の軸受106に対応する教師基底に属するパターンは、図12に示すようなパターンとなった。図12のグラフは、非負値となるように修正された正常な状態の軸受106に対応する係数 α を示す。図12のグラフの横軸は、係数 α のインデックスを示し、縦軸は、対応するデータの値を示す。

[0153] そして、発明者らは、軸受 106 が疵のない正常な状態である場合、図 13A～図 13C に示す各状態にある場合それぞれと、について、以下の作業を q' 回行った。図 13A～図 13C に示す各状態とは、図 13A に示す外輪に幅 3 mm・深さ約 0.1 mm の疵がある状態と、図 13B に示す外輪に幅 0.5 mm・深さ 0.1 mm 以下の疵がある状態と、図 13C に示す外輪に予め定められた大きさ（径が 1 mm 等）以下の微小な疵がある状態とのそれぞれである。 q' は、200 としたが、100 等の他の値としてもよい。各場合について、軸受 106 についての連続した M 個の計測データを取得し、取得した連続した M 個の計測データに基づいて、式 11 を用いて行列 Σ_s と行列 U_s とを求め、式 5 と式 13 を用いて修正された自己回帰モデルの係数 α を求める作業を q' 回行った。

[0154] q' が大きいほど診断結果の信頼性が向上するため、 q' は、大きい方が望ましい。 q' の適正な値は、診断の対象、診断結果に要求される信頼性の程度、計測データの種類等に応じ、実験等の手段を駆使して定めればよい。本実験 3 では、 q' は、10 以上とするのが望ましく、50 以上とするのがより望ましく、100 以上とするのがさらに望ましい。

[0155] これにより、疵のない正常な状態の軸受 106 と、図 13A～図 13C に示す各状態にある軸受 106 それぞれと、について、 q' 個の修正された自己回帰モデルの係数 α を取得した。

[0156] そして、軸受 106 が正常な場合、図 13A～図 13C に示す各状態にある場合それぞれについて、以下の式 37 で示すようなデータ行列 Y_d を生成した。

[0157] [数 37]

$$Y = \begin{pmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \cdots & \alpha_{1,q'} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \cdots & \alpha_{2,q'} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{m,1} & \alpha_{m,2} & \cdots & \alpha_{m,q'} \end{pmatrix} \quad \cdots(\text{式 37})$$

[0158] 式 37 の行列の各列のデータは、取得された q' 個の修正された自己回帰

モデルの係数 α それぞれを示すデータである。即ち、 $\alpha_{i,j}$ は、 q' 個の修正された自己回帰モデルの係数 α のうちの j 個目の係数 α における i 番目の要素を示す。

本実験では、このデータ行列 Y_d を、非負値の複数の行列に分解する。データ行列 Y_d を非負値の複数の行列に分解するためには、行列 Y の各列の係数 α のパターンを変えずに、行列 Y 自体の各成分を、非負値にするよう調整する必要がある。そこで、例えば、行列 Y の0未満の成分のうち、最小のものの絶対値を、データ行列 Y_d の各成分に加算することで、データ行列 Y_d の各成分が非負値となるようにする。データ行列 Y_d の各列には、修正された自己回帰モデルにおける係数 α のパターンを示す非負値のデータが格納されていることとなる。

[0159] 以下の式38に示すように、非負値の行列に修正したデータ行列 Y_d を、複数の非負値行列に分解する。より具体的には、データ行列 Y_d を、教師基底行列 F と、教師基底に対する重みを示す教師重み行列 G と、データ行列 Y_d から抽出される基底である抽出基底を示す抽出基底行列 Q と、抽出基底に対する重みを示す抽出基底重み行列 W と、に分解する。教師基底行列 F と、教師重み行列 G と、抽出基底行列 Q と、抽出基底重み行列 W は、何れも非負値行列である。本実験では、教師基底は、疵のない正常な状態の軸受106に対応する係数 α のパターンを示す基底ベクトルの集合である。抽出基底は、疵のない正常な状態の軸受106に対応する係数 α のパターン以外の係数 α のパターンを示す基底ベクトルの集合である。疵のない正常な状態の軸受106に対応する係数 α のパターン以外の係数 α のパターンは、例えば、状態が不知の軸受106に対応する係数 α のパターンを含む。

[0160] Y_d を F と G と Q と W とに分解する処理は、以下のような処理とみなすことができる。即ち、 Y_d の各列に格納された係数 α のパターンのデータを、教師基底に属するパターンと、それ以外のパターンと、の重み付けの足し合わせとして分解する処理とみなすことができる。

[0161] F は、 $m \times 1$ のサイズの行列である。 G は、 $1 \times q'$ のサイズの行列であ

る。Qは、 $m \times n$ （データ行列から抽出される基底ベクトルの数を示す数 n （本実験では、1とした））のサイズの行列である。Wは、 $n \times q'$ のサイズの行列である。

Gにおける各列の要素の値は、データ行列 Y_d のその列に格納された係数 α のパターンを示すデータに含まれる教師基底の成分の重みを示す。Wにおける n 行目の各列の要素の値は、データ行列 Y_d のその列に格納された係数 α のパターンを示すデータに含まれるQのその列に格納された抽出基底の成分の重みを示す。

[0162] [数38]

$$Y_d = FG + QW \quad \dots(\text{式38})$$

[0163] 以下の式39のようにコスト関数 J_d を定義する。

[0164] [数39]

$$J_d(G, Q, W) = \frac{1}{2} \|FG + QW - Y_d\|_{Fr}^2 + \delta_1 \sum_{k,t} G_{k,t} + \delta_2 \sum_{l,t} W_{l,t} + \varepsilon_1 \sum_{i,i'} (Q^T Q - I)_{i,i'} + \varepsilon_2 \sum_{i,i'} F^T Q \quad \dots(\text{式39})$$

[0165] 式39の右辺第1項の Fr は、フロベニウスノルムであることを示す添字である。即ち、式39の右辺第1項は、フロベニウスノルムである。式39の右辺第1項は、FとGとの積とQとWとの積との和と、データ行列Yと、の差分の大きさを示す。式39の右辺第2項は、教師重み行列のスパース制約を示す項である。式39の右辺第2項の δ_1 は、予め定められた実数である。式39の右辺第2項の k 、 t は、それぞれ行列の行、列を示すインデックスである。

[0166] 式39の右辺第3項は、抽出重み行列のスパース制約を示す項である。式39の右辺第3項の δ_2 は、予め定められた実数である。式39の右辺第3項の l 、 t は、それぞれ行列の行、列を示すインデックスである。式39の右辺第4項は、抽出基底の正規直交制約（即ち、抽出基底行列Qの各列に格納されているパターンの全体が近似的に正規直交系をなすとの制約）を示す項である。即ち、式39の右辺第4項は、正規直交性の向上に関する項である。

。式39の右辺第4項の ε_1 は、予め定められた実数である。式39の右辺第4項の i 、 i' は、それぞれ行列の行、列を示すインデックスである。式39の右辺第4項の I は、単位行列である。式39の右辺第5項は、教師基底と抽出基底との間の直交制約（即ち、教師基底行列 F の各列に格納されている全てのパターンと抽出基底行列 Q の各列に格納されている全てのパターンとが近似的に直交するとの制約）を示す項である。式39の右辺第5項の ε_2 は、予め定められた実数である。式39の右辺第4項の i 、 i' は、それぞれ行列の行、列を示すインデックスである。

[0167] 本実験では、教師重み行列のスパーズ制約、抽出重み行列のスパーズ制約、抽出基底の正規直交制約、教師基底と抽出基底との間の直交制約の何れも付加しない。即ち、 δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 それぞれは、0とする。そのため、コスト関数 J_d は、式39の右辺第1項のみの式となる。

[0168] J_d の値を適正化するように、 G 、 Q 、 W の値を更新することで、 Y_d を、 F と G と Q と W とに分解する。以下の式40で定義されるコスト関数 J_d の最小化問題を解くこととなる。

[0169] [数40]

$$\min_{G, Q, W} J_d(G, Q, W) \quad \dots(\text{式40})$$

[0170] 本実験では、コスト関数 J_d を最小化するために、以下のような処理を行う。即ち、 G と Q と W との更新を繰り返すことで、コスト関数 J_d を最小化する。また、コスト関数 J_d を最小化するために、以下に記載する方法以外の方法（例えば、ニュートン法、確率的勾配降下法等の最適化手法）を用いてもよい。

G の更新について説明する。本実験では、以下の式41に示すように G の更新を行った。

[0171] [数41]

$$\text{更新後の } G_{k,t} = G_{k,t} - \eta_{k,t}^G \left(\frac{\partial J_d}{\partial G} \right)_{k,t} \quad \dots(\text{式41})$$

[0172] 式41の k 、 t は、それぞれ行列の行、列を示すインデックスである。 $\eta^G_{k,t}$ は、 G の k 、 t 要素についての更新のステップサイズを示す非負値の値である。

コスト関数 J_d を G で偏微分することで、以下の式42が得られる。

[0173] [数42]

$$\frac{\partial J_d}{\partial G} = F^T (FG + QW - Y_d) + \delta_1 E_3 \quad \dots(\text{式42})$$

[0174] 式42の E_3 は、サイズが $1 \times q'$ の全ての成分が1の行列である。

式41に式42を代入することで、更新後の G を示す以下の式43が得られる。

[0175] [数43]

$$\begin{aligned} \text{更新後の } G_{k,t} &= G_{k,t} - \eta^G_{k,t} (F^T (FG + QW - Y_d) + \delta_1 E_3)_{k,t} \\ &= G_{k,t} - \eta^G_{k,t} (F^T (FG + QW) + \delta_1 E_3)_{k,t} + \eta^G_{k,t} (F^T Y_d)_{k,t} \quad \dots(\text{式43}) \end{aligned}$$

[0176] 行列 G は、非負値であるため、式43の値は、非負値である必要がある。

式43の最右辺の末尾の項は、必ず非負値となる項である。即ち、式43の最右辺から末尾の項を除いた式の値が0であるならば、必ず更新後の G は、非負値となる。そのため、以下の式44に示すように、式43の最右辺から末尾の項を除いた式が0であるという条件を満たすように、行列 G の更新を行うこととする。

[0177] [数44]

$$G_{k,t} - \eta^G_{k,t} (F^T (FG + QW) + \delta_1 E_3)_{k,t} = 0 \quad \dots(\text{式44})$$

[0178] 式44から $\eta^G_{k,t}$ は、以下の式45のようになる。

[0179] [数45]

$$\eta^G_{k,t} = \frac{G_{k,t}}{(F^T (FG + QW) + \delta_1 E_3)_{k,t}} \quad \dots(\text{式45})$$

[0180] 式 4 1 に式 4 2 と式 4 5 とを代入することで、更新後の G を示す以下の式 4 6 が得られる。

[0181] [数46]

$$\text{更新後の } G_{k,t} = G_{k,t} \frac{(F^T Y_d)_{k,t}}{(F^T (FG + QW) + \delta_1 E_3)_{k,t}} \quad \dots(\text{式46})$$

[0182] 即ち、 Y_d と、 F と、処理時点における更新前の G 、 Q 、 W と、予め定められた係数 δ_1 （本実験では、0）と、に基づいて、式 4 6 を用いて、 G を更新した。

次に、 Q の更新について説明する。本実験では、以下の式 4 7 に示すように Q を更新した。

[0183] [数47]

$$\text{更新後の } Q_{w,t} = Q_{w,t} - \eta_{w,t}^Q \left(\frac{\partial J_d}{\partial Q} \right)_{w,t} \quad \dots(\text{式47})$$

[0184] 式 4 7 の w 、 t は、それぞれ行列の行、列を示すインデックスである。 $\eta_{w,t}^Q$ は、 Q の w 、 t 要素についての更新のステップサイズを示す非負値の値である。

コスト関数 J_d を Q で偏微分することで、以下の式 4 8 が得られる。

[0185] [数48]

$$\frac{\partial J_d}{\partial Q} = (FG + QW - Y_d)W^T + \varepsilon_1 (QE_4 - Q) + \varepsilon_2 FE_5 \quad \dots(\text{式48})$$

[0186] 式 4 8 の E_4 は、サイズが $n \times n$ の全ての成分が 1 の行列である。式 4 8 の E_5 は、サイズが 1×1 の全ての成分が 1 の行列である。

式 4 7 に式 4 8 を代入することで、更新後の Q を示す以下の式 4 9 が得られる。

[0187]

[数49]

$$\begin{aligned}
 \text{更新後の } Q_{w,t} &= Q_{w,t} - \eta_{w,t}^Q \left((FG+QW-Y_d)W^T + \varepsilon_1(QE_4-Q) + \varepsilon_2 FE_5 \right)_{w,t} \\
 &= Q_{w,t} - \eta_{w,t}^Q \left((FG+QW)W^T + \varepsilon_1(QE_4-Q) + \varepsilon_2 FE_5 \right)_{w,t} + \eta_{w,t}^Q (Y_d W^T)_{w,t} \quad \dots(\text{式49})
 \end{aligned}$$

[0188] 行列Qは、非負値であるため、式49の値は、非負値である必要がある。
 式49の最右辺の末尾の項は、必ず非負値となる項である。即ち、式49の最右辺から末尾の項を除いた式の値が0であるならば、必ず更新後のQは、非負値となる。そのため、以下の式50に示すように、式49の最右辺から末尾の項を除いた式が0であるという条件を満たすように、行列Qを更新することとする。

[0189] [数50]

$$Q_{w,t} - \eta_{w,t}^Q \left((FG+QW)W^T + \varepsilon_1(QE_4-Q) + \varepsilon_2 FE_5 \right)_{w,t} = 0 \quad \dots(\text{式50})$$

[0190] 式50から $\eta_{w,t}^Q$ は、以下の式51のようになる。

[0191] [数51]

$$\eta_{w,t}^Q = \frac{Q_{w,t}}{\left((FG+QW)W^T + \varepsilon_1(QE_4-Q) + \varepsilon_2 FE_5 \right)_{w,t}} \quad \dots(\text{式51})$$

[0192] 47式に48式と51式とを代入することで、更新後のGを示す以下の式52が得られる。

[0193] [数52]

$$\text{更新後の } Q_{w,t} = Q_{w,t} \frac{(Y_d W^T)_{w,t}}{\left((FG+QW)W^T + \varepsilon_1(QE_4-Q) + \varepsilon_2 FE_5 \right)_{w,t}} \quad \dots(\text{式52})$$

[0194] 即ち、 Y_d と、Fと、処理時点における更新前のG、Q、Wと、予め定められた係数 ε_1 、 ε_2 （本実験では、共に0）と、に基づいて、式52を用いて、Qを更新した。

次に、Wの更新について説明する。本実験では、以下の式53に示すよう

にWを更新した。

[0195] [数53]

$$\text{更新後の } W_{l,t} = W_{l,t} - \eta_{l,t}^W \left(\frac{\partial J_d}{\partial W} \right)_{l,t} \quad \dots(\text{式53})$$

[0196] 式53のl、tは、それぞれ行列の行、列を示すインデックスである。 $\eta_{l,t}^W$ は、Wのl、t要素についての更新のステップサイズを示す非負値の値である。

コスト関数 J_d をWで偏微分することで、以下の式54が得られる。

[0197] [数54]

$$\frac{\partial J_d}{\partial W} = Q^T (FG + QW - Y_d) + \delta_2 E_6 \quad \dots(\text{式54})$$

[0198] 式54の E_6 は、サイズが $1 \times q'$ の全ての成分が1の行列である。

式53に式54を代入することで、更新後のWを示す以下の式55が得られる。

[0199] [数55]

$$\begin{aligned} \text{更新後の } W_{l,t} &= W_{l,t} - \eta_{l,t}^W (Q^T (FG + QW - Y_d) + \delta_2 E_6)_{l,t} \\ &= W_{l,t} - \eta_{l,t}^W (Q^T (FG + QW - Y_d) + \delta_2 E_6)_{l,t} + \eta_{l,t}^W (Q^T Y_d)_{l,t} \quad \dots(\text{式55}) \end{aligned}$$

[0200] 行列Wは、非負値であるため、式55の値は、非負値である必要がある。

式55の最右辺の末尾の項は、必ず非負値となる項である。即ち、式55の最右辺から末尾の項を除いた式の値が0であるならば、必ず更新後のWは、非負値となる。そのため、以下の式56に示すように、式55の最右辺から末尾の項を除いた式が0であるという条件を満たすように、行列Wの更新を行うこととする。

[0201] [数56]

$$W_{l,t} - \eta_{l,t}^W (Q^T (FG + QW) + \delta_2 E_6)_{l,t} = 0 \quad \dots(\text{式56})$$

[0202] 式 5 6 から $\eta^{W}_{l,t}$ は、以下の式 5 7 のようになる。

[0203] [数57]

$$\eta^{W}_{l,t} = \frac{W_{l,t}}{(Q^T(FG+QW) + \delta_2 E_6)_{l,t}} \quad \dots(\text{式57})$$

[0204] 5 3 式に 5 4 式と 5 7 式とを代入することで、更新後の W を示す以下の式 5 8 が得られる。

[0205] [数58]

$$\text{更新後の } W_{l,t} = W_{l,t} \frac{(Q^T Y_d)_{l,t}}{(Q^T(FG+QW) + \delta_2 E_6)_{l,t}} \quad \dots(\text{式58})$$

[0206] 即ち、 Y_d と、 F と、処理時点における更新前の G 、 Q 、 W と、予め定められた係数 δ_2 （本実験では、0）と、に基づいて、式 5 8 を用いて、 G を更新した。

以上のように、本実験では、式 4 6 を用いた G の更新と、式 5 2 を用いた Q の更新と、式 5 8 を用いた W の更新と、を繰り返す。各更新段階において、更新後の G 、 Q 、 W から、それぞれ更新前の G 、 Q 、 W を引いた差である ΔG 、 ΔQ 、 ΔW について、これらの行列のフロベニウスノルムを計算する。そして、各更新段階における ΔG 、 ΔQ 、 ΔW のフロベニウスノルムの、それぞれ最初の更新段階における ΔG 、 ΔQ 、 ΔW のフロベニウスノルムに対する比が、予め定められた閾値以下となる更新段階をもって、コスト関数 J_d の値が収束したとした。そして、 J_d が収束した際の G 、 Q 、 W を、コスト関数 J_d を最小化させる行列とした。これにより、データ行列 Y_d を、式 3 8 に示すように、それぞれ非負値の行列である F と G と Q と W とに分解した。

[0207] 本実験では、以上のようにして、コスト関数 J_d を最小化させる G と Q と W とを求めることとした。ただし、他の例として、式 4 6 を用いた G の更新と、式 5 2 を用いた Q の更新と、式 5 8 を用いた W の更新と、を繰り返し行い、 G 、 Q 、 W の更新前と更新後とでコスト関数 J_d の値の変動が予め定められ

た閾値以下となることが、予め定められた回数連続したら、コスト関数 J_d の値が収束したこととしてもよい。そして、 J_d が収束した際の G 、 Q 、 W を、コスト関数 J_d を最小化させる行列としてもよい。

[0208] 図 1 4 A～図 1 4 B を用いて、疵のない正常な状態にある軸受 1 0 6 についての本実験の実験結果について説明する。

図 1 4 A のグラフは、 F が示す教師基底（に属する係数 α のパターン）と、正常な状態にある軸受 1 0 6 についての計測データから本実験で求めた Q が示す抽出基底（に属する係数 α のパターン）と、を示すグラフである。図 1 4 A のグラフの横軸は、係数 α のインデックスを示し、縦軸は、対応するデータの値を示す。

[0209] 図 1 4 B のグラフは、正常な状態にある軸受 1 0 6 についての計測データから本実験で求めた G と W とを示すグラフである。図 1 4 B のグラフの横軸は、 G と W との列のインデックスを示し、縦軸は、対応する列の G と W との要素の値を示す。

G と W との各要素は、データ行列 Y_d に格納されている係数 α のパターンを示すデータそれぞれの中に、教師基底の成分と抽出基底の成分とのそれぞれが、どの程度の重みで存在しているかを示す重みを示す。そのため、図 1 4 B のグラフは、データ行列 Y_d 内に、教師基底の成分と抽出基底の成分とのそれぞれが、どの程度の重みで存在しているかを示すグラフである。

[0210] 図 1 4 A のグラフから、教師基底と抽出基底とは、似通っていることが見て取れる。また、図 1 4 B のグラフから、データ行列 Y_d 内における教師基底の成分と抽出基底の成分との重みには、顕著な違いがみられないことが分かる。図 1 4 B のグラフにおいて、 G と W とを、2 0 0 個の列の要素それぞれについて比較すると、1 1 3 点において G の方が大きくなっており、8 7 点において W の方が大きくなっている。

[0211] 図 1 5 A～図 1 5 B を用いて、図 1 3 A に示すように幅 3 mm・深さ約 0.1 mm の線上の疵が外輪に存在する状態にある軸受 1 0 6 についての本実

験の実験結果について説明する。

- [0212] 図15Aのグラフは、Fが示す教師基底（に属する係数 α のパターン）と、幅3mm・深さ約0.1mmの線上の疵が外輪に存在する状態の軸受106についての計測データから本実験で求めたQが示す抽出基底（に属する係数 α のパターン）と、を示すグラフである。図15Aのグラフの横軸は、係数 α のインデックスを示し、縦軸は、対応するデータの値を示す。
- [0213] 図15Bのグラフは、幅3mm・深さ約0.1mmの線上の疵が外輪に存在する状態の軸受106についての計測データから本実験で求めたGとWとを示すグラフである。図15Bのグラフの横軸は、GとWとの列のインデックスを示し、縦軸は、対応する列のGとWとの要素の値を示す。
- [0214] 図15Aのグラフから、教師基底と抽出基底とは、顕著に異なることが見て取れる。また、図15Bのグラフから、データ行列 Y_d 内における教師基底の成分と抽出基底の成分との重みには、顕著な違いがみられることが分かる。抽出基底の成分の重みが、教師基底の成分の重みよりも顕著に高くなっている。図15Bのグラフにおいて、GとWとを、200個の列の要素それぞれについて比較すると、200個全てにおいてWの方が大きくなる。
- [0215] 図16A～図16Bを用いて、図13Bに示すように幅0.5mm・深さ約0.1mm以下の線上の疵が外輪に存在する状態にある軸受106についての本実験の実験結果について説明する。
- [0216] 図16Aのグラフは、Fが示す教師基底と、幅0.5mm・深さ0.1mm以下の線上の疵が外輪に存在する状態の軸受106についての計測データから本実験で求めたQが示す抽出基底と、を示すグラフである。図16Aのグラフの横軸は、係数 α のインデックスを示し、縦軸は、対応するデータの値を示す。
- [0217] 図16Bのグラフは、幅0.5mm・深さ0.1mm以下の線上の疵が外輪に存在する状態の軸受106についての計測データから本実験で求めたGとWとを示すグラフである。図16Bのグラフの横軸は、GとWとの列のインデックスを示し、縦軸は、対応する列のGとWとの要素の値を示す。

- [0218] 図16Aのグラフから、教師基底と抽出基底とは、大まかな波形の動きとしては、似通っているともとれる。しかし、抽出基底に属する基本ベクトルの波形は、教師基底に属する基本ベクトルの波形に比べてより細かな振動が多数存在することが分かる。また、図16Bのグラフから、データ行列 Y_d 内における教師基底の成分と抽出基底の成分との重みには、顕著な違いがみられることが分かる。図16Bのグラフにおいて、GとWとを、200個の列の要素それぞれについて比較すると、199個においてWの方が大きくなっており、1個においてGの方が大きくなっている。
- [0219] 図17A～図17Bを用いて、図13Cに示すように微小な疵が外輪に存在する状態にある軸受106についての本実験の実験結果について説明する。
- [0220] 図17Aのグラフは、Fが示す教師基底と、微小な疵が外輪に存在する状態の軸受106についての計測データから本実験で求めたQが示す抽出基底と、を示すグラフである。図17Aのグラフの横軸は、係数 α のインデックスを示し、縦軸は、対応するデータの値を示す。
- [0221] 図17Bのグラフは、微小な疵が外輪に存在する状態の軸受106についての計測データから本実験で求めたGとWとを示すグラフである。図17Bのグラフの横軸は、GとWとの列のインデックスを示し、縦軸は、対応する列のGとWとの要素の値を示す。
- [0222] 図17Aのグラフから、教師基底と抽出基底とは、似通っているともとれる。また、図17Bのグラフから、データ行列 Y_d 内における教師基底の成分と抽出基底の成分との重みには、一見、顕著な違いがないようにもとれる。しかし、図17Bのグラフを見ると、Wの値は、大半が0.12付近に存在しており、Gの値は、大半が0.03付近に存在していることが分かる。図17Bのグラフにおいて、GとWとを、200個の列の要素それぞれについて比較すると、159個においてWの方が大きくなっており、41個においてGの方が大きくなっている。図14Bのグラフと比べて、GがWよりも大きくなっている箇所が顕著に多いのが分かる。

[0223] 図14A～図17Bに示した実験結果から、データ行列 Y_d に対応する軸受106の状態と、教師基底に対応する軸受106の状態と、が異なっている場合、データ行列 Y_d の分解により得られた W と G とも顕著に異なる傾向が確認された。

[0224] 発明者らは、本実験の実験結果から、データ行列 Y_d の分解により得られた G と W とを比較することで、データ行列 Y_d に対応する軸受106の状態が、教師基底が示す状態であるか否かを診断することができるとの知見を得た。

[0225] そこで、本実施形態の処理は、以下のような処理である。即ち、予め定められた状態の軸受106に対応する修正された自己回帰モデルの係数 α のパターンを示す非負値のデータを、教師基底に属する基底ベクトルとして求める。そして、診断対象の軸受106から計測された計測データからデータ行列 Y_d を生成し、生成したデータ行列 Y_d を、教師基底を示す行列と、教師基底の重みを示す教師重み行列と、抽出基底を示す抽出基底行列と、抽出基底の重みを示す抽出重み行列と、に分解する。そして、データ行列 Y_d の分解により得られた教師重み行列と、抽出重み行列と、に基づいて、軸受106の状態が、教師基底に対応する状態であるか否かを診断する処理である。

[0226] (システム構成)

図18は、本実施形態の診断システムのシステム構成の一例を示す図である。診断システムは、周期的な運動を行う物体についての状態診断を行うシステムである。診断システムは、情報処理装置1800、振動計測装置1801を含む。診断システムは、鉄道台車に利用されている軸受の状態診断を行う。本実施形態では、診断システムは、図1Aおよび図1Bと同様の状況で振動計測位置111に設置された振動計測装置1801により計測された振動の計測データに基づいて、軸受106の状態を診断する。

[0227] 情報処理装置1800は、振動計測装置1801により計測された信号に基づいて、軸受の状態診断を行うパーソナルコンピュータ(PC)、サーバ装置、タブレット装置等の情報処理装置である。また、情報処理装置1800は、電車に組み込まれたコンピュータ等であってもよい。

[0228] 振動計測装置 1801 は、加速度センサ等のセンサを含み、センサを介して物体の振動を検知し、検知した振動に応じた信号を有線又は無線で情報処理装置 1800 等の外部の装置に出力する計測装置である。

[0229] (情報処理装置の機能構成)

図 18 を参照しながら、情報処理装置 1800 が有する機能の一例を説明する。

情報処理装置 1800 は、取得部 1810、決定部 1820、学習部 1830、分解部 1840、診断部 1850、出力部 1860 を含む。

[0230] ≪取得部 1810≫

取得部 1810 は、周期的な運動を行う物体について、この周期的な運動に係る計測データ y を取得する。

本実施形態では、取得部 1810 は、軸受 106 の内輪を回転させ、振動計測位置 111 に設置された振動計測装置 1801 により計測された振動の計測データ y を取得する。

[0231] ≪決定部 1820≫

決定部 1820 は、取得部 1810 により取得された計測データ y に基づいて、修正された自己回帰モデルにおける係数 α を決定する。修正された自己回帰モデルは、計測データ y の実績値 $y_{k-1} \sim y_{k-m}$ と、この実績値に対する係数 α ($= \alpha_1 \sim \alpha_m$) と、を用いて、計測データ y の予測値 $\hat{y}_k$ を表す式 1 である。決定部 1820 は、修正された自己回帰モデルにおける係数 α を、式 12 を用いて決定する。式 12 は、一般的に知られている自己回帰モデルにおける係数の決定に用いる式 6 (ユール・ウォーカー方程式) において、式 7 で表される自己相関行列 R の代わりに、自己相関行列 R から物体の状態診断に有用な成分を抽出した第 1 の行列 R' (式 10) を用いる式である。式 6 は、時差が 0 から $m-1$ までの計測データ y の自己相関を成分とする自己相関行列 R を係数行列とし、時差が 1 から m までの計測データ y の自己相関を成分とする自己相関ベクトルを定数ベクトルとする方程式である。

[0232] 式 6 は、式 1 で算出される計測データ y の予測値 $\hat{y}_k$ と、計測データ y の

予測値 $\hat{y}_k$ に対応する時刻 k における計測データ y の実測値 y_k との二乗誤差を最小化する条件を示す条件式として導出することができる。第 1 の行列 R' は、自己相関行列 R の固有値を対角成分とする対角行列 Σ と、自己相関行列 R の固有ベクトルを列成分とする直交行列 U と、から導出される。自己相関行列 R の固有値は、自己相関行列 R を特異値分解（式 8）することで導出される。第 1 の行列 R' は、自己相関行列 R の固有値のうち 1 以上且つ m 未満の設定された使用固有値数 s 個の固有値を用いて、対角行列 Σ の部分行列であって、使用固有値数 s 個の固有値を対角成分とする行列 Σ_s と、直交行列 U の部分行列であって、使用固有値数 s 個の固有値に対応する固有ベクトルを列成分ベクトルとする行列 U_s と、から導出される行列 $U_s \Sigma_s U_s^T$ である。使用固有値数 s 個の固有値は、自己相関行列 R の固有値のうち、値が最大の固有値を含むようにすればよいが、値が大きいものから順に選ばれるのが好ましい。

[0233] ≪学習部 1830≫

学習部 1830 は、複数の状態の物体について、予め取得部 1810 により取得された計測データから決定部 1820 により決定された修正された自己回帰モデルにおける係数 α を学習データとして、予め定められた状態の物体に対応する修正された自己回帰モデルにおける係数 α のパターンを学習により、教師基底に属する基底ベクトルとして特定する。

[0234] ≪分解部 1840≫

分解部 1840 は、診断対象の物体から計測された計測データに基づいて決定部 1820 により決定された係数 α を予め定められた個数だけ取得する。分解部 1840 は、取得した係数 α それぞれのパターンを示す非負値のデータを格納するデータ行列を生成する。そして、分解部 1840 は、生成したデータ行列を、学習部 1830 により学習された教師基底を格納する教師基底行列と、データ行列内の教師基底の成分の重みを示す教師重み行列と、データ行列から抽出される基底が格納される抽出基底行列と、データ行列内の抽出基底の成分の重みを示す抽出重み行列と、に分解する。

[0235] ≪診断部 1850≫

診断部 1850 は、分解部 1840 により求められた教師重み行列と抽出重み行列とに基づいて、物体の状態が教師基底に対応する状態であるか否かを診断する。

本実施形態では、軸受 106 の状態が教師基底に対応する状態であるか否かを診断の結果とする。

≪出力部 1860≫

出力部 1860 は、診断部 1850 による診断の結果に係る情報を出力する。

[0236] (情報処理装置のハードウェア構成)

図 19 は、情報処理装置 1800 のハードウェア構成の一例を示す図である。

情報処理装置 1800 は、CPU 1900、主記憶装置 1901、補助記憶装置 1902、入出力 I/F 1903 を含む。各構成要素は、システムバス 1904 を介して、相互に通信可能に接続されている。

[0237] CPU 1900 は、情報処理装置 1800 を制御する中央演算装置である。主記憶装置 1901 は、CPU 1900 のワークエリアやデータの一時的な保管場所として機能する RAM (Random Access Memory) 等の記憶装置である。補助記憶装置 1902 は、各種のプログラム、設定データ、振動計測装置 1801 から出力される計測データ、診断情報等を記憶する ROM (Read Only Memory)、HDD (Hard Disk Drive)、SSD (Solid State Drive) 等の記憶装置である。入出力 I/F 1903 は、振動計測装置 1801 等の外部の装置との間での情報のやり取りに利用されるインターフェースである。

CPU 1900 が、補助記憶装置 1902 等に記憶されたプログラムに基づき処理を実行することによって、図 18 で説明した情報処理装置 1800 の機能及び図 20、21 で後述するフローチャートの処理等が実現される。

[0238] (学習処理)

図20は、診断システムが実行する学習処理の一例を示すフローチャートである。図20を用いて、教師基底を学習により特定する処理を説明する。

本実施形態では、情報処理装置1800は、軸受106が外輪に疵のある状態である場合、軸受106が転動体に疵のある状態である場合、軸受106が内輪に疵のある状態である場合、軸受106に疵がなく正常な状態である場合、軸受106が外輪に疵のある状態である場合のそれぞれについて、予め、 q (50) 回、以下の処理を繰り返す。

[0239] 即ち、取得部1810は、振動計測装置1801により計測された振動の計測データ y を取得する。取得部1810は、計測データ y として、ランダムに設定した時刻を時刻1とした場合の時刻1～ M までの計測データである $y_1 \sim y_M$ を取得する。そして、決定部1820は、取得した計測データ y と、予め設定された定数 M と、修正された自己回帰モデルにおいて、ある時刻のデータを過去の幾つのデータで近似するかを示す数 m と、に基づいて、式5と式7とを用いて自己相関行列 R を生成する。決定部1820は、予め記憶されている M 、 m の情報を読み出すことで、 M と m とを取得する。本実施形態では、 m の値は、500である。また、 M は、 m よりも大きい整数である。

[0240] そして、決定部1820は、生成した自己相関行列 R を特異値分解することで、式8の直交行列 U と対角行列 Σ を取得し、対角行列 Σ から自己相関行列 R の固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ を取得する。決定部1820は、自己相関行列 R の複数の固有値である $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ のうち、最大のものから使用固有値数 s だけの固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{ss}$ を、修正された自己回帰モデルの係数 α を求めるのに利用する自己相関行列 R の固有値として選択する。本実施形態では、使用固有値数 s は、3とするが、2以下としてもよいし、4以上としてもよい。そして、決定部1820は、計測データ y と、固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{ss}$ と、自己相関行列 R の特異値分解により得られた直交行列 U と、に基づいて、式13を用いて、修正された自己回帰モデルの係数 α を決定する。そして、決定部182

0は、決定した係数 α を、非負値化して、学習データとして補助記憶装置1902に記憶する。非負値化は、例えば、係数 α のそれぞれの成分に、係数 α に含まれる0未満の最低の成分の値に -1 をかけた値を足すことにより行われる。

これにより、情報処理装置1800は、軸受106が外輪に疵のある状態である場合、軸受106が転動体に疵のある状態である場合、軸受106が内輪に疵のある状態である場合、軸受106に疵がなく正常な状態である場合、軸受106が外輪に疵のある状態である場合のそれぞれについて、 q (50) 個ずつ修正された自己回帰モデルにおける係数 α のデータを、学習データとして取得し、記憶することができる。

[0241] 本実施形態では、軸受106が取り得る状態は、疵のない正常な状態、内輪に疵がある状態、保持器に疵がある状態、転動体に疵がある状態、および外輪に疵がある状態の5つであるとする。即ち、軸受106が取り得る状態の数 p は、5となる。

[0242] S2001において、学習部1830は、補助記憶装置1902に記憶されている学習データを取得する。

[0243] S2002において、学習部1830は、S2001で取得した学習データに基づいて、式19の行列 Y を生成する。学習部1830は、 m (500) $\times d$ (250) のサイズの行列を生成し、各列のデータを、学習データに含まれる各係数 α の値とすることで、行列 Y を生成する。また、 $m \times p$ のサイズの行列 A を生成し、行列 A の各成分に、予め定められた初期値を設定する。また、 $p \times d$ のサイズ行列 P を生成し、行列 P の各成分に、予め定められた初期値を設定する。

[0244] S2003において、学習部1830は、S2002で生成した行列 Y と、行列 A と、行列 P と、予め定められた係数 β と、予め定められた係数 γ と、に基づいて、式21を用いて、コスト関数 J の値を、コストとして求める。学習部1830は、求めたコストを、更新前コストとして、主記憶装置1901等に記憶する。

- [0245] S 2 0 0 4 において、学習部 1 8 3 0 は、行列 Y と、行列 A と、行列 P と、係数 γ と、サイズが $p \times p$ の全ての成分が 1 の行列である行列 E_2 と、に基づいて、式 3 4 を用いて、行列 A を更新する。また、学習部 1 8 3 0 は、更新した行列 A を、式 3 5 を用いて、更に更新する。また、学習部 1 8 3 0 は、行列 Y と、行列 A と、行列 P と、係数 β と、サイズが $m \times p$ の全ての成分が 1 の行列である行列 E_1 と、に基づいて、式 3 0 を用いて、行列 P を更新する。
- [0246] S 2 0 0 5 において、学習部 1 8 3 0 は、行列 Y と、S 2 0 0 3 で更新した行列 A と、S 2 0 0 3 で更新した行列 P と、係数 β と、係数 γ と、に基づいて、式 2 1 を用いて、コスト関数 J の値を、コストとして求める。学習部 1 8 3 0 は、求めたコストを、更新後コストとして、主記憶装置 1 9 0 1 等に記憶する。
- [0247] S 2 0 0 6 において、学習部 1 8 3 0 は、更新後コストと、更新前コストと、の差分の絶対値が、予め定められた閾値以下であるか否かを判定する。学習部 1 8 3 0 は、更新後コストと、更新前コストと、の差分が、予め定められた閾値以下であると判定した場合、S 2 0 0 7 の処理に進む。また、学習部 1 8 3 0 は、更新後コストと、更新前コストと、の差分の絶対値が、予め定められた閾値よりも大きいと判定した場合、S 2 0 0 8 の処理に進む。学習部 1 8 3 0 は、S 2 0 0 6 の処理の後、更新後コストを、新たな更新前コストとして、主記憶装置 1 9 0 1 に記憶する。
- [0248] S 2 0 0 7 において、学習部 1 8 3 0 は、主記憶装置 1 9 0 1 等に記憶されたカウンタの値に 1 を加える。学習部 1 8 3 0 は、このカウンタの値を、図 2 0 の処理の開始前に 0 に初期化している。
- S 2 0 0 8 において、学習部 1 8 3 0 は、主記憶装置 1 9 0 1 等に記憶されたカウンタの値を、0 に初期化して、S 2 0 0 4 の処理に進む。
- [0249] S 2 0 0 9 において、学習部 1 8 3 0 は、主記憶装置 1 9 0 1 等に記憶されたカウンタの値が、予め定められた閾値以上であるか否かを判定する。学習部 1 8 3 0 は、主記憶装置 1 9 0 1 等に記憶されたカウンタの値が、予め

定められた閾値以上であると判定した場合、コスト関数 J の値が極小値に収束したとして、S 2 0 1 0 の処理に進む。学習部 1 8 3 0 は、主記憶装置 1 9 0 1 等に記憶されたカウンタの値が、予め定められた閾値未満であると判定した場合、S 2 0 0 4 の処理に進む。

[0250] S 2 0 1 0 において、学習部 1 8 3 0 は、行列 P に基づいて、行列 A の各列のデータが示すパターンが、どの状態である軸受 1 0 6 に対応する修正された自己回帰モデルにおける係数 α のパターンであるかを特定する。

[0251] 行列 Y のある列のデータは、行列 A と、行列 P におけるその列と、をかけたデータとして求まる。即ち、行列 Y のある列のデータは、行列 A の各列のデータを、行列 P のその列における各行の値を重みとして、重ね合せたデータとなる。そこで、学習部 1 8 3 0 は、S 2 0 1 0 で以下のようにして、行列 A の各列のデータが示すパターンが、どの状態である軸受 1 0 6 に対応する修正された自己回帰モデルにおける係数 α のパターンであるかを特定する。

[0252] 学習部 1 8 3 0 は、行列 Y の各列のうち、ある 1 つの状態である軸受 1 0 6 に対応する係数 α を示すデータを格納する列を特定する。例えば、学習部 1 8 3 0 は、行列 Y の各列のうち、外輪に疵がある状態の軸受 1 0 6 に対応する係数 α を示すデータを格納する列である 1 列目～ q 列目を特定する。そして、学習部 1 8 3 0 は、行列 P における特定した列（1 列目～ q 列目）について、行毎に値を集計する。そして、学習部 1 8 3 0 は、集計した値のうち、最も大きいものに対応する行を特定する。学習部 1 8 3 0 は、特定した行列 P の行とかけ合わされる行列 A の列を特定する。例えば、学習部 1 8 3 0 は、行列 P の 1 行目を特定した場合、行列 P の 1 行目とかけ合わされる行列 A の列は、1 列目なので、1 列目を特定する。そして、学習部 1 8 3 0 は、行列 A の特定した列が示すデータを、その状態である軸受 1 0 6 に対応する係数 α の代表的なパターンを示すデータとして特定する。

[0253] 学習部 1 8 3 0 は、軸受 1 0 6 が取り得る各状態について、以上の処理を行うことで、行列 A の各列のデータが示すパターンが、どの状態である軸受

106に対応する修正された自己回帰モデルにおける係数 α のパターンであるかを特定する。

[0254] 学習部1830は、特定した各状態の軸受106に対応する修正された自己回帰モデルにおける係数 α の代表的なパターンを示す非負値のデータのうち、予め定められた状態の軸受106に対応するデータを、教師基底に属する基底ベクトルとして、補助記憶装置1902等に記憶する。本実施形態では、この予め定められた状態は、疵のない正常な状態であるとする。そのため、学習部1830は、正常な状態に対応する係数 α のパターンを示すデータを、教師基底に属する基底ベクトルとして、補助記憶装置1902等に記憶する。

[0255] (診断処理)

本実施形態では、診断システムは、軸受106の状態が教師基底に対応する状態か否かを特定することで、軸受106の状態を診断することとする。ただし、他の例として、診断システムは、予め振動計測装置1801により計測された計測データに基づいて、軸受106の状態を診断することとしてもよいし、リアルタイムで振動計測装置1801により計測されて出力され続けている計測データを用いて、稼働中の軸受106の状態を診断することとしてもよい。

[0256] 図21は、診断処理の一例を示すフローチャートである。

S2101において、取得部1810は、振動計測装置1801により計測された振動の計測データ y を取得する。取得部1810は、計測データ y として、振動の計測期間内からランダムに時刻を選択する。そして、取得部1810は、選択した時刻を時刻1として、時刻1～Mまでの計測データを、 $y_1 \sim y_M$ として取得する。

[0257] S2102において、決定部1820は、S2101で取得した計測データ y と、予め設定された定数Mと、修正された自己回帰モデルにおいて、ある時刻のデータを過去の幾つのデータで近似するかを示す数 m と、に基づいて、式5と式7とを用いて自己相関行列 R を生成する。決定部1820は、

予め記憶されているM、mの情報を読み出すことで、Mとmとを取得する。
本実施形態では、mの値は、500である。また、Mは、mよりも大きい整数である。

[0258] S2103において、決定部1820は、S2102で生成した自己相関行列Rを特異値分解することで、式8の直交行列Uと対角行列 Σ を取得し、対角行列 Σ から自己相関行列Rの固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ を取得する。

[0259] S2104において、決定部1820は、自己相関行列Rの複数の固有値である $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ のうち、最大のものから使用固有値数sだけの固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{ss}$ を、修正された自己回帰モデルの係数 α を求めるのに利用する自己相関行列Rの固有値として選択する。本実施形態では、使用固有値数sは、3とするが、2以下としてもよいし、4以上としてもよい。そして、決定部1820は、計測データyと、固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{ss}$ と、自己相関行列Rの特異値分解により得られた直交行列Uと、に基づいて、式13を用いて、修正された自己回帰モデルの係数 α を決定する。S2104で決定された係数 α は、計測データから決定された修正された自己回帰モデルにおける係数である修正係数の一例である。S2104で決定された係数 α のパターンは、計測パターンの一例である。

[0260] S2105において、決定部1820は、予め定められた数q'個の係数 α を決定したか否かを判定する。決定部1820は、予め定められた数q'個の係数 α を決定したと判定した場合、処理をS2105に進め、予め定められた数q'個以下の係数 α しか決定していないと判定した場合、処理をS2101に進め、係数 α の決定処理を繰り返す。

[0261] S2106において、分解部1840は、補助記憶装置1902から、S2010で記憶された教師基底を取得する。

[0262] S2107において、分解部1840は、決定部1820により決定されたq'個の係数 α を用いて、式37のように、 $m \times q'$ のサイズのデータ行列 Y_d を生成する。即ち、データ行列 Y_d の各列が、S2104で決定された係数 α のパターンのデータを格納することとなる。また、分解部1840は

、データ行列 Y_d の各成分を、非負値化する。非負値化は、例えば、0未満の行列 Y の成分のうち最低のものに -1 をかけた値を、行列 Y の各成分に足すことにより行われる。

[0263] S 2 1 0 8において、分解部1840は、教師基底を格納する $m \times 1$ のサイズの教師基底行列 F を生成する。そして、分解部1840は、 F の各要素に、教師基底に属するデータを設定する。また、分解部1840は、データ行列 Y_d に含まれる教師基底の成分の重みを格納する $1 \times q'$ のサイズの教師重み行列 G を生成する。また、分解部1840は、データ行列 Y_d から抽出されるパターンの集合である抽出基底を格納する $m \times$ 予め定められた数 n のサイズの行列 Q を生成する。本実施形態では、 n は1とする。また、分解部1840は、データ行列 Y_d に含まれる抽出基底の成分の重みを格納する $n \times q'$ のサイズの教師重み行列 W を生成する。

そして、分解部1840は、 G 、 Q 、 W それぞれの各成分に予め定められた初期値を設定することで、 G 、 Q 、 W それぞれを初期化する。

[0264] S 2 1 0 9において、分解部1840は、 Y_d と F と G と Q と W と予め定められた係数 δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 と、に基づいて、式39を用いて、コスト関数 J_d の値を、コストとして求める。本実施形態では、 δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 それぞれの値は、0とする。分解部1840は、求めたコストを、更新前コストとして、主記憶装置1901等に記憶する。

[0265] S 2 1 1 0において、分解部1840は、 G 、 Q 、 W それぞれを更新する。より具体的には、分解部1840は、 Y_d と、 F と、更新前の G 、 Q 、 W と、予め定められた係数 δ_1 （本実施形態では、0）と、サイズが $1 \times q'$ の全ての成分が1の行列である E_3 と、に基づいて、式46を用いて、 G を更新する。ただし、分解部1840は、本実施形態では δ_1 が0なので、 E_3 を用いずに、 G を更新してもよい。

[0266] また、分解部1840は、 Y_d と、 F と、更新前の G 、 Q 、 W と、予め定められた係数 ε_1 、 ε_2 （本実施形態では、共に0）と、サイズが $n \times n$ の全ての成分が1の行列である E_4 と、サイズが 1×1 の全ての成分が1の行列であ

る E_5 と、に基づいて、式52を用いて、 Q を更新する。ただし、分解部1840は、本実施形態では ε_1 、 ε_2 それぞれが0なので、 E_4 と E_5 とを用いずに、 Q を更新してもよい。

[0267] また、分解部1840は、 Y_d と、 F と、更新前の G 、 Q 、 W と、予め定められた係数 δ_2 （本実施形態では、0）と、サイズが $1 \times q'$ の全ての成分が1の行列である E_6 と、に基づいて、式58を用いて、 W を更新する。ただし、分解部1840は、本実施形態では δ_2 が0なので、 E_6 を用いずに、 Q を更新してもよい。

[0268] S2111において、分解部1840は、 Y_d と、 F と、S2110で更新した G 、 Q 、 W と、係数 δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 と、に基づいて、式39を用いて、コスト関数 J_d の値を、コストとして求める。分解部1840は、求めたコストを、更新後コストとして、主記憶装置1901等に記憶する。

[0269] S2112において、分解部1840は、更新後コストと、更新前コストと、の差分の絶対値が、予め定められた閾値以下であるか否かを判定する。分解部1840は、更新後コストと、更新前コストと、の差分の絶対値が、予め定められた閾値以下であると判定した場合、処理をS2113に進める。また、分解部1840は、更新後コストと、更新前コストと、の差分の絶対値が、予め定められた閾値よりも大きいと判定した場合、処理をS2114に進める。分解部1840は、S2112の処理の後、更新後コストを、新たな更新前コストとして、主記憶装置1901に記憶する。

[0270] S2113において、分解部1840は、主記憶装置1901等に記憶されたカウンタの値に1を加える。なお、分解部1840は、このカウンタの値を、図21の処理の開始前に0に初期化している。

[0271] S2114において、分解部1840は、主記憶装置1901等に記憶されたカウンタの値を、0に初期化して、処理をS2110に進める。

[0272] S2115において、分解部1840は、主記憶装置1901等に記憶されたカウンタの値が、予め定められた閾値以上であるか否かを判定する。分解部1840は、主記憶装置1901等に記憶されたカウンタの値が、予め

定められた閾値以上であると判定した場合、コスト関数 J_d の値が極小値に収束したとして、処理を S 2 1 1 6 に進める。分解部 1 8 4 0 は、カウンタの値が、予め定められた閾値未満であると判定した場合、処理を S 2 1 1 0 に進める。

[0273] S 2 1 1 6 において、診断部 1 8 5 0 は、処理時点までに更新された G と W とに基づいて、診断対象の軸受 1 0 6 の状態が教師基底に対応する状態であるか否かを診断する。診断部 1 8 5 0 は、G と W との各列について、要素同士を比較して、何れが大きいかを特定する。そして、診断部 1 8 5 0 は、G の要素の方が W の要素よりも大きい列の数が、予め定められた閾値以上である場合、診断対象の軸受 1 0 6 の状態が、教師基底に対応する状態（本実施形態では、正常な状態）であると診断する。予め定められた閾値は、例えば、G と W との列数の 7 5 % の個数（本実施形態では 1 5 0）である。また、診断部 1 8 5 0 は、G の要素の方が W の要素よりも大きい列の数が、予め定められた閾値未満である場合、診断対象の軸受 1 0 6 の状態が、教師基底に対応する状態ではないと診断する。

[0274] S 2 1 1 7 において、出力部 1 8 6 0 は、S 2 1 1 6 での軸受 1 0 6 の診断の結果を示す情報を出力する。出力部 1 8 6 0 は、例えば、表示装置に、軸受 1 0 6 の診断の結果を示す情報を表示することで出力する。また、他の例としては、出力部 1 8 6 0 は、例えば、軸受 1 0 6 の診断の結果を示す情報を、補助記憶装置 1 9 0 2 に記憶することで出力することとしてもよい。また、出力部 1 8 6 0 は、例えば、外部のサーバ装置等の設定された送信先に、軸受 1 0 6 の診断の結果を示す情報を送信することで出力することとしてもよい。

[0275] （まとめ）

診断対象の軸受 1 0 6 の計測データから得られた係数 α のパターンに含まれる、予め定められた状態に対応するパターンの成分の重みと、それ以外のパターンの成分の重みと、に基づいて、軸受 1 0 6 の状態が予め定められた状態か否かを適切に診断できるとの知見が実験 3 から見出された。本実施形

態では、診断システムは、この知見に基づいた軸受 106 の診断処理を行う。

[0276] 即ち、診断システムは、予め、疵のない正常な状態の軸受 106 に対応する修正された自己回帰モデルの係数 α のパターンを、教師基底に属する基底ベクトルとして求める。そして、診断システムは、診断対象の軸受 106 から計測された計測データから q' 個の修正された自己回帰モデルの係数 α を求め、求めた q' 個の係数 α それぞれのパターンを示すデータを格納するデータ行列 Y_d を生成する。そして、診断システムは、 Y_d を、 F と、教師基底の重みを示す教師重み行列 G と、抽出基底を示す抽出基底行列 Q と、抽出基底の重みを示す抽出重み行列 W と、に分解する。診断システムは、 Y_d を分解して得られた G と W とに基づいて、診断対象の軸受 106 が教師基底に対応する状態であるか否かを診断する。これにより、診断システムは、軸受 106 が予め定められた状態であるか否かを適切に診断できる。

[0277] また、診断システムは、自己相関行列 R の固有値のうち一部の固有値を用いることで、軸受 106 の診断に有用な成分がより多く残り、有用でない成分がより残らないように、計測データを近似する修正された自己回帰モデルの係数 α を決定する。診断システムは、このような係数 α を用いて、軸受 106 の診断を行うことで、様々な周波数域の信号成分を含んだ信号を用いて診断を行う場合に比べて、より精度よく軸受 106 の診断を行うことができる。

[0278] (変形例 1)

本実施形態では、診断システムは、鉄道台車の軸受 106 の状態診断を行うこととした。しかし、診断システムは、歯車等の回転体、振動子等の振動体、バネ等の伸縮体、生物の心臓等の周期的な運動を行う他の物体についての状態を診断することとしてもよい。

[0279] (変形例 2)

本実施形態では、 m は、予め設定された 500 という数であるとした。しかし、診断対象に応じて実験を行う等して適切に計測データを近似できる過

去のデータの数を特定し、特定した数を m の値としてもよい。例えば、情報処理装置 1800 は、診断対象から計測された計測データについて、ある時刻の計測データを、その時刻よりも過去の計測データを複数用いて自己回帰モデル等を利用して近似して、近似した値とその時刻の計測データとの差分が設定された閾値未満となる場合の近似に用いられた過去の計測データの数を、 m として決定してもよい。

[0280] (変形例 3)

本実施形態では、情報処理装置 1800 は、使用固有値数 s を 3 とした。しかし、情報処理装置 1800 は、以下のようにして、使用固有値数 s の値を決定してもよい。即ち、情報処理装置 1800 は、まず、自己相関行列 R の固有値全ての合計値を求める。そして、情報処理装置 1800 は、自己相関行列 R の固有値のうち、最大のものから a 個の合計が、求めた合計値の設定された割合（例えば 90%）以上となる a のうち、最小のものを使用固有値数 s として決定してもよい。

[0281] (変形例 4)

本実施形態では、情報処理装置 1800 は、自己相関行列 R の固有値のうち、最大のものから、使用固有値数 s 個の固有値を用いて、修正された自己回帰モデルにおける係数 α を決定することとした。しかし、情報処理装置 1800 は、自己相関行列 R の固有値のうち、任意の s 個の固有値を用いて、修正された自己回帰モデルにおける係数 α を決定することとしてもよい。例えば、情報処理装置 1800 は自己相関行列 R の固有値のうち、最大のものと、3 つ目に大きいものと、の 2 つを利用して、修正された自己回帰モデルにおける係数 α を決定することとしてもよい。

[0282] (変形例 5)

本実施形態では、式 19 に示す行列 Y の各列には、複数の状態の軸受 106 に対応する計測データから決定された修正された自己回帰モデルにおける係数 α が、状態毎に、 q 個ずつ格納されることとした。しかし、行列 Y の各列には、複数の状態の軸受 106 に対応する計測データから決定された修正

された自己回帰モデルにおける係数 α が、状態毎に、異なる数ずつ格納されることとしてもよい。

[0283] 本実施形態では、診断システムは、行列 Y を、同じ状態の軸受106に対応する係数 α を格納する列が連続するように、生成した。しかし、診断システムは、同じ状態の軸受106に対応する係数 α を格納する列が連続しないように、行列 Y を生成してもよい。

[0284] 本実施形態では、診断システムは、各列に各状態の軸受106に対応する係数 α が格納された行列 Y を生成し、行列 Y を非負値行列因子分解により学習することで、各状態の軸受106に対応する係数 α の代表的なパターンを特定した。しかし、診断システムは、例えば、学習データを取得する際の処理と同様の処理で、ある状態の軸受106に対応する係数 α を複数決定し、決定した複数の係数 α の平均を求めることにより学習することで、求めた平均の係数が示すパターンを、その状態の軸受106に対応する係数 α の代表的なパターンとして特定してもよい。

[0285] (変形例6)

本実施形態では、診断部1850は、 Y_d の分解により求めた G と W とに基づいて、図21のS2116で説明した方法で軸受106の診断を行うこととした。しかし、診断部1850は、他の方法で、診断対象の軸受106の状態が教師基底に対応する状態であるか否かを診断してもよい。

[0286] 例えば、診断部1850は、以下のようにしてもよい。即ち、診断部1850は、 G の各要素について、偏差を求めて、偏差が小さいものから予め定められた数を特定し、特定した G の要素の平均値を求める。予め定められた数は、例えば、 G の全要素の70%の数（本実施形態では、140）である。また、診断部1850は、 W の各要素について、偏差を求めて、偏差が小さいものから予め定められた数を特定し、特定した W の要素の平均値を求める。予め定められた数は、例えば、 G の全要素の70%の数（本実施形態では、140）である。そして、診断部1850は、求めた G の要素の平均値が W の要素の平均値よりも予め定められた閾値以上大きい場合、診断対象の

軸受 1 0 6 が教師基底に対応する状態であると診断する。一方、診断部 1 8 5 0 は、求めた G の要素の平均値が W の要素の平均値よりも予め定められた閾値以上大きくない場合、診断対象の軸受 1 0 6 が教師基底に対応する状態でないと診断する。

[0287] また、診断部 1 8 5 0 は、以下のようにしてもよい。即ち、診断部 1 8 5 0 は、G の各要素のうち値が中間の予め定められた数の要素の平均値を求める。予め定められた数は、例えば、G の全要素の 7 0 % の数（本実施形態では、1 4 0）である。また、診断部 1 8 5 0 は、W の各要素のうち値が中間の予め定められた数の要素の平均値を求める。そして、診断部 1 8 5 0 は、求めた G の要素の平均値が W の要素の平均値よりも予め定められた閾値以上大きい場合、診断対象の軸受 1 0 6 が教師基底に対応する状態であると診断する。一方、診断部 1 8 5 0 は、求めた G の要素の平均値が W の要素の平均値よりも予め定められた閾値以上大きくない場合、診断対象の軸受 1 0 6 が教師基底に対応する状態でないと診断する。

[0288] （変形例 7）

本実施形態では、データ行列 Y_d から抽出される、抽出基底に属する基底ベクトルの数（抽出基底行列 Q の列数、抽出重み行列 W の行数）を 1 とした。ただし、データ行列 Y_d から抽出される、抽出基底に属する基底ベクトルの数を 2 以上としてもよい。その場合、S 2 1 1 6 では、診断部 1 8 5 0 は、以下のようにしてもよい。

[0289] 即ち、診断部 1 8 5 0 は、診断部 1 8 5 0 は、G と、W の各行それぞれと、の各列について、要素同士を比較して、何れが大きいかを特定する。そして、診断部 1 8 5 0 は、G の要素が最も大きい列の数が、予め定められた閾値以上である場合、診断対象の軸受 1 0 6 の状態が、教師基底に対応する状態であると診断する。一方、診断部 1 8 5 0 は、G の要素が最も大きい列の数が、予め定められた閾値未満である場合、診断対象の軸受 1 0 6 の状態が、教師基底に対応する状態ではないと診断する。

[0290] （変形例 8）

本実施形態では、診断システムは、各列に係数 α のパターンを示す非負値のデータを格納するように行列 Y_d を生成した。ただし、他の例として、診断システムは、各列ではなく各行に係数 α のパターンを示す非負値のデータを格納するように行列 Y_d を生成してもよい。その場合、診断システムは、行列 Y_d を、 $Y_d = G^T F^T + W^T Q^T$ のように、分解すればよい。その場合、診断システムは、コスト関数 J_d として、式39における「 $F G + Q W - Y_d$ 」の部分を「 $G^T F^T + W^T Q^T - Y_d$ 」に置き換えた関数を用いればよい。

[0291] (変形例9)

本実施形態では、診断システムは、診断対象の軸受106が疵のない正常な状態であるか否かを診断することとした。ただし、診断システムは、診断対象の軸受106が他の状態（例えば、外輪に特定の疵の有る状態、内輪に疵の有る状態、転動体に疵の有る状態等）であるか否かを診断することとしてもよい。

[0292] (変形例10)

本実施形態では、診断システムは、式39で表される関数 J_d を、コスト関数として用いることとした。ただし、診断システムは、 G 、 Q 、 W の更新の指標となる関数であれば、他の関数をコスト関数として用いてもよい。例えば、診断システムは、式39で表される関数 J_d の逆数で表される関数をコスト関数として用いてもよい。その場合、診断システムは、コスト関数の値を適正化（最大化）するため、 G 、 Q 、 W の値をコスト関数の値が増大するように更新していくこととなる。そして、診断システムは、コスト関数が収束したら、コスト関数の値が適正化（最大化）できたとして、その際の G 、 Q 、 W を、 Y_d の分解結果として取得する。

[0293] ここで、最小化とは、コスト関数 J_d の値を最小化する解を導出する最適化アルゴリズムにおいてコスト関数 J_d を最小化することを指す。即ち、最小化とは、コスト関数の値の厳密な最小値を求めるものに限られない。このことは、最大化についても同じである。

[0294] (変形例11)

本実施形態では、診断システムは、図20の学習処理において、行列Pと行列Aとの更新前後で、コスト関数Jの値の変動が予め定められた閾値以下となることが、予め定められた回数連続するまで、行列Pと行列Aとの更新を繰り返した。これにより、診断システムは、コスト関数Jが最小化した際の行列Pと行列Aとを求めることとした。ただし、他の例として、診断システムは、以下のようにしてもよい。

[0295] 即ち、診断システムは、式30を用いて行列Pを更新し、式34、式35を用いて行列Aを更新することを繰り返す。そして、診断システムは、各更新段階において、更新後の行列P及び行列Aから、それぞれ更新前の行列P及び行列Aを引いた差である行列 ΔP 及び行列 ΔA を求める。診断システムは、行列 ΔP 及び行列 ΔA それぞれのフロベニウスノルムを計算する。診断システムは、各更新段階における行列 ΔP 及び行列 ΔA のフロベニウスノルムの、それぞれ最初の更新段階における行列 ΔP 及び行列 ΔA のフロベニウスノルムに対する比が、予め定められた閾値以下となる更新段階をもって、コスト関数Jの値が収束したとする。そして、診断システムは、その際の行列Aと行列Pとをコスト関数Jを最小化させる行列として求める。

[0296] (変形例12)

本実施形態では、診断システムは、図21の診断処理において、G、Q、Wの更新前と更新後とでコスト関数Jの値の変動が予め定められた閾値以下となることが、予め定められた回数連続するまで、G、Q、Wそれぞれの更新を繰り返すことで、コスト関数Jの値が収束した際のG、Q、Wを求めることとした。ただし、他の例として、診断システムは、以下のようにしてもよい。

[0297] 即ち、診断システムは、式46を用いたGの更新と、式52を用いたQの更新と、式58を用いたWの更新と、を繰り返し行う。診断システムは、各更新段階において、更新後のG、Q、Wから、それぞれ更新前のG、Q、Wを引いた差である ΔG 、 ΔQ 、 ΔW について、これらの行列のフロベニウスノルムを計算する。診断システムは、各更新段階における ΔG 、 ΔQ 、 ΔW

のフロベニウスノルムの、それぞれ最初の更新段階における ΔG 、 ΔQ 、 ΔW のフロベニウスノルムに対する比が、予め定められた閾値以下となる更新段階をもって、コスト関数 J_d の値が収束したとしてもよい。そして、診断システムは、 J_d が収束した際の G 、 Q 、 W を、コスト関数 J_d を最小化させる行列として求めてもよい。

[0298] <実施形態2>

本実施形態では、コスト関数 J_d における係数 δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 のうちの少なくとも1つが0以外の値である場合の処理について説明する。

[0299] (実験4)

発明者らは、実験3と同様の実験状況において、以下のような実験を行った。即ち、疵のない正常な状態にある軸受106と、図13Cに示す外輪に微小な疵のある状態の軸受106と、について実験3で説明した実験と同様の実験を、式39に示すコスト関数 J_d の δ_1 、 δ_2 、 ε_2 それぞれについて、値を変更しつつ行った。本実験では、使用固有値数 s は、3とした。また、 m は、500とした。

[0300] 本実験では、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 それぞれを0として、 δ_1 の値を、0、0.00025、0.0005、0.00075、0.001それぞれに変更しつつ、実験3で説明した実験と同様の実験を行った。

[0301] また、本実験では、 δ_1 、 ε_1 、 ε_2 それぞれを0として、 δ_2 の値を、0、0.00005、0.00025、0.0005それぞれに変更しつつ、実験3で説明した実験と同様の実験を行った。

[0302] また、本実験では、 δ_1 、 δ_2 、 ε_1 それぞれを0として、 ε_2 の値を、0、0.025、0.05、0.1それぞれに変更しつつ、実験3で説明した実験と同様の実験を行った。

[0303] δ_2 、 ε_1 、 ε_2 それぞれを0として、 δ_1 の値を変更しつつ、実験3で説明した実験と同様の実験を行った結果について説明する。 δ_1 は、コスト関数 J_d における教師重み行列 G のスパース性の向上に関する制約の項に係る係数である。以下では、スパース性の向上に関する制約を、スパース制約とする。

即ち、 δ_1 の値は、 Y_d の分解におけるGのスパース制約の度合を示す係数である。

[0304] 図22A～図22Eに、外輪に微小な疵のある状態の軸受106についての実験結果を示す。また、図23A～図23Eに、正常な状態の軸受106についての実験結果を示す。図22A～図22E、および図23A～図23Eの各グラフは、データ行列 Y_d の分解の結果求めたGとWとを示すグラフである。横軸は、GとWとの各列のインデックスを示す。縦軸は、GとWとの対応する列の要素の値を示す。

[0305] 図22A、図23Aのグラフは、 δ_1 が0の場合の実験結果を示すグラフである。図22B、図23Bのグラフは、 δ_1 が0.00025の場合の実験結果を示すグラフである。図22C、図23Cのグラフは、 δ_1 が0.0005の場合の実験結果を示すグラフである。図22D、図23Dのグラフは、 δ_1 が0.00075の場合の実験結果を示すグラフである。図22E、図23Eのグラフは、 δ_1 が0.001の場合の実験結果を示すグラフである。

[0306] 図22A～図22Eの各グラフを見ると、 δ_1 が0.00025、0.0005、0.00075それぞれの場合、 δ_1 が0の場合に比べて、Gの値とWの値とは、より分離しており、正常な状態と微小な疵のある状態との違いがより表れており、診断により有利になっていることが見て取れる。ただし、 δ_1 が0.001の場合、 δ_1 が0.00075の場合に比べて、Gの値とWの値とは、より近くなっており、正常な状態と微小な疵のある状態との違いが小さくなり、診断に不利になっていしまっていることが見て取れる。

[0307] 図23A～図23Eの各グラフを見ると、 δ_1 が0.00025、0.0005、0.00075、0.001それぞれの場合で、Gの値とWの値との分離の度合に顕著な違いが表れていないことが見て取れる。

[0308] 発明者らは、図22A～図22E、図23A～図23Eの各グラフから、 δ_1 が0.00025、0.0005、0.00075の場合において、軸受106の診断により有利であることを見出した。これにより、発明者らは、 δ_1 の適切な値は、0.00025以上0.00075以下の範囲の値である

との知見を得た。

- [0309] 次に、 δ_1 、 ε_1 、 ε_2 それぞれを0として、 δ_2 の値を変更しつつ、求まった実験結果について説明する。 δ_2 は、コスト関数 J^d における抽出重み行列 W のスパース制約の項に係る係数である。即ち、 δ_2 の値は、 Y_d の分解における W のスパース制約の度合を示す係数である。
- [0310] 図24A～図24Dに、外輪に微小な疵のある状態の軸受106についての実験結果を示す。また、図25A～図25Dに、正常な状態の軸受106についての実験結果を示す。図24A～図24D、図25A～図25Dの各グラフは、データ行列 Y_d の分解の結果求まった G と W とを示すグラフである。横軸は、 G と W との各列のインデックスを示す。縦軸は、 G と W との対応する列の要素の値を示す。
- [0311] 図24A、図25Aのグラフは、 δ_2 が0の場合の実験結果を示すグラフである。図24B、図25Bのグラフは、 δ_2 が0.00005の場合の実験結果を示すグラフである。図24C、図25Cのグラフは、 δ_2 が0.00025の場合の実験結果を示すグラフである。図24D、図25Dのグラフは、 δ_2 が0.0005の場合の実験結果を示すグラフである。
- [0312] 図24A～図24Dの各グラフを見ると、 δ_2 が0.00005の場合、 δ_2 が0の場合と同等に、 G の値と W の値とが分離していることが見て取れる。また、 δ_2 が0.00025、0.0005の場合、 δ_2 が0、0.00005の場合に比べて、 G の値と W の値とがより近くなっており、正常な状態と微小な疵のある状態との違いが小さくなり、診断に不利になっていしまっていることが見て取れる。
- [0313] 図25A～図25Dの各グラフを見ると、 δ_2 が0、0.00005それぞれの場合で、 G の値と W の値との分離の度合に顕著な違いが表れていないことが見て取れる。また、 δ_2 が0.00025、0.0005それぞれの場合で、 δ_2 が0、0.00005の場合に比べて、 G の値と W の値とがより分離してしまっており、正常な状態同士で違いが大きくなり、診断に不利になっていしまっていることが見て取れる。

- [0314] 発明者らは、図24A～図24B、図25A～図25Bの各グラフから、 δ_2 が0.00025、0.0005それぞれの場合において、軸受106の診断により不利であることを見出した。これにより、発明者らは、 δ_2 の適切な値は、0以上0.00005以下（好ましくは0以上0.00005未満）の範囲の値であるとの知見を得た。
- [0315] 次に、 δ_1 、 δ_2 、 ε_1 それぞれを0として、 ε_2 の値を変更しつつ、求まった実験結果について説明する。 ε_2 は、コスト関数 J_d における教師基底と抽出基底との直交性の向上に関する制約の項に係る係数である。以下では、直交性の向上に関する制約を、直交制約とする。即ち、 ε_2 の値は、 Y_d の分解におけるFとQとの直交制約の度合を示す係数である。
- [0316] 図26A～図26Dに、外輪に微小な疵のある状態の軸受106についての実験結果を示す。また、図27A～図27Dに、正常な状態の軸受106についての実験結果を示す。図26A～図26D、図27A～図27Dの各グラフは、データ行列 Y_d の分解の結果求まったGとWとを示すグラフである。横軸は、GとWとの各列のインデックスを示す。縦軸は、GとWとの対応する列の要素の値を示す。
- [0317] 図26A、図27Aのグラフは、 ε_2 が0の場合の実験結果を示すグラフである。図26B、図27Bのグラフは、 ε_2 が0.025の場合の実験結果を示すグラフである。図26C、図27Cのグラフは、 ε_2 が0.05の場合の実験結果を示すグラフである。図26D、図27Dのグラフは、 ε_2 が0.1の場合の実験結果を示すグラフである。
- [0318] 図26A～図26Dの各グラフを見ると、 ε_2 が0.05、0.1の場合、 ε_2 が0、0.025の場合に比べて、Gの値とWの値とがより近くなっており、正常な状態と微小な疵のある状態との違いが小さくなり、診断に不利になっていしまっていることが見て取れる。
- [0319] 図27A～図27Dの各グラフを見ると、 ε_2 が0.1の場合、 ε_2 が0、0.025、0.05の場合に比べて、Gの値とWの値とがより分離してしまっており、正常な状態同士で違いが大きくなり、診断に不利になっていし

まっていることが見て取れる。

[0320] 発明者らは、図26A～図26D、図27A～図27Dの各グラフから、 ε_2 が0.05、0.1それぞれの場合において、軸受106の診断により不利であることを見出した。これにより、発明者らは、 ε_2 の適切な値は、0以上0.025以下の範囲の値であるとの知見を得た。

[0321] (診断処理)

本実施形態の診断システムのシステム構成は、実施形態1と同様である。また、情報処理装置1800のハードウェア構成及び機能構成についても、実施形態1と同様である。

[0322] 本実施形態の処理は、診断システムが δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 の全てが0のコスト関数 J_d の代わりに δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 のうちの少なくとも1つが0でないコスト関数 J_d を用いること以外は、図20、図21で説明した実施形態1の処理と同様である。

[0323] 本実施形態では、 δ_1 の値は、実験により見出された適切な値の範囲（0.00025以上0.00075以下の範囲）から予め定められた値（例えば、0.00025、0.0005、0.00075等）である。また、 δ_2 の値は、実験により見出された適切な値の範囲（0以上0.00005以下の範囲）から予め定められた値（例えば、0、0.000025、0.00005等）である。また、 ε_2 の値は、実験により見出された適切な値の範囲（0以上0.025以下の範囲）から予め定められた値（例えば、0、0.01、0.025等）である。また、 ε_1 の値は、予め定められた値（例えば、0等）である。

[0324] δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 のうちの少なくとも1つが0でないコスト関数 J_d は、 δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 のうちの0でない係数に対応する制約を付加した関数となる。そのため、 δ_1 、 δ_2 、 ε_1 、 ε_2 のうちの少なくとも1つが0でないコスト関数 J_d は、教師重み行列Gについてのスパース制約、抽出重み行列についてのスパース制約、抽出基底の正規直交制約、および教師基底と抽出基底との間の直交制約のうちの少なくとも1つを示す。

[0325] (まとめ)

本実施形態の処理により、診断システムは、診断対象の軸受 106 が予め定められた状態であるか否かをより精度よく診断できる。尚、理論上は、式 38 に示す分解の自由度を低減させるために、コスト関数に抽出基底の正規直交制約と教師基底と抽出基底との間の直交制約とを付加するのが好ましい。本実施形態においても、実施形態 1 で説明した変形例を採用することができる。

[0326] <その他の実施形態>

本実施形態では、情報処理装置 1800 は、補助記憶装置 1902 に記憶されたプログラムを実行することで、図 20、図 21 の処理を実現することとした。しかし、情報処理装置 1800 は、外付けの記憶媒体や外部の記憶サーバ等に記憶されたプログラムを実行することで、図 20、図 21 の処理を実現することとしてもよい。

[0327] また、例えば、上述した情報処理装置 1800 の機能の一部又は全てをハードウェアとして情報処理装置 1800 に実装してもよい。

また、以上説明した本発明の実施形態は、何れも本発明を実施するにあたっての具体化の例を示したものに過ぎず、これらによって本発明の技術的範囲が限定的に解釈されてはならないものである。即ち、本発明はその技術思想、またはその主要な特徴から逸脱することなく、様々な形で実施することができる。

産業上の利用可能性

[0328] 本発明は、例えば、周期的な運動を行う物体の状態を診断することに利用することができる。

請求の範囲

[請求項1] 周期的な運動を行う物体の前記周期的な運動に係る計測データを取得する取得手段と、

前記取得手段により取得された前記計測データに基づいて、修正された自己回帰モデルにおける係数である修正係数を、予め定められた個数だけ決定する決定手段と、

前記決定手段により決定された前記個数の前記修正係数それぞれのパターンを示す非負値のデータが格納されたデータ行列を、教師基底行列と、教師重み行列と、抽出基底行列と、抽出重み行列と、に分解する分解手段と、

前記分解手段により前記データ行列が分解された前記教師重み行列と、前記抽出重み行列と、に基づいて、前記物体が前記予め定められた状態であるか否かを診断する診断手段と、
を有し、

前記修正された自己回帰モデルは、前記計測データの実績値と、前記実績値に対する前記修正係数と、を用いて、前記計測データの予測値を表す式であり、

前記決定手段は、前記計測データから導出される自己相関行列を特異値分解することで導出される前記自己相関行列の固有値を対角成分とする対角行列と、前記自己相関行列の固有ベクトルを列成分とする直交行列と、から導出される第1の行列を係数行列とし、前記計測データから導出される自己相関ベクトルを定数ベクトルとする方程式を用いて、前記修正係数を決定し、

前記自己相関ベクトルは、時差が1から前記修正された自己回帰モデルで用いられる前記実績値の数である m までの前記計測データの自己相関を成分とするベクトルであり、

前記自己相関行列は、時差が0から $m-1$ までの前記計測データの自己相関を成分とする行列であり、

前記第 1 の行列は、1 以上且つ m 未満の設定された数である s に対して、前記自己相関行列の s 個の固有値と前記対角行列とから導出される第 2 の行列 Σ_s と、前記 s 個の固有値と前記直交行列とから導出される第 3 の行列 U_s と、から導出される行列 $U_s \Sigma_s U_s^T$ であり、

前記第 2 の行列は、前記対角行列の部分行列であって、前記 s 個の固有値を対角成分とする行列であり、

前記第 3 の行列は、前記直交行列の部分行列であって、前記 s 個の固有値に対応する固有ベクトルを列成分ベクトルとする行列であり、

前記教師基底行列は、教師基底を格納する非負値の行列であり、

前記教師重み行列は、前記教師基底の重みを示す非負値の行列であり、

前記抽出基底行列は、抽出基底を格納する非負値の行列であり、

前記抽出重み行列は、前記抽出基底の重みを示す非負値の行列であり、

前記教師基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、

前記抽出基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターン以外の前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、

前記分解手段は、前記教師基底行列と前記教師重み行列との積と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との積との和と、前記データ行列と、の差分に関するコスト関数の値を適正化するように、前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との値を更新することで、前記データ行列を、前記教師基底行列と前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列とに分解する情報処理装置。

[請求項2] 前記 s 個の固有値は、前記自己相関行列の固有値のうち、値が最大の固有値を含む請求項 1 記載の情報処理装置。

[請求項3] 前記 s 個の固有値は、前記自己相関行列の固有値の中から、値が大

きいものから順に選ばれた固有値である請求項 2 記載の情報処理装置。

[請求項4] 前記自己相関行列は、前記計測データの予測値と当該計測データの予測値に対応する時刻における前記計測データの実測値との二乗誤差を最小化する条件を示す条件式に含まれる行列である請求項 1 乃至 3 何れか 1 項記載の情報処理装置。

[請求項5] 前記コスト関数は、前記教師基底行列と前記教師重み行列との積と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との積との和と、前記データ行列と、の差分を評価する項と、前記教師重み行列のスパース性の向上に関する制約と、前記抽出重み行列のスパース性の向上に関する制約と、前記抽出基底の正規直交性の向上に関する制約と、前記教師基底と前記抽出基底との直交性の向上に関する制約と、のうちの少なくとも 1 つの制約を示す項とを含む請求項 1 乃至 4 何れか 1 項記載の情報処理装置。

[請求項6] 前記コスト関数の値の適正化は、前記コスト関数の値の最小化また最大化である請求項 1 乃至 5 何れか 1 項記載の情報処理装置。

[請求項7] 前記計測データは、前記物体の振動に係る計測データである請求項 1 乃至 6 何れか 1 項記載の情報処理装置。

[請求項8] 前記診断手段による診断の結果に係る情報を出力する出力手段を更に有する請求項 1 乃至 7 何れか 1 項記載の情報処理装置。

[請求項9] 前記物体は、鉄道台車に利用される軸受であり、
前記診断手段は、前記教師重み行列と、前記抽出重み行列と、に基づいて、前記物体の状態が、前記予め定められた状態である疵のない正常な状態であるか否かを診断する請求項 1 乃至 8 何れか 1 項記載の情報処理装置。

[請求項10] 情報処理装置が実行する情報処理方法であって、
周期的な運動を行う物体の前記周期的な運動に係る計測データを取得する取得ステップと、

前記取得ステップで取得された前記計測データに基づいて、修正された自己回帰モデルにおける係数である修正係数を、予め定められた個数だけ決定する決定ステップと、

前記決定ステップで決定された前記個数の前記修正係数それぞれのパターンを示す非負値のデータが格納されたデータ行列を、教師基底行列と、教師重み行列と、抽出基底行列と、抽出重み行列と、に分解する分解ステップと、

前記分解ステップでの分解により前記データ行列が分解された前記教師重み行列と、前記抽出重み行列と、に基づいて、前記物体が前記予め定められた状態であるか否かを診断する診断ステップと、
を含み、

前記修正された自己回帰モデルは、前記計測データの実績値と、前記実績値に対する前記修正係数と、を用いて、前記計測データの予測値を表す式であり、

前記決定ステップでは、前記計測データから導出される自己相関行列を特異値分解することで導出される前記自己相関行列の固有値を対角成分とする対角行列と、前記自己相関行列の固有ベクトルを列成分とする直交行列と、から導出される第1の行列を係数行列とし、前記計測データから導出される自己相関ベクトルを定数ベクトルとする方程式を用いて、前記修正係数を決定し、

前記自己相関ベクトルは、時差が1から前記修正された自己回帰モデルで用いられる前記実績値の数である m までの前記計測データの自己相関を成分とするベクトルであり、

前記自己相関行列は、時差が0から $m-1$ までの前記計測データの自己相関を成分とする行列であり、

前記第1の行列は、1以上且つ m 未満の設定された数である s に対して、前記自己相関行列の s 個の固有値と前記対角行列とから導出される第2の行列 Σ_s と、前記 s 個の固有値と前記直交行列とから導出

される第3の行列 U_s と、から導出される行列 $U_s \Sigma_s U_s^T$ であり、

前記第2の行列は、前記対角行列の部分行列であって、前記 s 個の固有値を対角成分とする行列であり、

前記第3の行列は、前記直交行列の部分行列であって、前記 s 個の固有値に対応する固有ベクトルを列成分ベクトルとする行列であり、

前記教師基底行列は、教師基底を格納する非負値の行列であり、

前記教師重み行列は、前記教師基底の重みを示す非負値の行列であり、

前記抽出基底行列は、抽出基底を格納する非負値の行列であり、

前記抽出重み行列は、前記抽出基底の重みを示す非負値の行列であり、

前記教師基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、

前記抽出基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターン以外の前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、

前記分解ステップでは、前記教師基底行列と前記教師重み行列との積と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との積との和と、前記データ行列と、の差分に関するコスト関数の値を適正化するように、前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との値を更新することで、前記データ行列を、前記教師基底行列と前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列とに分解する情報処理方法。

[請求項11]

周期的な運動を行う物体の前記周期的な運動に係る計測データを取得する取得ステップと、

前記取得ステップで取得された前記計測データに基づいて、修正された自己回帰モデルにおける係数である修正係数を、予め定められた個数だけ決定する決定ステップと、

前記決定ステップで決定された前記個数の前記修正係数それぞれの

パターンを示す非負値のデータが格納されたデータ行列を、教師基底行列と、教師重み行列と、前抽出基底行列と、抽出重み行列と、に分解する分解ステップと、

前記分解ステップでの分解により前記データ行列が分解された前記教師重み行列と、前記抽出重み行列と、に基づいて、前記物体が前記予め定められた状態であるか否かを診断する診断ステップと、を含むステップをコンピュータに実行させ、

前記修正された自己回帰モデルは、前記計測データの実績値と、前記実績値に対する前記修正係数と、を用いて、前記計測データの予測値を表す式であり、

前記決定ステップでは、前記計測データから導出される自己相関行列を特異値分解することで導出される前記自己相関行列の固有値を対角成分とする対角行列と、前記自己相関行列の固有ベクトルを列成分とする直交行列と、から導出される第1の行列を係数行列とし、前記計測データから導出される自己相関ベクトルを定数ベクトルとする方程式を用いて、前記修正係数を決定し、

前記自己相関ベクトルは、時差が1から前記修正された自己回帰モデルで用いられる前記実績値の数である m までの前記計測データの自己相関を成分とするベクトルであり、

前記自己相関行列は、時差が0から $m-1$ までの前記計測データの自己相関を成分とする行列であり、

前記第1の行列は、1以上且つ m 未満の設定された数である s に対して、前記自己相関行列の s 個の固有値と前記対角行列とから導出される第2の行列 Σ_s と、前記 s 個の固有値と前記直交行列とから導出される第3の行列 U_s と、から導出される行列 $U_s \Sigma_s U_s^T$ であり、

前記第2の行列は、前記対角行列の部分行列であって、前記 s 個の固有値を対角成分とする行列であり、

前記第3の行列は、前記直交行列の部分行列であって、前記 s 個の

固有値に対応する固有ベクトルを列成分ベクトルとする行列であり、

前記教師基底行列は、教師基底を格納する非負値の行列であり、

前記教師重み行列は、前記教師基底の重みを示す非負値の行列であり、

前記抽出基底行列は、抽出基底を格納する非負値の行列であり、

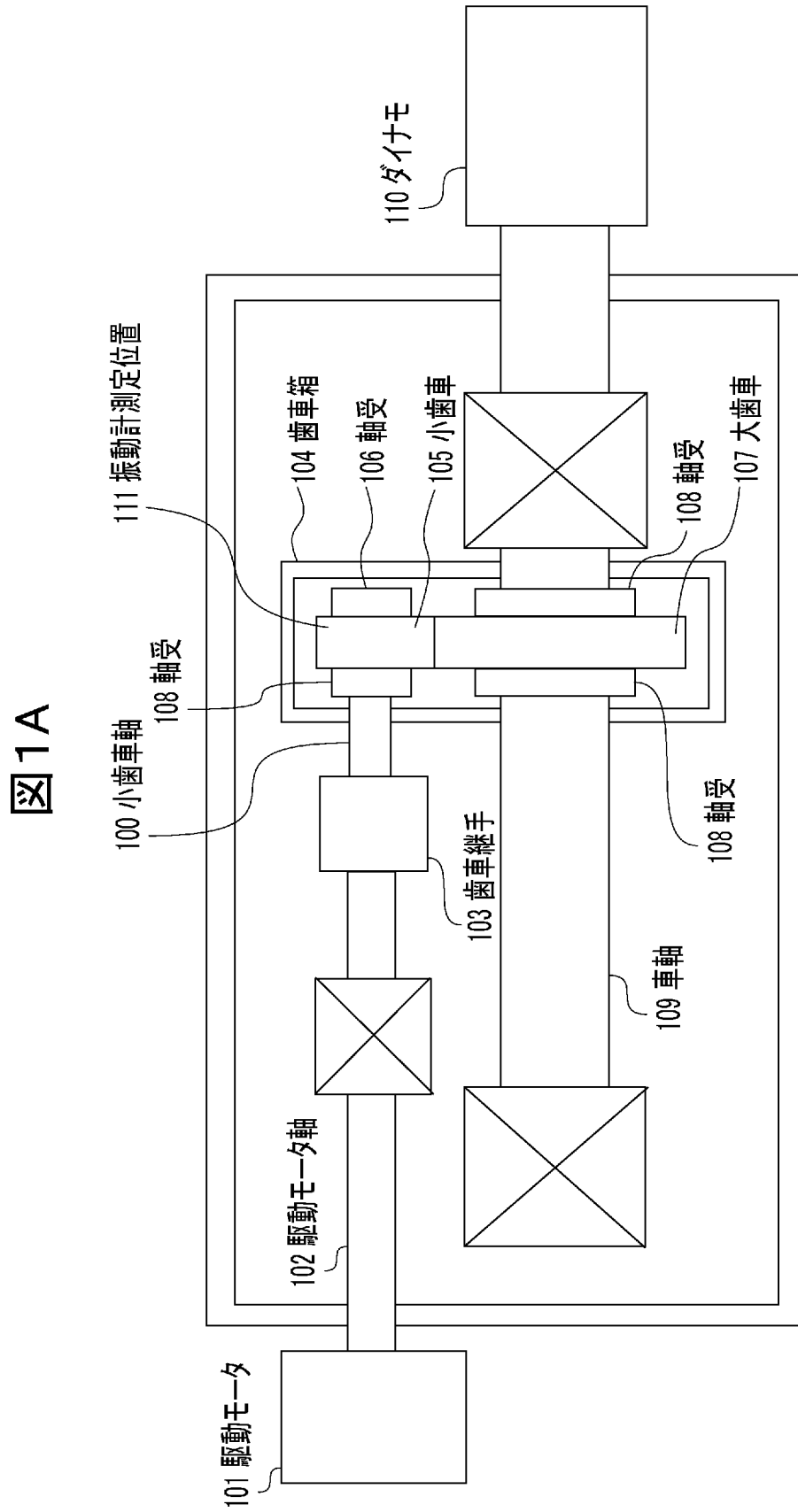
前記抽出重み行列は、前記抽出基底の重みを示す非負値の行列であり、

前記教師基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、

前記抽出基底は、前記物体の予め定められた状態に対応する前記修正係数のパターン以外の前記修正係数のパターンを示す基底ベクトルの集合であり、

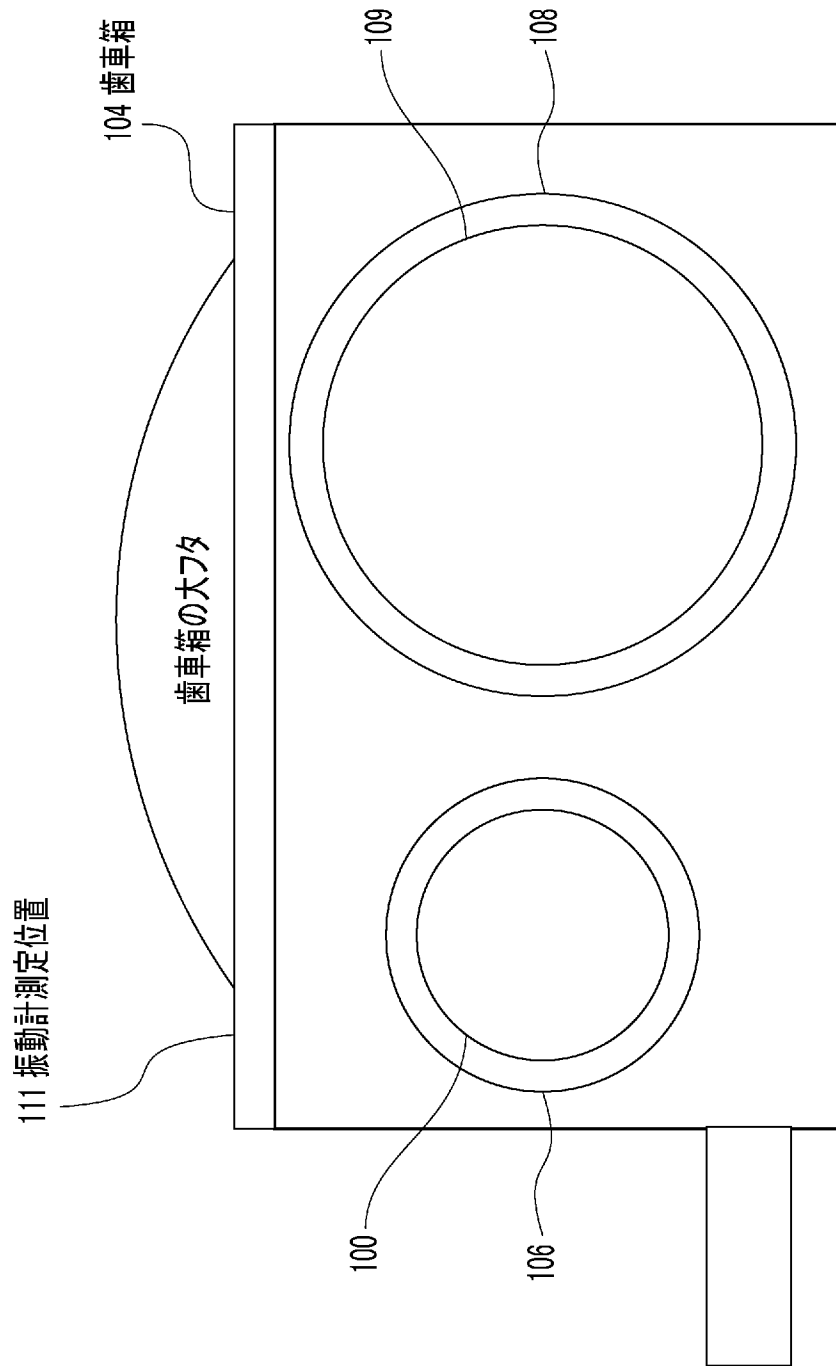
前記分解ステップでは、前記教師基底行列と前記教師重み行列との積と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との積との和と、前記データ行列と、の差分に関するコスト関数の値を適正化するように、前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列との値を更新することで、前記データ行列を、前記教師基底行列と前記教師重み行列と前記抽出基底行列と前記抽出重み行列とに分解するプログラム。

[図1A]



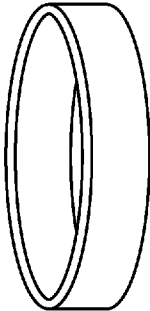
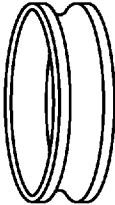
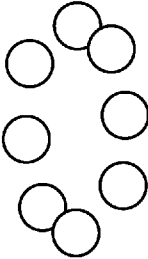
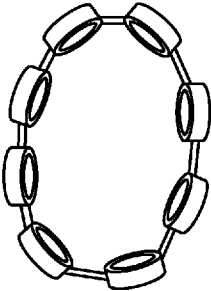
[図1B]

図1B



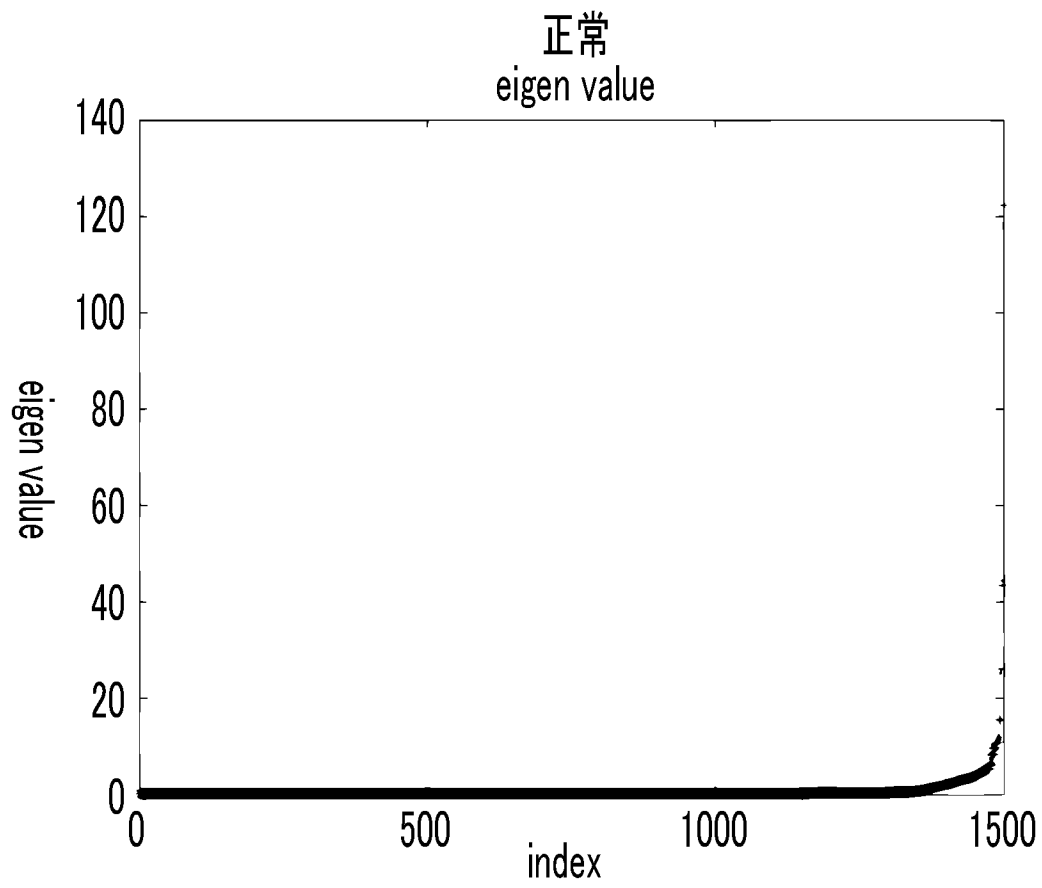
[図2]

図2

外輪	内輪	転動体	保持器
			

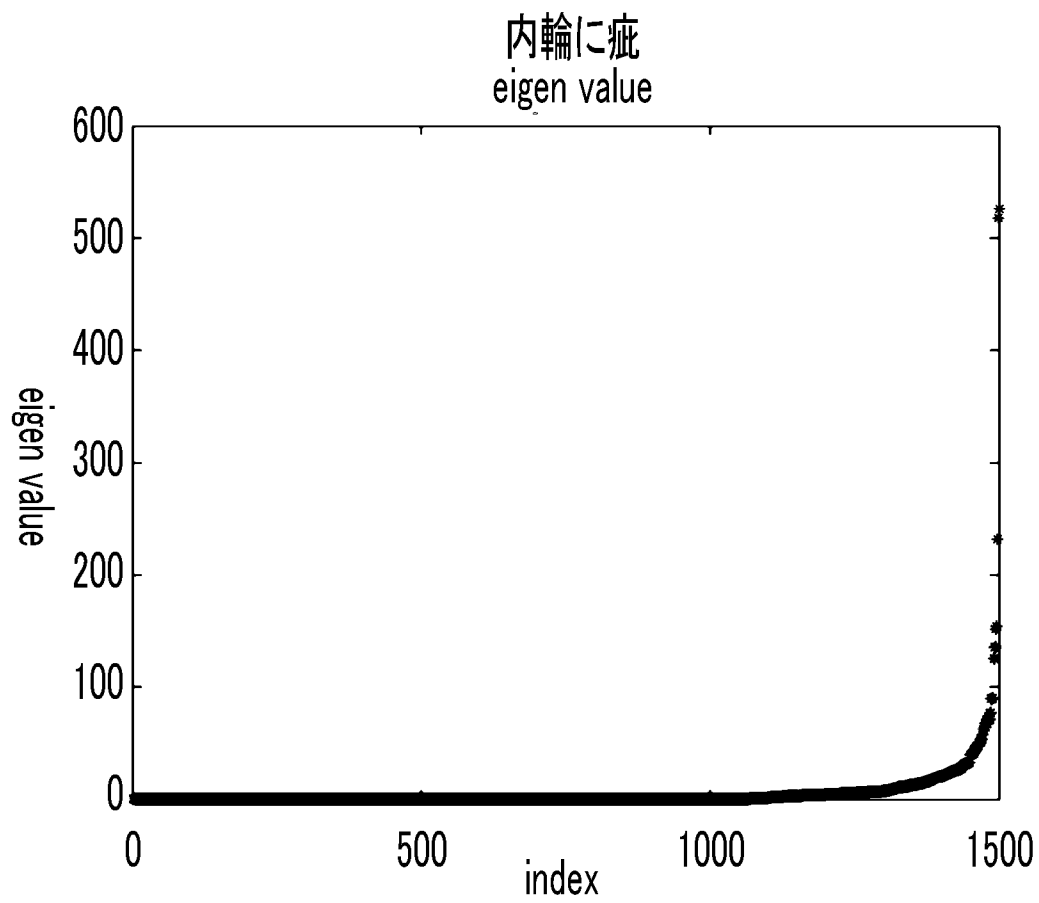
[図3A]

図3A



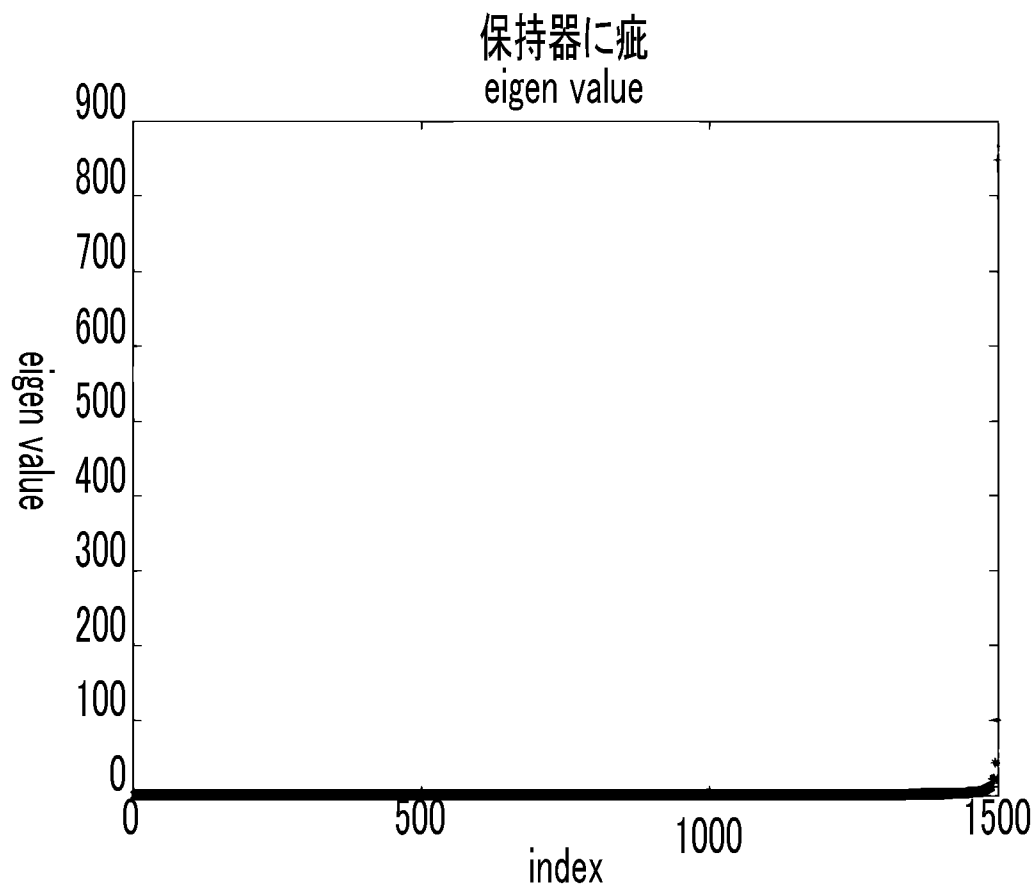
[図3B]

図3B



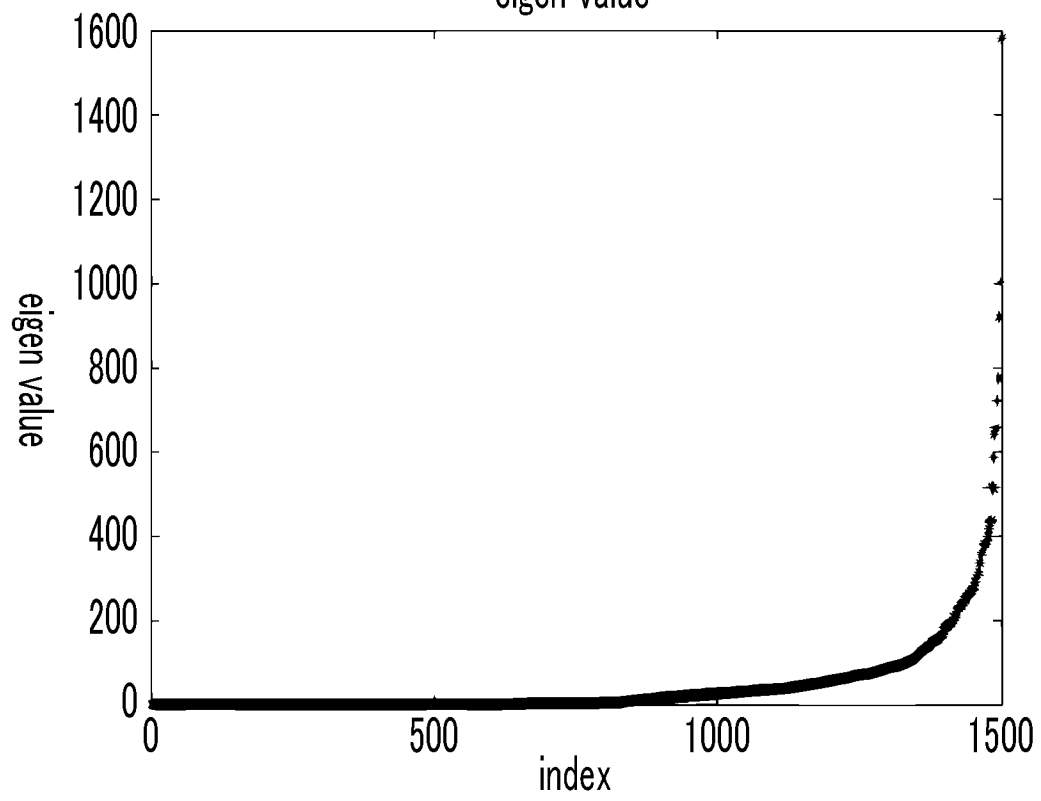
[図3C]

図 3C



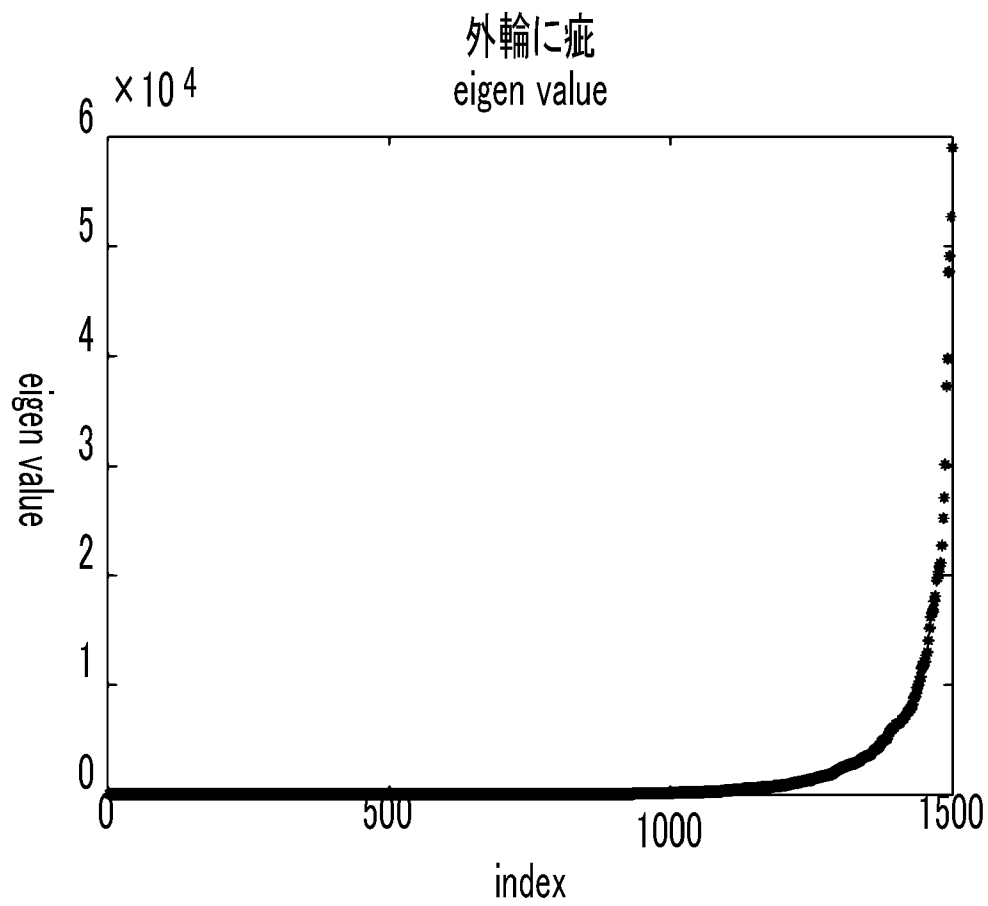
[図3D]

図3D

転動体に疵
eigen value

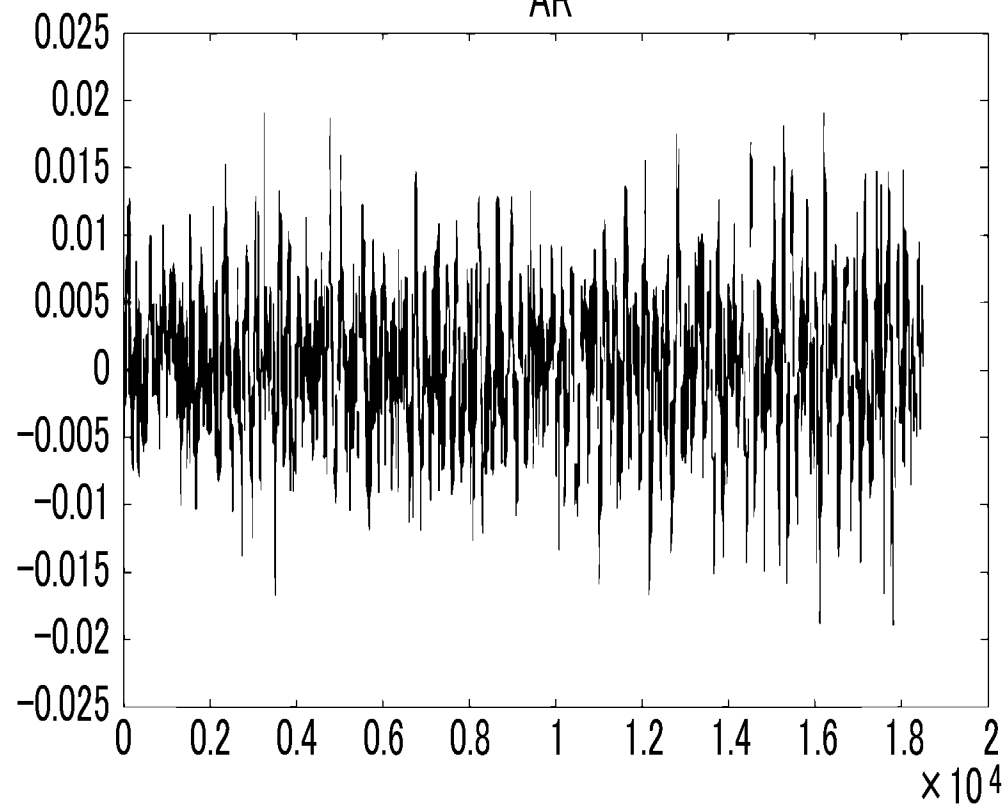
[図3E]

図3E



[図4A]

図4A

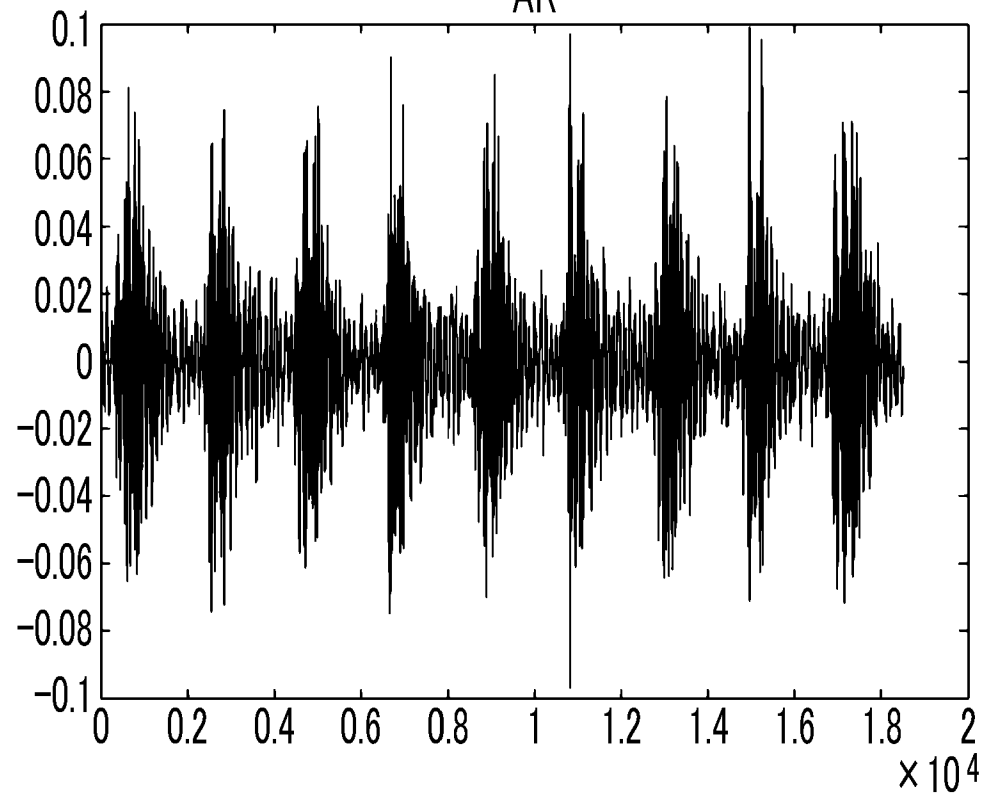
正常
AR

[図4B]

図4B

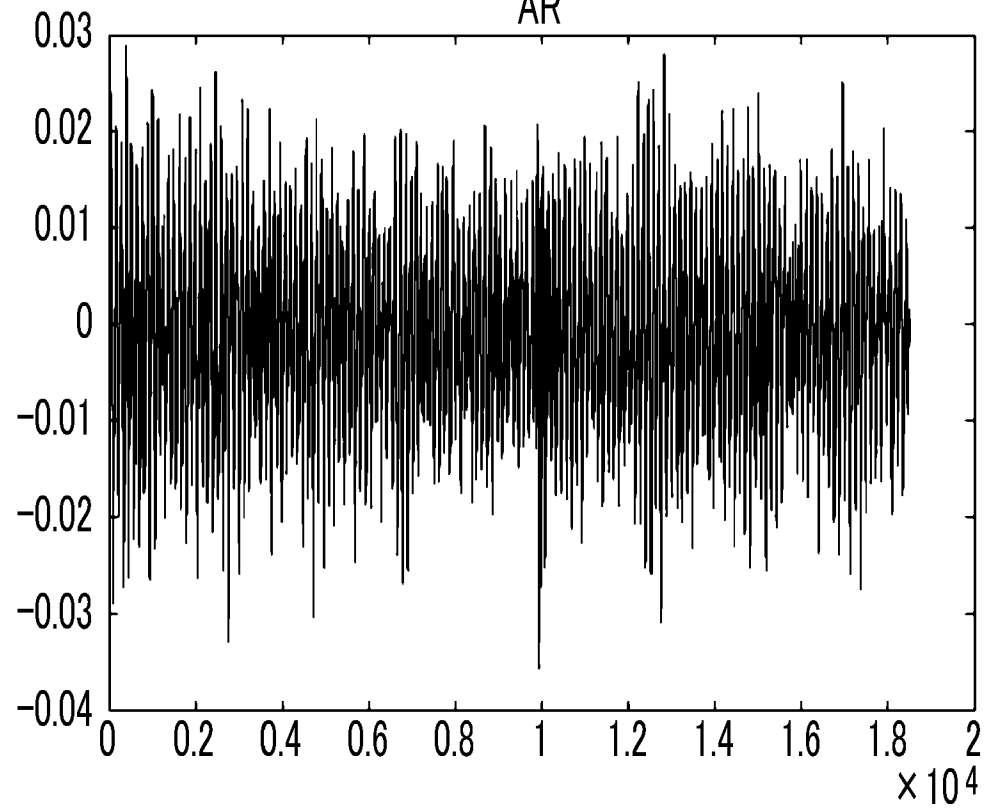
内輪に疵

AR



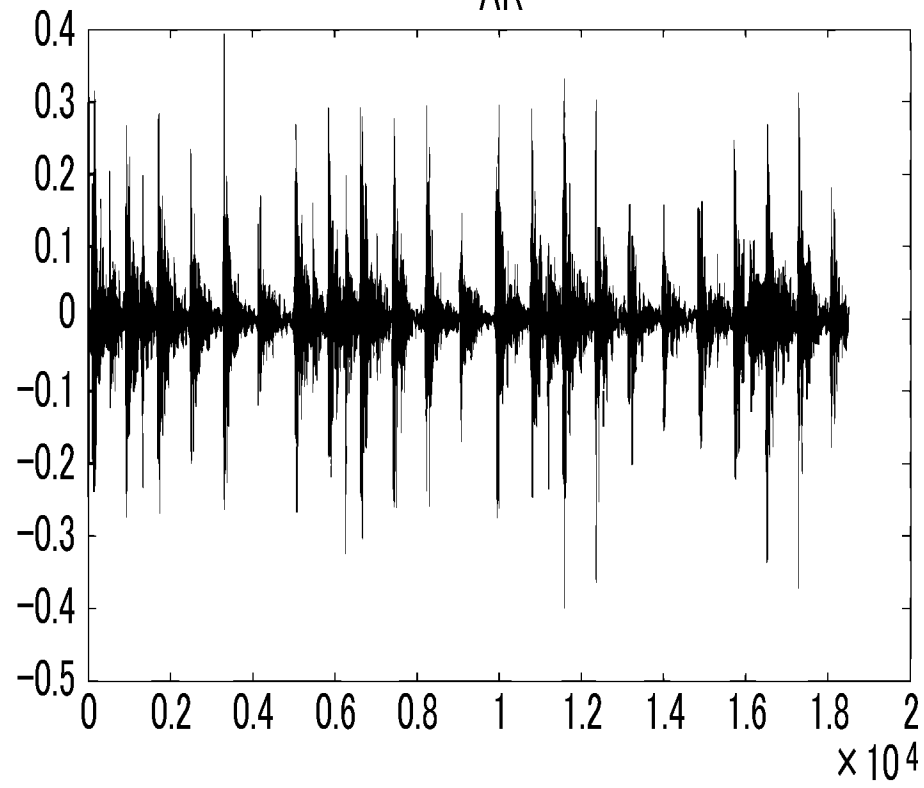
[図4C]

図4C

保持器に疵
AR

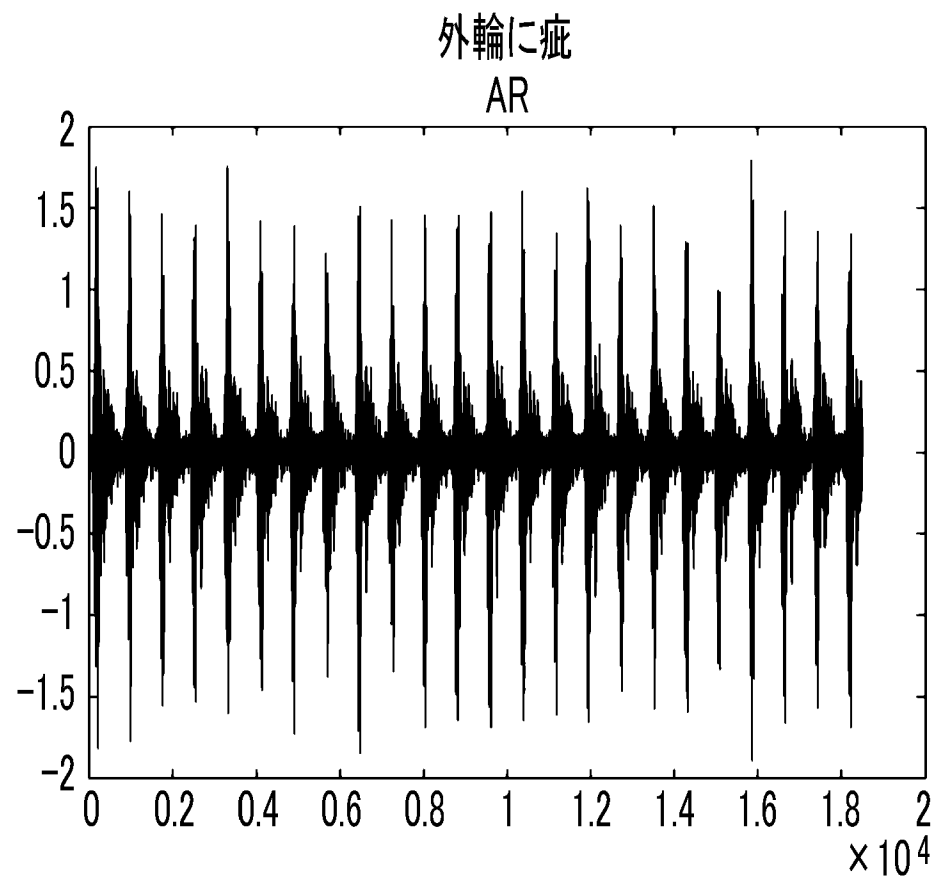
[図4D]

図4D

転動体に疵
AR

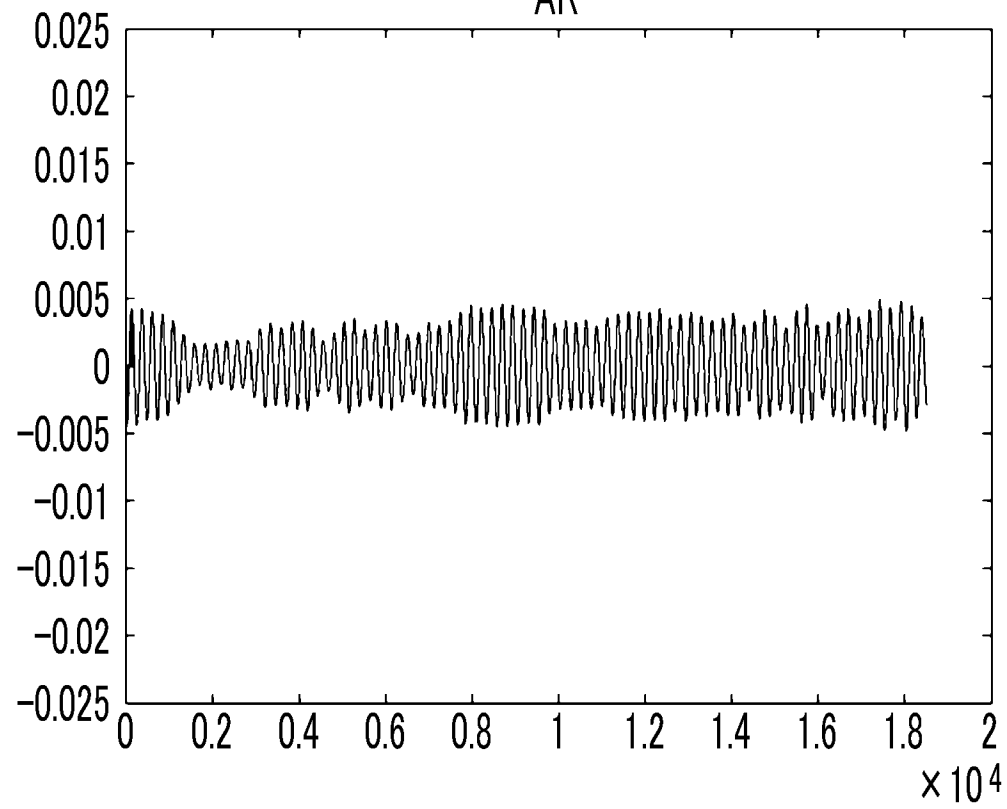
[図4E]

図4E



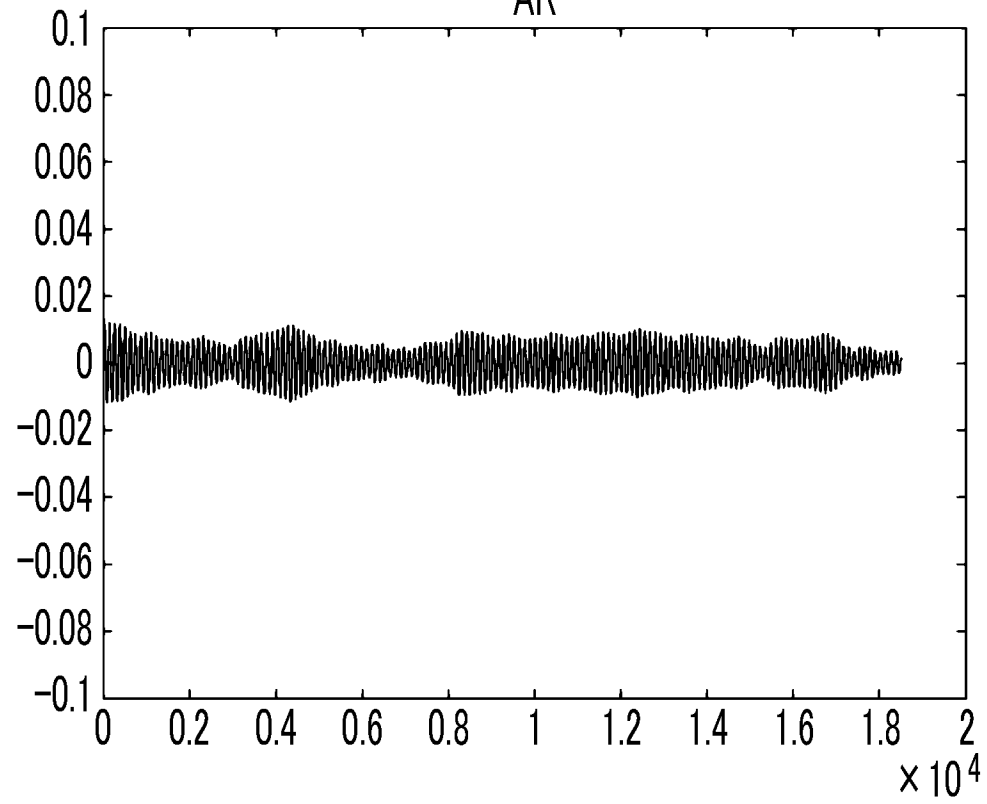
[図5A]

図5A

正常 $s=1$
AR

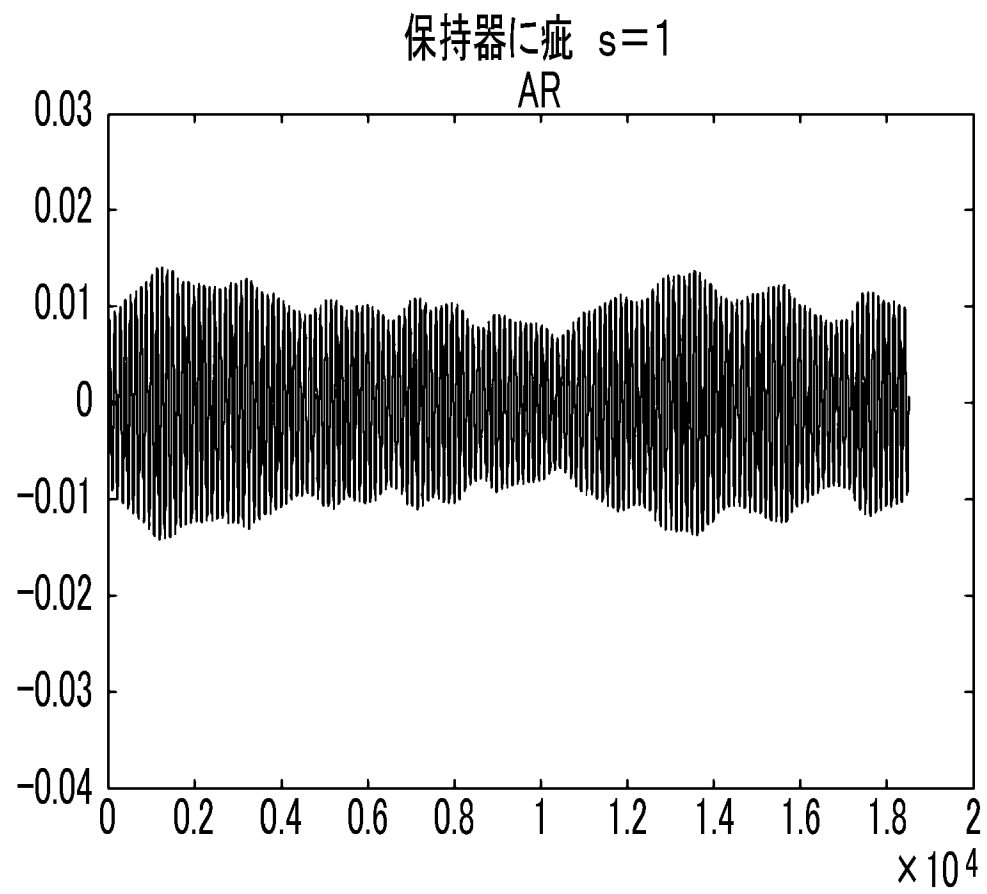
[図5B]

図5B

内輪に疵 $s=1$
AR

[図5C]

図5C

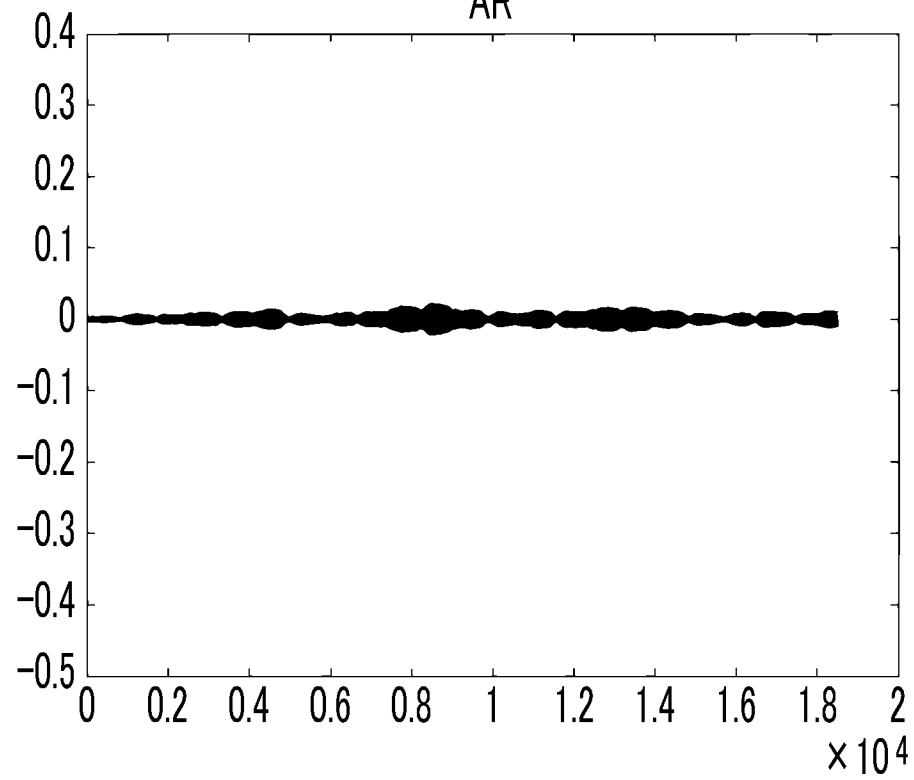


[図5D]

図5D

転動体に疵 $s=1$

AR

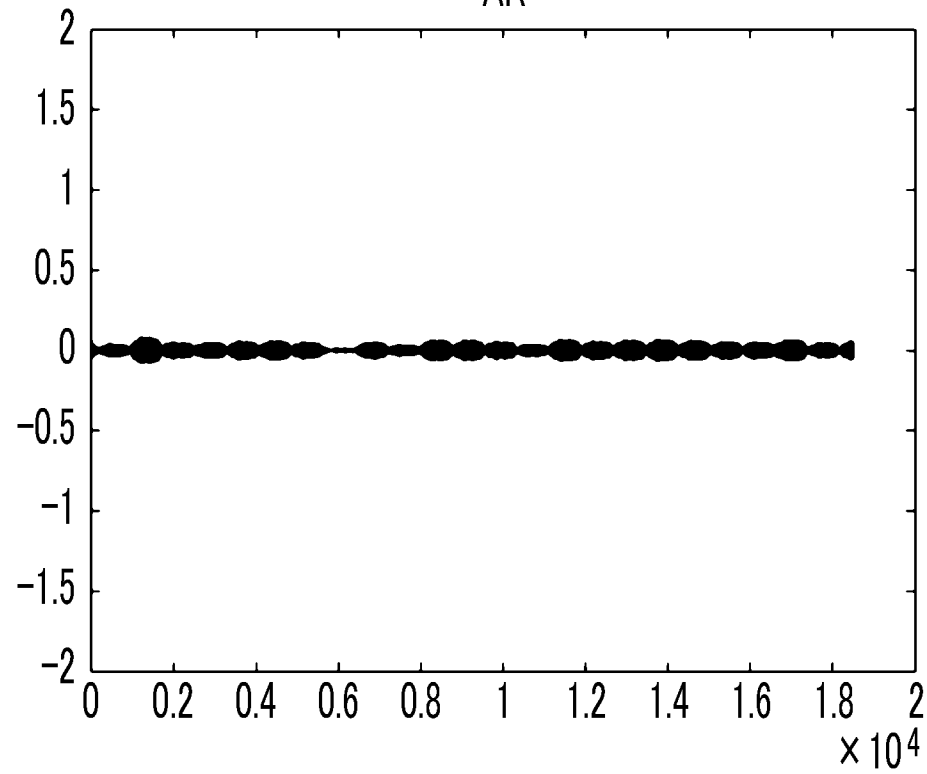


[図5E]

図5E

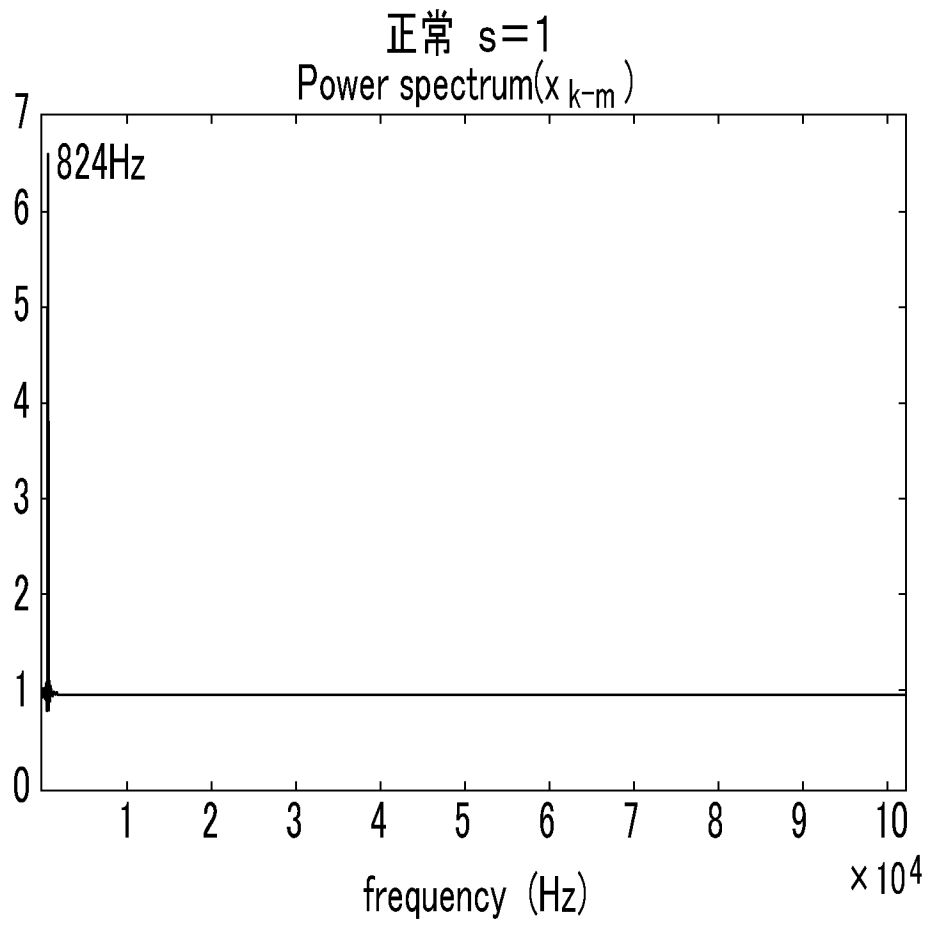
外輪に疵 $s=1$

AR



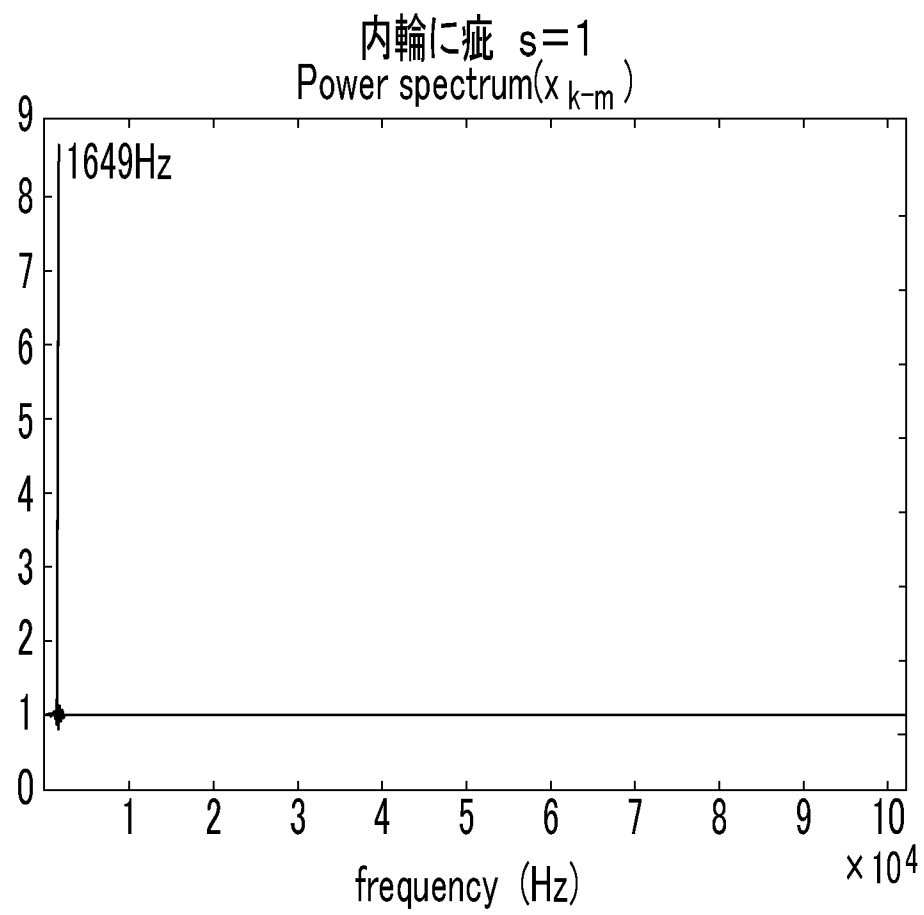
[図6A]

図6A



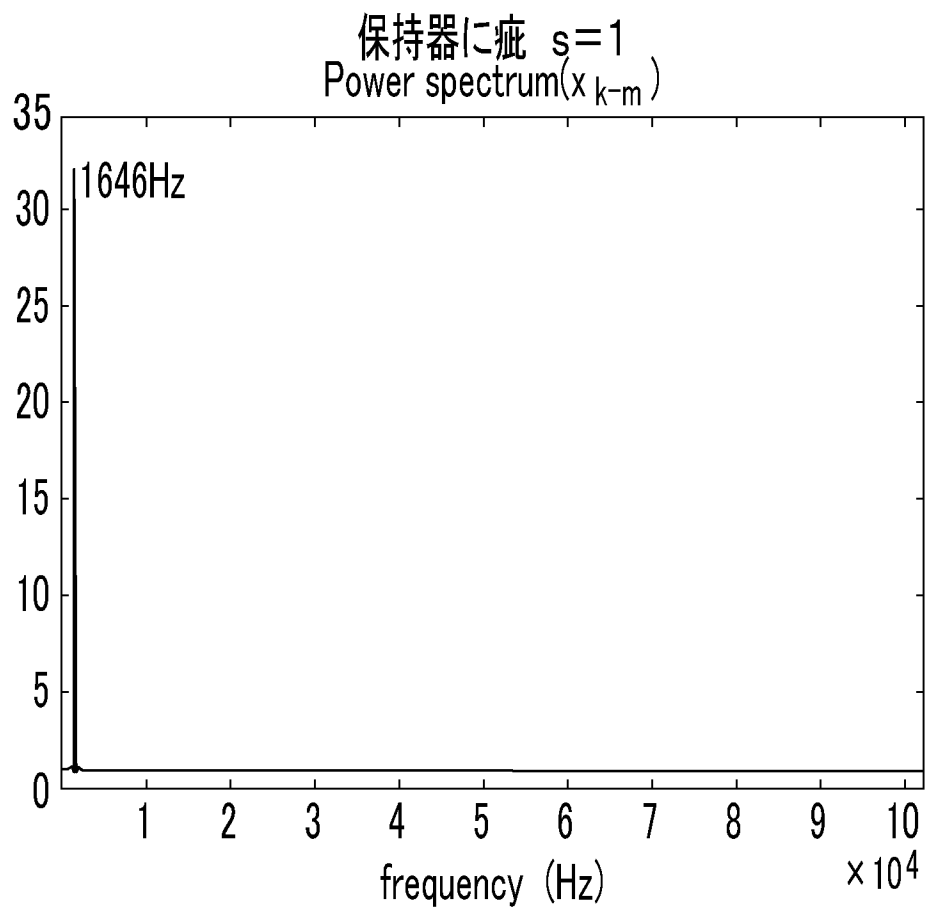
[図6B]

図6B



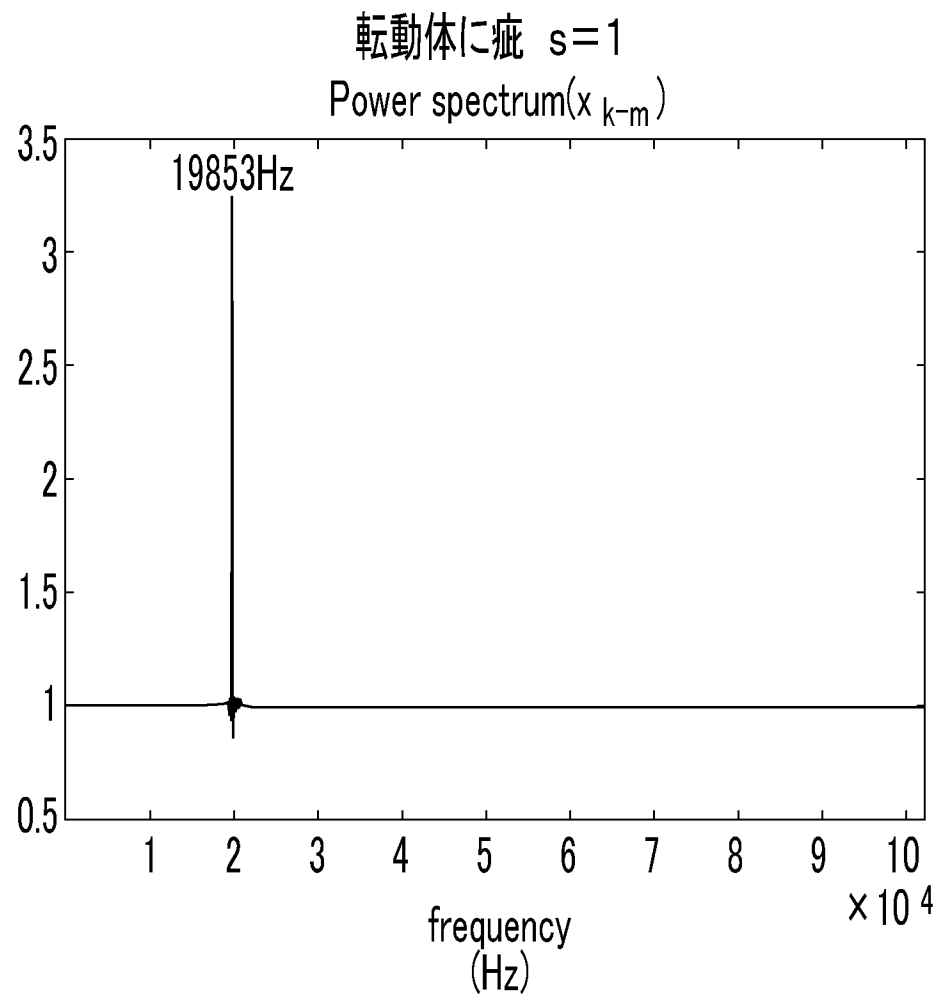
[図6C]

図6C



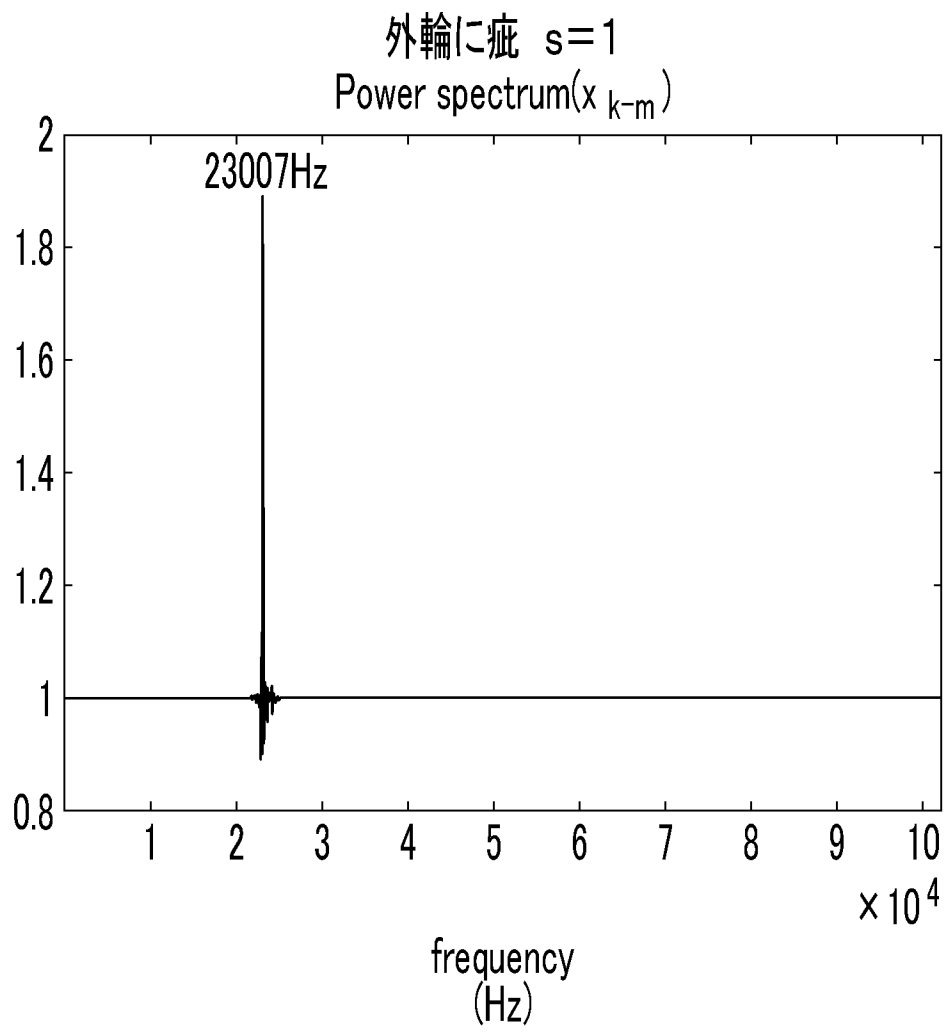
[図6D]

図 6D



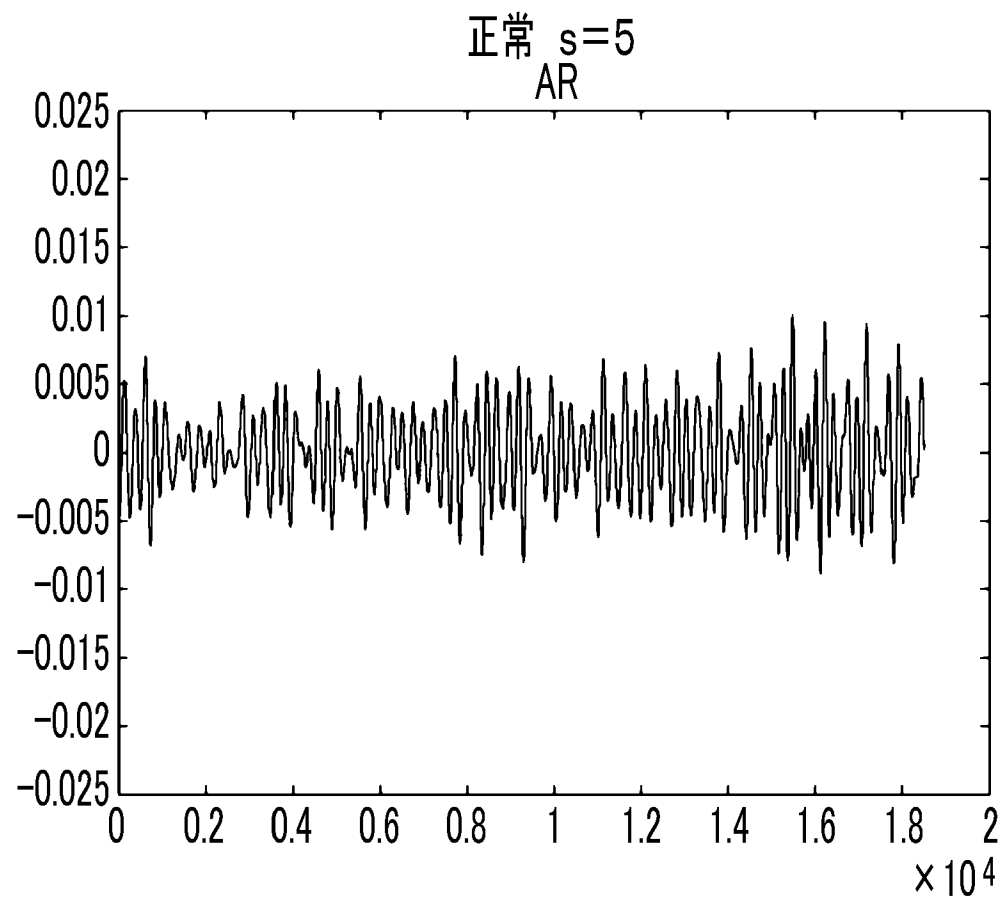
[図6E]

図 6E



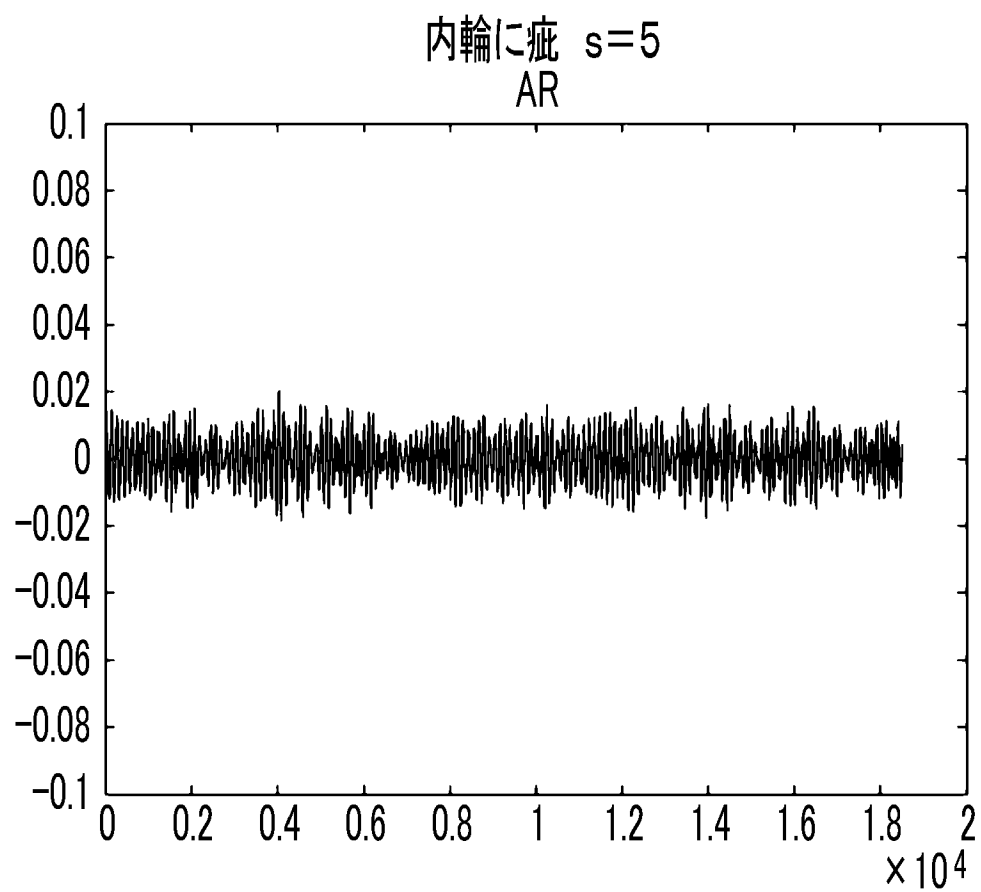
[図7A]

図7A



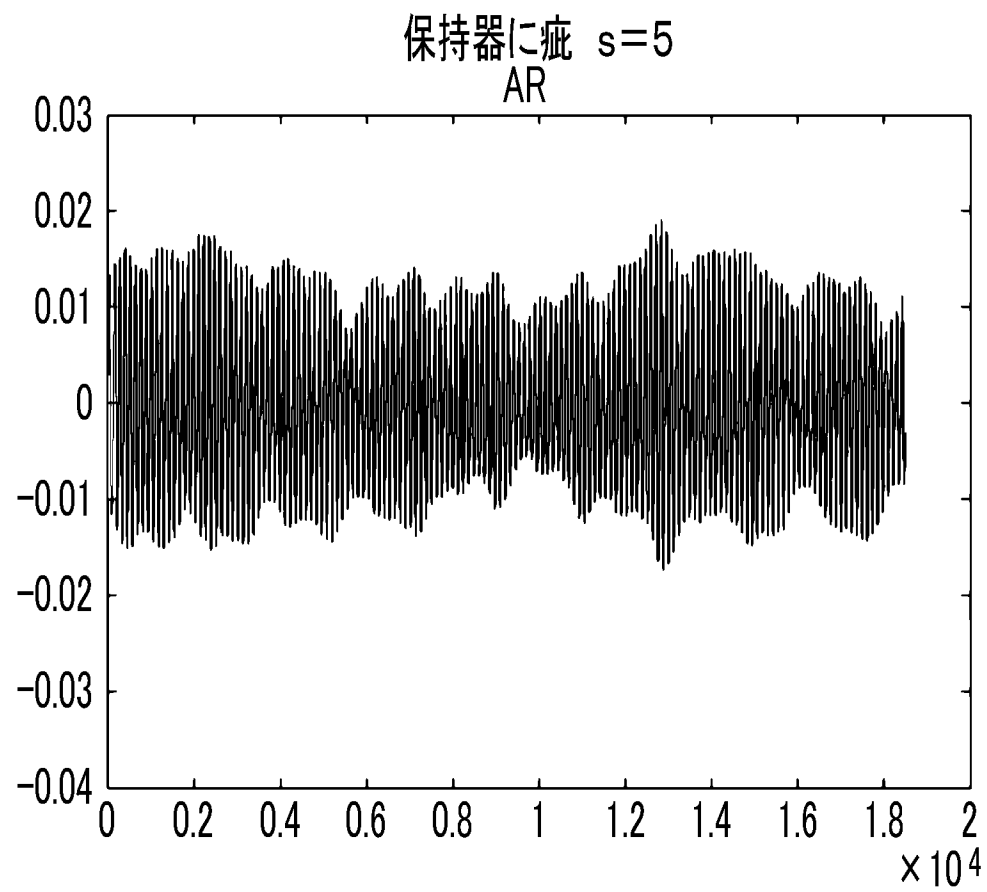
[図7B]

図7B



[図7C]

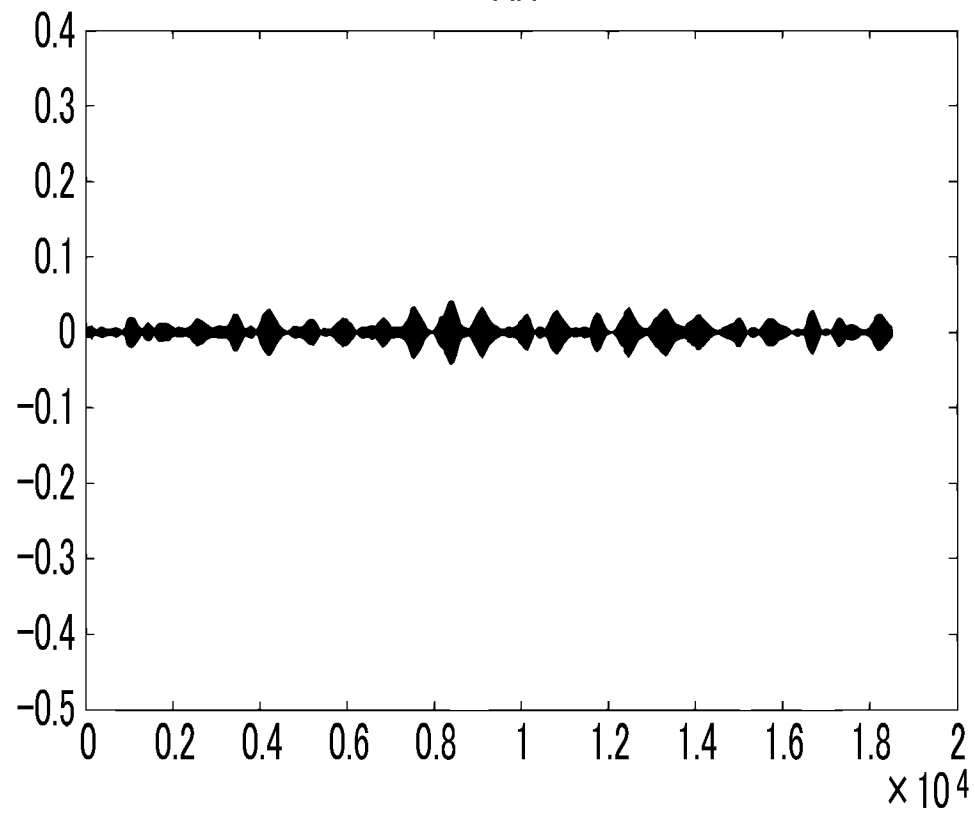
図7C



[図7D]

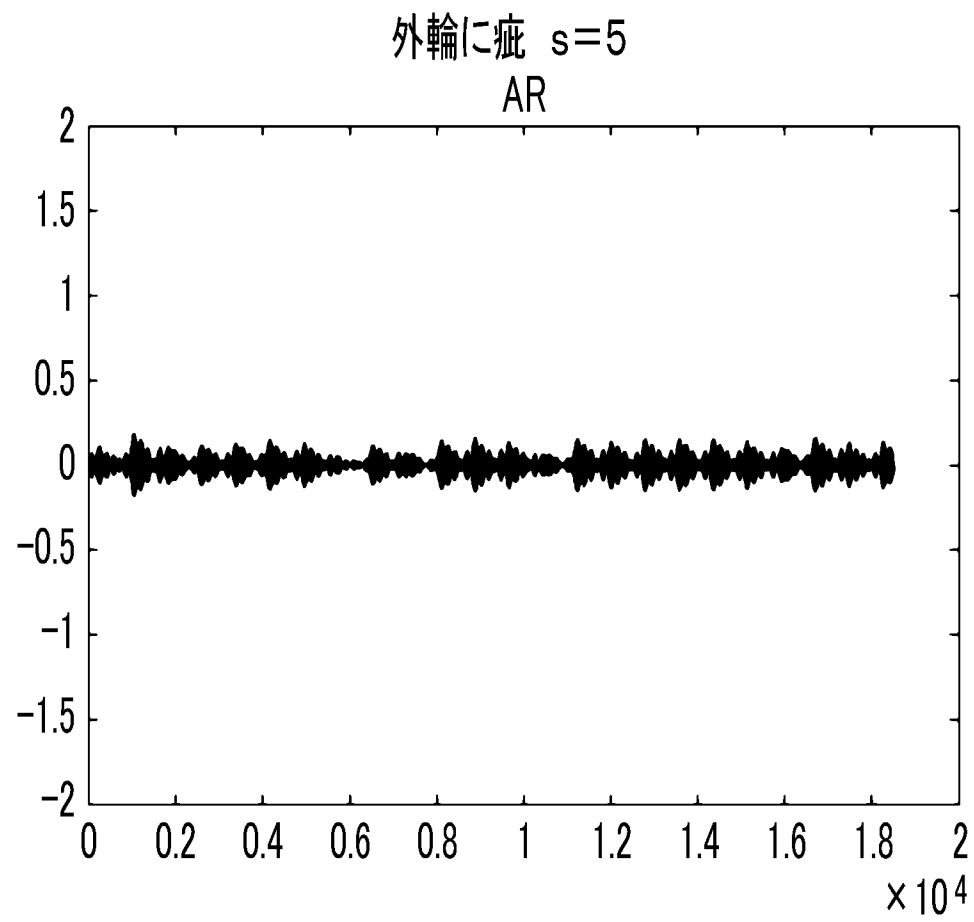
図7D

転動体に疵 $s=5$
AR



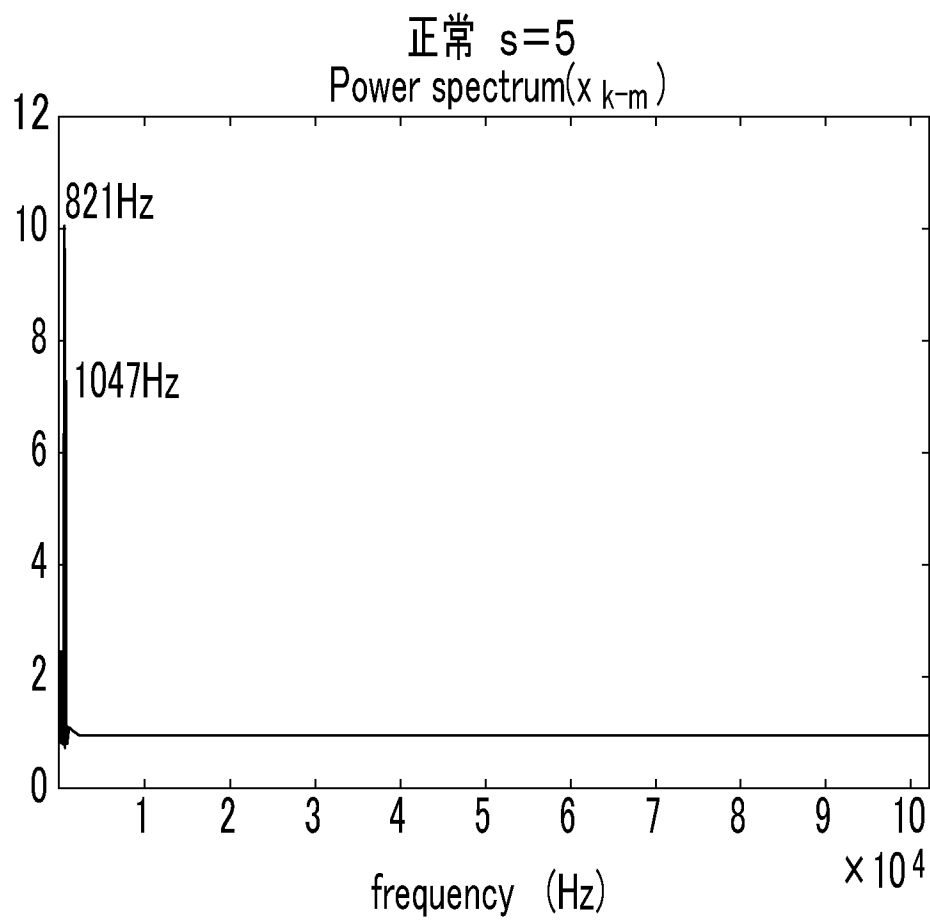
[図7E]

図7E



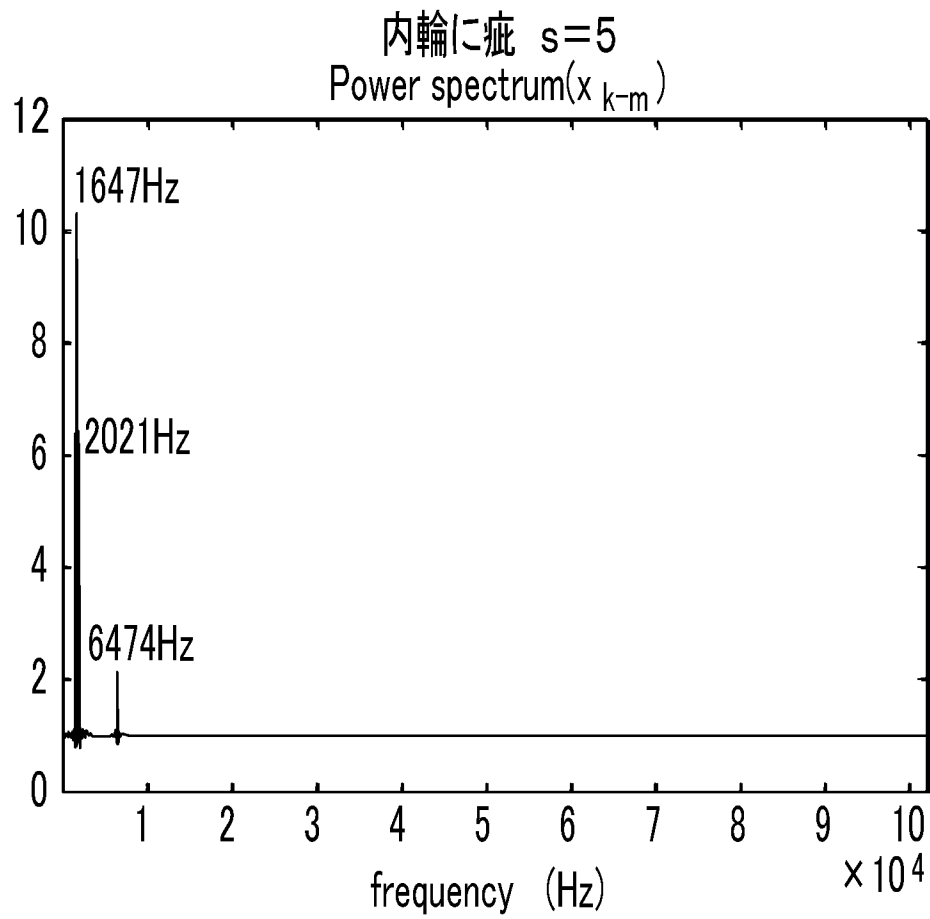
[図8A]

図8A



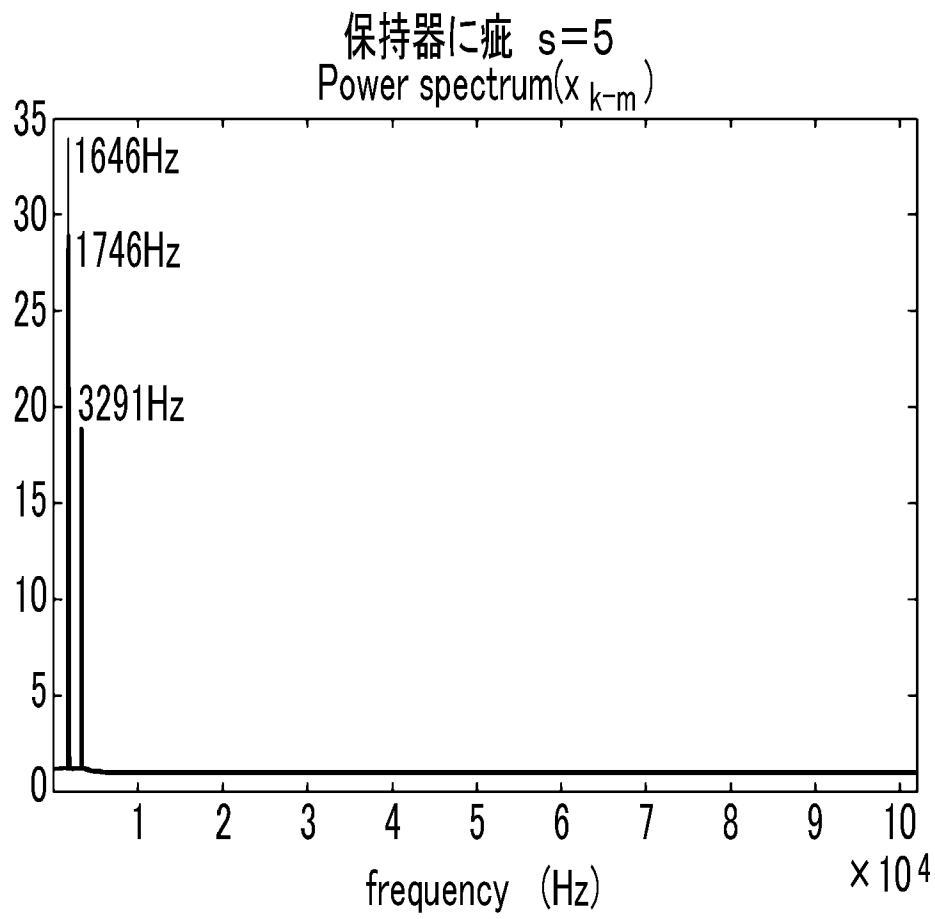
[図8B]

図8B



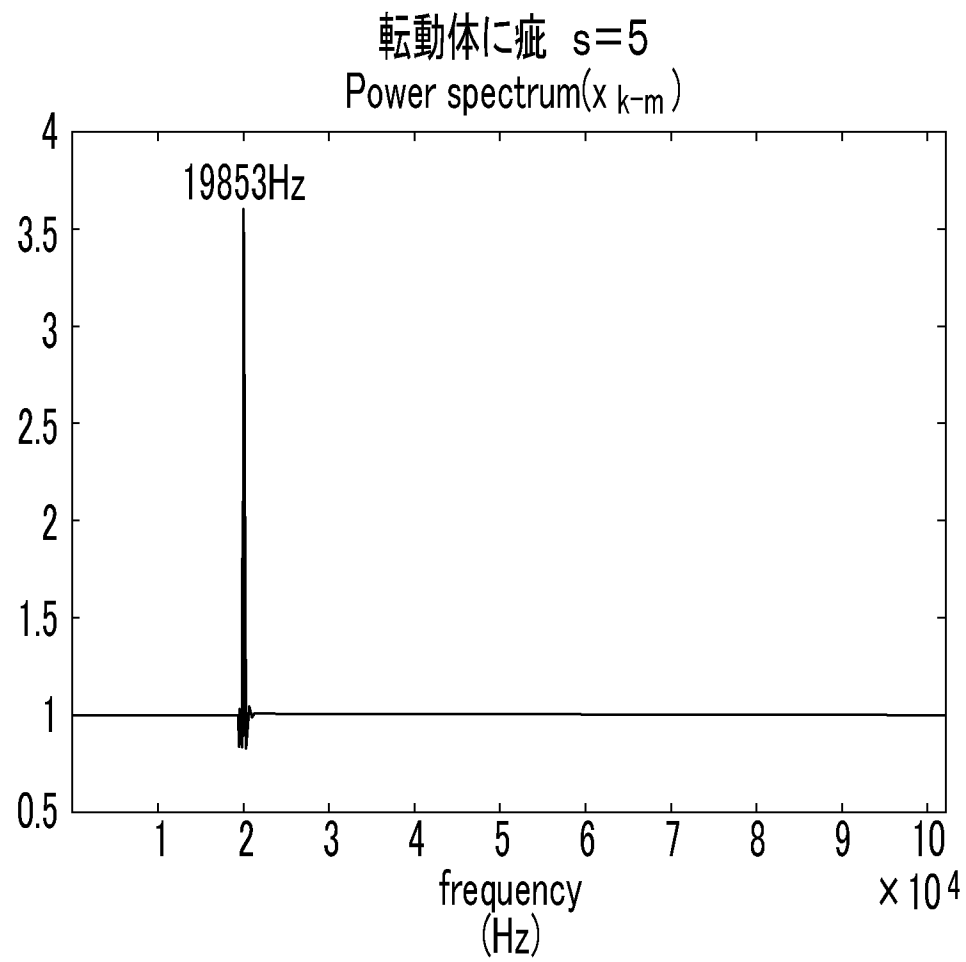
[図8C]

図8C



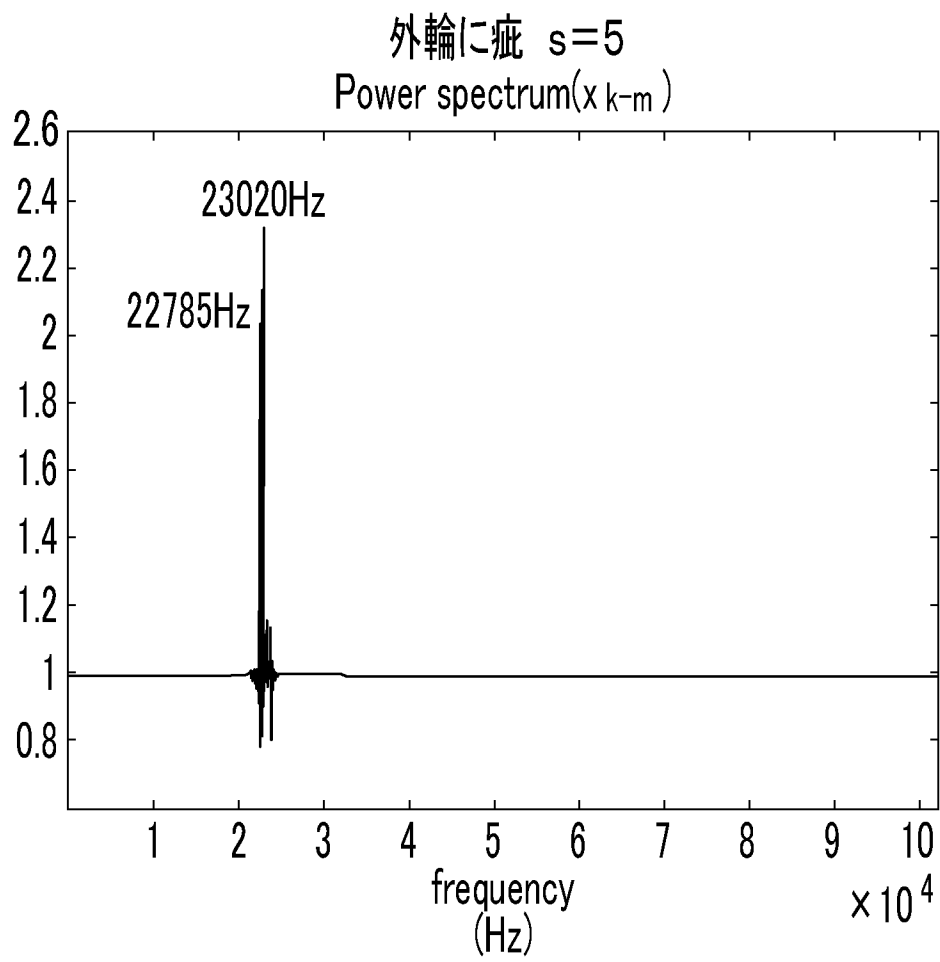
[図8D]

図8D



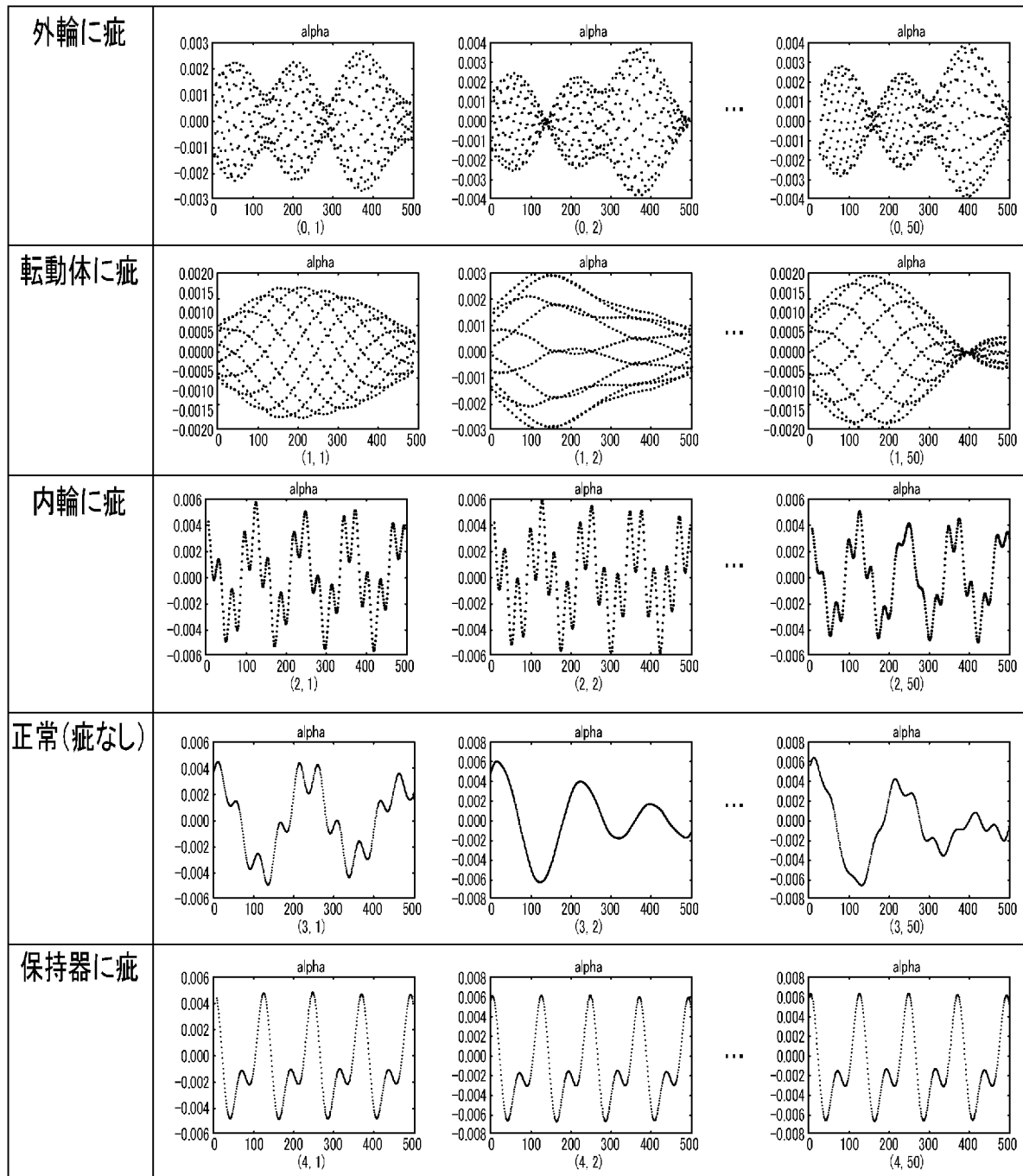
[図8E]

図8E



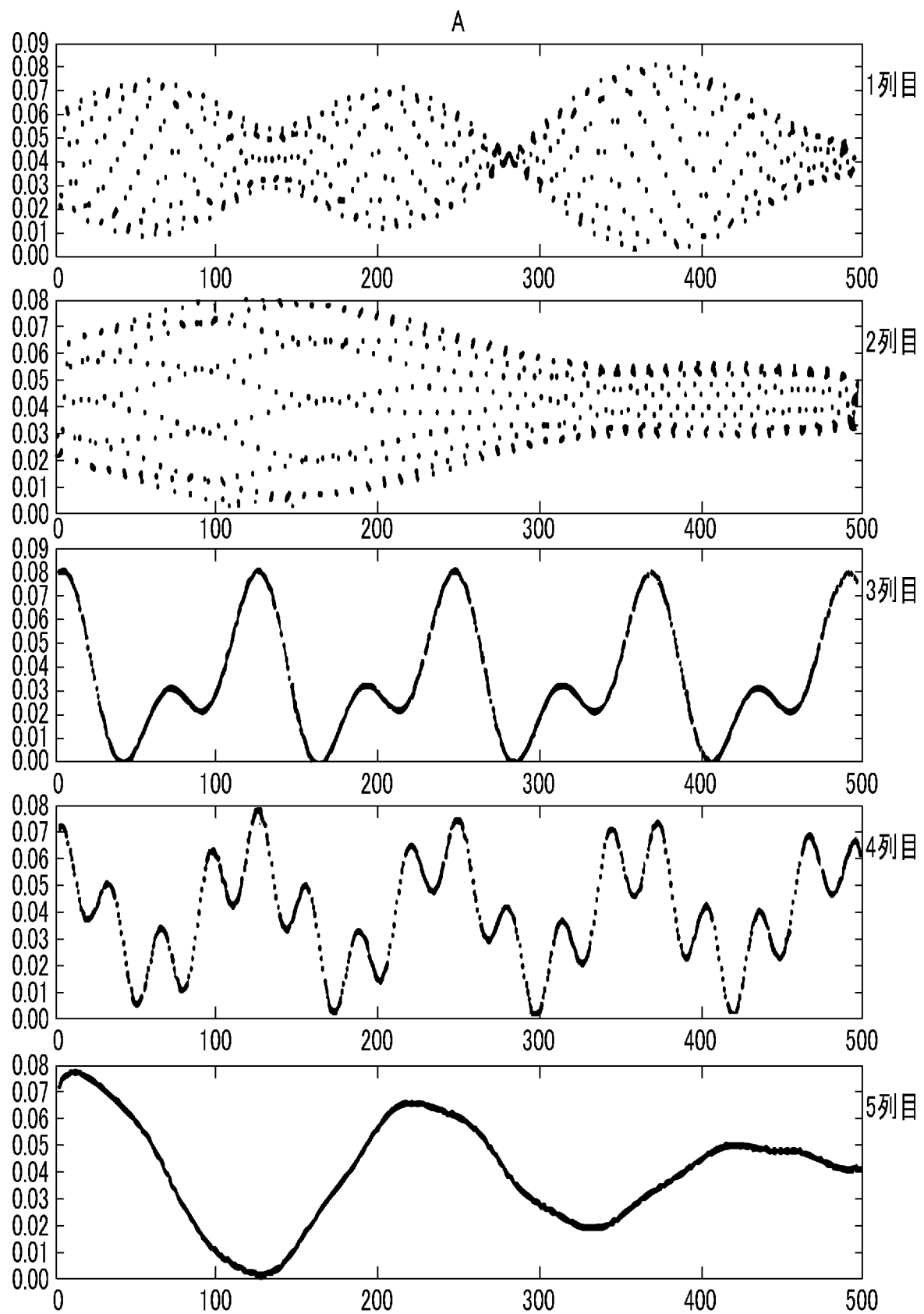
[図9]

図9



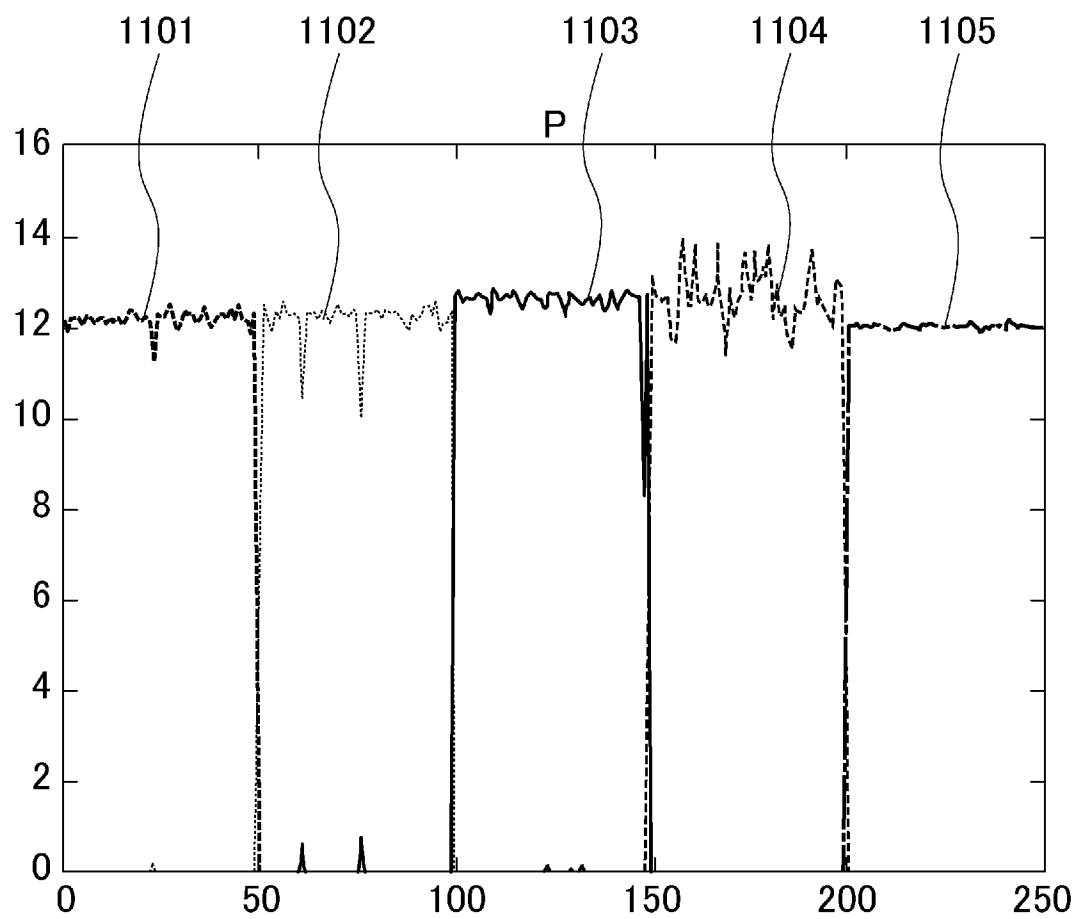
[図10]

図10



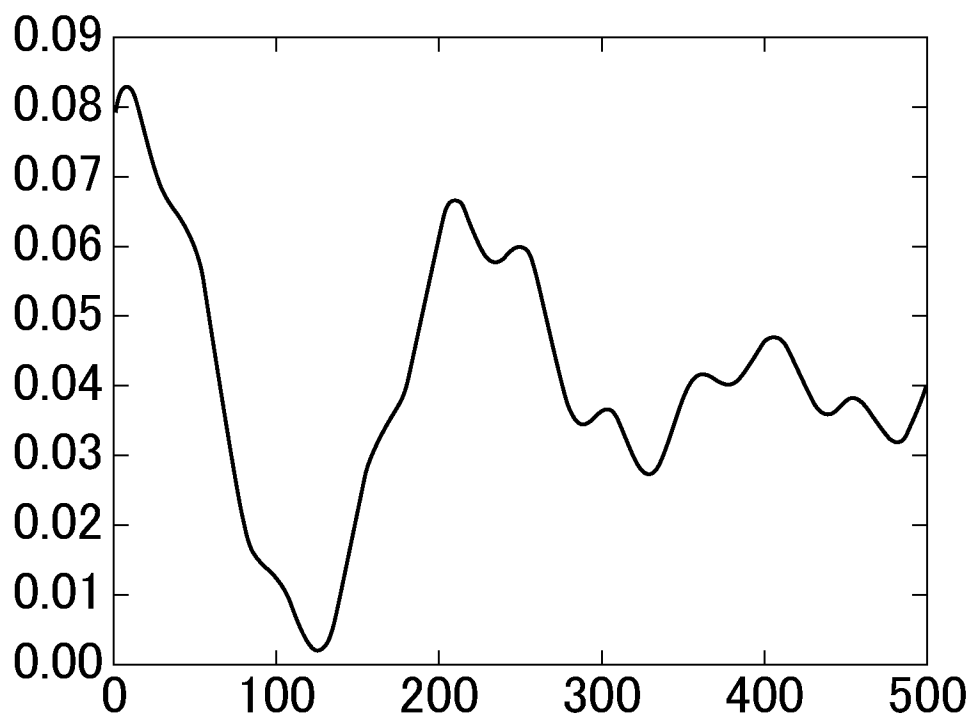
[図11]

図11



[図12]

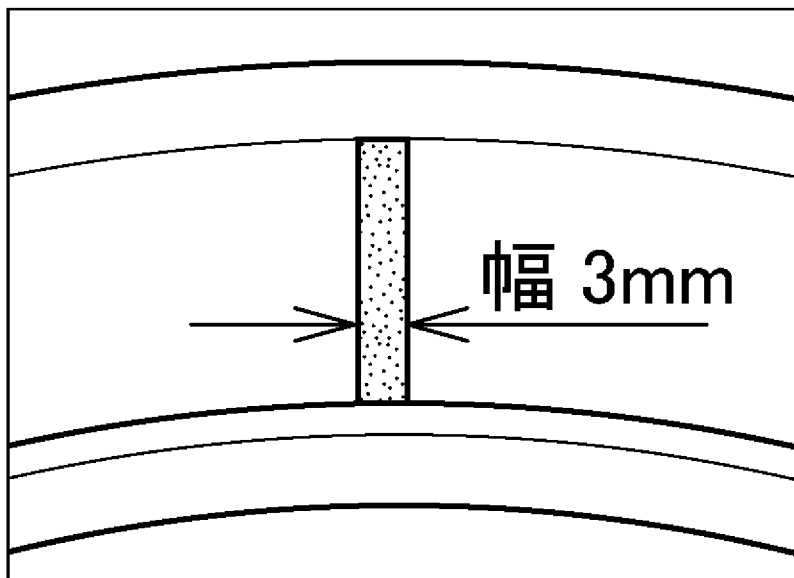
図12



[図13A]

図13A

外輪疵
(幅 3mm, 深さ 0.1mm 程度)

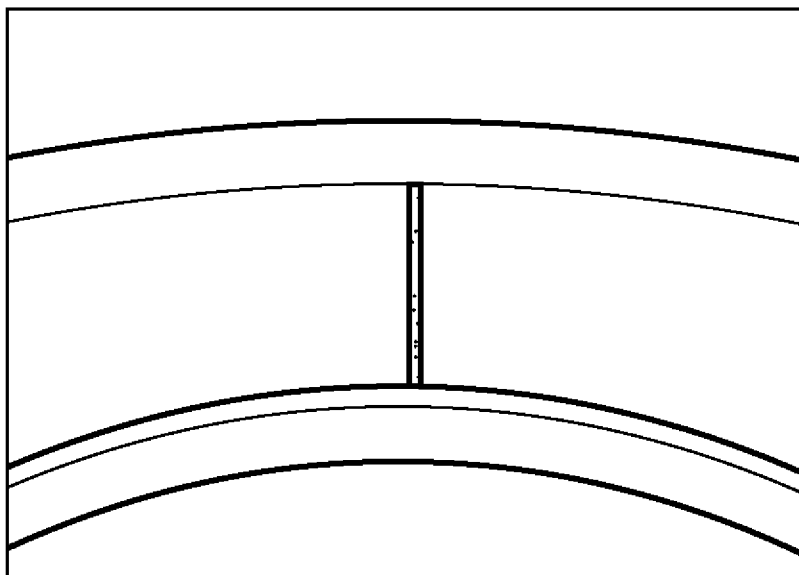


[図13B]

図13B

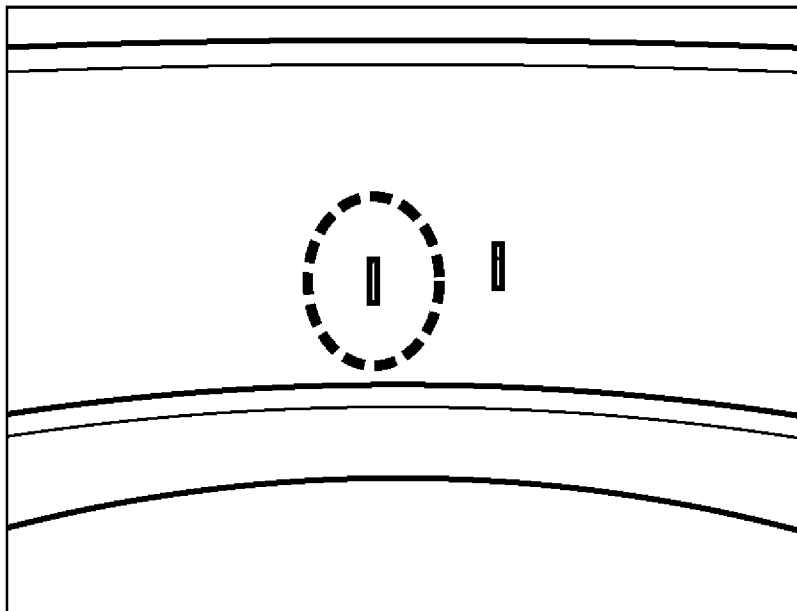
外輪疵

(幅 0.5mm, 深さ $\leq$ 0.1mm)



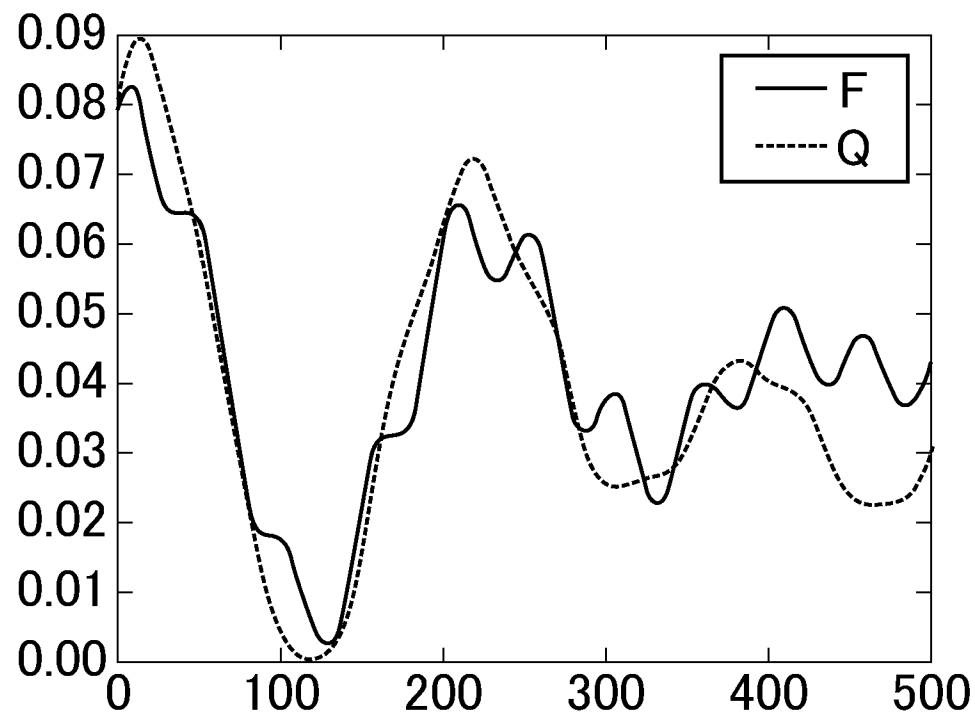
[図13C]

図 13C

外輪疵
(微小疵)

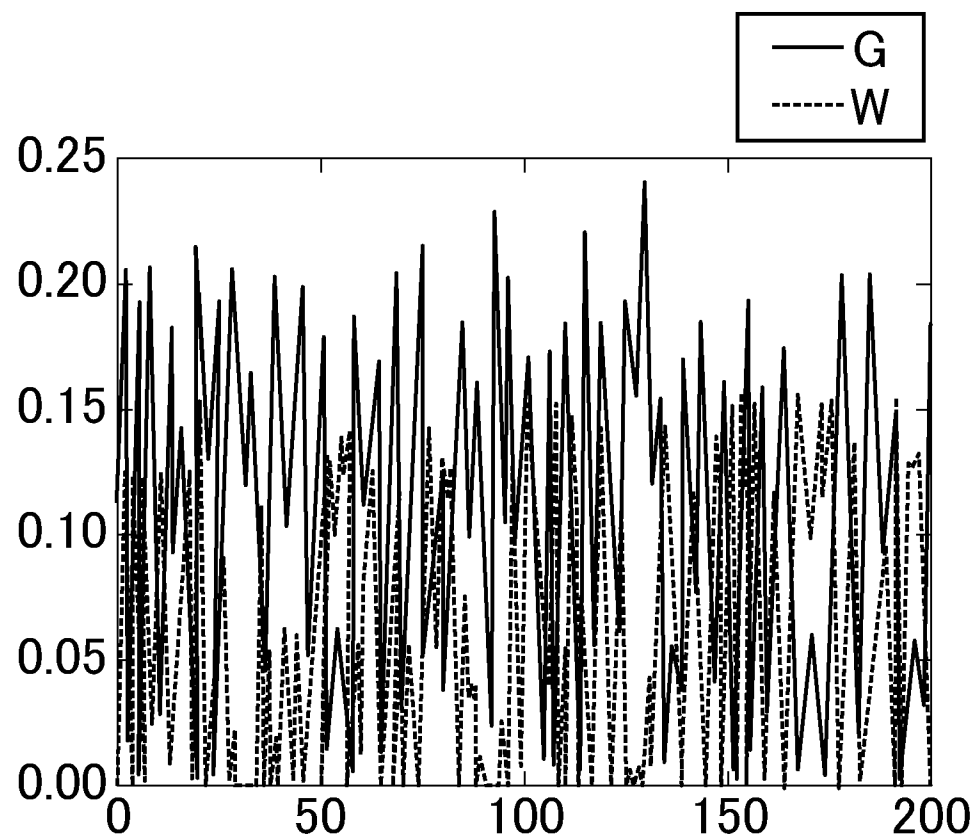
[図14A]

図14A



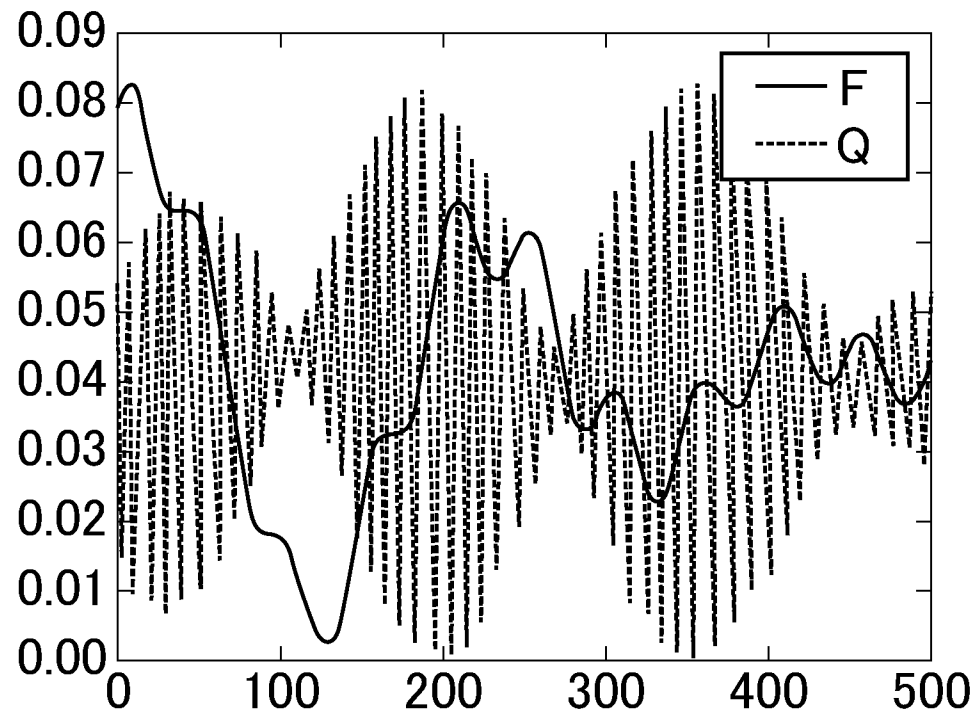
[図14B]

図14B



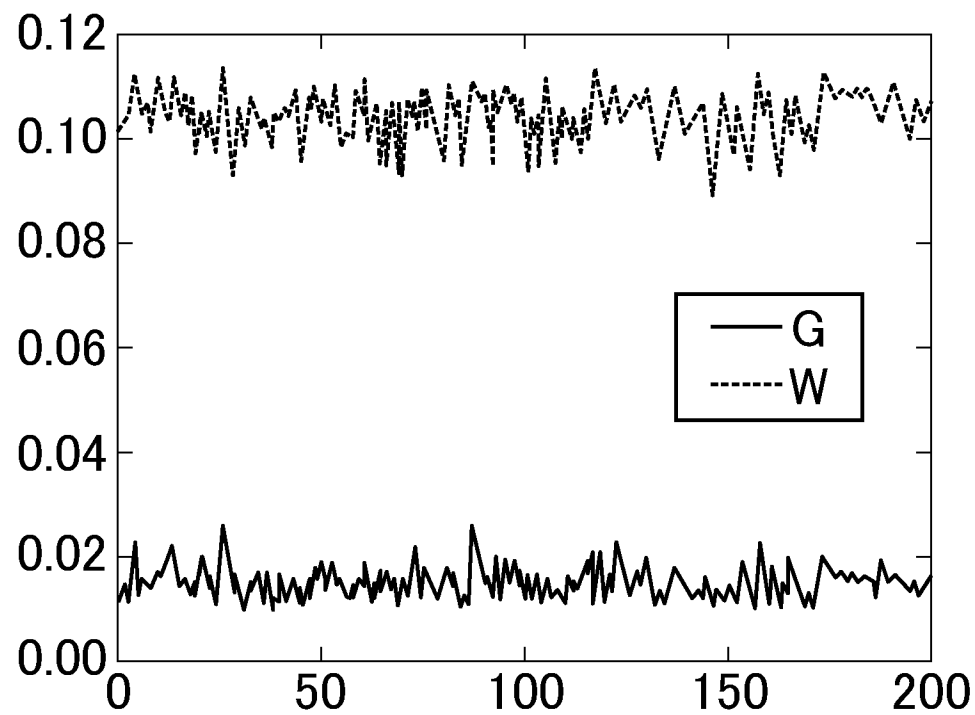
[図15A]

図15A



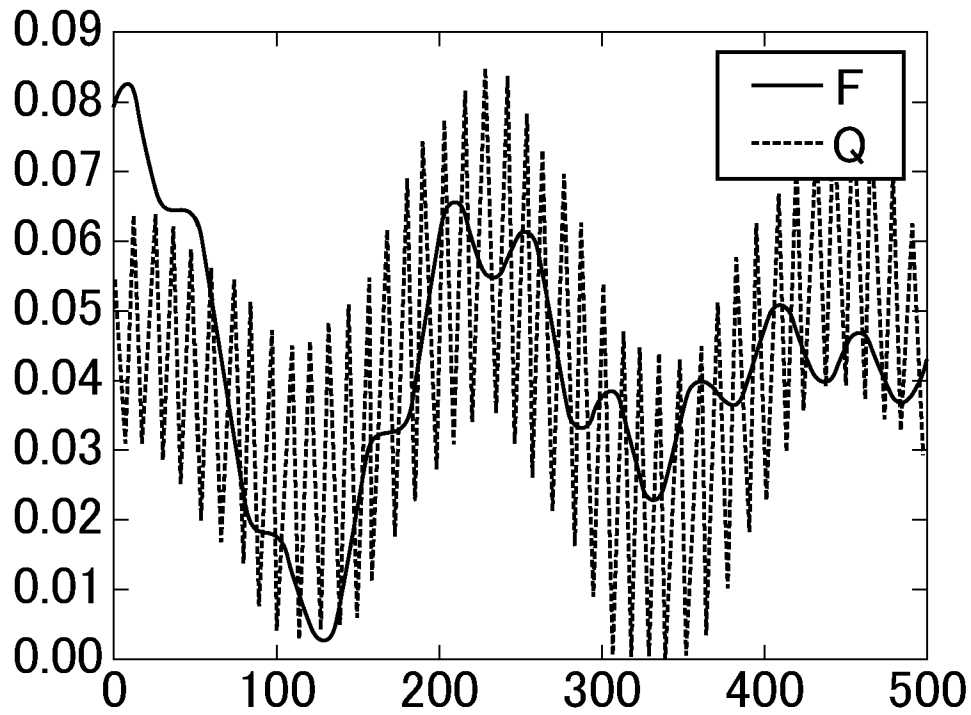
[図15B]

図15B



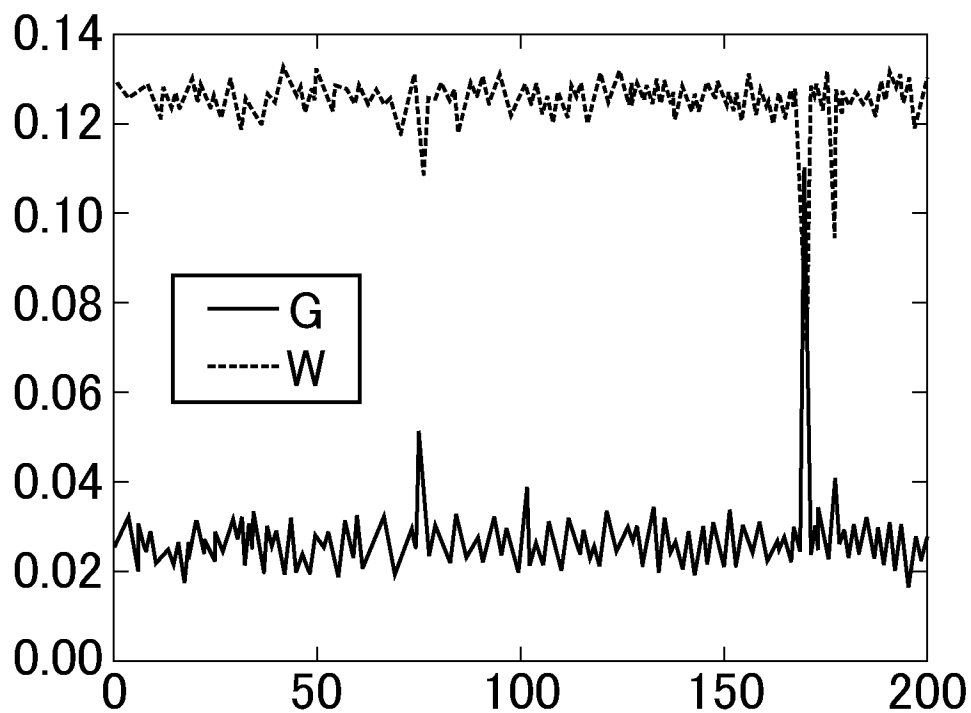
[図16A]

図16A



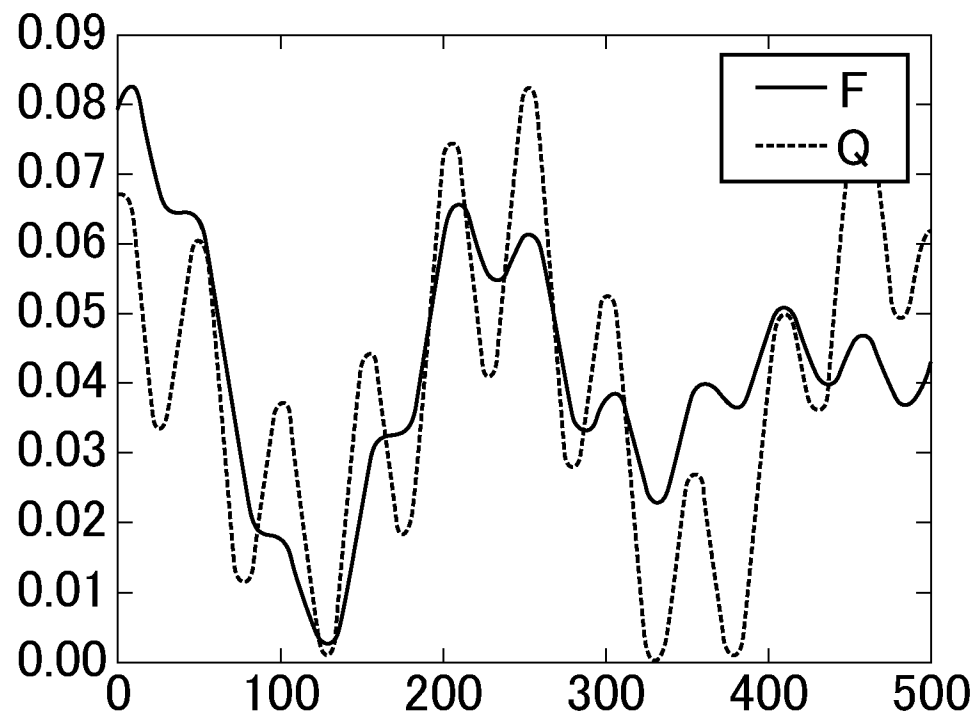
[図16B]

図16B



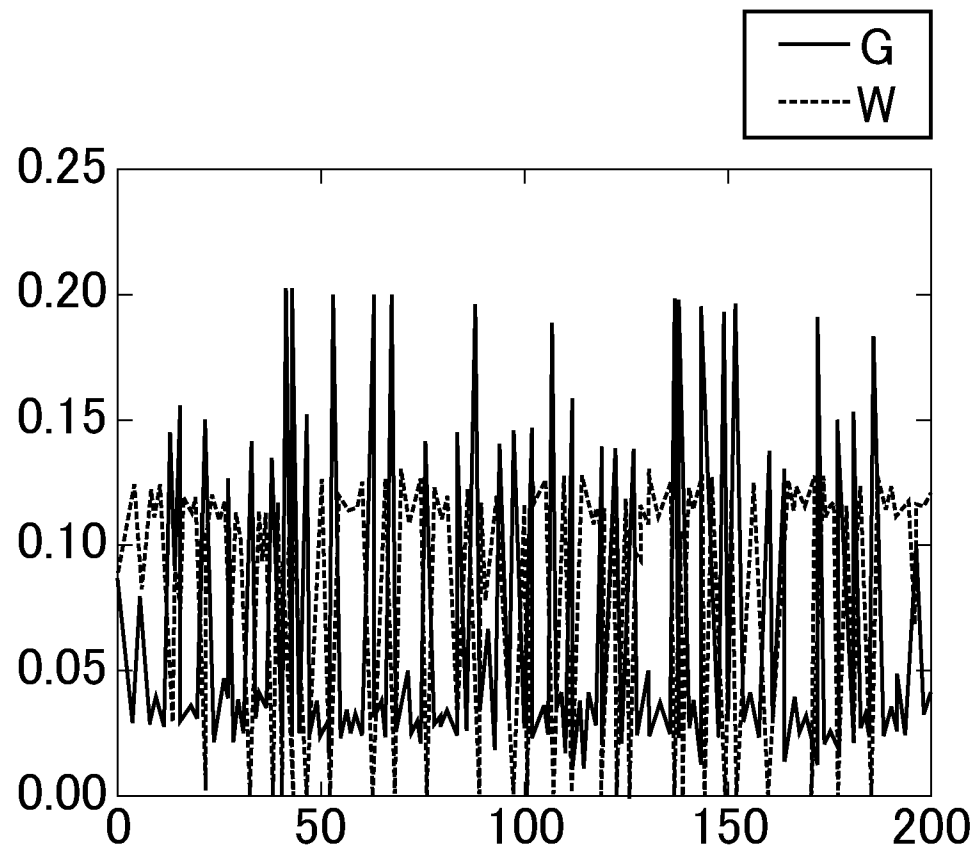
[図17A]

図17A



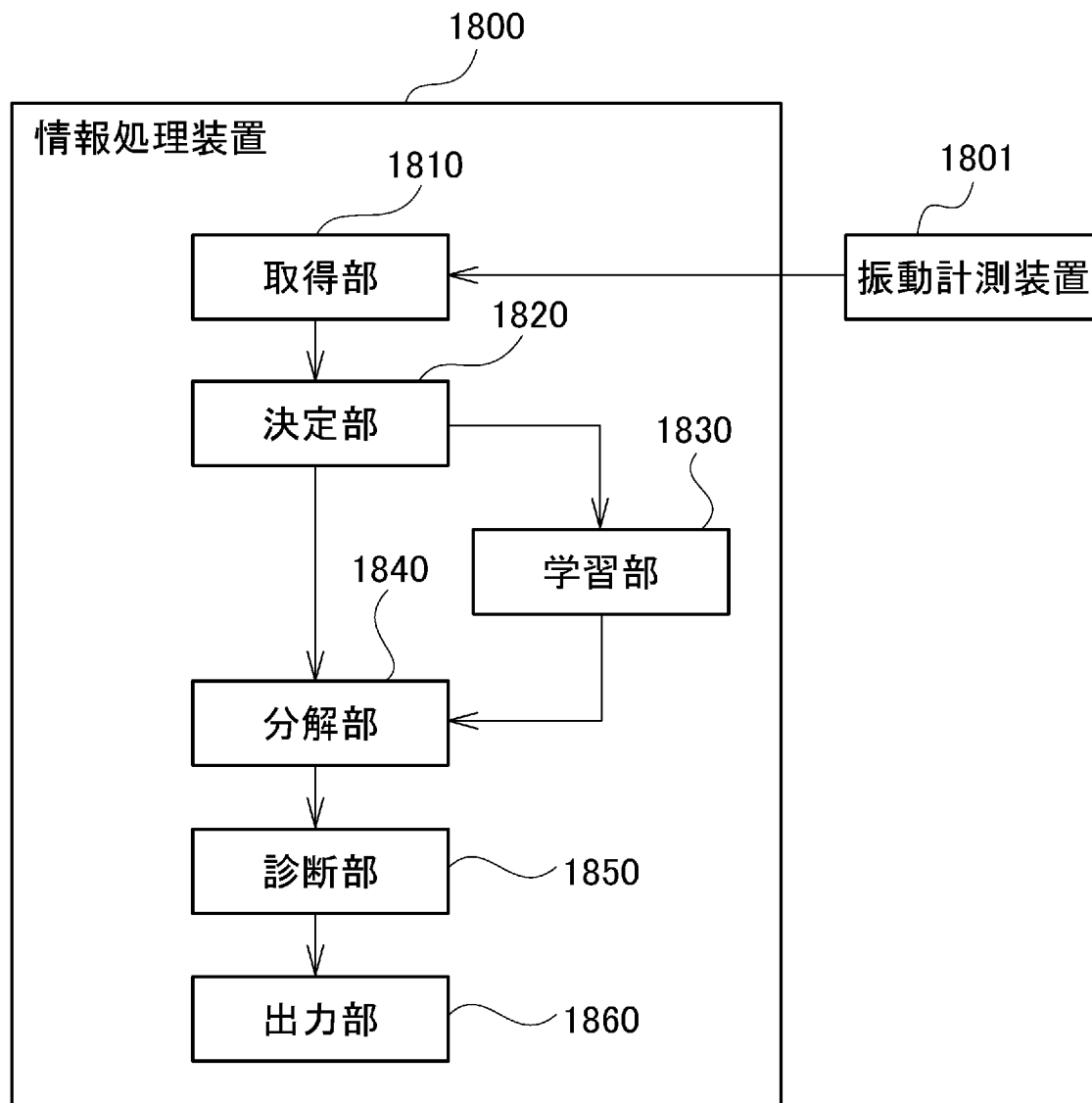
[図17B]

図17B



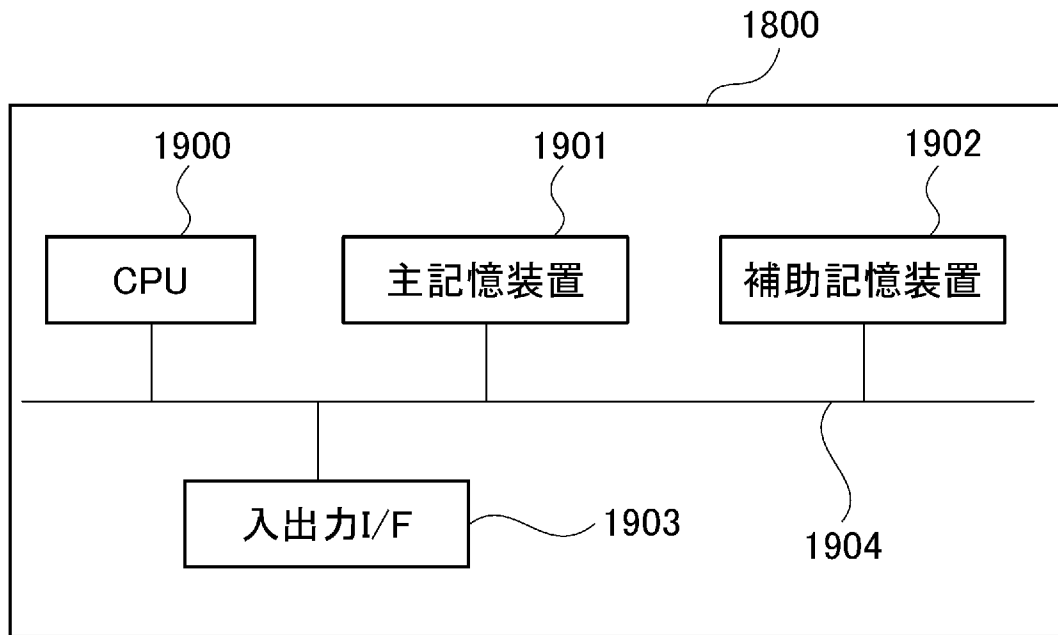
[図18]

図18



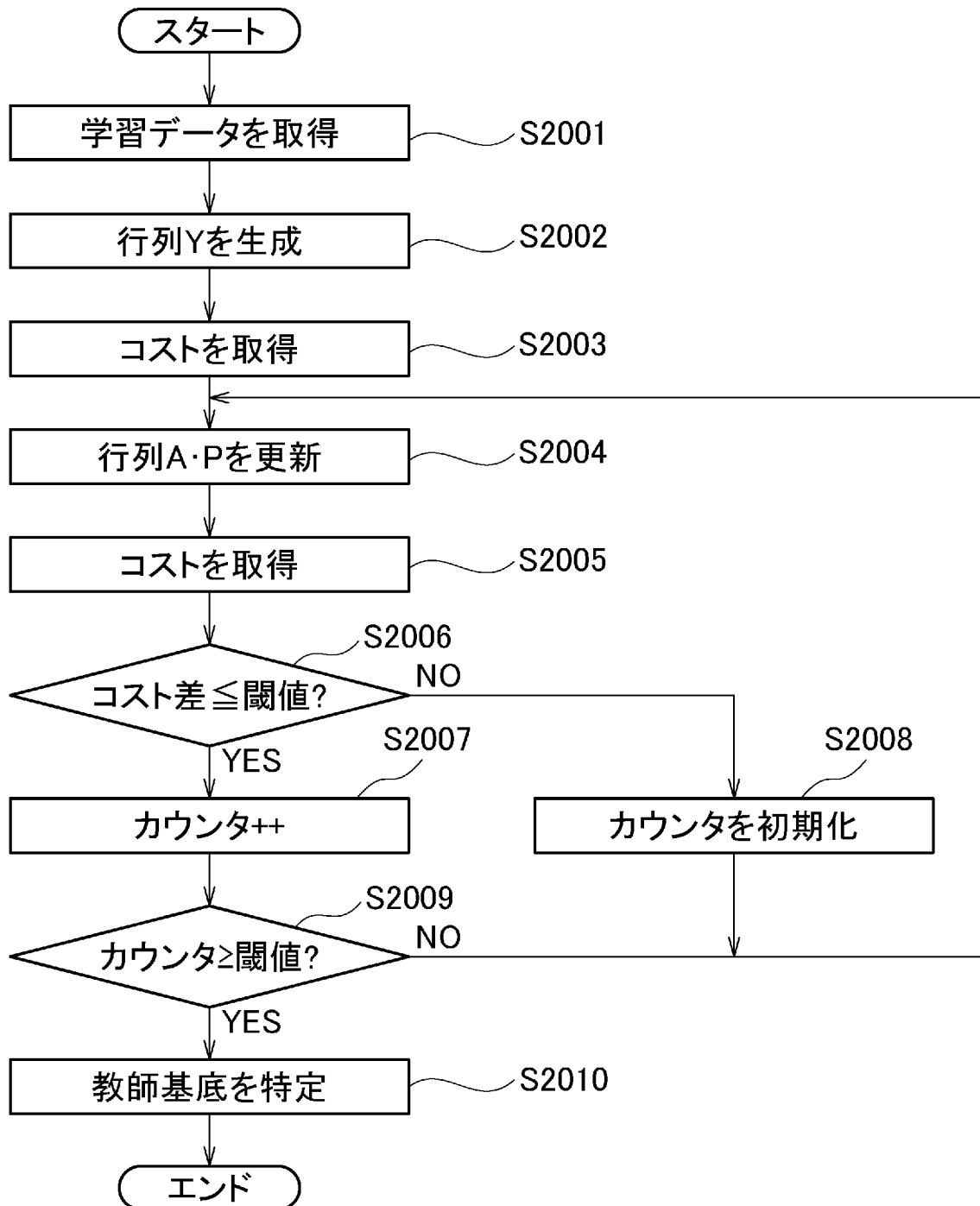
[図19]

図 19



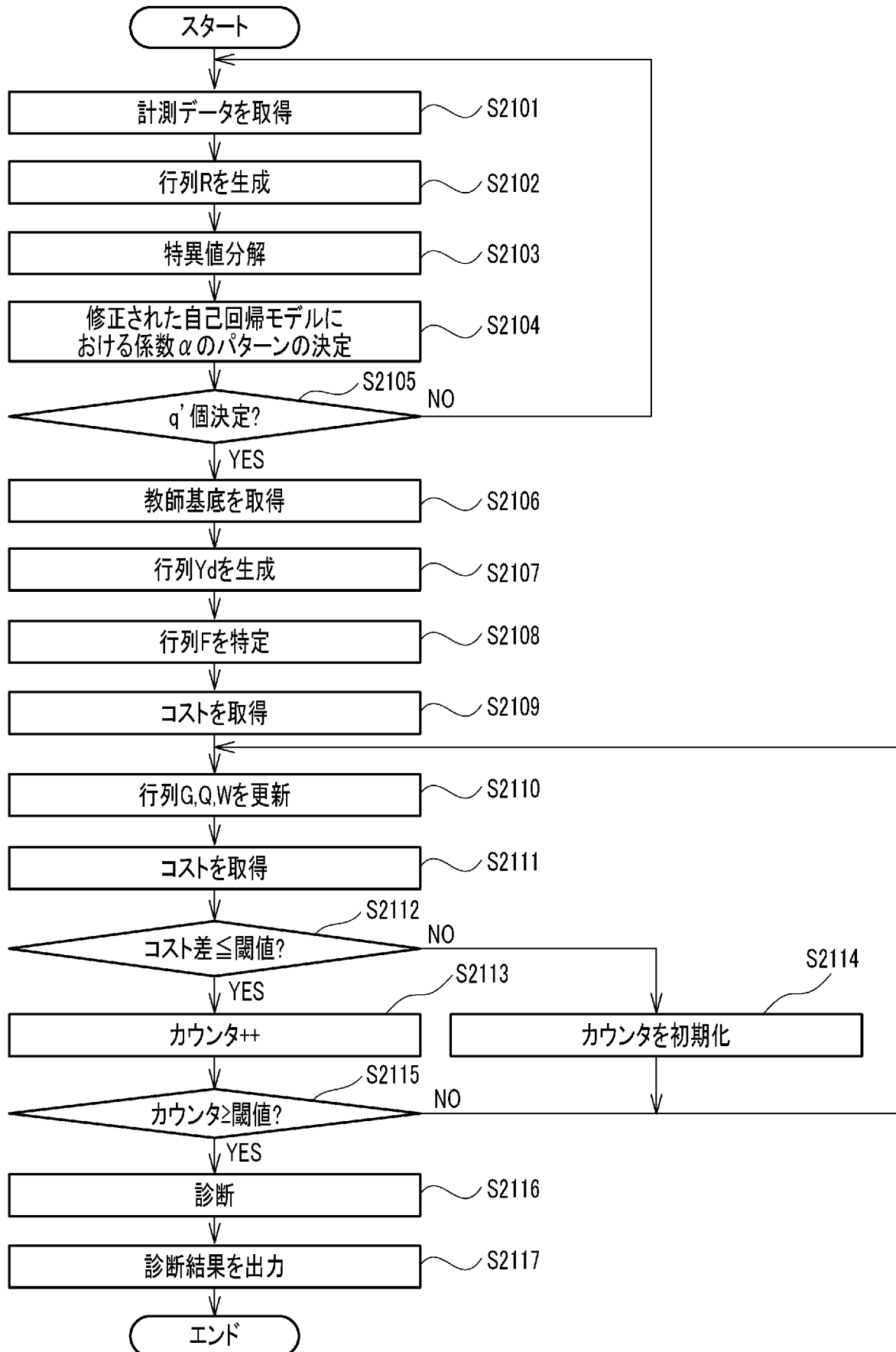
[図20]

図20



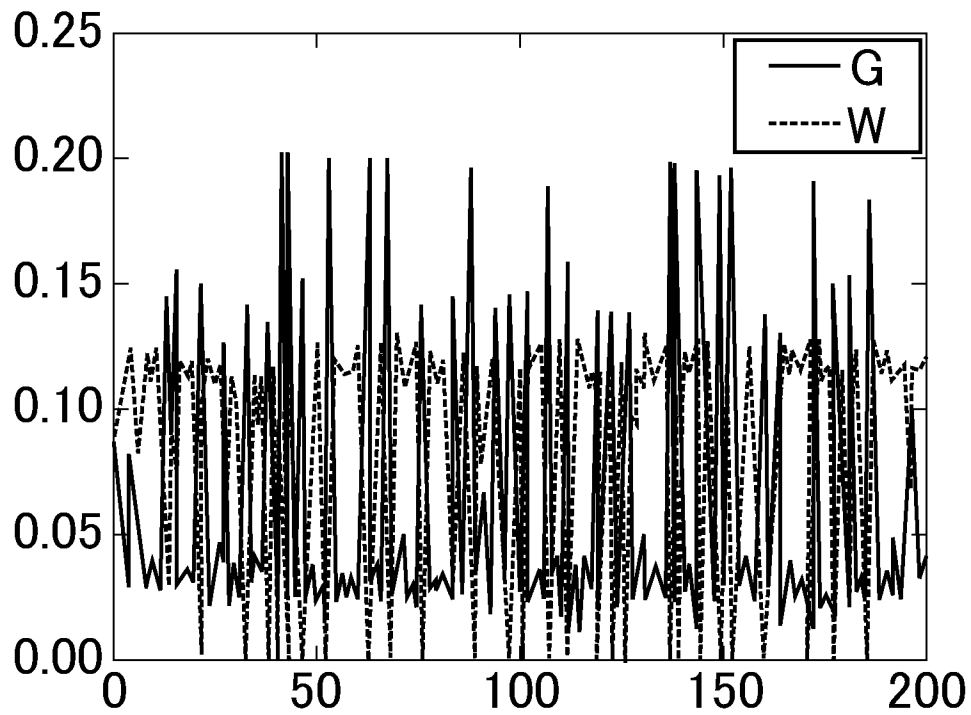
[図21]

図21



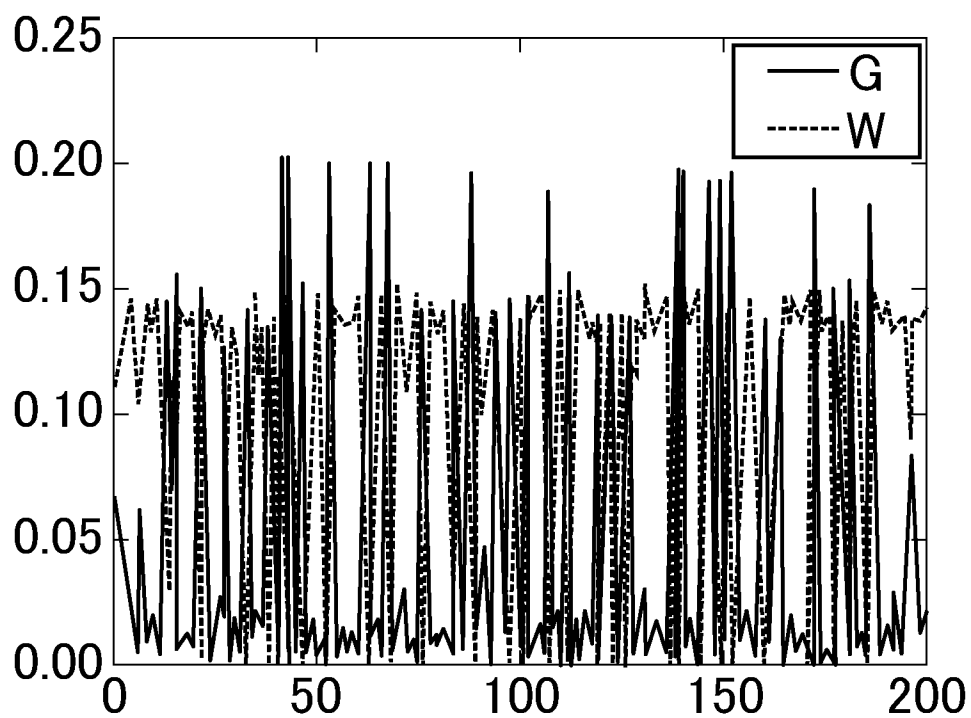
[図22A]

図22A



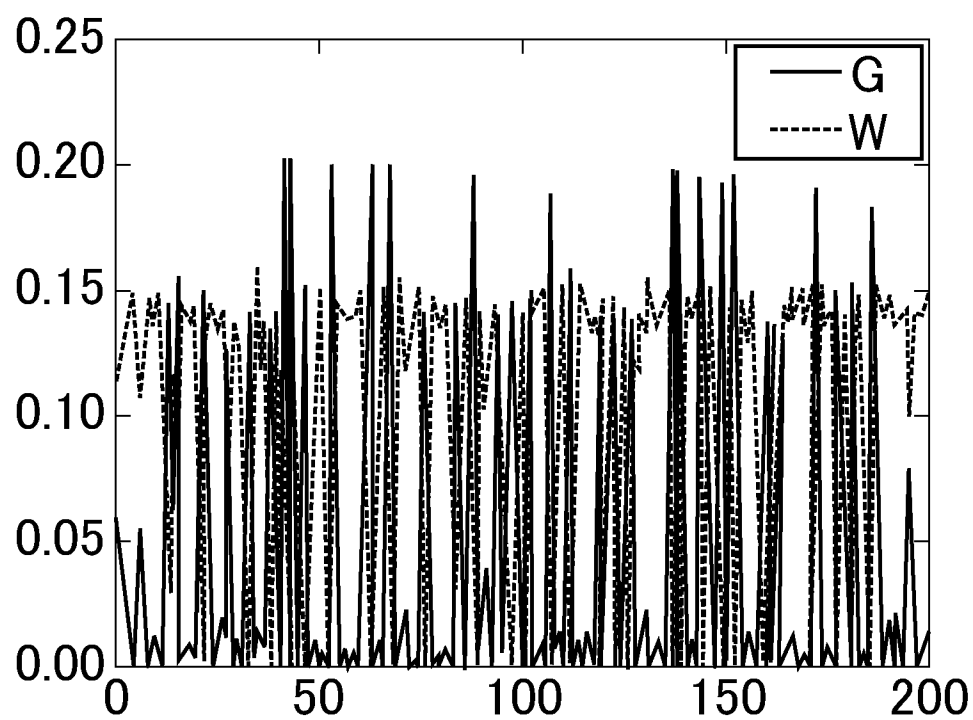
[図22B]

図22B



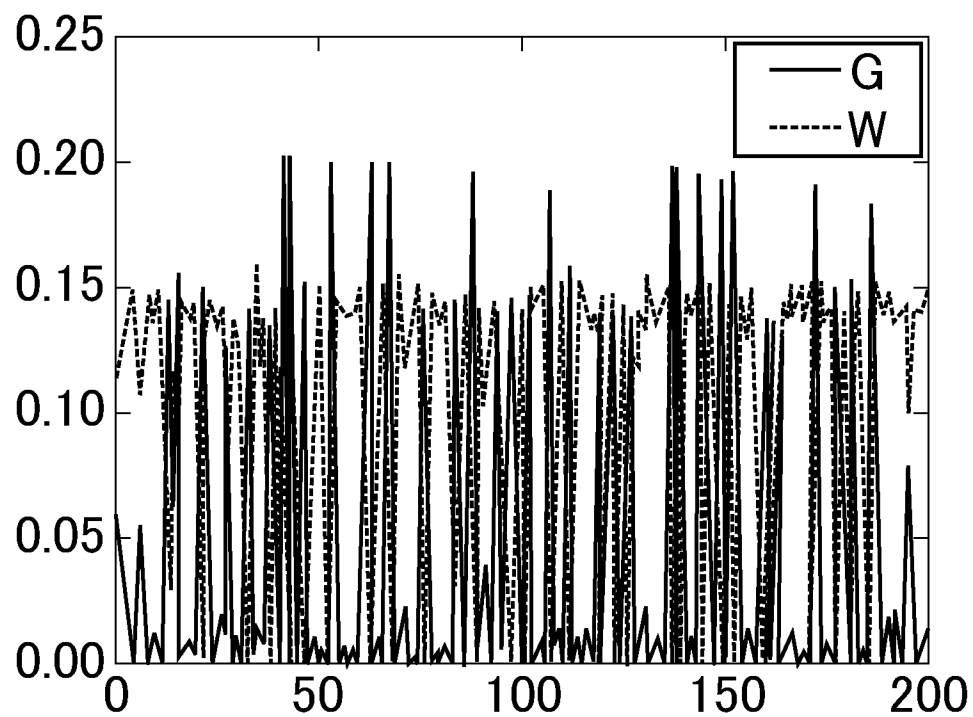
[図22C]

図22C



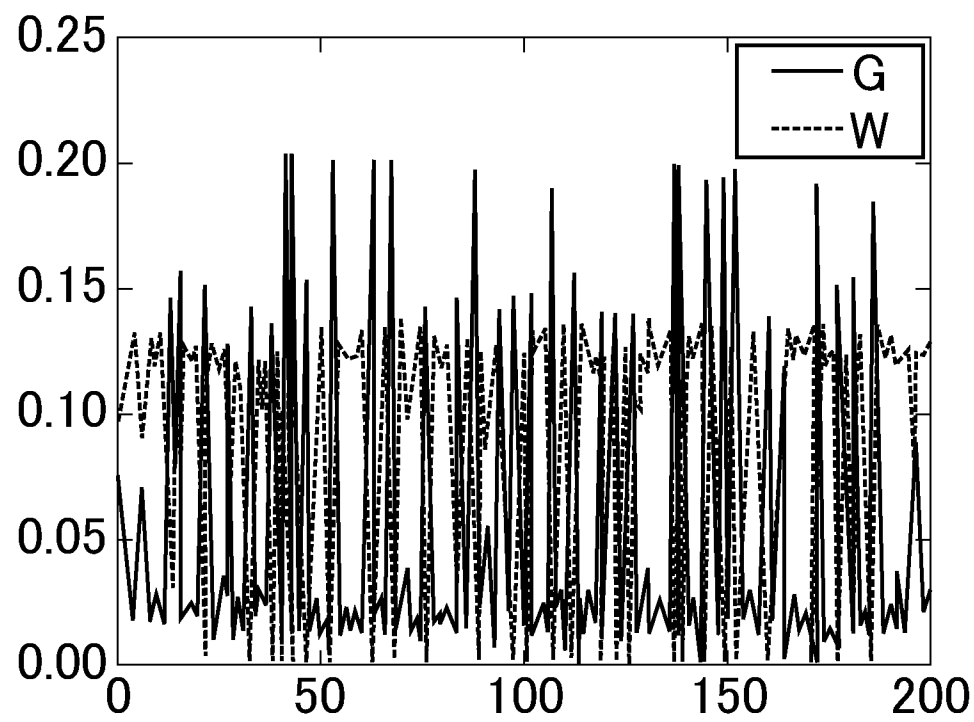
[図22D]

図22D



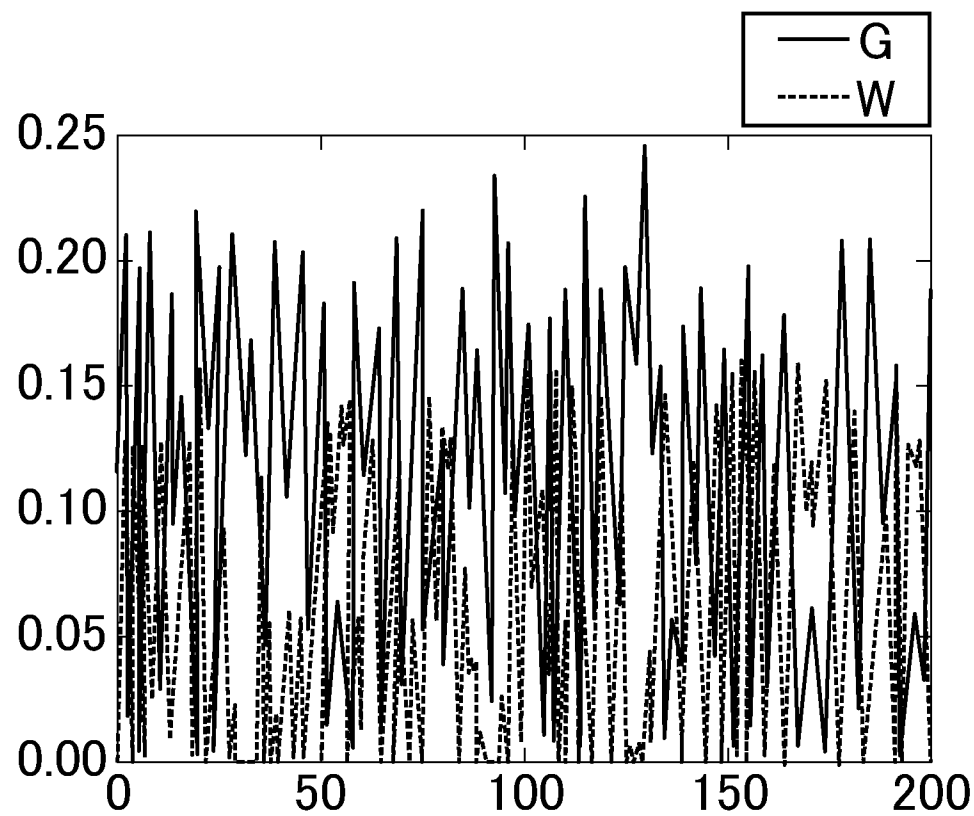
[図22E]

図22E



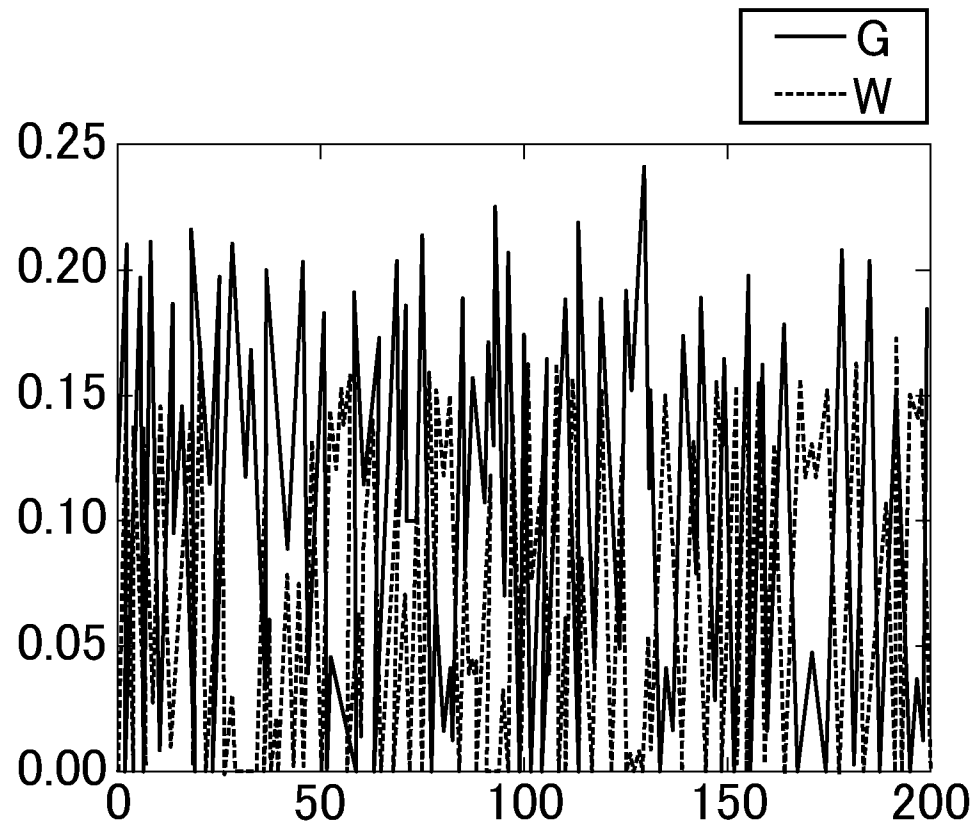
[図23A]

図23A



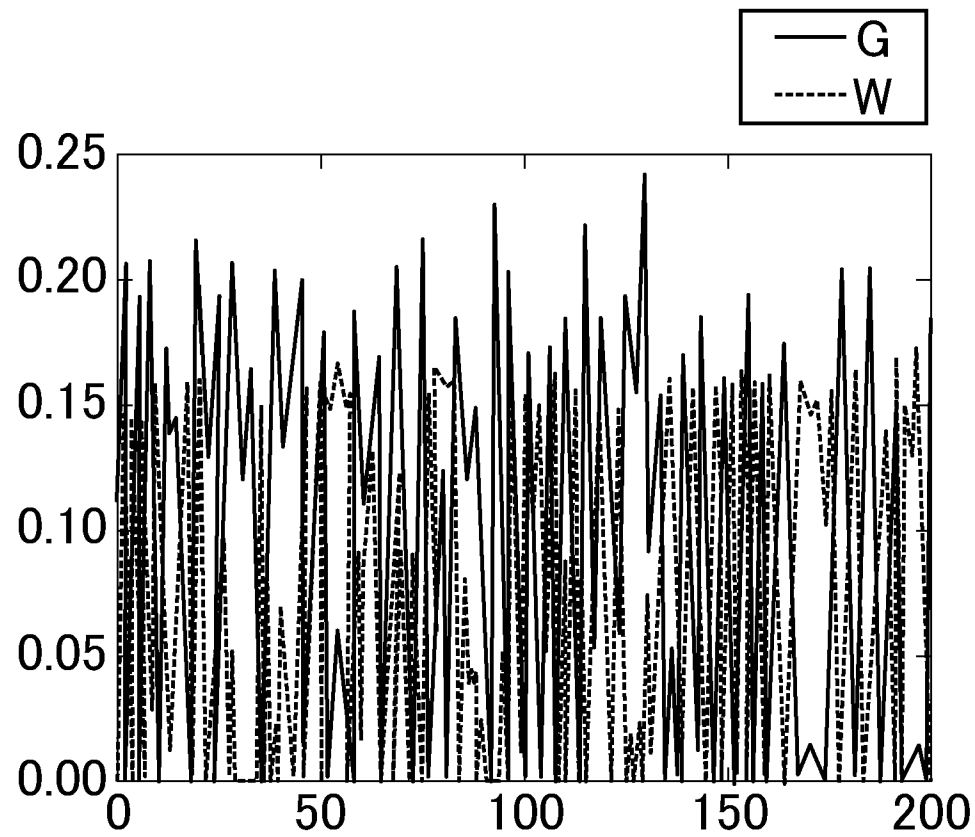
[図23B]

図23B



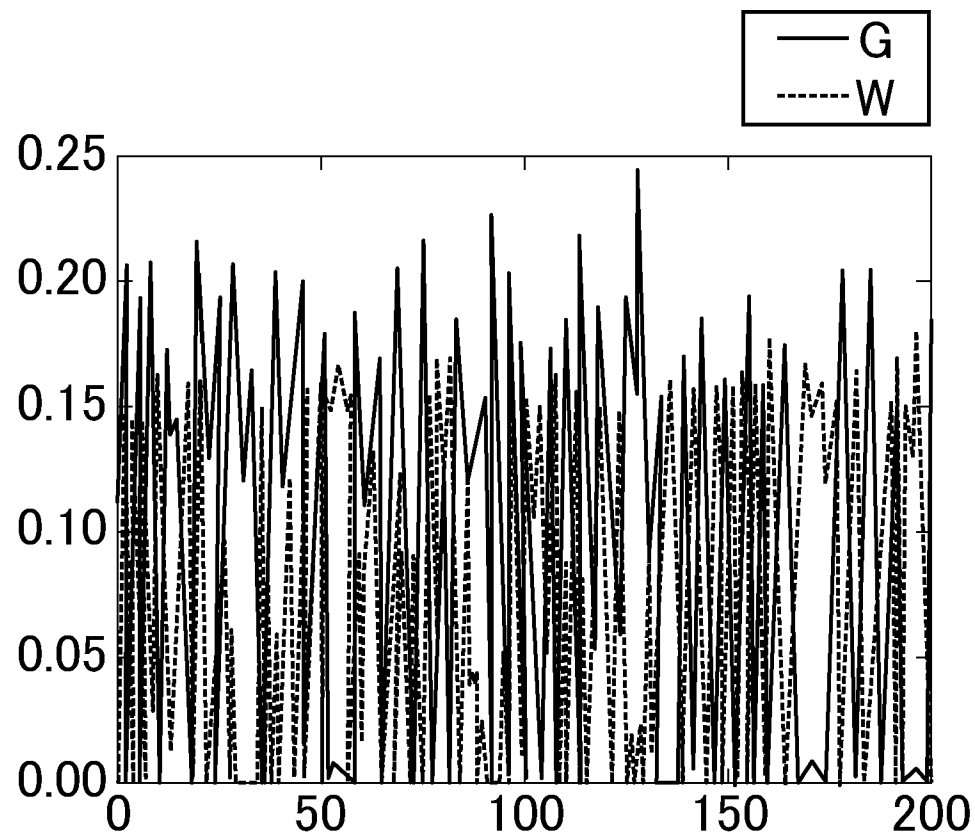
[図23C]

図23C



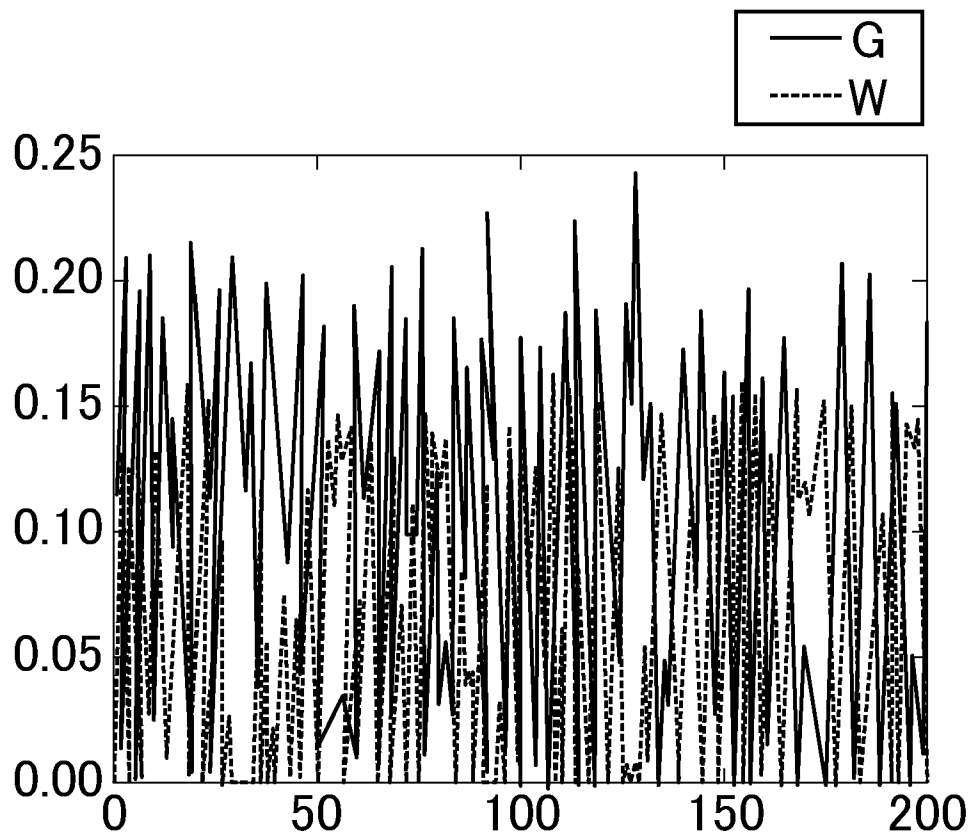
[図23D]

図23D



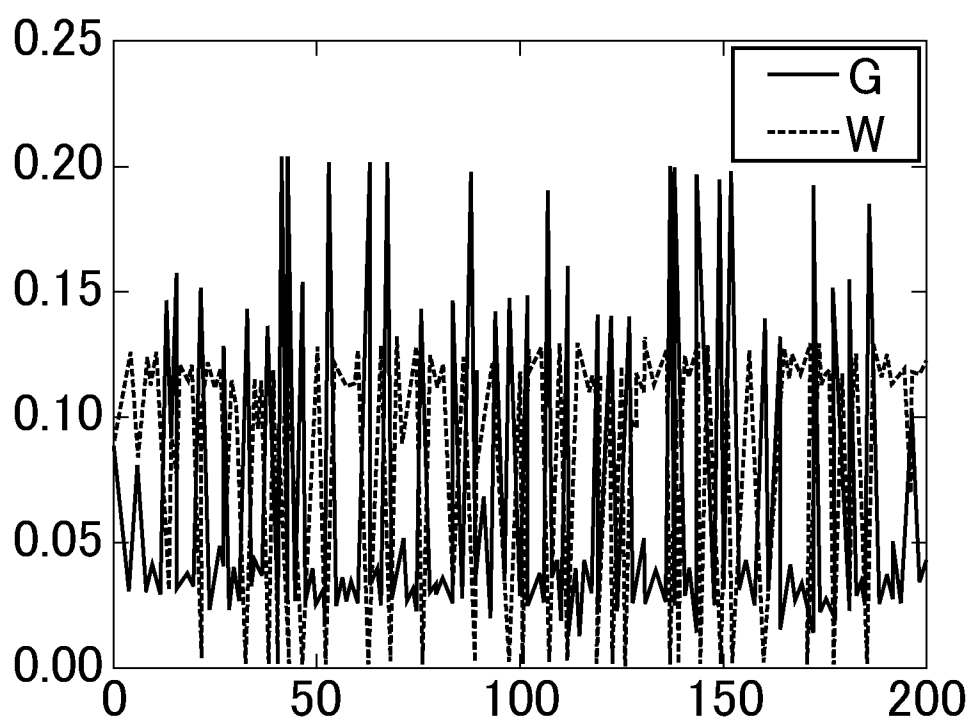
[図23E]

図23E



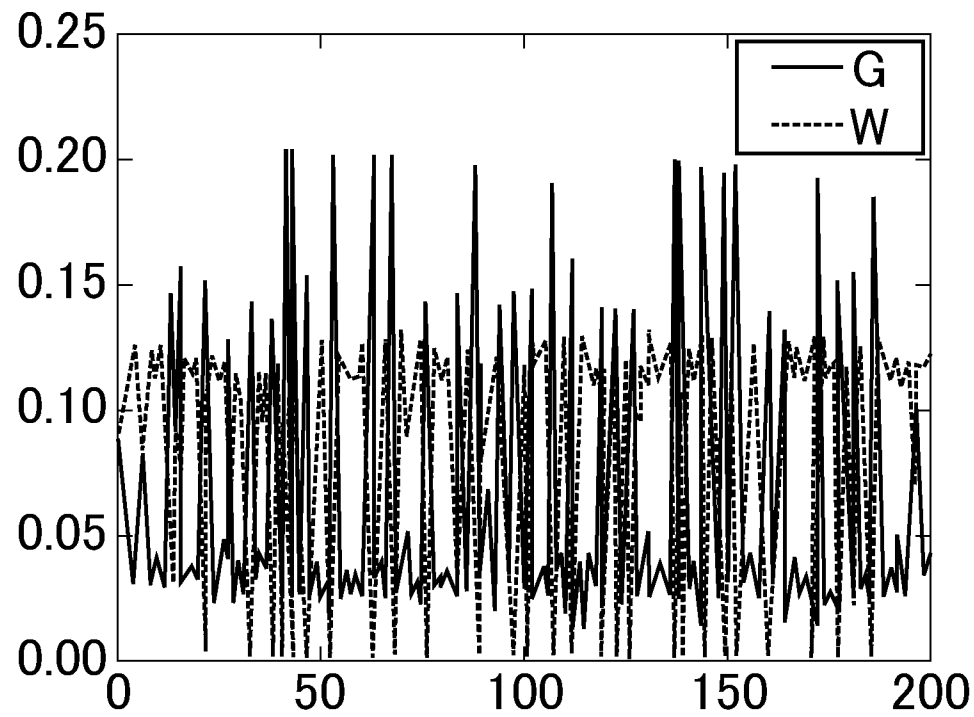
[図24A]

図24A



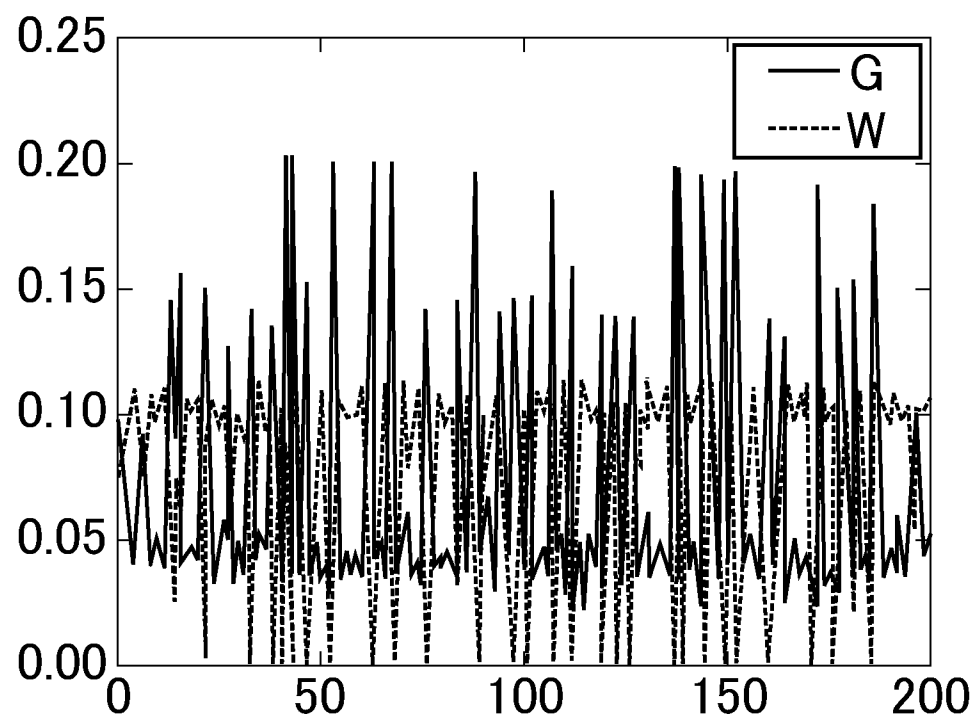
[図24B]

図24B



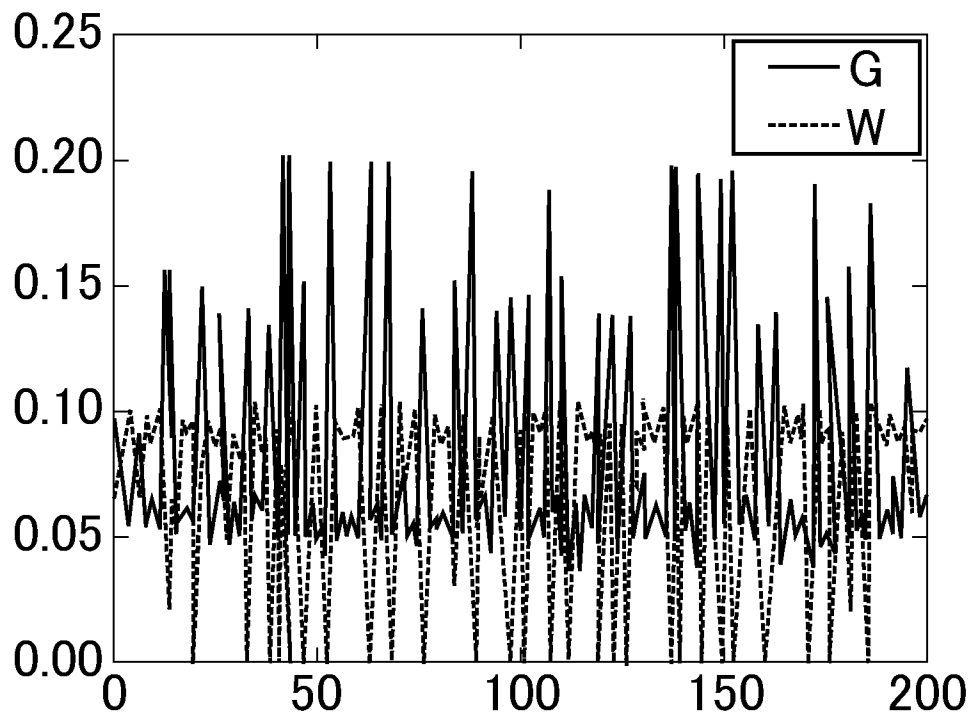
[図24C]

図24C



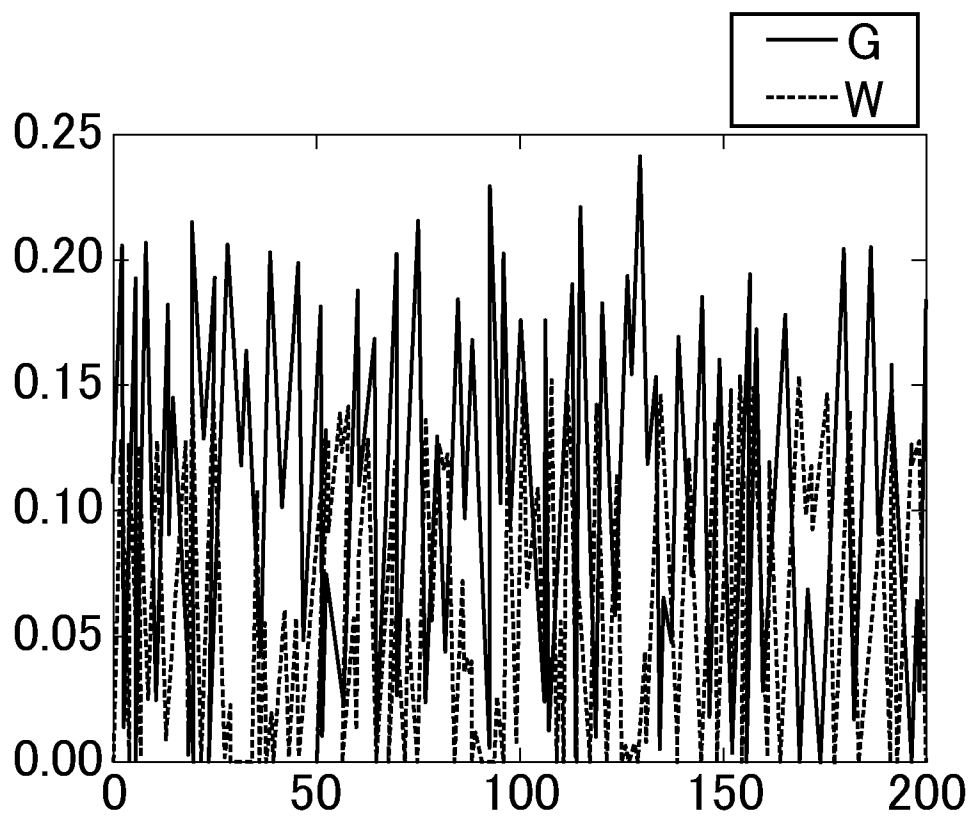
[図24D]

図24D



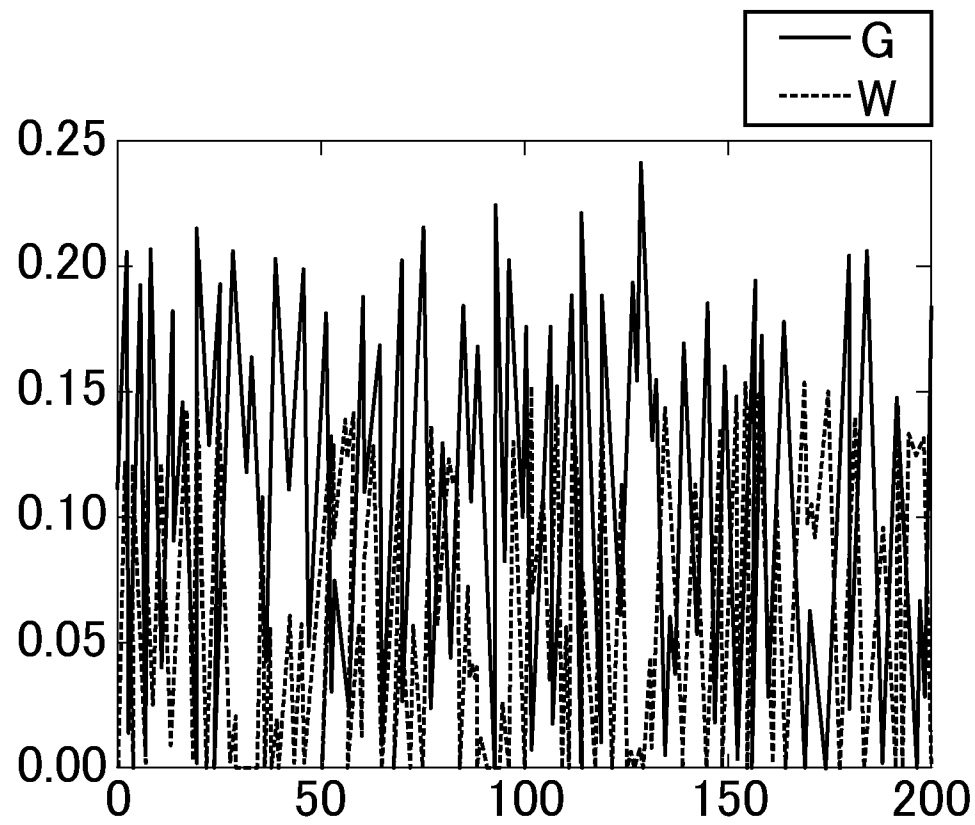
[図25A]

図25A



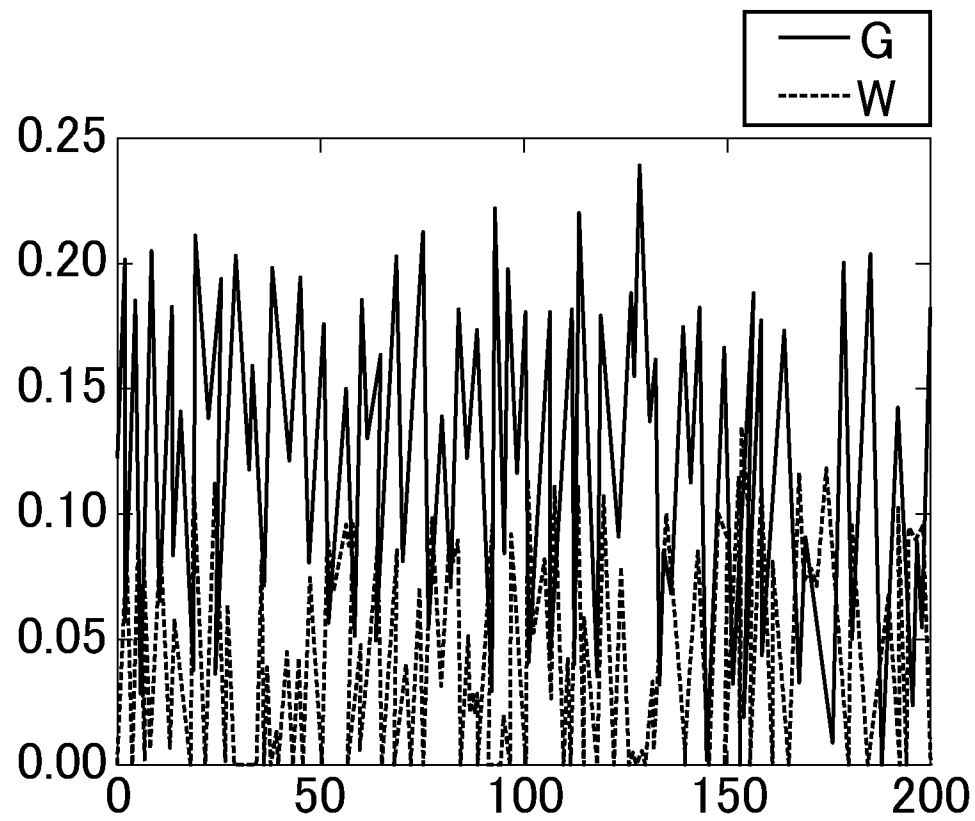
[図25B]

図25B



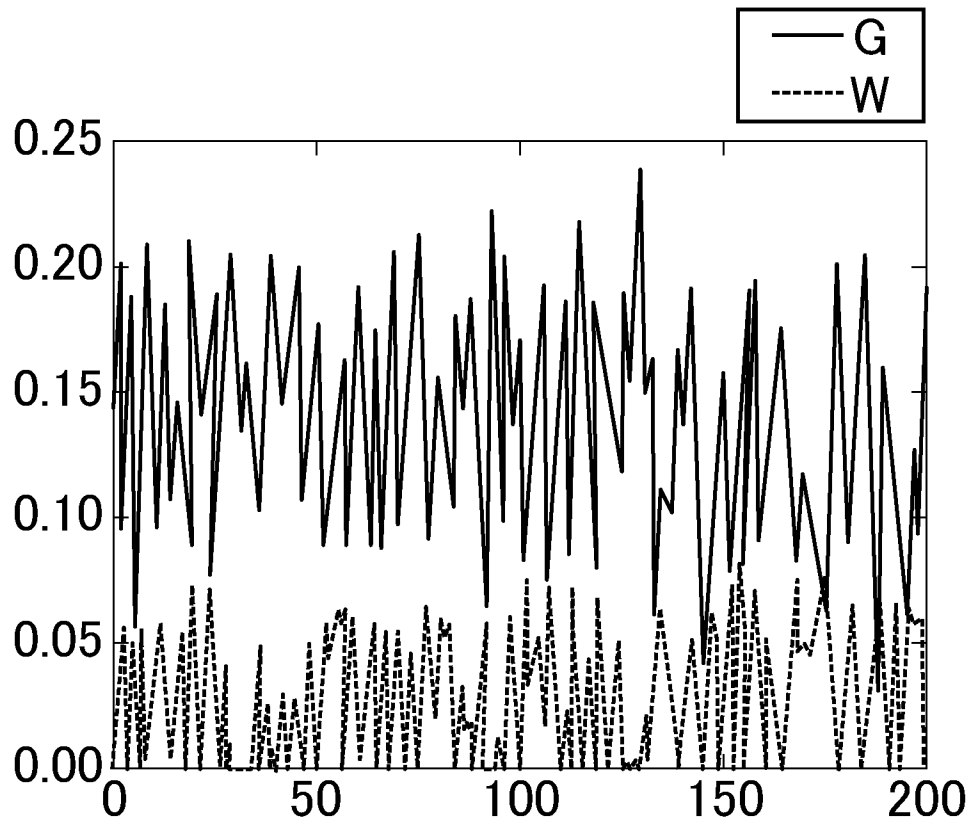
[図25C]

図25C



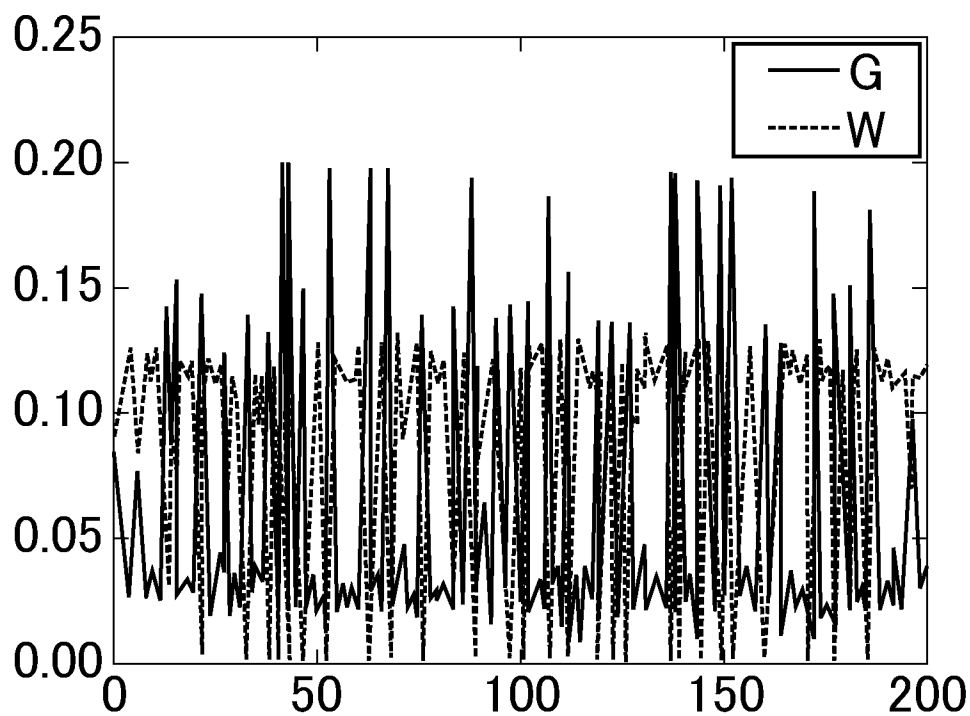
[図25D]

図25D



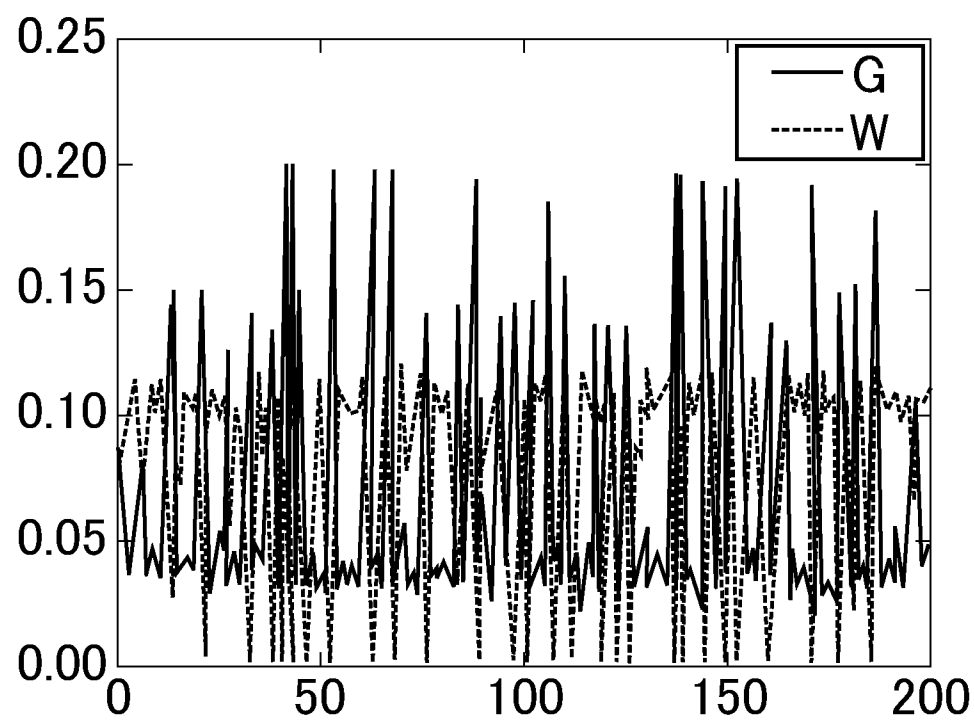
[図26A]

図26A



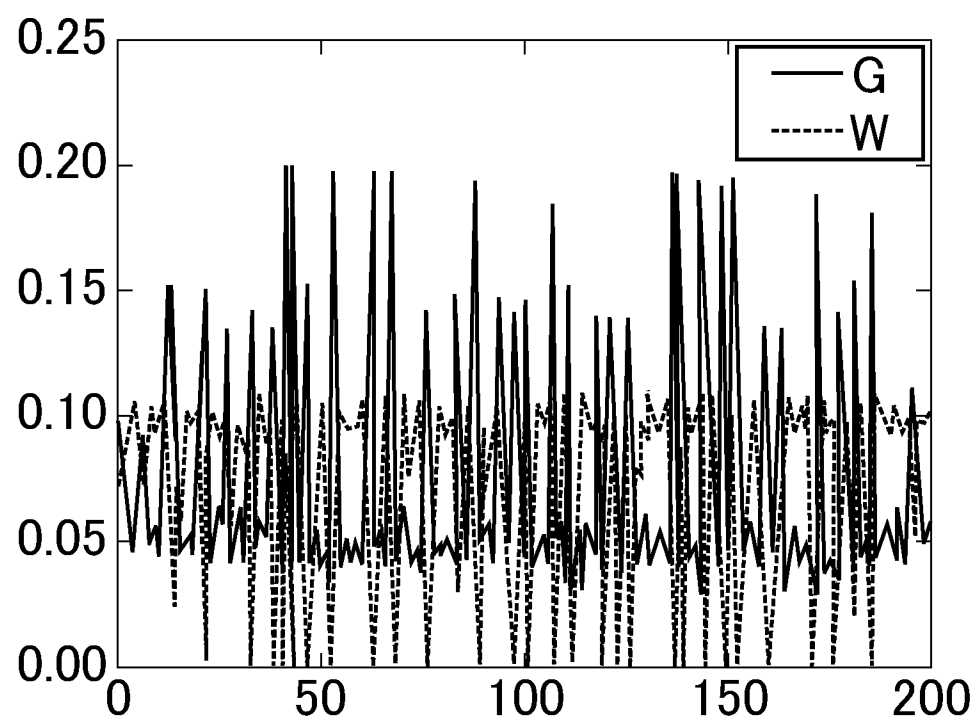
[図26B]

図26B



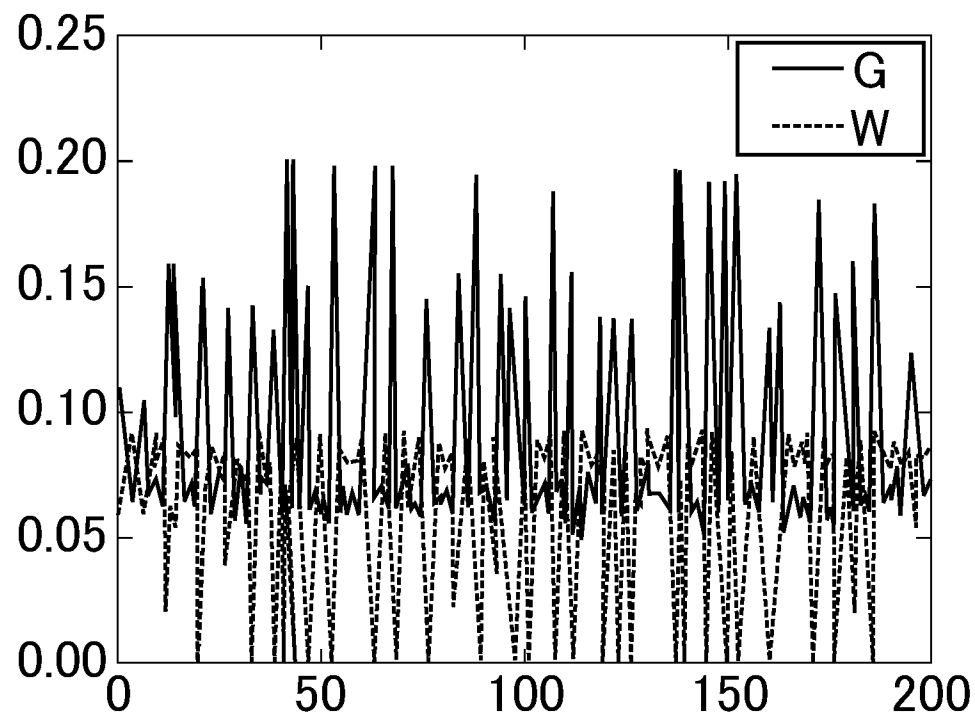
[図26C]

図26C



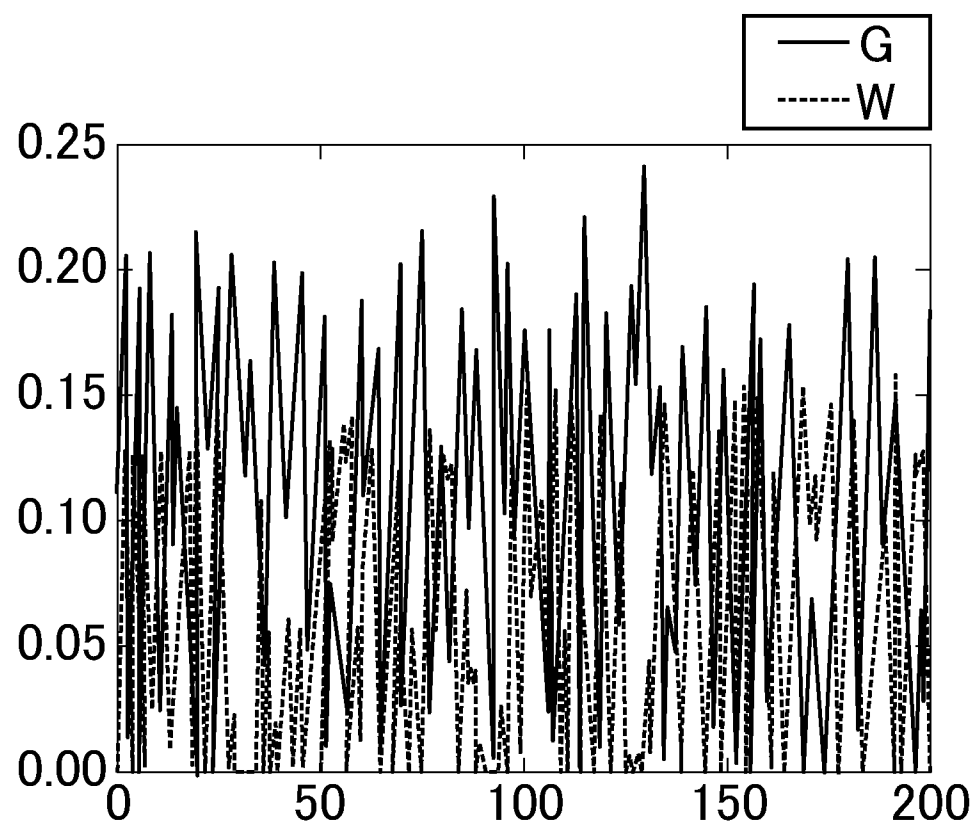
[図26D]

図26D



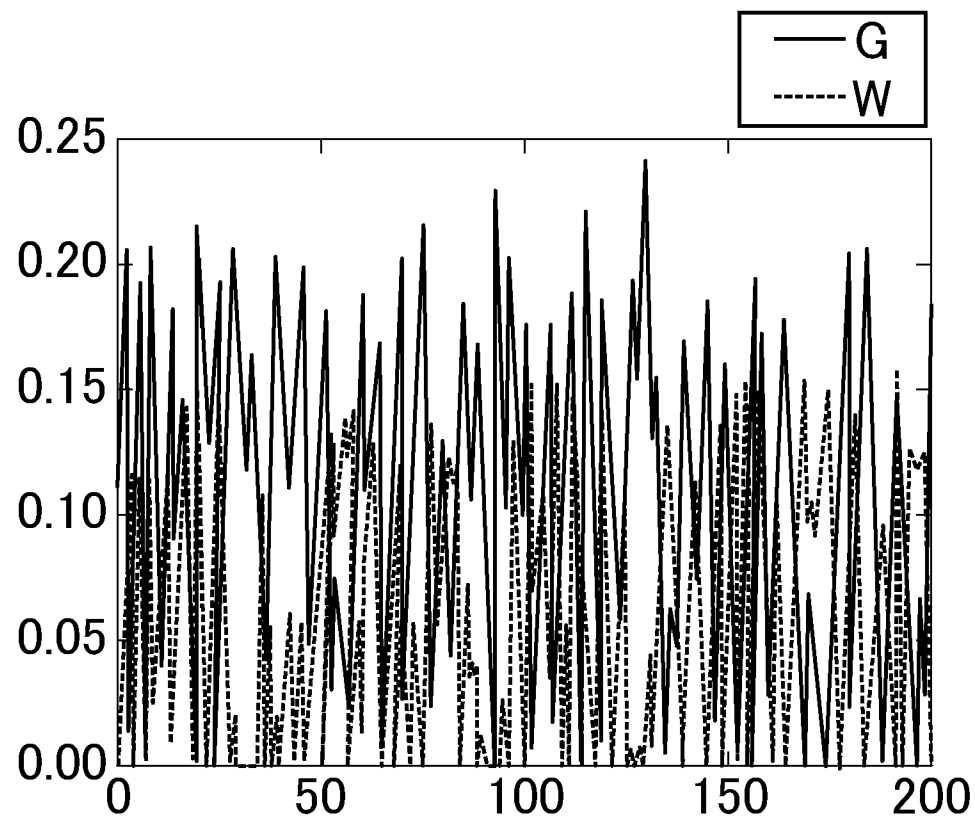
[図27A]

図27A



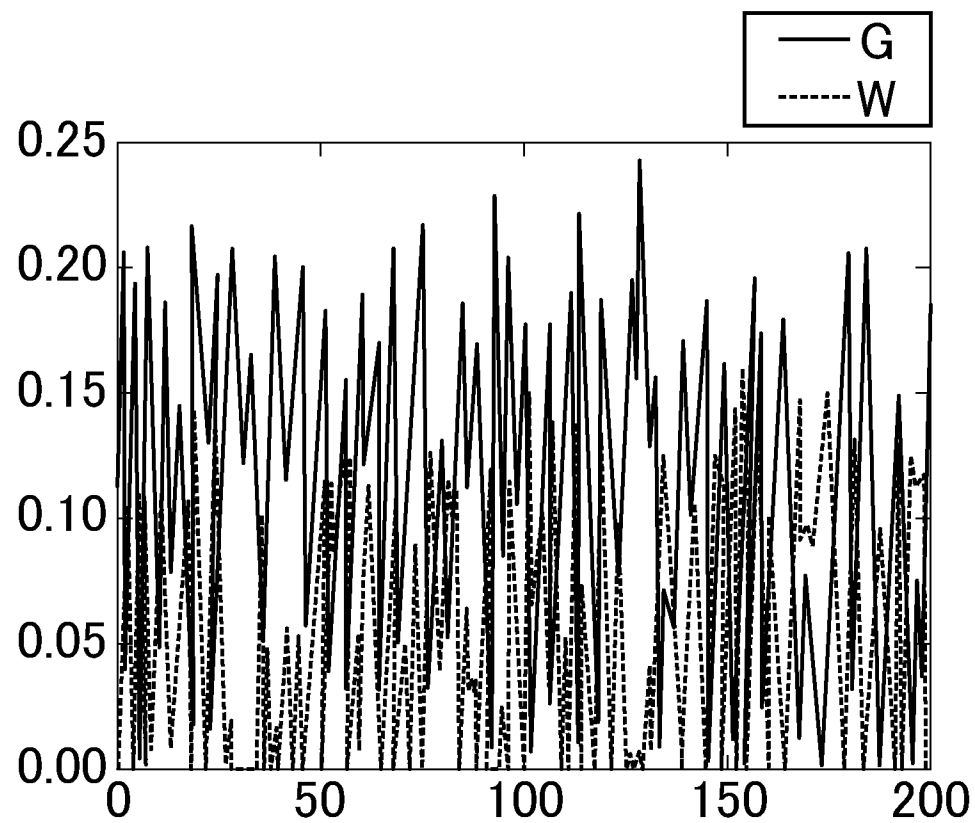
[図27B]

図27B



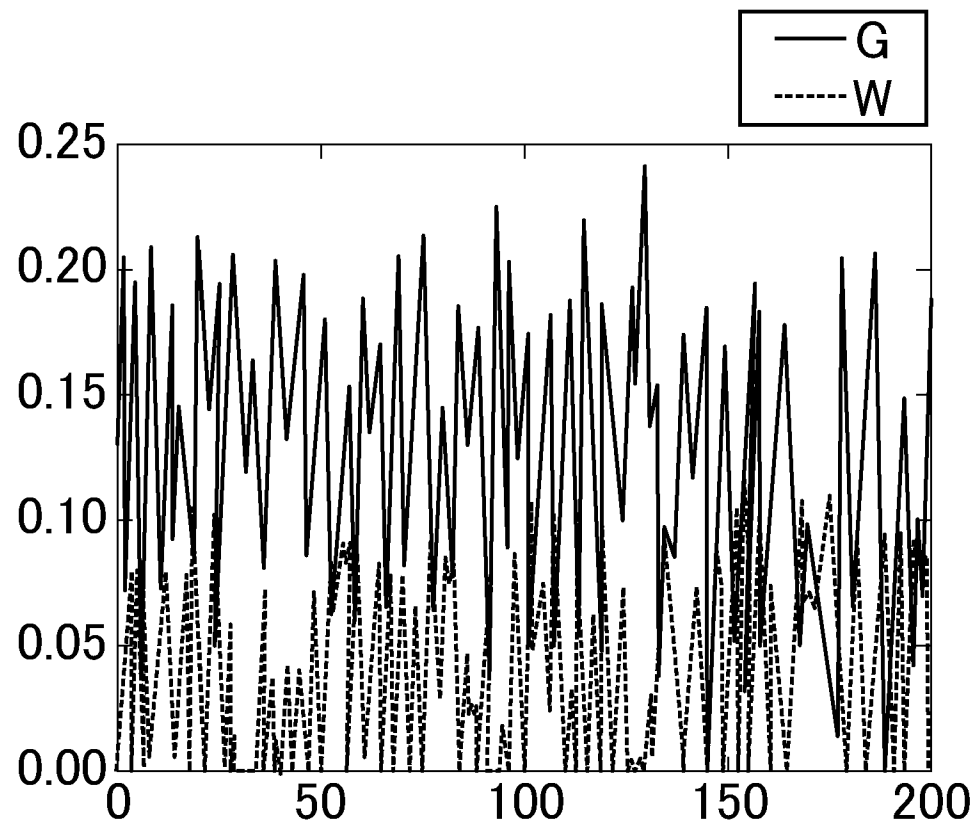
[図27C]

図27C



[図27D]

図27D



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/051619

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01M 99/00 (2011.01) i; G01M 17/08 (2006.01) i; G01M 13/045 (2019.01) i
FI: G01M13/045; G01M99/00 A; G01M17/08

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)

G01M99/00; G01M17/08; G01M13/045

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	1971-2020
Registered utility model specifications of Japan	1996-2020
Published registered utility model applications of Japan	1994-2020

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.
A	JP 2018-163135 A (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 18.10.2018 (2018-10-18) paragraphs [0008]-[0080], fig. 1-17	1-11
A	JP 2013-33196 A (NARA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 14.02.2013 (2013-02-14) paragraphs [0016]-[0082], fig. 1-5	1-11

☐ 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

"I" 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

04 March 2020 (04.03.2020)

Date of mailing of the international search report

17 March 2020 (17.03.2020)

Name and mailing address of the ISA/

Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2019/051619

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 2018-163135 A	18 Oct. 2018	WO 2019/026980 A1 paragraphs [0008]- [0149], fig. 1-23	
JP 2013-33196 A	14 Feb. 2013	US 2013/0010968 A1 paragraphs [0028]- [0099], fig. 1-5 EP 2544180 A1	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01M 99/00(2011.01)i; G01M 17/08(2006.01)i; G01M 13/045(2019.01)i FI: G01M13/045; G01M99/00 A; G01M17/08														
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）） G01M99/00; G01M17/08; G01M13/045														
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														
<table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2020年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2020年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2020年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2020年				
日本国実用新案公報	1922 - 1996年													
日本国公開実用新案公報	1971 - 2020年													
日本国実用新案登録公報	1996 - 2020年													
日本国登録実用新案公報	1994 - 2020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												
A	JP 2018-163135 A（新日鐵住金株式会社）18.10.2018（2018 - 10 - 18） [0008]-[0080], [図1]-[図17]	1-11												
A	JP 2013-33196 A（国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学）14.02.2013 （2013 - 02 - 14） [0016]-[0082], [図1]-[図5]	1-11												
☐ 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。														
<table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</td> <td>“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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</td> </tr> <tr> <td>“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの</td> <td>“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</td> </tr> <tr> <td>“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</td> <td>“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</td> </tr> <tr> <td>“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）</td> <td>“&” 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>“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</td> <td></td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー	“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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“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	“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	“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	“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）	“&” 同一パテントファミリー文献	“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	
* 引用文献のカテゴリー	“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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの													
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“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													
“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	“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													
“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）	“&” 同一パテントファミリー文献													
“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														
国際調査を完了した日 04.03.2020	国際調査報告の発送日 17.03.2020													
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 川瀬 正巳 2J 5260 電話番号 03-3581-1101 内線 3252													

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2019/051619

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
JP	2018-163135	A	18.10.2018	WO	2019/026980	A1	
				[0008]-[0149], [図1]-[図23]			
JP	2013-33196	A	14.02.2013	US	2013/0010968	A1	
				[0028]-[0099], FIGS1-5			
				EP	2544180	A1	