

加速度信号の統合による6軸加速度センサシステムの 安定性について*

(多自由度運動における遠心力項の動的な影響についての考察)

小野寺 良二^{*1}, 三村 宣治^{*2}

A Stability of Six-Degrees-of-Freedom Acceleration Sensor System by Integration of Acceleration Signals (Considerations about a Dynamic Influence of Centrifugal Force Term in the Multi-Degree-of-Freedom Motion)

Ryoji ONODERA^{*3} and Nobuharu MIMURA

^{*3} Graduate School of Science and Technology, Niigata University,
8050 Ikarashi-2, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

This paper describes a new six-degrees-of-freedom (6-DOF) motion sensor system using multiple accelerometers. It has been important for measurement and attitude control of mobile robots and vehicles to measure inertial data. However, we have no generic sensor systems that can be installed in small mobile robots and vehicles and can be used to control precisely, and its measurement methods have been subjects of study. So, we propose a new general sensor system that enables installing in them. In our method, six linear accelerometers are arranged like a circumference at a difference position of three points or more, and acceleration signals acquired by each accelerometer are integrated and converted into 6-DOF acceleration. We analyze a stability of our system by simulation and experiment, and demonstrate availability of our system in the multi-degree-of-freedom motion.

Key Words: Measurement, Sensor, Stability, Filter, Six-Degrees-of-Freedom Acceleration, Multiple Accelerometers, Centrifugal Force Term (CF. Term)

1. はじめに

これまで車両や空間移動型などの複雑な多自由度運動物体の運動計測および姿勢制御において、対象物体の慣性データの計測が重要であるとされてきた。しかし、精密な計測・制御を可能とする計測システムは、ロケット用あるいは航空機用に使われるような大型・高価格のシステムであるのが現状である。そのため、小型の移動体や移動ロボットに搭載し、精密な制御を可能とする汎用的な計測システム、またその計測法が今日の研究課題となっている。

物体の運動計測を目的とした計測システムでは、並進加速度計とレートジャイロを組み合わせたものや、振動あるいは光ファイバジャイロ、最近で

はマイクロマシンジャイロなども使用されている⁽¹⁾。しかし、それらの計測センサなどは近年小型、軽量、安価になりつつも、精度面に課題があり、さらにジャイロに関してはキャリブレーションが困難であるという欠点がある。

そこで Pad-gaonkar⁽²⁾らや太田^{(3),(4)}ら、増田⁽⁵⁾らはジャイロを使用せずに同様な計測を可能とする手法を提案している。彼らは複数個の加速度計を用いて物体の各軸の並進および回転角加速度を計測するシステムとしている。

一般に物体の6軸方向の加速度を計測するには、理論上6個の単軸並進加速度計を必要とし、Pad-gaonkarと太田らも当初は6個の加速度計により計測システムを構成している。しかし、両者の手法にはそれぞれ問題があり、今日まで一般的な計測法とはされていない。Pad-gaonkarらの手法では、加速度導出式に含まれる遠心力成分の項(以下、遠心力項)が各軸に対して相互に存在するこ

* 原稿受付 2006年4月7日。

^{*1} 正員, 新潟大学大学院自然科学研究科(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。

^{*2} 正員, 新潟大学工学部。

E-mail: f05n009k@mail.cc.niigata-u.ac.jp

とで、非線形の連立微分方程式となり、これにより各軸間で干渉してしまうという問題があった。その問題を考慮し、太田らは6個の加速度計の配置を変えた計測法を提案したが、各成分の大きさだけが計測されるため符号が得られないことや、低角速度では加速度信号に含まれる加速度計の雑音が増幅される問題があった。それらの問題を解消するために、彼らは加速度計を冗長化する手法を提案している。一方、増田らは3軸加速度計を4つ用いたシステムを提案しているが、これは単軸に換算すると12個の加速度計を使用するシステムであり、前者の2つの手法と酷似したシステムである。加速度計を冗長化することで、上記の問題は解消されるが、それによりシステム自体が複雑になってしまう。

そこで著者らはこれまで Pad-gaonkar らや太田らの手法をもとに、複数個の加速度計を使用し各加速度計の加速度信号を統合することで、物体の6軸方向の加速度を計測する6軸加速度センサを検討してきた⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。本センサでの6軸加速度導出では、従来提案された手法において安定性に大きく影響した遠心力項を含む。そのため、これまで遠心力項がシステムの安定性にどのように影響するのかについて理論的な考察を行ってきた。その結果、ある特定の条件でシステムが不安定になる可能性があることが明らかとなった。ただし、これまでの解析では計測誤差は微小であると仮定し、線形近似により導出した誤差微分方程式より上記の結果を得ている⁽⁷⁾。

そこで、上記の不安定条件におけるシステムの特性をシミュレーションにより検証し、試作した6軸加速度センサを用いて実験を行った。本稿では、シミュレーションおよび実験結果を示し、本センサの多自由度運動計測における有効性について考察した結果について報告する。

2. 6軸加速度計測システム

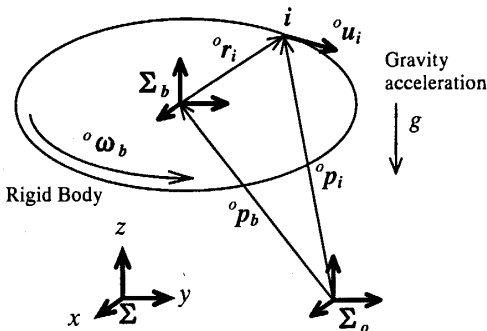


Fig. 1 Acceleration produced at the point i on a rigid body

2・1 加速度計測の基本原理 図1に示されるような剛体上の点 i に生じる加速度は、

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

となる。さらに、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、加速度計の出力は、

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

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。なお、 ${}^o u_i = [{}^o u_{ix} \ {}^o u_{iy} \ {}^o u_{iz}]^T$ 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運動座標系 Σ_b の原点の位置ベクトル、物体上の任意の位置 i の位置ベクトルである。ここで式(1)に注目すると、式(1)は並進、重力、回転、遠心加速度の4つの加速度成分が混入している。1つの加速度計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、複数個の加速度計からの信号を統合し、6軸加速度に変換することで6軸方向の加速度を算出する。

2・2 従来手法 物体の6軸加速度の計測法は前項の計測原理を用いて Pad-gaonkar らが提案している。Pad-gaonkar らの基本原理は、並進加速度に関しては加速度計の出力により取得し、回転角加速度に関しては、各加速度計の出力より並進加速度と重力加速度をキャンセルすることで算出している。すなわち、図2に示すように6個の加

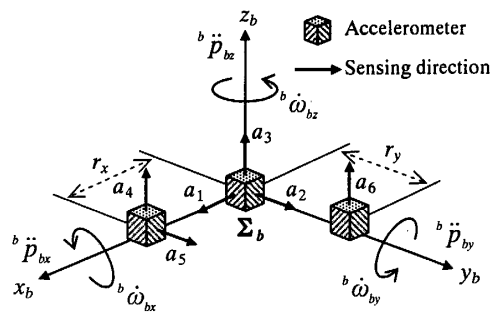


Fig. 2 Model of measurement system by Pad-gaonkar

速度計の配置より次式の6軸加速度を得ている.

$$\begin{bmatrix} {}^b \ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g} \\ {}^b \dot{\boldsymbol{\omega}}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ -(a_6 - a_3)/r_y \\ (a_4 - a_3)/r_x \\ -(a_5 - a_2)/r_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ {}^b \omega_{by} {}^b \omega_{bz} \\ -{}^b \omega_{bx} {}^b \omega_{bz} \\ {}^b \omega_{bx} {}^b \omega_{by} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし,

$${}^b \ddot{\mathbf{p}}_b = \begin{bmatrix} {}^b \ddot{p}_{bx} \\ {}^b \ddot{p}_{by} \\ {}^b \ddot{p}_{bz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix}, \quad {}^b \dot{\boldsymbol{\omega}}_b = \begin{bmatrix} {}^b \dot{\omega}_{bx} \\ {}^b \dot{\omega}_{by} \\ {}^b \dot{\omega}_{bz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

である. 式(4)において並進加速度 ${}^b \ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g}$ に関しては加速度計の出力であるが, 回転角加速度 ${}^b \dot{\boldsymbol{\omega}}_b$ は加速度計の出力に角速度からなる遠心力項を考慮する必要がある. このとき角速度が各軸に対して相互に現れているため, 各軸間で干渉し任意の加速度が得られないという問題があった. このため, この計測法は今日では一般的な計測法とはされていない. 式(4)のように遠心力項が複雑になる要因として図2の加速度計の配置に問題があると考えられた. これに対し, Pad-gaonkarらは, 図2の配置にさらに3個の加速度計を増設したシステムを提案しているが, その手法では角速度を求める際にドリフトが生じる問題があった.

2.3 提案手法 本研究ではPad-gaonkarらの手法をもとに, 6個の加速度計の配置を見直した新たな計測システムを提案した⁽⁷⁾.

ここでは簡潔に本システム構成を説明する. なお, 詳細については文献⁽⁷⁾を参照されたい. 本研究では6個の加速度計を円周上に分散配置させ計測システムを構成している(図3). この場合,

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_6 \end{bmatrix} = {}^o \mathbf{R} \begin{bmatrix} {}^o \ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g} \\ {}^o \dot{\boldsymbol{\omega}}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^o \mathbf{u}_1^T \{ {}^o \boldsymbol{\omega}_b \times ({}^o \boldsymbol{\omega}_b \times {}^o \mathbf{r}_1) \} \\ {}^o \mathbf{u}_2^T \{ {}^o \boldsymbol{\omega}_b \times ({}^o \boldsymbol{\omega}_b \times {}^o \mathbf{r}_2) \} \\ \vdots \\ {}^o \mathbf{u}_n^T \{ {}^o \boldsymbol{\omega}_b \times ({}^o \boldsymbol{\omega}_b \times {}^o \mathbf{r}_6) \} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし,

$${}^o \mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^o \mathbf{u}_1^T & -{}^o \mathbf{u}_1^T {}^o \mathbf{R}_1 \\ {}^o \mathbf{u}_2^T & -{}^o \mathbf{u}_2^T {}^o \mathbf{R}_2 \\ \vdots & \vdots \\ {}^o \mathbf{u}_6^T & -{}^o \mathbf{u}_6^T {}^o \mathbf{R}_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

である. なお, ${}^o \mathbf{R}$ は加速度計の感度ベクトルと位置ベクトルで決定されるゲイン行列であり, ${}^o \mathbf{R}$ が正則であるとき, 6軸加速度は式(6), 式(7)より,

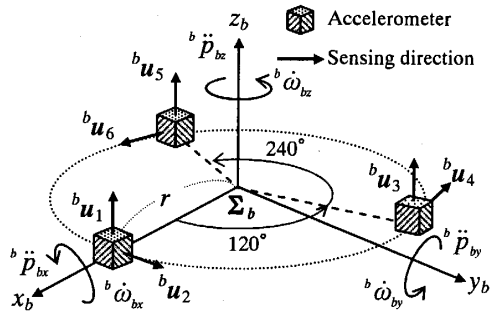


Fig. 3 Model of our new measurement system

$$\begin{bmatrix} {}^b \ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g} \\ {}^b \dot{\boldsymbol{\omega}}_b \end{bmatrix} = {}^b \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.03({}^b \omega_{bx}^2 - {}^b \omega_{by}^2) \\ 0.06 {}^b \omega_{bx} {}^b \omega_{by} \\ 0 \\ {}^b \omega_{by} {}^b \omega_{bz} \\ -{}^b \omega_{bx} {}^b \omega_{bz} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

と導出される. ここで, 原点 Σ_b から加速度計までの距離 r は $0.06[\text{m}]$ (図3), さらに, センサ本体を回転中心に設置するとすることで行列 ${}^o \mathbf{R}^{-1}$ は ${}^b \mathbf{R}^{-1}$ と等しくなり式(8)が導出される. 式(8)は, xyz 直行座標成分における並進加速度, 重力加速度, 回転角加速度である. 式(8)に注目すると, 右辺第二項は遠心力項である. 配置をより最適にしても遠心力項を完全に消去することはできない. また, 並進方向にも遠心力項が現れているが, 遠心力項が角速度から構成されていることから, 回転角加速度の導出式に着目すると, 式(4)の従来手法では各軸に対し相互に存在していた遠心力項が, 本手法では z 軸に関しては消去される. これにより, z 軸に関しては独立項として扱うことができる. また, x 軸および y 軸に関しては従来同様に非線形に見えるが, z 軸が独立項であるため, 時変係数の線形微分方程式として扱うことができる. ただし, 遠心力項は得られた回転角加速度より求める必要があるため, 実際に6軸加速度を求めるには, 式(8)を離散化し, 数値積分によって求める必要がある. そこで, 計測データのサンプリング間隔を Δt とすると式(8)は,

$$\begin{bmatrix} {}^b \ddot{\mathbf{p}}_b(n) + \mathbf{g}(n) \\ {}^b \dot{\boldsymbol{\omega}}_b(n) \end{bmatrix} = {}^b \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} a_1(n) \\ a_2(n) \\ a_3(n) \\ a_4(n) \\ a_5(n) \\ a_6(n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.03({}^b \omega_{bx}^2(n) - {}^b \omega_{by}^2(n)) \\ 0.06 {}^b \omega_{bx}(n) {}^b \omega_{by}(n) \\ 0 \\ {}^b \omega_{by}(n) {}^b \omega_{bz}(n) \\ -{}^b \omega_{bx}(n) {}^b \omega_{bz}(n) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^b\omega_b(n) = {}^b\omega_b(n-1) + \frac{{}^b\dot{\omega}_b(n) + {}^b\dot{\omega}_b(n-1)}{2} \Delta t \quad (10)$$

と離散化することができる。ここで式(9)を用いるためには初期値が必要となるが、静止状態から運動を開始すると仮定すれば ${}^b\omega_b(0) = 0$ とすることが可能である。このように6個の加速度計を図3のように構成することで現在使用されているジャイロなどの計測センサと同等の計測が可能となる。また、本センサはジャイロに比べ、キャリブレーションが容易であるという特徴をもつ。ジャイロは単独でのキャリブレーションが困難であり、基準入力の回転運動を生成するための精密な動揺テーブルなどの特別な設備が必要となり、極めて煩雑な操作を必須とする⁽¹⁾。それに対し、本センサは並進加速度計を使用しているため、重力加速度を基準入力することで比較的容易に行うことができる。なお、この詳細については別報で報告する予定である。

3. シミュレーションによる安定性解析

提案する6軸加速度センサシステムはz軸項の遠心力項が消去されたことにより、従来手法に比べ安定した計測が可能であると考えられる。しかし、x軸とy軸に関しては遠心力項が存在するため、式(10)より遠心力項を算出する必要がある。このとき、ある特定の条件でシステム全体が不安定となる解析結果が得られている⁽⁷⁾。それは、z軸周り(以下Yaw)の回転周波数に対して、計測ノイズが偶数倍の周波数を持つような場合である。なお、詳細な解析については参考文献⁽⁷⁾を参照されたい。本章ではシミュレーションにより、これまで得られた解析結果について検証する。

3.1 設定条件 これまでの解析により、遠心力項がシステムの安定性に大きく影響することが明らかとなっている。そこで、シミュレーションでは、x軸周り(以下Roll)とYawの2軸同時の回転運動により、3軸の回転角加速度を生成することとした。このとき与えるパラメータは回転の振幅と周波数である。単純に遠心力項が加速度に対して十分に小さい場合、その影響は小さくなることが予想される。したがって、与えるパラメータは以下のように決定した。

遠心力項が角速度で構成されることより、角速度を次のように仮定する。

$${}^b\omega_b(t) = A \sin(2\pi f t) \quad [\text{rad/s}] \quad (11)$$

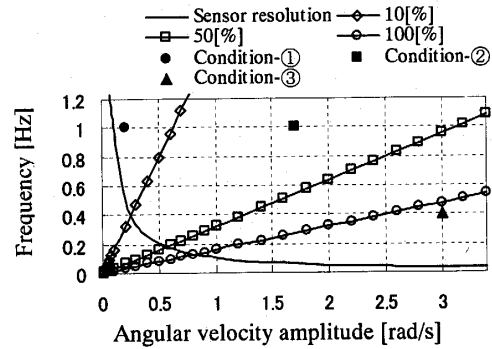


Fig. 4 A graph of a boundary condition

なお、 A は角速度振幅、 f は回転周波数である。さらに式(11)より回転角加速度は、

$${}^b\dot{\omega}_b(t) = 2\pi f A \cos(2\pi f t) \quad [\text{rad/s}^2] \quad (12)$$

と表される。したがって、式(11)と式(12)を式(9)のx軸回転角加速度導出式に適用した場合、加速度項と遠心力項の振幅値が一致するのは、

$$|A_{(pitch)}| \cdot |A_{(yaw)}| = |2\pi f_{(roll)} A_{(roll)}| \quad (13)$$

のときである。なお、y軸についても同様な形となる。ここで $A_{(roll)}$ 、 $A_{(pitch)}$ 、 $A_{(yaw)}$ は、それぞれ各軸周りの角速度振幅、 $f_{(roll)}$ はRollの回転周波数を表す。両者の関係を振幅値の割合で表すと、

$$\frac{|A_{(pitch)}| \cdot |A_{(yaw)}|}{|2\pi f_{(roll)} A_{(roll)}|} \times 100[\%] \quad (14)$$

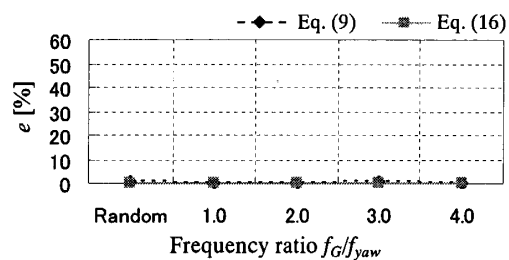
となる。本稿では遠心力項が加速度項に対して十分に小さい場合を式(13)において10[%]以下とし、図4に式(14)と本センサの分解能を考慮した境界条件を示す。図4において、100[%]で示される箇所は式(13)に該当し、両者の最大振幅が一致する場合となる。本稿では図4をもとに、①遠心力項が十分に小さくなる場合(10[%]以下)、②小さくなる場合(10~50[%])、③大きくなる場合(100[%]以上)の3つの運動条件における本センサの特性について考察する。なお、本センサの分解能を考慮した具体的な設定パラメータは以下の3通りである。

① $A_{(roll/yaw)} = 0.2 \text{ [rad/s]}$, $f_{(roll/yaw)} = 1.0 \text{ [Hz]}$

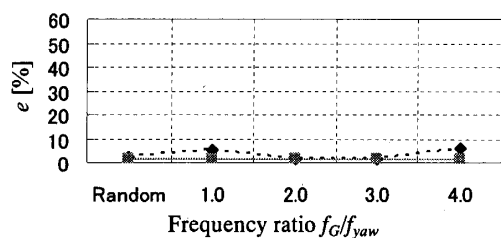
② $A_{(roll/yaw)} = 1.7 \text{ [rad/s]}$, $f_{(roll/yaw)} = 1.0 \text{ [Hz]}$

③ $A_{(roll/yaw)} = 3.0 \text{ [rad/s]}$, $f_{(roll/yaw)} = 0.4 \text{ [Hz]}$

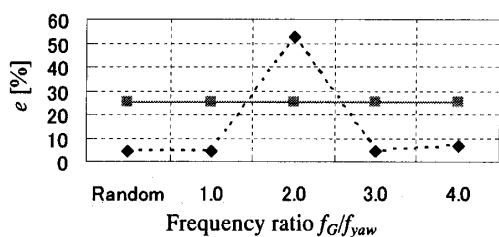
ここで、これまでの解析により得られた不安定条件を検証するために、上記の条件において、Yaw回転周波数に対して、RollおよびPitch加速度信号に含まれるノイズ成分を、1倍から4倍の特定の周波数成分をもつノイズ信号と、特定の周波数成分をもたないランダムノイズ信号で与えた。また、ノイズは6個の加速度計に対して独立に与え、6



(a) At $A=0.2$ [rad/s] and $f_{(roll/yaw)}=1.0$ [Hz]



(b) At $A=1.7$ [rad/s] and $f_{(roll/yaw)}=1.0$ [Hz]



(c) At $A=3.0$ [rad/s] and $f_{(roll/yaw)}=0.4$ [Hz]

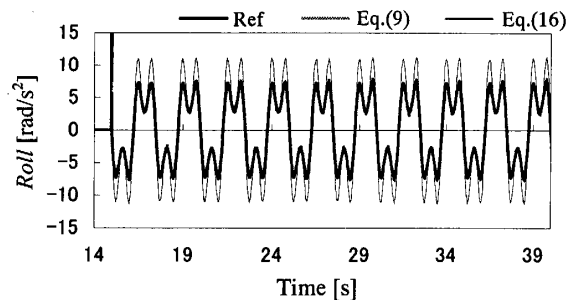
Fig. 5 Measurement error versus frequency ratio in Roll acceleration (At measurement noise 10[%])

軸加速度を算出する際に統合している。なお、ノイズはオフセット成分をもたず、加速度信号の10[%]程度の大きさとした。このとき、サンプリング周波数は60[Hz]、シミュレーション時間は200[sec]である。ただし、シミュレーションにおいては加速度信号の量子化については考慮していない。

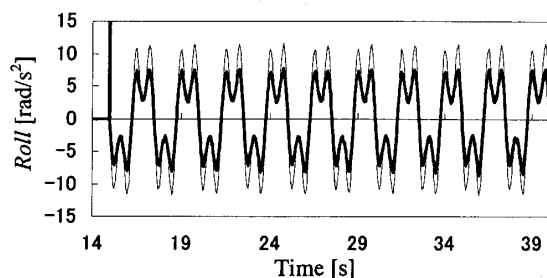
3・2 シミュレーション結果 図5および図6に結果を示す。図5はRollでの最大加速度に対する平均誤差の割合である。ここでの平均誤差は、理論値を ${}^b\dot{\omega}_{bmi}$ 、算出値を ${}^b\hat{\omega}_{bmi}$ とし、次式で算出する。

$$e = \frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |{}^b\dot{\omega}_{bmi}(n) - {}^b\hat{\omega}_{bmi}(n)| \right)}{{}^b\dot{\omega}_{bmi}(Maxacc.)} \times 100 [\%] \quad (15)$$

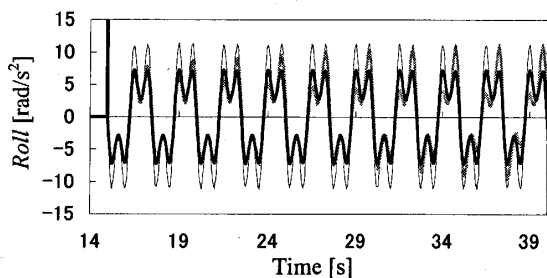
また、図5の点線は遠心力項を考慮した場合で式(9)による算出値、実線は遠心力項を考慮しない場合で、次式による算出値である。



(a) Random noise



(b) $f_G/f_{yaw} = 1.0$



(c) $f_G/f_{yaw} = 2.0$

Fig. 6 A simulation result at $A=3.0$ [rad/s] and $f=0.4$ [Hz]

$$\begin{bmatrix} {}^b\ddot{p}_e(n) + g(n) \\ {}^b\dot{\omega}_e(n) \end{bmatrix} = {}^bR^{-1} \begin{bmatrix} a_1(n) \\ \vdots \\ a_e(n) \end{bmatrix} \quad (16)$$

図6に条件③(図5-(c))における特定の成分をもたないノイズ、周波数比が1倍および2倍の成分をもつノイズ信号での、遠心力項を考慮した場合と考慮しない場合の時間波形を示す。なお、図中のRef.は遠心力項を考慮することで、本来得られる真の加速度信号である。ここで、図5、図6中の f_G はノイズ周波数であり、特定の周波数成分をもつRoll加速度に含まれるノイズ信号を意味する。

図5においては加速度に対する遠心力項の割合が大きくなるにつれ計測誤差が大きくなる傾向が確認できる。特に図5-(c)の遠心力項を考慮しない場合では、最大加速度に対して計測誤差が20[%]を超え精度的に満足する結果は得られない。これは図6の時間波形においても確認することができる。この影響を抑えるためには、式(9)を用いて遠

心力項を考慮する必要があるが、考慮することで、誤差は10[%]以下に抑えられている(図5)。しかし、ノイズ周波数 f_G がYaw回転周波数 f_{yaw} の2倍となる時、ノイズが増幅され、図6-(c)からもわかるように運動開始から比較的早い段階でのノイズの増幅がみられる。結果として、計測誤差が遠心力項を考慮しない場合以上に大きくなる結果となった。

これまでの解析では誤差は微小と仮定し、高次微小項を除き線形近似化したため、偶数倍でシステムが不安定となる可能性が考えられたが、シミュレーションでは図5-(c)および図6-(c)の2倍を除いては、ノイズの増幅による不安定化の傾向はみられなかった。このように解析により予測された結果と異なる結果となった要因には、解析自体が非常に特殊な条件であったことや、初期値、周波数、位相などの条件で解析結果が変わることが考えられる。ただし、図5-(c)、図6-(c)のように偶数倍で計測誤差が増幅され不安定になる可能性も考慮しなければならない。

本シミュレーション結果より、遠心力項が加速度に対して小さくなるような運動条件では、遠心力項を考慮した場合、あるいはしない場合でも、安定した計測が可能であることが明らかとなった。ただし、遠心力項の影響が大きい場合には、その項を考慮する必要があるといえる。そこで、次章ではその運動(条件③)についての実測とその結果を示し、システムの安定性について検証する。

4. 実験による安定性解析

本章では試作した6軸加速度センサを用いた実験、およびその結果を示す。実験ではシミュレーション同様に2軸の回転運動により3軸の回転角加速度を生成する。与える運動は遠心力項の影響が大きくなる運動で、シミュレーションでの条件③に該当する。実験では主に遠心力項を考慮した場合と考慮しない場合に着目し、本センサの安定性について検証する。

4.1 6軸加速度センサ 6個の単軸並進加速度計を用いてセンサを構成する場合、各加速度計の取付誤差や感度方向誤差などを抑える必要があり、それらの誤差はそれぞれセンサ筐体の加工精度、メーカーが保障する加速度計の製作誤差に依存する。したがって、センサを構成する上で、それらの幾何学的誤差をより小さくするために、本研究では2軸の並進加速度計を3箇所配置する

Table 1 Specifications of 6-DOF acceleration sensor

		Max	Resolution	Sampling
Translational	x	± 3.0 [G]	0.04 [m/s ²] (4.0 [mG])	60 [Hz]
	y			
	z			
Rotational	x	± 490.0 [rad/s ²]	0.64 [rad/s ²]	
	y			
	z			

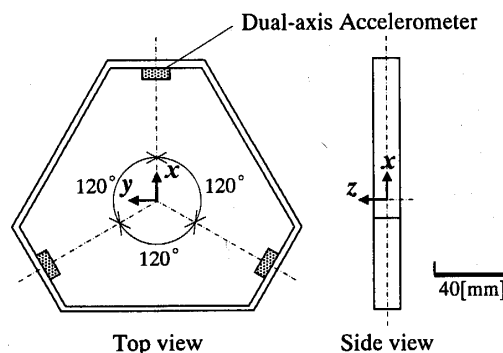


Fig. 7 A proto-type 6-DOF acceleration sensor

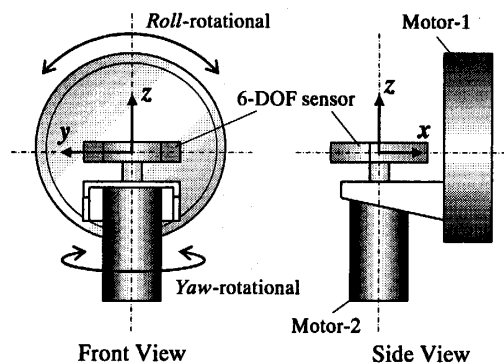


Fig. 8 Experiment system

構成とした。図7は試作した6軸加速度センサの構造図である。センサ本体は約200グラムと比較的軽量である。また、本センサに使用した2軸の並進加速度計はアナログ・デバイセズ社のADXL202Eである。表1に提案する6軸加速度センサ仕様を示す。

4.2 実験システム 実験装置を図8に示す。前章のシミュレーションと同様にRollとYawの2軸に回転運動を与える。そこで図8のように2つのモータを使用し、2軸の回転テーブルを構成した。センサ本体を各モータの回転中心に固定し、運動中心での6軸加速度センサ本体の回転を実現することができる。Motor-1を駆動させることでセンサ本体のRoll運動、Motor-2を駆動させることでYaw運動を生成する。

4.3 実測結果 前章での条件③における実測結果を示す。図9はRoll、PitchおよびYaw加速度の理論値と式(9)での実測値の比較である。Yaw

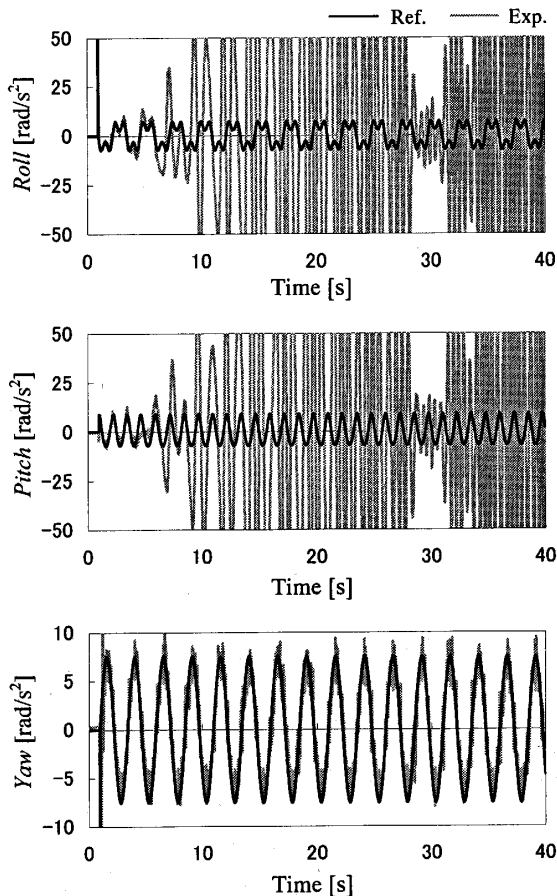


Fig. 9 A experiment result at $A=3.0$ [rad/s] and $f=0.4$ [Hz]

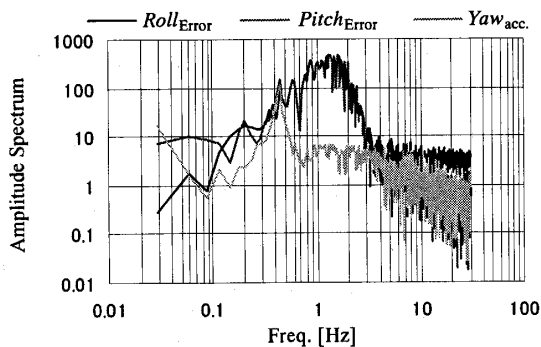
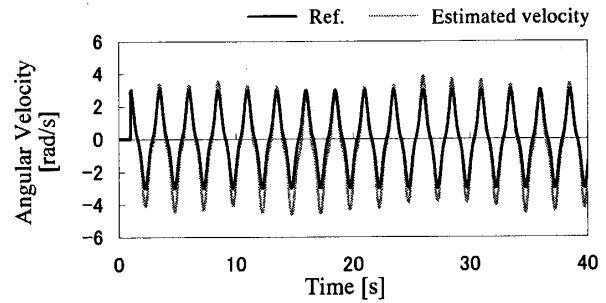


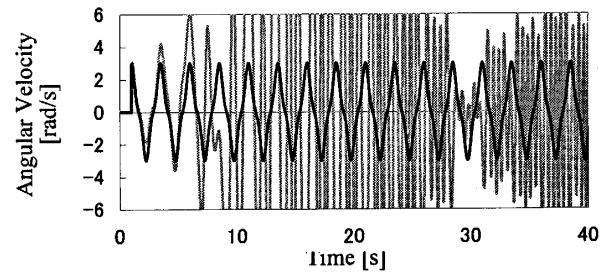
Fig. 10 A graph of amplitude spectrum of Roll and Pitch acceleration measurement error ($A = 3.0$ [rad/s] and $f = 0.4$ [Hz])

加速度に関しては、遠心力項の影響がないため理論値とほぼ一致した加速度が得られている。ここで、Yaw 加速度において、運動開始直後で理論値と実測値が大きく異なってしまっているが、これは急加速による過度的な初期振動が生じたためであり、本来の運動ではない。したがって、定常状態での信号を比較した場合、両者はほぼ一致しているとみることができる。

Roll および Pitch 加速度に関しては、理論値から



(a) In case of not consideration of CF. term



(b) In case of consideration of CF. term

Fig. 11 A graph of angular velocity by numerical integration in Roll

大きくずれ、不安定な状態となっていることが確認できる。さらに、図 10 に Roll と Pitch の計測誤差、Yaw 加速度の周波数特性を示す。なお、図 10 での計測誤差とは、図 9 での理論値と実測値の差である。図 9 と図 10 より、計測値に誤差が生じる原因として 2 つの要因が考えられる。1 つ目はオフセット誤差である。本システムは遠心力項を式 (10) より算出しているため、オフセット誤差によって積分時に遠心力項にドリフトが生じたためであると考えられる。2 つ目は前章での不安定条件での誤差の増幅である。図 10 からは、周波数成分が高周波領域に推移していることがわかる。このことから、遠心力項に生じたドリフトの影響で周波数成分が推移し、不安定条件となったことで、さらに誤差が増幅されたと考えられる。図 11 に実測で得られた信号から数値積分により角速度を算出した結果を示す。なお、図中の CF. term (Centrifugal force term) は遠心力項を意味する。図 11-(a) は遠心力項を無視した場合で積分した結果であるが、図 9 のような急激な誤差の増幅はみられない。しかし、遠心力項の影響があるため、理論値と一致はしていない。理論的には遠心力項を考慮した角加速度を積分することで、理論値と一致する角速度が得られるが、図 11-(b) に示すように、短時間で発散してしまっている。なお、Pitch についても同様な結果を得ている。このように、直接的な発

散の原因としては遠心力項を算出する積分時のドリフトであるが、さらに周波数比が偶数倍となったことで、発散速度を助長したと考えられる。したがって、直接の原因であるドリフトを除去することで、システムの不安定化を軽減することができると考えられる。そこで、本稿ではフィルタにより、ドリフト成分を除去することとし、次項で検証し、その結果を示す。

4・4 フィルタの適用 実測において直接的な原因としては、積分時のドリフトが考えられた。本稿では、フィルタ処理によりドリフト成分を除去することとした。高周波成分の加速度に対し、ドリフト成分は低周波成分の信号であるので、高域通過フィルタを適用し、低周波ドリフト成分を除去した。用いるフィルタは、1次のバターワース型高域通過フィルタである。フィルタのカットオフは、図10の信号の周波数特性をもとに、安定性が損なわれない程度に実験的に決め、カットオフ周波数を0.1[Hz]とした。フィルタは積分後の遠心力項に適用しているため、遠心力項の0.1[Hz]以下を除去している。したがって、加速度信号自体にはフィルタの影響はない。遠心力項に関しては、図12に示されるように、0.4[Hz]でのゲインが-0.26[dB]、位相遅れは0.24[rad]であり、ともに遠心力項の信号の5[%]以内の影響であることより、総合的に0.1[Hz]を妥当なカットオフ周波数であると判断した。

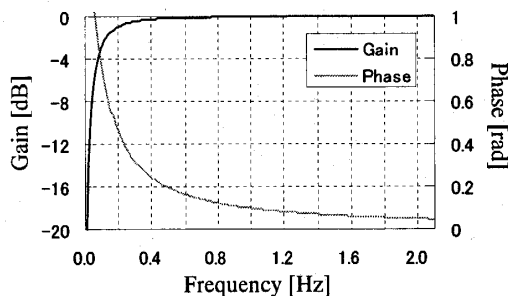
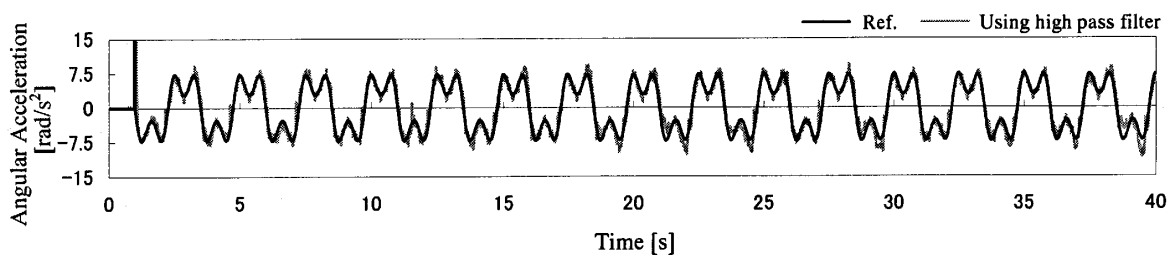
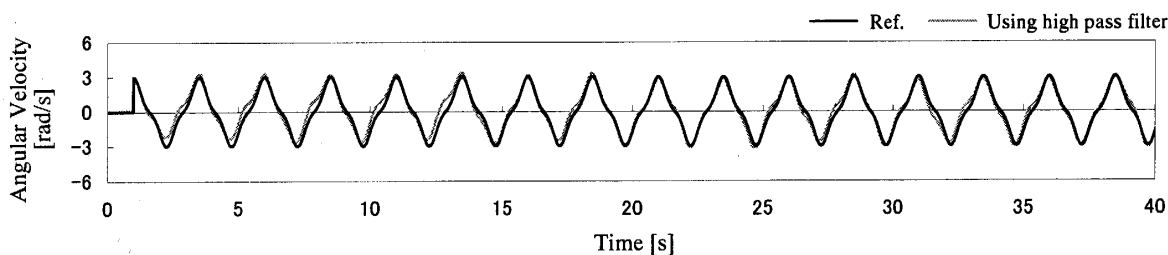


Fig. 12 A graph of a high pass filter characteristic

4・5 フィルタを適用した実測結果 ドリフト成分を除去するため、積分後に1次のバターワース型フィルタを適用し、遠心力項を算出した。図13は図9に対しフィルタを適用し、算出した結果である。図13-(a)の回転角加速度では、フィルタによりドリフト成分を除去することで、理論値とほぼ一致する結果が解かれていることがわかる。さらに、得られた回転角加速度を積分し、回転角速度を算出した結果が図13-(b)である。図9-(a)のように、遠心力項を考慮せず角速度を算出した場合では、遠心力項の影響が理論値とのずれとして現れる。これに対し、図13-(b)で示されるように、遠心力項を考慮し、積分時のドリフトを除去することで、理論値とほぼ一致する結果が得られていることが確認できる。3・2節の式(15)を用いて、図9、図11、図13でのRollにおける平均誤差の割合では、回転角加速度では、フィルタを適用せずに実測値を積分し遠心力項を考慮した場合(図9-(a))では、687.3[%]



(a) Angular acceleration



(b) Angular velocity

Fig. 13 A experiment result of Roll acceleration and velocity using high pass filter (Cut-off freq. = 0.1 [Hz])

であるのに対し、フィルタを用いた場合(図13-(a))では16.2[%]まで軽減された。さらに回転角速度では、遠心力項を考慮せずに積分により算出した場合(図11-(a))では19.7[%], 遠心力項を考慮した加速度を積分した場合(図11-(b))では204.3[%], フィルタを適用した場合(図13-(b))では12.8[%]という結果を得た。また、Pitchに関しても同様な結果が得られた。このように、フィルタにより遠心力項に生じたドリフト成分を除去することでドリフトによる誤差の発散と、それによる特定の周波数比での発散の助長を抑えることができ、比較的安定した計測が可能であることが確認された。

また、これらの全体の結果より、本センサが可能とする運動帯域は、カットオフ周波数0.1[Hz]より低い周波数で、さらに遠心力項が加速度項より十分に大きくなるような特定の運動の振幅と周波数以外であると言える。本センサが対象とする車両や航空機などの移動体の運動特性^{(9),(10)}においては、上記のような非常に振幅の大きい緩やかな運動は特殊な運動である。したがって、移動体の一般的な運動に対しては、本稿で提案する手法は有効であると考えられる。

5. ま と め

本論文で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 従来提案された手法をもとに、複数の加速度計による6軸加速度計測システムを提案した。
- (2) 遠心力項の影響が大きくなるような運動では、Yaw運動周波数に対して計測ノイズ周波数が偶数倍となるときに、誤差が増幅される傾向をシミュレーションにより確認した。また、遠心力項の影響が小さい運動では誤差の急激な増幅はみられないが、逆に遠心力項を無視した方が、より安定で誤差が少ないことを確認した。
- (3) 試作した6軸加速度センサを用いた実験を行った。その結果、遠心力項を算出する場合、積分時のドリフトにより、誤差周波数成分が高周波帯に推移していく。そのため、解析での不安定条件となり、システムの不安定化をより助

長してしまう。そこで、積分後に1次の高域通過フィルタにより遠心力項に生じたドリフト成分を除去することで、ノイズによる計測誤差の増幅が抑えられ、比較的安定した回転角加速度および回転角速度が得られることを確認した。

文 献

- (1) Tamagawa Seiki Co., LTD, *An introduction to gyro practical use technology in Japanese*, (2002), p. 17, Kogyo Chosakai Publishing Inc.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Masuda T., Tanizawa Y., Measurement Experiment of the 6 DOF Acceleration Using Multiple Sensors, *Research Report of Industrial Research Division, Mie Pref. Science & Technology Promotion Center*, No.26 (2002), pp. 117-120.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Onodera R., Mimura N., Six-Degree-of-Freedom Motion Sensor System Using Multiple Accelerometers, *36th International Symposium on Robotics (ISR2005)*, TU416.
- (9) Doi S., Vehicle Dynamics Performance Evaluations Through Human Dynamic Properties, *TOYOTA Central Labs R&D Review*, Vol.30, No.3 (1995), pp. 3-15.
- (10) 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.