

# 自動車走行軌跡・姿勢角計測に適用する GPS-IMU 融合法の研究

高畑 健二<sup>1)</sup>

## Research of GPS-IMU Fusion Method for Vehicle Trajectory and Attitude Measurement

Kenji TAKAHATA<sup>1)</sup>

### Abstract

Various fusion methods to measure a vehicle trajectory and attitude using the Global Positioning Systems (GPS) and Inertial Measurement Unit (IMU) are proposed ordinary. We have started this study of the fusion algorithm for the vehicle trajectory measurement systems. At a midterm of this study, we developed the measurement systems to solve the cycle slip phenomenon and verified the vehicle precise trajectory for the short time. The applied positioning algorithm was Time Differential (TD) method. Continuously, we have developed the real-time GPS-IMU fusion algorithm based on the discrete-time Kalman filter, which was described by a simplified linear state equation, through the higher performance of computer. Finally, we have developed the vehicle trajectory and attitude estimation method by the acceleration error separation about this trajectory and attitude estimator simultaneously. Our techniques showed good performances under various driving condition for the findings of this development process.

### 1. はじめに

自動車の走行軌跡を求める技術は地球座標における平面または空間上で位置と姿勢を計測する技術である。これらは移動する自動車の上から計測する車上計測と地球上の固定点から計測する地上計測とに分類<sup>1)</sup>される。

近年、GPS を利用した測位技術が発達すると、上記分類の中間的な考え方が必要となってきた。すなわち、座標系の視点からみると、GPS 測位座標は地上計測にあたり、自動車の走行軌跡の基になる加速度、角速度の計測は車上計測になる。地上固定座標系での GPS 測位データと車両固定座標系で計測した加速度、角速度からの走行軌跡を算出するためには、座標系を統一する必要がある、通常は地上固定座標系で走行軌跡が算出される。この GPS 測位値と座標変換を伴う速度、角速度から走行軌跡を算出するための融合アルゴリズムを適用した自動車走行軌跡・姿勢角計測方法の 4 フェーズにわたる研究について GPS-IMU 融合法の進展を述べ、最適な走行軌跡・姿勢角計測方法を研究成果として導く。

### 2. 研究の進展

筆者らは GPS の測位方式と GPS-IMU の適切な融合方

法について研究し、その組合せ固有の成果を得るとともに、課題をも明らかにして、研究を進展させてきた。その研究の進展を表 1 (次ページ参照) にまとめた。

#### 2.1 フェーズ 1

初期の研究では走行軌跡が有する実用性についての研究が主体であった。鈴鹿サーキットレーシングスクールにおいて、インストラクタと受講生の操縦するレーシングカーの走行軌跡が判別可能な計測精度を実証し、走行軌跡計測によって自動車の操縦技量の評価が可能であることを確認<sup>2)</sup>できた。

#### 2.2 フェーズ 2

GPS 測位方式のひとつであるキネマティック (Kinematic) GPS 方式について、複雑なシステム構成および脆弱点であるサイクルスリップを克服するために、システム構成を単独 GPS 方式、測位アルゴリズムを TD (Time Differential) 方式とした走行軌跡計測システムへと展開し、走行軌跡計測は自動車の過渡的な運動性能の測定<sup>3)</sup>が可能であることを確認できた。

##### (1)TD 方式による測位アルゴリズム<sup>4)</sup>

各時刻で計測した GPS 電波の搬送波位相計測による距離には伝播誤差およびアンビギュイティ (ambiguity, 不確定性) が含まれる。そのため、各時刻の測位誤差は

1) 交通科学科

1) Department of Transportation Engineering

Table1 Evolution of research and development

phase	Themes of R&D	Purpose	GPS positioning algorithm	GPS-IMU fusing algorithm
1	Development of measurement sensor for vehicle trajectory and verification of practical usage	Estimation device for the driving skill	Kinematic positioning by mobile and base station	Batch smoothing GPS update : 5Hz, IMU update : 50Hz
2	Development of vehicle trajectory measurement system using standalone GPS	Estimation device for the vehicle dynamics	TD positioning by mobile station	Batch smoothing GPS update : 5Hz, IMU update : 50Hz
3	Development of vehicle trajectory estimation system using GPS and IMU fusion		Kinematic positioning by mobile and base station	Real time Kalman filter GPS update : 5Hz, IMU update : 100Hz
4	Development of vehicle attitude estimation algorithm based on acceleration error separation			

大きい、各時刻の測位差と衛星間一重差 (異なる GPS 衛星に対する位相差) をとることにより、衛星時計のドリフト以外の伝播誤差、受信機時計誤差は同一のためキャンセル<sup>5)</sup>できる。

この原理を用いた測位アルゴリズムを TD 法という。

- ・走行軌跡：衛星時計の誤差以外をキャンセルした走行軌跡を計測することができるが、衛星時計の誤差累積による走行軌跡のドリフトが生じる。
- ・対地速度：各時刻における搬送波位相による距離の変化率を求めるため、衛星時計の誤差 (ドリフト) は累積せず、高精度に対地速度を計測することができる。

(2) GPS-IMU 融合アルゴリズム

TD 方式による GPS 測位周期が 0.2 秒では、過渡的な走行軌跡を取得できないが、加速度、角速度の積分による走行軌跡補間を周期 0.02 秒で行うことにより、過渡的な挙動の走行軌跡が取得できるようになる。加速度、角速度を時系列順に時間更新積分 (DR, Dead Reckoning) して求められる位置および、方位角の積分誤差を抑制するため、その DR データを TD 方式による GPS 測位値で 0.2 秒毎に観測更新する。さらに一旦、前向きに融合した走行軌跡を、逆の時系列順にスムージングすることで GPS データと DR データをさらに平滑に融合している。

(3) 精度実証試験

走行軌跡、対地速度について、同時に取得したキネマティック GPS 方式による走行軌跡、対地速度に対して、10 秒間程度の計測時間に限定すれば走行軌跡はキネマティック GPS 方式と TD 方式とで、ほとんど差がないことが実証できた。

3. フェーズ 3

フェーズ 2 で述べたシステムの GPS-IMU 融合方法では、融合時に発生する誤差をバッチでしか補正できないこと、および軌跡データを実時間で取得できないという

短所を有していたため、実時間処理が可能な GPS-IMU 融合方法による走行軌跡計測アルゴリズムを開発<sup>6)</sup>した。

3.1 システムの構成および性能

図 1 に示すようにシステム構成は、ビークルに搭載される移動局、および地上に設置される基準局、実時間融合処理装置から構成される。実時間キネマティック GPS 測位計算を行うため、実時間融合処理装置は GPS の位置データおよび IMU からの加速度、方位角を移動局から受信する。その受信データを用い、カルマンフィルタによる融合計算によって走行軌跡を算出する。

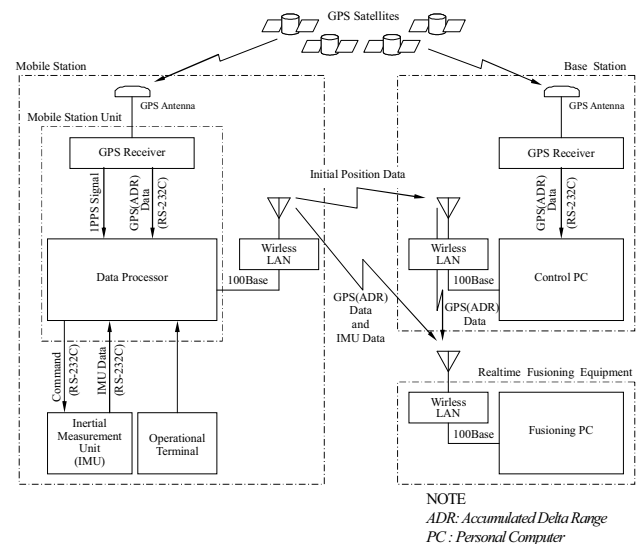


Fig.1 Block diagram of systems

ビークルの運動を並進系と回転系を併せて記述した式(1)の運動方程式 (ビークル座標系, 離散時間状態方程式) は, システム行列の並進系に座標変換行列  $E^l$ , 回転系に角速度変換行列  $e^l$ , および遠心力, コリオリ力の原因となる角速度の歪対象行列<sup>7)</sup> (テンソル)  $\omega \times$  を含むため非線形システムとなる. この非線形性により, カルマンフィルタの収束性を保証できなくなる<sup>8)</sup>ため, 状態方程式の線形化・簡略化を行い, 線形で極めてシンプ

ルな線形状態方程式として式(2),(3)を得ることができる。  
なお、本節では状態方程式を参考文献 6) のとおり離散系で示してある。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_{t+1} &= \mathbf{F}_t \cdot \mathbf{X}_t + \mathbf{G}_t \cdot \mathbf{w} \\ \mathbf{Y}_t &= \mathbf{H}_t \cdot \mathbf{X}_t + \mathbf{v} \end{aligned} \right\} (1)$$

where,

$$\mathbf{X}_t = [R_G \quad v \quad a \quad \varepsilon_{da} \quad W \quad \omega \quad \varepsilon_{d\omega}]^T$$

$$\mathbf{F}_t = \begin{bmatrix} I & E^{-1}\Delta T & \frac{1}{2}E^{-1}\Delta T^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I - \omega \times \Delta T & \Delta T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\alpha\Delta T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & e^{-1}\Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\beta\Delta T} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1-e^{-\alpha\Delta T}}{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1-e^{-\beta\Delta T}}{\beta} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_t = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{Y}_t$ : observation data,

$\mathbf{w} = [w_{da} \quad w_{d\omega}]^T$ : driving noise each for  $w_{da}, w_{d\omega}$ ,

$w_{da}$ : driving noise of  $\varepsilon_{da}$ ,  $w_{d\omega}$ : driving noise of  $\varepsilon_{d\omega}$ ,

$\varepsilon_{da}$ : fluctuation of acceleration,  $\varepsilon_{d\omega}$ : fluctuation of angular velocity,

$\mathbf{v} = [v_{R_G} \quad v_a \quad v_w \quad v_\omega]^T$ : observation noise each for  $R_G, a, W, \omega$

$R_G = [X, Y, Z]$ : position,  $\mathbf{v} = [u, v, w]$ : velocity on vehicle coordinate,

$a = [a_x, a_y, a_z]$ : acceleration on vehicle coordinate,

$W = [\phi, \theta, \psi]$ : attitude,  $\omega = [p, q, r]$ : angular velocity,

$I$ : unit matrix,  $\alpha, \beta$ : 1/time constant,  $\Delta T$ : sampling interval

$E^{-1} =$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix}$$

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

### 3.2 ドライバモデル

加速度データのパワースペクトル密度 (PSD) の直流 (極低周波数) 成分をドライバの運転の揺らぎと同日し、システム雑音と定義した。PSD の直流成分は、旋回が定常的に発生する走行条件では、パワーレベルは、ほぼ同一のまま周波数のみが、旋回周波数分だけ直流からシフトする。PSD がシフトする理由は車上計測であれば、旋回時の求心加速度は、定常的に同一極性で発生するが、この加速度を地上固定座標系に座標変換することで、周波数成分を持つようになるためである。

driver model1

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_{t+1} &= \mathbf{F}_t \cdot \mathbf{X}_t + \mathbf{G}_t \cdot \mathbf{w}_{da} \\ \mathbf{Y}_t &= \mathbf{H}_t \cdot \mathbf{X}_t + \mathbf{v} \end{aligned} \right\} (2)$$

where,

$$\mathbf{X}_t = [R_G \quad V \quad A \quad \varepsilon_{da}]^T$$

$$\mathbf{F}_t = \begin{bmatrix} I & \Delta T & \frac{1}{2}\Delta T^2 & 0 \\ 0 & I & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & I & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\alpha\Delta T} \end{bmatrix}, \mathbf{G}_t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{I - e^{-\alpha\Delta T}}{\alpha} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_t = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{R_G} \\ v_A \end{bmatrix}$$

driver model2

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_{t+1} &= \mathbf{F}_t \cdot \mathbf{X}_t + \mathbf{G}_t \cdot \mathbf{w}_{da} \\ \mathbf{Y}_t &= \mathbf{H}_t \cdot \mathbf{X}_t + \mathbf{v} \end{aligned} \right\} (3)$$

where,

$$\mathbf{X}_t = [R_G \quad V \quad A]^T$$

$$\mathbf{F}_t = \begin{bmatrix} I & \Delta T & \frac{1}{2}\Delta T^2 \\ 0 & I & \Delta T \\ 0 & 0 & e^{-\alpha\Delta T} \end{bmatrix}, \mathbf{G}_t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{I - e^{-\alpha\Delta T}}{\alpha} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_t = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{R_G} \\ v_A \end{bmatrix}$$

$R_G = [X, Y, Z]$ : position vector,

$V = [V_x, V_y, V_z]$ : velocity vector on inertial coordinate,

$A = [A_x, A_y, A_z]$ : acceleration on inertial coordinate,

$\varepsilon_{da}$ : fluctuation of acceleration,

$\varepsilon_{d\omega}$ : fluctuation of angular velocity,

$w_{da}$ : driving noise,  $\mathbf{v} = [v_{R_G}, v_A]$ : observation noise each for  $R_G, A$ ,

$I$ : unit matrix,  $\alpha, \beta$ : 1/time constant

$\Delta T$ : sampling interval

ここで式(2) のドライバモデル 1 はシステム雑音を加速度変化率 (ジャーク) とするモデル、式(3)のドライバモデル 2 はシステム雑音を加速度とするモデルである。

### 3.3 カルマンフィルタによる GPS-IMU 融合

状態更新レートと観測更新レートが異なるカルマンフィルタに対し、表 2 の走行条件 1 でフィルタ定数をチューニングした結果、100Hz 更新の IMU 観測データと 5Hz 更新の GPS 観測データを融合し、滑らかな走行軌跡を得ることができた。

さらに、走行条件 1 でチューニングしたフィルタ定数が、同表の走行条件 2 のような多様性のある走行条件へも適応できるかを検証した。ドライバモデル 1 については、走行条件 1 におけるフィルタ定数がそのまま適用でき、目標性能を満足することが確認できた。これは、ドライバモデル 1 はシステムの駆動雑音を加速度変化率としているため、加速度変化率への追従ができていたものと考えられる。ドライバモデル 2 については、穏やか

な旋回切返し, および直進は走行条件 1 におけるフィルタ定数の値が適用できるが, 横加速度の変化率が大きい旋回切返し時点で, 図 2 に示すような鋸歯状波の走行軌跡が発生し, GPS-IMU の融合が滑らかでないことが判る. これは, ドライバモデル 2 は加速度変化率への追従ができていないためと考えられる.

Table2 Driving condition

condition	# 1		#2
maneuvering	J turn	Eight figure	Racing course driving
test vehicle	arbitrary sedan		
velocity(max) (km/h)	52.13	22.19	92.32
yaw rate(max) (rad/s)	0.52	0.76	0.87
lat. acc(max) (m/s <sup>2</sup> )	3.20	5.64	10.55
jerk(approx. ) (m/s <sup>2</sup> /s)	110	180	600

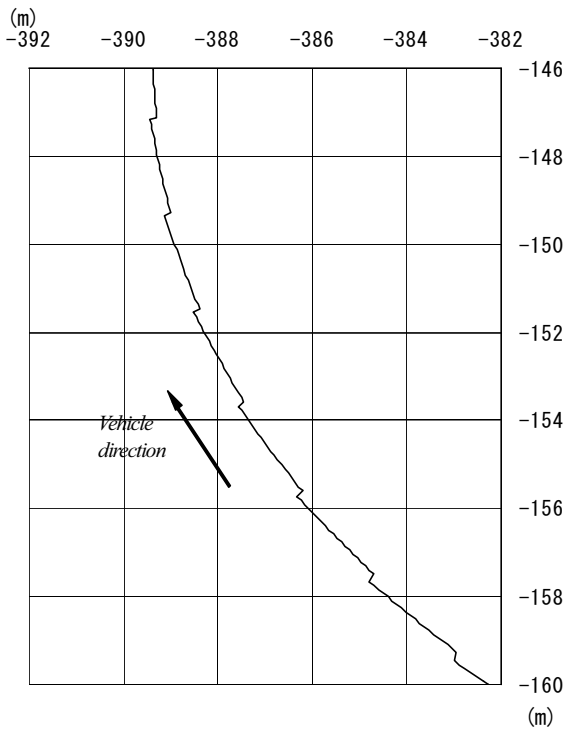


Fig.2 Saw toothed trajectory at racing maneuver

#### 4. フェーズ 4

フェーズ 4 ではフェーズ 3 で開発したアルゴリズムをさらに発展・統合させたビークル走行軌跡・姿勢角推定アルゴリズムについて, 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ることに着目した線形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研究を実施した. フェーズ 3 で開発した線形カルマ

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, 加速度誤差の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<sup>9)</sup>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) 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体的に推定するものである. この方法によれば, 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低減を狙って研究した.

#### 4.1 地上固定座標系で記述した状態方程式

フェーズ 3 と同様な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を得ることができた. なお, 本節では状態方程式を参考文献<sup>9)</sup> のとおり連続系で示してある.

(1) 式(4)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) (1)項によって, 状態方程式のシステム行列内の座標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(5)に示す.

(3) 式(5)はフェーズ 3 と同様に加速度データの PSD の直流(極低周波数)をシステム雑音と見做すものである.

(4) 一般的には specific force **A** のみで示す状態方程式の状態量に対して, 主に姿勢角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.

#### 4.2 姿勢角推定

姿勢角推定の概念を図 3 に示すとともに, 以下に説明する.

(1) 式(4)で示す回転系の状態方程式は, 姿勢角 **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利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(5)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 **A** と加速度誤差  $\delta\mathbf{A}$  を区別して推定し, specific force **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<sup>10)</sup>として扱うものである.

(3) 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.

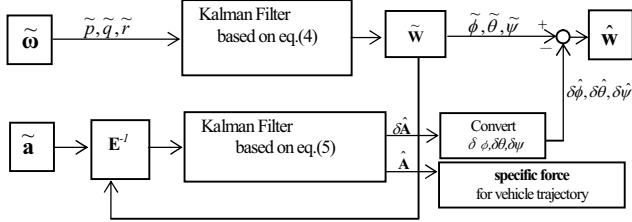


Fig.3 Conception of Specific force and Attitude error estimation

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{W} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\varepsilon}_\omega \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & -\alpha \cdot I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W \\ \omega \\ \varepsilon_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \cdot w_\omega \end{bmatrix} \\ y &= \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W \\ \omega \\ \varepsilon_\omega \end{bmatrix} + v_\omega \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

where,  
 $W = [\phi, \theta, \psi]$ : attitude,  
 $\omega = [p, q, r]$ : angular velocity,  
 $\varepsilon_\omega$ : fluctuation of angular velocity,  
 $w_\omega$ : driving noise,  
 $v_\omega$ : observation noise for  $\omega$   
 $I$ : unit matrix,  $\alpha$ : 1/time constant

### 4.3 姿勢角誤差による加速度誤差

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) 誤差が主な原因で発生するものである.

#### (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(5)の **specific force**  $\mathbf{A}$  と加速度誤差  $\delta\mathbf{A}$  を加えた形で表すと, 式(6)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**<sup>7)</sup>と定義する. なお, **specific force** は単位質量 1kg に対する実体力<sup>11)</sup>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, 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

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{R}_G \\ \dot{V} \\ \dot{A} \\ \dot{\delta A} \\ \dot{\varepsilon}_A \\ \dot{\varepsilon}_{dA} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma \cdot I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_G \\ V \\ A \\ \delta A \\ \varepsilon_A \\ \varepsilon_{dA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_A \\ \gamma \cdot w_{dA} \end{bmatrix} \\ y &= \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & I & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ V \\ A \\ \delta A \\ \varepsilon_A \\ \varepsilon_{dA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_R \\ v_A \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

where,  
 $R_G = [X, Y, Z]$ : position vector,  
 $V = [V_x, V_y, V_z]$ : velocity vector on inertial coordinate,  
 $A = [A_x, A_y, A_z]$ : acceleration on inertial coordinate,  
 $\delta A = [\delta A_x, \delta A_y, \delta A_z]$ : acceleration error on inertial coordinate,  
 $\varepsilon_A$ : fluctuation of acceleration,  
 $\varepsilon_{dA}$ : fluctuation of acceleration error,  
 $w_A, w_{dA}$ : driving noise,  
 $[v_R, v_A]$ : observation noise each for  $R_G, A$ ,  
 $I$ : unit matrix,  $\gamma$ : 1/time const

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

where,

$$\tilde{\mathbf{A}}_\psi = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\psi} & -\sin \tilde{\psi} \\ \sin \tilde{\psi} & \cos \tilde{\psi} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{a}_\psi, \quad (7)$$

$$\tilde{\psi} = \psi + \delta\psi,$$

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

式(7)の座標変換行列を変形し,  $\delta\psi$  が微小とすると, 式(8)を得る.

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \cos \tilde{\psi} & -\sin \tilde{\psi} \\ \sin \tilde{\psi} & \cos \tilde{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \psi - \sin \psi \cdot \delta\psi & -\sin \psi - \cos \psi \cdot \delta\psi \\ \sin \psi + \cos \psi \cdot \delta\psi & \cos \psi - \sin \psi \cdot \delta\psi \end{bmatrix} \\ &\approx \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\delta\psi \\ \delta\psi & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(6)から方位角誤差による加速度誤差は式(9)になる.

$$\begin{aligned} \delta\mathbf{A}_\psi &= \tilde{\mathbf{A}}_\psi - \mathbf{A}_\psi = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\psi} & -\sin \tilde{\psi} \\ \sin \tilde{\psi} & \cos \tilde{\psi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\delta\psi \\ \delta\psi & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

#### (2) ロール姿勢角, ピッチ姿勢角による加速度誤差

方位角誤差による加速度誤差と同様にそれぞれ式(10),(11)として得る. この場合はロール, ピッチ姿勢角誤差による重力加速度成分も加算される.

$$\delta\mathbf{A}_\phi = \begin{bmatrix} \delta A_y \\ \delta A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} 0 & -\delta\phi \\ \delta\phi & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta\phi \\ 0 \end{bmatrix} \cdot g \right\} \quad (10)$$

$$\delta\mathbf{A}_\theta = \begin{bmatrix} \delta A_x \\ \delta A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} 0 & \delta\theta \\ -\delta\theta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta\theta \\ 0 \end{bmatrix} \cdot g \right\} \quad (11)$$



#### 4.4 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(9)から判るよう  
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. すなわち, *specific*  
*force*  $\mathbf{A}$  と  $\delta\mathbf{A}$  の位相が  $90^\circ$  ずれた状態としてモデル化で  
きるので, これを式(5)で示す状態方程式において *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  $90^\circ$  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.

#### 4.5 走行軌跡の推定

4.4 節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(5)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した高精度な走行軌  
跡を得ることができる.

#### 4.6 姿勢角の推定

走行軌跡の推定のみであれば 4.4 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  $[a_x, a_z]^T, [A_x, A_z]^T$  に読み替えることで同様に求  
めることができる.

ロール姿勢角誤差は式(5)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(12)を用いて  
算出できる.

$$\delta\hat{\phi} = \tan^{-1} \frac{|\delta\hat{\mathbf{A}}_\phi|}{|\hat{\mathbf{A}}_\phi|} \equiv \tan^{-1} \frac{|\delta\hat{a}_\phi|}{|\hat{a}_\phi|} \quad (12)$$

#### 4.7 走行軌跡・姿勢角推定結果

##### (1) 走行軌跡

代表例として載せたスラローム (図 4) の走行軌跡は  
GPS データと加速度推定データ (*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  
速度誤差が精度良く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 4 の拡大図に示す.  
その標準偏差は  $0.67\text{cm}(1\sigma) \sim 1.01\text{cm}(1\sigma)$  であり, GPS 単  
体精度  $2.7\text{cm}(1\sigma)$  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.

##### (2) ロール姿勢角, ピッチ姿勢角

スラローム時の姿勢角 ( $\phi, \theta$ ) を図 5 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.

ロール姿勢角 ( $\phi$ ) 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 5 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 ( $\theta$ ) については, *specific force* が  
安定していないと考えられる区間 (図 5 の 15~22s 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 RMR (Root Mean  
Residual) 指標<sup>12)</sup>を用いて評価した. その結果を表 3 に  
示す. 結果は  $0.08^\circ_{\text{RMR}} \sim 0.50^\circ_{\text{RMR}}$  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,  $0.75^\circ$  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  
も, 姿勢角推定アルゴリズムの有効性を見て取ること  
ができる.

Table3 Fitting of Attitude measurement

Maneuvering		Fitting	$\phi$ ( $^\circ_{\text{RMR}}$ )	$\theta$ ( $^\circ_{\text{RMR}}$ )
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

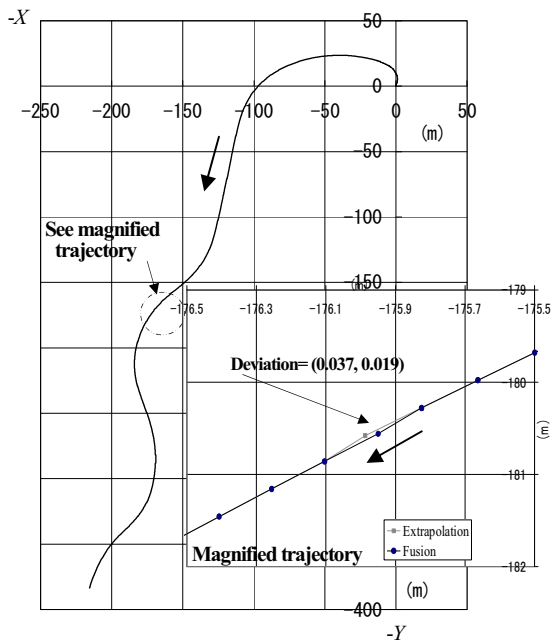


Fig.4 Trajectory of Slalom (typical)

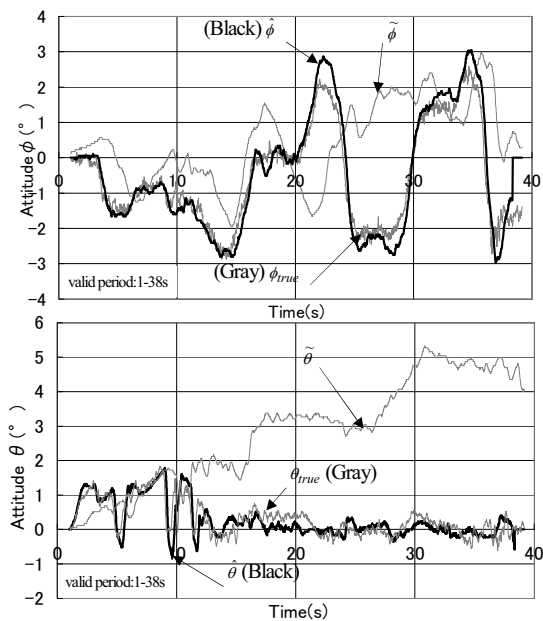


Fig.5 Attitude ( $\phi, \theta$ ) of Slalom

5. まとめ

5.1 最適な走行軌跡計測方法

3章で述べた結果から判るように、GPS と IMU を使用して走行軌跡を計測するためには、システム駆動源としてドライバモデル1を用いた実時間カルマンフィルタによる GPS-IMU の融合方法は以下の優れた特性を有し、走行軌跡計測に対して、最適な方法であることが確認できた。

(1)異なる計測周期, 計測次元の物理量融合

走行軌跡計測に必要な物理量は IMU が計測する加速度を2階積分した位置(積分走行軌跡)とGPSが計測する位置(GPS 走行軌跡)である。前者には計測加速度に含まれる観測雑音成分に由来する積分誤差が蓄積するため、その誤差を抑制する必要がある。カルマンフィルタは対象システム(ビークルダイナミクス)からIMUが計測する加速度とGPSが計測する走行軌跡(位置)について、加速度は短い周期(10ms)、位置は長い周期(200ms)で観測データとして入力する。この時、周期200ms毎のGPS 走行軌跡については、積分誤差が生じないのは自明である。一方、状態遷移を一定周期(10ms)で繰り返す時間更新ループ、観測更新ループで推定される状態変数(加速度、位置)と観測データ(加速度、位置)の差(イノベーションという)および、カルマンゲインによる最小誤差分散推定(推定誤差の2乗平均が最小という意味)により、積分誤差の原因である観測雑音成分を濾波した最適な加速度および位置が計算される。

イノベーションによる状態変数の最適推定機構により、GPS の観測データが存在しない周期においてもIMUの計測加速度から観測雑音を濾波した加速度を積分することで走行軌跡の積分誤差を実時間で抑制することができる。この方法によりIMUが計測する加速度計測周期とGPSが計測する位置計測周期という異なる周期、次元の物理量の実時間融合が可能になった。

(2) システム駆動源の同定モデル

通常は、駆動雑音は白色雑音とし、その白色雑音の全周波数帯域を積分することによって得られるランダムウォークモデルがシステム駆動源の駆動雑音として記述されるが、このモデルは駆動雑音のランダムウォークに対する物理的意味が抽象的であるため入力レベルの同定が困難である。一方、システム駆動源をドライバモデル1という具体的な物理モデルで記述することで、システム駆動源モデルの同定問題を整形フィルタの状態推定問題<sup>10)</sup>へ帰着できることが判った。

(3) 駆動雑音の物理的解釈

実走行データの加速度のPSDの直流成分を駆動雑音と見做すことで、駆動雑音の同定レベルに対する具体的な物理的解釈が可能になった。

5.2 加速度誤差による姿勢角推定

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、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、今後の研究成果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。

- International Technical Meeting 2002,Portland,OR.September, pp.12-20,2002
- 8)高浜盛雄:飛行制御におけるロバスト制御,三菱重工技報,Vol.29,No.2,pp.123-127,1992
- 9)高畑健二ほか:ビークル走行軌跡計測装置に適用する姿勢角推定アルゴリズムの開発と実用性確認,自動車技術会論文集,Vol.38,No.6,pp.241-246,2007
- 10)内田健康ほか:状態推定の理論,コロナ社,pp.96,102-103,2004
- 11)披山大三:次元解法の理論と応用,共立出版,p.30,1956
- 12)岩崎学ほか:実用統計用語事典,オーム社, p.184,2004

(原稿受理日 平成 22 年 9 月 30 日)

### 謝辞

本研究に際して、共同研究者として、元名古屋大学教授 高浜盛雄先生、名城大学教授 奥出宗重先生、元名城大学教授 松原武徳先生から絶大なるご指導・ご支援を受け賜りましたこと、および貴重な研究資料を提供していただいた三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します。

### 参考文献

- 1)近森順ほか:走行軌跡の測定方法について,自動車技術, Vol.38,No.3,pp.350-356,1984
- 2)飯沼裕美ほか:自動車走行軌跡計測装置の開発および実用性確認試験結果,自動車技術会学術講演会前刷集,No.1 - 99,pp.17-20,1999
- 3)高畑健二ほか:単独 GPS 測位によるビークル走行軌跡計測装置の開発,自動車技術会論文集,Vol.38,No.5,pp.21-26,2007
- 4)Mami Ueno *et al.*:Development of Low-cost GPS Autopilot Sensor for Agricultural Vehicle, Proceedings of The European Navigation Conference GNSS 2002,Copenhagen. May,pp.1-9,2002
- 5)村田正秋ほか:航空宇宙における誘導と制御,コロナ社,pp.236-237,1995
- 6)樋口智明ほか:GPS-IMU 融合によるビークル走行軌跡計測装置の開発,自動車技術会論文集,Vol.37,No.6,pp.21-26,2006
- 7)T.Numajima *et al.*:INS/DGPS/VMS Integration for In-Motion Alignment, Proceedings of The Institute of Navigation,15<sup>th</sup> In-