故障検出フィルタによる4WS車両制御系の異常推定*

山口 裕之^{*1}, 大澤 正 敬^{*2}
岩間 紀 男^{*2}, 山本 真 規^{*3}The Estimation of Ambiguous Change in 4WS Control System
Using Failure Detection FilterHiroyuki YAMAGUCHI, Masakaka OSAWA,
Norio IWAMA and Masaki YAMAMOTO

In the latest passenger cars, 4WS, a suspension system, and other vehicle systems are controlled using various sensors and actuators. Each control system is equipped with a fail-safe device to guarantee the safety. However, the fail-safe device can only detect unequivocal failures such as a short circuit. This paper presents a new method for estimating the ambiguous change in a 4WS control system using a compact failure detection filter in size. This filter is designed to discriminate ambiguous failure modes in the control system by processing output errors between sensors and an observer. The result of the experiments using a 4WS vehicle revealed that the filter can estimate with high accuracy the failures of the sensors and the actuator which conventional fail-safe devices cannot detect. The effects of a lateral wind and other disturbances on the filter were also clarified.

Key Words: Automobile, Observer, Sensor, Actuator, Diagnostics

1. 結 言

近年の車両では、さまざまなセンサ・アクチュエータが装着され、4WS、懸架系等能動的な制御が行われている。このような制御系では、信頼性向上のため各制御箇所ごとにフェールセーフ機能が付加されているが、この機能では断線やショート等の明らかな故障しか検出できず、より信頼性を高めることが課題となっている。したがって、完全な故障に至る途中の状況が検出でき、かつ実装規模が小さい故障検出システムが望まれる。

このような要求に対しては、センサ出力とオブザーバ出力との推定誤差から制御系の故障を特定する故障検出フィルタBJDF(Beard Jones Detection Filter)⁽¹⁾⁽²⁾等の適用が望ましいといえる。近年、このような故障検出フィルタを自動車に適用し、シミュレーション検討した結果の報告が見られる⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、実用上課題となるモデル化誤差や外乱に対する影響はシミュレーションだけでは明らかとはならず、これら

の点を明らかにすることが重要である。

そこで本報では、4WS実車を対象として、コンパクトな故障検出フィルタBJDFを用いた異常推定アルゴリズムを構築し、従来のフェールセーフ機能では識別しにくい故障の検出および横風等の外乱に対する影響を検討した実験結果を報告する。

2. 対象とした4WS車両

対象とした4WS車両モデルを図1に、また車両諸元を表1に示す。

これを2自由度モデルで表すと次式となる。

Fig.1 4WS vehicle system

* 原稿受付 1995年7月18日。

*¹ 正員、(株)豊田中央研究所(〒480 11 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41-1)。*² (株)豊田中央研究所。*³ (株)トヨタ自動車(〒410 11 裾野市御宿1200)。

$$-Cr\left(\beta - \frac{Lr}{V}\dot{\theta} - u\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$I\ddot{\theta} = -Cf\left(Lf\beta + \frac{Lf^2}{V}\dot{\theta} - Lf\delta_r\right) \\ + Cr\left(Lr\beta - \frac{Lr^2}{V}\dot{\theta} - Lru\right) \dots\dots\dots (2)$$

後輪制御量 u は、8 ms の制御周期として次式で算出する。

$$u = 0.1 \dot{\theta} \dots\dots\dots (3)$$

横加速度 $\ddot{y}$ と滑り角速度 $\dot{\beta}$ 、ヨーレート $\dot{\theta}$ 、車速 V には、次式が成り立つ。

$$\dot{y} = V(\dot{\beta} + \dot{\theta}) \dots\dots\dots (4)$$

そして、後述する状態量 X の中に横加速度を取込むため、横加速度センサは、次式のようにダイナミクスをもつと仮定する。

$$\ddot{y}' = \frac{1}{1+T \cdot s} \ddot{y} \dots\dots\dots (5)$$

時定数 T は、サンプリング周期を考慮しつつ、できるだけ高周波数までゲインが減衰しないような値として $T=5.3$ ms(カットオフ周波数 30 Hz)に設定した。また、 s はラプラス演算子であり、 $'$ はダイナミクスが与えられた信号であることを示す。式(5)より次式が得られる。

$$\ddot{y}' = -1/T \dot{y}' + 1/T \ddot{y} \dots\dots\dots (6)$$

式(1)～(6)より、図1の車両に対し次の状態方程式が得られる。

$$\dot{X} = AX + BU \dots\dots\dots (7)$$

$$Y = CX \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 A, B, C の各マトリックスは次のとおりである。

$$A = \begin{bmatrix} -(Cf+Cr)/mV & -1-(LfCf-LrCr)/mV^2 & 0 \\ (LrCr-LfCf)/I & -(Lf^2Cf+Lr^2Cr)/IV & 0 \\ -(Cf+Cr)/mT & -(LfCf-LrCr)/mVT & -1/T \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

Table 1 Constant of vehicle

Car mass	(m)	1979.0 kg
Yaw moment of inertia	(I)	3487.9 kg・s ²
Cornering power(front)	(Cf)	2×85369 N/rad
	(Cr)	2×125150 N/rad
Distance of front axle-C.G. (Lf)		1.256 m
rear axle-C.G. (Lr)		1.524 m
Steering gear ratio		14.6

C.G.: Center of Gravity

$$B = \begin{bmatrix} Cf/mV & Cr/mV \\ LfCf/I & -LrCr/I \\ Cf/mT & Cr/mT \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

また、 X, Y, U は次式のとおりである。

$$X = [\beta, \dot{\theta}, \ddot{y}']^T \dots\dots\dots (12)$$

$$Y = [\dot{\theta}, \ddot{y}']^T \dots\dots\dots (13)$$

$$U = [\delta_r, u]^T \dots\dots\dots (14)$$

3. 想定した故障および外乱

故障検出の対象部位は、後輪アクチュエータ、横加速度センサ、ヨーレートセンサとした。図2に設定した故障モードを、表2に後輪アクチュエータ、横加速度センサ、ヨーレートセンサのフルスケールを示す。

また、車両運動に対し故障と同じような影響を与える外乱として、横風、カント路(傾斜角小)、バンク路(傾斜角大)、低 μ 路を想定し故障との識別性を検討した。

4. 故障検出の原理

図3に故障検出系の概略図を、図4にその原理を示す。まず、式(7)、(8)の車両モデルに基づいたオブザーバにより状態推定を行う。正常時は推定値とセンサ値が一致するが、故障時は両者が一致せず残差 $\Delta \ddot{y}$ 、 $\Delta \dot{\theta}$ が発生する。そこで、残差のどちらかがしきい値を超えたとき故障を検出し、残差比率 $\Delta \ddot{y} / \Delta \dot{\theta}$ と設計時の値とを照合して故障箇所を特定する⁽¹⁾⁽²⁾。

この故障検出フィルタにおけるオブザーバは、故障箇所に応じて固有の一定残差比率を常に保つように設計するため、故障箇所の特特定までが可能となる。以下に、設計原理を簡単に述べる。

Table 2 Full scale of each failure part

	Actuator	$\ddot{y}$ sensor	$\dot{\theta}$ sensor
Full scale	±1deg	±9.8m/s ²	±20deg/s

Fig. 2 Failure mode

Fig. 3 Failure detection system

Fig. 4 Failure detection α identification

4.1 故障の記述 故障による車両への影響の仕方はイベントベクトルと呼ばれる故障ベクトルを用いて記述する。すなわち、アクチュエータ故障、センサ故障を次式のように記述する。

$$\dot{X} = AX + BU + fn \quad (15)$$

$$Y = CX + gn \quad (16)$$

ただし、 f は後輪アクチュエータ故障、 g は横加速度センサ故障およびヨーレートセンサ故障を記述するイベントベクトルで、 n は大きさが任意の時間関数である。センサ故障の場合、センサのダイナミクスを仮定すると、センサで生じた故障はそのダイナミクスを経て出力されることができ、アクチュエータ故障と同様のイベントベクトル f という形で記述できる。これにより故障検出フィルタの設計が容易となる⁽²⁾。

アクチュエータ故障により後輪制御量 u が $u + \Delta u$ に変化したとすると式(15)は B マトリックスに注目して次式となる。

$$\dot{X} = AX + [B_1 B_2][\delta_f, u]^T + B_2 \Delta u \quad (17)$$

したがって、イベントベクトル f は式(10)より次式となる。

$$f = B_2 [Cr/mV - LrCr/I \ Cr/mT]^T \quad (18)$$

4.2 故障検出フィルタ 故障検出フィルタは、式(7)、(8)を用いた次のオブザーバ形式で表される。

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + BU + D[Y - \hat{Y}] \quad (19)$$

$$\hat{Y} = C\hat{X} \quad (20)$$

アクチュエータ故障では状態量 X と推定量 $\hat{X}$ との誤差方程式は次式となる。

$$\dot{q} = [A - DC]q + fn \quad (21)$$

$$e = Cq \quad \text{ただし、} q = X - \hat{X}, e = Y - \hat{Y} \quad (22)$$

故障発生に従い状態の推定誤差 q は次の空間 $\mathcal{F}$ 上を推移する。

$$\mathcal{F} : \{f, [A - DC]f, [A - DC]^2 f, [A - DC]^3 f, \dots\} \quad (23)$$

オブザーバゲイン D は、次式のようにイベントベクトル f が $[A - DC]$ の固有ベクトルとなるよう決定し、推定誤差 q における状態間の非干渉化を図る。

$$[A - DC]f = \lambda f \quad (24)$$

ただし、 λ は $[A - DC]$ の固有値(フィルタの極)である。式(24)の関係をを用いると式(23)は次式となる。

$$\mathcal{F} : \{f, \lambda f, \lambda^2 f, \lambda^3 f, \dots\} \quad (25)$$

これにより、例えば q の次数が2とすると残差比率は次式となり、故障箇所のイベントベクトル f に応じた固有の一定残差比率を持つ。

$$q_{(1)}/q_{(2)} = f_{(1)}/f_{(2)} \quad (26)$$

ただし、

$$q = [q_{(1)} \ q_{(2)}]^T, f = [f_{(1)} \ f_{(2)}]^T$$

である。

5. 故障検出フィルタの設計

上記に基づき故障検出フィルタの設計手順を簡単に述べる。

5.1 故障検出フィルタの設計手順

(1) 式(7)、(8)に示されるような対象モデルの状態方程式を作成する。

(2) 状態方程式に基づき、故障検出対象のイベントベクトルを作成する。センサ出力数よりもイベントベクトルの数が少ない場合、ダミーのイベントベクトルを作成する。

(3) 作成したイベントベクトルの中から故障検出対象のイベントベクトルを含み、センサ出力数に等しい本数の独立なイベントベクトルを選択する。

(4) 状態方程式およびイベントベクトルを離散化し、式(24)を満たすフィルタゲイン D を求める。

(5) 設計したフィルタゲイン D により固有の残差比率を保ち故障検出が可能となるのは、(3)において選択したイベントベクトルおよびその線形和で記述できるイベントベクトルを持つ故障である⁽¹⁾⁽²⁾。線形和で記述できない場合は、別個に故障検出フィルタを作成する必要がある。

今回の場合、対象としたセンサ、アクチュエータ故障は、後述するイベントベクトルはすべてがお互いに独立となるため、上述の理由から複数の故障検出フィルタを構成する必要がある。以下、アクチュエータ故障検出フィルタ、センサ故障フィルタの具体的な設計方法について説明する。

5.2 アクチュエータ故障検出フィルタ 式(7)

～(11)より、アクチュエータ故障、横加速度センサ故障のイベントベクトルを次のように設定する。ただし、横加速度センサ故障のイベントベクトルは上述したダミー用のイベントベクトルである。

アクチュエータ故障：

$$f_1 = [1/mV \quad -Lr/I \quad I/mT]^T \quad \dots\dots\dots (27)$$

横加速度センサ故障：

$$f_2 = [0 \quad 0 \quad 1]^T \quad \dots\dots\dots (28)$$

ここで、横加速度センサについてはセンサのダイナミクスを仮定している。

式(7)～(10)および(27)をサンプリング周期 8 ms として離散系に変換し、式(24)を用いてオブザーバゲイン D を計算した結果、次式となった。

$$D = \begin{bmatrix} -0.0476 & 0.0 \\ 0.7086 & 0.0 \\ 12.2727 & 0.035 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (29)$$

ただし、 $\lambda=0.18637$ (連続系で $s=-210$)とした。このオブザーバゲイン D によって配置される $[A \quad DC]$ の固有値 p は次のようになった。

$$p = 0.18637, 0.18637, 0.94490 \quad \dots\dots\dots (30)$$

5.3 センサ故障検出フィルタ センサ故障の検出フィルタを設計容易とするため、ヨーレートセンサについても式(5)と同じセンサダイナミクスを与えた車両モデルを考える。すなわち、状態量 X および出力 Y を次式とする。

$$X = [B, \dot{\theta}, \ddot{y}, \dot{\theta}]^T \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$Y = [\ddot{y}, \dot{\theta}]^T \quad \dots\dots\dots (32)$$

ただし、式(32)におけるヨーレート出力の単位は deg/s とする。そして、横加速度センサ、ヨーレートセンサ故障について式(28)と同様に次のイベントベクトルを設定する。

横加速度センサ故障：

$$f_3 = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]^T \quad \dots\dots\dots (33)$$

ヨーレートセンサ故障：

$$f_4 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad \dots\dots\dots (34)$$

式(7)～(10)をサンプリング周期 8 ms で離散系に変換し、式(33)、(34)を用いてオブザーバゲイン D を計算した結果、次式となった。

$$D = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 \\ 0.035 & 0.0 \\ 0.0 & 6.11 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (35)$$

ただし、フィルタの極は $\lambda=0.18637$ とした。このオブザーバゲイン D によって配置される $[A \quad DC]$ の固有値 p は次のようになった。

$$p = 0.18637, 0.18637, 0.91994 \pm i0.046121 \quad \dots\dots\dots (36)$$

5.4 得られる残差比率 式(27)、(33)、(34)より

故障箇所特定のための設計時の残差比率を次式のように設定する。

(1) アクチュエータ故障

$$\Delta \ddot{y} / \Delta \dot{\theta} = f_{1(3)} / f_{1(2)} = -111 \quad \dots\dots\dots (37)$$

イベントベクトル f_1 はサンプリング周期 8 ms で離散系に変換されたものとする。また、括弧で示された番号は式(26)と同じくベクトルの要素番号を表す。

(2) 横加速度センサ故障

$$\Delta \dot{\theta} / \Delta \ddot{y} = f_{3(4)} / f_{3(3)} = 0 \quad \dots\dots\dots (38)$$

(3) ユーレートセンサ故障

$$\Delta \ddot{y} / \Delta \dot{\theta} = f_{4(3)} / f_{4(4)} = 0 \quad \dots\dots\dots (39)$$

表3に各故障の残差比率の設計値をまとめる。

5.5 シミュレーションおよび結果 設計したア

クチュエータ故障検出フィルタ、センサ故障検出フィルタを用いて故障検出シミュレーションを行った。

シミュレーションでは、式(7)、(8)で表される車両モデルにアクチュエータ故障、センサ故障を加えた場合の故障箇所特定の可否を調べた。図5にアクチュエータ故障の検出結果、図6に横加速度センサ故障の検出結果を示す。故障はアクチュエータ、横加速度センサともにステップモードとし、アクチュエータ故障は故障量 $u^*=0.3$ deg、横加速度センサ故障は故障量 $\ddot{y}^*=1.5$ m/s² とした。図5よりアクチュエータ故障の発生後、ただちに横加速度残差 $\Delta \ddot{y}$ 、ヨーレート残差

Table 3 The room in steady state frequency area

Failure part	The objective residual rate
Actuator	$\Delta \ddot{y} / \Delta \dot{\theta} = -111$
$\ddot{y}$ sensor	$\Delta \dot{\theta} / \Delta \ddot{y} = 0$
$\dot{\theta}$ sensor	$\Delta \ddot{y} / \Delta \dot{\theta} = 0$

Fig. 5 Actuator failure ($u^*=0.3$ deg) Fig. 6 Lateral acceleration sensor failure ($\dot{y}^*=1.5$ m/s²)

$\Delta\dot{\theta}$ が現われている。そして、このときの残差比率は $\Delta\dot{y}/\Delta\dot{\theta} = -111$ となって表3におけるアクチュエータ故障の残差比率と一致し、アクチュエータ故障であると特定できる。また、図6より横加速度センサ故障の発生後、ただちに横加速度残差 $\Delta\dot{y}$ のみが現われている。そして、この残差比率は $\Delta\dot{\theta}/\Delta\dot{y} = 0$ となって表3における横加速度センサ故障の残差比率と一致し、横加速度センサ故障であると特定できる。

6. モデル化誤差対策

故障検出フィルタは、表1の車両定数をもとに線形な車両モデルを用いて設計している。したがって、例えばタイヤ交換などによる車両定数の変化、あるいはモデル化誤差等による故障の誤検出という問題を考慮しておく必要がある。図7は、タイヤのコーナリングパワー C_f, C_r が1.5倍に変化した場合の操舵入力から横加速度出力までの伝達特性の変動を示したものである。図中には、今回の実験で得られた操舵のパワースペクトル密度を併せて示してある。図7において、周

Table 4 The room in steady state frequency area

Failure part	The room for objective residual rate
Actuator	$\Delta\dot{y} / \Delta\dot{\theta} = -111 \pm 30$
$\dot{y}$ sensor	$\Delta\dot{\theta} / \Delta\dot{y} = 0 \pm 0.5$
$\dot{\theta}$ sensor	$\Delta\dot{y} / \Delta\dot{\theta} = 0 \pm 0.2$

Fig. 7 The frequency characteristics of modeling error and power spectrum density of steering input

Fig. 8 Frequency characteristic of notch filter

波数領域を定常域、操舵域、高周波(応答)域の三つに分け、モデル変化(誤差)の対策を次のように考えた。

(1) 定常域は、故障のランプ、ステップ故障の周波数帯域でありモデル変化は故障時の残差比率の変化となって現れる。そこで、故障箇所判定のための残差比率の照合値に幅をもたせて対処する。表4にそれぞれの故障に対して設けた照合値の幅を示す。

(2) 高周波(応答)域は図7ではモデル変化による影響が大きく現れているが、入力である操舵のパワーは小さいため、実際には残差への影響はあまり問題とならない領域である。そこで、残差にローパスフィルタ処理を施すことで対処する。このローパスフィルタ処理はセンサノイズ除去の意味も併せもつ。

(3) 操舵域は、操舵のパワーが最も大きい領域でありモデル化誤差の影響も顕著に現れる部分である。そこで、人間の操舵周波数が0.1~1 Hz程度に限られ

Table 5 Threshold for the failure detection

Residual	The failure detection filter	
	Actuator	Sensor
$\Delta \ddot{y}$	0.36m/s^2	0.36m/s^2
$\Delta \dot{\theta}$	$2.8 \times 10^{-3}\text{rad/s}$	0.7deg/s

Fig. 9 Effect of modeling error in residual

Fig. 10 Flow chart of the failure detection

るということに着目し、この帯域のゲインを下げる帯域除去フィルタを施すこととする。

以上のうち、(2)、(3)の対策の効果確認のため、図8に示すモデル化誤差対策フィルタを横加速度残差に施した結果を図9に示す。図9は、モデル化誤差対策フィルタの効果を横加速度センサのランプ故障を例に示したものである。処理前では▼で示した故障発生以前から操舵時モデル化誤差により残差が大きく発生し、しきい値を超えて故障の誤検出が行われる。しかし、処理を施した結果、モデル化誤差による余分な残差およびセンサノイズが除去でき、故障検出に必要な成分のみが抽出できている。

Fig. 11 Failure of the actuator (step)

Fig. 12 Failure of the yaw rate sensor (ramp)

しきい値は故障の誤検出がなく、かつ、故障発生時には確実に故障検出できるよう設定される。具体的にはレーンチェンジにおける残差 $\Delta \ddot{y}$ 、 $\Delta \dot{\theta}$ (モデル化誤差対策フィルタ処理値) の最大値の3~3.5倍をそれぞれしきい値として設定した。表5に各故障検出用のしきい値を示す。

7. 実験方法および結果

故障検出アルゴリズムは、図10に示すフローチャートにしたがい、32 bit パーソナルコンピュータを用いてC言語で記述した。処理時間は2.8 msである。そして、4WS実験車を用い、車速80 km/h、直進および4秒レーンチェンジ中に、コンピュータ内で疑似発

Fig. 13 Failure of the lateral acceleration sensor (64 ms impulse)

Fig. 14 Lateral wind (20 m/s)

Table 6 Failure detection performance

Failure mode	Ramp	Step	Impulse	
			16 ms	64 ms
Actuator	100%(6/6)	100%(6/6)	—	—
ẏ sensor	100%(6/6)	—	83%(5/6)	100%(6/6)
θ̇ sensor	100%(6/6)	—	67%(4/6)	100%(6/6)

Table 7 Disturbance identification performance

	Rate of correct identification	
Wind(20 m/s)	100%(3/3)	No erroneous detection (Both residuals are smaller than the threshold)
10 m/s	100%(3/3)	
Cant road	100%(2/2)	
Lane change on slippery road	100%(2/2)	Erroneous detection at non liner range
Spin on slippery road	0%(0/2)	
Bank road	100%(2/2)	Achievement from residual ratio

Fig. 15 Slippery road

生させた故障および外乱を車両に印加して実験した。

図11にアクチュエータのステップ故障、図12にヨーレートセンサのランプ故障、図13に横加速度センサの瞬間故障の検出結果を示す。図11～13より設定した種々の故障に対し、確実な故障検出ができていたことがわかる。また、外乱に対する影響として、図14に横風、図15に低 μ 路走行の結果を示す。その結果、横風については残差がしきい値を超えないという理由により、故障なしと判定できた。一方、低 μ 路走行では、スピンのような極端な走行状況において、残差比率が故障の残差比率と一致した時点で故障と誤認識し、モデルに基づいた本検出手法の限界を把握した。しかしながら、低 μ 路スピンは他の簡易な手法で認識でき、

これらの診断結果を併用すれば、故障の誤認識は防止できる。

以上の故障検出性能および外乱との識別性能を表6、7に示す。表6より、従来のフェールセーフ機能では検出が難しいとされている故障について、本故障検出システムにより高い確率で故障検出ができることがわかる。また、表7より通常走行で受ける程度の外乱は故障と区別できた。

8. ま と め

以上、故障検出フィルタを4WS実車に適用した結果をまとめる。

(1) 車両搭載のため、故障検出フィルタにおける

車両モデルは簡易な二自由度モデルとし、モデル化誤差の影響を帯域除去フィルタで吸収した。

(2) 故障が正常か識別しにくい中間的なセンサ、アクチュエータ故障に対し、本システムでは 100% 近い検出率が得られた。

(3) 横風等の外乱に対する影響を調べ、通常レベルの外乱は本システムは故障と区別できた。一方、スピン等の限界状態では、線形な故障検出フィルタは適用できなかった。

しかし、低 μ 路スピン等非線形性が非常に強い領域では他の簡易な手法で外乱分離ができるため、これらとの併用により本システムは実車で使用可能と考え

る。

文 献

- (1) Jones, H. L., *Failure Detection in Linear Systems*, Ph. D. Thesis, (1973), M. I. T.
- (2) Meserole, Jr., *Detection Filters for Fault-Tolerant Control of Turbofan Engines*, Ph. D. Thesis, (1981), M. I. T.
- (3) Ribbens, W. B., A Mathematical Model Based Method for Diagnosing Failures in Automotive Electronic Systems, *SAE Papers* No. 910069 (1991).
- (4) Cormier, R. Jr., A New Method of Failure Detection and Isolation for Sensors and Actuators, *IECON '91*, (1991), 2139-2144.