(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2016-142636
(P2016-142636A)
(43)公開日　平成28年8月8日(2016.8.8)

(51)Int.Cl.		F I		テーマコード（参考）
G01M 1/10	(2006.01)	G01M	1/10	
G01N 33/46	(2006.01)	G01N	33/46	

審査請求 未請求　請求項の数 4　ＯＬ　（全 21 頁）

(21)出願番号　特願2015-18808(P2015-18808)
(22)出願日　平成27年2月2日(2015.2.2)

(71)出願人　504182255
国立大学法人横浜国立大学
神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台７９番１号
(71)出願人　509086486
株式会社エンヴィジョン
広島県広島市安佐北区あさひが丘７－２３－２９
(74)代理人　100064908
弁理士　志賀　正武
(74)代理人　100149548
弁理士　松沼　泰史
(74)代理人　100188558
弁理士　飯田　雅人

最終頁に続く

(54)【発明の名称】重量分布取得装置、重量分布取得方法およびプログラム

(57)【要約】
【課題】慣性モーメントを測定可能な任意の対象物を任意の部分に分割した場合に、質量分布を求めるられるようにする。
【解決手段】質量分布取得装置が、対象物の慣性モーメントの測定値を複数の回転軸の各々について取得する慣性モーメント取得部と、前記慣性モーメント取得部が取得した慣性モーメントに基づいて、前記対象物の質量分布を求める質量分布取得部と、を備える。
【選択図】図１

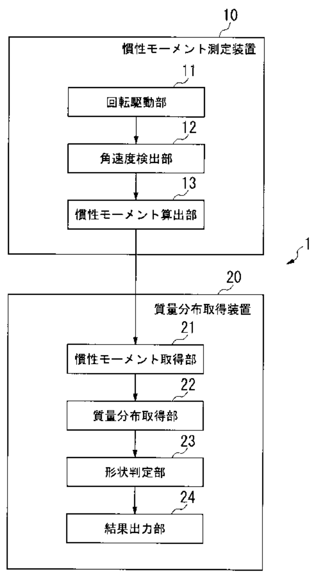

図1

【特許請求の範囲】
【請求項１】
対象物の慣性モーメントの測定値を複数の回転軸の各々について取得する慣性モーメント取得部と、
前記慣性モーメント取得部が取得した慣性モーメントに基づいて、前記対象物の質量分布を求める質量分布取得部と、
を備える質量分布取得装置。
【請求項２】
前記質量分布取得部が取得した質量分布に基づいて、前記対象物の形状を判定する形状判定部を備える、
請求項１に記載の質量分布取得装置。
【請求項３】
対象物の慣性モーメントの測定値を複数の回転軸の各々について取得する慣性モーメント取得ステップと、
前記慣性モーメント取得ステップにて得られた慣性モーメントに基づいて、前記対象物の質量分布を求める質量分布取得ステップと、
を備える質量分布取得方法。
【請求項４】
コンピュータに、
対象物の慣性モーメントの測定値を複数の回転軸の各々について取得する慣性モーメント取得ステップと、
前記慣性モーメント取得ステップにて得られた慣性モーメントに基づいて、前記対象物の質量分布を求める質量分布取得ステップと、
を実行させるためのプログラム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、重量分布取得装置、重量分布取得方法およびプログラムに関する。
【背景技術】
【０００２】
特許文献１には、材木に瞬間的な回転力を与え、そのときの加速度または角加速度を測定し、材ごとの測定値の相対的な差により材内水分布を判定する、木材の材内水分測定方法が記載されている。
特許文献１では、これにより、非破壊的でしかも簡単、確実に、住宅用の梁や桁、柱材のような比較的断面の大きい木材の水分状態を内部水分と外部水分の傾斜まで感知し、密度を把握することが可能とされている。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００３】
【特許文献１】特開２００９－２７０８７４号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００４】
上記のように、特許文献１には、木材の内側と外側との水分を把握することが記載されている。これに対し、木材に限らず、また、内側と外側との区分に限らずより詳細に対象物の質量分布を求められることが望まれる。
【０００５】
本発明は、慣性モーメントを測定可能な任意の対象物を任意の部分に分割した場合に、質量分布を求めることができる装置、方法およびプログラムを提供する。
【課題を解決するための手段】

【０００６】
本発明の第１の態様によれば、質量分布取得装置は、対象物の慣性モーメントの測定値を複数の回転軸の各々について取得する慣性モーメント取得部と、前記慣性モーメント取得部が取得した慣性モーメントに基づいて、前記対象物の質量分布を求める質量分布取得部と、を備える。
【０００７】
前記質量分布取得部が取得した質量分布に基づいて、前記対象物の形状を判定する形状判定部を備えるようにしてもよい。
【０００８】
本発明の第２の態様によれば、質量分布取得方法は、対象物の慣性モーメントの測定値を複数の回転軸の各々について取得する慣性モーメント取得ステップと、前記慣性モーメント取得ステップにて得られた慣性モーメントに基づいて、前記対象物の質量分布を求める質量分布取得ステップと、を備える。
【０００９】
本発明の第３の態様によれば、プログラムは、コンピュータに、対象物の慣性モーメントの測定値を複数の回転軸の各々について取得する慣性モーメント取得ステップと、前記慣性モーメント取得ステップにて得られた慣性モーメントに基づいて、前記対象物の質量分布を求める質量分布取得ステップと、を実行させるためのプログラムである。
【発明の効果】
【００１０】
本発明によれば、慣性モーメントを測定可能な任意の対象物を任意の部分に分割した場合に、質量分布を求めることができる装置、方法およびプログラムを提供することができる。
【図面の簡単な説明】
【００１１】
【図１】本発明の一実施形態における質量分布取得システムの機能構成を示す概略ブロック図である。
【図２】同実施形態における慣性モーメント測定装置の外形の例を示す概略外形図である。
【図３】同実施形態における、密度が異なる２つの部分を有する細長い棒の例を示す図である。
【図４】同実施形態における、密度が異なるｎ個の部分を有する細長い棒の例を示す図である。
【図５】同実施形態における、密度が異なる２つの円柱の部分を有する対象物の例を示す図である。
【図６】同実施形態における、密度が異なるｎ個の円柱の部分を有する対象物の例を示す図である。
【図７】同実施形態における、質量分布の推定結果の例を示す図である。
【図８】図７の質量分布の推定結果のうち、正解値および推定値の付近を拡大した図である。
【図９】同実施形態における、質量分布の推定結果の例を示す図である。
【図１０】図９の質量分布の推定結果のうち、正解値および推定値の付近を拡大した図である。
【図１１】本実施形態において、質量分布取得装置が行う処理手順の例を示すフローチャートである。
【発明を実施するための形態】
【００１２】
以下、本発明の実施形態を説明するが、以下の実施形態は特許請求の範囲にかかる発明を限定するものではない。また、実施形態の中で説明されている特徴の組み合わせの全てが発明の解決手段に必須であるとは限らない。

なお、明細書の記載において、ベクトルないし行列を示す太字表記を省略する。

【００１３】

＜第１の実施形態＞

図１は、本発明の一実施形態における質量分布取得システムの機能構成を示す概略ブロック図である。同図において、質量分布取得システム１は、慣性モーメント測定装置１０と、質量分布取得装置２０と、を備える。慣性モーメント測定装置１０は、回転駆動部１１と、角速度検出部１２と、慣性モーメント算出部１３とを備える。質量分布取得装置２０は、慣性モーメント取得部２１と、質量分布取得部２２と、形状判定部２３と、結果出力部２４とを備える。

【００１４】

慣性モーメント測定装置１０は、質量分布を求める対象である対象物の慣性モーメントを測定する。

回転駆動部１１は、例えばモータなどの動力を備え、慣性モーメント測定装置１０に載せられた対象物を回転させる。

角速度検出部１２は、回転駆動部１１が対象物を回転させるときの角速度を検出する。

慣性モーメント算出部１３は、角速度検出部１２が検出する角速度に基づいて、対象物の慣性モーメントを算出する。具体的には、回転駆動部１１が、回転エネルギーＫを出力し、角速度検出部１２が角速度ωを検出した場合、慣性モーメント算出部１３は、慣性モーメント$I=2K/\omega^2$を算出する。

【００１５】

図２は、慣性モーメント測定装置１０の外形の例を示す概略外形図である。同図において、慣性モーメント測定装置１０は、本体１０１と、回転軸１０２と、回転台１０３とを備える。

本体１０１は、回転駆動部１１を収納しており、回転駆動部１１が、回転軸１０２に回転力を加えることで、回転軸１０２、回転台１０３、および、回転台１０３に載せられている対象物ｂ１００を回転させる。また、本体１０１は、角速度検出部１２を収納しており、回転軸１０２が回転する角速度（＝対象物ｂ１００が回転する角速度）を検出する。なお、慣性モーメント算出部１３も本体１０１に収納されていてもよいし、慣性モーメント測定装置１０と別個の装置として設けられていてもよい。例えば、慣性モーメント算出部１３が、慣性モーメント測定装置１０と別個に設けられた汎用のコンピュータを用いて実現されていてもよい。

【００１６】

回転軸１０２は、回転駆動部１１からの回転力を回転台１０３に伝達する。

回転台１０３は、対象物の積載を受ける。そして、回転台１０３は、対象物が載せられた状態で回転軸１０２から伝達される回転力にて回転することで、対象物ｂ１００を回転させる。

なお、回転台１０３の慣性モーメント、対象物ｂ１００を固定する固定治具の慣性モーメントなど、慣性モーメント測定装置１０の慣性モーメントを予め求めておくようにしてもよい。そして、慣性モーメント算出部１３が、これらの慣性モーメントを予め記憶しておき、対象物ｂ１００の慣性モーメントを算出する際に、慣性モーメント測定装置１０の慣性モーメントの影響を低減させる補正を行うようにしてもよい。これにより、対象物ｂ１００の慣性モーメントを、より高精度に求めることができる。

また、回転台１０３に、慣性モーメントが既知の対象物を搭載して角速度を測定することで、摩擦等によるエネルギー損失分を予め推定するようにしてもよい。そして、慣性モーメント算出部１３が、対象物ｂの慣性モーメントを算出する際に、エネルギー損失分の影響を低減させる補正を行うようにしてもよい。これにより、対象物ｂ１００の慣性モーメントを、より高精度に求めることができる。

【００１７】

質量分布取得装置２０は、慣性モーメント測定装置１０が測定した慣性モーメントに基づいて、対象物における質量分布を求める。特に、慣性モーメント測定装置１０は、対象

物の慣性モーメントを複数の回転中心の各々について測定し、質量分布取得装置２０は、これら複数の慣性モーメントに基づいて、対象物の質量分布を求める。質量分布取得装置２０は、例えばコンピュータを用いて実現される。

慣性モーメント取得部２１は、慣性モーメント測定装置が測定した、対象物の慣性モーメントの測定値を取得する。

【００１８】

質量分布取得部２２は、慣性モーメント取得部が取得した慣性モーメントに基づいて、対象物の質量分布を取得（算出）する。

形状判定部２３は、質量分布取得部２２が取得した質量分布に基づいて、対象物の形状を判定する。具体的には、形状判定部２３は、対象領域（質量分布取得装置２０が処理対象とする、対象物を含む空間）が分割された各部分について、質量が所定の閾値以下となっている部分には、対象物が存在していないと判定する。

【００１９】

結果出力部２４は、質量分布取得部２２が取得した質量分布を示す情報を出力する。また、結果出力部２４は、形状判定部２３が取得した対象物の形状を示す情報を出力する。結果出力部が、質量分布を示す情報を出力する方法や、形状を示す情報を出力する方法としていろいろな方法を用いることができる。例えば、結果出力部２４が、液晶パネル等の表示画面を有し、これらの情報を表示するようにしてもよい。あるいは、結果出力部２４が通信回路を有し、これらの情報を他の装置へ送信するようにしてもよい。

なお、質量分布取得装置２０において、形状判定部２３は必須ではない。質量分布取得装置２０が形状判定部２３を備えていなくてもよい。

【００２０】

次に、質量分布取得部２２が慣性モーメントから対象物の質量分布を求める処理について説明する。

まず、対象物の寸法が決定すれば、対象物の質量分布と任意の回転中心における慣性モーメントとの関係を求めることができることについて説明する。

ある直線を回転中心（回転軸）として角速度ωで回転する剛体をｎ個の小部分に分割して考える。このとき、回転半径r_i、質量m_iの小部分が持つ運動エネルギーK_iは、式（１）のように表される。

【００２１】

【数１】

$$
\begin{aligned}
K_i &= \frac{1}{2} m_i v_i^2 \\
&= \frac{1}{2} m_i (r_i \omega)^2 \\
&= \frac{1}{2} (m_i r_i^2) \omega^2 \qquad \cdots (1)
\end{aligned}
$$

【００２２】

従って、対象物全体の運動エネルギーは、式（２）のように表される。

【００２３】

【数２】

$$
\begin{aligned}
K &= \sum_{i=1}^{n} K_i \\
&= \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}(m_i r_i^2)\omega^2 \\
&= \frac{1}{2}(\sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2)\omega^2 \\
&= \frac{1}{2} I\omega^2 \qquad \cdots (2)
\end{aligned}
$$

【００２４】

但し、Ｉは慣性モーメントを示し、式（３）のように表される。

【００２５】

【数３】

$$
\begin{aligned}
I &= \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 \\
&= \frac{2K}{\omega^2} \qquad \cdots (3)
\end{aligned}
$$

【００２６】

従って、対象物に運動エネルギー（回転エネルギー）を加え、その時の角速度ωを測定すれば、慣性モーメントＩを求めることができる。

なお、微小体積ΔＶの質量をΔｍとすると、密度ρは式（４）のように表される。

【００２７】

【数４】

$$
\begin{aligned}
\rho &= \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \\
&= \frac{dm}{dV} \qquad \cdots (4)
\end{aligned}
$$

【００２８】

微小部分の体積を０に近付けることにより、慣性モーメントＩは、式（５）のような積分の式で表される。

【００２９】
【数５】

$$
\begin{aligned}
I &= \lim_{\Delta m_i \to 0} \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i r_i^2 \\
&= \int r^2 dm \\
&= \int \rho r^2 dV \qquad \cdots (5)
\end{aligned}
$$

【００３０】
次に、密度が異なる２つの部分を有する細長い棒を例に、質量分布の推定について説明する。
図３は、密度が異なる２つの部分を有する細長い棒の例を示す図である。同図に示す棒ｂ１１１（対象物）は、部分ｂ１２１と、部分ｂ１２２とが、同図に向かって左からｂ１２１、ｂ１２２の順で結合して構成されている。部分ｂ１２１の長さはl_1、断面積はS_1、質量はw_1である。また、部分ｂ１２２の長さはl_2、断面積はS_2、質量はw_2である。
部分ｂ１２１の密度、部分ｂ１２２の密度をそれぞれρ_1、ρ_2とし、回転軸の、部分ｂ１２１の左端からの距離をｔ（０≦ｔ≦ｌ１）とする。回転軸からの距離ｚについて、慣性モーメントＩ（ｔ）は、式（６）のように表される。
【００３１】
【数６】

$$
\begin{aligned}
I(t) &= \int \rho_1 z^2 dV + \int \rho_2 z^2 dV \\
&= \int_0^t \rho_1 z^2 S_1 dz + \int_0^{(l_1-t)} \rho_1 z^2 S_1 dz + \int_{(l_1-t)}^{(l_1-t+l_2)} \rho_2 z^2 S_2 dz \\
&= \int_0^t \frac{w_1}{S_1 l_1} z^2 S_1 dz + \int_0^{(l_1-t)} \frac{w_1}{S_1 l_1} z^2 S_1 dz + \int_{(l_1-t)}^{(l_1-t+l_2)} \frac{w_2}{S_2 l_2} z^2 S_2 dz \\
&= \frac{w_1}{l_1}\left[\frac{1}{3}z^3\right]_0^t + \frac{w_1}{l_1}\left[\frac{1}{3}z^3\right]_0^{(l_1-t)} + \frac{w_2}{l_2}\left[\frac{1}{3}z^3\right]_{(l_1-t)}^{(l_1-t+l_2)} \\
&= \frac{1}{3}(l_1^2 - 3l_1 t + 3t^2)w_1 + \frac{1}{3}\left\{l_2^2 + 3(l_1-t)l_2 + 3(l_1-t)^2\right\}w_2
\end{aligned}
$$

$$\cdots (6)$$

【００３２】
ここで、異なる２つの回転軸の、部分ｂ１２１の左端からの距離を、それぞれt_1、ｔ

$_2$とし、これら２つの回転軸それぞれで棒ｂ１１１を回転させた場合の慣性モーメントをＩ（ｔ$_1$）、Ｉ（ｔ$_2$）とする。これらの慣性モーメントＩ（ｔ$_1$）、Ｉ（ｔ$_2$）を精度よく測定できれば、式（７）に示される２次の連立方程式により、各部分の質量を求めることができる。

【００３３】

【数７】

$$\left.\begin{aligned} I(t_1) &= \frac{1}{3}(l_1^2 - 3l_1t_1 + 3t_1^2)w_1 + \frac{1}{3}\left\{l_2^2 + 3(l_1 - t_1)l_2 + 3(l_1 - t_1)^2\right\}w_2 \\ I(t_2) &= \frac{1}{3}(l_1^2 - 3l_1t_2 + 3t_2^2)w_1 + \frac{1}{3}\left\{l_2^2 + 3(l_1 - t_2)l_2 + 3(l_1 - t_2)^2\right\}w_2 \end{aligned}\right\}$$

・・・（７）

【００３４】

式（７）を行列式で表すと、式（８）のようになる。

【００３５】

【数８】

$$\left\{\begin{array}{c} I(t_1) \\ I(t_2) \end{array}\right\} = \frac{1}{3}\left[\begin{array}{cc} l_1^2 - 3l_1t_1 + 3t_1^2 & l_2^2 + 3(l_1 - t_1)l_2 + 3(l_1 - t_1)^2 \\ l_1^2 - 3l_1t_2 + 3t_2^2 & l_2^2 + 3(l_1 - t_2)l_2 + 3(l_1 - t_2)^2 \end{array}\right]\left\{\begin{array}{c} w_1 \\ w_2 \end{array}\right\}$$

・・・（８）

【００３６】

ここで、Ｉ$_2$、Ｒ$_{22}$、Ｗ$_2$を式（９）のように定める。

【００３７】

【数９】

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{I}_2 &= \left\{\begin{array}{c} I(t_1) \\ I(t_2) \end{array}\right\} \\ \boldsymbol{R}_{22} &= \frac{1}{3}\left[\begin{array}{cc} l_1^2 - 3l_1t_1 + 3t_1^2 & l_2^2 + 3(l_1 - t_1)l_2 + 3(l_1 - t_1)^2 \\ l_1^2 - 3l_1t_2 + 3t_2^2 & l_2^2 + 3(l_1 - t_2)l_2 + 3(l_1 - t_2)^2 \end{array}\right] \\ \boldsymbol{W}_2 &= \left\{\begin{array}{c} w_1 \\ w_2 \end{array}\right\} \end{aligned}\right\}$$

・・・（９）

【００３８】

I_2、R_{22}、W_2は、それぞれ、慣性モーメントベクトル、応答行列、質量ベクトルである。

式（８）は、式（１０）のように表される。

【００３９】

【数１０】

$$I_2 = R_{22} W_2 \quad \cdots (10)$$

【００４０】

応答行列R_{22}の逆行列をR_{22}^{-}とすると、質量ベクトルW_2を求める式は、式（１１）のようになる。

【００４１】

【数１１】

$$W_2 = R_{22}^{-} I_2 \quad \cdots (11)$$

【００４２】

このように、慣性モーメントベクトルI_2と、質量ベクトルW_2との関係を示す応答行列R_{22}を予め得ることができる。測定により慣性モーメントベクトルI_2を得ることで、質量ベクトルW_2を推定することができる。

さらに、回転軸の位置（部分ｂ１２１の左端からの距離）をt_1からt_mまでのｍ通りに変えて慣性モーメントの測定数を増やし、$I(t_1)$から$I(t_m)$までの測定データを用いて質量を推定する場合、式（８）は式（１２）のようになる。

【００４３】

【数１２】

$$\left\{ \begin{array}{c} I(t_1) \\ I(t_2) \\ \vdots \\ I(t_m) \end{array} \right\} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} l_1^2 - 3l_1t_1 + 3t_1^2 & l_2^2 + 3(l_1 - t_1)l_2 + 3(l_1 - t_1)^2 \\ l_1^2 - 3l_1t_2 + 3t_2^2 & l_2^2 + 3(l_1 - t_2)l_2 + 3(l_1 - t_2)^2 \\ \vdots & \vdots \\ l_1^2 - 3l_1t_m + 3t_m^2 & l_2^2 + 3(l_1 - t_m)l_2 + 3(l_1 - t_m)^2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} w_1 \\ w_2 \end{array} \right\} \quad \cdots (12)$$

【００４４】

また、式（１０）は、式（１３）のようになる。

【００４５】

【数１３】

$$I_m = R_{m2} W_2 \quad \cdots (13)$$

【００４６】

但し、I_m、R_{m2}は、式（１４）のように表される。

【００４７】

【数１４】

$$\left.\begin{aligned} I_m &= \begin{Bmatrix} I(t_1) \\ I(t_2) \\ \vdots \\ I(t_m) \end{Bmatrix} \\ R_{\mathrm{m}2} &= \frac{1}{3}\begin{bmatrix} l_1^2-3l_1t_1+3t_1^2 & l_2^2+3(l_1-t_1)l_2+3(l_1-t_1)^2 \\ l_1^2-3l_1t_2+3t_2^2 & l_2^2+3(l_1-t_2)l_2+3(l_1-t_2)^2 \\ \vdots & \vdots \\ l_1^2-3l_1t_m+3t_m^2 & l_2^2+3(l_1-t_m)l_2+3(l_1-t_m)^2 \end{bmatrix} \end{aligned}\right\} \quad \cdots(14)$$

【００４８】

一方、W_2は、式（９）に示したのと同じである。

実際には、慣性モーメントベクトルI_mに測定誤差E_{rr}が加えられるため、式（１５）のようになる。

【００４９】

【数１５】

$$I_{m-m} = R_{m2}W_2 + E_{rr} \quad \cdots(15)$$

【００５０】

慣性モーメントベクトルI_{m-m}は、回転軸の位置をｍ通りに変えて測定された、ｍ個の慣性モーメントを示す。

未知数よりも多くの測定データを用いることで、最小二乗法などにより解の信頼性を高めることができる。

【００５１】

次に、密度が異なるｎ個の部分を有する細長い棒を例に、質量分布の推定について説明する。

図４は、密度が異なるｎ個の部分を有する細長い棒の例を示す図である。同図に示す棒ｂ２１１は、部分ｂ２２１と、部分ｂ２２２と、・・・、部分ｂ２２ｎとが、同図に向かって左からｂ２２１、ｂ２２２、・・・、ｂ２２ｎの順で結合して構成されている。部分ｂ２２１の長さはl_1、断面積はS_1、質量はw_1である。部分ｂ２２２の長さはl_2、断面積はS_2、質量はw_2である。・・・部分ｂ２２ｎの長さはl_n、断面積はS_n、質量はw_nである。

この場合、式（１５）は、式（１６）のようになる。

【００５２】

【数１６】

$$I_{m-m} = R_{mn}W_n + E_{rr} \quad \cdots (16)$$

【００５３】

但し、R_{mn}は、R_{m2}をｎ列に拡張した応答行列である。また、W_nは、W_2をｎ次元に拡張したベクトルである。R_{mn}の内容（各要素の値）は、回転軸の位置と注目領域の寸法とに基づいて決定することができる。ここでいう注目領域とは、質量を求める対象となる空間である。

式（１６）に基づいて、質量分布の推定ベクトルW_n’を求める式（１７）を得られる。

【００５４】

【数１７】

$$W_n' = R_{mn}^{+} I_{m-m} \quad \cdots (17)$$

【００５５】

但し、R_{mn}^{+}は、R_{mn}のムーア・ペンローズ一般逆行列を示す。ムーア・ペンローズ一般逆行列によれば、任意の応答行列R_{mn}に対して何らかの逆行列を得られる。

形状を考慮したｎよりも多いｍ通りの回転軸についてｍ個の慣性モーメントを測定する（ｍ個の観測方程式を得る）ことで、最小二乗法等により質量分布の推定精度を高めることができる。

【００５６】

式（１７）は、棒形状に限らず任意の形状に一般化することができる。質量分布取得部２２は、式（１７）に基づいて対象物の質量分布を求める。

具体的には、まず、対象物を含む空間である対象領域を複数の部分に分割する。例えば、対象領域を解析単位となるメッシュに分割する。質量分布取得装置２０のユーザが当該分割を行うようにしてもよいし、質量分布取得部２２が自動的に当該分割を行うようにしてもよい。

【００５７】

また、質量分布取得部２２は、応答行列のムーア・ペンローズ一般逆行列R_{mn}^{+}を取得する。質量分布取得装置２０のユーザがR_{mn}^{+}を入力するようにしてもよいし、質量分布取得部２２がR_{mn}^{+}を算出するようにしてもよい。

そして、質量分布取得部２２は、慣性モーメント測定装置１０による慣性モーメントの測定値を式（１７）に代入して、対象物の質量分布を算出する。

【００５８】

なお、質量分布取得部２２が、応答行列のムーア・ペンローズ一般逆行列に代えて、最小二乗型一般逆行列またはノルム最小型一般逆行列を取得するようにしてもよい。特に、未知数（方程式にて解くべき変数の数）に対して計測数（測定にて得られた慣性モーメントの数）が多い場合、最小二乗型一般逆行列を用いることが考えられる。一方、未知数に対して計測数が少ない場合、ノルム最小型一般逆行列を用いることができる。なお、ムーア・ペンローズ一般逆行列は、未知数に対して計測数が多い場合も少ない場合も適用可能である。

【００５９】

次に、密度が異なる２つの円柱の部分を有する対象物を例に、質量分布の推定について説明する。

図５は、密度が異なる２つの円柱の部分を有する対象物の例を示す図である。同図に示す対象物ｂ３１１は、円柱形状の２個の部分ｂ３２１と、ｂ３２２とが、同図に向かって左からｂ３２１、ｂ３２２の順で結合して構成されている。部分ｂ３２１の長さはl_1、半径はr_1、重心はG_1、質量はw_1である。部分ｂ３２２の長さはl_2、半径はr_2、重心はG_2、質量はw_2である。

また、部分ｂ３２１の左端から回転軸までの距離をｔとし、回転軸から重心G_1、G_2までの距離を、それぞれ、e_1、e_2とする。

このとき、部分ｂ３２１の重心G_1まわりの慣性モーメントI_{G1}は、式（１８）のように表される。

【００６０】

【数１８】

$$I_{G1} = \left(\frac{r_1^2}{4} + \frac{l_1^2}{12}\right) w_1 \quad \cdots (18)$$

【００６１】

また、部分ｂ３２２の重心G_2まわりの慣性モーメントI_{G2}は、式（１９）のように表される。

【００６２】

【数１９】

$$I_{G2} = \left(\frac{r_2^2}{4} + \frac{l_2^2}{12}\right) w_2 \quad \cdots (19)$$

【００６３】

対象物ｂ３１１全体の、点Ｐまわり（回転軸まわり）の慣性モーメントI_Pは、平行軸の定理より、式（２０）のようになる。

【００６４】

【数２０】

$$I_P = (I_{G1} + w_1 e_1^2) + (I_{G2} + w_2 e_2^2) \quad \cdots (20)$$

【００６５】

ここで、距離e_1は、式（２１）のように表される。

【００６６】

【数２１】

$$e_1 = \left| \frac{l_1}{2} - t \right| \quad \cdots (21)$$

【００６７】

距離e_2は、式（２２）のように表される。

【００６８】

【数２２】

$$e_2 = \left| l_1 + \frac{l_1}{2} - t \right| \quad \cdots (22)$$

【００６９】

従って、I_pは、式（２３）のようになる。

【００７０】

【数２３】

$$\begin{aligned} I_P &= \left(\frac{r_1^2}{4} + \frac{l_1^2}{12}\right)w_1 + \left(\frac{l_1^2}{4} - l_1 t + t^2\right)w_1 \\ &\quad + \left(\frac{r_2^2}{4} + \frac{l_2^2}{12}\right)w_2 + \left\{\left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)^2 - 2\left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)t + t^2\right\}w_2 \\ &= \left(\frac{r_1^2}{4} + \frac{l_1^2}{3} - l_1 t + t^2\right)w_1 + \left\{\frac{r_2^2}{4} + \frac{l_2^2}{12} + \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)^2 - 2\left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)t + t^2\right\}w_2 \end{aligned} \quad \cdots (23)$$

【００７１】

従って、質量w_1、w_2が未知の場合でも、異なる２つの回転軸の位置（部分ｂ３２１の左端からの位置）t_1、t_2それぞれに対する慣性モーメント$I(t_1)$、$I(t_2)$を精度よく求めることで、式（２４）の連立方程式により、質量w_1、w_2を求めることができる。

【００７２】

【数２４】

$$\left.\begin{aligned} I_P(t_1) &= \left(\frac{r_1^2}{4} + \frac{l_1^2}{3} - l_1 t_1 + {t_1}^2\right)w_1 + \left\{\frac{r_2^2}{4} + \frac{l_2^2}{12} + \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)^2 - 2\left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)t_1 + {t_1}^2\right\}w_2 \\ I_P(t_2) &= \left(\frac{r_1^2}{4} + \frac{l_1^2}{3} - l_1 t_2 + {t_2}^2\right)w_1 + \left\{\frac{r_2^2}{4} + \frac{l_2^2}{12} + \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)^2 - 2\left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)t_2 + {t_2}^2\right\}w_2 \end{aligned}\right\} \quad \cdots (24)$$

【００７３】

ここで、式（２４）を行列式で表すと、式（２５）のようになる。

【００７４】

【数２５】

$$\left\{\begin{matrix} I_P(t_1) \\ I_P(t_2) \end{matrix}\right\} = \begin{bmatrix} \frac{r_1^2}{4} + \frac{l_1^2}{3} - l_1 t_1 + {t_1}^2 & \frac{r_2^2}{4} + \frac{l_2^2}{12} + \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)^2 - 2\left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)t_1 + {t_1}^2 \\ \frac{r_1^2}{4} + \frac{l_1^2}{3} - l_1 t_2 + {t_2}^2 & \frac{r_2^2}{4} + \frac{l_2^2}{12} + \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)^2 - 2\left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)t_2 + {t_2}^2 \end{bmatrix} \left\{\begin{matrix} w_1 \\ w_2 \end{matrix}\right\} \quad \cdots (25)$$

【００７５】

式（２５）は、式（２６）のように表される。

【００７６】
【数２６】

$$I_{c2} = R_{c22} W_2 \quad \cdots (26)$$

【００７７】
但し、I_{c2}、R_{c22}は、式（２７）のように表される。
【００７８】
【数２７】

$$\left.\begin{aligned} I_{c2} &= \begin{Bmatrix} I_P(t_1) \\ I_P(t_2) \end{Bmatrix} \\ R_{c22} &= \begin{bmatrix} \frac{r_1^2}{4}+\frac{l_1^2}{3}-l_1t_1+t_1^2 & \frac{r_2^2}{4}+\frac{l_2^2}{12}+(l_1+\frac{l_2}{2})^2-2(l_1+\frac{l_2}{2})t_1+t_1^2 \\ \frac{r_1^2}{4}+\frac{l_1^2}{3}-l_1t_2+t_2^2 & \frac{r_2^2}{4}+\frac{l_2^2}{12}+(l_1+\frac{l_2}{2})^2-2(l_1+\frac{l_2}{2})t_2+t_2^2 \end{bmatrix} \end{aligned}\right\} \quad \cdots (27)$$

【００７９】
R_{c22}の逆行列をR_{c22}^{-}として、式（２７）は、式（２８）のようになる。
【００８０】
【数２８】

$$W_2 = R_{c22}^{-} I_{c2} \quad \cdots (28)$$

【００８１】
式（２８）に示されるように、異なる２つの回転軸（回転中心）に対する慣性モーメントI_p（t_1）、I_p（t_2）を取得できれば、２つの質量w_1、w_2を算出することができる。
さらに、回転軸の位置ｔをｍ通りに変えて慣性モーメントの測定数を増やし、I_p（t_1）からI_p（t_m）までの測定データを用いれば、式（２９）のようになる。
【００８２】
【数２９】

$$\begin{Bmatrix} I_P(t_1) \\ I_P(t_2) \\ \vdots \\ I_P(t_m) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_1^2}{4}+\frac{l_1^2}{3}-l_1t_1+t_1^2 & \frac{r_2^2}{4}+\frac{l_2^2}{12}+(l_1+\frac{l_2}{2})^2-2(l_1+\frac{l_2}{2})t_1+t_1^2 \\ \frac{r_1^2}{4}+\frac{l_1^2}{3}-l_1t_2+t_2^2 & \frac{r_2^2}{4}+\frac{l_2^2}{12}+(l_1+\frac{l_2}{2})^2-2(l_1+\frac{l_2}{2})t_2+t_2^2 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{r_1^2}{4}+\frac{l_1^2}{3}-l_1t_m+t_m^2 & \frac{r_2^2}{4}+\frac{l_2^2}{12}+(l_1+\frac{l_2}{2})^2-2(l_1+\frac{l_2}{2})t_m+t_m^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{Bmatrix} \quad \cdots (29)$$

【００８３】

式（２９）は、式（３０）のように表される。
【００８４】
【数３０】

$$I_{cm}=R_{cm2}W_2 \qquad \cdot\cdot\cdot(30)$$

【００８５】
但し、I_{cm}、R_{cm2}は、式（３１）のように表される。
【００８６】
【数３１】

$$\left.\begin{array}{l} I_{cm}=\begin{Bmatrix} I_{\mathrm{P}}(t_1)\\ I_{\mathrm{P}}(t_2)\\ \vdots\\ I_{\mathrm{P}}(t_m)\end{Bmatrix}\\ R_{cm2}=\begin{bmatrix} \frac{r_1^2}{4}+\frac{l_1^2}{3}-l_1t_1+t_1{}^2 & \frac{r_2^2}{4}+\frac{l_2^2}{12}+\left(l_1+\frac{l_2}{2}\right)^2-2\left(l_1+\frac{l_2}{2}\right)t_1+t_1{}^2\\ \frac{r_1^2}{4}+\frac{l_1^2}{3}-l_1t_2+t_2{}^2 & \frac{r_2^2}{4}+\frac{l_2^2}{12}+\left(l_1+\frac{l_2}{2}\right)^2-2\left(l_1+\frac{l_2}{2}\right)t_2+t_2{}^2\\ \vdots & \vdots\\ \frac{r_1^2}{4}+\frac{l_1^2}{3}-l_1t_m+t_m{}^2 & \frac{r_2^2}{4}+\frac{l_2^2}{12}+\left(l_1+\frac{l_2}{2}\right)^2-2\left(l_1+\frac{l_2}{2}\right)t_m+t_m{}^2\end{bmatrix}\end{array}\right\} \qquad \cdot\cdot\cdot(31)$$

【００８７】
慣性モーメントの測定誤差E_{rr}が加わっていても、最小二乗法等により解の信頼性を高めることができる。
次に、密度が異なるｎ個の円柱の部分を有する対象物を例に、質量分布の推定について説明する。
図６は、密度が異なるｎ個の円柱の部分を有する対象物の例を示す図である。同図に示す対象物ｂ４１１は、円柱形状のｎ個の部分ｂ４２１と、部分ｂ４２２と、・・・、部分ｂ４２ｎとが、同図に向かって左からｂ４２１、ｂ４２２、・・・、ｂ４２ｎの順で結合して構成されている。部分ｂ４２１の長さはl_1、半径はr_1、重心はG_1、質量はw_1である。部分ｂ４２２の長さはl_2、半径はr_2、重心はG_2、質量はw_2である。・・・部分ｂ４２ｎの長さはl_n、半径はr_n、重心はG_n、質量はw_nである。
また、部分ｂ４２１の左端から回転軸までの距離をｔとし、回転軸から重心G_1、G_2・・・G_nまでの距離を、それぞれ、e_1、e_2、・・・、e_nとする。
この場合、式（２０）は、式（３２）のように拡張される。
【００８８】
【数３２】

$$I_{\mathrm{P}} = (I_{\mathrm{G1}}+w_1e_1^2)+(I_{\mathrm{G2}}+w_2e_2^2)+\ldots+(I_{\mathrm{G}n}+w_ne_n^2) \qquad \cdot\cdot\cdot(32)$$

【００８９】

これにより、ｍ個の慣性モーメントの測定値を含む慣性モーメントベクトルI_{cm-m}と、ｎ個の未知数を含む質量ベクトルW_nとの関係R_{cmm}を算出することができる。このため、ｎよりも多いｍ個の測定データを用いることで、式（３３）のように、最小二乗法などにより解の信頼性を高めることができる。

【００９０】

【数３３】

$$I_{cm-m} = R_{cmn} W_n + E_{rr} \quad \cdots (33)$$

【００９１】

式（３３）に基づいて、質量分布の推定ベクトルW_n’を求める式（３４）を得られる。

【００９２】

【数３４】

$$W_n' = R_{cmn}^{+} I_{cm-m} \quad \cdots (34)$$

【００９３】

但し、$R_{cmm}{}^{+}$は、R_{cmm}のムーア・ペンローズ一般逆行列を示す。

次に、密度が異なる２つの部分を有する細長い棒の質量分布の推定例について説明する。

図３に示した、密度が異なる２つの部分ｂ１２１およびｂ１２２を有する細長い棒ｂ１１１について、質量w_1＝３６０キログラム（ｋｇ）、質量w_2＝２４０キログラムを求める問題を考える。部分ｂ１２１、ｂ１２２は、それぞれ、長さがl_1＝１．２メートル（ｍ）、l_2＝３．６メートルであるとする。

回転軸が部分ｂ１２１の左端からｔ（$0 \leqq t \leqq l_1$）の距離にあるときの慣性モーメントは、上述した式（１２）、（１３）のように表される。

また、式（１３）より式（３５）を得られる。

【００９４】

【数３５】

$$W_2 = R_{m2}^{+} I_m \quad \cdots (35)$$

【００９５】

但し、$R_{m2}{}^{+}$は、R_{m2}のムーア・ペンローズ一般逆行列を示す。

部分ｂ１２１およびｂ１２２の寸法が既知の場合には、質量分布に対する慣性モーメントを調べることができるため、応答行列R_{m2}を取得することができ、慣性モーメントの測定値を示す慣性モーメントベクトルI_mから質量分布を求める（推定する）ことができる。

【００９６】

いま、回転軸の位置（部分ｂ１２１の左端からの距離）ｔを、t_1＝０メートル、t_2＝０．３メートル、t_3＝０．６メートル、t_4＝０．９メートル、t_5＝１．２メートル、の５通りに変えて、慣性モーメントを測定し、質量分布w_1およびw_2を推定する場合を模擬する。慣性モーメントの測定値を模擬するために、慣性モーメントの正解値それ

ぞれに、平均０、標準偏差０．４キログラム平方メートル（ｋｇｍ^2）の正規分布に従う誤差を乱数として加えた。この標準偏差の値０．４は、市販されているエンジン主観性モーメント測定装置の例を参考に決定した。

【００９７】

図７は、質量分布の推定結果の例を示す図である。同図では、乱数シードを５０通りに変えて質量分布の推定を行った結果を示している。同図において、質量分布の正解値を四角（■）で示し、推定値を丸（○）で示している。正解値、推定値ともに、ｗ$_1$＝３６０キログラム、ｗ$_2$＝２４０キログラムの付近に示されている。

図８は、図７の質量分布の推定結果のうち、正解値および推定値の付近を拡大した図である。同図において、ｗ$_1$＝３６０キログラム、ｗ$_2$＝２４０キログラムの位置に正解値の点Ｐ１０１が表示されている。また、ｗ$_1$が３６０キログラム前後、ｗ$_2$＝２４０キログラム付近の位置に、点Ｐ１０２など、推定値を示す点が複数表示されている。

図７および図８に示すように、ｗ$_2$の推定精度が特に高く、ｗ$_1$についても、１キログラム程度の精度で推定できている。

【００９８】

次に、対象物の質量分布の推定から対象物の形状を推定する例について説明する。

図３に示した、密度が異なる２つの部分ｂ１２１およびｂ１２２を有する細長い棒ｂ１１１について、質量ｗ$_1$＝３６０キログラム、質量ｗ$_2$＝０キログラムを求める問題を考える。部分ｂ１２１、ｂ１２２は、それぞれ、長さがｌ$_1$＝１．２メートル（ｍ）、ｌ$_2$＝３．６メートルであるとする。これにより、対象物の長さは１．２メートルであるが、対象物の形状が不明であり、注目領域として長さ４．８メートルの領域について質量分布を求める場合を模擬する。

【００９９】

いま、回転軸の位置（部分ｂ１２１の左端からの距離）ｔを、ｔ$_1$＝０メートル、ｔ$_2$＝０．３メートル、ｔ$_3$＝０．６メートル、ｔ$_4$＝０．９メートル、ｔ$_5$＝１．２メートル、の５通りに変えて、慣性モーメントを測定し、質量分布ｗ$_1$およびｗ$_2$を推定する場合を模擬する。慣性モーメントの測定値を模擬するために、慣性モーメントの正解値それぞれに、平均０、標準偏差０．４キログラム平方メートル（ｋｇｍ^2）の正規分布に従う誤差を乱数として加えた。

【０１００】

図９は、質量分布の推定結果の例を示す図である。同図では、乱数シードを５０通りに変えて質量分布の推定を行った結果を示している。同図において、質量分布の正解値を四角（■）で示し、推定値を丸（○）で示している。正解値、推定値ともに、ｗ$_1$＝３６０キログラム、ｗ$_2$＝０キログラムの付近に示されている。

図１０は、図９の質量分布の推定結果のうち、正解値および推定値の付近を拡大した図である。同図において、ｗ$_1$＝３６０キログラム、ｗ$_2$＝０キログラムの位置に正解値の点Ｐ２０１が表示されている。また、ｗ$_1$が３６０キログラム前後、ｗ$_2$＝０キログラム付近の位置に、点Ｐ２０２など、推定値を示す点が複数表示されている。

図９および図１０に示されるように、質量ｗ$_2$の推定値がほぼ０になっている。

このように、質量がほぼ０になっている領域について、形状判定部２３は、対象物が存在していない領域であると判定する。これにより、形状判定部２３は、対象物の形状を求める。具体的には、形状判定部２３は、対象領域が分割された各部分について、質量が所定の閾値以下か否かを判定する。そして、形状判定部２３は、質量が閾値以下であると判定した部分には、対象物が存在していないと判定する。これにより、質量分布取得装置２０が対象とする領域が、対象領域よりも大きく設定されていても、形状判定部２３は、対象物の形状を検出することができる。また、形状判定部２３は、対象物内部の空洞を検出することができる。

【０１０１】

次に、図１１を参照して質量分布取得装置２０の動作について説明する。

図１１は、質量分布取得装置２０が行う処理手順の例を示すフローチャートである。

同図の処理において、慣性モーメント取得部２１は、慣性モーメント測定装置１０が複数の回転軸の各々について測定した慣性モーメントを取得する（ステップＳ１０１）。

次に、質量分布取得部２２は、ステップＳ１０１で得られた慣性モーメントに基づいて、対象物の質量分布を取得する（ステップＳ１０２）。具体的には、質量分布取得部２２は、ステップＳ１０１で得られた慣性モーメントを式（１７）に代入して質量分布を算出する。

次に、形状判定部２３は、ステップＳ１０２で得られた質量分布に基づいて、対象物の形状を判定する（ステップＳ１０３）。具体的には、形状判定部２３は、対象領域を分割した部分のうち、質量が所定の閾値以下となっている部分について、対象物が存在していないと判定する。

そして、結果出力部２４は、ステップＳ１０２で得られた対象物の質量分布、および、ステップＳ１０３で得られた対象物の形状を出力する（ステップＳ１０４）。

その後、図１１の処理を終了する。

【０１０２】

以上のように、慣性モーメント取得部２１は、対象物の慣性モーメントの測定値を複数の回転軸の各々について取得する。そして、質量分布取得部は、慣性モーメント取得部が取得した慣性モーメントに基づいて、対象物の質量分布を求める。

これにより、質量分布取得装置２０では、慣性モーメントを測定可能な任意の対象物を任意の部分に分割した場合に、質量分布を求めることができる。

【０１０３】

また、形状判定部２３は、質量分布取得部２２が取得した質量分布に基づいて、対象物の形状を判定する。

これにより、質量分布取得装置２０が対象とする領域が、対象領域よりも大きく設定されていても、形状判定部２３は、対象物の形状を検出することができる。また、形状判定部２３は、対象物内部の空洞を検出することができる。

【０１０４】

なお、質量分布取得装置２０が行う演算および制御の全部または一部の機能を実現するためのプログラムをコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録して、この記録媒体に記録されたプログラムをコンピュータシステムに読み込ませ、実行することで各部の処理を行ってもよい。なお、ここでいう「コンピュータシステム」とは、ＯＳや周辺機器等のハードウェアを含むものとする。

また、「コンピュータシステム」は、ＷＷＷシステムを利用している場合であれば、ホームページ提供環境（あるいは表示環境）も含むものとする。

また、「コンピュータ読み取り可能な記録媒体」とは、フレキシブルディスク、光磁気ディスク、ＲＯＭ、ＣＤ－ＲＯＭ等の可搬媒体、コンピュータシステムに内蔵されるハードディスク等の記憶装置のことをいう。さらに「コンピュータ読み取り可能な記録媒体」とは、インターネット等のネットワークや電話回線等の通信回線を介してプログラムを送信する場合の通信線のように、短時間の間、動的にプログラムを保持するもの、その場合のサーバやクライアントとなるコンピュータシステム内部の揮発性メモリのように、一定時間プログラムを保持しているものも含むものとする。また上記プログラムは、前述した機能の一部を実現するためのものであっても良く、さらに前述した機能をコンピュータシステムにすでに記録されているプログラムとの組み合わせで実現できるものであっても良い。

【０１０５】

以上、本発明の実施形態を図面を参照して詳述してきたが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、この発明の要旨を逸脱しない範囲の設計変更等も含まれる。

【符号の説明】

【０１０６】

１　質量分布取得システム

１０　慣性モーメント測定装置

１１　回転駆動部
１２　角速度検出部
１３　慣性モーメント算出部
２０　質量分布取得装置
２１　慣性モーメント取得部
２２　質量分布取得部
２３　形状判定部
２４　結果出力部

【図１】

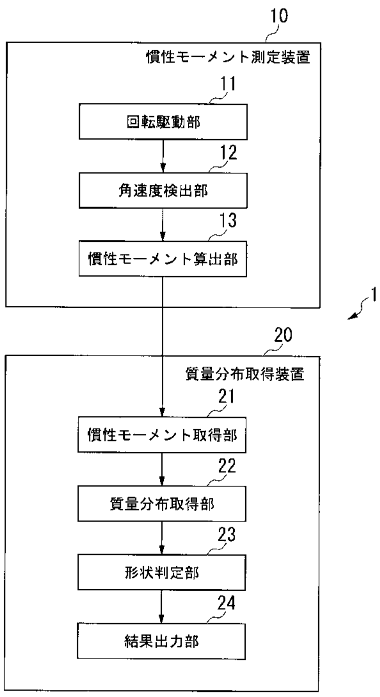

図1

【図２】

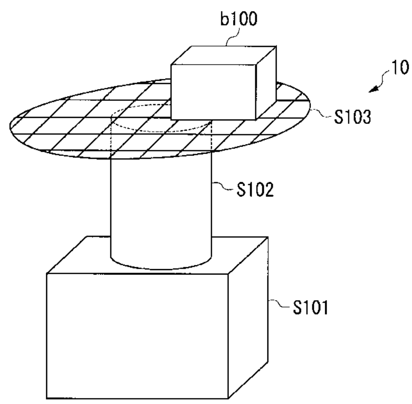

図2

【図３】

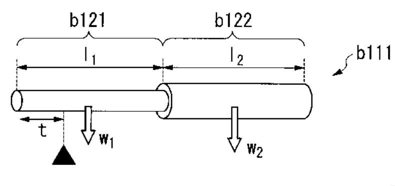

図3

【図４】

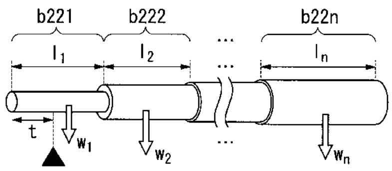

図4

【図５】

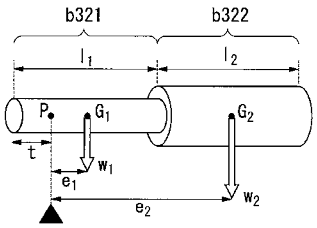

図5

【図６】

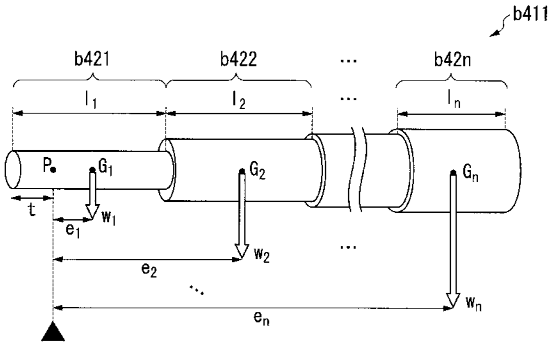

図6

【図７】

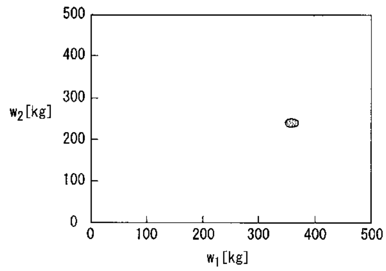

図7

【図８】

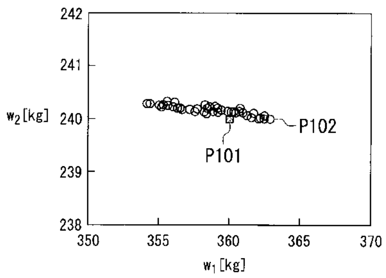

図8

【図９】

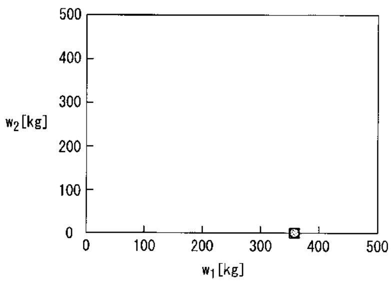

図9

【図１０】

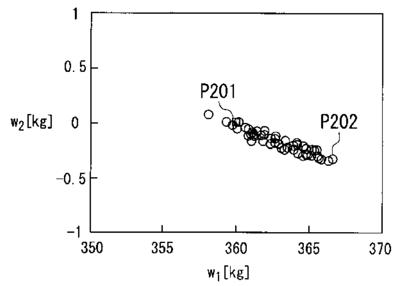

図10

【図１１】

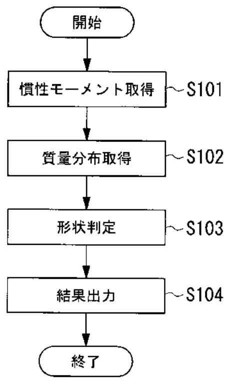

図11

フロントページの続き

(74)代理人　100196058
弁理士　佐藤　彰雄
(72)発明者　小川　雅
神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台７９番１号　国立大学法人横浜国立大学内
(72)発明者　原田　享
神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台７９番１号　国立大学法人横浜国立大学内
(72)発明者　平岡　正人
広島県広島市安佐北区あさひが丘７丁目２３番２９号　株式会社エンヴィジョン内