

株式会社東陽テクニカ

『自動車計測ポータルサイト』掲載記事

<https://www.toyo.co.jp/solution/car/>

これからの自動車計測はどこへ行く [3/3]

付録：計測の原理

株式会社東陽テクニカ

二上 貴夫

※当社は、本文書で紹介している実験を模倣して発生したあらゆる損害に関して一切の責任を負いません。

※本文書の内容、テキスト、画像等の無断転載・無断使用を固く禁じます。

概要

直行する 3 軸に沿って IMU センサが検出する並進加速度と各軸まわりの角速度を用いて数学上の積分計算と同等の時間積算を行うことで、センサが搭載された自動車の ICE 座標における速度と位置ベクトルを求める。ここで、ICE (Isometric Coordinate on Earth) 座標とは、地球重力に垂直な平面を XY 等角座標平面とし、地球重力と反対の向きを Z 軸とする 3 次元座標である。また、センサ座標とは、IMU センサの 3 軸で定義された等角座標である。

まず、センサ座標の加速度から ICE 座標の加速度を求める。これが求められれば、あとは ICE 座標系での単純な時間積算をすることで ICE 座標での速度と位置が求められる。

ICE 座標の加速度は、センサ座標での微小回転量からオイラー角表現のテンソル量を求めてセンサ加速度ベクトルに掛けることで得られる。この計算を計測したデータの全期間に対して実行することで対象の ICE ベクトル速度が求められる。もしも、計測の開始時点で計測対象が静止していない場合には、何らかの手段を用いて初期速度を計測しておき、積分計算の初期速度とする。

解析原理の詳細

IMU センサを含む計測対象が外部から受けている真の加速度を $\vec{\alpha}$ 、

IMU センサの真の角速度を $\vec{\omega}$ と書く。そして、

IMU センサが出力する 3 軸の加速度を \vec{a} あるいは (a_x, a_y, a_z)

角速度を \vec{o} あるいは (o_x, o_y, o_z) と書く。

$\vec{\alpha}$ は実数のベクトルであり \vec{a} はデジタル値を成分とするベクトルである。

センサの座標系と ICE 座標系が一致しているときには $\vec{\alpha}$ と \vec{a} 、 $\vec{\omega}$ と \vec{o} とは近いが同一ではない。

IMU センサは、任意の姿勢で自動車に取り付けられるので、まず静止しているときにセンサの x と y 座標軸が ICE の Z 座標軸となす角を求める。これは、センサ z 軸を ICE の Z 軸に一致させる操作に等しいのでセンサ x 軸まわりの回転に続いてセンサ y 軸まわりの回転を行う。その回転の大きさを ϕ_0 、 ψ_0 とすれば、

$$\phi_0 = \tan^{-1} (a_y / a_z) \times 180.0 / \pi$$

$$\psi_0 = -\tan^{-1} (a_x / (a_y^2 + a_z^2)) \times 180.0 / \pi$$

以後、このセットを初期チルト角と呼ぶ。

次に、センサ角速度とセンサ加速度を ICE 座標に変換するテンソルを求める。

一般に、あるベクトルをオイラー角 (φ 、 ψ 、 θ) 回転させるテンソルは、以下になる。

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & \sin(\varphi)\sin(\psi)\cos(\theta) - \cos(\varphi)\sin(\theta) & \cos(\varphi)\sin(\psi)\cos(\theta) + \sin(\varphi)\sin(\theta) \\ \cos(\psi)\sin(\theta) & \sin(\varphi)\sin(\psi)\sin(\theta) + \cos(\varphi)\cos(\theta) & \cos(\varphi)\sin(\psi)\sin(\theta) - \sin(\varphi)\cos(\theta) \\ -\sin(\psi) & \sin(\varphi)\cos(\psi) & \cos(\varphi)\cos(\psi) \end{bmatrix}$$

これを $[\tau]$ と書く。

こうして、 ϕ 、 ψ を求めた場合、 θ は任意となる。ここでは仮に θ をゼロと置き、後に走行する車両の走行方位に合わせることで $[\tau]$ を簡略化する。

自動車が走行中は、時々刻々と位置と姿勢を変えるが、姿勢を検出するのは角速度センサである。IMU のセンサ値は、IMU 計測の繰り返し時間 Δt ごとに取得される。角速度の変化は Δt から見て極めてゆっくりと変化するので Δt 期間中は一定とみなせる。このとき、センサ姿勢の変化量 (δ_x 、 δ_y 、 δ_z) は、単純に角速度 $\times \Delta t$ となる。初期の姿勢に対して Δt 秒後のセンサの姿勢の変化は、 $[\tau]$ と同様のテンソルで示せるから、これを $[\kappa]$ と書く。今、 Δt ごとの区切りを 1 ティックとすると n ティック後 ($n \times \Delta t$ 秒後) の姿勢変化テンソル $[\kappa_n]$ は、

$$[\kappa_n] = [\kappa_{n-1}] \times [\kappa_{n-1}] \times [\kappa_{n-1}] \times \dots \times [\kappa_0]$$

ここで初期のセンサ姿勢から ICE 座標への変換を加えれば、あるティック時刻 n における ICE 座標への変換テンソルは、

$$[\kappa_n] = [\kappa_{n-1}] \times [\kappa_{n-1}] \times [\kappa_{n-1}] \times \dots \times [\kappa_0] \times [\tau]$$

よってティック時刻 n におけるアイス座標の計測加速度 \vec{A}_n は、

$$\vec{A}_n = [\kappa_n] \vec{a}_n$$

である。

ただし、IMU は地球重力をも計測しているので a_z には常に $-G$ なる重力加速度が含まれている。このため、 \vec{A}_n が求まった後には、 A_z から G (重力加速度定数) を引いておく。

そして、ICE 座標での速度と位置をそれぞれ V 、 P とすれば、

$$\vec{V}_n = \sum_{k=0}^n \vec{A}_k$$

$$\vec{P}_n = \sum_{k=0}^n \vec{V}_k$$