

1111 慣性航法装置

Inertial Navigation System

○森元 誠一 (日本航空電子工業株式会社)

Seiichi Morimoto, Japan Aviation Electronics Industry, Ltd. 1-19, AOBADAI 3-CHOME, MEGURO-KU, TOKYO

1. 慣性航法装置とは

航法(navigation)とは、一般的にある2点間を安全に能率よく航行する技術を言うが、航空機等の高速移動体における航法は、常に目的地までの距離や方向を把握する必要があり、このためには、リアルタイムに自機の位置、速度、姿勢・方位を知る必要となる。

慣性航法装置(INS:Inertial Navigation System)は、慣性空間における運動加速度及び角速度を慣性センサ(加速度計、ジャイロ)により検出し、航空機の現在位置、速度、姿勢、方位等の航法情報を出力する装置である。また、大きな特長として、天候、電波異常(妨害)等の影響を受けず、地上の航法援助施設を必要としない完全自立航法システムである。この慣性航法装置の実用化は、航空航法史上最大の進歩であり、これにより航空機の安全に太平洋/大西洋等の航行することを可能にし、また、人類の月に立つこと事を可能にした。

2. 原理

慣性航法装置は、ジャイロにより安定させた「安定プラットフォーム」上に加速度計を配置し、機体の加速度を検出し、それを積分して「移動速度」を求め、さらにそれを積分して「移動距離」を求めるといった原理の装置である。ここで使用する加速度計とジャイロは、慣性空間(≡宇宙空間)における加速度(加速度計)及び角速度(ジャイロ)を検出することから、慣性センサと呼ばれる。

安定プラットフォーム上に配置した加速度計が検出する加速度は、航空機の慣性空間の移動によって発生する加速度であるが、地球は回転体であり、約 $15^\circ/\text{h}$ で自転しているため、加速度計出力には、航空機の移動に伴う加速度の他に自転に伴う見かけ上の加速度成分(コリオリの加速度)が含まれている。慣性航法装置は、地球上の航法のための装置であるため、加速度計出力からこの見かけ上の加速度(コリオリの加速度)を除き、真の加速度のみを算出する必要がある。

一般的に航空機に搭載して移動している加速度計の出力は、下式で表される。

[座標系:地球座標系 N(北)、E(東)、D(鉛直下)]

$$A = [dV/dt] + 2\Omega \times V - g \quad (\text{m/s}^2)$$

A : 加速度計の出力ベクトル

dV/dt : 航空機の地球に対する移動加速度ベクトル

$2\Omega \times V$: 地球自転による見かけ上の加速度ベクトル
(コリオリの加速度)

Ω : 地球アースレート (rad/s)

V : 航空機の移動速度 (m/s)

g : 重力加速度ベクトル

ここで慣性航法装置は、「航空機の地球に対する移動加速度: dV/dt 」を取り出すため、以下の①～③を実施している。

- ① 加速度計が重力加速度を感じないように安定プラットフォームを使って、常に局地水平に保つように制御する。
- ② 加速度計を、安定プラットフォーム上のX、Y方向に各々配置し、X方向が常に北に向くように制御する。
- ③ 航空機の位置と速度からコリオリの加速度: $2\Omega \times V$ を計算して差し引く。

3. 慣性センサ

(1) 加速度計

慣性航法装置に使用される加速度計は、慣性空間における加速度を検出するセンサであり、質量とこれを拘束する振り子から構成され、加速度に比例して生じる質点の変位を電流に変換し、質点に取り付けられているトルカコイルにフィードバックして電磁気力によって平衡させるフォースリバランス型加速度計(サーボ加速度計)である。

(2) ジャイロ

ジャイロは、慣性空間における回転運動を検出するセンサであり、大別すると、コリオリ力を利用する「機械式ジャイロ」、光のサニャック効果を利用する「光ジャイロ」に分類される。

慣性航法装置に用いられるジャイロは、以前は、機械式ジャイロが主流であったが、現在は、高ダイナミックレンジ、信頼性等の面から光ジャイロが主流である。この光ジャイロの代表例として、閉じた光路内にレーザ光源を持つ(能動型)リングレーザジャイロと、半導体レーザ等を光源とし、光ファイバを用いて閉じた光路とした光ファイバジャイロがある。リングレーザジャイロ(Figure 1)は、三角形(又は四角形)の石英ブロックをレーザ光が通過できるようにくり貫き、その中にヘリウムとネオンの混合ガスを封入し、高電圧の印加により右回りと左周りのレーザ光を発振させる。右回りと左周りの2つのレーザ光は、コーナキューブと読み出しミラーを経てフォトセンサーに集光される。回転角速度 Ω が印加されると、下式のとおり右回りと左周りの光路差 ΔL が発生し、 ΔL は波長 λ のレーザ光において Δf の周波数差が生じる。

$$\Delta f = \Delta L (f/L) = (4A/\lambda L)\Omega$$

この周波数差はフォトセンサー上で光学的な干渉縞となり、回転角速度に比例した縞の変動をデジタル信号として読み出すと回転角速度が検出できる。

光ファイバジャイロ(Figure 2)は、円筒に光ファイバを巻き始端に光源、終端に光検出器を置き、光ファイバを交差させ交点にビームスプレッダを設けてある。光源はレーザ光を発光し、ビームスプレッダで2方向の光を分ける。2つの光は再びビームスプレッダで合わされ、光検出器で位相差を検出する。光ジャイロは広いダイナミックレンジを有しており、ストラップダウン方式の慣性航法システムに適したセンサである。

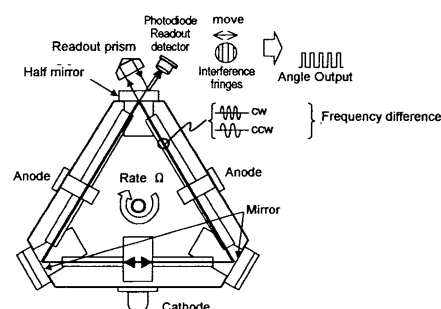


Figure 1 Ring Laser Gyro

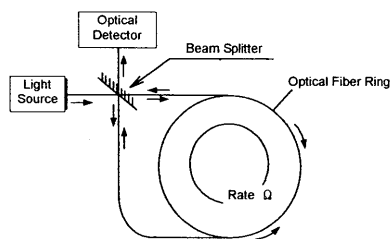


Figure 2 Fiber Optic Gyro

4. 安定プラットフォームの原理

安定プラットフォームは、XYZ3軸どの軸まわりにも可動可能なように、3個のジンバルより構成される。ジャイロ信号によりジンバルサーボを駆動し、一定の姿勢(局地水平、北)を保つように制御する。(Figure 3)

この制御により、X(北)方向配置加速度計出力から北方向加速度を算出し、2回積分して北方向移動距離を算出し、Y(東)方向配置加速度計から同様に東方向移動距離を算出して、初期位置からの北方向移動距離、東方向移動距離を加えて現在位置を算出する。

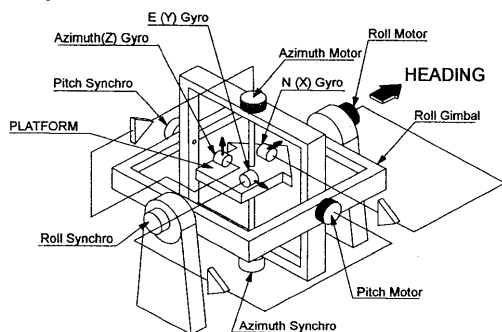


Figure 3 INS Platform Mechanization

5. 安定プラットフォームの補正

安定プラットフォームは航空機の移動につれて、「局地水平」と「北」は、時々刻々と変化していくが、ジャイロによる制御ではもとの姿勢のままである。また、静止状態においても、地球の自転によって「局地水平」と「北」は、時々刻々と変化していくが、ジャイロによる制御ではもとの姿勢のままである。このため、自転及び移動に合わせてジンバルサーボを駆動して、安定プラットフォームを連続的に局地水平、北になるように修正する。これを「アースレート補正」(Figure 4)、「トランスポートレート補正」(Figure 5)という。

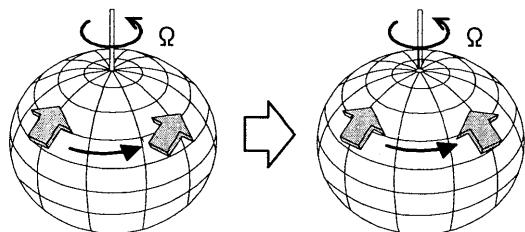


Figure 4 Earth Rate Compensation

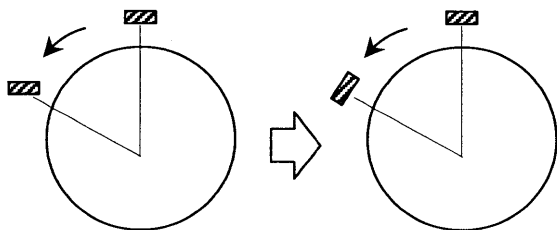


Figure 5 Transport Rate Compensation

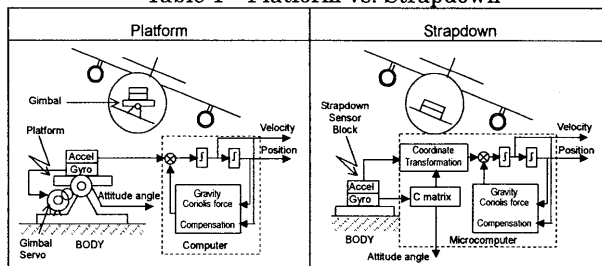
6. システム方法

慣性航法装置のその方式として、安定プラットフォームを機械的に構成する「プラットフォーム方式」と、コンピュータ上に安定プラットフォームに構成する「ストラップダウン方式」がある。

プラットフォーム方式は、ジンバル構造を有した機械的に安定したプラットフォーム上にセンサ(ジャイロ、加速度計)を配置し、ジャイロでプラットフォームが常に局地水平、北になるように制御する方法である。

ストラップダウン方式は、装置が機体に直付けるため、センサは高ダイナミックレンジが必要であり、また、小型で高性能な計算機が必要となるが、光ジャイロとサーボ加速度計、及びマイクロコンピュータの普及により、現在はストラップダウン方式が主流となっている。

Table 1 Platform vs. Strapdown



7. 精度

慣性航法装置の誤差要因は、大別すると慣性センサに起因する誤差と重力加速度の計算や座標変換等の計算誤差がある。慣性センサに起因する誤差は、加速度計バイアス、加速度計スケールファクタ誤差、加速度計スケールファクタ非直線性による誤差がある他、ジャイロのドリフトによる基準となる航法座標系のドリフト誤差などがある。また、航法計算の基準座標を設定する方位角誤差などがある。これらの誤差要因の慣性航法装置への影響は、位置誤差において、時間経過による発散系となり、一般的には1時間あたり0.8NM~1NM(1NM=1852m)の誤差を持つ。

これに対して、GPS やドップラーレーダは、受信状況による影響を受ける可能性があるが、発散系の誤差要因を持たないため、最適状態推測フィルタ(カルマンフィルタ)技術を使用して、互いの弱点を補間して長所を活かしたハイブリッド航法システムが実用化されており、より高い航法精度が得られる慣性航法装置が登場している。

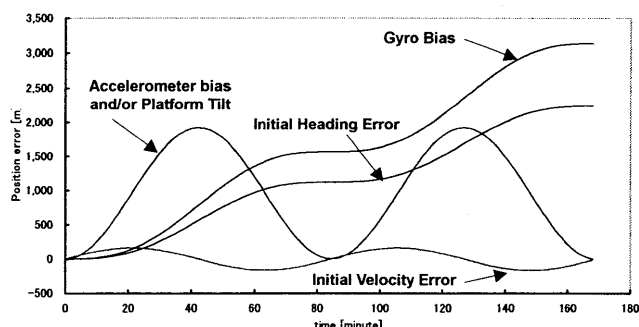


Figure 6 Error Propagation