

(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2005-121371

(P2005-121371A)

(43) 公開日 平成17年5月12日(2005.5.12)

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>

G01L 25/00

F I

G01L 25/00

B

G01L 25/00

C

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 請求項の数 28 O L (全 27 頁)

(21) 出願番号 特願2003-353158 (P2003-353158)

(22) 出願日 平成15年10月14日 (2003.10.14)

(71) 出願人 301021533

独立行政法人産業技術総合研究所

東京都千代田区霞が関1-3-1

(72) 発明者 梅田 章

茨城県つくば市東1-1-1 独立行政法

人産業技術総合研究所つくばセンター内

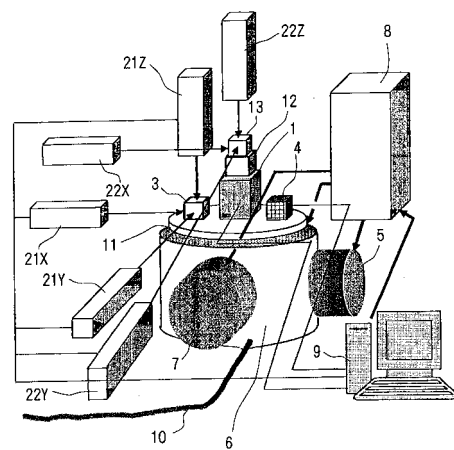
(54) 【発明の名称】 カセンサの動的マトリックス感度計測法とその装置

(57) 【要約】

【課題】 カセンサは、殆どの使用分野において時間的に変動する力を計測するにもかかわらず、その動的な力の標準は確立していない。したがって、カセンサを動的マトリックスにより正確に感度を計測することができるようにする

【解決手段】 X軸アクチュエータ5、Z軸アクチュエータ6、Y軸アクチュエータ7で各々並進運動と回転運動をテーブル11に対して付与し、テーブル11の振動を第1コーナキューブ3の振動として第1テーブル面計測用実時間レーザ干渉計21x、y、zで検出し、また、同一テーブル11上に固定した校正対象のセンサ1の振動を質量12を介して第2コーナキューブ13の振動として第2テーブル面計測用実時間レーザ干渉計22x、y、zで計測する。テーブル11上のカセンサ、前記各干渉計、校正用カセンサ等の信号を信号処理装置に入力し、マトリックスの全ての要素を決めることにより感度を計測する。

【選択図】 図1



レーザ干渉計を使う場合の計測法とその装置 (一次校正法)

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

テーブル上に被計測力センサをその取り付け面が該テーブルに向くように固定し、  
運動発生装置により前記テーブルに対して 3 軸方向の各並進運動と各回転運動の計 6 自由度のうち、任意に選択した並進運動と回転運動を付与し、

前記運動発生装置による特定の周波数において、前記力センサの 3 軸方向の各力と各トルクのうち任意に選択した力またはトルクの検出自由度と、前記運動発生装置の前記任意に選択した並進運動と回転運動の自由度とから求まる次数のマトリクス感度の全ての要素を未知数とする連立一次方程式を得て、

前記マトリクス感度の全ての要素を決めることにより、力センサの動的マトリクス感度を計測することを特徴とする力センサの動的マトリクス感度計測方法。 10

## 【請求項 2】

テーブル上に被計測力センサをその取り付け面が該テーブルに向くように固定し、  
運動発生装置により前記テーブルに対して 3 軸方向の各並進運動と各回転運動の計 6 自由度のうち、任意に選択した並進運動と回転運動を付与し、

前記運動発生装置による特定の周波数において、前記力センサの 3 軸方向の各力と各トルクのうち任意に選択した力またはトルクの検出自由度を  $N$  個とし、前記運動発生装置の前記選択した運動の自由度を  $M$  個とするとき、 $N \times M$  次の感度マトリクスの全ての要素に関する連立一次方程式を得てそれを解き、

前記感度マトリクスの全ての要素を決めることにより、力センサの動的マトリクス感度を計測することを特徴とする力センサの動的マトリクス感度計測方法。 20

## 【請求項 3】

力センサの出力軸のうちの  $N_1$  個の出力軸に対して、 $M_1$  の自由度をもつ運動発生装置を用いて前記マトリクス感度を求め、

力センサの出力軸のうちの  $N_2$  個の出力軸に対して、 $M_2$  の自由度をもつ運動発生装置を用いて前記マトリクス感度を求め、

両マトリクス感度を合成することにより最終的なマトリクス感度を求めることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリクス感度計測方法。

## 【請求項 4】

前記運動発生装置を前記テーブルに固定した運動検出センサの信号により制御し、 30

前記運動検出センサの感度を、力センサと運動発生装置とによる前記  $N \times M$  次のマトリクスとして与えることにより、前記力センサの感度を少なくとも  $N \times M$  次のマトリクスとして与えることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリクス感度計測方法。

## 【請求項 5】

前記運動検出センサは加速度センサ、速度センサ、変位センサ、レーザ光の干渉に基づく振動計、レーザ光の干渉に基づく変位計のいずれか一つであることを特徴とする請求項 4 記載の力センサの動的マトリクス感度計測方法。

## 【請求項 6】

力センサに継続時間の短い衝撃的運動ベクトルによる衝撃力を印加し、 40

そのときの力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して、各振動数成分に対応するマトリクス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、

前記振動数の関数としてマトリクス感度を求めることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリクス感度計測方法。

## 【請求項 7】

力センサに必要な振動数帯域を持つランダム運動ベクトルによるランダムな力を印加し、

そのときの力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して特性の周波数成分に対応するマトリクス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、

前記振動数の関数としてマトリクス感度を求めることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリクス感度計測方法。 50

## 【請求項 8】

力センサの出力信号ベクトル空間の次元の値がLであって、前記力センサがL次元の力を検出するL次元力センサとしての、L軸力センサであることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリックス感度計測方法。

## 【請求項 9】

入力運動ベクトルの入力軸と出力信号ベクトルの成分の出力軸との関係によって、マトリックス感度の対応する要素が誤差を表すことを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリックス感度計測方法。

## 【請求項 10】

校正対象とする力センサに印加する動的力ベクトルは、レーザ干渉計、またはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された基準力センサ、もしくはそれにトレーサブルな力センサで計測されること、若しくはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された力センサまたはそれにトレーサブルな力センサで計測されることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリックス感度計測方法。

10

## 【請求項 11】

重力加速度に対する力センサの姿勢角を含む、動特性に影響を及ぼす全ての変数の関数として、マトリックス感度を求めることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリックス感度計測方法。

## 【請求項 12】

自動車乗員保護用エアバッグ開発実験用ダミーの体内にセットする力センサの校正に用いることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリックス感度計測方法。

20

## 【請求項 13】

ロボットの運動制御用多軸力センサの校正に用いることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の力センサの動的マトリックス感度計測方法。

## 【請求項 14】

取り付け面がテーブルに向くように該テーブル上に固定した被計測力センサと、前記テーブルに対して 3 軸方向の各並進運動と各回転運動の計 6 自由度のうち、任意に選択した並進運動と回転運動を付与する運動発生装置と、

前記運動発生装置による特定の周波数において、前記力センサの 3 軸方向の各力と各トルクのうち任意に選択した力またはトルクの検出自由度と、前記運動発生装置の前記任意に選択した並進運動と回転運動の自由度とから求まる次数のマトリックス感度の全ての要素を未知数とする連立一次方程式を得て、前記マトリックス感度の全ての要素を決めることにより、力センサの動的マトリックス感度を計測する手段を備えたことを特徴とする力センサの動的マトリックス感度計測装置。

30

## 【請求項 15】

取り付け面がテーブルに向くように該テーブル上に固定した被計測力センサと、前記テーブルに対して 3 軸方向の各並進運動と各回転運動の計 6 自由度のうち、任意に選択した並進運動と回転運動を付与する運動発生装置と、

前記運動発生装置による特定の周波数において、前記力センサの 3 軸方向の各力と各トルクのうち任意に選択した力またはトルクの検出自由度をN個とし、前記運動発生装置の自由度をM個とするとき、 $N \times M$ 次の感度マトリックスの全ての要素に関する連立一次方程式を得てそれを解き、前記感度マトリックスの全ての要素を決めることにより、力センサの動的マトリックス感度を計測する手段を備えたことを特徴とする力センサの動的マトリックス感度計測装置。

40

## 【請求項 16】

力センサの出力軸のうちのN1個の出力軸に対して、M1の自由度をもつ運動発生装置を用いて前記マトリックス感度を求める手段と、

力センサの出力軸のうちのN2個の出力軸に対して、M2の自由度をもつ運動発生装置を用いて前記マトリックス感度を求める手段と、

50

両マトリックス感度を合成することにより最終的なマトリックス感度を求める手段とを備えることを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

【請求項 1 7】

前記運動発生装置を前記テーブルに固定した運動検出センサの信号により制御する制御手段と、

前記運動検出センサの感度を、前記力センサと運動発生装置とによる前記  $N \times M$  次のマトリックスとして与えることにより、前記力センサの感度を  $N \times M$  次のマトリックスとして与える信号処理手段とを備えることを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

10

【請求項 1 8】

前記運動検出センサは加速度センサ、速度センサ、変位センサのいずれか一つであることを特徴とする請求項 1 7 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

【請求項 1 9】

前記運動発生装置は前記被計測力センサに継続時間の短い衝撃的運動ベクトルによる衝撃力を印加するものであり、

力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して、各振動数成分に対応するマトリックス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、前記振動数の関数としてマトリックス感度を求める信号処理手段を備えることを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

20

【請求項 2 0】

前記運動発生装置は前記被計測力センサに必要な振動数帯域を持つランダム運動ベクトルによるランダムな力を印加するものであり、

力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して、各周波数成分に対応するマトリックス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、前記振動数の関数としてマトリックス感度を求める信号処理手段を備えたことを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

【請求項 2 1】

力センサの出力信号ベクトル空間の次元の値が  $L$  であって、前記力センサが  $L$  次元の力を検出する  $L$  次元力センサであることを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

30

【請求項 2 2】

前記信号処理手段は、入力運動ベクトルの入力軸と出力信号ベクトルの成分の出力軸との関係によって、マトリックス感度の対応する要素が、誤差出力の感度を表すことを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測方法。

【請求項 2 3】

校正対象とする力センサに印加する動的力ベクトルを、レーザ干渉計、またはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された基準力センサ、もしくはそれにトレーサブルな力センサで計測し、若しくはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された力センサまたはそれにトレーサブルな力センサで計測することを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

40

【請求項 2 4】

前記信号処理手段は、重力加速度に対する力センサの姿勢角を含む、動特性に影響を及ぼす全ての変数の関数として、マトリックス感度を求めることを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

【請求項 2 5】

自動車乗員保護用エアバッグ開発実験用ダミーの体内にセットする力センサの校正に用いることを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

【請求項 2 6】

50

ロボットの運動制御用多軸力センサの校正に用いることを特徴とする請求項 1 4 または請求項 1 5 記載の力センサの動的マトリックス感度計測装置。

【請求項 2 7】

テーブル上に直接設置した第 1 コーナキューブと、

前記テーブル上に固定した被計測力センサ上に設置した第 2 コーナキューブと、

前記テーブルに対して任意の並進運動と回転運動を付与する運動発生装置と、

前記第 1 及び第 2 コーナキューブの運動を実時間で各々計測するレーザ干渉計と、

前記テーブル上に固定し該テーブルの運動を検出するテーブル運動検出用センサと、

前記テーブル運動検出用センサの信号により前記運動発生装置の駆動を制御し、前記レーザ干渉計の出力信号と、被計測力センサの出力信号とを入力して被計測力センサの校正処理を行う信号処理装置を備えたことを特徴とする力センサの動的マトリックス感度計測装置。

10

【請求項 2 8】

テーブル上に直接設置したマトリックス感度が定義されている第 1 加速度計と、

前記テーブル上に固定した被計測力センサ上に設置したマトリックス感度が定義されている第 2 加速度計と、

前記テーブルに対して任意の並進運動と回転運動を付与する運動発生装置と、

前記テーブル上に固定し該テーブルの運動を検出するテーブル運動検出用センサと、

前記テーブル運動検出用センサの信号により前記運動発生装置の駆動を制御し、前記第 1 及び第 2 加速度計の出力信号と、被計測力センサの出力信号とを入力して被計測力センサの校正処理を行う信号処理装置を備えたことを特徴とする力センサの動的マトリックス感度計測装置。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、力センサの動的感度を計測する技術に関し、特にエアバック制御用ダミーや、ロボットの運動制御等に用いる力センサを動的マトリックスにより正確に感度を計測することができるようにした力センサの動的マトリックス感度計測法とその装置に関する。

【背景技術】

30

【0002】

力センサは、殆どの使用分野において時間的に変動する力を計測するにもかかわらず、その動的な力の標準は確立していない。また、国際度量衡局が主催する国際比較の対象にもなっていないし、ましてや担当する諮問委員会もないのが実情である。力センサの動的特性評価に関する研究としては、ドイツの物理工学研究所 (PTB) が図 4 に示すような装置を用いて、感度軸が一軸の力センサの動特性評価結果を発表している。

【0003】

図 4 に示す装置において 2 1 は一軸の振動台、2 2 は振動台 2 1 のテーブル面、2 3 は振動台 2 1 のテーブル面に取り付けられた一軸力センサ、2 4 は 1 軸力センサの力の受け面、2 5 は力センサに慣性力を作用させるための質量、2 6 は力センサ 2 3 の感度軸の方向、2 7 は振動台 1 のテーブル面の振動の方向で、力センサ 2 3 の感度軸方向と一致している。

40

【0004】

このような装置において、質量 2 5 の運動加速度を  $a$  とすると、ニュートンの法則に従って、力センサに作用する力  $f$  は、 $f = m \times a$  (  $a$  - テーブル 2 2 の運動加速度 ) で表される。図 4 に示すように振動台の上にこれをセットすれば、運動加速度は振動加速度となり、正弦波で時間的に変化する動的な力を、力センサに印加することが可能になり、このような装置を用いて力センサの動的特性評価を行っている。なお、多軸力センサの校正については特開平 9 - 1 1 1 6 8 号公報に記載され、PTB の実験を示す試料として下記の非特許文献 1 が存在する。

50

【特許文献1】特開平9-11168号公報

【非特許文献1】Error sources in dynamic force calibration, R. Kumme, proceedings of the XIII IMEKO world congress, Volume 1, P259.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

上記のような装置を用いた力センサの動的特性評価方法、及び従来の技術においては下記のような原理的な欠点がある。

【0006】

1：力センサは、構造上不可避な横感度を有し、当然周波数に依存するにもかかわらず、その特性を計測することができない。 10

【0007】

2：力がベクトルである以上、入力を実際の力ベクトルであって力センサの出力は電圧値であるにせよベクトルであるから、信号の変換の割合を示す感度は、線形代数学の教えに従えばマトリックスにならないといけないにもかかわらず、そのような数学的原理には反している。

【0008】

3：実際に使われている力センサの中には三軸、六軸など、感度軸が複数個あるものがあるが、このような多軸の力センサでは、一軸の振動発生装置による慣性力発生を用いたのでは、高い精度で感度をマトリックスとして求めることは不可能である。 20

【0009】

4：力がベクトルである以上、動的な力を計測するということは、大きさと方向を計ることを意味する。従って動的な力の計測のための校正としては、大きさと方向の検出の両方を行わなければ、無意味である。それに対して図1に示した方法においては、力センサの感度軸と振動台の振動方向を人為的に最初から一致させているので動的力の校正になっていない。

【0010】

5：圧電物質は剪断成分を持つので、圧電材料を用いた力センサは必然的に横感度を持つ。従って、精度の高い計測のためには横感度を明らかにする必要があるが、従来の技術では不可能であった。さらに圧電型の三軸力センサも開発されているが、マトリックス感度は与えられてはいないので、線形代数学の教えには反している。 30

【0011】

6：力センサと関係が深い加速度センサの校正技術においては、最も一般的な一軸加速度センサの感度軸と振動台の振動方向を一致させて校正がなされており、加速度が本来はベクトルであり、大きさと方向を持つ物理量であることが無視されている。最初から加速度センサの感度軸と振動方向を一致させたのでは、加速度の大きさでしか校正していないのであって、ベクトルとしての校正ではない以上、加速度計を用いて  $f(\text{力})=m(\text{質量}) \times (\text{加速度})$  の関係から力センサを力ベクトルで校正することは、完全に不可能な状況にある。

【0012】

7：本発明は力センサの横感度を求める方法と装置に関するもので、力センサの感度はマトリックスで表されなければならない、運動発生装置が3自由度であれば一軸力センサでは  $1 \times 3$  のマトリックスで、運動発生装置が3自由度であれば二軸力センサでは  $2 \times 3$  のマトリックスで、運動発生装置が3自由度であれば三軸力センサでは  $3 \times 3$  のマトリックスで表現されることと、それらのマトリックスの全ての要素が各周波数において連立一次方程式の根として求まることを示している。ところで加速度センサを、ベクトルとしての加速度を検出するセンサとして校正する技術に関しては、『加速度センサの動的マトリックス感度の計測方法及びその計測装置』出願番号：特願2003-123417として、平成15年4月28日に出願している。本発明は、前記加速度センサの場合と同様に、力センサの動特性はマトリックスで表されるべきであること、そのマトリックスの要素は連 40 50

立一次方程式の根として求まることをその本質としているが、装置の一部として感度がマトリックスで定義された加速度センサなどの運動量センサを用いなければならない。横感度を成分として持つマトリックスとして、力センサの感度を絶対校正に基づいて定義することは、従来不可能であった。

【0013】

したがって本発明は、力センサの動特性を表す動的感度をマトリックスにより正確に感度を計測することができるようにした力センサの動的マトリックス感度計測法とその方法を実施するための装置を提供することを主たる目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0014】

本発明は以下に述べる基本原理によって上記課題を解決することができる。即ち、そもそも力センサへの入力信号は、力（並進運動）であれトルク（回転運動）であれ、あるいは両方の組み合わせであれ、基本的にはベクトルである。一方、力センサの出力もベクトルである。つまり、力センサはベクトルの集合としての力のベクトル空間を、ベクトル信号の集合である力のベクトル空間に射影する機能を持つ。

【0015】

ベクトルには数値ベクトルと関数ベクトルが数学的にはありうるが、計測で考えるのは数値ベクトルであるから、射影の際の換算を意味する感度は線形性を仮定する限り線形代数学の教えに従えば、マトリックスにならねばならない。すなわち、マトリックスを決めることができなければ、力センサなどのベクトル量を計測する装置を校正したとは言えない。

【0016】

力センサがK軸を持ち出力ベクトル空間の次元がK次元になりうるとし、運動発生装置の自由度がM自由度あるとすると、力センサの感度マトリックスとして $K \times M$ 次マトリックスを導くことができる。この感度マトリックスの要素の全てを、振動数及び関連する環境変数の関数として解くことが校正を行うことと定義される。

【0017】

このマトリックスの全ての成分を未知数とし、力センサを搭載した運動発生装置がM自由度の運動を発生することが出来るので、M個の独立なベクトル運動を発生させて、そのときの出力信号をK個の出力軸から測定することによって、 $K \times M$ 次のマトリックスの全ての要素に関する連立一次方程式を立てることが可能になる。この連立一次方程式を解けば、ある周波数 $w$ における主軸感度と横感度からなる力センサの動的感度マトリックスを導くことができ、最終的に校正を行うことができる。

【0018】

このような基本原理により本発明に係る力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、テーブル上に被計測力センサをその取り付け面が該テーブルに向くように固定し、運動発生装置により前記テーブルに対して3軸方向の各並進運動と各回転運動の計6自由度のうち、任意に選択した並進運動と回転運動を付与し、前記運動発生装置による特定の周波数において、前記力センサの3軸方向の各力と各トルクのうち任意に選択した力またはトルクの検出自由度と、前記運動発生装置の前記任意に選択した並進運動と回転運動の自由度とから求まる次数のマトリックス感度の全ての要素を未知数とする連立一次方程式を得て、前記マトリックス感度の全ての要素を決めることにより、力センサの動的マトリックス感度を計測するようにしたものである。

【0019】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、テーブル上に被計測力センサをその取り付け面が該テーブルに向くように固定し、運動発生装置により前記テーブルに対して3軸方向の各並進運動と各回転運動の計6自由度のうち、任意に選択した並進運動と回転運動を付与し、前記運動発生装置による特定の周波数において、前記力センサの3軸方向の各力と各トルクのうち任意に選択した力またはトルクの検出自由度をN個とし、前記運動発生装置の前記選択した運動の自由度をM個とするとき、N

10

20

30

40

50

×M次の感度マトリックスの全ての要素に関する連立一次方程式を得てそれを解き、前記感度マトリックスの全ての要素を決めることにより、力センサの動的マトリックス感度を計測するようにしたものである。

【0020】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、力センサの出力軸のうちのN1個の出力軸に対して、M1の自由度をもつ運動発生装置を用いて前記マトリックス感度を求め、力センサの出力軸のうちのN2個の出力軸に対して、M2の自由度をもつ運動発生装置を用いて前記マトリックス感度を求め、両マトリックス感度を合成することにより最終的なマトリックス感度を求めるようにしたものである。

10

【0021】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、前記運動発生装置を前記テーブルに固定した運動検出センサの信号により制御し、前記運動検出センサの感度を、力センサと運動発生装置とによる前記N×M次のマトリックスとして与えることにより、前記力センサの感度を少なくともN×M次のマトリックスとして与えるようにしたものである。

【0022】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、前記運動検出センサは加速度センサ、速度センサ、変位センサ、レーザ光の干渉に基づく振動計、レーザ光の干渉に基づく変位計のいずれか一つとしたものである。

20

【0023】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、力センサに継続時間の短い衝撃的運動ベクトルによる衝撃力を印加し、そのときの力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して、各振動数成分に対応するマトリックス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、前記振動数の関数としてマトリックス感度を求めるようにしたものである。

【0024】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、力センサに必要な振動数帯域を持つランダム運動ベクトルによるランダムな力を印加し、そのときの力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して特性の周波数成分に対応するマトリックス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、前記振動数の関数としてマトリックス感度を求めるようにしたものである。

30

【0025】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、力センサの出力信号ベクトル空間の次元の値がLであって、前記力センサがL次元の力を検出するL次元力センサとしての、L軸力センサとしたものである。

40

【0026】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、入力運動ベクトルの入力軸と出力信号ベクトルの成分の出力軸との関係によって、マトリックス感度の対応する要素が誤差を表すようにしたものである。

【0027】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、校正対象とする力センサに印加する動的力ベクトルは、レーザ干渉計、またはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された基準力センサ、もしくはそれにトレーサブルな力センサで計測されること、若しくはレーザ干渉

50

計と運動発生装置で校正された力センサセンサまたはそれにトレーサブルな力センサで計測されるようにしたものである。

【0028】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、重力加速度に対する力センサの姿勢角を含む、動特性に影響を及ぼす全ての変数の関数として、マトリックス感度を求めるようにしたものである。

【0029】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、自動車乗員保護用エアバッグ開発実験用ダミーの体内にセットする力センサの校正に用いるものである。

10

【0030】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測方法においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測方法において、ロボットの運動制御用多軸力センサの校正に用いるものである。

【0031】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、取り付け面がテーブルに向くように該テーブル上に固定した被計測力センサと、前記テーブルに対して3軸方向の各並進運動と各回転運動の計6自由度のうち、任意に選択した並進運動と回転運動を付与する運動発生装置と、前記運動発生装置による特定の周波数において、前記力センサの3軸方向の各力と各トルクのうち任意に選択した力またはトルクの検出自由度と、前記運動発生装置の前記任意に選択した並進運動と回転運動の自由度とから求まる次数のマトリックス感度の全ての要素を未知数とする連立一次方程式を得て、前記マトリックス感度の全ての要素を決めることにより、力センサの動的マトリックス感度を計測する手段を備えたものである。

20

【0032】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、取り付け面がテーブルに向くように該テーブル上に固定した被計測力センサと、前記テーブルに対して3軸方向の各並進運動と各回転運動の計6自由度のうち、任意に選択した並進運動と回転運動を付与する運動発生装置と、前記運動発生装置による特定の周波数において、前記力センサの3軸方向の各力と各トルクのうち任意に選択した力またはトルクの検出自由度をN個とし、前記運動発生装置の自由度をM個とするとき、 $N \times M$ 次の感度マトリックスの全ての要素に関する連立一次方程式を得てそれを解き、前記感度マトリックスの全ての要素を決めることにより、力センサの動的マトリックス感度を計測する手段を備えたものである。

30

【0033】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、力センサの出力軸のうちのN1個の出力軸に対して、M1の自由度をもつ運動発生装置を用いて前記マトリックス感度を求める手段と、力センサの出力軸のうちのN2個の出力軸に対して、M2の自由度をもつ運動発生装置を用いて前記マトリックス感度を求める手段と、両マトリックス感度を合成することにより最終的なマトリックス感度を求める手段とを備えたものである。

40

【0034】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、前記運動発生装置を前記テーブルに固定した運動検出センサの信号により制御する制御手段と、前記運動検出センサの感度を、前記力センサと運動発生装置とによる前記 $N \times M$ 次のマトリックスとして与えることにより、前記力センサの感度を $N \times M$ 次のマトリックスとして与える信号処理手段とを備えたものである。

【0035】

50

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、前記運動検出センサは加速度センサ、速度センサ、変位センサのいずれか一つとしたものである。

【0036】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、前記運動発生装置は前記被計測力センサに継続時間の短い衝撃的運動ベクトルによる衝撃力を印加するものであり、力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して、各振動数成分に対応するマトリックス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、前記振動数の関数としてマトリックス感度を求める信号処理手段を備えるものである。

10

【0037】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、前記運動発生装置は前記被計測力センサに必要な振動数帯域を持つランダム運動ベクトルによるランダムな力を印加するものであり、力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して各周波数成分に対応するマトリックス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、前記振動数の関数としてマトリックス感度を求める信号処理手段を備えたものである。

【0038】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、力センサの出力信号ベクトル空間の次元の値がLであって、前記力センサがL次元の力を検出するL次元力センサとしたものである。

20

【0039】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、前記信号処理手段は、入力運動ベクトルの入力軸と出力信号ベクトルの成分の出力軸との関係によって、マトリックス感度の対応する要素が、誤差出力の感度を表すようにしたものである。

【0040】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、校正対象とする力センサに印加する動的力ベクトルを、レーザ干渉計、またはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された基準力センサ、もしくはそれにトレーサブルな力センサで計測し、若しくはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された力センサまたはそれにトレーサブルな力センサで計測するものである。

30

【0041】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、前記信号処理手段は、重力加速度に対する力センサの姿勢角を含む、動特性に影響を及ぼす全ての変数の関数として、マトリックス感度を求めるものである。

【0042】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、自動車乗員保護用エアバッグ開発実験用ダミーの体内にセットする力センサの校正に用いるものである。

40

【0043】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、前記力センサの動的マトリックス感度計測装置において、ロボットの運動制御用多軸力センサの校正に用いることによるものである。

【0044】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、テーブル上に直接設置した第1コーナキューブと、前記テーブル上に固定した被計測力センサ上

50

に設置した第2コーナキューブと、前記テーブルに対して任意の並進運動と回転運動を付与する運動発生装置と、前記第1及び第2コーナキューブの運動を実時間で各々計測するレーザ干渉計と、前記テーブル上に固定し該テーブルの運動を検出するテーブル運動検出用センサと、前記テーブル運動検出用センサの信号により前記運動発生装置の駆動を制御し、前記レーザ干渉計の出力信号と、被計測力センサの出力信号とを入力して被計測力センサの校正処理を行う信号処理装置を備えたものである。

【0045】

また、本発明に係る他の力センサの動的マトリックス感度計測装置においては、テーブル上に直接設置したマトリックス感度が定義されている第1加速度計と、前記テーブル上に固定した被計測力センサ上に設置したマトリックス感度が定義されている第2加速度計と、前記テーブルに対して任意の並進運動と回転運動を付与する運動発生装置と、前記テーブル上に固定し該テーブルの運動を検出するテーブル運動検出用センサと、前記テーブル運動検出用センサの信号により前記運動発生装置の駆動を制御し、前記第1及び第2加速度計の出力信号と、被計測力センサの出力信号とを入力して被計測力センサの校正処理を行う信号処理装置を備えたものである。

10

【発明の効果】

【0046】

本発明は上記のような方法及び装置を採用することにより、以下に示すような種々の効果を奏する。即ち、

(1) 従来の校正技術では、力センサは力の振幅値で静的にしか校正されていなかったものであるから、力センサでベクトルとしての動的力を計測することは出来なかった。力は、そもそもベクトル量であるから、大きさと方向を持つのであって、力の計測とはそもそも大きさと方向が未知な状況において、それら両方を計測できて初めて力の計測になり、同時に校正技術の出発点としなければならない。この点本発明によってベクトルとしての動的力で絶対校正できることになるため、本発明による手法によって初めて力センサは動的力で絶対校正されたことになり、力センサによって動的力が計測できるようになる。

20

(2) ベクトル合成が出来る力センサが開発される。これによって、作用方向がわからない時の動的力計測の精度が向上する。良く理解されていない現象の計測には、重要である。

30

【0047】

(3) 自動車乗員の衝突安全のためにダミー内部に設置される力センサのように、ベクトルとしての力を計測できないと意味のない応用において、利用が広まり衝突時の乗員の安全性が高まる。

(4) 自動車のサスペンション制御等に用いられる多軸力センサの利用技術が向上する。

【0048】

(5) 縦ゆれと横ゆれがある地震によって土木構造物及び建築構造物がどのような影響を受けるかを調べるためには、本特許で示す方法で動的に校正された力センサが用いられることが期待される。このことは、我が国のような地震多発国で最近のように建物も高層化が可能な状況において、力の計測技術はその強度を保証する意味で重要である。かつ、建築基準法は、地震時の建物の強度を品質保証することを要求している点からも、重要である。

40

【0049】

(6) 現在、基準力センサとして広く用いられている歪ゲージ型一軸力センサ、圧電型一軸力センサでは横感度が与えられていないが、本特許に示す技術によって横感度が与えられることになる。圧電型基準力センサ出力が1次元出力空間を構成するので、そのような力センサを三個直交座標系で組み立てる現状の三軸力センサで、ベクトル合成をすることによって、正確なベクトルとしての動的力の計測が可能になる。

【0050】

50

(7) ベクトル合成機能を持つ数値演算器を内蔵するような新しいタイプの力センサが製品として市場に現れる。その結果、実時間で力計測が可能になる。

(8) 力センサを校正するビジネスがより高度化する。

(9) 従来は計測が困難であった力センサの回転による誤差を計測することが可能になる。

(10) 並進運動力検出機能及びトルク検出機能を持つ多自由度の力センサの性能評価が可能になることによって、製品の性能が向上する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0051】

本発明による力センサの動的マトリクス感度計測装置は、取り付け面がテーブルに向くように該テーブル上に固定した被計測力センサと、前記テーブルに対して3軸方向の各並進運動と各回転運動の計6自由度のうち、任意に選択した並進運動と回転運動を付与する運動発生装置と、前記運動発生装置による特定の周波数において、前記力センサの3軸方向の各力と各トルクのうち任意に選択した力またはトルクの検出自由度と、前記運動発生装置の前記任意に選択した並進運動と回転運動の自由度とから求まる次数のマトリクス感度の全ての要素を未知数とする連立一次方程式を得て、前記マトリクス感度の全ての要素を決めることにより、力センサの動的マトリクス感度を計測する手段を備えたものであり、それにより、力センサは動的力で校正されたことになり、力センサによって動的力が計測できるようになる。

【実施例1】

【0052】

本発明を実施するには図1に示すような計測装置を用い、以下に述べるような原理、及び方法によって実施することができる。図1に示す実施例においては振動テーブル11上に直接第1コーナキューブ3を設置し、同じテーブル11上に校正対象の力センサ1をその取り付け面をテーブル面に向けて固定し、その上に所定の質量12を載置し、その質量12の上に第2コーナキューブ13を設置しており、また、運動発生装置制御用の力センサまたは加速度センサ4または干渉計システム21X、21Y、21Zと3も設置している。

【0053】

テーブル11は垂直並進運動アクチュエータ+回転運動発生用のZ軸アクチュエータ6によってZ軸方向としての垂直方向への並進運動とこの垂直軸を中心とした回転運動が与えられ、このZ軸アクチュエータ6に対して互いに直角方向に位置するX軸アクチュエータ5とY軸アクチュエータ7とを設けている。X軸方向アクチュエータは水平面におけるX軸方向について並進運動とその軸線を中心とした回転運動を行う。また、Y軸方向アクチュエータは水平面におけるY軸方向について並進運動とその軸線を中心とした回転運動を行う。これらの運動はテーブル11上の運動発生装置制御用の力センサまたは加速度センサ4によって検出され、これを信号処理装置9に入力して所定の運動データと比較し、フィードバック制御信号を出力してこれを電力増幅器8によって電力増幅し、前記各アクチュエータの運動制御を行っている。これらの駆動系の冷却のため、冷却水配管系10を用いて冷却を行っている。

【0054】

テーブル11上に直接設置した第1コーナキューブ3の並進運動は、X軸、Y軸、Z軸方向にそれぞれ設けた制御または計測用の実時間レーザ干渉計21によって計測しており、前記のように校正対象の力センサに載置した質量12上の第2コーナキューブ13の並進運動は、同様にX軸、Y軸、Z軸方向にそれぞれ設けた制御または計測用の実時間レーザ干渉計22によって計測している。また図面が錯綜するので図示を省略しているが各コーナキューブの回転運動については、各コーナキューブに対して各々別途設ける鏡とレーザ干渉計、もしくは回折格子とレーザ等を用いることにより計測している。それらの計測信号は全て信号処理装置9に出力し、また校正対象の力センサ1の信号も信号処理装置9に入力して、これらの信号により後述するような手法によって力センサを正確に校正すること

ができる。

【0055】

前記第1コーナキューブ3と第2コーナキューブ13で計測される振動加速度ベクトルを $(a_x, a_y, a_z)$ 、テーブル面上で計測される加速度を $(a_{tx}, a_{ty}, a_{tz})$ とすると、質量12を $m_1$ 、コーナキューブの質量を $m_2$ とすると、力センサに印可される動的力 $(f_x, f_y, f_z)$ は以下の式で表される。

【数1】

$$f_x = (m_1 + m_2)(a_x - a_{tx})$$

10

$$f_y = (m_1 + m_2)(a_y - a_{ty})$$

$$f_z = (m_1 + m_2)(a_z - a_{tz})$$

(1)

【0056】

20

本発明においては、マトリックス感度が定義されている加速度計を使う場合にはより校正を簡素化することができ、例えば図2に示すような装置によって計測を行うことができる。図2においてテーブルの駆動系及びその制御系、並びに冷却系は前記図1に示すものと同様であるのでその説明は省略する。

【0057】

テーブル11上にはマトリックス感度が定義されているテーブル面の運動計測用第1加速度センサ23と、テーブル上に設置された校正対象の力センサ1上に載置されている質量12上に固定されたマトリックス感度が定義されている質量の運動計測用第2加速度センサ33の信号を信号処理装置9に入力し、テーブル11上に設置されたマトリックス感度が定義されているテーブル面の運動制御用三次元加速度計24の信号も信号処理装置9

30

に入力し、後述するような原理に基づいて校正対象の力センサの校正を行うようにしている。

【0058】

この装置において第1加速度センサ23と第2加速度センサ33の出力を以下のように定義する。

第2加速度センサ33の出力 $= (a_{2x}, a_{2y}, a_{2z})$

第1加速度センサ23の出力 $= (a_{1x}, a_{1y}, a_{1z})$

加速度センサの質量を $m_2$ 、質量11を $m_1$ とする。このとき、力センサに作用する力ベクトル $(f_x, f_y, f_z)$ は以下のように表される。

【数 2】

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = (m_1 + m_2) \begin{pmatrix} a_{2x} - a_{1x} \\ a_{2y} - a_{1y} \\ a_{2z} - a_{1z} \end{pmatrix}$$

10

(2)

【0059】

上記のような装置を用いて力センサの校正を行うに際して、本発明については、一軸力センサの動特性を三次元振動台で校正する場合と二軸力センサの動特性を三次元振動台で校正する場合、三軸力センサの動特性を三次元振動台で校正する場合、及び力センサが三軸の力検出及び1自由度のトルクを検出するセンサで、四次元振動台（並進3自由度、ねじり振動1自由度）を用いる場合についての校正手法を説明する。以下これらの校正手法を順に説明する。なお、本発明は上記のような三次元振動台を用いるもの以外に、例えば6次元あるいは6自由度の振動台を用いたものにおいても同様の手法により校正を行うことができるものであるが、説明が冗長となるのでここでの説明は省略する。

20

【0060】

1. 一軸力センサの動特性を三次元振動台で校正する場合

力センサの1個の感度軸をX軸とし、出力信号の振動値のベクトルを  $(f_{ox}(\omega), 0, 0)$  とする。  $\omega$  は角振動数である。Y軸成分とZ軸成分は勿論ゼロである。これに対して、入力する力の振幅値のベクトルを  $f_{ix}(\omega)$ 、 $f_{iy}(\omega)$ 、 $f_{iz}(\omega)$  とする。入力信号としての力ベクトルが、該力センサの感度軸上にあるとは仮定しない。感度軸上にあるとは仮定したのでは、力加速度をベクトルとみなしたことはない。この時、マトリックス感度は  $1 \times 3$  のマトリックス  $(S_{x,x}, S_{x,y}, S_{x,z})$  で表される。  $S_{x,x}$ 、 $S_{x,y}$ 、 $S_{x,z}$  は各々、力センサのX軸入力に対する出力信号との関係を表すので主軸感度、力センサのY軸成分に対する出力信号との関係を表すので横感度、力センサのZ軸成分に対する出力信号との関係を表すので横感度を表す。このときに、出力信号と入力信号の関係は、以下の式で表される。

30

【数 3】

$$f_{ox}(\omega) \exp(j\omega t) = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix} \exp(j\omega t) \\ f_{iy} \exp(j\omega t) \\ f_{iz} \exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

40

(3)

【0061】

上記数式(3)の意味するところを次に説明する。

力センサは感度軸方向の入力成分に対しては当然出力信号があるが、感度軸に垂直な二つの方向からの入力成分にも出力信号を持つ。その理由は、例えば圧電材料を用いる力セ

50

ンサの場合には、圧電定数が剪断成分を持つからである。つまり、圧電物質はズレに対しても電荷を発生させる。起歪体とよばれる金属固体にひずみゲージを貼り付けた力を受ける固体においても、材料自体がポアソン比で定義される横感度を持つ。感度とは、入力信号に対して発生する電圧の割合であるので、線形性を仮定する限りにおいて以下の数式が成立する。

$$\begin{aligned} & \text{力センサの感度軸出力電圧 } (f_{ox}( ) \exp(j \ t)) \\ & = \text{主軸感度} \times \text{主軸感度方向の力の入力成分} \\ & \quad + \text{横感度 1} \times \text{主軸に直角な方向 1 への力の入力成分} \\ & \quad + \text{横感度 2} \times \text{主軸に直角な方向 2 への力の入力成分} \\ & = S_{x,x}( ) \times f_{ix} \exp(j \ t) + S_{x,y}( ) \times f_{iy} \exp(j \ t) + S_{x,z}( ) \times f_{iz} \exp(j \ t) \end{aligned} \quad (10)$$

この式をマトリックス形式に書いたものが上記(3)の式である。

【0062】

三次元振動台は、三次元空間で独立な3個のベクトル振動加速度を生成することが出来るので、それらを  $(f_{ix1}, f_{iy1}, f_{iz1}) \exp(j \ t)$ ,  $(f_{ix2}, f_{iy2}, f_{iz2}) \exp(j \ t)$ ,  $(f_{ix3}, f_{iy3}, f_{iz3}) \exp(j \ t)$  とする。この時(3)式に代入すると、以下の関係が成立する。 $f_{ox1}$ ,  $f_{ox2}$ ,  $f_{ox3}$  は、 $\exp(j \ t)$  との位相、ゲインを考えた  $w$  の関数としての複素数である。

【数4】

$$\begin{aligned} f_{ox1}(\omega) &= S_{x,x}(\omega) f_{ix1} + S_{x,y}(\omega) f_{iy1} + S_{x,z}(\omega) f_{iz1} \\ f_{ox2}(\omega) &= S_{x,x}(\omega) f_{ix2} + S_{x,y}(\omega) f_{iy2} + S_{x,z}(\omega) f_{iz2} \\ f_{ox3}(\omega) &= S_{x,x}(\omega) f_{ix3} + S_{x,y}(\omega) f_{iy3} + S_{x,z}(\omega) f_{iz3} \end{aligned} \quad (4)$$

20

【0063】

(4)式は、各々の角振動数  $\omega$  における  $(S_{x,x}, S_{x,y}, S_{x,z})$  に関する連立一次方程式であり、係数マトリックスは、 $(f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk})$  ( $k=1,2,3$ ) が独立である以上行列式はゼロではないので、必ず解ける。したがって、主軸感度  $S_{x,x}$ 、横感度  $S_{x,y}$ ,  $S_{x,z}$  が求まることを意味する。(4)の連立一次方程式で角振動数を走査することで、主軸感度、横感度を、周波数の関数として定義することが可能になる。

30

【0064】

上記(4)式で示された連立一次方程式が解けるかどうかは、本特許が示す技術にとっては、非常に重要である。そこで、運動発生装置が  $M$  自由度をもち、 $M$  個の線形独立な運動ベクトルが力センサに与えられたときに、 $N$  個の自由度を持つ力センサの感度に関する  $N \times M$  次の係数行列の行列式が、ゼロでないことは以下のように証明される。運動発生装置が与える線形独立な運動ベクトルが以下のように与えられるとする。

40

【数 5】

$$\begin{pmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ \vdots \\ a_{M-1}^1 \\ a_M^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1^2 \\ a_2^2 \\ \vdots \\ a_{M-1}^2 \\ a_M^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1^3 \\ a_2^3 \\ \vdots \\ a_{M-1}^3 \\ a_M^3 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} a_1^M \\ a_2^M \\ \vdots \\ a_{M-1}^M \\ a_M^M \end{pmatrix}$$

10

( 5 )

【 0 0 6 5 】

上のベクトルは一次独立なので ( 6 ) 式を成り立たせるためには、 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$  は、全てゼロでなければならない。

【数 6】

20

$$A_1 \begin{pmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ \vdots \\ a_{M-1}^1 \\ a_M^1 \end{pmatrix} + A_2 \begin{pmatrix} a_1^2 \\ a_2^2 \\ \vdots \\ a_{M-1}^2 \\ a_M^2 \end{pmatrix} + A_3 \begin{pmatrix} a_1^3 \\ a_2^3 \\ \vdots \\ a_{M-1}^3 \\ a_M^3 \end{pmatrix} \cdots + A_M \begin{pmatrix} a_1^M \\ a_2^M \\ \vdots \\ a_{M-1}^M \\ a_M^M \end{pmatrix} = 0$$

30

( 6 )

【 0 0 6 6 】

そこで問題は ( 6 ) の仮定のもとで、以下のベクトルが一次独立であるかどうかということになる。そこで、( 5 ) 式の線形独立な M 個の運動ベクトルを、 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_M$  とし、 $\vec{0}$  が M 個並んだゼロベクトルを、ベクトル  $\vec{0}$  とする。したがって、線形独立かどうかを調べる  $N \times M$  個のベクトルは、以下ようになる。

【数 7】

$$\begin{pmatrix} \vec{a}_1 \\ \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vdots \\ \vec{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{0} \\ \vec{a}_1 \\ \vec{0} \\ \vdots \\ \vec{0} \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vdots \\ \vec{a}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{a}_2 \\ \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vdots \\ \vec{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vdots \\ \vec{0} \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vdots \\ \vec{a}_2 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} \vec{a}_M \\ \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vdots \\ \vec{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{0} \\ \vec{a}_M \\ \vec{0} \\ \vdots \\ \vec{0} \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vec{0} \\ \vdots \\ \vec{a}_M \end{pmatrix}$$

40

( 7 )

【 0 0 6 7 】

( 7 ) 式で示すベクトルの線形結合をゼロとおきその係数が全てゼロになれば、ベクトル

50

ルが線形独立であることが証明されるのであるが、書き下すと、(6)式に一致する式がN個出てくるだけなので、 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_M$  は線形独立であることから、全ての係数はゼロであることが証明されるため、係数行列式はゼロにはならないことは明らかである。

【0068】

なお、上記のように(4)式で示された連立一次方程式が解けることの説明は、後述する(13)式、(19式)、(26)式で示された連立一次方程式が解けることの説明ともなる。

【0069】

2. 二軸力センサの動特性を三次元振動台で校正する場合

力センサの2個の感度軸をX軸、Y軸とし、出力信号のベクトルの振幅値を $(f_{ox}(\omega), f_{oy}(\omega), 0)$ とする。 $\omega$ は角振動数である。Z軸成分は勿論ゼロである。これに対して、入力となる力ベクトルの振幅値を、 $(f_{ix}(\omega), f_{iy}(\omega), f_{iz}(\omega))$ とする。入力となる力が、該力センサの二個の感度軸で決まる平面(感度平面)上にあるとは仮定しない。感度軸で決まる平面上にあると仮定したのでは、入力となる力をベクトルとみなしたことはない。この時、マトリックス感度は以下に示す $2 \times 3$ のマトリックスで表される。

【数8】

$$\begin{pmatrix} S_{x,x} & S_{x,y} & S_{x,z} \\ S_{y,x} & S_{y,y} & S_{y,z} \end{pmatrix}$$

(8)

【0070】

$S_{x,x}, S_{x,y}, S_{x,z}$ は各々、力センサへのX軸入力成分に対するX軸出力信号との関係を表すので主軸感度、力センサへのY軸入力成分に対するX軸出力信号との関係を表すので横感度、力センサへのZ軸入力成分に対するX軸出力信号との関係を表すので横感度を表す。 $S_{y,x}, S_{y,y}, S_{y,z}$ は、各々力センサへのX軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので横感度、 $S_{y,y}$ は力センサへのY軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので主軸感度、 $S_{y,z}$ は力センサへのZ軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので横感度を表す。このとき、入力ベクトルと、出力ベクトルとの関係は次式で表される。

【数9】

$$\begin{pmatrix} f_{ox}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oy}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix} \exp(j\omega t) \\ f_{iy} \exp(j\omega t) \\ f_{iz} \exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

(9)

【0071】

三次元振動台は、三次元空間で独立な3個のベクトル振動加速度を生成することができるので、それらを $(f_{ix1}, f_{iy1}, f_{iz1}) \exp(j\omega t), (f_{ix2}, f_{iy2}, f_{iz2}) \exp(j\omega t), (f_{ix3}, f_{iy3}, f_{iz3}) \exp(j\omega t)$ とする。この時(3)式に代入すると、以下の関係が成立する。 $f_{ox1}, f_{oy1}, f_{oz1}$

$f_{ox2}$ ,  $f_{ox3}$ ,  $f_{oy1}$ ,  $f_{oy2}$ ,  $f_{oy3}$ は、 $\exp(j\omega t)$ との位相、ゲインを考えた関数としての複素数である。このときに(9)式に代入すると、以下の3個の方程式(10)、(11)、(12)が成立するが、それを感度マトリックスの全ての要素に関する連立一次方程式としてまとめると、(13)式を得る。

【数10】

$$\begin{pmatrix} f_{ox1}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oy1}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix1} \exp(j\omega t) \\ f_{iy1} \exp(j\omega t) \\ f_{iz1} \exp(j\omega t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

【数11】

$$\begin{pmatrix} f_{ox2}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oy2}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix2} \exp(j\omega t) \\ f_{iy2} \exp(j\omega t) \\ f_{iz2} \exp(j\omega t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

【数12】

$$\begin{pmatrix} f_{ox3}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oy3}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix3} \exp(j\omega t) \\ f_{iy3} \exp(j\omega t) \\ f_{iz3} \exp(j\omega t) \end{pmatrix} \quad (12)$$

【数13】

$$\begin{pmatrix} f_{ix1} & f_{iy1} & f_{iz1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{ix1} & f_{iy1} & f_{iz1} \\ f_{ix2} & f_{iy2} & f_{iz2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{ix2} & f_{iy2} & f_{iz2} \\ f_{ix3} & f_{iy3} & f_{iz3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{ix3} & f_{iy3} & f_{iz3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{x,x} \\ S_{x,y} \\ S_{x,z} \\ S_{y,x} \\ S_{y,y} \\ S_{y,z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{ox1} \\ f_{oy1} \\ f_{ox2} \\ f_{oy2} \\ f_{ox3} \\ f_{oy3} \end{pmatrix} \quad (13)$$

10

20

30

40

50

【 0 0 7 2 】

( 1 3 ) 式において、3個のベクトル( $f_{ixk}$ ,  $f_{iyk}$ ,  $f_{izk}$ ) ( $k=1,2,3$ )が独立であることから、6個のベクトル( $f_{ixk}$ ,  $f_{iyk}$ ,  $f_{izk}$ , 0, 0, 0) ( $k=1,2,3$ )、(0,0,0, $f_{ixk}$ ,  $f_{iyk}$ ,  $f_{izk}$ ) ( $k=1,2,3$ )は独立であることがわかるから、連立一次方程式の行列式はゼロではないので、かならず解けることになる。感度 $S_{i,j}$  ( $i=x, y: j=x, y, z$ )では、添え字が等しいと主軸感度であり、等しくなければ横感度を表す。( 1 3 )の連立一次方程式で角振動数を走査することで、主軸感度、横感度を、周波数の関数として定義することが可能になる。

【 0 0 7 3 】

3 . 三軸力センサの動特性を三次元振動台で校正する場合

10

力センサの3個の感度軸をX軸、Y軸、Z軸とし、出力信号のベクトルの振幅を( $f_{ox}(\ )$ ,  $f_{oy}(\ )$ ,  $f_{oz}(\ )$ )とする。 $\omega$ は角振動数である。これに対して、力センサに入力する力の振幅値のベクトルを、( $f_{ix}(\ )$ ,  $f_{iy}(\ )$ ,  $f_{iz}(\ )$ )とする。入力としての力が、該力センサの3個の感度軸で決まる空間(感度空間)上にあるとは仮定しない。感度軸で決まる感度空間にあると仮定したのでは、入力としての力をベクトルとみなしたことはない。力センサは、入力としての力ベクトル空間を出力信号としての力のベクトル空間に射影する。

この時、マトリックス感度は以下に示す3×3のマトリックスで表される。

【 数 1 4 】

20

$$\begin{pmatrix} S_{x,x} & S_{x,y} & S_{x,z} \\ S_{y,x} & S_{y,y} & S_{y,z} \\ S_{z,x} & S_{z,y} & S_{z,z} \end{pmatrix}$$

30

( 1 4 )

【 0 0 7 4 】

$S_{x,x}$ ,  $S_{x,y}$ ,  $S_{x,z}$ は各々、力センサのX軸出力に対する各入力信号との関係を表す。 $S_{x,x}$ は力のX軸入力成分に対するX軸出力の割合を表すので主軸感度、 $S_{x,y}$ は力のY軸入力成分に対するX軸出力信号との関係を表すので横感度、 $S_{x,z}$ は力のZ軸入力成分に対するX軸出力信号との関係を表すので横感度を表す。 $S_{y,x}$ ,  $S_{y,y}$ ,  $S_{y,z}$ は力センサの各軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表す。 $S_{y,x}$ は力のX軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので横感度、 $S_{y,y}$ は力のY軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので主軸感度、 $S_{y,z}$ は力のZ軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので横感度を表す。 $S_{z,x}$ ,  $S_{z,y}$ ,  $S_{z,z}$ は、各々力センサのZ軸出力に対する入力信号との関係を表す。 $S_{z,x}$ は力センサへのX軸入力成分に対するZ軸出力信号との関係を表すので横感度、 $S_{z,y}$ は力センサへのY軸入力成分に対するZ軸出力信号との関係を表すので横感度、 $S_{z,z}$ は力センサへのZ軸入力成分に対するZ軸出力信号との関係を表すので主軸感度を表す。このとき、入力ベクトルと、出力ベクトルとの関係は次式で表される。

40

【数 1 5】

$$\begin{pmatrix} f_{ox}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{oy}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{oz}(\omega)\exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{iy}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{iz}(\omega)\exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

( 1 5 )

10

【 0 0 7 5】

三次元振動台は、三次元空間で独立な3個のベクトル振動加速度を生成することが出来るので、それらを $(f_{ix1}, f_{iy1}, f_{iz1})\exp(j\omega t)$ ,  $(f_{ix2}, f_{iy2}, f_{iz2})\exp(j\omega t)$ ,  $(f_{ix3}, f_{iy3}, f_{iz3})\exp(j\omega t)$ とする。この時(15)式に代入すると、以下の3個の方程式(16)、(17)、(18)が成立する。 $f_{ox1}, f_{oy1}, f_{oz1}, f_{ox2}, f_{oy2}, f_{oz2}, f_{ox3}, f_{oy3}, f_{oz3}$ は、 $\exp(j\omega t)$ との位相、ゲインを考えた関数としての複素数である。3個の方程式(16)、(17)、(18)を感度マトリックスの全ての要素に関する連立一次方程式としてまとめると、(19)式を得る。

【数 1 6】

$$\begin{pmatrix} f_{ox1}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{oy1}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{oz1}(\omega)\exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix1}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{iy1}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{iz1}(\omega)\exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

20

( 1 6 )

【数 1 7】

$$\begin{pmatrix} f_{ox2}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{oy2}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{oz2}(\omega)\exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix2}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{iy2}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{iz2}(\omega)\exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

30

( 1 7 )

【数 1 8】

$$\begin{pmatrix} f_{ox3}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{oy3}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{oz3}(\omega)\exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix3}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{iy3}(\omega)\exp(j\omega t) \\ f_{iz3}(\omega)\exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

40

( 1 8 )

【数 19】

$$\begin{pmatrix} f_{ix1} & f_{iy1} & f_{iz1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{ix1} & f_{iy1} & f_{iz1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix1} & f_{iy1} & f_{iz1} \\ f_{ix2} & f_{iy2} & f_{iz2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{ix2} & f_{iy2} & f_{iz2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix2} & f_{iy2} & f_{iz2} \\ f_{ix3} & f_{iy3} & f_{iz3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{ix3} & f_{iy3} & f_{iz3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix3} & f_{iy3} & f_{iz3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{x,x} \\ S_{x,y} \\ S_{x,z} \\ S_{y,x} \\ S_{y,y} \\ S_{y,z} \\ S_{z,x} \\ S_{z,y} \\ S_{z,z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{ox1} \\ f_{oy1} \\ f_{oz1} \\ f_{ox2} \\ f_{oy2} \\ f_{oz2} \\ f_{ox3} \\ f_{oy3} \\ f_{oz3} \end{pmatrix} \quad 10$$

( 19 ) 20

【0076】

(19)式において、3個のベクトル( $f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk}$ ) ( $k=1,2,3$ )が線形独立であるから、係数行列に見られる9個のベクトル( $f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk}, 0, 0, 0, 0, 0, 0$ ) ( $k=1, 2, 3$ ), ( $0, 0, 0, f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk}, 0, 0, 0$ ) ( $k=1,2,3$ ), ( $0, 0, 0, 0, 0, 0, f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk}$ ) ( $k=1,2,3$ )は線形独立であるから、(19)の係数行列式はゼロでないので、かならず解けることになる。感度 $S_{i,j}$  ( $i=x, y, z; j=x, y, z$ )では、添え字が等しいと主軸感度であり、等しくなければ横感度を表す。(19)の連立一次方程式で角振動数を走査することで、主軸感度、横感度を、周波数の関数として定義することが可能になる

【0077】

4. カセンサが三軸の力検出及び1自由度のトルクを検出するセンサで、四次元振動台 (並進3自由度、ねじり振動1自由度)を用いる場合 30

カセンサの3個の並進運動の感度軸をX軸、Y軸、Z軸とし、さらに、垂直軸周りのトルクの入力軸、出力軸を軸とする。この場合には、質量の重心がねじり振動の回転中心軸上にあるとする。出力信号のベクトルの振幅を( $f_{ox}(\ ), f_{oy}(\ ), f_{oz}(\ ), f_o(\ )$ )とする。は角振動数である。これに対して、カセンサに入力する力の振幅値のベクトルを、( $f_{ix}(\ ), f_{iy}(\ ), f_{iz}(\ ), f_i(\ )$ )とする。

【0078】

この時、マトリックス感度は以下に示す4×4のマトリックスで表される。

【数 2 0】

$$\begin{pmatrix} S_{x,x} & S_{x,y} & S_{x,z} & S_{x,\alpha} \\ S_{y,x} & S_{y,y} & S_{y,z} & S_{y,\alpha} \\ S_{z,x} & S_{z,y} & S_{z,z} & S_{z,\alpha} \\ S_{\alpha,x} & S_{\alpha,y} & S_{\alpha,z} & S_{\alpha,\alpha} \end{pmatrix}$$

10

( 2 0 )

20

$S_{x,x}$ ,  $S_{x,y}$ ,  $S_{x,z}$ ,  $S_{x,\alpha}$  は各々、複合力センサのX軸出力に対する入力信号との関係を表す。力以外にトルクも検出する場合を想定するので、複合力センサと称することにする。 $S_{x,x}$ は力のX軸入力成分に対するX軸出力信号との関係を表すので主軸感度、 $S_{x,y}$ は力のY軸入力成分に対するX軸出力信号との関係を表すので横感度、 $S_{x,z}$ は力のZ軸入力成分に対するX軸出力信号との関係を表すので横感度を、 $S_{x,\alpha}$ はトルクの 軸入力成分に対するX軸出力信号との関係を表すので横感度を表す。 $S_{x,\alpha}$ は、力の検出とトルクの検出の干渉の程度を表す指標となる重要な量である。

【 0 0 7 9】

$S_{y,x}$ ,  $S_{y,y}$ ,  $S_{y,z}$ ,  $S_{y,\alpha}$  については、夫々複合力センサのY軸出力に対する入力信号との関係を表す。 $S_{y,x}$ は力のX軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので横感度、 $S_{y,y}$ は力のY軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので主軸感度、 $S_{y,z}$ は力のZ軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので横感度を、 $S_{y,\alpha}$ はトルクの 軸入力成分に対するY軸出力信号との関係を表すので横感度を表す。 $S_{y,\alpha}$ は、力の検出とトルクの検出の干渉の程度を表す指標となる重要な量である。

30

【 0 0 8 0】

$S_{z,x}$ ,  $S_{z,y}$ ,  $S_{z,z}$ ,  $S_{z,\alpha}$  は、各々複合力センサのZ軸出力に対する入力信号との関係を表す。 $S_{z,x}$ は複合力センサへの入力カベクトルのX軸入力成分に対するZ軸出力信号との関係を表すので横感度、 $S_{z,y}$ は複合力センサへのY軸入力に対するZ軸出力信号との関係を表すので横感度、 $S_{z,z}$ は複合力センサへのZ軸入力に対するZ軸出力信号との関係を表すので主軸感度を、 $S_{z,\alpha}$ は複合力センサへの 軸トルク入力に対するZ軸出力信号との関係を表すので横感度を表す。 $S_{z,\alpha}$ は、力の検出とトルクの検出の干渉の程度を表す指標となる重要な量である。

40

【 0 0 8 1】

$S_{\alpha,x}$ ,  $S_{\alpha,y}$ ,  $S_{\alpha,z}$ ,  $S_{\alpha,\alpha}$  は、複合力センサの 軸出力に対する入力信号との関係を表すので、 $S_{\alpha,x}$ は力のX軸入力成分に対する 軸出力信号との関係を表すので横感度を、 $S_{\alpha,y}$ は力のY軸入力成分に対する 軸出力信号との関係を表すので横感度を、 $S_{\alpha,z}$ は力のZ軸入力成分に対する 軸出力信号との関係を表すので横感度を、 $S_{\alpha,\alpha}$ はトルクの 軸入力成分に対する 軸出力信号との関係を表すので主軸感度を表す。このとき、入力ベクトルと、出力ベクトルとの関係は次式で表される。

【数 2 1】

$$\begin{pmatrix} f_{ox}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oy}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oz}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{o\alpha}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) & S_{x,\alpha}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) & S_{y,\alpha}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) & S_{z,\alpha}(\omega) \\ S_{\alpha,x}(\omega) & S_{\alpha,y}(\omega) & S_{\alpha,z}(\omega) & S_{\alpha,\alpha}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iy}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iz}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{i\alpha}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

10

( 2 1 )

【 0 0 8 2】

四次元振動台は、四次元空間で独立な4個のベクトル振動加速度を生成することが出来るので、それらを  $(f_{ix1}, f_{iy1}, f_{iz1}, f_{i\alpha1}) \exp(j\omega t)$ ,  $(f_{ix2}, f_{iy2}, f_{iz2}, f_{i\alpha2}) \exp(j\omega t)$ ,  $(f_{ix3}, f_{iy3}, f_{iz3}, f_{i\alpha3}) \exp(j\omega t)$ ,  $(f_{ix4}, f_{iy4}, f_{iz4}, f_{i\alpha4}) \exp(j\omega t)$  とする。この時(21)式に代入すると、以下の4個の方程式(22)、(23)、(24)、(25)が成立する。 $f_{ox1}, f_{oy1}, f_{oz1}, f_{o\alpha1}, f_{ox2}, f_{oy2}, f_{oz2}, f_{o\alpha2}, f_{ox3}, f_{oy3}, f_{oz3}, f_{o\alpha3}, f_{ox4}, f_{oy4}, f_{oz4}, f_{o\alpha4}$  は、 $\exp(j\omega t)$  との位相、ゲインを考えた関数としての複素数である。4個の方程式(22)、(23)、(24)、(25)を感度マトリックスの全ての成分に関する連立一次方程式としてまとめると、(26)式を得る。

20

【数 2 2】

$$\begin{pmatrix} f_{ox1}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oy1}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oz1}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{o\alpha1}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) & S_{x,\alpha}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) & S_{y,\alpha}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) & S_{z,\alpha}(\omega) \\ S_{\alpha,x}(\omega) & S_{\alpha,y}(\omega) & S_{\alpha,z}(\omega) & S_{\alpha,\alpha}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix1}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iy1}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iz1}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{i\alpha1}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

30

( 2 2 )

【数 2 3】

$$\begin{pmatrix} f_{ox2}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oy2}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oz2}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{o\alpha2}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) & S_{x,\alpha}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) & S_{y,\alpha}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) & S_{z,\alpha}(\omega) \\ S_{\alpha,x}(\omega) & S_{\alpha,y}(\omega) & S_{\alpha,z}(\omega) & S_{\alpha,\alpha}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix2}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iy2}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iz2}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{i\alpha2}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

40

( 2 3 )

【数 2 4】

$$\begin{pmatrix} f_{ox3}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oy3}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oz3}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{o\alpha3}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) & S_{x,\alpha}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) & S_{y,\alpha}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) & S_{z,\alpha}(\omega) \\ S_{\alpha,x}(\omega) & S_{\alpha,y}(\omega) & S_{\alpha,z}(\omega) & S_{\alpha,\alpha}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix3}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iy3}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iz3}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{i\alpha3}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

50

( 2 4 )

【数 2 5】

$$\begin{pmatrix} f_{ox4}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oy4}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oz4}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{oa4}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) & S_{x,\alpha}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) & S_{y,\alpha}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) & S_{z,\alpha}(\omega) \\ S_{\alpha,x}(\omega) & S_{\alpha,y}(\omega) & S_{\alpha,z}(\omega) & S_{\alpha,\alpha}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{ix4}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iy4}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{iz4}(\omega) \exp(j\omega t) \\ f_{ia4}(\omega) \exp(j\omega t) \end{pmatrix}$$

10

( 2 5 )

【数 2 6】

$$\begin{pmatrix} f_{ix1} & f_{iy1} & f_{iz1} & f_{ia1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix1} & f_{iy1} & f_{iz1} & f_{ia1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix1} & f_{iy1} & f_{iz1} & f_{ia1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix1} & f_{iy1} & f_{iz1} & f_{ia1} & 0 \\ f_{ix2} & f_{iy2} & f_{iz2} & f_{ia2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix2} & f_{iy2} & f_{iz2} & f_{ia2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix2} & f_{iy2} & f_{iz2} & f_{ia2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix2} & f_{iy2} & f_{iz2} & f_{ia2} & 0 \\ f_{ix3} & f_{iy3} & f_{iz3} & f_{ia3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix3} & f_{iy3} & f_{iz3} & f_{ia3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix3} & f_{iy3} & f_{iz3} & f_{ia3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix3} & f_{iy3} & f_{iz3} & f_{ia3} & 0 \\ f_{ix4} & f_{iy4} & f_{iz4} & f_{ia4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix4} & f_{iy4} & f_{iz4} & f_{ia4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix4} & f_{iy4} & f_{iz4} & f_{ia4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{ix4} & f_{iy4} & f_{iz4} & f_{ia4} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{x,x} \\ S_{x,y} \\ S_{x,z} \\ S_{x,\alpha} \\ S_{y,x} \\ S_{y,y} \\ S_{y,z} \\ S_{y,\alpha} \\ S_{z,x} \\ S_{z,y} \\ S_{z,z} \\ S_{z,\alpha} \\ S_{\alpha,x} \\ S_{\alpha,y} \\ S_{\alpha,z} \\ S_{\alpha,\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{ox1} \\ f_{oy1} \\ f_{oz1} \\ f_{oa1} \\ f_{ox2} \\ f_{oy2} \\ f_{oz2} \\ f_{oa2} \\ f_{ox3} \\ f_{oy3} \\ f_{oz3} \\ f_{oa3} \\ f_{ox4} \\ f_{oy4} \\ f_{oz4} \\ f_{oa4} \end{pmatrix}$$

20

30

( 2 6 )

【0 0 8 3】

( 2 6 ) 式において、4 個のベクトル  $(f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk}, f_{iak}) (k=1,2,3,4)$  が線形独立であるから、係数行列に見られる 16 個のベクトル  $(f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk}, f_{iak}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) (k=1,2,3,4)$ ,  $(0, 0, 0, 0, f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk}, f_{iak}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) (k=1,2,3,4)$ ,  $(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk}, f_{iak}, 0, 0, 0, 0) (k=1,2,3,4)$ ,  $(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, f_{ixk}, f_{iyk}, f_{izk}, f_{iak}) (k=1,2,3,4)$  は線形独立であって、( 2 6 ) の係数行列はゼロでないので、かならず解けることになる。感度  $S_{i,j} (i=x, y, z, \alpha; j=x, y, z, \alpha)$  では、添え字が等しいと主軸感度であり、等しくなければ横感度を表す。( 2 6 ) の連立一次方程式で角振動数を走査することで、主軸感度、横感度を、周波数の関数として定義することが可能になる。

40

【0 0 8 4】

上記のような本発明を実施するに際して、前記図 1、図 2 及び図 3 に示すような装置によって力センサの動的マトリックス感度計測を行うことができるものであるが、その感度計測に際しては種々の手法により実施することができ、例えば前記被校正用力センサに対してこれを駆動するアクチュエータにより、継続時間の短い衝撃的運動ベクトルによる衝撃力を印加し、そのときの力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して、各

50

振動数成分に対応するマトリックス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、前記振動数の関数としてマトリックス感度を求めるようにしてもよい。その際には、図3に示すように、運動発生装置制御用のコーナキューブ3、一次校正用運動発生装置制御用の軸時間レーザ干渉計（二次校正用運動発生装置では運動発生装置制御用の加速度計4で制御する）、被校正対象の力センサ1、基準力センサ24、質量12、質量25、運動発生装置機制御用の加速度計4、電力増幅器8、水平並進運動用アクチュエータ+回転運動発生用アクチュエータ7、垂直並進運動用アクチュエータ+回転運動発生用アクチュエータ11、信号処理装置9、質量の運動を測定する加速度計13を用いて、前記と同様に計測を行ってもよい。

【0085】

また、前記力センサに前記アクチュエータにより必要な振動数帯域を持つランダム運動ベクトルによるランダムな力を印加し、そのときの力センサからの出力信号と入力信号をスペクトル分解して特定の周波数成分に対応するマトリックス感度の全ての要素に関する連立一次方程式をたて、前記振動数の関数としてマトリックス感度を求めることもできる。

【0086】

また、力センサの出力信号が力であり（複合力センサの場合には力とトルク）、力及びトルクはともにベクトルであるから、出力信号の集合はベクトル空間をなす。そこで、力センサもしくは複合力センサの出力信号ベクトル空間の次元を考え、その値をLとするときには、前記力センサはL次元力センサもしくはL次元複合力センサと称することができる。

【0087】

また、入力運動ベクトルの入力軸と出力信号ベクトルの成分の出力軸との関係によっては、マトリックス感度の対応する成分が誤差を表すこととなり、このデータも有効に利用することができる。

【0088】

また、校正対象とする力センサに印加する動的力ベクトルは、前記のようなレーザ干渉計、またはレーザ干渉計と運動発生装置で校正され感度マトリックスが与えられた基準力センサ、もしくはそれにトレーサブルな感度マトリックスが与えられた力センサで計測され、若しくはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された感度マトリックスが与えられた力センサまたはそれにトレーサブルな感度マトリックスが与えられた力センサで計測される。また、校正対象とする力センサに印可する動的力ベクトルは、前記のようなレーザ干渉計、またはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された感度マトリックスが与えられた基準加速度センサ、もしくはそれにトレーサブルな感度マトリックスが与えられた加速度センサで計測され、もしくはレーザ干渉計と運動発生装置で校正された感度マトリックスが与えられた加速度センサまたはそれにトレーサブルな感度マトリックスが与えられた加速度センサで計測される。

【0089】

また、本発明の力センサの動的マトリックス感度計測方法及び装置は、動特性に影響を及ぼす全ての変数の関数として、マトリックス感度を求めることができる。

【産業上の利用可能性】

【0090】

本発明は自動車乗員保護用エアバッグ開発実験用ダミーの体内にセットする力センサの校正に用い、更にロボットの運動制御用多軸力センサの校正に用いることもできる。

【図面の簡単な説明】

【0091】

【図1】本発明を実施する装置の実施例を示すシステム概要図である。

【図2】本発明を実施する装置の他の実施例を示すシステム概要図である。

【図3】本発明を実施する装置の更に他の実施例を示すシステム概要図である。

10

20

30

40

50

【図4】本発明における数式(1)を説明する図である。

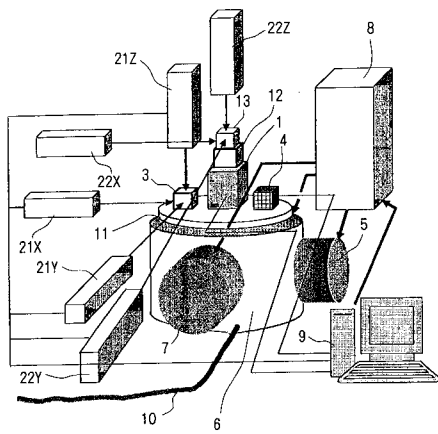
【図5】従来例を示す概要図である。

【符号の説明】

【0092】

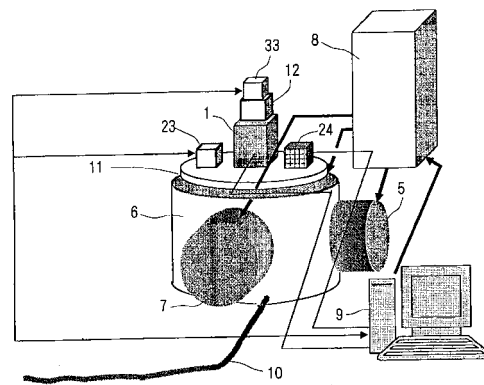
- 1 校正対象の力センサ
- 3 第1コーナキューブ
- 4 運動発生装置用制御用の力センサまたは加速度センサ
- 5 X軸アクチュエータ
- 6 Z軸アクチュエータ
- 7 Y軸アクチュエータ
- 8 電力増幅器
- 9 信号処理装置
- 10 冷却水配管系
- 11 テーブル
- 12 質量
- 13 第2コーナキューブ
- 21 x、y、z テーブル面計測用実時間レーザ干渉計
- 22 x、y、z 力センサ面計測用実時間レーザ干渉計

【図1】



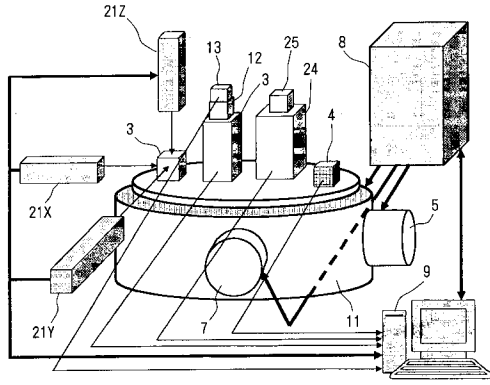
レーザ干渉計を使う場合の計測法とその装置 (一次校正法)

【図2】



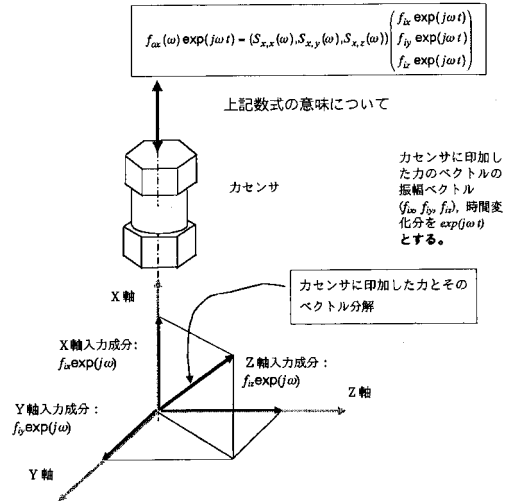
マトリックス感度が定義されている三次元加速度計を使う場合の計測法とその装置 (二次元校正法)

【 図 3 】



レーザー干渉計と運動発生装置で校正された基準力センサを用いる例

【 図 4 】



【 図 5 】

