

1 序論

(1) 移動体の座標系

有人・無人の航空機，船舶，自動車などを一般に移動体 (vehicle) とする。以下，移動体の胴体を機体 (body) とする。移動体と機体座標系の模式図を図 1.1 に示す。機体座標系とは，機体の基準とする点を座標系の原点 O とし，3 個の座標軸が機体に固定された直交座標系である。航空機分野などの多くの場合，機体の前方向に x 軸をとり，機体の右方向に y 軸をとり，機体の腹方向に z 軸をとって，右ねじ系の直交座標系を構成する。機体の x 軸回りの回転運動をローリング (rolling)， y 軸回りの回転運動をピッチング (pitching)， z 軸回りの回転運動をヨーイング (yawing) とする。

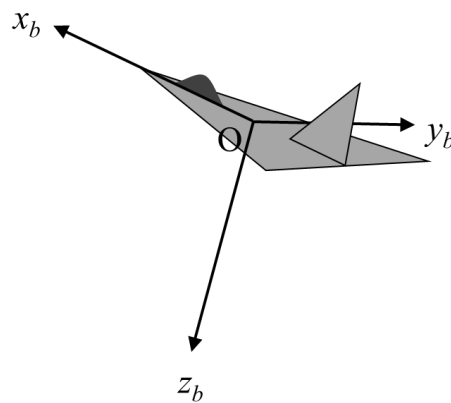


図 1.1 移動体 (航空機) と機体座標系

Column

右ねじ系の座標系の説明図を図 1.2 に示す。右ねじ (通常のねじ) の頭を図の x 軸の矢印から y 軸の矢印の方向にドライバーで回したときに，右ねじが進む方向が z 軸の方向である。同様に， y 軸の矢印から z 軸の矢印の方向に回したときに進む方向が x 軸の方向となる。 z 軸の矢印から x 軸の矢印の方向に回したときに進む方向が y 軸の方向となる。右ねじ系は右手系とも言う。

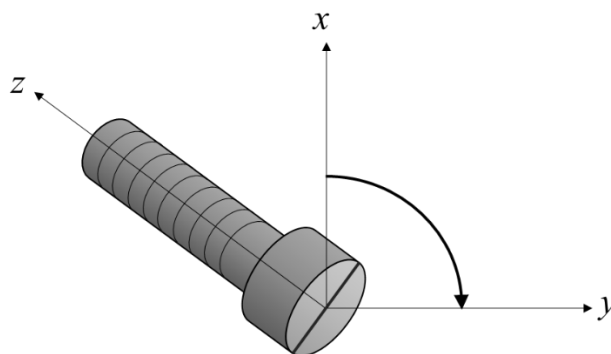


図 1.2 右ねじ系

Column

自動車の分野などでは，図 1.3 に示すように，機体の前方向に x 軸をとり，機体の左方向に y 軸をとり，機体の背方向に z 軸をとる場合も多い．この場合の y 軸と z 軸の向きは図 1.1 と逆になるが，やはり右ねじ系の直交座標系となる．

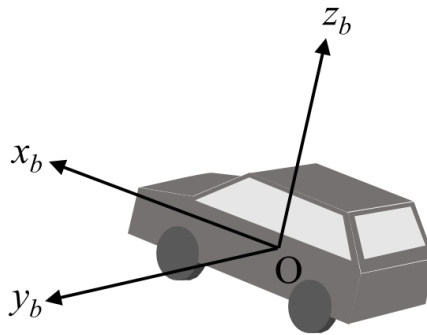


図 1.3 移動体（自動車）と機体座標系

(2) 慣性計測装置

慣性計測装置 (inertial measurement unit) という用語の定義は幅広い．狭義には 3 軸の加速度と 3 軸の角速度を出力するだけの装置を指し，広義には慣性航法演算を行う慣性航法装置 (inertial navigation system) を含む．

慣性計測装置の筐体には，図 1.4 に示すように直交座標系の x, y, z 軸が定義されている．慣性計測装置は，その x, y, z 軸が機体の x, y, z 軸にそれぞれ一致するように機体に固定される．慣性計測装置の x 軸をロール軸 (roll axis)， y 軸をピッチ軸 (pitch axis)， z 軸をヨー軸 (yaw axis) とも言う．

慣性計測装置の内部には，3 軸の角速度センサと 3 軸の加速度センサが，それぞれの検知軸が筐体の x, y, z 軸に一致するように固定されている．角速度センサは x, y, z 軸回りの角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ を検知し，加速度センサは x, y, z 軸方向の加速度 f_x, f_y, f_z を検知する．なお，センサのタイプによっては，センサ 1 個で 2 軸あるいは 3 軸を計測できるものもあるから，必ずしも計 6 個のセンサが使われているとは限らない．このようにセンサが固定された慣性計測装置をストラップダウン (strapdown) 型と言う．

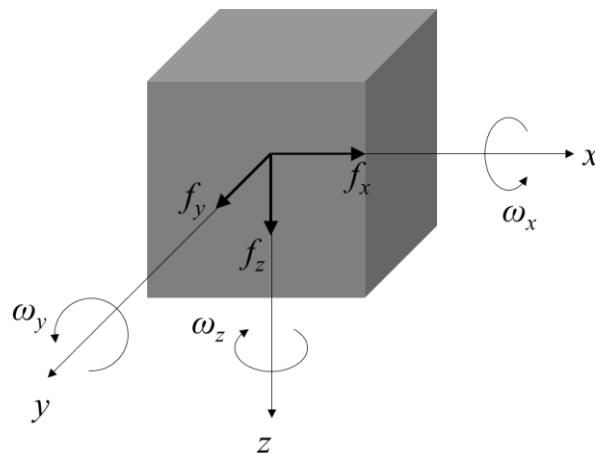


図 1.4 慣性計測装置

(3) 慣性センサ

慣性計測技術において、角速度センサと加速度センサは不可欠のセンサであり、両者を総称して慣性センサと言う。

角速度センサは、その検知軸回りの角速度、すなわち単位時間当たりの回転角度を検知するセンサであり、その出力の単位は rad/s, deg/s, deg/h などである。角速度センサは、ジャイロ스코ープ、ジャイロ、レートジャイロ、レートセンサなどとも言われる。ここでのレートとは角速度 (angular rate) の意味である。慣性計測装置の x 軸の角速度センサは、機体が x 軸回りに右ねじの回転方向に回転するときに、正の運動角速度を検知し、機体が x 軸回りに右ねじと逆方向に回転するときに、負の運動角速度を検知する。他の y 軸、 z 軸の角速度センサについても同様である。角速度センサは慣性座標系 (空間に固定された座標系) に対する角速度を検知する。したがって、地上の機体においては運動角速度と地球の自転角速度の和を出力する。

加速度センサは、その検知軸方向の加速度、すなわち単位時間当たりの速度変化を検知するセンサであり、その出力の単位は m/s^2 , g などである。ニュートンの運動方程式より、加速度とは物体に働く力を物体の質量で除した物理量であるから、加速度センサは比力センサ (specific force sensor) とも言われる。慣性計測装置の x 軸の加速度センサは、機体が x 軸の正方向に加速度運動するときに、正の運動加速度を検知し、機体が x 軸の負方向に加速度運動するときに、負の運動加速度を検知する。他の y 軸、 z 軸の加速度センサについても同様である。加速度センサは運動加速度と重力加速度を区別することはできない。したがって、地上の機体においては運動加速度と地球の重力加速度の和を出力する。

近年、微小電気機械システム (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) の技術革新によ

り、MEMS 角速度センサ・MEMS 加速度センサの性能向上が進み、広く普及するようになってきた。これらの MEMS センサを使った慣性計測装置の小型化・軽量化・低コスト化も進み、特に無人機（無人の移動体）への適用例は急速に増えつつある。

(4) 慣性航法と複合航法

慣性航法 (inertial navigation) とは、慣性センサの出力を利用して移動体の姿勢・速度・位置を推定する航法である。その原理を簡単に言えば、検知した加速度を時間積分して速度を計算し、その速度をさらに時間積分して位置を計算する。ただし、位置を計算するのに必要な速度は、基準とする座標系（多くの場合、南北・東西・上下方向の座標系）に対する速度であるから、機体座標系から基準とする座標系に座標変換しなくてはならない。そのため、検知した角速度を時間積分して機体の姿勢（ロール角、ピッチ角、方位角のオイラー角など）を連続的に計算している。このような航法演算を行うことによって、もし慣性センサが完全で、機体の初期条件が既知であれば、その後の移動体の姿勢・速度・位置を完全に計算することができる。しかも、機体に搭載された慣性計測装置のみですべての演算を行うことが可能であり、外部からの情報を使うことなく目的地に到達することができる。

しかし、いかに高精度な慣性センサを使うとしても必ず何らかの計測誤差は含まれ、初期条件にも何らかの誤差は含まれるから、慣性計測装置が出力する姿勢・速度・位置の誤差は時間の経過とともに増加していく。そのため、移動体の運動時間（飛行時間など）が長くなると、何らかの外部情報を利用して、姿勢・速度・位置の出力を補正する必要が生じてくる。慣性計測装置が利用する外部情報として最も代表的なものは、Global Positioning System (GPS) などの衛星測位システム (Global Navigation Satellite System, GNSS) である。衛星測位システムは移動体の位置（緯度、経度、高度）を全世界的に観測することができる。ただし、複数の衛星からの微弱な電磁波を観測できない環境、例えば、海中、地中、屋内などでは利用できない。慣性センサの出力と外部情報から最も確からしい姿勢・速度・位置を推定する航法を複合航法 (integrated navigation) と言う。この複合航法に広く使われているアルゴリズムがカルマンフィルタである。