加速度誤差分離に基づくビークル走行軌跡・姿勢角推定 アルゴリズムの開発*

高畑 健二^{*1}, 松原 武徳^{*2}, 奥出 宗重^{*3}

Development of Vehicle Trajectory and Attitude Estimation Algorithm Based on Acceleration Error Separation

Kenji TAKAHATA^{*4}, Takenori MATSUBARA and Muneshige OKUDE

^{*4} Product Development Department, Churyo Engineering Co., Ltd.,
22-6 Ryuugu-cho, Minato-ku, Nagoya-shi, Aichi, 455-0022 Japan

Various methods to estimate a vehicle trajectory and attitude using the Global Positioning Systems (GPS) and Inertial Measurement Unit (IMU) are proposed ordinary. The features of this research are the real-time GPS-IMU fusion based on the discrete-time Kalman filter described by a simplified linear state equation. A method to simplify the state equation is based on the precise vehicle position data measured by GPS and the acceleration error caused by vehicle attitude error estimated by Kalman filter. The additional method to simplify the state equation is to remove the coordinate transformation from the state equation. The vehicle trajectory is estimated correctly by the specific force cancelled the acceleration error from the measured data and the vehicle attitude is estimated correctly by the orthogonal geometry between specific force and acceleration error. This paper describes the vehicle trajectory and attitude estimation method by the above acceleration error separation and the practical evaluation results about this trajectory and attitude estimator simultaneously.

Key Words: Sensor, Sensor Fusion, Measurement, GPS, IMU, Kalman Filter, Vehicle Trajectory, Attitude

1. 緒 言

従来から運動体の姿勢角測定は Attitude Heading Reference System (AHRS)等が使用されてきたが、精度を上げるために高精度（高価）なセンサ（角速度ジャイロ、加速度計）が必要であった。

近年、Global Positioning Systems (GPS)の普及により GPS と安価な Inertial Measurement Unit (IMU)によって走行軌跡と姿勢角を計測するアルゴリズムが各種提案されている。たとえば、角速度ジャイロを使用せずに GPS とクォータニオンの誤差ベクトルから Wahba's problem による姿勢決定方法⁽¹⁾や複数 GPS アンテナを移動体に搭載して、その基線ベクトルによる姿勢決定方法⁽²⁾⁽³⁾が提案されている。

筆者らは AHRS の姿勢角推定方法や上記の先行研究の方法とは異なり、姿勢角推定を GPS-IMU 融合アルゴリズム内に取り込むことで、加速度誤差中の姿勢角誤差に起因する成分の抽出、姿勢角誤差の推定を行い、

低精度（安価）なセンサで問題となる姿勢角誤差（ドリフト）を補償して精度を向上させる姿勢角の推定アルゴリズム⁽⁴⁾を研究してきた。

今回提案する研究はこのアルゴリズムをさらに発展、統合させた GPS と IMU によるビークル走行軌跡・姿勢角推定アルゴリズムであり、高精度な GPS 測位値によって位置データの精密な補正が可能なことに着目した離散時間型のシンプルで線形なカルマンフィルタを用いて走行軌跡と姿勢角を一体的に推定するものである。

最初に、車両固定座標で記述するカルマンフィルタではシステム行列に座標変換のための三角関数を含む非線形演算になるが、ここで用いるカルマンフィルタは地上固定座標系へ座標系を統一することで、シンプルで線形なカルマンフィルタの開発を行った。

次に、このカルマンフィルタに対し、姿勢角推定を GPS と IMU の融合アルゴリズム内に取り込むことで、加速度誤差中の姿勢角誤差に起因する加速度成分を抽出するアルゴリズムの開発を行った。このアルゴリズムは、姿勢角誤差に起因する加速度誤差成分を計測加速度から分離することで specific force（後述、3.1.1

* 原稿受付 2009 年 3 月 2 日。

^{*1} 正員、三菱エンジニアリング(株) (〒455-0022 名古屋市港区竜宮町 22-6)。

^{*2} 正員、永年会員、名城大学理工学部 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜 1-501)。

^{*3} 正員、名城大学理工学部。

E-mail: k-takahata@churyo.co.jp

項参照)の推定を行い, この specific force を車体固定座標系から地上固定座標系へ座標変換した specific force と元来, 地上固定座標系で計測される GPS 測位値を融合することでビークルの走行軌跡および姿勢角を一體的に推定するものである。

この方法によれば, 特別に姿勢角計測器を準備することなく GPS-IMU 融合の一体システムとしてアルゴリズムを構築することが可能になり, 計測アルゴリズムがシンプルになり, ひいては計測器材のコストが低減できる効果が期待できる。

本論文では, 離散時間型のシンプルで線形なカルマンフィルタおよびこのカルマンフィルタによるビークル走行軌跡と姿勢角推定アルゴリズムの導出および, 実用性確認結果を報告する。

2. システムモデル

2.1 車両固定座標系で記述する状態方程式

AHRS 等で用いられているビークルの運動を並進系と回転系を併せて記述した運動方程式 (以下, 状態方程式と称す。) を式(1)に示す。この場合, 姿勢角 $\mathbf{W}$ は AHRS 等で可観測であるものとして定式化してある。慣性データおよび座標系の定義を図 1, 記号の定義を表 1 に示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{R}} \\ \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\mathbf{a}} \\ \dot{\mathbf{e}}_a \\ \dot{\mathbf{W}} \\ \dot{\mathbf{w}} \\ \dot{\mathbf{e}}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E}^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{g} \times \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{e}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{v} \\ \mathbf{a} \\ \mathbf{e}_a \\ \mathbf{W} \\ \mathbf{w} \\ \mathbf{e}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_a \\ \mathbf{w}_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{v} \\ \mathbf{a} \\ \mathbf{e}_a \\ \mathbf{W} \\ \mathbf{w} \\ \mathbf{e}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_r \\ \mathbf{v}_a \\ \mathbf{v}_w \\ \mathbf{v}_e \end{bmatrix}$$

where,

$$\mathbf{E}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{e}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix}, \boldsymbol{\omega} \times = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{g} \times = \begin{bmatrix} 0 & -g & 0 \\ g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式(1)からわかるように, システム行列に座標変換行列 $\mathbf{E}^{-1}$ や角速度変換行列 $\mathbf{e}^{-1}$ を含み, 非線形システムとなるため, 通常は基準姿勢周りで線形化した拡張カルマンフィルタを適用する必要があるが, 特に方位角が大きく変動する自動車のようなビークル走行軌跡では基準姿勢からの変化量が大きく, 厳密に最適性が得ら

Fig.1 Coordinate system and inertial data

Table1 Definition of Symbols

Symbol	Definition	Coordinates	Unit
Capital letter	earth-fixed coordinates	(X, Y, Z)	—
Small letter	vehicle-fixed coordinates	(x, y, z)	—
Boldface	vector or matrix	—	—
Italics	scalar	—	—
$\mathbf{v}$	velocity	vehicle-fixed	m
$[\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}]^T$			
$\mathbf{a}$	acceleration or specific force	vehicle-fixed	m/s ²
$[\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z]^T$			
$\boldsymbol{\omega}$	angular velocity	vehicle-fixed	rad/s
$[\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r}]^T$			
$\mathbf{e}_a$	fluctuation of acceleration (jerk)	vehicle-fixed	m/s ³
$\mathbf{e}_w$	fluctuation of angular velocity	vehicle-fixed	rad/s ²
$\mathbf{R}$	position (distance)	earth-fixed	m
$[\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}]^T$			
$\mathbf{V}$	velocity	earth-fixed	m/s
$[\mathbf{V}_x, \mathbf{V}_y, \mathbf{V}_z]^T$			
$\mathbf{A}$	acceleration	earth-fixed	m/s ²
$[\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z]^T$			
$\hat{\mathbf{A}}$	estimated specific force	earth-fixed	m/s ²
$[\hat{A}_x, \hat{A}_y, \hat{A}_z]^T$			
$\delta \mathbf{A}$	acceleration error	earth-fixed	m/s ²
$[\delta A_x, \delta A_y, \delta A_z]^T$			
$\hat{\delta \mathbf{A}}$	estimated acceleration error	earth-fixed	m/s ²
$[\hat{\delta A}_x, \hat{\delta A}_y, \hat{\delta A}_z]^T$			
$\mathbf{W}$	attitude angle (Euler angle)	earth-fixed	rad
$[\phi, \theta, \psi]^T$	[roll, pitch, yaw]		
$\phi_{true}, \theta_{true}, \psi_{true}$	optical attitude angle (true value)	earth-fixed	rad
$\tilde{\mathbf{W}}$	attitude angle non-corrected error	earth-fixed	rad
$[\tilde{\phi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi}]^T$			
$\delta \phi, \delta \theta, \delta \psi$	attitude angle error	earth-fixed	rad
$\hat{\delta \phi}, \hat{\delta \theta}, \hat{\delta \psi}$	estimated attitude angle error	earth-fixed	rad
$\mathbf{e}_A$	fluctuation of acceleration (jerk)	earth-fixed	m/s ³
$\mathbf{e}_{d1}$	fluctuation of acceleration error caused by attitude error	earth-fixed	m/s ³
$\mathbf{w}_a, \mathbf{w}_w$	system noise	—	—
$\mathbf{v}_R, \mathbf{v}_a, \mathbf{v}_w, \mathbf{v}_e$	observation noise	—	—
$\mathbf{W}_A, \mathbf{W}_d$	system noise	—	—
$\mathbf{v}_R, \mathbf{v}_A$	observation noise	—	—
α, β, γ	(time constant) ⁻¹	—	1/s
$\mathbf{I}$	unit matrix	—	—
$\boldsymbol{\omega} \times$	skew-symmetric matrix of angular velocity	—	—
$\mathbf{g} \times$	skew-symmetric matrix of gravitational acceleration	—	—
$\mathbf{g}$	gravitational acceleration	—	—
$\mathbf{y}_t$	observation vector	—	—
$\mathbf{K}_t$	Kalman gain	—	—
$\mathbf{H}_t$	observation matrix	—	—
$\mathbf{F}_t$	state transition matrix	—	—
$\mathbf{z}^{-1}$	delay operator	—	—

れず、対象の可観測性が変化してフィルタとしての収束性に問題が生じる⁹⁾ことがある。

2.2 地上固定座標系で記述する状態方程式 2.1節の問題解決として、下記の(1)から(4)の方法を用いて状態方程式の線形化・簡略化を行い、線形で極めてシンプルな状態方程式として回転系の状態方程式(2)、並進系の状態方程式(3)を得ることができる。

(1) 式(2)に示す回転系の状態方程式に基づくカルマンフィルタで推定した姿勢角誤差を含む姿勢角を用いて、IMUが車両固定(ビークル)座標系で計測した加速度を地上固定(慣性)座標系へ変換する。(2.3節参照)

(2) (1)項によって、状態方程式のシステム行列内の座標変換や角速度変換を除くことができ、座標系の地上固定座標系への統一、状態方程式の線形化が可能となる。その状態方程式を式(3)に示す。

(3) 式(3)は加速度データのパワースペクトル(PSD)のDC成分(直流成分及びそれに近い成分を指す)をドライバの運転の揺らぎ¹⁰⁾として、システム雑音と見做すものである。さらに、一般的には specific force $\mathbf{A}$ のみで示す状態方程式の状態量に対して、姿勢角誤差、bias 誤差および、scale factor 誤差から生じる加速度誤差 $\delta\mathbf{A}$ を状態量として加法追加している。

(4) この研究の目的は姿勢角を直接計測せずに、姿勢角を加速度誤差から推定するシステムであるから姿勢角 $\mathbf{W}$ を不可観測として定式化してある。

この状態方程式は航法方程式の Acceleration Dead Reckoning (ADR)モデル⁷⁾のひとつであり、等速運動に対する外乱としてドライバの運転の揺らぎおよび、姿勢角誤差に起因する加速度の揺らぎを表現するものと解釈できる。

2.3 姿勢角推定 姿勢角推定の概念を図2に示すとともに、以下に説明する。

(1) 式(2)で示す回転系の状態方程式は、姿勢角 $\mathbf{W}$ が不可観測であり、カルマンフィルタによる姿勢角推定はできないため、カルマンフィルタの構成を使用した時間更新ループのみで角速度積分した姿勢角誤差を含む姿勢角を用いて、慣性センサが車両固定座標系で計測した加速度を地上固定座標系へ変換する。

(2) 式(3)に示す並進系の状態方程式に基づくカルマンフィルタによって specific force $\mathbf{A}$ と加速度誤差 $\delta\mathbf{A}$ に区別して推定し、specific force $\mathbf{A}$ は走行軌跡推定用、加速度誤差 $\delta\mathbf{A}$ は姿勢角誤差推定用として弁別される。

specific force $\mathbf{A}$ は白色雑音で駆動される積分過程とし、加速度誤差 $\delta\mathbf{A}$ は白色雑音を整形フィルタに通し

た有色雑音で駆動される弱定常2次過程⁸⁾として扱うものである。

(3) 通常の離散時間形のカルマンフィルタにおいては、フィルタの状態更新レートと観測値を反映するレートが同じであるが、筆者らの研究⁹⁾では、図3に示すように、これらのレートが異なるカルマンフィルタを設計し、50Hz更新のIMU観測データと10Hz更新のGPS観測データの融合方法を使用している。この研究では、さらに加速度に加速度誤差を付加した観測値 $\tilde{\mathbf{A}} = (\mathbf{A} + \delta\mathbf{A})$ を実際のIMU(加速度計)の計測値に対応させることとした。

Fig.2 Concept of Specific force and Attitude error estimation

Solid line: time up date loop at 50Hz
Dotted line: observation up date loop at 10Hz

Fig.3 Construction of Kalman filter

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{W}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & -\alpha \cdot \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \cdot \mathbf{W}_{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} \\ y &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \mathbf{v}_{\boldsymbol{\omega}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{R}} \\ \dot{\mathbf{V}} \\ \dot{\mathbf{A}} \\ \dot{\delta\mathbf{A}} \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathbf{A}} \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\delta\mathbf{A}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma \cdot \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{V} \\ \mathbf{A} \\ \delta\mathbf{A} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{A}} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\delta\mathbf{A}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathbf{W}_{\mathbf{A}} \\ \gamma \cdot \mathbf{W}_{\delta\mathbf{A}} \end{bmatrix} \\ y &= \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & \mathbf{I} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{V} \\ \mathbf{A} \\ \delta\mathbf{A} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{A}} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\delta\mathbf{A}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_R \\ \mathbf{v}_A \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

3. 誤差モデルと誤差の分離

3.1 加速度誤差モデル カルマンフィルタで推定した加速度誤差 $\delta\mathbf{A}$ は地上固定座標におけるもので、ビークルに搭載して計測した加速度の座標変換精度に

影響する姿勢角（方位角，ロール姿勢角，ピッチ姿勢角）誤差とセンサ固有の誤差（bias, scale factor 誤差）から構成されるが，以降，姿勢角誤差に伴う加速度誤差の分離方法について述べ，センサ固有の誤差（bias, scale factor 誤差）の分離方法についてはこの研究の本質ではないので参考文献(4)に委ねる。

3-1-1 方位角誤差による加速度誤差 地上固定座標へ変換したビークルの運動を加速度計の観測データを基に，式(3)の specific force $\mathbf{A}$ と加速度誤差 $\delta\mathbf{A}$ を加えた形で表すと，式(4)になる。

観測誤差および，重力成分を含まないビークルの運動加速度を specific force と定義する。なお，specific force⁽⁹⁾は単位質量 1kg に対する実体力⁽¹⁰⁾を表し，単位質量で割ることで加速度と等価な次元になる。なお，表 1 にも示すように，地上固定座標系で表す specific force は $\mathbf{A}$ ，車両固定座標系で表す specific force は $\mathbf{a}$ と表記している。

$$\tilde{\mathbf{A}}_{\psi} = \mathbf{A}_{\psi} + \delta\mathbf{A}_{\psi} \quad (4)$$

where,

$$\tilde{\mathbf{A}}_{\psi} = \begin{bmatrix} \cos\tilde{\psi} & -\sin\tilde{\psi} \\ \sin\tilde{\psi} & \cos\tilde{\psi} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{a}_{\psi} \quad (5)$$

$$\tilde{\psi} = \psi + \delta\psi \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_{\psi} = [A_X \ A_Y]^T, \mathbf{a}_{\psi} = [a_x \ a_y]^T : \text{specific force}$$

式(5)の座標変換行列を変形し， $\delta\psi$ が微小とすると，式(7)を得る。

$$\begin{aligned} \cos\tilde{\psi} &= \cos(\psi + \delta\psi) = \cos\psi \cos\delta\psi - \sin\psi \sin\delta\psi \approx \cos\psi - \sin\psi \cdot \delta\psi \\ \sin\tilde{\psi} &= \sin(\psi + \delta\psi) = \sin\psi \cos\delta\psi + \cos\psi \sin\delta\psi \approx \sin\psi + \cos\psi \cdot \delta\psi \\ \therefore \begin{bmatrix} \cos\tilde{\psi} & -\sin\tilde{\psi} \\ \sin\tilde{\psi} & \cos\tilde{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\psi - \sin\psi \cdot \delta\psi & -\sin\psi - \cos\psi \cdot \delta\psi \\ \sin\psi + \cos\psi \cdot \delta\psi & \cos\psi - \sin\psi \cdot \delta\psi \end{bmatrix} \\ &\approx \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\delta\psi \\ \delta\psi & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

式(4)から方位角誤差による加速度誤差は式(8)になる。

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{A}}_{\psi} &= \mathbf{A}_{\psi} + \delta\mathbf{A}_{\psi} \\ \therefore \delta\mathbf{A}_{\psi} &= \tilde{\mathbf{A}}_{\psi} - \mathbf{A}_{\psi} = \begin{bmatrix} \cos\tilde{\psi} & -\sin\tilde{\psi} \\ \sin\tilde{\psi} & \cos\tilde{\psi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\delta\psi \\ \delta\psi & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\delta\psi \\ \delta\psi & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

3-1-2 ロール姿勢角誤差による加速度誤差 この加速度誤差は 3-1-1 項と同様に式(9)として得る。この場合はロール姿勢角誤差による重力加速度成分も加算される。

$$\delta\mathbf{A}_{\phi} = \begin{bmatrix} \delta A_X \\ \delta A_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\delta\phi \\ \delta\phi & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta\phi \\ 0 \end{bmatrix} \cdot g \quad (9)$$

3-1-3 ピッチ姿勢角誤差による加速度誤差 この加速度誤差は 3-1-2 項と同様に式(10)として得る。

$$\delta\mathbf{A}_{\theta} = \begin{bmatrix} \delta A_X \\ \delta A_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \delta\theta \\ -\delta\theta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta\theta \\ 0 \end{bmatrix} \cdot g \quad (10)$$

3-2 走行軌跡 式(3)に基づく並進系カルマンフィルタで specific force $\hat{\mathbf{A}}$ ，加速度誤差 $\delta\hat{\mathbf{A}}$ を推定し，その推定値のうち， $\hat{\mathbf{A}}$ は，車両固定座標系で計測された specific force を姿勢角誤差のない座標変換によって地上固定座標系に変換されたビークルの specific force に相当する。

3-2-1 加速度誤差の分離 姿勢角誤差による加速度誤差 $\delta\mathbf{A}$ は式(8)からわかるように，specific force に直交するので，specific force $\mathbf{A}$ が回転した場合，それと直交したまま $\delta\mathbf{A}$ も回転し，specific force $\mathbf{A}$ と $\delta\mathbf{A}$ の幾何学的関係は一定である。（図 4 参照）

すなわち，specific force $\mathbf{A}$ と $\delta\mathbf{A}$ の位相が 90° ずれた状態としてモデル化できるので，これを式(3)で示す状態方程式で定式化している。具体的には specific force $\mathbf{A}$ は白色雑音の積分過程，加速度誤差 $\delta\mathbf{A}$ は白色雑音を整形フィルタに通した有色雑音で駆動される弱定常 2 次過程として両者の位相関係を 90° ずらすことで，カルマンフィルタによる加速度誤差の分離を確実にしている。

Fig.4 Relationship of specific force and acceleration error

3-2-2 走行軌跡の推定 3-2-1 項の姿勢角誤差の分離によって得られた地上固定座標系のビークルの運動加速度（specific force $\mathbf{A}$ ）は正確な座標変換をされたことと等価な推定値になるので，この specific force $\mathbf{A}$ と GPS 測位データから式(3)の状態方程式に基づくカルマンフィルタによって，加速度誤差を積分することで生じる積分誤差を分離（補正）した高精度な走行軌跡を得ることができる。

3-3 ロール姿勢角，ピッチ姿勢角の推定 走行軌跡の推定のみであれば 3-2 節の誤差分離方法で十分であるが，さらにロール姿勢角，ピッチ姿勢角を陽に推定するための方法についてロール姿勢角誤差 $\delta\phi$ を求める場合を例にして述べる。

ピッチ姿勢角誤差も加速度成分を $[a_x, a_z], [A_X, A_Z]$ に読み替えることで同様に求めることができる。

3-3-1 ロール姿勢角誤差 式(3)の状態方程式に基づく並進系カルマンフィルタで specific force $\hat{\mathbf{A}}$ ，加速度誤差 $\delta\hat{\mathbf{A}}$ を推定した後，ロール姿勢角誤差 $\delta\phi$ は式(11)を用いて算出できる。なお，式(11)における specific

forceと加加速度誤差は式(12)に示すように座標系によって座標成分は相違するが大きさは座標系に依らず等しい。

また, specific forceと加加速度誤差の外積のベクトル方向が極性を示す性質により, 式(13)により, 姿勢角誤差による加加速度誤差の極性判別に用いる。

$$\delta\hat{\phi} = \tan^{-1} \frac{|\delta\hat{A}\phi|}{|\hat{A}\phi|} = \tan^{-1} \frac{|\delta\hat{a}\phi|}{|\hat{a}\phi|} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{a}\phi &:= \begin{bmatrix} \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \hat{A}\phi \\ \delta\hat{a}\phi &:= \begin{bmatrix} \delta\hat{a}_y \\ \delta\hat{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \delta\hat{A}\phi \end{aligned} \quad (12)$$

where,

$$\hat{A}\phi := \begin{bmatrix} A_y \\ A_z \end{bmatrix}, \delta\hat{A}\phi := \begin{bmatrix} \delta A_y \\ \delta A_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

$\delta\hat{A}\phi \times \hat{A}\phi$: polarity of $\delta\hat{A}\phi$

4. 実用性確認結果

3章で述べたアルゴリズムの実用性を実際の走行試験へ適用できるか検証した。検証項目は走行軌跡およびロール姿勢角, ピッチ姿勢角とした。

4.1 実証結果 試験条件の概要を表2, 試験に使用したGPS, IMUおよび, 光学式姿勢角計の計測諸元を表3に示す。表3に示した計測値(状態量)の記号は表1に対応している。

表3に示すようにGPSの測位精度は非常に高精度であり, 過去の実績から基準測位点(基準走行軌跡)と見做すことができるため, カルマンフィルタでのGPS測位点への観測雑音レベルは極小にして精度補償はかけていない。

また, 光学式姿勢角計の計測精度も非常に高精度であるため, 基準姿勢角計として扱った。

4.1.1 走行軌跡 定常円旋回時の走行軌跡を図5, スラローム時の走行軌跡を図6に示す。

走行軌跡は両者ともGPSデータと加加速度推定データ(specific force)による走行軌跡が段差なく滑らかに融合されていることが確認できる。走行軌跡の滑らかさはカルマンフィルタによって推定された走行軌跡を生成するためのspecific forceと加加速度誤差が精度良く推定(分離)されている結果と考えられる。

定量的評価はGPS測位点を基準点として, GPS測位間隔(0.1s間)において, specific forceを観測データとして0.02s毎に推定した4個目の地点(最初のGPS測位点から0.08s時点)から0.02s後(最初のGPS測位

点から0.1s時点)の評価のために外挿した地点と次のGPS測位点との偏差で評価した。

その結果を図5, 6の拡大図および表4に示す。結果は標準偏差で0.67cm(1σ)~1.01cm(1σ)であり, GPS単体精度2.7cm(1σ)の1/2以下の偏差であり, 十分に実用的な推定精度といえる。

Table2 Test conditions

Test case	#1	#2
Maneuvering	Steady state circular	Slalom
velocity(max) (km/h)	65	61
yaw rate(max) (rad/s)	0.65	0.5
lateral acceleration(max) (m/s ²)	10.5	5.0
jerk(approximately) (m/s ² /s)	70	50

Table3 Specification of Sensors

Sensor	Specification		Note
GPS	Method	Kinematic DGPS	CEP: Circular Error Probable σ: Standard Deviation
	Measurement data	Position	
	Accuracy	2cmCEP [2.7cm(1σ)]	
	Up date rate	10Hz	
	Observed state	R(X,Y,Z)	
Rate Gyro	Method	MEMS	
	Angular velocity range	±150°/s	
	Bias	3°/s	
	Non-linearity	0.5%	
	Drift	1.5°/s/h	
	Up date rate	50Hz	
Accelerometer	Method	MEMS	IG =9.80665m/s ²
	Acceleration range	±2G	
	Bias	0.2G	
	Non-linearity	30mG	
	Up date rate	50Hz	
Optical Attitude	Observed state	a(a _x ,a _y ,a _z)	Displacement to road surface
	Method	Laser displacement	
	Accuracy (Repeatability)	±0.003°	

Table4 Deviation of Trajectory

Maneuvering	Deviation(cm)	
Slalom	maximum	9.21
	average	0.88
	standard deviation	1.01 (1σ)
Steady state circular	maximum	4.25
	average	0.68
	standard deviation	0.67 (1σ)

Fig.5 Trajectory of Steady state circular

Fig.6 Trajectory of Slalom

4.1.2 ロール姿勢角, ピッチ姿勢角 スラローム時の姿勢角(ϕ, θ)を図7, 定常円旋回時の姿勢角(ϕ, θ)を図8に示す。図中, trueを添え字したGray色の波形は光学式姿勢角計で測定した基準データ, ^を冠したBlack色の波形は推定データ, ~を冠した波形は加速度誤差に依る姿勢角誤差を補正せずに算出した姿勢角を示す。

実際の姿勢角推定アルゴリズムは式(9), (10)において, 基準姿勢角 $0(\phi=0, \theta=0)$ として, そこからの姿勢角変化量を姿勢角誤差としているため, この姿勢角(ϕ, θ)は姿勢角誤差($\delta\phi, \delta\theta$)と等価である。

ロール姿勢角(ϕ)については同時取得した光学式姿勢角計の計測値と比較すると, 除去しきれていない小さな変動成分および, 図7のスラローム区間20~38sのゲイン差を除いて, ほぼ同様な波形を推定している。

ピッチ姿勢角(θ)については, specific forceが安定していないと考えられる区間(図7の15~22s, 図8の60~70s付近)において光学式姿勢角計の計測値と差がみられる。定量的評価は光学式姿勢角計の計測値を基準(真値)として, その真値への適合度として式(14)に示すRMR(Root Mean Residual)指標⁽¹¹⁾を用いて評価した。その結果を表5に示す。

結果は 0.08° RMR~ 0.50° RMRであり, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)を使用した比較的安価な姿勢角計と同等な精度(一例, 0.75° 程度)であり, 実用性はあるといえるが, specific forceが安定していない区間の推定アルゴリズムは改善する必要がある。

また, 加速度誤差に依る姿勢角誤差を補正せずに算出したロール姿勢角($\tilde{\phi}$)およびピッチ姿勢角($\tilde{\theta}$)は大きくドリフトしていることが判る。このことから, 姿勢角推定アルゴリズムの有効性を見取ることができる。

$$\sqrt{\frac{(\hat{y}_1 - y_1)^2 + \dots + (\hat{y}_i - y_i)^2}{i}} \quad (14)$$

where, $\hat{y}_i$: estimated data, y_i : reference data, i : data size

Fig.7 Attitude(ϕ, θ) of Slalom

Table5 Fitting of Attitude measurement

Fitting		$\phi (^{\circ})$ RMR	$\theta (^{\circ})$ RMR
Maneuvering			
Slalom	period: 1-38s	0.39	0.33
	period: 1-20s	0.26	0.39
	period: 20-38s	0.50	0.26
Steady state circular	period: 1-80s	0.08	0.22

Fig.8 Attitude(ϕ, θ) of Steady state circular

5. 結 言

ビークルの走行軌跡を求める場合、車両固定座標系で計測した加速度を地上固定座標系で計測した位置情報と融合するための座標変換において発生する姿勢角誤差に起因する加速度誤差を利用して、走行軌跡およびロール姿勢角、ピッチ姿勢角の推定を行った。

(1) 走行軌跡については、姿勢角誤差に伴う座標変換誤差を補正するのではなく、式(3)に基づく並進系カルマンフィルタで計測加速度から直接、姿勢角誤差に伴う加速度誤差を分離した specific force により連続で滑らかなで走行軌跡を得ることができ、精度についても定量的評価をすることで、このアルゴリズムの実用性を確認できた。

(2) ロール姿勢角、ピッチ姿勢角については、姿勢角誤差に伴う加速度誤差とそれを分離した specific force が直交するという幾何学的関係を用いて加速度誤差から姿勢角誤差を算出することができ、精度についても定量的評価をすることで、このアルゴリズムの実用性を確認できた。

(3) 光学式姿勢計で計測した姿勢角に対して specific force が安定しない区間および、スラローム振幅ピーク時において波形に差があることについては、今後のフィールドデータの蓄積によってアルゴリズムの更なる改善が必要である。

謝 辞

本研究に際して、貴重な資料を提供していただいた中菱エンジニアリング㈱の研究スタッフ各位に対して深甚なる謝意を表する次第である。

文 献

- (1) Demoz, G., Gabriel, H., J.D., Powell and Bradford, W., A Gyro-Free Quaternion-Based Attitude Determination System suitable for Implementation Using Low cost Sensors, *Proceedings of Position, Location and Navigation Symposium, IEEE2000* (2000) pp.185-192
- (2) Ueno, M., Itani, K., Hayashi, T., Development of Low-cost GPS Autopilot Sensor for Agricultural Vehicle, *Proceedings of The European Navigation Conference GNSS 2002*(2002) pp.1-9
- (3) Takano, T., Satoh, T., Kashimoto, M. and Masaaki M., *Radio Instrumentation and Navigation in Space*, (2000), p.226-231, CORONA PUBLISHING
- (4) Takahata, K., Okamura, K., Higuchi T. and Takahama, M., Development and Practical Evaluation of the Attitude Estimation for Vehicle Trajectory System, *Transactions of Automotive Engineers of Japan*, Vol.38, No.6(2007), pp.241-246.
- (5) Takahama, M., Application of Robust Control for Flight Control, *Mitsubishi Heavy Industries technical review*, Vol.29, No.2(1992), pp.123-127.
- (6) Higuchi, T., Takahata, K., Okamura, K., Nomura, Y. and Takahama, M., Development of Vehicle Trajectory Estimation system using GPS and IMU fusion, *Transactions of Automotive Engineers of Japan*, Vol.37, No.6 (2006), pp.21-26.
- (7) Nishimura, T., Kanai, K. and Murata, M., *Guidance and Control for Aeronautical and space* (in Japanese), (1995), p.248, The Society of Instrument and Control Engineers
- (8) Uchida, K., Yamanaka, K., *Theory of State Estimation*, (2004), p.96, CORONA PUBLISHING
- (9) Numajima, T., Kihara, M., Kubo, Y., Sigimoto, S. and Seki, T., INS/DGPS/VMS Integration for In-Motion Alignment, *Proceeding of ION GPS Portland, OR* (2002), pp.556-564
- (10) Nukiyama, D., *Theory and Application for Dimensional Analysis* (in Japanese), (1956), p.30, KYORITSU SHUPPAN
- (11) Iwasaki, M., Nakanishi, H. and Tokioka, N., *Encyclopedia of Practical statistics terminology* (in Japanese), (2004), p.184, Ohmsha