カルマンフィルタによる推測航法システムにおけるジャイロゲイン推定に関する検討

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 新谷, 敏弘, 中山, 謙二, 平野, 晃宏, 谷野, 英樹, 鶴見, 潔, 浅田, 博重 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/18187

第22回 信号処理シンポジウム
2007年11月7日〜9日（仙台）

カルマンフィルタによる推測航法システムにおける ジャイロゲイン推定に関する検討

On Gyro-Gain Estimation in Dead Reckoning Navigation System Using Kalman Filter

新谷敏弘 † 中山謙二 † 平野晃宏 †
谷野英樹 ‡ 鶴見 潔 ‡ 浅田博重 §

† 金沢大学大学院 自然科学研究科 電子情報工学専攻
‡ 株式会社デンソー ITS 開発部
§ 株式会社デンソー 情報安全システム開発部

Toshihiro SHINGAI† Kenji NAKAYAMA† Akihiro HIRANO†
Hideki TANINO‡ Kiyoshi TSURUMI‡ Hiroshige ASADA§

†Division of Electronics and Computer Science
Graduate School of Natural Science and Technology,Kanazawa Univ.
E-mail: nakayama@t.kanazawa-u.ac.jp
‡DENSO CORP. ITS R&D Dept.
§DENSO CORP. Information & Safety Systems R&D Dept.

アブストラクト

本稿では推測航法とカルマンフィルタを組み合わせる航法システム [1]，[3] において，ジャイロの換算ゲインが誤差を含むような場合であっても，装置構成を複雑化することなくジャイロの出力から方位変化量を安定して精度よく推定する方法について検討する．車速センサ，ジャイロでの検出値から移動距離演算部，方位変化量演算部にて算出される移動距離，方位変化量に基づき，相対軌跡演算部，絶対位置演算部が算出する推測航法データ (車速，絶対方位，絶対位置) と，GPS 受信機からの GPS 測位データ (速度，方位，位置) との差を観測値とするカルマンフィルタを備え，その状態量の一つとして，ジャイロ出力から角速度への変換ゲインの誤差 (ゲイン誤差) を設定する．このカルマンフィルタにより求められるゲイン誤差の推定値により，ジャイロ出力及び変換ゲインを用いて算出された方位変化量を補正する．

Abstract

In a navigation system which combines the dead reckoning and the Kalman filter, an approach to presuming the amount of the azimuth change with high accuracy from the gyro output is developed. The gyro contains some error in a conversion gain, which converts the gyro output into the angular velocity. In the Kalman filter, observation values are differences between the dead reckoning data and the GPS measurement data, and the inputs include the error of the conversion gain. By using the gain error estimated by the Kalman filter, the amount of the azimuth change, which is calculated by using the gyro output and the conversion gain, is corrected.

1 はじめに

従来，車載用ナビゲーション装置では，相対方位センサと距離センサの出力から，車両の位置・方位・車速等を検出する推測航法が用いられている．特に車両の進行方向等を検出するためのセンサの一つとして，コストや精度面に有利なジャイロスコープ (以下，ジャイロ) が用いられている．

このジャイロは，図 1 のグラフに示されるように，定められた検出軸回りの回転角速度に比例した出力 (電圧等) を発生するように構成されており，ジャイロの出力から回転角速度への換算比率 (即ちグラフの傾き) を表すために予め設定された比例定数 (以下，換算ゲイン) を用いて，ジャイロの出力を回転角速度に変換し，この変換値を積算することにより車両の方位変化量を求めることができる．ジャイロは，予め定められた検出軸を中心とする回転についての角速度を検出するが，センサ特性にばらつ

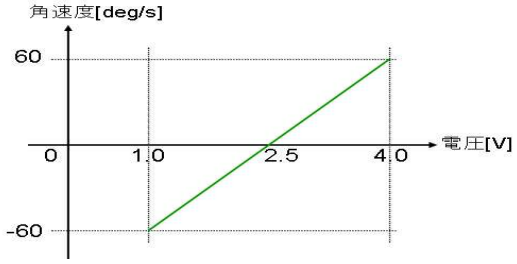

図 1: ジャイロの電圧特性

きがあり，また，常に変動するため予め設定された換算ゲインが実際の換算比率と異なってしまい，換算ゲインが誤差 (以下，ゲイン誤差) を有することになる．このようにゲイン誤差が含まれていると，方位変化量に誤差が生じる．その結果，現在位置の検出精度が低下するため，ナビゲーション装置は的確な案内を行うことができなくなる．

本稿では，ジャイロがゲイン誤差を含むような場合であっても，装置構成を複雑化することなく，ジャイロの出力から方位変化量を安定して精度良く求めることが可能な方法を検討する．

2 ナビゲーション装置の構成

本稿ではナビゲーション装置として，図 2 のように構成されるシステムを用いる．車速に応じた間隔でパルス信号を出力する車速センサと，車両に加わる回転運動の角速度に応じた検出信号を出力するジャイロと，GPS(Global Positioning System) 信号を用いて車両の位置，方位 (進行方向)，速度等を検出する GPS 受信機と，車速センサ，ジャイロ，GPS 受信機からの出力に基づいて車両の現在位置や進行方向等，推測航法を行うためのデータを検出する現在位置検出部と，現在位置検出部での検出結果に基づき，表示画面の地図上に自車両の位置を表示したり，設定された目的地までの経路案内等を行うナビゲーション実行部を備えている．

現在位置検出部は，車速センサからのパルス信号に基づいて車両の移動距離を算出する移動距離演算部とジャイロからの検出信号に基づいて方位変化量を算出する方位変化量演算部と，算出された移動距離と方位変化量に基づいて，相対軌跡及び車速を算出する相対軌跡演算部を備えている．さらに，絶対方位及び絶対位置を算出する絶対位置演算部と，相対軌跡演算部と絶対位置演算部での算出値と GPS 受信機での検出値との差を観測値とし，車速，方位，位置の算出に使用する各種パラメータや算出結果の誤差を状態量として，その状態量の推定値を求めるカルマンフィルタからなる誤差推定部と，誤差推定部により算出された状態量 (誤差) の推定値に従って，各演算部での算出パラメータや算出値を補正する補正部を備えている．

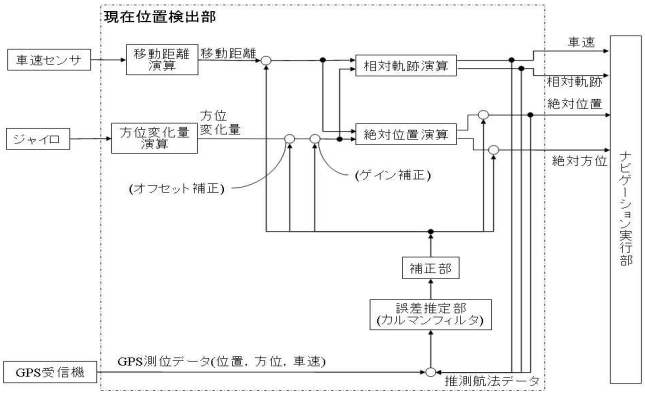

図 2: ナビゲーション装置の構成

3 カルマンフィルタ

3.1 カルマンフィルタの概要

本稿では推測航法と GPS との複合化を図るため，カルマンフィルタ [2] を用いている．この章ではカルマンフィルタの概要について述べる．

カルマンフィルタにおいては，推定したい誤差信号を状態量 $\boldsymbol{x}$ とする．状態量は次の状態方程式により更新される．

$$\boldsymbol{x}(t+1) = \boldsymbol{A}(t+1,t)\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{v}(t) \tag{1}$$

$\boldsymbol{x}(t)$ ：状態量：推測航法における誤差
$\boldsymbol{A}(t+1,t)$ ：状態遷移行列
$\boldsymbol{v}(t)$ ：状態量生成過程で発生する雑音

さらに観測過程を次のように示す．

$$\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{w}(t) \tag{2}$$

$\boldsymbol{y}(t)$ ：観測信号
$\boldsymbol{C}(t)$ ：観測行列
$\boldsymbol{w}(t)$ ：観測過程で発生する雑音

式 (1)，(2) の関係をシグナルフローグラフで表すと図 3 のようになる．

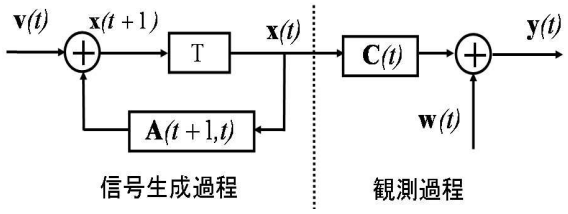

図 3: カルマンフィルタのシグナルフローグラフ

3.2 観測信号から状態量の推定

カルマンフィルタでは，観測信号を用いて次のような巡回計算により状態量を最小二乗推定する．

$$\boldsymbol{P}(t|t-1) = \boldsymbol{A}(t|t-1)\boldsymbol{P}(t-1|t-1)\boldsymbol{A}^T(t|t-1)+\boldsymbol{V}(t) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{G}(t) = \boldsymbol{P}(t|t-1)\boldsymbol{C}^T\{\boldsymbol{C}\boldsymbol{P}(t|t-1)\boldsymbol{C}^T + \boldsymbol{W}(t)\}^{-1} \tag{4}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(t|\boldsymbol{y}_{t-1}) = \boldsymbol{A}(t|t-1)\hat{\boldsymbol{x}}(t-1|\boldsymbol{y}_{t-1}) \tag{5}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(t|\boldsymbol{y}_t) = \hat{\boldsymbol{x}}(t|\boldsymbol{y}_{t-1}) + \boldsymbol{G}(t)\{\boldsymbol{y}(t) - \boldsymbol{C}\hat{\boldsymbol{x}}(t|\boldsymbol{y}_{t-1})\} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{P}(t|t) = \boldsymbol{P}(t|t-1) - \boldsymbol{G}(t)\boldsymbol{C}\boldsymbol{P}(t|t-1) \tag{7}$$

ただし，$\boldsymbol{G}(t)$ はカルマンゲイン，$\boldsymbol{P}(t|t-1)$ は状態量 $\boldsymbol{x}$ の誤差共分散の予測値，$\boldsymbol{P}(t|t)$ は誤差共分散，$\boldsymbol{V}(t)$ は雑音 $\boldsymbol{v}(t)$ の共分散行列，$\boldsymbol{W}(t)$ は雑音 $\boldsymbol{w}(t)$ の共分散行列を表す．

カルマンフィルタでは，推測航法における誤差を状態量として，観測信号から推定する．この誤差の推定値を推測航法にフィードバックして補正することにより，式 (5) に示す事前推定値 $\hat{\boldsymbol{x}}(t|\boldsymbol{y}_{t-1})$ を零と仮定できる．従って式 (6) は次のように変形できる．

$$\hat{\boldsymbol{x}}(t|\boldsymbol{y}_t) = \boldsymbol{G}(t)\boldsymbol{y}(t) \tag{8}$$

4　推測航法のモデル化とカルマンフィルタの定式化

本稿では，カルマンフィルタを推測航法へ適用している．本節では，カルマンフィルタ定式化のために，推測航法のモデル化，それによる状態量と観測信号の設定，及び，状態方程式と観測方程式の設定を行う．

自動車のセンサが出力する情報を基に車両の位置・方位・車速を求める推測航法は，以下の 4 つの部位から構成される．

ジャイロ	：車両の方位変化量を検出する．
車速センサ	：車両の速度を検出する．
相対軌跡演算部	：ジャイロと車速センサから求められた情報を基に相対方位と相対位置座標を求める．
絶対位置演算部	：ジャイロと車速センサから求められた情報を基に絶対方位と絶対位置座標を求める．

4.1　信号生成過程のモデル化

推測航法のカルマンフィルタは，状態量 $\boldsymbol{x}$ として以下の 6 つの誤差を用いる．

1. オフセット誤差 (ϵG)

$$\epsilon G_t = \epsilon G_{t-1} + \epsilon_0 \tag{9}$$

2. ゲイン誤差 (ϵS)

$$\epsilon S_t = \epsilon S_{t-1} + \epsilon_1 \tag{10}$$

3. 絶対方位誤差 ($\epsilon\theta$)

$$\epsilon\theta_t = T{\cdot}\epsilon G_{t-1} + D{\cdot}\epsilon\theta_{t-1} + \epsilon_2 \tag{11}$$

4. 距離係数誤差 (ϵK)

$$\epsilon K_t = \epsilon K_{t-1} + \epsilon_3 \tag{12}$$

5. 絶対方位北方向誤差 (ϵY)

$$\epsilon Y_t = sin(\theta){\cdot}L{\cdot}(1-\epsilon K_{t-1}) - sin(\theta_T){\cdot}L + \epsilon Y_{t-1} \tag{13}$$

6. 絶対方位東方向誤差 (ϵX)

$$\epsilon X_t = cos(\theta){\cdot}L{\cdot}(1-\epsilon K_{t-1}) - cos(\theta_T){\cdot}L + \epsilon X_{t-1} \tag{14}$$

ただし

$$\theta = \theta_T + \epsilon\theta_{t-1} + T{\cdot}\epsilon G_{t-1}/2 + D{\cdot}\epsilon S_{t-1/2}$$

ここで

θ_T	：真の絶対方位
D	：前回からの方位変化量
L	：前回からの移動距離
T	：前回からの経過時間

θ は真の絶対方位 θ_T にセンサ誤差が加わったものであり，方位変化量から求められる絶対方位 θ とする．

式 (9) から式 (14) の各式を状態量で偏微分すると，状態量生成過程は次のように表される．

$$\boldsymbol{x}(t+1) = \boldsymbol{A}(t+1,t)\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{v}(t)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon G_{t+1} \\ \epsilon S_{t+1} \\ \epsilon\theta_{t+1} \\ \epsilon K_{t+1} \\ \epsilon Y_{t+1} \\ \epsilon X_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T & D & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ cos(\theta){\cdot}T{\cdot}L/2 & cos(\theta){\cdot}D{\cdot}L & cos(\theta){\cdot}L & sin(\theta){\cdot}L & 1 & 0 \\ -sin(\theta){\cdot}T{\cdot}L/2 & -sin(\theta){\cdot}D{\cdot}L & -sin(\theta){\cdot}L & cos(\theta){\cdot}L & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon G_t \\ \epsilon S_t \\ \epsilon\theta_t \\ \epsilon K_t \\ \epsilon Y_t \\ \epsilon X_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \epsilon_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{15}$$

ϵ_0 はオフセット雑音 (温度ドリフト等によるオフセットの変動分)，ϵ_1 は，ゲイン雑音 (温度ドリフト等によるジャイロゲインの変動分)，ϵ_2 は絶対方位雑音 (ジャイロのクロスカップリング等による変動分)，ϵ_3 は距離係数雑音 (速度センサの経年変化による変動分) を意味する．

4.2　観測過程のモデル化

観測値は推測航法の出力と，GPS の出力の差により求める．それぞれの出力には誤差が含まれるため，観測値において推測航法の誤差と GPS の誤差の和が得られる．この観測値 $\boldsymbol{y}$ と状態量 $\boldsymbol{x}$ を関係付け，以下のようにモデル化する．

$$\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{v}(t)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon\theta_{DRt} - \epsilon\theta_{GPSt} \\ \epsilon K_{DRt} - \epsilon K_{GPSt} \\ \epsilon Y_{DRt} - \epsilon Y_{GPSt} \\ \epsilon X_{DRt} - \epsilon X_{GPSt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon G_t \\ \epsilon S_t \\ \epsilon\theta_t \\ \epsilon K_t \\ \epsilon Y_t \\ \epsilon X_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\epsilon\theta_{GPSt} \\ -\epsilon K_{GPSt} \\ -\epsilon Y_{GPSt} \\ -\epsilon X_{GPSt} \end{bmatrix} \tag{16}$$

ここで，添字の DRt は時刻 t において車速センサ，ジャイロからの信号に基づく推測航法にて求められた値を意味し，GPSt は時刻 t において GPS から出力される値を意味する．

4.3 観測信号の設定

式 (16) における $\epsilon\theta_{DRt} - \epsilon\theta_{GPSt}$ は，推測航法により求められた絶対方位と GPS から出力される方位の差，つまり推測航法により求められた絶対方位には真の絶対方位と，誤差 $\epsilon\theta_{DRt}$ が含まれており，GPS から出力される方位には真の絶対方位と，誤差 $\epsilon\theta_{GPSt}$ が含まれているため，それらの差を取ることにより，$\epsilon\theta_{DRt} - \epsilon\theta_{GPSt}$ が得られる．同様に，$\epsilon K_{DRt} - \epsilon K_{GPSt}$ は，推測航法により求められる速度と，GPS から出力される速度の差から求まる距離係数誤差である．また，$\epsilon Y_{DRt} - \epsilon Y_{GPSt}$，$\epsilon X_{DRt} - \epsilon X_{GPSt}$ は，それぞれ推測航法により求められる絶対位置と，GPS から出力される絶対位置の，X 成分，Y 成分の誤差の差である．

4.4 観測過程で発生する雑音

式 (16) における，観測過程で発生する雑音 $\boldsymbol{v}$ は GPS の雑音であり，以下のように定義される．

GPS における疑似距離の計測誤差 (UERE) と HDOP(Horizontal Dilution of Presision) の関係により測位精度が，UERE × HDOP で求められ，この測位精度を 2 乗することにより，ϵY_{GPSt}，ϵX_{GPSt} が求められる．

また，ドップラー周波数の計測誤差と HDOP の関係より速度精度が，ドップラー周波数の計測誤差× HDOP で求められ，速度精度/車速にて距離係数誤差が求められ，これを 2 乗することにより ϵK_{GPSt} が求められる．

さらに，車両の速度 V_c と速度精度から方位精度が tan^{-1}(速度精度/V_c) で求められ，この方位精度を 2 乗することにより $\epsilon\theta_{GPSt}$ が求められる．よって，カルマンフィルタでの演算を実行することにより，状態量生成過程にて定義された 6 つの誤差値による状態量 $\boldsymbol{x}$ が求められ，これらにより車速センサの距離係数補正，ジャイロのオフセット補正，ゲイン補正，更には絶対位置補正，絶対方位補正が行われる．

5 ナビゲーション装置の演算フロー

これまで述べてきた相対軌跡演算，絶対位置演算，カルマンフィルタによる演算はマイクロコンピュータによる演算処理にて行われる．以下にこれについて説明する．ただし，これらの処理は，一定周期 T_M で繰り返し実行されるものとする．

5.1 メインルーチンの演算処理

相対軌跡演算，絶対位置演算，カルマンフィルタによる処理は，図 4 に示す流れにより，相対軌跡演算，絶対位置演算を行った後に，カルマンフィルタを用いて推測航法と GPS との複合化処理を行い，カルマンフィルタにて推定した推測航法誤差を補正し，推定精度を上げる．

図 4: 推測航法のメインルーチンの演算処理

5.2 方位変化量・移動距離の演算処理

まず，ジャイロの出力角を基に方位変化量を算出する．

方位変化量＝ジャイロ出力角速度× T_M (17)

なお，ジャイロ出力角速度は，図 1 のグラフから明らかなように，ジャイロの出力をサンプリングした値から，オフセット値 (図 1 では 2.5V) を減じたものに，変換ゲイン (グラフの傾きに相当) を乗じることにより算出されたものである．次に，方位変化量のオフセット補正を行う．

方位変化量＝方位変化量－オフセット補正量× T_M(18)

即ち，図 5 に示すように，角速度 0[deg/sec] に対応するジャイロの出力電圧 (ゼロ点) の変動に基づく誤差を補正する．次に，方位変化量のゲイン補正を行う．

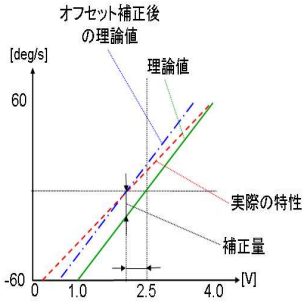

図 5: ジャイロのオフセット補正

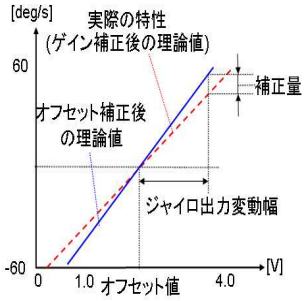

図 6: ジャイロのゲイン補正

方位変化量＝方位変化量×ゲイン補正量 (19)

即ち，図 6 に示すように，グラフの傾き (変換ゲイン) の変動に基づく誤差を補正する．

そして，車速センサパルス数を基に移動距離を算出して，方位変化量，移動距離演算処理を終了する．

移動距離＝車速センサパルス数×距離係数 (20)

5.3 相対軌跡の演算処理

まず式 (19) にて求めた方位変化量を基に，相対方位を更新する．

相対方位＝相対方位＋方位変化量 (21)

次に，式 (23) にて更新した相対方位と式 (20) にて求めた移動距離により，相対位置座標の更新を行う．

$$rel.x = rel.x + \text{移動距離} \times cos(\theta s)$$
$$rel.y = rel.y + \text{移動距離} \times sin(\theta s) \quad (22)$$

ただし，θs は相対方位である．この更新は，移動距離に対する相対方位の X，Y 成分をそれまでの相対位置座標に加算することにより行う．この相対位置座標は相対軌跡を求めるために算出するもので，その相対軌跡と道路形状との関係により，マップマッチングが行われる．

そして，式 (20) にて求めた移動距離を基に車速を算出して，相対軌跡演算処理を終了する．

車速＝移動距離/T_M (23)

5.4 絶対方位・絶対位置の演算処理

まず，式 (19) にて求めた方位変化量を基に，絶対方位を更新する．

絶対方位＝絶対方位＋方位変化量 (24)

次に，式 (24) にて更新した絶対方位と式 (20) にて求めた移動距離により，絶対位置座標の更新を行う．

$$abs.x = abs.x + \text{移動距離} \times cos(\theta)$$
$$abs.y = abs.y + \text{移動距離} \times sin(\theta) \quad (25)$$

ただし，θ は絶対方位である．

ここで更新された絶対方位 θ と絶対位置は後の GPS との複合化処理にて利用される．

5.5 GPS との複合化処理

GPS との複合化処理処理を図 7 に示す．

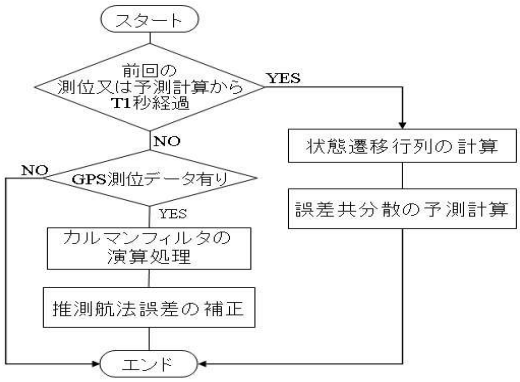

図 7: GPS との複合化処理

まず，前回の測位または予測計算から T1 秒経過したか否かを判定する．判定が NO になると，次に GPS からの測位データがあるか否かを判定する．GPS からの測位データがあると，カルマンフィルタの演算処理に進む．

そして，カルマンフィルタの演算処理により状態量$\boldsymbol{x}$を求めた後に，状態量 $\boldsymbol{x}$ に含まれる 6 つの誤差により，以下に示す推測航法誤差の補正が行われる．

$$\text{オフセット補正量} = \text{オフセット補正量} - \epsilon G \quad (26)$$

$$\text{ゲイン補正量} = \text{ゲイン補正量} \times (1 - \epsilon S) \quad (27)$$

$$\text{距離係数} = \text{距離係数} \times (1 - \epsilon K) \quad (28)$$

$$\text{絶対方位} = \text{絶対方位} - \epsilon\theta \quad (29)$$

$$abs.y(\text{絶対位置}) = abs.y - \epsilon Y$$
$$abs.x(\text{絶対位置}) = abs.x - \epsilon X \quad (30)$$

式 (26) のジャイロのオフセット補正により，式 (18) で用いられるオフセット補正量が修正され，式 (27) のゲイン補正により，式 (19) で用いられるゲイン補正量が修正され，式 (28) の車速センサの距離係数補正により，式 (20) にて用いられる距離係数が修正され，式 (29) の絶対方位補正により，式 (24) にて用いられる絶対方位 θ が修正され，式 (30) の絶対位置補正により，式 (25) にて用いられる絶対位置が修正される．

上記の処理を GPS からの測位データがある毎に繰り返し行い，誤差修正を行って，より正確な推測航法データを得ることができる．

また，GPS の測位データが長時間 (T1 秒以上) 得られなかった場合，状態遷移行列$\boldsymbol{A}$の計算と誤差共分散$\boldsymbol{P}$の予測計算を行う．これは，GPS 測位データが得られない場合，何も補正を行わないと誤差が大きくなってしまうため，誤差共分散$\boldsymbol{P}$の見積りだけは定期的に行っておくことにより，その後に GPS 測位データが得られた時に行われるカルマンフィルタの処理を正確に行えるようにするためのものである．

以上，説明したように，本稿のナビゲーション装置においては，ジャイロのゲイン誤差をカルマンフィルタにより推定して，ジャイロの出力に基づいて算出される方位変化量をゲイン補正するようにされている．従って，本稿のナビゲーション装置によれば，ジャイロの経年変化があったり，ジャイロが傾斜した状態で車両に取り付けられる等して，予め設定された換算ゲインが，実際の換算比率と異なってしまった場合でも，これに基づく誤差を補償でき，方位変化量，ひいては車両の現在位置や進行方向 (方位) を精度良く求めることができる．

6 ジャイロケイン推定法の改善

6.1 従来法の問題点

従来法は図 1 に示すようにジャイロが左右共通したゲイン特性を持つ場合を対象にしている．すなわち，直進時も左右の旋回時も同じ方式で連続的にゲイン補正量の推定を行っている．しかし，ジャイロは一般に図 8 に示すように，左右異なるゲイン特性を有する．このような場合，従来法では，例えば，左旋回（ゲイン=1.1）→右旋回（ゲイン=0.9）のようにゲインが大きく変化する場合に推定が追いつかないという問題がある．

6.2　走行状態に応じたゲイン推定法の改善

本稿では，走行状態に応じてゲイン推定を切り替える方式を提案する．ジャイロのゲインは直進に対してほぼ 1 であり，左旋回に対して 1 以上，右旋回に対して 1 以下である．従って，走行状態が変化したときに，以前の同じ走行状態で推定していたゲインを初期値としてゲイン推定を開始することにより，推定に要する時間を短縮でき，推定精度も向上させることができる．本稿で提案する方式を要約すると次のようになる．

ステップ 1: 現在，推定しているゲイン補正量を保存する．

ステップ 2: 走行状態の変化を検出する．
直進の判定：過去 3 秒間の方位変化量 (オフセット・ゲイン補正後の値) が 10deg/sec より小さい場合．
直進→旋回の判定：過去 1 秒間の方位変化量 (オフセット・ゲイン補正前の値) が 10 deg/sec 未満で，その時刻の方位変化量が 10deg/sec より大きい場合．

ステップ 3: 走行状態に応じて，直進の場合はゲイン=1 にリセット，旋回の場合は，以前の同じ走行状態で保存してあったゲイン補正量を初期値として推定を行う．

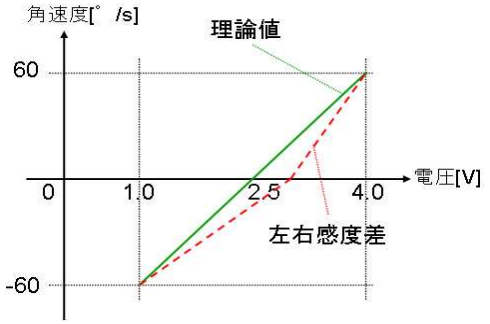

図 8: 左右異なるゲイン特性を持つジャイロ

7　シミュレーション

7.1　シミュレーション条件

走行条件として，0km/h から 45km/h へ加速し，その後定速で左右の旋回を交互に 2 回繰り返すように設定した．また，ジャイロのゲインとしては左方向:1.1 倍，右方向:0.9 倍と設定した．

7.2　シミュレーション結果とその考察

従来法におけるジャイロのオフセット誤差と補正量の関係，ゲイン誤差と推定値の関係の結果を図 9 に，提案法における結果を図 10 に示す．

従来法では直進時のゲイン推定のずれの影響を旋回時に受け，正しいゲイン推定ができていないが，提案法では直進時にゲイン補正量をリセットし，さらに旋回開始時に，前回の旋回時に保存していたゲイン補正量を用いることにより，うまくゲイン推定できている．また，従来法ではオフセット誤差とゲイン誤差の分離がうまくできておらず，旋回時のゲイン推定のずれをオフセット誤差として認識してしまい，旋回時にオフセット補正量が大きく真値からずれてしまっていたが，提案法では改善され，旋回時のオフセット補正量のずれをかなり抑制することができた．

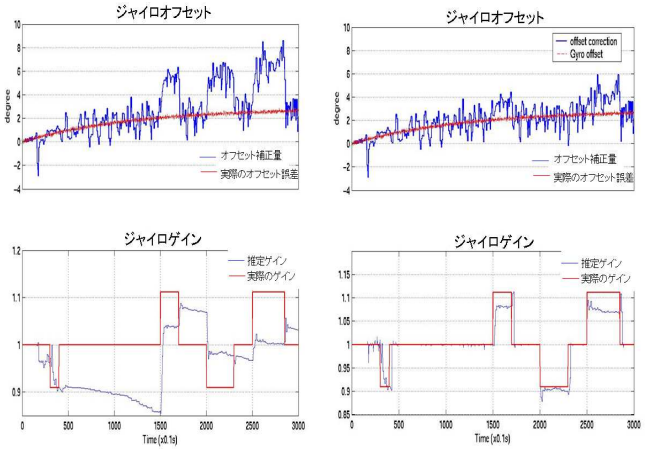

図 9: 従来法　　図 10: 提案法

8　まとめ

本稿では，ジャイロが左右異なるゲイン誤差を持つ場合において，直進時にゲインを 1 にリセットする処理，及び方位変化時のゲイン補正量を保存し，再び同じ方向に方位変化したときに，保存したゲイン補正量を初期値として推定する処理を導入した．その結果，従来法よりもオフセット誤差推定精度，ゲイン誤差推定精度を向上させることができた．

今後の課題として，今回提案した方式では走行時間が長くなり，旋回回数を重ねるにつれ，ゲイン誤差推定の精度が低下してしまう問題があったが，これについて改善していくことが挙げられる．また，今回はジャイロのゲインに雑音を乗せなかったが，実際の環境ではジャイロのゲインにも雑音が乗り，ゲイン特性も変化するので，今後，実際の環境特性に近付けることも課題となる．

参考文献

[1] Larry J.Levy,“The Kalman Filter: Navigation’s Integration Workhorse” *http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/Levy1997/index.html*, 1997

[2] S.Haykin,“Adaptive Filter Theory” , Sep., 2001

[3] Isaac Skog and Peter Handel,“A Low-Cost GPS Aided Inertial Navigation System For Vehicle Applications” *Proc. 13th European Signal Processing Conference: EUSIPCO’2005, Antalya, Turkey*, Sep., 2005