雑音で乱される加速度と誤差を含む車輪速度からの 車両絶対速さの推定[†]

渡 辺 嘉二郎*・家 入 義 郎**・岡 田 雄二郎***・倉 持 昭 彦****

Absolute Speed Estimation of Automobiles from Noisy Acceleration and Erroneous Wheel Speed Measurements

Kajiro WATANABE*, Yoshiro IEIRI**, Yujiro OKADA*** and Akihiko KURAMOTI****

Knowledge of the absolute speed of running direction of an automobile yields simple control rule of the anti-skid breaking system (ABS). The speed of the automobile calculated by the wheel speed includes the abrupt non-stational error due to slip and skid of wheels and the biased error due to the steady state slip. These errors lead to difficulty to develop the ABS. This paper describes how to accurately estimate the absolute speed of the mobiles from the acceleration in running direction of mobiles corrupted by high frequency noise and the erroneous wheel speed measurements.

Here, we employ the extended Kalman filter to reduce the high frequency noises in the acceleration measurement and the biased error in the wheel speed measurement. Further we employ a strategy to switch the values of the Kalman filter coefficient by simple rules to compensate abrupt non-stational errors in the wheel speed measurement. The rules are constructed by a simple knowledge such that when the skid or slip occurs, the weight of the acceleration measurement is set heavier and that of wheel speed measurement is set lighter.

Simulations and model experiment carried

out to verify the proposed strategy demonstrated that the strategy could estimate accurate absolute speed even when the wheel had slip or skid.

Key Words: anti-skid breaking, extended Kalman filter, abrupt noise, bias error, high frequency noise

1. はじめに

車両の対地絶対速さが搭載計器により正確に計測できると、車両の安全性は増す。たとえば、スキッド時の自動車対地速さが計測できるとアンチスキッドブレーキ系が簡単に正確に実現される¹⁾。ここでは、車両絶対速さを正確に求める方策を提案し検討する。

従来の車両搭載型の速さ計測は、①車輪速を利用する方法、②路面からの反射光を用いる方法、その他の方法に分類できる。

方法①は計測した車輪速を車輪半径倍するもので、古くから用いられ^{2),3)}、現在でも主流の速さ計である。この方法は、(1)走行時の定常スリップ、経時的な車輪半径の変化によるバイアス誤差、(2)スリップ、スキッド時のインパルス状の誤差を含む。

光学的方法②は、路面からの不規則な反射光を空間的な尺度として利用する方法である。反射光を進行方向直線上に設置した二つのセンサで計測し、その不規則反射光間のむだ時間を推定する相関法⁴⁾、また空間フィルタ法⁵⁾が代表例である。これらは無接触計測法であり、方法①の接触車輪型の誤差を含まないが、路面反射光以外の光が入ると誤差の原因になる。また低速の場合、いずれも電子的な処理が難しくなる。さらに光学系の焦点合せ、雨滴、泥などによる光センサ汚れの洗浄などの問題がある。

その他、均一磁界中を走行する移動体の金属に発生する渦電流から速さを計測する方法もある⁶⁾が、これ

† 第31回自動制御連合講演会で発表 (1988・10)

* 法政大学工学部 小金井市梶野町 3-7-2

** 法政大学大学院 小金井市梶野町 3-7-2

*** オムロン(株) 京都市右京区土堂 10

**** (株)日立製作所 千代田区神田駿河台 4-6

* Faculty of Engineering, Hosei University, Koganei

** Graduate Student (System Engineering) of Hosei University, Koganei

*** Omron Co., Kyoto

**** Hitachi, Ltd., Chiyoda-ku, Tokyo

(Received July 17, 1989)

(Revised December 19, 1989)

も計測条件に制約がある。

本論は、ある一つの物理量に関わる複数の量を計測し、それらの量から基の量を推定する方法を用いる。複数の物理量の関係は線形の方程式で記述され、それらの量は安価なセンサで計測でき、誤差の性質も互いに独立しているものを選ぶ。ここでは、車輪速と進行方向の加速度を計測し、車両の絶対速さを求める問題を考える。車輪半径の変化が小さい場合、車輪速、車輪半径の変化率、車両の絶対速さ、進行方向加速度の大きさの関係は簡単な線形常微分方程式と代数方程式で記述できる。また進行方向の加速度は統計的に定常で大振幅高周波雑音を含んで計測される。車輪速は方法①のバイアス誤差、インパルス状誤差を含み、誤差の性質は異なる。

このように大きな雑音で乱され加速度とバイアス誤差、インパルス状誤差を含む車輪速より、精度の高い絶対速さを求める方法を以下に示す。

2. システムと問題の記述

Fig. 1 に一方向に走行する車両の車輪速による速さと加速度の計測システムを示す。このシステムに関する変数、定数および後で使用するものを定義する。

t : 時間, τ : 離散計測におけるサンプル間隔

k : 離散時間, a_t : 真の加速度

a_m : 計測加速度, v_t : 真の対地絶対速さ

v_m : 車輪速による測定速さ

v_ω : 車輪速から求めた速さ, ω : 車輪回転速度

r : 基準車輪半径, Δr : 車輪半径の誤差

ε : 車輪半径の誤差率, n_v : 定常速さ計測雑音

n_a : 加速度計測雑音, w_1 : 第2加速度

w_2 : 回転速度微分値の雑音

w_3 : 半径誤差の時間変化率,

R_a : n_a の分散

R_v : n_v の分散,

Fig. 1 Speed and acceleration of a mobile

Q_1 : w_1 の分散, Q_2 : w_2 の分散,

Q_3 : w_3 の分散

P_1 : a_t の推定値の分散, P_2 : v_t の推定値の分散

P_3 : ε の推定値の分散, θ_1 : Rule(R_1) のしきい値

θ_2 : Rule(R_2) のしきい値, θ_3 : Rule(R_3) のしきい値

θ_4 : Rule(R_4) のしきい値

R : 雑音 $\{n_a, n_v\}$ の共分散行列

Q : $\{w_1, w_2, w_3\}$ の共分散行列

P : $\{a_t, v_t, \varepsilon\}$ の推定値の共分散行列

また、変数 $\{a_t, v_\omega, v_t, \varepsilon\}$ の推定値には $\hat{\cdot}$ を付ける。車両速さ v_m は車輪の回転速度 ω に基準半径 r を掛けて求まるものであり、この速さの計測、および進行方向加速度にはつぎの理由で誤差、雑音が含まれる。

(E1) 車輪の半径はタイヤの空気圧の変化、摩耗、車体重量の変化により r から微小にゆっくり変化する。

(E2) 定常走行時でも路面と車輪の間にわずかなスリップが生じている。

(E3) 急な加速あるいは減速時に路面と車輪の間に大きなスリップ、スキッドが発生し、大きなインパルス状の非定常誤差が現れる。

(E4) 速さ計測において、路面の凹凸、車両の振動、計器雑音などによる定常的な雑音に加わる。

(E5) 進行方向加速度計測において、振動などにより、大きな分散をもつ高周波雑音に加わる。

以上の誤差、雑音および計測法に関してつぎの仮定を設ける。

(A1) (E2)の定常走行時のスリップわずかであり、速さに比例する。これより、このスリップによる誤差は、車輪半径変化としてとらえられる。

(A2) (E4), (E5)の雑音はいずれもゼロ平均で定常な正規白色雑音とする。

(A3) 加速度計測において、センサの選択、設計、設置あるいは信号処理により加速、制動による前後方向の加速度のみが計測できるものとする。

仮定(A1)は車輪半径変化のモデリングのために設定され、仮定(A2)はカルマンフィルタの適用を可能にするための条件である。いずれも無理がない。

つぎに仮定(A3)について述べる。自動車の前後、左右、上下方向の加速度を別々に計測するセンサが開発されてきている^{9),10)}。このセンサの仕様は前後方向の加速度範囲 $\pm 0.01\text{ G} \sim \pm 1.1\text{ G}$; 周波数範囲 $\text{DC} \sim 10\text{ Hz}$; 他軸感度 $\pm 0.01\text{ G}$ である。このような加速度センサを利用し、その設置場所、設置法に配慮すれば、前後方向以外の加速度の影響を小さくできる。さらに、3方向の加速度を計測し、非干渉処理を施せば

さらに雑音に強い前後方向加速度が計測できると考えられる。

ここで取り扱う問題は、(E1)～(E5)の誤差、雑音で乱された速さ、加速度のデータから、車体進行方向の対地絶対速さ v_i をオンライン推定することである。

3. 絶対速さの推定

3.1 絶対速さの拡張カルマンフィルタによる推定

車輪回転速 ω からの車両の速さ v_o は

$$v_o = \omega r \quad (1a)$$

で求められる。車輪半径が仮定(A1)の定常走行スリップも含み誤差 Δr をもつ場合には、対地絶対速さは

$$v_i = \omega(r + \Delta r) = v_o(1 + \varepsilon) \quad (1b)$$

となる。計測した速さ、加速度は次式で与えられる。

$$v_m = v_o + n_v \quad (1c)$$

$$a_m = a_i + n_a \quad (1d)$$

真の加速度を微分すると、つぎようになる。

$$\frac{da_i}{dt} = w_1, \quad a_i(0) = a_{i0} \quad (1e)$$

また ε はゆっくり変化する係数であることを考慮に入れて、(1b)式を微分し、項を入れ替えると

$$\begin{aligned} \frac{dv_o}{dt} - \varepsilon \frac{dv_o}{dt} &= a_i - \varepsilon a_m + w_2, \\ v_o(0) &= v_{o0} \end{aligned} \quad (1f)$$

となる。ここで変数 w_2 は次式で与えられる。

$$w_2 = \varepsilon n_a + \varepsilon^2 \frac{dv_o}{dt} \quad (1g)$$

誤差(E1), (E2), 仮定(A1)より ε は小さな値をもち、仮定(A2)より n_a はゼロ平均の正規白色雑音であることより、変数 w_2 もゼロ平均の正規白色雑音とみなせる。また車輪半径の誤差率は微小でゆっくり変化し、 w_3 を小さな値をもつ変数とすると

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = w_3, \quad \varepsilon(0) = \varepsilon_0 \quad (1h)$$

と記述できる。いまつぎのベクトル、行列を定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= \begin{bmatrix} a_i(k) \\ v_o(k) \\ \varepsilon(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}(k) = \begin{bmatrix} w_1(k) \\ w_2(k) \\ w_3(k) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{z}(k) &= \begin{bmatrix} a_m(k) \\ v_m(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n}(k) = \begin{bmatrix} n_a(k) \\ n_v(k) \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}(k) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \tau & 1 & -\tau a_m \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}(k) = \begin{bmatrix} \tau & 0 & 0 \\ 0.5\tau^2 & \tau & 0 \\ 0 & 0 & \tau \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}(k) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2a)$$

(1e), (1f), (1h)式の連立微分方程式をサンプル

間隔 τ で離散値化し、(1c), (1d)式を出力方程式とすると、

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{w}(k), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{z}(k) &= \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{n}(k) \end{aligned} \quad (2b)$$

なる状態方程式が得られる。この方程式の変数にはゆっくり変化する係数 ε が含まれ、拡張状態方程式になっている。変数(システム雑音) $\{w_1, w_2, w_3\}$ は互いに統計的に独立し、雑音(観測雑音) $\{n_a, n_v\}$ も独立しているとして、これらの変数、雑音の共分散行列を

$$\mathbf{Q}(k) = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_v \end{bmatrix} \quad (2c)$$

として(2b), (2c)式につぎの離散値拡張カルマンフィルタを施し $\hat{\mathbf{x}}(k)$ を推定する。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k+1) &= \mathbf{A}(k)\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{P}(k+1)\mathbf{C}(k+1)^T \mathbf{R}(k+1)^{-1} \{ \mathbf{z}(k+1) - \mathbf{C}(k+1)\mathbf{A}(k)\hat{\mathbf{x}}(k) \} \\ \hat{\mathbf{x}}(0) &= \mathbf{x}_0 \end{aligned} \quad (2d)$$

ここで、 $\mathbf{P}(k)$ は $\hat{\mathbf{x}}(k)$ と $\mathbf{x}(k)$ の誤差の共分散行列で次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k) &= \mathbf{M}(k) - \mathbf{M}(k)\mathbf{C}(k)^T [\mathbf{C}(k)\mathbf{M}(k)\mathbf{C}(k)^T + \mathbf{R}(k)]^{-1} \mathbf{C}(k)\mathbf{M}(k) \\ \mathbf{M}(k) &= \mathbf{A}(k-1)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{A}(k-1)^T + \mathbf{B}(k-1)\mathbf{Q}(k-1)\mathbf{B}(k-1)^T \\ \mathbf{P}(0) &= \mathbf{P}_0 \end{aligned} \quad (2e)$$

推定値 $\hat{\mathbf{x}}(k) = [\hat{a}_i(k) \quad \hat{v}_o(k) \quad \hat{\varepsilon}(k)]^T$ の $\hat{v}_o(k)$, $\hat{\varepsilon}(k)$ を(1b)式に代入して、推定値 $\hat{v}_i(k)$ を求める。(2b)式の状態方程式は車両の進行方向加速度がゼロでない時間帯において可観測である。またスリップ、スキッドがなく大きなインパルス状の非定常誤差が印加されなければ、遅いが推定ベクトル $\hat{\mathbf{x}}(k)$ は $\mathbf{x}(k)$ に収束する。これにより絶対速さ推定の基本構造が構築でき、(E4), (E5)の雑音が除去できる。しかし、(E3)のスリップ、スキッドがあると、収束ができなくなる可能性がある。

3.2 拡張カルマンフィルタ諸係数の変更ルール

スリップ、スキッドに伴う非定常誤差を補正するため、また実際に起こらない、あるいは起こりにくい現象を実際に起こりにくくするように拡張カルマンフィルタの係数行列 $\mathbf{R}(k)$, $\mathbf{Q}(k)$, $\mathbf{P}(k)$, および推定変数 $\hat{\varepsilon}(k)$ をつぎの簡単なルールに基づき変更する。

以下、車両定常走行時のシステム雑音、観測雑音の分散には*を付ける。また θ_i はルールのしきい値である。

[スリップ、スキッドの発生時]

(E3)のスリップ、スキッドが発生すると v_m と $\hat{v}_i$ の間に大きな差が現れ、その判定は容易である。この

状況では、計測速さ v_m に大きな誤差が混入したことになりその分散 R_v を大きく、加速度計測の分散 R_a を小さくして、加速度信号に重いウェイトをかけ、カルマンフィルタの応答速さを損なわないようにして状態を推定する。そのためつぎのようなルールを作る。

$$(R_1) \quad \text{If } |\{\hat{v}_i(k) - v_m(k)\} / \hat{v}_i(k)| > \theta_1 \\ \text{Then } R_a = 0.5 \times R_a^* \text{ and } R_v = 1000 \times R_v^* \\ \text{Else } R_a = R_a^* \text{ and } R_v = R_v^*$$

[急加速, 急減速時]

この状況では第2加速度の分散 Q_1 が大きくなる。これに伴い, Q_1 を大きく設定する。また急激な加速度変化に伴い, ε が大きい影響を受け変化してしまう。本来 ε は経時変化であり, 加速度, 速度に比べかなり遅く, 急激な加速度変化によって突然変化しはじめるものではない。そこで, ε の時間変化率 w_3 の分散 Q_3 を小さい値にリセットするとともに, 大きく変化してしまった ε をもとの値にリセットする。ルールはつぎのように記述される。

$$(R_2) \quad \text{If } |\hat{a}_i(k) - \hat{a}_i(k-1)| > \theta_2 \\ \text{Then } Q_1 = 2.0 \times Q_1^*, Q_3 = 0.00001 \times Q_3^* \\ \text{and } \hat{\varepsilon}(k) = \hat{\varepsilon}(k-2) \\ \text{Else } Q_1 = Q_1^* \text{ and } Q_3 = Q_3^*$$

[車輪半径誤差率 ε 変化のローパスフィルタリング]

車輪半径の誤差率 ε の変化はきわめて遅いが, この変化を高感度に捕らえないと, (E1), (E2) の誤差は吸収できない。誤差率 ε の高い推定感度を保ちつつ, 急に ε は変化しないようにする論理ローパスフィルタを施す。これはルール (R2) にもすでに採用されているがさらに一般的にもう一つのルールを設けておく。

$$(R_3) \quad \text{If } |\hat{\varepsilon}(k) - \hat{\varepsilon}(k-1)| > \theta_3 \\ \text{Then } \hat{\varepsilon}(k) = \hat{\varepsilon}(k-2)$$

[負の速さのリセットと推定のスピードアップ]

前方に進行中の車両が負の速さになることは考えにくい。車両が低速走行する場合, 雑音によって推定絶対速さが負になることがある。この場合, この値をゼロにリセットするとともに, カルマンフィルタの推定値の共分散行列を初期値にリセットし, 推定の収束速度を速める⁸⁾。

$$(R_4) \quad \text{If } \hat{v}_i(k) < \theta_4 \\ \text{Then } \mathbf{P}(k) = \mathbf{P}_0 \text{ and } \hat{v}_i(k) = 0$$

4. シミュレーションと模型実験による確認

3章の速さ計測の方法の妥当性をシミュレーションと簡単な模型実験によって検証する。

4.1 シミュレーション

Fig. 2(a)の破線に進行方向の絶対速さを示す。こ

(a) Simulated (wheel) speed with the biased error, abrupt error, and steady state noise

(b) Simulated acceleration with the high frequency steady state noise

Fig. 2

の絶対速さにスリップ, スキッドによるインパルス状の誤差とバイアス誤差, 統計的に定常な雑音を加えて車輪速を発生する。Fig. 2(a)の実線に車輪速を示す。また, Fig. 2(b)の破線に真の加速度を示す。この加速度にゼロ平均の正規性高周波雑音を印加し計測加速度を発生する。Fig. 2(b)の実線に測定加速度を示す。シミュレーション条件を記述する。

[シミュレーション波形発生]

シミュレーション時間	40.0 s
サンプル間隔 τ	0.01 s
車輪半径の誤差率 ε	2.0%
第2加速度の分散 Q_1^*	$5.14 \text{ m}^2 \text{ s}^{-6}$
定常走行時の変数 w_2 の分散 Q_2^*	$1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-4}$
定常走行時の変数 w_3 の分散 Q_3^*	$3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-2}$
加速度雑音の分散 R_a^*	$0.80 \text{ m}^2 \text{ s}^{-4}$
速さ雑音の分散 R_v^*	$0.05 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$
スリップ発生時間	3.0~6.0 s
スキッド発生時間	26.0~29.0 s

[カルマンフィルタの初期条件]

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \times 10^{-3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[ルールのしきい値]

$$\theta_1 = 10\%, \quad \theta_2 = 0.05 \text{ ms}^{-2}, \quad \theta_3 = 1.0\%, \\ \theta_4 = 0.0 \text{ ms}^{-1}$$

Fig. 3 Estimated speed via the Kalman filter

Fig. 4 Estimated speed via the proposed method. Kalman filtering with assist of the four rules constructed by the simple knowledge

Fig. 3 にルール無し拡張カルマンフィルタによる推定速さを示す。3.0~6.0 s の間に発生したスリップにより、推定値は大きな影響を受け継続する。これは誤差率 ε に誤推定値が残留するためである。

Fig. 4 にルール付きカルマンフィルタによる推定速さを示す。Fig. 4 の上段には設定した絶対速さと推定値を示す。下段はルールのオン・オフの状況を示す。波形が上にある場合ルールが適用され、下にある場合適用されない。この場合、スリップ、スキッド発生時でも精度良く絶対速さを推定している。また加速度も全体として精度良く推定されている。また誤差率はゆっくり推定し 30 s 以降でほぼ設定値に収束した。

4.2 模型実験

Fig. 5 に示す模型装置で実験を行った。この装置は鉛直軸回りの回転アームに車両を付け、車両は水平面上を円周走行しかできないようにしたものである。車両はモータで駆動し、電磁ブレーキで減速する。車両の速さは車輪軸に取り付けたタコジェネレータ T_B より求め、絶対速さは垂直軸の回りのアームの回転速度をタコジェネレータ T_A で計測し、それにアーム半径を掛けることで求めた。加速度はタコジェネレータ T_A から求めた絶対速さの差分をとって求めた。装置および実験パラメータはつぎのとおりである。

車輪にかかる重量	0.71 kgf
アームの長さ L	0.623 m

Fig. 5 Experimental system

車輪半径 r	0.0302 m
実験時間	14.4 s
サンプル間隔 τ	0.0144 s

定常走行におけるシステム雑音、観測雑音の共分散行列をつぎのように設定する。

$$Q = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 3 \times 10^{-3} \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

推定値の共分散行列の初期値 P_0 はシミュレーションの場合と同じ値にし、またルールのしきい値は

$$\theta_1 = 5.0\%, \quad \theta_2 = 0.06 \text{ ms}^{-2}, \quad \theta_3 = 0.3\%, \\ \theta_4 = 0.0 \text{ ms}^{-1}$$

とした。

Fig. 6(a)の実線はタコジェネレータ T_A による絶対速さ v_i 、破線は T_B による速さ v_m である。減速時にタイヤがロックされ、 $v_m = 0$ となり大きなインパルス状の誤差が発生している。加速度は Fig. 6(a)の破線データの差分より求めた。Fig. 6(b)に示すように非常に大きい振幅の高周波雑音で乱されている。

Fig. 7 にルール付きの拡張カルマンフィルタで推定した速さ、タコジェネレータ T_A で直接計測した速さを示す。シミュレーションの場合と同様に精度良く推定している。推定加速度では、測定の大きな振幅の高周波雑音が除去されている。

4.3 シミュレーションと模型実験の補足説明

シミュレーションと模型実験のルール付きカルマンフィルタリングにおいて、ルール中の分散の倍率 (R_1 の場合、0.5 倍と 1000 倍; R_2 の場合 2.0 倍と 0.00001 倍)、各ルールのしきい値 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ および推定値の共分散の初期値 P_0 の値は正確にここで示した値でなければならないわけではない。数倍あるいは 1 桁異なっても同じような推定が可能である。したがってこれらのパラメータの調整において必ずしもファインチューニングを必要としない。システム雑音、観測雑

(a) Measured (wheel) speed when the wheel has the steady state slip and lock when breaking

(b) Measured acceleration when the wheel has the steady state slip and lock when breaking

Fig. 6

Fig. 7 Estimated absolute speed by the proposed method

音の共分散行列の値の設定においても同様なことがいえる。

5. む す び

分散の大きな高周波定常雑音で乱された車両進行方向加速度とスリップ、スキッド、バイアス誤差、定常雑音を含む車輪速から、精度良く車両の絶対速さを求

める方法を提案した。この方法は車両の車輪速、絶対速、車体加速度、車輪半径の誤差を関係づける状態方程式に拡張カルマンフィルタを応用したものである。スリップ、スキッドなどの大きな誤差が混入された場合、簡単なルールに基づきフィルタ係数である観測雑音の共分散行列や推定値の共分散行列の初期値および状態の値をリセットする。

この方法の有効性を確認するためにシミュレーションと模型実験を行った。その結果、拡張カルマンフィルタの諸係数やルールのリセット値はファインチューニングなしでも正常に動作し、大きなインパルス状の誤差、バイアス誤差、定常ランダムな雑音を含む車輪速と大きな分散をもつ高周波雑音で乱された加速度データから精度の良い車体の絶対速さが推定できた。この推定値はスリップ、スキッド発生時でも精度が良く、自動車の ABS における基準速さ信号として有効に使える。

この方式を実用化するにあたっては、仮定(A3)を満たす加速度センサおよび計測システムの実施設計が必要である。またカルマンフィルタの諸定数、ルールのしきい値は実車に即してチューニングする必要がある。場合によってはルールの数を増やす必要もある。

参 考 文 献

- 1) The Automobile Division of The Institution of Mechanical Engineers: Anti-Lock Breaking Systems for Road Vehicles, Conference of Institution of Mechanical Engineers (London) (1985)
- 2) 志賀, 水谷: カーエレクトロニクス, 146/148, 山海堂 (1986)
- 3) 藤本三治: 自動車電装品, 250/255, 電気書院 (1965)
- 4) 井戸川, 渡井, 大葉, 高井: 相関を用いる自動車の速度計測, 計測自動制御学会論文集, 11-4, 473/478 (1975)
- 5) 内藤, 狼, 小林: 空間フィルタによる速度計測, 計測と制御, 7-11, 761/772 (1968)
- 6) 芥田, 高梨: 移動体の速度計測装置, 計測と制御, 7-5, 357/358 (1968)
- 7) A. H. Jazwinski: Stochastic Process and Filtering Theory, Mathematics in Science and Engineering, 64, Academic Press (1970)
- 8) T. Yamada, K. Watanabe, K. Konishi and T. Soeda: A Sequential Failure Detection Approach and the Identification of Failure Parameters, Int. J. Sys. Sci., 10-7, 827/836 (1979)
- 9) 小林, 大林, 浅岡: 自動車加速度センサの開発, 日産技報, 23, 157/169 (1987)
- 10) 番, 別所, 竹内: 自動車用半導体加速度センサ, 三菱電機技報, 61-8, 637/640 (1987)