

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第6736669号
(P6736669)

(45) 発行日 令和2年8月5日 (2020. 8. 5)

(24) 登録日 令和2年7月17日 (2020. 7. 17)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 M 17/007 (2006. 01)	GO 1 M 17/007 Z
B 6 1 F 5/24 (2006. 01)	B 6 1 F 5/24 Z
GO 1 M 17/08 (2006. 01)	GO 1 M 17/08
B 6 1 L 25/04 (2006. 01)	B 6 1 L 25/04

請求項の数 9 (全 31 頁)

(21) 出願番号	特願2018-519818 (P2018-519818)	(73) 特許権者	518127576
(86) (22) 出願日	平成27年10月16日 (2015. 10. 16)		ポリテクニコ ディ バーリ
(65) 公表番号	特表2018-538519 (P2018-538519A)		イタリア国 7 0 1 2 6 バーリ ヴィア
(43) 公表日	平成30年12月27日 (2018. 12. 27)		アメンドラ 1 2 6 / ベー パルティエ
(86) 国際出願番号	PCT/IT2015/000255		タ イヴァ 0 4 3 0 1 5 3 0 7 2 3
(87) 国際公開番号	W02017/064734	(74) 代理人	110000796
(87) 国際公開日	平成29年4月20日 (2017. 4. 20)		特許業務法人三枝国際特許事務所
審査請求日	平成30年10月12日 (2018. 10. 12)	(72) 発明者	デ フィリッピス ジョバンニ
			イタリア国 7 4 0 2 0 ターラント レ
			ポラーノ ヴィア パンセ 4 1 5
		(72) 発明者	マンジアラルディ ルイージ
			イタリア国 7 0 1 2 5 バーリ バーリ
			ヴィア ジュゼッペ カパルディ 5 4

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 道路車両又は鉄道車両のモーダルパラメーターを求める方法及び道路プロファイル又はレールプロファイルの間接的な特徴付けの方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

少なくとも 2 つのホイールが設けられた道路車両又は鉄道車両の極 (λ_n)、モーダルベクトル (ψ_n) 及び実稼働ベクトル

$$(\alpha_n^m, \beta_n^{ml}, \chi_n^{ml})$$

の、前記車両の割り当てられた測定点において取得される移動量及び／又は速度及び／又は加速度 (システムの出力) の解析による推定の方法であり、

前記車両に対して前記道路の表面又はレールの表面によって及ぼされる「入力」と称される負荷は、時間周波数とともに減少する振幅を有し、前記入力は、時間及び／又は空間において互いに相関されることを前提とする前記推定の方法であって、

該方法は、
 N_w 個のトラック幅 W_m 及び N_L 個の軸間距離 L_l によって記述される幾何学的配置を有する車両を準備するステップであって、ここで、 m は $1 \sim N_w$ に及ぶ正の整数であり、 l は $1 \sim N_L$ に及ぶ正の整数であり、 N_w 及び N_L は規定の正の整数であるステップと、
定速 V で前記車両を運転するステップと、

前記車両の割り当てられた測定点において移動及び／又は速度及び／又は加速度 (出力) を測定するステップと、

直前のステップで取得された前記出力のパワースペクトル密度 PSD の行列 ($S_q(\omega)$) を

10

20

$$S_q(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\varphi_n(\omega) \psi_n^T}{i\omega - \lambda_n} + \frac{\psi_n \varphi_n^T(-\omega)}{-i\omega - \lambda_n}$$

のように計算するステップと、
を含み、項

$$\varphi_n(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

は、周波数依存実稼働基準ベクトルであり、

$$\varphi_n(\omega) = S_d(\omega) \left(\sum_{m=0}^{N_W} \Gamma_m(\omega) \left(\alpha_n^m + \sum_{l=1}^{N_L} \beta_n^{ml} e^{+i\omega\tau_l} + \chi_n^{ml} e^{-i\omega\tau_l} \right) \right)$$

10

ただし、 $\Gamma_0(\omega) = 1$

として定義され、前記式は、多項式関数間の比として書き換えられ、

$$S_q(\omega) = \frac{S_d(\omega) \left(\sum_{m=0}^{N_W} \Gamma_m(\omega) \left(B^m(\omega) + \sum_{l=1}^{N_L} (C^{ml}(\omega) e^{+i\omega\tau_l} + D^{ml}(\omega) e^{-i\omega\tau_l}) \right) \right)}{A(\omega)}$$

ただし、 $\Gamma_0(\omega) = 1$ であり、

ここで、 $B^m(\omega)$ 、 $C^{ml}(\omega)$ 及び

20

$$D^{ml}(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$$

は、その一般要素

$$B_{ij}^m(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r b_{ijr}^m, \quad C_{ij}^{ml}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r c_{ijr}^{ml} \quad \text{及び} \quad D_{ij}^{ml}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r d_{ijr}^{ml}$$

が、それぞれ

$$\text{係数 } b_{ijr}^m, c_{ijr}^{ml} \text{ 及び } d_{ijr}^{ml}$$

を有する多項式である行列であり、

30

ここで、前記多項式

$$B_{ij}^m(\omega), C_{ij}^{ml}(\omega) \text{ 及び } D_{ij}^{ml}(\omega)$$

は、「フィッティング多項式」と称され、

$$A(\omega) = \sum_{r=0}^{n_a} (i\omega)^r a_r$$

も、その根がシステム極である、係数 a_r を有するフィッティング多項式であり、

n_b 及び n_a は、それぞれ分子多項式及び分母多項式の係数の数であり、

$\Gamma_m(\omega)$ は、空間横座標 x の関数である 2 つの一般的な平行プロファイル $d_i(x)$ 及び $d_j(x)$ によって定義されるようなトラック幅 W_m についてのコヒーレンス関数であり、 $v = \omega / V$ を代入して、以下の式によって与えられ、

40

$$\Gamma_m(v) = \frac{|S_{d_i d_j}(v)|}{\sqrt{S_{d_i}(v) S_{d_j}(v)}}$$

ここで、

$$S_{d_i}(v) \text{ 及び } S_{d_j}(v)$$

は、それぞれ前記プロファイル $d_i(x)$ 及び $d_j(x)$ に関連付けられた自己 PSD であり、

50

一方、

$$S_{d,d_j}(v)$$

は、前記プロファイル $d_i(x)$ と $d_j(x)$ との間で計算された相互 PSD
であり、

$$S_d(\omega) = S_d(v = \omega / V) / V \text{ であり、}$$

N は自由度の数であり、 $\tau_1 = L_1 / V$ であり、 前記フィッティング多項式 $A(\omega)$

、

$$B_{ij}^m(\omega), C_{ij}^{ml}(\omega) \text{ 及び } D_{ij}^{ml}(\omega)$$

10

は、該フィッティング多項式を前記出力の値にフィッティングし、対応するフィッティン
グされた多項式を得ることによって計算され、

前記極 (λ_n) 、前記モーダルベクトル (ψ_n) 及び前記実稼働ベクトル

$$(\alpha_n^m, \beta_n^{ml}, \chi_n^{ml})$$

は、前記フィッティングされた多項式から計算される、方法。

【請求項 2】

前記出力 PSD 行列 $(S_q(\omega))$ を記述する多項式モデルを定義するステップであっ
て、該多項式モデルは、異なる車軸に配置されたホイールに印加される前記入力の間
に存在する前記時間相関の前記システム出力に対する前記効果を説明するように適合
された複
素指数項を含む、ステップと、

20

前記システム出力からフィッティング手順を実行して、前記多項式モデルの前記係数
を求めるステップと、

前記多項式モデルに関する前記特性多項式に関連付けられた前記コンパニオン行列の固
有値及び固有ベクトルを求めることによって、前記極 (λ_n) 及び前記モーダルベクトル
 (ψ_n) を求めるステップと、

を更に含む、

請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

$$S_q(\omega) = \frac{\bar{B}(\omega) + \sum_{l=1}^{N_L} (\bar{C}^l(\omega) e^{+i\omega\tau_l} + \bar{D}^l(\omega) e^{-i\omega\tau_l})}{A(\omega)}$$

30

であり、

ここで、

$$\bar{B}(\omega), \bar{C}^l(\omega) \text{ 及び } \bar{D}^l(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$$

は、その一般要素

$$\bar{B}_{ij}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} \Omega_r(\omega) \bar{b}_{ijr}, \bar{C}_{ij}^l(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} \Omega_r(\omega) \bar{c}_{ijr}^l \text{ 及び } \bar{D}_{ij}^l(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} \Omega_r(\omega) \bar{d}_{ijr}^l$$

40

が、それぞれ係数

$$\bar{b}_{ijr}, \bar{c}_{ijr}^l \text{ 及び } \bar{d}_{ijr}^l$$

を有する、前記対応する PSD の前記分子多項式である行列であり、

$\Omega_r(\omega)$ は多項式関数である、

請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

適切に選択されたパラメトリックモデルによるプロファイル $(S_d(\omega))$ に関連付けら
れた前記自己 PSD $(S_d(\omega))$ の記述と、

50

前記道路又は前記レールプロファイル($S_d(\omega)$)に関連付けられた前記自己PSD($S_d(\omega)$)の前記パラメトリックモデルの係数の前記推定と、
を更に含む、
請求項1～3のいずれか一項に記載の方法。

【請求項5】

適切に選択されたパラメトリックモデルによるコヒーレンス関数($\Gamma_m(\omega)$)の記述、及び、前記コヒーレンス関数($\Gamma_m(\omega)$)のパラメトリックモデルの係数の前記推定を更に含む、
請求項4に記載の方法。

【請求項6】

前記パワースペクトル密度PSDの行列($S_q(\omega)$)の第*i*成分は、

$$S_{q_i}(\omega) = \frac{c}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{n=1}^{2N} \left(\sum_{m=0}^{N_W} e^{-\frac{\mu_m W_m |\omega|}{v}} \left(T_{in}(\omega) \alpha_{in}^m + \sum_{l=1}^{N_L} (U_{in}^l(\omega) \beta_{in}^{ml} + V_{in}^l(\omega) \chi_{in}^{ml}) \right) \right)$$

によって与えられ、

ここで、 μ_m は、Boggsjoモデル $\mu_0 W_0 = 0$ を用いて前記コヒーレンス関数を定義するパラメータのセットであり、

$$\alpha_{in}^m, \beta_{in}^{ml} \text{ 及び } \chi_{in}^{ml}$$

は、前記実稼働ベクトルの第*i*成分であり、

ただし、 $m=0, \dots, N_W$ 、 $l=1, \dots, N_L$ 、 $n=1, \dots, 2N$ であり、
 c ($m^2 \text{ rad/s}$) 及び ω_0 (rad/s) は、プロファイル $S_d(\omega)$ に関連付けられた前記自己PSDの求められる未知の値であり、

$T_{in}(\omega)$ 、 $U_{in}^l(\omega)$ 、 $V_{in}^l(\omega)$ は、

$$T_{in}(\omega) = \frac{\psi_{in}}{\Omega_1(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in}}{\Omega_1(-\omega) - \lambda_n}, \quad U_{in}^l(\omega) = \frac{\psi_{in} e^{+i\omega\tau_l}}{\Omega_1(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} e^{-i\omega\tau_l}}{\Omega_1(-\omega) - \lambda_n},$$

$$V_{in}^l(\omega) = \frac{\psi_{in} e^{-i\omega\tau_l}}{\Omega_1(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} e^{+i\omega\tau_l}}{\Omega_1(-\omega) - \lambda_n}$$

によって与えられ、

ここで、 $\Omega_1(\omega)$ は、 $r=1$ である前記多項式関数であり、
 ψ_{in} は、モーダルベクトル(ψ_n)の第*i*成分である、
請求項5に記載の方法。

【請求項7】

前記パワースペクトル密度PSDの行列($S_q(\omega)$)の第*i*成分は、

$$S_{q_i}(\omega) = \frac{c}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{n=1}^{2N} \left(T_{in}(\omega) \alpha_{in} + \sum_{l=1}^{N_L} (U_{in}^l(\omega) \beta_{in}^l + V_{in}^l(\omega) \chi_{in}^l) \right)$$

によって与えられ、

$$\alpha_{in}, \beta_{in}^l \text{ 及び } \chi_{in}^l$$

は、前記稼働ベクトルの第*i*成分であり、

ただし、 $l=1, \dots, N_L$ 、 $n=1, \dots, 2N$ である、
請求項6に記載の方法。

【請求項8】

実行されると、請求項1～7のいずれか一項に記載の道路車両又は鉄道車両の極(λ_n)、モーダルベクトル(ψ_n)及び実稼働ベクトル

10

20

30

40

50

$$(\underline{\alpha}_n^m, \underline{\beta}_n^{ml}, \underline{\chi}_n^{ml})$$

の推定の方法を実現する命令を含むプログラマブルデバイスのプログラム。

【請求項 9】

道路車両又は鉄道車両の極 (λ_n)、モーダルベクトル (ψ_n) 及び実稼働ベクトル

$$(\underline{\alpha}_n^m, \underline{\beta}_n^{ml}, \underline{\chi}_n^{ml})$$

の推定のシステムであって、

前記車両に位置決めされ、請求項 1 で定義された前記出力に関するデータを取得して電子支援部に記憶するように構成された一連のセンサーと、

請求項 8 に記載のプログラマブルデバイスのプログラムを含む電子デバイスと、を備える、システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

〔説明〕

本発明は、作動状態にある道路／鉄道車両システムのモーダルパラメーター (modal parameters: モードパラメーター) の推定の方法及び道路／レール表面上のローリングプロファイルの粗度の統計的特性の間接的な特徴付けの方法に関する。

【0002】

前もって正確に言うと、以下に説明する方法は、道路車両システム又は鉄道車両システムのいずれにも適用することができ、したがって、道路表面及びレール表面、道路プロファイル及びレールプロファイル、道路及びレール又は鉄道線路という用語は、本文全体を通して交換可能であることが意図されている。

【0003】

用いられる全ての頭字語の説明については、本明細書の最後にあるリストを参照されたい。

【0004】

本発明の利用分野は、道路／鉄道車両システム及び道路／レール表面の粗度プロファイルの特徴付けの場合に適用される実稼働モーダル解析 (OMA) である。

【0005】

OMA は、作動状態にある構造体の実験的同定を行うために一般に用いられる技法であり、加速度計を用いることによって一般に取得される単独の (sole) 出力信号の解析に基づいている。使用荷重 (working load) を受ける N 個の自由度を有する線形システムの実験的同定は、いわゆる実稼働モーダルパラメーターの推定を目的とする。これらのパラメーターは、すなわち、

- システム極 λ_n ;
- モーダルベクトル

$$\psi_n \in \mathbb{C}^{N \times 1};$$

実稼働基準ベクトル

$$\phi_n \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

である。

【0006】

特に、システム極 λ_n を求めることは非常に重要である。なぜならば、システム極は、検査されるシステムの固有周波数 ω_n 及び減衰比 ζ_n についての情報を含むからである。

$$\lambda_n = (-\zeta_n + i\sqrt{1-\zeta_n^2})\omega_n \quad \text{with } n=1, \dots, N \quad (1)$$

【0007】

10

20

30

40

50

ただし、道路／レール表面プロファイルの特徴付けの場合、それらの粗度に関連付けられた統計的特性を求めることが意図されている。そのような特徴付けは、一般に、適した粗面計によって行われる直接の測定から実行され、様々な道路表面又は様々なレール要素に属するプロファイルの分類を目的とする。

【背景技術】

【0008】

実稼働モード解析

最先端技術において、自然励振技法（N E x T）の仮定が満たされる場合、単独の出力信号の解析から構造システムのモードパラメーターの推定を得ることを可能にする様々な方法が知られている。分離（separation）領域（タイムラグ）

10

(7)

では、出力される自己相関関数及び相互相関関数

$$R_{q_i q_j}(\tau)$$

（式（3））が一般に用いられる。代わりに周波数領域（ ω ）では、出力の自己及び相互電力スペクトル密度（P S D）

$$S_{q_i q_j}(\omega),$$

（式（4））から、モードパラメーターを直接推定することができる。N_t 個の外部荷重がN E x T 仮定を満たす場合、入力されたP S D 行列S_f は、定数要素を有する対角行列として記述することができる（式（2））。

20

$$S_f = \begin{bmatrix} S_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & S_{N_t} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t} \quad (2)$$

【0009】

上記のN E x T 仮定は、すなわち、以下のとおりである。

仮定1：システムに作用する荷重は、白色雑音（式（2）において周波数から独立した振幅）のシーケンスにトレースバックすることができるパターンを有しなければならない。

30

仮定2：励振が多くの点に作用する場合、インレット（inlets）は、厳密に無相関でなければならない（式（2）において対角以外の要素は存在しない）。

【0010】

N E x T 仮定を満たす外部荷重を受けるN個の自由度を有する一般的なシステムに関して、出力q_i 及びq_j を考えると、相互相関の数式表現は、[Shen, DOI:10.1006/jsvi.2002.5203] として記述することができる。

$$R_{q_i q_j}(\tau) = \sum_{n=1}^{2N} \phi_{in} \psi_{jn} e^{\lambda_n \tau} h(\tau) + \psi_{in} \phi_{jn} e^{-\lambda_n \tau} h(-\tau) \quad (3)$$

ここで、

40

－ ψ_{in} 及び ψ_{jn} は、モードベクトル ψ_n の2つの一般成分（generic component）である；

－ ϕ_{in} 及び ϕ_{jn} は、実稼働ベクトル ϕ_n の2つの一般的な成分である；

－ $h(\cdot)$ は、ヘビサイド（Heaviside）関数を示す。

【0011】

その結果、相互P S Dの数式表現は、フーリエ変換を適用することによって式（3）から得ることができる。

$$S_{q_i q_j}(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\phi_{in} \psi_{jn}}{i\omega - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} \phi_{jn}}{-i\omega - \lambda_n} \quad (4)$$

50

【0012】

最後に、式（3）及び（4）は、コンパクト行列形式に書き換えると、以下のものが得られる。

$$R_q(\tau) = \sum_{n=1}^{2N} \phi_n \psi_n^T e^{\lambda_n \tau} h(\tau) + \psi_n \phi_n^T e^{-\lambda_n \tau} h(-\tau) \quad (5)$$

$$S_q(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\phi_n \psi_n^T}{i\omega - \lambda_n} + \frac{\psi_n \phi_n^T}{-i\omega - \lambda_n} \quad (6)$$

ここで、

$$- R_q(\tau) \in \mathbb{R}^{N \times N} \quad 10$$

は、出力相関行列である；

$$- S_q(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$$

は出力 P S D 行列である；

— シンボル（・）^T は、転置演算子行列を示す。

【0013】

特に、様々な項をグループ化することによって、式（6）を多項式関数間の比としてより一般的な形態に書き換えることができる [Reynders, DOI:10.1007/s11831-012-9069-x]。

20

$$S_q(\omega) = \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \quad (7)$$

ここで、

$$- B(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$$

は、その一般要素

$$B_{ij}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r b_{ijr}$$

30

が、係数 b_{ijr} を有する対応する P S D の分子多項式である行列を表す；多項式 $B_{ij}(\omega)$ は、ここでは、フィッティング多項式として定義され、その結果、入力に関連付けられる；

$$- A(\omega) = \sum_{r=0}^{n_a} (i\omega)^r a_r$$

は、係数 a_r を有する全ての P S D に共通の分母多項式である；これは、その根がシステム極である特性多項式を表す；

— n_b 及び n_a は、それぞれ分子多項式及び分母多項式の係数の数を示す。

【0014】

40

式（5）、（6）及び（7）が有効である N E x T 仮定は、一般に、土木工学の用途（建物、橋、一般の土木構造物）において満たされる。なぜならば、ほとんどの場合、大きな建造物は、そのような仮定を容易に満たす確率論的荷重（交通及び風）にさらされるからである。

【0015】

以下に、特許文献において利用可能である主な寄与するものを説明する。

【0016】

国際公開第 01 / 33182 号は、N E x T 仮定に基づく実稼働モード同定のためのちょうど紹介したばかりの方法を記載している。

【0017】

50

国際公開第2008/002310号は、FRFからのモーダルパラメーターの抽出の方法に言及している。そのような関数を得るために、既知の信号を用いて構造体を励振することが必要とされる。これに対して、OMA技法は、入力を測定することを要しない。

【0018】

国際公開第2014/006176号は、伝達率(transmissibilities)の使用に基づく構造体のモーダルパラメーターの推定の方法を紹介している。そのような関数は、求められた作動状態にあるシステムの2つの出力の間の比として得られる。入力の影響を除去することも、少なくとも2つの異なる作動状態を検討するために必要とされる。

【0019】

道路／レール表面の粗度プロファイルの特徴付け

10

この数十年の間に、確率過程(確率場)の特性は広く研究され、その結果、道路／レール粗度のモデル化における様々な手法の使用が見られるようになった[Dodds&Robson, DOI:10.1016/S0022-460X(73)80373-6]。特に、基礎となるそのようなモデルは、3つの基本的な仮定である。

仮定3: 表面は均一である。すなわち、粗度の統計的特性は、より多くの平行プロファイルを参照しながら検討される空間的観測から独立している；

仮定4: 粗度の高さは、ゼロ平均を有するガウス分布を有し、したがって、統計的特性は、相関関数又はPSDによって完全に記載することができる；

仮定5: 表面はエルゴード過程である。すなわち、単一の実現値に沿って計算された単純平均は、全ての実現値に沿って計算されたアンサンブル平均と一致する。

20

【0020】

この論議において、技術文献は様々な近似を提案している。それらの大部分は、測定されたPSDのパラメトリックモデルの使用に基づいている。そのような近似に関するパラメーターは、取得されたデータから適したフィッティング技法を用いることによって計算される。例えば、標準ISO8608-1995は、空間周波数 ν の領域において定義される以下の自己PSDモデルを提案している。

$$S_{d(ISO)}(\nu) = S_0 \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{-e} \quad (8)$$

ここで、

30

- ν_0 は基準の空間周波数を示す ($\nu_0 = 1 \text{ rad/m}$)、
- $S_0 \text{ (m}^3\text{)}$ は、 $\nu = \nu_0$ の場合のPSDの振幅である。

【0021】

上記標準は、データが定速で取得される場合には、指数 e を2に等しくすることを提案している。したがって、これが所与の速度 v で進展する粗面計とみなされる場合、式(8)の数式表現は、時間周波数領域 ω に変換することができ、以下のように書き換えることができる。

$$S_{d(ISO)}(\omega) = S_{d(ISO)}(\nu = \omega/v) / v = \frac{S_0}{v} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-e} \quad (9)$$

40

ここで、 $\omega_0 = \nu_0 v$ (基準の空間周波数と速度 v との積)は、基準の周波数を示す。この例において、フィッティングによって求めなければならない単独のパラメーターがどのようにして振幅 S_0 になるのかに留意すべきである。

【0022】

道路及びレールの用途の双方に共通に用いられる別の近似は、Sussman [Andren, DOI:10.1504/IJVD.2006.008450]によって提案されたものであり、2つのパラメーターの推定しか必要としないので容易に使用可能である。時間周波数領域 ω において、自己PSDのパターンは、以下のものとなる。

$$S_{d(S_{us})}(\omega) = \frac{c}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (10)$$

ここで、 c ($\text{m}^2 \text{rad/s}$) 及び ω_0 (rad/s) は、求められる未知の値である。
【0023】

特徴付けが、同じ道路表面に属するより多くの平行プロファイル又は同じ鉄道線路に属する2本のレールに関係している場合、コヒーレンス関数 $\Gamma_{ij}(\nu)$ を用いてそれらの間の関係を記述することができる。距離 W_m において与えられ、空間横座標 x の関数として規定される2つの一般的な平行プロファイル $d_i(x)$ 及び $d_j(x)$ を考えることによって、そのような関数は、以下の公式を用いることによって計算することができる。

$$\Gamma_m(\nu) = \frac{|S_{d_i d_j}(\nu)|}{\sqrt{S_{d_i}(\nu) S_{d_j}(\nu)}} \quad (11)$$

ここで、第 m のトラック幅は、平行プロファイル $d_i(x)$ 及び $d_j(x)$ によって個別化されたものであり、特に、そのようなプロファイルの間の距離の尺度となる。その上、

$$-S_{d_i}(\nu) \text{ 及び } S_{d_j}(\nu)$$

は、それぞれプロファイル $d_i(x)$ 及び $d_j(x)$ に関連付けられた自己 PSD である；

$$-S_{d_i d_j}(\nu)$$

は、プロファイル $d_i(x)$ と $d_j(x)$ との間で計算された相互 PSD である。

【0024】

そこから、相互 PSD を以下のように得ることができることが導出される。

$$S_{d_i d_j}(\nu) = \Gamma_m(\nu) \sqrt{S_{d_i}(\nu) S_{d_j}(\nu)} e^{-i\beta_m(\nu)} \quad (12)$$

ここで、 $\beta_m(\nu)$ は、2つのプロファイル $d_i(x)$ 及び $d_j(x)$ のスペクトルに関連付けられた位相の差である。定義として、コヒーレンスは、その値を $0 \sim 1$ とすることができる偶実関数 ($\Gamma_m(\nu) = \Gamma_m(-\nu)$) である。その結果、2つのプロファイルは、コヒーレンスが1に近い値を前提とする空間周波数についてのみ互いに非常に類似する。その上、2つのプロファイルの間の距離 W_m を0にすることによって、コヒーレンス $\Gamma_m(\nu)$ は明らかにユニタリーになる。異なる種類の道路／レール表面に対して行われた研究は、多くの場合に、コヒーレンスは、空間周波数 ν の関数としてどの程度の減少パターンを有するのかを示している。Bogsjo [Bogsjo, DOI:10.1080/00423110802018289] によって提案されたフィッティングモデルは、そのような観測結果とよく一致している。なぜならば、このフィッティングモデルは、以下の関係による、1つのパラメータ μ のみを有する減少指数 (exponential) 関数の使用に基づいているからである。

$$\Gamma_m(\nu) = e^{-\mu W_m |\nu|} \quad (13)$$

【0025】

最後に、 $\Gamma_m(\nu)$ は無次元単位であるので、式 (11) 及び (13) に記載された関係は、代入 $\nu = \omega / v$ を適用して時間周波数領域 ω に変換することができることを想起されたい。

【0026】

近年、道路／レール表面プロファイルの統計的特性の間接的特徴付けに対する関心が、技術文献及び特許文献の双方において高まってきた。

【0027】

特に、Gonzales 他 [Gonzales, DOI:10.1080/00423110701485050] は、道路プロファイ

10

20

30

40

50

ルの自己PSDの間接的推定の方法を提案している。この方法では、車両全体が、単一のプロファイルに基づいて動いているとみなされる。車両のFRFの行列を知ることによって、同じ車両において検出された単独の加速度からプロファイルの自己PSDを再構成することが可能である。

【0028】

米国特許出願公開第2014/257629号は、1つ以上のサスペンションの上流及び下流で測定された振動から道路プロファイルの推定を可能にする方法を記載している。そのような方法は、適応カルマンフィルタに基づくとともに車両のモノサスペンションモデルを基準としたアルゴリズムを用いる。

【0029】

米国特許出願公開第2014/204205号は、車両が移動する道路プロファイルの高さを測定する方法を提案している。そのような方法は、画像処理技法を幅広く利用し、道路レベルに配置された1つ以上のカメラ（例えば、交通監視用カメラ）の使用を必要とする。

【0030】

鉄道線路分野において提案されている方法は、概ね、レールの障害の存在を検出することに限られ、粗度の統計的特性を特徴付ける推定のアルゴリズムを用いない。

【0031】

米国特許第799988号は、少なくとも鉄道車両に配置されたカメラによって鉄道線路網を監視する方法を記載している。画像制御及び変更のアルゴリズムによって、鉄道線路網を監視することが可能であり、とりわけ、同じ網において起こり得る異常の存在を検出することが可能である。

【0032】

米国特許第8905359号は、レールの損傷を検出する方法を記載している。車軸の垂直加速度及び縦加速度をそれぞれ測定する2つの加速度計を用いることによって、加速度計測信号のデータベースを作成することが可能である。起こり得る損傷を、同じ鉄道線路セクションにおいて異なる時間に取得される信号間の偏差として特定することができる。

【0033】

米国特許第8942426号は、カメラ及びGPSを用いることによって鉄道線路網をリアルタイムで監視する方法を記載している。測定値は、鉄道線路網の不規則なものの存在の基準を順守しているか否かを確認するためにリアルタイムで処理される。存在する場合、データは、コントロールセンターに自動的に送信され、そのような不規則なものの種類が判断される。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0034】

本発明の目的である、OMAが車両システムに適用される特定の場合において、以下の定常性の仮定が満たされるか否かを検証することが確実に必要とされる。

仮定6：車両は、直線軌道又は定半径を有する湾曲部に沿って定常走行（stationary running）状態、すなわち定速、で進行しなければならない。すなわち、これは、方向の急激な変化を意味しない。

【0035】

これらの条件において、車両は、主として、ホイールと道路／鉄道線路との間に存在する相互作用によって生み出される定常外部荷重を受ける。一般に、システムに印加される入力¹は未知のままであるので、そのモーダルパラメーターを同定するには、実稼働モーダル解析を用いることができる。

【0036】

例えば、 $N_t = 5$ 個の複数のホイールを有する図（1）に記載された車両を考えることにする。幾何学的配置は、一般的であるように規定されたものであり、したがって、その

10

20

30

40

50

結果、10個のトラック幅 W_m 及び3つの異なる軸間距離 L_1 の存在によって特徴付けられるように規定されたものである。車両が、速度 v を有する定常走行条件で5つのプロファイル $d_1(x), \dots, d_5(x)$ 上を移動する場合、外部荷重は、各単一のホイールを通じてシステムに伝達される。ホイールとローリング(rolling: 転がり)面との相互作用を説明するには、簡単にするために、点状の部類の接触を考えることが可能である。実際は、フットプリントは、入力に対してスローパスフィルター(slow-pass filter)のように振る舞うので、この説明の形態は、一般性を失うことなく導入することができる。仮定3~6が検証された場合、それぞれの接触点(図1において参照符号A~Eで示す)において表面によって誘発されるホイール上の移動を基準としたPSD行列 $S_r(\omega)$ は、時間周波数領域 ω において以下の式として定義することができる。

10

$$S_r(\omega) = \begin{bmatrix} S_{d_A} & S_{d_A d_B} & \cdots & S_{d_A d_E} \\ S_{d_A d_B}^* & S_{d_B} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ S_{d_A d_E}^* & \cdots & \cdots & S_{d_E} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N_i \times N_i}$$

$$= \begin{bmatrix} S_{d_1} & \Gamma_1 \sqrt{S_{d_1} S_{d_2}} e^{+i(\omega \tau_1 - \beta_1)} & \Gamma_2 \sqrt{S_{d_1} S_{d_3}} e^{+i(\omega \tau_2 - \beta_2)} & \Gamma_3 \sqrt{S_{d_1} S_{d_4}} e^{+i(\omega \tau_1 - \beta_3)} & \Gamma_4 \sqrt{S_{d_1} S_{d_5}} e^{-i\beta_4} \\ S_{d_A d_B}^* & S_{d_2} & \Gamma_5 \sqrt{S_{d_1} S_{d_3}} e^{+i(\omega \tau_3 - \beta_5)} & \Gamma_6 \sqrt{S_{d_2} S_{d_4}} e^{-i\beta_6} & \Gamma_7 \sqrt{S_{d_2} S_{d_5}} e^{-i(\omega \tau_1 + \beta_7)} \\ \vdots & & S_{d_3} & \Gamma_8 \sqrt{S_{d_3} S_{d_4}} e^{-i(\omega \tau_3 + \beta_8)} & \Gamma_9 \sqrt{S_{d_3} S_{d_5}} e^{-i(\omega \tau_2 + \beta_9)} \\ \vdots & & & S_{d_4} & \Gamma_{10} \sqrt{S_{d_4} S_{d_5}} e^{-i(\omega \tau_1 + \beta_{10})} \\ S_{d_A d_F}^* & \cdots & \cdots & \cdots & S_{d_5} \end{bmatrix} \quad (14)$$

20

ここで、 $l = 1, \dots, 3$ である $\tau_l = L_l / v$ は、2つの車軸の間の一般的な遅れを示し、簡略化するために、

$$S_{d_l}, \Gamma_m \text{ 及び } \beta_m$$

の ω への依存関係は省略されている。ホイールの周波数応答関数(FRF)の行列を、

30

$$H_f(\omega) \in \mathbb{C}^{N_f \times N_i}$$

を用いて示すことによって、ストック(stocks)に作用する力によって表される入力PSD行列 $S_f(\omega)$ は、以下のように計算することができる。

$$S_f(\omega) = H_f^*(\omega) S_r(\omega) H_f^T(\omega) \quad (15)$$

【0037】

自然励振を考慮することによって得られる入力PSD行列の数式表現(式(2))と、ローリング面との相互作用に起因した数式表現(式(15))とを比較すると、NEXT仮定から派生するモーダル同定技法、したがって、式(5)、(6)及び(7)に基づくモーダル同定技法は、OMAが、作動状態にある車両に適用される場合にどのように有効にならないのかは明らかである。実際には、以下の問題がある。

40

問題1: 荷重は、周波数とともに一般に減少する振幅を有する、有色雑音のパターンにトレースバックすることができるパターンであって、その形態が道路/レールプロファイルの特性(式(9)及び(10))とホイールの特性(式(15))において $H_{fr}(\omega)$ によって記述される)とに依存するパターンを有する。したがって、NEXTの仮定1は有効でない。

問題2: 同じ車軸上に位置決めされたホイールに作用する入力は、空間相関(式(14))において $\Gamma_m(\omega)$ によって記述される)に参与し、共通のローリングプロファイルを有するが異なる車軸に配置されたホイールに印加される入力は、時間相関(式(14))にお

50

いて

$e^{\pm i\omega t}$

によって記述される)に關与する一方、共通のローリングプロファイルを有せず、異なる車軸に属するホイールに關する荷重の場合、空間相関及び時間相関の双方が存在する。したがって、N E x T の假定 2 は有効でない。

【0038】

したがって、N E x T 假定に従って定式化されたモデルを用いることによって推定プロセスにおいて生じる誤差は著しく増加する。その上、N E x T 假定が満たされないことによって引き起こされるモデル化の誤差を補償するために、既知の同定のアルゴリズムは、物理的意味を有せず、極／偽モードの形式で提供される追加の解を、推定されるモダ

10

【0039】

したがって、本発明の第 1 の目的は、入力の特色化 (colouring) 及び相関がシステムの出力に対して有する効果を明示的に考慮した、作動状態にある車両のモダ

20

【0040】

道路／レール表面プロファイルの間接的な特徴付けに關して、上述の方法及び最先端技術において知られている他の全てのものは、車両システムの出力に対して入力の相関の効果を明示的に考慮していない。Gonzales 他 [Gonzales, DOI:10.1080/00423110701485050] によって提案された方法は、現に、様々な作動状態にある、すなわち、既知の特徴を有する道路表面における様々な移動速度を考慮した車両の F R F の行列を求めるのに必要とされる較正ステップを必要とする。米国特許出願公開第 2014/257629 号は、代わりに、道路入力の相関にリンクされた効果を適切に考慮することを可能にしている車両のモノサスペンションモデルに基づく方法を提案している。

【0041】

カメラは、固定された構造体に設置されている (車両に設置されていない) ので、米国特許出願公開第 2014/204205 号に記載された方法は、同じカメラの視角によってカバーされるエリア内のプロファイルの高さのみを再構成することを可能にする。鉄道線路の分野では、米国特許第 799988 号、米国特許第 8905359 号及び米国特許第 8942426 号は、レールの障害の存在を検出することに限られており、粗度の統計的特性を特徴付ける推定のアルゴリズムを用いない。

30

【0042】

したがって、もう 1 つの目的によれば、本発明は、作動状態にある車両に關して取得された出力信号からの道路／レール表面プロファイルの統計的特性の間接的な特徴付けの方法を提供する。特に、均一性の幾つかの固有特性を利用することによって、提案される方法

40

【課題を解決するための手段】

【0043】

本発明は、少なくとも 2 つのホイールが設けられ、作動状態にある道路車両又は鉄道車両の極 (λ_n) 及びモダ

50

前記車両が直線軌道又は定半径を有する湾曲部を定速で移動すると仮定することと、
前記車両が、粗度がガウス分布を有する均一のエルゴード的表面上を移動すると仮定することと、
前記少なくとも2つのホイールがプロファイル上又は互いに平行な複数のプロファイル上を移動すると仮定することと、

前記車両に対して前記道路表面又は前記レール表面によって誘発される前記入力、白色雑音のシーケンスにトレースバックすることができず、時間及び／又は空間において互いに相関されると仮定することと、
を特徴とする、方法を提供する。

【0044】

本発明はまた、実稼働ベクトル

$$(\alpha_n^m, \beta_n^{m'} \text{ 及び } \chi_n^{m'})$$

10

の前記推定、並びに、

道路プロファイル又はレールプロファイルに関連付けられた自己相関関数 ($R_d(\tau)$) 又は自己 PSD ($S_d(\omega)$) と、

平行な道路プロファイル又はレールプロファイルに関連付けられたコヒーレンス関数 ($\Gamma_m(\omega)$) 又はそれぞれの IFT ($\eta_m(\tau)$) と、
を用いることによって得られる道路表面又はレール表面の前記統計的特性の間接的な前記特徴付けの方法を提供する。

【図面の簡単な説明】

20

【0045】

【図1】5つのホイールを有するとともに10個のトラック幅及び3つの異なる軸間距離を有する車両の幾何学的配置を示す図である。

【図2】車両の図式化されたモデルを7つの自由度を有するシステムとして示す図である。

【図3. a】均一のガウス表面上を定速 (60 km/h) で移動している7つの自由度を有する車両のモデルに本発明による同定の手順を適用することによって得られる安定化の図である。

【図3. b】均一のガウス表面上を定速 (60 km/h) で移動している7つの自由度を有する車両のモデルに最小二乗複素周波数領域 (LSCF) アルゴリズムを適用することによって得られる安定化の図である。

30

【図4】提案された同定手順を用いることによる合成モデルの有効性確認の図である。

【図5】本発明による方法を説明するフローチャートである。

【図6】本発明による方法を説明するフローチャートである。

【図7】本発明による方法を説明するフローチャートである。

【図8】本発明による方法を説明するフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0046】

本方法の基本的仮定

本発明による車両のモーダル同定の方法は、仮定3～6の全てが満たされることを必要とするが、NEXT仮定1及び2が満たされることを要しない。換言すれば、表面は、均一であり、かつ、エルゴード過程に同化可能であることと、粗度がゼロ平均を有するガウス分布を有することと、車両が直線軌道又は定半径を有する湾曲部に沿って定速で進むことが前提とされる。しかし、車両に作用する荷重は、有色雑音にトレースバックすることができるパターンを有し、時間及び／又は空間の相関によって関係付けられることが仮定される。特に、以下に説明するように、トラック幅及び軸間距離の知識として意図された車両の幾何学的配置の知識は、モーダル同定方法における入力の時間及び／又は空間相関に関する情報を含むことを可能にする。これによって、NEXT仮定が満たされない場合にも車両のモーダルパラメーターと、道路／レールの特性パラメーターとを求めることが可能になる。

40

50

【0047】

所与の道路表面又はレール表面を均一のガウス確率場に同化させることができる場合、それらの道路表面又はレール表面に属する平行プロファイルに関連付けられた統計的特性を特徴付けるのに必要な物理量の数、著しく削減することができる。そのために、以下の均一性の重要な固有特性を利用することが可能である。

特性1：

$$S_{d_i}(\nu) = S_{d_j}(\nu) = S_d(\nu),$$

であり、プロファイル $d_i(x)$ 及び $d_j(x)$ に関連付けられた自己 PSD は一致し、したがって、それらは関数 $S_d(\nu)$ に等しいとみなすことができる；

10

特性2：

$$S_{d_i d_j}(\nu) = \Gamma_m(\nu) S_d(\nu)$$

であり、プロファイル $d_i(x)$ と $d_j(x)$ との間で計算された相互 PSD は、自己 PSD $S_d(\nu)$ 及びコヒーレンス関数 $\Gamma_m(\nu)$ にのみ依存する実関数である。

【0048】

したがって、表面によって誘発されるホイール上の移動量を基準とした式(14)の PSD 行列は、以下のように、時間周波数 ω の領域に書き換えることができる。

$$S_r(\omega) = S_d(\omega) \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_1(\omega)e^{+i\omega\tau_1} & \Gamma_2(\omega)e^{+i\omega\tau_2} & \Gamma_3(\omega)e^{+i\omega\tau_1} & \Gamma_4(\omega) \\ \Gamma_1(\omega)e^{-i\omega\tau_1} & 1 & \Gamma_5(\omega)e^{+i\omega\tau_2} & \Gamma_6(\omega) & \Gamma_7(\omega)e^{-i\omega\tau_1} \\ \vdots & & 1 & \Gamma_8(\omega)e^{-i\omega\tau_2} & \Gamma_9(\omega)e^{-i\omega\tau_2} \\ \vdots & & & 1 & \Gamma_{10}(\omega)e^{-i\omega\tau_1} \\ \Gamma_4(\omega) & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

20

【0049】

車両の幾何学的配置が分かると、トラック幅 W_m 及び軸間距離 L_1 に関して、式(16)の PSD 行列の係数全体を求めるために知られる物理量の数、計算することが可能である。すなわち、

- 自己 PSD の数は単一関数 S_d に制限される；
- コヒーレンス関数 Γ_m の数はトラック幅の数 N_w と一致する；
- 遅れ τ_1 の数は異なる長さの軸間距離の数 N_L と一致する。

30

【0050】

図(1)の一般的な車両システムについて、入力相関行列

$$R_f(\tau) \in \mathbb{R}^{N_f \times N_f} \text{ can}$$

は、IFT を式(15)の数式表現に適用することによって計算することができ、出力相関行列

$$R_q(\tau) \in \mathbb{R}^{N_q \times N_q}$$

40

は、時間領域における任意の外部荷重の作用に対するシステムへの応答を最初に数式化することと、いわゆるデュアメルの積分

$$q(t) = \int_{-\infty}^t h(t-\rho) f(\rho) d\rho \quad (17)$$

を用いることと、その後、2つの一般的な出力 $q_i(t)$ 及び $q_j(t)$ を考慮した一般的な出力相互相関関数

$$R_{q_i q_j}(\tau)$$

の数式表現を得ることによって得ることができる。ここで、

50

$$h(t) \in \mathbb{R}^{N \times N}$$

は、インパルスに対する応答関数の行列であり、

$$q(t) \in \mathbb{R}^{N \times 1}$$

は、出力ベクトルであり、

$$f(t) \in \mathbb{R}^{N \times 1}$$

は、入力のベクトルである。そのような関数は、システムダイナミクスに特有のパラメーター（すなわち、モーダルパラメーター）を含み、行列 $R_f(\tau)$ に依存する。

【0051】

10

出力相関行列 $R_q(\tau)$ を以下の形式で得ることができることを実証することが特に可能である。

$$R_q(\tau) = \sum_{n=1}^{2N} \bar{\varphi}_n(\tau) \psi_n^T e^{\lambda_n \tau} + \psi_n \bar{\varphi}_n^T(-\tau) e^{-\lambda_n \tau} \quad (18)$$

ここで、項

$$\bar{\varphi}_n(\tau) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

は、遅れ依存実稼働基準ベクトルであり、以下の式として定義される。

$$\bar{\varphi}_n(\tau) = R_d(\tau) * \left(\sum_{m=0}^{N_W} \eta_m(\tau) * \left(\alpha_n^m h(\tau) + \sum_{l=1}^{N_f} (\beta_n^{ml} e^{+\lambda_n \tau_l} h(\tau + \tau_l) + \chi_n^{ml} e^{-\lambda_n \tau_l} h(\tau - \tau_l)) \right) \right) \text{ with } \eta_0(\tau) = 1 \quad (19)$$

20

ここで、

— $R_d(\tau)$ は、プロファイルに関連付けられた自己相関の関数であり、 $S_d(\omega)$ から逆フーリエ変換（IFT）によって計算することができる；

— $m = 1, \dots, N_W$ である $\eta_m(\tau)$ は、距離 W_m に配置されたプロファイル d_i と d_j との間で計算されたコヒーレンス関数 $\Gamma_m(\omega)$ の IFT である；

$$-\alpha_n^m, \beta_n^{ml} \text{ 及び } \chi_n^{ml} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

は、実稼働ベクトルである。

30

【0052】

その結果、出力 PSD 行列 $S_q(\omega)$ の数式表現は、フーリエ変換を適用することによって式（18）によって得ることができる。

$$S_q(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\varphi_n(\omega) \psi_n^T}{i\omega - \lambda_n} + \frac{\psi_n \varphi_n^T(-\omega)}{-i\omega - \lambda_n} \quad (20)$$

ここで、項

$$\varphi_n(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

は、周波数依存実稼働基準ベクトルであり、以下の式として定義される。

40

$$\varphi_n(\omega) = S_d(\omega) \left(\sum_{m=0}^{N_W} \Gamma_m(\omega) \left(\alpha_n^m + \sum_{l=1}^{N_f} \beta_n^{ml} e^{+i\omega \tau_l} + \chi_n^{ml} e^{-i\omega \tau_l} \right) \right) \text{ with } \Gamma_0(\omega) = 1 \quad (21)$$

【0053】

様々な項をグループ化することによって、式（20）は、多項式関数間の比として、より一般的な形式に書き換えることができる。

$$S_q(\omega) = \frac{S_d(\omega) \left(\sum_{m=0}^{N_g} \Gamma_m(\omega) \left(B^m(\omega) + \sum_{l=1}^{N_l} (C^{ml}(\omega) e^{+i\omega\tau_l} + D^{ml}(\omega) e^{-i\omega\tau_l}) \right) \right)}{A(\omega)} \quad \text{with } \Gamma_0(\omega) = 1 \quad (22)$$

ただし、ここで、

$$-B^m(\omega), C^{ml}(\omega) \text{ 及び } D^{ml}(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$$

は、その一般要素

$$B_{ij}^m(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r b_{ijr}^m, \quad C_{ij}^{ml}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r c_{ijr}^{ml} \quad \text{及び} \quad D_{ij}^{ml}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r d_{ijr}^{ml} \quad (23)$$

が、それぞれ係数

$$b_{ijr}^m, c_{ijr}^{ml} \text{ 及び } d_{ijr}^{ml}$$

を有する対応する P S D の分子多項式である行列を表す；多項式

$$B_{ij}^m(\omega), C_{ij}^{ml}(\omega) \text{ 及び } D_{ij}^{ml}(\omega)$$

は、ここでは、フィッティング多項式と呼ばれ、結果として入力に関連付けられる；

$$-A(\omega) = \sum_{r=0}^{n_a} (i\omega)^r a_r \quad (24)$$

は、係数 a_r を有する全ての P S D に共通の分母多項式である；これは、その根がシステム極である特性多項式を表す；

— n_b 及び n_a は、それぞれ分子多項式及び分母多項式の係数の数を示す。

【0054】

したがって、式 (18) ~ (22) は、以下の様々な項の組み合わせを含むことが明らかである。

(i) $R_d(\tau)$ 及び $S_d(\omega)$ は、それぞれ分離領域及び周波数領域において、プロファイルに関連付けられた統計的特性のパターンを記述する；

(ii) $h(\tau \pm \tau_1)$ 及び

$$e^{\pm i\omega\tau_l}$$

は、共通のローリングプロファイルを有するが異なる車軸に配置されたホイールに作用する入力間に存在する時間相関の効果を含めることを可能にする；

(iii) $\eta_m(\tau)$ 及び $\Gamma_m(\omega)$ は、異なるプロファイル上を移動するホイールに作用する入力間に存在する空間相関の効果モデル化する。

【0055】

最後に、上記式は、作動状態にある車両の同定の新たな方法の基礎をなすものである。これらの数式表現からの作動状態にある道路／鉄道車両システムのモダルパラメータの推定と、道路／レール表面プロファイルの統計的特性の間接的な特徴付けとを可能にする特定の手順を開発することが可能である。特に、式 (18) 及び (19) は、分離領域において動作するアルゴリズムを設定するのに用いることができる。

【0056】

代替形態として、本発明の好ましい実施形態によれば、式 (20)、(21) 及び (22) を用いることによって、周波数領域の解析から得られる利点を利用することができるフィッティング技法を実施することが可能である。

【0057】

周波数領域における同定の手順

本発明の目的である同定の手順は、車両システムの幾何学的配置について、トラック幅及び軸間距離の数及び寸法が判明していることを要する。単独の出力信号を測定すること

10

20

30

40

50

で十分である。測定ツールは、様々な物理量、例えば、上記車両の割り当てられた測定点において取得される移動量、速度又は加速度、に関するものとして行うことができる。用いられる測定ツールが1つだけであってもシステムの全てのモーダルパラメーターを同定することが可能であるということが分かっている場合にも、モーダル形式の適した視覚的再構成を得て、したがって、モーダル形式の良好な空間解像度を得るために、適した数のセンサーを用いることが推奨される。各サスペンションの上方又は下方にセンサーを位置決めすることによって、適した実験準備を実現することができる。推定のプロセスを初期化するために、例えばGPSセンサーを用いることによってカバーされる地域において、車両の位置及び速度を検出することが有用であり得る。そのような情報は、定常走行条件が順守されない一時的なゾーンがあり得る場合に、そのようなゾーンを弁別することを可能にすることができる。信号が取得されると、実データ解析ステップが開始する。

10

【0058】

本発明による方法が、分離領域においても適用することができる場合であっても、周波数領域において機能する方法を採用することによって、少なくとも3つの利点が得られる。すなわち、(1) 最小計算労力と、(ii) より明瞭な安定化図と、(iii) 車両システムが一般にそうであるように正確に強く制動されたシステムを本方法が取り扱うことができる能力とが得られる。

【0059】

本発明のこの実施形態による推定の手順は、以下の2つのステップに分割される。

- ー ステップA：車両システムの極及びモーダルベクトルの推定；
- ー ステップB：道路／鉄道線路の実稼働ベクトル及び特性パラメーターの推定。

20

【0060】

ステップAの車両の極及びモーダルベクトルの推定は、以下のステップを含むと言われている。

- A. 1) 以下に表された式(25)によって数式化された多項式モデルに基づく、測定された出力信号からの出力PSD行列 $S_q(\omega)$ の1つ以上の関数の推定；
- A. 2) 式(25)の特性多項式に関連付けられたコンパニオン行列の自己値(auto-values：自動値)及び自己ベクトル(auto-vectors：自動ベクトル)を求めることによる極 λ_n 及びモーダルベクトル ψ_n の推定。

30

【0061】

ステップBの道路／鉄道線路の実稼働ベクトル及び特性パラメーターの推定は、以下のステップを含む。

- B. 1) 道路プロファイルに関連付けられた自己PSD $S_d(\omega)$ を記述するのに用いられるパラメトリックモデルの選択、及び、存在するときのコヒーレンス関数 $\Gamma_m(\omega)$ の選択；
- B. 2) 道路プロファイルに関連付けられた自己PSD $S_d(\omega)$ のパラメーターの実稼働ベクトル

$$\alpha_n^m, \beta_n^{ml} \text{ 及び } \chi_n^{ml}$$

の推定、並びに、必要に応じて、以下に表された式(26)～(34)に従った出力PSD行列 $S_q(\omega)$ の1つ以上の関数の単分数の分解に基づくコヒーレンス関数 $\Gamma_m(\omega)$ のパラメーターの推定。

40

【0062】

モーダルパラメーターの同定の手順は、多項式基底関数 $\Omega_r(\omega)$ の使用について、以下に単一のステップにおいて詳細に説明される。多項式関数 $\Omega_r(\omega)$ は、連続時間領域におけるモデルの場合には、 $\Omega_r(\omega) = (i\omega)^r$ とすることができ、離散時間領域におけるモデルの場合には、

$$\Omega(\omega) = (e^{i\omega T_s})^r$$

50

とすることができる。ここで、 T_s はサンプリング周期を示す。

【0063】

ステップA：車両システムの極及びモーダルベクトルの推定

ステップAの間、上述のように、車両システムの極 λ_n 及びモーダルベクトル ψ_n は、単独の出力信号から求められる。ステップAは、以下の2つのステップを含む。

A. 1) 以下の式(25)によって数式化された多項式モデルに基づく、測定された出力信号からの出力PSD行列 $S_q(\omega)$ の1つ以上の関数の推定。

【0064】

出力される自己PSD及び相互PSDを求めることが可能であるアルゴリズムは、パラメトリック推定器である。なぜならば、それらのアルゴリズムは、データフィッティングモデルの採用を必要とするからである。この論議において、パラメトリック推定器は、2種類に分割することができる。すなわち、(i)パラメトリック推定器が動作する開始データが測定信号である場合のこの用語の厳密な意味でのパラメトリック推定器と、(ii)パラメトリック推定器が動作する開始データがPSDの非パラメトリック推定値である場合の混成パラメトリック推定器とに分割することができる。

【0065】

特に、PSDの非パラメトリック推定値は、例えば、パーセバル(Parseval)の定理及びウィナー＝ヒンチン(Wiener-Khinchin)の定理によるPSDの理論的定義から得ることができる。そのような推定器を通常区別するものは、それらの推定器が動作するデータの領域と、推定誤差、例えばリーク(leakage)、を低減するために用いられるウィンドウとである。ウェルチ(Welch)の重み付けペリオドグラム法及びコレログラム法は、OMAの論議において最も普及した技法に含まれるものとして言及されるものである。

【0066】

特に、本発明による方法では、式(22)の多項式モデルの簡略化は、出力PSDに極を明らかに導入せず、その結果、システムの極の推定値及びそのモーダルベクトルに影響を与えない単独のゼロ(sole zeros)を有する多項式モデルによって、プロファイルに関連付けられた自己PSD S_d のパターンと、コヒーレンス関数 Γ_m のパターンとを記述することによって得られる。

【0067】

そのような考察に基づく、以下の式を記述することが可能である。

$$S_d(\omega) = \sum_{r=0}^{n_s} \Omega_r(\omega) \sigma_r \quad (23)$$

$$\Gamma_m(\omega) = \sum_{r=0}^{n_g} \Omega_r(\omega) \gamma_r^m \quad (24)$$

ここで、

— σ_r 及び n_s は、それぞれプロファイルに関連付けられた自己PSDの補間器(interpolator)多項式の係数及び係数の数を示す；

— γ_r 及び n_g は、それぞれコヒーレンス関数の補間器多項式の係数及び係数の数を示す。

【0068】

式(22)に提示されたフィッティングモデルに基づく、式(23)及び(24)を利用することによって、出力PSD行列 $S_q(\omega)$ の新たな多項式モデルは、以下の式となる。

$$S_q(\omega) = \frac{\bar{B}(\omega) + \sum_{l=1}^{N_L} (\bar{C}^l(\omega) e^{+i\omega\tau_l} + \bar{D}^l(\omega) e^{-i\omega\tau_l})}{A(\omega)} \quad (25)$$

ここで、

10

20

30

40

50

$$- \bar{B}(\omega), \bar{C}'(\omega) \text{ 及び } \bar{D}'(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$$

は、その一般要素

$$\bar{B}_{ij}(\omega) = \sum_{r=0}^n \Omega_r(\omega) \bar{b}_{ijr}, \quad \bar{C}'_{ij}(\omega) = \sum_{r=0}^n \Omega_r(\omega) \bar{c}'_{ijr} \quad \text{及び} \quad \bar{D}'_{ij}(\omega) = \sum_{r=0}^n \Omega_r(\omega) \bar{d}'_{ijr}$$

が、それぞれ係数

$$\bar{b}_{ijr}, \bar{c}'_{ijr} \text{ 及び } \bar{d}'_{ijr}$$

を有する対応する P S D の分子多項式である行列を表す。選択された推定方法によって、
係数

$$\bar{b}_{ijr}, \bar{c}'_{ijr} \text{ 及び } \bar{d}'_{ijr}$$

は、入力のカラライゼーション及びインレットの間の空間相関に関する情報を含むことを強調しておく。

$$- A(\omega) = \sum_{r=0}^n (i\omega)^r a_r$$

は、係数 a_r を有する全ての P S D に共通の分母多項式である。

【 0 0 6 9 】

式 (2 5) の未知の値を求めるには、推定問題を解くことが必要である。そのような問題は、パラメーター線形 (linear-in-the-parameters) 又はパラメーター非線形 (non-linear-in-the-parameters) になるように設定することができる。それらのケースによれば、未知の値は、文献において知られている技法によって計算することができ、例えば、二乗誤差を最小限に低減すること (最小二乗手法)、又は尤度関数を最大にすること (最尤手法) と、可能な場合には、(例えば、既知の回帰行列の逆行列に基づいて) 直接解く方法又は (例えば、ニュートン・ラフソン (Newton-Raphson) 解決アルゴリズム又はレーベンバーグ・マーカート (Levenberg-Marquardt) 解決アルゴリズムに基づく) 反復方法を用いることとによって計算することができる。

【 0 0 7 0 】

A. 2) 式 (2 5) の特性多項式に関連付けられたコンパニオン行列の固有値 (eigen-values) 及び固有ベクトル (eigen-vectors) を求めることによる極 λ_n 及びモーダルベクトル ψ_n の推定。

【 0 0 7 1 】

式 (2 5) の分子多項式及び分母多項式の係数が推定されると、特性多項式 $A(\omega)$ のコンパニオン行列を作成することによって、多項式モデルを状態空間における標準表現に変換することが可能である。用いられる表現とは無関係に、上記行列は、その固有値が定義によってシステム極 λ_n である状態行列に対応する。その代わりに、そのような行列に関連付けられた固有ベクトルは、用いられる標準形式に従って様々な物理的意味を仮定することができる。したがって、状態空間における表現は、モーダルベクトル ψ_n がそのような固有ベクトルに対応するように選択されなければならない。

【 0 0 7 2 】

ステップ B: 道路／レールの実稼働ベクトル及び特性パラメーターの推定

ステップ B の間、上述のように、道路／鉄道線路の実稼働ベクトル及び特性パラメーターが得られる。ステップ B は、以下のステップを含む。

【 0 0 7 3 】

B. 1) 適切に選択されたパラメトリックモデルによる、プロファイルに関連付けられた自己 P S D $S_d(\omega)$ の記述、及び、存在する場合には、コヒーレンス関数 $\Gamma_m(\omega)$ の記述。

【 0 0 7 4 】

そのために、式（２３）及び（２４）に導入された単独のゼロを有する多項式モデルを用いることができ、いずれにしても、それらの使用は、推定される未知のパラメーターが非常に多く存在することを意味する。これに対して、本明細書の最先端技術において提案されたモデルは、それらのモデルが、はるかに少ない数のパラメーターによって特徴付けられるという利点を提供し、その結果、実験的測定において観測される通常のパターンに良好に対応する。そのような簡略化を行うために、例として、時間周波数領域 ω におけるSussman（式（１０））及びBogsjo（式（１３））によって提案されたモデルが考慮される。

【００７５】

B．２）プロファイルに関連付けられた自己PSD $S_d(\omega)$ のパラメーターの実稼働ベクトル

10

$$\alpha_n^m, \beta_n^{ml} \text{ 及び } \chi_n^{ml}$$

の推定、並びに、必要に応じて、以下の式（２６）～（３４）に従った出力PSD行列 $S_q(\omega)$ の１つ以上の関数の単分数の分解に基づくコヒーレンス関数 $\Gamma_m(\omega)$ のパラメーターの推定。

【００７６】

出力PSD行列 $S_q(\omega)$ （式（２０））の単分数の分解から、一般的な自己PSD

$$S_q(\omega)$$

20

は、以下のように数式化することができる。

$$S_q(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\varphi_{in}(\omega) \psi_{in}}{\Omega(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} \varphi_{in}(-\omega)}{\Omega(-\omega) - \lambda_n} \quad (26)$$

ここで、周波数 $\varphi_{in}(\omega)$ に依存する実稼働ベクトルの第 i 成分は、以下の式によって与えられる。

$$\varphi_{in}(\omega) = S_d(\omega) \sum_{m=0}^{N_W} \Gamma_m(\omega) \left(\alpha_{in}^m + \sum_{l=1}^{N_l} \left(\beta_{in}^{ml} e^{+i\omega\tau_l} + \chi_{in}^{ml} e^{-i\omega\tau_l} \right) \right) \text{ with } \Gamma_0(\omega) = 1 \quad (27)$$

ただし、

30

【００７７】

時間周波数領域 ω においてSussman（式（１０））及びBogsjo（式（１３））によって提案されたモデルを用いると、式（２７）は、以下のように書き換えることができる。

$$\varphi_{in}(\omega) = \frac{c}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{m=0}^{N_W} e^{-\frac{\mu_m W_m |\omega|}{\nu}} \left(\alpha_{in}^m + \sum_{l=1}^{N_l} \left(\beta_{in}^{ml} e^{+i\omega\tau_l} + \chi_{in}^{ml} e^{-i\omega\tau_l} \right) \right) \text{ with } \mu_0 W_0 = 0 \quad (28)$$

【００７８】

ただし、その結果、式（２６）は以下の式となる。

$$S_q(\omega) = \frac{c}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{n=1}^{2N} \left(\sum_{m=0}^{N_W} e^{-\frac{\mu_m W_m |\omega|}{\nu}} \left(T_{in}(\omega) \alpha_{in}^m + \sum_{l=1}^{N_l} \left(U_{in}^l(\omega) \beta_{in}^{ml} + V_{in}^l(\omega) \chi_{in}^{ml} \right) \right) \right) \text{ with } \mu_0 W_0 = 0 \quad (29)$$

40

ただし、ここで、

$$T_{in}(\omega) = \frac{\psi_{in}}{\Omega(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in}}{\Omega(-\omega) - \lambda_n} \quad (30)$$

$$U_{in}^l(\omega) = \frac{\psi_{in} e^{+i\omega\tau_l}}{\Omega(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} e^{-i\omega\tau_l}}{\Omega(-\omega) - \lambda_n} \quad (31)$$

$$V_{in}^l(\omega) = \frac{\psi_{in} e^{-i\omega\tau_l}}{\Omega(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} e^{+i\omega\tau_l}}{\Omega(-\omega) - \lambda_n} \quad (32)$$

である。

【0079】

10

特に、式(29)における未知の値は、以下のとおりである。

— $m = 0, \dots, N_W$ 、 $l = 1, \dots, N_L$ 、 $n = 1, \dots, 2N$ である実稼働ベクトルの第 i 成分

$$\alpha_{in}^m, \beta_{in}^{ml} \text{ 及び } \chi_{in}^{ml}$$

；

— プロファイルに関連付けられた自己PSD $S_d(\omega)$ のパラメーター c 及び ω_0 ；

— コヒーレンス関数 $\Gamma_m(\omega)$ の $m = 1, \dots, N_W$ であるパラメーター μ_m 。

【0080】

式(29)の未知の値を求めるには、パラメーター非線形推定の問題を解く必要がある

20

。

【0081】

特に、ローリング面の特徴付けに必要とされるパラメーターは、文献において知られている実験的測定又は実験値から得られるデータを用いることによって初期化することができる。

【0082】

コヒーレンス関数 $\Gamma_m(\omega)$ のパラメーターの推定が必要とされない以下の3つのケースを個別化することが可能である。

ケース1：車両、例えばオートバイが単一のプロファイル上を移動している場合、 $\Gamma_m(\omega)$ は存在しない；

30

ケース2：車両が完全に一致したプロファイル上を移動している場合、コヒーレンス関数は既知であり、全ての値は1に等しいと仮定する；

ケース3：車両が完全に異なるプロファイル上を移動している場合、コヒーレンス関数は既知であり、全ての値は0に等しいと仮定する。

【0083】

3つの全てのケースにおいて、未知の値を求めることは、式(29)から導出される以下の関係を用いることによって得ることができる。

$$S_{q_i}(\omega) = \frac{c}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{n=1}^{2N} \left(T_{in}(\omega) \alpha_{in} + \sum_{l=1}^{N_L} (U_{in}^l(\omega) \beta_{in}^l + V_{in}^l(\omega) \chi_{in}^l) \right) \quad (33)$$

40

【0084】

特に、式(33)の未知の値は、以下のとおりである。

— $l = 1, \dots, N_L$ 、 $n = 1, \dots, 2N$ である実稼働ベクトルの第 i 成分

$$\alpha_{in}, \beta_{in}^l \text{ 及び } \chi_{in}^l$$

；

— プロファイルに関連付けられた自己PSD $S_d(\omega)$ のパラメーター c 及び ω_0 。

【0085】

式(29)と異なり、式(33)の未知の値を求めることは、パラメーター線形推定の問題を解くことによって行うことができる。

50

【0086】

コヒーレンス関数が必要とされない場合の実稼働ベクトルの残りの成分 α_n 、

$$\alpha_n, \beta_n^l \text{ 及び } \chi_n^l$$

の推定値又は逆の場合の

$$\alpha_n^m, \beta_n^{ml} \text{ 及び } \chi_n^{ml}$$

の推定値は、本節において前述した同じ手順に従うことと、一般的な出力相互 PSD

$$S_{q_i q_j}(\omega)$$

10

の以下の式の部分分数分解を考えることとによって得ることができる。

$$S_{q_i q_j}(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\varphi_{in}(\omega) \psi_{jn}}{\Omega(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} \varphi_{jn}(-\omega)}{\Omega(-\omega) - \lambda_n} \quad (34)$$

【0087】

そのような場合に、式(34)において推定される単独の未知の値は、 $l = 1, \dots, N_L$ 、 $n = 1, \dots, 2N$ である実稼働ベクトルの第 i の成分

$$\alpha_{jn}, \beta_{jn}^l \text{ 及び } \chi_{jn}^l$$

20

又は $m = 0, \dots, N_W$ 、 $l = 1, \dots, N_L$ 及び $n = 1, \dots, 2N$ である実稼働ベクトルの第 i の成分

$$\alpha_{jn}^m, \beta_{jn}^{ml} \text{ 及び } \chi_{jn}^{ml}$$

である。

【0088】

数値例

本発明の目的である同定の手順の性能を示すために、以下では、図(2)に表された、集中パラメーターを有するとともに、7つの自由度(DOFs: degree of freedom)を有する車両システムの同定の数値例を説明する。幾何学的特徴と、本発明による方法の仮定を順守する表面上の既知のモーダルパラメーターとを有する車両の動きを、適したコンピューティングフィールドにおいてシミュレーションした。用いられたモデルは、ばね上質量(シャーシ)の剛体モード、すなわち、ヒープ、ピッチ及びロールと、ばね下質量(ホイール)の剛体モード、すなわち、前車軸及び後車軸の上下方向の揺れ及びローリング運動を記述することを可能にする。固有周波数 $f_n = \omega_n / 2\pi$ (Hz) 及び減衰係数 ζ_n (%) は、以下の表に記載されている。

30

【0089】

【表 1】

モード	f_n (Hz)	ζ_n (%)	説明
1	1. 0 6 4	2 7. 9 5 4	ヒープ
2	1. 2 2 1	3 2. 1 8 9	ロール
3	1. 2 9 5	3 4. 2 9 5	ピッチ
4	8. 0 4 4	2 6. 0 3 1	後車軸ホップ
5	8. 1 2 9	2 7. 7 9 4	前車軸ロール
6	8. 1 3 4	2 8. 3 7 2	前車軸ホップ
7	8. 2 0 7	2 5. 3 5 4	後車軸ロール

10

【0 0 9 0】

車両は、1つのみのトラック幅 $W_1 = 1.49$ m 及び1つのみの軸間距離 $L_1 = 2.6$ m を有する既知の幾何学的配置を有し、均一のガウス表面（仮定 3～6 参照）上を定速 $v = 60$ km/h で移動していると仮定される。

【0 0 9 1】

剛体モードは、垂直方向に沿ってばね上質量の3つの角度に配置された仮想移動量センサー

20

$$(z_{\theta_1}, z_{\theta_2} \text{ 及び } z_{\theta_3})$$

と、4つのばね下質量のそれぞれに配置された仮想移動量センサー

$$(z_{u_1}, z_{u_2}, z_{u_3} \text{ 及び } z_{u_4})$$

とのレイアウトを用いることによって捕捉されてきた。これらの7つの移動センサーに関する時系列のデータが、同定の方法の入力として用いられる単独のデータである。以下に説明するように、同じデータが、従来のOMA技法（LSCF）及び本発明による方法を用いて解析されてきた。

30

【0 0 9 2】

ホイールとローリングプロファイルとの間の相互作用によって生成される入力を式（16）によって記述するこの例では、以下のものが必要とされる。

ー 右側及び左側のホイールがそれぞれ回転するプロファイル d_1 と d_2 との間で計算された1つのみのコヒーレンス関数 $\Gamma_1(\omega)$ ；

ー 1つのみの遅れ $\tau_1 = 0.16$ 秒。

【0 0 9 3】

そのような入力は、プロファイルに関連付けられた自己PSD $S_d(\omega)$ について Sussmanによって提案されたモデル（式（10））と、コヒーレンス関数 $\Gamma_1(\omega)$ について Bogsjoによって提案されたモデル（式（13））とをパラメトリックモデルとして用いることによってシミュレーションされる。用いられるパラメーターは、以下の表にまとめられている。

40

【0 0 9 4】

【表 2】

Sussman モデル		Bogsjo モデル
c (m ² rad/s)	ω_0 (rad/s)	μ_1
0. 1 2 2	1. 9 6	3. 8 0

50

【0095】

最後に、出力信号が、式(17)の入力－出力関係によって自己PSD及び相互PSDについて計算される。

【0096】

従来のOMAの通常のアルゴリズムの使用から派生する問題、すなわち、NEXT仮定(式(5)、(6)及び(7))に基づく問題を強調するために、同じ出力信号は、LSCF推定器によって処理され、それぞれの結果は、本発明の目的であるアルゴリズムを用いることによって得られた結果と比較される。

【0097】

モーダルテストにおいて、安定化解析は、多くの場合、解析者のシステムの物理的な極の選択を助けるのに用いられる。実際には、偽の極の存在が、推定のプロセスに多かれ少なかれ強く影響を与える可能性がある。それらの存在は、様々な原因、例えば、データ内の雑音、モデル化誤差及び計算上の問題に起因する可能性がある。物理的な極は、それよりも、推定が様々な多項式次数を用いて実行されるときに安定化される傾向がある。

【0098】

安定化図と呼ばれるグラフィカルツールは、多項式の増加する次数を用いて推定されるモーダルパラメーターを視覚化することを可能にする。固有周波数は、横座標軸に表される一方、様々な次数は、縦座標軸上に示される。解析者は、固有周波数、減衰係数及びモード信頼性評価基準(MAC)の値に関する安定化を規定する許容範囲閾値を設定する。様々な状況は、異なるシンボルを用いて表される。すなわち、oは固有周波数の安定化の失敗を示し、fは固有周波数の安定化を表し、d及びvは減衰係数及びモーダルベクトルに関する必要以上の安定化を表し、sは完全に安定化された解を指す。

【0099】

図(3. a)及び図(3. b)には、提案された同定の手順(式(25))及びLSCFアルゴリズムをそれぞれ用いることによって得られた安定化図が示されている。背景の曲線は、ばね上質量の右前部に配置されたセンサー

(図(2)における z_n)

によって検出された移動量から計算された自己PSDを指す。LSCFアルゴリズムによって生成される解は、高い多項式次数に向かってもどの程度安定しない傾向があるか、したがって、著しい量の極／偽のモードを生成することに留意されたい。提案された同定の手順は、そうではなく、完全に安定化された解の列及びシステムの7つの極／物理モードに対応する列が明瞭に現れる非常に明瞭な安定化図を提供する。40に等しい多項式次数を用いることによって得られる固有周波数 f_n (Hz)、減衰係数 ζ_n (%)は、以下の表に与えられている。

【0100】

【表3】

モード	f_n (Hz)	ζ_n (%)
1	1. 064	27. 862
2	1. 222	32. 189
3	1. 294	34. 319
4	8. 044	26. 031
5	8. 129	27. 794
6	8. 134	28. 368
7	8. 207	25. 354

【0101】

上記に紹介した表の解析から、提案された同定の手順によって提供される推定値が固有周波数及び減衰係数の双方に関して正確な値といかに完全に一致しているかということに気付くことができる。

【0102】

この論議において、MACは、推定されたモーダルベクトル (ψ_n) を正確なベクトルと比較するのに用いることができる。特に、そのような行列は、全相関である1から厳密な直交である0まで変化させることによって様々なモードのセットのモーダルベクトルの間の類似度を定量化することを可能にする。したがって、理想的な解は、MACが、同じモードのセットに属するモーダルベクトルをそれ自体と比較することによって得られるいわゆる自己MACと一致する解である。図(2)の車両システムの正確なモーダルベクトルを基準とした自己MACの行列を以下に示す。

【0103】

【表4】

		正確なモーダルベクトル						
		1	2	3	4	5	6	7
正確なモーダルベクトル	1	1. 0000	0. 0111	0. 0199	0. 0011	0. 0000	0. 0211	0. 0000
	2	0. 0111	1. 0000	0. 2911	0. 0033	0. 0244	0. 0000	0. 0077
	3	0. 0199	0. 2911	1. 0000	0. 0322	0. 0022	0. 0033	0. 0011
	4	0. 0011	0. 0033	0. 0322	1. 0000	0. 0000	0. 0300	0. 0000
	5	0. 0000	0. 0244	0. 0022	0. 0000	1. 0000	0. 0000	0. 3655
	6	0. 0211	0. 0000	0. 0033	0. 0300	0. 0000	1. 0000	0. 0000
	7	0. 0000	0. 0077	0. 0011	0. 0000	0. 3655	0. 0000	1. 0000

【0104】

一方、推定されたモーダルベクトルと正確なモーダルベクトルとの間で計算されたMACは以下の表となる。

【0105】

【表5】

		推定されたモーダルベクトル						
		1	2	3	4	5	6	7
正確なモーダルベクトル	1	1. 0000	0. 0111	0. 0188	0. 0011	0. 0000	0. 0211	0. 0000
	2	0. 0111	1. 0000	0. 2911	0. 0033	0. 0244	0. 0000	0. 0077
	3	0. 0199	0. 2911	1. 0000	0. 0322	0. 0022	0. 0033	0. 0011
	4	0. 0011	0. 0033	0. 0322	1. 0000	0. 0000	0. 0300	0. 0000
	5	0. 0000	0. 0244	0. 0022	0. 0000	1. 0000	0. 0000	0. 3655
	6	0. 0211	0. 0000	0. 0033	0. 0277	0. 0000	0. 9999	0. 0000
	7	0. 0000	0. 0077	0. 0011	0. 0000	0. 3655	0. 0000	1. 0000

【0106】

提案された同定の手順によって得られるMACは、理想的な状況に非常に近く、したがって、推定されたモーダルベクトルの正確性を示している。

【0107】

モーダルパラメーターの推定を完了するために、この時、実稼働ベクトル

$$(\alpha_n^m, \beta_n^m \text{ 及び } \chi_n^m)$$

を求めることが必要とされる。そのような目的のために、式(26)～(33)によって、最初に、プロファイルに関連付けられた自己PSD $S_d(\omega)$ 及びコヒーレンス関数 $\Gamma_1(\omega)$ のパラメトリックモデルに関連付けられた係数が計算される。それらの結果は、以下の表に示され、ローリングプロファイルとともにホイールの相互作用によって生成される入力をモデル化するのに用いられる正確な値への最適な対応を示している。

【0108】

【表6】

Sussman モデル		Bogsjo モデル
$c \text{ (m}^2 \text{ rad/s)}$	$\omega_0 \text{ (rad/s)}$	μ_1
0.119	1.96	3.64

【0109】

この時点で、出力される自己PSD又は相互PSDを時間ごとに参照するとともに式(26)又は(34)を用いて、実稼働ベクトルの全ての成分を求めることが可能である。この場合も、MACを用いて、推定された実稼働ベクトルを正確な実稼働ベクトルと比較することができる。簡潔にするために、以下に示す自己MACの行列は、図(2)の車両システムの正確な実稼働ベクトルのサブセットを指す。

【0110】

【表7】

		正確な実稼働ベクトル						
		1	2	3	4	5	6	7
正確な実稼働ベクトル	1	1.000	0.002	0.009	0.028	0.000	0.491	0.000
	2	0.002	1.000	0.046	0.001	0.502	0.000	0.140
	3	0.009	0.046	1.000	0.664	0.001	0.059	0.000
	4	0.028	0.001	0.664	1.000	0.000	0.030	0.000
	5	0.000	0.502	0.001	0.000	1.000	0.000	0.366
	6	0.491	0.000	0.059	0.030	0.000	1.000	0.000
	7	0.000	0.140	0.000	0.000	0.366	0.000	1.000

【0111】

一方、推定された実稼働値と正確な実稼働値との間で計算されたMACは以下の表となる。

【0112】

10

20

30

40

【表 8】

		推定された実稼働ベクトル						
		1	2	3	4	5	6	7
正確な実稼働ベクトル	1	1. 0000	0. 0002	0. 0009	0. 0310	0. 0000	0. 4990	0. 0000
	2	0. 0002	1. 0000	0. 0460	0. 0001	0. 5360	0. 0000	0. 1490
	3	0. 0009	0. 0480	1. 0000	0. 6800	0. 0001	0. 0640	0. 0000
	4	0. 0300	0. 0001	0. 6830	1. 0000	0. 0000	0. 0320	0. 0000
	5	0. 0000	0. 5300	0. 0001	0. 0000	1. 0000	0. 0000	0. 3930
	6	0. 5200	0. 0000	0. 0620	0. 0320	0. 0000	0. 9910	0. 0000
	7	0. 0002	0. 1460	0. 1100	0. 0100	0. 3720	0. 0000	1. 0000

10

【0113】

また、提案された同定の手順によって得られるMACは、理想的な状況に非常に近く、したがって、推定された実稼働ベクトルの正確性を示している。

【0114】

プロファイルに関連付けられた自己PSD $S_d(\omega)$ 及びコヒーレンス関数 $\Gamma_1(\omega)$ のパラメトリックモデルに関連付けられた全ての実稼働モーダルパラメーター及び係数が推定されると、出力される自己PSD及び相互PSDを合成することと、それらの実稼働モーダルパラメーター及び係数の非パラメトリック推定値との比較を行うことが可能である。この最後のステップは非常に興味深い。なぜならば、このステップは、得られた結果の有効性を確認する可能性を解析者に提供するからである。そのような比較の一例は図(4)に示されている。この図には、右前方のばね下質量に配置されたセンサー

20

(図(2)における z_{u_1})

によって検出された移動量から計算された自己PSDが示されている。2つの曲線を完全に重ね合わせることによって、提案された同定の手順から得られる結果が優れていることが更に確認される。

30

【0115】

頭字語

FRF：周波数応答関数

IFT：逆フーリエ変換

LSCF：最小二乗複素周波数

MAC：モード信頼性評価基準

NEXT：自然励振技法

OMA：実稼働モーダル解析

PSD：パワースペクトル密度

40

【0116】

シンボルのリスト

$$\alpha_n^m, \beta_n^m \text{ 及び } \chi_n^m \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

=実稼働ベクトル。

$\beta_{ij}(v) = 2$ つのプロファイル $d_i(x)$ 及び $d_j(x)$ のスペクトルに関連付けられた位相間の差。

γ_r = コヒーレンス関数の補間器多項式の係数

$\Gamma_{ij}(v)$ = コヒーレンス関数

λ_n = システム極

50

$\bar{\phi}_n(\tau) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ = 遅れ依存実稼働基準ベクトル

$\phi_n \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ = 実稼働基準ベクトル

$\phi_{i \ n}$ 及び $\phi_{j \ n}$ 実稼働ベクトル ϕ_n の成分

$\psi_n \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ = システムモーダルベクトル

$\psi_{i \ n}$ 、 $\psi_{j \ n}$ = モーダルベクトル ψ_n の成分

ν_0 = 基準空間周波数

$\tau_1 = L_1 / \nu$ = 遅れ

$\eta_{1 \ m+1}(\tau)$ = プロファイル d_1 と d_{m+1} との間で計算されたコヒーレンス関数 Γ

$\eta_{1 \ m+1}(\omega)$ の I F T ;

σ_r = プロファイルに関連付けられた自己 P S D の補間器多項式の係数 ;

$\Omega_r(\omega)$ = 多項式関数

$A(\omega) = \sum_{r=0}^R (i\omega)^r a_r$ = 全ての P S D に共通の分母の多項式

$B(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ = 一般的な P S D に関連付けられた分子多項式の行列

$d_i(x)$ 、 $d_j(x)$ = 横座標 x の関数として規定される道路表面に沿った平行プロファイル

$H_f(\omega) \in \mathbb{C}^{N_f \times N_f}$ = ホイールの周波数における応答関数の行列

L_1 = 軸間距離

n_g = コヒーレンス関数の補間器多項式の係数の数

n_s = プロファイルに関連付けられた自己 P S D の補間器多項式の係数の数 ;

N_t = ホイールの数

q_i 、 q_j = 出力

$R_d(\tau)$ = プロファイルに関連付けられた自己相関の関数

$R_q(\tau) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ = 出力相関行列 ;

$R_{q_i q_j}(\tau)$ = 出力相関関数

S_d = 道路表面又はレール表面を基準とした P S D

$S_{d_i}(\nu)$ 、 $S_{d_j}(\nu)$ = プロファイル $d_i(x)$ 及び $d_j(x)$ にそれぞれ関連付けられた自己 P S D ;

$S_{d_i d_j}(\nu)$ = プロファイル $d_i(x)$ と $d_j(x)$ との間で計算された相互 P S D

S_j = 入力 P S D 行列

$S_q(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ = 出力 P S D 行列 ;

$S_{q_i q_j}(\omega)$ = パワースペクトル相互密度

$S_r(\omega)$ = 表面によって誘発される移動量を基準とした P S D 行列

T_s = サンプリング周期

ν = 車両の進行速度

W = 2つの平行プロファイル $d_i(x)$ 、 $d_j(x)$ の間の距離

W_m = トラック幅

10

20

30

40

【図 1】

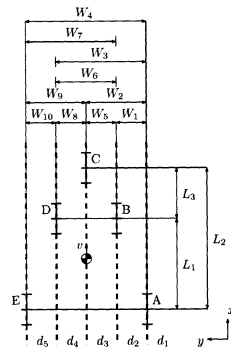


Fig. 1

【図 2】

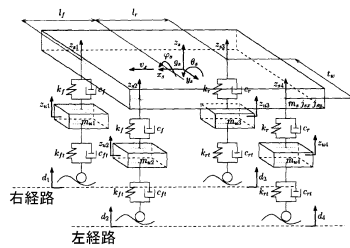


Fig. 2

【図 4】

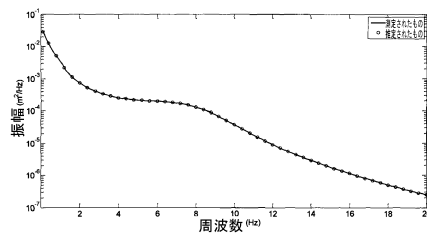


Fig. 4

【図 5】

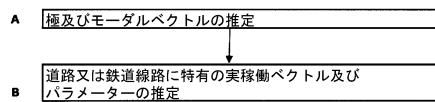


Fig. 5

【図 3. a】

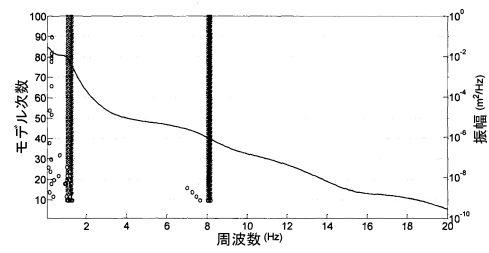


Fig. 3-a

【図 3. b】

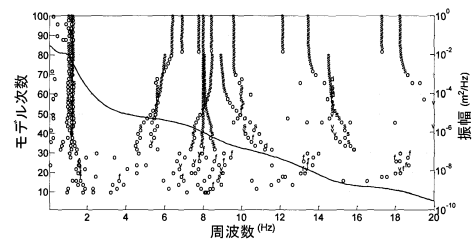


Fig. 3-b

【図 6】

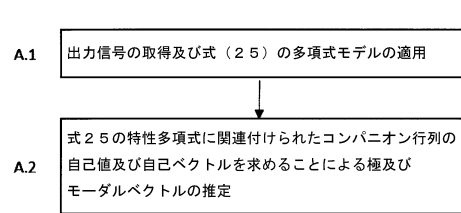
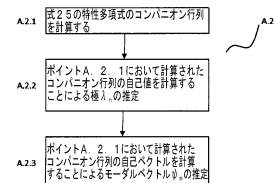


Fig. 6

【図 7】



【図 8】

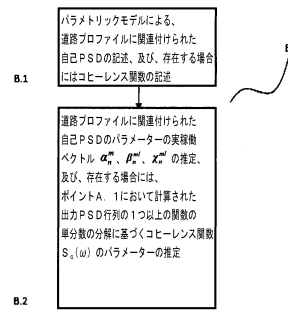


Fig. 8

フロントページの続き

(72)発明者 パルミエリ ダヴィデ
イタリア国 74027 ターラント サン ジョルジョ イオーニコ ヴィア ジュゼッペ マ
ッジーニ 54

(72)発明者 ソリア レオナルド
イタリア国 70122 バーリ バーリ ヴィア ニコロ プティニャニ 210

審査官 萩田 裕介

(56)参考文献 特開2002-073703 (JP, A)
特開平05-149833 (JP, A)
国際公開第2006/135090 (WO, A1)
特表2009-539667 (JP, A)
国際公開第2014/115259 (WO, A1)
米国特許第05614670 (US, A)
独国特許出願公開第10257793 (DE, A1)
米国特許出願公開第2014/0257629 (US, A1)
国際公開第2014/006176 (WO, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01M 17/00 - 17/10
G01M 7/00 - 7/08
G01M 99/00