多軸加速度センサの主軸方向と感度の同定手法* (主軸方向テンソルと感度テンソルの実測)

木村 仁^{*1}, 中村 成志^{*2}, 伊能 教夫^{*1}, 松平 昌之^{*3}, 吉田 稔^{*3}

Identification Method of Sensor Directions and Sensitivities in Multi-Axis Accelerometer (Actual Measurement of Direction Tensor and Sensitivity Tensor)

Hitoshi KIMURA^{*1}, Masashi NAKAMURA, Norio INOU,
Masayuki MATSUDAIRA and Minoru YOSHIDA

^{*1} Dept. of Mechanical and Control Engineering, Tokyo Institute of Technology
Ookayama, 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan

An accelerometer has direction gaps between the package and the actual sensors in general. Conventional calibration methods of accelerometer, e.g. ISO standard, do not consider this direction gap. This study proposes a new calibration method. The method uses a new examination system with parallel link exciter mechanism. The exciter rotates a target accelerometer in a uniform circular motion and the posture of the accelerometer is kept constant against external coordinates. The required torque for the rotation is small and constant because the rotation components are balanced with counter weights. Therefore, the exciter applies a stable sine wave acceleration to the accelerometer. This method contributes not only the accuracy of input acceleration but also removing offset noise. In addition, the input acceleration is calculated only by one differential computation whereas ordinary mechanism requires second order differential. From the accelerometer output, a plane including actual sensor direction is detected by the sine curve profile. The direction of actual sensor is the line of inter section of two measured planes. For a 3-axis accelerometer, 2 times measurement is enough to determine all actual sensor directions and sensitivities with this method (1 time measurement is enough for a 2-axis accelerometer). Actual sensor directions and sensitivities are experimentally examined. The result is consistent with the data sheet of test accelerometer.

Key Words : Accelerometer, Sensor Direction, Sensitivity Correction, Coordinate Conversion, Multi-Axis Examination

1. は じ め に

加速度センサの校正手法はこれまでに ISO16063⁽¹⁾や ISO5347⁽²⁾などで定義されているが、これらの手法は加速度センサのパッケージの方向とセンサ主軸方向が一致していることが前提となっている。しかし、この前提は必ずしも保証されているとは言えない。また、これらの手法はセンサに対して直動方向で加速度を入力するため、入力加速度を知るには一般に変位センサのデータを 2 回微分するか、センサ質量と力を同時に計測する必要がある。このような理由から高精度の校正を実現するには技術的な困難がある。

ひとつの加速度センサはその原理上、基本的に一方向の加速度しか検出できない。しかし、実際のセンサでは製造時や取り付け時に生じる誤差があるため、パッケージ方向とセンサ主軸方向を完全に一致させることは困難である。実際、通常多軸加速度センサはセンサ実方向がパッケージ方向に完全には一致しておらず、センサ実方向同士も直交してはいない。この方向の不一致は、例えば x 軸方向の加速度を検出すべきセンサが y 軸方向の加速度を検出してしまうといった現象を引き起こす。

* 原稿受付 2011 年 6 月 23 日

^{*1} 正員, 東京工業大学大学院機械制御システム専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*2} 東京工業大学大学院機械制御システム専攻

^{*3} 白山工業(株) (〒183-0044 東京都府中市日鋼町 1-1 J タワー10F)

E-mail: kimura@mech.titech.ac.jp

一般に本来の検出方向ではない加速度を検出してしまいう度合いは横感度と呼ばれ、加速度センサのデータシートに記述されている場合も少なくない。また、感度についても通常はセンサ個体ごとに差があり、一つの多軸センサパッケージ内ですら各方向で感度が異なっているのが現状である。現在広く普及している MEMS デバイスの加速度センサなどもこの例外ではない。現存するほとんど全ての加速度センサはパッケージとセンサ主軸方向とのずれや、感度のずれを有しており、これらを完全に取り除くことは困難である。

しかし、一つの加速度センサパッケージについて、各センサの主軸方向と感度を全て知ることができれば、座標変換と感度補正によって加速度を正確な三次元ベクトルとして算出できるため⁽³⁾、横感度という概念は不要になる。既に半導体加速度センサについては感度をマトリクスで校正すべきという意見はあるものの、実機での校正にコストがかかりすぎるという問題が指摘されている⁽⁴⁾。この点について本研究で提案する検定装置⁽⁵⁾⁽⁶⁾は単純な構造で安価に製造可能であり、原理的に複数のセンサを同時かつ高精度に検定できると考えられる。量産効果も考えれば、従来の検定方法と比較して精度面とコスト面の双方で有利と言える。

さて、提案手法では補正のための必要条件は、感度をノルムとするセンサ主軸方向ベクトルが一次独立というだけである。この条件は 2 つ以上のセンサが同じ方向に配置されておらず、全てのセンサの感度が 0 でないという意味であるから、正常動作する多軸加速度センサであればほぼ常に満たされる。本研究では実際のセンサ主軸方向および感度を知る目的で、平行リンクを利用した検定装置によるセンサ校正方法について述べる。この検定装置は精度を保ちやすい等速円運動を利用するため入力加速度の信頼性が高い。また、直動でなく周期運動であるため、加速度センサで問題となるオフセット電圧の除去も容易である。さらに、入力加速度の値は回転角速度の 2 乗から得られるので誤差の生じる微分計算は 1 回で良く、この点も位置を 2 回微分して加速度を得る従来の校正方法より有利である。

本手法は 1 軸から 3 軸まで全ての加速度センサで利用可能である。特に 3 軸センサでは 2 回の加振実験から 3 つの主軸方向と感度を求めることが可能であり、従来の並進運動を利用した加速度センサ校正手法よりもコスト、測定時間、精度の面で優れていると考えられる。また、本機構では加速度センサの軌道が既知の円運動に限定されるため、加速度データを積分して変位を算出する際のセンサ感度の校正といった応用も期待できる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

2. 提案するセンサ検定機構

提案機構の概念図を図 1 に示す。加速度センサを配置するテーブルを 2 本以上の平行リンクで結ぶことで、加速度センサは外界に対して姿勢を保ったまま円運動を行う。本機構ではセンサに正弦波の加速度が入力されることになる。試作機では機械的な安定性や加工精度を考慮して 3 本のリンクを用いている。動作を滑らかにするため、試作機では各リンクの長さを一つの治具で調整するなどの工夫を行っている⁽⁶⁾。また、質量バランスのために各リンクにカウンターウェイトを配置している(図 1 参照)。機構の特性上、センサの取り付け位置が多少ずれても運動の回転半径に差異が生じない。また、原理的に回転角速度が一定ならば必要なトルクは粘性抵抗から生じる値だけになる機構であるため、容易に安定した入力加速度を発生できると考えられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

Fig. 1 Schematic diagram of proposed examination system with balanced mechanism

3. 加速度センサの校正方法

3-1 実際の加速度センサ主軸方向

加振機固定部の座標系(実験室系)を xyz とし, 基底ベクトルを e_x, e_y, e_z とする. 3 軸加速度センサの座標系は 123 とし, パッケージ(外殻)表示座標の基底ベクトルを e_1, e_2, e_3 とする. また, パッケージ i 方向(ただし $i=1, 2, 3$)に配置された実際のセンサ主軸方向の単位ベクトルを s_i とし, その成分を $[c_i^1, c_i^2, c_i^3]^T$ と定義する. このとき $c_i^j (j=1, 2, 3)$ は s_i の 123 座標系に対する方向余弦である. 理想的には c_i^j はクロネッカー δ_i^j と等しいが, 実際にはセンサの主軸方向は図 2 に示すように必ずしもパッケージの座標方向とは一致しない. このため, c_i^j は $i=j$ のとき 1 に近い値となり, $i \neq j$ のとき 0 に近い値となる.

今, 加速度センサのパッケージに表示された 123 方向を xyz 方向と一致させた通常の姿勢でセンサに等速円運動を行わせるとする. 機構の回転による遠心力と重力によってセンサに加わる入力加速度ベクトル a は xyz 座標系で $a = [r\omega^2 \cos \theta, r\omega^2 \sin \theta, -g]^T$ となる. ただし r は機構の回転半径, ω は回転の角速度ベクトル, θ はエンコーダから得られる a (実際にはリンクアーム)と e_x とのなす角度, g は重力加速度である.

二つのベクトルの内積 $s_i \cdot a$ はセンサの出力電圧のうち, a によって生じた電圧を感度で除算した値とみなせる. まず加速度センサのパッケージと実際のセンサ主軸方向が一致している理想的なセンサの場合, つまり $c_i^j = 1, c_i^j = 0 (i \neq j)$ について考える. この条件では内積 $s_i \cdot a$ について以下の関係がなりたつ. センサ 1 方向(以下 s_1 方向)については $\theta = 0^\circ$ のとき最大, $\theta = 180^\circ$ のとき最小, s_2 方向については $\theta = 90^\circ$ のとき最大, $\theta = 270^\circ$ のとき最小, s_3 方向では常に 0 である.

しかし, 実際には $c_i^j \neq 0 (i \neq j)$ であるため, s_1, s_2 方向については内積 $s_i \cdot a$ が最大あるいは最小となるエンコーダの角度は上記の値と異なってくる. また, s_3 方向では $s_3 \cdot a$ が最大, 最小となる θ が生じることになる. xyz 座標系に対して任意に 123 座標系を設定しても(センサをどのような姿勢にしても), 本機構で加振測定を行えば実際のセンサ方向に応じて内積(電圧)最大となるエンコーダ角度を求めることができる. 電圧最大となるエンコーダ角度 θ_i^{actual} (以下 θ_i)を測定することによって, 実際のセンサ投影方向が理想の角度 θ_i^{ideal} から $\Delta\theta_i$ ずれる様子を図 3 に示す.

Fig. 2 Package and actual sensor direction

Fig. 3 Actual sensor output about phase and amplitude

つまり本機構を用いて加振測定を行うと, 図 4 に示すようなベクトル s_i と e_z を含み, e_x となす角度が θ_i となる 1 枚の平面 ϕ_i が得られる. 機構に対してうまくセンサを 2 つ以上の姿勢に配置して加振測定を行えば, s_i を含む異なる 2 つ以上の平面 ϕ_{ia}, ϕ_{ib} が得られ, その交線は s_i すなわちセンサ主軸方向を含む直線となる.

具体的なセンサ校正手順を以下に述べる. xyz 座標に対して 123 座標が一致している状態から, ある回転行列 R_a によって 123 座標すなわちセンサを回転させたとする. この状態で加振測定を行い, θ_{ia} を得る. s_i の xy 平面への射影方向の単位ベクトルを s'_{ia} としたとき, その成分は xyz 座標系で $[\cos \theta_{ia}, \sin \theta_{ia}, 0]^T$ となる(図 4 参照).

s_i と e_z を含む平面 ϕ_{ia} の xyz 座標系原点からの単位法線ベクトルを n'_{ia} とすると, $n'_{ia} = e_z \times s'_{ia} = [-\sin \theta_{ia}, \cos \theta_{ia}, 0]^T$ である. 123 座標系における n'_{ia} を n_{ia} としたとき, $n_{ia} = R_a^{-1} n'_{ia} = R_a^T n'_{ia}$ より, 123 座標系における単位法線ベクトル n_{ia} の成分が求まる. 同様に異なる回転行列 R_b から n_{ib} を求めれば, 123 座標系において s_i は次式となる.

$$s_i = \pm \frac{n_{ia} \times n_{ib}}{|n_{ia} \times n_{ib}|} \quad (1)$$

このときの符号は, s_i の成分のうち通常絶対値が最大となる c_i^j が正になるよう設定すれば良いが, 電圧測定値と整合させても良い. また, センサの測定姿勢を決定する2つの回転行列 R_a および R_b は, すべての方向 ($i = 1, 2, 3$) について2つの法線ベクトル n_{ia} と n_{ib} とのなす角度がなるべく大きくなるように設定する必要がある.

実際の測定ではさまざまな誤差が含まれるため, センサ主軸を含むふたつの平面がなす角度はなるべく 90° に近いことが望ましい. また, 回転軸 (e_z) といずれかのセンサ主軸方向を平行に近く設定してしまうと, その方向のセンサ出力電圧の振幅が小さくなってしまうことにも注意する必要がある. 仮にある方向のセンサを xy 平面に投影したときの xy 平面上での誤差の大きさを l_e とすると, θ_i の測定精度は s_i の投影長さを l_s としたとき l_e/l_s となる. このため加振装置の回転面に対するセンサ主軸方向の投影長さは全ての方向のセンサについてなるべく大きくとる必要がある.

3軸に対して3つの直交姿勢で測定を行えば理論的には最も精度よく主軸方向と感度を同定することが可能だが, 実際には測定の度にセンサの姿勢を変更するので, 取り付け誤差や温度変化, 入力電圧変化といった測定条件の不一致による問題が生じる. また, コスト的にも測定回数は少ないことが望ましい. 提案手法ではセンサの姿勢をうまくとれば1回の加振測定で3方向のセンサ主軸方向を含む平面が3つ同時に得られるので, 合計2回の測定実験によって3つのセンサ主軸方向を全て同定することが可能である. また, 2軸のセンサであれば必要な測定回数は1回となる. 理想の3軸センサで考えた場合, 全方向のセンサの投影長さを全て等しくとるような姿勢は有限回転群であり, 本校正方法において有意に異なる姿勢は図5に示すように投影面に対して4つ存在する. この4つの姿勢のうち, 任意の2つの姿勢の組み合わせは3方向のセンサのうちどれか1つの方向のセンサを含む平面同士が同一になってしまう.

Fig. 4 Sensor including plane in xyz coordinate

Fig. 5 Configuration of sensor direction vectors
 (projected lengths are equally divided)

したがってセンサの xyz 座標系に対する2つの姿勢を式(2)で示す回転行列 R_a と R_b で表すとすると, 2回の測定で全方向のセンサの投影長さの合計を等しくとる組み合わせ (R_a' の $\cos \alpha = \sqrt{\frac{3}{5}}$) か, 2つの平面の法線ベクトル同士の外積が大きいほど2平面同士のなす角度が 90° に近くなることを考慮し, 1つのセンサあたりの2回分の投影長さの積と, 法線ベクトルの外積との積が等しくなるような姿勢の組み合わせ (R_a' の $\cos \alpha = \frac{\sqrt{7}}{3}$) といったものが候補として考えられる. 本報告で実験に用いる姿勢の組み合わせについては後述する.

$$R_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_a' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad R_b' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_a = R_a' R_1, \quad R_b = R_b' R_a \quad (2)$$

3.2 各方向における個別センサ感度

実際のセンサでは同一パッケージ内でも各方向で感度が異なっている．さらに温度ドリフトなどによってオフセット電圧 $v_{\text{off},i}$ も変化する． i 方向のセンサ感度を κ_i とすると厳密には κ_i は入力加速度 $\mathbf{a}$ や温度 T ，入力電圧 v_{in} などに依存する非線形関数である．また， i 方向のセンサが出力する電圧 $v_{\text{out},i}$ は次式で示される．

$$v_{\text{out},i} = \kappa_i(\mathbf{a}, T, v_{\text{in}}, \text{etc.}) + v_{\text{off},i} \quad (3)$$

κ_i について，温度が一定に保たれた室内で測定が短時間であれば温度や入力電圧の変化による影響は小さいと考えられる．この場合 κ は $\mathbf{a}$ のみを変数とした $\kappa_i = k_i \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{a}$ (k_i は i 方向の加速度のみに対する感度を意味する定数) と近似することができる．この場合式 (3) は次式で示される．

$$v_{\text{out},i} = k_i \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{a} + v_{\text{off},i} \quad (4)$$

$v_{\text{off},i}$ は短い時間であればほぼ線形に変化する．このため本機構では同位相同士の電圧、例えば $\theta = 0^\circ$ のときと， $\theta = 360^\circ$ のときの $v_{\text{out},i}$ との差分をとることで $v_{\text{off},i}$ を除去できる．また，本機構では各方向のセンサに対して入力加速度が正弦波となることを利用して，測定開始時と測定終了時の電圧の平均値から $v_{\text{off},i}$ の項を除去することもできる⁽⁹⁾．

さて，式 (4) より加振装置によって得られるセンサ電圧信号の振幅にはセンサ主軸方向と入力加速度によって決定される $\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{a}$ の成分と，センサ感度 k_i の両者が積算されて含まれていることがわかる．両者を分離して同定するためには感度 k_i が主軸方向 $\mathbf{s}_i$ のどちらかが既知である必要がある．主軸方向が不明な状態で k_i のみを特定することはできないから，前節で述べた方法で $\mathbf{s}_i$ の成分を先に求めた後， $\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{a}$ の値から k_i を計算することになる．

今，ベクトル $\mathbf{s}_i$ が既知となった場合，機構によって加振された際の i 方向のセンサの最大電圧を $v_{\text{out},i}^{\text{max}}$ ，最小電圧を $v_{\text{out},i}^{\text{min}}$ としたとき，両者の差は次式となる．

$$v_{\text{out},i}^{\text{max}} - v_{\text{out},i}^{\text{min}} = 2k_i r |\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{s}_i \times \boldsymbol{\omega})| \quad (5)$$

右辺はセンサ主軸が機構から受ける遠心力にセンサ感度を乗じた値の2倍を意味している．機構の回転角速度 $|\boldsymbol{\omega}|$ が一定であれば式 (5) を利用して，センサを加振機構から取り外すことなく一回の測定データの中から係数 k_i を特定することができる．以上のことをまとめてテンソルを利用して表現すると，次式となる．

$$S = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1^T \\ \mathbf{s}_2^T \\ \mathbf{s}_3^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^1 & c_1^2 & c_1^3 \\ c_2^1 & c_2^2 & c_2^3 \\ c_3^1 & c_3^2 & c_3^3 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_{\text{off}} = \begin{bmatrix} v_{\text{off},1} \\ v_{\text{off},2} \\ v_{\text{off},3} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{v}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} v_{\text{out},1} \\ v_{\text{out},2} \\ v_{\text{out},3} \end{bmatrix} = K S \mathbf{a} + \mathbf{v}_{\text{off}} \quad (6)$$

ただし， S はセンサ主軸方向テンソル， K は感度テンソル， $\mathbf{v}_{\text{off}}$ ， $\mathbf{v}_{\text{out}}$ はそれぞれはオフセット電圧と各センサの出力電圧を示すベクトルである． S は3つのセンサの主軸方向を含んだ行列であるが，3つの一次独立な斜交基底ベクトル $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \mathbf{s}_3$ によって構成された座標変換テンソルと見ることもできる．また，拡大係数行列を利用すると，式 (6) は次式のように表現できる．

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{v}_{\text{out}} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a} \end{bmatrix}, \quad \left(T = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{v}_{\text{off}} & K S \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

以上よりセンサの実方向同士が直交していない一般的な加速度センサは入力加速度ベクトル空間を，テンソル $K S$ によって電圧ベクトル空間に変換し，基底座標をオフセット電圧 $\mathbf{v}_{\text{off}}$ に移すアフィン変換であるから，逆変換が存在すればそれによって加速度ベクトルを求めることができる．

式 (6),(7) より明らかなように，3軸加速度センサの特性を得るためには必ずしもテンソル S と K を分離して求める必要はなく，積 $K S$ の形で求めれば良い．ただしオフセット電圧ベクトル $\mathbf{v}_{\text{off}}$ は時間によって変化する場合が

あることに注意しなければならない．仮に K, S (あるいは KS) および v_{off} が既知となれば，入力加速度ベクトル $\mathbf{a}$ は出力電圧ベクトル $\mathbf{v}_{\text{out}}$ から次式を利用して求めることができる．

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{v}_{\text{out}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

複数軸の加速度センサのうち 2 軸の主軸方向が重なるとか，ある方向の感度が 0 であるなどの異常な事態を除けば逆変換 T^{-1} は存在する．本手法で校正した加速度センサは，互いのセンサ実軸方向が必ずしも直交していても入力加速度を 3 次元のベクトルとして求められるため，センサの特性が安定していれば常に高精度な計測ができる利点がある．また，実際の計算は 3×3 の正方行列を扱うだけなので高速な演算が可能であり，校正後のリアルタイム処理，例えば航空機や自動車のデッドレコニングなどの応用にも有利と考えられる．

4. 実 験

図 6 は本機構の概観である．センサ駆動部の回転半径は 50mm であり，ロータリエンコーダは 81000 ppr (4 通倍のため 1 回転あたり 324000 パルス) のものを使用している．ギアヘッドの振動の影響を避けるため，モータの端部は円形とし，ゴムで表面を覆ったターンテーブルを利用して機構を回転させている．PID 制御による 0.1Hz 駆動時の回転周波数の平均誤差は約 1% である．試作機は $0.002 \sim 0.2 \text{ m/s}^2$ ($0.2 \sim 20 \text{ gal}$) の範囲で入力加速度を設定可能である．本機構を用いて MEMS デバイスの 3 軸加速度センサの加振実験を行った．今回の加振条件は加振周波数 0.5Hz であり，センサが受ける加速度は最大約 0.5 m/s^2 である．オフセット電圧の時間変化の影響が無視できない場合は基線補正を行う必要があるが⁽⁹⁾，今回実験に用いたセンサは電圧変化率が 1% 以内で安定しており，補正は行っていない．

図 7 はセンサ主軸方向を含む平面とパッケージ角度とのずれ $\Delta\theta_i$ を測定した結果である．加振実験によって得られる出力電圧波形は完全な正弦波ではないため，本報告では非線形関数について収束性が高いことで広く知られている Levenberg-Marquardt アルゴリズムを利用して，最小二乗法による非線形曲線近似を行い，出力波形の近似正弦波を得ている⁽¹⁰⁾．これとエンコーダから得られる入力加速度とを比較することで $\Delta\theta_i$ が得られる．センサを異なる姿勢にして同様の測定を行えば実際のセンサ主軸方向を含む 2 平面が得られ，その交線が実際のセンサ主軸方向を示すことになる．

Fig. 6 Overview of prototype exciter

Fig. 7 Angle identification of the plane including actual sensor direction

前節で述べたように、2つの平面同士が平行に近くなるような状態は避けるよう注意する必要がある。今回の実験では、まず回転面に対する3つの主軸方向全ての投影長さを大きくとる目的で、図8(a)、(b)に示す2つの配置で加振実験を行うこととした。2つの配置は加振機座標系(xyz)とセンサ座標系(123)を一致させた状態から、図8(a)は次式の回転行列 R_a で、図8(b)は R_b によって回転させたものである。この組み合わせでは s_i の投影長さが全て $\sqrt{2}/2$ 以上となる。

$$R_a = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} - \sqrt{\frac{2}{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}, \quad R_b = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} - \sqrt{\frac{2}{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

仮に図8(a)と図8(c)に示す2つの配置で測定を行うと、 s_3 方向を含む2平面が平行あるいはそれに近い状態になってしまい、3.1節で述べたように精度上好ましくない。図9は実際の加振装置のテーブルと加速度センサの外観である。また図8、図9中の角度 α は $\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}$ となる鋭角である(式(2)中の $\cos \alpha$ に相当)。これを実験1とする。

さらに、本測定方法の妥当性を検証するため、図9における角度 α が $\cos \alpha = \frac{\sqrt{7}}{3}$ となる鋭角の台も用意して同様の測定を行った。これは1つのセンサあたりの2回分の投影長さの積と、法線ベクトルの外積との積が等しくなるような姿勢の組み合わせである(3.1節参照)。これを実験2とする。

Fig. 8 Experimental arrangement of exciter and accelerometer

Fig. 9 Overview of experimental arrangement (accelerometer and exciter table)

図10はセンサの出力波形に正弦波を近似した様子である。今回使用したセンサはオフセット電圧は時間に依存せずほぼ一定であった。しかし、入力加速度(振幅 100 mV)に対して平均ノイズレベル(振幅 28 mV)が比較的

大きく、良好な S/N 比が得られなかったためセンサを含む平面を特定する際の精度はそれほど高くなかったと考えられる。S/N 比はセンサの性能に依存するが、リンクの半径やモータの回転速度を変更して、発生可能な入力加速度の範囲を広げるといった対応方法は考えられる。

Fig. 10 Sine curve fitting

実験 1 および実験 2 から得られた方向テンソルをそれぞれ S_1, S_2 , 感度テンソルを K_1, K_2 としたときの、それぞれの測定結果を式 (6) の形式で示すと次式のようにになる。K 内の数値の単位は $\text{mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$ である。

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1.00 & -0.04 & 0.01 \\ 0.03 & 1.00 & -0.02 \\ -0.03 & -0.02 & 1.00 \end{bmatrix}, S_2 = \begin{bmatrix} 1.00 & -0.01 & 0.03 \\ 0.01 & 1.00 & -0.02 \\ -0.03 & -0.02 & 1.00 \end{bmatrix},$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} 108.2 & 0 & 0 \\ 0 & 106.7 & 0 \\ 0 & 0 & 95.7 \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} 107.8 & 0 & 0 \\ 0 & 107.2 & 0 \\ 0 & 0 & 96.2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式に示されるように、実験 1 および実験 2 の異なる条件下で有効数字 2 桁の精度で同一の方向テンソル S が得られた。感度テンソル K に関しては両者とも有効数字 3 桁において数値が一致した。また、感度の値はデータシートの値 $1000\text{mV}/\text{g} \approx 100\text{mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$ とほぼ一致した。表 1 に S_1 および S_2 から得られた各センサ実方向同士のなす角度を示す。各センサー同士のなす角度については本手法以外では測定自体が困難であるため、この値についてはデータシートに記載がない。今回の実験では S/N 比が良好ではなかったものの、両者の値は有効数字 2 桁の範囲で一致している。これらの結果から、提案手法の妥当性が示されたと考えられる。また、ノイズレベルが低いセンサならばさらに高精度な測定も期待できる。

Table 1 Relative angles of the sensor direction vectors

Sensor combination	s_1 and s_2 [°]	s_2 and s_3 [°]	s_3 and s_1 [°]
Experiment 1	90.4	92.7	90.7
Experiment 2	90.3	92.3	90.2

以上より、式 (6)、あるいは式 (8) を利用して、実際に方向テンソル S および感度テンソル K を測定可能ことが示された。これは、出力電圧から入力加速度をベクトルの形で求めることが可能であることを意味する。本手法はセンサ個別に主軸方向と感度を同定できるため、センサ個体のばらつきにも対応可能と考えられる。

5. 結 論

平行リンクを利用した加速度センサ検定用の加振装置による、加速度センサ内のセンサ主軸方向および感度の校正手法を提案した。また、3 軸全ての主軸方向と感度を得ることによって従来の加速度センサで用いられていた横感度という概念を導入せずに、 $3 \times 3(4 \times 4)$ の正方行列を利用した計算によって実際の入力加速度を 3 次元ベクトルの形で求められることを示した。

提案手法の妥当性を調べるため、実際に試作機構を利用して2回の等速円運動による加振測定を行った。異なる2つの条件で測定した実験結果から、3軸加速度センサの全ての主軸方向および感度を同定した。両者の実験値は実方向において有効数字2桁で一致し、感度に関しては有効数字3桁で一致した。また、感度の値は当該製品のデータシートの値とも整合し、提案手法によって3軸加速度センサの校正が可能であることを確認した。今後は姿勢の変更なども自動化し、より高精度かつ効率的な検定方法を構築していく予定である。

文 献

- (1) ISO 16063-1, Methods for the calibration of vibration and shock transducers Part1: Basic concepts, (1998).
- (2) ISO 5347, Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups, (1993).
- (3) 梅田章, 尾上賢, 坂田光児, 福島武博, 嘉成幸一, 小林敏之, “三次元振動発生機とレーザ干渉計による三軸加速度計の三次元加速度計としての校正法に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.697, (2007), pp.38-45.
- (4) 大和田 邦樹, “センサ・マイクロマシンの国際標準化動向”, 電学論 E(センサ・マイクロマシン部門誌), Vol.124, No.7, (2004), pp.238-241.
- (5) 中村成志, 渥美竜文, 木村仁, 伊能教夫, 松平昌之, 吉田稔, “加速度センサ検定用低周波加振装置の開発”, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, No.569, (2010), GO16-Fri-PM-9.
- (6) 木村 仁, 中村 成志, 伊能 教夫, 松平 昌之, 吉田 稔, “平行リンク機構を利用した加速度センサ検定装置(加速度データ積分による変位計算とセンサ個別補正)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.785, (2012), pp.27-34.
- (7) 林康裕, 勝倉裕, 渡辺孝英, 片岡俊一, 横田治彦, 田中貞二, “デジタル強震計の加速度記録を積分して得られる変位の信頼性について”, 日本建築学会構造系論文報告集, No.419, (1991), pp.57-66.
- (8) 松本裕史, 茜絢也, 楠浩一, 田才晃, “リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発: その4性能曲線の精度検討法概要”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2007), pp.25-26.
- (9) 大崎順彦, “第7章 応答スペクトル” 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, (1994), pp.129-151.
- (10) F. Facchinei and C. Kanzow, “A nonsmooth inexact Newton Method for the solution of large-scale nonlinear complementarity problems”, *Mathematical Programming*, Vol. 76, (1997), pp.493-512.