

複数加速度計を使用した6軸加速度センサシステムの安定性解析*

三村 宣治^{*1}, 小野寺 良二^{*2}Stability Analysis of 6 DOF Acceleration Sensor System
Using Multiple AccelerometersNobuharu MIMURA and Ryoji ONODERA^{*3}^{*3} Graduate School of Science and Technology, Niigata University,
8050 Ikarashi-2, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

There is a method of measuring a shake and vibration quantitatively and evaluating, in one of the performance evaluations of a moving object like vehicles. In that case, the acceleration information as an amount of physics of a shake and vibration becomes important. Furthermore, the acceleration information on 6 DOF is needed when measuring complicated motion of vehicles etc. Then, we constructed 6 DOF acceleration sensor system which used three dual-axis accelerometers, and enabled measurement 6 DOF acceleration. In this paper, we analyzed the problem of the stability in the measurement system of the same method that was not clearly analyzed in the past research. We took notices of a nonlinear term that consist of an angular velocity, which included in the derivation algorithm of 6 DOF acceleration, and made clearly how a nonlinear term would influence the stability of a measurement system by the analysis simulation. And we installed the acceleration sensor in vehicles and performed measuring 6 DOF acceleration to a slalom run. As a result of comparing survey data with a simulation data, emission of the measurement system under the influence of a nonlinear term was not seen.

Key Words: Sensor, Stability, Measurement, 6 DOF Acceleration, Nonlinear Term, Simulation, Emission

1. 緒 言

近年、車両の高性能化に伴い、ドライバや乗員の感性に訴える微妙な性能特性が重要になってきている⁽¹⁾。その性能特性の評価法のひとつに、車両走行時の快適性や乗り心地の評価、すなわち車両の振動特性評価がある。その評価のためには動揺や振動を定量的に計測する必要がある。そこで重要となるのは、動揺や振動の物理量である運動物体の加速度情報である。

物体加速度の取得には通常加速度計が用いられる。一般に市販されている加速度計は並進加速度計と回転角加速度計に大別され、それらの加速度計により並進または回転角加速度をそれぞれ計測することは可能である⁽²⁾。しかし、車両のような複雑な運動の場合、加速度計で計測される加速度信号には、並進加速度、遠心加速度および回転角加速度が混入し、加速度計のみでの計測では正確な加速度情報の取得が困難である。そのためには並進3軸方向とその軸周りの3軸の回転方向、計6軸の加速度を同時に計測する必要がある。複雑な6軸加速度運動を計測するためには、従来様々な方法が用いられてきた。代表的な計測法に3軸の並進加速度計と3軸のレートジャイロを用いる方法がある。

しかし、レートジャイロは、回転運動の中心に設置して用いられるため、設置箇所が限定されてしまう⁽²⁾。また、近年小型化、低価格化が進んでいるものの、小型で高精度の加速度計に比べ、小型で高精度のものがない。そのため計測システムとしては大型となってしまう、使用できる条件も航空機などの大型なものに限定されてしまう。また、レートジャイロにはキャリブレーションが困難であるという欠点がある。

また、過去の研究において単軸並進加速度計を複数個使用した加速度計測法には Pad-gaonkar⁽³⁾らや太田⁽⁴⁾らの手法がある。6軸の加速度を計測するには、理論上最低6個の単軸並進加速度計を必要とする⁽³⁾。しかし、6個の単軸並進加速度計を使用した場合、計測される加速度は、加速度信号を数値積分により算出した角速度からなる非線形項を含む。そのため、加速度にノイズが生じた場合、積分の際にドリフトが生じ、正確な加速度を求めることができないという問題があった⁽⁴⁾⁽⁵⁾。その問題を解消するために Pad-gaonkar らは6個の加速度計に3個加えた、計9個の単軸並進加速度計を使用した計測法を提案している。この方法により加速度の算出に含まれる非線形項は消去できたものの、角速度を求める際に、計測される加速度信号の数値積分を行うため、やはり計測される加速度にノイズが生じた場合にはドリフトが生じる。そこで、太田らはその問題を解消するために、Pad-gaonkar らの計測法を基に、さらに3個の加速度計を加えた、計12個の加速度

* 原稿受付 2004年7月12日。

^{*1} 正員, 新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。^{*2} 学生員, 新潟大学大学院自然科学研究科。
E-mail: f05n009k@mail.cc.niigata-u.ac.jp

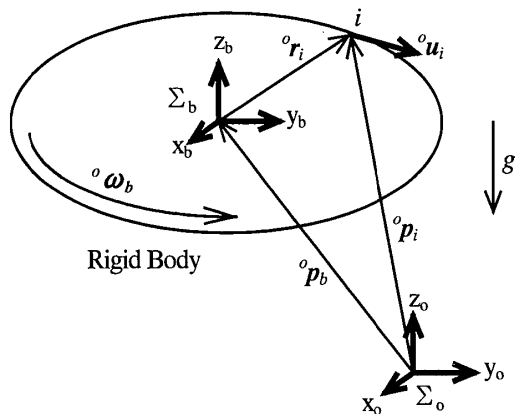


Fig.1 Acceleration produced at the point i on a rigid body

計を使用し、非線形項を含まない上に、数値積分を必要とせずに角速度を求める方法を提案している。このように、両者とも加速度計を冗長化することで上記の問題を解消しているが、上記に示した計測システムが不安定となる原因については、明確には解析されていないのが現状である。

そこで本研究では、Pad-gaonkar らや太田らの計測アルゴリズムを基に、比較的安価で応答性・位相特性のそろった、複数個の並進加速度計を複数の位置に分散配置し、これらの複数の並進加速度を統合することにより、任意位置・姿勢における6軸の加速度を計測する計測法を提案する。本研究では Pad-gaonkar らや太田らが行った加速度計の追加をせず、必要最低限の加速度計でのより最適な配置を検討し、さらにその配置において計測システムが不安定となる要因を解析し、シミュレーションと実測により本手法の有効性を検討した。

2 6軸加速度計測システムの構築

2.1 加速度計測原理と6軸加速度への拡張 図1に示すような運動する剛体上の点 i に生じる加速度を考える。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 の原点の位置ベクトルを ${}^o p_b = [{}^o p_{bx} \quad {}^o p_{by} \quad {}^o p_{bz}]^T$ とする。また、物体上の任意の位置を点 i とし、その位置ベクトルを ${}^o r_i = [{}^o r_{ix} \quad {}^o r_{iy} \quad {}^o r_{iz}]^T$ とする。また物体が Σ_b の原点まわりに角速度 ${}^o \omega_b$ で回転しているとき、速度と重力加速度を考慮した加速度の関係式は次のようになる。

$${}^o \ddot{p}_i = {}^o \ddot{p}_b + g + {}^o \dot{\omega}_b \times {}^o r_i + {}^o \omega_b \times ({}^o \omega_b \times {}^o r_i) \quad (1)$$

ここで、剛体上の点 i に一つの単軸並進加速度計を取付けた場合を考える。加速度計の出力を a_i 、感度方向を示す単位ベクトルを ${}^o u_i$ とすると、加速度計の出力 a_i は式(1)より次のように導出される。

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

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。ここで式(1)に注目すると、式(1)は並進加速度、重力加速度、回転角速度、および遠心加速度の4つの加速度からなる。一つの加速度計の出力からこれらの加速度を分離することは不可能である。そこで、式(2)を拡張し、複数個の単軸並進加速度計を異なった位置、方向に取り付け、複数個の加速度計から得られる加速度信号を統合することによって、6軸加速度を算出する。

ここで位置 ${}^o r_i$ に感度方向が ${}^o u_i (i=1,2,\dots,n)$ である単軸並進加速度計を n 個取付けた場合を考えると、式(2)より次式が導出される。

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

ただし、

$${}^o R = \begin{bmatrix} {}^o u_1^T & -{}^o u_1^T \cdot {}^o R_1 \\ {}^o u_2^T & -{}^o u_2^T \cdot {}^o R_2 \\ \vdots & \vdots \\ {}^o u_n^T & -{}^o u_n^T \cdot {}^o R_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

である。よって、剛体の6軸加速度を一意に求めるためには、 $n=6$ かつ $\text{rank } {}^o R=6$ 、つまり 6×6 の正方行列 ${}^o R$ が正則でなければならない。そこで、 ${}^o R$ が正則であるとすると、式(4)は、

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

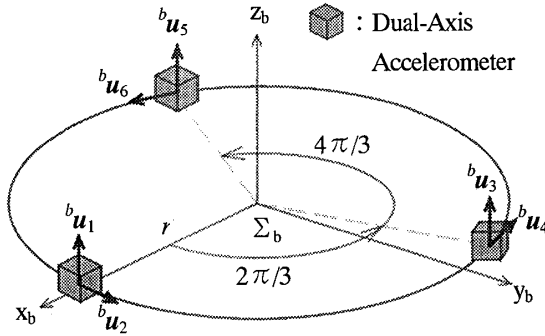


Fig.2 Arrangement of the Dual-Axis Accelerometer

$$f_i = \begin{bmatrix} {}^o u_1^T \{ {}^o \omega_b \times \{ {}^o \omega_b \times {}^o r_1 \} \} \\ {}^o u_2^T \{ {}^o \omega_b \times \{ {}^o \omega_b \times {}^o r_2 \} \} \\ \vdots \\ {}^o u_6^T \{ {}^o \omega_b \times \{ {}^o \omega_b \times {}^o r_6 \} \} \end{bmatrix} \quad (7)$$

となり、6軸加速度が導出される。

式(6)を用いて複数の加速度計の出力から6軸加速度の算出が可能であるが、式(7)に示す式(6)の第二項は角速度 ${}^o \omega_b$ からなる非線形な項を含む。そこで、式(6)を離散化し、角速度 ${}^o \omega_b$ を数値積分により求める必要がある。計測データのサンプリング間隔を Δt とすると、角速度 ${}^o \omega_b$ は次のように離散化することができる。

$${}^o \omega_b(n) = {}^o \omega_b(n-1) + {}^o \dot{\omega}_b(n-1)\Delta t \quad (8)$$

ここで式(8)を用いるためには $t=0$ における ${}^o \omega_b(n)$ の初期値 ${}^o \omega_b(0)$ が必要となるが、計測対象が静止状態から運動を開始すると仮定すれば $t=0$ において ${}^o \omega_b(0)=0$ とすることが可能であり、式(6)~(8)により6軸加速度を算出することができる。

2.2 6軸加速度センサの構成 式(6)により6軸加速度を計測するためには、 ${}^o R$ が正則となるように6個の加速度計を配置する必要がある。従って、加速度計は ${}^o R$ の正則性を考慮して取り付け位置、方向を決定しなければならない。ここで、 Σ_b から Σ_o への座標変換行列を ${}^o A_b$ とすると、 ${}^o R$ は次のように表される。

$${}^o R = {}^o A_b {}^b R \quad (9)$$

$${}^b R = {}^o U {}^b K \quad (10)$$

ただし、

$${}^o U = \begin{bmatrix} {}^b u_1^T & o_3^T & o_3^T & o_3^T & o_3^T & o_3^T \\ o_3^T & {}^b u_2^T & o_3^T & o_3^T & o_3^T & o_3^T \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ o_3^T & o_3^T & o_3^T & o_3^T & o_3^T & {}^b u_6^T \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$o_3 = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (12)$$

Table.1 Specifications

Measurement Range	± 2 g
Resolution (at 60 Hz)	2 mg
Operating Voltage Range	3~5 V
Quiescent Supply Current	0.6 mA
Temperature Operating Range	0~70°C
Size	5mm×5mm×2mm

$${}^b K = \begin{bmatrix} I_3 & -{}^b R_1 \\ I_3 & -{}^b R_2 \\ \vdots & \vdots \\ I_3 & -{}^b R_6 \end{bmatrix} \quad (13)$$

である。 ${}^o A_b$ は正則であるので、 ${}^b R$ が正則であればよい。そこで、 $\text{rank} {}^o U=6$ であるので少なくとも $\text{rank} {}^b K=6$ が成立しなければならない。また、 $\text{rank}[I_3 \ -{}^b R_i]=2$ であることを考慮すれば、式(10)を満たすためには ${}^b R_1 \sim {}^b R_6$ のうち3つが同じであってはならない。つまり、6個の単軸並進加速度計を用いる場合、少なくとも3カ所以上の異なった位置に取付ける必要がある。さらに構造を簡単にするため加速度計は同一平面上に配置することにする。これらの配置条件をもとに、図2に示すように、3個の2軸の加速度計を円周上に分散配置し、6軸加速度センサを構成した。本研究で使用した加速度計はアナログデバイセズ社の ADXL202E である。加速度計の仕様を表1に示す。なお、本研究では Σ_b から Σ_o への座標変換を考えていないので、 ${}^o r_i$ 、 ${}^o u_i$ は Σ_b から見た加速度計の配置と感度方向を示すベクトル ${}^b r_i$ 、 ${}^b u_i$ で表すことができる。また行列 ${}^o R$ は ${}^b R$ と等しくなる。

図2の ${}^b u_1, {}^b u_3, {}^b u_5$ は z 軸方向の感度方向を示し、 ${}^b u_2, {}^b u_4, {}^b u_6$ は xy 平面上の円の接線方向を感度方向であり、原点 Σ_b から加速度計までの距離 r は 60[mm] である。図2に示すような加速度計の配置に基づいて、ゲイン行列 ${}^b R$ を求める。図2および式(5)よりゲイン行列 ${}^b R$ は次のように導出される。

$${}^b R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & -r & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & r \\ 0 & 0 & 1 & r \cos 30^\circ & r \sin 30^\circ & 0 \\ -\cos 30^\circ & -\sin 30^\circ & 0 & 0 & 0 & r \\ 0 & 0 & 1 & -r \cos 30^\circ & r \sin 30^\circ & 0 \\ \cos 30^\circ & -\sin 30^\circ & 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix} \quad (14)$$

これにより、式(6)、式(7)および式(14)より次のように6軸加速度が導出される。なお、 ${}^b R^{-1}$ は逆ゲイン行列で $a_{1\sim 6}(n)$ は加速度計出力である。

$$\begin{bmatrix} {}^b\ddot{p}_{bx}(n) + g_x(n) \\ {}^b\ddot{p}_{by}(n) + g_y(n) \\ {}^b\ddot{p}_{bz}(n) + g_z(n) \\ {}^b\dot{\omega}_{bx}(n) \\ {}^b\dot{\omega}_{by}(n) \\ {}^b\dot{\omega}_{bz}(n) \end{bmatrix} = {}^bR^{-1} \begin{bmatrix} a_1(n) \\ a_2(n) \\ a_3(n) \\ a_4(n) \\ a_5(n) \\ a_6(n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.03({}^b\omega_{bx}^2(n) - {}^b\omega_{by}^2(n)) \\ 0.06{}^b\omega_{bx}(n){}^b\omega_{by}(n) \\ 0 \\ {}^b\omega_{by}(n){}^b\omega_{bz}(n) \\ -0.727{}^b\omega_{bx}(n){}^b\omega_{bz}(n) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

図2に示す配置により得られる6軸加速度は式(15)により算出される。式(15)に注目すると、6軸加速度は加速度計の出力のみではなく、角速度からなる非線形項を含む。我々が提案する計測システムの基本となった Pad-gaonkar⁽³⁾らの計測法においても非線形項が計測における発散の原因とされてきた。Pad-gaonkarらの配置では非線形項が各軸すべてに相互に存在するが、図2に示すようにより最適な配置とすることでz軸方向に関しては非線形項がゼロとなる。

3. 加速度計測システムの安定性解析

6軸加速度は前章式(15)によって計算される。図2に示す配置とすることでz軸方向の非線形項を消去することができるが、x軸およびy軸方向に関しては非線形項が存在する。つまりx軸およびy軸方向においては加速度計の出力だけでなく、非線形項を数値積分によって計算する必要があり、その値を加えることによって求まる。よって加速度計の計測ノイズなどが生じた場合、非線形項の計算に誤差が生じ、場合により長時間計測すると非線形な項の影響で誤差が増幅され、計算される加速度値が発散してしまう可能性がある。すなわち計測システム全体が不安定になる可能性が考えられる。そこで式(15)を誤差に関する微分方程式に書き換え、その方程式を解析することによって、計測ノイズなどによって計測システムが不安定となる条件を解析した。ただし、前章式(8)では角速度 ${}^b\omega_b$ を求めるために計測データを離散化し、実際の計測においても離散加速度値であるが、システムの安定性を解析する場合、連続時間関数として扱うこととする。

まず式(15)のうち角加速度を算出する3つの導出式に着目する。

$$\begin{aligned} {}^b\dot{\omega}_{bx}(t) &= g_x(a_1(t), \dots, a_6(t)) - {}^b\omega_{by}(t){}^b\omega_{bz}(t) \\ {}^b\dot{\omega}_{by}(t) &= g_y(a_1(t), \dots, a_6(t)) - 0.727{}^b\omega_{bx}(t){}^b\omega_{bz}(t) \\ {}^b\dot{\omega}_{bz}(t) &= g_z(a_1(t), \dots, a_6(t)) \end{aligned} \quad (16)$$

この際に計測された加速度計の計測信号にノイズがある場合、算出される角加速度、角速度にも誤差が生じ

る。そこでそれぞれの信号を真値の項を誤差の項に分解し、誤差に関する微分方程式より安定性の解析を行った。式(16)を真値と誤差の項に分解すると次のように表すことができる。ただし、添え字の n は真値を表し、 Δ は誤差を表すものとする。

$$\begin{aligned} {}^b\dot{\omega}_{bx}(t) + \Delta{}^b\dot{\omega}_{bx}(t) &= g_x(a_{1n}(t) + \Delta a_1(t), \dots, a_{6n}(t) + \Delta a_6(t)) \\ &\quad - ({}^b\omega_{byn}(t) + \Delta{}^b\omega_{by}(t))({}^b\omega_{bzn}(t) + \Delta{}^b\omega_{bz}(t)) \\ {}^b\dot{\omega}_{by}(t) + \Delta{}^b\dot{\omega}_{by}(t) &= g_y(a_{1n}(t) + \Delta a_1(t), \dots, a_{6n}(t) + \Delta a_6(t)) \\ &\quad + 0.727({}^b\omega_{bxn}(t) + \Delta{}^b\omega_{bx}(t))({}^b\omega_{bzn}(t) + \Delta{}^b\omega_{bz}(t)) \\ {}^b\dot{\omega}_{bz}(t) + \Delta{}^b\dot{\omega}_{bz}(t) &= g_z(a_{1n}(t) + \Delta a_1(t), \dots, a_{6n}(t) + \Delta a_6(t)) \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)は誤差がない場合も成立することより、

$$\begin{aligned} {}^b\dot{\omega}_{bx}(t) &= g_x(a_{1n}(t), \dots, a_{6n}(t)) - {}^b\omega_{byn}(t){}^b\omega_{bzn}(t) \\ {}^b\dot{\omega}_{by}(t) &= g_y(a_{1n}(t), \dots, a_{6n}(t)) + 0.727{}^b\omega_{bxn}(t){}^b\omega_{bzn}(t) \\ {}^b\dot{\omega}_{bz}(t) &= g_z(a_{1n}(t), \dots, a_{6n}(t)) \end{aligned} \quad (18)$$

となり、式(17)、式(18)より、

$$\begin{aligned} \Delta{}^b\dot{\omega}_{bx}(t) &= b_{xc}(t) - \Delta{}^b\omega_{by}(t){}^b\omega_{bzn}(t) \\ \Delta{}^b\dot{\omega}_{by}(t) &= b_{yc}(t) + 0.727\Delta{}^b\omega_{bx}(t){}^b\omega_{bzn}(t) \\ \Delta{}^b\dot{\omega}_{bz}(t) &= g_z(\Delta a_1(t), \dots, \Delta a_6(t)) \end{aligned} \quad (19)$$

ただし、

$$\begin{aligned} b_{xc}(t) &= g_x(t) - {}^b\omega_{byn}(t)\Delta{}^b\omega_{bz}(t) \\ b_{yc}(t) &= g_y(t) + 0.727{}^b\omega_{bxn}(t)\Delta{}^b\omega_{bz}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

である。式(20)は加速度計自体の出力誤差であり、独立に求めることができるため、定数として扱うことができる。ここで、式(19)より誤差に関する微分方程式は以下のように導出される。

$$\begin{aligned} \Delta{}^b\dot{\omega}_{bx}(t) - \frac{{}^b\dot{\omega}_{bzn}(t)}{{}^b\omega_{bzn}(t)}\Delta{}^b\omega_{bx}(t) + {}^b\omega_{bzn}^2(t)\Delta{}^b\omega_{bx}(t) &= F_x(\Delta a_1(t), \dots, \Delta a_6(t)) \\ \Delta{}^b\dot{\omega}_{by}(t) - \frac{{}^b\dot{\omega}_{bzn}(t)}{{}^b\omega_{bzn}(t)}\Delta{}^b\omega_{by}(t) + 0.727{}^b\omega_{bzn}^2(t)\Delta{}^b\omega_{by}(t) &= F_y(\Delta a_1(t), \dots, \Delta a_6(t)) \end{aligned} \quad (21)$$

ただし、加速度計自体の出力誤差を含む $F_x(t)$ 、 $F_y(t)$ は次のとおりである。

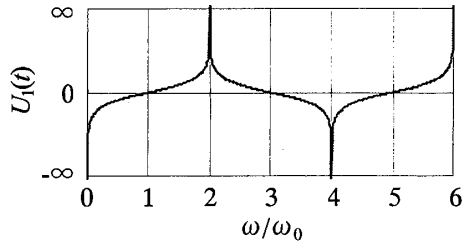


Fig.3 The state of $U_1(t)$ when time becomes infinite in various ω/ω_0

$$\begin{aligned} F_x(t) &= \dot{b}_{xe}(t) - {}^b\omega_{bzn}(t)b_{ye}(t) - \frac{{}^b\dot{\omega}_{bzn}(t)}{{}^b\omega_{bzn}(t)}b_{xe}(t) \\ F_y(t) &= \dot{b}_{ye}(t) + 0.727{}^b\omega_{bzn}(t)b_{xe}(t) - \frac{{}^b\dot{\omega}_{bzn}(t)}{{}^b\omega_{bzn}(t)}b_{ye}(t) \end{aligned} \quad (22)$$

式(21)に示す誤差に関する微分方程式の解 $\Delta^b\omega_{bx}(t)$, $\Delta^b\omega_{by}(t)$ は次のように導出される。

$$\begin{aligned} \Delta^b\omega_{bx}(t) &= C_1 \cos\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right) + C_2 \sin\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right) \\ &\quad + U_1(t) \cos\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right) + U_2(t) \sin\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right) \\ \Delta^b\omega_{by}(t) &= C_3 \cos\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right) + C_4 \sin\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right) \\ &\quad + U_3(t) \cos\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right) + U_4(t) \sin\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right) \end{aligned} \quad (23)$$

ただし、 $C_1 \sim C_4$ は任意定数、 $U_1(t) \sim U_4(t)$ は次のとおりである。

$$\begin{cases} U_1(t) = -\int \frac{F_x(t) \sin\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right)}{{}^b\omega_{bzn}(t)} dt \\ U_2(t) = \int \frac{F_x(t) \cos\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right)}{{}^b\omega_{bzn}(t)} dt \\ U_3(t) = -\int \frac{F_y(t) \sin\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right)}{{}^b\omega_{bzn}(t)} dt \\ U_4(t) = \int \frac{F_y(t) \cos\left(\int {}^b\omega_{bzn}(t) dt\right)}{{}^b\omega_{bzn}(t)} dt \end{cases} \quad (24)$$

システムが計測ノイズによって安定・不安定となるかを、誤差に関する微分方程式の解 $\Delta^b\omega_{bx}(t)$, $\Delta^b\omega_{by}(t)$ が収束するか発散するかで判断すればよい。式(23)に着目すると、全ての項は \cos , \sin の項からなり、 $C_1 \sim C_4$ は任意定数であるので、式(24)に示す $U_1(t) \sim U_4(t)$ が時間 t 進んだ場合に、発散または収束するかを判断できる。

4. シミュレーションと実測による検討

4.1 解析シミュレーション 前章で示したように、6軸加速度計測システムが安定または不安定になるかは、式(24)に示す $U_1(t) \sim U_4(t)$ の状態から判断することができる。さらに $U_1(t) \sim U_4(t)$ はすべて同形であるので、 $U_1(t)$ について時間 t 進めた場合のシミュレーションを行った。

シミュレーションを行うにあたり、式(24)において誤差に関する項の $F_x(t)$ と z 軸まわりの回転角速度を入力する必要がある。入力波形は本来計測される信号に近いランダム波形である必要があるが、数値化されたデータについて実際上有限区間のフーリエ級数あるいはフーリエ変換のみが計算され、常にこの有限区間がその関連するフーリエ級数の周期として考えられる⁷⁾。また、今回明らかにすべき点は計測システムが不安定となる運動状態である。よって、その運動を明確にするためには、入力波形を周期関数で仮定することにより、その運動状態をより明確に把握できると考えられる。よって誤差に関する項の $F_x(t)$ を振幅 Q 、振動数 ω の周期関数、 z 軸まわりの回転角速度 ${}^b\omega_{bzn}(t)$ を振幅 B 、回転振動数 ω_0 の次のような周期関数で仮定する。

$$F_x(t) = Q \cos(\omega t) \quad (25)$$

$${}^b\omega_{bzn}(t) = B \cos(\omega_0 t) \quad (26)$$

さらに上式を式(24)の $U_1(t)$ に代入すると次のようになる。

$$U_1(t) = -\int \frac{Q \cos(\omega t) \sin\left(\frac{B \sin(\omega_0 t)}{\omega_0}\right)}{B \cos(\omega_0 t)} dt \quad (27)$$

ここで、式(27)に注目すると、 $U_1(t)$ が収束、発散するかは ω と ω_0 の比で決まると予想できる。そこで $U_1(t)$ の時間 t が進むにつれどのように変化するかを ω と ω_0 の比を変えた場合をシミュレーションし、その結果を図3に示す。

図3は式(27)において誤差項の $F_x(t)$ の振動数 ω と z 軸まわりの回転角速度振動数 ω_0 の比を変化させた $U_1(t)$ の状態である。縦軸が $U_1(t)$ の振幅値、横軸が振動数比である。 z 軸まわりの回転角速度振動数 ω_0 を固定し、誤差項の $F_x(t)$ の振動数 ω を変化させた場合、振動比が偶数時、つまり誤差項の振動数 ω が z 軸まわりの回転角速度振動数 ω_0 の偶数倍となる運動での $U_1(t)$ の発散が確認される。逆に ω が ω_0 の奇数倍においては $U_1(t)$ の収束が確認される。つまり、前章式(23)で示した方程式の解 $\Delta^b\omega_{bx}(t)$ および $\Delta^b\omega_{by}(t)$ は、誤差項 $F_x(t)$

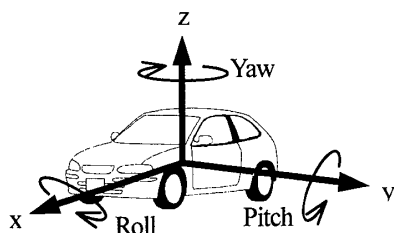


Fig.4 The coordinate system when installing an 6 DOF acceleration sensor in vehicle

の振動数 ω が z 軸まわりの回転角速度振動数 ω_0 の偶数倍の運動状態で発散し、その状態での長時間の計測によっては発散値が大きくなることが考えられる。その結果、計測される6軸加速度値も発散してしまう可能性があるとして推測される。

また、この非線形項の影響による計測システムの影響の他に考えられる不安定要因がオフセット誤差⁶⁾である。オフセット誤差の発生要因には温度や磁気などの環境によって変化するものや時間によって変化する誤差が考えられる。オフセット誤差が発生した場合、数値積分による非線形項の計算にも誤差の影響が現れ、計測システムが不安定になる可能性もある。しかし、オフセット誤差の有効な処理法については現在検討中であるため、本論文では次節での実測値を用いた比較においては、実測値をオフラインでハイパスフィルタにより処理することとした。

4.2 実測による比較検討 今回製作した6軸加速度センサを用い、実際に6軸加速度の計測を行った。6軸加速度センサを車両センターコンソールに設置し、スラローム走行時の6軸加速度の計測を行った。図4に車両設置時の6軸加速度センサシステムの座標系を示す。前進方向が x 軸、左右方向が y 軸、上下方向が z 軸であり、それぞれの軸に対する回転がロール、ピッチ、ヨーである。

今回、実際の計測では前章において解析した非線形項を考慮しない形で行った。従って、実測での算出方法は加速度計の出力のみで次のようになる。

$$\begin{bmatrix} {}^b \ddot{\mathbf{p}}_i(t) + \mathbf{g}(t) \\ {}^b \dot{\boldsymbol{\omega}}_i(t) \end{bmatrix} = {}^b \mathbf{R}^{-1}(t) \begin{bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \vdots \\ a_6(t) \end{bmatrix} \quad (28)$$

そこで実測にて得られた加速度値のオフセット誤差をオフラインでのハイパスフィルタにより処理し、その加速度値より再度非線形項を考慮した加速度値を算出し、スラローム走行における非線形項の影響を検証した。非線形項を考慮していない実測加速度値と非線形項を考慮した再算出加速度値の比較結果を図5に

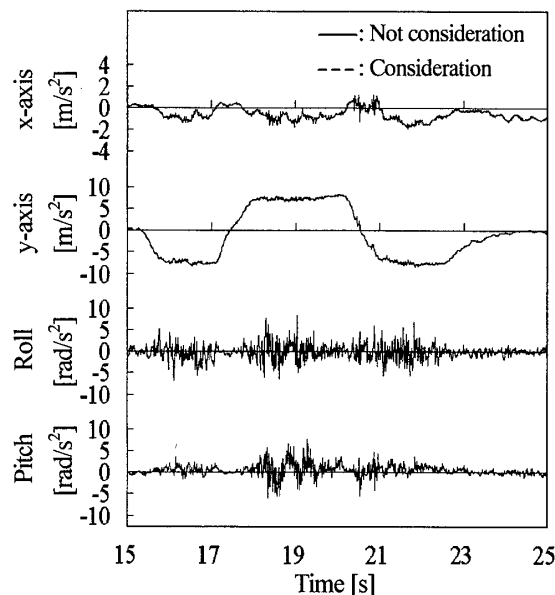


Fig.5 Comparison of the acceleration data in case of not taking a nonlinear term into consideration and in case of taking a nonlinear term into consideration

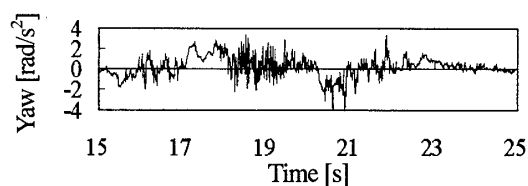


Fig.6 A measurement wave of yaw acceleration

示す。図5は上から、 x 軸並進加速度、 y 軸並進加速度、ロール加速度、ピッチ加速度である。なお、 z 軸並進加速度およびヨー加速度については、3章式(15)にも示すように非線形項は解析的にゼロであるので、比較を行う必要はない。

実加速度値と非線形項を考慮した再算出加速度値を比較するにあたり、図5において実線が実測加速度値、点線が非線形項を考慮した再算出加速度値である。両者の加速度値を比較した結果、加速度値はほぼ同一の値となった。よって、図5に示す実測加速度値がスラローム走行における車両運動の加速度とみなすことができ、スラローム走行では左右方向に対して大きく運動することから、左右方向の y 軸並進における加速度について、スラローム走行を示す特徴的な加速度波形が図5より確認される。

図5では時間軸に対する加速度値での比較であるが、この比較結果からは計測における非線形項の影響は見られなかった。前項の解析結果より、非線形項の影響は3軸の回転角速度振動数が大きく関係している。よって、図5に示すロール加速度とピッチ加速度、図6に示すヨー加速度から算出した角速度からロール速度

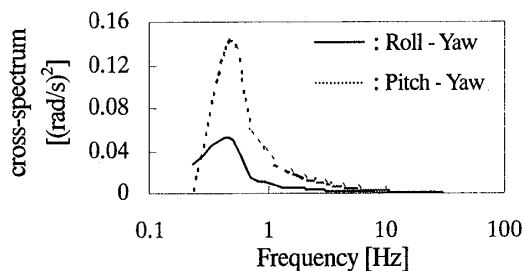


Fig.7 Cross-spectrum of yaw to roll and pitch

に対するヨー速度の相互スペクトル、ピッチ速度に対するヨー速度の相互スペクトルを算出し、両者の運動の周波数成分における相関を解析した。図7に示す相互スペクトル曲線は実線がロールとヨーの相互スペクトル、点線がピッチとヨーの相互スペクトルである。

図7よりロール運動に対するヨー運動、ピッチ運動に対するヨー運動は共に低い周波数において相関が確認できる。これは図5のy軸並進加速度からスラローム走行での車両運動は、非常に滑らかな運動であることにより、その周波数においての相関が高くなったと考えられる。さらに、前項の解析結果においてシステムが発散する可能性があるのは、ヨー速度回転振動数に対してロールもしくはピッチ速度の回転振動数が偶数倍の時である。よって、図7において偶数倍の周波数で仮に鋭いピークを示したならば、両者の運動はその周波数において相関があるといえるが、今回のスラローム走行時における運動では、両者とも偶数倍ではほぼゼロであることから、偶数倍の周波数帯での両者の運動には特別な相関はないといえる。したがって、発散条件を満たさないことから、スラローム走行時における加速度計測では非線形項の影響は現れないといえる。今回はスラローム走行時の運動について解析を行ったが、一般的な3次元運動では、ヨー運動に対してロールおよびピッチ運動は1倍の運動であることが予測される。よって、発散条件である2倍、4倍などの偶数倍の成分をもつ運動状態となる可能性が低いことより、スラローム走行以外の運動においても非線形項の影響は現れにくいと考えられる。

5. 結 言

本研究では、必要最低限の3個の2軸の並進加速度計を円周上に分散配置することにより、6軸加速度の計測を可能にした。さらに、加速度計の配置をより最適とすることで、今まで問題とされてきた非線形項をz軸方向に関しては消去される形にすることに成功した。また、計測システムが非線形項の影響により発散

する運動状態を解析およびシミュレーションより明らかにし、実測での非線形項による計測システムへの影響を比較、検討した。その結果、計測システムが不安定になる要因のひとつは、ヨー運動に対してロールまたはピッチ運動が偶数倍の角速度の運動時である。つまり、ヨー運動に対して他成分の運動が偶数倍の状態での相関がなければ、計測システムは不安定となることはない。ふたつ目の要因として、計測値にオフセット誤差が生じた場合である。このオフセット誤差による積分値の発散により、計測システム全体の発散が考えられるため、オフセット誤差を除去する必要がある。これらの要因を考慮することにより安定した計測が可能となる。現段階で本手法での車両運動の計測においては、非線形項による計測システムが発散はみられず、本手法の有効性が確認された。今後、6軸加速度センサを用いることにより、車両の振動特性および旋回中心などの車両独自の特性、性能評価の方法として期待される。

文 献

- (1) 土居俊一, ヒューマンダイナミクスを考慮した車両特性, 豊田中央研究所 R&D レビュー, 30-3, (1995.9), 3-15.
- (2) 増田峰知・谷澤之彦, 複数センサを用いた6軸加速度測定実験, 三重県科学技術振興センター工業研究所報告, 26, (2002), 117-120
- (3) Padgaonkar,A.J., Krieger,K.W., King,A.I., Measurement of Angular Acceleration of a Rigid Body Using Linear Accelerometers, ASME J of applied Mechanics, 42, (1975), 552-556.
- (4) 太田憲・小林一敏, 加速度計を用いたスポーツにおける角速度・角加速度計測, 計測自動制御学会論文集, 30-12, (1994), 1442-1448.
- (5) 森善一・中村達也・浅野通友・後藤忠敏, インピーダンス型検出器をもつ加速度計による移動ロボットの位置推定, 機論, 68-667, C(2002-3), 870-876
- (6) 多摩川精機(株), ジャイロ活用技術入門, (2002), 89, 株式会社 工業調査会.
- (7) J.S.ベンダット, A.G.ピアソル, ランダムデータの統計的処理, (1976), 28-31, 株式会社 培風館