

(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6月18日(18.06.2020)



(10) 国際公開番号

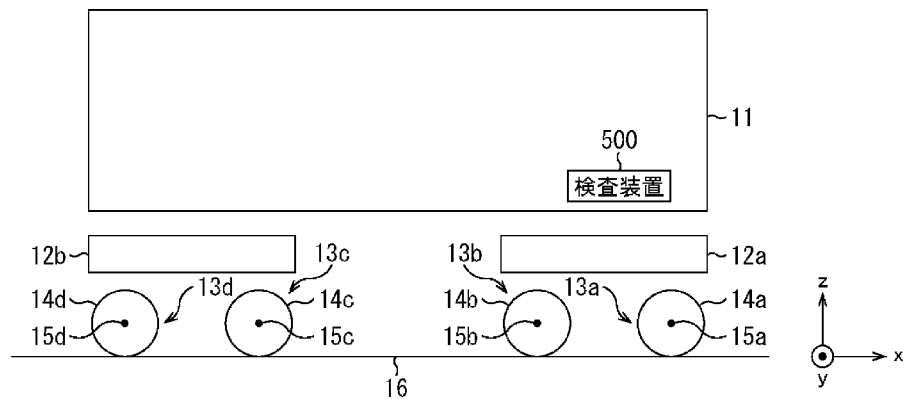
WO 2020/121943 A1

- (51) 国際特許分類:
B61K 9/08 (2006.01) E01B 35/04 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/047673
- (22) 国際出願日: 2019年12月5日(05.12.2019)
- (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 2018-230834 2018年12月10日(10.12.2018) 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).
- (74) 代理人: 國分 孝悦 (KOKUBUN, Takayoshi); 〒1700013 東京都豊島区東池袋1丁目17番8号 NBF池袋シティビル5階 Tokyo (JP).

(54) Title: INSPECTION SYSTEM, INSPECTING METHOD, AND PROGRAM

(54) 発明の名称: 検査システム、検査方法、およびプログラム

図1



500 Inspecting device

(57) Abstract: An inspecting device (500) derives a state variable by applying a measured value of a front-rear direction force, and an actual value of a conversion variable, to a Kalman filter. At this time, a fixed value (for example 0 (zero)), set in advance as a value originally applied as a measured value of an observed variable (acceleration in left-right direction of vehicle body (11), bogies (12a, 12b), and wheel sets (13a to 13d)) is used during data assimilation.



WO 2020/121943 A1

(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))

(57) 要約 : 検査装置 (500) は、前後方向力の測定値と、変換変数の実績値と、をカルマンフィルタに与えて、状態変数を導出する。このとき、データ同化の際に本来は観測変数の測定値として与えられる値 (車体 (11)、台車 (12 a、12 b)、および輪軸 (13 a ~ 13 d) の左右方向における加速度) として予め設定された一定値 (例えば0 (ゼロ)) が用いられる。

明 細 書

発明の名称： 検査システム、検査方法、およびプログラム

技術分野

[0001] 本発明は、検査システム、検査方法、およびプログラムに関し、特に、鉄道車両の軌道を検査するために用いて好適なものである。本願は、2018年12月10日に日本に出願された特願2018-230834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] 軌道上を鉄道車両が走行すると鉄道車両からの荷重により軌道の位置が変化する。このような軌道の変化が生じると、鉄道車両が異常な挙動を示す虞がある。そこで、特許文献1には、輪軸のヨーイングを記述する運動方程式に、輪軸のヨーイング方向における角変位と、データ同化を行うフィルタにより求めた状態変数と、軸箱を支持するための部材に生じる前後方向の力である前後方向力の測定値と、を代入して、鉄道車両の軌道不整（通り狂い量等）を導出する技術が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：国際公開第2017/164133号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] しかしながら、特許文献1に記載の技術では、データ同化を行う際に、前後方向力の測定値と、輪軸および台車（必要に応じて更に車体）のそれぞれにおける左右方向の加速度の測定値を用いる。これらの測定値は、特殊なセンサを用いなくても得ることができるが、鉄道車両に配置するセンサの数は少ない方が好ましい。

[0005] 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、鉄道車両の軌道不整を検知するために用いるセンサの数を低減することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] 本発明の検査システムは、車体と台車と輪軸とを有する鉄道車両を軌道上で走行させることにより測定される測定値のデータとして、前後方向力の測定値のデータを取得するデータ取得手段と、前記鉄道車両の運動を記述した運動方程式を用いて構成される状態方程式で決定すべき変数である状態変数を、前記前後方向力の測定値を用いて導出する状態変数導出手段と、前記軌道の状態を反映する情報を導出する軌道状態導出手段と、を有し、前記前後方向力は、前記輪軸と、当該輪軸が設けられる前記台車との間に配置される部材に生じる前後方向の力であって、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と、当該輪軸が設けられる前記台車のヨーイング方向の角変位との差に応じて定まる力であり、前記部材は、軸箱を支持するための部材であり、前記前後方向は、前記鉄道車両の走行方向に沿う方向であり、前記ヨーイング方向は、前記軌道に対し垂直な方向である上下方向を回動軸とする回動方向であり、前記状態方程式は、前記状態変数と、前記前後方向力と、変換変数と、を用いて記述される方程式であり、前記状態変数は、前記台車の左右方向の変位および速度と、前記台車のヨーイング方向の角変位および角速度と、前記台車のローリング方向の角変位および角速度と、前記輪軸の左右方向の変位および速度と、前記鉄道車両に取り付けられている空気バネのローリング方向の角変位と、を含み、前記輪軸のヨーイング方向の角変位および角速度を含まず、前記ローリング方向は、前記前後方向を回動軸とする回動方向であり、前記変換変数は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と前記台車のヨーイング方向の角変位とを相互に変換する変数であり、前記軌道状態導出手段は、前記状態変数導出手段により導出された前記状態変数の一つである前記台車のヨーイング方向の角変位と、前記変換変数の実績値と、を用いて、前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を導出し、導出した前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を用いて前記軌道の状態を反映する情報を導出し、前記変換変数の実績値は、前記前後方向力の測定値を用いて導出され、前記状態変数導出手段は、前記前後方向力の測定値が得られた期間におけ

る、前記台車、前記輪軸、および前記車体の左右方向の加速度の測定値を用いずに、前記状態変数を導出することを特徴とする。

[0007] 本発明の検査方法は、車体と台車と輪軸とを有する鉄道車両を軌道上で走行させることにより測定される測定値のデータとして、前後方向力の測定値のデータを取得するデータ取得工程と、前記鉄道車両の運動を記述した運動方程式を用いて構成される状態方程式で決定すべき変数である状態変数を、前記前後方向力の測定値を用いて導出する状態変数導出工程と、前記軌道の状態を反映する情報を導出する軌道状態導出工程と、を有し、前記前後方向力は、前記輪軸と、当該輪軸が設けられる前記台車との間に配置される部材に生じる前後方向の力であって、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と、当該輪軸が設けられる前記台車のヨーイング方向の角変位との差に応じて定まる力であり、前記部材は、軸箱を支持するための部材であり、前記前後方向は、前記鉄道車両の走行方向に沿う方向であり、前記ヨーイング方向は、前記軌道に対し垂直な方向である上下方向を回動軸とする回動方向であり、前記状態方程式は、前記状態変数と、前記前後方向力と、変換変数と、を用いて記述される方程式であり、前記状態変数は、前記台車の左右方向の変位および速度と、前記台車のヨーイング方向の角変位および角速度と、前記台車のローリング方向の角変位および角速度と、前記輪軸の左右方向の変位および速度と、前記鉄道車両に取り付けられている空気バネのローリング方向の角変位と、を含み、前記輪軸のヨーイング方向の角変位および角速度を含まず、前記ローリング方向は、前記前後方向を回動軸とする回動方向であり、前記変換変数は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と前記台車のヨーイング方向の角変位とを相互に変換する変数であり、前記軌道状態導出工程は、前記状態変数導出工程により導出された前記状態変数の一つである前記台車のヨーイング方向の角変位と、前記変換変数の実績値と、を用いて、前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を導出し、導出した前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を用いて前記軌道の状態を反映する情報を導出し、前記変換変数の実績値は、前記前後方向力の測定値を用いて導出され、前

記状態変数導出工程は、前記前後方向力の測定値が得られた期間における、前記台車、前記輪軸、および前記車体の左右方向の加速度の測定値を用いずに、前記状態変数を導出することを特徴とする。

[0008] 本発明のプログラムは、車体と台車と輪軸とを有する鉄道車両を軌道上で走行させることにより測定される測定値のデータとして、前後方向力の測定値のデータを取得するデータ取得工程と、前記鉄道車両の運動を記述した運動方程式を用いて構成される状態方程式で決定すべき変数である状態変数を、前記前後方向力の測定値を用いて導出する状態変数導出工程と、前記軌道の状態を反映する情報を導出する軌道状態導出工程と、をコンピュータに実行させ、前記前後方向力は、前記輪軸と、当該輪軸が設けられる前記台車との間に配置される部材に生じる前後方向の力であって、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と、当該輪軸が設けられる前記台車のヨーイング方向の角変位との差に応じて定まる力であり、前記部材は、軸箱を支持するための部材であり、前記前後方向は、前記鉄道車両の走行方向に沿う方向であり、前記ヨーイング方向は、前記軌道に対し垂直な方向である上下方向を回動軸とする回動方向であり、前記状態方程式は、前記状態変数と、前記前後方向力と、変換変数と、を用いて記述される方程式であり、前記状態変数は、前記台車の左右方向の変位および速度と、前記台車のヨーイング方向の角変位および角速度と、前記台車のローリング方向の角変位および角速度と、前記輪軸の左右方向の変位および速度と、前記鉄道車両に取り付けられている空気バネのローリング方向の角変位と、を含み、前記輪軸のヨーイング方向の角変位および角速度を含まず、前記ローリング方向は、前記前後方向を回動軸とする回動方向であり、前記変換変数は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と前記台車のヨーイング方向の角変位とを相互に変換する変数であり、前記軌道状態導出工程は、前記状態変数導出工程により導出された前記状態変数の一つである前記台車のヨーイング方向の角変位と、前記変換変数の実績値と、を用いて、前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を導出し、導出した前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を用いて前記軌道の状態を

反映する情報を導出し、前記変換変数の実績値は、前記前後方向力の測定値を用いて導出され、前記状態変数導出工程は、前記前後方向力の測定値が得られた期間における、前記台車、前記輪軸、および前記車体の左右方向の加速度の測定値を用いずに、前記状態変数を導出することを特徴とする。

図面の簡単な説明

- [0009] [図1]図1は、鉄道車両の概略の一例を示す図である。
- [図2]図2は、鉄道車両の構成要素の主な運動の方向を概念的に示す図である。
- [図3]図3は、台車の左右方向における加速度と、輪軸の左右方向における加速度のそれぞれにおける測定値および計算値を示す図である。
- [図4A]図4Aは、直線軌道における通り狂い量の一例を示す図である。
- [図4B]図4Bは、曲線軌道における通り狂い量の一例を示す図である。
- [図5]図5は、検査装置の機能的な構成の一例を示す図である。
- [図6]図6は、検査装置のハードウェアの構成の一例を示す図である。
- [図7]図7は、検査装置における処理の一例を示すフローチャートである。
- [図8]図8は、自己相関行列の固有値の分布の一例を示す図である。
- [図9]図9は、前後方向力の測定値の時系列データ（測定値）と、前後方向力の予測値の時系列データ（計算値）の一例を示す図である。
- [図10]図10は、前後方向力の高周波成分の時系列データの一例を示す図である。
- [図11]図11は、検査システムの構成の一例を示す図である。
- [図12]図12は、計算例を示す図であって、通り狂い量の導出対象の軌道の曲率 $1/R$ と、鉄道車両の走行速度を示す図である。
- [図13A]図13Aは、計算例を示す図であって、自己相関行列 R の固有値の分布の第1の例を示す図である。
- [図13B]図13Bは、計算例を示す図であって、自己相関行列 R の固有値の分布の第2の例を示す図である。
- [図14]図14は、計算例を示す図であって、前後方向力の測定値の時系列デ

ータと、前後方向力の予測値の時系列データとを示す図である。

[図15]図15は、計算例を示す図であって、前後方向力の高周波成分の時系列データを示す図である。

[図16A]図16Aは、第1の実施形態の手法による計算例を示す図であって、通り狂い量 y_R の第1の例を示す図である。

[図16B]図16Bは、第1の実施形態の手法による計算例を示す図であって、通り狂い量 y_R の第2の例を示す図である。

[図17A]図17Aは、第2の実施形態の手法による計算例を示す図であって、通り狂い量 y_R の第1の例を示す図である。

[図17B]図17Bは、第2の実施形態の手法による計算例を示す図であって、通り狂い量 y_R の第1の例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、図面を参照しながら、本発明の実施形態を説明する。

(着想)

まず、本発明の実施形態の実現に際し、本発明者らが得た着想について説明する。

図1は、鉄道車両の概略の一例を示す図である。尚、図1において、鉄道車両は、 x 軸の正の方向に進むものとする（ x 軸は、鉄道車両の走行方向に沿う軸である）。また、 z 軸は、軌道16（地面）に対し垂直方向（鉄道車両の高さ方向）であるものとする。 y 軸は、鉄道車両の走行方向に対して垂直な水平方向（鉄道車両の走行方向と高さ方向との双方に垂直な方向）であるものとする。また、鉄道車両は、営業車両であるものとする。尚、各図において、○の中に●が付されているものは、紙面の奥側から手前側に向かう方向を示し、○の中に×が付されているものは、紙面の手前側から奥側に向かう方向を示す。

[0011] 図1に示すように本実施形態では、鉄道車両は、車体11と、台車12a、12bと、輪軸13a~13dとを有する。このように本実施形態では、1つの車体11に、2つの台車12a、12bと4組の輪軸13a~13d

とが備わる鉄道車両を例に挙げて説明する。輪軸13a~13dは、車軸15a~15dとその両端に設けられた車輪14a~14dとを有する。本実施形態では、台車12a、12bが、ボルスタレス台車である場合を例に挙げて説明する。尚、図1では、表記の都合上、輪軸13a~13dの一方の車輪14a~14dのみを示すが、輪軸13a~13dの他方にも車輪が設けられている（図1に示す例では、車輪は合計8個ある）。また、鉄道車両は、図1に示す構成要素以外の構成要素（後述する運動方程式で説明する構成要素等）を有するが、表記の都合上、図1では、当該構成要素の図示を省略する。例えば、台車12a、12bは、台車枠および枕バネなどを有する。また、各輪軸13a~13dのy軸に沿う方向の両側には、軸箱が配置される。また、台車枠と軸箱は、軸箱支持装置により相互に結合される。軸箱支持装置は、軸箱および台車枠の間に配置される装置（サスペンション）である。軸箱支持装置は、軌道16から鉄道車両に伝わる振動を吸収する。また、軸箱支持装置は、軸箱が台車枠に対してx軸に沿う方向およびy軸に沿う方向に移動することを抑制するように（好ましくは、当該移動が生じないように）軸箱の台車枠に対する位置を規制した状態で軸箱を支持する。軸箱支持装置は、各輪軸13a~13dのy軸に沿う方向の両側に配置される。尚、鉄道車両自体は公知の技術で実現できるので、ここでは、その詳細な説明を省略する。

[0012] 鉄道車両が軌道16上を走行すると、車輪14a~14dと軌道16との間の作用力（クリープ力）が振動源となり、輪軸13a~13d、台車12a、12b、車体11に振動が順次伝搬する。図2は、鉄道車両の構成要素（輪軸13a~13d、台車12a、12b、車体11）の主な運動の方向を概念的に示す図である。図2に示すx軸、y軸、z軸は、それぞれ、図1に示したx軸、y軸、z軸に対応する。

[0013] 図2に示すように本実施形態では、輪軸13a~13d、台車12a、12b、および車体11が、x軸を回動軸として回動する運動と、z軸を回動軸として回動する運動と、y軸に沿う方向の運動とを行う場合を例に挙げて

説明する。以下の説明では、 x 軸を回動軸として回動する運動を必要に応じてローリングと称し、 x 軸を回動軸とする回動方向を必要に応じてローリング方向と称し、 x 軸に沿う方向を必要に応じて前後方向と称する。尚、前後方向は、鉄道車両の走行方向である。本実施形態では、 x 軸に沿う方向が鉄道車両の走行方向であるものとする。また、 z 軸を回動軸として回動する運動を必要に応じてヨーイングと称し、 z 軸を回動軸とする回動方向を必要に応じてヨーイング方向と称し、 z 軸に沿う方向を必要に応じて上下方向と称する。尚、上下方向は、軌道16に対し垂直な方向である。また、 y 軸に沿う方向の運動を必要に応じて横振動と称し、 y 軸に沿う方向を必要に応じて左右方向と称する。尚、左右方向は、前後方向（鉄道車両の走行方向）と上下方向（軌道16に対し垂直な方向）との双方に垂直な方向である。また、鉄道車両は、この他の運動も行うが、各実施形態では説明を簡単にするため、これらの運動については考慮しないものとする。しかしながら、これらの運動を考慮してもよい。

[0014] [第1の着想]

特許文献1に記載の技術では、輪軸13a、13b、13c、13dの左右方向における加速度 y_{w1} 、 y_{w2} 、 y_{w3} 、 y_{w4} と、台車12a、12bの左右方向における加速度 y_{t1} 、 y_{t2} と、必要に応じて更に車体11の左右方向における加速度 y_b を観測変数として用いて、データ同化を行うフィルタ（カルマンフィルタ）によるフィルタリングを行うことにより状態変数を導出する。

[0015] 図3は、台車12aの左右方向における加速度 y_{t1} と、輪軸13a、13bの左右方向における加速度 y_{w1} 、 y_{w2} のそれぞれにおける測定値および計算値を示す。計算値は、データ同化により算出される観測変数の推定値である。図3の横軸は、基準の時刻を0（ゼロ）とした場合の当該基準の時刻からの経過時間（秒）である。具体的に図3の横軸は、台車12aの左右方向における加速度 y_{t1} と、輪軸13a、13bの左右方向における加速度 y_{w1} 、 y_{w2} の測定時刻・計算時刻を表す。データ同化

を行う際には、本来は観測変数の測定値として与えられる値と推定値との誤差が最小または当該誤差の期待値が最小になるように状態変数の推定値を導出する。

[0016] 図3に示すように、輪軸13a、13bの左右方向における加速度 y_{w1} 、 y_{w2} の測定値および台車12aの左右方向における加速度 y_{t1} 、 y_{t2} の測定値には多くのノイズが含まれる。このことから、本発明者らは、軌道16（軌条）の状態によっては、データ同化を行っても、推定値が測定値に近づかず、概ね一定値になるという知見を得た。このことは、輪軸13c、13dの左右方向における加速度 y_{w3} 、 y_{w4} と、台車12bの左右方向における加速度 y_{t2} と、車体11の左右方向における加速度 y_b についても同じである。このことから、本発明者らは、状態変数の導出の際に、これらの加速度の測定値を用いなくても、通り狂い量 y_{R1} 、 y_{R2} 、 y_{R3} 、 y_{R4} を、精度を大きく落とすことなく導出することができるのではないかと考えた。

[0017] [第2の着想]

特許文献1に記載のように、本発明者らは、輪軸13a～13b（13c～13d）と、当該輪軸13a～13b（13c～13d）が設けられる台車12a（12b）との間に配置される部材に生じる前後方向の力の測定値を用いて、通り狂い量を算出する方法に想到した。以下の説明では、この部材に生じる前後方向の力を、必要に応じて前後方向力と称する。

[0018] 通り狂い量は、鉄道車両の直線軌道の走行時における運動を記述する運動方程式に基づく式であって、通り狂い量と前後方向力との関係を示す式を用いて算出される。軌道16には、直線部と曲線部とが含まれる。以下の説明では、軌道16の直線部を必要に応じて直線軌道と称し、軌道16の曲線部を必要に応じて曲線軌道と称する。

[0019] データ同化を行うフィルタ（カルマンフィルタ）によるフィルタリングを行う場合に、曲線軌道を走行する鉄道車両の運動を記述する運動方程式を用いて状態方程式を構成すると、状態変数が発散する虞がある。そこで、デー

タ同化を行うフィルタ（カルマンフィルタ）によるフィルタリングを行う場合の状態方程式を、直線軌道を走行する鉄道車両の運動を記述する運動方程式を用いて構成する。

曲線軌道を走行する鉄道車両の運動を記述する運動方程式では、走行時に鉄道車両が受ける遠心力等を考慮する必要がある。従って、曲線軌道を走行する鉄道車両の運動を記述する運動方程式には、軌条（レール）の曲率半径を含む項が含まれる。よって、鉄道車両が曲線軌道を走行しているときに、直線軌道を走行する鉄道車両の運動を記述する運動方程式を用いて構成したデータ同化を行うフィルタ（カルマンフィルタ）を用いて状態変数を導出すると、状態変数を高精度に導出することができなくなる虞がある。

[0020] 本発明者らは、鉄道車両が曲線軌道を走行する場合には、直線軌道を走行しているときに対し、前後方向力の測定値が或るバイアスを持つことに着目した。通り狂いによる前後方向力の成分自体は、曲線軌道であっても、直線軌道であっても同じように生じる。そこで、本発明者らは、通り狂い量自体は、前記バイアスの量とは無関係であると考え、前後方向力の測定値の時系列データから低周波成分（前記バイアスの挙動）を低減させることにより、鉄道車両の直線軌道の走行時における運動を記述する運動方程式に基づく式を用いてデータ同化を行うフィルタ（カルマンフィルタ）を構成しても、状態変数の推定値から、鉄道車両が曲線軌道を走行することに起因する低周波成分を低減することができると考えた。このことから、本発明者らは、低周波成分が低減された前後方向力の値の時系列データを用いて通り狂い量を算出することに想到した。このようにして通り狂い量を算出することによって、鉄道車両の直線軌道の走行時における運動を記述する運動方程式に基づく式を用いているのにも関わらず、曲線軌道における通り狂い量を算出することができる。また、通り狂い量の算出式は、曲線軌道であっても直線軌道であっても同じ算出式になる。尚、設計上は直線軌道であっても、実際には通り狂い量の推定精度に影響を与える程度の曲率を有することがある。従って、曲線軌道だけではなく、直線軌道においても、前後方向力の測定値の時系

列データから低周波成分（前記バイアスの挙動）を低減させることは、通り狂い量の推定精度の向上に寄与する。以下では、設計上は直線軌道であっても、実際には通り狂い量の推定精度に影響を与える程度の曲率を有する軌道も曲線軌道であるものとして説明を行う。

[0021] （運動方程式）

次に、鉄道車両の運動を記述する運動方程式の一例を説明する。本実施形態では、特許文献 1 に記載の運動方程式を例に挙げ、鉄道車両が 21 自由度を有する場合を例に挙げて説明する。即ち、輪軸 13 a～13 d が、左右方向における運動（横振動）とヨーイング方向における運動（ヨーイング）とを行うものとする（ 2×4 セット = 8 自由度）。また、台車 12 a、12 b が、左右方向における運動（横振動）とヨーイング方向における運動（ヨーイング）とローリング方向における運動（ローリング）とを行うものとする（ 3×2 セット = 6 自由度）。また、車体 11 が、左右方向における運動（横振動）とヨーイング方向における運動（ヨーイング）とローリング方向における運動（ローリング）とを行うものとする（ 3×1 セット = 3 自由度）。また、台車 12 a、12 b に対してそれぞれ設けられている空気バネ（枕バネ）が、ローリング方向における運動（ローリング）を行うものとする（ 1×2 セット = 2 自由度）。また、台車 12 a、12 b に対してそれぞれ設けられているヨーダンパが、ヨーイング方向における運動（ヨーイング）を行うものとする（ 1×2 セット = 2 自由度）。

[0022] 尚、自由度は、21 自由度に限定されない。自由度を大きくすれば計算精度は向上するが、計算負荷が高くなる。また、後述するカルマンフィルタの動作が安定しなくなる虞がある。これらの点を考慮して自由度を適宜決定することができる。また、以下の運動方程式は、それぞれの構成要素（車体 11、台車 12 a、12 b、輪軸 13 a～13 d）のそれぞれの方向（左右方向、ヨーイング方向、ローリング方向）の動作を、例えば、非特許文献 1、2 の記載に基づいて表すことにより実現することができる。従って、ここでは、それぞれの運動方程式の概要を説明し、詳細な説明を省略する。尚、以

下の各式には、軌道 16（軌条）の曲率半径（曲率）を含む項が存在しない。即ち、以下の各式は、鉄道車両が直線軌道を走行することを表現する式となる。鉄道車両が曲線軌道を走行することを表現する式において、軌道 16（軌条）の曲率半径を無限大（曲率を 0（ゼロ））とすることにより、鉄道車両が直線軌道を走行することを表現する式が得られる。

[0023] 以下の各式において、添え字 w は、輪軸 13 a ~ 13 d を表す。添え字 w （のみ）が付されている変数は、輪軸 13 a ~ 13 d で共通であることを表す。添え字 w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 はそれぞれ、輪軸 13 a、13 b、13 c、13 d を表す。

添え字 t 、 T は、台車 12 a、12 b を表す。添え字 t 、 T （のみ）が付されている変数は、台車 12 a、12 b で共通であることを表す。添え字 t_1 、 t_2 はそれぞれ、台車 12 a、12 b を表す。

添え字 b 、 B は、車体 11 であることを表す。

[0024] 添え字 x は、前後方向またはローリング方向を表し、添え字 y は、左右方向を表し、添え字 z は、上下方向またはヨーイング方向を表す。

また、変数の上に付している「 $\cdot\cdot$ 」、「 \cdot 」はそれぞれ、2階時間微分、1階時間微分を表す。

尚、以下の運動方程式の説明に際し、必要に応じて、既出の変数の説明を省略する。また、運動方程式自体は、特許文献 1 に記載されているものと同じである。

[0025] [輪軸の横振動]

輪軸 13 a ~ 13 d の横振動（左右方向における運動）を記述する運動方程式は、以下の（1）式 ~ （4）式で表される。

[0026]

[数1]

$$m_w \ddot{y}_{w1} + \frac{f_2}{v} \dot{y}_{w1} + C_{wy} [\dot{y}_{w1} - \{\dot{y}_{t1} + a \dot{\psi}_{t1} + h_1 \dot{\phi}_{t1}\}] - f_2 \psi_{w1} + K_{wy} [y_{w1} - \{y_{t1} + a \psi_{t1} + h_1 \phi_{t1}\}] = 0 \quad \dots (1)$$

$$m_w \ddot{y}_{w2} + \frac{f_2}{v} \dot{y}_{w2} + C_{wy} [\dot{y}_{w2} - \{\dot{y}_{t1} + a \dot{\psi}_{t1} + h_1 \dot{\phi}_{t1}\}] - f_2 \psi_{w2} + K_{wy} [y_{w2} - \{y_{t1} + a \psi_{t1} + h_1 \phi_{t1}\}] = 0 \quad \dots (2)$$

$$m_w \ddot{y}_{w3} + \frac{f_2}{v} \dot{y}_{w3} + C_{wy} [\dot{y}_{w3} - \{\dot{y}_{t2} + a \dot{\psi}_{t2} + h_1 \dot{\phi}_{t2}\}] - f_2 \psi_{w3} + K_{wy} [y_{w3} - \{y_{t2} + a \psi_{t2} + h_1 \phi_{t2}\}] = 0 \quad \dots (3)$$

$$m_w \ddot{y}_{w4} + \frac{f_2}{v} \dot{y}_{w4} + C_{wy} [\dot{y}_{w4} - \{\dot{y}_{t2} + a \dot{\psi}_{t2} + h_1 \dot{\phi}_{t2}\}] - f_2 \psi_{w4} + K_{wy} [y_{w4} - \{y_{t2} + a \psi_{t2} + h_1 \phi_{t2}\}] = 0 \quad \dots (4)$$

[0027] m_w は、輪軸13a～13dの質量である。 $y_{w1} \cdot \cdot$ （式において $\cdot \cdot$ は y_{w1} の上に付される（以下、その他の変数についても同様））は、輪軸13aの左右方向における加速度である。 f_2 は、横クリープ係数である（尚、横クリープ係数 f_2 は、輪軸13a～13d毎に与えられてもよい）。 v は、鉄道車両の走行速度である。 $y_{w1} \cdot$ （式において \cdot は y_{w1} の上に付される（以下、その他の変数についても同様））は、輪軸13aの左右方向における速度である。 C_{wy} は、軸箱と輪軸とをつなぐ軸箱支持装置の左右方向におけるダンピング定数である。 $y_{t1} \cdot$ は、台車12aの左右方向における速度である。 a は、台車12a、12bに設けられている輪軸13a・13b、13c・13d間の前後方向における距離の1/2を表す（台車12a、12bに設けられている輪軸13a・13b、13c・13d間の距離は2aになる）。 $\phi_{t1} \cdot$ は、台車12aのヨーイング方向における角速度である。 h_1 は、車軸の中心と台車12aの重心との上下方向における距離である。 $\phi_{t1} \cdot$ は、台車12aのローリング方向における角速度である。 ϕ_{w1} は、輪軸13aのヨーイング方向における回動量（角変位）である。 K_{wy} は、軸箱支持装置の左右方向のバネ定数である。 y_{w1} は、輪軸13aの左右方向における変位である。 y_{t1} は、台車12aの左右方向における変位である。 ϕ_{t1} は、台車12aのヨーイング方向における回動量（角変位）である。 ϕ_{t1} は、台車1

2 a のローリング方向における回動量（角変位）である。尚、（2）式～（4）式の各変数は、前述した添え字の意味に従って（1）式の変数を読み替えることにより表される。

[0028] [輪軸のヨーイング]

輪軸 1 3 a～1 3 d のヨーイングを記述する運動方程式は、以下の（5）式～（8）式で表される。

[0029] [数2]

$$I_{wz} \ddot{\psi}_{w1} + \frac{f_1 b^2}{V} \dot{\psi}_{w1} + C_{wx} b_1^2 \{\dot{\psi}_{w1} - \dot{\psi}_{t1}\} + \frac{f_1 b \gamma}{r} \{y_{w1} - y_{R1}\} + s_a K_{wy} \{y_{w1} - y_{t1}\} + s_a C_{wy} \{\dot{y}_{w1} - \dot{y}_{t1}\} + K_{wx} b_1^2 \{\psi_{w1} - \psi_{t1}\} = 0 \quad \dots (5)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi}_{w2} + \frac{f_1 b^2}{V} \dot{\psi}_{w2} + C_{wx} b_1^2 \{\dot{\psi}_{w2} - \dot{\psi}_{t1}\} + \frac{f_1 b \gamma}{r} \{y_{w2} - y_{R2}\} + s_a K_{wy} \{y_{w2} - y_{t1}\} + s_a C_{wy} \{\dot{y}_{w2} - \dot{y}_{t1}\} + K_{wx} b_1^2 \{\psi_{w2} - \psi_{t1}\} = 0 \quad \dots (6)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi}_{w3} + \frac{f_1 b^2}{V} \dot{\psi}_{w3} + C_{wx} b_1^2 \{\dot{\psi}_{w3} - \dot{\psi}_{t2}\} + \frac{f_1 b \gamma}{r} \{y_{w3} - y_{R3}\} + s_a K_{wy} \{y_{w3} - y_{t2}\} + s_a C_{wy} \{\dot{y}_{w3} - \dot{y}_{t2}\} + K_{wx} b_1^2 \{\psi_{w3} - \psi_{t2}\} = 0 \quad \dots (7)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi}_{w4} + \frac{f_1 b^2}{V} \dot{\psi}_{w4} + C_{wx} b_1^2 \{\dot{\psi}_{w4} - \dot{\psi}_{t2}\} + \frac{f_1 b \gamma}{r} \{y_{w4} - y_{R4}\} + s_a K_{wy} \{y_{w4} - y_{t2}\} + s_a C_{wy} \{\dot{y}_{w4} - \dot{y}_{t2}\} + K_{wx} b_1^2 \{\psi_{w4} - \psi_{t2}\} = 0 \quad \dots (8)$$

[0030] I_{wz} は、輪軸 1 3 a～1 3 d のヨーイング方向における慣性モーメントである。 $\phi_{w1} \dots$ は、輪軸 1 3 a のヨーイング方向における角加速度である。 f_1 は、縦クリープ係数である。 b は、輪軸 1 3 a～1 3 d に取り付けられている 2 つの車輪と軌道 1 6（軌条）との接点の間の左右方向における距離である。 $\phi_{w1} \dots$ は、輪軸 1 3 a のヨーイング方向における角速度である。 C_{wx} は、軸箱支持装置の前後方向のダンピング定数である。 b_1 は、軸箱支持装置の左右方向における間隔の 1 / 2 の長さを表す（1 つの輪軸に対して左右に設けられている 2 つの軸箱支持装置の左右方向における間隔は $2 b_1$ になる）

。 γ は、踏面勾配である。 r は、車輪 14 a ~ 14 d の半径である。 y_{R1} は、輪軸 13 a の位置での通り狂い量である。 s_a は、車軸 15 a ~ 15 d の中心から軸箱支持バネまでの前後方向におけるオフセット量である。 y_{t1} は、台車 12 a の左右方向における変位である。 K_{wx} は、軸箱支持装置の前後方向のバネ定数である。尚、(6) 式 ~ (8) 式の各変数は、前述した添え字の意味に従って (5) 式の変数を読み替えることにより表される。ただし、 y_{R2} 、 y_{R3} 、 y_{R4} はそれぞれ、輪軸 13 b、13 c、13 d の位置での通り狂い量である。

[0031] ここで、通り狂いとは、日本工業規格 (JIS E 1001 : 2001) に記載されているように、軌条の長手方向の左右の変位である。通り狂い量は、その変位の量である。図 4 A および図 4 B に、輪軸 13 a の位置での通り狂い量 y_{R1} の一例を示す。図 4 A では、軌道 16 が、直線軌道である場合を例に挙げて説明する。図 4 B では、軌道 16 が、曲線軌道である場合を例に挙げて説明する。図 4 A および図 4 B において、16 a は、軌条を示し、16 b は、枕木を示す。図 4 A では、輪軸 13 a の車輪 14 a が位置 401 で軌条 16 a と接触しているとする。図 4 B では、輪軸 13 a の車輪 14 a が位置 402 で軌条 16 a と接触しているとする。輪軸 13 a の位置での通り狂い量 y_{R1} は、輪軸 13 a の車輪 14 a と軌条 16 a との接触位置と、正規の状態であると仮定した場合の軌条 16 a の位置と、の左右方向の距離である。輪軸 13 a の位置とは、輪軸 13 a の車輪 14 a と軌条 16 a との接触位置である。輪軸 13 b、13 c、13 d の位置での通り狂い量 y_{R2} 、 y_{R3} 、 y_{R4} も、輪軸 13 a の位置での通り狂い量 y_{R1} と同様に定義される。

[0032] [台車の横振動]

台車 12 a、12 b の横振動 (左右方向における運動) を記述する運動方程式は、以下の (9) 式、(10) 式で表される。

[0033]

[数3]

$$\begin{aligned}
& m_T \ddot{y}_{t1} + c_2' [\dot{y}_{t1} - h_4 \dot{\phi}_{t1}] - \{\dot{y}_b + L \dot{\psi}_b + h_5 \dot{\phi}_b\} + 2 C_{wy} \{\dot{y}_{t1} + h_1 \dot{\phi}_{t1}\} - C_{wy} \{\dot{y}_{w1} + \dot{y}_{w2}\} \\
& + 2 k_2' [\{y_{t1} - h_2 \phi_{t1}\} - \{y_b + L \psi_b + h_3 \phi_b\}] + 2 K_{wy} \{y_{t1} + h_1 \phi_{t1}\} - K_{wy} \{y_{w1} + y_{w2}\} = 0 \\
& \dots (9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m_T \ddot{y}_{t2} + c_2' [\dot{y}_{t2} - h_4 \dot{\phi}_{t2}] - \{\dot{y}_b + L \dot{\psi}_b + h_5 \dot{\phi}_b\} + 2 C_{wy} \{\dot{y}_{t1} + h_1 \dot{\phi}_{t1}\} - C_{wy} \{\dot{y}_{w3} + \dot{y}_{w4}\} \\
& + 2 k_2' [\{y_{t2} - h_2 \phi_{t2}\} - \{y_b + L \psi_b + h_3 \phi_b\}] + 2 K_{wy} \{y_2 + h_1 \phi_{t2}\} - K_{wy} \{y_{w3} + y_{w4}\} = 0 \\
& \dots (10)
\end{aligned}$$

[0034] m_T は、台車12a、12bの質量である。 $y_{t1} \cdot \cdot$ は、台車12aの左右方向における加速度である。 c_2' は、左右動ダンパのダンピング定数である。 h_4 は、台車12aの重心と左右動ダンパとの上下方向における距離である。 $y_b \cdot$ は、車体11の左右方向における速度である。 L は、台車12a、12bの中心間の前後方向における間隔の1/2を表す（台車12a、12bの中心間の前後方向における間隔は2Lになる）。 $\phi_b \cdot$ は、車体11のヨーイング方向における角速度である。 h_5 は、左右動ダンパと車体11の重心との間の上下方向における距離である。 $\phi_b \cdot$ は、車体11のローリング方向における角速度である。 $y_{w2} \cdot$ は、輪軸13bの左右方向における速度である。 k_2' は、空気バネ（枕バネ）の左右方向のバネ定数である。 h_2 は、台車12a、12bの重心と空気バネ（枕バネ）の中心との間の上下方向における距離である。 y_b は、車体11の左右方向における変位である。 ϕ_b は、車体11のヨーイング方向における回動量（角変位）である。 h_3 は、空気バネ（枕バネ）の中心と車体11の重心との間の上下方向における距離である。 ϕ_b は、車体11のローリング方向における回動量（角変位）である。尚、（10）式の各変数は、前述した添え字の意味に従って（9）式の変数を読み替えることにより表される。

[0035] [台車のヨーイング]

台車12a、12bのヨーイングを記述する運動方程式は、以下の（11）式、（12）式で表される。

[0036] [数4]

$$\begin{aligned}
 I_{Tz} \ddot{\psi}_{t1} + C_{wx} b_1^2 \{ \dot{\psi}_{t1} - \dot{\psi}_{w1} \} + C_{wx} b_1^2 \{ \dot{\psi}_{t1} - \dot{\psi}_{w2} \} + 2C_{wy} a^2 \dot{\psi}_{t1} - C_{wy} a \{ \dot{y}_{w1} - \dot{y}_{w2} \} \\
 + K_{wx} b_1^2 \{ \psi_{t1} - \psi_{w1} \} + K_{wx} b_1^2 \{ \psi_{t1} - \psi_{w2} \} + 2K_{wy} a^2 \psi_{t1} - K_{wy} a \{ y_{w1} - y_{w2} \} \\
 + 2k'_0 (b'_0)^2 \{ \psi_{t1} - \psi_{y1} \} + 2k''_2 b_2^2 \{ \psi_{t1} - \psi_b \} = 0
 \end{aligned}
 \dots (11)$$

$$\begin{aligned}
 I_{Tz} \ddot{\psi}_{t2} + C_{wx} b_1^2 \{ \dot{\psi}_{t2} - \dot{\psi}_{w3} \} + C_{wx} b_1^2 \{ \dot{\psi}_{t2} - \dot{\psi}_{w4} \} + 2C_{wy} a^2 \dot{\psi}_{t2} - C_{wy} a \{ \dot{y}_{w3} - \dot{y}_{w4} \} \\
 + K_{wx} b_1^2 \{ \psi_{t2} - \psi_{w3} \} + K_{wx} b_1^2 \{ \psi_{t2} - \psi_{w4} \} + 2K_{wy} a^2 \psi_{t2} - K_{wy} a \{ y_{w3} - y_{w4} \} \\
 + 2k'_0 (b'_0)^2 \{ \psi_{t2} - \psi_{y2} \} + 2k''_2 b_2^2 \{ \psi_{t2} - \psi_b \} = 0
 \end{aligned}
 \dots (12)$$

[0037] I_{Tz} は、台車12a、12bのヨーイング方向における慣性モーメントである。 $\dot{\psi}_{t1}$ は、台車12aのヨーイング方向における角加速度である。 $\dot{\psi}_{w2}$ は、輪軸13bのヨーイング方向における角速度である。 ψ_{w2} は、輪軸13bのヨーイング方向における回動量（角変位）である。 y_{w2} は、輪軸13bの左右方向における変位である。 k'_0 は、ヨーダンパのゴムブッシュ剛性である。 b'_0 は、台車12a、12bに対し左右に配置された2つのヨーダンパの左右方向における間隔の1/2を表す（台車12a、12bに対し左右に配置された2つのヨーダンパの左右方向における間隔は $2b'_0$ になる）。 ψ_{y1} は、台車12aに配置されたヨーダンパのヨーイング方向における回動量（角変位）である。 k''_2 は、空気バネ（枕バネ）の前後方向のバネ定数である。 b_2 は、台車12a、12bに対し左右に配置された2つの空気バネ（枕バネ）の左右方向における間隔の1/2を表す（台車12a、12bに対し左右に配置された2つの空気バネ（枕バネ）の左右方向における間隔は $2b_2$ になる）。尚、(12)式の各変数は、前述した添え字の意味に従って(11)式の変数を読み替えることにより表される。

[0038] [台車のローリング]

台車12a、12bのローリングを記述する運動方程式は、以下の(13)式、(14)式で表される。

[0039] [数5]

$$\begin{aligned}
& I_{Tx} \ddot{\phi}_{t1} \\
& + 2c_1 (b'_1)^2 \dot{\phi}_{t1} + 2c_2 b_2^2 \{\dot{\phi}_{t1} - \dot{\phi}_{a1}\} + C_{wy} h_1 [2\{\dot{y}_{t1} + h_1 \dot{\phi}_{t1}\} - \{\dot{y}_{w1} + \dot{y}_{w2}\}] \\
& - c'_2 h_4 [\{\dot{y}_{t1} - h_4 \dot{\phi}_{t1}\} - \{\dot{y}_b + L \dot{\psi}_b + h_5 \dot{\phi}_b\}] \\
& + 2k_1 b_1^2 \phi_{t1} + 2\lambda k_2 b_2^2 \{\phi_{t1} - \phi_{a1}\} + K_{wy} h_1 [2\{y_{t1} + h_1 \phi_{t1}\} - \{y_{w1} + y_{w2}\}] \\
& - 2k'_2 h_2 [\{y_{t1} - h_2 \phi_{t1}\} - \{y_b + L \psi_b + h_3 \phi_b\}] \\
& + 2k_3 b_2^2 \{\phi_{t1} - \phi_b\} = 0 \quad \dots (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& I_{Tx} \ddot{\phi}_{t2} \\
& + 2c_1 (b'_1)^2 \dot{\phi}_{t2} + 2c_2 b_2^2 \{\dot{\phi}_{t2} - \dot{\phi}_{a2}\} + C_{wy} h_1 [2\{\dot{y}_{t2} + h_1 \dot{\phi}_{t2}\} - \{\dot{y}_{w3} + \dot{y}_{w4}\}] \\
& - c'_2 h_4 [\{\dot{y}_{t2} - h_4 \dot{\phi}_{t2}\} - \{\dot{y}_b - L \dot{\psi}_b + h_5 \dot{\phi}_b\}] \\
& + 2k_1 b_1^2 \phi_{t2} + 2\lambda k_2 b_2^2 \{\phi_{t2} - \phi_{a2}\} + K_{wy} h_1 [2\{y_{t2} + h_1 \phi_{t2}\} - \{y_{w3} + y_{w4}\}] \\
& - 2k'_2 h_2 [\{y_{t2} - h_2 \phi_{t2}\} - \{y_b + L \psi_b + h_3 \phi_b\}] \\
& + 2k_3 b_2^2 \{\phi_{t2} - \phi_b\} = 0 \quad \dots (14)
\end{aligned}$$

[0040] I_{Tx} は、台車12a、12bのローリング方向における慣性モーメントである。 ϕ_{t1} は、台車12aのローリング方向における角加速度である。 c_1 は、軸ダンパの上下方向のダンピング定数である。 b'_1 は、台車12a、12bに対し左右に配置された2つの軸ダンパの左右方向における間隔の1/2を表す（台車12a、12bに対し左右に配置された2つの軸ダンパの左右方向における間隔は $2b'_1$ になる）。 c_2 は、空気バネ（枕バネ）の上下方向のダンピング定数である。 ϕ_{a1} は、台車12aに配置された空気バネ（枕バネ）のローリング方向における角速度である。 k_1 は、軸バネの上下方向のバネ定数である。 λ は、空気バネ（枕バネ）の本体の容積を補助空気室の容積で割った値である。 k_2 は、空気バネ（枕バネ）の上下方向のバネ定数である。 ϕ_{a1} は、台車12aに配置された空気バネ（枕バネ）のローリング方向における回動量（角変位）である。 k_3 は、空気バネ（枕バネ）の有

効受圧面積の変化による等価剛性である。尚、(14)式の各変数は、前述した添え字の意味に従って(13)式の変数を読み替えることにより表される。ただし、 ϕ_{a2} は、台車12bに配置された空気バネ(枕バネ)のローリング方向における回動量(角変位)である。

[0041] [車体の横振動]

車体11の横振動(左右方向における運動)を記述する運動方程式は、以下の(15)式で表される。

[0042] [数6]

$$\begin{aligned} m_B \ddot{y}_b + 2c_2' \{\dot{y}_b + h_5 \dot{\phi}_b\} - c_2' [\{\dot{y}_{t1} + \dot{y}_{t2}\} - h_4 \{\dot{\phi}_{t1} + \dot{\phi}_{t2}\}] \\ + 4k_2' \{y_b + h_3 \phi_b\} - 2k_2' [\{y_{t1} + y_{t2}\} - h_2 \{\phi_{t1} + \phi_{t2}\}] = 0 \\ \dots (15) \end{aligned}$$

[0043] m_B は、台車12a、12bの質量である。 $y_b \cdot \cdot$ は、車体11の左右方向における加速度である。 $y_{t2} \cdot$ は、台車12bの左右方向における速度である。 $\phi_{t2} \cdot$ は、台車12bのローリング方向における角速度である。 y_{t2} は、台車12bの左右方向における変位である。 ϕ_{t2} は、台車12bのローリング方向における回動量(角変位)である。

[0044] [車体のヨーイング]

車体11のヨーイングを記述する運動方程式は、以下の(16)式で表される。

[0045] [数7]

$$\begin{aligned} I_{Bz} \ddot{\psi}_b + 2c_2' L^2 \dot{\psi}_b - c_2' L \{\dot{y}_{t1} - \dot{y}_{t2}\} + c_2' L h_4 \{\dot{\phi}_{t1} - \dot{\phi}_{t2}\} \\ + 2c_0 (b_0')^2 \{\dot{\psi}_b - \dot{\psi}_{y1}\} + 2c_0 (b_0')^2 \{\dot{\psi}_b - \dot{\psi}_{y2}\} \\ + 4k_2' L^2 \psi_b - 2k_2' L \{y_{t1} - y_{t2}\} + 2k_2' L h_2 \{\phi_{t1} - \phi_{t2}\} \\ + 2k_2'' b_2^2 \{\psi_b - \psi_{t1}\} + 2k_2'' b_2^2 \{\psi_b - \psi_{t2}\} = 0 \quad \dots (16) \end{aligned}$$

[0046] I_{Bz} は、車体11のヨーイング方向における慣性モーメントである。 $\phi_b \cdot \cdot$ は、車体11のヨーイング方向における角加速度である。 c_0 は、ヨーダン

パの前後方向のダンピング定数である。 $\phi_{y1} \cdot$ は、台車1 2 aに配置されたヨーダンパのヨーイング方向における角速度である。 $\phi_{y2} \cdot$ は、台車1 2 bに配置されたヨーダンパのヨーイング方向における角速度である。 ϕ_{t2} は、台車1 2 bのヨーイング方向における回動量（角変位）である。

[0047] [車体のローリング]

車体1 1のローリングを記述する運動方程式は、以下の(17)式で表される。

[0048] [数8]

$$\begin{aligned} I_{Bx} \ddot{\phi}_b + 2c_2' h_5 \{ \dot{y}_b + h_5 \dot{\phi}_b \} - c_2' h_5 [\{ \dot{y}_{t1} + \dot{y}_{t2} \} - h_4 \{ \dot{\phi}_{t1} + \dot{\phi}_{t2} \}] \\ + 4k_2' h_3 \{ y_b + h_3 \phi_b \} - 2k_2' h_3 [\{ y_{t1} + y_{t2} \} - h_2 \{ \phi_{t1} + \phi_{t2} \}] \\ + 2k_3 b_2^2 \{ \phi_b - \phi_{t1} \} + 2k_3 b_0^2 \{ \phi_b - \phi_{t2} \} \\ + 2k_2 b_2^2 \{ \phi_b - \phi_{a1} \} + 2k_2 b_2^2 \{ \phi_b - \phi_{a2} \} = 0 \quad \dots (17) \end{aligned}$$

[0049] I_{Bx} は、車体1 1のローリング方向における慣性モーメントである。 $\phi_b \cdot$ は、車体1 1のローリング方向における角加速度である。

[0050] [ヨーダンパのヨーイング]

台車1 2 aに配置されたヨーダンパ、台車1 2 bに配置されたヨーダンパのヨーイングを記述する運動方程式は、それぞれ以下の(18)式、(19)式で表される。

[0051] [数9]

$$2c_0 (b_0')^2 \{ \dot{\psi}_{y1} - \dot{\psi}_b \} + 2k_0' (b_0')^2 \{ \psi_{y1} - \psi_{t1} \} = 0 \quad \dots (18)$$

$$2c_0 (b_0')^2 \{ \dot{\psi}_{y2} - \dot{\psi}_b \} + 2k_0' (b_0')^2 \{ \psi_{y2} - \psi_{t2} \} = 0 \quad \dots (19)$$

[0052] ϕ_{y2} は、台車1 2 bに配置されたヨーダンパのヨーイング方向における回動量（角変位）である。

[0053] [空気バネ（枕バネ）のローリング]

台車1 2 aに配置された空気バネ（枕バネ）、台車1 2 bに配置された空

気バネ（枕バネ）のローリングを記述する運動方程式は、それぞれ以下の（20）式、（21）式で表される。

[0054] [数10]

$$2c_2 b_2^2 \{\dot{\phi}_{a1} - \dot{\phi}_{t1}\} + 2\lambda k_2 b_2^2 \{\phi_{a1} - \phi_{t1}\} + 2k_2 b_2^2 \{\phi_{a1} - \phi_b\} = 0 \quad \dots (20)$$

$$2c_2 b_2^2 \{\dot{\phi}_{a2} - \dot{\phi}_{t2}\} + 2\lambda k_2 b_2^2 \{\phi_{a2} - \phi_{t2}\} + 2k_2 b_2^2 \{\phi_{a2} - \phi_b\} = 0 \quad \dots (21)$$

[0055] $\phi_{a2} \cdot$ は、台車12bに配置された空気バネ（枕バネ）のローリング方向における角速度である。

[0056] （前後方向力）

次に、前後方向力について説明する。尚、前後方向力自体は、特許文献1に記載されているものと同じである。

1つの輪軸における左右の車輪のうち一方の車輪における縦クリープ力と他方の車輪における縦クリープ力との同相の成分は、ブレーキ力や駆動力に対応する成分である。従って、縦クリープ力の逆相成分に対応するように前後方向力を定めるのが好ましい。縦クリープ力の逆相成分とは、1つの輪軸における左右の車輪のうち一方の車輪における縦クリープ力と他方の車輪における縦クリープ力との相互に逆位相となる成分である。即ち、縦クリープ力の逆相成分とは、縦クリープ力の、車軸をねじる方向の成分である。この場合、前後方向力は、1つの輪軸の左右方向の両側に取り付けられた2つの前記部材に生じる力の前後方向の成分のうち、相互に逆位相となる成分となる。

[0057] 以下に、縦クリープ力の逆相成分に対応するように前後方向力を定める場合の前後方向力の具体例について説明する。

軸箱支持装置が、モノリンク式の軸箱支持装置である場合、軸箱支持装置は、リンクを備えており、軸箱と台車枠とがリンクにより連結されている。このリンクの両端にはゴムブッシュが取り付けられる。この場合、前後方向

力は、1つの輪軸の左右方向の端にそれぞれ1つずつ取り付けられる2つのリンクのそれぞれが受ける荷重の前後方向の成分のうち、相互に逆位相となる成分になる。また、リンクの配置および構成により、リンクは、前後方向、左右方向、上下方向の荷重のうち主に前後方向の荷重を受ける。従って、例えば、各リンクに歪ゲージを1つ取り付ければよい。この歪ゲージの測定値を用いて、当該リンクが受ける荷重の前後方向の成分を導出することにより、前後方向力の測定値を得る。また、このようにすることに替えて、リンクに取り付けられたゴムブッシュの前後方向の変位を変位計で測定してもよい。この場合、測定した変位と当該ゴムブッシュのバネ定数との積を、前後方向力の測定値とする。軸箱支持装置が、モノリンク式の軸箱支持装置である場合、前述した、軸箱を支持するための部材は、リンクまたはゴムブッシュになる。

[0058] 尚、リンクに取り付けられる歪ゲージにより測定される荷重には、前後方向の成分だけでなく、左右方向の成分および上下方向の成分のうち少なくとも何れか一方の成分が含まれる場合がある。しかしながら、このような場合であっても、軸箱支持装置の構造上、リンクが受ける左右方向の成分の荷重および上下方向の成分の荷重は、前後方向の成分の荷重に比べて十分に小さい。従って、各リンクに歪ゲージを1つ取り付けただけで、実用上要求される精度を有する前後方向力の測定値を得ることができる。このように、前後方向力の測定値には、前後方向の成分以外の成分が含まれることがある。従って、上下方向および左右方向の歪みがキャンセルされるように3つ以上の歪ゲージを各リンクに取り付けてもよい。このようにすれば、前後方向力の測定値の精度を向上させることができる。

[0059] 軸箱支持装置が、軸はり式の軸箱支持装置である場合、軸箱支持装置は、軸はりを備えており、軸箱と台車枠とが、軸はりにより連結されている。軸はりは、軸箱と一体に構成されていてもよい。この軸はりの台車枠側の端にはゴムブッシュが取り付けられる。この場合、前後方向力は、1つの輪軸の左右方向の端にそれぞれ1つずつ取り付けられる2つの軸はりのそれぞれが

受ける荷重の前後方向の成分のうち、相互に逆位相となる成分になる。また、軸はりの配置構成により、軸はりは、前後方向、左右方向、上下方向の荷重のうち前後方向の荷重に加えて、左右方向の荷重も受けやすい。従って、例えば、左右方向の歪みがキャンセルされるように2つ以上の歪ゲージを各軸はりに取り付ける。これらの歪ゲージの測定値を用いて、軸はりが受ける荷重の前後方向の成分を導出することにより、前後方向力の測定値を得る。また、このようにすることに替えて、軸はりに取り付けられたゴムブッシュの前後方向の変位を変位計で測定してもよい。この場合、測定した変位と当該ゴムブッシュのバネ定数との積を、前後方向力の測定値とする。軸箱支持装置が、軸はり式の軸箱支持装置である場合、前述した、軸箱を支持するための部材は、軸はりまたはゴムブッシュになる。

[0060] 尚、軸はりに取り付けられる歪ゲージにより測定される荷重には、前後方向および左右方向の成分だけでなく、上下方向の成分が含まれる場合がある。しかしながら、このような場合であっても、軸箱支持装置の構造上、軸はりが受ける上下方向の成分の荷重は、前後方向の成分の荷重および左右方向の成分の荷重に比べて十分に小さい。従って、軸はりが受ける上下方向の成分の荷重をキャンセルするように歪ゲージを取り付けなくても、実用上要求される精度を有する前後方向力の測定値を得ることができる。このように、計測された前後方向力には、前後方向の成分以外の成分が含まれることがあり、左右方向の歪みに加えて上下方向の歪みもキャンセルされるように3つ以上の歪ゲージを各軸はりに取り付けてもよい。このようにすれば、前後方向力の測定値の精度を向上させることができる。

[0061] 軸箱支持装置が、板バネ式の軸箱支持装置である場合、軸箱支持装置は、板バネを備えており、軸箱と台車枠とが、板バネにより連結されている。この板バネの端にはゴムブッシュが取り付けられる。この場合、前後方向力は、1つの輪軸の左右方向の端にそれぞれ1つずつ取り付けられる2つの板バネのそれぞれが受ける荷重の前後方向の成分のうち、相互に逆位相となる成分になる。また、板バネの配置構成により、板バネは、前後方向、左右方向

、上下方向の荷重のうち前後方向の荷重に加えて、左右方向の荷重および上下方向の荷重も受けやすい。従って、例えば、左右方向および上下方向の歪みがキャンセルされるように3つ以上の歪ゲージを各板バネに取り付ける。これらの歪ゲージの測定値を用いて、板バネが受ける荷重の前後方向の成分を導出することにより、前後方向力の測定値を得る。また、このようにすることに替えて、板バネに取り付けられたゴムブッシュの前後方向の変位を変位計で測定してもよい。この場合、測定した変位と当該ゴムブッシュのバネ定数との積を、前後方向力の測定値とする。軸箱支持装置が、板バネ式の軸箱支持装置である場合、前述した、軸箱を支持するための部材は、板バネまたはゴムブッシュになる。

[0062] 尚、前述した変位計としては、公知のレーザ変位計や渦電流式の変位計を用いることができる。

また、ここでは、軸箱支持装置の方式が、モノリンク式、軸はり式、および板バネ式である場合を例に挙げて、前後方向力を説明した。しかしながら、軸箱支持装置の方式は、モノリンク式、軸はり式、および板バネ式に限定されない。軸箱支持装置の方式に合わせて、モノリンク式、軸はり式、および板バネ式と同様に、前後方向力を定めることができる。

また、以下では、説明を簡単にするために、1つの輪軸について1つの前後方向力の測定値が得られる場合を例に挙げて説明する。即ち、図1に示す鉄道車両は、4つの輪軸13a~13dを有する。従って、4つの前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値が得られる。

[0063] (第1の実施形態)

次に、本発明の第1の実施形態を説明する。

[0064] <検査装置500>

図5は、検査装置500の機能的な構成の一例を示す図である。図6は、検査装置500のハードウェアの構成の一例を示す図である。図7は、検査装置500における処理の一例を示すフローチャートである。本実施形態では、図1に示すように、検査装置500が、鉄道車両に搭載される場合を例

に挙げて示す。

- [0065] 図5において、検査装置500は、その機能として、記憶部501、データ取得部502、第1の周波数調整部503、状態変数導出部504、第2の周波数調整部505、軌道状態導出部506、および出力部507を有する。
- [0066] 図6において、検査装置500は、CPU601、主記憶装置602、補助記憶装置603、通信回路604、信号処理回路605、画像処理回路606、I/F回路607、ユーザインターフェース608、ディスプレイ609、およびバス610を有する。
- [0067] CPU601は、検査装置500の全体を統括制御する。CPU601は、主記憶装置602をワークエリアとして用いて、補助記憶装置603に記憶されているプログラムを実行する。主記憶装置602は、データを一時的に格納する。補助記憶装置603は、CPU601によって実行されるプログラムの他、各種のデータを記憶する。補助記憶装置603は、後述する状態方程式および観測方程式を記憶する。記憶部501は、例えば、CPU601および補助記憶装置603を用いることにより実現される。
- [0068] 通信回路604は、検査装置500の外部との通信を行うための回路である。通信回路604は、例えば、前後方向力の測定値の情報を受信する。通信回路604は、検査装置500の外部と無線通信を行っても有線通信を行ってもよい。通信回路604は、無線通信を行う場合、鉄道車両に設けられるアンテナに接続される。
- [0069] 信号処理回路605は、通信回路604で受信された信号や、CPU601による制御に従って入力した信号に対し、各種の信号処理を行う。データ取得部502は、例えば、CPU601、通信回路604、および信号処理回路605を用いることにより実現される。また、第1の周波数調整部503、状態変数導出部504、第2の周波数調整部505および軌道状態導出部506は、例えば、CPU601および信号処理回路605を用いることにより実現される。

[0070] 画像処理回路606は、CPU601による制御に従って入力した信号に対し、各種の画像処理を行う。この画像処理が行われた信号は、ディスプレイ609に出力される。

ユーザインターフェース608は、オペレータが検査装置500に対して指示を行う部分である。ユーザインターフェース608は、例えば、ボタン、スイッチ、およびダイヤル等を有する。また、ユーザインターフェース608は、ディスプレイ609を用いたグラフィカルユーザインターフェースを有していてもよい。

[0071] ディスプレイ609は、画像処理回路606から出力された信号に基づく画像を表示する。I/F回路607は、I/F回路607に接続される装置との間でデータのやり取りを行う。図6では、I/F回路607に接続される装置として、ユーザインターフェース608およびディスプレイ609を示す。しかしながら、I/F回路607に接続される装置は、これらに限定されない。例えば、可搬型の記憶媒体がI/F回路607に接続されてもよい。また、ユーザインターフェース608の少なくとも一部およびディスプレイ609は、検査装置500の外部にあってもよい。

出力部507は、例えば、通信回路604および信号処理回路605と、画像処理回路606、I/F回路607、およびディスプレイ609との少なくとも何れか一方を用いることにより実現される。

[0072] 尚、CPU601、主記憶装置602、補助記憶装置603、信号処理回路605、画像処理回路606、およびI/F回路607は、バス610に接続される。これらの構成要素間の通信は、バス610を介して行われる。また、検査装置500のハードウェアは、後述する検査装置500の機能を実現することができれば、図6に示すものに限定されない。

[0073] [記憶部501]

記憶部501は、後述する状態変数導出部504が状態変数を導出する際に用いる方程式を記憶する。

本実施形態では、記憶部501は、状態方程式と観測方程式とを記憶する

。

本実施形態では、特許文献 1 に記載の状態方程式および観測方程式を用いる場合を例に挙げて説明する。

[0074] まず、状態方程式について説明する。

本実施形態では、(5)式～(8)式(輪軸 13 a～13 d のヨーイングを記述する運動方程式)を状態方程式に含めず、以下のようにして状態方程式を構成する。

まず、(9)式、(10)式(台車 12 a、12 b の横振動(左右方向における運動)を記述する運動方程式)と、(13)式、(14)式(台車 12 a、12 b のローリングを記述する運動方程式)と、(15)式(車体 11 の横振動(左右方向における運動)を記述する運動方程式)と、(16)式(車体 11 のヨーイングを記述する運動方程式)と、(17)式(車体 11 のローリングを記述する運動方程式)と、(18)式、(19)式(台車 12 a に配置されたヨーダンパ、台車 12 b に配置されたヨーダンパのヨーイングを記述する運動方程式)と、(20)式、(21)式(台車 12 a に配置された空気バネ(枕バネ)、台車 12 b に配置された空気バネ(枕バネ)のローリングを記述する運動方程式)については、これらをそのまま用いて状態方程式を構成する。

[0075] 一方、(1)式～(4)式(輪軸 13 a～13 d の横振動(左右方向における運動)を記述する運動方程式)と、(11)式、(12)式(台車 12 a、12 b のヨーイングを記述する運動方程式)には、輪軸 13 a～13 d のヨーイング方向における回動量(角変位) $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ や角速度 $\phi_{w1} \cdot \sim \phi_{w4} \cdot$ が含まれる。(1)式～(4)式および(11)式、(12)式からこれらの変数を消去したものをを用いて状態方程式を構成する。

[0076] まず、輪軸 13 a～13 d における前後方向力 $T_1 \sim T_4$ は、以下の(22)式～(25)式で表される。このように、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ は、輪軸のヨーイング方向の角変位 $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ と、当該輪軸が設けられる台車のヨーイング方向の角変位 $\phi_{t1} \sim \phi_{t2}$ との差に応じて定まる。

[0077] [数11]

$$T_1 = C_{wx} b_1^2 \{ \dot{\psi}_{t1} - \dot{\psi}_{w1} \} + K_{wx} b_1^2 \{ \psi_{t1} - \psi_{w1} \} \quad \dots (22)$$

$$T_2 = C_{wx} b_1^2 \{ \dot{\psi}_{t1} - \dot{\psi}_{w2} \} + K_{wx} b_1^2 \{ \psi_{t1} - \psi_{w2} \} \quad \dots (23)$$

$$T_3 = C_{wx} b_1^2 \{ \dot{\psi}_{t2} - \dot{\psi}_{w3} \} + K_{wx} b_1^2 \{ \psi_{t2} - \psi_{w3} \} \quad \dots (24)$$

$$T_4 = C_{wx} b_1^2 \{ \dot{\psi}_{t2} - \dot{\psi}_{w4} \} + K_{wx} b_1^2 \{ \psi_{t2} - \psi_{w4} \} \quad \dots (25)$$

[0078] 以下の(26)式～(29)式のように、変換変数 $e_1 \sim e_4$ を定義する。

このように、変換変数 $e_1 \sim e_4$ は、台車のヨーイング方向の角変位 $\phi_{t1} \sim \phi_{t2}$ と輪軸のヨーイング方向の角変位 $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ との差で定義される。変換変数 $e_1 \sim e_4$ は、台車のヨーイング方向の角変位 $\phi_{t1} \sim \phi_{t2}$ と輪軸のヨーイング方向の角変位 $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ とを相互に変換するための変数である。

[0079] [数12]

$$e_1 = \psi_{t1} - \psi_{w1} \quad \dots (26)$$

$$e_2 = \psi_{t1} - \psi_{w2} \quad \dots (27)$$

$$e_3 = \psi_{t2} - \psi_{w3} \quad \dots (28)$$

$$e_4 = \psi_{t2} - \psi_{w4} \quad \dots (29)$$

[0080] (26)式～(29)式を式変形すると、以下の(30)式～(33)式が得られる。

[0081]

[数13]

$$\psi_{w1} = \psi_{t1} - e_1 \quad \dots (30)$$

$$\psi_{w2} = \psi_{t1} - e_2 \quad \dots (31)$$

$$\psi_{w3} = \psi_{t2} - e_3 \quad \dots (32)$$

$$\psi_{w4} = \psi_{t2} - e_4 \quad \dots (33)$$

[0082] (30)式～(33)式を、(1)式～(4)式の輪軸13a～13dの横振動（左右方向における運動）を記述する運動方程式に代入すると、以下の(34)式～(37)式が得られる。

[0083] [数14]

$$m_w \ddot{y}_{w1} + \frac{f_2}{V} \dot{y}_{w1} + C_{wy} [\dot{y}_{w1} - \{\dot{y}_{t1} + a \dot{\psi}_{t1} + h_1 \dot{\phi}_{t1}\}] - f_2 \psi_{t1} + K_{wy} [y_{w1} - \{y_{t1} + a \psi_{t1} + h_1 \phi_{t1}\}] = -f_2 e_1 \quad \dots (34)$$

$$m_w \ddot{y}_{w2} + \frac{f_2}{V} \dot{y}_{w2} + C_{wy} [\dot{y}_{w2} - \{\dot{y}_{t1} + a \dot{\psi}_{t1} + h_1 \dot{\phi}_{t1}\}] - f_2 \psi_{t1} + K_{wy} [y_{w2} - \{y_{t1} + a \psi_{t1} + h_1 \phi_{t1}\}] = -f_2 e_1 \quad \dots (35)$$

$$m_w \ddot{y}_{w3} + \frac{f_2}{V} \dot{y}_{w3} + C_{wy} [\dot{y}_{w3} - \{\dot{y}_{t2} + a \dot{\psi}_{t2} + h_1 \dot{\phi}_{t2}\}] - f_2 \psi_{t2} + K_{wy} [y_{w3} - \{y_{t2} + a \psi_{t2} + h_1 \phi_{t2}\}] = -f_2 e_3 \quad \dots (36)$$

$$m_w \ddot{y}_{w4} + \frac{f_2}{V} \dot{y}_{w4} + C_{wy} [\dot{y}_{w4} - \{\dot{y}_{t2} + a \dot{\psi}_{t2} + h_1 \dot{\phi}_{t2}\}] - f_2 \psi_{t2} + K_{wy} [y_{w4} - \{y_{t2} + a \psi_{t2} + h_1 \phi_{t2}\}] = -f_2 e_4 \quad \dots (37)$$

[0084] このように、(1)式～(4)式（輪軸13a～13dの横振動（左右方向における運動）を記述する運動方程式）を、変換変数 $e_1 \sim e_4$ を用いて表現することで、当該運動方程式に含まれていた輪軸13a～13dのヨーイング方向における回動量（角変位） $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ を消去することができる。

[0085] (22)式～(25)式を、(11)式、(12)式（台車12a、12bのヨーイングを記述する運動方程式）に代入すると、以下の(38)式、(39)式が得られる。

[0086] [数15]

$$\begin{aligned}
& I_{Tz} \ddot{\psi}_{t1} + 2 C_{wy} a^2 \dot{\psi}_{t1} - C_{wy} a \{ \dot{y}_{w1} - \dot{y}_{w2} \} \\
& \quad + 2 K_{wy} a^2 \psi_{t1} - K_{wy} a \{ y_{w1} - y_{w2} \} \\
& \quad + 2 k_0' (b_0')^2 \{ \psi_{t1} - \psi_{y1} \} + 2 k_2'' b_2^2 \{ \psi_{t1} - \psi_b \} = -T_1 - T_2 \\
& \quad \dots (38)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& I_{Tz} \ddot{\psi}_{t2} + 2 C_{wy} a^2 \dot{\psi}_{t2} - C_{wy} a \{ \dot{y}_{w3} - \dot{y}_{w4} \} \\
& \quad + 2 K_{wy} a^2 \psi_{t2} - K_{wy} a \{ y_{w3} - y_{w4} \} \\
& \quad + 2 k_0' (b_0')^2 \{ \psi_{t2} - \psi_{y2} \} + 2 k_2'' b_2^2 \{ \psi_{t2} - \psi_b \} = -T_3 - T_4 \\
& \quad \dots (39)
\end{aligned}$$

[0087] このように、(11)式、(12)式(台車12a、12bのヨーイングを記述する運動方程式)を、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ を用いて表現することで、当該運動方程式に含まれていた輪軸13a～13dのヨーイング方向における角変位 $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ および角速度 $\phi_{w1} \cdot \sim \phi_{w4} \cdot$ を消去できる。

[0088] また、(26)式～(29)式を、(22)式～(25)式に代入すると、以下の(40)式～(43)式が得られる。

[0089] [数16]

$$C_{wx} b_1^2 \dot{e}_1 + K_{wx} b_1^2 e_1 = T_1 \quad \dots (40)$$

$$C_{wx} b_1^2 \dot{e}_2 + K_{wx} b_1^2 e_2 = T_2 \quad \dots (41)$$

$$C_{wx} b_1^2 \dot{e}_3 + K_{wx} b_1^2 e_3 = T_3 \quad \dots (42)$$

$$C_{wx} b_1^2 \dot{e}_4 + K_{wx} b_1^2 e_4 = T_4 \quad \dots (43)$$

[0090] 以上のように本実施形態では、(34)式～(37)式のようにして輪軸13a～13dの横振動(左右方向における運動)を記述する運動方程式を表すと共に、(38)式、(39)式のようにして台車12a、12bのヨーイングを記述する運動方程式を表す。(34)式～(39)式を用いて状

態方程式を構成する。また、(40)式～(43)式は、常微分方程式である。当該常微分方程式の解である変換変数 $e_1 \sim e_4$ の実績値は、輪軸 13a～13d における前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の値を用いることにより求めることができる。ここで、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の値は、後述する第1の周波数調整部 503により、前後方向力の測定値の時系列データから鉄道車両が軌道の曲線部を走行することに起因して生じる低周波成分の信号強度が低減されたものである。

[0091] このようにして求めた変換変数 $e_1 \sim e_4$ の実績値を、(34)式～(37)式に与える。また、輪軸 13a～13d における前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の値を(38)式、(39)式に与える。ここで、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の値は、後述する第1の周波数調整部 503により、前後方向力の測定値の時系列データから鉄道車両が軌道の曲線部を走行することに起因して生じる低周波成分の信号強度が低減されたものである。

[0092] 本実施形態では、以下の(44)式に示す変数を状態変数とし、(9)式、(10)式、(13)式～(21)式、(34)式～(39)式の運動方程式を用いて状態方程式を構成する。

[0093] [数17]

$$\text{状態変数} = \begin{bmatrix} \dot{y}_{w1} & y_{w1} & \dot{y}_{w2} & y_{w2} & \dot{y}_{w3} & y_{w3} & \dot{y}_{w4} & y_{w4} & \dot{y}_{t1} & y_{t1} & \dot{y}_{t2} & y_{t2} & \dot{\psi}_{t1} & \psi_{t1} & \dot{\psi}_{t2} & \psi_{t2} \\ \dot{\phi}_{t1} & \phi_{t1} & \dot{\phi}_{t2} & \phi_{t2} & \dot{y}_b & y_b & \dot{\psi}_b & \psi_b & \dot{\phi}_b & \phi_b & \psi_{y1} & \psi_{y2} & \phi_{a1} & \phi_{a2} \\ \dots \end{bmatrix} \quad (44)$$

[0094] 記憶部 501 は、例えば、以上のようにして構成される状態方程式を、オペレータによるユーザインターフェース 608 の操作に基づいて入力し、記憶する。

[0095] 次に、観測方程式について説明する。

本実施形態では、車体 11 の左右方向における加速度、台車 12a、12b の左右方向における加速度、および輪軸 13a～13d の左右方向における加速度を観測変数とする。この観測変数は、後述するカルマンフィルタに

よるフィルタリングの観測変数である。本実施形態では、(34)式～(37)式、(9)式、(10)式、および(15)式(横振動を記述する運動方程式)を用いて観測方程式を構成する。

記憶部501は、例えば、このようにして構成される観測方程式を、オペレータによるユーザインターフェース608の操作に基づいて入力し、記憶する。

[0096] 以上のようにして、状態方程式および観測方程式が検査装置500に記憶された後に、データ取得部502、第1の周波数調整部503、状態変数導出部504、第2の周波数調整部505、軌道状態導出部506、および出力部507が起動する。即ち、図7のフローチャートによる処理は、状態方程式および観測方程式が検査装置500に記憶された後に開始する。

[0097] [データ取得部502、S701]

データ取得部502は、前後方向力の測定値の時系列データを取得する。前後方向力の測定の方法は、前述した通りである。データ取得部502は、例えば、前後方向力を測定するための歪ゲージの測定値を用いて前後方向力を演算する演算装置との通信を行うことにより、前後方向力の測定値の時系列データを取得することができる。尚、データ取得部502は、車体11の左右方向における加速度の測定値の時系列データ、台車12a、12bの左右方向における加速度の測定値の時系列データ、および輪軸13a～13dの左右方向における加速度の測定値の時系列データを取得しない。

[0098] [第1の周波数調整部503、S702]

第1の周波数調整部503は、データ取得部502により取得された前後方向力の測定値の時系列データに含まれる低周波成分の信号強度を低減(好ましくは除去)する。この低周波成分の信号は、鉄道車両が、曲率が0(ゼロ)の直線軌道を走行している場合には計測されないが、鉄道車両が、曲線軌道を走行している場合に計測される信号である。即ち、鉄道車両が曲線軌道を走行している場合に計測される信号は、鉄道車両が曲率が0(ゼロ)の直線軌道を走行している場合に計測される信号に、この低周波成分の信号が

重畳された信号と見なすことができる。

[0099] 本発明者らは、自己回帰モデル（AR（Auto-regressive）モデル）を修正したモデルを考案した。そして、本発明者らは、このモデルを用いて、前後方向力の測定値の時系列データに含まれる低周波成分の信号強度を低減することに想到した。以下の説明では、本発明者らが考案したモデルを、修正自己回帰モデルと称する。これに対し、公知の自己回帰モデルを、単に自己回帰モデルと称する。以下、修正自己回帰モデルの一例について説明する。

[0100] 時刻 k ($1 \leq k \leq M$) における物理量 y の時系列データの値を y_k とする。 M は、物理量 y の時系列データ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。以下の説明では、物理量の時系列データを必要に応じてデータ y と略称する。データ y の値 y_k を近似する自己回帰モデルは、例えば、以下の（45）式のようになる。（45）式に示すように、自己回帰モデルとは、データ y における時刻 k ($m+1 \leq k \leq M$) の物理量の予測値 \hat{y}_k を、データ y におけるその時刻 k よりも前の時刻 $k-1$ ($1 \leq l \leq m$) の物理量の実績値 y_{k-1} を用いて表す式である。尚、 \hat{y}_k は、（45）式において、 y_k の上に $\hat{}$ を付けて表記したものである。

[0101] [数18]

$$\hat{y}_k = \sum_{l=1}^m \alpha_l y_{k-l}, \quad m+1 \leq k \leq M \quad \dots (45)$$

[0102] （45）式における α は、自己回帰モデルの係数である。 m は、自己回帰モデルにおいて時刻 k におけるデータ y の値 y_k を近似するために用いられるデータ y の値の数であって、その時刻 k よりも前の連続する時刻 $k-1 \sim k-m$ におけるデータ y の値 $y_{k-1} \sim y_{k-m}$ の数である。 m は、 M 未満の整数である。 m として、例えば、1500を用いることができる。

[0103] 続いて、最小二乗法を用いて、自己回帰モデルによる時刻 k における物理量の予測値 \hat{y}_k が、値 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時刻 k における物理量の予測値 \hat{y}_k が値 y_k に近似するための条件

として、例えば、自己回帰モデルによる時刻 k における物理量の予測値 y^{\wedge}_k と値 y_k との二乗誤差を最小化するとする条件を採用することができる。即ち、自己回帰モデルによる時刻 k における物理量の予測値 y^{\wedge}_k を値 y_k に近似するために最小二乗法を用いる。以下の (46) 式は、自己回帰モデルによる時刻 k における物理量の予測値 y^{\wedge}_k を値 y_k との二乗誤差を最小にするための条件式である。

[0104] [数19]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha_j} \sum_{k=m+1}^M \left| y_k - \sum_{l=1}^m \alpha_l y_{k-l} \right|^2 \\ &= 2 \sum_{k=m+1}^M \left\{ \left(y_k - \sum_{l=1}^m \alpha_l y_{k-l} \right) y_{k-j} \right\} \\ &= 2 \left\{ \sum_{k=m+1}^M y_k y_{k-j} - \sum_{l=1}^m \alpha_l \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-l} \right\} = 0, \quad 1 \leq j \leq m \\ & \dots (46) \end{aligned}$$

[0105] (46) 式より、以下の (47) 式の関係が成り立つ。

[0106] [数20]

$$\begin{aligned} \sum_{k=m+1}^M y_k y_{k-j} &= \alpha_1 \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-1} + \alpha_2 \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-2} \\ &+ \dots + \alpha_m \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-m}, \quad 1 \leq j \leq m \quad \dots (47) \end{aligned}$$

[0107] また、(47) 式を変形 (行列表記) することで、以下の (48) 式が得られる。

[0108]

[数21]

$$R_{j0} = (R_{j1} \ R_{j2} \ \dots R_{jm}) \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix}, \quad 1 \leq j \leq m \quad \dots (48)$$

[0109] (48)式における R_{j1} はデータ y の自己相関と呼ばれるもので、以下の(49)式で定義される値である。このときの $|j-1|$ を時差という。

[0110] [数22]

$$R_{j1} = \sum_{k=m+1}^M y_{k-j} y_{k-1}, \quad 1 \leq j \leq m, \ 0 \leq l \leq m \quad \dots (49)$$

[0111] (48)式を基に、以下の(50)式を考える。(50)式は、自己回帰モデルによる時刻 k における物理量の予測値 \hat{y}_k と、その予測値 \hat{y}_k に対応する時刻 k における物理量の値 y_k 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。(50)式は、ユール・ウォーカー (Yule-Walker) 方程式と呼ばれる。また、(50)式は、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。(50)式における左辺の定数ベクトルは、時差が1から m までのデータ y の自己相関を成分とするベクトルである。以下の説明では、(50)式における左辺の定数ベクトルを必要に応じて自己相関ベクトルと称する。また、(50)式における右辺の係数行列は、時差が0から $m-1$ までのデータ y の自己相関を成分とする行列である。以下の説明では、(50)式における右辺の係数行列を必要に応じて自己相関行列と称する。

[0112] [数23]

$$\begin{pmatrix} R_{10} \\ R_{20} \\ \vdots \\ R_{m0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} \quad \dots (50)$$

[0113] また、(50)式における右辺の自己相関行列 (R_{j_1} で構成される $m \times m$ の行列) を、以下の (51) 式のように、自己相関行列 R と表記する。

[0114] [数24]

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \cdots & R_{mm} \end{pmatrix} \quad \dots (51)$$

[0115] 一般に、自己回帰モデルの係数を求める際には、(50)式を係数 α について解くという方法が用いられる。(50)式では、自己回帰モデルで導出される時刻 k における物理量の予測値 \hat{y}_k が、その時刻 k における物理量の値 y_k にできるだけ近づくように係数 α を導出する。よって、自己回帰モデルの周波数特性には、各時刻におけるデータ y の値 y_k に含まれる多数の周波数成分が含まれる。

[0116] 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。その結果、本発明者らは、自己相関行列 R の固有値の一部を用いて、データ y に含まれる高周波成分の影響を低減することができることを見出した。即ち、本発明者らは、低周波成分が強調されるように自己相関行列 R を書き換えることができることを見出した。

[0117] 以下に、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 の要素は、対称である。従って、自己相関行列 R を特異値分解すると以下の (52) 式のように、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。

[0118] [数25]

$$R = U \Sigma U^T \quad \dots (52)$$

[0119] (52)式の対角行列 Σ は、以下の (53) 式に示すように、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、直交行列 U は、各列成分ベクトルが自

自己相関行列 R の固有ベクトルとなる行列である。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} という対応関係がある。自己相関行列 R の固有値は、自己回帰モデルによる時刻 k における物理量の予測値 \hat{y}_k の時間波形に含まれる各周波数の成分の強度を反映する変数である。

[0120] [数26]

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{mm} \end{pmatrix}, U = (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m) \quad \dots \quad (53)$$

[0121] 自己相関行列 R の特異値分解の結果から得られる対角行列 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。(53) 式に示す自己相関行列 R の固有値のうち、最大のものから s 個の固有値を用いて、以下の(54)式のように、行列 R' を定義する。 s は、1以上且つ m 未満の数である。本実施形態では、 s は、予め定められる。行列 R' は、自己相関行列 R の固有値のうち 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。

[0122] [数27]

$$R' = U_s \Sigma_s U_s^T \quad \dots \quad (54)$$

[0123] (54) 式における行列 U_s は、(52) 式の直交行列 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 $m \times s$ の要素を切り出して構成される部分行列である。また、(54) 式における U_s^T は、 U_s の転置行列である。 U_s^T は、(52) 式の行列 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。(54) 式における行列 Σ_s は、(52) 式の対角行列 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 の要素を切り出して構成される部分行列である。

行列 Σ_s および行列 U_s を行列要素で表現すれば、以下の (55) 式のようにになる。

[0124] [数28]

$$\Sigma_s = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{ss} \end{pmatrix}, U_s = (u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_s) \quad \dots (55)$$

[0125] 自己相関行列 R の代わりに行列 R' を用いることで、(50) 式の関係式を、以下の (56) 式のように書き換える。

[0126] [数29]

$$\begin{pmatrix} R_{10} \\ R_{20} \\ \vdots \\ R_{m0} \end{pmatrix} = U_s \Sigma_s U_s^T \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix} \quad \dots (56)$$

[0127] (56) 式を変形することで、係数 α を求める式として、以下の (57) 式が得られる。(57) 式によって求められる係数 α を用いて、(45) 式により、時刻 k における物理量の予測値 y^{\wedge}_k を算出するモデルが「修正自己回帰モデル」である。

[0128] [数30]

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix} = U_s \Sigma_s^{-1} U_s^T \begin{pmatrix} R_{10} \\ R_{20} \\ \vdots \\ R_{m0} \end{pmatrix} \quad \dots (57)$$

[0129] ここでは、対角行列 Σ の対角成分である σ_{11} 、 σ_{22} 、 \cdots 、 σ_{mm} の値を降順とする場合を例に挙げて説明した。しかしながら、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。その場合には、行列

U_s は、直交行列 U から左の $m \times s$ の要素を切り出して構成される部分行列ではなく、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になる。また、行列 Σ_s は、対角行列 Σ から左上の $s \times s$ の要素を切り出して構成される部分行列ではなく、修正自己回帰モデルの係数の決定に利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になる。

[0130] (57)式は、修正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。(57)式の行列 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 U の部分行列であって、修正自己回帰モデルの係数の決定に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（第3の行列）である。また、(57)式の行列 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、修正自己回帰モデルの係数の決定に利用される固有値を対角成分とする行列（第2の行列）である。(57)式の行列 $U_s \Sigma_s U_s^T$ は、行列 Σ_s と行列 U_s とから導出される行列（第1の行列）である。

[0131] (57)式の右辺を計算することにより、修正自己回帰モデルの係数 α が求まる。以上、修正自己回帰モデルの係数 α の導出方法の一例について説明した。ここでは、修正自己回帰モデルの基となる自己回帰モデルの係数の導出方法を、直感的に分かり易いように、時刻 k における物理量の予測値 \hat{y}_k に対して最小二乗法を用いる方法とした。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。従って、本実施形態におけるデータ y 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よい。例えば、 $R_{22} \sim R_{mm}$ は、時差が0（ゼロ）の自己相関であるが、これらを R_{11} に置き換えてもよい。

[0132] (53)式に示す自己相関行列 R から抽出する固有値の数 s は、例えば、

自己相関行列 R の固有値の分布から決定することができる。

ここでは、前述した修正自己回帰モデルの説明における物理量は、前後方向力になる。前後方向力の値は、鉄道車両の状態等に応じて変動する。

そこで、まず、鉄道車両を軌道 16 上で走行させて、前後方向力の測定値についてのデータ y を得る。得られたデータ y 毎に、(49) 式と (51) 式とを用いて自己相関行列 R を求める。この自己相関行列 R について (52) 式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 の固有値を求める。図 8 は、自己相関行列 R の固有値の分布の一例を示す図である。図 8 では、輪軸 13 a における前後方向力 T_1 の測定値 y の時系列データのそれぞれについての自己相関行列 R を特異値分解して得られた固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ を昇順に並べ替えて、プロットしている。図 8 の横軸は、固有値のインデックスであり、縦軸は、固有値の値である。

[0133] 図 8 に示す例では、他よりも顕著に高い値をもつ固有値が 1 つある。また、前記顕著に高い値もつ固有値ほどではないが、他と比べると比較的大きな値を持ち 0 (ゼロ) とみなせない固有値が 2 つある。このことから、(53) 式に示す自己相関行列 R から抽出する固有値の数 s として、例えば、2 または 3 を採用することができる。どちらを採用しても結果に顕著な差異は生じない。尚、鉄道車両の構成や軌道の構成等により、他よりも顕著に高い値をもつ固有値の数は変わり得る。従って、自己相関行列 R から抽出する固有値の数 s は、1 以上であれば、これらの値に限定されない。

[0134] 第 1 の周波数調整部 503 は、データ取得部 502 で前後方向力の測定値 y の時系列データの時刻 k における値 y_k が所定のサンプリング周期で取得されるたびに以下の処理を行う。

まず、第 1 の周波数調整部 503 は、前後方向力の測定値 y の時系列データと、予め設定されている数 M 、 m と、に基づいて、(49) 式と (51) 式とを用いて自己相関行列 R を生成する。

[0135] 次に、第 1 の周波数調整部 503 は、自己相関行列 R を特異値分解することで、(52) 式の直交行列 U および対角行列 Σ を導出し、対角行列 Σ から

自己相関行列 R の固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ を導出する。

次に、第 1 の周波数調整部 503 は、自己相関行列 R の複数の固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ のうち、最大のものから s 個の固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{ss}$ を、修正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。

次に、第 1 の周波数調整部 503 は、前後方向力の測定値 y の時系列データと、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、(57) 式を用いて、修正自己回帰モデルの係数 α を決定する。

[0136] そして、第 1 の周波数調整部 503 は、修正自己回帰モデルの係数 α と、前後方向力の測定値 y の時系列データと、に基づいて、(45) 式により、前後方向力の測定値 y の時系列データの時刻 k における予測値 \hat{y}_k を導出する。前後方向力の予測値 \hat{y}_k の時系列データは、前後方向力の測定値 y の時系列データに含まれる低周波成分を抽出した時系列データになる。

[0137] 図 9 は、前後方向力の測定値の時系列データ（測定値）と、前後方向力の予測値の時系列データ（計算値）の一例を示す図である。尚、本実施形態では、4 つの前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値が得られる。即ち、前後方向力について 4 つのデータ y が得られる。図 9 では、これら 4 つのデータ y のそれぞれにおける測定値および計算値を示す。図 9 の横軸は、基準の時刻を 0（ゼロ）とした場合の当該基準の時刻からの経過時間（秒）であり、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定時刻・計算時刻を表す。縦軸は、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ (Nm) である。

[0138] 図 9 において、輪軸 13a における前後方向力 T_1 の計算値は、概ね 15 秒～35 秒において、バイアスがかかっている。即ち、輪軸 13a における前後方向力 T_1 の計算値は、概ね 15 秒～35 秒において、他の時間よりも大きな値を示す。この期間は、輪軸 13a が曲線軌道を通過する期間に対応する。輪軸 13b における前後方向力 T_2 の計算値、輪軸 13c における前後方向力 T_3 の計算値、および輪軸 13d における前後方向力 T_4 の計算値について

も、輪軸 13 a における前後方向力 T_1 の計算値と同様に、輪軸 13 b、13 c、13 d が曲線軌道を通過する期間にバイアスがかかっている。

[0139] 従って、図 9 において、輪軸 13 a ~ 13 d における前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値から計算値を除けば、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の信号のうち、輪軸 13 a ~ 13 d が曲線軌道を通過することに起因する低周波成分を除くことができる。即ち、図 9 において、輪軸 13 a ~ 13 d における前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値から計算値を除けば、輪軸 13 a ~ 13 d が曲線軌道を通過した場合の前後方向力 $T_1 \sim T_4$ として、輪軸 13 a ~ 13 d が直線軌道を通過した場合と同等の前後方向力を得ることができる。

[0140] そこで、第 1 の周波数調整部 503 は、前後方向力の測定値 y_k の時系列データ（データ y ）から、前後方向力の予測値 \hat{y}_k の時系列データを減算する。以下の説明では、前後方向力の測定値 y_k の時系列データ（データ y ）から、前後方向力の予測値 \hat{y}_k の時系列データを減算した時系列データを、必要に応じて前後方向力の高周波成分の時系列データと称する。また、前後方向力の高周波成分の時系列データの各サンプリング時刻における値を、必要に応じて前後方向力の高周波成分の値と称する。

[0141] 図 10 は、前後方向力の高周波成分の時系列データの一例を示す図である。図 10 の縦軸は、前後方向力 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 の高周波成分の時系列データを示す。即ち、図 10 の縦軸に示す前後方向力 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 の高周波成分は、それぞれ、図 9 に示した、輪軸 13 a、13 b、13 c、13 d における前後方向力 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 の測定値から計算値を減算することにより得られるものである。また、図 10 の横軸は、図 9 の横軸と同様に、基準の時刻を 0（ゼロ）とした場合の当該基準の時刻からの経過時間（秒）であり、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定時刻・計算時刻を表す。

第 1 の周波数調整部 503 は、以上のようにして、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の高周波成分の時系列データを導出する。

[0142] [状態変数導出部 504、S703]

状態変数導出部 504 は、観測方程式を記憶部 501 により記憶された観

測方程式とし、状態方程式を記憶部501により記憶された状態方程式として、カルマンフィルタにより、(44)式に示す状態変数の推定値を決定する。このとき、状態変数導出部504は、第1の周波数調整部503で生成された前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の高周波成分の時系列データを用いる。本実施形態では、状態変数の推定値を決定する際に、車体11の左右方向における加速度の測定値の時系列データ、台車12a、12bの左右方向における加速度の測定値の時系列データ、および輪軸13a~13dの左右方向における加速度の測定値の時系列データのうち、少なくとも前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値が得られた期間における時系列データを用いない。

[0143] カルマンフィルタは、データ同化を行う手法の一つである。即ち、カルマンフィルタは、観測できる変数（観測変数）の測定値と推定値との差異が小さく（最小に）なるように、未観測の変数（状態変数）の推定値を決定する手法の一例である。状態変数導出部504は、観測変数の測定値と推定値との差異が小さく（最小に）なるカルマンゲインを求め、そのときの未観測の変数（状態変数）の推定値を求める。カルマンフィルタにおいては、以下の(58)式の観測方程式と、以下の(59)式の状態方程式を用いる。

$$Y = HX + V \quad \dots (58)$$

$$X \cdot = \Phi X + W \quad \dots (59)$$

[0144] (58)式において、 Y は、観測変数の測定値を格納するベクトルである。 H は、観測モデルである。 X は、状態変数を格納するベクトルである。 V は、観測ノイズである。(59)式において、 $X \cdot$ は、 X の時間微分を示す。 Φ は、線形モデルである。 W は、システムノイズである。尚、カルマンフィルタ自体は、公知の技術で実現できるので、その詳細な説明を省略する。

[0145] 特許文献1に記載の技術では、観測変数の測定値として与えられる値として測定値（車体11の左右方向における加速度の測定値、台車12a、12bの左右方向における加速度の測定値、および輪軸13a~13dの左右方向における加速度の測定値）をそのまま用いる。これに対し、本実施形態では、[第1の着想]の項において説明したように、データ同化の際に本来は

観測変数の測定値として与えられる値として、測定値ではなく、予め設定された一定値を与える。本実施形態では、加速度の時系列データの平均値が0（ゼロ）であるとして、観測変数として与える一定値を全て0（ゼロ）とする。従って、本実施形態では、状態変数導出部504は、データ同化を行うに際して、観測変数の推定値の、一定値（ここでは0（ゼロ））に対する誤差が最小または当該誤差の期待値が最小になるように状態変数の推定値を導出することになる。

状態変数導出部504は、(44)式に示す状態変数の推定値を所定のサンプリング周期で決定することにより、(44)式に示す状態変数の推定値の時系列データを生成する。

[0146] [第2の周波数調整部505、S704]

第1の周波数調整部503により、前後方向力の測定値の時系列データに含まれる低周波成分の信号強度が十分に除去されていないと、状態変数導出部504により生成される状態変数の推定値の時系列データに、鉄道車両が曲線軌道を走行することに起因する低周波成分の信号が残る虞がある。そこで、第2の周波数調整部505は、状態変数導出部504により生成された状態変数の推定値の時系列データに含まれる低周波成分の信号強度を低減（好ましくは除去）する。尚、第1の周波数調整部503により、前後方向力の測定値の時系列データに含まれる低周波成分の信号強度が十分に除去されるように、(53)式に示す自己相関行列Rから抽出する固有値の数sを定めることができる場合には、第2の周波数調整部505の処理は不要になる。

[0147] 本実施形態では、第2の周波数調整部505は、第1の周波数調整部503と同様に、修正自己回帰モデルを用いて、状態変数の推定値の時系列データに含まれる低周波成分の信号強度を低減する。

[0148] 第2の周波数調整部505は、所定のサンプリング周期で状態変数毎に以下の処理を行う。

ここでは、前述した修正自己回帰モデルの説明における物理量は、状態変

数になる。即ち、状態変数のデータ y は、状態変数導出部 504 により生成された状態変数の推定値の時系列データになる。状態変数の推定値は、何れも鉄道車両の状態に応じて変動する。

まず、第2の周波数調整部 505 は、状態変数の推定値のデータ y と、予め設定されている数 M 、 m と、に基づいて、(49) 式と (51) 式とを用いて自己相関行列 R を生成する。

[0149] 次に、第2の周波数調整部 505 は、自己相関行列 R を特異値分解することで、(52) 式の直交行列 U および対角行列 Σ を導出し、対角行列 Σ から自己相関行列 R の固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ を導出する。

次に、第2の周波数調整部 505 は、自己相関行列 R の複数の固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{mm}$ のうち、最大のものから s 個の固有値 $\sigma_{11} \sim \sigma_{ss}$ を、修正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。 s は、状態変数毎に予め定められる。各状態変数の推定値のデータ y は、例えば、鉄道車両を軌道 16 上で走行させた状態で、これまで説明してきたようにして得られる。そして、第2の周波数調整部 505 は、自己相関行列 R の固有値の分布を状態変数毎に個別に作成する。第2の周波数調整部 505 は、この自己相関行列 R の固有値の分布から、(53) 式に示す自己相関行列 R から抽出する固有値の数 s を状態変数のそれぞれについて決定する。

[0150] 次に、第2の周波数調整部 505 は、状態変数の推定値のデータ 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、(57) 式を用いて、修正自己回帰モデルの係数 α を決定する。

[0151] そして、第2の周波数調整部 505 は、修正自己回帰モデルの係数 α と、状態変数の推定値のデータ y と、に基づいて、(45) 式により、状態変数の推定値のデータ y の時刻 k における予測値 \hat{y}_k を導出する。状態変数の予測値 \hat{y}_k の時系列データは、状態変数の推定値のデータ y に含まれる低周波成分を抽出した時系列データになる。

[0152] そして、第2の周波数調整部 505 は、状態変数の推定値のデータ y から

、状態変数の予測値 y^{\wedge}_k の時系列データを減算する。以下の説明では、状態変数の推定値のデータ y から、状態変数の予測値 y^{\wedge}_k の時系列データを減算した時系列データの各サンプリング時刻における値を、必要に応じて状態変数の高周波成分の値と称する。

[0153] [軌道状態導出部506、S705]

(5) 式～(8) 式の輪軸13a～13dのヨーイングを記述する運動方程式に、(22) 式～(25) 式を代入すると、以下の(60) 式～(63) 式が得られる。

[0154] [数31]

$$I_{wz} \ddot{\psi}_{w1} + \frac{f_1 b^2}{v} \dot{\psi}_{w1} + \frac{f_1 b \gamma}{r} \{y_{w1} - y_{R1}\} + s_a K_{wy} \{y_{w1} - y_{t1}\} + s_a C_{wy} \{\dot{y}_{w1} - \dot{y}_{t1}\} = T_1 \quad \dots (60)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi}_{w2} + \frac{f_1 b^2}{v} \dot{\psi}_{w2} + \frac{f_1 b \gamma}{r} \{y_{w2} - y_{R2}\} + s_a K_{wy} \{y_{w2} - y_{t1}\} + s_a C_{wy} \{\dot{y}_{w2} - \dot{y}_{t1}\} = T_2 \quad \dots (61)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi}_{w3} + \frac{f_1 b^2}{v} \dot{\psi}_{w3} + \frac{f_1 b \gamma}{r} \{y_{w3} - y_{R3}\} + s_a K_{wy} \{y_{w3} - y_{t2}\} + s_a C_{wy} \{\dot{y}_{w3} - \dot{y}_{t2}\} = T_3 \quad \dots (62)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi}_{w4} + \frac{f_1 b^2}{v} \dot{\psi}_{w4} + \frac{f_1 b \gamma}{r} \{y_{w4} - y_{R4}\} + s_a K_{wy} \{y_{w4} - y_{t2}\} + s_a C_{wy} \{\dot{y}_{w4} - \dot{y}_{t2}\} = T_4 \quad \dots (63)$$

[0155] 本実施形態では、(60) 式～(63) 式に示すようにして、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ と輪軸13a～13dの位置での通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ との関係を示す関係式が定められる。

軌道状態導出部506は、(30) 式～(33) 式より、輪軸13a～13dのヨーイング方向における回動量(角変位) $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ の推定値を算出する。そして、軌道状態導出部506は、輪軸13a～13dのヨーイング方向における回動量(角変位) $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ の推定値と、第2の周波数調整部505で生成された状態変数の高周波成分の値と、第1の周波数調整部503により生成された前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の高周波成分の値とを、(60) 式

～(63)式に与えることにより、輪軸13a～13dの位置での通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ を算出する。ここで使用される状態変数は、台車12a～12bの左右方向の変位 $y_{t1} \sim y_{t2}$ 、台車12a～12bの左右方向の速度 $y_{t1} \cdot \sim y_{t2} \cdot$ 、輪軸13a～13dの左右方向の変位 $y_{w1} \sim y_{w4}$ 、および輪軸13a～13dの左右方向の速度 $y_{w1} \cdot \sim y_{w4} \cdot$ である。軌道状態導出部506は、以上のような通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ の算出を所定のサンプリング周期で行うことにより、通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ の時系列データを得る。

[0156] そして、軌道状態導出部506は、通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ から、最終的な通り狂い量 y_R を算出する。例えば、軌道状態導出部506は、通り狂い量 $y_{R2} \sim y_{R4}$ の時系列データの位相を、通り狂い量 y_{R1} の時系列データの位相に合わせる。即ち、軌道状態導出部506は、輪軸13aと輪軸13b～13dとの前後方向の距離と、鉄道車両の速度とから、或る位置を輪軸13aが通過する時刻に対する、当該位置を輪軸13b～13dが通過する時刻の遅れ時間を算出する。軌道状態導出部506は、通り狂い量 $y_{R2} \sim y_{R4}$ の時系列データに対して、この遅れ時間だけ位相をずらす。

[0157] 軌道状態導出部506は、位相を合わせた通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ の同じサンプリング時刻における値の和の算術平均値を当該サンプリング時刻における最終的な通り狂い量 y_R として算出する。軌道状態導出部506は、このような計算を各サンプリング時刻において行うことにより、最終的な通り狂い量 y_R の時系列データを得る。通り狂い量 $y_{R2} \sim y_{R4}$ の位相を、通り狂い量 y_{R1} の位相に合わせるので、通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ の時系列データに共通して存在する外乱因子を相殺することができる。

[0158] 尚、軌道状態導出部506は、位相を合わせた通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ のそれぞれについて移動平均をとり（即ち、ローパスフィルタを通し）、当該移動平均をとった通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ から、最終的な通り狂い量 y_R を算出してもよい。

また、軌道状態導出部506は、位相を合わせた通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ の同じサンプリング時刻における値のうち、最大値と最小値を除く2つの値の

算術平均値を最終的な通り狂い量 y_R として算出してもよい。

- [0159] 検査装置 500 は、鉄道車両が、通り狂い量の導出対象の走行区間を走行している間にデータ取得部 502 により取得された各サンプリング時刻における前後方向力の測定値の時系列データを用いて、第 1 の周波数調整部 503、状態変数導出部 504、第 2 の周波数調整部 505、および軌道状態導出部 506 の処理を実行する。
- [0160] このようにして、軌道状態導出部 506 は、通り狂い量の導出対象の走行区間を鉄道車両が走行している間の各サンプリング時刻における通り狂い量 y_R を得ることができる。軌道状態導出部 506 は、各サンプリング時刻に鉄道車両の走行位置を、例えば、鉄道車両の走行速度と、鉄道車両の走行開始からの経過時間とに基づいて算出する。鉄道車両の走行位置を、例えば、輪軸 13a の位置とすることができる。軌道状態導出部 506 は、各サンプリング時刻における通り狂い量 y_R と、各サンプリング時刻に鉄道車両の走行位置とに基づいて、当該鉄道車両の各走行位置における最終的な通り狂い量 y_R を導出する。
- [0161] 尚、軌道状態導出部 506 は、各サンプリング時刻に鉄道車両の走行位置を、必ずしも前述したようにして算出する必要はない。例えば、軌道状態導出部 506 は、GPS (Global Positioning System) を用いて、各サンプリング時刻に鉄道車両の走行位置を求めてもよい。
- [0162] [出力部 507、S706]
- 出力部 507 は、軌道状態導出部 506 により算出された最終的な通り狂い量 y_R の情報を出力する。このとき出力部 507 は、最終的な通り狂い量 y_R が、予め設定された値よりも大きい場合には、軌道 16 が異常であることを示す情報を出力してもよい。出力の形態としては、例えば、コンピュータディスプレイへの表示、外部装置への送信、およびの内部または外部の記憶媒体への記憶の少なくとも何れか 1 つを採用することができる。
- [0163] [まとめ]
- 以上のように本実施形態では、検査装置 500 は、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の

測定値と、変換変数 $e_1 \sim e_4$ の実績値と、をカルマンフィルタに与えて、状態変数 ($y_{w1} \sim y_{w4}$ 、 $y_{t1} \sim y_{t2}$ 、 $\phi_{t1} \sim \phi_{t2}$ 、 y_b 、 ϕ_b 、 ϕ_{y1} 、 ϕ_{y2} 、 ϕ_{a1} 、 ϕ_{a2}) を導出する。このとき、データ同化の際に本来は観測変数の測定値として与えられる値 (車体 11、台車 12 a、12 b、および輪軸 13 a~13 d の左右方向における加速度) として予め設定された一定値 (例えば 0 (ゼロ)) が用いられる。次に、検査装置 500 は、前記状態変数に含まれる台車 12 a、12 b のヨーイング方向における回動量 (角変位) $\phi_{t1} \sim \phi_{t2}$ と、変換変数 $e_1 \sim e_4$ の実績値と、を用いて、輪軸 13 a~13 d のヨーイング方向における回動量 (角変位) $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ を導出する。次に、検査装置 500 は、輪軸 13 a~13 d のヨーイングを記述する運動方程式に、輪軸 13 a~13 d のヨーイング方向における回動量 (角変位) $\phi_{w1} \sim \phi_{w4}$ と、前記状態変数と、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値と、を代入して、輪軸 13 a~13 d の位置での通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ を導出する。そして、検査装置 500 は、通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ から、最終的な通り狂い量 y_R を導出する。従って、車体 11、台車 12 a、12 b、および輪軸 13 a~13 d の左右方向における加速度の測定値を用いずに、通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ (最終的な通り狂い量 y_R) を、精度を大きく落とすことなく導出することができる。従って、通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ (最終的な通り狂い量 y_R) を導出する際に用いるセンサの数を低減することができる。

[0164] また、本実施形態では、検査装置 500 は、前後方向力の測定値 y の時系列データから、自己相関行列 R を生成し、自己相関行列 R を特異値分解して得られた固有値のうち、最大のものから s 個の固有値を用いて、前後方向力の測定値 y の時系列データを近似する修正自己回帰モデルの係数 α を決定する。従って、前後方向力の測定値 y の時系列データに含まれる低周波成分の信号が残り、高周波成分が残らないように、係数 α を決定することができる。検査装置 500 は、時刻 k における前後方向力の予測値 \hat{y}_k を、このよう

にして係数 α が定められた修正自己回帰モデルに、その時刻よりも前の時刻 $k-1$ ($1 \leq l \leq m$)の前後方向力の測定値 y の時系列データを与えることにより算出する。従って、カットオフ周波数を予め想定することなく、前後方向力の測定値 y の時系列データから、鉄道車両の曲線軌道の走行に起因する低周波成分の信号を低減することができる。そして、検査装置500は、このようにして前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値の時系列データに含まれる低周波成分の信号強度を低減し、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の高周波成分の時系列データを生成する。検査装置500は、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の高周波成分の時系列データを、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ と輪軸13a~13dの位置での通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ との関係式に与えることにより、輪軸13a~13dの位置での通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ を算出する。この関係式は、鉄道車両の直線軌道の走行時における運動を記述する運動方程式（即ち、軌道16（レール）の曲率半径 R を含まない式）に基づく式である。従って、曲線軌道における通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ （最終的な通り狂い量 y_R ）を、鉄道車両の直線軌道の走行時における運動を記述する運動方程式に基づいて、特別な測定装置を用いることなく検出することができる。

[0165] [変形例]

本実施形態では、データ同化の際に本来は観測変数の測定値として与えられる値として、予め設定された一定値を与える。この一定値は、0（ゼロ）に限定されない。例えば、検査装置500を搭載した鉄道車両または当該鉄道車両と同等の鉄道車両（当該鉄道車両と構造が同じ鉄道車両）が、通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ （最終的な通り狂い量 y_R ）の導出対象の軌道16を走行しているときの、車体11の左右方向における加速度の測定値の時系列データ、台車12a、12bの左右方向における加速度の測定値の時系列データ、および輪軸13a~13dの左右方向における加速度の測定値の時系列データを得て、各々の時系列データの平均値を、一定値として用いてもよい。また、これらの測定値を用いて、前述した修正自己回帰モデルにより、車体11の左右方向における加速度 y^{\wedge}_k の予測値の時系列データ、台車12a、12

bの左右方向における加速度 y^{\wedge}_k の予測値の時系列データ、および輪軸 13 a ~ 13 d の左右方向における加速度の予測値 y^{\wedge}_k の時系列データを導出する。そして、それらの平均値を、一定値として用いてもよい。このようにする場合、加速度の測定を行うが、当該測定は、鉄道車両および軌道 16 毎に、それぞれ 1 回行えばよく、輪軸 13 a ~ 13 d における前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値が得られた期間における加速度の測定値は、状態変数の導出の際には用いられない。

[0166] 本実施形態では、修正自己回帰モデルを用いる場合を例に挙げて説明した。しかしながら、必ずしも、修正自己回帰モデルを用いて、前後方向力測定値 y の時系列データから、鉄道車両の曲線軌道の走行に起因する低周波成分の信号を低減する必要はない。例えば、鉄道車両の曲線軌道の走行に起因する周波数帯を特定することができる場合には、ハイパスフィルタを用いて、前後方向力の測定値 y の時系列データから、鉄道車両の曲線軌道の走行に起因する低周波成分の信号を低減してもよい。また、鉄道車両が走行する軌道が、(曲率が 0 (ゼロ) の理想的な) 直線軌道、または、設計上は直線軌道であるが通り狂い量の推定精度に影響を与えない程度の曲率を有している軌道である場合には、第 1 の周波数調整部 503 および第 2 の周波数調整部 505 の処理は不要になる。

[0167] また、本実施形態では、位相を合わせる際の基準となる輪軸が輪軸 13 a である場合を例に挙げて説明した。しかしながら、基準となる輪軸は、輪軸 13 a 以外の輪軸 13 b、13 c、または 13 d でもよい。

また、本実施形態では、カルマンフィルタを用いる場合を例に挙げて説明した。しかしながら、観測変数の推定値の、一定値に対する誤差が最小または当該誤差の期待値が最小になるように状態変数の推定値を導出するフィルタ(即ち、データ同化を行うフィルタ)を用いていれば、必ずしもカルマンフィルタを用いる必要はない。例えば、粒子フィルタを用いてもよい。尚、観測変数の推定値の、一定値に対する誤差としては、例えば、観測変数の推定値と一定値との二乗誤差が挙げられる。

[0168] また、本実施形態では、通り狂い量を導出する場合を例に挙げて説明した。しかしながら、軌道 1 6 の状態を反映する情報として、軌道不整（軌道 1 6 の外観上の不良）を反映する情報を導出していけば、必ずしも通り狂い量を導出する必要はない。例えば、通り狂い量に加えてまたは代えて以下の（64）式～（67）式の計算を行うことにより、鉄道車両が直線軌道を走行しているときに生じる横圧（車輪とレールとの間における左右方向の応力）を導出してもよい。ただし、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 はそれぞれ、車輪 1 4 a、1 4 b、1 4 c、1 4 d における横圧である。 f_3 はスピנקリープ係数を表す。

[0169] [数32]

$$Q_1 = \frac{f_2}{v} \dot{y}_{w1} - f_2 \psi_{w1} + f_2 \frac{T_1}{K_{wx} b_1^2} - f_3 \frac{\dot{\psi}_{t1}}{v} + f_3 \frac{\dot{T}_1}{K_{wx} b_1^2 v} \quad \dots (64)$$

$$Q_2 = \frac{f_2}{v} \dot{y}_{w2} - f_2 \psi_{w2} + f_2 \frac{T_2}{K_{wx} b_1^2} - f_3 \frac{\dot{\psi}_{t1}}{v} + f_3 \frac{\dot{T}_2}{K_{wx} b_1^2 v} \quad \dots (65)$$

$$Q_3 = \frac{f_2}{v} \dot{y}_{w3} - f_2 \psi_{w3} + f_2 \frac{T_3}{K_{wx} b_1^2} - f_3 \frac{\dot{\psi}_{t2}}{v} + f_3 \frac{\dot{T}_3}{K_{wx} b_1^2 v} \quad \dots (66)$$

$$Q_4 = \frac{f_2}{v} \dot{y}_{w4} - f_2 \psi_{w4} + f_2 \frac{T_4}{K_{wx} b_1^2} - f_3 \frac{\dot{\psi}_{t2}}{v} + f_3 \frac{\dot{T}_4}{K_{wx} b_1^2 v} \quad \dots (67)$$

[0170] また、本実施形態では、車体 1 1 の状態を表す状態変数を含める場合を例に挙げて説明した。しかしながら、車体 1 1 は、車輪 1 4 a～1 4 d と軌道 1 6 との間の作用力（クリープ力）による振動の伝搬が最後に伝わる部分である。従って、例えば、車体 1 1 においてその伝搬による影響が小さいと判断される場合には、車体 1 1 の状態を表す状態変数を含めなくてもよい。このようにする場合、（1）式～（21）式の運動方程式のうち、（15）式～（17）式（車体 1 1 の横振動、ヨーイング、ローリングを記述する運動方程式）と、（18）式、（19）式（台車 1 2 a に配置されたヨーダンパ、台車 1 2 b に配置されたヨーダンパのヨーイングを記述する運動方程式）

は不要になる。また、(1)式～(21)式の運動方程式において、車体に関する状態量（添え字bを含む状態量）と、車体に関する状態量（添え字bを含む状態量）を含む{}内の値（例えば(21)式の左辺第3項の $\{\phi_{a2} - \phi_b\}$ ）を0（ゼロ）にする。

[0171] また、本実施形態では、台車12a、12bがボルスタレス台車である場合を例に挙げて説明した。しかしながら、台車12a、12bは、ボルスタレス台車に限定されない。この他、鉄道車両の構成要素、鉄道車両が受ける力、および鉄道車両の運動の方向等に応じて、運動方程式は、適宜書き換えられる。即ち、運動方程式は、本実施形態で例示したものに限定されない。鉄道車両が、状態変数に依存しない外力を受けることを、運動方程式に表す場合、状態方程式には、当該外力を表す項が含まれることになる。

[0172] (第2の実施形態)

次に、第2の実施形態を説明する。第1の実施形態では、データ同化の際に本来は観測変数の測定値として与えられる値（車体11の左右方向における加速度、台車12a、12bの左右方向における加速度、および輪軸13a～13dの左右方向における加速度）を一定値（0（ゼロ））として、データ同化を行うフィルタ（カルマンフィルタ）を用いて状態変数を導出する場合を例に挙げて説明した。これに対し、本実施形態では、データ同化を行わずに状態変数を導出する場合について説明する。このように本実施形態と第1の実施形態とは、状態変数を導出する手法（状態変数導出部504が有する機能）が主として異なる。従って、本実施形態の説明において、第1の実施形態と同一の部分については、図1～図10に付した符号と同一の符号を付す等して詳細な説明を省略する。

[0173] 本実施形態では、記憶部501は、状態方程式（(58)式）および観測方程式（(59)式）を記憶せずに、以下の(68)式の運動方程式を記憶する。

$$X \cdot = c \Phi X \quad \dots \quad (68)$$

(68)式は、(9)式、(10)式、(13)式～(21)式、(34

)式～(39)式の運動方程式を(44)式に示す状態変数を用いて表現した式((68)式において c を1とした式)を、当該式よりも状態変数の時間変化が小さくなるように変更した式の一例である。具体的に、(68)式は、(9)式、(10)式、(13)式～(21)式、(34)式～(39)式の運動方程式を(44)式に示す状態変数を用いて表現した式において、状態変数の一階時間微分($X \cdot$)の項と等号で結ばれる項に忘却係数(forgetting factor) c を乗算したものである。即ち、(68)式は、(59)式の状態方程式において、忘却係数 c を導入することによってシステムノイズ W を0(ゼロ)としたものである。

[0174] 忘却係数 c は、予め定められる値であり、(理論的には)0超1以下の値($0 < c \leq 1$)である。忘却係数 c は、その値が小さいほど、過去の観測値を忘却するように作用するものである。(68)式においては、忘却係数 c の値が小さいほど、前後方向力の測定値が、状態変数の推定値(解)に与える影響が小さくなる。このため、状態変数の推定値(解)を正確に得ようとする観点からは、忘却係数 c の値は1に近いほうが望ましい。一方、忘却係数 c の値が大きすぎると、状態変数の推定値(解)が発散する可能性が高くなる。本実施形態では、データ同化を行うフィルタを用いずに、(68)式をそのまま解く。このため、状態変数の推定値(解)が発散することを抑制する必要がある。以上のような観点から、忘却係数 c の値が定められる。忘却係数 c は、例えば、0.0超1.0以下($0.0 < c \leq 1.0$)の値、好ましくは0.90以上1.0以下($0.90 \leq c \leq 1.0$)の値、より好ましくは0.95以上1.0以下($0.95 \leq c \leq 1.0$)の値、さらに好ましくは0.99以上1.0以下($0.99 \leq c \leq 1.0$)の値の中から、最も好ましくは1.0が選択される。

[0175] 但し、忘却係数 c は、(68)式を解いて得られる状態変数の推定値(解)が発散しないように選択されることが必須である。(68)式を解いて得られる状態変数の推定値(解)が発散しなければ、忘却係数 c の値が1.0のときの当該状態変数の推定値(解)が、最も精度の高い解となる。しかし

ながら、忘却係数 c の値が 1.0 であると、(68) 式を解いて得られる状態変数の推定値 (解) が発散する (解が求まらない) 可能性が高い。

このような観点から、忘却係数 c の上限値を 1.0 未満として、忘却係数 c の選択を行ってもよい。即ち、忘却係数 c の値は、例えば、0.0 超 1.0 未満 ($0.0 < c < 1.0$) の値、好ましくは 0.90 以上 1.0 未満 ($0.90 \leq c < 1.0$) の値、より好ましくは 0.95 以上 1.0 未満 ($0.95 \leq c < 1.0$) の値、さらに好ましくは 0.99 以上 1.0 未満 ($0.99 \leq c < 1.0$) の値の中から選択することができる。

尚、忘却係数 c の値が 1.0 である場合、(68) 式は、(9) 式、(10) 式、(13) 式～(21) 式、(34) 式～(39) 式の運動方程式そのもの (当該運動方程式を、状態変数を用いて表現しただけのもの) となる。

[0176] 状態変数導出部 504 は、第 1 の周波数調整部 503 で生成された前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の高周波成分の時系列データを用いて、変換変数 $e_1 \sim e_4$ の実績値を導出して (34) 式～(37) 式に代入すると共に、第 1 の周波数調整部 503 で生成された前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の高周波成分の時系列データを前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値として (38) 式～(39) 式に代入して (68) 式の方程式を解くことにより、(44) 式に示す状態変数の推定値を決定する。(68) 式の方程式を解く手法は、例えば、公知の数値解法 (オイラー法等) で実現することができる。従って、状態変数導出部 504 は、状態変数の推定値を導出する際に、車体 11 の左右方向における加速度の測定値の時系列データ、台車 12 a、12 b の左右方向における加速度の測定値の時系列データ、および輪軸 13 a～13 d の左右方向における加速度の測定値の時系列データを用いない。また、観測方程式も用いない。

[0177] 以上のように本実施形態では、検査装置 500 は、システムノイズ W を 0 (ゼロ) とした状態方程式において、状態変数の時間微分項 $X \cdot$ 以外の項に忘却係数 c が乗算された方程式に、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定値と、変換変数 $e_1 \sim e_4$ の実績値と、を与えて状態変数 ($y_{w1} \cdot \sim y_{w4} \cdot$ 、 $y_{w1} \sim y_{w4}$ 、

$y_{t1} \cdot \sim y_{t2} \cdot$ 、 $y_{t1} \sim y_{t2}$ 、 $\phi_{t1} \cdot \sim \phi_{t2} \cdot$ 、 $\phi_{t1} \sim \phi_{t2}$ 、 $\phi_{t1} \cdot \sim \phi_{t2} \cdot$ 、 $\phi_{t1} \sim \phi_{t2}$ 、 $y_{b} \cdot$ 、 y_b 、 $\phi_{b} \cdot$ 、 ϕ_b 、 $\phi_{b} \cdot$ 、 ϕ_b 、 ϕ_{y1} 、 ϕ_{y2} 、 ϕ_{a1} 、 ϕ_{a2}) を導出する。従って、車体 11、台車 12 a、12 b、および輪軸 13 a～13 d の左右方向における加速度の測定値を用いず、通り狂い量 $y_{R1} \sim y_{R4}$ (最終的な通り狂い量 y_R) を、精度を大きく落とすことなく導出することができる。

本実施形態においても、第 1 の実施形態で説明した種々の変形例を採用することができる。状態方程式 X に依存しない外力等が運動方程式に含まれる場合、(68) 式は、以下の (69) 式のように表される。

$$X \cdot = c (\Phi X + G f) \quad \dots (69)$$

G は、運動方程式において、状態方程式に依存しない項を格納するベクトルである。f は、ベクトル G に対応する行列である。

[0178] (第 3 の実施形態)

次に、第 3 の実施形態を説明する。

第 1、第 2 の実施形態では、鉄道車両に搭載した検査装置 500 が最終的な通り狂い量 y_R を算出する場合を例に挙げて説明した。これに対し、本実施形態では、検査装置 500 の一部の機能が実装されたデータ処理装置が、指令所に配置される。このデータ処理装置は、鉄道車両から送信される計測データを受信し、受信した計測データを用いて最終的な通り狂い量 y_R を算出する。このように、本実施形態では、第 1、第 2 の実施形態の検査装置 500 が有する機能を、鉄道車両と指令所とで分担して実行する。本実施形態と第 1、第 2 の実施形態とは、このことによる構成および処理が主として異なる。従って、本実施形態の説明において、第 1、第 2 の実施形態と同一の部分については、図 1～図 10 に付した符号と同一の符号を付す等して詳細な説明を省略する。尚、本実施形態は、第 1、第 2 の実施形態の何れにも適用することができる。

[0179] 図 11 は、検査システムの構成の一例を示す図である。図 11 において、検査システムは、データ収集装置 1110 a、1110 b と、データ処理装

置 1120 とを有する。図 11 には、データ収集装置 1110 a、1110 b およびデータ処理装置 1120 の機能的な構成の一例も示す。尚、データ収集装置 1110 a、1110 b およびデータ処理装置 1120 のハードウェアは、例えば、図 6 に示すもので実現することができる。従って、データ収集装置 1110 a、1110 b およびデータ処理装置 1120 のハードウェアの構成の詳細な説明を省略する。

[0180] 鉄道車両のそれぞれには、データ収集装置 1110 a、1110 b が 1 つずつ搭載される。データ処理装置 1120 は、指令所に配置される。指令所は、例えば、複数の鉄道車両の運行を集中管理する。

[0181] [データ収集装置 1110 a、1110 b]

データ収集装置 1110 a、1110 b は、同じもので実現することができる。データ収集装置 1110 a、1110 b は、データ取得部 1111 a、1111 b と、データ送信部 1112 a、1112 b とを有する。

[0182] <データ取得部 1111 a、1111 b>

データ取得部 1111 a、1111 b は、データ取得部 502 と同じ機能を有する。即ち、データ取得部 1111 a、1111 b は、データ取得部 502 と同様に、前後方向力の測定値の時系列データを取得する。前後方向力の測定値を得るための構成は、第 1 の実施形態で説明したものと同一である。

[0183] [データ送信部 1112 a、1112 b]

データ送信部 1112 a、1112 b は、データ取得部 1111 a、1111 b で取得された前後方向力の測定値の時系列データを、データ処理装置 1120 に送信する。本実施形態では、データ送信部 1112 a、1112 b は、データ取得部 1111 a、1111 b で取得された前後方向力の測定値の時系列データを、無線通信により、データ処理装置 1120 に送信する。このとき、データ送信部 1112 a、1112 b は、データ収集装置 1110 a、1110 b が搭載されている鉄道車両の識別番号を、データ取得部 1111 a、1111 b で取得された前後方向力の測定値の時系列データに

付加する。このようにデータ送信部 1 1 1 2 a、1 1 1 2 b は、鉄道車両の識別番号が付加された前後方向力の測定値の時系列データを送信する。

[0184] <データ処理装置 1 1 2 0>

[データ受信部 1 1 2 1]

データ受信部 1 1 2 1 は、データ送信部 1 1 1 2 a、1 1 1 2 b により送信された前後方向力の測定値の時系列データを受信する。この前後方向力の測定値の時系列データには、当該前後方向力の測定値の時系列データの送信元である鉄道車両の識別番号が付加されている。

[0185] [データ記憶部 1 1 2 2]

データ記憶部 1 1 2 2 は、データ受信部 1 1 2 1 で受信された前後方向力の測定値の時系列データを記憶する。データ記憶部 1 1 2 2 は、鉄道車両の識別番号ごとに前後方向力の測定値の時系列データを記憶する。データ記憶部 1 1 2 2 は、鉄道車両の現在の運行状況と、前後方向力の測定値の時系列データの受信時刻とに基づいて、当該前後方向力の測定値の時系列データの受信時刻における鉄道車両の位置を特定し、特定した位置の情報と当該前後方向力の測定値の時系列データとを相互に関連付けて記憶する。尚、データ収集装置 1 1 1 0 a、1 1 1 0 b が、鉄道車両の現在の位置の情報を収集し、収集した情報を前後方向力の測定値の時系列データに含めてもよい。

[0186] [データ読み出し部 1 1 2 3]

データ読み出し部 1 1 2 3 は、データ記憶部 1 1 2 2 により記憶された前後方向力の測定値の時系列データを読み出す。データ読み出し部 1 1 2 3 は、データ記憶部 1 1 2 2 により記憶された前後方向力の測定値の時系列データのうち、オペレータにより指定されたデータを読み出すことができる。また、データ読み出し部 1 1 2 3 は、予め定められたタイミングで、予め定められた条件に合致する前後方向力の測定値の時系列データを読み出すこともできる。本実施形態では、データ読み出し部 1 1 2 3 により読み出される前後方向力の測定値の時系列データは、例えば、鉄道車両の識別番号および位置の少なくとも何れか 1 つに基づいて決定される。

[0187] 記憶部501、第1の周波数調整部503、状態変数導出部504、第2の周波数調整部505、軌道状態導出部506、および出力部507は、第1の実施形態と説明したものと同一である。従って、ここでは、これらの詳細な説明を省略する。尚、第1の周波数調整部503は、データ取得部502で取得された前後方向力の測定値の時系列データに代えてデータ読み出し部1123で読み出された前後方向力の測定値の時系列データを用いて、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の高周波成分の時系列データを生成する。

[0188] <まとめ>

以上のように本実施形態では、鉄道車両に搭載されたデータ収集装置1110a、1110bは、前後方向力の測定値の時系列データを収集してデータ処理装置1120に送信する。指令所に配置されたデータ処理装置1120は、データ収集装置1110a、1110bから受信した前後方向力の測定値の時系列データを記憶し、記憶した前後方向力の測定値の時系列データを用いて、最終的な通り狂い量 y_R を算出する。従って、第1、第2の実施形態で説明した効果に加え、例えば、以下の効果を奏する。即ち、データ処理装置1120は、計測データを任意のタイミングで読み出すことにより、任意のタイミングで最終的な通り狂い量 y_R を算出することができる。また、データ処理装置1120は、同じ位置における最終的な通り狂い量 y_R の時系列的な変化を出力することができる。また、データ処理装置1120は、複数の路線における最終的な通り狂い量 y_R を路線ごとに出力することができる。

[0189] <変形例>

本実施形態では、データ収集装置1110a、1110bからデータ処理装置1120に計測データを直接送信する場合を例に挙げて説明した。しかしながら、必ずしもこのようにする必要はない。例えば、クラウドコンピューティングを利用して検査システムを構築してもよい。

その他、本実施形態においても、第1の実施形態および第2の実施形態で説明した種々の変形例を採用することができる。

[0190] また、第1、第2の実施形態では、記憶部501、データ取得部502、第1の周波数調整部503、状態変数導出部504、第2の周波数調整部505、軌道状態導出部506、および出力部507が1つの装置に含まれる場合を例に挙げて説明した。しかしながら、必ずしもこのようにする必要はない。記憶部501、データ取得部502、第1の周波数調整部503、状態変数導出部504、第2の周波数調整部505、軌道状態導出部506、および出力部507の機能を複数の装置で実現してもよい。この場合、これら複数の装置を用いて検査システムが構成される。

[0191] (計算例)

次に、計算例を説明する。本計算例では、第1の実施形態の手法により最終的な通り狂い量 y_R を導出することと、第2の実施形態の手法により、最終的な通り狂い量 y_R を導出することと、を行った。第1の実施形態の手法では、データ同化の際に本来は観測変数の測定値として与えられる値(一定値)を0(ゼロ)とした。また、第2の実施形態の手法では、忘却係数 c を0.9987とした。

また、第1の実施形態の手法に対し、観測変数の測定値として与えられる値(車体11、台車12a、12b、および輪軸13a~13dの左右方向における加速度の測定値)として予め設定された一定値ではなく、そのまま測定値を与えること(即ち、特許文献1に記載の手法)により最終的な通り狂い量 y_R を導出することを行った。

[0192] 図12は、本計算例を示し、通り狂い量の導出対象の軌道16の曲率 $1/R$ と、鉄道車両の走行速度 v を示す図である。図12において、グラフ1201は、鉄道車両の走行速度を示し、グラフ1202は、軌道16の曲率 $1/R$ を示す。尚、図12の横軸は、基準の時刻を0(ゼロ)とした場合の当該基準の時刻からの経過時間(秒)である。

図13Aおよび図13Bは、本計算例を示し、自己相関行列 R の固有値の分布を示す図である。図13Aは、輪軸13aにおける前後方向力 T_1 に対する自己相関行列 R の固有値の分布を示し、図13Bは、輪軸13bにおける

前後方向力 T_2 に対する自己相関行列 R の固有値の分布を示す。

[0193] 図14は、本計算例を示し、前後方向力 T_1 、 T_2 の測定値 y の時系列データと、前後方向力 T_1 、 T_2 の予測値 y^{\wedge}_k の時系列データ（前後方向力の測定値 y の時系列データに含まれる低周波成分を抽出した時系列データ）とを示す図である。図14において、測定値は、前後方向力の測定値 y の時系列データを示し、バイアスは、前後方向力の予測値 y^{\wedge}_k の時系列データを示す。尚、図14の横軸は、基準の時刻を0（ゼロ）とした場合の当該基準の時刻からの経過時間（秒）であり、前後方向力 $T_1 \sim T_4$ の測定時刻・計算時刻を表す。

[0194] 図15は、本計算例を示し、前後方向力 T_1 、 T_2 の高周波成分の時系列データを示す図である。前後方向力 T_1 、 T_2 の高周波成分の時系列データは、図14に示す前後方向力 T_1 、 T_2 の測定値 y の時系列データから、前後方向力 T_1 、 T_2 の予測値 y^{\wedge}_k の時系列データを減算することにより得られる。尚、図15の横軸は、基準の時刻を0（ゼロ）とした場合の当該基準の時刻からの経過時間（秒）であり、前後方向力 T_1 、 T_2 の高周波成分の時系列データの計算時刻を表す。

[0195] 図16Aおよび図16Bは、図15に示す前後方向力 T_1 、 T_2 の高周波成分の時系列データを用いて第1の実施形態の手法および特許文献1に記載の手法により導出された通り狂い量 y_R を示す図である。図16Aにおいて、計算値は、特許文献1に記載の手法により導出された通り狂い量 y_R を示し、測定値は、通り狂い量 y_R の測定値を示す。図16Bにおいて、計算値は、第1の実施形態の手法により導出された通り狂い量 y_R を示し、測定値は、通り狂い量 y_R の測定値を示す。ここでは、通り狂い量 y_R の計算値として、輪軸13aの位置での通り狂い量 y_{R1} と、輪軸13bの位置での通り狂い量 y_{R2} との平均値を用いた。また、図16Aに示す測定値と、図16Bに示す測定値は同じものである。尚、図16Aおよび図16Bの横軸は、基準の時刻を0（ゼロ）とした場合の当該基準の時刻からの経過時間（秒）であり、通り狂い量 y_R が存在する位置に対応する時刻である。また、図16Aでは、表記の

都合上、鉄道車両の出発点からの距離が小さい部分のデータの図示を省略している。

[0196] 図17Aは、図15に示す前後方向力 T_1 、 T_2 の高周波成分の時系列データを用いて第2の実施形態の手法により導出された通り狂い量 y_R を示す図である。図17Bは、図15に示す前後方向力 T_1 、 T_2 の高周波成分の時系列データを用いて特許文献1に記載の手法により導出された通り狂い量 y_R を示す図である。図17Aにおいて、計算値は、特許文献1に記載の手法により導出された通り狂い量 y_R を示し、測定値は、通り狂い量 y_R の測定値を示す。図17Bにおいて、計算値は、第2の実施形態の手法により導出された通り狂い量 y_R を示し、測定値は、通り狂い量 y_R の測定値を示す。ここでは、通り狂い量 y_R の計算値として、輪軸13aの位置での通り狂い量 y_{R1} と、輪軸13bの位置での通り狂い量 y_{R2} との平均値を用いた。また、図17Aに示す測定値と、図17Bに示す測定値は同じものである（これらの測定値は、図16Aおよび図16Bに示す測定値とも同じである）。尚、図17Aおよび図17Bの横軸は、基準の時刻を0（ゼロ）とした場合の当該基準の時刻からの経過時間（秒）であり、通り狂い量 y_R が存在する位置に対応する時刻である。また、図17Aおよび図17Bでは、表記の都合上、鉄道車両の出発点からの距離が小さい部分のデータの図示を省略している。

[0197] 図16Aの計算値と図16Bの計算値とを比較すると、第1の実施形態の手法により導出された通り狂い量 y_R は、特許文献1に記載の手法により導出された通り狂い量 y_R と良好な精度で一致していることが分かる。また、計算値と測定値も良好な精度で一致していることが分かる。同様に、図17Aの計算値と図17Bの計算値とを比較すると、第2の実施形態の手法により導出された通り狂い量 y_R は、特許文献1に記載の手法により導出された通り狂い量 y_R と良好な精度で一致していることが分かる。また、計算値と測定値も良好な精度で一致していることが分かる。また、図16Bの計算値と図17Bの計算値とを比較すると、両者は殆ど同じであり、第1の実施形態の手法でも第2の実施形態の手法でも、同等の通り狂い量 y_R を導出することができ

ることが分かる。

[0198] (その他の実施形態)

尚、以上説明した本発明の実施形態は、コンピュータがプログラムを実行することによって実現することができる。また、前記プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体及び前記プログラム等のコンピュータプログラムプロダクトも本発明の実施形態として適用することができる。記録媒体としては、例えば、フレキシブルディスク、ハードディスク、光ディスク、光磁気ディスク、CD-ROM、磁気テープ、不揮発性のメモリカード、ROM等を用いることができる。

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。すなわち、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。

尚、特許文献1の明細書および図面の内容を全てここに援用することができる。

産業上の利用可能性

[0199] 本発明は、例えば、鉄道車両を検査することに利用することができる。

請求の範囲

[請求項1]

車体と台車と輪軸とを有する鉄道車両を軌道上で走行させることにより測定される測定値のデータとして、前後方向力の測定値のデータを取得するデータ取得手段と、

前記鉄道車両の運動を記述した運動方程式を用いて構成される状態方程式で決定すべき変数である状態変数を、前記前後方向力の測定値を用いて導出する状態変数導出手段と、

前記軌道の状態を反映する情報を導出する軌道状態導出手段と、を有し、

前記前後方向力は、前記輪軸と、当該輪軸が設けられる前記台車との間に配置される部材に生じる前後方向の力であって、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と、当該輪軸が設けられる前記台車のヨーイング方向の角変位との差に応じて定まる力であり、

前記部材は、軸箱を支持するための部材であり、

前記前後方向は、前記鉄道車両の走行方向に沿う方向であり、

前記ヨーイング方向は、前記軌道に対し垂直な方向である上下方向を回動軸とする回動方向であり、

前記状態方程式は、前記状態変数と、前記前後方向力と、変換変数と、を用いて記述される方程式であり、

前記状態変数は、前記台車の左右方向の変位および速度と、前記台車のヨーイング方向の角変位および角速度と、前記台車のローリング方向の角変位および角速度と、前記輪軸の左右方向の変位および速度と、前記鉄道車両に取り付けられている空気バネのローリング方向の角変位と、を含み、前記輪軸のヨーイング方向の角変位および角速度を含まず、

前記ローリング方向は、前記前後方向を回動軸とする回動方向であり、

前記変換変数は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と前記台車の

ヨーイング方向の角変位とを相互に変換する変数であり、

前記軌道状態導出手段は、前記状態変数導出手段により導出された前記状態変数の一つである前記台車のヨーイング方向の角変位と、前記変換変数の実績値と、を用いて、前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を導出し、導出した前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を用いて前記軌道の状態を反映する情報を導出し、

前記変換変数の実績値は、前記前後方向力の測定値を用いて導出され、

前記状態変数導出手段は、前記前後方向力の測定値が得られた期間における、前記台車、前記輪軸、および前記車体の左右方向の加速度の測定値を用いずに、前記状態変数を導出することを特徴とする検査システム。

[請求項2]

前記状態変数導出手段は、前記状態方程式と、観測方程式と、を用いて、データ同化を行うフィルタを用いた演算を行うことにより、前記状態変数を導出し、

前記観測方程式は、観測変数と、前記変換変数と、を用いて記述される方程式であり、

前記観測変数は、前記台車および前記輪軸の左右方向の加速度を含み、

前記状態変数導出手段は、データ同化の際に本来は前記観測変数の測定値として与えられる値を予め定められた一定値として、前記前後方向力の測定値および前記変換変数の実績値を代入した前記状態方程式と、前記変換変数の実績値を代入した前記観測方程式と、を用いて、前記観測変数の計算値の、前記一定値に対する誤差または当該誤差の期待値が最小になるときの前記状態変数を導出することを特徴とする請求項1に記載の検査システム。

[請求項3]

前記一定値は、0であることを特徴とする請求項2に記載の検査システム。

[請求項4]

前記状態方程式は、前記輪軸の左右方向の運動を記述した運動方程式と、前記台車の左右方向の運動を記述した運動方程式と、前記台車のヨーイング方向の運動を記述した運動方程式と、前記台車のローリング方向の運動を記述した運動方程式と、前記空気バネのローリング方向の運動を記述した運動方程式と、を用いて構成され、

前記台車のヨーイング方向の運動を記述した運動方程式は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位および角速度に代えて、前記前後方向力を用いて記述された運動方程式であり、

前記観測方程式は、前記輪軸の左右方向の運動を記述した運動方程式と、前記台車の左右方向の運動を記述した運動方程式と、を用いて構成され、

前記輪軸の左右方向の運動を記述した運動方程式は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位に代えて、前記変換変数を用いて記述された運動方程式であり、

前記変換変数は、前記台車のヨーイング方向の角変位と前記輪軸のヨーイング方向の角変位との差で表されることを特徴とする請求項2または3に記載の検査システム。

[請求項5]

前記状態方程式は、前記車体の左右方向の運動を記述した運動方程式と、前記車体のヨーイング方向の運動を記述した運動方程式と、前記車体のローリング方向の運動を記述した運動方程式と、前記鉄道車両に取り付けられるヨーダンパのヨーイング方向の運動を記述した運動方程式と、を更に用いて構成され、

前記観測方程式は、前記車体の左右方向の運動を記述した運動方程式を更に用いて構成され、

前記観測変数は、前記車体の左右方向の加速度を更に含み、

前記状態変数は、前記車体の左右方向の変位および速度と、前記車体のヨーイング方向の角変位および角速度と、前記車体のローリング方向の角変位および角速度と、前記ヨーダンパのヨーイング方向の角

変位と、を更に含むことを特徴とする請求項4に記載の検査システム。

[請求項6] 前記フィルタは、カルマンフィルタであることを特徴とする請求項2～5の何れか1項に記載の検査システム。

[請求項7] 前記状態変数導出手段は、前記状態方程式を解かずに、前記鉄道車両の運動を記述した運動方程式を、前記状態変数と、前記前後方向力と、前記変換変数とを用いて表現した式であって、前記前後方向力の測定値および前記変換変数の実績値を代入した式を解くことにより、前記状態変数を導出することを特徴とする請求項1に記載の検査システム。

[請求項8] 前記状態変数導出手段は、前記状態方程式を用いずに、前記鉄道車両の運動を記述した運動方程式を、前記状態変数と、前記前後方向力と、前記変換変数とを用いて表現した式を、当該式よりも前記状態変数の時間変化が小さくなるように変更した式であって、前記前後方向力の測定値および前記変換変数の実績値を代入した式を用いて、前記状態変数を導出することを特徴とする請求項7に記載の検査システム。

[請求項9] 前記状態変数導出手段は、前記鉄道車両の運動を記述した運動方程式を、前記状態変数と、前記前後方向力と、前記変換変数とを用いて表現した式において、前記状態変数の1階時間微分の項と等号で結ばれる項のそれぞれに、忘却係数を乗算した式を解くことにより、前記状態変数を導出し、

前記忘却係数は、予め定められる0.95以上1未満の値であることを特徴とする請求項8に記載の検査システム。

[請求項10] 前記鉄道の運動を記述した運動方程式は、前記輪軸の左右方向の運動を記述した運動方程式と、前記台車の左右方向の運動を記述した運動方程式と、前記台車のヨーイング方向の運動を記述した運動方程式と、前記台車のローリング方向の運動を記述した運動方程式と、前記

空気バネのローリング方向の運動を記述した運動方程式と、を含み、

前記輪軸の左右方向の運動を記述した運動方程式は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位に代えて、前記変換変数を用いて記述された運動方程式であり、

前記台車のヨーイング方向の運動を記述した運動方程式は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位および角速度に代えて、前記前後方向力を用いて記述された運動方程式であり、

前記変換変数は、前記台車のヨーイング方向の角変位と前記輪軸のヨーイング方向の角変位との差で表されることを特徴とする請求項7～9の何れか1項に記載の検査システム。

[請求項11]

前記鉄道の運動を記述した運動方程式は、前記車体の左右方向の運動を記述した運動方程式と、前記車体のヨーイング方向の運動を記述した運動方程式と、前記車体のローリング方向の運動を記述した運動方程式と、前記鉄道車両に取り付けられるヨーダンパのヨーイング方向の運動を記述した運動方程式と、を更に含み、

前記状態変数は、前記車体の左右方向の変位および速度と、前記車体のヨーイング方向の角変位および角速度と、前記車体のローリング方向の角変位および角速度と、前記ヨーダンパのヨーイング方向の角変位と、を更に有することを特徴とすることを特徴とする請求項10に記載の検査システム。

[請求項12]

前記軌道状態導出手段は、前記状態変数導出手段により導出された前記状態変数の一つである前記台車の左右方向の変位および速度と、前記状態変数導出手段により導出された前記状態変数の一つである前記輪軸の左右方向の変位および速度と、前記輪軸のヨーイング方向の角変位の前記推定値と、前記前後方向力の測定値と、前記輪軸のヨーイング方向の運動を記述した運動方程式と、に基づいて、前記軌道の通り狂い量を、前記軌道の状態を反映する情報として導出し、

前記輪軸のヨーイング方向の運動を記述した運動方程式は、前記前

後方向力および前記軌道の通り狂い量を変数として含むことを特徴とする請求項1～11の何れか1項に記載の検査システム。

[請求項13] 前記軌道状態導出手段は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と、前記状態変数の一つである前記輪軸の左右方向の速度と、に基づいて、前記輪軸に設けられた車輪と前記軌道との間における左右方向の応力である横圧を、前記軌道の状態を反映する情報として導出することを特徴とする請求項1～11の何れか1項に記載の検査システム。

[請求項14] 前記鉄道車両の状態に応じて値が変動する物理量の時系列データから、前記鉄道車両が前記軌道の曲線部を走行することに起因して生じる低周波成分の信号強度を低減する周波数調整手段を更に有し、

前記周波数調整手段は、前記物理量の一つである前記前後方向力の測定値の時系列データから、前記鉄道車両が前記軌道の曲線部を走行することに起因して生じる低周波成分の信号強度を低減する第1の周波数調整手段を有し、

前記状態変数導出手段は、前記第1の周波数調整手段により低周波成分の信号強度が低減された前記前後方向力の値を用いて、前記状態変数を導出することを特徴とする請求項1～13の何れか1項に記載の検査システム。

[請求項15] 車体と台車と輪軸とを有する鉄道車両を軌道上で走行させることにより測定される測定値のデータとして、前後方向力の測定値のデータを取得するデータ取得工程と、

前記鉄道車両の運動を記述した運動方程式を用いて構成される状態方程式で決定すべき変数である状態変数を、前記前後方向力の測定値を用いて導出する状態変数導出工程と、

前記軌道の状態を反映する情報を導出する軌道状態導出工程と、を有し、

前記前後方向力は、前記輪軸と、当該輪軸が設けられる前記台車との間に配置される部材に生じる前後方向の力であって、前記輪軸のヨ

ーイング方向の角変位と、当該輪軸が設けられる前記台車のヨーイング方向の角変位との差に応じて定まる力であり、

前記部材は、軸箱を支持するための部材であり、

前記前後方向は、前記鉄道車両の走行方向に沿う方向であり、

前記ヨーイング方向は、前記軌道に対し垂直な方向である上下方向を回動軸とする回動方向であり、

前記状態方程式は、前記状態変数と、前記前後方向力と、変換変数と、を用いて記述される方程式であり、

前記状態変数は、前記台車の左右方向の変位および速度と、前記台車のヨーイング方向の角変位および角速度と、前記台車のローリング方向の角変位および角速度と、前記輪軸の左右方向の変位および速度と、前記鉄道車両に取り付けられている空気バネのローリング方向の角変位と、を含み、前記輪軸のヨーイング方向の角変位および角速度を含まず、

前記ローリング方向は、前記前後方向を回動軸とする回動方向であり、

前記変換変数は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と前記台車のヨーイング方向の角変位とを相互に変換する変数であり、

前記軌道状態導出工程は、前記状態変数導出工程により導出された前記状態変数の一つである前記台車のヨーイング方向の角変位と、前記変換変数の実績値と、を用いて、前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を導出し、導出した前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を用いて前記軌道の状態を反映する情報を導出し、

前記変換変数の実績値は、前記前後方向力の測定値を用いて導出され、

前記状態変数導出工程は、前記前後方向力の測定値が得られた期間における、前記台車、前記輪軸、および前記車体の左右方向の加速度の測定値を用いずに、前記状態変数を導出することを特徴とする検査

方法。

[請求項16]

車体と台車と輪軸とを有する鉄道車両を軌道上で走行させることにより測定される測定値のデータとして、前後方向力の測定値のデータを取得するデータ取得工程と、

前記鉄道車両の運動を記述した運動方程式を用いて構成される状態方程式で決定すべき変数である状態変数を、前記前後方向力の測定値を用いて導出する状態変数導出工程と、

前記軌道の状態を反映する情報を導出する軌道状態導出工程と、をコンピュータに実行させ、

前記前後方向力は、前記輪軸と、当該輪軸が設けられる前記台車との間に配置される部材に生じる前後方向の力であって、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と、当該輪軸が設けられる前記台車のヨーイング方向の角変位との差に応じて定まる力であり、

前記部材は、軸箱を支持するための部材であり、

前記前後方向は、前記鉄道車両の走行方向に沿う方向であり、

前記ヨーイング方向は、前記軌道に対し垂直な方向である上下方向を回動軸とする回動方向であり、

前記状態方程式は、前記状態変数と、前記前後方向力と、変換変数と、を用いて記述される方程式であり、

前記状態変数は、前記台車の左右方向の変位および速度と、前記台車のヨーイング方向の角変位および角速度と、前記台車のローリング方向の角変位および角速度と、前記輪軸の左右方向の変位および速度と、前記鉄道車両に取り付けられている空気バネのローリング方向の角変位と、を含み、前記輪軸のヨーイング方向の角変位および角速度を含まず、

前記ローリング方向は、前記前後方向を回動軸とする回動方向であり、

前記変換変数は、前記輪軸のヨーイング方向の角変位と前記台車の

ヨーイング方向の角変位とを相互に変換する変数であり、

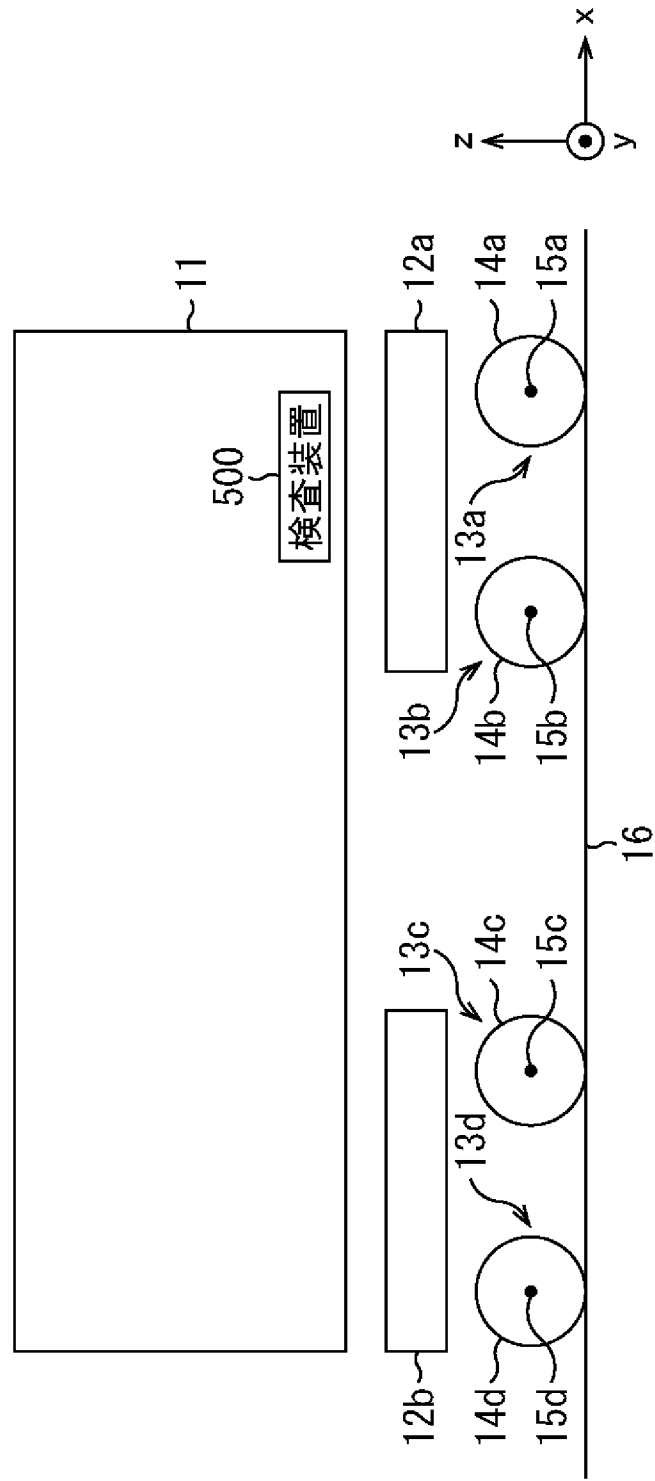
前記軌道状態導出工程は、前記状態変数導出工程により導出された前記状態変数の一つである前記台車のヨーイング方向の角変位と、前記変換変数の実績値と、を用いて、前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を導出し、導出した前記輪軸のヨーイング方向の角変位の推定値を用いて前記軌道の状態を反映する情報を導出し、

前記変換変数の実績値は、前記前後方向力の測定値を用いて導出され、

前記状態変数導出工程は、前記前後方向力の測定値が得られた期間における、前記台車、前記輪軸、および前記車体の左右方向の加速度の測定値を用いずに、前記状態変数を導出することを特徴とするコンピュータプログラム。

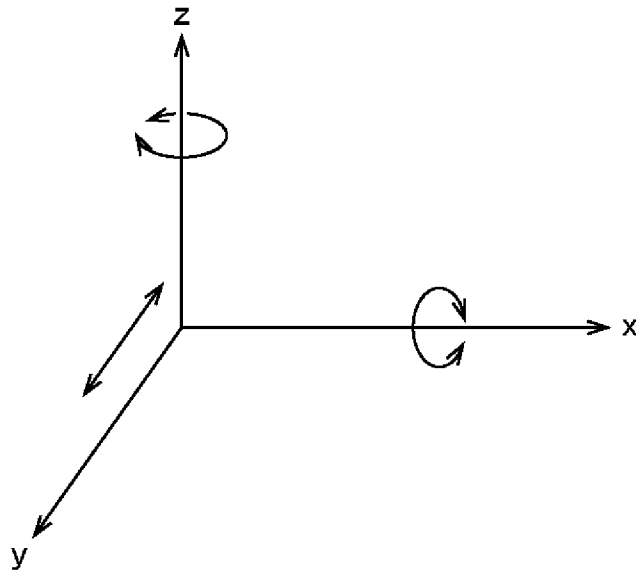
[図1]

図1

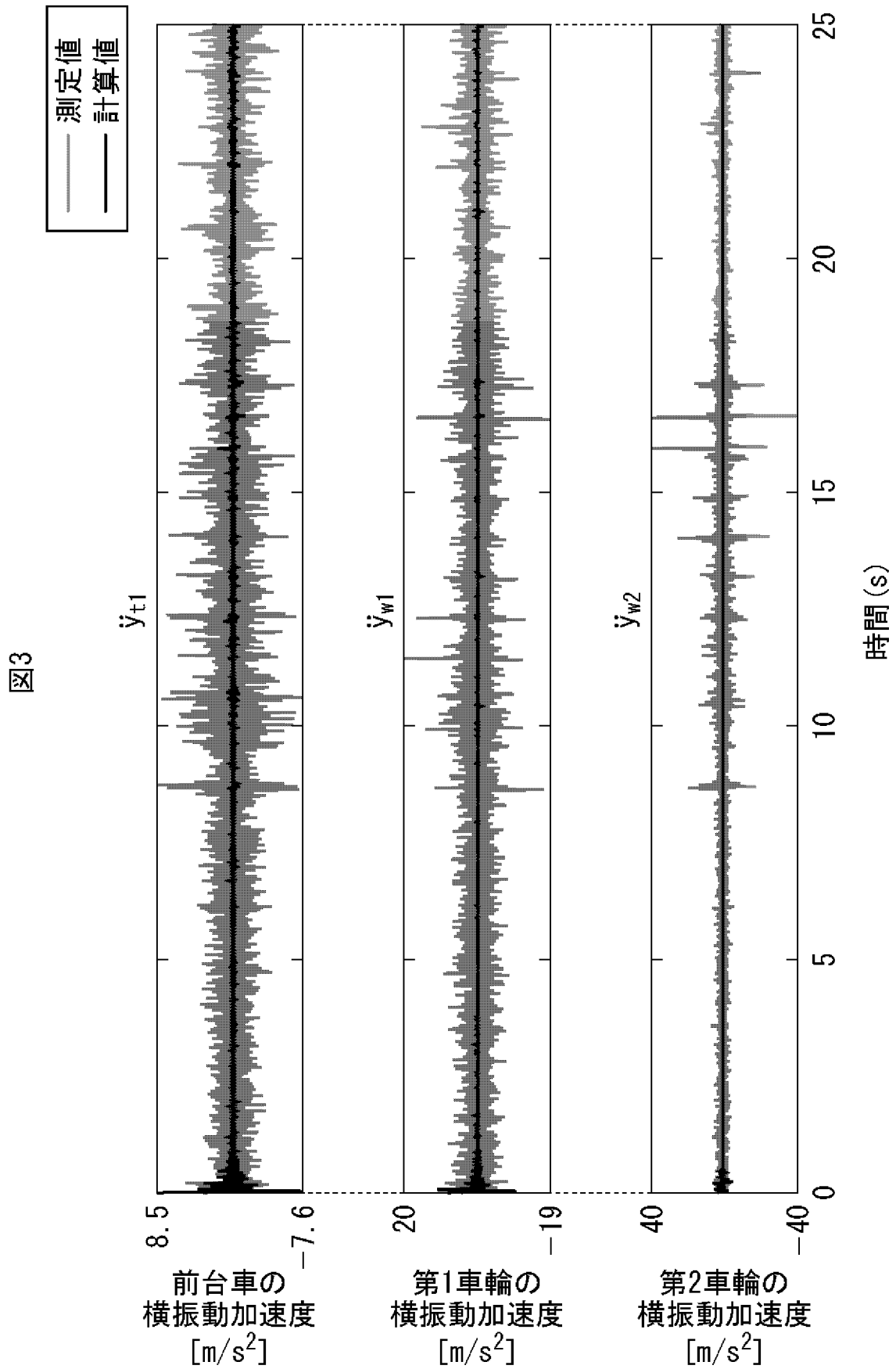


[図2]

図2

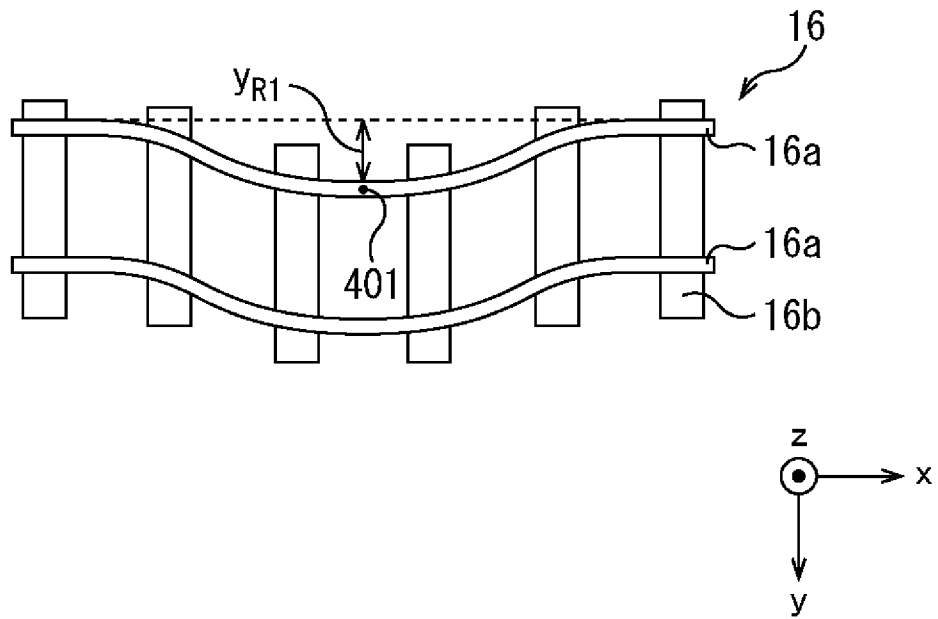


[図3]



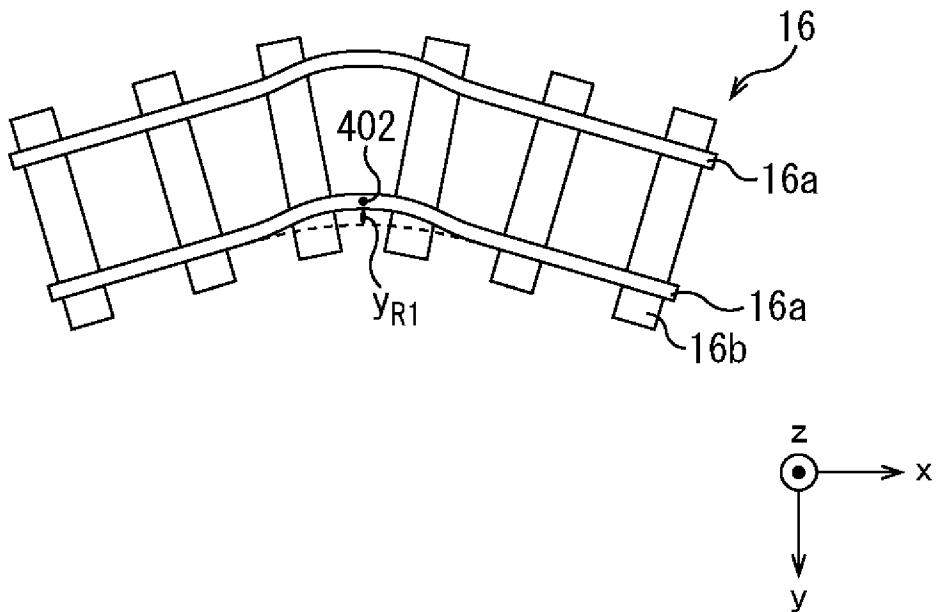
[図4A]

図4A



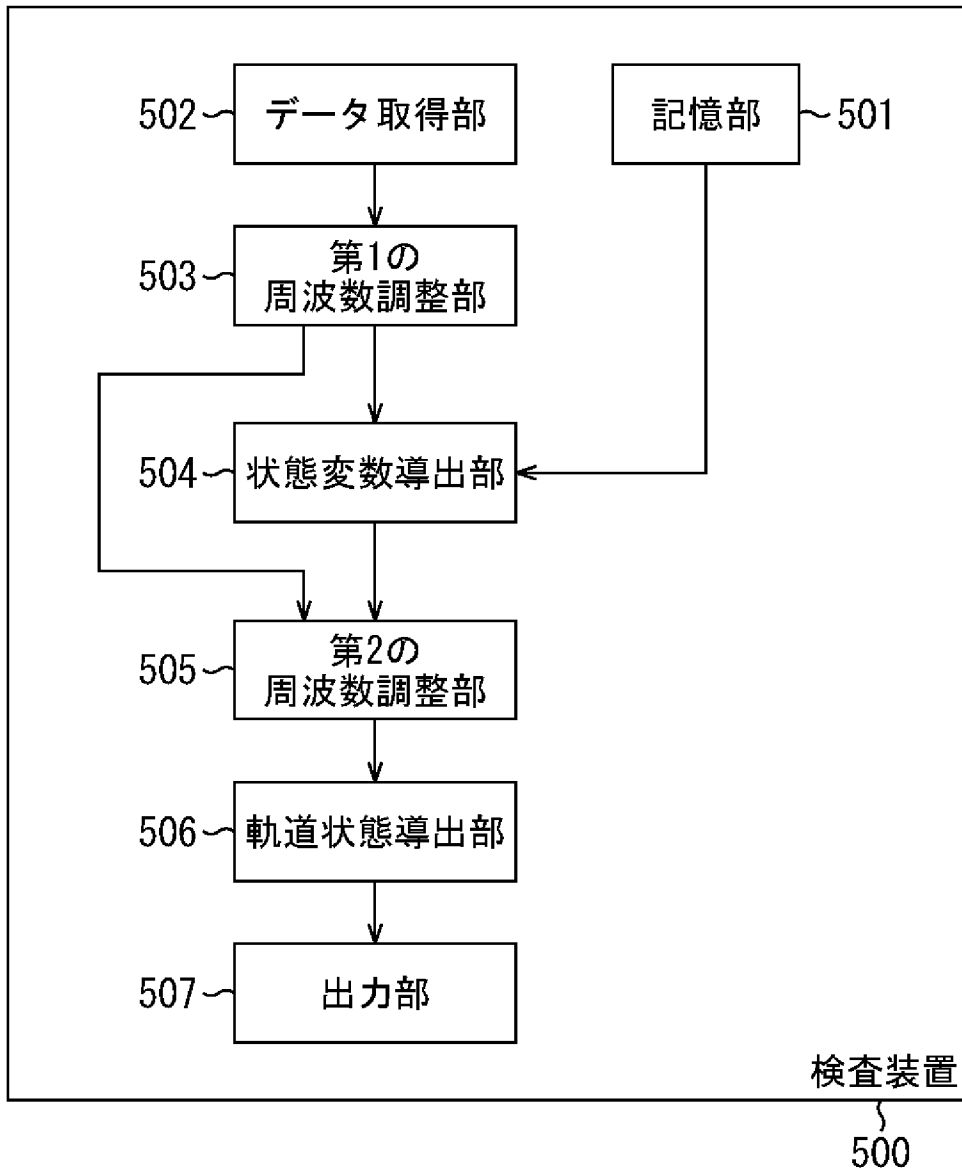
[図4B]

図4B



[図5]

図5



[図6]

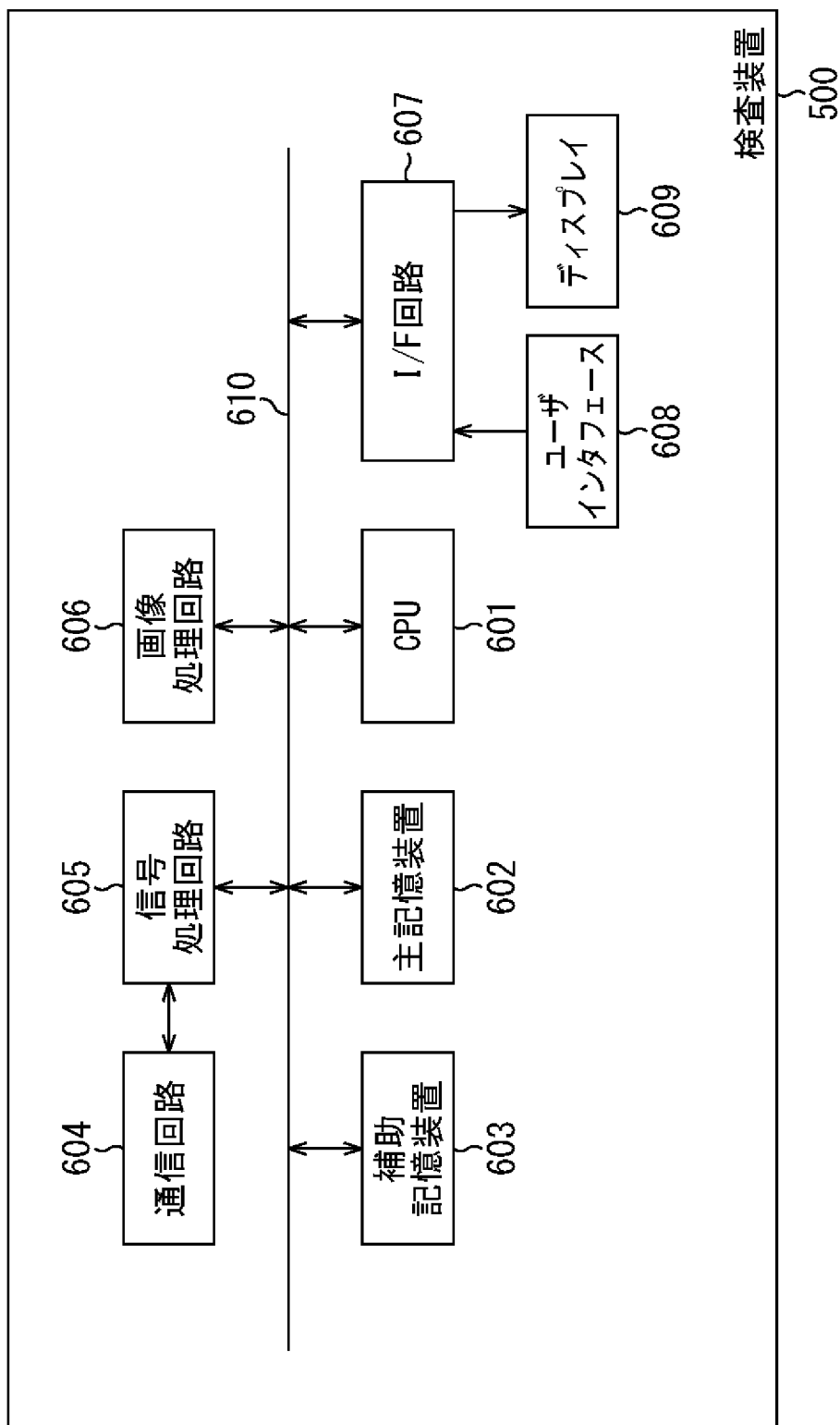
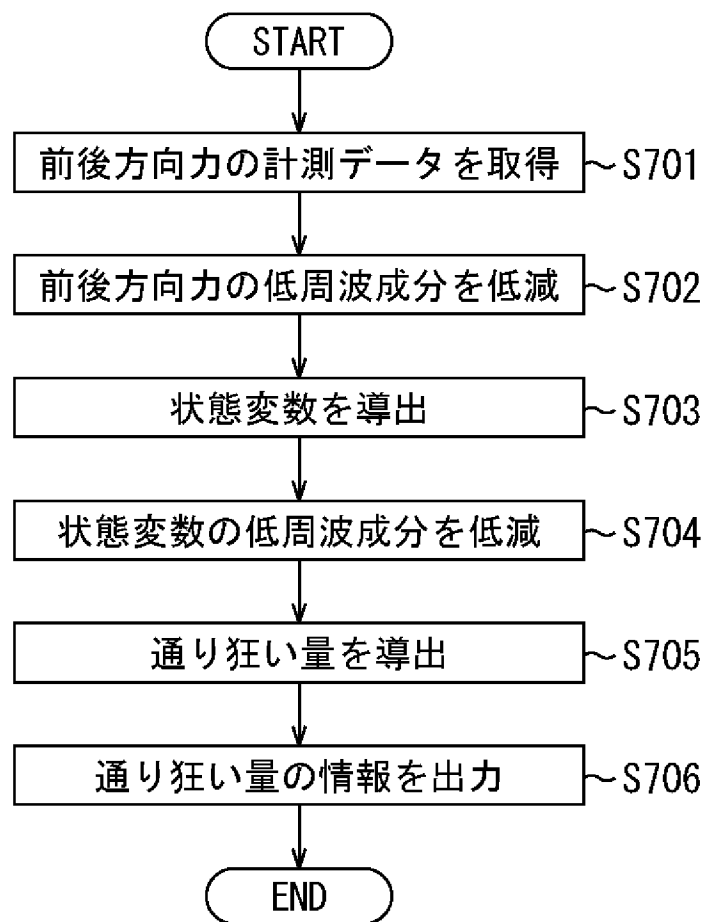


図6

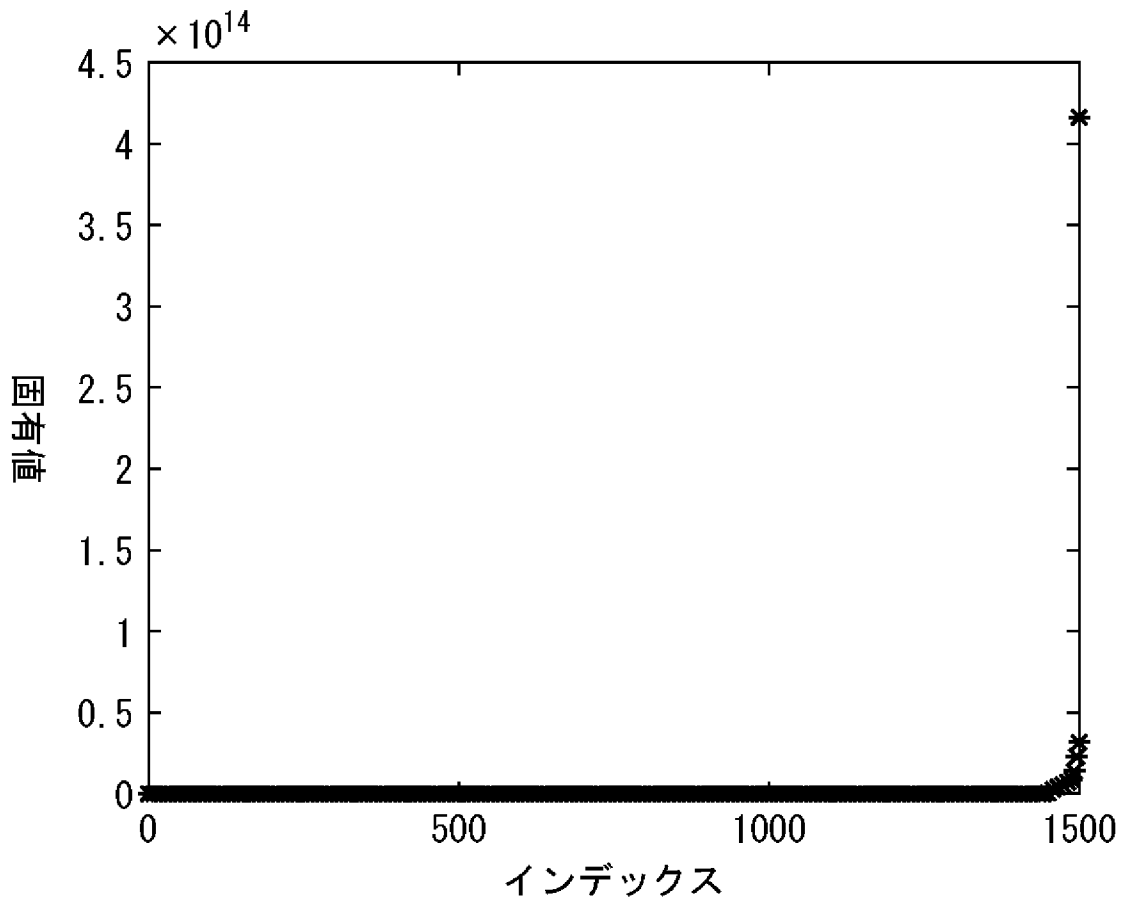
[図7]

図7

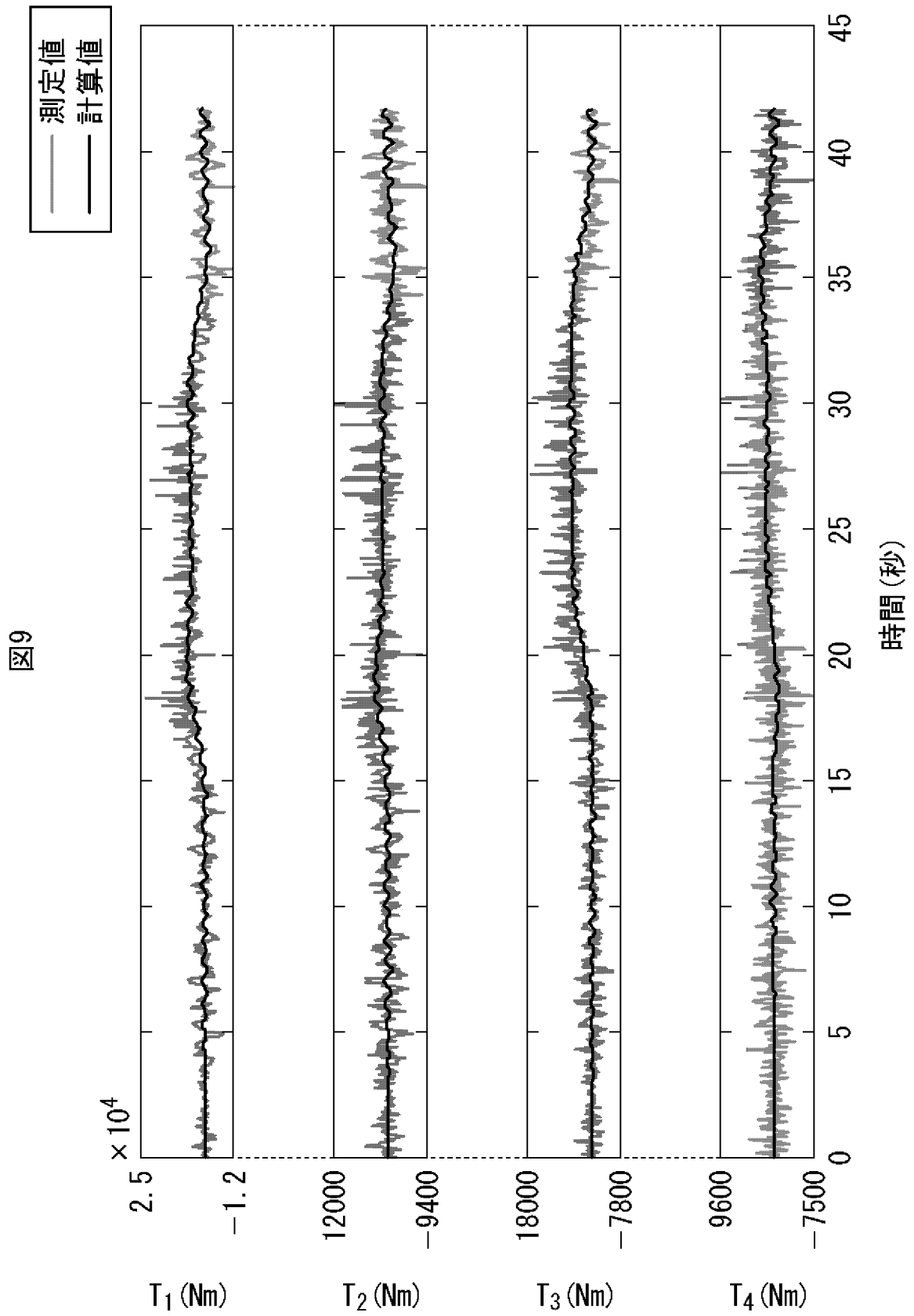


[図8]

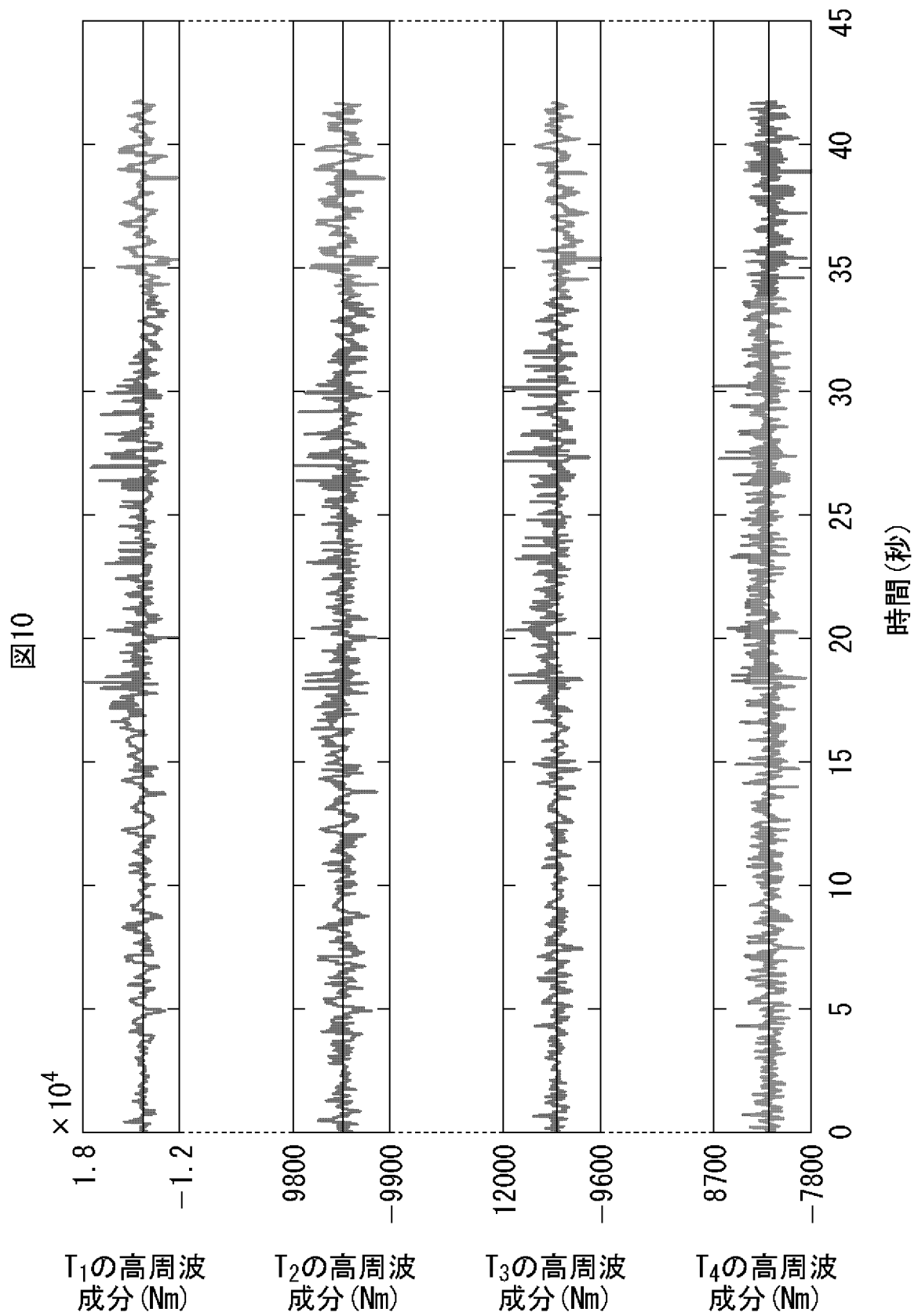
図8



[図9]

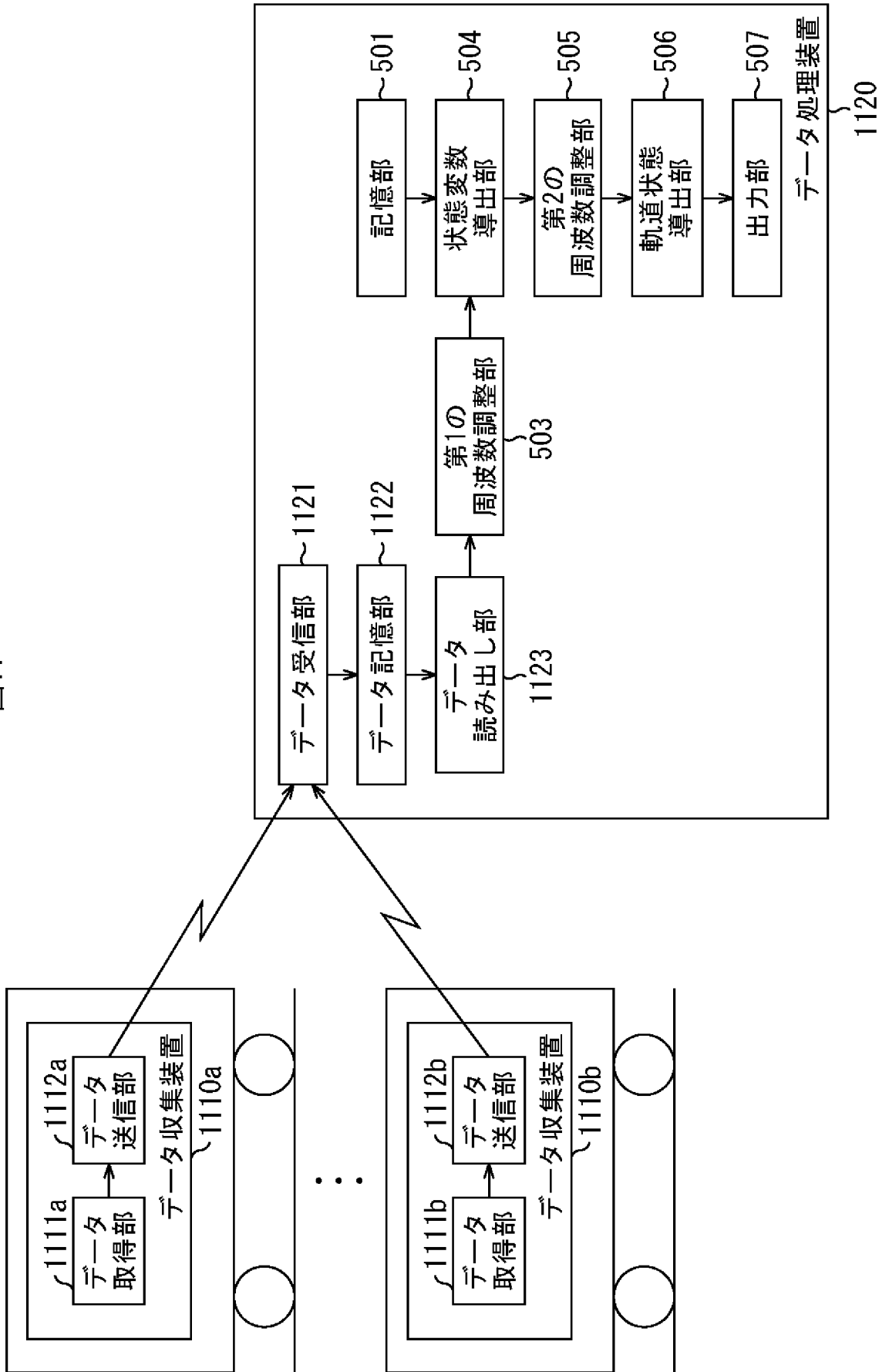


[図10]



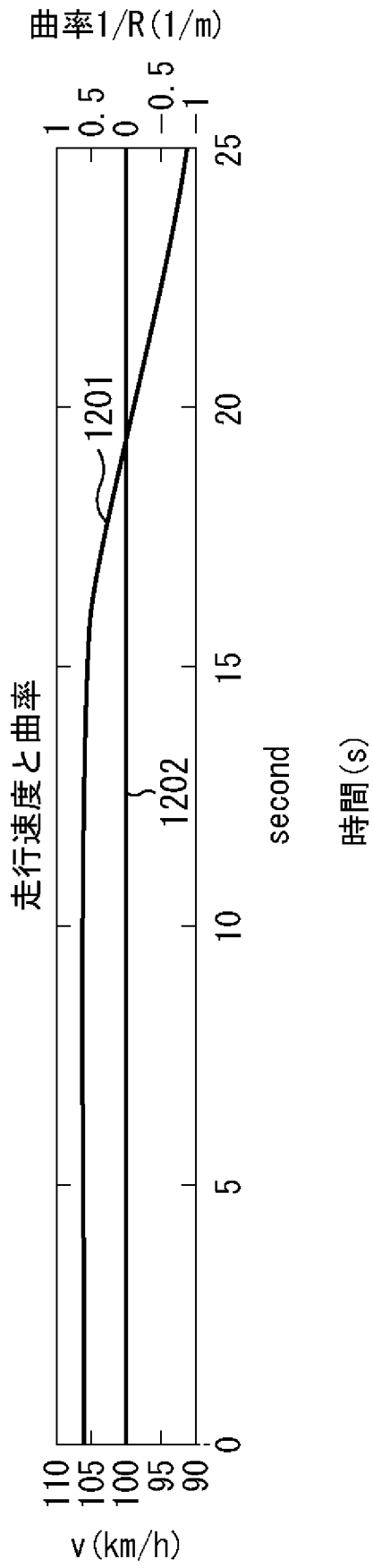
[図11]

図11

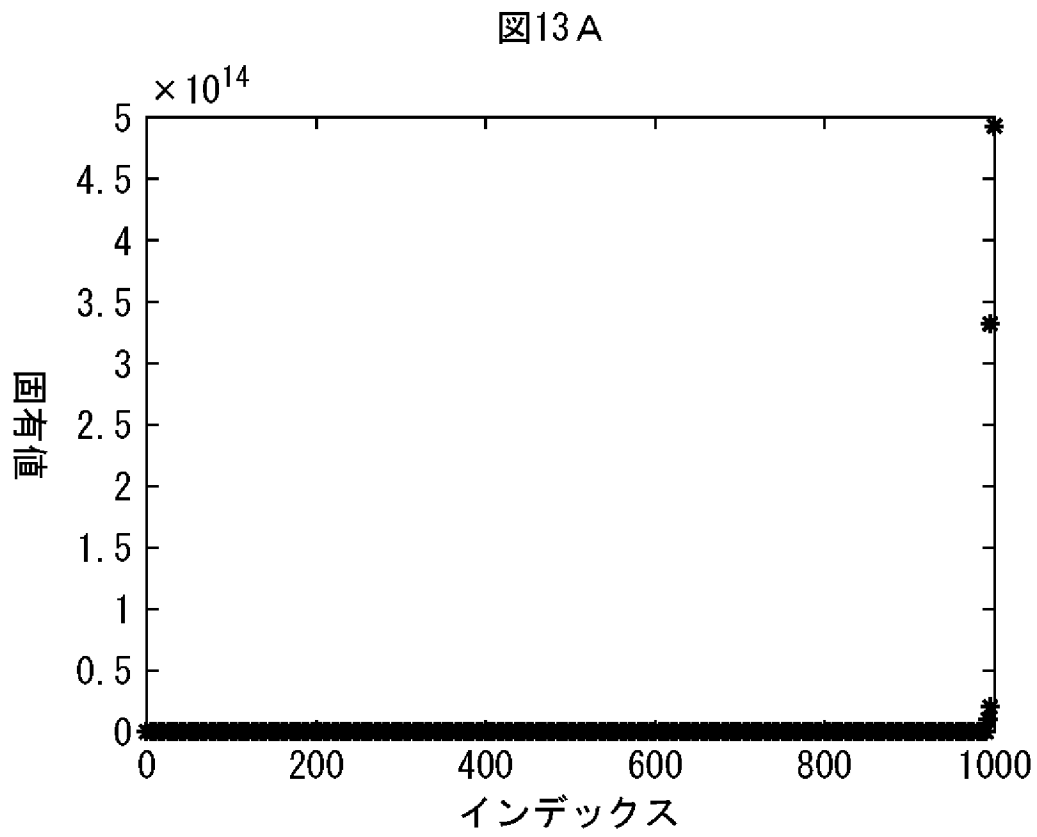


[図12]

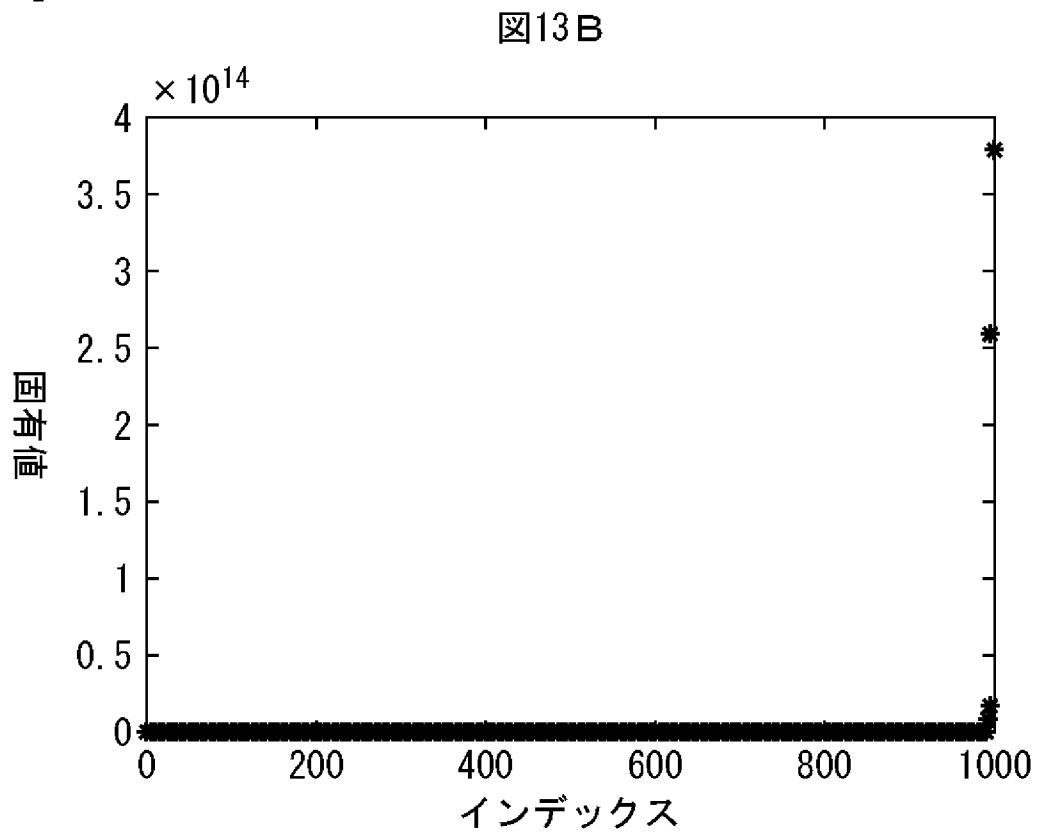
図12



[図13A]

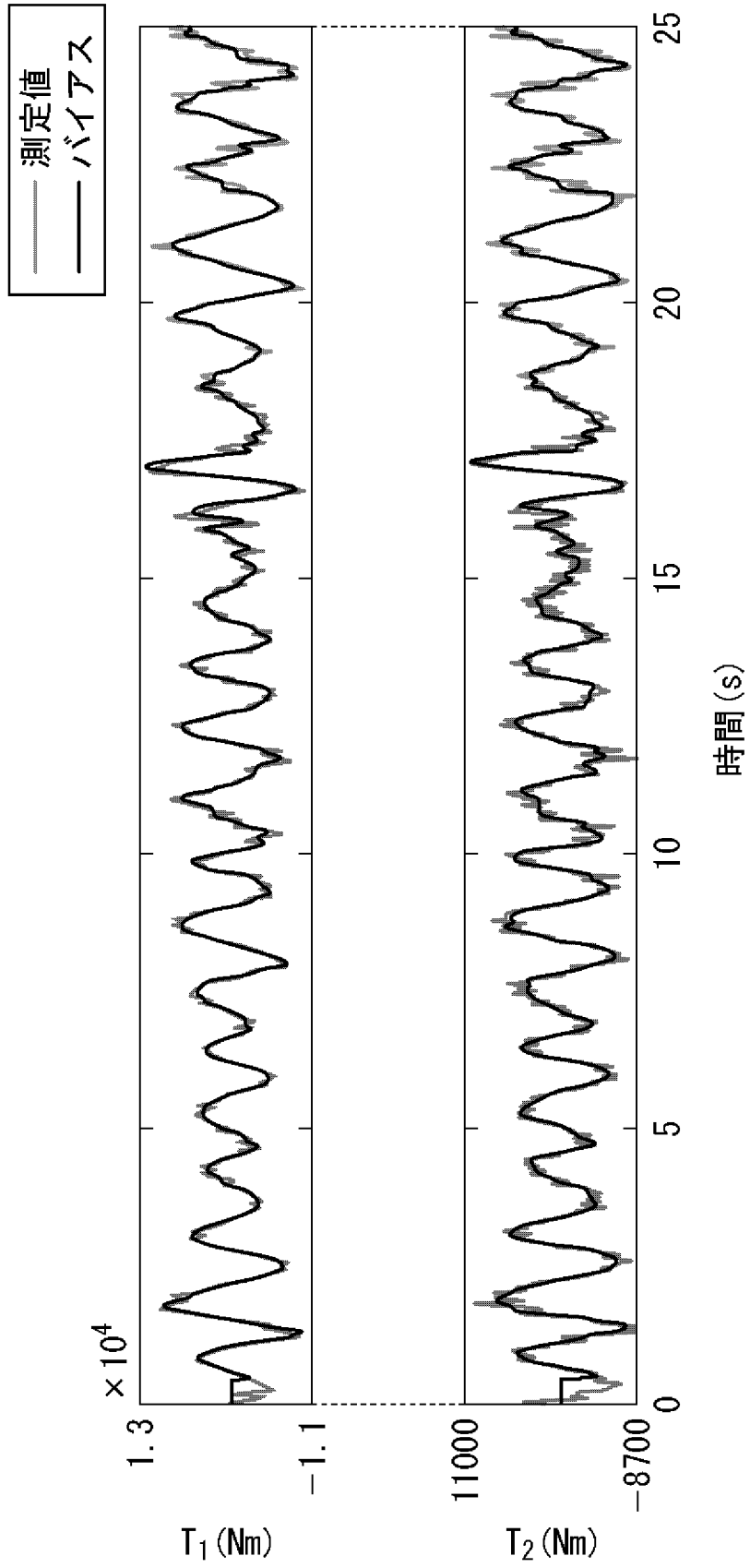


[図13B]



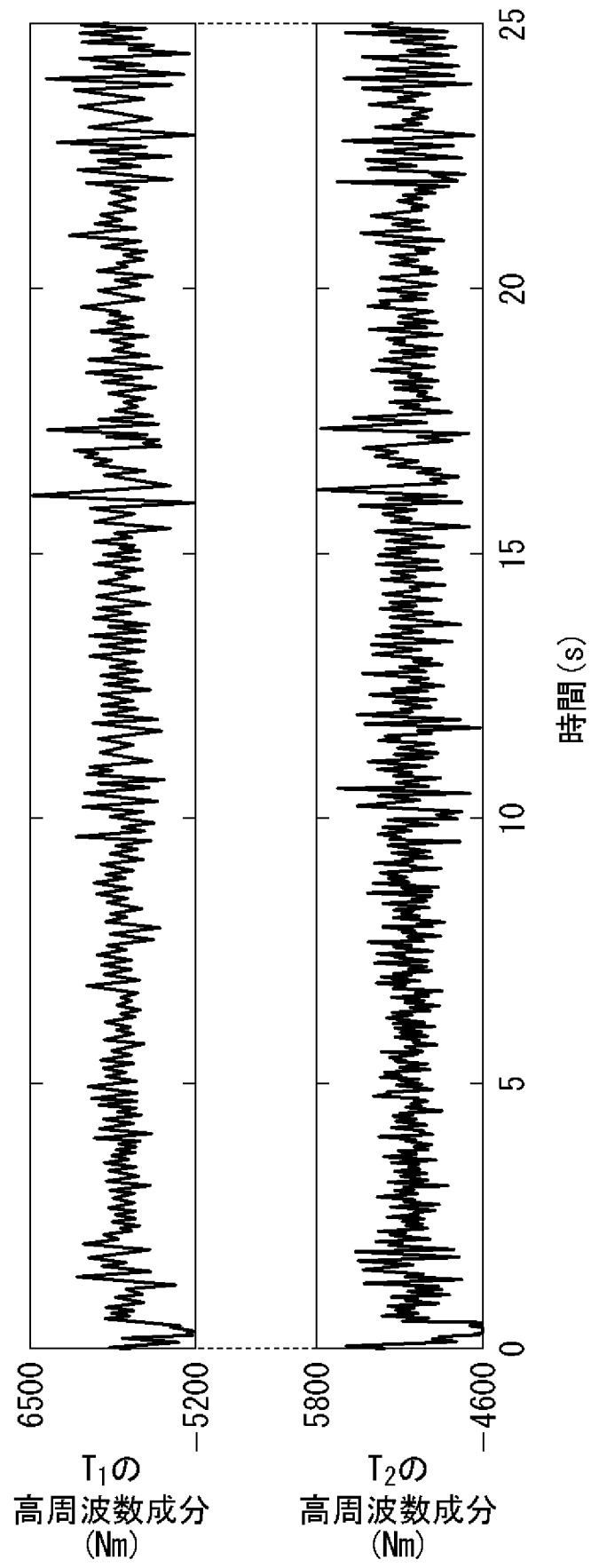
[図14]

図14



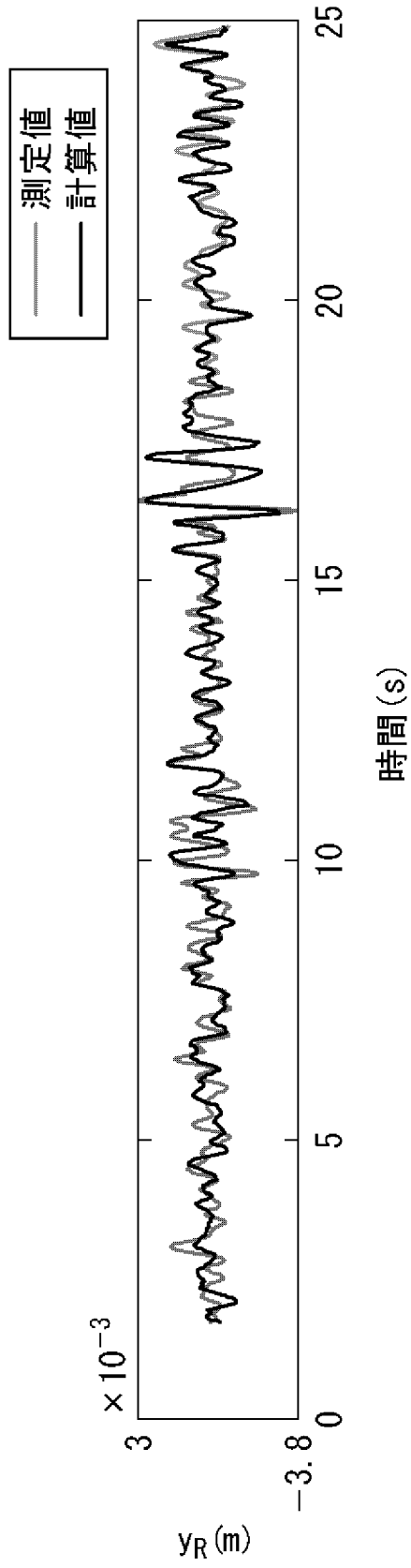
[図15]

図15



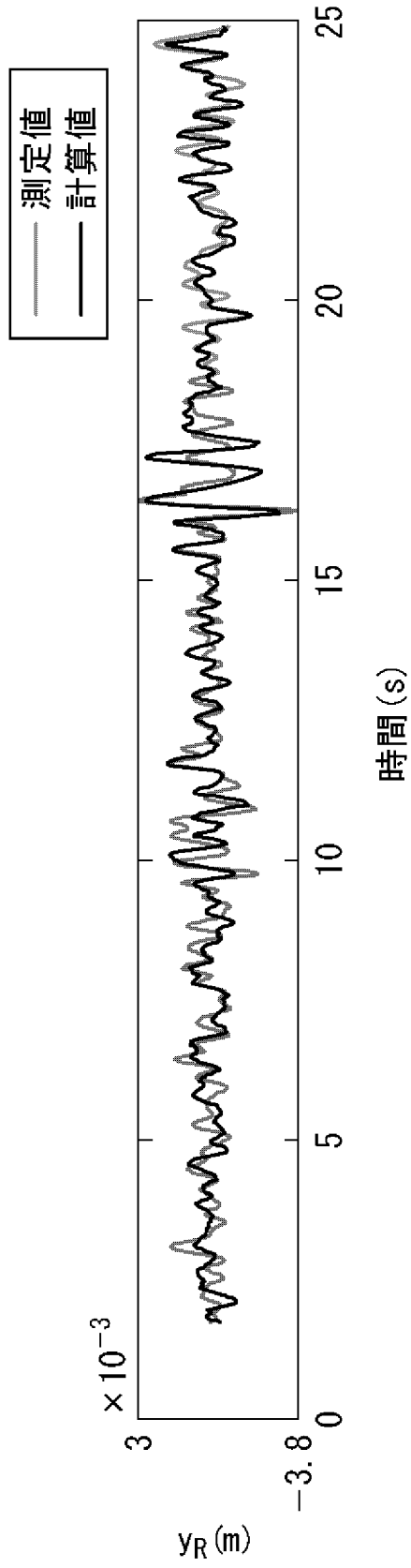
[図16A]

図16A



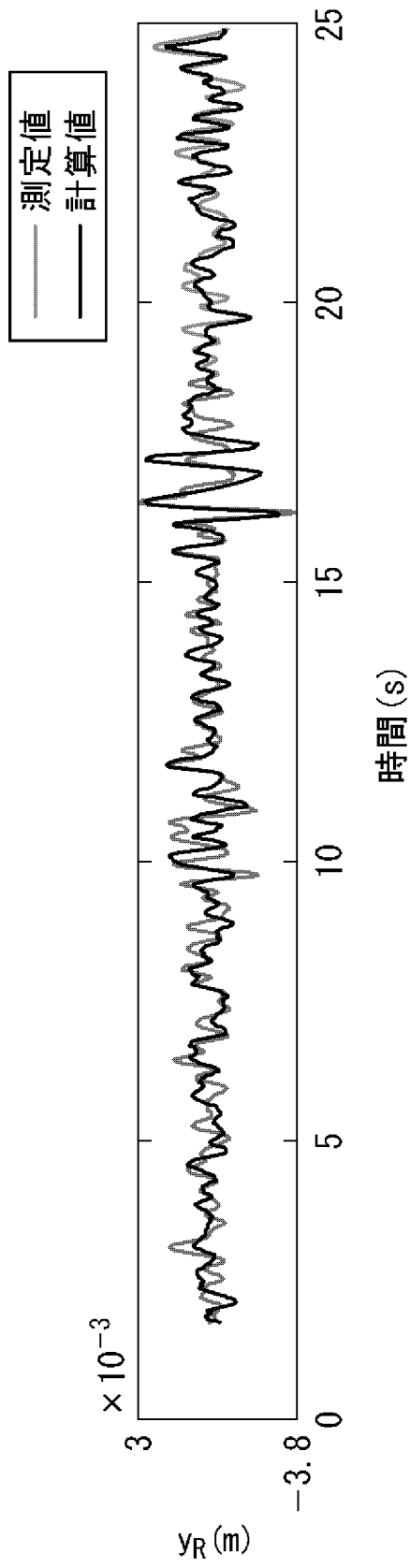
[図16B]

図16B



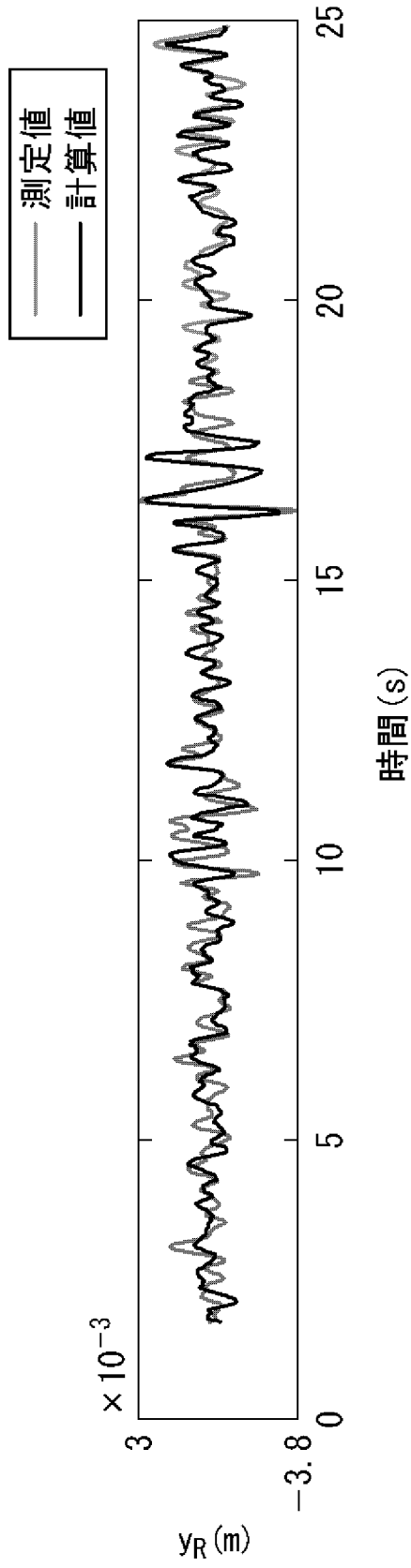
[図17A]

図17A



[図17B]

図17B



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/047673

<p>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER B61K 9/08 (2006.01) i; E01B 35/04 (2006.01) i FI: B61K9/08; E01B35/04</p> <p>According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC</p>														
<p>B. FIELDS SEARCHED</p> <p>Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B61K9/08; E01B35/04</p> <p>Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched</p> <table style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:80%;">Published examined utility model applications of Japan</td> <td style="text-align: right;">1922-1996</td> </tr> <tr> <td>Published unexamined utility model applications of Japan</td> <td style="text-align: right;">1971-2020</td> </tr> <tr> <td>Registered utility model specifications of Japan</td> <td style="text-align: right;">1996-2020</td> </tr> <tr> <td>Published registered utility model applications of Japan</td> <td style="text-align: right;">1994-2020</td> </tr> </table> <p>Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)</p>			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				
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													
<p>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width:10%;">Category*</th> <th style="width:70%;">Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th style="width:20%;">Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td align="center">A</td> <td>WO 2017/164133 A1 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 28.09.2017 (2017-09-28)</td> <td align="center">1-16</td> </tr> <tr> <td align="center">P, A</td> <td>WO 2019/043859 A1 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 07.03.2019 (2019-03-07)</td> <td align="center">1-16</td> </tr> <tr> <td align="center">E, A</td> <td>WO 2020/008525 A1 (NIPPON STEEL CORPORATION) 09.01.2020 (2020-01-09)</td> <td align="center">1-16</td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	A	WO 2017/164133 A1 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 28.09.2017 (2017-09-28)	1-16	P, A	WO 2019/043859 A1 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 07.03.2019 (2019-03-07)	1-16	E, A	WO 2020/008525 A1 (NIPPON STEEL CORPORATION) 09.01.2020 (2020-01-09)	1-16
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.												
A	WO 2017/164133 A1 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 28.09.2017 (2017-09-28)	1-16												
P, A	WO 2019/043859 A1 (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION) 07.03.2019 (2019-03-07)	1-16												
E, A	WO 2020/008525 A1 (NIPPON STEEL CORPORATION) 09.01.2020 (2020-01-09)	1-16												
<p><input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.</p>														
<table style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> <p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“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)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> </td> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“&” document member of the same patent family</p> </td> </tr> </table>			<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“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)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>										
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“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)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>													
<p>Date of the actual completion of the international search 19 February 2020 (19.02.2020)</p>		<p>Date of mailing of the international search report 03 March 2020 (03.03.2020)</p>												
<p>Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan</p>		<p>Authorized officer</p> <p>Telephone No.</p>												

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2019/047673

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
WO 2017/164133 A1	28 Sep. 2017	EP 3434552 A1 CN 108778888 A	
WO 2019/043859 A1	07 Mar. 2019	(Family: none)	
WO 2020/008525 A1	09 Jan. 2020	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） B61K 9/08(2006.01)i; E01B 35/04(2006.01)i FI: B61K9/08; E01B35/04		
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）） B61K9/08; E01B35/04 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2020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	WO 2017/164133 A1（新日鐵住金株式会社）28.09.2017（2017-09-28）	1-16
P, A	WO 2019/043859 A1（新日鐵住金株式会社）07.03.2019（2019-03-07）	1-16
E, A	WO 2020/008525 A1（日本製鉄株式会社）09.01.2020（2020-01-09）	1-16
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と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 “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 19.02.2020	国際調査報告の発送日 03.03.2020	
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） 志水 裕司 3D 9528 電話番号 03-3581-1101 内線 3341	

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/JP2019/047673

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
WO	2017/164133	A1	28.09.2017	EP	3434552	A1	
				CN	108778888	A	
WO	2019/043859	A1	07.03.2019	(ファミリーなし)			
WO	2020/008525	A1	09.01.2020	(ファミリーなし)			