

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7600901号
(P7600901)

(45)発行日 令和6年12月17日(2024.12.17)

(24)登録日 令和6年12月9日(2024.12.9)

(51)国際特許分類

F I

G O 1 M 99/00 (2011.01)

G O 1 M 99/00 Z

G O 1 H 17/00 (2006.01)

G O 1 H 17/00 Z

請求項の数 15 (全58頁)

(21)出願番号	特願2021-108745(P2021-108745)	(73)特許権者	000002369
(22)出願日	令和3年6月30日(2021.6.30)		セイコーエプソン株式会社
(65)公開番号	特開2023-6238(P2023-6238A)		東京都新宿区新宿四丁目1番6号
(43)公開日	令和5年1月18日(2023.1.18)	(74)代理人	100179475
審査請求日	令和6年4月22日(2024.4.22)		弁理士 仲井 智至
		(74)代理人	100216253
			弁理士 松岡 宏紀
		(74)代理人	100225901
			弁理士 今村 真之
		(72)発明者	小林 祥宏
			長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイ
			コーエブソン株式会社内
		審査官	佐々木 崇

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 計測方法、計測装置、計測システム及び計測プログラム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

構造物の観測点を観測する観測装置から出力される観測データに基づいて、前記構造物を移動する移動体の複数の部位の前記観測点への作用に対する応答である物理量に基づく第1の測定データを生成する第1測定データ生成工程と、

前記第1の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第2の測定データを生成する第2測定データ生成工程と、

前記移動体の前記構造物に対する進入時刻及び進出時刻を含む観測情報を生成する観測情報生成工程と、

前記観測情報と、予め作成された前記移動体の寸法及び前記構造物の寸法を含む環境情報とに基づいて、前記移動体の平均速度を算出する平均速度算出工程と、

前記構造物のたわみの近似式と、前記観測情報と、前記環境情報と、前記平均速度とに基づいて、前記移動体による前記構造物の第1のたわみ量を算出する第1たわみ量算出工程と、

前記第1のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量を算出する第2たわみ量算出工程と、

前記第2の測定データを前記第2のたわみ量の1次関数で近似し、前記1次関数の1次係数及び0次係数を算出する係数算出工程と、

前記1次係数及び前記0次係数と、前記第2のたわみ量とに基づいて、第3のたわみ量を算出する第3たわみ量算出工程と、

前記 0 次係数と、前記第 2 のたわみ量と、前記第 3 のたわみ量とに基づいて、オフセットを算出するオフセット算出工程と、

前記 1 次係数と前記第 1 のたわみ量との積と、前記オフセットとを加算して、静的応答を算出する静的応答算出工程と、

前記第 1 の測定データから前記静的応答を減算して、第 1 の動的応答を算出する第 1 動的応答算出工程と、

前記第 1 の動的応答から不要な信号を減衰させるフィルター処理を行って第 2 の動的応答を算出する第 2 動的応答算出工程と、

前記第 2 の動的応答の包絡線振幅を算出する包絡線振幅算出工程と、

前記包絡線振幅に基づいて、前記第 2 の動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出する減衰率算出工程と、

を含む、計測方法。

【請求項 2】

請求項 1 において、

前記減衰率算出工程では、

前記第 2 の動的応答に含まれる前記振動成分が減衰する区間の少なくとも一部の第 1 区間において前記包絡線振幅を指数関数で近似して前記指数関数の冪の係数を算出し、前記冪の係数を前記第 2 の動的応答の固有振動数で除算して前記減衰率を算出する、計測方法。

【請求項 3】

請求項 2 において、

前記進出時刻は、前記移動体の前記複数の部位のうちの最後尾の部位が前記構造物の進出端を通過した時刻であり、

前記第 1 区間の開始時刻は、前記進出時刻以降である、計測方法。

【請求項 4】

請求項 1 乃至 3 のいずれか一項において、

前記第 1 の動的応答から不要な信号を減衰させる前記フィルター処理は、前記第 1 の動的応答に含まれる基本周波数の振動成分の高調波成分を減衰させるとともに、前記基本周波数における利得を補正するローパスフィルター処理を含む、計測方法。

【請求項 5】

請求項 4 において、

前記第 1 の動的応答から不要な信号を減衰させる前記フィルター処理は、前記基本周波数よりも低い周波数の信号成分を減衰させるハイパスフィルター処理を含む、計測方法。

【請求項 6】

請求項 1 乃至 5 のいずれか一項において、

前記包絡線振幅算出工程では、

前記第 2 の動的応答の絶対値をローパスフィルター処理し、かつ、 $\pi/2$ を乗算して、前記包絡線振幅を算出する、計測方法。

【請求項 7】

請求項 1 乃至 6 のいずれか一項において、

前記構造物は、橋梁の上部構造である、計測方法。

【請求項 8】

請求項 1 乃至 7 のいずれか一項において、

前記移動体は、車両又は鉄道車両であり、

前記複数の部位のそれぞれは車軸又は車輪である、計測方法。

【請求項 9】

請求項 1 乃至 8 のいずれか一項において、

前記構造物のたわみの近似式は、前記構造物の構造モデルに基づく式である、計測方法。

【請求項 10】

請求項 9 において、

前記構造モデルは、両端を支持した単純梁である、計測方法。

10

20

30

40

50

【請求項 1 1】

請求項 1 乃至 1 0 のいずれか一項において、

前記観測装置は、加速度センサー、衝撃センサー、感圧センサー、歪計、画像測定装置、ロードセル又は変位計である、計測方法。

【請求項 1 2】

請求項 1 乃至 1 1 のいずれか一項において、

前記構造物は、BWIM (Bridge Weigh in Motion) が機能する構造である、計測方法。

【請求項 1 3】

構造物の観測点を観測する観測装置から出力される観測データに基づいて、前記構造物を移動する移動体の複数の部位の前記観測点への作用に対する応答である物理量に基づく第 1 の測定データを生成する第 1 測定データ生成部と、

前記第 1 の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第 2 の測定データを生成する第 2 測定データ生成部と、

前記移動体の前記構造物に対する進入時刻及び進出時刻を含む観測情報を生成する観測情報生成部と、

前記観測情報と、予め作成された前記移動体の寸法及び前記構造物の寸法を含む環境情報とに基づいて、前記移動体の平均速度を算出する平均速度算出部と、

前記構造物のたわみの近似式と、前記観測情報と、前記環境情報と、前記平均速度とに基づいて、前記移動体による前記構造物の第 1 のたわみ量を算出する第 1 たわみ量算出部と、

前記第 1 のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第 2 のたわみ量を算出する第 2 たわみ量算出部と、

前記第 2 の測定データを前記第 2 のたわみ量の 1 次関数で近似し、前記 1 次関数の 1 次係数及び 0 次係数を算出する係数算出部と、

前記 1 次係数及び前記 0 次係数と、前記第 2 のたわみ量とに基づいて、第 3 のたわみ量を算出する第 3 たわみ量算出部と、

前記 0 次係数と、前記第 2 のたわみ量と、前記第 3 のたわみ量とに基づいて、オフセットを算出するオフセット算出部と、

前記 1 次係数と前記第 1 のたわみ量との積と、前記オフセットとを加算して、静的応答を算出する静的応答算出部と、

前記第 1 の測定データから前記静的応答を減算して、第 1 の動的応答を算出する第 1 動的応答算出部と、

前記第 1 の動的応答から不要な信号を減衰させるフィルター処理を行って第 2 の動的応答を算出する第 2 動的応答算出部と、

前記第 2 の動的応答の包絡線振幅を算出する包絡線振幅算出部と、

前記包絡線振幅に基づいて、前記第 2 の動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出する減衰率算出部と、

を含む、計測装置。

【請求項 1 4】

請求項 1 3 に記載の計測装置と、

前記観測装置と、

を備えた、計測システム。

【請求項 1 5】

構造物の観測点を観測する観測装置から出力される観測データに基づいて、前記構造物を移動する移動体の複数の部位の前記観測点への作用に対する応答である物理量に基づく第 1 の測定データを生成する第 1 測定データ生成工程と、

前記第 1 の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第 2 の測定データを生成する第 2 測定データ生成工程と、

前記移動体の前記構造物に対する進入時刻及び進出時刻を含む観測情報を生成する観測

10

20

30

40

50

情報生成工程と、

前記観測情報と、予め作成された前記移動体の寸法及び前記構造物の寸法を含む環境情報とに基づいて、前記移動体の平均速度を算出する平均速度算出工程と、

前記構造物のたわみの近似式と、前記観測情報と、前記環境情報と、前記平均速度とに基づいて、前記移動体による前記構造物の第1のたわみ量を算出する第1たわみ量算出工程と、

前記第1のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量を算出する第2たわみ量算出工程と、

前記第2の測定データを前記第2のたわみ量の1次関数で近似し、前記1次関数の1次係数及び0次係数を算出する係数算出工程と、

前記1次係数及び前記0次係数と、前記第2のたわみ量とに基づいて、第3のたわみ量を算出する第3たわみ量算出工程と、

前記0次係数と、前記第2のたわみ量と、前記第3のたわみ量とに基づいて、オフセットを算出するオフセット算出工程と、

前記1次係数と前記第1のたわみ量との積と、前記オフセットとを加算して、静的応答を算出する静的応答算出工程と、

前記第1の測定データから前記静的応答を減算して、第1の動的応答を算出する第1動的応答算出工程と、

前記第1の動的応答から不要な信号を減衰させるフィルター処理を行って第2の動的応答を算出する第2動的応答算出工程と、

前記第2の動的応答の包絡線振幅を算出する包絡線振幅算出工程と、

前記包絡線振幅に基づいて、前記第2の動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出する減衰率算出工程と、をコンピューターに実行させる、計測プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、計測方法、計測装置、計測システム及び計測プログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献1には、列車の先頭車両と最後尾車両にそれぞれ上下加速度を計測する加速度計を設け、走行時の先頭車両と最後尾車両の上下加速度を計測し、橋梁通過時の加速度計の計測データを抽出し、最後尾車両の加速度計で計測した上下加速度の特徴量を、先頭車両で計測した上下加速度の特徴量で除して加速度増幅率を算出し、予め求めた橋梁の衝撃係数と加速度増幅係数の関係式に加速度増幅係数を当てはめて橋梁の衝撃係数（動的応答成分）を算出する鉄道橋の動的応答評価方法が記載されている。この動的応答評価方法では、先頭車両の通過時には橋梁に動的応答がほとんど発生せず、最後尾車両の通過時には橋梁に静的応答と動的応答が発生することに着目し、列車の先頭車両と最後尾車両にそれぞれ設けた加速度計が計測する上下加速度に基づいて、簡易に且つ網羅的に橋梁の衝撃係数（動的応答成分）を求めることができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特開2017-20172号公報

【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に記載の動的応答評価方法では、最後尾車両の加速度計で計測した上下加速度の特徴量を先頭車両で計測した上下加速度の特徴量で除した加速度増幅率は静的応答と動的応答とを十分に分離することができない、橋梁の衝撃係数と加速度増幅係数の関係式の精度が十分でない、上下加速度の計測箇所や車両振動に起因する誤差が

10

20

30

40

50

存在する等の要因により、動的応答の算出精度が十分ではない。したがって、特許文献 1 に記載の動的応答評価方法では、動的応答の減衰率を精度良く算出することが難しい。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明に係る計測方法の一態様は、

構造物の観測点を観測する観測装置から出力される観測データに基づいて、前記構造物を移動する移動体の複数の部位の前記観測点への作用に対する応答である物理量に基づく第 1 の測定データを生成する第 1 測定データ生成工程と、

前記第 1 の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第 2 の測定データを生成する第 2 測定データ生成工程と、

前記移動体の前記構造物に対する進入時刻及び進出時刻を含む観測情報を生成する観測情報生成工程と、

前記観測情報と、予め作成された前記移動体の寸法及び前記構造物の寸法を含む環境情報とに基づいて、前記移動体の平均速度を算出する平均速度算出工程と、

前記構造物のたわみの近似式と、前記観測情報と、前記環境情報と、前記平均速度とに基づいて、前記移動体による前記構造物の第 1 のたわみ量を算出する第 1 たわみ量算出工程と、

前記第 1 のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第 2 のたわみ量を算出する第 2 たわみ量算出工程と、

前記第 2 の測定データを前記第 2 のたわみ量の 1 次関数で近似し、前記 1 次関数の 1 次係数及び 0 次係数を算出する係数算出工程と、

前記 1 次係数及び前記 0 次係数と、前記第 2 のたわみ量とに基づいて、第 3 のたわみ量を算出する第 3 たわみ量算出工程と、

前記 0 次係数と、前記第 2 のたわみ量と、前記第 3 のたわみ量とに基づいて、オフセットを算出するオフセット算出工程と、

前記 1 次係数と前記第 1 のたわみ量との積と、前記オフセットとを加算して、静的応答を算出する静的応答算出工程と、

前記第 1 の測定データから前記静的応答を減算して、第 1 の動的応答を算出する第 1 動的応答算出工程と、

前記第 1 の動的応答から不要な信号を減衰させるフィルター処理を行って第 2 の動的応答を算出する第 2 動的応答算出工程と、

前記第 2 の動的応答の包絡線振幅を算出する包絡線振幅算出工程と、

前記包絡線振幅に基づいて、前記第 2 の動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出する減衰率算出工程と、

を含む。

【0006】

本発明に係る計測装置の一態様は、

構造物の観測点を観測する観測装置から出力される観測データに基づいて、前記構造物を移動する移動体の複数の部位の前記観測点への作用に対する応答である物理量に基づく第 1 の測定データを生成する第 1 測定データ生成部と、

前記第 1 の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第 2 の測定データを生成する第 2 測定データ生成部と、

前記移動体の前記構造物に対する進入時刻及び進出時刻を含む観測情報を生成する観測情報生成部と、

前記観測情報と、予め作成された前記移動体の寸法及び前記構造物の寸法を含む環境情報とに基づいて、前記移動体の平均速度を算出する平均速度算出部と、

前記構造物のたわみの近似式と、前記観測情報と、前記環境情報と、前記平均速度とに基づいて、前記移動体による前記構造物の第 1 のたわみ量を算出する第 1 たわみ量算出部と、

前記第 1 のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第 2 のたわみ量を算出

10

20

30

40

50

する第2たわみ量算出部と、

前記第2の測定データを前記第2のたわみ量の1次関数で近似し、前記1次関数の1次係数及び0次係数を算出する係数算出部と、

前記1次係数及び前記0次係数と、前記第2のたわみ量とに基づいて、第3のたわみ量を算出する第3たわみ量算出部と、

前記0次係数と、前記第2のたわみ量と、前記第3のたわみ量とに基づいて、オフセットを算出するオフセット算出部と、

前記1次係数と前記第1のたわみ量との積と、前記オフセットとを加算して、静的応答を算出する静的応答算出部と、

前記第1の測定データから前記静的応答を減算して、第1の動的応答を算出する第1動的応答算出部と、

前記第1の動的応答から不要な信号を減衰させるフィルター処理を行って第2の動的応答を算出する第2動的応答算出部と、

前記第2の動的応答の包絡線振幅を算出する包絡線振幅算出部と、

前記包絡線振幅に基づいて、前記第2の動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出する減衰率算出部と、

を含む。

【0007】

本発明に係る計測システムの一態様は、

前記計測装置の一態様と、

前記観測装置と、

を備える。

【0008】

本発明に係る計測プログラムの一態様は、

構造物の観測点を観測する観測装置から出力される観測データに基づいて、前記構造物を移動する移動体の複数の部位の前記観測点への作用に対する応答である物理量に基づく第1の測定データを生成する第1測定データ生成工程と、

前記第1の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第2の測定データを生成する第2測定データ生成工程と、

前記移動体の前記構造物に対する進入時刻及び進出時刻を含む観測情報を生成する観測情報生成工程と、

前記観測情報と、予め作成された前記移動体の寸法及び前記構造物の寸法を含む環境情報とに基づいて、前記移動体の平均速度を算出する平均速度算出工程と、

前記構造物のたわみの近似式と、前記観測情報と、前記環境情報と、前記平均速度とに基づいて、前記移動体による前記構造物の第1のたわみ量を算出する第1たわみ量算出工程と、

前記第1のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量を算出する第2たわみ量算出工程と、

前記第2の測定データを前記第2のたわみ量の1次関数で近似し、前記1次関数の1次係数及び0次係数を算出する係数算出工程と、

前記1次係数及び前記0次係数と、前記第2のたわみ量とに基づいて、第3のたわみ量を算出する第3たわみ量算出工程と、

前記0次係数と、前記第2のたわみ量と、前記第3のたわみ量とに基づいて、オフセットを算出するオフセット算出工程と、

前記1次係数と前記第1のたわみ量との積と、前記オフセットとを加算して、静的応答を算出する静的応答算出工程と、

前記第1の測定データから前記静的応答を減算して、第1の動的応答を算出する第1動的応答算出工程と、

前記第1の動的応答から不要な信号を減衰させるフィルター処理を行って第2の動的応答を算出する第2動的応答算出工程と、

10

20

30

40

50

前記第 2 の動的応答の包絡線振幅を算出する包絡線振幅算出工程と、

前記包絡線振幅に基づいて、前記第 2 の動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出する減衰率算出工程と、をコンピューターに実行させる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図 1】計測システムの構成例を示す図。

【図 2】図 1 の上部構造を A－A 線で切断した断面図。

【図 3】加速度センサーが検出する加速度の説明図。

【図 4】測定データ $u(t)$ の一例を示す図。

【図 5】測定データ $u(t)$ のパワースペクトラム密度を示す図。

10

【図 6】測定データ $u_{lp}(t)$ の一例を示す図。

【図 7】測定データ $u_{lp}(t)$ と進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o との関係の一例を示す図。

【図 8】車両の長さ $L_c(C_m)$ 及び車軸間の距離 $L_a(a_w(C_m, n))$ の一例を示す図。

【図 9】橋梁の上部構造の構造モデルの説明図。

【図 10】たわみ量 $w_{std}(a_w(C_m, n), t)$ の一例を示す図。

【図 11】たわみ量 $C_{std}(C_m, t)$ の一例を示す図。

【図 12】たわみ量 $T_{std}(t)$ の一例を示す図。

【図 13】たわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の一例を示す図。

20

【図 14】測定データ $u_{lp}(t)$ とたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ とを重ねて示す図。

【図 15】たわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ の一例を示す図。

【図 16】たわみ量 $T_{Estd}(t)$ の一例を示す図。

【図 17】たわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ 及びたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ とそれらの平均値を算出する所定区間 T_{avg} との関係の一例を示す図。

【図 18】オフセット $T_{offset_std}(t)$ の一例を示す図。

【図 19】たわみ量 $T_{EOstd}(t)$ の一例を示す図。

【図 20】測定データ $u(t)$ とたわみ量 $T_{EOstd}(t)$ との関係を示す図。

【図 21】固有振動 $u_{nv}(t)$ の一例を示す図。

【図 22】固有振動 $u_{nv}(t)$ のパワースペクトラム密度を示す図。

30

【図 23】ハイパスフィルターの周波数特性を示す図。

【図 24】固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ の一例を示す図。

【図 25】移動平均フィルターの伝達特性を示す図。

【図 26】固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の一例を示す図。

【図 27】包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ の一例を示す図。

【図 28】包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ の対数 $y(t)$ 及び第 1 区間 T_1 の一例を示す図。

【図 29】減衰振動 $u_{env}(t)$ と固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ とを重ねて示す図。

【図 30】本実施形態の計測方法の手順の一例を示すフローチャート図。

【図 31】第 1 測定データ生成工程の手順の一例を示すフローチャート図。

40

【図 32】第 2 測定データ生成工程の手順の一例を示すフローチャート図。

【図 33】観測情報生成工程の手順の一例を示すフローチャート図。

【図 34】平均速度算出工程の手順の一例を示すフローチャート図。

【図 35】第 1 たわみ量算出工程の手順の一例を示すフローチャート図。

【図 36】第 2 たわみ量算出工程の手順の一例を示すフローチャート図。

【図 37】オフセット算出工程の手順の一例を示すフローチャート図。

【図 38】第 2 動的応答算出工程の手順の一例を示すフローチャート図。

【図 39】減衰率算出工程の手順の一例を示すフローチャート図。

【図 40】センサー、計測装置及び監視装置の構成例を示す図。

【図 41】計測システムの他の構成例を示す図。

50

【図４２】計測システムの他の構成例を示す図。

【図４３】計測システムの他の構成例を示す図。

【図４４】図４３の上部構造をＡ－Ａ線で切断した断面図。

【発明を実施するための形態】

【００１０】

以下、本発明の好適な実施形態について図面を用いて詳細に説明する。なお、以下に説明する実施の形態は、特許請求の範囲に記載された本発明の内容を不当に限定するものではない。また以下で説明される構成の全てが本発明の必須構成要件であるとは限らない。

【００１１】

１．計測システムの構成

本実施形態に係る構造物である橋梁の上部構造を通過する移動体は、重量が大きく、ＢＷＩＭで計測可能な車両又は鉄道車両等である。ＢＷＩＭは、Bridge Weigh in Motionの略であり、橋梁を「はかり」に見立て、橋梁の変形を計測することにより、橋梁を通過する移動体の重量、軸数などを測定する技術である。変形やひずみなどの応答から通過する移動体の重量を解析可能な橋梁の上部構造は、ＢＷＩＭが機能する構造であり、橋梁の上部構造への作用と応答の間の物理的なプロセスを応用するＢＷＩＭシステムが通行する移動体の重量の計測を可能にする。以下では、移動体が鉄道車両である場合を例に挙げ、本実施形態の計測方法を実現するための計測システムについて説明する。

【００１２】

図１は、本実施形態に係る計測システムの一例を示す図である。図１に示すように、本実施形態に係る計測システム１０は、計測装置１と、橋梁５の上部構造７に設けられる少なくとも１つのセンサー２と、を備えている。また、計測システム１０は、監視装置３を備えていてもよい。

【００１３】

橋梁５は上部構造７と下部構造８からなる。図２は、上部構造７を図１のＡ－Ａ線で切断した断面図である。図１及び図２に示すように、上部構造７は、床板Ｆ、主桁Ｇ、不図示の横桁等からなる橋床７ａと、支承７ｂと、レール７ｃと、枕木７ｄと、バラスト７ｅと、を含む。また、図１に示すように、下部構造８は、橋脚８ａと、橋台８ｂと、を含む。上部構造７は、隣り合う橋台８ｂと橋脚８ａ、隣り合う２つの橋台８ｂ、又は、隣り合う２つの橋脚８ａのいずれか１つに渡された構造である。上部構造７の両端部は、隣り合う橋台８ｂと橋脚８ａの位置、隣り合う２つの橋台８ｂの位置、又は、隣り合う２つの橋脚８ａの位置にある。

【００１４】

鉄道車両６が上部構造７に進入すると、鉄道車両６の荷重によって上部構造７が撓むが、鉄道車両６は複数の車両が連結されているので、各車両の通過に伴って上部構造７の撓みが周期的に繰り返されるという現象が起きる。この現象は静的応答と呼ばれている。これに対して、上部構造７は構造物としての固有振動周波数を有しているため、鉄道車両６が上部構造７を通過することにより上部構造７の固有振動が励振される場合がある。上部構造７の固有振動が励振されることにより、上部構造７の撓みが周期的に繰り返されるという現象が起きる。この現象は動的応答と呼ばれている。

【００１５】

計測装置１と各センサー２とは、例えば、不図示のケーブルで接続され、ＣＡＮ等の通信ネットワークを介して通信を行う。ＣＡＮは、Controller Area Networkの略である。あるいは、計測装置１と各センサー２とは、無線ネットワークを介して通信を行ってもよい。

【００１６】

各センサー２は、移動体である鉄道車両６が構造物である上部構造７を移動したときの動的応答の減衰率を算出するために用いられるデータを出力する。本実施形態では、各センサー２は加速度センサーであり、例えば、水晶加速度センサーであってもよいし、ＭＥＭＳ加速度センサーであってもよい。ＭＥＭＳは、Micro Electro Mechanical System

10

20

30

40

50

sの略である。

【0017】

本実施形態では、各センサー2は上部構造7の長手方向の中央部、具体的には、主桁Gの長手方向の中央部に設置されている。ただし、各センサー2は、動的応答の減衰率を算出するための加速度を検出することができればよく、その設置位置は上部構造7の中央部に限定されない。なお、各センサー2を上部構造7の床板Fに設けると、鉄道車両6の走行によって破壊するおそれがあり、また橋床7aの局所的な変形により測定精度が影響を受けるおそれがあるため、図1及び図2の例では、各センサー2は上部構造7の主桁Gに設けられている。

【0018】

上部構造7の床板Fや主桁G等は、上部構造7を通過する鉄道車両6による荷重によって、垂直方向に撓む。各センサー2は、上部構造7を通過する鉄道車両6の荷重による床板Fや主桁Gの撓みの加速度を検出する。

【0019】

計測装置1は、各センサー2から出力される加速度データに基づいて、鉄道車両6が上部構造7を通過したときの動的応答の減衰率を算出する。計測装置1は、例えば、橋台8bに設置される。

【0020】

計測装置1と監視装置3とは、例えば、携帯電話の無線ネットワーク及びインターネット等の通信ネットワーク4を介して、通信を行うことができる。計測装置1は、鉄道車両6が上部構造7を通過したときの動的応答の減衰率を含む計測データを監視装置3に送信する。監視装置3は、当該情報を不図示の記憶装置に記憶し、例えば、当該情報に基づいて鉄道車両6の監視や上部構造7の異常判定等の処理を行ってもよい。

【0021】

なお、本実施形態では、橋梁5は、鉄道橋であり、例えば、鋼橋や桁橋、RC橋等である。RCは、Reinforced-Concreteの略である。

【0022】

図2に示すように、本実施形態では、センサー2に対応付けて観測点Rが設定されている。図2の例では、観測点Rは、主桁Gに設けられたセンサー2の鉛直上方向にある上部構造7の表面の位置に設定されている。すなわち、センサー2は、観測点Rを観測する観測装置であり、構造物である上部構造7を移動する鉄道車両6の複数の部位の観測点Rへの作用に対する応答である物理量を検出し、検出した物理量を含むデータを出力する。例えば、鉄道車両6の複数の部位のそれぞれは車軸又は車輪であるが、以降では車軸であるものとする。また、本実施形態では、各センサー2は加速度センサーであり、物理量として加速度を検出する。センサー2は、鉄道車両6の走行により観測点Rに生じる加速度を検出可能な位置に設けられていればよいが、観測点Rの鉛直上に近い位置に設けられることが望ましい。

【0023】

なお、センサー2の数及び設置位置は、図1及び図2に示した例には限定されず種々の変形実施が可能である。

【0024】

計測装置1は、センサー2から出力される加速度データに基づいて、鉄道車両6が移動する上部構造7の面と交差する方向の加速度を取得する。鉄道車両6が移動する上部構造7の面は、鉄道車両6が移動する方向、すなわち上部構造7の長手方向であるX方向と、鉄道車両6が移動する方向と直交する方向、すなわち上部構造7の幅方向であるY方向とによって規定される。鉄道車両6の走行によって、観測点Rは、X方向及びY方向と直交する方向に撓むので、計測装置1は、撓みの加速度の大きさを正確に算出するために、X方向及びY方向と直交する方向、すなわち、床板Fの法線方向であるZ方向の加速度を取得するのが望ましい。

【0025】

10

20

30

40

50

図3は、センサー2が検出する加速度を説明する図である。センサー2は、互いに直交する3軸の各軸方向に生じる加速度を検出する加速度センサーである。

【0026】

鉄道車両6の走行による観測点Rの撓みの加速度を検出するために、センサー2は、3つの検出軸であるx軸、y軸、z軸のうち、1軸がX方向及びY方向と交差する方向となるように設置される。図1及び図2では、センサー2は、1軸がX方向及びY方向と交差する方向となるように設置される。観測点Rは、X方向及びY方向と直交する方向に撓むので、撓みの加速度を正確に検出するために、理想的には、センサー2は、1軸をX方向及びY方向と直交するZ方向、すなわち、床板Fの法線方向に合わせて設置される。

【0027】

ただし、センサー2を上部構造7に設置する場合、設置場所が傾いている場合もある。計測装置1は、センサー2の3つの検出軸の1軸が、床板Fの法線方向に合わせて設置されなくても、概ね法線方向に向いていることで誤差は小さく無視できる。また、計測装置1は、センサー2の3つの検出軸の1軸が、床板Fの法線方向に合わせて設置されなくても、x軸、y軸、z軸の加速度を合成した3軸合成加速度によって、センサー2の傾斜による検出誤差の補正を行うことができる。また、センサー2は、少なくとも鉛直方向にほぼ平行な方向に生ずる加速度、あるいは、床板Fの法線方向の加速度を検出する1軸加速度センサーであってもよい。

【0028】

以下、計測装置1が実行する本実施形態の計測方法の詳細について説明する。

【0029】

2. 計測方法の詳細

まず、計測装置1は、式(1)のように、加速度センサーであるセンサー2から出力される加速度データ $a(k)$ を積分して速度データ $v(k)$ を生成し、さらに、式(2)のように、速度データ $v(k)$ を積分して測定データ $u(k)$ を生成する。加速度データ $a(k)$ は、鉄道車両6が橋梁5を通過した時の変位変化を算出するために不要な加速度バイアスを除いた加速度変化のデータである。例えば、鉄道車両6が橋梁5を通過する直前の加速度を0として、以降の加速度変化を加速度データ $a(k)$ としても良い。式(1)及び式(2)において、 k はサンプル番号であり、 ΔT はサンプルの時間間隔である。測定データ $u(k)$ は、鉄道車両6の走行による観測点Rの変位のデータである。

【0030】

【数1】

$$v(k) = a(k)\Delta T + v(k-1) \cdots (1)$$

【0031】

【数2】

$$u(k) = v(k)\Delta T + u(k-1) \cdots (2)$$

【0032】

サンプル番号 k を変数とする測定データ $u(k)$ は、時刻 $t = k \Delta T$ として、時刻 t を変数とする測定データ $u(t)$ に変換される。図4に、測定データ $u(t)$ の一例を示す。測定データ $u(t)$ は、観測点Rを観測するセンサー2から出力される加速度データ $a(t)$ に基づいて生成されるので、上部構造7を移動する鉄道車両6の複数の車軸の観測点Rへの作用に対する応答である加速度に基づくデータである。

【0033】

次に、計測装置1は、測定データ $u(t)$ に含まれる基本周波数 F_f の振動成分及びその高調波を低減させるために、測定データ $u(t)$ をフィルター処理した測定データ $u_{lp}(t)$ を生成する。フィルター処理は、例えば、ローパスフィルター処理であってもよいし、バンドパスフィルター処理であってもよい。

【0034】

10

20

30

40

50

具体的には、まず、計測装置 1 は、測定データ $u(t)$ を高速フーリエ変換処理してパワースペクトラム密度を算出し、パワースペクトラム密度のピークを基本周波数 F_f として算出する。図 5 に、図 4 の測定データ $u(t)$ を高速フーリエ変換処理して得られたパワースペクトラム密度を示す。図 5 の例では、基本周波数 F_f は約 3 Hz として算出される。そして、計測装置 1 は、式 (3) により、基本周波数 F_f から基本周期 T_f を算出し、式 (4) のように、基本周期 T_f を ΔT で除してデータの時間分解能に調整した移動平均区間 k_{mf} を算出する。基本周期 T_f は、基本周波数 F_f に対応する周期であり、 $T_f > 2\Delta T$ である。

【0035】

【数 3】

$$T_f = \frac{1}{F_f} \cdots (3)$$

10

【0036】

【数 4】

$$k_{mf} = 2 \left\lfloor \frac{T_f}{2\Delta T} \right\rfloor + 1 \cdots (4)$$

【0037】

そして、計測装置 1 は、フィルター処理として、式 (5) により、基本周期 T_f で測定データ $u(t)$ を移動平均処理して、測定データ $u(t)$ に含まれる振動成分を低減させた測定データ $u_{lp}(t)$ を生成する。この移動平均処理は、必要な計算量が小さいだけでなく、基本周波数 F_f の信号成分及びその高調波成分の減衰量が非常に大きいので振動成分が効果的に低減された測定データ $u_{lp}(t)$ が得られる。図 6 に、測定データ $u_{lp}(t)$ の一例を示す。図 6 に示すように、測定データ $u(t)$ に含まれる振動成分がほとんど除かれた測定データ $u_{lp}(t)$ が得られる。

20

【0038】

【数 5】

$$u_{lp}(k) = \frac{1}{k_{mf}} \sum_{n=k-\frac{k_{mf}-1}{2}}^{k+\frac{k_{mf}-1}{2}} u(n) \cdots (5)$$

30

【0039】

なお、計測装置 1 は、フィルター処理として、測定データ $u(t)$ に対して基本周波数 F_f 以上の周波数の信号成分を減衰させる F I R フィルター処理を行って測定データ $u_{lp}(t)$ を生成してもよい。F I R は、Finite Impulse Response の略である。この F I R フィルター処理は、移動平均処理よりも計算量が大いだが、基本周波数 F_f 以上の周波数の信号成分をすべて減衰させることができる。

40

【0040】

次に、計測装置 1 は、測定データ $u_{lp}(t)$ の振幅が、予め定められた係数 C_L と測定データ $u_{lp}(t)$ から算出される振幅 u_a との積である閾値 $C_L u_a$ と一致し、又は、閾値 $C_L u_a$ を超える 2 つの時刻を、鉄道車両 6 の上部構造 7 に対する進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o として算出する。但し、 $0 < C_L < 1$ とし、振幅 u_a は、例えば、測定データ $u_{lp}(t)$ の振幅がシフトしている時刻 t_1 から時刻 t_2 までの区間の平均値とし、式 (6) によって算出される。

【0041】

【数 6】

50

$$u_a = \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{t=t_1}^{t_2} u_{lp}(t) \cdots (6)$$

【0042】

進入時刻 t_i は、鉄道車両 6 の複数の車軸のうちの先頭の車軸が上部構造 7 の進入端を通過した時刻である。また、進出時刻 t_o は、鉄道車両 6 の複数の車軸のうちの最後尾の車軸が上部構造 7 の進出端を通過した時刻である。図 7 に、測定データ $u_{lp}(t)$ と進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o との関係の一例を示す。

10

【0043】

次に、計測装置 1 は、式 (7) により、進出時刻 t_o と進入時刻 t_i との差として、鉄道車両 6 が橋梁 5 の上部構造 7 を通過する通過時間 t_s を算出する。

【0044】

【数 7】

$$t_s = t_o - t_i \cdots (7)$$

【0045】

また、計測装置 1 は、式 (8) により、鉄道車両 6 の車両数 C_T として、通過時間 t_s と基本周波数 F_f との積から 1 を減算した数以下の最大の整数を算出する。

20

【0046】

【数 8】

$$C_T = \lfloor t_s F_f - 1 \rfloor = \text{floor}(t_s F_f - 1) = \{t_s F_f - 1\} \cdots (8)$$

【0047】

計測装置 1 は、進入時刻 t_i 、進出時刻 t_o 、通過時間 t_s 及び車両数 C_T を含む観測情報を不図示の記憶部に記憶する。なお、図 7 の例では、進入時刻 $t_i = 7.155$ 秒、進出時刻 $t_o = 12.845$ 秒、通過時間 $t_s = 5.69$ 秒、車両数 $C_T = 16$ である。

【0048】

30

そして、計測装置 1 は、観測情報と、予め作成された鉄道車両 6 の寸法及び上部構造 7 の寸法を含む環境情報とに基づいて、以降の処理を行う。

【0049】

環境情報は、上部構造 7 の寸法として、例えば、上部構造 7 の長さ L_B 及び観測点 R の位置 L_x を含む。上部構造 7 の長さ L_B は、上部構造 7 の進入端と進出端との間の距離である。また、観測点 R の位置 L_x は、上部構造 7 の進入端から観測点 R までの距離である。また、環境情報は、鉄道車両 6 の寸法として、例えば、鉄道車両 6 の各車両の長さ L_C (C_m)、各車両の車軸数 a_T (C_m) 及び各車両の車軸間の距離 L_a ($a_w(C_m, n)$) を含む。 C_m は車両番号であり、各車両の長さ $L_C(C_m)$ は、先頭から C_m 番目の車両の両端の間の距離である。各車両の車軸数 $a_T(C_m)$ は、先頭から C_m 番目の車両の車軸数である。 n は、各車両の車軸番号であり、 $1 \leq n \leq a_T(C_m)$ である。各車両の車軸間の距離 $L_a(a_w(C_m, n))$ は、 $n = 1$ のときは先頭から C_m 番目の車両の先端と先頭から 1 番目の車軸との間の距離であり、 $n \geq 2$ のときは先頭から $n - 1$ 番目の車軸と n 番目の車軸との間の距離である。図 8 に、鉄道車両 6 の C_m 番目の車両の長さ $L_C(C_m)$ 及び車軸間の距離 $L_a(a_w(C_m, n))$ の一例を示す。鉄道車両 6 の寸法や上部構造 7 の寸法は、公知の手法によって測定することができる。予め、橋梁 5 を通過する鉄道車両 6 の寸法のデータベースを作成し、通過時刻から該当する車両の寸法を参照しても良い。

40

【0050】

なお、橋梁 5 の上部構造 7 を、寸法が同じである任意の数の車両が連結された鉄道車両 6 が走行すると想定される場合、環境情報は、1 両分についての、車両の長さ $L_C(C_m$

50

）、車両の車軸数 $a_T(C_m)$ 及び車軸間の距離 $La(a_w(C_m, n))$ を含んでいればよい。

【0051】

鉄道車両6の総車軸数 Ta_T は、観測情報に含まれる車両数 C_T と環境情報に含まれる各車両の車軸数 $a_T(C_m)$ を用いて、式(9)により算出される。

【0052】

【数9】

$$Ta_T = \sum_{C_m=1}^{C_T} a_T(C_m) \cdots (9)$$

10

【0053】

鉄道車両6の先頭の車軸から C_m 番目の車両の n 番目の車軸までの距離 $D_{wa}(a_w(C_m, n))$ は、環境情報に含まれる各車両の長さ $L_C(C_m)$ 、各車両の車軸数 $a_T(C_m)$ 及び各車両の車軸間の距離 $La(a_w(C_m, n))$ を用いて、式(10)により算出される。なお、式(10)では、 $L_C(C_m) = L_C(1)$ であるものとしている。

【0054】

【数10】

$$D_{wa}(a_w(C_m, n)) = \sum_{y=1}^{C_m} L_C(y) + \sum_{x=1}^n La(a_w(C_m, x)) - \{L_C(1) + La(a_w(1, 1))\} \cdots (10)$$

20

【0055】

計測装置1は、式(10)において $C_m = C_T$ 、 $n = a_T(C_T)$ とした式(11)により、鉄道車両6の先頭の車軸から最後尾の車両の最後尾の車軸までの距離 $D_{wa}(a_w(C_T, a_T(C_T)))$ を算出する。

【0056】

【数11】

$$D_{wa}(a_w(C_T, a_T(C_T))) = \sum_{y=1}^{C_T} L_C(y) + \sum_{x=1}^{a_T(C_T)} La(a_w(C_T, x)) - \{L_C(1) + La(a_w(1, 1))\} \cdots (11)$$

30

【0057】

鉄道車両6の平均速度 v_a は、環境情報に含まれる上部構造7の長さ L_B 、観測情報に含まれる通過時間 t_s 及び算出した距離 $D_{wa}(a_w(C_T, a_T(C_T)))$ を用いて、式(12)により、鉄道車両6の平均速度 v_a を算出する。

【0058】

【数12】

$$v_a = \frac{L_B}{t_s} + \frac{D_{wa}(a_w(C_T, a_T(C_T)))}{t_s} \cdots (12)$$

40

【0059】

計測装置1は、式(12)に式(11)を代入した式(13)により、鉄道車両6の平均速度 v_a を算出する。

【0060】

【数13】

50

$$v_a = \frac{L_B}{t_s} + \frac{1}{t_s} \left[\sum_{y=1}^{C_T} L_C(y) + \sum_{x=1}^{a_T(C_T)} La(a_w(C_T, x)) - \{L_C(1) + La(a_w(1, 1))\} \right] \cdots (13)$$

【 0 0 6 1 】

次に、計測装置 1 は、以下のようにして、鉄道車両 6 の走行により生じる上部構造 7 のたわみ量を算出する。

【 0 0 6 2 】

本実施形態では、橋梁 5 の上部構造 7 において、床板 F と主桁 G などによって構成される橋床 7 a が 1 つ或いは複数の連続配置される構成として考え、計測装置 1 は、1 つの橋床 7 a の変位を長手方向の中央部における変位として算出する。上部構造 7 に印加される荷重は上部構造 7 の一端から他端へ移動する。この時、荷重の上部構造 7 上の位置と荷重量を用いて、上部構造 7 の中間部の変位であるたわみ量を表すことができる。本実施形態では、鉄道車両 6 の車軸が上部構造 7 上を移動するときのたわみ変形を、1 点荷重の梁上の移動によるたわみ量の軌跡として表すために、図 9 に示す構造モデルを考え、当該構造モデルにおいて、中央部におけるたわみ量を算出する。図 9 において、P は荷重である。a は、鉄道車両 6 が進入する側の上部構造 7 の進入端からの荷重位置である。b は、鉄道車両 6 が進出する側の上部構造 7 の進出端からの荷重位置である。L_B は、上部構造 7 の長さ、すなわち、上部構造 7 の両端の間の距離である。図 9 に示す構造モデルは、両端を支点とする両端を支持した単純梁である。

【 0 0 6 3 】

図 9 に示す構造モデルにおいて、上部構造 7 の進入端の位置をゼロとしてたわみ量の観測位置を x としたとき、単純梁の曲げモーメント M は式 (14) で表される。

【 0 0 6 4 】

【数 1 4】

$$M = \frac{b}{L_B} Px - PH_a(x - a) \cdots (14)$$

【 0 0 6 5 】

式 (14) において、関数 H_a は式 (15) のように定義される。

【 0 0 6 6 】

【数 1 5】

$$H_a = \begin{cases} 0 & (\text{if } x \leq a) \\ 1 & (\text{if } x > a) \end{cases} \cdots (15)$$

【 0 0 6 7 】

式 (14) を変形し、式 (16) が得られる。

【 0 0 6 8 】

【数 1 6】

$$-\frac{ML_B}{P} = -bx + H_a L_B(x - a) \cdots (16)$$

【 0 0 6 9 】

一方、曲げモーメント M は式 (17) で表される。式 (17) において、θ は角度であり、I は二次モーメントであり、E はヤング率である。

【 0 0 7 0 】

【数 1 7】

$$-M = EI \frac{d\theta}{dx} \cdots (17)$$

【0071】

式(17)を式(16)に代入し、式(18)が得られる。

【0072】

【数18】

$$\frac{EIL_B}{P} \frac{d\theta}{dx} = -bx + H_a L_B (x - a) \cdots (18)$$

10

【0073】

式(18)を観測位置 x について積分する式(19)を計算し、式(20)が得られる。
式(20)において、 C_1 は積分定数である。

【0074】

【数19】

$$\int \frac{EIL_B}{P} \frac{d\theta}{dx} dx = \int (-bx + H_a L_B (x - a)) dx \cdots (19)$$

【0075】

【数20】

$$\frac{EIL_B}{P} \theta = -\frac{bx^2}{2} + H_a \frac{L_B (x - a)^2}{2} + C_1 \cdots (20)$$

20

【0076】

さらに、式(20)を観測位置 x について積分する式(21)を計算し、式(22)が得られる。
式(22)において、 C_2 は積分定数である。

【0077】

【数21】

$$\int \frac{EIL_B}{P} \theta dx = \int \left\{ -\frac{bx^2}{2} + H_a \frac{L_B (x - a)^2}{2} + C_1 \right\} dx \cdots (21)$$

30

【0078】

【数22】

$$\frac{EIL_B}{P} \theta x = -\frac{bx^3}{6} + H_a \frac{L_B (x - a)^3}{6} + C_1 x + C_2 \cdots (22)$$

40

【0079】

式(22)において、 θx はたわみ量を表し、 θx をたわみ量 w に置き換えて式(10)が得られる。

【0080】

【数23】

$$\frac{EIL_B}{P} w = -\frac{bx^3}{6} + H_a \frac{L_B (x - a)^3}{6} + C_1 x + C_2 \cdots (23)$$

【0081】

50

図 9 より、 $b = L_B - a$ なので、式 (23) は式 (24) のように変形される。

【0082】

【数24】

$$\frac{EI L_B}{P} w = -\frac{(L_B - a)x^3}{6} + H_a \frac{L_B(x - a)^3}{6} + C_1 x + C_2 \cdots (24)$$

【0083】

$x = 0$ でたわみ量 $w = 0$ として、 $x \leq a$ より $H_a = 0$ であるから、式 (24) に $x = w = H_a = 0$ を代入して整理すると、式 (25) が得られる。

【0084】

【数25】

$$C_2 = 0 \cdots (25)$$

【0085】

また、 $x = L_B$ でたわみ量 $w = 0$ として、 $x > a$ より $H_a = 1$ であるから、式 (24) に $x = L_B$ 、 $w = 0$ 、 $H_a = 1$ を代入して整理すると、式 (26) が得られる。

【0086】

【数26】

$$C_1 = \frac{a(L_B - a)(a + 2(L_B - a))}{6} \cdots (26)$$

【0087】

式 (26) に $b = L_B - a$ を代入し、式 (27) が得られる。

【0088】

【数27】

$$C_1 = \frac{ab(a + 2b)}{6} \cdots (27)$$

【0089】

式 (23) に式 (25) の積分定数 C_1 及び式 (26) の積分定数 C_2 を代入し、式 (28) が得られる。

【0090】

【数28】

$$\frac{EI L_B}{P} w = -\frac{bx^3}{6} + H_a \frac{L_B(x - a)^3}{6} + \frac{ab(a + 2b)}{6} x \cdots (28)$$

【0091】

式 (28) を変形し、荷重 P が位置 a に印加された時の観測位置 x におけるたわみ量 w は、式 (29) で表される。

【0092】

【数29】

$$w = \frac{P}{6EI L_B} \{-bx^3 + H_a L_B(x - a)^3 + ab(a + 2b)x\} \cdots (29)$$

【0093】

荷重 P が上部構造 7 の中央にある時の中央の観測位置 x におけるたわみ量 $w_{0.5 L_B}$ は

10

20

30

40

50

、 $x = 0.5 L_B$ 、 $a = b = 0.5 L_B$ 、 $H_a = 0$ として、式(30)で表される。このたわみ量 $w_{0.5 L_B}$ が、たわみ量 w の最大振幅となる。

【0094】

【数30】

$$w_{0.5 L_B} = \frac{P}{48EI} L_B^3 \cdots (30)$$

【0095】

任意の観測位置 x におけるたわみ量 w は、たわみ量 $w_{0.5 L_B}$ で規格化される。荷重 P の位置 a が観測位置 x よりも進入端側にある場合、 $x > a$ より、式(30)に $H_a = 1$ を代入して式(31)が得られる。

10

【0096】

【数31】

$$w = \frac{P}{6EIL_B} \{-bx^3 + L_B(x-a)^3 + ab(a+2b)x\} \cdots (31)$$

【0097】

荷重 P の位置 a を $a = L_B r$ とし、式(31)に $a = L_B r$ 、 $b = L_B(1-r)$ を代入して整理すると、式(32)により、たわみ量 w が規格化されたたわみ量 w_{std} が得られる。 r は、上部構造7の長さ L_B に対する荷重 P の位置 a の比を示す。

20

【0098】

【数32】

$$w_{std} = \frac{8}{L_B} \left\{ xr^3 + \left(\frac{x^3}{L_B^2} + 2x \right) r \right\} - \frac{8}{L_B} \left(L_B r^3 + \frac{3x^2}{L_B} r \right) \cdots (32)$$

【0099】

同様に、荷重 P の位置 a が観測位置 x よりも進出端側にある場合、 $x \leq a$ より、式(30)に $H_a = 0$ を代入して式(33)が得られる。

30

【0100】

【数33】

$$w = \frac{P}{6EIL_B} \{-bx^3 + ab(L_B + b)x\} \cdots (33)$$

【0101】

荷重 P の位置 a を $a = L_B r$ とし、式(33)に $a = L_B r$ 、 $b = L_B(1-r)$ を代入して整理すると、式(34)により、たわみ量 w が規格化されたたわみ量 w_{std} が得られる。

40

【0102】

【数34】

$$w_{std} = \frac{8}{L_B} \left\{ xr^3 + \left(\frac{x^3}{L_B^2} + 2x \right) r \right\} - \frac{8}{L_B} \left(3xr^2 + \frac{x^3}{L_B^2} \right) \cdots (34)$$

【0103】

式(32)、式(34)をまとめて、任意の観測位置 $x = L_x$ におけるたわみ量 $w_{std}(r)$ は、式(35)で表される。式(35)において、関数 $R(r)$ は式(36)で表される。式(35)は、構造物である上部構造7のたわみの近似式であり、上部構造7の

50

構造モデルに基づく式である。具体的には、式（３５）は、上部構造 ７ の進入端と進出端との中央位置におけるたわみの最大振幅で規格化された近似式である。

【 ０ １ ０ ４ 】

【数 ３ ５】

$$w_{std}(r) = \frac{8}{L_B} \left\{ L_x r^3 + \left(\frac{L_x^3}{L_B^2} + 2L_x \right) r - R(r) \right\} \cdots (35)$$

【 ０ １ ０ ５ 】

【数 ３ ６】

$$R(r) = \begin{cases} L_B r^3 + \frac{3L_x^2}{L_B} r & (if L_x > L_B r) \\ 3L_x r^2 + \frac{L_x^3}{L_B^2} & (if L_x \leq L_B r) \end{cases} \cdots (36)$$

10

【 ０ １ ０ ６ 】

本実施形態では、荷重 P は鉄道車両 ６ の任意の車軸の荷重である。鉄道車両 ６ の任意の車軸が上部構造 ７ の進入端から観測点 R の位置 L_x に至るまでに要する時間 t_{xn} は、式（１２）によって算出される平均速度 v_a を用いて、式（３７）により算出される。

20

【 ０ １ ０ ７ 】

【数 ３ ７】

$$t_{xn} = \frac{L_x}{v_a} \cdots (37)$$

【 ０ １ ０ ８ 】

また、鉄道車両 ６ の任意の車軸が長さ L_B の上部構造 ７ を通過するのに要する時間 t_{ln} は、式（３８）により算出される。

【 ０ １ ０ ９ 】

【数 ３ ８】

$$t_{ln} = \frac{L_B}{v_a} \cdots (38)$$

30

【 ０ １ １ ０ 】

鉄道車両 ６ の C_m 番目の車両の n 番目の車軸が上部構造 ７ の進入端に到達する時刻 t_0 (C_m, n) は、観測情報に含まれる進入時刻 t_i 、式（１０）によって算出される距離 $D_{wa}(a_w(C_m, n))$ 及び式（１２）によって算出される平均速度 v_a を用いて、式（３９）により算出される。

40

【 ０ １ １ １ 】

【数 ３ ９】

$$t_0(C_m, n) = t_i + \frac{1}{v_a} D_{wa}(a_w(C_m, n)) \cdots (39)$$

【 ０ １ １ ２ 】

計測装置 １ は、式（３７）、式（３８）及び式（３９）を用いて、式（４０）により、 C_m 番目の車両の n 番目の車軸による式（３５）で表されるたわみ量 $w_{std}(r)$ を時間に置き換えたたわみ量 $w_{std}(a_w(C_m, n), t)$ を算出する。式（４０）において

50

、関数 $R(t)$ は式 (41) で表される。図 10 に、たわみ量 $w_{std}(a_w(C_m, n), t)$ の一例を示す。

【0113】

【数40】

$$w_{std}(a_w(C_m, n), t) = \begin{cases} 0 & \text{if}(t < t_0(C_m, n)) \\ \frac{8}{t_{ln}} \left\{ t_{xn} \left(\frac{t - t_0(C_m, n)}{t_{ln}} \right)^3 + \left(\frac{t_{xn}^3}{t_{ln}^2} + 2t_{xn} \right) \left(\frac{t - t_0(C_m, n)}{t_{ln}} \right) - R(t) \right\} & \text{if}(t_0(C_m, n) \leq t \leq t_0(C_m, n) + t_{ln}) \cdots (40) \\ 0 & \text{if}(t_0(C_m, n) + t_{ln} < t) \end{cases}$$

【0114】

【数41】

$$R(t) = \begin{cases} 0 & \text{if}(t < t_0(C_m, n)) \\ t_{ln} \left(\frac{t - t_0(C_m, n)}{t_{ln}} \right)^3 + \frac{3t_{xn}^2}{t_{ln}} \left(\frac{t - t_0(C_m, n)}{t_{ln}} \right) & \text{if}(t_0(C_m, n) \leq t \leq t_0(C_m, n) + t_{ln} \cap t_{xn} > t - t_0(C_m, n)) \\ 3t_{xn} \left(\frac{t - t_0(C_m, n)}{t_{ln}} \right)^2 + \frac{t_{xn}^3}{t_{ln}^2} & \text{if}(t_0(C_m, n) \leq t \leq t_0(C_m, n) + t_{ln} \cap t_{xn} \leq t - t_0(C_m, n)) \\ 0 & \text{if}(t_0(C_m, n) + t_{ln} < t) \end{cases} \cdots (41)$$

【0115】

また、計測装置 1 は、式 (42) により、 C_m 番目の車両によるたわみ量 $C_{std}(C_m, t)$ を算出する。図 11 に、車軸数 $n = 4$ の C_m 番目の車両によるたわみ量 $C_{std}(C_m, t)$ の一例を示す。

【0116】

【数42】

$$C_{std}(C_m, t) = \sum_{n=1}^{a_T(C_m)} w_{std}(a_w(C_m, n), t) \cdots (42)$$

【0117】

さらに、計測装置 1 は、式 (43) により、鉄道車両 6 によるたわみ量 $T_{std}(t)$ を算出する。図 12 に、車両数 $C_T = 16$ の鉄道車両 6 によるたわみ量 $T_{std}(t)$ の一例を示す。なお、図 12 において、破線は 16 個のたわみ量 $C_{std}(1, t) \sim C_{std}(16, t)$ を示す。

【0118】

【数43】

$$T_{std}(t) = \sum_{C_m=1}^{C_T} C_{std}(C_m, t) \cdots (43)$$

【0119】

次に、計測装置 1 は、たわみ量 $T_{std}(t)$ に含まれる基本周波数 F_M の振動成分及びその高調波を低減させるために、たわみ量 $T_{std}(t)$ をフィルター処理したたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を生成する。フィルター処理は、例えば、ローパスフィルター処理であってもよいし、バンドパスフィルター処理であってもよい。

【0120】

具体的には、まず、計測装置 1 は、たわみ量 $T_{std}(t)$ を高速フーリエ変換処理してパワースペクトラム密度を算出し、パワースペクトラム密度のピークを基本周波数 F_M として算出する。そして、計測装置 1 は、式 (44) により、基本周波数 F_M から基本周期

10

20

30

40

50

T_M を算出し、式(45)のように、基本周期 T_M を ΔT で除してデータの時間分解能に調整した移動平均区間 k_{mM} を算出する。基本周期 T_M は、基本周波数 F_M に対応する周期であり、 $T_M > 2\Delta T$ である。

【0121】

【数44】

$$T_M = \frac{1}{f_M} \cdots (44)$$

【0122】

【数45】

$$k_{mM} = 2 \left\lfloor \frac{T_M}{2\Delta T} \right\rfloor + 1 \cdots (45)$$

【0123】

そして、計測装置1は、フィルター処理として、式(46)により、基本周期 T_M でたわみ量 $T_{std}(t)$ を移動平均処理して、たわみ量 $T_{std}(t)$ に含まれる振動成分を低減させたたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を算出する。この移動平均処理は、必要な計算量が小さいだけでなく、基本周波数 F_M の信号成分及びその高調波成分の減衰量が非常に大きいので振動成分が効果的に低減されたたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ が得られる。図13に、たわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の一例を示す。図13に示すように、たわみ量 $T_{std}(t)$ に含まれる振動成分がほとんど除かれたたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ が得られる。

【0124】

【数46】

$$T_{std_lp}(k) = \frac{1}{k_{mM}} \sum_{n=k-\frac{k_{mM}-1}{2}}^{k+\frac{k_{mM}-1}{2}} T_{std}(n) \cdots (46)$$

【0125】

なお、計測装置1は、フィルター処理として、たわみ量 $T_{std}(t)$ に対して基本周波数 F_M 以上の周波数の信号成分を減衰させるFIRフィルター処理を行ってたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を算出してもよい。このFIRフィルター処理は、移動平均処理よりも計算量が大いだが、基本周波数 F_f 以上の周波数の信号成分をすべて減衰させることができる。

【0126】

図14に、図6に示した測定データ $u_{lp}(t)$ と図13に示したたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ とを重ねて示す。たわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を、上部構造7を通過する鉄道車両6の荷重に比例するたわみ量と考え、たわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の1次関数が測定データ $u_{lp}(t)$ とほぼ等しくなると仮定する。すなわち、計測装置1は、式(47)のように、測定データ $u_{lp}(t)$ をたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の1次関数で近似する。なお、近似する時間区間を進入時刻 t_i と進出時刻 t_o の間、または、たわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の振幅が0でない時間区間とする。

【0127】

【数47】

$$u_{lp}(t) \cong c_1 T_{std_lp}(t) + c_0 \cdots (47)$$

【0128】

そして、計測装置1は、式(47)で表される1次関数の1次係数 c_1 及び0次係数 c_0 を算出する。例えば、計測装置1は、最小二乗法により、式(48)で表される誤差 e (

t)、すなわち、測定データ $u_{lp}(t)$ と式(47)の1次関数との差が最小となる1次係数 c_1 及び0次係数 c_0 を算出する。

【0129】

【数48】

$$e(t) = u_{lp}(t) - c_1 T_{std_lp}(t) + c_0 \dots (48)$$

$$t_i \leq t \leq t_o$$

【0130】

1次係数 c_1 及び0次係数 c_0 は、それぞれ、式(49)及び式(50)によって算出される。近似する時間区間に対応するデータ区間を $k_a \leq k \leq k_b$ とする。

【0131】

【数49】

$$c_1 = \frac{\left\{ n \sum_{k=k_a}^{k_b} u_{lp}(k) T_{std_lp}(k) - \sum_{k=k_a}^{k_b} T_{std_lp}(k) \sum_{k=k_a}^{k_b} u_{lp}(k) \right\}}{\left\{ n \sum_{k=k_a}^{k_b} T_{std_lp}(k)^2 - \sum_{k=k_a}^{k_b} T_{std_lp}(k) \right\}} \dots (49)$$

$$n = \sum_{k=k_a}^{k_b} 1$$

【0132】

【数50】

$$c_0 = \frac{\left\{ \sum_{k=k_a}^{k_b} u_{lp}(k) - c_1 \sum_{k=k_a}^{k_b} T_{std_lp}(k) \right\}}{n} \dots (50)$$

$$n = \sum_{k=k_a}^{k_b} 1$$

【0133】

そして、計測装置1は、式(51)のように、1次係数 c_1 及び0次係数 c_0 を用いてたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を調整したたわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ を算出する。式(51)で示されるように、たわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ は、基本的に式(47)の右辺に相当するが、進入時刻 t_i よりも前の区間と進出時刻 t_o よりも後の区間では0次係数 c_0 を0としている。図15に、たわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ の一例を示す。

【0134】

【数51】

$$T_{Estd_lp}(t) = \begin{cases} t < t_i & c_1 T_{std_lp}(t) \\ t_i \leq t \leq t_o & c_1 T_{std_lp}(t) + c_0 \dots (51) \\ t_o < t & c_1 T_{std_lp}(t) \end{cases}$$

【0135】

また、式(52)のように、式(49)で算出された1次係数 c_1 及び式(50)で算出された0次係数 c_0 を用いたたわみ量 $T_{std}(t)$ の1次関数が測定データ $u(t)$ とほぼ等しくなると仮定する。

【0136】

【数52】

$$u(t) \cong c_1 T_{std}(t) + c_0 \dots (52)$$

$$t_i \leq t \leq t_o$$

10

20

30

40

50

【0137】

1次係数 c_1 及び0次係数 c_0 を用いてたわみ量 $T_{std}(t)$ を調整したたわみ量 $T_{Estd}(t)$ は、式(53)によって算出される。式(53)の右辺は、式(51)の右辺の $T_{std_lp}(t)$ を $T_{std}(t)$ に置き換えたものである。図16に、たわみ量 $T_{Estd}(t)$ の一例を示す。

【0138】

【数53】

$$T_{Estd}(t) = \begin{cases} t < t_i & c_1 T_{std}(t) \\ t_i \leq t \leq t_o & c_1 T_{std}(t) + c_0 \cdots (53) \\ t_o < t & c_1 T_{std}(t) \end{cases}$$

10

【0139】

次に、計測装置1は、 $t = k \Delta T$ として、式(54)により、所定区間におけるたわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ とたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ との振幅比 R_T を算出する。式(54)において、分子は、たわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ の波形及びたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の波形がシフトしている区間の一部の所定区間に含まれるたわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ の $n+1$ 個のサンプルの平均値であり、分母は当該所定区間に含まれるたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の $n+1$ 個のサンプルの平均値である。図17に、たわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ 及びたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ とそれらの平均値を算出する所定区間 T_{avg} との関係の一例を示す。

20

【0140】

【数54】

$$R_T = \left(\frac{1}{n+1} \sum_{k=k_0}^{k_0+n} T_{Estd_lp}(k) \right) / \left(\frac{1}{n+1} \sum_{k=k_0}^{k_0+n} T_{std_lp}(k) \right) \cdots (54)$$

【0141】

次に、計測装置1は、振幅比 R_T とたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ との積 $R_T T_{std_lp}(t)$ を0次係数 c_0 と比較してオフセット $T_{offset_std}(t)$ を算出する。具体的には、計測装置1は、式(55)のように、振幅比 R_T とたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ との積 $R_T T_{std_lp}(t)$ の絶対値が0次係数 c_0 の絶対値よりも大きい積 $R_T T_{std_lp}(t)$ の区間を0次係数 c_0 に置き換えてオフセット $T_{offset_std}(t)$ を算出する。図18に、オフセット $T_{offset_std}(t)$ の一例を示す。図18の例では、たわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の振幅が0又は負であるので、計測装置1は、積 $R_T T_{std_lp}(t)$ の0次係数 c_0 よりも小さい区間を0次係数 c_0 に置き換えてオフセット $T_{offset_std}(t)$ を算出している。

30

【0142】

【数55】

$$T_{offset_std}(t) = \begin{cases} R_T T_{std_lp}(t) \geq c_0 & R_T T_{std_lp}(t) \cdots (55) \\ R_T T_{std_lp}(t) < c_0 & c_0 \end{cases}$$

40

【0143】

次に、計測装置1は、式(56)のように、1次係数 c_1 とたわみ量 $T_{std}(t)$ との積 $c_1 T_{std}(t)$ と、オフセット $T_{offset_std}(t)$ とを加算して、たわみ量 $T_{Eostd}(t)$ を算出する。このたわみ量 $T_{Eostd}(t)$ は、鉄道車両6が上部構造7を通過したときの静的応答に相当する。図19に、たわみ量 $T_{Eostd}(t)$ の一例を示す。また、図20に、測定データ $u(t)$ とたわみ量 $T_{Eostd}(t)$ との関係を示

50

す。

【0144】

【数56】

$$T_{EStd}(t) = c_1 T_{std}(t) + T_{offset_std}(t) \cdots (56)$$

【0145】

そして、計測装置1は、式(57)のように、測定データ $u(t)$ からたわみ量 $T_{EStd}(t)$ を減算して、固有振動 $u_{nv}(t)$ を算出する。この固有振動 $u_{nv}(t)$ は、鉄道車両6が上部構造7を通過したときの動的応答に相当する。図21に、固有振動 $u_{nv}(t)$ の一例を示す。

10

【0146】

【数57】

$$u_{nv}(t) = u(t) - T_{EStd}(t) \cdots (57)$$

【0147】

式(57)により算出された第1の動的応答としての固有振動 $u_{nv}(t)$ は、基本波以外に不要な信号も含む。そのため、計測装置1は、固有振動 $u_{nv}(t)$ の基本波を抽出するために、第1の動的応答である固有振動 $u_{nv}(t)$ から不要な信号を減衰させるフィルタ処理を行って第2の動的応答としての固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ を算出する。不要な信号は、例えば、基本波の周波数 F_N よりも低い周波数の信号成分や高調波成分である。

20

【0148】

固有振動 $u_{nv}(t)$ から不要な信号を減衰させるフィルタ処理は、固有振動 $u_{nv}(t)$ に含まれる基本周波数 F_N の振動成分の高調波成分を減衰させるとともに、基本周波数 F_N における利得を補正するローパスフィルタ処理を含む。さらに、固有振動 $u_{nv}(t)$ から不要な信号を減衰させるフィルタ処理は、基本周波数 F_N よりも低い周波数の信号成分を減衰させるハイパスフィルタ処理を含んでもよい。

【0149】

例えば、計測装置1は、固有振動 $u_{nv}(t)$ に対して、ハイパスフィルタ処理を行った後、さらに、ローパスフィルタ処理を行ってもよい。具体的には、まず、計測装置1は、固有振動 $u_{nv}(t)$ に対して、固有振動 $u_{nv}(t)$ の基本周波数 F_N よりも低い周波数の信号成分を減衰させるハイパスフィルタ処理を行って、固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ を算出する。

30

【0150】

具体的には、まず、計測装置1は、固有振動 $u_{nv}(t)$ を高速フーリエ変換処理してパワースペクトラム密度を算出し、パワースペクトラム密度のピークを基本周波数 F_N として算出する。図22に、図21の固有振動 $u_{nv}(t)$ を高速フーリエ変換処理して得られたパワースペクトラム密度を示す。図22の例では、基本周波数 F_N は約3Hzとして算出される。そして、計測装置1は、式(58)により、基本周波数 F_N から基本周期 T_N を算出し、式(59)のように、基本周期 T_N を ΔT で除してデータの時間分解能に調整した移動平均区間 k_{mN} を算出する。基本周期 T_N は、基本周波数 F_N に対応する周期であり、 $T_N > 2\Delta T$ である。

40

【0151】

【数58】

$$T_N = \frac{1}{F_N} \cdots (58)$$

【0152】

50

【数 5 9】

$$k_{mN} = 2 \left\lfloor \frac{T_N}{2\Delta T} \right\rfloor + 1 \cdots (59)$$

【0 1 5 3】

そして、計測装置 1 は、式 (60) により、固有振動 $u_{nv}(t)$ から、基本周期 T_N で固有振動 $u_{nv}(t)$ を移動平均処理して振動成分を低減させた低域信号成分を減算するハイパスフィルター処理を行って、固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ を算出する。この移動平均処理は、必要な計算量が小さいだけでなく、基本周波数 F_N の信号成分及びその高調波成分の減衰量が非常に大きいので振動成分が効果的に低減された低域信号成分が得られる。そのため、式 (60) により、低域信号成分が効果的に低減された固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ が得られる。図 23 に、式 (60) によるハイパスフィルターの周波数特性を示す。また、図 24 に、固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ の一例を示す。

10

【0 1 5 4】

【数 6 0】

$$u_{nv_hp}(k) = u_{nv}(k) - \frac{1}{k_{mN}} \sum_{n=k-\frac{k_{mN}-1}{2}}^{k+\frac{k_{mN}-1}{2}} u_{nv}(n) \cdots (60)$$

20

【0 1 5 5】

なお、計測装置 1 は、ハイパスフィルター処理として、固有振動 $u_{nv}(t)$ に対して基本周波数 F_N よりも低い周波数の信号成分を減衰させる FIR フィルター処理を行って固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ を算出してもよい。

【0 1 5 6】

さらに、計測装置 1 は、固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ に含まれる基本周波数 F_N の振動成分の高調波成分を減衰させるとともに、基本周波数 F_N における利得を補正するローパスフィルター処理を行って、第 2 の動的応答としての固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ を算出する。例えば、図 22 に示した固有振動 $u_{nv}(t)$ のパワースペクトラム密度では 3 次高調波成分が大きい。そのため、計測装置 1 は、3 次高調波成分を減衰させるために、式 (61) のように、基本周期 T_N の 3 倍の周期を ΔT で除してデータの時間分解能に調整した移動平均区間 k_{mL} を算出する。ただし、 $3T_N > 2\Delta T$ である。

30

【0 1 5 7】

【数 6 1】

$$k_{mL} = 2 \left\lfloor \frac{3T_N}{2\Delta T} \right\rfloor + 1 \cdots (61)$$

【0 1 5 8】

固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ を移動平均区間 k_{mL} で移動平均処理すると、基本周波数 F_N とその 3 倍の周波数 $3F_N$ との周波数間隔が小さいので、図 25 に示すように、基本周波数 F_N の利得 g_N が 1 よりも小さくなる。移動平均フィルターの伝達特性は式 (62) で表されるので、計測装置 1 は、式 (62) より、 $\omega = 2\pi F_N$ の時の利得 g_N を算出することができる。

40

【0 1 5 9】

【数 6 2】

$$H(z) = \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} \quad (N = k_{mf} - 1, z = e^{-i\omega\Delta T}) \cdots (62)$$

【0 1 6 0】

50

したがって、基本周波数 F_N の利得を 1 に補正する補正係数を g_N^{-1} とし、計測装置 1 は、式 (63) により、固有振動 $u_{nv}(t)$ に含まれる 3 次高調波成分を減衰させるとともに、基本周波数 F_N における利得を 1 に補正するローパスフィルター処理を行って、第 2 の動的応答としての固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ を算出する。このようにして算出される固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ は、基本的に、固有振動 $u_{nv}(t)$ に含まれる基本周波数 F_N の振動成分とみなすことができる。図 26 に、固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の一例を示す。

【0161】

【数 63】

$$u_{nv_3lp}(t) = g_f^{-1} f_{lp}(u_{nv_hp}(t)) = g_f^{-1} \frac{1}{k_{mL}} \sum_{n=k-\frac{k_{mL}-1}{2}}^{k+\frac{k_{mL}-1}{2}} u_{nv_hp}(n) \cdots (63)$$

10

【0162】

なお、固有振動 $u_{nv}(t)$ に含まれる 2 次高調波成分が大きい場合は、計測装置 1 は、2 次高調波成分を減衰させる移動平均処理を行う。また、固有振動 $u_{nv}(t)$ に含まれる 2 次高調波成分と 3 次高調波成分がともに大きい場合は、計測装置 1 は、2 次高調波成分を減衰させる移動平均処理と 3 次高調波成分を減衰させる移動平均処理の両方を行えばよい。一般化すると、固有振動 $u_{nv}(t)$ に含まれる n 次高調波成分が大きい場合は、計測装置 1 は、 n 次高調波成分を減衰させる移動平均処理を行えばよい。

20

【0163】

また、計測装置 1 は、ローパスフィルター処理として、固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ に対して基本周波数 F_N よりも高い周波数の信号成分を減衰させる FIR フィルター処理を行って固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ を算出してもよい。

【0164】

なお、計測装置 1 が固有振動 $u_{nv}(t)$ に対してハイパスフィルター処理を行った後にローパスフィルター処理を行う場合について説明したが、計測装置 1 は、固有振動 $u_{nv}(t)$ に対してローパスフィルター処理を行った後にハイパスフィルター処理を行ってもよい。また、固有振動 $u_{nv}(t)$ に含まれる基本周波数 F_N よりも低い周波数の信号成分が小さい場合には、計測装置 1 は、ハイパスフィルター処理を行わなくてもよい。

30

【0165】

次に、計測装置 1 は、固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を算出する。具体的には、固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ はほぼ基本周波数 F_N の振動成分とみなすことができるので、計測装置 1 は、波高率を $\pi/2$ として、式 (64) により、固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の絶対値をローパスフィルター処理して包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を算出する。図 27 に、包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ の一例を示す。

【0166】

【数 64】

$$u_{nv_mag}(t) = \frac{\pi}{2} f_{lp}(|u_{nv_3lp}(t)|) = \frac{\pi}{2} \sum_{s=t-\frac{k}{F_N}}^{t+\frac{k}{F_N}} |u_{nv_3lp}(t)| \cdots (64)$$

40

【0167】

固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の絶対値は、基本周波数 F_N の 2 倍の周波数の信号成分を含むので、ローパスフィルター処理の通過帯域は $2F_N$ よりも低い範囲とすることが望ましい。例えば、ローパスフィルター処理が式 (64) のように移動平均処理である場合、移動平均区間長 t_{MA} を、整数 k を基本周波数 F_N で除した値とし、 $k=4$ 、 $F_N=2.7917\text{ Hz}$ 、 $\Delta T=0.012\text{ 秒}$ とすると、式 (65) のように $t_{MA}=118\Delta T$ に設

50

定すればよい。

【 0 1 6 8 】

【数 6 5】

$$t_{MA} = \frac{k}{F_N} = \frac{4}{2.7917} \cong 1.416 = 118\Delta T \cdots (65)$$

【 0 1 6 9 】

次に、計測装置 1 は、固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ に含まれる振動成分が減衰する区間の少なくとも一部の第 1 区間 T_1 において包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を指数関数で近似する。第 1 区間 T_1 は時刻 t_{e0} から時刻 t_{e1} までの区間であり、第 1 区間 T_1 の開始時刻 t_{e0} は、進出時刻 t_o 以降である。例えば、計測装置 1 は、式 (66) により、鉄道車両 6 の最後尾の車軸の上部構造 7 からの退出時刻 t_{out} を算出し、式 (67) を満たす時刻 t の範囲を第 1 区間 T_1 としてもよい。前出の式 (7)、前出の式 (12) 及び式 (66) の関係から、退出時刻 t_{out} は進出時刻 t_o と等しいので、式 (67) を満たす第 1 区間 T_1 の開始時刻 t_{e0} は、進出時刻 t_o 以降である。

10

【 0 1 7 0 】

【数 6 6】

$$t_{out} = t_i + \frac{L_B}{v_a} + \frac{D_{wa} \left(a_w(C_T), a_T(C_T) \right)}{v_a} \cdots (66)$$

20

【 0 1 7 1 】

【数 6 7】

$$t_{out} < t_{e0} \leq t \leq t_{e1} \cdots (67)$$

【 0 1 7 2 】

第 1 区間 T_1 の開始時刻 t_{e0} 及び終了時刻 t_{e1} は、例えば、式 (68) で示される包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ の対数 $y(t)$ が凡そ直線となる範囲で選択される。図 28 に、包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ の対数 $y(t)$ 及び第 1 区間 T_1 の一例を示す。

30

【 0 1 7 3 】

【数 6 8】

$$y(t) = \ln\{u_{nv_mag}(t)\} \cdots (68)$$

【 0 1 7 4 】

図 28 に示すように、鉄道車両 6 の通過後、上部構造 7 の振動が減衰する第 1 区間 T_1 で対数 $y(t)$ はほぼ直線となる。第 1 区間 T_1 における対数 $y(t)$ は式 (69) で示される 1 次関数 $Q(t)$ で近似される。

【 0 1 7 5 】

【数 6 9】

$$Q(t) = q_1 t + q_0 \cdots (69)$$

40

【 0 1 7 6 】

計測装置 1 は、最小二乗法により、式 (70) で表される誤差 $e(t)$ 、すなわち、対数 $y(t)$ と式 (69) の 1 次関数 $Q(t)$ との差が最小となる 1 次係数 q_1 及び 0 次係数 q_0 を算出する。

【 0 1 7 7 】

【数 7 0】

$$e(t) = y(t) - (q_1 t + q_0) \cdots (70)$$

50

【0178】

1次係数 q_1 及び0次係数 q_0 は、それぞれ、式(71)及び式(72)によって算出される。ここで、近似する時間区間に対応するデータ区間を $t_{e0} \leq t \leq t_{e1}$ とする。

【0179】

【数71】

$$q_1 = \left\{ \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} 1 \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} y(t) t - \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} t \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} y(t) \right\} / \left\{ \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} 1 \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} t^2 - \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} t \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} t \right\} \dots (71)$$

10

【0180】

【数72】

$$q_0 = \left\{ \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} y(t) - q_1 \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} t \right\} / \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} 1 \dots (72)$$

【0181】

第1区間 T_1 において包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を近似する指数関数を減衰振動曲線 $u_{env_b}(t)$ とすると、減衰振動曲線 $u_{env_b}(t)$ は、1次係数 q_1 及び0次係数 q_0 を用いて、式(73)によって算出される。

20

【0182】

【数73】

$$u_{env_b}(t) = e^{q_1 t + q_0} \dots (73)$$

【0183】

一方、運動方程式から減衰振動 $u_b(t)$ は、式(74)で表される。式(74)において、 ζ は減衰率であり、 ω は固有振動数である。

【0184】

【数74】

$$u_b(t) = \frac{1}{\omega \sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega t} \sin(\omega \sqrt{1 - \zeta^2} t) \dots (74)$$

30

【0185】

減衰振動 $u_b(t)$ の包絡線部分と減衰振動曲線 $u_{env_b}(t)$ を対応させると、式(75)が得られる。

【0186】

【数75】

$$\frac{1}{\omega \sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega t} = e^{q_1 t + q_0} \dots (75)$$

40

【0187】

式(75)より、減衰率 ζ は、式(76)によって算出される。

【0188】

【数76】

50

$$\zeta = -\frac{q_1}{\omega} = -\frac{q_1}{2\pi F_f} \cdots (76)$$

【0189】

減衰振動 $u_b(t)$ の包絡線部分の開始時の値を第1区間 T_1 の開始時刻 t_{e0} における減衰振動曲線 $u_{env_b}(t)$ の振幅と対応させると、式(77)及び式(78)が得られる。

【0190】

【数77】

$$\frac{1}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}} = e^{q_1 t_{e0} + q_0} \cdots (77)$$

10

【0191】

【数78】

$$\omega\sqrt{1-\zeta^2} = \sqrt{\omega^2 - q_1^2} \approx \omega_M \cdots (78)$$

【0192】

減衰振動 $u_{env}(t)$ は、式(79)で表される。図29に、減衰振動 $u_{env}(t)$ と第2の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ とを重ねて示す。図29に示すように、減衰振動 $u_{env}(t)$ と固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ とは精度良く近似している。

20

【0193】

【数79】

$$u_{env}(t) = \begin{cases} 0 & t < t_{e0} \\ e^{q_1 t_{e0} + q_0} e^{-\zeta\omega(t-t_{e0})} \sin(\omega_M(t-t_{e0})) & t \geq t_{e0} \end{cases} \cdots (79)$$

【0194】

3. 計測方法の手順

図30は、本実施形態の計測方法の手順の一例を示すフローチャート図である。本実施形態では、計測装置1が図30に示す手順を実行する。

30

【0195】

図30に示すように、まず、観測データ取得工程S10において、計測装置1は、観測装置であるセンサー2から出力される観測データである加速度データ $a(k)$ を取得する。

【0196】

次に、第1測定データ生成工程S20において、計測装置1は、工程S10で取得した観測データである加速度データ $a(k)$ に基づいて、上部構造7を移動する鉄道車両6の複数の車軸の観測点Rへの作用に対する応答である物理量としての加速度に基づく第1の測定データである測定データ $u(t)$ を生成する。第1測定データ生成工程S20の手順の一例については後述する。

40

【0197】

次に、第2測定データ生成工程S30において、計測装置1は、工程S20で生成した測定データ $u(t)$ をフィルター処理して振動成分を低減させた第2の測定データである測定データ $u_{lp}(t)$ を生成する。例えば、計測装置1は、フィルター処理として、測定データ $u(t)$ の基本周波数 F_f 以上の周波数の振動成分を減衰させるローパスフィルター処理を行う。第2測定データ生成工程S30の手順の一例については後述する。

【0198】

次に、観測情報生成工程S40において、計測装置1は、鉄道車両6の上部構造7に対

50

する進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o を含む観測情報を生成する。進入時刻 t_i は、鉄道車両 6 の複数の車軸のうちの先頭の車軸が上部構造 7 の進入端を通過した時刻であり、進出時刻 t_o は、鉄道車両 6 の複数の車軸のうちの最後尾の車軸が上部構造 7 の進出端を通過した時刻である。本実施形態では、計測装置 1 は、工程 S 3 0 で生成した測定データ $u_{lp}(t)$ に基づいて、進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o を算出する。更に、計測装置 1 は、車両数 C_T を生成する。観測情報生成工程 S 4 0 の手順の一例については後述する。

【0199】

次に、平均速度算出工程 S 5 0 において、計測装置 1 は、工程 S 4 0 で生成した観測情報と、予め作成された鉄道車両 6 の寸法及び上部構造 7 の寸法を含む環境情報とに基づいて、鉄道車両 6 の平均速度 v_a を算出する。環境情報は、上部構造 7 の長さ L_B 、観測点 R の位置 L_x 、鉄道車両 6 の各車両の長さ L_C (C_m)、各車両の車軸数 a_T (C_m) 及び鉄道車両 6 の複数の車軸の各々の位置に相当する各車軸間の距離 L_a ($a_w(C_m, n)$) を含む。平均速度算出工程 S 5 0 の手順の一例については後述する。

【0200】

次に、第 1 たわみ量算出工程 S 6 0 において、計測装置 1 は、前出の式 (35) である上部構造 7 のたわみの近似式と、工程 S 4 0 で生成した観測情報と、環境情報と、工程 S 5 0 で算出した鉄道車両 6 の平均速度 v_a とに基づいて、鉄道車両 6 による上部構造 7 の第 1 のたわみ量であるたわみ量 $T_{std}(t)$ を算出する。具体的には、計測装置 1 は、上部構造 7 のたわみの近似式と、観測情報と、環境情報と、平均速度 v_a とに基づいて、複数の車軸のそれぞれによる上部構造 7 のたわみ量 $w_{std}(a_w(C_m, n), t)$ を算出し、複数の車軸のそれぞれによる上部構造 7 のたわみ量 $w_{std}(a_w(C_m, n), t)$ を加算してたわみ量 $T_{std}(t)$ を算出する。第 1 たわみ量算出工程 S 6 0 の手順の一例については後述する。

【0201】

次に、第 2 たわみ量算出工程 S 7 0 において、計測装置 1 は、工程 S 6 0 で算出したたわみ量 $T_{std}(t)$ をフィルター処理して振動成分を低減させた第 2 のたわみ量であるたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を算出する。例えば、計測装置 1 は、フィルター処理として、たわみ量 $T_{std}(t)$ の基本周波数 F_M 以上の周波数の振動成分を減衰させるローパスフィルター処理を行う。第 2 たわみ量算出工程 S 7 0 の手順の一例については後述する。

【0202】

次に、係数算出工程 S 8 0 において、計測装置 1 は、工程 S 3 0 で生成した測定データ $u_{lp}(t)$ を工程 S 7 0 で算出したたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の 1 次関数で近似し、当該 1 次関数の 1 次係数 c_1 及び 0 次係数 c_0 を算出する。具体的には、計測装置 1 は、前出の式 (47) のように、測定データ $u_{lp}(t)$ をたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の 1 次関数で近似し、最小二乗法を用いて前出の式 (49) 及び式 (50) により、1 次係数 c_1 及び 0 次係数 c_0 を算出する。

【0203】

次に、第 3 たわみ量算出工程 S 9 0 において、計測装置 1 は、工程 S 8 0 で算出した 1 次係数 c_1 及び 0 次係数 c_0 と、工程 S 7 0 で算出したたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ とに基づいて、第 3 のたわみ量であるたわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ を算出する。具体的には、計測装置 1 は、前出の式 (51) のように、進入時刻 t_i よりも前の区間及び進出時刻 t_o よりも後の区間では 1 次係数 c_1 とたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ との積 $c_1 T_{std_lp}(t)$ であり、進入時刻 t_i と進出時刻 t_o との間の区間では積 $c_1 T_{std_lp}(t)$ と 0 次係数 c_0 との和であるたわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ を算出する。

【0204】

次に、オフセット算出工程 S 100 において、計測装置 1 は、工程 S 8 0 で算出した 0 次係数 c_0 と、工程 S 7 0 で算出したたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ と、工程 S 9 0 で算出したたわみ量 $T_{Estd_lp}(t)$ とに基づいて、オフセット $T_{offset_std}(t)$ を算出する。オフセット算出工程 S 100 の手順の一例については後述する。

【0205】

10

20

30

40

50

次に、静的応答算出工程 S 1 1 0 において、計測装置 1 は、前出の式 (5 6) のように、工程 S 8 0 で算出した 1 次係数 c_1 と工程 S 6 0 で算出したたわみ量 $T_{std}(t)$ との積 $c_1 T_{std}(t)$ と、工程 S 1 0 0 で算出したオフセット $T_{offset_std}(t)$ とを加算して、静的応答としてのたわみ量 $T_{Estd}(t)$ を算出する。

【0206】

次に、第 1 動的応答算出工程 S 1 2 0 において、計測装置 1 は、前出の式 (5 7) のように、工程 S 2 0 で生成した測定データ $u(t)$ から工程 S 1 1 0 で算出した静的応答としてのたわみ量 $T_{Estd}(t)$ を減算して、第 1 の動的応答としての固有振動 $u_{nv}(t)$ を算出する。

【0207】

次に、第 2 動的応答算出工程 S 1 3 0 において、計測装置 1 は、工程 S 1 2 0 で算出した第 1 の動的応答である固有振動 $u_{nv}(t)$ から不要な信号を減衰させるフィルター処理を行って第 2 の動的応答としての固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ を算出する。このフィルター処理は、固有振動 $u_{nv}(t)$ に含まれる基本周波数 F_N の振動成分の高調波成分を減衰させるとともに、基本周波数 F_N における利得を補正するローパスフィルター処理を含んでもよい。さらに、このフィルター処理は、基本周波数 F_N よりも低い周波数の信号成分を減衰させるハイパスフィルター処理を含んでもよい。第 2 動的応答算出工程 S 1 3 0 の手順の一例については後述する。

【0208】

次に、包絡線振幅算出工程 S 1 4 0 において、計測装置 1 は、工程 S 1 3 0 で算出した第 2 の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を算出する。具体的には、計測装置 1 は、前出の式 (6 4) のように、固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の絶対値をローパスフィルター処理し、かつ、 $\pi/2$ を乗算して、包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を算出する。

【0209】

次に、減衰率算出工程 S 1 5 0 において、計測装置 1 は、工程 S 1 4 0 で算出した包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ に基づいて、第 2 の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ に含まれる振動成分の減衰率 ζ を算出する。減衰率算出工程 S 1 5 0 の手順の一例については後述する。

【0210】

次に、計測データ出力工程 S 1 6 0 において、計測装置 1 は、工程 S 1 5 0 で算出した減衰率 ζ を含む計測データを監視装置 3 に出力する。具体的には、計測装置 1 は、計測データを、通信ネットワーク 4 を介して監視装置 3 に送信する。計測データは、減衰率 ζ に加えて、測定データ $u(t)$ 、 $u_{lp}(t)$ 、たわみ量 $T_{std}(t)$ 、 $T_{std_lp}(t)$ 、 $T_{Estd_lp}(t)$ 、たわみ量 $T_{Estd}(t)$ 、固有振動 $u_{nv}(t)$ 、 $u_{nv_3lp}(t)$ 、包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ 等を含んでもよい。

【0211】

そして、工程 S 1 7 0 において計測を終了するまで、計測装置 1 は、工程 S 1 0 ~ S 1 6 0 の処理を繰り返し行う。

【0212】

図 3 1 は、図 3 0 の第 1 測定データ生成工程 S 2 0 の手順の一例を示すフローチャート図である。

【0213】

図 3 1 に示すように、工程 S 2 0 1 において、計測装置 1 は、前出の式 (1) のように、センサー 2 から出力される加速度データ $a(t)$ を積分して速度データ $v(t)$ を生成する。

【0214】

そして、工程 S 2 0 2 において、計測装置 1 は、前出の式 (2) のように、工程 S 2 0 1 で生成した速度データ $v(t)$ を積分して測定データ $u(t)$ を生成する。

【0215】

10

20

30

40

50

このように、本実施形態では、測定データ $u(t)$ は、構造物である上部構造 7 を移動する移動体である鉄道車両 6 による上部構造 7 の変位のデータであり、鉄道車両 6 が移動する上部構造 7 の面と交差する方向の加速度を 2 回積分したデータである。したがって、測定データ $u(t)$ は、正方向又は負方向に凸の波形、具体的には、矩形波形、台形波形又は正弦半波波形のデータを含む。なお、矩形波形には、正確な矩形波形のみならず矩形波形に近似する波形も含まれる。同様に、台形波形には、正確な台形波形のみならず台形波形に近似する波形も含まれる。同様に、正弦半波波形には、正確な正弦半波波形のみならず正弦半波波形に近似する波形も含まれる。

【0216】

図 32 は、図 30 の第 2 測定データ生成工程 S30 の手順の一例を示すフローチャート図である。

【0217】

図 32 に示すように、工程 S301 において、計測装置 1 は、図 31 の工程 S202 で算出した測定データ $u(t)$ を高速フーリエ変換処理してパワースペクトラム密度を算出し、パワースペクトラム密度のピークを基本周波数 F_f として算出する。

【0218】

そして、工程 S302 において、計測装置 1 は、測定データ $u(t)$ の基本周波数 F_f 以上の周波数の振動成分を減衰させるローパスフィルター処理を行って測定データ $u_{lp}(t)$ を生成する。計測装置 1 は、ローパスフィルター処理として、前出の式 (5) のように、基本周波数 F_f に対応する基本周期 T_f で測定データ $u(t)$ を移動平均処理して測定データ $u_{lp}(t)$ を生成してもよい。あるいは、計測装置 1 は、ローパスフィルター処理として、測定データ $u(t)$ に対して基本周波数 F_f 以上の周波数の信号成分を減衰させる FIR フィルター処理を行って測定データ $u_{lp}(t)$ を生成してもよい。

【0219】

図 33 は、図 30 の観測情報生成工程 S40 の手順の一例を示すフローチャート図である。

【0220】

図 33 に示すように、まず、工程 S401 において、計測装置 1 は、振幅 u_a として、前出の式 (6) により、図 32 の工程 S302 で生成した測定データ $u_{lp}(t)$ の振幅がシフトしている時刻 t_1 から時刻 t_2 までの区間の平均値を算出する。

【0221】

次に、工程 S402 において、計測装置 1 は、進入時刻 t_i として、測定データ $u_{lp}(t)$ の振幅が予め定められた係数 C_L と工程 S401 で算出した振幅 u_a との積である閾値 $C_L u_a$ と一致し、又は、閾値 $C_L u_a$ を超える第 1 の時刻を算出する。

【0222】

また、工程 S403 において、計測装置 1 は、進出時刻 t_o として、測定データ $u_{lp}(t)$ の振幅が閾値 $C_L u_a$ と一致し、又は、閾値 $C_L u_a$ を超える、第 1 の時刻よりも後の第 2 の時刻を算出する。

【0223】

また、工程 S404 において、計測装置 1 は、前出の式 (7) のように、通過時間 t_s として、進出時刻 t_o と進入時刻 t_i との差を算出する。

【0224】

次に、工程 S405 において、計測装置 1 は、前出の式 (8) のように、鉄道車両 6 の車両数 C_T として、工程 S404 で算出した通過時間 t_s と図 32 の工程 S301 で算出した基本周波数 F_f との積 $t_s F_f$ から 1 を減算した数以下の最大の整数を算出する。

【0225】

そして、工程 S406 において、計測装置 1 は、工程 S402 で算出した進入時刻 t_i 、工程 S403 で算出した進出時刻 t_o 、工程 S404 で算出した通過時間 t_s 及び工程 S405 で算出した車両数 C_T を含む観測情報を生成する。

【0226】

10

20

30

40

50

図34は、図30の平均速度算出工程S50の手順の一例を示すフローチャート図である。

【0227】

工程S501において、計測装置1は、環境情報に基づいて、前出の式(11)により、鉄道車両6の先頭の車軸から最後尾の車軸までの距離 $D_{wa}(a_w(C_T, a_T(C_T)))$ を算出する。

【0228】

また、工程S502において、計測装置1は、環境情報に基づいて、上部構造7の進入端から進出端までの距離を算出する。本実施形態では、上部構造7の進入端から進出端までの距離は、環境情報に含まれる上部構造7の長さ L_B である。

【0229】

そして、工程S503において、計測装置1は、図33の工程S406で生成した観測情報に含まれる進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o 、工程S501で算出した鉄道車両6の先頭の車軸から最後尾の車軸までの距離 $D_{wa}(a_w(C_T, a_T(C_T)))$ 、及び、工程S502で算出した上部構造7の進入端から進出端までの距離である上部構造7の長さ L_B に基づいて、前出の式(12)により、鉄道車両6の平均速度 v_a を算出する。

【0230】

図35は、図30の第1たわみ量算出工程S60の手順の一例を示すフローチャート図である。

【0231】

まず、工程S601において、計測装置1は、環境情報に基づいて、前出の式(10)により、鉄道車両6の先頭の車軸から C_m 番目の車両の n 番目の車軸までの距離 $D_{wa}(a_w(C_m, n))$ をそれぞれ算出する。

【0232】

次に、工程S602において、計測装置1は、環境情報に含まれる観測点Rの位置 L_x と、図34の工程S503で算出した平均速度 v_a とを用いて、前出の式(37)により、鉄道車両6の任意の車軸が上部構造7の進入端から観測点Rの位置 L_x に至るまでに要する時間 t_{xn} を算出する。

【0233】

また、工程S603において、計測装置1は、図34の工程S502で算出した上部構造7の進入端から進出端までの距離である上部構造7の長さ L_B と、平均速度 v_a とを用いて、前出の式(38)により、鉄道車両6の任意の車軸が上部構造7を通過するのに要する時間 t_{ln} を算出する。

【0234】

さらに、工程S604において、計測装置1は、図33の工程S406で生成した観測情報に含まれる進入時刻 t_i と、工程S601で算出した距離 $D_{wa}(a_w(C_m, n))$ と、平均速度 v_a とを用いて、前出の式(39)により、鉄道車両6の C_m 番目の車両の n 番目の車軸が上部構造7の進入端に到達する時刻 $t_o(C_m, n)$ をそれぞれ算出する。

【0235】

次に、工程S605において、計測装置1は、前出の式(35)である上部構造7のたわみの近似式と、工程S602で算出した時間 t_{xn} と、工程S603で算出した時間 t_{ln} と、工程S604で算出した時刻 $t_o(C_m, n)$ とを用いて、前出の式(40)により、 C_m 番目の車両の n 番目の車軸による上部構造7のたわみ量 $w_{std}(a_w(C_m, n), t)$ をそれぞれ算出する。

【0236】

次に、工程S606において、計測装置1は、前出の式(42)により、車両毎に工程S605で算出した各車軸による上部構造7のたわみ量 $w_{std}(a_w(C_m, n), t)$ を加算して、各車両による上部構造7のたわみ量 $C_{std}(C_m, t)$ を算出する。

【0237】

そして、工程S607において、計測装置1は、前出の式(43)により、工程S60

10

20

30

40

50

6で算出した各車両による上部構造7のたわみ量 $C_{std}(C_m, t)$ を加算して、鉄道車両6による上部構造7のたわみ量 $T_{std}(t)$ を算出する。

【0238】

図36は、図30の第2たわみ量算出工程S70の手順の一例を示すフローチャート図である。

【0239】

図36に示すように、工程S701において、計測装置1は、図35の工程S607で算出したたわみ量 $T_{std}(t)$ を高速フーリエ変換処理してパワースペクトラム密度を算出し、パワースペクトラム密度のピークを基本周波数 F_M として算出する。

【0240】

そして、工程S702において、計測装置1は、たわみ量 $T_{std}(t)$ の基本周波数 F_M 以上の周波数の振動成分を減衰させるローパスフィルター処理を行ってたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を算出する。計測装置1は、ローパスフィルター処理として、前出の式(46)のように、基本周波数 F_M に対応する基本周期 T_M でたわみ量 $T_{std}(t)$ を移動平均処理してたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を算出してもよい。あるいは、計測装置1は、ローパスフィルター処理として、たわみ量 $T_{std}(t)$ に対して基本周波数 F_M 以上の周波数の信号成分を減衰させるFIRフィルター処理を行ってたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を算出してもよい。

【0241】

図37は、図30のオフセット算出工程S100の手順の一例を示すフローチャート図である。

【0242】

図37に示すように、工程S1001において、計測装置1は、前出の式(54)により、所定区間における図30の工程S90で算出したたわみ量 $T_{Est_lp}(t)$ と図36の工程S702で算出したたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ との振幅比 R_T を算出する。

【0243】

そして、工程S1002において、計測装置1は、前出の式(55)のように、工程S1001で算出した振幅比 R_T とたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ との積 $R_T T_{std_lp}(t)$ の絶対値が図30の工程S80で算出した0次係数 c_0 の絶対値よりも大きい積 $R_T T_{std_lp}(t)$ の区間を0次係数 c_0 に置き換えてオフセット $T_{offset_std}(t)$ を算出する。

【0244】

図38は、図30の第2動的応答算出工程S130の手順の一例を示すフローチャート図である。

【0245】

図38に示すように、工程S1301において、計測装置1は、前出の式(60)により、図30の工程S120で算出した固有振動 $u_{nv}(t)$ から、基本周期 T_N で固有振動 $u_{nv}(t)$ を移動平均処理して振動成分を低減させた低域信号成分を減算するハイパスフィルター処理を行って、固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ を算出する。

【0246】

さらに、工程S1302において、計測装置1は、前出の式(63)により、工程S1301で算出した固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ に含まれる基本周波数 F_N の振動成分の高調波成分を減衰させるとともに、基本周波数 F_N における利得を補正するローパスフィルター処理を行って、第2の動的応答としての固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ を算出する。

【0247】

図39は、図30の減衰率算出工程S150の手順の一例を示すフローチャート図である。

【0248】

図39に示すように、工程S1501において、計測装置1は、図38の工程S1302で算出した第2の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ に含まれる振動成分が減

10

20

30

40

50

衰する区間の少なくとも一部の第1区間 T_1 において、図30の工程S140で算出した包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を指数関数で近似して指数関数の冪の係数 q_1 を算出する。第1区間 T_1 の開始時刻 t_{e0} は、進出時刻 t_0 以降である。例えば、計測装置1は、前出の式(69)のように、第1区間 T_1 において包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ の対数 $y(t)$ を1次関数 $Q(t)$ で近似し、前出の式(71)により、冪の係数 q_1 を算出する。
【0249】

そして、工程S1502において、計測装置1は、前出の式(76)のように、工程S1501で算出した冪の係数 q_1 を第2の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の固有振動数 $\omega = 2\pi F_N$ で除算して減衰率 ζ を算出する。

【0250】

4. 観測装置、計測装置及び監視装置の構成

図40は、観測装置であるセンサー2、計測装置1及び監視装置3の構成例を示す図である。

【0251】

図40に示すように、センサー2は、通信部21と、加速度センサー22と、プロセッサ23と、記憶部24と、を備えている。

【0252】

記憶部24は、プロセッサ23が計算処理や制御処理を行うための各種のプログラムやデータ等を記憶するメモリーである。また、記憶部24は、プロセッサ23が所定のアプリケーション機能を実現するためのプログラムやデータ等を記憶している。

【0253】

加速度センサー22は、3軸の各軸方向に生じる加速度を検出する。

【0254】

プロセッサ23は、記憶部24に記憶された観測プログラム241を実行することにより、加速度センサー22を制御し、加速度センサー22が検出した加速度に基づいて観測データ242を生成し、生成した観測データ242を記憶部24に記憶させる。本実施形態では、観測データ242は、加速度データ $a(k)$ である。

【0255】

通信部21は、プロセッサ23の制御により、記憶部24に記憶されている観測データ242を計測装置1に送信する。

【0256】

図40に示すように、計測装置1は、第1通信部11と、第2通信部12と、記憶部13と、プロセッサ14と、を備えている。

【0257】

第1通信部11は、センサー2から観測データ242を受信し、受信した観測データ242をプロセッサ14に出力する。前述の通り、観測データ242は、加速度データ $a(k)$ である。

【0258】

記憶部13は、プロセッサ14が計算処理や制御処理を行うためのプログラムやデータ等を記憶するメモリーである。また、記憶部13は、プロセッサ14が所定のアプリケーション機能を実現するための各種のプログラムやデータ等を記憶している。また、プロセッサ14が通信ネットワーク4を介して各種のプログラムやデータ等を受信して記憶部13に記憶させてもよい。

【0259】

プロセッサ14は、第1通信部11が受信した観測データ242及び予め記憶部13に記憶されている環境情報132に基づいて計測データ135を生成し、生成した計測データ135を記憶部13に記憶させる。

【0260】

本実施形態では、プロセッサ14は、記憶部13に記憶された計測プログラム131を実行することにより、観測データ取得部141、第1測定データ生成部142、第2測

10

20

30

40

50

定データ生成部 143、観測情報生成部 144、平均速度算出部 145、第 1 たわみ量算出部 146、第 2 たわみ量算出部 147、係数算出部 148、第 3 たわみ量算出部 149、オフセット算出部 150、静的応答算出部 151、第 1 動的応答算出部 152、第 2 動的応答算出部 153、包絡線振幅算出部 154、減衰率算出部 155 及び計測データ出力部 156 として機能する。すなわち、プロセッサ 14 は、観測データ取得部 141、第 1 測定データ生成部 142、第 2 測定データ生成部 143、観測情報生成部 144、平均速度算出部 145、第 1 たわみ量算出部 146、第 2 たわみ量算出部 147、係数算出部 148、第 3 たわみ量算出部 149、オフセット算出部 150、静的応答算出部 151、第 1 動的応答算出部 152、第 2 動的応答算出部 153、包絡線振幅算出部 154、減衰率算出部 155 及び計測データ出力部 156 を含む。

10

【0261】

観測データ取得部 141 は、第 1 通信部 11 が受信した観測データ 242 を取得し、観測データ 133 として記憶部 13 に記憶させる。すなわち、観測データ取得部 141 は、図 30 における観測データ取得工程 S10 の処理を行う。

【0262】

第 1 測定データ生成部 142 は、記憶部 13 に記憶されている観測データ 133 を読み出し、観測データ 133 である加速度データ $a(t)$ に基づいて、上部構造 7 を移動する鉄道車両 6 の複数の車軸の観測点 R への作用に対する応答である物理量としての加速度に基づく第 1 の測定データである測定データ $u(t)$ を生成する。具体的には、第 1 測定データ生成部 142 は、前出の式 (1) のように、観測データ 133 である加速度データ $a(t)$ を積分して速度データ $v(t)$ を生成し、さらに、前出の式 (2) のように、速度データ $v(t)$ を積分して測定データ $u(t)$ を生成する。すなわち、第 1 測定データ生成部 142 は、図 30 における第 1 測定データ生成工程 S20 の処理、具体的には図 31 の工程 S201、S202 の処理を行う。

20

【0263】

第 2 測定データ生成部 143 は、第 1 測定データ生成部 142 が生成した測定データ $u(t)$ をフィルター処理して振動成分を低減させた第 2 の測定データである測定データ $u_{lp}(t)$ を生成する。例えば、第 2 測定データ生成部 143 は、フィルター処理として、測定データ $u(t)$ の基本周波数 F_f 以上の周波数の振動成分を減衰させるローパスフィルター処理を行う。具体的には、第 2 測定データ生成部 143 は、測定データ $u(t)$ を高速フーリエ変換処理してパワースペクトラム密度を算出し、パワースペクトラム密度のピークを基本周波数 F_f として算出し、測定データ $u(t)$ の基本周波数 F_f 以上の周波数の振動成分を減衰させるローパスフィルター処理を行って測定データ $u_{lp}(t)$ を生成する。第 2 測定データ生成部 143 は、ローパスフィルター処理として、前出の式 (5) のように、基本周波数 F_f に対応する基本周期 T_f で測定データ $u(t)$ を移動平均処理して測定データ $u_{lp}(t)$ を生成してもよい。あるいは、第 2 測定データ生成部 143 は、ローパスフィルター処理として、測定データ $u(t)$ に対して基本周波数 F_f 以上の周波数の信号成分を減衰させる FIR フィルター処理を行って測定データ $u_{lp}(t)$ を生成してもよい。すなわち、第 2 測定データ生成部 143 は、図 30 における第 2 測定データ生成工程 S30 の処理、具体的には図 32 の工程 S301、S302 の処理を行う。

30

40

【0264】

観測情報生成部 144 は、第 2 測定データ生成部 143 が生成した測定データ $u_{lp}(t)$ に基づいて、鉄道車両 6 の上部構造 7 に対する進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o を含む観測情報 134 を生成し、記憶部 13 に記憶させる。具体的には、まず、観測情報生成部 144 は、振幅 u_a として、前出の式 (6) により、測定データ $u_{lp}(t)$ の振幅がシフトしている時刻 t_1 から時刻 t_2 までの区間の平均値を算出する。次に、観測情報生成部 144 は、進入時刻 t_i として、測定データ $u_{lp}(t)$ の振幅が予め定められた係数 C_L と振幅 u_a との積である閾値 $C_L u_a$ と一致し、又は、閾値 $C_L u_a$ を超える第 1 の時刻を算出する。また、観測情報生成部 144 は、進出時刻 t_o として、測定データ $u_{lp}(t)$

50

の振幅が閾値 C_{Lu_a} と一致し、又は、閾値 C_{Lu_a} を超える、第1の時刻よりも後の第2の時刻を算出する。また、観測情報生成部144は、前出の式(7)のように、通過時間 t_s として、進出時刻 t_o と進入時刻 t_i との差を算出する。次に、観測情報生成部144は、前出の式(8)のように、鉄道車両6の車両数 C_T として、通過時間 t_s と基本周波数 F_f との積 $t_s F_f$ から1を減算した数以下の最大の整数を算出する。そして観測情報生成部144は、進入時刻 t_i 、進出時刻 t_o 、通過時間 t_s 及び車両数 C_T を含む観測情報134を生成する。すなわち、観測情報生成部144は、図30における観測情報生成工程S40の処理、具体的には図33の工程S401～S406の処理を行う。

【0265】

平均速度算出部145は、記憶部13に記憶されている観測情報134と、予め作成されて記憶部13に記憶されている鉄道車両6の寸法及び上部構造7の寸法を含む環境情報132とに基づいて、鉄道車両6の平均速度 v_a を算出する。具体的には、平均速度算出部145は、環境情報132に基づいて、前出の式(11)により、鉄道車両6の先頭の車軸から最後尾の車軸までの距離 $D_{wa}(a_w(C_T, a_T(C_T)))$ を算出する。また、平均速度算出部145は、環境情報132に基づいて、上部構造7の進入端から進出端までの距離である上部構造7の長さ L_B を算出する。そして、平均速度算出部145は、観測情報134に含まれる進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o 、距離 $D_{wa}(a_w(C_T, a_T(C_T)))$ 及び上部構造7の長さ L_B に基づいて、前出の式(12)により、鉄道車両6の平均速度 v_a を算出する。すなわち、平均速度算出部145は、図30における平均速度算出工程S50の処理、具体的には図34の工程S501, S502, S503の処理を行う。

【0266】

第1たわみ量算出部146は、前出の式(35)である上部構造7のたわみの近似式と、記憶部13に記憶されている観測情報134と、記憶部13に記憶されている環境情報132と、平均速度算出部145が算出した鉄道車両6の平均速度 v_a とに基づいて、鉄道車両6による上部構造7の第1のたわみ量であるたわみ量 $T_{std}(t)$ を算出する。具体的には、まず、第1たわみ量算出部146は、環境情報132に基づいて、前出の式(10)により、鉄道車両6の先頭の車軸から C_m 番目の車両の n 番目の車軸までの距離 $D_{wa}(a_w(C_m, n))$ を算出する。次に、第1たわみ量算出部146は、環境情報132に含まれる観測点Rの位置 L_x と、平均速度 v_a とを用いて、前出の式(37)により、鉄道車両6の任意の車軸が上部構造7の進入端から観測点Rの位置 L_x に至るまでに要する時間 t_{xn} を算出する。また、第1たわみ量算出部146は、上部構造7の進入端から進出端までの距離である上部構造7の長さ L_B と、平均速度 v_a とを用いて、前出の式(38)により、鉄道車両6の任意の車軸が上部構造7を通過するのに要する時間 t_{ln} を算出する。さらに、第1たわみ量算出部146は、観測情報134に含まれる進入時刻 t_i と、距離 $D_{wa}(a_w(C_m, n))$ と、平均速度 v_a とを用いて、前出の式(39)により、鉄道車両6の C_m 番目の車両の n 番目の車軸が上部構造7の進入端に到達する時刻 $t_0(C_m, n)$ を算出する。次に、第1たわみ量算出部146は、前出の式(35)である上部構造7のたわみの近似式と、時間 t_{xn} と、時間 t_{ln} と、時刻 $t_0(C_m, n)$ とを用いて、前出の式(40)により、 C_m 番目の車両の n 番目の車軸による上部構造7のたわみ量 $w_{std}(a_w(C_m, n), t)$ を算出する。次に、第1たわみ量算出部146は、たわみ量 $w_{std}(a_w(C_m, n), t)$ を用いて、前出の式(42)により、 C_m 番目の車両による上部構造7のたわみ量 $C_{std}(C_m, t)$ を算出する。そして、第1たわみ量算出部146は、たわみ量 $C_{std}(C_m, t)$ を用いて、前出の式(43)により、鉄道車両6による上部構造7のたわみ量 $T_{std}(t)$ を算出する。すなわち、第1たわみ量算出部146は、図30における第1たわみ量算出工程S60の処理、具体的には図35の工程S601～S607の処理を行う。

【0267】

第2たわみ量算出部147は、第1たわみ量算出部146が算出したたわみ量 $T_{std}(t)$ をフィルター処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量であるたわみ量 $T_{std_}$

$l_p(t)$ を算出する。例えば、第2たわみ量算出部147は、フィルタ処理として、たわみ量 $T_{std}(t)$ の基本周波数 F_M 以上の周波数の振動成分を減衰させるローパスフィルタ処理を行う。具体的には、第2たわみ量算出部147は、たわみ量 $T_{std}(t)$ を高速フーリエ変換処理して基本周波数 F_M として算出し、たわみ量 $T_{std}(t)$ の基本周波数 F_M 以上の周波数の振動成分を減衰させるローパスフィルタ処理を行ってたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を算出する。第2たわみ量算出部147は、ローパスフィルタ処理として、前出の式(46)のように、基本周波数 F_M に対応する基本周期 T_M でたわみ量 $T_{std}(t)$ を移動平均処理してたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を算出してもよい。あるいは、第2たわみ量算出部147は、ローパスフィルタ処理として、たわみ量 $T_{std}(t)$ に対して基本周波数 F_M 以上の周波数の信号成分を減衰させる FIR フィルタ処理を行ってたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ を算出してもよい。すなわち、第2たわみ量算出部147は、図30における第2たわみ量算出工程S70の処理、具体的には図36の工程S701, S702の処理を行う。

【0268】

係数算出部148は、第2測定データ生成部143が生成した測定データ $u_{lp}(t)$ を第2たわみ量算出部147が算出したたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の1次関数で近似し、当該1次関数の1次係数 c_1 及び0次係数 c_0 を算出する。具体的には、係数算出部148は、前出の式(47)のように、測定データ $u_{lp}(t)$ をたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の1次関数で近似し、最小二乗法を用いて前出の式(49)及び式(50)により、1次係数 c_1 及び0次係数 c_0 を算出する。すなわち、係数算出部148は、図30における係数算出工程S80の処理を行う。

【0269】

第3たわみ量算出部149は、係数算出部148が算出した1次係数 c_1 及び0次係数 c_0 と、第2たわみ量算出部147が算出したたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ とに基づいて、第3のたわみ量であるたわみ量 $T_{estd_lp}(t)$ を算出する。具体的には、第3たわみ量算出部149は、前出の式(51)のように、進入時刻 t_i よりも前の区間及び進出時刻 t_o よりも後の区間では1次係数 c_1 とたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ との積 $c_1 T_{std_lp}(t)$ であり、進入時刻 t_i と進出時刻 t_o との間の区間では積 $c_1 T_{std_lp}(t)$ と0次係数 c_0 との和であるたわみ量 $T_{estd_lp}(t)$ を算出する。すなわち、第3たわみ量算出部149は、図30における第3たわみ量算出工程S90の処理を行う。

【0270】

オフセット算出部150は、係数算出部148が算出した0次係数 c_0 と、第2たわみ量算出部147が算出したたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ と、第3たわみ量算出部149が算出したたわみ量 $T_{estd_lp}(t)$ とに基づいて、オフセット $T_{offset_std}(t)$ を算出する。具体的には、オフセット算出部150は、前出の式(54)により、所定区間におけるたわみ量 $T_{estd_lp}(t)$ とたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ との振幅比 R_T を算出する。そして、オフセット算出部150は、前出の式(55)のように、振幅比 R_T とたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ との積 $R_T T_{std_lp}(t)$ の0次係数 c_0 よりも小さい区間を0次係数 c_0 に置き換えてオフセット $T_{offset_std}(t)$ を算出する。すなわち、オフセット算出部150は、図30におけるオフセット算出工程S100の処理、具体的には図37の工程S1001, S1002の処理を行う。

【0271】

静的応答算出部151は、前出の式(56)のように、係数算出部148が算出した1次係数 c_1 と第1たわみ量算出部146が算出したたわみ量 $T_{std}(t)$ との積 $c_1 T_{std}(t)$ と、オフセット算出部150が算出したオフセット $T_{offset_std}(t)$ とを加算して、静的応答としてのたわみ量 $T_{Eostd}(t)$ を算出する。すなわち、静的応答算出部151は、図30における静的応答算出工程S110の処理を行う。

【0272】

第1動的応答算出部152は、前出の式(56)のように、第1測定データ生成部14

2が生成した測定データ $u(t)$ から静的応答算出部151が算出した静的応答としてのたわみ量 $T_{Eostd}(t)$ を減算して、第1の動的応答としての固有振動 $u_{nv}(t)$ を算出する。すなわち、第1動的応答算出部152は、図30における第1動的応答算出工程S120の処理を行う。

【0273】

第2動的応答算出部153は、第1動的応答算出部152が算出した第1の動的応答である固有振動 $u_{nv}(t)$ から不要な信号を減衰させるフィルタ処理を行って第2の動的応答としての固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ を算出する。このフィルタ処理は、固有振動 $u_{nv}(t)$ に含まれる基本周波数 F_N の振動成分の高調波成分を減衰させるとともに、基本周波数 F_N における利得を補正するローパスフィルタ処理を含んでもよい。さらに、このフィルタ処理は、基本周波数 F_N よりも低い周波数の信号成分を減衰させるハイパスフィルタ処理を含んでもよい。例えば、第2動的応答算出部153は、前出の式(60)により、固有振動 $u_{nv}(t)$ から、基本周期 T_N で固有振動 $u_{nv}(t)$ を移動平均処理して振動成分を低減させた低域信号成分を減算するハイパスフィルタ処理を行って、固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ を算出する。さらに、第2動的応答算出部153は、前出の式(63)により、固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ に含まれる基本周波数 F_N の振動成分の高調波成分を減衰させるとともに、基本周波数 F_N における利得を補正するローパスフィルタ処理を行って、第2の動的応答としての固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ を算出する。すなわち、第2動的応答算出部153は、図30における第2動的応答算出工程S130の処理、具体的には図38の工程S1301, S1302の処理を行う。

【0274】

包絡線振幅算出部154は、第2動的応答算出部153が算出した第2の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を算出する。具体的には、包絡線振幅算出部154は、前出の式(64)のように、固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の絶対値をローパスフィルタ処理し、かつ、 $\pi/2$ を乗算して、包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を算出する。すなわち、包絡線振幅算出部154は、図30における包絡線振幅算出工程S140の処理を行う。

【0275】

減衰率算出部155は、包絡線振幅算出部154が算出した包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ に基づいて、第2動的応答算出部153が算出した第2の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ に含まれる振動成分の減衰率 ζ を算出する。具体的には、減衰率算出部155は、第2の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ に含まれる振動成分が減衰する区間の少なくとも一部の第1区間 T_1 において、包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ を指数関数で近似して指数関数の冪の係数 q_1 を算出する。第1区間 T_1 の開始時刻 t_{e0} は、進出時刻 t_0 以降である。例えば、減衰率算出部155は、前出の式(69)のように、第1区間 T_1 において包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ の対数 $y(t)$ を1次関数 $Q(t)$ で近似し、前出の式(71)により、冪の係数 q_1 を算出する。そして、減衰率算出部155は、前出の式(76)のように、冪の係数 q_1 を固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の固有振動数 $\omega = 2\pi F_N$ で除算して減衰率 ζ を算出する。すなわち、減衰率算出部155は、図30における減衰率算出工程S150の処理、具体的には図39の工程S1501, S1502の処理を行う。

【0276】

減衰率 ζ は、計測データ135の少なくとも一部として記憶部13に記憶される。計測データ135は、減衰率 ζ に加えて、測定データ $u(t)$ 、 $u_{lp}(t)$ 、たわみ量 $T_{std}(t)$ 、 $T_{std_lp}(t)$ 、 $T_{Estd_lp}(t)$ 、 $T_{Eostd}(t)$ 、固有振動 $u_{nv}(t)$ 、 $u_{nv_3lp}(t)$ 、包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ 等を含んでもよい。

【0277】

計測データ出力部156は、記憶部13に記憶されている計測データ135を読み出し、計測データ135を監視装置3に出力する。具体的には、計測データ出力部156の制御により、第2通信部12が、記憶部13に記憶されている計測データ135を、通信ネ

ットワーク 4 を介して、監視装置 3 に送信する。すなわち、計測データ出力部 1 5 6 は、図 3 0 における計測データ出力工程 S 1 6 0 の処理を行う。

【0 2 7 8】

このように、計測プログラム 1 3 1 は、図 3 0 に示したフローチャートの各手順を、コンピュータである計測装置 1 に実行させるプログラムである。

【0 2 7 9】

図 4 0 に示すように、監視装置 3 は、通信部 3 1 と、プロセッサ 3 2 と、表示部 3 3 と、操作部 3 4 と、記憶部 3 5 と、を備えている。

【0 2 8 0】

通信部 3 1 は、計測装置 1 から計測データ 1 3 5 を受信し、受信した計測データ 1 3 5 をプロセッサ 3 2 に出力する。

10

【0 2 8 1】

表示部 3 3 は、プロセッサ 3 2 の制御により、各種の情報を表示させる。表示部 3 3 は、例えば、液晶ディスプレイや有機 E L ディスプレイであってもよい。E L は、Electro Luminescence の略である。

【0 2 8 2】

操作部 3 4 は、ユーザーによる操作に対応する操作データをプロセッサ 3 2 に出力する。操作部 3 4 は、例えば、マウス、キーボード、マイクロフォン等の入力装置であってもよい。

【0 2 8 3】

20

記憶部 3 5 は、プロセッサ 3 2 が計算処理や制御処理を行うための各種のプログラムやデータ等を記憶するメモリーである。また、記憶部 3 5 は、プロセッサ 3 2 が所定のアプリケーション機能を実現するためのプログラムやデータ等を記憶している。

【0 2 8 4】

プロセッサ 3 2 は、通信部 3 1 が受信した計測データ 1 3 5 を取得し、取得した計測データ 1 3 5 に基づいて上部構造 7 の変位の経時的な変化を評価して評価情報を生成し、生成した評価情報を表示部 3 3 に表示させる。

【0 2 8 5】

本実施形態では、プロセッサ 3 2 は、記憶部 3 5 に記憶された監視プログラム 3 5 1 を実行することにより、計測データ取得部 3 2 1 及び監視部 3 2 2 として機能する。すなわち、プロセッサ 3 2 は、計測データ取得部 3 2 1 及び監視部 3 2 2 を含む。

30

【0 2 8 6】

計測データ取得部 3 2 1 は、通信部 3 1 が受信した計測データ 1 3 5 を取得し、取得した計測データ 1 3 5 を記憶部 3 5 に記憶される計測データ列 3 5 2 に追加する。

【0 2 8 7】

監視部 3 2 2 は、記憶部 3 5 に記憶される計測データ列 3 5 2 に基づいて、統計的に上部構造 7 のたわみ量の経時的な変化を評価する。そして、監視部 3 2 2 は、評価結果を示す評価情報を生成し、生成した評価情報を表示部 3 3 に表示させる。ユーザーは、表示部 3 3 に表示される評価情報に基づいて、上部構造 7 の状態を監視することができる。

【0 2 8 8】

40

監視部 3 2 2 は、記憶部 3 5 に記憶される計測データ列 3 5 2 に基づいて、鉄道車両 6 の監視や上部構造 7 の異常判定等の処理を行ってもよい。

【0 2 8 9】

また、プロセッサ 3 2 は、操作部 3 4 から出力される操作データに基づいて、計測装置 1 やセンサー 2 の動作状況を調整するための情報を、通信部 3 1 を介して計測装置 1 に送信する。計測装置 1 は、第 2 通信部 1 2 を介して受信した情報によって動作状況が調整される。また、計測装置 1 は、第 2 通信部 1 2 を介して受信したセンサー 2 の動作状況を調整するための情報を、第 1 通信部 1 1 を介してセンサー 2 に送信する。センサー 2 は、通信部 2 1 を介して受信した情報によって動作状況が調整される。

【0 2 9 0】

50

なお、プロセッサ１４，２３，３２は、例えば各部の機能が個別のハードウェアで実現されてもよいし、或いは各部の機能が一体のハードウェアで実現されてもよい。例えば、プロセッサ１４，２３，３２はハードウェアを含み、そのハードウェアは、デジタル信号を処理する回路及びアナログ信号を処理する回路の少なくとも一方を含むことができる。プロセッサ１４，２３，３２は、ＣＰＵ、ＧＰＵ、或いはＤＳＰ等であってもよい。ＣＰＵはCentral Processing Unitの略であり、ＧＰＵはGraphics Processing Unitの略であり、ＤＳＰはDigital Signal Processorの略である。また、プロセッサ１４，２３，３２は、ＡＳＩＣなどのカスタムＩＣとして構成され、各部の機能を実現してもよいし、ＣＰＵとＡＳＩＣとによって各部の機能を実現してもよい。ＡＳＩＣはApplication Specific Integrated Circuitの略であり、ＩＣはIntegrated Circuitの略である。

10

【０２９１】

また、記憶部１３，２４，３５は、例えば、ＲＯＭやフラッシュＲＯＭ、ＲＡＭ等の各種ＩＣメモリーやハードディスク、メモリーカードなどの記録媒体等により構成される。ＲＯＭはRead Only Memoryの略であり、ＲＡＭはRandom Access Memoryの略であり、ＩＣはIntegrated Circuitの略である。記憶部１３，２４，３５は、コンピュータにより読み取り可能な装置や媒体である不揮発性の情報記憶装置を含み、各種のプログラムやデータ等は当該情報記憶装置に記憶されていてもよい。情報記憶装置は、光ディスクＤＶＤ、ＣＤ等の光ディスク、ハードディスクドライブ、或いはカード型メモリーやＲＯＭ等の各種のメモリー等であってもよい。

【０２９２】

20

なお、図４０ではセンサー２は１つのみ図示されているが、複数のセンサー２がそれぞれ観測データ２４２を生成し、計測装置１に送信してもよい。この場合、計測装置１は、複数のセンサー２から送信された複数の観測データ２４２を受信して複数の計測データ１３５を生成し、監視装置３に送信する。また、監視装置３は、計測装置１から送信された複数の計測データ１３５を受信し、受信した複数の計測データ１３５に基づいて、複数の上部構造７の状態を監視する。

【０２９３】

５．作用効果

以上に説明した本実施形態の計測方法によれば、計測装置１は、測定データ $u(t)$ をフィルタ処理して振動成分を低減させた測定データ $u_{lp}(t)$ を、たわみ量 $T_{std}(t)$ をフィルタ処理して振動成分を低減させたたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の１次関数で近似することにより、測定データ $u(t)$ に含まれる静的応答及び動的応答から静的応答を分離して算出することができる。

30

【０２９４】

また、本実施形態の計測方法によれば、計測装置１は、測定データ $u_{lp}(t)$ を近似する１次関数の１次項である１次係数 c_1 とたわみ量 $T_{std}(t)$ との積 $c_1 T_{std}(t)$ は鉄道車両６の荷重に比例する上部構造７の変位に相当し、オフセット $T_{offset_std}(t)$ は上部構造７のあそびや浮き等の鉄道車両６の荷重に比例しない変位に相当するので、積 $c_1 T_{std}(t)$ とオフセット $T_{offset_std}(t)$ とを加算することにより、静的応答を精度良く算出することができる。

40

【０２９５】

また、本実施形態の計測方法によれば、計測装置１は、測定データ $u(t)$ に含まれる基本周波数 F_f 以上の振動成分が減衰された測定データ $u_{lp}(t)$ をたわみ量 $T_{std_lp}(t)$ の１次関数で近似することにより、当該１次関数の１次係数 c_1 及び０次係数 c_0 の算出精度が向上するので、静的応答を精度良く算出することができる。

【０２９６】

また、本実施形態の計測方法によれば、計測装置１は、前出の式（５５）により、鉄道車両６が上部構造７を通過する区間では上部構造７のあそびや浮き等の鉄道車両６の荷重に比例しない変位が生じ、それ以外の区間では上部構造７の変位が生じないことを反映したオフセット $T_{offset_std}(t)$ を算出するので、静的応答を精度良く算出する

50

ことができる。

【0297】

また、本実施形態の計測方法によれば、計測装置1は、前出の式(8)により、鉄道車両6の上部構造7への進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o に基づいて鉄道車両6の車両数 C_T を算出することができるので、車両数 C_T が未知の鉄道車両6が上部構造7を移動したときの静的応答を精度良く算出することができる。

【0298】

また、本実施形態の計測方法によれば、計測装置1は、振動成分が低減された測定データ $u_{lp}(t)$ に基づいて、鉄道車両6の上部構造7への進入時刻 t_i 及び進出時刻 t_o を精度よく算出することができるので、静的応答を精度良く算出することができる。

10

【0299】

また、本実施形態の計測方法によれば、計測装置1は、前出の式(57)により、測定データ $u(t)$ から精度良く算出された静的応答であるたわみ量 $T_{Eostd}(t)$ を減算して第1の動的応答である固有振動 $u_{nv}(t)$ を算出し、さらに、不要な信号を減衰させるフィルター処理を行うことにより、第2の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ を精度よく算出することができる。

【0300】

特に、計測装置1は、固有振動 $u_{nv}(t)$ に対して、基本周波数 F_N よりも低い周波数の信号成分を減衰させるハイパスフィルター処理を行うことにより、低周波ノイズや環境振動等に起因する信号成分が低減された固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ が得られる。さらに、計測装置1は、固有振動 $u_{nv_hp}(t)$ に対して、基本周波数 F_N の振動成分の高調波成分を減衰させるとともに、基本周波数 F_N における利得を補正するローパスフィルター処理を行うことにより、高調波成分が低減されて基本周波数の信号成分が強調された固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ が得られる。したがって、本実施形態の計測方法によれば、計測装置1は、精度良く算出された第2の動的応答である固有振動 $u_{nv_3lp}(t)$ の包絡線振幅 $u_{nv_mag}(t)$ に基づいて、動的応答の減衰率を精度良く算出することができる。

20

【0301】

また、本実施形態の計測方法によれば、計測装置1は、センサー2から出力される加速度データ $a(t)$ に基づいて測定データ $u(t)$ を生成し、測定データ $u(t)$ と橋梁5の上部構造7の構造を反映した構造モデルに基づくたわみの近似式である式(35)とに基づいて、鉄道車両6による上部構造7のたわみ量 $T_{std}(t)$ を算出する。そして、計測装置1は、測定データ $u(t)$ とたわみ量 $T_{std}(t)$ とを用いた比較的簡単な処理で、鉄道車両6が上部構造7を移動したときの動的応答の減衰率を算出する。したがって、本実施形態の計測方法によれば、計測装置1は、計算量が比較的小さい処理で動的応答の減衰率を算出することができる。

30

【0302】

また、本実施形態の計測方法によれば、実際には鉄道車両6の速度はわずかに変化するもののほとんど変化しないため、計測装置1は、鉄道車両6が一定の平均速度 v_a で走行するものとして、平均速度 v_a に基づいてたわみ量 $T_{std}(t)$ を算出することにより、たわみ量 $T_{std}(t)$ の計算精度を維持しつつ計算量を大幅に低減させることができる。

40

【0303】

また、本実施形態の計測方法によれば、計測装置1は、直接的に鉄道車両6の平均速度 v_a を測定することなく、センサー2から出力される加速度データ $a(t)$ に基づいて、式(13)による簡易な計算によって鉄道車両6の平均速度 v_a を算出することができる。

【0304】

6. 変形例

本発明は本実施形態に限定されず、本発明の要旨の範囲内で種々の変形実施が可能である。

【0305】

50

上記の各実施形態では、観測装置であるセンサー 2 は、加速度データ $a(k)$ を出力する加速度センサーであるが、観測装置は加速度センサーに限られない。例えば、観測装置は、衝撃センサー、感圧センサー、歪計、画像測定装置、ロードセル又は変位計であってもよい。

【0306】

衝撃センサーは、鉄道車両 6 の各車軸の観測点 R への作用に対する応答として衝撃加速度を検出する。感圧センサー、歪計、ロードセルは、鉄道車両 6 の各車軸の観測点 R への作用に対する応答として応力変化を検出する。画像測定装置は、画像処理により、鉄道車両 6 の各車軸の観測点 R への作用に対する応答として変位を検出する。変位計は、例えば、接触式変位計、リング式変位計、レーザー変位計、感圧センサー又は光ファイバーによる変位計測機器等であり、鉄道車両 6 の各車軸の観測点 R への作用に対する応答として変位を検出する。

【0307】

一例として、図 4 1 に、観測装置としてリング式変位計を用いた計測システム 10 の構成例を示す。また、図 4 2 に、観測装置として画像測定装置を用いた計測システム 10 の構成例を示す。図 4 1 及び図 4 2 において、図 1 と同じ構成要素には同じ符号が付されており、その説明を省略する。図 4 1 に示す計測システム 10 では、リング式変位計 40 の上面とその直上にある主桁 G の下面との間にピアノ線 41 が固定されており、リング式変位計 40 が上部構造 7 の撓みによるピアノ線 41 の変位を計測し、計測した変位データを計測装置 1 に送信する。計測装置 1 は、リング式変位計 40 から送信され変位データに基づいて計測データ 135 を生成する。また、図 4 2 に示す計測システム 10 では、カメラ 50 が、主桁 G の側面に設けられたターゲット 51 を撮影した画像を計測装置 1 に送信する。計測装置 1 は、カメラ 50 から送信された画像を処理し、上部構造 7 の撓みによるターゲット 51 の変位を算出して変位データを生成し、生成した変位データに基づいて計測データ 135 を生成する。図 4 2 の例では、計測装置 1 が、画像測定装置として変位データを生成しているが、計測装置 1 とは異なる不図示の画像測定装置が画像処理によって変位データを生成してもよい。

【0308】

また、上記の各実施形態では、橋梁 5 は鉄道橋であり、橋梁 5 を移動する移動体は鉄道車両 6 であるが、橋梁 5 が道路橋であり、橋梁 5 を移動する移動体が自動車、路面電車、トラック、建設車両等の車両であってもよい。図 4 3 に、橋梁 5 が道路橋であり、橋梁 5 を車両 6 a が移動する場合の計測システム 10 の構成例を示す。図 4 3 において、図 1 と同じ構成要素には同じ符号が付されている。図 4 3 に示すように、道路橋である橋梁 5 は、鉄道橋と同様、上部構造 7 と下部構造 8 からなる。図 4 4 は、上部構造 7 を図 4 3 の A-A 線で切断した断面図である。図 4 3 及び図 4 4 に示すように、上部構造 7 は、床板 F、主桁 G、不図示の横桁等からなる橋床 7 a と、支承 7 b と、を含む。また、図 4 3 に示すように、下部構造 8 は、橋脚 8 a と、橋台 8 b と、を含む。上部構造 7 は、隣り合う橋台 8 b と橋脚 8 a、隣り合う 2 つの橋台 8 b、又は、隣り合う 2 つの橋脚 8 a のいずれか 1 つに渡された構造である。上部構造 7 の両端部は、隣り合う橋台 8 b と橋脚 8 a の位置、隣り合う 2 つの橋台 8 b の位置、又は、隣り合う 2 つの橋脚 8 a の位置にある。橋梁 5 は、例えば、鋼橋や桁橋、RC 橋等である。

【0309】

各センサー 2 は上部構造 7 の長手方向の中央部、具体的には、主桁 G の長手方向の中央部に設置されている。ただし、各センサー 2 は、上部構造 7 の変位を算出するための加速度を検出することができればよく、その設置位置は上部構造 7 の中央部に限定されない。なお、各センサー 2 を上部構造 7 の床板 F に設けると、車両 6 a の走行によって破壊するおそれがあり、また橋床 7 a の局所的な変形により測定精度が影響を受けるおそれがあるため、図 4 3 及び図 4 4 の例では、各センサー 2 は上部構造 7 の主桁 G に設けられている。

【0310】

図 4 4 に示すように、上部構造 7 は、移動体である車両 6 a が移動し得る 2 つのレーン

L_1 、 L_2 及び3個の主桁Gを有している。図43及び図44の例では、上部構造7の長手方向の中央部において、両端の2つの主桁のそれぞれにセンサー2が設けられており、一方のセンサー2の鉛直上方向にあるレーン L_1 の表面の位置に観測点 R_1 が設けられ、他方のセンサー2の鉛直上方向にあるレーン L_2 の表面の位置に観測点 R_2 が設けられている。すなわち、2つのセンサー2は、それぞれ観測点 R_1 、 R_2 を観測する観測装置である。観測点 R_1 、 R_2 をそれぞれ観測する2つのセンサー2は、車両6aの走行により観測点 R_1 、 R_2 に生じる加速度を検出可能な位置に設けられていればよいが、観測点 R_1 、 R_2 に近い位置に設けられることが望ましい。なお、センサー2の数及び設置位置やレーンの数は、図43及び図44に示した例には限定されず種々の変形実施が可能である。

【0311】

計測装置1は、各センサー2から出力される加速度データに基づいて、車両6aの走行によるレーン L_1 、 L_2 の撓みの変位を算出し、レーン L_1 、 L_2 の変位の情報を、通信ネットワーク4を介して、監視装置3に送信する。監視装置3は、当該情報を不図示の記憶装置に記憶し、例えば、当該情報に基づいて車両6aの監視や上部構造7の異常判定等の処理を行ってもよい。

【0312】

また、上記の各実施形態では、各センサー2は、それぞれ上部構造7の主桁Gに設けられているが、上部構造7の表面や内部、床板Fの下面、橋脚8a等に設けられていてもよい。また、上記の各実施形態では、構造物として橋梁の上部構造を例に挙げたが、これに限られず、構造物は移動体の移動によって変形するものであればよい。

【0313】

また、上記の各実施形態では、計測装置1は、観測点Rを観測する観測装置から出力される観測データに基づいて進入時刻 t_i を算出しているが、上部構造7の進入端を観測する他の観測装置から出力される観測データに基づいて進入時刻 t_i を算出してもよい。同様に、上記の各実施形態では、計測装置1は、観測点Rを観測する観測装置から出力される観測データに基づいて進出時刻 t_o を算出しているが、上部構造7の進出端を観測する他の観測装置から出力される観測データに基づいて進出時刻 t_o を算出してもよい。

【0314】

上述した実施形態および変形例は一例であって、これらに限定されるわけではない。例えば、各実施形態および各変形例を適宜組み合わせることも可能である。

【0315】

本発明は、実施の形態で説明した構成と実質的に同一の構成、例えば、機能、方法及び結果が同一の構成、あるいは目的及び効果が同一の構成を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成の本質的でない部分を置き換えた構成を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成と同一の作用効果を奏する構成又は同一の目的を達成することができる構成を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成に公知技術を付加した構成を含む。

【0316】

上述した実施形態および変形例から以下の内容が導き出される。

【0317】

計測方法の一態様は、

構造物の観測点を観測する観測装置から出力される観測データに基づいて、前記構造物を移動する移動体の複数の部位の前記観測点への作用に対する応答である物理量に基づく第1の測定データを生成する第1測定データ生成工程と、

前記第1の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第2の測定データを生成する第2測定データ生成工程と、

前記移動体の前記構造物に対する進入時刻及び進出時刻を含む観測情報を生成する観測情報生成工程と、

前記観測情報と、予め作成された前記移動体の寸法及び前記構造物の寸法を含む環境情報とに基づいて、前記移動体の平均速度を算出する平均速度算出工程と、

10

20

30

40

50

前記構造物のたわみの近似式と、前記観測情報と、前記環境情報と、前記平均速度とに基づいて、前記移動体による前記構造物の第1のたわみ量を算出する第1たわみ量算出工程と、

前記第1のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量を算出する第2たわみ量算出工程と、

前記第2の測定データを前記第2のたわみ量の1次関数で近似し、前記1次関数の1次係数及び0次係数を算出する係数算出工程と、

前記1次係数及び前記0次係数と、前記第2のたわみ量とに基づいて、第3のたわみ量を算出する第3たわみ量算出工程と、

前記0次係数と、前記第2のたわみ量と、前記第3のたわみ量とに基づいて、オフセットを算出するオフセット算出工程と、

前記1次係数と前記第1のたわみ量との積と、前記オフセットとを加算して、静的応答を算出する静的応答算出工程と、

前記第1の測定データから前記静的応答を減算して、第1の動的応答を算出する第1動的応答算出工程と、

前記第1の動的応答から不要な信号を減衰させるフィルター処理を行って第2の動的応答を算出する第2動的応答算出工程と、

前記第2の動的応答の包絡線振幅を算出する包絡線振幅算出工程と、

前記包絡線振幅に基づいて、前記第2の動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出する減衰率算出工程と、

を含む。

【0318】

この計測方法によれば、第1の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第2の測定データを、第1のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量の1次関数で近似することにより、第1の測定データに含まれる静的応答及び動的応答から静的応答を分離して算出することができる。

【0319】

また、この計測方法によれば、第1のたわみ量を近似する1次関数の1次項である1次係数と第1のたわみ量との積は移動体の荷重に比例する構造物の変位に相当し、オフセットは構造物のあそびや浮き等の移動体の荷重に比例しない変位に相当するので、1次係数と第1のたわみ量との積とオフセットとを加算することにより、静的応答を精度良く算出することができる。

【0320】

また、この計測方法によれば、第1の測定データから精度良く算出された静的応答を減算し、さらに、不要な信号を減衰させるフィルター処理を行うことにより、第2の動的応答を精度よく算出することができる。したがって、この計測方法によれば、精度良く算出された第2の動的応答の包絡線振幅に基づいて、動的応答の減衰率を精度良く算出することができる。

【0321】

また、この計測方法では、観測データに基づいて生成される第1の測定データと、構造物のたわみの近似式に基づいて生成される第1のたわみ量とを用いた比較的簡単な処理で、移動体が構造物を移動したときの動的応答の減衰率が算出される。したがって、この計測方法によれば、計算量が比較的小さい処理で動的応答の減衰率を算出することができる。

【0322】

また、この計測方法によれば、実際には移動体の速度はわずかに変化するもののほとんど変化しないため、移動体が一定の平均速度で移動するものとして、平均速度に基づいて第1のたわみ量を算出することにより、第1のたわみ量の計算精度を維持しつつ計算量を大幅に低減させることができる。

【0323】

前記計測方法の一態様において、

10

20

30

40

50

前記減衰率算出工程では、

前記第2の動的応答に含まれる前記振動成分が減衰する区間の少なくとも一部の第1区間において前記包絡線振幅を指数関数で近似して前記指数関数の冪の係数を算出し、前記冪の係数を前記第2の動的応答の固有振動数で除算して前記減衰率を算出してもよい。

【0324】

前記計測方法の一態様において、

前記進出時刻は、前記移動体の前記複数の部位のうちの最後尾の部位が前記構造物の進出端を通過した時刻であり、

前記第1区間の開始時刻は、前記進出時刻以降であってもよい。

【0325】

前記計測方法の一態様において、

前記第1の動的応答から不要な信号を減衰させる前記フィルター処理は、前記第1の動的応答に含まれる基本周波数の振動成分の高調波成分を減衰させるとともに、前記基本周波数における利得を補正するローパスフィルター処理を含んでもよい。

【0326】

この計測方法によれば、高調波成分が低減されて基本周波数の信号成分が強調された第2の動的応答の包絡線振幅が得られるので、当該包絡線振幅に基づいて動的応答の減衰率を高い精度で算出することができる。

【0327】

前記計測方法の一態様において、

前記第1の動的応答から不要な信号を減衰させる前記フィルター処理は、前記基本周波数よりも低い周波数の信号成分を減衰させるハイパスフィルター処理を含んでもよい。

【0328】

この計測方法によれば、高調波成分とともに低周波ノイズや環境振動等に起因する信号成分が低減されて基本周波数の信号成分が強調された第2の動的応答の包絡線振幅が得られるので、当該包絡線振幅に基づいて動的応答の減衰率を高い精度で算出することができる。

【0329】

前記計測方法の一態様において、

前記包絡線振幅算出工程では、

前記第2の動的応答の絶対値をローパスフィルター処理し、かつ、 $\pi/2$ を乗算して、前記包絡線振幅を算出してもよい。

【0330】

前記計測方法の一態様において、

前記構造物は、橋梁の上部構造であってもよい。

【0331】

この計測方法によれば、計算量が比較的小さい処理で移動体が橋梁の上部構造を移動したときの動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出することができる。

【0332】

前記計測方法の一態様において、

前記移動体は、車両又は鉄道車両であり、

前記複数の部位のそれぞれは車軸又は車輪であってもよい。

【0333】

この計測方法によれば、計算量が比較的小さい処理で車両又は鉄道車両が構造物を移動したときの動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出することができる。

【0334】

前記計測方法の一態様において、

前記構造物のたわみの近似式は、前記構造物の構造モデルに基づく式であってもよい。

【0335】

この計測方法によれば、移動体が移動する構造物の構造を反映した第1のたわみ量を算

10

20

30

40

50

出し、動的応答に含まれる振動成分の減衰率を精度良く算出することができる。

【0336】

前記計測方法の一態様において、
前記構造モデルは、両端を支持した単純梁であってもよい。

【0337】

この計測方法によれば、移動体が単純梁に近い構造の構造物を移動したときの動的応答に含まれる振動成分の減衰率を精度良く算出することができる。

【0338】

前記計測方法の一態様において、
前記観測装置は、加速度センサー、衝撃センサー、感圧センサー、歪計、画像測定装置、ロードセル又は変位計であってもよい。

10

【0339】

この計測方法によれば、加速度、応力変化又は変位のデータを用いて動的応答に含まれる振動成分の減衰率を精度良く計測することができる。

【0340】

前記計測方法の一態様において、
前記構造物は、BWIM (Bridge Weigh in Motion) が機能する構造であってもよい。

【0341】

計測装置の一態様は、
構造物の観測点を観測する観測装置から出力される観測データに基づいて、前記構造物を移動する移動体の複数の部位の前記観測点への作用に対する応答である物理量に基づく第1の測定データを生成する第1測定データ生成部と、

20

前記第1の測定データをフィルタ処理して振動成分を低減させた第2の測定データを生成する第2測定データ生成部と、

前記移動体の前記構造物に対する進入時刻及び進出時刻を含む観測情報を生成する観測情報生成部と、

前記観測情報と、予め作成された前記移動体の寸法及び前記構造物の寸法を含む環境情報とに基づいて、前記移動体の平均速度を算出する平均速度算出部と、

前記構造物のたわみの近似式と、前記観測情報と、前記環境情報と、前記平均速度とに基づいて、前記移動体による前記構造物の第1のたわみ量を算出する第1たわみ量算出部と、

30

前記第1のたわみ量をフィルタ処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量を算出する第2たわみ量算出部と、

前記第2の測定データを前記第2のたわみ量の1次関数で近似し、前記1次関数の1次係数及び0次係数を算出する係数算出部と、

前記1次係数及び前記0次係数と、前記第2のたわみ量とに基づいて、第3のたわみ量を算出する第3たわみ量算出部と、

前記0次係数と、前記第2のたわみ量と、前記第3のたわみ量とに基づいて、オフセットを算出するオフセット算出部と、

前記1次係数と前記第1のたわみ量との積と、前記オフセットとを加算して、静的応答を算出する静的応答算出部と、

40

前記第1の測定データから前記静的応答を減算して、第1の動的応答を算出する第1動的応答算出部と、

前記第1の動的応答から不要な信号を減衰させるフィルタ処理を行って第2の動的応答を算出する第2動的応答算出部と、

前記第2の動的応答の包絡線振幅を算出する包絡線振幅算出部と、

前記包絡線振幅に基づいて、前記第2の動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出する減衰率算出部と、

を含む。

【0342】

50

この計測装置によれば、第1の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第2の測定データを、第1のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量の1次関数で近似することにより、第1の測定データに含まれる静的応答及び動的応答から静的応答を分離して算出することができる。

【0343】

また、この計測装置によれば、第1のたわみ量を近似する1次関数の1次項である1次係数と第1のたわみ量との積は移動体の荷重に比例する構造物の変位に相当し、オフセットは構造物のあそびや浮き等の移動体の荷重に比例しない変位に相当するので、1次係数と第1のたわみ量との積とオフセットとを加算することにより、静的応答を精度良く算出することができる。

【0344】

また、この計測装置によれば、第1の測定データから精度良く算出された静的応答を減算し、さらに、不要な信号を減衰させるフィルター処理を行うことにより、第2の動的応答を精度よく算出することができる。したがって、この計測装置によれば、精度良く算出された第2の動的応答の包絡線振幅に基づいて、動的応答の減衰率を精度良く算出することができる。

【0345】

また、この計測装置では、観測データに基づいて生成される第1の測定データと、構造物のたわみの近似式に基づいて生成される第1のたわみ量とを用いた比較的簡単な処理で、移動体が構造物を移動したときの動的応答の減衰率が算出される。したがって、この計測装置によれば、計算量が比較的小さい処理で動的応答の減衰率を算出することができる。

【0346】

また、この計測装置によれば、実際には移動体の速度はわずかに変化するもののほとんど変化しないため、移動体が一定の平均速度で移動するものとして、平均速度に基づいて第1のたわみ量を算出することにより、第1のたわみ量の計算精度を維持しつつ計算量を大幅に低減させることができる。

【0347】

計測システムの一態様は、
前記計測装置の一態様と、
前記観測装置と、
を備える。

【0348】

計測プログラムの一態様は、
構造物の観測点を観測する観測装置から出力される観測データに基づいて、前記構造物を移動する移動体の複数の部位の前記観測点への作用に対する応答である物理量に基づく第1の測定データを生成する第1測定データ生成工程と、

前記第1の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第2の測定データを生成する第2測定データ生成工程と、

前記移動体の前記構造物に対する進入時刻及び進出時刻を含む観測情報を生成する観測情報生成工程と、

前記観測情報と、予め作成された前記移動体の寸法及び前記構造物の寸法を含む環境情報とに基づいて、前記移動体の平均速度を算出する平均速度算出工程と、

前記構造物のたわみの近似式と、前記観測情報と、前記環境情報と、前記平均速度とに基づいて、前記移動体による前記構造物の第1のたわみ量を算出する第1たわみ量算出工程と、

前記第1のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量を算出する第2たわみ量算出工程と、

前記第2の測定データを前記第2のたわみ量の1次関数で近似し、前記1次関数の1次係数及び0次係数を算出する係数算出工程と、

前記1次係数及び前記0次係数と、前記第2のたわみ量とに基づいて、第3のたわみ量

10

20

30

40

50

を算出する第3たわみ量算出工程と、

前記0次係数と、前記第2のたわみ量と、前記第3のたわみ量とに基づいて、オフセットを算出するオフセット算出工程と、

前記1次係数と前記第1のたわみ量との積と、前記オフセットとを加算して、静的応答を算出する静的応答算出工程と、

前記第1の測定データから前記静的応答を減算して、第1の動的応答を算出する第1動的応答算出工程と、

前記第1の動的応答から不要な信号を減衰させるフィルター処理を行って第2の動的応答を算出する第2動的応答算出工程と、

前記第2の動的応答の包絡線振幅を算出する包絡線振幅算出工程と、

前記包絡線振幅に基づいて、前記第2の動的応答に含まれる振動成分の減衰率を算出する減衰率算出工程と、をコンピューターに実行させる。

【0349】

この計測プログラムによれば、第1の測定データをフィルター処理して振動成分を低減させた第2の測定データを、第1のたわみ量をフィルター処理して振動成分を低減させた第2のたわみ量の1次関数で近似することにより、第1の測定データに含まれる静的応答及び動的応答から静的応答を分離して算出することができる。

【0350】

また、この計測プログラムによれば、第1のたわみ量を近似する1次関数の1次項である1次係数と第1のたわみ量との積は移動体の荷重に比例する構造物の変位に相当し、オフセットは構造物のあそびや浮き等の移動体の荷重に比例しない変位に相当するので、1次係数と第1のたわみ量との積とオフセットとを加算することにより、静的応答を精度良く算出することができる。

【0351】

また、この計測プログラムによれば、第1の測定データから精度良く算出された静的応答を減算することにより、第1の動的応答を精度よく算出することができる。

【0352】

また、この計測プログラムによれば、第1の測定データから精度良く算出された静的応答を減算し、さらに、不要な信号を減衰させるフィルター処理を行うことにより、第2の動的応答を精度よく算出することができる。したがって、この計測プログラムによれば、精度良く算出された第2の動的応答の包絡線振幅に基づいて、動的応答の減衰率を精度良く算出することができる。

【0353】

また、この計測プログラムでは、観測データに基づいて生成される第1の測定データと、構造物のたわみの近似式に基づいて生成される第1のたわみ量とを用いた比較的簡単な処理で、移動体が構造物を移動したときの動的応答の減衰率が算出される。したがって、この計測プログラムによれば、計算量が比較的小さい処理で動的応答の減衰率を算出することができる。

【0354】

また、この計測プログラムによれば、実際には移動体の速度はわずかに変化するもののほとんど変化しないため、移動体が一定の平均速度で移動するものとして、平均速度に基づいて第1のたわみ量を算出することにより、第1のたわみ量の計算精度を維持しつつ計算量を大幅に低減させることができる。

【符号の説明】

【0355】

1…計測装置、2…センサー、3…監視装置、4…通信ネットワーク、5…橋梁、6…鉄道車両、6a…車両、7…上部構造、7a…橋床、7b…支承、7c…レール、7d…枕木、7e…バラスト、F…床板、G…主桁、8…下部構造、8a…橋脚、8b…橋台、10…計測システム、11…第1通信部、12…第2通信部、13…記憶部、14…プロセッサー、21…通信部、22…加速度センサー、23…プロセッサー、24…記憶部、3

10

20

30

40

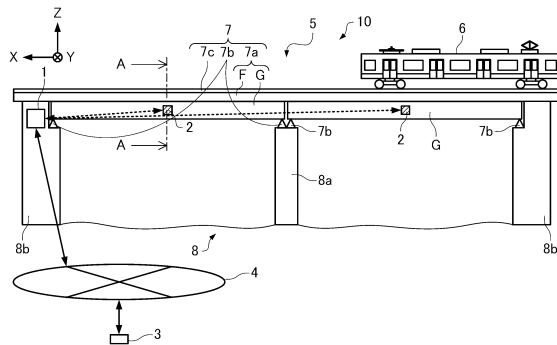
50

1…通信部、32…プロセッサ、33…表示部、34…操作部、35…記憶部、40…リング式変位計、41…ピアノ線、50…カメラ、51…ターゲット、131…計測プログラム、132…環境情報、133…観測データ、134…観測情報、135…計測データ、141…観測データ取得部、142…第1測定データ生成部、143…第2測定データ生成部、144…観測情報生成部、145…平均速度算出部、146…第1たわみ量算出部、147…第2たわみ量算出部、148…係数算出部、149…第3たわみ量算出部、150…オフセット算出部、151…静的応答算出部、152…第1動的応答算出部、153…第2動的応答算出部、154…包絡線振幅算出部、155…減衰率算出部、156…計測データ出力部、241…観測プログラム、242…観測データ、321…計測データ取得部、322…監視部、351…監視プログラム、352…計測データ列

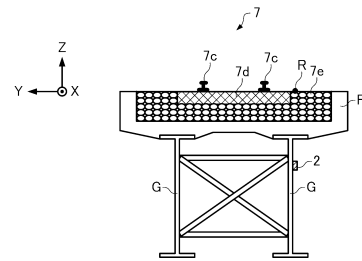
10

【図面】

【図1】

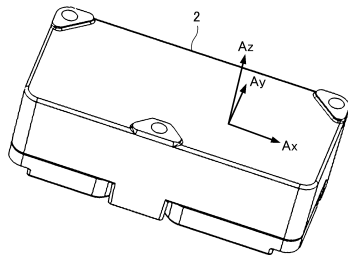


【図2】

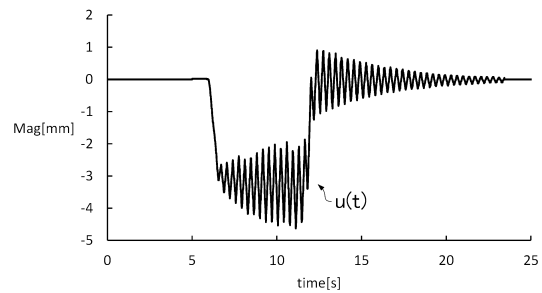


20

【図3】



【図4】

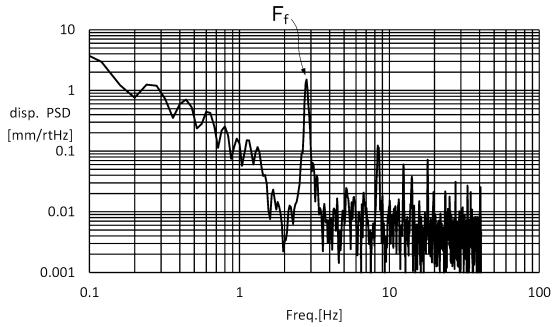


30

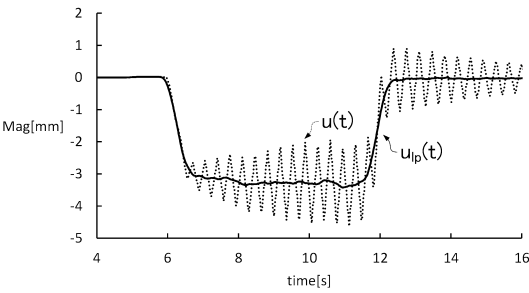
40

50

【図 5】

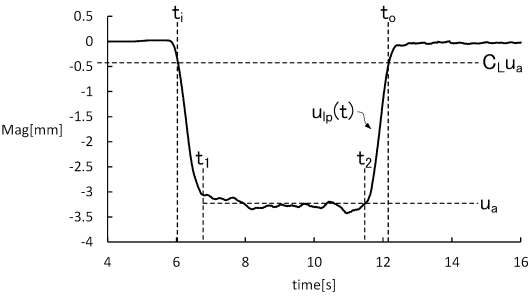


【図 6】

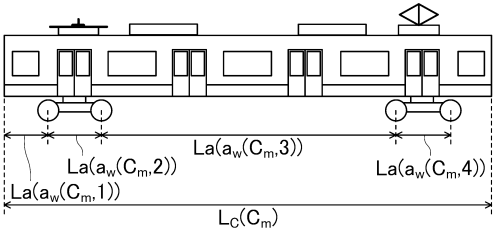


10

【図 7】

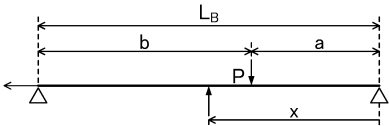


【図 8】

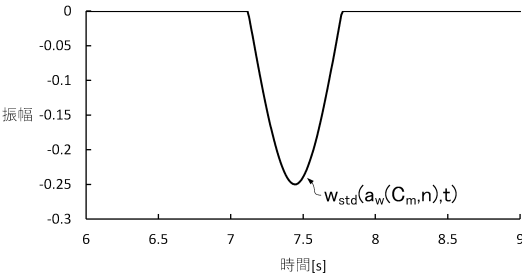


20

【図 9】



【図 10】

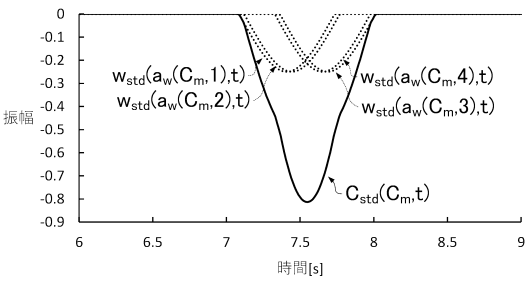


30

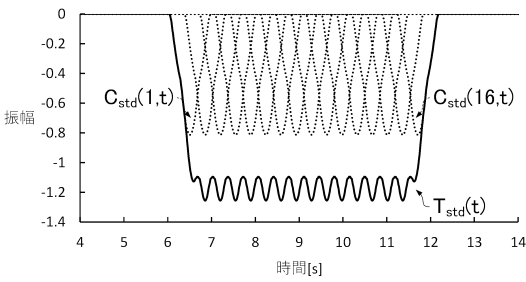
40

50

【図 1 1】

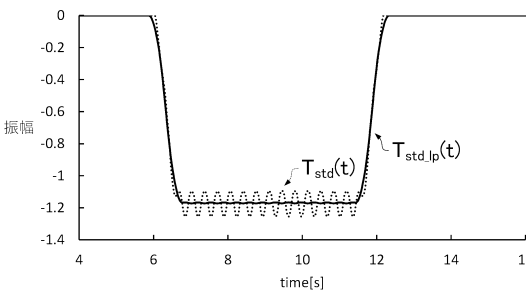


【図 1 2】

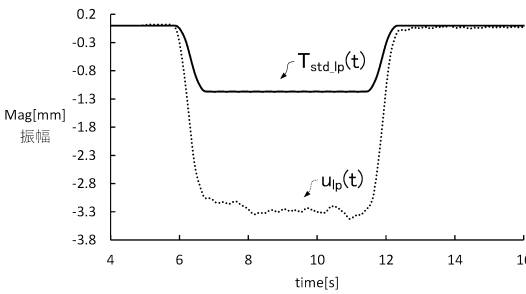


10

【図 1 3】

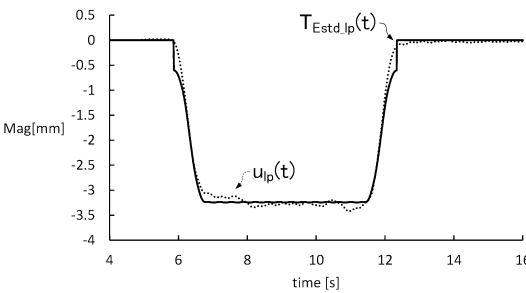


【図 1 4】

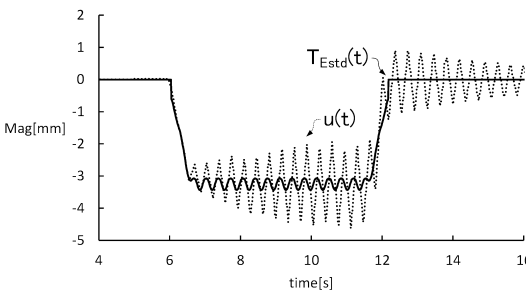


20

【図 1 5】



【図 1 6】

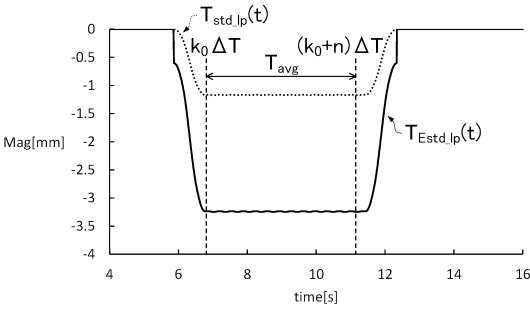


30

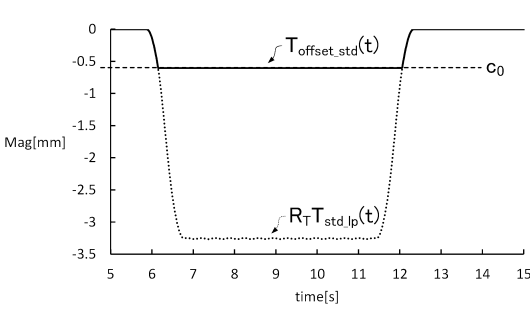
40

50

【図 1 7】

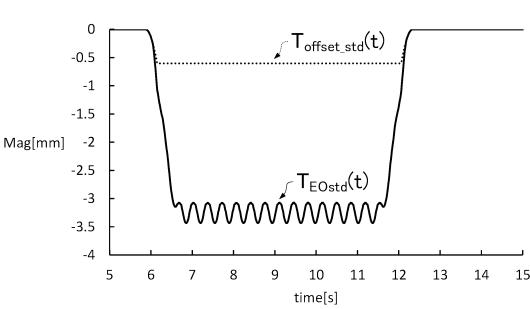


【図 1 8】

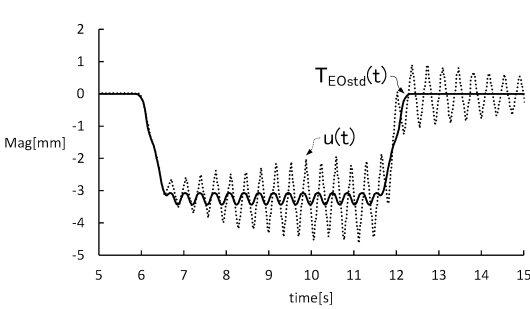


10

【図 1 9】

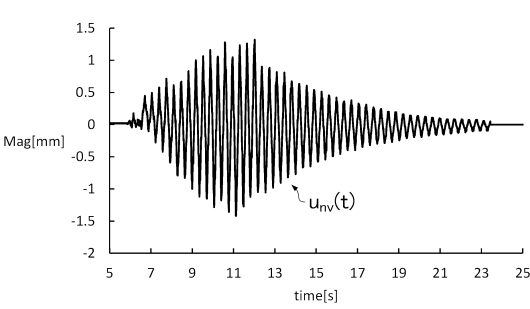


【図 2 0】

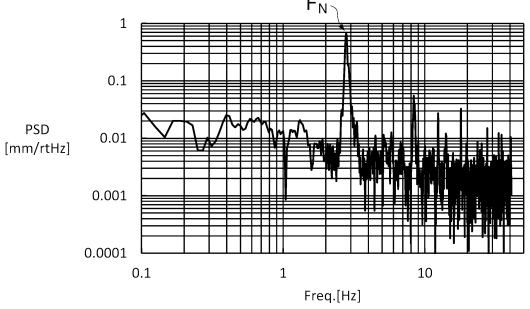


20

【図 2 1】



【図 2 2】

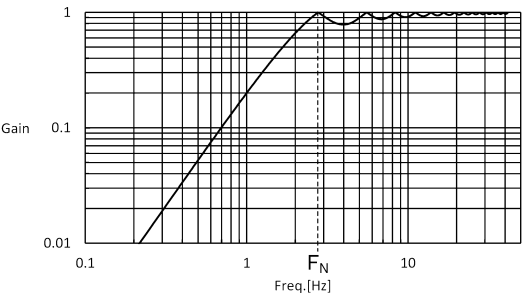


30

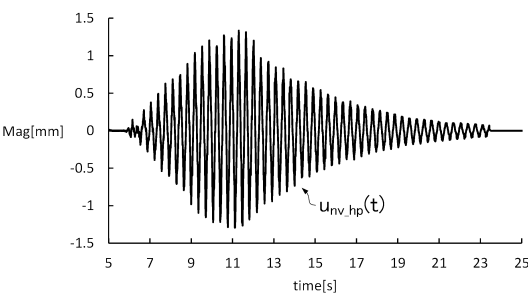
40

50

【図 2 3】

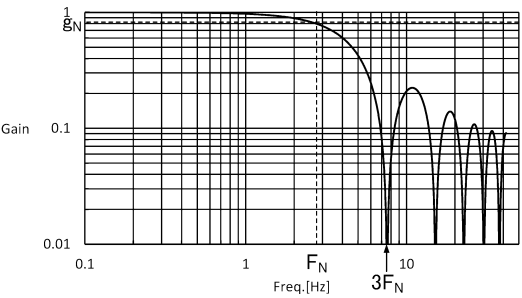


【図 2 4】

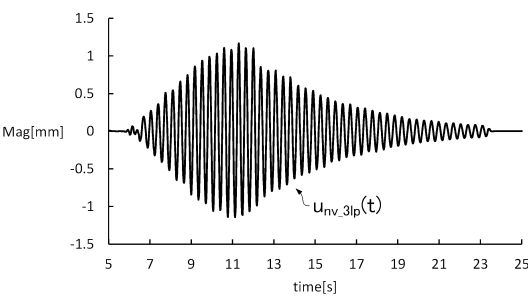


10

【図 2 5】

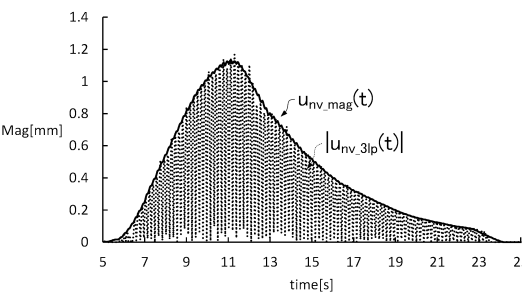


【図 2 6】

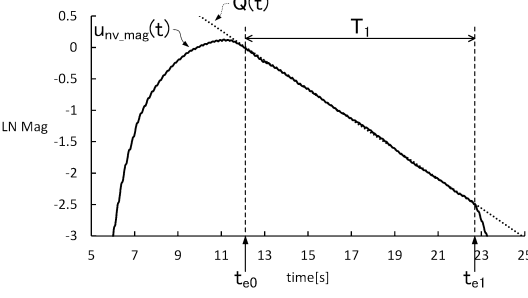


20

【図 2 7】



【図 2 8】

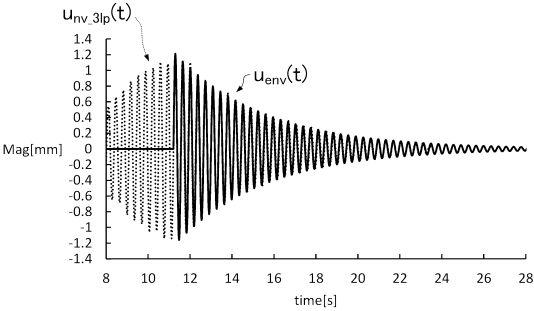


30

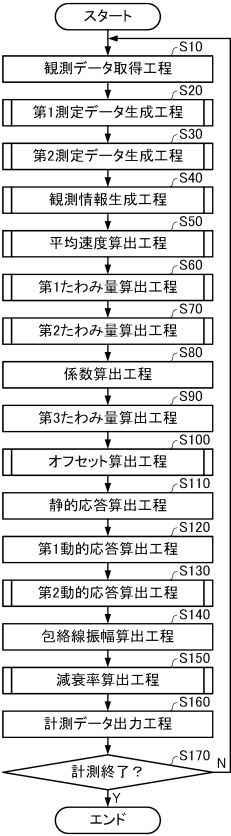
40

50

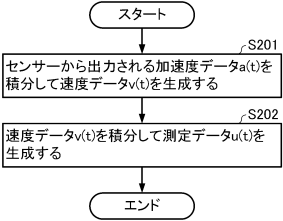
【図 29】



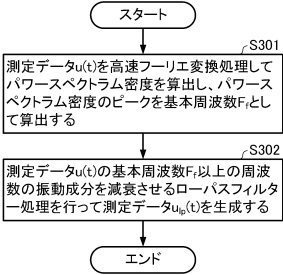
【図 30】



【図 31】



【図 32】



10

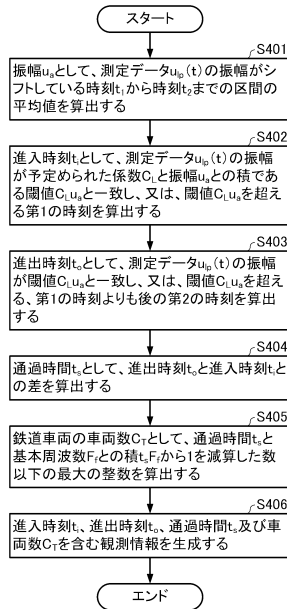
20

30

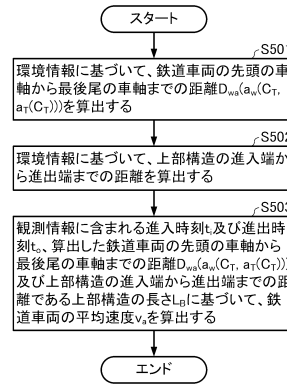
40

50

【図 3 3】

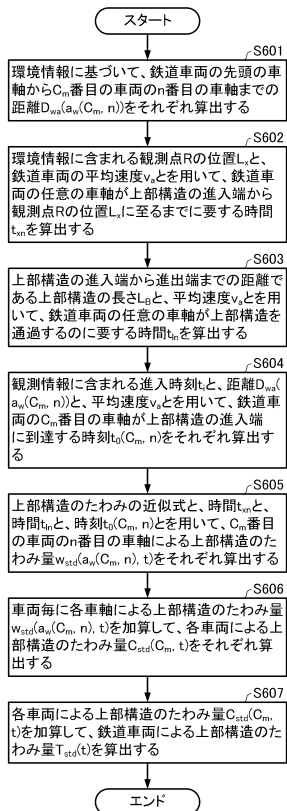


【図 3 4】

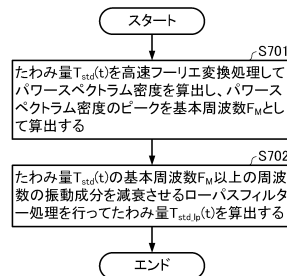


10

【図 3 5】



【図 3 6】



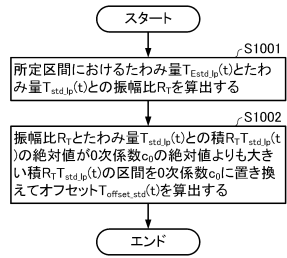
20

30

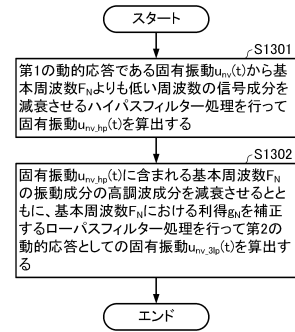
40

50

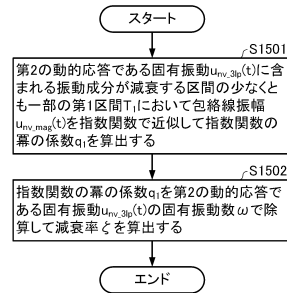
【図 3 7】



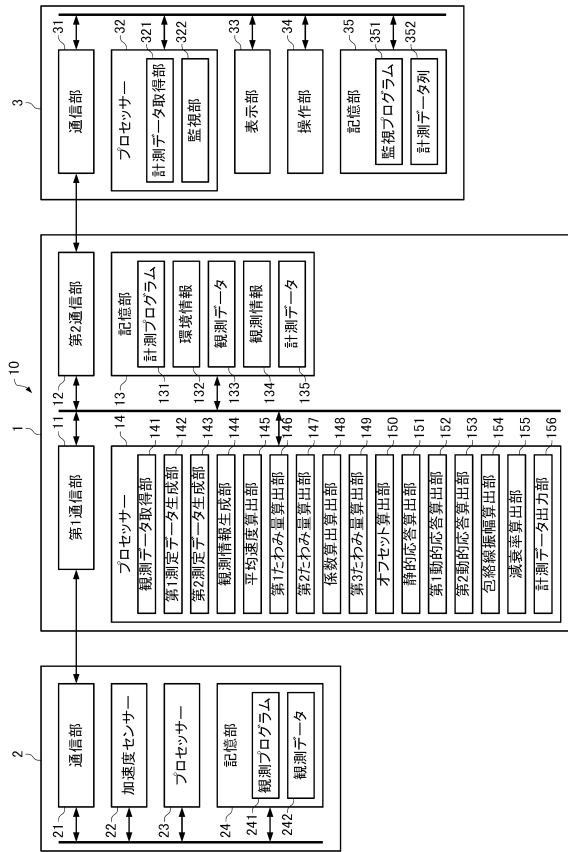
【図 3 8】



【図 3 9】



【図 4 0】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2018-204952 (JP, A)
特開2017-120208 (JP, A)
特開2017-003556 (JP, A)
特開2015-145577 (JP, A)
特開2018-031189 (JP, A)
米国特許出願公開第2015/0316426 (US, A1)
中国特許出願公開第111521247 (CN, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
E01D 1/00-24/00
G01H 1/00-17/00
G01M13/00-13/045
99/00