微分フィルタの周波数特性に基づく空燃比センサの診断

青 野 俊 宏*・清 村 章**

An Air Fuel Ratio Sensor Diagnosis Method Based on Frequency Characteristics of Differential Filter

Toshihiro AONO* and Akira KIYOMURA**

OBD (On-Board Diagnosis) system is required in North America to prevent malfunction of automotive engine control systems and to keep emissions clean. Diagnosis of A/F (Air Fuel Ratio) sensor is one function of OBD system. In conventional methods, large amplitude vibration of fuel injection is required and the A/F sensors are diagnosed on the basis of their response to the vibration. In this paper, an A/F sensor diagnosis method without special fuel injection control is proposed. The proposed method detects changes in the A/F signal frequency which are caused by a decreased A/F sensor response. The change in the A/F signal frequency is detected on the basis of the fact that the gain of the differential filter is proportional to the input signal frequency. This method was evaluated using engine bench data. Even in the worst case, the required diagnosis was performed within 17 seconds.

Key Words: A/F sensor, OBD, engine, signal processing

1. はじめに

車検制度のない北米では、故障した自動車が走り続ける可能性がある。このような事態を防ぐため、車載コンピュータにはエンジンを制御するセンサ・アクチュエータの故障を診断する機能を備えることが1988年よりカリフォルニア州で義務付けられた。このような車載コンピュータに備えられているエンジン制御系を診断する機能はOBD (On Board Diagnosis: 車載故障診断) と呼ばれている。さらに1996年からはより高度な診断機能であるOBDIIが全米で義務付けられた。OBDIIと同等な機能は、2001年からは欧州で、2008年からは日本でも義務付けられた^{1), 2)}。

自動車のエンジンで燃料と空気の混合気が燃焼する際に、窒素酸化物 NO_x、炭化水素 HC、一酸化炭素 CO が発生する。これらの有害物質は三元触媒によって無害な物質に変換されるが、三つの有害物質の変換効率空燃比に依存し、空燃比を14.7に保つと三つの有害物質を同時に高効率で無害物質に変換できる³⁾。自動車のエンジンでは、空燃比センサにより排気ガス中の酸素イオン濃度を計測し、これから空燃比を推定し、空燃比が目標値14.7に収束するように制御している。

この空燃比センサは長時間運転していると、排気ガス中の汚れがセンサに蓄積し、応答性が劣化する。応答性が劣化す

ると空燃比制御の性能が劣化し、空燃比が14.7から外れてきて、排気ガスへの有害物質の放射の原因となる。そこで、空燃比センサの劣化を診断し、劣化していれば、ドライバに交換を促すことが必要となる。この機能はOBDの一つとして義務付けられている⁴⁾。

これまで空燃比センサの劣化診断は、空燃比が櫛状のパターンになるように燃料噴射量を制御し、そのときのセンサ出力の応答性を観測し、この応答性に基づいて行なっていた⁵⁾。このような方法では、本来、目標空燃比に保たれていることが望ましいはずの空燃比を、空燃比センサの診断のために目標空燃比から外れているので、排気に悪影響を与える。年々厳しくなる排気ガス規制には、もはやこれまでの空燃比を櫛形に制御する方法では対応できなくなった。そこで、従来の診断方法とは発想を変えて、診断のために特別な空燃比制御をせずに目標空燃比を保ちながら診断が行なえる方法を開発した。開発した方法はさまざまなエンジン回転数と負荷で実機評価された。

2. 空燃比センサの劣化検出の考え方

空燃比フィードバックのブロック図をFig. 1に示す。空燃比センサはこのフィードバックの中の一つの遅れ要素となっており、これが劣化して応答性が低下すると、空燃比フィードバックループ全体の時定数が大きくなる。フィードバックループの時定数が大きくなれば、空燃比の周波数分布は低周波側にシフトする。この周波数分布の特徴量に基づいて、空燃比センサの診断を行なおうというのが、本研究のコンセプトである。

なお、排気触媒の劣化の診断も特別な空燃比制御を行わずに行なわれており、そこでは排気触媒の上流と下流にO₂

* (株)日立製作所日立研究所 ひたちなか市堀口 832

** 日立オートモティブシステムズ(株) 伊勢崎市粕川町 1671

* Hitachi Lab., Hitachi Ltd., 832 Horiguchi, Hitachinaka

** Hitachi Automotive Systems, 1671 Kasukawacho, Isesaki
(Received October 23, 2012)

(Revised March 4, 2013)

Fig. 1 Block diagram of A/F feed-back

Fig. 2 λ signal at low engine speed and low load

センサを設け、それら二つの相関により排気触媒の劣化を診断している⁶⁾。本研究が対象とする空燃比センサの診断では、相関が取れるセンサの組み合わせが設定できないので、周波数分布を用いている。

Fig. 2 は、エンジンが低回転・低負荷で運転されているときに空燃比センサが出力する信号 λ を 10 ms でサンプリングしたものである。この図から、空燃比センサが劣化することによって、周波数が低いほうにシフトしていることがわかる。Fig. 3 は Fig. 2 をフーリエ変換した結果である。正常なときは、0.1 Hz から 1 Hz の周波数スペクトル強度はほぼフラットで、1 Hz より周波数が高いときに周波数スペクトル強度は右下がりに減衰しているが、劣化センサの場合は 0.2 Hz 程度から単調に減衰している。つまり、センサが劣化すると 0.1 Hz から 1 Hz 程度の低周波の周波数スペクトル密度が高くなっていることがわかる。したがって、ここでは周波数スペクトル

Fig. 3 Frequency spectrum of λ signal at low engine speed and low load

ラムの特徴を表わすパラメータにより空燃比センサの診断を行なう方法を開発する。

OBD ではリアルタイムで常時モニタリングする必要があるので、フーリエ変換などの周波数領域の処理では計算コストがかかりすぎる。少ない計算コストで診断を実現するためには、時間領域で処理することが望ましい。そこで、本研究では、微分フィルタのゲインが周波数に比例することに着目した。空燃比センサの劣化によって空燃比信号の周波数分布が低周波側にシフトすれば、微分フィルタの入出力比が大きくなるはずである。本論文では、微分フィルタの入力と出力の比を劣化診断の指標とする診断方式を開発した。

3. フィルタの設計と最適化

3.1 フィルタの設計

ここでは、 $t = 0, \Delta, 2\Delta, \dots, 2N\Delta$ ($2N\Delta = T$) で定義された離散的な入力信号 $\lambda(t)$ を三角関数の和で表わすことで連続化し、連続化した関数を微分して $\lambda'(t)$ とし、 $\lambda(t)$ から $\lambda'(t)$ を生成するようにフィルタを設計する。ここでの設計方法は、window method⁷⁾、窓関数法⁸⁾の考え方に基いて行なう。

$\lambda(t)$ は以下のように三角関数の和で表わせる。

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t + \alpha_n\right) \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cos(\omega_n t + \alpha_n) \end{aligned} \quad (1)$$

これを時間 t で微分すると $\lambda'(t)$ を得る。

$$\lambda'(t) = - \sum_{n=1}^N a_n \omega_n \sin(\omega_n t + \alpha_n). \quad (2)$$

したがって、 $\lambda(t)$ から $\lambda'(t)$ を得るフィルタを設計することがここでの課題である。

フィルタを

$$f(t) = \phi_0 + \sum_{n=1}^N \phi_n \cos(\omega_n t + \beta_n) \quad (3)$$

と表わし、 $\lambda(t)$ を $f(t)$ に入力したときに出力が

$$\begin{aligned} \lambda'\left(t - \frac{T}{2}\right) &= - \sum_{n=1}^N a_n \omega_n \sin\left\{\omega_n \left(t - \frac{T}{2}\right) + \alpha_n\right\} \\ &= - \sum_{n=1}^N a_n \omega_n \sin(\omega_n t - \pi n + \alpha_n) \end{aligned} \quad (4)$$

と一致するように $f(t)$ のパラメータを決める。時間を $T/2$ シフトするのは、フィルタの出力はフィルタの長さの半分遅れるからである。

$\lambda(t)$ を $f(t)$ に入力したときの出力は、

$$\begin{aligned} \mu(t) &= \int_0^T f(\tau) \lambda(t - \tau) d\tau \\ &= \phi_0 \int_0^T \lambda(t - \tau) d\tau \\ &\quad + \sum_{n=1}^N \phi_n \int_0^T \cos(\omega_n \tau + \beta_n) \lambda(t - \tau) d\tau \\ &= \phi_0 a_0 T + \sum_{n=1}^N \phi_n a_n \frac{T}{2} \cos(\omega_n t + \beta_n + \alpha_n) \end{aligned} \quad (5)$$

となるので、これが $\lambda'(t - T/2)$ と一致する条件は、

$$\begin{cases} \phi_0 = 0 \\ \phi_n = 2\omega_n / T \\ \beta_n = \pi/2 - \pi n \end{cases} \quad (6)$$

である。したがって、フィルタは

$$f(t) = - \sum_{n=1}^N \frac{2\omega_n}{T} \sin(\omega_n t - \pi n) \quad (7)$$

となる。

このフィルタの周波数特性は、

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_0^T f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= - \sum_{n=1}^N \frac{2\omega_n}{T} \int_0^T \sin(\omega_n \tau - \pi n) e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= \sum_{n=1}^N \frac{4\omega_n^2}{T} \frac{\sin\left(\frac{\omega T}{2}\right)}{(\omega_n - \omega)(\omega_n + \omega)} e^{-\frac{i\pi}{2}} e^{-\frac{i\omega T}{2}} (-1)^n \end{aligned} \quad (8)$$

となる。 $N = 1, 2, 3, 10$ の場合について周波数特性のゲインをプロットすると **Fig. 4** のようになり、次数 N を上げるほ

Fig. 4 Response characteristics of differential filter

Fig. 5 Response characteristics of $(n+0.5)$ th differential filter

Table 1 Engine operating condition

P_b [atm] \ N_{eng} [rpm]	1500	2250	3000
1/3	case1		case4
2/3		case3	
3/3	case2		case5

Fig. 6 Distribution of standard deviation of λ and λ derivative in case 1

ど高い周波数までゲインが増加していくことがわかる。一方で、ゲインの増加の仕方が線形ではなく、脈動していることが気になる。脈動していると、ゲインと周波数が1対1に対応しないため、診断の妨げになる。脈動の原因は、信号の長さを T としたため、微分フィルタは周期 $T, T/2, T/3 \dots$ の信号には望ましい特性を示すが、そのあいだの周期の信号については特性が悪くなるためである。次節ではこの脈動を低減するようにフィルタを改善する。

3.2 フィルタのゲインの脈動の低減

Fig. 4 をみると、 $\omega = 0$ の近傍でのゲインの上昇の仕方が、 N が奇数のときは上に凸で、偶数のときは下に凸となる。そこで、 N 次のフィルタと $N+1$ 次のフィルタの平均をとり、

Fig. 7 Relationship between correlation, filter length and order

フィルタ

$$\begin{aligned}
 g(t) &= \frac{1}{2} \left\{ - \sum_{n=1}^N \frac{2\omega_n}{T} \sin(\omega_n t - \pi n) \right. \\
 &\quad \left. - \sum_{n=1}^{N+1} \frac{2\omega_n}{T} \sin(\omega_n t - \pi n) \right\} \\
 &= - \sum_{n=1}^N \frac{2\omega_n}{T} \sin(\omega_n t - \pi n) \\
 &\quad - \frac{2\omega_{N+1}}{T} \sin(\omega_{N+1} t - \pi N - \pi)
 \end{aligned} \quad (9)$$

を考えれば、周波数ゲインは **Fig. 5** に示すようになり、脈動は低減する。このフィルタを $n + 0.5$ 次フィルタと呼ぶこととする。次節でこの最適化を行なう。

3.3 フィルタの長さや次数の最適化

3.2 節で導いたフィルタの長さ T と次数 N の最適化をここで行なう。長さ 0.4s の 1.5 次フィルタに、**Table 1** の case1 の運転状態における正常なセンサと劣化したセンサの信号を入力し、入力と出力それぞれの 1s 間の標準偏差を示したのが **Fig. 6** である。この図では正常センサと劣化センサの分離があまりうまくいっていない。分離度を上げるには、正常、劣化それぞれにおいて、横軸に示す入力の標準偏差と、縦軸に示す出力の標準偏差の相関を強くするようにフィルタの長さ、次数を最適化する必要がある。**Table 1** に示す各条件で、正常、劣化それぞれのセンサについて、フィルタの長さや次数を変えたときのフィルタの入出力の標準偏差の相関を調べた結果が **Fig. 7** である。全体的にいえることはフィルタの長さが 0.4s のときは次数と相関の関係が安定しない。フィルタの長さが 0.8s 以上のときの傾向は劣化センサの case4 が典型的である。振動のサンプリング間隔はここでは 40ms としているので、フィルタの長さが T のときに、最高次数は

$$\frac{T}{40[\text{ms}] \cdot 2}$$

なので、 $T = 0.8\text{s}$ なら 10 次、 $T = 1.2\text{s}$ なら 15 次、 $T = 1.6\text{s}$ なら 20 次が最高の次数である。劣化センサの case4 では、 $T = 0.8\text{s}$ で 9.5 次、 $T = 1.2\text{s}$ で 14.5 次、 $T = 1.6\text{s}$ で 19.5 次で相関が最も強くなっていて、周波数の高い成分まで微分するようにフィルタを設計することで、相関が強くなることがわかる。劣化センサの case4 が一番相関が低いので、この場合に最も相関を強くする $T = 1.2\text{s}$ で 14.5 次を採用する。

4. 空燃比センサの劣化識別性能の評価

前章で開発・最適化した、長さ 1.2s の 14.5 次の微分フィルタを用いて空燃比センサの信号 λ を微分し、微分前後の信号 λ , λ' の標準偏差を用いて空燃比センサの正常、劣化を識別する。一定時間の空燃比センサ信号 λ の標準偏差 $\sigma(\lambda)$ と、 λ の微分 λ' の標準偏差 $\sigma(\lambda')$ を計算し、**Fig. 8** に示すように点 $(\sigma(\lambda), \sigma(\lambda'))$ への角度

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sigma(\lambda')}{\sigma(\lambda)}$$

Fig. 8 Concept of A/F sensor diagnosis

と閾値の大小で劣化を識別する。

Table 1 に示す各ケースにおいて、正常センサと劣化センサの信号のフィルタの入出力の 4 秒間の標準偏差を **Fig. 9** に示す。この図から、エンジン負荷の大きい case2, case5 のときは正常と劣化がかなりのマージンをもって識別できることがわかる。一方で、エンジン速度が低く負荷が小さい case1 で識別性能が最も悪い。また、特に正常センサの場合に、傾きが運転条件に依存してばらつく。

そこで、エンジンへの空気流量 Q に基づいて

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sigma(\lambda') + a_y \cdot Q + b_y}{\sigma(\lambda) + a_x \cdot Q + b_x}$$

と補正し、識別性能の向上を図る。識別性能が最も良くなるようにパラメータを

$$a_x = -0.000011 [\ell^{-1}]$$

$$b_x = 0.01$$

$$a_y = -0.0013 [\ell^{-1}]$$

$$b_y = 0.59$$

と最適化し、識別性能を運転条件ごとに評価する。識別性能の指標は、正常センサと劣化センサのそれぞれの信号から 4 秒ごとに求めた θ の平均 $\mu[\theta_{\text{normal}}]$, $\mu[\theta_{\text{deteriorated}}]$, 標準偏差 $\sigma[\theta_{\text{normal}}]$, $\sigma[\theta_{\text{deteriorated}}]$ を用いて、

$$\frac{\mu[\theta_{\text{normal}}] - \mu[\theta_{\text{deteriorated}}]}{\sigma[\theta_{\text{normal}}] + \sigma[\theta_{\text{deteriorated}}]}$$

によって定義する。その結果、 4 秒ごとに θ を求めたときの識別性能は、**Table 2** のようになる。

この表を見ると、エンジンが低負荷の case1 と case4 で識別性能が 6 に満たない。では、何秒間の空燃比信号 λ からフィルタの入出力の標準偏差をとれば識別性能が 6 になるか調べたところ、case1 の場合は 17 秒、case2 の場合は 8 秒であることがわかった。これは通常の自動車のキーオンからキーオフまでの時間に比べればはるかに短い時間であり、診断に必要な時間として問題ないレベルである。

5. おわりに

空燃比センサの劣化により空燃比フィードバックループの

Fig. 9 Distribution of standard deviation of λ and λ derivative using optimized differential filter

Table 2 Diagnosis performance in the condition that λ is measured for 4 seconds

	case1	case2	case3	case4	case5
diagnosis performance	2.6	8.7	6.7	3.7	6.6

周期が長くなることに着目し、診断のために特別なパターンで空燃比を制御することなく、空燃比センサの診断ができる方法を提案した。この方法は、空燃比信号を微分フィルタで微分し、その入出力のゲイン、具体的には、入出力信号の標準偏差の比によって、空燃比フィードバックループの周期の変化をとらえ、周波数領域での処理に比べはるかに少ない計算量で診断が可能である。周波数によるゲインの脈動の小さい微分フィルタを実現するため、window method により設計される奇数次のフィルタと偶数次のフィルタの平均をとる方法を提案した。また、実験データからフィルタの入力と出力の標準偏差の相関を調べ、相関が最も強くなるようにフィルタの次数を決定した。この方法の妥当性を検証するため、実験データで正常センサと劣化センサを識別したところ、最も診断に不利な低回転低負荷の条件下でも 17 秒で識別性能が 6 に達し、診断時間に関しては実用上問題がないことを確認した。

参 考 文 献

- 1) (独) 情報処理推進機構セキュリティセンタ：2010 年度自動車の情報セキュリティに関する調査報告書 (2011)
- 2) OBDII, EOBDD 適合試験の自動化, http://www.etas.com/data/RealTimes.2007/rt_07_02_37_jp.pdf
- 3) 自動車技術会教育図書編集委員会：自動車工学—基礎—, 自動車技術会 (2002)
- 4) <http://www.arb.ca.gov/msprog/obdprog/obdprog.htm>
- 5) P.J. Maloney: A Production Wide-Range AFR Sensor Response Diagnostic Algorithm for Direct-Injection Gasoline Application, SAE Paper 2001-01-0558 (2001)
- 6) N. Kurihara, H. Kimura and T. Ishii: An On-Board Diagnosis Method for Three Way Catalyst Deterioration, SAE Paper 972854 (1997)
- 7) A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer and J.R. Buck: *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd ed., Prentice Hall (1999)
- 8) 有本 卓：信号・画像のデジタル処理, 産業図書 (1980)

[著 者 紹 介]

青 野 俊 宏 (正会員)

1992 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年 (株) 日立製作所入社, 機械研究所を経て日立研究所に勤務, 現在に至る。自動車エンジンのモデリング・制御・信号処理に従事。

清 村 章

1989 年群馬大学工業短期大学部機械工学科卒業。同年日本電子機器 (株) 入社, (株) ユニシアジェックス, (株) 日立ユニシアオートモティブ, (株) 日立製作所オートモティブシステムグループを経て日立オートモティブシステムズ (株) に勤務, 現在に至る。自動車エンジンの制御システム設計に従事。