

複数加速度計を使用した6軸加速度センサシステムの キャリブレーションについて*

三村 宣治^{*1}, 小野寺 良二^{*2}

Calibration Method for 6 DOF Acceleration Sensor Systems Using Multiple Accelerometers

Nobuharu MIMURA^{*3} and Ryoji ONODERA

^{*3} Faculty of Engineering, Niigata University,
8050 Ikarashi-2, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

This paper investigates a calibration method of 6 DOF acceleration sensor system using multiple linear accelerometers. So far, it has been considered that a set of 6 DOF acceleration data is to be essential to its calibration. In this accelerometer system, 6 DOF acceleration can be resolved using the geometrical condition of 6 linear accelerometers. Therefore, the measurement error results from the alignment error of the 6 linear accelerometers. And so, we analyze the alignment error and give a calibration method to identify the error only using some limited linear accelerations (acceleration of gravity). This paper discusses its calibration method with experiments for our prototype 6 DOF accelerometer. The results show that the calibration using limited data is possible and has good performance.

Key Words: Sensor, Calibration, Measurement, 6 DOF Acceleration, Error Analysis

1. はじめに

ロボットや車両など3次元空間内の物体は並進および回転方向にそれぞれ3自由度(合計6自由度)を有するので,その運動の計測・制御にはこれら6自由度の運動を検出できるセンサが必要である。従来,このような6自由度運動を計測するセンサとして,ロケットや航空機分野向けに開発されたジャイロシステムと加速度計を組み合わせたものが知られている⁽¹⁾。しかしこれらは,比較的大型・高価であるため,小型の移動体や移動ロボットに搭載することが困難であった。近年,振動ジャイロやマイクロマシンジャイロなどを用いたセンサシステムの開発が進められている⁽²⁾が,計測精度や安定性などに問題があり,実用化された例は少ない。また,一般にジャイロに関してはキャリブレーションが困難で,精密な動揺テーブルなどの特別な設備が必要になるという問題点もある。一方,キャリブレーションが十分でない場合には,軸間干渉やゲインおよびオフセット誤差などが発生し,精密な計測が行えない。

上記のようなジャイロセンサを用いず,6~12個

の加速度計のみによって6自由度運動を計測する手法が Pad-gaonkar⁽³⁾らや太田⁽⁴⁾⁽⁵⁾らによって提案されている。彼らの方法では,十分にキャリブレーションされた複数個の加速度計を適切に配置することにより,6自由度運動を計測する。物体の6自由度運動と複数個の加速度計出力の関係は,加速度計の幾何学的配置条件により決定される。彼らは,加速度計の幾何学配置には誤差がないとして計測系を構成している。しかし,この手法では,複数個の加速度計がそれぞれ単体で十分にキャリブレーションされていたとしても,それらの幾何学的配置に誤差があると,それが最終的な計測誤差となりうる。したがって,より高精度な計測を行うためには,複数個の加速度計単体ではなく,6軸加速度計測システムとしてキャリブレーションを行う必要がある。

一般に,6軸力覚センサなどの多軸センサでは,センサシステムを構成するひずみゲージなど個々のセンサセルの出力から6軸の情報への変換を行う。しかし,この変換が Pad-gaonkar⁽³⁾らの加速度センサシステムのようにセンサセルの幾何学配置から簡単には求まらない場合が多い。そのような場合には,この変換を一般的な行列で表し,行列の要素をキャリブレーションにより決定する。このキャリブレーションには6軸全ての方向のデータが必要で,極めて煩雑な操作が必要となる⁽⁶⁾。

* 原稿受付 2006年5月19日。

^{*1} 正員,新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。

^{*2} 正員,新潟大学大学院自然科学研究科。
E-mail: mimura@bc.niigata-u.ac.jp

一方、金子ら⁽⁷⁾は、キャリブレーションの比較的簡単な3軸力覚センサを複数個組み合わせ、より多軸のセンサシステムを構成する手法を提案している。しかし、この手法でも、組み合わせる複数個のセンサ配置には誤差がないとしている。

著者ら⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾はこれまで Pad-gaonkar⁽³⁾らの手法を改良した6軸加速度センサシステムを開発し、彼らと同様に個々の加速度計の幾何学配置に誤差がないとして処理を行っていた。しかし、この方法では個々の加速度計のキャリブレーションを注意深く行っても、最終的な計測誤差(軸間干渉やオフセット誤差)が十分に小さくならないという現象が発生した。これに関し検討した結果、加速度計の幾何学配置の誤差が影響していると推定された。

本論文では、個々の加速度計の幾何学配置誤差に関する解析を行い、その影響を明確にしている。一般にこれらセンサ誤差を同定するためには6軸全ての方向の基準入力が必要となり、極めて煩雑な操作が要求される。それに対し誤差解析の結果、提案するセンサシステムではセンサ誤差の並進と回転の主成分に従属性があることを見いだした。この結果を利用し並進3軸方向の基準入力のみから主たる誤差を同定するキャリブレーション方法を提案している。一般に、回転方向の基準入力の生成は困難で、これまでは精密な動揺テーブルが利用されてきたが、本手法によれば並進3軸方向の基準入力のみから回転方向3軸の誤差も低減できることが示されている。これらの結果を、試作した6軸加速度センサシステムに適用し、提案するキャリブレーション方法の有効性を実験的にも確認している。

2. 複数加速度計を用いた6軸加速度計測システム

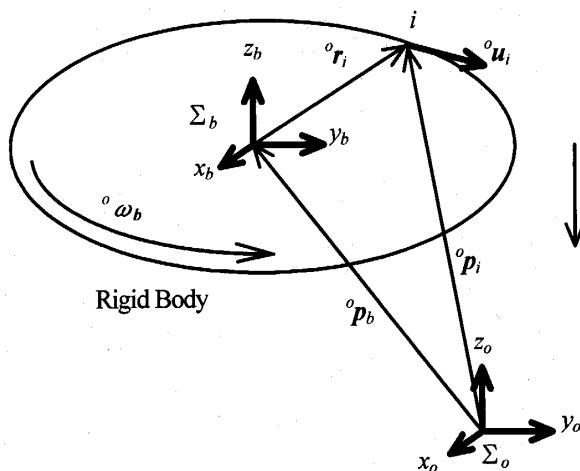


Fig.1 Acceleration produced at the point i on a rigid body

2.1 加速度計測原理と6軸加速度への拡張 既報⁽⁸⁾に示すように、運動する剛体上の点 i に取り付けられた単軸加速度計の出力 a_i (図1) は次式より得られる。

$$\begin{aligned} a_i &= {}^o u_i^T {}^o \ddot{p}_i, \\ {}^o \ddot{p}_i &= {}^o \ddot{p}_b + g + {}^o \dot{\omega}_b \times {}^o r_i + {}^o \omega_b \times ({}^o \omega_b \times {}^o r_i) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)を整理すると、

$$a_i = \begin{bmatrix} {}^o u_i^T & -{}^o u_i^T {}^o R_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^o \ddot{p}_b + g \\ {}^o \dot{\omega}_b \end{bmatrix} + {}^o u_i^T \{ {}^o \omega_b \times ({}^o \omega_b \times {}^o r_i) \} \quad (2)$$

である。ただし、

$${}^o R_i = \begin{bmatrix} 0 & -{}^o r_{iz} & {}^o r_{iy} \\ {}^o r_{iz} & 0 & -{}^o r_{ix} \\ -{}^o r_{iy} & {}^o r_{ix} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

である。ここで、 ${}^o u_i = [{}^o u_{ix} \ {}^o u_{iy} \ {}^o u_{iz}]^T$ および ${}^o p_b = [{}^o p_{bx} \ {}^o p_{by} \ {}^o p_{bz}]^T$, ${}^o r_i = [{}^o r_{ix} \ {}^o r_{iy} \ {}^o r_{iz}]^T$ は、それぞれ感度方向を示す単位ベクトルおよび静止基準座標系 Σ_o から見た剛体に固定した座標系 Σ_b の位置ベクトルと物体上の任意の位置 i の位置ベクトルである。また、物体の並進加速度 ${}^o \ddot{p}_b + g$, 回転角加速度 ${}^o \dot{\omega}_b$ は6個以上の単軸加速度計を用いて得られる。すなわち、6個の場合には(図2)、

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_6 \end{bmatrix} = {}^o R \begin{bmatrix} {}^o \ddot{p}_b + g \\ {}^o \dot{\omega}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^o u_1^T \{ {}^o \omega_b \times ({}^o \omega_b \times {}^o r_1) \} \\ {}^o u_2^T \{ {}^o \omega_b \times ({}^o \omega_b \times {}^o r_2) \} \\ \vdots \\ {}^o u_6^T \{ {}^o \omega_b \times ({}^o \omega_b \times {}^o r_6) \} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし、

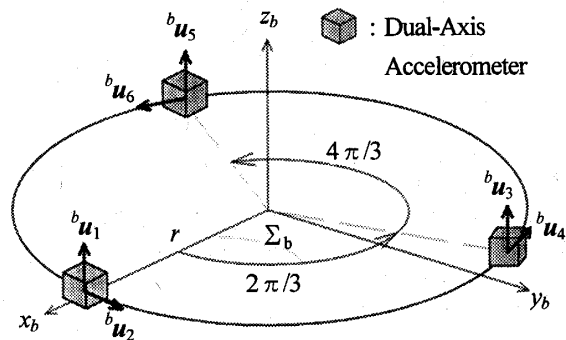


Fig.2 Arrangement of a prototype accelerometer

$${}^o\mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^o\mathbf{u}_1^T & -{}^o\mathbf{u}_1^T {}^o\mathbf{R}_1 \\ {}^o\mathbf{u}_2^T & -{}^o\mathbf{u}_2^T {}^o\mathbf{R}_2 \\ \vdots & \vdots \\ {}^o\mathbf{u}_6^T & -{}^o\mathbf{u}_6^T {}^o\mathbf{R}_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

である。 ${}^o\mathbf{R}$ が正則であるとき、式(4)は、

$$\begin{bmatrix} {}^o\ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g} \\ {}^o\dot{\boldsymbol{\omega}}_b \end{bmatrix} = {}^o\mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_6 \end{bmatrix} - {}^o\mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$f_i = {}^o\mathbf{u}_i^T \{ {}^o\boldsymbol{\omega}_b \times ({}^o\boldsymbol{\omega}_b \times {}^o\mathbf{r}_i) \}, \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (7)$$

となり、物体の並進および回転加速度(${}^o\ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g}$, ${}^o\dot{\boldsymbol{\omega}}_b$)を求めることができる。

2.2 加速度計測誤差の発生要因とその影響 式(5), (6)に示すように、本加速度センサでは、これに用いる単軸加速度センサの感度方向単位ベクトル ${}^o\mathbf{u}_i$ およびその取り付け位置ベクトル ${}^o\mathbf{r}_i$ が正確であることが必要とされる。これらの値はセンサ固有のパラメタである。そこで、以下では ${}^o\mathbf{u}_i$ および ${}^o\mathbf{r}_i$ に誤差が含まれる場合について考察する。本加速度センサの計測値は、複数個の単軸加速度センサの出力を統合することにより得られるので、誤差については、単軸加速度センサの出力 a_i (式(2))について検討すればよい。まず、式(2)を以下のように変形し、物体の運動(${}^o\ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g}$), ${}^o\dot{\boldsymbol{\omega}}_b$ のみを含む項とセンサ固有のパラメタ ${}^o\mathbf{u}_i$ および ${}^o\mathbf{r}_i$ のみを含む項に分離する。

$$a_i = c_{ii} ({}^o\ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g}) + c_{ri} ({}^o\dot{\boldsymbol{\omega}}_b) + c_{rvi} \text{vec} ({}^o\boldsymbol{\Omega}_b^T) \quad (8)$$

ここで、

$$c_{ii} = {}^o\mathbf{u}_i^T, \quad c_{ri} = -{}^o\mathbf{u}_i^T {}^o\mathbf{R}_i, \quad c_{rvi} = \left[\text{vec} \left(\left({}^o\mathbf{u}_i {}^o\mathbf{r}_i^T \right)^T \right)^T \right]^T,$$

$$\begin{aligned} \text{vec} \left(\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \right) \\ = [a_{11} \ a_{21} \ a_{31} \ a_{12} \ a_{22} \ a_{32} \ a_{13} \ a_{23} \ a_{33}]^T, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^o\boldsymbol{\Omega}_i &= ({}^o\boldsymbol{\omega}_b \times {}^o\boldsymbol{\omega}_b \times) \\ &= \begin{bmatrix} -({}^o\omega_{by}^2 + {}^o\omega_{bz}^2) & {}^o\omega_{bx} {}^o\omega_{by} & {}^o\omega_{bx} {}^o\omega_{bz} \\ {}^o\omega_{bx} {}^o\omega_{by} & -({}^o\omega_{bx}^2 + {}^o\omega_{bz}^2) & {}^o\omega_{by} {}^o\omega_{bz} \\ {}^o\omega_{bx} {}^o\omega_{bz} & {}^o\omega_{by} {}^o\omega_{bz} & -({}^o\omega_{bx}^2 + {}^o\omega_{by}^2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

である。つぎに、センサ固有のパラメタの誤差を $\Delta^o\mathbf{u}_i$ および $\Delta^o\mathbf{r}_i$ とし、これらによる加速度計測誤差を Δa_{ci} とする。また一般に加速度センサにはこれら以外にオフセット誤差が含まれるためこれを Δa_{ofi} とし、これら誤差を含む加速度計の計測値を a_{mi} すると、式(2)は以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} a_{mi} &= a_i + \Delta a_{ci} + \Delta a_{ofi}, \\ \Delta a_{ci} &= \Delta c_{ii} ({}^o\ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g}) \\ &\quad + \Delta c_{ri} {}^o\dot{\boldsymbol{\omega}}_b + \Delta c_{rvi} \text{vec} ({}^o\boldsymbol{\Omega}_b^T) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta c_{ii} (\Delta^o\mathbf{u}_i) &= \Delta^o\mathbf{u}_i^T, \\ \Delta c_{ri} (\Delta^o\mathbf{u}_i, \Delta^o\mathbf{r}_i) &= -\Delta^o\mathbf{u}_i^T {}^o\mathbf{R}_i \\ &\quad - {}^o\mathbf{u}_i^T \Delta^o\mathbf{R}_i \\ &\quad - \Delta^o\mathbf{u}_i^T \Delta^o\mathbf{R}_i, \\ \Delta c_{rvi} (\Delta^o\mathbf{u}_i, \Delta^o\mathbf{r}_i) &= \left[\text{vec} \left\{ \left(\Delta^o\mathbf{u}_i {}^o\mathbf{r}_i^T \right)^T \right\} \right]^T \\ &\quad + \left[\text{vec} \left\{ \left({}^o\mathbf{u}_i \Delta^o\mathbf{r}_i^T \right)^T \right\} \right]^T \\ &\quad + \left[\text{vec} \left\{ \left(\Delta^o\mathbf{u}_i \Delta^o\mathbf{r}_i^T \right)^T \right\} \right]^T \end{aligned} \quad (11)$$

である。このように、式(10), (11)において、 Δa_{ofi} および $\Delta^o\mathbf{u}_i$ は主に加速度センサの製作誤差に基づくもので、メーカー保証値を表1に示す(なお、表1中の括弧内の値は実際に用いた6個の加速度センサの実測値である)。また、 $\Delta^o\mathbf{r}_i$ はセンサ筐体の製作精度で決定され、今回はNC加工機による切削加工で、長さ精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ($r = 60\text{mm}$ に対し)、角度精度 $\pm 0.1\text{deg}$ 以内である。なお、この切削加工精度は通常のNC加工機で十分可能な範囲である。ただし、誤差 $\Delta^o\mathbf{u}_i$ および

Table 1 Specifications of the accelerometer chip (Analog Devices, Inc. Accelerometer ADXL 202E)

Measurement Range	± 20 [m/s ²]	
Resolution (at 60 Hz)	0.02 [m/s ²]	
Operating Voltage Range	3~5 [V]	
Quiescent Supply Current	0.6 [mA]	
Temp. Operating Range	0~70 [°C]	
Size	5×5×2 [mm]	
Gain error	$ \Delta^j u_j / {}^j u_j $	± 20 [%] (-0.69~+3.58) [%]
Absolute alignment error	$ \Delta^j \alpha_j / {}^j u_j $, $ \Delta^j \beta_j / {}^j u_j $	± 1.75 [%]
Offset error	$ \Delta a_{ofi} / g$	± 200 [%] (-28.3~+25.4) [%]

Table 2 Estimated error values

Error factor	C_i	C_{ri}			C_{rvi}		
		$\frac{ \Delta^o \mathbf{u}_i^T \mathbf{R}_i _{max}}{ \mathbf{u}_i^T \mathbf{R}_i }$	$\frac{ \mathbf{u}_i^T \Delta^o \mathbf{R}_i _{max}}{ \mathbf{u}_i^T \mathbf{R}_i }$	$\frac{ \Delta^o \mathbf{u}_i^T \Delta^o \mathbf{R}_i _{max}}{ \mathbf{u}_i^T \mathbf{R}_i }$	$\frac{ \text{vec}\{\Delta^o \mathbf{u}_i^T \mathbf{r}_i^T\} _{max}}{ \text{vec}\{\mathbf{u}_i^T \mathbf{r}_i^T\} }$	$\frac{ \text{vec}\{(\Delta^o \mathbf{u}_i \Delta^o \mathbf{r}_i)^T\} _{max}}{ \text{vec}\{(\mathbf{u}_i \mathbf{r}_i)^T\} }$	$\frac{ \text{vec}\{(\Delta^o \mathbf{u}_i \Delta^o \mathbf{r}_i)^T\} _{max}}{ \text{vec}\{(\mathbf{u}_i \mathbf{r}_i)^T\} }$
Estimated value	0.251 (0.352×10^{-1})	0.251 (0.305×10^{-1})	0.242×10^{-2} (0.242×10^{-2})	0.651×10^{-3} (0.198×10^{-3})	0.251 (0.352×10^{-1})	0.247×10^{-2} (0.247×10^{-2})	0.751×10^{-3} (0.105×10^{-3})

$\Delta^o \mathbf{r}_i$ は基準座標系 Σ_o で表される量であるのに対し、上記センサおよび筐体の加工精度は、それぞれのセンサに固定した座標系 Σ_b ($i = 1, 2, \dots, 6$)に関する値であるので、座標系 Σ_o と Σ_i の間の回転行列を ${}^o \mathcal{R}_i$ として、

$$\begin{aligned} \Delta^o \mathbf{r}_i &= \begin{bmatrix} \Delta^o r_{ix} \\ \Delta^o r_{iy} \\ \Delta^o r_{iz} \end{bmatrix} = {}^o \mathcal{R}_i \begin{bmatrix} \Delta^i r_i \\ \Delta^i \alpha_i \\ \Delta^i \beta_i \end{bmatrix}, \\ \Delta^o \mathbf{u}_i &= \begin{bmatrix} \Delta^o u_{ix} \\ \Delta^o u_{iy} \\ \Delta^o u_{iz} \end{bmatrix} = {}^o \mathcal{R}_i \begin{bmatrix} \Delta^i u_i \\ \Delta^i \xi_i \\ \Delta^i \beta_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

と書ける。表1に示したセンサおよび筐体の加工精度を考慮し、式(1)~(12)より各項の最大範囲を計算し、まとめた結果を表2に示す(なお、表2中の括弧内の値は実際に用いた3組の加速度センサの実測値から計算した値である)。この結果から $\Delta^o \mathbf{r}_i$ を含む項は他の項に比べ十分小さく、省略可能であることが確認できる。言い換えると、センサの主たる誤差は $\Delta^o \mathbf{u}_i$ を含む項によって生じていることがわかる。そこで、式(11)から $\Delta^o \mathbf{r}_i$ を含む項を省略すると、

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{c}_{ii}(\Delta^o \mathbf{u}_i) &= \Delta^o \mathbf{u}_i^T, \\ \Delta \mathbf{c}_{ri}(\Delta^o \mathbf{u}_i, \Delta^o \mathbf{r}_i) &\approx \Delta \mathbf{c}_{ri}(\Delta^o \mathbf{u}_i, 0) \\ &= -\Delta^o \mathbf{u}_i^T \mathbf{R}_i, \\ \Delta \mathbf{c}_{rvi}(\Delta^o \mathbf{u}_i, \Delta^o \mathbf{r}_i) &\approx \Delta \mathbf{c}_{rvi}(\Delta^o \mathbf{u}_i, 0) \\ &= \left[\text{vec}\left\{ \Delta^o \mathbf{u}_i^o \mathbf{r}_i^T \right\}^T \right]^T \end{aligned} \quad (13)$$

である。すなわち、式(10)、(13)を6個の加速度計に適用し、統合すると、

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_m &= \left({}^o \mathbf{R} + \Delta^o \mathbf{R} \right) \begin{bmatrix} {}^o \ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g} \\ {}^o \dot{\boldsymbol{\omega}}_b \end{bmatrix} \\ &\quad + \left({}^o \mathbf{C}_{rv} + \Delta^o \mathbf{C}_{rv} \right) \text{vec}\left({}^o \boldsymbol{\Omega}_b^T \right) + \Delta \mathbf{a}_{of}, \\ \mathbf{a}_m &= \left[a_{m1} a_{m2} \cdots a_{m6} \right]^T, \\ \Delta \mathbf{a}_{of} &= \left[\Delta a_{of1} \Delta a_{of2} \cdots \Delta a_{of6} \right]^T \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta^o \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} \Delta^o \mathbf{u}_1^T & -\Delta^o \mathbf{u}_1^T \mathbf{R}_1 \\ \Delta^o \mathbf{u}_2^T & -\Delta^o \mathbf{u}_2^T \mathbf{R}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta^o \mathbf{u}_6^T & -\Delta^o \mathbf{u}_6^T \mathbf{R}_6 \end{bmatrix}, \\ \Delta^o \mathbf{C}_{rv} &= \begin{bmatrix} \left[\text{vec}\left\{ \Delta^o \mathbf{u}_1^o \mathbf{r}_1^T \right\}^T \right]^T \\ \left[\text{vec}\left\{ \Delta^o \mathbf{u}_2^o \mathbf{r}_2^T \right\}^T \right]^T \\ \vdots \\ \left[\text{vec}\left\{ \Delta^o \mathbf{u}_6^o \mathbf{r}_6^T \right\}^T \right]^T \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

である。結局、式(14)、(15)が主たる誤差を考慮したセンサ方程式である。

3. センサ誤差のキャリブレーション

一般に多自由度の力覚や位置のセンサでは、構造が複雑で式(14)、(15)のようなセンサ方程式が求まらないので、種々の既知の基準入力を用いてキャリブレーション行列とゼロ点の補正が行われている。6自由度のセンサの場合には、最低 $6 \times 6 + 6 = 42$ 個の成分を決定する必要がある。

それに対し、本センサシステムでは、式(14)、(15)に示すように未知の誤差は $\Delta^o \mathbf{u} \in \mathbf{R}^{3 \times 6}$ と $\Delta \mathbf{a}_{of} = [\Delta a_{of1} \Delta a_{of2} \cdots \Delta a_{of6}]^T \in \mathbf{R}^6$ の24成分である。また、式(15)に着目すると、誤差 $\Delta^o \mathbf{u}$ および $\Delta \mathbf{a}_{of}$ は、並進入力だけで決定できることがわかる。そこで、並進入力だけの場合(${}^o \boldsymbol{\omega}_b = 0, {}^o \dot{\boldsymbol{\omega}}_b = 0$)を考えると式(14)は、

$$\mathbf{a}_m = \left({}^o \mathbf{R} + \Delta^o \mathbf{R} \right) \begin{bmatrix} {}^o \ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g} \\ 0 \end{bmatrix} + \Delta \mathbf{a}_{of} \quad (16)$$

である。式(15)を考慮し、誤差 $\Delta^o \mathbf{u}$ 、 $\Delta \mathbf{a}_{of}$ に関し整理すると、

$$\begin{bmatrix} {}^o A & I_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta^o \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{a}_{of} \end{bmatrix} = \mathbf{a}_m - {}^o U \ddot{\mathbf{p}}_{gb},$$

$${}^o A = \begin{bmatrix} {}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gb1}^T & & \\ & \ddots & \\ & & {}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gb6}^T \end{bmatrix},$$

$${}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gb} = {}^o \ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g}, \quad \Delta^o \mathbf{u} = [\Delta^o u_1^T \cdots \Delta^o u_6^T]^T,$$

$${}^o U = [{}^o u_1 \cdots {}^o u_6]^T \quad (17)$$

である。式(17)のような計測を n 回行った場合には、

$${}^o A_n \begin{bmatrix} \Delta^o \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{a}_{of} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_m - {}^o U \ddot{\mathbf{p}}_{gb1} \\ \mathbf{a}_m - {}^o U \ddot{\mathbf{p}}_{gb2} \\ \vdots \\ \mathbf{a}_m - {}^o U \ddot{\mathbf{p}}_{gbn} \end{bmatrix},$$

$${}^o A_n = \begin{bmatrix} {}^o A_1 & I_6 \\ {}^o A_2 & I_6 \\ \vdots & \vdots \\ {}^o A_n & I_6 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{6n \times 24} \quad (18)$$

Table 3 Specifications of the prototype accelerometer

		Max	Typ	Resolution	Sampling
Transrational	x	±2 [g]	±1 [g]	0.04 [m/s ²]	60 [Hz]
	y				
	z				
Rotational	x	±490 [rad/s ²]	±163 [rad/s ²]	0.64 [rad/s ²]	
	y				
	z				

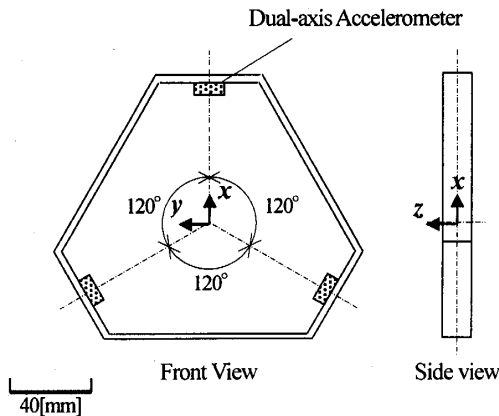


Fig. 3 A proto-type 6-DOF acceleration sensor system.

となり、式(18)において ${}^o A_n$ が列フルランクであるとき、誤差 $[\Delta^o \mathbf{u}^T \Delta \mathbf{a}_{of}^T]^T$ が決定できる。とくに、 $n=4$ ときには、 ${}^o A_n$ は正方行列となり、これが誤差 $[\Delta^o \mathbf{u}^T \Delta \mathbf{a}_{of}^T]^T$ を一意に決定するための最小計測回数である。本6軸加速度センサの定格計測範囲は ±1g (9.807 [m/s²]) であるので、キャリブレーションのための並進加速度 ${}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gb}$ として重力加速度 (1 g) を利用できる。すなわち、

$$\begin{bmatrix} {}^o A_i & I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gbi}^T & & \\ & \ddots & \\ & & I_6 \\ & & & {}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gbi}^T \end{bmatrix},$$

$$(i=1,2,\dots,4),$$

$${}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gb1}^T = [g \ 0 \ 0], \quad {}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gb2}^T = [0 \ g \ 0],$$

$${}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gb3}^T = [0 \ 0 \ g], \quad {}^o \ddot{\mathbf{p}}_{gb4}^T = [0 \ 0 \ -g] \quad (19)$$

のような4通りの姿勢に対し計測を行うことにより、正則な ${}^o A_4$ を生成でき、式(18)から誤差 $[\Delta^o \mathbf{u}^T \Delta \mathbf{a}_{of}^T]^T$ を決定できる。

なお、詳細は省略するが、式(19)より構成した ${}^o A_4$ が正則となることは容易に証明できる。

4. 実験

4.1 実験システム 図2で示した計測原理に基づき試作した6軸加速度センサの概略を表3と図3に示す。なお、本センサに使用した2軸の並進加速度センサはアナログデバイセズ社の ADXL202E である(表1)。本センサ内部にルネサンステクノロジー社の H8-3664 マイコンとUSBインターフェースを装備し、6つの加速度センサからの信号取り込みとホストコンピュータへのデータ転送(60Hz)を行っており、処理

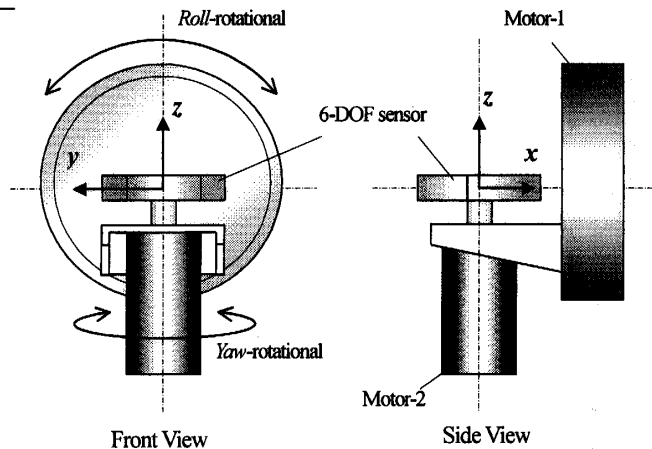


Fig.4 2 DOF rotational table for calibration

の高速化のため整数演算を用いている。6軸加速度への変換やキャリブレーションの補正はホストコンピュータ側で行っている。ただし、表1に示すように並進加速度計のオフセット誤差が比較的大きくH8-3664での整数演算処理のダイナミックレンジに影響を与えるおそれがあるため、センサ内部でオフセット誤差が数%以内になるように補正している。

提案するキャリブレーション方法は、基準となる並進加速度として重力を利用し比較的簡便に実施できることが第1の特徴であるが、式(19)のような4方向の並進加速度を生成する必要がある。そこで、水平方向に対し試作加速度センサの姿勢を任意に設定できるジグを製作し利用した。

提案するキャリブレーション方法のもう一つの特徴は、並進方向のキャリブレーションのみで回転方向のキャリブレーションもある程度正確に行えることである。この特徴を確認するため、回転方向の加速度(角加速度)の基準を与える図4に示すような2軸回転テーブルを製作した。本回転テーブルは、DDモータとDCモータにより構成され、加速度センサの取り付け方向によって任意の2軸回転角加速度を加えることができる。発生する角加速度は、それぞれのモータ軸に直結した精密エンコーダの読みとり値(回転角)を数値微分処理することにより取得した。

4.2 キャリブレーション結果 まず、センサのz軸を水平に固定し、z軸周りに回転されることによりセンサのx-y平面内の任意の方向に重力加速度を加えキャリブレーション前後の計測値を比較した。なお、計測値はすべて表3に示した定格値で除し、無次元化して表示している。また、前記したように、2軸加速度センサのオフセット誤差はセンサ内部であらかじめ

数%以内になるように補正してある。図5は、y軸方向の並進加速度の計測結果を比較して示してある。また、図6は図5の結果を基準値との差として整理し直した結果である。図5および図6に示すように、キャリブレーション前は、本センサの定格値(1g)に対し約2%のゲイン誤差と約4%のオフセット誤差が生じている。前記したように、オフセット誤差についてはセンサ単体である程度補正してあるので、この程度であるが、このような補正を行わないと数10%の誤差が発生する。それに対し、キャリブレーションによってゲインおよびオフセット誤差は、約1%以下に改善しており、本手法の有効性が確認できる(なお、紙面の都合で省略するが他軸方向もほぼ同様の結果である)。

また、図7は、このときのx軸方向の並進加速度とRoll(x軸周りの回転)角加速度の計測結果である。

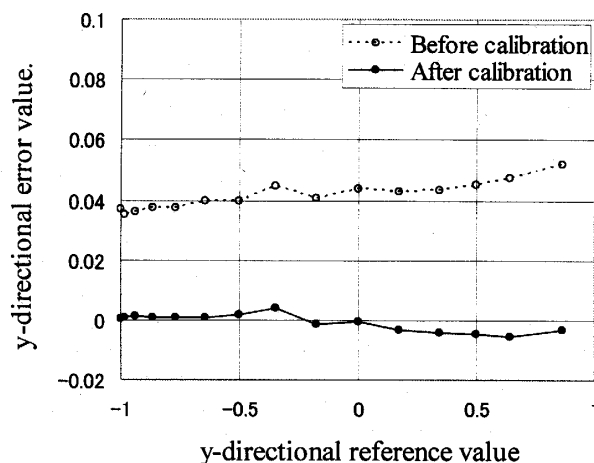


Fig. 6 y-directional error characteristic before and after calibration

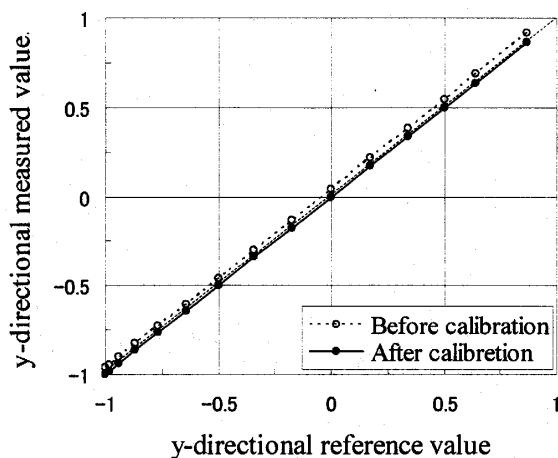


Fig. 5 y-directional characteristic before and after calibration

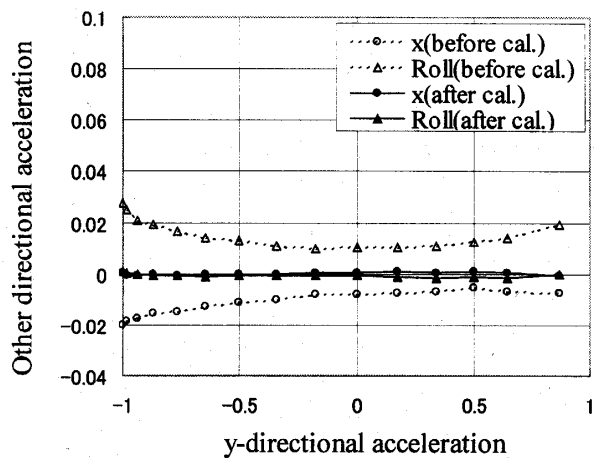


Fig. 7 Interference of y-directional acceleration to the other directions

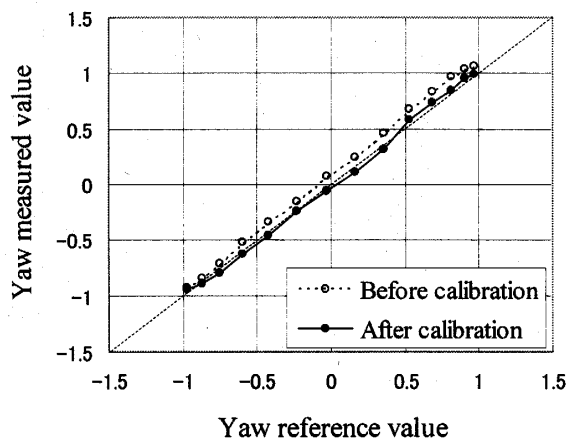


Fig. 8 Yaw-directional characteristic before and after calibration

これらの加速度は、本来0となるべきであるが、キャリブレーション前では、数%のオフセットとy軸方向加速度の干渉が確認できる。一方、キャリブレーション実施後は、これらオフセットとy軸方向加速度の干渉が大幅に改善されていることがわかる。

また、図8は、図4に示した動揺テーブルを用いてYaw方向のみに2Hzの回転振動を与えた場合の結果である。提案する手法では、キャリブレーションは並進方向のデータのみで行っているが、図9に示すように回転方向についてもゲインおよびオフセット誤差が改善していることが確認できる。図9は、このときのy軸方向の並進加速度およびRoll角加速度の計測値である。これらは本来0となるべきであるが、この結果についても本キャリブレーション手法の有効性が確認できる。

4.3 実車両加速度計測への適用結果 前節では比較的単純な加速度を加え、提案するキャリブレーション手法の有効性について検討したが、本節では試作加速度センサを実車両に搭載し、より複雑な運動状態での検討結果について示す。実験は、直線路で約2.5mの車線変更を2回行い、元の車線に戻るというダブルレーンチェンジを行った。このタスクは、車線変更時比較的大きな横加速度と比較的小きなYaw速度（加速度）が発生することが知られており⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、加速度センサを用いた方法では横加速度の影響が大きくYaw成分を検出することが比較的困難なタスクである。実験では、比較のため横加速度の影響を受けない高精度の3軸ヨーレートセンサ（多摩川精機製）を用いた。また、試作センサの直接の出力は角加速度であるので、比較しやすいようにこれを数値積分し、角速度に変換した

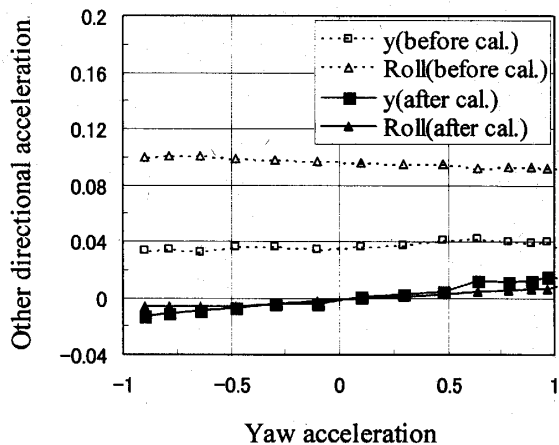


Fig. 9 Interference of Yaw-directional acceleration to the other directions

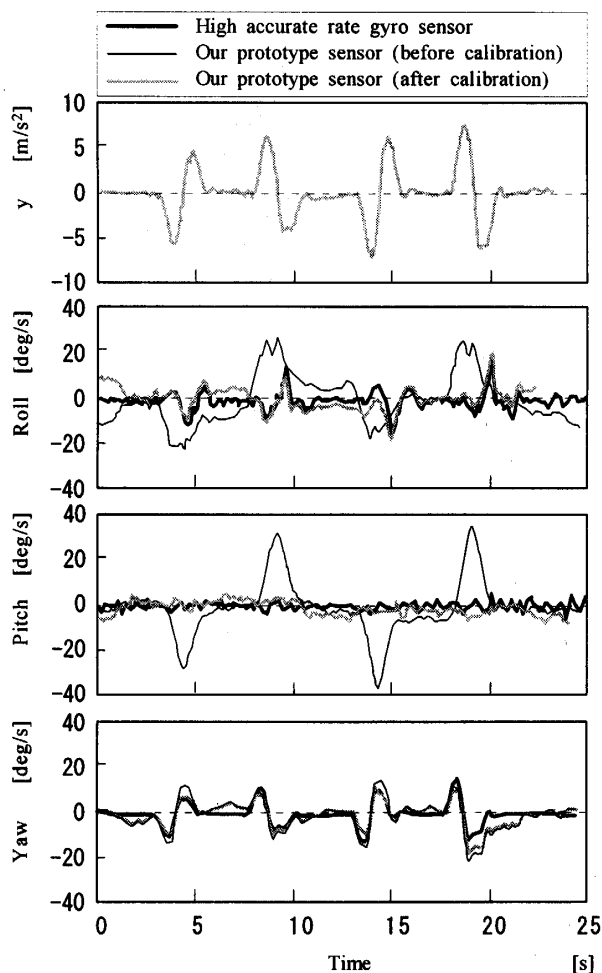


Fig. 10 Comparison of the reference rate gyroscope and our prototype accelerometer in double lane change experiment

(なお、ハイパスフィルタ処理によりオフセット誤差を取り除いた後、積分処理を行った)。この計測結果を

図10に示す。キャリブレーションを行っていない場合には、図7に示したように回転方向成分が並進方向成分の干渉を受けるため、計測されたYaw速度は基準となるヨーレートセンサの結果とは大きく異なる。特に、本来ほとんど0であるべきPitch方向にも大きな角速度が計測されている。一方、提案するキャリブレーションを実施した場合には、ゲインおよびオフセット誤差が軽減されると同時に軸間干渉も大幅に軽減されるため、図10に示すように基準とするヨーレートセンサの結果とはほぼ一致した結果が得られている。このように、比較的複雑な運動状態の計測にも提案するキャリブレーション方法の有効性が確認できた。

5. ま と め

本研究では、6個の単軸加速度計を円周上に分散配置した6軸加速度センサの幾何学的誤差を解析し、その結果に基づき重力加速度を利用して比較的簡便にキャリブレーションを行う手法を提案した。さらに、実験による検証を行った。本研究の結果は以下の通りである。

- (1) 主たる誤差は、単軸加速度計のオフセット、感度およびその方向誤差と考えられ、取り付け位置の誤差は比較的小さい。
- (2) 上記主たる誤差の影響は、6軸加速度の並進と回転成分とで従属関係となるため、並進あるいは回転のどちらか一方のみの誤差成分を決定すれば他方は本解析によって決定できる。
- (3) 一般に、6軸加速度の回転成分のキャリブレーションには高精度の回転テーブルが必要とされるが、上記(2)の結果を利用すると、基準となる並進加速度(重力)のみで回転成分についても誤差を同定できる。
- (4) 試作した回転テーブルによる実験と実車両によるダブルレーンチェンジ走行実験により、提案するキャリブレーション手法の有効性を示した。

文 献

- (1) Tamagawa Seiki Co., LTD, *An introduction to gyro practical use technology in Japanese*, (2002), p. 17, Kogyo Chosakai Publishing Inc.
- (2) Fraden, J., *Handbook of Modern Sensors*, (2004), pp.301-322, AIP Press.
- (3) Padgaonkar, A. J., Krieger, K. W., King, A. I., *Measurement of Angular Acceleration of a Rigid Body Using Linear Accelerometers*, *Transaction of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, 42, (1975), pp. 552-556.
- (4) Ohta K., Kobayashi K., *Measurement of Angular Velocity and Angular Acceleration in Sports Using Accelerometers*, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 30, No. 12 (1994), pp. 1442-1448.
- (5) Ohta K., Kobayashi K., *Measurement of Angular Velocity and Angular Acceleration in Sports Using Extended Kalman Filter*, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 31, No. 9 (1995), pp. 1265-1272.
- (6) Nagata, K. et al, *Development of a Fingertip-type 6D Force Sensor and Error Evaluation of Contact Point Sensing*, *Journal of the Robot Society of Japan*, Vol.14, No.8(1996), pp.1221-1228.
- (7) Kaneko, M. and Nishihara, T., *Basic Study of Six-Axis Force Sensor Design Based on Combination Theory*, *Journal of the Robot Society of Japan*, Vol.11, No.8(1993), pp.1261-1271.
- (8) Onodera R., Mimura N., *Stability Analysis of 6 DOF Acceleration Sensor System Using Multiple Accelerometers*, *The 22th Annual Conference of the Robotics Society of Japan (RSJ2004)*, (2004), 2A14.
- (9) Mimura N., Onodera R., *Stability Analysis of 6 DOF Acceleration Sensor System Using Multiple Accelerometers*, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 707 (2005), pp. 2218-2224.
- (10) Onodera R., Mimura N., *Six-Degree-of-Freedom Motion Sensor System Using Multiple Accelerometers*, *36th International Symposium on Robotics (ISR2005)*, TU416.
- (11) Doi S., *Vehicle Dynamics Performance Evaluations Through Human Dynamic Properties*, *TOYOTA Central Labs R&D Review*, Vol.30, No.3 (1995), pp. 3-15.
- (12) Ono E., Doi S., *Vehicle Running Stability Analysis and Spin Control*, *TOYOTA Central Labs R&D Review*, Vol.32, No.1 (1997), pp. 13-22.