

## 屋外における車両方位および位置の自動計測(2)

—— 位置・方位計測センサを組み合わせた方位計測精度の改善 ——

### I 実験目的

農用移動ロボットに限らず移動体の運動を記述したり、制御問題を考慮したりする場合、位置・方位情報は重要なファクターとなる。方位計測センサとしては GDS やジャイロが一般的に用いられるが、これらはそれぞれ計測原理による計測誤差が内在し、これをいかに補償するかが計測精度に影響する。一方、位置計測センサとしては、GPS や GLONASS、GALILEO、Compass、QZSS、DORIS、IRNSS といった全地球航法衛星システム (GNSS: Global Navigation Satellite System) が計画もしくは一般的に用いられるようになってきており、その精度も補正信号を用いる事により十分に屋外環境で使用できるようになってきている。そこで、本実験は各方位センサが出力する誤差を含んだ方位情報の特性を理解するとともに、これに GNSS を組み合わせることで、方位精度の改善方法について検討する。

### II 方位センサ

#### 1. 地磁気方位センサ

前回の資料を参照。

#### 2. ジャイロスコープ

ジャイロスコープとは物体の角速度を計測するセンサの一つで、地磁気方位センサのような周辺環境の影響を受けないことから、船や航空機などの航法装置として使用されている。近年では、カーナビや自動運転システム、ロボットのみならず、デジタルカメラの手ぶれ補正などにも応用されている。その計測原理は大きく、力学的な慣性力を用いるものと、光学的な干渉を用いるものに分類できる。いずれの場合においても、基本的な出力が角速度となるため、角度を求めるためには積算が必要となる。これが0点のズレ、計測装置の分解能による積算誤差(ドリフト誤差)をうむ原因となる。また、測定値が変化量であるため、出力は相対値となり、初期方位を別途求める必要がある。

##### 1) 振動ジャイロ

振動する物体が回転している場合、その回転軸に垂直な平面上で振動に対して垂直な力が発生することが物理的な基本原理となっている。

速度  $v$  で動作する質量  $m$  の物体が角速度  $\omega$  で回転した時に受けるコリオリ力  $F_c$  は、

$$F_c = -2m\omega \times v$$

となる。このとき、コリオリ力  $F_c$  は回転  $\omega$  と反対方向であり、反時計回りの時は進行方向から 90 度右向きとなる。中心となる物体にピエゾ素子などを用い、電圧を与えることで励起し、回転することによって加えられるコリオリ力を、ピエゾ素子を用いて測定することで、角速度  $\omega$  を求めること

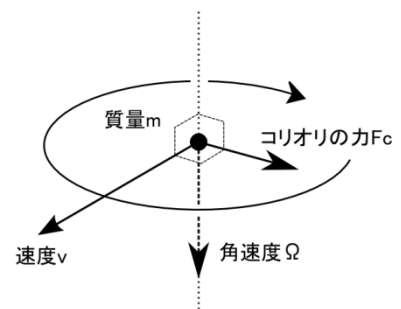


図1 コリオリ力

が可能となる。

## 2) 光ファイバージャイロ (Fiber Optic Gyro: FOG)

長距離の光ファイバーを巻き、それぞれの端面にレーザー光をスプリットして挿入する。巻いた面と垂直な軸方向を中心に角速度が加わると、相対論的効果により、分離された光に光路差が生じる(サニャック効果)。この光路差により分離された二つの光の間に位相差が生じる。この位相差を検出することにより、角速度を得るのが光ファイバージャイロである。

## 3. GNSS 位置データによる方位計測

全地球航法衛星システム(GNSS)とは、GPS や GLONASS、GALILEO、Compass、QZSS、DORIS、IRNSS といった衛星からの電波を基に地球上のどこでも正確に絶対位置を計測可能なシステムである。その精度は電離層遅延やマルチパスの影響により、単独のシステムでは10~30m程度であるが、基準局を設置したり、電波によって配信される補正信号を用いたりする事で、ディファレンシャル方式で1m以下、リアルタイムキネマティクス方式だと3cm以下の精度で測定可能である。これらの位置情報を一定周期で計測し、その差分を用いる事で、移動体の速度、方位を測定する事が可能である。

# Ⅲ GNSS を用いた方位の補正

## 1. フィルタ処理

計測したデータには様々なノイズ成分、バイアス成分が含まれるため、その中から目的とする情報を取り出すためにフィルタ処理が行われる。主に周波数領域におけるローパスフィルタやハイパスフィルタ、バンドパスフィルタ、画像処理における平滑化や微積分、局所演算処理が一般的であるが、それ以外にも様々な離散データ処理のためにフィルタが用いられている。そこで、本実験では簡便なフィルタリング処理として有効な最小自乗法と、近年様々な分野で利用されているカルマンフィルタの2手法を扱うこととする。

## 2. 最小自乗法 (Least Squares Method: LSM) を用いたセンサーフュージョン

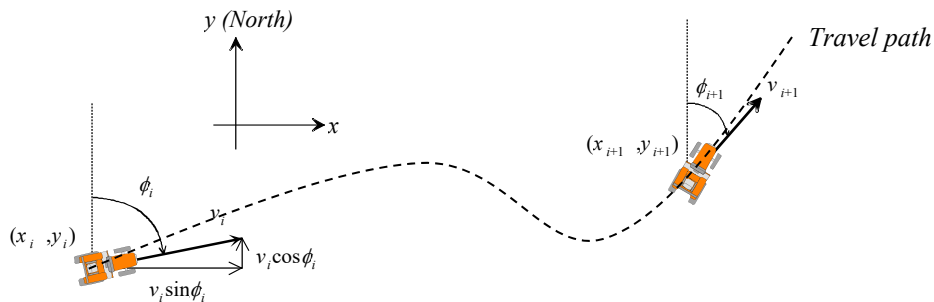


図2 運動モデル

図のような滑りを無視した運動モデルを考える。 $(x_i, y_i)$ は時刻  $i$  の GNSS 座標系における車両の重心位置、 $\phi_i$ は車両の方位、 $v_i$ は車両速度である。時刻  $i+1$  の車両の重心位置 $(x_{i+1}, y_{i+1})$ を以下の式で表す。

$$\begin{aligned}
x_{i+1} &= x_i + \int_i^{i+1} v(t) \sin \phi(t) dt \\
&\approx x_i + \frac{1}{2} v_i \Delta t (\sin \phi_i + \sin \phi_{i+1})
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
y_{i+1} &= y_i + \int_i^{i+1} v(t) \cos \phi(t) dt \\
&\approx y_i + \frac{1}{2} v_i \Delta t (\cos \phi_i + \cos \phi_{i+1})
\end{aligned} \tag{2}$$

ここで、 $\Delta t$  は時間刻みである。上式中の積分項は時刻  $i$  から  $i+1$  において連続時間で積分することを表している。また、 $v_i \approx v_{i+1}$  と仮定した。

一方、ジャイロから計測される方位角を  $\phi_{fi}$  とすると、 $\phi_i$  は以下の式で表される。

$$\phi_i = \phi_{fi} + b_i \tag{3}$$

ここで、 $b_i$  はジャイロのバイアスを表し、方位  $\phi_i$  を算出する上でジャイロの初期偏差と時間ドリフトを補償する補正值となる。この  $b_i$  を逐次求める事で、車両の絶対方位を得る事ができる。

上の運動モデルを用いて評価関数  $I_i$  を以下の式で定義する。

$$\begin{aligned}
I_i &= \sum_{k=i-N}^i \left[ \left\{ x_k - x_{k-1} - \frac{1}{2} v_k \Delta t (\sin \phi_k + \sin \phi_{k-1}) \right\}^2 \right. \\
&\quad \left. + \left\{ y_k - y_{k-1} - \frac{1}{2} v_k \Delta t (\cos \phi_k + \cos \phi_{k-1}) \right\}^2 \right]
\end{aligned} \tag{4}$$

ここで、時刻  $i$  から  $i+1$  にかけての GNSS 座標系における車両重心位置の運動をベクトルで表すと、

$$e_{P_i} = \begin{bmatrix} x_{i+1} - x_i \\ y_{i+1} - y_i \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$e_{\phi_i} = \frac{v_i \Delta t}{2} \begin{bmatrix} \sin \phi_i + \sin \phi_{i+1} \\ \cos \phi_i + \cos \phi_{i+1} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$e_{P_i}$  は位置を元に算出される運動ベクトル、 $e_{\phi_i}$  は方位を元に算出される運動ベクトルである。式(5)、(6)を用いて  $I_i$  は以下のように表す事ができる。

$$I_i = \sum_{k=i-N}^i \| e_{P_{i-1}} - e_{\phi_{i-1}} \|^2 \tag{7}$$

つまり、 $I_i$  は車両重心位置の運動ベクトルを位置、方位それぞれを元に算出し、それらのサンプリングステップ毎の差分を二乗和したものである。

最小自乗法によって推定されるジャイロバイアス  $b_i$  は、

$$\frac{dI_i}{db_i} = 0 \tag{8}$$

を満たす必要がある。また、式(4)中の  $N$  は誤差関数  $I_i$  で考慮するデータ点数であり、これは履歴時間として表すと  $N\Delta t$  となる。式(8)は履歴時間  $N\Delta t$  間のジャイロバイアスを一定と仮定したとき、 $I_i$  を最小にする  $b_i$  を求める事を意味する。 $N\Delta t$  はジャイロの時間ドリフトに合わせて調整する必要があり、適切な  $N\Delta t$  を選定することで精度の高いバイアス推定を可能とする。

式(4)に式(3)を代入すると、

$$\begin{aligned}
I_i = & \sum_{k=i-N}^i \{dx_k^2 + dy_k^2 + S_k^2 + C_k^2 \\
& - 2(dx_k S_k + dy_k C_k) \cos b_i \\
& + 2(-dx_k C_k + dy_k S_k) \sin b_i\}
\end{aligned} \tag{9}$$

を得る。ただし、

$$dx_k = x_k - x_{k-1} \tag{10}$$

$$dy_k = y_k - y_{k-1} \tag{11}$$

$$S_k = \frac{1}{2} v_k \Delta t (\sin \phi_{f_k} + \sin \phi_{f_{k-1}}) \tag{12}$$

$$C_k = \frac{1}{2} v_k \Delta t (\cos \phi_{f_k} + \cos \phi_{f_{k-1}}) \tag{13}$$

とおいた。

式(8)に式(9)を代入して、

$$\begin{aligned}
\frac{dI_i}{db_i} = & 2 \sin b_i \sum_{k=i-N}^i (dx_k S_k + dy_k C_k) \\
& - 2 \cos b_i \sum_{k=i-N}^i (-dx_k C_k + dy_k S_k) \\
= & 0
\end{aligned} \tag{14}$$

となり、式(14)から  $b_i$  は式(16)によって計算することができる。

$$\begin{aligned}
\tan b_i = & \frac{\sum_{k=i-N}^i (dx_k C_k - dy_k S_k)}{\sum_{k=i-N}^i (dx_k S_k + dy_k C_k)} \\
b_i = & \begin{cases} \operatorname{atan} \frac{\sum_{k=i-N}^i (dx_k C_k - dy_k S_k)}{\sum_{k=i-N}^i (dx_k S_k + dy_k C_k)} \\ \operatorname{atan} \frac{\sum_{k=0}^i (dx_k C_k - dy_k S_k)}{\sum_{k=0}^i (dx_k S_k + dy_k C_k)} \end{cases}
\end{aligned} \tag{16}$$

### 3. カルマンフィルタ

カルマンフィルタはノイズを含む観測地から状態量を推定するフィルタアルゴリズムの一つで、その利便性から近年様々な分野で応用されている。本実験で使用する一体型センサの方位角計測にも利用されている。詳細は省略する。

## IV 実験方法

### 1. 静的な方位センサの計測

トラクタ上部に地磁気方位センサ、ジャイロスコープ、GNSS 一体型センサ Topcon AGI-3 を取り付け、約1分間静止させた状態で各センサ出力を記録する。

- 各人保存したデータファイルを Excel で開き、IMU データ (\$PTPSR,IS)、姿勢データ (\$PTPSR,ATT2)、位置データ (\$GPGGA)、方位・速度データ (\$GPVTG)を確認する。  
( \$GPGGA、\$GPVTG は \$GNGGA、\$GNVTG の場合もある。)
- 出力データから同時刻の地磁気方位センサ方位角  $\phi_{GDS}$ 、ジャイロ方位角  $\phi_{Gyro}$ 、GNSS 方位角  $\phi_{GNSS}$ 、フィルタ方位角  $\phi_{Kalman}$  を時系列データとしてまよめよ。
- 時間変化と各方位角の時系列変化をグラフにまとめ、それぞれの特徴について考察せよ。

### 2. 動的な方位センサの計測

トラクタ上部に地磁気方位センサ、ジャイロスコープ、GNSS 一体型センサ Topcon AGI-3 を取り付け、走行速度 0.5m/s 程度で直線やランダムな走行を行う。

- 各人保存したデータファイルを Excel で開き、IMU データ (\$PTPSR,IS)、姿勢データ (\$PTPSR,ATT2)、位置データ (\$GPGGA)、方位・速度データ (\$GPVTG)を確認する。  
( \$GPGGA、\$GPVTG は \$GNGGA、\$GNVTG の場合もある。)
- 出力データから同時刻の地磁気方位センサ方位角  $\phi_{GDS}$ 、ジャイロ方位角  $\phi_{Gyro}$ 、GNSS 方位角  $\phi_{GNSS}$ 、フィルタ方位角  $\phi_{Kalman}$  を時系列データとしてまよめよ。
- 時間変化と各方位角の時系列変化をグラフにまとめ、それぞれの特徴について考察せよ。
- 静的な方位センサ出力と動的な方位センサ出力を比較することで、それぞれの特徴を考察せよ。

### 3. LSMを用いたジャイロのバイアス推定

動的な方位センサの計測で得られたジャイロ方位角  $\phi_{Gyro}$  (=  $\phi_i$ ) に存在するバイアス値  $b_i$  を、LSM を用いて推定する。

- サンプル数  $N$  は5~10程度で各自適当に設定し、位置データ ( $x_i, y_i$ ) は \$GPGGA から得られるデータを UTM 変換して、速度データは \$GPVTG から得られるデータを用いて、時刻毎のジャイロのバイアス値  $b_i$  を求めよ。また、その時系列変化をグラフに示せ。
- 求めたバイアス値  $b_i$  から、時刻毎の補正後のジャイロ方位角  $\phi_{Gyro}'$  (=  $\phi_i$ ) を求めよ。またこれをフィルタ方位角  $\phi_{Kalman}$  とともに時系列変化をグラフに示し、それぞれの特徴について考察せよ。

レポートの提出は、1班は 月 日 ( ) 16:30、2班は 月 日 ( ) 16:30 まで。S264 生物生産応用工学研究室に提出すること。メールでの提出も可だが、1つのワードファイルもしくは PDF にまとめること。計算がわかりにくい場合は質問に来ること。

## AGI-3 NMEA-0183 メッセージ

### 〔\$GPGGA〕 Global Positioning System Fix Data

例, GGA,123519.00,4807.038247,N,01131.324523,E,1,08,0.9,545.42,M,46.93,M,5.0,1012\*42

123519.00	= 測位時刻 (UTC) 12:35:19.00
4807.038247,N	= 緯度 48 度 07.038247 分 (北緯)
01131.324523,E	= 経度 11 度 31.324523 分 (東経)
1	= GPS のクオリティ; 0 = 受信不能, 1 = 単独測位, 2 = DGPS
08	= 受信衛星数
0.9	= HDOP
545.42, M	= 平均海水面からのアンテナ高度 (m)
46.93, M	= WGS-84 楕円体から平均海水面の高度差 (m)
5.0	= DGPS データのエッジ (秒)
1012	= DGPS 基準局の ID
*42	= チェックサム

### 〔\$GPVTG〕 Course Over Ground and Ground Speed

例, VTG,010.0,T,016.5,M,002.5,N,004.8,K,A\*4D

010.0,T	= 真北に対する進行方向 (度)
016.5,M	= 磁北に対する進行方向 (度)
002.5,N	= 対地速度 (ノット)
004.8,K	= 対地速度 (km/h)
A	= モード; A = 単独測位, D = DGPS, N = 無効
*4D	= チェックサム

### 〔\$PTPSR,IS〕

例, PTPSR,IS,V,281093.01,-0.58877,0.58186,0.23020,-0.343,-0.380,-11.326\*27

V	= 測位時刻表示 (UTC)
281093.01	= 位置の測位時刻 (UTC) 28:10:93.01
-0.58877	= ヨー角速度 (rad/s)
0.58186	= ピッチ角速度 (rad/s)
0.23020	= ロール角速度 (rad/s)
-0.343	= y 軸加速度 (m/s)
-0.380	= x 軸加速度 (m/s)
-11.326	= z 軸加速度 (m/s)
*27	= チェックサム

### 〔\$PTPSR,ATT2〕

例, PTPSR,ATT2,V,279235.90,79.049,-4.362,11.334,86,127,1\*7D

V	= 測位時刻表示 (UTC)
279235.90	= 位置の測位時刻 (UTC) 28:10:93.01
79.049	= カルマンフィルタ方位角 (度)
-4.362	= ロール角 (度)
11.334	= ピッチ角 (度)
86,127	= 地磁気方位センサ方位角 (度)
1	= ベース位置タイプ
*7D	= チェックサム