

Evaluation of Inclination to Stability and Functional Extension of 6 D.O.F Acceleration Sensor

○菊地一貴 (新潟大院)
 沖津良史 (新潟大院)

大前隆道 (新潟大院)
 正 三村宣治 (新潟大)

Kazutaka KIKUCHI, Takamiti OHOMAE, Yoshifumi OKITSU, Nobuharu MIMURA
 Niigata University, Ikarashi2-8050, Niigatashi, Niigata

Key Words : 6 DOF Acceleration, Fusion of Multi-Accelerometer, Angular Velocity, Angular Acceleration, Posture sense

1. はじめに

車両運動や航空機に代表される6自由度の複雑な運動を計測するための代表的な方法として3軸のレートジャイロと3軸の並進加速度計を組み合わせた方法がある。しかしレートジャイロは計測範囲が低速な運動に限られる、コストが高い、重量が大きいななど様々な問題点がある。そこで安価で小型な単軸並進加速度計を複数個使い、その出力を統合することによって同様の機能を実現する6軸加速度センサの開発が有効である。本研究では上記で述べた6軸加速度センサの開発と安定性解析、機能拡張として本センサを用いた物体の姿勢検出法について検討する。

2. 計測原理

まず運動する剛体に生じる加速度を考える。Fig.1に示すように静止基準座標系を Σ_0 、剛体に固定した座標系を Σ_b とする。 Σ_0 から見た Σ_b の原点の位置ベクトルを 0p_b とする。剛体上の任意の点*i*を考え、その位置ベクトルを 0r_i とする。また Σ_0 から見た点*i*の位置ベクトルを 0p_i とする。この剛体が重力下で Σ_b の原点まわりに角速度 ${}^0\omega_b$ で回転しており、点*i*に単軸並進加速度計を取り付けた場合を考える。この加速度計の感度方向を表す単位ベクトルを 0u_i とし、出力を a_i で表すと

$$a_i = {}^0u_i^T \{ {}^0\ddot{p}_b + g + {}^0\dot{\omega}_b \times {}^0r_i + {}^0\omega_b \times ({}^0\omega_b \times {}^0r_i) \} \quad (1)$$

である。ただし g は重力加速度とする。式(1)をみると遠心加速度の項が含まれている。 Σ_b の原点に働く並進加速度及び回転角加速度を求めようとした場合、上記の遠心角加速度の項の除去が必要となるが一つの加速度データでは不可能である。

そこで、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、その出力信号を統合する。位置 0r_i に感度方向 0u_i ($i=1,2,\dots,n$)となるように n 個の単軸並進加速度計を取り付けた場合を考えると、式(1)より

$$a = {}^0R \begin{matrix} {}^0\ddot{p}_b + g \\ {}^0\dot{\omega}_b \end{matrix} + \begin{matrix} {}^0u_1^T \{ {}^0\omega_b \times ({}^0\omega_b \times {}^0r_1) \} \\ {}^0u_2^T \{ {}^0\omega_b \times ({}^0\omega_b \times {}^0r_2) \} \\ \vdots \\ {}^0u_n^T \{ {}^0\omega_b \times ({}^0\omega_b \times {}^0r_n) \} \end{matrix} \quad (2)$$

ただし、

$$a = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]^T$$

である。ここで、 ${}^0\ddot{p}_b + g$ が剛体の6自由度加速度である。また行列 0R は並進加速度計の取り付けの位置と方向によって決まる行列である。よって式(2)より ${}^0\ddot{p}_b + g$ が6次元空間を張るためには、 $\text{rank } {}^0R = 6$ (3)が条件である。特に、 $n=6$ かつ $\text{rank } {}^0R = 6$ のとき、つまり、行列 0R が正則であるとき、式(2)より ${}^0\ddot{p}_b + g$ を一意に決定できる。そこで、以下では $n=6$ で 0R が正則であるとする。ここで ${}^0R^T = {}^0R$ とおくと式(2)は次のように書ける。

$${}^0\ddot{p}_b + g \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_6 \end{matrix} = {}^0R \begin{matrix} {}^0u_1^T \{ {}^0\omega_b \times ({}^0\omega_b \times {}^0r_1) \} \\ {}^0u_2^T \{ {}^0\omega_b \times ({}^0\omega_b \times {}^0r_2) \} \\ \vdots \\ {}^0u_n^T \{ {}^0\omega_b \times ({}^0\omega_b \times {}^0r_n) \} \end{matrix} \quad (4)$$

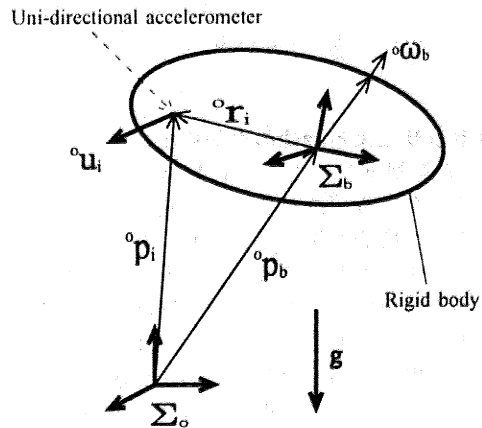


Fig.1 Coordinate system and an accelerometer configuration

3. 6軸加速度センサの構成

式(4)が成立するためには行列 0R が正則となるように6個の並進加速度計を配置すればよい。また製作のし易さ等を考慮し全ての加速度計が同一平面上にあることが望ましい。以上の条件を満足する加速度計の配置例をFig.2に示す。本センサは円の半径を変えることによって計測できる角加速度の最大値が変化する。計測対象は車両やロボットヘリなのでその特性を考慮した結果、今回は半径0.06mの円周上に配置する。まず円の法線方向に感度方向が一致するよう120°間隔で3つの加速度計を配置する。さらに感度方向が円の接線方向に一致するよう3つの加速度計を

法線方向の加速度計からそれぞれ 10° ずらして配置する。

4. センサの安定性

Fig.2 のようなセンサを構成した場合、式(4)から次式のような6軸加速度の導出式が導かれる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{p}_x(n) + g_x(n) \\ \ddot{p}_y(n) + g_y(n) \\ \ddot{p}_z(n) + g_z(n) \\ \dot{\omega}_x(n) \\ \dot{\omega}_y(n) \\ \dot{\omega}_z(n) \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} a_1(n) \\ a_2(n) \\ a_3(n) \\ a_4(n) \\ a_5(n) \\ a_6(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1(n) \\ f_2(n) \\ 0 \\ f_4(n) \\ f_5(n) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし

$$\begin{bmatrix} f_1(n) \\ f_2(n) \\ 0 \\ f_4(n) \\ f_5(n) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.03(\omega_x^2(n) - \omega_y^2(n)) \\ -0.06\omega_x(n)\omega_y(n) \\ 0 \\ -\omega_y(n)\omega_z(n) \\ \omega_x(n)\omega_z(n) \\ 0 \end{bmatrix}$$

である。f という項は遠心加速度による項で角速度情報を含んでいる。そこで実際の計算では求めた角加速度を数値積分して計算していた。しかしこの方法では運動によっては長時間計測した場合に、積分誤差の影響で角加速度の値が発散してしまうことがあった。一般的な車両運動のモデルを仮定し、回転運動の周波数を変化させた場合に遠心加速度による項 f が求める6軸加速度に対してどれだけの割合になるか調べてみた。(並進運動の周波数は一定) まず並進加速度に対する f1 と f2 の割合だがほとんど0であり無視できると思われる。次に回転角加速度に対する f4, f5 の割合はかなり大きく無視できないことがわかる。よってこれ以降は f1 と f2 は0として考え、f4, f5 のみを考慮することとする。

5. 本センサによる物体の姿勢検出法

物体の姿勢制御をしようとした場合、必要となる情報は角加速度や角速度ではなく、姿勢角が必要とされる場合が多い。そこで機能拡張として本センサを用いた物体の姿勢検出法を示す。本センサは角加速度を計測することができる。理論上は単純に、求めた角加速度を2回積分すれば姿勢角を求めることもできる。しかし4章でも述べたが長時間計測した場合、積分誤差のため角加速度値が発散してしまう場合がある。そこで重力加速度を用いた方法を提案する。本センサは角加速度と同時に並進加速度と重力加速度の和を計測できる。4章でのシミュレーションにより並進加速度に対する f1, f2 の影響は無視できるので、並進加速度と重力加速度の和は発散することなどなく、6個の単軸並進加速度計の出力のみから求めることができる。もし並進加速度と重力加速度を分離することができれば、その重力加速度から物体の水平面からのずれ(姿勢角)を検出できる。本センサの測定対象は車両やロボットヘリであり、その運動(加速度)の特性は Fig.5 に示す通りである。つまり並進加速度の周波数は高く、重力加速度の周波数は低いのである。よってまず式(5)によって並進加速度と重力加速度の和を求める。その結果をローパスフィルタに通すことによって重力加速度を求めることができる。重力加速度が求めれば姿勢角を検出できる。

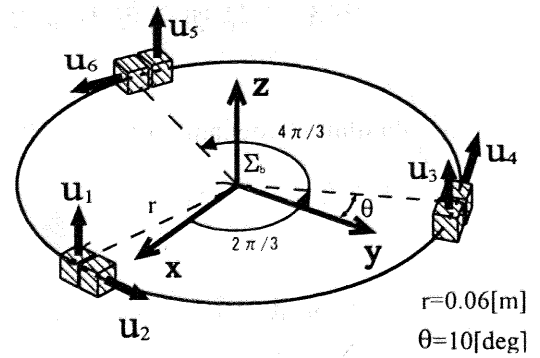


Fig.2 Coordinate system and six accelerometer configurations

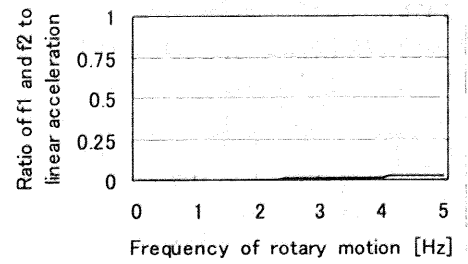


Fig.3 Rate of f1 and f2 to linear acceleration

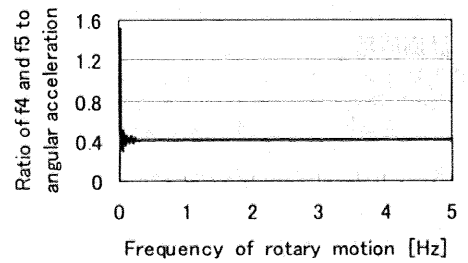


Fig.4 Rate of f4 and f5 to angular acceleration

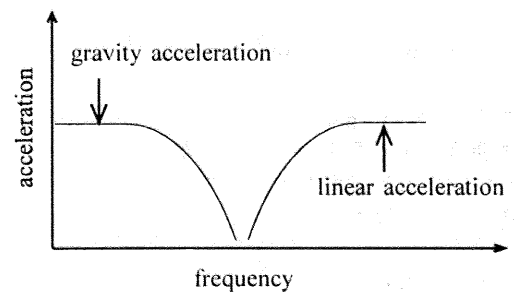


Fig.5 Frequency characteristic of acceleration

5. まとめ

6個の単軸並進加速度計を用いた6軸加速度センサを提案し、機能拡張として本センサを用いた姿勢角検出法を提案した。現在フィルタの設計と、フィルタを通した際の信号の位相遅れの補正を検討している。

参考文献

太田：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 Vol.30, No.12, 1442/1448 (1994)